

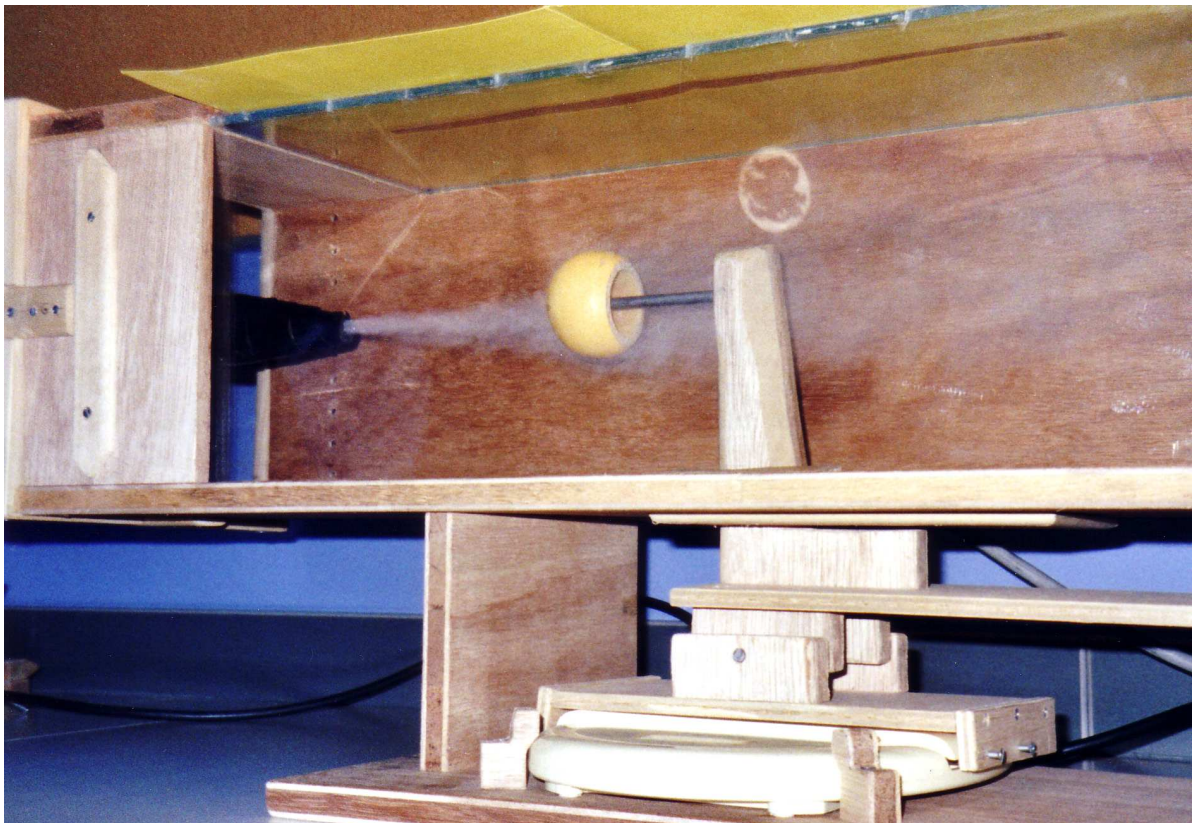


Olympiades de physique
2006/2007



Une soufflerie au lycée

Comment construire une véritable soufflerie au lycée ?



CORSAT Bastien
LEGRAND Thomas
VIRETTO-CIT Rémi

encadrés par M. LEFEVRE

Lycée G. St Hilaire - ETAMPES



Sujet : Une soufflerie au lycée

Problématique : *Comment construire une véritable soufflerie au lycée ?*

Résumé :

Les élèves ont récupéré le projet d'un collège qui était de construire une soufflerie à la main, avec les moyens du bord. L'objectif principal des élèves n'était pas de réaliser des expériences sur une soufflerie mais plutôt de pouvoir mener à bien la réalisation complète de l'appareil (cahier des charges, choix des matériaux, notice de montage, étude et réalisation des instruments de mesure...). Celle-ci est maintenant réalisée et montée, les élèves sont prêts à en expliquer le fonctionnement ainsi qu'à montrer les applications directes.

Elèves :

CORSAT Bastien

LEGRAND Thomas

VIRETTO-CIT Rémi

Professeur encadrant :

LEFEVRE Yoann

SOMMAIRE

SOMMAIRE	3
INTRODUCTION	4
I. POURQUOI FAIRE UNE SOUFFLERIE ? A QUOI ÇA SERT ?	5
A. Principe de la soufflerie	5
1) Définition	5
2) Schéma de principe d'une soufflerie	6
3) Les différents types de soufflerie	7
B. Les utilisations de la soufflerie	12
C. Définition du besoin et du cahier des charges	13
1) Le besoin	14
2) Le cahier des charges	14
II. QUELQUES NOTIONS D'AERODYNAMISME	17
1) Les forces mises en jeu	17
2) Zoom sur C_x et C_z	19
3) Le nombre de Reynolds Re	19
III. LA CONSTRUCTION DE LA SOUFFLERIE DU LYCEE	23
1) Origine du projet	23
2) Caractéristiques de notre soufflerie	23
3) Les systèmes de mesure	24
4) La motorisation	29
5) Etude de la liaison encastrement entre l'axe du moteur et l'axe de l'hélice	30
6) Dernières améliorations	32
7) Notice finale de montage	35
IV/ EXEMPLES D'EXPERIENCES AVEC LA SOUFFLERIE DU LYCEE	39
1) Quelques règles pratiques	39
2) Etude de la traînée	40
3) Etude de la portance	40
4) Observation de l'écoulement de l'air	42
5) Quelques exemples d'expériences	42
CONCLUSION	44
BIBLIOGRAPHIE	45
ANNEXE : CENTRE AERODYNAMIQUE EIFFEL	46

INTRODUCTION

Le monde d'aujourd'hui a vu arriver de nouveaux véhicules allant toujours plus vite (les Formules 1), de nouveaux immeubles allant toujours plus haut (les gratte-ciels). Bref, tous les objets techniques ayant à composer avec le vent sont de plus en plus performants. Ces nouvelles performances sont bien sûr dues aux nouvelles connaissances données par le progrès des technologies mais sont également possibles grâce à une étude approfondie de l'objet en question. Un des moyens pour effectuer l'étude des rapports qu'entretient l'objet avec le vent ou l'air, c'est la soufflerie. Ce dispositif technique permet d'étudier l'aérodynamisme, les vitesses d'écoulement de l'air, les forces exercées sur l'objet et encore bien d'autres paramètres. A notre échelle, afin d'étudier tous ces paramètres au lycée, il est nécessaire de disposer d'une soufflerie. Voyons comment en réaliser une à moindre coût et avec les moyens du bord.

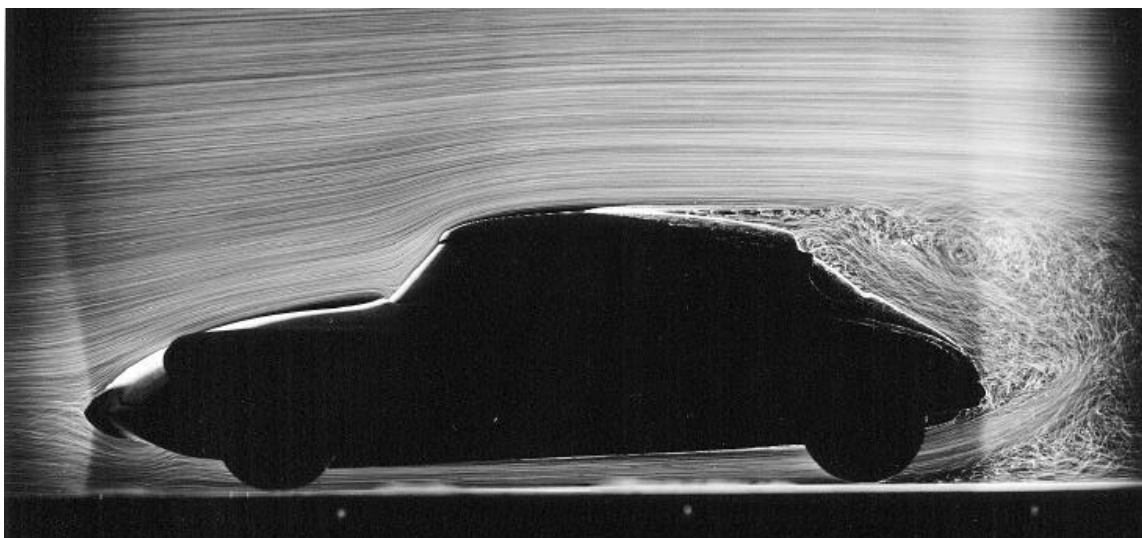
I. POURQUOI FAIRE UNE SOUFFLERIE ? A QUOI ÇA SERT ?

A. Principe de la soufflerie

1) Définition

Une soufflerie est un dispositif expérimental utilisé pour prévoir le comportement et simuler les conditions rencontrées par un véhicule se déplaçant dans l'air en réalisant une simulation expérimentale sur une maquette, en général à échelle réduite. Un véhicule étudié dans une soufflerie est placé, immobile, dans un écoulement artificiel d'air ou de gaz.

La soufflerie réalise un changement de référentiel : le véhicule est fixe et l'air en mouvement. C'est équivalent sauf lorsqu'il y a des frottements entre les pneus du véhicule et la surface du sol (automobile, train, avion à l'atterrissage ou au décollage) : on parle alors de l'effet de sol.

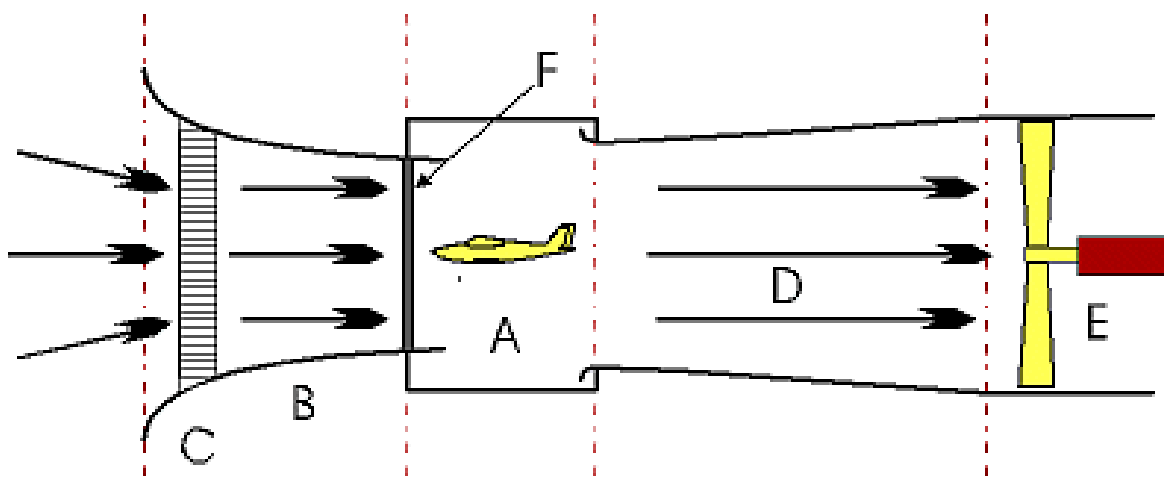


La photo ci-dessus montre une voiture subissant des essais en soufflerie. Dans la réalité, la voiture se déplace dans l'atmosphère au repos en roulant sur une route fixe. Ici, nous voyons bien les lignes de courant d'air se propager autour de la voiture. En essai, l'air s'écoule donc autour de la maquette immobile et la route est fixe. Encore une fois, l'inconvénient de l'immobilité de la voiture, c'est qu'il n'y a pas d'effet de sol, ce qui crée un problème pour la simulation de cet effet.

