

Développement d'un banc expérimental de mesure de frottement visqueux



Etudiants :

Kenza AZZABI ZOURAQ Daouda GUEYE

Alexandre HMIDI Guillaume LAVIGNE

Shuangjia YANG

Enseignant-responsable du projet :

Clément KELLER

Date de remise du rapport : **16/06/2019**

Référence du projet : **STPI/P6/2019 – 13**

Intitulé du projet : Développement d'un banc expérimental de mesure de frottement visqueux

Type de projet : **expérimental**

Objectifs du projet :

Réaliser un banc expérimental de mesures de frottements visqueux afin de pouvoir vérifier les expressions théoriques des forces de frottements fluides. Expérimenter le travail de groupe, la mise en oeuvre d'un projet et les enjeux du métier d'ingénieur. Acquérir des connaissances en matière de frottements fluides, de l'expérience pratique sur le travail manuel. Savoir mettre en pratique les connaissances théoriques obtenues suite à une étude.

Mots-clefs du projet : **Frottements visqueux, expérimental, banc**

TABLE DES MATIERES

1-Introduction	6
2-Organisation du travail	7
3-Travail réalisé et résultats	7
3.1 Partie Théorique	7
3.1.1 Théorie Aérodynamique sur les frottements visqueux	7
3.1.1.1 Couche Limite	7
3.1.1.2 Couche limite laminaire et Couche limite turbulente :	8
3.1.1.3 Décollement de la couche limite :	9
3.1.1.4 Les force de frottement au final :	10
3.1.2 Formules et théories sur les frottements visqueux	11
3.2 Contexte Expérimental	15
3.2.1 Le Dispositif	15
3.2.1.1 Le banc	17
3.2.1.2 Les solides	17
3.2.2 Le Protocole expérimental	18
4-Conclusions et perspectives	19
4.1 Commentaires	19
4.1.1 Le banc	20
4.1.2 Les solides	20
4.1.3 Solutions	21
4.2 Conclusion	22
5-Bibliographie	23

1. INTRODUCTION

En mécanique (classique et du fluide), les forces de frottements occupent une place importante car responsables de pertes d'énergies. Le but des avancées technologiques étant de produire des machines de plus en plus performantes et au rendement élevé, la détermination des forces de frottements représente donc un enjeu important.

Nous distinguons deux types de frottements :

- Les frottements solides : ils sont indépendants de la vitesse de glissement du solide. Il y a le frottement sec statique (force ou couple de forces qui tend à garder un corps en état statique) et le frottement sec cinétique ou dynamique (force qui tend à réduire l'énergie cinétique d'un solide glissant sur une surface).

- Les frottements visqueux : il s'agit de forces (ou couples) de frottement qui dépendent de la vitesse relative des deux corps en mouvement.

Tout au long de ce projet, nous allons nous intéresser uniquement aux forces de frottements visqueux et aux moyens expérimentaux de déterminer l'expression de celles-ci en fonction de la vitesse des corps en mouvement. D'un point de vue historique et général, l'expression connue de ces forces de frottements n'a pu être obtenue que de manière empirique par expérimentation. Ainsi, le but de ce projet est de mettre en évidence le phénomène de frottement fluide et surtout de vérifier les expressions connues des forces de frottement fluide (voir contexte théorique) grâce à la mise en œuvre d'un banc de mesure de frottements visqueux.

Dans un second temps, vu le caractère empirique (pas de démonstrations mathématiques) des expressions des forces de frottements fluides, nous comprenons qu'il est difficile pour un élève de STPI1 de cerner le phénomène relatif à ces forces dans le cadre de l'EC P2. C'est ainsi, que nous allons proposer aux étudiants de STPI1, une vidéo illustrant le phénomène de frottements visqueux afin que ces forces soient pour eux plus qu'une formule purement théorique à retenir par cœur.

2. ORGANISATION DU TRAVAIL

Afin de réaliser ces objectifs, nous avons décidé de réaliser un banc vertical qui nous permettrait de mesurer la force exercé par l'air . Pour optimiser la réalisation du banc et la rédaction du présent rapport, nous avons décidé de répartir le travail par groupe de deux pour les différentes manipulations à faire sur le banc avec une personne qui fera le pivot entre les deux groupes pour vérifier la cohérence du travail effectué entre les deux groupes.

3. TRAVAIL RÉALISÉ ET RÉSULTATS

3.1. Partie Théorique

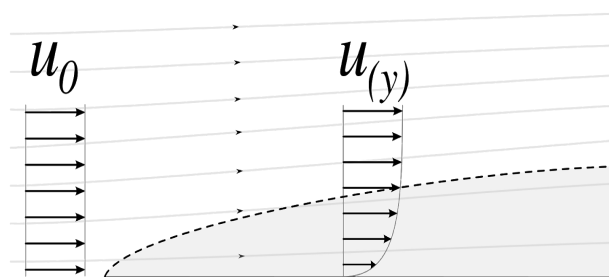
3.1.1. Théorie Aérodynamique sur les frottements visqueux

3.1.1.1 Couche Limite

La couche limite est la zone d'interface entre un corps et le fluide environnant lors d'un mouvement relatif entre les deux, conséquence de sa viscosité.

