

PROJET TPE

AERODYNAMIQUE

Thème : matière et forme

Problématique : En quoi la forme d'un objet influe-t-elle sur sa résistance à un flux d'air ?

Eddy Barraud et Adrien David
Encadrés par Mme Blanco, et M. Leluec

Sommaire

Introduction

- I. Les intérêts de l'aérodynamisme
 - a. L'origine de l'aérodynamisme
 - b. Son évolution jusqu'à nos jours
 - c. Les tests actuels
- II. Le rôle de la forme
 - a. Efforts aérodynamiques
 - b. Résistance de l'air
 - c. Portance sur un avion
- III. Présentation de nos expériences
 - a. Protocole expérimental
 - b. Résultat des expériences
- IV. Résultat des simulations
 - a. Protocole expérimental
 - b. Résultat des simulations

Conclusion

Introduction

L'aérodynamisme a vu le jour à partir du moment où nous avons voulu faire voler des objets. Depuis il s'est énormément développé dans de nombreux domaines et nous avons voulu comprendre ses principaux enjeux. Le domaine étant très vaste nous nous sommes intéressé avant tout à la forme, on s'est donc posé la question : en quoi la forme d'un objet influe-t-elle sur sa résistance à l'air ?

I. Les intérêts de l'aérodynamisme

a. L'origine de l'aérodynamisme

L'aérodynamique a vu le jour à la fin du XIX^{ème} siècle, lorsque les premiers pionniers de l'aviation ont tenté de faire voler des engins "plus lourds que l'air". En effet, le vol était connu depuis plus d'un siècle avec les "plus légers que l'air", c'est-à-dire les montgolfières et les ballons (la première montgolfière a volé en 1782 à Versailles, grâce aux frères Montgolfier).



Le premier vol d'une montgolfière à Versailles, en 1782



Clément Ader s'est inspiré des ailes de chauve-souris pour construire l'Eole.

L'idée que des engins plus lourds que l'air puissent voler paraissait irréalisable pour beaucoup car le principe de l'aile n'était pas connu. Le premier vol au sens strict d'un avion eu lieu le 9 octobre 1890 en France, avec Clément Ader et son prototype, l'**Eole**. C'est de lui que nous vient le mot avion.



Peugeot L45 (1913)

A cette époque, on essaie d'abord de créer de la portance et on ne s'occupe pas de la traînée car les avions et les voitures ne vont pas encore assez vite. Ce n'est que dans les années 1910 que l'on va commencer à profiler les fuselages et les carrosseries. Dans l'automobile, c'est le constructeur Peugeot qui va

développer cela pour la première fois sur ces voitures "de course". En effet, avec l'aide de Gustave Eiffel passionné par l'aérodynamique, ils créent une soufflerie, dans la tour Eiffel car celle-ci est menacée de démolition. Il prétend donc en faire un laboratoire en aérodynamique. Il mène ses premières expériences sur la Peugeot L45 de course dont on profile toute la partie arrière, une grande première pour l'époque.

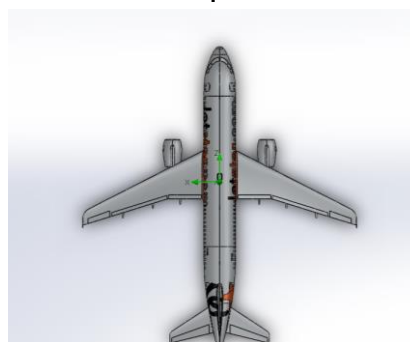
b. Son évolution jusqu'à nos jours

L'aérodynamique se développe ensuite très rapidement, notamment grâce à la Première Guerre mondiale : alors que les premiers avions qui sont entrés en guerre en 1914 n'étaient fait que de toile et de bois, et ne disposait pas d'un fuselage profilé, les avions entrés en guerre en 1918 étaient construits en acier et avaient une forme de goutte d'eau.



