
RAPPORT DE PROJET TUTORÉ

MINI-SOUFFLERIE AÉRODYNAMIQUE





Remerciements

Ce travail a été effectué dans le cadre de la formation en DUT génie thermique et énergie de l'Institut Universitaire de Technologie Clermont Auvergne à Montluçon.

Avant toute chose, nous souhaitons adresser nos remerciements à toutes les personnes qui nous ont aidés, de près ou de loin, dans la réalisation de ce projet.

En premier lieu, nous tenons à remercier Monsieur Guillaume Mioche pour la qualité de l'encadrement qu'il nous a apporté. Nous lui exprimons toute notre reconnaissance pour son soutien, sa disponibilité, sa pédagogie et ses conseils.

Nous remercions également Stéphane Roy pour son aide précieuse dans la fabrication des pièces à l'atelier et Myriam Moissang pour la fourniture du matériel.

Enfin, nous souhaitons remercier tous les professeurs du département GTE qui, à travers leurs divers enseignements, nous ont permis d'acquérir les connaissances et les compétences nécessaires à la réalisation d'un projet comme celui-ci.



Sommaire

I) Introduction.....	4
a. Contexte.....	4
b. Projet.....	5
II) L'aérodynamique.....	6
a. Définition et exemples d'applications.....	6
b. Écoulement de l'air.....	9
c. Forces aérodynamiques.....	10
d. Souffleries.....	11
III) Description du projet.....	14
a. Présentation.....	14
b. Objectifs.....	15
c. Étapes de réalisation.....	16
IV) La mini-soufflerie et ses composants.....	17
a. Caractéristiques de la maquette.....	17
b. Modèle 3D Solidworks.....	18
c. Collecteur.....	19
d. Injecteur de fumée.....	20
e. Ventilation.....	22
f. Chambre de visualisation.....	24
g. Support du profil d'aile.....	25
V) Tests et observations.....	27
a. Tests avant-assemblage.....	27
b. Tests après-assemblage.....	30
c. Importance de la forme aérodynamique.....	31
d. Influence de l'angle d'incidence.....	33
VI) Pistes d'amélioration.....	35
VII) Contraintes.....	36
VIII) Conclusion.....	37
IX) Annexes.....	38
X) Liste des figures.....	40
XI) Références.....	42



I) Introduction

a. Contexte

Dans le cadre de notre deuxième année de DUT génie thermique et énergie, nous devons réaliser un projet en binôme encadré par un enseignant du département et portant sur une thématique en lien avec les enseignements suivis.

Le projet tutoré est un élément essentiel de notre formation. En effet, il nous permet de mettre en pratique les compétences que nous avons acquises tout au long du DUT. C'est une expérience pédagogique unique qui permet de se confronter à la gestion de projet, au travail en groupe en développant l'esprit d'équipe et d'enrichir nos compétences technologiques et scientifiques.



1) Introduction

b. Projet

Passionnés par les secteurs de l'aéronautique, l'aérospatial et l'automobile, nous souhaitons travailler sur un projet nous permettant d'explorer plus en détail nos connaissances dans le domaine de la mécanique des fluides, que nous avons étudiée au cours des semestres 2 et 3. Nous voulions aussi développer nos compétences pratiques et notre créativité à travers un projet concret.

Nous avons donc décidé de travailler sur le projet suivant:

« Démonstration pédagogique mettant en évidence le phénomène de flux d'air autour d'une aile d'avion » tutoré par M. Mioche, enseignant-chercheur à l'IUT Clermont Auvergne.



II) L'aérodynamique

b. Définition et exemples d'applications

Avant de présenter notre travail sur ce projet, il est important de rappeler certaines bases nécessaires à la compréhension des phénomènes étudiés.

Tout d'abord, le mot aérodynamique vient de deux mots grecs : "aerios", qui signifie air, et "dynamis", qui désigne la force. L'aérodynamique, branche de la dynamique des fluides, est donc l'étude de l'écoulement de l'air et de ses effets sur des éléments solides qui l'environnent.

Ensuite, il est important de faire la différence avec le terme d'aérodynamisme. En effet, ce dernier désigne une forme offrant la plus faible résistance à l'air lors du déplacement d'un objet.

Par conséquent, c'est l'étude des phénomènes aérodynamiques qui permet de déterminer l'aérodynamisme d'un corps, c'est-à-dire sa capacité à se déplacer dans l'air avec le moins de frottements possible.

L'air, qui compose notre atmosphère, est incolore, invisible, inodore et a une masse volumique très faible ($1,225 \text{ kg/m}^3$ à 15°C et au niveau de la mer, soit environ 800 fois plus petite que celle de l'eau). Néanmoins, cela reste un milieu visqueux qui ralentit le mouvement des objets. De ce fait, il nécessite des études approfondies dans de nombreux secteurs.

L'automobile

Le déplacement dans l'air d'un véhicule est soumis à la résistance du vent qui varie en fonction des conditions météorologiques en termes de direction et d'intensité. Les véhicules terrestres se déplacent donc dans une masse d'air très mobile qui affecte leur comportement tant en ligne droite que dans les virages.

Les ingénieurs automobiles doivent alors diminuer la trainée et la portance. En effet, ils cherchent à réduire la portance au point de créer une déportance aérodynamique pour augmenter l'adhérence des pneumatiques et ainsi améliorer la force de freinage et la vitesse de passage en courbe. Pour cela, ils travaillent sur la forme du véhicule afin de diminuer sa résistance à l'air.

Par exemple, la forme dite "fastback" (figure 1) a été inventée pour réduire la trainée générée par les descentes de toits sur les voitures.



Figure 1: Peugeot 508 Fastback

Un autre exemple sont les monoplaces de formule 1 (figure 2) qui sont équipées d'ailerons à l'avant et à l'arrière pour optimiser leur vitesse de pointe en ligne droite et leur adhérence dans les virages.



Figure 2: Aston Martin AMR21

L'aéronautique

L'aérodynamique est également très présente dans l'aéronautique afin de tirer les meilleures performances des aéronefs. Parce que le réchauffement climatique devient une préoccupation de premier ordre et que les prix du carburant ne cessent d'augmenter, les ingénieurs aéronautiques se doivent de concevoir des avions moins polluants et plus économiques. Pour cela, ils cherchent à réduire la traînée et à augmenter la portance de l'aile afin de diminuer la consommation en kérosène. En effet, plus l'avion est aérodynamique, moins l'air exerce une force sur celui-ci et donc une plus faible quantité de carburant est nécessaire pour créer la poussée fournie par les turboréacteurs.

Par exemple, les ailes à flèche positive (figure 3) sont des ailes en forme de flèche dirigées vers l'arrière qui permettent une meilleure pénétration dans l'air et une bonne stabilité de l'appareil. On peut retrouver ce type d'aile sur l'Airbus A320.



Figure 3: Airbus A320 à flèche positive

De même, les winglets (figure 4) sont des appendices recourbés au bout des ailes qui servent à éliminer les turbulences situées aux extrémités des ailes sous forme de tourbillons.



Figure 4: winglet sur un King Air

c. L'écoulement de l'air

L'écoulement correspond au déplacement de l'air par rapport à un objet. L'air peut s'écouler de trois façons différentes autour d'un corps.

- L'écoulement laminaire (figure 5) correspond au déplacement rectiligne et parallèle des particules d'air. Elles ne se mélangent pas les unes aux autres.
- L'écoulement turbulent (figure 6) apparaît lorsque les particules d'air ne se déplacent plus de façon rectiligne. Néanmoins, les trajectoires restent parallèles entre elles.
- L'écoulement tourbillonnaire (figure 7) est le plus désordonné car les particules ne suivent plus de trajectoires rectilignes et parallèles et se mélangent entre elles. Des tourbillons peuvent apparaître lorsque certaines particules remontent le courant.

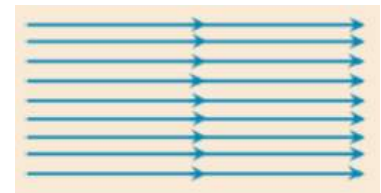


Figure 5: écoulement laminaire



Figure 6: écoulement turbulent

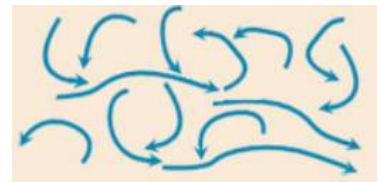


Figure 7: écoulement tourbillonnaire

Le nombre de Reynolds représente le rapport entre forces d'inertie et forces visqueuses. Il se calcule de la façon suivante:

$$Re = \frac{VLc}{\nu} = \frac{\rho VLc}{\mu}$$

- V : Vitesse du fluide (m s^{-1})
- Lc : Dimension caractéristique (m) (longueur de la plaque, diamètre intérieur du tube, diamètre extérieur du cylindre)
- ν : Viscosité cinématique du fluide ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)
- ρ : Masse volumique du fluide (kg m^{-3})
- μ : Viscosité dynamique du fluide (Pa s ou $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$)

Le nombre de Reynolds permet de connaître le régime d'écoulement de l'air: pour $Re < 2000$ le régime est laminaire, pour $2000 < Re < 3000$ le régime est dit transitoire et pour $Re > 3000$ le régime est turbulent.

d. Les forces aérodynamiques

L'atmosphère terrestre est un milieu visqueux qui freine le mouvement des corps en déplacement. Il génère une force physique appelée résistance à l'air ou trainée.

