

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique



Département de Génie Mécanique  
Laboratoire de Génie Mécanique et Développement

Mémoire de projet de fin d'études  
pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie Mécanique

---

**Intitulé:** *Étude numérique et expérimentale de l'écoulement à travers une soufflerie à circuit fermé. Étude de cas: soufflerie de l'ENP.*

---

Réalisé par : Mohamed Chakib BOUDEHANE

Présenté et soutenu publiquement le 05/10/2021

**Composition du Jury:**

Président	Mohamed BENBRAIKA	MAA	ENP
Examineur	Mohammed Amokrane MAHDI	MCB	ENP
Promoteur	Abdelhamid BOUHELAL	MCB	ENP
Co-Promoteur	Arezki SMAILI	Professeur	ENP



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique



Département de Génie Mécanique  
Laboratoire de Génie Mécanique et Développement

Mémoire de projet de fin d'études  
pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie Mécanique

---

**Intitulé:** *Étude numérique et expérimentale de l'écoulement à travers une soufflerie à circuit fermé. Étude de cas: soufflerie de l'ENP.*

---

Réalisé par : Mohamed Chakib BOUDEHANE

Présenté et soutenu publiquement le 05/10/2021

**Composition du Jury:**

Président	Mohamed BENBRAIKA	MAA	ENP
Examineur	Mohammed Amokrane MAHDI	MCB	ENP
Promoteur	Abdelhamid BOUHELAL	MCB	ENP
Co-Promoteur	Arezki SMAILI	Professeur	ENP

ENP 2021

## ملخص

يخص هذا العمل الدراسة التجريبية و الرقمية لسريان الهواء داخل النفق الهوائي ذو السرعات المنخفضة للمدرسة الوطنية المتعددة التقنيات. تشمل الدراسة التجريبية قياسات لحقل السرعة المتوسطة في قسم التجارب باستخدام أنبوب بيتو و مرياح ذو خط ساخن. أيضا تم قياس الاضطرابات باستخدام المرياح ذو خط ساخن. أما الدراسة الرقمية، فهي تعتمد على محاكاة السريان داخل النفق باستخدام برنامج أنسيس فلوانت و ذلك عن طريق حل معادلات نافيه و ستوكس المتوسطة بطريقة رينولدز. تمت نمذجة الاضطرابات باستخدام نموذج كاي إيسيلون. نتائج أنبوب بيتو تظهر تناسق الحقل مع إنحراف معياري يتراوح بين 0.21 و 0.37 م/ث. أما نتائج الخط الساخن فهي تؤكد نتائج بيتو و تطيف معلومات حول الطابع الاضطرابي للحقل بقيم شدة الاضطرابات التي تتراوح بين 7 و 22%. المقارنة بين قياسات السرعة و تلك المتحصل عليها من المحاكاة تبرز خطأ نسبي أعظمي قيمته % 15 في المنطقة السفلية لقسم التجارب. نتائج المحاكاة توضح تشكل منطقة ركود في الجزء العلوي للنفق التي تؤثر على حقل السرعة في قسم التجارب. نتائج المحاكاة تظهر أيضا دور خلية النحل و الموجات في التخفيف من الاضطرابات.

**الكلمات الدالة:** نفق هوائي ذو السرعات المنخفضة, أنبوب بيتو, مرياح ذو الخط الساخن, السريان المضطرب, محاكاة رقمية.

## Abstract

The present work deals with an experimental and numerical study of the flow through the low speed wind tunnel of the National Polytechnic School-ENP. The experimental study has involved measurements of the mean velocity field using Pitot tube and hot wire anemometer within the test section. Also turbulence intensity has been carried out using a hot wire anemometer. The numerical study has consisted in flow simulation through the tunnel using CFD software Ansys Fluent by solving Reynolds averaged Navier-Stokes equations. The turbulence of the flow has been described by the k-ε model. Pitot tube results show the uniformity of the field with a standard deviation varying between 0.21 and 0.37 m/s. The hot wire results confirm the previous results and add information about the turbulence with values of turbulence intensity between 7 and 22%. Simulation results show the development of a stagnation layer in the upper part of the wind tunnel that influences the velocity field at the test section. The comparison between measured velocity and velocity from simulation show a maximum relative error of 15% at the bottom of the test section. Additionally, simulation results show the role of the honeycomb and corner vanes in the reduction of flow irregularities.

**Key words:** Low speed wind tunnel, Pitot tube, Hot wire anemometry, Turbulent flow, Numerical simulation.

## Résumé

Ce travail concerne l'étude expérimentale et numérique de l'écoulement à travers la soufflerie à basse vitesse de l'École Nationale Polytechnique. La partie expérimentale est basée sur des mesures du champ de vitesse moyenne à l'aide d'un tube de Pitot et d'un anémomètre à fil chaud dans la section d'essais. Également, des mesures de l'intensité de turbulence par l'anémomètre à fil chaud ont été réalisées. La partie numérique consistait en la simulation de l'écoulement à travers toute la soufflerie par le logiciel CFD Ansys Fluent en résolvant les équations de Navier-Stokes moyennées par la procédure de Reynolds. La turbulence de l'écoulement a été décrite par le modèle de turbulence k-ε. Les résultats du tube de Pitot montrent l'uniformité du champ de vitesse avec un écart type variant entre 0.21 et 0.37 m/s. Les résultats du fil chaud confirment ceux de Pitot et ajoutent des informations sur la turbulence avec des valeurs d'intensité de turbulence comprises entre 7 et 22%. Les résultats de simulation montrent le développement d'une zone de stagnation dans la partie supérieure de la soufflerie qui influe le champ de vitesse dans la section d'essais. La comparaison entre la vitesse obtenue par les résultats de simulation et celle mesurée indique une erreur relative maximale de 15% au niveau de la partie inférieure de la section d'essais. De plus, les résultats de simulation montrent le rôle du nid d'abeilles et des vannes de redressement dans la réduction des non-uniformités.

**Mots clés:** Soufflerie à basses vitesses, Tube de Pitot, Anémométrie à fil chaud, Écoulement turbulent, Simulation Numérique.

## Remerciements

Dans un premier lieu, je remercie dieu, Allah, le tout puissant de m'avoir donné le courage, la force et la patience de mener à terme le présent travail.

Mes remerciements d'adressent à mes encadreurs, Professeur A. SMAILI et Docteur A. BOUHELAL, pour leur disponibilité, leurs conseils et le temps qu'ils m'ont consacré tout au long de ce travail.

Je tiens à remercier également Monsieur M. NAOURI, technicien du laboratoire, Monsieur K. LAHLAH, ingénieur du laboratoire et le Doctorant S. OUCHENE, pour leur aide et leur soutien précieux qu'ils m'ont accordés lors des essais en soufflerie.

J'exprime ma reconnaissance à Monsieur M. BENBRAIKA, le président du Jury, ainsi que Monsieur M. A. MAHDI, l'examineur, pour avoir accepté de juger et évaluer ce travail.

Pour terminer, je remercie toute personne ayant contribué de loin ou de près au bon déroulement de ce modeste travail.

# Dédicace

Cet humble travail est une dédicace

à ma famille,

à mes amis,

et à tous ceux qui me sont chers.

# Sommaire

Sommaire

Liste des tableaux

Liste des figures

Nomenclature

Introduction Générale.....	11
1 Chapitre 1 : Généralités sur les souffleries .....	12
1.1 Introduction .....	12
1.2 Historique .....	12
1.3 Types de souffleries.....	14
1.3.1 Avantages et inconvénients de chaque type.....	15
1.4 Classification des souffleries .....	17
1.4.1 Selon le mode d'opération .....	17
1.4.2 Selon le nombre de Mach.....	19
1.5 Tests en soufflerie.....	20
1.5.1 Mesure des efforts et moments.....	20
1.5.2 Mesure de pression et vitesse .....	20
1.5.3 Visualisation de l'écoulement.....	21
1.6 Applications des souffleries.....	22
2 Chapitre 2 Étude expérimentale.....	25
2.1 Présentation de la soufflerie de l'ENP .....	25
2.2 Instruments et appareillage utilisés et méthodologie.....	28
2.2.1 Tube de Pitot .....	28
2.2.2 Anémomètre à fil chaud .....	30
2.3 Méthodologie.....	32
2.3.1 Tube de Pitot .....	32
2.3.2 Anémomètre à fil chaud .....	34
3 Chapitre 3 : Étude numérique .....	46
3.1 Introduction .....	46
3.2 Modèle géométrique .....	46
3.3 Simulation Ansys Fluent .....	49
4 Chapitre 4 : Résultats et discussion .....	61
4.1 Tube de Pitot.....	61
4.2 Anémométrie à fil chaud .....	63
4.3 Simulation.....	66

5	Conclusion .....	72
6	Références.....	73

## Liste des tableaux

Tableau 2-1 Fonctions des différents composants de la soufflerie. ....	27
Tableau 2-2 Coordonnées des points de mesure par tube de Pitot. ....	33
Tableau 3-1 Calcul de la taille des éléments proches de la paroi. ....	53
Tableau 4-1 Écart type des vitesses (Pitot). ....	62
Tableau 4-2 Erreurs relatives entre les résultats de Pitot et fil Chaud. ....	64
Tableau 4-3 Erreur relative entre les résultats numériques et expérimentaux. ....	70

## Liste des figures

Figure 1-1 Croquis du bras tournant de Benjamin Robins.....	13
Figure 1-2 Modèle de soufflerie à circuit fermé.Modèle de soufflerie à circuit fermé.....	14
Figure 1-3 Modèle de soufflerie à circuit fermé. ....	15
Figure 1-4 Rotor de la soufflerie du centre de recherche Glenn, NASA. Cleveland, OH. ....	17
Figure 1-5 Fonctionnement des souffleries à unité de stockage de pression. ....	18
Figure 1-6 Classification des souffleries.....	20
Figure 1-7 Soufflerie verticale. ....	22
Figure 1-8 Test en soufflerie sur un monoplace de type Formule 1. ....	23
Figure 1-9 Étude de l'effet de sillage dans une soufflerie. ....	23
Figure 1-10 Étude de l'effet du vent sur des panneaux solaires. ....	24
Figure 1-11 Étude de l'écoulement de l'air autour du corps d'un skieur. ....	24
Figure 2-1 Soufflerie de l'ENP.....	25
Figure 2-2 Comparaison entre l'ancienne et la nouvelle soufflerie.....	26
Figure 2-3 Moteur électrique et ventilateur de la soufflerie.....	26
Figure 2-4 Numérotation des composants de la soufflerie.....	27
Figure 2-5 Tube de Pitot.....	28
Figure 2-6 Prises de pression dans le tube de Pitot. ....	28
Figure 2-7 Anémomètre KIMO MP200.....	29
Figure 2-8 Fonctionnement du fil chaud. ....	30
Figure 2-9 Types de sondes.....	31
Figure 2-10 Chaîne de mesure d'un anémomètre à fil chaud. ....	31
Figure 2-11 Emplacement des trous de la plaque en plexiglas. ....	32
Figure 2-12 Emplacement des points de mesure par tube de Pitot. ....	33
Figure 2-13 Disposition des trous pour la mesure par fil chaud. ....	34
Figure 2-14 Installation des support du fil chaud.....	36
Figure 2-15 Sonde du fil chaud (à gauche) et sonde de calibration (à droite). ....	36
Figure 2-16 Branchement de l'anémomètre à fil chaud. ....	37
Figure 2-17 Création d'une base de données.....	38
Figure 2-18 Création d'un nouveau projet.....	38
Figure 2-19 Choix de l'appareil de conversion. ....	39
Figure 2-20 Configuration de la chaîne d'instruments. ....	39
Figure 2-21 Sélection des paramètres de la sonde du fil chaud. ....	40
Figure 2-22 Schémas des interrupteurs DIP.....	41
Figure 2-23 Ouverture du CTA.....	42
Figure 2-24 Configuration des interrupteurs DIP. ....	42
Figure 2-25 Sélection des plages de vitesse pour la calibration.....	43
Figure 2-26 Menu de calibration de la vitesse ....	43
Figure 2-27 Vérification des performances.....	44
Figure 2-28 Insertion des données réduites.....	45
Figure 3-1 Conception des composants à section constante. ....	47
Figure 3-2 Conception des composants à section non constante. ....	47
Figure 3-3 Conception des composant de retour 180°. ....	48
Figure 3-4 Assemblage des composants. ....	49
Figure 3-5 Importation et ouverture du modèle géométrique en Spaceclaim. ....	49

Figure 3-6 Création du volume du fluide.....	50
Figure 3-7 Volume du fluide final.....	51
Figure 3-8 Insertion des fonctions de Sizing.....	52
Figure 3-9 Maillage du domaine.....	54
Figure 3-10 Inflation du maillage.....	54
Figure 3-11 Approche de la simulation du nid d'abeilles.....	57
Figure 3-12 Maillage du modèle Sub-grid.....	57
Figure 3-13 Chute de pression pour $U=5\text{m/s}$ .....	58
Figure 3-14 Chute de pression pour $U=10\text{m/s}$ .....	58
Figure 3-15 Chute de pression pour $U=15\text{m/s}$ .....	59
Figure 3-16 Evolution de la chute de pression en fonction de la vitesse d'écoulement.....	59
Figure 4-1 Résultats de mesure de vitesse par tube de Pitot.....	61
Figure 4-2 Evolution de la vitesse moyenne en fonction de la fréquence (tube de Pitot).....	62
Figure 4-3 Evolution de la vitesse moyenne en fonction de la fréquence (Fil chaud).....	63
Figure 4-4 Comparaison entre les résultats du tube de Pitot et fil chaud.....	63
Figure 4-5 la variation de l'intensité de turbulence en fonction de la vitesse.....	64
Figure 4-6 Vitesses instantanées obtenues par fil chaud.....	65
Figure 4-7 Étude de maillage.....	66
Figure 4-8 Courbe du système.....	67
Figure 4-9 Champ de pression dans la soufflerie.....	67
Figure 4-10 Évolution de la pression à travers la soufflerie.....	68
Figure 4-11 Champ de vitesse dans la soufflerie.....	68
Figure 4-12 Évolution de la vitesse à travers la soufflerie.....	69
Figure 4-13 Champ de vitesse dans une section transversale.....	69
Figure 4-14 Comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques.....	70
Figure 4-15 Lignes de courant au niveau du nid d'abeilles.....	70
Figure 4-16 Lignes de courant au niveau des vannes de redressement.....	71
Figure 4-17 Lignes de courant en absence des vannes de redressement.....	71

## Nomenclature

$a$  : Vitesse du son. [ $\text{m.s}^{-1}$ ]

$A_c$  : Section transversale. [ $\text{m}^2$ ]

$C_2$  : Résistance d'inertie. [ $\text{m}^{-1}$ ]

$c_f$  : Coefficient de frottement.

$D$  : Diamètre de la section. [m]

$D_h$  : Diamètre hydraulique. [m]

$e$  : Epaisseur du nid d'abeilles. [m]

$f$  : Facteur de frottement.

$F$  : Fréquence électrique [Hz]

$I$  : Intensité de turbulence.

$k$  : Facteur de la courbe du système.

$L$  : Longueur de la section. [m]

$p$  : Pression. [Pa]

$Q$  : Débit volumique. [ $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ ]

$Re$  : Nombre de Reynolds.

$u$  : Vitesse selon  $x$ . [m]

$u'$  : Erreur quadratique moyenne de la vitesse. [ $\text{m.s}^{-1}$ ]

$u_\tau$  : Vitesse de frottement. [ $\text{m.s}^{-1}$ ]

$U_\infty$  : Vitesse loin de la paroi. [ $\text{m.s}^{-1}$ ]

$U_{moy}$  : Vitesse moyenne. [ $\text{m.s}^{-1}$ ]

$\vec{V}$  : Vecteur vitesse. [ $\text{m.s}^{-1}$ ]

$x$ : Variable spatiale. [m]

$y$ : Variable spatiale. [m]

$y^+$  : Grandeur adimensionalisée de  $y_p$ .

$y_p$  : Distance au centre de la 1ère maille. [m]

$z$ : Variable spatiale. [m]

$\alpha$  : La perméabilité.

$\mu$  : Viscosité dynamique. [ $\text{kg.m}^{-1}$ ]

$\rho$  : Masse volumique. [ $\text{kg.m}^{-3}$ ]

$\tau_w$  : Contrainte de cisaillement. [Pa]

## Introduction Générale

Les souffleries sont des installations qui permettent aux chercheurs et scientifiques d'étudier l'écoulement de l'air sur un modèle d'étude, les forces qui s'appliquent ainsi que l'interaction du modèle avec l'écoulement de l'air. Les caractéristiques les plus pertinentes d'une soufflerie sont la qualité de l'écoulement au niveau de la section d'essais et la performance générale. Pour définir ces caractéristiques, trois critères sont souvent utilisés: La vitesse maximale, l'uniformité de l'écoulement et l'intensité de turbulences.

Avec les progrès des recherches dans le domaine de la mécanique des fluides, la description des phénomènes liés aux écoulements des fluides par des modèles mathématiques avait une tendance à aboutir à des équations gouvernantes de plus en plus complexes dont la résolution par des méthodes analytiques pour aboutir à des solutions exactes n'est pas possible. Parallèlement, la résolution des systèmes algébriques a connu de majeurs progrès avec le développement de l'informatique et des semi-conducteurs ce qui a donné naissance à la CFD (*Computational Fluid Dynamics* i.e. mécanique des fluides numérique) qui est la branche de la mécanique des fluides qui consiste à étudier les mouvements d'un fluide, ou leurs effets, par des méthodes numériques. Elle est basée sur la conversion des équations qui gouvernent les fluides en systèmes algébriques pour ensuite les résoudre numériquement soit par des méthodes directes ou bien des méthodes itératives.

L'objectif de ce travail est de réaliser une étude expérimentale et numérique sur la soufflerie de l'Ecole Nationale Polytechnique qui a récemment été reconstruite afin de valider l'écoulement qui s'y développe avant d'entamer les essais dans cette nouvelle installation. L'étude expérimentale sera réalisée à l'aide des anémomètres à tube de Pitot et à fil chaud pour mesurer la vitesse moyenne de l'écoulement dans la section d'essais. L'étude numérique porte sur la simulation de l'écoulement à travers toute la soufflerie à l'aide du logiciel Ansys Fluent en se basant sur la résolution des équations de Navier et Stokes moyennées par la procédure de Reynolds. Le modèle de turbulence k- $\epsilon$  a été utilisé pour décrire la turbulence de l'écoulement.

Le travail est structuré en quatre chapitres. Le chapitre 1 concerne des généralités sur les souffleries. Le chapitre 2 porte sur l'étude expérimental où les différents instruments et méthodes utilisés sont décrits et présentés. Le chapitre 3 décrit la procédure de l'analyse CFD de la soufflerie. Enfin, les résultats des deux études sont présentées, discutées et comparées dans le chapitre 4.

# Chapitre 1 : Généralités sur les souffleries

Dans ce chapitre, l'état de l'art en terme de souffleries sera présenté. L'évolution des souffleries à partir des premiers tests jusqu'aux souffleries actuelles sera décrite. Nous présenterons également les différents types et classifications de souffleries ainsi que les avantages et les inconvénients de chaque type. Enfin nous donnerons un aperçu sur les différents tests effectués en soufflerie ainsi que les domaines d'application de ces dernières.

## 1.1 Introduction

Les souffleries sont des installations destinées à reproduire des écoulements d'air contrôlés dans le but d'étudier les interactions de l'écoulement avec des modèles de dimensions généralement réduites. Depuis leur début, les souffleries ont été longuement utilisées pour vérifier les théories du domaine de l'aérodynamique et faciliter la conception des aérodynes, et pour une longue période ceci fut leur domaine d'application principale.

De nos jours, le domaine de l'aérodynamique a beaucoup évolué, il s'étend actuellement sur diverses branches tel que l'industrie automobile, l'architecture, l'environnement et l'éducation pour en citer quelques uns. Ce qui a permis aux tests en soufflerie de gagner en importance.

## 1.2 Historique

En observant les vols des oiseaux, les chercheurs du 19ème siècle ont étudié la possibilité de créer des machines volantes [1]. Les premières, copiant la forme des oiseaux, ont été un échec qui a permis aux chercheurs de se rendre compte qu'ils manquent en connaissances sur les forces de portance et de traînée qui s'appliquent sur les surfaces qui traversent l'atmosphère [2]. Ceci dit, il aurait fallu créer des laboratoires et instruments capables d'étudier les effets de l'écoulement de l'air sur les surfaces sous des conditions contrôlées. Les souffleries sont le moyen indispensable pour aboutir à tels résultats, cependant elles ne furent pas le premier modèle utilisé pour ces expériences.

Les premières recherches étaient focalisées sur le moyen de remplacer le vent turbulent de la nature par un écoulement d'air laminaire et contrôlable. Deux approches pouvaient être suivies: soit de déplacer leurs modèles à travers l'air à la vitesse requise, ou bien, souffler de l'air à travers le modèle stationnaire.

Au début, des sources naturelles avec un écoulement relativement stable ont été au centre de la recherche. Des modèles ont été montés sur des crêtes balayées par le vent et à l'entrée des caves naturellement ventilées. La qualité du vent dans ces premiers tests ont forcé les

chercheurs à changer d'approche et à développer des dispositifs mécaniques pour mouvoir leurs modèles [3]. Le dispositif le plus simple et le moins cher pour ce faire était le bras tournant.

Le mathématicien anglais Benjamin Robins (1707-1751) fut le premier à employer ce type de dispositif [3]. Sa première machine (figure 1-1[R. Hunt, G. S. Hornby, J. D. Lohn. 2005]) contenait un bras d' 1.20m tourné par un poids tombant. Même si son dispositif ne dépassait pas le tiers du mètre par seconde à l'extrémité, il lui a permis de conclure que les théories antérieures sur la résistance ne pouvaient pas être appliquées dans ce contexte. En effet, en accrochant des objets de géométries différentes (Pyramides, plaques oblongues...etc.) sur l'extrémité de son bras, il a pu conclure que les objets de forme différentes, même si ils présentent la même surface à l'écoulement, n'avaient pas la même résistance à l'écoulement.

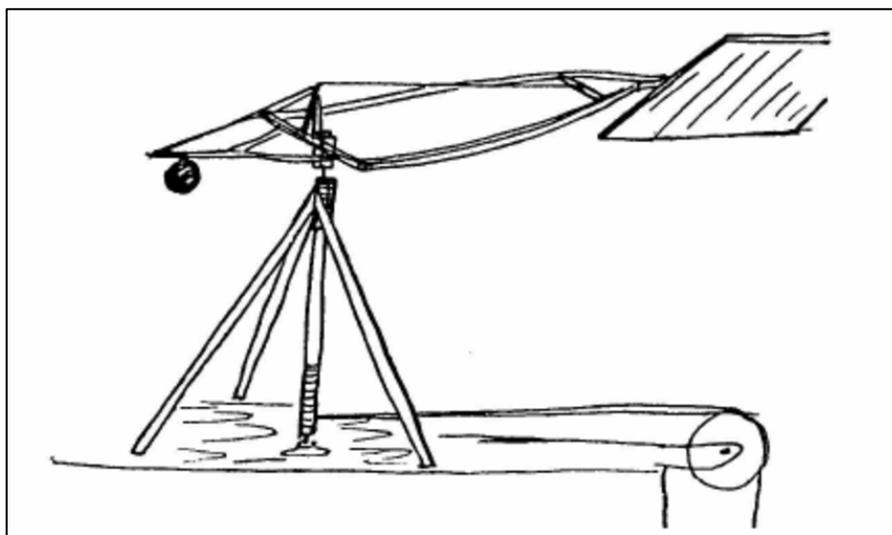


Figure 1-1 Croquis du bras tournant de Benjamin Robins.

Sir George Cayley (1773-1857) continua les tests sur le bras tournant et put réaliser un petit planeur faisant l'objet du premier essai réussi d'un véhicule plus lourd que l'air [3]. Cependant sa contribution majeure était plus une philosophie de conception. Il en était que les chercheurs pensaient que le système de propulsion devait assurer le mouvement d'avance ainsi que générer la force de portance en même temps. Cayley prouva qu'une surface peut soulever un poids par les forces créées lors de la résistance à l'écoulement de l'air. Cette séparation de la fonction de propulsion et de portance, aussi simple qu'elle en avait l'air, était un changement révolutionnaire dans la façon d'aborder les problèmes d'aéronautique.

Le bras tournant était la base de tous les résultats et données générés jusqu'à la fin du 19ème siècle, ses défauts en revanche, ne sont pas passés inaperçus. Effectivement, les résultats étaient influencés par les effets de tourbillons créés par la rotation du bras, ce qui fait que la

détermination de la vitesse relative entre l'air et le modèle était difficile à cause de la turbulence. D'autant plus, il était extrêmement dur d'accrocher des instruments de mesure et mesurer les forces exercées sur le modèle lorsqu'il tournait à hautes vitesses.

Frank H. Wenham (1824-1908), membre du conseil de la société aéronautique de Grande Bretagne, est souvent crédité comme le premier à avoir conçu et opéré une soufflerie en 1871 [3]. Wenham a utilisé le bras tournant lors de ces premières expériences mais, insatisfait des résultats obtenus, il demanda au conseil de collecter des fonds pour construire la soufflerie qui mesure 3.6m de longueur. Un moteur à vapeur fut utilisé pour tourner le ventilateur afin de créer l'écoulement.

### 1.3 Types de souffleries

Il existe deux types principaux de souffleries, les souffleries à circuit ouvert et les souffleries à circuit fermé. Chacun de ces types comporte une infinité de configurations qui fait que presque chaque soufflerie qui existe dans le monde est unique.

L'air qui circule dans une soufflerie à circuit ouvert (figure 1-2) suit une trajectoire qui est grand partie rectiligne de l'entrée et à travers une contraction en passant par la section d'essais suivi par un diffuseur, une section pour ventilateur et en fin une sortie d'échappement. La soufflerie peut avoir une section d'essais sans parois solides ( on parle là d'une soufflerie "*Open Jet*" ou de type "*Eiffel*") ou une section d'essais avec parois solides (on parle dans ce cas d'une soufflerie "*Closed Jet*")



Figure 1-2 Modèle de soufflerie à circuit fermé. Modèle de soufflerie à circuit fermé.

