

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DU GENIE DE LA CONSTRUCTION
DEPARTEMENT DU GENIE MECANIQUE

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME
DE MASTER PROFESSIONNEL EN GENIE MECANIQUE
OPTION: FROID CHAUFFAGE ET CLIMATISATION

Etude et réalisation d'un anémomètre à coupelles

Proposé et dirigé par :

Mr. NEBBALI.R

Présenté par :

KACI Wahab

LOUNAS Mohamed Amine

Promotion : 2019 / 2020

Remerciement

On remercie Dieu tout puissant de nous avoir donné la force et le courage d'aller au bout de ce travail.

On tient à exprimer notre sincère gratitude à Monsieur REZKI NEBBALI, qui a accepté de diriger ce mémoire. Pour l'intérêt porté à notre travail, sa disponibilité, ses conseils précieux, et surtout sa grande patience, qu'il veuille bien trouver ici nos vifs remerciements, l'expression de notre profonde reconnaissance et de notre sincère considération.

On remercie les membres de jury qui ont bien voulu accepter de juger notre travail.

Enfin, nous remercions tous ceux qui ont apportés leurs contributions de près ou de loin.

Dédicaces

A mon père,

' L'épaule solide, l'œil attentif compréhensif et la personne la plus digne de mon estime et de mon respect.

Aucun dédicace ne serait exprimer mes sentiments, que Dieu te préserve et te procure santé et longue vie.'

A ma mère,

' Tu m'as donné la vie, la tendresse et le courage pour réussir.

Tout ce que je peux t'offrir ne pourra exprimer l'amour et la reconnaissance que je te porte.

En témoignage, je t'offre ce modeste travail pour te remercier pour tes sacrifices et pour l'affection dont tu m'as toujours entourée.'

A mes grands-parents,

A mon frère,

A mes sœurs,

A ma famille,

A mes amis ...

LOUNAS Mohamed Amine

Dédicaces

Ce modeste travail est d'abord dédié à mes parents

Mon père

Qui est pour moi un exemple et un modèle à suivre. Sans lui, je ne serais jamais arrivé ici.

Ma mère

Ma douce et tendre mère. Quoi que je fasse, je ne peux pas vous rendre ce que vous avez fait pour moi. Si je suis arrivé ici, c'est grâce à vous.

Puisse Allah vous donner tous les deux une longue vie et vous protéger pour moi.

Ma grande mère, mes sœurs, oncles, tantes et à tous les membres de ma grande famille.

À tous mes amis. À tous ceux qui m'ont aidé durant ma formation.

KACI Wahab

Sommaire

Sommaire

Introduction générale.....	1
-----------------------------------	----------

Chapitre I: Généralités sur les anémomètres

1. Introduction.....	3
2. Définition de l'anémomètre.....	3
3. Types d'anémomètres.....	3
3-1. Anémomètres à pression.....	3
3.1.1. Anémomètre à plaque.....	3
3.1.2. Anémomètre à boule.....	4
3.1.3. Anémomètre à tube.....	5
3.1.4. Anémomètre à tube de Pitot.....	5
3.2. Anémomètres à vitesse.....	6
3.2.1. Anémomètre à fil chaud.....	6
3.2.2. Anémomètre à ultrason.....	8
3.2.3. Anémomètre à laser.....	9
3.2.4. Anémomètre à hélice.....	10
3.2.5. Anémomètre à coupelles.....	10
4. Conclusion.....	12

Chapitre II: Étude expérimentale

1. introduction.....	13
2. Réalisation de l'anémomètre à coupelles.....	13
2.1. Conception des coupelles	13
2.2. Réalisation d'un arbre de transmission.....	14

2.3. Montage d'un roulement sur l'arbre.....	15
2.3.1. Composants et types de roulement.....	15
2.3.2-Charges supportées par les roulements.....	16
a) Charge radiale (F_r).....	16
b) Charge axiale (F_a).....	16
c) Charge combinée (F).....	16
2.3.3. Couple de frottement pour un roulement non lubrifié (C_f).....	17
2.4. Réalisation de la chemise.....	18
2.5. Dispositif expérimental.....	19
3. La soufflerie.....	20
3.1. Composants de la soufflerie.....	22
3.2. Les caractéristiques de la soufflerie.....	22
3.3. Les moyens de mesure.....	22
3.3.1. Tube de Pitot.....	22
3.3.2. Multi-manomètre.....	23
4. Résultats obtenus en soufflerie.....	25
5. Etalonnage de l'anémomètre.....	28
6. Conclusion.....	29

Chapitre III: Simulation numérique

1. Introduction.....	30
2. Principe de la méthode des volumes finis.....	30
3. Présentation de GAMBIT.....	30

3.1. Préparation de la géométrie et maillage.....	31
3.1.1. Création de la géométrie.....	31
3.1.2. Choix du type de maillage.....	33
3.1.2.1 Maillage structuré.....	33
3.1.2.2. Maillage non structuré.....	34
3.1.2.3. Maillage hybride (mixte).....	34
3.1.3. Enregistrer et exporter.....	37
4. Présentation de FLUENT.....	37
4.1. Principales étapes de simulation sous Fluent.....	37
5. Résultats et interprétation.....	44
6. Couple appliquée sur la coupelle.....	46
7. Calcul de la vitesse de rotation des coupelles de l'anémomètre.....	47
7.1. Moment d'inertie.....	47
7.2. Organigramme de calcul.....	49
8. Résultats.....	51
9. Comparaison entre valeurs calculées et mesurées.....	53
Conclusion générale	55

Chapitre I :

Figure (I-1): Principe d'anémomètre à plaque.....	4
Figure (I-2): Anémomètre à boule.....	4
Figure (I-3): Principe de l'anémomètre à tube.....	5
Figure (I-4): Schéma de fonctionnement d'un anémomètre à tube de Pitot.....	5
Figure (I-5): Anémomètre à tube de Pitot.....	6
Figure (I-6): Principe de fonctionnement d'un anémomètre à fil chaud.....	7
Figure (I-7) : Anémomètre à fil chaud.....	7
Figure (I-8): Schéma de principe de fonctionnement.....	8
Figure (I-9): Anémomètre à ultrason.....	8
Figure (I-10): Configuration générale d'un anémomètre laser.....	9
Figure (I-11): Anémomètre à laser.....	9
Figure (I-12) : Anémomètre à hélice.....	10
Figure (I-13) : Anémomètre à coupelles à trois coniques.....	11
Figure (I-14) : Anémomètres à coupelles à trois demi-sphères.....	12

Chapitre II :

Figure (II-1): Les coupelles hémisphériques.....	13
Figure (II-2): Tour conventionnel.....	14
Figure (II-3): Epaulement sur l'arbre.....	14
Figure (II-4): Rainures pour fixation du roulement.....	14
Figure (II-5): Représentation des éléments constituant un roulement.....	15
Figure (II-6): Charges supportées par un roulement.....	16

Figure (II-7): Montage d'un roulement.....	17
Figure (II-8): Chemise de couverture.....	18
Figure (II-9): Anémomètre à coupelles.....	19
Figure (II-10): Capteur de vitesse (tachymètre).....	19
Figure (II-11): Principe de fonctionnement d'un tachymètre.....	20
Figure (II-12): Soufflerie subsonique.....	21
Figure (II-13): Anémomètre à coupelles placé dans la soufflerie.....	21
Figure (II-14): Les composants de la soufflerie.....	22
Figure (II-15): Multi-manomètre du laboratoire.....	24
Figure (II-16): Evolution de la vitesse de rotation au cours du temps pour 10 m/s.....	26
Figure (II-17): Evolution de la vitesse de rotation au cours du temps pour 15 m/s.....	26
Figure (II-18): Evolution de la vitesse de rotation au cours du temps pour 20 m/s.....	27
Figure (II-19): Evolution de la vitesse de rotation au cours du temps pour 25 m/s.....	27
Figure (II-20): Evolution de la vitesse de rotation au cours du temps pour 30 m/s.....	28
Figure (II-21): Courbe d'étalonnage de l'anémomètre à coupelles.....	28

Chapitre III :

Figure (III-1): Interface de GAMBIT.....	31
Figure (III-2): Création de la géométrie sur GAMBIT.....	33
Figure (III-3): Les trois types de maillages.....	34
Figure (III-4): Maillage de la géométrie.....	35
Figure (III-5): Type de résolution.....	38

Figure (III-6): Importation de la géométrie générée sous Gambit.....	38
Figure (III-7): Définition des caractéristiques du fluide.....	40
Figure (III-8): Valeurs des conditions aux limites.....	41
Figure (III-9): Allures de l'évolution des résidus de calcul.....	42
Figure (III-10): valeurs de référence.....	43
Figure (III-11): Force appliquée sur la coupelle.....	44
Figure (III-12): Evolution de coefficient de poussée C_p en fonction de l'angle Θ pour les différentes vitesses d'air.....	45
Figure (III-13): Courbes de tendances associées aux intensités de forces par apport à l'angle d'incidence.....	45
Figure (III-14): Forces appliquées sur l'anémomètre à coupelles.....	46
Figure (III-15): La direction de la vitesse relative V_r	47
Figure (III-16): Moments d'inertie de quelques solides usuels.....	48
Figure (III-17): Organigramme de calcul de la vitesse de rotation.....	50
Figure (III-18): Evolution de la vitesse de rotation au cours du temps pour une vitesse d'air de 10m/s.....	51
Figure (III-19): Evolution de la vitesse de rotation au cours du temps pour une vitesse d'air de 15m/s.....	51
Figure (III-20): Evolution de la vitesse de rotation au cours du temps pour une vitesse d'air de 20m/s.....	52
Figure (III-21): Evolution de la vitesse de rotation au cours du temps pour une vitesse d'air de 25m/s.....	52
Figure (III-22): Evolution de la vitesse de rotation au cours du temps pour une vitesse d'air de 30m/s.....	53
Figure (III-23): Comparaison des résultats expérimentaux et numérique pour la vitesse de rotation.....	54

Liste des tableaux

Tableau (II.1) : Mesure de la vitesse d'air en fonction de la différence des hauteurs.....	25
Tableau (II.2) : Vitesse de rotation des coupelles en fonction de la vitesse d'air.....	25
Tableau (III.1) : Vitesse de rotation des coupelles mesurées et calculées.....	53

Symboles	Désignations	Unités
C_f	Couple de frottement.	(N.m)
ω	Vitesse de rotation.	(tr/s)
P_A	Pression au point A entrée du convergent	(Pa)
P_B	Pression au point B section de travail	(Pa)
V_A	Vitesse de l'air au point	(m/s)
V_B	Vitesse de l'air au point B	(m/s)
z_A	Altitude au point A	(m)
z_B	Altitude au point B	(m)
ρ_{air}	Masse volumique de l'air	(kg/m ³)
ρ_{huile}	Masse volumique de l'huile	(kg/m ³)
g	Gravité	(m/s ²)
z_C	Altitude au point C	(m)
z_D	Altitude au point D	(m)
V	Vitesse d'écoulement	(m/s)
F_p	Force de poussée	(N)
C	Couple appliquée sur la coupelle	(N.m)
F	Force	(N)
R_1	Bras de levier.	(m)
S	Section droite de la coupelle	(m ²)
r	Rayon du cercle décrit par le centre des coupelles	(m)
r_c	Rayon de la coupelle	(m)
V_r	Vitesse relative.	(m/s)
Θ	Angle d'incidence	(rad)
I_d	Moment d'inertie	(kg.m ²)
$\dot{\theta}$	Vitesse angulaire	(rad/s)

$\ddot{\theta}$	Accélération angulaire	(rad/s ²)
t	Temps	(s)
Δt	Pas du temps	(s)

Nombres adimensionnels

- α Coefficient de frottement d'un roulement.
- C_p Coefficient de poussée.

Introduction générale

Introduction générale

Le vent est une force naturelle dont l'origine repose sur des mécanismes atmosphériques qui provoquent des différences de pression, ce qui met l'air en mouvement. Ces mouvements se traduisent par des déplacements plus ou moins rapides des gaz qui composent l'atmosphère et des particules qui s'y trouvent en suspension.

Les mouvements d'air jouent un rôle important dans plusieurs domaines, tels la météorologie, l'agronomie, l'aéronautique, la navigation, l'architecture, la mécanique des fluides et la conversion d'énergie...etc.

De ce fait, mesurer cette grandeur avec précision constitue un défi pour les chercheurs dans ce domaine, l'anémomètre est toujours un excellent instrument indispensable dans la métrologie des flux.

L'anémomètre est un matériel professionnel qui mesure la vitesse des fluides, il est idéal pour le contrôle des systèmes, grâce à cet avantage il est adapté à de nombreuses applications dans le domaine des techniques de ventilation et de climatisation.

Dans ce travail, on s'intéresse à un anémomètre à coupelles. Il est connu par sa précision, sa simplicité et sa durabilité.

Son prix d'achat reste beaucoup moins élevé que les anémomètres ultrason ainsi que les anémomètres laser. Donc, il possède un meilleur rapport qualité-prix.

L'objectif de notre travail est de réaliser et étudier un anémomètre à coupelles. Pour ce faire, on a scindé ce travail en trois chapitres:

-Le premier chapitre consiste en une description générale sur les anémomètres, tout en donnant une définition sur cet instrument de mesure et les différents types d'anémomètres.

-Le deuxième chapitre porte sur les différentes étapes de la réalisation d'un anémomètre à coupelles et les différents tests effectués en soufflerie pour calibrer le système conçu.

-Le troisième chapitre présente la simulation numérique sous les trois logiciels (GAMBIT, FLUENT et MATLAB) et les résultats obtenus.

-Enfin on termine par une conclusion générale.

Chapitre I : généralités sur les anémomètres

1. Introduction :

L'anémométrie est une technique de mesure de la vitesse des fluides.

Un anémomètre fournit le module du vecteur vent (appelé vitesse ou force du vent), on l'exprime en (nœuds, mètre par second, kilomètre par heure). Pour s'affranchir de l'influence du sol, on expose les capteurs à 10 m de hauteur en un lieu bien dégagé en dehors de la zone de turbulence. Et généralement accompagner, d'une girouette permet le repérage de l'angle que fait la direction d'où vient le vent avec la direction du nord géographique ; cet angle, compté dans le sens des aiguilles d'une montre, exprimé en degrés. [1]

2. Définition de l'anémomètre :

Le terme « *anemos* », en français « vent » et du suffixe « mètre » « mesure », est un appareil permettant de mesurer la vitesse ou la pression du vent. [2]

Les anémomètres peuvent être divisés en deux classes :

1. Ceux qui mesurent la vitesse
2. Ceux qui mesurent la pression du vent.

3. Types d'anémomètres :

3-1. Anémomètres à pression :

3.1.1. Anémomètre à plaque :

Le premier anémomètre de toute nature est l'anémomètre à plaque. Il a été inventé par Leon Battista Alberti en 1450. Cette situation est encore affinée par Robert Hooke (1664) et Roger Pickering (1744). Il se compose essentiellement d'un balancement plaque tenue à la fin d'un bras horizontal. Cet élément est fixé à un arbre vertical autour duquel le bras peut tourner librement. Une girouette dirige la plaque toujours perpendiculaire à l'écoulement du vent. (Figure I-1)

La pression exercée sur la plaque fait la balancer vers l'intérieur, Comme la distance sur laquelle la saute de plaque dépend de la force du vent, il peut être directement calibré en termes de la vitesse du vent. Les instruments de ce type sont très précis pour les vents faibles. [3]

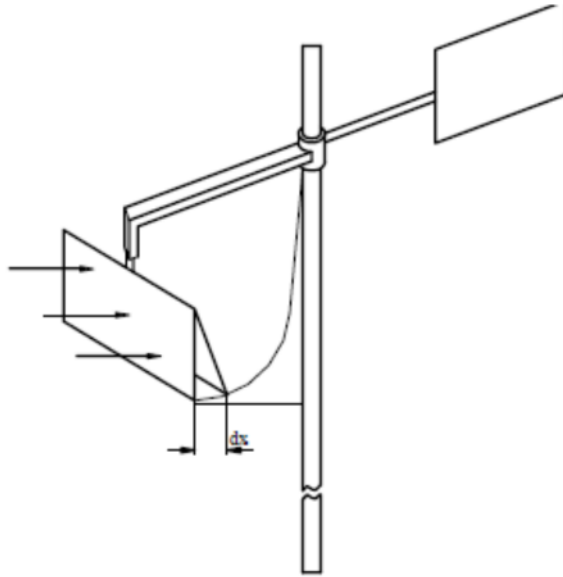


Figure (I-1): Principe d'anémomètre à plaque.

3.1.2. Anémomètre à boule :

Le système est disposé sur une girouette permettant d'orienter dans la direction du vent le plan de rotation du pendule où est fixée la boule. La boule est attachée à l'extrémité supérieure de l'appareil par une tige et l'opérateur la laisse descendre le long de l'axe gradué face au vent. Ce dernier s'oppose à la gravité qui s'exerce sur la boule et lorsque les deux forces s'équilibrent, la boule cesse de tomber. Il suffit alors de noter la position de la boule sur l'axe. (**Figure I-2**)



Figure (I-2): Anémomètre à boule. [2]

3.1.3. Anémomètre à tube :

L'anémomètre à tube ou anémomètre de Dines consiste simplement en un tube en U contenant un liquide avec une extrémité pliée horizontalement pour faire face au vent. Le vent soufflant dans l'ouverture du tube provoque une pression qui peut se transmettre à n'importe quel manomètre. Le tube peut être guidé par une girouette. [2]

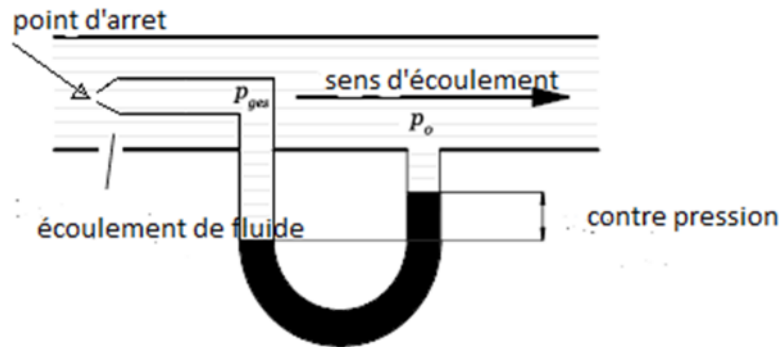


Figure (I-3): Principe de l'anémomètre à tube.

3.1.4. Anémomètre à tube de Pitot:

L'anémomètre à tube de Pitot offre une mesure précise de la vitesse d'écoulement d'un fluide. Il se compose de deux conduits, l'un mesurant la pression statique moyenne et l'autre la pression totale en un point de la section de mesure, dont les extrémités sont reliées aux entrées du manomètre. (Figure I-5)

La mesure donnée par le manomètre représente la pression différentielle, différence de la pression totale et de la pression statique égale à la pression dynamique en ce point du système. [4]

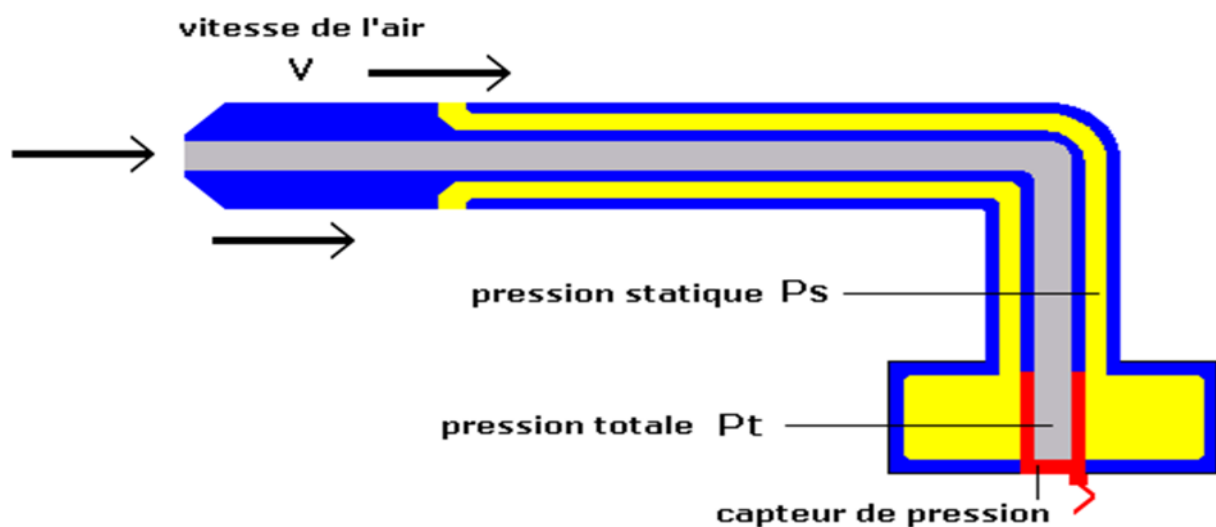


Figure (I-4): Schéma de fonctionnement d'un anémomètre à tube de Pitot.

