

Projet de Physique P6
STPI/P6/2022 – 11

Découverte de l'aérodynamique 1



Etudiants :

Hugo BOULENGER

Léo JACQUOT

Gauthier SAVARIN

Florian RUAULT

Antoine CHARCELLAY

Simon LEPRETRE

Enseignant-responsable du projet :

Andrei-Silviu MILEA

Date de remise du rapport : 11/06/2022

Référence du projet : **STPI/P6/2022 – 11**

Intitulé du projet : **Découverte de l'aérodynamique 1**

Type de projet : **Bibliographique et expérimental**

Objectifs du projet :

Comprendre ce qu'est l'aérodynamique et expliciter ses enjeux.

Réaliser notre soufflerie pour des modèles à échelle réduite dans le but de réaliser plusieurs expériences sur différents modèles.

Mener à bien un projet de groupe en se fixant un calendrier et en se répartissant le travail.

Mots-clefs du projet : ***Enjeux, soufflerie, sport automobile***

Remerciements

Nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont rendu ce projet réalisable.

En premier, nous voulons remercier notre chargé de projet, Monsieur Andrei-Silviu Milea, qui nous a guidés tout au long de ce projet. Il a su nous écouter, et se rendre disponible chaque semaine.

Il est aussi important pour nous de remercier l'INSA, pour nous avoir donné la possibilité de travailler sur un sujet qui nous plaît ainsi que le matériel nécessaire à sa mise en œuvre.

TABLE DES MATIERES

1. INTRODUCTION	6
2. ETUDE DE L'AERODYNAMIQUE	7
2.1. Modélisations mathématiques	7
2.1.1. Les forces aérodynamiques	7
2.1.2. Les équations de grandeurs conservées	8
2.1.3. Nombres adimensionnels	10
2.1.4. Similitudes	11
2.2. Application au sport automobile	12
2.2.1. Les éléments aérodynamiques	12
2.2.2. Les performances	13
2.2.3. La sécurité	14
3. METHODOLOGIE	15
3.1. Sécurité	15
3.2. Organisation du travail	15
4. EXPERIENCE EN SOUFFLERIE	16
4.1. Mise en place	16
4.1.1. Première version	16
4.1.2. Version finale	16
4.2. Résultats expérimentaux	17
4.2.1. Moteur	17
4.2.2. Première version	17
4.2.3. Version finale	18
5. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	21
6. BIBLIOGRAPHIE	22
7. ANNEXES	23
7.1. Plan de la soufflerie	23

NOTATIONS, ACRONYMES

- C_x : coefficient de traînée
- C_z : coefficient de portance
- S : surface (m^2)
- Re : nombre de Reynolds
- ρ : masse volumique du fluide ($kg.m^{-3}$)
- v : vitesse du fluide (ou champ de vitesse pour Navier Stokes)
- D : dimension caractéristique de l'écoulement (m)
- Pr : nombre de Prandtl
- ν : la viscosité cinématique ($m^2.s^{-1}$)
- μ : viscosité dynamique du fluide ($Pa.s$)
- α : la diffusivité thermique ($m^2.s^{-1}$)
- λ : la conductivité thermique ($W.m^{-1}.K^{-1}$)
- c_p : la capacité thermique massique isobare ($J.kg^{-1}.K^{-1}$)
- c_v : la capacité thermique massique isochore ($J.kg^{-1}.K^{-1}$)
- Ma : nombre de Mach
- c : vitesse de propagation ou célérité du son dans l'environnement considéré ($m.s^{-1}$)
- P : la pression (Pa)
- z : altitude (m)
- g : accélération de pesanteur ($m.s^{-2}$)
- t : temps (s)
- Fr : nombre de Froude
- h : hauteur (m)
- $\vec{\tau}$: tenseur des contraintes visqueuses (Pa)
- \vec{f} : résultante des forces massiques s'exerçant dans le fluide ($N.kg^{-1}$)
- e : énergie totale par unité de masse
- \vec{q} : flux de chaleur perdu par conduction thermique ($J.m^{-2}.s^{-1}$)
- r : perte de chaleur volumique due au rayonnement ($J.m^{-3}.s^{-1}$)

1. INTRODUCTION

L'aérodynamique est présente partout, dans les déplacements des véhicules, dans les systèmes de propulsion, dans les bâtiments, les tours, les ponts, les éoliennes, ou encore les turbines. Pourtant, nous sommes le plus souvent inconscients de sa présence et de son fonctionnement. L'aérodynamique est dans sa définition la plus simple une branche de la physique qui étudie les effets de l'air et des gaz sur les déplacements des corps solides. Nous avons décidé dans ce projet de nous concentrer sur l'aérodynamique appliquée à l'automobile, car nous pouvons y retrouver de nombreux enjeux importants.

En effet, le premier enjeu de l'aérodynamique automobile est celui appliqué à toutes les voitures que l'on retrouve sur le marché. Les constructeurs automobiles se concentrent sur les frottements qu'exercent l'air à haute vitesse sur un véhicule. Plus il y aura de frottements et plus le moteur du véhicule sera sollicité. L'aérodynamique a donc un effet important sur les émissions de gaz à effets de serre et notamment de CO₂. De plus, le second enjeu est celui appliqué au sport automobile afin de réaliser des véhicules les plus performants possible. En effet, de nos jours, une voiture doit non seulement être belle, mais aussi être capable de fendre l'air efficacement. Cette alliance n'est pas aussi simple qu'il n'y paraît. Les premiers constructeurs automobiles ne se souciaient pas de l'aérodynamique, car les voitures étaient si lentes qu'il n'était pas nécessaire d'améliorer leur pénétration dans l'air. Par la suite, avec le développement de l'aviation, les automobiles aux formes effilées sont devenues à la mode, les phares ont été mieux intégrés, les ailes ont été profilées et les calandres se sont abaissées.

L'aérodynamique est aujourd'hui devenue un enjeu majeur pour les constructeurs automobiles, et les essais en soufflerie sont devenus indispensables afin de réduire le plus possible les coefficients de traînée. Les simulations sur ordinateur sont également indispensables au processus d'évolution de l'aérodynamique, mais ne remplacent pas pour autant les souffleries.

