



**HAL**  
open science

# Analyse de l'influence de paramètres géométriques et physiques sur le coefficient de décharge appliqué à la ventilation dans le bâtiment

Jean-Rémy Salliou

► **To cite this version:**

Jean-Rémy Salliou. Analyse de l'influence de paramètres géométriques et physiques sur le coefficient de décharge appliqué à la ventilation dans le bâtiment. Mécanique des fluides [physics.class-ph]. 2011. dumas-00633711

**HAL Id: dumas-00633711**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-00633711>**

Submitted on 19 Oct 2011

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



**MASTER SCIENCES ET TECHNIQUES DES ENVIRONNEMENTS URBAINS  
SPECIALITE AMBIANCE ET FORME URBAINE**

**Année 2010/2011**

**Thèse de Master STEU**

*Diplôme cohabilité par  
l'École Centrale de Nantes,  
l'École Nationale Supérieure des Techniques Industrielles et des Mines de Nantes  
l'École Supérieure d'Architecture de Nantes,  
l'Université de Nantes*

Présentée et soutenue par :

JEAN-REMY SALLIOU

le 26 septembre 2011

À l'école supérieure d'architecture de Nantes

**ANALYSE DE L'INFLUENCE DE PARAMETRES GEOMETRIQUES ET PHYSIQUES SUR LE COEFFICIENT DE DECHARGE  
APPLIQUE A LA VENTILATION DANS LE BATIMENT**

**JURY**

Président :	Marjorie Musy	Chercheur au CERMA de Nantes
Examineurs :	Xavier Faure	Ingénieur études et recherche au département CAPE du CSTB Nantes
	Thomas Leduc	Ingénieur de recherche au CERMA de Nantes
	Laurent Perret	maître de conférences à l'école Centrale de Nantes

---

Directeur de mémoire : Xavier Faure  
Laboratoire/Institution : CSTB Nantes  
Co-encadrant : Nicolas Le Roux

## Résumé :

Cette étude expérimentale utilise une soufflerie à jet ouvert et un modèle à échelle réduite pour caractériser l'influence de paramètres géométriques (facteur de forme et forme de l'orifice, porosité) et paramètres physiques du vent (vitesse du vent, vitesse d'aspiration de l'air, incidence) sur le coefficient de décharge. Ce coefficient permet de prendre en compte la contraction des lignes de courant lors du passage de l'air au travers d'un orifice, il autorise donc l'utilisation du modèle théorique en l'appliquant à la pratique. Mais l'usage d'un coefficient de décharge de valeur constante comme il est préconisé dans la littérature paraît être une simplification trop réductrice. Après avoir caractérisé la soufflerie, les différentes hypothèses prises pour l'application de la loi d'orifice vont être discutées. Par la suite, les trois modèles théoriques vont être confrontés pour obtenir le plus précis. L'objectif de ce stage est l'obtention d'un type d'orifice dont le coefficient de décharge est le plus indépendant possible de l'écoulement d'air environnant. L'analyse de l'influence des paramètres et la connaissance des configurations critiques permettra d'atteindre cet objectif afin d'obtenir une modélisation plus précise des débits traversant les ouvertures d'un bâtiment.

Mots-clés : coefficient de décharge, ventilation, modèle théorique, maquette à échelle réduite, coefficient de pression, angle d'incidence, porosité, nombres de Reynolds, facteur de forme

Discipline : mécanique des fluides, aéraulique

**Abstract :**

**Analysis of the influence of geometrical and physical parameters on the discharge coefficient applied to the building's ventilation**

This experimental study uses an open jet wind tunnel and a scale model to investigate the influence of geometrical parameters (form factor, shape of the orifice and porosity) and physical parameters of the wind (wind speed, suction speed air and impact) on the discharge coefficient. This coefficient allows to take into account the contraction of streamlines during the airflow through the orifice which permits the use of the theoretical model in practice. Even though, the use of a discharge coefficient with a constant value such as it is stated in literature seems to be an invalid simplification. After the characterization of the wind tunnel, the different hypothesis of the application of the orifice law will be discussed. Then, the three theoretical models will be confronted to each other in order to obtain the plus accurate one. The objective of this study is to know what kind of hole must be used in order to have a discharge coefficient as independent as possible of the airflow by studying the influence of different parameters and by knowing the critical configurations. This will permit the modeling of a more accurate airflow through the building openings.

Key words: Discharge coefficient, ventilation, orifice law, theoretical modeling, scale modeling, pressure coefficient, wind incidence, porosity, Reynolds numbers, form factor

# Table des matières

<i>Résumé</i> .....	<i>ii</i>
<i>Abstract</i> .....	<i>iii</i>
<i>Analysis of the influence of geometrical and physical parameters on the discharge coefficient applied to the building's ventilation</i> .....	<i>iii</i>
<b>Table des matières</b> .....	<b>iv</b>
<b>Table des figures</b> .....	<b>vii</b>
<b>Table des tableaux</b> .....	<b>xii</b>
<i>Remerciements</i> .....	<i>xiii</i>
<b>Introduction</b> .....	<b>1</b>
<b>Partie I : Contexte</b> .....	<b>2</b>
I.1. Contexte général.....	2
I.1.1. <i>Présentation</i> .....	2
I.1.2. <i>Modèle théorique</i> .....	5
I.2. Contexte scientifique.....	7
I.3. Objectifs.....	9
<b>Partie II : Présentation du dispositif expérimental</b> .....	<b>10</b>
II.1. Soufflerie buse .....	10
II.1.1. <i>Description</i> .....	10
II.1.2. <i>Qualification de la soufflerie</i> .....	13
II.2. Modèle pour les essais.....	21
II.3. Instrumentation des mesures et le système de contrôle des débits .....	24
II.3.1. <i>Mesures de pression</i> .....	24
II.3.2. <i>Mesures de débits</i> .....	27
II.4. Protocole expérimental.....	29
<b>Partie III : Détermination du coefficient de décharge et des paramètres influents</b> .....	<b>32</b>
III.1. Présentation de la campagne expérimentale .....	32

III.2. Vérification préliminaire des essais réalisés à l'aide du modèle et validation par rapport à la littérature .....	35
III.2.1. Vérification de l'homogénéité du modèle et des coefficients de pression.....	36
III.2.2. Validation du modèle par rapport au modèle de Chu .....	41
III.3. Paramètres influençant le coefficient de décharge ( $C_d$ ) .....	46
III.3.1. Calcul du coefficient de décharge.....	46
III.3.2. Influence du Reynolds building ( $Re_b$ ) sur le $C_d$ .....	48
III.3.3. Influence du Reynolds orifice ( $Re_o$ ) sur le $C_d$ .....	52
III.3.4. Influence de l'incidence ( $\theta$ ) sur le $C_d$ .....	54
III.3.5. Influence de la forme de l'orifice sur le $C_d$ .....	57
III.3.6. Influence de la porosité ( $A_{orifice}/A_{mur}$ ) sur le $C_d$ .....	57
<b>Conclusion</b> .....	<b>62</b>
<b>Perspectives</b> .....	<b>63</b>
<b>Bibliographie</b> .....	<b>65</b>
<b>Annexe A</b> .....	<b>69</b>
Tableau récapitulatif des études sur le coefficient de décharge .....	69
<b>Annexe B</b> .....	<b>75</b>
Capteur Vaisala (T, P, HR) .....	75
<b>Annexe C</b> .....	<b>76</b>
Calcul de la masse volumique .....	76
<b>Annexe D</b> .....	<b>79</b>
Caractéristique de la veine de soufflerie .....	79
• Reproductibilité sur le plan à 30 cm .....	79
• Mesures sur le plan à 80 cm.....	82
<b>Annexe E</b> .....	<b>85</b>
Calcul de la surface de blocage et du coefficient de blocage .....	85
<b>Annexe F</b> .....	<b>86</b>

Visualisation des coefficients de pression sur la façade sans orifice.....	86
<b>Annexe G</b> .....	<b>90</b>
Répartition des coefficients de pression pour la plaque n°1 .....	90
<b>Annexe H</b> .....	<b>96</b>
Courbes de l'influence de l'incidence sur le coefficient de décharge .....	96

# Table des figures

Figure I-1 : paramètres influents sur la distribution des débits d'air dans le bâtiment (Feustel, 1998) .....	3
Figure I-2 : équation du coefficient de décharge .....	6
Figure II-1 : plan du sous-sol des souffleries climatiques.....	11
Figure II-2 : pièce de la soufflerie .....	11
Figure II-3 : photo du caisson de mesure avec la maquette.....	12
Figure II-4 : en 1, le tube de Pitot de référence fixé à la buse de sortie et en 2, la carte d'acquisition associée .....	12
Figure II-5 : fonctionnement du tube de Pitot.....	13
Figure II-6 : schéma du montage expérimental pour la mesure du vent.....	14
Figure II-7 : vue de face de la buse d'entrée avec le quadrillage des prises de mesures suivant Y et Z.....	14
Figure II-8: sonde de Pitot rapide .....	15
Figure II-9 : signal donnée par le Pitot rapide pour Y = 0 cm, Z = +10 cm et potentiomètre à 40 % .....	16
Figure II-10 : Post-traitement de la soufflerie.....	17
Figure II-11 : vitesse suivant des plans Y = -40, 0, 40 cm .....	18
Figure II-12 : vitesse suivant des plans Z = -40, 0, 40 cm .....	18
Figure II-13 : Intensité turbulente suivant les plans Y = -40, 0, 40 cm.....	19
Figure II-14 : Intensité turbulente suivant les plans Z = -40, 0, 40 cm .....	20
Figure II-15 : photo du caisson fixé à 0° avec les prises de pressions connectées.....	22
Figure II-16 : schéma de montage du caisson, incidence 0° .....	22
Figure II-17 : plaque de façade avec un orifice rond au centre .....	23
Figure II-18 : Capteurs de pression PSI de 32 voies à une fréquence d'acquisition de 200 Hz.....	24
Figure II-19 : photo du tube de cuivre avec le vinyle connecté et photo des tubes vinyles affleurant sur la plaque d'un orifice (d = 1 cm) .....	25
Figure II-20 : prises de pression sur le caisson.....	26



Figure II-21 : acquisition des 32 prises de pression en fonction du temps sans vent, mise en évidence de la déviation .....	26
Figure II-22 : acquisition des 32 prises de pression en fonction du temps sans vent sur 2 minutes 30 secondes, déviation "stabilisée" après un temps d'une heure sans offset .....	27
Figure II-23 : Schématisation et vue d'un diaphragme à prises de pression à la bride (Le Roux, 2011).....	28
Figure II-24 : protocole expérimental pour les essais sur le coefficient de décharge .....	31
Figure III-1 : plan d'expérience des essais sur le coefficient de décharge .....	34
Figure III-2 : plaque avec les 4 orifices vue de face.....	35
Figure III-3 : répartition des coefficients de pression sur la façade sans orifice, pour un angle d'incidence de 0°.....	38
Figure III-4 : répartition des pressions sur la façade sans vent, pour l'orifice de la plaque n°1 .....	39
Figure III-5 : répartition des pressions sur la façade sans vent, pour l'orifice de la plaque n°5 .....	40
Figure III-6 : répartition des coefficients de pression sur la façade avec un vent à 4,4 m/s à une incidence de 0°, pour l'orifice de la plaque n°5 .....	40
Figure III-7 : schéma du dispositif expérimental et de la plaque avec l'orifice testée par Chu (2009) .....	42
Figure III-8 : comparaison entre les valeurs de Chu et les nôtres, pour une vitesse nulle à 0° .....	43
Figure III-9 : comparaison entre les valeurs de Chu à 2 m/s et les nôtres à 5 m/s à 0° ...	43
Figure III-10 : comparaison entre les valeurs de Chu à 8 m/s et les nôtres à 10 m/s à 0° .....	44
Figure III-11 : comparaison entre les valeurs de Chu à 8 m/s et les nôtres à 10 m/s à 45° .....	45
Figure III-12 : loi débit/pression pour la plaque n°1, sans vent, pour une incidence de 0° .....	47
Figure III-13 : $C_d$ en fonction du $Re_b$ pour une incidence de 0° pour la plaque n°1.....	49
Figure III-14 : $C_d$ en fonction du $Re_b$ pour une incidence de 45° pour la plaque n°6 avec les 4 orifices ouverts .....	50

Figure III-15 : $C_d$ en fonction du $Re_b$ pour une incidence de $180^\circ$ pour la plaque n°6 avec les 4 orifices ouverts .....	51
Figure III-16 : courbe du $C_d$ en fonction du $Re_o$ à une incidence de $0^\circ$ pour la plaque n°4 .....	52
Figure III-17 : courbe du $C_d$ en fonction du $Re_o$ à une incidence de $45^\circ$ pour la plaque n°4 .....	53
Figure III-18 : variation de l'exposant $n$ et du coefficient de décharge en fonction de l'incidence pour la plaque n° 1 .....	55
Figure III-19 : Ensemble des $C_d$ en fonction de la porosité pour les orifices circulaires .	59
Figure III-20 : Ensemble des $C_d$ en fonction de la porosité pour les orifices rectangulaires .....	60
Figure D-1 : vitesse suivant les plans $Y = -40, 0, 40$ cm .....	79
Figure D-2 : vitesse suivant les plans $Z = -40, 0, 40$ cm .....	80
Figure D-3 : intensité turbulente suivant les plans $Y = -40, 0, 40$ cm.....	80
Figure D-4 : intensité turbulente suivant les plans $Z = -40, 0, 40$ cm.....	81
Figure D-5 : vitesse suivant les plans $Y = -30, 10, 30$ cm.....	82
Figure D-6 : vitesse suivant les plans $Z = -30, 10, 30$ cm.....	82
Figure D-7 : intensité turbulente suivant les plans $Y = -30, 10, 30$ cm .....	83
Figure D-8 : intensité turbulente suivant les plans $Z = -30, 10, 30$ cm .....	83
Figure F-1 : répartition des coefficients de pression sur la façade sans orifice, pour un angle d'incidence de $45^\circ$ .....	86
Figure F-2 : répartition des coefficients de pression sur la façade sans orifice, pour un angle d'incidence de $60^\circ$ .....	87
Figure F-3 : des coefficients de pression sur la façade sans orifice, pour un angle d'incidence de $75^\circ$ .....	87
Figure F-4 : répartition des coefficients de pression sur la façade sans orifice, pour un angle d'incidence de $90^\circ$ .....	88
Figure F-5 : répartition des coefficients de pression sur la façade sans orifice, pour un angle d'incidence de $135^\circ$ .....	88
Figure F-6 : répartition des coefficients de pression sur la façade sans orifice, pour un angle d'incidence de $180^\circ$ .....	89

Figure G-1 : répartition des coefficients de pression autour de l'orifice de la plaque n°1, à une vitesse de 5 m/s et une incidence de 0° .....	90
Figure G-2 : répartition des coefficients de pression autour de l'orifice de la plaque n°1, à une vitesse de 10 m/s et une incidence de 0° .....	91
Figure G-3 : répartition des coefficients de pression autour de l'orifice de la plaque n°1, à une vitesse de 15 m/s et une incidence de 0° .....	91
Figure G-4 : répartition des coefficients de pression autour de l'orifice de la plaque n°1, à une vitesse de 20 m/s et une incidence de 0° .....	92
Figure G-5 : répartition des coefficients de pression autour de l'orifice de la plaque n°1, à une vitesse de 5 m/s et une incidence de 45° .....	92
Figure G-6 : répartition des coefficients de pression autour de l'orifice de la plaque n°1, à une vitesse de 5 m/s et une incidence de 60° .....	93
Figure G-7 : répartition des coefficients de pression autour de l'orifice de la plaque n°1, à une vitesse de 5 m/s et une incidence de 75° .....	93
Figure G-8 : répartition des coefficients de pression autour de l'orifice de la plaque n°1, à une vitesse de 5 m/s et une incidence de 90° .....	94
Figure G-9 : répartition des coefficients de pression autour de l'orifice de la plaque n°1, à une vitesse de 5 m/s et une incidence de 135° .....	94
Figure G-10 : répartition des coefficients de pression autour de l'orifice de la plaque n°1, à une vitesse de 5 m/s et une incidence de 180° .....	95
Figure H-1 : variation de l'exposant n et du coefficient de décharge en fonction de l'incidence pour la plaque n° 1 (copie de la figure III-17) .....	97
Figure H-2 : variation de l'exposant n et du coefficient de décharge en fonction de l'incidence pour la plaque n° 2 .....	98
Figure H-3 : variation de l'exposant n et du coefficient de décharge en fonction de l'incidence pour la plaque n° 3 .....	99
Figure H-4 : variation de l'exposant n et du coefficient de décharge en fonction de l'incidence pour la plaque n° 4 .....	100
Figure H-5 : variation de l'exposant n et du coefficient de décharge en fonction de l'incidence pour la plaque n° 5 .....	101
Figure H-6 : variation de l'exposant n et du coefficient de décharge en fonction de l'incidence pour la plaque n° 6 avec un orifice ouvert.....	102

Figure H-7 : variation de l'exposant  $n$  et du coefficient de décharge en fonction de l'incidence pour la plaque n° 6 avec 2 orifices ouverts .....103

Figure H-8 : variation de l'exposant  $n$  et du coefficient de décharge en fonction de l'incidence pour la plaque n° 6 avec 4 orifices ouverts .....104

# Table des tableaux

Tableau II-1 : données récapitulatives de vitesses et d'intensité turbulente de la veine d'essai pour le plan $X = 30$ cm .....	19
Tableau III-1 : valeurs de vitesse et d'intensité turbulente du vent dans la soufflerie à vide.....	33
Tableau III-2 : fréquence d'alimentation du ventilateur .....	33
Tableau III-3 : angle d'incidence.....	33
Tableau III-4 : orifices testés.....	33
Tableau III-5 : coefficient de décharge calculé par la première méthode pour la plaque n°1, une incidence de $0^\circ$ et une vitesse nulle.....	47
Tableau A-1 : tableau récapitulatif des études sur le coefficient de décharge .....	71
Tableau B-1 : données du capteur Vaisala PTU 300 .....	75
Tableau C-1 : température, humidité, pression atmosphérique et masse volumique de l'air lors des essais .....	77
Tableau D-1 : récapitulatif des vitesses et de l'intensité turbulente sur le plan à 30 cm.	81
Tableau D-2 : récapitulatif des vitesses et de l'intensité turbulente sur le plan à 80 cm.	84
Tableau E-1 : coefficient d'obstruction en fonction de l'incidence .....	85

## **Remerciements**

Je tiens à remercier le CSTB de Nantes pour m'avoir accueilli en stage et m'avoir donné les moyens de réaliser cette étude. Je tiens aussi à remercier Xavier Faure pour son aide et son enthousiasme ainsi que Nicolas Le Roux. Merci aux techniciens de m'avoir aidé quand j'avais des questions et de m'avoir mis à disposition le matériel. Enfin, je tiens à remercier Amélie Lannuzel pour son soutien et de m'avoir supporté dans les moments plus difficiles.

---

# Introduction

---

Dans la ventilation du bâtiment, l'obtention des débits d'air souhaités reste un problème, de sa conception à sa mise en œuvre. Des modèles théoriques ont été développés pour pouvoir prédire les débits d'air entrant ou sortant et sont toujours d'actualité. Mais dans la pratique une multitude de facteurs influent sur la prédiction idéale et faussent en général le résultat. C'est pour cela que le coefficient de décharge a été introduit pour palier aux effets de l'environnement et obtenir une valeur proche de la réalité. Mais prendre une valeur constante pour le coefficient de décharge quelque soit le type d'orifices et la configuration de l'environnement, c'est oublier pourquoi il a été introduit. Ce stage est donc dédié à l'étude de l'influence des paramètres géométriques (forme de l'orifice, rapport de forme et porosité) et des paramètres physiques du vent (vitesse et incidence) sur le coefficient de décharge appliqué à la ventilation dans le bâtiment. Ce stage s'effectue au CSTB de Nantes au sein du département CAPE (Climatologie, Aérodynamique, Pollution et Epuration) qui regroupe parmi ses employés des experts de l'aéraulique ainsi que des moyens expérimentaux conséquents. L'examen des paramètres influant sur le coefficient de décharge commencera par une étude bibliographique qui permettra de poser les bases théoriques et d'orienter vers quels paramètres les recherches vont se porter. Ensuite, connaissant les besoins, le dispositif expérimental ainsi que les essais qui seront réalisés vont être décrits. Puis l'analyse de l'influence des différents paramètres sur le coefficient de décharge se fera. Enfin, le coefficient de décharge sera caractérisé aux travers de cette étude pour améliorer sa compréhension et les besoins de l'ingénierie aéraulique pour le bâtiment.

---

# Partie I : Contexte

---

## I.1. Contexte général

### I.1.1. Présentation

La ventilation d'un bâtiment est indispensable quelle que soit son utilisation (résidentielle, tertiaire, industrielle). Le rôle de la ventilation est double. Premièrement, elle doit veiller à la qualité de l'air intérieur, c'est-à-dire que les polluants soient évacués avant qu'ils y en aient au-delà d'une concentration néfaste. Ceci est important pour la santé de l'occupant comme celle du bâti (moisissures dues à l'humidité). De ce fait, il y a un débit minimal à respecter en apportant une quantité d'air neuf suffisante. C'est la principale préoccupation à la saison froide lorsque les locaux sont peu ouverts. Ainsi la réglementation française oblige un débit de renouvellement d'air en ventilation mécanique suivant le type de local et son utilisation. Mais il faut prendre en compte que cet apport d'air frais est à l'origine de déperditions thermiques ce qui alimente encore aujourd'hui de nombreux débats. Par exemple quand Liddament prend la totalité du parc immobilier anglais en 1998, il montre que le renouvellement d'air consomme approximativement 36 % de l'énergie pour l'air conditionné et contribue à près de la moitié des pertes d'énergie en chauffage (Liddament, 1998).

Deuxièmement, la ventilation sert à maintenir une ambiance thermique confortable pour les occupants, principalement en été, en apportant de l'air frais et en rafraichissant les occupants ainsi que la structure. Il faut bien sûr réfléchir à sa conception, car pour un fonctionnement efficace elle demande un apport d'air plus frais que celui se trouvant à



l'intérieur. Et les débits sont ici bien plus importants que pour les débits hygiéniques. Ce qui demande des ouvertures plus grandes, les fenêtres par exemple.

Ces débits de ventilation résultent de l'action simultanée du vent, du tirage thermique, de la ventilation mécanique et du comportement de l'utilisateur qui créent une répartition de pression dans le bâtiment et sur son enveloppe comme le montre la Figure I-1.

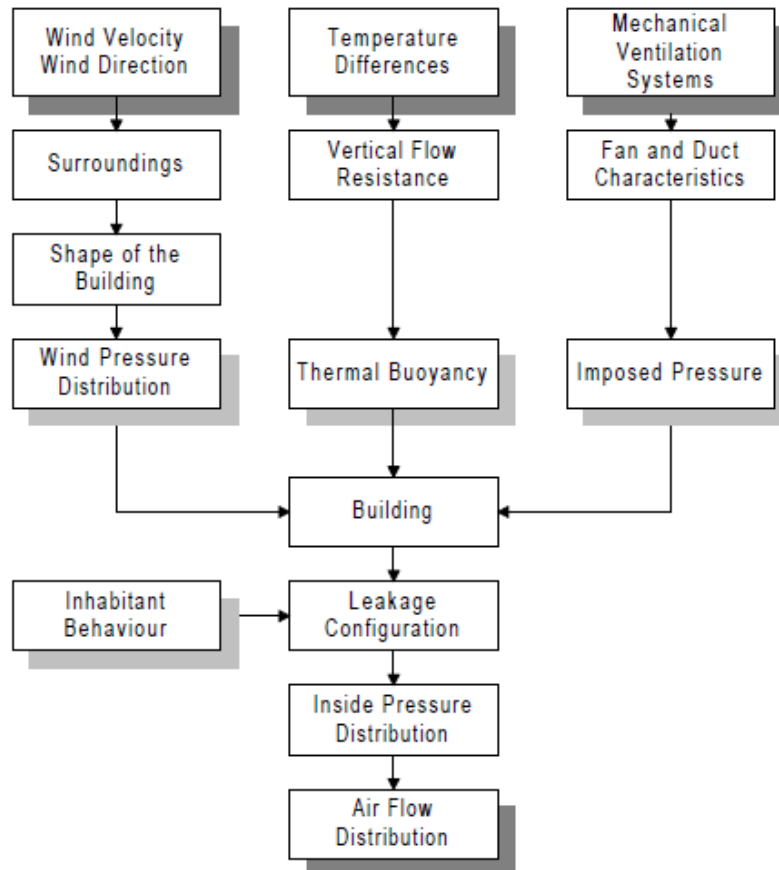


Figure I-1 : paramètres influents sur la distribution des débits d'air dans le bâtiment (Feustel, 1998)

Parmi ces différentes méthodes de ventilation, la ventilation naturelle émerge de plus en plus à notre époque et répond bien à trois exigences liées (Karava, 2008) :

- Promouvoir le développement durable par l'utilisation de matériaux respectueux de l'environnement et de sources d'énergies renouvelables.
- Minimiser les coûts de l'énergie pour des besoins tels que le chauffage, le rafraîchissement, la ventilation et l'éclairage.

- Améliorer la qualité de l'environnement intérieur et le confort.

Dans le cadre de ce stage, la ventilation naturelle n'est abordée que par rapport aux effets du vent. Les effets thermiques ainsi que la ventilation mécanique ne seront pas traités. La ventilation entraînée par le vent est connue comme étant une stratégie de ventilation efficace, à faible coût et demandant peu d'entretien, une bonne alternative à la ventilation mécanique (Wang, 2010 ; Etheridge & Sandberg, 1996 ; Linden, 1999).

Mais des problèmes persistent quant à sa conception, sa mise en œuvre ou son implantation qui ne permettent pas toujours d'obtenir les débits d'air souhaités. En effet, dès la conception l'utilisation d'outils informatiques simplifiés pour la prédiction des débits n'est pas parfaitement fiable car souvent il faut introduire des paramètres source d'erreur, le coefficient de décharge ( $C_d$ ) et les coefficients de pressions ( $C_p$ ).

Les calculs de débit s'appuient sur ces coefficients. Le coefficient de décharge permet de relier le modèle idéal d'écoulement de Bernoulli à celui qui passe réellement à travers l'orifice (détail dans le paragraphe II.1.2). Ces problèmes se retrouvent pour beaucoup de chercheurs lors de leurs modélisations numériques (Regard, 1996 ; Straw, 2000 ; Chiu, 2007 ; Karava, 2008 ; Wang, 2010). Par exemple, selon l'étude de Straw, pour une configuration normale (incidence normale du vent par rapport à la maquette,  $\theta = 0^\circ$ ), la méthode du coefficient de décharge sous-estime le débit de ventilation moyen vis-à-vis des mesures expérimentales. Et pour une configuration parallèle (incidence du vent parallèle à la paroi de la maquette,  $\theta = 90^\circ$ ), la méthode du coefficient de décharge surestime le débit de ventilation moyen. Ces coefficients soulèvent des questions, dont deux incertitudes:

- Le coefficient de décharge,  $C_d$ , est déterminé dans un cas sans vent. Peut-il être affecté par le vent ? Il devrait, par définition, ne pas être perturbé par l'écoulement environnant.
- Le coefficient de pression,  $C_p$ , fourni dans les livres de calculs est mesuré en l'absence d'ouverture sur les modèles. Peut-il être influencé par ces ouvertures ? Il devrait donc être constant même à proximité de l'orifice.

C'est sur le coefficient de décharge que porte l'essentiel de l'étude décrite dans ce rapport. Pour y voir plus clair sur celui, le paragraphe suivant caractérise à partir de quel modèle théorique il est défini. D'autre part, le coefficient de pression sera étudié aux abords de l'orifice pour vérifier son homogénéité spatiale et conclure sur les dispositions à prendre pour le mesurer.

### **I.1.2. Modèle théorique**

Le paragraphe précédent permet de situer le coefficient de décharge et les problèmes qu'il peut créer. Maintenant, le modèle théorique associé permettra de le comprendre explicitement. L'équation(1.1) la plus communément utilisée pour décrire l'écoulement de l'air à travers une ouverture est la loi d'orifice. Celle-ci est basée sur l'équation de Bernoulli pour un fluide incompressible et non visqueux dans un écoulement stationnaire :

$$Q = C_d \cdot A \cdot \sqrt{\frac{2|\Delta P|}{\rho}} \quad (1.1)$$

Elle relie le débit  $Q$  [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] à la différence de pression  $\Delta P$  [Pa] entre la face extérieure et la face intérieure. Dans l'équation, la masse volumique  $\rho$  [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ], l'aire de l'orifice  $A$  [ $\text{m}^2$ ] et le coefficient de décharge  $C_d$  [-] interviennent aussi. Comme il a été dit précédemment, le coefficient de décharge permet de relier le modèle idéalisé de Bernoulli à la réalité. C'est une constante sans dimension qui est généralement prise dans une fourchette de 0,60 à 0,65, valeur par défaut prise dans une multitude de publications citant l'ASHRAE. Le coefficient de décharge caractérise la contraction locale de l'écoulement liée à la présence d'un orifice ; il est fonction des caractéristiques du fluide, de la forme de l'ouverture, de l'écoulement en amont de l'ouverture et sa détermination est problématique. L'application de l'équation du coefficient de décharge obéit à plusieurs hypothèses (Karava, 2004 ; Wang, 2010) :

- 1) L'écoulement turbulent est totalement développé.
- 2) La distribution de pression sur l'enveloppe du bâtiment n'est pas affectée par la présence des ouvertures (hypothèse d'un corps étanche).

- 3) Le coefficient de décharge obtenu lors de test sans vent est vrai pour des cas instationnaires.
- 4) La différence de pression de part et d'autre de l'orifice est égale à la différence de pression statique, i.e. la pression dynamique dans la pièce intérieure est négligée. En d'autres termes, l'énergie cinétique de l'air induit par le vent en aval et passant dans l'orifice est dissipée en aval de l'orifice (Sandberg, 2004).

Des détails physiques sur l'écoulement d'un fluide à travers l'ouverture d'une paroi peuvent être trouvés dans le livre d'Etheridge et Sandberg (1996, p. 42-48). L'équation (1.1) a été plus détaillée par l'équation (1.2) et comme l'illustre la Figure I-2 (Karava, 2008) :

$$Q = A_c \cdot U_c = C_c \cdot A \cdot C_v \cdot U_{th} = C_d \cdot A \cdot \sqrt{\frac{2|\Delta P|}{\rho}} \quad (1.2)$$

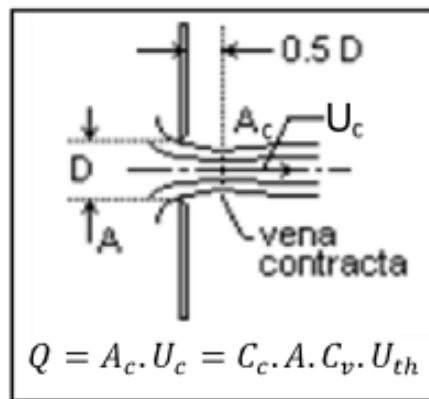


Figure I-2 : équation du coefficient de décharge

Où  $C_d = C_c \cdot C_v$  avec  $C_c = \frac{A_c}{A}$  qui correspond au coefficient de contraction  $\leq 1$  et  $C_v = \frac{U_c}{U_{th}}$  le coefficient de vitesse  $\leq 1$ . Ici,  $U_{th}$  est la vitesse théorique de l'air [m/s],  $A$  l'aire de l'orifice [m<sup>2</sup>],  $A_c$  l'aire au niveau de la contraction de la veine [m<sup>2</sup>] et  $U_c$  la vitesse au niveau de la contraction [m/s]. Le problème de cette particularisation des termes est qu'en pratique on ne peut pas différencier les deux coefficients. Une approche globale sur le coefficient de décharge est privilégiée dans la suite. Ainsi, seule l'équation (1.1) sera considérée.

En outre, cette équation est valable pour des orifices de taille raisonnable. En effet pour des orifices trop grands (fenêtre), le coefficient de décharge n'est pas constant sur toute

la surface. Alors que pour des orifices trop petits (fissures à l'origine d'infiltration d'air), la loi carré n'est plus valable. Une loi puissance serait alors plus adaptée. Cette discussion sur le choix de la loi a déjà eu lieu (Etheridge, 1977 ; Etheridge, 1998 ; Walker, 1998) mais elle n'a pas abouti à une conclusion à l'heure actuelle. En s'appuyant alors sur le travail de Faure, 2010, une loi puissance (1.3) sera utilisée et comparée à l'équation (1.1) pour vérifier leur précision.

$$Q = K \cdot \Delta P^n \quad (1.3)$$

Où  $K$  devient un coefficient de perte [ $\text{m}^3/\text{s} \cdot \text{Pa}^n$ ] et  $n$  la puissance de pression. Cette équation généralise en quelque sorte l'équation (1.1) même si elle n'a pas d'origine physique du point de vue de Bernoulli. Elle permettra de maximiser le coefficient de corrélation entre les mesures et la courbe de tendance en faisant varier  $K$  et  $n$ .

Le deuxième coefficient qui sera utilisé, est le coefficient de pression (1.4). Il permet de donner une répartition de pression adimensionnelle, en s'acquittant du cadre local où il a été déterminé, ce qui facilite sa comparaison au regard d'autres coefficients de pression.

$$C_p = \frac{P - P_{ref}}{\frac{1}{2} \rho U^2} \quad (1.4)$$

Où  $P$  est la pression mesurée [Pa],  $P_{ref}$  la pression statique de référence dans l'écoulement [Pa] et  $U$  la vitesse de l'air [m/s], ce qui donne la pression dynamique  $P_{dyn} = \frac{1}{2} \rho U^2$  en [Pa].

Les bases théoriques étant posées, la partie suivante va permettre de récolter les facteurs influençant le coefficient de décharge et de montrer un récapitulatif des différentes études déjà faites sur ce coefficient.

## **I.2. Contexte scientifique**

Le coefficient de décharge a été l'objet de nombreuses recherches. En effet, il est pris par défaut constant avec une valeur de 0,6 à 0,65. Le Tableau A-1 : tableau récapitulatif des études sur le coefficient de décharge en Annexe A présente une liste non exhaustive

d'étude sur le coefficient de décharge. Il montre une majeure partie des paramètres qui ont été étudiés pour leurs influences ou non sur ce coefficient. Il s'inspire de la publication de Karava en 2004, présentant un tableau récapitulatif similaire.

Une analyse du tableau 1 en annexe révèle que :

- Le nombre de paramètres influents sur le coefficient de décharge est important. Il y a des paramètres géométriques (forme de l'orifice, porosité, forme du bâti, placement de l'ouverture, placement des pièces à l'intérieur du bâti) et des paramètres dépendant du vent (vitesse, turbulence, incidence) qui entrent en jeu.
- En considérant le nombre de paramètres, les auteurs ont proposé différentes manières de formuler le coefficient de décharge. Mais il n'existe aucun accord général. Chaque étude étant réalisée dans des conditions et avec des hypothèses particulières, il est difficile de les comparer et d'obtenir une valeur globale pour le coefficient de décharge. De plus, tous n'observent pas les mêmes variations suivant le paramètre, par exemple Chu (2009) trouve une indépendance du coefficient de décharge par rapport à la porosité alors que Karava (2007) montre son effet. Ceci s'explique par le fait qu'ils ne travaillent pas forcément avec les mêmes hypothèses. Chu travaille avec une porosité  $r < 7\%$  quand Karava fait varier la porosité de 0.5 à 22%. On voit tout de même une variation du  $C_d$  pour une porosité inférieure à 7 % chez Karava, mais les maquettes et les conditions d'essai ne sont pas identiques.
- Le coefficient de décharge dans les études citées, peut varier d'une valeur de 0,1 (Chiu, 2007) jusqu'à quasiment 2 (Regard, 1996). Le débit à travers l'orifice peut alors être largement surestimé ou sous-estimé si une valeur par défaut est prise à 0,65.

Il n'y a au final pas d'accord global sur la valeur du coefficient de décharge. Qui plus est, une valeur fixe est difficile à concevoir après les nombreuses études qui montrent la variation de ce coefficient. C'est pourquoi l'étude faite ici a été souhaitée et le paragraphe suivant exposera les objectifs posés.

### I.3. Objectifs

Il est important de prendre en compte le bon coefficient de décharge dans la ventilation. Etant donné que la communauté scientifique présente des valeurs différentes, il semble pertinent de réaliser une étude complète intégrant les précédentes et adaptée à l'ingénierie aéraulique pour le bâtiment. Les objectifs à atteindre sont donc :

- Observer et analyser l'effet de différents paramètres sur le coefficient de décharge qui sont la vitesse du vent (au travers du nombre de Reynolds du caisson,  $Re_b$ ), la vitesse de l'air dans l'orifice (avec le Reynolds de l'orifice,  $Re_o$ ), l'incidence du vent, la forme de l'ouverture (orifice rond, carré, épaisseur variable) et la porosité.
- Etudier laquelle des deux relations, l'équation de Bernoulli (1.1) ou la loi d'orifice (1.4), permet d'obtenir la meilleure approximation de façon simple.
- trouver la forme d'orifice la moins sensible aux variations pour avoir des essais futurs simplifiés.

Ces objectifs vont diriger le reste de l'étude. Dans la partie II, le dispositif expérimental sera présenté. La soufflerie pour les essais sera qualifiée, la maquette et les capteurs utilisés pour l'obtention du  $C_d$  seront ensuite présentés. Enfin, le protocole d'exploitation sera explicité. La partie suivante exposera l'exploitation des résultats. D'abord le dispositif expérimental sera validé par rapport à des études déjà menées (Chu, 2009). Le programme d'essai sera ensuite décrit et l'influence des paramètres sur le coefficient de décharge sera étudiée. Cette partie se conclura par une réponse aux objectifs cités précédemment. Enfin, une perspective s'ouvrira sur le travail encore possible sur le coefficient de décharge, les paramètres non-étudiés par exemple.

---

## Partie II : Présentation du dispositif expérimental

---

La première partie a permis de poser les bases bibliographiques et théoriques utiles à la compréhension du coefficient de décharge. À présent, le dispositif expérimental va être décrit. Pour les besoins des essais, une soufflerie sera utilisée. Celle-ci a besoin d'être en premier lieu définie pour connaître exactement les caractéristiques de l'écoulement d'air dans lequel sera baigné le modèle. Par la suite, celui-ci va être défini ainsi que tous les capteurs qui en dépendent pour la spécification du coefficient de décharge.

### **II.1. Soufflerie buse**

#### **II.1.1. Description**

Lors des différentes campagnes d'essais pour obtenir le coefficient de décharge, la soufflerie Buse a été utilisée. Celle-ci est une soufflerie de type Eiffel situé au sous-sol du bâtiment des souffleries climatiques dans une pièce de dimension 15.5 m\*9.2 m\*2.6 m (Figure II-1). Une telle soufflerie ouverte ne représente pas réellement l'environnement mais elle est suffisante pour simuler un champ de pression extérieur ce qui convient parfaitement à l'étude générale voulue sur le coefficient de décharge.