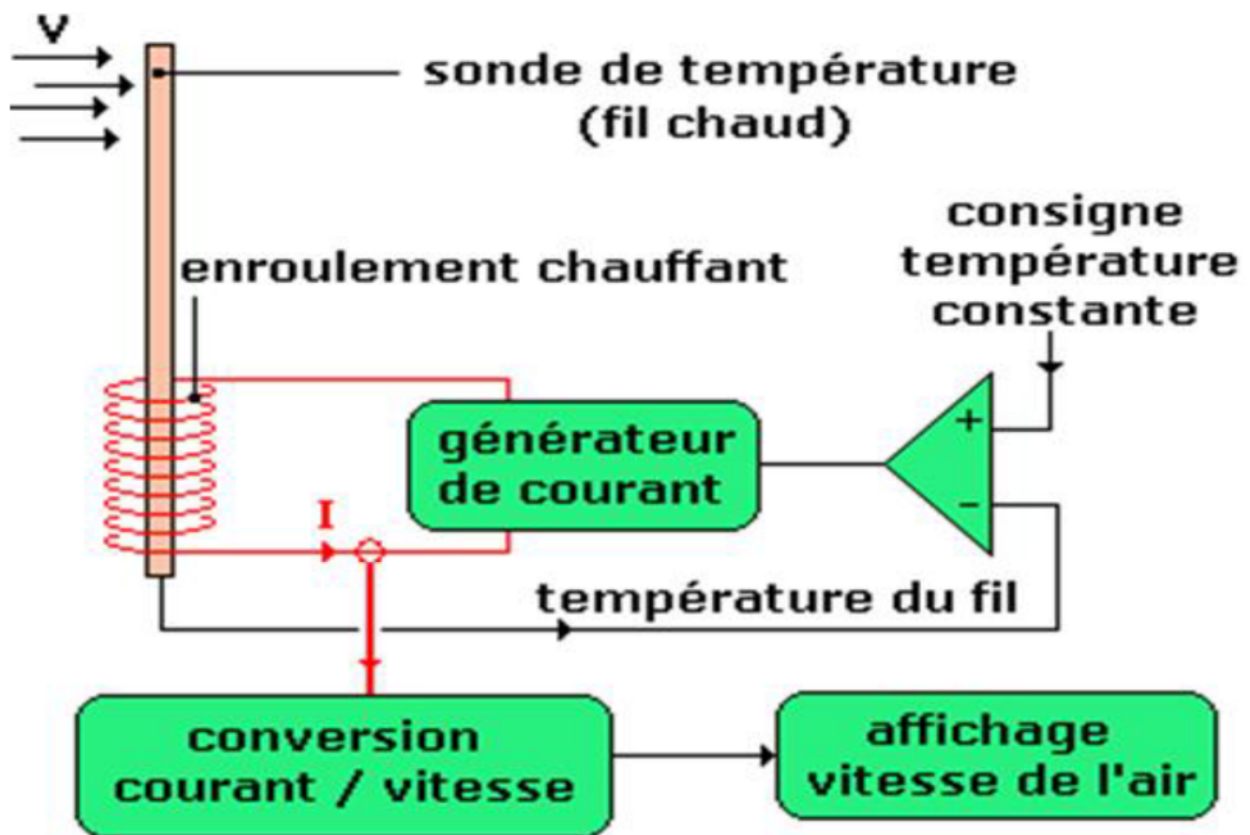


Figure (I-5): Anémomètre à tube de Pitot.

3.2. Anémomètres à vitesse :

3.2.1. Anémomètre à fil chaud :

C'est le plus ancien anémomètre qui travaille avec une méthode classique inventé en 1904. C'est l'instrument le plus adapté pour mesurer la vitesse dans des écoulements turbulents, à cause de sa capacité de mesurer la vitesse avec une très forte résolution spatiale et temporelle. L'anémomètre à fil chaud est constitué d'un fil fin traversé par un courant électrique. Une certaine résistance électrique existe alors et est sensible au passage de l'air. Plus l'air souffle fort et plus il y aura refroidissement du fil. Dans ce cas la résistance électrique diminue. Sachant que l'élément résistif est placé dans un pont de Wheatstone, la variation de la résistance déséquilibre celui-ci. Un voltmètre est placé au milieu de ce pont permet de mesurer sa tension de déséquilibre et ensuite si l'anémomètre est calibré permet de mesurer la vitesse. (**Figure I-7**) [5]



Figure(I-6): Principe de fonctionnement d'un anémomètre à fil chaud.



Figure (I-7): Anémomètre à fil chaud.

3.2.2. Anémomètre à ultrason:

L'anémomètre à ultrasons obtient la vitesse du vent en calculant la durée de déplacement d'une onde ultrasonique. L'appareil se compose d'un émetteur et d'un récepteur qui communiquent par un signal ultrason suivant un axe orthogonal. Ils sont tous les deux placés à une distance connue et cela permet de calculer le temps de propagation de l'onde ultrasonique. En fonction de la vitesse du vent, l'onde se déplacera plus ou moins vite permettant alors de déduire la vitesse du vent. **(Figure I-9)**

Cet anémomètre a une bonne linéarité, robustesse à cause de ses pièces qu'ils ne sont pas en mouvement. L'intérêt de ce type d'anémomètre est d'être sensible à détecter des faibles vitesses d'écoulement et de sa capacité à mesurer un vent turbulent. Ses inconvénients sont situés dans l'encombrement de cet instrument à cause de ses dimensions et aussi la distorsion du flux d'air par les supports des transducteurs.

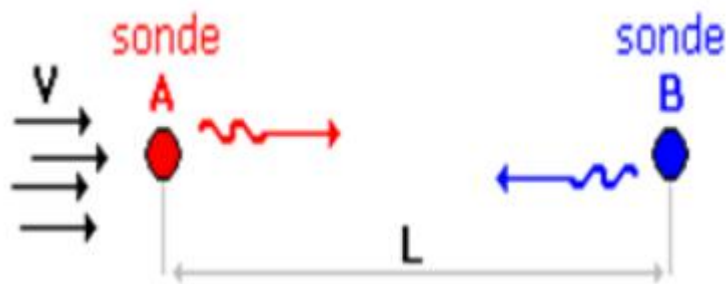


Figure (I-8): schéma de principe de fonctionnement.



Figure (I-9): Anémomètre à ultrason.

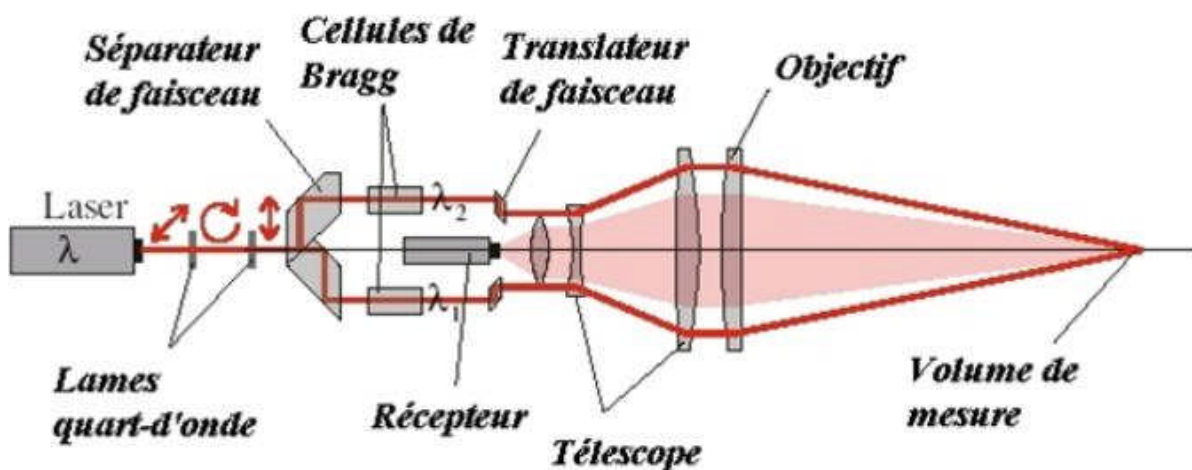
3.2.3. Anémomètre à laser:

Depuis de nombreuses années, plusieurs chercheurs s'intéressent à utiliser les techniques d'anémomètre à laser en laboratoire et en soufflerie. Contrairement à l'anémomètre à hélice ou à fil chaud ce type d'anémomètre utilise une technique optique (la vélocimétrie) pour déterminer la vitesse de l'air et donc le vent. Le faisceau émis par un laser est divisé en deux.

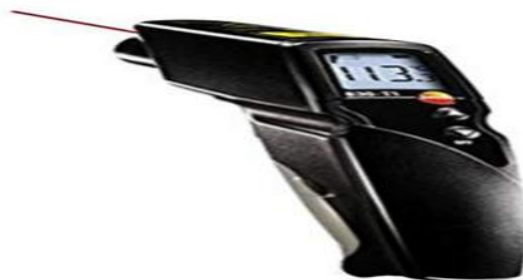
Le premier faisceau est dirigé vers l'atmosphère environnante où il est rétrodiffusé par les aérosols ambiants. Comme ceux-ci sont légers, ils se déplacent plus ou moins exactement à la vitesse du vent et le faisceau retourné subit un décalage de fréquence.

Le récepteur capte la lumière diffusée et est modulée à une fréquence, celle qu'on va comparer avec le second faisceau pour calculer le décalage de fréquence, appelée la fréquence de doppler qu'elle est proportionnelle à la vitesse.

Ce type ne présente pas de non-linéarité, il sert à donner des résultats très précis. Cet instrument est très coûteux. [6]



Figure(I-10): Configuration générale d'un anémomètre laser.



Figure(I-11) : Anémomètre à laser.

3.2.4. Anémomètre à hélice:

Ce type d'anémomètre peut mesurer une vitesse d'écoulement de l'air avec une précision importante, il la détermine par une mesure de fréquence lié à la rotation de l'hélice. Il a l'avantage d'être très robuste et précis, Dans ce type d'anémomètre l'hélice tourne autour d'un axe horizontal, elle est couplée à une girouette qui s'oriente dans la direction du vent. De façon similaire à l'anémomètre à coupelles la vitesse du vent dépend de la vitesse de rotation de l'arbre, qui est enregistrée et convertie en vitesse du vent. C'est également le cas sur les éoliennes.

Cet instrument a parmi ses inconvénients, la sensibilité aux sollicitations mécaniques et il dépend de la direction ainsi que ses dimensions. [6]



Figure(I-12) : Anémomètre à hélice.

3.2.5. Anémomètre à coupelles:

L'anémomètre à coupelles est l'un des types simples, il a été inventé par John Romney Robinson en 1846, Il se compose de trois à quatre demi-sphères ou bien de trois à quatre coniques, chacune montée sur l'extrémité des bras horizontaux, qui sont eux-mêmes montés à angle égaux sur un arbre vertical. Le passage horizontal du flux d'air sur les coupelles fait tourner ces dernières proportionnellement à la vitesse du vent. Le décompte des tours effectués par les coupelles sur une période définie mesure donc la vitesse moyenne du vent par rapport à une large gamme de vitesses.

Dès les premiers anémomètres, le constructeur prétendait à tort que peu importe la taille des coupelles ou la longueur des bras, les coupelles se déplaçaient toujours à un tiers de la vitesse du vent. Ceci fut apparemment confirmé par certaines premières expériences indépendantes, mais c'était loin de la vérité. Il fut ensuite découvert que le véritable rapport entre la vitesse du vent et celle des coupelles, appelé le facteur anémomètre, dépendait des dimensions des coupelles et des bras.

L'anémomètre à trois coupelles, mis au point par le Canadien John Patterson en 1926, et les améliorations ultérieures des Américains Brevoort & Joiner en 1935, ont conduit à un modèle linéaire de coupelles doté d'une erreur de 3%. Patterson a découvert que chaque coupelle produisait un couple maximal lorsqu'elle était inclinée à 45 degrés par rapport à l'écoulement du vent. L'anémomètre à trois coupelles possédait également un couple plus constant et réagissait plus rapidement aux rafales que l'anémomètre à quatre coupelles.

L'anémomètre à trois coupelles fut ensuite modifié par l'Australien **Derek Weston** en 1991, afin de mesurer à la fois la vitesse et la direction du vent. Weston ajouta une étiquette sur une coupelle, qui provoqua l'accélération et le ralentissement de la vitesse de rotation de la coupelle en fonction de l'emplacement de l'étiquette, qu'elle soit dans le sens du vent ou non. Le sens du vent est calculé à partir de ces variations cycliques de la vitesse de la coupelle, tandis que la vitesse du vent est déterminée comme d'habitude à partir de la vitesse moyenne de rotation des coupelles.

Les anémomètres à trois coupelles sont actuellement utilisés comme des standards industriels pour les études d'évaluation des ressources en éoliennes. [7]



Figure (I-13) : Anémomètre à coupelles trois coniques.



Figure (I-14) : Anémomètres à coupelles à trois demi-sphères.

4. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté beaucoup de type d'anémomètre, on se basant sur les plus utilisés. Chaque anémomètre fonctionne suivant une technique précise pour déterminer la vitesse du vent.

Dans le prochain chapitre, nous allons donc étudier le fonctionnement d'un anémomètre à coupelles.

Chapitre II : Etude expérimentale

1. Introduction :

Ce chapitre porte sur la partie expérimentale. On présente, d'abord, les étapes de réalisation d'un anémomètre à coupelles. Ensuite, on décrit la soufflerie où sont réalisés les essais. A cet effet, plusieurs vitesses de vent ont été retenues pour calibrer cet anémomètre.

2. Réalisation de l'anémomètre à coupelles :

2.1. Conception des coupelles :

Pour réaliser une coupelle, une machine à commande numérique est nécessaire. En l'absence de cette dernière, notre choix s'est porté sur des cuillères de glace, en inox, de formes hémisphériques et de diamètre 50 mm (**Figure II-1**).

Trois coupelles sont ensuite disposées sur un cercle horizontal de rayon 128mm à intervalles réguliers de 120° . Trois tiges de longueurs 80mm solidarisent, avec des soudures, chaque coupelle avec le centre de rotation. La distance entre les centres des coupelles et le centre de rotation atteint alors la valeur de 102.5mm.

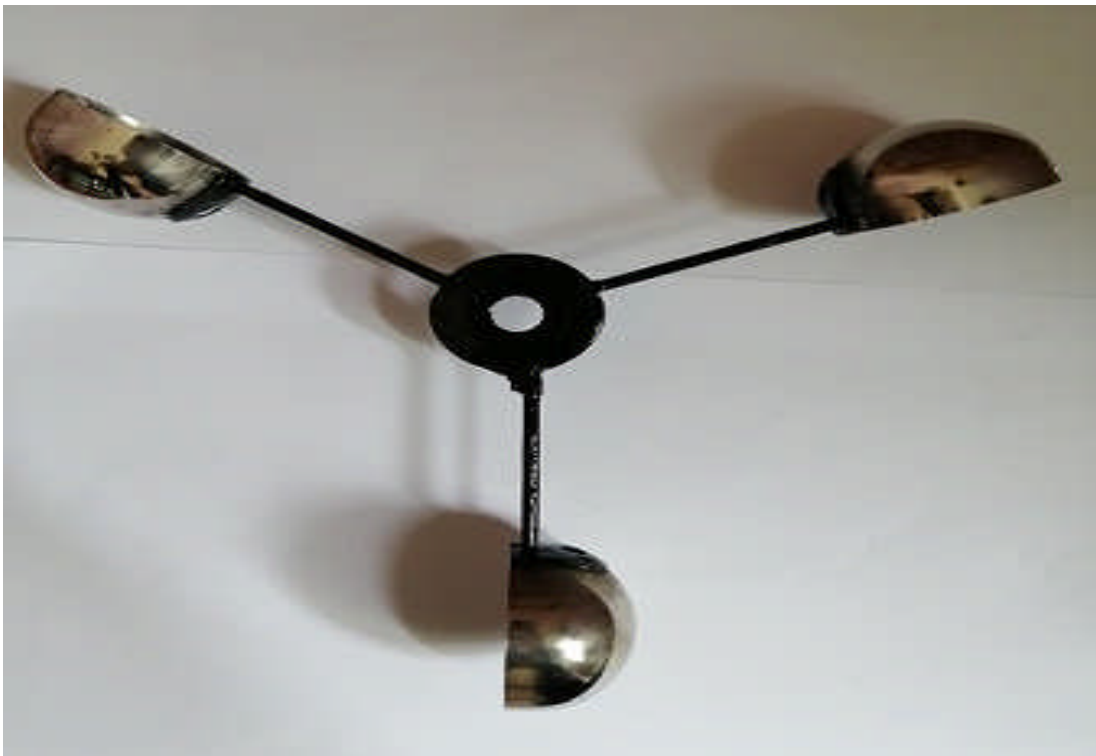


Figure (II-1) : Les coupelles hémisphériques.

2.2. Réalisation d'un arbre de transmission :

L'usinage est un moyen de fabrication de pièces mécaniques. L'usinage par un outil de coupe permet de donner à la pièce brute une forme précise selon le dessin de définition. Cette étape est réalisée sur un tour parallèle (**Figure II-2**).



Figure (II-2) : Tour conventionnel.

A l'aide de ce tour conventionnel on a usiné un arbre, en acier inoxydable, de longueur 100mm et de diamètre 12mm. Cet arbre contient un épaulement et deux rainures pour la fixation du roulement.



Figure (II-3) : Epaulement sur l'arbre.



Figure (II-4) : Rainures pour fixation du roulement

2.3. Montage d'un roulement sur l'arbre :

Le roulement est un organe mécanique destiné à permettre la transmission des efforts entre deux pièces en rotation l'une par à l'autre. Ce qui permet la mobilité de la pièce avec un frottement minimal. [8]

2.3.1. Composants et types de roulement :

Un roulement est constitué de quatre éléments différents (**figure II-5**) :

- Une bague extérieure : elle sera montée dans un logement ménagé dans un bâti fixe ou un moyeu tournant
- Une bague intérieure rendue solidaire du tourillon de l'arbre tournant ou fixe
- Des éléments roulants qui permettent la rotation relative d'une bague par rapport à l'autre
- La cage qui maintient l'écartement des éléments roulants et les empêche de frotter l'un contre l'autre.




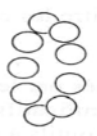










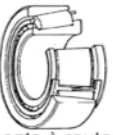
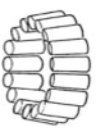





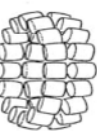






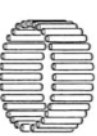


TYPE	BAGUE EXTÉRIEURE	BAGUE INTÉRIEURE	ÉLÉMENTS ROULANTS	CAGE		
				Matière synthétique	Tôle emboutie	Massive usinée
 Roulements à billes						
 Roulements à rouleaux cylindriques						
 Roulements à rouleaux coniques	Cuvette	Cône				
 Roulements à rouleaux sphériques						
 Roulements à aiguilles						

Figure (II-5) : Représentation des éléments constituant un roulement

2.3.2-Charges supportées par les roulements :

Les actions mécaniques de contact exercées par les éléments roulants sur l'une ou l'autre bague sont en général schématisées par des forces ou des charges.

On observe trois cas :

a) Charge radiale (F_r) : sa direction, perpendiculaire à l'axe de rotation, passe par le centre géométrique du roulement. F_r est toujours portée par un rayon, d'où le nom de charge radiale.

b) Charge axiale (F_a) : sa direction est celle de l'axe de rotation du roulement.

c) Charge combinée (F) : c'est la combinaison des deux cas précédents. La direction de F , passe par le centre géométrique du roulement.

