



OLYMPIADES  
DE PHYSIQUE FRANCE



Mémoire des OLYMPIADES DE PHYSIQUE  
FRANCE

ANNÉE 2019 – 2020

CLASSE DE SECONDE BILINGUE DU LYCÉE HANOI –  
AMSTERDAM

---

Mémoire ODPF: Simulation et estimation de  
la portance d'une aile d'avion

---

*Étudiants :*

Hoang Vu DO

Quang Minh LUONG

Vu Hoang Hai NGUYEN

*Superviseur :*

Prof. Trung Dung PHAM

Le 20 novembre 2019



FIGURE 1 – L'équipe du lycée Hanoï-Amsterdam avec le montage expérimental. Du gauche à droite : Vu Hoang Hai NGUYEN, Hoang Vu DO et Quang Minh LUONG

### Résumé

Réalisé au sein d'un toit de Hanoï, "Aile avion" est un projet au cours duquel nous voulons mesurer la portance exercée sur une aile d'avion par le vent. Après avoir bien compris les phénomènes engendrés, nous procédons à reproduire le vol d'une aile d'avion sur une petite échelle en utilisant les simples d'objets de la vie quotidienne. Notre expérience se concentre sur la fabrication d'une aile d'avion fixée sur un axe, l'obtention d'un flux laminaire et le calcul de la portance par le traitement d'images.

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Mécanisme du soulèvement</b>	<b>3</b>
2.1	Troisième loi de Newton . . . . .	3
2.2	Écoulement de l'air . . . . .	3
2.2.1	Nombre de Reynolds . . . . .	3
2.2.2	Effet Coanda . . . . .	4
2.3	Théorème de Bernoulli . . . . .	4
2.4	Estimation de la portance . . . . .	4
<b>3</b>	<b>Expérience</b>	<b>6</b>
3.1	Position du problème . . . . .	6
3.2	Soufflerie . . . . .	6
3.3	Fabrication d'ailes . . . . .	9
3.4	Fixation d'axes de l'aile . . . . .	11
<b>4</b>	<b>Traitement d'images et calcul des forces</b>	<b>12</b>
4.1	L'enregistrement des images . . . . .	12
4.2	L'accélération du mouvement et la force exercée sur l'aile . . . . .	14
<b>5</b>	<b>Conclusion et perspective</b>	<b>16</b>

## 1 Introduction

L'homme rêve conquérir le ciel depuis longtemps. Les frères Wright ont ainsi réalisés ce rêve au début du XX<sup>ime</sup> siècle [1]. Depuis ce moment-là, il y a beaucoup de scientifiques, inventeurs ont continué à développer et à améliorer les avions, donnant naissances aux nouveaux modèles plus modernes, plus sécurisé de ce transport [2, 3]. De nos jours, l'aéronotique se développe de plus en plus. Par exemple l'Airbus A380 est le plus grand l'avion de la terre, il devienne la fierté de l'Europe, la capacité maximum est de 853 passagers avec deux étages et les services sont au complet. Nous nous demandons : " Comment ce gigantesque machine peuvent-il voler dans le ciel, gagner la pesanteur ? " Nous allons vous montrer la réponse dans trois parties :

1. Mécanisme du soulèvement

2. Notre expérience
3. Traitement d'image et calcul des forces

## 2 Mécanisme du soulèvement

### 2.1 Troisième loi de Newton

La troisième loi de Newton, aussi appelée un principe des actions réciproques" énonce que "L'action est toujours égale à la réaction", c'est-à-dire que les actions de deux corps l'un sur l'autre sont toujours égales et de sens contraires. Le principe du soulèvement de l'aile d'avion se base sur cette loi [4].

Considérons le système contenant l'aile d'avion et l'air. Dans ce cas, cette loi s'écrit :

$$\vec{f}_{aile} = -\vec{f}_{air} \quad (1)$$

Quand la masse d'air coule vers le bas, i.e., le composant vertical de la force d'air  $\vec{f}_{air} \cdot \vec{u}_z$  est négative. La compensation de la force créée par l'air entraîne une force vers le haut exercée sur l'aile d'avion.

Pour pouvoir guider le déplacement d'air vers le bas, plusieurs éléments sera considérés. L'écoulement d'air sera ensuite discuté en détails dans la section suivant.

### 2.2 Écoulement de l'air

#### 2.2.1 Nombre de Reynolds

Deux effets principaux qui gouvernent l'écoulement d'air sont la viscosité et l'inertie de l'air. Selon le rapport entre les forces d'inertie et les forces visqueuses précisés par le nombre de Reynolds  $Re$  dans l'équation 2, nous pouvons caractériser le flux d'air.

