

Titre: Mise en évidence des paramètres influant sur les forces fluides et
établissement de modèles empiriques de la traînée d'objets à
géométrie variable
Title:

Auteur: Bastien Cucuel
Author:

Date: 2015

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Cucuel, B. (2015). Mise en évidence des paramètres influant sur les forces fluides
et établissement de modèles empiriques de la traînée d'objets à géométrie
variable [Master's thesis, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie.
Citation: <https://publications.polymtl.ca/1951/>

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

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/1951/>
PolyPublie URL:

**Directeurs de
recherche:** Njuki W. Mureithi
Advisors:

Programme: Génie mécanique
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

MISE EN ÉVIDENCE DES PARAMÈTRES INFLUANT SUR LES FORCES FLUIDES
ET ÉTABLISSEMENT DE MODÈLES EMPIRIQUES DE LA TRAÎNÉE D'OBJETS À
GÉOMÉTRIE VARIABLE

BASTIEN CUCUEL
DÉPARTEMENT DE MÉCANIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLOME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE MÉCANIQUE)
DÉCEMBRE 2015

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

MISE EN ÉVIDENCE DES PARAMÈTRES INFLUANT SUR LES FORCES FLUIDES
ET ÉTABLISSEMENT DE MODÈLES EMPIRIQUES DE LA TRAÎNÉE D'OBJETS À
GÉOMÉTRIE VARIABLE

présenté par : CUCUEL Bastien

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. TRÉPANIÉ JeanYves, Ph. D., président

M. MUREITHI Njuki, Ph. D., membre et directeur de recherche

M. GOSSELIN Frédérick, Doctorat, membre

REMERCIEMENTS

Durant ces deux années, de nombreuses personnes m'ont aidé dans mon travail.

Je voudrais en premier lieu remercier mon directeur de recherche M. Njuki Murethi, pour ses conseils, son soutien et son exigence.

Je suis aussi reconnaissant envers EPRI qui a participé au financement de mes recherches. Je remercie également M. Benedict Besner, technicien du laboratoire de génie mécanique qui m'a aidé à la réalisation des différents montages nécessaires à mes expériences et Mme Jeanne Daunais, secrétaire de la chaire IFS.

J'aimerais aussi saluer toutes les personnes qui, de près ou de loin m'ont aidé, conseillé, accompagné durant ce projet. Je pense particulièrement à Inès Benito pour ses suggestions de rédaction pertinentes, Elsa Piollet qui m'a prodigué des conseils tout au long de ma maîtrise, Stephen Olala, Farzad Ashrafi qui m'a aidé dans la prise en main des logiciels de simulation, Karim Saber-Cherif, et François de Kerret. Enfin, j'ai une pensée pour ceux qui m'ont permis de décompresser en dehors des heures de travail : mes colocataires, mes partenaires de tennis et tous mes amis.

RÉSUMÉ

La connaissance du coefficient de traînée des objets a un intérêt dans de nombreuses applications industrielles. En particulier, dans les générateurs de vapeur, certains objets peuvent se déposer et, entraînés par l'écoulement, endommager les tubes. Les objets présents dans ces générateurs pouvant être très différents, la difficulté de ce projet a été de trouver des modèles de prédiction du coefficient de traînée pour un panel très varié de formes.

Séparer en différentes catégories l'ensemble des objets étudiés a permis de créer des paramètres propres à chacune. Ainsi ont été étudiés successivement des objets à géométrie hélicoïdale, des objets à géométrie allongée et enfin des objets plus neutres, libres de se déplacer dans la soufflerie.

Pour les objets hélicoïdaux, des simulations numériques ainsi que des résultats expérimentaux ont permis de définir le paramètre d'hélicité, et de trouver que le coefficient de traînée pour de tels objets est proche de celui d'un cylindre et dépend peu de la géométrie de base. Une analyse par Particle Image Velocimetry (PIV) a aussi été menée pour étudier le comportement du fluide, et assurer une correspondance entre l'allure de l'écoulement numérique et expérimental. Une décomposition Proper Orthogonal Decomposition (POD) a aussi été effectuée pour visualiser les différents modes de l'écoulement. L'étude du sillage derrière ces objets a montré une similarité entre l'écoulement autour d'un cylindre et d'un objet fortement vrillé.

Concernant les objets allongés, un rapport de $\frac{L}{H} = 15$ a été utilisé. Pour cette étude, la traînée a été obtenue par des tests en soufflerie et des simulations numériques.

Enfin les objets 3D ont été testés dans une soufflerie verticale sans capteur. Le principe de mesure est basé sur l'équilibre des forces entre le poids et la traînée. Les objets sont libres de se déplacer au sein de la section d'essai. Pour cela nous avons envisagé l'étude du coefficient de traînée non pas par une valeur exacte calculée via une surface déterminée, mais comme une moyenne. Du fait de leurs mouvements, et particulièrement des rotations qu'ils effectuent autour d'eux mêmes, les objets ont été assimilés à des sphères. Pour calculer la traînée de ces objets, le coefficient de traînée d'une sphère a ainsi été utilisé.

ABSTRACT

Knowledge of the drag coefficient is used in many industrial applications. For instance, in the nuclear industry, some objects can get stuck inside steam generators and damage tubes by fretting-wear due to the flow. Because these objects are very different from each other, the main difficulty of this project will be to find correlations for very different shapes of objects. Distinguishing different groups among the studied objects, it is possible to establish parameters for each category. Thus, twisted objects, elongated objects and more 3D and free-to-move objects will be studied.

For the twisted objects, numerical simulations and physical experiments were carried out for Reynolds number such as $5000 < Re < 15000$. The results allowed us to define the helicity parameter and to find out that for such objects, the drag coefficient is close to that of a cylinder and doesn't depend so much on the original shape. A PIV analysis was carried out to study the flow behaviour and to verify the similarity between the numerical and experimental flow. A POD analysis was also performed to visualize the different modes of the flow. Study of the wake behind these objects has shown a similarity between the flow around a cylinder and a strongly twisted object.

For the elongated objects, a $\frac{L}{H} = 15$ length to height aspect ratio will be used. For this study, the drag will be either measured in a wind tunnel or calculated thanks to numerical simulations.

Eventually, the 3D objects have been tested inside a vertical wind tunnel without using any sensor. The principle of the measure is given by the equilibrium between the drag force and the weight. The objects were free to move inside the test section. Thus we did not consider any more the drag coefficient as an exact value calculated from a well defined area, but as an average value. Because of their movements and particularly of the fact that the objects are turning around themselves, the objects were assimilated to spheres. Thus, the drag coefficient of a sphere was used in order to calculate their drag force.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	iii
RÉSUMÉ	iv
ABSTRACT	v
TABLE DES MATIÈRES	vi
LISTE DES TABLEAUX	viii
LISTE DES FIGURES	ix
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	xiv
LISTE DES ANNEXES	xvi
CHAPITRE 1 INTRODUCTION	1
1.1 Contexte industriel	1
1.2 Objectifs de recherche	2
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE	3
2.1 Explication de la traînée	3
2.1.1 Effet du rapport $\frac{L}{d}$ sur le coefficient de traînée d'un cylindre	5
2.1.2 Modèles de prédictions de la traînée	6
2.2 Organisation de l'étude et objectifs spécifiques	15
CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE	16
3.1 Dessin et fabrication des différents objets	16
3.1.1 Dessin des objets	16
3.1.2 Fabrication des objets	18
3.1.3 Mesure et modélisation des objets pour la soufflerie verticale	19
3.2 Simulations numériques	20
3.2.1 Le maillage	20
3.2.2 Simulation des objets hélicoïdaux	21
3.2.3 Analyse POD	22
3.3 Tests expérimentaux	22

3.3.1	Calibration du capteur	23
3.3.2	Mesure de la force de traînée	23
3.4	Mesure de PIV	29
CHAPITRE 4 ÉCOULEMENTS AUTOUR DES OBJETS HELICOÏDAUX ET CO-EFFICIENTS DE TRAÎNÉE		31
4.1	Définition et propriétés des géométries des objets vrillés	31
4.1.1	Le toron à deux brins	31
4.1.2	La plaque vrillée	38
4.2	Simulations numériques des écoulements autour de torons	40
4.2.1	Simulations numériques sur un cylindre	40
4.2.2	Forme de l'écoulement et résultats de coefficients de traînée	46
4.2.3	Analyse POD des résultats numériques et structures cohérentes de l'écoulement.	50
4.3	Expériences de PIV	54
4.3.1	Montage et visualisations	54
4.3.2	Analyse POD des résultats PIV	58
4.4	Mesure expérimentale de la traînée	59
4.5	Résultats finaux	62
CHAPITRE 5 OBJETS ALLONGÉS		64
5.1	Tests préliminaires et identification des paramètres géométriques	64
5.1.1	Nouveaux paramètres géométriques	65
5.2	Simulations numérique et corrélations	68
5.2.1	Maillage et paramètres de simulation	68
5.2.2	Influence de Σ sur le coefficient de traînée	71
5.2.3	Influence du paramètre Γ sur le coefficient de traînée.	80
CHAPITRE 6 CORRELATION DU C_D POUR DES OBJETS 3D NON SPHÉRIQUES		85
6.1	Corrélation basée sur le coefficient de traînée d'une sphère	86
CHAPITRE 7 CONCLUSION		90
7.1	Synthèse des travaux	90
7.2	Précisions sur les résultats et suggestions de travaux complémentaires	91
RÉFÉRENCES		93
ANNEXES		95

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 5.1	Tableau des coefficients de traînée des ellipses	72
Tableau 5.2	Tableau des coefficients de traînée des objets dont le paramètre Σ est fixe.	81
Tableau 6.1	Tableau de comparaison du coefficient de traînée d'une sphère par ces deux souffleries.	86
Tableau 6.2	Tableaux des valeurs des facteurs de correction et des écarts entre notre modèle et les valeurs expérimentales.	88
Tableau C.1	Tableaux des dimensions des objets vrillés	106
Tableau C.2	Tableaux des dimensions des objets utilisés dans la soufflerie verticale (Partie 1)	107
Tableau C.3	Tableaux des dimensions des objets utilisés dans la soufflerie verticale (Partie 2)	108

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1	Schéma des deux composantes de la traînée	3
Figure 2.2	Variation du coefficient de traînée d'une sphère et d'un cylindre infini en fonction du nombre de Reynolds d'après Achenbach (1972)	4
Figure 2.3	Visualisation de l'écoulement (carré des vitesses relatives axiales) autour d'un cylindre pour $R_e = 10^4$ (a), et pour $R_e = 10^6$ (b), d'après Singh et Mittal (2005)	5
Figure 2.4	Définition des paramètres L et d	5
Figure 2.5	Impact du rapport longueur sur diamètre sur le C_D d'un cylindre d'après Wang <i>et al.</i> (2012)	6
Figure 2.6	Modèle de coefficient de traînée de Turton et Levenspiel (1986) pour des objets sphériques	7
Figure 2.7	Modèle de coefficient de traînée d'après Haider et Levenspiel (1989) .	9
Figure 2.8	Visualisations de la zone de recirculation derrière un objet d'après Roshko (1993)	10
Figure 2.9	Distribution du coefficient de pression en aval de l'objet d'après Roshko et Lau (1965) avec les coordonnées adimensionnalisées par le diamètre (a), et les coordonnées adimensionnalisées par la distance de rattachement (b).	12
Figure 2.10	Modèle de coefficient de traînée de McCleskey (1988)	13
Figure 2.11	Résultats expérimentaux de Saber-Cherif et Mureithi (2015)	14
Figure 3.1	Construction d'un objet via la fonction Surface Multi Section	17
Figure 3.2	Construction d'un objet via <i>Imagine and shape</i> . Choix de la géométrie de base (a), extrusion à partir des faces (b), modification des points de contrôles (c). On peut aussi choisir plus de points de contrôle dès le choix de la géométrie de base (d), et après modification (e)	18
Figure 3.3	Photographie de l'imprimante <i>Ultimaker Original</i>	19
Figure 3.4	Vue isométrique de la section d'essai numérique	20
Figure 3.5	Etude de convergence de maillage pour un cylindre	21
Figure 3.6	Courbe de calibration du capteur Futek	23
Figure 3.7	Vue de la soufflerie horizontale	24
Figure 3.8	Schéma représentant le montage dans la soufflerie horizontale	25
Figure 3.9	Schéma représentant le principe de mesure de la soufflerie verticale .	26
Figure 3.10	Vue globale de la soufflerie verticale	27

Figure 3.11	Vue agrandie de la section de la soufflerie verticale	28
Figure 3.12	Profil de vitesse de la soufflerie verticale au centre de la section dans les deux directions établies par Saber-Cherif et Mureithi (2015) . . .	28
Figure 3.13	Schéma de fonctionnement du système de PIV d'après Seika (2014) .	30
Figure 4.1	Exemple d'une plaque vrillée	31
Figure 4.2	Exemple d'un toron vrillé	31
Figure 4.3	Profil du toron avec contact ponctuel (a) et après modification pour permettre le maillage (b)	32
Figure 4.4	Exemple de la géométrie initiale pour le toron à 1 tour (a), 2 tours (b), 7 tours(c) et 10 tours (d)	32
Figure 4.5	Agrandissement de la vue en coupe (plan YZ) du maillage pour le toron à un tour	33
Figure 4.6	Courbe du coefficient de traînée pour le toron en fonction du nombre de tours de vrille	34
Figure 4.7	Exemple de la géométrie initiale pour le toron à 1 tour (a), 2 tours (b), 3 tours(c), 4 tours (d), 5 tours (e), 7 tours (f) et 10 tours (g)	35
Figure 4.8	Schéma de la séparation des surfaces projetées sur le toron	36
Figure 4.9	Décomposition en S_1 et S_2 du toron	37
Figure 4.10	Variation de la surface projetée d'un toron (divisé par Ld en fonction du nombre de tours de vrille.	37
Figure 4.11	Exemple de la géométrie initiale pour la plaque vrillée à 1 tour (a), 2 tours (b), 3 tours(c), 4 tours (d), 5 tours (e), 7 tours (f) et 10 tours (g) .	38
Figure 4.12	Décomposition en S_1 et S_2 d'une plaque vrillée	39
Figure 4.13	Projection des surfaces S_1 et S_2	40
Figure 4.14	Evolution de la traînée pendant les dernières secondes de simulation pour le cylindre avec le modèle Shear Stress Transport (SST)	41
Figure 4.15	Agrandissement de l'évolution de la traînée avec le modèle SST . . .	41
Figure 4.16	Evolution de la portance en fonction du temps de simulation pour le cylindre avec le modèle SST (le début de la simulation a artificiellement été mis à zéro)	42
Figure 4.17	Vue en coupe (plan YZ) du maillage pour le toron à un tour	43
Figure 4.18	Agrandissement de la vue en coupe (plan YZ) du maillage pour le toron à un tour	44
Figure 4.19	Vue en coupe (plan XZ) du maillage pour le toron à un tour	44
Figure 4.20	Vue en coupe (plan XY) du maillage pour le toron à un tour	45

Figure 4.21	Courbe d'évolution de la traînée et de la portance pour le toron à un tour pendant la simulation	45
Figure 4.22	Lignes de courant surfaciques autour du toron à un tour dans le plan central YZ (a) et dans un plan YZ décalé de 35 mm (b).	47
Figure 4.23	Lignes de courant 3D autour du toron à un tour	48
Figure 4.24	Lignes de courant 3D autour du toron à dix tours	48
Figure 4.25	Lignes de courant 3D autour d'un cylindre	49
Figure 4.26	Courbe du coefficient de traînée C_D pour le toron de géométrie finale en fonction du nombre de tours de vrille	49
Figure 4.27	Répartition modale de l'énergie autour d'un toron à un tour.	50
Figure 4.28	Répartition modale de l'énergie autour d'un cylindre.	51
Figure 4.29	Visualisation du premier mode de la POD pour le cylindre (a), et le toron à un tour (b).	52
Figure 4.30	Visualisation du deuxième mode de la POD pour le cylindre (a), et le toron à un tour (b).	53
Figure 4.31	Image de l'objet utilisé pour les tests de PIV	55
Figure 4.32	Line Integral Convolution (LIC) de la PIV dans le plan central YZ (a), lignes de courant issues de la simulation numérique en régime transitoire dans le même plan (b)	56
Figure 4.33	LIC de la PIV dans un plan YZ décalé de 35 mm (a), lignes de courant issues de la simulation numérique en régime transitoire dans le même plan (b)	57
Figure 4.34	Montage superposant la cartographie des vecteurs vitesses obtenue par PIV et une photographie de l'objet.	58
Figure 4.35	Répartition modale de l'énergie autour d'un toron à un tour grâce à l'analyse par PIV.	59
Figure 4.36	Toron à un tour imprimé en 3D	59
Figure 4.37	Image de la section d'essai utilisée pour les expériences	60
Figure 4.38	Montage utilisé pour mesurer la traînée	61
Figure 4.39	Signal enregistré pour un toron à un tour à $U_\infty = 10$ m/s	61
Figure 4.40	Courbe du coefficient de traînée pour la plaque vrillée en fonction du nombre de tours de vrille	62
Figure 4.41	Coefficient de traînée en fonction de l'hélicité.	63
Figure 5.1	Graphique représentant C_D en fonction de Σ pour différents objets	65
Figure 5.2	Vue de deux profils ayant le même Σ mais des C_D différents	65
Figure 5.3	Répartition de la pression autour d'un cylindre à section rectangulaire	66

Figure 5.4	Visualisation de la "bulle" derrière l'objet d'après Roshko et Lau (1965).	67
Figure 5.5	Différentes géométries en fonction de Γ , avec le paramètre Σ fixe. . .	67
Figure 5.6	Variation d'une géométrie en fonction de Σ avec le paramètre Γ fixe. .	67
Figure 5.7	Géométrie et conditions limites de la section numérique des simulations 2D	68
Figure 5.8	Courbe d'évolution du coefficient de traînée de la demi-ellipse en fonc- tion du nombre d'éléments.	69
Figure 5.9	Vue générale du maillage 2D	69
Figure 5.10	Vue agrandie du maillage autour de l'objet 2D.	70
Figure 5.11	Courbe d'évolution de la traînée en fonction du paramètre Σ	73
Figure 5.12	Visualisation des vitesses axiales pour les différents objets (partie 1) .	74
Figure 5.13	Visualisation des vitesses axiales pour les différents objets (partie 2) .	75
Figure 5.14	Visualisation des pressions relatives pour les différents objets (partie 1)	75
Figure 5.15	Visualisation des pressions relatives pour les différents objets (partie 2)	76
Figure 5.16	Visualisation de la vorticité pour les différents objets (partie 1)	76
Figure 5.17	Visualisation de la vorticité pour les différents objets (partie 2)	77
Figure 5.18	Profil d'évolution du coefficient de pression en fonction de la distance à l'extrémité arrière de l'objet	78
Figure 5.19	Profil d'évolution du coefficient de pression en fonction de la distance adimensionnalisée à l'extrémité arrière de l'objet	78
Figure 5.20	Illustration de la mesure de x_r	79
Figure 5.21	Profil d'évolution du coefficient de pression en fonction de la distance en amont de l'objet	79
Figure 5.22	Courbe d'évolution de la traînée en fonction du paramètre Γ	82
Figure 5.23	Visualisations des vitesses axiales pour les différents objets	83
Figure 5.24	Visualisations des pressions relatives pour les différents objets	84
Figure 6.1	Photographies de différents objets testés dans la soufflerie verticale. .	85
Figure 6.2	Courbe de notre modèle de traînée en utilisant $A = A_{Avg}$ (a), $A =$ $\pi \frac{L_{Avg}^2}{4}$ (b), $A = A_{Max}$ (c), $A = \pi \frac{L_{Max}^2}{4}$ (d)	87
Figure 6.3	Courbe de notre modèle de traînée corrigé en utilisant $A = A_{Avg}$ (a), $A = \pi \frac{L_{Avg}^2}{4}$ (b), $A = A_{Max}$ (c), $A = \pi \frac{L_{Max}^2}{4}$ (d)	89
Figure 6.4	Courbe d'évolution du coefficient de traînée en fonction de A_{Avg} . . .	89
Figure A.1	Visualisation du troisième mode de la POD pour le cylindre (a), et le toron à un tour (b).	95
Figure A.2	Visualisation du quatrième mode de la POD pour le cylindre (a), et le toron à un tour (b).	96

Figure A.3	Visualisation du cinquième mode de la POD pour le cylindre (a), et le toron à un tour (b).	97
Figure A.4	Visualisation du sixième mode de la POD pour le cylindre (a), et le toron à un tour (b).	98
Figure A.5	Visualisation du septième mode de la POD pour le cylindre (a), et le toron à un tour (b).	99
Figure A.6	Visualisation du huitième mode de la POD pour le cylindre (a), et le toron à un tour (b).	100
Figure A.7	Visualisation du neuvième mode de la POD pour le cylindre (a), et le toron à un tour (b).	101
Figure A.8	Visualisation du dixième mode de la POD pour le cylindre (a), et le toron à un tour (b).	102
Figure B.1	Photographie des objets utilisés par Saber-Cherif et Mureithi (2015)	103
Figure B.2	Photographies des objets testés dans cette étude (partie 1)	104
Figure B.3	Photographies des objets testés dans cette étude (partie 2)	105

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

Lettres latines

A	Surface externe de l'objet (m^2)
A_{Avg}	Surface projetée moyenne de l'objet (m^2)
A_{Max}	Surface projetée maximale de l'objet (m^2)
A_{Min}	Surface projetée minimale de l'objet (m^2)
A_p	Surface projetée (m^2)
A_v	Surface externe de la sphère équivalente (iso-volume)(m^2)
C	Circularité
$C(t, t')$	Tenseur de corrélation
C_D	Coefficient de traînée
C_p	Coefficient de pression
C_τ	Coefficient de force visqueuse
d	Diamètre d'un cylindre (m)
d_p	Diamètre équivalent (m)
e	Epaisseur de la plaque (m)
f	Fréquence liée au nombre de Strouhal (Hz)
h	Hélicité
H	Hauteur (m)
H_s	Demi hauteur de la bulle en aval de l'objet (m)
l	Largeur de la plaque (m)
L	Longueur de l'objet (m)
L_s	Longueur de la bulle en aval de l'objet (m)
m	Masse de l'objet (m)
n	Nombre de tours
F_p	Poids (N)
p	Pression relative
P	Périmètre
Re	Nombre de Reynolds
St	Nombre de Strouhal
U	Vitesse du fluide (m/s)
U_∞	Vitesse d'entrée du fluide
x_r	Point de réattachement

Lettres grecques

α	Facteur d'optimisation
Γ	Paramètre géométrique relatif à l'allongement arrière de l'objet
μ	Viscosité dynamique ($\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$)
ρ	Masse volumique (kg/m^3)
Σ	Paramètre géométrique relatif à la forme globale de l'objet
ϕ	Sphéricité
ψ	Paramètre de forme
Φ	Mode spatial de l'écoulement
Ψ	Mode temporel de l'écoulement

Acronymes

LES	Large Eddy Simulation
LIC	Line Integral Convolution
PIV	Particle Image Velocimetry
POD	Proper Orthogonal Decomposition
SST	Shear Stress Transport

LISTE DES ANNEXES

Annexe A	VISUALISATIONS DES MODES PAR POD	95
Annexe B	Objets 3D	103
Annexe C	Dimensions des objets	106

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

La traînée est un phénomène très facilement observable et qui au premier abord est assez intuitif. On sent lorsqu'on sort la main par la fenêtre d'une voiture que le vent applique une force qui a tendance à entraîner la main dans sa direction. On l'observe aussi lorsqu'on voit des objets emportés par le courant d'une rivière, les feuilles par le vent etc. Il existe aussi de nombreuses applications industrielles où l'on cherche tantôt à la diminuer (aéronautique, balistique, hydrodynamique...) ou bien au contraire à la maximiser (voiles d'un bateau par vent arrière, atterrissage d'un avion).

L'établissement d'un modèle de prédiction de traînée pour des objets aléatoires peut avoir des applications dans le calcul de la portée de débris suite à une explosion ou pour calculer les forces d'impact de débris mus par un fluide par exemple.

Afin de réaliser un tel modèle, il est nécessaire de comprendre les phénomènes et de caractériser les paramètres qui gouvernent la traînée. C'est pourquoi dans notre étude, nous allons nous intéresser à des géométries bien définies.

1.1 Contexte industriel

Le générateur de vapeur est une partie majeure d'une centrale nucléaire, tant au niveau du prix que de l'importance. Il est constitué de nombreux tubes qui permettent l'échange de chaleur entre le fluide chaud (et irradié) et le fluide à évaporer qui permettra ensuite d'entraîner les turbines pour la génération d'électricité. La connaissance de l'espérance de vie de ces tubes est importante pour pouvoir prévenir l'apparition de fuites. Or il arrive que certains objets indésirables tels que des copeaux, des projections de soudures, des fils de fer, arrivent dans le générateur de vapeur, et, à cause des forces exercées par le fluide, viennent user les tubes de ces générateurs de vapeur par frottement. La Chaire industrielle de recherche BWC/EACL/CRSNG en Interaction Fluide-Structure cherche donc dans un vaste projet à déterminer l'espérance de vie de ces tubes soumis à un contact avec ces objets. Les générateurs de vapeur étant utilisés dans des centrales nucléaires, l'arrêt de celles-ci a un cout considérable. Pouvoir estimer au mieux l'espérance de vies des tubes se révèle donc très important. Les générateurs de vapeur étant arrêtés environ tous les deux ans, la précision recherché se situe de l'ordre de quelques mois. Deux différents cas peuvent se présenter :

- L'espérance de vie est supérieure à la durée de vie du générateur de vapeur : Pas besoin de retirer l'objet.

- L'espérance de vie est supérieure inférieure à la durée de vie du générateur de vapeur :
Il faudra retirer l'objet.

Il faut donc créer un modèle d'usure du tube en fonction de la géométrie des objets et des forces externes. Pour connaître ces forces, il faut connaître les forces fluides appliquées sur ces objets placés dans des faisceaux de tube. La première étape de cette étude est de connaître les forces fluides s'appliquant sur ces objets en écoulement axial, afin de pouvoir réaliser les autres étapes de l'étude. Afin de prédire l'espérance de vie de ces tubes, il convient donc de connaître les forces exercées par le fluide sur ces objets. C'est sur cette partie que cette recherche sera effectuée. Les résultats seront donc utilisés au sein de ce projet global, mais auront aussi une valeur en soi pour la connaissance des forces en mécanique des fluides. Afin de simplifier l'étude, et basé sur l'observation faites des différents objets trouvés dans les générateurs de vapeurs, l'ensemble des objets étudiés a été divisé en trois catégories :

1. Les objets vrillés
2. Les objets allongés
3. Les objets non sphériques libres de bouger dans la soufflerie.

Les deux premières catégories correspondent à des objets qui se coincent dans les faisceaux de tubes et qui viennent les user par frottement. La troisième correspond au cas où des objets sont situés dans la partie externe de l'écoulement. Ils sont libre de se déplacer et viennent impacter les tubes.

1.2 Objectifs de recherche

Les objectifs de la recherche sont d'identifier les paramètres influant sur les forces de traînée et de portance, et de créer des modèles en fonction de ces paramètres pour évaluer ces forces.

Pour atteindre cet objectif principal, nous allons procéder par différentes étapes définies par plusieurs objectifs spécifiques :

1. Choisir les objets d'étude et les regrouper en types d'objets. Chaque type d'objets sera comparé à une géométrie plane, cylindrique ou sphérique.
2. Pour chaque type d'objets, identifier les paramètres influant les forces de traînée.
3. Effectuer un grand nombre d'essais en soufflerie et de simulations pour se créer une banque de donnée suffisante
4. Établir des modèles empiriques pour évaluer la force de traînée d'objets appartenant aux différentes catégories.

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

2.1 Explication de la traînée

Un objet soumis à un écoulement fluide subit une force dans la direction de l'écoulement. Cette force est appelée force de traînée. Elle dépend des propriétés physiques du fluide (masse volumique, viscosité), de la vitesse de l'écoulement ainsi que de la forme de l'objet. Plus un objet est dit aérodynamique, moins la traînée qui lui est appliquée sera forte (à conditions expérimentales identiques). On peut décomposer cette force en deux parties. La traînée dite visqueuse qui est due à l'action de la viscosité sur la paroi de l'objet. Celle-ci est prépondérante pour des nombres de Reynolds faibles. Lorsque le nombre de Reynolds devient plus important, la traînée dite de pression devient prépondérante. Cette force est due à la différence de pression entre l'amont et l'aval de l'objet. En effet, en amont de l'objet, l'écoulement est ralenti par celui-ci, entraînant une augmentation de la pression. En contournant l'objet, la couche limite (qui est formée par la zone de fluide dans laquelle la vitesse axiale est inférieure à 99% de la vitesse d'entrée) se décolle de l'objet et crée une zone de dépression en arrière de l'objet. La figure 2.1 schématise les deux composantes de cette force. Plus d'informations sur ces phénomènes peuvent être trouvés dans White (2015). On définit le coefficient de traînée par la formule suivante :

$$C_D = \frac{1}{2\rho U^2 A} \quad (2.1)$$

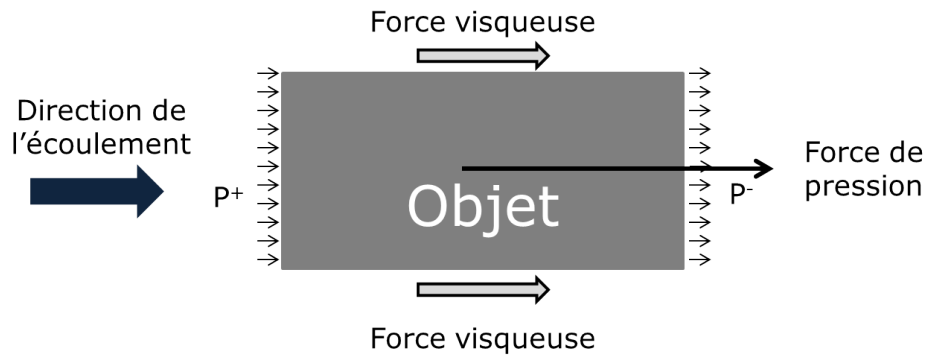


Figure 2.1 Schéma des deux composantes de la traînée

Avec ρ qui représente la masse volumique, U une vitesse caractéristique (on choisit usuellement la vitesse loin en amont), A une surface de référence. On utilise souvent la

surface projetée dans la direction de l'écoulement pour A (que l'on nomme alors A_p). Lorsque le nombre de Reynolds est très faible ($Re \ll 1$), la traînée de pression est négligeable et seule la traînée visqueuse a un effet notable. On considère alors que l'on est dans le régime de Stokes où l'on peut définir le coefficient de traînée par l'approximation suivante :

$$C_D = \frac{24}{Re} \quad (2.2)$$

Lorsque le nombre de Reynolds devient plus important, ($Re > 1000$) on entre dans le régime de Newton. Enfin, lorsque le nombre de Reynolds devient proche de ($Re = 10^5$), on atteint ce que l'on appelle la crise de traînée. A ce moment, la turbulence créée par l'objet entraîne le recollement de la couche limite sur l'objet. Cela a pour conséquence une chute brutale du coefficient de traînée. Cependant l'amplitude de ce phénomène ainsi que la valeur du nombre de Reynolds à laquelle il se produit dépendent grandement de l'état de surface de l'objet. La figure 2.2 montre un exemple de tracé de la variation du coefficient de traînée d'une sphère et d'un cylindre en fonction du nombre de Reynolds. Les courbes en traits pleins correspondent à des objets lisses, tandis que les lignes en pointillés correspondent à différents états de surface. Singh et Mittal (2005) étudie en détail l'impact du nombre de Reynolds sur l'écoulement autour d'un cylindre. La figure 2.3 montre quelques images de l'écoulement autour d'un cylindre avant et après la crise de traînée.

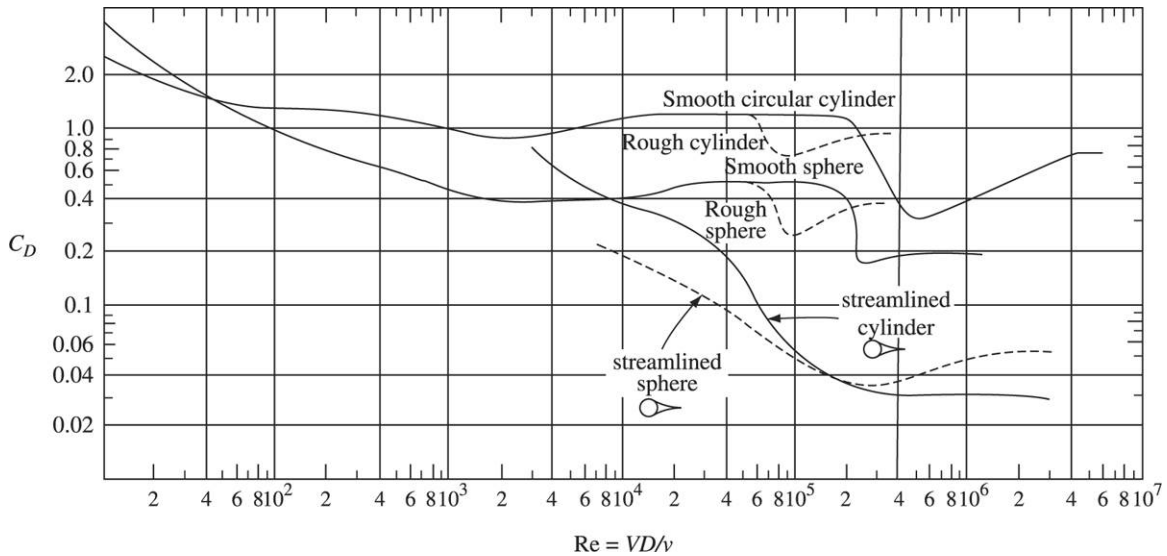


Figure 2.2 Variation du coefficient de traînée d'une sphère et d'un cylindre infini en fonction du nombre de Reynolds d'après Achenbach (1972)

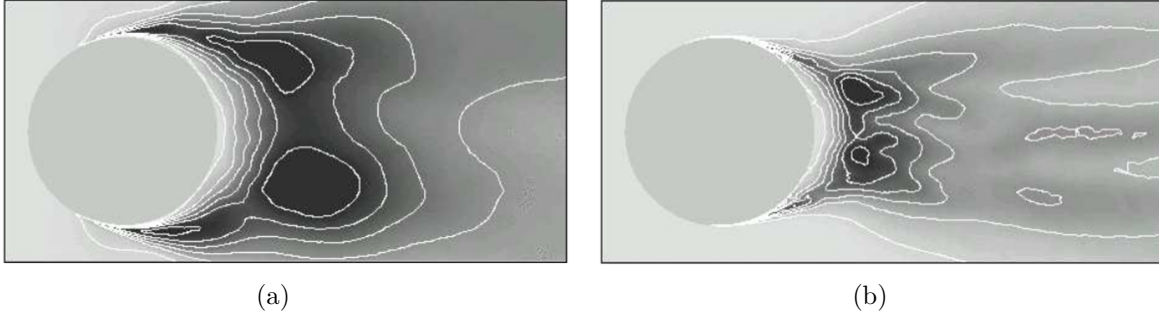


Figure 2.3 Visualisation de l'écoulement (carré des vitesses relatives axiales) autour d'un cylindre pour $Re = 10^4$ (a), et pour $Re = 10^6$ (b), d'après Singh et Mittal (2005)

2.1.1 Effet du rapport $\frac{L}{d}$ sur le coefficient de traînée d'un cylindre

La figure 2.4 définit clairement les longueurs L et d par rapport à la direction du fluide.