- La projection de F sur l'axe de rotation donne une composante axiale F_a .

- La projection de F sur un rayon perpendiculaire à l'axe donne une composante radiale F_r .

Remarque : F_a et F_r sont deux projections orthogonales possibles de F .

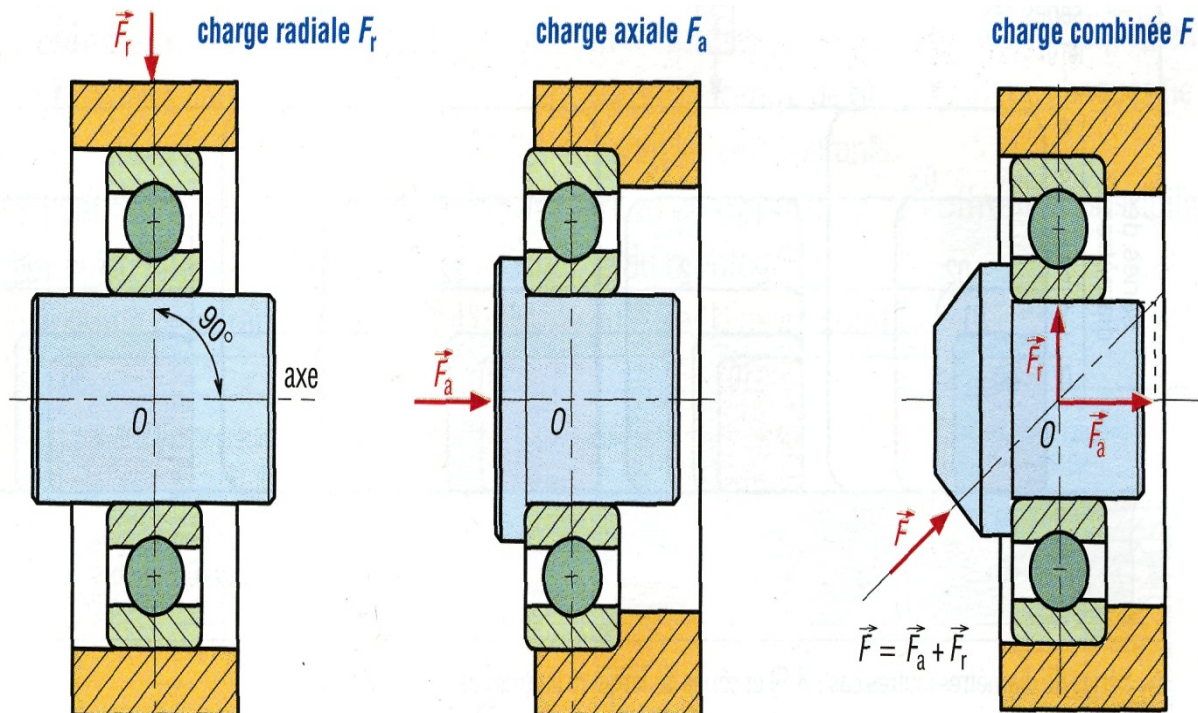


Figure (II-6) : Charges supportées par un roulement.

2.3.3. Couple de frottement pour un roulement non lubrifié (C_f) :

Le couple de frottement est un critère important pour le bon fonctionnement d'un roulement. Il dépend de la charge appliquée sur les billes, de la vitesse de rotation et des propriétés du lubrifiant. [9]

Sa valeur est évaluée par l'expression suivante :

$$C_f = \alpha * Fr \dots\dots\dots (II.1)$$

Avec :

C_f : Couple de frottement.

α : Définit le coefficient de frottement, lequel est proportionnel à la vitesse de rotation (w) au même titre que la charge radiale. Il en résulte que pour le couple de frottement, on retient cette expression :

$$C_f = Aw^2 \dots\dots\dots (II.2)$$

Dans notre cas nous avons choisi de monter un roulement à billes de type C3 (6001-12/28/8), car il est rigide et a une capacité de fonctionner à vitesse élevée.

Pour monter ce roulement il faut d'abord graisser légèrement sa face interne ainsi que la portée de l'arbre. Ensuite engager le roulement en bout d'axe et frapper la bague intérieure en intercalant un morceau de tube. Enfin vérifier que le roulement ne se positionne pas de travers. Et pour le fixer nous avons utilisés deux circlips.



Figure (II-7) : Montage d'un roulement.

2.4. Réalisation de la chemise :

Cette chemise se compose de deux pièces en acier inoxydable ; pour réaliser ces deux dernières on est passé par plusieurs opérations d'usinage tels que le dressage ; chariotage, perçage et le filetage.

La première opération est réalisée sur deux cylindres pleins de diamètres 48mm et de longueurs 25mm et 80mm.

Sur le cylindre court, sont réalisés de chaque côté de ses bases, deux logements de formes cylindriques de diamètres 12mm et 28mm sur des profondeurs 2 et 26mm respectivement. Le cylindre est ensuite fileté sur sa face externe.

Le cylindre plus long est aussi pourvu, sur des profondeurs de 25mm, de deux logements cylindriques de chaque côté de ses bases, avec des diamètres 12 et 30mm. Le cylindre est ensuite fileté sur sa face interne pour l'assembler avec le cylindre court.

A la fin on a taraudé deux trous en bas de la pièce pour la fixation de notre système.



Figure (II-8) : Chemise de couverture.



Figure (II-9) : Anémomètre à coupelles.

2.5. Dispositif expérimental :

Afin de mesurer la vitesse de rotation occasionnée par l'action du vent, on a utilisé une carte d'acquisition de donnée (Arduino Uno) et un capteur électronique dit tachymètre. Ce dernier est composé d'une fourche optique et d'un interrupteur sans contact (Fig. II-10).

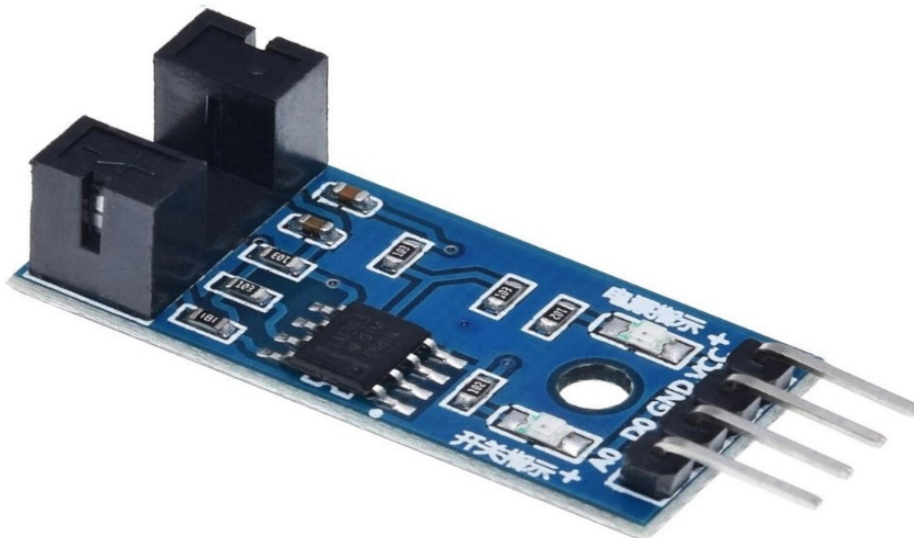


Figure (II-10) : Capteur de vitesse (tachymètre).

Le principe de fonctionnement de ce capteur dans notre cas est basé sur une rondelle à trois dents placée sur l'axe de rotation. A chaque fois que cette rondelle dentée tourne devant la fourche, la coupure périodique du faisceau lumineux provoque une impulsion

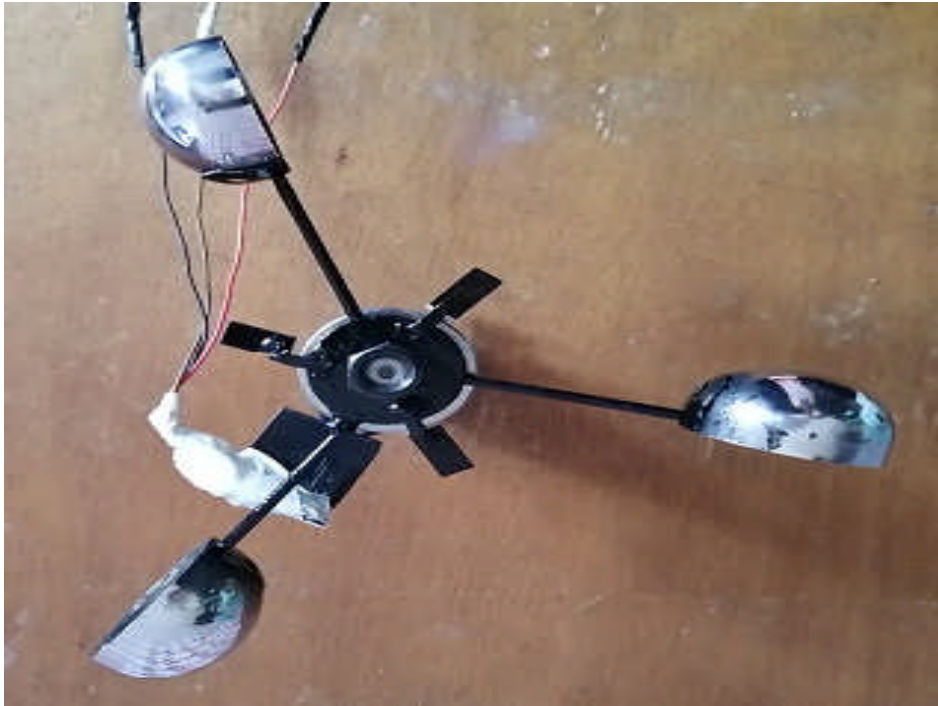


Figure (II-11) : Principe de fonctionnement d'un tachymètre.

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.



Figure (II-12) : Soufflerie subsonique.

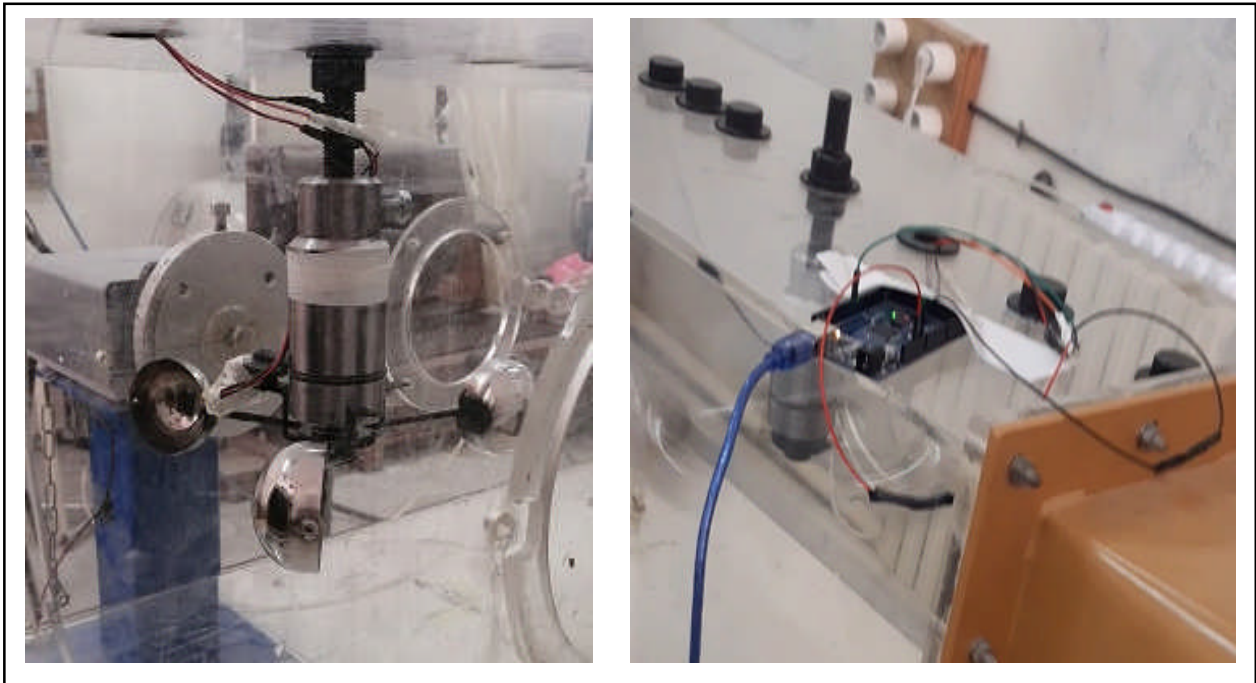


Figure (II-13) : Anémomètre à coupelles placé dans la soufflerie.

3.1. Composants de la soufflerie :

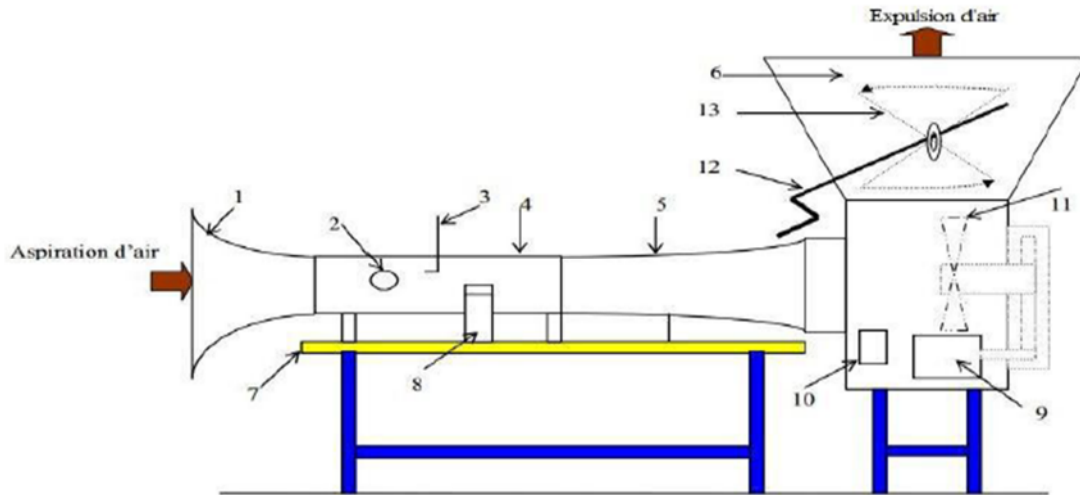


Figure (II-14) : Les composants de la soufflerie. [10]

- | | |
|------------------|--------------------------|
| 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 | |

3.2. 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.

3.3. Les moyens de mesure :

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 de 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. [11]

Avec :

$$P_A + \frac{1}{2}\rho_{air}V_A^2 + \rho_{air}gz_A = P_B + \frac{1}{2}\rho_{air}V_B^2 + \rho_{air}gz_B \dots\dots\dots (II.3)$$

- P_A : La pression au point A entrée du convergent
- P_B : La pression au point B section de travail
- V_A : La vitesse de l'air au point A
- V_B : La vitesse de l'air au point B
- z_A : L'altitude au point A
- z_B : L'altitude au point B
- ρ_{air} : La masse volumique de l'air
- g :La gravité

Or, comme nous l'avons dit, $V_A = 0$ et $z_A = z_B$ (altitude négligeable).

On aura :

$$P_A - P_B = \frac{1}{2}\rho_{air}V_B^2 \dots\dots\dots (II.4)$$

$$V_B = \sqrt{2 \frac{P_A - P_B}{\rho}} \dots\dots\dots (II.5)$$

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 (II-15) : Multi-manomètre du laboratoire.

On applique le principe de l'hydrostatique pour déterminer $P_A - P_B$:

$$\frac{dP}{dz} = -\rho g \dots \dots \dots (II.6)$$

$$\int_{P_A}^{P_B} dP = -\rho g \int_{z_C}^{z_D} dz$$

$$P_B - P_A = -\rho_{huile} g (z_C - z_D)$$

$$z_C - z_D = \Delta H$$

$$P_A - P_B = \rho_{huile} g \Delta H$$

$$\frac{1}{2} \rho_{air} V_B^2 = \rho_{huile} g \Delta H$$

Donc :

$$V_B = \sqrt{2 \frac{\rho_{huile} g \Delta H}{\rho_{air}}} \dots \dots \dots (II.7)$$

$\Delta H = z_C - z_D$: La différence de hauteur entre le point C et D

ρ_{huile} : La masse volumique de l'huile (856 kg/m^3)

ρ_{air} : La masse volumique de l'air (1.20 kg/m^3)

g :La gravité (9.81 m/s^2)

Les mesures des vitesses seront données par dénivellations des hauteurs :

Tableau (II.1) : Mesure de la vitesse d'air en fonction de la différence des hauteurs.

ΔH (mm)	V_{air} (m/s)
7,15	10
16	15
28,6	20
44,6	25
64,3	30

4. Résultats obtenus dans la soufflerie :

Grace au tachymètre et son programme on a mesuré la vitesse de rotation des coupelles pour chaque vitesse d'air.

Tableau (II.2) : Vitesse de rotation des coupelles en fonction de la vitesse d'air.

Vitesse d'écoulement d'air m/s	0	10	15	20	25	30
vitesse de rotation des coupelles tr/s	0	10.66	17.32	26.66	32	40

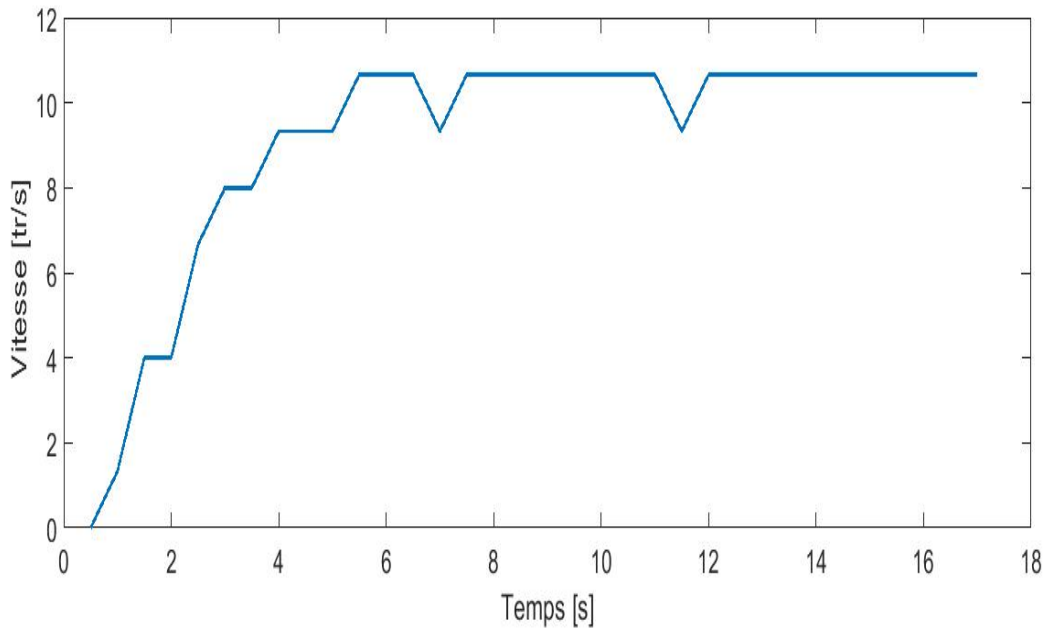


Figure (II-16) : Evolution de la vitesse de rotation au cours du temps pour 10 m/s.