De nos jours, il existe quelques centaines de souffleries dans le monde. Leur puissance varie de plusieurs dizaines de Watts à plus de 100 MW.

2) Schéma de principe d'une soufflerie

L'air rentre par le collecteur, est accéléré par le ventilateur, passe dans la chambre d'expérience avant de ressortir ensuite par le diffuseur :



C - FILTRE
B - COLLECTEUR
F - VEINE

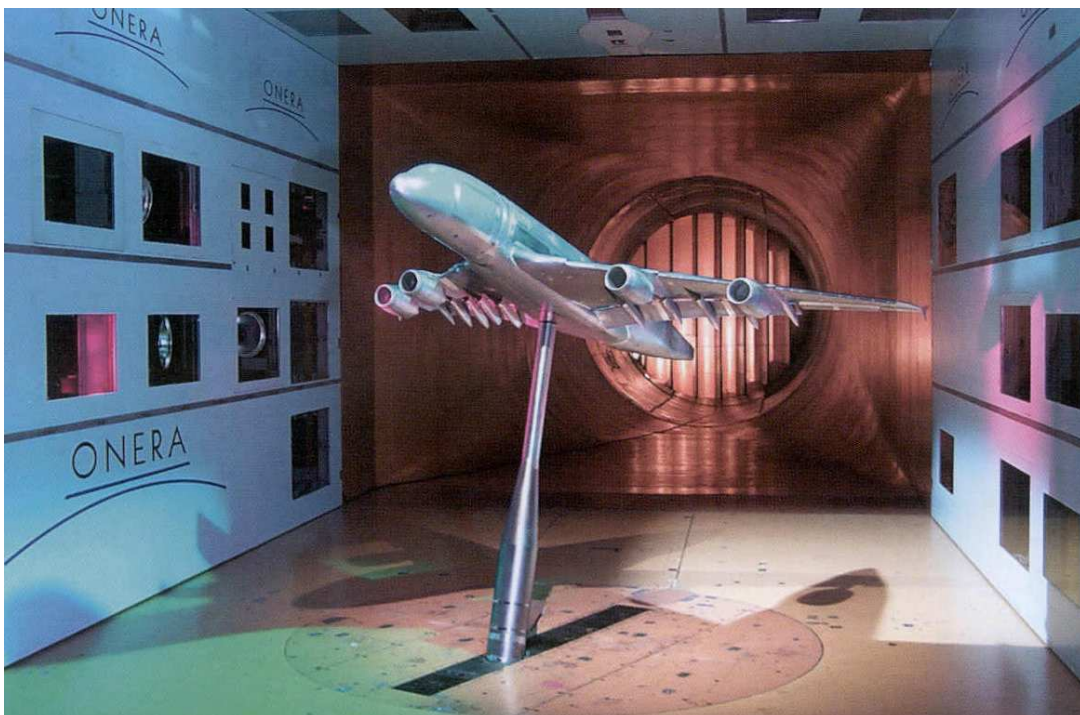
A - CHAMBRE D'EXPERIENCE
D - DIFFUSEUR
E - VENTILATEUR

3) Les différents types de soufflerie

Que se soit pour les automobiles, les avions ou les missiles, les souffleries sont très utilisées. Cependant, ces différentes études n'ont pas les mêmes besoins et exigences. C'est pourquoi il existe aujourd'hui différents types de souffleries qui ont des caractéristiques spécifiques, afin de répondre au mieux aux différents besoins. Il existe actuellement quatre types de souffleries dont la différence principale est le nombre de Mach (M), autrement dit la vitesse d'écoulement de l'air (rapport de la vitesse d'un mobile à celle du son dans un fluide).

a. Les souffleries subsoniques

Ces souffleries ont une vitesse d'écoulement de l'air qui va de 0 à 200 m/s. Elles s'adressent par exemple aux véhicules terrestres ou aux avions en phase de décollage ou d'atterrissage.



Maquette d'A380 dans la soufflerie F1 du Centre Onera du Fauga-Mauzac

La soufflerie *Eiffel* (voir en annexe) avec laquelle nous avons travaillé fait partie de ce type de soufflerie. Datant du début du XX^{ème} siècle, elle a été aujourd'hui dépassée par des souffleries beaucoup plus performantes.

b. Les souffleries transsoniques

Ces souffleries ont une vitesse d'écoulement de l'air allant de Mach 0,7 à Mach 1,3. Celles-ci s'adressent à l'étude des avions de transport civils (Airbus, Boeing) ainsi qu'aux avions de combat. L'objectif est de produire des écoulements dont le nombre de Mach est proche de 1 pour étudier des dispositifs fonctionnant dans le domaine transsonique où des régions supersoniques se forment sur les avions (régions où l'air s'écoule à une vitesse supérieure à la vitesse du son dans l'air).

Il survient pourtant des problèmes techniques. La diminution de la section due à la maquette produit un col sonique : c'est une sorte de goulot d'étranglement où il y a plus d'air voulant circuler que d'air pouvant circuler. Autrement dit il se crée une sorte de bouchon, ce qui entraîne un effet de blocage de l'air. De plus, les perturbations supersoniques se propagent dans des directions presque perpendiculaires à la maquette. Ces perturbations se réfléchissent sur les parois puis retombent sur la maquette. A ces problèmes existent des solutions. On débloquent l'écoulement en agissant sur les parois (hautes et basses) de la veine. Le but est d'augmenter le débit passant au niveau de la maquette pour éviter la formation de ce col sonique. Concrètement, on installe des parois ventilées soit grâce à des trous, soit grâce à des fentes pour créer des zones d'aspiration. L'autre solution est l'installation de parois adaptables qui reproduisent la ligne de courant de l'écoulement.



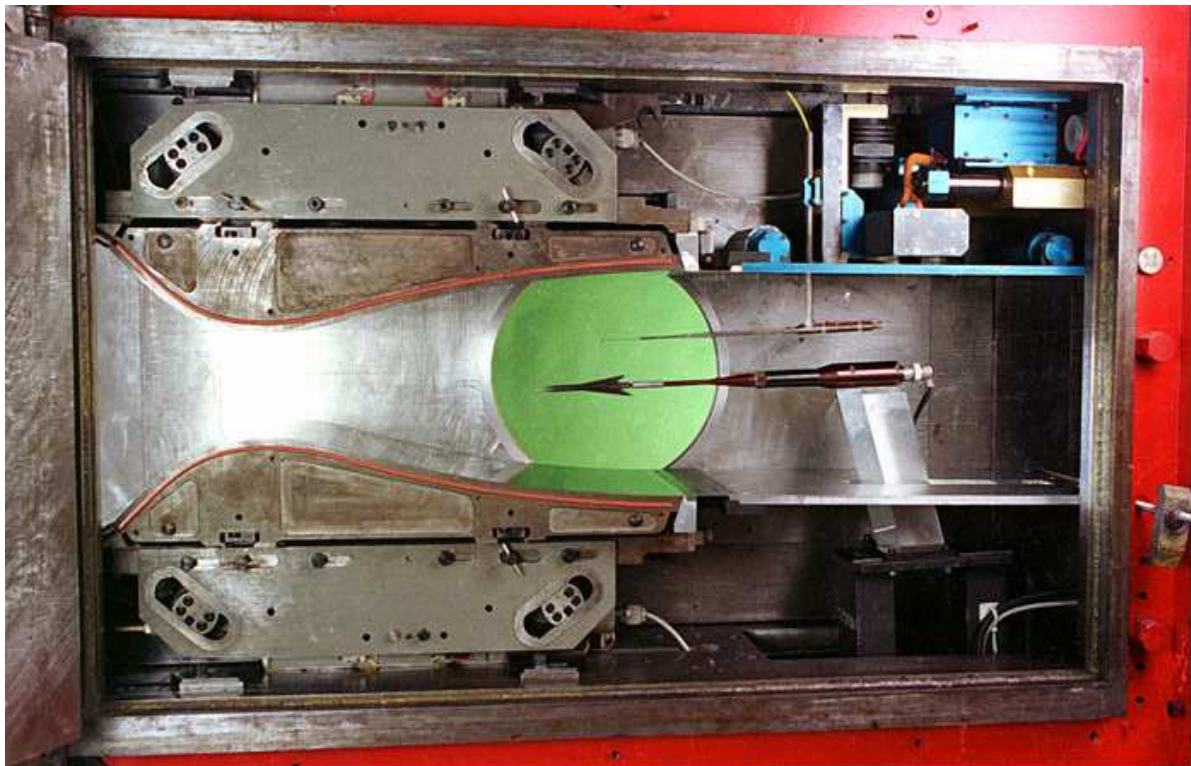
Veine de la soufflerie S3Ch avec maquette motorisée d'aile d'A340



Essai de largage d'un missile Apache sous Mirage 2000 dans la soufflerie S1MA

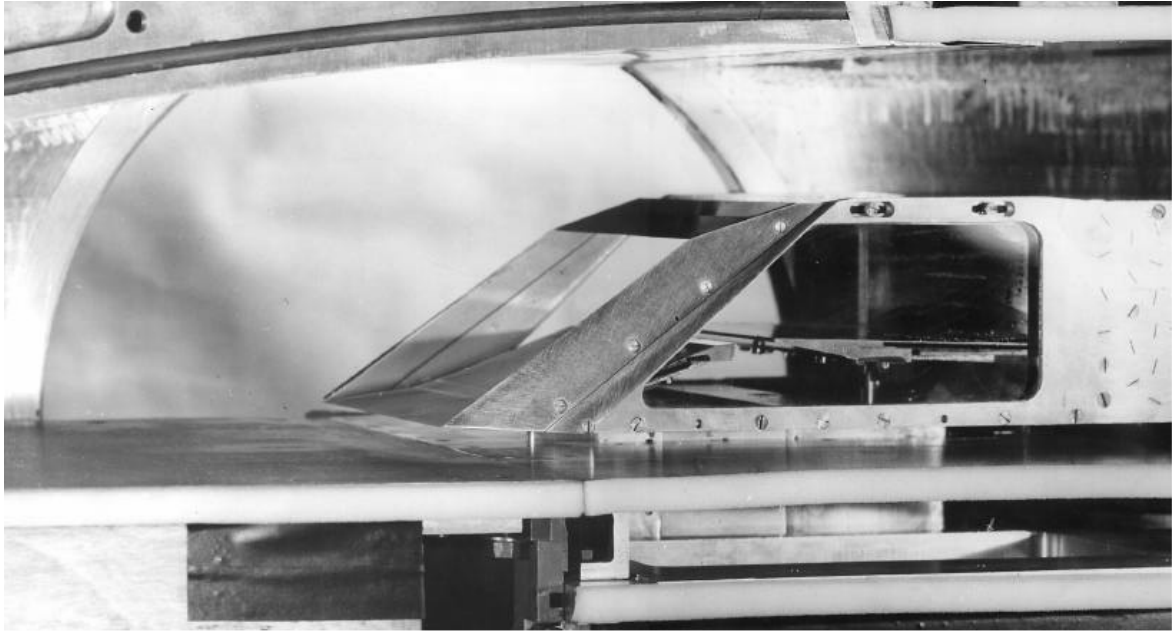
c. Les souffleries supersoniques

Ces souffleries fonctionnent de Mach 1,6 à Mach 4. Leurs domaines de prédilections sont les avions de transport (Concorde), les avions de combat et les missiles. Malgré tout, pour obtenir un flux supersonique, la forme de la veine doit être particulière. En effet, la tuyère doit être convergente-divergente, comme sur la photo suivante.