Cette soufflerie fonctionne en veine libre à aspiration permettant de générer des vents allant de 5 m/s jusqu'à 20 m/s sur une buse de section de 1.1 m\*1.1 m avec une intensité



turbulente homogène sur le centre de la section. La Figure II-2 présente une schématisation de la soufflerie dans la pièce.

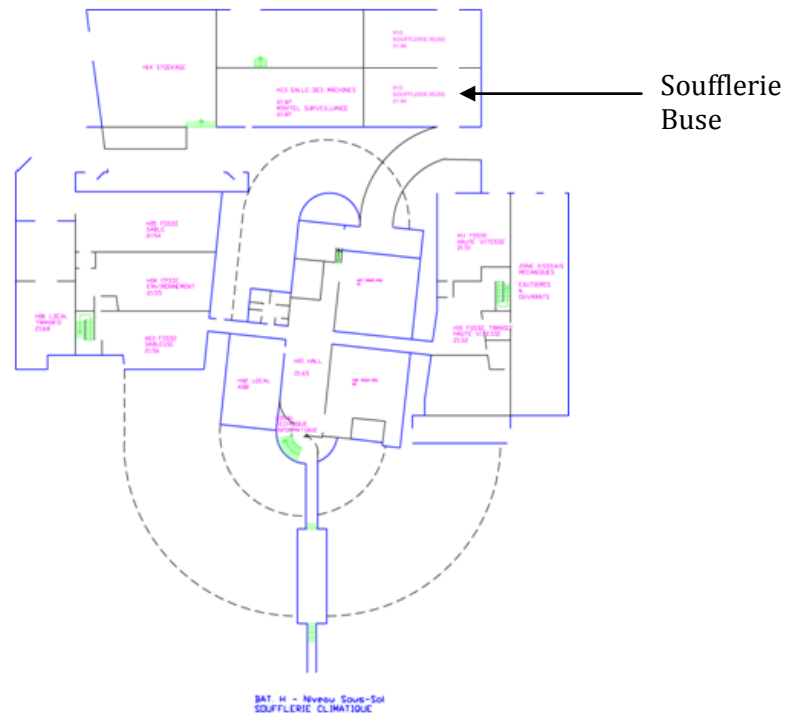


Figure II-1 : plan du sous-sol des souffleries climatiques

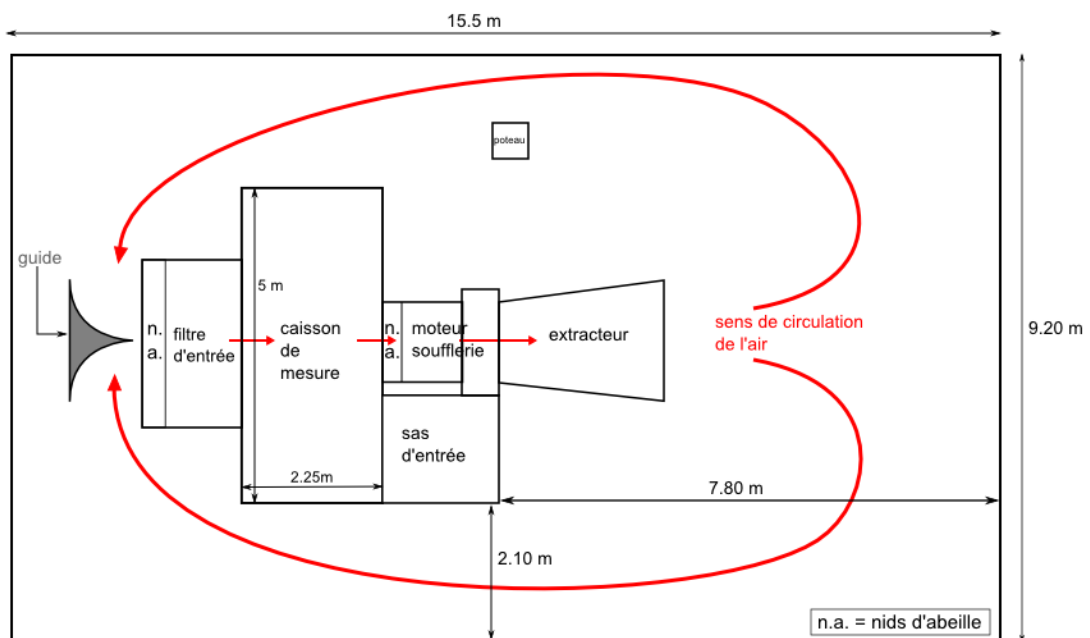


Figure II-2 : pièce de la soufflerie

Plus précisément, la Figure II-3 présente une photo de la veine d'essai :



Figure II-3 : photo du caisson de mesure avec la maquette

L'acquisition des données de température, d'hygrométrie et de pression atmosphérique est réalisée dans la pièce voisine à l'aide du capteur Vaisala (cf. Annexe B). Et il est supposé y avoir peu de variation entre les deux pièces séparées par une simple paroi en contreplaqué. Ces données permettent le calcul de la masse volumique de l'air. Après des relevés journaliers, la masse volumique est prise comme valeur moyenne à  $1,2 \text{ kg/m}^3$  (données de calculs en Annexe C).

Pour l'ensemble des tests réalisés, la mesure de la vitesse du vent est effectuée par un tube de Pitot situé au niveau de la buse de sortie. Il est accompagné de la carte d'acquisition à affichage direct (Figure II-4 : en 1, le tube de Pitot de référence fixé à la buse de sortie et en 2, la carte d'acquisition associée), ce qui permet des vérifications préalable de la stabilité et de l'homogénéité des pressions.

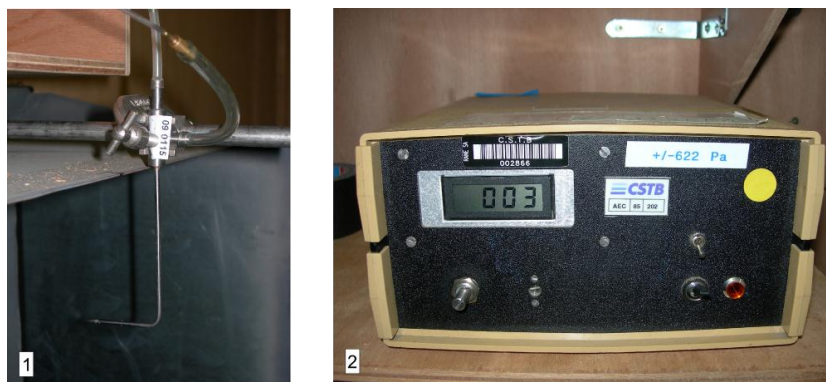


Figure II-4 : en 1, le tube de Pitot de référence fixé à la buse de sortie et en 2, la carte d'acquisition associée

Remarque : le fonctionnement du tube de Pitot est présenté dans la Figure II-5 :

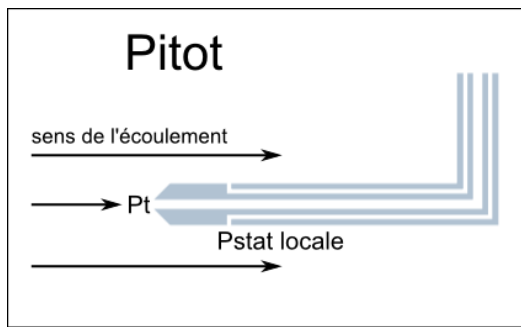


Figure II-5 : fonctionnement du tube de Pitot

fonctionnement du tube de Pitot. Figure II-5, cet instrument permet de mesurer la pression totale dans l'écoulement ( $P_t$ ) ainsi que la pression statique locale ( $P_{stat}$  locale). Grâce à ces deux pressions, on peut calculer la pression dynamique qui est la soustraction de la seconde à la première

( $P_{dyn} = P_t - P_{stat}$ ). Dans le cas d'un écoulement incompressible, en utilisant l'équation de

Bernoulli la vitesse du fluide dans l'écoulement permet d'obtenir cette pression dynamique.

Les variations de vitesse dans la soufflerie sont obtenues en modulant la fréquence d'alimentation du moteur. L'intensité turbulente n'est quant à elle pas maîtrisée. Elle est asservie à la détermination de la vitesse.

## II.1.2. Qualification de la soufflerie

### II.1.2.1. Dispositif expérimental

L'utilisation de la soufflerie implique en premier lieu sa caractérisation. Elle consiste à mesurer la vitesse moyenne et l'intensité turbulente sur un maillage de la veine d'essai. Cette caractérisation ne se fera que selon l'axe d'écoulement, l'axe X. Pour rappel, ces données sont obtenues ainsi :

$$U = \text{signe}(\Delta P) \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot |\Delta P|}{\rho}} \quad (2.1)$$

$$I_u = \frac{\sigma(U)}{\bar{U}} \cdot 100 \quad (2.2)$$

Où  $U$  correspond à la vitesse du vent [m/s] calculée à partir de la différence de pression  $\Delta P = P_t - P_{stat}$  [Pa] avec  $\rho$  la masse volumique [kg/m<sup>3</sup>]. Et  $I_u$  correspond à l'intensité turbulente de l'écoulement. L'intensité turbulente est une grandeur sans dimension qui caractérise l'agitation par rapport au champ cinétique moyen.

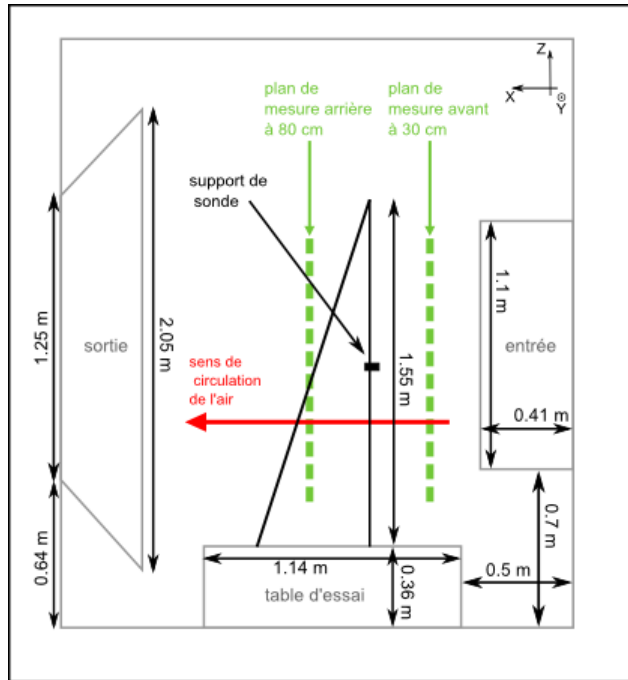


Figure II-6 : schéma du montage expérimental pour la mesure du vent

La Figure II-6 présente le montage expérimental permettant de quadriller la veine. Ce quadrillage de la veine par la sonde de mesure est effectué tous les 10 cm (cf. Figure II-7). Et ceci est fait sur 2 plans de mesure selon l'axe X : un plan central situé à 30 cm de la bouche d'entrée et un second plan en arrière à 80 cm (cf. Figure II-6). Tout cela permet de vérifier l'uniformité sur les 3 dimensions de la vitesse du vent et de l'intensité turbulente.

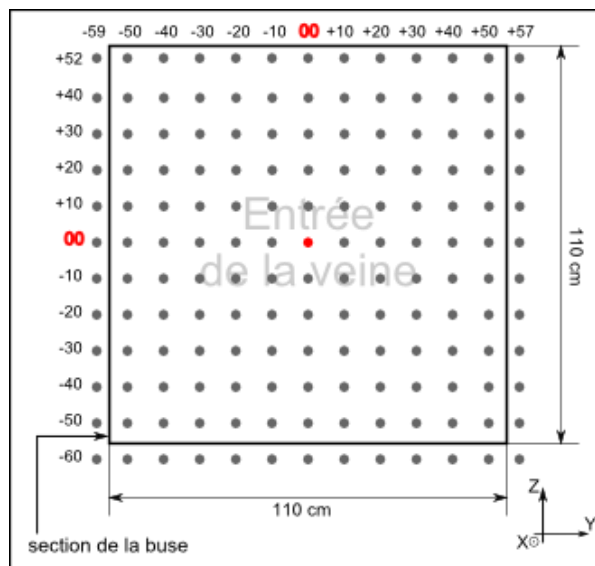


Figure II-7 : vue de face de la buse d'entrée avec le quadrillage des prises de mesures suivant Y et Z

### **II.1.2.2. Instrumentation et protocole expérimental**

Le capteur utilisé pour ces essais est une sonde "Pitot rapide" qui permet d'acquérir à une fréquence de 200 Hz les données de pression. Le capteur de pression (conversion de la pression en signal électrique) se trouve au plus proche du tube de Pitot pour ne pas avoir d'amortissement du signal et donc pas de modification des fréquences. En effet, la distance entre le tube de Pitot et le capteur est minimisée comme on peut le voir sur la photographie (Figure II-8). La sonde est ensuite reliée par un câble à l'alimentation et lui transmet les données par ce même câble. La carte d'acquisition étant une carte National Instruments (NI) 9215 avec une liaison USB NI USB-9162, elle acquiert directement la pression dynamique du Pitot de référence et du Pitot rapide.

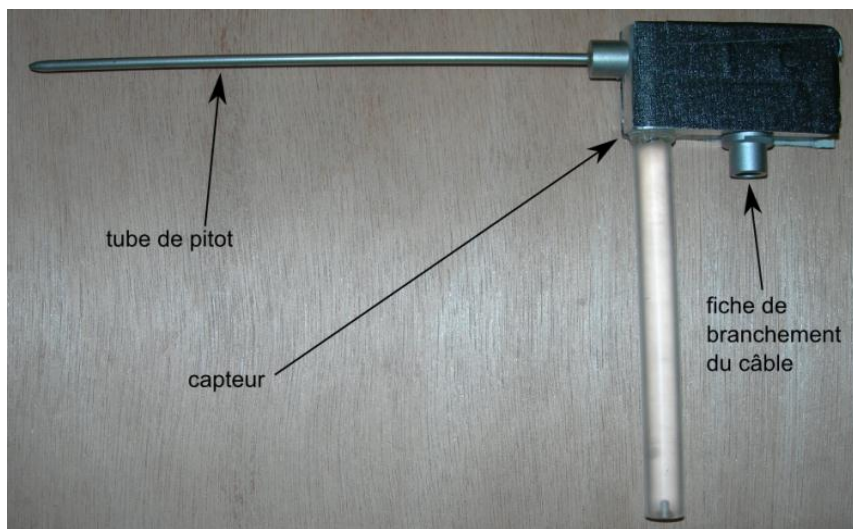


Figure II-8: sonde de Pitot rapide

Chaque acquisition se fait sur un intervalle de temps de 30 secondes, ce qui permet de travailler avec des valeurs moyennes en atténuant les effets des différentes perturbations possibles. Ces perturbations peuvent être d'ordre mécanique (l'ouverture de la porte d'accès lors d'essai) ou d'ordre magnétique (fréquence de fonctionnement du moteur de la soufflerie, ou fonctionnement des souffleries climatiques au-dessus). Sur ces deux sortes de perturbations, la première peut être effacée en refaisant l'essai. Pour la seconde, n'ayant pas d'influence possible sur son origine, elle a été négligée. Au final, le signal obtenu par ce système correspond à la Figure II-9. On remarque qu'il est

effectivement stable (ici vitesse moyenne égale à 10,8 m/s pour une intensité turbulente de 7,2%).

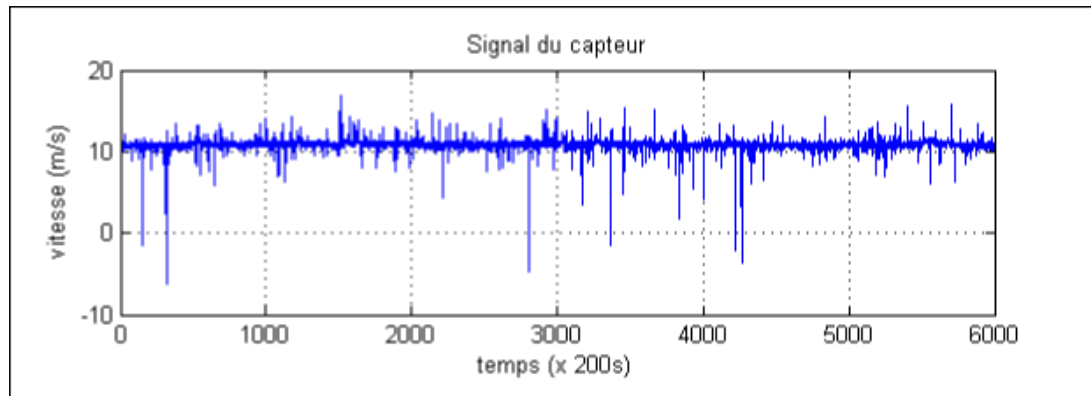


Figure II-9 : signal donnée par le Pitot rapide pour  $Y = 0$  cm,  $Z = +10$  cm et potentiomètre à 40 %

Une fois le dispositif mis en place, le protocole d'essai est défini tel que, pour chaque position géométrique du capteur (cf. Figure II-6) pour le plan à 30 cm de la buse de sortie, cinq valeurs du potentiomètre soient utilisées : 20, 30, 40, 50 et 65%. Chaque mesure se fait quand le régime permanent de la soufflerie est atteint (il faut attendre une dizaine de seconde minimum). Dès qu'elle est acquise, une vérification visuelle est faite pour s'assurer de la stabilité temporelle et de la cohérence de la mesure. D'autres mesures sur ce plan sont effectuées pour s'assurer de la reproductibilité des essais. Enfin ces mêmes mesures sont réitérées sur un plan à 80 cm de l'ouverture mais en allégeant le nombre de prise avec seulement une prise tous les 20 cm en commençant par le point de coordonnées  $Y = +10$ ,  $Z = 00$  et avec trois valeurs de potentiomètre : 20, 40 et 65 %.

### II.1.2.3. *Post traitement, allure des vitesses et intensités turbulentes*

Avec les mesures de pressions obtenues et validées, la vitesse et l'intensité turbulente sont calculées. La vitesse est calculée à partir des données du Pitot de référence et du Pitot rapide alors que l'intensité turbulente uniquement sur les dernières. Les résultats obtenus pour le premier essai vont être détaillés tout de suite, ainsi que les différences avec les résultats du plan arrière (ceux-ci étant tout de même précisés à l'Annexe D). La

méthode de dépouillement des résultats est exposée dans le schéma ci-dessous (Figure II-10).

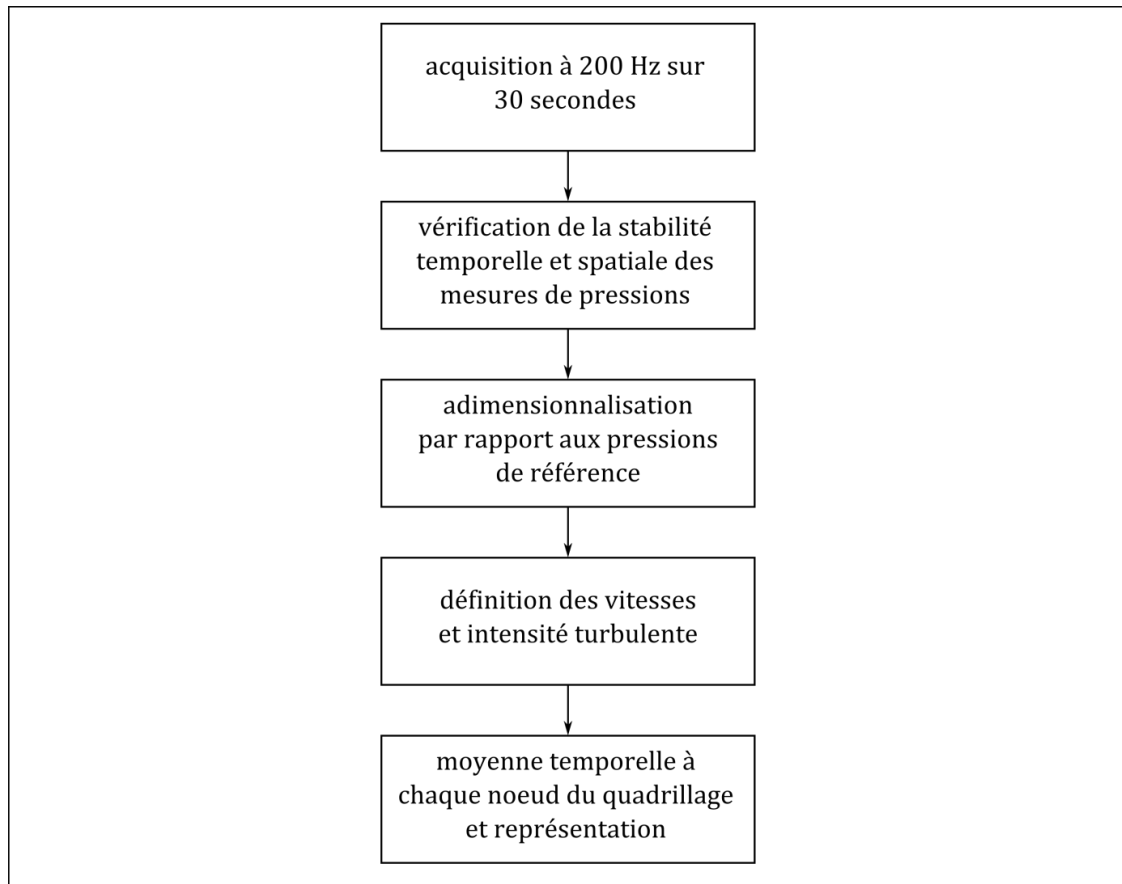


Figure II-10 : Post-traitement de la soufflerie

Les vitesses sont représentées dans les Figure II-11 et Figure II-12 suivant des plans Y ou Z pour toutes les valeurs de potentiomètre (20, 30, 40, 50, 65). Sur ces figures, les vitesses sont plus importantes sur les extrémités qu'au centre, ceci est particulièrement vrai pour les vitesses les plus élevées (correspondant au potentiomètre P50 et P 65). Ces valeurs supérieures dans les coins de la veine sont dues au fait qu'il y a une contraction de la veine avant l'ouverture entraînant une vitesse légèrement supérieure sur les bords. Des variations sont aussi observées sur l'ensemble des courbes, celles-ci sont dues aux variations climatiques (température, hygrométrie et pression atmosphérique) lors des essais qui sont étalés sur plusieurs jours. Enfin, l'obtention de valeurs homogènes au centre de la veine suivant les plans Y et Z permet de valider l'utilisation de la soufflerie pour les essais sur le coefficient de décharge. Les valeurs numériques caractéristiques seront données dans le Tableau II-1.

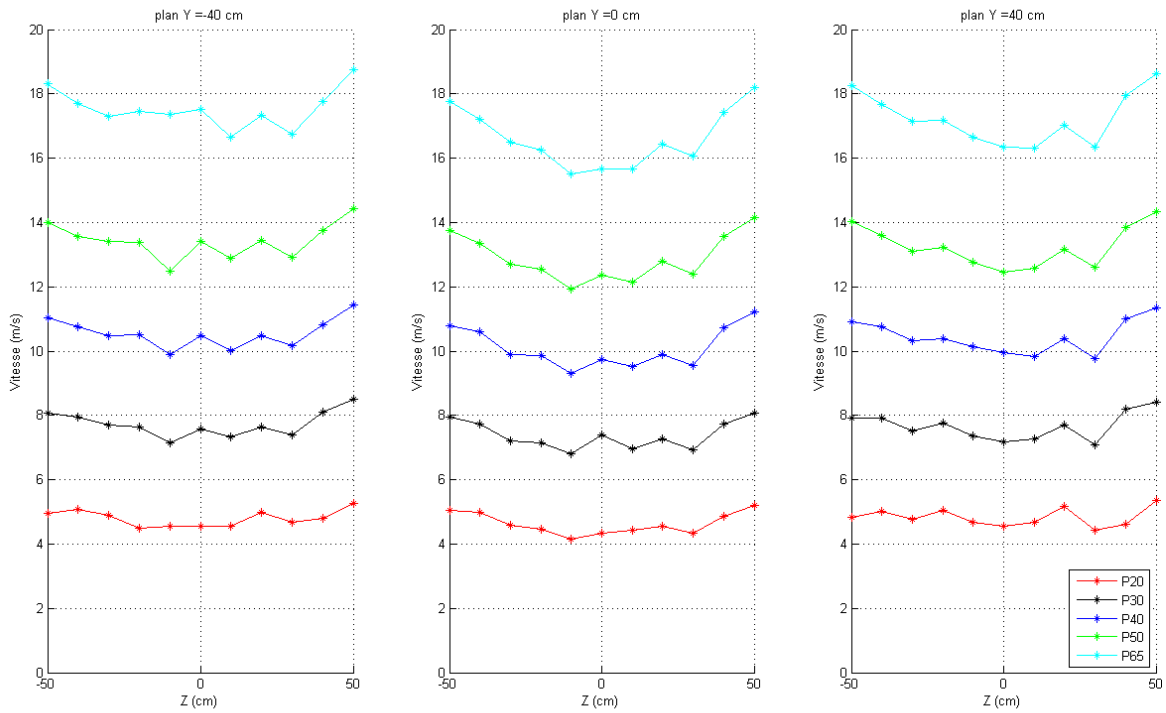


Figure II-11 : vitesse suivant des plans Y = -40, 0, 40 cm

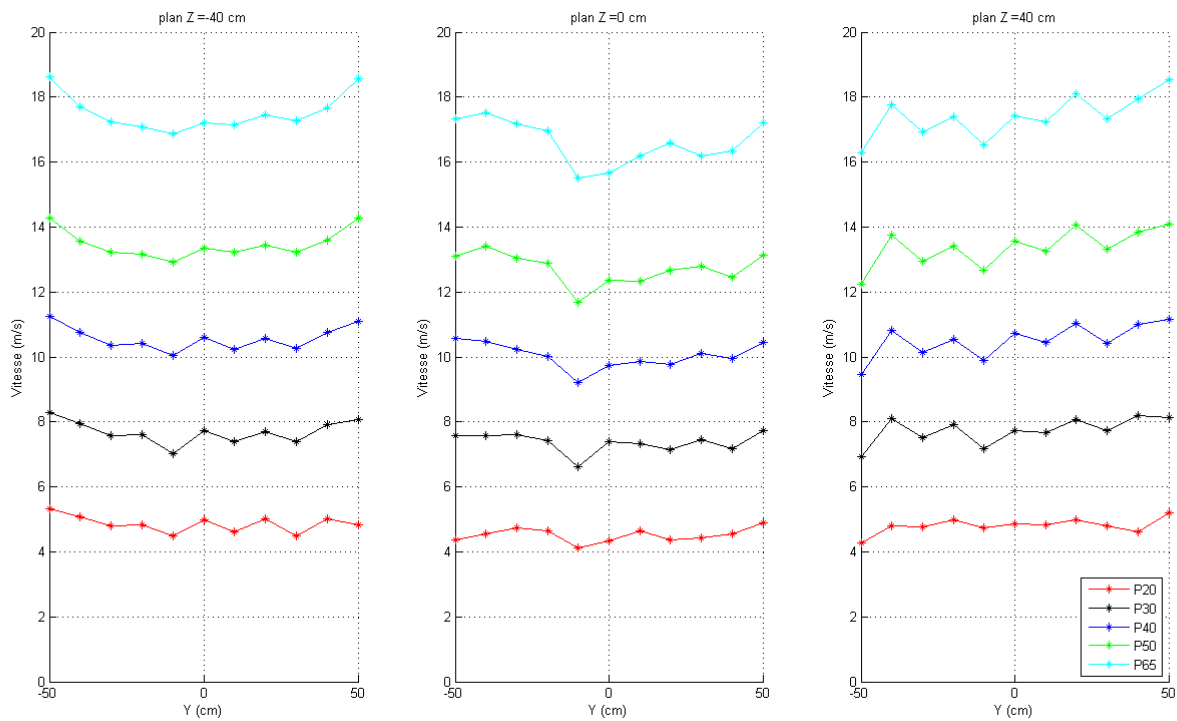


Figure II-12 : vitesse suivant des plans Z = -40, 0, 40 cm



L'intensité turbulente est moins stable sur la veine, surtout à faible vitesse, comme le montre les Figure II-13 et Figure II-14, ce qui est logique au vue de sa méthode de calcul. Le Tableau II-1 récapitule les caractéristiques (moyenne, minimum, maximum et écart-type) de chaque courbe de vitesse et d'intensité turbulente.

Tableau II-1 : données récapitulatives de vitesses et d'intensité turbulente de la veine d'essai pour le plan X = 30 cm

potentiomètre (%)	20	30	40	50	65
vitesse moyenne (m/s)	4.70	7.54	10.31	13.14	17.12
maximum	5.45	8.73	11.78	14.95	19.43
minimum	4.03	6.63	9.20	11.68	15.51
écart type	0.35	0.43	0.52	0.58	0.69
intensité turbulente (%)	30.31	13.34	7.38	5.46	4.66
maximum	39.86	23.57	17.99	16.08	13.56
minimum	23.29	8.40	4.61	3.39	2.49
écart type	3.66	3.32	3.57	3.62	3.30

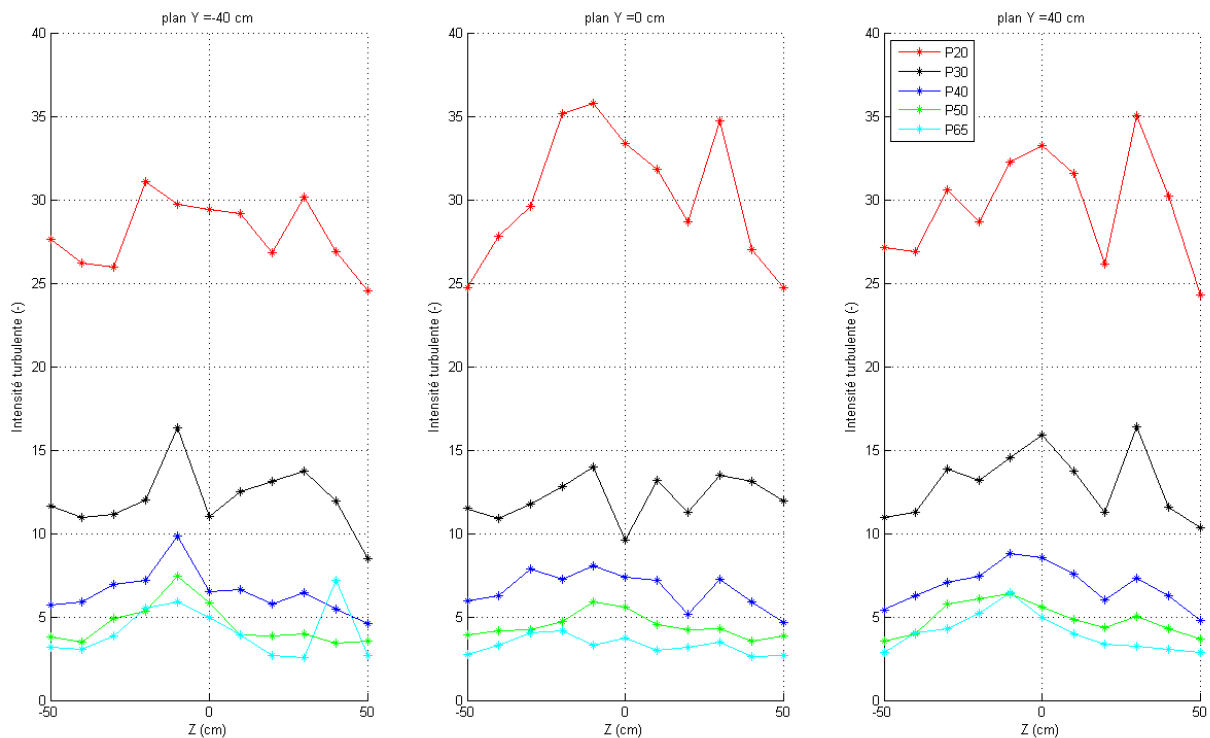


Figure II-13 : Intensité turbulente suivant les plans Y = -40, 0, 40 cm

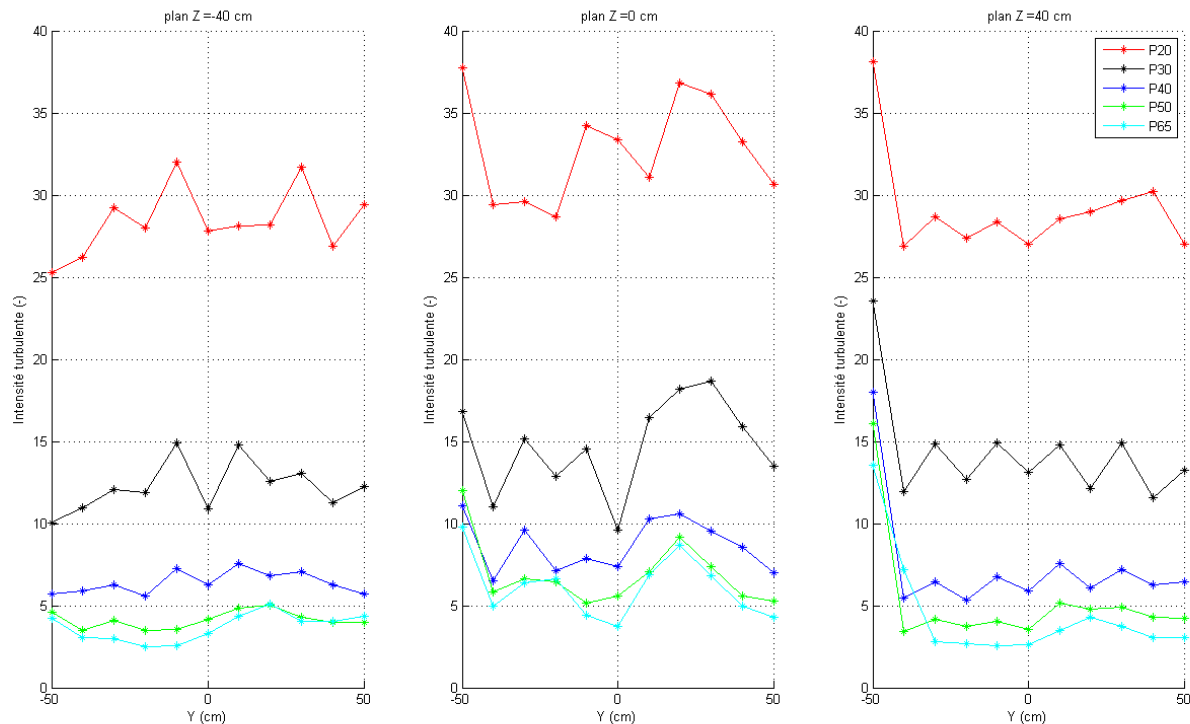


Figure II-14 : Intensité turbulente suivant les plans Z = -40, 0, 40 cm

Le récapitulatif (Tableau II-1) démontre bien la stabilité des vitesses sur la section de passage avec un écart maximal entre les valeurs de 15 % par rapport à la moyenne. La dispersion est, par contre, plus grande au niveau de l'intensité turbulente comme le montre les Figure II-13 et Figure II-14, l'écart maximal monte jusqu'à 11 % d'intensité turbulente entre la moyenne (5 %) et le maximum (16 %, pour le potentiomètre à 50 %). Et l'intensité turbulente reste plus proche du minimum que du maximum ce qui confirme les pics d'intensité positifs à certains endroits.

Les valeurs des deux autres campagnes de mesures sont exposées en annexe. Les remarques faites sur le plan à 30 cm sont valables pour ces deux dernières. Les ordres de grandeur sur la vitesse moyenne et l'intensité turbulente sont les mêmes. Les vitesses varient d'ailleurs très peu. La reproductibilité sur le plan avant à 30 cm est bonne : la différence entre les vitesses est inférieure à 1 % et monte jusqu'à 5 % sur l'intensité turbulente. Alors que la différence entre le plan à 30 cm et celui à 80 cm est aussi inférieure à 10 % pour la vitesse, elle monte par contre jusqu'à 65 % sur l'intensité turbulente. La précision sur la turbulence se montre bien plus variable. Il n'était pas

possible de l'étudier plus précisément dans le temps imparti à l'étude avec le matériel à disposition.

La soufflerie qualifiée de la sorte permet de réaliser les essais souhaités sur le coefficient de décharge à l'aide de la maquette qui va être présentée ultérieurement. L'obtention d'une vitesse homogène spatialement avec une précision à 10 % près est concluante. Surtout que les mesures seront réalisées au centre de la veine, ce qui est le plus arrangeant étant donné que les différences de vitesse interviennent principalement sur les bords de la veine. Dans la pratique, la zone de mesure sera approximativement restreinte à un cube de 130 cm\*80 cm\*80 cm (X\*Y\*Z) axé sur le centre de la veine. En revanche l'intensité turbulente est assez variable spatialement. Mais elle n'est intéressante qu'à titre indicatif car elle n'est pas maîtrisée par le potentiomètre, elle est assujettie au réglage de la vitesse. L'étude ne se fera donc pas avec la variation de la turbulence.

## **II.2. Modèle pour les essais**

Les mesures de pression qui sont utiles à la caractérisation du coefficient de décharge demandent l'utilisation d'une maquette adéquate. Celle-ci va être décrite dans les paragraphes suivants. Elle s'inspire des maquettes utilisées par Chiu en 2007 ou par Chu en 2009. Dans ce cas, la réutilisation d'un banc de calibration qui a servi à Nicolas le Roux durant sa thèse facilite la fabrication, sa dimension étant adaptée aux besoins expérimentaux.

Le système utilisé est un caisson de dimension 0.6 m\*0.3 m\*0.3 m sur lequel on fixe en façade (section de 0.3 m\*0.3 m) une plaque avec l'orifice souhaité au centre. Cette modélisation correspond environ à l'échelle 1/10<sup>ème</sup> d'une pièce taille réelle. Sur la façade opposée, une extraction à l'aide d'une gaine et d'un ventilateur est mise en place, tout ceci pour contrôler le débit d'aspiration au niveau de l'orifice avec différentes fréquences d'alimentation utilisées (0, 10, 20, 30, 40 et 50). Ce caisson est ensuite placé au centre de la veine de soufflage et fixé sur une plaque de bois horizontale. Sur celle-ci, le caisson est placé selon plusieurs incidences (0°, 45°, 60°, 75°, 90°, 135° et 180°) où il

est en rotation autour d'un axe Z qui est centré suivant  $Y = 00$  cm et à une distance de 90 cm selon X de la section d'ouverture. Tout ceci est visible sur la figure II-3 ainsi que le caisson plus précisément sur la photo (Figure II-15) et le schéma (Figure II-16) ci-dessous.



