

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
*MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE*



Université Mouloud Mammeri - Tizi-Ouzou
Faculté du Génie de la Construction
Département de Génie Mécanique

Mémoire de fin d'études pour l'obtention du Diplôme
De Master en Génie-Mécanique
Option : Énergétique

Thème

**Réduction de la traînée dans l'écoulement autour d'une
sphère par modification de l'état de surface**

Proposé et dirigé par :

M : BOUTOUDJ M. Said

M: TEBBICHE Hocine

Étudié par :

M: AMMI ALI Malik

M: LARABI Hakim

ANNÉE : 2017/2018

Remerciements

Nous remercions ALLAH tout puissant de nous avoir donné la volonté, Le courage et la confiance en nous même, nous remercions également nos parents qui grâce à Eux nous sommes arrivées à ce stade.

Nous tenons à remercier notre promoteur Mr BOUTOUDJ M.Said pour les nombreuses heures qu'il nous a sacrifiés durant notre encadrement.

Une grande estime est aussi dédiée à, Mr TEBBICHE Hocine pour son accompagnement, son aide et sa disponibilité à nous fournir ses conseils ci précieux.

Ainsi que les membres de jury d'avoir accepté de juger ce modeste travail.

Nos remerciements à tout le corps enseignants qui a veillé sans relâche à nous transmettre leur savoir.

Enfin, on tient à remercier, tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

***Ammi Ali Malik
Larabi Hakim***

2017/2018



Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A mes très chers parents pour leur générosité et leurs sacrifices.

A mes chers frères.

A mes chères sœurs.

A mes oncles et mes tantes.

A toute ma famille.

A mes collègues Mustapha, Madjid majik , Hamid , massi , amir, Fazia, Ghnima, bob ,joo, et walid guitariste .

A tous mes amis sans exception et mes collègues de la
Promotion.

Enfin je dédie ce travail à toutes les personnes qui, de près ou de loin, m'ont apporté leurs aides.

À tous, du fond de nos cœurs, nous vous dédions ce travail

LARABI HAKIM





Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A mes très chers parents Arezki et Farida pour leur générosité et leurs sacrifices.

A mon cher frère Rayane.

A mes chères sœurs Kahina et Kenza.

A mes oncles et mes tantes.

A toute ma famille.

A mes collègues Mustapha, Madjid, Hamid , massi , amir, Fazia, et Ghnima.

A tous mes amis sans exception et mes collègues de la Promotion.

Enfin je dédie ce travail à toutes les personnes qui, de près ou de loin, m'ont apporté leurs aides.

À tous, du fond de nos cœurs, nous vous dédions ce travail

AMMI ALI Malik



Sommaire

Sommaire	II
liste des figures	V
liste des tableaux	IX
Liste des symboles	X
<i>Introduction générale</i>	2
<i>Chapitre I : Couche limite et écoulements autour de corps solides</i>	
I.1. Introduction.	4
I.2. Force de traînée.	4
I.2.1 Définitions de la traînée.	4
I.2.2 Coefficient de traînée.	5
I.3. Coefficient de pression.	6
I.4. Régimes d'écoulements.	6
I.4.1 Turbulence dans un écoulement.	6
I.4.2 Nombre de Reynolds.	7
I.5. Couche limite autour des obstacles.	8
I.5.1 Définition.	8
I.5.2 Transition Laminaire-Turbulent de la couche limite.	9
I.5.3 Contrôle de la couche limite.	11
I.5.3.1 Systèmes de contrôle actif	12
I.5.3.2. Systèmes de contrôle passif.	12
I.5.4. Décollement de la couche limite.	12
I.6. Ecoulement autour de quelques obstacles simples.	12
I.6.1 Ecoulement autour d'un cylindre.	12
I.6.2. Ecoulement autour d'un disque plan.	14
I.6.3 Ecoulement autour d'une sphère.	14
Conclusion.	17
<i>Chapitre II : Etat d'art</i>	
II.1. Introduction.	19
II.2. La couche limite et son équation intégrale de VON KÁRMÁN.	19
II.3. Note sur la vitesse de chute des gouttes d'eau.	20
II.4. Influence de la rugosité de la sphère sur son Cx.	23
II.5. Les sphères de sport.	24
II.5. Les difficultés des mesures du Cx de la sphère.	26
II.6. Aérodynamique des alvéoles.	27

II.6.1. Type de balle subit moins de frottement une fois lancée en l'air : une balle lisse ou une balle alvéolée.	28
Conclusion.	29

Chapitre III : Etude expérimentale.

III.1. Introduction.	31
III.2. Réalisation des maquettes.	31
III.3. La soufflerie.	35
III.3.1. Les caractéristiques de la soufflerie.	36
III.3.2. Les composants utilisés pour mesurer les efforts.	36
III.3.2.1. La veine d'essais.	36
III.3.2.2. Balance aérodynamique.	37
III.3.2.3. Indicateur des contraintes.	37
III.3.2.4. Convertisseur.	37
III.3.2.5. Ordinateur.	38
III.3.2.6. La chaîne d'acquisition des données.	38
III.3.3. Les composants utilisés pour mesurer les pressions.	39
III.3.3.1. Tube de Pitot.	39
III.3.3.2. Multi-manomètre.	39
III.4. Les résultats des efforts.	40
III.4.1. Les efforts obtenus pour la sphère de diamètre 90 mm ,110mm et 150mm.	40
III.4.2. Les efforts obtenus pour la sphère de diamètre 70 mm.	42
III.5. Contrôle du décollement de la couche limite pour les différentes sphères.	43
III.5.1. Comparaison pour un diamètre $D=70$ mm, qui a une surface lisse, et une surface rugueuse et pour les vitesses (15, 35) m/s.	43
III.5.2. Dans le cas d'un fluide parfait, le coefficient de pression C_p est donné par la relation suivante.	44
III.5.3. Prises de pressions obtenus pour une sphère de 150mm de diamètre avec d'efférente états de surfaces et a déférentes vitesses.	45
III.5.4. Prises de pressions obtenues pour une sphère de 110 mm de diamètre avec différents états de surface.	46
III.5.5. Champ de pressions obtenu pour une sphère de 90mm de diamètre.	47
Conclusion.	49

Chapitre IV : Approche numérique.	
IV.1. Introduction.	50
IV.2. Buts de la simulation.	50
IV.3. Présentation de code Fluent.	51
IV.3.1. Fluent.	51
IV.4. Création du maillage.	51
IV.4.1. Type de maillage.	51
a) Maillage structuré (quadra /hexa).	51
b) Maillage non structuré (tri /tétra).	52
c) Maillage hybride.	52
➤ Génération d'un maillage de couche limite.	52
➤ Conditions aux limites.	53
➤ Choix du modèle de turbulence.	53
IV.4.2. Conditions de la simulation.	53
➤ Modèle physique.	53
➤ Géométrie simulée.	54
➤ Création du maillage.	54
➤ Définition des frontières et du domaine d'étude.	55
➤ Simulation sur fluent.	55
IV.5. Résultats et discussion.	56
IV.5.1. Critères de convergence.	56
IV.5.2. Coefficients aérodynamiques.	56
➤ Résultats quantitatifs.	56
➤ Résultats qualitatifs.	57
Conclusion.	58
Conclusion générale.	60
Références bibliographique	61

Chapitre I

Figure I.1 : Projection d'un solide sur un plan perpendiculaire à l'écoulement.

Figure I.2 : Coefficient de trainée pour quelques obstacles aérodynamiques.

Figure I.3.a : Ecoulement laminaire.

Figure I.3.b : Ecoulement turbulent.

Figure I.4 : Représentation schématique d'un écoulement turbulent.

Figure I.5 : Couche limite sur un obstacle.

Figure I.6 : Couche limite se développant sur une plaque plane : passage de l'état Laminaire à l'état turbulent.

Figure I.7 : Transition de la couche limite sur plaque plane.

Figure I.8 : Décollement de la couche limite.

Figure I.9.a : Point de décollement pour une couche limite laminaire.

Figure I.9.b : Point de décollement pour une couche limite turbulente.

Figure I.10.a : Ecoulement autour d'un cylindre en fonction du Re . Les points (D) et (D') indiquent les points de décollement. D'après Van Dyke.

Figure I.10.b : Distribution de pression autour d'un cylindre à $Re=10^5$ (Mesures de Achenbach reportées par Schlichting). La ligne en pointillés représente les valeurs théoriques pour un fluide parfait et les cercles représentent les mesures de pression réelles.

Figure I.11 : Distribution de pression et un écoulement autour un disque placé perpendiculairement à la vitesse de l'écoulement.

Figure I.12 : Ecoulement autour d'une sphère et Distribution de pression.

Figure I.13 : Evolution du coefficient de trainée en fonction de nombre de Reynolds sans le cas du cylindre et de la sphère.

Figure I.14.a : Ecoulement autour d'une sphère a $Re < 1$.

Figure I.14.b : Ecoulement autour d'une sphère a $Re \approx 10$.

Figure I.14.c : Ecoulement autour d'une sphère a $Re > 100$.

Figure I.14.d : Ecoulement autour d'une sphère a $Re > 10000$.

Figure I.14.e : Ecoulement autour d'une sphère a $Re \approx 2 \times 10^5$.

Chapitre II

Figure II.1 : Le recul du point de décollement sur la sphère.

Figure II.2 : Le point de décollement sur la sphère avec un anneau de fil tabulateur.

Figure II.3 : Vitesse de chute de la goutte de pluie en fonction du diamètre.

Figure II.5 : C_x et vitesse des gouttes d'eau selon leur diamètre.

Figure II.4 : C_x des gouttes de pluie en comparaison avec la courbe de Clift, grâce à Reynolds.

Figure II.6 : C_x de la sphère selon Reynolds en fonction de la rugosité.

Figure II.7 : Le C_x de quatre types de ballons.

Figure II.8 : Mesure de C_x du ballon.

Figure II.9 : Les quatre types des ballons étudiés.

Liste des figures

Figure II.10 : C_x de certaines balles de sports en comparaison avec celui établi par Achenbach pour la sphère lisse.

Figure II.11 : La courbe d'achenbach et les courbes modernes.

Figure II.12 : Une Balle de golf.

Chapitre III

Figure III.1 : Le tour d'usinage du bois.

Figure III.2 : Les boules après usinage.

Figure III.3 : Les boules après l'ajustage de leurs surfaces.

Figure III.4 : Le perçage des boules.

Figure III.5 : A gauche : la tige de fixation. A droite : la boule placée dans la soufflerie.

Figure III.6 : Travaux effectués sur les boules.

Figure III.7 : Mesure des coefficients de pressions pour une surface lisse.

Figure III.8 : Les boules après le collage des grains de rugosité.

Figure III.9 : La boule avec la rugosité dans la soufflerie..

Figure III.10.a : La mise d'un anneau sur les sphères.

Figure III.10.b : Schéma qui montre l'emplacement de l'anneau sur la sphère

Figure III.11.a : Soufflerie convergente .

Figure III.11.b : Ses composants de la soufflerie.

Figure III.12 : Balance aérodynamique

Figure III.13: Indicateur des contraintes.

Figure III.14: Convertisseur du signal.

Figure III.15 : Ordinateur.

Figure III.16 : Multi-manomètre.

Figure III.17.a : L'évolution du coefficient de trainé pour les différents états de surface en fonction du nombre de Reynolds d'une sphère de 150 mm de diamètre.

Figure III.17.b : Coefficient de trainée pour les différents états de surface en fonction du nombre de Reynolds d'une sphère de 110 mm de diamètre.

Figure III.17.c : Coefficient de trainée pour les différents états de surface en fonction du nombre de Reynolds d'une sphère de 90 mm de diamètre.

Figure III.17.d : Coefficient de trainée pour les différents états de surface en fonction du nombre de Reynolds d'une sphère de 70 mm de diamètre.

Figure III.18.a : Une sphère d'un diamètre 70 mm, avec une surface lisse pour la vitesse 15m/s.

Figure III.18.b : Une sphère d'un diamètre 70 mm, avec une surface lisse pour la vitesse 35m/s.

Figure III.19 : Coefficients de pression d'une sphère dans le cas d'un fluide parfait.

Figure III.20.a : Représentations des coefficients de pression pour la sphère lisse $D=150\text{mm}$.

Figure III.20.b : Représentations des coefficients de pression pour la sphère avec anneau $D=150\text{mm}$.

Figure III.20.c : Représentations des coefficients de pression pour la sphère lisse $D=110\text{mm}$.

Liste des figures

Figure III.20.d : Représentations des coefficients de pression pour la sphère avec anneau $D=110\text{mm}$.

Figure III.20.e : Représentation des coefficients de pression pour la sphère lisse $D=90\text{mm}$.

Figure III.20.f : Représentation des coefficients de pression pour la sphère avec anneau $D=90\text{mm}$.

Chapitre IV

Figure IV.1 : Maillage structuré et non structuré.

Figure IV.2 : La géométrie a simulé et le domaine de calcul.

Figure IV.3 : Maillage non structuré.

Figure IV.4 : Maillage utilisé

Figure IV.5 : Evolution du coefficient de trainée en fonction de nombre de Reynolds pour une sphère de diamètre 90 mm.

Figure IV.6 : Visualisation des lignes de courant pour la sphère $D=90$ mm avec une surface lisse.

Liste des symboles

Lettres grecques :

θ	Angle d'incidence	deg
$\vec{\gamma}$	Accélération	m/s ²
δ	Epaisseur du déplacement	m
Δh	Dénivellation	m
λ	Allongement	
μ	Viscosité dynamique	kg/m.s
ν	Viscosité cinématique	m ² /s
ρ	Masse volumique	kg/m ³
ρ_h	Masse volumique de l'huile	kg/m ³

Lettres latines :

C_p	Coefficient de pression	
C_x	Coefficient de traînée	
F_x	Force de traînée	N
g	Accélération de la pesanteur	m/s ²
H	Facteur de forme	
P	Pression statique locale	Pa
p_0	Pression statique locale à l'amont infini	Pa
P_a	Pression d'arrêt	Pa
P_∞	Pression à l'infini amont (tube de Pitot)	Pa
Re	Nombre de Reynolds	
S	Surface	m ²
D	diamètre	m
L	l'épaisseur caractéristique de l'obstacle.	m
U	la vitesse de l'écoulement lointain	m/s
V	Vitesse	m/s
V_∞	Vitesse à l'infini amont	m/s
Z	Cote du liquide correspondant à la pression statique locale p	m
Z_∞	Cote du liquide correspondant à la pression statique à l'infini amont	m
Z_A	Cote du liquide correspondant à la pression d'arrêt à l'infini amont	m

Acronymes :

CFD	Computational Fluid Dynamics.
VGs	Acronyme pour Vortex generators (générateurs de vortex en langue française).
UFD	User Defined Function

Les écoulements autour de formes solides sont des phénomènes rencontrés fréquemment dans la pratique. Leur compréhension est indispensable pour mieux approcher des problèmes de mécanique des fluides ou de thermique associés à de nombreux systèmes en engineering comme par exemple l'automobile, le bâtiment ou encore l'aviation.

L'identification et l'étude des phénomènes hydro et aérodynamique qui se produisent dans le sillage d'un obstacle restent un sujet d'intérêt et d'actualité dans divers domaines.

Donc, le sillage généré autour des obstacles a une grande importance dans la pratique. Entre autre la connaissance de structures tourbillonnaires créées derrière ces obstacles et les différents régimes d'écoulement sont d'une grande utilité dans la conception des formes aérodynamiques en mouvement dans l'air.

Ainsi dans le cas de l'écoulement autour d'une sphère, la forme alvéolée d'une balle de golf par exemple montre une résistance moindre comparée à celle ayant une surface lisse; ce qui se traduit par une meilleure portée de la balle.

Le travail effectué dans le cadre de mémoire de fin d'études porte justement sur l'écoulement autour de sphère avec comme objectif principal la réduction de la trainée. Différentes sphères ont été usinées puis soumises à des essais en soufflerie pour la détermination des coefficients de trainée et de pression à plusieurs nombres de Reynolds. Trois états de surfaces ont été considérés: lisse, avec rugosités et avec un anneau.

Le travail expérimental est ensuite complété par une simulation numérique de l'écoulement autour d'une sphère. Les résultats obtenus sont comparés à ceux obtenus expérimentalement.

I.1 Introduction :

L'aérodynamique est la science qui a pour objet l'étude des mouvements de l'air autour des corps solides. En d'autres termes, il s'agit des phénomènes mis en jeu chaque fois qu'il existe un mouvement relatif entre un corps et l'air qui l'entoure.

Dans ce chapitre, on rappelle différentes notions de base sur l'aérodynamique telles que les efforts ou encore les coefficients aérodynamiques qui intéressent le travail effectué dans le cadre de ce mémoire. Un aperçu sur la couche limite et les phénomènes qui en découlent est également donné.

I.2. Force de traînée:

I.2.1 Définitions de la traînée:

Par définition, la traînée F_x ou force de traînée, est la composante parallèle à la vitesse V de l'écoulement des forces exercées par le fluide en mouvement. C'est la partie nuisible de cette résultante. La traînée est définie par :

$$F_x = \frac{1}{2} \rho S V^2 C_x \quad (\text{I.1})$$

Le « maître-couple » S est l'aire de la surface obtenue en « projetant » le solide sur un plan perpendiculaire à l'écoulement [1], ρ est la masse volumique du fluide et C_x le coefficient de traînée.

La grandeur $\frac{1}{2} \rho S V^2$ représente la densité volumique d'énergie cinétique. La traînée est usuellement décomposée en une traînée dite de pression et une autre dite de frottement. La traînée de pression se décompose elle-même en une traînée dite de forme et une traînée d'onde :

- la traînée de forme ; elle tire son appellation du fait de l'apparition de zones de décollement qui résulte des gradients de pression qui dépendent eux-mêmes de la forme du corps sur lequel se produit l'écoulement.
- la traînée d'onde est spécifique aux écoulements de régime transsonique et supersonique ; elle correspond à l'apparition d'ondes de choc dans l'écoulement.

La traînée de frottement est un effet direct de la viscosité du fluide : l'intensité du frottement du fluide au niveau d'une paroi solide dépend aussi du régime laminaire ou turbulent de l'écoulement car une couche limite turbulente frotte beaucoup plus qu'une couche limite laminaire.

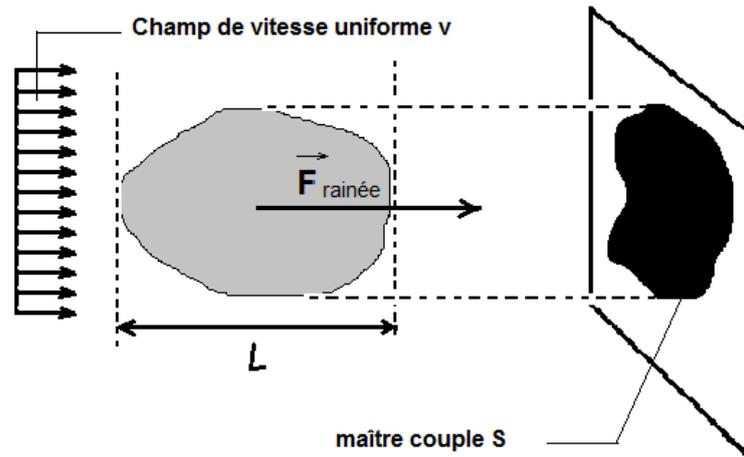


Figure I.1 : Projection d'un solide sur un plan perpendiculaire à l'écoulement.

I.2.2 Coefficient de traînée:

Le coefficient de traînée C_x d'un solide se définit comme un nombre sans dimension qui renseigne sur la traînée globale d'un objet quelconque, autrement dit sa capacité à générer le moins de résistance possible lors de son déplacement dans l'air. Il est donné par l'équation suivante équivalente à la relation (1.1).

$$C_x = \frac{2F_x}{\rho S V^2} \quad (\text{I.2})$$

A titre indicatif, la figure suivant (I.2) fournit le coefficient de traînée pour quelques corps.