Chaque corps en mouvement dans l'air est soumis à une résistance qui s'oppose à son mouvement.

On peut observer les forces (figure 8) s'exerçant sur un profil d'aile d'avion:

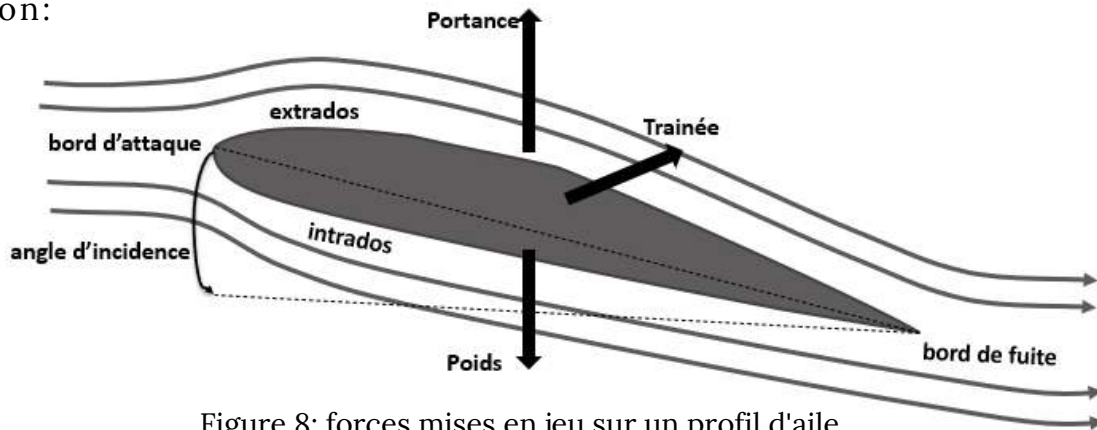


Figure 8: forces mises en jeu sur un profil d'aile

- Le poids est la force qui entraîne l'aile vers le bas. Elle se calcule de la façon suivante:

$$P = Mg$$

Avec P le poids en N, M la masse de l'objet en kg, g l'intensité de pesanteur en $N \cdot kg^{-1}$

- La portance, force opposée au poids, est perpendiculaire à l'extrados. Elle pousse l'aile vers le haut et porte l'avion. Elle se calcule de la façon suivante:

$$F_z = \frac{1}{2} \cdot C_z \cdot \rho \cdot S \cdot V^2$$

F_z: portance en N

C_z: coefficient de portance sans unité qui dépend de Re et de l'angle d'incidence θ

ρ : masse volumique de l'air en $kg \cdot m^{-3}$

S: surface projetée au sol de l'objet en m^2

V: vitesse relative de l'air non perturbé par rapport au mobile en $m \cdot s^{-1}$

- La trainée est la force qui est due à la résistance de l'aile sur l'air, opposée au déplacement, elle grandit avec la vitesse du mobile (ou de l'air selon le référentiel dont on parle). Elle se caractérise par la formule suivante :

$$F_x = \frac{1}{2} \cdot C_x \cdot \rho \cdot S \cdot V^2$$

F_x: trainée en N

C_x: coefficient de pénétration dans l'air sans unité qui dépend de Re et de l'angle d'incidence θ

S: surface de l'objet faisant face au fluide en déplacement en m^2

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



II) L'aérodynamique

e. Les souffleries

Le rôle des souffleries

Étudier l'influence de la vitesse d'un corps qui se déplace dans un volume d'air immobile est équivalent à étudier l'écoulement de l'air frappant un corps immobile. En effet, la plupart des études aérodynamiques prennent comme référentiel le corps à travers lequel l'air se déplace.

Les souffleries (en anglais "wind tunnels") sont utilisées pour réaliser des essais aérodynamiques. Elles permettent d'étudier les effets d'un écoulement d'air sur un corps, généralement un modèle réduit. Celui-ci est placé, immobile, dans un écoulement artificiel d'air. Les souffleries ont trois principales fonctions:

- Mesurer les pressions locales (sur la surface du modèle), les forces de portance (verticale et latérale), de traînée, les moments aérodynamiques sur les trois axes : tangage, roulis, lacet
- Mesurer le bruit (aéroacoustique)
- Visualiser les écoulements avec des jets d'air bien visibles afin d'observer les lignes d'écoulement et leur nature (attachée ou décollée).

Les souffleries sont très utilisées car elles permettent de contrôler toutes les conditions aux limites, c'est-à-dire d'imposer la direction et la vitesse de l'écoulement (ou le débit dans la section) ou encore les conditions géométriques de la section d'essai.

Le fonctionnement des souffleries

Le principe de fonctionnement d'une soufflerie (figure 9) est le suivant:

L'air rentre par le collecteur (1) et est accéléré par le ventilateur (4) situé en aval qui aspire l'air de l'entrée vers la sortie. Le collecteur est généralement un convergent qui sert à accélérer l'écoulement de l'air dans lequel se trouvent des filtres permettant de briser les structures tourbillonnaires génératrices de turbulences.

L'air arrive ensuite dans la section d'essai (2) appelée aussi chambre d'expérience dans laquelle le modèle d'étude est placé pour visualiser les flux d'air et mesurer les efforts aérodynamiques.

Puis, l'air sort dans le diffuseur (3) qui est généralement un divergent permettant de ralentir progressivement la vitesse de l'air en élargissant la section.

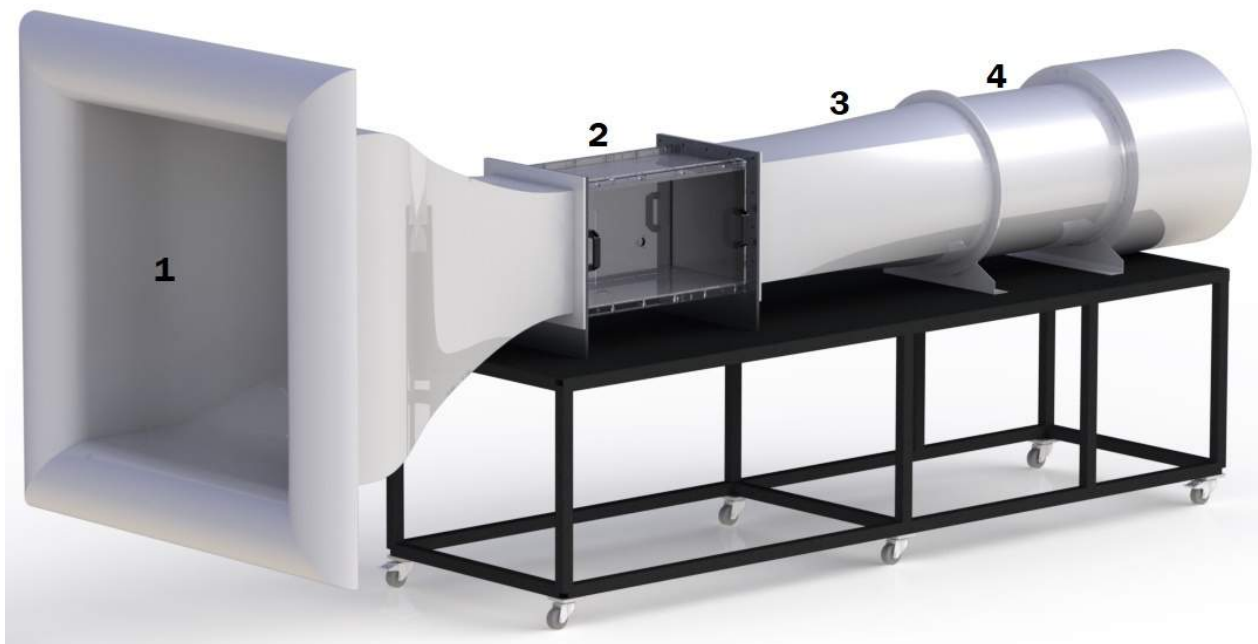


Figure 9: illustration d'une soufflerie d'étude

Les types de souffleries

Les différentes études aérodynamiques n'ont pas les mêmes exigences. Ainsi, il existe 4 types différents de souffleries avec des caractéristiques spécifiques. La principale différence est le nombre de Mach (M), rapport de la vitesse d'un mobile à celle du son dans l'air.

- Les souffleries subsoniques (figure 10) ont des vitesses d'écoulement d'air entre 0 et 200 m/s, soit Mach inférieur à 1. Elles sont utilisées pour les véhicules terrestres ou les avions en phase de décollage ou d'atterrissage.
- Les souffleries transsoniques (figure 11) ont des vitesses d'écoulement de l'air allant de Mach 0,7 à Mach 1,3. Leur utilisation est dédiée aux avions civils et de chasse. Elles permettent d'étudier des régions où la vitesse de l'air atteint celle du son.
- Les souffleries supersoniques (figure 12) fonctionnent de Mach 1,6 à Mach 4 et sont utilisées pour les avions de chasse ou les missiles. L'air entre à une vitesse subsonique et est accéléré dans un convergent puis il atteint la vitesse du son et accélère davantage lorsqu'il arrive dans le divergent (car lorsque $M > 1$, un accroissement de section produit un accroissement de vitesse contrairement à l'écoulement subsonique).
- Les souffleries hypersoniques (figure 13) sont les plus puissantes et produisent des écoulements d'air avec un nombre de Mach compris entre 5 et 25. Elles permettent de tester les véhicules hypersoniques et la rentrée dans l'atmosphère.