D'autre part, l'air dans une soufflerie à circuit fermé (aussi connue sous l'appellation "de type *Prandtl*" ou "*Göttingen*") (figure 1-3) est re-circulé de manière continue avec peu voir aucun échange avec le milieu extérieur.



Figure 1-3 Modèle de soufflerie à circuit fermé.

Là encore, les souffleries à circuit fermé peuvent disposer d'une section d'essais à parois solides ou sans parois. La majorité des souffleries à circuit fermé ont un seul retour, néanmoins des souffleries avec un retour double ont déjà été construites. Des souffleries ont été construites pouvant être interchangeable en circuit fermé et circuit ouvert pour des programmes spécifiques [5].

### 1.3.1 Avantages et inconvénients de chaque type

Comme dans tout autre problème d'ingénierie, il existe des avantages et des inconvénients avec chaque type de soufflerie. En général, le choix du type de soufflerie se fait sur la base des objectifs et des fonds mis à disposition pour le projet en question.

#### Souffleries à circuit ouvert

Ici sont cités les avantages et les inconvénients des souffleries à circuit ouvert [4]:

##### Avantages:

1. Coûts de construction moins élevés.

2. Le problème d'évacuation de fumée, lors d'essai de refroidissement de moteur à combustion interne par exemple, ne se pose dans ce cas du fait que l'entrée et la sortie sont ouvert à l'atmosphère.

### **Inconvénients:**

1. Si la soufflerie se trouve à l'intérieur d'un laboratoire/atelier fermé, l'application de plusieurs écrans doit être envisagée (selon la proportion de la taille de la soufflerie à la taille de l'endroit où elle se trouve) pour aboutir à des écoulements de qualité élevée.
2. En fonction du flux souhaité, les souffleries à circuit nécessitent plus d'énergie pour fonctionner. Ceci est un facteur à prendre en compte si la soufflerie sera utilisée dans des projets où elle travaillera à plein temps.
3. La plus part du temps, les souffleries à circuit ouvert produisent beaucoup de bruit. Les grandes souffleries (Souffleries dont la section d'essais est plus large que  $6.5\text{m}^2$  [4]) peuvent causer des problèmes de pollution sonore ce qui peut influencer/limiter temps d'opération et/ou nécessite d'investir dans une système de réduction de bruit.

Grace aux couts initiaux réduits, les souffleries à circuit ouvert sont idéales pour les écoles et les universités où une telle installation est indispensable pour des travaux pratiques et de recherche et où le temps d'emploi n'est pas long.

### **Souffleries à circuit fermé**

Ici sont cités les avantages et les inconvénients des souffleries à circuit ouvert [4]:

#### **Avantages:**

1. Grace à l'utilisation des écrans et des vannes de redressement dans les coins, la qualité de l'air qui s'écoule peut être mieux contrôlée et sera d'autant plus indépendante des activités de l'atelier et du climat extérieur.
2. L'énergie requise pour une certaine section et/ou vitesse est faible comparée à une soufflerie à circuit ouvert, ceci s'avère important lorsque la soufflerie est utilisé dans des expériences où elle fonctionne à longueur de jour.
3. Moins de bruit est produit lors du fonctionnement de la soufflerie.

## **Inconvénients:**

1. Les coûts de construction sont nettement plus élevés à cause du conduit de retour et des vannes de redressement additionnels.
2. SI la soufflerie est utilisée dans des tests où un modèle produisant de la fumée est étudié (comme le refroidissement des moteurs à combustion interne), un système d'évacuation de fumée doit être mis en place.
3. Si la soufflerie est utilisée durant de longues périodes, un système de refroidissement tel qu'un échangeur de chaleur pourrait être nécessaire pour contrôler la température de l'air qui circule à l'intérieur.

## **1.4 Classification des souffleries**

Nous avons discuté précédemment qu'il existe deux types de souffleries: les souffleries à circuit ouvert et les souffleries à circuit fermé. Chacun de ces deux types peut comporter une section d'essais à parois solides ou être sans parois. Cependant la distinction entre les souffleries ne s'arrête pas ici, en effet, il existe d'autre paramètres pour classer les souffleries, à savoir, le mode d'opération et le nombre de Mach.

### **1.4.1 Selon le mode d'opération**

Ici on parle du système utilisé pour entrainer l'air en mouvement, deux classes principales sont utilisées: Les souffleries à rotor et les souffleries à unité de stockage de pression.

#### **Les souffleries à rotor**

Les souffleries à rotor sont le type le plus utilisé en pratique. Ce mode d'emploi est basé sur la rotation d'un ventilateur placé sur moteur généralement électrique. L'air est mis en circulation par le mouvement des aubes du ventilateur qui créent une différence de pression.



Figure 1-4 Rotor de la soufflerie du centre de recherche Glenn, NASA. Cleveland, OH.

## Les souffleries à unité de stockage de pression

Les souffleries à unité de stockage de pression ont vu le jour avec la deuxième guerre mondiale [6], époque durant la quelle les avions supersoniques étaient au centre d'intérêt des nations, ce qui fait que la réalisations d'installations de tests pour assurer la sécurité de ces engins était en hausse. La réalisation de tunnels supersoniques nécessita une énergie énorme ce qui a donné naissance aux unités de stockage qui garde l'air sous pression avant l'ouverture d'une vanne pour lancer l'écoulement. La figure 1-5 illustre le fonctionnement de ce type de soufflerie.

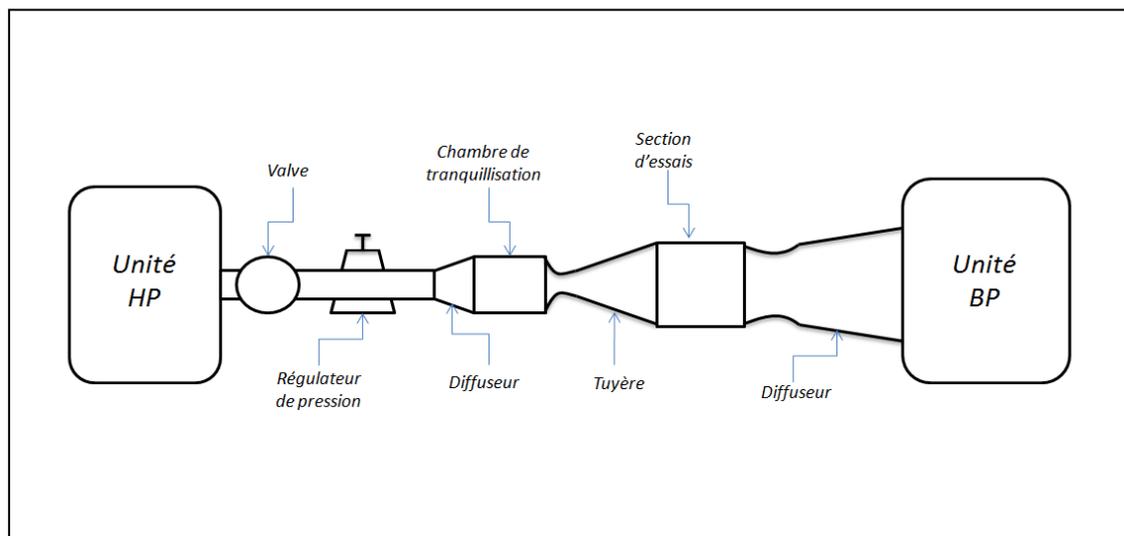


Figure 1-5 Fonctionnement des souffleries à unité de stockage de pression.

Ce mode d'opération, lui même, est réparti en trois catégories:

### **Indraft**

Dans les souffleries de type "*Indraft*", l'atteinte de nombres de Mach importants est basée sur la présence d'une pression négative à la sortie de la soufflerie et des conditions atmosphériques à l'entrée.

### **Blowdown**

Inversement au fonctionnement d'une soufflerie "*Indraft*", les souffleries de type "*Blowdown*" présentent une pression très élevée à l'entrée et des conditions atmosphériques à la sortie.

## **Pressure vacuum**

Les souffleries de type "*Pressure vacuum*" sont un hybride entre les souffleries de types "*Indraft*" et celles de type "*Blowdown*". On y retrouve une unité de stockage d'air à haute pression à l'entrée et une autre unité de stockage d'air à basse pression à la sortie du tunnel.

### **1.4.2 Selon le nombre de Mach**

La classification la plus appropriée des souffleries est basée sur les plages de vitesse qu'elles couvrent. On rappelle que le nombre de Mach est définie comme le rapport entre la vitesse d'écoulement et la vitesse du son dans le milieu  $Ma = \frac{V}{a}$ , cette classification inclut:

#### **Souffleries à basse vitesse**

Les vitesses d'écoulement dans une soufflerie à basse vitesse sont celles avec un nombre de Mach situé entre 0 et 0.3. Les effets de viscosité et les forces d'inertie sont dominants, alors que les effets de compressibilité sont négligés [6]. Il s'agit des souffleries subsoniques.

#### **Souffleries à haute vitesse**

La désignation "haute vitesse" concerne généralement les hautes vitesses dans le régime subsonique, les vitesses transsoniques, et les faibles vitesses du régime supersonique. Ceci correspond à un nombre de Mach compris entre 0.3 et 1.4. Ici, les effets de compressibilité dominant ainsi que les effets de viscosité qui jouent un rôle important dans les interaction choc/couche limite.

#### **Souffleries supersoniques**

Les vitesses dans une soufflerie supersonique correspondent à celles avec un nombre de Mach situé entre 1.4 et 5.

#### **Souffleries hypersoniques**

Les vitesses d'écoulement dans une soufflerie hypersonique sont celles avec un nombre de Mach supérieur à 5. Pour atteindre de telles vitesses, d'hautes températures totales sont nécessaires qui, combinées avec de hautes pressions, peuvent mener à des vibrations des molécules du gaz ce qui peut entraîner leur dissociation voir l'ionisation du gaz. C'est des caractéristiques du régime hypersonique où le gaz ne peut plus être considéré comme gaz parfait [6]. La figure 1-6 résume les différentes classifications des souffleries.

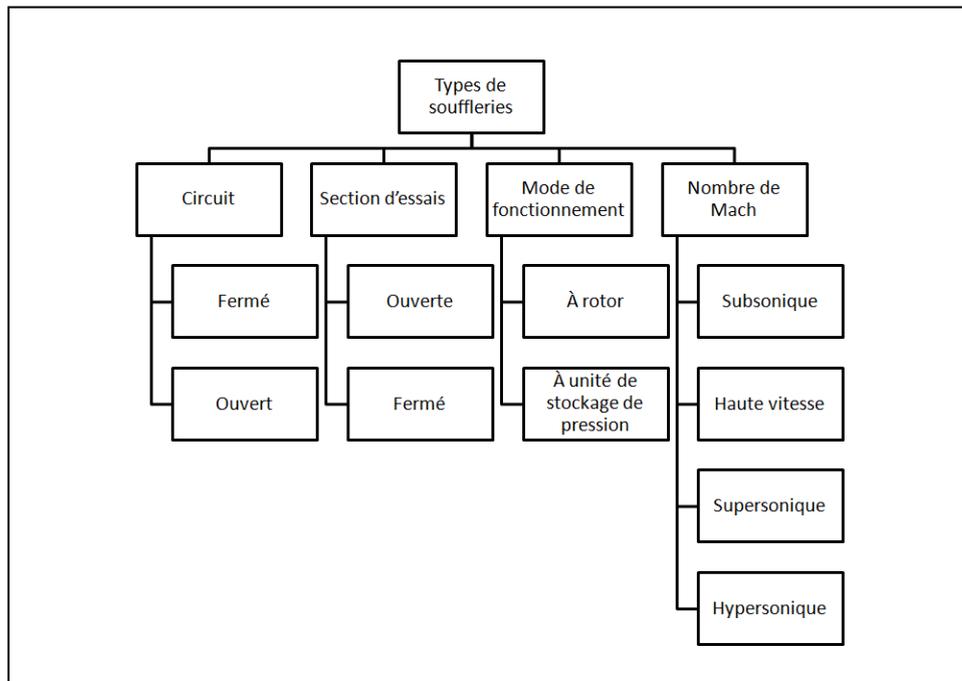


Figure 1-6 Classification des souffleries.

## 1.5 Tests en soufflerie

Les souffleries sont des installations polyvalentes qui permettent d'effectuer une multitude de tests et mesures. Durant les tests, les modèles sont placés à l'intérieur de la section d'essais et l'air s'écoule à travers le modèle. Plusieurs types d'instruments de mesures peuvent être placés pour déterminer les paramètres souhaités. Dans ce qui suit, nous citerons les types principaux de tests en soufflerie.

### 1.5.1 Mesure des efforts et moments

Dans certaines souffleries, les forces et moments aérodynamique agissant sur le modèle peuvent être mesurés directement. Le modèle est monté sur un appareil appelé "*Balance de forces*"[7], qui capte les déplacements et les rotations du modèle suivant les trois axes principaux et les transforme en un signal de sortie. La balance est capable donc de mesurer les forces de trainé et les forces de portance. Il faut noter que l'appareil doit être calibré par rapport à une valeur de force connue avant d'effectuer les mesures.

### 1.5.2 Mesure de pression et vitesse

Pour la mesure de la pression statique sur la surface du modèle, des trous fins sont percés sur sa surface reliés à un transducteur à l'extérieure de la section d'essais. La pression totale est mesuré par des instruments classiques tel que le tube de Pitot.

Le tube de Pitot peut également être utilisé pour la mesure de vitesse via la différence entre la pression statique et la pression dynamique [8], cependant, d'autres instruments de l'anémométrie existent, tel que le laser doppler et le fil chaud.

L'anémométrie laser Doppler est une technique qui permet de mesurer la vitesse en un point donné de l'écoulement avec une haute résolution temporelle. Lorsqu'une particule de l'ordre du micron passe à travers l'intersection de deux faisceaux laser, l'intensité de la lumière reçue fluctue. La fréquence de cette fluctuation est équivalente au décalage entre l'onde incidente et celle reçue qui est en elle-même proportionnelle à la vitesse des particules qui la traversent [9].

La mesure de vitesse par fil chaud sera abordée en détail dans le chapitre 2.2.2.

### **1.5.3 Visualisation de l'écoulement**

La visualisation de l'écoulement est un outil important dans les expériences en mécanique des fluides. Elle procure une image de l'écoulement autour des modèles et permet d'observer les phénomènes qui se passent (ex. séparation de la couche limite). D'autant plus, ces observations, de type qualitatives, permettent de prendre des décisions de type quantitative (ex. variation de l'angle d'attaque d'une pale d'éolienne).

Pour les écoulements sur les surfaces, plusieurs méthodes sont utilisées dont les touffes [10] (fil fins plantés sur la surface du modèle) et l'application de fines couches d'huile qui donnent une idée sur la direction des vecteurs vitesse.

Pour les écoulements autour du modèle, la majorité des méthodes sont basées sur le traçage de particule. Généralement de la fumée ou des bulles d'hélium sont placées en aval du modèle afin qu'elles suivent le même parcours que l'air.

Chacune de ces méthodes nécessite un éclairage approprié ainsi qu'un appareil d'enregistrement tel qu'une caméra vidéo.

Ces méthodes sont des méthodes non-optique, c'est à dire on ne visualise pas l'écoulement de l'air en lui-même mais plutôt ces effets sur des médiums. Il existe des méthodes optiques qui permettent de visualiser l'écoulement en lui-même, il s'agit de la *shadowgraphy* (système de Schlieren) où on place une source de lumière et un capteur de part et d'autre de la section d'essai, c'est le phénomène de diffraction des rayons lumineux lors du changement de densité de l'air qui permet une telle visualisation.

## 1.6 Applications des souffleries

Une partie importante des souffleries qui existent sont destinées aux expériences aéronautiques. Les tests précédemment cités sont au cœur des expériences effectuées dans ce domaine, cependant il existe d'autres applications spécifiques. Les souffleries verticales sont des installations utilisées pour étudier les avions en chute qui rentrent dans des rotations autour d'eux même en cas où le moteur cale (figure 1-7).

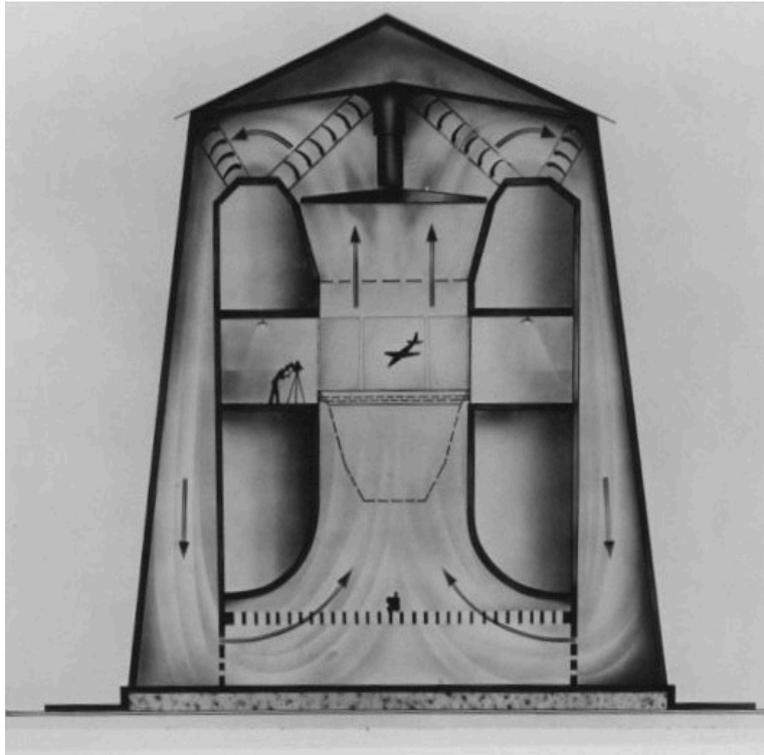


Figure 1-7 Soufflerie verticale.

L'automobile est aussi un vaste domaine pour les applications des souffleries. Les paramètres aérodynamiques qui influent sur les performances des véhicules, sur l'équilibre, sur le refroidissement du moteur et des freins, le bruit en habitacle, entre autres, sont obtenus par des expériences en soufflerie. Ceci inclut bien évidemment les véhicules de sport où les performances sont une priorité (figure 1-8).



Figure 1-8 Test en soufflerie sur un monoplace de type Formule 1.

Le domaine de l'énergie est aussi concerné par les souffleries. Les applications les plus répandues sont la détermination des paramètres aérodynamiques des ailettes des éoliennes. Des modèles réduits d'installations éoliennes font aussi l'objet de tests dans les souffleries pour étudier les fermes éoliennes et l'énergie électrique qu'elles génèrent (figure 1-9).



Figure 1-9 Étude de l'effet de sillage dans une soufflerie.

L'énergie solaire bénéficie également des souffleries. En effet, les collecteurs solaires, qui connaissent une hausse, ont une section transversale de forme parabolique qui sont assujetties aux forces du vent. Des tests pour déterminer les forces et moments que subissent ces collecteurs permettent de mieux les concevoir pour mieux résister aux perturbations (figure 1-10).



Figure 1-10 Étude de l'effet du vent sur des panneaux solaires.

Les performances athlétiques dépendent des compétences des sportifs. Dans de nombreuses disciplines, la victoire dépend de la vitesse qui est largement conditionnée par la résistance à l'air (figure 1-11).



Figure 1-11 Étude de l'écoulement de l'air autour du corps d'un skieur.

## Chapitre 2 Étude expérimentale

Dans ce chapitre, nous nous intéresserons à l'étude expérimentale de l'écoulement à travers la soufflerie de l'ENP qui consiste en des mesures de vitesse moyenne dans la section d'essais à l'aide du tube de Pitot et de l'anémomètre à fil chaud ainsi que des mesures de l'intensité de turbulence à l'aide de ce dernier. Le fonctionnement des instruments de mesure et appareillage sera présenté ainsi que la méthodologie suivie pour effectuer les mesures.

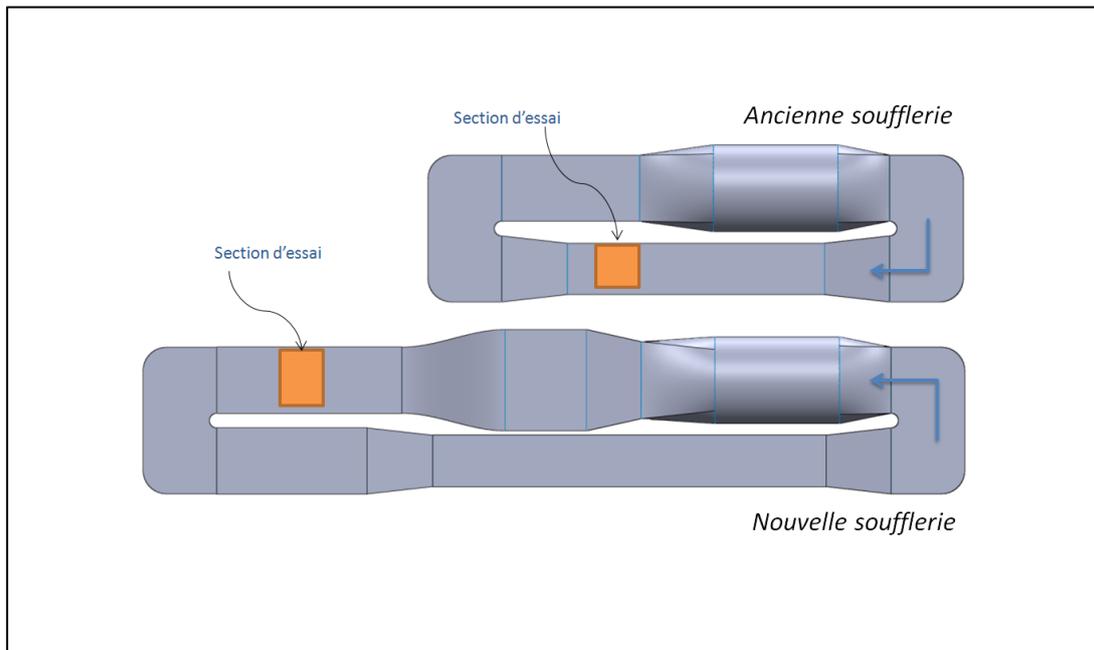
### 2.1 Présentation de la soufflerie de l'ENP

La soufflerie disponible à l'école nationale polytechnique d'Alger est une soufflerie à basse vitesse à circuit fermé (figure 2-1). C'est une soufflerie à retour unique et dispose d'une section d'essais fermée de dimensions  $900 \times 700\text{mm}$ . La vitesse maximale atteinte dans la section de test est de  $15.74\text{m/s}$  ( $Ma=0.046$ ), il s'agit donc d'une soufflerie subsonique. La soufflerie est mise à disposition pour des essais dans un cadre pédagogique tel que les travaux pratiques, les projets de fin d'étude, les thèses de doctorat...etc.



Figure 2-1 Soufflerie de l'ENP.

La soufflerie a été récemment reconstruite à partir d'une soufflerie ancienne (figure 2-2) pour avoir une section de test plus importante ( $700 \times 500\text{mm}$  pour l'ancienne) et installer une chambre de tranquillisation contenant un nid d'abeilles [11][12].



**Figure 2-2 Comparaison entre l'ancienne et la nouvelle soufflerie.**

L'air à l'intérieur de la soufflerie est entraîné par un ventilateur monter sur un moteur électrique 380V comme le montre la figure 2-3. La variation de la vitesse de rotation est assurée par un variateur de fréquences de 50Hz.



**Figure 2-3 Moteur électrique et ventilateur de la soufflerie.**

Les fonctions des composants de la soufflerie indiqués dans la figure 2-4 sont résumées dans le tableau 4-1.

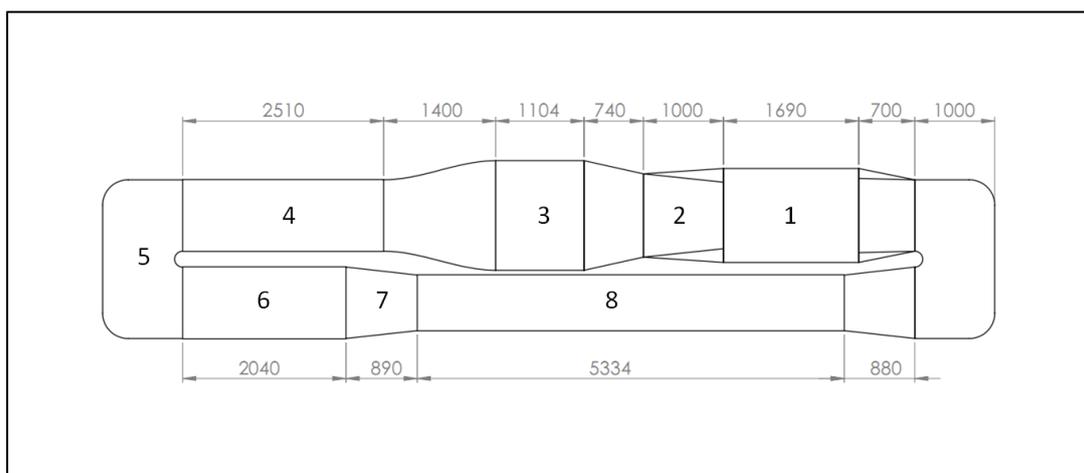


Figure 2-4 Numérotation des composants de la soufflerie.

Tableau 2-1 Fonctions des différents composants de la soufflerie.

Numéro du composant	Nom du composant	Fonction
1	Cylindre du moteur	Maintenir le fluide en écoulement à l'intérieur de la soufflerie et compenser les pertes et dissipations
2	Duct	Minimiser les pertes lors du passage de la section circulaire du cylindre du moteur à la section rectangulaire dans le reste de la soufflerie
3	Chambre de tranquillisation	Récupérer une partie l'énergie de pression en énergie cinétique et supprimer les non-uniformité dans l'écoulement par la présence d'un nid d'abeilles.
4	Section d'essais	Partie dans la quelle on introduit le modèle à étudier. La conception d'une soufflerie se base autour de cette partie pour avoir la meilleure qualité d'écoulement.
5	Conduite de changement de direction	Incontournable pour assurer le retour du fluide et fermer le circuit. Cause 50% des pertes de pressions totales dont 36% se produisant dans le premier coin [4].
6	Conduite de retour	Conduite ajoutée lors de l'extension de l'ancienne soufflerie pour assurer la fermeture du circuit
7	Tuyère / diffuseur	Tuyère: Accélérer le fluide et réduire les non-uniformités Diffuseur: récupérer la pression statique pour améliorer l'efficacité
8	Ancienne section d'essais	Récupéré de l'ancienne soufflerie pour fermer le circuit

## 2.2 Instruments et appareillage utilisés et méthodologie

### 2.2.1 Tube de Pitot

Le tube de Pitot (figure 2-5) est un instrument de mesure de vitesse hydraulique. Il est basé sur la différence de pression statique et dynamique dans l'écoulement.

