POLYTECHNIQUE MONTRÉAL
affiliée à l'Université de Montréal

Conception et validation d'outils pour injection sur profil aérant

GRÉGOIRE RECCHIA
Département de génie mécanique

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

Juin 2020

© Grégoire Recchia, 2020.

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL
affiliée à l'Université de Montréal

Ce mémoire intitulé :

Conception et validation d'outils pour injection sur profil aérant

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

Jérôme VÉTEL, président
Cédric BÉGUIN, membre et directeur de recherche
Stéphane ÉTIENNE, membre et codirecteur de recherche
Teguewinde SAWADOGO, membre

DÉDICACE

À ma très chère petite C.R,
à qui je dois beaucoup plus qu'elle ne le croit...

REMERCIEMENTS

Tout d'abord je tiens à remercier mes collègues de travail au sein de la Chaire. Tout particulièrement Leila Dhar, avec qui nous avons suivi les mêmes cours et qui m'a énormément soutenu et aidé dans mon projet de maîtrise. Puis également Florentin Anne et Stefane Sved, qui m'ont aussi également beaucoup éclairé et conseillé dans mes travaux. Sans eux trois, je n'aurais sans doute pas pu avoir le même niveau d'aboutissement. J'aimerais également remercier mes directeur et codirecteur de recherche, les professeurs Cédric Béguin et Stéphane Étienne, sans qui je n'aurais pas intégré ce projet si intéressant, qui étaient également très présents et toujours disponibles pour répondre à mes questions. Merci encore d'avoir encadré ma maîtrise, de l'avoir rendue très agréable à réaliser, tout en la gardant tout aussi intéressante et motivante jusqu'au bout ! Un grand merci aussi aux techniciens de Polytechnique et du Département qui m'ont énormément aidé sur les aspects pratiques et techniques tout au long de cette maîtrise. Merci pour leur conseils, leur temps et leur patience. À Guy Gironne, Nour Aimene, Benedict Besner et Vincent Mayer, un grand merci. Enfin mention spéciale pour les étudiants en stage avec nous pour nous épauler : Louis Dutheil, Simon Tanguay, Thierry Pelletier et Marco Esteban Castaneda, merci à eux également.

RÉSUMÉ

Ce mémoire a pour objectif de présenter la conception, la réalisation et le test d'outils expérimentaux dans le but d'obtenir un profil d'aile dit "aérant". L'aération des turbines hydroélectriques est aujourd'hui une problématique de recherche qui se développe de plus en plus. En effet, d'une part elle serait une bonne manière d'atteindre les normes environnementales en vigueur et d'autre part, constitue une avancée technique capable d'améliorer la durée de vie des turbines actuelles voire même, sous certaines conditions précises, d'accroître leurs performances en rendement.

La réalisation d'un profil aérant, qui se rapproche du profil d'une aube de turbine, capable d'injecter de l'air dans un écoulement d'eau à haute vitesse (de 10 à 25 m/s) constitue un pas de plus vers la compréhension des phénomènes qui ont lieu dans les turbines aérantes et sont justement étudiés au sein de la Chaire CRSNG-GE à Polytechnique Montréal.

Dans ce mémoire il sera détaillé, dans un premier temps, les simulations pour optimiser la chambre à air interne du profil et la conception du profil lui même. Les simulations ont permis d'obtenir une chambre à air garantissant un profil de vitesse de l'air en sortie le plus homogène possible pour des conditions de pleines charges (injections de 55 L/s d'air dans la boucle) avec une vitesse moyenne de sortie de l'air de 135 m/s dans la veine d'essai.

Le travail présenté ici fait également part de la construction d'une toute nouvelle boucle pour accueillir les tests préliminaires à basse vitesse du profil ainsi que les autres expériences à basses vitesses de la Chaire. Des instruments de mesure propres à cette boucle ont également été développés, dont un nouveau système de déplacement motorisé pour les sondes à fibres optiques et un ensemble de jauges de contraintes pour le profil. Ces dernières se révéleront utiles pour la suite des expériences afin de quantifier les efforts en jeu sur le profil sous différentes conditions d'écoulements. La technique de "Krigeage" développée au long de cette Maîtrise permet de lisser les résultats et, dans une moindre mesure, d'obtenir des cartographies 3D de l'écoulement à partir de données 2D. Ce modèle reste néanmoins à développer plus en profondeur afin d'en tirer une utilisation optimale. Les tests préliminaires font état d'un bon comportement du profil aérant à basse vitesse et laissent entrevoir de très bonnes perspectives lorsque que ce dernier sera mis en écoulement à haute vitesse.

ABSTRACT

This thesis presents the design, realisation and testing of an aerating profile and devices to test and understand the behaviors of the latter. The aeration of hydroelectric turbines is today a research field that is growing. Indeed, it would be a good way to achieve the environmental standards in terms of water oxygenation. Moreover it is a technical advance capable of improving the lifetime of current turbines or even, under certain specific conditions, to increase their efficiency.

Thus, the tests of an “aerating” profile , similar to the profile of a turbine blade, and capable of injecting air into a high-speed water flow (from 10 to 25 m/s) represent a further step towards understanding the phenomena that occur in aerating turbines and are currently studied within the NSERC-GE Chair at Polytechnique Montreal.

In this thesis we expose the simulations to optimize the inner air chamber of the profile and the design of the profile. The simulations allowed us to design an air chamber that produce a most homogeneous air velocity profile for full load conditions (injections of 55 L/s of air into the water loop) with an average air velocity of 135 m/s into the test section.

The work presented here also includes the construction of a completely new loop to accommodate the preliminary low-speed tests of the profile as well as the other low-speed experiments of the Chair. Measuring instruments specific to this loop have also been developed, including a new motorized displacement system for fiber optic probes and a set of strain gauges for the profile. These will be useful for further experiments in order to quantify the loads involved on the profile under different flow conditions. The technique of “Krigeage" developed along this Master allows to smooth the results and to obtain 3D mapping of the flow from 2D data. However, this model still needs to be developed in order to get its full potential in terms of representativity of the void fraction. Preliminary tests yield a good behavior of the low-speed air profile and suggest very good prospects for high-speed velocities tests.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE iii

REMERCIEMENTS iv

RÉSUMÉ v

ABSTRACT vi

TABLE DES MATIÈRES vii

LISTE DES FIGURES ix

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS xi

LISTE DES ANNEXES xii

CHAPITRE 1 INTRODUCTION 1
1.1 Contexte 1
1.2 Motivations des travaux 2
1.3 Problématique et objectifs 2

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE 4
2.1 Définitions 4
2.2 Écoulements diphasiques 4
2.3 Injection d'air dans les turbines hydroélectriques 5
2.4 Injection sur profil aérant 5

CHAPITRE 3 PRÉSENTATION DES INSTALLATIONS ET AMÉLIORATION DES SYSTÈMES EXISTANTS 8
3.1 Présentation des matériels, protocoles et outils de la Chaire 8
3.1.1 Avant propos 8
3.1.2 La boucle d'essai initiale 8
3.1.3 Fibres optiques 9
3.1.4 Sonde optique 11
3.1.5 Traitement Matlab 15
3.2 Le laboratoire A106 et sa modernisation 16

3.2.1 Les nouvelles veines d'essai 16
3.2.2 Conception de la structure 19
3.2.3 Les supports des veines 19
3.2.4 Modernisation de la boucle d'essai 20
3.2.5 Conception d'une nouvelle sonde 23

CHAPITRE 4 PROFIL AÉRANT 30
4.1 Conception du profil 30
4.1.1 Cahier des charges attendu pour le profil 30
4.1.2 Choix de profil et dimensions 30
4.1.3 Conception numérique et optimisation de l'injection 31
4.1.4 Résultats finaux et concept retenu pour le prototype 42
4.2 Fabrication du prototype 44
4.2.1 Réalisation d'un profil modulable 44
4.2.2 Choix du procédé de fabrication 46
4.3 Dispositif expérimental 48
4.3.1 Ancrage et positionnement du profil 48
4.3.2 Injection d'air et étanchéité 49
4.3.3 Prise de mesure 53

CHAPITRE 5 RÉSULTATS ET ANALYSE 56
5.1 Notion de Krigeage 56
5.1.1 Qu'est-ce que le krigeage ? 56
5.1.2 Le Krigeage utilisé en post-traitement 57
5.2 Analyse des résultats 60
5.2.1 Préparation à la prise de mesure 60
5.2.2 Résultats sur le nuage de bulles 61
5.2.3 Efforts sur profil 62
5.2.4 Modèle pour la perte de pression 63

CHAPITRE 6 CONCLUSION ET DISCUSSION 64
6.1 Synthèse des travaux 64
6.2 Limitations 66
6.3 Améliorations futures 66

RÉFÉRENCES 68

ANNEXES 71

LISTE DES FIGURES

Figure 3.1 Boucle originale 9
Figure 3.2 Visuel de la veine initiale avec système de déplacement de sonde au-dessus 10
Figure 3.3 Exemple de nuage de bulles généré 10
Figure 3.4 Sonde optique (gauche et schéma de principe du fonctionnement des fibres en paires (droite) 11
Figure 3.5 Zoom, au microscope électronique, de la pointe d'une fibre 12
Figure 3.6 Principe de la réflexion totale en changement de milieu 12
Figure 3.7 Photo d'une pince (gauche) et assemblage actuel de la sonde (droite) 13
Figure 3.8 Système de déplacement 3D de la sonde dans la Veine Originale . . . 14
Figure 3.9 Les 3 plans de mesures de la veine originale 14
Figure 3.10 Arborescence des fichiers pour une campagne de mesure A1PE**i** . . . 17
Figure 3.11 Sections d'essais version 15 cm 18
Figure 3.12 Sections d'essais version 25 cm 18
Figure 3.13 Vue isométrique de la structure concue 20
Figure 3.14 Support des veines 21
Figure 3.15 Schéma de la boucle modernisée 23
Figure 3.16 Boucle du laboratoire A106 modernisée 24
Figure 3.17 Nouveau système de déplacement 25
Figure 3.18 Schéma de principe illustrant le mouvement vertical de la sonde . . . 25
Figure 3.19 Schéma de principe illustrant le mouvement horizontal de la sonde . . 26
Figure 3.20 Ancienne sonde (haut) vs nouvelle (bas) 28
Figure 3.21 Visuel réel de la sonde 28
Figure 3.22 Section d'essai et plage de mesure de la nouvelle sonde 29
Figure 4.1 Schéma du concept d'injection par le côté sur le profil (version non finale) 31
Figure 4.2 Vue du dessus de la chambre d'injection V1.1 33
Figure 4.3 Version 1.2 semblable à la V1.1 avec l'ajout du déflecteur 34
Figure 4.4 V2.1 : "tuyaux d'orgue" avec rétrécissement de section 35
Figure 4.5 V2.2 : Version avec tuyaux courbés 36
Figure 4.6 V2.3 : Version avec tuyaux courbés n2 37
Figure 4.7 V2.4 : tuyaux droits et évasés 38
Figure 4.8 V3.1 : virage continu 39
Figure 4.9 V3.2 : virage continu n2 40
Figure 4.10 V4.1 : la forme de type "harmonica" 41

Figure 4.11	V4.2 : Chambre de type “harmonica” avec ailettes rapprochées	42
Figure 4.12	Version finale du profil avec remblai au centre	43
Figure 4.13	Concept final pour un profil de 15 cm et à basse vitesse (qui sera expérimenté en premier)	44
Figure 4.14	Vue du profil en CAO	45
Figure 4.15	Vue transparente du corps principal, avec visuel de la chambre à air	46
Figure 4.16	Vue du haut et de côté du capuchon (parties transparentes)	47
Figure 4.17	Photo du profil une fois assemblé	49
Figure 4.18	Schéma du système de positionnement/d’étanchéité	50
Figure 4.19	Positions des trous et angles d’attaque possibles pour le profil	50
Figure 4.20	Image du système dans la réalité	51
Figure 4.21	“Triple contact” et étanchéité avec les deux joints O-Ring	52
Figure 4.22	Raccord pour connecter le profil à l’air sous pression	52
Figure 4.23	Avant du profil en conditions réelles	53
Figure 4.24	Trous de passage des fils de jauges	54
Figure 4.25	Position des plans de mesure	55
Figure 5.1	Dérives (en haut) et covariances (en bas) usuellement utilisées en Krigeage	57
Figure 5.2	Passage des plans expérimentaux à l’ensemble de la section d’essai	58
Figure 5.3	Conditions aux limites au niveau de la fente d’injection	59
Figure 5.4	Plan central de la veine	59
Figure 5.5	Représentation en 3D des taux de vides dans la section d’essai	60
Figure 5.6	Tableau des prises de mesures expérimentales à venir pour le profil aérant	62
Figure A.1	Système matriciel à résoudre pour solutionner le krigeage	73
Figure A.2	Tableau récapitulatif	73
Figure B.1	Schéma illustrant les volumes de contrôle sur un écoulement diphasique	74
Figure B.2	Schéma illustrant les volumes de Contrôle sur un modèle prenant en compte le profil aérant	76
Figure C.1	Schéma CAD des colliers de serrage après la coude en sortie des veines	77
Figure C.2	Schéma CAD de la purge haute de la boucle d’essai	77

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

A106	Laboratoire d'essai à pression atmosphérique et basse vitesse
Beta	Titre volumique de l'écoulement : $\beta = \frac{Q_G}{Q_L+Q_G}$
Corde	Longueur d'un profil, mesurée du bord de fuite au bord d'attaque
Epsilon	Taux de vide de l'écoulement : $\varepsilon = \frac{S_G}{S_L+S_G}$
LEGH	Laboratoire Expérimental de Grande Hauteur : écoulements à pression contrôlée et haute vitesse
O-Ring	Joint Torique utilisé pour assurer l'étanchéité
Veines	Synonyme de section d'essai. Partie de la boucle d'écoulement où se font les expériences et les prises de mesures
Velmex	Système de transmission de mouvement de type roue/vis sans fin. Permet la transformation d'un mouvement de rotation en un mouvement de translation

LISTE DES ANNEXES

Annexe A	Principe du Krigeage géométrique dual	71
Annexe B	Détails des calculs pour la formule de perte de Pression à la section 5.2.4	74
Annexe C	Schémas et images additionnelles	77

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

1.1 Contexte

L'énergie hydroélectrique est une des plus anciennes à avoir été utilisée et figure aujourd'hui parmi les énergies les mieux maîtrisées au monde. En effet, les premiers usages de turbines hydroélectriques remontent au milieu du 19ème siècle et certaines, datant des années 1920/1930, sont encore en service aujourd'hui. Les écoulements qui se développent tout au long des conduites ou au niveau de la turbine sont dans l'immense majorité connus et maîtrisés. Néanmoins, si les aspects physiques de tels écoulements sont aujourd'hui parfaitement maîtrisés, il n'en demeure pas moins que pendant très longtemps l'impact de centrales hydroélectriques sur l'environnement a été négligé. Un des impacts majeurs est notamment celui de l'oxygénation de la rivière en aval de l'édifice [1] [2]. En effet, comme tout autre organisme vivant, les espèces (animales aussi bien que végétales) vivant en aval de la centrale ont besoin d'un certain taux d'oxygène dans l'eau pour vivre correctement, sans avoir à migrer plus en aval encore, ce qui déstabiliserait tout l'écosystème local. Ce manque d'oxygène dans l'eau se fait surtout ressentir dans le cadre des centrales avec réservoir (ce que l'on appelle plus communément des barrages). Ces centrales retiennent en amont une importante quantité d'eau, créant ainsi d'immenses lacs artificiels. Or dans un lac, plus on se trouve en profondeur, plus l'oxygène se fait rare (à cause du manque d'ensoleillement, de la respiration des espèces se trouvant plus proches de la surface mais surtout à cause de la décomposition des organismes au fond du lac) [3]. Le même phénomène peut survenir l'hiver lorsque la surface du réservoir est gelée. Alors coupée de l'air ambiant, l'eau du réservoir s'appauvrit peu à peu en oxygène en commençant par le fond. Cette zone du lac est appelée *hypolimnion*. L'eau captée pour les centrales, dites à réservoirs, se fait justement par le fond de ces mêmes réservoirs (comme pour le principe d'un évier), rejetant ainsi en aval une eau très pauvre en oxygène. Il a donc été constaté pendant très longtemps une migration voire une disparition de certaines espèces vivant habituellement en aval d'une centrale. Ceci peut alors avoir des conséquences dramatiques sur tous les écosystèmes vivant en aval. Les valeurs recommandées de nos jours [4] stipulent que des taux d'oxygène de 5.5 à 6 mg/L d'eau pour des eaux "chaudes" et de 6.5 à 9.5 mg/L pour les eaux "froides" respectivement sont nécessaires pour assurer la survie de la plupart des espèces aquatiques d'eau douce. La solution apportée par les industriels est alors d'injecter de l'air dans les écoulements hydrauliques de leurs centrales. Plusieurs configurations ont été testées, en amont de la turbine, en aval de cette dernière ou bien même dans la turbine elle-même, pour profiter des conditions de pressions subatmosphériques et

donc se passer de la nécessité d'un compresseur. La technique retenue, et qui fait l'objet de cette maîtrise, est d'effectuer l'injection directement au niveau des aubes de la turbine. On parle alors de profils, ou d'aubes, dit(e)s aérant(e)s [5, 6]. Présente dans l'industrie depuis quelques années seulement, cette technique est aujourd'hui encore à un stade précoce de son développement. Ceci est principalement dû au fait que dans le domaine de l'hydro-électricité, les innovations et nouveautés prennent énormément de temps à être validées et reconnues par les industriels. Bien que la phase de prototypage soit désormais validée, il s'agit maintenant d'optimiser le concept de turbines aérantes. Cette maîtrise se concentre donc autour d'écoulements diphasiques eau/air simulés en conditions semblables à celles occurrentes dans les turbines hydrauliques, c'est-à-dire des écoulements d'eau à haute vitesse et basse pression. Même si ce type d'écoulement air/eau a déjà été étudié par le passé [7], ces conditions précises d'opérations restent obscures à notre connaissance.

1.2 Motivations des travaux

Même si l'étude de bulles dans l'eau est un sujet présent aujourd'hui dans la littérature [7–9], l'injection à basse pression d'air dans un écoulement à haute vitesse est aujourd'hui très originale. La problématique de cette maîtrise est donc, au sein de ce projet, de réaliser un profil d'aube similaire à ceux utilisés dans les turbines, permettant l'injection d'air directement au niveau de l'extrados de ce même profil. Toute la difficulté et en même temps l'originalité de ce projet réside dans le fait qu'une telle pièce n'est quasiment pas utilisée aujourd'hui dans l'industrie et représenterait une réelle avancée scientifique dans le cadre des écoulements diphasiques. En particulier, l'injection de l'air doit se faire de manière à permettre au nuage d'air ainsi généré de se disperser le mieux possible dans l'écoulement, et ceci pour favoriser la dissolution de l'oxygène dans l'eau [10]. On parlera alors de nuages de bulles, ou bien de nuages d'air, dans l'écoulement, dont on étudiera les propriétés.

1.3 Problématique et objectifs

Dans ce cadre, la Chaire GE-CRSNG à Polytechnique Montréal du professeur Stéphane Étienne en collaboration avec General Electric a été créée afin de mieux comprendre les caractéristiques de tels écoulements. Complexes à mettre en place, ils nécessitent des installations spéciales, c'est pourquoi, au sein de la Chaire, s'est opérée la construction d'un nouveau laboratoire doté d'une telle boucle d'essai. Cette dernière est ainsi capable de reproduire les conditions de basses pressions et de hautes vitesses similaires à celles rencontrées dans les écoulements propres aux turbines hydro-électriques. Au coeur de ce grand projet,

nous nous intéressons à une problématique particulière : celle d'une injection d'air sur un profil placé dans un écoulement. On parlera alors de "profil aérant".

Dans un premier temps il convient de présenter le travail déjà existant en terme d'écoulements diphasiques (voir Chapitre 2, Revue de Littérature) mais également le travail réalisé à date au sein de la chaire, avant le début de cette maîtrise [11,12]. Puis nous aborderons les installations déjà existantes de la chaire et le travail effectué sur celles-ci ainsi que les notions essentielles pour comprendre le travail qui a été effectué. Nous développerons ensuite la conception du profil aérant, les défis et exigences auxquels il doit répondre. Enfin, nous aborderons les résultats obtenus, leur post-traitement et discuterons autour de ces derniers en présentant les améliorations possibles pour le futur ainsi que les idées et pistes pour de futurs travaux.

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

2.1 Définitions

Durant cette revue il sera fait mention de “Beta”. Pour rappel, le Beta est le titre volumique de l'écoulement, défini comme étant le ratio du débit d'air injecté sur le débit total (débit d'air + débit d'eau), soit $\beta = \frac{Q_G}{Q_G + Q_L}$. Il est important de le préciser ici, afin que nous puissions mettre en évidence par la suite, l'originalité des travaux de la Chaire, dont l'objectif est d'injecter à “fort” Beta (de l'ordre de 10% et supérieur) dans des conduites de tailles importantes et non millimétriques comme de nombreuses études antérieures. Nous définissons également le taux de vide ϵ comme le ratio entre la surface d'air dans un plan de l'écoulement et la surface totale (air + eau).

2.2 Écoulements diphasiques

Des études ont été effectuées en injectant de l'air dans un écoulement hydraulique afin de mieux caractériser les écoulements diphasiques air/eau. La majorité de ces études a pour motivation une meilleure compréhension de l'oxygénation de l'eau, le scénario optimal étant d'avoir les plus petites bulles possibles avec le plus grand temps de résidence possible afin de maximiser les échanges d'oxygène avec l'eau. De nombreuses études ont ainsi été effectuées dans plusieurs conditions qui regroupent les divers scénarios pouvant avoir lieu, dans la nature comme dans l'industrie :

-Avec une injection dans un réservoir d'eau stagnante, **K.Harby *et al.* (2017) [13]**, s'intéressent à la trajectoire globale d'un nuage de gaz généré dans le réservoir ainsi que ses caractéristiques globales (répartition de la densité du nuage, vitesse moyenne du jet...).

- Avec une injection perpendiculaire à un écoulement de surface libre comme l'on fait **Zhang et Zhu (2013) [14]**, qui démontrent que pour une injection verticale d'un mélange air/eau, les vitesses de bulles suivent une distribution Gaussienne dans la direction transverse à l'écoulement et théorisent les distributions des diamètres des bulles d'air au fil de l'écoulement. Les Beta correspondants à ces expériences étaient de l'ordre de 0.001% à 0.005%.

-Avec un écoulement axial en conduite, **Sevilla *et al.* (2005) [15]** montrent l'apparition du régime de jet d'air à partir d'une certaine vitesse critique d'injection du gaz. Un autre exemple est celui de **Gutiérrez-Montes *et al.* (2012) [16]**, qui démontrent l'influence du nombre de Weber et du ratio des vitesses sur le comportement des bulles injectées, notamment

leur fréquence de formation. Les Beta correspondants étaient de l'ordre de 2% à 12%, et la conduite d'eau était un cylindre de 3 mm de rayon, avec un injecteur d'air de rayon variable (env. 0.45 mm à 0.82 mm) pour [15]. Pour [16], les Beta étaient plus de l'ordre de 25% à 50%. Dans cette expérience, l'injection d'air était axiale et s'effectuait entre deux plaques, parallèles à la conduite d'eau, distantes de 0.47 mm dans une conduite de largeur totale de 4.8 mm et de hauteur 41.75 mm.

- Dans des conditions de conduites forcées, à l'image de **Balzan *et al.* (2017) [17]**, où les différents régimes d'écoulements diphasiques sont caractérisés. De même, **Siddiqui (2010) [18]** montre que pour une injection diphasique, la fréquence de formation des bulles est fonction du débit volumique de liquide tout comme du débit volumique de gaz. Les Beta correspondant étaient inférieurs (pour les plus grands) à 10% selon les expériences de [17], et de l'ordre de 0.01 à 0.08% pour le cas [18].

2.3 Injection d'air dans les turbines hydroélectriques

L'injection d'air dans les turbines est, comme nous l'avons mentionné plus tôt, en plein essor. Cette technique bien qu'utilisée et testée par plusieurs manufacturiers aujourd'hui reste néanmoins peu maîtrisée. Dans une première étude publiée par Alstom, **Papillon *et al.* (2002) [19]** caractérisaient 2 types d'injections (par le cône central et par la périphérie de la turbine) et indiquait les forces et faiblesses de chaque technique. Elle spécifiait que la technique choisie devait l'être en portant une grande attention aux différentes conditions d'opérations de la turbine, afin d'allier efficacité et performances environnementales.
Selon les conclusions de **Patrick March (2009) [20]**, ce procédé (aération des turbines hydroélectriques) peut se révéler très utile et bénéfique à de nombreux niveaux : rendement plus avantageux, meilleure capacité de production, et surtout meilleure performance environnementale. Cette étude démontre notamment qu'une injection au niveau de la turbine elle-même serait la plus efficace. Des conclusions similaires avaient été apportés par **GE Renewable Energy Canada [21]**. Elles stipulent notamment que l'injection d'air, qu'elle soit forcée ou non, est une technique rentable pour augmenter les performances et l'efficacité des turbines tout en réduisant les vibrations, rendant donc les roues de turbine plus viables grâce à des cycles de maintenance plus espacés dans le temps.

2.4 Injection sur profil aérant

Des études sur profils simples dans un écoulement diphasique ont été étudiés par **C. Kang et M. Yang (2008) [22]**. Dans cette étude, une série de 3 hydrofoils en cascade sont placés

dans un écoulement aéré (avec des bulles d'air présentes dans l'écoulement). Les conclusions de cette étude montrent une forte interaction entre turbulence de sillage et le gradient de pression au niveau du bord de fuite. De plus, ils mettent en évidence différents types de cavitations se produisant à différentes zones de l'écoulement. Néanmoins ici, on ne parle pas d'un profil aérant à proprement parlé, car les hydrofoils ici reçoivent un écoulement à bulles mais ne le génèrent pas (si on exclut les bulles de cavitation).

S. E Forrester et C. D Rielly (1998) [23], ont proposé une étude d'injection en écoulement sur des corps au formes variées. Dans cet article, ils concluent que la position de l'injection a une importance cruciale sur le régime d'écoulement du nuage de bulles. Par exemple, le régime de jet est prédominant lorsque l'injection est placée proche d'une zone à écoulement laminaire. Ainsi, ils indiquent également que plus la vitesse du fluide est élevée et plus les bulles sont petites. Ils indiquent également que la réduction de taille des bulles (pour une vitesse fixe de l'air à l'injection) se fait le plus sentir entre 1 et 3 m/s de vitesse d'écoulement. Les Beta correspondants variaient entre 0.02% et 1.7%.

Une méthode d'injection originale, qui fait l'objet de ce mémoire, est donc celle de l'injection sur profil mince. Une étude effectuée au St. Antony Falls Laboratory (SAFL) conjointement avec General Electric, et complétée par une étude en CFD par **D. Scott *et al.* (2014) [24]**, a mis en évidence le comportement d'un nuage de bulles injectées directement sur l'extrados du profil, soumis à un écoulement hydraulique. Selon **A. Karn *et al.*, (2015) [25]**, la position optimale pour former les plus petites bulles (synonyme d'un temps de résidence des bulles plus long, d'une surface de contact plus grande et donc d'une meilleure oxygénation de l'eau) est étudiée. La conclusion est que pour former des bulles plus petites, une injection proche du bord d'attaque est privilégiée. D'autres articles associés à cette même étude (**A. Karn *et al.*, (2015) [26]** ou encore **A. Karn, C. Ellis *et al.* (2015)** [27]) démontrent que l'augmentation du Reynolds favorise la séparation des bulles en aval, tandis qu'une augmentation du débit d'air conduit à une coalescence plus importante des bulles. De plus, la fonction de répartition des diamètres de Sauter se trouve avoir une forme indépendante de l'angle d'attaque du profil, du Reynolds ou encore du débit d'air entrant. Enfin, les techniques de mesures par imagerie à haute fréquence d'acquisition se révèlent particulièrement efficaces pour caractériser les (petites) bulles dans le sillage de l'injection sur profil.

Une étude numérique par **Sarah Vahaji *et al.* (2018) [28]**) vient alors montrer que l'angle d'attaque du profil avait une influence considérable sur la répartition des bulles en aval du profil. Augmenter l'angle d'attaque permet de réduire la taille des bulles ainsi que de mieux les disperser. De plus, cette étude numérique vient confirmer les résultats obtenus par l'étude expérimentale.

Néanmoins, peu d'autres articles ont été publiés sur ce sujet en particulier, en faisant ainsi un thème relativement nouveau dans la recherche en écoulement diphasique. Les études menées à SAFL, si elles sont importantes par leur nouveauté, restent toutefois incomplètes, dans le sens où seulement une très faible partie du profil était aérée (5% de la largeur du profil), et pour de très faibles titres volumiques (Beta), de l'ordre de 0.01%.

CHAPITRE 3 PRÉSENTATION DES INSTALLATIONS ET AMÉLIORATION DES SYSTÈMES EXISTANTS

3.1 Présentation des matériels, protocoles et outils de la Chaire

3.1.1 Avant propos

Toute l'information présentée ici a pour but de mieux familiariser le lecteur avec les concepts de prise de mesure par fibre optique et de traitement des données. Il est en effet important de les mentionner et de les développer ici, car ces concepts seront les mêmes qui seront réutilisés dans la partie 3 du mémoire lors des prises de mesure sur profil et leur post-traitement. Dans l'optique de réaliser ces mêmes opérations sur profil aérant, il me fut donc très important de me familiariser avec les matériels et protocoles de mesure pour pouvoir ensuite les appliquer de manière optimale à l'étude de l'injection sur profil.

3.1.2 La boucle d'essai initiale

Une boucle d'essai initiale au sein du laboratoire de la Chaire GE-CRSNG (figure 3.1) a permis de comprendre les mécanismes en jeu lors d'une injection de bulles pour des injections ayant un Beta (β) de 3 et 9 %. Pour rappel, le Beta est le titre volumique de l'écoulement, défini comme étant le ratio du débit d'air injecté sur le débit total (débit d'air + débit d'eau), soit :

$$\beta = \frac{Q_G}{Q_G + Q_L} \tag{3.1}$$

Dans une petite section d'essai de 10 par 17 cm (voir Figure 3.1), des résultats ont été obtenus pour constituer une première base de données expérimentales pour la chaire [11,12]. Les tests effectués ont permis d'analyser l'écoulement pour des vitesses de 1.25 m/s d'eau et des Beta de 3 % et 9 % pour une fente simple. Les données en pression (pertes de charge à l'injection, variations de pression amont/aval de la conduite avant et après l'injecteur d'air) ont également été compilées lors de ces études. Ladite fente avait pour dimension 1×36 mm^2, centrée sur le milieu de la veine d'essai et placée à l'entrée de cette dernière (afin que l'on puisse avoir un bon visuel sur le nuage de bulles créé (figure 3.3). Elle a permis d'injecter l'air par la surface basse de la veine (en figure 3.2), après une chambre de tranquilisation située sous la veine. Pour plus de détails concernant la conception de la veine d'essai et son utilisation, se référer aux références [11,12]. Grâce à ces tests, la répétabilité des mesures a pu

être assurée et des données quantitatives sur la dispersion du nuage, la vitesse moyenne des bulles, la répartition de leur diamètre dans l'écoulement ont pu être enregistrées et traitées. Pour plus de détails explicites sur les résultats se référer à [29], où L. Dhar expose les résultats dans son rapport de Maîtrise.