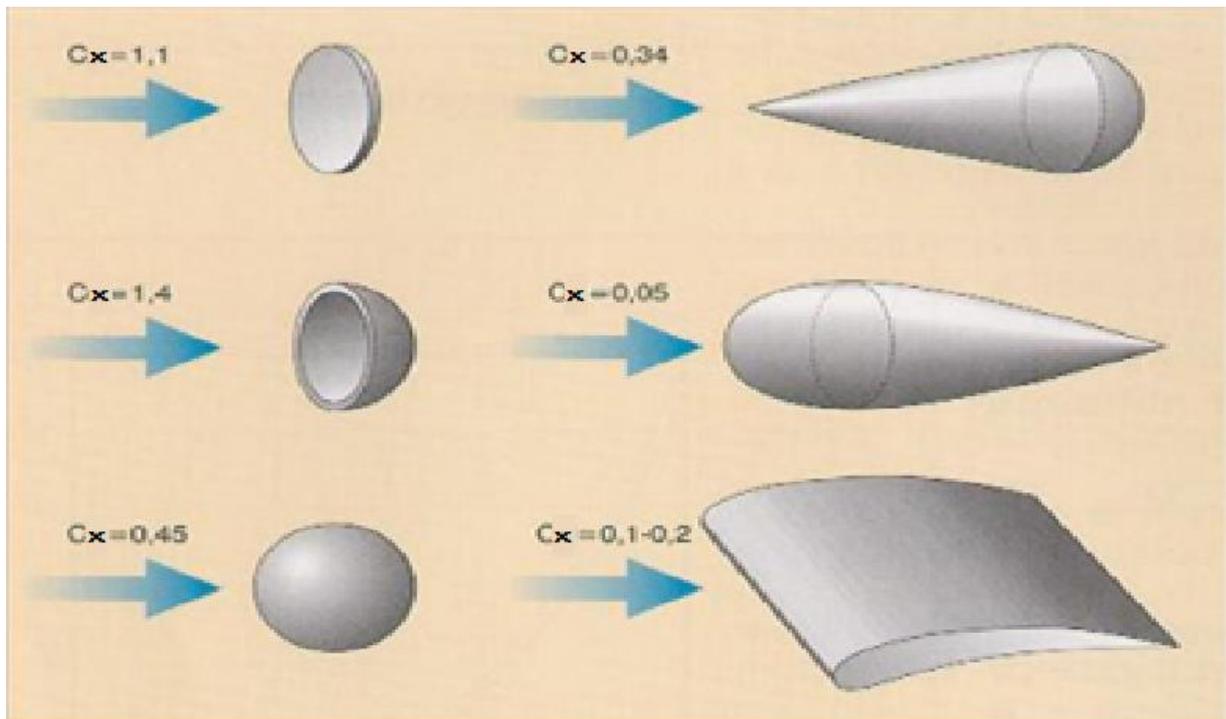


Figure I.2: Coefficient de traînée pour quelques obstacles aérodynamiques. [1]

I.3. Coefficient de pression:

La distribution de la pression sur un corps solide est caractérisée par le coefficient sans dimension C_p défini par la relation (I.3).

$$C_p = \frac{P - P_\infty}{\frac{1}{2} \rho_\infty V_\infty^2} \quad (\text{I.3})$$

P est la pression statique et l'indice ∞ renvoi aux caractéristiques à l'infini amont de l'écoulement avant qu'il soit perturbé par la présence de l'obstacle.

I.4. Régimes d'écoulements :

Les coefficients aérodynamiques ne sont pas des constantes. Ils dépendent de la géométrie du solide considéré mais aussi du régime de l'écoulement.

Un écoulement est **laminaire** lorsque le mouvement des particules fluides se fait de manière régulière et ordonnée. Les filets d'air suivent des trajectoires rectilignes et parallèles entre elles. Elles glissent les unes sur les autres, comme des lames de fluide.

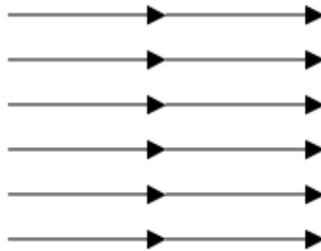


Figure I.3.a : Ecoulement laminaire.

Un écoulement est **turbulent** lorsque le déplacement est irrégulier et que des fluctuations aléatoires de vitesse se superposent au mouvement moyen du fluide.

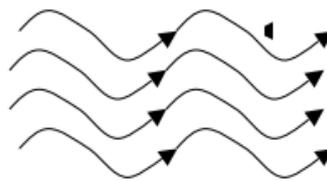


Figure I.3.b : Ecoulement turbulent.

I.4.1 Turbulence dans un écoulement :

La turbulence disperse et mélange le milieu où elle se développe. Puis elle s'efface et disparaît une fois produites l'unité et l'homogénéité qu'elle a favorisées.

La turbulence est présente dans de nombreux domaines. En aéronautique elle est considérée comme néfaste puisqu'elle est responsable de l'augmentation de la traînée et de la diminution de la portance.

Les premières caractérisations de la turbulence sont apparues à la fin du 19^{ème} siècle grâce au scientifique Osborne Reynolds. Ses travaux sur les écoulements dans les conduites lui permirent de définir un nombre sans dimension auquel il attribua son nom. Il montra qu'au-dessus d'une valeur critique de ce nombre, l'écoulement changeait radicalement de topologie et de dynamique. [3]. Ce nombre est défini au paragraphe suivant.

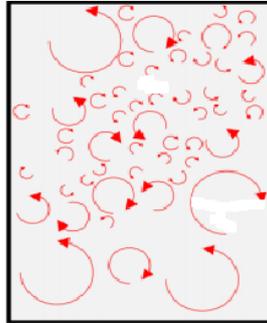


Figure I.4 : Représentation schématique d'un écoulement turbulent

I.4.2 Nombre de Reynolds:

Soit un écoulement de vitesse caractéristique V , de dimension caractéristique L , et de viscosité cinématique du fluide considéré ν . Le nombre de Reynolds caractéristique de cet écoulement est le nombre sans dimension défini comme suit:

$$Re = \frac{VL}{\nu} \quad (I.4)$$

Le nombre de Reynolds est le rapport des ordres de grandeur de deux termes de l'équation de Navier Stokes, que l'on peut interpréter comme deux modes de transfert de quantité de mouvement :

$$Re = \frac{\|\vec{v}(\overline{\text{grad}} \vec{v})\|}{\|\nu \Delta \vec{v}\|} = \frac{\text{inertie}}{\text{viscosité}} = \frac{\text{transfert convectif}}{\text{transfert diffusif}} \quad (I.5)$$

$Re \ll 1$: l'écoulement est gouverné par la viscosité ; il est dit rampant.

$Re \gg 1$: l'écoulement est gouverné par l'inertie.

- La plupart des écoulements de la vie quotidienne sont caractérisés par $Re \gg 1$.
- Les écoulements à faible nombre de Reynolds correspondent aux vitesses très faibles, aux dimensions très petites, ou aux fluides très visqueux.

I.5. Couche limite autour des obstacles :

I.5.1 Définition :

Lorsqu'un écoulement fluide rencontre un obstacle, dû au frottement sur la surface de l'obstacle et à la viscosité de l'écoulement, la vitesse de l'écoulement est égale à zéro sur la surface de l'obstacle. Au-dessus de cette surface, la vitesse de l'écoulement augmente progressivement jusqu'à une certaine hauteur où la vitesse de l'écoulement non perturbée est retrouvée. Cette zone de gradient de vitesse s'appelle la couche limite. La Figure montre une illustration de la couche limite, notée δ , qui se développe sur un obstacle. [3]

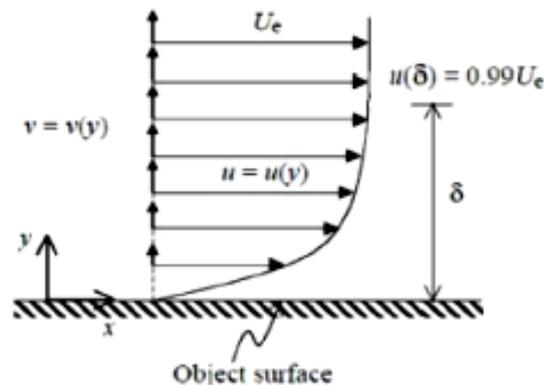


Figure I.5 : Couche limite sur un obstacle.

L'épaisseur de la couche limite est classiquement définie comme la distance à la paroi pour laquelle la vitesse dans la couche limite atteint 99% de la vitesse de l'écoulement extérieur U_e , soit :

$$\frac{U(x,\delta)}{U_e} = 0.99 \quad (\text{I.6})$$

Cette définition conventionnelle ne représente pas un caractère très significatif; d'autres grandeurs telles que l'épaisseur de déplacement et l'épaisseur de perte de quantité de mouvement sont utilisées.

L'écoulement autour des obstacles fait apparaître des couches limites au sein desquelles la forme du profil de vitesse évolue. Elles échappent donc à la classe des couches limites descriptibles avec des solutions auto-similaires [4]. Près du point d'arrêt amont, la couche limite est à la fois très mince et fortement accélérée dans un gradient de pression négatif. Plus loin le long de la paroi, dans la région où la vitesse de l'écoulement extérieur atteint son maximum et où le gradient de pression change de signe, le profil de vitesse atteint une forme proche de celle de la couche de Blasius.

L'épaisseur de la couche limite atteint alors un ordre de grandeur adimensionnel $\delta \setminus L$ voisin de $\sqrt{\frac{\nu}{U_\infty L}}$ où U_∞ désigne la vitesse de l'écoulement lointain et L l'épaisseur caractéristique de l'obstacle. Si l'écoulement extérieur est laminaire, ce qui est le cas lorsque l'obstacle se meut dans un fluide lointain au repos, la couche limite accélérée demeure stable et laminaire entre

le point d'arrêt amont et le point de vitesse maximale. Par contre, dans une soufflerie, dans une conduite, en mer, ou bien dans un fleuve, où l'écoulement est déjà turbulent. Lorsque l'on introduit un obstacle, la couche limite qui se forme autour de lui est immédiatement marquée par la turbulence environnante, même si l'influence de la viscosité y demeure prépondérante.

Dans le cas des écoulements autour d'obstacles épais, le fluide dans la couche limite ne possède plus assez d'énergie pour remonter le gradient de pression adverse et se sépare donc de la paroi. Ce décollement qui se produit même à des nombres de Reynolds relativement modérés, voisins de la centaine. A des nombres de Reynolds plus élevés, l'écoulement décollé devient instationnaire, marqué par le rythme périodique des lâchers des tourbillons (allée de Von Karman).

Malgré leur complexité, ces couches limites turbulentes sont maintenant bien connues. Elles ont d'abord fait l'objet d'investigations expérimentales approfondies. Et, depuis la fin du 20^{ème} siècle, elles sont aussi accessibles au calcul numérique, soit en ne mettant l'accent que sur les valeurs moyennes, soit en simulant aussi les fluctuations turbulentes. En particulier, la simulation des fluctuations de pression sur les ailes des avions permet d'estimer leurs vibrations et d'évaluer l'intensité des secousses auxquelles l'appareil est soumis.

I.5.2. Transition Laminaire-Turbulent de la couche limite :

En général, le mécanisme de transition de l'état laminaire à l'état turbulent est le résultat d'une réponse non linéaire de la couche limite à des perturbations.

Ces dernières ont différentes origines qui peuvent être le taux de turbulence de l'écoulement libre, l'état de surface (rugosités) ou encore les vibrations. Depuis les expériences réalisées par Reynolds en 1883, les phénomènes d'instabilité de l'écoulement laminaire et la transition vers la turbulence ont maintenu un intérêt constant en mécanique des fluides. Cet intérêt provient du fait que des quantités aérodynamiques telles que la portance ou la traînée dépendent de la transition. Des critères empiriques sont principalement utilisés pour prédire cette transition.

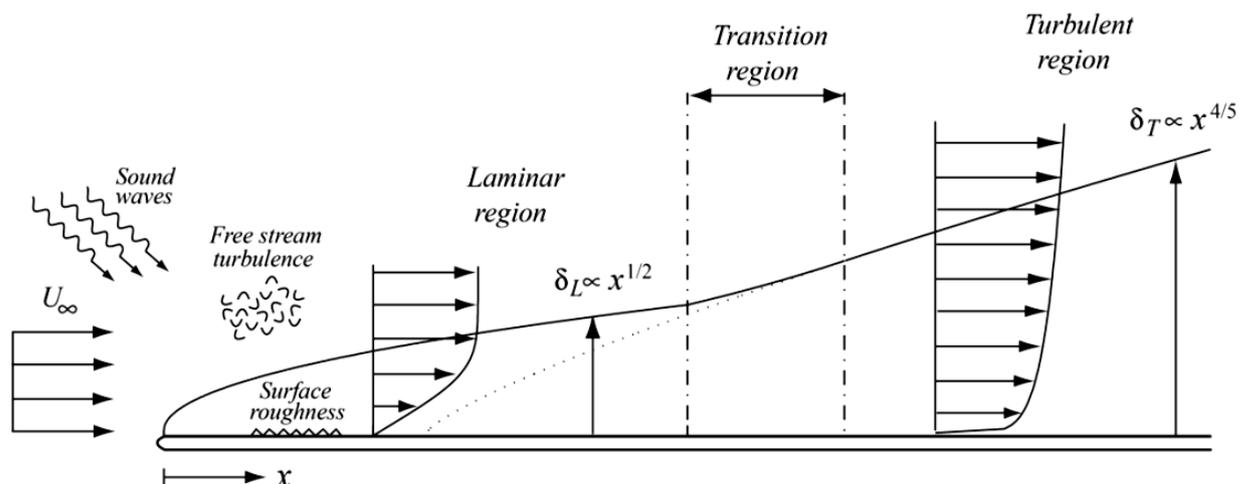


Figure I.6 : Couche limite se développant sur une plaque plane : passage de l'état Laminaire à l'état turbulent. [4]

Lorsque le nombre de Reynolds dépasse une certaine valeur critique, on observe une transition de la couche limite laminaire vers la turbulence.

Le phénomène est mis en évidence sur une plaque plane sur la Figure 1.8. On observe, pour le nombre de Reynolds critique $Re_c = 5 \times 10^5$, un changement de l'épaisseur de couche limite qui passe d'une loi d'évolution en $x^{1/2}$ (couche limite laminaire) à une loi en $x^{4/5}$ (couche limite turbulente). D'autre part, au-dessus du nombre de Reynolds critique Re_c , des fluctuations turbulentes apparaissent dans la couche limite et intensifient les échanges de quantité de mouvement. La pente du profil de vitesse au voisinage de la paroi augmente en entraînant un accroissement de la contrainte pariétale.

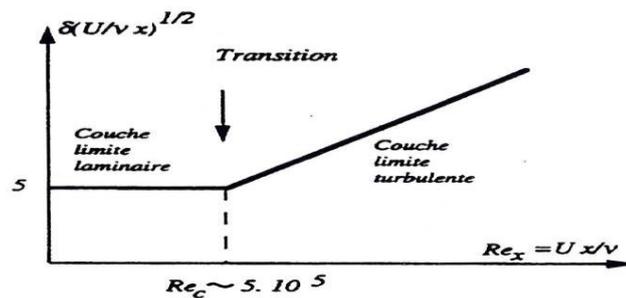


Figure I.7: Transition de la couche limite sur plaque plane [4].

I.5.3. Contrôle de la couche limite:

Il y a plusieurs façons différentes de classifier les méthodes de contrôle du décollement pour arriver à des résultats souhaitées.

Gad-El-Hak [5] présente une classification du contrôle basé sur le mode de fonctionnement de l'actionneur. L'actionneur est le dispositif mécanique, pneumatique, électrique ou acoustique destiné à interagir avec l'écoulement pour lui donner le comportement souhaité. Il distingue deux grandes stratégies de contrôle : **le contrôle passif et le contrôle actif.**

I.5.3.1 Systèmes de contrôle actif:

Le contrôle par systèmes actif fonctionne sur le principe de variation de vitesse due à la couche poreuse comparé à une couche limite de surface dans le domaine fluide. À la frontière entre le milieu poreux et un fluide, la vitesse d'écoulement locale n'est pas nulle. Ainsi, un milieu poreux faisant office de paroi sur un objet d'étude permet de perturber en proche paroi l'établissement de la couche limite, induisant une modification de l'écoulement aval résultant.

I.5.3.2 Systèmes de contrôle passif:

Le système de contrôle passif est une solution simple qui prend la forme d'appendices plus ou moins discrets, qui permettent d'obtenir une modification du torseur aérodynamique. En automobile, l'application la plus connue est l'aileron arrière, en forme de profil d'aile d'avion inversée, permettant un accroissement de l'appui lorsque la vitesse augmente. Il s'agit dans ce cas d'augmenter la portance du véhicule pour améliorer ces caractéristiques de tenue de route.

Le contrôle par VGs alors d'appendices de petite taille par rapport aux longueurs de l'objet d'étude et disposé de manière espacée régulière transversalement à l'écoulement de référence

incident (exemple rugosité sur une sphère). Permettant d'apporter localement de l'énergie à la couche limite, de façon à éviter ou repousser le décollement de celle-ci. L'idée consiste à créer localement un tourbillon qui favorise les échanges de quantité de mouvement au sein de la couche limite. On peut aussi citer l'ajout d'un fil ou bande rugueuse sur l'avant d'une sphère cela génère une chute de pression et une réduction de la surface de la zone de sillage créée derrière la sphère.

I.5.4. Décollement de la couche limite

Un écoulement décollé se caractérise par la présence d'une zone de recirculation dans laquelle les vitesses sont faibles et les pertes énergétiques importantes. C'est pourquoi les aérodynamiciens essaient d'en limiter le développement.

En général, quand un objet est placé dans un écoulement, les filets fluides épousent la surface du corps : ils « collent » à la paroi. Dans certaines circonstances, ces filets peuvent se détacher de la paroi, c'est ce qu'on appelle le décollement. Ce décollement, causé par un gradient de pression positif ou par une rupture géométrique de la paroi, influence fortement les performances aérodynamiques. Source d'instationnarité, il peut notamment provoquer des nuisances sonores ou être à l'origine de vibrations de la structure : il a globalement des effets pénalisants sur le rendement aérodynamique des véhicules.

De fait, le décollement est un phénomène qu'on cherche à éviter sauf dans des cas précis comme par exemple dans le cas de l'utilisation d'aérofreins sur les ailes d'avion. Mais dans la plupart des cas, l'objectif est bien de réduire voire d'éliminer les décollements.



Figure I.8: Décollement de la couche limite.

Par exemple, lorsque la couche limite décolle, la traînée de pression devient élevée (figure I.7.a) et le point de décollement de la couche limite turbulente petite est également la traînée de pression est donc plus faible lorsque la région de séparation est moindre. (Figure I.7.b)

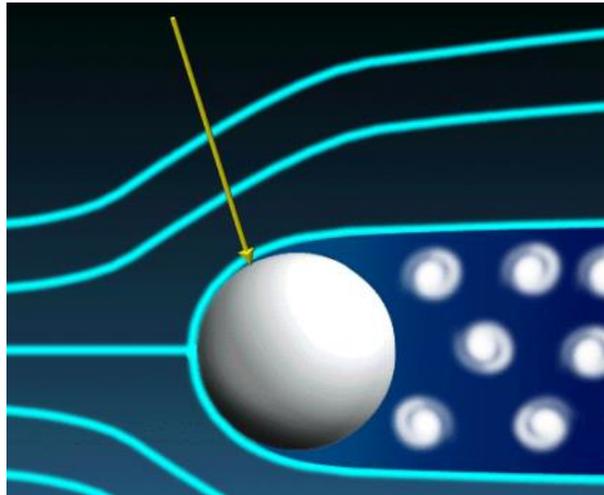


Figure I.9.a : Point de décollement pour une couche limite laminaire.

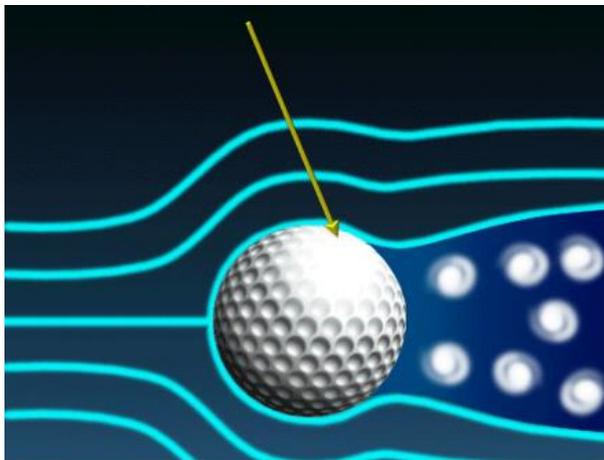


Figure I.9.b : Point de décollement pour une couche limite turbulente.

I.6. Écoulement autour de quelques obstacles simples:

I.6.1 Écoulement autour d'un cylindre :

Le cylindre est un corps simple et classique en mécanique des fluides. Il présente une forte surface frontale à l'écoulement. A partir de $Re = 50$, la couche limite décolle au niveau du maître couple du fait de l'action retardatrice du trop fort gradient de pression positif à cet endroit. On dit gradient positif, lorsque la pression près de la paroi augmente dans le sens de l'écoulement. Ce décollement crée un sillage épais de dimension comparable au maître couple (la plus grande surface frontale présentée à l'écoulement). [7]

La traînée est due essentiellement à la différence de pression régnant entre le point d'arrêt et le sillage. On appelle cette traînée de pression ou de culot. Il est donc évident de choisir le maître couple (S) comme surface de référence permettant de définir le C_x .

