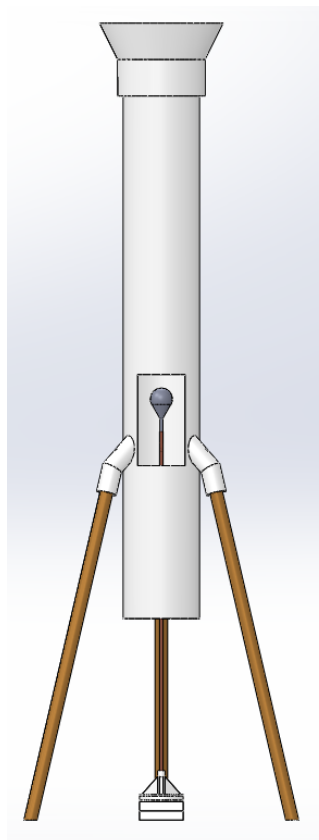


## **Amélioration d'un banc de mesure de frottements visqueux à vocation pédagogique**



**Etudiants :**

**Mathis LOTTERIE**

**Pascale SALLÉ**

**Julie VACANDARE**

**Olivier REBRIOUX**

**Axel TARTENSON**

**Léopold VALE**

**Enseignant-responsable du projet :**

**Clément KELLER**



Date de remise du rapport : **15/06/2020**

Référence du projet : **STPI/P6/2020 – 40**

Intitulé du projet : **Amélioration d'un banc de mesure de frottements visqueux à vocation pédagogique**

Type de projet : **Initialement expérimental puis transformé en théorique à la suite du Covid-19)**

Objectifs du projet :

**Réalisation d'un banc expérimental permettant la mise en évidence et la mesure de frottements visqueux.**

**Approfondir nos connaissances concernant les frottements. Expérimenter le travail de groupe. Analyser des données expérimentales.**

Mots-clefs du projet : **Banc / Frottements / Visqueux**

## TABLE DES MATIERES

1. Introduction.....	5
2. Méthodologie / Organisation du travail.....	5
3. Travail réalisé et résultats.....	6
3.1. Partie Théorique.....	6
3.1.1. Frottements.....	6
3.1.1.1. Frottements Visqueux.....	6
3.1.1.2. Nombre de Reynolds.....	7
3.1.1.2.1. Les différents régimes selon les valeurs du nombre.....	7
3.1.1.2.2. Une Approche intuitive.....	8
3.1.1.3. Régime laminaire et régime turbulent.....	8
3.1.2. Étude de cas.....	9
3.1.2.1. Le cycliste.....	9
3.1.2.1.1. Les forces et la résistance.....	9
3.1.2.1.2. Comment minimiser la traînée aérodynamique.....	10
3.1.2.1.3. Rouler en peloton.....	10
3.1.2.2. La consommation d'une voiture.....	12
3.1.2.3. Facteurs pour limiter les frottements.....	13
3.2. Protocole expérimental.....	14
3.2.1. Le dispositif.....	14
3.2.2. Protocole.....	16
4. Conclusions et perspectives.....	16
5. Bibliographie.....	17
6. Annexes.....	18
6.1. Modélisation du dispositif.....	18

## 1. INTRODUCTION

L'un des enjeux de l'innovation mécanique est la maîtrise des frottements, en effet, ces derniers sont problématiques car ils provoquent des dissipations d'énergie, et donc des pertes de rendement. Or le rendement est un élément clé de toute production mécanique, les constructeurs essaient d'ailleurs d'avoir toujours de meilleurs rendements, car perdre de l'énergie signifie également perdre de l'argent et de l'efficacité. Ce n'est pas le cas uniquement en mécanique. Par exemple, un cycliste se mettra dans une position particulière pour limiter les frottements avec l'air en descente ou en ligne droite en plaine, et ainsi aller plus vite en se fatiguant moins.

Il existe deux types de frottements quand on évoque les forces ou de couples de frottements. D'abord les frottements secs, indépendants de la vitesse de glissement du solide, qui ont lieu entre deux solides non séparés par un lubrifiant. Dans ces frottements secs on sépare également :

- Le frottement sec statique qui tend à garder un corps en état statique (ex : un objet immobile sur un support alors qu'il devrait être entraîné par son poids)
- Le frottement sec cinétique ou dynamique qui cherche à réduire l'énergie cinétique d'un solide glissant sur une surface non lubrifiée (ex : le frein sur une roue)

Ensuite, les frottements visqueux (ou fluides) sont associés au déplacement d'un objet dans un fluide, le fluide pouvant être de l'eau, de l'air ou encore de l'essence. Ils dépendent de la vitesse relative du solide et du fluide, de la géométrie du solide, de sa surface de contact avec le fluide ou encore de la viscosité du fluide<sup>1</sup>.

