Nomenclature

P_1 ,P_2	Pression	N/m^2
ρ_{air}	masse volumique de l'air	kg/m^3
V_1, V_2	vitesse de l'air	m/s
g	Pesanteur	m/s^2
Z_1, Z_2	altitude	M
ρ_{eau}	masse volumique d'eau	Kg/m^3
P1 , P2 , P3	poids des tiges	kg
F_T	force de trainée	N
F_P	force de portance	N
R_{OY} , R_{OX}	forces de réaction	N
S	surface de référence	m^2
a, b	Longueur des tiges	m
C_T	Coefficient de trainée	/
P	pression dynamique	N/m^2
Re	nombre de Reynolds	/
D_H	Diamètre hydraulique	m
η	viscosité cinématique	m^2/s
μ	Viscosité dynamique	kg /m.s
P_m	périmètre mouillé	m
m	masse	kg
Δh	hauteur	m

Sommaire

Introduction générale.....

Chapitre 1 : Recherche bibliographique

1.1.Introduction 02

1.2. Historique 02

1.3. Recherche bibliographique 03

1.4. Pourquoi les souffleries…….……05

1-4-1-Définition……09

1-4-2- Structure ……...10

1-4-3- Les différents types de soufflerie……...…….....11

1.5. Souffleries existantes 14

1.5.1. Souffleries d'étude 14

1.5.2 Souffleries universitaires. 14

1-5-3-Souffleries subsoniques…….14

1-5-4-Très grandes souffleries…….……14

1-5-5-Souffleries transsoniques…….…..14

1-5-6-Souffleries supersoniques…….….15

1-5-7-Souffleries hypersoniques…….……15

1.6.Les souffleries à veine ouverte (de type Eiffel).....15

1.6.1-Avantages 15

1-6- 2-Inconvénients……... 15

1.7. Souffleries aujourd'hui 17

1.7.1. Souffleries en France 19

Chapitre 2 : Présentation de la soufflerie de laboratoire

2.1. Introduction 24

2.2. Objectifs 24

2.3. Tunnel aérodynamique :… 24

2.4. Fonctionnement du tunnel aérodynamique 25

2.5. Soufflerie étudiée 26

2.5.1. Dimensions réelles de la soufflerie 26

2.5.2. Caractéristique de notre soufflerie 27

2.5.3. Systèmes de mesure 30

2.5.4. Motorisation……33

Chapitre 3 :Formulation et Calcul

3.1. Introduction 36

- Partie 1….....36

3.2. Théorème de Bernoulli.....36

3.3. Forces mises en jeu 38

3.3.1. Trainée.....39

3.3.2. Portance 40

3.4. Nombre de Reynolds.....41

- -Partie 2……..….. 43

Chapitre 4 : Résultats et discussions

4.1. Introduction 47

4.2 Profils de <plaque >…….……...…….47

4.3 Profils de <Demi - cylindre>…….50

4.4 Profil de <Disque (S)>…….……..53

4.5 Profil de <Disque (2S)> ….……...……..……56

4.6 Profil de <sphère>……..59

Conclusion.....63

Conclusion générale

Référence bibliographique

Introduction générale

Une soufflerie est un système à grande échelle servant à tester les performances Aérodynamiques. Cependant, il est possible de transposer une soufflerie à petite échelle pour l'enseignement des principes physiques et aérodynamiques. Lors des l'étude des cas précédents, plusieurs solutions de soufflerie ont été imaginées pour répondre aux besoins des clients, et une solution potentielle a été proposée.

Dans la présente étude, il s'agit de réaliser une soufflerie avec différents systèmes de mesure des caractéristiques de l'écoulement d'air. Cela comporte la recherche des données techniques des composants utilisés dans la soufflerie, les suppositions les choix de conception, les calculs ainsi que l'analyse de tous les composantes de la soufflerie. Cette dernière étape s'accompagne ainsi des justifications des choix de design ainsi que des dessins d'ingénierie des sous-systèmes constituant la soufflerie.

Ainsi cette étude, est entamée par une recherche bibliographique sur les souffleries. Puis, nous ferons un aperçu sur la réalisation de soufflerie, puis nous citons les différents calculs qu'on a fait. Enfin, on termine par une représentation des différents graphes de différents profils y compris leur discutions Nous terminons le travail par une conclusion.

Objectif de l'étude

Le but de ce travail est l'étude expérimentale des profils aérodynamiques dans une soufflerie et calculer les différentes caractéristiques à savoir (la portance, la trainée, la vitesse et le nombre de Reynolds).

Organisation du mémoire

- Le premier chapitre est consacré à une description détaillée d'une recherche bibliographique sur la soufflerie.
- Le deuxième chapitre s'agit de réaliser une soufflerie de taille réduite .Cette soufflerie doit permettre la réalisation de quelques expériences physiques quantifiables et la mise en évidence de phénomènes physiques simples.
- Le troisième chapitre développera la formulation mathématique y compris la réalisation des expériences.
- Le quatrième chapitre présente les résultats obtenus et leur discussion.

Chapitre 1

Recherche bibliographique

Introduction

Le monde d'aujourd'hui a vu arriver de nouveaux véhicules allant toujours plus vîtes, de nouveaux immeubles allant toujours plus haut (les gratte ciels).Bref ,tous les objets techniques ayant à composer avec le vent sont de plus en plus performants .ces nouvelles performances sont bien sûr dues aux nouvelles connaissances données par le progrès des technologies mais sont également possibles grâce à une étude approfondie de l'objet en question .Un des moyens pours effectuer l'étude des rapports qu'entretient l'objet avec le vent ou l'air ,c'est la soufflerie .Ce dispositif technique permet d'étudier l'aérodynamisme ,les vitesses d'écoulement de l'air , les forces exercées sur l'objecte encore bien d'autres paramètres .A notre échelle , afin d'étudier , il est nécessaire de disposer d'une soufflerie . Voyons comment en réaliser une à moindre coût et avec les moyens du bord.

Tout ingénieur ou technicien, quelle que soit sa formation doit avoir des connaissances de la mécanique des fluides, et notamment autour des corps, des couches et dessellages, et des profils de vitesse.

La soufflerie permet d'effectuer un grand nombre d'expériences en mécanique des fluides et en aérodynamique [1].

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

1-1-Historique

Les premières expériences visant à tester l'écoulement de l'air sur des corps ont été faites soit par chute libre soit avec des manèges, notamment par George Cayley vers 1800 [2] .L e corps étant supporté par un bras tournant. Cette deuxième méthode ayant l'inconvénient d'introduire des effets centrifuges et de faire évoluer le corps dans son propre sillage aérodynamique, l'idée est venue de créer un mouvement d'air sur un corps immobile. La première soufflerie a été inventée et réalisée en Angleterre par Francis Herbert Wenham en 1871 [2]. Constantin Tsiolkovsky [2] construit et expérimente la première soufflerie russe en 1897 [2]. Les Frères Wright [2] , cherchant à analyser et améliorer les performances de leurs planeurs, ont également fabriqué une petite soufflerie en 1901[2]. Après celle de Charles Renard, les premières souffleries françaises sont celles de Gustave Eiffel dans son laboratoire aérodynamique édifié sur le Champ-de-Mars (Paris) en 1909[2] et réinstallé dans le Quartier d'Auteuil en 1912 [3]. La première soufflerie à circuit fermé est celle

de Ludwig Prandtl au Centre de Recherche Aérodynamique de Göttingen en 1909[4, 5,6 ,7]. Avec le développement de l'aéronautique militaire à partir de 1910 [2], les grandes nations ont construit des souffleries de plus en plus grandes; celle de Chalais-Meudon était la plus grande en 1929 [2].

1-2-Recherche bibliographique

Leonardo da Vinci (1452-1519) était la première personne qui a travaillé sur l'aviation. Il a consacré beaucoup de sa vie sur l'aviation et il a laissé 160 pages de descriptions et de schémas de machines. Dans ses manuscrits, on a trouvé des descriptions des schémas des premiers modèles de parachutes et d'hélicoptère. D'après ses notes, on pense qu'il a construit et testé avec succès les deux modèles. Il aurait dû construire, un planeur piloté. Mais, comme beaucoup d'autre personne, il était obsédé avec l'idée d'homme volant comme les oiseaux. Il a décrit, fait des schémas et construit beaucoup de modèles (une machine qui vole en battant des ailes). Son travail aurait pu changer l'histoire des avions aparté le fait tragique que ses manuscrits ont été trouvés 300 ans après sa mort [8].

Sir George Cayley (1773-1857) était le premier à travailler sur les avions dans le XIX siècle. Son aventure a commencé quand il avait 9 ans quand les Montgolfier ont fait leur premier vol. Il a immédiatement commencé d'expérimenter avec des petites montgolfières. Quand il était adolescent, il a construit des petites modèles d'hélicoptères et, comme Leonardo da Vinci, a étudié le vol des oiseaux. En 1804, il a construit une machine pour battre des ailes expérimentales qu'il pouvait échanger pour les tester. Plus tard, il a fait des petits modèles de planeurs. Il a fini par publier ses textes en 1809. Cayley a identifié les forces de poussées et de résistance. Il a développé l'aile extrados (incurvé) qui augmente la poussée. Il a travaillé sur les moteurs et les propulseurs et a développé les configurations de biwing et triwing et il a construit le premier planeur de taille réelle. La première soufflerie a été inventée et réalisée en Angleterre par Francis Herbert Wenham en 1871[8].

John Stringfellow (1799-1883) était un ingénieur habile qui a fait des plans pour un avion qui serait piloté et propulsé. Il a fait ses plans après avoir lu les travaux de Cayley avec W. S. Henson. En 1843, ils ont fait des plans pour Ariel. Leur avion allé être poussé par une machine à vapeur qui tournait 2 hélices. L'avion n'a jamais était construit, mais les

Rapport-Gratuit.com

plans étaient des créations merveilleuses d'aviation. Un petit modèle d'Ariel a été construit et testé, mais n'a pas réussi à voler. Plus tard, Stringfellow a construit un modèle propulsé par une machine à vapeur qui a fini par voler ; et a devenu le premier vol propulsé qui a marché.

Otto Lilienthal (1848-1896) a été surnommé le Père de l'aviation moderne car il a lui-même piloté ses inventions**.** Il a construit beaucoup de modèles de planeur et à fait plus de 2 mille vols de 1891 à 1896 dont beaucoup ont volé plus de 210m. Il a construit des planeurs à single-wing et biwing et a récupéré assez de vitesse en descendant des collines. Ses planeurs avaient des carrossages extrados. Le dernier planeur qu'il a construit avait des ascenseurs mobiles. Malheureusement, il est mort de son denier vol et n'a jamais pu expérimenter avec le vol propulsé. Les photos de ses vols ont ainsi inspiré beaucoup de personnes.

Constantin Tsiolkovsky construit et expérimente la première soufflerie russe en 1897. Les Frères Wright, cherchant à analyser et améliorer les performances de leurs planeurs, ont également fabriqué une petite soufflerie en 1901 [8].

Wilbur (1867-1912) et Orville Wright (1871-1948) étaient les personnes qui ont fait le plus évolué l'aviation. Ils ont commencé leur travail sur l'aviation ensemble après avoir fait quelques observations sur des oiseaux. Ils ont cru que les oiseaux se dirigent en tordant leurs ailes. Ils ont fait une paire d'ailes et a volé comme un cerf-volant. Ils ont trouvé qu'ils pouvaient tordre ses ailes et pouvait manipuler l'avion.

Ils ont fait des tests avec un planeur avec des cordes attachés aux ailes. Le pilote a donc tiré sur ses cordes, a pu manipuler les ailes et contrôler l'avion. Le plus part du temps, il n'y avait pas assez de vent donc ils n'ont pas pu faire beaucoup de tests.

L'année qui suit, ils ont refait le planeur mais avec des ailes plus grandes. Ils ont manipulé les ailes successivement et le planeur a tourné.

En 1902, ils ont reconstruit le même planeur, mais avec deux aillerons derrières qui aidaient le pilote a contrôlé l'avion. Ils ont résolu tous les problèmes de l'aviation à part le vol propulsé [8].

1-3-Pourquoi les souffleries

Une soufflerie (en anglais wind tunnel) est une installation d'essais utilisée en aérodynamique pour étudier les effets d'un écoulement d'air sur un corps, généralement un modèle de dimension réduite par rapport au réel. On peut effectuer dans une soufflerie des mesures, par exemple d'efforts, et des visualisations d'écoulement le plus souvent impossibles à faire dans les conditions réelles de déplacement [9].

En aérodynamique les équations de Navier - Stockes- donnent beaucoup plus de mal aux ordinateurs. Leur résolution est hors de portée, sans simplification, pour des formes complexes, il faut modéliser la turbulence et cela entraine un tel manque de précision.

Il n'existe donc pas encore en aérodynamique d'autre moyen que d'essayer « vraiment » dés que la situation est un peu complexe. La soufflerie permet tout de même une simplification en permettant l'essai de maquettes à échelle réduite. Il existe des règles de similitudes lorsque l'on change les dimensions, c'est-à-dire que deux écoulements à échelle différente donneront des résultats équivalents si [10] :

- la maquette a la même forme géométrique que l'original,
- le fluide dans laquelle elle sera essayée a les mêmes propriétés,
- des coefficients d'échelle, en particulier le nombre de Reynolds, sont respectés.

En aérodynamique la similitude n'est jamais parfaite mais on trouve des conditions donnant une bonne approximation pour un type d'essai [10].

Le nombre de Reynolds $\rho V L / \eta$ est le produit de la masse volumique de l'air par la vitesse d'écoulement et une longueur caractéristique divisé par la viscosité dynamique de l'air.

Il compare les forces de viscosité aux forces d'inertie. Pour que ce nombre soit constant dynamique sur, une maquette plus petite que l'original. Il faut donc augmenter la vitesse. Un autre moyen est d'augmenter la masse volumique en pressurisant ou en abaissant la température. L'abaissement de température a pour autre avantage de diminuer la viscosité. Pour les essais d'avions rapides, on doit aussi respecter le nombre de Mach qui est le rapport de la vitesse d'écoulement sur la vitesse du son ,car le fluide n'est plus incompressible comme aux basses vitesses (à 15°C au sol la vitesse du son est de 340 m/s, à 11000m d'altitude à -55°C, elle tombe à 296 m/s) A 30m/s pour une maquette de 30cm le Reynolds est de 650 000 et le mach de 0,088, la compressibilité est donc négligeable.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Notons que si en soufflerie c'est le Reynolds et le Mach qui comptent ,il n'en est pas de même dans un bassin ou les forces massiques sont importantes. C'est alors une autre constante, le nombre de Froude, qui commande la similitude.

L'essai en soufflerie doit tenir compte :

- du support de la maquette qui risque de perturber l'essai,
- d'un effet des paroi de la soufflerie qui interdit de réaliser des essais de maquettes de grandes dimensions par rapport à celle de la veine d'essai
- de la qualité de l'écoulement arrivant sur la maquette qui doit être exempt de perturbations.
- du réalisme de certains essais. Par exemple si on veut mesurer l'effet de sol d'une voiture, suffit-il de poser la maquette sur une plaque fixe ? Si on fait cela, la « route » ne bouge pas et l'essai est différent de la réalité [10] (figure 1-1).

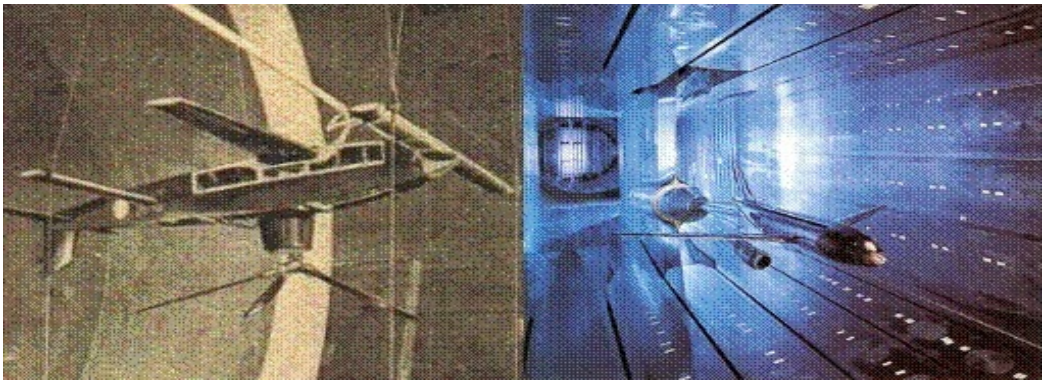


Figure 1-1- Maquette suspendue inversée dans la soufflerie S2Ch D'Issy [10]

Une épineuse question est la méthode de montage de la maquette, il faut en effet pouvoir faire des mesures sans que le support influe sur la mesure. Dans les premières souffleries on suspendait le modèle, la tête en bas à l'aide de fils et on mesurait leur tension (durant l'essai la maquette va être tirée vers le sol puisqu'elle est montée à l'envers. La soufflerie Eiffel utilisait un montage de suspension par le haut par une tige rigide constituant l'un des fléaux d'une balance (la maquette peut donc être montée à l'endroit) [10] (figure 1-2).
Les balances peuvent avoir plusieurs plateaux liés permettant de mesurer simultanément le moment, la portance, le dérapage et la trainée.
La mesure des efforts sur l'objet par une balance demandait une manipulation pour

équilibrer les poids. La mesure devint instantanée avec l'apparition de dynamomètres électriques, puis des jauges de contraintes. Les balances à jauges permettent de mesurer simultanément suivant les 6 degrés de liberté de la maquette.
Dans les souffleries aéronautiques modernes le modèle est supporté par un « dard » placés en arrière du modèle et fixé au sol ou au plafond de la chambre d'essai.