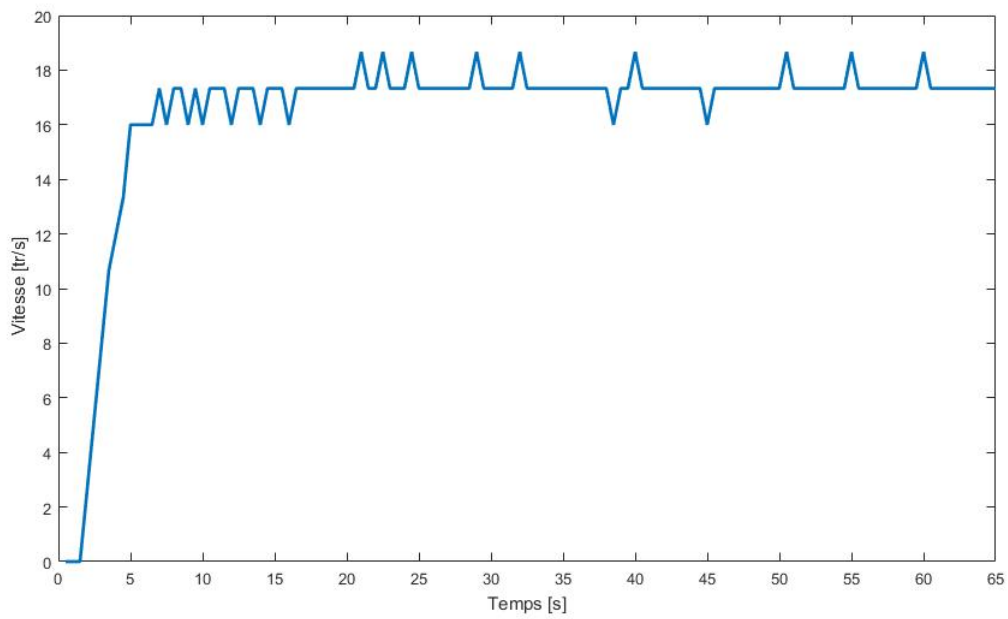


Figure (II-17) : Evolution de la vitesse de rotation au cours du temps pour 15 m/s.

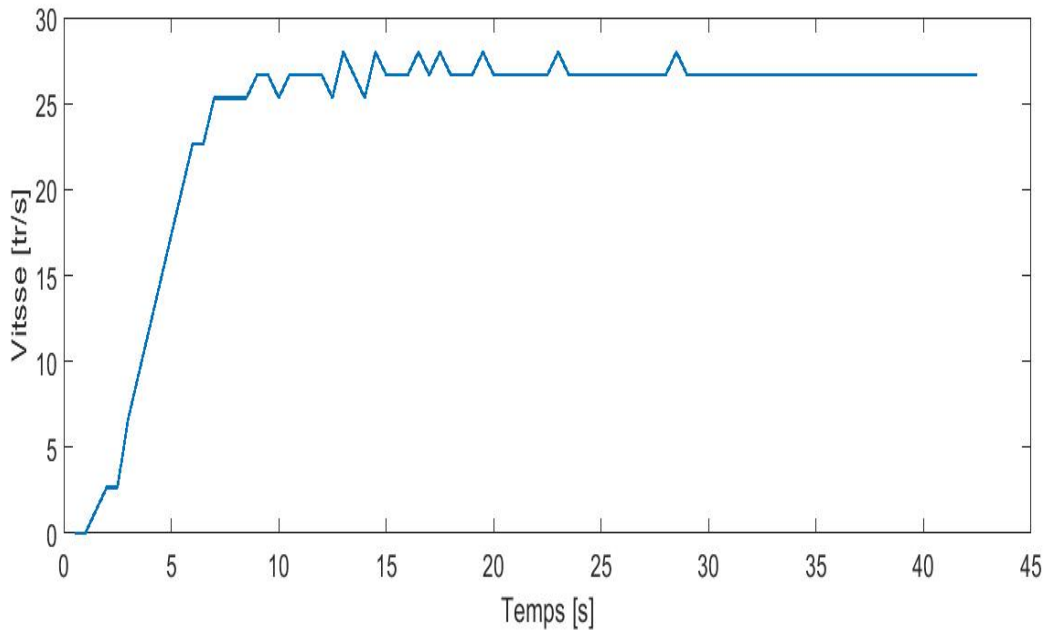


Figure (II-18) : Evolution de la vitesse de rotation au cours du temps pour 20 m/s.

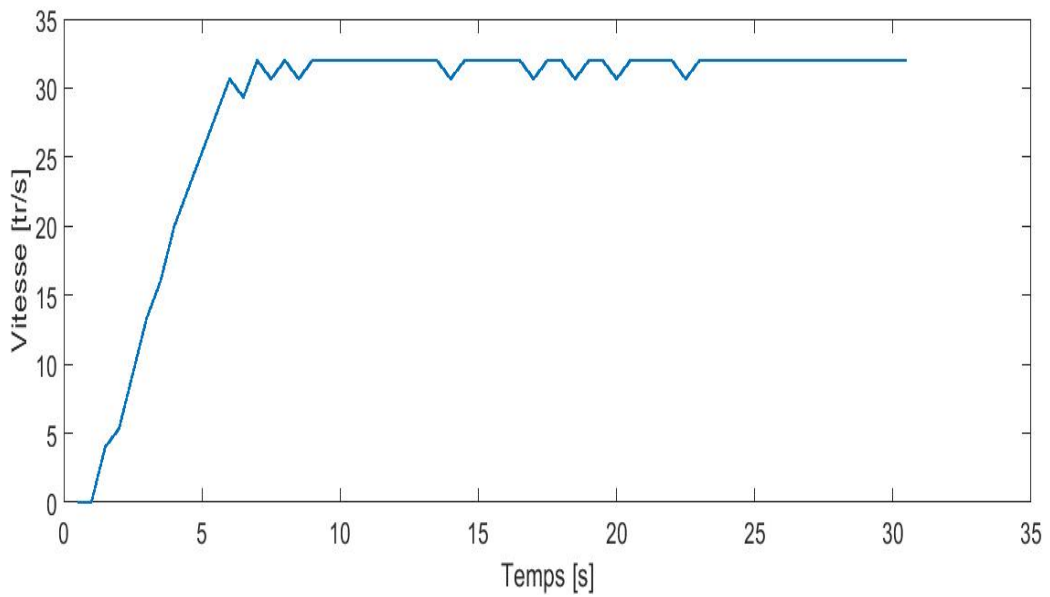


Figure (II-19) : Evolution de la vitesse de rotation au cours du temps pour 25 m/s.

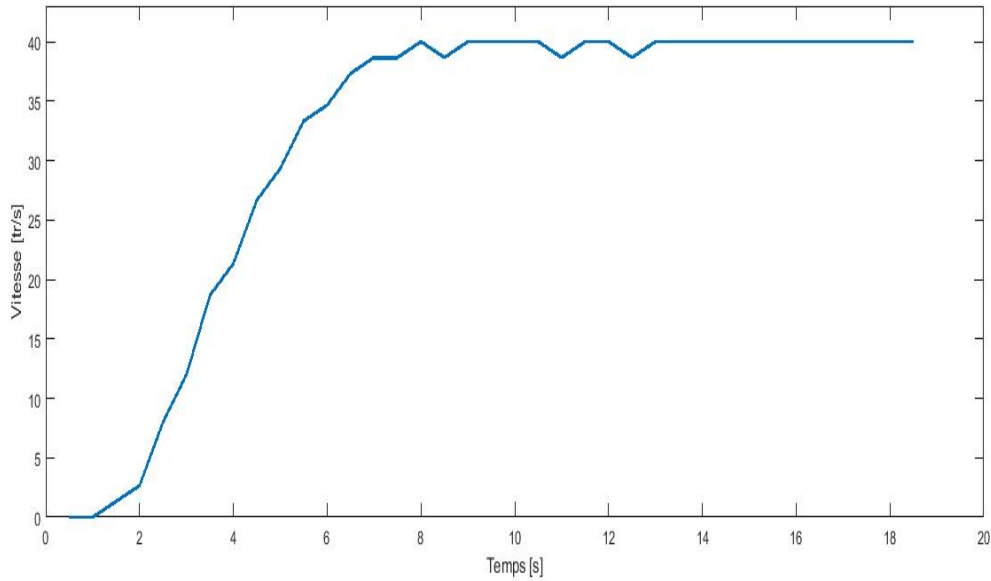


Figure (II-20) : Evolution de la vitesse de rotation au cours du temps pour 30 m/s.

D’après les figures (II-16 ; II-17 ; II-18 ; II-19 ; II-20) on observe que la vitesse de rotation des coupelles se stabilise après quelques instants.

C’est le temps nécessaire à l’équilibre du couple d’entraînement avec le couple de frottement.

5. Etalonnage de l’anémomètre :

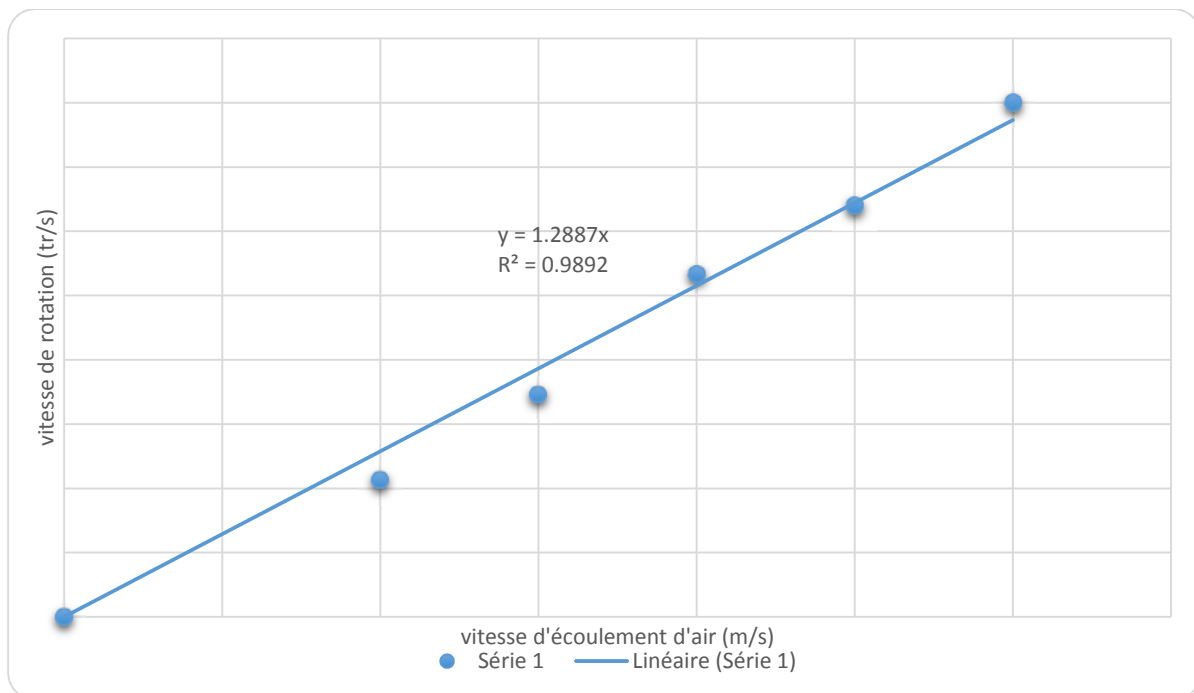


Figure (II-21) : Courbe d’étalonnage de l’anémomètre à coupelles.

On observe que cette courbe est linéaire, elle passe par l'origine (**Figure (II-21)**). On constate que la vitesse de rotation des coupelles est proportionnelle à la vitesse d'écoulement d'air.

Elle s'exprime par :

$$\omega = 1.29 * V_a \dots \dots \dots (II.8)$$

6. Conclusion :

Les différentes courbes tracées après avoir effectué les essais en soufflerie ont mis en évidence de nombreux résultats expérimentaux, ces derniers sont résumés comme suit:

- La vitesse de rotation des coupelles n'est pas instantanée. Elle se stabilise après quelques seconds de fonctionnement.
- La vitesse de rotation des coupelles est proportionnelle à la vitesse d'écoulement d'air et suit une évolution linéaire.

Chapitre III: Simulation Numérique

1. Introduction:

En mécanique des fluides, les écoulements que ce soit on régime laminaire ou turbulent, sont décrits par le système d'équation aux dérivée partielle (E.D.P). Ainsi, tous les phénomènes physiques sont régis par ce système formé par les équations de continuité, de quantité de mouvement et d'énergie qu'il convient de résoudre pour déterminer les champs de vitesses, de pression et de température.

Parmi les méthodes numériques les plus utilisées dans les problèmes d'écoulement et de transfert de chaleur en peut citer :

- * La méthode des différences finies.
- * La méthode des éléments finis.
- * La méthode des volumes finis.

Dans la présente étude, on utilisera la méthode des volumes finis.

2. Principe de la méthode des volumes finis:

La méthode des volumes finis a été décrite pour la première fois en 1971 par Patankar et Spalding et publiée en 1980 par Patankar [12], Elle transforme les équations aux dérivées partielles en système algébrique linéaire faciles à résoudre.

Le logiciel commercial Fluent, utilisant cette méthode de VF, permet la résolution de problèmes divers. Dans ce logiciel deux interfaces : Gambit et Fluent permettent le maillage du domaine puis la résolution des équations mises en jeu.

3. Présentation de GAMBIT:

GAMBIT (Geometry And Mesh Building Intelligent Toolkit) est un logiciel de DAO (Dessin Assisté par Ordinateur) et de génération de maillage. Il permet de réaliser des géométries en 2D ou 3D et de construire le maillage. Largement répandu dans l'industrie (automobile, aéronautique, ...etc.) en raison de son interface graphique puissante, il permet aussi de réaliser tout type de géométries complexes (fixes ou mobiles) associées à des maillages fixes ou adaptatifs, il engendre des fichiers (*.msh) pour Fluent. [13]

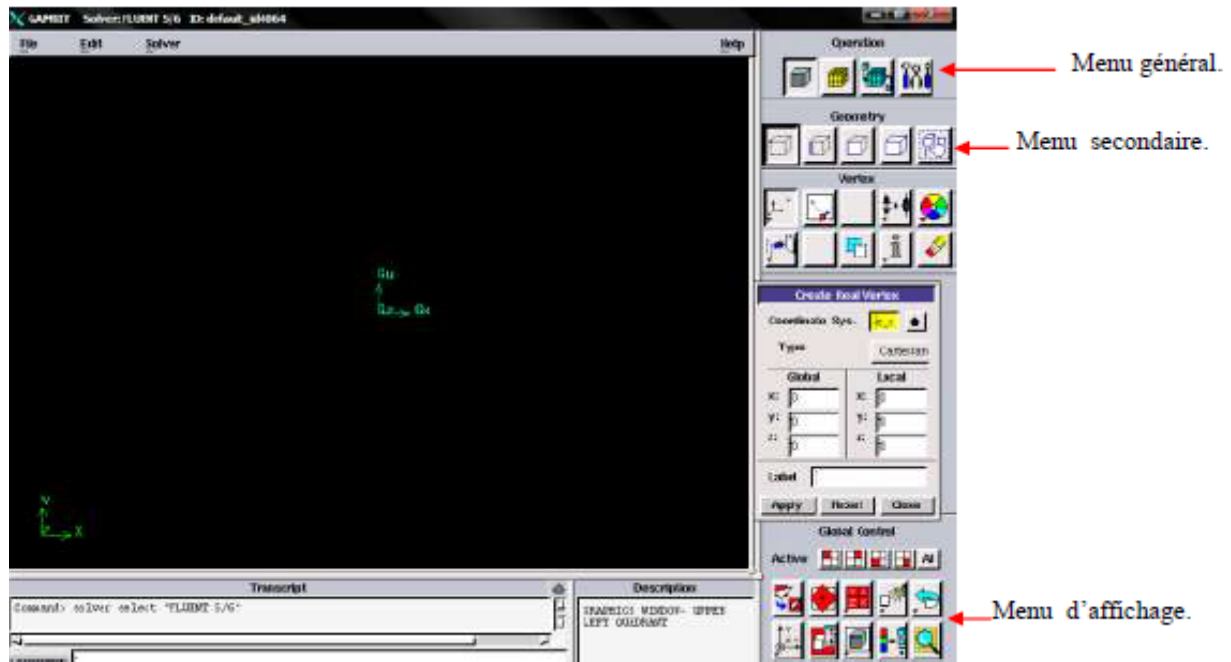





Figure (III-1): Interface de GAMBIT.




3.1. Préparation de la géométrie et maillage:

3.1.1. Création de la géométrie:




-Pour créer la sphère, il faut suivre les étapes suivantes :

Geometry Command Button  → Volume Command Button  → Create Real
 Sphere Volume Command  < Radius 25 mm >, puis [Apply]




-Créer un plan :

Geometry Command Button  → Face Command Button  → Create Real
 Rectangular Face  < Width: 100 mm; Height: 100 mm; Direction: XY Centered >, puis [Apply]

-couper la sphère avec le plan crée :

Geometry Command Button  → Volume Command Button  → Split Volume 
 <Volume : la sphère ; Split With : Face(Real) ; Face : le plan ; décocher Retain>, puis [Apply]




-Supprimer l'une des deux demi sphères :

Geometry Command Button  → Volume Command Button  → Delete Volumes 
 <Volume : l'une des deux demi sphères>, puis [Apply]

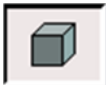


-Supprimer le plan :

Geometry Command Button  → Face Command Button  → Delete Faces 
 <faces: le plan>, puis [Apply]

-Créer un cube :

Geometry Command Button  → Volume Command Button  → Create Real Brick 
 <Width (X): 500 mm, Depth(Y): 500 mm; Height (Z): 500 mm>, puis [Apply]

-Partager le cube et la demi-sphère pour avoir deux volumes:

Geometry Command Button  → Volume Command Button  → Split Volume 
 <Volume: le cube; Split With: Volume (Real); Volume: la demi sphère; >, puis [Apply]

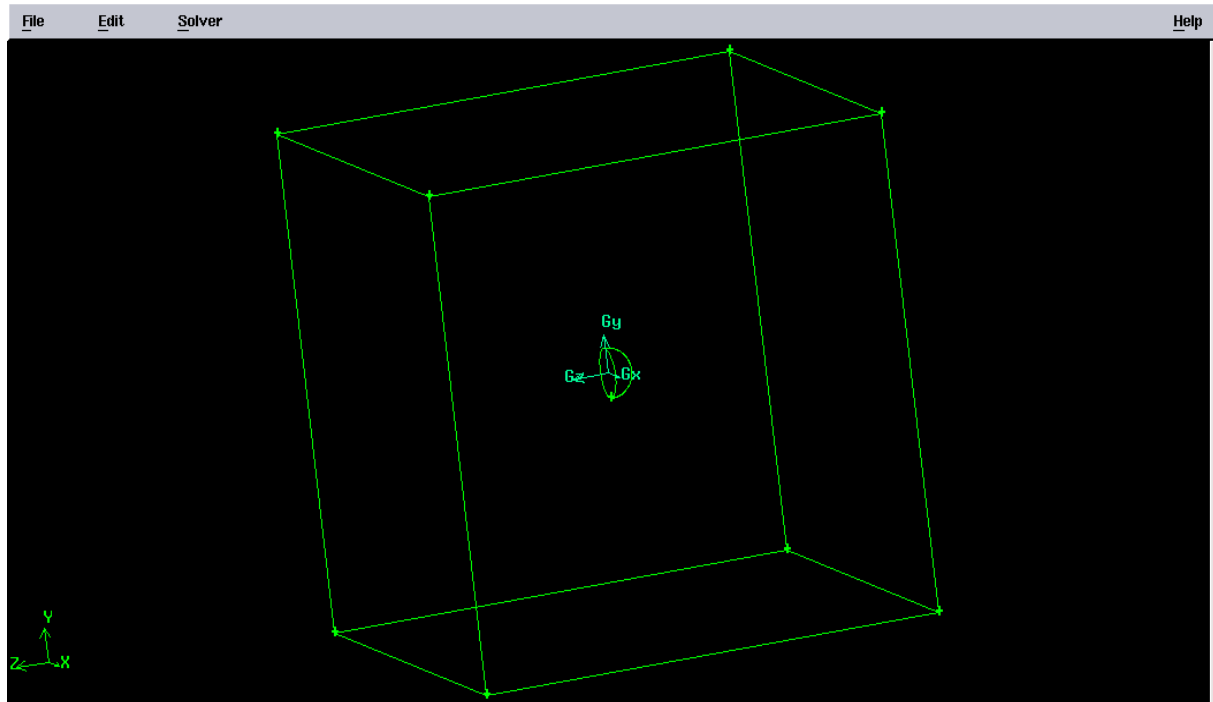


Figure (III-2): Création de la géométrie sur GAMBIT.