Ici, nous allons nous intéresser uniquement aux forces de frottements visqueux, et à la méthode que nous avons utilisé pour mettre en évidence ces frottements en fonction des différentes géométries des objets.

Nous allons d'abord voir ce que sont ces frottements par une approche théorique, cette approche qui sera ensuite vérifiée par les expérimentations mises en place grâce au dispositif et au protocole adoptés dans ce projet. Le but étant de permettre aux futurs étudiants de STPI1 de visualiser plus facilement ce phénomène de frottement visqueux pas nécessairement évident à saisir dans le cadre de l'EC de P2, et ainsi de ne pas se limiter à la vision basique des frottements.

## 2. MÉTHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL

Afin d'atteindre nos objectifs, nous avons réalisé une soufflerie artisanale verticale qui nous permettait de mesurer des différences de masse dues aux frottements. En nous basant sur le projet de l'année précédente, il nous a été possible de développer une solution technique sans refaire les mêmes erreurs de manipulation et ainsi espérer des résultats plus exploitables.

Nous nous sommes répartis en deux groupes de trois personnes pour le rapport, l'un s'occupant du cadre général et l'autre de l'approfondissement théorique de la notion de frottement. Cependant, les événements liés au Covid-19 nous ont fortement ralenti au niveau des expérimentations, ce qui a fait que nous avons tous travaillé seulement sur la partie théorique.

---

<sup>1</sup> pour la définition des frottements visqueux : [http://public.iutenligne.net/mecanique/mecanique-du-solide/charbonnieras/mecanique/133\\_frottement\\_fluide.html](http://public.iutenligne.net/mecanique/mecanique-du-solide/charbonnieras/mecanique/133_frottement_fluide.html)

pour la définition des frottements secs : <https://babel.cegep-ste-foy.qc.ca/profs/rfoy/capsules/frott.html>

### 3. TRAVAIL RÉALISÉ ET RÉSULTATS

#### 3.1. Partie Théorique

Dans cette étude, nous avons fait le choix de simplifier les phénomènes de frottement en ne tenant pas compte du phénomène de couche limite<sup>2</sup>.

##### 3.1.1. Frottements

Le frottement désigne les phénomènes qui dissipent de l'énergie inutilement, qui naissent dans les zones superficielles de deux corps s'appuyant l'un sur l'autre en se déplaçant l'un par rapport à l'autre. Ils s'opposent à ce mouvement relatif entre les corps. On notera qu'il existe plusieurs types de frottements notamment en fonction du type de la zone superficielle entre les deux corps:

- Les frottements secs, entre 2 solides, indépendant de l'aire de contact et de la vitesse relative.
- Les frottements visqueux, entre 2 solides séparés par un lubrifiant ou le déplacement d'un objet dans un fluide, dépendant de la vitesse relative entre les corps.

##### 3.1.1.1. Frottements Visqueux

Les frottements visqueux sont l'un des deux types de forces (ou couples) de frottements. Ceux-ci s'appliquent à un corps plongé dans un fluide, comme de l'air par exemple. Contrairement aux frottements solides qui eux ne dépendent nullement de la vitesse du corps sur lequel s'appliquent ces forces, les forces de frottement visqueux dépendent de la vitesse relative du corps par rapport au fluide dans lequel il est plongé. Ces forces sont alors responsables d'une perte d'énergie pour ce corps. Elles peuvent être dues à deux facteurs : soit à la viscosité du fluide pour les forces dans la couche limite, soit à une différence de pression entre l'avant et l'arrière du corps étudié. Pour calculer cette force de frottement visqueux, on utilise la formule ci-dessous :

$$d\vec{F} = \eta \frac{d\vec{v}_{\parallel}}{dz} dS, \text{ avec}$$

- $dS$  une portion de surface de la paroi de l'objet
- $d\vec{F}$  la force de frottement exercée par le fluide sur la surface  $dS$
- $\vec{v}_{\parallel}$  la vitesse tangentielle, c'est-à-dire parallèle à la paroi
- $z$  la distance à la surface
- $\eta$  la viscosité du fluide

---

<sup>2</sup> Si vous souhaitez plus de renseignement sur la couche limite : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Couche\\_limite](https://fr.wikipedia.org/wiki/Couche_limite)

### 3.1.1.2. Nombre de Reynolds

#### 3.1.1.2.1. Les différents régimes selon les valeurs du nombre

Considérons un objet sphérique plongé dans un fluide. Regardons les forces exercées sur cette sphère en fonction du nombre de Reynolds noté  $Re$ .

- Si  $Re \ll 1$  alors l'écoulement est dit laminaire.