Tuyère Mach 2 de la soufflerie S5Ch du Centre Onera de Meudon

Notons qu'il est possible de calculer théoriquement le contour de la tuyère afin de fournir un écoulement uniforme de nombre de Mach voulu.



Maquette de la prise d'air du Concorde dans la même soufflerie S5Ch

d. Les souffleries hypersoniques

Ces dernières souffleries sont les souffleries les plus puissantes. Le but est de produire des écoulements à grande vitesse (6 km/s et plus) avec un grand nombre de Mach (de 5 à 25) pour étudier les véhicules hypersoniques et la rentrée dans l'atmosphère.

Tout comme les souffleries transsoniques, celles-ci sont soumises à des problèmes techniques. Pour amorcer et maintenir l'écoulement important que nécessite ces souffleries, il faut que les rapports de pression amont/aval soient suffisants et il faut éviter la liquéfaction de l'air en cours de détente dans la tuyère. Pour palier au premier problème, il faut alimenter la soufflerie en air comprimé haute pression. Pour remédier au second, il faut chauffer l'air avant la détente (1100 K pour Mach 10).



La soufflerie R3Ch à Mach 10 du Centre Onera de Meudon

B. Les utilisations de la soufflerie

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

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

C. Définition du besoin et du cahier des charges

Avant de construire une petite soufflerie au lycée (comme d'ailleurs pour la construction de tout autre objet technique), il faut se demander à qui l'objet s'adresse, quelles en seront les utilisations et dans quel but : cela s'appelle **le besoin**. Ensuite, il faut définir toutes les caractéristiques de l'objet technique en question : cela va de la beauté de l'objet (contrainte d'esthétique) à ses fonctions fondamentales (qu'est ce qu'il doit faire) en passant par le coût (contrainte économique), la facilité d'utilisation (contrainte de praticité), son adaptabilité (contrainte de l'environnement extérieur), etc... : cela s'appelle **le cahier des charges**.

Cette étape préliminaire permet de cadrer au maximum le projet et, grâce à ces deux outils, on peut par exemples minimiser le coût de production (en choisissant des produits moins chers) ou tout simplement éviter de partir dans une conception trop complexe ou sur dimensionnée par rapport au besoin précédemment défini.

1) Le besoin

Dans notre cas, il s'agit de réaliser une soufflerie de taille réduite pour un lycée (elle peut également servir pour d'autres écoles d'un niveau supérieur comme l'IUT par exemple). Cette soufflerie doit permettre la réalisation de quelques expériences physiques quantifiables et la mise en évidence de phénomènes physiques simples.

2) Le cahier des charges

a. Les critères

Il ne faut pas perdre de vue que cette soufflerie s'adresse majoritairement à un lycée, donc l'étude pour sa réalisation doit être principalement axée sur le coût, qui doit être plutôt faible, la facilité de la conception et l'encombrement qui doit être minimal.

Il faut que la soufflerie soit portative, donc non montée sur un socle fixe et il faut qu'elle soit démontable pour que son transport soit aisé.

L'intérieur de la veine doit être visible lors du fonctionnement de la soufflerie pour pouvoir observer les comportements des objets et les phénomènes qui se produisent. Elle doit en plus être accessible pour y placer les différents objets à étudier.

Ensuite, le débit d'air doit être assez important pour que l'écoulement de l'air soit le plus fluide possible (autrement dit sans perturbations).

La motorisation ne doit occuper un espace important par rapport au reste de la structure.

La soufflerie doit être équipée d'appareils permettant la mesure de phénomènes physiques.

La soufflerie doit également être sécurisée, notamment en « isolant » la motorisation.

b. Solutions retenues

La soufflerie sera majoritairement construite en bois, qui, en plus d'être beaucoup moins cher que le métal ou le plastique (type plexiglas), se travaille plus facilement et permettra donc une réalisation moins contraignante de la structure.

L'assemblage des différentes pièces se fera par vissage et en aucun cas par collage ou cloutage qui ne permet pas la répétitivité du montage.

Le haut et un côté de la veine sera réalisé en plexiglas.

Les plaques de plexiglas ne seront pas fixées par des vis pour que l'on puisse les démonter et donc accéder facilement à l'intérieur de la veine.

Pour la motorisation, nous pencherons pour la solution standard utilisée dans les souffleries : un moteur électrique couplé à une hélice. Pour cette dernière, nous avons choisi une hélice en plastique d'un avion d'aéromodélisme qui est moins dangereuse qu'une hélice en métal, moins lourde et plus résistante qu'une en bois. Pour le moteur, il faut qu'il soit assez puissant (pour la fluidité de l'écoulement) tout en prenant le moins de place possible.

Les mesures physiques concerneront la mesure de la vitesse de l'air dans la veine ainsi que la mesure des efforts sur l'objet qu'on appelle la portance et la traînée (*voir partie II*). Nous utiliserons deux balances, l'une pour mesurer la

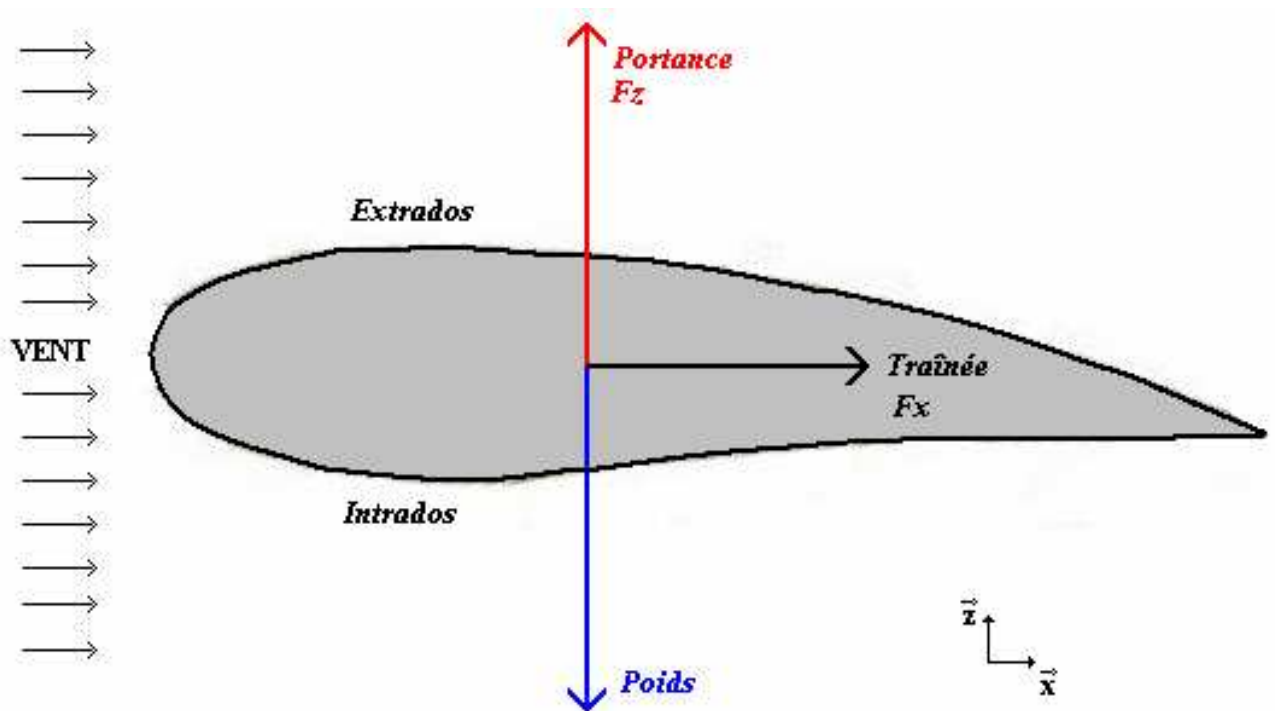
portance et l'autre pour la mesure de la traînée. Pour ce qui est de la vitesse de l'air, nous utiliseront un manomètre en U.

La sécurité se fera par l'installation d'une grille autour du moteur et par un système d'arrêt d'urgence du type interrupteur.

II. QUELQUES NOTIONS D'AERODYNAMISME

1) Les forces mises en jeu

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



Le poids : c'est la force qui entraîne notre aile vers le bas, dont la formule est : $P = mg$ avec P le poids en N
 m la masse de l'objet en kg
 g l'intensité de pesanteur qui vaut $9,81 \text{ N.kg}^{-1}$

La portance : c'est la force de sens opposée au poids ; elle est orientée perpendiculairement à l'extrados, (dessus de l'aile), c'est elle qui permet à toute aile de faire voler l'avion. Elle se caractérise par la formule suivante :

$$F_z = \frac{1}{2} \cdot C_z(Re, \theta) \cdot \mu \cdot S \cdot V^2$$

F_z définissant la portance, en N

C_z étant le coefficient de portance, un nombre sans unité (*voir 2.*) qui dépend de Re et de θ

Re étant le nombre de Reynolds, en Reynolds (*voir 3.*)

θ étant l'angle d'incidence, en degrés

μ la masse volumique du fluide s'écoulant (l'air généralement), en kg.m^{-3}

S Surface projetée au sol de l'objet, en m^2

V la vitesse relative du fluide non perturbé par rapport au mobile, en m.s^{-1}

La traînée : c'est la force qui est due à la résistance de l'aile sur l'air, elle a un sens opposé au déplacement, et s'accroît avec la vitesse du mobile (ou de l'air selon le référentiel dont on parle). Elle se caractérise par la formule suivante :

$$F_x = \frac{1}{2} \cdot C_x(Re, \theta) \cdot \mu \cdot S \cdot V^2$$

F_x définissant la traînée, en N

C_x étant le coefficient de pénétration dans l'air, un nombre sans unité (*voir 2.*) qui dépend de Re et de θ

S Surface de l'objet faisant face au fluide en déplacement, en m^2

Re , θ , μ , et V étant les mêmes paramètres que pour la portance

2) Zoom sur C_x et C_z

L'aérodynamisme est défini par le C_x , le coefficient de pénétration dans l'air, et par le C_z , le coefficient de portance. Ce C_x est le rapport de l'effort nécessaire à maintenir un objet dans un écoulement d'air par rapport à une plaque de 1 m^2 .