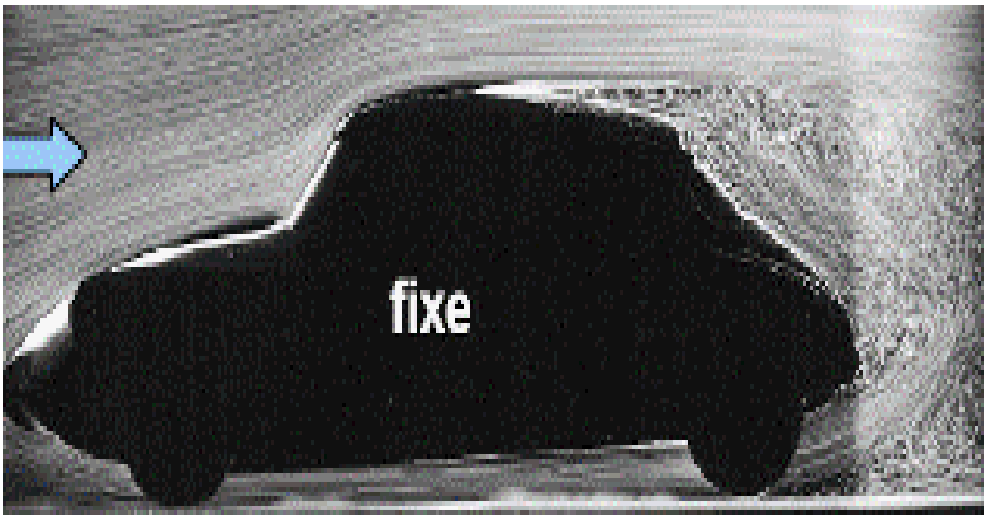


Figure 1-2- Voiture convenablement profilée en dessous [10]

La vitesse du fluide était mesurée par un tube de Pitot, elle l'est maintenant par des anémomètres à fil chaud qui utilisent la variation de résistance avec la température d'un fil placé dans la veine (des souffleries subsoniques), par des sondes de pression à plusieurs orifices – mesure de la différence des pressions entre orifices différemment positionnés- ou par vélocimétrie doppler –mesure de l'effet doppler sur la lumière diffusée par les particules entrainées par l'écoulement.

Figure 1-3-Essai à Langley du P51 Mustang [10]

Pour un avion, les mesures les plus courantes sont le Cx (coefficient de trainée aérodynamique) et le Cz (coefficient de portance) (figure 1-3).

La trainée est la résistance qu'exerce un fluide sur un objet, la portance est la force perpendiculaire au mouvement créé par l'aspiration dans un zone de dépression au dessus de l'objet. Ces résultats sont souvent représentés sous forme de polaires, courbes donnant en ordonnée Cz et en abscisse Cx suivant l'inclinaison de l'objet.

Pour les ailes, les polaires pour des centaines de profils sont disponibles dans des bases de données dont la plus connue est celle constituée par la NACA (US National Advisory Commette for Aeronautics).

La portance s'écrit $Cz\ \rho\ S\ V^2 / 2$ et la trainée $Cx\ \rho\ S\ V^2 / 2$ ou ρ est la masse volumique du fluide, V la vitesse et S la surface frontale (appelée aussi maitre couple, c'est la surface projetée dans un plan perpendiculaire au mouvement).

Figure 1-4- Taille de guêpe du Convair YF-102 après les modifications conseillées par Richard Whitcomb qui redécouvrit la loi des aires brevetée durant la guerre par la société Junkers [10]

Pour des vitesses inférieures à Mach 0,3, la portance ne dépend pas du Reynolds au contraire de la trainée. La portance existe pour des fluides parfaits mais le rapport Cx/Cz dépend de la viscosité. Si pour des vitesses faibles la portance est proportionnelle au carré de la vitesse, elle dépend de la compressibilité pour des vitesses approchant le Mach. Le mur du son provoque une onde de choc produisant une instabilité. Sur les avions modernes on pince le fuselage au niveau des ailes pour que la transition soit rapide (pour éviter que le nez de l'avion ne passe le mur du son avant l'empennage).
Au-delà du mur du son la portance est principalement déterminée par le nombre de Mach [10](figure 1-4).

1-3-1-Définition

Les souffleries sont des tunnels, ronds ou rectangulaires, dans lesquels le vent est produit par des ventilateurs dans le but d'essayer des objets fixes comme des avions ou des automobiles, des maquettes de bâtiments ou de quartiers entiers.

Pour un avion une soufflerie est une machine à « voler » immobile. Pour un ouvrage d'art la soufflerie va reproduire l'action du vent. Il y a en effet équivalence

entre essayer un objet fixe dans un « courant d'air » et essayer un objet mobile dans un air « fixe ».

L'objet à tester est connecté à une instrumentation qui permet de mesurer les pressions, les moments et les forces exercées.. Les souffleries sont utilisées pour définir tous les nouveaux modèles d'avions ou d'automobiles et pour éviter la conception de stades ou l'on s'enrhume à la moindre brise. On peut aussi améliorer l'efficacité d'éléments comme une bouche de ventilation, la forme d'un rétroviseur ou d'un radiateur [11] (figure 1-5).

Aujourd'hui tous les constructeurs d'avions ou d'automobiles et les centres techniques qui s'intéressent à l'aérodynamique utilisent une soufflerie. La NASA en a 42 principales, certaines permettant de tester un avion de 30m d'envergure, d'autres très petites permettant de tester une allumette.

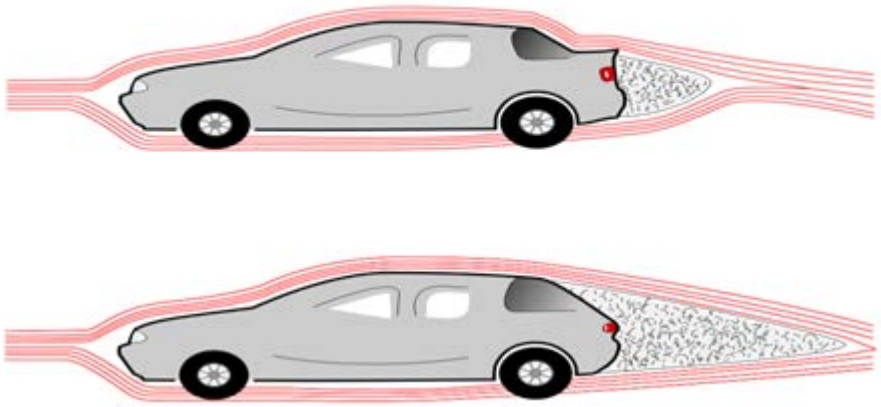


Figure-1- 5-Essai de soufflerie sur 2 voitures de différente forme[11]

1-3-2- Structure

Les souffleries comprennent trois parties essentielles :

- à l'amont de la veine d'expérience, le collecteur ou convergent, dans lequel on accélère progressivement l'air aspiré par des ventilateurs tout en amortissant les fluctuations de vitesse [11] (figure 1-6).
- une chambre d'essai, de section constante, dans l'ensemble de laquelle les conditions d'écoulement de l'air sont les mêmes, et où se trouve la maquette ;

- à l'aval de la veine d'expérience, un diffuseur ou divergent, qui réduit la vitesse de l'air à la sortie et diminue ainsi l'énergie cinétique perdue et, par suite, la puissance consommée.

Figure-1- 6-La chute libre en soufflerie, une activité insolite[11]

1-3-3- Les différents types de soufflerie

Une soufflerie est d'abord caractérisée par son diamètre utile et la vitesse du « vent » qui y est réalisable mais il existe plusieurs architectures possibles.

- Soufflerie à veine ouverte « système Eiffel ». La soufflerie est un tunnel droit avec au centre une chambre d'essai. L'air qui y entre est celui contenu dans le bâtiment qui abrite la soufflerie, il est éjecté dans ce même bâtiment. On distingue le collecteur qui va s'amincissant vers la chambre d'essai pour augmenter la vitesse de l'air et le diffuseur qui reprend l'air en sortie de chambre d'essai pour s'élargir vers le ventilateur (dans une soufflerie le ventilateur est situé en sortie et aspire). Une grille en nid d'abeille disposée à l'entrée du collecteur améliore la qualité du flux [12] (figure 1-7).

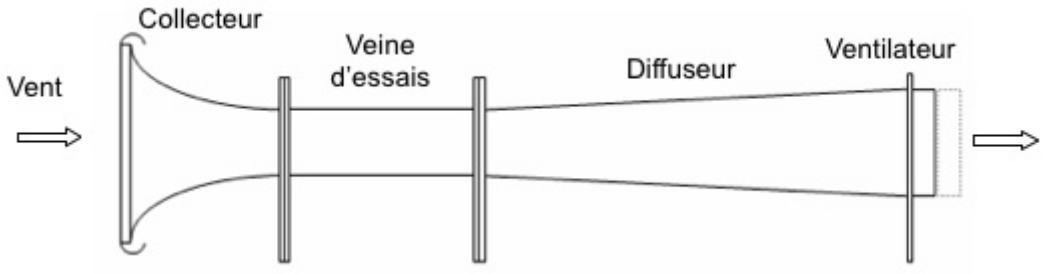


Figure 1-7- Soufflerie à veine ouverte [12]

- Soufflerie à retour : L'air après être passé dans la chambre d'essai est guidé dans un tunnel en boucle et réinjecté. On dispose des déflecteurs dans les angles afin d'améliorer la qualité du flux (figure 1-8).

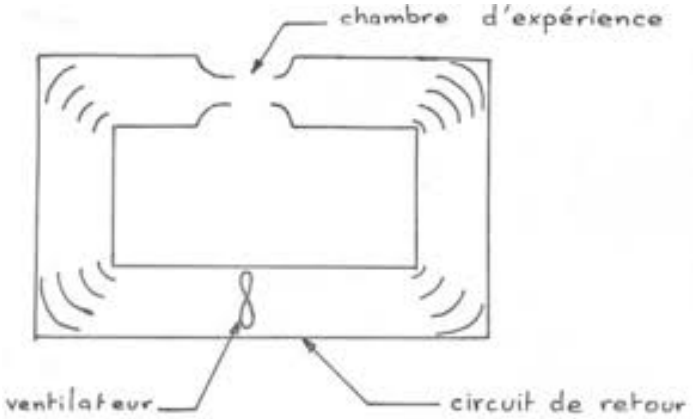


Figure 1-8-Soufflerie à retour [12]

- Soufflerie climatique : En plus du vent la soufflerie reproduit des conditions climatiques comme la pluie, la neige ou le sable par exemple de canada.
- Soufflerie pressurisée : Les conditions de pression y sont supérieures à la normale. Ceci permet d'avoir une bonne similitude d'écoulement avec de petites maquettes en augmentant, par la pression, la masse volumique de l'air. L'inconvénient est que la pression dynamique sur la maquette augmente et donc que la maquette est soumise à de plus grands efforts et risque de se déformer.
- Soufflerie cryogénique : Un autre moyen d'augmenter la masse volumique de l'air est de diminuer la température, ce qui diminue aussi la viscosité de l'air et ne change pas les efforts sur la maquette.

- Soufflerie à rafale : Il n'est pas possible d'obtenir des vitesses hypersoniques (mach 5 et plus) de façon continue en soufflerie : on génère des rafales par détente du gaz issu d'une tuyère vers une sphère à vide.
- Soufflerie à arc : C'est une réalisation possible d'une soufflerie à rafale par déclenchement d'arc électrique dans un gaz ce qui le chauffe et le comprime. On obtient ainsi de très hautes températures et pressions durant moins d'une seconde.
- Soufflerie à choc : Autre variante des souffleries à rafale où on utilise un long tube divisé en deux enceintes séparées par un diaphragme, l'une à haute pression, l'autre à basse pression. La rupture du diaphragme provoque une onde de choc [12].

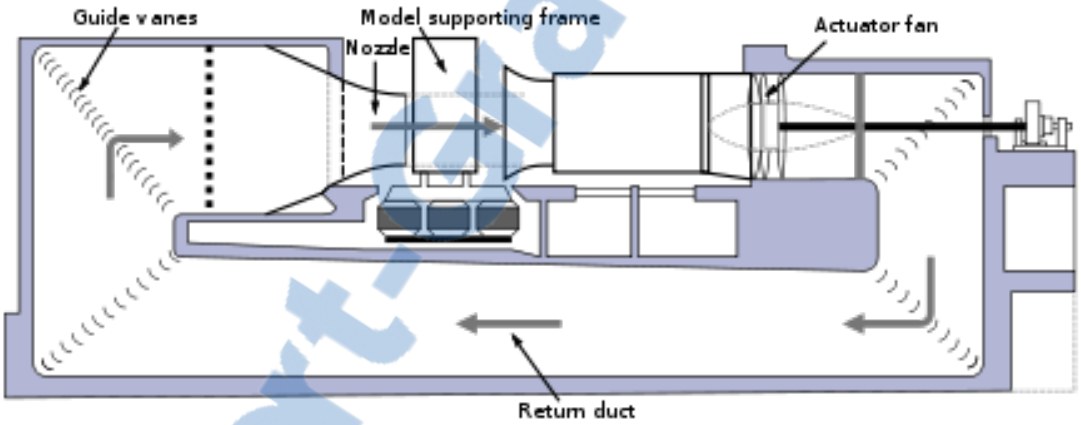


Figure 1-9- Soufflerie à retour à choc [12]

1. On peut distinguer les types de souffleries suivant la vitesse du « vent » :

- Souffleries subsoniques : 0 à 200m/s (720km/h). Utilisées pour la simulation d'un vent réel, par exemple pour les bâtiments ouvrages d'art, ou pour le déplacement des véhicules terrestres, des avions de tourisme ou ceux en phase d'atterrissage et de décollage.
- Souffleries transsoniques : 0,7 <Mach < 1,5, pour les avions de transport civils
- Soufflerie supersoniques : 1,5 < Mach <5, pour les avions de combat.
- Soufflerie hypersoniques : 5 < Mach <15, obligatoirement du type par rafales, pour les missiles, lanceurs [12].

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

1-4- Souffleries existantes

1-4-1-Souffleries d'étude

Modèles simples à visée éducative, généralement à circuit ouvert. Dimension de la veine de l'ordre de 60 x 60 cm. Les moins puissantes ont une puissance de quelques kilowatts, ce qui permet de mettre en mouvement une veine fluide de quelques décimètres carrés de section [12].

1-4-2-Souffleries universitaires

Veines de 1 à 5 m² de section, vitesse de l'ordre de 40 à 60 m/s, permettent des essais de modèles de planeurs et d'avions à basse vitesse (moins de 200 km/h). Exemples, la soufflerie S4 de l'ISAE[3], ou celle de l'Université d'Orléans.

Veines de 5 à 8 m² de section, vitesse de l'ordre de 50 à 100 m/s, permettent des essais de modèles d'avions plus grands, à vitesse plus élevée. Exemple typique, la soufflerie américaine Texas University 7 x 10 ft (6.32 m²)[12].

1-4-3-Souffleries subsoniques

Ces souffleries ont une vitesse d'air jusqu'à 100 m/s (360 km/h ou M 0.3). On peut y tester les véhicules routiers et les avions en phase de décollage ou d'atterrissage. Exemples, souffleries F1 (pressurisée) et F2 de l'Onera [12].

1-4-4-Très grandes souffleries

La plus grande soufflerie subsonique à retour est celle de l'ONERA à Modane[5] (plus de 120 mètres de circuit, veine d'expérience de 8 m de diamètre), mise en service en 1952. Très puissante (88 MW), on peut y tester des modèles de 4 m d'envergure, à plus de 300 m/s. La soufflerie subsonique en circuit ouvert la plus grande est celle De la NASA Ames Research Center; elle a une section de test ouverte de 80 x 120 ft soit 24 x 36 m, près de 900 m²; Elle dispose de 6 ventilateurs d'une puissance totale de 100 MW (135 000 cv) [12].

1-4-5-Souffleries transsoniques

Elles ont une vitesse d'air allant de M 0.5 à M 1.3 permettant de tester les avions à réaction de transport civil volant généralement autour de M 0.80-0.85. La soufflerie transsonique cryogénique Européenne ETW (European Transonic Wind Tunnel) est établie à Cologne, en Allemagne. La combinaison de la pression (jusqu'à 4.5 bars) et de la température très basse (jusqu'à - 160 degré) permet d'obtenir un nombre de

Reynolds équivalent à celui des plus grands avions de ligne (Reynolds80 M pour l'aile de l'A380). La puissance installée est de 50 MW (68 000 cv) [12].