La figure (I.10.a) présente l'écoulement autour d'un cylindre pour deux nombres de Re et la figure (I.10.b) les évolutions des pressions sur sa paroi que l'on observe pour ces deux types d'écoulement. Pour le premier écoulement à très faible Re ($Re=0,16$), on remarque que le

fluide reste attaché tout autour du cylindre. Les pressions entre l'amont et l'aval s'équilibrent, la traînée de pression du cylindre est donc nulle.

Lorsque Re augmente, la courbure du cylindre impose un gradient de pression positif trop important et la couche limite décolle. En aval de D et D' , les points expérimentaux ne suivent plus la même évolution que dans le cas théorique (figure I.10.a). Les mesures d'Achenbach [9] nous indiquent que les pressions dans la zone de recirculation sont plus faibles que pour un écoulement idéal. La différence entre les deux courbes montre alors un déficit de pression entre l'amont et l'aval du cylindre. C'est ce déficit qui est générateur de traînée. La pression dans la zone décollée est relativement constante et on peut constater que c'est la valeur aux points de décollement qui est maintenue. Ainsi on peut estimer qu'en manipulant l'écoulement pour repousser la séparation on agira sur deux phénomènes en même temps. D'un côté la pression dans la zone séparée sera plus élevée, donc l'écart entre l'amont et l'aval plus faible. De l'autre, la surface sur laquelle le déficit est intégré sera restreinte. Les deux actions vont dans le sens d'une réduction de traînée. [9]

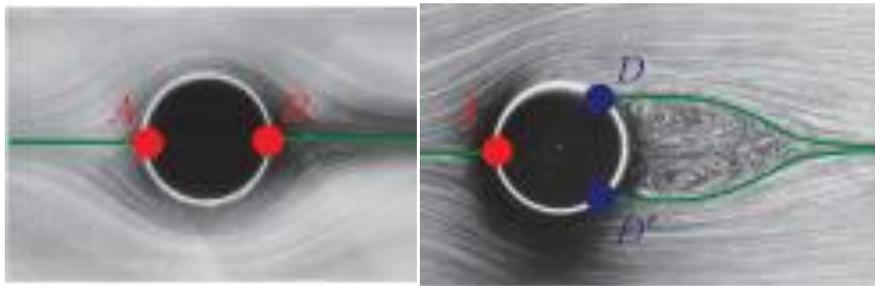


Figure I.10.a: Ecoulement autour d'un cylindre en fonction du Re . Les points (D) et (D') indiquent les points de décollement. D'après Van Dyke. [6; 9]

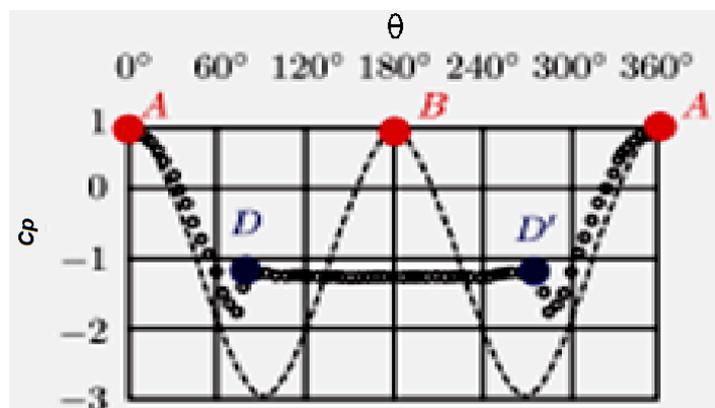


Figure I.10.b : Distribution de pression autour d'un cylindre à $Re=10^5$ (Mesures de Achenbach [7] reportées par Schlichting [8]). La ligne en pointillés représente les valeurs théoriques pour un fluide parfait et les cercles représentent les mesures de pression réelles. [9]

I.6.2. Ecoulement autour d'un disque plan :

Soit un disque plan et mince, normal par rapport à la vitesse de l'écoulement V (Figure I.12). Les pressions locales mesurées sur la face amont demeurent à peu près constantes sur une grande partie de la surface, mais décroissent rapidement vers les bords. Sur la face aval, les pressions restent pratiquement constantes. A partir des données expérimentales, on peut calculer graphiquement le coefficient moyenne de pression C_p sur chaque face. Ainsi, sur la face amont, il y a une surpression sur la face aval, on obtient une dépression dans la partie amont. conduisent à des forces s'appliquant dans le même sens. [3]

La valeur de la traînée du disque, mesurée directement, est $C_x = 1.1$ lorsqu'on prend la surface du disque comme surface de référence. Dans ce cas particulier, la résultante des forces tangentiels de frottement est nulle, parce que les forces de frottement radiales ont une projection nulle et celles qui s'exercent sur la surface latérale sont négligeables, le disque ayant une très faible épaisseur. On constate, lorsqu'on représente l'écoulement visuellement, que les filets fluides décollent sur l'arête du disque, plutôt que la contourner [3].

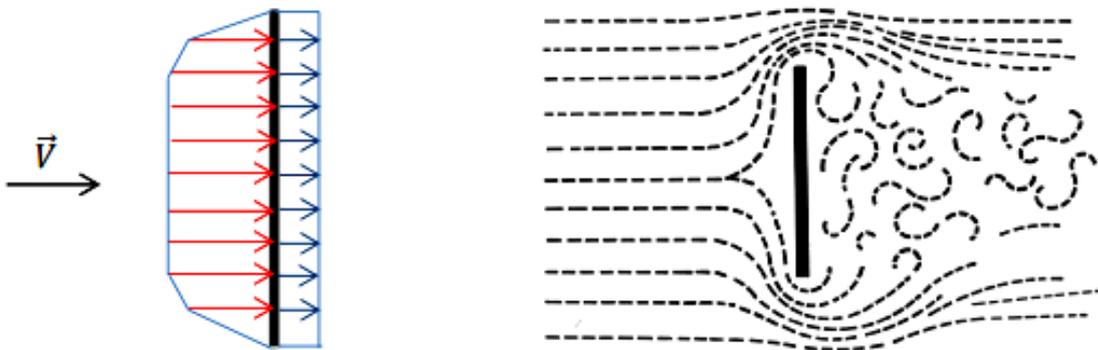


Figure I.11: Distribution de pression et un écoulement autour un disque placé perpendiculairement à la vitesse de l'écoulement [3].

I.6.3 Ecoulement autour d'une sphère :

Dans le cas de l'écoulement autour d'une sphère, on retrouve une partie de la face amont en surpression et le reste en dépression. Les forces élémentaires de pression sont radiales, leur sens est représenté sur la figure (I.12). Le décollement s'effectue un peu en amont du plan diamétral perpendiculaire à V . [3]

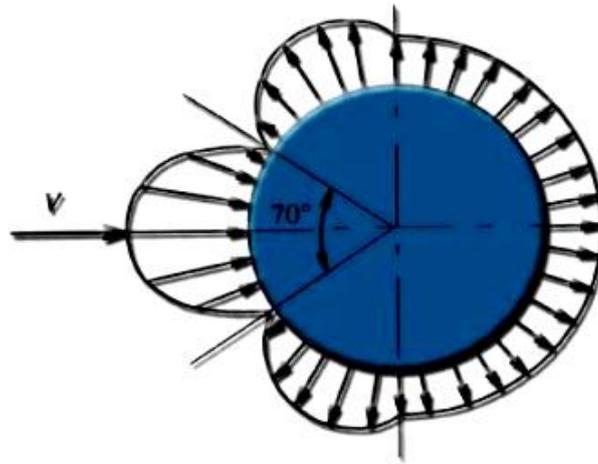


Figure I.12 : Ecoulement autour d'une sphère et distribution de pression. [3]

En pratique, le coefficient de traînée est calculé en utilisant des relations empiriques basées sur des données expérimentales. Les cas classiques le plus étudiés sont la sphère et le cylindre.

La figure suivante représente la dépendance du coefficient de traînée C_x en fonction du nombre de Reynolds.

On note que C_x diminue considérablement à partir de faibles valeurs de Re , jusqu'à atteindre un plateau ($C_x \approx 1$) pour $Re > 10^3$. Pour ces corps, on distingue cinq types régimes:

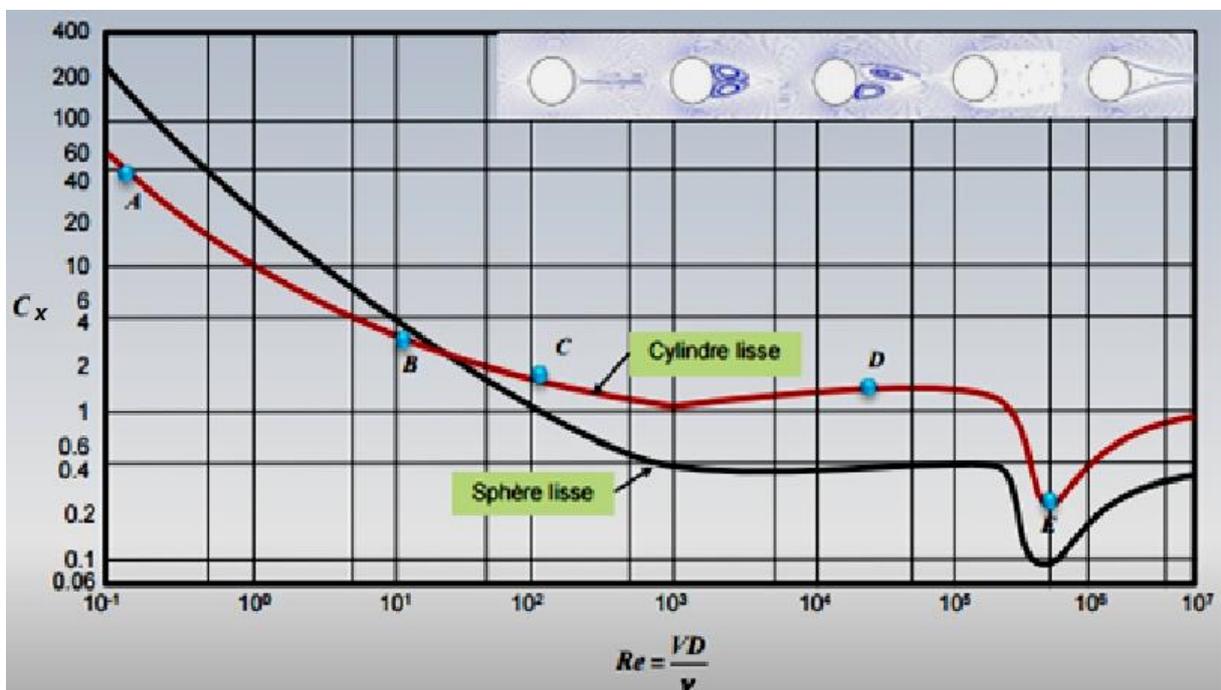


Figure I.13 : Evolution du coefficient de traînée en fonction de nombre de Reynolds sans le cas du cylindre et de la sphère.

- $Re < 1$, les contraintes visqueuses sont dominantes et il n'y a pas de décollement.

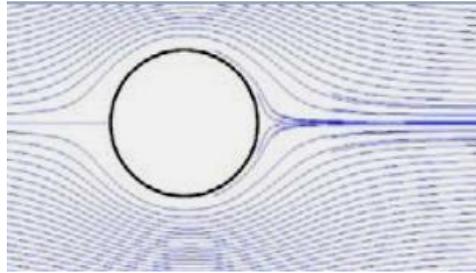


Figure I.14.a : Ecoulement autour d'une sphère a $Re < 1$.

- $Re \sim 10$, un décollement a lieu et deux tourbillons stables se forment derrière l'objet. La pression chute fortement en arrière de l'objet, ce qui augmente la traînée. Un rallongement du corps restreint le phénomène et la traînée diminue.

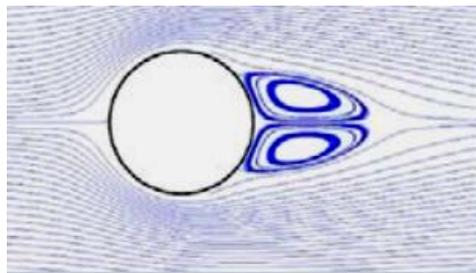


Figure I.14.b : Ecoulement autour d'une sphère a $Re \approx 10$.

- $Re > 100$, les deux tourbillons sont devenus trop grands pour coexister en même temps. Ils ne sont plus stables et une émission alternée se produit: c'est l'allée de von Karman (ce phénomène cause l'oscillation de structures).

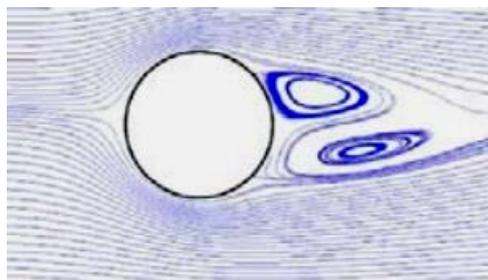


Figure I.14.c : Ecoulement autour d'une sphère a $Re > 100$.

- $Re > 10000$, la couche limite autour du cylindre demeure laminaire du côté amont et devient turbulente à partir d'un point de décollement ($\theta \approx 80^\circ$) On remarque un grand sillage turbulent.

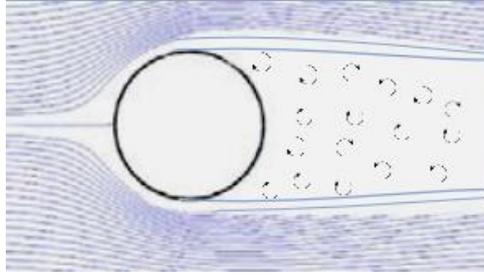


Figure I.14.d : Ecoulement autour d'une sphère a $Re > 10000$.

- Au-delà d'un nombre de Reynolds critique ($\approx 2 \times 10^5$), le décollement s'effectue plus en aval. Le profil de vitesse dans la couche limite turbulente oppose plus de résistance au gradient de pression défavorable. Le sillage devient plus étroit et la force de traînée chute fortement à la transition, parfois dite "crise de traînée".

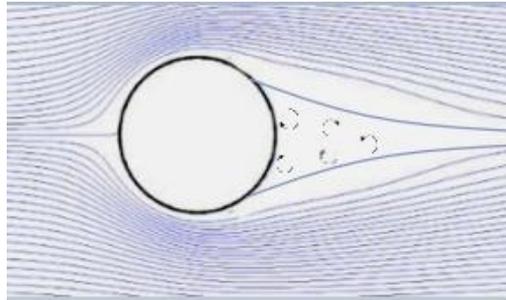


Figure I.14.e : Ecoulement autour d'une sphère a $Re \approx 2 \times 10^5$.

Conclusion :

Après avoir exposé les phénomènes qui entourent notre sujet, on a constaté que le comportement de la couche limite diffère d'une géométrie à une autre, et par rapport à l'état de surface et le nombre de Reynolds qui caractérise l'écoulement.

II.1.Introduction :

Après une brève évocation de l'existence des sphères parmi les objets naturels et parmi nos objets manufacturés, nous proposerons un bref historique de la mesure du coefficient de Traînée des sphères (le fameux C_x), mesure qui donna lieu à une découverte de la plus haute importance : celle de l'influence primordiale du Nombre de Reynolds sur les écoulements.

L'une des sphères qui a le plus compté dans l'histoire est sans doute le vaisseau Vostok de Yuri Gagarine, premier homme à être allé dans l'espace et en être revenu vivant.

Le choix d'une telle forme pour ce vaisseau spatial avait été dicté par la bonne connaissance que les ingénieurs russes avaient de l'aérodynamique de la sphère (depuis le haut hypersonique jusqu'au bas subsonique).

D'autres corps sphériques connaissent de fréquentes heures de gloire :

Ce sont les ballons et balles de sports (football, volley, handball, tennis, golf, ping-pong, etc.)

Les footballeurs, par exemple, dont les qualités ne sont pas uniquement physiques, ont appris à utiliser l'aérodynamique très particulière de leur ballon : cette aérodynamique, à quelques détails près est celle de la sphère.

La plupart des acteurs de jeux de balles utilisent de même les propriétés aérodynamiques singulières de la sphère, mais les golfeurs ont, de plus, influé sur la fabrication de leur balles (sur leur état de surface) afin que leur traînée soit moins importante.

II.2. La couche limite et son équation intégrale de VON KÁRMÁN :

Pour Prandtl, en effet, c'est la transition de la Couche Limite existant sur la sphère depuis un état laminaire jusqu'à un état turbulent qui expliquait le recollement de l'écoulement sur l'arrière de ce corps aux grandes vitesses, la Couche Limite turbulente étant paradoxalement plus apte à résister au décollement que la Couche Limite laminaire.

On voit sur les captations ci-dessous (effectuées dans l'eau) le recul du point de décollement sur la sphère, entre l'image de gauche (en Couche Limite laminaire) et l'image de droite (en Couche Limite turbulente) : [10]

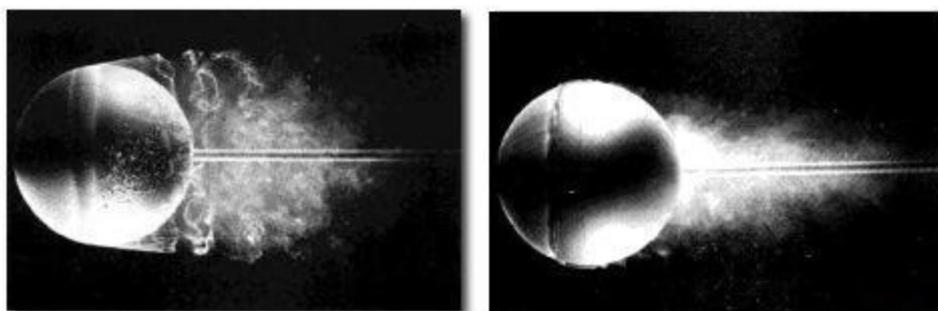


Figure II.1: Le recul du point de décollement sur la sphère. [10]

Le décollement sur la sphère de droite correspond à une zone de basse pression de culot de moindre section frontale et donc à un moindre C_x

Cette importance de la dépression de culot apparaîtra mieux quand nous aurons rappelé que la partie avant de la sphère développe un C_x très faible, ce qui pour le débutant en aérodynamique apparaît toujours comme très paradoxal. Cela semble d'autant plus paradoxal qu'on assigne intuitivement à la partie avant d'un corps le rôle de se frayer un chemin dans l'atmosphère, de faire la trace, au fond, pour le reste du corps.

D'une façon générale pourtant, les avant-corps, comme les ogives de fusées par exemple, développent un C_x très faible, voire négatif...

Prandtl lui-même était conscient du fait qu'il était difficile à admettre que la transition de la Couche Limite depuis un état laminaire jusqu'à un état turbulent puisse conduire à une diminution de traînée (l'écoulement laminaire autour d'un corps apparaissant comme un idéal par rapport à l'écoulement turbulent).

Afin de prouver la véracité de son explication, Prandtl conçut alors une expérience qui est toujours pratiquée de nos jours : il posa sur la partie avant de la sphère un élément turbulateur (fil ou bande rugueuse) qui, malgré son action traînante, faisait chuter le C_x de la sphère.

Un anneau de fil turbulateur est présent sur l'image (captée dans l'eau), mais on le voit mieux sur l'image d'archive captée dans l'air (avec ajout de fumées), en 1914. [10]

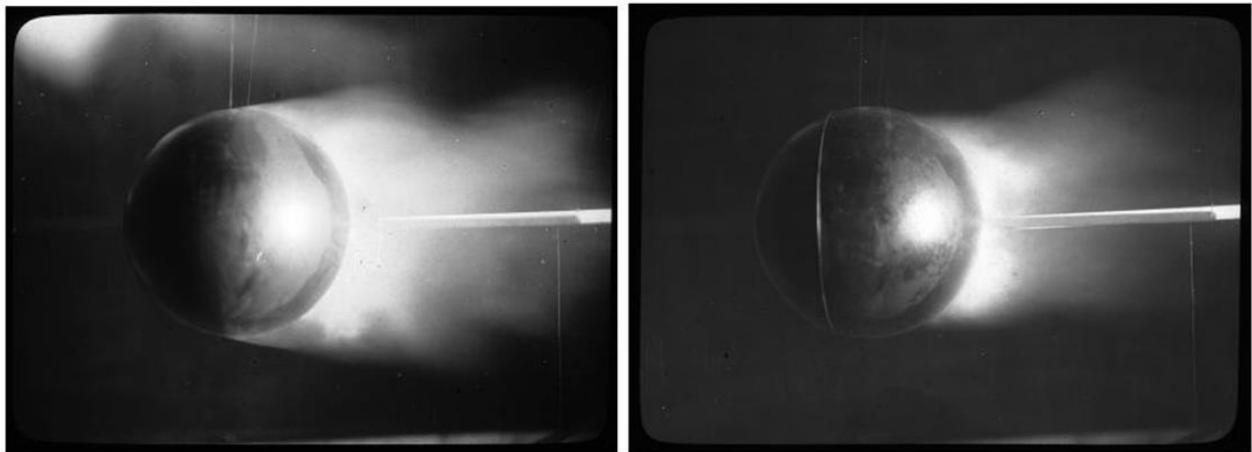


Figure II.2: Le point de décollement sur la sphère avec un anneau de fil turbulateur.