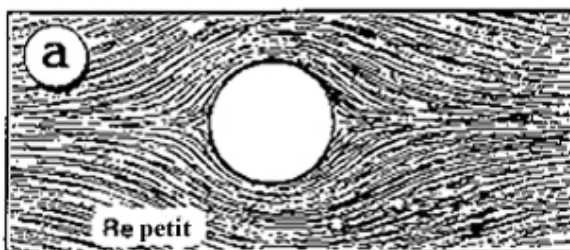


Figure 1: Sphère subissant un écoulement laminaire

- Si  $Re$  est plus élevé, des tourbillons en aval de l'objet se créent (b), puis la sphère est suivie de tourbillon formant une "allée de Karman" (d)

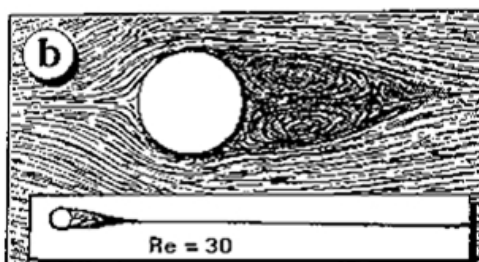


Figure 2: Sphère subissant un écoulement intermédiaire entre laminaire et turbulent



Figure 3: Allée de Karman

- Si  $Re > 2500$  alors l'écoulement est dit fortement turbulent.

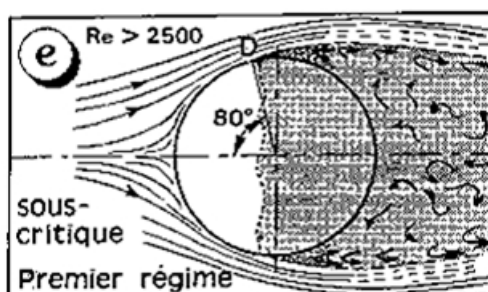


Figure 4: Sphère subissant un écoulement turbulent

### 3.1.1.2.2. Une Approche intuitive

Si l'écoulement d'un fluide semble se faire de manière bien parallèle on parle d'écoulement laminaire et s'il est le siège de multiples tourbillons, on dit que l'écoulement est turbulent. L'écoulement dépend principalement de la viscosité du liquide. En effet, elle agit comme un frottement qui va freiner les perturbations et empêcher les tourbillons d'apparaître. Mais comment savoir lorsque cette viscosité est suffisante pour freiner l'apparition des tourbillons turbulents ?

Si la viscosité tend à faire disparaître les tourbillons, l'inertie les propage. Il va donc falloir comparer la viscosité à l'inertie d'écoulement.

Prenons tout d'abord l'exemple d'un skieur. Lorsqu'un skieur arrive en bas d'une pente, à un endroit où la piste est plate, quelle est la distance qu'il va parcourir ? Cela va évidemment dépendre de la vitesse qu'il a acquise (son inertie) et de l'intensité des frottements qui vont le freiner. Considérons l'énergie cinétique de formule  $\frac{1}{2}mv^2$  pour quantifier l'inertie et une force proportionnelle à la vitesse pour exprimer les frottements d'expression  $kv$  avec  $k$  le coefficient de frottement. Le rapport des deux est  $\frac{mv}{k}$ , qui correspond environ à la distance que le skieur va parcourir.

Retournons à notre liquide et appliquons-lui un raisonnement similaire à celui du skieur. Considérons que le fluide s'écoule dans un tube de diamètre  $D$ , à une vitesse moyenne  $v$ . Si  $\rho$  est la masse volumique du fluide, l'énergie cinétique du fluide est proportionnelle à  $\rho v^2$ .

La viscosité  $\mu$  étant la résistance d'un fluide à son mouvement, elle est d'autant plus élevée que la vitesse  $v$  est importante et que le diamètre  $D$  du tube est petit. Ainsi l'énergie dissipée par les forces de viscosité est proportionnelle à la quantité  $\frac{\mu v}{D}$ .

Le ratio inertie/frottement dans le liquide correspond donc au rapport des deux formules trouver précédemment. Ce ratio correspond au nombre de Reynolds :

$$\mathfrak{R} = \frac{\rho v D}{\mu}$$

### 3.1.1.3. Régime laminaire et régime turbulent

On peut distinguer deux régimes différents : le régime laminaire et le régime turbulent. Commençons par le régime laminaire qui correspond à un nombre de Reynolds très faible. Il peut être appliqué à des corps ayant un mouvement relatif par rapport au fluide, qui ici sera de l'air, de moins de 5 m/s. Dans ce cas, l'écoulement du fluide se fait de manière parallèle. On calcule alors la force de frottement à l'aide de la formule suivante, aussi appelée loi de Stokes :

$$\vec{F} = -k\eta\vec{v}, \text{ avec}$$

- $k$  coefficient caractéristique de la géométrie du solide (par exemple pour une boule de rayon  $R$ , on a  $k=6\pi R$ )
- $\eta$  coefficient de viscosité du fluide qui dépend de la température
- $\vec{v}$  vitesse relative du corps par rapport au fluide