Notre groupe s'est concentré sur la partie expérimentale de l'aérodynamique automobile en étudiant les flux et les forces s'appliquant à des modèles réduits de voitures. Pour cela, nous avons construit une soufflerie à échelle réduite afin de réaliser des mesures expérimentales de portance et d'observer les flux d'air s'appliquant sur une voiture.

2. ETUDE DE L'AERODYNAMIQUE

2.1. Modélisations mathématiques

2.1.1. Les forces aérodynamiques

Un véhicule est soumis à 4 forces : la poussée qui dépend du moteur, le poids, et deux forces aérodynamiques : la traînée et la portance.



Figure 2.1 : Représentation des forces

La traînée

En mécanique des fluides, la traînée peut être qualifiée comme la force qui s'oppose au mouvement d'un corps dans un liquide ou un gaz (dans l'air pour l'aérodynamique automobile). Mathématiquement, c'est la composante des efforts exercés sur le corps, dans le sens opposé à la vitesse relative du corps par rapport au fluide.

La traînée induite est une force de résistance à l'avancement induite par la portance. Pour la réduire, on peut réduire le poids, augmenter l'allongement (d'une aile pour un avion) et augmenter la vitesse.

On peut la calculer (en Newton) à l'aide de la formule suivante :

$$R_{x_i} = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_{x_i} \quad 1/2 \cdot \rho \cdot V^2 - \text{la pression dynamique}$$

Le coefficient de traînée est une quantité sans dimension utilisé pour quantifier la traînée dans un fluide.

Deux facteurs principaux agissent sur celui-ci : le frottement de la peau ainsi que la traînée de forme d'un objet. Ainsi, on peut trouver des tableaux avec des valeurs de C_x variant pour différentes formes d'objets.

Shape	Drag Coefficient
Sphere	0.47
Half-sphere	0.42
Cone	0.50
Cube	1.05
Angled Cube	0.80
Long Cylinder	0.82
Short Cylinder	1.15
Streamlined Body	0.04

Figure 2.2 : Coefficients de traînée

La portance

En mécanique des fluides, la portance est la composante de la force subie par un corps en mouvement dans un fluide, qui s'exerce perpendiculairement à la direction du mouvement.

On peut la calculer (en Newton) à l'aide de la formule suivante :

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

Le coefficient de portance est mesuré en soufflerie. Il est utilisé pour quantifier la portance d'un corps profilé.

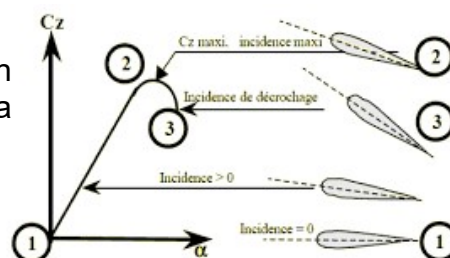


Figure 2.3 : Coefficient de portance et angle d'incidence

2.1.2. Les équations de grandeurs conservées

Les équations de Navier-Stokes

Les équations de Navier-Stokes permettent de décrire le mouvement des fluides. Il s'agit d'équations mathématiquement compliquées à résoudre car il s'agit d'équations différentielles non linéaires du fait de la présence de turbulences.

- **Equation de la continuité (conservation de la masse)** : En mécanique des fluides, l'équation de continuité décrit le principe de conservation de la masse au sein d'un écoulement. L'établissement de cette équation locale repose sur un bilan de masse de fluide au sein d'un élément de volume pendant un temps élémentaire.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{v}) = \frac{d\rho}{dt} + \rho \text{div}(\vec{v}) = 0$$

Pour un fluide incompressible :

Dans le cas d'un écoulement incompressible (fluide avec une densité constante au cours du temps et uniforme dans l'espace), l'équation de continuité est réduite à :

$$\text{div}(\vec{v}) = 0$$

- **Equation de bilan de la quantité de mouvement :**

$$\frac{\partial (\rho \vec{v})}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v} \otimes \vec{v}) = -\vec{\nabla} p + \vec{\nabla} \cdot \vec{\tau} + \rho \vec{f}$$

Pour un fluide incompressible :

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \vec{\nabla}) \vec{v} = -\underbrace{\frac{1}{\rho} \vec{\nabla} p}_{\text{Forces de pression}} + \underbrace{\nu \nabla^2 \vec{v}}_{\text{Forces visqueuses}} + \vec{f}$$

- **Equation de bilan de l'énergie :**

$$\frac{\partial (\rho e)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot [(\rho e + p) \vec{v}] = \vec{\nabla} \cdot (\vec{\tau} \cdot \vec{v}) + \rho \vec{f} \cdot \vec{v} - \vec{\nabla} \cdot \vec{q} + r$$

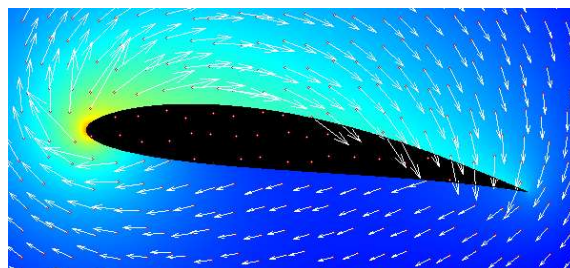


Figure 2.4 : Champ de vitesse dans un fluide autour d'une aile d'avion

Le théorème de Bernoulli

Conditions de Bernoulli :

- Fluide incompressible (masse volumique constante)
- Ecoulement stationnaire
- Fluide non visqueux (c'est-à-dire parfait)
- Forces qui dérivent d'un potentiel (ici pesanteur)
- Equation valable le long d'une ligne de courant

Formule :

$$\frac{v^2}{2} + g \cdot z + \frac{p}{\rho} = \text{constante}$$

Cette formule mathématique montre l'effet de Bernoulli, cet effet est celui d'une accélération se produisant simultanément avec la diminution de la pression ou inversement. En effet, sur les voitures la portance est liée à une dépression qui soulève la voiture. Cette dépression est le résultat d'une baisse de la pression au-dessus de la voiture, car l'air est accéléré pour parcourir une plus grande distance, celle de la courbure de la voiture. En dessous de la voiture, la distance est moins élevée et l'air ira donc moins vite. La pression sera donc plus élevée.