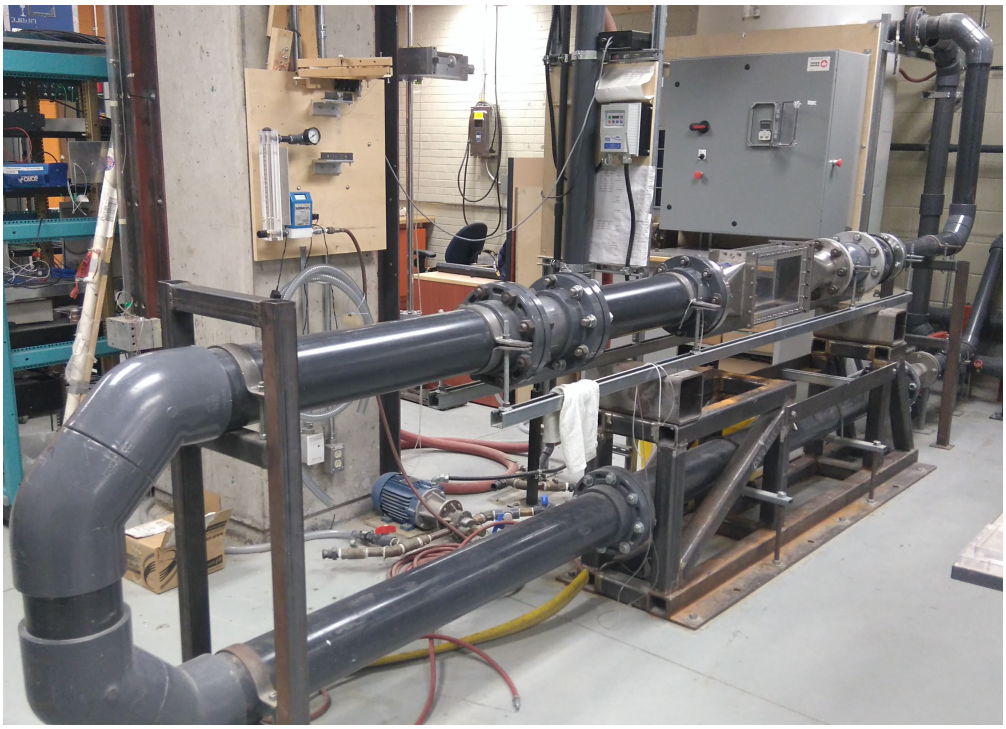


Figure 3.1 Boucle originale

3.1.3 Fibres optiques

Pour obtenir les données quantitatives sur les bulles (vitesses, diamètres et répartition), le principe de mesure se doit d'être intrusif. En effet, pour être représentatif des conditions des centrales hydroélectriques (entre 3 et 6 % de Beta), le débit de gaz injecté se doit d'être conséquent : ceci implique que les nuages de bulles générés sont trop denses pour que des techniques non intrusives telles que la PIV et l'analyse d'images puissent être efficaces (voir figure 3.3). Les bulles, passant les unes devant les autres et sur une largeur trop importante pour qu'elles soient contenues dans un seul plan focal, rendent cette technique inutilisable. C'est pourquoi la mesure se fait grâce à une sonde composée de fibres optiques (voir figure 3.4)). Ces fibres sont traitées à l'acide Hydrofluorique (HF de pH 2.0) afin qu'une de leurs extrémités soit en forme de pointe (une utilité que nous détaillerons par la suite) (voir figure 3.5). Ce procédé complexe suit un protocole de préparation précis et les fibres sont préparées

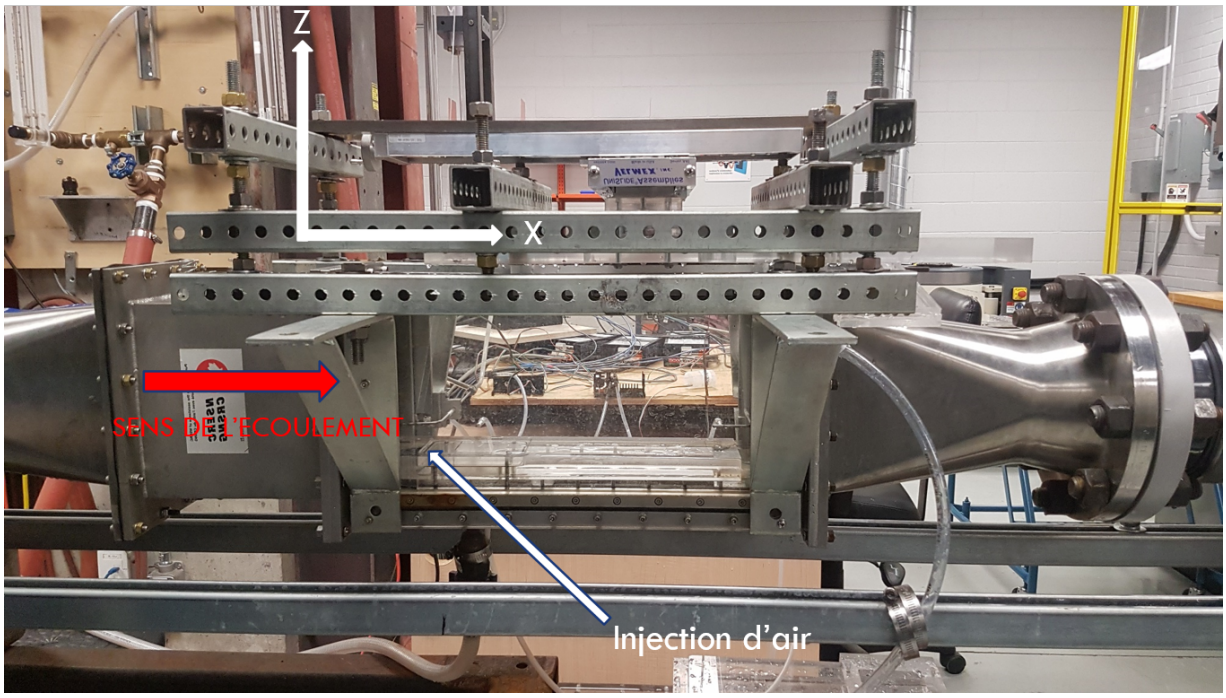


Figure 3.2 Visuel de la veine initiale avec système de déplacement de sonde au-dessus

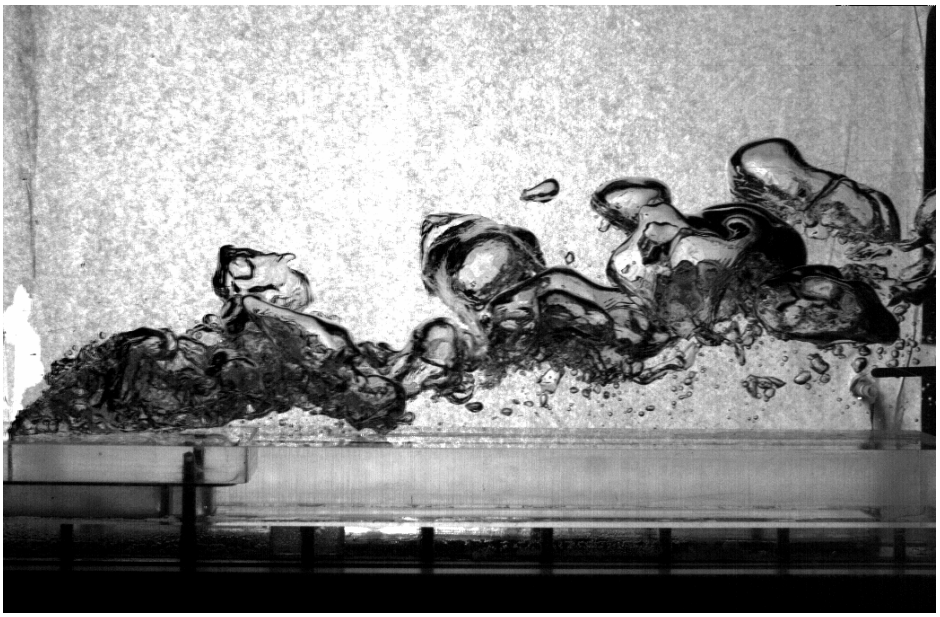


Figure 3.3 Exemple de nuage de bulles généré

ici même à Polytechnique Montréal, dans un laboratoire spécialement prévu à cet effet. Cette pointe sera au contact de l'écoulement et donc des bulles. Le principe est le suivant : les pointes de fibres optiques transmettent de la lumière, émise par un laser, au milieu (eau

ou gaz lorsqu'une bulle est percée par la pointe de la fibre). Cette lumière est réfléchie dans la fibre ou non selon que l'on est dans l'air (réflexion totale interne) ou dans l'eau (absence de réflexion et donc transmission totale de la lumière vers l'eau). Et c'est ici que la forme de pointe prend toute son importance : sans cette pointe (synonyme d'angle de séparation entre la silice de la fibre et le milieu), il ne pourrait jamais y avoir la moindre réflexion au contact de l'air (figure3.6)

Le signal émanant nous indique alors, à un instant t, si on est dans une bulle ou non. Grâce à

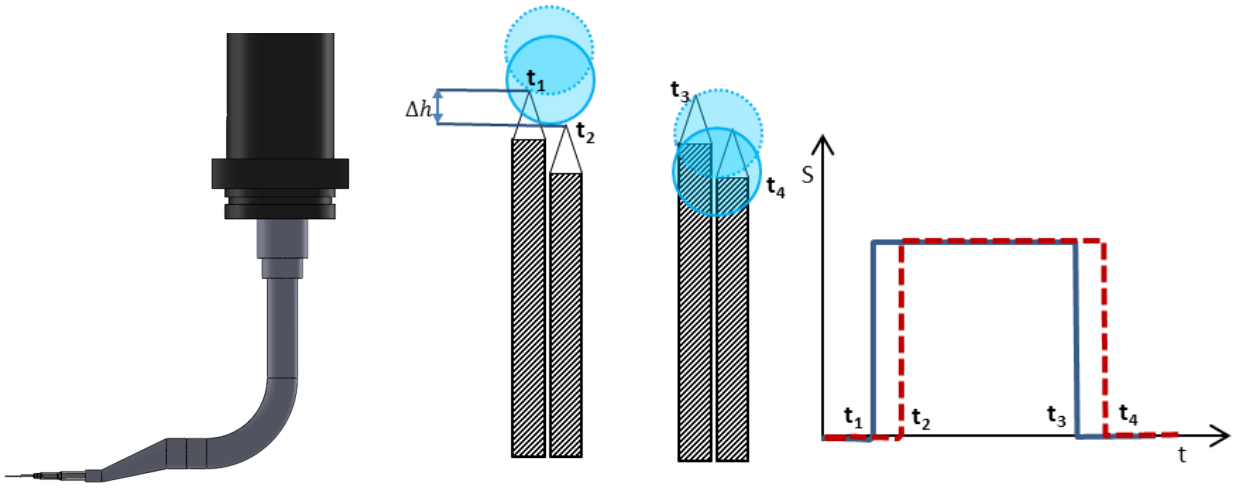


Figure 3.4 Sonde optique (gauche et schéma de principe du fonctionnement des fibres en paires (droite)

cela on peut savoir notamment combien de bulles on perçoit à un point donné de la conduite ainsi que leurs tailles respectives. Les fibres sont doublées pour pouvoir connaître la vitesse des bulles : connaissant la distance inter-pointes des fibres, et le temps de passage d'une fibre à l'autre, on en déduit la vitesse individuelle de chacune des bulles.

3.1.4 Sonde optique

Les fibres optiques sont un matériau très fragile. En effet, la moindre tension sur une des fibres pouvait conduire à un bris de cette dernière. Si une fibre est cassée, il faut la remplacer, au terme d'un processus long, minutieux et impliquant de nombreuses manipulations de la sonde et des fibres (le plus critique étant de casser la pointe d'une des fibres, auquel cas il faut changer les deux fibres intégralement, ce qui prend encore plus de temps). Enfin, le processus de remplacement est lui même risqué : si la manipulation est mal faite lors du remplacement, le signal perd beaucoup en intensité et la mesure devient difficile.

Une nouvelle méthode de jonction des fibres a alors été trouvée au sein du laboratoire,

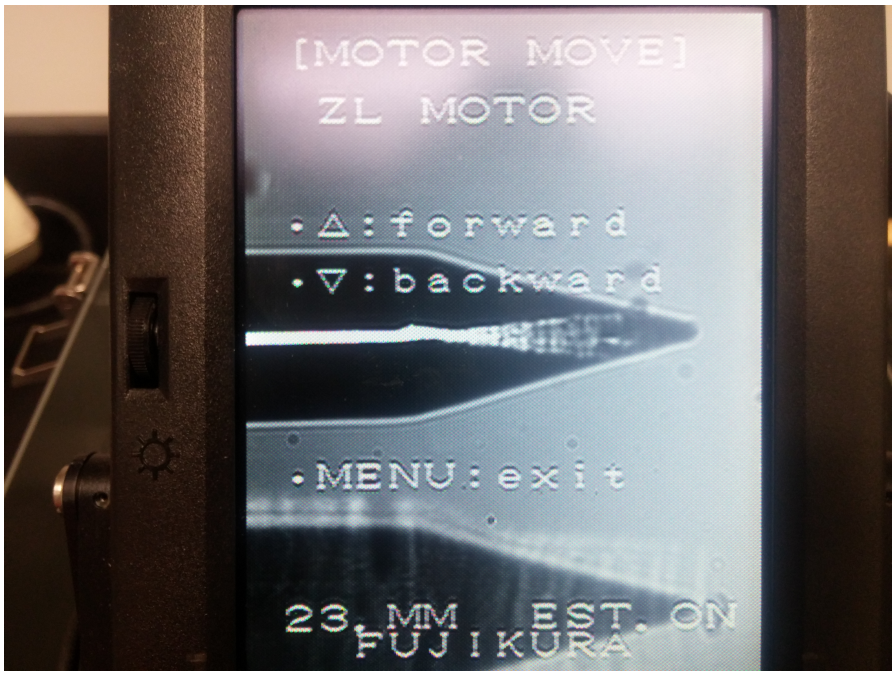


Figure 3.5 Zoom, au microscope électronique, de la pointe d'une fibre

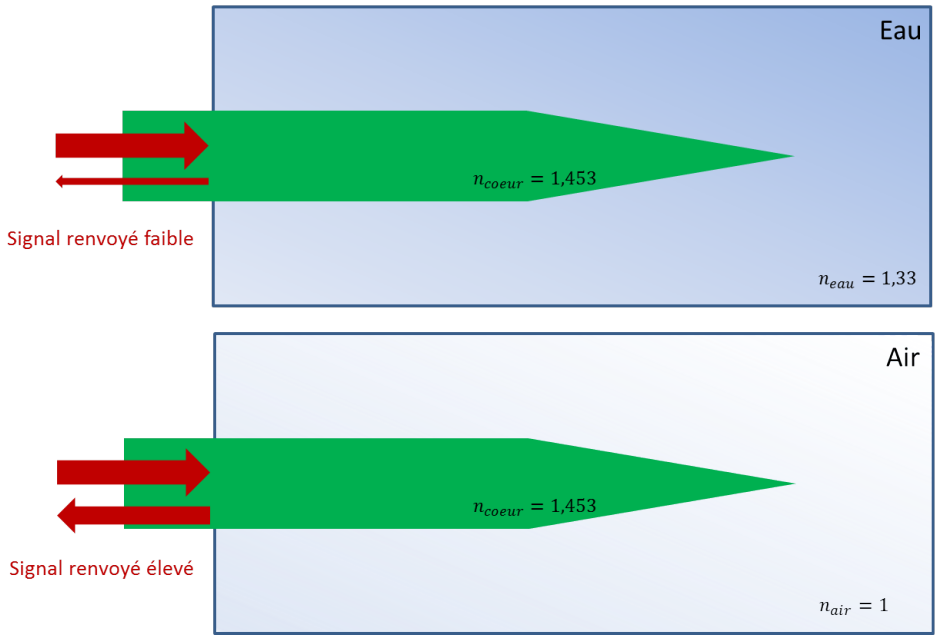


Figure 3.6 Principe de la réflexion totale en changement de milieu

simplifiant à la fois la "maintenance" en cas de bris, et réduisant le temps de remplacement des fibres (le cas échéant) dans la sonde. Cette méthode consiste à clipper la fibre directement sur un connecteur. La fibre est passée au travers de la pince et ressort tangeante à l'extrémité

du connecteur (petit embout blanc sur la figure 3.7). Ainsi, ce montage se comporte comme si nous avions construit notre propre embout pour le connecter directement au système d'acquisition.

Testée avec succès au laboratoire, cette méthode se trouve être une très bonne alternative à la méthode précédemment employée pour connecter des fibres, à savoir la fusion de deux fibres optiques entre-elles. Cette nouvelle méthode de jonction offre (lorsqu'elle est bien faite) en moyenne une perte d'intensité inférieure à une fusion classique. Cette volonté de simplifier les opérations autour des fibres optiques est née en parallèle de la conception d'une nouvelle sonde automatisée, ayant pour but de simplifier la phase de prise de mesure et d'accélérer cette dernière [29].



Figure 3.7 Photo d'une pince (gauche) et assemblage actuel de la sonde (droite)

Le système de déplacement de la sonde s'effectuait manuellement et était opéré depuis la partie supérieure de la veine. Un système de deux actuateurs linéaires, permettait d'assurer les déplacements selon les axes X et Y, et une vis micrométrique assure le déplacement selon Z. La sonde était alors capable de se déplacer en 3 dimensions dans l'écoulement comme on peut le voir sur la figure **??**. Ce système de déplacement devait également assurer l'étanchéité de la surface supérieure de la veine, en permettant à une plaque d'acrylique de coulisser sur un joint d'étanchéité (de type O-ring). Les possibilités de "sondage" de l'écoulement ont alors pu permettre de recenser les données de l'écoulement selon 3 plans : à +100 mm, +153 mm et +206 mm, ayant tous pour référence la fente d'injection (Figure 3.9). Les plans sont composés respectivement de 18×8 points de mesures, soit 144 points par plans. Ces points reflètent le pas de mesure utilisé, soit 3 mm et 5 mm d'espacements entre les points selon les axes Y et Z respectivement. Ceci représentait une surface de mesure d'environ 24 % la surface totale de la veine. Ce résultat apparaît après symétrisation des résultats de mesure selon l'axe Y. En effet, l'injection étant une fente simple on peut considérer, en restant prudent, que seule une moitié de la fente peut être étudiée et ensuite symétrisée afin d'obtenir les résultats globaux.

Grâce à cette symétrisation, on obtient l'intégralité de la largeur du nuage dans notre fenêtre de mesure.

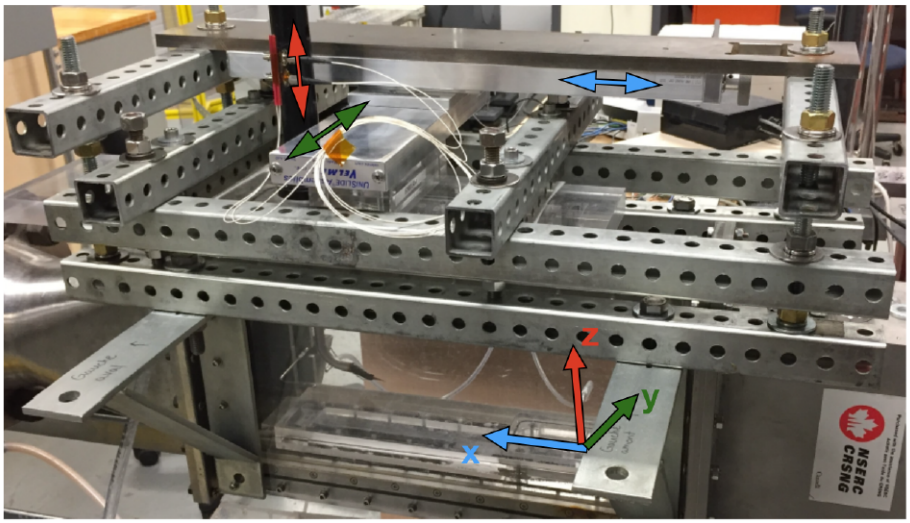


Figure 3.8 Système de déplacement 3D de la sonde dans la Veine Originale

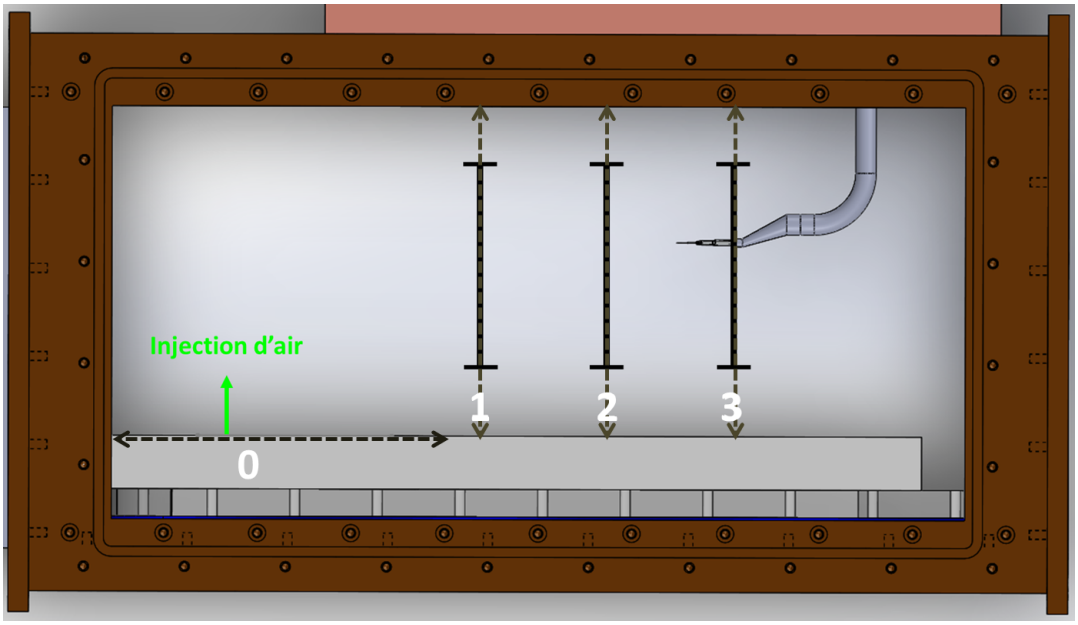


Figure 3.9 Les 3 plans de mesures de la veine originale

3.1.5 Traitement Matlab

Une fois les données brutes enregistrées, une routine Matlab permet de transformer les signaux (alternances de créneaux) en bulles, permettant d'en extraire leurs caractéristiques essentielles. Dans ce programme, développé par F. Anne, M. Chartray-Pronovost et J. Bouvard [12], une série de filtres permet notamment de supprimer les "fausses bulles", les incohérences ainsi que les artefacts de mesures. Il a été par la suite amélioré pour accélérer les traitements, réduire encore l'apparition d'éventuels artefacts, et extraire des données encore plus significatives de l'écoulement [29]. Grâce à ce traitement, il est alors possible d'établir une véritable cartographie, plan par plan, des taux de vides, des vitesses des bulles ainsi que de leurs diamètres. Ces données sont alors stockées dans des fichiers de format Matlab pour une lecture plus facile sur Matlab. Il est alors possible de les réutiliser pour tracer les différentes grandeurs d'intérêt, comme on le souhaite, sur des graphiques.
Une grande partie du travail a également été de repenser l'arborescence des fichiers et la sauvegarde de ces derniers. En effet, le programme Matlab permet une automatisation des traitements et un stockage des données dans plusieurs dossiers et sous-dossiers. Celle-ci a été repensée afin de rendre l'arborescence plus pertinente avec les ambitions de la Chaire : en effet, dans un souci d'homogénéité, il faut rassembler toutes les données expérimentales, afin que celles-ci soient accessibles rapidement et intelligiblement. Avec la construction du nouveau Laboratoire Expérimental de Grande Hauteur, ou LEGH, (avec ses conditions propres en vitesse, pression et taux de vide), ajouté aux résultats déjà existants et à venir sur la boucle atmosphérique, considérant l'arrivée de nouveaux projets expérimentaux, s'impose une homogénéisation de TOUTES les données, stockées avec la même nomenclature. Ce travail a donc été une des priorités de début de maîtrise. Les différentes fentes d'injection doivent également être identifiées selon une certaine nomenclature (avec des numéros identifiant les fentes 1,2,3 etc...) afin de les reconnaître, qu'elles soient utilisées au LEGH ou bien au laboratoire atmosphérique A106. Les données brutes sont écrites et stockées comme suit :

- Les données de sonde : sonde-A**i**PE**j**-**XY**-**xyz**-V**k**C0**l**-**aaaammjj**
- Les données de pression/pitot : pression-A**i**PE**j**-**XY**-**MV**-**aaaammjj**
- Les données de pression sans eau : pressionair-A**i**PE**j**-00-**W**-**aaaammjj**
  - **i** pour la référence au projet
  - **j** pour le numéro de l'expérience effectuée dans le cadre de ce projet
  - **XY** X faisant référence au Beta et Y à la vitesse d'écoulement de l'eau au cours de cette expérience
  - **xyz** pour la position (en 3D) du point de mesure
  - **k** faisait référence à quelle sonde à été utilisée pour faire cette expérience

- **l** pour la version de la précédente sonde (combien de fois elle à été changé principalement)
- **aaaammjj** pour la date à laquelle a été enregistrée cette donnée
- **MV** la hauteur aval de la vague et la hauteur amont de la vague en mm (si il y a)
- **W** le débit d'air injecté

À chaque expérience est écrite une clé d'expérience qui permet d'encoder, selon la nomenclature, les informations de chaque point de mesure ou données expérimentales afin d'aider les expérimentateurs dans l'écriture de leurs fichiers de données. Cette clé fait le parallèle entre les caractéristiques physiques de la prise de mesure (débit d'air, débit d'eau, position...) avec les données codées de la nomenclature. D'où le terme de clé. L'inverse de cette clé (générée automatiquement par le programme) permet de réattribuer les données à leurs caractéristiques physiques lors du post-traitement. Connaissant UNE clé liée à UNE expérience, le programme peut donc placer les données correctement dans l'arborescence de fichier, explicitée en figure 3.10.

3.2 Le laboratoire A106 et sa modernisation

Afin de permettre aux nouveaux travaux de la Chaire de se poursuivre il a fallu repenser le laboratoire existant, qui travaillera de pair avec le LEGH. En effet, les mêmes essais se doivent d'être reproductibles au LEGH (en pression contrôlée) et à pression atmosphérique au laboratoire A106 (numéro du local). Cette partie a pour but de présenter les travaux de conception et de modernisation effectués au A106 permettant de continuer la nouvelle phase d'études de la Chaire.

3.2.1 Les nouvelles veines d'essai

De nouvelles veines d'essais ont été réalisées pour répondre à nos nouveaux besoins. Au total il y a 5 veines réparties en 2 sets : 2 de section 15×15 cm et 3 de section 25×25 cm (voir sur les figures 3.11 et 3.12). Ces nouvelles veines, conçues en interne par F.Anne (associé de Recherche de la Chaire), avaient le cahier des charges suivant :

- Les 2 versions (15 cm et 25 cm), doivent pouvoir être montées au LEGH et au A106.
- Elles doivent permettre une meilleure visualisation de l'écoulement que la version précédente.
- Elles doivent être intégralement inoxydables.
- Elles doivent supporter une pression interne de 5 bars (cas de défaillance du LEGH).
- Avoir des ouvertures afin de permettre la mesure grâce à la sonde optique.

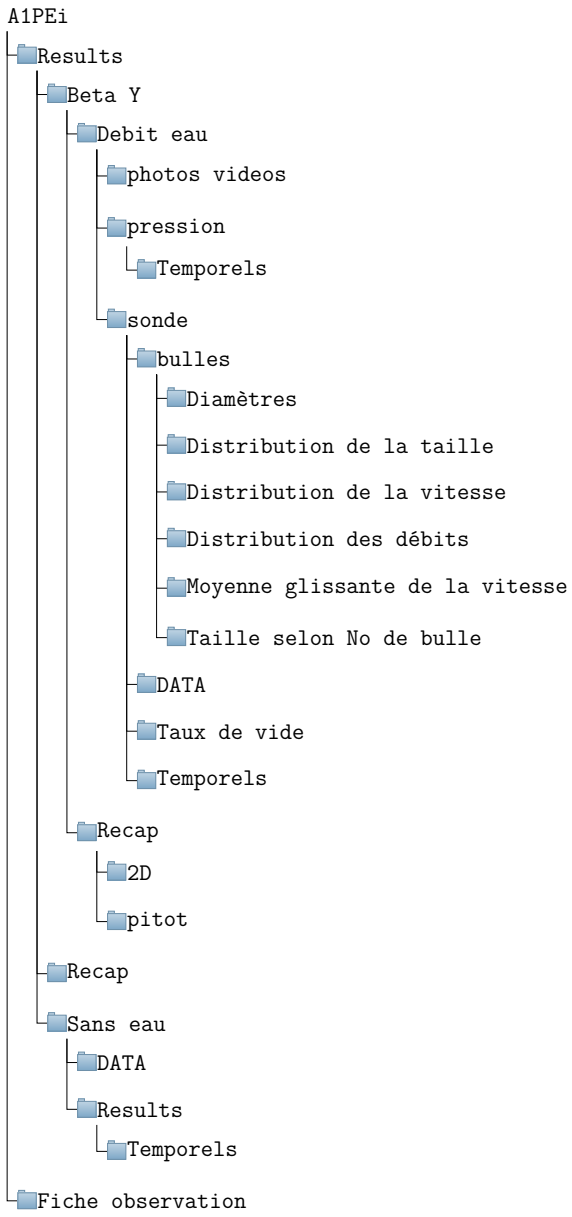


Figure 3.10 Arborescence des fichiers pour une campagne de mesure A1PE**i**

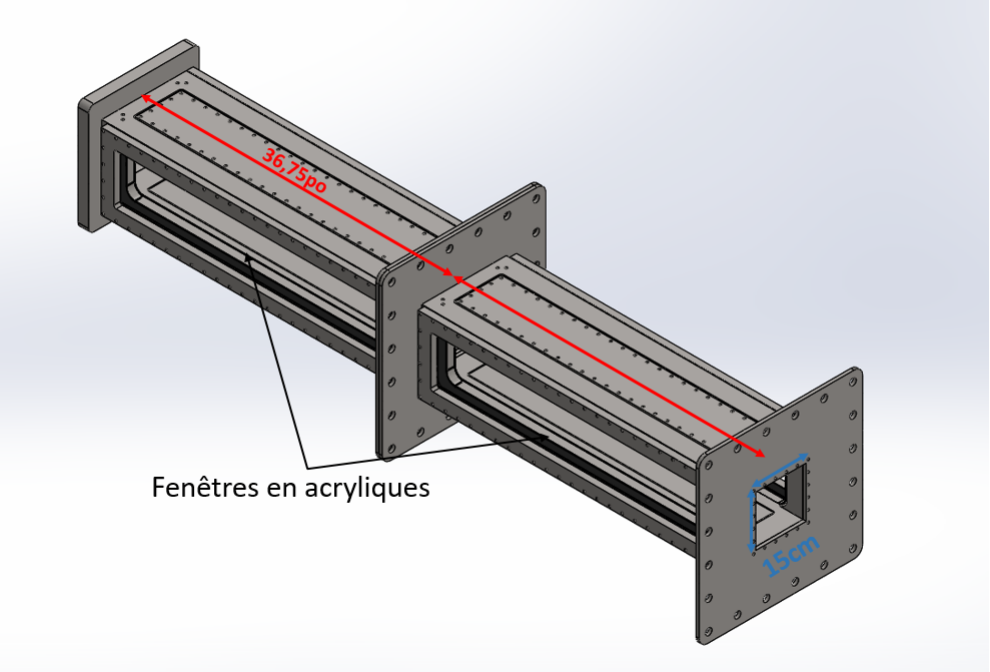


Figure 3.11 Sections d'essais version 15 cm

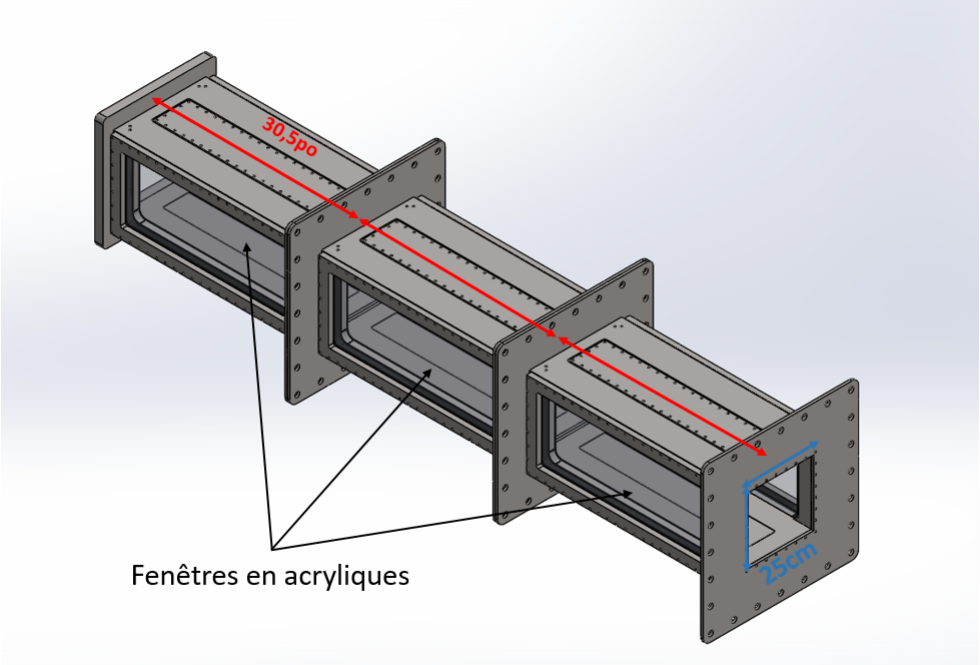


Figure 3.12 Sections d'essais version 25 cm

Pour le premier point, il est à noter que pour que les veines soient adaptables, 2 différents convergents (pour les 2 sections) et un divergent de 15 cm à 25 cm ont également été conçus

en interne. Les veines sont construites intégralement en acier inoxydable afin de pallier à tout risque de rouille. Sur le côté, elles ont deux plaques d'acrylique qui permettent de voir l'écoulement et le nuage de bulles se développer. Pour plus de détails sur la conception et la réalisation de cette partie se référer à Stefane Sved [30].
Grâce à ces 2 sets de nouvelles veines, les laboratoires A106 et LEGH peuvent travailler en parallèle et de manière indépendante : pendant qu'un set de veine est utilisé au LEGH, l'autre set est utilisé au laboratoire A.106 et vice versa.