Le second régime, le régime turbulent apparaît lorsque le  $Re$  est supérieur à 2500. Il est applicable à l'étude d'un corps dont sa vitesse relative par rapport au fluide (l'air) est supérieure à 5 m/s. Dans ce cas, pour calculer la force de frottement, on utilise la formule suivante :

$$F = \frac{-1}{2} \rho C S v^2, \text{ avec}$$

- $\rho$  la masse volumique du fluide
- $C$  le coefficient de traînée obtenu expérimentalement
- $S$  la surface perpendiculaire à la vitesse du fluide
- $v$  la vitesse relative de l'objet par rapport au fluide

Nous pouvons donner également quelques ordres de grandeurs pour le coefficient  $C$  en fonction de la géométrie de l'objet étudié :

- $C \approx 1.32$  pour un disque
- $C \approx 0.45$  pour une boule
- $C \approx 0.04$  pour une demi-boule finie par un cône

Entre le régime laminaire et le régime turbulent, on constate un état d'écoulement intermédiaire à mi-chemin entre les caractéristiques d'un écoulement laminaire et d'un écoulement turbulent.

### 3.1.2. Étude de cas

#### 3.1.2.1. Le cycliste

##### 3.1.2.1.1. Les forces et la résistance

Il existe plusieurs forces qui s'opposent à l'avancement du cycliste : la gravité, la résistance de friction et la résistance aérodynamique qui est constituée de la force de traînée et de la force de portance. Dans le cas d'un cycliste, la force de portance est considérée comme étant négligeable.

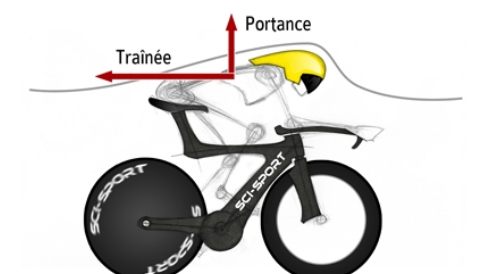


Figure 5: Forces subies par un cycliste

Pour un cycliste à grande vitesse, la résistance aérodynamique se révèle être 90 % de la résistance globale :

$$R_A = 0,5 \times \rho \times A_p \times C_x \times v_f^2, \text{ avec}$$

- L'aire frontale projetée du cycliste et de sa bicyclette notée  $A_p$  (en  $m^2$ )
- Coefficient de traînée  $C_x$  (sans unité)
- La masse volumique de l'air  $\rho$  (en  $kg \cdot m^{-3}$ )
- La vitesse d'écoulement du fluide sur le corps du cycliste  $v_f$  (en  $m/s$ )

D'autres facteurs influent aussi tels que la vitesse d'écoulement du fluide sur le corps (la force et l'orientation du vent) ainsi que la masse volumique de l'air qui dépend de la pression et donc de l'altitude.

### 3.1.2.1.2. Comment minimiser la traînée aérodynamique

En cyclisme, la traînée aérodynamique est composée de deux formes de traînée : la traînée de frottement et de la traînée de pression qui est plus importante que la première. La traînée de pression représente la différence de pression qui existe entre l'avant et l'arrière du corps du cycliste en mouvement. Réduire la traînée de pression revient à optimiser la taille générale et la forme du corps en mouvement. Enfin, la traînée de frottement dépend quant à elle de la taille et de la rigidité de la surface.

La position des bras est un facteur supplémentaire qui permet d'améliorer  $A_p$  jusqu'à diminuer  $R_A$  de 28 %. La modification de la hauteur du guidon permet quant à elle de diminuer  $A_p$  de 5,8 %.

Enfin, il est important pour chaque cycliste de trouver le bon compromis entre production de puissance, aérodynamisme et ergonomie. En effet, les positions les plus aérodynamique ne sont pas forcément les plus confortables ou permettant le plus de puissance et inversement. La meilleure solution est donc de tester sur le terrain et en laboratoire en faisant varier les différents paramètres.

### 3.1.2.1.3. Rouler en peloton

La résistance aérodynamique est atténuée lorsque les cyclistes roulent en peloton. Comme le schéma suivant l'indique, ce sont les coureurs en tête de peloton qui doivent fournir un effort plus intense pour pénétrer dans l'air.

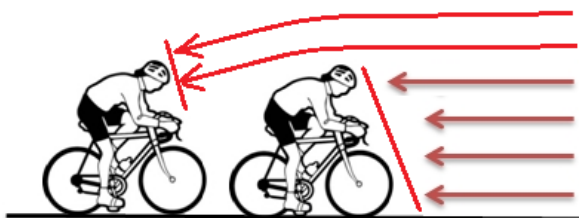


Figure 6: Forces subies dans un peloton

Les flèches rouges représentent la résistance due aux forces aérodynamiques.