Figure II-15 : photo du caisson fixé à 0° avec les prises de pressions connectées

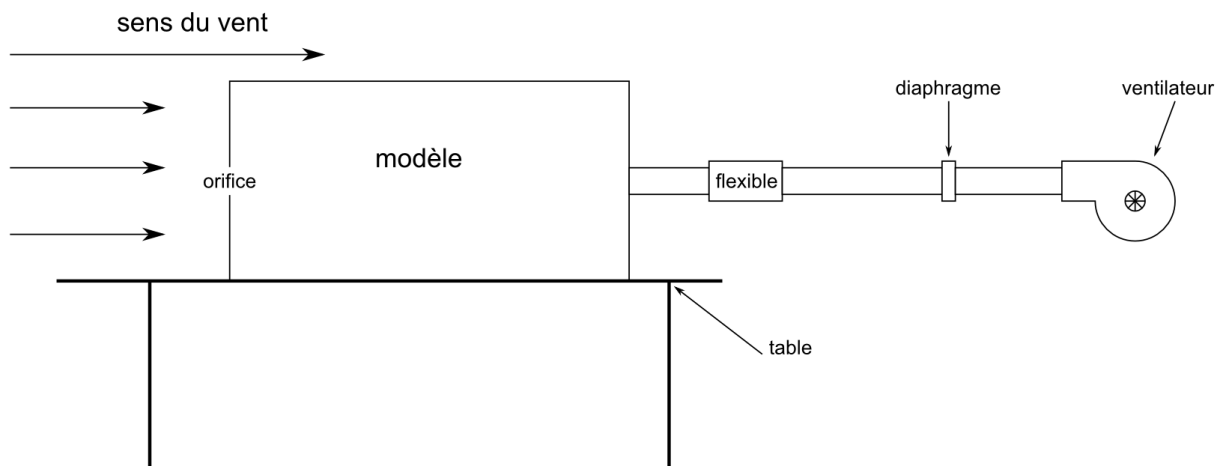


Figure II-16 : schéma de montage du caisson, incidence 0°

Un point important à vérifier est la dimension de la maquette face à celle de la buse de soufflage. Ce caisson obstrue la section de la veine de soufflage jusqu'à 16,6 % (à une incidence de 60°), ce à quoi il faut faire attention. En effet quand le ratio de blocage est

supérieur à 5 %, l'effet est non négligeable pour une soufflerie fermée (Chu, 2009). Le même effet existe dans une soufflerie à jet ouvert. La vitesse du vent dans la veine est alors diminuée. On obtient d'après l'équation (Pankhurst & Holder, 1968) :

$$U_F = U_T \cdot (1 + \varepsilon_s) \quad (2.3)$$

Où  $U_F$  est la vitesse finale [m/s] et  $U_T$  la vitesse initiale non corrigée.  $\varepsilon_s$  est le coefficient de blocage tel que :  $\varepsilon_s = \tau \cdot \lambda \cdot \left(\frac{t}{h}\right)^2$ .

Avec  $\tau$  qui est un facteur dépendant de la forme de la soufflerie,  $\tau = -\frac{\pi}{24} = -0,411$  pour une soufflerie à jet ouvert.  $t$  est l'épaisseur maximale du modèle [m] qui est variable suivant l'incidence,  $h$  est la hauteur de la veine [m] et  $\lambda = 1,5$  est le coefficient d'obstruction du modèle, sans dimension, qui dépend du gabarit du modèle.

Le caisson a donc un effet non négligeable sur la vitesse, en effet elle est surestimée jusqu'à 20 %, valeur de  $\varepsilon_s$  pour un angle de  $45^\circ$  ou  $135^\circ$ . Les calculs du rapport de surface d'obstruction ainsi que du coefficient de blocage sont visibles dans l'Annexe E.

La façade du caisson où se trouve l'orifice est interchangeable. Il y a plusieurs façades suivant l'épaisseur de la plaque, la dimension, le nombre et la forme de l'orifice. Sur chacune d'elles, les prises de pressions se répartissent autour de l'orifice et permettent de vérifier l'homogénéité du coefficient de pression autour de l'orifice. Le schéma (Figure II-17) ci-dessous représente une des plaques.

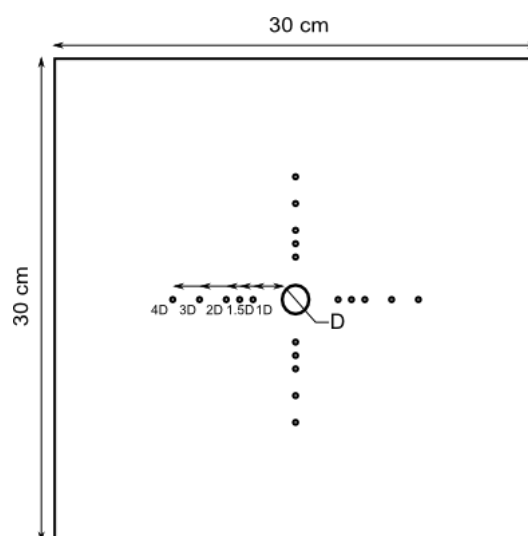


Figure II-17 : plaque de façade avec un orifice rond au centre

La maquette étant complètement décrite, le paragraphe suivant va exposer comment les pressions et les débits sont obtenus sur le montage.

### II.3. Instrumentation des mesures et le système de contrôle des débits

Pour les essais, les données nécessaires sont les pressions au niveau de la façade du modèle, les pressions dans le caisson, les pressions au niveau du diaphragme pour le débit et celles de Pitot de référence pour connaître la vitesse du vent. Pour cela, un seul capteur sera utilisé, le capteur PSI qui est présenté ci-dessous. Ensuite, une présentation du système de mesure de débits sera faite, le diaphragme.

#### II.3.1. Mesures de pression

Les mesures de pression sont effectuées avec des capteurs de pression piezorésistifs de marque PSI, illustrés sur la Figure II-18. Ces capteurs permettent une mesure simultanée sur 32 voies de pression à une fréquence d'acquisition de 200 Hz (Sollic, 1995; Le Roux, 2011). En effet, un capteur regroupe 32 voies de pression au sein d'un boîtier de faible dimension (55 x 35 x 25 mm). Ces 32 voies sont multiplexées à une fréquence de 20 kHz, permettant ainsi de considérer les 32 mesures de pression synchrones. Ces capteurs de pression associés à la carte d'acquisition utilisée permettent l'acquisition des signaux à une fréquence de 200 Hz.



Figure II-18 : Capteurs de pression PSI de 32 voies à une fréquence d'acquisition de 200 Hz

La gamme de validité de ces capteurs de pression est de  $\pm 2500$  Pa. En général, l'incertitude de pression est estimée à 0,1 % de la valeur maximale du capteur. L'incertitude absolue est donc de l'ordre de 2,5 Pa. Par ailleurs, des capteurs de pression ont été ré-étalonnés avec un intervalle de confiance de l'ordre de 1 Pa durant la thèse de Nicolas Le Roux en 2011. Cet intervalle de confiance a donc été pris lors des essais.

Les prises de pression des maquettes sont reliées aux capteurs par des tubes vinyles de 1,4 mm de diamètre. Ces tubes vinyles ont des fonctions de transfert dont les fréquences de résonance peuvent entraîner des erreurs lors de l'analyse fréquentielle des signaux mesurés. Néanmoins, dans notre étude aucune analyse spectrale n'est effectuée. Ainsi, compte tenu des dimensions de la maquette, des tubes vinyles de longueurs variables et sans restricteurs (qui sont des filtres passe-bas utilisés sur les tubes vinyles en cas de besoin) ont été considérés pour des raisons pratiques de connections des prises de pression au capteur. Enfin ces tubes vinyles sont reliés au niveau de la maquette par des tubes en cuivre de 1,6 mm de diamètre. Une attention particulière est donnée à leur mise en place. En effet pour obtenir des mesures fiables, il faut qu'ils soient tangents à la surface et bien étanches (cf. Figure II-19).



Figure II-19 : photo du tube de cuivre avec le vinyle connecté et photo des tubes vinyles affleurant sur la plaque d'un orifice ( $d = 1$  cm)

Enfin, étant donné le nombre de voies de pression disponibles (32 voies), les prises de pression ont été multipliées aux différents points de mesure, afin de s'assurer de la validité des mesures et de l'homogénéité des niveaux de pression. Les niveaux de pression sont mesurés dans le modèle en 6 points (Figure II-20). La façade est équipée de 20 prises de pression autour de l'orifice (Figure II-17et Figure II-19) et 21 prises

pour la plaque à 4 orifices. Le diaphragme de mesures de débit est aussi équipé de deux prises de pression en amont et en aval. Les techniques de mesure de débits utilisées sont présentées dans la section II.3.2.

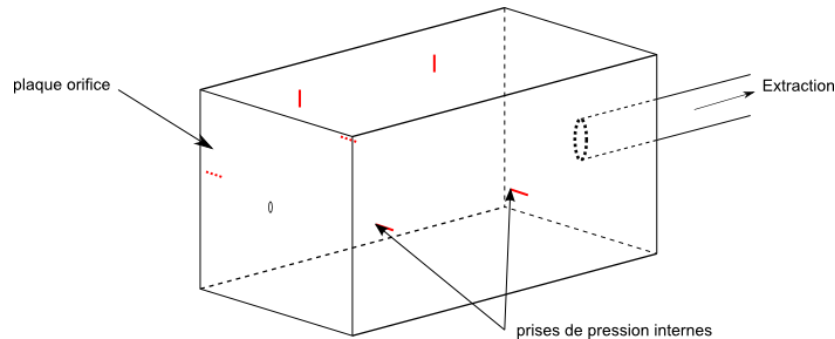


Figure II-20 : prises de pression sur le caisson

Un problème a été mis en évidence lors des essais sur le coefficient de décharge. En effet, les essais se déroulant à chaque fois sur une durée d'une minute, la vérification de la stabilité temporelle est impérative. Ce problème est apparu avec certaines voies du PSI qui déviaient et il a été confirmé lors d'essai spécifique. Dans la Figure II-21, la déviation est manifeste, l'essai a été réalisé sans aucun mouvement d'air (soufflerie et ventilateur à l'arrêt) sur une durée de 5 minutes immédiatement après l'offset. Les mesures devraient toutes être centrées autour d'une pression moyenne à 0 Pa, alors que pour la voie 18 la pression moyenne est de 1,53 Pa (et montant jusqu'à 5 Pa en pointe) et pour la voie 27 la pression moyenne est de -2,78 Pa (et descendant jusqu'à -7,2 Pa en pointe).

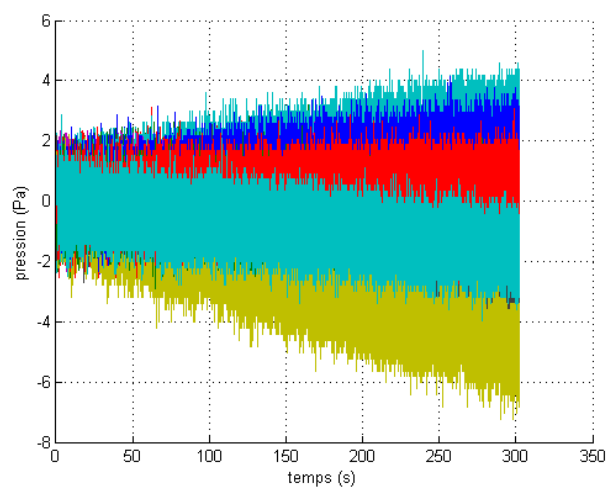


Figure II-21 : acquisition des 32 prises de pression en fonction du temps sans vent, mise en évidence de la déviation



Un offset régulier est donc indispensable avant chaque série de mesure ainsi que la vérification systématique des mesures obtenues par rapport à leur stabilité temporelle car même à partir d'une minute la déviation est visible. En effet, les calculs seraient forcément faussés au regard des écarts qui apparaissent si l'offset n'est pas fait régulièrement (Figure II-22).

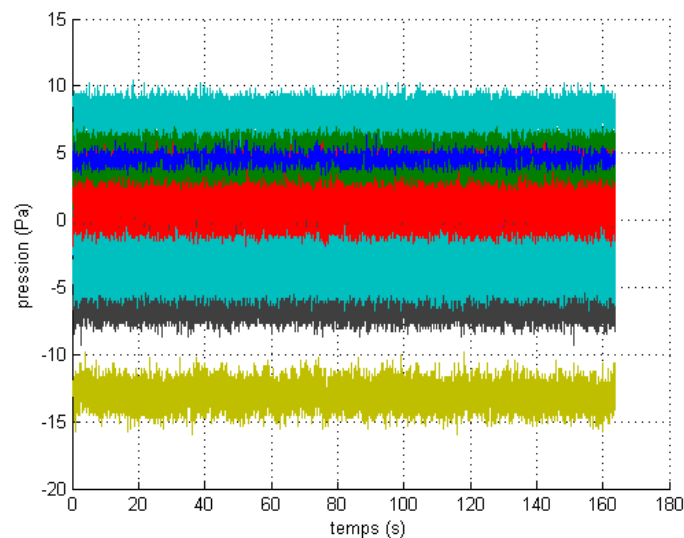


Figure II-22 : acquisition des 32 prises de pression en fonction du temps sans vent sur 2 minutes 30 secondes, déviation "stabilisée" après un temps d'une heure sans offset

La différence est importante, pour la voie 27 la pression moyenne est de -13 Pa et pour la voie 18 la pression moyenne est 8 Pa. Une différence de pression de 21 Pa dès le départ est problématique sachant que sur certains essais la différence n'est que de 27 Pa (chiffre donnant la différence de pression entre la façade et l'intérieur du caisson tiré de l'essai avec la plaque d'épaisseur 4 mm, l'orifice carré de 30 mm de côté, le ventilateur à 10 Hz et sans la soufflerie) soit une erreur de 80 % induite dès les mesures.

### II.3.2. Mesures de débits

Une fois les mesures de pressions explicitées, un autre outil indispensable à l'instrumentation du banc d'essais est celui de mesure du débit. Il se met en aval du capteur PSI et permet d'obtenir des valeurs de débit d'une précision à 0,5 %. Les mesures de débits vont utilisées les mêmes outils que ceux de la thèse de Nicolas Le

Roux (2011). Elles sont réalisées par des diaphragmes à prises de pression à la bride (Norme AFNOR NFX 10-231, 1984). La Figure II-23 présente une schématisation et une vue d'un diaphragme utilisé.

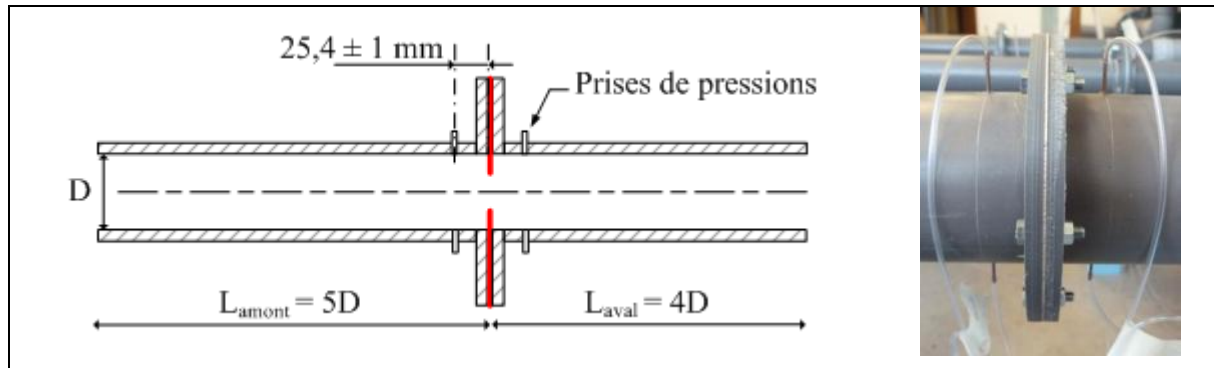


Figure II-23 : Schématisation et vue d'un diaphragme à prises de pression à la bride (Le Roux, 2011)

La différence de pression  $\Delta P$  aux bornes du diaphragme permet de calculer le débit  $Q$  comme le montre l'équation 2.4 :

$$Q = 3600 C_d S \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho \left( \left( \frac{D}{d} \right)^4 - 1 \right)}} \quad (2.4)$$

Où  $\rho$  est la masse volumique de l'air dans le conduit [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ],  $C_d = 0,6$  est le coefficient de décharge du diaphragme [-],  $S$  la section du conduit [ $\text{m}^2$ ],  $D$  et  $d$  les diamètres du conduit et du diaphragme [m]. La norme AFNOR définit un domaine d'utilisation des diaphragmes rigoureux pour obtenir des mesures de débit extrêmement précises, la norme annonce une "erreur limite nulle". Toutefois, des conditions moins contraignantes sont couramment utilisées et donnent des résultats sur la mesure du débit dans un intervalle d'une précision de 0,5 %, ce qui est amplement suffisant pour la précision dans les débits souhaités. Les principales conditions respectées sont présentées dans ce qui suit :

- La norme impose un diamètre minimal de 50 mm pour des valeurs avec une "erreur limite nulle". Dans notre cas, le diamètre interne des conduits est de 44 mm au niveau des diaphragmes.

- Le rapport des diamètres  $d/D$  doit être compris entre 0,2 et 0,75. En ayant  $d= 16$  ou 33 mm, la condition est remplie.
- L'épaisseur du diaphragme doit être inférieure 0,02 D. Des plaques en aluminium d'épaisseur 1 mm sont utilisées, l'épaisseur est donc de 0.023 D, très proche de la valeur limite.
- Pour notre cas de mesure de débit, la norme impose une longueur minimale de 4 D en aval pour le rapport des diamètres  $d/D$  le plus grand. Une longueur droite supérieure à 4 D est alors mise en place. En amont du diaphragme, une longueur droite est nécessaire en fonction du type d'éléments placés en amont (coudes, réductions...). La longueur droite la plus contraignante est de 19 D avant un évasement pour le rapport  $d/D = 0,75$ . Ce qui est bien respecté car la longueur libre de tout élément est de 21 D.

Enfin, l'incertitude de mesure sur le débit est estimée de façon simplifiée par rapport aux incertitudes liées aux mesures de pression aux bornes du diaphragme dans l'équation (2.5). Elle établit l'incertitude absolue  $\delta X$  avec la variable  $X$ .

$$\frac{\delta Q}{Q} = \frac{1}{2} \frac{\delta(\Delta P)}{\Delta P} = \frac{\delta(P)}{\Delta P} \quad (2.5)$$

Ainsi, l'instrumentation de la maquette avec le capteur de pression PSI permet d'étudier les niveaux de pressions sur la façade et à l'intérieur de la maquette et aussi les débits d'aspiration relatifs à chaque configuration d'orifice. Pour cela, le protocole décrit ci-après est utilisé.

## II.4. Protocole expérimental

La mise en place des instruments de mesure étant faite, l'utilisation des données expérimentales acquises va être expliquée dans cette partie. Le capteur PSI permet d'obtenir les pressions en façade autour de l'orifice, à plusieurs endroits à l'intérieur du modèle, au niveau des bornes du diaphragme et sur le tube de Pitot de référence. Le schéma ci-dessous montre le protocole suivi quelque soit la configuration de l'orifice utilisée (Figure II-24).

Ce protocole est utilisé pour toutes les configurations d'essais. Il permet de définir une démarche rigoureuse et similaire pour l'ensemble des essais. Ainsi, les différentes étapes permettant de définir les valeurs du coefficient de décharge à partir des mesures synchrones des 32 voies de pressions sont détaillées dans ce protocole.

La validité des mesures de pression est tout d'abord vérifiée temporellement et spatialement. Les mesures de pression étant multiples en chacun des endroits et aux bornes des diaphragmes, une moyenne spatiale est considérée après vérification de l'homogénéité des voies. Les valeurs moyennes de pression et de débits sont déterminées pour les essais en régime aéraulique permanent. Ces valeurs sont organisées en fonction des variables d'états (fréquence d'alimentation de la soufflerie, celle du ventilateur, incidence). Le protocole se divise ensuite en trois parties très proches. Premièrement, le calcul du coefficient de décharge,  $C_d$ , se fait pour un  $n$  fixé à 2 et un coefficient de décharge variable. Celui-ci s'effectue donc suivant l'équation (1.1) (cf. paragraphe I.1.2). Et ceci se fait pour chaque couple débit/différence de pression, c'est-à-dire à chaque fois qu'une variable d'état est changée. C'est cette méthode qui est utilisée en général pour définir le coefficient de décharge (Chiu, 2007 ; Chu, 2009 ; Wang, 2011). Deuxièmement, le calcul se fait comme décrit pour le cas précédent, mais il n'est réalisé que lorsque les fréquences d'alimentation du ventilateur sont toutes acquises. Celui-ci s'effectue donc à chaque fois que l'on change d'incidence ou de vitesse de l'air dans la soufflerie. Il correspond à l'ajustement d'une loi carrée sur les points de mesures expérimentaux. Le dernier calcul est réalisé pour un exposant  $n$  variable ainsi qu'un coefficient de décharge variable, il suit l'équation (1.3) du paragraphe I.1.2. Il se fait aussi comme le deuxième sur une loi débit/pression obtenue après avoir acquis toutes les fréquences d'alimentation du ventilateur. Les points de mesure expérimentaux sont ici ajustés par une loi puissance (Faure, 2010). Finalement, les différentes valeurs du coefficient de décharge sont obtenues, représentées et comparées par rapport aux différents paramètres influents (vitesse du vent, vitesse à travers l'orifice, incidence du vent, facteur de forme de l'orifice, porosité de l'ouverture sur la façade).

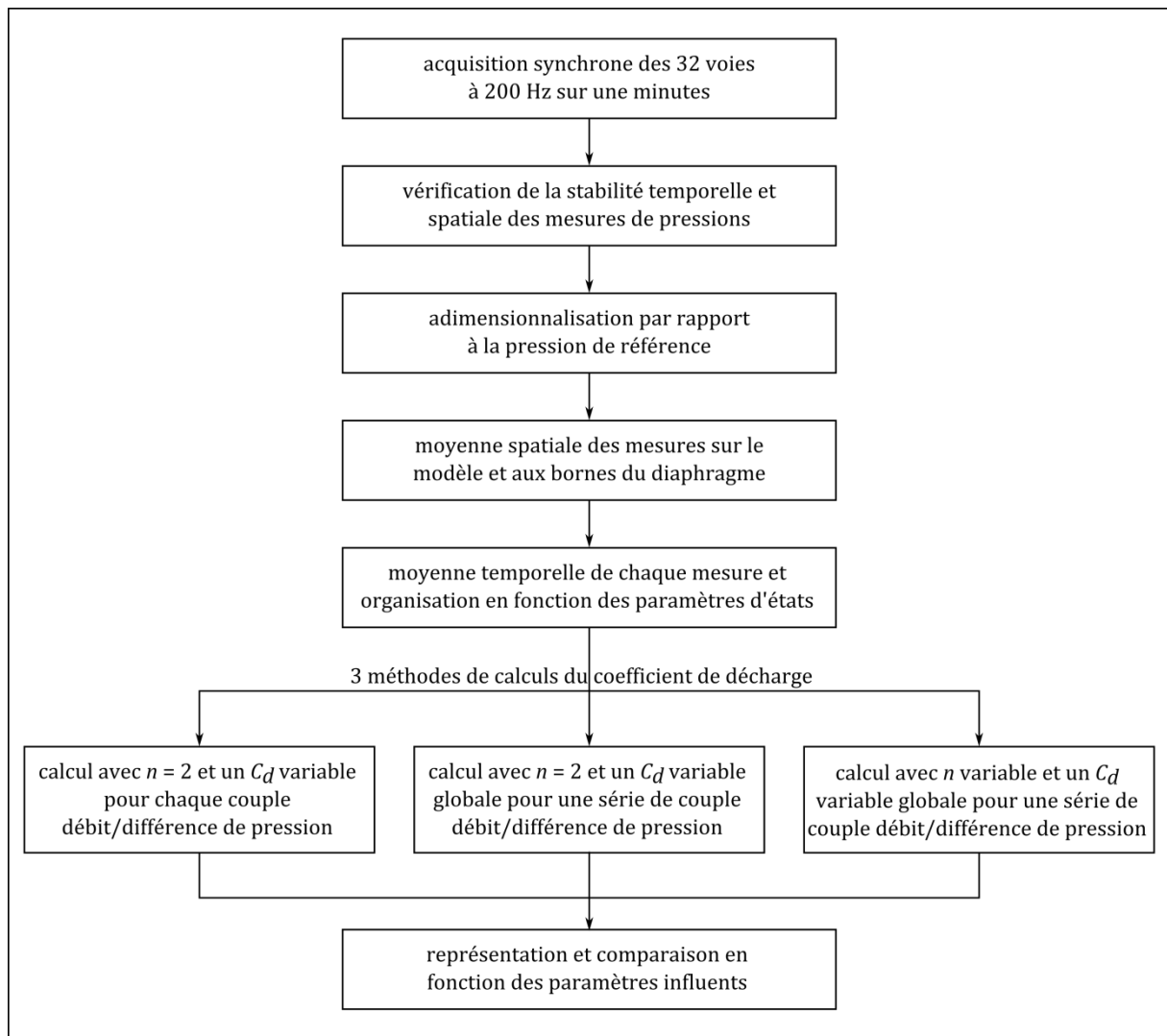


Figure II-24 : protocole expérimental pour les essais sur le coefficient de décharge

Ainsi, ce protocole est systématiquement appliqué pour l'ensemble des essais sur le coefficient de décharge après avoir réalisé les campagnes expérimentales en soufflerie. Celles-ci ainsi que les résultats obtenus sont présentés dans la partie suivante (Partie III : . La maquette et son instrumentation ont été abordées dans cette partie avec l'utilisation du capteur PSI permettant de caractériser la répartition de pression externe et interne, ainsi que les débits d'aspiration. Cependant, avant la réalisation des campagnes expérimentales avec les différents paramètres influents, une validation du modèle par rapport à l'article de Chu en 2009 va être réalisée.

---

## Partie III : Détermination du coefficient de décharge et des paramètres influents

---

Dans la première partie, la littérature nous a montré les différentes façons de définir le coefficient de décharge ainsi qu'une multitude d'approches et de paramètres influents sur sa valeur. La prise d'un coefficient de décharge constant quelque soit les caractéristiques de l'écoulement environnant paraît difficile. Le modèle et l'instrumentation de mesure ont été présentés dans la partie précédente, ainsi que le traitement des données recueillies. Une fois les bases et les outils définis, dans la partie III, la campagne expérimentale va tout d'abord être présentée et les effets des paramètres influents sur le coefficient de décharge seront ensuite exposés. En effet, le coefficient de décharge apparaîtra comme un coefficient qui n'est pas constant. Au final, les réponses aux différents objectifs fixés dans le paragraphe I.3 seront données dans cette partie.

### **III.1. Présentation de la campagne expérimentale**

Pour connaître les effets des différents paramètres sur le coefficient de décharge plusieurs campagnes expérimentales ont été effectuées et ceci sur différentes configurations d'orifices.

Durant les campagnes expérimentales, il s'agit de faire varier les paramètres sur lesquels il est possible d'agir. Ici, la vitesse du vent dans la soufflerie (avec la correction

due au phénomène d'obstruction du modèle dans la soufflerie), la vitesse de l'air dans l'orifice et l'incidence du vent par rapport à la façade où se situe l'orifice sont différents paramètres d'états de l'écoulement environnant l'orifice. Dans les tableaux ci-dessous (Tableau II-1, Tableau III-2 et Tableau III-3), ces paramètres sont présentés.

Tableau III-1 : valeurs de vitesse et d'intensité turbulente du vent dans la soufflerie à vide

Valeur du potentiomètre	0	20	36	54	71
Vitesse de vent théorique (m/s)	0	5	10	15	20
Intervalle de vitesse de vent avec la correction d'obstruction (m/s)	0	$4 \leq U \leq 5$	$8 \leq U \leq 9,5$	$12 \leq U \leq 14,3$	$16 \leq U \leq 19$
Intensité turbulente (%)	0	25	10	5	5
Reynolds building correspondant	0	$8 \cdot 10^4 \leq Re_b \leq 10^5$	$1,5 \cdot 10^4 \leq Re_b \leq 2 \cdot 10^5$	$2,4 \cdot 10^4 \leq Re_b \leq 3 \cdot 10^5$	$3 \cdot 10^5 \leq Re_b \leq 4 \cdot 10^5$

Tableau III-2 : fréquence d'alimentation du ventilateur

Valeur des fréquences d'alimentation du ventilateur	10	20	30	40	50
---	----	----	----	----	----

Tableau III-3 : angle d'incidence

Incidence du vent ( $\theta$ en °)	0	45	60	75	90	135	180
------------------------------------	---	----	----	----	----	-----	-----

De plus, il faut prendre en compte différentes configurations d'orifices qui ont été considérées lors des essais (Tableau III-4).

Tableau III-4 : orifices testés

Plaque n° :	Forme	Diamètre équivalent (d en mm)	Epaisseur plaque (e en mm)	Aire de l'orifice (cm <sup>2</sup> )	Facteur de forme de l'orifice (t = e/d en %)	Porosité ( $r = A_{\text{orifice}}/A_{\text{plaque}}$ en %)
1	Rond	10	2	0.78	20	0.09
2	Rond	10	4	0.78	40	0.09
3	Rond	10	8	0.78	80	0.09
4	Carré	≈10	4	1	40	0.11

5	Carré	30	4	9	13	1
6	Multi - rond (4 orifices)	46 (soit 4 trou de d = 23 mm)	6	16.6	13	1.8

Où  $d$  le diamètre équivalent de l'orifice correspond au diamètre hydraulique de l'orifice, défini tel que  $d = \frac{4.A}{p}$  (avec  $A$  l'aire de l'orifice [ $m^2$ ] et  $p$  le périmètre [ $m$ ]). Le déroulement des essais se fait de façon systématique en suivant le plan expérimental présenté dans la Figure III-1.

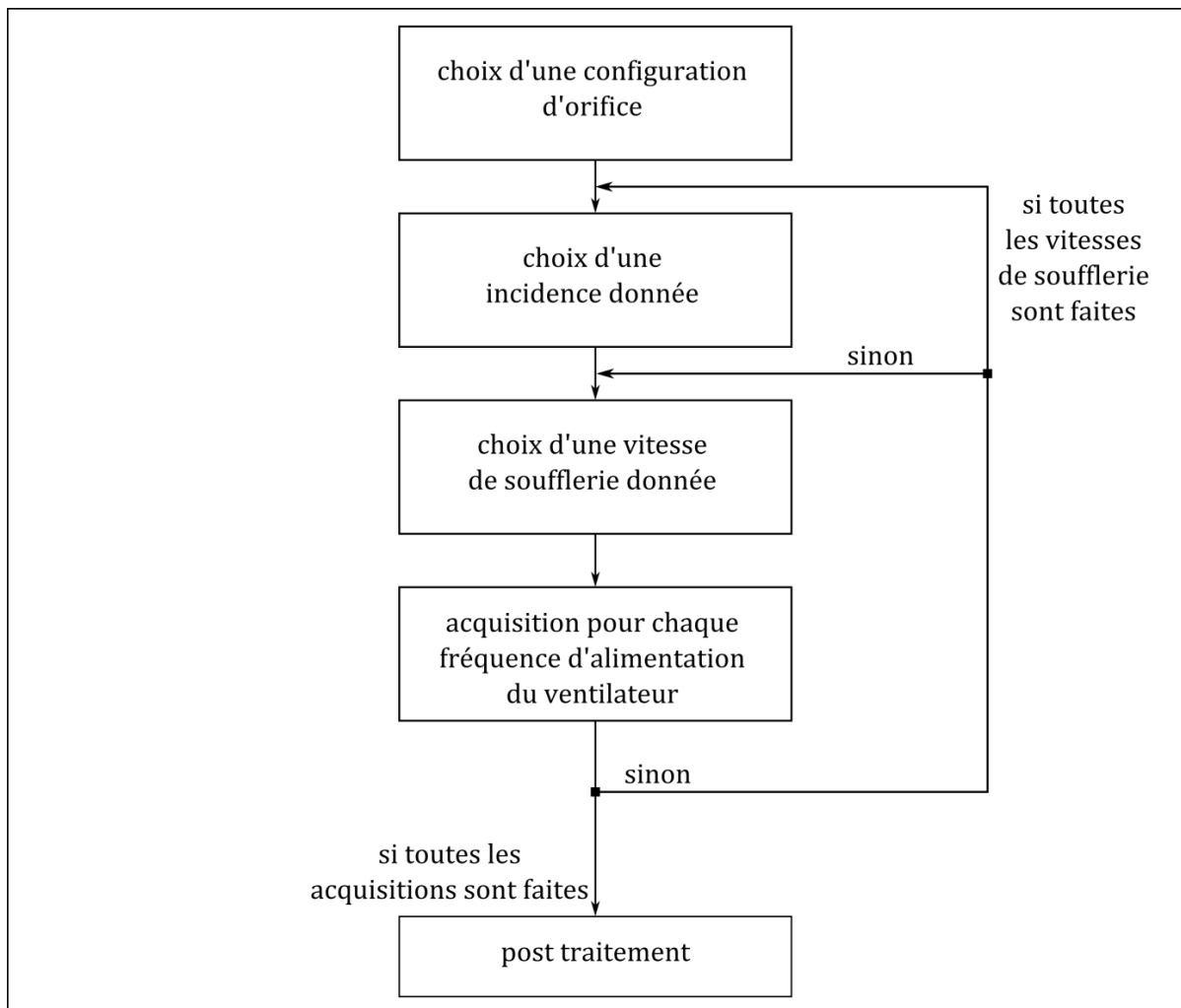


Figure III-1 : plan d'expérience des essais sur le coefficient de décharge

Les essais commencent donc par le choix de la plaque avec l'orifice souhaité (cf. Tableau III-4). Une différence pour la plaque à plusieurs trous (Figure III-2), celle-ci sera testée avec différentes configurations car les orifices seront bouchés ou non : configuration



avec un seul orifice ouvert (le 1), avec deux orifices ouverts (le 1 et le 2) et avec les quatre orifices ouverts. Une fois la plaque installée sur le caisson, la maquette est fixée au support avec une incidence donnée et une vitesse de vent est sélectionnée. Ensuite, à chacun de ces paramétrages, la fréquence d'alimentation du ventilateur varie (valeurs dans le Tableau III-2). Les essais sont réalisés pour toutes les incidences et toutes les vitesses de vent de la soufflerie.

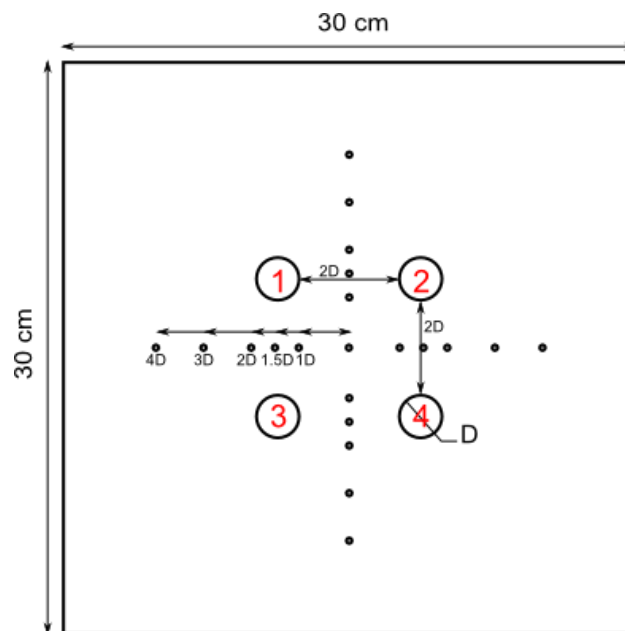


Figure III-2 : plaque avec les 4 orifices vue de face

Ainsi, le plan d'expérience est appliqué à chaque plaque, ce qui constitue une campagne expérimentale. Deux campagnes expérimentales comme celle décrite dans ce paragraphe seront réalisées pour vérifier la reproductibilité des résultats. Le protocole des essais étant défini, il faut maintenant vérifier la validité des résultats obtenus.

### III.2. Vérification préliminaire des essais réalisés à l'aide du modèle et validation par rapport à la littérature

Après avoir acquis les données de pressions mesurées par le capteur PSI, la vérification que le modèle utilisé est fiable est indispensable. Pour cela, l'article de Chu (2009) sert de référence. En effet, une des plaques utilisées (la plaque n° 5 du Tableau III-4) est une copie approchant le modèle utilisé (Figure III-6) par Chu (2009). La comparaison se fera

sur les valeurs du coefficient de décharge obtenues grâce à la plaque n°5 par rapport à celle de Chu qui trace le coefficient de décharge en fonction du nombre de Reynolds de l'orifice à différentes vitesses de vent.

### **III.2.1. Vérification de l'homogénéité du modèle et des coefficients de pression**

Mais avant de faire cette comparaison, le modèle doit être vérifié en lui-même. C'est-à-dire qu'il faut premièrement vérifier que la répartition en pression est bien homogène spatialement, ainsi que temporellement. Il faut de plus vérifier la répartition des coefficients de pressions en façade. En effet ceux-ci sont considérés constants dans la littérature, c'est l'hypothèse n°2 dite de corps étanche déjà citée dans le paragraphe I.1.2.

Premièrement, les données prises pour les calculs sont toutes naturellement homogènes temporellement car elles sont vérifiées dès l'acquisition et sont refaites en cas de problème (exemple du problème cité en paragraphe II.3.1). Deuxièmement, la vérification de l'homogénéité spatiale se fait à différent endroit, au niveau de la façade, au niveau de l'intérieur du caisson et au niveau des prises de pressions aval et amont du diaphragme.

Pour les prises de pressions en aval du diaphragme, quand le débit est assez important pour être mesuré, la différence entre les deux prises peut monter jusqu'à 25 %, quelque soit la plaque et la configuration utilisée ce qui est important comme différence. Mais c'est à relativiser car ces pics de différence interviennent sur des mesures de pression qui sont proches de 0 Pa, la différence absolue n'est alors pas grande étant donné que l'erreur de mesure du capteur est de 1 Pa. Mais en dehors de ces cas particuliers, la différence n'excède jamais les 5 % (en différence absolue le résultat est de 10 Pa maximum). De même, la différence grimpe jusqu'à 9 % pour les prises de pressions en amont (différence absolue de 20 Pa maximum). Et le point important des mesures en aval et en amont du diaphragme est que la différence entre les deux soit bien marquée pour mesurer un débit, ce qui est le cas pour toutes les mesures étudiées. Quand le débit est trop faible, les mesures ne sont pas utilisées.

Ensuite, l'homogénéité sur les prises de pressions à l'intérieur est plus instable. Il y a une prise de pressions qui obtenait des mesures assez différentes des autres, sans explication satisfaisante. Cette prise de pression située sur le côté droit du caisson (cf. Figure II-20) donne des valeurs différentes des autres quelque soit l'incidence ou la vitesse de l'air. La seule explication serait un problème de capteur ou de tube vinyle mais là encore rien n'est apparu. Cette prise de pression, qui correspond au numéro 27 dans les fichiers d'acquisition, a été exclue de tous les calculs dans la suite du rapport. Par contre, comme les cinq autres restaient relativement homogènes, elles ont été gardées pour faire la moyenne d'un coefficient interne global. La différence monte ici jusqu'à 200 %. Mais cela est encore dû à des cas particuliers similaires à ceux pour les prises autour du diaphragme (mesures de pressions proche du 0 Pa). Ces cas ne sont pas représentatifs de l'homogénéité de pression. Au final, toutes les mesures de pressions moyennes représentatives sont homogènes spatialement à l'intérieur à 10 % près (pourcentage calculé avec la différence par rapport à la valeur moyenne).