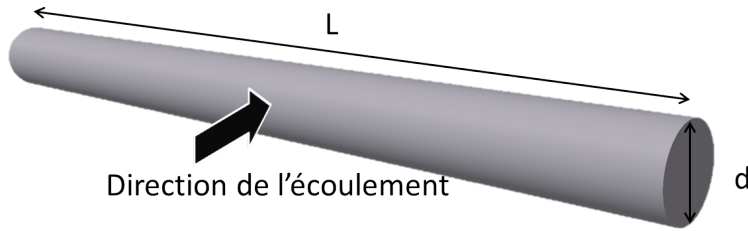


Figure 2.4 Définition des paramètres L et d

Ce rapport $\frac{L}{d}$ a un effet considérable sur le coefficient de traînée. En effet, un cylindre avec ce rapport nul devient une plaque alignée avec l'écoulement dont le coefficient de traînée est aux alentours de 0,07 d'après Ortiz *et al.* (2012) tandis que pour un cylindre infini, il est de l'ordre de 1,2 (pour $1, 10^4 < Re < 2, 10^5$). La plupart des courbes de traînée des cylindres sont définies pour un cylindre infini. Or dans la réalité les cylindres sont souvent finis. La figure 2.5 montre une figure de Wang *et al.* (2012) où l'on peut voir différentes études de l'évolution du coefficient de traînée d'un cylindre en fonction de ce rapport (défini par $\frac{H}{d}$ dans cet article)

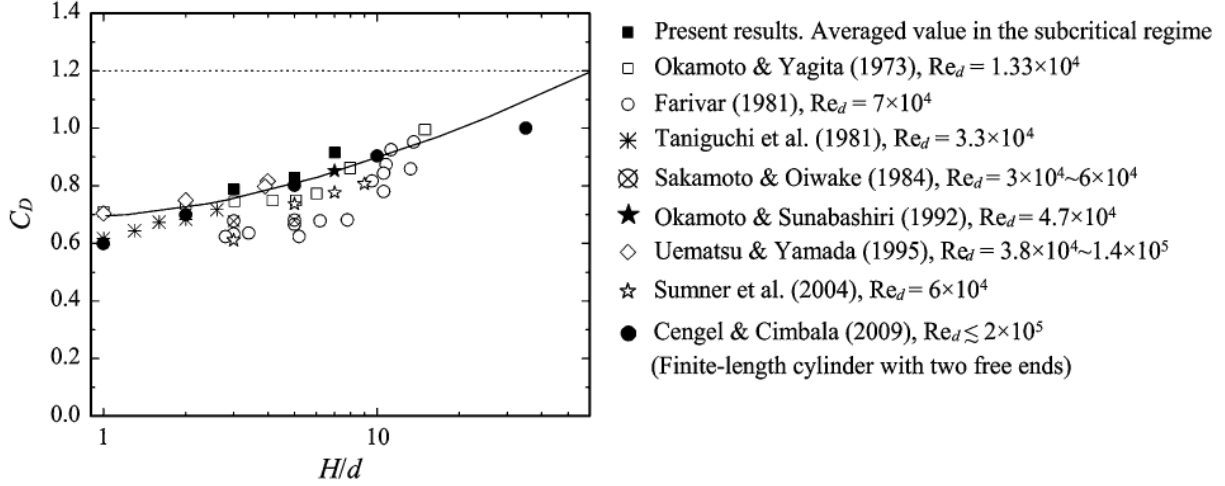


Figure 2.5 Impact du rapport longueur sur diamètre sur le C_D d'un cylindre d'après Wang *et al.* (2012)

2.1.2 Modèles de prédictions de la traînée

De nombreuses relations plus ou moins complexes ont été établies pour prédire le coefficient de traînée de différents objets en définissant différents facteurs de formes. Ainsi en utilisant la définition de la sphéricité de Wadell (1934) :

$$\phi = \frac{A_v}{A} \quad (2.3)$$

Avec A la surface externe de l'objet et A_v la surface externe de la sphère ayant le même volume que l'objet, Chien *et al.* (1994) donne la formule suivante :

$$C_D = \frac{30}{Re} + 67,289e^{(-5,03\phi)} \quad (2.4)$$

Khan et Richardson (1987) donne dans l'équation 2.5

$$C_d = (2,25Re^{-0,31} + 0.36Re^{0,06})^{3,45} \quad (2.5)$$

Turton et Levenspiel (1986) propose un modèle (valable uniquement pour des objets

sphériques), présenté dans l'équation 2.6 :

$$C_D = \frac{24}{Re}(1 + 0,173Re^{0,657}) + \frac{0,413}{1 + 16300Re^{-1,09}} \quad (2.6)$$

Ce modèle a été obtenu à partir de l'équation de Clift et Gauvin (1970) qui se divise en deux parties principales. La première en $\frac{24}{Re}$ reprend la formule du régime de Stokes, tandis que la deuxième partie renvoie à la traînée de pression :

$$C_D = \frac{24}{Re}(1 + AR_e^B) + \frac{C}{1 + DR_e^E} \quad (2.7)$$

dont les paramètres A, B, C, D, E sont calculés en minimisant l'écart entre les valeurs mesurées et les valeurs prédites :

$$(\log_{10}C_{D_{mesuré}} - \log_{10}C_{D_{prédit}})^2 \quad (2.8)$$

La figure 2.6 montre les résultats obtenus. Cependant ces modèles ne fonctionnent que pour

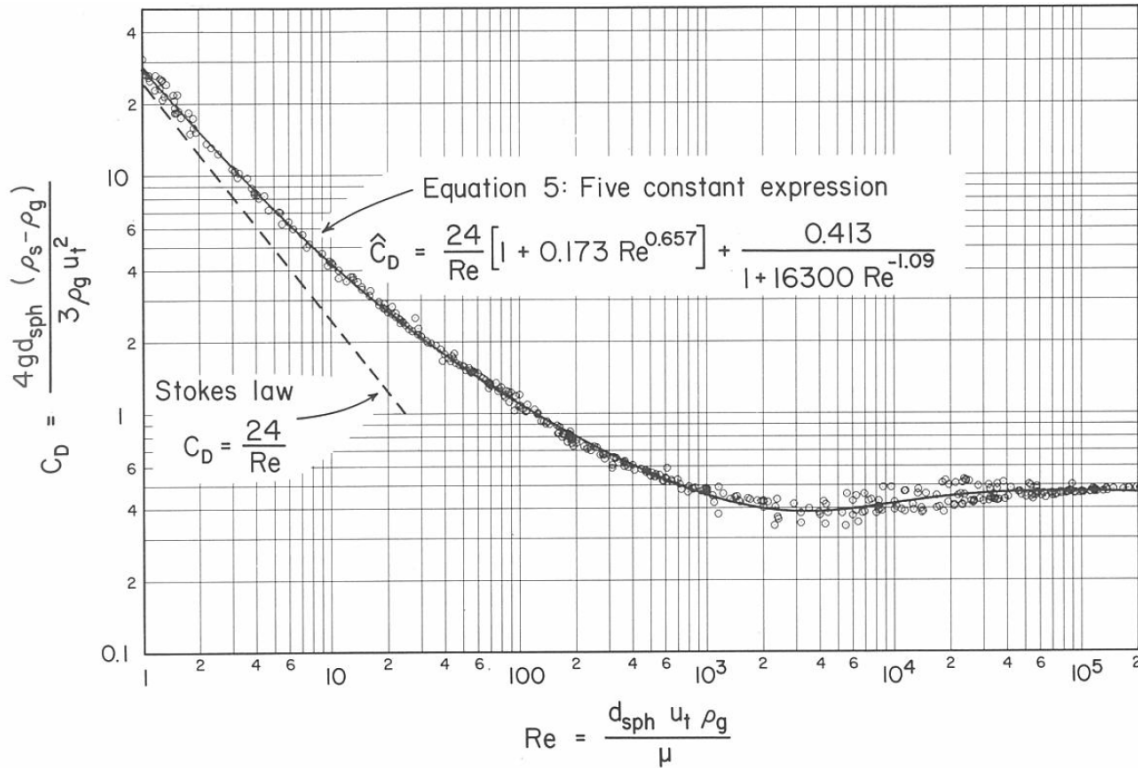


Figure 2.6 Modèle de coefficient de traînée de Turton et Levenspiel (1986) pour des objets sphériques

des objets sphériques, et n'étudient pas l'effet de la forme sur le coefficient de traînée.

Haider et Levenspiel (1989) reprend la formulation de Clift et Gauvin (1970) (avec $E = 1$) et la généralise aux géométries non sphériques en exprimant les différents paramètres A, B, C, D en fonction de la sphéricité ϕ . Pour les calculer, différents tests ont été réalisés pour chaque valeur de sphéricité, et, procédant de même que Turton et Levenspiel (1986), A, B, C, D sont calculés par une minimisation de l'écart entre les valeurs mesurées et prédites (équation 2.8). Une fois ceux-ci connus pour chaque valeur de ϕ , on procède à une régression mathématique de chaque paramètre en fonction de la sphéricité. On obtient alors :

$$A = e^{2,3288 - 6,4581\phi + 2,4886\phi^2} \quad (2.9a)$$

$$B = 0,0964 + 0,5565\phi \quad (2.9b)$$

$$C = e^{4,905 - 13,8944\phi + 18,4222\phi^2 - 10,2599\phi^3} \quad (2.9c)$$

$$D = e^{1,4681 + 12,2584\phi - 20,7322\phi^2 + 15,8855\phi^3} \quad (2.9d)$$

A ensuite été simplifié au premier ordre le modèle précédent pour obtenir la version finale :

$$C_D = \frac{24}{Re} (1 + 8,1716e^{-4,0655\phi} Re^{0,0964 + 0,5565\phi}) + \frac{73,69Ree^{-5,0748\phi}}{Re + 5,378e^{6,2122\phi}} \quad (2.10)$$

qui est une des équations les plus complètes trouvées dans la littérature. Apparaît aussi dans ce modèle le paramètre de sphéricité ϕ . Cette relation, contrairement à celle de Clift et Gauvin (1970) s'applique donc à la fois aux objets sphériques et aux objets non sphériques. La figure 2.7 montre les résultats obtenus. L'utilisation de ce modèle nécessite néanmoins l'utilisation du paramètre de sphéricité ce qui requiert une connaissance parfaite de la géométrie de l'objet étudié. Or pour un objet non trivial et dont on ne dispose pas d'un modèle numérique, il peut être très difficile d'obtenir la sphéricité. De plus, ce paramètre de sphéricité a un sens à condition que les objets restent des objets tridimensionnels. Pour des objets avec une forme cylindrique, il convient de définir d'autres relations.

D'autres modèles ont été créés utilisant la sphéricité, comme celui de Ganser (1993) qui définit une formulation utilisant deux paramètres K_1, K_2 , eux-même fonction de la sphéricité :

$$C_D = \frac{24}{ReK_1K_2} (1 + 0,1118(ReK_1K_2)^{0,65657}) + \frac{0,4305}{1 + \frac{3305}{ReK_1K_2}} \quad (2.11)$$

Un autre facteur de forme mis en évidence par Bowen et Masliyah (1973) est :

$$\Sigma = \frac{A}{A_p} \quad (2.12)$$

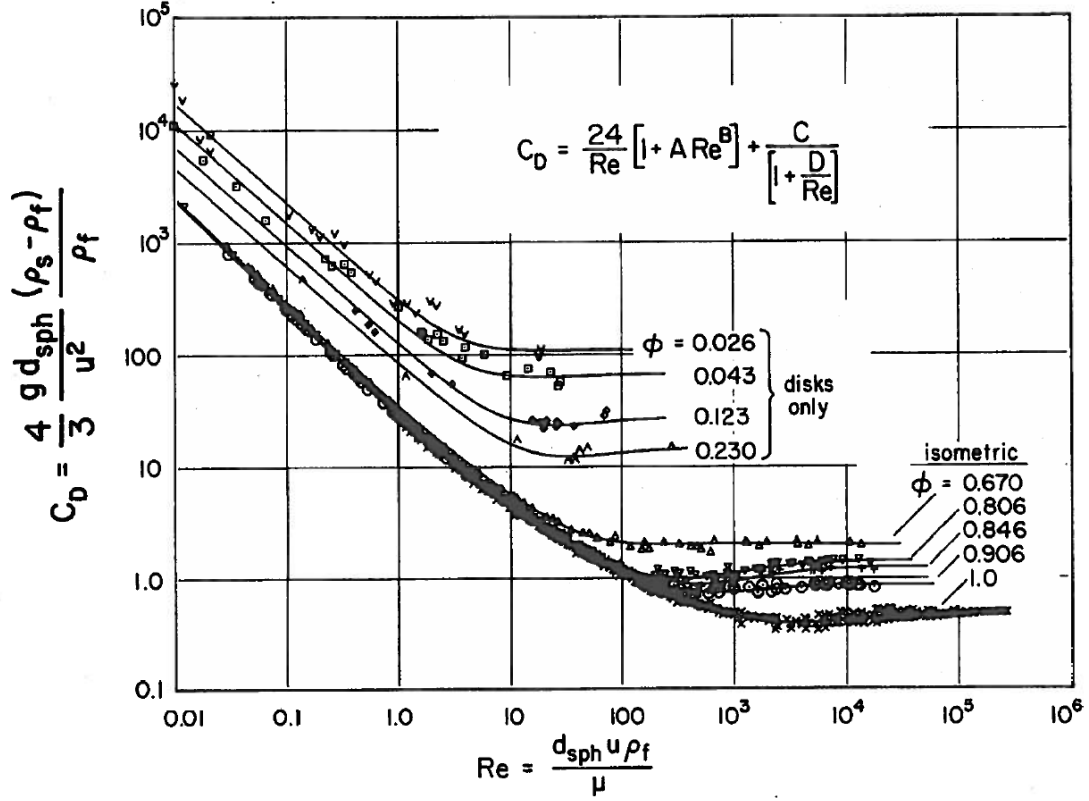


Figure 2.7 Modèle de coefficient de traînée d'après Haider et Levenspiel (1989)

avec A la surface externe de l'objet et A_p la surface projetée de l'objet.

Roshko (1993) s'intéresse particulièrement à la traînée de pression et spécialement à l'impact du sillage sur cette force. Il montre que les dimensions du sillage en aval de l'objet influent de manière conséquente la force de traînée. En effet en partant de l'équation initialement proposé par Sychev (1982), traitant de l'équilibre des forces agissant dans la zone délimitée par la ligne de courant zéro :

$$p_b H_s + \int_0^{x_r} \tau^* dx = \int_0^{H_s} p^* dy \quad (2.13)$$

avec p_b la pression sur l'objet, x_r le point de rattachement, H_s la demi-hauteur de la bulle en aval de l'objet, p^* et τ^* respectivement la pression et la force de cisaillement sur la ligne de courant zéro tels qu'illustrés sur la figure 2.8. En posant $C_p = \frac{p - p_b}{0.5 \rho U_\infty^2}$ et $C_\tau = \frac{\tau}{0.5 \rho U_\infty^2}$, on obtient la relation :

$$\frac{L_s}{H_s} = \frac{1}{2} \frac{k \tilde{C}_{pr}}{\langle C_\tau^* \rangle} \quad (2.14)$$

avec L_s la longueur de la zone morte en aval de l'objet, \tilde{C}_{pr} le coefficient de pression au point de rattachement $\langle C_\tau^* \rangle$ la moyenne sur L du coefficient de cisaillement :

$$\langle C_\tau^* \rangle = \frac{1}{L_s} \int_0^{x_r} C_\tau^* dx \quad (2.15)$$

et k telle que :

$$\int_0^{H_s} \tilde{C}_p^* dy = k H \tilde{C}_{pr} \quad (2.16)$$

Par la relation 2.14, Roshko (1993) met en évidence un lien entre la géométrie du sillage et les coefficients de forces s'appliquant sur celui-ci. Les dimensions du sillage sont contrôlés par l'équilibre entre les forces de pression et les forces de cisaillement. Le fait que cette relation soit universelle soutient l'idée qu'il est possible de trouver une corrélation unique pour décrire le coefficient de traînée d'objets totalement différents. La figure 2.9 montre la distribution du coefficient de pression en aval de différents objets. Il montre que pour différents objets, les profils de pression se superposent très bien, à l'exception de ceux pour lesquels les objets sont très longs dans la direction de l'écoulement.

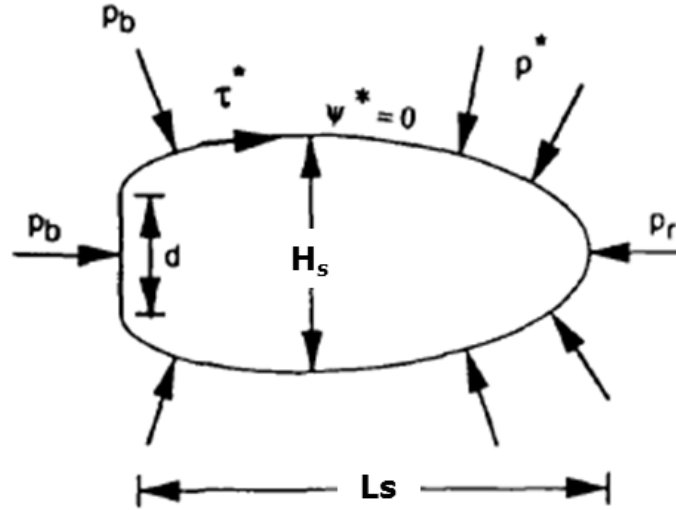
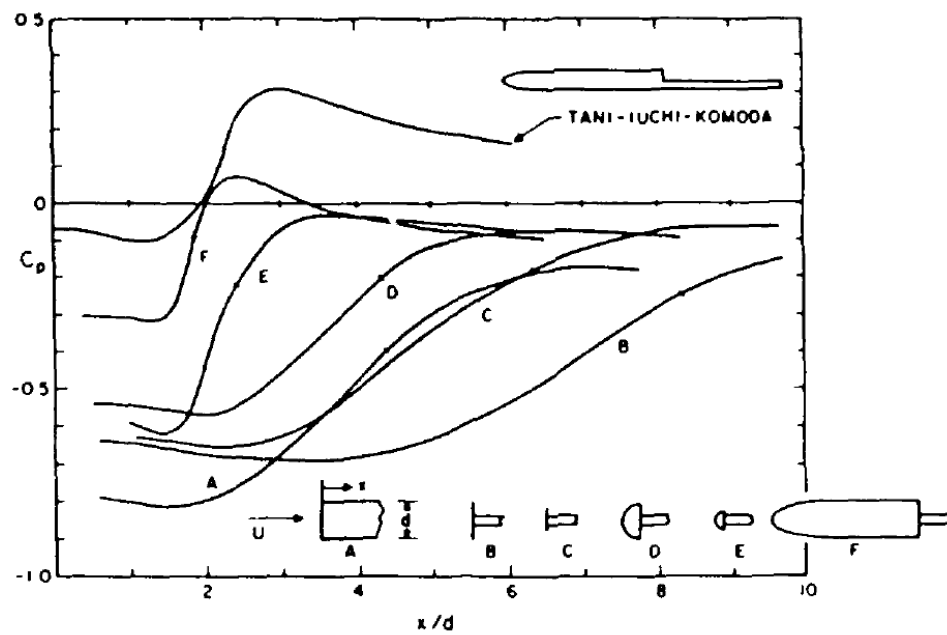


Figure 2.8 Visualisations de la zone de recirculation derrière un objet d'après Roshko (1993)

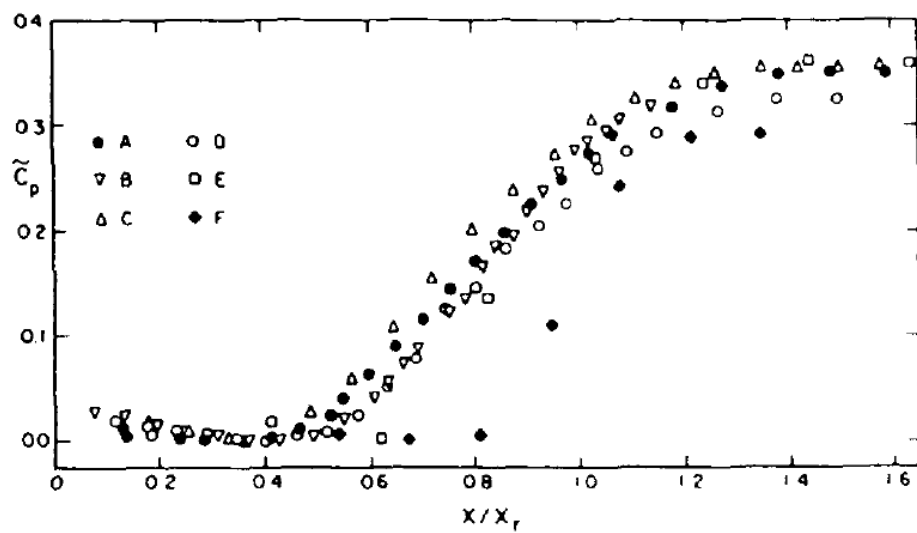
McCleskey (1988) cherche à prévoir la portée de débris dus à une explosion. Pour cela il a testé une centaine d'objets. Une géométrie équivalente a été calculée pour pallier le fait que les débris avaient une géométrie complexe et partiellement inconnue (la surface externe, les différentes surfaces projetées... sont inconnus). Celle-ci est calculée en mesurant deux longueurs de l'objet et son volume. Il est alors possible de calculer la surface projetée

moyenne de l'objet (appelée A_{Avg}) et de calculer son C_D . Après avoir testé plusieurs facteurs de forme, il est arrivé à la conclusion que le paramètre le plus pertinent était $\frac{A_{Max}}{A_{Avg}}$ avec A_{Max} la surface projetée maximale de l'objet. En traçant l'évolution du coefficient de traînée en fonction de ce paramètre, il obtient une tendance croissante qui est cependant entachée d'une dispersion, comme le montre la figure 2.10. Le principal avantage de ce modèle est qu'il ne nécessite pas de connaître parfaitement la géométrie des objets. Cependant il est beaucoup moins précis que ceux vus précédemment.

Enfin plus récemment, Saber-Cherif et Mureithi (2015) a commencé à tester des objets pour essayer de trouver une corrélation pour des objets 3D. Il a utilisé la même méthode de mesure que McCleskey (1988) mais a mis en évidence un autre paramètre qui est $\psi \frac{A_{Max}}{A_{Avg}}$ avec $\psi = \frac{\phi}{C}$. C est défini par Waddell (1933) comme la circularité et se définit par $C = \frac{P_{mp}}{P_p}$, P_{mp} étant le périmètre d'une sphère de même surface projetée que l'objet et P_p le périmètre projeté de l'objet. A cause de l'instabilité des objets et donc de la difficulté à déterminer précisément la vitesse à laquelle il y a équilibre entre la force de traînée et le poids de l'objet, Saber-Cherif et Mureithi (2015) calcule la vitesse moyenne entre la vitesse à laquelle l'objet commence à décoller et celle à laquelle l'objet est principalement à l'entrée du diffuseur de sortie de la soufflerie verticale. C'est pour cela qu'il est possible de voir des barres d'erreurs sur la figure 2.11. Celles-ci ne représentent pas vraiment une erreur de mesure, mais la plage de vitesses dans laquelle l'objet (suivant son orientation) est en équilibre avec la force. Cependant, il utilise encore une fois la sphéricité qui n'est pas toujours facile à obtenir. Nous allons donc dans une partie de notre travail continuer cette étude en reprenant ces résultats et en testant davantage d'objets en essayant d'obtenir une nouvelle relation n'utilisant pas ϕ .



(a)



(b)

Figure 2.9 Distribution du coefficient de pression en aval de l'objet d'après Roshko et Lau (1965) avec les coordonnées adimensionnalisées par le diamètre (a), et les coordonnées adimensionnalisées par la distance de rattachement (b).

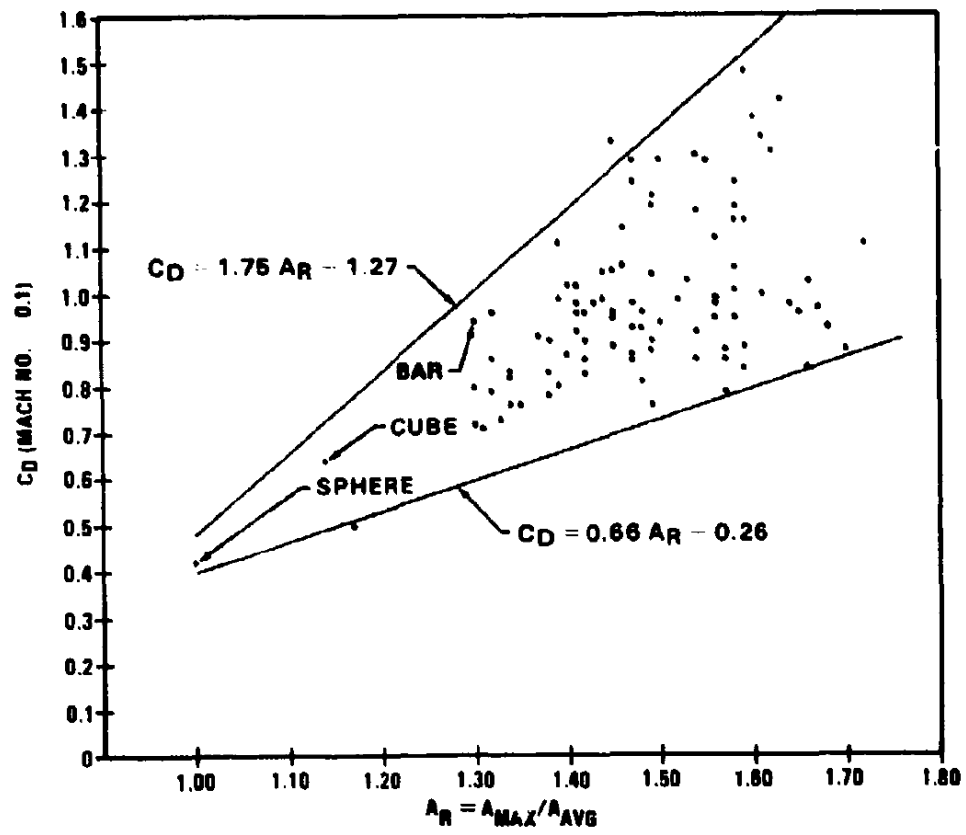


Figure 2.10 Modèle de coefficient de traînée de McCleskey (1988)

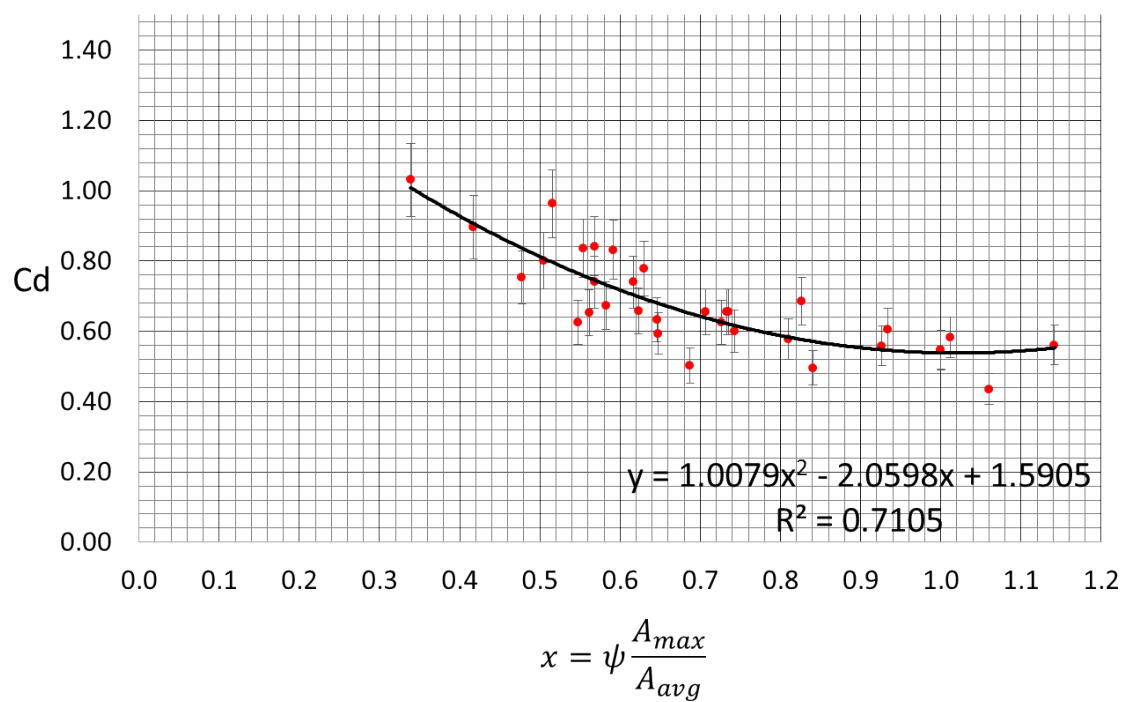


Figure 2.11 Résultats expérimentaux de Saber-Cherif et Mureithi (2015)

2.2 Organisation de l'étude et objectifs spécifiques

Compte tenu du contexte industriel dans lequel se place notre étude et des travaux déjà réalisés, nous allons nous concentrer sur trois différents modèles qui seront liés à trois types de géométrie :

1. Les objets vrillés
2. Les objets allongés
3. Les objets non sphériques libres de bouger dans la soufflerie.

Comme expliqué au chapitre 1, ces trois catégories regroupent la grande majorité des objets qui ont pu être observés dans les générateurs de vapeur. Pour chacun de ces types de géométrie les objectifs spécifiques sont les suivants :

1. Identifier les paramètres géométriques propres à chaque type de géométrie.
2. Développer une corrélation utilisant les paramètres spécifiques pour chaque type de géométrie.

Concernant la dernière catégorie d'objets, nous cherchons une corrélation qui puisse s'appliquer pour des objets dont on ne dispose pas nécessairement de modèle numérique. Il faudra donc choisir des paramètres faciles à mesurer.

CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE

Pour cette étude ont été effectués à la fois des tests expérimentaux et des simulations numériques. L'avantage des premiers est l'absence d'erreurs dues à la discrétisation du domaine d'étude, à la modélisation des équations de Navier-Stokes... ainsi que la rapidité des expériences. En effet, le temps de calcul des simulations numériques ne nous permettrait pas de tester de nombreux objets. Cependant les simulations numériques ont pour avantage de donner beaucoup plus d'informations qu'une simple mesure de traînée. De plus, certaines sources d'erreurs qui peuvent exister lors d'expériences en soufflerie n'existent pas en simulation numérique (problèmes d'alignement, fiabilité des capteurs, propriétés physiques de l'écoulement...). C'est pourquoi les simulations numériques ont été faites en support des résultats numériques pour une partie de l'étude.

Dans cette partie seront présentés les différentes méthodes, protocoles expérimentaux et précautions qui ont été utilisés pour l'ensemble de la maîtrise. Cette étude consistant en l'établissement de corrélations de la traînée en fonction de la géométrie des objets, il a en premier lieu fallu définir les objets de l'étude, les dessiner et les fabriquer si besoin. La traînée a ensuite pu être mesurée.

3.1 Dessin et fabrication des différents objets

Tous les objets (réels et numériques) ont été dessinés sous CATIA. Ceux fabriqués l'ont été grâce à des imprimantes 3D.

3.1.1 Dessin des objets

Pour cette étude, des tests ont été effectués sur différentes géométries. Pour les dessiner, différentes méthodes ont été utilisées en fonction du type d'objet :

Les objets allongés

Les objets allongés sont des objets dont la longueur dans une des directions orthogonale au sens de l'écoulement est prépondérante par rapport aux deux autres. Ils ont tous été dessinés via le module *Generative Shape Design* de CATIA. Il a d'abord fallu dessiner le profil puis effectuer un balayage selon un segment pour obtenir notre objet. Tous les objets testés expérimentalement ont une longueur de 150 mm. Ceux utilisés dans les simulations numériques ont soit une largeur de 1 mm (longueur utilisée pour simuler un écoulement 2D),

soit une largeur de 150 mm. Tous les objets ont une hauteur de 1 cm afin d’avoir toujours la même valeur de la surface projetée divisée par la largeur de l’objet. Cela assure d’avoir le même nombre de Reynolds pour tous les objets avec la même vitesse en entrée.

Les objets quelconques

Il a fallu pour ce projet créer des géométries quelconques, c’est-à-dire des géométries n’ayant pas de forme particulière (cylindre, sphère, cube...), tout en essayant de décrire un panel de formes le plus varié possible. Pour cela, différents modules CATIA ont été utilisés. La fonction de surface multi section dans le module *Generative Shape Design* de CATIA permet de créer une géométrie à partir de différents profils et d’une courbe guide les reliant. La figure 3.1 montre la construction d’un tel objet.

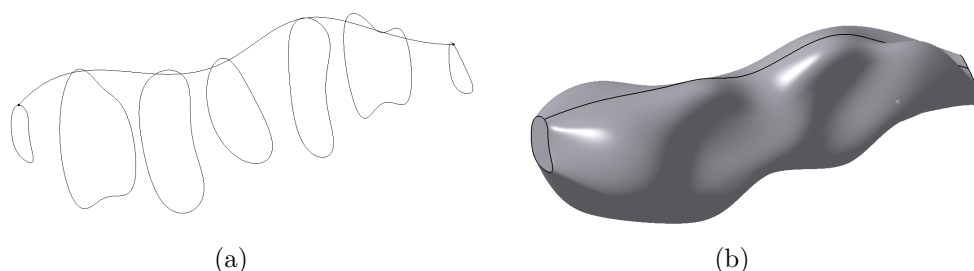


Figure 3.1 Construction d’un objet via la fonction Surface Multi Section

Cette méthode permet de construire de nombreux objets de formes très variées. Cependant, tous ces objets ont en commun qu’ils s’étirent autour d’une courbe (la courbe guide). Cette spécificité leur donne une direction préférentielle et empêche de créer des objets vraiment tri-dimensionnels. Pour essayer de balayer la plus grande variété d’objets possible, il faut utiliser d’autres méthodes de dessin. Le module *Imagine and Shape* permet de créer des géométries à base de cubes, cylindres, sphères et de les déformer, soit en extrudant d’autres formes à partir des différentes faces, soit en modifiant les points de contrôle des géométries. Cela permet de créer des formes de façon totalement arbitraire, sans courbe guide donnant une orientation préférentielle à l’objet. La figure 3.2 montre différentes étapes de fabrication de ces objets.

En combinant les différentes options de ce module, il est possible de créer une quantité d’objets très variés, à géométrie plutôt plate, plutôt circulaire... ou totalement quelconque.

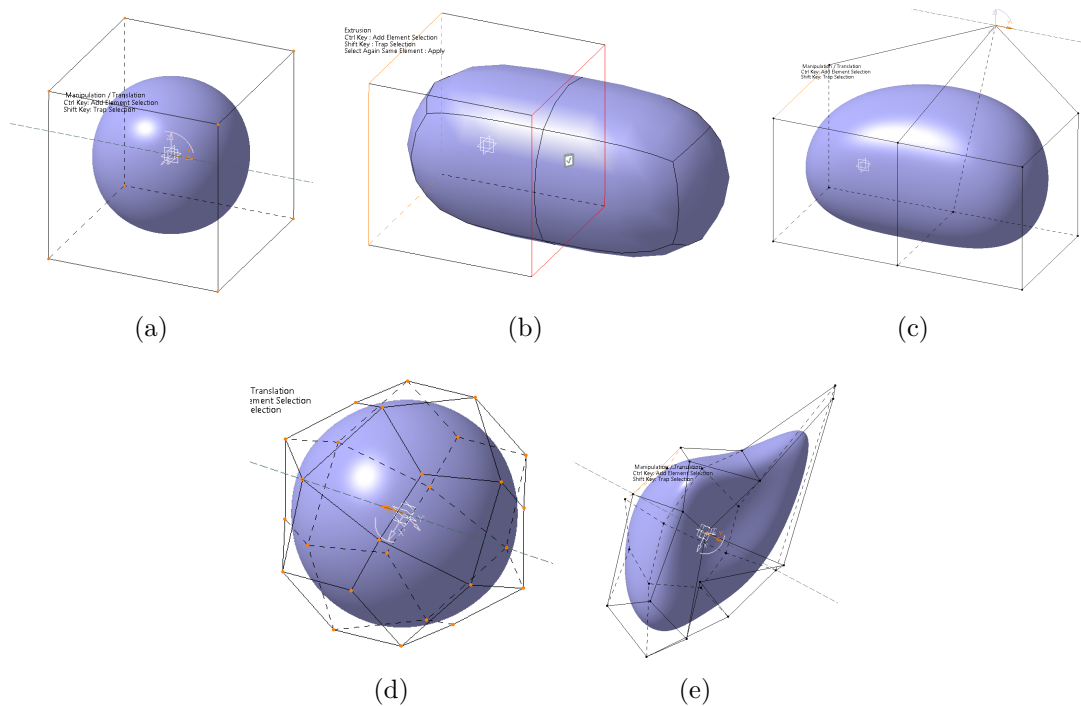


Figure 3.2 Construction d'un objet via *Imagine and shape*. Choix de la géométrie de base (a), extrusion à partir des faces (b), modification des points de contrôles (c). On peut aussi choisir plus de points de contrôle dès le choix de la géométrie de base (d), et après modification (e)

3.1.2 Fabrication des objets

Les objets ont été fabriqués grâce à une impression 3D. L'imprimante utilisée est la *Ultimaker Original*. C'est une imprimante qui fonctionne par dépôts successifs de couches de plastique. L'épaisseur minimale de celles-ci est de 0.1 mm. La vitesse d'impression est entre 5 mm/s et 8 mm/s. La figure 3.3 montre une photographie de l'imprimante utilisée. Afin de gagner du temps, certains objets ont été imprimés par une compagnie extérieure.

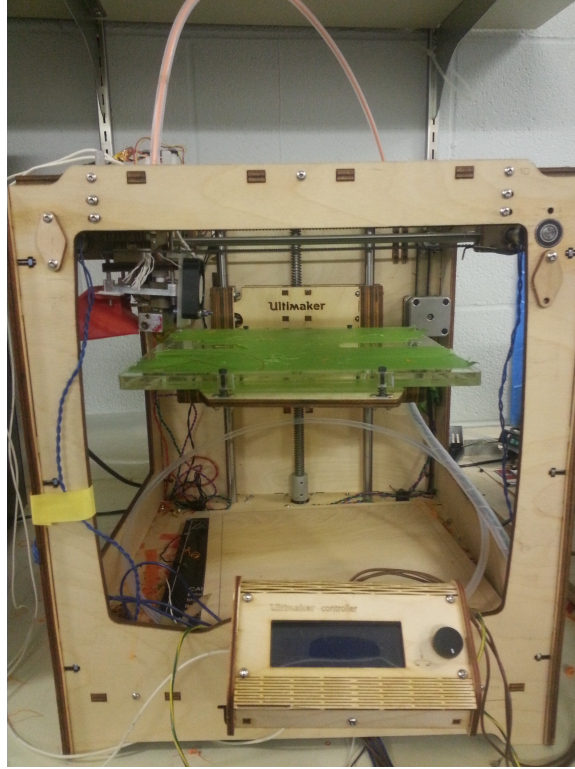


Figure 3.3 Photographie de l'imprimante *Ultimaker Original*

3.1.3 Mesure et modélisation des objets pour la soufflerie verticale

Comme précisé dans les objectifs spécifiques, nous allons essayer d'établir une corrélation sans utiliser de paramètres nécessitant une connaissance parfaite de l'objet (uniquement pour les objets libres de se déplacer). Cependant le calcul d'un coefficient de traînée demande la connaissance d'une surface caractéristique. Pour être capable de la calculer, l'objet réel a été transformé en un parallélépipède de longueur L , de largeur W et d'épaisseur T en utilisant la même méthode que McCleskey (1988). A l'aide d'un pied à coulisse, ont été mesurés la longueur maximale de l'objet que l'on appelle L_{Max} , puis la largeur maximale W_{Max} selon une direction perpendiculaire à la première. A été posé ensuite $L = 0,9L_{Max}$ et $W = 0,9W_{Max}$. Enfin, l'épaisseur a été calculée afin de conserver le même volume que l'objet réel par la formule $T = \frac{V}{LW}$ avec V le volume de l'objet. Celui-ci peut être soit mesuré directement (par immersion dans un fluide par exemple) soit par mesure de la masse si le matériau est connu. Enfin s'il n'est pas possible d'avoir une mesure directe ou indirecte du volume, il est possible de l'estimer en mesurant directement l'épaisseur de l'objet. Cependant pour tous les résultats qui seront présentés, la véritable valeur du volume, mesurée directement sur le logiciel de dessin, a été utilisée.

Il est alors possible de calculer toutes les grandeurs souhaitées.

3.2 Simulations numériques

Pour certains objets particuliers, les résultats expérimentaux ont été comparés aux résultats obtenus par simulations numériques. Pour ces simulations, le mailleur ICEM et le logiciel de simulation ANSYS-CFX ont été utilisés.