Une étude menée aux Pays-Bas par l'université d'Eindhoven<sup>3</sup> a permis de modéliser les phénomènes aérodynamiques dans le peloton.

## Les meilleures places au centre et à l'arrière du peloton

En pourcentage de résistance à l'air

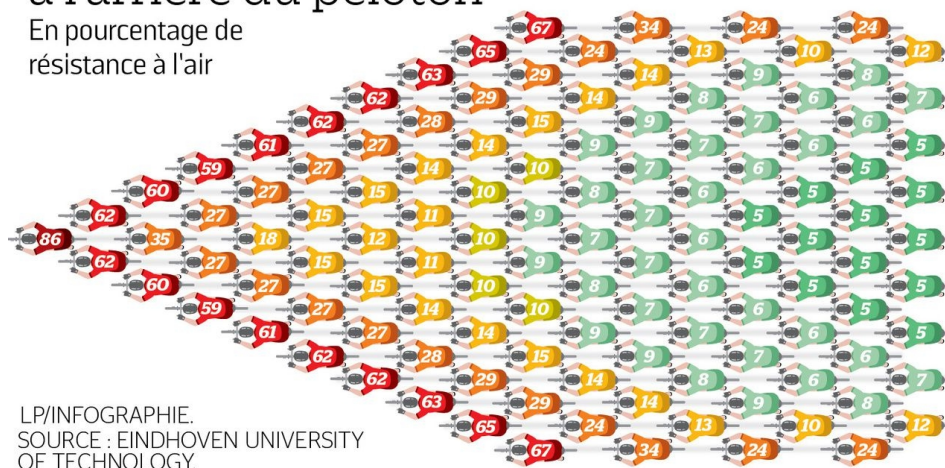


Figure 7: Résultat de l'étude néerlandaise

Le scientifique, passionné de vélo, a pu mettre des chiffres sur le ressenti des membres du peloton. « Le coureur a l'impression d'être à l'abri et c'est bien vrai, confirme-t-il. Aux deux derniers rangs de notre étude, pour un effort qui permettrait normalement à un cycliste seul de rouler à 12 km/h, et bien grâce aux phénomènes d'aspiration et d'écoulement de l'air, celui atteint en fait la vitesse de 54 km/h. »

Cinquante-quatre heures de calcul ont été nécessaires aux ordinateurs de la société Ansys pour résoudre les calculs complexes et ont été confirmés par une modélisation dans une soufflerie comportant 121 coureurs à l'échelle 1/4 et disposés sur 17 rangs. Ainsi, les coureurs au dernier rang économisent leurs forces dans des proportions énormes quand ceux placés devant et même sur les côtés du peloton consomment bien plus d'énergie pour faire face aux forces aérodynamiques.

Si nous nous penchons sur la forme d'une échappée à quatre coureurs comme le montrent les deux images suivantes, on remarque que dans le cas où les deux cyclistes qui suivent le coureur de tête sont côte à côte, ceux-ci créent une bulle aérodynamique qui pousse le coureur en tête mais les cyclistes suivant le coureur de tête profitent moins de l'aspiration que dans le cas où les coureurs sont en file indienne.

<sup>3</sup> Voir <http://www.leparisien.fr/sports/cyclisme/tour-de-france-la-meilleure-place-a-l-abri-du-peloton-21-07-2018-7828593.php>

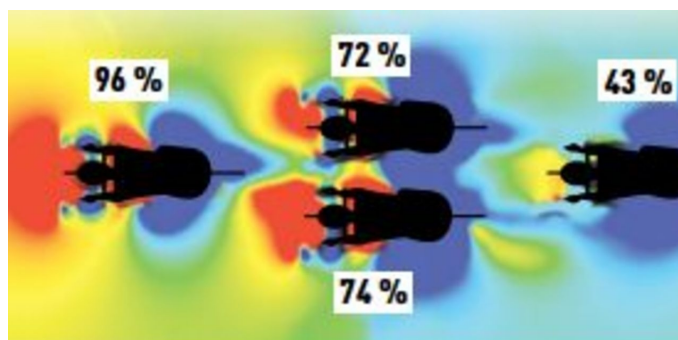


Figure 8: Forces subies par des cyclistes roulant en losange

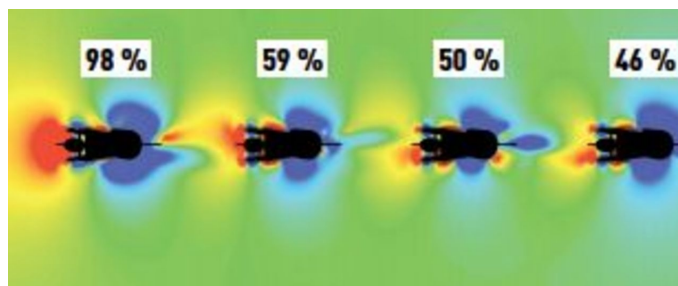


Figure 9: Forces subies par des cyclistes roulant en file indienne

### 3.1.2.2. La consommation d'une voiture

On dit que pour la même distance on consomme plus à grande vitesse, expliquons cela. Premièrement, la voiture est un objet en déplacement dans un fluide, donc la voiture est sujette à des forces de traînée :

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

Cette formule n'est pas valable en régime de Stokes (faibles vitesses donc petit nombre de Reynolds) ni à grande vitesse (vitesse supérieure à celle du son). Dans notre cas de voiture en déplacement sur une autoroute, nous sommes dans aucun de ces deux cas.