Lorsque le fluide (air) coule sur une surface d'objet qui n'est pas absolument lisse, cette surface exerce une force de ralentissement sur l'ensemble de particules gazeuses les plus proches de la surface, ce qui provoque la chute de sa vitesse à zéro. Ensuite, cet ensemble va traîner l'ensemble extérieur adjacent , faisant baisser sa vitesse et ainsi de suite. Cela forme une fine couche d'air à la surface de l'objet et dans la direction normale à la surface, la vitesse du courant augmentant progressivement de zéro à la vitesse d'écoulement de l'air extérieur

Figuré ci-dessous :



Profil de vitesse au travers d'une couche limite au-dessus d'une plaque¹

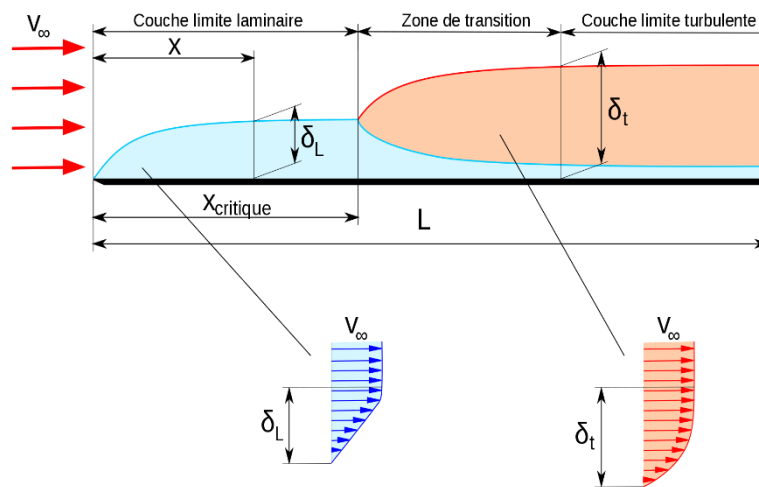
¹ https://fr.wikipedia.org/wiki/Couche_limite#/media/File:Laminar_boundary_layer_scheme.svg

Plus la longueur de contact est importante, plus la surface traînera longtemps l'ensemble de particules gazeuses. Progressivement le flux d'air extérieur proche de la couche limite se transformera en une partie de la couche limite et la couche limite deviendra plus épaisse.

On appelle δ l'épaisseur de la couche limite. On définit en général δ l'épaisseur de la couche limite comme l'épaisseur dans laquelle les particules de fluides ont une vitesse moyenne donnée par $V \leq 0,99U_e$, U_e étant la vitesse de l'écoulement « extérieur », c'est-à-dire « au sommet » de la couche limite.

3.1.1.2 Couche limite laminaire et Couche limite turbulente :

Lorsque le fluide (air) coule sur une surface d'objet, les mouvements verticaux des particules deviennent plus importants et désordonnés, et le courant devient de plus en plus instable, ce qui forme la couche limite turbulente.



Couches Limites²

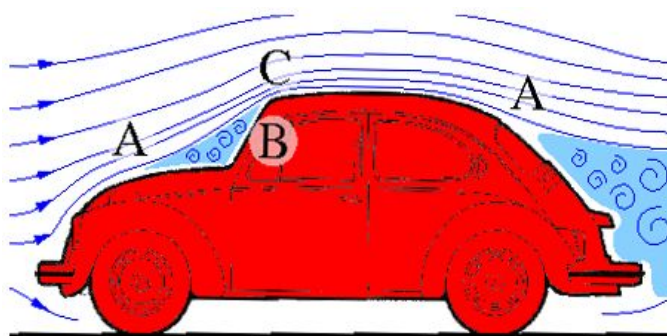
Comme expliqué dans la partie [1], la couche limite turbulente sera plus épaisse que la couche limite laminaire. De plus, les ensembles de particules ayant des mouvements verticaux créent des forces de traînée entre les 'sous-couches'. Par conséquent, proche de

² https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/17/Boundary_Layer_Fr.svg

la surface d'objet , l'effet de traînée est beaucoup plus important dans la couche limite turbulente.

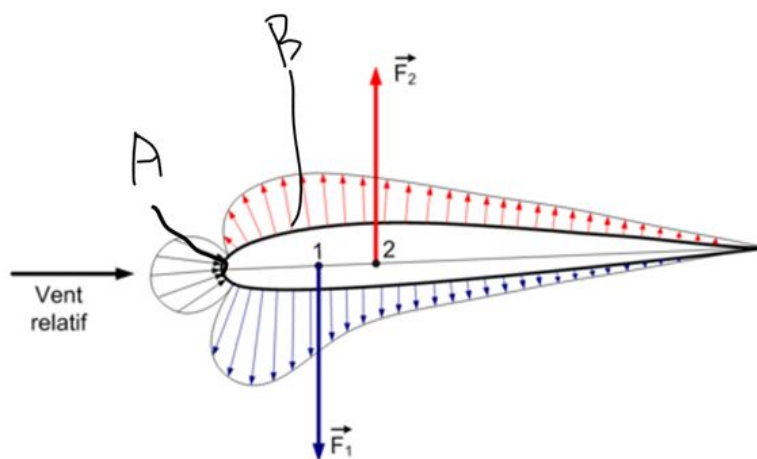
3.1.2.3 Décollement de la couche limite :

Le décollement de la couche limite apparaît quand la couche limite ne suit plus les contours du solide. Sur le schéma ci-dessous, en aval du point de séparation (A) se forme, entre le courant laminaire (en bleu , les lignes de courant) et la surface, un domaine tourbillonnant (en bleu clair). Le courant non turbulent peut rejoindre le contour du solide à un autre point (C). Ainsi, l'espace d'air entre le point de séparation et de jonction constitue une bulle turbulente (B).



Courant avec les lignes de courant laminaire (bleu) pour une voiture (rouge) avec séparation de la couche limite (A) et une bulle de séparation (B). On peut décrire le débit au point C.

Dans notre cas de boue-cône, la répartition de pression (relative à la pression atmosphère, négative mais en valeur absolue) peut être similaire à la représentation ci-dessous, la différence étant que dans notre cas, la répartition est symétrique par révolution et ne crée pas de portance comme le ferait une aile d'avion.



Répartition de pression

(Selon l'équation de Bernoulli : $P + \frac{1}{2} \rho v^2 = P_0 = cte$)

Au point A, la vitesse extérieure (extérieure* à la couche limite) est réduite à 0 (pression extérieure* maximum), et elle a son maximum au point B (pression extérieure* minimum). Après le point B, la vitesse diminue et la pression extérieure augmente. Cela crée un gradient de pression négatif, ce qui traîne le flux de courant. En conséquence, le courant d'air dans la couche limite va être vite ralenti dès qu'il pénètre dans la zone de gradient de pression négatif, produisant partiellement un courant inverse. Ce courant inverse sera en collision avec des courants arrivant juste après, ce qui cause le décollement de la couche limite avec la surface de l'objet. La couche limite qui s'est décollée est ensuite en collision avec le courant principal, engendrant des fortes turbulences. Ces turbulences sont poussées sans cesse vers l'arrière par le courant principal, formant finalement une importante zone de turbulences au bout de l'objet.