Après la Grande Guerre, l'aérodynamique s'étend à l'automobile où là encore, on tente de réduire la traînée. Les roues, qui étaient alors laissées à l'air libre, faisaient obstacle au flux d'air, on les a donc carénées, c'est-à-dire recouvertes par la carrosserie. Les voitures utilisaient aussi la forme de la goutte d'eau.

Encore une fois, c'est la guerre qui va considérablement accélérer les technologies, dont l'aérodynamique. A la fin de la Seconde Guerre mondiale, on découvre de nouveaux types d'ailes. Autrefois tous les avions étaient équipés de voilure "droites", on invente alors les ailes en flèches, qui sont aujourd'hui les plus utilisées, comme sur les avions de ligne avec l'exemple de l'airbus A320 que nous avons utilisé sur SolidWorks.



Airbus A320 avec ailes en flèches, modèle SolidWorks

L'aile delta apparaît par la suite, d'abord aux Etats-Unis puis dans le monde entier. L'aile delta est particulièrement adaptée au vol supersonique, c'est pourquoi de nombreux avions de chasse l'adoptent. Pour les avions de ligne, seul le célèbre Concorde et le Tupolev 144 ont utilisé cette solution, car ils volaient à des vitesses supersoniques (2 179 km/h pour le Concorde).



Depuis la fin de la Seconde Guerre mondiale, tous les avions rapides (au-delà de 600 km/h) abandonnent les ailes droites pour adopter l'une ou l'autre de ces solutions. Dans les années cinquante et soixante, d'autres types d'ailes sont essayées, notamment les ailes à géométrie variable, qui permettaient à l'avion d'avoir soit des ailes droites, soit des ailes en flèche.



Plus récemment (dans les années quatre-vingt) le constructeur russe Sukhoï testa des ailes en flèche inversée mais ce projet n'aboutit à rien, de même que bien d'autres tests, comme l'aile oblique, qui pouvait pivoter pendant le vol.



En somme voici tous les principaux types d'ailes :



Dans le domaine automobile, on décide d'appliquer le principe de la portance, mais dans le sens inverse ; on développe la déportance pour permettre aux voitures une meilleure adhérence à la piste et donc plus de stabilité surtout dans les virages. On installe alors des ailerons à l'arrière et à l'avant des voitures, les Formules 1 furent les premières bénéficiaires de cette innovation vers la fin des années soixante.



Aujourd'hui, ces ailerons ont bien évolué et sont désormais appliqués sur de nombreuses voitures de sport, de course ou de série. Ils sont même parfois rétractables : on appelle cela de l'aérodynamique active.



L'aérodynamisme possède une telle importance de nos jours que la France possède la plus grande soufflerie du monde. La soufflerie de Modane, par l'ONERA, a testé les maquettes des plus grands programmes aéronautiques français et européens comme le Concorde, les Airbus, le Mirage, le Falcon, le Rafale, et bien d'autre encore.

c. Les tests actuels

La plupart des tests aérodynamiques sont effectués en soufflerie pour l'aviation et l'automobile, c'est pour cette raison qu'aujourd'hui de nombreuses souffleries ont été construite. Notamment chez les constructeurs automobiles car les nouveaux objectifs de consommation de carburant et de pollution les obligent à optimiser la forme de leurs véhicules.