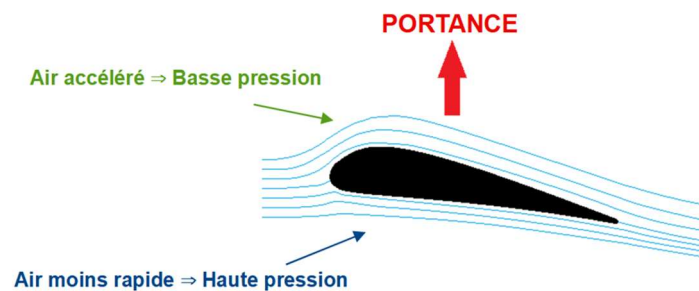


Figure 2.5 : Effet de Bernoulli

2.1.3. Nombres adimensionnels

Le nombre de Reynolds

Le nombre de Reynolds est le rapport entre les forces d'inertie et les forces visqueuses dans un fluide. Il est utilisé pour prédire la nature de l'écoulement du fluide. Celui-ci pourra être laminaire ou turbulent.

$$Re = \frac{\rho VD}{\mu}$$

Écoulement laminaire :

- Fluide lent, forces visqueuses dominantes sur les forces d'inertie
- Re faible (<2000)
- Le fluide se déplace en ligne droite et parallèle

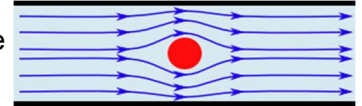


Figure 2.6 : Écoulement laminaire

Écoulement turbulent :

- Fluide plus rapide, forces d'inertie dominantes sur les forces visqueuses
- Re élevé (>>2000)
- Le fluide se déplace avec des mouvements irréguliers (ex : tourbillons pour le cas des fleuves)

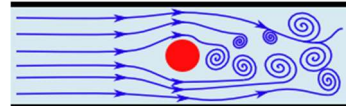


Figure 2.7 : Écoulement turbulent

Le nombre de Prandtl (Pr)

Il s'agit d'un nombre sans dimension et représente le rapport entre la diffusivité de la quantité de mouvement (viscosité cinématique) et celle de la chaleur (diffusivité thermique).

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\mu c_p}{\lambda}$$

Un nombre de Prandtl élevé traduit un profil de température fortement influencé par la vitesse, tandis qu'un nombre de Prandtl faible correspond à une conduction thermique rapide, où la vitesse a peu d'influence sur le profil de température.

Le nombre de Mach (Ma)

Le nombre de Mach mesure le rapport entre les forces liées au mouvement et la compressibilité du fluide.

$$Ma = \frac{V}{c} \quad \text{avec } c = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}}$$

Le nombre de Mach sert à savoir si un fluide est compressible ou incompressible. Les effets de la compression peuvent être ignorés pour des nombres de Mach inférieur à 0,3.

2.1.4. Similitudes

A- Pourquoi utiliser des maquettes ?

Tout problème en mécanique des fluides est régi par des équations qui sont malheureusement insolubles dans la plupart des cas. Les solutions analytiques sont même rares et les solutions numériques sont parfois lourdes à mettre en œuvre et coûteuses en temps de calcul. Il devient donc impératif d'avoir recours à l'étude expérimentale, soit grandeur nature, soit par l'intermédiaire de maquettes.

La taille géométrique des problèmes réels est souvent difficile à mettre en place en laboratoire, car il faut respecter certaines conditions de fonctionnement liant l'étude sur la maquette et sa transposition au prototype. Les essais sur maquettes sont plus intéressants dans un premier temps, car ils permettent de trouver des solutions, d'acquérir des données ou de vérifier des calculs. La technique des modèles réduits est basée sur les règles de similitude, faisant intervenir l'analyse dimensionnelle. Cette technique permet de réduire le nombre de paramètres intervenant dans les équations décrivant un système afin de simplifier son analyse. Toutes ces conditions permettent d'une part de concevoir et d'exploiter le modèle, mais surtout de transposer les résultats obtenus à la réalité.

B- Règles de similitude

Pour tout système, les résultats des mesures expérimentales sur le modèle ne sont transposables au prototype que si les données définissant les problèmes posés satisfont à un certain nombre de relations. Ce sont les conditions de similitude mécanique. On en distingue trois différentes : les similitudes géométriques, cinématiques et dynamiques.

Similitude géométrique :

Le rapport de toutes les dimensions du prototype et du modèle doit être constant :

$$\hat{L} = \frac{L_{\text{nature}}}{L_{\text{modèle}}} = \text{constante} \quad \hat{L} : \text{échelle de longueur.}$$

Similitude cinématique :

Le rapport des accélérations doit être constant en tous les points correspondants de l'écoulement :

$$\hat{T} = \frac{t_1}{t_2} = \text{constante}$$

$$\hat{V} = \frac{\hat{L}}{\hat{T}} \Rightarrow \hat{a} = \frac{\hat{V}}{\hat{T}} = \frac{\hat{L}}{\hat{T}^2}$$

Similitude dynamique :

Le rapport des forces appliquées à des éléments homologues doit être constant, quelles que soient les forces homologues considérées.

Similitudes de Reynolds et de Froude :

La similitude de Froude exprime le rapport des forces d'inertie aux forces de pesanteur. Elle s'applique aux écoulements à surface libre et se traduit par :

$$F_r = 1 \text{ où } F_r = \frac{V}{\sqrt{gh}} \quad \hat{V} = \sqrt{\hat{L}}$$

Nombre de Froude (rapport des forces d'inertie aux forces de pesanteur)

La similitude de Reynolds exprime le rapport des forces d'inertie aux forces de viscosité. Elle s'applique aux écoulements en charge. Elle se traduit par :

$$\frac{\hat{V}\hat{L}}{\hat{\nu}} = 1 \quad R_e = 1$$

2.2. Application au sport automobile

2.2.1. Les éléments aérodynamiques

Les éléments aérodynamiques sont tous les éléments qui vont influencer sur et généralement améliorer l'aérodynamisme d'un véhicule.