Figure 10: soufflerie Deltalab EA600



Figure 11: soufflerie Aerolab



Figure 12: soufflerie de Modane-Avrieux



Figure 13: soufflerie JF-12 de l'IMECH à Pékin



III) Description du projet

a. Présentation

Maintenant que nous avons défini les notions clés de l'aérodynamique, nous pouvons entrer dans le vif du sujet concernant notre projet. En effet, celui-ci a consisté à imaginer et fabriquer un outil permettant d'observer les phénomènes aérodynamiques autour d'un profil d'aile d'avion.

Il s'agissait de concevoir une maquette capable de créer des flux d'air suffisamment visibles pour montrer le comportement de l'air autour d'une aile d'avion.

Cette maquette pourra ensuite être utilisée à des fins pédagogiques à l'IUT. Par exemple, lors de journées portes-ouvertes ou de présentations de vulgarisation scientifique, elle servira à réaliser des démonstrations afin que tout public puisse visualiser et appréhender concrètement les phénomènes régis par les notions de la mécanique des fluides.



III) Description du projet

b. Objectifs

Afin de mener à bien le projet, il était essentiel de fixer des objectifs clairs. La mission principale du projet est de visualiser l'écoulement de l'air autour d'un profil d'aile. Pour cela, nous nous sommes fixés plusieurs objectifs:

- Concevoir une mini-soufflerie aérodynamique permettant de visualiser le flux d'air autour d'un objet
- Fabriquer cette maquette à l'atelier, tester son fonctionnement et apporter les éléments de corrections nécessaires
- Conclure sur les phénomènes aérodynamiques observés sur un profil d'aile d'avion.

c. Étapes de réalisation

Notre projet se décompose en trois phases :

- La **conception** de la maquette et des systèmes qui la composent à travers des croquis et une conception assistée par ordinateur
- La **réalisation** à l'atelier des composants et l'assemblage
- Les **tests** de fonctionnement et les **observations**.

Pour réaliser ce projet, nous avons eu à notre disposition 10 séances de 3h au cours du semestre 3 et 9 séances de 4h au cours du semestre 4. Cela représente un total de 66 heures pour réaliser le projet.

Dans chaque phase se trouvent différentes étapes que nous avons organisées dans un diagramme de Gantt (figure 14) afin de mener à bien notre projet dans les délais impartis.



Figure 14: diagramme de Gantt du projet

Le calendrier ne représente que les mardis de chaque mois, jour où à lieu notre séance de projet tutoré.

Les jours sans travail programmé sont des jours de vacances, de soutenance ou sans séance prévue par l'emploi du temps de l'IUT.

La date de début du projet est le 22 septembre 2020 et la date de fin est le 16 mars 2021. La dernière séance de projet tutoré ayant lieu le 30 mars 2021, notre marge de sécurité est donc de 2 séances de 4h.



IV) La mini-soufflerie et ses composants

a. Caractéristiques de la maquette

Contrairement aux souffleries de taille réelle qui permettent de mesurer les forces aérodynamiques, notre maquette aura pour unique fonction d'observer des flux d'air sur un profil d'aile.

Nous avons démarré notre conception par des croquis (figure 15) qui nous ont permis d'exprimer nos premières idées.

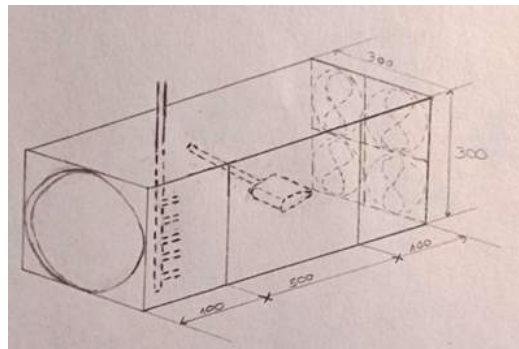


Figure 15: croquis de la maquette

Nous avons choisi une section carrée pour que la maquette puisse être facilement déplaçable et posée aisément. Ne souhaitant pas obtenir de grandes vitesses d'écoulement, nous avons décidé de ne pas changer la taille de la section comme cela se fait sur des grandes souffleries.

Toujours dans une optique de réduction de l'encombrement, nous avons opté pour de petites dimensions, sans toutefois nuire à l'observation des flux d'air. La section de la maquette est de 300 x 300 mm et la longueur est de 700 mm.

Elle est composée de matériaux de récupération (disponibles à l'atelier). Nous avons utilisé des plaques de contreplaqué et une vitre en plexiglass. Plus précisément:

- 3 plaques de bois de 700 x 300 mm (derrière, en haut et en bas)
- 2 plaques de bois de 100 x 300 mm (devant)
- 2 plaque de bois de 300 x 300 mm (sur les côtés)
- 1 vitre en plexiglass de 500 x 300 mm (devant)

Pour permettre de réaliser des modifications importantes à l'intérieur de la soufflerie, nous avons fait en sorte que la paroi supérieure puisse s'ouvrir grâce à des charnières et des loquets.

b. Modèle 3D Solidworks

Après la réalisation de nos croquis, nous avons effectué une conception assistée par ordinateur (CAO) à l'aide du logiciel Solidworks (figure 19).

La maquette se présente alors de la façon suivante:

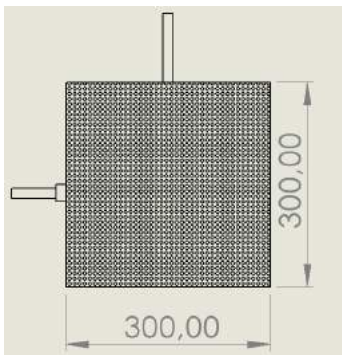


Figure 16: vue de gauche de la maquette

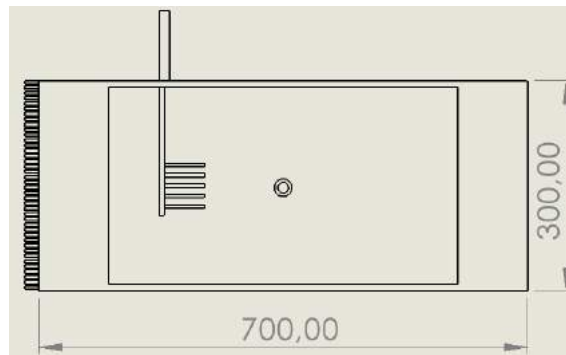


Figure 17: vue de face de la maquette

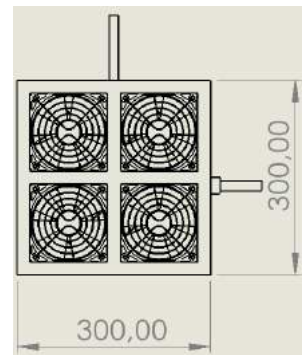


Figure 18: vue de droite de la maquette

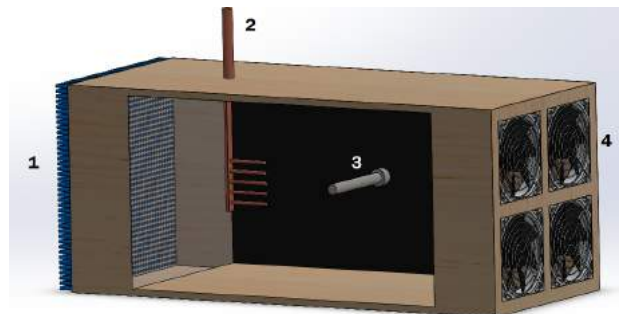


Figure 19: vue en 3 dimensions de la maquette

Le fonctionnement global de la maquette est le suivant:

L'air, aspiré par des ventilateurs (4), rentre dans un maillage composé de pailles en plastique (1). Un tube de cuivre (2) permet ensuite de diriger la fumée sur le profil d'aile maintenu par une tige filetée (3).

De la fumée épaisse et bien visible sera utilisée afin de visualiser distinctement les lignes de courant se dirigeant sur le profil étudié.

Pour mieux comprendre le fonctionnement de la maquette, dans les pages suivantes, nous nous attacherons à décrire le rôle de chaque composant ainsi que les méthodes de fabrication, les problèmes rencontrés et les corrections apportées.

c. Collecteur

Le collecteur est le premier composant dans lequel l'air circule. Aspiré par les ventilateurs, cet air provient de l'extérieur de la maquette. Les particules sont donc désordonnées et des turbulences peuvent être générées en fonction des conditions extérieures (agitation des personnes, vent, appels d'air). Ainsi, le rôle du collecteur est d'éliminer au maximum toutes turbulences afin de pouvoir observer des flux constants. Comme nous l'avons vu précédemment, il s'agit ici d'obtenir un régime d'écoulement laminaire.