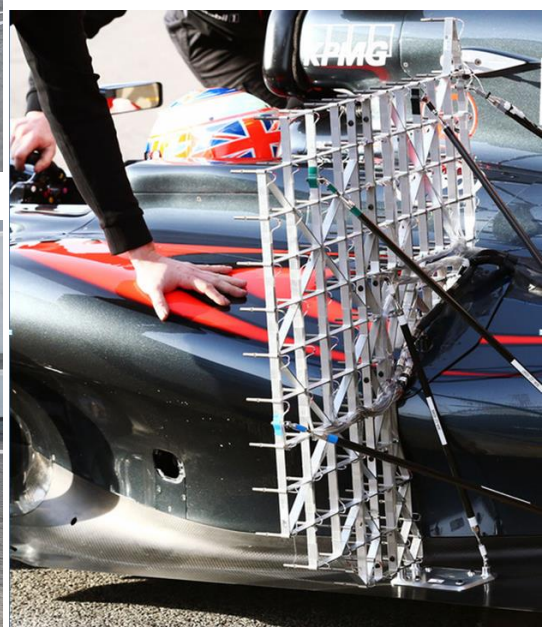
Actuellement de nombreuses entreprises utilisent la simulation numérique suite au progrès des nouvelles technologies comme nous l'a permis Flow Works sur SolidWorks que nous vous présenterons en fin de dossier. Bien entendu cette technique de simulation n'est que complémentaire face aux souffleries et aux tests réels qui sont réalisables par différentes techniques. On relève notamment l'utilisation de tubes de Pitot, ils permettent de mesurer la vitesse d'un flux d'air à un endroit spécifique par différenciation de pression de l'air. De plus il existe des peintures flow-viz (pour flow visualization) qui consistent en une goutte d'huile mélangée à un colorant. On dépose cette goutte à un endroit précis sur le véhicule pour qu'avec la vitesse du flux d'air elle crée une trace. Ces techniques sont notamment utilisées en Formule 1 et en aviation :



Flow-viz sur une formule 1



Sondes pitos sur une formule 1



II. Le rôle de la forme

a. Efforts aérodynamiques

Un objet en mouvement dans un fluide subit des efforts dans un repère x, y, z. Ces efforts sont dus à la résistance du fluide face à l'objet. Plusieurs facteurs induisent cette résistance, comme la matière de contact, la vitesse, la pression du fluide, mais aussi et surtout la forme de l'objet. On parle de forme aérodynamique lorsque l'on optimise les efforts exercés par le fluide. Il existe une force sur chaque axe :

- Une force de traînée, sur l'axe x, nommé F_x
- Une force de dérive, sur l'axe y, nommé F_y
- Une force de portance, sur l'axe z, nommé F_z

L'expression de la force est de la forme générale :

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

- ρ = masse volumique de l'air (ρ varie avec la température et la pression, dans notre cas il vaut $1,225 \text{ kg/m}^3$)
- S = surface de contact
- C = coefficient aérodynamique
- V = Vitesse de déplacement

Les efforts sont généralement mesurés expérimentalement ou par simulation numérique.

Pour mesurer l'efficacité aérodynamique on utilise des **coefficients aérodynamiques**, ils permettent de comparer l'efficacité aérodynamique de plusieurs formes, il y en a un par force et donc par axe :

- C_x : le coefficient de traînée
- C_y : le coefficient de portance latérale
- C_z : le coefficient de portance

L'expression des coefficients aérodynamiques s'expriment par :

$$C_{x,y,z} = \frac{F_{x,y,z}}{\frac{1}{2} \times \rho \times V^2 \times S}$$

Pour donner un ordre de grandeur voici les coefficients de traînés de formes basiques. →

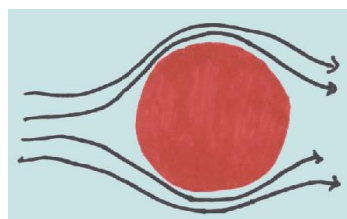
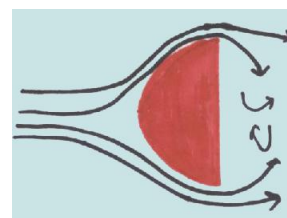
Forme		Coefficient de traînée
Sphère	→ 	0.47
Demi-sphère	→ 	0.42
Cube	→ 	1.05
Corps profilé	→ 	0.04
Semi-corps profilé	→ 	0.09

Mesures des coefficients de traînée

b. Résistance de l'air

En chemin, l'écoulement de l'air est laminaire, à l'arrivée sur un objet, il devient turbulent, et derrière, il est tourbillonnaire, créant ainsi une dépression qui aura tendance à aspirer l'objet vers l'arrière. La résistance de l'air correspond à l'aspiration créée par cette dépression. Une grande partie du travail des ingénieurs aéronautiques consiste à concevoir des formes d'avion telles que la résistance de l'air soit la plus faible.