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu} \quad (2)$$

Dans laquelle,  $\rho$  est la masse volumique de l'air,  $V$  est sa vitesse,  $L$  est la taille caractéristique du déplacement et  $\mu$  est une constante qui représente la viscosité dynamique.

Plus le nombre de Reynold est petit, plus la viscosité est importante, plus l'écoulement se stabilise. La viscosité cause aussi l'air à suivre le profil de l'aile d'avion. Cet effet est précisé ci-dessous.

### 2.2.2 Effet Coanda

L'effet Coanda décrit l'attachement d'un courant visqueux par une surface convexe en contact. Autrement dit, une surface convexe peut dévier la direction d'un écoulement visqueux.

Précisément, dans notre cas, l'aile d'avion dévie le courant d'air vers le bas. Ceci ne reste vrai que pour une angle incidente faible. Quand l'angle incidente est assez grande, le courant d'air se détache de l'aile d'avion.

## 2.3 Théorème de Bernoulli

Le théorème de Bernoulli énonce que l'accélération d'un fluide homogène incompressible cause une diminution de la pression.

En observant la forme de notre aile ainsi que l'angle incident avec lequel le vent tape sur l'aile d'avion, on constate que l'air parcourt une plus longue distance en passant au-dessus de l'aile qu'en passant en dessous de l'aile. Il a été également observé que l'air passant au-dessus et l'air passant en dessous ne se rejoignent pas du tout en même temps, dans la réalité, l'air passant au-dessus de l'aile arrive avant l'air passant en dessous. En conséquence, la vitesse d'air du haut de l'aile d'avion est supérieure à celle du bas, ce qui fait que, selon le théorème de Bernoulli, la pression qu'en bas de l'aile d'avion est plus importante que la pression en haut de l'aile d'avion.

Cette différence de pression aide à soulever l'aile d'avion, mais dans le cas général, la simple présence de cet effet ne serait pas suffisante pour dépasser le poids de l'aile d'avion.

## 2.4 Estimation de la portance

Nous définissons le repère comme dans Fig.2.

Bien que ce soit difficile de calculer précisément la portance, nous pouvons l'estimer grossièrement en calculant l'ordre de grandeur de la force de la masse d'air circulé vers le bas.



FIGURE 2 – L’aile au cours du vol vers le haut.

$$\begin{aligned}
 \vec{f}_{aile} \cdot \vec{u}_z &= -\vec{f}_{air} \cdot \vec{u}_z \\
 &= -m_{air} \vec{a}_{air} \cdot \vec{u}_z \\
 &= -\rho_{air} V_{air} \vec{a}_{air} \cdot \vec{u}_z
 \end{aligned} \tag{3}$$

avec  $\rho_{air}$  la masse volumique d’air et  $V_{air}$  le volume d’air déplacé. Nous estimons que ce volume est du même ordre de grandeur du volume de l’aile d’avion. Ce volume peut être estimé comme le produit de la surface (au dessus ou en dessous) de l’aile  $S_{aile}$  et l’épaisseur d’avion.

Nous considérons un écoulement laminaire et puisqu’il n’y a aucune force exercée dans la direction  $y$ , nous pouvons considérer que le déplacement de l’air soit seulement dans le plan  $xz$ . Sous la condition que l’angle d’inclinaison soit assez petite pour que l’air suive la courbure de l’avion, et que la vitesse d’air ne se varie pas énormément en valeur mais seulement en direction, l’accélération de l’air s’écrit :

$$a_{air} \sim \frac{v_{air}^2}{r} \tag{4}$$

avec  $v_{air}$  la vitesse de l’air et  $r$  le rayon de la courbure de la face convexe d’aile. Nous estimons ce rayon de la même ordre de grandeur que de l’épaisseur d’aile.

Finalement, puisque l’air suive la forme d’aile, l’accélération d’air sera inclinée d’une même angle d’inclinaison de l’aile. Nous avons donc

$$\vec{a}_{air} \cdot \vec{u}_z \approx \sin(20^\circ) a_{air} \tag{5}$$

Et nous pouvons finalement estimer l'ordre de grandeur de la portance, utilisons les valeurs expérimentals précisé dans la section ci-dessous :

$$\begin{aligned} \mathcal{O}(f_{aile}) &\approx \rho_{air} S_{aile} v_{air}^2 \sin(20^\circ) \\ &= 1.3 \text{ kg/m}^3 \times 10 \times 14 \text{ cm}^2 \times (2 \text{ m/s})^2 \times \sin(20^\circ) \\ &\approx 0.025 \text{ N} \end{aligned} \quad (6)$$

Nous attendons alors de mesurer une portance aux alentours de  $10^{-2}$  N.