3.2.2 Conception de la structure

Afin d'accueillir les veines, il faut dans un premier temps concevoir une nouvelle structure capable de les supporter. L'ancienne structure étant trop petite, nous avons procédé à son remplacement. La nouvelle structure doit être suffisamment longue pour pouvoir y installer les veines et suffisamment robuste pour pouvoir supporter le poids de l'ensemble en fonctionnement (700 à 800 kg, une fois en eau). S'appuyant sur les travaux de Matthieu Chartray-Pronovost [31], nous avons opté pour une structure en tubes HSS (High Speed Steel) d'acier, alliant robustesse et minimisation des coûts. Cette structure, longue de 147 po, large de 18 po et haute de 39 po, permet d'accueillir les 2 sets de veines (voir figure 3.13). Cette dimension est la dimension optimale en terme d'encombrement du laboratoire et permet de venir soutenir une grande majorité de la boucle. De plus, elle a été pensée de manière à faciliter la maintenance des veines et les phases d'installation/désinstallation. Les veines pesant plus de 200 kg chacune, il faut prendre en considération qu'un engin de levage est nécessaire pour leur retrait et leur déplacement. Ainsi, elle a une forme la plus évasée possible à sa base afin de laisser circuler une grue de levage (opérée manuellement). Enfin, boulonnée et ancrée dans le sol du laboratoire en 6 points, elle permet de rigidifier l'ensemble de la boucle en limitant d'éventuelles vibrations de la structure induites par l'écoulement. Recouverte intégralement avec une peinture inoxydable, elle est à l'épreuve de la rouille qui pourrait se former en cas de fuites d'eau.

3.2.3 Les supports des veines

L'interface entre la structure et les veines est constituée de supports sur lesquelles les veines vont venir s'appuyer. Il n'est pas possible de venir poser directement les veines sur la structure. En effet si on effectue l'alignement du reste des tuyaux de la boucle sur un type de veine (posé simplement sur la structure), il est alors impossible de centrer l'autre set de veines si on souhaite les interchanger, car les 2 sets ont des brides qui leur sont propres, avec leurs dimensions respectives. En résumé, sans support à hauteur modulable, il faudrait changer

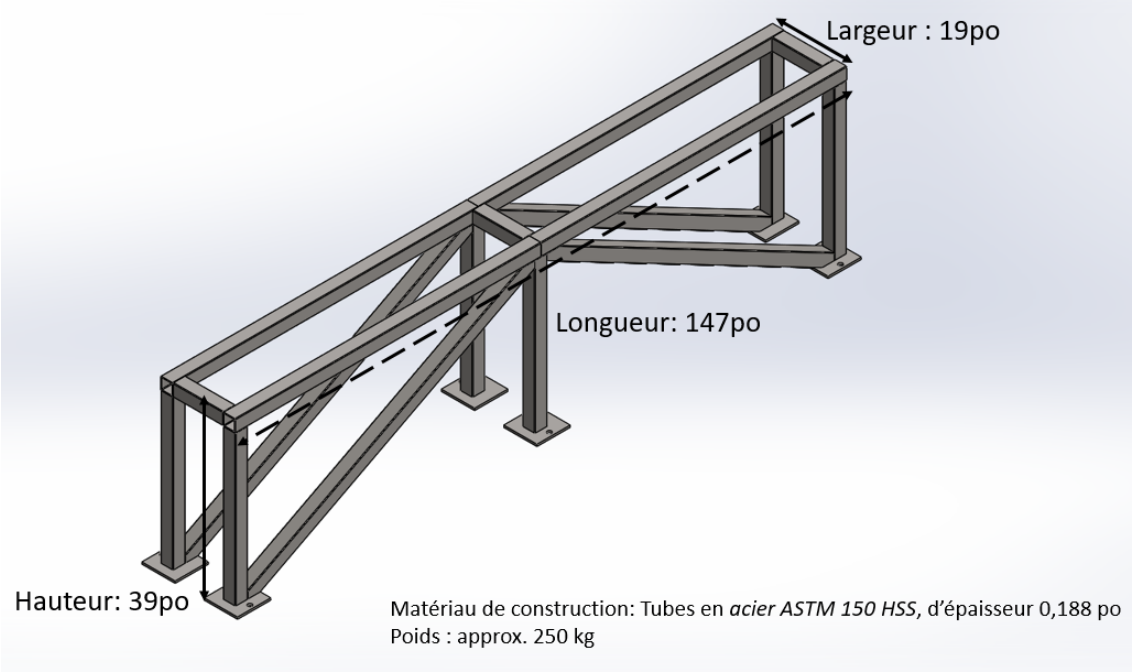


Figure 3.13 Vue isométrique de la structure concue

l'intégralité de la boucle à chaque fois que l'on change de set de veines.

Les supports suivants sont (voir figure 3.14) constitués d'un tube carré HSS en acier (de même dimension que ceux utilisés pour faire la structure principale), de deux vis de 12 po de long et d'un U-Channel en acier sur le dessus (voir schéma). Ils permettent de faire varier la hauteur du support et donc de s'adapter aux 2 dimensions des veines. Une fois boulonnées, la hauteur est verrouillée, l'ensemble est rigide et immobile. 4 Équerres en acier ont été soudées à la base du tube HSS. Ces équerres vont avoir un usage double : empêcher la translation vers le côté de la structure (et donc la chute du support) mais servent également de guide au support afin que ce dernier puisse coulisser le long de la structure. On peut ainsi positionner le support où on le souhaite sur la structure, ce qui a été pensé pour pouvoir s'adapter aux deux sets de veines qui ont des longueurs différentes. Une fois les supports posés en place, le poids que l'on met dessus empêche, par friction, tout déplacement. Ainsi, le support bien qu'ayant un degré de liberté restant, reste fixe en position et ne risque pas de bouger en opération.

3.2.4 Modernisation de la boucle d'essai

De l'ancienne boucle d'essai n'a été gardée que le réservoir, la pompe principale, la pompe auxiliaire servant à la vidange de la boucle ainsi que le débitmètre (voir figure 3.15). Tout

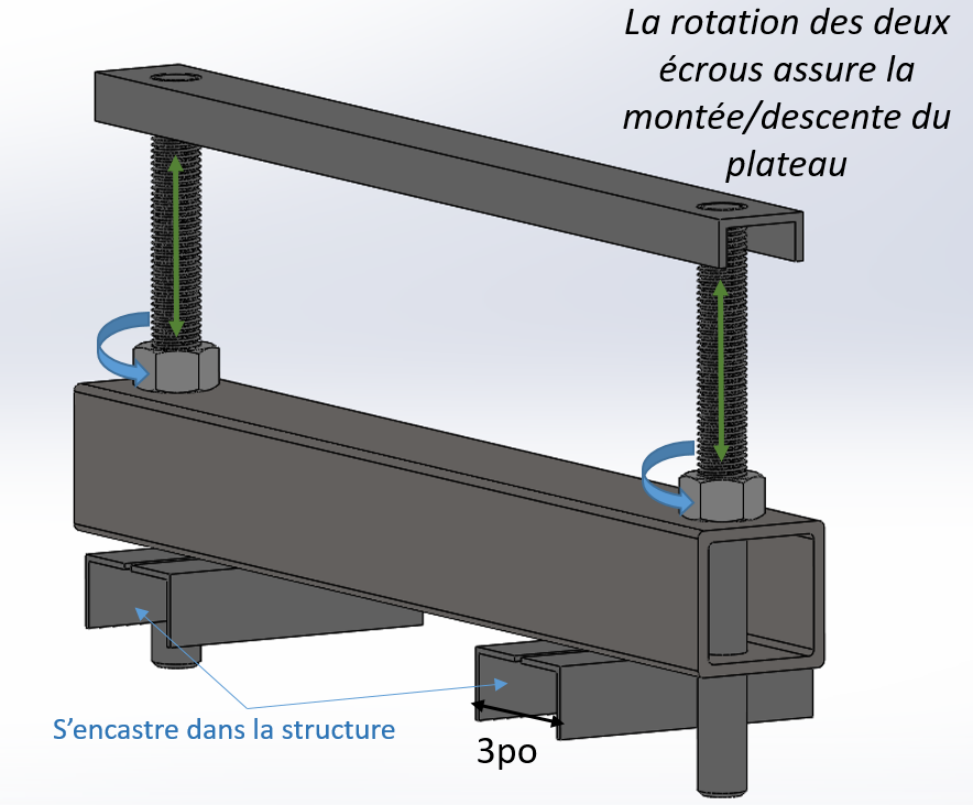


Figure 3.14 Support des veines

le reste a été démonté et désinstallé. Pour cette boucle qui est à pression atmosphérique et à faible vitesse (de l'ordre de 1 à 2 m/s de vitesse débitante d'eau) le choix de la tuyauterie s'est orienté vers des tuyaux en PVC SCH40, qui tient une pression de 140 psi (9.5 bar) pour un diamètre de 10 po. L'usage du PVC permet une plus grande rapidité d'installation, une réduction du poids et du coût de l'ensemble. Après le débitmètre, les tuyaux installés partent en 3 po jusqu'à un T. Une des deux sorties du T est obstruée. L'intérêt de ce T ici est à titre prévisionnel : il a été placé dans l'optique d'une autre boucle, construite en parallèle de cette boucle. Pour l'instant obstruée, cette sortie en serait le début. Après ce T, les tuyaux se poursuivent jusqu'à une vanne qui permet d'isoler cette ligne d'eau. Elle est accompagnée d'un filtre qui doit récupérer les éventuelles particules en suspension dans l'eau. En effet, une des constatations que nous avons eue sur la précédente boucle d'essai était que la présence de particules en suspension dans l'eau pouvait nuire à la sonde. Si une particule se mettait entre les deux fibres, elle pouvait soit endommager les pointes des fibres soit bloquer le signal, ce qui obligeait dans le premier cas à tout changer et dans le second cas à arrêter l'écoulement et à faire partir la particule des pointes des fibres. Ce filtre a donc pour but d'éviter que de telles particules se rendre jusqu'aux fibres. Après le filtre et la vanne, un divergent fait passer

les tuyaux de 3 à 6 pouces de diamètre. Ceci a été pensé pour pouvoir réutiliser des tuyaux de 6 pouces de l'ancienne boucle. Ces tuyaux de 6 pouces sont solidaires de la structure via 2 colliers de serrage rigides, vissés à même la structure. Puis après cela, l'écoulement passe en tuyaux de 10 po. C'est à ce niveau que nous avons décidé de placer la vidange de la boucle, car c'est à cet endroit que nous avons le point le plus bas de toute la boucle. Ainsi on minimise grandement la quantité d'eau restante dans les tuyaux après vidange. Puis la boucle remonte en 10 po toujours et fait un double virage à 90 degrés pour se retrouver à la verticale puis de nouveau à l'horizontale et arriver dans les sections d'essais (figure 3.15). À ce niveau, à l'extrémité d'un tuyau 10 po, on vient placer une bride en PVC de 1 po d'épaisseur. Cette dernière servira à venir connecter le début des sections d'essais au reste de la boucle. À partir de là, on peut venir directement connecter les sections de 25 cm, ou bien (ce qui est le cas sur les figures 3.15 et 3.16) venir connecter le divergent 15/25 cm du LEGH qui sera ici utilisé à l'envers, c'est-à-dire en convergent 25/15 cm. En effet, si les sections de 25 cm sont utilisées au LEGH, le divergent est donc démonté et il peut être utilisé dans la boucle atmosphérique avec les sections de 15 cm en tant que convergent. Après les sections, une autre bride de PVC (de 1 po d'épaisseur également) est utilisée pour effectuer la connexion entre la fin des sections et la fin de la boucle. Après cette bride, on est toujours en 10 po de tuyaux en PVC, auquel on connecte un joint d'expansion afin de prendre les désalignements et d'éventuelles vibrations. Puis, on passe de 10 po à 4 po après un coude à 90 degrés vers la verticale et enfin après un dernier coude, on revient dans le réservoir.
Les tuyaux de PVC ainsi que les brides au niveau des sections ont été collés entre eux avec l'usage d'une colle et d'un apprêt spécial pour les tuyaux de PVC de gros diamètre. Cette technique, communément utilisée en plomberie, permet d'assurer une bonne étanchéité pour les écoulements à faible pression (ce qui est le cas au laboratoire A106). L'usage de tuyaux 10 po (25.4 cm) a été nécessaire pour minimiser le changement (brusque) de section, passant de 10 po de diamètre à 25 cm carré. Le rôle du convergent 25/15 cm est alors aussi d'obtenir un profil d'écoulement plat à l'approche de la section d'essai de 15 cm. Étant à faible vitesse, on se permet alors ce changement rapide de section. En sortie on peut considérer que puisque l'on retourne au réservoir et que nous sommes en aval de la zone de mesure, la qualité de l'écoulement est moins primordiale.

En résumé, cette boucle est capable d'accueillir les deux types de sections avec un minimum de maintenance et d'opérations à effectuer. En cas de changement de sections d'essai il suffit simplement de démonter les sections, installer les nouvelles et changer la partie allant de la bride du joint d'expansion à la bride de PVC de sortie (au total 10 po de longueur de tuyaux) pour qu'elle se connecte à la section de nouvelle dimension.

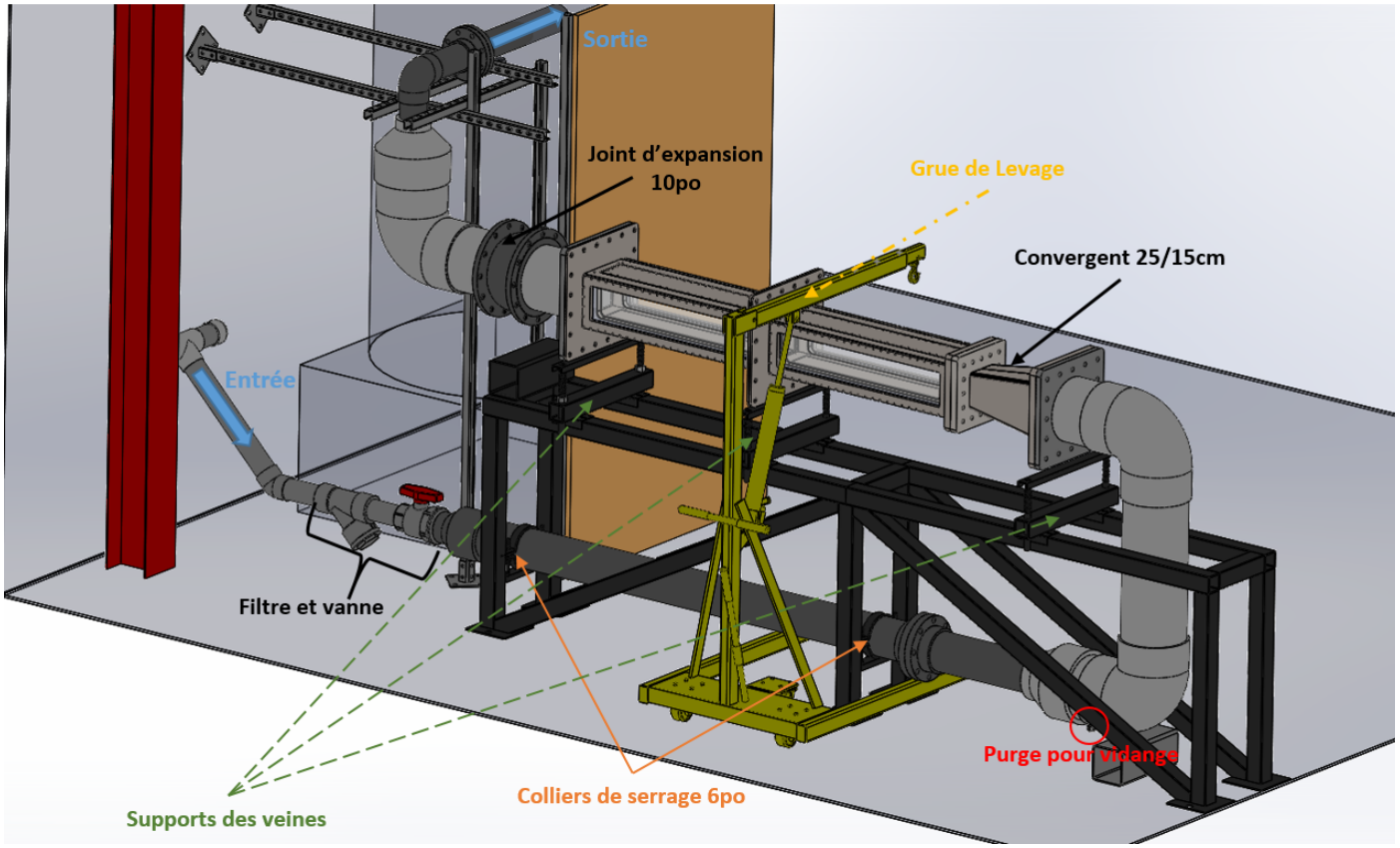


Figure 3.15 Schéma de la boucle modernisée

3.2.5 Conception d'une nouvelle sonde

Pour accélérer la phase de prise de mesure et pallier aux défauts de la sonde originale, un nouveau système de déplacement de la sonde a été conçu. Le principe de déplacement par glissement d'une plaque d'acrylique sur le dessus des sections d'essais a, quant à lui, été conservé. En effet, après plusieurs mois de test sur le premier set up expérimental, nous sommes arrivés aux conclusions suivantes :

— La phase de prise de mesure devait être accélérée, car trop coûteuse en temps
— Le système de déplacement de la sonde devait être revu, car il était difficile à opérer et son usure commençait à présenter des problèmes d'étanchéité dans la section d'essai

La conception du nouveau système de déplacement prend donc en compte une automatisation de deux axes de mesure (les axes Z et Y, voir sur les figures 3.17, 3.18 et 3.19) et un changement total du système d'étanchéité et de serrage (voir figure 3.21). Deux moteurs, couplés aux deux actuateurs linéaires (auxquels nous avions fait référence dans la partie 3.1) viennent donc motoriser automatiquement les axes Z et Y. Cette fois le déplacement ne se fait



Figure 3.16 Boucle du laboratoire A106 modernisée

que selon l'axe Y. On supprime le déplacement selon l'axe X afin de limiter les frottements de la plaque supérieure sur le haut de la veine. À cela on vient ajouter 4 paliers lisses qui viennent transmettre l'effort de serrage plus uniformément autour de la sonde. Puisque l'on vient appuyer plus localement autour de la sonde grâce à la suppression de l'axe de déplacement X, l'étanchéité est mieux assurée. Les différents composants de ce nouveau système de déplacement sont les suivants :

Moteur NI

Nous utilisons deux moteurs NI ISM-7413 d'un couple de 2.4 N/m ayant un courant moteur allant de 2.5 à 6.0 A en pic de phase. Ce sont des moteurs pas à pas avec un pas minimal de 0.009 degré (20 000 pas par tour soit 0.05μm de déplacement par pas) qui seront utilisés pour motoriser avec précision les deux axes (Z et Y) de la sonde.

Actuateur Vertical

L'actuateur qui assure la translation verticale de la sonde est placé tout au-dessus de la sonde et vient remplacer la vis micrométrique. Dans le référentiel de la veine, cet actuateur est fixe.

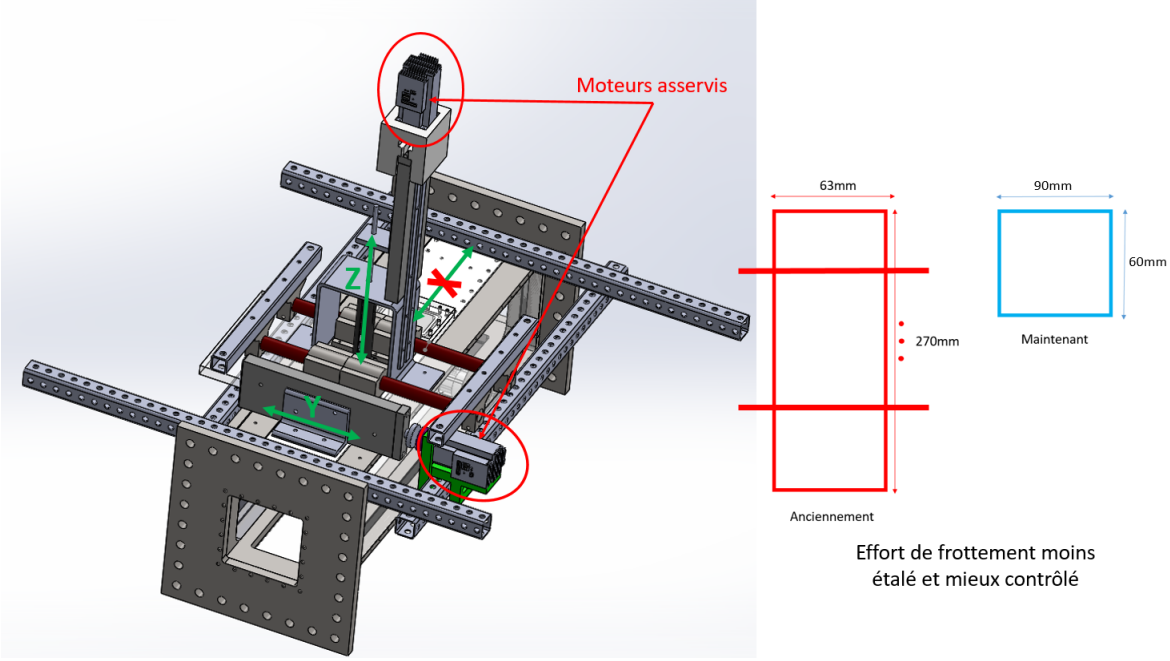


Figure 3.17 Nouveau système de déplacement

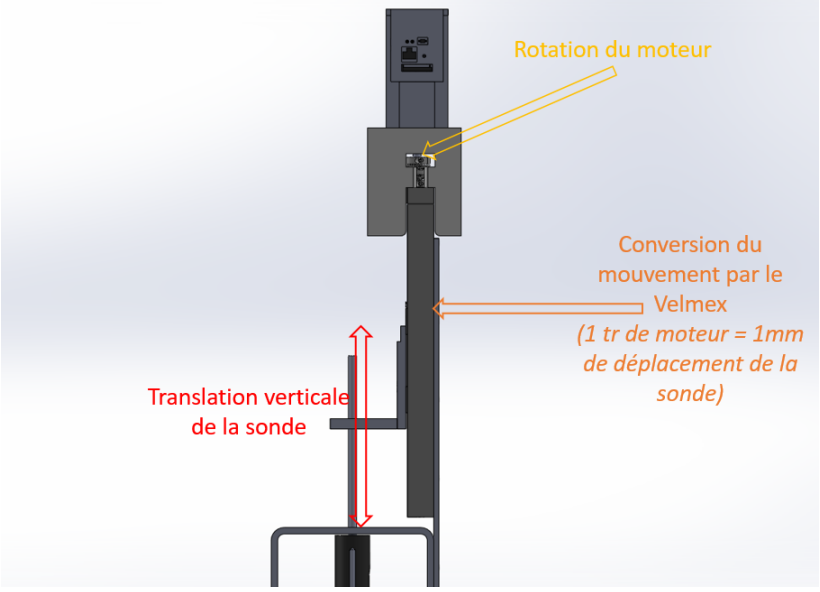


Figure 3.18 Schéma de principe illustrant le mouvement vertical de la sonde

Son chariot déplace une équerre qui est fixée à une tige en acier elle-même vissée au corps de la sonde. Le va-et-vient de l'actuateur entraîne donc une montée/descente de la sonde.

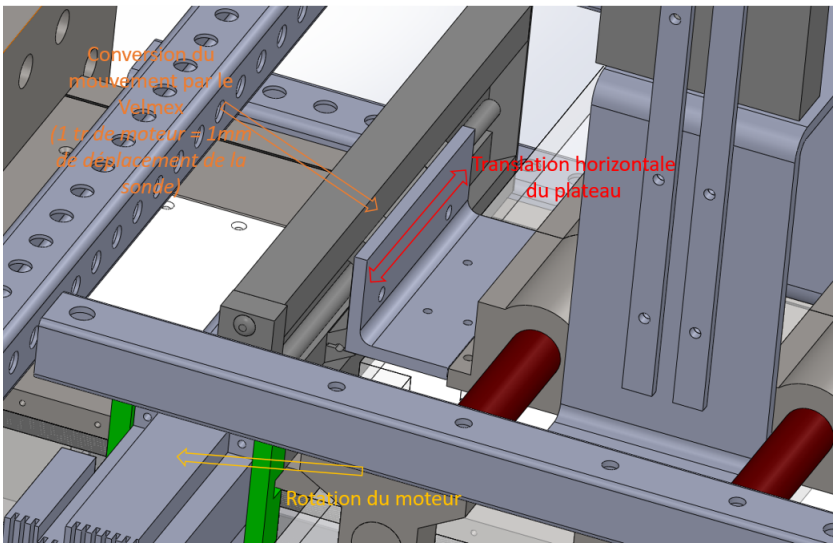


Figure 3.19 Schéma de principe illustrant le mouvement horizontal de la sonde

Actuateur Horizontal

L'actuateur est solidaire grâce à une équerre de la partie supérieure de la veine. Dans le référentiel de la veine, cet actuateur est donc également fixe. Son chariot est solidaire du plateau de déplacement via une équerre et entraîne le plateau selon l'axe Y dans son mouvement.

Plaque d'acrylique supérieure (plateau de déplacement)

La plaque supérieure coulisse sur le dessus de la veine sur une autre plaque d'acrylique. La sonde passe au travers d'un trou qui traverse les deux plaques. L'étanchéité est assurée par un joint torique. C'est sur ce joint que se fait la friction entre les deux plaques.

Support pour l'actuateur Vertical

Un support pour l'actuateur vertical est nécessaire pour le maintenir au-dessus de la sonde. Ce support, en aluminium anodisé, enjambe la sonde et prend une forme de U inversé. Il est encastré dans la plaque supérieure d'acrylique et est percé d'un trou en son centre pour pouvoir laisser passer la tige de déplacement vertical.

Support imprimé des deux moteurs

Les deux supports des moteurs sont imprimés 3D en plastique et les tiennent en place lors de leur opération, les empêchant de se désaxer, de vibrer ou encore de tomber.

Paliers lisses et barres transversales

Les 4 paliers lisses reprennent les efforts de serrage qui sont appliqués sur les 2 barres transversales et permettent de faire 4 surfaces d'appuis bien réparties autour de la sonde. Ils permettent également d'avoir un minimum de frottement lors de leurs translations le long des deux barres transversales (qui sont fixes dans le référentiel de la Veine). Grâce à cela, le moteur a moins à forcer pour déplacer le plateau. Le seul effort à vaincre étant alors l'effort de frottement du plateau sur le joint d'étanchéité.

Remplacement du coude en bas de la sonde

Afin d'assurer une plus grande plage de points de mesure dans les veines, le coude de la sonde a été repensé. Nous passons d'une sonde qui faisait face à l'écoulement à une sonde ayant un angle de 45 degrés par rapport à l'écoulement (l'axe x). Un nouvel embout de sonde a été pensé pour redresser les fibres, en les remettant face à l'écoulement (voir figure 3.20). L'objectif est de pouvoir aller plus proche du bord de la section d'essai, car la fente du profil a une largeur de 124 mm soit plus de 82% de la largeur totale de la section. Pour bien prendre la mesure du nuage jusqu'à son extrémité, il fallait donc permettre un décalage de la mesure par rapport au corps de la sonde qui ne peut se déplacer que sur 90 mm (voir au début du paragraphe 3.2.5).

Ainsi cette nouvelle sonde nous permet de capter 100% du nuage après le processus de symétrisation, grâce au décalage de la tête de mesure comme on peut le voir sur la figure 3.22.