La première solution (figure 20) que nous avons envisagée était d'utiliser une plaque en bois percée de plusieurs perforations en son centre de sorte que l'air ne rentre que dans les trous prévus à cet effet. Le problème de cette solution est que l'air se retrouverait bloqué par la paroi et aurait eu beaucoup de mal à circuler créant une accumulation d'air et donc potentiellement des turbulences.

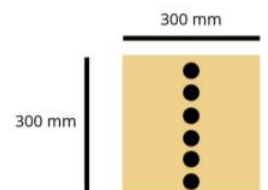


Figure 20: schéma de principe du premier collecteur

Ainsi, nous avons préféré utiliser des pailles (1275 au total) de 7 mm de diamètre (et de longueur 210 mm) dans lesquelles l'air passera et sera "découpé" en fines couches. Ces pailles sont placées dans un tube de ventilation en acier de 250 mm de diamètre (figure 21).

Lors de la fabrication, nous avons encastré le tube acier dans une plaque de contreplaqué de section carrée 300 x 300 mm. Le diamètre du tube étant assez important comparé à la section, à l'endroit le plus fin, la paroi s'est fragilisée lors de l'encastrement.

Alors, nous avons étanchéifié le contour du tube et renforcé la zone fragilisée avec du silicone (figure 22).



Figure 21: collecteur (côté gauche de la maquette)



Figure 22: défaut de fabrication corrigé

d. L'Injecteur de fumée

L'air étant invisible, nous utiliserons de la fumée afin de visualiser correctement les flux d'air. Pour cela, nous avons à notre disposition une machine à fumée (figure 23) utilisée pour les recherches de fuites d'airs dans les locaux par les opérateurs d'infiltrométrie. L'intérêt principal de cette fumée est qu'elle n'engendre pas de changement de comportement par rapport à la circulation de l'air.



Figure 23: machine à fumée TINY CX

Notre première idée était de faire rentrer la fumée dans une zone close à l'entrée de la maquette afin qu'elle se dirige vers le profil d'aile à travers des petits trous situés sur une paroi interne. Tout comme notre première solution concernant le collecteur, une mauvaise circulation de la fumée aurait été causée par l'accumulation de celle-ci dans la maquette.

Au vu de l'importance d'éliminer toute turbulence d'écoulement au sein de la soufflerie, nous avons conçu un tout autre dispositif que l'on nommera "injecteur de fumée" (figure 24).

Il s'agit en fait d'un tube vertical en cuivre fixé sur le dessus de la maquette et traversé par 5 tubes horizontaux plus fins. L'objectif est de faire rentrer la fumée dans le tube principal pour qu'elle soit redistribuée sur le profil de façon linéaire par les tubes horizontaux.

Le tube principal a un diamètre de 16 mm et une longueur de 200 mm. La partie inférieure de ce tube a été pincée afin d'empêcher l'air de sortir. Nous avons percé ce tube à 5 reprises et brasé les tubes horizontaux de 6 mm de diamètre.

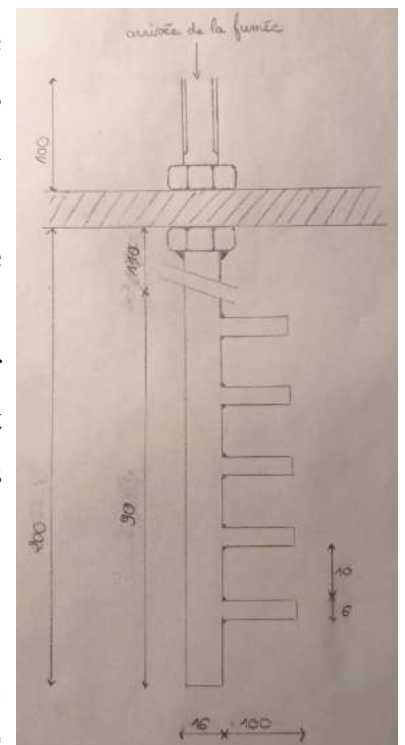


Figure 24: croquis de l'injecteur de fumée



IV) La mini-soufflerie et ses composants

Pour fixer le tube principal sur la paroi supérieure de la maquette, nous avons imaginé braser la tête d'une vis au tube en cuivre puis percer la vis en son milieu pour laisser passer la fumée. Un écrou aurait permis de maintenir l'injecteur en position. Les vis disponibles à l'atelier ne correspondant pas au diamètre du tube, nous avons choisi une autre solution.

Pour réaliser cette fixation, nous avons finalement utilisé un raccord serti sur le tube en cuivre (figure 25) qui se fixe parfaitement à la paroi supérieure.

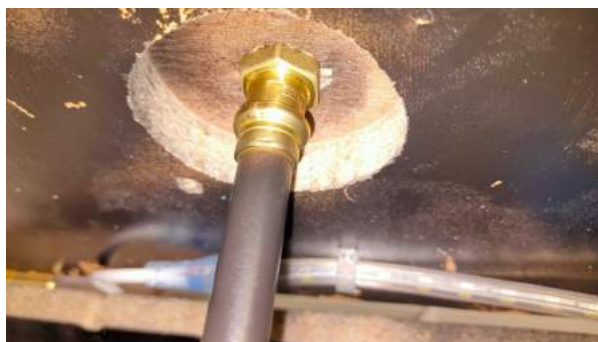


Figure 25: raccord serti sur le tube



Figure 26: tubes en cuivre de l'injecteur

Après l'étape de brasage des tubes horizontaux (figure 26), nous avons réalisé un premier test en faisant circuler de l'eau. Nous nous sommes rendu compte que certains tubes étaient trop enfoncés dans le tube principal ce qui engendrait des débits différents dans chaque tube. Cela nous a conduit à modifier l'enfoncement des tubes "défaillants" dans le tube principal.

Après cette correction, pour vérifier notre travail, nous avons réalisé un second test (figure 27) en injectant de la fumée face à des ventilateurs en mode aspiration. Suite à cet essai, nous avons décidé de ne pas découper les tubes horizontaux pour les laisser d'une longueur de 100 mm permettant ainsi de conduire au maximum la fumée vers le profil d'aile.



Figure 27: essai de l'injecteur de fumée

e. Ventilation

Afin de faire circuler l'air dans la maquette, il était nécessaire d'y intégrer un système de ventilation. Ce système est situé à l'extrémité droite de la soufflerie et permet d'aspirer l'air. En effet, tout comme les souffleries d'étude, c'est l'aspiration qui est privilégiée au profit du soufflage évitant la création de zones turbulentes et potentiellement d'accumulation d'air.

Nous avons choisi d'installer 4 ventilateurs d'ordinateur avec une section carrée de 120 x 120 mm (figure 28).

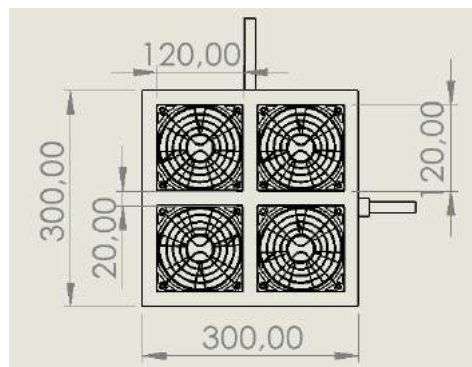


Figure 28: vue de droite
Solidworks

Au départ, nous avons pensé à un système de ventilation composé d'un seul ventilateur circulaire. Malheureusement, au vu du prix très élevé pour un ventilateur de cette taille, nous avons décidé de récupérer des ventilateurs provenant d'ordinateurs de l'IUT. Cette solution à 4 ventilateurs est bénéfique pour la circulation de l'air qui reste uniforme dans notre section carrée contrairement à un seul ventilateur circulaire.

Avant d'installer les ventilateurs sur la maquette, nous avons réalisé un test avec une alimentation électrique pour vérifier leur bon fonctionnement. Nous nous sommes rendu compte qu'un d'entre eux était défectueux et ne tournait pas. Alors, nous l'avons remplacé par un autre ventilateur de même dimension.

Une fois que nous nous étions assurés que tous les ventilateurs fonctionnaient correctement, nous les avons installés. Pour cela, nous avons récupéré une plaque de contreplaqué de 300 x 300 mm que l'on a découpée circulairement à l'emplacement de chaque ventilateur. Puis, nous avons fixé les ventilateurs en vissant leurs coins sur la plaque en bois (figure 29).



Figure 29:
Ventilateurs (côté droit de la maquette)

A l'aide d'un anémomètre, nous avons mesuré la vitesse optimale (figure 31) pour la visualisation de l'écoulement de l'air autour du profil d'aile (figure 30). Cette vitesse est de 1,46 m/s, correspondant à une intensité de 0.22 A et une tension de 3.4 V.