## 3 Expérience

### 3.1 Position du problème

Au lieu de réaliser l'expérience dans un laboratoire du lycée, nous avons construit notre expérience chez nous avec les matériels qu'on peut trouver dans la vie quotidienne. Il est, dans les deux cas, difficile d'atteindre les vraies conditions de vol d'une vraie avion de grande vitesse et de grande taille, c'est à dire, pour un nombre de Reynold de 5000. Nous respectons pourtant la même ordre de grandeur avec l'angle de décollage usuelle  $\sim 15^\circ - 25^\circ$  de l'avion.

Nous utilisons un ventilateur de la marque Sunhouse, surnommé "le Roi contre la canicule", qui sous sa puissance maximale produit un flux d'air de  $4500 \text{ m}^3/\text{h}$ . Elle consiste de deux grande tourbillons avec un axe de rotation verticale qui produit un vent dans le sens horizontal (Voir Fig. 4).

Nous n'utiliserons qu'un des deux compartiments de ce ventilateur. Nous avons enlevé la partie en plastique qui couvre le tourbillon, mais nous n'avons pas pu enlevé la grille métallique montrée dans Fig. 4.

Nous vérifions d'avoir déadifférentes fonctions de refroidissements par brouillard d'eau et d'ionization pour avoir un flux d'air homogène avant chaque expérience.

### 3.2 Soufflerie

Pour pouvoir soulever l'aile d'avion, nous avons besoin d'un écoulement laminaire qui se colle au profil de l'aile d'avion. Pourtant, l'écoulement sortant du ventilateur est turbulent est instable, à cause du grande puissance de soufflement ainsi que de la passe du ventilateur par une grille métallique (vue Fig. 4). Nous pouvons aussi mesurer des vitesses de l'air très fluctuées,



FIGURE 3 – Photo du ventilateur utilisé

$v = 8 \pm 2$  m/s,  $v = 9 \pm 3$  m/s et  $v = 10 \pm 3$  m/s pour les trois niveaux de vent bas, médium et haut du ventilateur.

Nous estimons la qualité du vent sortant du ventilateur en observant la forme d'un feu crée par une bougie face au vent, et la fumée de la bougie une fois éteinte nous permet également tracer l'écoulement des particules d'air. Fig.5 montre la turbulence du flux d'air sortant.

Un fabricant de cheminées pour les aspirateurs de fumée dans la cuisine nous a aidé à fabriquer une soufflerie en étein adaptée à notre problème (Voir



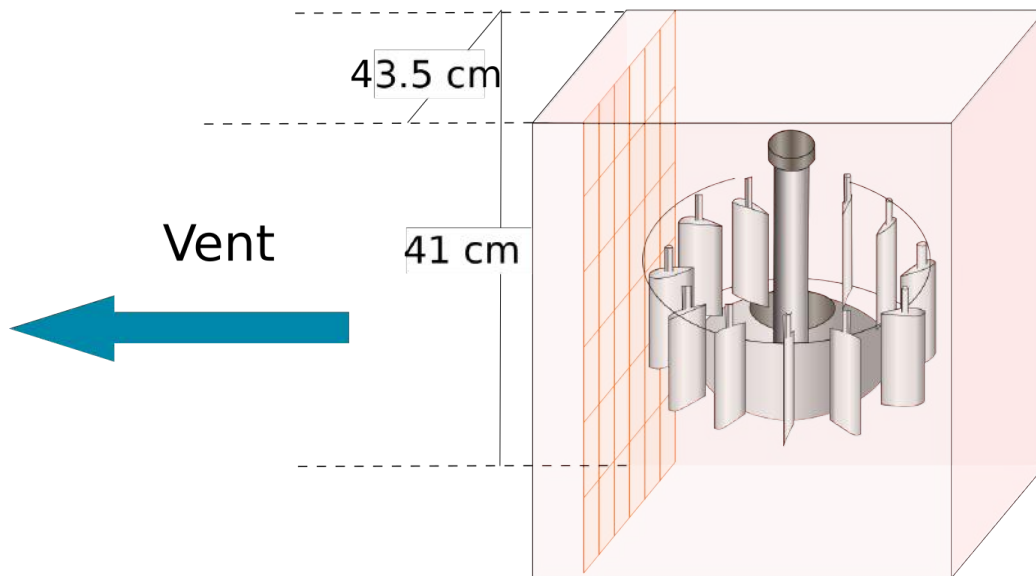


FIGURE 4 – Représentation schématique du ventilateur utilisé dans l'expérience. Notez que le nombre d'ailes du tourbillon ainsi que leur taille ne sont pas exactes. Le flux d'air sorti du tourbillon traverse une grille métallique.