On note  $V_1$  la vitesse de la voiture 1 et  $V_2$  celle de la voiture 2. L'énergie consommée sur un même trajet de A à B est représentée par le travail :

$$W_1 = \int_A^B F_{x_1} dx = \int_A^B \frac{1}{2} \rho S C_x V_1^2 dx = \frac{1}{2} \rho S C_x V_1^2 (B - A)$$

Comparons l'énergie consommée par deux voitures, une à 110km/h et une à 150km/h:

$$r = \frac{W_1}{W_2} = \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^2$$

$$r = \left( \frac{110}{150} \right)^2 = 0.538 \approx \frac{1}{2}$$

Donc une voiture à 150 a besoin d'au moins 2 fois plus d'énergie pour le même parcours qu'une voiture à 110.

Prenons l'exemple de la loi du 1<sup>er</sup> juillet 2018 relatif aux vitesses maximales autorisées des véhicules, cette dernière vise à modifier la vitesse maximale de 90 km/h à 80 km/h sous certaines conditions.

On a donc :  $\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2 = 0,79$ , avec

- $V_1 = 80 \text{ km/h}$
- $V_2 = 90 \text{ km/h}$

On remarque donc qu'une voiture à 90 km/h consomme environ 1,25 fois plus qu'une autre à 80 km/h. On peut donc en déduire qu'en plus de la sécurité routière que cette loi amène, et même si cette loi est discutée, elle permet d'économiser au moins 25 % de son essence ainsi que rejeter beaucoup moins de matière polluante comme les gaz à effet de serre.

Ce résultat ne prend en compte que les forces de traînée alors que d'autres frottements, notamment les frottements mécaniques, alourdissent ce résultat faisant de ce dernier qu'un minimum.

### 3.1.2.3. Facteurs pour limiter les frottements

Pour conclure avec ces deux études de cas, on peut noter deux principaux facteurs pour limiter les frottements : la géométrie de l'objet et la vitesse de celui-ci. En effet, plus la surface de contact entre l'objet et le fluide est petite, plus les forces de frottements sont faibles. De plus, en réduisant la vitesse, on réduit également les frottements subis par le corps en question.

## 3.2. Protocole expérimental

### 3.2.1. Le dispositif

Pour créer notre dispositif expérimental, nous avons repris celui du projet de l'année précédente. Cependant, nous l'avons modifié afin de correspondre à nos objectifs. Pour ce faire, nous avons repéré les éléments à garder, et ceux à améliorer sur le banc du projet de l'année précédente. Initialement, le dispositif consistait en un grand tube vertical de 16cm de large sur 2m de long à l'intérieur duquel était fixée une masse (il y a différentes masses accrochables qui ont toutes une géométrie différente). La masse était accrochée à l'aide d'un ressort, lequel était fixé à l'aide d'une tige métallique qui traversait le tube.

A l'extrémité haute du tube se trouvait le moteur et l'hélice. Comme l'hélice était plus large que le tube, ils étaient fixés dans une tuyère qui était elle-même raccordée au tube.

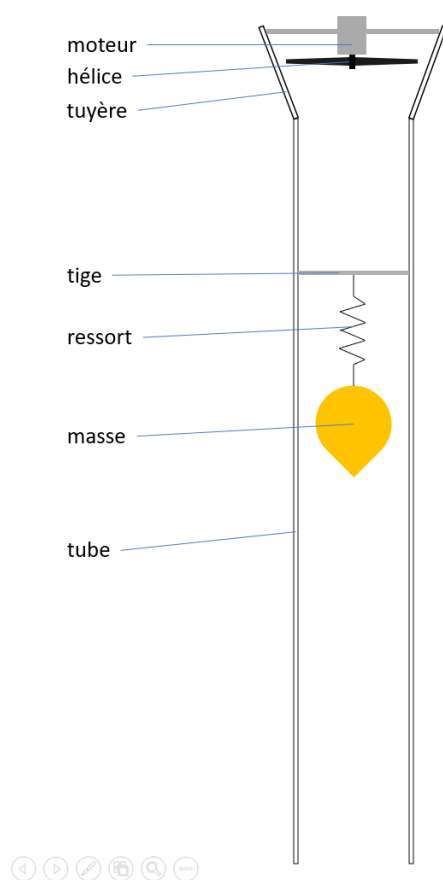


Figure 10: Dispositif initial

Ce dispositif possédait de nombreux problèmes que nous avons eu à résoudre.