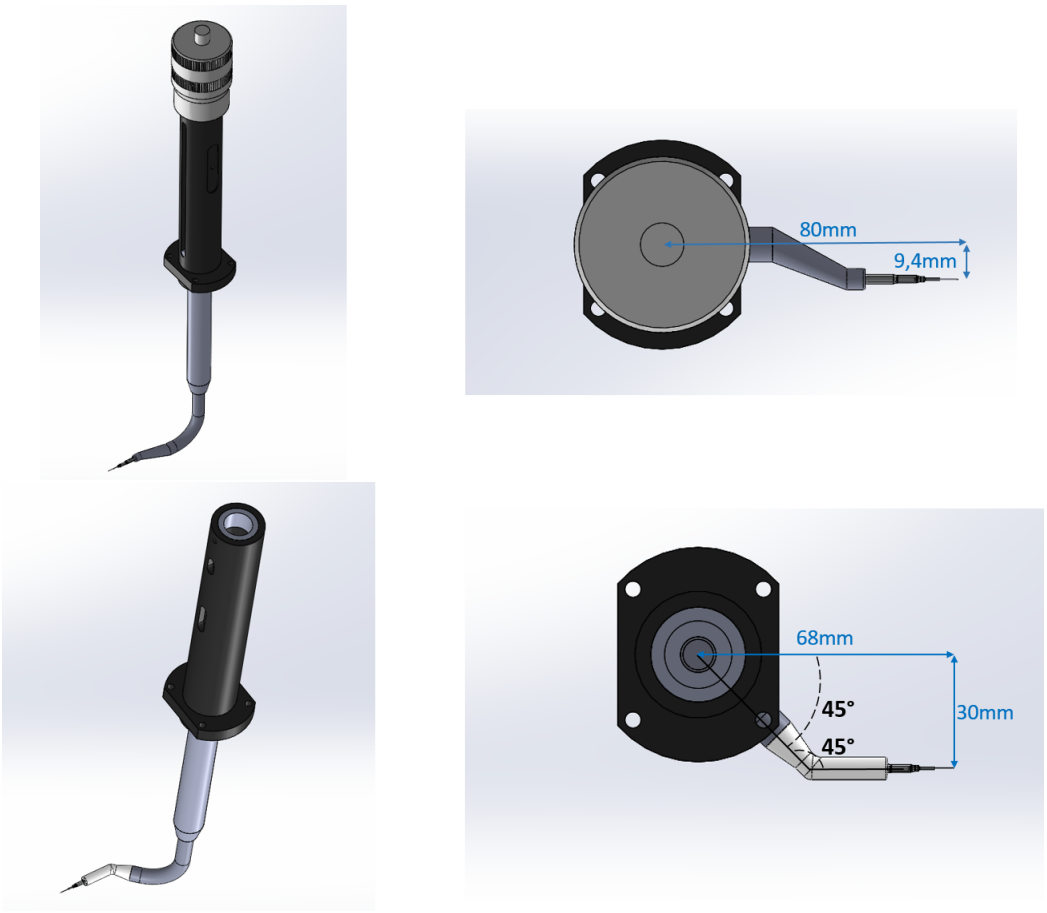


Figure 3.20 Ancienne sonde (haut) vs nouvelle (bas)

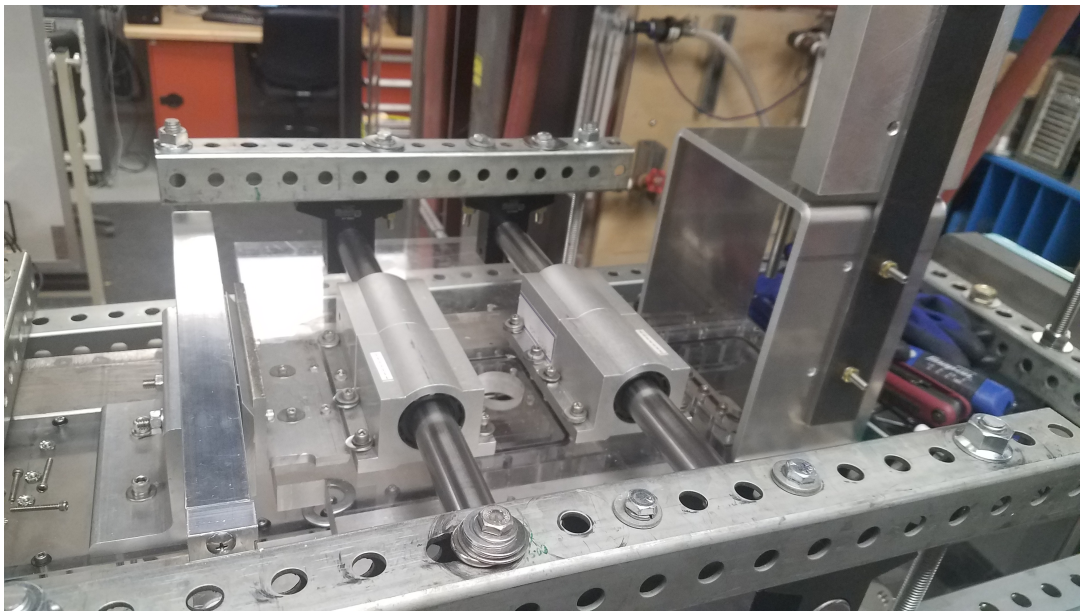


Figure 3.21 Visuel réel de la sonde

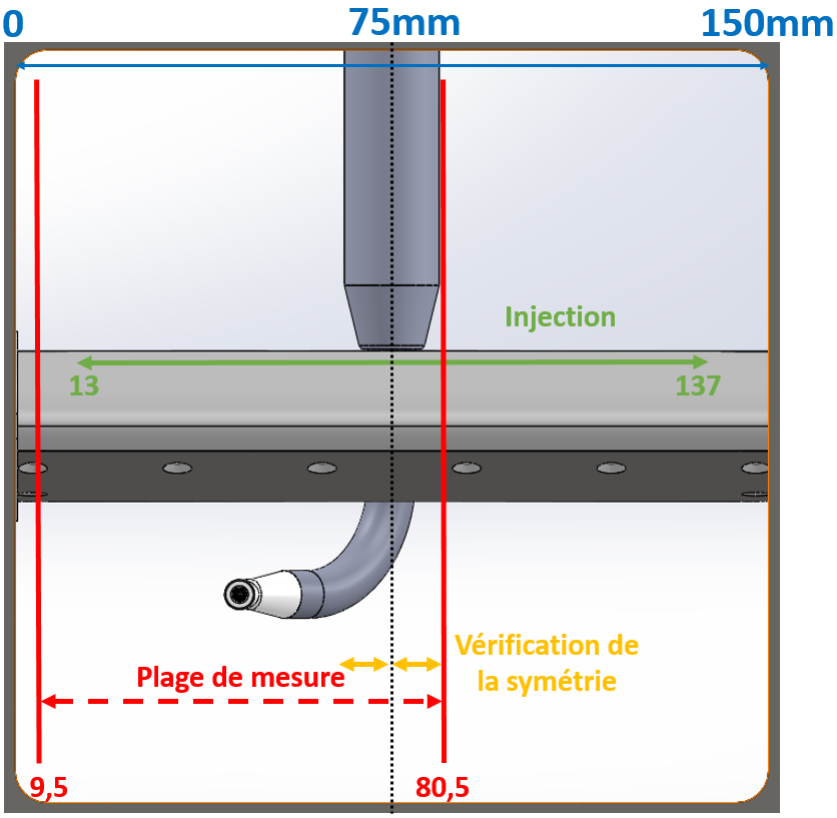


Figure 3.22 Section d'essai et plage de mesure de la nouvelle sonde

CHAPITRE 4 PROFIL AÉRANT

Cette section traite de la conception, réalisation et de l'installation du profil. Elle a pour but de développer les choix de conceptions compte tenu des attentes et besoins de ce projet de recherche de la Chaire ainsi que de présenter l'opération de ce profil en conditions expérimentales, tout en mettant en avant ses capacités.

4.1 Conception du profil

4.1.1 Cahier des charges attendu pour le profil

L'objectif est de concevoir un profil aérant capable d'injecter un nuage d'air sous pression dans un écoulement d'eau à haute vitesse tout en assurant une bonne dispersion de l'air en aval de l'injection. Ce profil permettra d'étudier les propriétés du nuage de bulles généré et de quantifier les pertes/gains de pression générés dans la conduite. Ce profil doit répondre à un certain nombre de critères :

- Se maintenir dans un écoulement d'eau à haute vitesse (25 m/s pour la version 15 cm)
- Limiter l'obstruction de section
- Pouvoir avoir un angle d'attaque variable
- Avoir un injecteur maximisant la dispersion du nuage de bulle en aval de l'écoulement
- Permettre une aération homogène tout le long de l'injecteur
- Penser le système du maintien du profil afin que l'on puisse mesurer les efforts sur ce dernier

Compte tenu de ce cahier des charges, nous allons maintenant présenter la conception du profil en elle-même.

4.1.2 Choix de profil et dimensions

Sur les conseils du partenaire de la Chaire, General Electric, le profil retenu pour cette étude est un profil de type NACA 0015. Ce terme signifie que ce profil est un profil mince, sans cambrure et que son épaisseur maximale est égale à 15 % de la corde (longueur du bord d'attaque au bord de fuite du profil). Les dimensions retenues pour le profil sont alors de 20 cm de corde, offrant alors une épaisseur maximale de 3 cm. Cette épaisseur correspond à une obstruction de 20 % de la section d'essai dans le cas 15 cm et d'environ 8% dans le cas des sections de 25 cm. Cette épaisseur est nécessaire au bon fonctionnement de la chambre d'injection, garante d'une sortie homogène et bien distribuée à l'injecteur (se référer à la

section suivante).

4.1.3 Conception numérique et optimisation de l'injection

Afin d'optimiser l'injection d'air, il est important de bien penser la conception de la chambre à air, qui a pour but de garantir une injection homogène en sortie du profil. En effet, les débits d'air attendus à pleine capacité sont de l'ordre de 55 L/s, ce qui correspond à un titre volumique de 9 %. Ce chiffre sera pris comme référence pour le dimensionnement, car il correspond aux conditions maximales de tests envisagées aujourd'hui au LEGH, ce qui en fait donc notre grandeur dimensionnante. Pour un tel débit d'air entrant (55 L/s), il est important que l'écoulement d'air à l'intérieur de la chambre ne soit pas mal dispersé et soit bien pensé.

Afin de pouvoir placer des jauges de contraintes sur le profil, le profil sera maintenu uniquement d'un seul côté, ayant alors l'avantage de ne pas plus encombrer l'écoulement. Le défi est alors de redresser un écoulement d'air à haute vitesse afin qu'il effectue un virage à 90 degrés dans un espace très confiné (moins d'une dizaine de centimètres) et se répartisse uniformément le long d'une fente mince (voir figure 4.1).

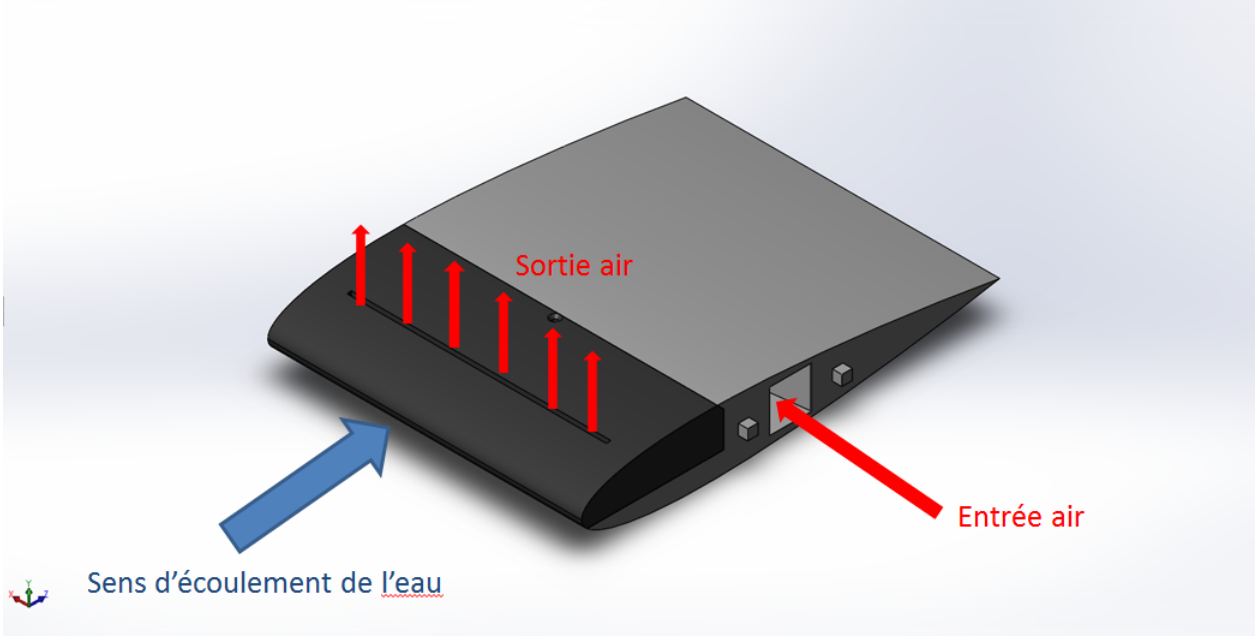


Figure 4.1 Schéma du concept d'injection par le côté sur le profil (version non finale)

Plusieurs concepts ont alors été envisagés, et testés numériquement sur CFX, chaque itération prenant en compte les défauts du dernier afin de les corriger. Le critère de satisfaction de notre

chambre d'injection est que notre sortie d'air, donc notre injecteur, soit le plus homogène possible. La partie suivante présente les chambres successives qui ont été simulées. Elles représentent la cavité à l'intérieur du profil, de l'entrée d'air dont on peut voir un premier exemple avec la figure 4.2 jusqu'à la fente d'injection. Les simulations qui vont suivre sont réalisées avec le logiciel ANSYS CFX, recommandé et utilisé par le partenaire industriel, General Electric, dans le cadre de simulations sur aubes de turbines.

NOTE IMPORTANTE : Dans les schémas à suivre, il y a deux échelles de couleurs : la première en haut à gauche représente les vitesses de l'air à la sortie uniquement, celle en bas à droite indique le niveau des vitesses dans le reste de la chambre.
Après avoir testé de nombreux maillages et configurations, les paramètres suivants ont été retenus : Mailles triangulaires de taille maximale 0.5 mm et minimale de 5 μm (présentes dans les zones à fortes courbures et les zones fines) avec un taux de croissance maximal de 1.2. Les conditions imposées sont un débit massique de 0.066 kg/s d'air à l'entrée (soit environ 55 L/s, notre condition dimensionnante) et une condition en pression à la sortie de 0.1 bar (condition de pleine charge au LEGH). Tout le reste des frontières du domaine sont en condition de "non-glissement". Le modèle de turbulence k-ω SST a été utilisé. On se place en écoulement compressible lors des calculs. Les simulations sont réalisées en stationnaires. La convergence des simulations se fait sur 100 itérations avec un pas (en pseudo temps) de 20 ms.

Premier design : V1.1

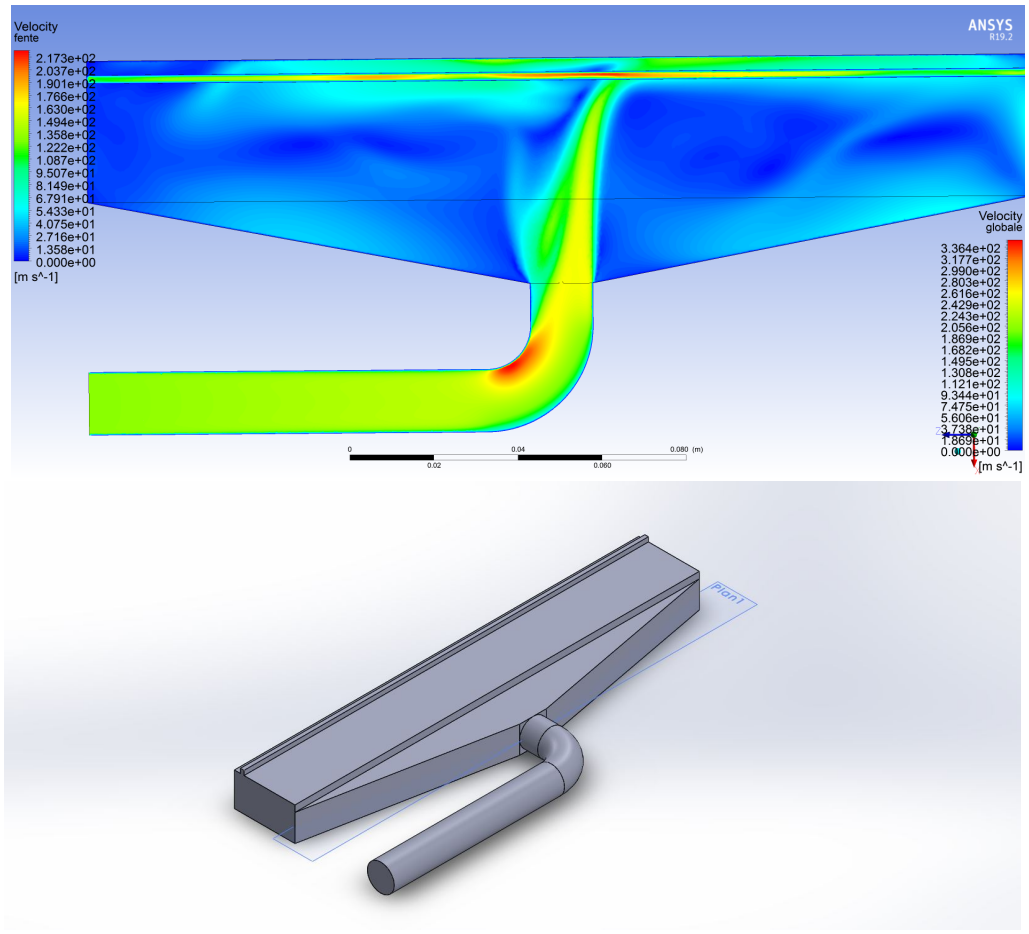


Figure 4.2 Vue du dessus de la chambre d'injection V1.1

Le premier design consistait en un simple conduit circulaire, faisant un coude à 90 degrés. Le coude arrive dans la chambre de tranquillisation et la sortie s'effectue par la fente (partie rouge et orange au bout de la chambre). Ce design n'est pas satisfaisant, car la sortie présente une forte disparité de vitesse, présentant un front allant de 217 à 100 m/s, le maximum étant au centre et les minima sur les côtés.

Design V1.2 : ajout d'un déflecteur

Dans cette version (Figure 4.3), on rajoute un déflecteur à la sortie du coude afin de mieux disperser l'écoulement. Cette mesure est également insuffisante puisque la disparité des vitesses à la fente est toujours trop importante (128 à 98 m/s). De plus, on constate un maximum des vitesses à droite tandis que la gauche de la fente présente des vitesses bien plus faibles.

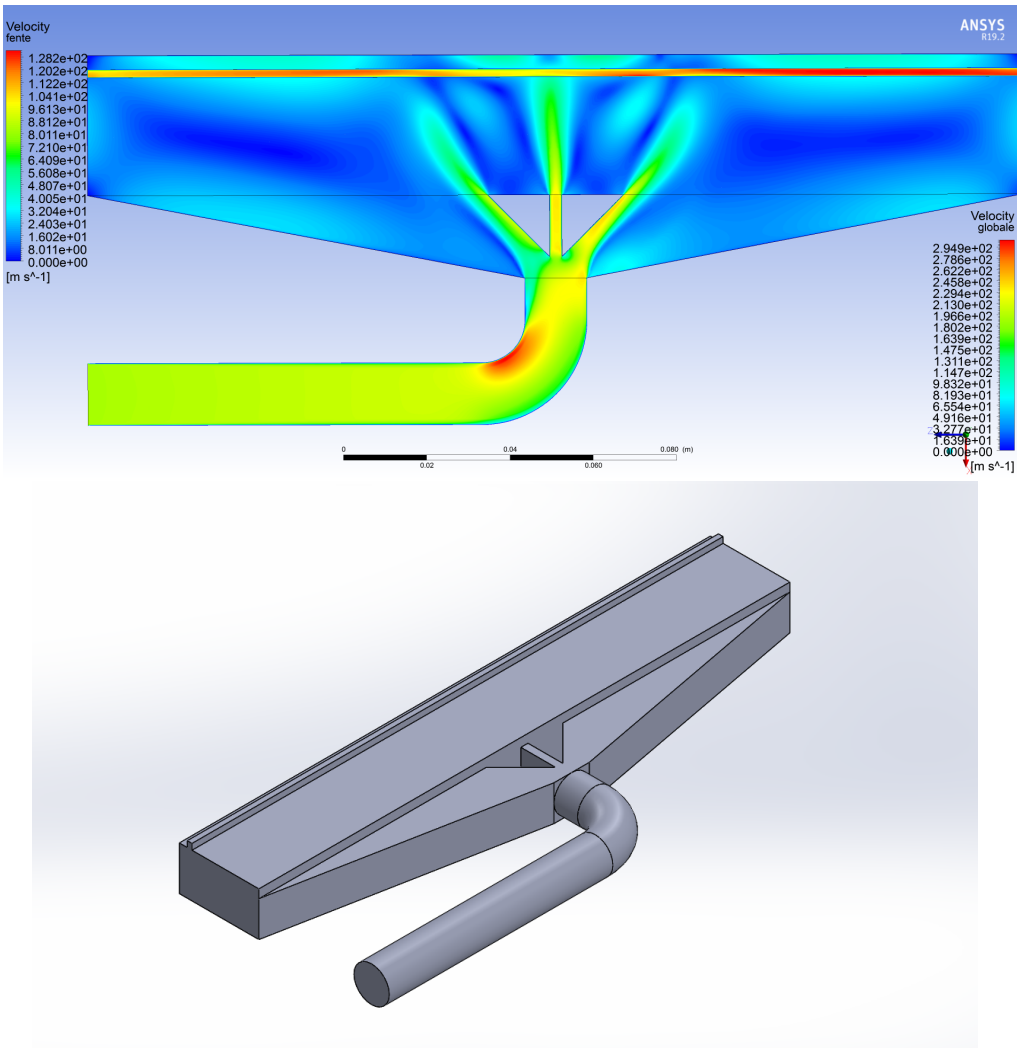


Figure 4.3 Version 1.2 semblable à la V1.1 avec l'ajout du déflecteur

Design V2.1 : Chambre type "tuyaux d'orgue" droit

Dans cette version (Figure 4.4) nous changeons de concept : puisque le simple coude ne suffit pas à bien répartir uniformément l'air le long de la fente, on choisit de diviser le flux d'air en plusieurs coudes successifs. Il est à noter que pour tenter de conserver un débit constant dans chaque coude, la conduite principale se rétrécit. Ce design s'inspire des bâches spirales des turbines hydroélectriques. Pour garder un débit constant sur toute la périphérie de la roue, la bâche spirale des turbines rétrécit sa section tout en s'enroulant autour de la roue et éjectant l'eau par des sorties de surfaces constantes. Cette idée de concept est reprise et mise "à plat" pour notre cas, espérant assurer ainsi une meilleure distribution du flux. Malheureusement, les disparités sont toujours présentes allant de 200 à 110 m/s en sortie, en notant les différents maxima le long de la fente. De plus, on remarque des parties où l'écoulement serait sonique

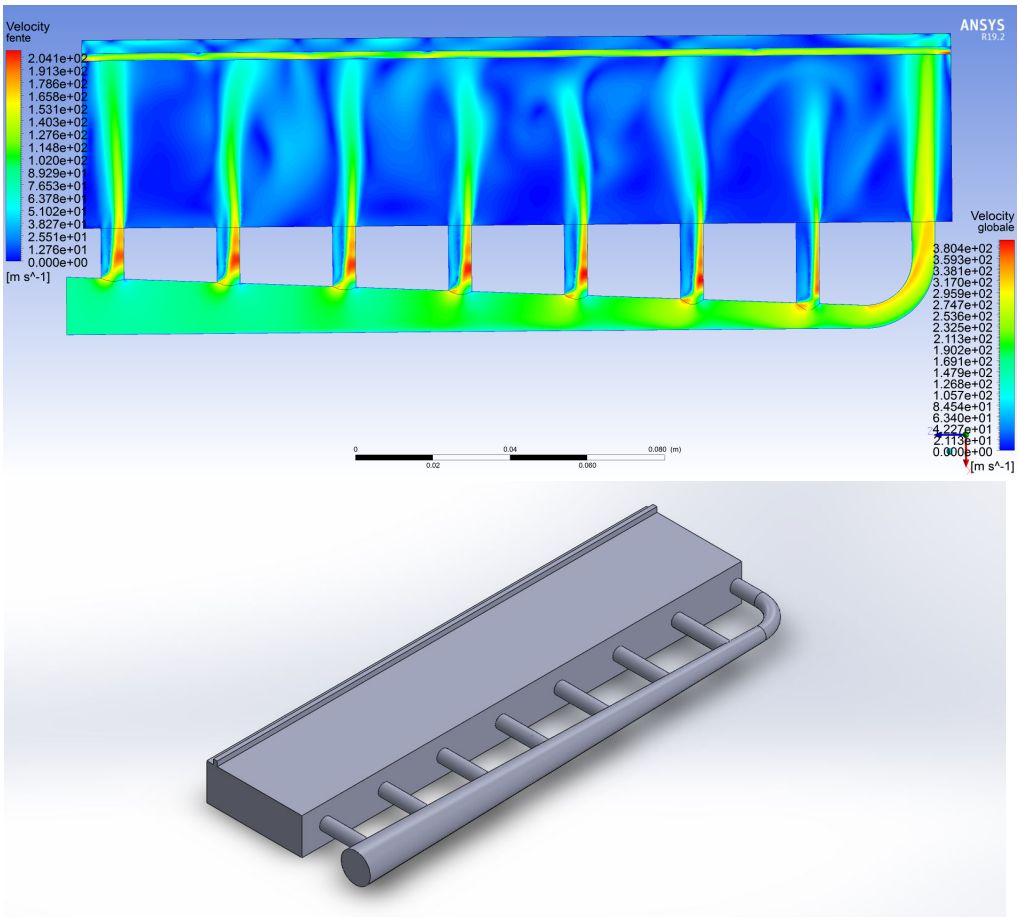


Figure 4.4 V2.1 : “tuyaux d’orgue” avec rétrécissement de section

dans certaines parties des conduites (voir échelle en bas à droite des figures).

Design V2.2 : Chambre type “tuyaux d’orgue” courbés

On reprend le même concept sur la Figure 4.5, qui semble prometteur. On change la forme des coudes en leur donnant une forme courbée. Le résultat semble meilleur dans les conduites et change au niveau de la sortie avec des vitesses variant de 170 à 130 m/s. Ces variations, même si elles ont été réduites, sont tout de même trop importantes pour être satisfaisantes.

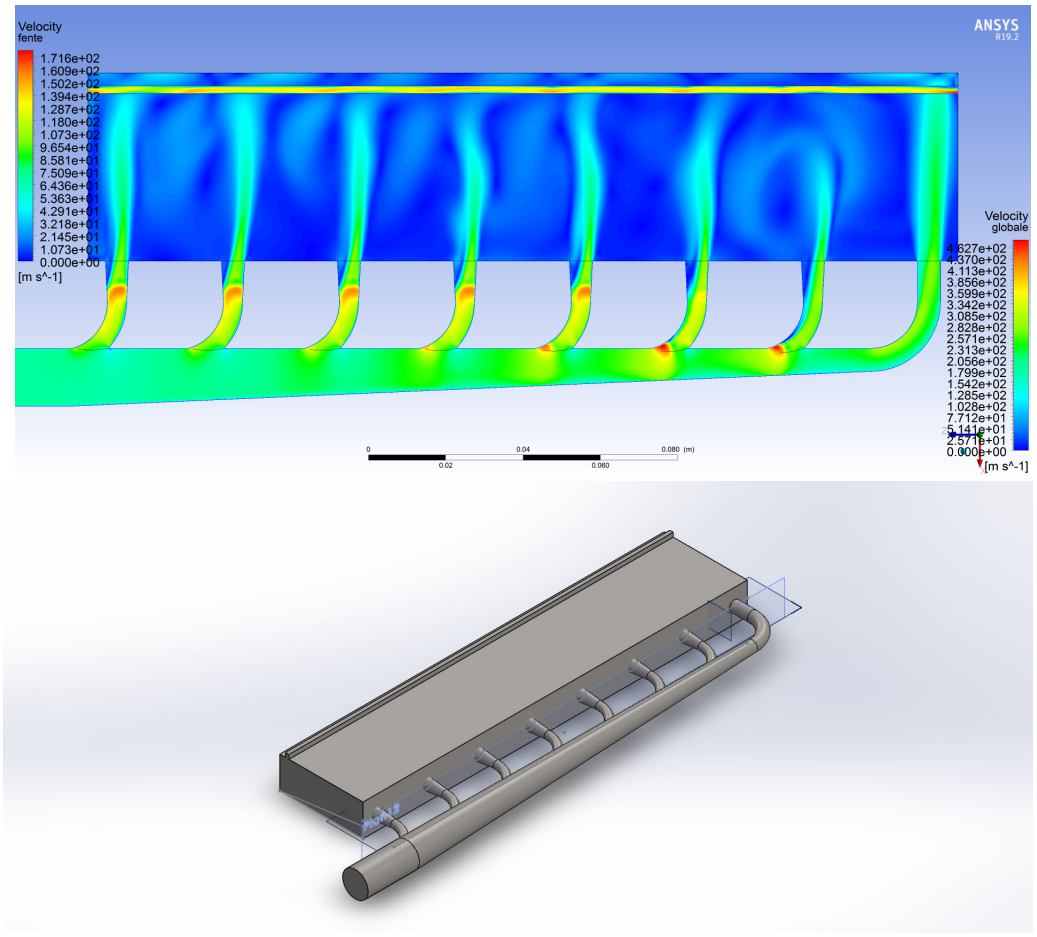


Figure 4.5 V2.2 : Version avec tuyaux courbés

Design V2.3 : Chambre type “tuyaux d’orgue” de courbure différente

Nous repartons des conduites courbées et changeons légèrement leur géométrie sur la figure 4.6, en modifiant la courbure. Cette configuration est équivalente à la précédente puisqu’elle ne réduit que peu notre plage de vitesse à la sortie (de 130 à 165 m/s), et les maxima de vitesse semblent encore plus présents que dans le dernier cas.

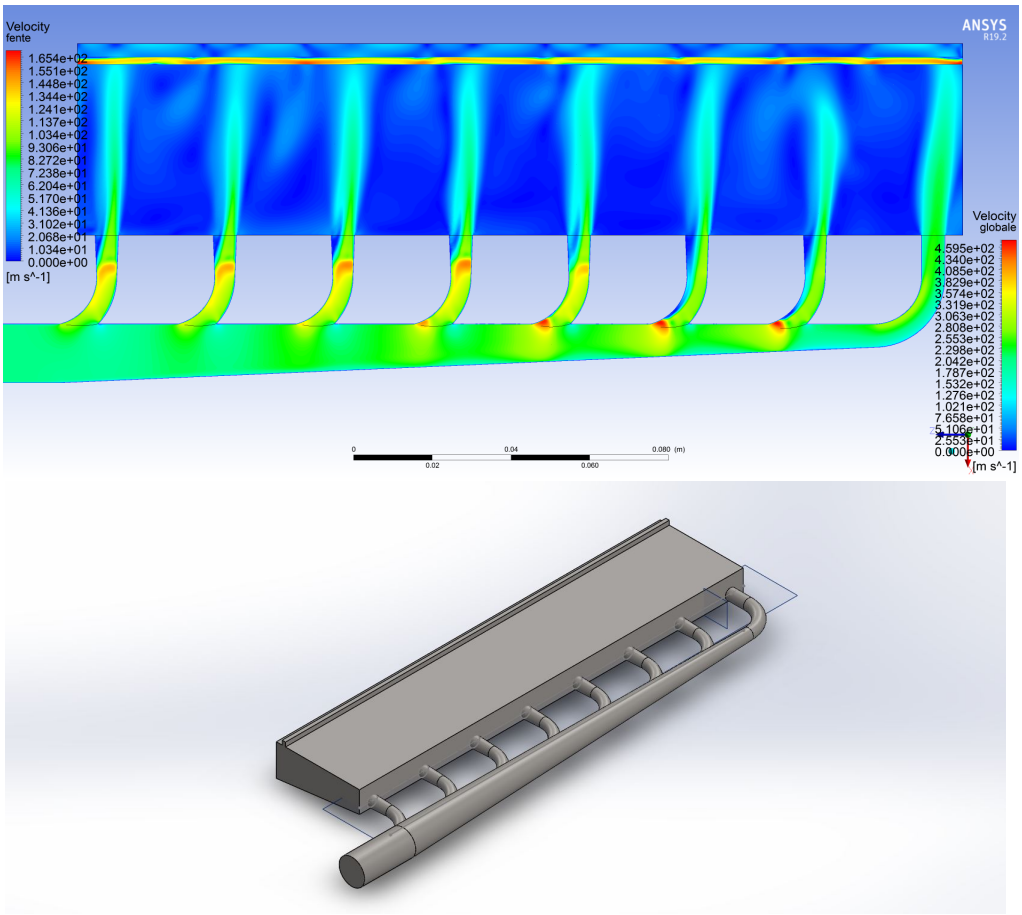


Figure 4.6 V2.3 : Version avec tuyaux courbés n2

Design V2.4 : Chambre type “tuyaux d’orgue” droits et évasés à la base

Cette configuration (figure 4.7) reprend les conduites de forme droite mais avec une base évasée est un pas en arrière puisqu’elle présente un décalage semblant favoriser l’injection vers la gauche de la fente, en délaissant la droite. Les vitesses s’étalent entre 120 et 170 m/s.