II.3 .Note sur la vitesse de chute des gouttes d'eau :

L'Encyclopédie Universalise en donne la vitesse de chute en fonction du diamètre. Comme on s'en doute, plus le diamètre est fort et plus la vitesse de chute est grande (c'est ce qui fait naître l'impression –erronée– que les très fines gouttes d'eau d'un brouillard ne tombent pas).

Diamètre de la goutte (m)	Vitesse de la goutte (m/s)
0,00001	0,003
0,00002	0,012
0,00003	0,026
0,00004	0,047
0,00005	0,072
0,00006	0,103
0,00008	0,175
0,0001	0,25
0,0002	0,71
0,0004	1,6
0,0006	2,46
0,0008	3,25
0,001	4,03
0,002	6,49
0,003	8,06
0,004	8,83

Figure II.3: Vitesse de chute de la goutte de pluie en fonction du diamètre.

L'auteur donne la vitesse de 9 m/s pour une goutte de 5 mm de diamètres, et 9,2 m/s pour une goutte de 5,8 mm.

Il est aisé de tirer de ces relevés la courbe du C_x frontal des gouttes en fonction du Reynolds diamétral de leur mouvement (en considérant que les vitesses annoncées sont des vitesses terminales, c.-à-d. des vitesses limites de chute stabilisée).

Voici cette courbe, en jaune, comparée avec la courbe standard de Clift, Grace et Weber (en rouge), courbe standard que nous étudierons en détails plus bas, mais dont on peut déjà dire qu'elle représente l'état des connaissances actuelles sur le sujet du C_x de la sphère :

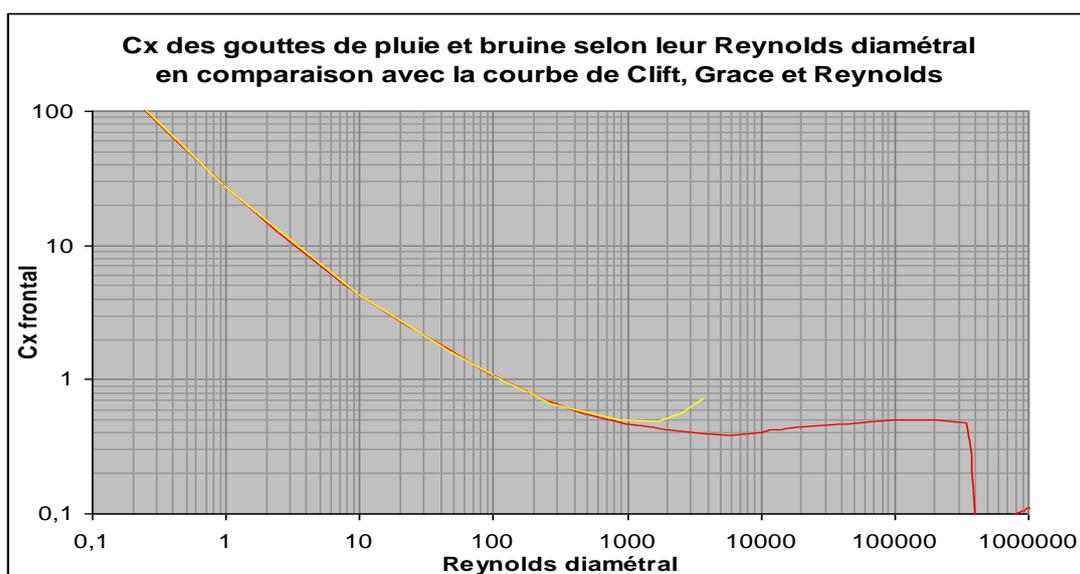


Figure II.4: C_x des gouttes de pluie en comparaison avec la courbe de Clift, grâce à Reynolds.

Il est patent que le C_x des gouttes devient plus fort que le C_x des sphères étudiées par Clift et collaborateurs au-dessus d'un Reynolds diamétral de 300, ce dernier Reynolds correspondant à un diamètre de goutte de 1 mm.

Au demeurant, cette divergence entre les deux courbes est tout à fait normale puisque la pression dynamique au point d'arrêt des grosses gouttes les aplatit légèrement, augmentant par là-même leur C_x .

Cette déformation sort d'ailleurs les gouttes d'eau d'un diamètre supérieur à 1 ou 2 mm du cadre du présent texte

Vers la gauche de la courbe jaune ci-dessus, le C_x commence à grandir pour suivre et adopter la courbe (tendant vers une droite) du régime de Stokes (régime où la Traînée peut être exprimée comme étant proportionnelle à la vitesse

Si l'on dessine le C_x des gouttes par rapport à leur diamètre, on obtient la courbe jaune ci-dessous :

Pour mémoire, précisons que lorsque les gouttes d'eau grossissent cet aplatissement de la goutte au point d'arrêt s'amplifie pour évoluer vers un creusement tendant à donner à la goutte d'eau de diamètre 6 mm une forme d'ombrelle, forme aérodynamiquement instable qui entraînera l'éclatement de la goutte en gouttes plus petites. Ceci explique qu'il n'existe pas de gouttes de pluie de diamètre supérieur à 6 mm. Cela n'empêche pas notre C_x (défini dans tout notre texte comme le quotient de la Traînée par la pression dynamique $\frac{1}{2} P V^2$ et par la section frontale) d'être valide ; simplement il augmente quand on va vers la gauche du graphe...

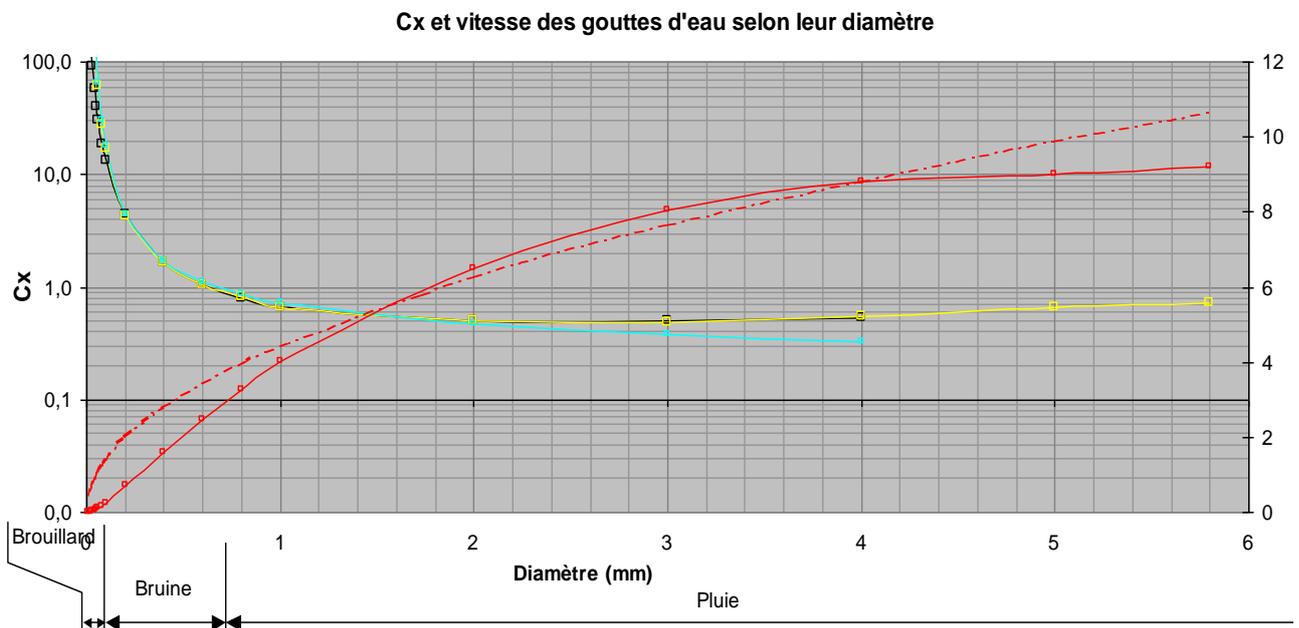


Figure II.5: C_x et vitesse des gouttes d'eau selon leur diamètre.

En dessous de l'abscisse 2 mm, ce C_x est également celui des sphères en général (puisque au-dessus de 2 mm les gouttes ne respectent plus la forme sphérique).

On peut observer qu'en-dessous de 1 mm de diamètre ces sphères voient leur C_x devenir notablement plus fort (bien noter que le C_x est exprimé en ordonnées

logarithmiques) : ce C_x quitte donc le régime que l'on pourrait qualifier de quadratique pour s'approcher du régime de Stokes...

Dans ce régime de Stokes, le C_x croît vertigineusement pour atteindre, par exemple, ~12 000 pour une goutte de 10 microns.

II.4. Influence de la rugosité de la sphère sur son C_x :

Achenbach, a réalisé un très utile travail de relevé de C_x de la sphère selon la rugosité relative de sa surface. Dans quatre cas, ci-dessous, la rugosité des sphères a été obtenue en collant à leur surface, de façon aussi compacte que possible des billes de verre d'un diamètre donné.

Voici les courbes relevées par Achenbach, dans une soufflerie dont il convient de rappeler qu'elle était extrêmement peu turbulente. [11]

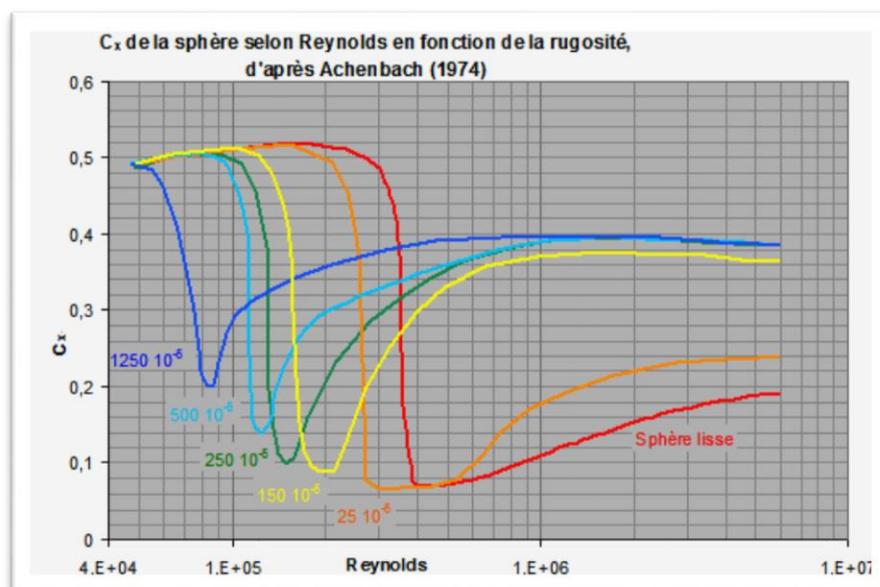


Figure II.6: C_x de la sphère selon Reynolds en fonction de la rugosité.

Les rugosités relatives sont indiquées sur le graphe.

La rugosité relative est définie par Achenbach comme le quotient de la hauteur moyenne des aspérités sur le diamètre de la sphère, toute la surface de la sphère ayant bien-sûr été rendue rugueuse.

Bien que ces courbes révèlent une certaine irrégularité d'échelonnement en abscisse (spécialement pour le début de crise), l'anticipation de cette crise du C_x due à la rugosité apparaît nettement, avec une rehausse progressive du point bas des courbes pour les plus fortes rugosités (rehausse du point bas que l'on peut attribuer à l'augmentation de friction due à la rugosité).

De ce point de vue particulier, il est curieux que la partie sous-critique de toutes les courbes rejoigne la partie sous-critique de la courbe rouge (celle de la sphère lisse) :

l'influence de la rugosité ne se fait donc guère sentir en sous-critique, ce qui doit être pris comme un encouragement à forcer au besoin la transition de la Couche Limite par des dispositifs rugueux.

Remarquons que la plus faible rugosité relative (courbe orange) a été obtenue en rayant une sphère lisse avec du papier émeri. Ce mode d'obtention de la rugosité met peut-être cette courbe orange un peu à l'écart des autres.

Achenbach note dans son texte que les C_x supercritiques (le point bas des courbes) sont régulièrement espacés et il en tire une courbe assez seyante

Il est également notable que les C_x hypercritiques des quatre autres courbes se rejoignent à peu près (au delà du Reynolds un million), même si c'est à un C_x qui vaut le double de celui de la sphère lisse (la courbe orange se tenant encore à part). [11]

II.5. les sphères de sport :

Voici le graphe, établi en soufflerie par LES japonais Takeshi Asai et Kazuya Seo indiquant le C_x de quatre types de ballons de football Adidas de fabrications différentes.

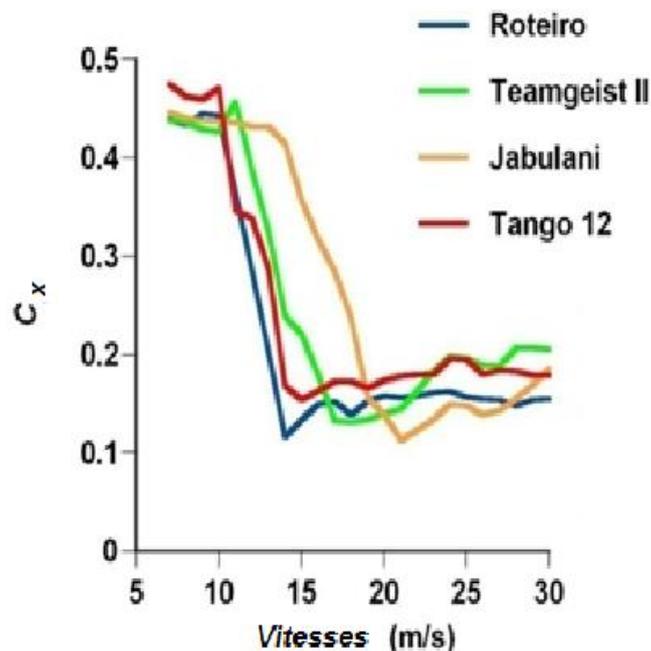


Figure II.7: Le C_x de quatre types de ballons. [12]

Les deux auteurs indiquent que le Reynolds critique, c.-à-d. le Reynolds en dessous duquel le C_x commence à croître lorsque la vitesse du ballon diminue est :

$2,2 \cdot 10^5$, $C_x = 0,12$, pour le ballon Roteiro.

$2,8 \cdot 10^5$, $C_x = 0,13$, pour le ballon Teamgeist II

$3,3 \cdot 10^5$, $C_x = 0,11$, pour le ballon Jabulani

$2,4 \cdot 10^5$, $C_x = 0,15$, pour le ballon Tango 12

Ces mesures du C_x de ces ballons sont effectuées ballon fixe (donc non doté de rotation), comme on le devine ci-dessous :



Figure II.8: Mesure de C_x du ballon. [12]



Figure II.9: Les quatre types des ballons étudiés. [12]

Dans la thèse, Jeffrey Ryan Kensrud dresse un tableau presque complet du C_x de certaines balles de sports en comparaison avec celui établi par Achenbach pour la sphère lisse (trait noir).

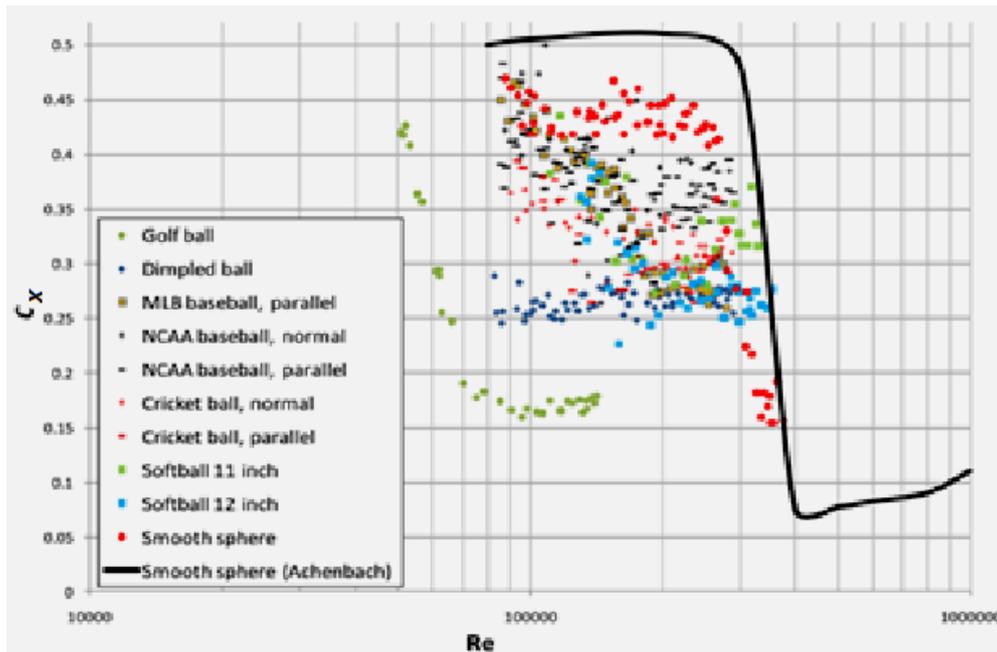


Figure II.10: C_x de certaines balles de sports en comparaison avec celui établi par Achenbach pour la sphère lisse. [12]

II.5. Les difficultés des mesures du C_x de la sphère :

De telles courbes de C_x sont difficiles à relever : la crise de la sphère se produit dans nos souffleries à un Reynolds très dépendant de la rugosité de ce corps, bien sûr, mais surtout de la turbidité de l'écoulement (sa turbulence).

Si le premier critère, la rugosité peut être facilement éliminé en donnant à la surface de la sphère un poli parfait (dit aérodynamique), c'est par le deuxième critère que les résultats des aérodynamiciens ont souvent péché : il reste toujours dans les souffleries un reste de turbidité, aussi faible soit-il, qui déclenche de façon anticipée la crise de la sphère et la déplace donc vers les Reynolds plus faibles

Le meilleur travail qui ait été produit à ce sujet est celui d'Achenbach (en 1972 puis 1974) à des Reynolds courant de $5 \cdot 10^4$ à $6 \cdot 10^6$.

Ce chercheur utilisa pour ses mesures la soufflerie pressurisée de l'Institut für Reaktorbauelemente, Kern fors chung anlage Julich, en Allemagne.

Lesdites mesures furent effectuées à une vitesse de 15 m/s mais à une pression montant jusqu'à 40 atmosphères, le taux de turbulence de l'écoulement restant inférieur à 0,45 %.

Ce faible taux de turbulence peut être comparé avec celui rencontré par des sphères en chute libre et, de fait, Achenbach a obtenu des résultats comparables à ceux, obtenus en vol 39 années plus tôt par Millikan et Klein.