3.2.1 Le maillage

Pour modéliser un objet dans un écoulement libre, la section numérique aura une longueur de 500 mm (200 mm en amont et 300 mm en aval de l'objet), une largeur de 450 mm et une épaisseur de 150 mm. Pour des objets simulés de maximum 10 mm de diamètre et 150 mm de largeur, cela permet d'avoir un ratio de 20 diamètres en amont, 30 en aval, d'une largeur d'objet de part et d'autre de l'objet et de 7 diamètres au dessus et au dessous de l'objet. La figure 3.4 montre une vue d'ensemble de la section numérique qui a été utilisée pour les simulations.

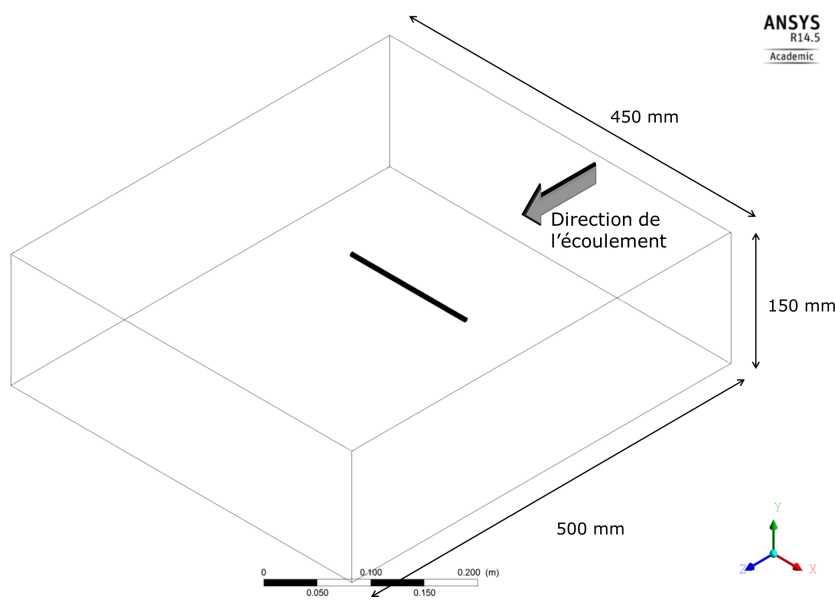


Figure 3.4 Vue isométrique de la section d'essai numérique

A cause de la complexité géométrique de certains objets, un maillage non structuré pour la partie proche de l'objet a été utilisé, tandis qu'un maillage structuré est utilisé pour le reste du domaine d'étude. Cependant, dans un premier temps, afin d'avoir un élément de référence, les simulations numériques ont été effectuées sur un cylindre à section circulaire.

Avec cette géométrie, il est facile d'utiliser un maillage structuré pour l'ensemble du domaine. Une analyse de convergence a ainsi pu être faite en contrôlant parfaitement la géométrie du maillage, dont on peut voir les résultats sur la figure 3.5. Un maillage non structuré a ensuite été appliqué à cette géométrie et a été raffiné pour atteindre un résultat proche du résultat du maillage structuré. Le domaine d'étude a donc été divisé en deux : un cylindre de 15 mm de diamètre contenant l'objet et dans lequel le maillage est non structuré, et le reste de la section d'essai avec un maillage structuré. Une fonction de couches concentriques a été utilisée autour de l'objet pour contrôler au maximum la géométrie du maillage.

Celui-ci a ensuite été appliqué aux torons vrillés. Enfin, une dernière étude de convergence sur ce maillage a été effectuée sur le toron vrillé avec un seul tour.

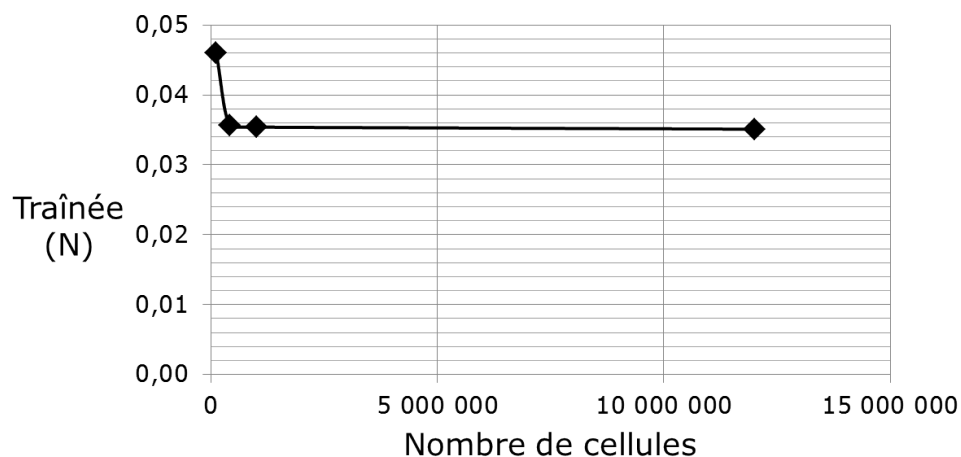


Figure 3.5 Etude de convergence de maillage pour un cylindre

3.2.2 Simulation des objets hélicoïdaux

Pour cette étude, le fluide utilisé est de l'air à 25 degrés Celsius avec une vitesse en entrée de 10 m/s, les autres conditions limites étant une pression relative nulle en sortie, des murs sur les parties supérieures et inférieures de la section d'essai et des condition de symétrie sur les bords. Les simulations ont été réalisées en régime stationnaire et en régime instationnaire.

Pour le régime stationnaire, le modèle de turbulence SST $\gamma - \theta$ a été utilisé. Le critère de convergence utilisé était d'obtenir un résidu inférieur à 10^{-7} .

Le modèle Large Eddy Simulation (LES) a été utilisé pour le régime instationnaire. Trois boucles d'itérations à chaque pas de temps ont été appliquées, le pas de temps étant de

0,5 ms. De plus, pour le post-traitement, seules les dernières itérations temporelles ont été enregistrées pour éviter de biaiser les résultats par des phénomènes transitoires.

3.2.3 Analyse POD

L'analyse POD nous donne une décomposition spatio-temporelle de l'écoulement auquel on a enlevé le champ moyen en chaque endroit. Pour cela on calcule d'abord le champ de vitesses turbulent donné par l'équation 3.1,

$$\mathbf{u}_i(\mathbf{x}, t) = \sum \Psi_k(t) \Phi_{ik}(\mathbf{x}) \quad (3.1)$$

avec Ψ_k et Φ_{ik} qui représentent respectivement les composantes temporelles et spatiales des modes de l'écoulement. Les modes temporels Ψ_k sont les vecteurs propres du tenseur de corrélation $C(t, t')$.

$$\begin{aligned} \int_T C(t, t') \Psi(t') dt' &= \lambda_k \Psi_k(t) \\ C(t, t') &= \frac{1}{T} \int_V \tilde{\mathbf{u}}_i(\mathbf{x}, t) \tilde{\mathbf{u}}_i(\mathbf{x}, t') d^3\mathbf{x} \end{aligned} \quad (3.2)$$

Les modes spatiaux Φ_{ik} sont calculés en projetant le champ de vitesses sur le mode temporel (eq 3.3 et 3.2).

$$\Phi_{ik}(\mathbf{x}) = \frac{1}{T \lambda_k} \int_T \Psi_k(t) \tilde{\mathbf{u}}_i(\mathbf{x}, t) dt \quad (3.3)$$

La valeur propre λ_k est représentative du niveau d'énergie associé au mode k . Ainsi l'énergie relative de chaque mode est donnée par l'équation 3.4

$$\lambda_{rk} = \frac{\lambda_k}{\sum_{k=1}^{\infty} \lambda_k} \quad (3.4)$$

Pour les analyses, entre 150 et 400 fichiers ont été extraits à différents instants pour calculer les décompositions POD.

3.3 Tests expérimentaux

Deux souffleries ont été utilisées pour les tests expérimentaux : une soufflerie classique à circuit fermé, et une soufflerie verticale. Pour la première, la mesure de la traînée a été faite par le biais d'un capteur Futek LSB200. Avant de l'utiliser, il a fallu calibrer le capteur pour

connaître le rapport de proportionnalité entre le signal mesuré et la force.

3.3.1 Calibration du capteur

Pour calibrer le capteur, différentes masses pré-calibrées ont été utilisées. Le signal de sortie du capteur a été tracé en fonction de ces masses. Pour chaque masse, la moyenne sur 10 secondes de mesure à 1000 Hz de la valeur a été calculée, soit 10 000 points de mesure. Le coefficient directeur de la droite ainsi obtenue donne le facteur de proportionnalité. La figure 3.6 montre cette courbe.

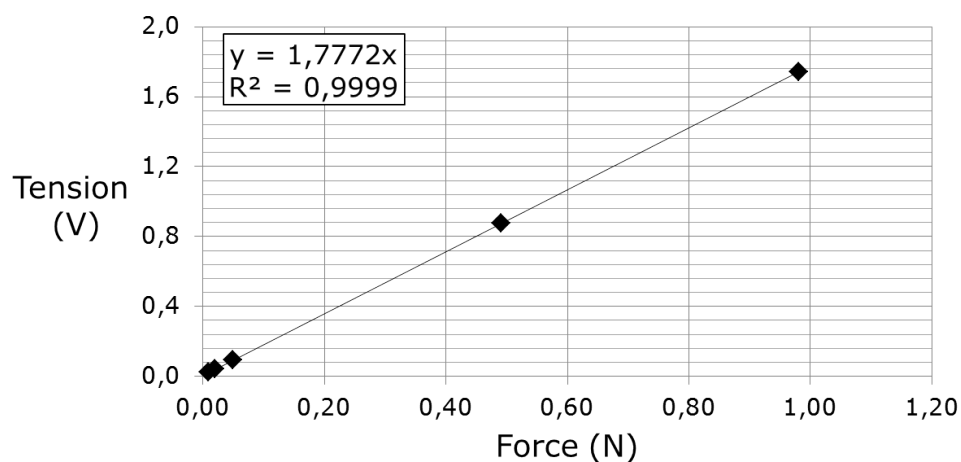


Figure 3.6 Courbe de calibration du capteur Futek

3.3.2 Mesure de la force de traînée

Les méthodes de mesure de la force de traînée sont différentes pour la soufflerie horizontale et pour la soufflerie verticale et sont détaillées ci-dessous.

Soufflerie horizontale

La soufflerie dans laquelle nous avons effectué nos mesures est une soufflerie à circuit fermé. La vitesse est réglable entre 0 m/s et 91 m/s par pas de 0,03 m/s. Le niveau de turbulence à vide est inférieur à 0.25%. La température est contrôlée à l'intérieur avec une stabilité à $\pm 1^\circ\text{C}$. La figure 3.7 montre une photo de celle-ci. Dans cette soufflerie, l'objet est directement relié au capteur par une tige métallique. Cet ensemble est relié à la paroi de la soufflerie. Le signal du capteur est alors envoyé pour être enregistré et traité par la suite. La figure 3.8 montre le positionnement du système dans la soufflerie. La vitesse de l'écoulement dans la

soufflerie est connue grâce à une table de conversion fréquence du moteur/vitesse précise. Un tube pitot permet de confirmer les valeurs données par cette table.



Figure 3.7 Vue de la soufflerie horizontale

Chaque mesure de traînée a été réalisée par trois enregistrements différents de 20 secondes minimum. De plus, la soufflerie ayant un capteur de température, la température a été maintenue constante pour l'ensemble de nos expériences.

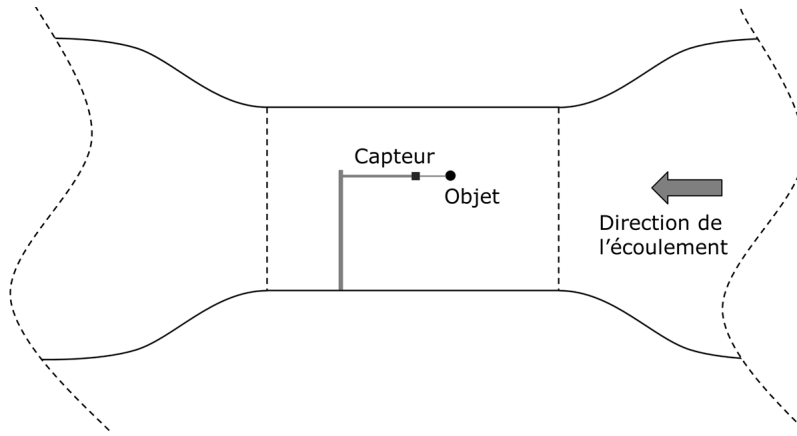


Figure 3.8 Schéma représentant le montage dans la soufflerie horizontale

Soufflerie verticale

Pour cette étude, il est nécessaire de tester de nombreux objets rapidement. Pour cela il est intéressant d'utiliser un système de mesure très simple, qui permet de tester un objet dans des délais très brefs. De plus ce système permet de mesurer le coefficient de traînée d'objets libres de se déplacer au sein de la section d'essai. Pour son étude sur la portée des fragments, McCleskey (1988) utilise une soufflerie verticale pour tester ses objets. Le principe de mesure repose sur l'équilibre entre la force due à la masse de l'objet et la force de traînée, comme le montre la figure 3.9. L'équation 3.5 donne la relation exacte entre le poids F_p , et le coefficient de traînée de l'objet :

$$C_d = \frac{2F_p}{\rho A_p V^2} \quad (3.5)$$

et ainsi, aucun capteur n'est nécessaire pour mesurer la force de traînée. Il suffit de poser l'objet sur une grille et d'augmenter la vitesse jusqu'à ce que l'objet commence à se soulever. Les figures 3.10 et 3.11 montrent respectivement une vue globale de la soufflerie verticale et un agrandissement sur la section d'essai. La vitesse est contrôlée via la fréquence de rotation du moteur. La plage de vitesse dans la section d'essai est $[0..12,5]$ m/s. La figure 3.12 montre les différents profils de vitesse mesurés grâce à une sonde pitot. Cependant, bien que le principe de mesure soit simple, il est difficile de repérer le moment exact du décollage de l'objet. En effet, celui-ci a tendance à avoir un mouvement vertical chaotique sur une certaine plage de vitesse. Cela est dû au fait que suivant l'orientation de l'objet, la force de traînée change, tous les autres paramètres restant inchangés. Définir une valeur exacte de la traînée n'a dans ce cas pas de réel sens physique, à moins de la définir comme une moyenne sur la plage de vitesse bornée par les deux vitesses suivante comme le préconise Saber-Cherif

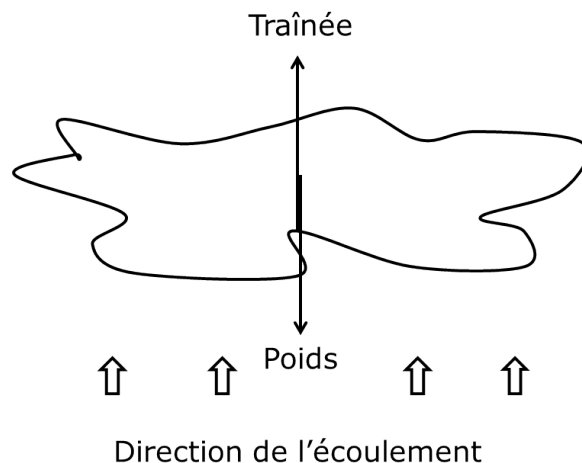


Figure 3.9 Schéma représentant le principe de mesure de la soufflerie verticale

et Mureithi (2015) :

- La vitesse pour laquelle l'objet commence à décoller de la grille.
- La vitesse pour laquelle l'objet est principalement situé au niveau du début du diffuseur de sortie

Du fait de cette plage de vitesse, le résultat ne sera pas un coefficient de traînée exact mais un intervalle dans lequel est compris ce coefficient. Cet intervalle n'est pas à proprement parler une erreur de mesure mais la zone dans laquelle, suivant son orientation l'objet est en équilibre dans l'écoulement. Prendre la moyenne des deux extrémités de cet intervalle revient donc à calculer une force de traînée moyenne.



Figure 3.10 Vue globale de la soufflerie verticale



Figure 3.11 Vue agrandie de la section de la soufflerie verticale

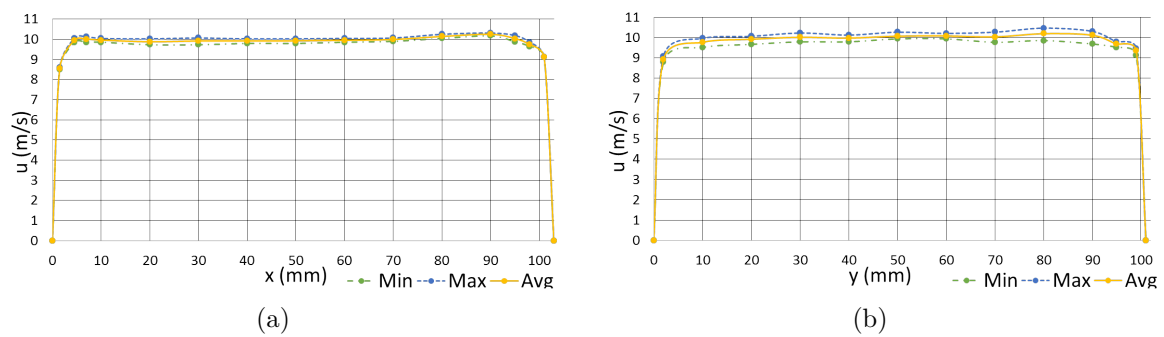


Figure 3.12 Profil de vitesse de la soufflerie verticale au centre de la section dans les deux directions établies par Saber-Cherif et Mureithi (2015)

3.4 Mesure de PIV

Afin de visualiser l'écoulement de nos expériences, des mesures PIV ont été réalisées dans la soufflerie horizontale. Le principe de cette analyse est d'envoyer des particules suffisamment fines et légères dans l'écoulement (afin de ne pas perturber celui-ci). Un laser éclaire selon un plan une partie de notre section d'essai. Les particules réfléchissent cette lumière vers un appareil photo. Ce dernier est synchronisé avec le laser qui est capable d'émettre deux impulsions lumineuses à deux instants très proches. Par la suite, une comparaison des deux images permet de tracer les vecteurs vitesses sur les images. La figure 3.13 explique le fonctionnement de cette analyse.

Pour cette étude, les particules utilisées étaient des particules d'huile d'olive d'environ 1 micron de diamètre. Le temps entre deux impulsions était réglé à $dt = 100 \mu s$. Nous utiliserons un filtre de couleur sur l'appareil photo afin de ne capter que la longueur d'onde du laser.

Afin que la lumière puisse passer à travers l'objet, il est important de faire un objet transparent. Il a aussi été décidé de le faire creux, afin de minimiser la réfraction des rayons lumineux. Pour minimiser davantage les réflexions et les lumières parasites, des caches en papier cartonné noir ont été disposés dans différentes parties de la section. Enfin, une attention particulière a été accordée à la coïncidence et au parallélisme entre le plan laser et le plan focal de l'appareil photo afin d'avoir des images de qualité.

Avant d'effectuer des mesures, il est important de calibrer l'échelle de la PIV. Pour cela, un objet de dimensions connus (un réglet) a été placé dans le plan laser et reporté sur les images de traitement. Ainsi le logiciel était capable de convertir les distances non calibrées en distances réelles, et donc de déterminer les vitesses réelles dans l'écoulement.

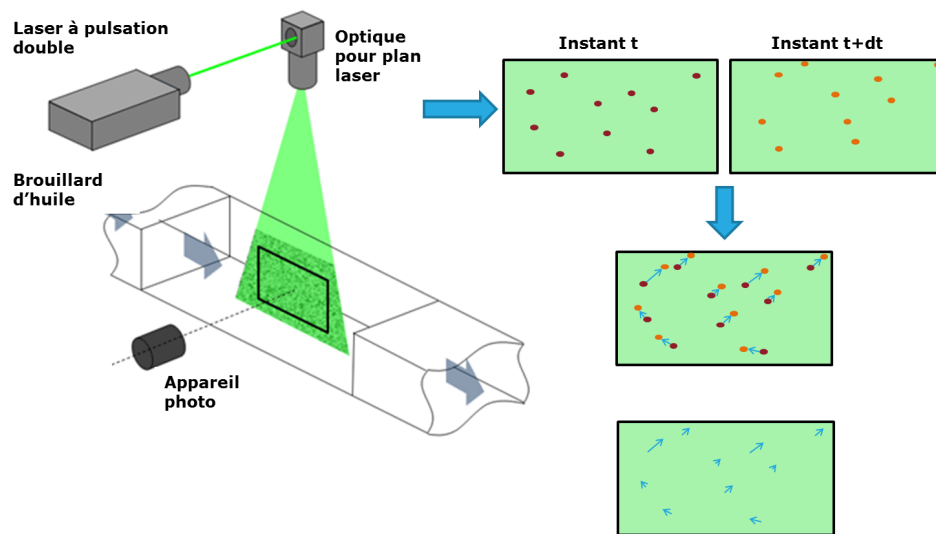


Figure 3.13 Schéma de fonctionnement du système de PIV d'après Seika (2014)

CHAPITRE 4 ÉCOULEMENTS AUTOUR DES OBJETS HELICOÏDAUX ET COEFFICIENTS DE TRAÎNÉE

Dans un premier temps l'étude s'est intéressée à des objets à géométrie hélicoïdale. Le but de cette partie est de comprendre les impacts de l'hélicité d'un objet sur son coefficient de traînée. Cette étude, s'est spécialement intéressée à deux géométries particulières : Le toron à deux brins et la plaque. Elle a aussi étudié le cylindre comme objet de référence. Pour obtenir les forces de traînée, il a fallu effectuer des simulations numériques (pour les torons) ainsi que procéder à des tests expérimentaux. Les expériences ont été faites dans la soufflerie à section carrée de 61 cm de côté. De plus, afin de confronter les visualisations numériques aux observations expérimentales, un dispositif de PIV a été mis en place.

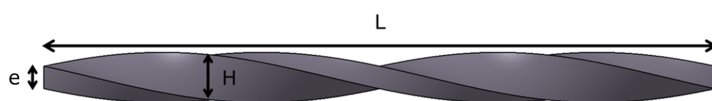


Figure 4.1 Exemple d'une plaque vrillée



Figure 4.2 Exemple d'un toron vrillé

4.1 Définition et propriétés des géométries des objets vrillés

La première étape de l'analyse est de réussir à dessiner des objets dont la géométrie correspond réellement à celle d'objets qui auraient été mécaniquement vrillés. Cela a été réalisé grâce au logiciel de dessin CATIA et particulièrement au module *Generative Shape Design* et à la fonction *balayage*. Chacun des objets a un nombre de tours entier afin de conserver une surface projetée constante par rotation de l'objet autour de son axe principal.

4.1.1 Le toron à deux brins

Dans ce cas la forme recherchée est celle d'un câble à deux brins qui s'enroulent l'un autour de l'autre. Pour dessiner ces géométries spécifiques, un profil de deux cercles tangents

a dans un premier temps été dessiné, auquel un balayage avec une rotation linéaire du profil a été appliqué. Le problème est que, du fait du contact linéaire entre les deux parties de l'objet, ICEM (le logiciel de maillage utilisé pour les simulations numériques) n'arrivait pas à mailler correctement le domaine. Par la suite les deux cercles ont été rapprochés de manière à supprimer ce problème comme le montre la figure 4.3. La figure 4.4 montre la géométrie d'un toron avec différents nombres de tour de vrille.

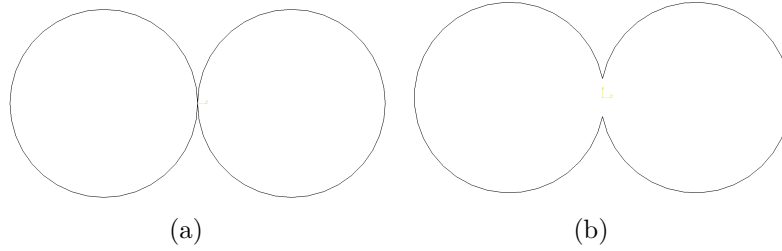


Figure 4.3 Profil du toron avec contact ponctuel (a) et après modification pour permettre le maillage (b)

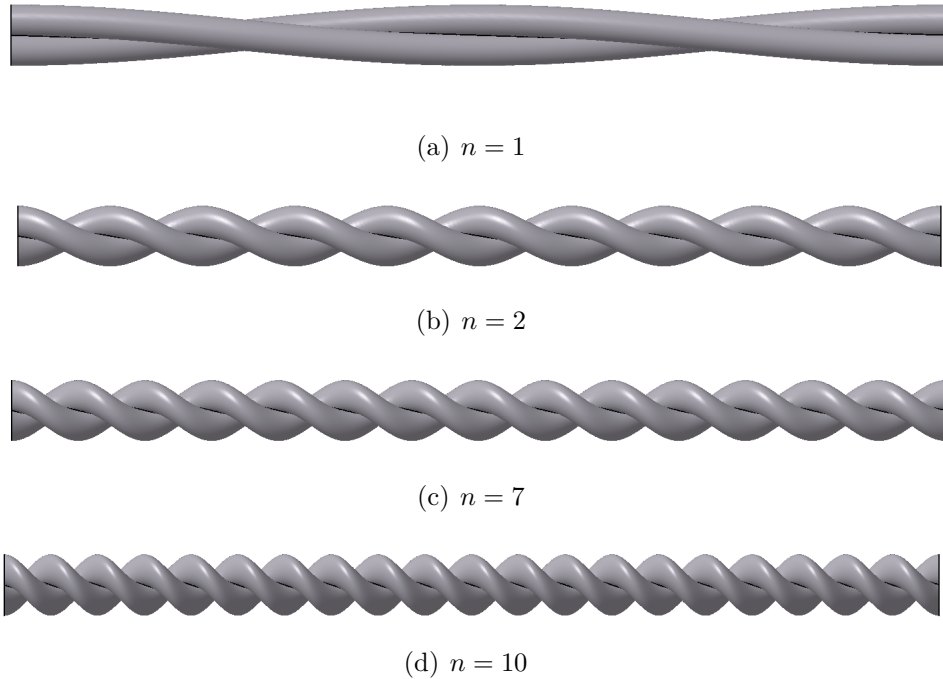


Figure 4.4 Exemple de la géométrie initiale pour le toron à 1 tour (a), 2 tours (b), 7 tours (c) et 10 tours (d)

Des simulations ont été faites pour ce type de géométrie avec un nombre de tours de vrille variant de 1 à 10 et un nombre de Reynolds d'environ $R_e = 5300$. Pour rappel, le

maillage utilisé est composé d'un maillage non structuré proche de l'objet, auquel on applique un raffinement concentrique autour de l'objet et d'un maillage structuré pour le reste de la section qui rejoint la partie non structurée par un maillage concentriques avec un taux de croissance de 1,1. La figure 4.5 montre une vue de ce maillage.

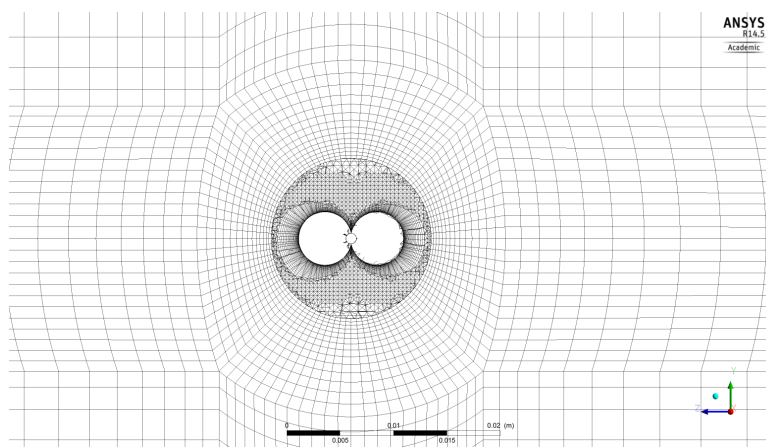


Figure 4.5 Agrandissement de la vue en coupe (plan YZ) du maillage pour le toron à un tour

Pour plus de renseignements, les méthodes de maillage sont précisées au chapitre de méthodologie, et certains renseignements spécifiques seront donnés par la suite.

Afin de pouvoir calculer le coefficient de traînée de ces objets, il est nécessaire de connaître la surface projetée de chacun de ces objets. Pour les torons, étant donné que les cylindres se cachent alternativement l'un derrière l'autre, et en première approximation, celle-ci sera considérée égale à 1,5 fois la surface projetée d'un cylindre de rayon d . Dans ce cas-là, la surface projetée reste constante pour tous les torons quel que soit leur nombre de tours de vrille. Basé sur une longueur caractéristique de $1,5d$, le nombre de Reynolds de notre simulation est d'environ 3200. La figure 4.6 montre les coefficients de traînée obtenus pour ces différents objets (tels que ceux représentés à la figure 4.4).

Cette courbe montre que le coefficient de traînée diminue lorsque le nombre de tours augmente trop. Or les résultats attendus était que le coefficient d'un objet très vrillé se rapproche de celui d'un cylindre, car lorsque le nombre de tours tend vers l'infini, la géométrie tend vers celle d'un cylindre de diamètre $2d$. Cependant, avec notre design, même pour le toron à 10 tours, la géométrie ne semble pas se rapprocher de celle d'un cylindre. Le problème visible sur la figure 4.4 est qu'avec l'augmentation du nombre de tours, l'objet devient de plus en plus "tranchant", ce qui n'est pas le cas pour un câble vrillé par exemple. Ce problème vient du fait que les deux cercles ne doivent pas être en permanence orientés dans la même direction, mais chacun doit être orthogonal à la spirale que décrit son centre. L'objet ainsi

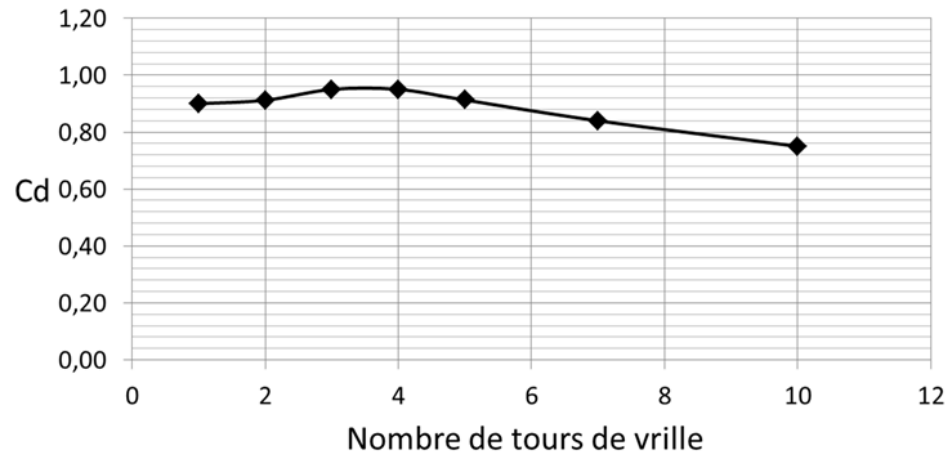


Figure 4.6 Courbe du coefficient de traînée pour le toron en fonction du nombre de tours de vrille

corrigé est montré en figure 4.7.

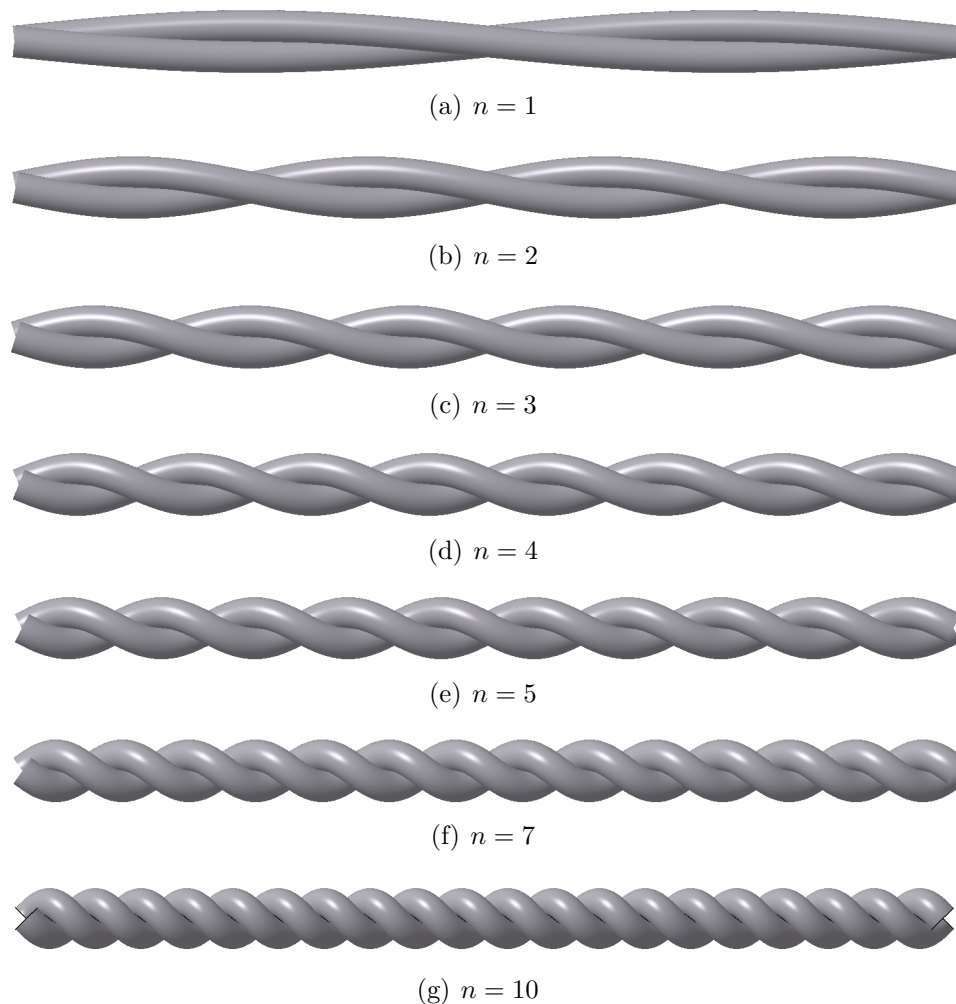


Figure 4.7 Exemple de la géométrie initiale pour le toron à 1 tour (a), 2 tours (b), 3 tours (c), 4 tours (d), 5 tours (e), 7 tours (f) et 10 tours (g)

Calcul de la surface projetée du toron

En modifiant cette géométrie il était important de savoir si notre hypothèse sur la surface projetée est valide. En effet, l'hypothèse était que la surface projetée des torons était égale à 1,5 fois celle d'un cylindre. Or afin de pouvoir calculer le coefficient de traînée, il est nécessaire de connaître la valeur exacte de la surface projetée. Pour cela, la surface va être séparée en deux parties :

1. S_1 : La partie de la surface située entre les deux lignes centrales des deux cylindres
2. S_2 : La partie de la surface située à l'extérieur des deux lignes centrales des deux cylindres

La figure 4.8 illustre cette séparation.

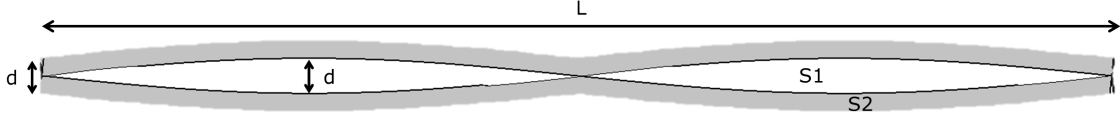


Figure 4.8 Schéma de la séparation des surfaces projetées sur le toron

La surface S_1 se calcul par l'intégrale d'une fonction sinus :

$$S_1 = \int_0^L d \left| \sin\left(\frac{2\pi n x}{L}\right) \right| dx \quad (4.1a)$$

$$S_1 = 2n \int_0^{\frac{L}{2n}} d \sin\left(\frac{2\pi n x}{L}\right) dx \quad (4.1b)$$

$$S_1 = 2n \left[d \frac{L}{2\pi n} \cos\left(\frac{2\pi n x}{L}\right) \right]_0^{\frac{L}{2n}} \quad (4.1c)$$

$$S_1 = \frac{2dL}{\pi} \quad (4.1d)$$

$$(4.1e)$$

La figure 4.9 montre une vue agrandie de S_2 avec \vec{t} le vecteur tangent en un point à S_2 . On a $\vec{t} = (1, f')$ avec $f = \frac{d}{2} \sin\left(\frac{2n\pi}{L}x\right)$. On a alors :

$$S_2 = 2nd \int_0^{\frac{L}{2n}} \frac{d}{\cos(\beta)} dx \quad (4.2)$$

avec :

$$\cos\beta = \frac{1}{\sqrt{1 + f'^2}} \quad (4.3)$$

Ce qui donne finalement la surface totale :

$$S = \frac{2dL}{\pi} + 2nd \int_0^{\frac{L}{2n}} \sqrt{1 + \left(\frac{d\pi n}{L} \cos\left(\frac{2n\pi}{L}x\right)\right)^2} dx \quad (4.4)$$

En réalité, la surface projetée dépend du nombre de tours. La figure 4.10 montre cette dépendance.