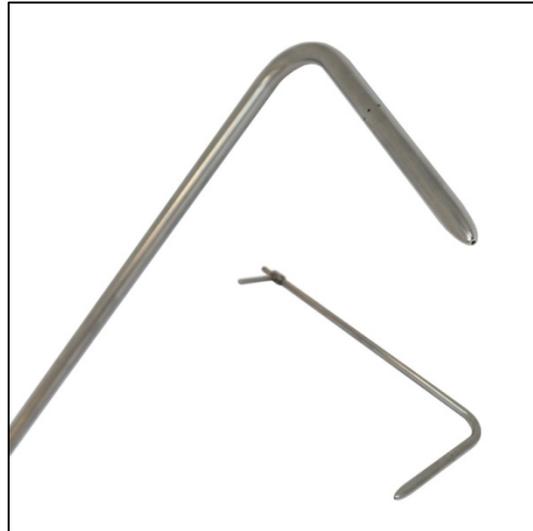


Figure 2-5 Tube de Pitot.

Il s'agit d'un tube métallique en acier inoxydable comportant, comme le montre la figure 2-6, deux prises: Une prise ouverte parallèlement à l'écoulement pour mesurer la pression dynamique, et une prise ouverte perpendiculairement à l'écoulement pour mesurer la pression statique.

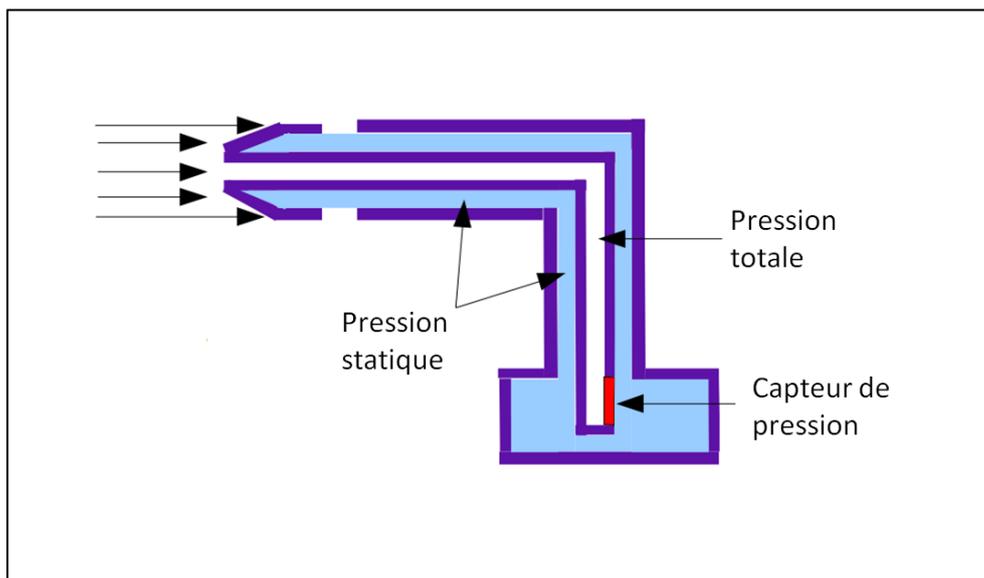


Figure 2-6 Prises de pression dans le tube de Pitot.

Les deux prises sont reliées à un transducteur de pression qui convertit la différence de pression en un signal analogique. La conversion est assurée par une jauge de déformation intégré au diaphragme et qui est reliée à un pont de Wheatstone. La pression appliquée au transducteur produit une déflexion du diaphragme qui engendre des contraintes dans la jauge qui va causer un changement dans la résistance électrique.

Une fois la différence de pression acquise, la vitesse est calculé par la loi de Bernoulli:

$$P_{tot} = P_{stat} + \frac{1}{2}\rho u^2 \quad (2.1)$$

$$\rightarrow u = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (2.2)$$

L'anémomètre à tube de Pitot disponible est de marque *KIMO MP200* qui peut mesurer des vitesses allant de 2 à 100m/s avec une précision de  $\pm 0.2\text{m/s}$  (figure 2-7).



Figure 2-7 Anémomètre KIMO MP200.

### 2.2.2 Anémomètre à fil chaud

L'anémomètre à fil chaud est un instrument de mesure thermique utilisé dans la mesure de vitesse dans les écoulements de fluides.

Le principe de fonctionnement des anémomètres à fil chaud est de chauffer, par passage de courant électrique, un fil dont la résistance dépend de la température. Cet élément est ensuite placé dans un écoulement de fluide, est refroidi par effet de convection. Le taux de refroidissement est lié à la vitesse de l'écoulement.

Le fil fait 5  $\mu\text{m}$  de diamètre et environ 1.2mm de longueur. Il est généralement fabriqué par du tungstène ou du platine (figure 2-10).

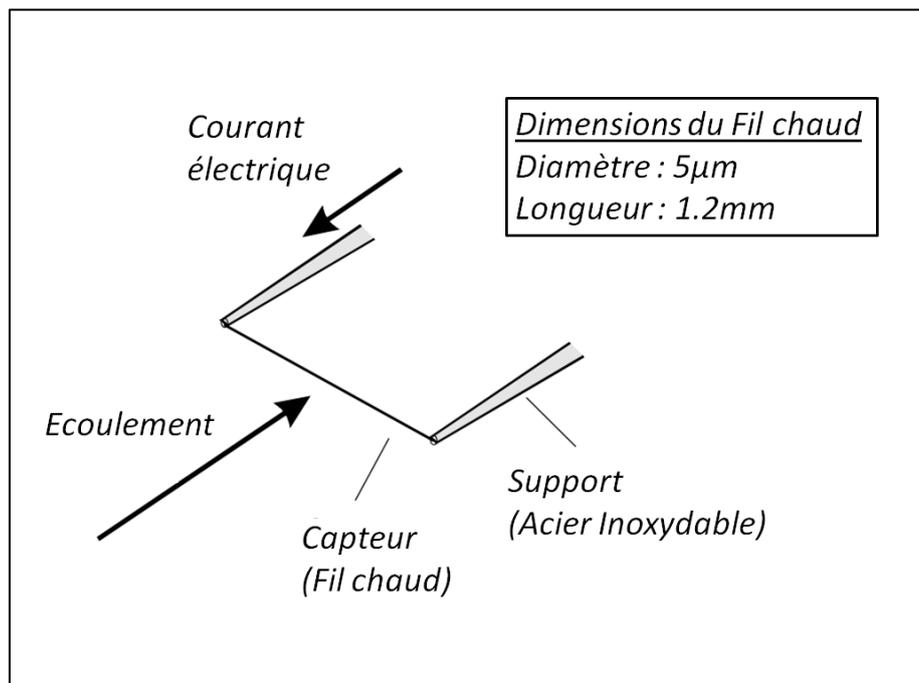


Figure 2-8 Fonctionnement du fil chaud.

Ce type d'instrument est caractérisé par une excellente résolution spatiale et temporelle, ce qui lui rend adéquat pour les mesures des phénomènes qui varient rapidement tels que la turbulence.

Les sondes disposent, comme le montre la figure 2-11, de deux types de capteurs, les fils miniatures et les fils enrobés de gaine d'or à leurs extrémités. Les deux types peuvent être réparés, cependant les fils miniature présente une meilleur fréquence de réponse alors que les fils enrobé peuvent être utilisé dans des écoulement avec une intensité de turbulence supérieur[13].

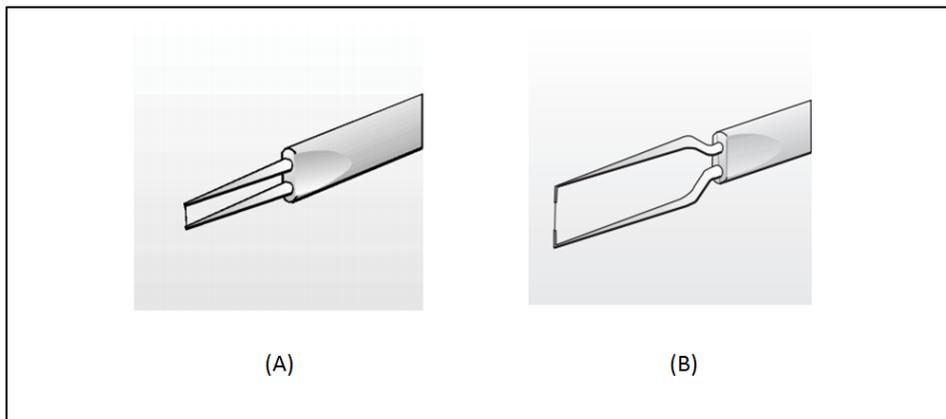


Figure 2-9 Types de sondes

Les anémomètre a fil chaud peuvent être employés en deux modes: à température constante ou à courant constant. Dans le cas du mode à courant constant, le fil, alimenté par un courant d'amplitude constante, est placé dans l'écoulement. Le refroidissement du fil implique un changement de la résistance. C'est ce changement qui est proportionnel à la vitesse contrairement au mode à température constante, où le fil est chauffé par effet de Joule à une température déterminée qui est sensée rester constant. Lorsque le fluide s'écoule, le fil se refroidit le courant sera augmenté pour garder la température imposée. C'est cette énergie supplémentaire qui est dans ce cas proportionnelle à la vitesse de l'écoulement.

Une chaîne de mesure typique d'un anémomètre à fil chaud est représentée dans la figure 2-13.

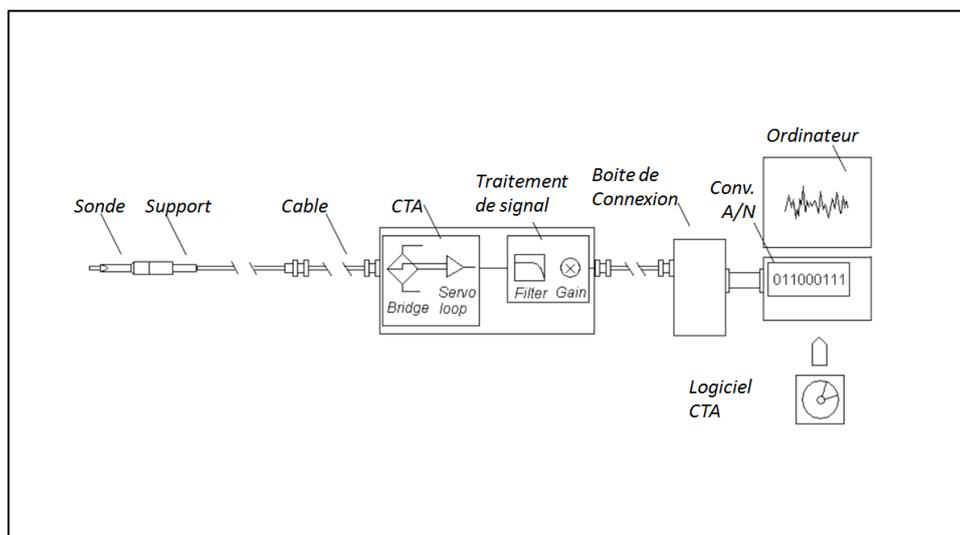


Figure 2-10 Chaîne de mesure d'un anémomètre à fil chaud.

## 2.3 Méthodologie

### 2.3.1 Tube de Pitot

Pour effectuer les tests, la vitre contenue dans la porte de la section d'essais à été remplacée par une autre en plexiglas afin de pouvoir percer des trous pour introduire le tube de Pitot à l'intérieur. Les vis qui tenaient la vitre d'origine en place ont été dévissées pour permettre de libérer la plaque et l'utiliser comme référence pour découper la nouvelle en plexiglas. Les dimensions de la vitre sont 640mm de largeur et 870mm de longueur.

Neuf trous de diamètre de 10mm ont été percés dans la vitre en plexiglas, comme l'indique la figure 2-8, pour introduire le tube de Pitot dans différents emplacements de la section d'essais. Le perçage s'est effectué de manière progressive à l'aide d'une presseuse en augmentant à chaque passe le diamètre du foret.

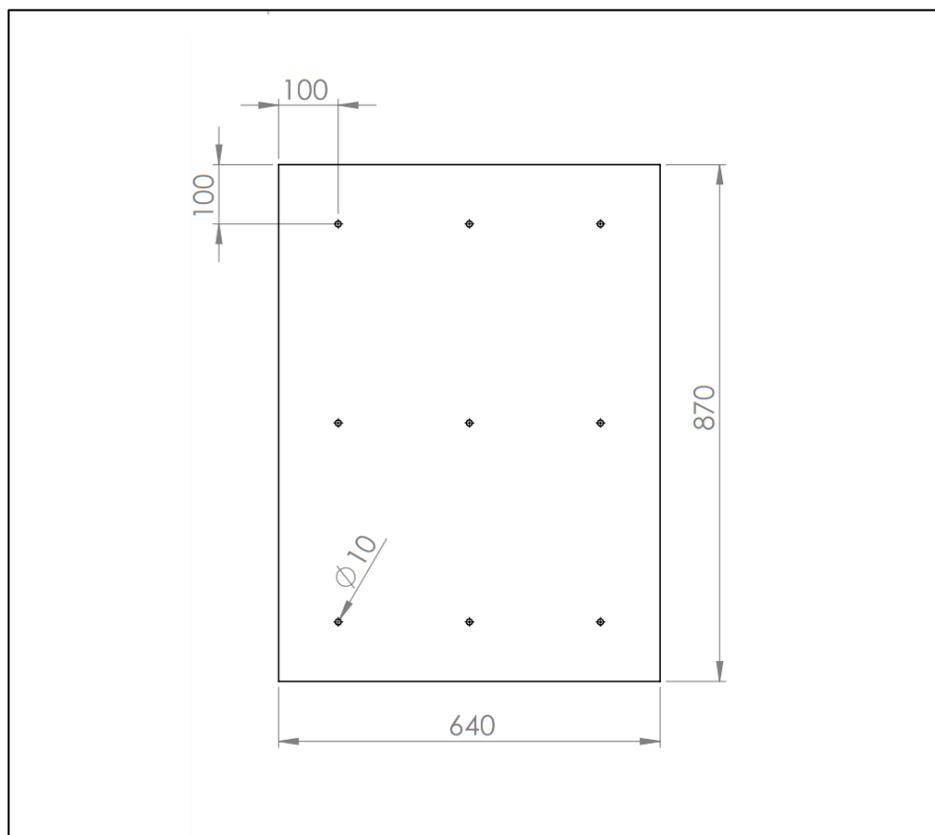


Figure 2-11 Emplacement des trous de la plaque en plexiglas.

Les trous pour accueillir les vis de fixation sur la porte ont également été percés sur la circonférence de la plaque, pour être enfin assemblé à la porte de la section d'essais.

Le tube de Pitot relié à l'anémomètre (alimenté de 4 piles de 1.5V) qui est placé sur un support rigide muni d'une glissière lui permettant de se déplacer le long de la section d'essais.

La restriction par rapport à la longueur du tube de Pitot ne permet pas de couvrir tous les points du domaine. On se contente de mesurer les points illustrer dans la figure 2-9. Vu que la soufflerie présente une géométrie symétrique par rapport à sont plan milieu latérale, on peut supposer que l'écoulement est symétrique et déduire le reste des points.

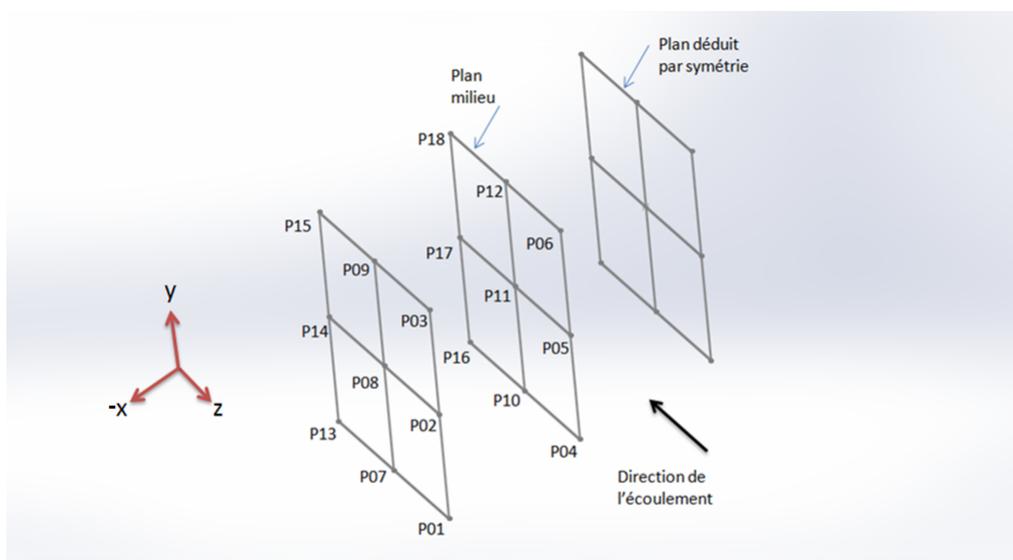


Figure 2-12 Emplacement des points de mesure par tube de Pitot.

Les coordonnées des points de mesure par rapport à un repère lié au coin inférieur gauche de la porte de la section d'essais sont résumé dans le tableau 2-2 :

Tableau 2-2 Coordonnées des points de mesure par tube de Pitot.

Point	x (cm)	y(cm)	z (cm)
P01	17.5	10	74
P02	17.5	43.4	74
P03	17.5	77	74
P04	35	10	74
P05	35	43.4	74
P06	35	77	74
P07	17.5	10	42
P08	17.5	43.4	42
P09	17.5	77	42
P10	35	10	42
P11	35	43.4	42
P12	35	77	42
P13	17.5	10	10
P14	17.5	43.4	10
P15	17.5	77	10
P16	35	10	10
P17	35	43.4	10
P18	35	77	10

En faisant varier la fréquence de rotation du moteur de 15 à 45Hz par un pas de 5Hz, on mesure, trois fois, au niveau de chaque point la vitesse moyenne pour une durée d'une minute par chaque mesure.

## 2.3.2 Anémomètre à fil chaud

### 2.3.2.1 Installation de l'appareillage:

Avant de commencer l'installation, la soufflerie est mise en marche quelques minutes pour évacuer la poussière qui aurait pu se déposer.

1. Dans un premier temps, percer à l'aide d'une perceuse deux trous d'au moins 10mm de diamètre sur la paroi supérieure de la section d'essais, comme le montre la figure 2-13.

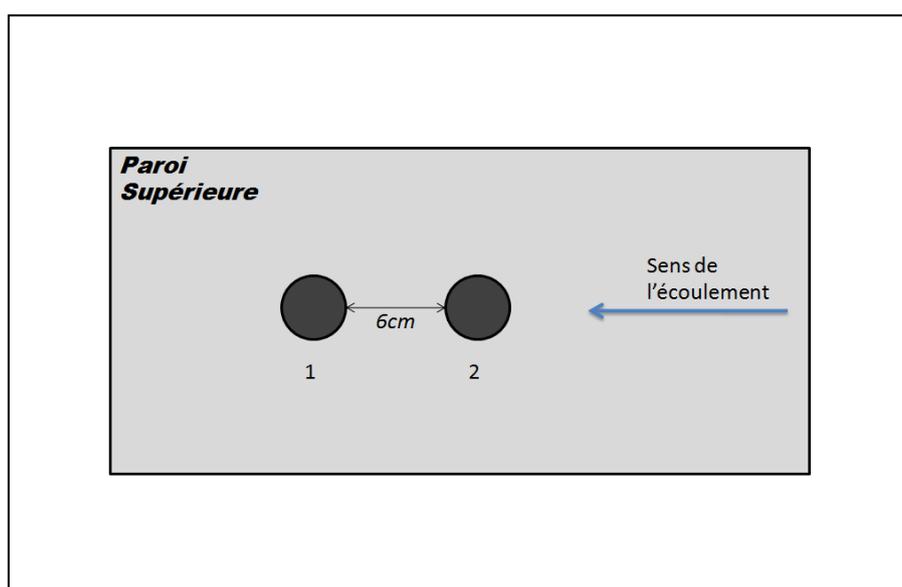


Figure 2-13 Disposition des trous pour la mesure par fil chaud.

2. Poser les deux traverses de part et d'autre des trous pour accueillir les supports de fixation.
3. Faire passer le fil en cuivre du support de la sonde en forme de L et raccorder le support en L au cylindre métallique via son extrémité filetée.
4. Insérer le tube en L, maintenant relié au cylindre, dans le trou numéro 1 ensuite dans l'un des supports de fixation.
5. Insérer la pince de fixation dans le deuxième support et poser l'ensemble sur les traverses.
6. Insérer la sonde de calibration dans le trou numéro 2 et la maintenir en place par la pince de fixation.
7. Fixer les supports sur les traverses en utilisant les attaches.

8. Régler la sonde du fil chaud à la hauteur désirée en dévissant/vissant la vis de serrage du support.
9. Révéler les capteurs de la sonde de calibration via la vis de serrage du cache. Régler ensuite, en utilisant la vis de serrage du support respective, la sonde de calibration de sorte que l'extrémité de cette dernière se situe à une distance de 4 mm en haut de l'extrémité de celle du fil chaud.
10. S'assurer que le plan formé par les deux axes des capteurs de la sonde de calibration sont normaux à la direction de l'écoulement.
11. Relier l'extrémité du fil en cuivre à l'adaptateur BNC et y brancher le câble BNC.
12. Recouvrir les parties métalliques de l'adaptateur et du câble BNC par du Charteton pour éviter les effets de parasites ou de radiofréquences.
13. Brancher l'autre extrémité du câble BNC à l'entrée 1 de l'anémomètre "*Probe Input 1*".
14. Relier la sortie 1 de l'anémomètre à la chaîne 1 de l'unité d'acquisition. (Il est important de choisir les mêmes numéros d'entrée et de sortie dans ce cas).
15. Relier la sonde de calibration à l'entrée "Probe" de l'unité de calibration via le câble respective (Distingué par le reste des câbles par la couleur grise) en respectant les repères d'alignement (Points en rouge).
16. Relier la sortie "Flow out" de l'unité de calibration à une des chaînes de l'unité d'acquisition.
17. Relier l'unité de calibration au PC via le câble USB.
18. Enfin, brancher la sonde du fil chaud dans le support en faisant en sorte que le plan formé par les supports du fil soit horizontal. (le fil chaud est un capteur d'une extrême délicatesse, en aucun cas doit il rentrer en contact avec n'importe quel objet. Manipuler avec prudence)

L'installation du matériel ainsi que le branchement sont illustrés dans les figures 2-14 et 2-15.



**Figure 2-14** Installation des support du fil chaud.



**Figure 2-15** Sonde du fil chaud (à gauche) et sonde de calibration (à droite).

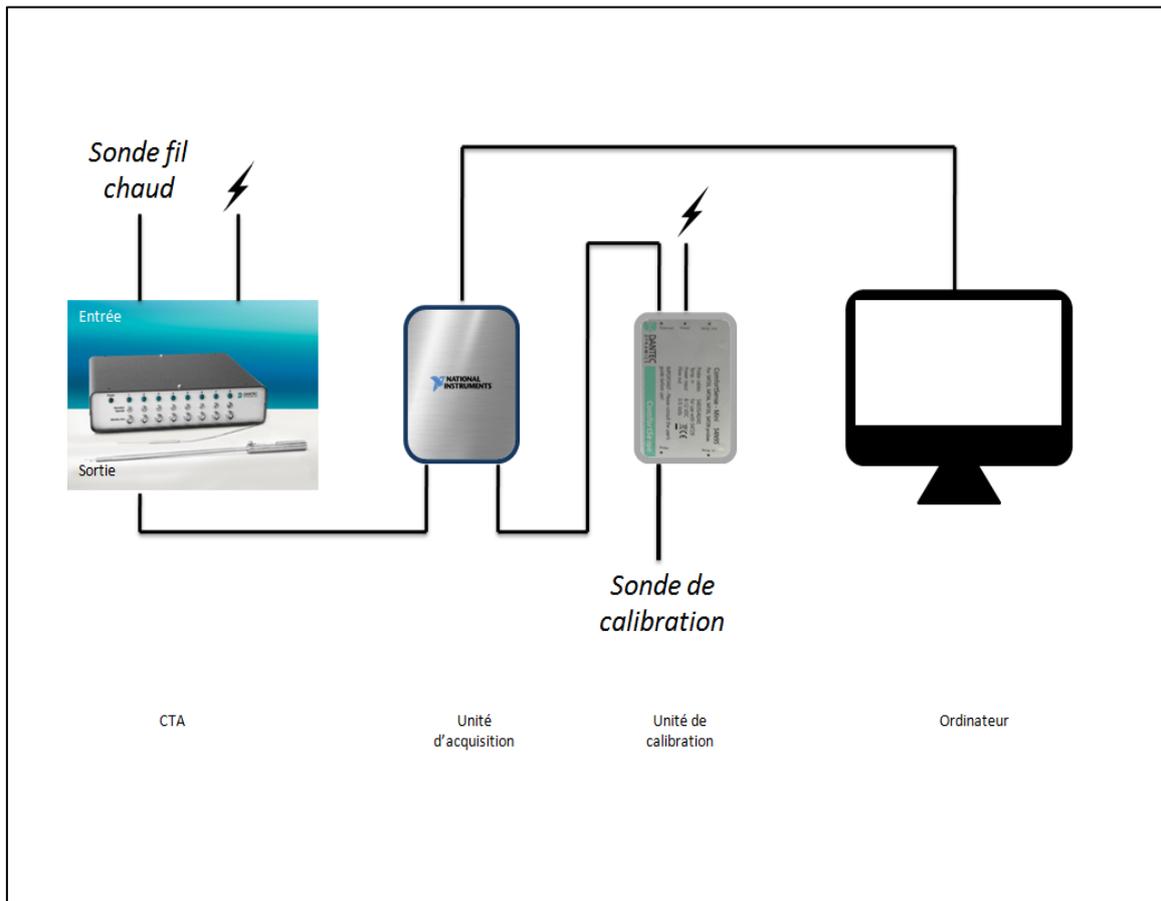


Figure 2-16 Branchement de l'anémomètre à fil chaud.