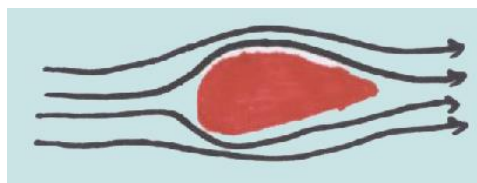
Dans le cas d'une **demie-sphère**, la résistance de l'air est légèrement moindre car les particules d'air contournent plus facilement la surface, cependant, la dépression est encore très forte à l'arrière de la demie-sphère.



Si on prend maintenant une **sphère entière**, l'écoulement de l'air se fera beaucoup plus facilement, cependant, une légère dépression subsiste à l'arrière de la sphère, ce n'est donc pas la forme aérodynamique parfaite.



Il n'y a en réalité aucune forme aérodynamique parfaite, cependant, on peut déformer cette sphère de manière à obtenir une forme **biseautée**, de cette manière, la résistance de l'air est la plus faible. Tout comme la Microjoule qui est de cette forme !



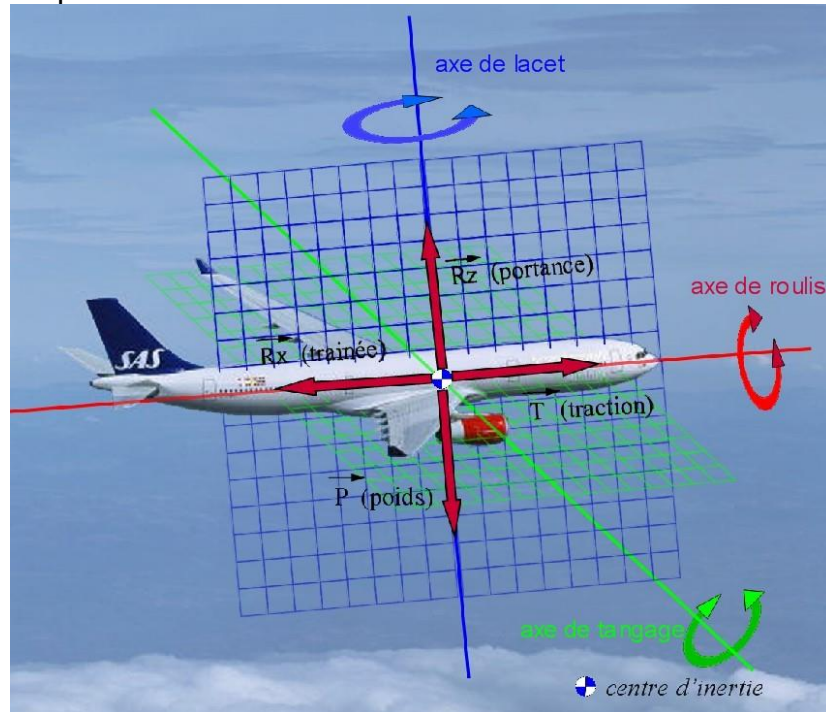
c. Portance d'un avion

En vol, un avion subit quatre grandes forces qui s'exercent sur le centre de gravité de l'avion.