Fig. 1). La soufflerie combine l'air sortie d'une surface de la taille du cadre du ventilateur  $43.5 \times 41$  cm sur une aire  $19 \times 17.5$  cm, un peu plus petite que la taille du tourbillon situé à l'intérieur sur une longueur de 50 cm. Nous faisons attention que cette petite aire soit bien centré sur le tourbillon. Nous laissons ensuite l'air couler et stabiliser sur une longue distance de 1 m. Notons que l'écoulement sur une longue distance affaiblit le vent. Nous utilisons une échelle comme support, et nous fixons la soufflerie au ventilateur simplement avec du scotch.

À la sortie de la soufflerie, les vitesses mesurées sont successivement  $v = 1.65 \pm 0.05$  m/s,  $1.9 \pm 0.1$  m/s et  $2.0 \pm 0.1$  m/s pour les trois modes bas, médium et haut du ventilateur. Nous remarquons que les vitesses du vent ont été énormément diminuées mais en même temps leur fluctuations sont beaucoup moins importantes.

Le profil de l'écoulement tracé par la fumée de la bougie montre un écoulement stable et laminaire dans le sens horizontale (Fig. 6), permet à l'avion à se soulever.

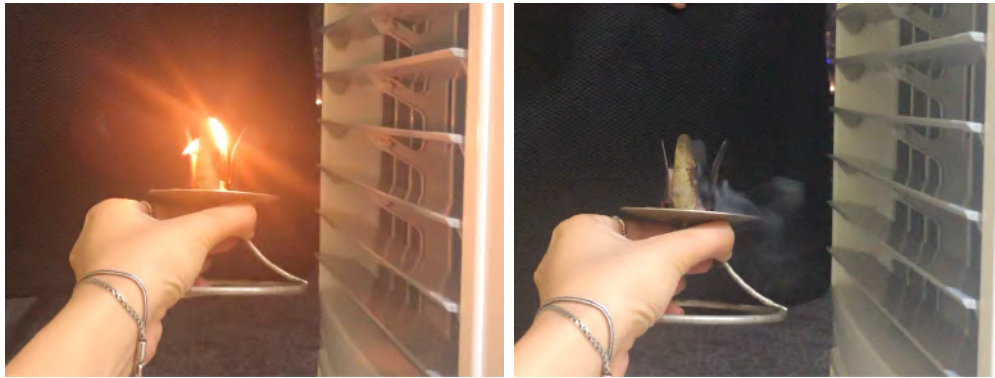


FIGURE 5 – Le soufflement d’air sortant du ventilateur est puissant pourtant instable et présente des turbulences. Le feu créé par la bougie possède toutes les formes et s’étale sur n’importe quelle direction. De même, la fumée montre un écoulement turbulent.



FIGURE 6 – Face au vent sortant de la soufflerie, le feu est presque tout le temps aplattit sur la direction horizontale et la fumée coule horizontalement (dans le même axe que la soufflerie)

### 3.3 Fabrication d’ailes

Il y a beaucoup de profil de l’aile qu’on puisse trouver comme le plan convexe, biconvexe dissymétrique, biconvexe symétrique, etc [5]. Notre aile a 14.4cm de longueur de la face convexe et 13.8 cm de longueur de la face concave, donc un contour de 28.2 cm. Dans notre cas, nous avons décidé de faire un profil d’aile creux, i.e., une surface convexe au-dessus et une surface