Tout d'abord, nous pouvons parler des ailerons qui sont incontestablement les éléments aérodynamiques les plus connus. En automobile, ils sont définis comme étant des pièces de carrosserie destinées à améliorer l'adhérence et la stabilité du véhicule. Ils permettent de réaliser un appui aérodynamique très important grâce à une surpression au-dessus et une dépression en dessous de ceux-ci. Ainsi, on évite que le véhicule ne "décolle" car les ailerons garantissent l'appui sur la piste. Cependant, les ailerons possèdent un défaut : ils ne favorisent pas la pénétration dans l'air et vont donc freiner le véhicule. De plus, la forme des ailerons est étudiée pour les véhicules allant à grandes vitesses. De ce fait, les véhicules de faible puissance ne sont impactés en général que par les défauts. C'est pourquoi leur utilisation reste généralement exclusive aux sports automobiles où ils sont très efficaces.



Figure 2.9 : Aileron arrière d'une voiture de sport



Figure 2.8 : Aileron avant d'une Formule 1 de l'écurie Ferrari

D'autres éléments aérodynamiques, les spoilers, permettent de créer une zone bloquant l'air, créant ainsi une zone de plus faible pression sous la voiture. Ceci entraîne une augmentation de la déportance, et l'appui aérodynamique est alors augmenté. Il existe aussi des spoilers arrière : l'air se retrouve bloqué au-dessus, ce qui crée un coussin d'air ; l'air au-dessus de la voiture ne sera plus perturbé. De ce fait, les turbulences et donc la traînée sont diminuées.

En conclusion, le rôle des spoilers est double : ils permettent d'améliorer le coefficient C_x , donc de réduire la traînée, et permettent aussi de diminuer la portance.



Figure 2.11 : Spoiler Arrière



Figure 2.12 : Spoiler Avant

Ensuite, les jupes latérales jouent un rôle similaire mais de manière beaucoup moins marquée. Elles diminuent la portance ainsi que la traînée car elles permettent d'améliorer le coefficient C_x . Cependant, il faut savoir que l'utilisation de spoilers et jupes trop proches du sol entraînera une dégradation de la tenue de route du véhicule. Par conséquent, des frottements parasites avec le sol à haute vitesse peuvent entraîner un accident. C'est pourquoi elles sont plus présentes dans le sport automobile.



Figure 2.10 : Jupes latérales d'une Mazda

De plus, les lames DTM (Deutsche Tourenwagen Masters) qui tirent leur nom du trophée Grand Tourisme allemand ont pour rôle de diminuer la portance. Le profil d'une lame permet de canaliser l'air qui arrive de l'avant du véhicule sur les côtés. Cela réduit l'air en dessous du véhicule et donc la portance. Cependant, elles sont souvent utilisées pour permettre de dépasser les limites de certains véhicules.

Enfin, le fond plat est utilisé dans le sport automobile pour augmenter l'appui aérodynamique tout en limitant les effets de traînée. Le rôle de celui-ci est d'accélérer le fluide sous le véhicule pour diminuer la pression. Cela va créer une dépression sous la voiture et donc augmenter l'appui.



Figure 2.14 : Lame DTM sur avant d'une AUDI



Figure 2.13 : Fonds plats d'une F1 de l'écurie Mercedes

2.2.2. Les performances

Au début de sa découverte, le principal objectif de l'aérodynamique était d'améliorer les performances, notamment lors des courses automobiles. Cependant l'aérodynamique a une influence importante sur les performances dans tous les domaines, notamment en ski ou en cyclisme, où une position courbée est adoptée. Cette position est plus aérodynamique qu'une position standard et permet de meilleures performances.



Figure 2.16 : Tests cyclistes en soufflerie



Figure 2.15 : Ivan Origone bat le record du monde de vitesse en ski à 254,958 km/h

Pour améliorer au maximum la vitesse d'un véhicule il faut que sa traînée et sa portance soient les plus bas possibles. Une traînée faible permet d'aller vite en ligne droite tandis qu'une portance plus faible permet d'aller plus vite lors des virages, à moindres risques. Cependant, le mariage entre l'augmentation de la déportance et la diminution de la traînée est plutôt incompatible et il est donc nécessaire de trouver le meilleur compromis entre les deux forces pour obtenir la voiture la plus performante.

Cx (coefficient de traînée)	0.4	0.45	0.5	0.6	0.7
Temps	1'36''7	1'37''6	1'38''5	1'40''6	1'42''7
Vitesse max (en km/h)	327	316	306	289	273

Ce tableau ci-dessus nous montre que le coefficient de traînée influence la vitesse en modifiant la vitesse maximale. Plus celui-ci est faible, plus la vitesse maximale est élevée.

Cz (coefficient de portance)	- 0.5	- 1.0	- 1.5	- 2.0	- 3.0
Temps	1'41"9	1'38"5	1'36"3	1'33"7	1'30"5
Vitesse max (en km/h)	306	306	306	306	306

Ce second tableau nous montre que le coefficient de portance n'influe pas sur la vitesse maximale, ce qui confirme le fait que ce coefficient est important pour les virages.

A 90km/h, le moteur d'une voiture moderne fournit 13,5 kW. 8,3 kW sont consommés par la résistance aérodynamique, ce qui a pour résultat que 62% de l'énergie du moteur ne sert pas à l'avancement de la voiture, et est gaspillé en pure perte dans l'air ambiant.

Dans les circuits réputés rapides, les forces aérodynamiques développées sont très fortes, puisqu'elles sont proportionnelles à la vitesse au carré. Un coefficient de déportance faible est suffisant pour retrouver une force d'appui importante, mais aussi pour minimiser la traînée. Pour ce qui est des circuits réputés lents, il faut rechercher des coefficients d'appui très fort, car, les vitesses étant faibles, c'est le seul moyen d'obtenir de la déportance.

Les éléments aérodynamiques présents sur les voitures, présentés précédemment, ont pour but d'améliorer les performances automobiles. Leur but est donc souvent de diminuer au maximum la portance.

2.2.3. La sécurité

Depuis son début et jusqu'à nos jours l'aérodynamique a connu quelques problèmes malgré l'avancement des technologies et des connaissances sur le sujet, il continue à y avoir des accidents. En voici des exemples :

En 1999, le circuit du Mans en France a connu un terrible accident. Marc Webber d'est envolé à bord de sa Mercedes CLR. Lors d'une accélération dans un virage, le pilote décolla littéralement du sol à cause d'une mauvaise association de son spoiler avant et de ses déflecteurs latéraux. Le véhicule n'avait donc pas assez d'appui pour rester sur la piste.