3.1.2. Choix du type de maillage:

La localisation des variables du problème est définie par le maillage (grille) qui correspond à une représentation discrète du domaine physique. Le domaine de calcul se trouve alors divisé en un nombre fini de volume de contrôle. Dans les différents codes de calcul utilisant la méthode des volumes finis, on rencontre principalement trois types de maillage :

3.1.2.1 Maillage structuré:

Il est beaucoup plus facile de le générer en utilisant une géométrie à multi bloc.

-Ses avantages :

- Economique en nombre d'éléments, 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.

-Ses inconvénients :

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

3.1.2.2. Maillage non structuré:

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.

3.1.2.3. Maillage hybride (mixte):

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

Ses avantages :

- Combine entre les avantages du maillage structuré et ceux du maillage non structuré.

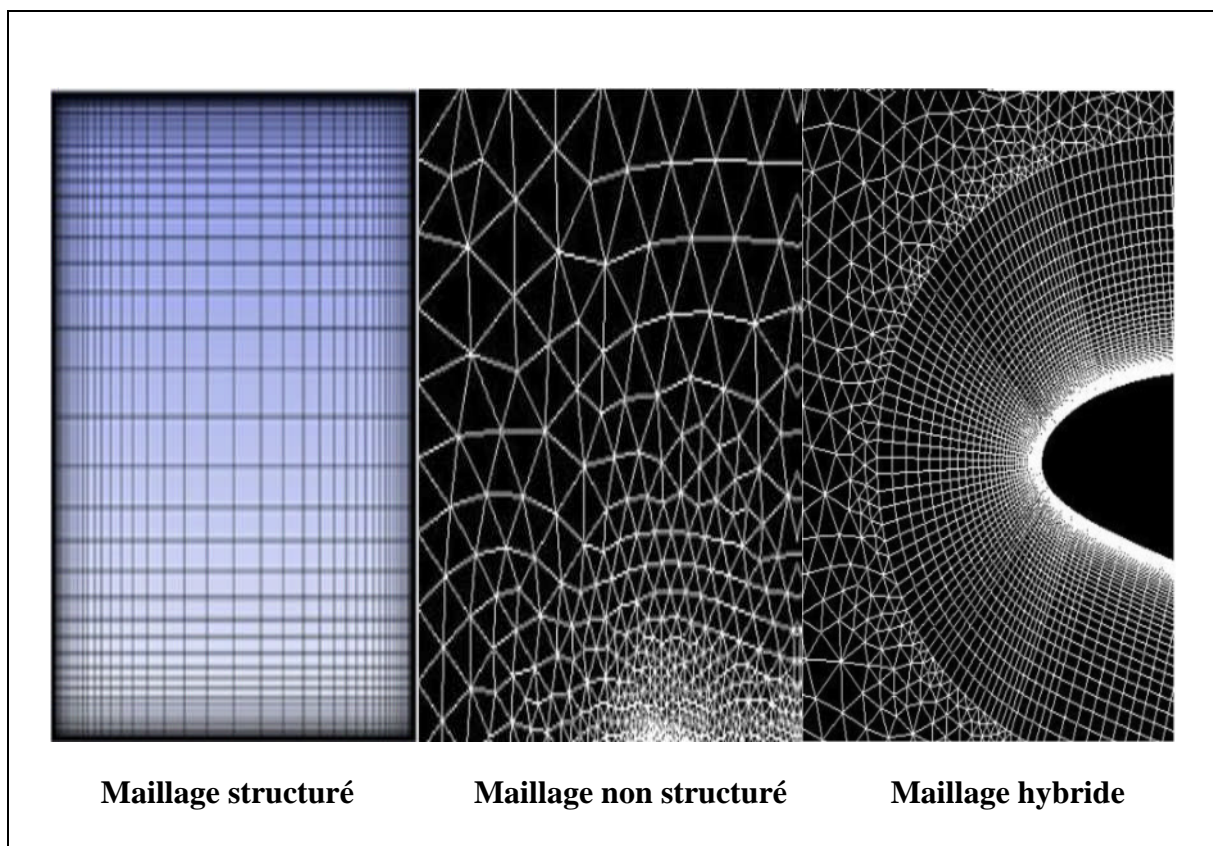








Figure (III-3): Les trois types de maillages. [14]

-Pour mailler notre géométrie il faut suivre cette étape :

Mesh Command Button  → Volume Command Button  → Mesh Volumes 
<Volumes: coupelle; Spacing: 1 (Interval size); Cocher Remove Old Mesh>, puis [Apply]

Mesh Command Button  → Volume Command Button  → Mesh Volumes 
<Volumes: coupelle et cube; Spacing: 10 (Interval size); Cocher Remove Old Mesh>, puis [Apply]

Après le maillage on obtient 900006 noeuds.

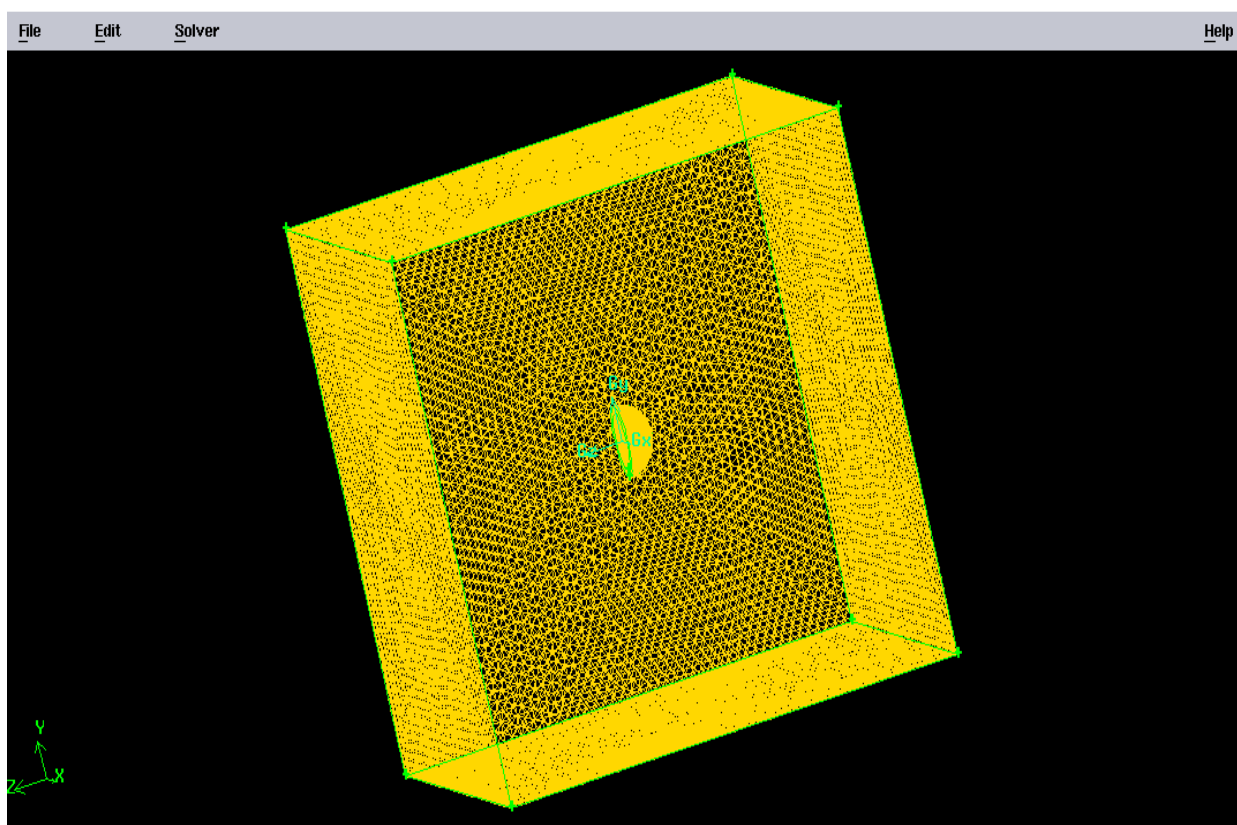








Figure (III-4): Maillage de la géométrie.



-Pour procéder à la création des types de condition aux limites, il faut suivre les étapes suivantes :



Zones Command Button  → Specify Continuum Types Command Button 
 <Volumes: volume1 (coupelle); Type: Solid; Name : coupelle ; cocher Show Label>, puis [**Apply**]



-Il faut définir les entités qui seront des murs, des entres ou des sorties ; appliquer la procédure suivante :



Zones Command Button  → Specify Boundary Types Command Button 
 <Faces: face1; Type: Velocity inlet; Name: Nord; cocher Show Label>, puis [**Apply**]

Zones Command Button  → Specify Boundary Types Command Button 
 <Faces: face2; Type: Velocity inlet; Name: Sud; cocher Show Label>, puis [**Apply**]

Zones Command Button  → Specify Boundary Types Command Button 
 <Faces: face3; Type: Velocity inlet; Name: Est; cocher Show Label>, puis [**Apply**]

Zones Command Button  → Specify Boundary Types Command Button 
 <Faces: face4; Type: Velocity inlet; Name: Ouest; cocher Show Label>, puis [**Apply**]

Zones Command Button  → Specify Boundary Types Command Button 
 <Faces: face5; Type: Velocity inlet; Name: Haut; cocher Show Label>, puis [**Apply**]

Zones Command Button  → Specify Boundary Types Command Button 
 <Faces: face6; Type: Velocity inlet; Name: Bas; cocher Show Label>, puis [**Apply**]

A la fin de toutes les opérations, cliquer sur [**Close**].

3.1.3. Enregistrer et exporter:

Pour enregistrer notre travail il faut suivre les étapes suivantes :

Cliquer sur [**File**], puis sur [**Export**], ensuite [**Mesh**].

Tapez un nom de fichier ; cliquer [**Accept**].

4. Présentation de FLUENT:

Fluent est un logiciel de calcul numérique en dynamique des fluides CFD

(Computational Fluid Dynamics), destiné à effectuer des simulations numériques des problèmes d'écoulements fluides. Le package Fluent s'appuie sur la méthode de volume-fini pour résoudre les équations régissant le mouvement d'un fluide en écoulement et comprend des modèles physiques différents tels que : [15]

- . Ecoulement dans des géométries 2D et 3D en utilisant des maillages adaptatifs non structurés.
- . Ecoulement incompressible et compressible.
- . Analyse stationnaire ou instationnaire.
- . Ecoulement non-visqueux, laminaire ou turbulent.
- . Ecoulement Newtonien ou non-Newtonien.
- . Transfert de chaleur par convection, naturelle ou forcée.
- . Transfert de chaleur par rayonnement.
- . Multiple repère de référence en mouvement, incluant des interfaces glissantes et des plans mélange.
- . Mélange et réaction d'espèces chimiques, incluant des modèles de combustion et des réactions de surface.
- . Sources volumiques arbitraires de chaleur, masse, quantité de mouvement, turbulence, et espèces chimiques.

4.1. Principales étapes de simulation sous Fluent:

-Ouverture de fluent :

La première chose à faire quand on entre sous fluent est de choisir le type de résolution que le logiciel va avoir à faire : résolution 2D ou 3D.



Figure (III-5): Type de résolution

-Importation de la géométrie:

Pour commencer la simulation il faut importer le fichier (*.msh) généré sous Gambit.

File → Read → Case

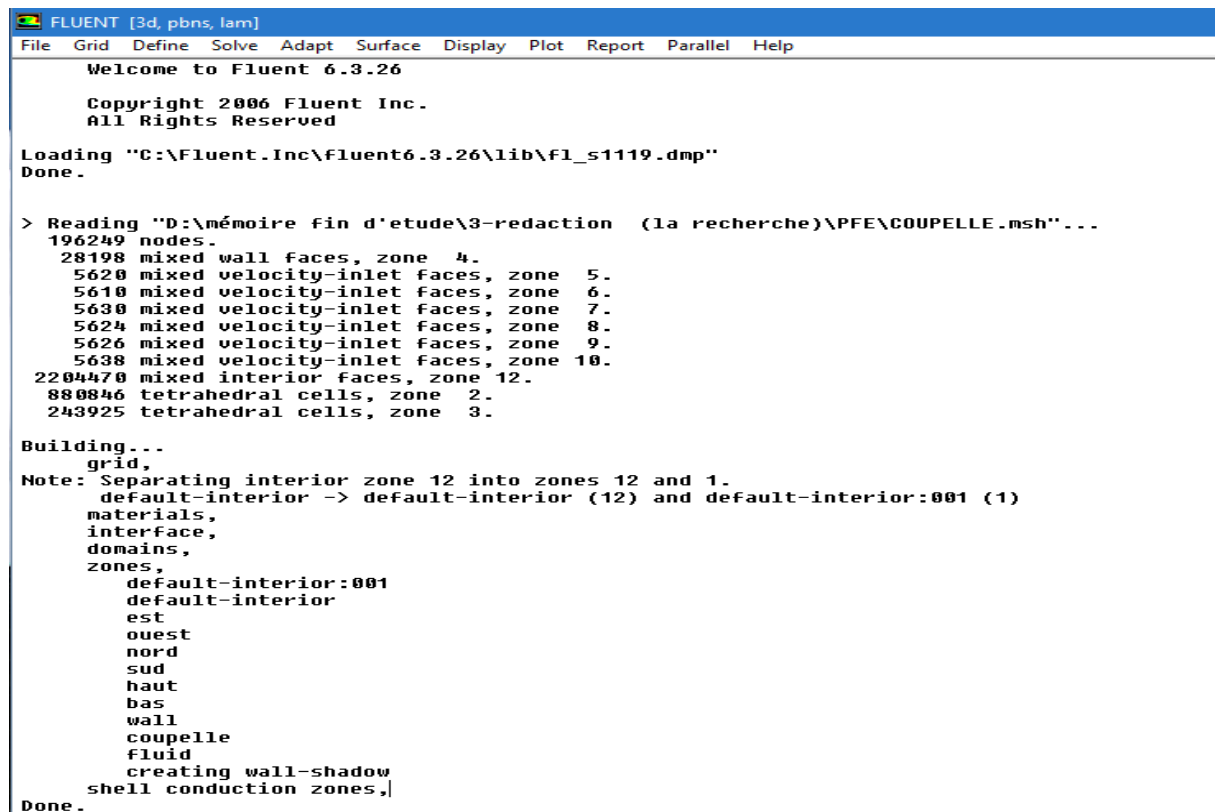


Figure (III-6): Importation de la géométrie générée sous Gambit.

-vérification du maillage importé :

Grid → Check

Ceci permet de vérifier si le maillage importé ne contient pas d'erreurs ou de volumes négatifs, il faut que le mot [Done] s'affiche à la fin.

-vérification de l'échelle :

Grid → Scale

Il faut toujours vérifier que les dimensions affichées correspondent aux dimensions physiques du problème.

-Affichage de la grille :

Display → Grid

Il est possible d'afficher le maillage et il est très judicieux de vérifier les conditions aux limites définies au préalable dans Gambit.

-Choix du solveur :

Define → Models → Solver

On doit utiliser les défauts de résolveur isolé, la formulation implicite, la formulation absolue de la vitesse, c'est là aussi qu'on choisit le régime d'écoulement, permanent ou instationnaire.

-Choix de modèle visqueux :

Define → Model → Viscous

Fluent propose différentes modélisations de l'écoulement peut être turbulent ou laminaire selon le nombre de Reynolds.

Nos calculs seront réalisés en régime turbulent (K-epsilon).

-Définition des caractéristiques du fluide :

Define → Materials

Les caractéristiques du fluide (air), sont chargées à partir de la bibliothèque de données de Fluent.

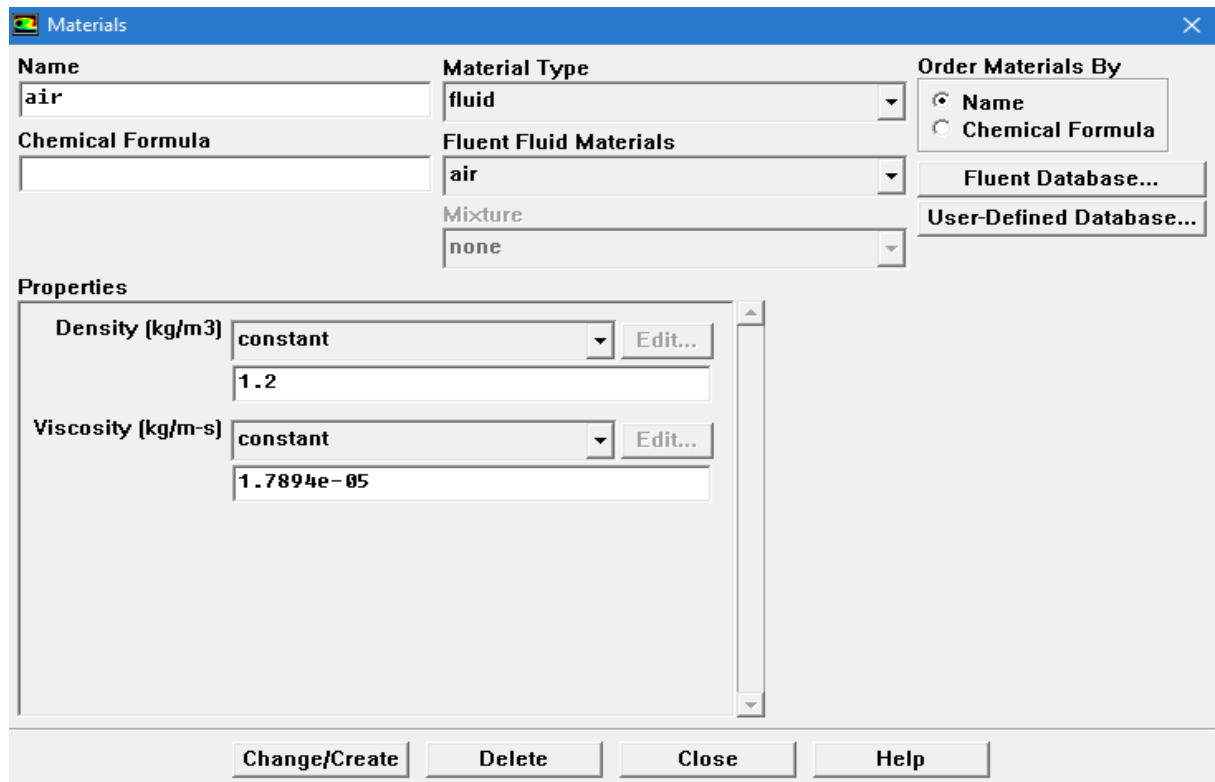


Figure (III-7): Définition des caractéristiques du fluide.

-Conditions aux limites usuelles :

Define → Boundary Conditions

Il faut fixer les valeurs des conditions aux limites pour chaque zone, et donner le type qui correspond.