Ces deux coefficients sont mesurés expérimentalement et sont fonction du nombre de Reynolds (*voir 3.*), du profil d'aile et de son incidence. Les graphiques représentant ces deux coefficients sont appelés polaires. Une aile est caractérisée par le rapport de ces deux coefficients, $F = C_z / C_x$, appelé la finesse de l'aile. Plus la finesse d'une aile est grande, plus elle pourra parcourir de grandes distances en ne perdant que peu d'altitude. De plus, le C_x permet d'extrapoler des résistances à l'avancement pour des séries de profils géométriquement semblables.

3) Le nombre de Reynolds Re

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

- la viscosité dynamique (notée ν), qui est le facteur de proportionnalité s'opposant au déplacement de deux plaques, séparés par le fluide, l'une par rapport à l'autre.

- la viscosité cinématique (notée η), qui est la viscosité dynamique divisé par la masse volumique du fluide.

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

$$Re = V.D/\eta \quad \text{ou} \quad Re = \mu.V.D/\nu$$

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

D le diamètre de la veine ou longueur caractéristique de l'écoulement, en m

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

μ la masse volumique du fluide, en kg.m^{-3}

ν la viscosité dynamique du fluide, en $\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$

Il est le plus important nombre sans dimension en dynamique des fluides. En effet, il montre que l'écoulement se perturbe au delà d'une certaine vitesse, pour un même fluide et un même tube. Il a été mis en évidence en 1883 par Osborne Reynolds, lors d'une étude sur l'écoulement d'un fluide dans une conduite rectiligne. Il en a déduit les résultats qui suivent :

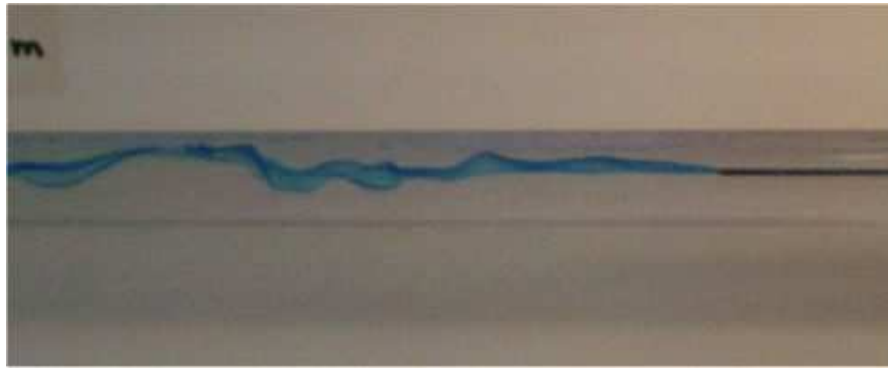
Si $Re < 2000$, le régime est LAMINAIRE



Sur la photo ci-dessus, l'expérience consiste à envoyer un fluide, à une certaine vitesse, dans un cylindre et de visualiser son régime en envoyant, grâce à un

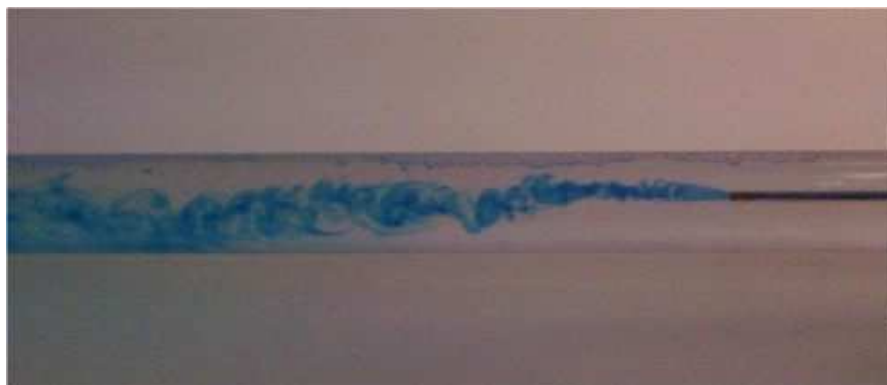
autre tube beaucoup plus fin, un filet de colorant bleu qui se laisse porter par le fluide. Ici, le régime est laminaire car on voit que le colorant suit une trajectoire rectiligne lorsqu'il est porté par le fluide.

Si $2000 < Re < 3000$, le régime est intermédiaire



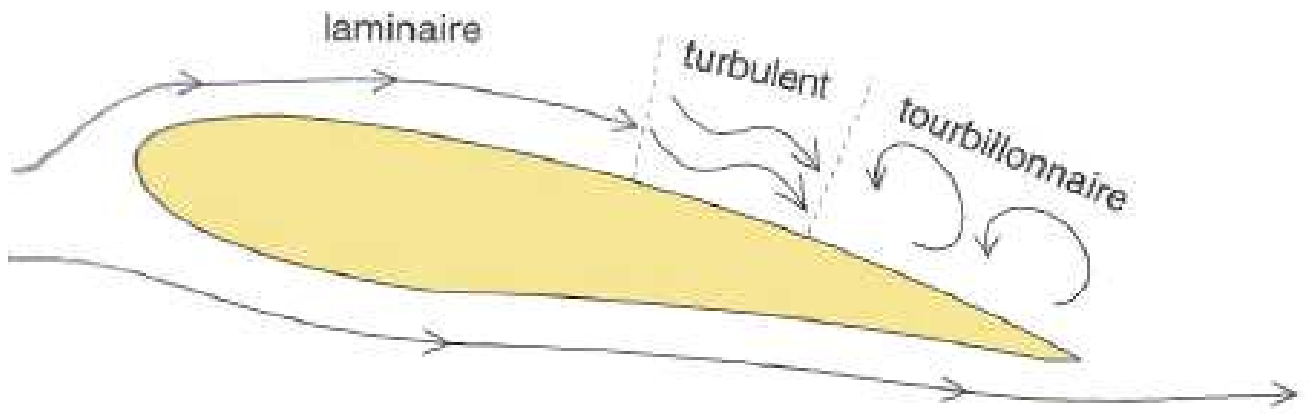
Ici, l'expérience est la même mais l'écoulement est intermédiaire : on commence à voir que le colorant ne suit plus de trajectoire rectiligne, mais qu'il commence à se disperser dans le cylindre.

Si $Re > 3000$, le régime est TURBULENT



Ici, l'expérience est toujours la même mais l'écoulement est turbulent car on voit clairement que le colorant ne suit pas de trajectoire définie, il se disperse dans tout le cylindre.

Par exemple, il sera possible de montrer, grâce à notre soufflerie, les différents régimes d'écoulement autour d'un profil d'aile particulier :



III. LA CONSTRUCTION DE LA SOUFFLERIE DU LYCEE

1) Origine du projet

L'idée de la soufflerie nous vient du collège Cotton de Blanc Mesnil, où le projet d'étude, dirigé par M. Gérard LARUELLE, Secrétaire Général de l'AAAF, Association Aéronautique et Astronautique de France, et par Mme Paulette BEFFARE, professeur de sciences physiques, a été abandonné, faute de collégiens. Nous avons donc récupéré ce projet en mars 2006. L'étude technique, le façonnage de la veine avait été réalisé mais la soufflerie n'était pas entièrement montée : en particulier toute la partie essentielle de motorisation était loin d'être opérationnelle. Nous avons donc dû la réparer, nous rendant compte assez vite que cela représentait beaucoup de travail et que notre objectif initial de réaliser des expériences sur la soufflerie devait être abandonné, au profit d'un objectif plus réaliste : proposer une « notice de fabrication d'une soufflerie », fabrication accessible aux petits budgets, notamment aux lycées.

2) Caractéristiques de notre soufflerie

Notre soufflerie est entièrement constituée de planches de bois fixées les unes aux autres par des vis. La veine est, à la différence des souffleries classiques, carrée, de 18 cm de côté. Ces deux caractéristiques ont pour

bénéfice de diminuer le coût de fabrication et de simplifier grandement la mise en oeuvre. Après estimation, ce coût s'élèverait à 190€ sans compter la motorisation et l'hélice.

Au final, notre soufflerie :



3) Les systèmes de mesure

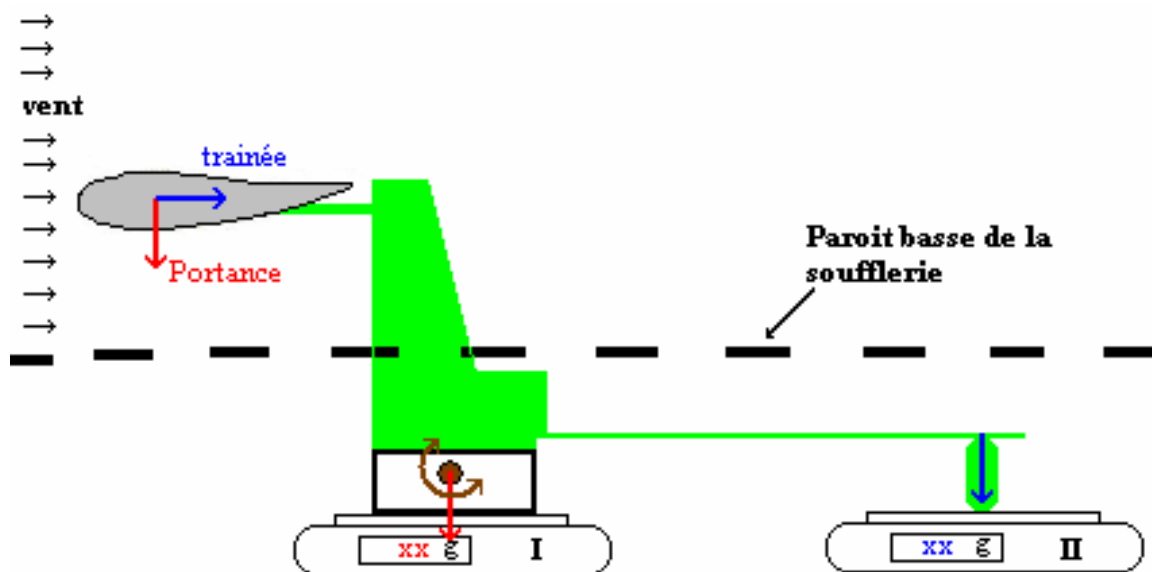
a. Le système de mesure de la portance et de la trainée

Nous pouvons mesurer la portance et la traînée de l'objet étudié grâce à un système de levier renvoyant ces forces et les appliquant sur des balances. Nous pouvons ainsi mesurer ces paramètres.