Figure 30: observation des flux d'air avec vitesse optimale des ventilateurs



Figure 31:
mesure de la vitesse optimale des ventilateurs

Ainsi, on remarque que la vitesse de fonctionnement de notre soufflerie n'est pas très élevée. Contrairement aux souffleries de taille réelle qui ont besoin de grandes vitesses pour reproduire des conditions spécifiques de déplacement, notre maquette permet seulement la visualisation de l'écoulement de l'air à faible vitesse. En effet, si l'on augmente la vitesse (figure 33) de nos ventilateurs (3,82 m/s), l'air se déplace à une vitesse excessive et se dissipe dès sa sortie de l'injecteur (figure 32), ce qui nuit grandement à la visibilité de la fumée.



Figure 32: observation des flux d'air avec vitesse maximale des ventilateurs



Figure 33:
mesure de la vitesse maximale des ventilateurs

f. La chambre de visualisation

Maintenant que nous avons défini les systèmes permettant une bonne circulation de l'air et de la fumée dans notre soufflerie, nous pouvons nous concentrer sur l'observation des phénomènes.

Le centre de la maquette est appelé "chambre de visualisation" car c'est l'endroit dédié à l'observation des flux d'air autour du profil d'aile.

Pour cela, la paroi latérale est composée de deux plaques en bois de 100 x 300 mm et d'une vitre en plexiglass de 500 x 300 mm (figure 34).

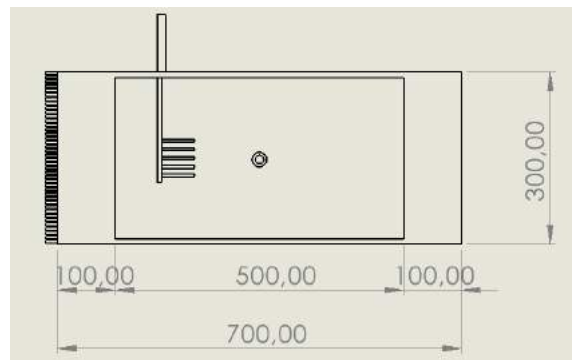


Figure 34: vue de face Solidworks

Après avoir fixé les plaques et la vitre, nous avons étanchéifié les contours de la maquette avec du silicone pour éviter tout risque de fuites d'air pouvant perturber l'écoulement.

Pour faciliter la visualisation des phénomènes aérodynamiques, nous avons apporté des améliorations. Nous avons peint toutes les parois intérieures en noir pour rendre la fumée plus visible. De plus, nous avons commandé et installé des lumières LED blanches sur la paroi supérieure afin d'éclairer le profil d'aile (figure 35).



Figure 35: Intérieur de la maquette

g. Le support du profil d'aile

Pour pouvoir observer le comportement de l'air autour du profil d'aile, il est important que ce dernier soit correctement positionné. Ainsi, nous avons conçu un système qui permet à la fois de modifier l'inclinaison et la profondeur du profil.

Il s'agit d'une tige filetée maintenue par deux écrous de chaque côté de la paroi arrière (figure 36).

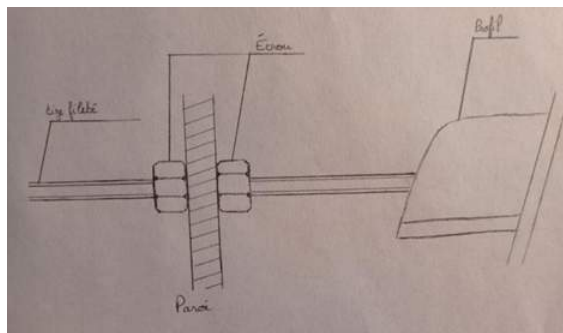


Figure 36: croquis du support du profil d'aile

La première idée à laquelle nous avons pensé était de réaliser un alésage puis un taraudage à l'intérieur du profil afin de le visser sur la tige filetée. Cependant, cela s'est avéré trop compliqué au vu de la fragilité du profil d'aile imprimé en 3D en plastique.

La solution que nous avons retenue a été de percer le profil d'aile dans toute sa longueur avec un diamètre correspondant à celui de la tige filetée. Ensuite, nous avons serré le profil sur la tige avec des écrous de chaque côté permettant de modifier sa profondeur dans la maquette.

Nous avons également percé un second emplacement sur la paroi arrière afin de pouvoir placer la tige filetée (et donc le profil) moins proche de l'injecteur de fumée (figure 37).

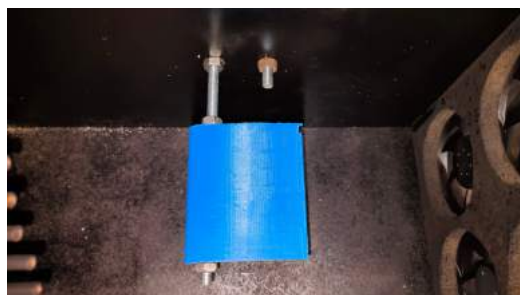


Figure 37: fixation du support du profil d'aile

Lorsqu'on observe les flux d'air sur un profil d'aile, il est intéressant de comprendre l'influence de l'angle d'incidence sur l'écoulement (ce que nous abordons dans la partie "Influence de l'incidence"). Il faut donc que le profil puisse être facilement orienté selon un certain angle.

Pour cela, notre système, décrit en page précédente, permet de modifier l'angle d'incidence du profil en dévissant l'écrou arrière (à l'extérieur de la maquette) et en effectuant la rotation souhaitée de la tige filetée.

Nous avons inscrit sur la paroi arrière des graduations en degré (figure 38) permettant de connaître l'angle précis du profil.

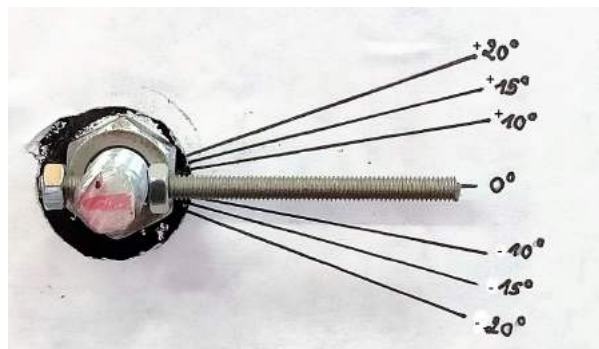


Figure 38: angles d'incidence du profil d'aile à l'arrière de la maquette

Le grand intérêt de ce système de fixation (figure 39) est qu'il est totalement modifiable (il suffit de retirer les écrous) et adaptable à n'importe quel profil en le perçant. De plus, en fonction de la taille du profil utilisé, deux positions de la tige filetée sont possibles plus ou moins près de l'injection de la fumée.



Figure 39: démontage du profil d'aile

a. Tests avant-assemblage

Afin de vérifier le bon fonctionnement global de la maquette, nous avons réalisé des tests avant de fixer définitivement la paroi supérieure. Il s'agissait en fait de voir si les flux d'air étaient suffisamment visibles et distincts les uns des autres.



Figure 40: flux d'air à l'instant t



Figure 41: flux d'air à l'instant $t+dt$

Nous remarquons sur les images ci-dessus que les flux d'air sont bien distincts au niveau du bord d'attaque du profil mais qu'ils se mélangent arrivés au bord de fuite. De plus, on peut observer qu'entre deux instants (figure 40 et 41), l'injection de la fumée n'est pas uniforme. En effet, la machine à fumée semble créer des à-coups qui saccadent l'écoulement de la fumée. La machine, qui est directement reliée à l'injecteur, n'envoie pas la fumée de façon constante. Ce sont ces à-coups qui entraînent des turbulences à l'aval du profil empêchant ainsi une bonne visualisation de l'écoulement.

Pour remédier à ce problème, nous avons réfléchi à une solution permettant de supprimer ces à-coups et d'obtenir des flux constants.

Nous avons donc décidé de fabriquer un réservoir de fumée, cube de 150 mm de côté. Celui-ci est placé entre la machine à fumée et l'injecteur. La fumée est alors envoyée dans le réservoir dans lequel elle s'accumule. Cette accumulation permet de supprimer ces effets d'à-coups et d'obtenir des flux moins saccadés.

Nous avons également décidé de rajouter un tuyau afin de pouvoir utiliser la machine à fumée horizontalement car nous avons remarqué qu'elle fonctionnait moins bien lorsqu'elle était placée verticalement sur l'injecteur.

Pour optimiser l'écoulement de l'air et tenter de diminuer davantage les turbulences observées devant les ventilateurs, nous avons fabriqué un nouveau collecteur (figure 42). Il s'agit, tout comme le premier collecteur, d'un tube acier rempli de pailles. Le tube a pour diamètre 200 mm et les pailles ont une longueur de 105 mm.



Figure 42: second collecteur

Dans l'idée, ce collecteur aurait permis de réduire les tourbillons et de faire en sorte que les flux ne se mélangent pas avant de sortir par les ventilateurs. Cependant, après plusieurs essais avec cet élément, nous nous sommes rendus compte qu'il n'améliorait pas le comportement de la fumée et avons décidé de ne pas l'inclure dans la maquette. Cette inefficacité peut s'expliquer par le fait que le collecteur aspire de l'air turbulent à son entrée et le rend laminaire à sa sortie, or la sortie de ce collecteur correspond aux ventilateurs qui aspirent l'air vers l'extérieur de la maquette. Cela n'a donc pas d'intérêt de rendre laminaire des flux d'air pour ensuite les rejeter hors de la soufflerie. En revanche, cela confirme bien l'utilité du premier collecteur placé à l'entrée de la maquette.