1-4-6-Soufflerie supersoniques

Fonctionnant de M 1.5 à 5, elles permettent de tester les avions de combat et les missiles. Exemples, la soufflerie Onera S2 MA [12].

1-4-7-Soufflerie hypersoniques

Les souffleries à rafales, soufflant un air stocké sous haute pression dans des cuves, permettent d'atteindre de très grandes vitesses, jusqu'à 25 Mach pour tester les véhicules hypersoniques et la rentrée dans l'atmosphère. Exemples, les souffleries Onera S3 (Mach 5.5) et S4 (Mach 12) [12].

1-5- Les souffleries à veine ouverte (de type Eiffel)

1-5- 1-Avantage

- Couts de construction bas
- Refroidissement naturel (les souffleries à boucle fermée réutilisant le même air doivent disposer d'échangeurs ou d'un système de refroidissement pour un fonctionnement à des vitesses élevées)
- Adaptées à l'étude des moteurs ou de la visualisation de la fumée puisqu'il n'y a pas d'accumulation de résidus dans l'air de la veine [13].

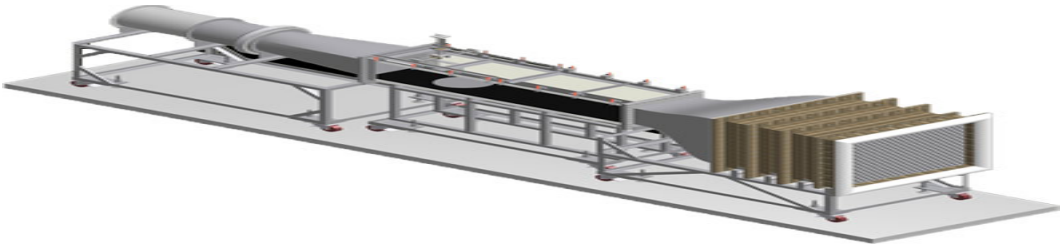


Figure 1-10- Soufflerie à veine ouverte (de type Eiffel)

1-5- 2-Inconvénients :

-L'espace autour de la soufflerie doit être important afin d'éviter des dissymétries dues aux objets proches du collecteur. La qualité du flux des souffleries en boucle fermée est supérieure [13].

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

-Si la prise d'air est externe, le vent et les conditions météo influencent le fonctionnement de la soufflerie

-Le cout d'exploitation est important puisque l'air doit être constamment accéléré.

-Le fonctionnement est bruyant.

La chambre d'expérimentation peut avoir plusieurs dispositions. Elle peut être rectangulaire, ce qui facilite la manipulation (le diffuseur et le collecteur apparaissent comme deux orifices circulaires de même diamètre sur deux murs opposés de la chambre) ou au contraire être une simple portion du tunnel. Suivant le cas la veine est dite libre ou guidée [13].

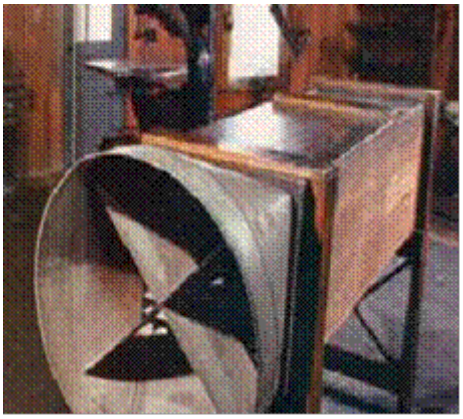


Figure 1-11 La modeste soufflerie des frères Wright[13]

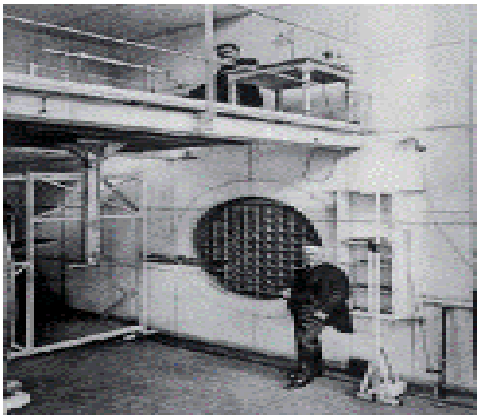


Figure 1- 12 Eiffel Auteuil : soufflerie à veine ouverte libre[13]

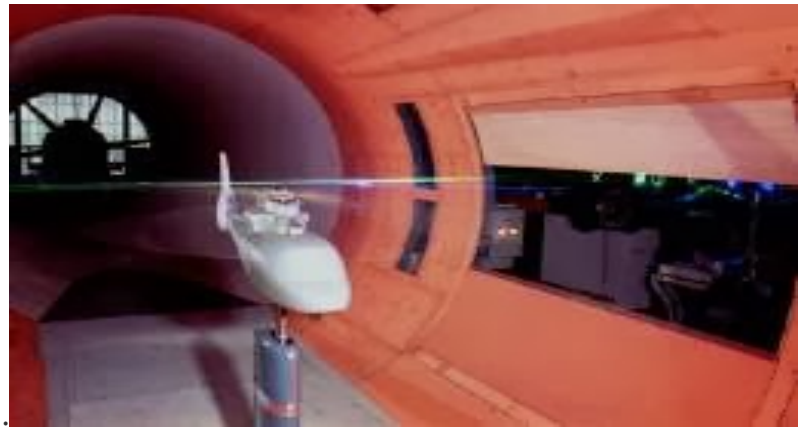


Figure 1- 13-Soufflerie à veine ouverte guidée (déménagée et rénovée en 1962) [13]

1-6-Les souffleries aujourd'hui

Figure -1-14-La plus grande soufflerie du monde en Californie [13]

L'âge d'or des souffleries doit se situer dans les années 50.
Toutes les grandes souffleries subsoniques construites avant la guerre fonctionnaient, Le supersonique devenait objet d'étude courant et chacun voulait « sa » soufflerie.
Il s'est produit, comme dans d'autres domaines, un phénomène de concentration: seuls les plus grands instituts conservent leurs propres équipements de plus en plus complexes. Il reste cependant des souffleries moyennes [13].
Les souffleries se comptent tout de même par centaines dans le monde.
La plus grande soufflerie au monde appartient à la NASA, elle est située à l'Ames Research Center en Californie. Cette soufflerie subsonique permet de tester des avions de 33 m d'envergure, de plus de 45 m de longueur et de 26 m de haut. Elle a deux sections: l'une de 26 m de haut et de 40 m de largeur, l'autre de 13 m de haut et 26 m de large.
L'air est soufflé par six ventilateurs de 15 pales ayant la hauteur d'un bâtiment de 4 étages, entrainés chacun par un moteur de 25 000 CV.
Cette géante est l'ultime descendante d'une lignée née dans les années 30 à Meudon, Langley et Moscou. Elle a été fermée en 2003 par la NASA et ré-ouverte en 2007 par l'Air Force [13].

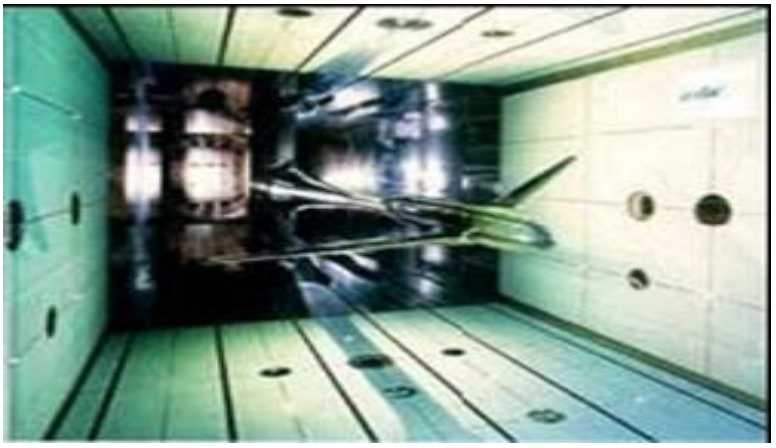


Figure 1-15-La veine de l'ETW [13]

La France, l'Allemagne, les Pays Bas et le Royaume Uni ont construit à Cologne l'Européen Transsonique Wind tunnel (ETW) qui est vraiment opérationnel depuis l'an 2000. Il s'agit d'une soufflerie cryogénique transsonique continue où l'air est remplacé par de l'azote. La veine d'essai est de 2m x 2,40 m, la pression peut atteindre 4 bars et la température -163°C pour une vitesse d'écoulement maximum de 1,35 mach. Le but de cette soufflerie est d'obtenir pour les conditions d'essai des maquettes une vraie similitude de Reynolds.

Deux paramètres permettent de respecter une similitude entre les essais en soufflerie et les conditions réelles.

- Le nombre de Reynolds est le produit d'une longueur caractéristique de la maquette, de la vitesse et de la densité divisé par la viscosité de l'écoulement.
- Le nombre de Mach est le rapport entre la vitesse d'écoulement et la vitesse locale du son.

Comme on ne peut pas utiliser des maquettes très petites, ceci a conduit d'abord à de très grandes veines telles que celles de 8 m la soufflerie S1 de Modane qui permet d'utiliser des maquettes 1/2 ou 1/4.

On a ensuite essayer d'augmenter la pression pour augmenter la densité de l'air comme la soufflerie F1 du Fauga sous 4 bars. Cela augmente malheureusement les contraintes dynamiques sur la maquette et on ne pouvait dépasser des Reynolds de l'ordre de 10 millions pour des Mach de 0,5 à 1. Le Reynolds de l'A 300 était de 40 millions, celui de l'A320 est de 25 millions, Il a donc fallu s'orienter vers les souffleries cryogéniques pressurisées dont le premier exemple fut le " 0,3 mètre Transsonique Cryogénique Tunnel "

mis en service par La NASA à Langley en 1973 qui permit la mise au point de la National Transsonique Facilité

La mise au point de L'ETW a été faite grâce à deux souffleries: la KKK (KryoKanalKöln) cryogénique non pressurisée mais de géométrie semblable à l'ETW et la T2 de Toulouse de veine 0,4m x 0,4m transformée en soufflerie cryogénique pressurisée [13].

1-6-1-Les souffleries en France

En France les souffleries publiques les plus marquantes appartiennent à l'ONERA (Office national d'études et de recherches aérospatiales), à l'IAT Institut aérotechnique du CNAM (Conservatoire national des arts et métiers), au CSTB (Centre scientifique et technique du Bâtiment) ou à l'IMFT (Institut de mécanique des fluides de Toulouse) [13].

Figure1-17- Soufflerie Eiffel d'Auteuil (CSTB). Le plus ancien, monument historique[13]

Figure 1- 18-Souffleries S1Ch et S2Ch de Chalais Meudon- ONERA

S2Ch est de type Eiffel (longueur 40m), elle fut d'abord construite à Issy les Moulineaux puis déménagée en 1962[13].

Figure 1-19-Soufflerie de Banlève (Toulouse)- IMFT De type Eiffel

Figure 1-20-Souffleries S1MA à S4MA à Modane[13].

ONERA Un ensemble très impressionnant de souffleries du transsonique à l'hypersonique.

Figure 1-21-Souffleries F1,F2 et F4 Fauga-Mauzac (haute Garonne)[13]

ONERA F1 est une soufflerie moderne, 1978, subsonique à pressurisation sous 4 bars et cellules d'essai interchangeables. F2 est une soufflerie subsonique atmosphérique. F4 est une soufflerie hypersonique [13].

Figure 1-22:Soufflerie Jules Verne à Nantes [13]

CSTB Soufflerie climatique à 2 circuits (dynamique, thermique) pouvant réaliser des conditions extrêmes : -30°C à +55°C, humidité 30% a 100%, brouillard, pluie, neige, sable. [de I 'institut de mécanique des fluides de Lille (ONERA]. La plus ancienne soufflerie de date de 1934 (veine de 2,40m). Il existait aussi une soufflerie de « vrille » verticale de 2m de diamètre construite en 1938 et remplacée aujourd'hui [13].

Dans les années 50 les constructeurs aéronautiques et les constructeurs automobiles ont leur soufflerie. Celles de la SNCASE (Société nationale des constructions aéronautiques du Sud-Est) sont à la Courneuve, à Suresnes et à Marignane, Louis Breguet la sienne à Velizy , Chausson est à Asniéres, Rateau à la Courneuve[13].

La soufflerie Hispano Suiza de Bois Colombes, construite en 1937, est un vestige de cette époque. Elle fut partiellement démolie dans le années 70 puis, transformée en école en 2005. Le bâtiment d'origine est encore « lisible », il faisait 55 m de long par 16m de large, le ventilateur de 8m de diamètre soufflait à 325km/h [13].

Figure 1-23-soufflerie Hispano Suiza[13]

Aujourd'hui les constructeurs aéronautiques utilisent les moyens publics mais pour l'automobile il existe un GIE (groupement d'intérêt économique) formé avec Renault PSA et le CNAM « souffleries aéroacoustiques automobiles (S2A)» exploitant à Montigny le Bretonneau une soufflerie échelle 1 à veine ouverte équipée d'un tapis roulant et permettant aussi l'étude aéroacoustique des véhicules et une soufflerie à l'échelle 2/5. Une soufflerie climatique créée par les usines Chausson à St Ouen l'Aumône en 1976, puis rachetée par Valeo et maintenant indépendante SCIDF(société civile immobilière) permet d'essayer voitures et camions jusqu'à -35°C[13].

Figure 1-24-Soufflerie de Puy de Dôme [13]

Beaucoup de laboratoires possèdent de petites souffleries.
Certaines sont originales comme la nouvelle soufflerie du Puy de Dôme(fig 1.24) dédiée à l'échantillonnage des nuages et des cristaux de glace en milieu naturel, ou la grande soufflerie de l'IRPHE (institut de recherche sur les phénomènes hors équilibre) à Marseille dédiée à l'interaction entre l'air (40m x 3m) et l'eau (40m x 1,5m) [13].

Chapitre 2
Présentation de la soufflerie de laboratoire

Rapport-Gratuit.com

2.1 Introduction :

On se sert des souffleries pour étudier les avions civils et militaires, ainsi que les missiles, l'hélicoptère, les équipements spatiaux, les sondes mais également des dispositifs plus courants comme les voitures par exemple. Outre dans le domaine de la propulsion, elles trouvent aussi une application dans l'étude des bâtiments de toutes sortes. Elles sont également utilisées dans le domaine domestique avec extracteurs d'air statiques.

Les tests en soufflerie permettent d'effectuer de différentes analyses telles que l'aérodynamisme de l'objet étudié (vitesse et écoulement de l'air par exemple) ou encore les efforts subits par l'objet dus à la force qu'exerce l'air avec la vitesse. Ce sont les deux instruments de mesure essentiels nécessaires lorsqu'on utilise une soufflerie[12].

2.2 Objectifs :

Dans notre cas, il s'agit de réaliser une soufflerie de taille réduite. Cette soufflerie doit permettre la réalisation de quelques expériences physiques quantifiables et la mise en évidence de phénomènes physiques simples.

2.3 Tunnel aérodynamique :

Un tunnel aérodynamique appartient aux souffleries à circuit ouvert. Sa fonction et d'aspirer l'air de l'extérieur, puis le rejeter à l'autre coté à travers un ventilateur. L'espace environnant assure le retour de l'air vers l'entrée. L'appareil se compose essentiellement des parties suivantes :

- Préchambre avec stabilisateur d'écoulement.
- Tuyère.
- Section de mesure.
- Diffuseur.
- Ventilateur.

Ce type de soufflerie s'adapte uniquement à des vitesses limitées de l'air (**0 < Ma <0.08**)[14].

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

2.4. Fonctionnement du tunnel aérodynamique :

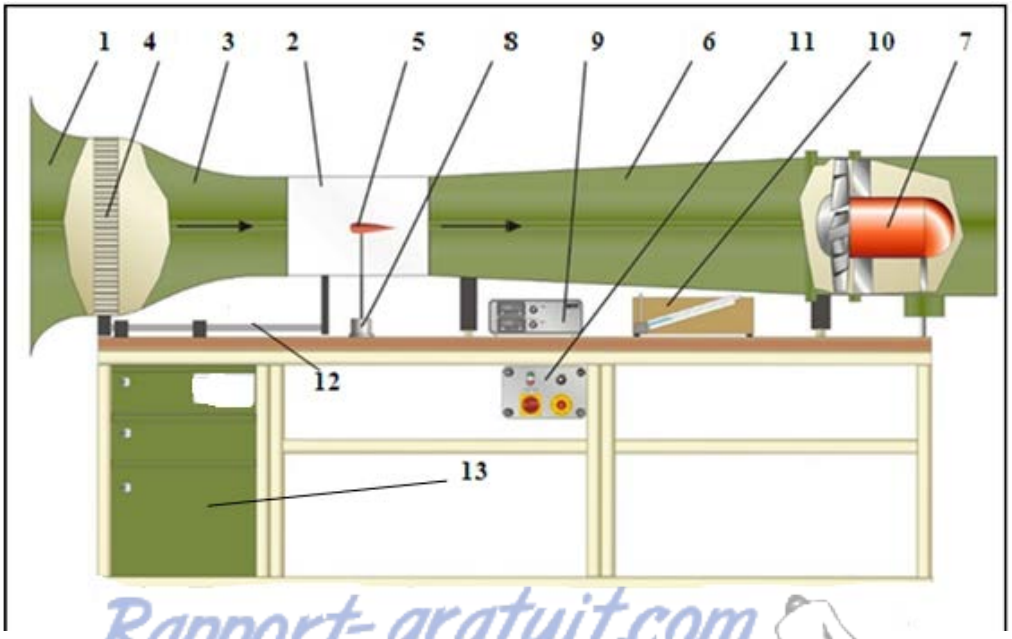
L'air est aspiré de l'espace environnant par le cône d'entrée (1) facilitant l'écoulement. Cet air passe par un filtre qui placé sur le stabilisateur d'écoulement (4) . L'air quitte le stabilisateur sous forme d'écoulement parallèle et sa vitesse augmente dans le convergent (3).