Le principal problème résidait dans l'instabilité de la masse accrochée dans la soufflerie. En effet, celle-ci était maintenue à l'aide de ressorts, donc au passage du vent, elle se mettait à osciller de manière transverse.

Pour remédier à ce problème, nous avons choisi d'accrocher la masse par-dessous, au bout d'une tige rigide, et de fixer cette dernière sur une balance. La variation de masse affichée par la balance permet de retrouver la variation de force appliquée à la masse. Ce système est donc plus stable, car la tige est suffisamment rigide pour empêcher la masse de bouger.

De plus cela nous a permis de résoudre un autre problème que nous aurions pu rencontrer plus tard : les mesures. En effet mesurer une variation d'allongement du ressort à partir du dispositif initial aurait pu s'avérer compliqué, ou en tout cas peu précis. Or étant données la taille et la masse de la masse, la vitesse du moteur, la taille de l'hélice et la rigidité du ressort, nous ne nous attendions pas à un allongement significatif. L'utilisation d'une balance est plus précise et la précision ne dépend quasiment que de celle de la balance. Il nous suffit donc de choisir une balance précise.

Un deuxième problème que nous avons rencontré : la stabilité du dispositif dans sa globalité. En effet, les pieds qui maintenaient le banc de mesure n'étaient pas adaptés, donc le système n'était pas stable, et les mesures pouvaient varier d'un essai à un autre. Nous avons donc fabriqué des pieds plus adaptés pour supporter le poids du dispositif de mesure. Les pieds sont constitués de cylindres en bois d'environ 1 mètre de long et inclinés de  $15^\circ$  par rapport au tube principal. Aux deux extrémités des pieds sont accrochées des pièces de plastique imprimées qui permettent de raccorder les pieds et le tube d'un côté et de stabiliser l'appui sur le sol de l'autre.

Les dimensions des pieds ont été étudiées afin d'obtenir la meilleure stabilité possible avec le matériel dont nous disposions, tout en ne perturbant pas les mesures. Nous avons ainsi choisi de laisser une bonne distance entre l'extrémité basse de la soufflerie et le sol pour que l'air puisse aisément s'échapper, nous l'avons aussi ajustée afin que la tige qui maintient la masse ne soit pas trop longue, et donc instable.

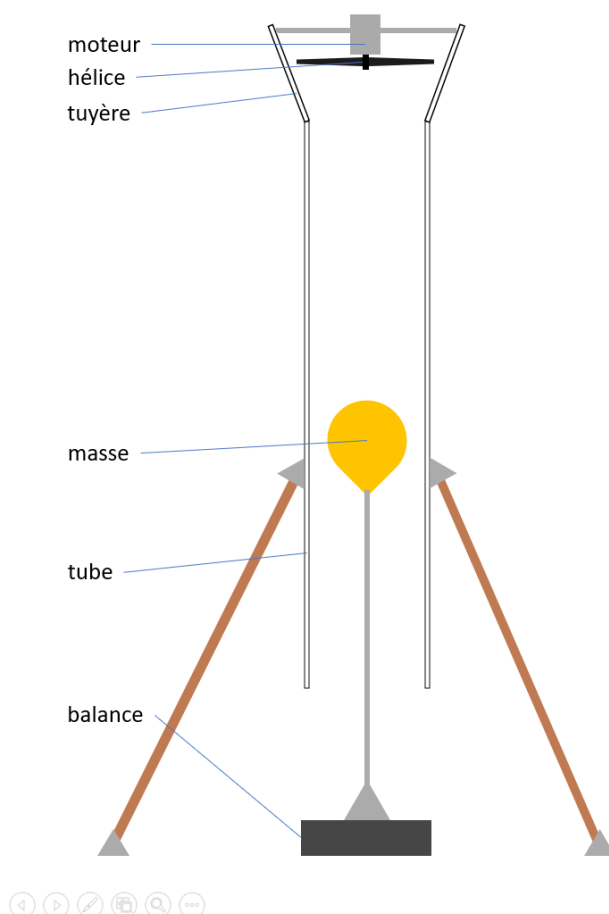


Figure 11: Dispositif amélioré

Une visualisation de ce à quoi aurait du ressembler le dispositif amélioré est disponible en annexe.