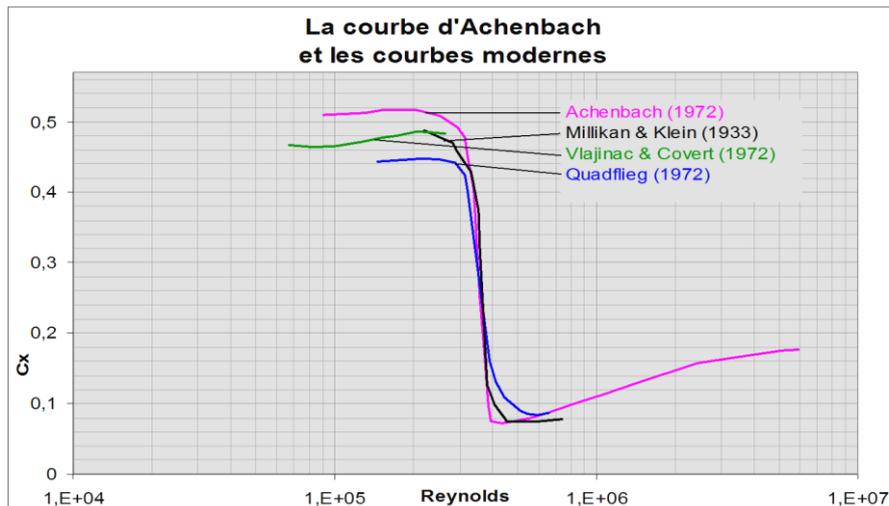


Figure II.11: La courbe d'Achenbach et les courbes modernes. [13]

II.6.Aérodynamique des alvéoles :

Lorsqu'une balle de golf est frappée, l'impact, qui dure moins d'une milliseconde, détermine la vitesse, l'angle de lancement et la vitesse de rotation de la balle, autant de facteurs qui influent sur sa trajectoire (et sur son comportement lorsqu'elle touche le sol). Une balle en mouvement dans l'air subit deux grandes forces aérodynamiques : la portance et la traînée. La traînée ralentit le mouvement vers l'avant, alors que la portance exerce une action perpendiculaire à celui-ci. L'ampleur de ces forces dépend du comportement de la couche limite de l'air qui se déplace avec la surface de la balle. Les balles sont fabriquées à l'aide d'un moule en deux pièces. Et comme il n'y a aucune alvéole au niveau d'un des grands cercles en pointillés (rouges), le moule peut être constitué de deux hémisphères. Toutes les balles de golf modernes comportent des alvéoles, lesquelles visent à accroître et à façonner les forces de portance et de traînée en modifiant le comportement de la couche limite. En physique et en mécanique des fluides, une couche limite est la couche de fluide située à proximité immédiate d'une surface délimitante. Sur une aile d'aéronef, la couche limite est la partie de l'écoulement située à proximité de l'aile. Les balles lisses subissent également les forces de traînée et de portance : elles sont uniquement modifiées, non pas créées, par les alvéoles. Les balles alvéolées volent plus loin que les balles sans alvéoles du fait de l'action combinée de deux effets : [14]

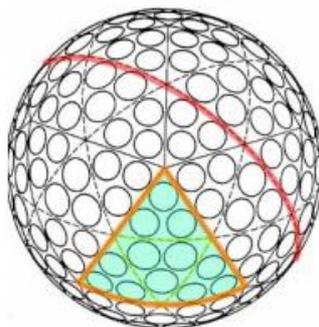


Figure II.12: Balle de golf. [14]

- Premièrement, les alvéoles retardent la séparation entre la couche limite et la balle. Une séparation immédiate, comme cela se produit avec une sphère lisse, entraîne une turbulence de sillage importante, principale cause de traînée. Le retardement de la séparation engendré par les alvéoles entraîne donc une réduction de cette turbulence de sillage, et par conséquent, de la traînée.
- Deuxièmement, l'effet rétro «backspin» génère une portance en déformant l'écoulement d'air autour de la balle, de la même manière que sur une aile d'avion. Un effet rétro est imprimé quasiment à chaque coup en raison de l'angle d'ouverture de la face du club (c'est-à-dire l'angle entre la face du club et un plan vertical). Lorsqu'on imprime un effet rétro à une balle, celle-ci subit une force de portance vers le haut et volera donc plus haut et plus loin qu'une balle sans effet rétro. Un effet de rotation latérale «sidespin» se produit lorsque la face du club n'est pas perpendiculaire à la direction du swing, entraînant une force de portance qui fait que la balle suit une trajectoire incurvée vers un côté ou l'autre. Malheureusement, les alvéoles amplifient cet effet, ainsi que la portance vers le haut plus désirable dérivée du simple effet rétro. (Certaines balles alvéolées sont supposées réduire les effets de rotation latérale.)

Caractéristiques techniques La plupart des balles de golf actuellement commercialisées comportent entre 300 et 450 alvéoles. Auparavant, quelques unes en comportaient plus de 500. Le record revient à une balle de 1 070 alvéoles : 414 grandes alvéoles (de quatre tailles différentes) et 656 très petites. Toutes les marques de balles, sauf une, ont un nombre pair d'alvéoles. La seule balle sur le marché qui en compte un nombre impair comporte 333 alvéoles. Le diamètre minimum autorisé pour une balle de golf est de 42,67 mm et sa masse ne peut dépasser 45,93 g. Les balles de golf modernes possèdent deux, trois ou quatre couches fabriquées à partir de divers matériaux synthétiques. La surface présente généralement un motif de 300 à 400 alvéoles conçues pour améliorer l'aérodynamisme des balles. La méthode de construction et les matériaux utilisés influent largement sur les caractéristiques de jeu de la balle, telles que la distance, la trajectoire, la rotation et le toucher. Les matériaux durs, tels que le Surlyn, produisent généralement des balles capables de parcourir de plus longues distances, alors que les revêtements plus souples, tels que le Balata, ont tendance à générer une plus grande rotation, un meilleur « toucher » et un potentiel d'arrêt supérieur. On distingue trois grandes catégories de balles de golf selon leur construction : les enveloppes à deux, trois ou quatre couches. La première balle de golf était en cuir et remplie de plumes. [14]

II.6.1. Type de balle subit moins de frottement une fois lancée en l'air : une balle lisse ou une balle alvéolée :

Les tests réalisés montrent qu'une balle de golf lisse ne parcourra que la moitié de la distance requise par une balle alvéolée. Les tests réalisés sur les balles de golf dans des tunnels aérodynamiques révèlent qu'en fait, les balles alvéolées produisent une traînée nettement inférieure du fait de la couche limite turbulente créée qui réduit le sillage. Les

alvéoles présentes sur les balles de golf réduisent en fait la traînée aérodynamique que subirait normalement la balle si sa surface était lisse. Lorsqu'une balle complètement lisse est lancée dans l'air, une grande poche d'air basse pression se forme dans son sillage. Cela crée une traînée, qui ralentit la balle. Du fait de la réduction du sillage, la différence de pression baisse, entraînant une réduction de la force de traînée. Les alvéoles créent de la turbulence dans l'air autour de la balle et l'air épouse ainsi de très près la forme de la balle. Cela signifie qu'au lieu d'effleurer rapidement la balle, l'air en épouse plus étroitement la courbe, de l'avant vers l'arrière. Résultat : il y a moins de sillage et moins de traînée. Les balles alvéolées produisent environ deux fois moins de traînée que les balles lisses. [14]

CONCLUSION

Modifier les caractéristiques d'une surface peut changer les fonctionnalités de celle-ci. Les requins peuvent, en modifiant la structure de leur peau, diminuer la force de friction avec l'eau, responsable de la résistance à l'avancement qu'on appelle la traînée. On a constaté depuis longtemps que les empreintes en creux des balles de golf augmentent leur portée. Des chercheurs du MIT ont imaginé des surfaces courbes « intelligentes » capables de se plisser et ainsi de modifier à la demande leur topographie et ils ont pu en mesurer les conséquences aérodynamiques.

En effet, la rugosité particulière d'un corps solide autour duquel s'écoule un fluide peut abaisser la vitesse à laquelle se produit la transition laminaire-turbulente de l'écoulement. Ceci entraîne une diminution de la traînée. On appelle traînée la force qui s'oppose au mouvement d'un corps dans un liquide Ou gaz.

A faible vitesse, l'écoulement d'un fluide visqueux autour d'un corps solide est toujours laminaire, c'est-à-dire que deux particules voisines à un instant donné le restent ultérieurement. A une certaine vitesse (d'autant plus élevée que la viscosité l'est et que la longueur caractéristique du solide est petite), l'écoulement devient turbulent avec l'apparition de tourbillons de vitesse, désordonnés et difficilement prévisibles. La turbulence diminue à son début la traînée aux alentours de cette transition laminaire -turbulent. Cet effet est exploité pour des combinaisons de nageurs, les balles de golf et même à la surface d'ailes d'avions. Mais, si la vitesse augmente bien au delà de celle de la transition, la force de traînée réaugmente.

III.1. Introduction :

Dans un écoulement autour d'une géométrie sphérique, le décollement de la couche limite au niveau de la surface génère une zone de turbulence qui influe sur le rendement aérodynamique, soit une augmentation de la traînée.

Parmi les solutions possibles au retardement du décollement, celle du contrôle passif par modification de l'état de surface, soit en ajoutant des rugosités ou bien un anneau sur la surface, fournit des résultats satisfaisants.

Dans ce chapitre, on exposera les résultats des manipulations réalisées sur les efforts (trainés) et les coefficients de pression résultant de l'écoulement autour de sphères de différents diamètres.

III.2. Réalisation des maquettes :

Afin de réaliser des boules sphériques, on a utilisé un tour spécial pour usiner le bois comme le montre la figure III.1 ci-dessous.

Différentes sphères ont été usinées avec des diamètres de 150mm, 110mm, 90mm et 70mm.



Figure III.1: Le tour d'usinage du bois.

Les figures III.2 et III.3 montrent les maquettes sphériques au cours de réalisation.



Figure III.2 : Les boules après usinage



Figure III.3 : Les boules après l'ajustage de leurs surfaces.

A l'aide de papier abrasif, on a amélioré l'état de surface des sphères, et pour avoir une surface très lisse on a ajouté une couche de peinture. Des trous ont été également réalisés sur les maquettes pour les besoins de fixation dans la veine d'essais ainsi que les mesures de pression statique.

Une tige filetée permet de relier les maquettes à la balance aérodynamique ainsi de pouvoir mesurer les forces de trainée.



Figure III.4 : Le perçage des boules.



Figure III.5 : A gauche : la tige de fixation A droite : la boule placée dans la soufflerie.



Figure III.6 : Travaux effectués sur les boules.

Pour la réalisation des prises de pressions, on a utilisé des petits tubes en cuivre (tubes capillaires) de diamètre 1mm qui ont été collés sur une tôle en aluminium d'épaisseur de 0.3 mm, cette dernière est courbée pour prendre la forme de la sphère.



Figure III.7: Mesure des coefficients de pressions pour une sphère lisse.

Une fois les sphères usinées, elles sont placées dans la soufflerie pour entamer le programme d'essais portant sur les efforts et le champ de pression pariétal.



Figure III.8 : Les boules après le collage des grains de rugosité.

La figure III.8 montre la modification de surface par ajout de rugosités constituées par des grains de 1mm de diamètre répartis uniformément sur toute la surface.



Figure III.9 : La boule avec la rugosité dans la soufflerie.

Nous avons également considéré une autre modification de surface en ajoutant un anneau générateur de turbulence afin de rendre la couche limite plus résistante au décollement. Les figures III.10 et III.11 montrent une sphère munie de cet anneau.



Figure III.10.a : La mise d'un anneau sur les sphères

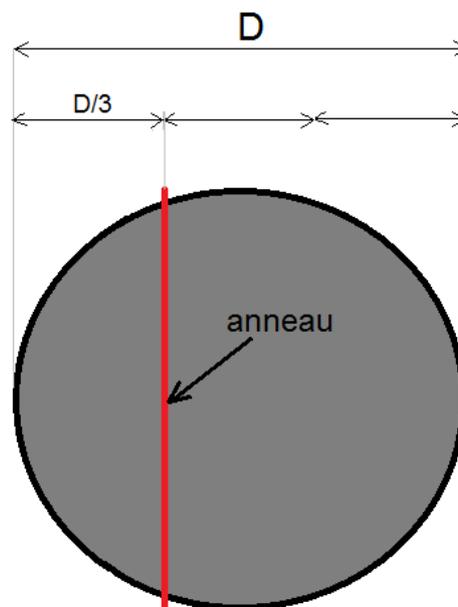


Figure III.10.b : Schéma montrant l'emplacement de l'anneau sur la sphère

III.3. La soufflerie :

La soufflerie est une machine destinée à produire le vent nécessaire à un essai et à une étude aérodynamique sur une maquette, en général à l'échelle réduite. Elles constituent donc un outil indispensable à l'étude expérimentale.

Le corps à étudier dans une soufflerie est fixe (immobile) dans un écoulement artificiel d'air ou de gaz.

Les paramètres à respecter :

- Propriétés du fluide
- Forme géométrique de la maquette
- Nombre de Mach
- Nombre de Reynolds

Composants de la soufflerie :



Figure III.11.a : Soufflerie convergente.

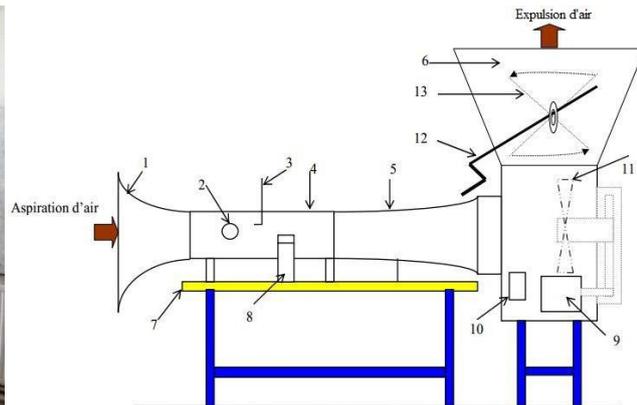


Figure III.11.b : Les composants de la soufflerie. [15]

- | | |
|------------------|--------------------------|
| 1- Convergent | 8- Balance aérodynamique |
| 2- Hublot | 9- Moteur électrique |
| 3- Tube de Pitot | 10- Interrupteur |
| 4- Veine d'essai | 11- ventilateur |
| 5- Divergent | 12- Variateur de vitesse |
| 6- Diffuseur | 13- Vanne papillon |
| 7- Table | |

III.3.1. Les caractéristiques de la soufflerie :

Dimensions de la veine : 30x30x100 cm.

Longueur : 4 m.

Vitesse dans la veine : variable de 0 à 45 m/s.

Puissance du moteur : 4 KW.

Vitesse du moteur : 1440 tr/mn.

III.3.2. Les composants utilisés pour mesurer les efforts :

III.3.2.1. La veine d'essais :

C'est une enceinte de dimensions 30x30x100 cm; les sphères à étudier y sont placées pour mener nos expériences.

III.3.2.2. Balance aérodynamique :

Elle permet de mesurer les efforts aérodynamiques (portance, traînée) qui s'exercent sur la maquette (les sphères).



Figure III.12 : Balance aérodynamique.

III.3.2.3. Indicateur des contraintes :

Pour mesurer les efforts aérodynamiques (portance et traînée) s'exerçant sur la maquette, on utilise une balance aérodynamique à jauges de contraintes.



Figure III.13 : Indicateur des contraintes.

III.3.2.4. Convertisseur :

Il permet de traiter un signal afin d'obtenir à sa sortie un signal lisible dans un logiciel spécifique installé dans l'ordinateur.



Figure III.14 : Convertisseur du signal.

III.3.2.5. Ordinateur :

L'ordinateur permet un enregistrement du signal (et donc de la portance et de la trainée) sur une durée et avec une fréquence choisies (60 secondes dans notre cas).



Figure III.15: Ordinateur.

III. 3.2.6. La chaîne d'acquisition des données :

Pour mesurer les efforts, la chaîne d'acquisition se compose de quatre éléments qui sont :

- La balance aérodynamique sur laquelle est reliée la maquette ainsi que l'indicateur de contraintes.

L'indicateur de contraintes qui permet d'obtenir un signal électrique qui sera relié a un convertisseur.

Un convertisseur qui traite le signal afin d'obtenir en sa sortie un signal lisible dans un logiciel spécifique installé dans l'ordinateur.

L'ordinateur qui permet un enregistrement du signal (et donc de la portance et de la trainée) sur une durée et avec une fréquence choisies.

III.3.3. Les composants utilisés pour mesurer les pressions :

III.3.3.1. Tube de Pitot :

C'est un tube qui permet de mesurer la vitesse de l'écoulement en un point. Il est constitué de deux tubes coaxiaux munis de deux prises de pressions l'une correspondante à la pression totale et l'autre à la pression statique. Par application du théorème de Bernoulli, la vitesse en un point m s'écrit :

$$V_m = \sqrt{\frac{2 \cdot \rho_h \cdot g \cdot \Delta h}{\rho}} \quad (\text{III.1})$$

Avec :

ρ : Masse volumique de l'air à la température d'essai.

ρ_h : Masse volumique de l'huile.

Δh : Dénivellation d'huile lue sur le multi- manomètre.

III.3.3.2. Multi-manomètre :

Composé de 24 tubes disposés verticalement, le multi-manomètre est utilisé pour la mesure des pressions. Ces tubes débouchent sur un même réservoir d'huile de masse volumique $\rho_h = 856.418 \text{ Kg/m}^3$. Le multi-manomètre est gradué de 2 en 2 mm, et les mesures de pressions sont données par les dénivellations des hauteurs. Il est aussi équipé de vis à sa base qui permettent le réglage de l'horizontalité et du niveau dans les tubes avant utilisation.



Figure III.16 : Multi-manomètre.

Les mesures de pressions seront données par les dénivellations des hauteurs, la pression locale mesurée se traduit par le coefficient de pression que l'on définit par l'expression :

$$C_p = \frac{p - p_0}{1/2 \rho V_0^2} \quad (\text{III.2})$$

p : pression statique locale.

p_0 : pression statique locale à l'amont infini.

ρ : masse volumique de l'air.

V_0 : vitesse de l'air à l'amont infini.

On sait que :

$$p - p_0 = \rho_H \cdot g \cdot (z - z_0)$$

Aussi la relation de Bernoulli appliquée entre un point d'arrêt (a) et un point de pression statique à l'amont infini nous permet d'écrire :

$$p_a - p_0 = \frac{1}{2} \rho \cdot V_0^2 = \rho_H \cdot g \cdot (z_a - z_0)$$

Ainsi, la valeur expérimentale du C_p sera :

$$C_p = \frac{z - z_0}{z_a - z_0} \quad (\text{III.3})$$

z : côte du liquide correspondante à la pression statique locale p .

z_0 : Côte du liquide correspondante à la pression statique à l'amont infini p_0 .

z_a : Côte du liquide correspondante à la pression d'arrêt p_a .

ρ_H : Masse volumique de l'huile.

III.4. Les résultats des efforts :

Après la mise en place des sphères dans la balance aérodynamique on a obtenu les résultats suivants :

III.4.1. Les efforts obtenus pour la sphère de diamètre 90 mm ,110mm et 150mm :

A différents nombres de Reynolds pour des sphères de 90 mm, 110mm, 150mm de diamètres et à différents états de surface (lisse, rugueuse, anneau) on a obtenu les résultats sur les graphes suivants :

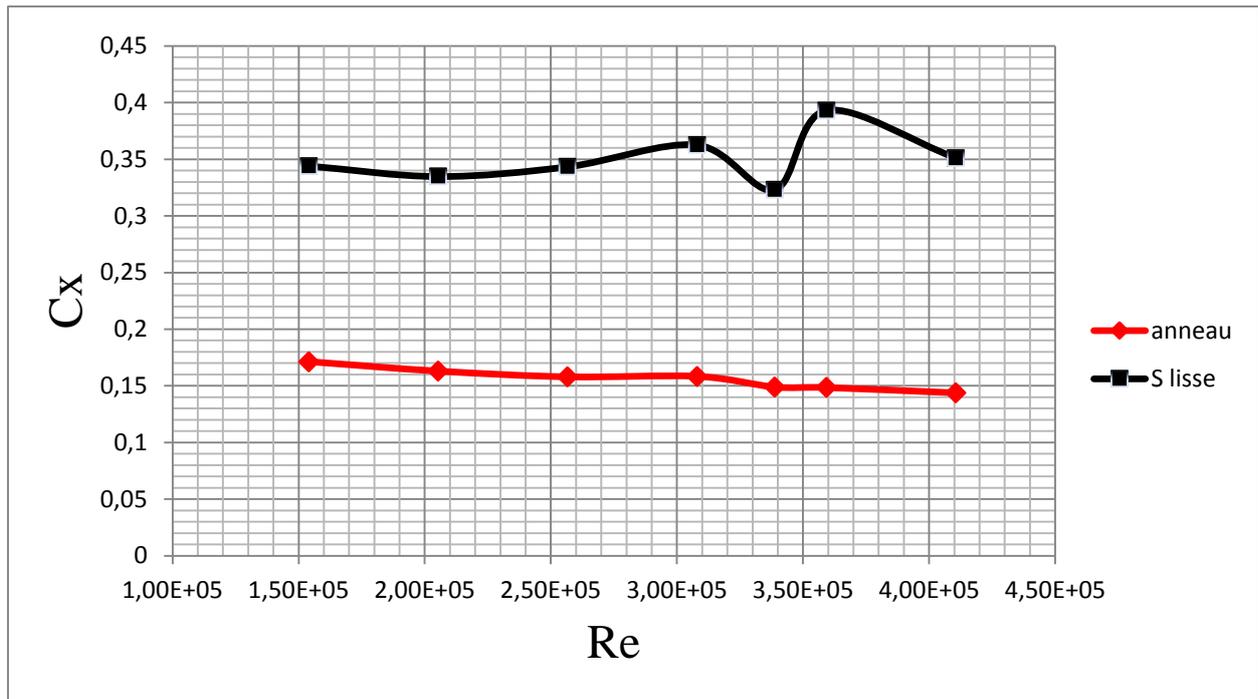


Figure III.17.a : Coefficient de trainée pour les différents états de surface en fonction du nombre de Reynolds d'une sphère de 150 mm de diamètre.