Après avoir quitté la convergent, la pression statique affichée (10) est mesurée à l'entrée de la section de mesure. En partant de l'hypothèse d'un écoulement quasi sans perte, la vitesse d'écoulement peut être déterminée par la formation de la différence avec la pression ambiante (pression totale avec vitesse zéro). L'air traverse à présent la section constante de mesure (2). Le cône convergent peut translater avec la section de mesure (2) par l'intermédiaire de roues (12).

Après la section de mesure, l'écoulement est décéléré dans un diffuseur (6) et la chute de pression nécessaire à l'accélération de l'air dans la tuyère est partiellement récupérée.

L'angle de diffuseur égale à $\theta = 9.92^0$,est proportionné de telle sorte qu'aucun décollage de courant n'apparaisse.

Le ventilateur axial (7) doté de 8 pales, est actionné par un moteur électrique. La vitesse de rotation, et par conséquent la vitesse de l'air, peuvent être réglées en continu à l'aide d'un variateur de vitesse (11) [14].



Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Figure (2.1) : Schéma d'un tunnel aérodynamique [14]

(1) Cône d'entrée
(2) Section de mesure
(3) tuyère
(4) Stabilisateur d'écoulement
(5) section de travail
(6) Diffuseur
(7) Ventilateur
(8) transducteur de force à deux composants électronique
(9) Amplificateur de mesure avec affichage de la force
(10) manomètre à tube incliné pour la vitesse de l'air
(11) Boîtier de commande avec réglage de la vitesse
(12) Guide pour tuyère translatable
(13) Chariot de laboratoire avec tiroirs

2.5 Soufflerie étudiée :

2.5.1 Dimensions réelles de la soufflerie (fig2.2) :

Faites de planches de bois contre plaqué, et de traverses en hêtre, notre soufflerie a une veine différente, carrée de dimensions simples pour simplifier sa mise en œuvre et diminuer le coût de fabrication.

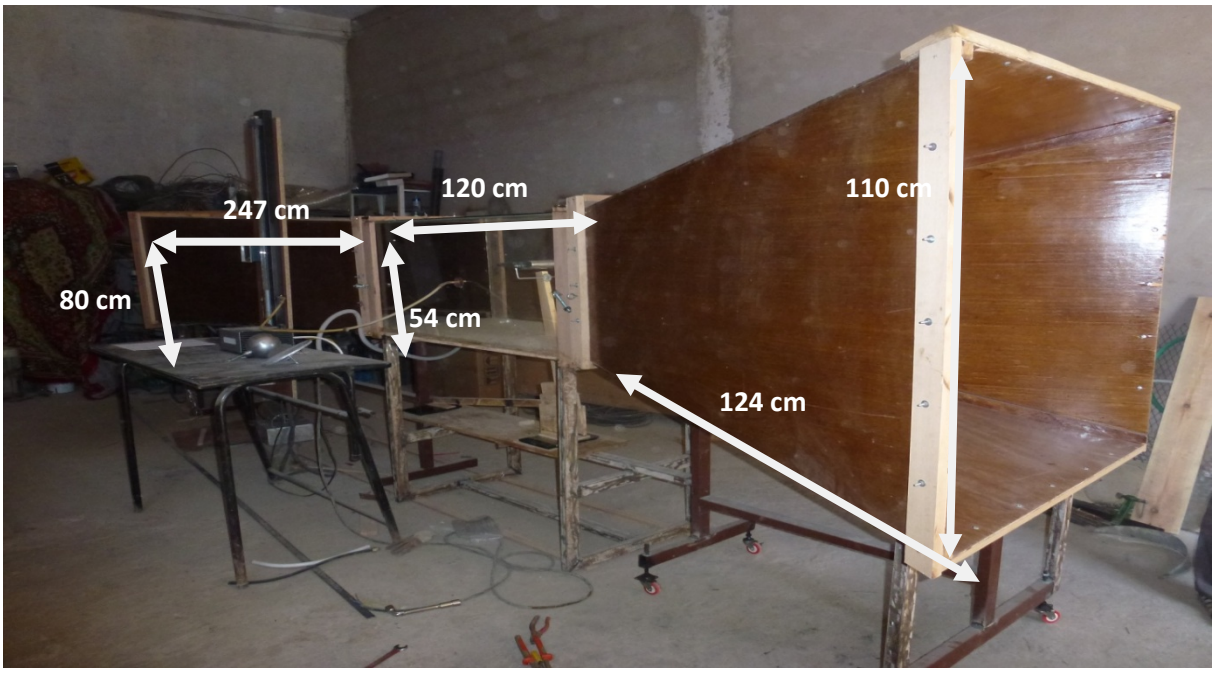


Figure (2.2) : Dimensions réelles de la soufflerie.

2.5.2 Caractéristique de notre soufflerie:

La soufflerie présentée dans notre travail a été réalisée selon un simple modèle. Elle a été fabriquée localement au sein de notre université (Aboubekr Belkaid) : Dimensions, éléments ... .

Tout d'abord, l'hélice a été achetée du marché dans un état vétuste puis réparée et repeinte (figure2.3).

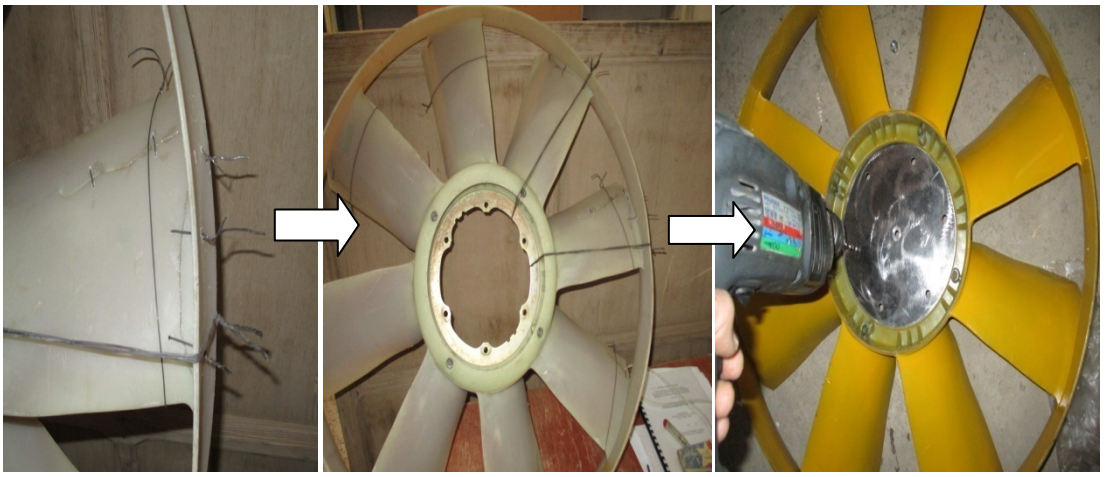


Figure (2.3) : l'hélice réparé

Les côtés du convergent et du divergent ont été construites en planches de bois contre-plaqué, et de traverse en hêtre. La section de mesure est réalisée en verre transparent (figure2.4).

Notre soufflerie a une veine différente, carrée de différentes dimensions ce qui simplifie sa mise en œuvre et diminue le coût de fabrication.

Figure (2.4): construction du convergent, divergent et la section de mesure

La moteur hydraulique a été récupéré du laboratoire de MDF de l'université, sur lequel l'hélice est montée aprè avoir tourné son arbre d'adaptation .Le tout : moteur, hélice est monté sur un support soudé en cornière (figure 2.5).

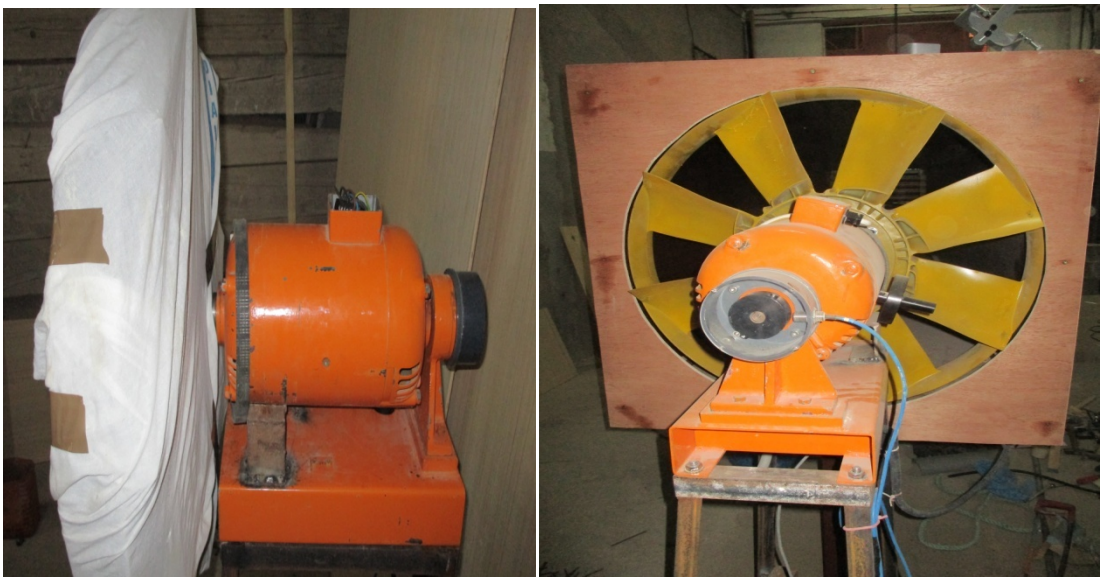


Figure (2.5) : le ventilateur

Les forces de trainée et de portance sont mesurées par un système de bras rotatif posé sur 2 balances. L'une pour la mesure de la trainée et l'autre pour la mesure de la portance (figure2.6 et 2.8)

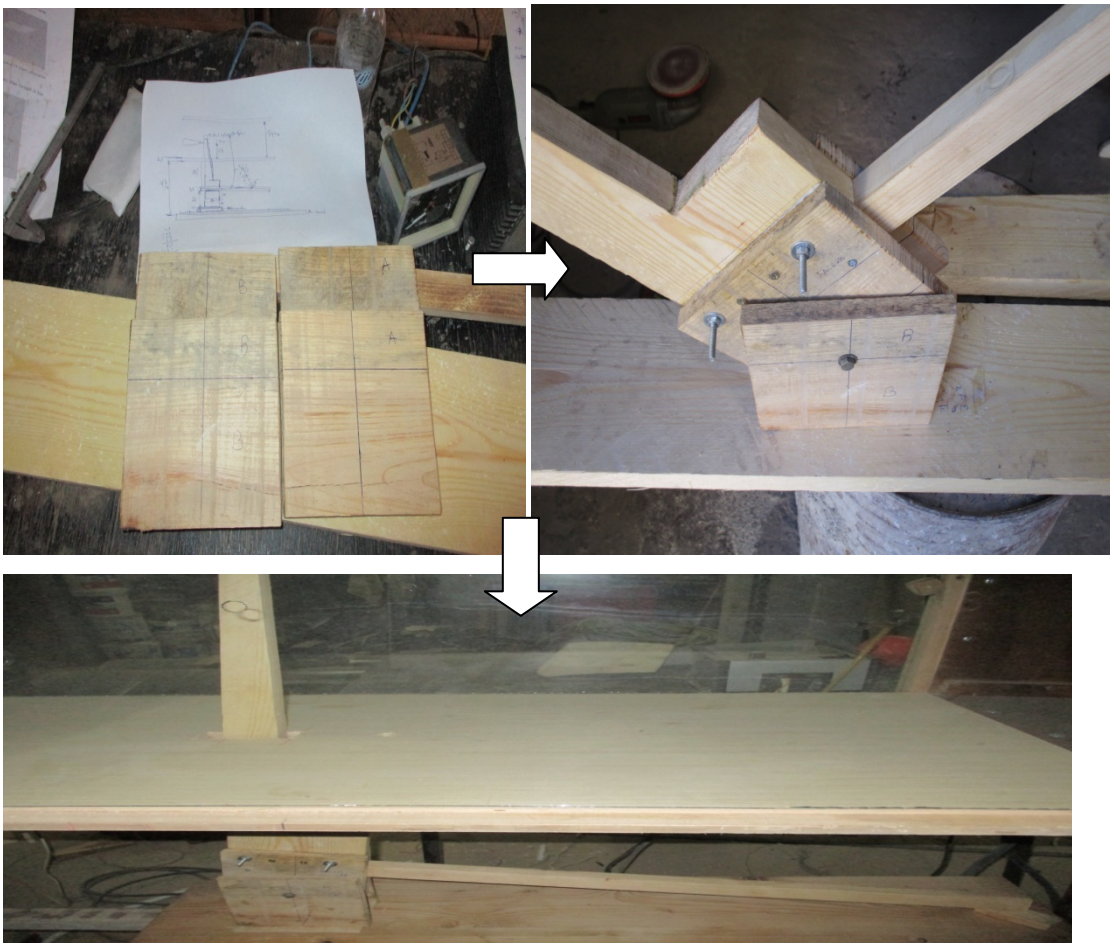


Figure (2.6) : balance des mesures et le levier

Figure (2.7) : la soufflerie

2.5.3. Systèmes de mesure :

- **Les systèmes de mesure de la portance et de la trainée**

la portance et la traînée d'un objet se mesurent grâce à un système de levier renvoyant les forces (de portance et de traînée) et les appliquant sur des balances (figure 2.8).

Nous pouvons ainsi mesurer la masse.

Figure (2.8) : Système de pesé

La figure suivante représente un schéma explicatif du système de mesure des forces de la portance et de la trainée :

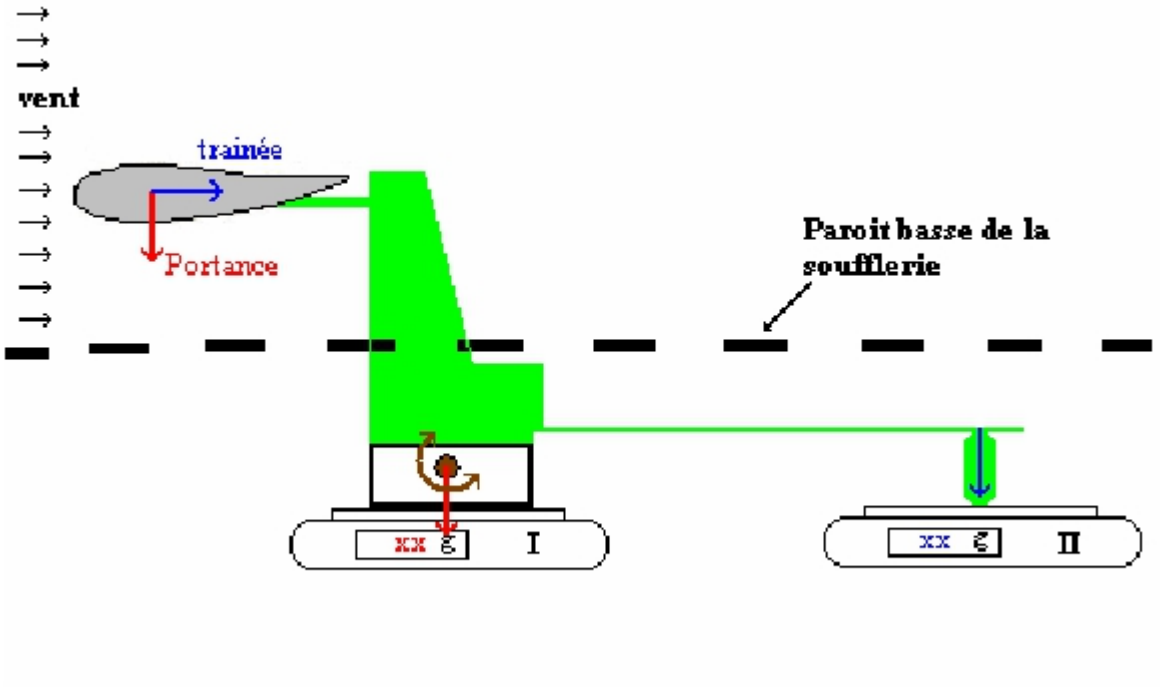


Figure (2.9) : Schéma du système de mesure des forces [12].