Enfin l'homogénéité spatiale des mesures en façade autour de l'orifice a fait l'objet d'une plus grande attention. Celles-ci ont été plus précisément étudiées car il y a un intérêt particulier à répondre à l'hypothèse du corps étanche. Pour cela, 20 prises de pressions ont été disposées autour de l'orifice (5 au-dessus, 5 en-dessous, 5 à gauche et 5 à droite, comme dans la Figure II-17).

Premièrement, en bouchant l'orifice (cela a été fait pour une plaque avec un orifice de diamètre  $D = 1$  cm), les coefficients de pressions observés en façade sont bien homogènes, comme le montre la figure III-3. Ici pour le cas d'incidence à  $0^\circ$ , les coefficients de pression sont tous proches de 1, ce qui est attendu car tous les points de la façade sont des points d'arrêts perpendiculaires à l'écoulement. De plus, quelque soit la vitesse de vent prise et la distance du centre de la plaque (en fonction du diamètre  $D = 1$  cm), les coefficients sont tous très proches de 1. L'homogénéité spatiale est visible directement. Dans l'Annexe F, les figures pour les autres incidences sont visibles.

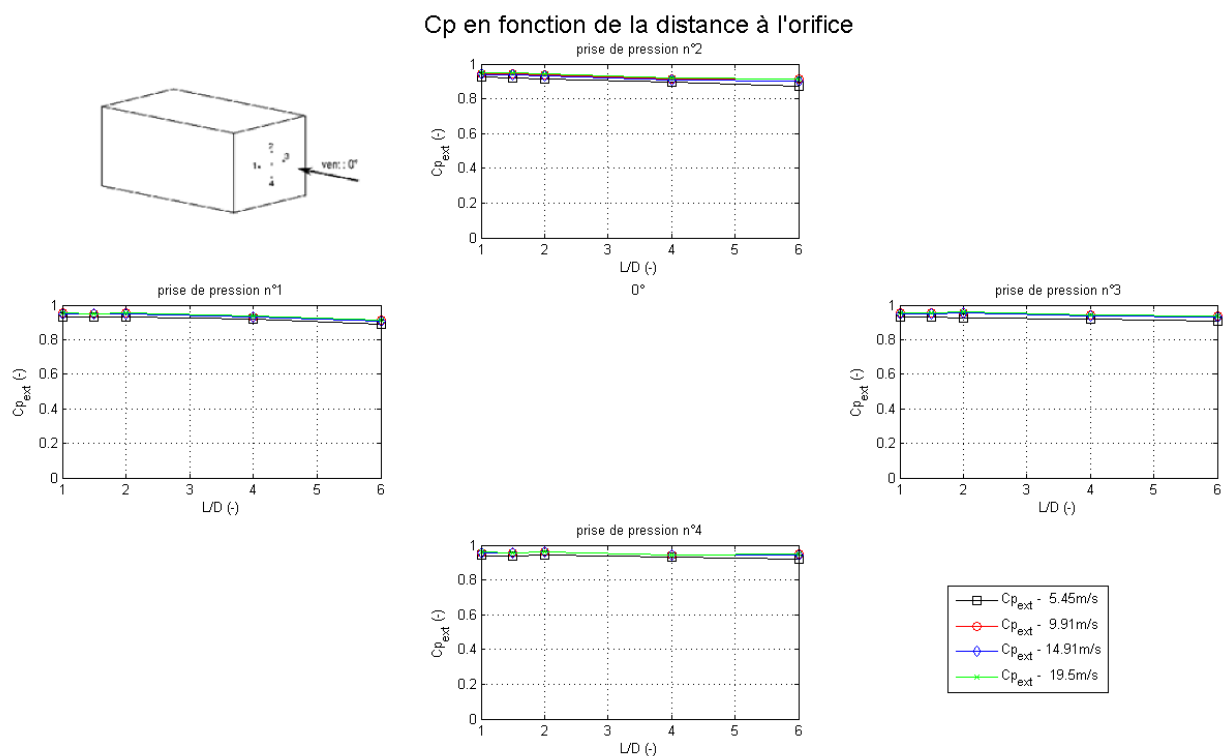


Figure III-3 : répartition des coefficients de pression sur la façade sans orifice, pour un angle d'incidence de  $0^\circ$

Pour toutes les autres incidences (Figure F-1, Figure F-2, Figure F-3, Figure F-4, Figure F-5 et Figure F-6), la répartition des coefficients de pression est bien homogène spatialement. Quelque soit la vitesse du vent, on obtient bien les mêmes coefficients de pression. Les valeurs de ces coefficients de pression correspondent tout à fait aux valeurs attendues. Pour les prises de pression en haut et en bas, les valeurs des coefficients de pression sont constantes pour toutes les incidences et toutes les vitesses. Pour les valeurs de gauche et de droite, elles sont quasiment toutes constantes. Pour les incidences  $0^\circ$  et  $180^\circ$ , elles sont aussi stables car la façade est perpendiculaire à l'écoulement. Pour  $45^\circ$  et  $60^\circ$ , les valeurs sont constantes et positives. Pour  $90^\circ$  et  $135^\circ$ , les valeurs sont négatives car il y a une dépression à la surface de la plaque. Par contre, pour l'incidence  $75^\circ$ , il y a une augmentation du coefficient de pression sur le graphique "prise de pression n°1" à gauche (figure F-3), ce qui montrerait le recollement de la couche limite. La visualisation de l'écart type des valeurs à cet endroit permettrait de confirmer cette hypothèse. Au final, l'analyse de ces coefficients de pression est conforme aux attentes.

Si l'orifice a un effet sur la répartition des pressions en façade, il peut se voir facilement quand la soufflerie est hors de fonctionnement. La figure III-4 ci-dessous montre l'effet de l'aspiration sur la façade pour une porosité de 0,09 %. L'effet est très léger, quand l'aspiration est au maximum (50Hz), la différence de pression est 1 Pa. Par contre pour une porosité un peu plus élevée, 1 %, le résultat obtenu peut avoir une plus grande influence (Figure III-5). La différence de pression monte à 8 Pa pour l'aspiration au maximum (un débit de 60 m<sup>3</sup>/h). Sachant que les pressions sur la façade varie de 20 Pa pour le vent à faible vitesse ( $U = 4$  m/s) jusqu'à 250 Pa pour un vent à 17 m/s. Pour la plus faible vitesse cette différence peut avoir un effet non négligeable sur les pressions. Après avoir observée la répartition des coefficients de pression sur les différents orifices, cette ouverture a un effet sur le coefficient de pression à faible vitesse de vent mais pas à forte vitesse (dès que l'on passe à 10 m/s). Ceci est visible en Annexe G où une série de courbes sur le coefficient de pression pour la plaque n°1 est donnée.

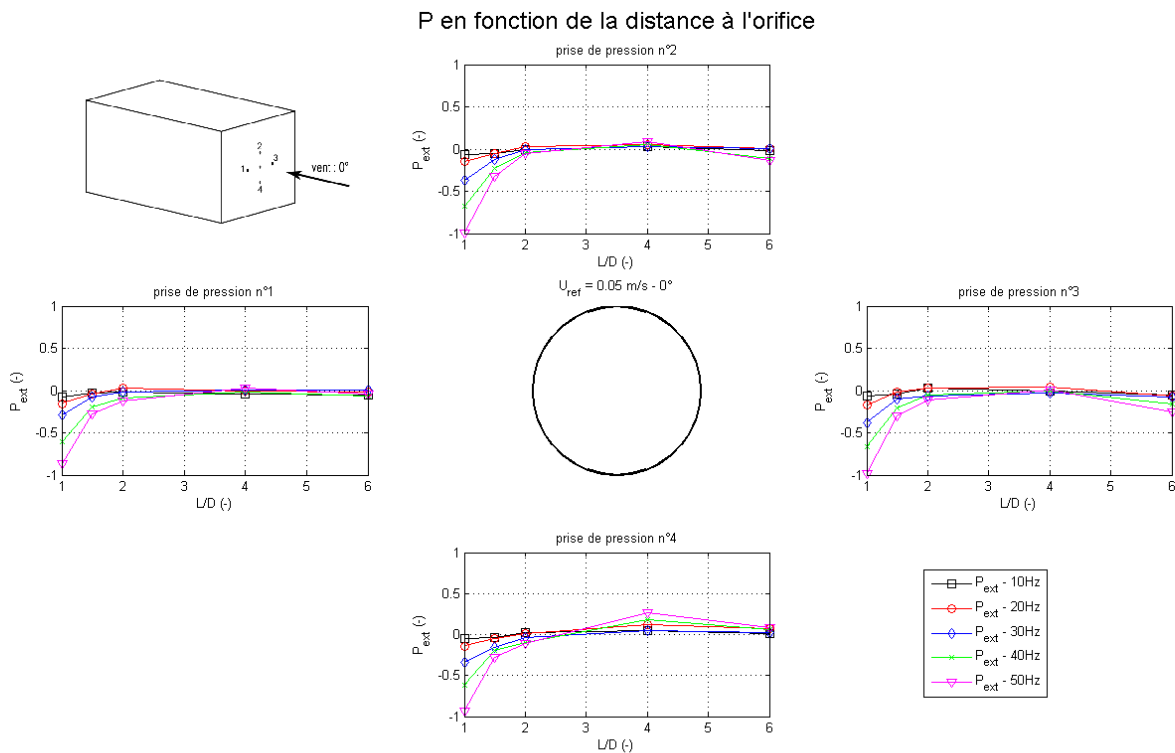
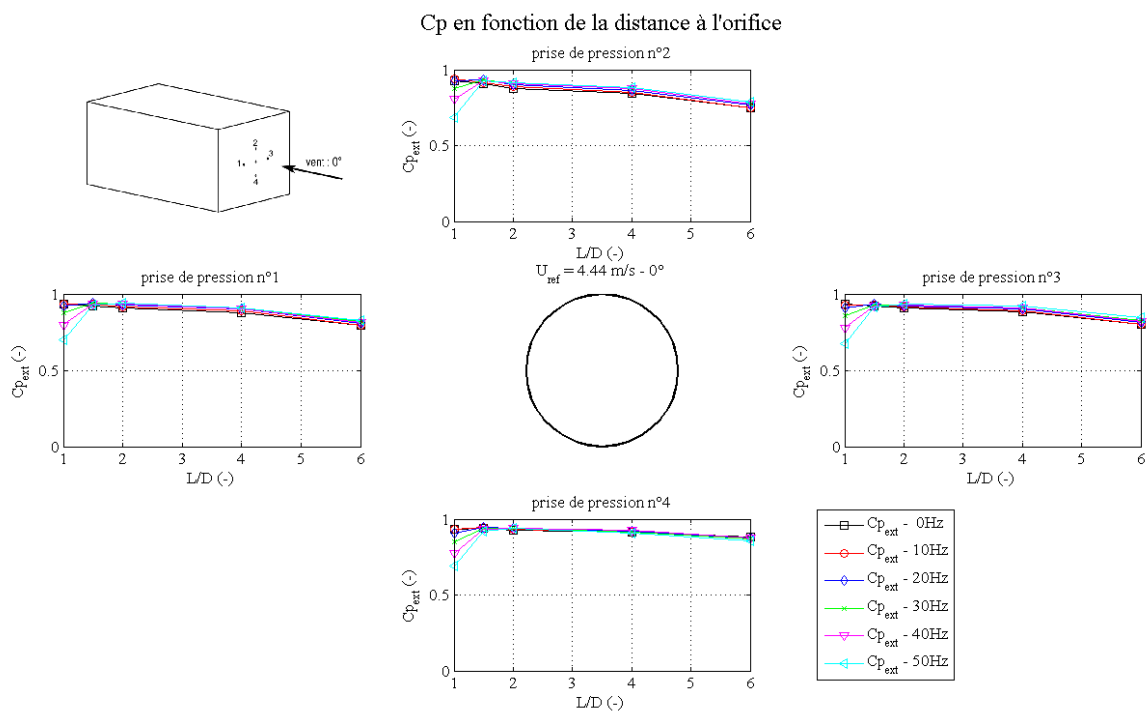
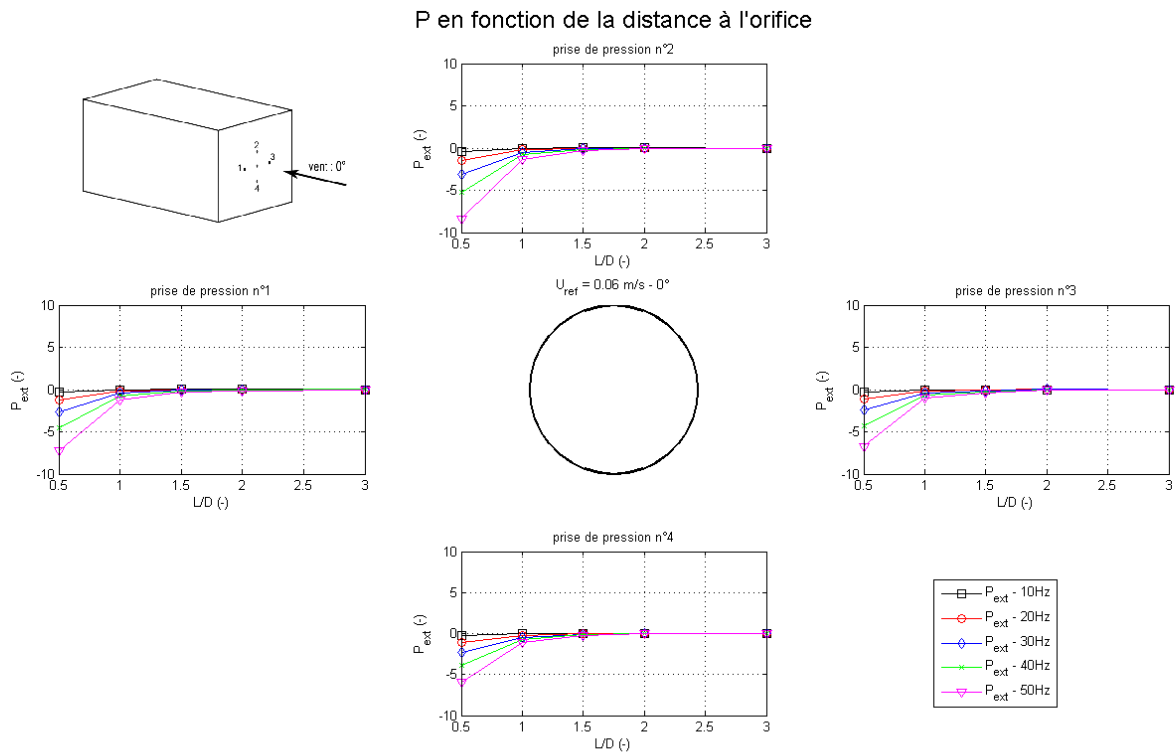


Figure III-4 : répartition des pressions sur la façade sans vent, pour l'orifice de la plaque n°1



Finalement, le coefficient de pression est relativement constant sur la façade où se trouve l'orifice. Il faut tenir compte du fait que la porosité reste quand même très faible dans les essais. Pour coller parfaitement à l'hypothèse de corps étanche, même à faible vitesse de vent, il suffit de prendre les mesures à une distance minimale de l'orifice. C'est d'ailleurs pourquoi les prises de pressions ont été disposées ainsi. Après analyse des courbes de coefficient de pression pour les différentes plaques (cf. Figure III-6 ou les figures de l'annexe G), une distance de  $2 D$  est choisie. Elle permet de ne pas être perturbé par l'orifice tout en restant assez proche de celui-ci pour obtenir un différentiel de pression entre l'intérieur et l'extérieur le plus proche de la théorie.

L'homogénéité spatiale et l'homogénéité temporelle sont confirmées ainsi que le choix de la distance adéquate pour les prises de pression. Maintenant le modèle va être comparé à celui de Chu (2009).

### **III.2.2. Validation du modèle par rapport au modèle de Chu**

Le modèle utilisé par Chu va tout d'abord être décrit. La maquette (Figure III-6) de dimension  $40 \text{ cm} \times 40 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$  ressemble à la nôtre. L'orifice est carré et de longueur de côté de  $d = 40 \text{ mm}$ , la porosité ( $r$ ) est égale à 6,3 % et le facteur de forme (ratio épaisseur sur diamètre de l'orifice,  $t$ ) est égal à 1 %. La plaque ressemblant le plus à ces caractéristiques est la plaque n°5 (cf. Tableau III-4, ou  $d = 30 \text{ mm}$ ,  $r = 13 \%$  et  $t = 1 \%$ ). De plus, les mesures sont réalisées avec une intensité turbulente  $< 1 \%$  pour des vitesses de 0, 2 et 8 m/s. Dans son article, il ne trouve pas de dépendance entre la turbulence et le coefficient de décharge, ce qui permet de ne pas tenir compte de ce paramètre. Les vitesses de comparaison seront celles des essais pris à 0, 5 et 10 m/s. Enfin les tests sont faits pour deux incidences différentes,  $0^\circ$  et  $45^\circ$ , ce qui va aussi être comparé. Les coefficients de décharge seront tracés en fonction du nombre de Reynolds de l'orifice.

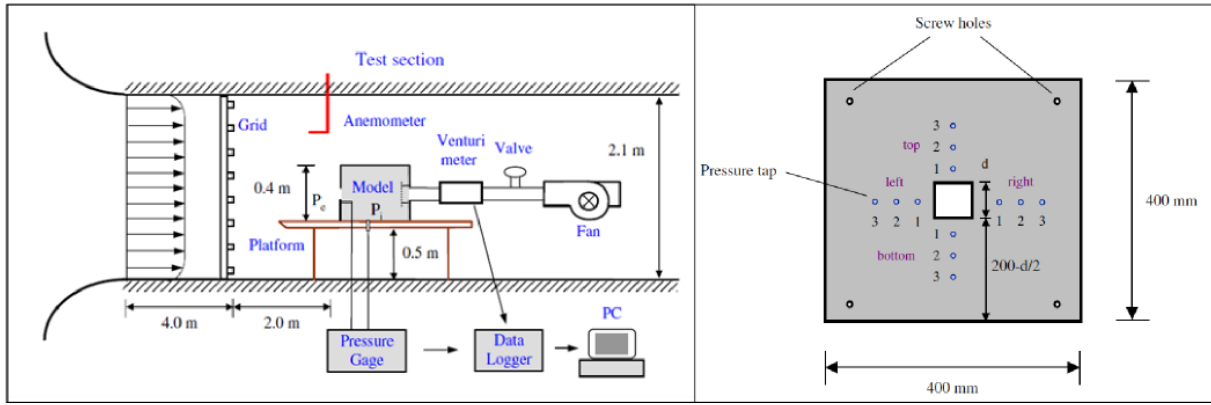


Figure III-7 : schéma du dispositif expérimental et de la plaque avec l'orifice testée par Chu (2009)

Pour ses essais à  $0^\circ$ , il trouve une courbe de tendance identique pour chaque vitesse de vent :

$$\begin{cases} \frac{C_d}{C_{d0}} = \left(\frac{Re}{Re_c}\right)^{0.333} & \text{pour } Re < 18000 \\ C_{d0} = 0.66 & \text{pour } Re \geq 18000 \end{cases} \quad (3.1)$$

Avec  $Re_c = 18000$  le nombre de Reynolds critique (le coefficient de décharge devient indépendant du nombre de Reynolds) et il obtient un coefficient de corrélation de 0.90 pour ces valeurs (Figure III-8, Figure III-9 et Figure III-10). Les deux valeurs qui sont données montrent déjà que la reproductibilité des résultats est bonne car les ronds rouges sont tirés de la première campagne et les carrés bleus de la seconde et les valeurs y sont très proches pour les 3 vitesses différentes. Pour les deux jeux de données, la vitesse du vent n'a pas d'effet notable sur le coefficient de décharge. Il y a par contre des différences marquées avec les valeurs de Chu, les siennes varient avec le Reynolds de l'orifice, ce qui n'est pas le cas des valeurs acquises. Les valeurs sont équivalentes pour un intervalle sur le nombre de Reynolds compris entre  $1.10^4$  et  $1.5.10^4$ . De plus, elles tendent vers une valeur de 0,67 pour le  $C_d$  alors que nous obtenons une valeur limite de 0,61 ce qui fait une différence de 10 %. De plus, Chu ne remarque aucun effet de l'augmentation de la vitesse de vent sur ces résultats, alors que les résultats obtenus par les essais montrent qu'à faible Reynolds d'orifice, la variation n'est pas la même avec la vitesse du vent. En effet, les valeurs du  $C_d$  augmentent avec la vitesse du vent à faible Reynolds orifice.



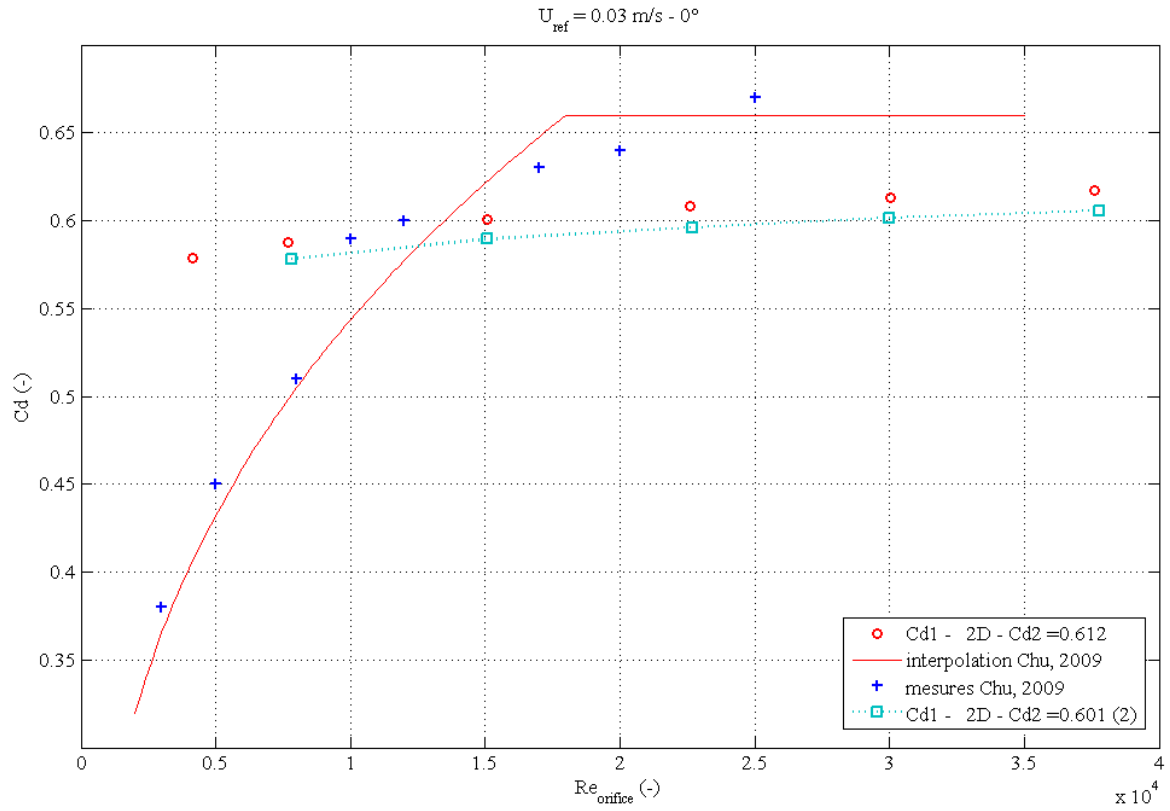


Figure III-8: comparaison entre les valeurs de Chu et les nôtres, pour une vitesse nulle à 0°

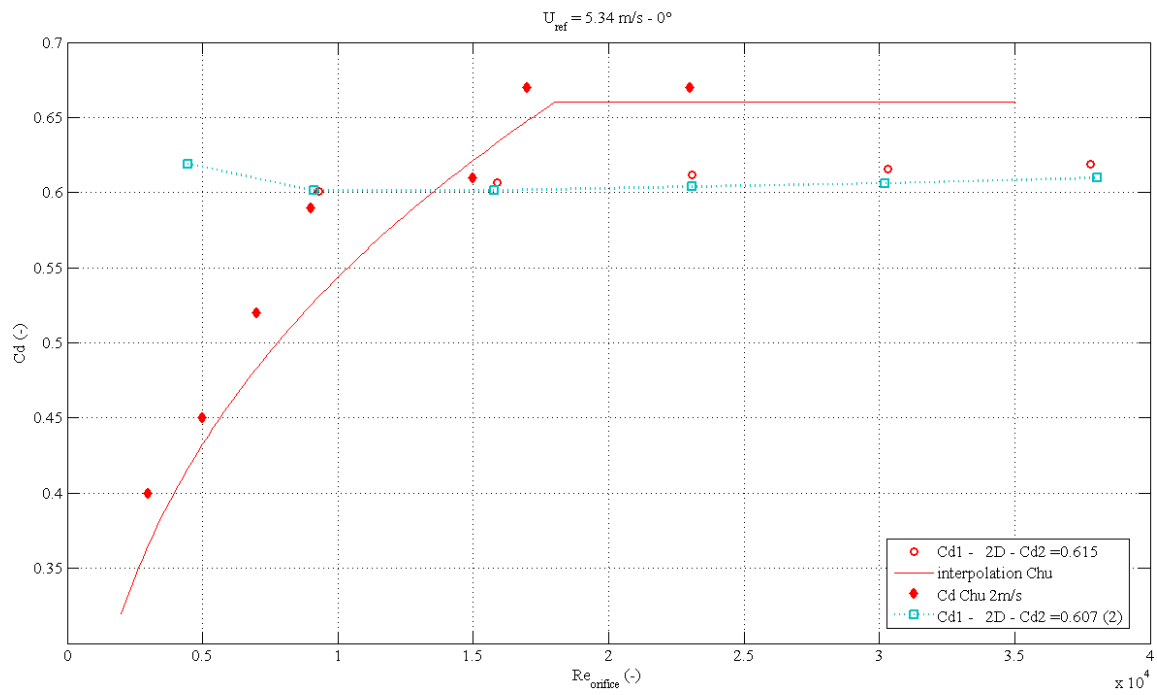


Figure III-9 : comparaison entre les valeurs de Chu à 2 m/s et les nôtres à 5 m/s à 0°

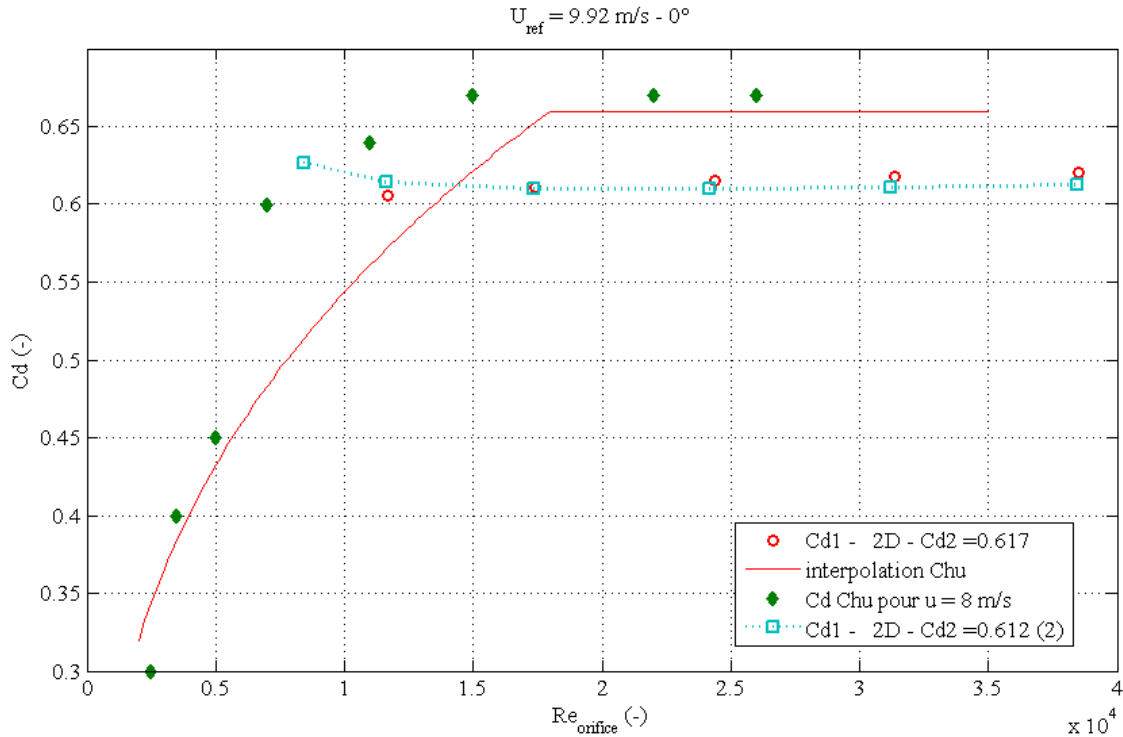


Figure III-10 : comparaison entre les valeurs de Chu à 8 m/s et les nôtres à 10 m/s à  $0^\circ$

L'autre essai est celui réalisé à  $45^\circ$ , il donne une nouvelle courbe de tendance pour le coefficient de décharge qui est :

$$\begin{cases} \frac{C_d}{C_{d0}} = \left(\frac{Re}{Re_c}\right)^{0.584} & \text{pour } Re < 18000 \\ C_{d0} = 0.66 & \text{pour } Re \geq 18000 \end{cases} \quad (3.2)$$

Avec  $Re_c = 18000$  et un coefficient de corrélation égal à 0.96, soit une meilleure précision. Le graphique de la figure III-11 présente la comparaison des résultats pour une incidence de  $45^\circ$  et une vitesse de 8 m/s pour Chu. Ici, les données à l'incidence nulle sont aussi représentées (en rouge pour les valeurs de Chu et en bleu foncé pour les nôtres). La reproductibilité des résultats est toujours bonne. Ce graphique montre une plus forte influence du Reynolds d'orifice sur le coefficient de décharge pour une incidence de  $45^\circ$  et ceci pour les deux cas. Les valeurs tendent quasiment vers la même limite que pour l'incidence  $0^\circ$ , il y a donc toujours une différence de 10 %. Les deux jeux de valeurs sont encore équivalents sur le même intervalle de nombre de Reynolds.

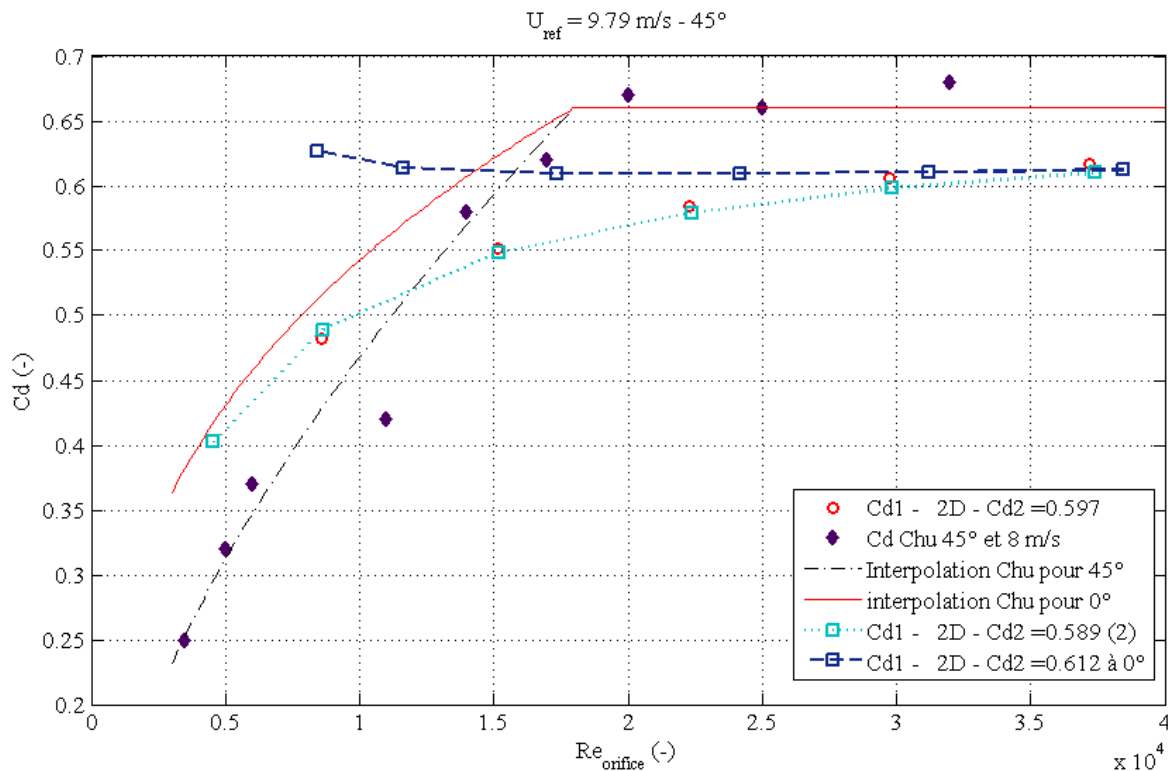


Figure III-11 : comparaison entre les valeurs de Chu à 8 m/s et les nôtres à 10 m/s à 45°

Les essais tirés de Chu montrent la variabilité importante du coefficient de décharge. Les dépendances vis-à-vis du Reynolds de l'orifice et de l'incidence sont mises en évidence et confirment le fait que le coefficient de décharge n'est pas facile à déterminer. Les variations observées par Chu ne sont pas toujours confirmées dans les essais. Il faut remarquer que les hypothèses ne sont pas exactement les mêmes. Et c'est ce qui pose généralement problème pour retrouver le même coefficient que dans la littérature. Pour une incidence nulle, la variation du coefficient de décharge avec le Reynolds de l'orifice n'est pas visible dans notre cas. Le fait de descendre dans des Reynolds plus faibles aurait pu mettre en évidence cette dépendance. Cependant, il est rare de travailler à des Reynolds inférieurs à 500, car dans ce cas-là, c'est la théorie utilisée pour déterminer le coefficient de décharge qui n'est plus valable. Donc en dépassant un nombre de Reynolds de l'orifice de 1000 ou 2000, les valeurs obtenues par Chu et les essais ne sont pas très différentes. Une erreur de 10 % est faite dessus, soit une erreur de 10 % dans le débit entre nos deux campagnes d'essais. On pourra alors considérer que notre système est viable malgré une différence marquée sur le comportement du coefficient par rapport aux paramètres de variation mais qui est moins prononcée sur les valeurs du

coefficient de décharge. L'obtention d'une valeur assez proche reste satisfaisante au regard des difficultés existantes pour le qualifier précisément. La vérification ainsi que la validation étant faite, le modèle va être utilisé pour analyser les influences de différents paramètres sur le coefficient de décharge.

### **III.3. Paramètres influençant le coefficient de décharge ( $C_d$ )**

Le paragraphe précédent a montré que le coefficient de décharge n'est pas évident à cerner et que malgré de nombreuses recherches effectuées, il n'est toujours pas bien défini. La valeur de 0,65 qui est prise par défaut n'est pas toujours juste comme cette partie le montrera. Le but des paragraphes suivant sera de montrer comment différents paramètres influent sur le coefficient de décharge. Dans cette étude, cinq paramètres ont été choisis et étudiés. Tout d'abord, l'effet du Reynolds building (ce qui correspond à la vitesse du vent) sera étudié. Ensuite viendra l'influence du Reynolds d'orifice (ce qui correspond à la vitesse dans l'orifice, soit le débit le traversant). Puis l'effet de l'incidence du vent et celle de la forme de l'orifice seront abordées, pour finir avec l'interaction de la porosité sur le coefficient de décharge. Mais en premier lieu, une description du moyen utilisé pour obtenir les différents coefficients de décharge va être donnée.

#### **III.3.1. Calcul du coefficient de décharge**

Pour chaque couple débit passant au travers de l'orifice, différence de pression entre l'aval et l'amont de l'orifice, un coefficient de décharge peut être déterminé. C'est ce qui est utilisé dans la première méthode de calcul cité dans le protocole expérimental (Figure II-24). Cette méthode est simple à mettre en œuvre et permet d'obtenir un coefficient de décharge précis à chaque cas mais elle en multiplie le nombre. Une deuxième méthode, qui utilise un ajustement de courbe, se calque sur l'équation carrée (1.1). Enfin une dernière méthode utilisée est celle d'ajuster une loi puissance sur les valeurs mesurées avec un  $n$  et un  $K$  variable (cf. (1.3)), et ensuite une valeur du coefficient de décharge correspondant est calculée à partir de  $n$ ,  $K$ , l'aire de l'orifice  $A$  et

la masse volumique de l'air  $\rho$ . En pratique, chaque fois qu'une série d'essais fait varier l'alimentation du ventilateur (de 0 à 50 Hz), une courbe peut être ajustée sur les mesures. On obtient ainsi les trois coefficients de décharges différents comparables entre eux. Par exemple, la figure III-12 et le Tableau III-5 donnent les coefficients de décharge pour la plaque n°1 dans un cas sans vent et avec une incidence nulle.

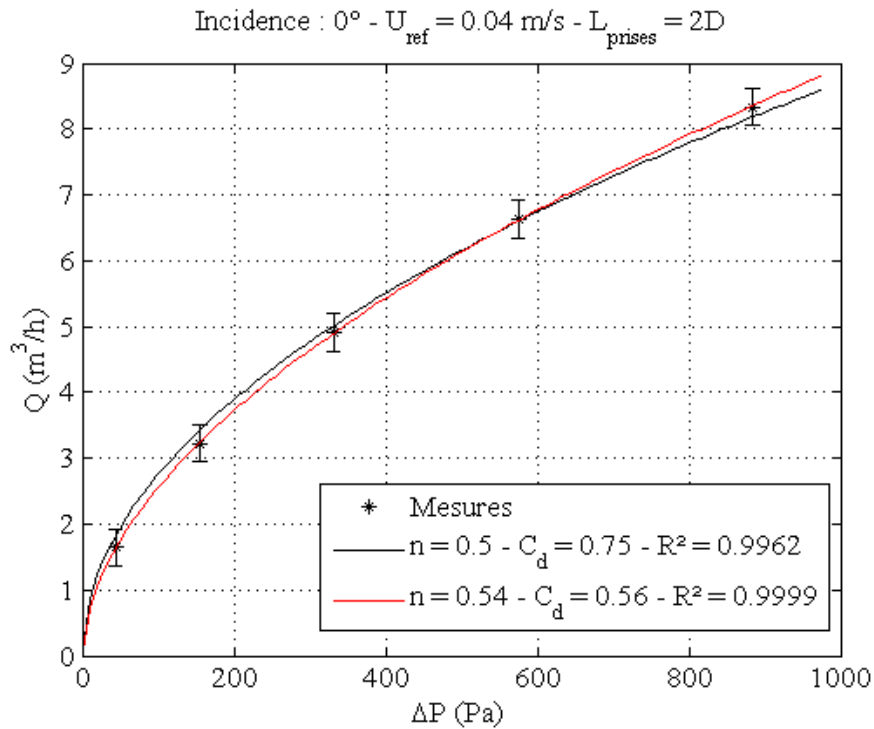


Figure III-12 : loi débit/pression pour la plaque n°1, sans vent, pour une incidence de  $0^\circ$

Tableau III-5 : coefficient de décharge calculé par la première méthode pour la plaque n°1, une incidence de  $0^\circ$  et une vitesse nulle

fréquence d'alimentation du ventilateur	10	20	30	40	50
coefficient de décharge (méthode 1)	0,68	0,71	0,74	0,76	0,77

La première remarque est que les valeurs des coefficients peuvent être bien différentes. La méthode 2 donne une valeur ( $C_{d2} = 0,75$ ) proche de la moyenne de la méthode 1 ( $C_{d1m} = 0,73$ ). Et pour la 3<sup>ème</sup> méthode, la valeur obtenue est  $C_{d3} = 0,56$ , le problème est qu'il faut aussi retenir la valeur de l'exposant correspondant,  $n = 0.54$ , assez proche de la loi carrée. Ce qui fait que les 2 méthodes obtiennent un coefficient de corrélation très

bon, ici les deux méthodes sont valables. C'est ainsi que chaque coefficient de décharge peut être observé pour chaque série d'essais.