Durant nos essais, nous avons souvent démonté et remonté le profil d'aile sur la tige filetée. Ainsi, nous avons voulu trouver une solution pratique permettant de faciliter le changement du profil d'aile. Nous avons choisi de créer une trappe sur la plaque supérieure de la maquette (figure 43 et 56). Le but est que le profil d'aile soit complètement démontable et remplaçable par n'importe quel autre objet. Cette trappe a pour dimension 150 x 150 mm, ce qui laisse suffisamment de place pour manipuler l'intérieur de la maquette. Nous avons également posé un joint sur tout le contour de la trappe afin d'empêcher les fuites d'air. Des charnières et un crochet permettent aussi de bien appuyer la trappe sur le joint.

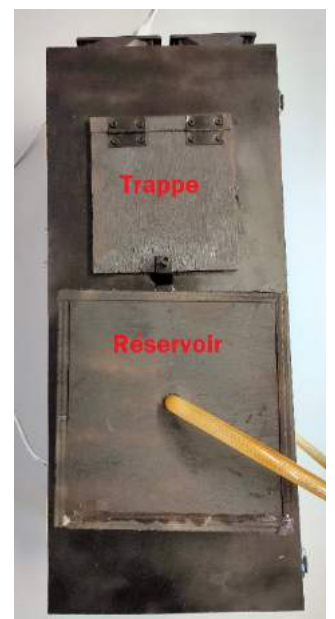


Figure 43: vue de la trappe et du réservoir

On résume tous les éléments sur la figure 44:

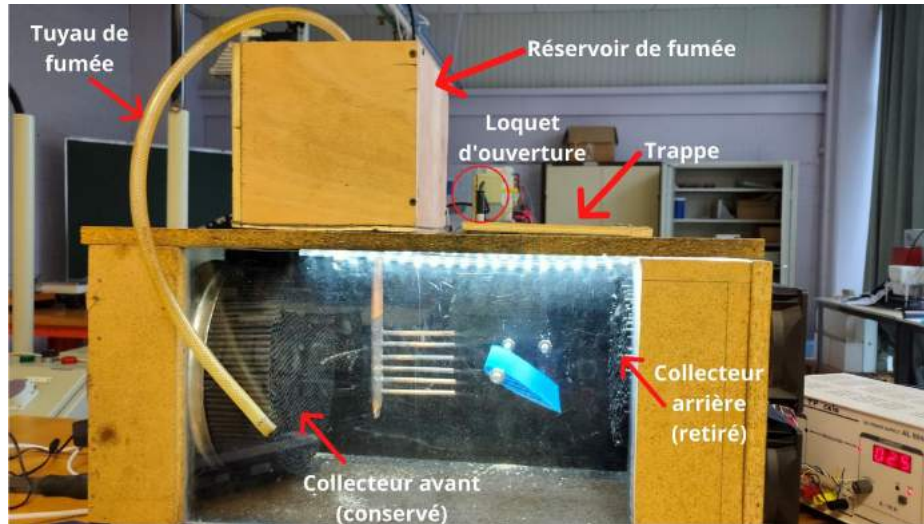


Figure 44: modifications apportées durant les tests avant-assemblage

Après avoir apporté toutes les corrections nécessaires, nous voulions fermer définitivement le dessus de la maquette. Nous avons décidé pour cela de faire en sorte que la plaque supérieure soit amovible. Nous avons alors accroché des charnières à l'arrière de la maquette et des loquets sur la face avant afin de maintenir plaquée la paroi supérieure. Cela permet ainsi d'ouvrir complètement la maquette afin de pouvoir la modifier facilement et rapidement. Pour des raisons esthétiques, nous avons peint toutes les parois extérieures en noir. On obtient alors la version finale de la maquette en figure 45.



Figure 45: Aspect final de la maquette

b. Tests après-assemblage

L'assemblage terminé, nous avons décidé de réaliser les derniers tests pour observer le comportement final de la maquette.

Lorsque nous avons envoyé la fumée dans le réservoir, nous avons remarqué d'importantes fuites d'air sur les contours de cet élément. Ainsi, nous avons commencé par mettre un joint d'étanchéité. Mais cela ne suffisant pas, nous avons rajouté du silicone sur toutes les arrêtes pour étanchéifier complètement le réservoir. Par précaution, nous en avons fait de même pour les contours de la maquette (parois en bois et plexiglass).

Nous avons alors réalisé un test final de la soufflerie (figure 46). Pour cela, nous avons injecté la fumée dans le tuyau menant au réservoir. Nous avons ensuite réglé les paramètres optimums des ventilateurs (comme nous l'avons présenté dans la partie "ventilation").



Figure 46: Test final de la maquette

On observe sur l'image ci-dessus que les flux d'air sont bien séparés les uns des autres et qu'il n'y a aucune formation de turbulences. Grâce à cet écoulement laminaire, on arrive à bien visualiser la fumée qui ne se décolle pas du profil. Nous avons remarqué que l'obtention de ces résultats très satisfaisants était possible grâce à l'accumulation de la fumée dans le réservoir. En effet, nous recommandons d'attendre quelques instants que la fumée s'accumule dans le réservoir puis une fois qu'elle est présente en grande quantité l'écoulement apparaît bien plus visible.

c. Influence de la forme sur les flux d'air

Il s'agit maintenant d'étudier l'influence de la forme d'un objet sur l'écoulement de l'air. Pour cela, nous allons effectuer 3 tests avec 3 formes différentes.

Le premier objet étudié est un pavé droit (figure 47). Comme le montre l'image ci-dessous, on observe que certains flux d'air s'accumulent devant le pavé droit et sont stoppés alors que d'autres parviennent à contourner l'objet. On remarque également que des tourbillons se forment dans le sillage.



Figure 47: flux d'air autour d'un pavé droit

Le deuxième objet étudié est un cylindre (figure 48). On peut voir sur l'image ci-dessous que la fumée a plus de facilité à contourner l'obstacle contrairement au cas précédent. En revanche, il subsiste des tourbillons dans le sillage (bien que moins importants pour le pavé droit).



Figure 48: flux d'air autour d'un cylindre

Le troisième objet étudié est un corps profilé (figure 49). On observe que tous les flux d'air contournent l'objet et qu'aucun tourbillon n'est présent.

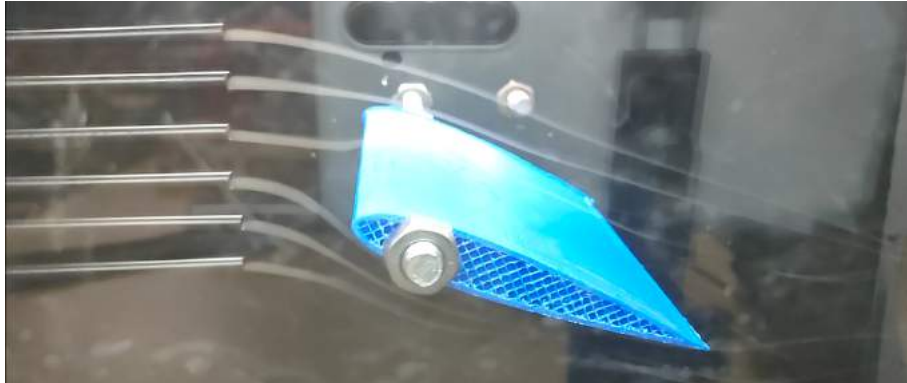


Figure 49: flux d'air autour d'un corps profilé

Suite à nos différentes observations, nous pouvons maintenant en tirer les conclusions.

Nous avons observé l'influence de la forme d'un corps sur l'écoulement de l'air. Chaque forme a une pénétration plus ou moins bonne dans l'air. Chaque fois qu'un obstacle présente des changements brusques dans sa géométrie (arrêtes vives), des lignes de décollement et de sillage se développent.

La traînée de forme prend donc ici une très grande importance. C'est alors avec un coefficient de traînée (C_x) que l'on peut caractériser la résistance d'un corps par rapport à l'écoulement de l'air.

Pour n'importe quelle forme d'un obstacle, il se forme un sillage consécutif au décollement des flux d'air. Cependant, il existe une catégorie d'obstacles pour lesquels les lignes de courant les contournent sans se détacher: ce sont les corps profilés qui ont une forme dite de "goutte d'eau". Leur surface ne présentant pas de variation brusque de courbure dans le sens de l'écoulement, leur coefficient de traînée est très faible. Les lignes de courant se rejoignent au bord de fuite créant un sillage avec des turbulences pratiquement invisibles contrairement aux corps non-profilés qui ont un coefficient de traînée très important.

d. Influence de l'incidence sur les flux d'air

L'angle d'incidence est l'angle formé par la direction de la vitesse et celle de la ligne de foi de l'avion. Notre soufflerie nous permettant de modifier ce paramètre, nous allons étudier l'influence de ce dernier sur l'écoulement de l'air et les conséquences sur les forces s'appliquant au profil d'aile.

Commençons par des observations sur des angles d'incidences négatifs (figure 50 et 51). Cela correspond, par exemple, à la descente d'un avion en approche en vue d'un atterrissage.