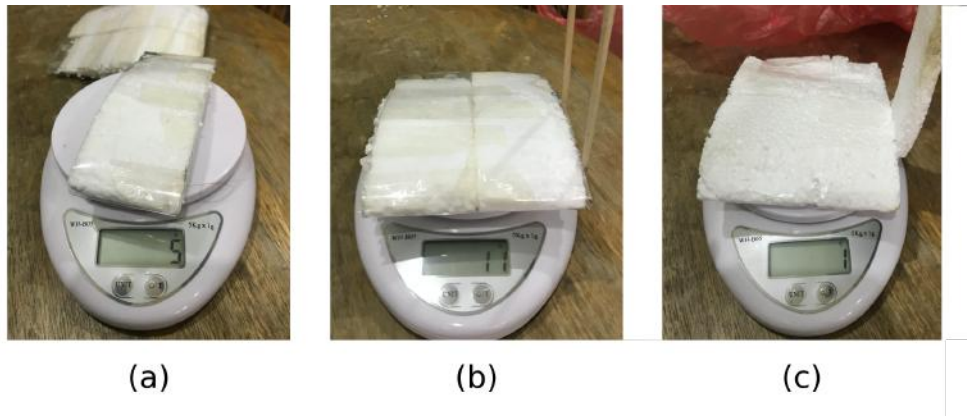


FIGURE 7 – Mesure de poids (en gramme) de notre différents modèles d’ailes d’avion

concave en dessous pour maximiser l’effet Coanda expliqué ci-dessus.

Puisque la vitesse du vent n’est pas élevée, nous avons besoin d’une aile très légère. Un autre problème, si notre aile est molle, elle sera déformée ou sera rompue. De plus, on a besoin que sur la surface de l’aile soit lisse pour dévier la direction de l’écoulement visqueux et pour que les instabilités ne se créent pas.

Nous avons d’abord essayé de découper le corps de l’aile sur le matériel polystyrène, rigide et léger. Nous le couvrons ensuite avec une feuille transparente pour obtenir une surface lisse. Cette aile a un poids de 5 g et se déplace bien sous action du vent du ventilateur avant la soufflerie. Pourtant, son axe n’était pas fixe et elle se retournera facilement avec le vent. (Voir Fig. 7 (a)). L’aile a initialement une largeur de 5 cm.

Nous avons essayé ensuite d’alléger le système en couvrant le polystyrène avec du scotch d’épaisseur  $30\ \mu\text{m}$ , beaucoup plus léger que la feuille transparente. Pourtant, pour pouvoir fixer l’axe de l’aile, nous avons utilisé deux baguettes en bois (les baguettes qui sont normalement utilisées pour les brochettes). Le détail de ce système sera expliqué dans la sous-section suivante. Malheureusement, ces baguettes ont alourdi énormément l’aile, jusqu’à 11 g (Voir Fig. 7 (b)), et l’aile n’était pas suffisamment légère pour s’envoler avec le flux d’air à la sortie de la soufflerie. Nous élargissons également l’aile à 10 cm.

Finalement, nous avons décidé de remplacer ces tiges rigides par un morceau de polystyrène. Nous ne couvrons pas les faces de côté de l’aile avec du

scotch car nous n'estimons pas que c'est important. Le poids est maintenant ramené à 1 g, et nous avons finalement une aile convenable à notre expérience (Voir Fig. 7 (c)).

### 3.4 Fixation d'axes de l'aile

Notre but est de fixer l'inclinaison de l'aile, alors nous avons attaché une tige rigide sur l'aile (voir Fig. 7 (b) et (c)) que nous gardons dans le sens vertical. Pour ceci nous utilisons deux murs pour bloquer et pour forcer cette tige à déplacer verticalement seulement. Nous mettons ces murs sur une voiture qui peut rouler sur une voie en plastique représentant l'axe horizontal, en espoir de mesurer non pas seulement la portance mais aussi la traînée exercée par le vent sur le système. (Voir Fig. 8)