### III.3.2. Influence du Reynolds building ( $Re_b$ ) sur le $C_d$

L'étude de l'influence du nombre de Reynolds building sur le coefficient de décharge va se faire dans ce paragraphe. Le nombre de Reynold building ( $Re_b$ ), nombre sans dimension, correspond à :

$$Re_b = \frac{\rho \cdot U \cdot L}{\mu} \quad (3.3)$$

Où  $\rho$  est la masse volumique de l'air [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ],  $U$  la vitesse du vent dans la soufflerie,  $L = 0.3 \text{ m}$  est la dimension caractéristique de la maquette et  $\mu$  la viscosité dynamique de l'air égal à  $1,8 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ . Ce coefficient va permettre d'observer si le vent environnant la maquette et particulièrement sa vitesse, a un effet sur le coefficient de décharge. Pour observer cet effet, des courbes où le coefficient de décharge est tracé en fonction du Reynolds building ont été faites pour les toutes les plaques et les configurations d'essais. Dans le rapport, seulement quelques courbes représentatives du comportement de coefficient de décharge vont être prises. La figure III-13ci-dessous montre une de ces courbes, les tracés vont être expliqués ensuite.

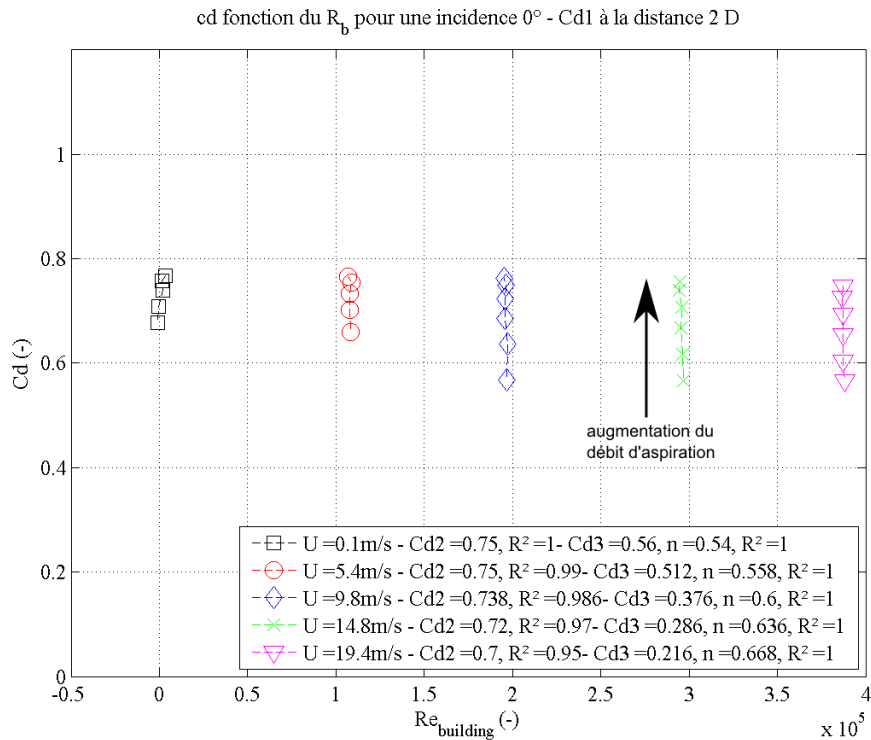


Figure III-13 : Cd en fonction du  $Re_b$  pour une incidence de  $0^\circ$  pour la plaque n°1

Dans la figure ci-dessus, les coefficients de décharge calculés à partir de la première méthode sont tracés. Dans la légende, la vitesse de vent correspondante, le coefficient de décharge calculé de la manière 2 (appelé coefficient de décharge 2 ou  $Cd2$ ) et 3 (appelé coefficient de décharge 3 ou  $Cd3$ ) et leurs coefficients de détermination respectifs sont donnés. Les données sont représentées de façon verticale, elles correspondent aux différentes valeurs du  $C_d$  en fonction de la fréquence d'alimentation du ventilateur, les points les plus bas correspondant à la fréquence la plus faible (10 Hz) et les plus hauts à la fréquence d'alimentation maximale (50 Hz). Les valeurs du coefficient de décharge sont toutes calculées pour une distance 2 D de l'orifice.

La méthode étant présentée, l'analyse peut être effectuée. Sur la Figure III-13, les coefficients de décharge tendent vers une valeur constante quelque soit la valeur du Reynolds building. Cette valeur limite correspond au coefficient de décharge 2. On peut en déduire que le  $Cd2$  est une bonne approximation de la valeur limite du  $Cd1$ . Cette tendance à tendre vers une valeur limite s'observe sur tous les orifices et pour toutes les configurations d'essais. Mais à faible aspiration, la valeur du coefficient de décharge dépend du  $Re_b$ , elle décroît légèrement avec l'augmentation du Reynolds (dans la Figure

III-13, la valeur passe de 0.65 à 0.55 soit une différence de 14 % (pourcentage rapporté à la valeur limite)). Ce phénomène est présent dans toutes les configurations de façon plus ou moins prononcée suivant l'incidence du vent. En effet, pour une incidence entre 45° et 90° (Figure III-14), cet effet est plus visible et moins pour une incidence de 0°, 135° ou 180° (Figure III-15). L'effet de l'incidence du vent apparaît déjà.

La différence entre les orifices est qu'ils ne tendent pas tous vers la même valeur limite, plus l'orifice est grand plus le coefficient est faible (comparaison de la figure III-13 avec la Figure III-14 qui a la même limite pour une incidence nulle). Et plus le facteur de forme est élevé, plus le coefficient de décharge tend vers une valeur élevée. Et enfin, à facteur de forme équivalent l'orifice carré a une valeur limite du coefficient de décharge supérieur à un orifice circulaire.

Enfin, le coefficient de décharge 3 (méthode de la loi puissance) donne toujours une approximation précise de la courbe débit/pression de l'orifice, il a un coefficient de détermination très souvent au-dessus de 0,99 alors que ce n'est pas le cas pour le  $Cd2$ .

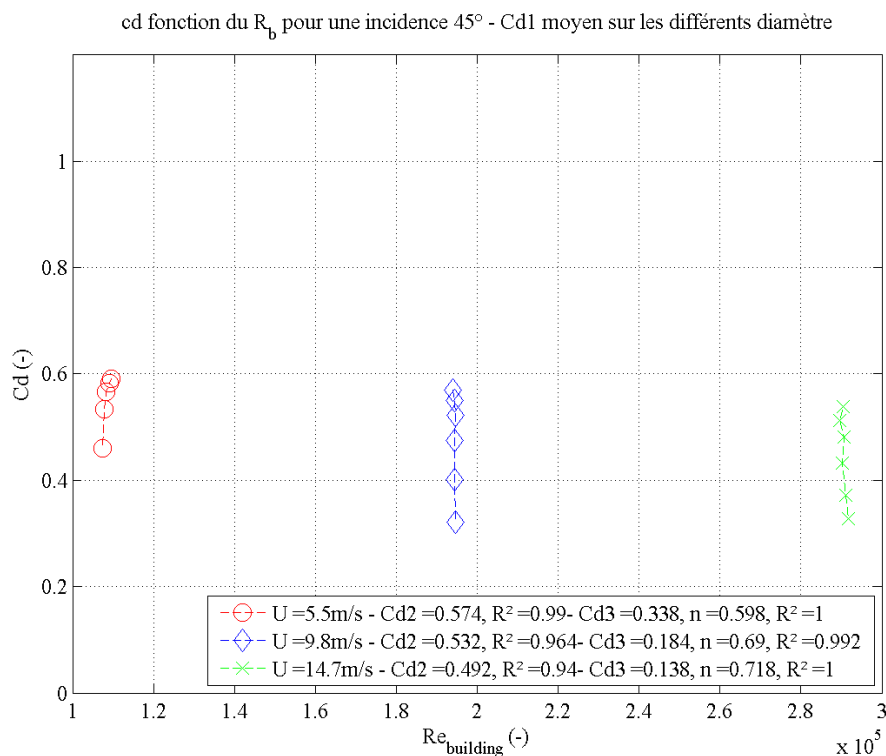


Figure III-14 :  $Cd$  en fonction du  $Re_b$  pour une incidence de 45° pour la plaque n°6 avec les 4 orifices ouverts



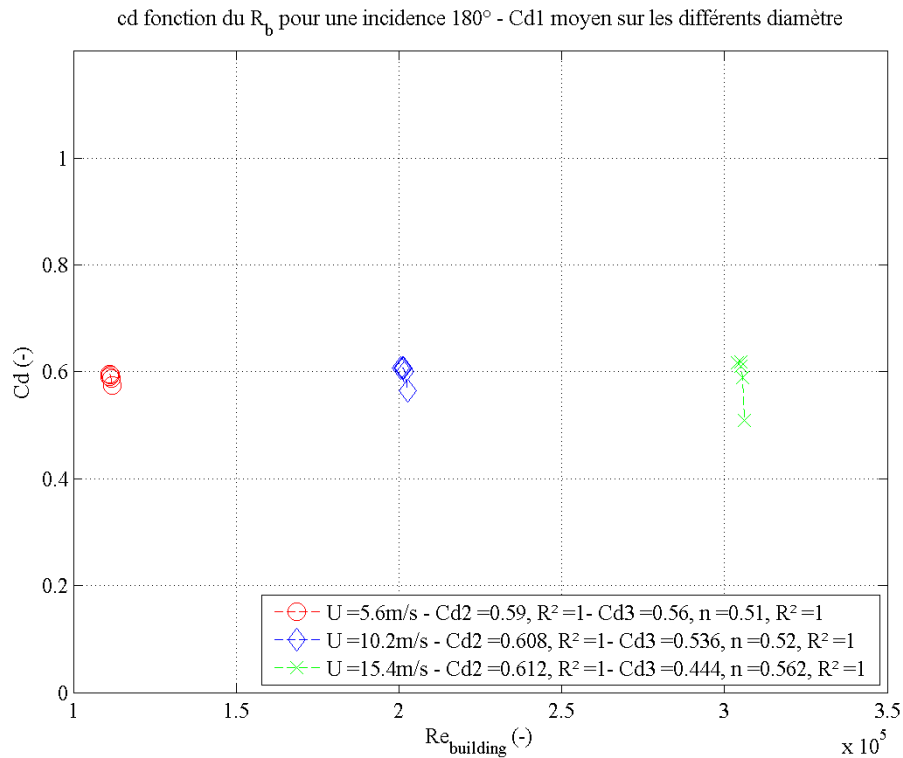


Figure III-15 :  $Cd$  en fonction du  $Re_b$  pour une incidence de  $180^\circ$  pour la plaque n°6 avec les 4 orifices ouverts

Au final, le nombre de Reynolds building a un effet sur le coefficient de décharge mais pas dans toutes les configurations. En effet, dès que le débit à travers l'orifice est assez important, le Reynolds building n'a plus d'effet sur le coefficient de décharge. Il faut donc dépasser un nombre de Reynolds orifice de 10000 pour obtenir une indépendance vis-à-vis de la vitesse du vent. Par contre si le vent est le seul moteur du débit traversant l'orifice, il y a de forte chance que le débit soit surestimé car prendre la valeur limite du coefficient simplifie son choix, mais elle est souvent supérieure au coefficient de décharge réel. Cela peut alors causer des problèmes en ventilation naturelle. Enfin l'effet du nombre de Reynolds building est similaire sur toutes les plaques et le coefficient de décharge reste assez constant pour une configuration donnée. Le Reynolds building n'a donc pas un effet majeur sur le coefficient de décharge. Dans la gamme de Reynolds considéré, les courbes nous montrent une influence plus prononcée du Reynolds orifice, étudié dans la partie suivante, ainsi que de l'incidence (cet effet sera vu dans la partie III.3.4).

### III.3.3. Influence du Reynolds orifice ( $Re_o$ ) sur le $C_d$

L'étude sur le coefficient de décharge se poursuit sur l'influence du Reynolds orifice. Comme dans le paragraphe précédent, le nombre de Reynolds va être présenté, ensuite les courbes permettant l'examen de l'influence vont être décrites pour finir par l'analyse de l'effet du nombre de Reynolds orifice. Ce nombre est similaire au précédent, il est décrit par l'équation (3.4).

$$Re_o = \frac{\rho \cdot u_o \cdot d}{\mu} \quad (3.4)$$

Où  $\rho$  est la masse volumique de l'air [ $\text{kg/m}^3$ ],  $u_o$  la vitesse de l'air dans l'orifice (calculée grâce au débit d'aspiration et de la surface de l'orifice),  $d$  est le diamètre correspondant à l'orifice [m] et  $\mu$  la viscosité dynamique de l'air égal à  $1,8 \cdot 10^{-5}$  Pa.s. Ce coefficient va permettre d'observer si la vitesse de l'air traversant l'orifice a un effet sur le coefficient de décharge et si elle perturbe sa valeur. Les courbes utilisées dans ce paragraphe représentent le coefficient de décharge 1 tracé en fonction du nombre de Reynolds de l'orifice comme on peut le voir en-dessous.

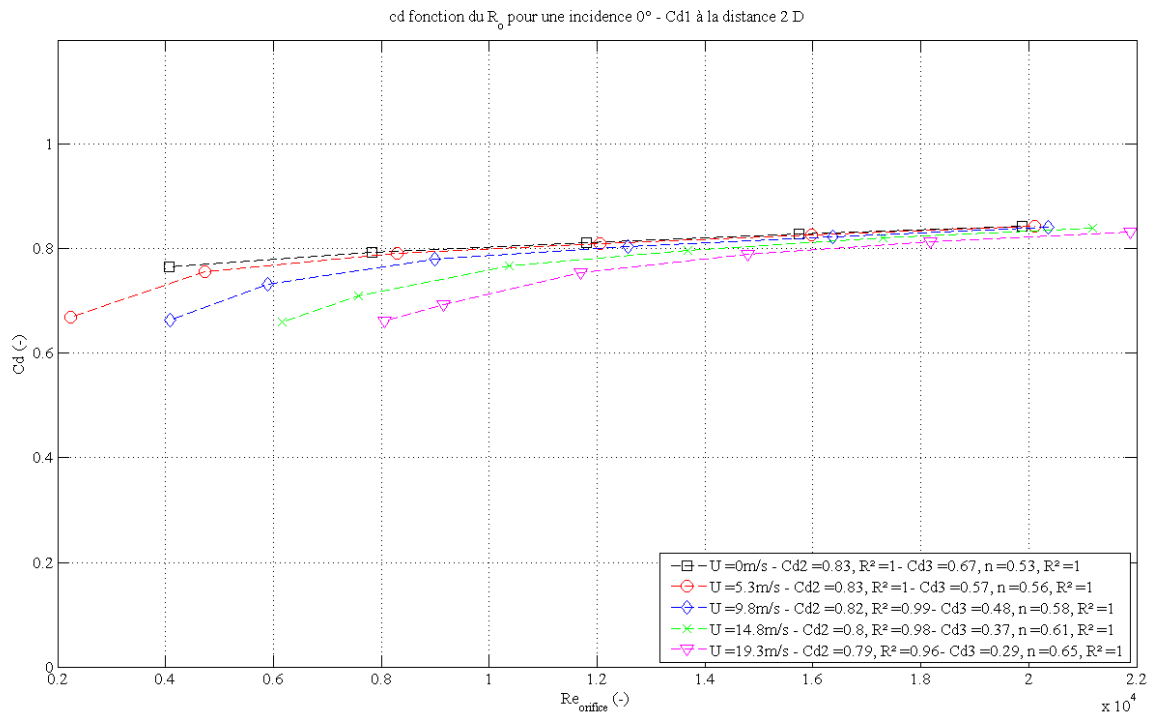


Figure III-16 : courbe du  $C_d$  en fonction du  $Re_o$  à une incidence de  $0^\circ$  pour la plaque n°4

Les courbes représentent les valeurs du  $Cd1$  obtenues à partir des mesures à différentes vitesses de vent, chaque point étant une fréquence d'alimentation. Comme pour les courbes du paragraphe précédent, la légende de chaque courbe est accompagnée de la valeur du  $Cd2$ ,  $Cd3$  et des coefficients de détermination respectifs.

L'observation des courbes obtenues montre que le coefficient de décharge augmente avec le nombre de Reynolds orifice pour toutes les configurations jusqu'à ce qu'il se stabilise. L'effet observé correspond à celui observé par Chu et il est présent quelque soit l'orifice. Comme pour Chu, une fois un Reynolds critique atteint le coefficient se stabilise. Mais ce Reynolds critique dépend aussi d'autres paramètres, comme la porosité ou l'incidence. En effet, en comparant la figure III-16 et la figure III-17, le Reynolds critique est 15000 pour la première et augmente à 20000 pour la seconde figure. Les incidences entre  $45^\circ$  et  $90^\circ$  ont tendance à augmenter le Reynolds critique. Prendre une valeur critique pour le Reynolds orifice aux alentours de 20000 correspond assez bien à la plupart des orifices testés (ce qui correspond à la valeur de Chu).

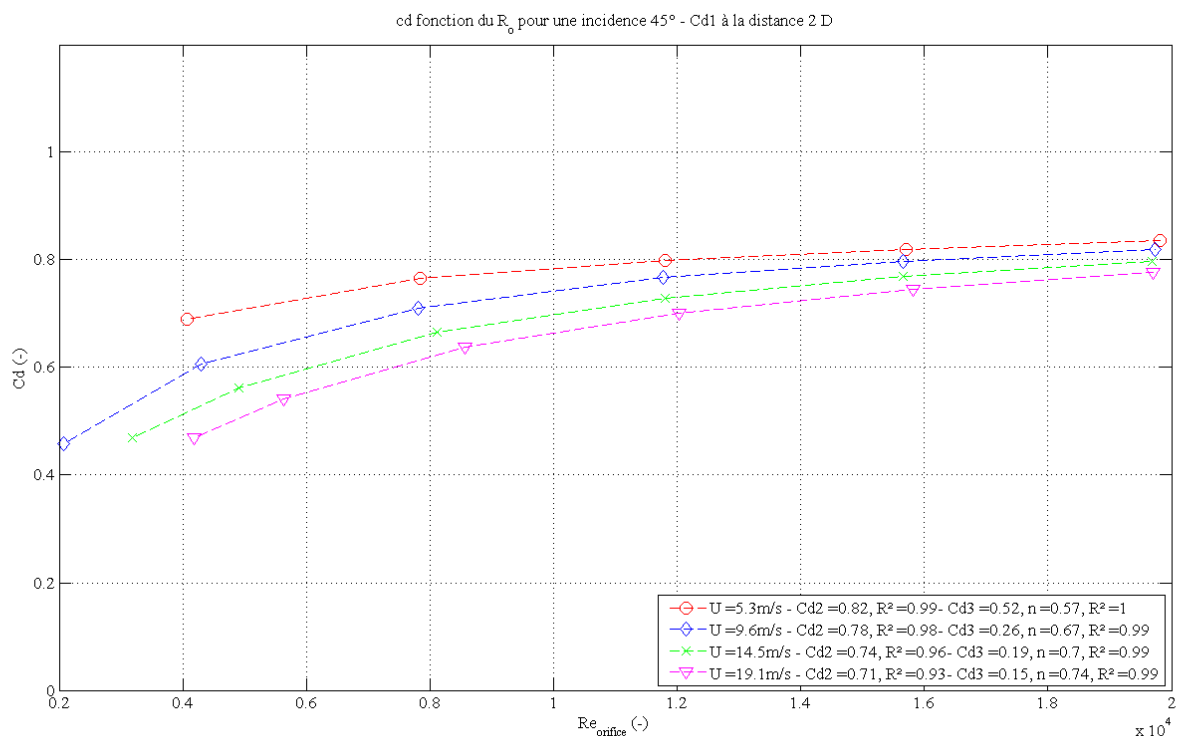


Figure III-17 : courbe du  $Cd$  en fonction du  $Re_o$  à une incidence de  $45^\circ$  pour la plaque n°4

Mais on observe pour les orifices ayant une porosité plus importante, des Reynolds d'orifice critique qui monte jusqu'à 35000 pour les incidences comprises entre 45° et 90°. Pour avoir une indépendance plus forte vis-à-vis du Reynolds orifice, une porosité faible est meilleure. De même, un facteur de forme assez faible est préférable pour éviter les frottements au niveau des parois de l'orifice qui augmenteront alors la dépendance au Reynolds d'orifice (comparaison entre les plaques 1 et 3).

Les valeurs  $Cd2$  et  $Cd3$  sont encore présentées. Sur les courbes précédentes et sur l'ensemble des résultats, le  $Cd3$  est celui qui approxime le mieux le coefficient de décharge (coefficient de détermination  $> 0,99$  dans la majorité des cas). Mais en regardant la figure III-17, le  $Cd3$  est égal à 0,52 avec un exposant  $n = 0,57$  pour la vitesse de vent 5m/s alors qu'il est égal à 0,15 avec  $n = 0.74$  pour une vitesse de vent de 19 m/s. L'obtention d'un coefficient de décharge spécifique pour un orifice n'est donc pas triviale. De plus, si chaque orifice a besoin d'être calibré, l'utilisation de ce coefficient devient compliquée.

Le nombre de Reynolds de l'orifice a donc une influence sur le coefficient de décharge. Pour s'en libérer, il faut que le Reynolds orifice dépasse un nombre de Reynolds critique qui est variable suivant l'orifice et la configuration d'essai. Mais une valeur de 20000 pour ce Reynolds critique permet déjà de se placer dans un cas où l'effet du Reynolds orifice sera plus négligeable. Dans les mesures présentées précédemment ainsi que dans celles du paragraphe précédent, l'incidence du vent joue un rôle important, en particulier quand le vent arrive avec une inclinaison comprise entre 45° et 90°. Le paragraphe suivant va permettre de le mettre en évidence.

#### **III.3.4. Influence de l'incidence ( $\theta$ ) sur le $C_d$**

Dans les deux paragraphes précédents, l'incidence perturbe à chaque fois le coefficient de décharge. Pour étudier son influence, des courbes donnant le coefficient de décharge  $Cd2$  et  $Cd3$  en fonction de l'incidence sont tracées. La figure III-18 suivante montre ces courbes pour la plaque n°1. Et en Annexe H, les courbes pour toutes les plaques sont données.

Dans cette courbe, l'exposant  $n$  est tracé dans le graphique du haut, avec  $n$  variable suivant les vitesses du vent dans la soufflerie. Les coefficients de décharge sont visibles dans le graphique du bas avec en trait plein  $Cd2$  et en pointillé  $Cd3$ . Ils sont aussi tracés suivant la vitesse du vent (code couleur) et dans la légende, il est associé le coefficient de détermination moyen sur l'ensemble des coefficients de décharge 2 et 3.

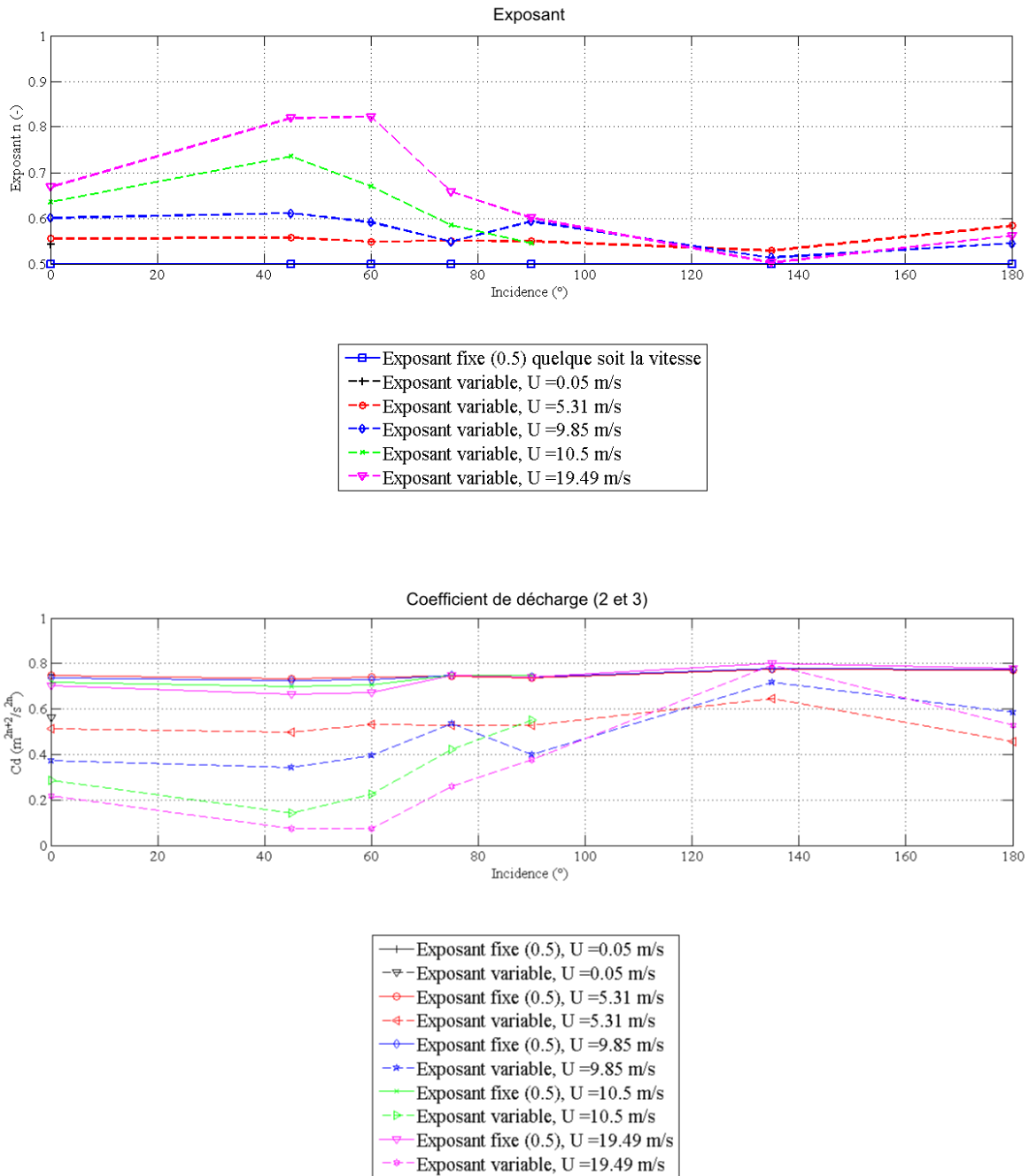


Figure III-18 : variation de l'exposant  $n$  et du coefficient de décharge en fonction de l'incidence pour la plaque n° 1

Sur l'ensemble des courbes (Figure H-1, Figure H-2, Figure H-3, Figure H-4, Figure H-5, Figure H-6, Figure H-7 et Figure H-8), l'influence de l'incidence est bien mise en évidence. Et comme il a été dit dans les parties précédentes, c'est au niveau des incidences comprises entre  $45^\circ$  et  $90^\circ$  que l'effet peut se faire fortement sentir. En effet, le coefficient de décharge variable ( $Cd3$ ) et l'exposant  $n$  associé varient énormément dans cette intervalle alors qu'une fois les  $90^\circ$ , tous les coefficients sont stables. De plus, à l'angle de  $75^\circ$ , les courbes peuvent se chevaucher, ce qui montre l'instabilité particulière à cette incidence.

La vitesse du vent influe ici sur les coefficients de décharge obtenus. En effet pour les incidences entre  $0^\circ$  et  $90^\circ$ , plus la vitesse du vent augmente, plus le coefficient de décharge  $Cd3$  varie et compense l'effet du vent. Cet effet est aussi visible à plus petite échelle sur le  $Cd2$ . L'indépendance du Reynolds building n'est donc pas vraie pour toutes les configurations.

Ensuite, en regardant les coefficients de détermination globale pour toutes incidences, les deux méthodes de calculs obtiennent de bonne approximation. Le problème interviendrait si dans un lieu, le vent est particulièrement directionnel, la prise en compte d'un coefficient de décharge spécifique serait indispensable pour ne pas mal évaluer le débit. Mais ceci n'intervient que pour des cas particuliers, en moyenne, les deux méthodes obtiennent de bons résultats. En comparant ces courbes, l'influence de la forme de l'orifice peut se voir, elle sera exposée dans le paragraphe suivant.

Au final, l'incidence peut avoir une grande importance sur le coefficient de décharge car dans l'intervalle de  $45^\circ$  à  $90^\circ$ , tous les orifices sont perturbés. Dans cet intervalle d'incidence, les différents paramètres étudiés précédemment interagissent fortement. C'est dans le cas où le vent ne viendrait que d'une direction comprise dans cet intervalle qu'il faut faire attention au coefficient de décharge choisi pour obtenir le bon débit. Dans ce cas-là, la méthode de calcul numéro 3 est la plus adaptée.

### III.3.5. Influence de la forme de l'orifice sur le $C_d$

La forme de l'orifice ainsi que son facteur de forme influe aussi sur le coefficient de décharge. Ces effets sont visibles sur les différentes courbes déjà présentées dans les trois paragraphes précédents.

Premièrement, la valeur limite du coefficient de décharge (qui peut être considérée proche de  $Cd2$ ) n'est pas la même suivant le facteur de forme. Pour les 3 premières plaques, le coefficient de décharge ( $Cd2$ ) commence à une valeur de 0,75 pour la plaque 1 et la plaque 2 (en se référant aux valeurs dans les courbes dépendant de l'incidence de l'annexe H). Mais il augmente jusqu'à 1 pour la plaque 3. Quand le facteur de forme augmente, le coefficient de décharge augmente aussi. Ensuite, l'orifice de la plaque 4 (forme carrée) et celui de la plaque 2 (forme circulaire) n'ont pas les mêmes valeurs limites pour le coefficient de décharge, il est plus élevé pour la forme carrée. Par contre, pour les plaques 5 et 6, qui ont le même facteur de forme, mais une forme très différente (un trou carré pour la première alors qu'il y a 4 orifices circulaires pour la seconde), le coefficient de décharge limite est le même et égal à 0,6. Elles confirment en tout cas l'influence du facteur de forme.

Déduire l'effet de la forme de l'orifice sur le coefficient de décharge n'est pas possible après ces essais. Suivant les configurations, la forme peut jouer sur le coefficient. Par contre pour le facteur de forme, il est mis en évidence qu'il influe sur le coefficient de décharge. Comme il a été vu dans les paragraphes précédents (effet du Reynolds orifice) et juste au-dessus, un facteur de forme le plus faible possible permet de stabiliser la valeur du coefficient de décharge. Ce qui est tout à fait logique car la théorie s'applique à des orifices à bord vif (ce qui est vrai plus le facteur de forme est faible). On peut le rapprocher des conditions d'utilisation du diaphragme, pour avoir des mesures justes, il faut que le diaphragme soit à bord vif et avec un facteur de forme très faible.

### III.3.6. Influence de la porosité ( $A_{orifice}/A_{mur}$ ) sur le $C_d$

Pour étudier l'influence de la porosité, la plaque multi-trou est la plus appropriée. En effet, les autres plaques ont toutes des porosités très faibles. Ceci se justifie par le fait

que l'on utilise uniquement de petits orifices pour modéliser des bouches de ventilation. De plus, l'effet de la taille du caisson sur le coefficient de décharge est inférieur à 5 % si la surface de l'orifice est inférieure à 10 % de la surface de la section du caisson. Cela se retrouve grâce à la théorie de l'expansion soudaine (application de l'équation de dynamique des fluides pour déterminer le changement de pression dû à l'expansion) (Chiu, 2007).

Une visualisation des coefficients de décharge en fonction de la porosité a été reprise de l'article de Karava (2004) et montre bien une variation due à la porosité pour les orifices circulaires (Figure III-19). Mais une tendance générale ne peut pas sortir de ce graphique. Les valeurs des essais ont été mises sur cette visualisation. Tous les coefficients de décharge calculés ( $Cd1$ ,  $Cd2$  et  $Cd3$ ) y sont. Entourées en rouge, les valeurs des coefficients de décharge les plus nombreuses ont été mises en évidence car ce sont celles correspondant aux valeurs limites (les moins sensibles aux paramètres de variation étudiés précédemment). Les plus basses correspondent à celles obtenues avec un faible Reynolds d'orifice ou à celles calculées par la méthode 3. Les autres courbes en pointillés sont tirées d'essais étudiés par Karava. L'effet de la porosité apparaît comme inexistant sur les courbes obtenues pour la plaque multi-trou. Les valeurs du coefficient de décharge reste les mêmes quelque soit le nombre d'orifices ouverts (1, 2 ou 4). Par contre, la valeur du coefficient de décharge est plus importante pour les orifices circulaires plus petits. Celui-ci décroît en fonction de la porosité pour devenir constant à partir de 0,5 % pour nos essais (Figure III-19). Les courbes tirées de l'article de Karava (valeur limite de 0,65) ne tendent pas vers la même valeur que celles obtenues dans les essais (valeur limite de 0,6). Cependant les valeurs obtenues sont proches de celles données par Jensen, un domaine de variation plus conséquent aurait permis de comparer les données. Mais il faut faire attention car les hypothèses et les conditions d'essais utilisées dans leurs déterminations ne sont pas connues. Elles sont mises à titre indicatif et permettent de voir la variabilité existante sur le coefficient de décharge et qu'il n'y a pas d'accord global.

Un point intéressant qui ressort de cette courbe est que la modélisation par plusieurs orifices est valable. En effet, qu'il y ait 1,2 ou 4 orifices le coefficient de décharge reste constant. Ceci permet de modéliser des ouvertures plus grandes où le coefficient de



décharge pourrait être variable car si l'orifice est grand (une fenêtre par exemple), le coefficient de décharge n'est pas forcément constant sur toute la surface de l'ouverture. Ainsi avec cette méthode de modélisation de grande ouverture, les débits sur les maquettes sont mieux représentés et permettent un meilleur dimensionnement (méthode de modélisation des fenêtres utilisée dans Faure, 2010).

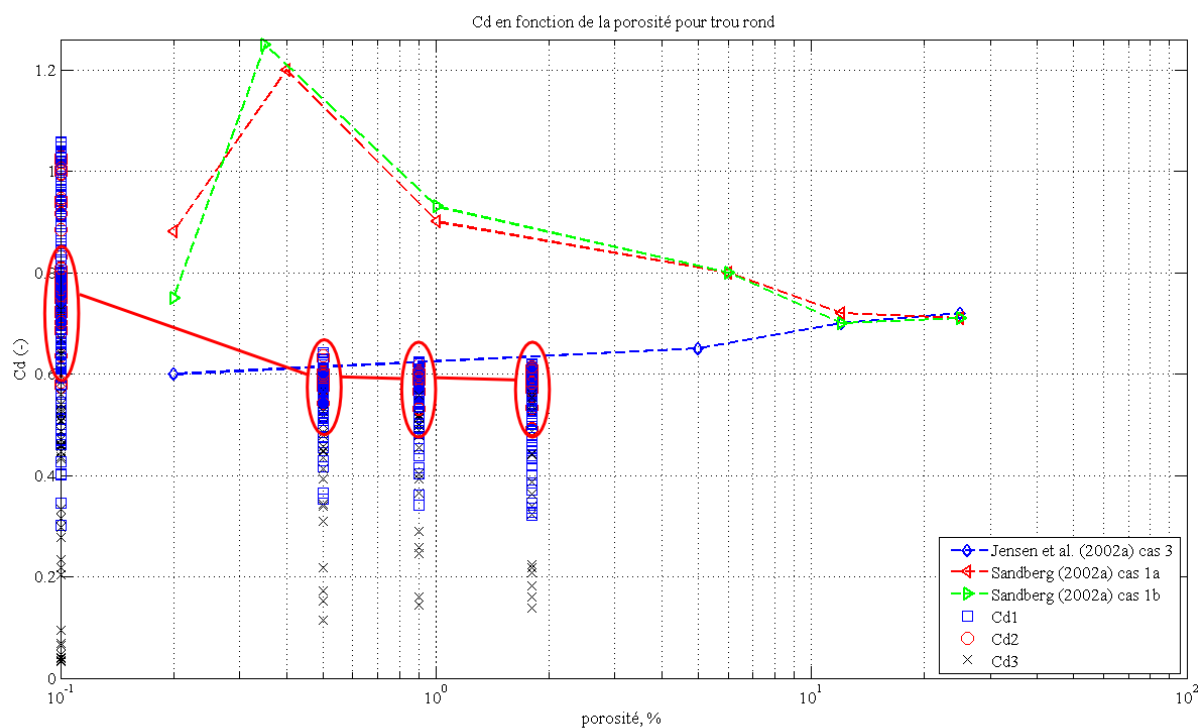


Figure III-19 : Ensemble des Cd en fonction de la porosité pour les orifices circulaires

Une autre visualisation des coefficients de décharge en fonction de la porosité a été reprise de l'article de Karava (2004) et montre aussi une variation due à la porosité pour une multitude de configuration d'orifices rectangulaires (Figure III-20). Mais une tendance générale ne peut pas sortir de ce graphique. Comme pour la Figure III-19, les valeurs des essais ont été mises sur cette visualisation. Un effet de la porosité apparaît ici (entre les valeurs de la plaque 4 et la plaque 5), l'augmentation de la porosité amène à une diminution du coefficient de décharge. La même conclusion peut être tirée sur les orifices circulaires en comparant les plaques 1, 2 et 3 à la plaque 6, le coefficient de décharge diminue quand la porosité augmente.

Au final, l'influence de la porosité a été mise en évidence. Plus elle augmente, plus le coefficient de décharge diminue. Une investigation plus poussée (jusqu'à 10 % de porosité) aurait permis de voir s'il y a une valeur limite. Avec le domaine de variation pris dans les essais, la porosité critique obtenue est de 0,5 %. Au-delà de cette valeur critique, le coefficient de décharge est stable quelque soit la forme de l'orifice.