### 2.3.2.2 Configuration du logiciel Streamware

Après avoir installé le logiciel Streamware et le pilote NI, brancher le *dongle* à une des prises USB du PC car sans, le logiciel StreamWare ne peut démarrer (l'USB joue le rôle de la licence d'utilisation).

1. Ouvrir le logiciel StreamWare.
2. Création d'une base de données:
  - 2.1. Appuyer sur "New Database" depuis le menu "FILE".
  - 2.2. Indiquer la destination dans le répertoire et le nom de la base de données dans la fenêtre qui s'ouvre (figure 2-17).

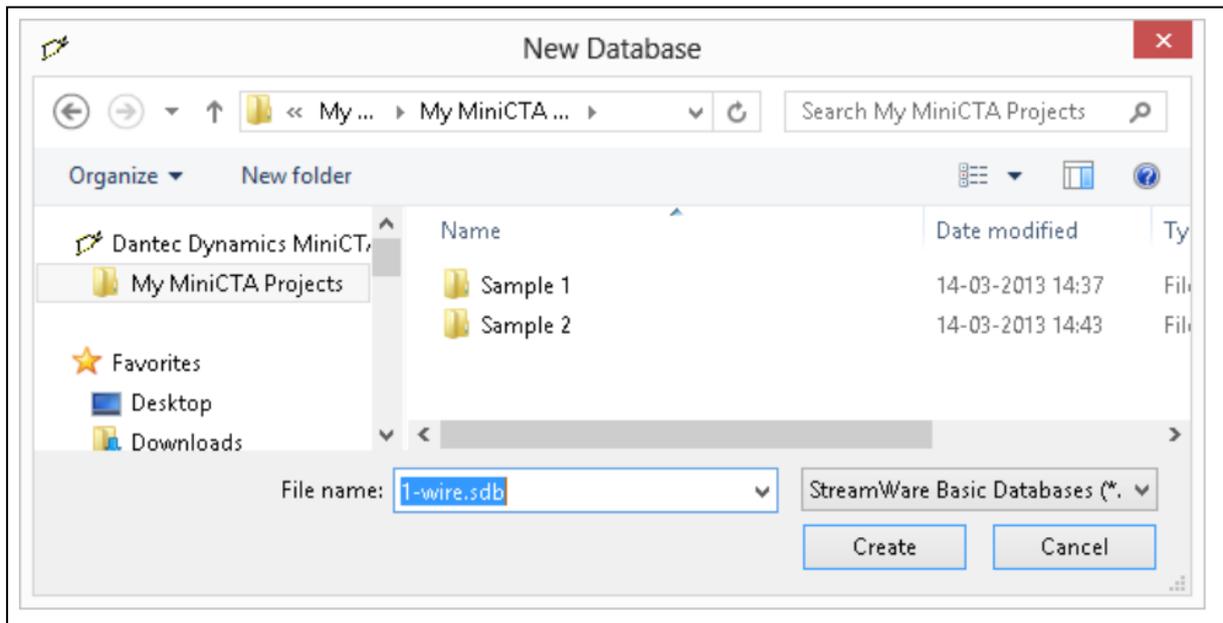


Figure 2-17 Création d'une base de données.

### 3. Création d'un projet:

3.1. Une fenêtre apparaît pour créer un nouveau projet (figure 2-18).

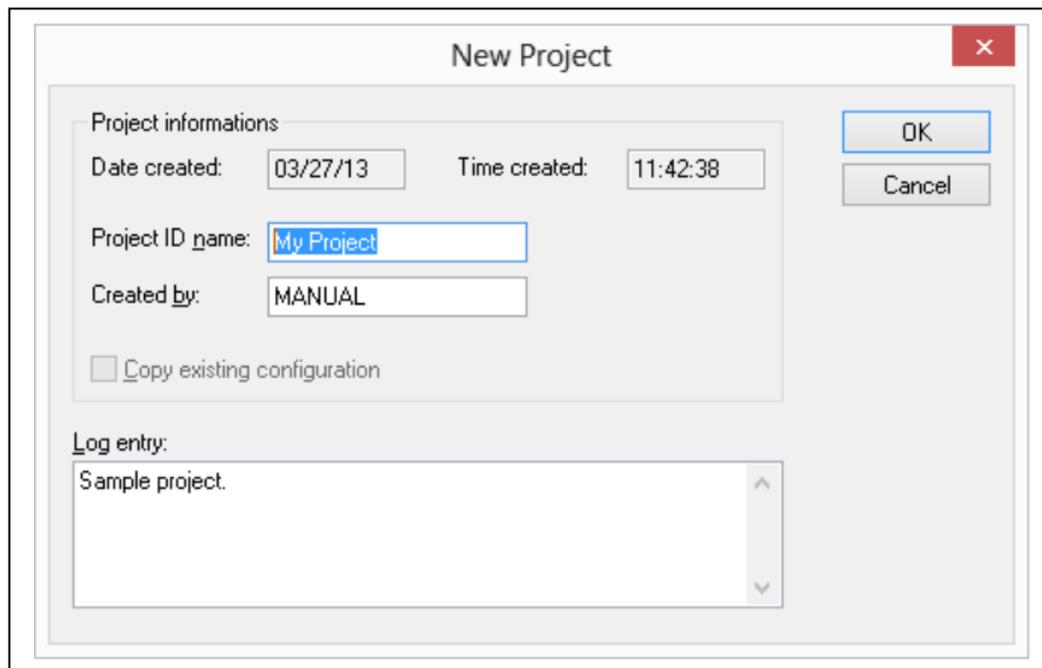


Figure 2-18 Création d'un nouveau projet.

3.2. Indiquer le nom du projet .

3.3. Cliquer sur OK.

4. Définition des instruments:

4.1. Une fenêtre s'affiche pour choisir l'appareil de conversion de signal analogique et numérique (figure 2-19).

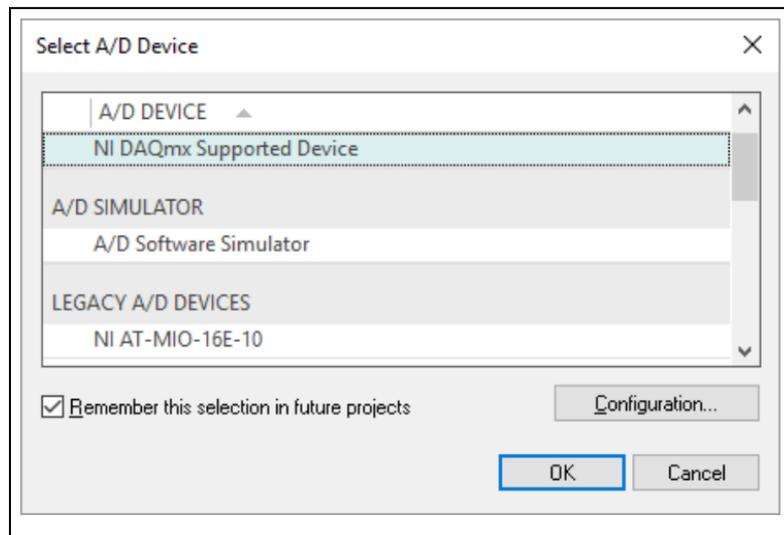


Figure 2-19 Choix de l'appareil de conversion.

4.2. Dans notre cas, il s'agit du NI DAQmx Supported Device.

4.3. Le sélectionner et appuyer sur OK.

On remarque qu'une chaîne d'appareils a été créée (figure 2-20).

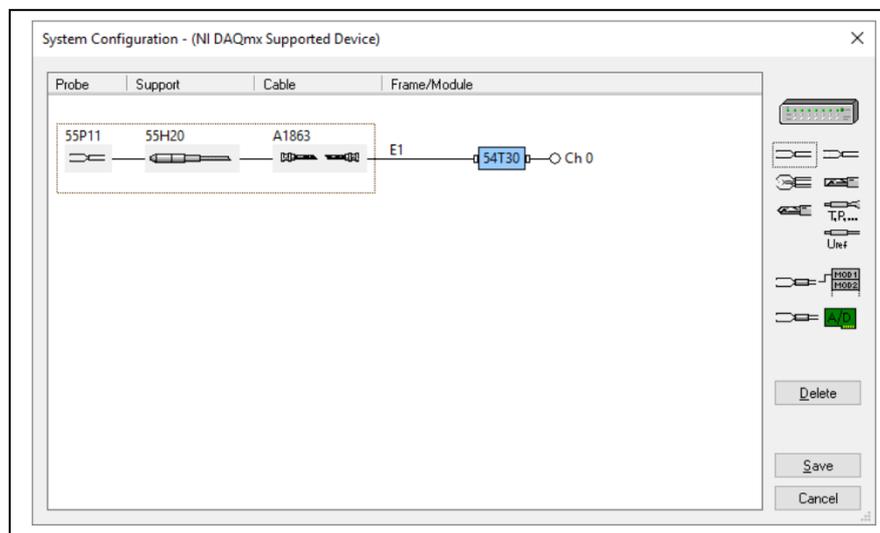


Figure 2-20 Configuration de la chaîne d'instruments.

5. Configuration du système:

5.1. Configuration du CTA:

5.1.1. Sélectionner l'icône MultiChannel CTA Frame à partir des icônes à droite de la fenêtre.

5.1.2. Dans notre cas, il s'agit du 54N82 (inscrit sur le boîtier de l'anémomètre).

5.1.3. Le sélectionner et cliquer sur OK.

## 5.2. Configuration de la sonde du fil chaud:

5.2.1. Sélectionner le type de sonde à partir des icônes à droite de la fenêtre. (Dans notre cas, il s'agit d'une sonde à une dimension donc clique sur l'icône 1D).

5.2.2. Introduire les données de la sonde. (Dans notre cas, il s'agit de la sonde 55P01 (inscrite sur le boîtier de la sonde) avec le support 55H22 de 90° (inscrite sur le boîtier de support) avec une longueur de 4m).

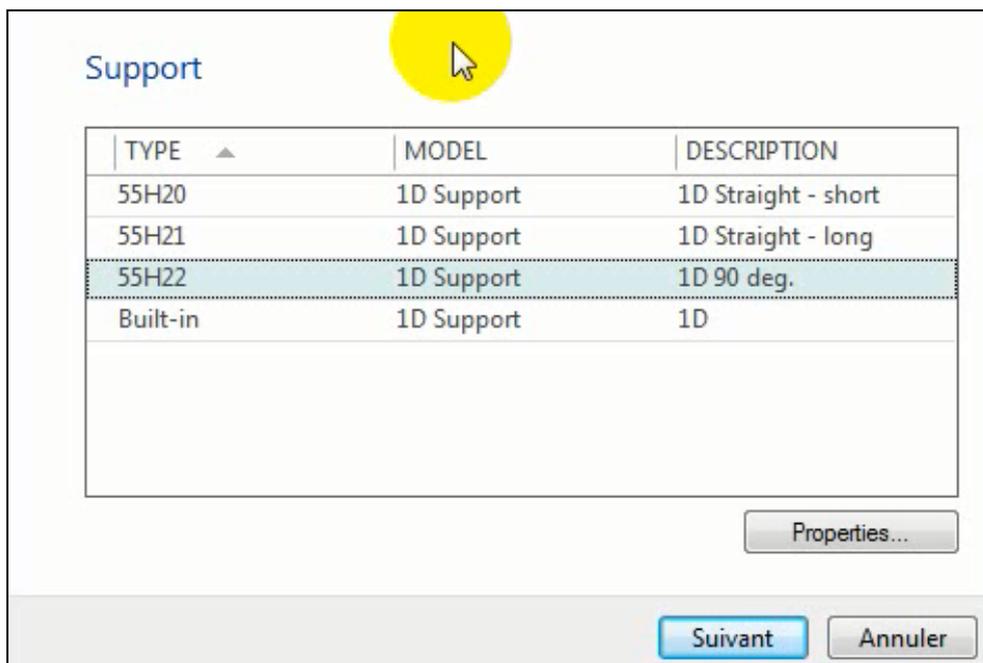


Figure 2-21 Sélection des paramètres de la sonde du fil chaud.

5.2.3. Cliquer sur OK

## 5.3. Choix de la sonde de référence:

5.3.1. Cliquer sur l'icône "Reference Probes" (Dans notre cas il s'agit de la référence T29).

5.3.2. Appuyer sur OK.

**Remarque :** Si la référence de la sonde ne s'affiche pas, changer la destination de la bibliothèque en allant à File -> Libraries -> Libraries location et copier les fichiers de calibration à partir du CD fourni.

## 5.4. Désignation du canal de la carte d'acquisition:

5.4.1. Appuyer sur l'icône "Assign A/D Channels".

5.4.2. Choisir l'entrée 3 (Il est important de noter que le compte commence de la chaîne 0 donc le 4ème canal à l'extérieur de la carte correspond au canal numéro 3 dans le logiciel)

5.4.3. Appuyer sur OK.

5.5. Sauvegarder la configuration en appuyant sur "Save".

6. Configuration de l'anémomètre:

6.1. Appuyer sur "Hardware Configuration" à droite de la fenêtre.

6.2. Indiquer la résistance de la sonde du fil chaud Indiqué sur le boîtier de protection de la sonde (Dans notre cas il s'agit de 3.45 Ohm).

On remarque un schémas qui se dessine en rouge (figure 2-22) des interrupteurs DIP. Ce schémas sera la référence pour la prochaine étape.

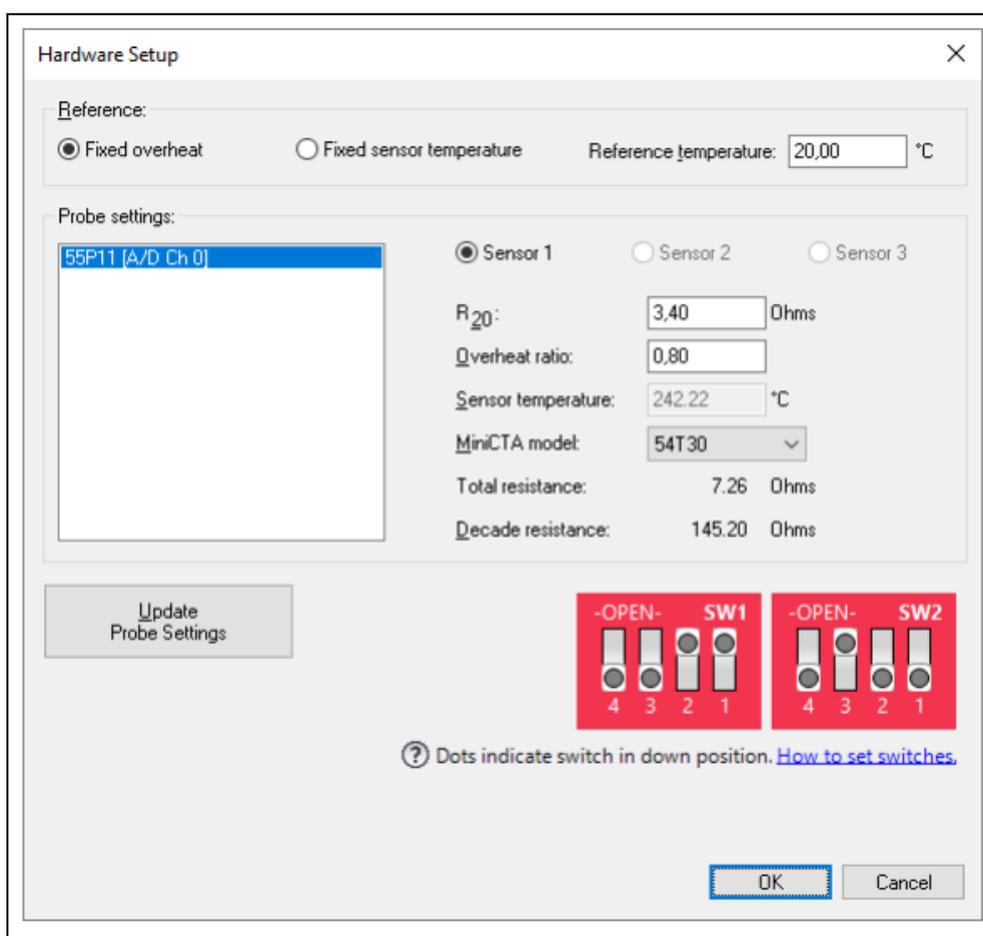


Figure 2-22 Schémas des interrupteurs DIP.

6.3. Ouvrir le boîtier de l'amplificateur en devisant les vis à l'aide d'un tournevis pour révéler les interrupteurs de configuration (figure 2-23).

- 6.4. Configurer manuellement les interrupteur DIP (figure 2-25) selon le schémas indiqué sur l'écran (La désignation des groupes d'interrupteur est indiquée sur l'arrière du couverct du CTA).
- 6.5. Refermer le boitier du CTA.
- 6.6. Appuyer sur OK
- 6.7. Brancher les câbles d'alimentation du CTA et de l'unité de calibration.
- 6.8. Mettre le CTA en marche en remontant le bouton "Stand by".

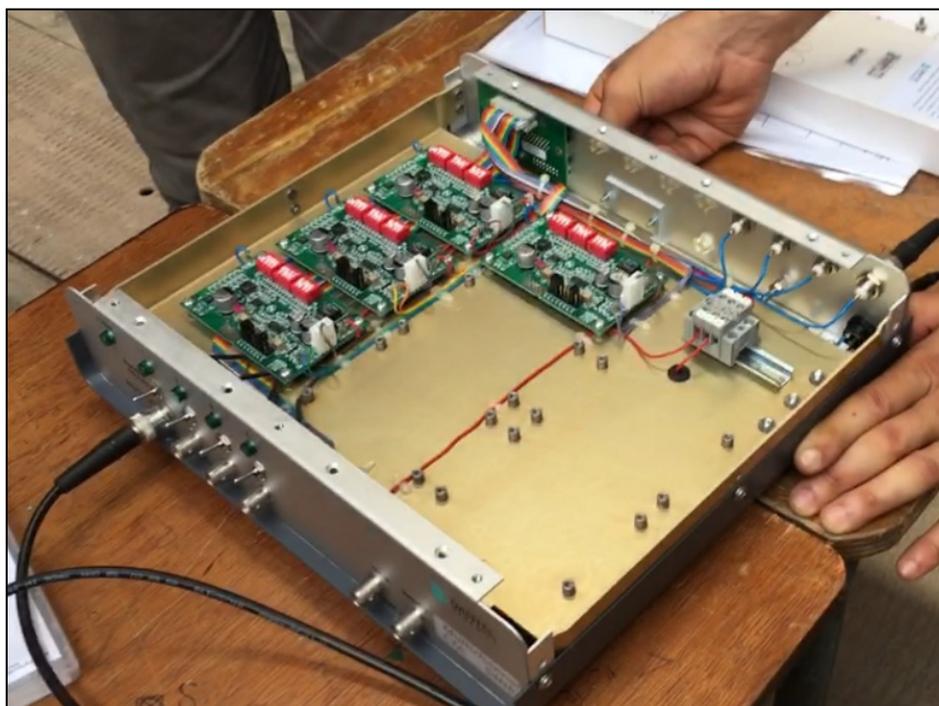


Figure 2-23 Ouverture du CTA.

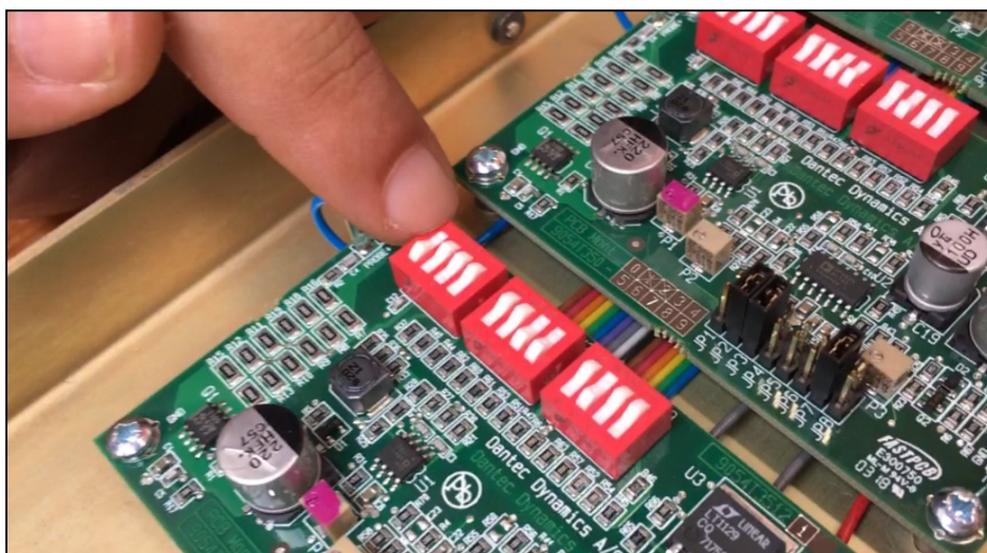


Figure 2-24 Configuration des interrupteurs DIP.

7. Calibration:

7.1. Appuyer sur "Velocity Calibration" dans le menu "Calibration".

7.2. Une fenêtre de dialogue s'ouvre (figure 2-25). Choisir la vitesse maximale et minimale ainsi que le nombre de points.

7.3. Cliquer sur OK.

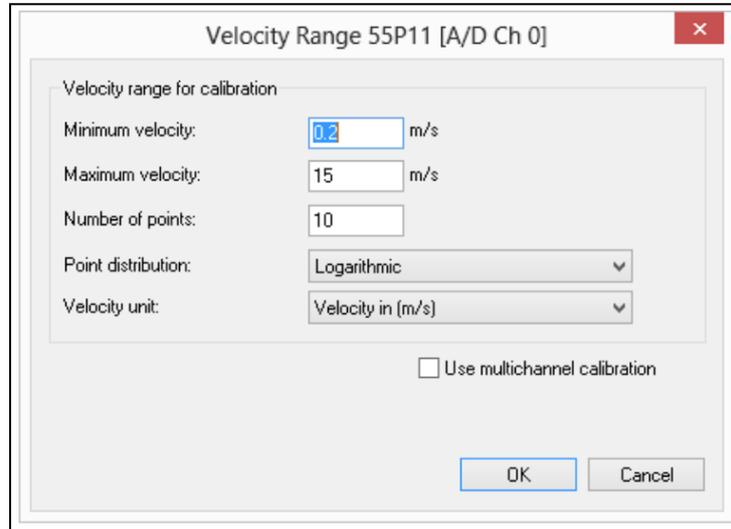


Figure 2-25 Sélection des plages de vitesse pour la calibration.

On remarque qu'une fenêtre contenant un graphe qui relie la vitesse à la tension s'ouvre (figure 2-26).

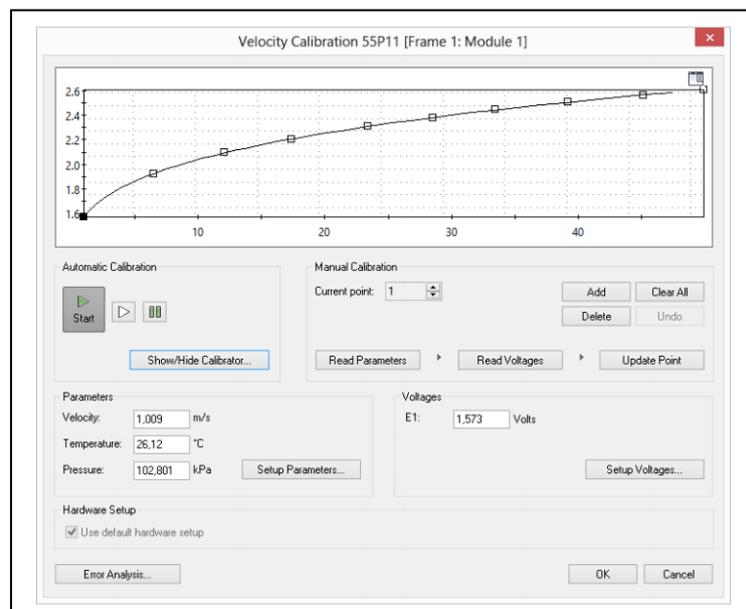


Figure 2-26 Menu de calibration de la vitesse

- 7.4. Cliquer sur "Point 1" et créer le champ de vitesse affiché. (Si on obtient une autre valeur que celle affichée on peut l'introduire manuellement).
- 7.5. Cliquer sur "Read Parameters" suivi de "Read Voltages" puis "Update Point".
- 7.6. Les données sont maintenant enregistrées. Changer le point et ré effectuer les deux étapes précédentes jusqu'à la fin des points.
- 7.7. Cliquer sur OK. Un tableau récapitulatif s'affiche.
- 7.8. Cliquer sur "Menu Controle" en haut à gauche du tableau.
- 7.9. Appuyer sur "Save" pour enregistrer.
8. Vérification des performances:
  - 8.1. Appuyer sur "Run Online" à partir du menu "Run and Acquire".
  - 8.2. Sélectionner "Velovity from Calibration" depuis "Output Data" (figure 2-27).
  - 8.3. Appuyer sur le bouton "Start"

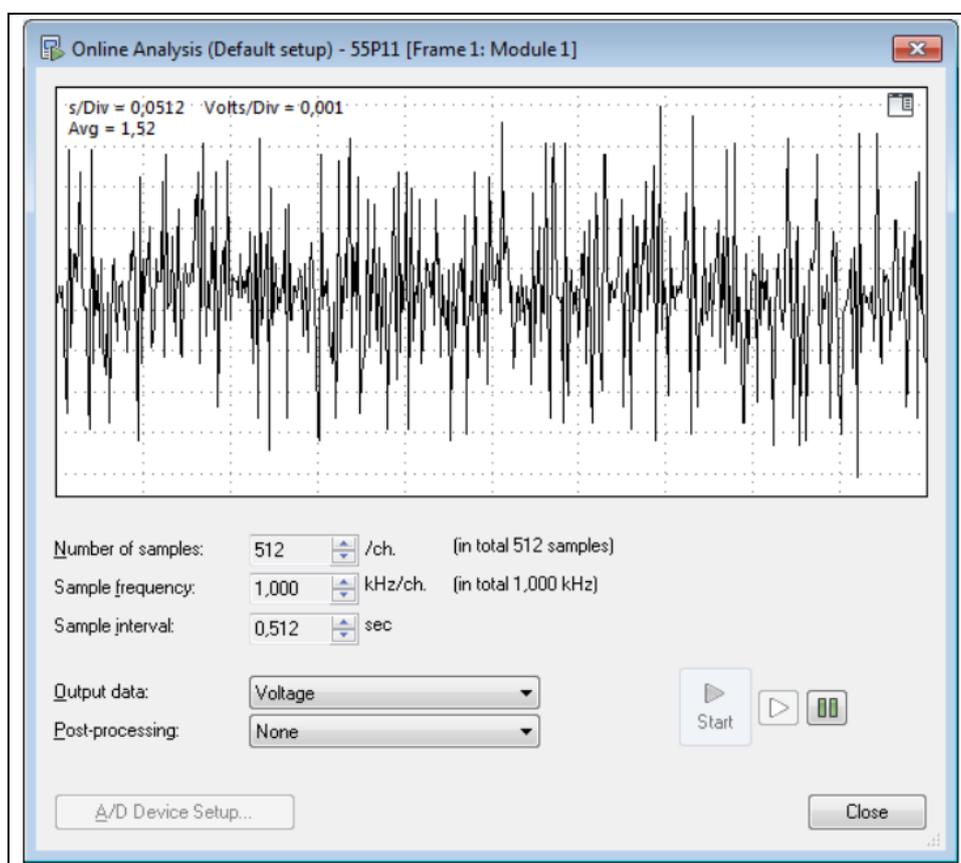


Figure 2-27 Vérification des performances.