Dans cette zone de turbulences, l'énergie des particules d'air est perdue sous forme de chaleur par effet de friction. La pression est largement diminuée, ce qui apporte **une différence de pression** entre le dôme (paraboloïde de révolution) formé par la demi-boule et la pointe du cône.

* : Il faut noter que l'équation néglige la viscosité, elle ne s'applique ni dans la couche limite ni dans la zone de turbulence. C'est pourquoi on a marqué précédemment extérieur*

3.1.1.4 Les forces de frottement au final :

- Frottement dû à la viscosité :

Cette force de frottement n'existe que dans la couche limite. D'après la troisième loi de Newton, les particules dans la couche limite sont traînées par la surface, et la surface subit une force de frottement de valeur équivalente, dans le sens opposé. Comme expliqué dans la partie **3.1.1.2**, le frottement sur la surface qui est en contact avec la couche limite turbulente est plus fort que celui sur la surface qui est en contact avec la couche limite laminaire.

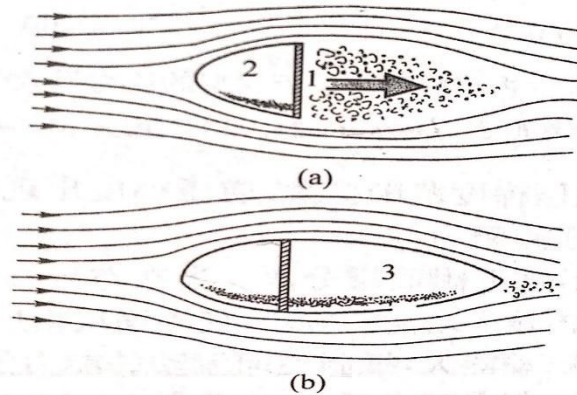
Parmi les mesures permettant d'améliorer l'aérodynamisme, on comptera notamment :

- 1) Maintenir la surface lisse dans le but d'allonger la couche limite laminaire.
- 2) Réduire la zone de contact entre l'air et l'objet.

- Frottement dû à la différence de pression :

Comme expliqué dans **3.1.1.4**, il existe une différence de pression entre l'avant et l'arrière de l'objet. Prenons l'exemple d'un disque posé verticalement, il y aura deux grandes zones de turbulence de chaque côté. Cela nous donne une force de frottement importante due à la différence de pression.

Pour améliorer cela, si le solide a un bord suivant les lignes de courant, alors les grandes zones sont assez bien remplies, nous laissant une toute petite zone de turbulence à la queue de l'objet. La différence de pression est diminuée. Figuré ci-dessous :



La forme qui remplit la zone de turbulence

3.1.2 Formules et théories sur les frottements visqueux

Dans ce projet qui consiste à réaliser un banc de mesure expérimentale de frottements fluides. A cet effet nous avons décidé de tester plusieurs formes, dans cette partie nous nous proposons de calculer de manière théorique les forces de frottements s'exerçant sur ces différentes formes pour pouvoir par la suite comparer nos résultats.

Pour calculer ces forces nous utilisons les formules suivantes

-pour les faible vitesse (<5m/s) :

$$F = - C v$$

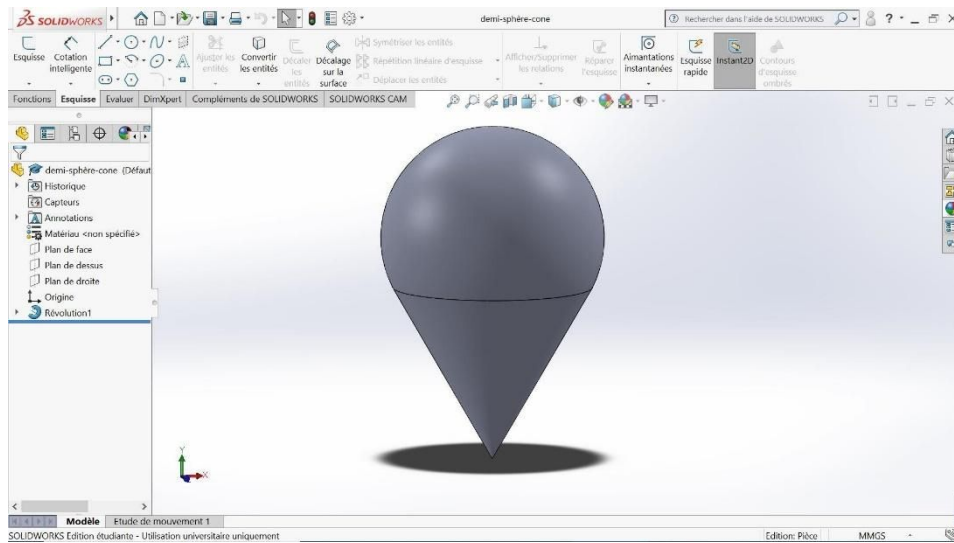
-pour les grandes vitesse (>5m/s) :

$$F = \frac{1}{2} \rho C S v^2$$

avec:

- ρ la masse volumique du fluide dans lequel l'objet est placé
- C le coefficient de traînée qui est obtenu expérimentalement (en mesurant la force de façon expérimentale puis en appliquant la formule citée plus haut)
- v la vitesse relative de l'objet par rapport au fluide
- et S la surface opposée à la vitesse du fluide.

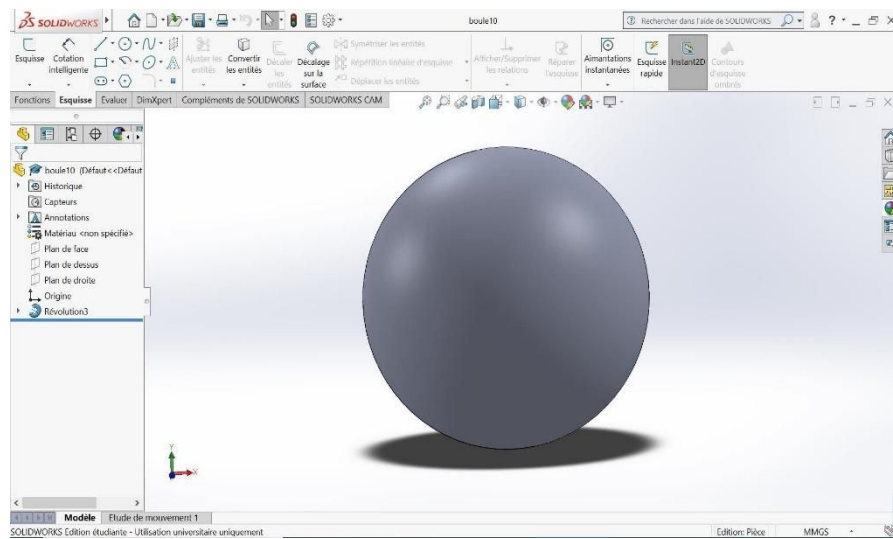
Nous avons appliqué ces deux formules aux formes suivantes :



Demi-boule cône

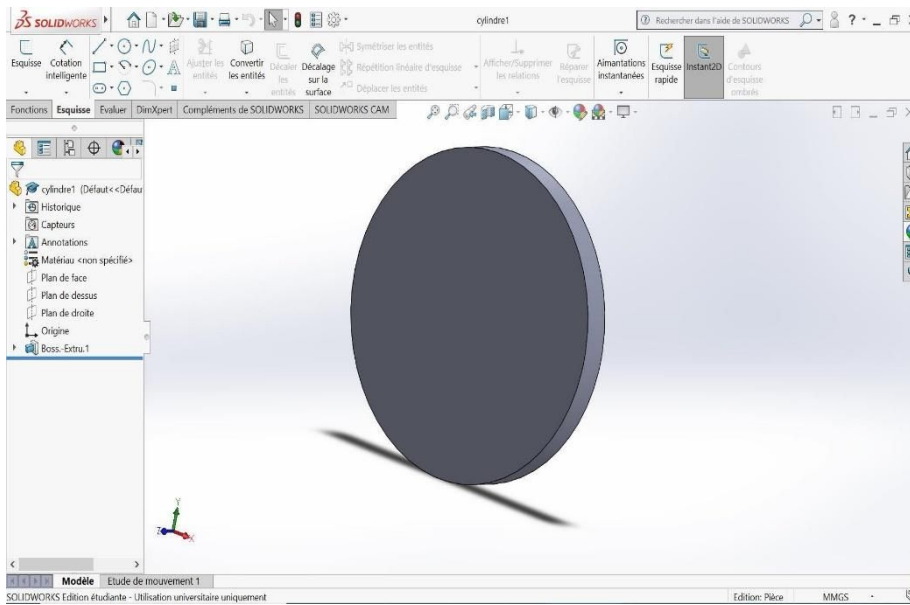
Pour cette forme à 6 mètres par seconde : $F = 1.38 N$

Pour une vitesse de 1m/s : $F = 0.04 N$



Boule

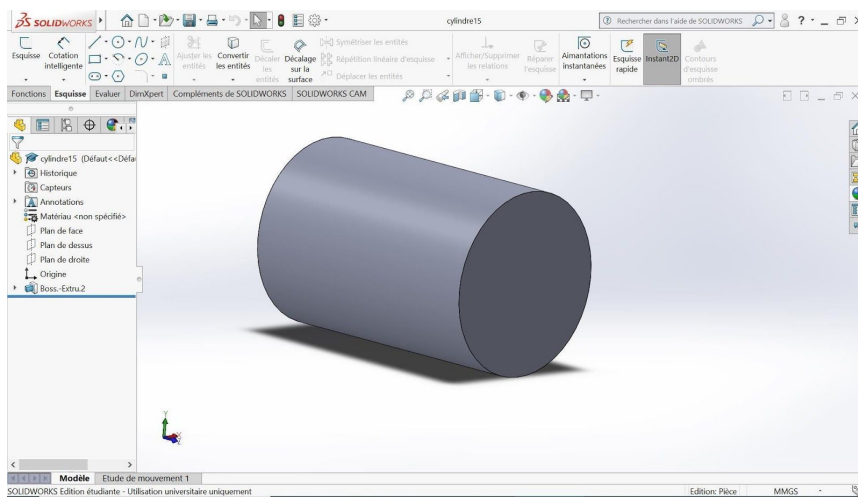
Pour cette forme à 6 mètres par seconde : $F = 15.58 N$, pour une vitesse de 1m/s : $F = 0.45 N$



Cylindre de faible épaisseur

Pour cette forme à 6 mètres par seconde : $F = 45.72 N$

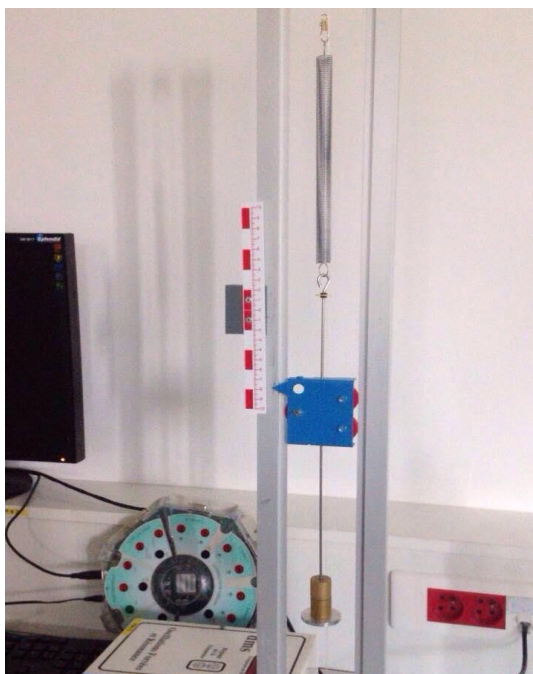
Pour une vitesse de 1m/s : $F = 1.32 N$



Cylindre

Sur cette forme les forces de frottements devrait être les mêmes que sur celle-ci-dessus car les formules utilisée ne dépendent apparemment pas de la longueur de l'objet. Ce que nous pourrions vérifier lors de la réalisation de notre projet.

Nous avons aussi dû choisir un ressort avec une raideur adapter au poids de nos objet. A cet effet nous avons-nous avons mesuré la raideur de deux ressort différents à l'aide d'un banc de mesures (voir image ci-dessous).



masses	Ressort 1	Ressort 2
50	4.3	2.4
100	7.9	4.8
150	11.5	7.2
200	15.1	9.9

Résultats obtenu

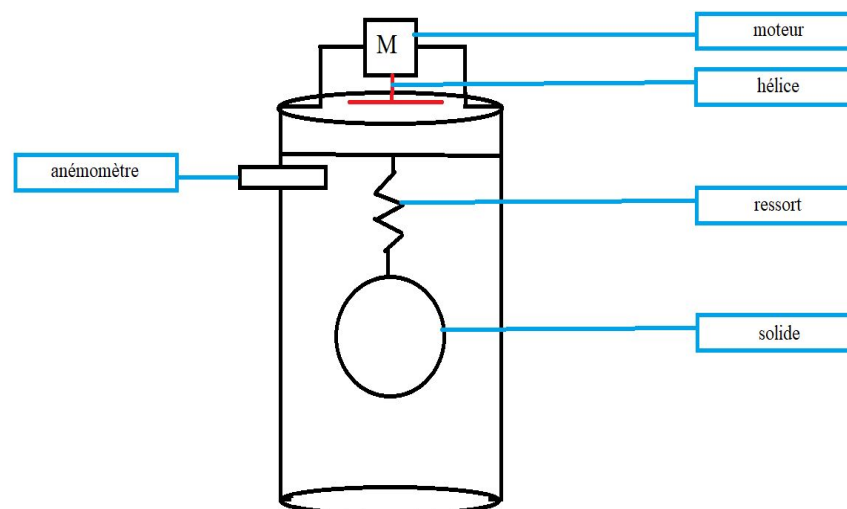
Grâce au tableau de valeur précédent nous avons pu déduire que la raideur du premier ressort est de 1.32 et la raideur du second ressort est de 2.02. le poids de nos objets n'étant

pas très élevés et les vitesses de l'air que nous pourrions obtenir n'étant pas très rapides nous avons donc décidé de prendre le premier ressort.

3.2. Contexte Expérimental

3.2.1 Le Dispositif

Afin de réaliser nos expérimentations, nous avons optés dès la première séance pour un banc vertical (voir schéma ci-dessous). Ce choix nous paraissait logique puisque le but du projet est de mesurer les frottements visqueux et donc d'avoir le minimum possible affaire aux frottements secs. Dans ce projet, nous avons décidé de mettre le fluide (l'air) en mouvement par rapport au solide et non l'inverse car cette méthode est beaucoup plus simple à mettre en oeuvre. Les résultats obtenus seraient identiques si c'était le solide qui



était en mouvement à une vitesse v par rapport au fluide.

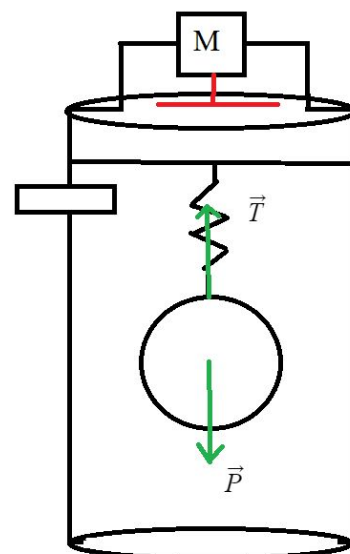
Bilan des forces :

$$\vec{P} = M \times \vec{g} \quad : \text{ poids du solide}$$

$$\vec{T} = k \times x_o \times (-\vec{y}) \quad : \text{ tension du ressort}$$

PFD : $\vec{P} + \vec{T} = \vec{0}$ en projetant sur l'axe (Oy) orienté vers le bas on a :

$$M \times g = k \times x_o \Rightarrow x_o = \frac{M \times g}{k} \quad (1)$$



Ensuite, en appliquant le PFD, au solide lorsque le moteur est allumé on a :

Bilan des forces :

$\vec{P} = M \times \vec{g}$: poids du solide

$\vec{T} = k \times x_o \times (-\vec{y})$: tension du ressort

\vec{F} : force de frottements visqueux

PFD : $\vec{P} + \vec{T} + \vec{F} = \vec{0}$ (on attend le moment où le système est en équilibre) d'où en projetant comme précédemment on a :

$M \times g + F = k \times x \Rightarrow F = k \times x - M \times g = k \times (x - \frac{M \times g}{k})$ donc d'après (1) on a :

$$F = k \times (x - x_o)$$

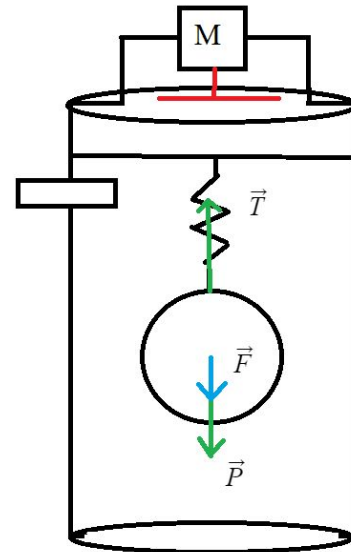


Schéma du bilan des forces (allumé)

Avec ce banc, nous pouvons donc obtenir les valeurs des forces de frottements visqueux sans considérer d'éventuels frottements secs qui pourraient fausser les résultats ou encore sans se soucier du poids du solide. Le résultat ne dépend que de la raideur du ressort (k) et de l'allongement de celui-ci.

Ainsi, notre banc permet de mesurer les frottements visqueux dues au déplacement de l'air (généré par une hélice) sur des solides de différentes formes. En effet, comme précisé plus haut, la valeur des frottements visqueux varient suivant la forme du solide qui subit ces frottements. Nous avons donc créés deux solides par impression 3D, une boule et une demi-boule cône (forme de cornet de glace) afin de vérifier la valeur des frottements visqueux pour ces deux cas. Le banc est constitué de deux parties : le banc en lui même et les différents solides que l'on accroche sur le ressort.

3.2.1.1 Le banc

Il s'agit d'une partie d'un tuyau en PVC présent dans les laboratoires de mécanique que nous avons réutilisé. Il a 15 cm de diamètre et mesure 1m20 de long sans les barres de

support qui ajoutent 60cm de hauteur à l'ensemble . Nous l'avons modifier au fur et à mesure des séances afin d'obtenir le meilleur rapport efficacité/coût possible. Il est lui même constitué de deux parties :

- La partie supérieure : où nous retrouvons le moteur (10500 tr/min) , l'hélice, le support pour le ressort et l'anémomètre.

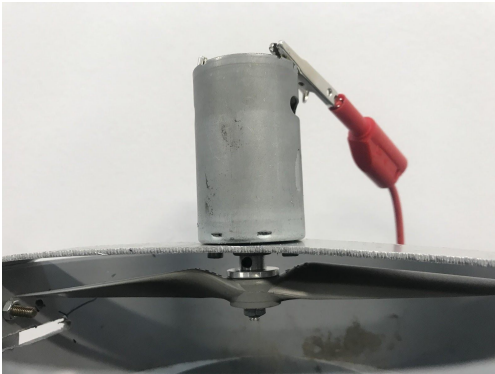
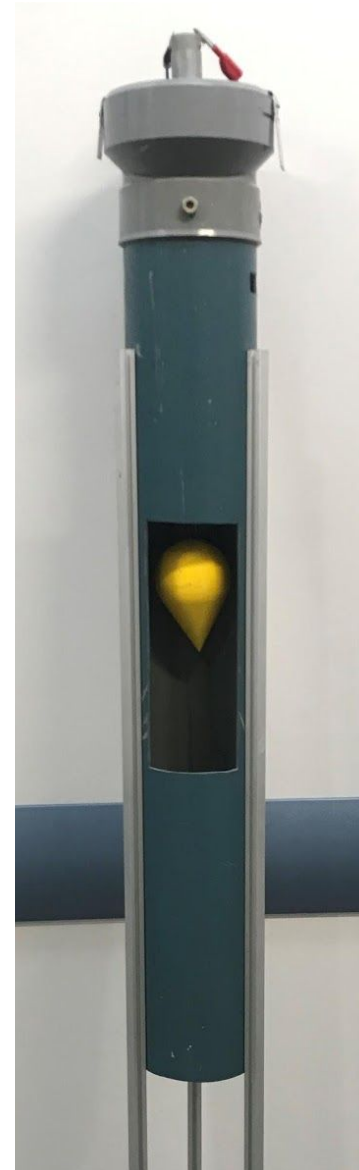


Image du moteur et de l'hélice

Le moteur est fixé au banc par l'intermédiaire d'une barre en aluminium que nous avons vissé au niveau de l'ouverture supérieure banc tandis que l'anémomètre s'intercale parfaitement dans un fente que nous avons faite sur le côté.

- La partie centrale du banc : où nous avons fait une fenêtre afin de pouvoir facilement remplacer les solides et prendre les mesures de l'allongement du ressort grâce au déplacement du solide.L'ensemble du banc repose sur trois barres de profilé en aluminium qui sont fixées au banc par l'intermédiaire d'écrous en T.



3.2.1.2 Les solides

Pour réaliser les solides, plusieurs méthode s'offraient à nous : couper les formes dans du polystyrène, essayer de les tailler dans des morceaux de bois ou encore les commander en ligne. Cependant, nous avons finalement opter pour une méthode plus moderne, grâce à la présence d'équipement à la pointe de la technologie dans notre école, l'impression 3D.

Cette méthode est plus efficace car, elle nous permet d'obtenir avec une grande précision les formes que nous voulons dans les dimensions qui nous conviennent grâce aux croquis que nous avons réalisés sur SolidWorks. Néanmoins, pour des raisons de temps et de

disponibilité de l'imprimante 3D nous n'avons réalisé que deux formes (demi-boule-cône et boule) afin de vérifier les formules relatives à ces formes.

Les solides sont fixés au ressort par l'intermédiaire d'un crochet ce qui nous permet de facilement changer de solide, tout en ayant une certaine stabilité lorsque le moteur est allumé. Voir image page suivante.

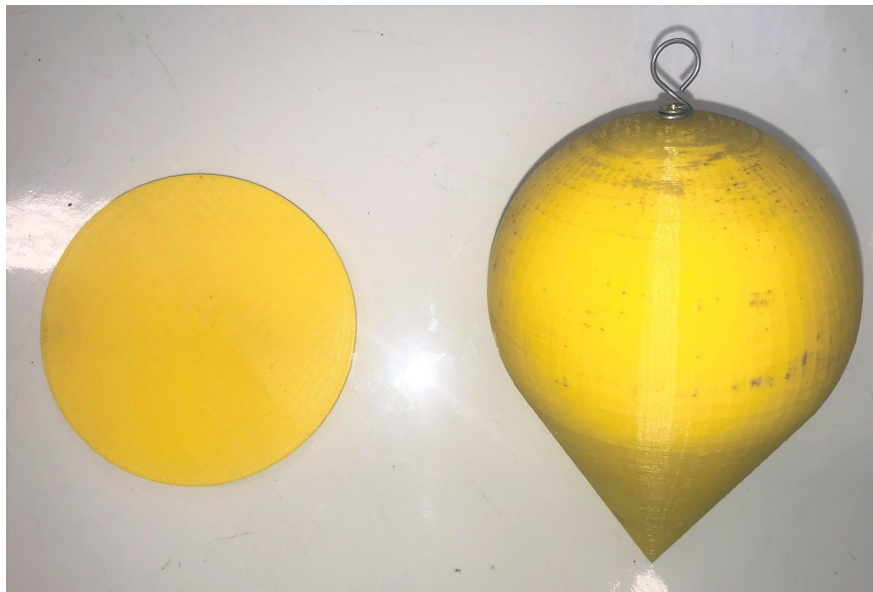


Image des solides

3.2.2 Le Protocole expérimental

Afin de déterminer les valeurs des forces de frottements visqueux pour les différents solides, nous allons procéder comme suit :

- Puisque la valeurs des frottements visqueux dépend de l'allongement initial du ressort qui supporte le solide et que le moteur est éteint (cf méthodologie) , on commence par placer le solide sur le ressort, attendre l'équilibre et prendre une mesure de l'allongement initial x_0 .

- Ensuite, on allume le moteur et, pour différentes valeurs de la vitesse de l'air généré par l'hélice (cette vitesse qui peut être lue sur l'anémomètre dépend de la tension

d'alimentation du moteur), on attends l'équilibre puis on mesure l'allongement du ressort x avant de changer de vitesse. On effectue plusieurs mesures pour différentes vitesses pour un même solide afin de bien pouvoir vérifier les résultats théoriques concernant les régimes laminaire (vitesse $v \leq 5 \text{ m/s}$) et turbulent (vitesse $v \geq 5 \text{ m/s}$).

- Enfin, on trace les courbes expérimentales $F = f(v)$ montrant la valeur des forces de frottements visqueux F en fonction de la vitesse de l'air v pour les deux solides et nous les comparons aux courbes théoriques obtenues (obtenues avec les expressions détaillées à la partie théorique). Voir image page suivante.



Image du banc durant les mesures expérimentales

4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

4.1 Commentaires

Durant ce projet très ambitieux, nous avons rencontré de nombreux problèmes. Nous les avons toujours abordés comme de nouveaux challenges à surmonter et si dans leur majorité

ils ont été pour nous source d'expérience et de maturité, nous n'avons malheureusement pas pu tous les résoudre, notamment en vue des limitations de budget et de temps, ce qui explique l'absence de résultats expérimentaux. Ces problèmes concernent :

4.1.1 Le banc :

Il s'agit de la partie la plus importante de notre projet et l'objectif, de mettre en oeuvre un banc vertical s'est avéré plus ardu que prévu. En effet, nous avons apporté des modifications sur le banc jusqu'à la toute dernière séance afin de tenter d'obtenir un rendu optimal et les valeurs expérimentales les plus précises possible.

Les problèmes rencontrés concernaient notamment la stabilité (les profilés en aluminium étaient très compliqués à placer sur la banc) alors même que nous avons décidé de fabriquer un banc isostatique. D'autre part, le moteur, composant crucial du banc, nous a apporté de nombreuses difficultés, se cassant dans un premier temps et nous obligeant à en commander un nouveau (ce qui implique une semaine d'attente de supplémentaire) avant de finalement se révéler trop peu puissant pour nous donner des résultats exploitables. En effet, l'hélice ne produisait qu'un flux d'air de faible vitesse, ainsi, l'allongement du ressort était pratiquement impossible à mesurer notamment à cause de l'absence d'un système permettant de fixer le solide (oscillations dans le tube). De plus nous aurions eu de meilleurs résultats si nous avions eu à disposition un ressort encore moins raide. Il nous aurait aussi fallu une alimentation plus puissante, car celle que nous avons ne nous permettait pas de monter à des vents de plus de 3.5 m/s ce qui est bien en deçà de la vitesse de changement de régime.

4.1.2 Les solides :

En ce qui concerne les solides utilisés dans le banc en soi, nous avons également dû faire face à de nombreux obstacles. En effet, Parmi les solides que nous avons préalablement conçu par CAO sur SolidWorks, tous n'ont pas pu être imprimés en fabrication

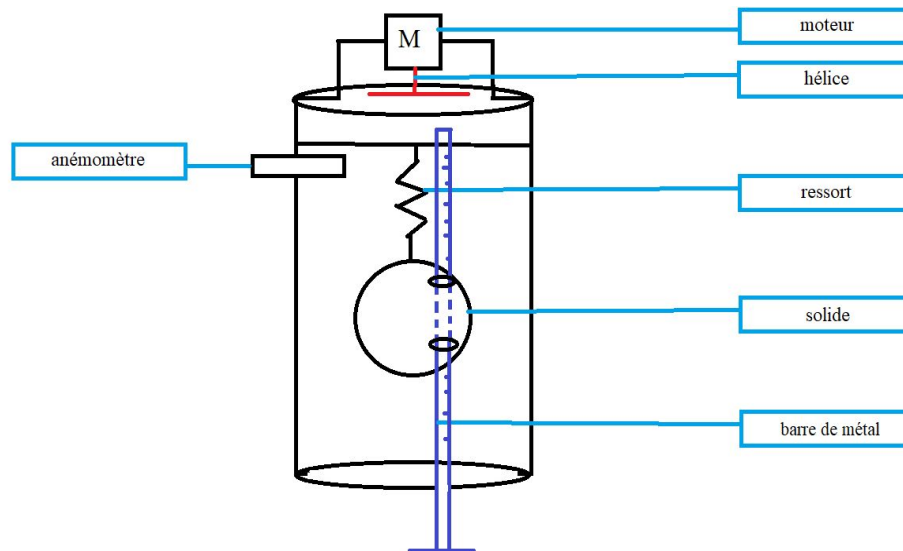
additive. En ce qui concerne les solides que nous avons pu imprimer, leur aspect rugueux nuit à l'aérodynamisme de la pièce, problème que nous n'avons pu que partiellement pallier à grand renfort de papier de verre, afin de tenter d'obtenir un écoulement plus laminaire. Enfin, nous avons rencontré des difficultés pour accrocher les solides de manière stable, en effet la présence d'un angle entre leur axe de symétrie de révolution et leur axe de fixation fausse leur profil aérodynamique.

4.1.3 Solutions :

Les éventuelles solutions pouvant être apportées à ce projet sont les suivantes :

- Une barre fixe à l'intérieur du banc afin que lorsque le moteur est allumé et que le solide puisse seulement coulisser le long de la barre et non entâmer un mouvement de balancier qui rend la mesure de l'allongement du ressort pratiquement impossible.

Il pourrait juste s'agir d'une barre en métal de faible diamètre que l'on fixera le long du banc. On pourrait même la graduer de telle sorte à ce la lecture de l'allongement soit simple. Voir schéma page suivante.



- Changer complètement le moyen de mesure des forces de frottements visqueux, en effet, au lieu d'utiliser un ressort et de se contraindre à de nombreuses difficultés (raideur trop importante, mesure l'allongement), on aurait simplement pu se procurer une balance avec une assez bonne précision. Et ainsi, placer le solide sur un support qui s'appuiera ensuite sur la balance. En mesurant la différence de masse (Δm) entre le repos et la mise en marche du moteur, nous aurions eu grâce à la formule : $F = \Delta m \times g$, nous obtiendrions la valeur des forces de frottements. Il faut cependant souligner que cette méthode aussi a ses défauts, notamment la construction d'un support suffisamment petit pour rentrer dans le banc et assez stable pour soutenir le solide tout en s'appuyant sur la balance. Voir schéma page suivante :

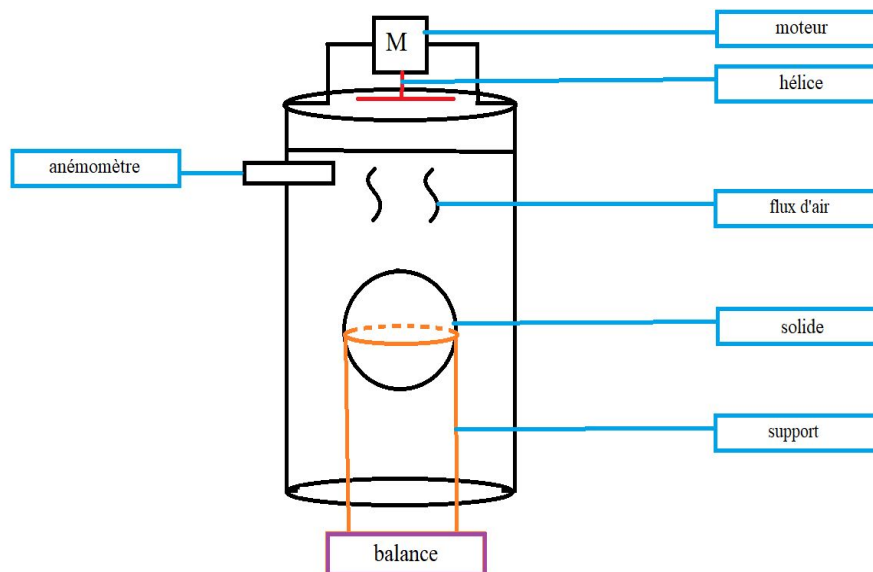


Schéma du banc avec la méthode de la balance

4.2 Conclusion

Pour conclure, ce projet nous appris énormément dans la mesure où nous avons une idée plus claire sur le monde du travail, le travail en équipe et des difficultés rencontrées dans cet environnement. En effet, nous avons dû nous adapter aux restrictions du laboratoire et du matériel disponible. Nous avons d'ailleurs eu des difficultés à maintenir notre banc vertical, nous avons dû commander un nouveau moteur après que le nôtre ne se soit cassé, notre hélice ne produisait pas flux d'air assez rapide pour avoir des résultats exploitables, entre autres.

C'est avec les conseils et les directions de notre professeur que nous avons pu trouver des solutions et surmonter ces obstacles afin de remettre la meilleure version possible de notre travail.

Ce projet était très enrichissant et décisif pour nos choix respectifs de départements car il nous a permis de comprendre que le travail d'un ingénieur n'est pas toujours récompensé par des résultats, mais c'est plutôt l'aptitude à apprendre de ses erreurs et devenir chaque jour meilleur qui fait la force d'un ingénieur.

5. BIBLIOGRAPHIE

[⁴]:

https://www.google.com/search?rlz=1C1CHBF_frFR773FR773&q=a%C3%A9rodynamique+pression+sur+surface&tbm=isch&source=univ&sa=X&ved=2ahUKEwjVo9PAnaDiAhVFThoKHaQ0BJ4QsAR6BAhjEAE&biw=509&bih=447#imgsrc=CYT4fHDSuFQ4fM:

[1] LI Youlian, "Basics of Aerodynamique and maintenance Technology", Tsinghua University, 2017, ISBN:978-7-302-45995-8

[3] https://fr.wikipedia.org/wiki/Couche_limite

[³]: https://fr.wikipedia.org/wiki/Couche_limite#/media/File:Laminar_boundary_layer_scheme.svg

[4] https://fr.wikipedia.org/wiki/S%C3%A9paration_de_couche_limite

Formules sur les frottements visqueux : <https://owl-ge.ch/IMG/pdf/frottement.pdf> 11/05/2019

Théorie sur les frottements fluides : https://fr.wikipedia.org/wiki/Frottement_fluide 12/05/2019

http://public.iutenligne.net/mecanique/mecanique-du-solide/charbonnieras/mecanique/133_frottement_fluide.html consulté le 11/05/2019