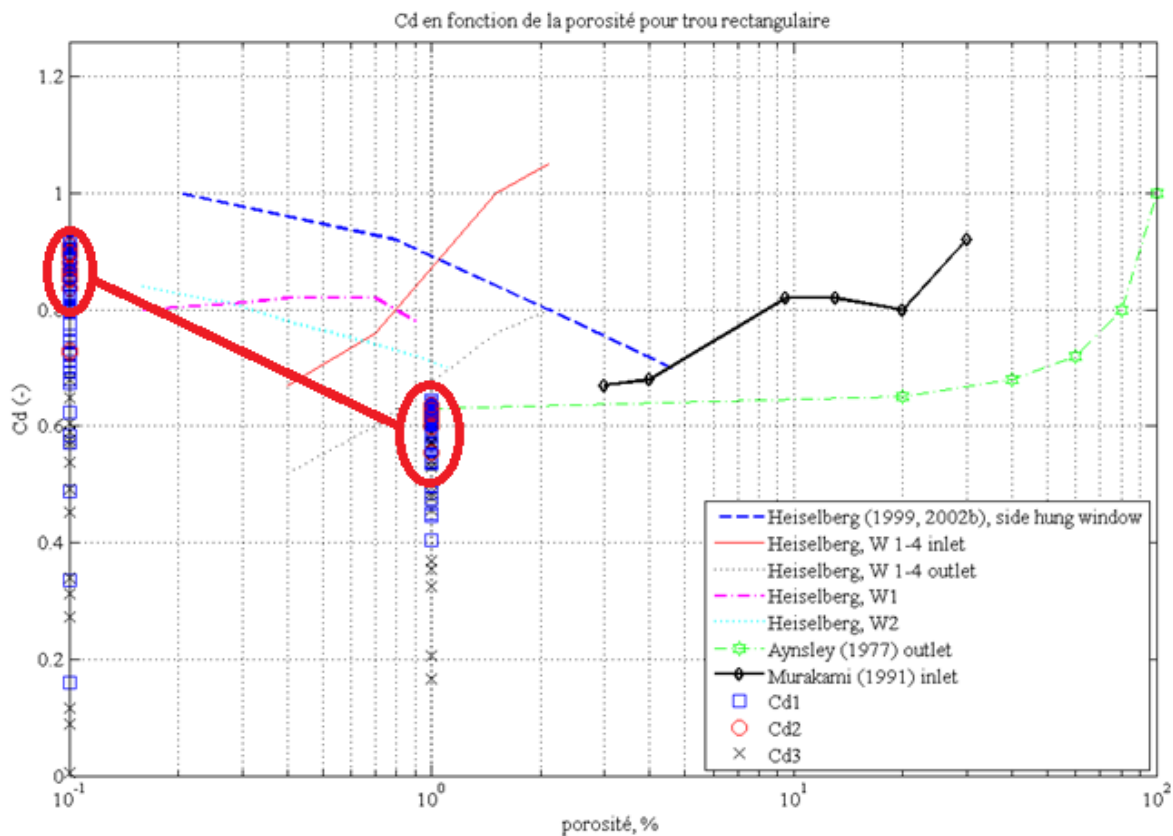


Figure III-20 : Ensemble des  $C_d$  en fonction de la porosité pour les orifices rectangulaires

Ces différentes analyses de l'influence des paramètres sur le coefficient de décharge sont finies. Elles répondent au premier objectif qui a été fixé dans le paragraphe I.3, qui était l'observation et l'analyse des paramètres sur le coefficient de décharge. Il a été montré que tous les paramètres influent sur le coefficient, mais de façon plus ou moins importante. Le principal problème rencontré est que les paramètres interagissent entre eux. Pour l'intervalle d'incidence entre  $45^\circ$  et  $90^\circ$ , l'effet des autres paramètres (Reynolds building et Reynolds orifice) sont amplifiés.

Ensuite, des deux relations de calcul du coefficient de décharge, la plus précise sur les essais est la loi puissance. Même si elle n'a pas de sens direct par rapport à la théorie de Bernoulli utilisée au départ, elle permet l'obtention d'un coefficient de décharge toujours très proche de la réalité. Le débit de ventilation sera bien mieux calibré. Mais le problème de cette méthode, c'est que le coefficient de décharge ainsi calculé doit l'être pour chaque orifice. Et si on prend une valeur globale du coefficient de décharge, on observe que la méthode de l'équation de Bernoulli obtient un résultat raisonnable. En définitif, la méthode de la loi puissance est bien à utiliser pour des cas spécifiques nécessitant une précision particulière.

Pour finir, les études faites sur le coefficient de décharge ne permettent pas de conclure sur une forme précise qui ne subirait pas de variations du coefficient de décharge. Pour autant des prescriptions d'usage peuvent permettre de limiter les effets. Il faut prendre un orifice ayant un facteur de forme le plus faible possible (se rapprocher le plus de la théorie finalement). Se placer dans des cas où le Reynolds d'orifice est supérieur à 20000 est favorable à la constance du coefficient. Une porosité supérieure à 0,5 % est à préférer pour obtenir une indépendance du coefficient de décharge. Enfin, il faut éviter le plus possible de se placer dans le cône d'incidence critique compris entre 45° et 90° pour maximiser les chances d'avoir un coefficient de décharge constant. L'étude sur le coefficient de décharge étant finie, de nouveaux besoins et problèmes ont pu apparaître. La conclusion sera alors suivie de quelques perspectives d'études possibles.

---

## Conclusion

---

Le coefficient de décharge a été introduit pour permettre de faire concorder le modèle théorique à la réalité. Il permet de prendre en compte les effets perturbant l'écoulement parfait de l'air dans l'orifice. Le coefficient de décharge a donc été l'objet d'étude de ce stage. Ce rapport a montré à partir d'une analyse bibliographique non exhaustive les paramètres faisant varier le coefficient de décharge. Ces paramètres étant très nombreux, l'étude s'est limitée à des paramètres géométriques de l'orifice tel que le facteur de forme ou la porosité et à des paramètres physiques de l'écoulement tel que la vitesse du vent et son incidence. Pour analyser leurs effets, le dispositif expérimental et les systèmes de mesures ont été décrits. La soufflerie Buse ainsi qu'un modèle de mesures ont été utilisés afin d'acquérir des données en pression permettant l'analyse du coefficient de décharge. Plusieurs méthodes de calcul du coefficient ont été confrontées. Il a été mis en évidence les effets des paramètres sur le coefficient de décharge et leurs interdépendances. Au final la caractérisation d'un coefficient de décharge est difficile. Dans l'idéal, il faudrait caractériser chaque orifice pour toujours obtenir une bonne approximation du débit. Cependant des prescriptions sur l'utilisation du coefficient permettent d'orienter son choix. Et l'introduction d'une équation de calcul du débit calqué sur une loi puissance est une bonne solution pour obtenir une bonne précision. Il s'agit maintenant de donner la loi correspondant aux cas rencontrés pour permettre à l'ingénierie aéraulique de perfectionner ces prévisions.

---

## Perspectives

---

L'étude du coefficient de décharge a montré la dépendance de celui-ci vis-à-vis de son environnement (paramètres géométriques et paramètres liés au vent). Elle ne se voulait pas complète, c'est pourquoi des interrogations sur le coefficient de décharge et sa variabilité restent encore en suspens, en voici des points présentés :

- L'influence de la turbulence n'a pas été abordée. La soufflerie mise à disposition ne permettait pas de faire des essais mais même si Chu (2009) affirme que la turbulence n'a pas d'effet, une étude serait la bienvenue.
- Ici, le système a toujours été placé dans des cas de régime permanent, est-ce que le fait de se placer dans des cas variables suivant le temps aurait une influence sur le coefficient de décharge ? Costola (2008) a déjà étudié les effets instationnaires sur des cheminées, l'étude sur des orifices à paroi mince pourrait se faire.
- L'influence du facteur de forme n'a pas pu être complète. En effet, le facteur de forme critique qui permet d'obtenir l'indépendance du coefficient de décharge n'a pas été obtenu. Une campagne expérimentale plus complète en variation du facteur de forme permettrait de confirmer la tendance mise en évidence.
- L'influence de la porosité n'a pas été poussée très loin. En effet toutes les valeurs de la porosité prises dans l'étude sont faibles. L'étude sur des orifices plus grands peut apporter de nouvelles informations. Même si l'étude ne doit pas monter sur de très grandes porosités, on peut se demander s'il existe une porosité critique où l'influence serait négligeable (est-ce que pour la forme carrée on obtiendrait les mêmes résultats que pour la forme circulaire ?). Et l'étude d'un orifice de

porosité équivalente à plusieurs petits orifices donnerait-il le même résultat sur le coefficient de décharge ? C'est ce qui en ressort, mais la comparaison n'est pas complète, un orifice circulaire de même porosité que les orifices de la plaque n°6 n'a pas été testé.

- D'autres paramètres peuvent influencer sur le coefficient de décharge et n'ont pas été étudiés ici, comme la position de l'orifice sur la façade, l'agencement de l'intérieur du caisson, la différence entre l'air entrant ou sortant (cf. Tableau A-1 : tableau récapitulatif des études sur le coefficient de décharge).

Ces axes de recherche proposés ne se veulent pas exhaustifs, d'autres paramètres influents sur le coefficient de décharge peuvent apparaître.

---

## Bibliographie

---

Chiu Y-H., Etheridge D.W., 2004, *experimental technique to determine unsteady flow in natural ventilation stacks at model scale*, Journal of wind engineering and industrial aerodynamics 92, p. 292-313

Chiu Y-H., Etheridge D. W., 2007, *external flow effects on the discharge coefficient of two types of ventilation opening*, Journal of wind engineering and industrial aerodynamics 95, p. 225-252

Chu C. R., Chiu Y-H., Chen Y-J., Wang Y-W., Chou C-P., 2009, *Turbulence effects on the discharge coefficient and mean flow rate of wind-driven cross-ventilation*, Building and environment 44, issue 10, p. 2064-2072

Costola D., Etheridge D.W., 2008, *unsteady natural ventilation at model scale – flow reversal and discharge coefficients of a short stack and an orifice*, building and environment 43, p. 1491-1506

Etheridge D.W., 1977, *Crack flow equations and scale effect*, building and environment 12, p. 181-189

Etheridge D.W., Sandberg M., 1996, *Building Ventilation – theory and measurement*, John Wiley & sons Ltd, 724p.

Etheridge D.W., 1998, *A note on crack flow equations for ventilation modelling*, building and environment vol. 33 n°5, p. 325-328

Faure X., Le Roux N., 2010, *ventilation naturelle d'origine aérodynamique dans les logements et bâtiments de faible hauteur : application pour les orifices innovants en façade*, rapport EN-CAPE 10.257 C – V0

Feustel H.E., Diamond R.C., 1998, *Ventilation in high-rise apartments*, Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Conference on Air Distribution in Rooms (ROOMVENT 1998), 1, p. 29-36, Stockholm, Sweden, June 14-17.

Flourentzou F., Van der Maas J., Roulet C-A., 1998, *Natural ventilation for passive cooling : measurement of discharge coefficients*, Energy and buildings 27, p. 283-292

Jéhu A., septembre 2009, *Qualification de la veine de la soufflerie µse*, rapport EN-CAPE 09.145 C V0 du CSTB

Karava P., Stathopoulos T., Athienitis A.K., 2004, *wind-driven flow through openings – a review of discharge coefficients*, international journal of ventilation vol. 3 n°3, p. 255-266

Karava P., Stathopoulos T., Athienitis A.K., 2007, *Wind-induced natural ventilation analysis*, solar energy 81, issue 1, p. 20-30

Karava P., 2008, *Airflow Prediction in Buildings for Natural Ventilation Design: Wind Tunnel Measurements and Simulation*, Ph.D thesis, Department of Building, Civil, and Environmental Engineering, Concordia University Montreal, Quebec, Canada

Le Roux N., 2011, *Etude par similitude de l'influence du vent sur les transferts de masse dans les bâtiments complexes*, thèse de doctorat, CSTB, Nantes, France

Liddament M.W., Orme M., 1998, *Energy and ventilation*, Applied Thermal Engineering 18, p. 1101-1109

Linden P.F., 1999, *the fluid mechanics of natural ventilation*, Annu. Rev. Fluid Mech. 31, p. 201-238

Norme AFNOR NF X 10-231, 1984, *Distribution et diffusion d'air - technique de mesure du débit d'air dans un conduit aéraulique*



Pankhurst R.C., Holder D.W., 1968, *Wind tunnel technique :An account of experimental methods in low- and high-speed wind tunnels*, edition Pitman

Regard M., 1996, *contribution à l'étude des mouvements d'air dans le bâtiment à l'aide d'un code champ : application à la ventilation naturelle d'un local par une ou deux grandes ouvertures*, Ph.D thesis, Institut national des sciences appliquées de Lyon, France

Sawachi T., Narita K-I., Kiyota N., Seto H., Nishizawa S., Ishikawa Y., 2004, *Wind Pressure and Air Flow in a Full-Scale Building Model under Cross Ventilation*, International Journal of Ventilation Volume 2 n° 4, p. 343-358

Sandberg M., 2004. *An alternative View on Theory of Cross-Ventilation*, International Journal of Ventilation 2 n° 4, p. 400-418

Sollic C., Mary J., 1995, *Simultaneous measurements of fluctuating pressures using piezoresistive multichannel transducers as applied to atmospheric wind tunnel tests*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 56, p. 71-86

Straw M.P., Baker C.J., Robertson A.P., 2000, *Experimental measurements and computations of the wind-induced ventilation of a cubic structure*, Journal of Wind Engineering Industrial Aerodynamics 88, p. 213-230

Walker I.S., Wilson D.J., Sherman M.H., 1998, *A comparison of the power law to quadratic formulations for air infiltration calculations*, Energy and building 27, p. 293-299

Wang B., 2010, *Unsteady wind effects on natural ventilation*, Ph.D thesis, departement of Architecture and Built Environment, University of Nottingham, UK

Wang B., Etheridge D.W., Ohba M., 2011, *wind tunnel investigation of natural ventilation through multiple stacks. Part 1 : mean values*, building and environment 46, p. 1380-1392

Wang B., Etheridge D.W., Ohba M., 2011, *wind tunnel investigation of natural ventilation through multiple stacks. Part 2 : instantaneous values*, building and environment 46, p. 1393-1402



---

## Annexe A

---

### Tableau récapitulatif des études sur le coefficient de décharge

Comme il a été précisé dans la partie I.2, le tableau suivant s'inspire de celui de Karava en 2004. Ici les cases grisées correspondent aux articles que j'ai pu analyser alors que les autres correspondent à ceux que Karava à exploiter. La première colonne donne la référence bibliographique, la seconde donne la méthode de détermination utilisée (empirique, en soufflerie, numérique ou à l'échelle réelle), la troisième donne la forme de l'ouverture, les paramètres faisant varier le coefficient de décharge se trouve de la 4<sup>ème</sup> à la 11<sup>ème</sup>, la 12<sup>ème</sup> donne les relations résultantes des recherches, et la dernière donne des remarques et observations sur le coefficient de décharge ou les méthodes utilisées.

Abréviations utilisées dans le Tableau A-1:

- Porosité ouverture avec  $r = \frac{A_{ouv}}{A_{mur}}$  où  $A_{mur}$  est l'aire du mur [m<sup>2</sup>] et  $A_{ouv}$  est l'aire de l'ouverture [m<sup>2</sup>].
- $Re = \frac{\rho U D}{\mu}$  nombre de Reynolds où D est la dimension caractéristique de l'objet [m], U la vitesse de l'écoulement [m/s],  $\rho$  la masse volumique [kg/m<sup>3</sup>] et  $\mu$  la viscosité dynamique du fluide [Pa.s]. Dans les cas cités dans le tableau, le Reynolds est celui de l'orifice où D est le diamètre,  $U = \frac{\bar{Q}}{A}$  la vitesse dans l'orifice et le fluide l'air.
- CFD : Computational Fluid Dynamics, correspond à la modélisation informatique des écoulements.

- $V$  est la vitesse tangentielle à la paroi [m/s].
- $z$  longueur de la fissure [m]
- $d_h = \frac{4A}{p}$  le diamètre hydraulique [m] qui dépend de l'aire  $A$  [m<sup>2</sup>] et du périmètre  $p$  [m] de l'orifice.
- $Ar$  est le nombre d'Archimède, sans dimension, permet de montrer la combinaison de l'effet du vent et de l'effet thermique dans un écoulement,  $Ar = Gr/Re^2$ , ce nombre indique la part relative des forces gravitationnelles par rapport aux forces d'inertie.
- $Gr$  est le nombre de Grashof, sans dimension, il caractérise la convection libre dans un fluide. Il correspond au rapport des forces de gravité sur les forces visqueuses.

Tableau A-1 : tableau récapitulatif des études sur le coefficient de décharge

Source	méthode	Forme ouverture	Paramètres variant								Coefficient de décharge ( $C_d$ ) fonction de :	remarques
			Aire de l'ouverture ( $A_{ouv}$ )	Vitesse vent	Incidence vent ( $\theta$ )	Placement de l'ouverture	Répartition des pièces intérieures	Porosité de l'enveloppe du bâtiment	turbulence	Autres paramètres		
Aynsley et al. (1977)	Empirique	rectangulaire	X								f(porosité ouverture)	
Vickery et Karakatsanis (1987)	soufflerie	rectangulaire et ronde	X	X							f(porosité ouverture) f(Re)	$C_d$ entrant < sortant
Murakami et al. (1991), Kato et al. (1992, 2004)	soufflerie	ouverture type fenêtre	X	X		X	X				équation en puissance f(configuration) f( $A_{ouv}$ )	Murakami : $C_d$ entrant < sortant
Flourentzou et al. (1998)	bâtiment réel	fenêtres et portes				X	X				$0.6 \pm 0.1$	pendant nuit sans vent, prise en compte des fuites
Heiselberg et al. (1999, 2001, 2002a, 2002b)	test en laboratoire	fenêtres battantes et à guillotine	X			X			X		f(configuration) f( $A_{ouv}$ ) f( $\Delta P$ )	paroi chaude en aval et froid avant, (2002b) $C_d$ entrant > sortant

Sandberg (2002, 2004), Jensen et al. (2002a, 2002c)	soufflerie et CFD	trous dans disque ou cylindre	X	X		X					f(configuration) f(porosité ouverture) $C_d = 0.7$ pour les grandes porosités	Jensen (2002a) : $C_d$ entrant < sortant
Jensen et al. (2002b)	CFD	rectangulaire			X						f( $\theta$ )	
Ohba et al. (2002, 2004), Kurabuchi et al. (2002, 2004), Akamine et al. (2004), Endo et al. (2004)	soufflerie et CFD	rectangulaire, circulaire et fenêtre	X	X	X	X					modèle local de similarité f( $Pr^*$ ) ou $Pr^* = \Delta p / 0.5\rho U^2$	tous sauf Kurabuchi : $C_d$ entrant < sortant
Sawachi (2002), Nishizawa et al. (2004)	Soufflerie à échelle réelle (maquette jusqu'à 5.7x5.7x3 m) et CFD	fenêtre	X	X	X			X			f( $\theta$ ) f( $\Delta C_p$ )	
Sawachi et al. (2004)	Soufflerie à échelle réelle (maquette jusqu'à 5.7x5.7x3 m) et CFD	fenêtre	X	X	X			X		différence si c'est entrant ou sortant	f( $\theta$ ) f( $\Delta C_p$ ) f( $U_{orifice} / U_{vent}$ )	proposition de relation entre le $C_d$ et le $C_p$
Andersen (2002)	empirique	événements avec volets mobiles	X								f(angle d'ouverture)	
Carey et Etheridge (1999),	soufflerie	circulaire		X		X		X			f(Re)	

Etheridge (2004)												
Chu et al. (2009)	soufflerie (maquette 40x40x40 cm)	rectangulaire	X	X	X	X (face à face ou adjacent)			X	différence si c'est entrant ou sortant	f(Re)	pas d'influence de la turbulence sur le $C_d$ , orifice grand par rapport à la maquette
Chiu et Etheridge (2007)	soufflerie (25x50x20 cm) et CFD	circulaire et cheminée	X		X					mesure entrant et sortant; géométrie ext. variable	pour trou : f(V/u) f( $\theta$ ) pour cheminée : f(Re)	difficile de mesurer V
Karava, Stathopoulos, Athienitis (2007)	soufflerie et CFD		X			X		X		entrant et sortant	f(porosité ouverture) f( $A_{inlet}/A_{outlet}$ )	variation du $C_d$ pour grand ouvrant
Faure (2010)	soufflerie maquette 1/10ème)	plusieurs petits trous circulaires et cheminée	X		X	X	X					loi puissance
Chiu et Etheridge (2004)	soufflerie (25x50x20 cm) et CFD	cheminée		X						géométrie ext variable	f(Re)	avec banc de calibration, mesure en instantanée pour mise en évidence de l'inversion

Wang, Etheridge et Ohba (2011)	soufflerie et CFD	4 cheminées		X	X	X (à cause de rotation)				entrant et sortant	f(Re)	mesurer avec et sans vent, en dynamique, mise en évidence de l'inversion, conservation $C_d * A$
Etheridge (1977)	soufflerie et taille réelle	différent type de fissure; circulaire et fenêtre sur maquette		X	X (0 et 90°)				X (pour 90°)		f(Re, z/d <sub>h</sub> )	
Costola et Etheridge (2008)	soufflerie	petite cheminée rectangulaire		X	X					géométrie ext. variable	f(Re, U <sub>vent</sub> /u <sub>orifice</sub> )	Questionne sur l'effet de l'inertie et de la compressibilité
Regard (1996)	CFD	fenêtre taille réelle		X	X					1er : une fenêtre en façade 2ème : 2 fenêtres sur des façades opposées	f(Ar) f(Gr) f(U <sub>vent</sub> ) f(θ)	C <sub>d</sub> entrant < sortant



---

## Annexe B

---

### Capteur Vaisala (T, P, HR)

Ce capteur permet de faire des relevés de température, humidité relative et pression atmosphérique. C'est un capteur Vaisala PTU 300 référencé CSTB 07 0695.

Tableau B-1 : données du capteur Vaisala PTU 300

Capteur	Etendue de mesure	Gain	Offset	COFRAC
Pression atmosphérique	500 -1100 hPa	30.0300	949.93	Oui
Température	-40°C - +60°C	19.9960	-39.91	Oui
Hygrométrie	0 -100% HR	20.4294	-0.71	Oui

Tiré de Jéhu, 2009

---

## Annexe C

---

### Calcul de la masse volumique

Pour calculer la masse volumique, en connaissant la température ambiante, l'humidité relative et la pression atmosphérique du lieu, la loi des gaz parfait peut être utilisée en modifiant la constante spécifique de l'air R. La loi donne :

$$\rho = \frac{p}{R_h T}$$

Où  $R_h$  est la constante spécifique de l'air humide défini tel que :

$$R_h = \frac{R_s}{1 - HR \cdot \frac{p_{sat}}{p} \cdot \left(1 - \frac{R_s}{R_v}\right)}$$

Avec :

- $R_s = 287,06 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$  correspond à la constante spécifique de l'air sec,
- $R_v = 461 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$  est la constante spécifique de la vapeur d'eau,
- HR est l'humidité relative (égal à la valeur HR du tableau C-1 divisée par 100),
- p la pression atmosphérique [Pa],
- Et  $p_{sat}$  la pression de vapeur saturante calculé grâce à la formule de Magnus tel que :

$$p_{sat} = 611,213 \cdot \exp\left(\frac{17,5043 \cdot \theta}{241,2 + \theta}\right)$$

Avec :

- $\theta$  la température ambiante en °C

La formule pour la masse volumique devient alors :

$$\rho(\theta, HR, p) = \frac{1}{R_s \cdot (273,15 + \theta)} \cdot \left( p - HR \cdot 230,617 \cdot \exp\left(\frac{17,5043 \cdot \theta}{241,2 + \theta}\right) \right)$$

Le tableau suivant donne les valeurs de température, d'humidité et de pression récoltées au cours des essais ainsi que les masses volumiques correspondantes :

Tableau C-1 : température, humidité, pression atmosphérique et masse volumique de l'air lors des essais

rho (kg/m3)	T (°C)	P (hPa)	HR (%)	date
1.19543094	18	1003	50	22/04 matin
1.21479434	17.6	1018.2	56.7	26/04 matin
1.20863523	18.5	1016.4	56.3	26/04 aprèm
1.21686375	17.1	1017.9	54.7	27/04 matin
1.21999545	15.7	1014.8	47.8	28/04 matin
1.21301665	16.7	1012.8	49.1	28/04 aprèm
1.20725236	16.4	1007.2	53.4	29/04 matin
1.19435471	17.4	1001	64.7	2/05 matin
1.20325647	17	1006.9	64.4	3/05 matin
1.20523536	16.9	1008.1	63.4	3/05 aprèm
1.21632553	16.6	1016.1	62	5/05 matin
1.20990629	17.8	1015	58.4	5/05 aprèm
1.21037062	16.9	1012.1	59.6	6/05 matin
1.21844185	17.2	1020.3	64.3	9/05 matin
1.22124026	16.7	1019.8	51.3	13/05 matin
1.20986043	18.4	1016.5	49.4	13/05 aprèm
1.23395617	16.1	1028	49.6	16/05 matin
1.22429777	16.8	1023	55.2	17/05 matin
1.21541191	16.9	1016	55.5	18/05 matin
1.20928965	17.9	1015.1	61.5	19/05 matin
1.20372543	19	1014.5	60.4	19/05 aprèm
1.21474234	17.5	1017.6	54.3	20/05 matin
1.21650548	18.4	1022.5	54.9	23/05 matin
1.22381255	17.9	1026.6	53.3	24/05 matin
1.22318722	17.1	1022.5	45.6	25/05 matin
1.21065472	18.5	1017.2	45.2	26/05 aprèm
1.21637072	17.6	1019	49.9	27/05 matin
1.20255222	17.9	1009.1	56.7	30/05 matin
1.21847646	17.3	1019.6	49.4	31/05 matin

1.23222028	16.9	1029.4	47.3	1/06 matin
1.19067107	19.1	1004.2	63.7	6/06 matin
1.19674684	18.1	1005	56.8	7/06 matin
1.20313496	17.9	1009.1	50.4	8/06 matin
1.21091168	17.7	1014.8	49.7	9/06 matin
1.21600955	19.3	1025.1	50.4	30/06 matin
1.21678667	18.8	1023.9	50.7	1/07 matin
1.19792502	20.2	1012.9	46.4	4/07 matin
1.19186152	21.3	1012	48	5/07 matin
1.1825981	22.8	1010.6	56.6	5/07 aprèm
1.19207154	20.4	1009.7	57.4	6/07 matin
1.18743482	20.6	1006.1	52.6	7/07 matin
1.1916657	19.9	1007.7	59.8	8/07 matin
1.20531328	19.3	1016.5	54.9	11/07 matin
1.19264025	19.9	1008.8	63	12/07 matin
1.2015028	19.3	1013.9	62	13/07 matin
1.1937341	18.7	1005	60.4	18/07 matin
1.19538955	18.1	1004.1	59.8	19/07 matin
1.20209768	18.4	1011	61.9	20/07 matin
1.19654317	18.8	1008.3	67.4	21/07 matin
1.20648004	18	1013.3	63.7	22/07 matin
1.19744258	19.3	1011.2	70.4	26/07 matin
1.2037538	19.5	1016.7	63.8	27/07 matin
1.20672178	19.8	1020.1	61.1	28/07 matin
1.20468745	20	1019.2	61.7	29/07 matin
1.19821751	21.2	1018.3	61.7	29/07 aprèm
1.19450316	20.1	1010.9	60.5	1/08 matin

Soit une valeur moyenne de la masse volumique de l'air utilisée pour les calculs qui est :  
 $\rho = 1,2069 \text{ kg/m}^3$  soit  $\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$ .

# Annexe D

## Caractéristique de la veine de soufflerie

La même méthode de dépouillement que celle décrite dans la partie II.1.2.3 est utilisée ici. Les résultats présentés seront de nouveau sous forme de réseaux de courbes puis avec un tableau récapitulatif.

- **Reproductibilité sur le plan à 30 cm**

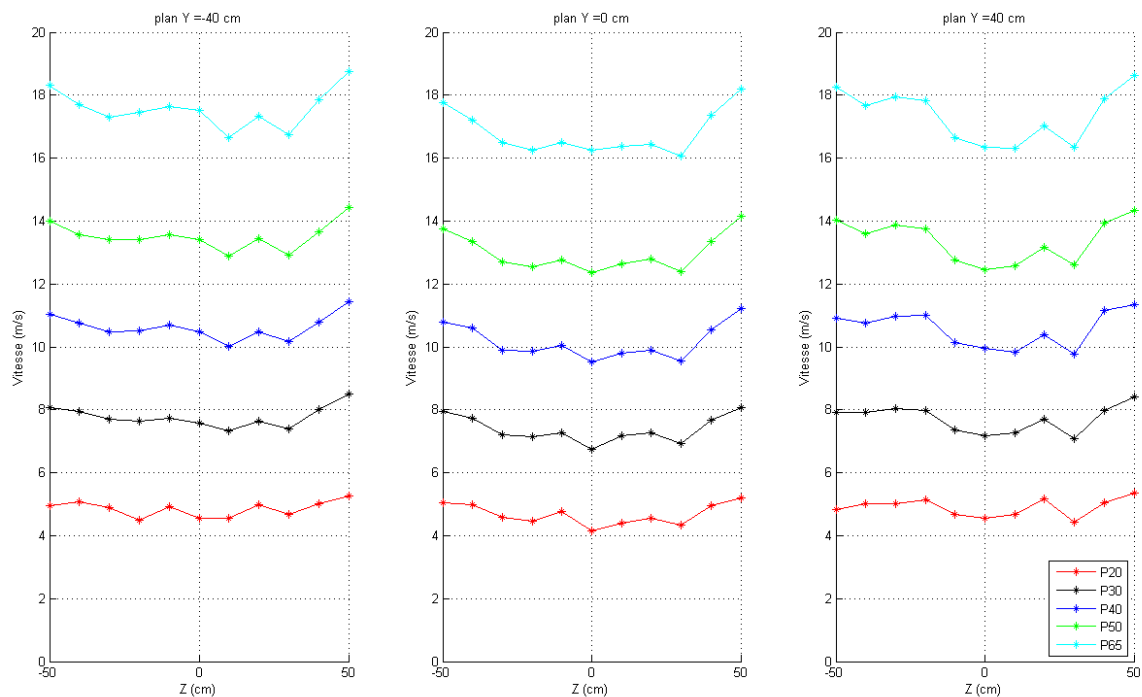


Figure D-1 : vitesse suivant les plans Y = -40, 0, 40 cm

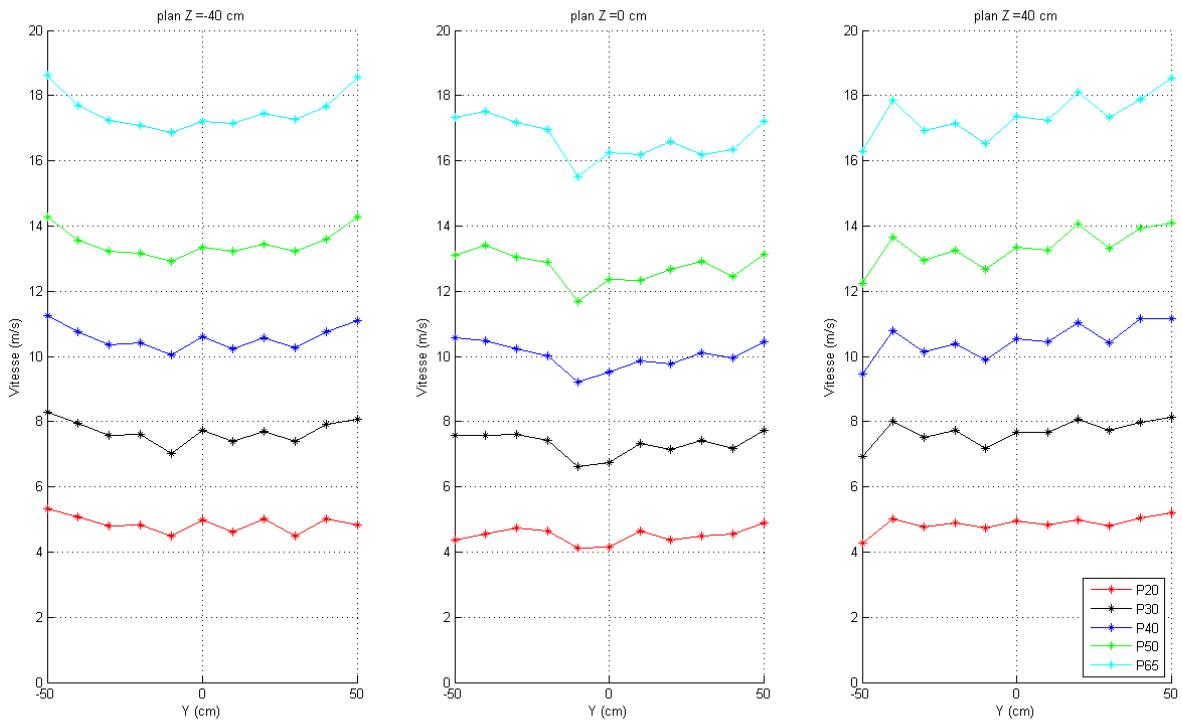


Figure D-2 : vitesse suivant les plans Z = -40, 0, 40 cm

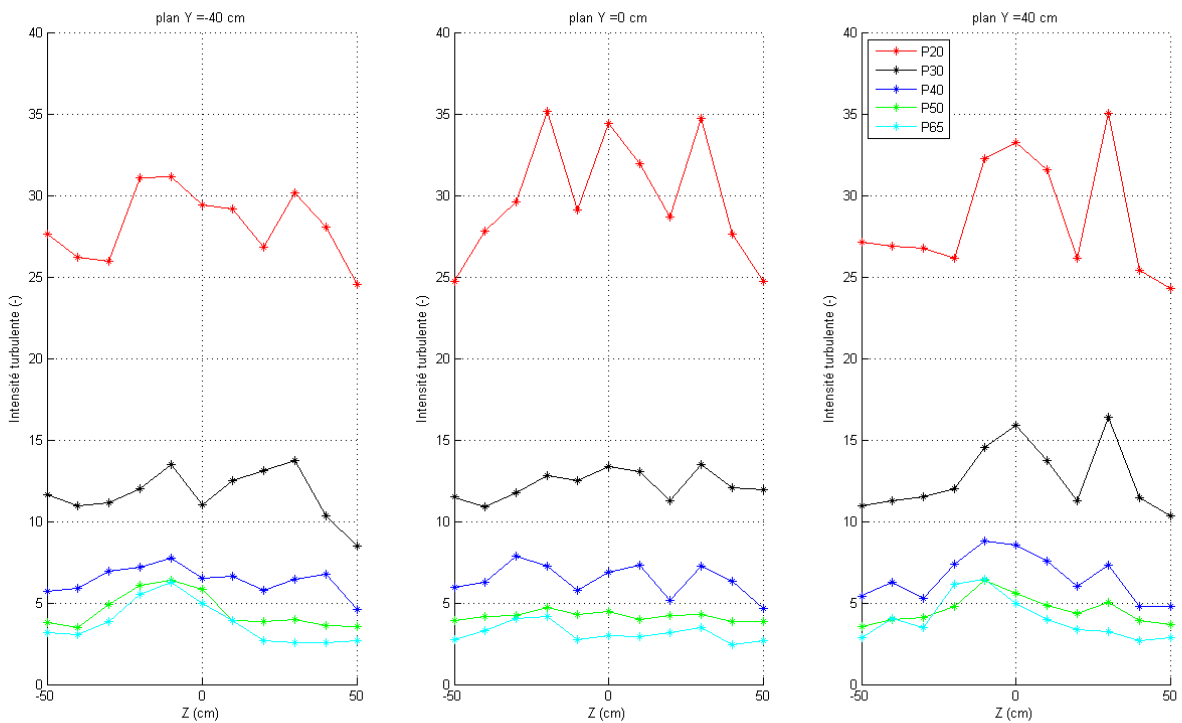


Figure D-3 : intensité turbulente suivant les plans Y = -40, 0, 40 cm

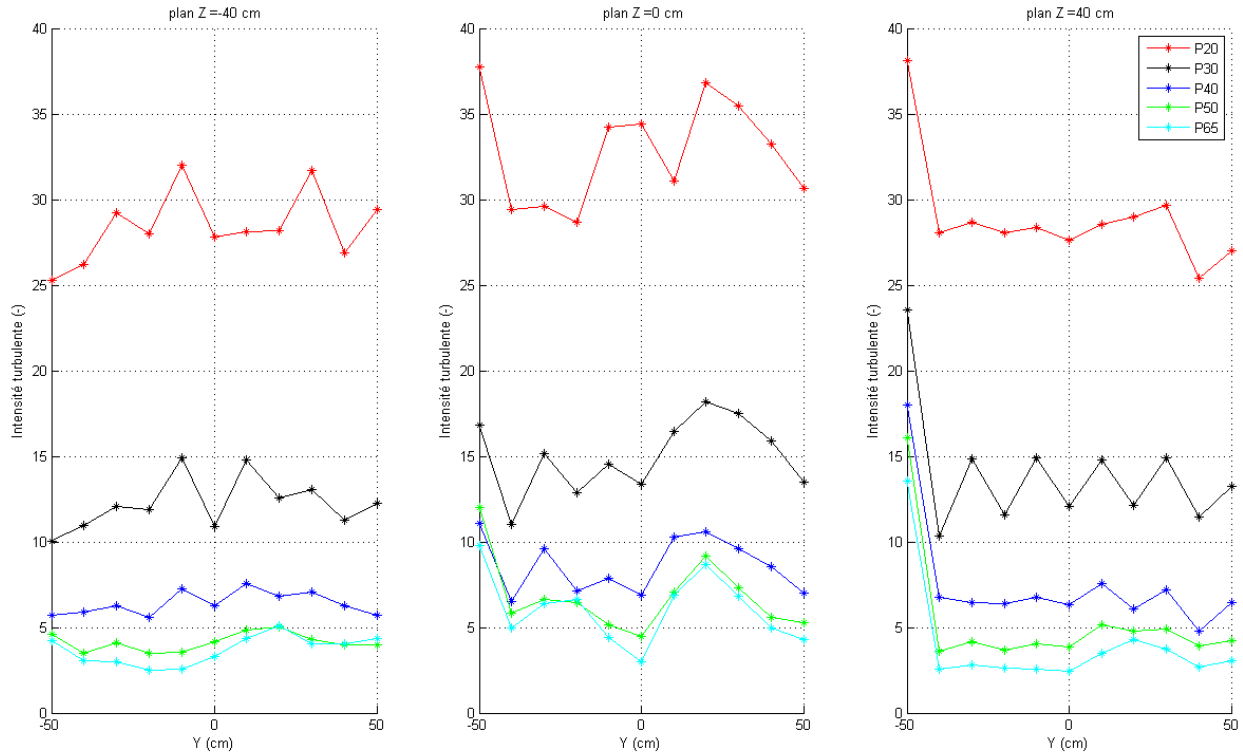


Figure D-4: intensité turbulente suivant les plans Z = -40, 0, 40 cm

Tableau D-1 : récapitulatif des vitesses et de l'intensité turbulente sur le plan à 30 cm

potentiomètre (%)	20.00	30.00	40.00	50.00	65.00
vitesse moyenne (m/s)	4.73	7.57	10.36	13.21	17.19
maximum	5.45	8.73	11.78	14.95	19.43
minimum	4.03	6.63	9.20	11.68	15.52
écart type	0.35	0.45	0.53	0.58	0.67
intensité turbulente (%)	29.94	13.09	7.20	5.23	4.43
maximum	39.86	23.57	17.99	16.08	13.56
minimum	23.29	8.40	4.61	3.39	2.43
écart type	3.66	3.58	3.54	3.61	3.23