Le graphe de vitesse s'affiche maintenant en temps réel jusqu'à ce qu'on appuie sur le bouton "Pause" ou on ferme la fenêtre.

9. Effectuation des mesures:
  - 9.1. Appuyer sur "Run Mesurments" à partir du menu "Run and Acquire".

9.2. Indiquer le nom de l'essai et appuyer sur "Run".

9.3. L'essai est effectué lorsque le champ "Status" indique "Ready".

On remarque que l'essai est enregistré dans la fenêtre "Database".

10. Visualisation des résultats:

10.1. Double-cliquer sur l'essai en question puis appuyer sur "Load" pour afficher le graphe de vitesse ainsi que le tableau des valeurs mesurées à chaque instant (1,2 s avec un pas de 0.001s)

10.2. Cliquer à l'aide du bouton droit de la souris sur l'essai puis choisir "Reduced Data" pour obtenir la vitesse moyenne ainsi que la Racine de l'erreur quadratique moyenne (figure 2-28)

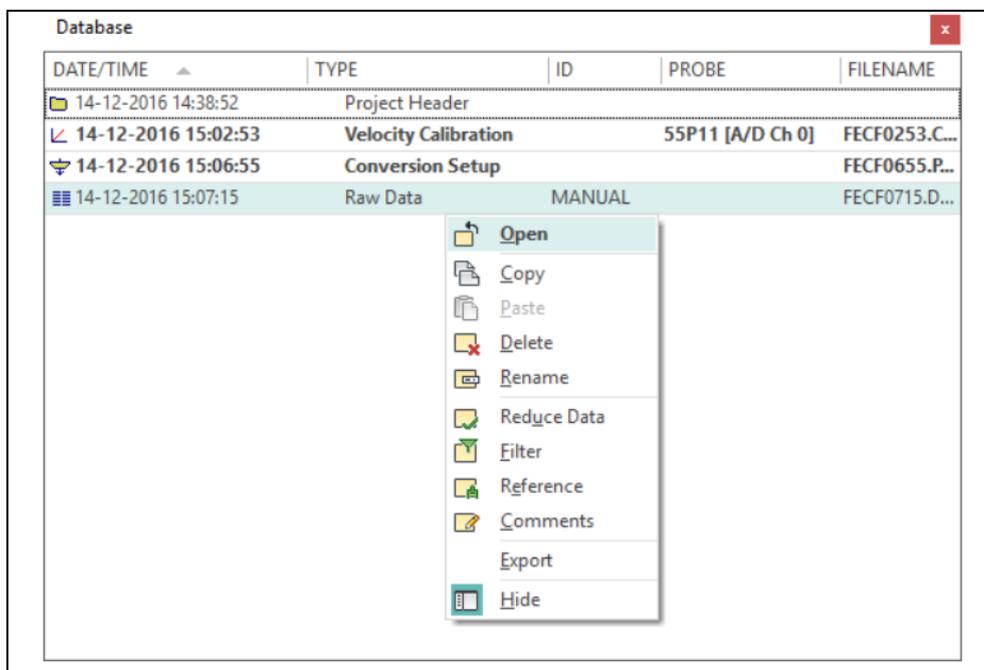


Figure 2-28 Insertion des données réduites.

L'accès aux données réduites nous permettra de calculer l'intensité de turbulence et elle est définie par le rapport entre la l'erreur quadratique moyenne  $u'$  et la vitesse moyenne  $U_{moy}$ , durant une période de temps  $I = \frac{u'}{U_{moy}}$ .

Les essais ont été effectués en 3 emplacements P1, P2 et P3 dans le milieu de la section d'essais qui correspondent respectivement à une distance de 15, 39 et 49cm à partir de la paroi supérieure de la section d'essais.

Pour chacun des emplacements, la fréquence de rotation du moteur électrique a été varié de 15 à 45Hz avec un pas de 5Hz.

## Chapitre 3 : Étude numérique

Dans ce chapitre nous présenterons les étapes de la simulation numérique de l'écoulement à travers la soufflerie. Dans un premier temps nous expliquerons la création du modèle géométrique à l'aide du logiciel de CAO Solidworks, ensuite nous aborderons la préparation du domaine du fluide dans le logiciel Ansys SpaceClaim. La génération du maillage sera décrite avant de poursuivre avec la définition des conditions d'écoulement et la modélisation du nid d'abeilles par une zone poreuse.

### 3.1 Introduction

La CFD (Computational Fluid Dynamics i.e. mécanique des fluides numérique) est la branche de la mécanique des fluides qui consiste à étudier les mouvements d'un fluide, ou leurs effets, en utilisant des méthodes numériques. Elle est basée sur la conversion des équations qui gouvernent les fluides en systèmes algébriques pour ensuite les résoudre numériquement soit par des méthodes directes ou bien des méthodes itératives.

L'étude numérique de la soufflerie de l'ENP est basée sur la recréation de sa géométrie en utilisant le logiciel Solidworks. Une fois le modèle géométrique terminé, ce dernier est importé au logiciel Ansys où un maillage du domaine sera effectué pour ensuite fixer les conditions de l'écoulement avant de lancer les calculs.

### 3.2 Modèle géométrique

La conception du modèle géométrique est basée sur le modèle réel de la soufflerie. Dans un premier temps des mesures des dimensions de la soufflerie ont été effectuées sur place, ensuite en utilisant le logiciel de conception assistée par ordinateur SolidWorks, on réalise le modèle géométrique.

Si on se place dans un point de vue conception, il existe 3 types de composants dans la soufflerie: Les composants à section constante, les composants à section non constante et les composants de retour 180°.

Pour les composants à section constante, la conception se fait en traçant la section transversale dans une esquisse et puis en utilisant la fonction "Surface extrudé" pour l'extruder à la longueur convenable (figure 3-1).

Pour les composants à section non constante, l'approche est de créer deux contours, dans deux plans parallèles se trouvant à une distance équivalente à la longueur du composant et dont la droite reliant les centres des contours est normale aux deux plans puis relier les deux contour en utilisant l'option "Surface lissée" (figure 3-2).

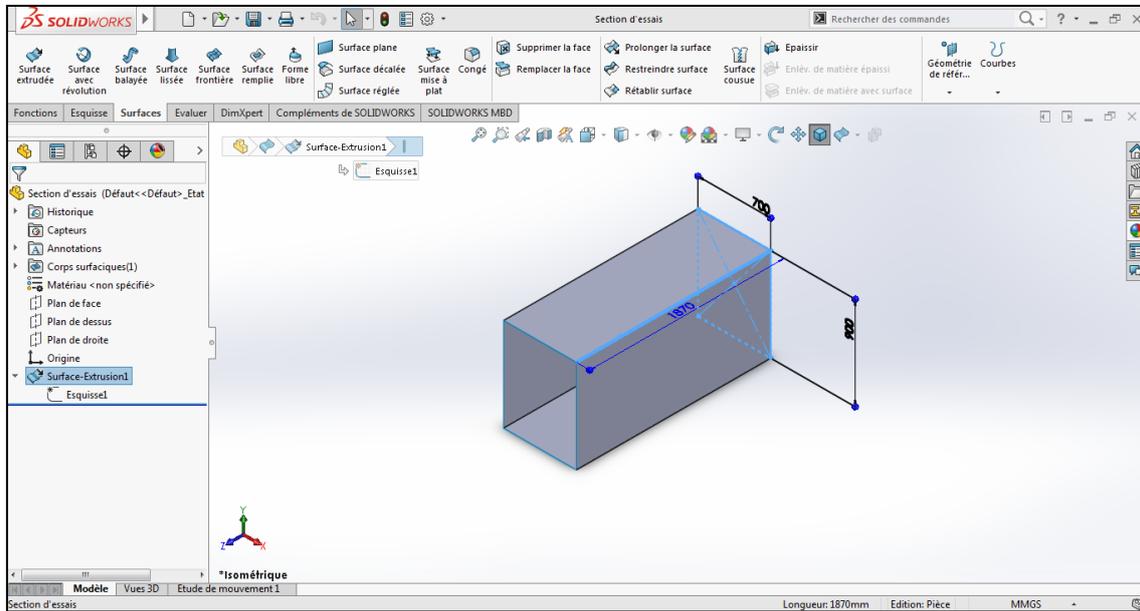


Figure 3-1 Conception des composants à section constante.

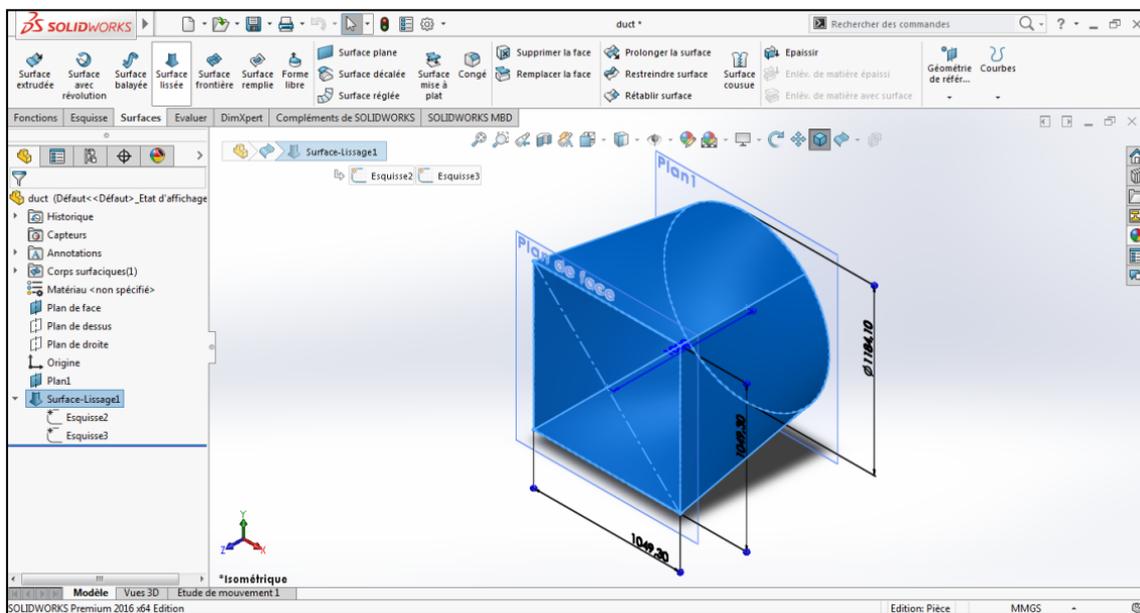


Figure 3-2 Conception des composants à section non constante.

Pour la conception des deux composants de retour 180°, elle se fait en traçant la section latérale dans une esquisse et puis en utilisant la fonction "Surface extrudé" pour l'extruder à la longueur convenable. Ensuite les deux sections latérales sont remplies en utilisant la fonction "Surface remplie". En fin les deux sections transversales d'entrée/sortie sont supprimé via la fonction "Supprimer la face" (figure 3-3).

Une fois tous les composants créés, on les regroupe dans un fichier assemblage et on les assemble en utilisant des contrainte de position (Coïncidence, parallélisme, distance...etc.) (figure 3-4).

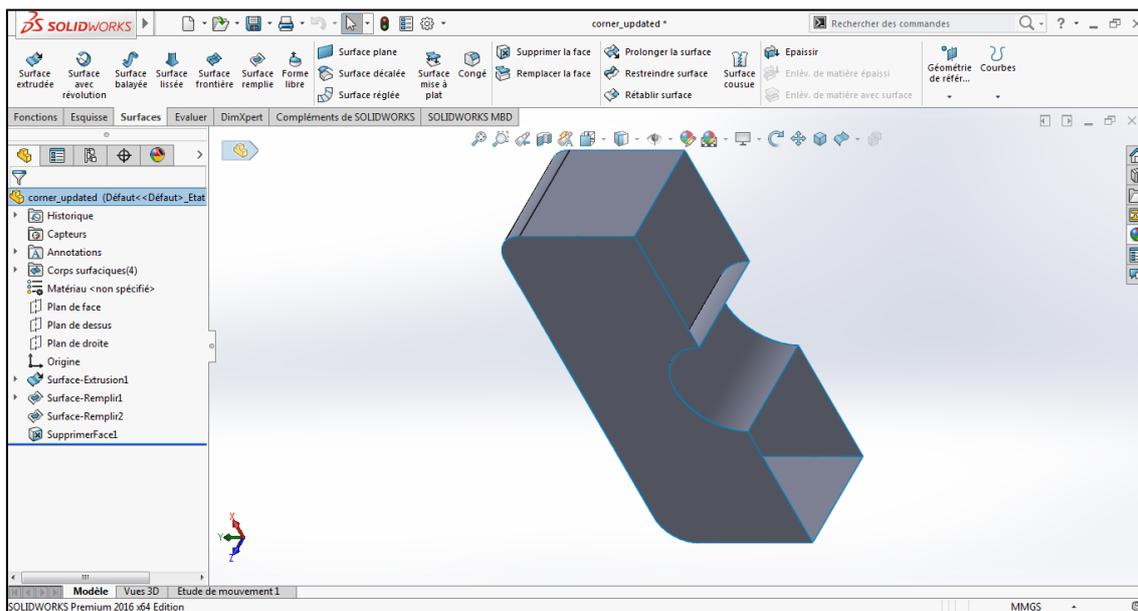


Figure 3-3 Conception des composant de retour 180°.

Une fois l'assemblage terminé, le modèle géométrique est prêt et peut être exporté vers le logiciel Ansys en le sauvegardant sous le format "Parasolid Binary (.x\_b)".

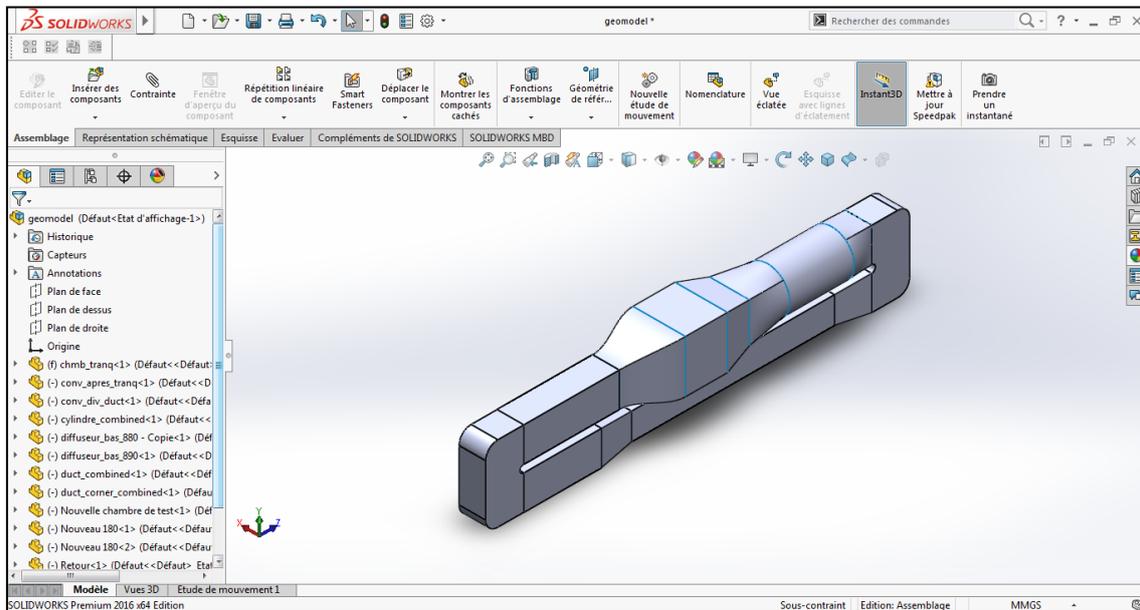


Figure 3-4 Assemblage des composants.

### 3.3 Simulation Ansys Fluent

On ouvre le logiciel Workbench et on crée un nouveau projet Fluent en faisant glisser l'application Fluent dans la fenêtre de projet.

#### 3.3.1.1 Préparation du domaine

On commence par importer le modèle géométrique précédemment créé en Solidworks, ensuite on l'ouvre dans le logiciel SpaceClaim d'Ansys (figure 3-5).

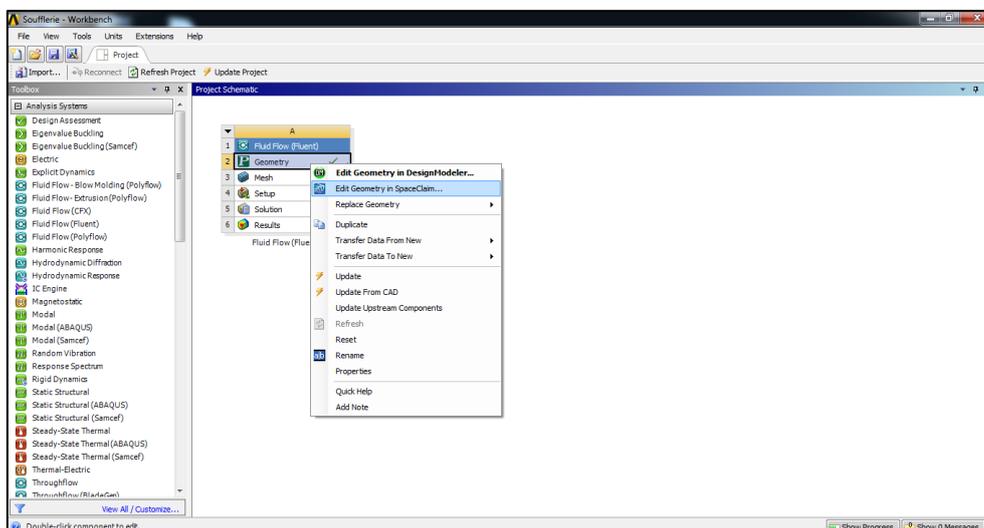


Figure 3-5 Importation et ouverture du modèle géométrique en Spaceclaim.

Une fois dans SpaceClaim, on doit d'abord créer le volume de fluide, pour cela, on utilise la fonction "Volume interne" dans le menu "Préparer", ensuite on sélectionne les surfaces dans

les quelle se trouve le contour d'entrée/sortie ainsi qu'une surface interne qui touche le fluide (figure 3-6).

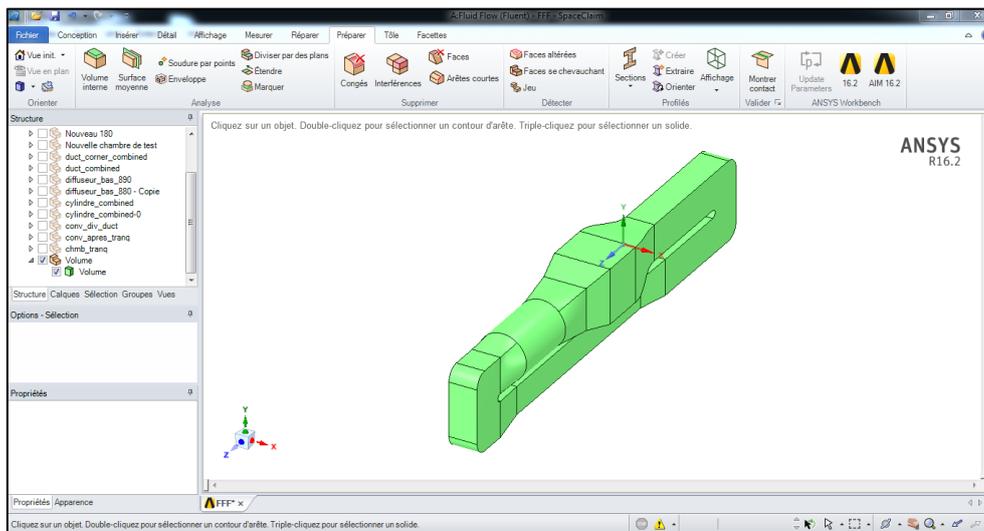


Figure 3-6 Création du volume du fluide.

Remarque : vu que le modèle représente un circuit fermé, les contours d'entrée et de sortie du fluide sont superposés et ne sont pas exposés, il suffit de cacher le composant adjacent en le désélectionnant du menu "Structure".

Dans ce qui suit, on cache le modèle des parois de la soufflerie et on laisse uniquement le volume du fluide créé pour ne pas encombrer la vue.

Le modèle est ensuite découpé selon les composants de la soufflerie en utilisant la fonction "Dévisser un corps". On note qu'une découpe supplémentaire a été ajoutée au milieu du cylindre pour créer une face qui servira ultérieurement comme condition limite du ventilateur.

Pour reproduire l'effet de ces vannes, on exécute un enlèvement de matière, en dessinant des contours sous forme d'arcs de cercles décalé d'une distance d'un millimètre. Une fois les contours dessinés, on utilise la fonction "Tirer" et on sélectionne l'option "Enlever" la matière et on l'exécute à travers tous le domaine.

Pour finir, la taille de la soufflerie est très grande ce qui annonce un grand besoin en ressources informatiques. Néanmoins on peut remarquer que la soufflerie est symétrique. On peut donc découper le domaine selon le plan latérale milieu et ainsi donc réduire la taille du domaine par deux (figure 3-7).

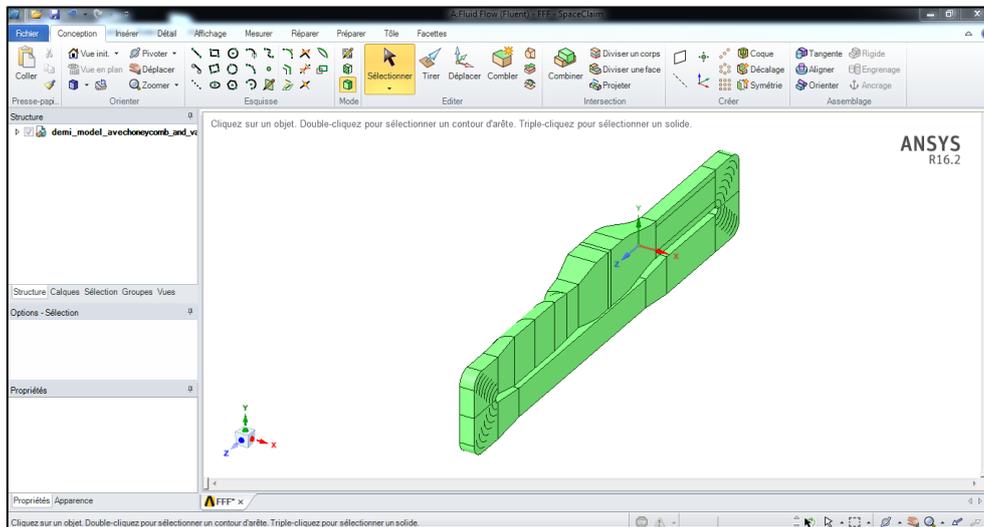


Figure 3-7 Volume du fluide final.

Une fois terminé, on enregistre le modèle et on ferme Spaceclaim.

### Remarque :

La simulation plane à partir du modèle en 2 dimensions n'est pas possible en raison de la complexité de la géométrie (présence de sections circulaires, carrées et une fusion des deux en même temps) et de la largeur qui n'est pas assez grande pour être considérée comme infinie (influences des parois latérales).

#### 3.3.1.2 Maillage

Le maillage dans notre cas comporte des zones avec un maillage structuré et d'autres zones avec un maillage non structuré pour combiner au maximum les avantages de chaque type. Les maillages structurés offrent une diffusion numérique réduite lorsqu'ils sont alignés avec l'écoulement [14] et donne de meilleurs résultats, alors qu'une grille non structuré permet de faire le maillage pour des géométries complexes et effectuer une concentration de maillage si besoin l'est.

On ouvre le logiciel Meshing et on commence par générer un maillage arbitraire en cliquant sur "Générer Maillage".

Pour aboutir à un maillage structuré, on insère une fonction de maillage en appuyant sur "Mesh" puis "Insert" puis "Body Sizing", on sélectionne chaque composant et on impose un dimensionnement par taille d'éléments. (figure 3-8).