Nous allons maintenant définir comme longueur de référence le diamètre équivalent d_p qui sera calculé de la manière suivante :

$$d_p = \frac{A_p}{L} \quad (4.5)$$

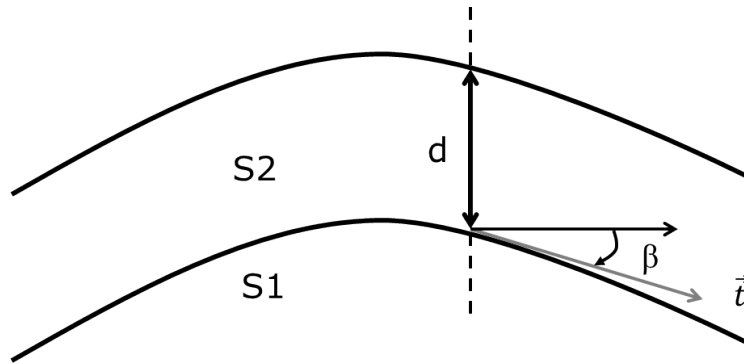


Figure 4.9 Décomposition en S_1 et S_2 du toron

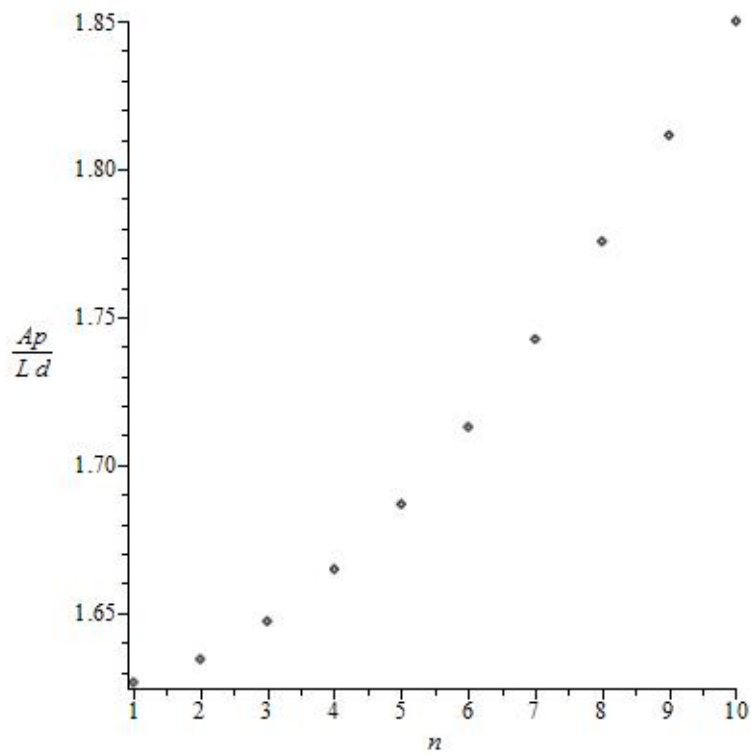


Figure 4.10 Variation de la surface projetée d'un toron (divisé par Ld en fonction du nombre de tours de vrille.

4.1.2 La plaque vrillée

La plaque vrillée a été faite simplement, par le balayage d'un profil rectangulaire auquel on ajoute un effet de rotation. La figure 4.11 montre les dessins numériques des différentes plaques, qui ont par la suite été imprimés en 3D puis testés en soufflerie.

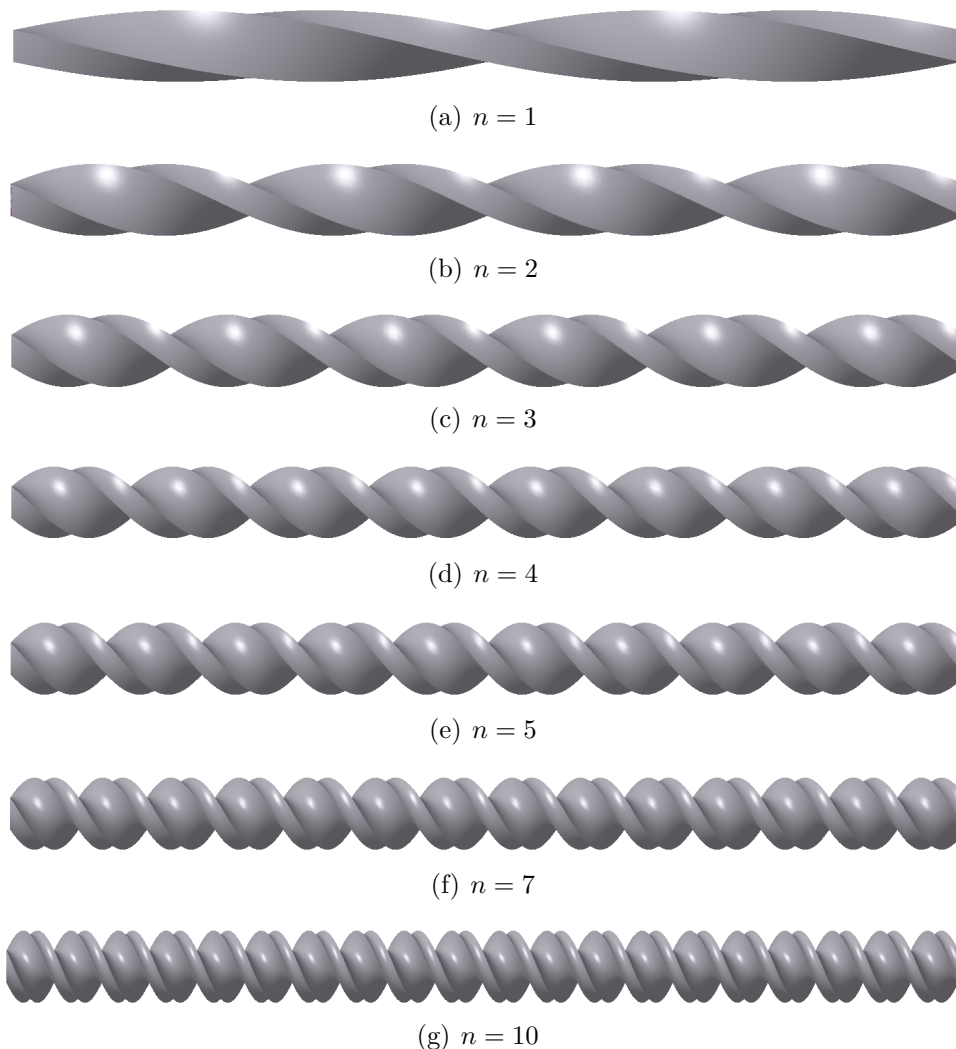


Figure 4.11 Exemple de la géométrie initiale pour la plaque vrillée à 1 tour (a), 2 tours (b), 3 tours(c), 4 tours (d), 5 tours (e), 7 tours (f) et 10 tours (g)

Calcul de la surface projetée de la plaque vrillée

Afin de pouvoir calculer le coefficient de traînée, la surface projetée de la plaque vrillée a été calculée. En effet, la surface d'une plaque vrillée peut se décomposer en deux, comme illustré figure 4.12. Le projeté de ces deux surfaces, lorsqu'on recolle les différents morceaux est représenté respectivement figure 4.13(a) et figure 4.13(b). Ces deux surfaces peuvent donc

être calculées par la formule suivante :

$$\begin{cases} S_1 = \int_0^L H |\cos(\theta)| d\theta \\ S_2 = \int_0^L e |\sin(\theta)| d\theta \\ \theta = \frac{2\pi nx}{L} \end{cases} \quad (4.6a)$$

Pour supprimer la valeur absolue, on peut intégrer sur $\frac{L}{4n}$:

$$\begin{cases} S_1 = 4n \int_0^{\frac{L}{4n}} H \cos(\theta) d\theta \\ S_2 = 4n \int_0^{\frac{L}{4n}} e \sin(\theta) d\theta \end{cases} \quad (4.6b)$$

En calculant les intégrales :

$$\begin{cases} S_1 = 4n \left[H \frac{L}{2\pi n} \sin\left(\frac{2\pi nx}{L}\right) \right]_0^{\frac{L}{4n}} \\ S_2 = 4n \left[-e \frac{L}{2\pi n} \cos\left(\frac{2\pi nx}{L}\right) \right]_0^{\frac{L}{4n}} \end{cases} \quad (4.6c)$$

Finalement :

$$\begin{cases} S_1 = \frac{2HL}{\pi} \\ S_2 = \frac{2eL}{\pi} \\ S = S_1 + S_2 \end{cases} \quad (4.6d)$$

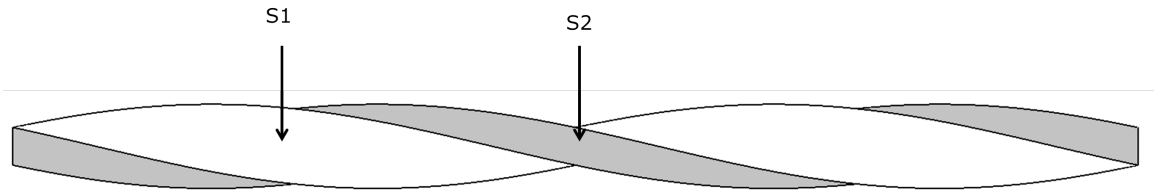


Figure 4.12 Décomposition en S_1 et S_2 d'une plaque vrillée

Il faut remarquer que la surface projetée est indépendante du nombre de tours n :

$$A_p = 2\frac{L}{\pi}(e + H).$$

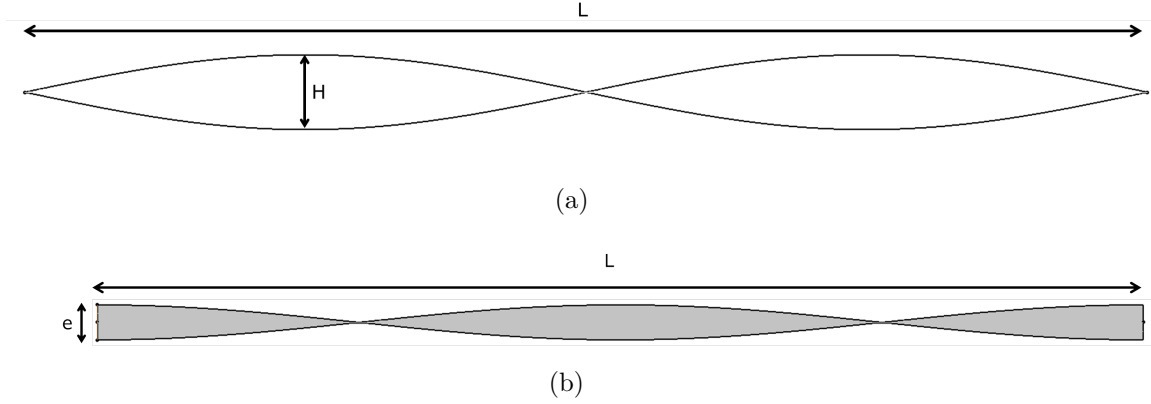


Figure 4.13 Projection des surfaces S_1 et S_2

4.2 Simulations numériques des écoulements autour de torons

4.2.1 Simulations numériques sur un cylindre

Dans un premier temps, les études numériques ont porté sur le cylindre. Cela permet de commencer par un cas simple, d'avoir un élément de comparaison entre notre simulation et la littérature, ainsi qu'un élément de référence avec lequel comparer nos autres résultats. Les dimensions du cylindre sont : un rayon de 5 mm et une longueur de 150 mm soit un rapport $L/d = 30$. Le coefficient de traînée obtenu en régime stationnaire est de 0,8. En régime transitoire, le coefficient de traînée en utilisant le modèle SST- γ - θ est 0,868 tandis qu'avec le modèle LES le coefficient de traînée est 0,875. Dans les deux cas, en se basant sur la courbe d'évolution de la portance comme montré en figure 4.16, on établit un nombre de Strouhal égal à 0,18. La figure 4.14 montre l'évolution de la traînée pendant les dernières secondes de simulation. La figure 4.15 montre un agrandissement pendant 0,5 secondes de la traînée. Cette figure permet de visualiser la fréquence de Strouhal sur la traînée. Celle-ci semble deux fois plus importante que celle calculée avec la portance. Cet effet est en fait dû au fait que contrairement à la portance, les lâchers tourbillonnaires sont du même côté de l'objet ce qui double la fréquence d'oscillation. D'après Wang *et al.* (2012), pour un ratio $\frac{L}{d} = 30$, on doit avoir un coefficient de traînée pour un cylindre et un nombre de Reynolds autour de $Re = 5.10^4$ d'environ 0.97. En tenant compte de la différence de nombre de Reynolds entre notre simulation et cet article en effectuant un produit en croix entre la valeur du coefficient de traînée pour un cylindre infini à $Re = 5.10^5$ et $Re = 2500$, on obtient un C_d attendu pour notre simulation de 0,82. Cependant, comme il est visible dans cet article, il y a une certaine dispersion des différents résultats scientifiques de la traînée, et la courbe doit être complétée d'une marge d'incertitude. Enfin, une mesure expérimentale dans la soufflerie verticale avec

un cylindre de 8,2 mm de diamètre a permis de mesurer un coefficient de traînée de 0,83. C'est donc cette valeur que nous considérerons pour le reste de notre étude.

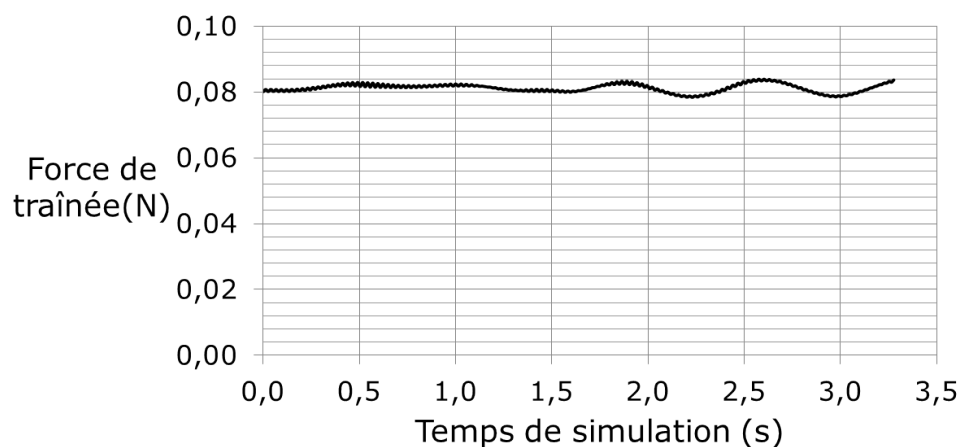


Figure 4.14 Evolution de la traînée pendant les dernières secondes de simulation pour le cylindre avec le modèle SST

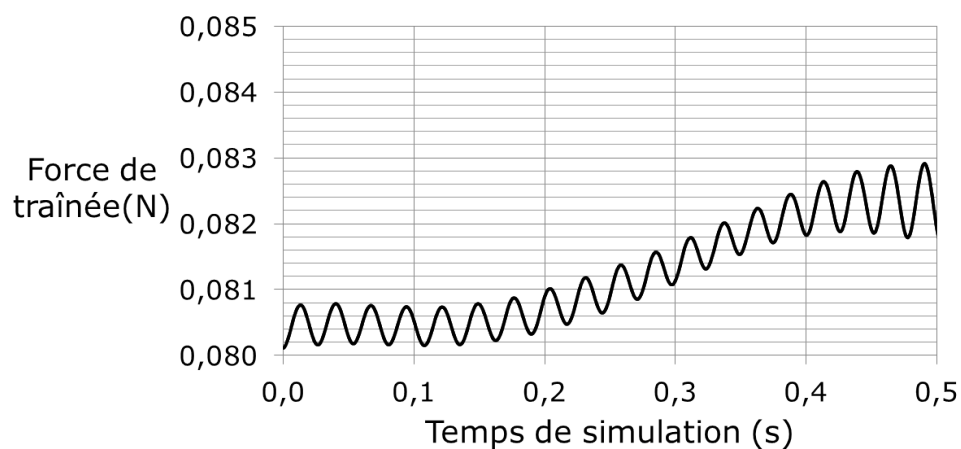


Figure 4.15 Agrandissement de l'évolution de la traînée avec le modèle SST

au chapitre 3. Ainsi le volume proche de l'objet est constitué d'un maillage non structuré avec un raffinement en couches concentriques autour du toron tandis que le reste de la section d'essai est un maillage structuré qui rejoint la partie non structurée par un autre raffinement en couches concentriques d'un rapport de 1,1.

Pour avoir des résultats pertinents, il est important de faire des simulations en régime transitoire. Cependant, celles-ci prennent beaucoup de temps (plusieurs jours par seconde

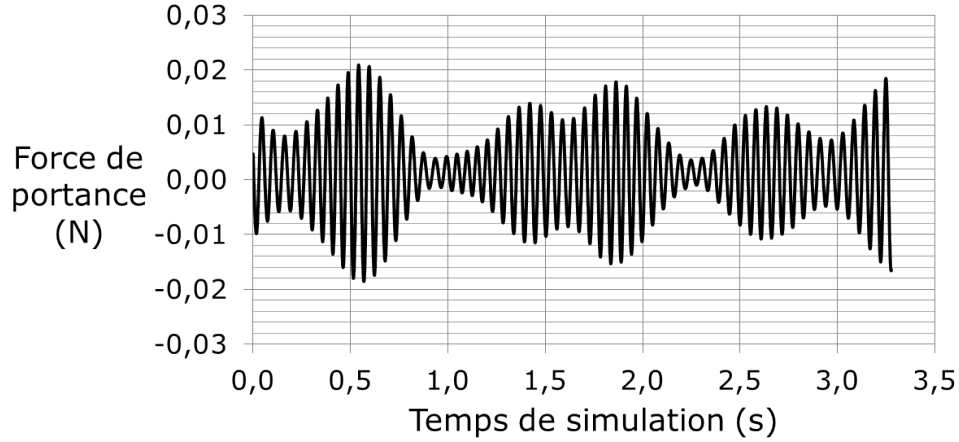


Figure 4.16 Evolution de la portance en fonction du temps de simulation pour le cylindre avec le modèle SST (le début de la simulation a artificiellement été mis à zéro)

simulée), et rendent impossible la simulation de nombreux objets rapidement. Afin de pouvoir effectuer plus de simulations, il était intéressant de savoir si la traînée pour un toron était très différente entre une simulation en régime stationnaire ou une simulation en régime transitoire. C'est pourquoi une comparaison entre une simulation en transitoire et en stationnaire a été menée. Pour ralentir la fréquence tout en conservant approximativement le même nombre de Reynolds, nous avons choisi comme fluide pour cette simulation de l'eau avec une vitesse $U_\infty = 0,5$ m/s. Cette simulation a été initialisée par le résultat de la simulation en régime stationnaire. En se basant sur le nombre de Strouhal d'un cylindre (environ 0,2) et sur le diamètre équivalent, on peut facilement calculer que (eq.4.7) le nombre de cycles correspondant à une seconde est d'environ 50.

$$\frac{1}{f} = \frac{S_T}{U_\infty d_p} \quad (4.7)$$

La figure 4.21 montre l'évolution de la traînée pendant la simulation. Les 500 premières itérations correspondent à la simulation en régime stationnaire tandis que la suite correspond à la partie transitoire. Le calcul de la moyenne de la traînée sur les deux dernières secondes de simulation (4000 itérations) donne une valeur de 0,12863 N. La valeur en régime stationnaire est de 0,12859, soit une différence d'environ 0,03%. Par la suite, seules des simulations en régime stationnaire seront faites car les différences sont faibles, d'autant qu'on peut supposer que la variation sera dans le même sens pour tous les objets hélicoïdaux.

Pour effectuer le reste des simulations, le fluide utilisé sera de l'air à 25°C. Les propriétés

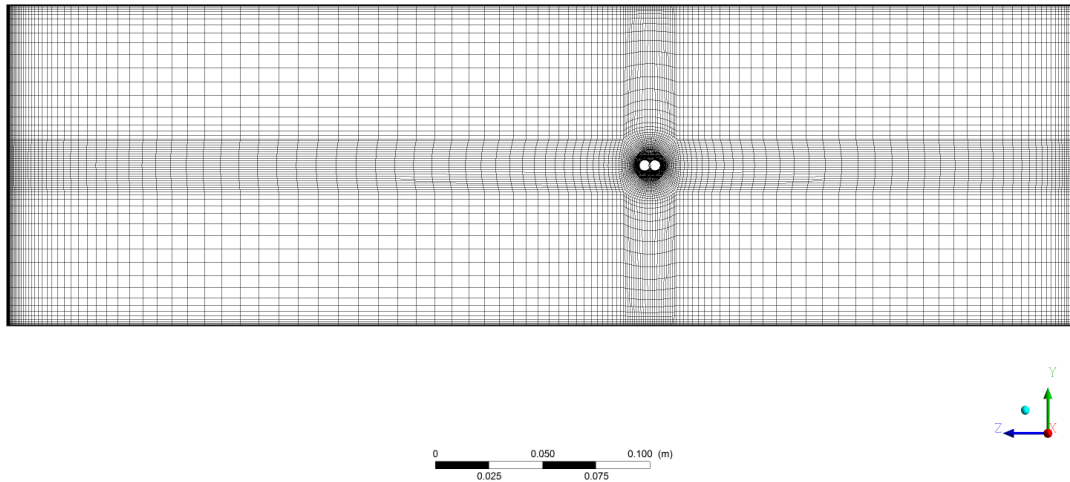


Figure 4.17 Vue en coupe (plan YZ) du maillage pour le toron à un tour

de l'écoulement sont les suivantes :

- $\rho = 1,185 \text{ kg/m}^3$
- $\mu = 1,84 \cdot 10^{-5} \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$
- $U_{\infty} = 10 \text{ m/s}$
- $Re = 5280$

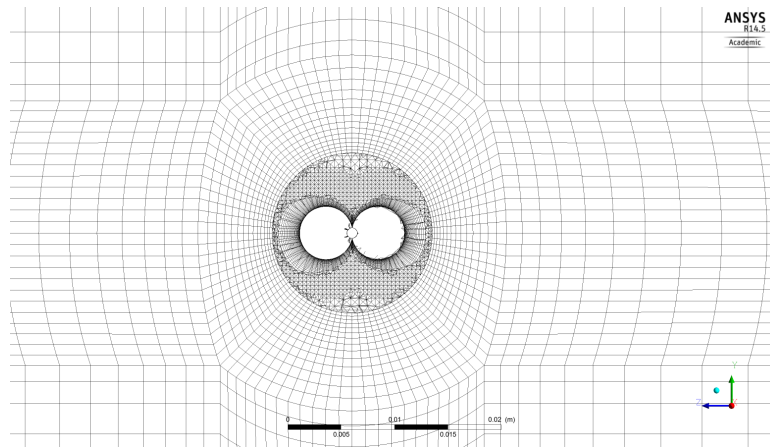


Figure 4.18 Agrandissement de la vue en coupe (plan YZ) du maillage pour le toron à un tour

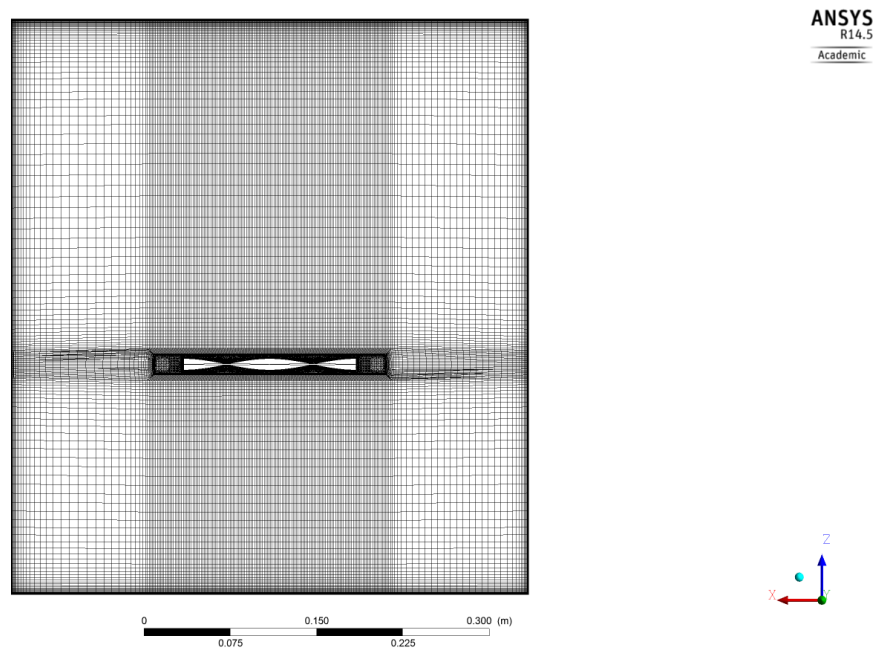


Figure 4.19 Vue en coupe (plan XZ) du maillage pour le toron à un tour

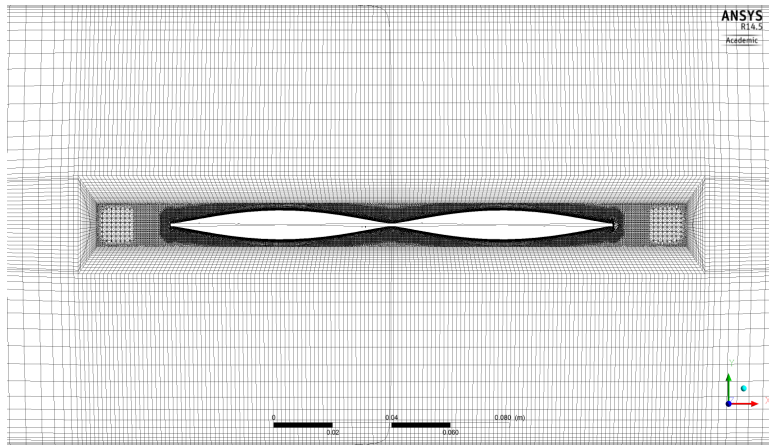


Figure 4.20 Vue en coupe (plan XY) du maillage pour le toron à un tour

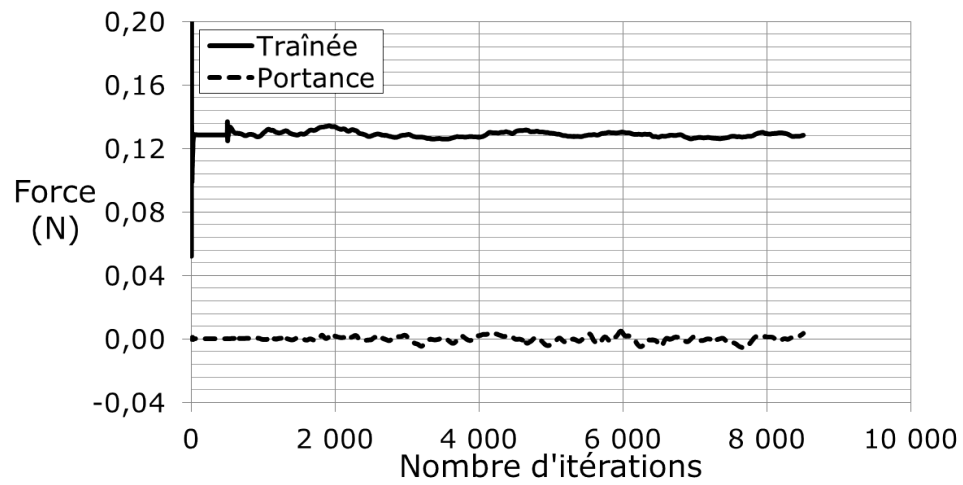


Figure 4.21 Courbe d'évolution de la traînée et de la portance pour le toron à un tour pendant la simulation

4.2.2 Forme de l'écoulement et résultats de coefficients de traînée

La figure 4.22 représente les lignes de courant dans deux plans de coupe différents pour le toron à un tour. La figure 4.23 représente une vue des lignes de courants 3D proches de l'objet. Les figures 4.24 et 4.25 représentent aussi les lignes de courant 3D, mais pour un toron à 10 tours et pour un cylindre dont le diamètre est de 8,2 mm. On remarque que le sillage du toron à dix tours semble beaucoup plus proche de celui du cylindre que de celui du toron à un seul tour. De fait, on observe trois grosses structures à l'arrière du toron à un tour, qui sont liées à la géométrie spécifique de l'objet. Or dans le cas du toron à dix tours, les variations de géométrie sont trop proches pour permettre le développement de telles structures qui interfèrent et créent un sillage plus uniforme. Si l'on crée un nouveau toron en faisant tendre son hélicité vers l'infini, on comprend bien que l'on va obtenir exactement un cylindre de diamètre $2d$. Enfin, la figure 4.26 montre l'évolution du coefficient de traînée en fonction du nombre de tours pour les torons vrillés de géométrie finale. Le coefficient de traînée augmente légèrement de 0,84 à 0,88 entre $n = 1$ et $n = 4$, puis il diminue lentement pour atteindre la valeur de 0,77 à $n = 10$. De plus, la valeur du C_D semble se stabiliser entre les deux derniers points et atteindre une limite.

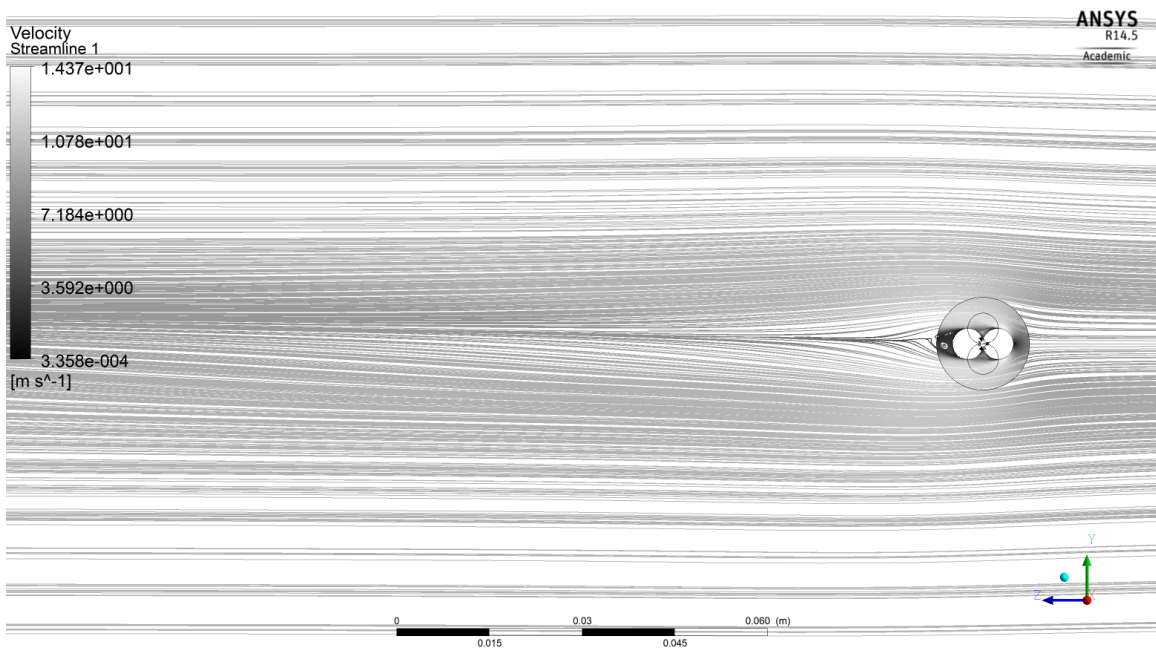
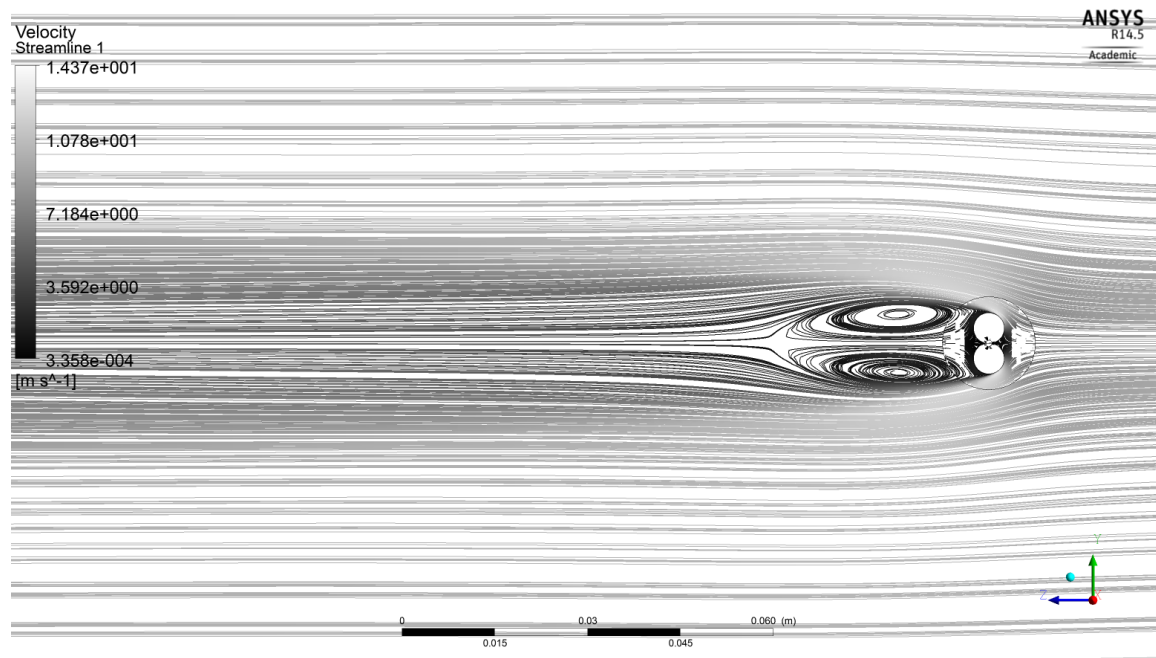


Figure 4.22 Lignes de courant surfaciques autour du toron à un tour dans le plan central YZ (a) et dans un plan YZ décalé de 35 mm (b).

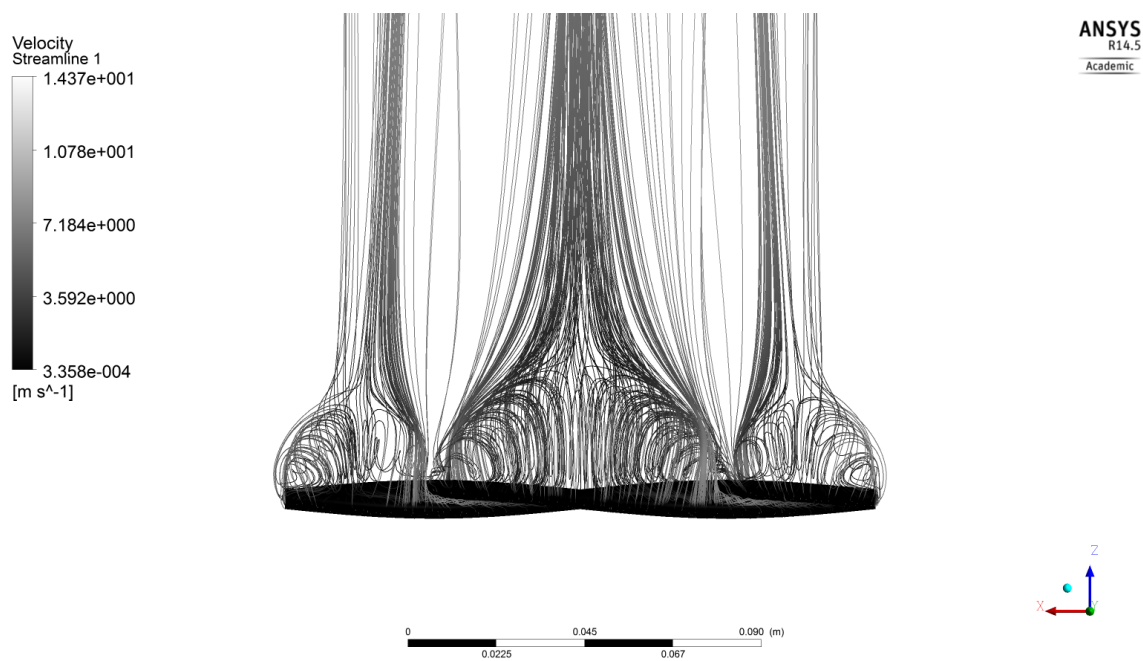


Figure 4.23 Lignes de courant 3D autour du toron à un tour

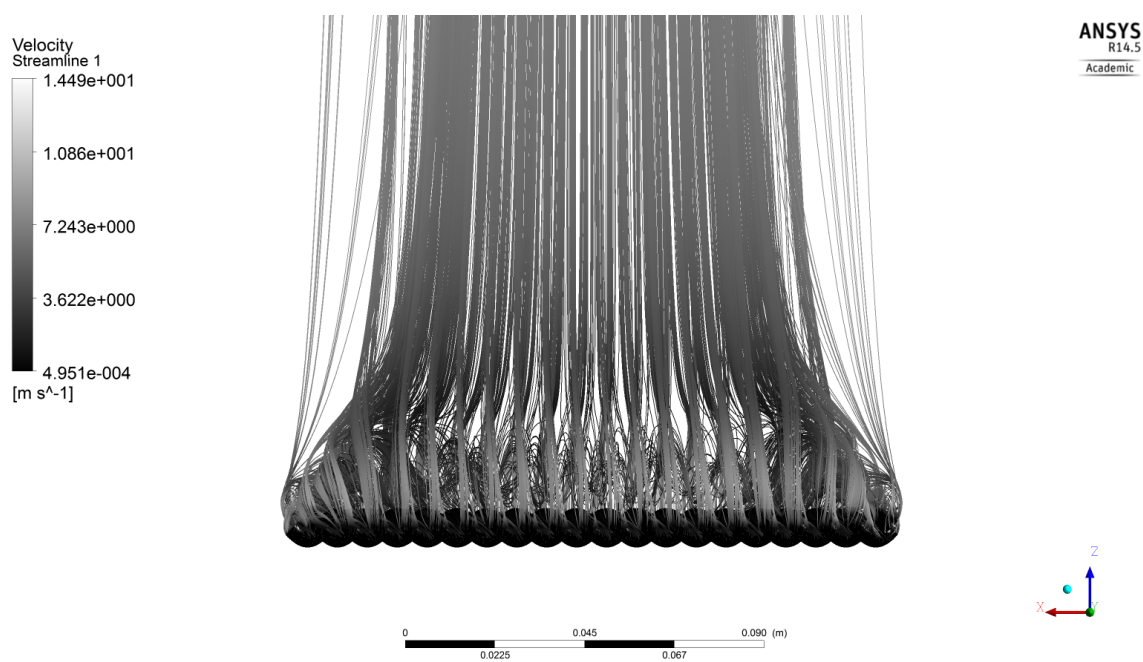


Figure 4.24 Lignes de courant 3D autour du toron à dix tours

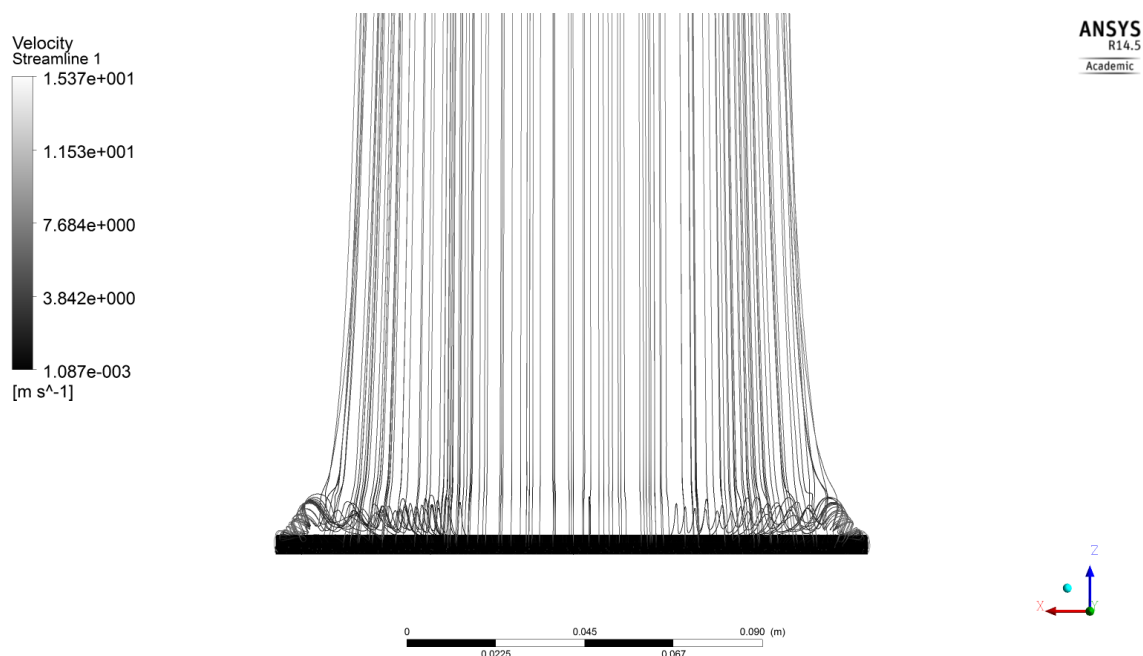


Figure 4.25 Lignes de courant 3D autour d'un cylindre

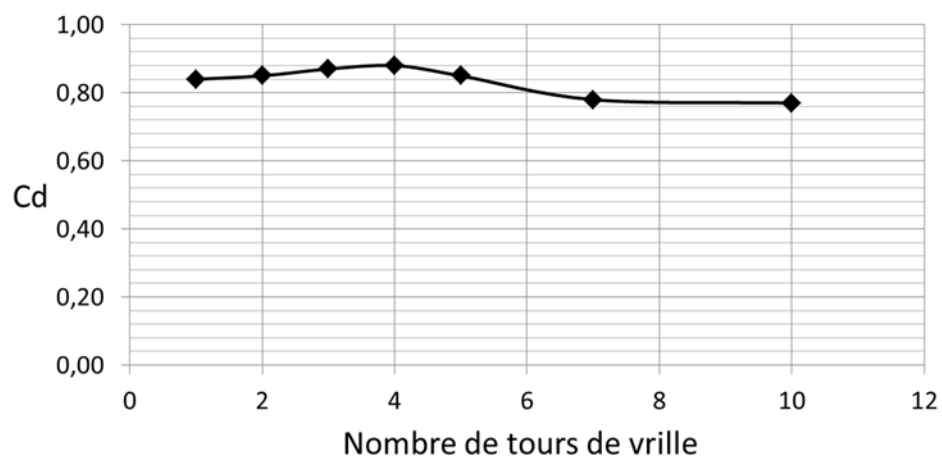


Figure 4.26 Courbe du coefficient de traînée C_D pour le toron de géométrie finale en fonction du nombre de tours de vrille

4.2.3 Analyse POD des résultats numériques et structures cohérentes de l'écoulement.

Les structures complexes de l'écoulement sont à l'origine des forces de traînée qui s'appliquent sur un corps. Dans cette section, une étude détaillée de ces structures, en utilisant une analyse POD, sera présentée. Cela correspond à chercher les modes de notre écoulement. De même qu'on est capable de trouver les modes propres d'une poutre soumise à différentes sollicitations, on cherche ici les modes de notre écoulement soumis à ses propres contraintes. La figure 4.27 montre la répartition modale de l'énergie de l'écoulement autour du toron à un tour et la figure 4.28 celle du cylindre. On remarque tout de suite que pour le cylindre, l'énergie est répartie de manière très forte sur les premiers modes, tandis que dans le cas du toron on peut voir une répartition plus uniforme de l'énergie. Les figures 4.29 et 4.30 représentent respectivement une visualisation des modes 1 et 2 de la décomposition POD autour d'un cylindre et d'un toron à un tour. Dans les deux modes, l'écoulement derrière le cylindre est plus uniforme que derrière le toron qui génère des grosses structures, particulièrement dans le plan A-A et au niveau des deux extrémités de l'objet, ce qui corrobore les observations faites sur les figures 4.23 et 4.25. En revanche dans le plan B-B l'écoulement est peu perturbé par la rencontre avec l'objet. De plus, la fréquence des lâchers tourbillonnaires semble être plus faible pour le toron que pour le cylindre. Les modes 3 à 10 sont représentés en Annexe A.