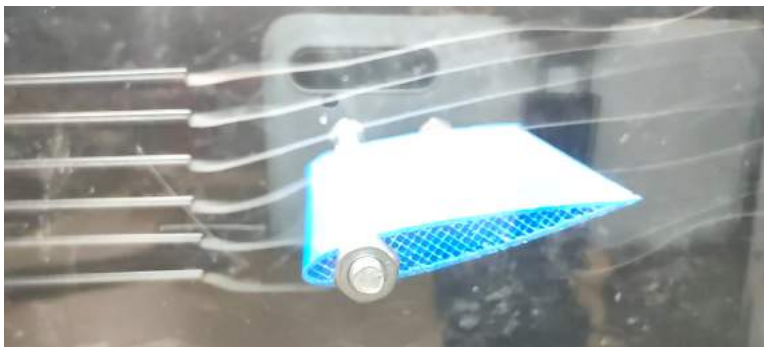


Figure 50: flux d'air avec angle d'incidence de -10°

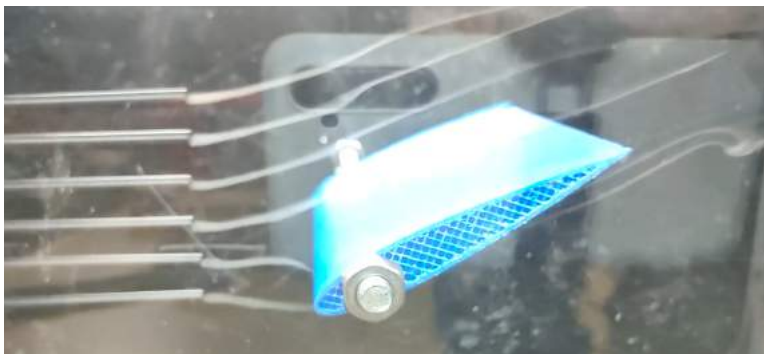


Figure 51: flux d'air avec angle d'incidence de -20°

On remarque que certaines turbulences apparaissent pour un angle d'incidence plus élevée (en valeur absolue). Dans le cas d'incidence négative, la portance créée par l'écoulement de l'air sur le profil est nulle quelque soit l'angle. Ce qui paraît logique, car si on reprend l'exemple d'un avion, dans cette situation on cherche à descendre et non pas à avoir de portance pour monter en altitude.

Poursuivons maintenant par des observations sur des angles d'incidences positifs (figure 52 et 53). Cela correspond, par exemple, à la montée ou au décollage d'un avion.



Figure 52: flux d'air avec angle d'incidence de 20°



Figure 53: flux d'air avec angle d'incidence supérieur à 20°

Lorsque l'air contourne le profil, il adhère à sa surface grâce à la viscosité qui lui permet de suivre les courbes de l'intrados et de l'extrados. Cela engendre une force contraire au poids, appelée portance.

Lorsque l'incidence augmente tout en restant inférieure à une valeur critique (aux alentours de 20°), on observe que l'écoulement de l'air reste proche du profil avec très peu de turbulences. La portance augmente avec l'incidence. Cependant, au-delà de la valeur critique, l'augmentation de l'angle d'incidence provoque un décollement des flux d'air sur l'extrados, ce qui engendre de grosses perturbations appelées turbulences de sillage. Ainsi, l'aile cesse d'être considérée comme un obstacle profilé. On appelle cette situation le décrochage.

La portance diminue alors très fortement et la traînée devient très importante.

Les figures 54 et 55 (en annexe 1) montrent des incidences intermédiaires.



VI) Pistes d'amélioration

Maintenant que ce projet est terminé, nous souhaitons donner des pistes d'amélioration qui pourraient être réalisées dans le futur.

Premièrement, nous avons remarqué de légères fuites de fumée à l'intérieur de la maquette au niveau de la jonction entre le tube de l'injecteur et la paroi supérieure. Difficilement atteignable, cet endroit pourrait être étanchéifié pour faire en sorte que toute la fumée du réservoir se retrouve bien dans les tubes de l'injecteur. Nous n'avons pas pu tout redémonter faute de temps pour le faire.

Deuxièmement, il serait possible d'améliorer la sortie du câble des lumières LED qui nécessite d'être bien placé dans le trou prévu à cet effet lorsqu'on referme la paroi supérieure.

Troisièmement, par manque de temps, nous n'avons pas pu réaliser un câble électrique des ventilateurs. Il conviendrait alors de raccorder les 4 ventilateurs de sorte d'avoir une sortie électrique commune et convenable.

Quatrièmement, pour éviter d'avoir à utiliser une alimentation électrique externe, il serait pratique d'intégrer une alimentation au sein de la maquette. De plus, on pourrait imaginer des potentiomètres placés sur le côté de la soufflerie permettant de changer le courant fournit aux ventilateurs et donc la vitesse de ces derniers.

Cinquièmement, nous avons remarqué que les ventilateurs aspirent l'air en faisant des mouvements circulaires. Cela engendre des brassages d'air et donc des turbulences lorsque l'air arrive vers les ventilateurs. Nous conseillons alors de remplacer ce système de ventilation par un autre qui aspirerait ou soufflerait l'air de façon linéaire.



VII) Contraintes

Lors de la réalisation de ce projet, nous avons du travailler en prenant en compte différents types de contraintes.

Commençons par les contraintes d'emploi du **temps**. Comme expliqué dans la partie "étapes de réalisation", des séances de 3 ou 4h nous ont été réservées pour travailler. Au début du projet, nous avons été retardés par les consignes sanitaires liées à la pandémie qui ne nous autorisaient pas à venir à l'atelier. Nous avons donc aménagé cette période par des recherches profondes concernant la conception de la maquette. Cela nous a ainsi permis de bien réfléchir et préparer la phase de fabrication. Dès lors que les consignes sanitaires nous l'ont permis (en janvier), nous avons débuté la fabrication à l'atelier.

Poursuivons par les contraintes de **matériaux** et de **coût**. Dans une optique de recyclage et d'économie, nous avons souhaité utiliser le maximum de matériaux de récupération, c'est-à-dire déjà disponibles à l'atelier. Ainsi, nous avons passé beaucoup de temps à réfléchir et à chercher les matériaux correspondant à nos besoins pour cette maquette. Malheureusement, certains matériaux ne se trouvaient pas à l'atelier et nous avons donc dû les commander. Nous avons alors toujours veillé à acheter uniquement les quantités nécessaires. De plus, pendant l'attente de la livraison, nous avons réorganisé notre travail pour rester efficace dans l'avancement du projet.



VIII) Conclusion

En conclusion, la conduite de ce projet nous a permis de mettre en évidence le phénomène de flux d'air autour d'une aile d'avion et ainsi de répondre à l'objectif de départ. La maquette qui a été réalisée semble tout à fait répondre à l'objectif de démonstration pédagogique souhaité. Elle nous a permis de montrer l'impact de la forme aérodynamique et de l'angle d'incidence d'un profil d'aile sur l'écoulement de l'air.

Par ailleurs, tout au long de ce projet, nous n'avons cessé d'apprendre et de développer de nouvelles compétences.

Ce projet a repoussé nos limites et nous a obligé à nous surpasser pour atteindre nos objectifs. En travaillant en binôme, nous avons amélioré nos qualités de travail en groupe car cela demande de savoir débattre, argumenter pour défendre ses idées et parfois faire des concessions pour le bien du groupe. Il nous a aussi fallu être créatifs et innovants pour inventer ou rechercher des systèmes répondant à nos critères. En plus des connaissances théoriques et pratiques, nous avons aussi acquis une méthode de travail rigoureuse pour réaliser le projet en respectant des contraintes techniques et des limites de temps.

Nous avons pris beaucoup de plaisir à travailler sur ce projet et sommes très heureux d'avoir pu le mener à son terme. Cela nous a permis d'approfondir un domaine qui nous passionne et d'aller au-delà des enseignements du DUT.

Étant passionnés par l'aéronautique et l'automobile, nous sommes fiers d'avoir travaillé sur un projet comme celui-ci. Cela nous permettra de poursuivre nos études dans ces domaines avec une plus grande vision d'ensemble. De plus, ce projet nous a aussi permis d'avoir une approche plus professionnelle de notre formation en nous donnant des responsabilités et des exigences à satisfaire.