Afin que ce système permette d'obtenir une portance mesurable, le profil doit être placé à l'envers : ainsi, la portance se répercute sur la première balance. La trainée agit sur la partie mobile du système (en vert) qui peut pivoter autour de l'axe marron et répercute ainsi cette force sur la seconde balance [12].

- **Le système de mesure des pressions et des vitesses (fig 2.10)**

Afin de mesurer la pression à l'intérieur de la veine, nous avons prévu un manomètre différentiel sous forme de U.

Figure (2.10) : Système de mesure de pression et de vitesse

Le montage est constitué de deux tubes en plastique transparent de 1 mètre et de diamètre constant sous forme de U (3). Le tube est donc placé sur un support en bois vertical et muni d'une règle graduée placée entre les deux parties du tube afin de mesurer au millimètre la hauteur h, différence de niveau d'eau due à la différence des pressions d'air.

En effet, la mesure réalisée est avant tout une mesure de pression : un des tubes est placé à l'arrivé de l'air perpendiculaire à la section de travail.

(4) : appareil d'affichage de vitesse de rotation du ventilateur

(5) : appareil de commande de vitesse (potentiomètre)

2.5.4. Motorisation

La veine et l'ensemble des appareils de mesure étant en place, nous avons récupéré un moteur d'un banc hydraulique d'une puissance de 1.5KW et d'une vitesse de rotation 2900 tr/min ainsi que l'hélice en plastique de 76cm de diamètre et se compose de 8 pales (Fig 2.11).

Le moteur est à courant continu dont nous pouvons régler sa vitesse à l'aide d'un potentiomètre (5) qui se trouve sur la table de travail.

Figure (2.11) : Moteur avec le ventilateur utilisé

Rapport-Gratuit.com

2.5.5 Modèles expérimentaux disponibles :

Nous avons testé 5 profils pour notre étude (figure2.12)

Figure (2.12) : Profils étudiés

1: demi-cylindre de 10,5 cm de diamètre

2: Plaque de 20 cm de coté et une hauteur de 10cm

3: sphère de 11cm de diamètre

4 : Disque de 9 cm de diamètre

5: Disque de 15cm de diamètre

Chapitre 3

Formulation

et

Calcul

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

3.1 -Introduction

Dans ce chapitre on a étudie les différents paramètres pour des différents profils, dans la première partie (théorique) . On à détaillé les différentes lois et théorèmes qu'on à utilisé (théorème de Bernoulli, portance, trainée, le nombre de Reynolds).

Dans la deuxième partie on a entamé les calculs des différents paramètres.

- **-Partie 1**

Les effets de compressibilité devient importants avec l'augmentation de la vitesse de l'écoulement. Une attention particulière sera alloué au fait que ce n'est pas le sens de la vitesse qui induit l'importance des effets de compressibilité mais plutôt le rapport de cette vitesse à celle de son qui en sera déterminant, le rapport commun c'est le nombre de Mack M

Avec M=V/a

v : vitesse de l'écoulement

a : vitesse locale du son

La vitesse du son dans l'air, considérée comme un gaz parfait, s'exprime par :

$a = \sqrt{\gamma RT}$ Avec $\gamma = 1.4$ et T : la température T en kelvin , R=287 $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ pour l'air

3.2 Théorème de Bernoulli

Ce théorème est la formulation mathématique du principe de Bernoulli qui énonce que dans le flux d'un fluide, une accélération se produit simultanément avec la diminution de la pression. Dans un flux de fluide sans viscosité et dans lequel une différence de pression est la seule force d'accélération [17].

Avec : $P_1 + \frac{1}{2}.\rho_{air} V_1^2 + \rho_{air} g.z_1 = P_2 + \frac{1}{2}.\rho_{air} V_2^2 + \rho_{air} g z_2$ ……..(3.1)

P_1 : la pression au point n°1 entrée du convergent

P_2 : la pression au point n°2 section de travail

v_1 : la vitesse de l'air au point n°1

v_2 :la vitesse de l'air au point n°2

z_1 :l'altitude au point n°1

z_2 :l'altitude au point n°2

ρ_{air} la masse volumique de l'air.

Figure 3.1 : La section de travail

Or, comme nous l'avons dit, $V_1 = 0$ et $z_1 = z_2$ (même altitude).

On a

$$P_1 - P_2 = ½\ \rho_{air}\, v_2^2 \quad \text{……...……(3.2)}$$

La différence de pression P_1 - P_2 est directement mesurée, à l'autre extrémité des tubes, grâce au tube en U [12].

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

- **théorème de tube de Pitot**

$$P_1 + ½.\rho_{eau}\, V_1^2 + \rho_{eau}\, g.Z_A = P2 + ½.\rho_{eau}\, V_2^2 + \rho_{eau}\, g\, Z_B \quad \text{……..(3.3)}$$

$V_A = V_B = O$ (les niveaux d'eau sont fixes)

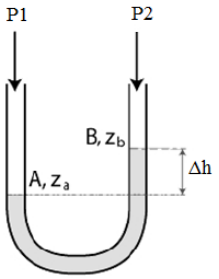
P_1 - P_2 $=\rho_{eau}$ .g.($z_B - z_A$) …….....(3.4)

donc : P_1 - P_2 $=\rho_{eau}$ .g. Δh ……..(3.5)

la vitesse devient :

$$\frac{1}{2}\rho_{air}\, v_2^2 = \rho_{eau}\, g\, \Delta h \quad \text{……...(3.6)}$$

$$v_2 = \sqrt{\frac{\rho_{eau}}{\rho_{air}} 2g\Delta h} \quad \text{……(3.7)}$$



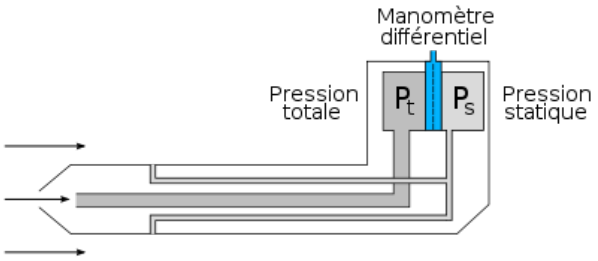


Figure 3.2 .a . Le tube de Venturi [12]. **Figure 3.2 .b . Le tube de Pitot .**

$\boldsymbol{\rho_{eau}}$: la masse volumique d'eau égale à 1000 kg/m^3

$\boldsymbol{\rho_{air}}$:la masse volumique d'air égale à 1,29 kg / m^3

3.3 Les forces mises en jeu

Tout d'abord, avant de commencer , il nous faut définir les notions clés de l'aérodynamisme. Intéressons-nous aux forces mises en jeu sur le profil lorsque ce dernier est soumis au vent de la soufflerie.

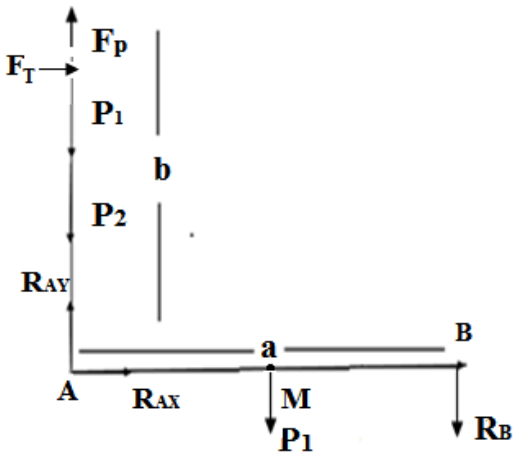


Figure 3.3 : Forces mises en jeu.

Avec

P1 : poids de profil

P2 : poids de la tige verticale

P3 : poids de la tige horizontale

F_T : force de trainée

F_P : force de portance

R_{OY} , R_{OX} : forces de réaction

a=84 cm ,b=64 cm (longueurs des tiges)

3.2.1 La trainée

C’est la force qui est due à la résistance du profil sur l’air, elle a un sens opposé au déplacement .Elle s’accroît avec la vitesse du mobile (ou de l’air selon le référentiel dont on parle). Elle est représentée par la formule suivante [15] :

$$\mathbf{F_T = ½.C_T.\,\rho_{air}\,.S.v^2} \quad \text{……………………………………………………………} \quad (3.8)$$

F_P : portance en N
ρ_{air} : masse volumique du fluide (air)
S : surface de la vue en plan de l’aile en m²
v : vitesse relative en m/s

C_p : coefficient de trainée

$$\sum M_{/A} = 0 \text{ (somme des moments des forces) ……………………………………… (3.9)}$$

$$F_T b + P_3 a = R_{BY} a \quad \text{……………………………………………………………} \quad (3.10)$$

$$F_T = \frac{R_{BY}\, a - P_3 a}{b} \quad \text{……………………………………………………………} \quad (3.11)$$

on néglige les poids des tiges, (car les balances sont mises a zéro) la force de trainée prend la forme

$$F_T = \frac{R_{BY}\, a}{b} \quad \text{……………………………………………………………} \quad (3.12)$$

Avec

$R_B = m_b g$ ……..... (3.13)

(m_b masse mesurée directement sur la balance 2)

- **Coefficient de trainée**

C'est le rapport entre la force de traînée F_T et le produit de la pression dynamique P par la surface de référence S [15].

$C_T = \frac{F_T}{PS}$ ……..……(3.14)

Posons P : $P = \frac{1}{2}\rho_{air}\ v^2$ ……..……(3.15)

ρ_{air} :est la masse volumique de l'air et v c'est la vitesse

Donc l'équation (3.14) devient comme suit :

$C_T = \frac{F_T}{\frac{1}{2}\rho_{air}\ v^2 S}$ ……(3.16)

3.2.2 La portance

C'est la force de sens opposée au poids, Elle est représentée par la formule suivante [15] :

$\mathbf{F_P = ½.\ C_P.\ \rho_{air}\ .S.v^2}$……(3.17)

F_P : portance en N
ρ_{air} : masse volumique du fluide (air)
S : surface de la vue en plan de l'aile en m²
v : vitesse relative en m/s
C_p : coefficient de portance

$\overrightarrow{\sum M_{/B}} = \vec{0}$ ……(3.18)

$F_P a + (P_1 + P_2 - R_{AY})a + P_3 \frac{a}{2} = 0$ ……..……..(3.19)

$F_P = \frac{R_{AY}\, a - (P_1 + P_2 + \frac{P_3}{2})a}{a}$ ……. (3.20)

$F_P = R_{AY} - (P_1 + P_2 + \frac{P_3}{2})$ …… (3.21)

On néglige les poids des tiges, la relation de la force de trainée prend la forme

$F_P = R_{AY}$ …… (3.22)

Avec

$R_{AY} = m_a g$ ……..…. (3.23)

(m_a masse mesurée directement sur la balance 1)

- **Coefficient de portance**

c'est un nombre sans dimension qui quantifie la capacité de portance d'une surface. La portance n'est pas obligatoirement verticale (opposée à la gravité) ; elle est perpendiculaire à la vitesse [16].

$C_p = \frac{F_p}{PS}$ ……..……(3.24)

Posons : $P = \frac{1}{2}\rho_{air}\ v^2$ ……...(3.25)

ρ_{air} :est la masse volumique de l'air et v c'est la vitesse

Donc l'équation (3.24) devient comme suit :

$C_p = \frac{F_p}{\frac{1}{2}\rho_{air}\ v^2 S}$ …….……..……..(3.26)

3.3 -le nombre de Reynolds (Tableau 1)

Le nombre de Reynolds caractérise un écoulement et en particulier la nature de son régime (laminaire, transitoire, turbulent etc. …). Il représente le rapport entre les forces d'inertie et les forces visqueuses. La viscosité d'un fluide est sa capacité à s'écouler, elle varie en fonction de la température du fluide ou des actions mécaniques auxquelles il est soumis. On distingue deux types de viscosité :

- la viscosité dynamique notée μ qui est le facteur de proportionnalité s'opposant au déplacement de deux plaques, séparés par le fluide, l'une par rapport à l'autre.
- la viscosité cinématique (notée η), qui est la viscosité dynamique divisée par la masse du volumique du fluide.

Le nombre de Reynolds Re se calcule grâce aux formules suivantes [16] :

$\boldsymbol{R_e = \frac{vD_H}{\eta}}$ ……(3.27)

Ou $R_e = \frac{vD_H\rho}{\mu}$……...…….……..……..(3.28)

Avec :

$D_H = \frac{4S}{P_m}$ (diamètre hydraulique) ……... (3.29)

v la vitesse du fluide en m. s^{-1}

D_H le diamètre hydraulique en m

η: la viscosité cinématique du fluide, en $m^2.s^{-1}$

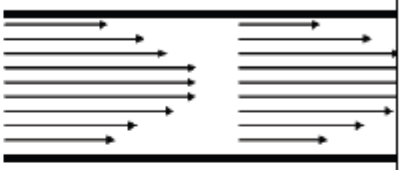
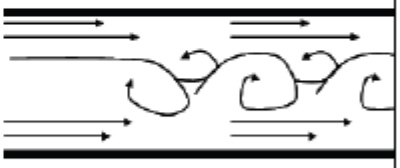
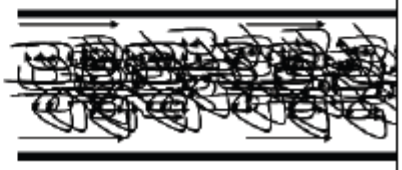
ρ: la masse volumique du fluide, en $kg.m^{-3}$

μ: la viscosité dynamique du fluide, en $kg.m^{-1}.s^{-1}$

S : la surface en m^2

P_m : le périmètre mouillé en m

Tableau 1 : Caractéristiques des écoulements visqueux en fonction du nombre de Reynolds [16].

Nombre de Reynolds	Type d'écoulement	Ecoulement d'un fluide visqueux dans une conduite
Re<2000	Laminaire	
2000<Re<6000	Transitionnel	
Re> 6000	Turbulent	

- **-Partie 2**

cette partie représente le coté expérimental qui se base sur les réalisations des expériences et essais (plaque, demi- cylindre, disque, sphère) .On a fait les calculs suivants :

-le profil de plaque (Tableau 2)

soit une plaque carrée de cotés et de dimensions suivantes :

L=20cm $S= a^2$ $S=0.04\ m^2$

Tableau 2 : Résultat de calcul pour le cas du profil de plaque

Tr /min	v (m/s)	Δh (m)	R_{By}	$R_{Ay}=F_p$ (N)	F_T(N)	C_P	C_T	Re
100	17.60	0.0019	0.08	0.1	0.105	0.011	0.01	495257.94
150	19.56	0.0024	0.25	0.18	0.32	0.018	0.030	550411.67
200	21.34	0.0030	0.41	0.33	0.53	0.028	0.045	600500.26
250	24.65	0.0039	0.60	0.54	0.78	0.034	0.060	693642.52
300	27.56	0.0048	0.81	0.71	1.06	0.039	0.069	775528.92
350	29.84	0.0057	1.33	1.03	1.74	0.044	0.071	839687.33
400	33.22	0.0071	1.54	1.38	2.02	0.048	0.073	934799.37
450	37.75	0.0091	1.83	1.6	2.40	0.047	0.075	1062272.01
500	41.29	0.010	2.4	2	3.15	0.045	0.077	1161886.39

RapportGratuit.com

-le profil de Demi – cylindre (Tableau 3)

Soit une Demi-cylindre de dimension suivante :

D = 10.5 cm L = 34.5 cm S=0.172m^2

Tableau 3 : Résultat de calcul pour le cas du profil demi-cylindre

tr/min	V(m/s)	Δh (m)	R_{By}	$R_{Ay}=F_p$(N)	F_T(N)	C_P	C_T	Re
100	17.60	0.0019	0.07	0.03	0.091	0.0087	0.0264	495257.94
150	19.56	0.0024	0.15	0.08	0.196	0.0188	0. 0461	550411.67
200	21.34	0.0030	0.27	0.15	0.354	0.0330	0.0700	600500.26
250	24.65	0.0039	0.40	0.20	0.524	0.0480	0.0777	693642.52
300	27.56	0.0048	0.59	0.50	0.774	0.0630	0.0918	775528.92
350	29.84	0.0057	0.77	0.80	1.010	0.0750	0.1021	839687.33
400	33.22	0.0071	0.90	1.03	1.181	0.0841	0.1030	934799.37
450	37.75	0.0091	1.2	1.40	1.575	0.0885	0.1050	1062272.01
500	41.29	0.010	1.36	1.68	1.785	0.0860	0.1090	1161886.39

-le profil de Disque (S) (Tableau 4)