• Mesures sur le plan à 80 cm

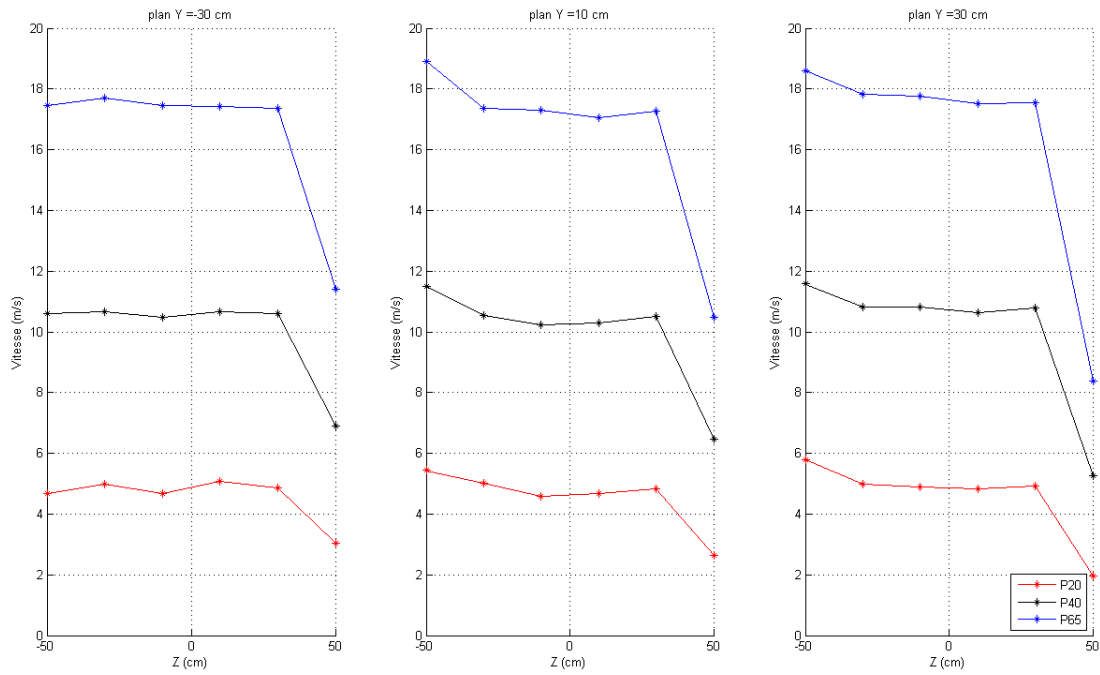


Figure D-5 : vitesse suivant les plans Y = -30, 10, 30 cm

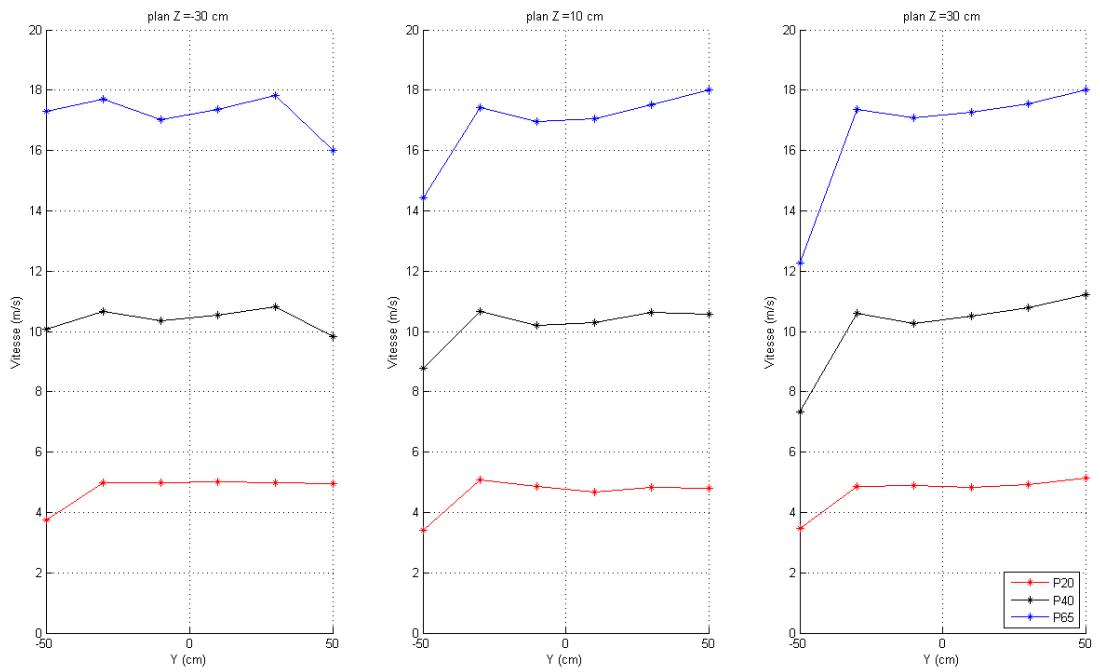


Figure D-6 : vitesse suivant les plans Z = -30, 10, 30 cm



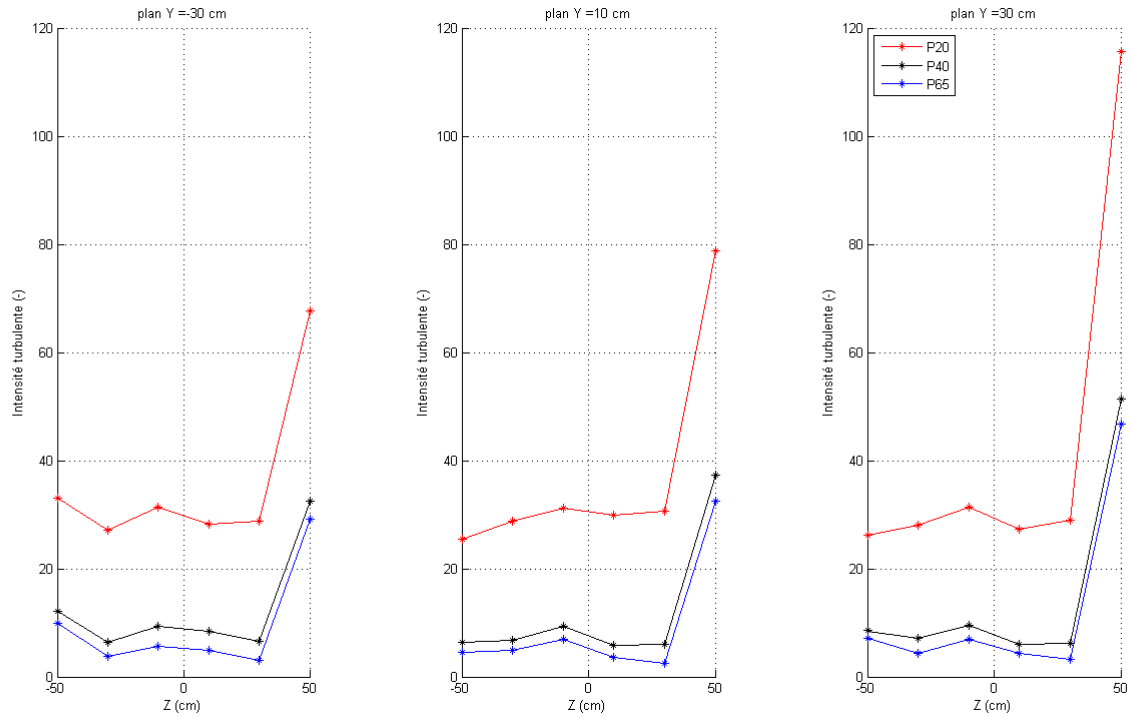


Figure D-7 : intensité turbulente suivant les plans Y = -30, 10, 30 cm

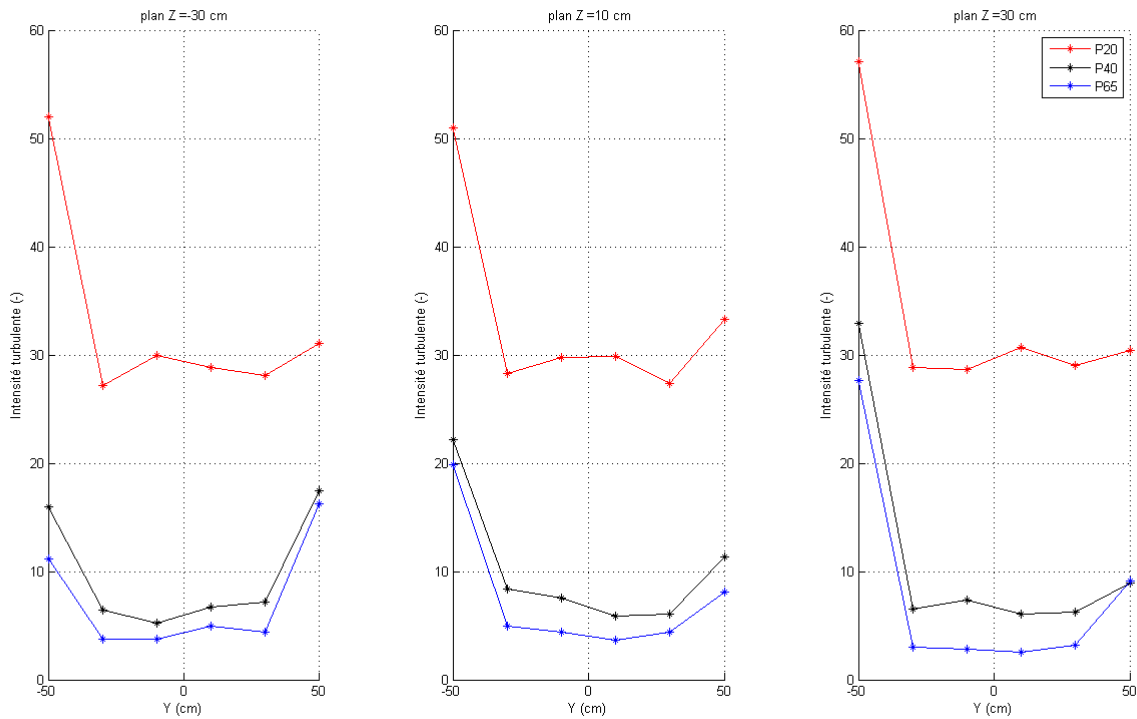


Figure D-8 : intensité turbulente suivant les plans Z = -30, 10, 30 cm

Tableau D-2 : récapitulatif des vitesses et de l'intensité turbulente sur le plan à 80 cm

potentiomètre (%)	20.00	40.00	65.00
vitesse moyenne (m/s)	4.33	9.53	15.78
maximum	5.79	11.58	18.90
minimum	1.95	4.68	8.37
écart type	0.91	1.69	2.68
intensité turbulente (%)	42.82	16.58	13.36
maximum	115.58	62.22	47.38
minimum	25.42	5.21	2.56
écart type	21.04	12.23	9.93

---

## Annexe E

---

### Calcul de la surface de blocage et du coefficient de blocage

Ces calculs sont exposés dans le Tableau E-1 ci-dessous, ils sont expliqués dans le livre de Pankhurst et Holder de 1968 et en partie explicités dans la partie II.2.

Tableau E-1 : coefficient d'obstruction en fonction de l'incidence

angle (°)	surface maître couple ( $S_m$ en $m^2$ )	pourcentage d'obstruction de la veine ( $S_m/S_v$ )	profondeur suivant l'incidence (t en m)	coefficient d'obstruction $\epsilon_s$
0	0.09	7.44	0.60	-0.18
45	0.19	15.78	0.64	-0.21
60	0.20	16.60	0.56	-0.16
75	0.20	16.29	0.45	-0.10
90	0.18	14.88	0.30	-0.05
135	0.19	15.78	0.64	-0.21
180	0.09	7.44	0.60	-0.18

# Annexe F

## Visualisation des coefficients de pression sur la façade sans orifice

Comme exposé dans le paragraphe III.2.1, les coefficients de pression sont tracés pour une incidence donnée en fonction de leur distance au centre de la plaque (distance en fonction de  $D = 1$  cm, diamètre de l'orifice bouché). Les courbes suivantes vont montrer l'évolution des coefficients de pression en fonction de l'incidence ( $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $75^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $180^\circ$ ). Chaque graphique aura 4 courbes suivant les 4 vitesses de vent de la soufflerie (5, 10, 15, 20 m/s). On obtient alors :

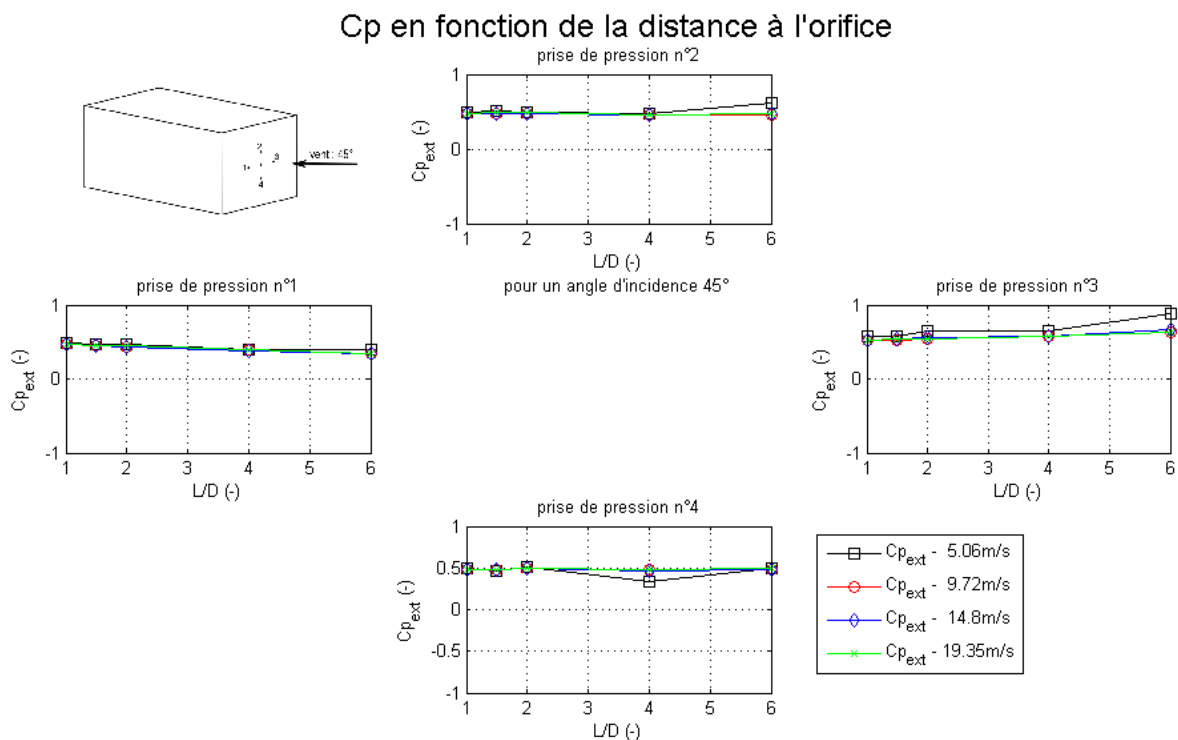


Figure F-1 : répartition des coefficients de pression sur la façade sans orifice, pour un angle d'incidence de  $45^\circ$

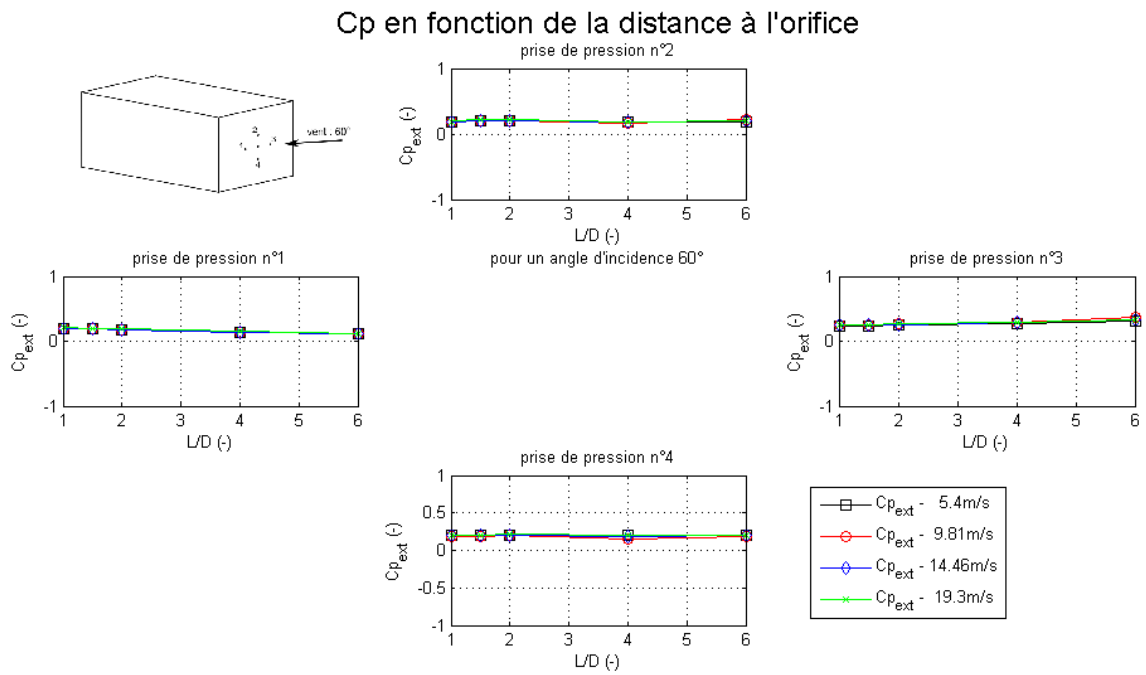


Figure F-2 : répartition des coefficients de pression sur la façade sans orifice, pour un angle d'incidence de 60°

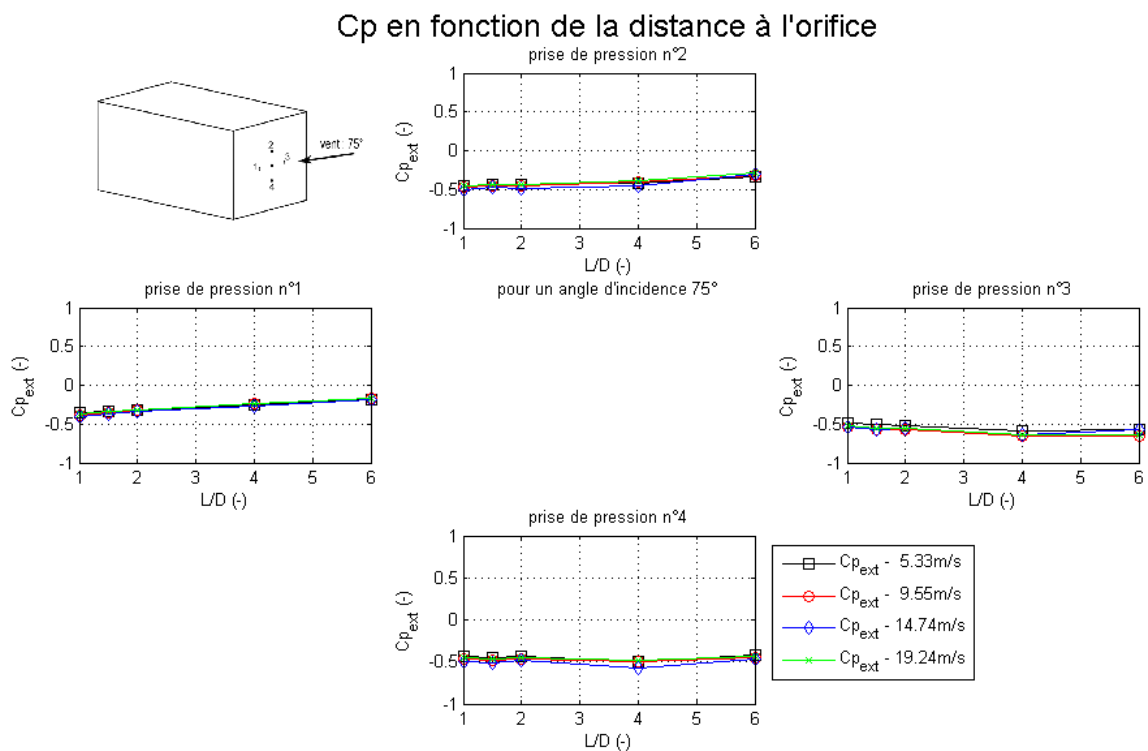


Figure F-3 : des coefficients de pression sur la façade sans orifice, pour un angle d'incidence de 75°

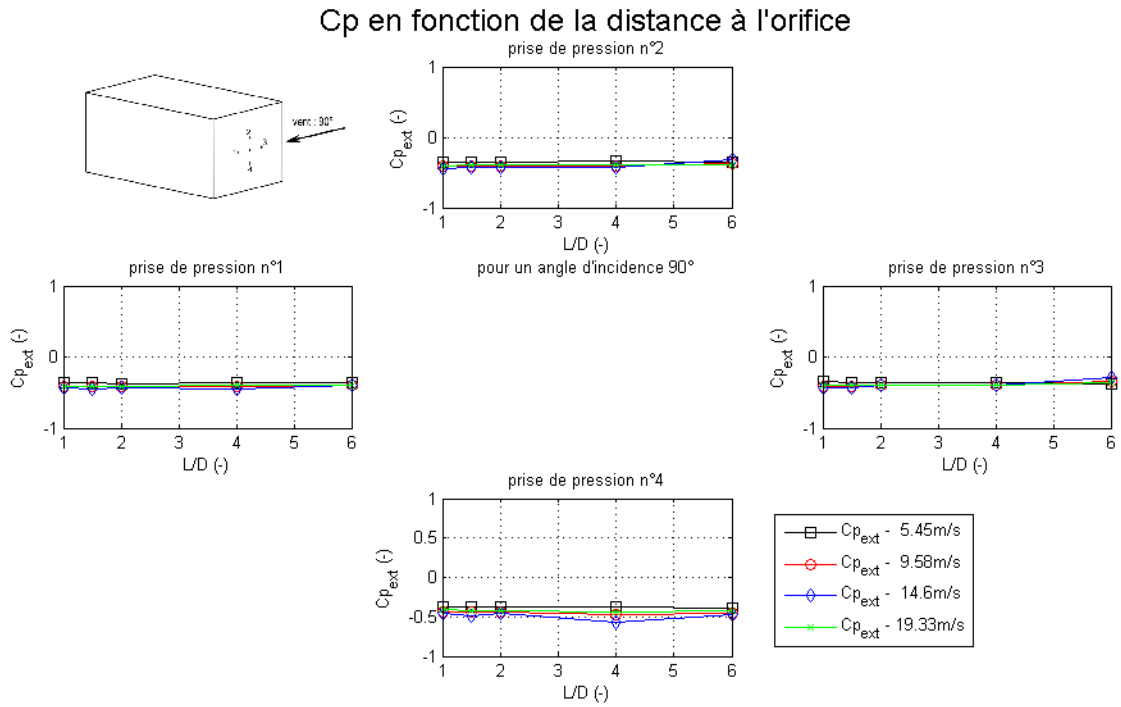


Figure F-4 : répartition des coefficients de pression sur la façade sans orifice, pour un angle d'incidence de 90°

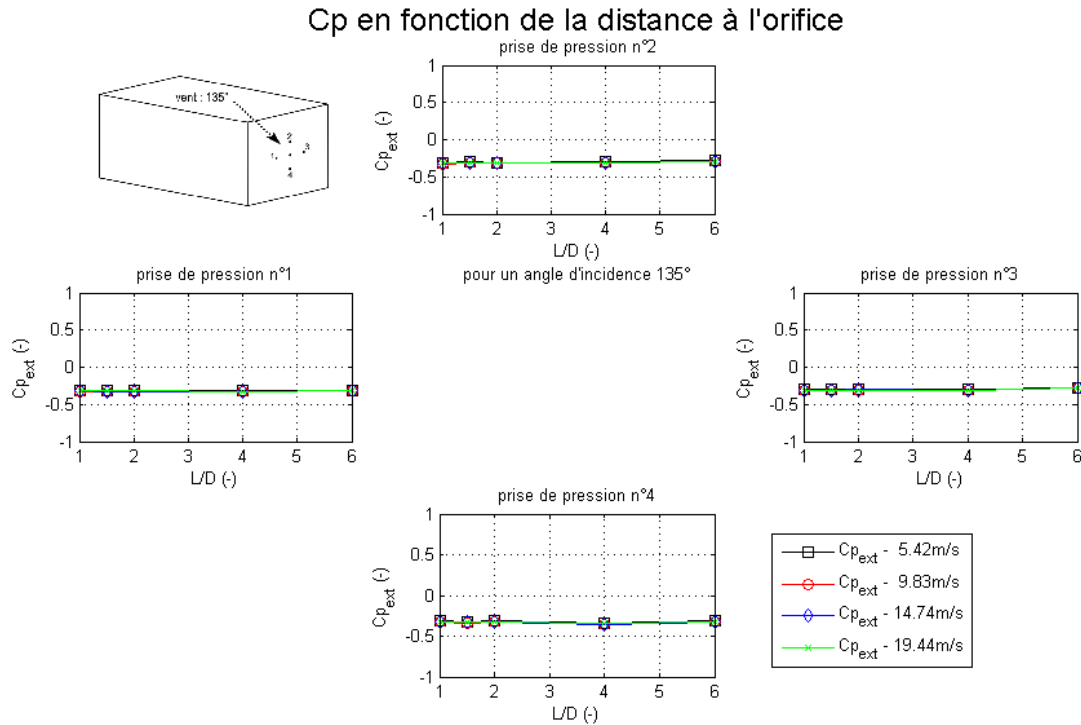


Figure F-5 : répartition des coefficients de pression sur la façade sans orifice, pour un angle d'incidence de 135°

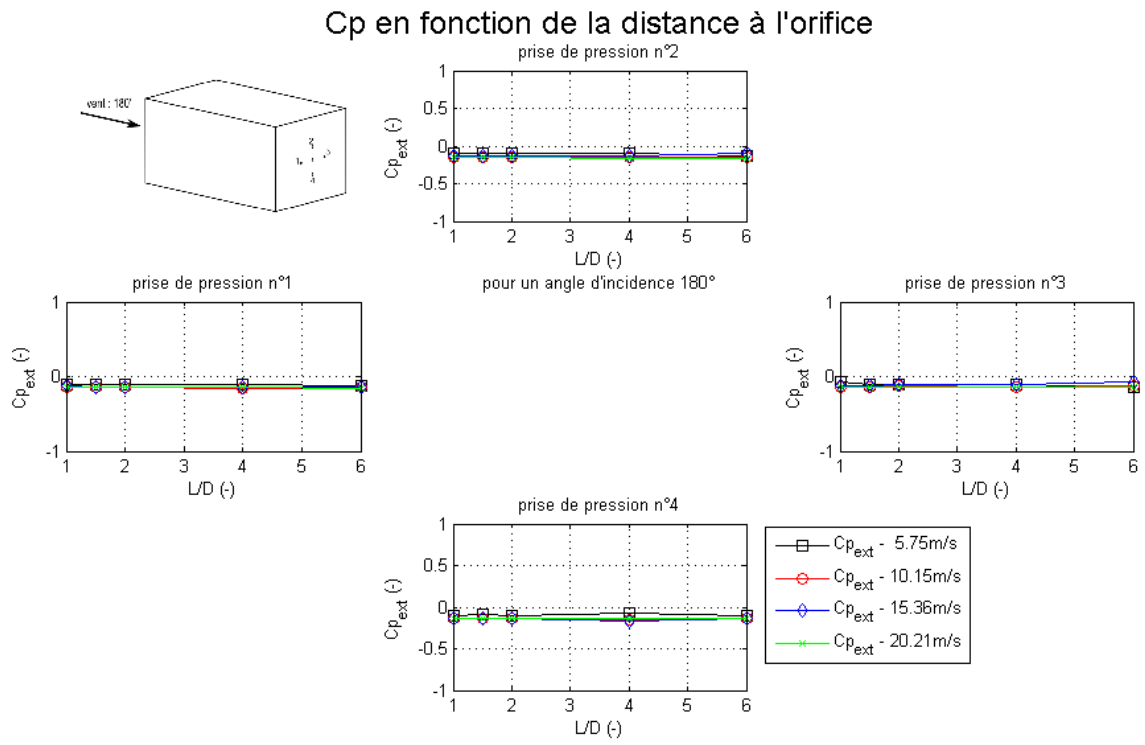


Figure F-6 : répartition des coefficients de pression sur la façade sans orifice, pour un angle d'incidence de 180°

# Annexe G

## Répartition des coefficients de pression pour la plaque n°1

Dans cette annexe, la répartition des coefficients de pression en fonction de la vitesse du vent ainsi que son incidence va être présentée. Les mesures sont réalisées pour la plaque n° 1 mais elles permettront de bien voir les tendances de variation du coefficient de pression qui sont communes à tous les orifices.

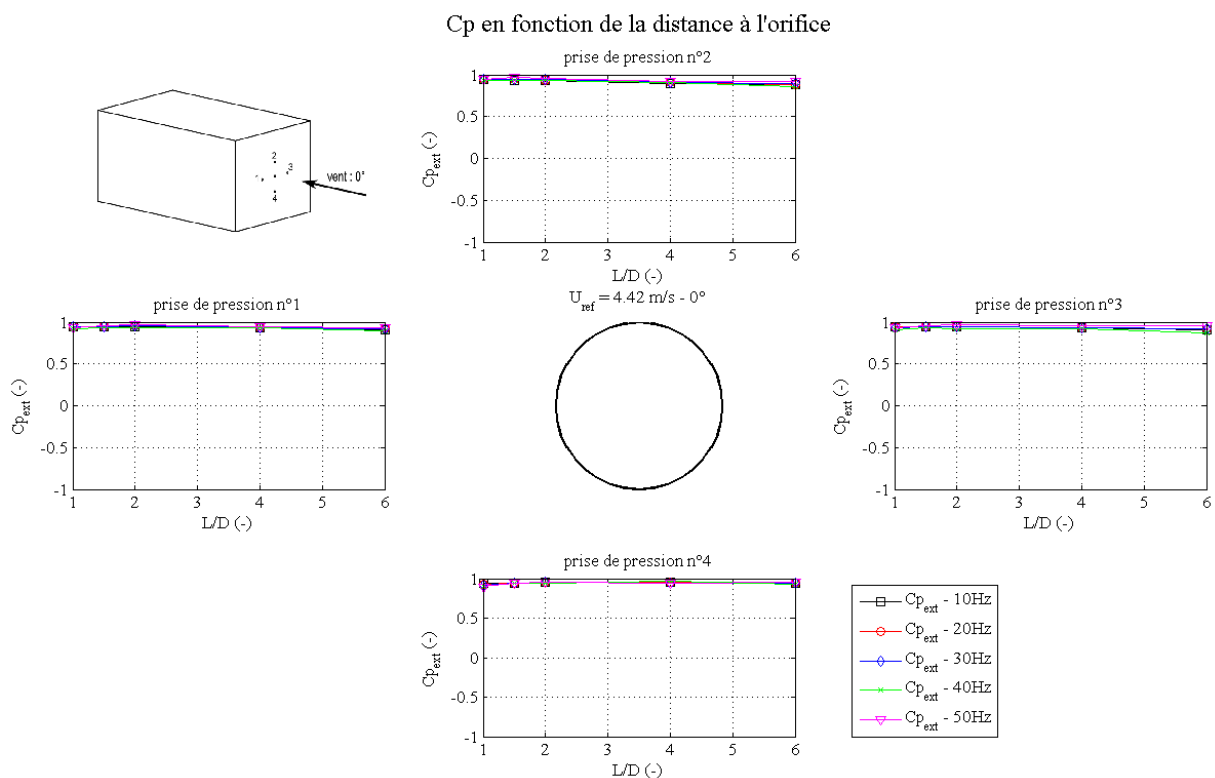


Figure G-1 : répartition des coefficients de pression autour de l'orifice de la plaque n°1, à une vitesse de 5 m/s et une incidence de 0°



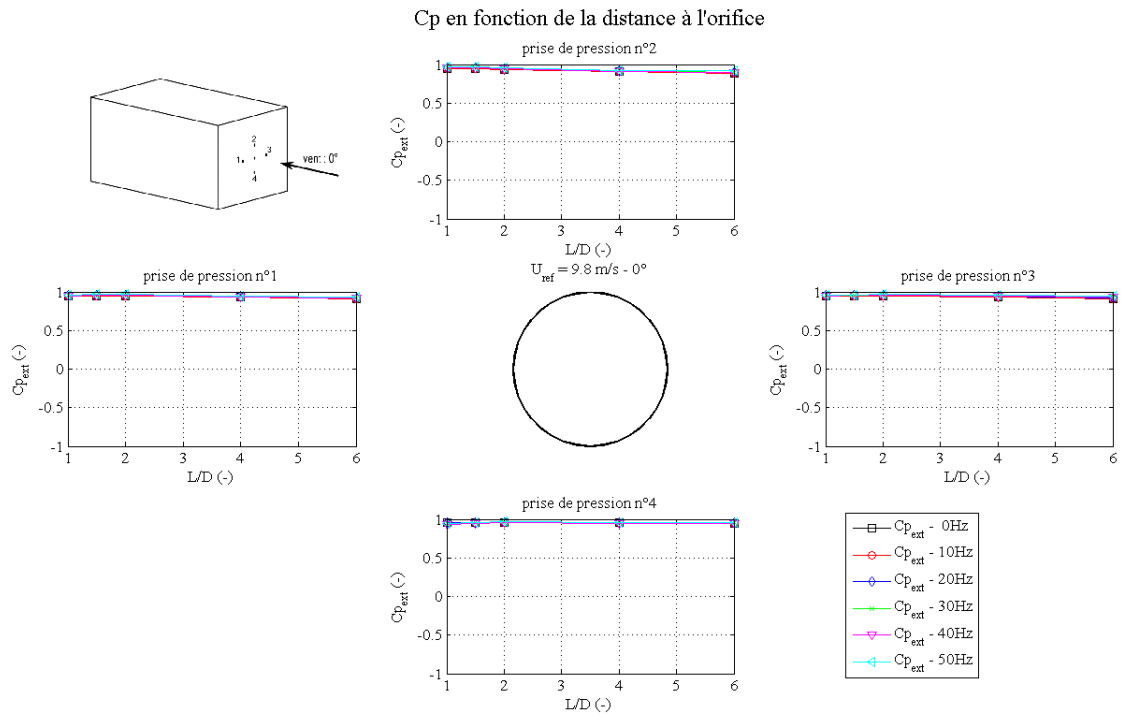


Figure G-2 : répartition des coefficients de pression autour de l'orifice de la plaque n°1, à une vitesse de 10 m/s et une incidence de 0°

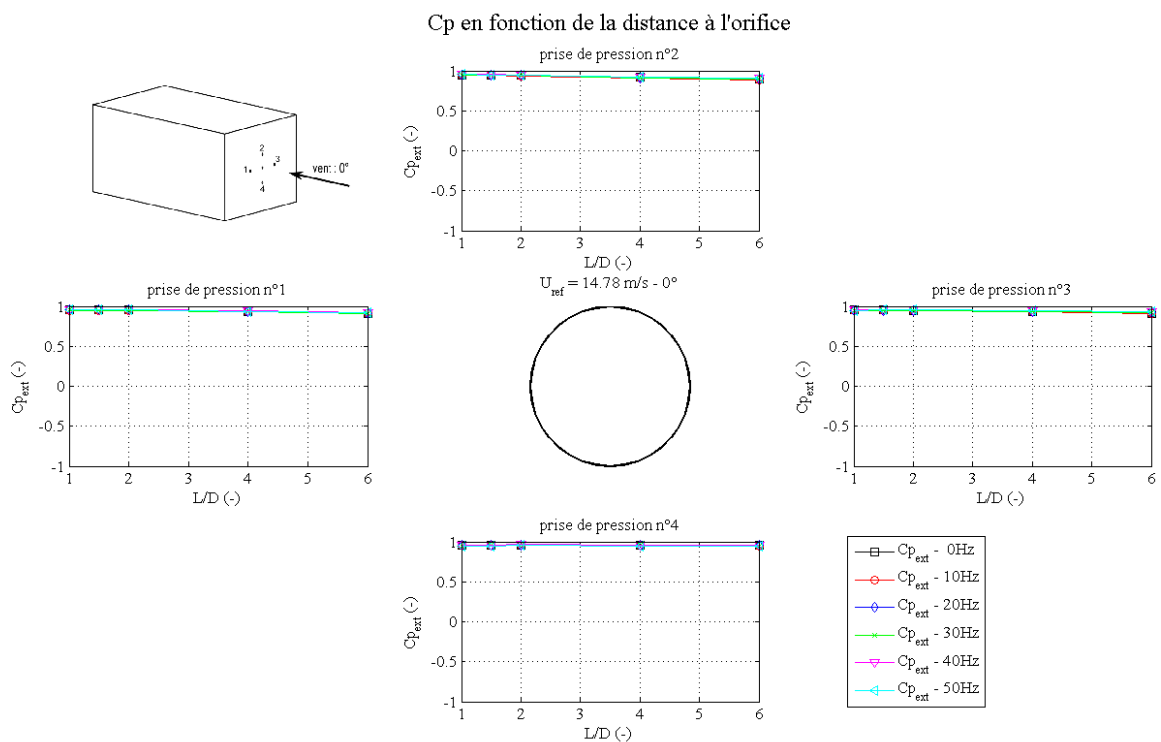


Figure G-3 : répartition des coefficients de pression autour de l'orifice de la plaque n°1, à une vitesse de 15 m/s et une incidence de 0°