Figure 2.17 : Photo de l'accident de Marc Webber



Figure 2.18 : Photo de l'accident de Marcus Ericsson

Le 31 Août 2018, environ 20 ans après, un autre accident se produit à cause du spoiler arrière (DRS), cette fois-ci sur le circuit de Monza en Italie. Le pilote Marcus Ericsson a fait des « tonneaux », comme on dit dans le milieu de l'automobile. Le pilote, à la fin d'une accélération, n'a pas pu prendre son virage car le DRS (qui diminue la traînée mais aussi l'appui aérodynamique) ne s'est pas fermé.

Cependant, aucun de ces deux accidents n'a causé la mort et les cas restent relativement rares.

En conclusion, l'aérodynamisme est en perpétuelle progression en ce qui concerne la sécurité. Cependant le risque zéro n'existe pas et la Formule 1 demeure un sport dangereux.

3. METHODOLOGIE

3.1. Sécurité

Lors de la réalisation de ce projet, plusieurs travaux pratiques ont été mis en place, nécessitant l'utilisation d'outils pouvant parfois s'avérer dangereux. Il est donc nécessaire de répondre au mieux à différentes règles de sécurité afin de ne pas se mettre en danger et également pour ne pas détériorer le matériel.

Sur la première version de la soufflerie, nous avons utilisé des cutters afin de découper du carton. Cet outil peut être à l'origine de coupures s'il est mal utilisé. C'est pourquoi pour éviter tout risque de blessure, nous utilisons des gants de protection lors des manipulations. De plus, nous utilisons des supports de protection pour ne pas abîmer les tables.

La deuxième version de la soufflerie nécessitant l'utilisation de matériels plus complexe, il a fallu ajouter de nouvelles règles de sécurité. Afin de manipuler la scie et la perceuse, il était nécessaire de garder des gants de protections et également de porter des vêtements de protection couvrant l'intégralité du corps pour éviter toute coupure. Le reste du groupe se tenait également à l'écart.

De plus, le port de lunettes de protections a été très important pour éviter la projection d'éclats ou de copeaux de bois dans les yeux lors de la manipulation. Il est également conseillé de garder un casque de protection auditif lors de l'utilisation de la perceuse.

Lors des branchements du générateur électrique avec le moteur, il faut être prudent pour ne pas provoquer un court-circuit, et veiller à respecter le protocole de montage de notre circuit électrique.

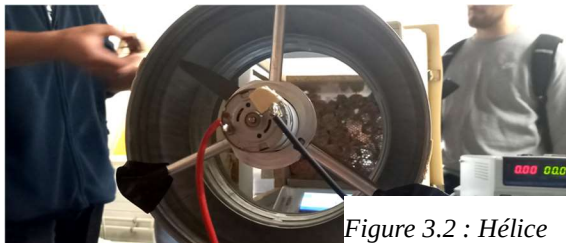


Figure 3.2 : Hélice

3.2. Organisation du travail

L'objectif de ce projet était de concilier les découvertes théoriques et l'élaboration de notre expérience pratique. Ainsi, lors des premières séances, nous nous sommes concentrés à faire des recherches sur le thème de l'aérodynamique.

Une fois les bases théoriques acquises, nous avons débuté la construction de notre projet et donc la création de la soufflerie. C'est à partir de la 3ème séance que nous avons décidé de consacrer les séances encadrées à l'élaboration expérimentale du projet tout en continuant nos recherches théoriques en dehors de ce créneau d'1h30 par semaine.

Premièrement nous avons fait un prototype « test » en carton. Nous avons ensuite essayé de tester la soufflerie et de noter les résultats obtenus.

Dans un second temps, nous nous sommes concentrés sur la fabrication de la version finale de la soufflerie. Afin de gagner du temps, nous nous sommes réparti les tâches. Gauthier a réalisé les plans, Antoine s'est occupé de réaliser la structure globale. Hugo s'est chargé de la Tuyère, Léo et Antoine de l'entrée de la soufflerie, tandis que Simon a conçu la charnière et Florian a construit l'entrée de pailles. Par la suite nous avons mis en commun le travail fait individuellement pour concevoir la soufflerie dans son ensemble.



Figure 3.1 : Sécurité

4. EXPERIENCE EN SOUFFLERIE

4.1. Mise en place

4.1.1. Première version

Afin d'optimiser la réalisation de notre soufflerie, nous avons décidé de réaliser une première version de celle-ci, construite de façon plus simple et rudimentaire, afin de nous permettre de comprendre correctement son fonctionnement, ainsi que de trouver d'éventuels axes d'amélioration.

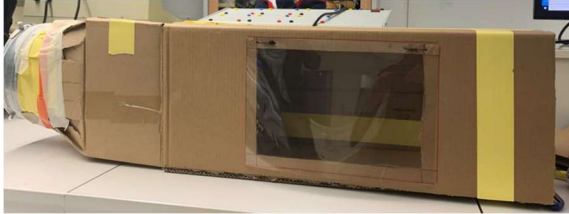


Figure 4.2: Vue de face soufflerie V1

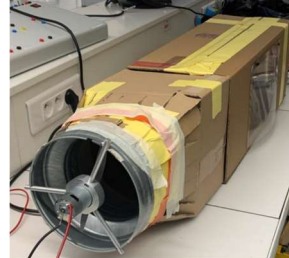


Figure 4.1 : Vue de gauche

Nous avons donc décidé de réaliser cette soufflerie en carton, pour pouvoir la construire rapidement, simplement, et pouvoir la modifier sans difficulté. A l'aide des recherches théoriques que nous avons préalablement réalisées, nous nous sommes mis d'accord pour réaliser une soufflerie en forme de pavé droit, qui se termine par une tuyère située avant l'hélice, où l'air est aspiré. Dans la tuyère, l'air passe dans une phase de contraction qui va permettre d'accélérer le flux d'air et de réduire les turbulences (effet Venturi). Il s'agit de l'une des parties les plus importante de la soufflerie permettant d'avoir un flux avec une vitesse homogène dans toute la chambre de test. L'objectif de cette chambre de contraction est d'opposer le moins de résistance possible au flux, c'est à dire qu'il faut éviter qu'il y ait une résistance directe comme avec l'utilisation d'un angle droit.