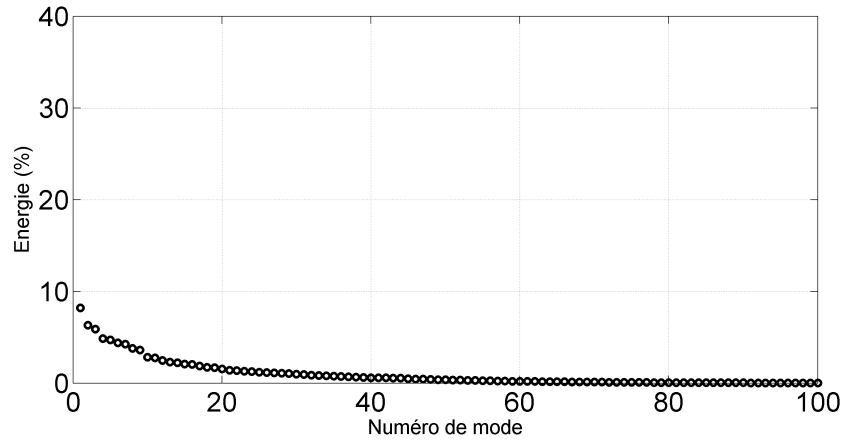


Figure 4.27 Répartition modale de l'énergie autour d'un toron à un tour.

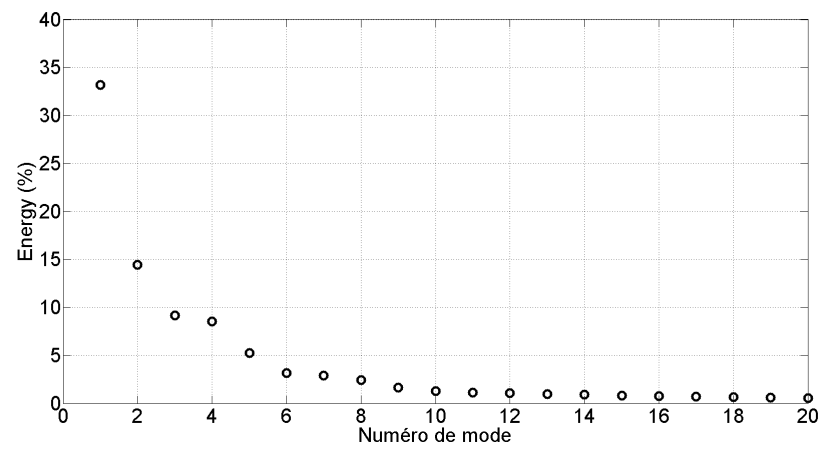
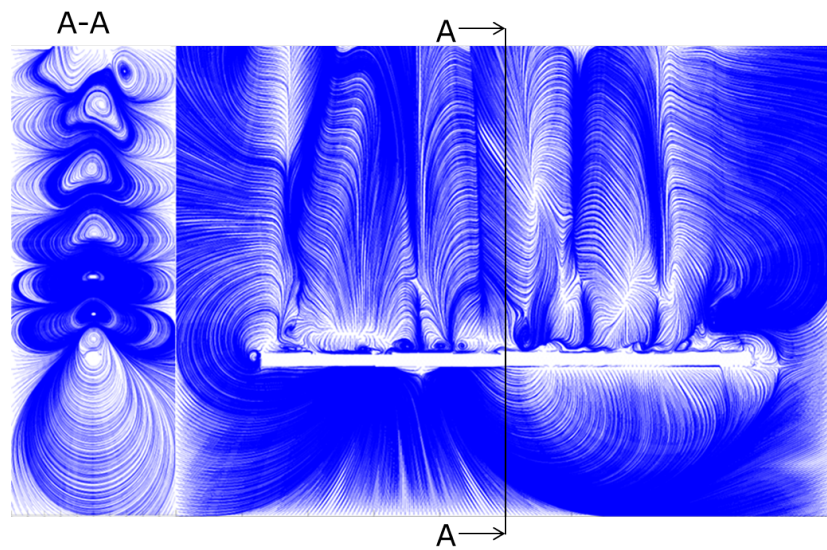
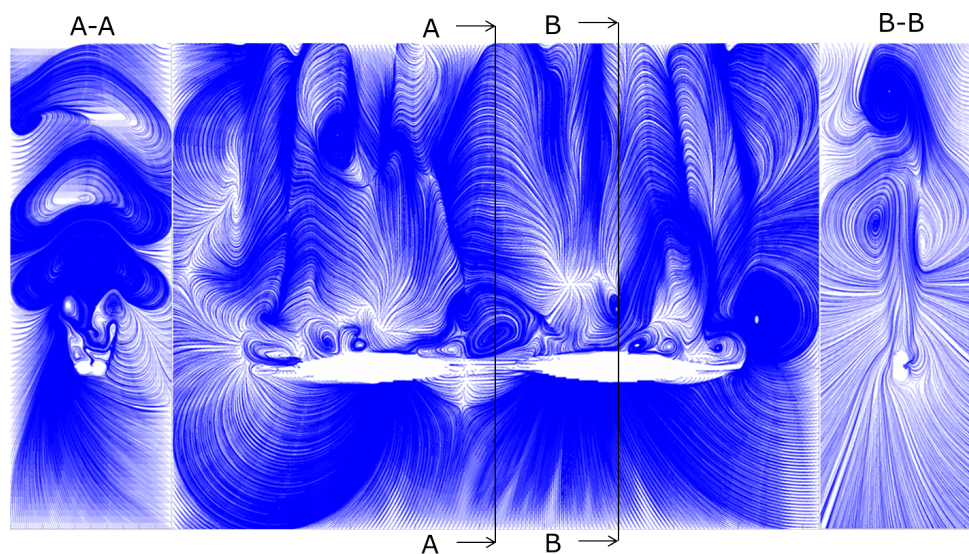


Figure 4.28 Répartition modale de l'énergie autour d'un cylindre.



(a)



(b)

Figure 4.29 Visualisation du premier mode de la POD pour le cylindre (a), et le toron à un tour (b).

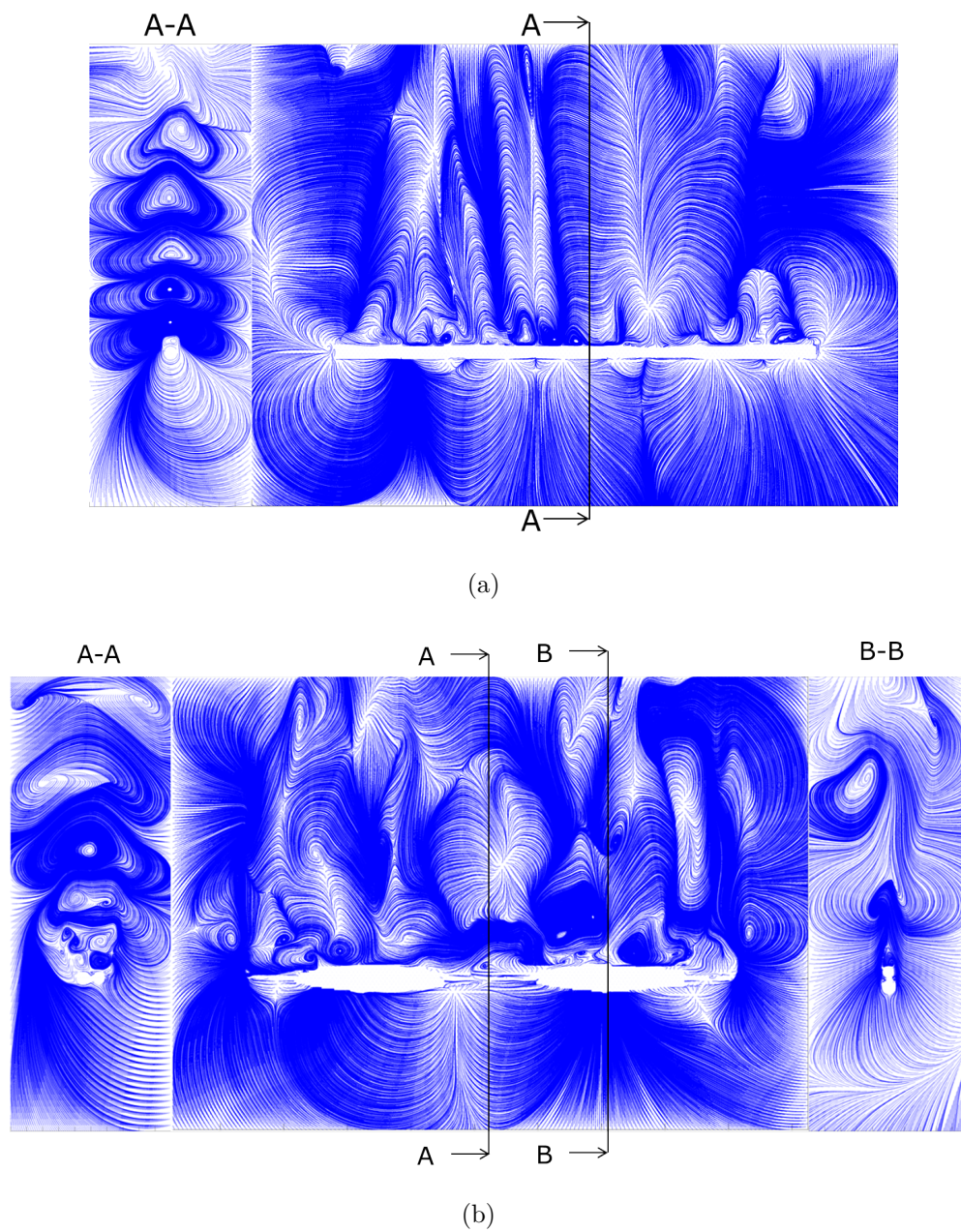


Figure 4.30 Visualisation du deuxième mode de la POD pour le cylindre (a), et le toron à un tour (b).

4.3 Expériences de PIV

La visualisation de l'écoulement numérique donne de précieuses informations qui aident à la compréhension de l'évolution du coefficient de traînée. Une analyse PIV a été menée avec le toron à un tour. Cela permet de comparer quelques images issues de la simulation numérique et d'expériences en soufflerie afin de vérifier l'allure générale de l'écoulement.

4.3.1 Montage et visualisations

La figure 4.31 montre une image de l'objet utilisé pour cette analyse. Comme précisé au chapitre de méthodologie, il a été choisi de le faire transparent et creux pour optimiser l'éclairage par le laser. Malgré ces précautions, des zones d'ombres apparaissent dans les images de PIV. De plus, des rayures dans les parois de la soufflerie ont perturbé les trajets lumineux et engendré des vecteurs totalement inconsistants. Cependant, grâce à des traitements numériques qui ont amélioré les rendus, et parce que le but était une comparaison quantitative avec les simulations, cela n'a pas été si problématique.

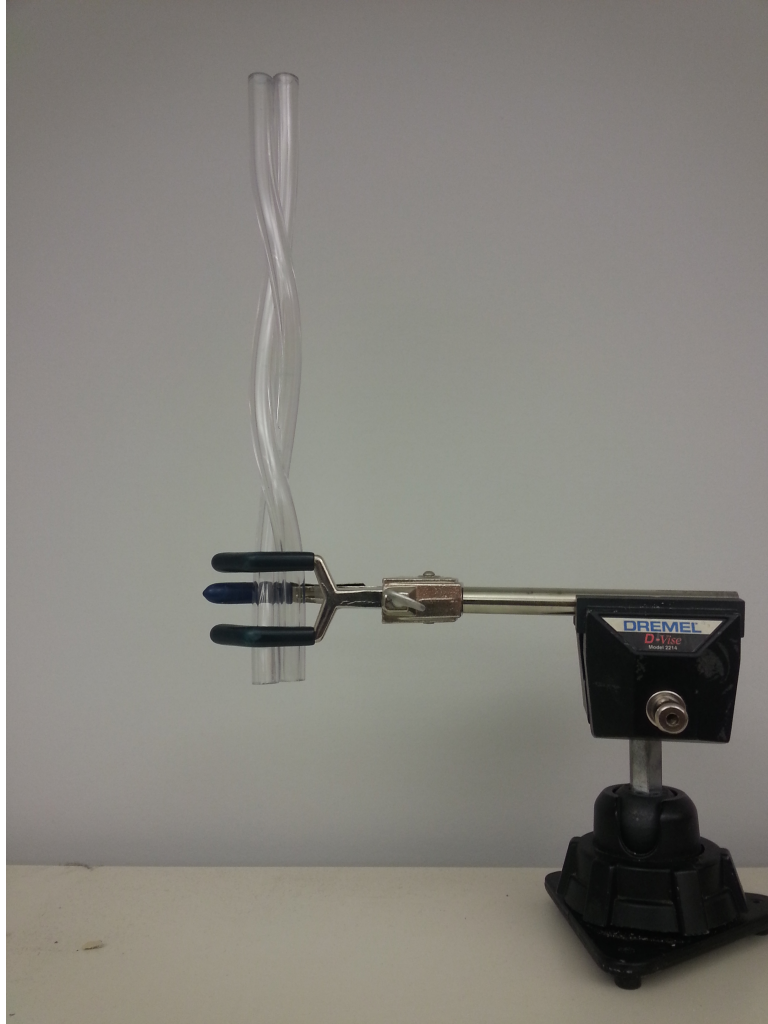
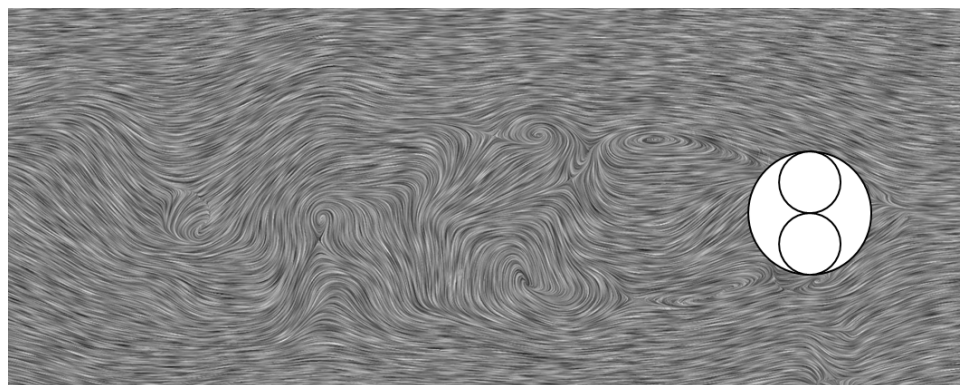
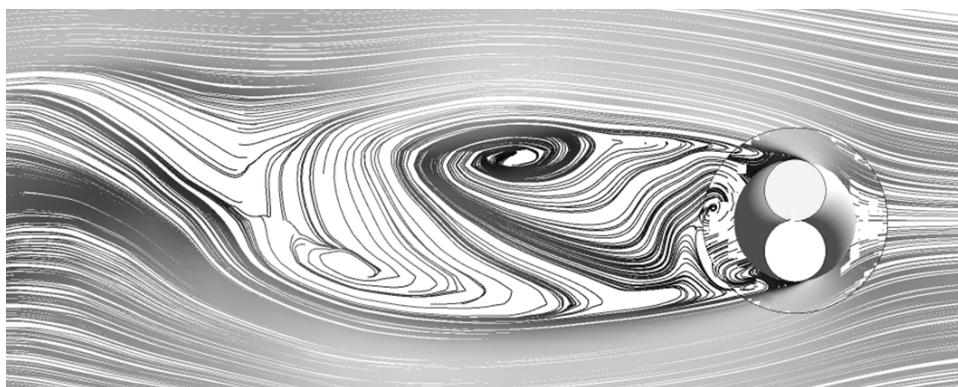


Figure 4.31 Image de l'objet utilisé pour les tests de PIV

Afin de pouvoir comparer l'écoulement numérique avec celui que l'on peut observer dans la soufflerie, il était intéressant de tracer les mêmes figures que celles dessinées grâce aux résultats numériques. Les figures 4.32 et 4.33 comparent les LIC calculées grâce aux mesures PIV avec des lignes de courant prises à un instant t pendant la simulation numérique en régime transitoire (modèle LES) dans deux plans de coupe différents. Les LIC sont un moyen de visualiser l'écoulement en négligeant ses légères variations. L'utilisation des LIC a permis d'atténuer les perturbations de l'analyse dues aux rayures sur les vitres de la section. Dans les deux plans, les sillages calculées grâce à la PIV et aux simulations numériques ont la même allure.

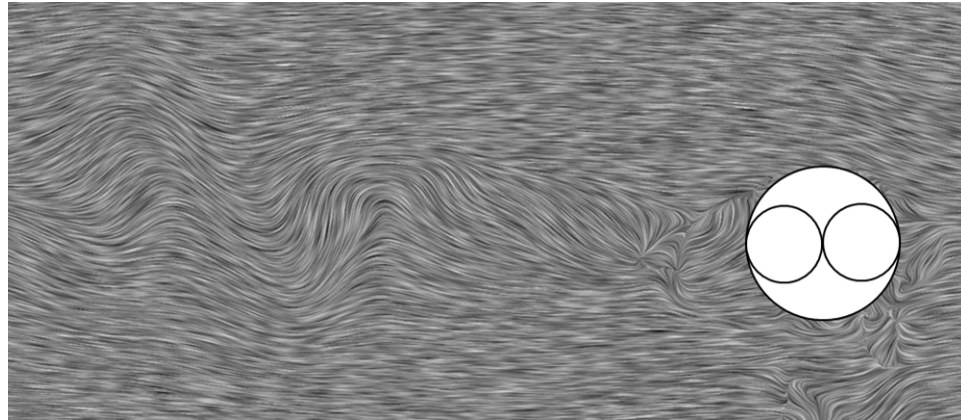


(a)

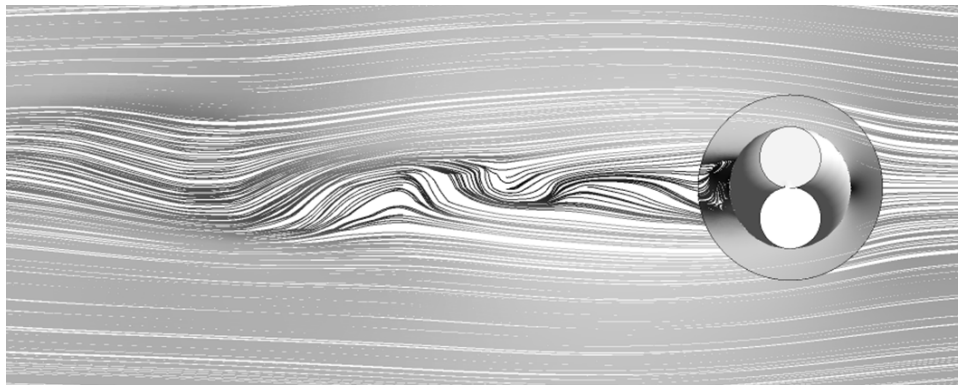


(b)

Figure 4.32 LIC de la PIV dans le plan central YZ (a), lignes de courant issues de la simulation numérique en régime transitoire dans le même plan (b)



(a)



(b)

Figure 4.33 LIC de la PIV dans un plan YZ décalé de 35 mm (a), lignes de courant issues de la simulation numérique en régime transitoire dans le même plan (b)

Avec notre système il était impossible d'obtenir des tracés de lignes de courants en 3D. La figure 4.34 montre donc en 2D, une superposition des vecteurs vitesses et de la photographie de l'objet. Des structures semblables à celles observées à la figure 4.23 sont alors obtenues. Ces deux comparaisons appuient la fiabilité de nos résultats numériques.

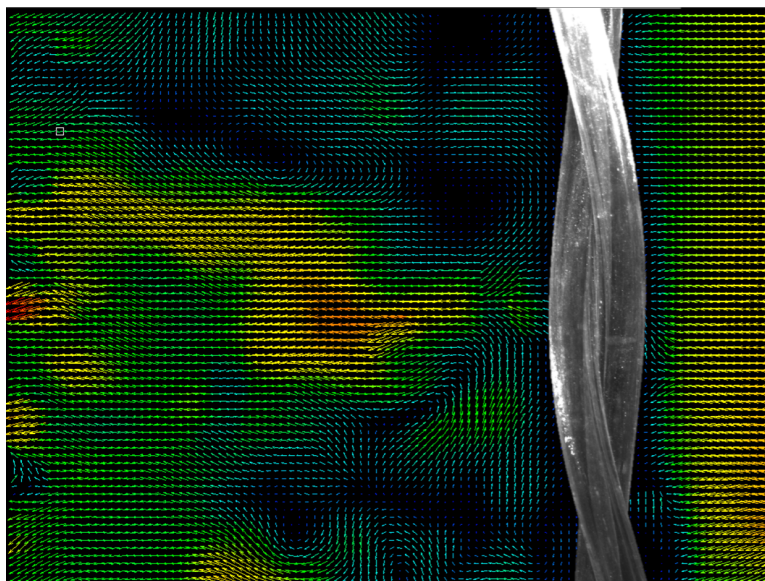


Figure 4.34 Montage superposant la cartographie des vecteurs vitesses obtenue par PIV et une photographie de l'objet.

4.3.2 Analyse POD des résultats PIV

Enfin, pour avoir une comparaison plus approfondie de l'écoulement la répartition de l'énergie a été calculée grâce à l'analyse PIV visible sur la figure 4.35. On remarque immédiatement que celle ci est très proche de la courbe sur la figure 4.27, ce qui confirme encore plus les résultats numériques.

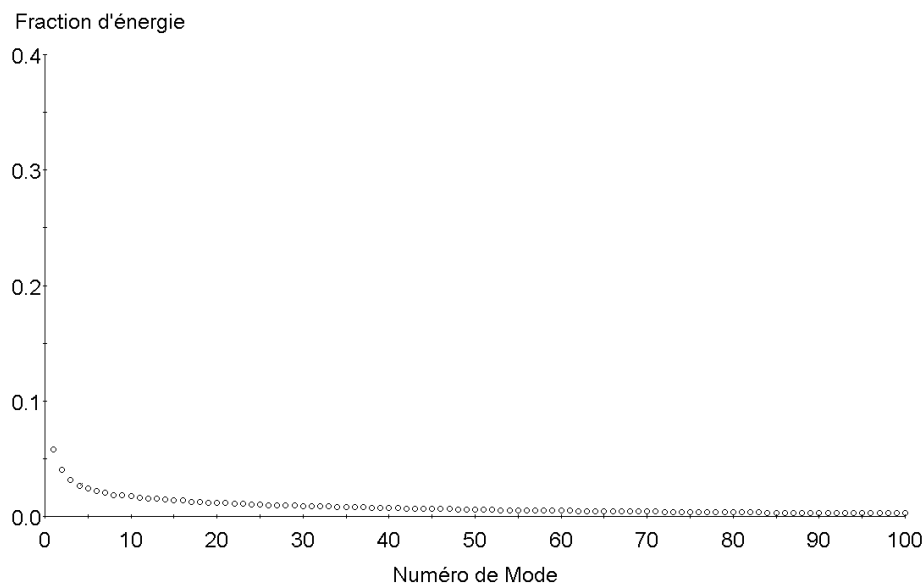


Figure 4.35 Répartition modale de l'énergie autour d'un toron à un tour grâce à l'analyse par PIV.

4.4 Mesure expérimentale de la traînée

L'objet principal de notre étude étant le coefficient de traînée, nous avons aussi mesuré de manière expérimentale la traînée des différents objets. Ceux-ci ont été dessinés sur CATIA et imprimés en 3D grâce à une imprimante 3D *Ultimaker Original*. La figure 4.36 montre un exemple d'un objet imprimé. L'épaisseur des couches d'impression a été fixée à 0.1 mm (précision maximale de la machine). La géométrie des différents objets est ainsi connue avec exactitude. Il est alors facile de calculer les différents paramètres géométriques nécessaires à l'étude (surface projetée, diamètre équivalent...). Concernant les torons, les mêmes objets ont été imprimés et testés que ceux qui avaient été simulés. Étant donné le fait que la surface projetée change peu avec l'hélicité, le nombre de Reynolds sera considéré identique pour tous nos objets. Leurs dimensions ont été calculées de façon à avoir des nombres de Reynolds très proches pour les torons, le cylindre et les plaques vrillées.



Figure 4.36 Toron à un tour imprimé en 3D

Pour les expériences une soufflerie à circuit fermé dont la section d'essai mesure 61 cm par 61 cm a été utilisée. La vitesse à l'intérieur est réglable entre 0 m/s et 91 m/s. La figure

4.37 montre une image de la section d'essai utilisée pour les tests.



Figure 4.37 Image de la section d'essai utilisée pour les expériences

Pour mesurer la force de traînée un capteur Futek LSB200 d'une précision de 16 bits pour une charge maximale de 100 g a été utilisé. Chaque mesure a été effectuée trois fois à chaque vitesse : $U_\infty = 10$ m/s, 20 m/s et 30 m/s. Les résultats ont ensuite été moyennés pour chaque vitesse, le temps d'acquisition pour chaque test étant au minimum de 20 secondes. Finalement, les résultats les plus significatifs sont ceux mesurés à $U_\infty = 20$ m/s car pour $U_\infty = 10$ m/s les valeurs des forces étant très faibles, de minces perturbations pouvaient influencer le résultat. Pour $U_\infty = 30$ m/s, du fait de sa faible rigidité, le capteur engendrait beaucoup de vibrations ce qui peut générer des biais dans les résultats. La figure 4.38 montre le montage utilisé pour réaliser les expériences. Il a directement été vissé dans la soufflerie grâce à des emplacements prévus à cet effet. La figure 4.39 montre un exemple de signal enregistré grâce au capteur.

La figure 4.40 montre les résultats de mesure de coefficient de traînée pour la plaque vrillée en fonction du nombre de tours de vrille obtenus expérimentalement. Bien que l'allure générale de la courbe soit la même que celle du toron, des différences notables existent.

Par la suite, il sera intéressant de comparer les résultats du toron et de la plaque vrillée sur un même graphique. Pour cela, il est important de trouver un paramètre qui soit image du nombre de tours de vrille de l'objet mais qui prenne aussi en compte sa géométrie. L'idée est que ce paramètre représente la torsion de l'objet par rapport à un état non vrillé. Ainsi une homothétie ne doit pas affecter ce nombre. Afin de garder un nombre cohérent avec la géométrie de chaque type d'objet, l'hélicité a été définie différemment pour chaque catégorie.

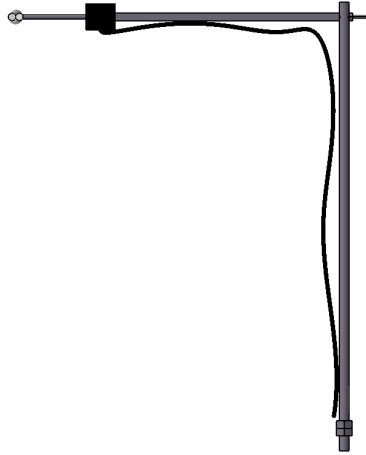


Figure 4.38 Montage utilisé pour mesurer la traînée

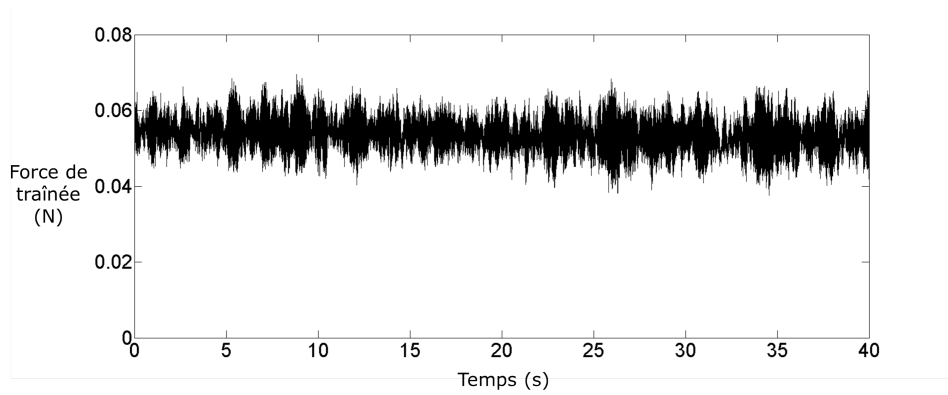


Figure 4.39 Signal enregistré pour un toron à un tour à $U_{\infty} = 10$ m/s

Ainsi pour le toron, l'hélicité est définie par l'équation 4.8 :

$$h = \frac{2nD}{L}. \quad (4.8)$$

Pour la plaque, l'hélicité est définie par l'équation 4.9 :

$$h = \frac{n(e + l)}{L}. \quad (4.9)$$

De plus, concernant les plaques vrillées, la surface projetée définie par l'équation 4.10 est indépendante du nombre de tours n :

$$A_p = 2 \frac{L}{\Pi} (e + l). \quad (4.10)$$

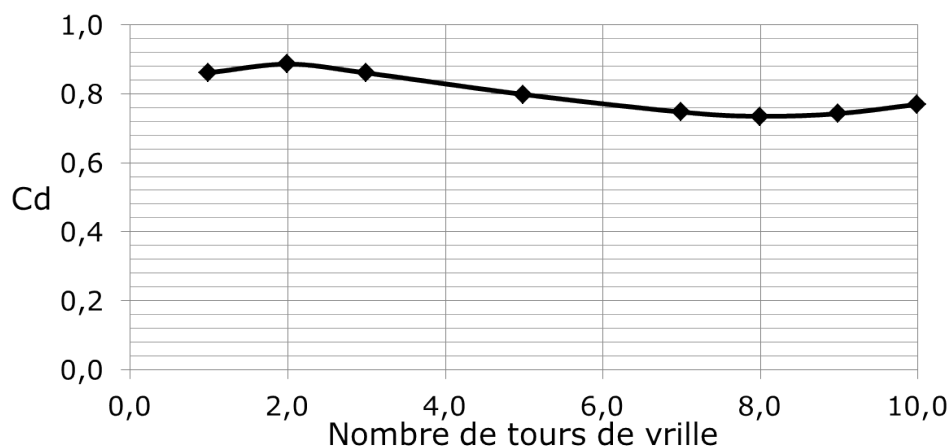


Figure 4.40 Courbe du coefficient de traînée pour la plaque vrillée en fonction du nombre de tours de vrille

4.5 Résultats finaux

Dans cette section seront présentés les résultats des simulations numériques ainsi que ceux des expériences. La figure 4.41 montre l'évolution du coefficient de traînée en fonction de l'hélicité pour les torons et les plaques vrillées. Bien que pour ces objets l'hélicité soit constante et égale à 0, nous avons aussi tracé sur cette même figure le coefficient de traînée du cylindre et celui de la plaque plane non vrillée comme éléments de comparaison. Les objets étudiés ont tous entre 1 tour et 10 tours de vrille. Compte-tenu des autres paramètres géométriques, leur hélicité est comprise entre 0,1 et 1. La première chose que l'on peut noter est que le coefficient de traînée ne varie pas beaucoup en fonction de l'hélicité. Cependant le fait que l'objet soit vrillé impact davantage son C_D . En effet, il y a un grand écart entre la valeur du coefficient de traînée de la plaque plane non vrillée et de celle vrillée au minimum. Il nous semble important de rappeler que les surfaces projetées réelles ont été utilisées pour calculer nos coefficients de traînée, donc elles ne sont pas des paramètres de notre étude.

Un autre résultat intéressant est le fait qu'à hélicité égale, les valeurs de C_D pour le toron ou la plaque plane sont très proches. Le fait que les valeurs expérimentales et numériques s'accordent bien conforte la fiabilité des résultats. De plus la valeur du coefficient de traînée des objets vrillés reste toujours proche de celle d'un cylindre, avec un écart minimal pour $h = 0,1$ et $h \rightarrow \infty$. Enfin, le C_D maximum est obtenu pour $h \approx 0,2$.

Ainsi, la figure 4.41 semble montrer que le coefficient de traînée d'objets allongés hélicoïdaux ne dépend que peu de la géométrie de base, et que sa valeur reste proche de celle d'un cylindre.

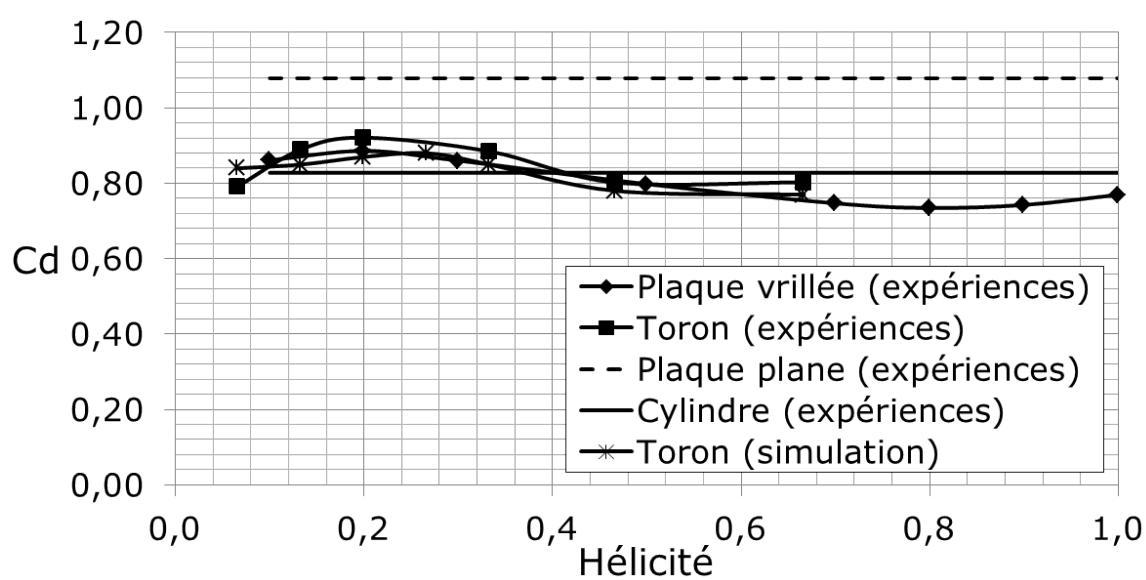


Figure 4.41 Coefficient de traînée en fonction de l'hélicité.

CHAPITRE 5 OBJETS ALLONGÉS

Dans cette partie des objets allongés avec des géométries bien définies ont été étudiés. Le but de cette étude est de trouver les paramètres géométriques qui gouvernent le coefficient de traînée, afin de trouver pour ce type de géométrie une relation permettant de prédire le C_D , connaissant ces paramètres. Cependant, suite à des travaux de rénovation dans la soufflerie utilisée, seuls quelques tests préliminaires ont pu être réalisés. A cause de cela, le reste des objets a été étudié en simulation numérique.

5.1 Tests préliminaires et identification des paramètres géométriques

Dans un premier temps, le paramètre géométrique représentatif de la forme de la section de l'objet était Σ tel que défini dans l'équation 5.1 :

$$\Sigma = \frac{A}{A_p} \quad (5.1)$$

mis en évidence par Bowen et Masliyah (1973) qui représente le rapport entre la surface externe d'un objet et sa surface projetée. Plus Σ est grand, plus l'objet est profilé, et plus il est petit, plus il est frontal à l'écoulement. Les deux cas extrêmes sont la plaque alignée avec l'écoulement dans le cas de $\Sigma \rightarrow \infty$ et la plaque perpendiculaire à l'écoulement pour $\Sigma \rightarrow 2$. La figure 5.1 montre les premiers résultats obtenus en utilisant ce seul paramètre. Il semble alors très difficile de trouver un lien direct entre ce paramètre et le coefficient de traînée tant les données de ce graphique sont réparties uniformément.

Or avec un tel paramètre, il est possible d'avoir des objets de formes très différentes ayant le même Σ . La figure 5.2 donne un exemple de deux objets dissemblables ayant le même Σ mais des C_D très différents.

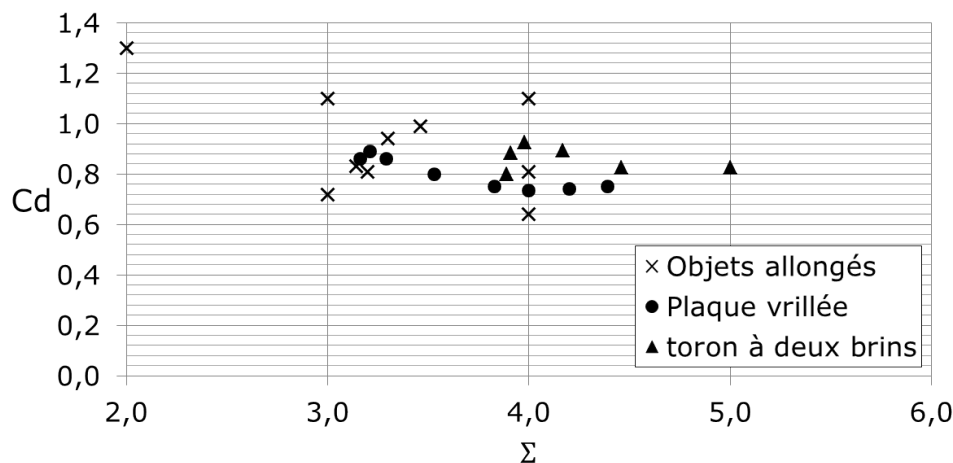


Figure 5.1 Graphique représentant C_D en fonction de Σ pour différents objets



Figure 5.2 Vue de deux profils ayant le même Σ mais des C_D différents

5.1.1 Nouveaux paramètres géométriques

La figure 5.3 montre une vue en coupe de la distribution de pression autour d'un cylindre à section rectangulaire, obtenue par une étude en régime stationnaire sur CFX. Le fluide se déplace de la gauche vers la droite. Cette figure montre bien la surpression en amont de l'objet et la dépression en aval. Cette différence de pression crée une force orientée dans le sens de l'écoulement. On comprend bien que pour faire varier cette force, il faut changer soit la pression en amont, soit la pression en aval. Dans son article, Roshko (1993) montre l'importance de la géométrie du sillage dans la valeur du coefficient de traînée. Il montre aussi qu'il existe une relation universelle reliant la géométrie du sillage avec les coefficients de pression et de cisaillement. Cela permet de croire qu'il est possible de trouver une relation universelle permettant de prédire le coefficient de traînée. La figure 5.4 illustre la "bulle" formée à l'arrière de l'objet. En dehors de cette zone, les variations de pressions dans la partie aval de l'écoulement sont peu importantes. "Remplir" cette bulle par un objet pour diminuer l'écart de pression entre l'amont et l'aval de l'objet permettrait ainsi de diminuer la traînée. Ainsi, il étudie l'effet de la partie arrière de l'objet sur le coefficient de traînée. La partie avant a, quant à elle, un effet aussi important car elle va conditionner la surpression ainsi que la largeur du sillage. De cette brève réflexion a été conclu qu'il faut trouver au moins

deux paramètres géométriques pour décrire l'objet : un premier qui décrit l'aérodynamisme de la partie avant de l'objet, et un deuxième celui de la partie arrière.

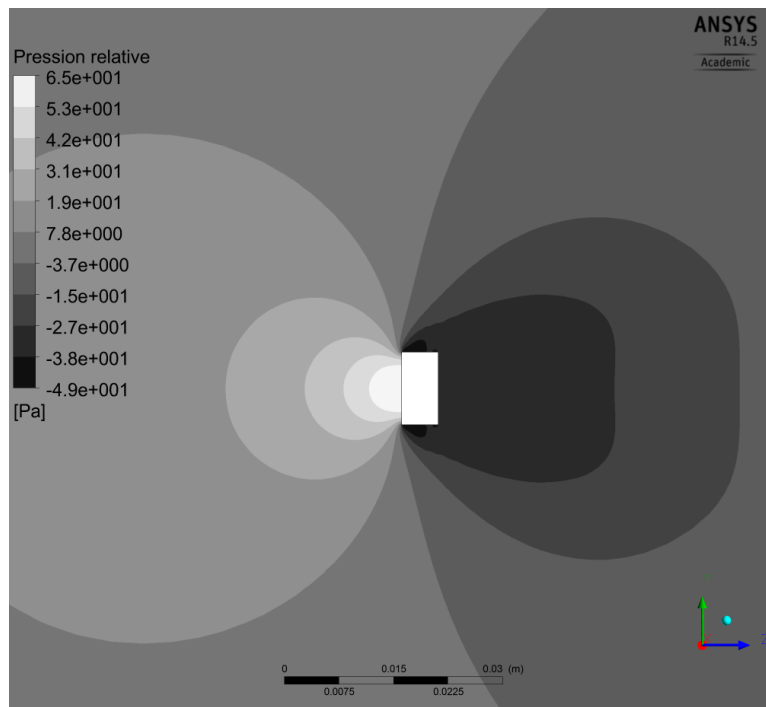


Figure 5.3 Répartition de la pression autour d'un cylindre à section rectangulaire

Les deux paramètres qui seront utilisés sont :

1. $\Sigma = \frac{A}{A_p}$ comme expliqué précédemment.
2. $\Gamma = \frac{\Delta x}{\Delta y}$ qui représente la distance entre le point d'attaque de l'objet et la section maximale, divisée par la hauteur de cette section.

Dans un premier temps, tous nos objets auront une section uniforme sur toute la longueur. Pour décrire leur géométrie il suffit donc de décrire une section, et se ramener à un dessin 2D. Ainsi le paramètre Σ peut être simplifié par le paramètre $\frac{P}{H}$. Les figures 5.5 et 5.6 montrent chacune un exemple de variation de géométrie avec Σ et Γ respectivement fixes.

A travers ces exemples, on peut mieux se rendre compte de l'impact de chacun de ces paramètres sur la géométrie des objets. Le paramètre Γ permet de faire varier la forme globale de l'objet, et en particulier la partie avant de l'objet, tandis que le paramètre Σ permet de contrôler la géométrie de la partie arrière de l'objet, plus exactement l'allongement de la partie arrière de l'objet.

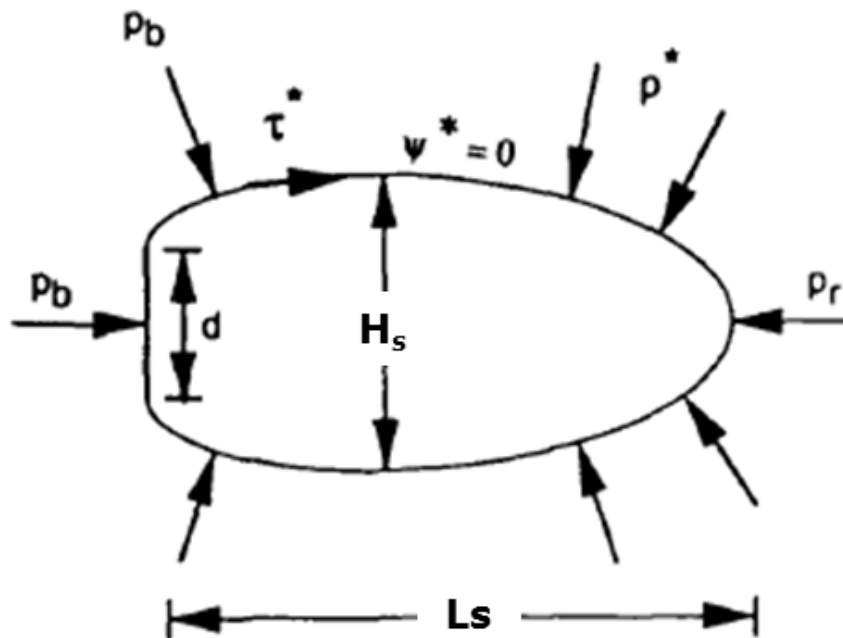


Figure 5.4 Visualisation de la "bulle" derrière l'objet d'après Roshko et Lau (1965).

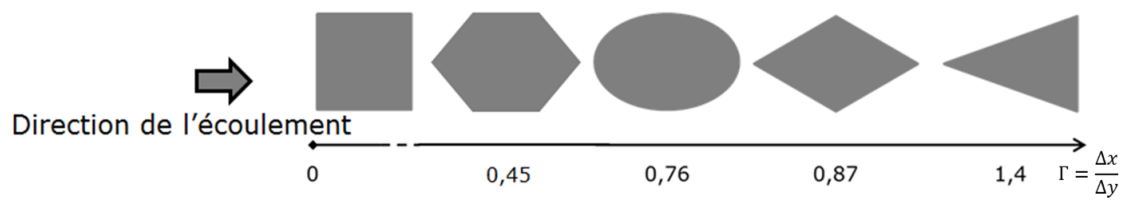


Figure 5.5 Différentes géométries en fonction de Γ , avec le paramètre Σ fixe.

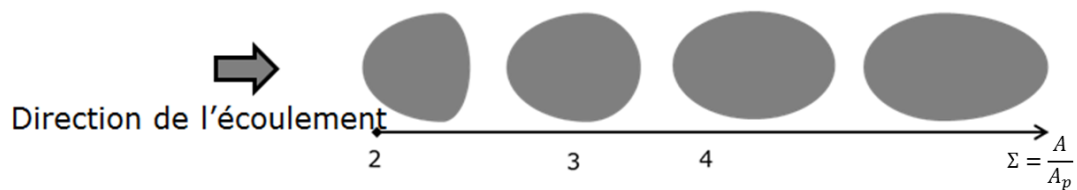


Figure 5.6 Variation d'une géométrie en fonction de Σ avec le paramètre Γ fixe.

5.2 Simulations numérique et corrélations

5.2.1 Maillage et paramètres de simulation

Comme expliqué précédemment, les coefficients de traînée ont été calculés grâce à des simulations numériques 2D et 3D. Le logiciel CFX n'étant capable que de simulations 3D, les objets ont une épaisseur de 1 mm répartie sur une seule cellule de maillage avec des conditions de symétrie sur les bords. La figure 5.7 présente la géométrie et les conditions limites utilisées pour nos simulations 2D. La géométrie de la section et les conditions limites utilisées pour les simulations en 3D sont les mêmes que celles utilisées au chapitre 4, avec pour seule différence, le fait qu'ici le maillage utilisé est entièrement structuré.

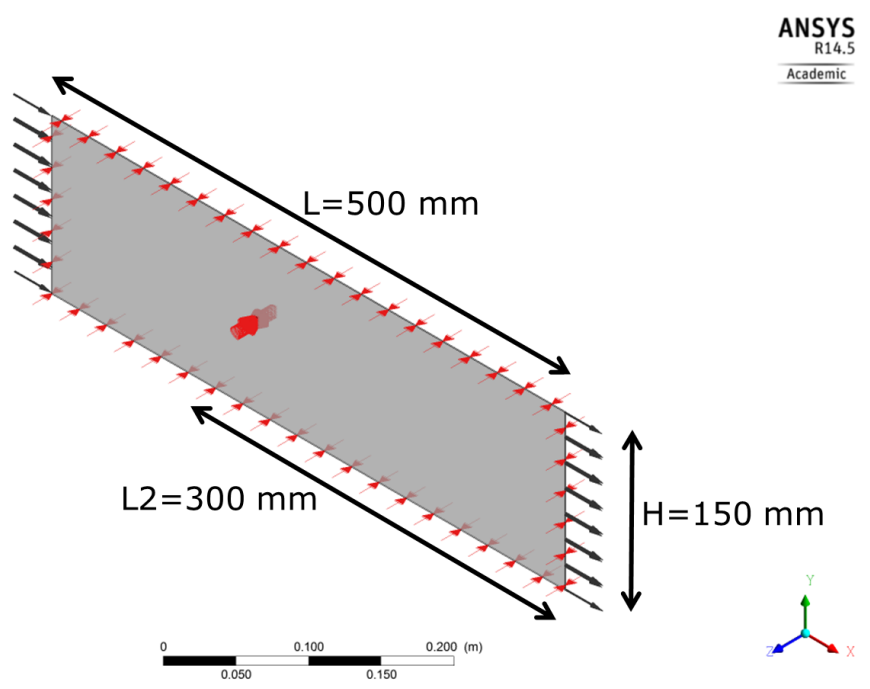


Figure 5.7 Géométrie et conditions limites de la section numérique des simulations 2D

Afin de déterminer le maillage à utiliser pour nos simulations, une étude de maillage a été réalisée. La figure 5.8 montre l'évolution du coefficient de traînée en fonction du nombre d'éléments. Finalement, le troisième maillage sera celui utilisé pour les simulations. Étant donné que les géométries sont proches, le même maillage sera appliqué à tous les objets. Les figures 5.9 et 5.10 montrent différentes vues de ce dernier avec l'objet utilisé précisément pour l'étude de convergence.

Les paramètres Γ et Σ seront dans un premier temps étudiés séparément pour comprendre l'effet de chacun sur le coefficient de traînée.

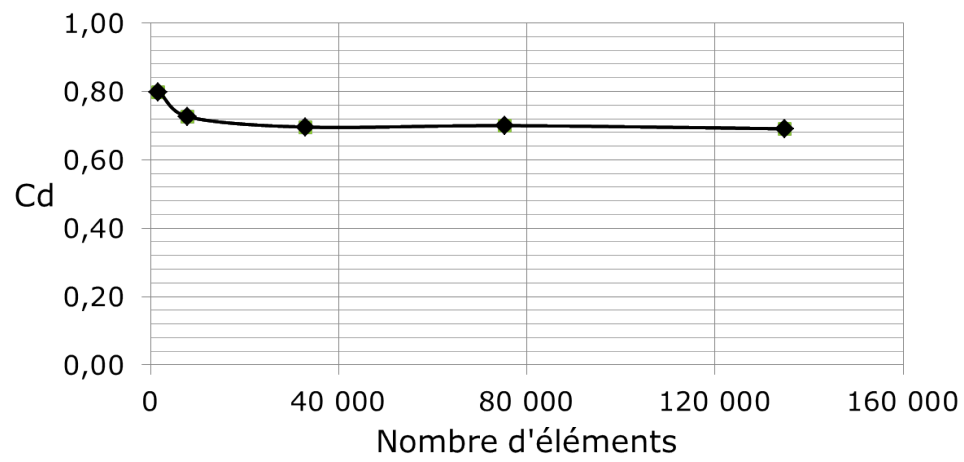


Figure 5.8 Courbe d'évolution du coefficient de traînée de la demi-ellipse en fonction du nombre d'éléments.

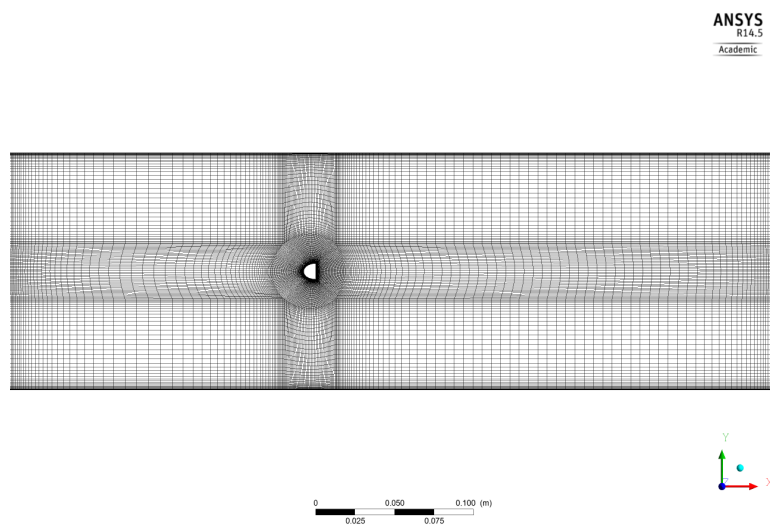


Figure 5.9 Vue générale du maillage 2D

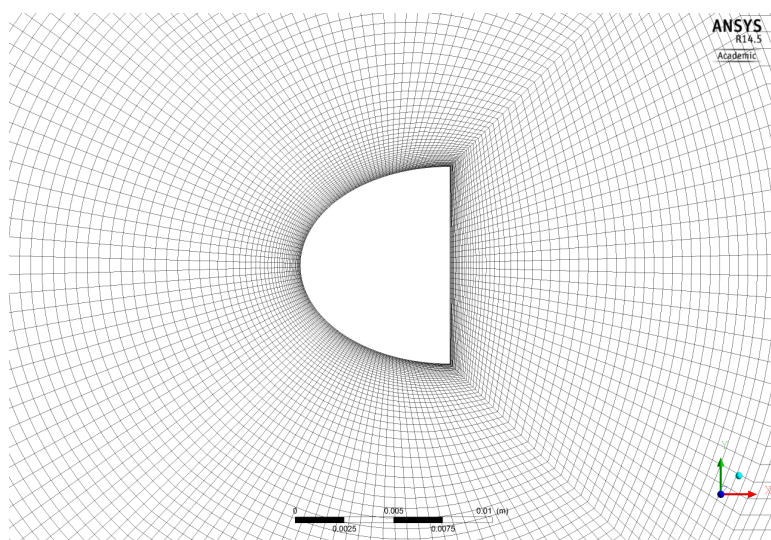


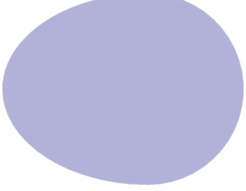






Figure 5.10 Vue agrandie du maillage autour de l'objet 2D.

5.2.2 Influence de Σ sur le coefficient de traînée

Ici les objets étudiés ont été dessinés de sorte que tous ont la même valeur de Γ et seulement Σ qui varie. Le tableau 5.1 montre la géométrie et les valeurs du C_D et de Σ des objets étudiés. Les simulations pour ce paramètre ont été faites en 2D. La figure 5.11 montre l'évolution du coefficient de traînée en fonction de Σ . Entre le cinquième et le sixième point, le coefficient de traînée chute brusquement. Pour essayer de comprendre l'origine de cette chute brutale, les figures 5.12 et figure 5.13 montrent une visualisation de la vitesse axiale pour les différents objets testés. Les figures 5.14 et figure 5.15 montrent une visualisation de la pression relative. Enfin les figures 5.16 et figure 5.17 montrent une visualisation de la vorticité de l'écoulement. Pour la pression, la vitesse et la vorticité, les mêmes échelles de couleur ont été appliquées pour tous les objets afin de pouvoir avoir un visuel comparable. Entre le cinquième et le sixième objet, la taille du sillage derrière l'objet diminue brutalement. Ce phénomène, observable sur les trois visualisations ressemble à celui de la crise de traînée dans lequel la turbulence permet le recollement de la couche limite. Ici, il semble que le prolongement de la partie arrière de la géométrie permet aussi le recollement de la couche limite.

Tableau 5.1 Tableau des coefficients de traînée des ellipses

Image	Σ	C_d
	3,00	0,70
	3,20	0,66
	3,57	0,65
	4,00	0,64
	4,42	0,60
	5,34	0,30
	6,77	0,25

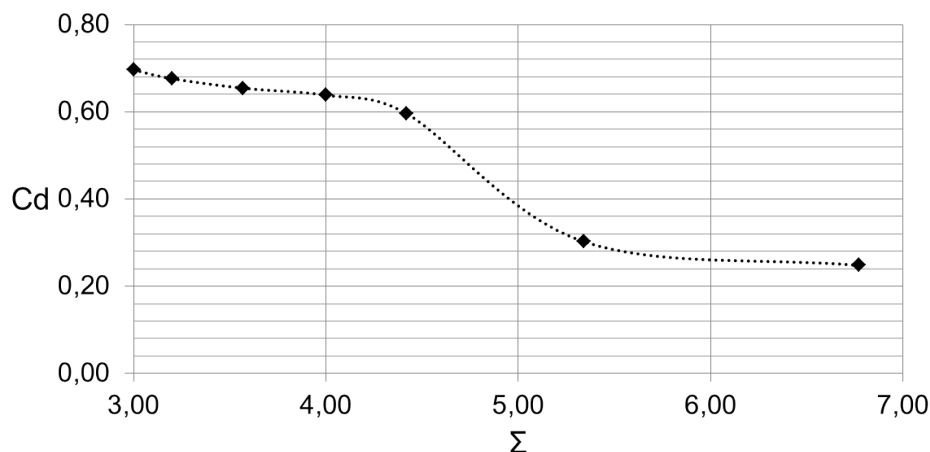
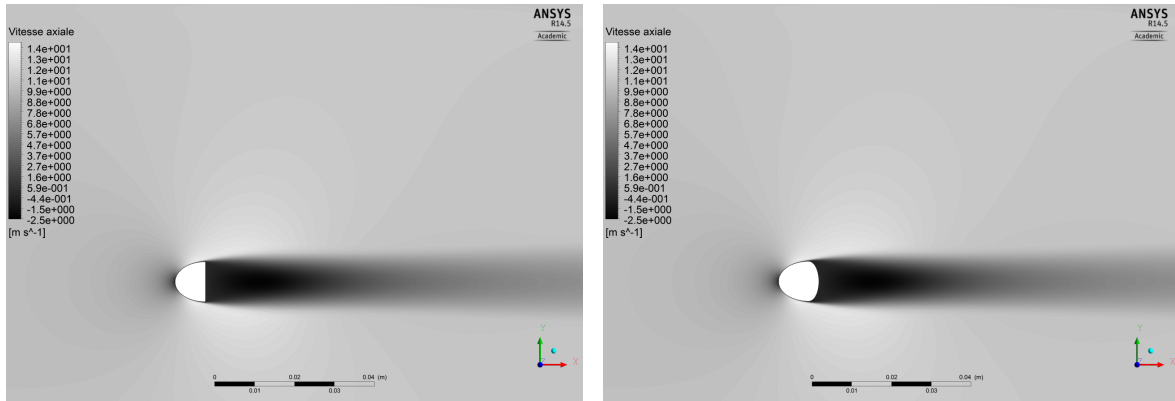


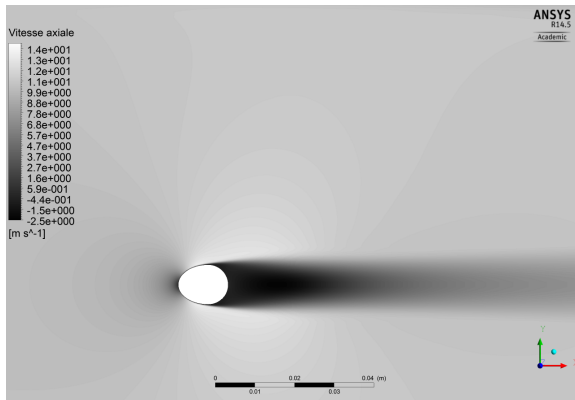
Figure 5.11 Courbe d'évolution de la traînée en fonction du paramètre Σ

En s'inspirant de l'article de Roshko (1993), un tracé du profil de pression en aval des objets a été réalisé. Pour chaque ellipse, l'origine a été choisie à l'extrémité arrière de l'objet. La figure 5.18 représente ce tracé, sur lequel on peut voir que les 4 premières courbes sont assez proches, tandis que les courbes 5 et 6 sont plus hautes que les autres. Cela entraîne une pression moins faible dans la zone de recirculation, et ainsi une chute du coefficient de traînée. Afin de le visualiser encore plus clairement, la figure 5.19 montre la même chose que la figure 5.18 sauf que fois l'axe des abscisses est adimensionnalisé par la longueur de la zone de recirculation. Il a été décidé de choisir x_r tel que le point de rattachement corresponde au point de la ligne centrale en aval de l'objet au niveau duquel la vitesse axiale de l'écoulement est nulle. La figure 5.20 illustre cette mesure. De même que dans Roshko (1993), la plupart des profils se superposent bien, excepté les deux derniers. Or la principale différence entre ceux-ci et les autres est justement le fait que la couche limite se recolle à l'arrière de l'objet. Le recollement de la couche limite pourrait donc être la limite au modèle de Roshko (1993). Le fait que la partie avant de l'objet ne soit pas modifié laisse penser que seule la zone de dépression en arrière de l'objet est responsable du changement de la force de traînée. En effet ici la traînée visqueuse est négligeable, car celle-ci augmente avec la taille de l'objet, ce qui est opposé à l'évolution constatée. La figure 5.21 montre pour les différents objets l'évolution de la pression en amont des différents objets. Celle-ci est quasiment identique pour tous les objets, ce qui prouve que c'est bien la modification de la pression en aval de l'objet qui modifie le coefficient de traînée.

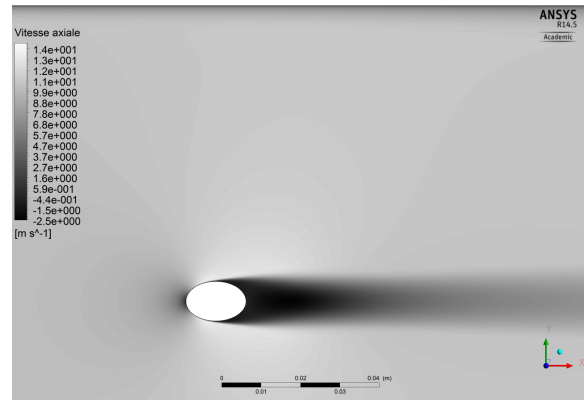


(a)

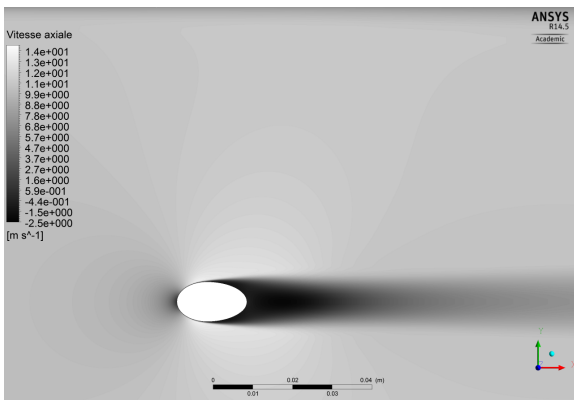
(b)



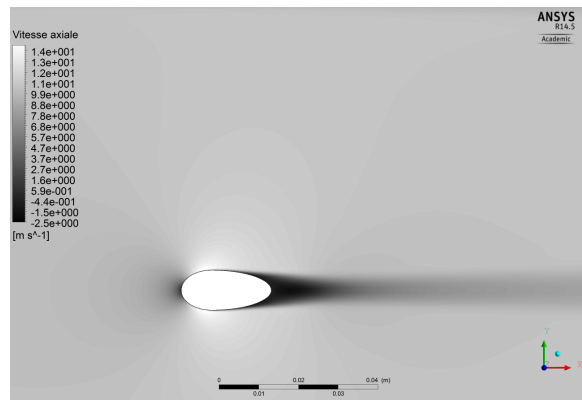
(c)



(d)



(e)



(f)

Figure 5.12 Visualisation des vitesses axiales pour les différents objets (partie 1)

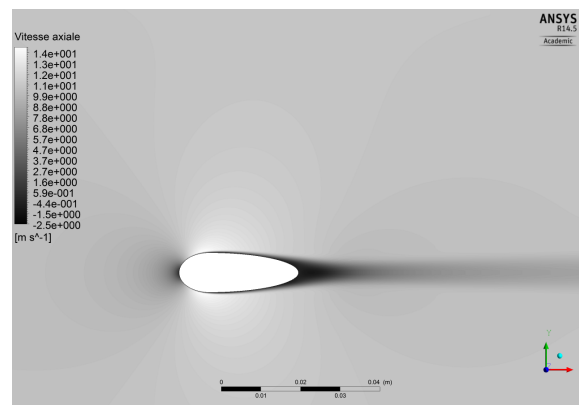
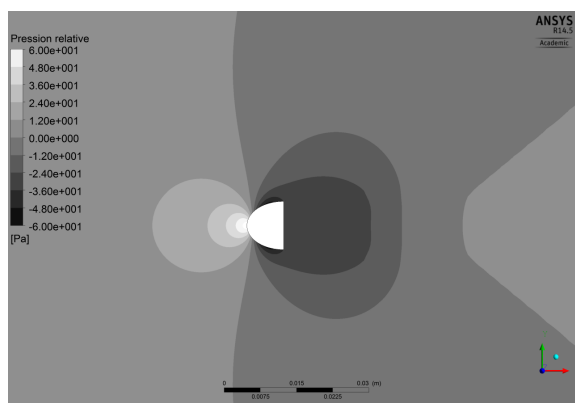
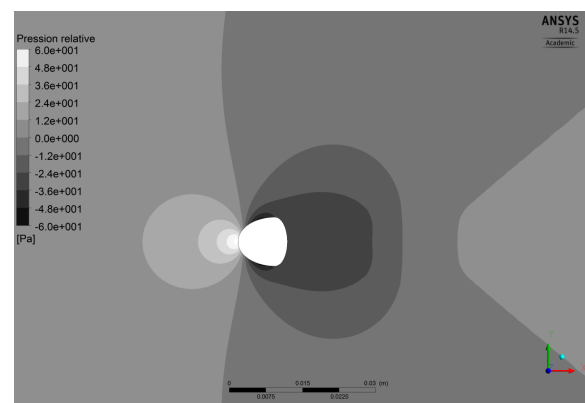


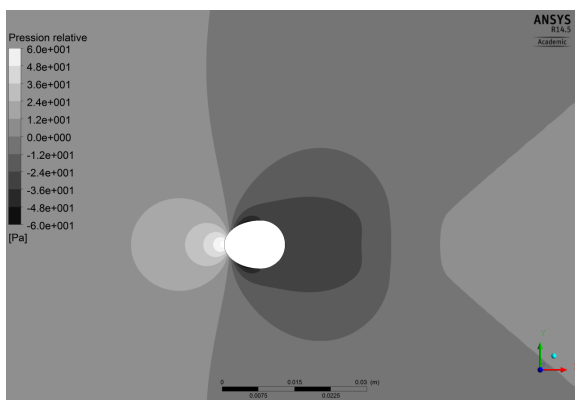
Figure 5.13 Visualisation des vitesses axiales pour les différents objets (partie 2)



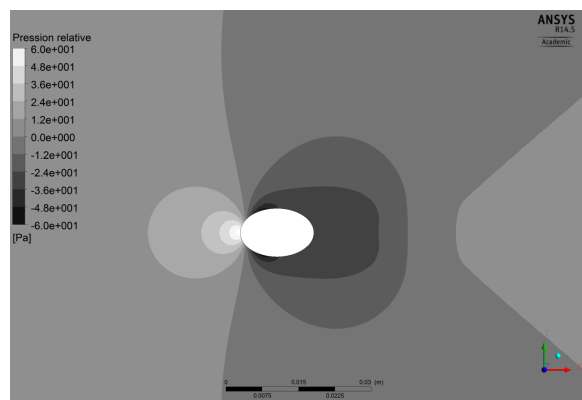
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 5.14 Visualisation des pressions relatives pour les différents objets (partie 1)

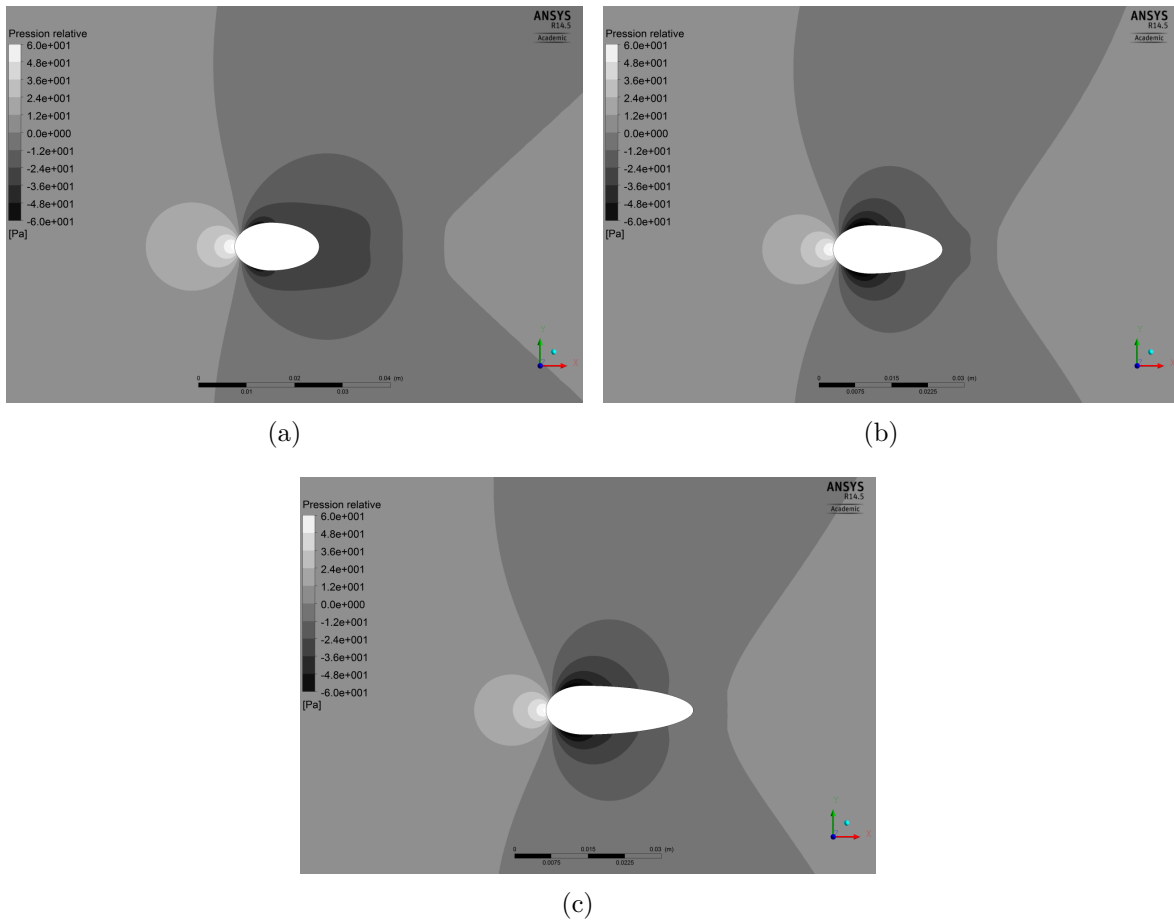


Figure 5.15 Visualisation des pressions relatives pour les différents objets (partie 2)

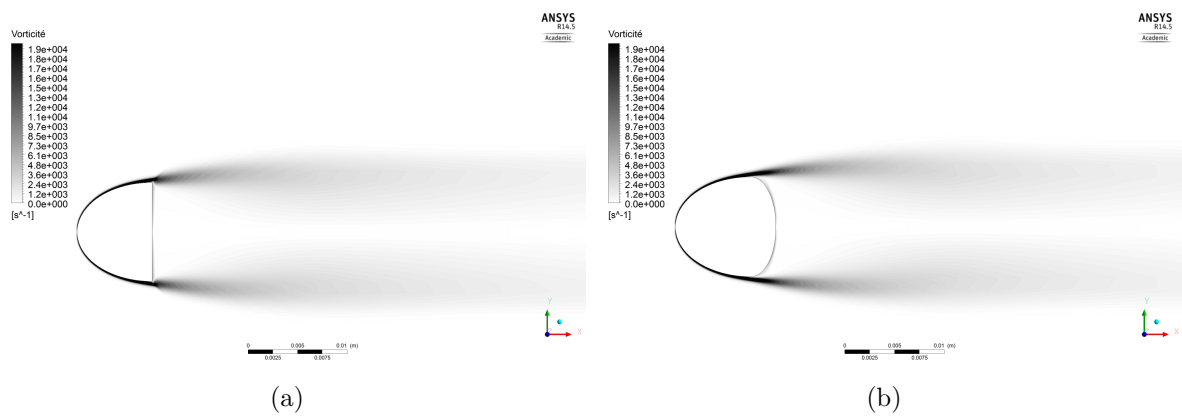


Figure 5.16 Visualisation de la vorticité pour les différents objets (partie 1)