Enfin, un dernier point auquel il aurait fallu penser : le moteur et l'hélice. Notre objectif étant de créer un écoulement qui puisse passer de laminaire à turbulent, nous avons besoin d'un moteur et d'une hélice qui puissent créer un écoulement d'air à vitesse variable. Dans la partie théorique, nous avons déterminé une vitesse de transition entre régime laminaire et turbulent autour de 5 m/s. Il nous fallait donc un moteur qui couplé à une hélice puissent nous fournir un écoulement variant de 2 m/s à 8 ou 10 m/s. Nous avons prévu de mesurer les vitesses d'écoulement possibles dans notre dispositif avec un anémomètre, et ainsi pouvoir déterminer si nous avons besoin ou non de remplacer le moteur, l'hélice ou les deux. Nous n'avons cependant pas rencontré de problèmes concernant ce point car nous n'avons pas pu commencer les mesures.

### 3.2.2. Protocole

De manière à déterminer les forces de frottements visqueux s'exerçant sur les solides, nous avons procédé de cette façon :

- On place les solides sur leur support puis nous effectuons une tare à l'équilibre de la balance.
- On allume le moteur afin de mettre en place un écoulement continu tout en le réglant pour obtenir la vitesse voulue.
- On fait évoluer la vitesse pour vérifier nos résultats théorique sur les régimes laminaires et régimes turbulents
- On trace enfin la courbe expérimentales  $F=f(v)$  faisant apparaître la force de frottement visqueux  $F$ .

## 4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Afin de conclure, nous dirons juste que la crise sanitaire frappant notre pays nous a empêché de réaliser notre projet initial. Nous avons des plans et une approche théorique mais nous n'avons finalement pas pu nous pencher sur la partie expérimentale.

Cependant, nous ne sortons pas de ce projet inutilement. En effet, il nous a appris beaucoup de choses et notamment sur la faculté de s'adapter aux changements. Nous avons réussi à nous adapter à la crise sanitaire et à faire évoluer un projet expérimental vers un projet théorique ce qui nous a permis d'approfondir nos connaissances sur le sujet.

Enfin, ce projet nous a beaucoup appris sur le plan collectif. Nous avons su nous mobiliser à distance et nous répartir le travail de la bonne manière afin de rendre un rapport dont nous sommes fiers.

Il est évident que si nous devons donner des perspectives pour la suite du projet nous souhaiterions que notre dispositif voit le jour car nous sommes persuadés qu'il a des chances d'amener à des résultats concrets.



## 5. BIBLIOGRAPHIE

- <https://owl-ge.ch/IMG/pdf/frottement.pdf>, consulté le 7/05.
- <https://fr.wikipedia.org/wiki/Frottement>, consulté le 7/05.
- [https://fr.wikipedia.org/wiki/Frottement\\_fluide](https://fr.wikipedia.org/wiki/Frottement_fluide), consulté le 7/05.
- [https://perso.crans.org/mbertin/Cours\\_Mecanique\\_des\\_fluides.pdf](https://perso.crans.org/mbertin/Cours_Mecanique_des_fluides.pdf), consulté le 7/05.
- [https://perso.crans.org/mbertin/Cours\\_Mecanique\\_des\\_fluides.pdf](https://perso.crans.org/mbertin/Cours_Mecanique_des_fluides.pdf), consulté le 7/05.
- <http://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/ressource/MecaFlu.xml>, consulté le 7/05.
- <http://www.universalis-edu.com.ezproxy.normandie-univ.fr/encyclopedie/frottement/>, consulté le 7/05.  
<https://www-techniques-ingenieur-fr.ezproxy.normandie-univ.fr/base-documentaire/mecanique-th7/frottement-et-usure-42464210/introduction-a-la-tribologie-tri100/contacts-en-frottement-sec-tri100niv10003.html#niv-sl9724571>, consulté le 7/05.
- <https://sciencetonnante.wordpress.com/2011/08/22/le-nombre-de-reynolds/>, consulté le 7/05.
- <https://www.sci-sport.com/dossiers/methodes-d-evaluation-de-l-aerodynamisme-en-cyclisme-002.php#gravite>, consulté le 7/05.
- <http://vcpontois.wifeo.com/rouler-en-peloton.php>, consulté le 7/05.
- <http://www.leparisien.fr/sports/cyclisme/tour-de-france-la-meilleure-place-a-l-abri-du-peloton-21-07-2018-7828593.php>, consulté le 7/05.

## Table des figures

Figure 1: Sphère subissant un écoulement laminaire.....	7
Figure 2: Sphère subissant un écoulement intermédiaire entre laminaire et turbulent.....	7
Figure 3: Allée de Karman.....	7
Figure 4: Sphère subissant un écoulement turbulent.....	7
Figure 5: Forces subies par un cycliste.....	9
Figure 6: Forces subies dans un peloton.....	10
Figure 7: Résultat de l'étude néerlandaise.....	11
Figure 8: Forces subies par des cyclistes roulant en losange.....	12
Figure 9: Forces subies par des cyclistes roulant en file indienne.....	12
Figure 10: Dispositif initial.....	14
Figure 11: Dispositif amélioré.....	15

## 6. ANNEXES

### 6.1. Modélisation du dispositif