Notre système de pesée :



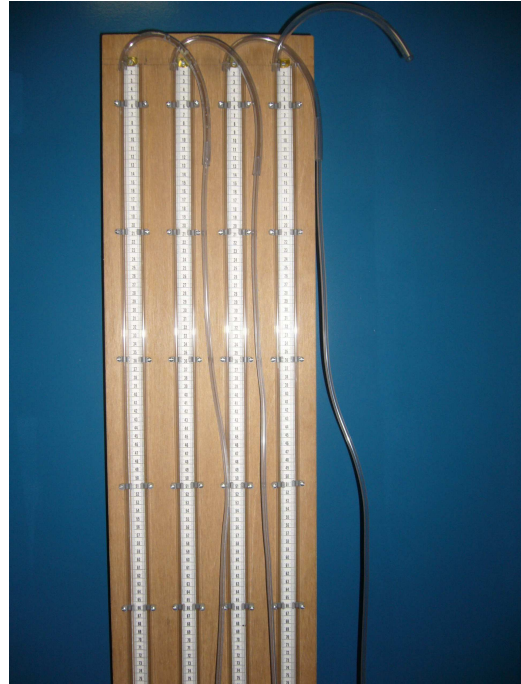
Voici un schéma explicatif du système de mesure des forces de la portance et de la traînée :



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

b. Le système de mesure des pressions et des vitesses

Afin de mesurer la pression à l'intérieur de la veine, nous avons à notre disposition un manomètre hydraulique en U.



Le montage est constitué d'un long tube en plastique transparent de 3 mètres environ et de diamètre constant que nous avons mis en U. Le tube est donc placé sur un support en bois vertical fixé à l'aide de clous et muni d'une règle graduée placée entre les deux parties du tube afin de mesurer au millimètre la hauteur h , différence des niveaux d'eau due à la différence des pressions de l'air qui s'exercent sur chaque côté du tube.

En effet, la mesure réalisée est avant tout une mesure de pressions (*voir la photo page suivante*) : un des tubes est placé face à l'arrivée de l'air (point de mesure n°1) : on considère ce point comme un point d'arrêt car la vitesse de l'air au bout de ce tube est considérée comme nulle. L'autre bout du tube est placé perpendiculairement à l'arrivée de l'air (point de mesure n°2).

La relation de Bernoulli (relation fondamentale dans la mécanique des fluides) nous donne :

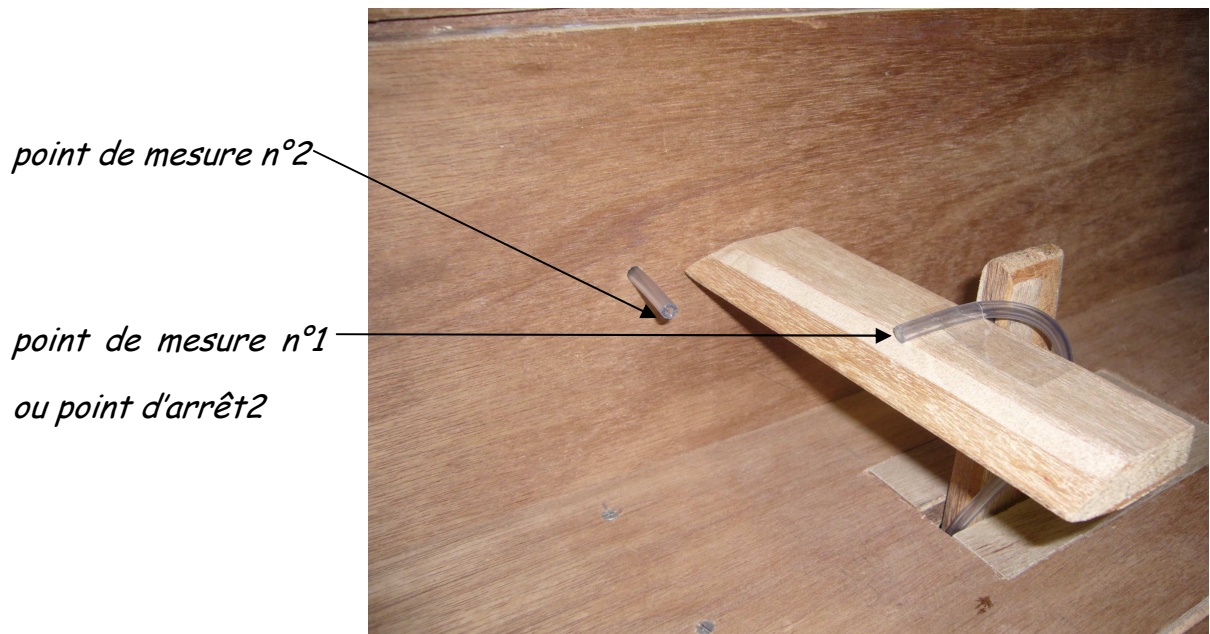
$$P_1 + \frac{1}{2} \cdot \mu \cdot V_1^2 + \mu_{\text{air}} \cdot g \cdot z_1 = P_2 + \frac{1}{2} \cdot \mu_{\text{air}} \cdot V_2^2 + \mu \cdot g \cdot z_2 \quad \text{avec :}$$

P_1 la pression au point n°1, P_2 la pression au point n°2,

V_1 la vitesse de l'air au point n°1, V_2 la vitesse de l'air au point n°2

z_1 l'altitude au point n°1, z_2 l'altitude au point n°2

et μ_{air} la masse volumique de l'air.



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

On a donc
$$P_1 - P_2 = \frac{1}{2} \cdot \mu_{\text{air}} \cdot V_2^2$$

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

On a la relation suivante, dans le tube en U :

$$P_1 + \frac{1}{2} \cdot \mu_{\text{eau}} \cdot V_A^2 + \mu_{\text{eau}} \cdot g \cdot z_A = P_2 + \frac{1}{2} \cdot \mu_{\text{eau}} \cdot V_B^2 + \mu_{\text{eau}} \cdot g \cdot z_B$$

or $V_A = V_B = 0$ (les niveaux d'eau sont fixes)

$$P_1 - P_2 = \mu_{\text{eau}} \cdot g \cdot (z_B - z_A)$$

On a donc : $P_1 - P_2 = \mu_{\text{eau}} \cdot g \cdot h$

La vitesse au point n° 2 peut donc s'écrire :

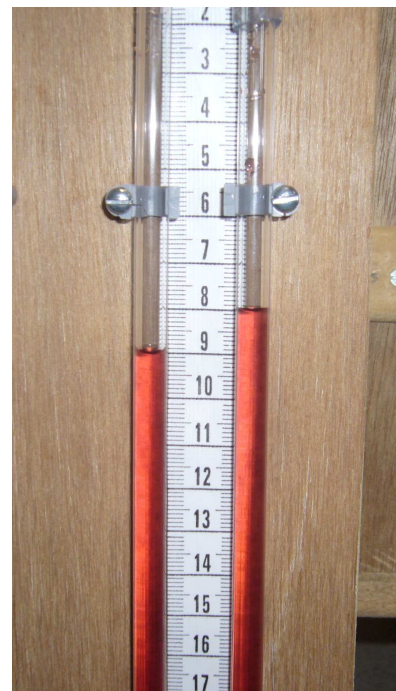
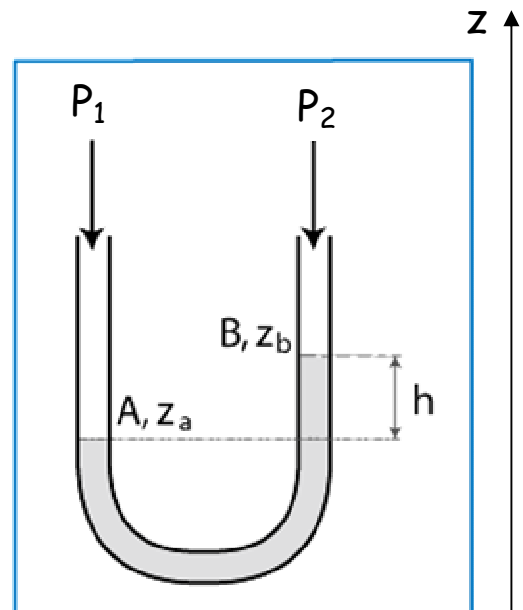
$$\frac{1}{2} \cdot \mu_{\text{air}} \cdot V_2^2 = \mu_{\text{eau}} \cdot g \cdot h$$

soit : $V_2 = \sqrt{\frac{\mu_{\text{eau}}}{\mu_{\text{air}}} \cdot 2 \cdot g \cdot h}$

Avec l'exemple ci-contre : mesure d'une hauteur d'eau $h \approx 1,0$ cm dans le tube en U.

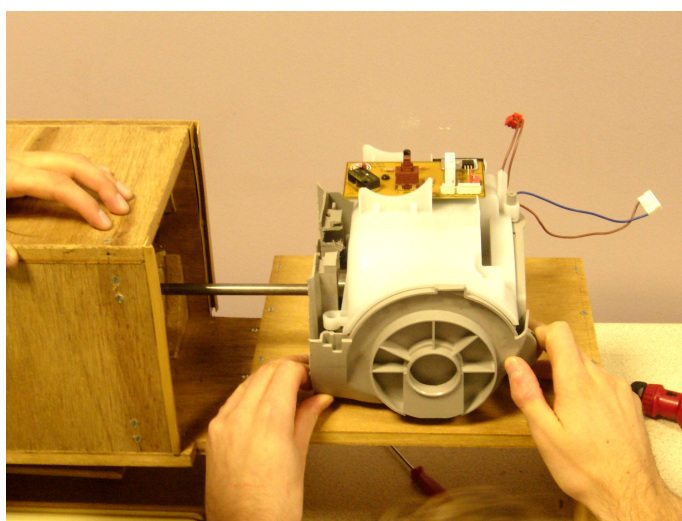
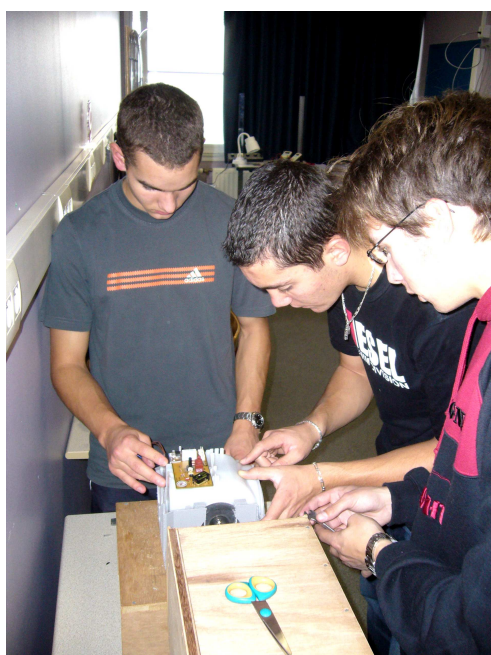
$$\text{A.N. } V_2 = \sqrt{\frac{1000}{1,29} \times 2 \times 9,8 \times 0,010}$$

$$\underline{V_2 \approx 12 \text{ m.s}^{-1}}$$



4) La motorisation

La veine et l'ensemble des appareils de mesure étant en place, il a fallu trouver le système de ventilation. Pour cela, nous avons récupéré un moteur d'aspirateur ainsi que la carcasse plastique d'origine afin de pouvoir bien le fixer. C'est un moteur à courant alternatif, alimenté en 230V, et dont nous pouvions régler sa vitesse à l'aide d'un potentiomètre qui se trouve sur le circuit d'origine de l'aspirateur.