Soit un Disque (S) de dimension suivante

D= 9 cm $S = \pi r^2$ S=0.0063 m^2

Tableau 4 : Résultat de calcul pour le cas du profil de disque (S)

tr /min	V(m/s)	Δh(m)	R_{By}	$R_{Ay}=F_p$(N)	F_T(N)	C_P	C_T	Re
100	17.60	0.0019	0.02	0.02	0.026	0.015	0.02	495257.94
150	19.56	0.0024	0.05	0.03	0.065	0.024	0.044	550411.67
200	21.34	0.0030	0.1	0.06	0.131	0.032	0.070	600500.26
250	24.65	0.0039	0.12	0.1	0.157	0.034	0.078	693642.52
300	27.56	0.0048	0.20	0.11	0.262	0.037	0.09	775528.92
350	29.84	0.0057	0.28	0.17	0.367	0.047	0.12	839687.33
400	33.22	0.0071	0.35	0.19	0.459	0.045	0.125	934799.37
450	37.75	0.0091	0.46	0.25	0.603	0.043	0.13	1062272.01
500	41.29	0.010	0.52	0.28	0.682	0.0355	0.128	1161886.39

-le profil de Disque (2S) (Tableau 5)

Soit un Disque (2S) de dimension suivante

D= 15cm $S = \pi r^2$ S = 0.018 m^2

Tableau 5 : Résultat de calcul pour le cas du profil de disque(2S)

tr/min	V(m/s)	Δh(m)	R_{By}	$R_{Ay}=F_p$(N)	F_T(N)	C_P	C_T	Re
100	17.60	0.0019	0.07	0.06	0.078	0.0167	0.078	495257.94
150	19.56	0.0024	0.15	0.1	0.019	0.0225	0.19	550411.67
200	21.34	0.0030	0.27	0.15	0.35	0.0284	0.35	600500.26
250	24.65	0.0039	0.47	0.28	0.61	0.0397	0.61	693642.52
300	27.56	0.0048	0.63	0.38	0.82	0.0446	0.82	775528.92
350	29.84	0.0057	0.82	0.51	1.07	0.0493	1.07	839687.33
400	33.22	0.0071	1.04	0.66	1.36	0.0515	1.36	934799.37
450	37.75	0.0091	1.26	0.68	1.65	0.0445	1.65	1062272.01
500	41.29	0.010	1.50	0.78	1.96	0.0394	1.73	1161886.39

-le profil de sphère (Tableau 6)

Soit une sphère de dimension suivante :

D = 11cm $S = 4\pi r^2$ S= 0.034 m^2

Tableau 6: Résultat de calcul pour le cas du profil de sphère

tr/min	V(m/s)	Δh(m)	R_{By}	F_p(N)	F_T(N)	C_P	C_T	Re
100	17.60	0.0019	0.02	0.02	0.026	0.0029	0.0038	495257.94
150	19.56	0.0024	0.03	0.04	0.039	0.0040	0.0050	550411.67
200	21.34	0.0030	0.07	0.07	0.091	0.0079	0.0091	600500.26
250	24.65	0.0039	0.10	0.11	0.131	0.0082	0.0098	693642.52
300	27.56	0.0048	0.14	0.14	0.183	0.0084	0.0108	775528.92
350	29.84	0.0057	0.20	0.18	0.262	0.0092	0.0134	839687.33
400	33.22	0.0071	0.27	0.24	0.354	0.0099	0.0146	934799.37
450	37.75	0.0091	0.33	0.27	0.433	0.0086	0.0138	1062272.01
500	41.29	0.010	0.37	0.32	0.485	0.0075	0.0129	1161886.39

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Chapitre 4
Résultats et discussions

4.1 Introduction :

Dans ce chapitre on a présenté les différentes représentations graphiques des profils étudiés (plaque, sphère, disque, demi –cylindre) pour faire une comparaison des différents paramètres (coefficients de trainée et de portance, le nombre de Reynolds et la vitesse) ainsi qui l'influence de chaque profile sur ces paramètres.

4.2 Le profil de plaque (fig 4.1 , fig 4.2 , fig 4.3 , fig 4.4 , fig 4.5)

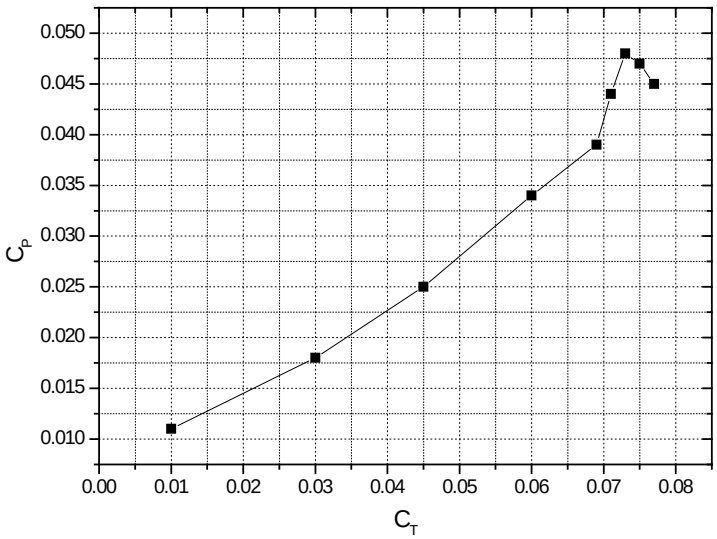


Figure 4.1 : Evolution de C_P en fonction de C_T .

La figure (4 .1) représente l'évolution de C_P en fonction de C_T .Une augmentation très rapide de C_P .On constate que le coefficient de portance maximale atteint une valeur de l'ordre de 0 ,045 avec un coefficient de trainée C_T égal à 0.072 ; puis une diminution de C_p car les filets fluides quittent le profil pour les grandes vitesses (phénomène de décrochage).

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

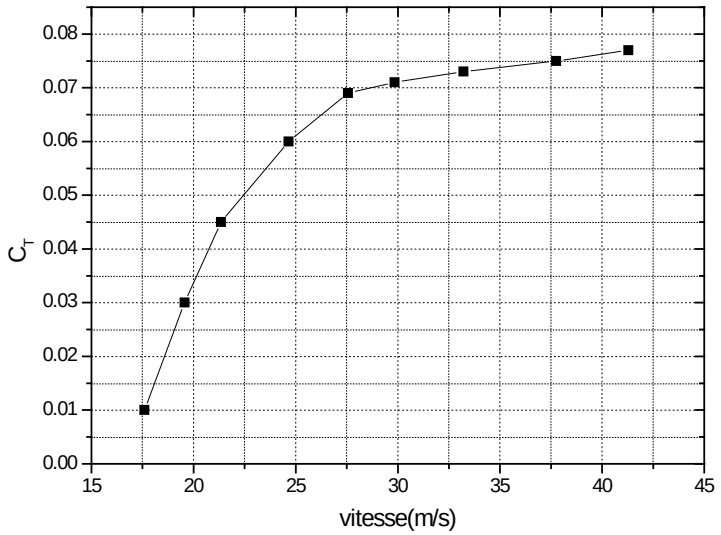


Figure 4.2 : Evolution de C_T en fonction de la vitesse

La figure (4.2) représente l'évolution de C_T en fonction de la vitesse. Le coefficient de trainée augmente en fonction de la vitesse jusqu'à atteindre une valeur maximale de 0 ,075 pour la vitesse de 4 3 m/s.

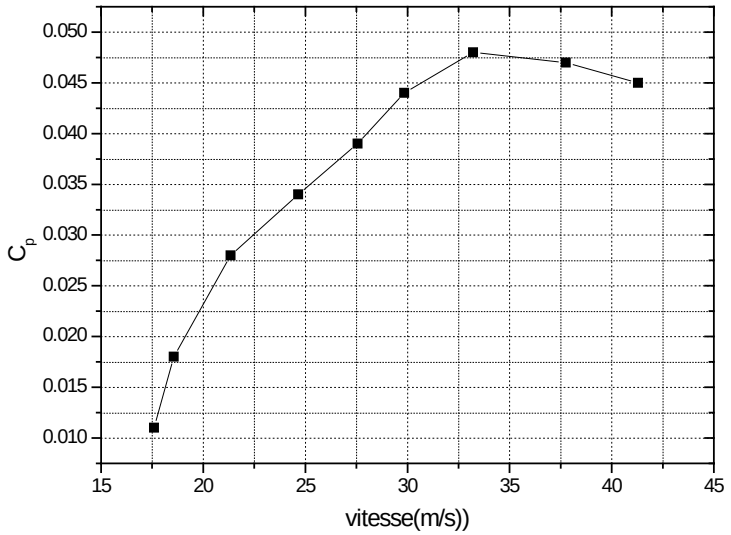


Figure 4.3: Evolution de C_P en fonction de la vitesse

La figure (4.3) représente l'évolution de C_P en fonction de la vitesse. Le coefficient de portance augmente en fonction de la vitesse jusqu'à attendre une valeur maximale de 0 ,046 pour la vitesse de 33 m/s.

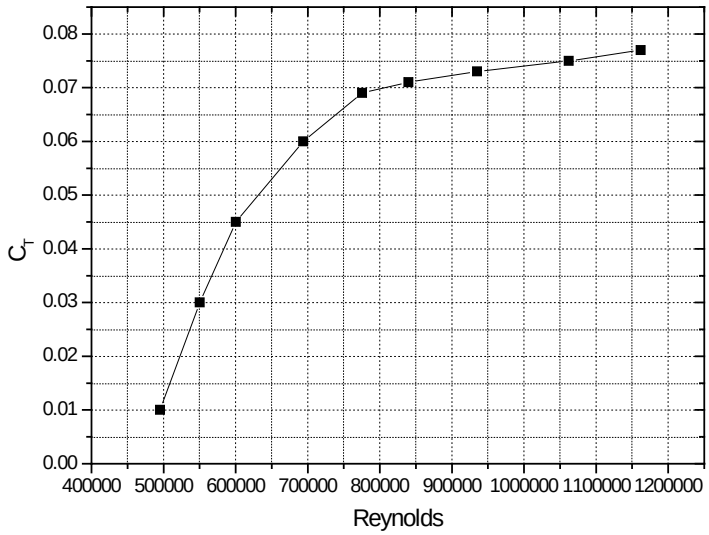


Figure 4.4 : Evolution de C_T en fonction de R_e

La figure (4.4) représente l'évolution de C_T en fonction de Reynolds. Le coefficient de trainée augmente avec le nombre de Reynolds et se stabilise autour de $C_{T=}0.07$ jusqu'à atteindre sa valeur maximale de l'ordre de 0 ,075.

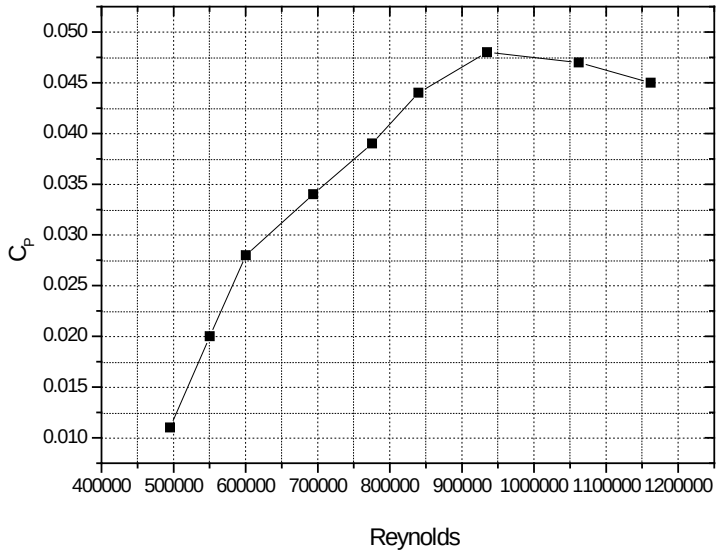


Figure 4.5 : Evolution de C_P en fonction de R_e

La figure(4,5) représente l'évolution de C_P en fonction de R_e. Le coefficient de portance augmente avec l'augmentation du nombre de Reynolds jusqu'à sa valeur maximale égale à 0.046.

4.3 Le profil Demi – cylindre (fig4.6 ,fig4.7 ,fig4.8 ,fig4.9 ,fig4.10)

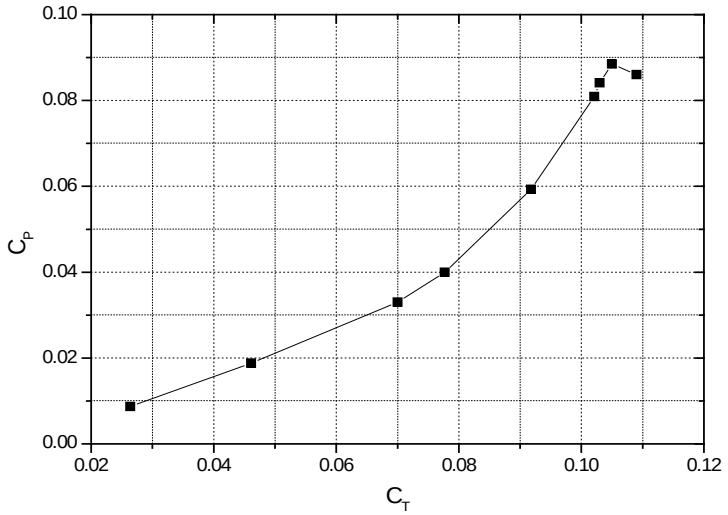


Figure 4.6 : Evolution de C_P en fonction de C_T

La figure (4.6) représente l'évolution de C_P en fonction de C_T . On remarque sur ce graphe une augmentation de C_p jusqu'à atteindre une valeur maximale de 0,085 pour C_T égale à 0,109 ; puis une diminution de C_p car les filets fluides quittent le profil pour les grandes vitesses (phénomène de décrochage). .

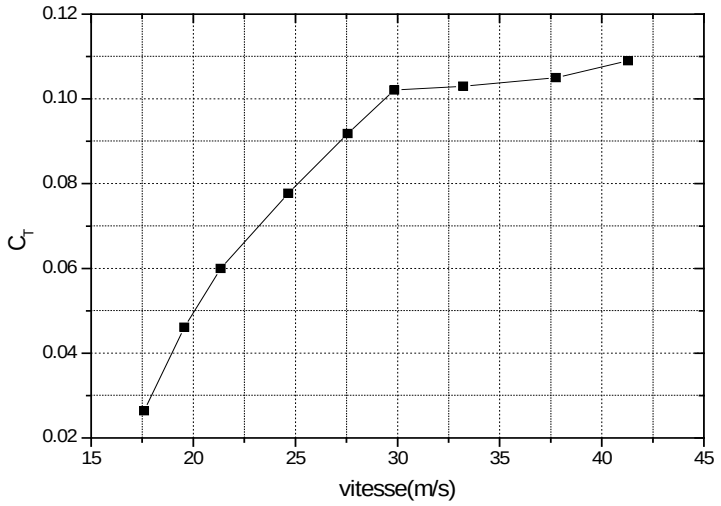


Figure 4.7 : Evolution de C_T en fonction de la vitesse

La figure (4 .7) représente l'évolution de C_T en fonction de la vitesse .Le coefficient de trainée augmente rapidement en fonction de la vitesse jusqu'à atteindre une valeur de 0,1021 pour une vitesse égale à 30 m/s puis elle se stabilise autour de celle ci.

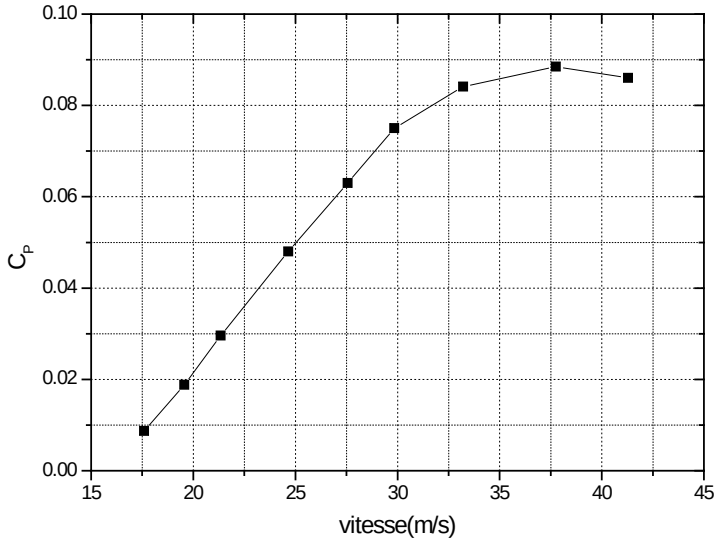


Figure 4.8 : Evolution de C_p en fonction de la vitesse

La figure (4 ,8) représente l'évolution de C_p en fonction de la vitesse .Le coefficient de portance augmente en fonction de la vitesse jusqu'à atteindre une valeur de 0.0809 pour une vitesse égale à 30 m/s ; puis elle se stabilise légèrement .