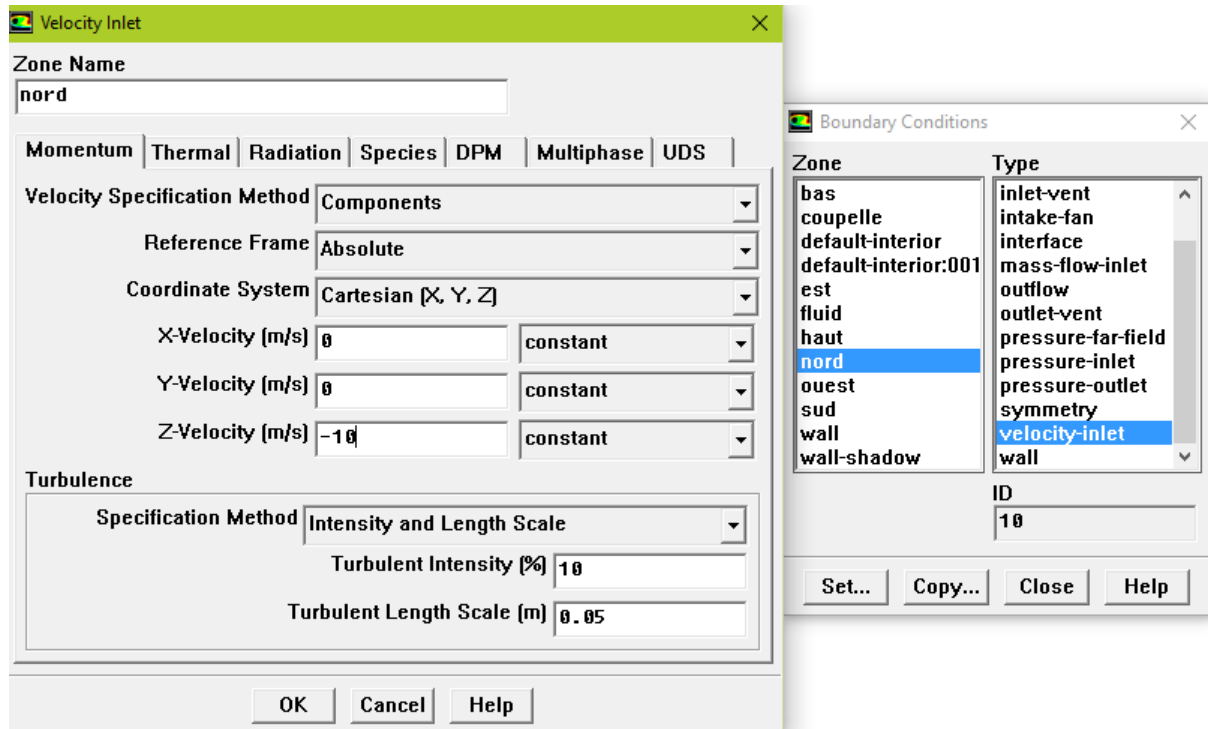


Figure (III-8): Valeurs des conditions aux limites.

-Choix des critères de convergence :

Solve → Monitors → Residual

Il s'agit ici de choisir les critères qui doivent être vérifiés pour que les calculs de la simulation s'arrêtent. Pour afficher la convergence à l'écran pendant les calculs sous forme d'un graphe, il faut activer l'option Plot. Il est possible de désactiver certains critères d'arrêt de la simulation en décochant la case de convergence.

Remarque importante :

Les résidus sont calculés à partir des corrections dans les variables ; pression, vitesse, température... du problème entre la présente itération et l'itération précédente. Dans la plupart des cas, le critère de convergence par défaut dans Fluent (residual) est suffisant. La solution converge quand les résidus atteignent 10^{-3} . Toutefois, dans certains cas il faut pousser les calculs à 10^{-4} voir 10^{-6} . Il n'y a pas de règle universelle (c'est le cas dans notre simulation). [16]

-Initialisation des calculs :

Solve → Initialize

Il est conseillé dans de nombreux cas d'initialiser les calculs aux conditions de l'entrée.

-Sauvegarde du fichier :

File → Write → Case

Il est conseillé qu'une fois le paramétrage est effectué, de sauvegarder le fichier en format *.cas. S'il y a un bug durant les calculs, il suffit de charger le fichier *.cas, on n'aura pas à refaire le paramétrage.

-Lancement de la simulation :

Solve → Iterat

Choisir le nombre d'itérations que Fluent devra réaliser (par exemple 1000), plus la géométrie est complexe, plus il y a des cellules et plus le nombre d'itérations nécessaires avant que le calcul converge sera grand.

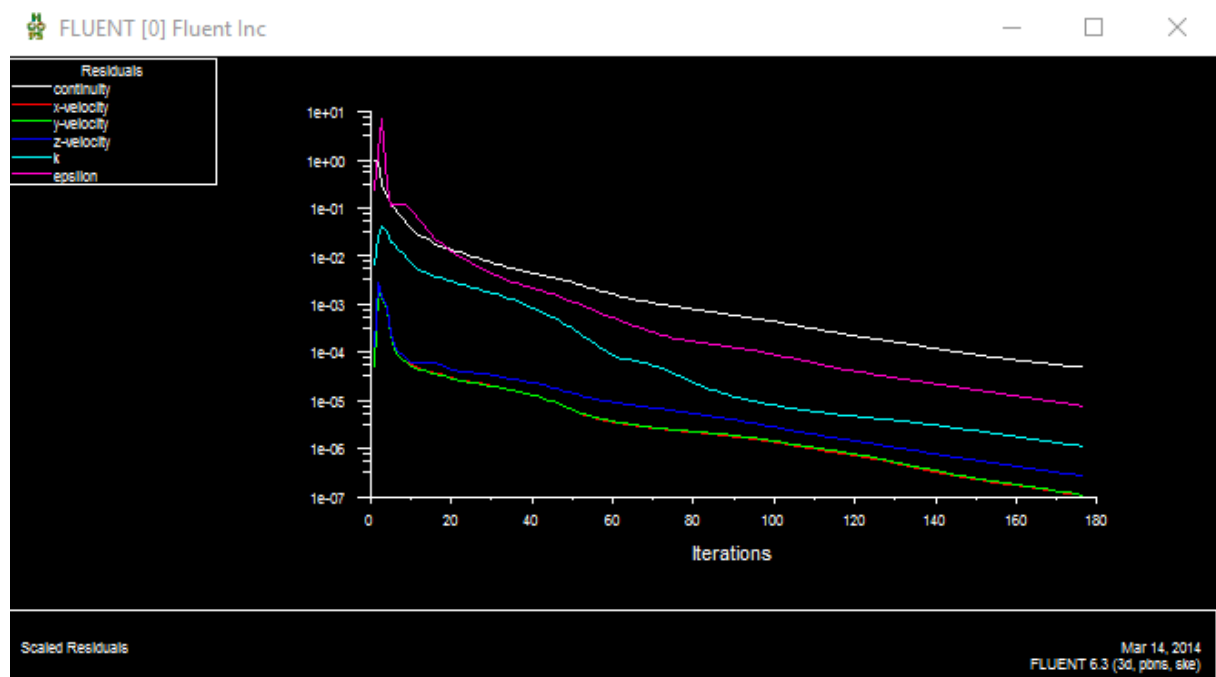


Figure (III-9): Allures de l'évolution des résidus de calcul.

La simulation converge au bout de 290 itérations.

A l'issue des simulations on procède à l'exploitation des résultats. On évalue alors la force qui s'applique sur la coupelle pour différents angles d'incidence et pour différentes intensités (10, 15, 20, 25, 30m/s) de vitesses d'air.

On définit d'abord, les valeurs de références comme suit:

Report → Reference Values

Property	Value
Area (m ²)	0.001962
Density (kg/m ³)	1.2
Enthalpy (J/kg)	0
Length (m)	1
Pressure (pascal)	0
Temperature (K)	288.16
Velocity (m/s)	30
Viscosity (kg/m·s)	1.7894e-05
Ratio of Specific Heats	1.4

Figure (III-10): valeurs de référence.

Ensuite, on affiche l'intensité de la force tangentielle à la trajectoire circulaire de la coupelle dite force de poussée, laquelle s'exprime par:

$$F_P = \frac{1}{2} C_P \rho S V^2 \dots\dots\dots (III-1)$$

ρ : masse volumique de l'air

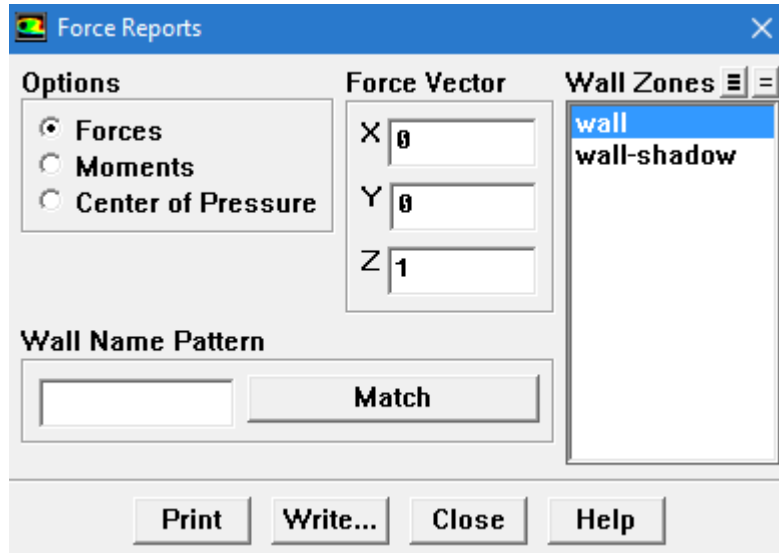
V : vitesse d'écoulement

S : surface de référence (section droite de la coupelle: $S = \pi d^2/4$)

C_p : coefficient de poussée.

Cette force est évaluée selon la procédure suivante:

Report → Force



Force vector: (0 0 1)

zone name	pressure force n	viscous force n	total force n	pressure coefficient	viscous coefficient	total coefficient
wall	0.0013302624	0.00025310364	0.001583366	0.002171857	0.00041323044	0.0025850874
net	0.0013302624	0.00025310364	0.001583366	0.002171857	0.00041323044	0.0025850874

Figure (III-11): Force appliquée sur la coupelle.

5. Résultats et interprétation:

Après avoir calculé la force avec le code Fluent, et par l'application de l'équation (III-1) on a calculé le coefficient de poussée pour chaque valeur d'angle d'incidence et différentes vitesses d'air. On obtient alors des courbes confondus qui présentent un axe de symétrie ($\theta = \pi$) (Figure III-12).

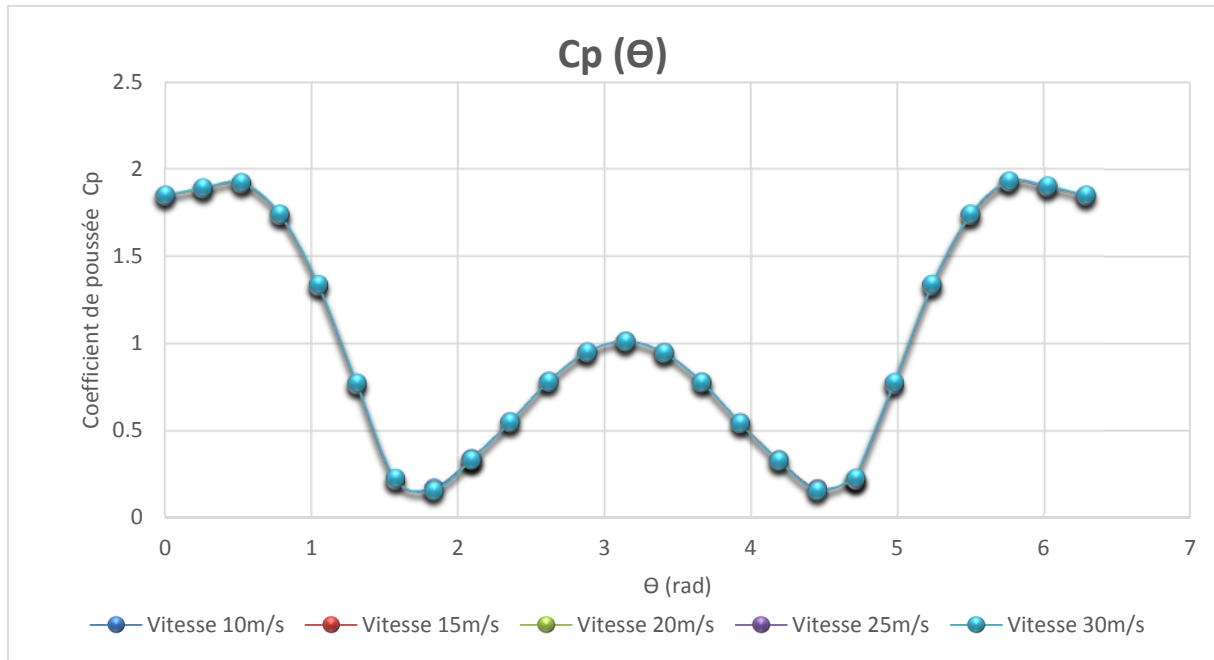


Figure (III-12): Evolution de coefficient de poussée C_p en fonction de l'angle Θ pour les différentes vitesses d'air.

On approche ensuite ces différentes courbes par des courbes de tendance de type polynomiale.

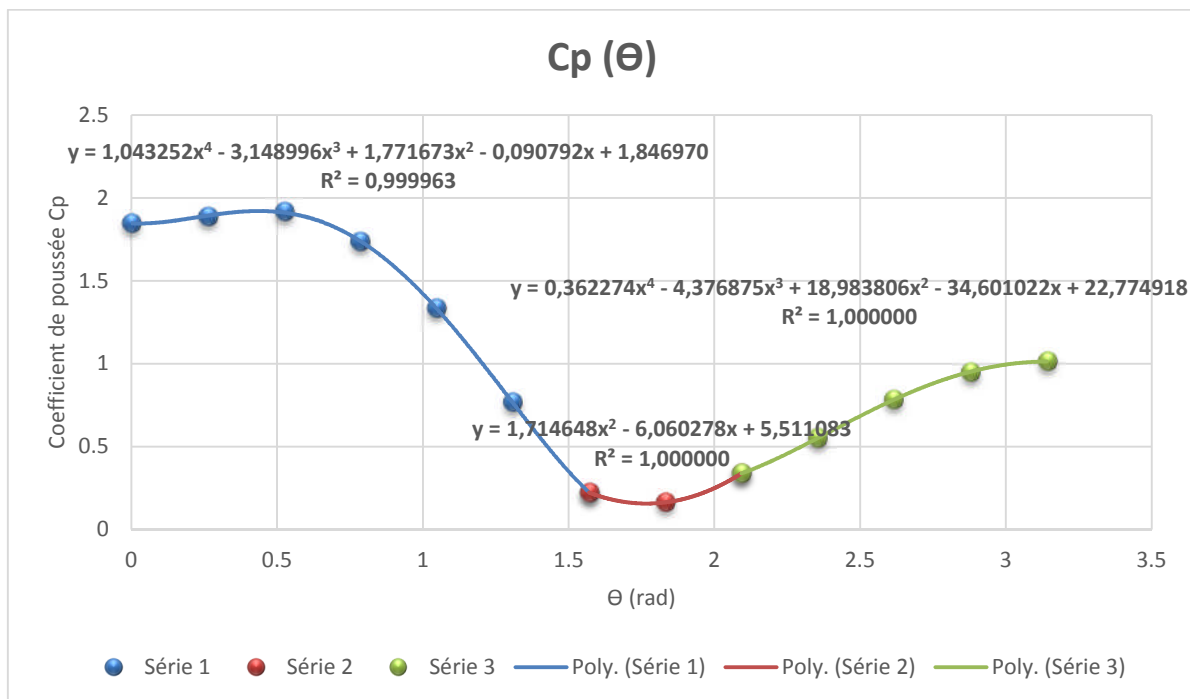


Figure (III-13): Courbes de tendances associées aux intensités de forces par rapport à l'angle d'incidence.

6. Couple appliquée sur la coupelle: C'est la résultante de forces tendant à faire tourner notre système physique. Il est donné par la relation suivante:

$$C = F * R_1 \dots\dots\dots (III-2)$$

F : La force

R_1 : Le bras de levier.

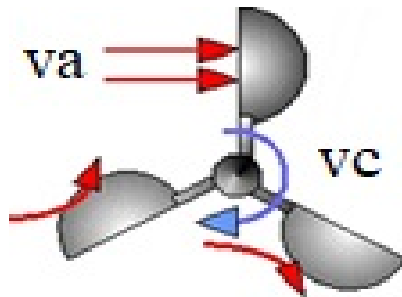


Figure (III-14): Forces appliquées sur l'anémomètre à coupelles.

En posant :

$$R_1 = r - r_c \quad \text{Et} \quad F = \frac{1}{2} C_p \rho_{air} V_r^2 S$$

L'équation (III-2) devient alors :

$$C = \frac{1}{2} C_p \rho_{air} V_r^2 S * (r - r_c) \dots\dots\dots (III-3)$$

C_p : Coefficient de poussée

ρ_{air} : Masse volumique de l'air

S : Section droite de la coupelle

r : Rayon du cercle décrit par le centre des coupelles

r_c : Rayon de la coupelle

V_r : Vitesse relative.

. **La vitesse relative** : est la différence entre la vitesse de l'air et la vitesse de rotation de la coupelle. Elle est donné par:

$$\vec{V}_r = \vec{V}_a - \vec{V}_c \dots \dots \dots \text{(III-4)}$$

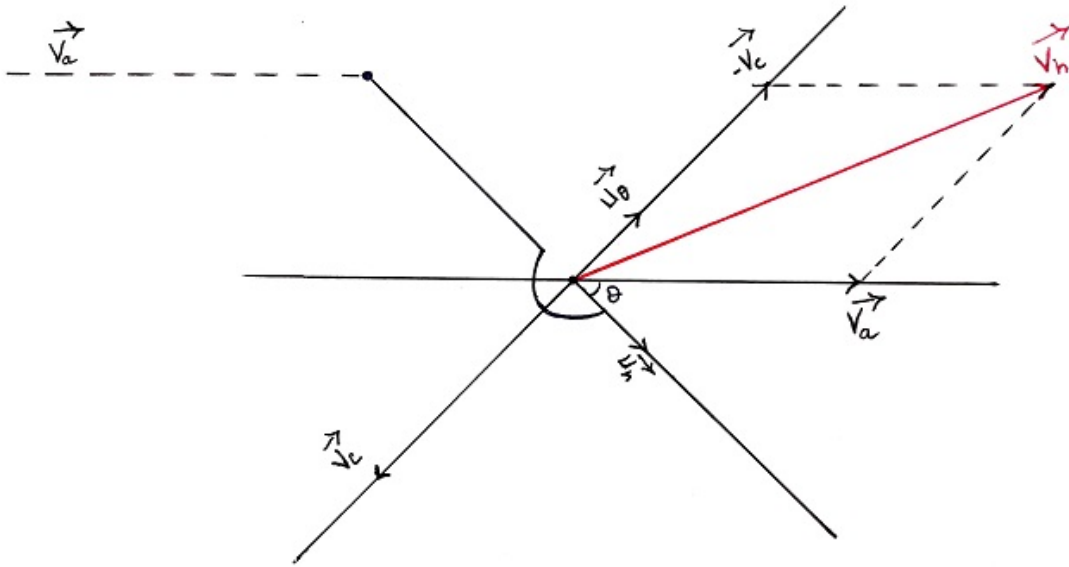


Figure (III-15): La direction de la vitesse relative V_r .

Par projection on obtient:

$$\vec{V}_a = V_a \cos\theta \vec{u}_r + V_a \sin\theta \vec{u}_\theta$$

$$\vec{V}_c = -V_c \vec{u}_\theta$$

L'équation (III-4) devient alors:

$$\vec{V}_r = V_a \cos\theta \vec{u}_r + (V_a \sin\theta + V_c) \vec{u}_\theta$$

$$|\vec{V}_r| = \sqrt{(V_a \cos\theta)^2 + (V_a \sin\theta + V_c)^2} \dots \dots \dots \text{(III-5)}$$

7. Calcul de la vitesse de rotation des coupelles de l'anémomètre:

$$\Sigma_{M/0} = I_d * \ddot{\Theta} \dots\dots\dots \text{(III-6)}$$

$$C(\Theta) - C_f = I_d * \ddot{\Theta} \dots\dots\dots \text{(III-7)}$$

$C(\Theta)$: Couple appliquée sur les coupelles qui est fonction de l'angle Θ .

C_f : Couple de frottement d'un roulement donné par la relation **(II-2)**

I_d : Moment d'inertie

$\ddot{\Theta}$: Accélération angulaire.