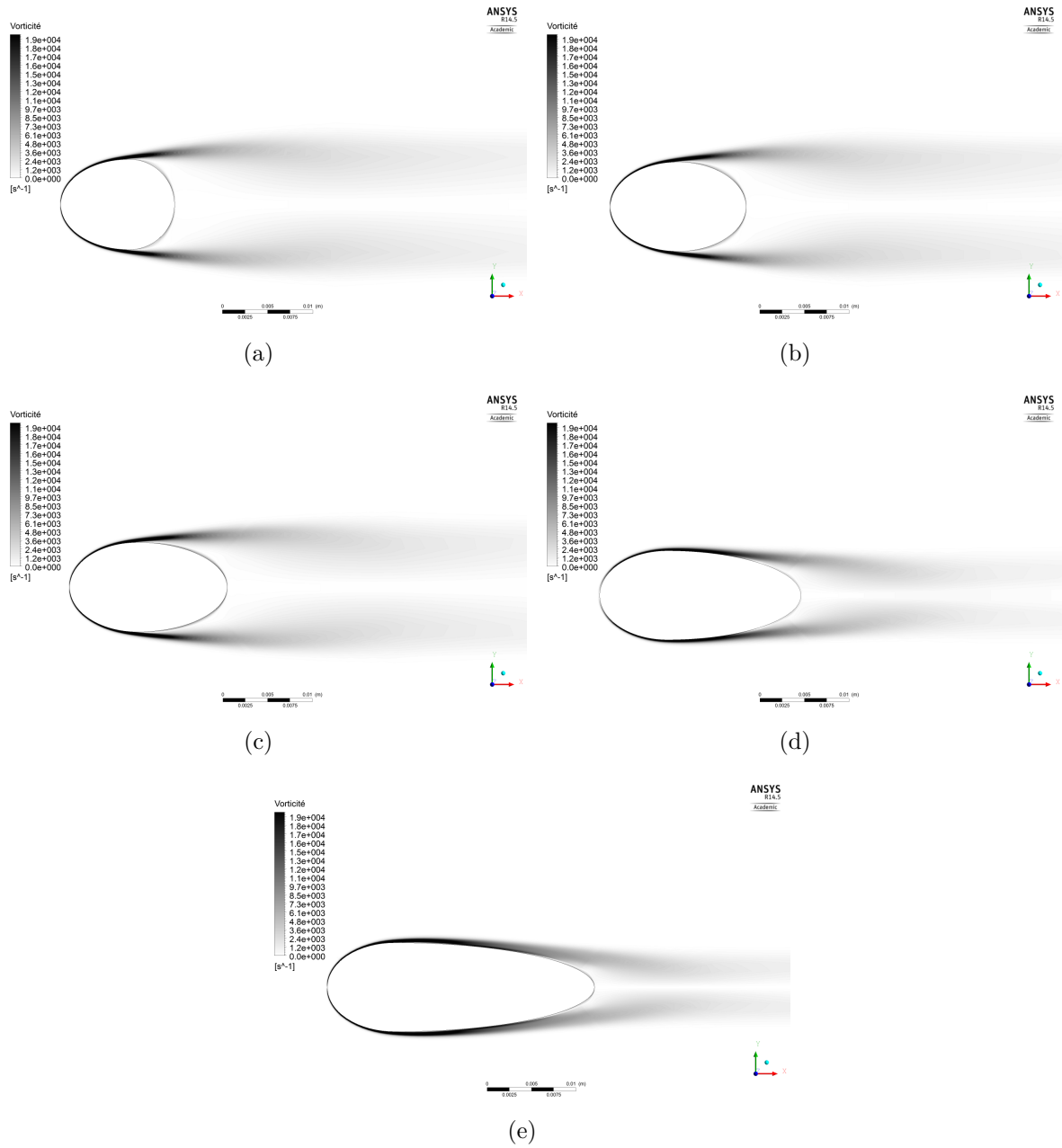


Figure 5.17 Visualisation de la vorticité pour les différents objets (partie 2)

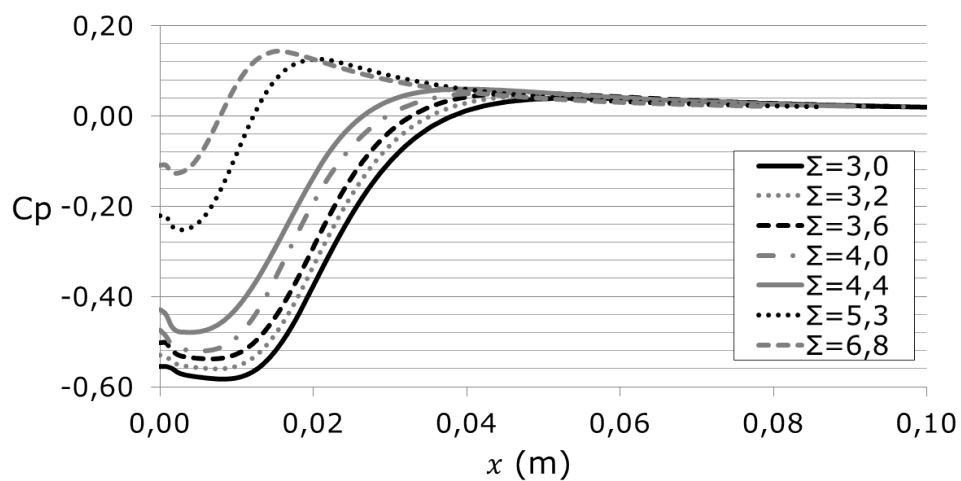


Figure 5.18 Profil d'évolution du coefficient de pression en fonction de la distance à l'extrémité arrière de l'objet

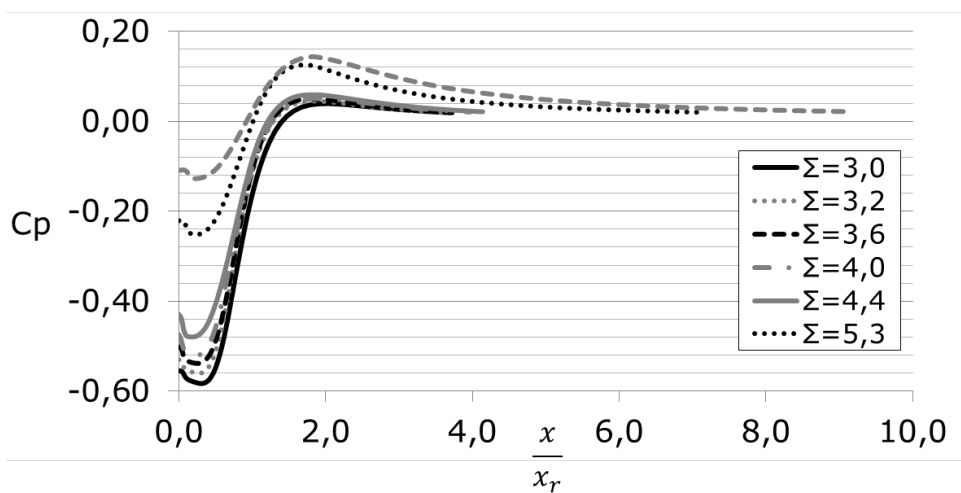


Figure 5.19 Profil d'évolution du coefficient de pression en fonction de la distance adimensionnée à l'extrémité arrière de l'objet

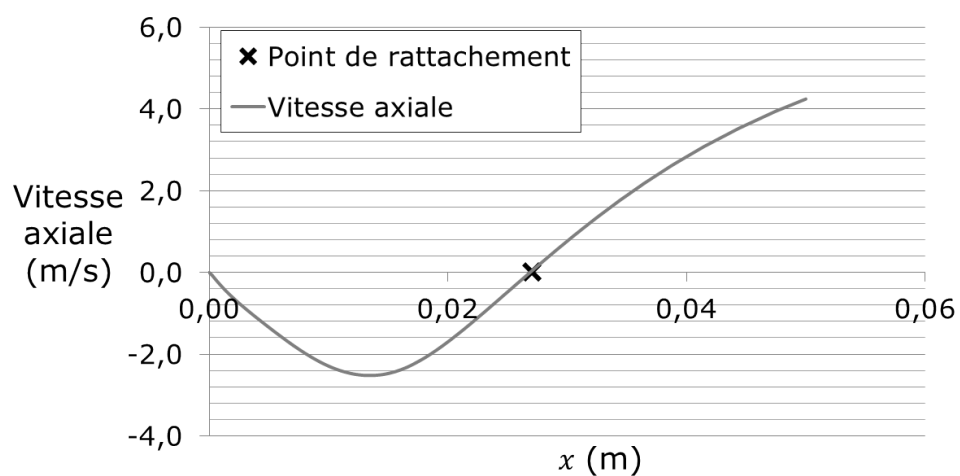


Figure 5.20 Illustration de la mesure de x_r .

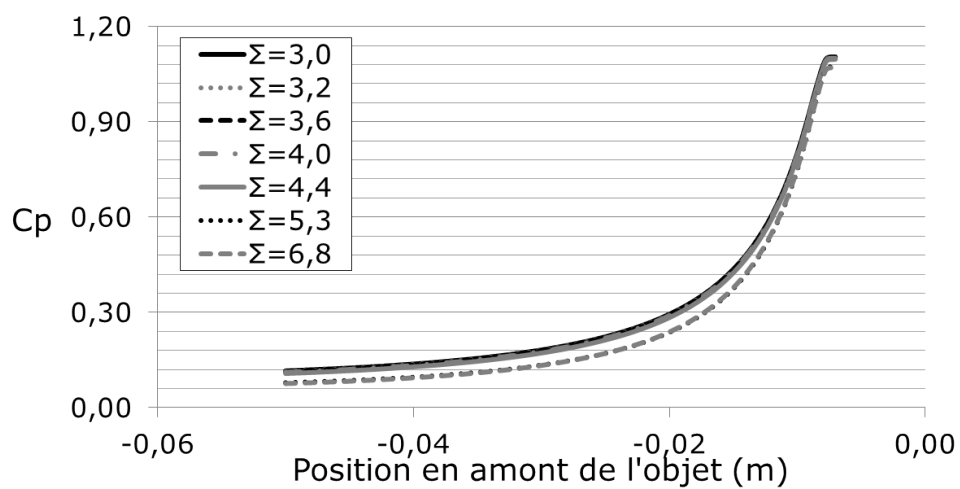



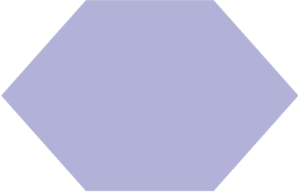
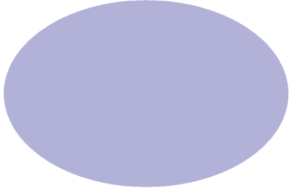
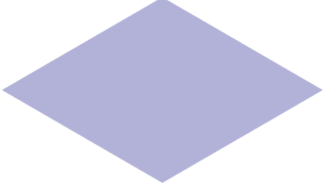
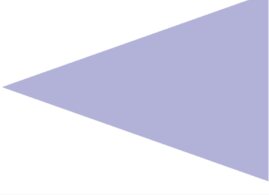
Figure 5.21 Profil d'évolution du coefficient de pression en fonction de la distance en amont de l'objet

5.2.3 Influence du paramètre Γ sur le coefficient de traînée.

Ici les objets étudiés ont été dessinés de sorte que tous ont la même valeur de Σ et seulement Γ qui varie. Le tableau 5.2 montre la géométrie et les valeurs du C_D et de Γ des objets étudiés. Les simulations pour ce paramètre ont été faites en 3D.

La figure 5.22 montre l'évolution du coefficient de traînée en fonction du paramètre Γ . Le coefficient de traînée évolue de manière décroissante lorsque le paramètre Γ augmente, excepté pour le troisième point. Ce dernier correspond à l'objet à section ellipsoïdale. C'est le seul objet ne comportant aucun angle vif. La figure 5.23 montre une visualisation de la vitesse axiale de l'écoulement autour des différents objets, tandis que la figure 5.24 montre une visualisation de la pression relative autour de l'objet. Les échelles sont identiques pour les différents objets afin de garder une consistance dans les résultats. Comme pour l'étude du paramètre Σ , le sillage derrière les objets diminue lorsque Γ augmente (l'ellipse mise à part), sauf que cette fois, la pression en amont de l'objet change beaucoup suivant les objets, comme le montre la figure 5.24. Ici, ce n'est donc pas juste la pression en aval qui modifie le coefficient de traînée, mais l'ensemble du champ de pression autour de l'objet.

Tableau 5.2 Tableau des coefficients de traînée des objets dont le paramètre Σ est fixe.

Image	Γ	C_d
	0,00	1,34
	0,45	1,00
	0,76	0,63
	0,87	0,84
	1,40	0,72

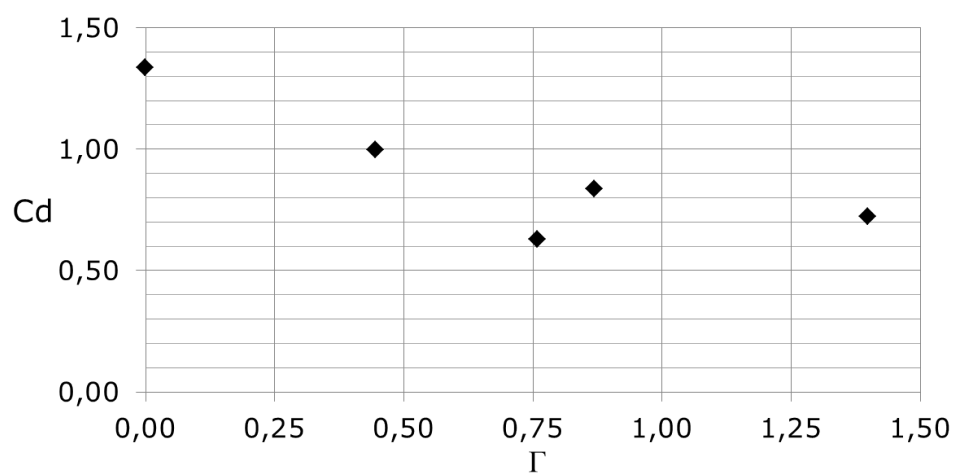
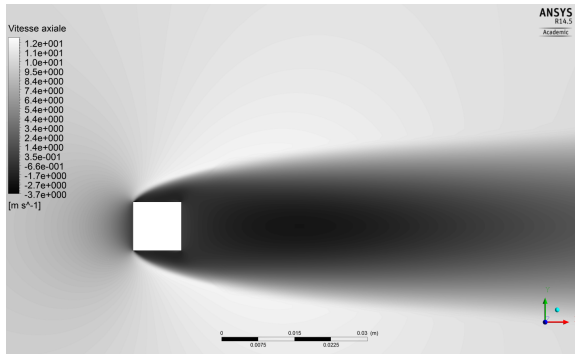
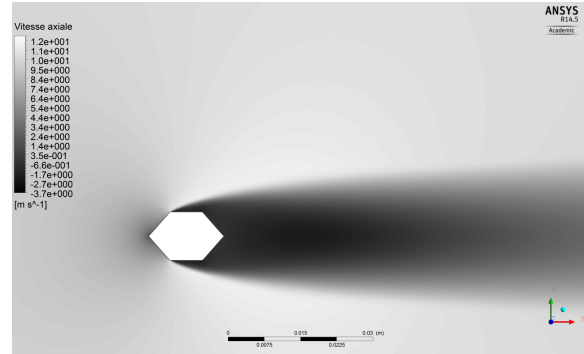


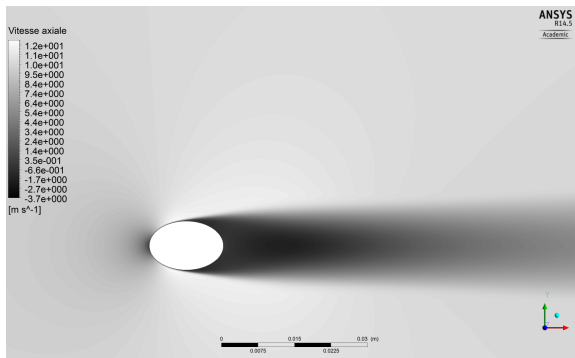
Figure 5.22 Courbe d'évolution de la traînée en fonction du paramètre Γ



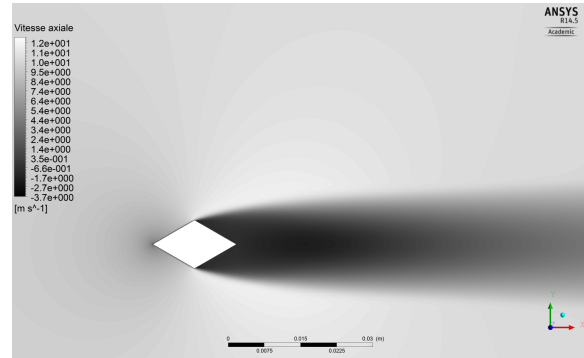
(a)



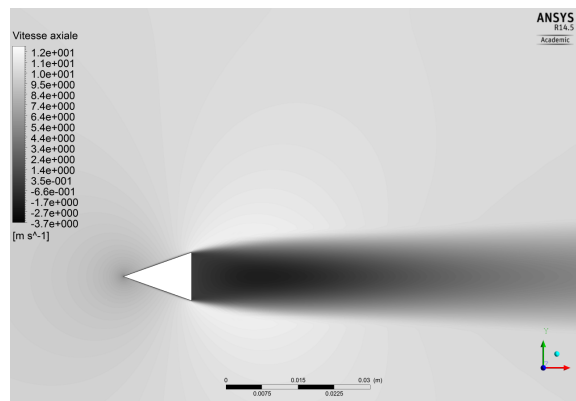
(b)



(c)



(d)



(e)

Figure 5.23 Visualisations des vitesses axiales pour les différents objets

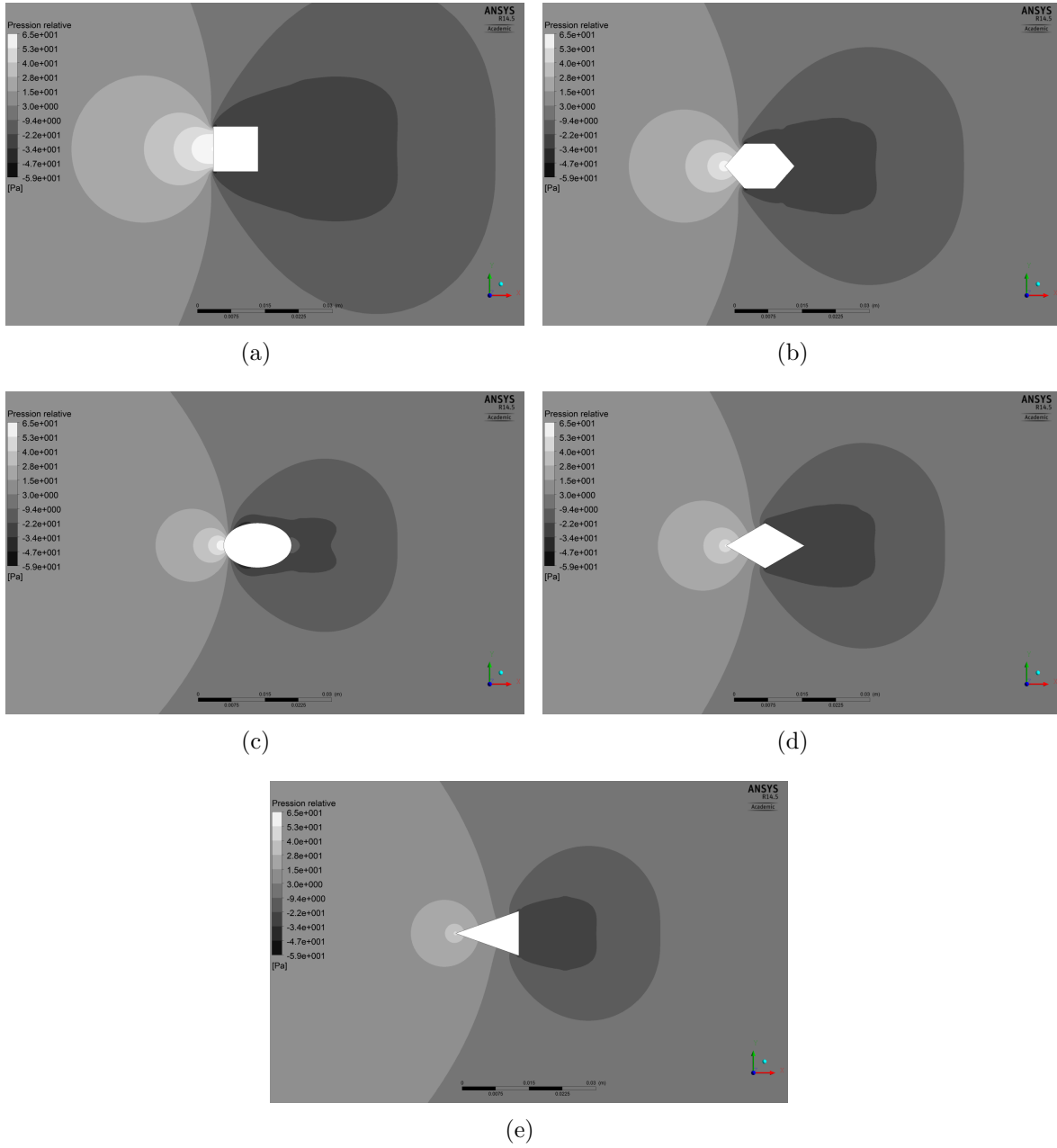


Figure 5.24 Visualisations des pressions relatives pour les différents objets

CHAPITRE 6 CORRELATION DU C_D POUR DES OBJETS 3D NON SPHÉRIQUES

Cette partie traite le cas d'objets 3D non sphériques, c'est-à-dire dont les dimensions dans les trois directions principales sont du même ordre de grandeur sans être nécessairement égales. Le but est de trouver une autre corrélation pour ce type spécifique d'objets. Ce travail va pour cela continuer les travaux commencés par Saber-Cherif et Mureithi (2015). La même soufflerie sera utilisée et les résultats qu'il a déjà obtenu seront récupérés. L'apport principal de cette étude sera d'augmenter le nombre d'objets testés pour valider ses résultats, et d'établir une corrélation ne nécessitant pas le calcul de paramètres difficiles à obtenir.

Un problème qui s'est posé est le fait que les objets ne sont pas statiques. Leur surface projetée change donc en permanence et il n'est plus possible de calculer le coefficient de traînée de l'objet en utilisant la surface projetée exacte de l'objet suivant une direction précise. C'est d'ailleurs ce phénomène qui explique en partie le mouvement vertical des objets. C'est pour cela que tous les résultats auront une plage "d'incertitude". L'absence de surface projetée constante oblige à définir une nouvelle surface de référence pour définir un coefficient de traînée.

Comme expliqué au chapitre 3, nos objets ont tous été dessinés sous CATIA et imprimés en 3D à l'aide de l'imprimante 3D *Ultimaker Original*. La figure 6.1 montre un aperçu des différents objets testés. Le reste des objets est montré en Annexe B.

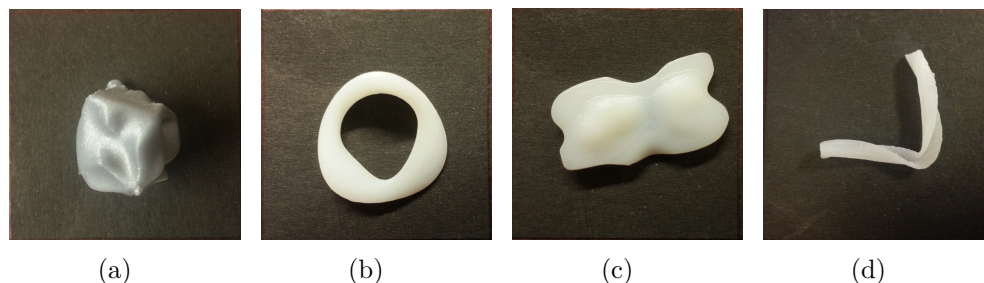


Figure 6.1 Photographies de différents objets testés dans la soufflerie verticale.

Dans un premier temps les coefficients de traînée d'une sphère, obtenu dans la soufflerie verticale et dans la soufflerie horizontale ont été comparés. En effet la surface projetée de la sphère étant toujours la même quelle que soit son orientation, cet objet est le meilleur témoin possible pour vérifier la fiabilité de notre soufflerie verticale. Le tableau 6.1 montre les résultats de cette comparaison. Un écart d'environ 6% existe entre les deux valeurs.

Cette différence peut venir du fait que le profil de vitesse n'est pas parfaitement plat dans la soufflerie verticale, ce qui crée des mouvements oscillatoires de la sphère et empêche une mesure très précise de la vitesse à laquelle l'objet est en équilibre avec les forces fluides.

Tableau 6.1 Tableau de comparaison du coefficient de traînée d'une sphère par ces deux souffleries.

	C_D	R_e
Soufflerie verticale	0,48	18000
Soufflerie horizontale	0,45	25000

6.1 Corrélation basée sur le coefficient de traînée d'une sphère

Lors des expériences, les objets tournent beaucoup, suivant différentes directions, de sorte qu'en moyenne le fluide voit une sphère. L'idée de la corrélation suivante est donc d'appliquer le coefficient de traînée d'une sphère pour prédire la traînée réelle des objets. On peut donc réécrire l'équation 2.1 :

$$D = \frac{1}{2} C_{D_{sphère}} \rho U^2 A \quad (6.1)$$

pour laquelle reste à définir la surface de référence A . Quatre différentes définitions sont choisies pour définir A :

- $A = A_{Avg}$
- $A = \pi \frac{L_{Avg}^2}{4}$
- $A = A_{Max}$
- $A = \pi \frac{L_{Max}^2}{4}$

avec, de la même manière que les définit Saber-Cherif et Mureithi (2015), lui même inspiré de McCleskey (1988), les grandeurs L_{Max} , W_{Max} et T_{Max} ont d'abord été mesurées, desquelles sont déduits L_{Avg} et W_{Avg} en prenant 90% de la valeur mesurée, puis calculées les autres grandeurs comme décrit dans l'équation 6.2. Comme expliqué au chapitre 3, ces formules viennent du fait que les objets sont transformés en parallélépipèdes équivalents afin justement d'être capable de définir des surfaces de référence sans avoir de connaissance approfondies des objets. La figure 6.2 montre quatre courbes utilisant différentes définitions de cette surface. Pour cette figure, les losanges noirs correspondent à la traînée mesurée via la soufflerie verticale (représentée ici sans les barres d'erreurs par souci de visibilité) tandis que les carrés transparents correspondent à la traînée calculée avec notre modèle. Pour une meilleure visibilité, les résultats ont été triés de manière à avoir une traînée mesurée croissante

de la gauche vers la droite du graphique. L'axe horizontal ne représente aucune grandeur particulière, si ce n'est qu'à une abscisse précise correspond un objet unique (donc deux points, celui calculé et celui mesuré). Le $C_{D_{sphère}}$ choisi est celui mesuré par Saber-Cherif et Mureithi (2015).

$$T_{Avg} = \frac{m}{L_{Avg}W_{Avg}\rho} \quad (6.2a)$$

$$A_{Min} = W_{Avg}T_{Avg} \quad (6.2b)$$

$$A_{Max} = \sqrt{L_{Max}^2W_{Max}^2 + L_{Max}^2T_{Max}^2 + T_{Max}^2W_{Max}^2} \quad (6.2c)$$

$$A_{Avg} = \frac{1}{2}(L_{Avg}W_{Avg} + L_{Avg}T_{Avg} + W_{Avg}T_{Avg}) \quad (6.2d)$$

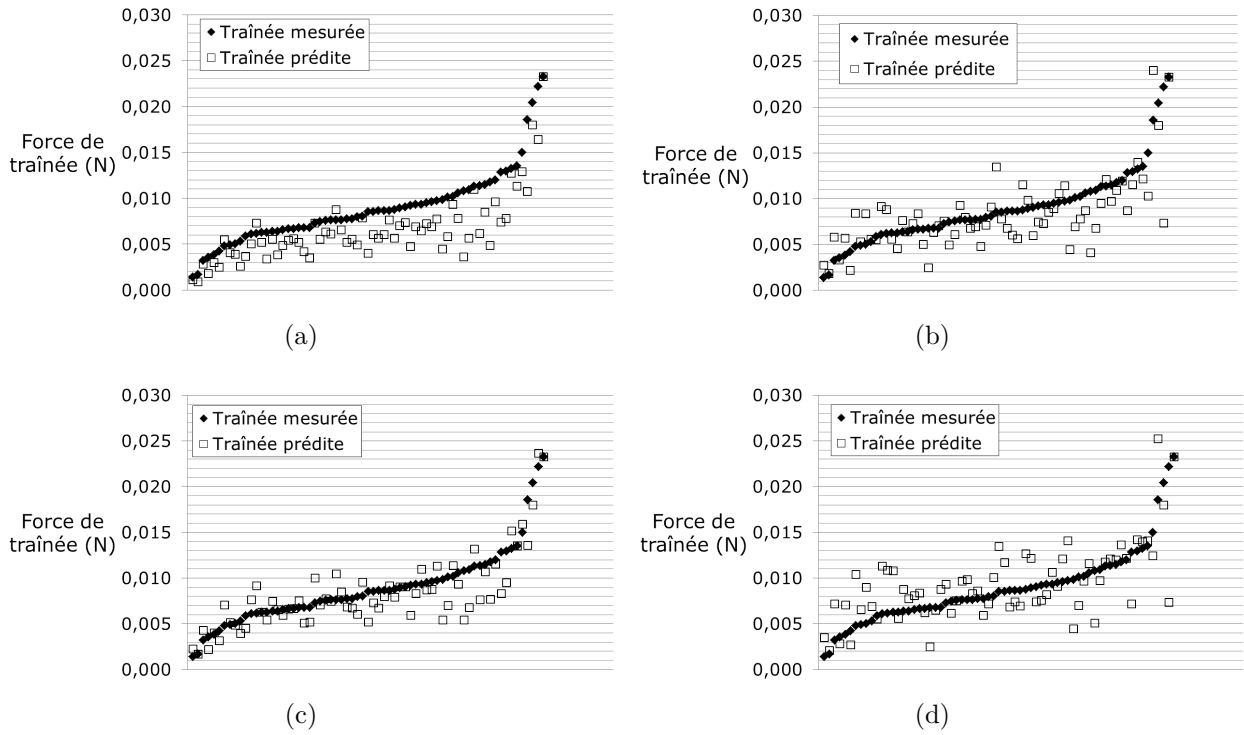


Figure 6.2 Courbe de notre modèle de traînée en utilisant $A = A_{Avg}$ (a), $A = \pi \frac{L_{Avg}^2}{4}$ (b), $A = A_{Max}$ (c), $A = \pi \frac{L_{Max}^2}{4}$ (d)

Les courbes utilisant A_{Avg} et A_{Max} semblent plus précises que celles utilisant L_{Avg} et L_{Max} . Cela était attendu car ces deux premières valeurs demandent une meilleure connaissance de l'objet que les deux dernières. Cependant, même pour ces courbes il existe un écart

important entre les valeurs mesurées et calculées.

Afin d'améliorer les résultats, un facteur d'optimisation α a été ajouté à l'équation 6.1 pour obtenir notre nouveau modèle de traînée donné par l'équation 6.3 :

$$D = \frac{1}{2}\alpha C_{D_{sphère}}\rho U^2 A \quad (6.3)$$

Ce paramètre α est calculé par un algorithme de minimisation de l'écart entre la traînée mesurée et la traînée prédite par notre modèle :

$$Ecart = \sqrt{D_{mesuré}^2 - (\frac{1}{2}\alpha C_{D_{sphère}}\rho U^2 A)^2} \quad (6.4)$$

Il provient du fait que nos objets ne sont pas exactement des sphères. On peut donc voir le nombre $\alpha C_{D_{sphère}}$ comme le coefficient de traînée optimal à utiliser pour notre modèle. Le tableau 6.2 montre ces valeurs ainsi que la valeur des écarts aux moindres carrés.

Tableau 6.2 Tableaux des valeurs des facteurs de correction et des écarts entre notre modèle et les valeurs expérimentales.

	Facteur de correction (α)	Ecart
A_{Avg}	1,31	0,0060
L_{Avg}	1,05	0,0950
A_{Max}	1,06	0,0094
L_{Max}	0,93	0,0119

La figure 6.3 montre les mêmes courbes que la figure 6.2 mais en prenant en compte le facteur d'optimisation α calculé précédemment. Enfin la figure 6.4 montre l'évolution du coefficient de traînée en fonction de la valeur de la surface de référence. Ce graphe n'est réalisé que pour la corrélation utilisant la surface de référence $A = A_{Avg}$ car d'après le tableau 6.2 c'est celle-ci qui est la plus précise.

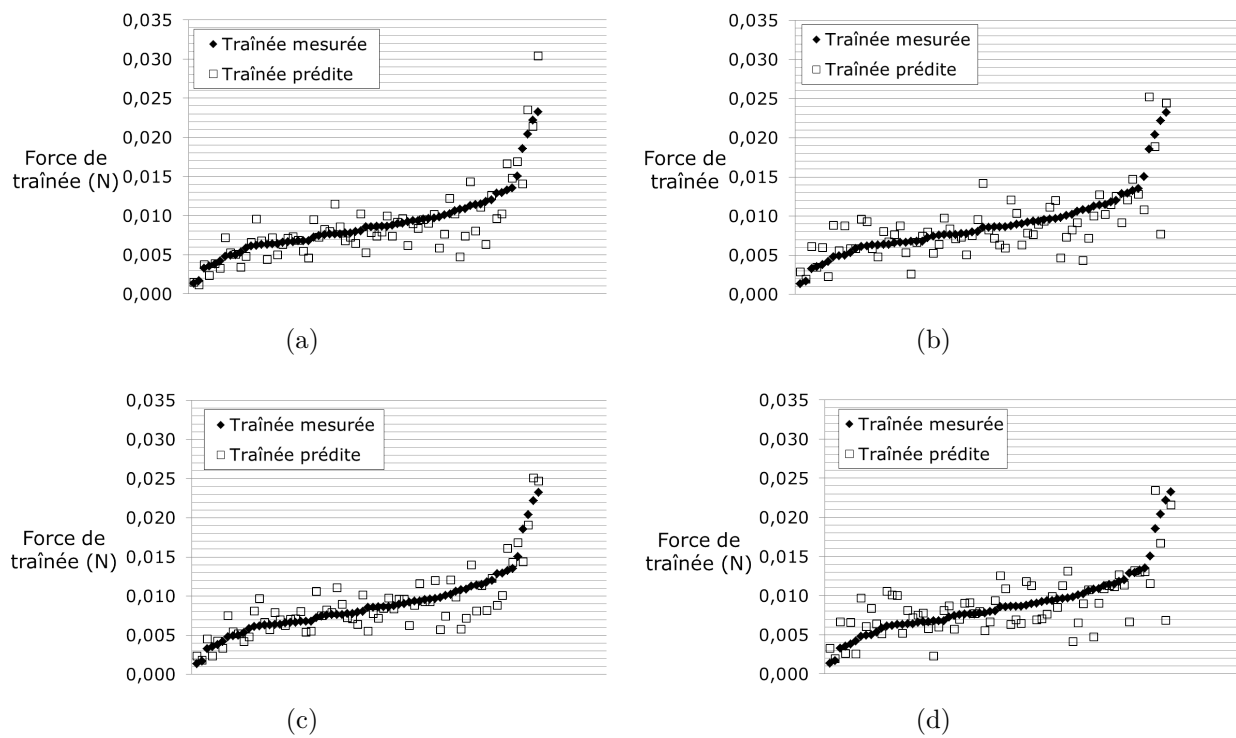


Figure 6.3 Courbe de notre modèle de traînée corrigé en utilisant $A = A_{Avg}$ (a), $A = \pi \frac{L_{Avg}^2}{4}$ (b), $A = A_{Max}$ (c), $A = \pi \frac{L_{Max}^2}{4}$ (d)

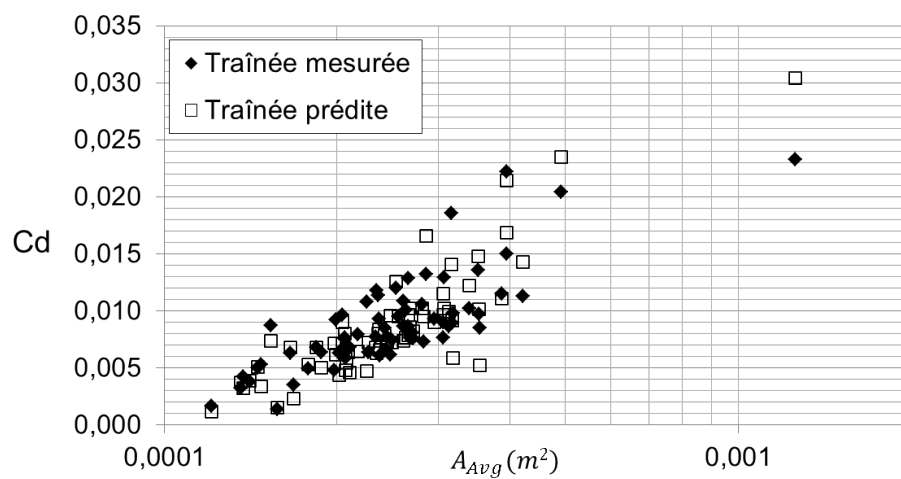


Figure 6.4 Courbe d'évolution du coefficient de traînée en fonction de A_{Avg}

CHAPITRE 7 CONCLUSION

Ce projet a traité du lien existant entre la géométrie de certains objets et leur coefficient de traînée. Trois différentes catégories d'objets ont été étudiées : les objets vrillés, les objets allongés et les objets 3D non sphériques. Différents paramètres ont été mis en évidence tels que l'hélicité, le paramètre $\Sigma = \frac{A}{A_p}$ déjà introduit par Bowen et Masliyah (1973), le paramètre que nous avons appelé $\Gamma = \frac{\Delta x}{\Delta y}$ et le facteur de correction α .