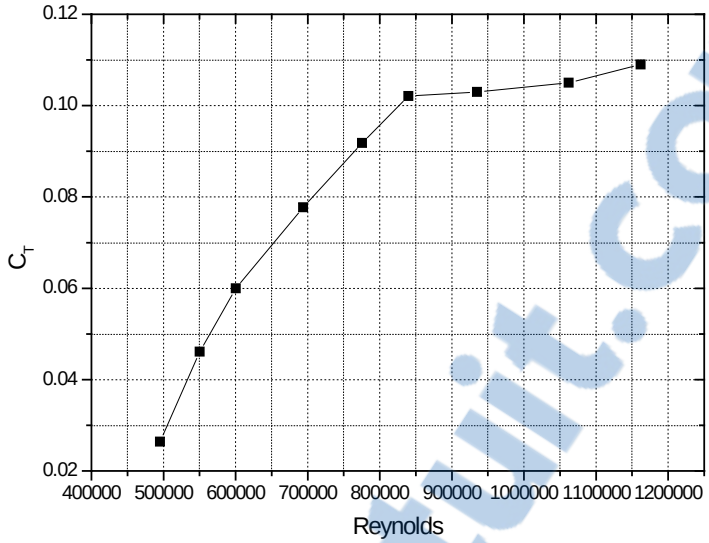


Figure 4.9 : Evolution de C_T en fonction de R_e

La figure (4,9) représente l'évolution de C_T en fonction de R_e. Le coefficient de trainée augmente avec le nombre de Reynolds et se stabilise autour d'une valeur égale a 0,1021 jusqu'à la valeur de 0,11.

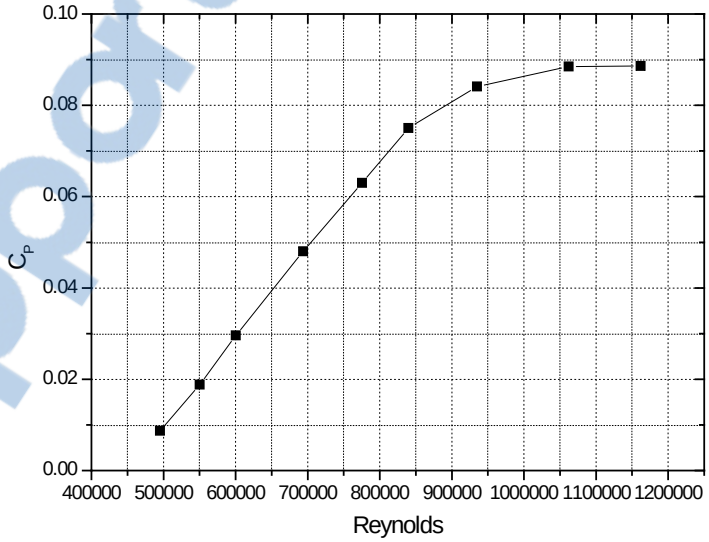


Figure 4.10 : Evolution de C_P en fonction de R_e

Rapport-Gratuit.com

La figure (4.10) représente l'évolution de C_P en fonction de R_e . Le coefficient de portance augmente avec le nombre de Reynolds .

4.4 Le profil Disque (S) (fig4.11, fig4.12, fig4.13, fig4.14, fig4.15)

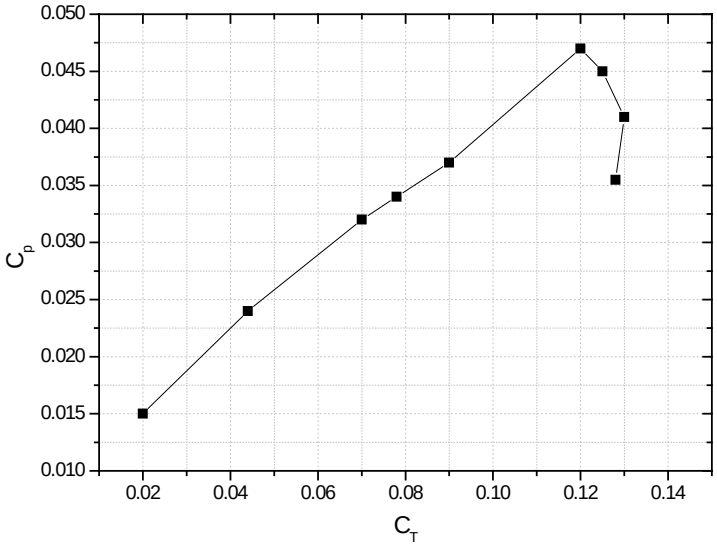


Figure 4.11 : Evolution de C_P en fonction de C_T.

La variation de coefficient de portance est montrée sur la figure (4 .11). On remarque sur ce graphe, une augmentation de C_P jusqu'à atteindre une valeur maximale égale 0.048 qui correspond à une valeur du coefficient de trainée égale à 0.12, suivie directement une diminution de C_P car les filets fluides quittent le profil pour les grande vitesses (phénomène de décrochage). .

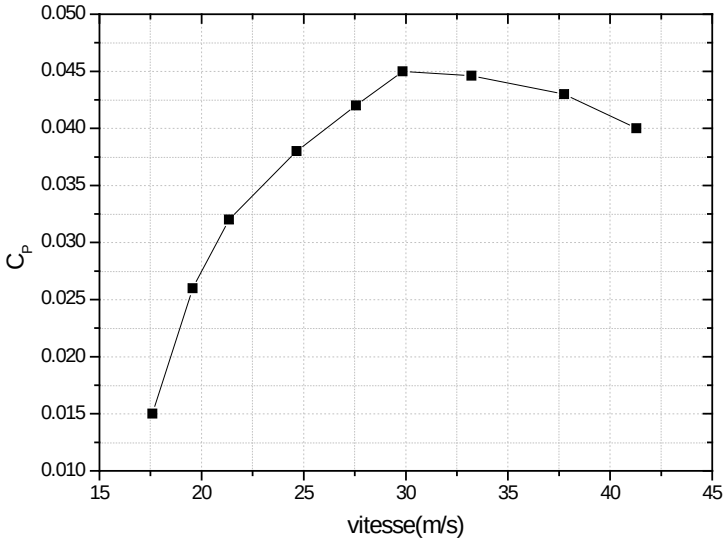


Figure 4.12 : Evolution de C_P en fonction de vitesse.

La figure (4,12) représente l'évolution du coefficient de portance en fonction de la vitesse. Le coefficient de portance augmente en fonction de la vitesse jusqu' à une valeur maximale de 0 ,045 pour une vitesse de 30 m /s, ensuite le C_P diminue jusqu'à atteindre une valeur de 0,04 ce qui correspond à une vitesse égale de 43m/s.

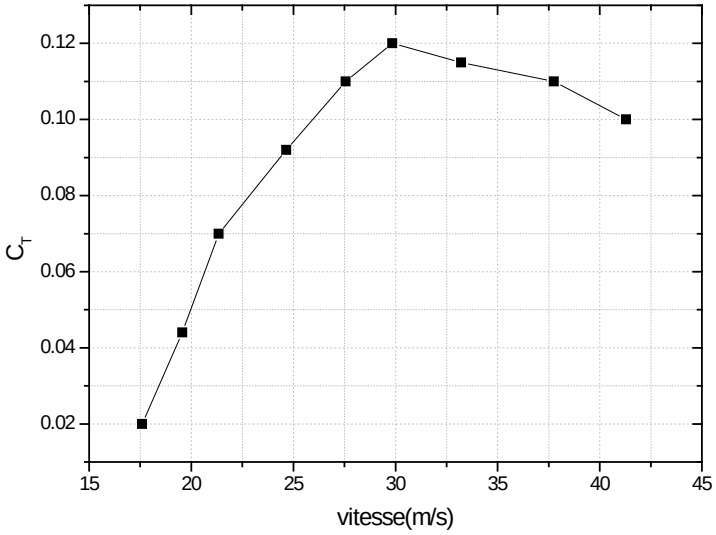


Figure 4.13 : Evolution de C_T en fonction de vitesse.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

La figure (4.13) représente l'évolution du coefficient de trainée en fonction de la vitesse. Le coefficient de trainée augmente en fonction de la vitesse jusqu' à atteindre une valeur maximale de 0 ,12 pour une vitesse de 30 m/s puis diminue légèrement.

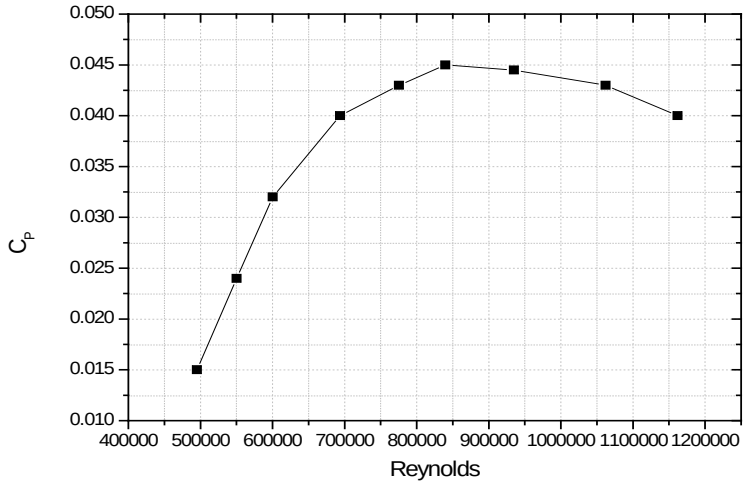


Figure 4.14 : Evolution de C_P en fonction de R_e

La figure (4.14) représente l'évolution de C_P en fonction de R_e .Le coefficient de portance augmente avec le nombre de Reynolds, et diminue légèrement jusqu'à atteindre la valeur de 0,045.

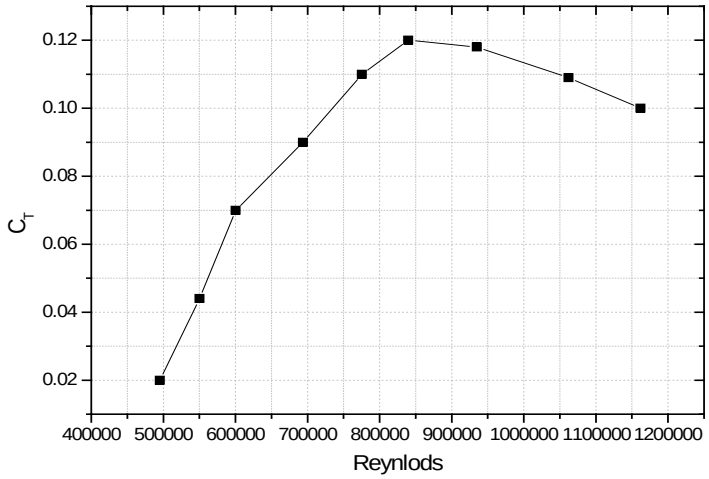


Figure 4.15 : Evolution de C_T en fonction de R_e .

La figure (4.15) représente l'évolution de C_T en fonction de R_e . Le coefficient de trainée augmente avec le nombre de Reynolds jusqu'à atteindre une valeur maximale 0,12.

4.5 Le profil de Disque (2S) (fig4.16 ,fig4.17,fig4.18 ,fig4.19 ,fig4.20)

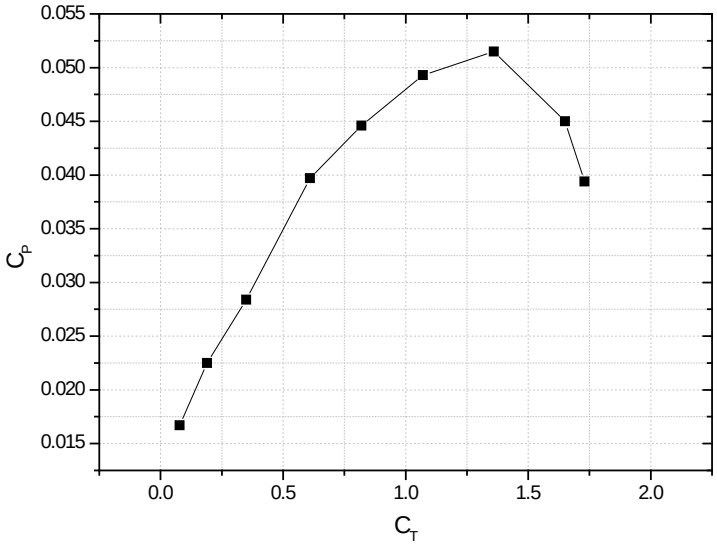


Figure 4.16 : Evolution de C_P en fonction de C_T

La variation du coefficient de portance est montrée sur la figure (4 ,16). On remarque sur ce graphe, une augmentation de C_P jusqu'à atteindre une valeur maximale égale 0,051 et cela pour la valeur de coefficient de trainée égale à 1,3 ,suivie directement par une diminution de C_P car à cette vitesse , les filets fluides quittent le profil pour les grandes vitesses (Phénomène de décrochage). .

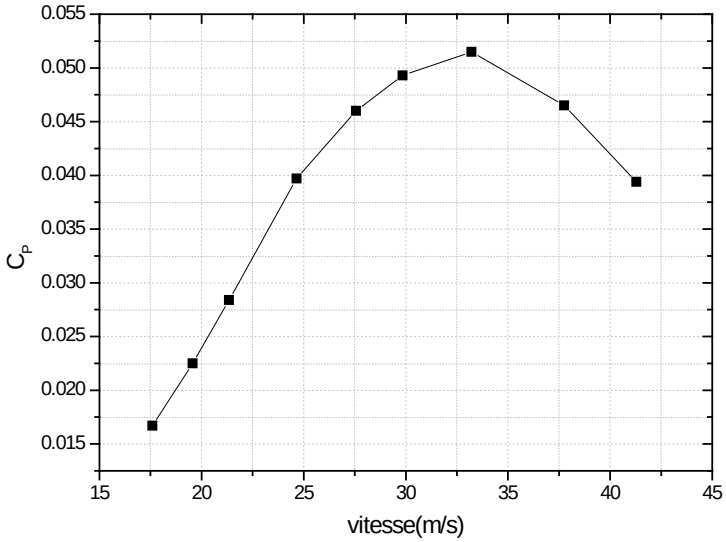


Figure 4.17 : Evolution de C_P en fonction de la vitesse

La figure (4.17) représente l'évolution du coefficient de portance en fonction de la vitesse . Le coefficient de portance augmente en fonction de la vitesse jusqu'à une valeur maximale de 0 ,053 pour une vitesse de 33 m /s .Ensuite le C_P diminue jusqu'à atteindre une valeur de 0,039 pour une vitesse de 42m/s car les filets fluides quittent le profil.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

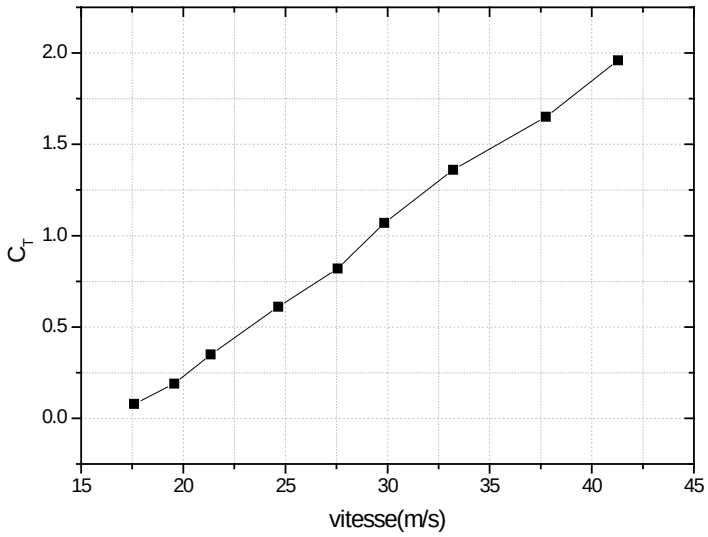


Figure 4.18 : Evolution de C_T en fonction de la vitesse

La figure(4.18) représente l'évolution de coefficient de trainée en fonction de la vitesse .

Le coefficient de trainée augmente en fonction de la vitesse jusqu' à une valeur maximale de C_T= 2 , pour une vitesse de 43 m/s .

.

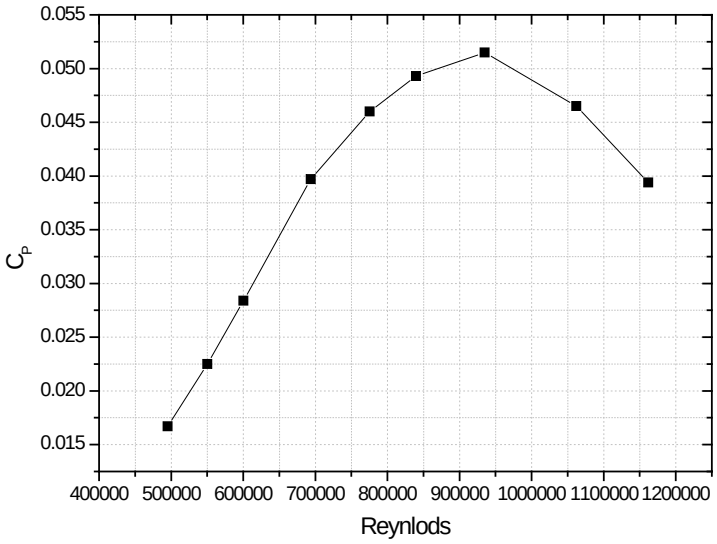


Figure 4.19 : Evolution de C_P en fonction de Re.