La soufflerie en carton est munie d'une face en plastique transparent afin de permettre de voir dans la soufflerie sans modifier le flux d'air dans la soufflerie. L'isolation des jointures a été réalisée au scotch.

La difficulté principale de la fabrication de cette première version a été la réalisation de la tuyère, car il fallait réaliser la jointure entre le bord carré de la partie principale de la soufflerie avec l'hélice ronde. Le carton n'était pas très déformable et se déchirait facilement. Au final, nous avons réussi à la terminer en découpant des fines lamelles de cartons que l'on a enroulées à l'aide de scotch, dans le but de réduire les déperditions d'air.

4.1.2. Version finale

Pour la version finale de notre soufflerie, nous avons décidé de nous appuyer sur notre première version, en y apportant des améliorations, ainsi qu'en la réalisant de manière plus solide avec de meilleurs matériaux (voir plan en annexe). Pour cela, nous avons construit le corps principal (partie en forme de pavé droit) en bois, en vissant les planches ensemble pour une solidité optimale. Pour la tuyère, nous avons trouvé une tuyère en plastique et avons découpé une planche de bois pour l'adapter parfaitement à l'hélice.

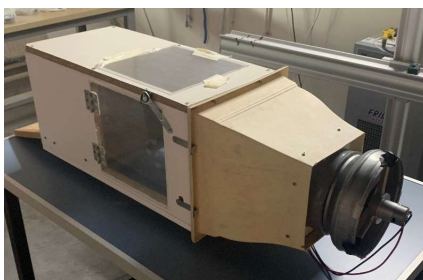


Figure 4.3 : Soufflerie version finale



Figure 4.4 : Mur de pailles

Nous avons apporté quelques modifications majeures par rapport à la première version. Tout d'abord, nous avons réalisé un trou dans la soufflerie afin que la balance puisse être posée sur le sol, ce qui facilite son équilibrage et son tarage. Ensuite, nous avons mis un « mur de pailles » en entrée de la soufflerie afin d'optimiser le flux d'air pour qu'il arrive avec le minimum de turbulences sur la voiture. De plus, nous avons remonté le sol de la soufflerie en vissant deux planches à l'entrée de la soufflerie, afin d'augmenter la vitesse de l'air à l'intérieur par effet Venturi et pour diminuer les turbulences à la surface de la balance, car l'air arrive directement à sa hauteur. Nous avons aussi rajouté une vitre en plexiglas au-dessus de la soufflerie et muni la vitre latérale de charnières. Finalement, nous avons bouché et isolé les jointures au silicone pour encore une fois optimiser l'efficacité de la soufflerie.

4.2. Résultats expérimentaux

4.2.1. Moteur

Lors de cette première expérience, nous avons alimenté le moteur qui va faire tourner l'hélice. Cependant, nous avons observé une difficulté : Le moteur ne peut pas aller à sa puissance maximale permettant une rotation de 10000 tr/min. En effet, vu que l'intensité arrivant dans nos générateurs est de maximum 3 ampères (provenant des prises de courant de l'INSA), on se retrouve bloqués et on ne peut alimenter le moteur uniquement avec 4 volts. Cela permet tout de même de le faire tourner à 5000 tr/min. Pour le faire fonctionner à son régime maximum, on a besoin de 8 ampères, que nous n'avons malheureusement pas à disposition.

4.2.2. Première version

Objectif :

L'objectif de cette série d'expériences est de déterminer l'efficacité et le bon fonctionnement de notre premier modèle de soufflerie. Pour cela on étudiera l'appui aérodynamique créé par des voitures mises dans la soufflerie (modèles de deux différentes F1) ainsi que la vitesse de l'air circulant dans la soufflerie.

Première expérience

Protocole expérimental :

On met une balance dans la soufflerie V1 sur laquelle on pose le modèle. On fait le tarage de la balance avant d'alimenter l'hélice. On prend finalement les valeurs plusieurs fois.

Résultats :

Tests : min - max - moyenne (en g)

Voiture rouge total : 0,91 - **1.76** - 2,60

Voiture noire total : 0,94 - **1.72** - 2,58

A vide (sans modèle) : +/- **1.7**



Figure 4.5 : Expérience avec voiture rouge

Deuxième expérience

Protocole expérimental :

Même configuration. Cette fois, on mesure la vitesse avec un anémomètre.

Résultats :

Tests : min - moyenne - max (en m/s)

Total : 2,7 - 3.11 - 3.50

Conclusion :

Même si une augmentation de l'appui sur la balance a lieu lorsque l'on met en route l'hélice, on observe un gain d'appui similaire avec et sans la voiture dessus. Cela signifie un problème concernant la circulation de l'air dans la soufflerie. Il est en effet censé agir que sur la voiture et non sur la balance.

4.2.3. Version finale

Protocole expérimental :

On met une balance dans la soufflerie V1 sur laquelle on pose le modèle. On tare alors la balance avant d'alimenter l'hélice. On allume un brumisateur que l'on dirige vers la soufflerie. On prend finalement les valeurs.

Résultats :

Poids voiture 1 = 37,12 g

Test avec tarage :

Test : min - max - moyenne (en g)

Voiture 1 : 0,010 - 0,020 - 0,015

Test sans tarage :

Test : min - max - moyenne (en g)

Voiture 1 : 37,79 - 38,26 - 38,03

Poids voiture 2 = 45,3 g

Test avec tarage :

Test : min - max - moyenne (en g)

Voiture 2 : 0,63 - 0,82 - 0,73

Test sans tarage :

Test : min - max - moyenne (en g)

Voiture 1 : 45,71 - 46,47 - 46,09

A vide :

Test : min - max - moyenne (en g)

Test : 0,26 - 0,42 - 0,34

Prise de la vitesse de l'air

Température = 21°C

Test : min - max - moyenne (en m.s⁻¹)