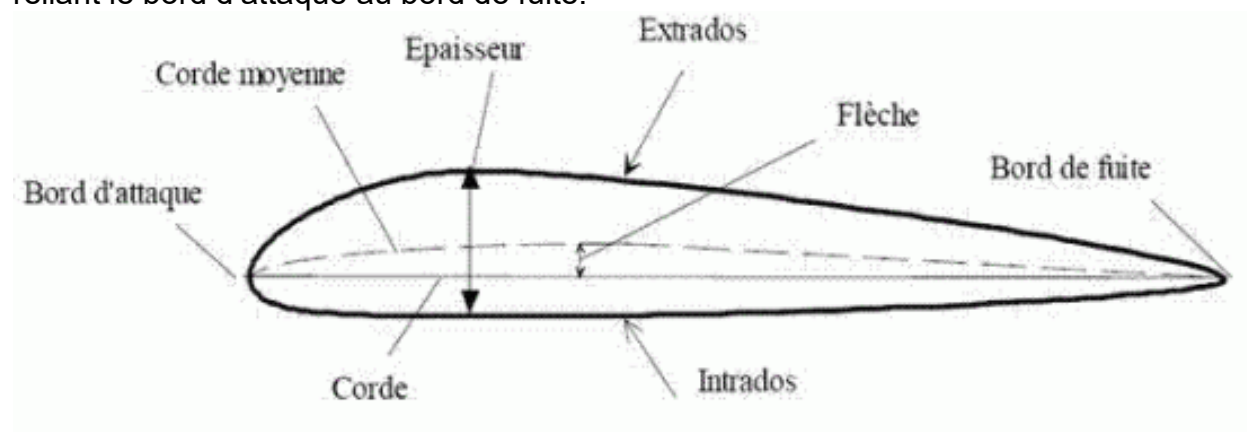
Sur le plan vertical, il y a tout d'abord la **pesanteur**, qui tire l'avion vers le sol, et la **portance**, qui au contraire le fait monter. En vol horizontal à une vitesse constante, **la portance équilibre la force exercée par la pesanteur**.

Sur le plan horizontal, il y a tout d'abord la **traînée**, que nous avons vu ci-dessus, mais aussi la force qui permet à l'avion de se mouvoir, c'est à dire soit la **traction** de l'hélice, ou la **poussée** des réacteurs.

Schéma récapitulatif :



La forme d'une aile d'avion est courbe, et non pas plane, pour faciliter l'écoulement de l'air et pour que l'air "appui" plus sur l'aile. Cette adhérence de l'air permet d'éviter l'écoulement tourbillonnaire qui se crée sur le dos de l'aile, cependant, une dépression est nécessaire pour faire voler l'avion. Le dos de l'aile est appelé **extrados**, son ventre est appelé **intrados**, le bord le plus bombé de l'aile, celui qui fait face à l'écoulement de l'air est nommé **bord d'attaque**, le bord opposé est le **bord de fuite**. On pourra également prendre la **corde** qui est le segment reliant le bord d'attaque au bord de fuite.



III. Présentation de nos expériences

a. Protocole expérimental

Nous avons réalisé plusieurs expériences afin de visualiser l'écoulement de l'air. Pour se faire nous avons utilisé de la vapeur d'eau guidée dans un tuyau, ce qui nous a permis d'observer le flux invisible à l'œil nu. Nous avons repris le principe d'une soufflerie. Après plusieurs essais, nous avons améliorés les conditions d'expérimentations en ajoutant un tunnel et un ventilateur en sortie pour mieux guider le flux et limiter les perturbations extérieures.

Matériel :

- Diffuseur ultrasonique
- Deux ventilateurs
- Gaine électrique
- Bac d'eau
- Générateurs électriques
- Maquettes d'avions et de voitures
- Tunnel en plastique et en bois

Protocole :

1. Montage de l'ensemble brumisateur, ventilateur, gaine électrique, bac d'eau,
2. Faire chauffer l'eau grâce au brumisateur et attendre que la vapeur se forme,
3. Mise sous tension des ventilateurs à vitesse moyenne,
4. Tests sans gaine : on dirige le flux sur les maquettes une par une,
5. Tests avec gaine : on répète l'étape 4 dans une boîte en plastique et avec un ventilateur en sortie

b. Résultat des expériences

- Premiers essais

Nous avons réalisé des premiers essais non concluant. Effectivement le flux de vapeur n'était pas assez visible à l'œil nu et encore moins sur vidéo. De plus les courants d'air provoquaient des perturbations et faussaient nos résultats. Il nous fallait donc trouver un nouveau protocole pour améliorer nos conditions d'expérience.