La figure (4.19) représente l'évolution de C_P en fonction de R_e . Le coefficient de portance augmente avec le nombre de Reynolds jusqu'à une valeur maximale de 0,051 ,et puis diminue légèrement jusqu'à atteindre la valeur de 0,040 .

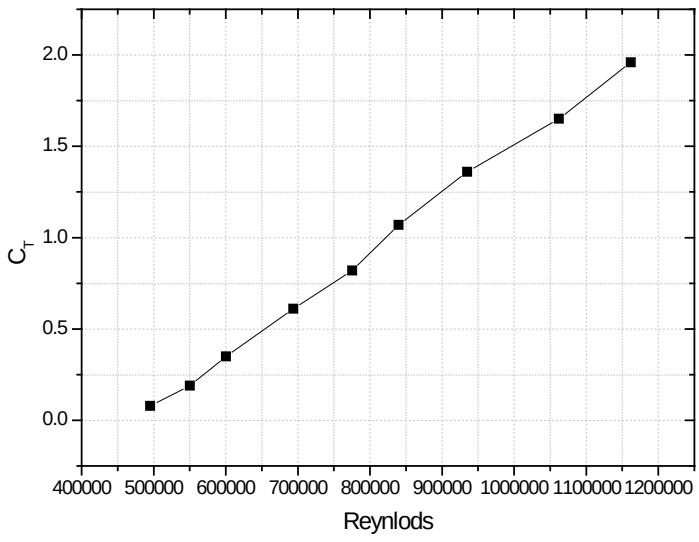


Figure 4.20 : Evolution de C_T en fonction de Re

La figure (4,20) représente l'évolution de C_T en fonction de Reynolds. Le coefficient de trainée augmente avec le nombre de Reynolds jusqu'à une valeur maximale de l'ordre de 2.

4.6 Le profil de sphère (fig4.21, fig4.22,fig4.23 , fig4.24 ,fig4.25)

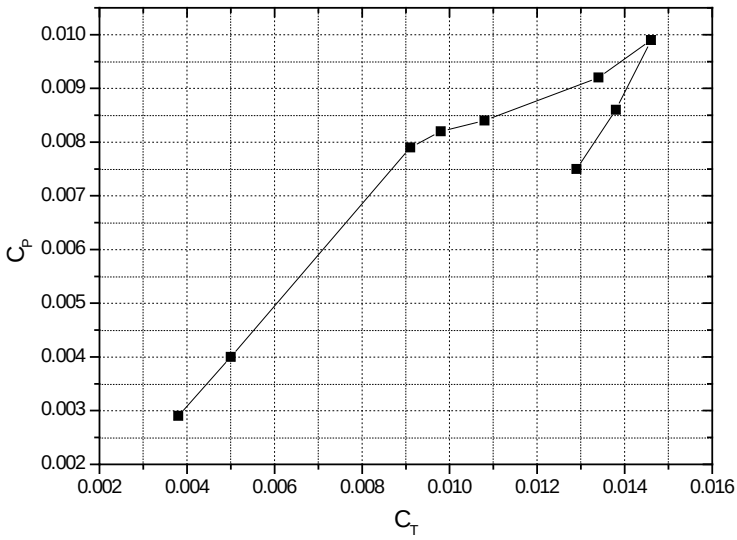


Figure 4.21 : Evolution de C_P en fonction de C_T.

La figure (4.21) représente l'évolution de C_P en fonction de C_T . On constate que le coefficient de portance maximale atteint une valeur de l'ordre de 0 ,0099. On remarque une diminution de la valeur de C_P car les filets fluides quittent le profil pour les grandes vitesses (phénomène de décrochage). .

.

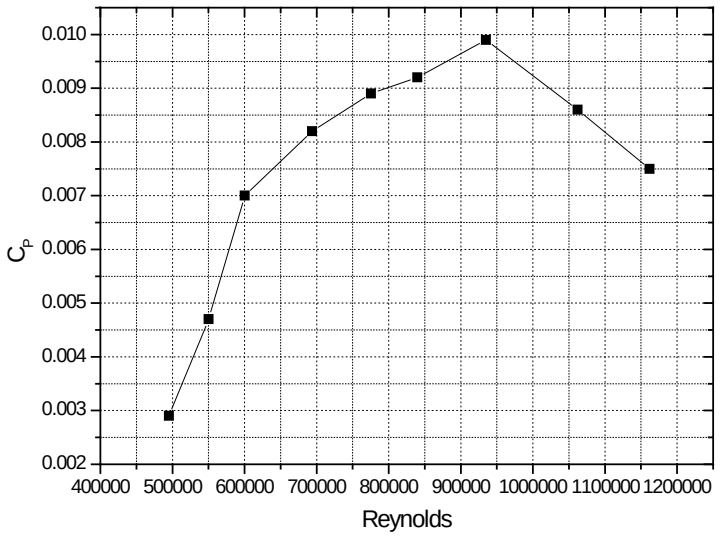


Figure 4.22 : Evolution de C_P en fonction de R_e

La figure (4.22) représente l'évolution de C_P en fonction de R_e . Le coefficient de portance augmente avec le nombre de Reynolds jusqu'à une valeur maximale de 0.0099, puis elle diminue légèrement jusqu'à atteindre la valeur de 0,0075

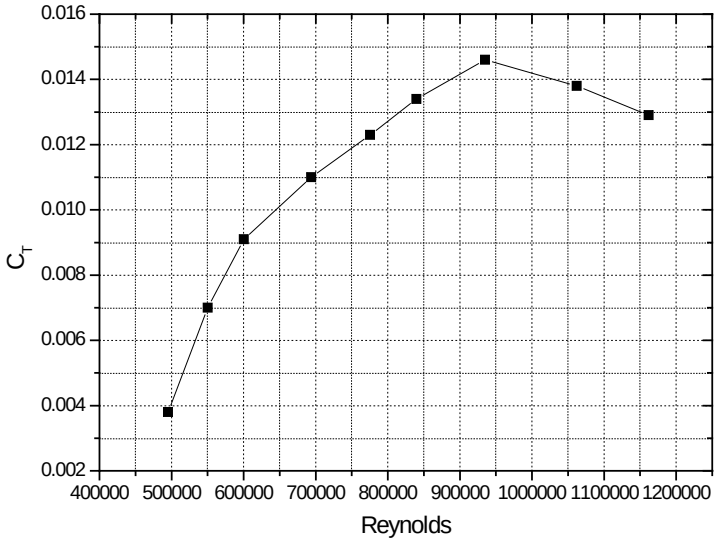


Figure 4.23: Evolution de C_T en fonction de R_e

La figure (4.23) représente l'évolution de C_T en fonction de R_e. On constate que le coefficient de trainée maximale atteint une valeur de l'ordre de 0 ,0146 . Le coefficient de trainée augmente avec le nombre de Reynolds.

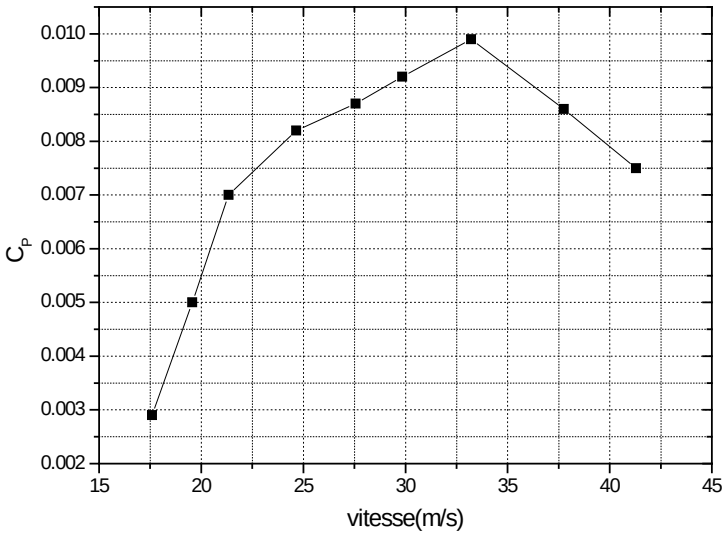


Figure 4.24 : Evolution de C_P en fonction de la vitesse

La figure (4.24) représente l'évolution de C_P en fonction de R_e. On constate une augmentation très rapide de C_P pour atteindre une valeur de l'ordre de 0 ,0099 à une vitesse de 33 m/s .

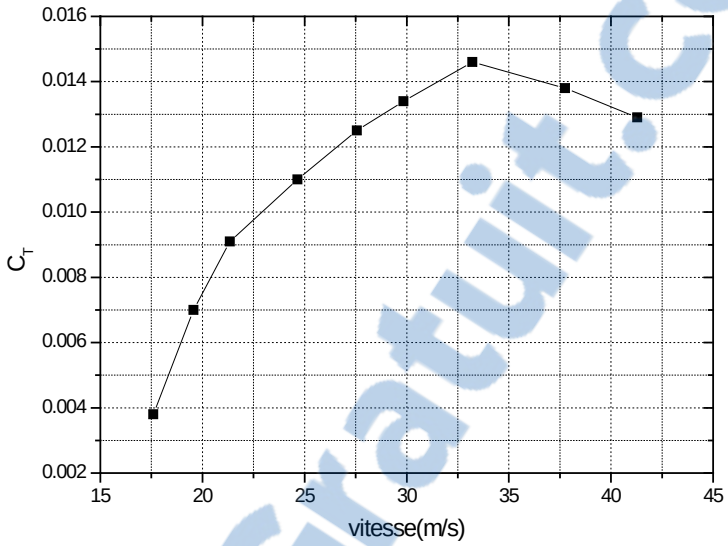


Figure 4.25 : Evolution de C_T en fonction de la vitesse.

La figure (4.25) représente l'évolution de C_T en fonction de la vitesse. On constate que le coefficient de trainée maximale augmente pour atteindre une valeur de l'ordre de 0 ,0146 à une vitesse de 33,22 m/s .

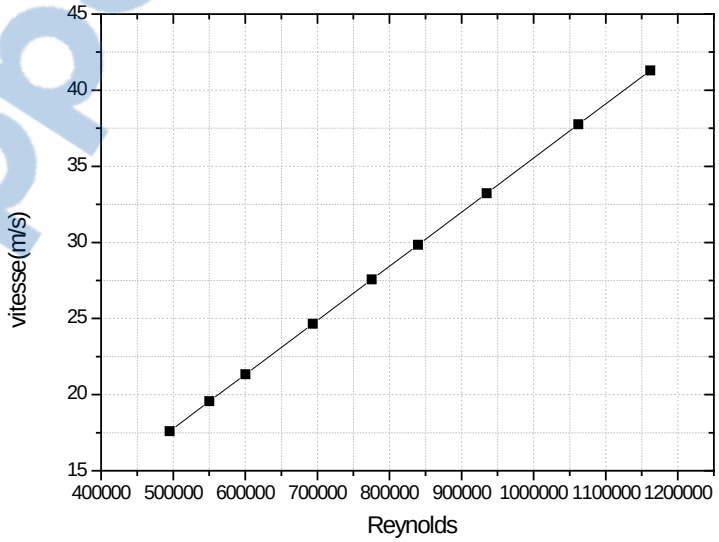


Figure 4.26 : Evolution de vitesse en fonction de R_e

Rapport-Gratuit.com

La figure représente l'évolution de vitesse en fonction de R_e ,Une augmentation très rapide de allure suivant une droite. On remarque que les deux fonctions sont proportionnelles l'un a l'autre

Conclusion :

- on remarque que le nombre de Reynolds et la vitesse sont proportionnelles.
- les coefficients de portance et de trainée sont différents dans chacun des profils.
- les valeurs importantes des deux coefficients ont étaient soulevées pour les profils.
- Dans la comparaison entre les profils disque(S) et disque (2S), on remarque que Lorsqu' on a un profil de surface importante nous obtenons une trainée plus élevée
- Quand en augmente la vitesse le régime va changer
- Quand la portance augmente la trainée diminue
- Pour la comparaison entre les deux profils demi-cylindre et la sphère, on remarque que la sphère acquit des faibles coefficients de portance et de trainée , par contre le profil demi-cylindre acquit à un résultat élevé du coefficient de portance et de trainée
- Dans le régime turbulent les files des fluides quittent la surface de profil
- Enfin , on conclut que la structure de profil joue un rôle très important dans le comportement des forces de trainée et de portance.

Conclusion générale

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Conclusion générale

A la lumière de ce que nous avons vu, le travail réalisé s'articule dans sa totalité sur des prélèvements expérimentaux des valeurs des forces de traînée et de portance, sur différents profils à savoir: une surface plaque, une sphère, un demi-cylindre et deux disques de différents diamètres.

Les travaux ont été réalisés sur une soufflerie fabriquée localement au sein de notre université (Aboubekr Belkaid) qui d'un côté, sera utile pour les futurs étudiants pour réaliser et voir le comportement des profils exposés à un écoulement d'air et d'un autre côté, nous a permis d'initier un travail rédigé dans ce mémoire dans lequel l'étude balaie l'ensemble des constituants et de cette soufflerie, représentés par:

- Une veine d'entrée (un collecteur sous forme de convergent)
- Une veine d'essais appelée aussi section de travail
- Un canal à la sortie (le diffuseur).
- Le ventilateur axial servant à circuler le fluide.

Toutes ces expérience être significatif et qu'il propose les caractéristiques liées au profil de chaque élément, en prenant en compte le but souligné. La réalisation dans cette étude expérimentale exige d'abord, de prendre le traitement de chaque élément a part et de mettre en évidence, les caractéristiques aérodynamiques de l'écoulement dans la section de travail de la soufflerie ont été mesure et/ou les calcule, (**la vitesse**, la portance , la trainée , puis les coefficient de trainée , de portance , le nombre de Reynolds) On a introduit pour chaque élément

La vitesse est mesurée par un tube sous forme de U rempli par pour pouvoir appliquer le théorème de Bernoulli. Pour vérifier la validité de ces vitesses, de nouvelles valeurs ont été relevées par un anémomètre à fil chaud de marque Testo 425 prêté par le laboratoire des énergies renouvelables ETAP de notre département. Le calcul des efforts de trainée et de portance est effectué par le biais d'un système physique constitué de deux bras appuyés chacun sur une balance pour afficher à la fin une masse.

L'utilisation du système à l'état statique avec les valeurs des deux masses relevées, nous a permis de déduire les deux forces (de traînée et de portance) ainsi que leurs coefficients.

Enfin, les résultats relevés et calculés sont représentés sous forme de tableaux et de graphes dans les deux derniers chapitres et on a comparai pour chaque profil

Perspectives :

Je propose aux futurs étudiants de développer le système en introduisant un balancier électronique dans la mesure du possible et d'élargir les travaux sur les profils NACAxxx réalisés par une matière légère (la fibre de verre), qui de nos jours est disponible et moins chère.

Références bibliographiques

[1] M .Jeaun –paul lemarquis ,ing,M.Patrice remy ,ing -8 avril 2014 Conception et réalisation du sous –système « génération d'un flux d'air » d'une soufflerie artisanale éducative

[3] Gérard Hartmann, « Aérodynamique : les travaux de M. Eiffel » [archive] (consulté le 7 janvier 2016)

[4] Prandtl, « *Tragflügeltheorie I* », Mitteilungen und Nachr. der königlichen Gesellschaft der Wissenschaft en zu

[5] ıdtl, « *Über die Härte plastischer Körper* », Nachr. der kön. Ges. der Wiss. zu Göttingen (Math.-phys. Kl.)

[6] L. Prandtl, *« Über die Eindringungsfestigkeit plastischer Baustoffe und die Festigkeit von Schneiden »*, Zeitschrift für angewandte Mathematik und Mechanik, vol. 1

[7] Ernst Klee, Das Personenlexikon zum Dritten Reich. Wer war was vor und nach 1945, Francfort-sur-le-Main, Fischer Taschenbuch Verlag, 2005, 2e edition . (ISBN 978-3-596-16048-8)

[12] Olimpiades de physique 2006 /2007 ,une soufflerie au lycée

Sylvain champonnois , « les Wright et l'armée française :les débuts de l'aviation militaire

[13] (1900-1909) » ,in revue historique des armés ,n°255 ,service historique de la défense ,2009 ,p.108-121

[14] M.Salim HAMDIA :Conception d'une soufflerie subsonique ,juin 2012

[15] Chauffardon christopher ,le colleter quentin ,poyet amoud ,l'aile d'avion Lycée jean monnet annemasse

[16] Akimaro kawahara ,michio sadatomi ,hiroyuki kudo et keiko kano (2006)

[2] https://fr.wikipedia.org/wiki/George_Cayley

[8] http://www2.istp.org/StudentsCorner/StudentsCorner2001_2002/8thGrade/SiteWebTechnoJuin2002/Cameron/Pages_Web/Histoire_Hommes.html

[9] https://fr.wikipedia.org/wiki/Soufflerie

[10] http://pw1949.blogspot.com/2013/08/ pourquoi-des-souffleries.html

[11] http://pw1949.blogspot.com/2013/08/quest-ce-quune-soufflerie.html²

[17] https://fr.wikipedia.org/wiki/Th%C3%A9or%C3%A8me_de_Bernoulli

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES