

Réalisation d'une maquette aérodynamique



Étudiants :

Juliette LE FERRAND
Erwan RONDEAUX
Louis DESPREZ

Ophélie LARIVIERE
Frédéric BLONDEL

Enseignant-responsable du projet :
Jérôme YON

Date de remise du rapport : 13/06/2016

Référence du projet : STPI/P6/2016 – 043

Intitulé du projet : Réalisation d'une maquette sur l'aérodynamisme.

Type de projet : expérimental.

Objectifs du projet : Le but de ce projet est d'améliorer une maquette aérodynamique afin de visualiser l'écoulement d'air autour d'un profil, notamment de profils que nous avons modélisés et imprimés à l'aide d'une imprimante 3D.

Mots-clefs du projet : Aérodynamisme, maquette, visualisation, modélisation.

Table des matières

Introduction	4
1 Méthodologie, organisation du travail	5
2 Travail réalisé et résultats	6
2.1 Qu'est ce qu'un écoulement ?	6
2.1.1 Définition d'un écoulement	6
2.1.2 Les différent types d'écoulement	7
2.2 Influence d'un écoulement sur un objet	8
2.2.1 Existence des forces de pression dues à l'écoulement	8
2.2.2 Détermination des forces de portance et de trainée	10
2.3 Expérimentation faite autour de la maquette	11
2.3.1 Présentation de la maquette	11
2.3.2 Justification du produit à utiliser	11
2.3.3 Les différentes méthodes de visualisation adaptées	14
2.3.4 Calcul des forces de trainée sur la maquette	17
Conclusion et perspectives	20
Bibliographie	21
.0.5 Justification du produit à utiliser	22
.0.6 Calcul de force de traînée sur la maquette	22

Introduction

Dans le cadre d'un projet de physique à l'INSA de Rouen, nous nous sommes penchés sur l'utilisation et la modification d'une maquette sur l'aérodynamisme JEULIN. En effet, M. Yon nous a proposé de modifier une maquette, dans une démarche pédagogique, puisqu'il s'agit d'adapter la maquette pour pouvoir participer à des manifestations scientifiques, comme par exemple la fête de la science qui se tient à l'UFR des Sciences et Techniques à St-Etienne-du-rouvray.

Notre objectif principal étant de visualiser l'écoulement de l'air autour de profils, nous avons développé différentes stratégies de visualisation, dans le but d'illustrer les phénomènes aérodynamiques comme les effets de turbulence par exemple. Il est évident que les phénomènes de l'aérodynamisme sont très importants et les comprendre nous a permis de développer de nombreuses applications, notamment toutes celles liées à l'aviation.

Nous verrons donc au travers de ce rapport ce qu'est un écoulement, puis les différents phénomènes liés à l'écoulement, et enfin nous aborderons les différentes méthodes de visualisation que nous avons tenté de mettre en place durant ce projet.

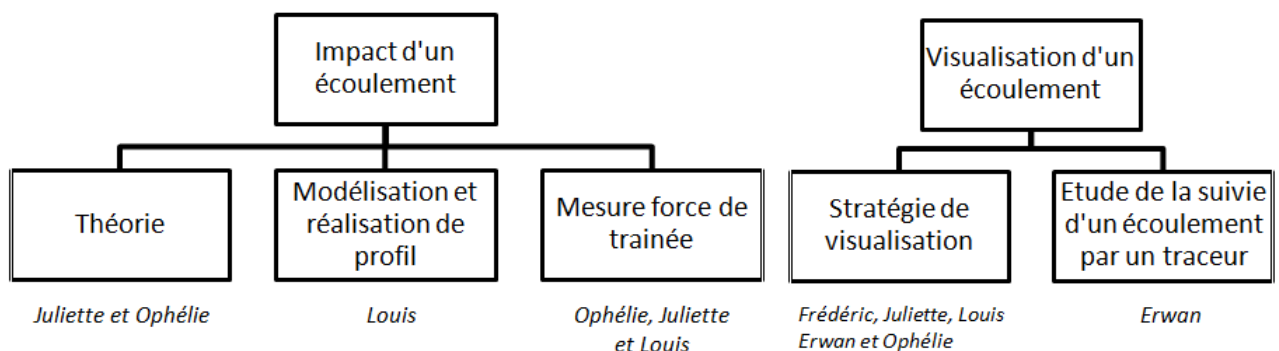
Chapitre 1

Méthodologie, organisation du travail

Nous avons dans un premier temps adapté la stratégie de visualisation que M.Yon nous avez proposé, qui consistait à utiliser de l'encens, puis les autres idées nous sont venues pendant le projet. Pour nos recherches, nous avons suivi deux grands axes le premier qui concernait la visualisation de l'écoulement et un concernant les différents phénomènes liés au écoulement. Pour visualiser un écoulement on devait utiliser un traceur, donc Erwan a déterminé le condition sur ce dernier pour qu'il suive l'écoulement d'air. Pendant ce temps Frédéric et Louis ont essayé les différentes méthodes de visualisation que nous avons trouvées. Parallèlement, Juliette et ophelie se sont demandé quels sont les impacts d'un objet dans un flux d'air laminaire, afin de mieux comprendre ce que nous devons observer dans la soufflerie si nous réussissions à visualiser l'écoulement. Suite à cette recherche avons pensé utile de créer de nouveaux profil pour la maquette, louis s'est donc chargé de cette partie. La soufflerie permettait de calculer des forces de trainée Juliette, Ophélie et Louis ont donc décidé d'exploiter cette fonctionnalité.

Nous nous retrouvons sur les temps prévus pendant la semaine pour vérifier de l'avancée de chacun, et plus particulièrement lorsqu'une méthode de visualisation s'avérait ne pas être la bonne, afin de trouver une alternative de visualisation de l'écoulement.

Répartition du travail au sein du groupe.



Chapitre 2

Travail réalisé et résultats

A travers cette première partie, nous allons étudier la notion d'écoulement et tout ce qui s'y rapporte.

2.1 Qu'est ce qu'un écoulement ?

2.1.1 Définition d'un écoulement

Un écoulement est le déplacement d'un fluide. Un fluide est déformable et peut-être considéré comme un milieu continu. On peut alors définir des variables de ce dernier thermodynamiquement comme sa masse volumique (exprimée en kilogramme par mètre cube), sa pression (exprimée en Pascal), sa viscosité ou encore sa composition. Lorsque ce fluide est en mouvement, on parle d'écoulement. Ce déplacement est décrit par des lignes de courant qui possèdent en tout point une tangente parallèle à la vitesse des particules du fluide.

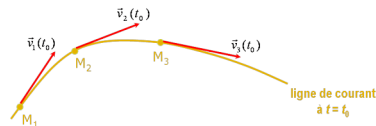


FIGURE 2.1 – Schéma lignes de courant

De plus, l'écoulement dépend de la viscosité du fluide, cette viscosité est caractérisée par le coefficient de viscosité et agit comme un frottement qui va freiner les perturbations et éviter aux tourbillons d'apparaître. Finalement, la viscosité est la particularité du fluide à se coller plus ou moins à une paroi. Il existe deux viscosités : la viscosité dynamique qui lie la surface, la distance à la force de frottement et la vitesse et la viscosité dynamique s'obtient en divisant la viscosité dynamique par la masse volumique du fluide. Pour savoir si la viscosité est assez élevée pour éviter l'arrivée de turbulences, nous devons la comparer à l'inertie de l'écoulement. La force d'inertie est le produit de la masse volumique du fluide, de la vitesse du fluide et d'une longueur de référence qui est égale à la longueur du profil à l'écoulement dans notre cas. Le nombre de Reynolds est le ratio inertie/frottement : $Re = \rho v L$. Il permet alors de déterminer si le fluide conservera son comportement laminaire ou subira la parcelisation d'un écoulement turbulent. Plus il est élevé, plus l'inertie est élevée et la viscosité faible, plus les tourbillons pourront se développer. Ainsi pour $Re < 2000$, l'écoulement sera laminaire, lorsque $2000 < Re < 6000$, c'est la zone de transition, et $Re > 6000$ l'écoulement est turbulent.

2.1.2 Les différent types d'écoulement

Il existe effectivement différents types d'écoulements selon l'environnement du fluide. Tout d'abord, l'écoulement laminaire est le type d'écoulement qu'adopte un fluide qui ne subit aucune perturbation, ou très peu, durant son déplacement.

Les particules d'un écoulement laminaire suivent des trajectoires parallèles. Elles ne se rencontrent pas au cours de leur déplacement. Un écoulement laminaire conserve une certaine organisation apparente.

Lorsque que le fluide rencontre un obstacle qui l'oblige à modifier sa trajectoire, le fluide peut rester laminaire si l'obstacle n'est pas très grand.

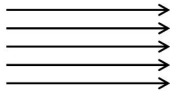


FIGURE 2.2 – Schéma écoulement laminaire (extrait de <http://aerodynamismeavion.e-monsite.com>)

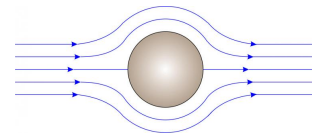


FIGURE 2.3 – Schéma écoulement laminaire en présence d'un objet (extrait de <http://hmf.enseeiht.fr/travaux>)

Mais si la vitesse du fluide augmente ou la forme du profil change, l'écoulement peut être alors plus perturbé et on obtiendra un écoulement turbulent. Par exemple, la présence d'un obstacle comme un immeuble, un arbre ou encore un rocher freine la vitesse du flux, particulièrement dans ce cas, l'air et provoque alors de la turbulence.

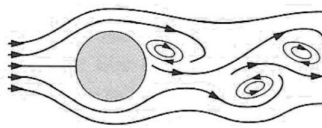


FIGURE 2.4 – Schéma écoulement turbulent (image extraite de <http://olivier.granier.free.fr>)

La turbulence est l'état d'un fluide pour lequel la vitesse a un comportement tourbillonnaire. Les écoulements turbulents sont d'apparence très désordonnés et imprévisibles. En effet, un fluide ayant un comportement turbulent est sujet à de nombreuses variations liées à la taille, la localisation et l'orientation des tourbillons. Ces turbulences apparaissent lorsque la source de l'énergie cinétique, qui est à l'origine du mouvement du fluide, est plus intense que les forces de viscosité que le fluide oppose pour se déplacer. La transition d'un écoulement laminaire à un écoulement turbulent s'explique par la présence de couche limite. Cette couche est la zone de fluide contiguë à la paroi dans laquelle se produit l'accommodation entre la vitesse nulle de la paroi et la vitesse locale du fluide libre. L'épaisseur de cette couche limite dépend de l'état de la surface, ainsi plus la surface sera lisse, plus la couche sera mince. Elle dépend aussi de la vitesse du fluide, plus le fluide sera rapide, plus la couche sera fine. L'épaisseur de cette couche limite est la distance à la paroi à partir de laquelle la vitesse du fluide répond à cette égalité : $V = 0,99V_0$ avec V_0 la vitesse du fluide parfait, soit non visqueux (coefficient de viscosité nul). Ainsi on peut distinguer deux types de couche limite dans un écoulement :

- La couche limite laminaire qui se caractérise par le fait que tous les vecteurs vitesses sont parallèles au même plan.
- La couche limite turbulente apparaît lorsque les vecteurs vitesse ne sont plus parallèles entre eux.

Lorsque le fluide rencontre un obstacle, la couche limite préalablement laminaire va devenir turbulente après une zone de transition, qui se déroule en plusieurs étapes :
Premièrement, l'écoulement laminaire est perturbé par de faibles ondes d'instabilités, ces dernières vont ensuite se déformer pour prendre la forme de fer à cheval et vont s'étirer avec l'écoulement. Des instabilités secondaires apparaissent, ce sont des régions turbulentes qui vont se propager et conduire à un écoulement turbulent développé.

Cependant, la zone de transition n'est pas fixe, elle dépend de plusieurs paramètres :

- Le nombre de Reynolds : ce nombre permet aussi d'évaluer l'épaisseur de la couche limite qui diminue lorsque Re augmente.
- La courbure.
- L'état de la surface : les rugosités de la paroi anticipe la transition.
- Le nombre de Mach : ce nombre sans dimension mesure le rapport de la vitesse locale du fluide à la vitesse du son dans ce même fluide.

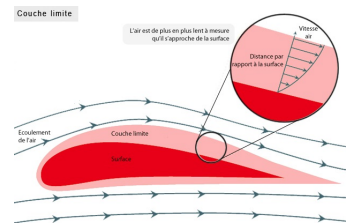


FIGURE 2.5 – Schéma couche limite (extrait de <http://www.fli.com/magazine/magazine-features/laspiration-inspiree-de-mclaren/2/>)

La couche limite doit ainsi se déplacer pour laisser passer l'objet à travers le flux, l'air exerce donc des forces qui ont tendance à s'opposer au mouvement du solide...

2.2 Influence d'un écoulement sur un objet

2.2.1 Existence des forces de pression dues à l'écoulement

Lorsqu'un objet est mis en mouvement dans un écoulement d'air, l'air exerce sur l'objet différentes forces qui tendent à s'opposer au mouvement de ce dernier. Il s'agit de la résultante des forces aérodynamiques ou résistance à l'air. Cette force dépend de la vitesse (V), la densité volumique du fluide (ρ), du maître couple (le maître couple est la surface exposée au vent) (S), et de la forme de l'objet. La résultante aérodynamique est composée d'une force normale à l'écoulement, la portance et une force tangentielle, la traînée.

La portance

La force de portance F_p est la force perpendiculaire au mouvement. Elle vaut :

$$F_P = \frac{1}{2} C_z \rho S V^2 \quad (2.1)$$

où C_z est le coefficient de portance, il dépend de l'angle d'incidence de l'objet par rapport à l'écoulement et de la forme de l'objet, il peut aussi dépendre du nombre de Reynolds. Il est déterminé expérimentalement grâce à des mesures en soufflerie.

Cette force est due à une différence de pression au dessus et en dessous de l'objet. Cette différence de pression peut être calculée grâce à la Loi de Bernoulli selon laquelle "la somme

des pressions et des énergies mécaniques par unité de volume est constante tout le long du tube de courant¹, c'est à dire :

Pression Cinétique + Pression de pesanteur + Énergie de pression = constante.

Pour un fluide parfait permanent incompressible, dont les forces dérivent d'un potentiel massique, la formule de Bernoulli est la suivante : $P + \rho gz + \frac{1}{2}\rho V^2 = \text{constante}$ où ρ est la masse volumique en Kg/m^3 , V est la vitesse du fluide en m/s , g est la gravité terrestre $9.81m/s^2$ et z est le dénivelé vertical de l'objet en mètres. Nous allons montrer analytiquement que nous obtenons bien une différence de pression au dessus et en dessous de l'objet.

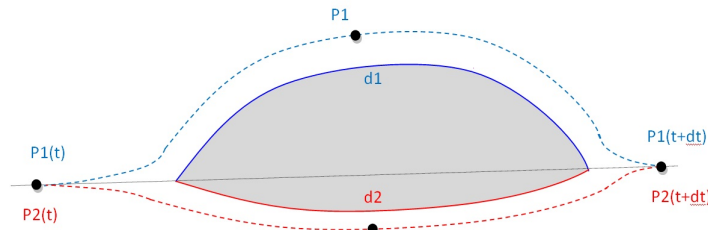


FIGURE 2.6 – Schéma représentant le parcours de deux particules autour d'un profil asymétrique.

Nous allons donc considérer deux particules de fluide P_1 et P_2 ; lâchées à un instant t au même endroit, se déplaçant respectivement en passant au dessus et en dessous de l'objet, ces particules se retrouveront à un instant $t + dt$ au même endroit après l'objet. Dans le cas d'un objet symétrique les distances à parcourir par la particule sont les mêmes, les vitesses des deux particules sont donc identiques et les pressions au dessus et en dessous sont donc identiques, les forces de portance sont alors nulles. Dans le cas d'un objet non symétrique, l'une des particules aura une distance plus grande à parcourir durant dt . Or $v = \frac{d}{t}$, la particule ayant parcouru la plus grande distance a donc nécessairement une vitesse plus élevée. Grâce à la formule de Bernoulli nous pouvons écrire $\rho * \frac{V_1^2}{2} + P_1 + \rho gz_1 = \rho * \frac{V_2^2}{2} + P_2 + \rho gz_2$ si on suppose que l'objet est assez fin pour dire que z est le même, on obtient $\rho * \frac{V_1^2}{2} - \rho * \frac{V_2^2}{2} = P_2 - P_1$ et en remplaçant on a donc $\frac{\rho}{2 * dt} * (d_1 - d_2) = P_2 - P_1$ comme la partie gauche est positive $P_2 - P_1 > 0$ donc le fluide exercera une pression plus importante en dessous de l'objet qu'au dessus.

C'est grâce à cette force de portance que l'on réussit à faire décoller un avion.

La traînée

La force de traînée (F_T) est due aux frottements entre l'air et l'objet car l'air est un fluide visqueux, on cherche donc le plus souvent à ce qu'elle soit la plus petite possible. Elle vaut :

$$F_T = \frac{1}{2} C_x \rho S V^2 \tag{2.2}$$

où C_x est le coefficient de traînée tout comme le coefficient de portance il dépend de l'angle d'incidence et de la forme de l'objet, il dépend aussi du nombre de Reynolds. Il est également déterminé expérimentalement grâce à des mesures en soufflerie.

La force de traînée peut être divisée en trois types :

- La traînée de forme qui dépend de la géométrie de l'objet et de ses propriétés physiques (rugosité, fuselage)

1. extrait de <http://www.mecaflux.com/Bernoulli.htm>

- La trainée induite : comme nous l'avons dit précédemment il y a une différence de vitesse d'écoulement du fluide au dessus et en dessous de l'objet donc suite à l'arrêt de la géométrie de l'objet ces deux flux se croisent ce qui engendre des tourbillons derrière l'objet.
- La trainée d'onde qui dépend de la vitesse relative de l'objet dans l'écoulement, en effet si cette vitesse est supérieure à la vitesse du son soit $340m.s^{-1}$ il se produit une onde de choc qui engendre une dissipation d'énergie.

2.2.2 Détermination des forces de portance et de trainée

Nous avons essayé de calculer la résultante des forces au dessus et en dessous d'un objet, afin d'avoir la force de trainée et de portance. Pour cela nous prenons une courbe continue paramétrée par la fonction f_1 pour la partie supérieure de l'objet et f_2 pour la partie inférieure.

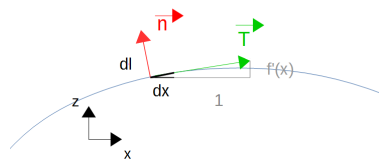


FIGURE 2.7 – Schéma explicatif du calcul des forces de pression

Nous avons d'abord exprimé la force de pression sur une surface élémentaire dS ($dS=Ldl$) où L est la profondeur du profil selon l'axe y) que nous intégrerons sur toute la surface. Soit $\vec{T} (= \vec{x} + f''(x)\vec{z})$ un vecteur unitaire tangent à la surface ds et $\vec{n} (= n_x\vec{x} + n_z\vec{z})$ un vecteur unitaire normal. En tout ds , \vec{n} est orthogonal à \vec{T} donc $\vec{n} \cdot \vec{T} = 0$ donc $n_x + n_z f''(x) = 0$. De plus \vec{n} est unitaire donc $n_x^2 + n_z^2 = 1$. En résolvant ces deux équations on a la valeur du vecteur \vec{n} en tout point de la courbe paramétrée par f . Nous avons également besoin de l'expression de dS , pour cela nous avons utilisé le théorème de Pythagore et le théorème de Thalès qui nous ont permis d'avoir le résultat suivant $\frac{dx}{1} = \frac{dl}{\sqrt{1+f''(x)^2}}$ donc $ds = L * dx * \sqrt{1 + f''(x)^2}$. Ainsi la résultante des forces de pression sur la surface paramétrée par f vaut $\vec{R} = \int_x \int_y P \cdot \vec{n} \cdot ds$ où $P = constante - \rho gz - \frac{1}{2}mV^2$ en faisant l'approximation que le fluide est parfait, permanent, incompressible et dont ses forces dérivent d'un potentiel massique.

Nous avons essayé pour un profil cylindrique en prenant $f_1(x) = \sqrt{1 - x^2}$ (x allant de -1 à 1 et y de 0 à L) et $f_2(x) = \sqrt{1 - x^2}$ (x allant de -1 à 1 et y allant de 0 à L) mais les intégrales étaient trop complexes à calculer, notre calcul n'a pas pu aboutir. Cependant cela nous a permis de confirmer le fait que la portance est nulle pour un objet symétrique, car on obtenait la même intégrale à calculer au signe près.

Cette méthode pourrait aboutir si on réussit à trouver deux fonctions polynomiale, une positive et une négative, dont la courbe obtenue est asymétrique et continue.

Nous avons cependant réussi à estimer les force de portance et son coefficient grâce à la maquette que l'on avait, nous allons donc maintenant vous la présenter.

2.3 Expérimentation faite autour de la maquette

2.3.1 Présentation de la maquette

Notre maquette sur l'aérodynamisme est une soufflerie générant un écoulement d'air laminaire que l'on peut régler en vitesse. Elle fournit une gamme de vitesse allant jusque 20m/s. Elle est basiquement fournie avec 4 profils différents et dispose d'un capteur permettant de mesurer une force.

Elle permet d'évaluer la résistance à l'air de certaines formes, et par conséquent la force de traînée qui s'applique à l'objet. Cette force est indiquée en millinewton (mN). En effet, la soufflerie projette de l'air sur notre profil fixé sur le support, sur lequel est également fixé le capteur. L'écoulement va donc générer sur le profil une force, qui comme vous avez pu le voir précédemment possède une composante verticale nommée force de portance et une composante horizontale que l'on nomme la force de traînée. Sous l'effet de cette force, le support du profil va pouvoir légèrement fléchir, et c'est la distance entre la position d'origine du support et la position lorsque celui-ci fléchit que le capteur va mesurer, et qui va alors lui permettre d'évaluer la composante horizontale de la force appliquée à l'objet, c'est-à-dire la force de traînée.

Déterminer la force de traînée s'appliquant sur les profils peut permettre par exemple d'approximer l'évolution du coefficient de traînée en fonction de l'évolution de la vitesse. En effet, comme nous l'avons déjà vu, la force de traînée s'appliquant à un objet dans un flux d'air s'écrit :

$$f_t = \frac{1}{2} C_t \rho S V^2 \quad (2.3)$$

avec C_t le coefficient de traînée, qui dépend de la forme de l'objet.

Ainsi, comme la vitesse de l'écoulement peut se lire sur la machine, il devient possible de calculer ce coefficient pour chaque vitesse.

La réelle difficulté du projet était d'adapter notre maquette à la visualisation, car elle n'a pas du tout été conçue dans ce but. De plus, nous ne pouvions dans un premier temps pas l'utiliser. En effet, la maquette nous a été livrée défectueuse, et nous avons dû la renvoyer au constructeur, qui nous l'a retournée seulement au début du mois d'Avril.

En conséquence, nous avons dû trouver une solution pour réussir à effectuer des tests sans la machine. Bien que nous n'avons pas pu nous en servir, il est tout de même important de noter que nous avons eu l'opportunité d'aller observer le modèle de soufflerie présent à l'UFR des Sciences et Techniques en face de l'INSA grâce à Richard Tondelier, élève en première année de Master Physique, Mécanique, Sciences de l'Ingenieur. Ce dernier réalisait un stage au cours duquel il devait s'intéresser à l'aérodynamisme d'un profil d'aile NACA et à la conception de pièces par impression 3D, et nous a permis de venir observer les installations de la faculté, et de nous en inspirer dans notre projet.

Nous allons donc pouvoir aborder les différents tests effectués sur la maquette pour visualiser les lignes de courant. Pour cela, nous nous sommes tournés vers l'utilisation d'une fumée, et avant de rentrer dans les détails sur la maquette, nous avons voulu vérifier si nous pouvions utiliser n'importe quel produit.

2.3.2 Justification du produit à utiliser

Trajectoire d'une particule de liquide dans un flux d'air laminaire

Il est important de déterminer si une fumée peut être utilisée pour notre montage. En effet, nous désirons visualiser les écoulements autour de profils sur notre maquette grâce à

cette fumée. Or, si le poids qui s'applique sur nos particules de fumée est trop important, la trajectoire de ces particules et donc de la fumée de manière générale risque de ne pas être représentative de l'écoulement. Ainsi, nous allons ici déterminer la trajectoire des particules dans notre flux d'air en prenant en compte l'influence de la gravité, et déterminer, en fixant quelques paramètres comme la vitesse de l'écoulement produit par la maquette, la masse des particules de fumée à partir de laquelle le produit devient inutilisable pour nous.

Détermination de la trajectoire de la particule

Situation et liste des forces s'appliquant à la particule

Nous considérons une particule de forme sphérique de notre liquide à fumée lâchée dans notre flux d'air laminaire généré par la machine aérodynamique. A l'instant $t=0$, on lâche la particule a une hauteur h et avec une vitesse horizontale $\vec{V}_{part} = V_{part} \cdot \vec{U}_x$.

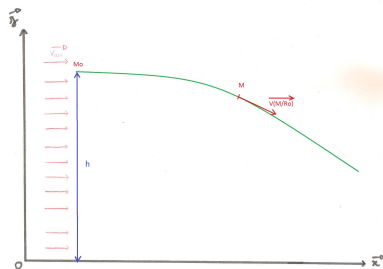


FIGURE 2.8 – Trajectoire d'un particule dans un écoulement laminaire.

- Poids $\vec{P} = -mg\vec{U}_z$, avec m la masse d'une particule ;
- Force de trainée $\vec{f}_t = \alpha \cdot (\vec{V}_{air} - \vec{V}_{(M/R_0)})$, avec α coefficient que nous calculerons par la suite, \vec{V}_{air} vitesse de l'écoulement et $\vec{V}_{(M/R_0)}$ vitesse de la particule en M par rapport au référentiel terrestre ;
- Force de portance $\vec{f}_p = \vec{0}$. En effet, on a supposé la particule de forme sphérique, les composantes verticales des forces de pression dues à l'écoulement autour de la particule s'annulent, l'écoulement n'applique donc pas de portance sur la particule.

Produit fondamental de la dynamique appliqué à la particule

$$m \cdot \vec{a} = \sum \vec{F}_{ext}$$

$$m(\ddot{x} \cdot \vec{U}_x + \ddot{z} \cdot \vec{U}_z) = \vec{P} + \vec{f}_t + \vec{f}_p$$

$$m(\ddot{x} \cdot \vec{U}_x + \ddot{z} \cdot \vec{U}_z) = -mg\vec{U}_z + \alpha \cdot (\vec{V}_{air} - \vec{V}_{(M/R_0)})$$

Or $\vec{V}_{air} = V_0 \cdot \vec{U}_x$ et $\vec{V}_{(M/R_0)} = \dot{x} \cdot \vec{U}_x + \dot{z} \cdot \vec{U}_z$

On a donc

$$m(\ddot{x} \cdot \vec{U}_x + \ddot{z} \cdot \vec{U}_z) = -mg\vec{U}_z + \alpha \cdot (V_0 - \dot{x}) \cdot \vec{U}_x - \alpha \cdot \dot{z} \cdot \vec{U}_z$$

Si l'on projette cette équation sur \vec{U}_x et \vec{U}_z on obtient :

$$\ddot{x} + \frac{\alpha}{m} \dot{x} = \frac{\alpha \cdot V_0}{m} \tag{2.4}$$

$$\ddot{z} + \frac{\alpha}{m} \dot{z} = -g \tag{2.5}$$

On peut ensuite résoudre ces deux équations différentielles, en commençant par la solution générale homogène sans second membre : $y_g(t) = x_g(t) = A \cdot e^{-\frac{\alpha}{m}t} + B$

Pour calculer les solutions particulières, nous savons qu'il existe un temps à partir duquel la vitesse de la particule va se stabiliser. Cette vitesse sera donc constante. On peut donc cette

propriété dans nos équations différentielles, en prenant en compte que l'accélération de la particule à partir de ce moment sera nulle, pour trouver nos solutions particulières.

$$\frac{\alpha}{m} \dot{x}_p = \frac{\alpha}{m} V_0 \quad (2.6)$$

$$\frac{\alpha}{m} \dot{z}_p = -g \quad (2.7)$$

$$x_p(t) = V_0 \cdot t \quad (2.8)$$

$$z_p(t) = -\frac{mg}{\alpha} t \quad (2.9)$$

En utilisant nos conditions initiales, on peut déterminer les expressions de nos deux trajectoires en fonctions du temps. On a introduit la particule à $t=0$ à une hauteur h et avec une vitesse initiale horizontale $\vec{V}_{part} = V_{part} \cdot \vec{U}_x$. On obtient donc finalement

$$x(t) = -\frac{m}{\alpha} (V_{part} - V_0) e^{-\frac{\alpha}{m} t} + \frac{m}{\alpha} (V_{part} - V_0) + V_0 \cdot t \quad (2.10)$$

$$z(t) = -\left(\frac{m}{\alpha}\right)^2 g e^{-\frac{\alpha}{m} t} + h + \left(\frac{m}{\alpha}\right)^2 g - \frac{m}{\alpha} g t \quad (2.11)$$

Il nous reste à déterminer α pour pouvoir calculer et représenter ces trajectoires.

Calcul de α On a considéré notre particule comme une sphère de diamètre d . Dans ce cas, la force de traînée s'exprime :

$$\vec{f}_t = \frac{1}{2} \rho S C_t V^2 \text{ avec}$$

- ρ masse volumique du fluide dans lequel a lieu le déplacement, ici l'air, $\rho = 1292 \text{ kg/m}^3$;
- S surface de référence de l'objet, ou maître-couple, qui correspond à la surface apparente de l'objet lorsque que l'on se place dans le sens de l'écoulement. Pour une sphère, il s'agit donc de l'aire d'un disque ;
- C_t coefficient de traînée ;
- V vitesse de l'objet ou de fluide en écoulement dans le cas d'un objet fixe ;

Dans le cas d'une sphère dans un écoulement laminaire on peut déterminer le coefficient de traînée grâce au nombre de Reynolds de l'écoulement, et ce dernier grâce à la vitesse de l'écoulement : $Re = \frac{2\rho V R}{\eta}$

Nous prendrons par la suite une valeur fixe de la vitesse de l'écoulement égale à 5 m/s . Avec cette valeur, nous pouvons calculer Re : $Re \approx 359$

Le coefficient de traînée s'approxime alors : $C_t = \frac{18,5}{Re^{0,6}}$ si $1 \leq Re \leq 10^3$

En injectant cela dans l'expression de la force de traînée, on peut calculer (calculs développés en annexe) : $f_t = 9,25 \cdot \rho^{0,4} \cdot \pi \cdot R^{1,4} \cdot \left(\frac{\eta}{2}\right)^{0,6} \cdot V^{1,4} = \alpha V$ d'où $\alpha = 9,25 \cdot \rho^{0,4} \cdot \pi \cdot R^{1,4} \cdot \left(\frac{\eta}{2}\right)^{0,6} \cdot V^{0,4}$ avec $\eta = 1,8 \cdot 10^{-5}$ le coefficient de viscosité dynamique de l'air.

Nous allons maintenant pouvoir combiner ces deux expressions de la trajectoire de notre particule en fonction du temps pour obtenir une trajectoire dans l'espace grâce à un tableur, et discuter sur la masse des particules valables pour notre montage.

Représentation de la trajectoire

Afin de pouvoir discuter de la masse acceptable des particules, il convient de fixer certains paramètres. En effet, en réalité, nous voyons que dans l'expression de la trajectoire, le rayon de la particule, la vitesse d'écoulement de l'air, ou encore la vitesse et la position initiale de la particule interviennent également. Nous allons donc les fixer et ne faire varier que la masse de notre particule :

- $R = 0,5\mu m$ Nous nous basons sur les particules de fumée d'huile dont le diamètre peut aller jusqu'à $1\mu m$
- $V_0 = 5m.s^{-1}$ La maquette fournit une gamme de vitesse allant jusqu'à $10m.s^{-1}$
- $h = 10cm$
- $V_{part} = 0,2m.s^{-1}$

Nous voyons que pour une masse peu élevée la trajectoire n'est quasiment pas déviée sur une courte distance. Sachant que la longueur de notre maquette est d'environ 20 cm, nous allons pouvoir en modifiant juste la masse trouver une valeur seuil à partir de laquelle l'influence du poids devient problématique.

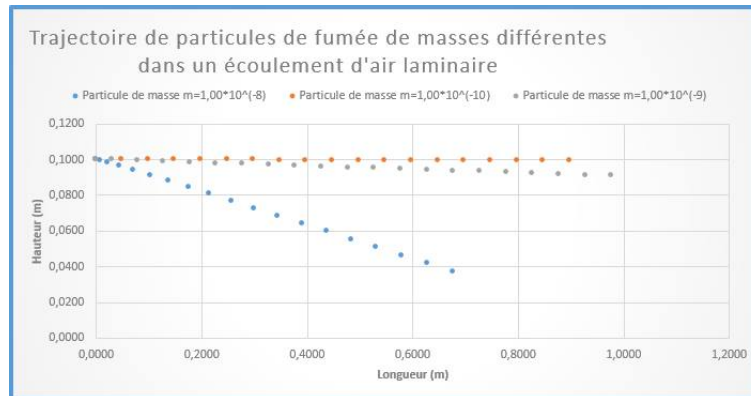


FIGURE 2.9 – Courbe représentant la trajectoire de particules de taille différentes en fonction du temps.

A partir d'une échelle de grandeur de $10^{-8}kg$ soit $10\mu g$, la particule descend beaucoup trop vite et on peut affirmer que le déplacement de la fumée n'est plus représentatif de l'écoulement.

Bien entendu, ces modèles théoriques ne permettent de donner qu'un ordre de grandeur concernant la masse des particules. En effet, il est très difficile de trouver dans la pratique les valeurs de paramètres dont nous avons besoin. Vous verrez par la suite que lors de nos différents montage, nous ne pouvions pas déterminer la vitesse initiale des particules par exemple. De plus, nous avons fais une approximation sur le calcul du coefficient de traînée et donc du coefficient α . Tout ceci diminue la précision des calculs, c'est pour cela que la valeur critique de la masse que nous trouvons n'est qu'une approximation. Elle nous permet seulement d'affirmer que pour une masse inférieure à cette valeur critique, nous sommes sûrs que les trajectoires des particules seront bien représentatives de l'écoulement. Pour une masse supérieure, nos calculs ne sont pas assez précis pour nous permettre d'affirmer que la trajectoire des particules ne sera pas représentative de l'écoulement.

Maintenant que nous avons une idée des produits qui seront représentatif d'un écoulement et que nous savons comment fonctionne la maquette, nous allons pouvoir essayer d'adapter le maquette afin de visualiser l'écoulement.

2.3.3 Les différentes méthodes de visualisation adaptées

Notre objectif étant de constater le comportement de l'air lorsque celui-ci rencontre un obstacle, nous avons donc cherché à mettre en place un montage permettant une visualisation efficace et nette de la trajectoire de l'air autour des profils.

Afin de visualiser ce flux d'air, nous avons d'abord essayé de le rendre visible avec différents types d'encens car les particules de fumée sont très fines, ainsi leur poids ne viendrait pas perturber l'écoulement naturel de l'air face à un obstacle. Cependant, l'ensemble des

résultats obtenus ne s'est pas révélé probant car la fumée dégagée par sa combustion n'était pas assez importante pour pouvoir visualiser les écoulements autour des profils.

Ensuite, nous avons travaillé avec des filaments de papier. Les filaments étaient sensibles au flux d'air engendré par la soufflerie mais cette technique s'est révélée être imprécise et difficilement réalisable car il aurait fallu fixer chaque filament à la sortie de la soufflerie sans obstruer l'arrivée d'air.

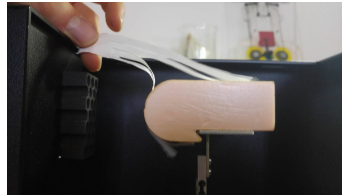


FIGURE 2.10 – Photo : visualisation avec filaments en papier

Nous étions convaincus que le meilleur système pour visualiser nos écoulements d'air autour de nos profils serait d'utiliser de la fumée. Nous avons donc fait des recherches et tenté une autre technique qui consiste à mélanger de l'eau et de la glycérine. En effet, beaucoup de liquides à fumée sont composés de glycérine, c'est ce qui nous a poussé vers cette méthode. Lorsque ce mélange est chauffé, on obtient une vapeur plus épaisse que celle résultant de la simple évaporation de l'eau.



FIGURE 2.11 – Photo : Fumée obtenue en chauffant de l'eau sans glycérine



FIGURE 2.12 – Photo : Fumée obtenue en chauffant de l'eau avec glycérine

Au vu des résultats, nous avons donc retenu cette méthode de visualisation pour chercher à l'adapter à notre montage. Ensuite le problème était de trouver un moyen de chauffer ce mélange pour concentrer l'émission de ces gaz dans un récipient.

Nous avons donc placé un fer à souder dans un bocal ainsi qu'un gobelet contenant le mélange. Le gobelet nous a permis de déposer goutte après goutte la solution sur le fer à souder entraînant la combustion immédiate du mélange et l'émission de fumée. Le système était totalement hermétique à l'extérieur pour une concentration optimale de la fumée dans le récipient.

Ensuite, nous devons trouver un moyen de conduire cette fumée jusqu'à l'entrée de la soufflerie. Pour ce faire, nous avons fixé toujours de manière totalement hermétique, un tuyau à un entonnoir à la sortie du récipient.



FIGURE 2.13 – Photo : Montage réalisé pour concentrer la fumée du mélange eau-glycérine

Nous avons pris en compte dans notre expérience les forces de viscosité obtenues par l'écoulement du fluide sur les parois du conduit, et qui sont d'autant plus importantes que le diamètre du conduit est petit. Nous avons donc privilégié des conduits de diamètre important. De plus, pour aider le flux de gaz à s'écouler dans le tuyau, nous avons allumé notre soufflerie dès le début de la manipulation pour créer une dépression à la sortie du tuyau. En effet, l'effet Venturi explique qu'une dépression se forme à l'endroit où des particules fluides sont accélérées.

Pour finir, nous avons éclairé notre système avec une source de lumière pour faciliter la visualisation de la fumée. Cependant, même avec une source de lumière, des conduits de diamètre conséquent et la création d'une dépression à la sortie du conduit, le flux de fumée était très difficilement visualisable.

Ainsi, à l'issue de ces manipulations nous en avons tiré les conclusions suivantes :

- Comme pour l'encens, la concentration de fumée générée par ce système était trop faible.
- La dépression engendrée par la mise en marche de la soufflerie n'était pas assez importante pour faciliter l'écoulement d'une quantité suffisante de fumée à l'entrée de celle-ci.
- Les forces de viscosité dans le conduit s'opposaient également à cet écoulement, ce qui réduisait le débit de fumée à la sortie de la soufflerie.

Nous avons donc décidé d'abandonner l'idée d'une chambre intermédiaire pour concentrer la fumée, car ensuite il était très compliqué d'acheminer celle-ci jusqu'à l'entrée de la soufflerie. L'idéal était de trouver un diffuseur de fumée qui l'expulserait avec une vitesse à la sortie de celui-ci. Ainsi, l'écoulement de la fumée dans le conduit jusqu'à la soufflerie serait beaucoup plus simple. Cependant, il fallait faire attention à ce que celle-ci n'arrive pas avec une vitesse trop importante pour ne pas compromettre l'écoulement de l'air autour des profils.

M.Yon nous a alors proposé d'utiliser une machine lui servant à étalonner ses systèmes optiques. Cette machine disperse des nanoparticules et produit une fumée blanchâtre.



FIGURE 2.14 – Photo : Montage réalisé avec un diffuseur de nanoparticules

Nous avons pu visualiser, avec une source de lumière, un écoulement assez fin et de bonne qualité. Nous avons donc décidé de tester ce nouveau système dans notre soufflerie. Avec cette nouvelle méthode, comme nous l'avons décrite précédemment, pour la première fois nous avons obtenu un écoulement visualisable à l'entrée de notre soufflerie. Cependant, lors de la mise en marche de celle-ci à la vitesse minimale, le trait de fumée s'est trouvé complètement dissipé par le flux d'air.

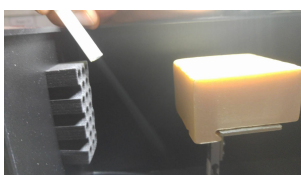


FIGURE 2.15 – Photo : Visualisation avec la soufflerie éteinte

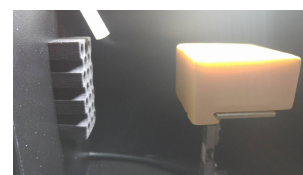


FIGURE 2.16 – Photo : Visualisation avec la soufflerie allumée



FIGURE 2.17 – Photo : Visualisation obtenue avec la machine à fumée

Il était donc impossible de conserver ce système pour la visualisation des lignes de courant autour de nos profils. Le flux de particules engendré par ce système était trop fin, il s'est donc trouvé dissipé dans toutes les directions par celui de l'air.

Ensuite, nous avons réussi à récupérer une machine à fumée conçue pour sonoriser des événements. Nous avons alors décidé de brancher la sortie de la machine à fumée avec un conduit qui acheminerait celle-ci directement à l'entrée de la soufflerie. Le trait de fumée à l'entrée de celle-ci était beaucoup plus important que lors des tentatives précédentes, la visualisation des écoulements autour des profils semblait alors possible.

Cependant, lors de la mise en marche de la soufflerie à la vitesse minimale nous avons rencontré le même problème qu'avec le diffuseur de particules vu précédemment ; une bonne partie de la fumée se trouvant dispersée par le flux d'air. Ainsi, à l'issue de cette expérience la qualité des écoulements autour des profils a été meilleure qu'avec les autres méthodes mais elle reste cependant insuffisante pour rendre cette observation complète. Avec cette machine le problème ne vient pas de la création de la fumée en tant que telle mais davantage de la soufflerie qui, même réduite à sa vitesse minimale, en dissipe une bonne partie dans toutes les directions. En effet, à l'issue de nos expériences une remarque est souvent revenue : la soufflerie met en mouvement des particules d'air de manière beaucoup trop rapide pour permettre l'observation des écoulements. Mais la raison principale est très simple, cette soufflerie n'a pas été conçue pour ce type de manipulation lors de sa conception, mais pour le calcul des forces de traînée, ce qui peut en partie expliquer ces grandes vitesses.

2.3.4 Calcul des forces de traînée sur la maquette

Démarche et modélisation 3D

Avec la maquette quatre profils de bases différents nous étaients fournis avec le même maître couple. Comme on voulait étudier l'écoulement sur des formes différentes de celles fournies et que les profils de bases étaient abîmés et de faible qualité, nous avons décidé de créer de nouveaux profils. Lors de notre projet on a pris contact avec un élève en master de physique de l'université de Rouen. Ce dernier avait un projet sur les profils d'aile NACA. Les profils à réaliser pouvant être comparés aux profils d'aile NACA. On a pu ainsi discuter des différentes formes de profil et de l'influence de celles-ci sur les forces de portance et de traînée. On a ainsi vu que la différence entre l'intrados (surface inférieure de l'aile ou du profil) et l'extrados (surface supérieure de l'aile ou du profil) influait sur la portance du profil. Ainsi un profil symétrique aura une force de portance nulle contrairement à un profil asymétrique. On a donc décidé de comparer 2 formes ayant le même maître couple, mais une forme différente. Pour cela nous avons conçu un profil symétrique assez standard puis un profil asymétrique ayant plus une forme en goutte d'eau afin de voir la différence du coefficient de traînée. On ne voulait pas impérativement créer un profil symétrique et un asymétrique. Mais la nécessité de poser le profil sur un petit plateau afin de réaliser les mesures nous a obligé à réaliser un profil asymétrique afin d'avoir un profil avec une forme type « goutte d'eau ». Ces profils ont été conçu grâce au logiciel solidworks. Concernant la

phase de conception, tout d'abord l'esquisse du profil a été dessinée. Puis la fonction bossage a été utilisée pour donner le volume escompté à la pièce.

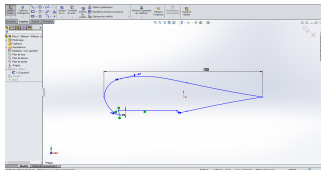


FIGURE 2.18 – Esquisse profil symétrique

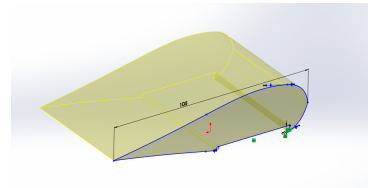


FIGURE 2.19 – Extrusion profil symétrique

On a ainsi obtenu les profils suivants.

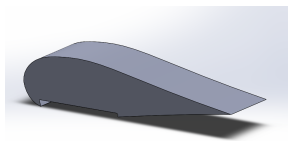


FIGURE 2.20 – Profil symétrique

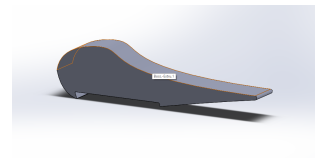


FIGURE 2.21 – Profil asymétrique

La phase de conception terminée, ils ont été imprimés avec des imprimantes 3D. Ainsi on a pu en déduire quelle type de forme diminuait ou au contraire augmentait la force de traînée. On aurait pu aussi comparer l'influence sur la force de l'inclinaison du profil par rapport à l'écoulement, en créant des profils inclinés par rapport au support de la soufflerie. De plus une autre possibilité que nous fournissait l'impression 3D était d'imprimer les profils en plusieurs fois puis de les recouvrir par différentes matières (vernis, peinture..) afin de voir l'influence de la rugosité du profil sur la force de traînée.

Calcul et évolution du coefficient de traînée

La maquette Jeulin nous permettait de faire des calculs de force de traînée. La maquette a des soucis de calibrage les valeurs des C_x ne seront donc pas correct mais ils permettront quand même de voir l'influence de différents paramètres sur la valeur du coefficient de traînée. Nous avons donc exploité cette fonctionnalité pour mettre en évidence les paramètres influant sur la force de traînée et sur le coefficient de traînée. Nous avons donc utilisé les profils suivants :



FIGURE 2.22 – au dessus profil symétrique et en dessous celui fait avec imprimante 3D

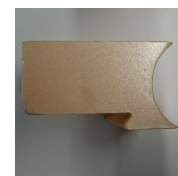


FIGURE 2.23 – Profil concave

Nous avons donc, dans un premier temps, tracé la courbe des forces de traînées en fonction de la vitesse (voir annexe B1). Tout d'abord on peut remarquer que la force de traînée dépend de la vitesse en effet plus on augmente la vitesse plus la force de traînée est importante.

Comme on connaît le maître couple des différents profils ($S = 21cm^2$) et la densité volumique de l'air envoyé par la machine ($\rho = 1.26kg.m^{-3}$), on peut donc déterminer C_x .

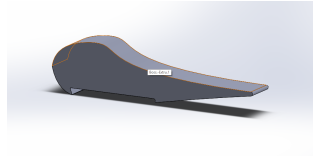


FIGURE 2.24 – Profil asymétrique fait par imprimante 3D

Grâce aux différentes valeurs relevées sur la machine, pour chaque profil, nous allons pouvoir obtenir le coefficient de traînée. Pour les courbes du profil concave et de celui symétrique on obtient une équation de la forme $F_t = av^2$, le coefficient de Reynolds est donc relativement constant pour notre gamme de vitesse pour ces deux profils. Par identification $a = \frac{1}{2}\rho SC_x$. Nous avons donc obtenu les coefficients suivant pour ces deux profils

— Profil concave : $C_x = 990$

— Profil symétrique fourni avec la machine : $C_x = 287$

Entre le profil symétrique et le concave seule la forme du profil change, on remarque que le C_x est différent entre ces deux profils, donc il dépend bien de la forme. On remarque, que le coefficient de traînée est beaucoup plus important pour le profil concave que celui symétrique, cela semble logique. L'air aura tendance à s'engouffrer dans le creux du profil concave, ce qui rendra plus difficile la mise en mouvement du profil concave par rapport à la mise en mouvement du profil symétrique. En ce qui concerne les deux profils symétriques on peut tout de même remarquer sur les courbes, que les forces de trainée sont très proches.

En ce qui concerne les profils réalisés avec une imprimante 3D, nous n'obtenons pas une courbe de la forme $F_t = av^2$ car le nombre de Reynolds varie aussi lorsque que la vitesse de l'écoulement est modifiée. On va donc calculer la valeur du C_x pour différents points. Nous avons ensuite tracé la courbe représentant le $C - x$ des deux profils réalisés avec une imprimante 3D et du profil symétrique fournie avec la maquette en fonction de de la vitesse de l'écoulement (voir annexe B2). On remarque que le coefficient de trainée reste plutôt constant pour le profil symétrique fournie avec la maquette et augmente avec la vitesse pour les deux profils réalisés par imprimante. Le fait que le nombre de Reynolds varie autant sur ce profil alors qu'il ne varie que très peu sur les autres, est peut être dû au changement du matériau et donc du poids du profil fait par imprimante 3D perturberait le calcul de la force de trainée par la maquette. Cela pourrait aussi être expliqué par le fait que la ligne de fuite du profil fait par imprimante 3D est moins arrondis ce qui a tendance à créer plus de turbulences à l'arrière du profil. Pour les deux profils réalisés par imprimante 3D coefficient de traînée augmente quand la vitesse augmente ce qui est normal puisque le coefficient de traînée dépend du nombre de Reynolds qui est d'autant plus grand que l'écoulement est turbulent, et la turbulence d'un écoulement est d'autant plus important que la vitesse est grande.