Positionnement du moteur et réglages

Il ne restait plus qu'à fixer l'axe de l'hélice sur celui-ci et nous pouvions espérer un écoulement d'air assez puissant. L'étude de cette délicate liaison et sa réalisation furent effectuées en mai. Les premiers essais n'étant pas concluants, un nouveau mode de liaison fût installé en octobre (*voir partie suivante*).

Mais, à la suite de cette deuxième fixation de l'axe de l'hélice sur celui du moteur, nous avons rencontré un nouveau problème avec ce dernier. En effet, nous avons remarqué que le moteur tournait beaucoup plus vite que

d'habitude et faisait des étincelles bleues. Nous nous sommes renseignés auprès de professeurs en génie électromécanique et avons appris que la soudure à l'arc sur l'axe du moteur avait « flashé » le vernis de protection qui se trouve sur la bobine de moteur. De ce fait, nous ne pouvions plus contrôler la vitesse du moteur qui fonctionnait donc à un régime anormal.

Nous avons donc cherché une autre solution, rapide et efficace afin de pouvoir présenter dans de bonnes conditions notre soufflerie au jury des Olympiades. Cette dernière solution (la perceuse...) est présentée dans la partie 6) *Dernières améliorations*.

5) Etude de la liaison encastrement entre l'axe du moteur et l'axe de l'hélice

Au départ, nous avons choisi une première solution très bruyante et surtout qui se dégradait beaucoup. Un écrou était fixé sur l'arbre du moteur et sur la tige de l'hélice était vissé une plaque métallique tordu en U avec un trou pour accueillir l'écrou. On peut voir sur les photos ci-dessous l'usure de l'écrou et de la pièce fixée sur l'axe de l'hélice qui s'arrondissent.



axe du moteur



tige de l'hélice

Cela nous causait beaucoup trop de problèmes, d'un point de vue sonore mais aussi d'un point de vue de la transmission des efforts. Nous avons donc cherché une autre solution. Il nous fallait une liaison qui permettait un certain décalage radial entre les deux axes. C'est pourquoi nous avons choisi d'usiner quelques pièces et de les fixer sur les axes. L'usinage a été effectué par un professeur d'un autre lycée car nous n'avions pas les machines adéquates et les soudures ont été réalisées à l'arc électrique.



nouvelle pièce sur l'axe du moteur



nouvelle pièce sur la tige de l'hélice

Les deux axes sont liés entre eux grâce à un perçage transversal sur les pièces et le maintien en position est réalisé à l'aide de vis, écrous et rondelles. Les rondelles permettent aux écrous de ne pas se desserrer à cause vibrations liées à la rotation du moteur.



perçage sur l'axe du moteur



vis permettant le maintien en position



perçage sur l'axe de l'hélice

Cette fixation, grâce à la petite différence de diamètre entre les deux pièces et la partie en caoutchouc, nous permet d'avoir un certain jeu entre les deux axes car ils doivent être alignés le plus précisément possible afin d'éviter les vibrations et le bruit assourdissant.

6) Dernières améliorations

a. Avant les sélections régionales : changement du filtre d'entrée d'air

Durant la dernière partie de notre étude de cette soufflerie, nous avons apporté quelques améliorations à sa structure. Nous avons notamment changé l'entrée d'air afin d'obtenir un écoulement plus uniforme et moins perturbé. Ce changement nous est venu à l'idée suite à la visite de la soufflerie Eiffel, à Paris. En effet, M. Peter, directeur de la soufflerie à la retraite, qui nous a offert une visite guidée (*voir l'annexe*), a attiré notre attention sur ce point, en nous montrant que notre entrée d'air, faite de cylindres mis les uns à côté des autres, traversés d'une tige filetée, devait produire un écoulement perturbé. Nous avons donc décidé de suivre son conseil et de chercher à adopter une entrée d'air faite de lamelles de métal entrecroisées.

Notre ancienne entrée d'air :



Notre nouvelle entrée d'air :



b. Après les sélections régionales : changement de moteur

Depuis les sélections régionales, nous avons apporté les quelques dernières modifications qui s'imposaient pour que notre soufflerie fonctionne correctement.

Suite aux problèmes liés au système de ventilation, que ce soit au niveau de l'élément moteur ou au niveau de la liaison entre le moteur et l'axe, nous avons décidé de changer totalement de solution car il y avait beaucoup trop de contraintes. En effet, il aurait été très difficile d'adapter, en très peu de temps, une autre pièce sur un nouveau moteur récupéré d'aspirateur autrement que par la soudure (qui est à l'origine même du dysfonctionnement de l'ancien moteur). C'est pourquoi nous avons reconsidéré la motorisation. Désormais, l'élément moteur sera une perceuse que l'on fixera au socle à l'aide d'un étau et de morceaux de polyesters pour ne pas abîmer la perceuse et absorber une partie des vibrations.



Perceuse fixée sur l'étau en position de fonctionnement

L'axe de l'hélice sera désormais directement installé dans le mandrin de la perceuse, ce qui met fin aux problèmes de la liaison encastrement entre la partie motorisation et l'axe.



Axe de l'hélice fixé sur le mandrin de la perceuse

Cette solution a retenue a finalement de gros avantages : elle permet l'utilisation de n'importe quelle perceuse grâce à l'adaptabilité du système de maintien de cette dernière, elle est peu coûteuse (puisque la perceuse n'est pas exclusivement achetée pour la soufflerie) et elle offre un confort d'utilisation intéressant (variateur de vitesse pour faire varier le débit d'air, adaptabilité du mandrin selon les diamètres de l'axe de l'hélice...). Cependant, il faut utiliser une perceuse assez puissante (750 W) et la faire tourner au moins dans les 1000 tours/min pour obtenir un écoulement d'air suffisant.

7) Notice finale de montage

Nous avons créé une liste des éléments nécessaire à la réalisation de notre soufflerie, sachant que la plupart peuvent être récupérés à partir d'anciens matériaux dont il resterait des chutes.

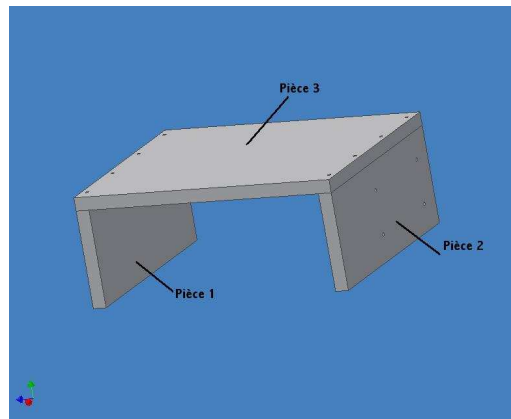
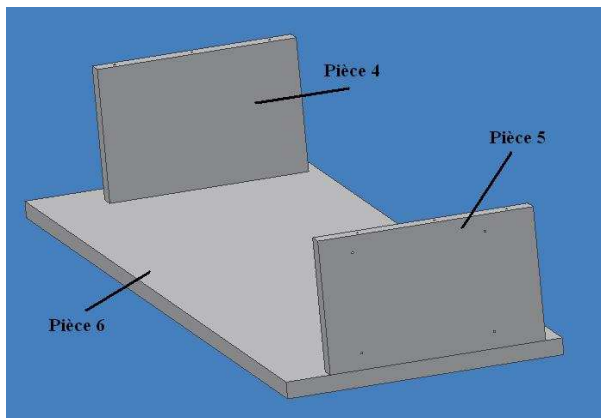
Voici la liste du matériel nécessaire :

- 1 planche de bois mélaminé de 2500x1250x15 à 21€90 chez *Leroy Merlin*, sachant qu'il en faut au moins 1.2m².
- 1 planche de bois mélaminé de 1000x1000x8 à 12€90 chez *Leroy Merlin*, sachant qu'il en faut au moins 0.2m².
- 20,4cm de baguette plate de 3mm à 1.50€ les 2m.
102cm de baguette quart de rond de 23mm à 2€ les 2m.
- 1 lot de 2 plaques acrylique transparent de 500x400x5 à 32€50 chez *Radiospares* code commande : 824-676.
- 80 vis à bois ø4 L29 à 8€55 les 200 vis chez *Radiospares* code commande : 194-3942, sachant que le prix dans un magasin comme *Leroy Merlin* sera moins chère.
- 40 vis à bois ø3 L15 à moins de 4.95€.
- 20 vis à bois ø2 L9 à moins de 4€.
- 4 vis avec écrou ø4 L25 à moins de 7.32€ les vis et moins de 4€ les écrous.
- 2 balances électroniques de cuisine à environ 26€.
- un bouchon de vin.
- une tige en métal de ø6 et de longueur 110mm à moins de 13€ les 5 tiges d'un mètre.
- un roulement à billes de diamètre extérieur 19mm et intérieur 6mm à moins de 4€ pièce.

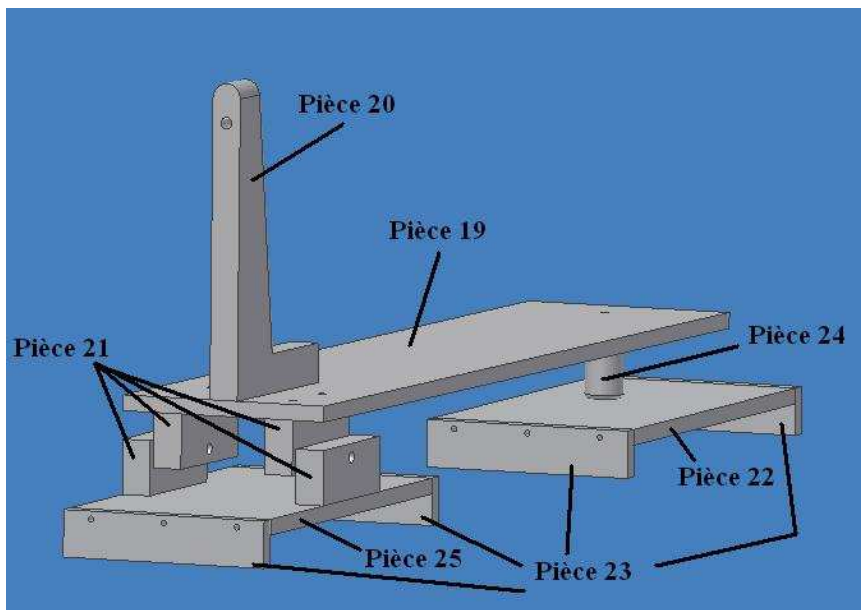
- un étau en fonte SYSTEC à base tournante à 39€90 chez Leroy Merlin.
- une feuille d'aluminium d'au moins 180x320

Il faut assembler dans l'ordre :

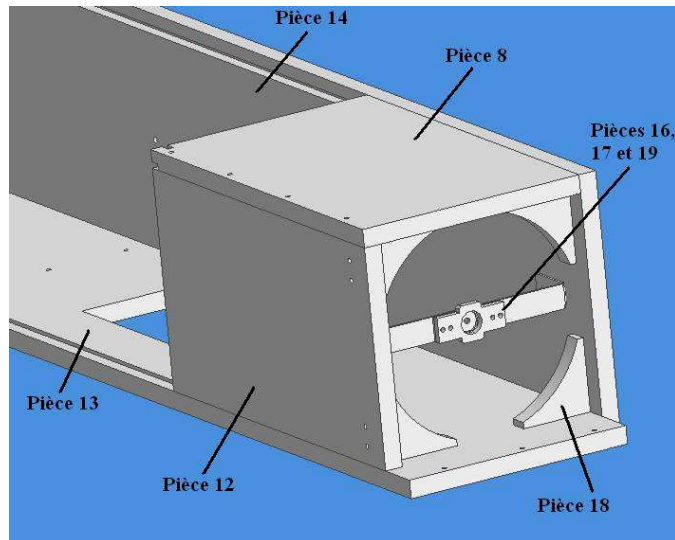
1. La pièce 1 avec 2 et 3 grâce à 8 vis $\varnothing 4$. Elles forment le bloc support moteur.
2. La pièce 4 avec 5 et 6 grâce à 6 vis $\varnothing 4$. Elles forment le bloc support veine.