7.1. Moment d'inertie : est une grandeur physique qui caractérise la géométrie des masses d'un solide, c'est-à-dire la répartition de la matière en son sein. Il quantifie également la résistance à une mise en rotation de ce solide il est exprimé en kg.m^2 .

$$I = \sum_{i=1}^n m_i r_i^2$$

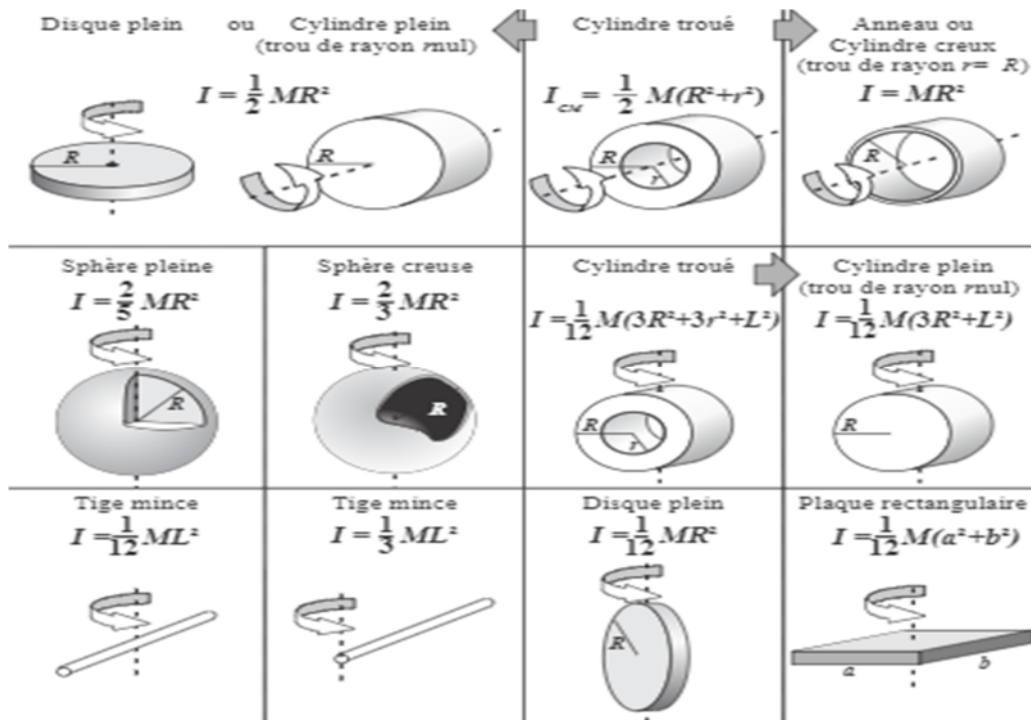


Figure (III-16) : Moments d'inertie de quelques solides usuels.

$$I_d * \ddot{\theta} + \alpha * \dot{\theta} = C(\theta)$$

En posant : $\dot{\theta} = \omega$, il vient que :

$$I_d * \dot{\omega} + \alpha * \omega = C(\theta) \dots\dots\dots \text{(III-8)}$$

Avec: $\alpha = A\omega$

On discrétise $\dot{\omega}$ en utilisant le schéma aval de la méthode des différences finis :

$$\dot{\omega} = \frac{\omega^{t+\Delta t} - \omega^t}{\Delta t}$$

$$\dot{\omega} = \frac{\omega_{i+1} - \omega_i}{\Delta t}$$

L'équation (III-8) devient alors:

$$I_d * \left(\frac{\omega_{i+1} - \omega_i}{\Delta t} \right) + \alpha * \omega_{i+1} = C(\theta_i)$$

$$\frac{I_d}{\Delta t} * \omega_{i+1} + \alpha * \omega_{i+1} = C(\theta_i) + \frac{I_d}{\Delta t} * \omega_i$$

$$\omega_{i+1} = \frac{C(\theta_i) + \frac{I_d}{\Delta t} * \omega_i}{\frac{I_d}{\Delta t} + \alpha} \dots\dots\dots \text{(III-9)}$$

7.2. Organigramme de calcul:

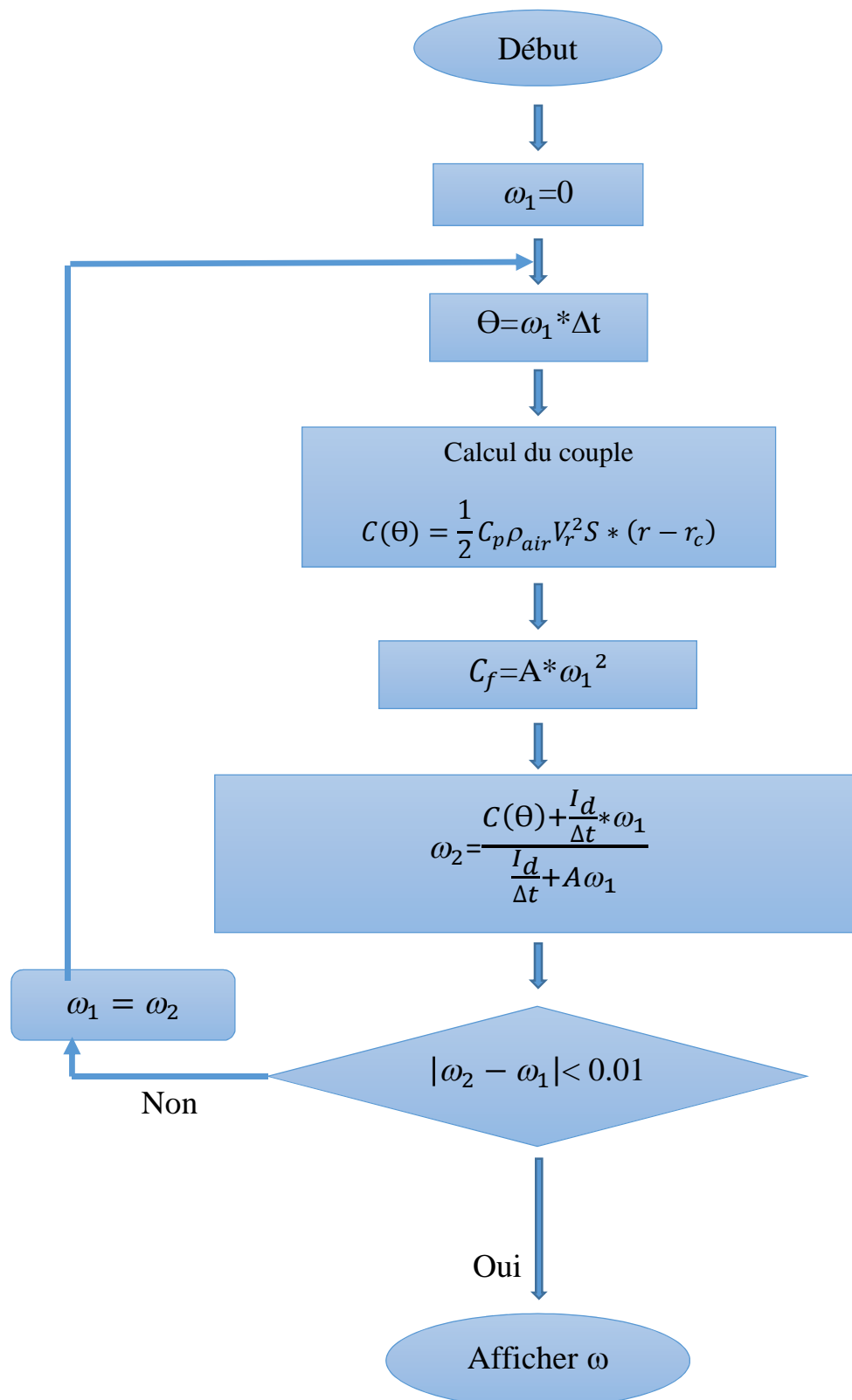


Figure (III-17): Organigramme de calcul de la vitesse de rotation.

8. Résultats:

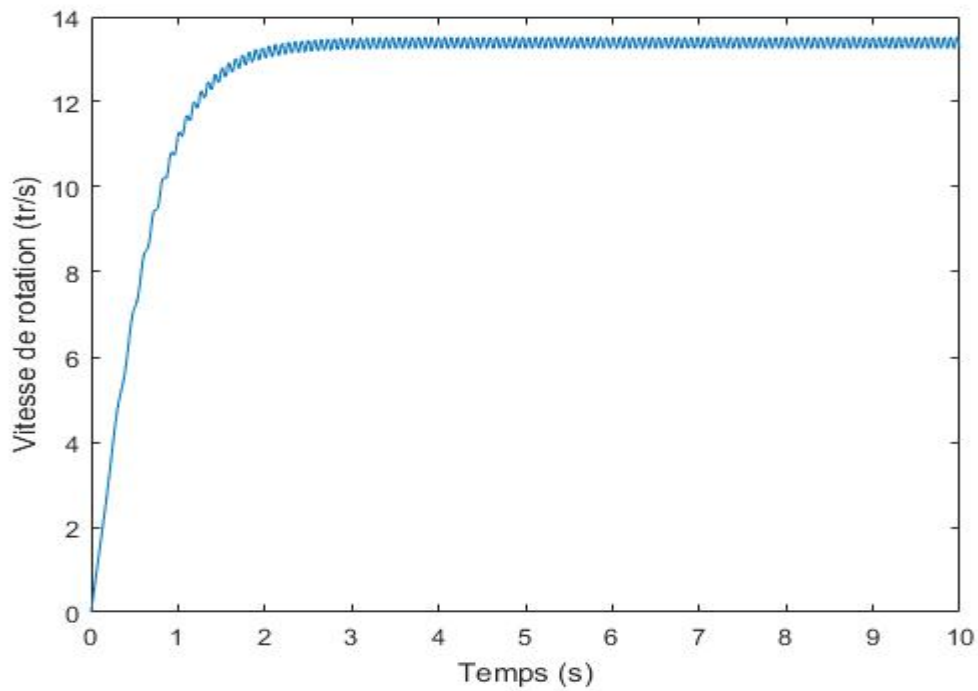


Figure (III-18): Evolution de la vitesse de rotation au cours du temps pour une vitesse d'air de 10m/s.

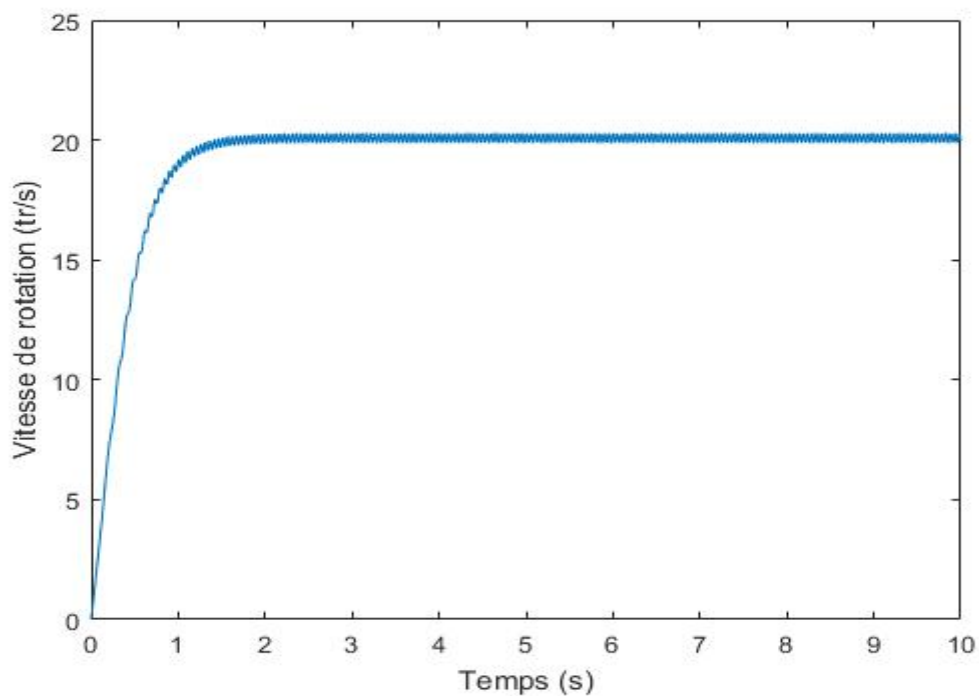


Figure (III-19): Evolution de la vitesse de rotation au cours du temps pour une vitesse d'air de 15m/s.

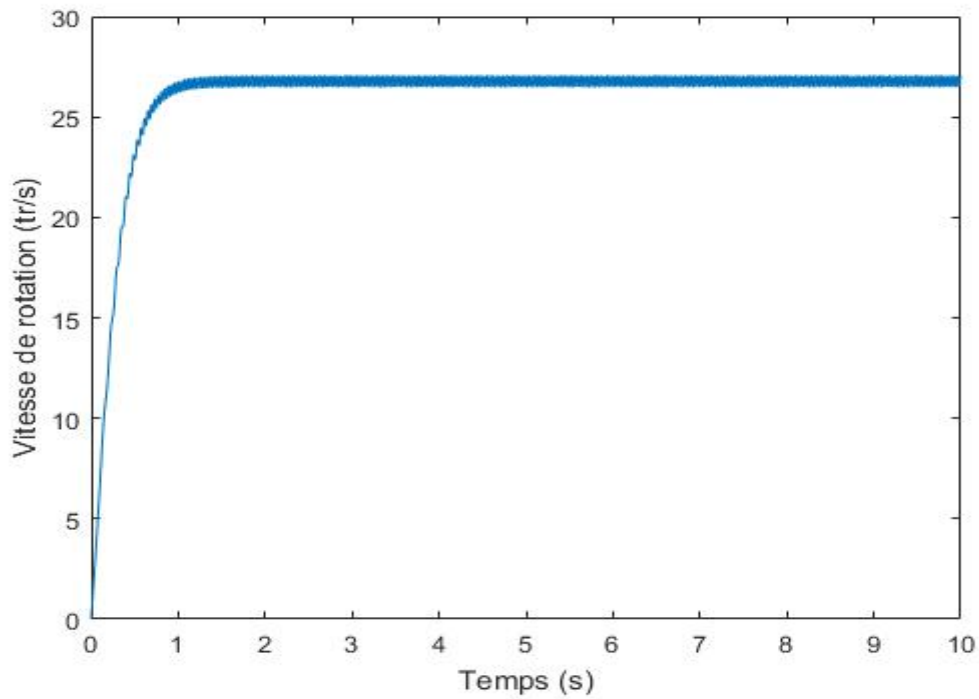


Figure (III-20): Evolution de la vitesse de rotation au cours du temps pour une vitesse d'air de 20m/s.

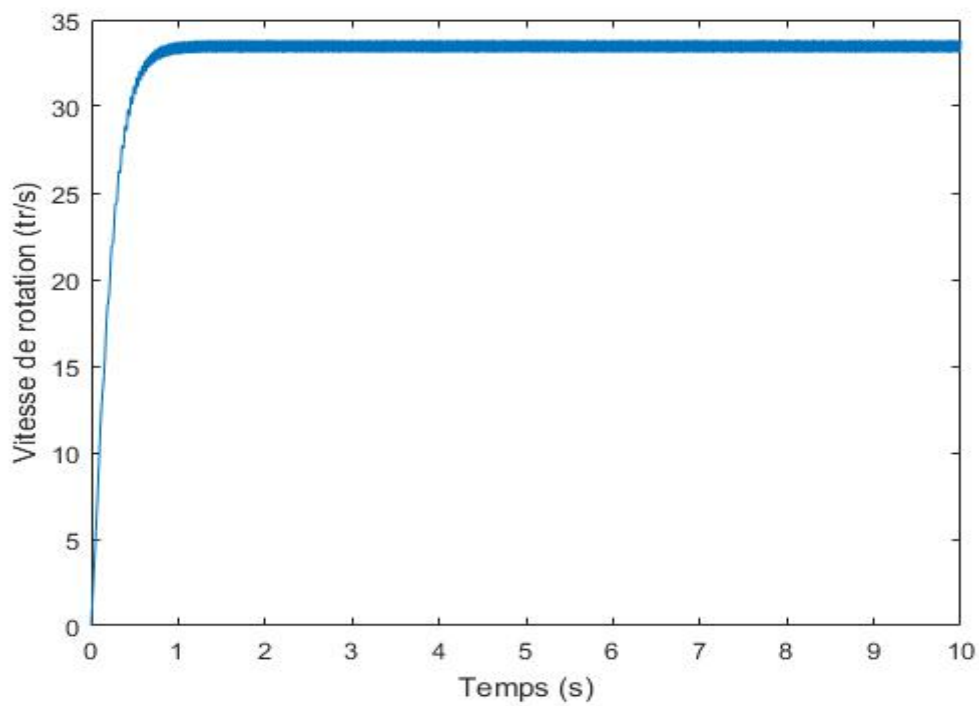


Figure (III-21): Evolution de la vitesse de rotation au cours du temps pour une vitesse d'air de 25m/s.

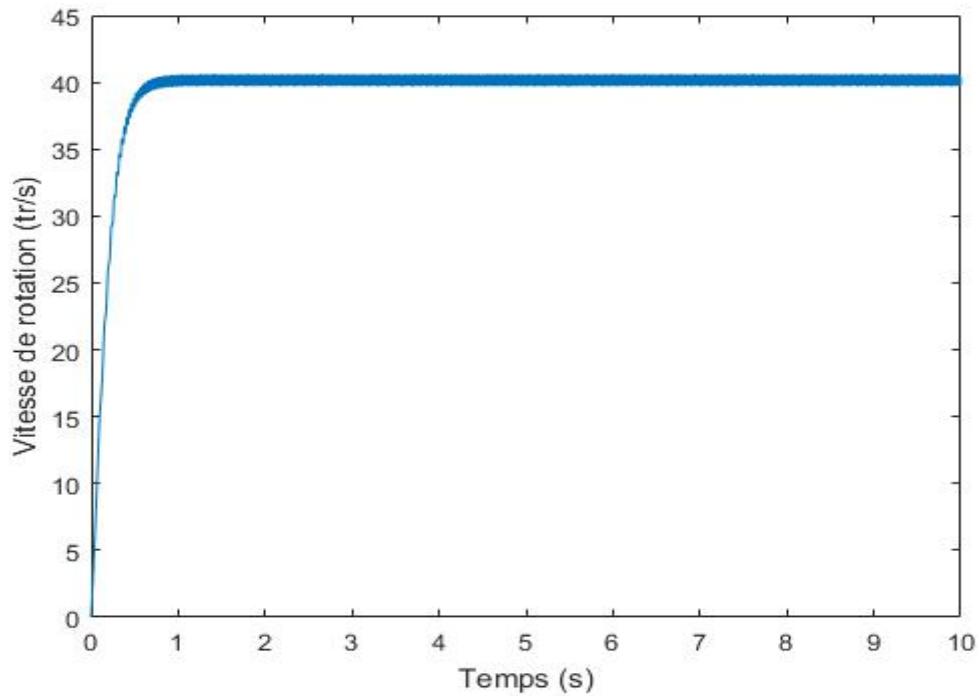


Figure (III-22): Evolution de la vitesse de rotation au cours du temps pour une vitesse d'air de 30m/s.

Il apparaît à travers les figures (III-18-22), que la vitesse angulaire atteint (13, 20, 27, 33, 40 tr/s) respectivement, pour des vitesses d'air de 10, 15, 20, 25 et 30m/s.

9. Comparaison entre valeurs calculées et mesurées:

Tableau (III.1) : Vitesse de rotation des coupelles mesurées et calculées.

Vitesse de rotation mesurée (tr/s)	0	10,66	17,32	26,66	32	40
Vitesse de rotation calculée (tr/s)	0	13,27	20,29	27,05	33,76	40,33
Ecart relatif ε (%)	0	24,48	17,14	1,46	5,5	0,825

Ecart relatif (ε) est donnée par :

$$\varepsilon = \frac{\omega_{cal} - \omega_{mes}}{\omega_{mes}} * 100$$

D'après le tableau de comparaison (**Tableau III.1**) : On distingue que les écarts sont très importants pour des vitesses d'écoulements d'air à ses faibles due aux vibrations dans la soufflerie, qui peuvent causer des défaillances.