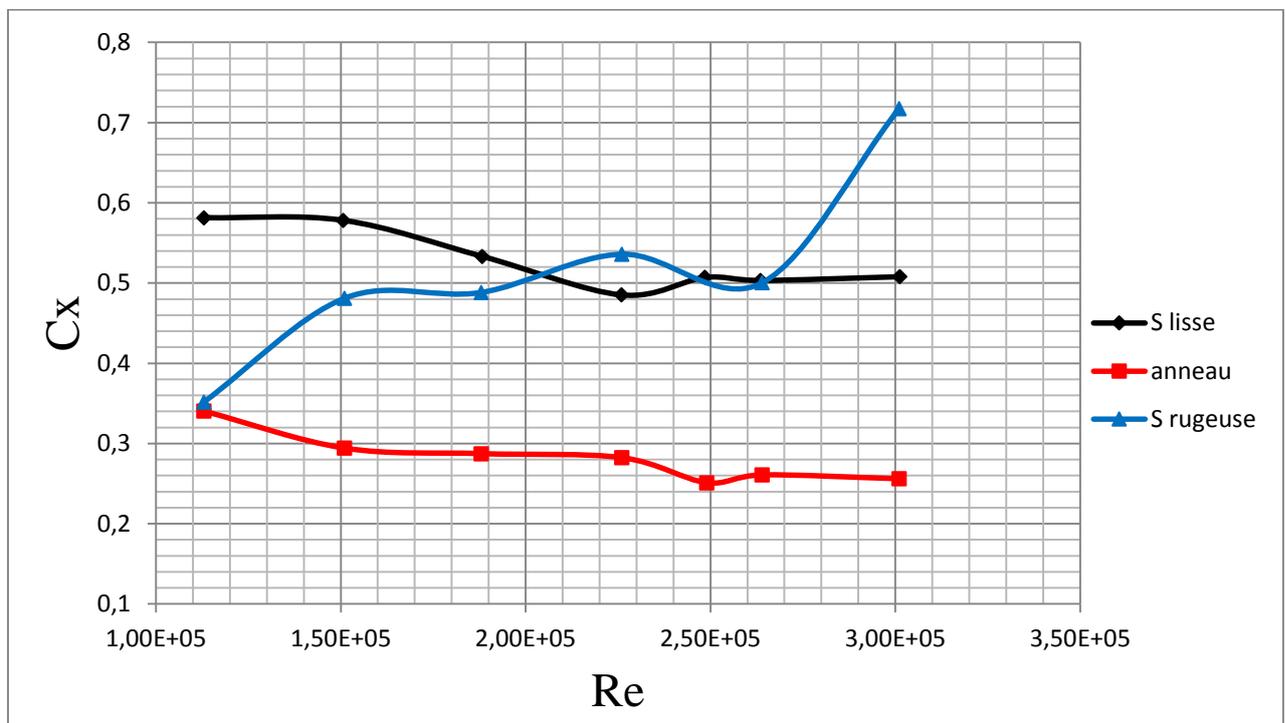


Figure III.17.b : Coefficient de trainée pour les différents états de surface en fonction du nombre de Reynolds d'une sphère de 110 mm de diamètre.

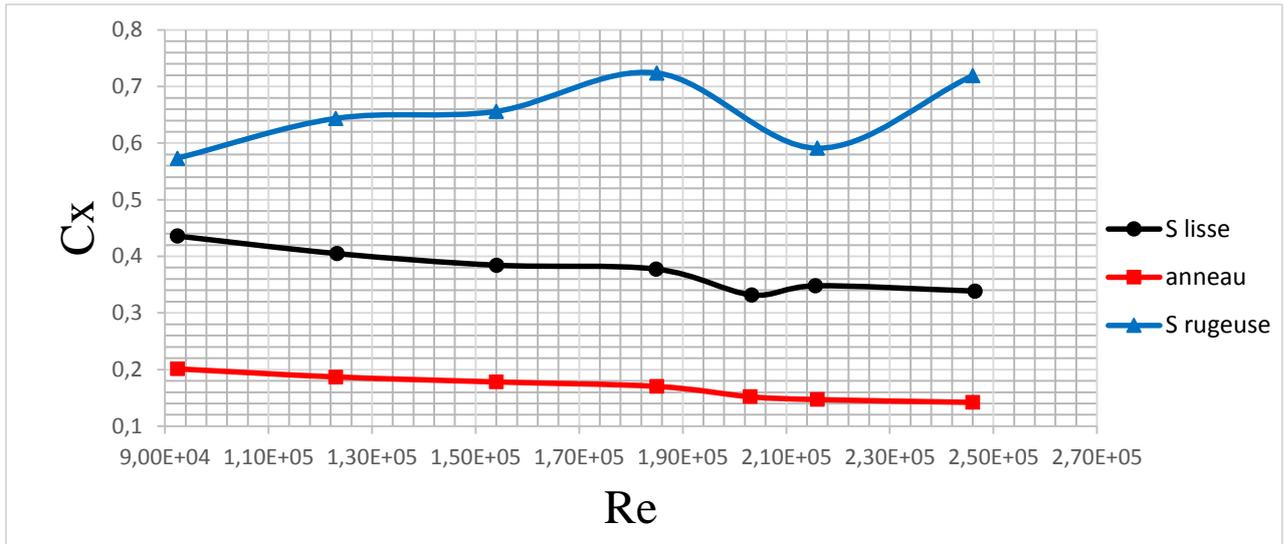


Figure III.17.c : Coefficient de trainée pour les différents états de surface en fonction du nombre de Reynolds d’une sphère de 90 mm de diamètre.

Constatation des résultats :

D’après les graphes III.18 et après l’application des deux contrôles (rugueuse, avec anneau), on remarque que le contrôle avec les rugosités est défavorable en terme de trainée, contrairement au contrôle avec anneau.

III.4.2. Les efforts obtenus pour la sphère de diamètre 70 mm :

A différents nombres de Reynolds pour une sphère de 70 mm de diamètre et à différents états de surface (rugueux et lisse), on a obtenu les résultats sur les graphes suivants :

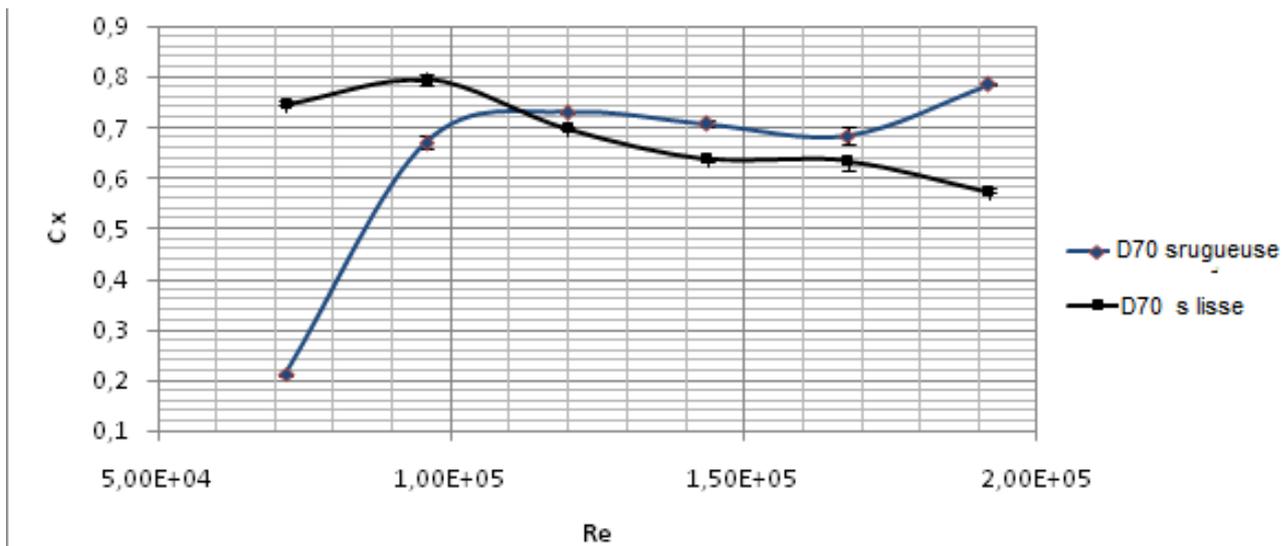


Figure III.17.d: Coefficient de trainée pour les différents états de surface en fonction du nombre de Reynolds d’une sphère de 70 mm de diamètre.

Constatation des résultats :

Nous constatons dans ce graphe que le contrôle avec rugosités est défavorable pour cette sphère. On remarque que la courbe des efforts caractérisant la sphère avec la surface rugueuse est en dessous de celle de la sphère lisse.

En général :

Donc d'après les résultats des graphes on peut dire que l'ajout d'un anneau influe sur le rendement aérodynamique des sphères (le coefficient de trainée).

III.5. Contrôle du décollement de la couche limite pour les différentes sphères :

Dans ce qui suit nous présentons le contrôle de la couche limite autour des sphères de diamètres 70mm, 90mm, 110mm et 150mm dans le but de repérer le point de décollement caractérisant chaque état de surface et cela en faisant varier la vitesse d'écoulement.

III.5.1. Comparaison Pour un diamètre $D=70$ mm, qui a une surface lisse, et une surface rugueuse et pour les vitesses (15, 35) m/s :

On compare l'angle de décollement de la couche limite pour un diamètre $D=70$ mm, et pour des vitesses $V=15$ m/s et $V=35$ m/s par rapport à l'état de surface (rugueuse et lisse) donné par les figure (III.19.a, III.19.b), on remarque que :

- ❖ Le décollement de la couche limite de la surface rugueuse s'effectue plus rapidement par rapport à la surface lisse.

Par rapport aux deux vitesses entre elle et chaque état de surface on remarque que :

- ❖ Le décollement s'effectue plus rapidement pour la vitesse 35 m/s par rapport à la vitesse 15 m/s.
- La sphère d'un diamètre 70 mm, avec une surface lisse pour les deux vitesses :

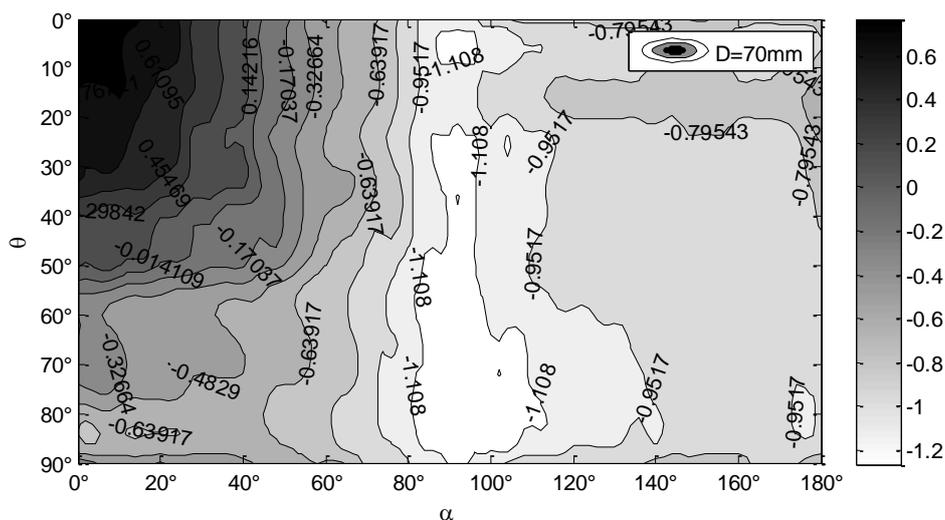


Figure III.18.a: Une sphère d'un diamètre 70 mm, avec une surface lisse pour la vitesse 15m/s.

III.5.3. Champ de pression obtenu pour une sphère de 150mm de diamètre avec différents états de surfaces et à différentes vitesses :

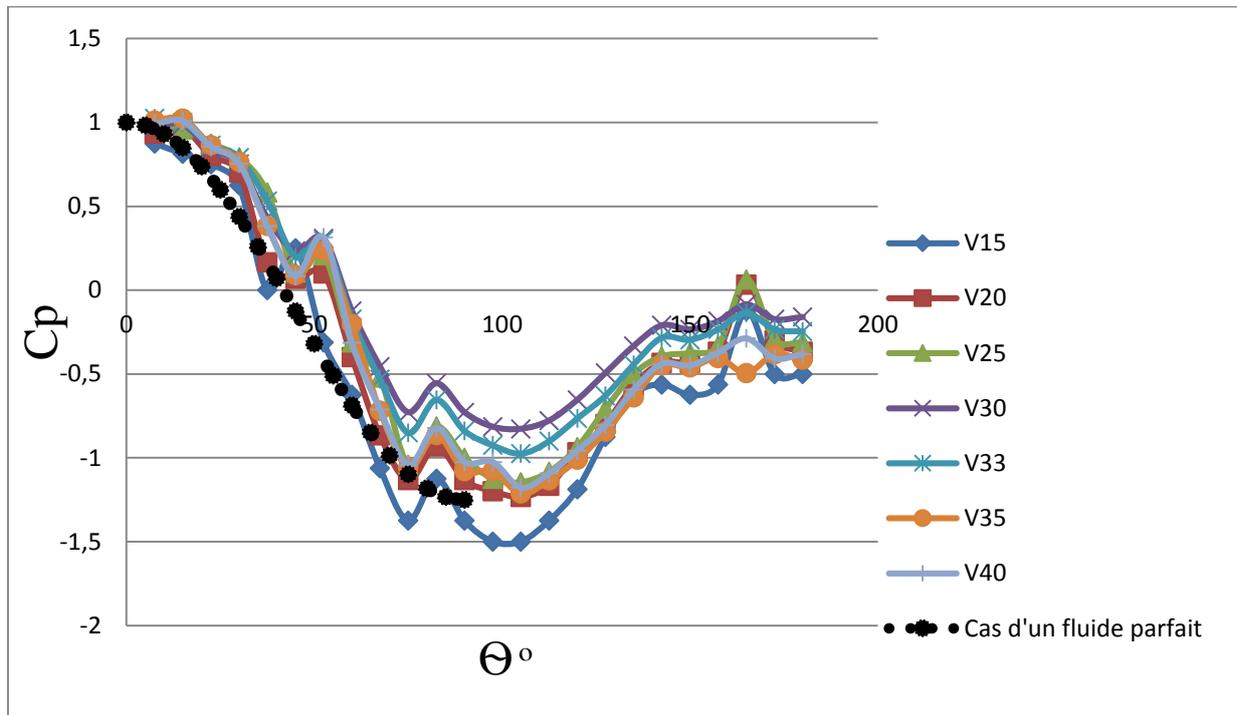


Figure III.20.a: représentations des coefficients de pression pour la sphère lisse $D=150\text{mm}$.

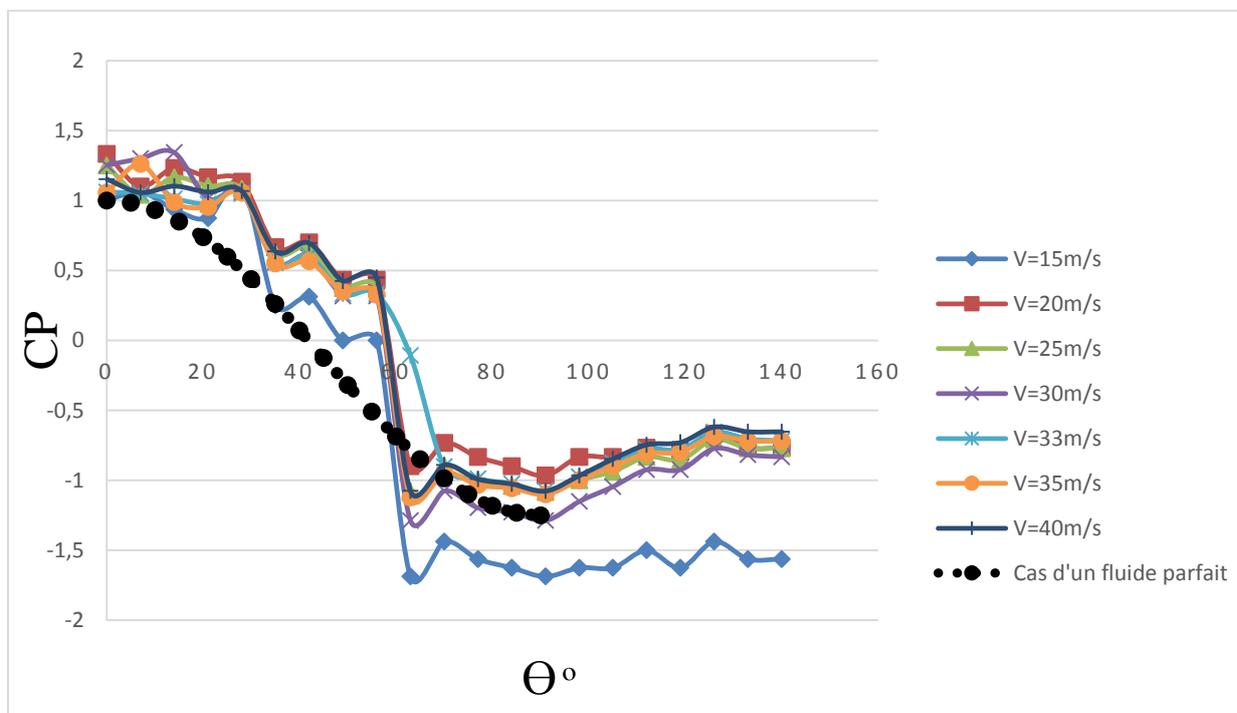


Figure III.20.b: Représentations des coefficients de pression pour la sphère avec anneau $D=150\text{mm}$.

III.5.4. Champ de pression obtenu pour une sphère de 110 mm de diamètre avec différents états de surface :

Dans le graphe III.20, nous représentons l'évolution du coefficient de pression pour une sphère de 110 mm de diamètre à différentes vitesses et différents états de surface :

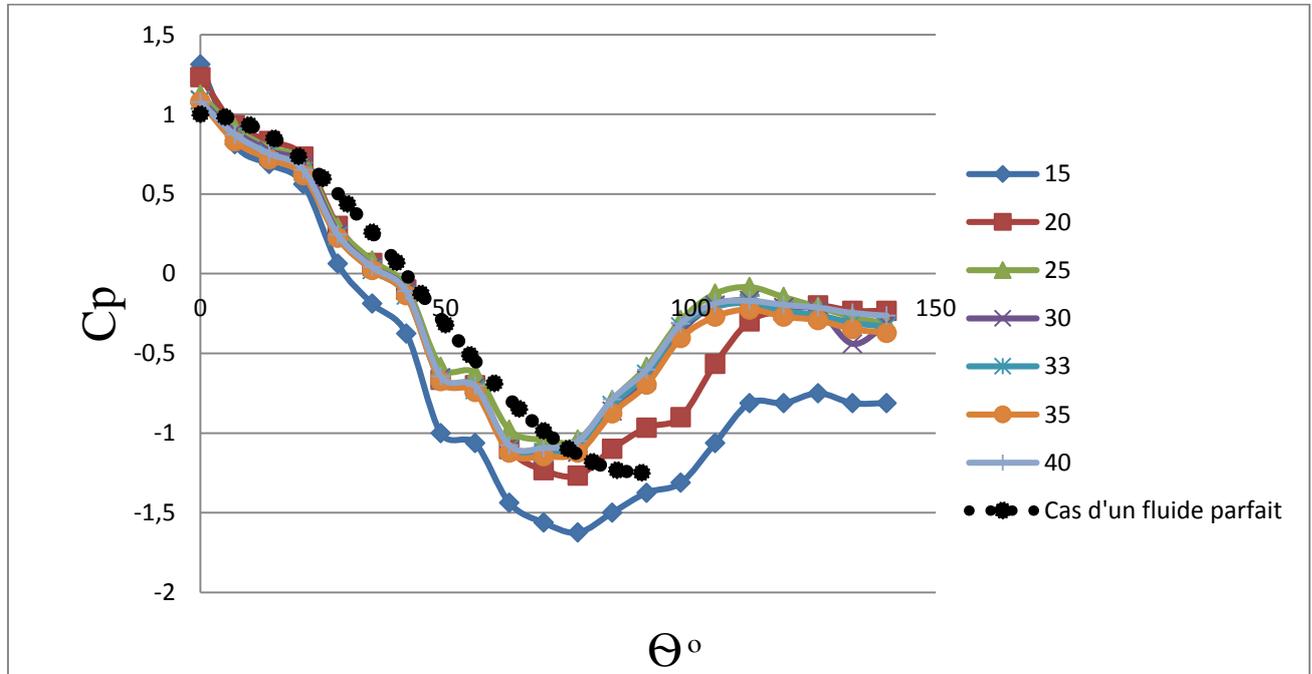


Figure III.20.c: Représentations des coefficients de pression pour la sphère lisse D=110mm.