Test : 1,39 - 1,81 - 1,60



Figure 4.6 : Anémomètre

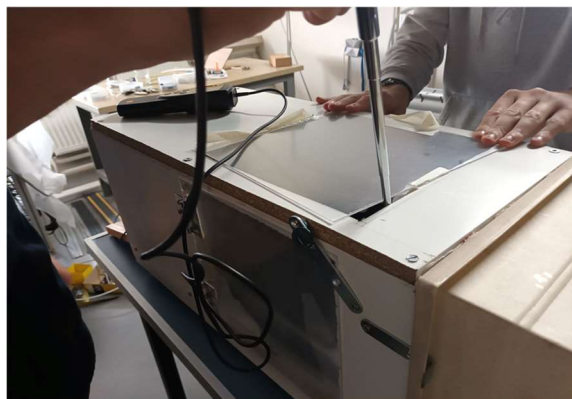


Figure 4.7 : Mesure de la vitesse de l'air

Observation des flux :

On peut observer des flux d'air autour du véhicule grâce à un ajout de fumée à l'entrée de la soufflerie :



Figure 4.8 : Voiture 1



Figure 4.9 : Voiture 2

Expérience d'observation des flux d'air :

Sur les nombreuses vidéos et photos que nous avons réalisées, nous pouvons observer différents flux d'air grâce à la présence de fumée. Cela permet d'observer l'influence des éléments aérodynamiques (présents sur les modèles réduits) sur ces flux d'air. On remarque qu'il n'y a pas de fumée (ou du moins elle n'est pas visible) sous le véhicule, mais qu'à contrario il y a beaucoup de fumée sur le véhicule. Cela confirme la création d'une dépression sous le véhicule ainsi qu'une surpression au-dessus du véhicule. Cela nous permet de prouver une certaine efficacité de l'aérodynamique des modèles réduits. Nous avons aussi voulu vérifier le phénomène « d'aspiration », où une voiture en suivant de près une autre est moins ralentie par l'air en ligne droite. Nous avons montré cela en mettant les deux modèles l'un devant l'autre (voir photo ci-dessous). On observe alors que la seconde voiture est très peu affectée par l'air, la majorité de la fumée étant déviée au-dessus d'elle par la voiture de devant.



Figure 4.10 : 2 voitures à la suite

Expérience de mesure de l'appui :

	Gain de masse moyen (g)	Gain de masse sur balance à vide (g)	Appui (g)	Force de gravité s'appliquant sur la voiture au repos en Newton suivant l'axe -Uz	Force s'appliquant sur la voiture avec l'ajout de la portance en Newton suivant l'axe -Uz
Voiture1	0,91 g	0,34 g	0,57 g	$3,6 \times 10^{-1} \text{Newton}$	$3,7 \times 10^{-1} \text{Newton}$
Voiture 2	0,79 g	0,34 g	0,45g	$4,4 \times 10^{-1} \text{Newton}$	$4,5 \times 10^{-1} \text{Newton}$

(Calcul appui : moyenne de l'augmentation de poids – moyenne de l'augmentation de poids sur la balance à vide)

Les résultats de l'expérience nous montrent une augmentation moyenne de 0,57 g pour la voiture 1 et une augmentation de 0,45 g. On remarque donc que l'expérience a bien fonctionné puisque la masse des véhicules ont augmenté avec la mise en rotation de l'hélice. De plus la voiture 1 se révèle être plus efficace que la voiture 2 car son appui est plus grand : 0,57 g contre 0,45 g, ce qui nous a paru logique car la voiture 1 est un modèle réduit d'un modèle plus récent donc théoriquement plus efficace aérodynamiquement. L'appui peut sembler très faible car il représente seulement une fraction de la masse initiale. Cependant, l'appui augmente considérablement avec la vitesse, par exemple l'appui d'une Formule 1 à 100 km/h est d'environ 150 kg, et passe à 1,5 tonne à 300 km/h. Or, dans notre cas, la vitesse mesurée à l'anémomètre est de 1,60 m/s en moyenne, soit 5,76 km/h. Cela explique le faible appui mesuré par rapport aux masses des modèles réduits.

Interprétations :

Tous les résultats obtenus avec la version finale semblent cohérents d'un point de vue aérodynamique même s'il faut bien prendre en compte leur imprécision notable. Les résultats sont très différents de ceux de la version 1, avec les mêmes modèles de voiture utilisés. Le gain d'appui est plus important dans cette seconde version et les mesures sont plus fiables, car les turbulences sur la balance ont été réduites. Les résultats obtenus avec cette seconde version sont donc utilisables, contrairement à ceux de la soufflerie en carton.

5. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Pour conclure, nous avons dans un premier temps beaucoup appris sur l'aérodynamique d'un point de vue théorique. Nous avons découvert et approfondi les forces et équations liées à l'aérodynamique. Nous avons aussi compris l'intérêt des souffleries et de la partie expérimentale dans le sport automobile, visant à améliorer les performances et la sécurité des voitures de course et de série.

Dans un second temps, ces recherches nous ont permis de réaliser de manière optimale notre soufflerie à échelle réduite. Une grande partie de notre temps a été consacré à concevoir et chercher tous les composants nécessaires à la construction de cette soufflerie ainsi qu'au déroulement de nos expériences. Nous avons pu apprendre à nous adapter au matériel disponible ainsi qu'aux besoins et demandes qui ont évolué au cours du projet. De plus, ces expériences se sont avérées concluantes.

Ce projet nous a également beaucoup apporté de connaissances lors de nos recherches sur l'aérodynamique et sur la mécanique des fluides en général. C'est un savoir que nous avons pu assimiler et qui nous servira certainement dans la suite de nos études voire dans notre métier. Nous avons également pu voir comment sont appliquées les équations que nous étudions actuellement en mécanique des fluides, ce qui nous a permis d'améliorer leur compréhension .

Enfin, ce projet nous a permis d'avoir un aperçu de ce que peut être le travail d'ingénieur. En effet, nous avons travaillé en équipe autour d'un projet commun en séparant les tâches sur l'expérimentation ainsi que sur les recherches bibliographiques. Toute l'organisation telle que la gestion de projet, le respect d'un calendrier ou les réunions d'équipe a été nécessaire au bon déroulement du projet.

En perspective d'évolution, on pourrait mettre en parallèle des résultats de simulation avec des résultats d'expérience en soufflerie. On pourrait aussi imaginer une soufflerie à échelle réelle pour avoir des résultats encore plus proches de la réalité.