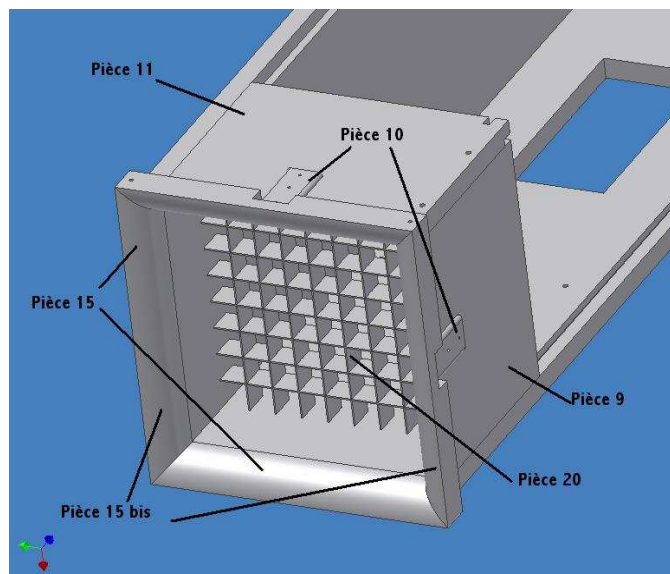
3. La pièce 19 avec 20, 21 et 24 grâce à 7 vis $\varnothing 4$. La pièce 24 étant un bouchon de vin. Elles forment le bloc système pesé 1.
4. La pièce 22 avec deux pièces 23 grâce à 6 vis $\varnothing 3$. Elles forment le bloc système pesé 2.



5. La pièce 25 avec deux pièces 21 et 23 grâce à 4 vis $\varnothing 4$ et 6 vis $\varnothing 3$. Elles forment le bloc système pesé 3.
6. Les pièces 17 et 19 sur la pièce 16 grâce à 4 vis avec écrou $\varnothing 4$.
7. La pièce 16 avec 12 et 14 grâce à 4 vis $\varnothing 4$.
8. Puis l'assemblage précédent avec les pièces 8, 13 et 18 grâce à 30 vis $\varnothing 4$.

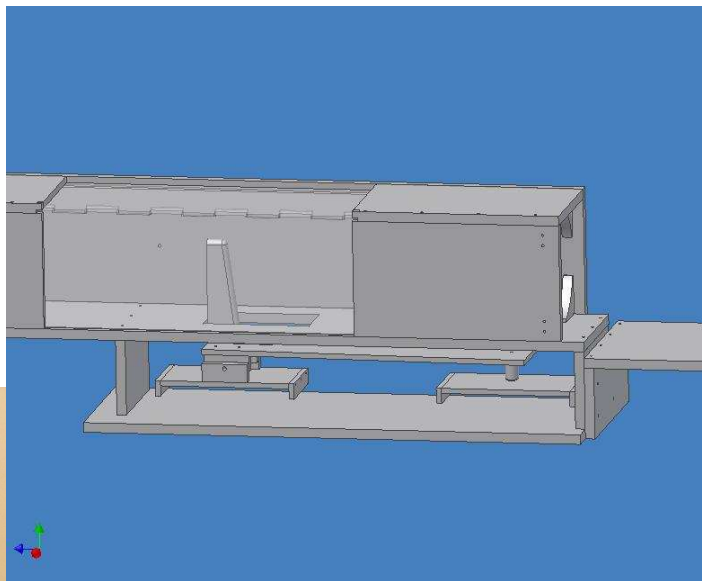


9. Puis on ajoute à l'assemblage précédent les pièces 9 puis 11 grâce à 6 vis $\varnothing 4$.
10. Deux pièces 15 et deux pièces 15bis grâce à 4 vis $\varnothing 3$ et 4 pièces 10 grâce à 4 vis $\varnothing 3$ et 8 vis $\varnothing 2$.
11. On ajoute 16 pièces 20 assemblées en nid d'abeille.



12. On fixe les blocs système pesé 2 et 3 sur les deux balances grâce à 12 vis $\varnothing 2$.
13. On assemble les blocs système pesé 1 et 3 grâce à une tige en métal de $\varnothing 6$ et de longueur 110mm.
14. On place les balances sur le bloc support veine.
15. On fixe le bloc veine sur le bloc support veine grâce à 6 vis $\varnothing 4$.
16. Enfin, on fixe le bloc support moteur sur le bloc support veine grâce à 4 vis $\varnothing 4$.

*le montage et le démontage
de la soufflerie*



Pour mieux se représenter l'assemblage, un diaporama est disponible, ainsi que la maquette numérique sous *Inventor*. Enfin, tous les plans de constructions de chacune des pièces sont rassemblés dans un dossier annexe. Tous ces documents seront disponibles lors de la présentation orale.

IV/ EXEMPLES D'EXPERIENCES AVEC LA SOUFFLERIE DU LYCEE

La majeure partie du temps ayant été consacrée à la réhabilitation de la soufflerie, nous n'avons pas pu effectuer de mesures expérimentales. C'est pourquoi la partie qui suit est plus un mode opératoire pour de futures expériences que des expériences vraiment réalisées et quantifiées.

1) Quelques règles pratiques

a. Règles de sécurité

- Ne jamais mettre en marche la soufflerie si la grille de protection ou si les plaques de plexiglas ne sont pas en place.
- Vérifier de temps en temps si la motorisation est bien fixée.
- Ne jamais mettre dans la veine des éléments qui ne sont pas fixés et/ou qui pourraient s'engouffrer et endommager irrémédiablement la motorisation.

b. Règles expérimentales

- Ne pas mettre d'objets trop gros dans la veine. Autrement dit il ne faut pas que les objets soient proches des parois à cause de l'effet de parois (en s'en approchant, la vitesse de l'air est de plus en plus faible et tend à être quasi nulle sur les parois) qui fausserait les résultats.
- Enfin, il faut absolument faire tourner la soufflerie une dizaine de minutes avant d'effectuer des mesures ou des observations à l'aide de fumée pour que

l'écoulement soit le plus stable possible. Avant ce délai, les mesures et observations pourraient être faussées par des perturbations.

2) Etude de la traînée

- Mettre l'objet à étudier dans la veine
- Allumer la balance de droite
- Mettre en route la soufflerie
- Relever la mesure indiquée sur la balance



Mise en place d'une surface perpendiculaire au déplacement d'air : mesure de la traînée avec la balance

3) Etude de la portance

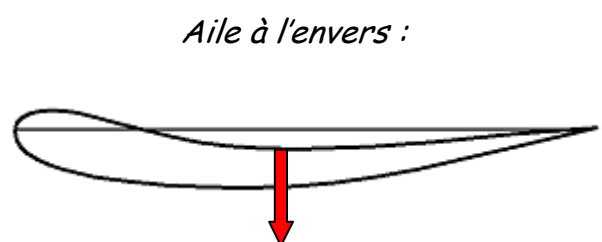
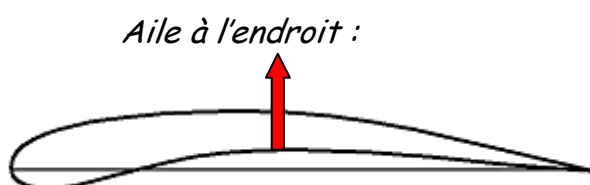
- Mettre l'objet à étudier dans la veine
- Allumer la balance de gauche
- Mettre en route la soufflerie

- Relever la mesure indiquée sur la balance



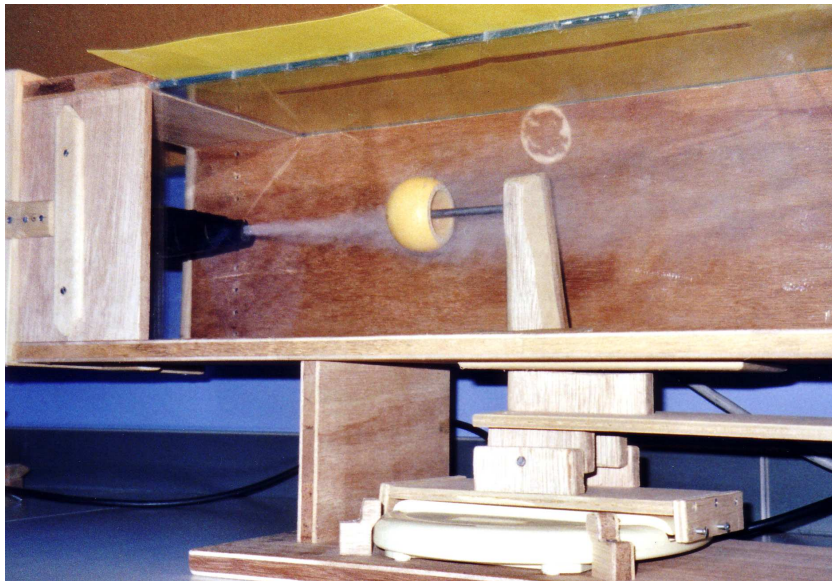
*Mise en place d'un profil d'aile dissymétrique face au déplacement d'air :
mesure de la portance avec la balance*

ATTENTION : pour la mesure d'une force de portance sur la balance de gauche, il faut que cette force soit dirigée vers le bas comme sur le schéma ci-dessus. Par exemple, pour l'étude d'un profil d'aile, il faut le fixer à l'envers, à cause de la portance, pour permettre la mesure de ce phénomène. En mettant un profil d'aile à l'endroit dans la veine, la portance soulève l'aile et la balance de gauche ne peut donc effectuer aucune mesure. Par contre, en la mettant à l'envers, la portance ne se dirige plus vers le haut mais vers le bas, plaquant ainsi l'aile, ce qui permet la mesure (portance en rouge sur le schéma).