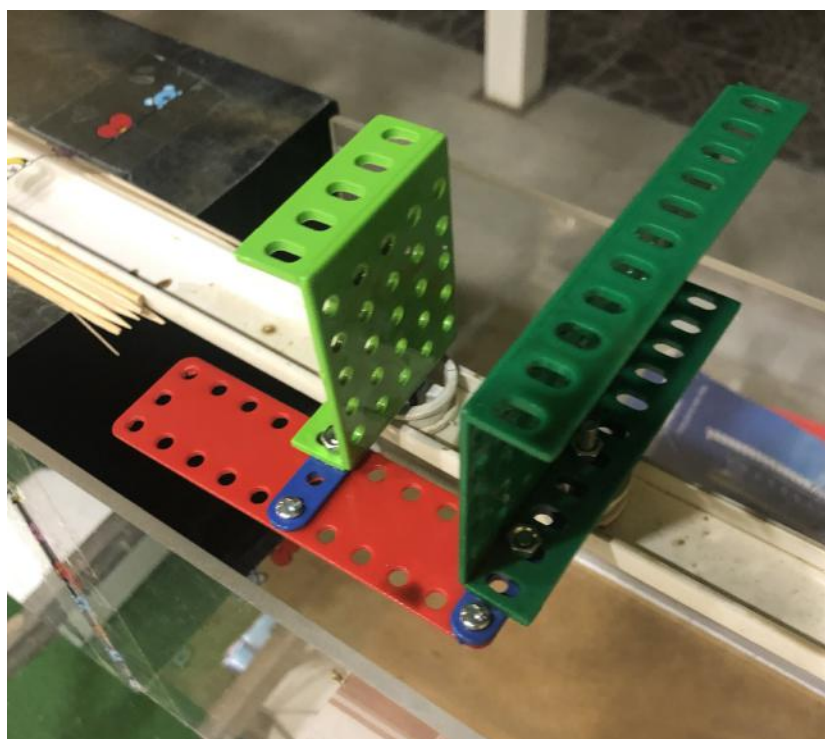


FIGURE 8 – Système de fixation d'angle d'inclinaison de l'aile d'avion.

D'abord, nous constatons que le frottement entre la voiture et le support en plastique, ainsi que le frottement entre la tige attachée à l'aile et les murs

en plastique est très important. Alors nous décidons d'utiliser les lubrifiants pour le réduire.

Malheureusement, nous n'avons pas pu mesurer le frottement du système. Au premier temps, nous ne considérons pas le frottement dynamique entre l'aile et deux murs. Mais on observe que le frottement statique entre la voiture et la voie est encore important, i.e., la trainée ne sera pas assez importante pour pouvoir déplacer le système sur l'axe horizontal, ainsi que pour la moitié du temps, l'aile une fois arrêtée et bloquée entre les deux murs ne peut plus continuer à déplacer sous l'effet de la portance.

Pour pouvoir minimiser le frottement, nous avons gardé une distance entre deux murs légèrement plus grand que la taille de la tige verticale. Ceci a causé de légère rotation de l'aile d'avion. Nous estimons que l'aile est inclinée à  $20^\circ \pm 5^\circ$  par rapport à l'axe horizontal (à l'axe d'écoulement de l'air).

## 4 Traitement d'images et calcul des forces

Notre idée initiale est de mesurer directement la portance d'aile d'avion avec un dynamomètre mais nous n'avons pas pu trouver un dynamomètre adapté à notre système.

Nous tentons alors une approche indirecte en recordant le déplacement de l'aile d'avion et en utilisant la 2<sup>me</sup> loi de Newton qui énonce que la somme des forces exercées sur l'aile d'avion sera égale au produit de sa masse  $m_{aile}$  et son accélération  $\vec{a}_{aile}$ .

### 4.1 L'enregistrement des images

Nous mesurons d'abord le déplacement de l'aile d'avion. Nous repérons l'axe vertical en mettant au début de la vidéo un fil accroché à un poids lourd qui se tend selon l'axe vertical. Ceci nous a permis de définir un bon repère. (Voir Fig. 9)

Nous utilisons un téléphone portable pour filmer la vidéo. Sa résolution temporelle maximale en mode d'enregistrement normal est 60 fps (images par seconde), et 240 fps en mode d'enregistrement ralenti (la vidéo est ralentie par 4 fois). Nous nous servons de l'enregistrement ralenti pour avoir plus de précisions et nous divisons le temps de la vidéo finale par quatre lors du traitement d'images. Fig. 2 montre une aile entrain de s'envoler.