6. BIBLIOGRAPHIE

Nicolas Carpentiers, "Technique F1 : Quels sont les rôles de l'aile avant ?" 22 mars 2019
<https://www.google.com/amp/s/f1i.autojournal.fr/magazine/magazine-technique/technique-f1-aile-avant/amp/>

Kidioui, Lexique automobile, « Spoiler »
<https://voiture.kidioui.fr/lexique-automobile/spoiler.html>

Thomas Callewaert Alban Fievez Rodrigue Dias, aérodynamisme automobile, "Les forces s'exerçant sur une automobile"
<https://aerodynamismeautomobile.webnode.fr/les-forces-s%27exer%C3%A7ant-sur-une-automobile/>

Michael PEREIRA, LIFSE, "Une brève histoire de l'aérodynamique et des souffleries"
<https://lifse.artsetmetiers.fr/infrastructure/la-soufflerie-aerodynamique>

Fiche-Auto, « L'aérodynamisme d'une voiture : principes et notions », 07/05/2019
<https://www.fiches-auto.fr/articles-auto/fonctionnement-d-une-auto/s-1701-l-aerodynamisme-d-une-voiture-cx-scx-trainee-etc.php>

Evaluation des interférences en soufflerie sur la prédiction numérique de l'aérodynamique des roues :
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167610522000502?fbclid=IwAR0jmsaK1ba5tJDBBRrHvobl1sZ TN1N2g OypE uM 28 b5eOuSA7 SA0>

Contribution de l'aérodynamique au développement durable et sécuritaire dans l'automobile :
<https://www.mechanicsindustry.org/articles/meca/pdf/2005/06/mi04027.pdf?fbclid=IwAR2OXOJpOXk3gu8yFCM9Ro6nWCs2lixWU2Amv2cl aoDHy9Q6htjHphX4>

Gromke, Christof. "A Vegetation Modeling Concept for Building and Environmental Aerodynamics Wind Tunnel Tests and Its Application in Pollutant Dispersion Studies." Environmental Pollution, Elsevier, 4 Dec. 2010,
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0269749110005221>

"Risques Électriques." Manuel Sécurité ISASTUR,
https://www.isastur.com/external/seguridad/data/fr/1/1_5_3_1.htm.

Stathopoulos, T. "Design and Fabrication of a Wind Tunnel for Building Aerodynamics." Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Elsevier, 3 Mar. 2003,
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0167610584900187>

Sumner, Jonathon, et al. "CFD in Wind Energy: The Virtual, Multiscale Wind Tunnel." MDPI, Molecular Diversity Preservation International, 17 May 2010,
<https://www.mdpi.com/1996-1073/3/5/989>

<https://www.mechanics-industry.org/articles/meca/pdf/2007/02/mi0267-2006.pdf>

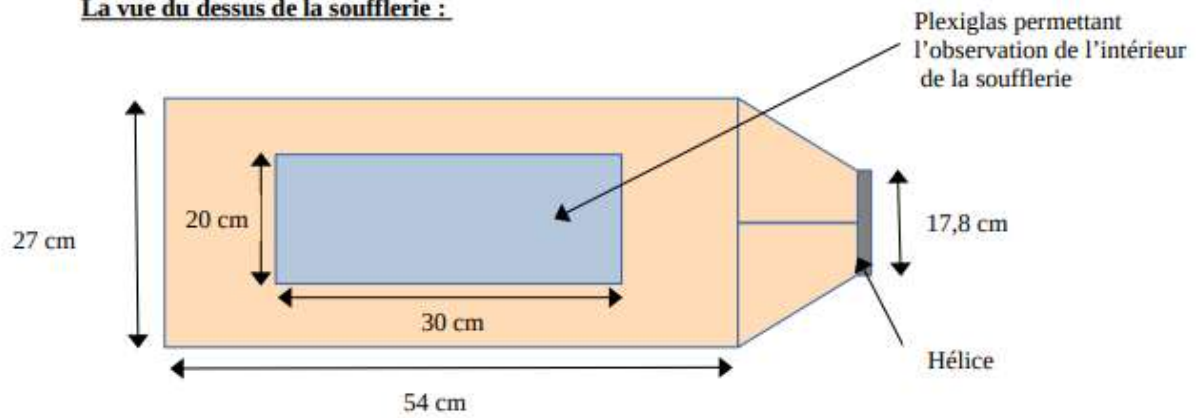
<https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/ingenierie-des-transportsth14/hydrodynamique-navires-et-bateaux-42599210/ecoulement-des-fluides-be8159/>

<https://scienceetonnante.com/2014/03/03/la-mysterieuse-equation-de-navier-stokes/>

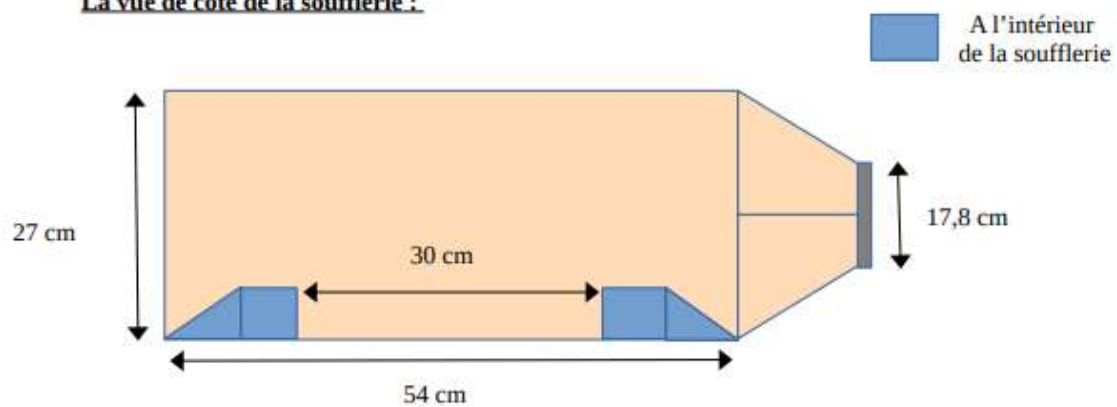
7. ANNEXES

7.1. Plan de la soufflerie

La vue du dessus de la soufflerie :



La vue de côté de la soufflerie :



La vue du dessous de la soufflerie :