- **Seconds essais**

On a donc décidé de réaliser les expériences sur fond noir, lumières éteintes et fenêtres et portes fermées. Ces conditions étaient bien plus optimales et nous ont permis de réaliser nos tests. Le fond noir était pratique mais il subsistait quelques perturbations. Pour y remédier nous avons utilisé un ventilateur en sortie et nous avons placé le tout dans un tunnel en planche de bois puis une boîte en plastique faute de transparence. Voici une vue globale du projet :



A partir des résultats on peut faire un classement des différents modèles par efficacité aérodynamique :

1. Sans trop de surprise la MicroJoule l'emporte avec une forme tellement aérodynamique que nous n'avons observé aucune perturbation. Le véhicule semble épouser parfaitement le flux sans même le perturber.



2. En seconde position se trouve la Peugeot 908 HDI FAP. Elle doit peut-être sa place à la perte de son aileron arrière mais sa forme reste très bien pensée et le flux n'est presque pas perturbé même sur les côtés de la voiture.



3. La Williams FW18 remporte quant à elle la troisième place. Son aileron arrière dévie légèrement le flux sans trop le perturber mais ce sont ses roues à l'air libre qui l'ont désavantagée.



4. L'Audi A4 est en quatrième position. Sa forme très imposante dévie énormément le flux et provoque de nombreuses perturbations notamment sur le parechoc.



5. En dernière place nous pouvons mettre le cylindre. De profile, il crée des perturbations sur les côtés et de face, il bloque et percute le flux et fait encore plus de turbulences.



IV. Résultat des simulations

a. Protocole expérimental

Nous avons réalisé des simulations sur FlowWorks, complément du logiciel de CAO SolidWorks de Dassault Système. Ces tests ont été effectués avec différents modèles dont le modèle de la MicroJoule par La Joliverie. Nous avons également téléchargé des modèles sur le site internet GrabCad. Puis nous avons calculé le maître couple, qui correspond à la surface en contact avec l'air vu plus haut, pour ensuite lancer une simulation sur FlowWorks. Cette simulation nous a permis de trouver la force exercée sur l'axe X et par la suite calculer le C_x .

Protocole :

1. Ouvrir le fichier dans SolidWorks
2. Définir les paramètres de l'expérience (type de fluide, vitesse, pression atmosphérique, altitude, domaine de définition)
3. Sélectionner les objectifs (vitesse, force), et insérer une équation pour obtenir directement le C_x
4. Lancer les calculs
5. Afficher les résultats des objectifs et l'animation du flux d'air