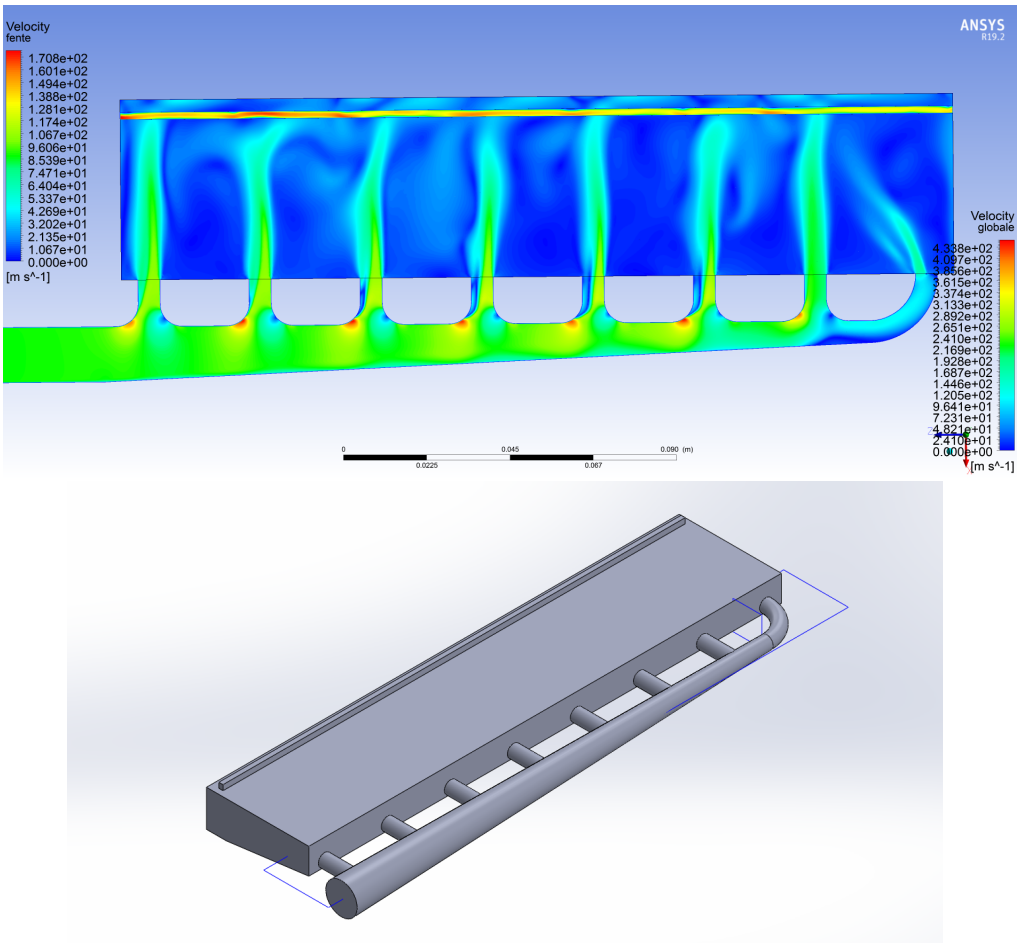


Figure 4.7 V2.4 : tuyaux droits et évasés

Design V3.1 : Chambre avec coude aplati et continu

Dans cette version (figure 4.8), nous tentons une toute nouvelle géométrie. Nous tentons d'avoir un coude fin et continu tout le long de la conduite principale. Le but est de palier aux défauts présents sur le concept précédent, à savoir la présence de maxima de vitesse le long de la fente. En rendant le coude continu, on espère donc mieux étaler le flux d'air. Le résultat est que la répartition semble certes plus continue que dans les cas précédents mais avec des vitesses croissantes de la gauche vers la droite, partant d'environ 110 m/s pour atteindre 180 m/s. Ce concept ne remplit donc que partiellement les attentes que nous avions.

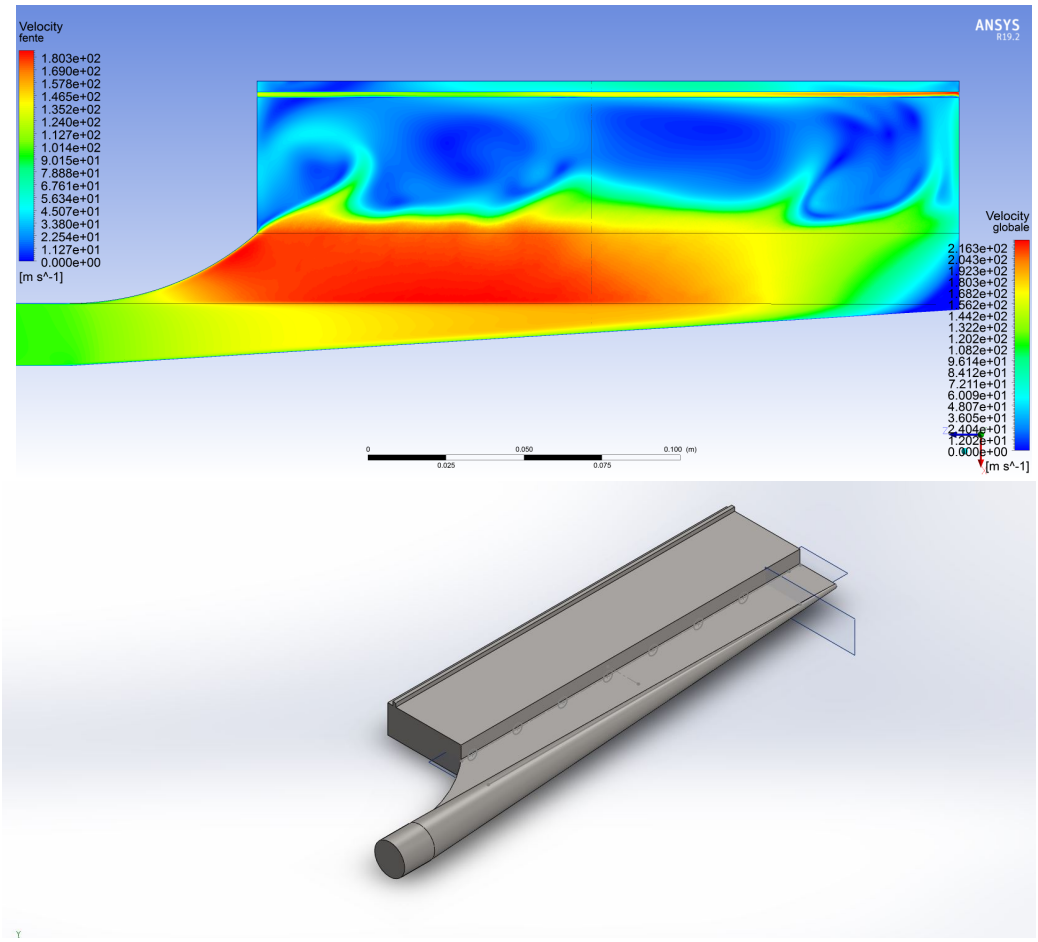


Figure 4.8 V3.1 : virage continu

Design V3.2 : Chambre avec coude aplati et continu

Nous tentons cette fois-ci la même version mais avec quelques changements de géométrie (voir Figure 4.9), notamment en épaississant le coude. Le résultat est comparable à la version précédente, avec une croissance des vitesses à la fente en se décalant du côté droit (de 120 à 177 m/s).

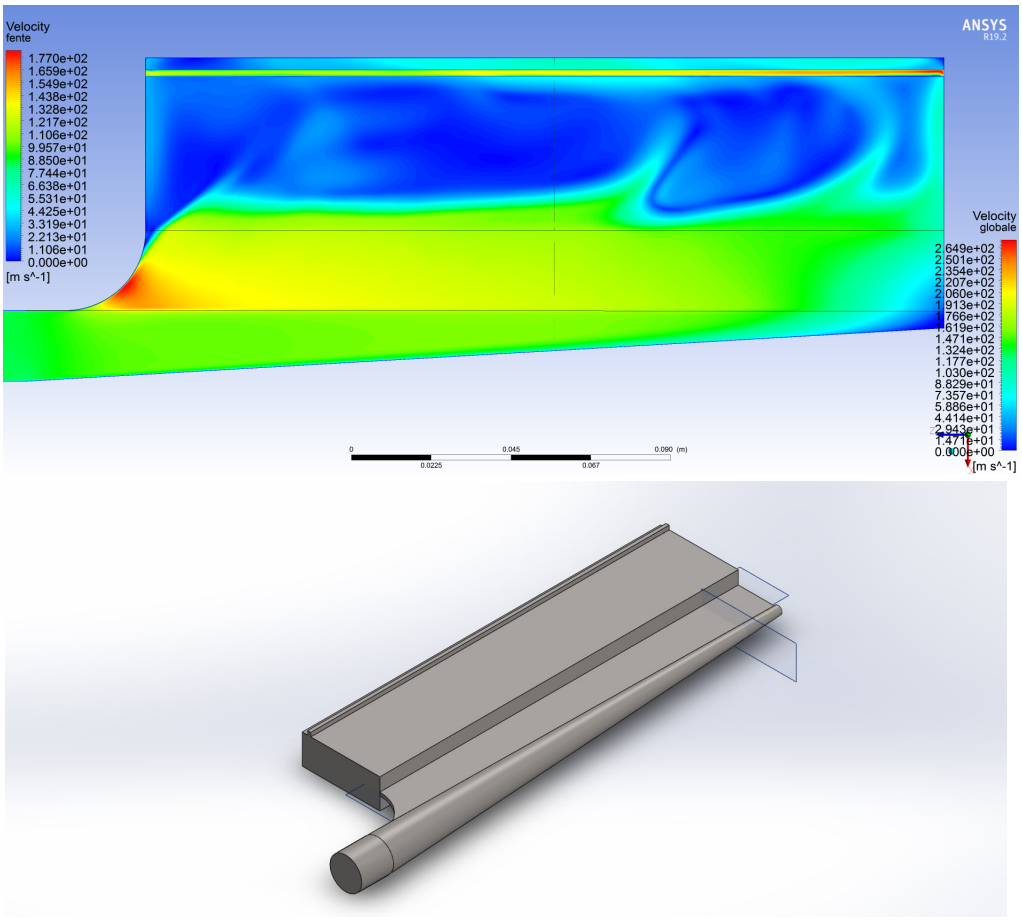


Figure 4.9 V3.2 : virage continu n2

Design V4.1 : Chambre avec forme type “harmonica”

Le concept de chambre en harmonica (Figure 4.10) résulte des deux précédents concepts : celui aplati et celui avec des tuyaux. Ce concept avec tuyaux répartit l’écoulement le long de la fente sans disparité gauche/droite mais avec des maxima locaux. Le concept aplati nous donne une sortie avec un profil de vitesse continu mais avec une disparité gauche/droite. La combinaison des deux devrait répondre à nos attentes. Dans cette version on constate une disparité gauche/droite plus légère que les précédentes et des maxima plus étalés, avec des vitesses allant de 120 à 150 m/s.

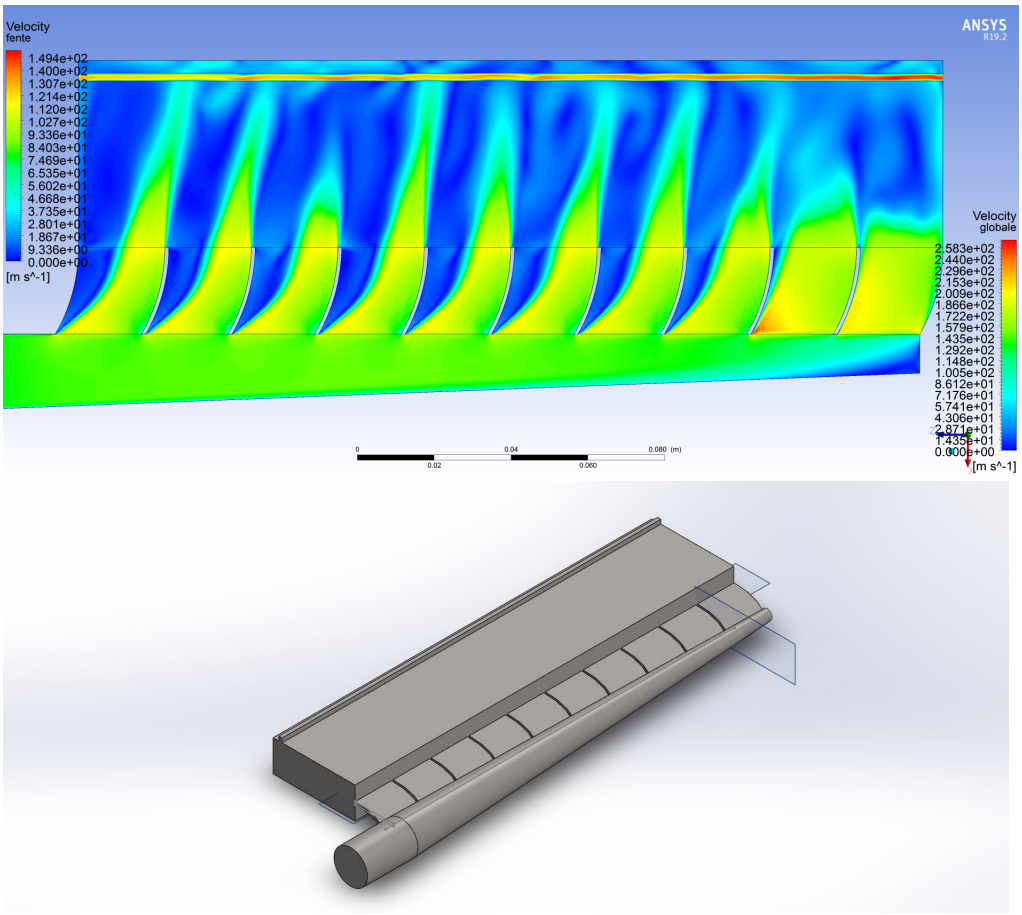


Figure 4.10 V4.1 : la forme de type “harmonica”

Design V4.2 : Chambre type “harmonica ”affinée

Nous trouvons une configuration satisfaisante dans le concept suivant (figure 4.11) : en rapprochant les séparations interconduites (que nous appellerons ailettes) et les distribuant tout le long de la conduite principale, nous arrivons à une sortie correspondant aux attentes : profil de vitesse uniforme, aucun maxima et pas de disparité gauche/droite le long de la fente. Les vitesses semblent varier autour de 130 m/s en moyenne (globalement entre 127 et 132 m/s). Notons que nous sommes également passés d’une entrée de la conduite principale ronde à carrée. En effet, ce choix a été fait pour maximiser la surface d’entrée et ainsi réduire la vitesse à l’entrée de la chambre. Le passage d’un cercle de rayon R à un carré de côté 2R augmente ainsi la surface de plus de 27%. L’entrée est donc un carré de côté 20 mm. Grâce à cela, et au fait que les ailettes permettent au flux de se répartir uniformément le long de la conduite principale, la vitesse de l’air dans la conduite est bien plus faible que dans les autres cas considérés précédemment.

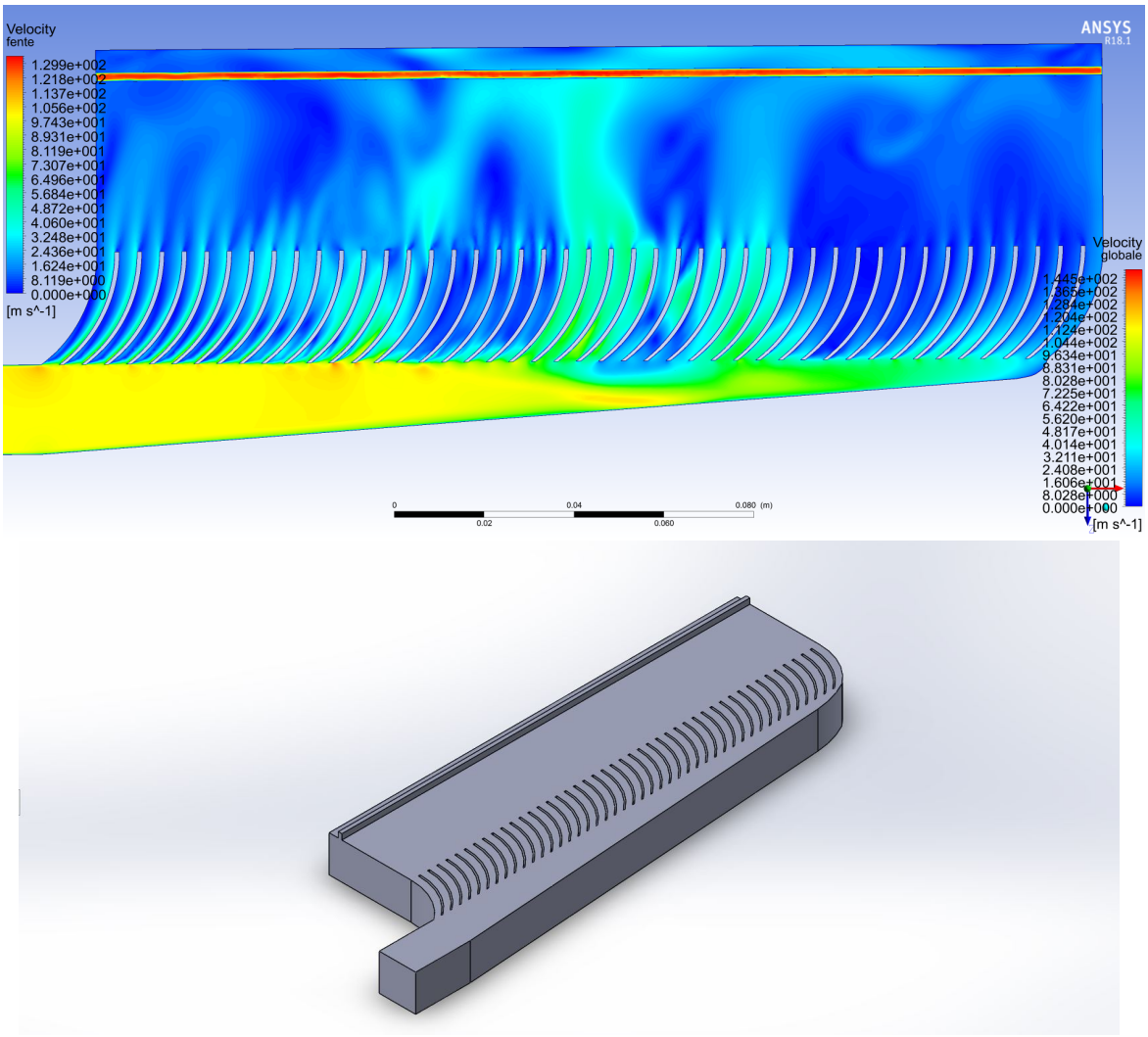
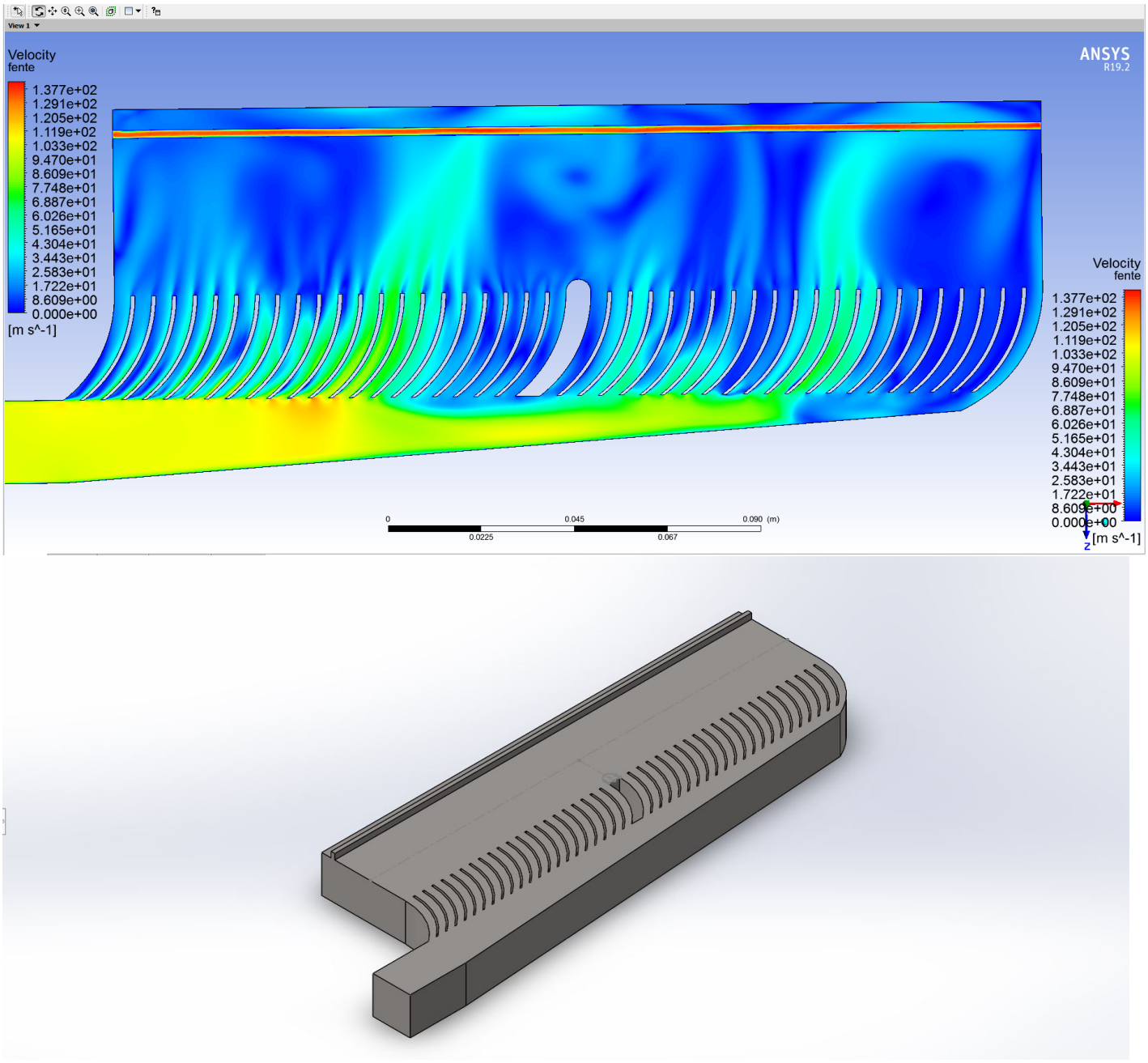


Figure 4.11 V4.2 : Chambre de type “harmonica” avec ailettes rapprochées

4.1.4 Résultats finaux et concept retenu pour le prototype

Le concept final retenu est donc le concept que nous appelons type “harmonica” (présenté en figure 4.12, dont les ailettes ne sont pas sans rappeler l’instrument de musique. Ce concept s’inspire, comme nous l’avons mentionné précédemment, des bâches spirales des turbines hydroélectriques, dont les sections diminuent petit à petit afin de permettre toujours un débit d’eau constant sur la roue. Une des fentes a été comblée (au centre) dans le but de laisser passer une vis afin d’assurer une bonne étanchéité de la chambre à air (voir Section suivante). Le résultat au niveau de la fente est une vitesse de sortie moyenne à la fente de 135 m/s avec des légères variations estimées entre 130 et 140 m/s soit un écart de 4% à la moyenne.



-Écart à la moyenne de ± 4% (max à 140 m/s et min à 130 m/s)

Figure 4.12 Version finale du profil avec remblai au centre

Des tests ont également été effectués sur la version 15 cm du profil. Nous trouvons des résultats de simulation pour le concept final en figure 4.13. Cette figure illustre les conditions de faible charge (faible vitesse d'eau), qui seront testées en premier. Le résultat s'avère être tout aussi bon qu'à pleine charge, avec un profil de vitesse en sortie bien homogène.

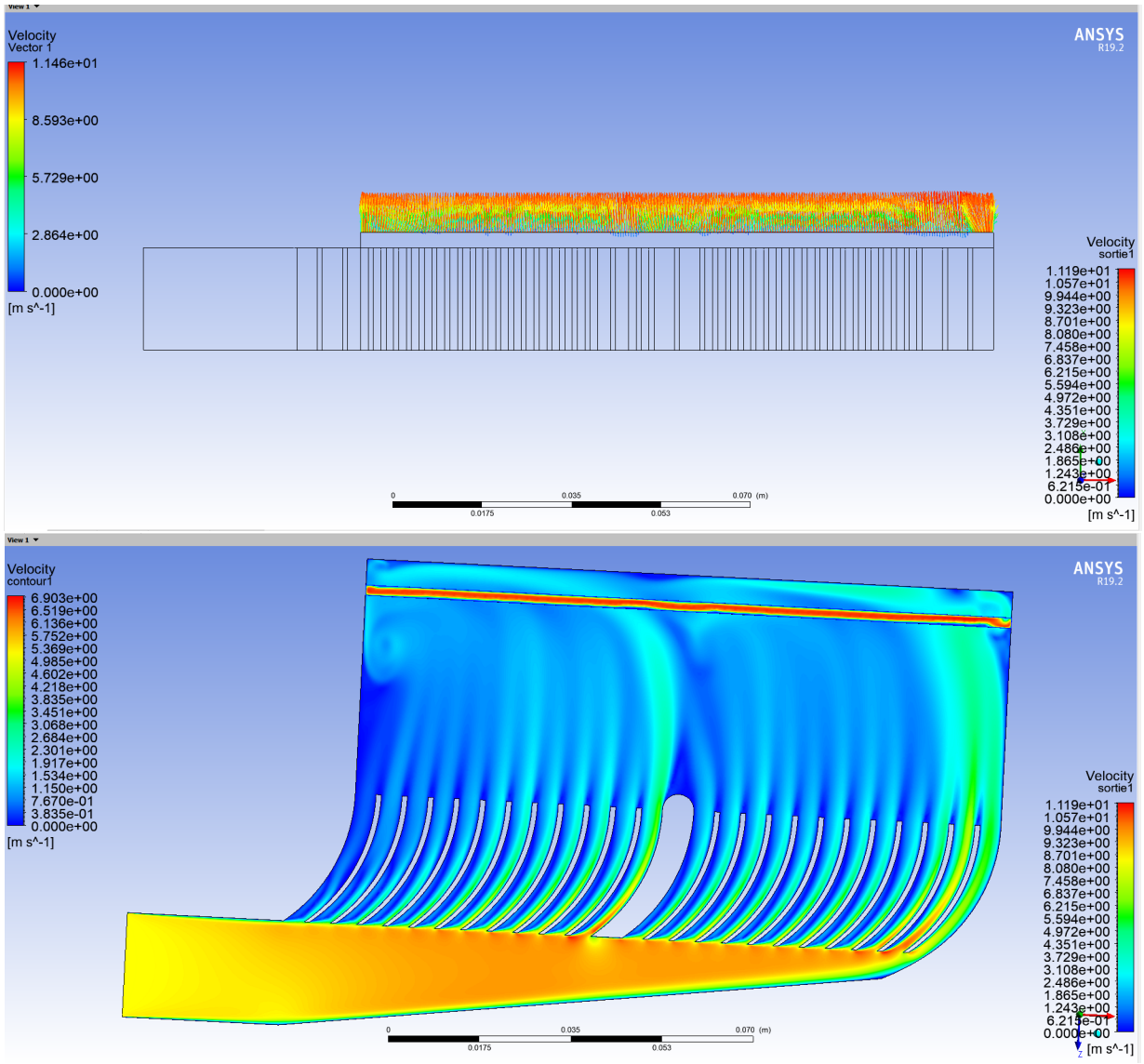


Figure 4.13 Concept final pour un profil de 15 cm et à basse vitesse (qui sera expérimenté en premier)

4.2 Fabrication du prototype

Dans cette section, nous allons décrire les choix de conception qui ont été faits pour la réalisation du profil en lui-même une fois la chambre conçue.

4.2.1 Réalisation d'un profil modulable

Le profil est, pour rappel, un profil NACA0015. Ses dimensions sont donc fixes et il n'est pas possible de jouer sur ces dernières. Deux questions se posent alors : comment assurer un

bon maintien du profil dans l'écoulement et comment pouvoir changer de forme d'injecteur facilement ? Le type d'injecteur envisagé (et validé par simulation) est celui de la fente mince. Mais le profil doit permettre le changement de cet injecteur, pour tester d'autres types de fentes ou d'autres formes par exemple.
Le profil a donc été pensé comme un corps principal surmonté d'un capuchon démontable, vissé dans le corps principal tout en assurant l'étanchéité, afin d'être le plus modulable possible (voir figure 4.15).

Maintien du profil dans l'écoulement

Le profil est tenu par le même côté où se fait l'injection (voir figure 4.14). Cette dernière passe par l'intérieur du support pour entrer dans le profil. Le profil sera maintenu en place en étant solidaire de la plaque d'acrylique du côté des veines (Voir section sur les veines) via un dispositif d'ancrage. Ce dernier sera vissé et muni de joints afin d'assurer un bon maintien et une bonne étanchéité de l'ensemble (voir section dédiée à l'ancrage ci-dessous).