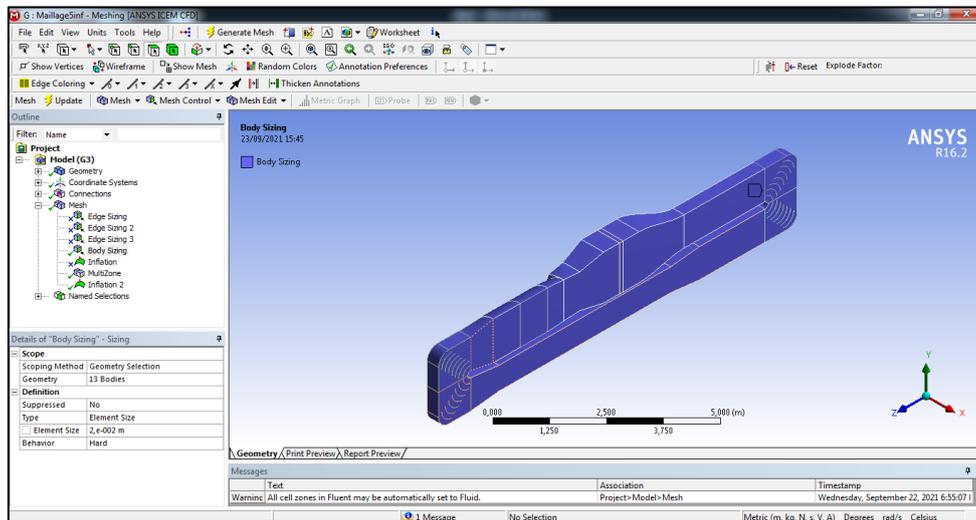


Figure 3-8 Insertion des fonctions de Sizing.

On remarque que le maillage généré est structuré sauf dans les composants de retour. Ceci est évident du fait que tous les autres composants ont une géométrie relative non-complexe.

On insère une autre fonction. Cette fois ci, on sélectionne la fonction "Method", on sélectionne tous les composants puis et sélectionne "Multizone" de la case "Method". Ceci va permettre de ne pas perdre le maillage structuré lors de l'insertion de l'inflation.

Pour insérer l'inflation, on clique sur "Mesh" puis "Insert" puis "Inflation". On sectionne tous les composants puis toutes les surfaces qui correspondent aux parois de la soufflerie. (Ne pas sélectionner les surfaces qui font partie de la symétrie!). On sélectionne 10 dans "Layers Number" et on met à jour le maillage.

### Remarque 1:

Pour avoir une idée sur la taille du premier élément de la couche limite, selon [15]:

$$y_p = \frac{y^+ \mu}{\rho u_\tau} \quad (3.1)$$

où  $y_p$  est la distance entre le centre du premier élément du maillage et la paroi et  $y^+$  est la grandeur adimensionalisée de  $y_p$ .

$u_\tau$  est une vitesse qui représente les effets de viscosité et elle est définie par:

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (3.2)$$

avec  $\tau_w$  étant la contrainte de cisaillement de la paroi. Il peut être calculé par la formule:

$$\tau_w = \frac{1}{2} \rho U^2 c_f \quad (3.3)$$

où  $c_f$  est le coefficient de frottement. Il peut être calculé par la formule empirique

$$c_f = [2 \log_{10}(Re) - 0.65]^{-2.3} \quad (3.4)$$

Les résultats de calculs pour un  $y^+$  de 290 et une vitesse d'écoulement de 5m/s sont résumés dans le tableau 3-1 .

Tableau 3-1 Calcul de la taille des éléments proches de la paroi.

Grandeur	Valeur
$D_h$	0.787m
$Re$	207830
$c_f$	$5.028 \times 10^{-3}$
$\tau_w$	0.062859 Pa
$u_\tau$	0.250717 m/s
$y_p$	0.017531m

Donc la taille du premier élément doit être inférieure à la valeur de 3.6cm.

**Remarque 2:** Une étude de maillage sera effectuée en raffinant à chaque fois le maillage générée jusqu'à obtenir une convergence des résultats.

Ensuite, on procède aux "Named Selections", il s'agit de donner ou grouper un certain nombre d'éléments de la géométrie qui ont des caractères similaires.

On commence par sélectionner les faces résultantes de la découpe symétrique de la soufflerie, ensuite on clique à l'aide du bouton droit de la souris et on appuie sur "Create Named Selection". On donne un nom à la selection (de préférence « Symmetry » pour qu'à la suite dans le logiciel Fluent, la reconnaissance des faces de symétrie se fasse automatiquement) et on appuie sur OK.

On sélectionne similairement la surface transversale du ventilateur et lui donne le nom « Fan » et on appuie sur OK.

Enfin, on sélectionne le composant du nid d'abeilles et on lui donne un nom arbitraire ("honeycomb" dans notre cas) et on appuie sur OK.

La figure 3-9 et 3-10 montrent le maillage du domaine.

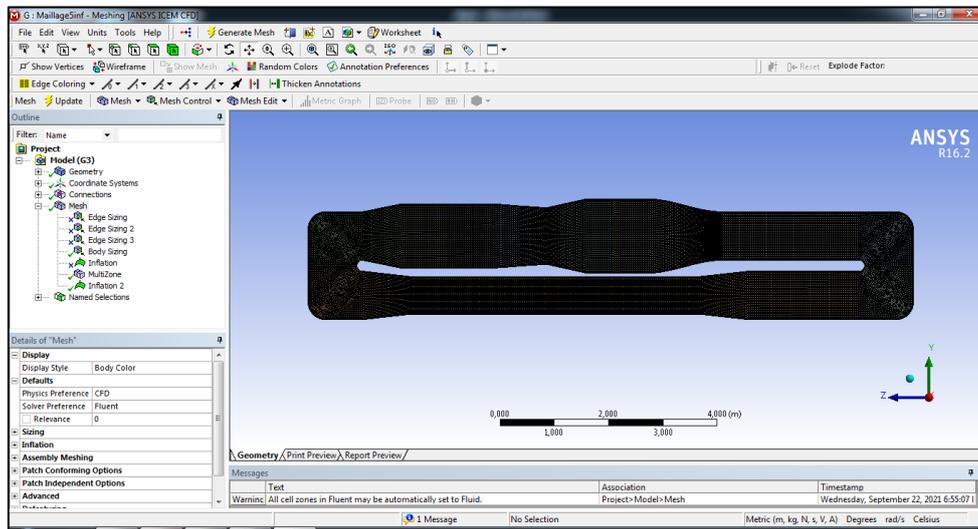


Figure 3-9 Maillage du domaine.

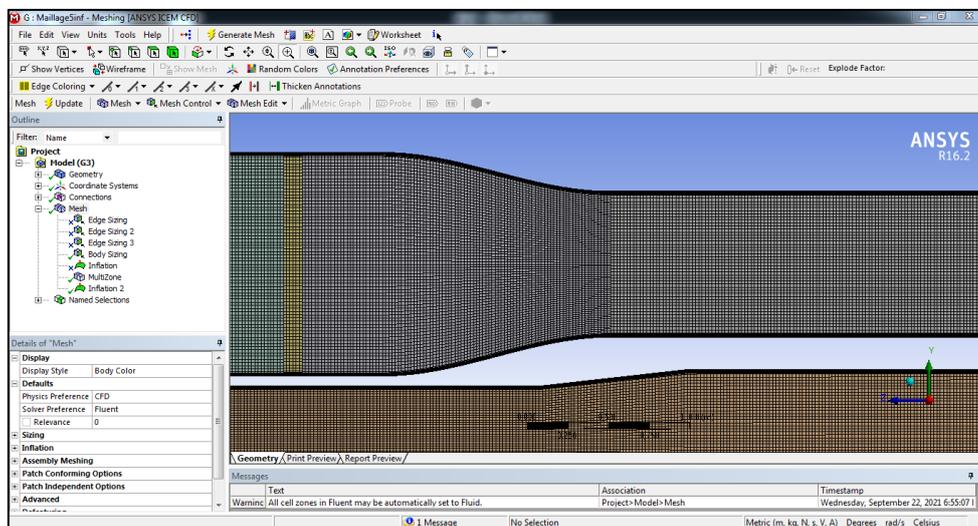


Figure 3-10 Inflation du maillage.

### 3.3.1.3 Définition des conditions d'écoulement

Comme cité précédemment, la solution sera basée sur la résolution des équations de Navier et Stokes moyennées. On commence par prendre les équations de Navier et Stokes ci dessous:

$$\rho \frac{D\vec{U}}{Dt} = \rho \vec{g} - \vec{\nabla}p + \mu \Delta \vec{U} \quad (3.5)$$

$$\text{div}(\vec{U}) = 0 \quad (3.6)$$

L'approche RANS consiste à écrire le champ de vitesse en un terme atemporel qui décrit la vitesse moyenne et un terme qui dépend du temps qui décrit les fluctuations:

$$U(x, t) = \bar{U}(x) + u'(x, t) \quad (3.7)$$

Le modèle de turbulence  $k - \varepsilon$  est un modèle utilisé en CFD pour simuler les écoulements turbulents. Il est basé sur deux équations de transport: de l'énergie cinétique de turbulence  $k$  et du taux de dissipation de l'énergie cinétique de turbulence  $\varepsilon$ [16].

Pour la préparation des calculs, pour cela, on ouvre le logiciel fluent et on attend que la géométrie et le maillage se chargent.

1. Menu Setup:

- a. On introduit le vecteur de gravité (0,-1,0) dans la rubrique General.
- b. On choisit le modèle de turbulence  $k - \varepsilon$  dans l'option Viscous de la rubrique Model.
- c. Dans la rubrique Cell Zone Conditions, on sélectionne la zone du nid d'abeilles précédemment créée lors du maillage et on active la zone poreuse et on introduit la résistance visqueuse et la résistance d'inertie (le calcul des paramètres est expliqué dans la partie 3.3.1.4).
- d. Dans la rubrique Boundary Conditions, on sélectionne Fan et on introduit la différence de pression qui sera arbitraire et égale à 2408Pa pour la première simulation pour obtenir la courbe du système, pour ensuite déduire la différence de pression correspondant au débit calculé expérimentalement.

2. Menu Solution:

- a. Dans Monitors, on attribue la valeur de  $10^{-5}$  comme limite pour la Continuity.
- b. Dans Solution Initialization, on choisit Hybrid initialisation (L'initialisation hybride permet par le calcul de certains paramètres d'initialiser les paramètres de l'écoulement pour accélérer la convergence, contrairement à l'initialisation standard qui initialise les paramètres de l'écoulement à zéro).
- c. Enfin, on sélectionne Run Calculations et on définit notre nombre d'itérations (On peut toujours ajouter des itérations si le nombre n'est pas suffisant pour la convergence).

#### **3.3.1.4 Simulation du nid d'abeilles**

Dans plusieurs applications de l'ingénierie, on fait faces à des structures disposant d'une géométrie qui consiste en une répétition de petites parties telles que les grilles, les ailettes dans les échangeurs de chaleur, les nids d'abeilles ...etc. L'implémentation de telles structures dans les travaux de simulation s'avère très couteux en terme de ressources informatiques, surtout dans le cas du maillage. Cependant il existe une façon de simuler ce types de

structures sans inclure leur géométrie dans le maillage, il s'agit des zones poreuse. En effet, le passage de l'écoulement à travers une tel structure ne créé pas de pertes d'énergie cinétique (principe de continuité des fluides incompressible) , mais plutôt une perte de pression qui est fonction de la vitesse de l'écoulement.

La loi de Darcy à travers les zones poreuse est donnée par [17]:

$$\frac{dp}{dx} = \frac{\mu}{\alpha} U \quad (3.8)$$

où  $\alpha$  représente la perméabilité de la zone.

En comparant la loi de Darcy avec la loi générale de chute de pression:

$$\Delta p = C_1 U_x + C_2 \frac{1}{2} \rho |U| U_x \quad (3.9)$$

$C_2$  étant le facteur de résistance d'inertie.

On peut donc écrire:

$$\frac{C_1}{e} = \frac{\mu}{\alpha} \quad (3.10)$$

En ayant la différence de pression en fonction de la vitesse de l'écoulement, on peut obtenir le facteur de résistance d'inertie  $C_2$  et le facteur de résistance visqueux  $\frac{1}{\alpha}$  pour les introduire dans les conditions limites de la zone poreuse dans Fluent.

La simulation du nid d'abeilles en sa totalité, indépendamment du reste de la soufflerie, s'avère aussi couteuse en ressources informatiques, néanmoins il existe une méthode "Sub-grid scale modeling" qui consiste à simuler une seule partie du nid d'abeilles [18][19][20].

Le nid d'abeilles de notre étude est de forme carrée de 1380mm de côté et d'une épaisseur de 112mm. Les canalisations sont également de forme carrée de 16mm de côté. L'épaisseur qui sépare les canalisations est de 7mm

L'approche consiste à prendre 4 canaux et imposé une condition de symétrie comme le montre la figure 3-11.

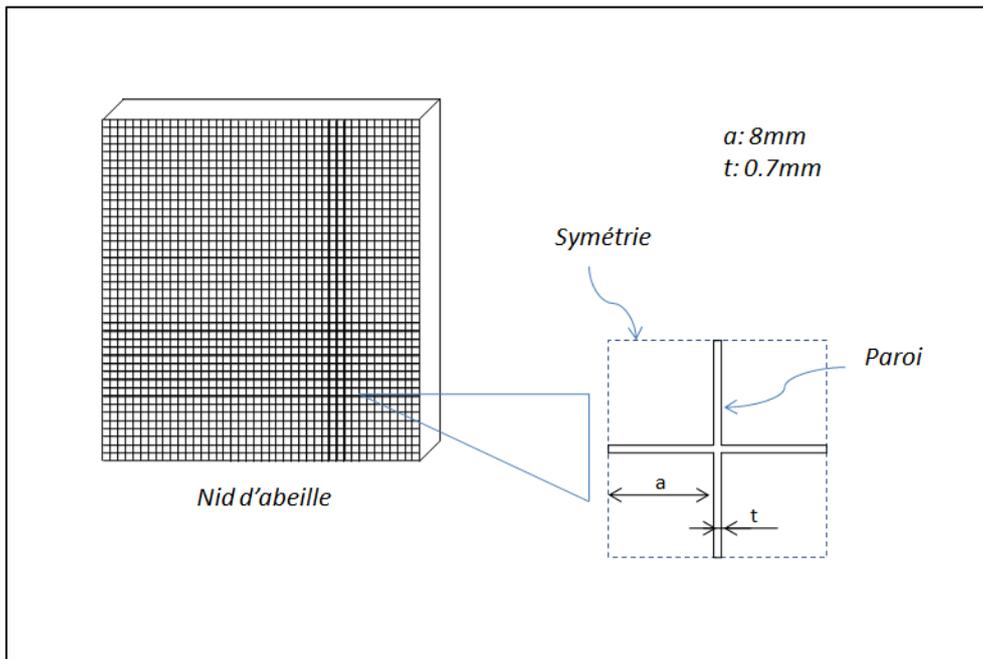


Figure 3-11 Approche de la simulation du nid d'abeilles.

L'échantillon est mis à l'intérieur d'une boîte englobant de trois mètres de longueur et un maillage structuré a été appliqué après division du domaine (figure 3-12).

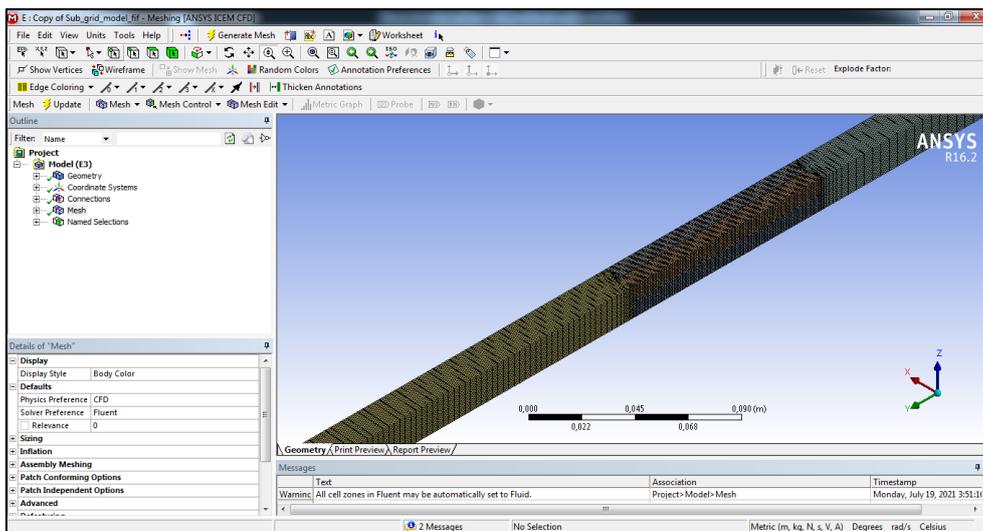


Figure 3-12 Maillage du modèle Sub-grid.

Une condition à la limite de vitesse a été imposée à l'entrée, une condition limite de pression atmosphérique a été imposée à la sortie et une condition limite de symétrie a été imposée aux parois latérales.

La simulation a été effectuée pour trois vitesses différentes ( 5, 10 et 15m/s) pour une limite de continuité de  $10^{-4}$ . Les résultats de la simulation sont présentés dans les figures 3-13, 4-14 et 4-14.

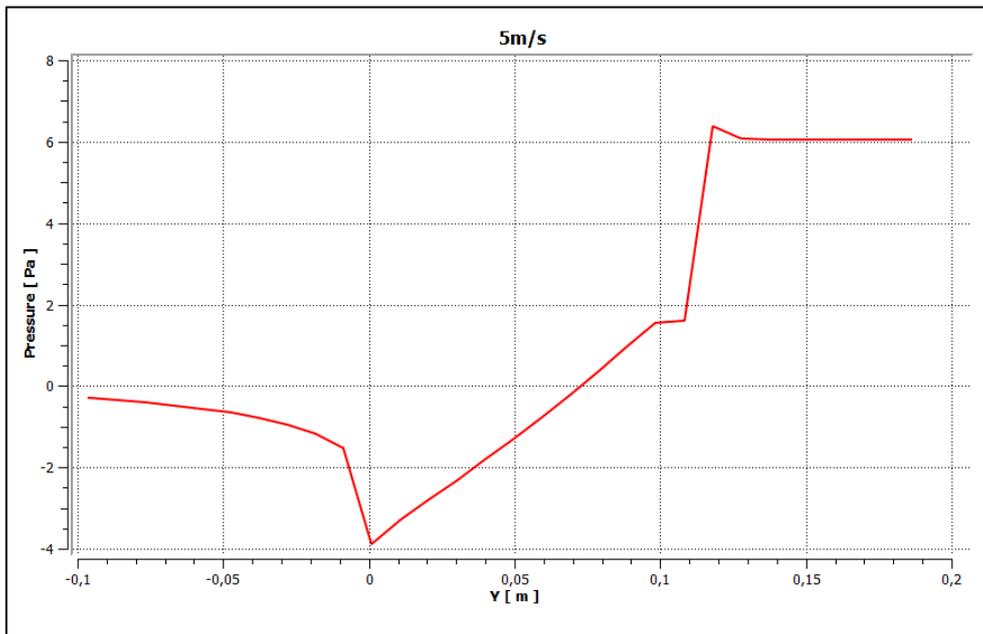


Figure 3-13 Chute de pression pour U=5m/s.

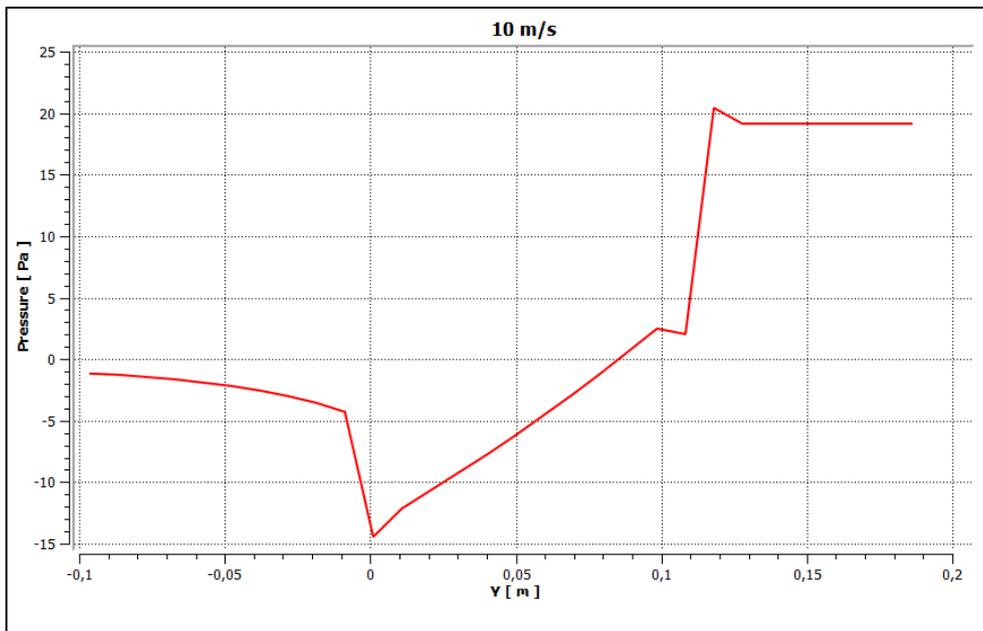


Figure 3-14 Chute de pression pour U=10m/s.

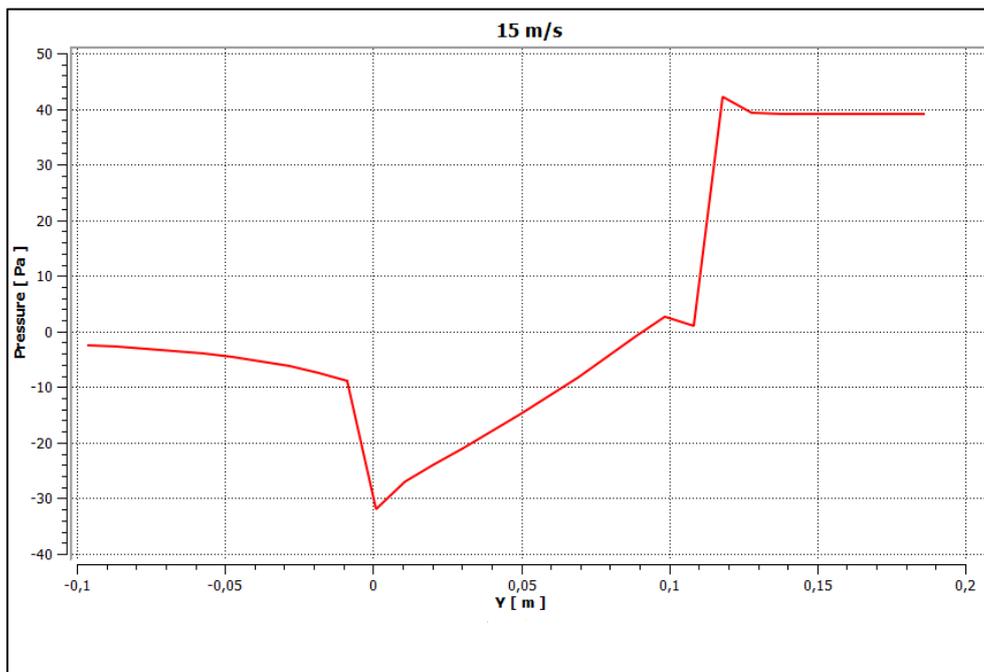


Figure 3-15 Chute de pression pour U=15m/s.

L'interpolation par une polynôme de second ordre de la différence de pression en fonction de la vitesse, illustrée dans la figure 3-16, donne l'équation suivante:

$$\Delta P(U) = \frac{3}{25} U^2 + U$$

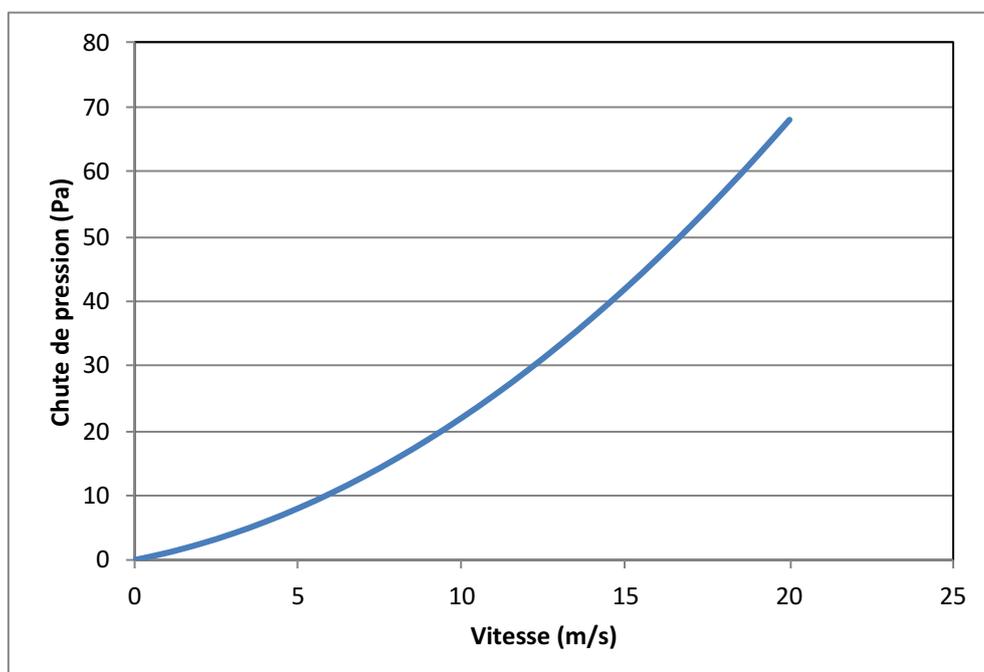


Figure 3-16 Evolution de la chute de pression en fonction de la vitesse d'écoulement.

En divisant par l'épaisseur du nid d'abeilles et en identifiant avec l'équation de Darcy (3.8), sachant que la viscosité dynamique et la masse volumique de l'air à 20°C et à la pression atmosphérique sont respectivement  $1.8025 \cdot 10^{-5} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$  et  $1.2041 \text{ kg m}^{-3}$ , on trouve les paramètres de la zone poreuse ainsi:

$$\frac{1}{\alpha} = \frac{C_1}{\mu e} = \frac{1}{1.825 \cdot 10^{-5} \cdot 0.112} = 7.415 \cdot 10^5 \text{ m}^{-2}$$

$$\frac{3}{25} = C_2 \frac{1}{2} \rho e \rightarrow C_2 = \frac{2 \cdot 3/25}{\rho e} = \frac{2 \cdot 3/25}{1.2041 \cdot 0.112} = 1.780 \text{ m}^{-1}$$

## Chapitre 4 : Résultats et discussion

Dans ce chapitre, nous présenterons les résultats de mesures de vitesse moyenne par tube de Pitot et l'anémomètre à fil chaud, nous discuterons et comparerons ces résultats. Les résultats de l'anémomètre à fil chaud nous permettront de calculer l'intensité de turbulence qui sera également présentée. Pour finir nous présenterons les résultats de simulation qui comporteront la courbe du système, le champ de vitesse et de pression à travers l'ensemble de la soufflerie ainsi qu'une comparaison avec les résultats expérimentaux.