b. Résultat des simulations

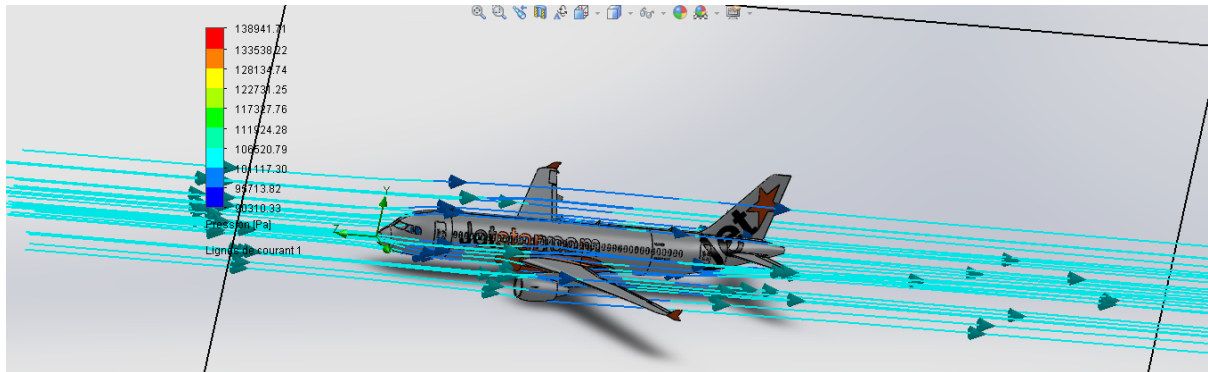
- Airbus A320

Nous avons utilisé le modèle de l'airbus A320 disponible gratuitement sur GrabCad. La simulation a été paramétrée pour correspondre à la réalité. L'avion se situe à 12500 mètres d'altitudes, à -43.5°C , avec une pression atmosphérique de 300hPa et donc une masse volumique de l'air de 0.46 kg/m^3 , le tout avec une vitesse de croisière de 828 km/h. Le calcul a pris plus de 30 minutes à pleine puissance pour obtenir ces résultats :

Nom	Unité	Valeur
Pression totale	Pa	43973.09
Température (Fluide)	$^{\circ}\text{C}$	-45.46
Densité (Fluide)	kg/m^3	0.46
Vitesse (Z)	m/s	229.722
Energie turbulente 1	J/kg	0.089
GG Force (Z) 1	N	231430.692
C_x	-	0.15

$$C_x = \frac{F_x}{0.5 * p * V^2 * S} = \frac{231430.692}{0.5 * 0.46 * 229.722^2 * 122.4} = 0.15$$

Donc l'airbus est très aérodynamique car ce C_x est très faible et prouve que l'avion optimise les efforts pour consommer le moins possible. Une représentation en ligne de courant nous a permis de visualiser la propagation de l'air sur le fuselage de l'avion et force est de constater que les perturbations sont minimales voir quasiment inexistantes. Le fluide ne tourbillonne pas à l'arrière mais reste laminaire comme nous le montre cette capture d'écran :

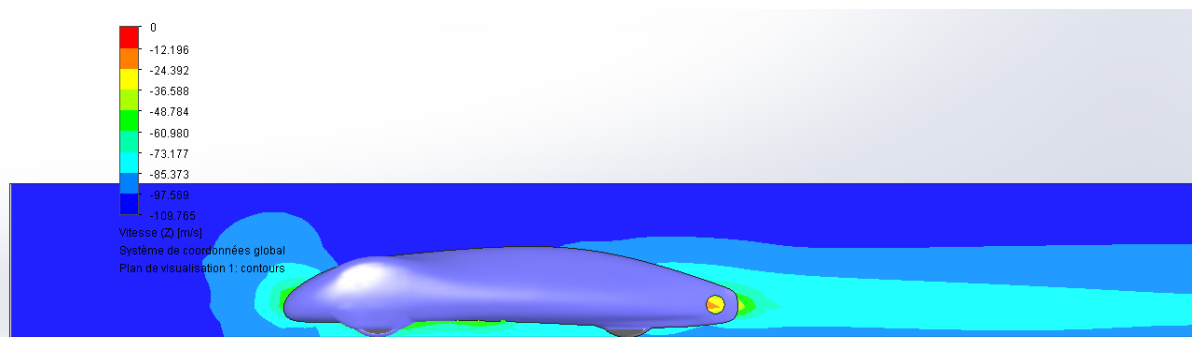


- Microjoule

Nom	Unité	Valeur
Vitesse (X)	m/s	97.590
Force (X)	N	0.172
Cx	-	0.133

$$C_x = \frac{0.01187}{0.5 * 1.225 * (27.7)^2 * 192 * 10^{-6}} = 0.13$$

Le modèle Microjoule possède une forme étudiée pour avoir une traînée le plus faible possible à tel point que nous n'observons aucunes turbulences.