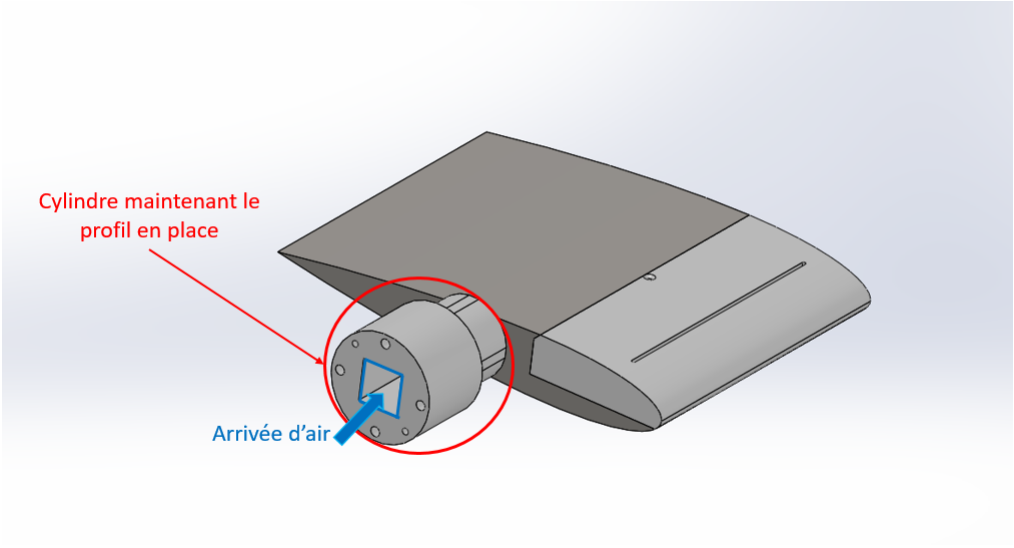


Figure 4.14 Vue du profil en CAO

Un profil en deux pièces

Intéressons nous maintenant au profil et aux deux parties qui le composent. Le corps principal a été pensé pour être le plus étanche possible une fois assemblé avec le capuchon. Le capuchon tient grâce à des vis dont les filets sont dans le capuchon. Ainsi, en serrant les vis on comprime le joint et on assure l'étanchéité de la chambre à air. Le joint est sur une surface inclinée

afin de bien entourer toute la chambre à air. Compte tenu de l'encombrement et du manque de place disponible, il s'agissait de la seule solution envisageable que nous ayons trouvée. Ce joint passe d'ailleurs le plus prêt possible des vis afin que ces dernières assurent un bon serrage sur le joint. Les vis sont inclinées dans le capuchon (voir figure 4.16) afin que la tête

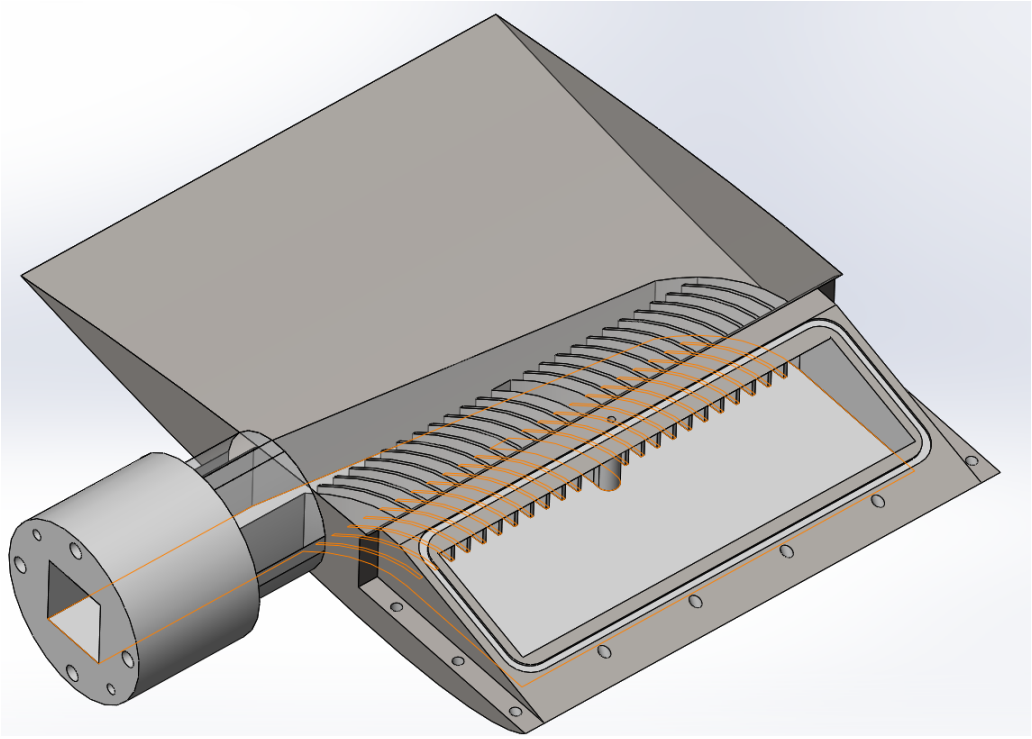


Figure 4.15 Vue transparente du corps principal, avec visuel de la chambre à air

de vis arrive tangente au corps du profil. La tête de vis sera alors "cachée" dans le corps principal et ne perturbera pas l'écoulement de l'eau sur l'intrados. La vis sur le dessus du capuchon vient comprimer le haut de ce dernier contre le corps principal. Cet endroit est en effet loin de "l'influence" des autres vis, insérées par le dessous. Cette vis est la raison pour laquelle nous avons mis un "remblai" en bouchant une des inter-ailettes de la chambre en harmonica (section précédente). Une "contre-dépouille" à 45 degrés sur le haut du capuchon a été pensée pour permettre un meilleur encastrement du capuchon et mieux répartir l'effort une fois serré au corps.

4.2.2 Choix du procédé de fabrication

Une fois le design arrêté et validé compte tenu de nos attentes, un prototype de profil a été créé en utilisant l'impression 3D en plastique. Le but a été de vérifier d'une part l'étanchéité du concept et de vérifier que l'injection d'air est bien homogène le long de la fente, ce qui

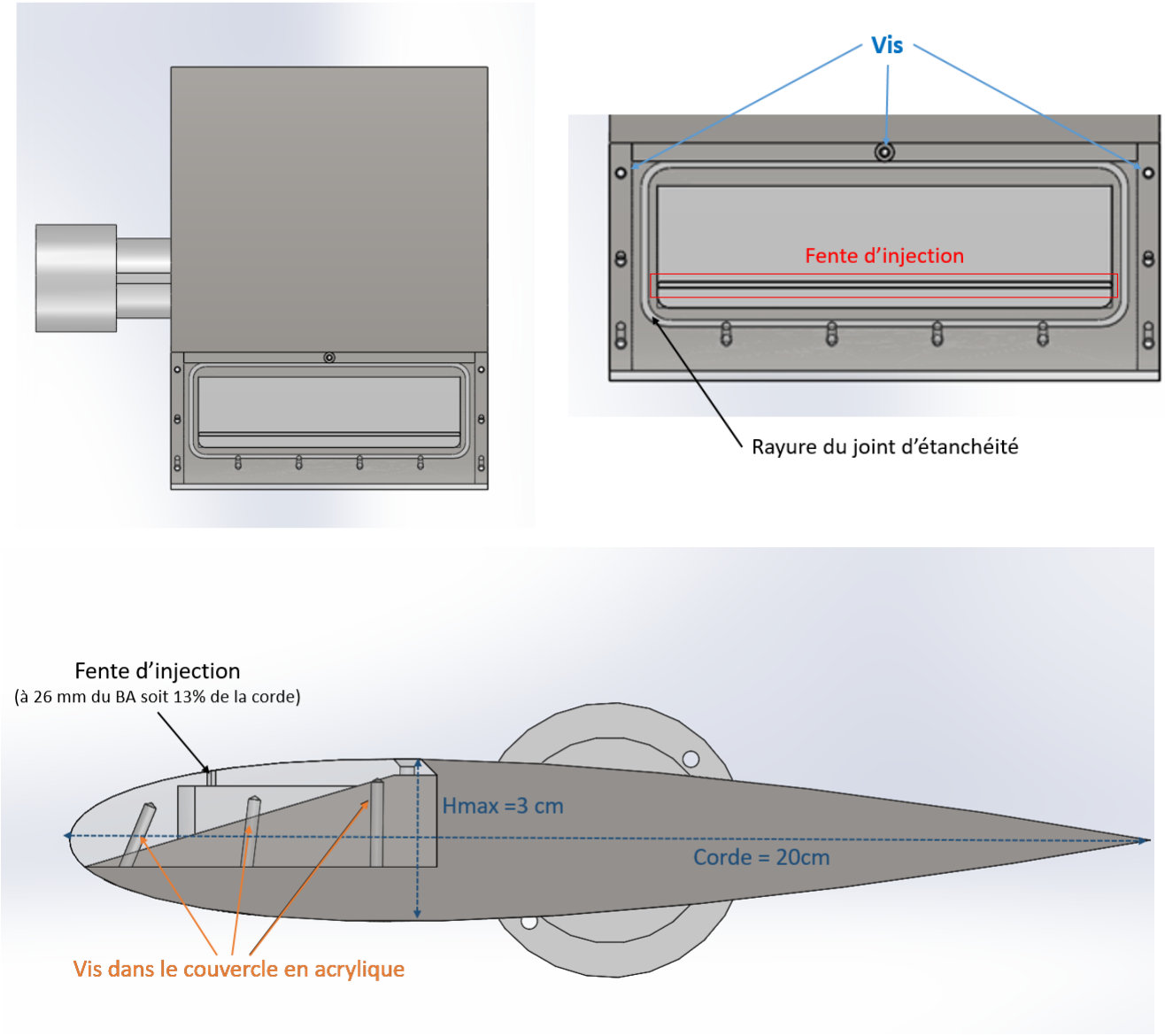


Figure 4.16 Vue du haut et de côté du capuchon (parties transparentes)

nous permet de valider l'étude numérique où nous avons simulé l'intérieur de la chambre à air. L'impression 3D était un véritable défi puisque le profil est de grande dimension pour une imprimante 3D classique. Bien qu'imparfaite compte tenu du résultat attendu (fini de surface grossier en extérieur, imperfections des trous de vis et parties "fines", ...), le profil a pu être testé avec succès dans la veine originale (version 10×17 cm, voir section 3).
Nous avons donc testé une version de 10 cm de largeur de ce concept, avec un corps et un capuchon en plastique. Ce prototype de test n'avait pas le même système de maintien que la

version finale pour des soucis de simplification, car ici seules l'étanchéité et l'homogénéité de l'injection importaient. Le plastique ne pose pas de problèmes de solidité puisque les tests ont été faits à basse vitesse d'écoulement (1.25 m/s). Cette phase a été cruciale, car elle nous a permis de confirmer que nous allions bien dans la bonne direction et que ce concept répondait au cahier des charges. Une fois cette étape validée se pose la question de la réalisation du vrai profil.

L'usinage conventionnel d'une telle pièce est impossible à faire si l'on souhaite garder le corps en une seule pièce. En effet, l'usinage de la chambre à air se révèle impossible avec des moyens conventionnels, c'est pourquoi le corps principal du profil final a été créé par fabrication additive en métal. Ce procédé nous permet d'avoir un profil solide en métal et d'un seul tenant. De plus, il nous assure une bonne précision de fabrication dans la chambre d'injection. Il a ensuite été réusiné sur sa surface extérieure afin d'être le plus lisse possible, ciblant une rugosité de surface (ra) de 0.6 micromètre, pour se rapprocher des conditions de surface des aubes de turbines. Ce procédé, effectué par une entreprise spécialisée dans l'impression 3D en métal est extrêmement précis et nous permet une grande fidélité du profil réel par rapport au modèle CAO. Réalisé à partir d'une poudre d'aluminium-42200 (AlSi7Mg0,6 ST6), il a ensuite subi un bain pour le passiver en surface, rendant toute corrosion à l'eau impossible. L'avantage de cette méthode de fabrication (qui permet de créer n'importe quelle forme) est que le cylindre de maintien et le corps principal ne sont qu'une seule et même pièce, rendant l'ensemble plus solide et facilite la tâche pour la transmission d'effort, ce qui nous aidera pour le calcul des efforts (détaillé dans la section suivante). Le capuchon, fabriqué en acrylique, quant à lui a été réalisé par les techniciens du département de génie mécanique de Polytechnique Montréal. On peut le voir en figure 4.17.

4.3 Dispositif expérimental

4.3.1 Ancrage et positionnement du profil

Comme nous avons énoncé précédemment, le profil doit être tenu et nous devons aussi, si le cas se présente, pouvoir changer son angle d'attaque par rapport à l'écoulement. Le cylindre de support du profil passe au travers de la plaque d'acrylique par un trou percé dans cette dernière et est vissé à une pièce elle-même solidaire de la plaque d'acrylique (voir figures 4.18 et 4.19). Cette pièce, que nous appelons "l'ancrage", permet de maintenir le profil en place, l'empêchant de tourner dans l'écoulement ou même de se faire emporter tout simplement. Il est ancré au profil par 4 vis, et il est ancré dans l'acrylique par 4 vis en tout temps également. La pièce d'acrylique est percée de 8 trous au total, 4 étant utilisés en même temps selon l'angle que l'on souhaite donner au profil. Grâce à la disposition des trous dans



Figure 4.17 Photo du profil une fois assemblé

l'acrylique (avec une rotation de 45 degrés entre les 2 quatuors de trous) ainsi que les trous en triplets dans l'ancrage, l'angle d'attaque du profil peut varier de -10 degrés à +15 degrés avec un pas de 5 degrés. Ainsi, nous sommes donc capables de tester 6 configurations d'angles différentes. De plus, avec ce concept, le profil n'a pas à être sorti pour être repositionné avec un autre angle : il suffit de dévisser l'ancrage et de le faire tourner de l'angle souhaité puis de le revisser. Ceci facilite grandement les opérations, car pour sortir le profil, il faudrait démonter toute la plaque d'acrylique, ce qui implique de démonter tout le cadre d'un côté de la section d'essai, ce que nous essayons de faire le moins possible, car justement chronophage.

4.3.2 Injection d'air et étanchéité

Le rôle de l'ancrage est également d'assurer une bonne étanchéité de l'ensemble. L'injection d'air comme nous l'avons mentionné précédemment se fait par le côté, par le support cylindrique. Ceci fait donc trois "zones" en contact au niveau du cylindre de support qui doivent être isolées les unes des autres. Ces trois contacts sont : l'eau, l'arrivée d'air (sous pression) et l'air ambiant du laboratoire (à pression atmosphérique). Le système d'étanchéité est composé de 2 joints toriques qui font respectivement la séparation eau/air pressurisé et air pressurisé/atmosphère. Grâce à ces deux joints, l'eau ne peut fuir au-dehors, et l'air sous pression ne peut pas s'infiltrer dans la veine ailleurs que par la fente du profil. Les deux joints sont des joints de type O-ring (ou joints toriques en Français) en caoutchouc de diamètre 4

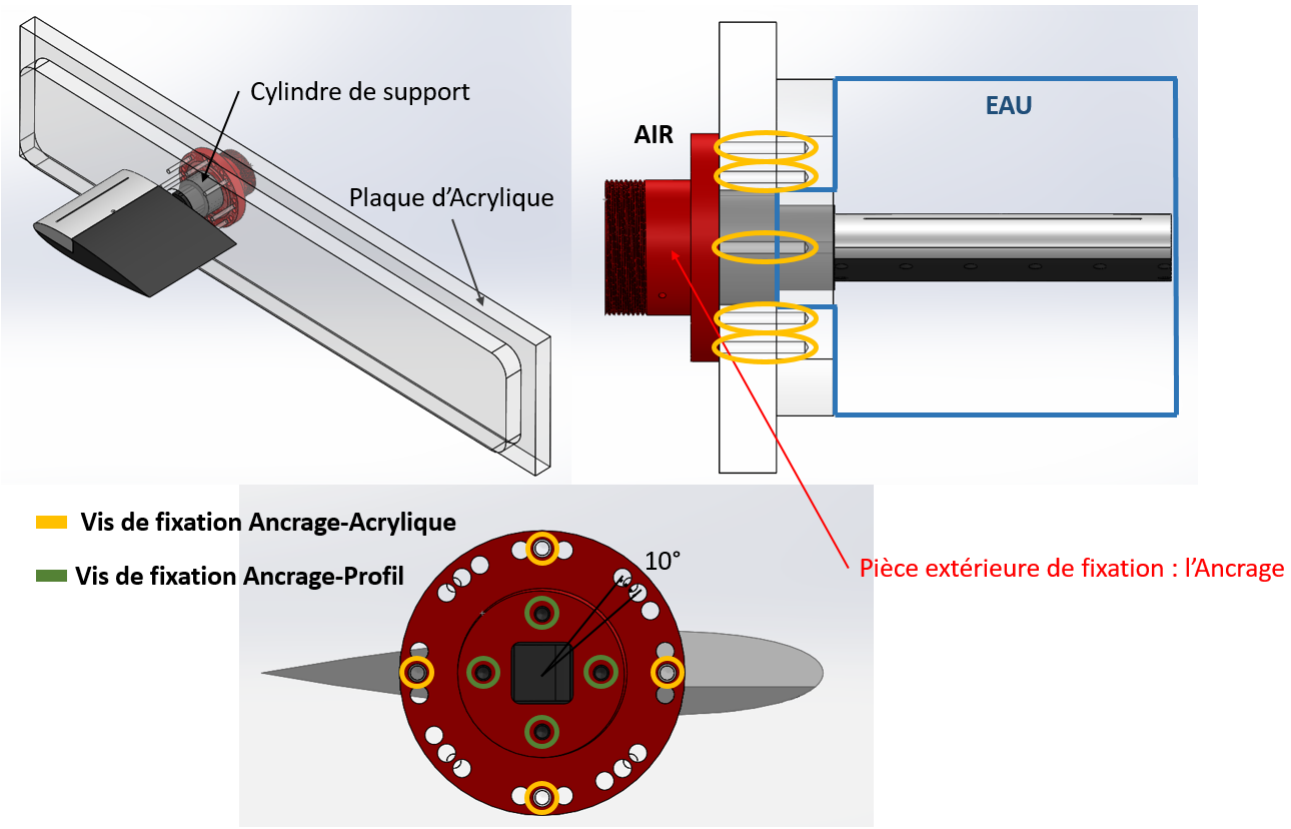


Figure 4.18 Schéma du système de positionnement/d'étanchéité

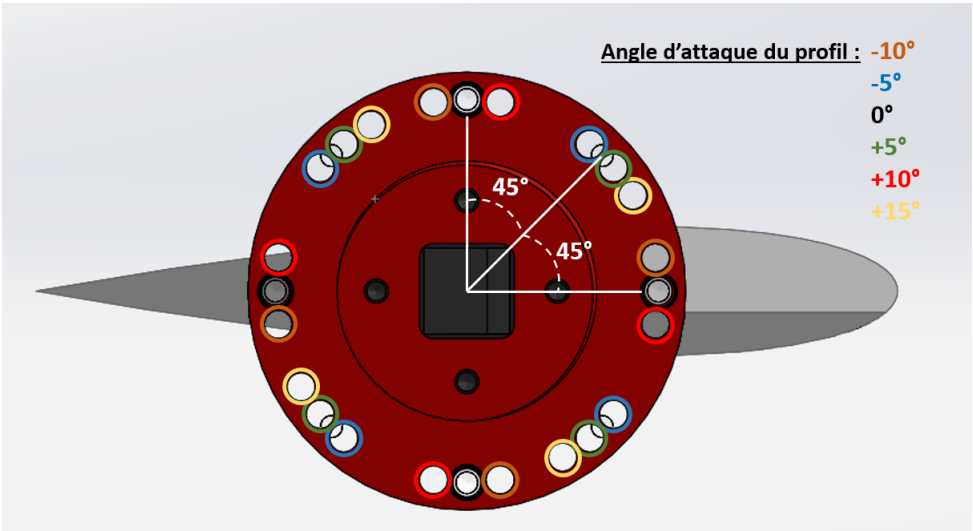


Figure 4.19 Positions des trous et angles d'attaque possibles pour le profil

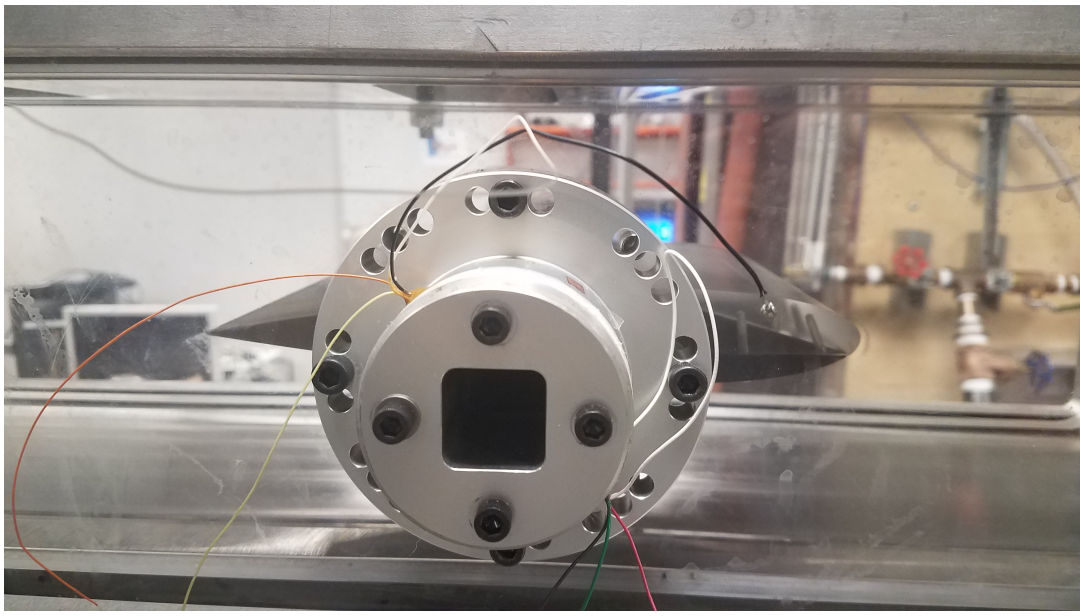


Figure 4.20 Image du système dans la réalité

mm. Compte tenu de l'encombrement de cette zone et du peu d'espace disponible, les O-rings sont une excellente solution pour l'étanchéité. Le premier est placé à l'intérieur de l'ancrage et effectue la séparation air sous pression/eau en enveloppant le cylindre du profil. Le second est placé sur la surface plate de l'ancrage et est comprimé contre l'acrylique assurant ainsi l'étanchéité eau/atmosphère. Le nombre de vis de serrage (4), bien que semblant peu important sur tout le contour d'un cercle, est suffisant car un joint O-ring est un moyen extrêmement efficace pour étanchéifier une surface, et demande notamment beaucoup moins de vis qu'un joint d'étanchéité plat. Ainsi les 4 vis dans l'acrylique assurent la bonne étanchéité de l'ensemble (figure 4.20).

L'air quant à lui est connecté à l'ancrage par un raccord en métal vissé sur l'ancrage (qui est muni d'un pas de vis (voir figures 4.21 et 4.22). C'est par ce raccord, connecté au réseau d'air sous pression de l'École, que nous injectons l'air. Il est à noter que les vis qui fixent le profil dans l'ancrage sont à l'intérieur du raccord, donc au contact de l'air sous pression, une fois l'ensemble monté. Le profil quant à lui est positionné (position du bord d'attaque du profil) à 231 mm de l'entrée de la section d'essai (bride en avant de la section). Ce positionnement est voulu pour se placer hors de la "zone d'influence" d'un éventuel (installé plus tard) nid d'abeille à l'entrée des sections, qui a pour but de redresser l'écoulement à haute vitesse (figure 4.23).

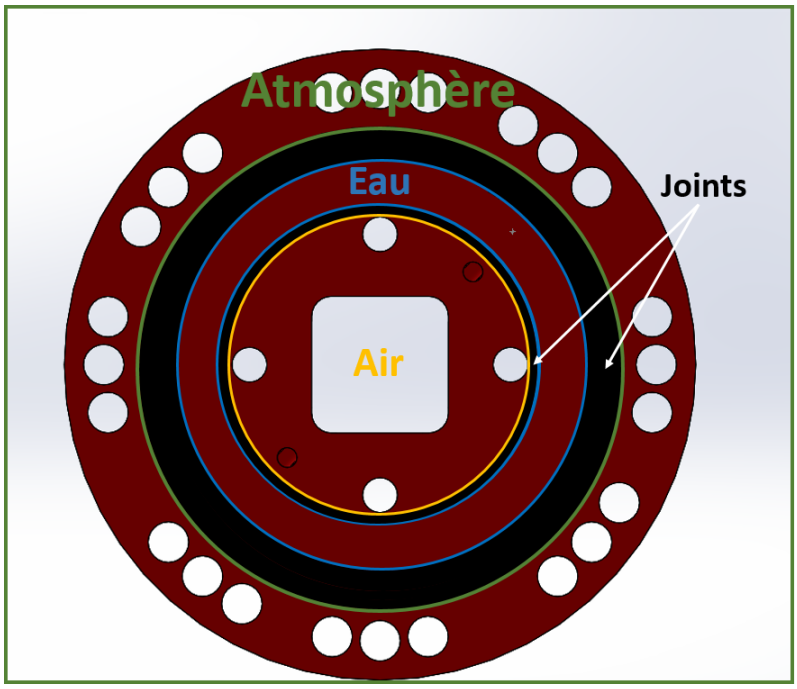


Figure 4.21 “Triple contact” et étanchéité avec les deux joints O-Ring

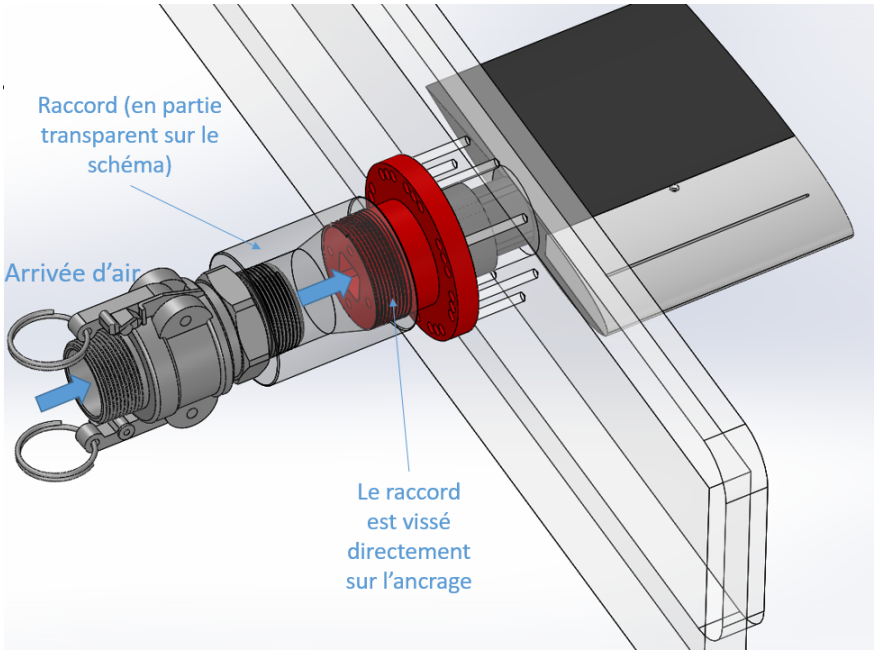


Figure 4.22 Raccord pour connecter le profil à l’air sous pression

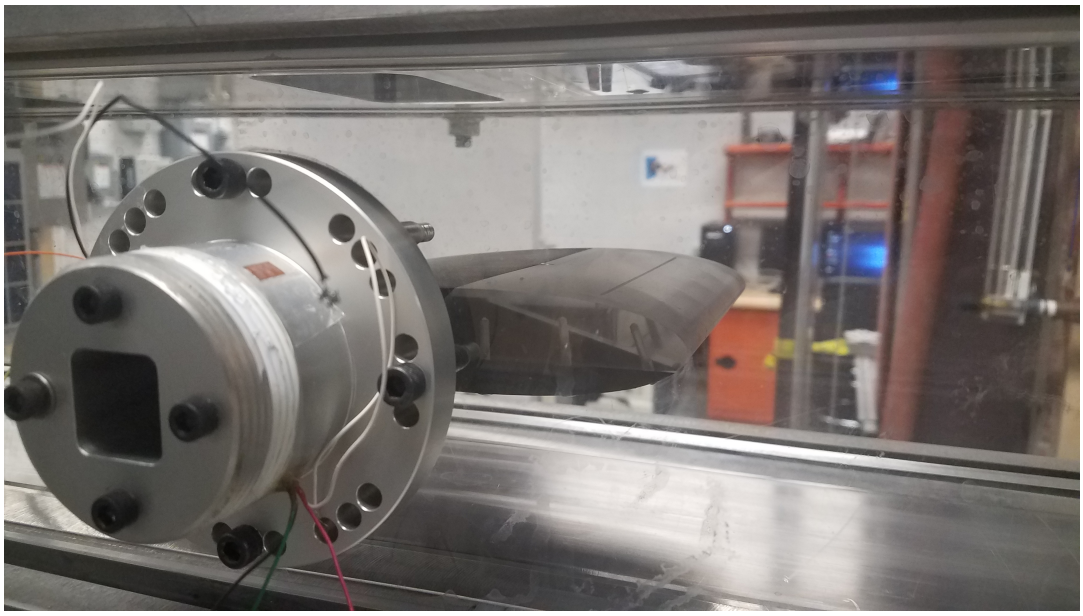


Figure 4.23 Avant du profil en conditions réelles

4.3.3 Prise de mesure

Deux types de mesures sont faites sur le profil : des mesures d'effort de traînée et portance du profil, ainsi que des mesures de taux de vide.

Jauges de contraintes

Les efforts seront mesurés grâce à quatre jauges de contraintes placées sur le cylindre de support du profil qui travaillent par paires. Deux mesurent l'effort de traînée (horizontal) et deux mesurent l'effort de portance (vertical). La déformation du cylindre due aux efforts de traînée et de portance sera donc mesurée sur le cylindre de support (qui ne fait qu'un avec le profil pour rappel) et nous pourrons remonter aux efforts. Les jauges sont collées sur des méplats sur le cylindre afin d'avoir une surface plate sur laquelle s'appuyer. Les fils qui partent de ces jauges (4 fils donc) passent par deux petits trous percés dans le cylindre de support, trous qui sont concentriques avec des trous dans l'ancrage, amenant ainsi les fils à l'extérieur après un virage à 90 degrés (car sinon ils ne pourraient émerger à l'extérieur), comme on peut le voir sur la figure 4.24. Les trous seront ensuite scellés avec de la colle de type "Epoxy" pour parfaire l'étanchéité et pallier à toute fuite/infiltration. (voir figure 4.23)

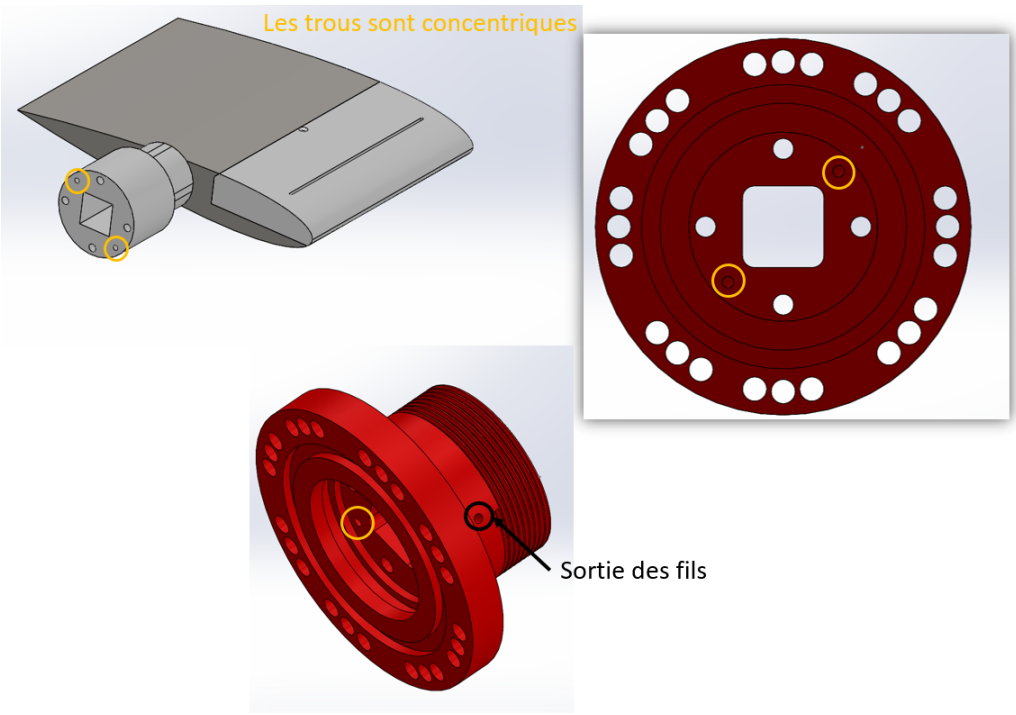


Figure 4.24 Trous de passage des fils de jauges

Mesures de taux de vide

Les mesures de taux de vide sont faites à l'aide de la sonde optique présentée en section 3. Cette dernière est positionnée au-dessus de la section d'essai et nous permet de balayer les plans. Comme nous l'avions mentionné, il faut repositionner le système de déplacement à chaque fois que l'on souhaite changer le plan. Sur la figure 4.25, on peut voir la position des 2 plans de mesure initialement prévus lors des campagnes d'essais. Les 2 plans sont respectivement à 55 mm et 95 mm du bord de fuite (soit 228 et 268 mm de la fente d'injection). Avec un pas vertical de 4 mm et un pas horizontal de 3 mm, le nombre de points par plan serait d'environ 828 si l'on souhaite un balayage complet de la veine, ce qui, à 22 secondes de prise de mesure par point pour être conservateur (20 secondes de prise de mesure et 2 secondes de déplacement), nous donnerait environ 5h de temps passé par plan. Ce temps est une nette amélioration par rapport aux prises de mesures effectuées précédemment (1 journée pour avoir 144 points par plan) compte tenu de la précision de mesure bien plus importante que nous avons ici.