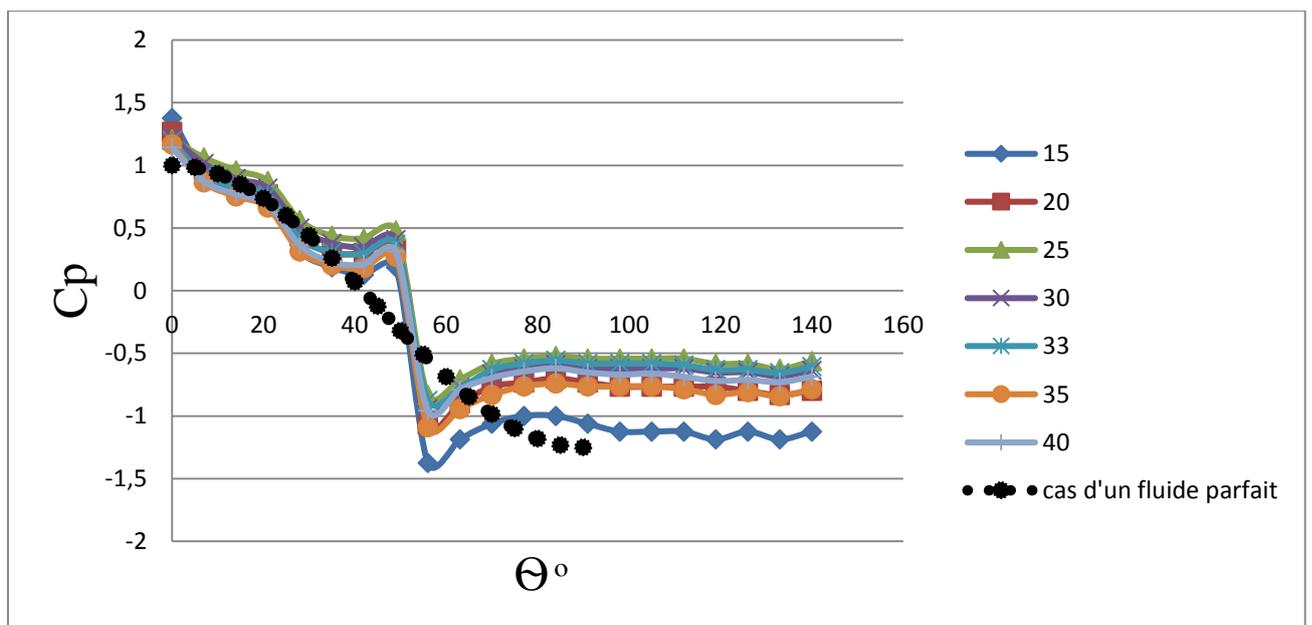


Figure III.20.d: Représentations des coefficients de pression pour la sphère avec anneau D=110mm.

III.5.5. Champ de pression obtenu pour une sphère de 90mm de diamètre

Les figures III.22 et III.23 représentent l'évolution de la pression en fonction de l'angle θ pour plusieurs vitesses pour la sphère lisse et en présence de l'anneau.

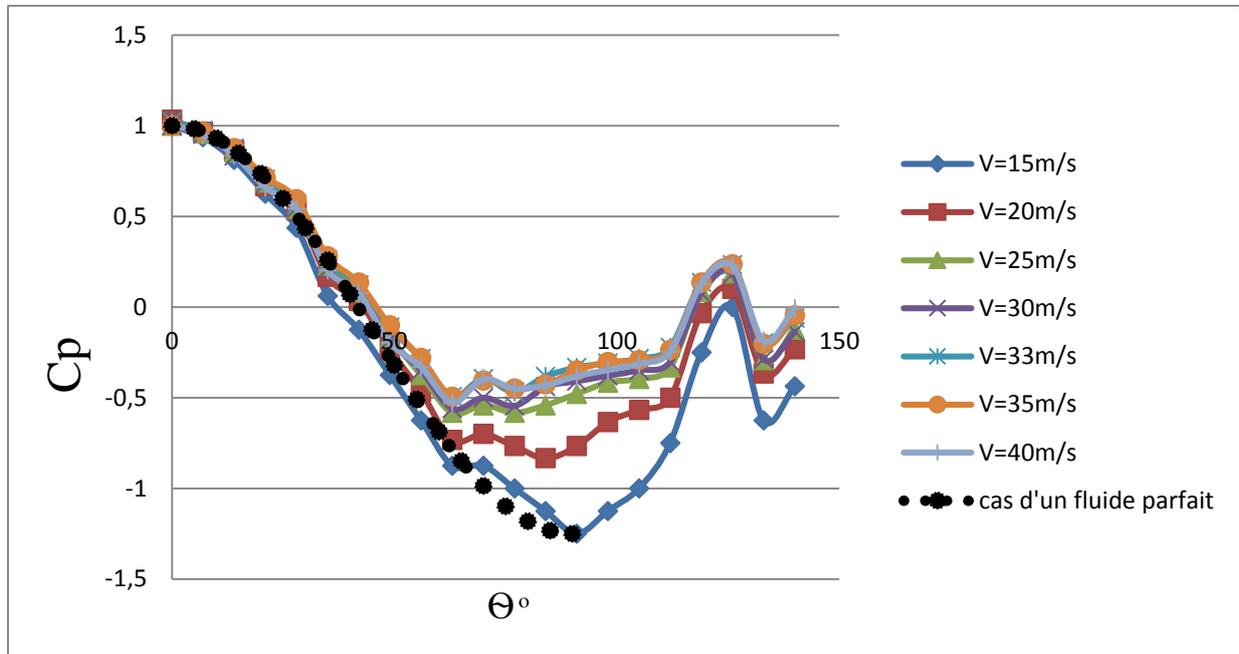


Figure III.20.e: Représentation des coefficients de pression pour la sphère lisse D=90mm.

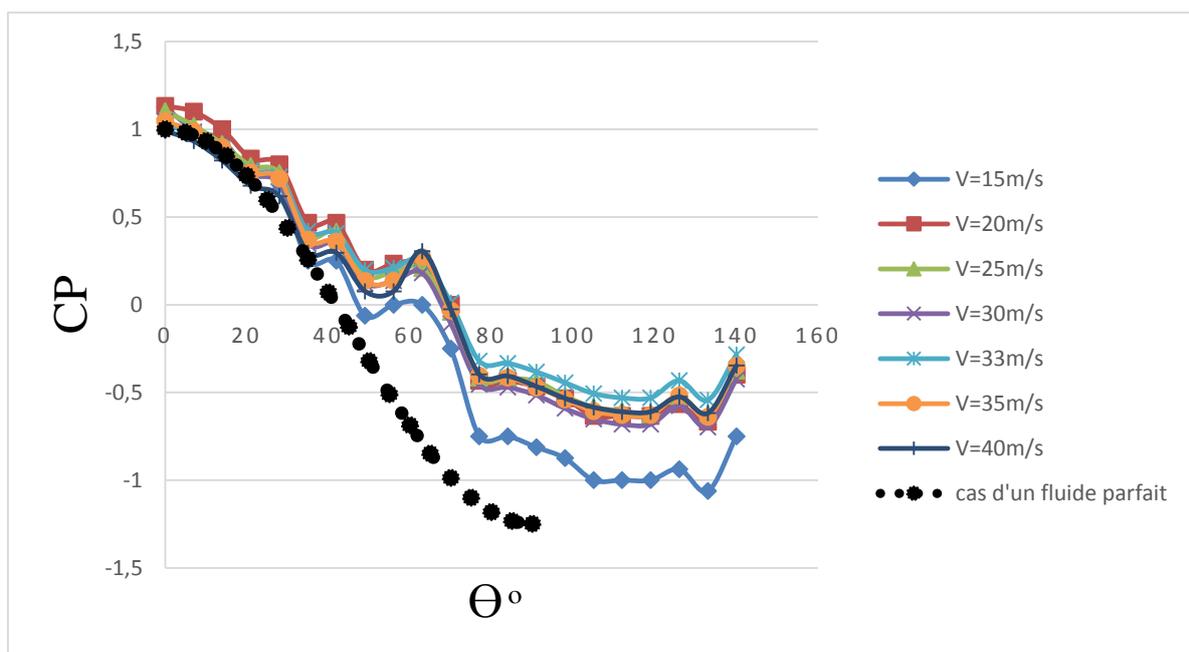


Figure III.20.f: Représentation des coefficients de pression pour la sphère avec anneau D=90mm.

Conclusion

Notre étude porte sur l'évaluation des efforts de trainée sur des sphères de différents diamètres et états de surface ainsi que la détermination du champ de pression avec comme objectifs initiaux la réduction de la trainée et la délimitation de la zone décollée.

La modification de l'état de surface par ajout d'un anneau situé aux deux tiers du diamètres a permis de mettre en évidence une réduction sensible du coefficient de trainée sur une large plage du nombre de Reynolds, et cela dans le cas de deux sphères de diamètres 90 mm 110mm et 150mm.

Cette diminution de trainée est confirmée par une baisse d'intensité de la dépression à l'arrière de ces sphères.

L'ajout des rugosités a permis de mettre en évidence l'effet inverse, soit une augmentation de la trainée. L'interprétation possible de ce résultat réside sans doute dans le fait que l'écoulement est encore laminaire aux nombres de Reynolds considérés.

IV.1. Introduction

La complexité et la diversité des phénomènes physiques rencontrés, rendent leur exploration expérimentale excessivement chère et relativement lentes alors que la recherche analytique d'une solution exacte n'est pas une chose aisée. Compte tenu de ces multiples contraintes, un puissant outil de simulation numérique, à savoir, le code de calcul commercial Fluent, permet d'avoir des solutions à des systèmes d'équations complexes régissant les écoulements en mécanique des fluides, transfert thermiques ou de phénomènes couplés à moindre coût.

Les outils de simulation numérique occupent une place prépondérante dans les études de mécanique des fluides. Les lois de la physique peuvent être écrites de différentes manières, dont certaines sont plus efficaces que d'autres et elles sont représentées par un système d'équations aux dérivées partielles. Il n'est pas toujours possible de trouver des solutions analytiques à ce système d'équations. C'est pourquoi il faudrait remplacer le système continu par un système discret dont le comportement est décrit par des équations algébriques qu'on peut résoudre avec les méthodes numériques. La simulation se définit comme l'utilisation ou la résolution de modèles correspondant à un système donné pour étudier le comportement de ce dernier dans un contexte précis. Elle est la suite logique de la modélisation qui est la première approche d'une simulation.

Dans ce chapitre, une tentative de simulations numérique de l'écoulement tridimensionnel autour des maquettes de type sphérique est entreprise.

IV.2. Buts de la simulation :

La simulation intervient donc pour :

- La compréhension de la structure et des interactions à l'intérieur d'un système (déterminer le rendement, la performance...)
- L'étude du comportement du système par rapport à son environnement extérieur (consommation énergétique/cout...)
- La prédiction du comportement d'un système pour des situations nouvelles ou extrêmes.
- La conception de nouveaux dispositifs/ composants, étude de système (composant) avant la création de prototype et mise en œuvre de procédés nouveaux (stratégies et algorithmes de contrôle).
- L'optimisation des solutions lors de la conception.

Dans ce qui suit on va présenter une étude sur des maquettes de types sphériques. Ces dernières, lorsqu'elles sont soumises à un flux d'air, il se crée autour d'elles un écoulement d'une structure tourbillonnaire complexe. L'exploration qualitative et quantitative de ces propriétés est désormais possible à l'aide du logiciel ANSYS(Fluent), qui permet entre autres de :

- Tracer les différentes cartographies des champs de pression et de vitesse autour des sphères.
- Le suivi du développement des tourbillons longitudinaux créés par la géométrie ainsi que leur intensité à différents états de surface.

IV.3.Présentation de code Fluent :

IV.3.1.Fluent :

Fluent est un programme informatique conçu pour la simulation des écoulements de fluide et de transfert de chaleur dans des géométries complexes. Il présente une grande flexibilité des résultats et une adaptation avec n'importe quel type de maillage. Il permet le raffinement du maillage en fonction des conditions aux limites, des dimensions et même des résultats déjà obtenus. Cela est très utile dans la région à gradients importants (couches limites, couches à cisaillement libre). Fluent écrit en langage C, emploie toute la flexibilité et la puissance qu'offre ce langage. Il utilise l'architecture serveur client nécessaire au calcul parallèle sur plusieurs machines. Fluent dispose d'un outil de graphisme pour l'affichage des résultats et leur exploitation. On peut aussi exporter les résultats vers un autre logiciel de graphisme, et l'option UDF permet de résoudre des équations adimensionnelles ou des termes sources additionnelles définies par l'utilisateur.

IV.4.Création du maillage :

IV.4.1.Type de maillage :

a) Maillage structuré (quadra /hexa) :

Il est beaucoup plus facile de le générer en utilisant une géométrie à multi bloc, Il présente les avantages suivants :

- Economique en nombre d'éléments et présente un nombre inférieur de maille par rapport à un maillage non structuré équivalent.
- Réduit les risques d'erreurs numériques car l'écoulement est aligné avec le maillage.

Cependant, il a aussi ses inconvénients :

- Difficile à générer dans le cas d'une géométrie complexe.
- Difficile d'obtenir une bonne qualité de maillage pour certaines géométries complexes.

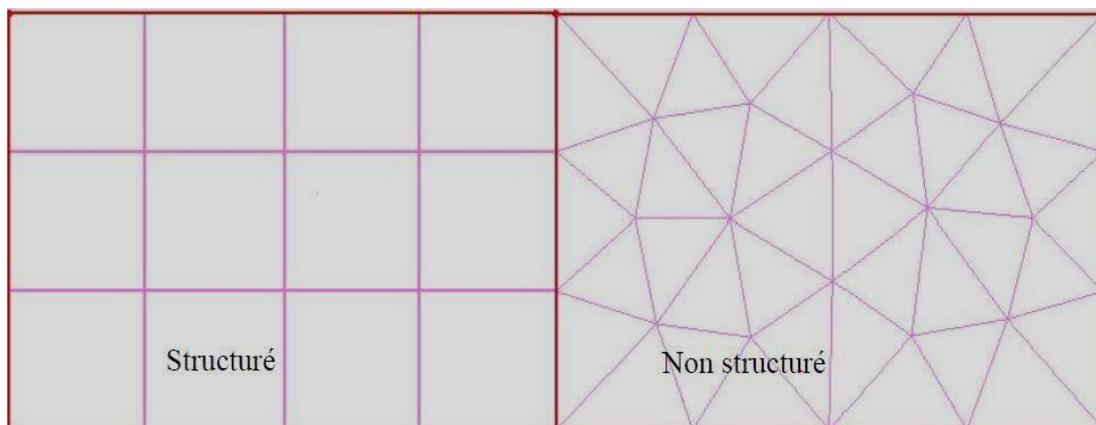


Figure IV.1 : Maillage structuré et non structuré.

b) Maillage non structuré (tri /tétra) :

Les éléments de ce type de maillage sont générés arbitrairement sans aucune contrainte quant à leur disposition.

Ses avantages :

- Peut-être généré sur une géométrie complexe tout en gardant une bonne qualité des éléments.
- Les algorithmes de génération de ce type de maillage (tri/tétra) sont très automatisés.

Ses inconvénients :

- Très gourmand en nombre de mailles comparativement au maillage structuré.
- Engendre des erreurs numériques (fausse diffusion) qui peuvent être plus importantes si l'on compare avec le maillage structuré.

c) Maillage hybride :

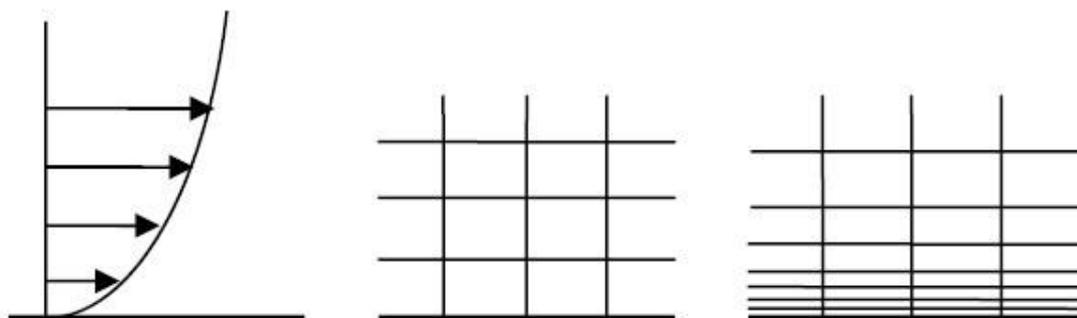
Ce maillage est généré par un mélange d'éléments de différents types : triangulaires ou quadrilatéraux en 2D, tétraédriques, prismatiques ou pyramidaux en 3D.

Ses avantages : il combine entre les avantages du maillage structuré et ceux du maillage non structuré.

Nous avons choisi ce type de maillage car il permet de réduire les erreurs dues à la diffusion numérique.

➤ **Génération d'un maillage de couche limite :**

La notion de résolution concerne plus particulièrement les zones qui présentent un fort gradient. Ainsi une bonne résolution permet de mieux décrire les phénomènes physiques qui se produisent dans ces zones.



L'écoulement

Mauvaise résolution

Meilleure résolution

➤ **Conditions aux limites :**

Cette étape consiste à définir le type des différentes frontières du système ainsi que la nature du (des) domaine(s) décrit(s) globalement.

➤ **Choix du modèle de turbulence :**

Fluent propose différents modèles de turbulence résumés dans le tableau V.1.

Modèle	Avantages	Inconvénients
Spalart- Allmaras	Économique (1 équation). Bon pour les écoulements moyennement complexes.	N'est pas largement testé.
STD $k-\varepsilon$	Robuste, économique et relativement précis.	Résultats médiocre pour des écoulements complexes (fort gradient de pression, rotation et swirl).
RNG $k-\varepsilon$	Bon pour des écoulements moyennement complexes (impact de jet, séparation d'écoulements, écoulements secondaires...)	Limité par l'hypothèse de viscosité turbulente isotrope.
Réalisable $k-\varepsilon$	Offre les mêmes avantages que le RNG. Recommandé dans le cas des turbomachines.	Limité par l'hypothèse de viscosité turbulente isotrope.
Reynolds Stress Model (RSM)	Le modèle le plus complet physiquement (transport et l'anisotropie de la turbulence sont tenus en compte)	Requiert plus de temps CPU. Les équations de quantité de mouvement et turbulence sont étroitement liées.
SST et Standard $k-\omega$	Modèle le plus recommandé pour les problèmes liés aux turbomachines, meilleur que le Réalisable $k-\varepsilon$.	Nécessite une plus grande résolution du maillage aux frontières (Pas de lois aux murs).

Tableau V.1 : Modèles de turbulence.

IV.4.2. Conditions de la simulation :

➤ **Modèle physique :**

Cette étape est déterminante car elle conditionne tous les résultats ultérieurs. Le but initial étant de comparer nos résultats aux valeurs expérimentales en notre possession. Nous avons retenu pour nos simulations, les mêmes conditions expérimentales que celles menées au sein de la soufflerie : des conditions atmosphériques pour la pression et la température et des vitesses à l'infini amont de l'écoulement de l'ordre de 15 ,20 ,25 ,30 ,35 et 40 m/s.

Notre cas d'étude représente un écoulement en présence d'un gradient de pression adverse. La maquette étant des sphères mettant en jeu de forts gradients de pression.

➤ **Géométrie simulée :**

La finalité de la construction de la géométrie est de définir les domaines de calcul qui sont des faces dans un problème 2D et des volumes dans un problème 3D.

Dans notre cas, le problème à résoudre est en 3D.

La géométrie considérée est d'une forme sphérique, générée par le biais du logiciel SolidWorks d'un diamètre de 90 mm (Figure V.2).

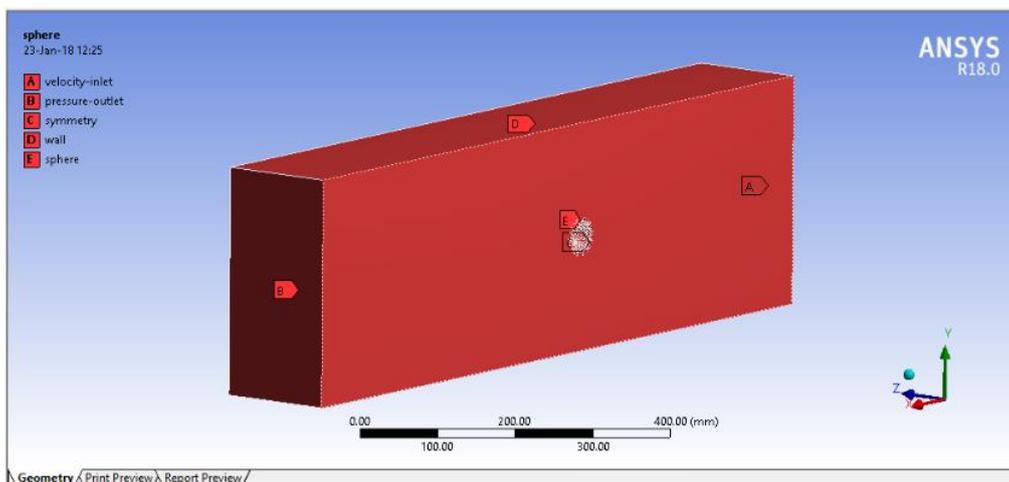


Figure IV.2 : Géométrie simulée et domaine de calcul.