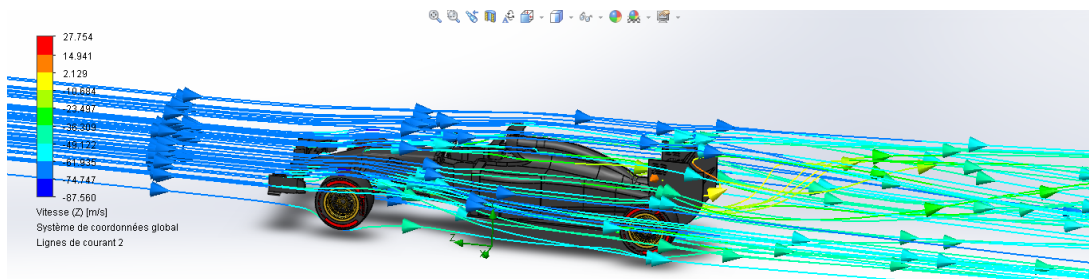


- Lotus formule 1

Nom	Unité	Valeur
Vitesse (X)	m/s	69.032
Force (X)	N	2532.134
Cx	-	0.3579751

$$C_x = \frac{2411}{0.5 * 1.225 * (69)^2 * 2.4234} = 0.35$$

On peut remarquer qu'il y a quelques tourbillons due aux ailerons notamment celui de l'arrière pour créer un compromis entre déportance et trainé.

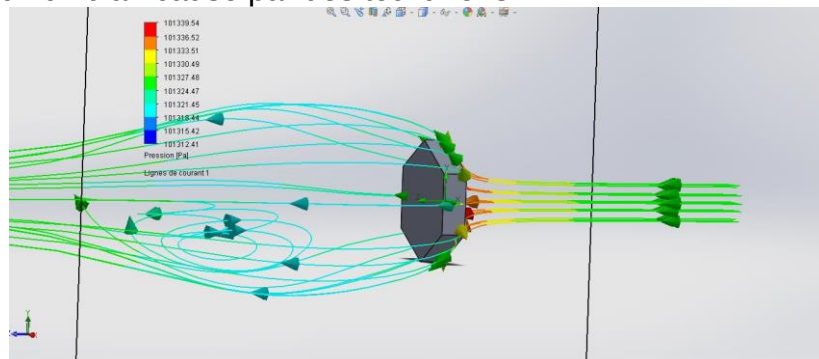


- Hexagone

Nom	Unité	Valeur
Vitesse (X)	m/s	12.727
Force (X)	N	0.154
Cx	-	0.972

$$C_x = \frac{0.151791997}{0.5 * 1.225 * (14)^2 * 16.02 * 10^{-4}} = 0.97$$

On peut constater que l'hexagone génère une force de trainé très importante illustré par un Cx proche de 1. La force exercée sur cet objet est majoritairement due à la dépression du flux d'air causé par des tourbillons.



Conclusion

Nous avons donc réalisé deux types d'expériences, une réelle et une autre par simulation informatique. Dans la première expérience nous avons pu constater la difficulté d'être précis à cause des turbulences extérieures mais les différences entre les modèles étaient visibles. La simulation nous a permis d'approfondir et d'affirmer les résultats précédents. De plus nous avons compris qu'il y avait beaucoup d'enjeux derrière l'aérodynamisme quel que soit le domaine d'application, tant dans l'aviation que dans l'automobile, que ce soit pour des raisons économiques, d'adhérence avec la déportance ou tout simplement de portance. Néanmoins ce domaine reste très complexe et difficile à appréhender, ce projet nous a permis d'acquérir de nouvelles compétences et nous a prouvé que les formes des véhicules possèdent un véritable impact aérodynamique. On peut maintenant s'interroger sur cet impact dans d'autres fluides comme l'eau où la densité est bien plus importante et donc provoque plus de forces.

Sources :

<https://madmagz.com/fr/magazine/121611>
http://www.deleze.name/~marcel//physique/TemperaturesEbullition/table_masse_vol.html
<http://pierre.garde.free.fr/Pages%20HTML/aerodynamique.htm>
<http://tpe-aerodynamisme.e-monsite.com/pages/3-le-profil-de-l-aile.html>
<http://aerodynamique.e-monsite.com/pages/petite-histoire-de-l-aerodynamique.html>
<http://pierre.garde.free.fr/Pages%20HTML/aerodynamique.htm>