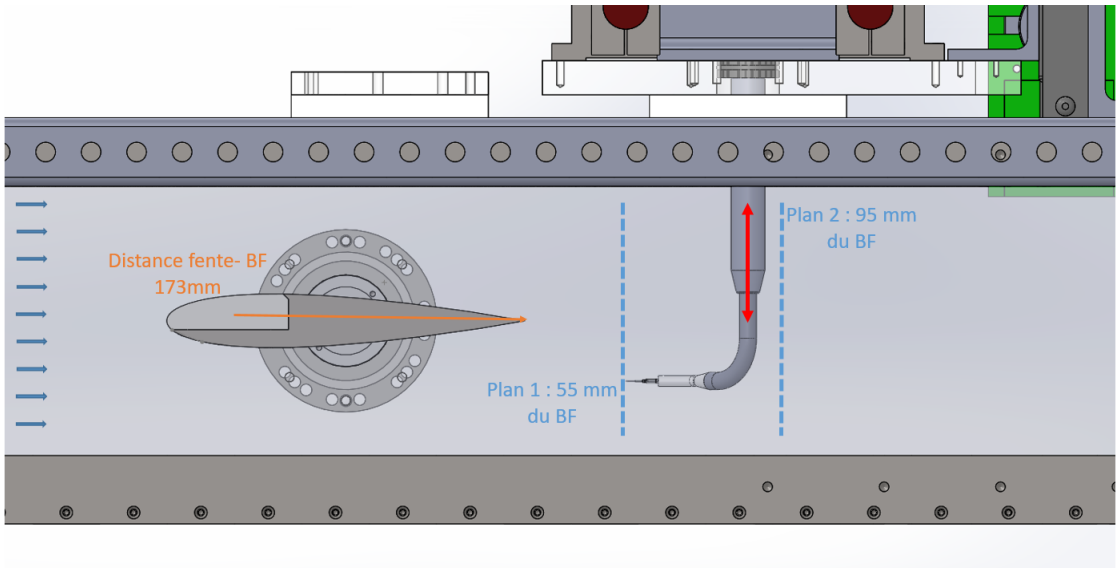


Figure 4.25 Position des plans de mesure

CHAPITRE 5 RÉSULTATS ET ANALYSE

5.1 Notion de Krigeage

5.1.1 Qu'est-ce que le krigeage ?

"Le krigeage est une méthode statistique permettant de construire le meilleur estimateur linéaire sans biais d'une fonction aléatoire à référence spatiale, c'est-à-dire définie sur un espace géométrique", selon les termes de F. Trochu [32]. Le krigeage est une méthode d'interpolation qui peut être appliquée en 1D, 2D ou encore 3D. Cette approche a été développée par le Dr. Krige en 1951 en Afrique du Sud pour l'industrie minière. Cette technique d'interpolation se rapproche de la méthode des éléments finis. Le krigeage peut être utilisé à la fois comme estimateur d'une fonction aléatoire en un point ou bien comme interpolateur de fonctions (ou de formes géométriques diverses,comme on peut le voir en figure 5.1). C'est ce deuxième point qui nous intéresse particulièrement. Le krigeage utilisé en temps qu'interpolateur permet en effet un grand champ de possibilités. Pour plus de détails sur le krigeage en lui-même et le champ de ses capacités se référer au cours MEC6310 de F. Trochu [32].

Le principe général du krigeage est de "décomposer la fonction représentative d'un phénomène en une somme de deux termes" [32]. La première est la valeur moyenne de cette fonction, que l'on appelle la *dérive*. Le second terme nous donne les fluctuations autour de cette moyenne. Ces fluctuations ont pour nom la *covariance généralisée*, K(h). C'est une approche que l'on peut retrouver souvent pour caractériser de nombreux phénomènes physiques. À partir de N points de mesures, on construit alors une fonction interpolée que nous appelons *U(x)* qui doit se rapprocher le plus possible des N points. Soit *U (x) = a (x) + K (x)*. Le terme a est déterministe (une fonction classique), tandis que K est un terme probabiliste (une fonction aléatoire). Puisque a est le comportement moyen du phénomène on doit avoir *E[U(x)]=a(x)* d'où $a(x) + E[K(x)] = a(x)$ soit $E[K(x)] = 0$. K est donc d'espérance nulle. C'est ce que nous appelons la condition de *non-biais*.

À partir de ce point, pour ne pas nuire à la fluidité du mémoire, nous invitons le lecteur soucieux de mieux comprendre la partie mathématique et calculatoire du Krigeage Géométrique Dual à se référer à l'annexe B où ces concepts sont développés plus en détails. Ici nous indiquons seulement à titre explicatif les différentes formes de dérives et de covariances les plus communément utilisées dont nous allons parler directement dans la section suivante.

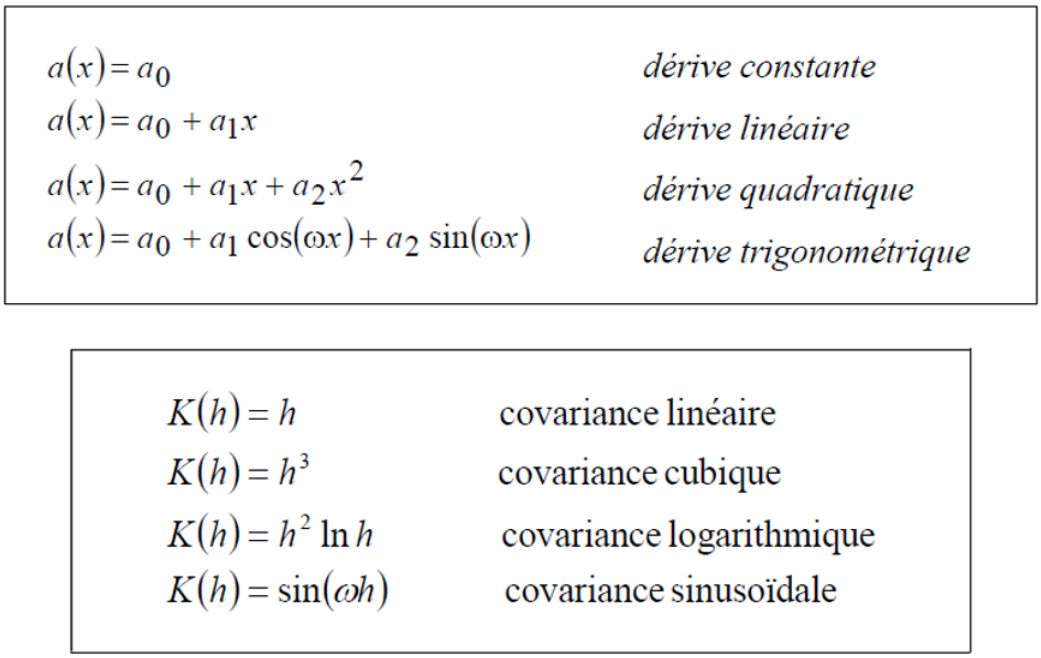


Figure 5.1 Dérives (en haut) et covariances (en bas) usuellement utilisées en Krigeage

5.1.2 Le Krigeage utilisé en post-traitement

Le travail présenté ici a été effectué conjointement avec la collaboration de **Leila Dhar**, étudiante également en Maîtrise Recherche de la Chaire, avec qui nous avons écrit le code de Krigeage pour le post-traitement et effectué l'analyse des nuages de bulles krigés. L'idée d'utiliser le Krigeage pour nos projets respectifs nous est venue après avoir suivi le cours de Krigeage donné à Polytechnique Montréal.

L'objectif du Krigeage est de nous permettre, à partir de nos points de mesures de taux de vide, d'obtenir une cartographie 3D de l'ensemble du nuage de bulle dans la section d'essai. Ayant 3 plans de mesures distincts, et connaissant les conditions aux limites et à l'injection, nous cherchons à interpoler les taux de vides entre toutes ces données en utilisant le krigeage géométrique. Le choix de dérive (comportement spatial moyen du taux de vide) a été guidé par la forme du nuage de bulles : en effet en 2D dans un plan, nous partons d'un minimum pour passer par un maximum avant de redescendre à un minimum. Nous optons donc pour une dérive quadratique, qui devrait représenter au mieux ce comportement. Pour ce qui est de la covariance, après en avoir testé plusieurs, nous avons sélectionné la covariance qui nous

donnait un écart le plus bas possible entre la fonction krigée et les points expérimentaux, écart qui a été validé par validation croisée et par la méthode des moindres carrés. La covariance retenue est ainsi une covariance cubique. Les données initiales (trois plans de mesures de taux de vide) qui ont été utilisées dans le Krigeage, sont accessibles dans le mémoire de **Leila Dhar** à la figure C.5.

Le but de l'étude est d'obtenir les valeurs du taux de vide dans toute la section d'essai, et pas seulement entre les 3 plans de mesures. Pour cela, il faut prendre en compte les conditions aux limites sur les parois. On impose un taux de vide nul sur les parois latérales. Concernant les parois supérieures nous laissons les conditions libres, car nous ignorons à quel moment les bulles atteignent le haut de la section d'essai. On inclut également le plan de la fente. Pour cela, on impose un taux de vide égal à 100% en $Z = 0$ et en $X = -108$. On impose également que le taux de vide à une distance delta en amont de la fente égal à 0% pour permettre au nuage de bulle de se former et de suivre l'écoulement (figure 5.2 et 5.3).

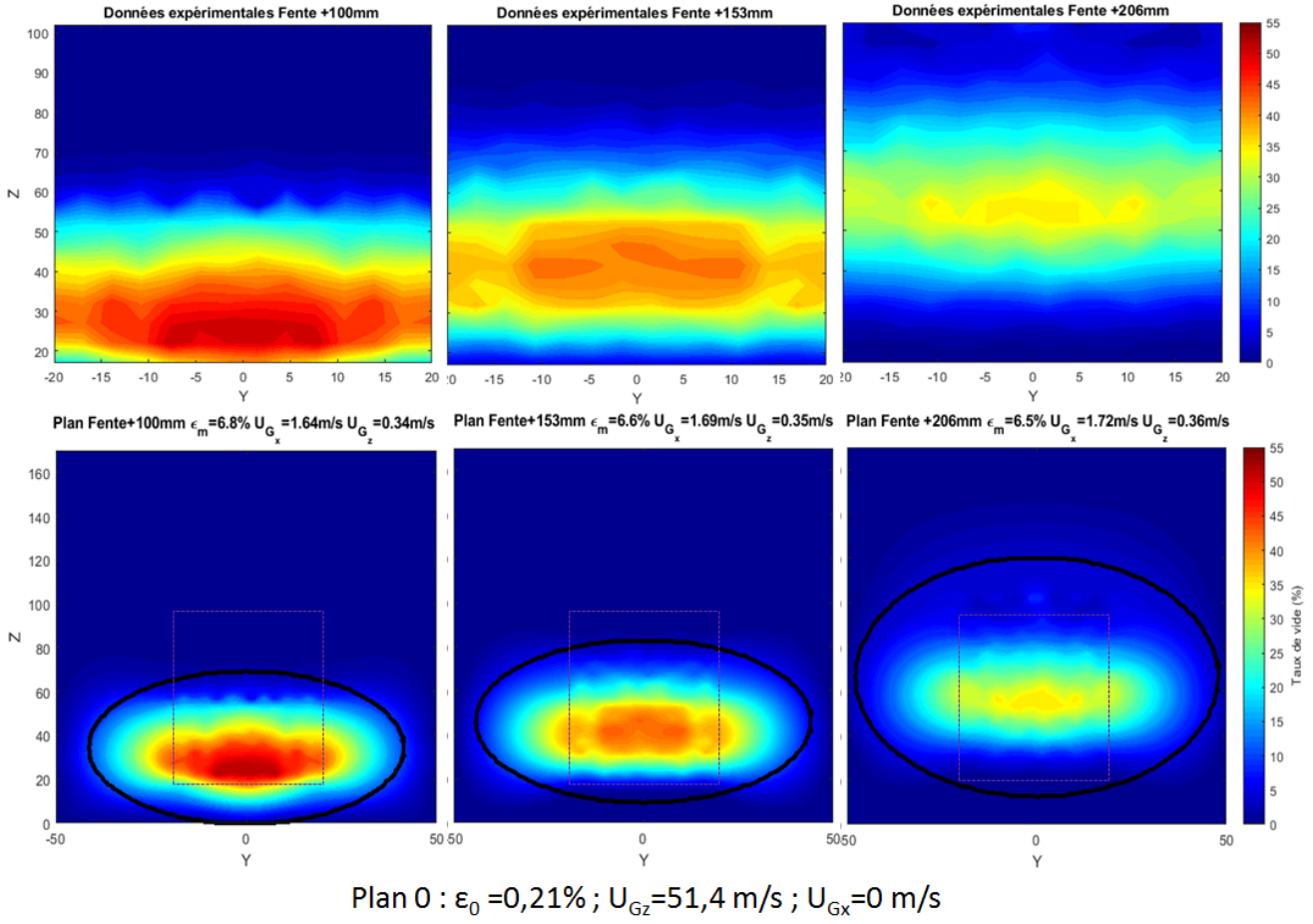


Figure 5.2 Passage des plans expérimentaux à l'ensemble de la section d'essai

Le résultat nous donne bien un nuage réaliste avec une distribution continue des taux de vide dans la section d'essai. Les cercles noirs que l'on peut voir sur les images représentent les ellipses où 90 % du nuage sont contenus. Les carrés en pointillés représentent les surfaces de mesures. En plus de ces trois plans, nous cherchons à exprimer les taux de vide dans le

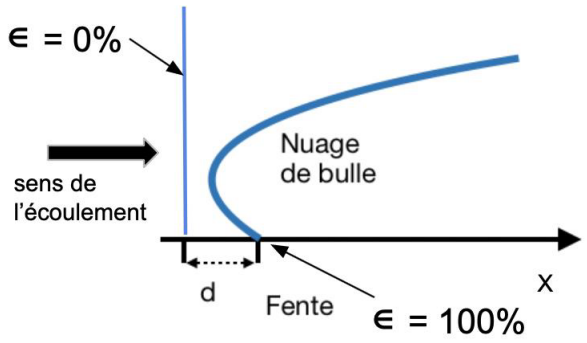


Figure 5.3 Conditions aux limites au niveau de la fente d'injection

plan central de l'écoulement (figure 5.4). Pour kriger ce plan, nous utilisons comme données

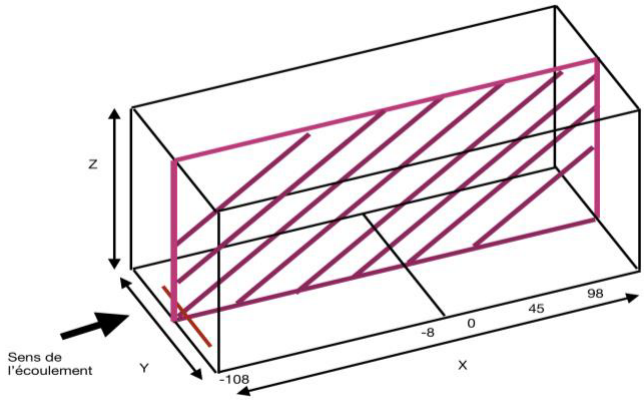


Figure 5.4 Plan central de la veine

expérimentales : les valeurs à la fente, les 3 plans de mesures (dont nous utilisons la ligne centrale pour ce plan comme données) et les conditions aux parois hautes et basses de la section. Le résultat nous donne, une fois le plan central krigé, que la physique de l'écoulement semble respectée puisque nous avons une continuité des taux de vide dans le sens de l'écoulement et non pas de zone avec de maximum de taux de vide. Plus on s'éloigne de la fente plus les taux de vide sont faibles, car le nuage se disperse dans l'écoulement, ce qui est physiquement valide. Mais ce que nous voyons comme une faiblesse de ce modèle est le manque de raffinement que nous avons proche de la fente. Les taux de vide à cet endroit

sont peu significatifs (comme on peut le voir avec la masse rouge proche de la fente sur la figure 5.5). Le peu de données que nous avons entre la fente et le premier plan de mesure sont insuffisantes pour que le krigeage puisse correctement interpoler les taux de vide dans cette zone de l'écoulement. Ce manque d'information peut être compensé grâce à des prises de vidéo de l'écoulement qui nous permettraient d'avoir des données supplémentaires de taux de vide dans le plan central de la section d'essai. Ceci implique de trouver une conversion efficace pour passer de données images (donc des données en taux de gris) aux données de taux de vide.

Ce processus de post-traitement et le passage des données de taux de gris en taux de vide peut être trouvé dans le rapport de maîtrise de Leila Dhar [29], qui s'est penchée plus en détail sur ce procédé et qui réutilise le code que nous avons développé en collaboration.

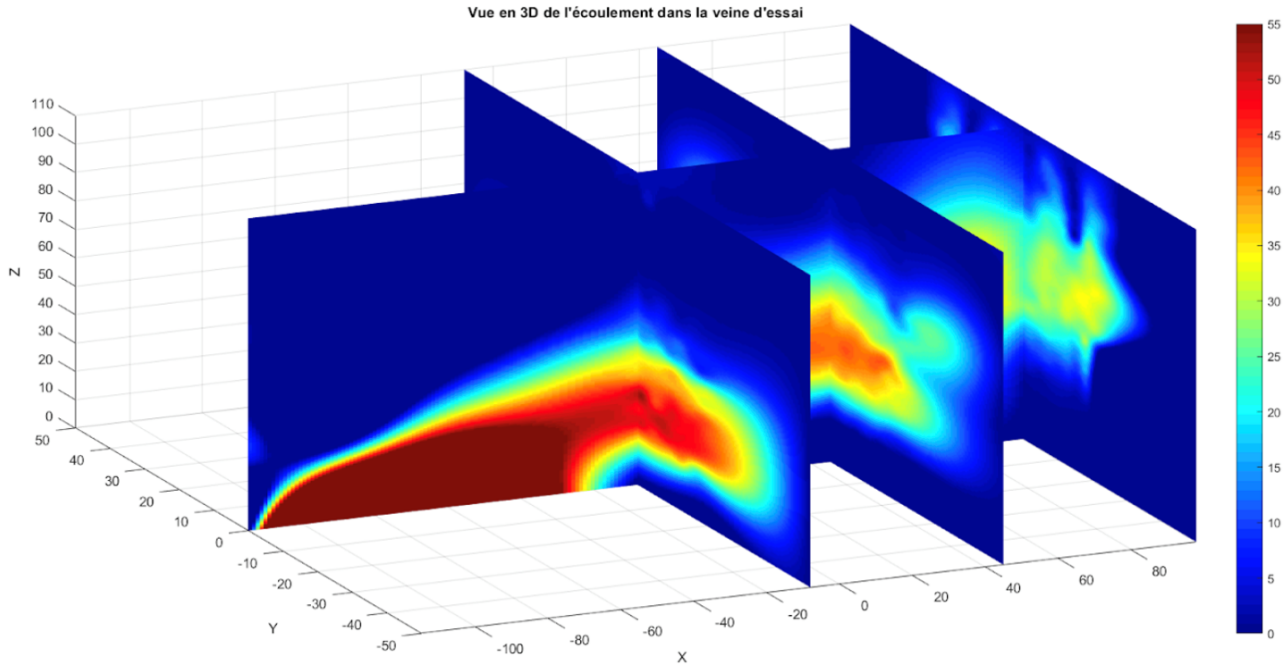


Figure 5.5 Représentation en 3D des taux de vides dans la section d'essai

5.2 Analyse des résultats

5.2.1 Préparation à la prise de mesure

Pour caractériser les écoulements, un nouveau paramètre R qui tient compte de la vitesse des phases est introduit. Ce paramètre permet de se concentrer simplement sur la zone de l'in-

jection. En effet, si on suppose que l'injection se fait en écoulement transverse d'un domaine très grand, alors β tend vers 0. Or, en ce qui concerne l'injection, ce cas n'est pas plus différent qu'un domaine beaucoup plus limité autour de l'injection. Avec R, on s'affranchit des tailles de la veine et de la fente alors que β ne permet pas de comparer de manière adéquate l'injection dans les veines et celle dans les profils inter-aubes des turbines aérantes. Le but est de relier le nouveau paramètre R à un type de nuage pour une géométrie de fente donnée, quel que soit l'environnement dans lequel l'air est injecté, i.e différentes tailles de veines.

$$\beta = \frac{Q_G}{Q_G + Q_L} \text{ donc } Q_G = \frac{Q_L \beta}{1-\beta} \implies \mathrm{S}_{fente} V_G = \frac{S_{veine} V_L \beta}{1-\beta}$$

Les corrélations de la littérature appliquées aux jets s'intéressent plutôt au ratio d'énergie cinétique $R = \dfrac{\rho_G V_G^2}{\rho_L V_L^2}$.
La formule pour faire la transition entre β et R s'écrit alors :

$$R = \frac{\rho_G}{\rho_L} \left(\frac{S_{Veine}}{S_{Fente}} \frac{\beta}{1-\beta} \right)^2 \tag{5.1}$$

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.

Pour la fente de référence, un titre volumique de 0.03, 0.06 et 0.09 respectivement donne un paramètre R de 0.40, 1.70 et 4.07. Afin de garder ces mêmes valeurs de R pour le profil (dont la fente fait 124 mm^2 pour rappel), il faut avoir des titres volumiques de 0.094, 0.176 et 0.249 respectivement. Ceci nous donne des débits d'eau de 25.5, 23.2 et 21.1 L/s et d'air de 2.64, 4.94 et 7.01 L/s respectivement pour ces trois conditions. Ces conditions nous donnent une vitesse débitante d'eau de 1.25 m/s au niveau de l'injecteur (ce qui était le cas dans la veine originale et que nous avons souhaité conserver pour faire le parallèle).

5.2.2 Résultats sur le nuage de bulles

Puisque le profil est ancré à mi-hauteur de la section d'essai, nous pouvons supposer à juste titre que les bulles qui vont se développer à partir de la fente du profil seront contenues dans la moitié haute de la section d'essai. Nous balayons donc les 75 mm du haut de la section d'essai (de dimension 15 cm par 15 cm). Avec un pas de 3 mm entre les points ceci correspond à 25 points de mesures verticaux. Nous avons une course horizontale de 71 mm (voir section 3.2.5). Avec un pas horizontal de 3 mm également nous avons 23 points de mesures horizontaux, soit un total de 23×25 = 575 points par plan de mesure. À 22 secondes par points pour rester

conservateur (20 secondes de prise de mesure et 2 secondes de déplacement), ceci nous donne 3h30 de prise de mesure.

Compte tenu de cela, voici une liste des conditions de test à réaliser pour obtenir une bonne base de données initiale pour le profil :

	Beta = 9,4%	Beta = 17,6%	Beta = 24,9%	Sous total
Angle d'attaque 0°	**Plan +228 et +268**	**Plan +228 et +268**	**Plan +228 et +268**	6 Plans
Angle d'attaque -5°	**Plan +228 et +268**	**Plan +228 et +268**	**Plan +228 et +268**	6 Plans
Angle d'attaque +5°	**Plan +228 et +268**	**Plan +228 et +268**	**Plan +228 et +268**	6 Plans
			TOTAL	18 Plans

Figure 5.6 Tableau des prises de mesures expérimentales à venir pour le profil aérant

Si elles sont toutes réalisées, ces conditions expérimentales permettront d'avoir des données sur le profil aérant avec 2 variables, à savoir le titre volumique et l'angle d'attaque du profil. Ce qui pourrait nous conduire à définir une corrélation puis éventuellement une loi de similitude.

5.2.3 Efforts sur profil

Les efforts que l'écoulement exerce sur le profil sont mesurés à l'aide de quatre jauges de contraintes, disposées sur le cylindre de maintien du profil pour rappel (voir section 4.3.3). Elles sont appareillées deux par deux et chaque paire constitue un demi-pont de Wheatstone. Ainsi un premier demi-pont nous donne les efforts horizontaux (Traînée) et le second demi-pont nous donne les efforts verticaux (Portance). Ces capteurs permettront de mettre en évidence, sous les différentes conditions testées, l'influence en termes d'effort du nuage de bulle par rapport à un profil NACA 0015 simple, ce qui donnera donc une valeur chiffrée sur l'augmentation ou bien la réduction/compensation des efforts de Traînée/Portance qui s'exercent sur un profil aérant par rapport à un simple profil.

5.2.4 Modèle pour la perte de pression

Une équation pour caractériser la perte de pression en aval de l'écoulement a également été développée à partir de Volumes de Contrôles et du théorème de transport de Reynolds. Il donne la pression en un plan de l'écoulement (appelé "le plan de sortie") en prenant comme paramètres :

- β le titre volumique de l'écoulement (Connu)
- P_E la pression juste avant l'injecteur (Donnée Capteur)
- V_E la vitesse de l'eau (Connue)
- ϵ_s le taux de vide moyen du plan de sortie (Donnée capteur)
- V_S la vitesse de l'air à l'injecteur (Connue via le débit, en supposant l'air incompressible)
- P_i la pression dans la chambre d'injection (Donnée capteur)

$$P_s = \overbrace{(1-\beta)\left\{P_E - \rho_l \frac{V_E^2}{2}\left[\left(\frac{1}{1-\varepsilon_s}\right)^2 - 1\right] - \sigma_\nu\right\}}^{EAU} - \underbrace{\beta\left\{\rho_g \frac{Vi^2}{2}\left[\left(\frac{S_i}{\varepsilon_s S}\right)^2 - 1\right] - P_i\right\}}_{AIR}$$

Plus de détails sur l'obtention de cette équation sont donnés en Annexe B, avec un schéma illustrant les différents volumes de contrôles choisis (voir figure B.1).

Donnant un résultat concluant ($P_s(Théorique)$: 26.780 à 26.795 kPa Vs $P_s(Expérimental)$= 26.781 kPa) lors des tests effectués dans la veine initiale, ce modèle reste à vérifier expérimentalement sur plus de cas pour diverses conditions. La fourchette de résultats théoriques est obtenue en faisant varier la masse volumique de l'air (ρ_l) dont la température n'est pas connue, bien que nous l'estimons autour de 20/25 °C.

Un modèle prenant en compte la présence du profil a également été pensé. Reprenant la même "philosophie", nous séparons cette fois le domaine en deux (intrados et extrados) et considérons seulement la partie de l'extrados pour fermer les Volumes de Contrôles (voir figure B.2). Nous réutilisons alors la même équation que présentée ci-dessus. Nous faisons l'hypothèse que le débit est divisé en deux de manière équitable entre le dessus et le dessous du profil d'aile. Cette hypothèse, bien que très simplificatrice, nous donnera une première idée de la validité du modèle en attendant de l'étoffer.

CHAPITRE 6 CONCLUSION ET DISCUSSION

Cette maîtrise a pour objectif de mettre en place de nouveaux outils et dispositifs expérimentaux à la disposition de la Chaire, afin d'étudier le comportement de l'écoulement diphasique autour de profils hydrodynamiques aérants. Ces derniers ont pour objectif de permettre le passage à une échelle supérieure par rapport à ce qui existe aujourd'hui dans la littérature, tout en mettant en place l'environnement expérimental nécessaire à la poursuite des opérations à venir.

6.1 Synthèse des travaux

Le profil aérant a été conçu et réalisé de manière à permettre une injection d'air homogène dans des conditions nécessitant un grand apport d'air (dimensionné pour une condition limite d'opération permettant d'injecter jusqu'à 55 L/s soit prêt de 200 m^3/h). Robuste, grâce à sa réalisation en Aluminium, et modulable, grâce à son capuchon remplaçable, le profil ainsi réalisé ouvre un grand éventail de possibilités expérimentales pour la Chaire pour les années à venir. Permettant également d'atteindre plusieurs angles d'attaques, le profil offre des conditions de test encore plus variées et réalistes selon les besoins expérimentaux. Enfin les jauges de contraintes viennent compléter l'ensemble en donnant une valeur quantitative aux efforts de traînée et de portance qui s'exercent sur le profil, variant selon les divers nuages de bulles générés.

La sonde "intermédiaire" (basse vitesse dédié au laboratoire A106) dote la Chaire d'un nouvel instrument de mesure qui peut être utilisé en parallèle de la sonde "nouvelle génération"(haute vitesse dédiée au LEGH) que L. Dhar propose dans son mémoire [29]. Offrant un quadrillage de plus de la moitié de la section d'essai de 15 cm, elle peut être adaptée sur les sections de 25 cm moyennant de légères adaptations sur cette dernière. En effet, le principe général de la sonde restant le même, il n'est pas nécessaire d'en repenser l'intégralité mais seulement les fixations et le positionnement. Offrant bien moins de frottement que la sonde "initiale", elle reste une grande avancée dans la phase de prise de mesure lors des expériences, notamment par sa motorisation et sa course beaucoup plus importante.

La nouvelle boucle mise en place au laboratoire A106 a été également un véritable défi. Il a fallu pratiquement tout repenser de zéro, en passant par le support des sections d'essai et de la boucle toute entière. Très encombré et permettant un espace limité, il a fallu composer avec l'étroitesse de notre espace de travail pour que tout puisse s'imbriquer correctement. La

boucle actuelle permet donc de servir de laboratoire “secondaire” au LEGH, où nous pouvons effectuer les expériences à basses vitesses. Elle peut accueillir les deux types de sections (15 cm et 25 cm). Les opérations de placement/enlèvement des sections a été une grande composante de la conception et de la réalisation de la boucle. Actuellement, les sections peuvent être montées et démontées à la guise et selon le besoin des expérimentateurs. L’opération prend environ une bonne demi-journée une fois bien rodée à la manoeuvre grâce à la grue de levage, tout en respectant bien les consignes de sécurité.

Des tests préliminaires ont pu être effectués et montrent des premiers résultats encourageants : Le profil se comporte comme attendu dans l’écoulement pour des titres volumiques “ordinaires” (environ 10%) à basse vitesse, qui sont les seules vitesses que nous pouvons tester dans le A106. Nous rappelons ici, à toute fin utile, qu’avec l’arrivée du profil (qui dispose d’une plus grande surface d’injection) nous changeons d’échelle : ce qui était auparavant des Beta “forts” (de l’ordre de 10%) sont maintenant la norme et les nouveaux Beta “forts” deviennent de l’ordre de 20/25%.