4) Observation de l'écoulement de l'air

- Mettre l'objet à étudier dans la veine
- Mettre en route la soufflerie
- Positionner une source de fumée (encens par exemple) à l'entrée de la veine
- Déplacer la source de fumée pour positionner le trait de fumée à l'endroit souhaité



Visualisation de l'écoulement d'air autour d'un objet sphérique

5) Quelques exemples d'expériences

Des études peuvent se faire sur des objets tels que des boules, des cylindres, des plaques différemment orientées, autrement dit tout objet géométrique simple. Ce genre d'études reste dans l'ensemble assez simple à réaliser et à interpréter.

Par exemple, on peut étudier la portance et la traînée d'une plaque placée d'abord parallèlement à l'écoulement puis de plus en plus perpendiculairement à

l'écoulement. En fonction de l'angle d'incidence de l'arrivée d'air, la portance et la traînée varient. Cette étude permet de mettre en avant le principe d'une aile d'avion. Des tiges spécifiques pour fixer les différentes ailes ont été fabriquées. Un rapporteur a été dessiné dans la veine en vue de cette étude.



Profil d'aile fixé à 45° sur le support

Voyons un autre exemple d'expériences : on peut étudier l'aérodynamisme d'un modèle réduit de voiture du type majorette ou de tout autre véhicule avec les traits de fumée. Cet étude permet quant à elle d'observer et de différencier les différents écoulements possibles (laminaires, turbulents ou tourbillonnaires).

Il est également possible de réaliser des études un peu plus poussées. Par exemple, on peut étudier différents types de profils d'aile (symétriques, bombés, creux) et valider l'un d'entre eux selon le choix d'un critère (portance la plus élevée, traînée la plus faible, vitesse d'écoulement la plus rapide, écoulement le plus stable) ou de plusieurs à la fois.

CONCLUSION

Partis de quelques planches, de quelques vis, d'un peu de récupération et d'ingéniosité, nous voici arrivés à ce qu'est maintenant devenu notre soufflerie. Sa conception n'a pas été des plus simples suites aux soucis rencontrés, notamment avec le système de motorisation, mais, au final, nous sommes assez contents du résultat obtenu. L'essentiel de notre démarche était ici de montrer que la construction d'une soufflerie était à la portée de tout le monde et, de ce point de vue là, nous pensons avoir réussi notre challenge. Ce projet de construction permet de rassembler des élèves dans un travail d'équipe, dans l'objectif d'une réalisation concrète qui leur permettra ensuite de voir fonctionner et d'utiliser le fruit de leur travail dans une démarche scientifique et ludique. Les premières expérimentations sont en cours et nous espérons pouvoir les présenter lors du Salon UNIV'Air au Bourget où nous sommes invités en mars 2007.

BIBLIOGRAPHIE

Personnes ayant permis l'évolution de notre TPE :

- M. Gérard LARUELLE, président de l'AAAF
- M. PETER, conservateur et ancien directeur de la soufflerie Eiffel

Visite :

- Centre aérodynamique Eiffel, rue Boileau, Paris.

Internet :

<http://www.aaaf.asso.fr>

<http://www.Futura-Sciences.com>

<http://www.jesuismort.com>

<http://www.mecaflux.com>

<http://www.ac-nancy-metz.fr/enseign/Physique/Tp-phys/Term/Reynolds/Reynolds3.htm>

<http://www.chez.com/aerodynamique>

<http://fr.wikipedia.org/wiki/Accueil>

ANNEXE : CENTRE AERODYNAMIQUE EIFFEL

Le mercredi après midi du 15 novembre 2006, notre groupe, accompagné de notre professeur encadrant les *Olympiades*, M. Lefevre, sommes allés à Paris, rue Boileau, pour visiter le Centre aérodynamique EIFFEL.

Sur Gustave Eiffel :



Ingénieur de formation, Eiffel a fondé puis développé son entreprise spécialisée dans les charpentes métalliques, dont la Tour Eiffel marque le couronnement, avant de dédier les trente dernières années de sa vie à des activités de recherches expérimentales. Né en 1832 à Dijon, il sort de l'École Centrale des Arts et Manufactures en 1855. Après quelques années passées dans le Sud-Ouest de la France, il s'installe à son compte en 1864 comme entrepreneur spécialisé dans les charpentes métalliques. Son exceptionnelle carrière de constructeur est jalonnée en 1876 par le viaduc de Porto sur le Douro, puis celui du Garabit en 1884, ainsi que par la gare de Pest en Hongrie, la coupole de l'observatoire de Nice et l'astucieuse structure de la Statue de la

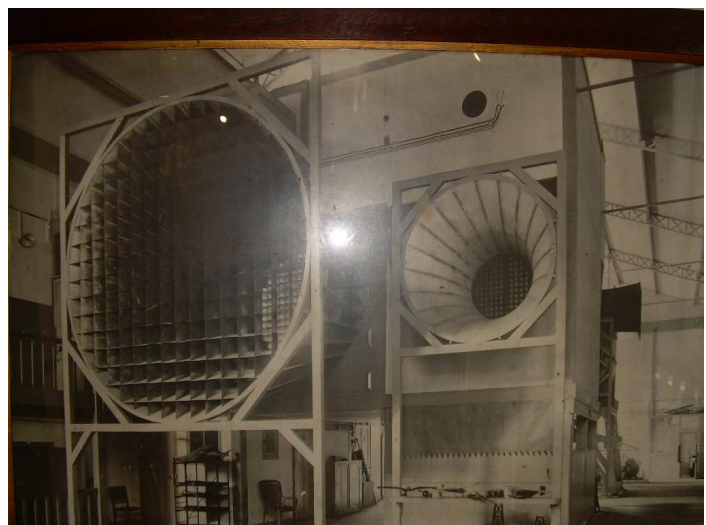
Liberté, avant de culminer en 1889 avec la Tour Eiffel. Cette date marque la fin de sa carrière d'entrepreneur.

Après sa retraite, Eiffel consacre les trente dernières années de sa vie à une féconde carrière de savant. Il s'emploie d'abord à trouver une utilité à la Tour, qui n'avait été construite que pour une durée de vingt ans : expériences sur la résistance de l'air, station d'observation de météorologie et antenne géante pour la radio naissante. Il poursuit ses études sur l'aérodynamisme en construisant une soufflerie au pied même de la Tour, puis une plus importante en 1909 rue Boileau à Paris, toujours en activité. Il meurt le 27 décembre 1923 à l'âge de 91 ans.

Sur la soufflerie Eiffel :

Construite au pied de la Tour Eiffel sous un hangar, la soufflerie sera dénommée "Chambre EIFFEL". Eiffel, 70 ans passés, testera dans ce tunnel une vingtaine d'aéronefs. La municipalité de Paris jugeant l'installation inesthétique, Eiffel s'installe dans le seizième arrondissement de Paris, rue Boileau. Inauguré en 1912, le laboratoire d'Auteuil abrite deux souffleries, l'une de un mètre de diamètre (démontée en 1933), l'autre de deux mètres de diamètre, toujours en activité.

Les deux entrées d'air de la petite et de la grande soufflerie, rue Boileau



A partir de 1929, le GIFAS reprend la gestion du laboratoire, le premier au monde à entreprendre des essais en soufflerie pour établir les lois de l'aéronautique et doter ainsi de l'aviation naissante de bases scientifiques. Outre les essais pour l'aéronautique, activité traditionnelle de ce laboratoire, le GIFAS diversifie et développe les activités en ouvrant ses installations techniques à l'industrie automobile ainsi qu'au bâtiment en 1945. Dans les années 80, et afin de sauvegarder le témoignage de l'excellence industrielle française, le GIFAS fit classer "monument historique" l'ensemble des installations et du bâtiment.

Depuis 2001, le GIFAS a cédé cet équipement au CSTB - Centre Scientifique et Technique du Bâtiment. Aujourd'hui, le Centre aérodynamique EIFFEL exploite l'expérience acquise dans le passé avec des technologies modernes.

La visite :

Nous avons été accueillis par Mr Peter qui est maintenant retraité mais qui a travaillé pendant beaucoup d'années dans la soufflerie Eiffel. Son expérience et son vécu nous ont été très profitables tant au niveau des explications techniques qu'au niveau des anecdotes.

Nous avons commencé la visite par une petite page d'histoire sur Gustave Eiffel, sur ses constructions et plus particulièrement sur la soufflerie, de ses débuts avec Eiffel jusqu'à aujourd'hui. Nous avons ainsi appris que le centre Eiffel avait travaillé pour de grandes marques d'automobiles telles que Peugeot, Fiat, Panhard ou encore Mercedes et Porsche. Ensuite, nous avons commencé à proprement dit la visite du Centre aérodynamique. On a pu ainsi voir l'appareil

de chute, système inventé et utilisé par Eiffel au deuxième étage de sa Tour pour effectuer des mesures sur la résistance de l'air et étudier ce phénomène.



à gauche : l'appareil de chute

ci dessus : maquettes utilisées en soufflerie

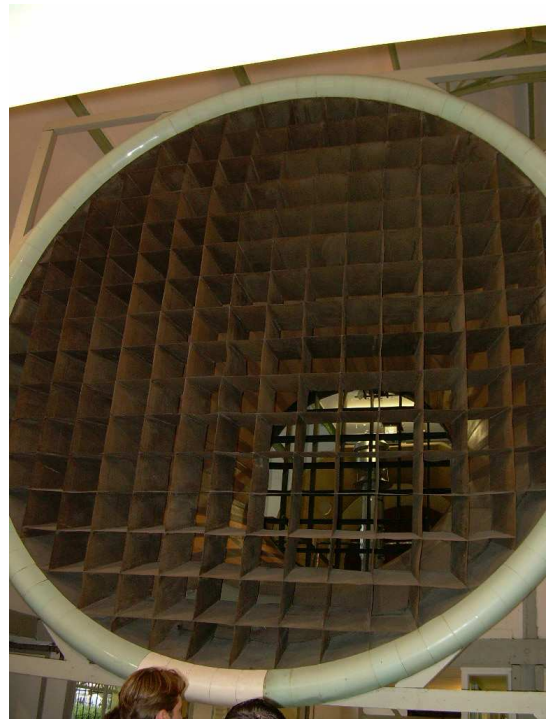
Des maquettes étaient également en exposition : des avions, des voitures et même le stade de football d'Amiens. Ceci montre la grande diversité des utilisations possibles de la soufflerie.

La visite s'est poursuivie par la soufflerie en elle-même.



*ventilateur de la soufflerie
relié au moteur par une
courroie*

Un système d'extraction d'air statique était installé dans la chambre d'expériences de la soufflerie. C'est pourquoi nous n'avons pas pu la voir fonctionner, et ce à notre grand regret. Malgré cela nous avons fait une visite très riche d'informations et d'explications.



entrée d'air de la soufflerie avec le filtre