### 4.1 Tube de Pitot

Les vitesses moyennes temporelles des trois mesures, et pour chaque fréquence, dans chaque point sont illustrées dans la figure 4-1.

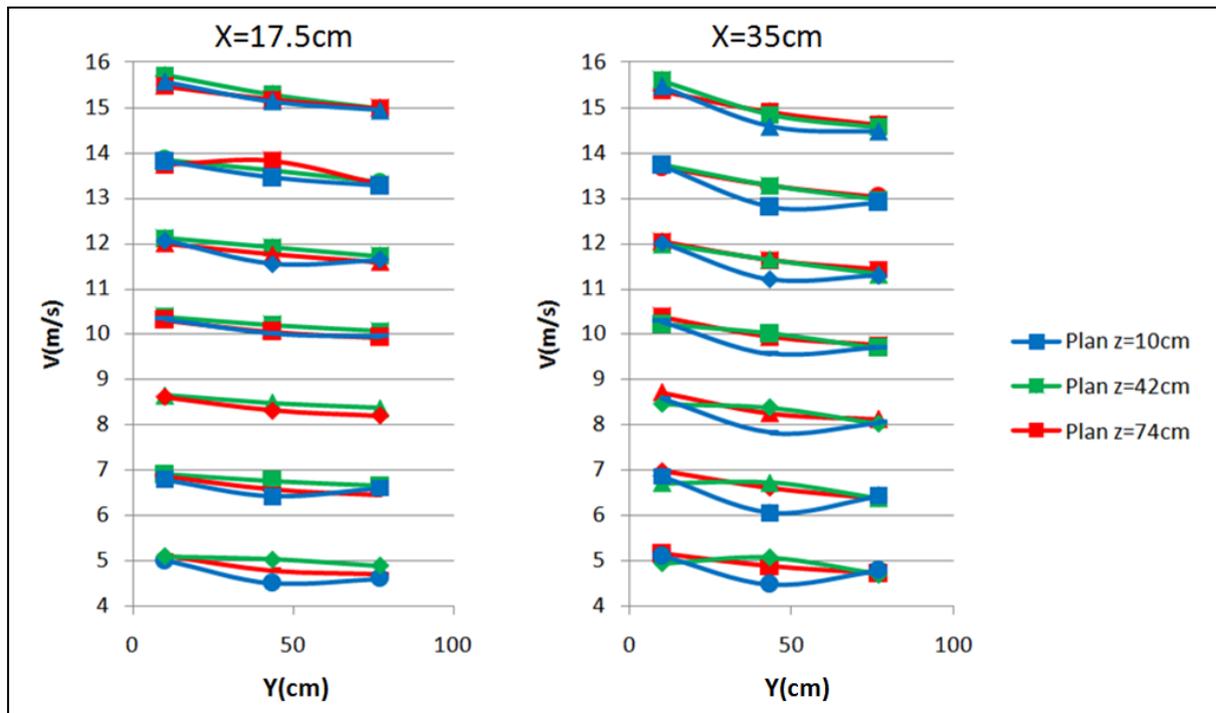


Figure 4-1 Résultats de mesure de vitesse par tube de Pitot.

Nous constatons qu'effectivement la vitesse dans la section d'essais augmente à chaque fois qu'on augmente la fréquence de rotation.

Le champ de vitesse est aussi uniforme dans la section. En effet comme le montre le tableau 4-1 l'écart type dans toute la section ne dépasse 0.37m/s.

Tableau 4-1 Écart type des vitesses (Pitot).

Fréquence (Hz)	Écart type (m/s)
15	0.21
20	0.23
25	0.23
30	0.24
35	0.27
40	0.33
45	0.37

Nous présenterons ensuite dans la figure 4-2 la variation de la vitesse moyenne spatial dans chacun des plans normaux à l'écoulement du fluide en fonction de la fréquence de rotation du moteur électrique.

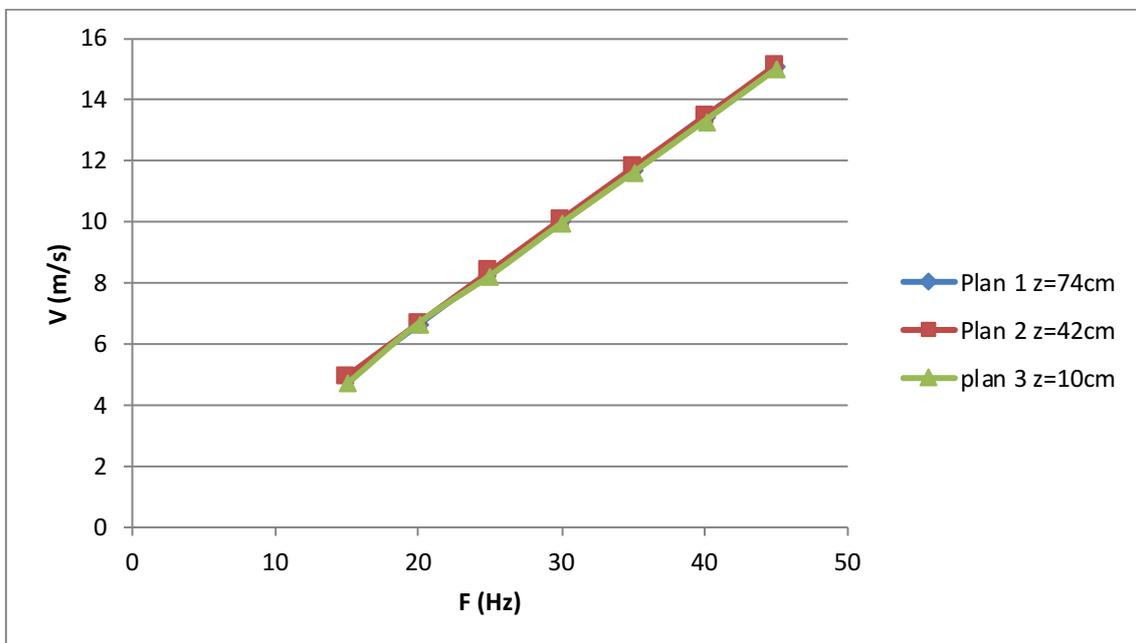


Figure 4-2 Evolution de la vitesse moyenne en fonction de la fréquence (tube de Pitot).

On remarque que la vitesse dans chaque plan de la section d'essais augmente de façon linéaire avec la fréquence de rotation du moteur.

## 4.2 Anémométrie à fil chaud

Les vitesses moyennes de chaque emplacement en fonction de la fréquence de rotation du moteur électrique sont représentées dans la figure 4-3.

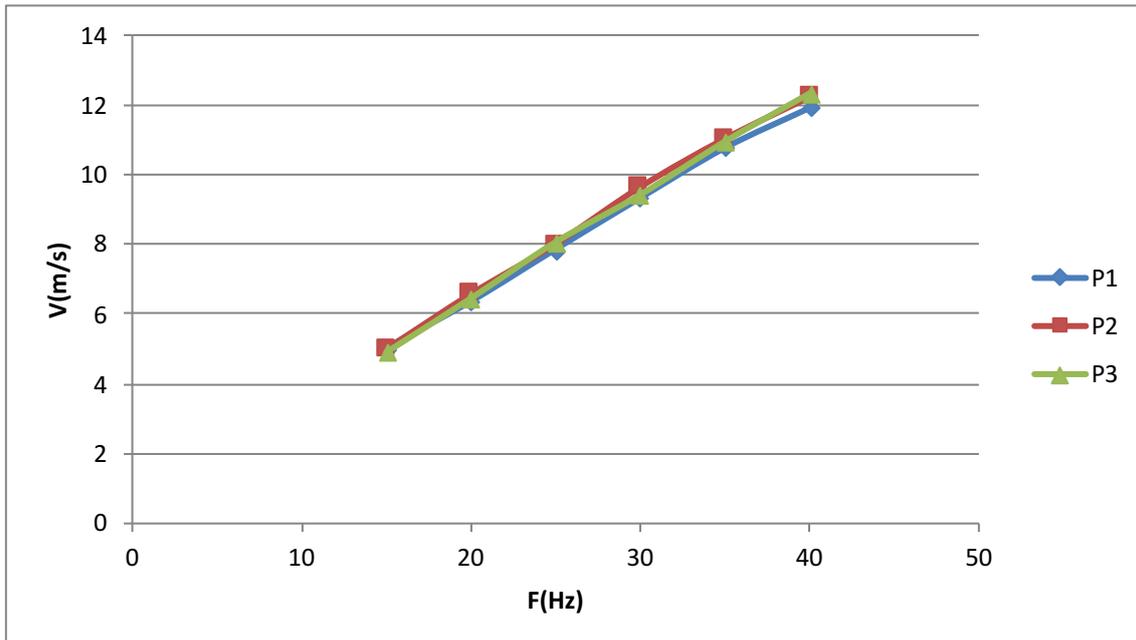


Figure 4-3 Evolution de la vitesse moyenne en fonction de la fréquence (Fil chaud).

Les graphes confirment l'uniformité de l'écoulement. Ils confirment également la relation linéaire entre la vitesse dans la section et la fréquence de rotation du moteur électrique précédemment établie.

La figure 4-4 montre la comparaison entre les résultats de vitesse moyenne obtenus par tube de Pitot (Point 11) et anémomètre à fil chaud (Point 3).

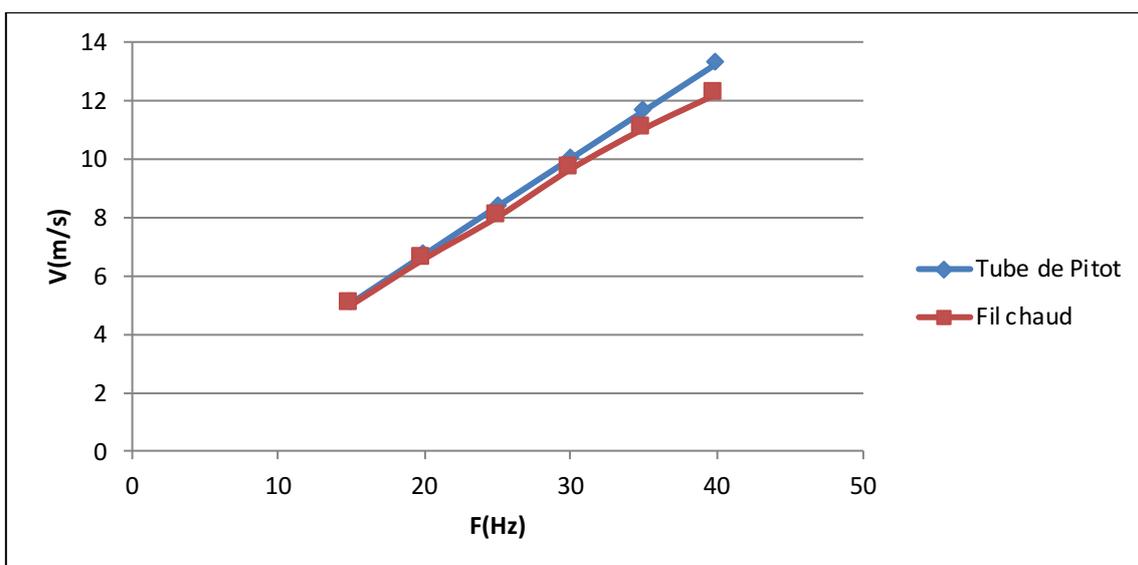


Figure 4-4 Comparaison entre les résultats du tube de Pitot et fil chaud.

On trouve que les résultats se rapprochent avec un léger décalage au niveau des hautes fréquences. Là encore, l'erreur relative est de 8.19% comme le montre le tableau 4-2.

Tableau 4-2 Erreurs relatives entre les résultats de Pitot et fil Chaud.

Fréquence (Hz)	Incertitude relative (%)
15	1.32
20	2.15
25	4.44
30	3.69
35	5.36
40	8.19

La figure 4-5 montre la variation de l'intensité de turbulence en fonction de la vitesse.

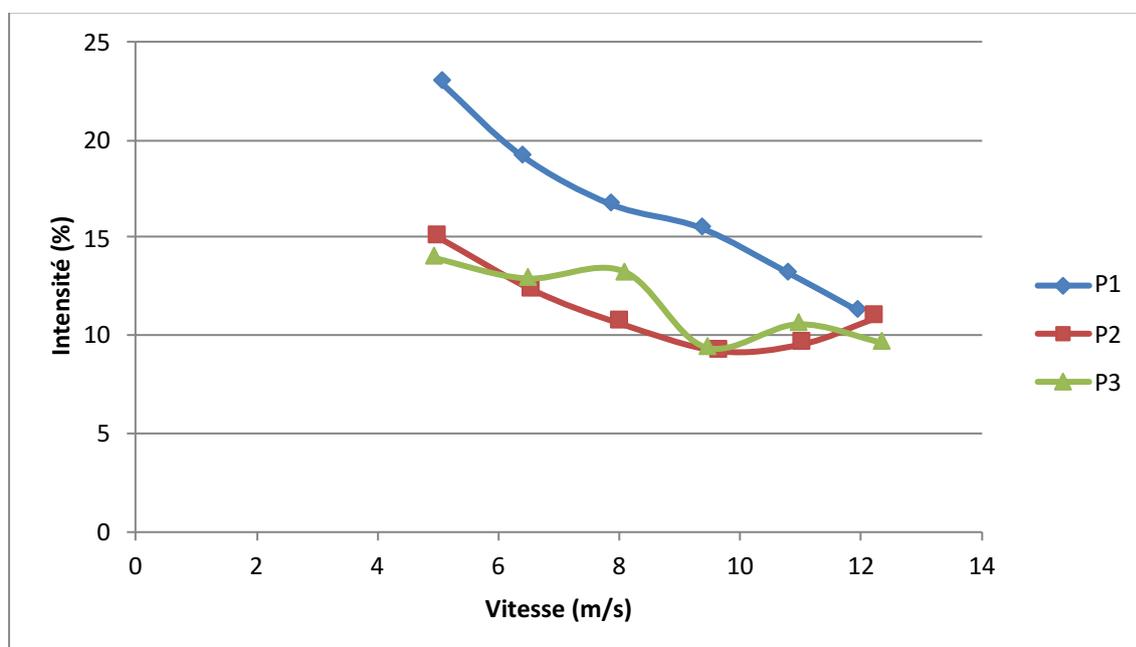


Figure 4-5 la variation de l'intensité de turbulence en fonction de la vitesse.

On remarque que l'intensité diminue à chaque fois qu'on augmente la vitesse. L'intensité de turbulence est élevée. Elle peut être due aux fissures dans la porte de la section d'essais et la paroi supérieure où il y a un échappement d'air ou bien au problème de terre de la soufflerie qui peut influencer le courant dans les câbles de l'installation du fil chaud. Les vibrations de la soufflerie peuvent aussi contribuer à ces hautes valeurs vu que le support repose sur la paroi supérieure de la soufflerie. L'intensité de turbulence est encore plus élevée pour le point P1 qui est le plus proche de la paroi et donc les effets de couche limite se manifestent.

On rappelle que l'écoulement de l'air est considéré comme un écoulement de haute qualité si l'intensité de turbulence est située entre 0.5 et 2% [21].

Les vitesses instantanées pour le point P2 sont présentées dans la figure 4-6.

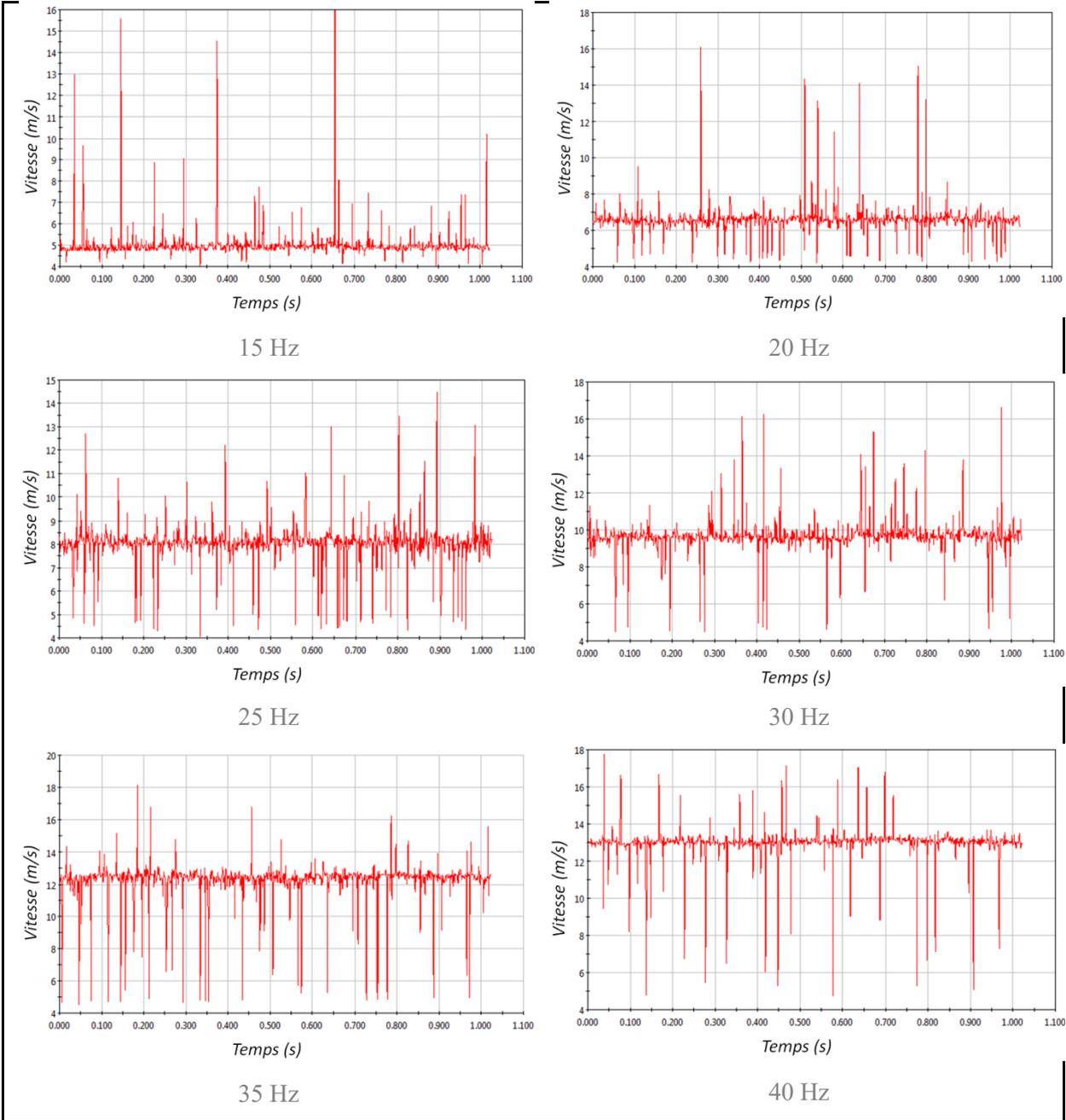


Figure 4-6 Vitesses instantanées obtenues par fil chaud.

### 4.3 Simulation

Pour assurer que la convergence est indépendante du maillage, une étude de maillage basée sur la vitesse dans la section d'essais ( $x=17.5\text{cm}$ ,  $z=42\text{cm}$  milieu de la section) a été effectuée et ce en répétant la simulation en raffinant à chaque fois le maillage jusqu'à arriver à des résultats identiques entre deux maillage comme le montre la figure 4-7. Le critère de convergence pour chaque maille est de  $10^{-4}$ . Les valeurs de  $y^+$  sont incluses dans l'intervalle [30,300].

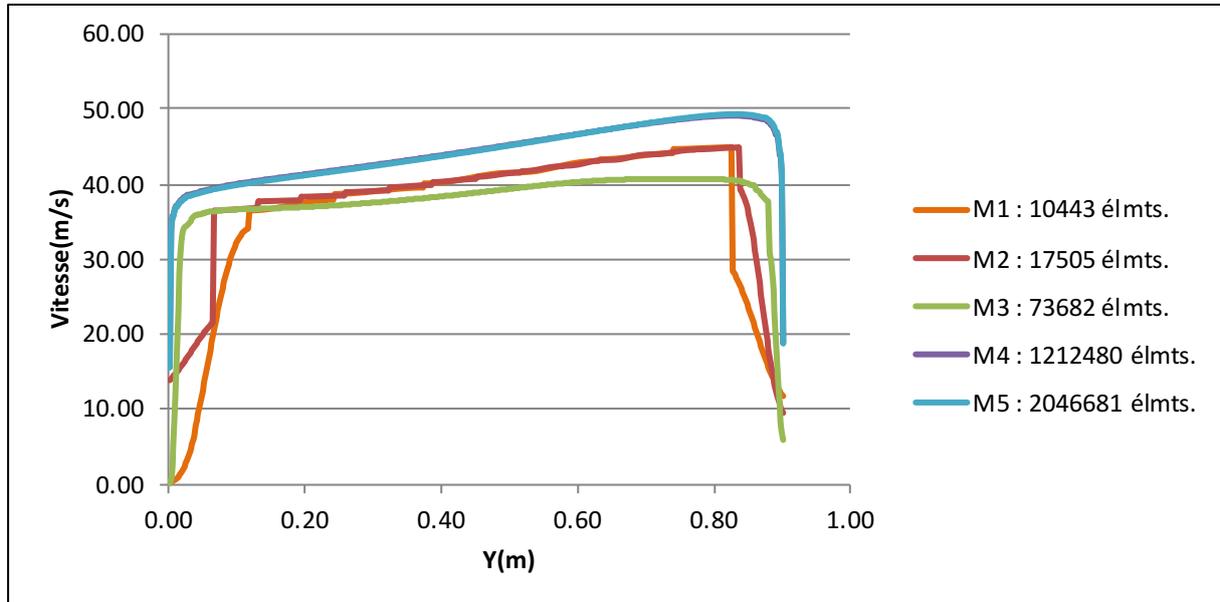


Figure 4-7 Étude de maillage.

Le débit calculé par Fluent pour la différence de pression de 2408Pa est de  $16.7936 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ , en tenant compte de la symétrie, on retrouve le débit volumique :

$$Q = \frac{\dot{m}}{\rho} \quad (4.1)$$

$$Q = \frac{16.7936 \times 2}{1.204} = 27.8963 \text{ m}^3/\text{s}$$

On peut calculer le paramètre de la courbe du système et ainsi tracer cette dernière:

$$\Delta p = kQ^2 \quad (4.2)$$

$$k = \frac{2408}{27.8963^2} = 3.09$$

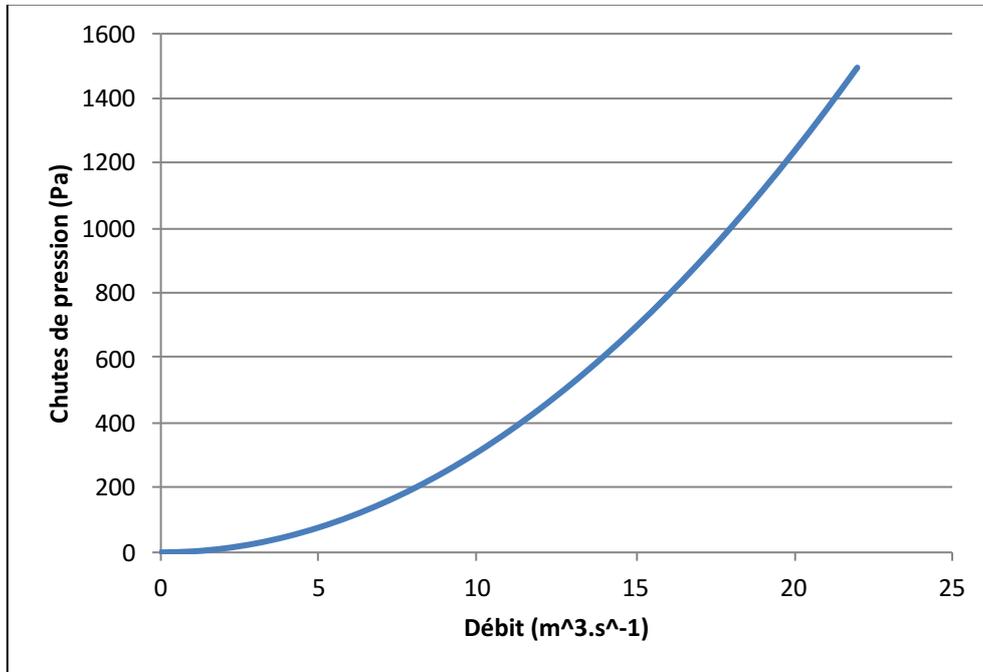


Figure 4-8 Courbe du système.

Pour une vitesse moyenne dans la section  $z=74\text{cm}$  de  $8.33\text{ m/s}$  le débit volumique est:

$$Q = 8.33 \times 0.9 \times 0.7 = 5.2479\text{ m}^3/\text{s}$$

A partir de la courbe du système, ce débit correspond à une différence de pression de  $85.1\text{Pa}$ .

Ce qui fait que les résultats présentés dans ce qui suit correspondent à la simulation qui a été conduite pour une différence de pression au niveau du ventilateur de  $85.1\text{Pa}$ .

Le champ de pression dans le plan de symétrie de la soufflerie est illustré dans la figure 4-9.