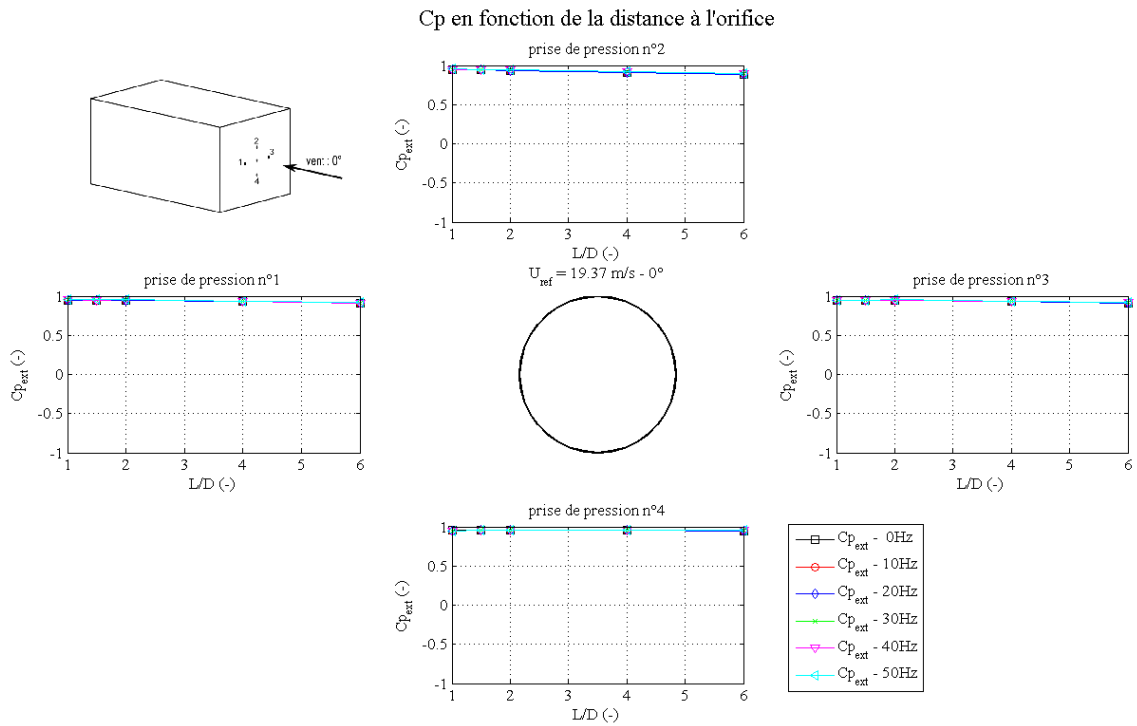


Figure G-4 : répartition des coefficients de pression autour de l'orifice de la plaque n°1, à une vitesse de 20 m/s et une incidence de 0°

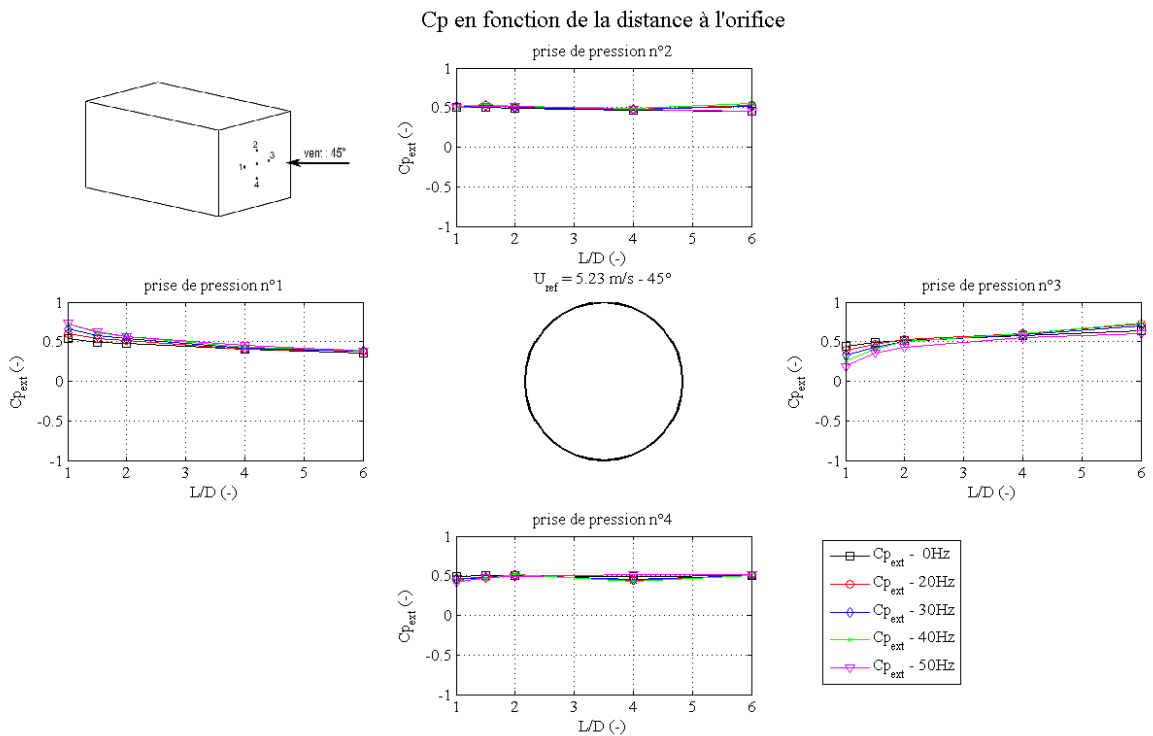


Figure G-5 : répartition des coefficients de pression autour de l'orifice de la plaque n°1, à une vitesse de 5 m/s et une incidence de 45°





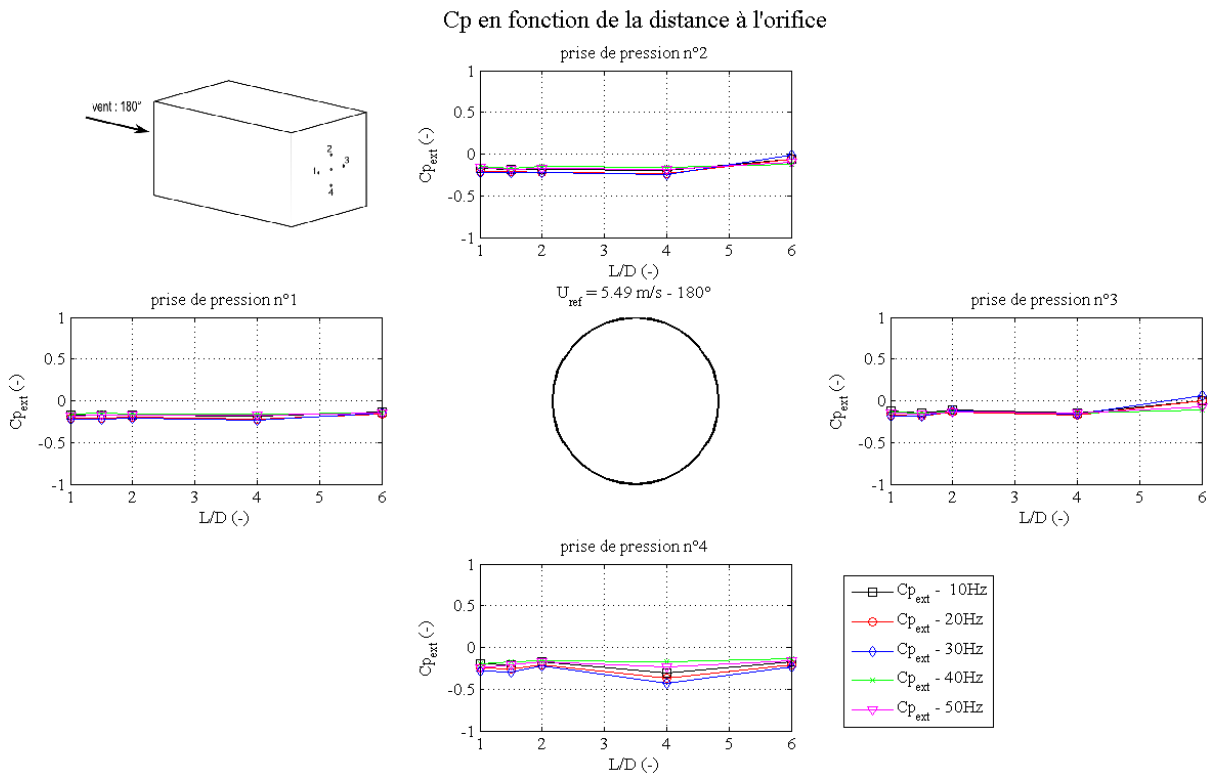


Figure G-10 : répartition des coefficients de pression autour de l'orifice de la plaque n°1, à une vitesse de 5 m/s et une incidence de 180°

---

## Annexe H

---

### **Courbes de l'influence de l'incidence sur le coefficient de décharge**

Dans cette annexe, qui se réfère au paragraphe III.3.4, les courbes donnant l'influence de l'incidence sur le coefficient de décharge sont données. Elles sont décrites dans le paragraphe y faisant allusion. Elles se trouvent dès la page suivante en format paysage.

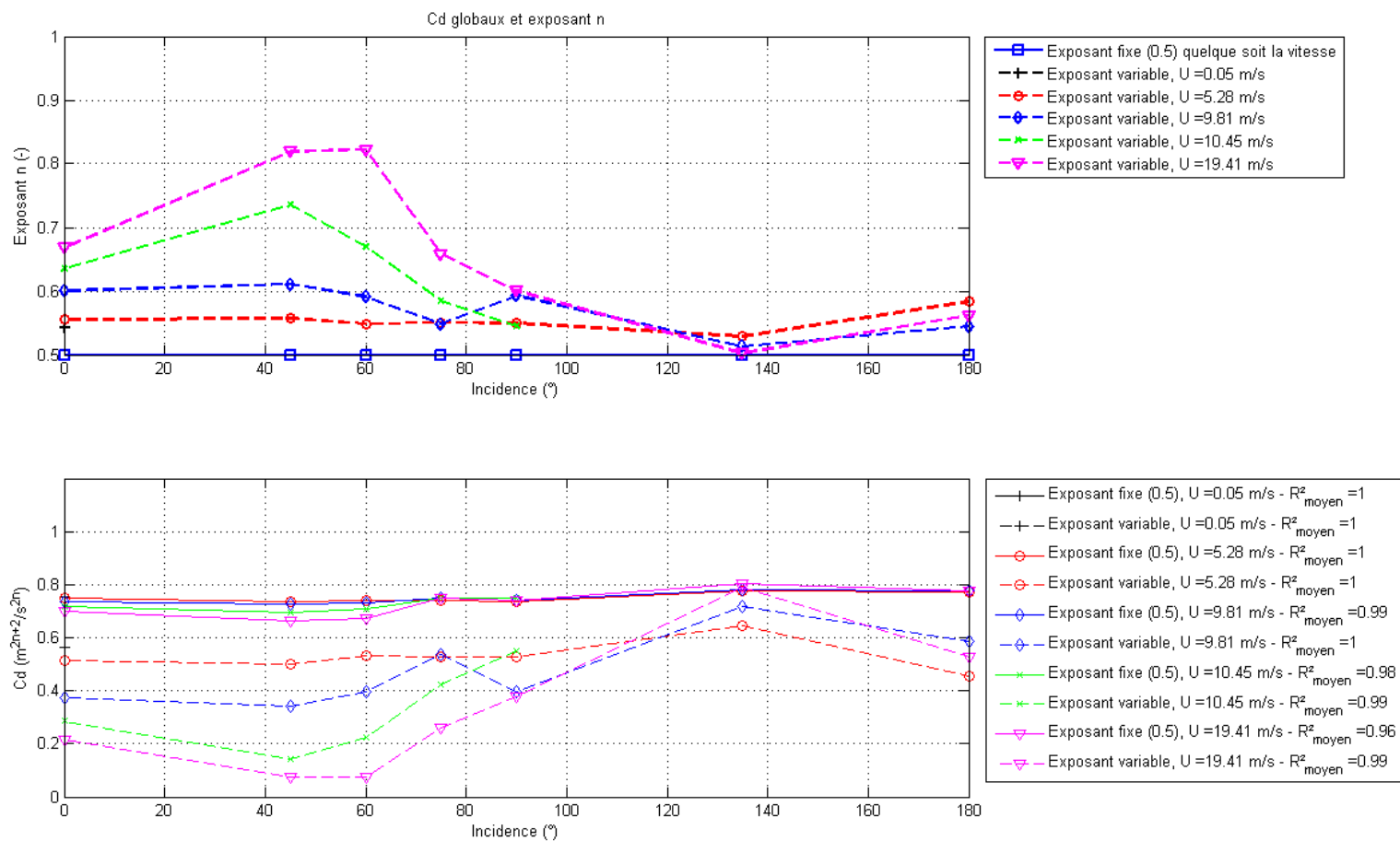


Figure H-1 : variation de l'exposant n et du coefficient de décharge en fonction de l'incidence pour la plaque n° 1 (copie de la figure III-17)

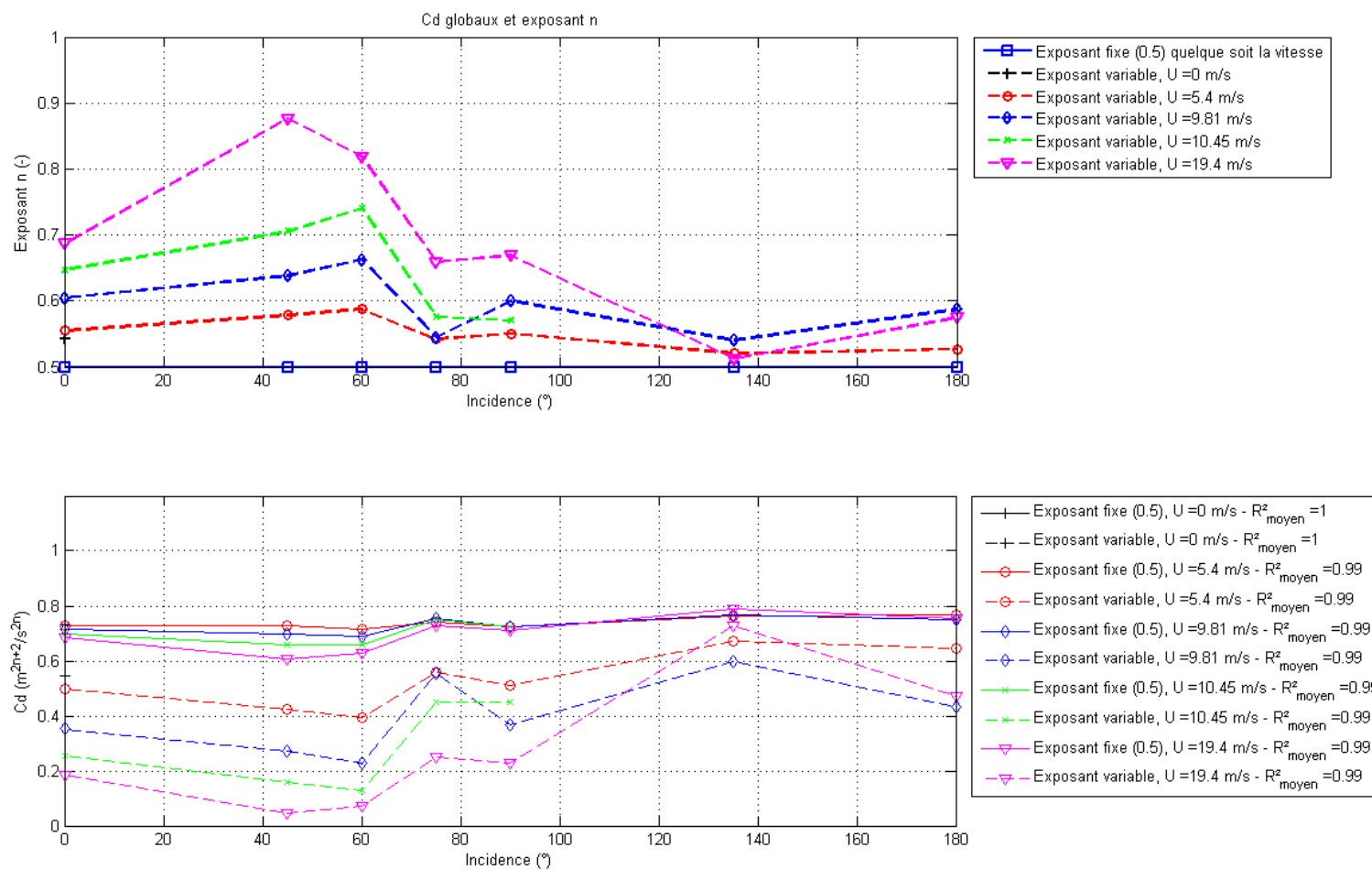


Figure H-2 : variation de l'exposant n et du coefficient de décharge en fonction de l'incidence pour la plaque n° 2



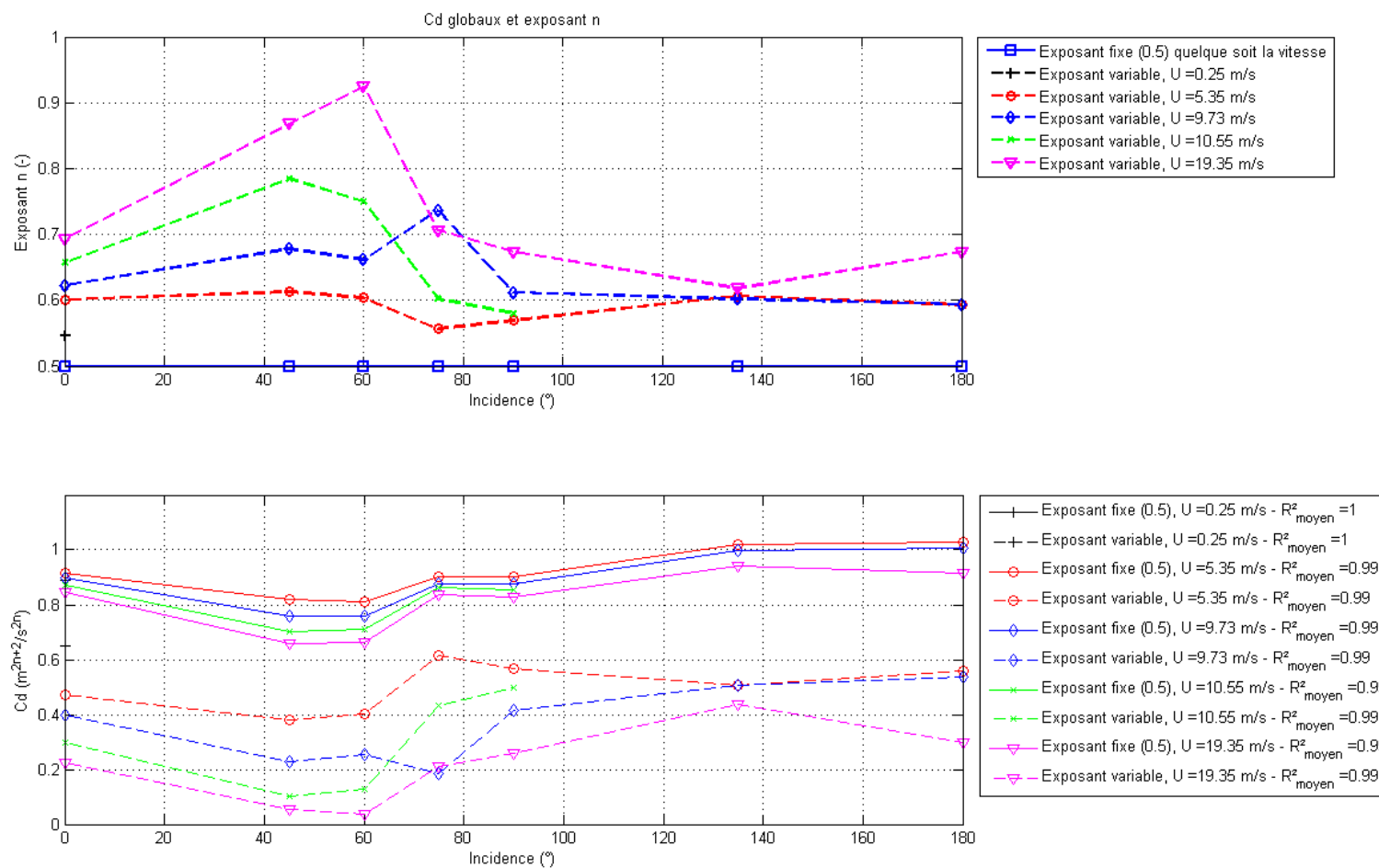


Figure H-3 : variation de l'exposant n et du coefficient de décharge en fonction de l'incidence pour la plaque n° 3

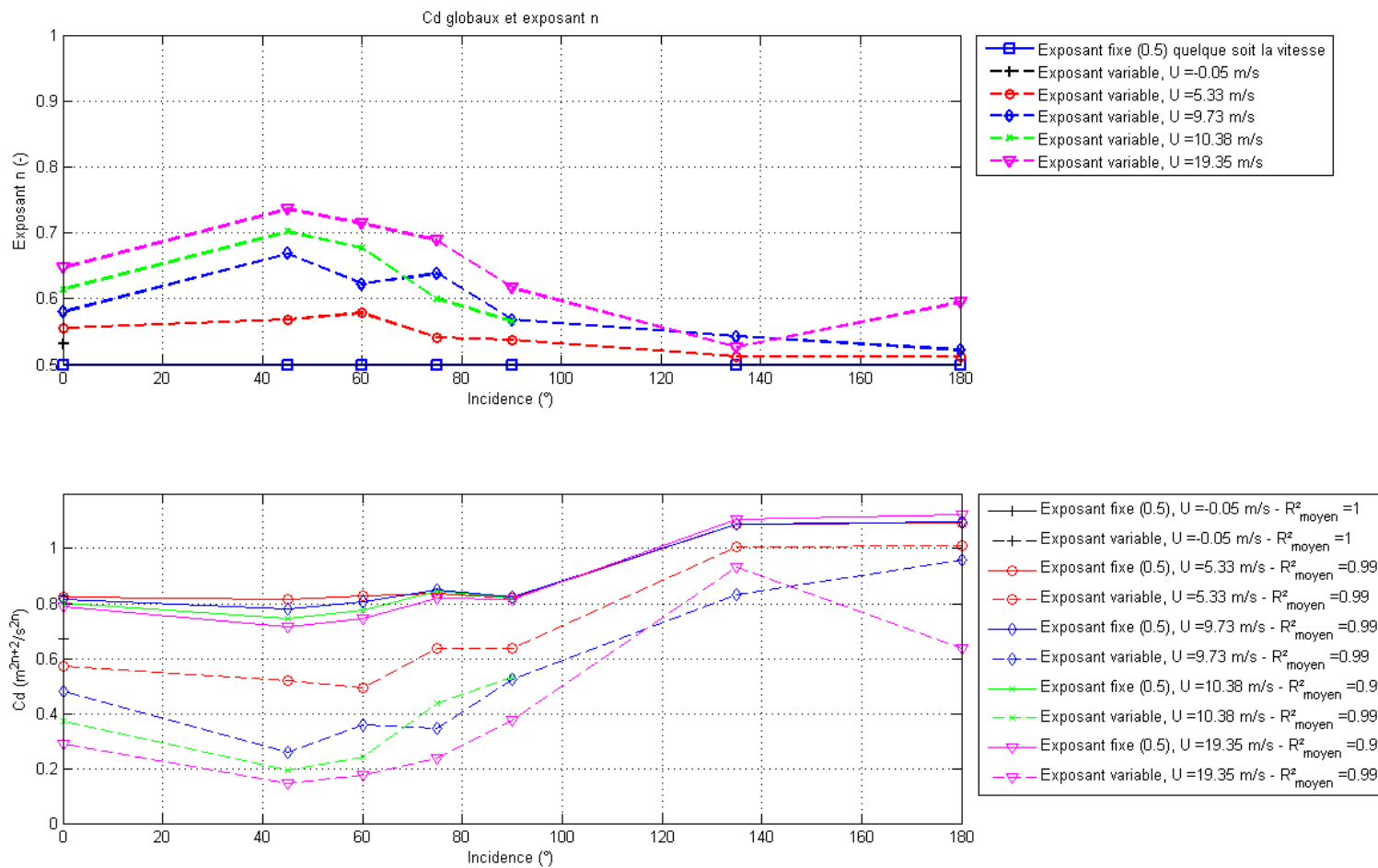


Figure H-4 : variation de l'exposant n et du coefficient de décharge en fonction de l'incidence pour la plaque n° 4

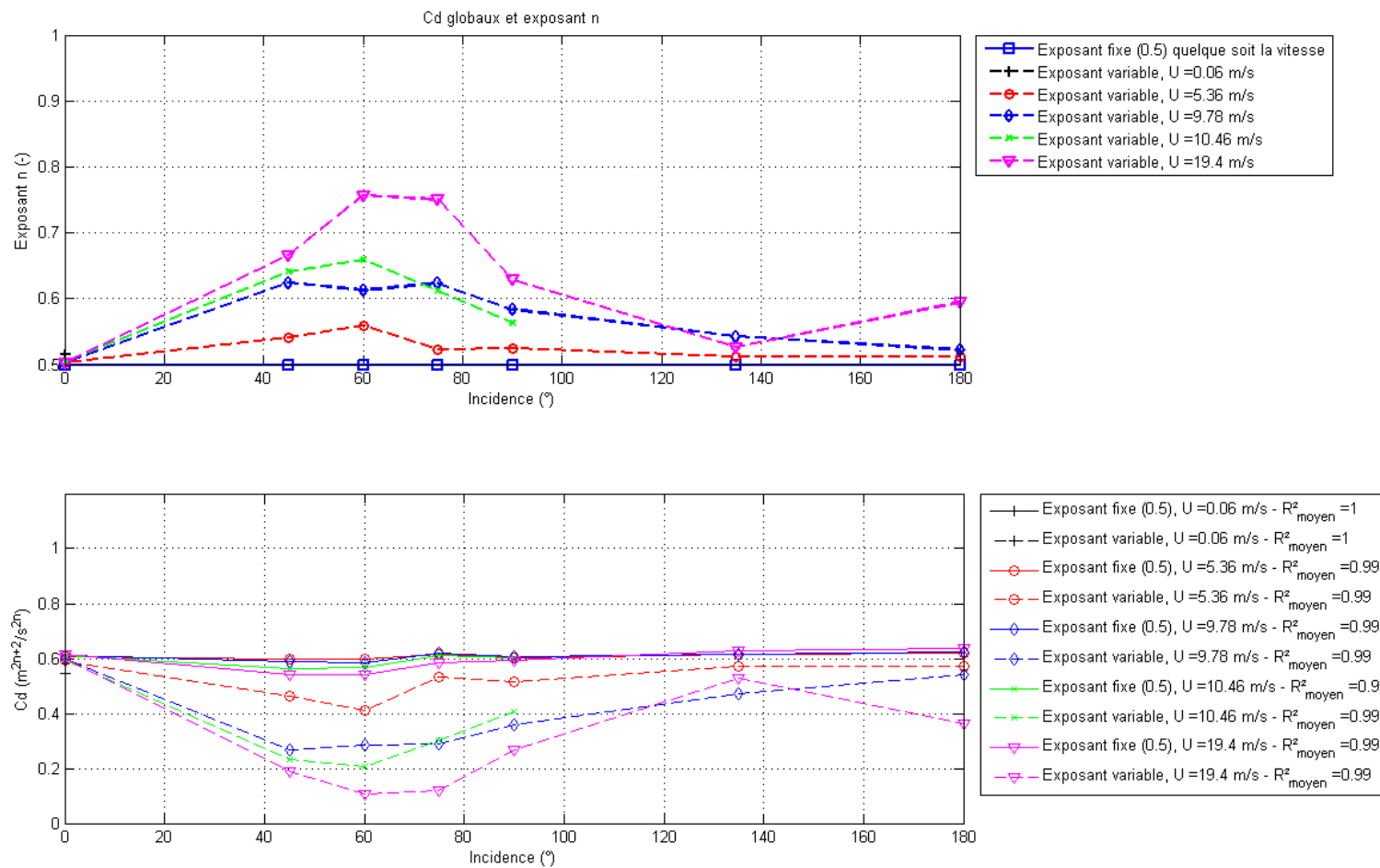


Figure H-5 : variation de l'exposant n et du coefficient de décharge en fonction de l'incidence pour la plaque n° 5

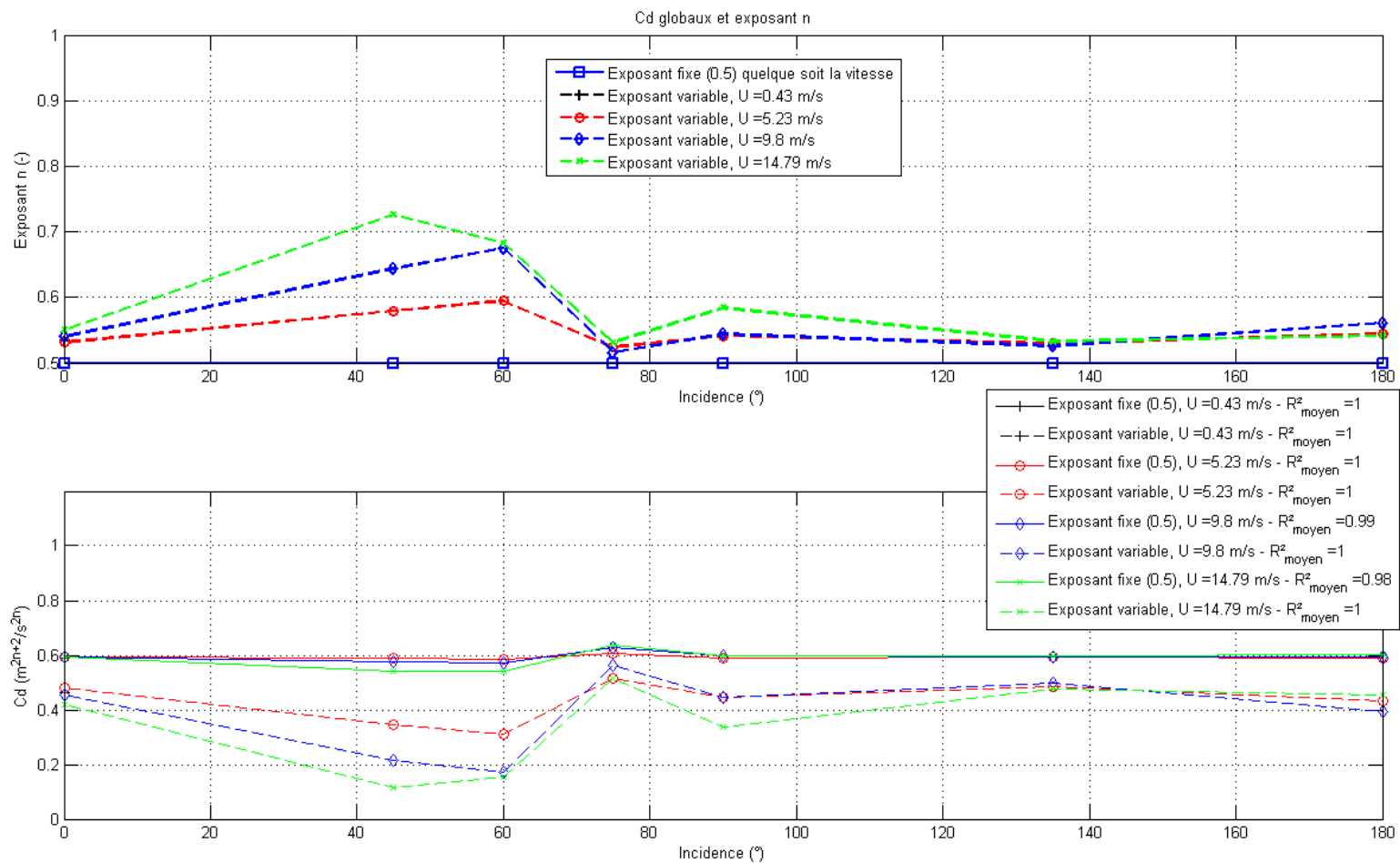


Figure H-6 : variation de l'exposant n et du coefficient de décharge en fonction de l'incidence pour la plaque n° 6 avec un orifice ouvert

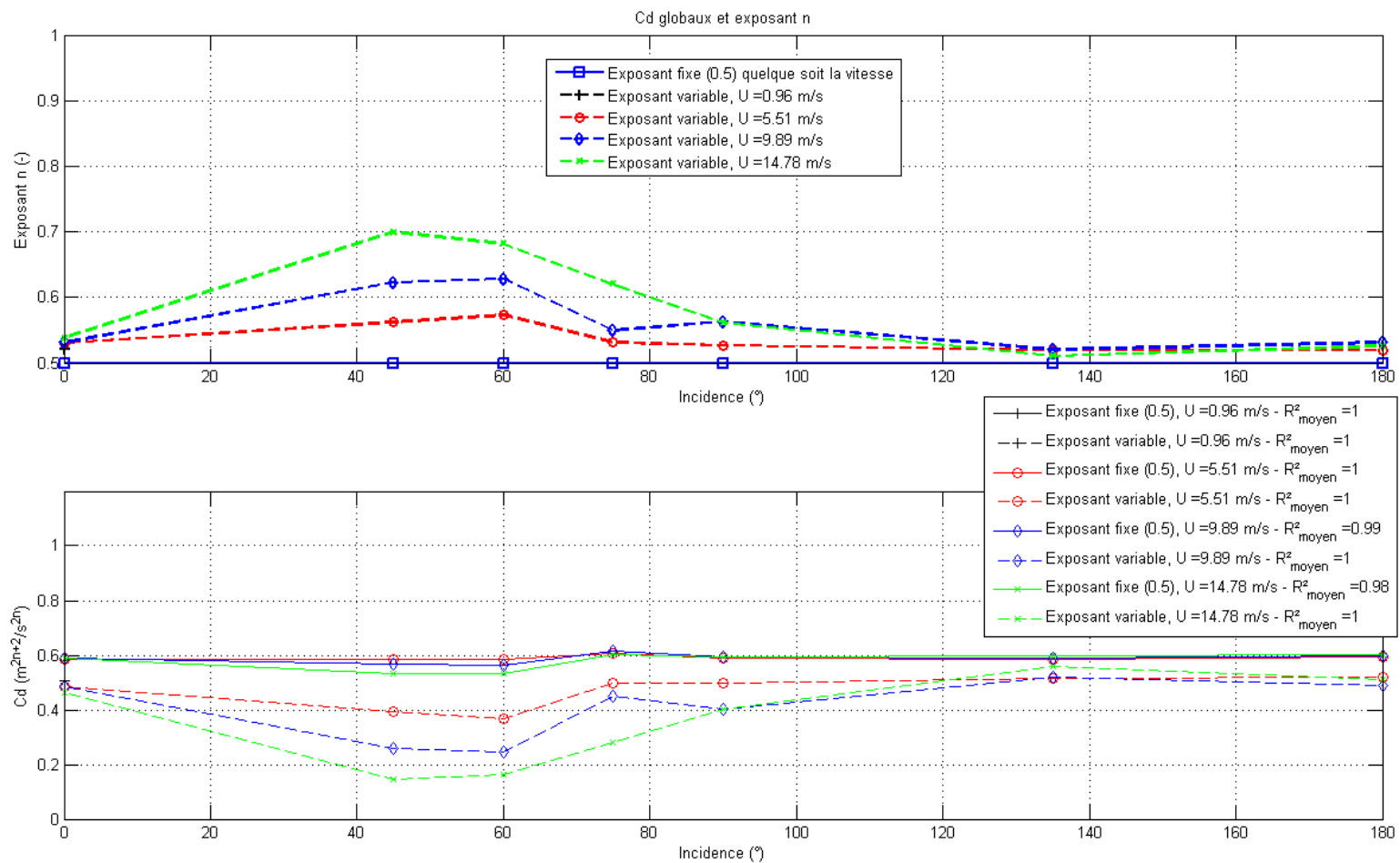


Figure H-7 : variation de l'exposant n et du coefficient de décharge en fonction de l'incidence pour la plaque n° 6 avec 2 orifices ouverts

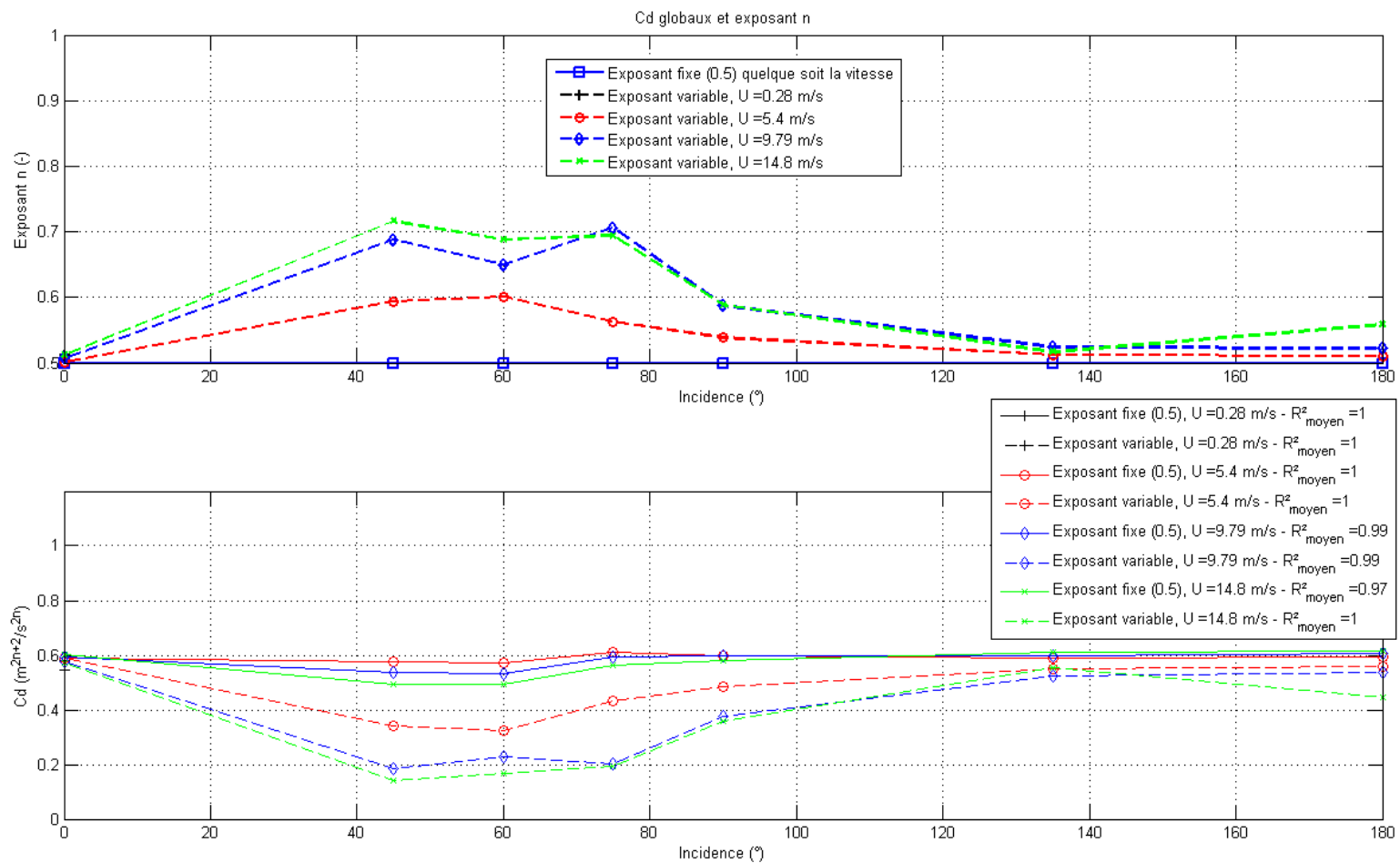


Figure H-8 : variation de l'exposant n et du coefficient de décharge en fonction de l'incidence pour la plaque n° 6 avec 4 orifices ouverts