La sonde “intermédiaire” remplit bien son rôle et se déplace bien selon les deux axes de déplacements prévus. Enfin, la boucle circule bien et des aménagements ont été faits pour pallier aux vibrations dans le coude en aval des sections, que l’on constatait pour de hauts titres volumiques. À cet endroit, le coude a été renforcé par des colliers de serrage qui le maintiennent mieux en place en opération, comme on peut le voir en Annexe C, sur la Figure C.1. Un dispositif de suppression de poches d’air a également été installé juste en amont du convergent car nous avons décelé une zone de recirculation d’air à cet endroit. Elle a été supprimée en perçant un petit piquetage de 1/2 po sur le haut du tuyau de 10 po, muni d’une valve afin de vider l’air de cette poche entièrement lorsque l’on remplit la boucle en eau. (Annexe C, Figure C.2).

Le Krigeage enfin est une bonne piste pour l’amélioration et le lissage des résultats obtenus, car il permettrait, à terme et une fois bien optimisé, d’obtenir une cartographie en 3D du nuage de bulle généré. Par exemple, il serait un moyen d’obtenir une estimée du profil de vitesse longitudinal moyen du liquide. L. Dhar décrit plus en détail les débouchés que peuvent avoir le Krigeage de données sur notre cas précis, notamment à l’aide de prise de vidéo du nuage avec une caméra rapide, et en associant les taux de gris des images filmées au taux de vide [29].

6.2 Limitations

Les plus grosses limitations des travaux présentés ici concernent la sonde “intermédiaire”. Cette dernière reste assez encombrante par rapport à la sonde “nouvelle génération” d'une part, et d'autre part, elle n'a pas sa polyvalence. En effet, elle ne peut pas être montée au LEGH ou utilisée dans les écoulements à haute vitesse. Des “marches” se créent en haut des sections lorsque l'on utilise la sonde “intermédiaire”, ce qui est du à une nécessité opérationnelle. Il n'est pas envisageable en écoulement à grande vitesse d'avoir de telles marches dans l'écoulement, ce qui risquerait de créer de la turbulence. Si l'étanchéité est assurée pour des pressions basses (de l'ordre de la pression atmosphérique), il est très fortement déconseillé de la monter au LEGH car, constituée d'acrylique/d'aluminium et “coulissant” sur le haut des sections, en cas de défaillance (montée soudaine en pression par exemple) les conséquences peuvent être désastreuses.

Une seconde limitation apparaît également sur le profil aérant. En effet il semblerait, au vu des premiers tests visuels, que les conditions de fort titre volumique (Beta environ de l'ordre de 25% , ce qui est très important pour une condition de test mais que l'on souhaite malgré tout obtenir) soient difficilement atteignables à faible vitesse (1.25 m/s). Lorsque l'on injecte trop d'air, le nuage devient beaucoup trop important par rapport à l'écoulement d'eau arrivant et crée une surface libre sur le haut des sections, rendant les expériences invalides. Cela tient à la fente du profil qui est beaucoup plus grande que les fentes d'injection utilisées précédemment (prêt de 3.5 fois plus grandes en termes de surface). Ainsi pour avoir les mêmes conditions à la fente que pour nos cas de références (voir section 5.2.1), il faut injecter beaucoup plus d'air, ce qui perturbe l'écoulement comme nous l'avons décrit.

Enfin concernant la boucle, le passage de la section ronde à carré au niveau du convergent 15/25 cm est la seule ombre à apparaître. Si elle reste acceptable à faible vitesse (ce qui est le cas ici), elle mérite d'être cependant mentionnée afin que ce défaut soit corrigé dans le futur.

6.3 Améliorations futures

Nous allons à présent évoquer les pistes et idées qui vont permettre d'améliorer l'ergonomie et la qualité des prises de mesure.

- Le profil si on souhaite l'utiliser à son maximum de capacité doit être installé et testé au LEGH. En effet, les écoulements à haute vitesse d'eau permettront de le pousser vers des titres volumiques plus élevés et ainsi constituer une base de données plus complète.
- La nouvelle boucle du A106 peut être dotée de l'amélioration suivante : au niveau du

passage de la section ronde à carrée (au niveau du convergent), il faudrait installer des "sur-épaisseur" dans le tuyau de 10 po en amont du convergent, afin que ce dernier épouse les coins du carré du convergent. En somme il faudrait constituer un convergent rond/carré au niveau du tuyau de PVC 10 po. Il pourrait être constitué de 4 pièces de plastique reprenant le diamètre de 10 po du tuyau et terminant avec le coin carré au niveau du convergent. La pente de ces pièces devrait être inférieure à 7 afin de se comporter comme les convergents usuels rond/rond ou carré/carré. Il faudra toutefois penser à les démonter/décoller avant d'utiliser le convergent au LEGH car cette "amélioration" n'est valable uniquement qu'au laboratoire A106. ! Ceci permettra de supprimer l'effet de marche au niveau des coins de la jonction tuyau 10 po/convergent.

— Le réservoir du laboratoire A106 doit être rempli jusqu'au niveau du coude (dans le réservoir) afin d'avoir le maximum de pression dans la boucle d'essai au niveau des sections et limiter la formation de surfaces libres.

— Il serait intéressant de placer des capteurs de pression statique dans chaque plan de mesure afin de valider le modèle développé en section 5.2.4. Ainsi on pourrait vérifier la théorie à l'aide de données expérimentales.

— En combinant prise de mesure de taux de vide (intrusive), prise de vidéo pour suivre l'évolution du nuage et Krigeage sur l'ensemble de ces données, il serait possible de recréer intégralement le nuage de bulle (ou du moins sa "trace") en 3 dimensions.

RÉFÉRENCES

[1] M. McCartney, C. Sullivan et M. Acreman, "Ecosystem impacts of large dams background," *Prepared for IUCN / UNEP / WCD*, vol. Paper Nr. 2.

[2] E. P. R. Institute, "Maintaining and monitoring dissolved oxygen at hydroelectric projects," Rapport technique, 2002.

[3] F. Bunea *et al.*, "Aspects concerning the quality of aeration for environmental friendly turbines," *IOP Conference Series : Earth and Environmental Science*, vol. 12, p. 1, 2010.

[4] conseil canadien des ministres de l'environnement, "Recommandations canadiennes pour la qualité des eaux : protection de la vie aquatique — oxygène dissous (eau douce)," *Recommandations canadiennes pour la qualité de l'environnement*, Winnipeg, 1999.

[5] P. March, "Hydraulic and environmental performance of aerating turbine technologies," *EPRI Conference on Environmentally Enhanced Hydropower Turbines*, 2011.

[6] J. Foust *et al.*, "Integrating turbine rehabilitation and environmental technologies : aerating runners for water quality enhancement at osage plant," *Proceedings of Waterpower XVI*, Spokane, Washington, US, juill. 2009.

[7] H. Bai et B. G. Thomas, "Bubble formation during horizontal gas injection into downward flowing liquid," *Metallurgical and materials transactions*, vol. 32, p. 1143–1159, 2001.

[8] Y. Kawase et J. J. Ulbrecht, "Formation of drops and bubbles in flowing liquids," *Industrial Engineering Chemistry Process Design and Development*, vol. 20, p. 636–640, 1981.

[9] M. Jamialahmadi *et al.*, "Study of bubble formation under constant flow conditions," *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 79, p. 523–532, 2001.

[10] D. F. McGinnis et J. C. Little, "Predicting diffused-bubble oxygen transfer rate using the discrete-bubble model," *Water research*, vol. 36, p. 4627–4635, 2002.

[11] 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.

[12] F. Anne, "Conception de section d'essai et de méthodes d'analyse de mesures d'écoulement diphasique," 15 octobre 2018, rapport de projet de fin d'étude.

[13] K. Harby, S. Chiva et J. L. Munoz-Cobo, “Modelling and experimental investigation of horizontal buoyant gas jets injected into stagnant uniform ambient liquid,” *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 93, p. 33–47, mars 2017.

[14] W. Zhang et D. Z. Zhu, “Bubble characteristics of air–water bubbly jets in crossflow,” *International Journal of Multiphase Flow*, nº. 55, p. 156–171, mai 2013.

[15] A. Sevilla, J. M. Gordillo et C. Martinez-Bazan, “Transition from bubbling to jetting in a coaxial air–water jet,” *American Institute of Physics*, vol. 2005, nº. 17, juin 2005.

[16] C. Guierrez-Montes *et al.*, “Experimental and numerical study of the periodic bubbling regime in planar co-flowing air–water sheets,” *International Journal of Multiphase Flow*, nº. 50, p. 106–119, nov. 2012.

[17] M. A. Balzan, R. Sean 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, p. 372–385, févr. 2017.

[18] K. Siddiqui et W. A. Chishty, “The influence of channel orientation and flow rates on the bubble formation in a liquid crossflow,” dans *Proceedings of the ASME 2010 3rd Joint US-European Fluids Engineering Summer Meeting and 8th International*, Montréal, Canada, 1-5 aout 2010.

[19] B. Papillon *et al.*, “Methods for air admission in hydroturbines,” Alstom, Rapport technique Proccedings of the Hydraulic Machinery and Systems, 21st IAHR Symposium, Septembre 9-12, 2002, Lausanne.

[20] P. March, “Hydraulic and environmental performance of aerating turbine technologies,” EPRI, Rapport technique, 2009.

[21] B. Papillon *et al.*, “Impact of turbine aeration on peaking and cycling ability of turbine units,” GE Renewable Energy, Rapport technique.

[22] C. Kang et M. Yang, “Experimental study of aerated two-phase flow patterns in tandem cascade,” dans *Proceedings of 16th IAHR-APD Congress and 3rd Symposium of IAHR-ISHS*, Hohai University, Nanjing, China, October 20-23 2008.

[23] S. E. Forrester et C. D. Rielly, “Bubble formation from cylindrical, at and concave sections exposed to a strong liquid cross-ow,” *Chemical Engineering Science*, vol. 53, nº. 8, p. 1517—1527, janv. 1998.

[24] D. Scott *et al.*, “Cfd model of an aerating hydrofoil,” dans *27th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems*, IOP Conf. Series : Earth and Environmental Science 22, 2014.

[25] A. Karn *et al.*, "Bubble size characteristics in the wake of ventilated hydrofoils with two aeration configurations," *International Journal of Fluid Machinery and Systems*, vol. 8, n°. 2, p. 73–84, juin 2015.

[26] A. Karn et C. Ellis, "Investigations into the turbulent bubbly wake of a ventilated hydrofoil : Moving toward improved turbine aeration techniques," *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 64, p. 186–195, janv. 2015.

[27] C. Ellis, "Measurements in the wake of a ventilated hydrofoil : a step towards improved turbine aeration techniques," dans *IOP Conf. Series : Earth and Environmental Science 22 062009*, 27th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, 2014.

[28] S. Vahaji *et al.*, "Numerical investigation on the bubble size distribution around naca0015 hydrofoil," *Ocean Engineering*, vol. 64, p. 59–71, avr. 2018.

[29] L. Dhar, "Étude de l'injection d'air à travers des fentes dans un écoulement d'eau transverse," Mémoire de maîtrise, Dép. de génie mécanique, École Polytechnique de Montréal, 2020.

[30] S. Sved, "A new laboratory to study high-velocity two-phase flows," Panama, 1-6 Septembre 2019.

[31] M. Chartray-Pronovost, "Design d'une boucle d'essai avec section interchangeable et entrée de type aspirateur," 14 Août 2019, rapport de projet Intégrateur III (PI3), en lien avec le cours AER3900, Polytechnique Montréal.

[32] F. Trochu, *Cours MEC6310, Krigeage en CAO et FAO*, Polytechnique Montréal, Montréal QC, 2018.

ANNEXE A PRINCIPE DU KRIGEAGE GÉOMÉTRIQUE DUAL

Les formules présentées ci-dessous sont extraites du cours de Krigeage MEC6310 du Prof. François TROCHU, donné à Polytechnique Montréal [32].

Pour décrire le principe de krigeage géométrique dual on considère un estimateur linéaire $T(x)$ d'une fonction $U(x)$ à partir d'une combinaison linéaire des variables aléatoires $U(x_i)$ pour i allant de 1 à N. Soit :

$$T_x(U(x_1), ..., U(x_N)) = \sum_{i=1}^{N} \lambda_i(x) U(x_i) \tag{A.1}$$

Notre condition de non biais s'écrit alors :

$$\sum_{i=1}^{N} \lambda_i(x) E[U(x_i)] = E[U(x)] \tag{A.2}$$

Si on exprime maintenant la variance de l'erreur ϵ_x associée à l'estimateur T_x :

$$var(\epsilon_x) = E[(\epsilon_x - E[\epsilon_x])^2] = E[\epsilon_x^2] = E[(T_x(U(x_1), ..., U(x_N)) - U(x))^2] \tag{A.3}$$

$$var(\epsilon_x) = \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{N} \lambda_i(x) \lambda_j(x) E[U(x_i)U(x_j)] - 2 \sum_{i=1}^{N} \lambda_i(x) E[U(x_i)U(x)] + E[U(x)^2] \tag{A.4}$$

Le problème se résume alors à trouver le *meilleur estimateur linéaire sans biais* soit :

Minimiser pour $(\lambda_1, ..., \lambda_N) \in \Re^N$

$$\frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{N} \lambda_i(x) \cdot \lambda_j(x) \cdot E\left[U(x_i) \cdot U(x_j)\right] - \sum_{i=1}^{N} \lambda_i(x) \cdot E\left[U(x_i) \cdot U(x)\right] + \frac{1}{2} E\left[U(x)^2\right]$$

sous la contrainte

$$\sum_{i=1}^{N} \lambda_i(x) \cdot E\left[U(x_i)\right] = E\left[U(x)\right] \quad \textit{(condition de non - biais)}$$

À ce stade nous faisons une hypothèse fondamentale, appelée **hypothèse intrinsèque**, stipulant que notre terme $E[U(x)U(y)]$ ne dépend plus que de la distance entre les points x et y soit : $|x - y|$ et donc : $E[U(x)U(y)] = K(|x - y|)$. Grâce à cette hypothèse, notre problème se résume à la procédure suivante pour le cas d'une dérive linéaire par exemple :

$$\textit{Minimiser} \text{ pour } (\lambda_1,...,\lambda_N) \in \Re^N$$

$$\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}\lambda_i(x)\cdot\lambda_j(x)\cdot K\left(\left|x_i - x_j\right|\right) - \sum_{i=1}^{N}\lambda_i(x)\cdot K\left(\left|x_i - x\right|\right)$$

sous les contraintes

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{N}\lambda_i - 1 = 0 \\ \sum_{i=1}^{N}\lambda_i \cdot x_i - x = 0 \end{cases} \quad \text{(conditions de non - biais)}$$

On utilise alors les multiplicateurs de Lagrange pour réduire notre problème où nous ajoutons à l'expression à minimiser les contraintes pondérées par des coefficients μ_l. On obtient alors le Lagrangien :

$$\textit{Minimiser} \text{ pour } (\lambda_1,...,\lambda_N,\mu_1,\mu_2) \in \Re^{N+2}$$

$$\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}\lambda_i(x)\cdot\lambda_j(x)\cdot K\left(\left|x_i - x_j\right|\right) - \sum_{i=1}^{N}\lambda_i(x)\cdot K\left(\left|x_i - x\right|\right) + \mu_0\cdot\left(\sum_{i=1}^{N}\lambda_i - 1\right) + \mu_1\cdot\left(\sum_{i=1}^{N}\lambda_i\cdot x_i - x\right)$$

On dérive le Lagrangien par rapport à chacune des variables λ_1,..., λ_N, μ_0, μ_1 pour trouver le minimum. Soit le système suivant :

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{N} K(|x_i - x_j|)\lambda_j(x) + \mu_0 + \mu_1 x_i = K(|x - x_i|) \text{ avec } 1 \leq i \leq N \\ \sum_{i=1}^{N}\lambda_i(x) = 1 \\ \sum_{i=1}^{N}\lambda_i(x)x_i = x \end{cases} \tag{A.5}$$

que l'on peut écrire sous la forme matricielle de la figure A.1.
Puis il reste à inverser ce système afin de remonter à la fonction krigée. Le tableau A.2 est un récapitulatif de la méthode avec le détail des dérives et covariances les plus communément utilisées.

$$\begin{bmatrix} & K\left(\left|x_i - x_j\right|\right) & & 1 & x_1 \\ & & & \vdots & \vdots \\ & & & 1 & x_N \\ 1 & \cdots & 1 & 0 & 0 \\ x_1 & \cdots & x_N & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \lambda_1(x) \\ \vdots \\ \lambda_N(x) \\ \mu_0(x) \\ \mu_1(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K\left(\left|x - x_1\right|\right) \\ \vdots \\ K\left(\left|x - x_N\right|\right) \\ 1 \\ x \end{bmatrix}$$

Figure A.1 Système matriciel à résoudre pour solutionner le krigeage

Choix de la dérive	$a(x) = a_0$ $a(x) = a_0 + a_1 x$ $a(x) = a_0 + a_1 x + a_2 x^2$ $a(x) = a_0 + a_1 \cos(wx) + a_2 \sin(wx)$	*dérive constante* *dérive linéaire* *dérive quadratique* *dérive trigonométrique*
Choix de la covariance	$K(h) = h$ $K(h) = h^3$ $K(h) = h^2 \ln h$ $K(h) = \sin(\omega h)$	*covariance linéaire* *covariance cubique* *covariance logarithmique* *covariance sinusoïdale*
Résolution du système du krigeage dual	$\begin{bmatrix} & K\left(\left\|x_i - x_j\right\|\right) & & 1 & x_1 \\ & & & \vdots & \vdots \\ & & & 1 & x_N \\ 1 & \cdots & 1 & 0 & 0 \\ x_1 & \cdots & x_N & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_N \\ a_0 \\ a_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1 \\ \vdots \\ u_N \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$ (cas d'une dérive linéaire)	
Fonction krigée	$u(x) = a_0 + a_1 \cdot x + \sum_{i=1}^{N} b_i \cdot K\left(\left\|x - x_i\right\|\right)$ (cas d'une dérive linéaire)	

Figure A.2 Tableau récapitulatif

ANNEXE B DÉTAILS DES CALCULS POUR LA FORMULE DE PERTE DE PRESSION À LA SECTION 5.2.4

Soit ρ la masse volumique, t le temps, U la vitesse, P la pression, σ_k le tenseur des contraintes, σ_ν les efforts visqueux sur les parois (sur le liquide seulement ici) et $\mathbf{f_{\Omega C}^{2\Phi}}$ les interactions diphasiques entre l'air et l'eau, $\dot{m}_i$ le débit massique de chacune des phases et enfin g l'accélération de pesanteur. L'indice k (ou i) symbolise l'air (g) ou l'eau (l).

— Équation de conservation de la masse généralisée :

$$\rho_k t + \nabla \cdot \{\rho_k \mathbf{U_k}\} = 0$$

— Équation de conservation de la quantité de mouvement généralisée :

$$\rho_k \mathbf{U_k} t + \nabla \cdot \{\rho_k \mathbf{U_k} \otimes \mathbf{U_k}\} = -\nabla P + \nabla \cdot \{\sigma_k\} - \sigma_\nu - \mathbf{f}_{\Omega_C}^{2\Phi}$$

— Équation de conservation de l'énergie généralisée :

$$\Sigma_{in}(\dot{m}_i(P_i + \frac{1}{2}\rho_i V_i^2 + \rho_i g z_i)) = \Sigma_{out}(\dot{m}_i(P_i + \frac{1}{2}\rho_i V_i^2 + \rho_i g z_i)) + \rho_l \dot{W}_\nu$$

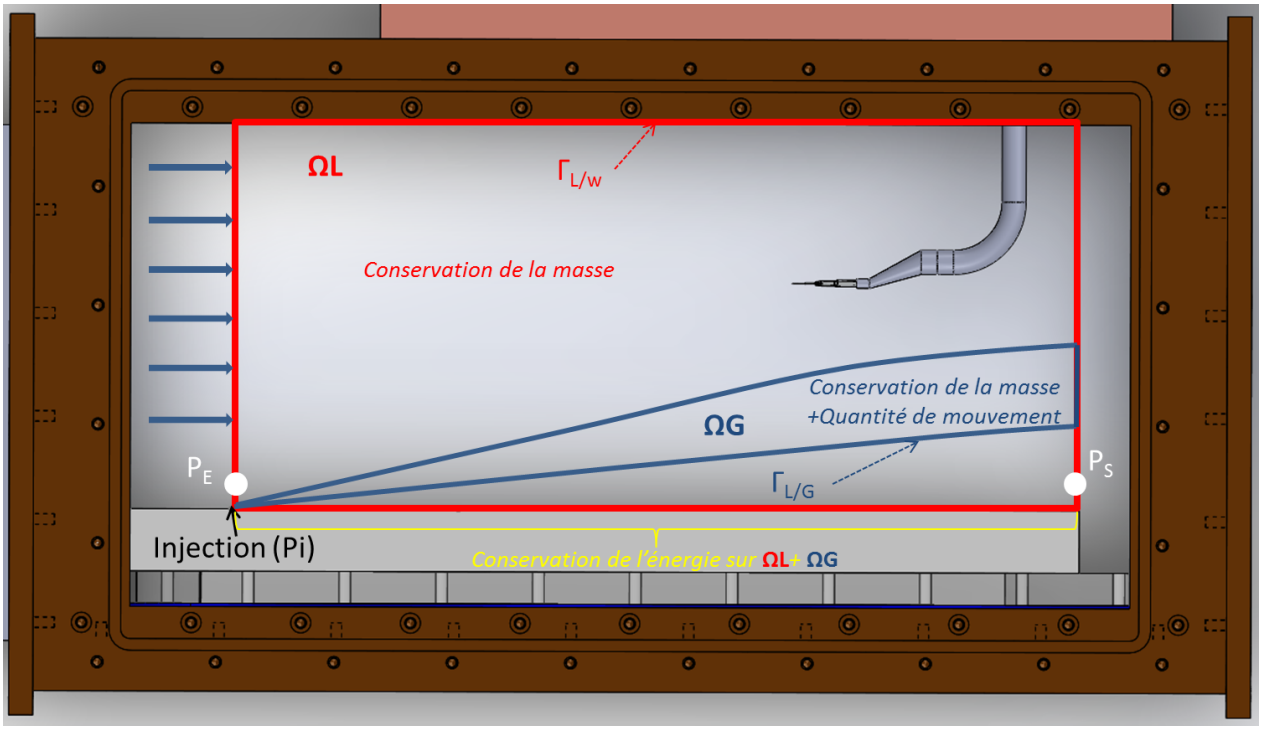


Figure B.1 Schéma illustrant les volumes de contrôle sur un écoulement diphasique

— Sur (Ω_L) et (Ω_G) séparés

Conservation de la masse (Ω_L) et (Ω_G)

Conservation de la quantité de mouvement (Ω_G)

— Sur $(\Omega_L + \Omega_G)$

Conservation de la quantité d'énergie (3)

— On obtient avec la Conservation de la Masse sur Ω_G

$$V_{Gs} = \frac{V_i S_i}{S_s}$$

— Puis ensuite avec la Conservation de la Masse sur Ω_L

$$V_{Ls} = \frac{V_E}{1 - \varepsilon_s}$$

— Et avec l'équation de l'énergie on obtient la pression de sortie P_s :

$$P_s = \overbrace{(1-\beta)\left\{P_E - \rho_l \frac{V_E^2}{2}\left[\left(\frac{1}{1-\varepsilon_s}\right)^2 - 1\right] - \sigma_\nu\right\}}^{EAU} \underbrace{- \beta\left\{\rho_g \frac{Vi^2}{2}\left[\left(\frac{S_i}{\varepsilon_s S}\right)^2 - 1\right] - P_i\right\}}_{AIR}$$

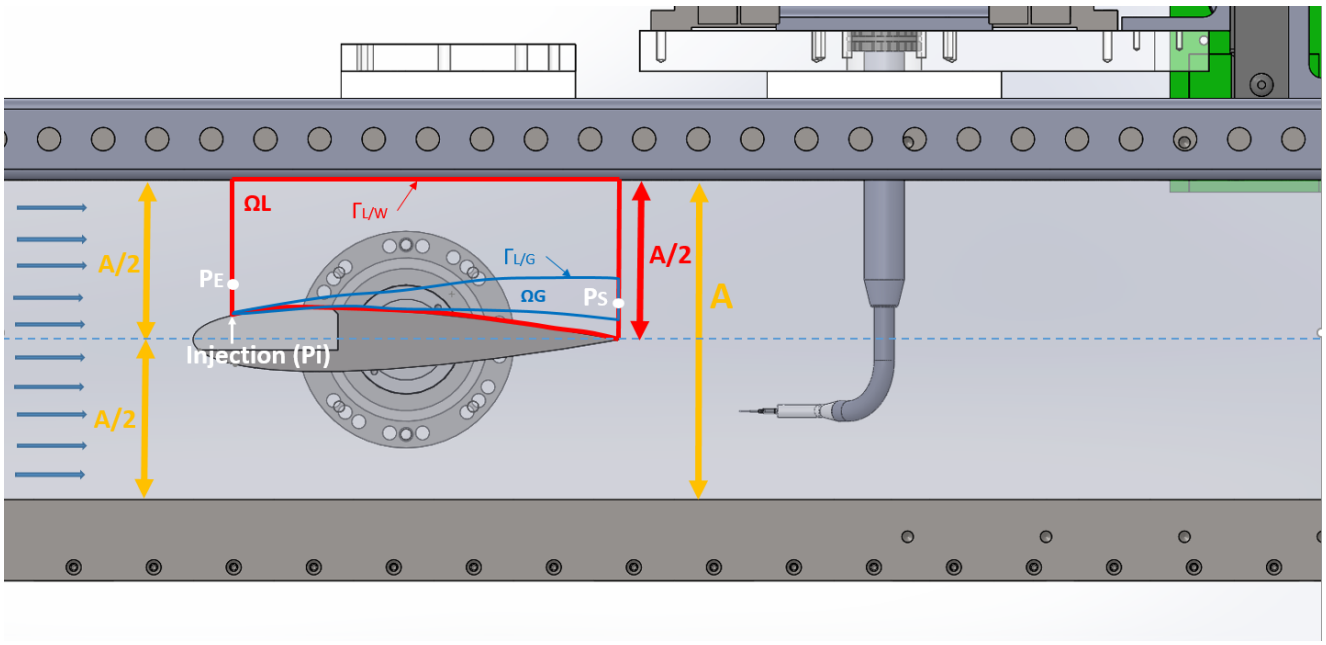


Figure B.2 Schéma illustrant les volumes de Contrôle sur un modèle prenant en compte le profil aérant

ANNEXE C SCHÉMAS ET IMAGES ADDITIONNELLES

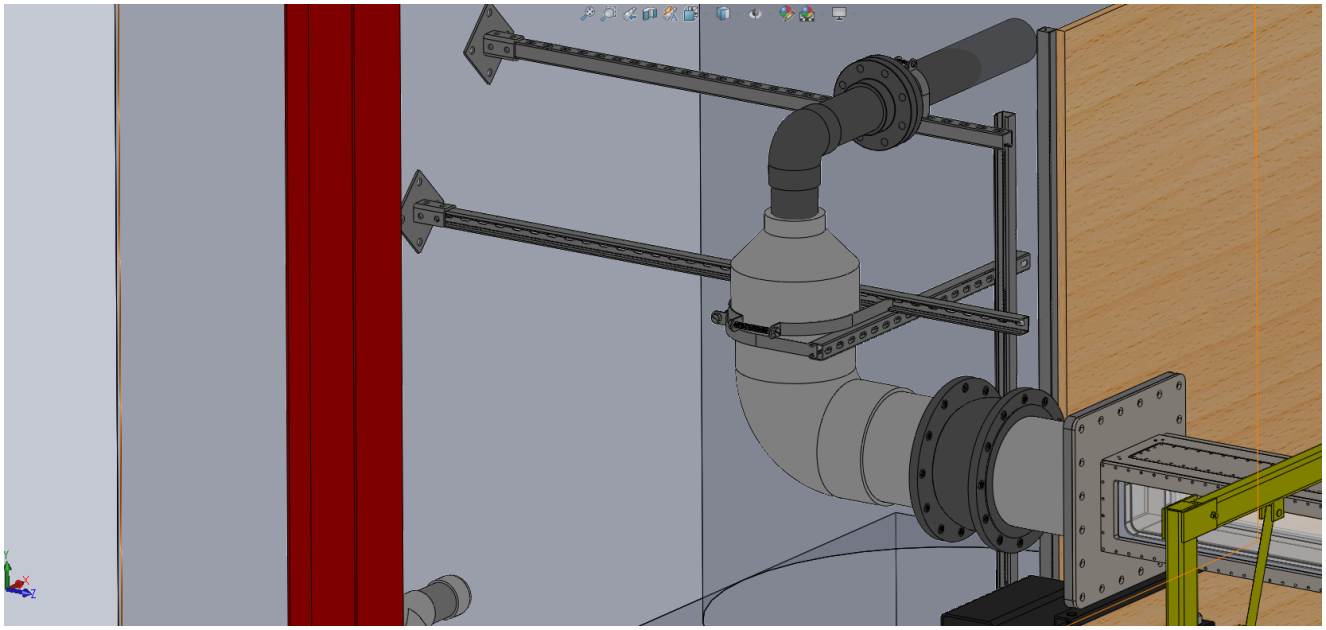


Figure C.1 Schéma CAD des colliers de serrage après la coude en sortie des veines

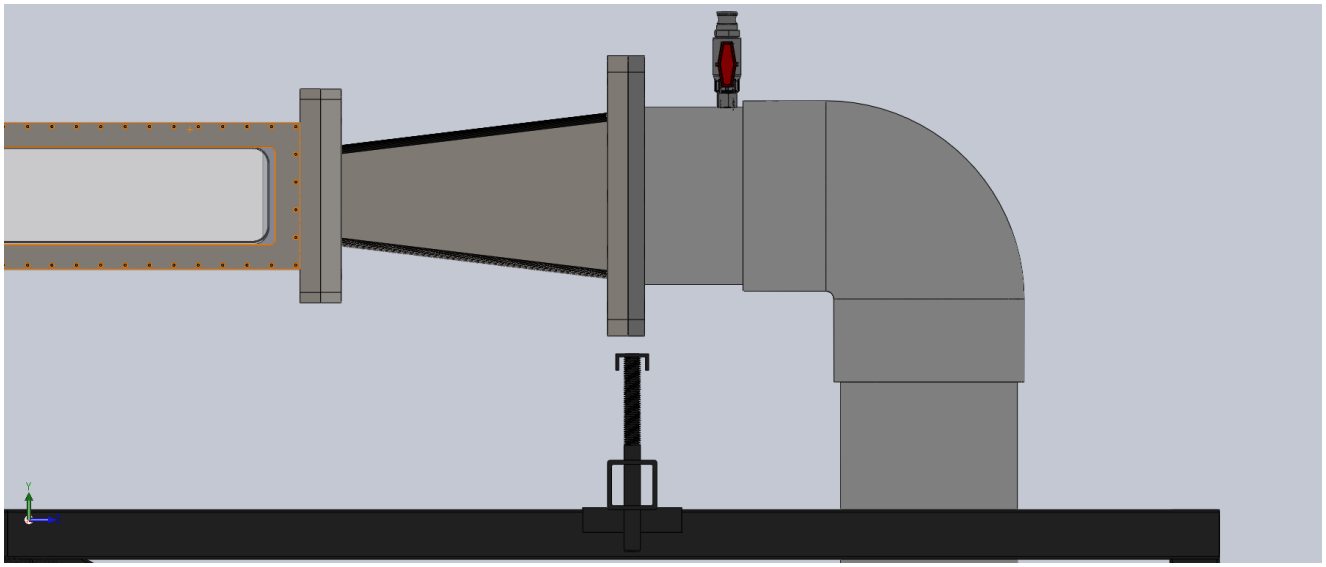


Figure C.2 Schéma CAD de la purge haute de la boucle d'essai