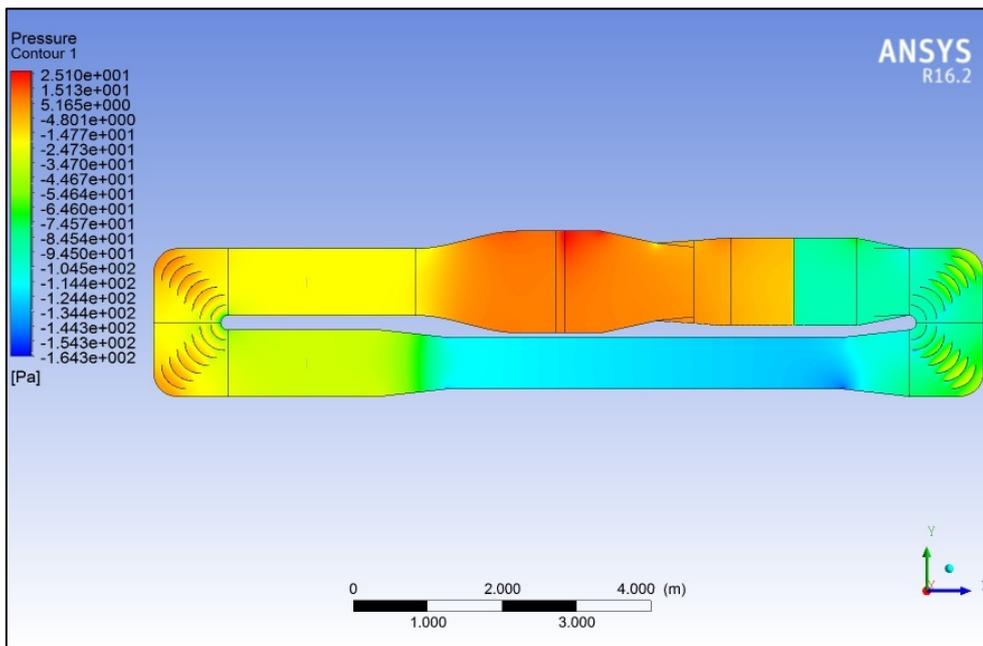


Figure 4-9 Champ de pression dans la soufflerie.

La condition "Fan Boundary Condition" est bien apparente dans la figure qui se traduit par un saut de pression. On remarque une augmentation de la pression lors de l'augmentation de la section et au niveau des vannes de retour ce qui est attendu car elles représentent un obstacle.

L'évolution de la pression par rapport au parcours que prend l'air à l'intérieur de la soufflerie à partir du coins haut droit est montrée dans la figure 4-10.

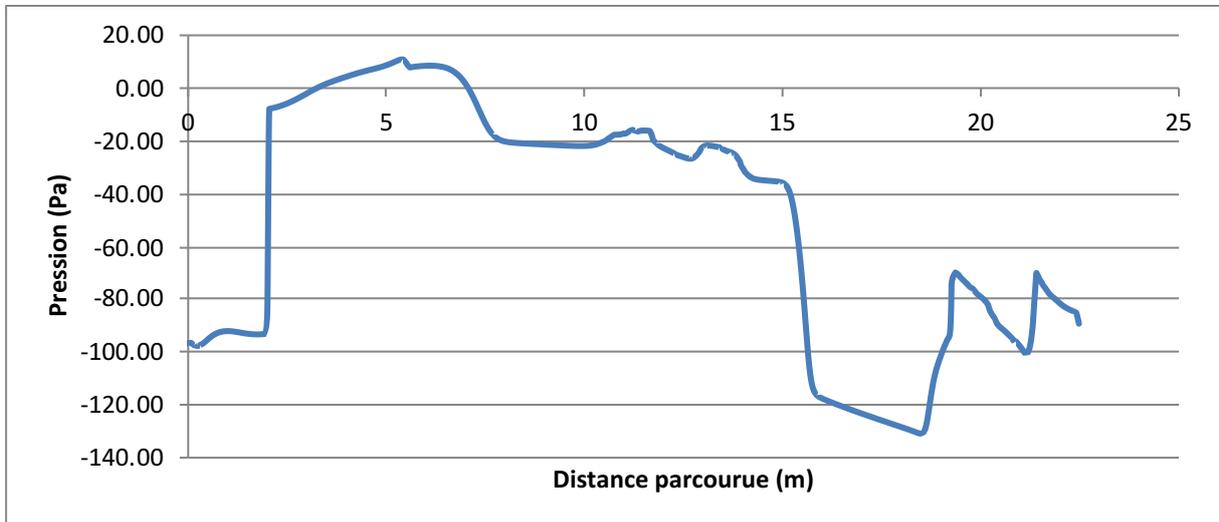


Figure 4-10 Évolution de la pression à travers la soufflerie.

Le champ de vitesse dans la section moyenne illustré dans la figure 4-11.

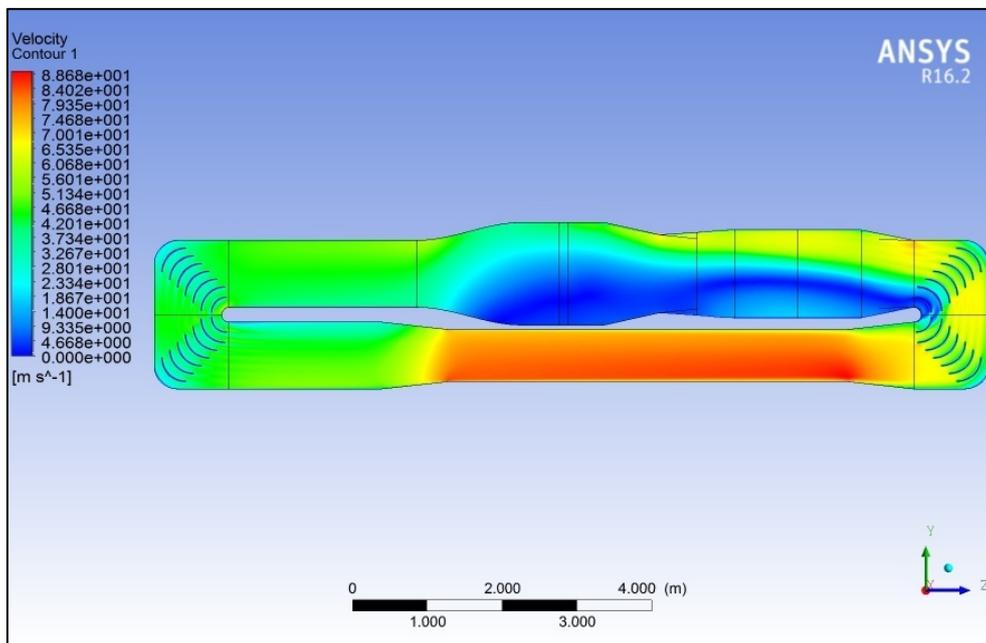


Figure 4-11 Champ de vitesse dans la soufflerie.

L'évolution de la vitesse par rapport au parcours que prend l'air à l'intérieur de la soufflerie à partir du coins haut droit est montrée dans la figure 4-12.

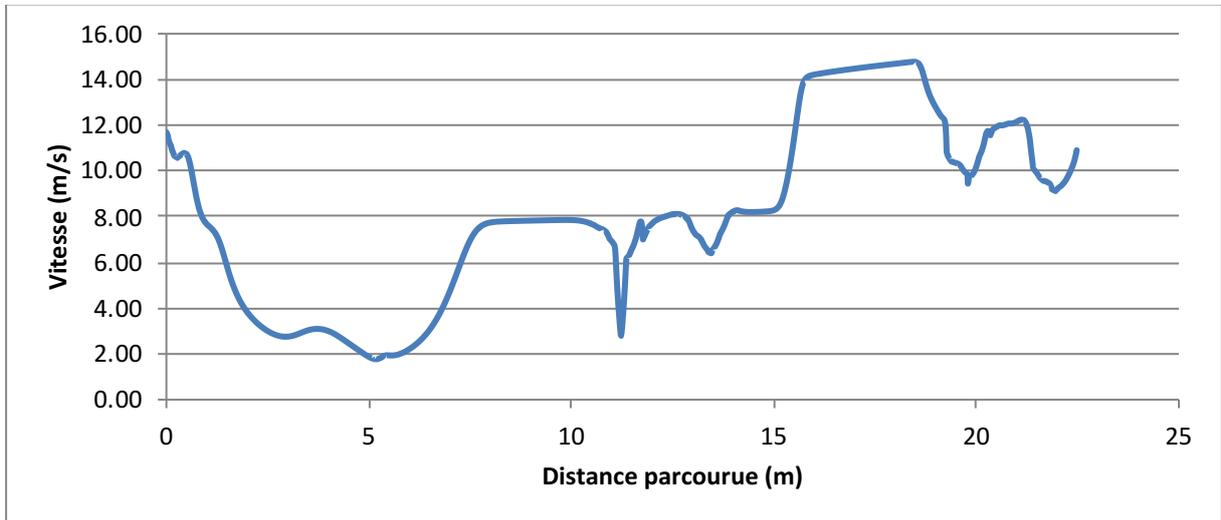


Figure 4-12 Évolution de la vitesse à travers la soufflerie.

On voit bien à travers les résultats de vitesse, l'uniformité de cette dernière au niveau de la section d'essais. On remarque aussi une zone de stagnation qui s'étale sur la zone supérieure de la soufflerie due à l'emplacement du moteur juste après un organe de changement de direction 90°. On retrouve aussi que la vitesse augmente lors de la diminution de la section et inversement, en accord avec l'écoulement subsonique.

La figure 4-13 montre la vitesse une coupe transversale dans la section d'essais.

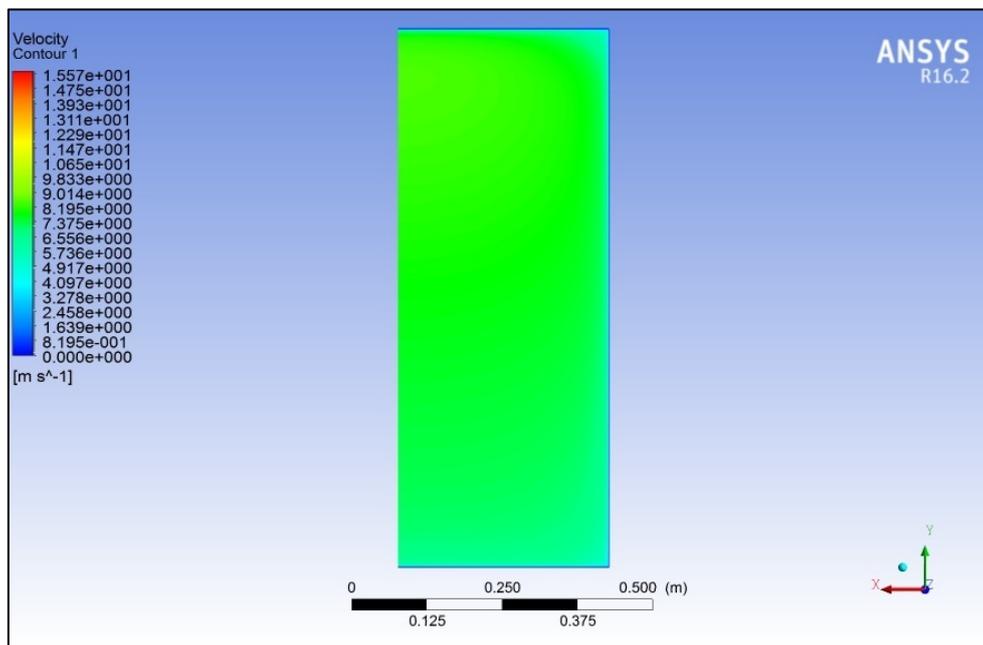


Figure 4-13 Champ de vitesse dans une section transversale.

La comparaison entre les tests expérimentaux et numériques au milieu  $x=17.5\text{cm}$ ,  $z=42\text{cm}$ ) de la section d'essais est illustrée dans la figure 4-14.

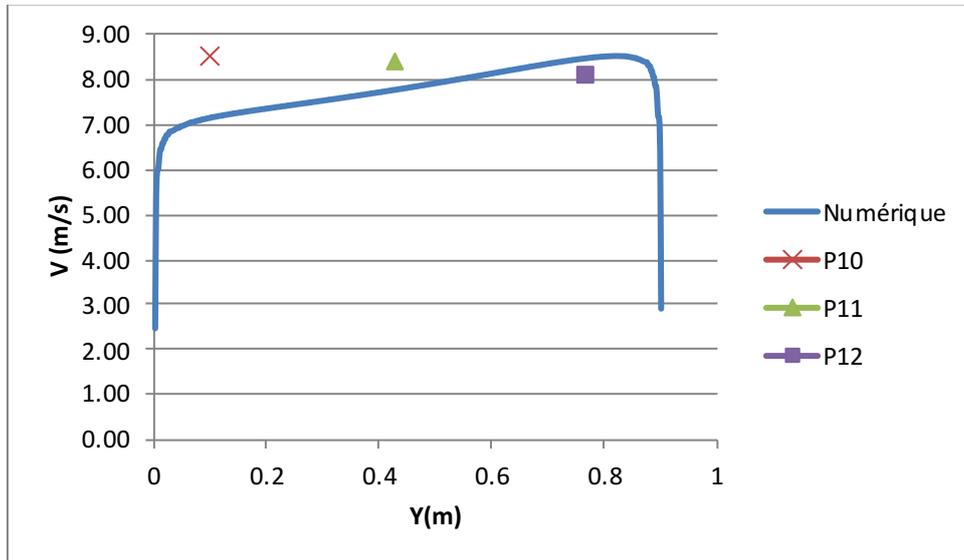


Figure 4-14 Comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques obtenus dans la section d'essais.

On remarque que les résultats se rapprochent dans les points P12 et P11, et le sont moins dans le point P10, ceci est dû aux phénomènes de turbulence causés par les petites fissures dans la soufflerie ou l'air s'échappe. Le tableau 4-3 montre l'erreur relative entre les résultats numériques et ceux mesurés expérimentalement.

Tableau 4-3 Erreur relative entre les résultats numériques et experimentaux.

Point	Erreur relative (%)
P10	15.94
P11	7.38
P12	5.28

Les figures 4-15 à 4-17 montrent les lignes de courant dans différents endroits de la soufflerie.

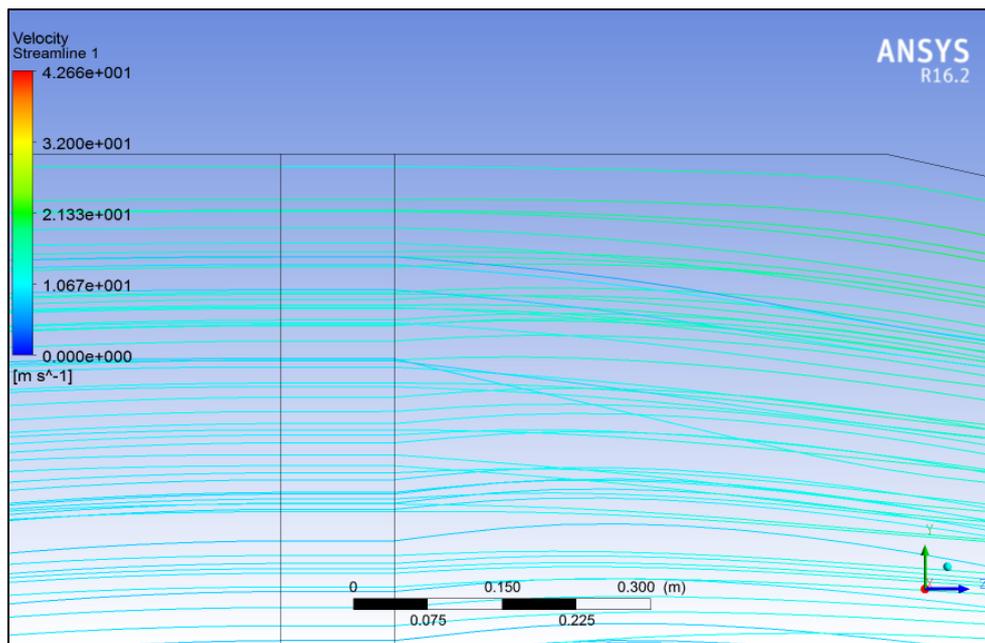


Figure 4-15 Lignes de courant au niveau du nid d'abeilles.

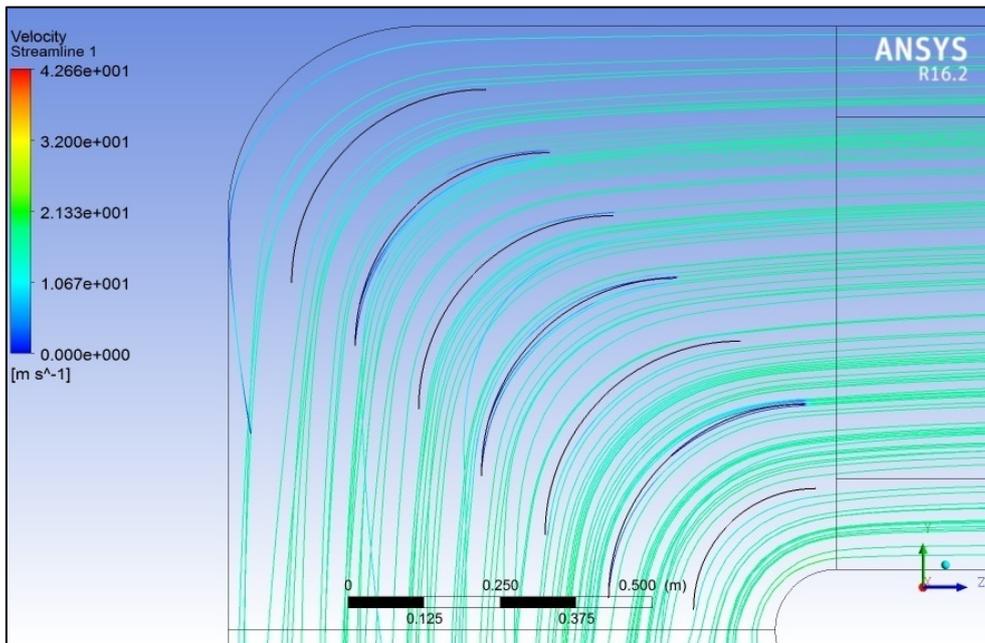


Figure 4-16 Lignes de courant au niveau des vannes de redressement.

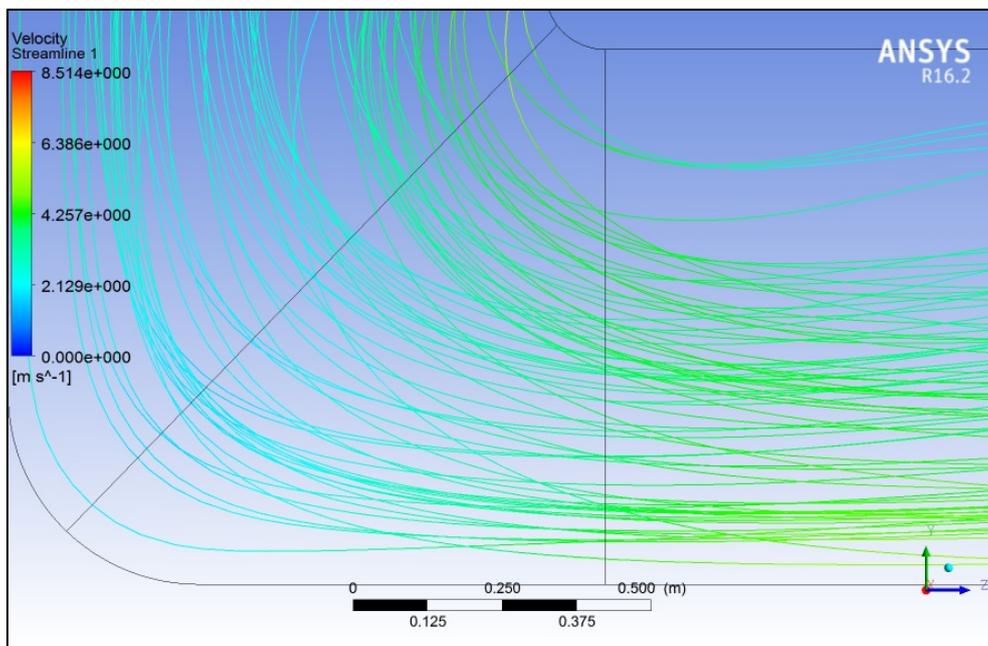


Figure 4-17 Lignes de courant en absence des vannes de redressement.

On constate l'effet des vannes de guidage ainsi que le nid d'abeilles dans la réduction des non-uniformités.

## Conclusion

À l'issue de ce travail, nous avons pu modéliser l'écoulement qui se développe dans la section d'essais de la soufflerie. Les essais expérimentaux à l'aide du tube de Pitot montrent que le champ de vitesse est homogène dans la section avec un écart type variant entre 0.21 et 0.37 m/s et que la vitesse augmente linéairement avec la fréquence de rotation du moteur électrique. Les résultats des tests par anémomètre à fil chaud confirment ceux obtenus par tube de Pitot et ajoutent la caractéristique turbulente de l'écoulement avec des valeurs d'intensité de turbulence comprises entre 7 et 22% qui diminue à chaque fois que la vitesse augmente. Un mode d'emploi détaillé a été élaboré pour l'utilisation de l'anémomètre à fil chaud pour éviter d'endommager les composants fragiles. L'étude numérique quant à elle, a permis de déterminer la courbe de résistance de la soufflerie. Elle a permis également de montrer l'existence d'une zone de stagnation dans la partie supérieure de la soufflerie qui influence le champ de vitesse dans la section d'essais. La comparaison entre la vitesse obtenue par les résultats de simulation et celle mesurée indique une erreur relative maximale de 15% au niveau de la partie inférieure de la section d'essais. Et au final, l'effet du nid d'abeilles et les vannes de redressement sur la réduction des non uniformité de l'écoulement a été clairement démontré.

Pour ce qui concerne les travaux futurs, une étude expérimentale de la chute de pression à travers le nid d'abeilles via des manomètre à pression peut être effectuée pour vérifier les résultats de simulation du nid d'abeilles. Similairement, une étude expérimentale de la différence de pression que génère le ventilateur, combinée à l'étude faite dans ce travail pourrait aider à estimer les pertes de charge qui ne sont pas dues à la résistance du système.

Il aurait également lieu de faire une analyse de Fourier pour amener les piques dans les graphes de vitesse instantanée à des courbes de Fourier pour améliorer la visibilité et pouvoir déterminer l'origine des piques.

Dans le but d'améliorer les performances de la soufflerie, des travaux de maintenance doivent être effectués. Ceci comprend les joints des différentes portes, ainsi que les fissures au niveau du cylindre du moteur et ceux de la paroi supérieure de la section d'essais.

Des travaux de maintenance du moteur électrique doivent être aussi envisagés, on a remarqué lors des essais que le variateur de fréquence indiquait de hautes charges sur les câbles lors du démarrage et du fonctionnement à de faibles fréquences.

Un système de traverses fixe et indépendant de la soufflerie pourrait être mis en place pour supprimer les fluctuations dues à la vibration de la soufflerie lors du fonctionnement à haute fréquences électriques.

## Références

- [1] Carlo Pedretti, Leo Pope. A chronology of Leonardo da Vinci's architectural studies after 1500. Genève, E. Droz, (1962).
- [2] John D. Anderson Jr., Michael J. Rycroft, Wei Shy. A History of Aerodynamics: And Its Impact on Flying Machines. Cambridge University Press; New Ed edition, (1999).
- [3] Donald D. Baals, William R. Corliss. Wind Tunnels of NASA. (2012, Progressive Management).
- [4] N. A. Ahmed. *Wind Tunnel: Designs And Their Diverse Engineering Applications* (2013, IntechOpen).
- [5] Barlow, J. B., Rae, W. H., et Pope, A. *Low-Speed Wind Tunnel Testing* (3rd ed.). (1999, Wiley-Interscience).
- [6] Deron Hurley, Johnny Arteaga, Amir Elzawawy. Design and Fabrication of Small-Scale Supersonic Wind Tunnel, Vaughn College of Aeronautics and Technology. NY, USA.
- [7] Abe, Corey, Aerodynamic force and moment balance design, fabrication, and testing for use in low Reynolds flow applications (2003). Thèse. Rochester Institute of Technology.
- [8] Jean Déleroy. Méthodes de mesure en aérodynamique. The French Aerospace Lab (ONERA).
- [9] Pauline M.Doran. Bioprocess Engineering Principles (Second Edition). Elsevier Ltd (2013) Pages 201-254.
- [10] Slavica Ristic. Flow Visualisation Techniques in Wind Tunnels Part I – Non optical Methods. Scientific Technical Review, Vol. LVII, No.1, (2007).
- [11] Ouchene Samir, Hamlaoui Mohamed Nadjib. Flow velocity mesurments in the wind tunnel. Rapport. (2016). Dpt. Génie mécanique. École nationale polytechnique.
- [12] S.Ouchene, M.N.Hamlaoui, A.Smaili, H.Fellouah. Numerical and Experimental Investigations of Flow Field through Low Speed ENP Wind tunnel. Dpt. Génie mécanique. École nationale polytechnique.

- [13] How to Measure Turbulence with Hot-wire Anemometers: A Practical Guide. Dantec Dynamics, (2005).
- [14] Peter Moonena, Bert Blockena, Staf Roels, Jan Carmeliet. Numerical modeling of the flow conditions in a closed-circuit low-speed wind tunnel. *International Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 94, pp. 699-723, (2006).
- [15] Hermann Schlichting, Klaus Gersten - *Boundary-Layer Theory*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, (2017).
- [16] Henk Kaarle Versteeg, Weeratunge Malalasekera. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. Pearson Education Limited, (2007).
- [17] ANSYS, Inc. (2016) *ANSYS Fluent User's Guide*, Release 17.2.
- [18] S. H. Amirnordin, S. M. Seri, W. S. I. Wan Salim, H. Abd Rahman, K. Hasnan. Pressure Drop Analysis of Square and Hexagonal Cells and its Effects on the Performance of Catalytic Converters. *International Journal of Environmental Science and Development*, Vol. 2, No. 3, (Juin 2011).
- [19] Miyairi, Y., Aoki, T., Hirose, S., Yamamoto, Y. et al., "Effect of Cell Shape on Mass Transfer and Pressure Loss," *SAE Technical Paper 2003-01-0659*, (2003).
- [20] Vinayak Kulkarni, Niranjana Sahoo, Sandip D. Chavan. Simulation of honeycomb–screen combinations for turbulence management in a subsonic wind tunnel. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 99 (2011),Pages 37–45.
- [21] Harold Sherwood Boudreau III, "Design, construction, and testing of an open atmospheric boundary layer wind tunnel. (2009).