7.1 Synthèse des travaux

Il a été mis en évidence dans ce travail que pour les objets vrillés, l'hélicité est un paramètre représentatif du coefficient de traînée, peu importe leur forme de base. Celui-ci reste quel que soit la valeur de ce paramètre, proche de celui d'un cylindre, avec un maximum atteint lorsque l'hélicité vaut $h = 0, 2$. Cela s'est vérifié à la fois lors des simulations numériques et des mesures expérimentales en soufflerie sur les torons à deux brins, mais aussi lors de mesures expérimentales sur des plaques vrillées. La comparaison des lignes de courant en 3D proches de l'objet montre que le sillage derrière un cylindre est plus proche de celui derrière un toron à 10 tours de vrille que de celui derrière un toron à un seul tour de vrille. Cela semble être dû au fait que l'interaction des structures en aval de l'objet empêche le développement d'un plus gros sillage lorsque l'objet devient plus vrillé. L'analyse des décompositions POD montre que l'hélicité entraîne une répartition plus uniforme de l'énergie suivant les différents modes. Les premiers modes cèdent une partie de leur énergie aux modes de numéro plus élevé. La comparaison de la répartition modale de l'énergie ainsi que la comparaison entre les lignes de courant 2D derrière le toron à un tour de vrille entre l'écoulement expérimental (visualisé grâce à une analyse de PIV) et l'écoulement numérique ont montré de grandes similarités entre les écoulements. Cela confirme les résultats numériques obtenus.

L'étude d'objets allongés a permis de mettre en évidence que le paramètre Σ seul ne permettait pas de trouver une corrélation du coefficient de traînée. L'ajout du paramètre Γ a permis de contrôler davantage la géométrie des objets et de trouver des comportements caractéristiques de certaines variations de géométries. Ainsi, le coefficient de traînée observé sur les différentes ellipses avec le paramètre Γ constant, connaît une chute brutale de sa valeur lorsque le paramètre Σ passe de 4,42 à 5,34. L'analyse des vitesses axiales, des profils de pression et de vorticité derrière ces objets a montré un phénomène semblable à celui observable lors de la crise de traînée : le recollement de la couche limite. Cette discontinuité est aussi observée dans l'analyse des coefficients de pression en aval des objets. C'est justement

ce changement brutal dans le coefficient de pression qui explique la chute tout aussi brutale du coefficient de traînée. Roshko et Lau (1965) avait aussi observé que les coefficients de pression derrière différents objets étaient superposables (en les définissant de manière spécifique) excepté ceux d'objets dont la partie arrière était trop étirée. Il semble que le recollement de la couche limite soit à l'origine de ce phénomène. L'étude du paramètre Γ avec Σ fixe montre une tendance décroissante de la traînée avec ce paramètre. Cependant, un point rompt cette tendance. On note toutefois que celle-ci est respectée pour tous les objets comprenant des angles vifs, le seul qui détonne étant une ellipse.

Enfin, l'observation du mouvement chaotique des objets libres de se déplacer dans la soufflerie verticale nous a conduit à assimiler de tels objets à des sphères. La surface A_{Avg} telle que définie au chapitre 6 permet d'obtenir un premier modèle de prédiction de la traînée d'un objet en prenant le C_D d'une sphère. L'ajout du paramètre de correction α améliore ce modèle en diminuant l'écart entre les valeurs mesurées et les valeurs prédites sans ajouter de mesure supplémentaire. Il représente le fait que les objets ne sont pas vraiment des sphères. Pour un échantillon d'objets aléatoires, il doit donc rester identique pour le même type d'écoulement (un écoulement en faisceau de tubes aura probablement un paramètre différent par exemple). Il est important de noter que ce modèle ne nécessite aucune connaissance approfondie de l'objet à tester. Seuls son volume, son poids et deux mesures de longueurs sont nécessaires au calcul de la traînée d'un objet.

Bien qu'un modèle général de traînée, s'appliquant à tous les objets simultanément eut été avantageux, la séparation en différentes catégories a permis de créer différents modèles pour différents types d'objets. Une personne voulant utiliser un des ces modèles devra donc dans un premier temps identifier la catégorie à laquelle son objet appartient. De plus, l'étude séparée permet de mettre en évidence différents phénomènes qui pourront être regroupés dans un modèle plus global les englobant.

7.2 Précisions sur les résultats et suggestions de travaux complémentaires

Comme il a été dit au chapitre 4, tous les objets vrillés et les objets allongés (excepté ceux de l'étude sur le paramètre Γ) testés avaient une longueur de 15 cm pour une hauteur d'environ 1 cm. Par conséquent cette étude n'a pas étudié l'impact du rapport $\frac{H}{L}$ sur le coefficient de traînée.

De plus, tous les objets étudiés l'ont été à un nombre de Reynolds particulier, et donc l'influence du nombre de Reynolds sur le coefficient de traînée n'a pas été étudiée. Cependant, la comparaison avec des éléments de référence (le cylindre pour les objets vrillés, la sphère

pour les objets 3D) dont on connaît l'évolution du C_D en fonction du Re peut en première approximation donner une idée de cette évolution pour les autres objets, en faisant l'hypothèse que les objets suivent la même loi que celle suivie par leur objet de référence. Ceci dit, cette première hypothèse mérite probablement d'être modifiée car on n'attend pas tout à fait le même comportement autour de la zone de la crise de traînée, connaissant l'influence de la rugosité sur celle-ci.

On note aussi que la plage d'hélicité étudiée est environ $h = [0, 1..1]$, avec seuls deux types de géométries étudiés (le toron et la plaque). Il serait aussi intéressant de continuer le travail sur les objets allongés en essayant de combiner ces deux paramètres (Σ et Γ) sur des objets plus aléatoires.

Enfin, dans le modèle de traînée basé sur celui de la sphère, on considère que l'objet a un mouvement de rotation sur lui-même très rapide et dans toutes les directions afin que le fluide voie une sphère. Il pourrait être intéressant d'essayer de trouver de nouveaux paramètres de correction de ce modèle compte-tenu du fait que, suivant leur géométrie, certains objets n'auront pas exactement ce mouvement.

RÉFÉRENCES

- Achenbach, Elmar (1972). Experiments on the flow past spheres at very high reynolds numbers. *Journal of Fluid Mechanics*, 54(03), 565–575.
- Bowen, BD and Masliyah, JH (1973). Drag force on isolated axisymmetric particles in stokes flow. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 51(1), 8–15.
- Chien, Sze-Foo and others (1994). Settling velocity of irregularly shaped particles. *SPE Drilling & Completion*, 9(04), 281–289.
- Clift, R and Gauvin, WH (1970). The motion of particles in turbulent gas streams. *Proc. Chemeca*. 19–26.
- Ganser, Gary H (1993). A rational approach to drag prediction of spherical and nonspherical particles. *Powder Technology*, 77(2), 143–152.
- Haider, A and Levenspiel, O (1989). Drag coefficient and terminal velocity of spherical and nonspherical particles. *Powder technology*, 58(1), 63–70.
- Khan, AR and Richardson, JF (1987). The resistance to motion of a solid sphere in a fluid. *Chemical Engineering Communications*, 62(1-6), 135–150.
- McCleskey, Frank (1988). Drag coefficients for irregular fragments. Rapport technique, DTIC Document.
- Ortiz, Xavier and Hemmati, A and Rival, David and Wood, David (2012). Instantaneous forces and moments on inclined flat plates. *Seventh International Colloquium on Bluff Body Aerodynamics & Applications (BBAA VII)*.
- Roshko, A (1993). Free shear layers, base pressure and bluff-body drag. Rapport technique, DTIC Document.
- Roshko, Anatol and Lau, Jark C (1965). Some observations on transition and reattachment of a free shear layer in incompressible flow. *Proc. 1965 Heat Transfer and Fluid Mechanics Institute*, edited by AF Charwat, Stanford University Press, Stanford, 157–167.
- Saber-Cherif, Karim and Mureithi, Njuki (2015). *Rapport de stage*. Ecole Polytechnique Montréal.
- Seika (2014). Principle of PIV.
- Singh, SP and Mittal, S (2005). Flow past a cylinder : shear layer instability and drag crisis. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 47(1), 75–98.
- Sychev, VV (1982). Asymptotic theory of separation flows. *Fluid Dynamics*, 17(2), 179–188.

- Turton, R and Levenspiel, O (1986). A short note on the drag correlation for spheres. *Powder Technology*, 47(1), 83–86.
- Waddell, HAKON (1933). Sphericity et roundness of rock particles. *J. Geol*, 41, 310–331.
- Wadell, Hakon (1934). The coefficient of resistance as a function of reynolds number for solids of various shapes. *Journal of the Franklin Institute*, 217(4), 459–490.
- Wang, HF and Zhou, Y and Mi, J (2012). Effects of aspect ratio on the drag of a wall-mounted finite-length cylinder in subcritical and critical regimes. *Experiments in fluids*, 53(2), 423–436.
- White, Frank (2015). *Fluid mechanics*. McGraw-Hill Higher Education.

ANNEXE A VISUALISATIONS DES MODES PAR POD

Dans cette annexe seront présentés, sous formes de lignes de courant, les modes 3 à 10 des écoulements autour du cylindre et du toron à un tour.

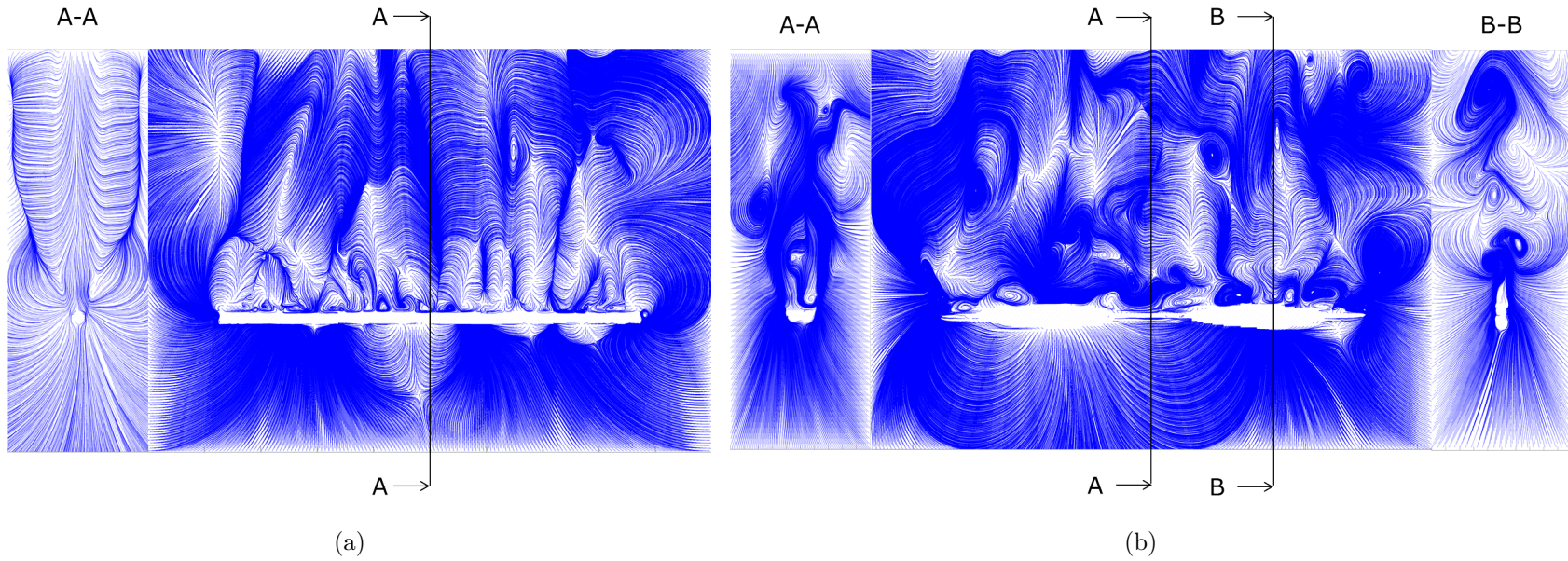


Figure A.1 Visualisation du troisième mode de la POD pour le cylindre (a), et le toron à un tour (b).

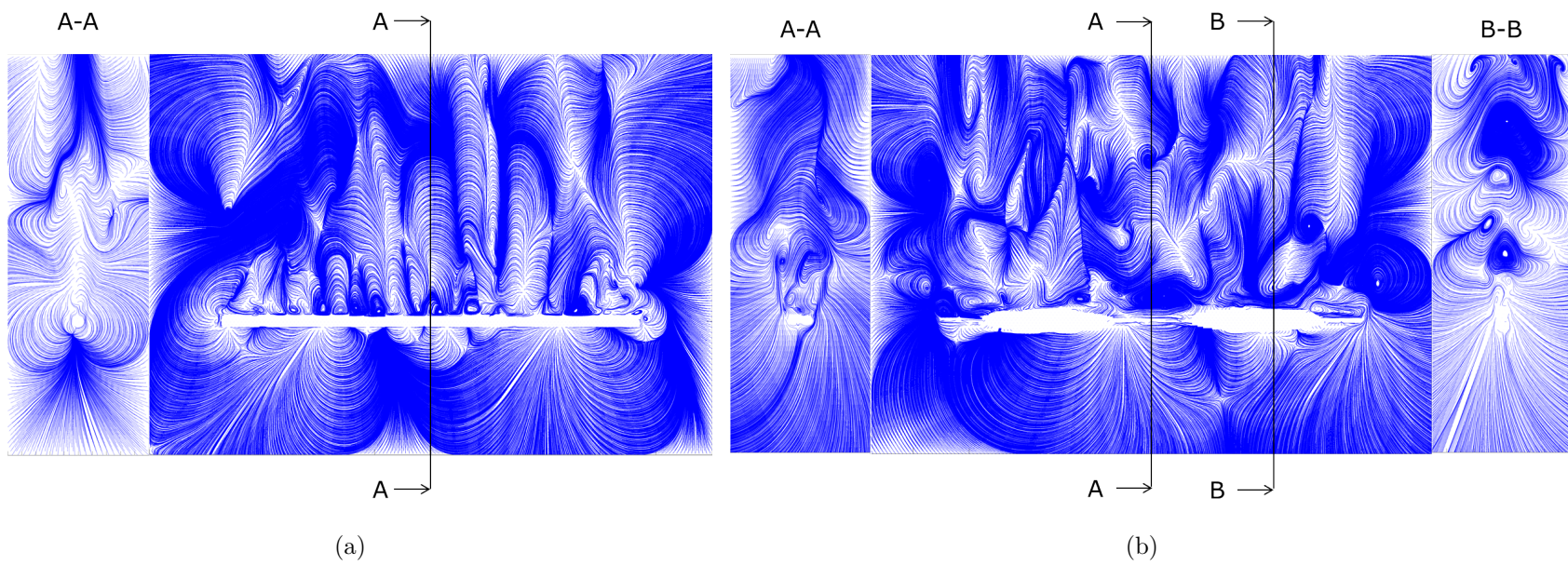


Figure A.2 Visualisation du quatrième mode de la POD pour le cylindre (a), et le toron à un tour (b).

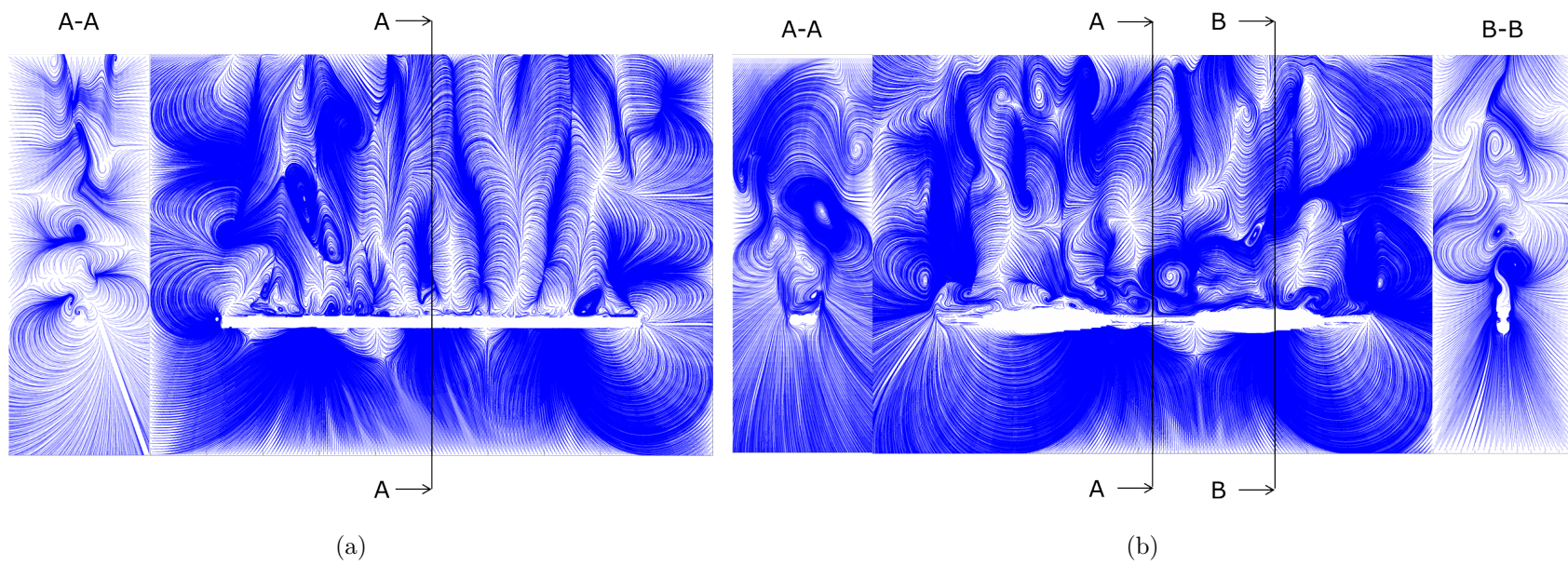


Figure A.3 Visualisation du cinquième mode de la POD pour le cylindre (a), et le toron à un tour (b).

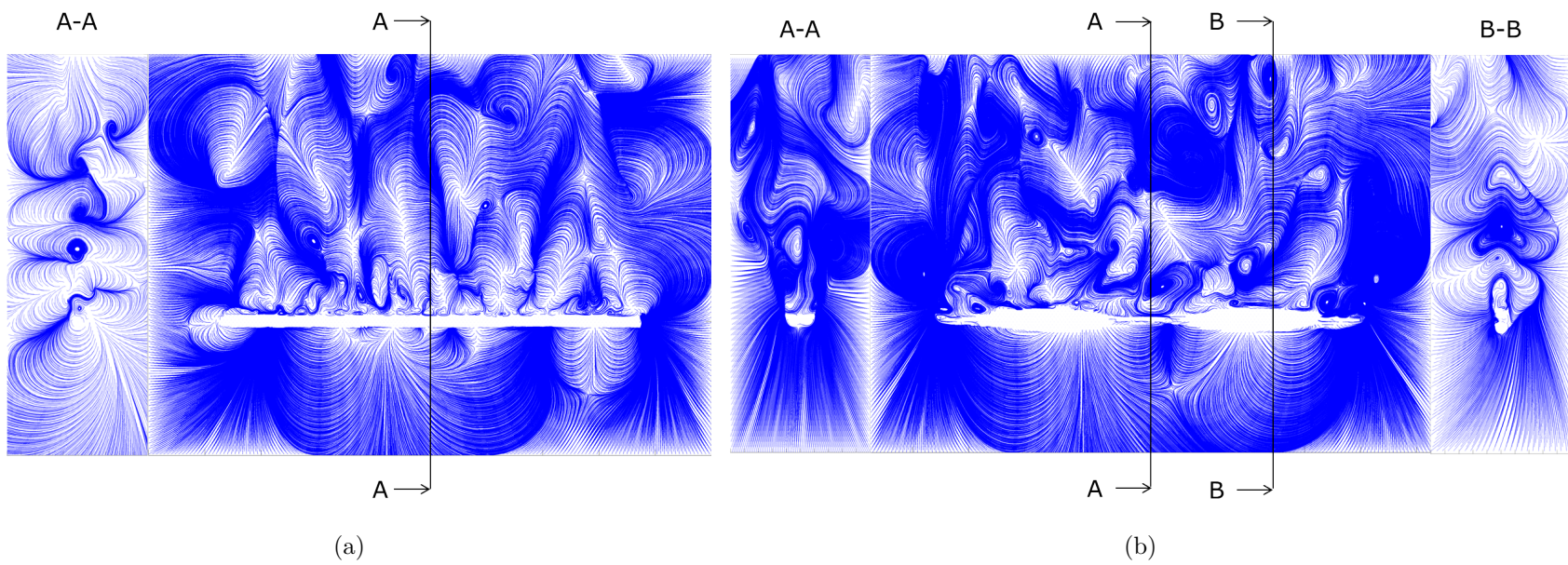


Figure A.4 Visualisation du sixième mode de la POD pour le cylindre (a), et le toron à un tour (b).

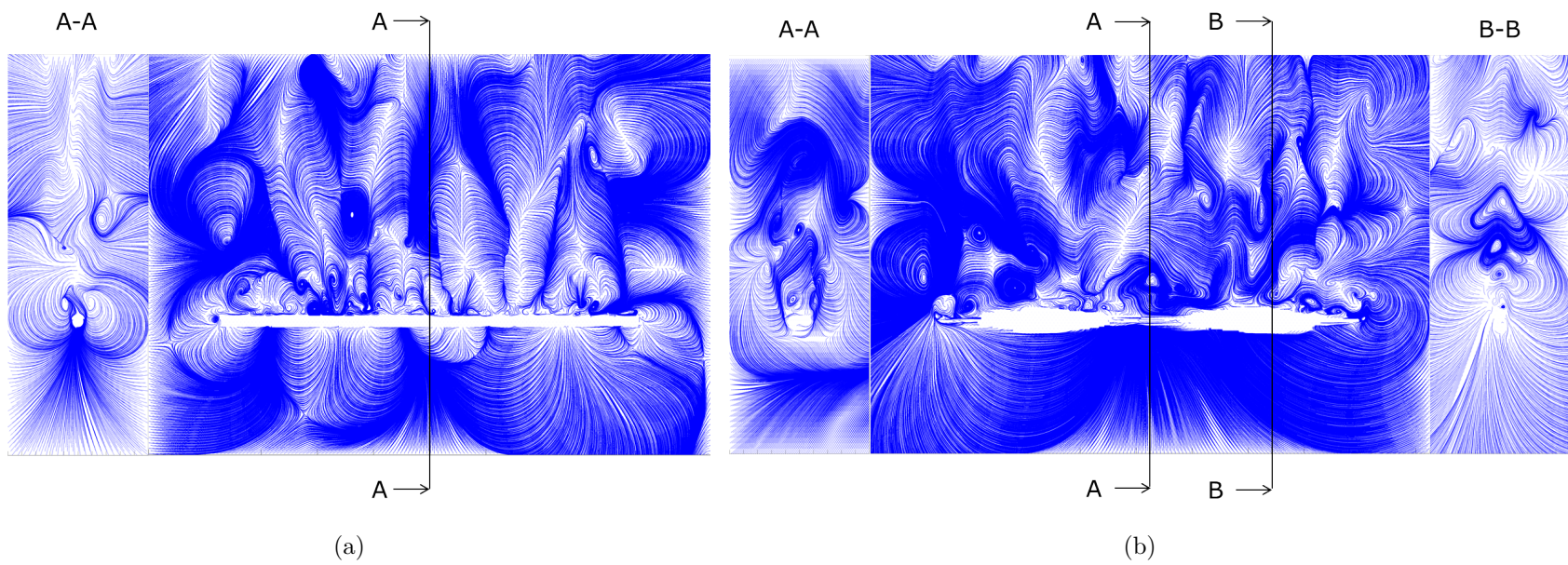


Figure A.5 Visualisation du septième mode de la POD pour le cylindre (a), et le toron à un tour (b).

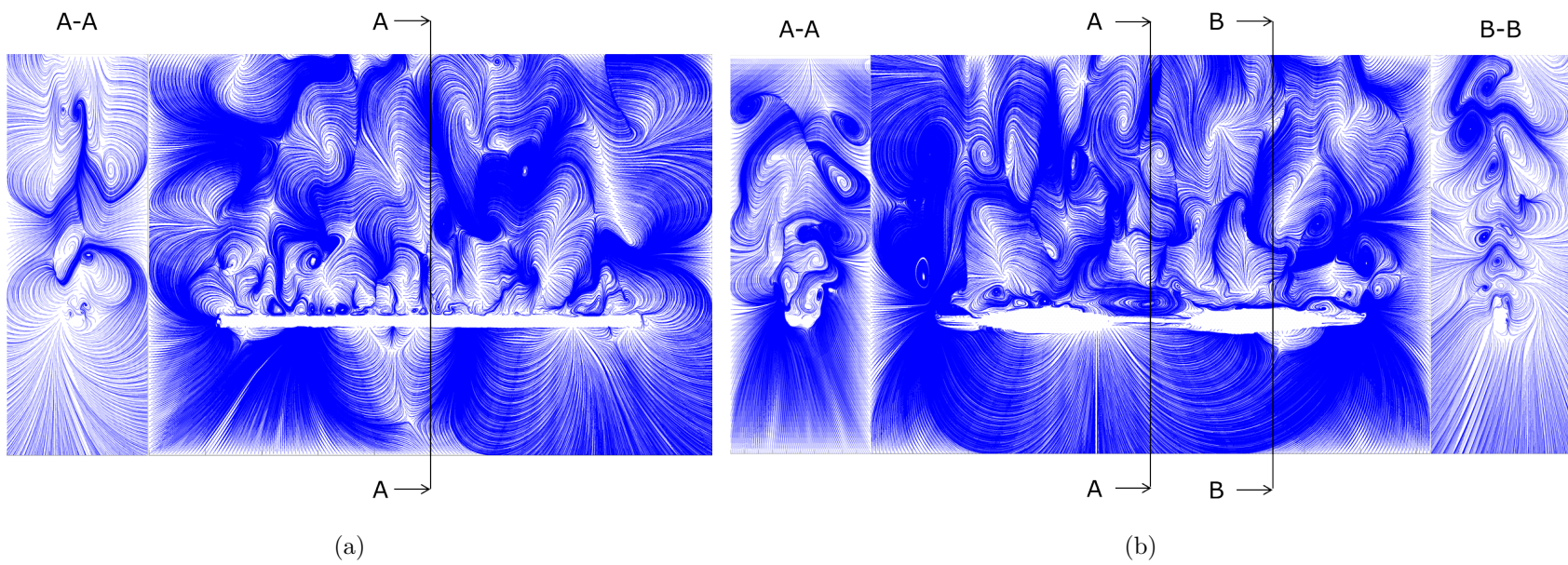


Figure A.6 Visualisation du huitième mode de la POD pour le cylindre (a), et le toron à un tour (b).

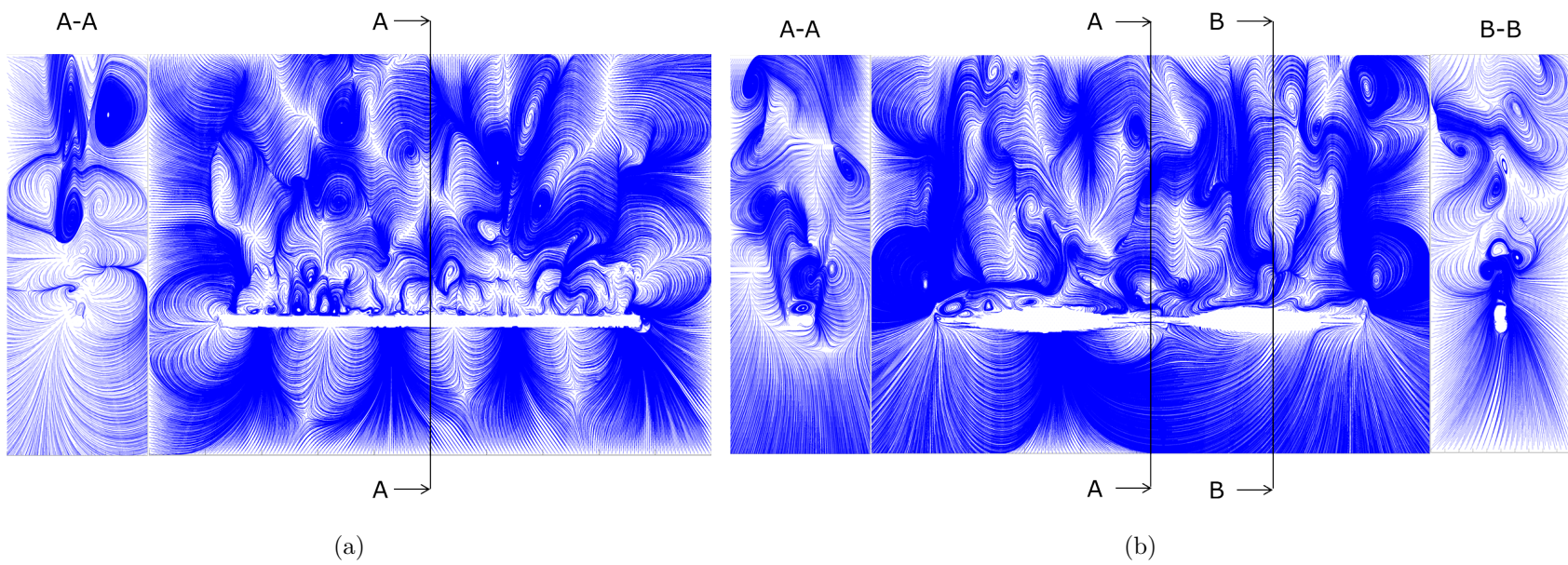


Figure A.7 Visualisation du neuvième mode de la POD pour le cylindre (a), et le toron à un tour (b).

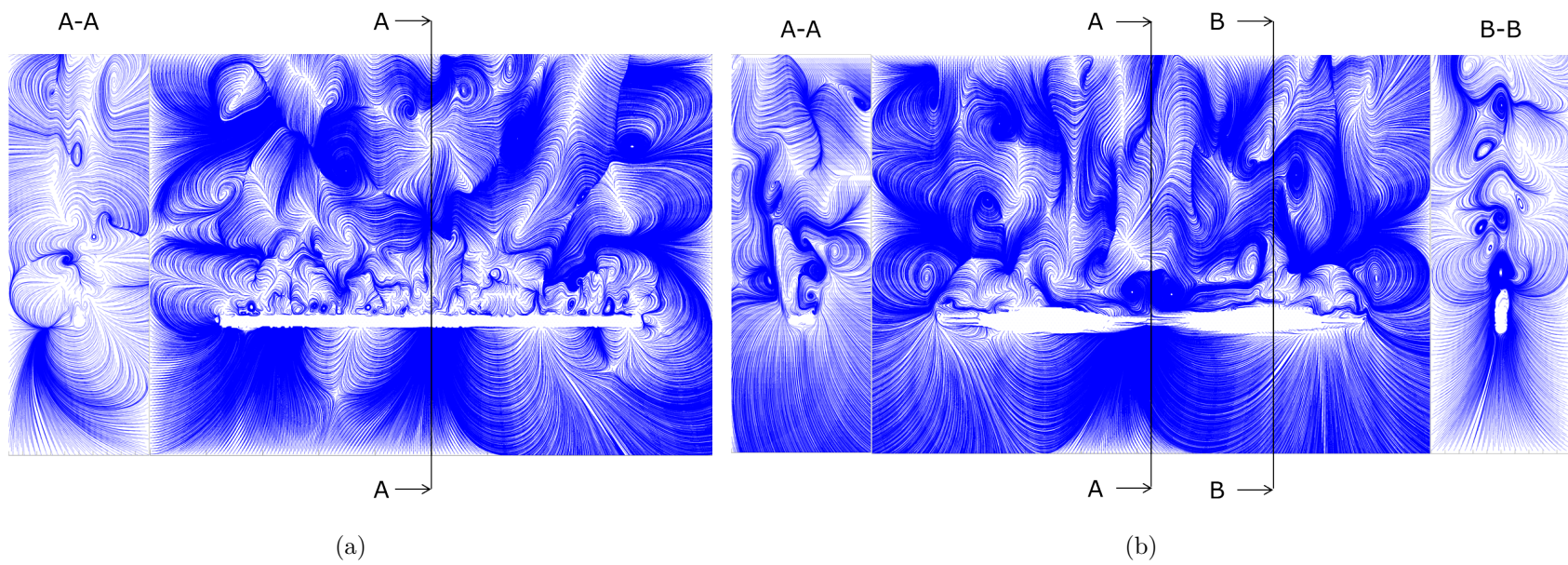


Figure A.8 Visualisation du dixième mode de la POD pour le cylindre (a), et le toron à un tour (b).

ANNEXE B Objets 3D

Voici les images des objets utilisés dans la soufflerie verticale.



Figure B.1 Photographie des objets utilisés par Saber-Cherif et Mureithi (2015)



Figure B.2 Photographies des objets testés dans cette étude (partie 1)



Figure B.3 Photographies des objets testés dans cette étude (partie 2)

ANNEXE C Dimensions des objets

Dans cette annexe seront présentées les dimensions des objets utilisés dans les expériences.

Tableau C.1 Tableaux des dimensions des objets vrillés

Nom	Lp(cm)	L(cm)	V(cm ³)
Cylindre	0,82	2,58	7,92
Plaque épaisse	1,00	3,00	7,50
Plaque fine	1,00	2,15	1,13
Toron à 1 tour	0,81	3,01	5,90
Toron à 2 tours	0,82	3,06	6,00
Toron à 3 tours	0,83	3,13	6,15
Toron à 4 tours	0,83	3,23	6,36
Toron à 5 tours	0,85	3,35	6,61
Toron à 7 tours	0,87	3,63	7,24
Toron à 10 tours	0,90	3,82	8,39
Plaque vrillée à 1 tour	0,95	3,08	7,50
Plaque vrillée à 2 tours	0,95	3,13	7,50
Plaque vrillée à 3 tours	0,95	3,21	7,50
Plaque vrillée à 4 tours	0,95	3,31	7,50
Plaque vrillée à 5 tours	0,95	3,43	7,50
Plaque vrillée à 7 tours	0,95	3,73	7,50
Plaque vrillée à 10 tours	0,95	4,26	7,50

Tableau C.2 Tableaux des dimensions des objets utilisés dans la soufflerie verticale (Partie 1)

Nom	Volume (cm ³)	Lmax (cm)	Wmax (cm)	Tmax (cm)	Lavg (cm)	Amax (cm ²)	Aavg (cm ²)
1	2,36E-06	2,86E-02	2,12E-02	1,56E-02	2,58E-02	1,13E-02	7,75E-03
2	2,23E-06	2,03E-02	1,65E-02	1,32E-02	1,83E-02	7,74E-03	6,31E-03
3	1,97E-06	1,86E-02	1,48E-02	1,36E-02	1,67E-02	6,69E-03	5,59E-03
4	3,60E-06	2,64E-02	1,95E-02	1,85E-02	2,38E-02	1,07E-02	8,47E-03
5	6,76E-07	2,06E-02	1,03E-02	9,63E-03	1,86E-02	4,01E-03	2,97E-03
6	4,42E-06	2,40E-02	2,05E-02	1,75E-02	2,16E-02	1,32E-02	1,10E-02
8	2,02E-06	2,08E-02	1,79E-02	1,71E-02	1,87E-02	8,46E-03	6,58E-03
9	1,85E-06	1,88E-02	1,82E-02	1,61E-02	1,69E-02	7,05E-03	5,53E-03
11	7,12E-07	2,10E-02	1,12E-02	9,90E-03	2,00E-02	7,89E-03	5,62E-03
13	7,29E-07	2,23E-02	2,17E-02	1,04E-02	2,00E-02	1,10E-02	6,42E-03
14	1,13E-06	2,61E-02	1,66E-02	1,22E-02	2,35E-02	7,65E-03	5,01E-03
15	2,68E-06	1,98E-02	1,92E-02	1,92E-02	1,78E-02	9,04E-03	7,37E-03
16	4,95E-07	2,20E-02	1,90E-02	5,10E-03	2,00E-02	6,56E-03	3,82E-03
17	7,56E-07	2,07E-02	1,90E-02	6,83E-03	1,86E-02	5,41E-03	3,37E-03
18	1,11E-06	2,01E-02	2,01E-02	1,18E-02	1,81E-02	5,44E-03	3,62E-03
19	5,44E-07	2,23E-02	1,21E-02	5,31E-03	2,01E-02	3,97E-03	2,60E-03
21	1,01E-06	2,58E-02	1,43E-02	8,41E-03	2,32E-02	5,22E-03	3,52E-03

Tableau C.3 Tableaux des dimensions des objets utilisés dans la soufflerie verticale (Partie 2)

Nom	Volume (cm ³)	Lmax (cm)	Wmax (cm)	Tmax (cm)	Lavg (cm)	Amax (cm ²)	Aavg (cm ²)
22	9,55E-07	2,90E-02	1,58E-02	7,40E-03	2,60E-02	7,66E-03	4,83E-03
24	5,02E-07	2,09E-02	1,17E-02	9,40E-03	1,88E-02	4,27E-03	2,83E-03
25	1,95E-06	2,15E-02	2,07E-02	2,07E-02	1,93E-02	9,98E-03	7,27E-03
26	2,56E-06	2,64E-02	1,66E-02	1,59E-02	2,38E-02	9,06E-03	7,02E-03
27	1,94E-06	1,82E-02	1,59E-02	1,31E-02	1,64E-02	6,71E-03	5,54E-03
28	1,11E-06	1,92E-02	1,23E-02	1,18E-02	1,72E-02	5,11E-03	4,04E-03
29	7,64E-07	1,38E-02	1,34E-02	1,28E-02	1,24E-02	3,15E-03	2,49E-03
30	1,56E-06	2,22E-02	1,54E-02	1,51E-02	2,00E-02	6,83E-03	5,17E-03
32	2,84E-06	1,91E-02	1,92E-02	1,79E-02	1,72E-02	9,17E-03	7,61E-03
33	1,91E-06	2,04E-02	1,92E-02	1,81E-02	1,84E-02	7,96E-03	6,03E-03
34	3,16E-06	2,12E-02	1,94E-02	1,94E-02	1,90E-02	1,13E-02	9,32E-03
36	2,80E-06	2,09E-02	1,59E-02	1,59E-02	1,88E-02	1,04E-02	8,78E-03
37	1,25E-06	2,18E-02	1,24E-02	1,24E-02	1,97E-02	7,07E-03	5,48E-03
38	1,86E-06	2,17E-02	1,48E-02	1,48E-02	1,95E-02	9,15E-03	7,31E-03
2D 1pli vrillé	6,10E-08	2,48E-02	1,54E-02	3,80E-03	2,20E-02	2,22E-03	1,14E-03
3D 2pli vrillé	5,50E-08	1,92E-02	1,41E-02	1,33E-02	1,80E-02	1,69E-03	8,70E-04