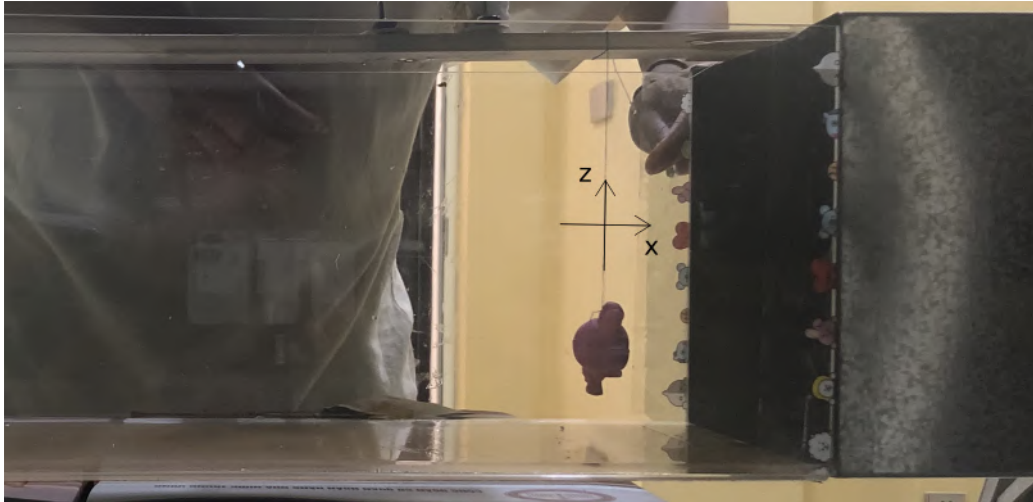


FIGURE 9 – Représentation de l’axe verticale en utilisant de la force de pesanteur.

Nous nous servons du logiciel *AviMeca* pour traiter notre vidéo. Nous définissons les sens des deux axes  $x$  et  $z$  comme dans Fig. 9 et la distance selon la taille déjà connue de la soufflerie. Nous filmons 19 vols de durée entre 1.2 s et 3 s pour la statistique. Nous calculons l’erreur des déplacements  $\Delta z(t)$  en utilisant la formule :

$$\Delta z(t) = \frac{\langle z^2(t) \rangle_{N(t)} - \langle z(t) \rangle_{N(t)}^2}{N(t)} \quad (7)$$

avec  $N(t)$  le nombre total de mesures au temps  $t$  et  $\langle \rangle_{N(t)}$  la moyenne sur  $N(t)$  mesures. Nous utiliserons la même formule pour calculer l’erreur sur le déplacement horizontal et sur l’accélération.

Après avoir filmé pour le niveau de vent haut, nous voyons bien sur Fig. 10 que l’aile a déplacé vers le haut de l’axe vertical mais ce déplacement est encore très fluctué. De plus, nous voyons aussi un petit déplacement de l’aile vers l’arrière à cause de la trainée et du retournement de l’axe de l’aile même si elle est arrêtée par les deux murs. Vu que ce déplacement est petit par rapport au soulèvement de l’aile, nous confirmons que l’angle d’inclinaison de l’aile avec la surface horizontale n’est pas énormément modifiée.

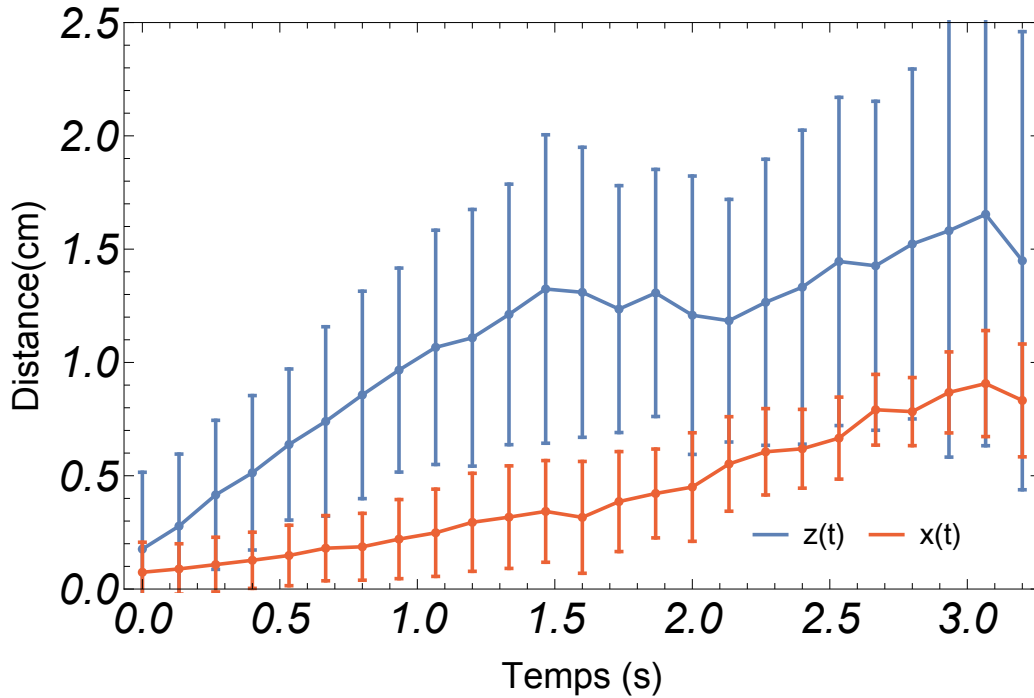


FIGURE 10 – Le déplacement de l’aile selon l’axe vertical (en bleu) et l’axe horizontal (en rouge) en fonction du temps.