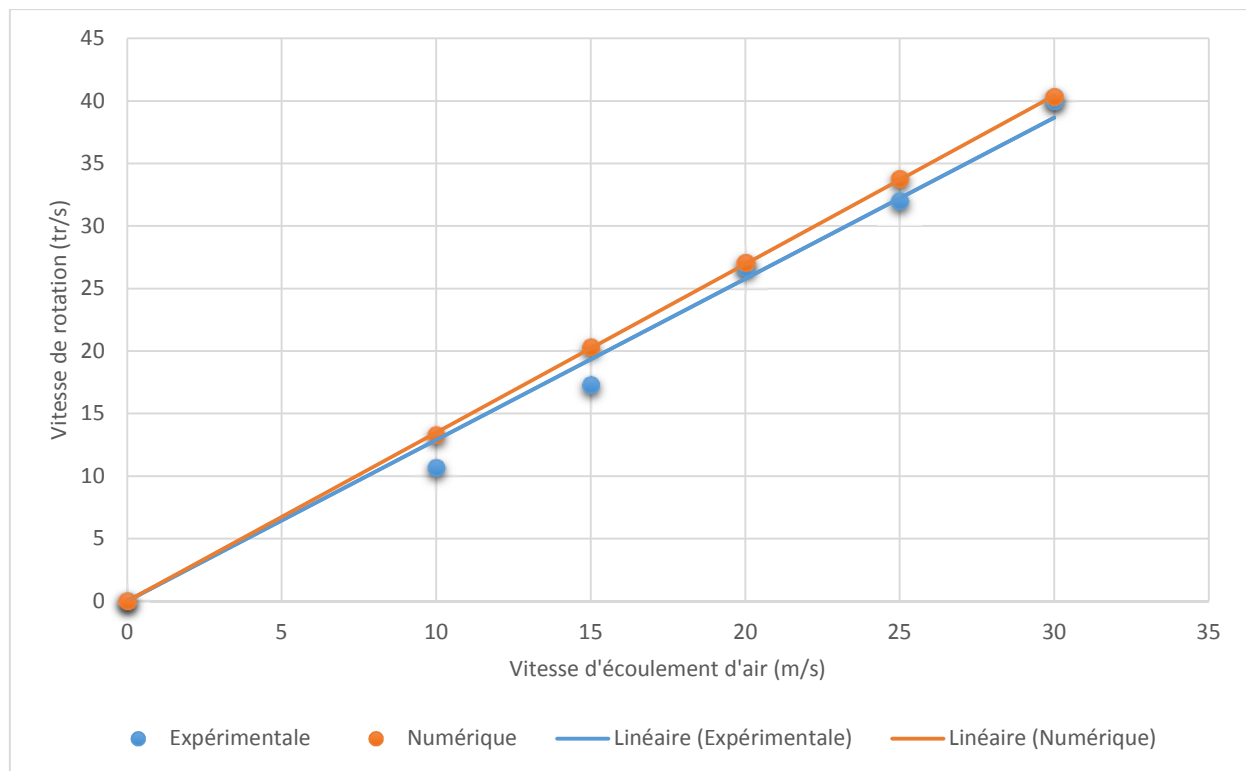


Figure (III-23): Comparaison des résultats expérimentaux et numérique pour la vitesse de rotation.

D'après la figure **(III-23)** on remarque que les résultats issus de la simulation numérique sont proches de ceux qu'on a obtenus expérimentalement.

Par ailleurs, pour des vitesses d'air inférieures à 10 m/s les valeurs calculées restent en bon accord avec celle fournie par la courbe d'étalonnage.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le présent travail constitue une étude expérimentale et numérique d'un anémomètre à coupelles.

Il s'agit de réaliser puis d'expérimenter un anémomètre à coupelles pour la mesure de la vitesse du vent. Après avoir réalisé cet anémomètre des essais en soufflerie ont été effectués, afin d'étalonner l'anémomètre à coupelles.

Pour ce faire, un système d'acquisition de données a été nécessaire. Il a permis d'enregistrer les vitesses de rotation de l'anémomètre au regard des vitesses de l'air.

L'étude numérique a permis de proposer un modèle de calcul de la vitesse de rotation.

En première étape, le couple engendré par la force dynamique de l'air en écoulement est d'abord déterminé à travers des simulations avec fluent.

L'équation différentielle issue de la première loi de Newton est ensuite résolue par la méthode des différences finies.

Les valeurs calculées et mesurées de la vitesse de rotation de l'anémomètre ont été ensuite confrontées. Ce qui a montré une bonne concordance entre les deux approches.

Bibliographie

- [1] LEROY, MICHEL et GRÉGOIRE, Pierre., 10 sept. 2005, « Mesures en météorologie ». Dans : « Caractérisation des fluides », Editions T.I. [Paris, France].
- [3] M. SATHAYAJITH, « wind energy fundamentals, resource analysis and economics » assistant professor and wind energy consultant faculty of engineering, KCAET.
- [5] Document Dantec "Streamline" (1999), n°194-111-02.
- [6] N. CHAGGAGA, Etude et réalisation d'un anémomètre sans capteur spécifique, Mémoire de fin d'étude, Université Saad Dahleb Blida 1 Institut d'Aéronautique et des Etudes spatiales 2018-2019.
- [7] Article : anémomètre. Sur omega-engeniring.posté 28 août 2018.
- [8] Chevalier-Andre-Guide du dessinateur industriel-Livre-eleve-Ed-2004.
- [9] SYLVAIN PHILIPPOI, Etude expérimentale du frottement sec à grande vitesse de glissement. Thèse de doctorat, Université de Metz, France 2004.
- [10] BOUMRAR IDDIR, Comportement des ailes delta à apex privilégiés avec et sans fuselage, Etude expérimentale et simulation numérique, Thèse de doctorat, U.M.M.T.O Le 13 Septembre 2012.
- [11] N.BELLIFA, Etude expérimentale des profils aérodynamiques dans une soufflerie de laboratoire, Mémoire de fin d'étude, Université Aboubakr BelKaid Tlemcen 2015-2016.
- [12] SuhasV.Pakantar: Numerical heat transfer and fluid flow; Hemisphere publishing corporation, Etas-Unis d'Amérique; 1980.
- [13] Y. MENNI, Etude numérique comparative entre deux types de chicanes ailettes (trapézoïdale et triangulaire) utiliser pour améliorer les performances des capteurs solaire plans a air, Thèse de Magistère, Université Abou Bekrbelkaid Tlemcen 2011-2012.

[14] H.AOUAICHIA, Etude thermique et simulation numérique de l'ascension d'une bulle dans un milieu continu au repos, Thèse de Magistère, Université d'Oran des sciences de la technologie (USTO-MB) 2014-2015.

[15] H. GHAEDAMINI, P.S.LEE, C.J.TEO: Developing forced convection in convergingdiverging micro-channel, Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol 65, P.P 491-499, 2013.

[16] DJ. FEDALA, "Simulation numérique des écoulements internes dans les turbomachines", Laboratoire d'Energétique et de Mécanique des Fluides Interne ENSAM, CER de Paris, OCTOBRE 2007.

Sites web :

[2] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Anémomètre> [page consultée le 27 Décembre 2020].

[4] www.th-industrie.com.

Annexes

Annexes

Annexe A : Force et coefficient de poussée en fonction d'angle d'incidence pour V=10m/s.

Cp	F (N)	Θ (rad)
1.845350	0.21729	0
1.886369	0.22212	0.262
1.913205	0.22528	0.523
1.733503	0.20412	0.785
1.327983	0.15637	1.046
0.762547	0.08979	1.308
0.216475	0.02549	1.57
0.174352	0.02053	1.832
0.341316	0.04019	2.093
0.341316	0.04019	2.093
0.553121	0.06513	2.355
0.784203	0.09234	2.616
0.952696	0.11218	2.878
1.014692	0.11948	3.14
0.949639	0.11182	3.402
0.781316	0.092	3.663
0.547600	0.06448	3.925
0.336050	0.03957	4.186
0.170530	0.02008	4.448
0.217664	0.02563	4.71
0.217664	0.02563	4.71
0.764416	0.09001	4.972
1.329596	0.15656	5.233
1.733418	0.20411	5.495
1.923991	0.22655	5.756
1.894352	0.22306	6.018
1.845350	0.21729	6.28

Annexe B : Force et coefficient de poussée en fonction d'angle d'incidence pour V=15m/s.

Cp	F (N)	Θ (rad)
1.848058	0.48962	0
1.888407	0.50031	0.262
1.918641	0.50832	0.523
1.737277	0.46027	0.785
1.333031	0.35317	1.046
0.768936	0.20372	1.308
0.222882	0.05905	1.57
0.163397	0.04329	1.832
0.338192	0.0896	2.093
0.338192	0.0896	2.093
0.551262	0.14605	2.355
0.782901	0.20742	2.616
0.951507	0.25209	2.878
1.013408	0.26849	3.14
0.948110	0.25119	3.402
0.779768	0.20659	3.663
0.545826	0.14461	3.925
0.332870	0.08819	4.186
0.164453	0.04357	4.448
0.222995	0.05908	4.71
0.222995	0.05908	4.71
0.771049	0.20428	4.972
1.334729	0.35362	5.233
1.737202	0.46025	5.495
1.927548	0.51068	5.756
1.899768	0.50332	6.018
1.848058	0.48962	6.28

**Annexe C : Force et coefficient de poussée en fonction d'angle d'incidence
pour V=20m/s.**

Cp	F (N)	Θ (rad)
1.848811	0.87079	0
1.888174	0.88933	0.262
1.920212	0.90442	0.523
1.739023	0.81908	0.785
1.335201	0.62888	1.046
0.771592	0.36342	1.308
0.225668	0.10629	1.57
0.161167	0.07591	1.832
0.336454	0.15847	2.093
0.336454	0.15847	2.093
0.550084	0.25909	2.355
0.781932	0.36829	2.616
0.951040	0.44794	2.878
1.012314	0.4768	3.14
0.947303	0.44618	3.402
0.778577	0.36671	3.663
0.544649	0.25653	3.925
0.331146	0.15597	4.186
0.160486	0.075589	4.448
0.226050	0.10647	4.71
0.226050	0.10647	4.71
0.774012	0.36456	4.972
1.336963	0.62971	5.233
1.738917	0.81903	5.495
1.929171	0.90864	5.756
1.900594	0.89518	6.018
1.848811	0.87079	6.28

**Annexe D : Force et coefficient de poussée en fonction d'angle d'incidence
pour V=25m/s.**

Cp	F (N)	Θ (rad)
1.849273	1.36095	0
1.890432	1.39124	0.262
1.921059	1.41378	0.523
1.739971	1.28051	0.785
1.336608	0.98366	1.046
0.773231	0.56905	1.308
0.227573	0.16748	1.57
0.159198	0.11716	1.832
0.335245	0.24672	2.093
0.335245	0.24672	2.093
0.549367	0.4043	2.355
0.781275	0.57497	2.616
0.949863	0.69904	2.878
1.011797	0.74462	3.14
0.946969	0.69691	3.402
0.777960	0.57253	3.663
0.543701	0.40013	3.925
0.329987	0.24285	4.186
0.159143	0.11712	4.448
0.227750	0.16761	4.71
0.227750	0.16761	4.71
0.775459	0.57069	4.972
1.338483	0.98504	5.233
1.739916	1.28047	5.495
1.930177	1.42049	5.756
1.901207	1.39917	6.018
1.849273	1.36095	6.28

Annexe E : Force et coefficient de poussée en fonction d'angle d'incidence pour $V=30\text{m/s}$.

C_p	F (N)	θ (rad)
1.849615	1.96013	0
1.891012	2.004	0.262
1.921774	2.0366	0.523
1.740806	1.84482	0.785
1.337645	1.41757	1.046
0.774503	0.82078	1.308
0.229072	0.24276	1.57
0.157565	0.16698	1.832
0.334333	0.35431	2.093
0.334333	0.35431	2.093
0.548733	0.58152	2.355
0.780787	0.82744	2.616
0.949384	1.00611	2.878
1.011087	1.0715	3.14
0.945779	1.00229	3.402
0.777419	0.82387	3.663
0.543090	0.57554	3.925
0.329049	0.34871	4.186
0.157810	0.16724	4.448
0.229318	0.24302	4.71
0.229318	0.24302	4.71
0.776805	0.82322	4.972
1.339193	1.41921	5.233
1.740655	1.84466	5.495
1.930625	2.04598	5.756
1.901863	2.0155	6.018
1.849615	1.96013	6.28

Annexe F : Présentation de MATLAB.

MATLAB est un logiciel commercial de calcul interactif. Il permet de réaliser des simulations numériques basées sur des algorithmes d'analyse numérique. Il peut donc être utilisé pour la résolution approchée d'équations différentielles, d'équations aux dérivées partielles ou de systèmes linéaires, etc....Son objectif, par rapport aux autres langages, est de simplifier au maximum la transcription en langage informatique d'un problème mathématique, en utilisant une écriture la plus proche possible du langage naturel scientifique.

Le logiciel fonctionne sous Windows et sous Linux. Son interface de manipulation HMI (Human Machine Interface) utilise les ressources usuelles du multifenêtrage. Son apprentissage n'exige que la connaissance de quelques principes de base à partir desquels l'utilisation des fonctions évoluées est très intuitive grâce à l'aide intégrée aux fonctions.



Figure (1) : Interface de MATLAB.

Annexe G : Le programme sous MATLAB.

```

1
2 -   clear all; clc;
3
4   % rayon de anemometre
5 -   r=0.105;
6   % vitesse air
7 -   Va=30;
8   % rayon des coupelles
9 -   rc=0.025;r=0.105
10
11  %masse de une coupelle
12 -  m=25e-3;
13  % coefficient frottement
14 -  A=1.05e-5;
15  % moment inertie
16 -  Io=1/3*m*rc^2+m*(r-rc)^2;
17 -  Io=3*Io;
18 -  a=0;w(1)=0;dt=0.001;
19 -  angle(1)=0;
20 -  time(1)=0;
21 -  for i=1:10000
22
23 -     time(i+1)=i*dt;
24 -     teta0=a;
25
26 -     tetal=teta0;
27 -     eta=3.14/2-tetal;
28 -     Vr=((Va-(r-rc)*w(i)*sin(eta))^2+ ((r-rc)*w(i)*cos(eta))^2)^0.5;
29 -     Vr1=Vr,

```

```

30
31 - s=floor(tetal/(2*3.14));
32 - teta=tetal-s*6.28;
33
34
35
36 - tgB=(Va*sin(teta)-r*w(i))/Va*cos(teta);
37 - beta=atan(tgB);
38 - teta=beta+6.28;
39 - s=floor(teta/(2*3.14));
40 - teta=teta-s*6.28;
41 % tet1=teta,
42
43
44 - if ((teta<1.57) && (teta>=0))
45 -     CP1(i)= 1.043*teta^4-3.148*teta^3+1.771*teta^2-0.090*teta+1.846;
46 - end
47
48 - if (teta<2.093 && teta>=1.57)
49 -     CP1(i)= -(1.714*teta^2-6.060*teta+5.511);
50 - end
51
52 - if (teta<3.14 && teta>=2.093)
53 -     CP1(i)=- ( 0.362*teta^4-4.376*teta^3+18.983*teta^2-34.601*teta+22.774);
54 - end
55
56 - if (teta<4.186 && teta>=3.14)
57 -     tet=6.28-teta;
58 -     CP1(i)= -(0.362*tet^4-4.376*tet^3+18.983*tet^2-34.601*tet+22.774);
59
60 - end
61
62
63 - if (teta<4.71 && teta>=4.186)
64 -     tet=6.28-teta;
65 -     CP1(i)= -(1.714*tet^2-6.060*tet+5.511);
66 - end
67
68 - if (teta<6.28 && teta>=4.71)
69 -     tet=6.28-teta;
70 -     CP1(i)= (1.043*tet^4-3.148*tet^3+1.771*tet^2-0.090*tet+1.846);
71 - end
72
73 - Cl(i)=CP1(i)*1/2*1.20*Vr^2*3.14*rc^2*(r-rc);
74
75
76
77
78 - teta2=tetal+2*3.14/3;
79 - eta=3.14/2-teta2;
80 - Vr=((Va-(r-rc)*w(i)*sin(eta))^2+ ((r-rc)*w(i)*cos(eta))^2)^0.5;
81 - Vr2=Vr,
82 - s=floor(teta2/(2*3.14));
83 - teta=teta2-s*6.28;
84
85
86 - tgB=(Va*sin(teta)-r*w(i))/Va*cos(teta);
87 - beta=atan(tgB)+6.28;

```

```

88 -     teta=beta;
89 -     s=floor(teta/(2*3.14));
90 -     teta=teta-s*6.28;
91 -
92 -
93 -     % tet2=teta,
94 -
95 -     if ((teta<1.57) && (teta>=0))
96 -         CP2(i)= 1.043*teta^4-3.148*teta^3+1.771*teta^2-0.090*teta+1.846;
97 -     end
98 -
99 -     if (teta<2.093 && teta>=1.57)
100 -         CP2(i)= -(1.714*teta^2-6.060*teta+5.511);
101 -     end
102 -
103 -     if (teta<3.14 && teta>=2.093)
104 -         CP2(i)= -(0.362*teta^4-4.376*teta^3+18.983*teta^2-34.601*teta+22.774);
105 -     end
106 -
107 -     if (teta<4.186 && teta>=3.14)
108 -         tet=6.28-teta;
109 -         CP2(i)= -(0.362*tet^4-4.376*tet^3+18.983*tet^2-34.601*tet+22.774);
110 -
111 -     end
112 -
113 -
114 -     if (teta<4.71 && teta>=4.186)
115 -         tet=6.28-teta;
116 -         CP2(i)= -(1.714*tet^2-6.060*tet+5.511);
117 -
118 -     end
119 -
120 -     if (teta<6.28 && teta>=4.71)
121 -         tet=6.28-teta;
122 -         CP2(i)= (1.043*tet^4-3.148*tet^3+1.771*tet^2-0.090*tet+1.846);
123 -     end
124 -
125 -     C2(i)=CP2(i)*1/2*1.20*Vr^2*3.14*rc^2*(r-rc);
126 -
127 -     teta3=teta2+4*3.14/3;
128 -     eta=3.14/2-teta3;
129 -     Vr=((Va-(r-rc)*w(i)*sin(eta))^2+ ((r-rc)*w(i)*cos(eta))^2)^0.5;
130 -     Vr3=Vr,
131 -     w(i),
132 -     s=floor(teta3/(2*3.14));
133 -     teta=teta3-s*6.28;
134 -
135 -     tgB=(Va*sin(teta)-r*w(i))/Va*cos(teta);
136 -     beta=atan(tgB)+6.28;
137 -     teta=beta;
138 -     s=floor(teta/(2*3.14));
139 -     teta=teta-s*6.28;
140 -     % tet3=teta,
141 -     % pause
142 -     % clc
143 -
144 -

```

```

145 -     if ((teta<1.57) && (teta>=0))
146 -         CP3(i)= 1.043*teta^4-3.148*teta^3+1.771*teta^2-0.090*teta+1.846;
147 -     end
148
149 -     if (teta<2.093 && teta>=1.57)
150 -         CP3(i)= -(1.714*teta^2-6.060*teta+5.511);
151 -     end
152
153 -     if (teta<3.14 && teta>=2.093)
154 -         CP3(i)= -(0.362*teta^4-4.376*teta^3+18.983*teta^2-34.601*teta+22.774);
155 -     end
156
157 -     if (teta<4.186 && teta>=3.14)
158 -         tet=6.28-teta;
159 -         CP3(i)= -(0.362*tet^4-4.376*tet^3+18.983*tet^2-34.601*tet+22.774);
160
161 -     end
162
163
164 -     if (teta<4.71 && teta>=4.186)
165 -         tet=6.28-teta;
166 -         CP3(i)= -(1.714*tet^2-6.060*tet+5.511);
167 -     end
168
169 -     if (teta<6.28 && teta>=4.71)
170 -         tet=6.28-teta;
171 -         CP3(i)= (1.043*tet^4-3.148*tet^3+1.771*tet^2-0.090*tet+1.846);
172 -     end
173
174
175 -     ang(i)=teta0;
176
177 -     C3(i)=CP3(i)*1/2*1.20*Vr^2*3.14*rc^2*(r-rc);
178
179 -     COUPLE(i)=((C1(i)+C2(i)+C3(i)));
180
181 -     alpha=A*w(i);
182
183 -     w(i+1)=dt/Io*(COUPLE(i)-alpha*w(i))+w(i);
184 - % w(i+1)=(COUPLE(i)+Io/dt*w(i))/(Io/dt+alpha);
185 -     angle(i+1)=w(i+1)*dt+angle(i);
186 -     a=angle(i+1);
187 -     if a<0
188 -         s=floor(abs(a/(2*3.14)));
189 -         a=abs(a+6.28*(s));
190 -     end
191 -     if a>0
192 -         s=floor(abs(a/(2*3.14)));
193 -         a=(a-6.28*(s));
194 -     end
195
196 -     OMEGA=w(i+1)/6.28;
197 - end
198 - plot(time, w/6.28)

```

Figure (2) : La boucle programmée sous MATLAB.