Les géométries ont été modélisées sur SolidWorks (logiciel spécialisé dans la conception assisté par ordinateur) puis le domaine d'étude a été maillé sur le logiciel ANSYS Meshing.

➤ **Création du maillage :**

La première étape est donc de créer un maillage adéquat. N'ayant plus de contraintes par rapport au nombre de cellules, nous nous sommes attaché à adapter notre maillage aux régions à forts gradients de vitesse et de pression sur la sphère. Pour capter pleinement ces phénomènes, il est essentiel d'avoir un maillage très raffiné dans ces zones (Figure V.3). Donc, nous avons généré un maillage de plus d'un million cinq cent de mailles puis nous avons procédé à la campagne de simulations et ce pour différentes vitesses d'écoulement.

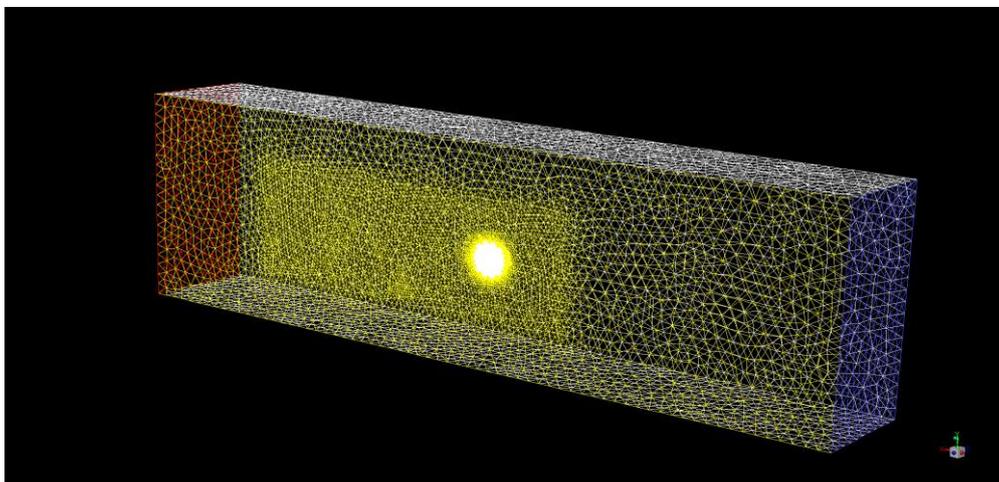


Figure IV.3 : Maillage non structuré.

Le maillage utilisé est de type non structuré comme le montre la figure V.4. Ceci est généré en tenant compte à la fois, des zones proches de la paroi où le maillage est raffiné où les paramètres de l'écoulement présentent de forts gradients, mais aussi des zones éloignées en imposant un maillage relâché qui réduit le nombre de cellules ce qui se répercute sur le temps de calcul de la machine.

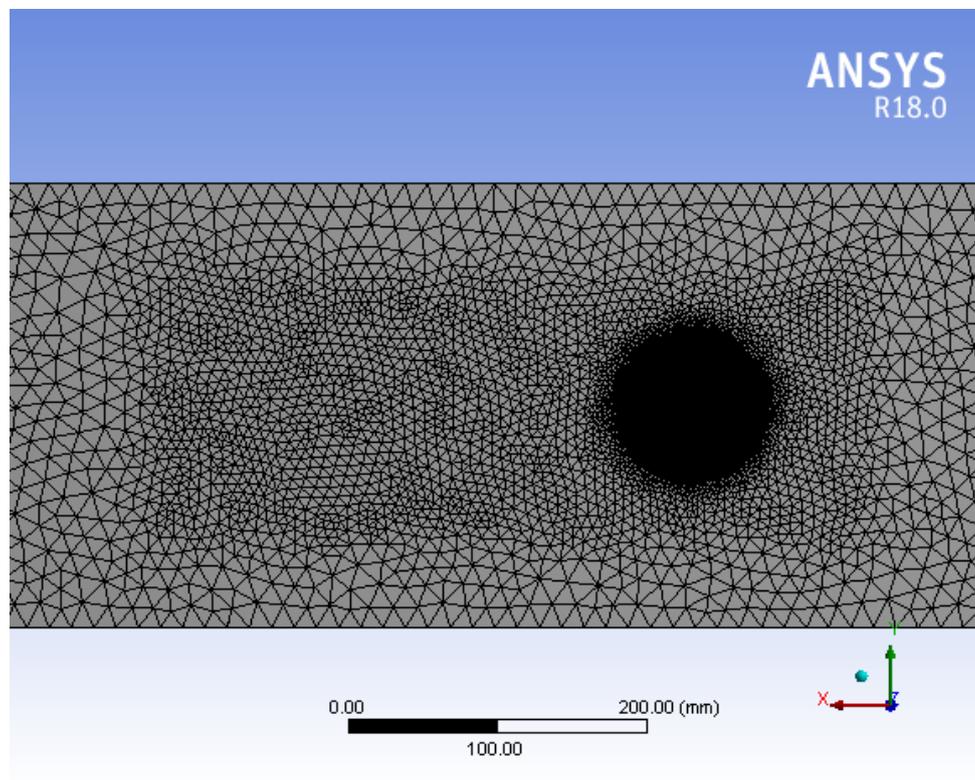


Figure IV.4 : Maillage utilisé.

➤ **Définition des frontières et du domaine d'étude :**

Après avoir fini le maillage, on passe à la définition des conditions aux limites aux frontières en imposant :

- une vitesse (Velocity inlet) constante à l'entrée de la veine d'essais.
- une pression à sa sortie (Pressure Outlet)

Et on définit par :

- la condition "Wall" les parois de la maquette avec des noms différents pour pouvoir les reconnaître sous fluent.
- la condition « Wall » pour la paroi haute et basse de la boîte de calcul.
- la condition "Symmetry" pour les deux parois latérales de la boîte de calcul.
- le domaine fluide, le domaine donné par la "veine d'essais".

➤ **Simulation sur fluent :**

Fluent est un logiciel qui permet de résoudre et de simuler des problèmes de mécanique des fluides et de transferts thermiques. Nous poursuivons les étapes suivantes pour résoudre le problème décrit précédemment :

- Exécuter le programme fluent.
- Mesh→Check : Ceci permet de vérifier si le maillage importé ne contient pas d'erreurs ou de volumes négatifs.

- Mesh→ Scale : Il faut toujours vérifier que les dimensions affichées correspondent aux dimensions physiques du problème.
- Mesh→ quality : Pour s'assurer de la qualité du maillage, il est pratique de lisser le maillage.
- Display→ Grid : affichage de la grille et vérification des conditions.
- Define →Models →Viscous : Choix du modèle de turbulence.

Après convergence de la simulation CFD, les résultats sont exploités à travers l'interface "Results" qui offre un aperçu sur les différentes cartographies incluant entre autres, les champs de vitesse, champs de pression, etc. Quant aux variables quantitatives, elles sont données par les menus "Plot" et "Report".

En complément des outils d'analyse des résultats disponible sur fluent, un second logiciel spécialisé dans le post-traitement est disponible dans la suite proposée par ANSYS du nom de « CFD Post ».

IV.5.Résultats et discussion :

IV.5.1) Critères de convergence :

Dans la plupart des cas étudiés, le critère de convergence imposé par défaut dans Fluent™ est suffisant. La solution converge quand les résidus atteignent 10^{-3} . Toutefois, dans certains cas il faut pousser les calculs à 10^{-4} voire même à 10^{-6} .

IV.5.2) Coefficients aérodynamiques :

➤ Résultats quantitatifs

La figure ci-dessous IV.5, illustre l'évolution du coefficient de traînée en fonction du nombre de Reynolds de l'écoulement pour une sphère lisse de 90 mm . Les deux approches (expérimentale et numérique) montrent une bonne concordance pour des valeurs du nombre de Reynolds allant de 9.2×10^4 jusqu'à 1.5×10^5 . Les deux évolutions montrent une forte disparité à partir d'un nombre de Reynolds de 1.5×10^5 , elles s'écartent au fur et à mesure que l'on augmente la vitesse de l'écoulement. Ce constat peut s'expliquer, dans le cas expérimental, par le fait d'existence lors des essais de fortes vibrations, ces dernières amplifient amplement la production d'une traînée parasite. Aussi, la présence du bras de suspension dans la pesée des efforts aérodynamiques et des champs de pression, peut éventuellement être à l'origine de cette erreur ; En effet, l'écoulement autour de la sphère et le bras peut modifier la distribution des champs de pression à l'aval comme à l'amont de la sphère en créant une situation d'écoulement asymétrique donnant naissance à une force parasite.

En comparant la courbe obtenue numériquement avec celle de l'expérimental, on remarque que son intensité est fortement sous-estimée à partir du nombre de Reynolds de 1.5×10^5 , c'est probablement dû au cas idéaliste considéré dans nos simulations ainsi qu'aux qualités des maillages générés.

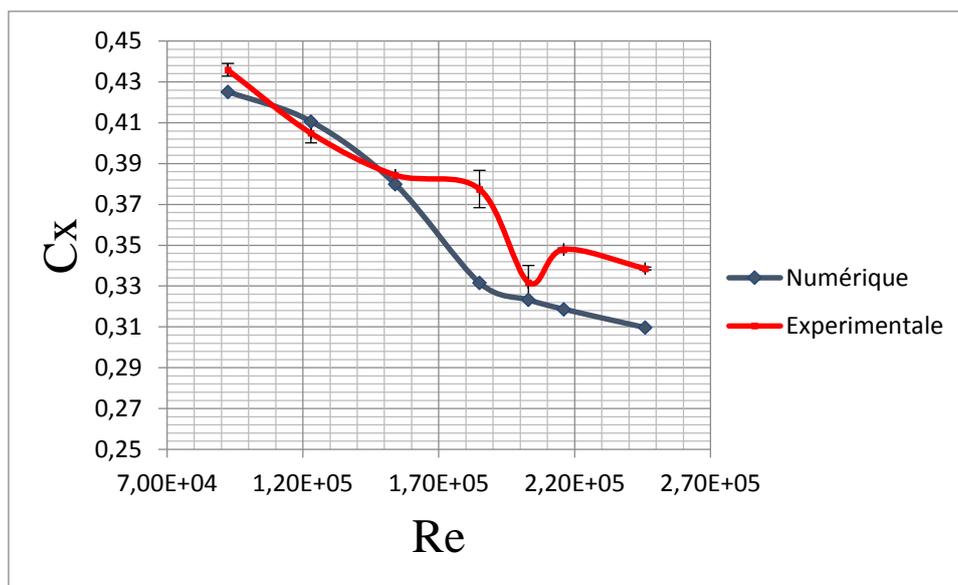
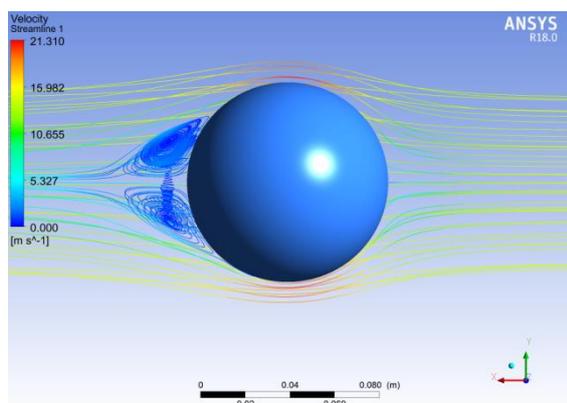


Figure IV.5 : Evolution du coefficient de trainée en fonction du nombre de Reynolds pour une sphère de diamètre 90 mm.

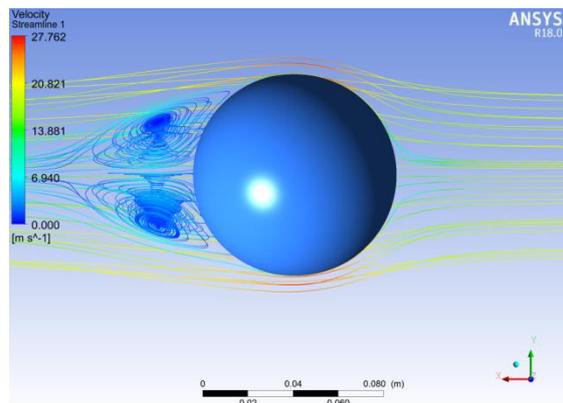
➤ **Résultats qualitatifs :**

Le tracé des lignes de courant autour de la sphère à différentes vitesses d'écoulement est représenté sur les figures IV.6. Les figures mettent en évidence le caractère contrarotatif des zones de recirculations (Tourbillons de Bénard) à l'aval de la sphère ainsi que leurs aspects symétrique.

Il est bien clair sur l'ensemble des cartographies, que la zone du décollement remonte au fur et à mesure que l'on augmente la vitesse de l'écoulement à l'infini amont. On remarque aussi que les vitesses maximales se situent au voisinage de la circonférence du cercle donnée par le plan yoz au centre de la sphère. Ces résultats qualitatifs sont aussi vérifiés expérimentalement.



$V=15\text{m/s}$



$V=20\text{m/s}$

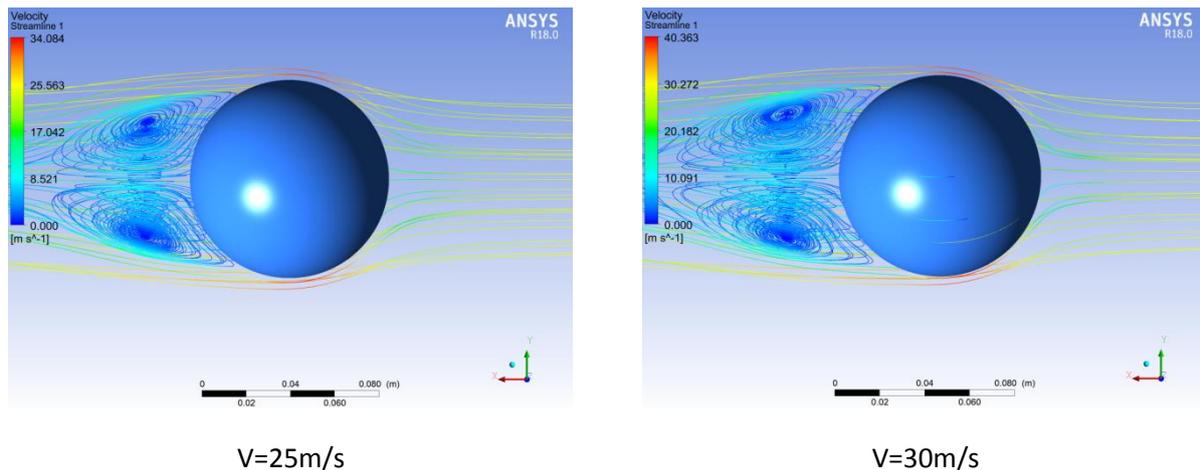


Figure IV.6 : Visualisation des lignes de courant pour la sphère $D=90$ mm avec une surface lisse.

Conclusion

La campagne de simulations numérique a porté sur une sphère de 90 mm de diamètre et une plage de vitesses variant entre 15 et 30 m/s. Il en ressort à travers ces calculs CFD, la mise en évidence des points suivants :

- Existence d'une zone de recirculation à l'aval des sphères (Tourbillons de Bénard),
- La zone du décollement est liée à la variation de la vitesse d'écoulement,
- La comparaison des évolutions de C_x (Expérimental et numérique) à différentes vitesses de l'écoulement a montré globalement une bonne corrélation.

Bien que la confrontation entre les deux approches soit marquée par une disparité entre les résultats des différentes évolutions, néanmoins, il est intéressant de signaler que l'approche numérique a permis de compléter l'étude expérimentale d'une manière intéressante, fournissant ainsi des informations qui seraient difficilement obtenues sur le terrain de par leur nature ou à défaut de moyens de mesure expérimentaux.

L'étude numérique entreprise dans ce chapitre nous a permis, entre autres, de nous familiariser avec l'outil de simulation numérique ANSYS(Fluent) et aussi d'appréhender le comportement de l'écoulement complexe 3D autour d'une sphère.

Le présent travail vise en premier lieu à contrôler l'écoulement autour d'une sphère afin d'améliorer ses performances aérodynamiques et cela par le biais de la modification de l'état de surface en vue de réduire le phénomène de décollement de la couche limite.

Cette étude a donc portée essentiellement sur deux étapes:

- Une recherche théorique qui nous a permis de bien cerner le phénomène du décollement de la couche limite et des techniques mises en œuvre pour y remédier et appuyer par quelques rappels sur la mécanique des fluides.
- Une étude expérimentale portant sur la mesure des efforts aérodynamiques et du coefficient de traînée réalisée sur des maquettes qu'on a au préalable conçues. Une étude numérique à l'aide d'un logiciel (ANSYS) qui nous a permis d'approcher numériquement les résultats expérimentaux obtenus.

La campagne d'essais menée en soufflerie nous a permis de conclure qu'en apportant des modifications à la surface de la sphère, nous pouvons réduire la traînée et améliorer les performances aérodynamiques. Ainsi, en matière de réduction de traînée, nous avons obtenu une amélioration de plus de 40% lorsque la sphère est munie d'un anneau positionné aux deux tiers du diamètre, et cela sur une large plage du nombre de Reynolds. Cette diminution de la traînée est confirmée par une modification du coefficient de pression à l'arrière de la sphère. Les mesures du coefficient de pression montrent par ailleurs que le C_p est bien approché par celui du fluide parfait dans la zone non décollée.

La simulation numérique de l'écoulement autour d'une sphère lisse a montré des résultats en bonne concordance avec les valeurs expérimentales, tout comme elle a permis de mettre en évidence les zones tourbillonnaires en aval de la sphère.

Références bibliographique

- ◆ [1] : Cengel / Cimbala, « Mécanique des fluides : Ecoulements Externes », Québec, 2009.
- ◆ [2] : John D, Anderson, Jr. FUNDAMENTALS OF AERODYNAMICS, McGraw-Hill Book Company
- ◆ [3] : Thèse présentée pour obtenir le grade de docteur de l'université de Bordeaux, école doctorale de mathématiques et informatique, par YOANN EULALIE, thème : Etude aérodynamique et contrôle de la trainée sur un corps d'Ahmad culot droit.
- ◆ [4] : Bourgois S, Etude expérimentale du décollement sur profile d'aile : analyse et contrôle, thèse de doctorat, Université de Poitiers 2006.
- ◆ [5]: Gad-el-Hak M., 1990, Control of Low-Speed Airfoil Aerodynamics, AIAA Journal 28, N° 9.
- ◆ [6]: M. Van Dyke .An album of fluid motion, volume 46. Parabolic Press Stanford, CA, 1982.
- ◆ [7]: E. Achenbach. Distribution of local pressure and skin friction around a circular cylinder in cross-flow up to $re= 5 \times 10^6$. Journal of Fluid Mechanics, 34(04):625– 639, 1968.
- ◆ [8]: H. Schlichting. 1979, boundary layer theory, mc graw-hill. New York.
- ◆ [9] : Thomas ROUILLON, Thèse de doctorat de l'université Pierre et Marie Curie, Ecole doctorale Sciences mécaniques, acoustique, électronique et robotique de Paris, thèse : Modélisation par termes sources de générateurs de tourbillon et optimisation de leurs caractéristiques pour la réduction de traînée de véhicules automobiles Soutenue le 20 décembre 2012.
- ◆ [10] : La couche limite et son équation intégrale de VON KÁRMÁN.
- ◆ [11]: The surface of the sphere was roughened by being covered with small glass spheres as compactly as possible.
- ◆ [12]: AERODYNAMIC DRAG OF MODERN SOCCER BALLS, Takeshi Asai Et Kazuya Seo.
- ◆ [13]: DETERMINING AERODYNAMIC PROPERTIES OF SPORTS BALLS IN SITU, by JEFFREY RYAN KENSRUD.
- ◆ [14] : Ingénierie du sport Elaboré par IEEE dans le cadre de TryEngineering.
- ◆ [15] : Thèse de doctorat présenté par BOUMRAR Iddir – Comportement des ailes delta à apex privilégiés avec et sans fuselage _Etude expérimentale et simulation numérique- U.M.M.T.O Le 13 Septembre 2012.