Les profils symétrique et asymétrique réalisés par imprimante 3D ont le même maître couple. On remarque sur le graphique que le coefficient de traînée du profil asymétrique (qui est cambrée) est moins important que celui du profil symétrique pour des faibles vitesses. Mais pour des vitesses plus élevées c'est l'inverse. Cela est dû au fait que pour des faibles vitesses la cambrure va permettre de limiter les effets de tourbillons derrière le profil car cette cambrure va permettre à l'écoulement au dessus et en dessous du profil de se retrouver avec le même angle. Mais pour des vitesses trop élevées l'écoulement ne va plus réussir suivre la cambrure et va donc tourbillonner à l'intérieur de celle-ci entrainer donc des forces de traînées importantes. Il est donc préférable d'utiliser un profil peu cambré pour des vitesses élevées et un profil cambré pour des vitesses peu importantes.

Conclusion et perspectives

Ce projet a été une expérience très enrichissante pour nous tous. En effet, il nous a permis d'acquérir des compétences très intéressantes en aérodynamisme, de partager nos connaissances et nos idées avec M. Yon, responsable de notre projet, ainsi que M. Tondelier, étudiant à l'UFR des Sciences et Techniques de St-Etienne-du-Rouvray et son professeur de physique, dans le cadre de notre collaboration.

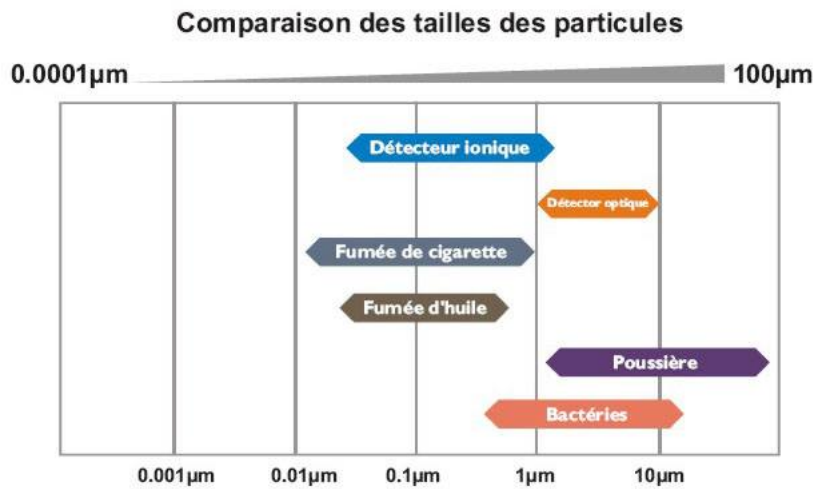
Ce projet nous a permis également de prendre conscience de la difficulté de mener un tel travail dans son intégralité. Pour finir, nous voudrions soumettre quelques pistes d'évolution concernant la visualisation des écoulements autour des profils. A l'avenir, il serait intéressant de tester notre dernière méthode de visualisation avec la machine à fumée en modifiant les commandes dirigeant les vitesses de la soufflerie. Ces changements permettront sûrement d'améliorer la visualisation des écoulements autour des profils. Dans ce cas, il serait intéressant à des fins pédagogiques de réaliser une fiche explicative et d'exposer cette maquette au grand public.

Bibliographie

- [1] MONAVON ARNAULT *Mini manuel de la mécanique des fluides* Dunod, 2014
- [2] XAVIER CARBONNEAU, LAURENT JOLY *Mécanique des fluides PC-PCSI* Les nouveaux précis Bréal, 2005
- [3] LIEN INTERNET, <http://mongolfiere.e-monsite.com> (Valide à la date du 27/05/2016)
- [4] LIEN INTERNET, <http://www.mecaflux.com> (Valide à la date du 27/05/2016)
- [5] LIEN INTERNET, <http://www.france3.fr/emissions/c-est-pas-sorcier/> (Valide à la date du 27/05/2016)
- [6] LIEN INTERNET, http://m-selig.ae.illinois.edu/ads/coord_database.html (Valide à la date du 27/05/2016)
- [7] LIEN INTERNET, <https://fr.wikipedia.org/wiki/Aérodynamique> (Valide à la date du 27/05/2016)
- [8] LIEN INTERNET, <http://pierre.garde.free.fr/PagesHTML/aerodynamique.htm> (Valide à la date du 27/05/2016)
- [9] LIEN INTERNET, http://www.grandvol.com/FFP-manuel/mv_03.htm (Valide à la date du 27/05/2016)
- [10] LIEN INTERNET, <https://aerodynamismetpe.wordpress.com/i-les-principes-de-laerodynamisme/> (Valide à la date du 27/05/2016)
- [11] LIEN INTERNET, <http://www.lavionnaire.fr/AerodynEcoulAir.php> (Valide à la date du 27/05/2016)
- [12] LIEN INTERNET, <http://xn--drmstrre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/fr/tour/wres/obst.htm> (Valide à la date du 27/05/2016)
- [13] LIEN INTERNET, http://res-nlp.univ-lemans.fr/NLP_C_M02_G02/co/Contenu_34.html (Valide à la date du 27/05/2016)
- [14] LIEN INTERNET, https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89coulement_laminaire (Valide à la date du 27/05/2016)
- [15] LIEN INTERNET, http://public.iutenligne.net/mecanique/mecanique-des-fluides/courtin/pertes-de-charge-lineique/co/Pertes%20de%20charges%20lineiques_17.html (Valide à la date du 27/05/2016)
- [16] LIEN INTERNET, <https://sciencetonnante.wordpress.com/2011/08/22/le-nombre-de-reynolds/> (Valide à la date du 27/05/2016)
- [17] LIEN INTERNET, http://res-nlp.univ-lemans.fr/NLP_C_M02_G02/co/Contenu_34.html (Valide à la date du 27/05/2016)
- [18] LIEN INTERNET, https://fr.wikipedia.org/wiki/Ligne_de_courant (Valide à la date du 27/05/2016)
- [19] LIEN INTERNET, <http://www.futura-sciences.com/magazines/matiere/infos/dico/d/physique-viscosite-2018/> (Valide à la date du 27/05/2016)

Annexe

.05 Justification du produit à utiliser



Graphique représentatif des intervalles de tailles de particules

calcul du coefficient α

1. $f_t = \frac{1}{2} \rho S C_t V^2$
2. $R_e = \frac{\rho V L}{\eta}$ avec $L=2R$ et R rayon de notre particule
3. $C_t = \frac{18,5}{R_e^{0,6}}$

$$\Rightarrow f_t = \frac{1}{2} \rho S \cdot \frac{18,5}{R_e^{0,6}} \cdot V^2$$

$$\Leftrightarrow f_t = 9,25 \rho S \left(\frac{\eta}{\rho V L} \right)^{0,6} V^2$$

$$\Leftrightarrow f_t = 9,25 \rho^{0,4} S \left(\frac{\eta}{2R} \right)^{0,6} V^{1,4}$$

$$\Leftrightarrow f_t = 9,25 \rho^{0,4} \cdot \pi R^2 \cdot \left(\frac{\eta}{2R} \right)^{0,6} V^{1,4}$$

$$\Leftrightarrow f_t = 9,25 \rho^{0,4} \cdot \pi R^{1,4} \cdot \left(\frac{\eta}{2} \right)^{0,6} V^{1,4}$$

.06 Calcul de force de traînée sur la maquette

Détermination de la force de traînée exercée par un flux d'air laminaire sur différents profil