I) Écoulement de l'air pour des incidences intermédiaires

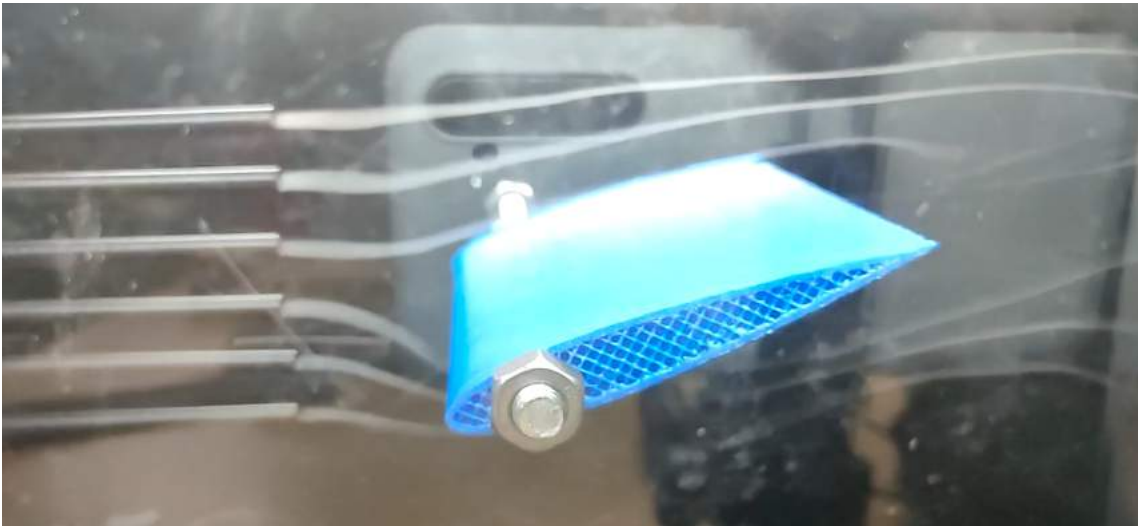


Figure 54: flux d'air avec angle d'incidence de -15°



Figure 55: flux d'air avec angle d'incidence de 15°

II) Accès à l'intérieur de la maquette

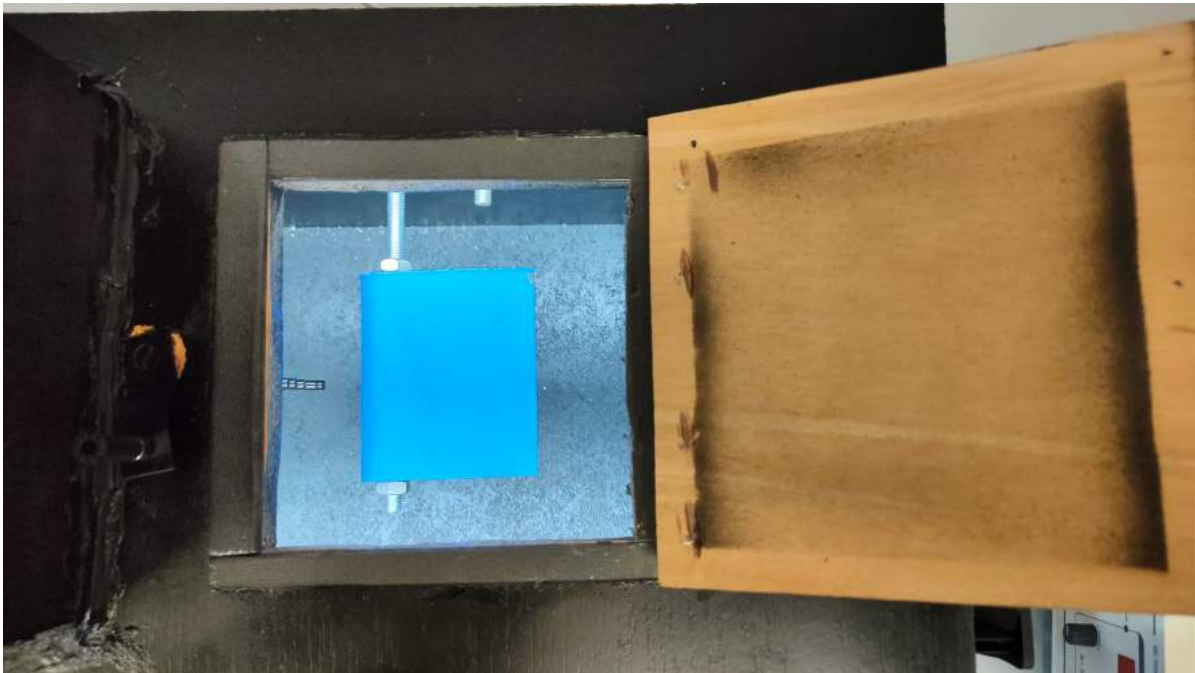


Figure 56: Trappe de remplacement du profil d'aile



X) Liste des figures

• Figure 1: Peugeot 508 Fastback.....	7
• Figure 2: Aston Martin AMR21.....	7
• Figure 3: Airbus A320 à flèche positive.....	8
• Figure 4: Winglet sur un King Air.....	8
• Figure 5: Écoulement laminaire.....	9
• Figure 6: Écoulement turbulent.....	9
• Figure 7: Écoulement tourbillonnaire.....	9
• Figure 8: Forces mises en jeu sur un profil d'aile.....	10
• Figure 9: Illustration d'une soufflerie d'étude.....	12
• Figure 10: Soufflerie Deltalab EA600.....	13
• Figure 11: Soufflerie Aerolab.....	13
• Figure 12: Soufflerie de Modane-Avrieux.....	13
• Figure 13: Soufflerie JF-12 de l'IMECH à Pékin.....	13
• Figure 14: Diagramme de Gantt du projet.....	16
• Figure 15: Croquis de la maquette.....	17
• Figure 16: Vue de gauche de la maquette.....	18
• Figure 17: Vue de face de la maquette.....	18
• Figure 18: Vue de droite de la maquette.....	18
• Figure 19: Vue en 3 dimensions de la maquette.....	18
• Figure 20: Schéma de principe du premier collecteur.....	19
• Figure 21: Collecteur (côté gauche de la maquette).....	19
• Figure 22: Défaut de fabrication corrigé.....	19
• Figure 23: Machine à fumée TINY CX.....	20
• Figure 24: Croquis de l'injecteur de fumée.....	20
• Figure 25: Raccord serti sur le tube.....	21
• Figure 26: Tubes en cuivre de l'injecteur.....	21
• Figure 27: Essai de l'injecteur de fumée.....	21
• Figure 28: Vue de droite Solidworks.....	22
• Figure 29: Ventilateurs (côté droit de la maquette).....	23
• Figure 30: Observation des flux d'air avec vitesse optimale des ventilateurs.....	23



X) Liste des figures

• Figure 31: Mesure de la vitesse optimale des ventilateurs.....	23
• Figure 32: Observation des flux d'air avec vitesse maximale des ventilateurs.....	23
• Figure 33: Mesure de la vitesse maximale des ventilateurs.....	23
• Figure 34: Vue de face Solidworks.....	24
• Figure 35: Intérieur de la maquette.....	24
• Figure 36: Croquis du support du profil d'aile.....	25
• Figure 37: Fixation du support du profil d'aile.....	25
• Figure 38: Angles d'incidence à l'arrière de la maquette.....	26
• Figure 39: Démontage du profil d'aile.....	26
• Figure 40: Flux d'air à l'instant t	27
• Figure 41: Flux d'air à l'instant $t+dt$	27
• Figure 42: Second collecteur.....	28
• Figure 43: Vue de la trappe et du réservoir.....	28
• Figure 44: Modifications apportées durant les tests avant-assemblage.....	29
• Figure 45: Aspect final de la maquette.....	29
• Figure 46: Test final de la maquette.....	30
• Figure 47: Flux d'air autour d'un pavé droit.....	31
• Figure 48: Flux d'air autour d'un cylindre.....	31
• Figure 49: Flux d'air autour d'un corps profilé.....	32
• Figure 50: Flux d'air avec angle d'incidence de -10°	33
• Figure 51: Flux d'air avec angle d'incidence de -20°	33
• Figure 52: Flux d'air avec angle d'incidence de 20°	34
• Figure 53: Flux d'air avec angle d'incidence supérieur à 20°	34
• Figure 54: Flux d'air avec angle d'incidence de -15°	38
• Figure 55: Flux d'air avec angle d'incidence de 15°	38
• Figure 56: Trappe de remplacement du profil d'aile.....	39



XI) Références

- Cours de mécanique des fluides du semestre 3 réalisé par Pascal PERSONNE et Pascal BIWOLE
- « Mécanique du vol » 2ème édition A.C. KERMODE Editions MODULO
- "Réalisation d'une maquette aérodynamique" Rapport de physique par des étudiants de l'INSA Rouen
- "Démonstration expérimentale en soufflerie: les souffleries" vidéo par LMFN : https://youtu.be/3c_EvS7Phu0
- "SOUFFLERIE MAREY, Association AERODYNE, IUT de CACHAN" vidéo par conceptionaero : <https://www.youtube.com/watch?v=zucu13Ihxr0>
- "La soufflerie aéronautique la plus puissante du monde" vidéo par aeronewstv : <https://www.youtube.com/watch?v=-1C9G6le5t8>
- "Centre de controle Mercedes-Benz - Soufflerie et test aérodynamique" vidéo par Forum-mercedes.com : <https://www.youtube.com/watch?v=w2LsOkMMJJg>
- "DIY wind tunnel to visualize the flow lines like Ferrari or Mercedes - Windkanal für Strömungslinien" vidéo par stoppi : <https://www.youtube.com/watch?v=EviSJvzaRuM>
- "Formula 1 Aerodynamics with Martin Brundle" vidéo par kweli25 : https://www.youtube.com/watch?v=jYaIXWNOa_A