## 4.2 L’accélération du mouvement et la force exercée sur l’aile

Nous nous examinons ensuite l’accélération de l’aile d’avion. Premièrement, la vitesse de l’aile au temps  $t$ , représentant le déplacement de l’aile entre l’instant  $t$  et l’instant juste après  $t + \Delta t$ , est défini comme

$$v_z(t) \equiv \frac{z(t + \Delta t) - z(t)}{\Delta t} \quad (8)$$

Nous prenons  $\Delta t$  comme le temps entre deux images successives, i.e., la plus petite résolution de temps que nous pouvons utiliser pour estimer.

De même, l’accélération au temps  $t$  est définie comme la variation de la vitesse entre le temps  $t$  et le temps suivant  $t + \Delta t$ .

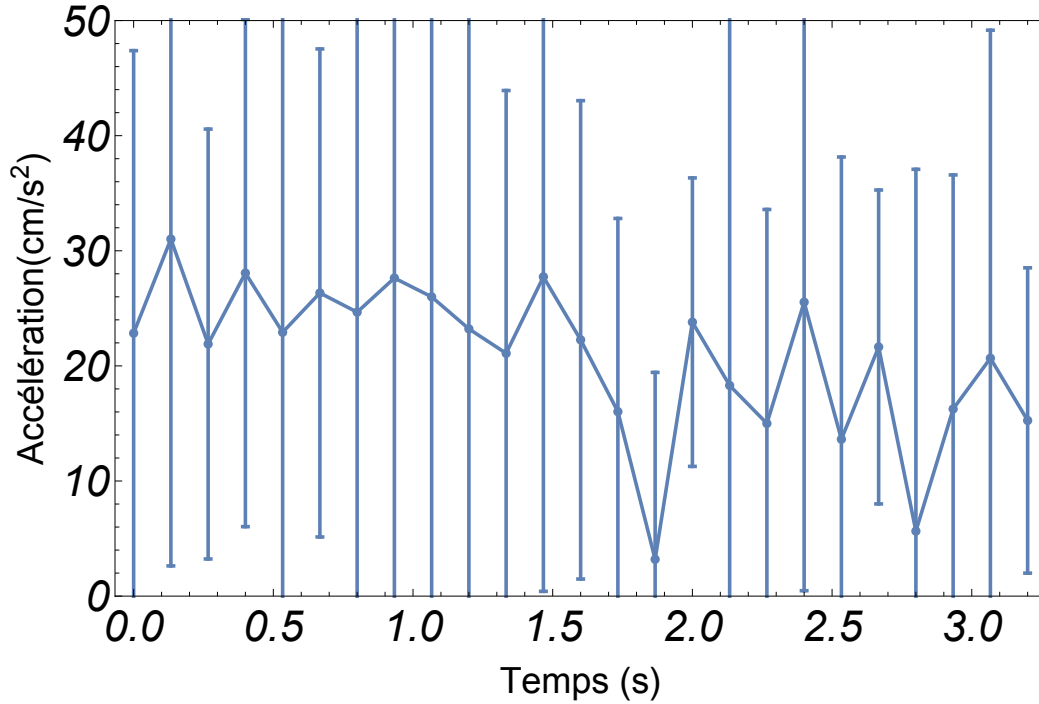


FIGURE 11 – L'accélération vertical de l'aile en fonction du temps

$$\begin{aligned}
 a_z(t) &\equiv \frac{v(t + \Delta t) - v(t)}{\Delta t} \\
 &= \frac{z(t + 2\Delta t) - z(t)}{\Delta t^2}
 \end{aligned} \tag{9}$$

Notons que dans ce cas, nous pouvons choisir la division du temps égale à  $\Delta t \rightarrow \frac{\Delta t}{2}$ , la moitié du temps entre deux images successives.

$$a_z(t) \equiv \frac{4(z(t + \Delta t) - z(t))}{\Delta t^2} \tag{10}$$

Nous pouvons utiliser cette formule pour calculer l'accélération de l'aile  $a_{aile}(t)$  en fonction du déplacement  $z(t)$ . Le résultat est représenté dans la courbe Fig. 11.

Nous observons une accélération également très fluctuée, il est difficile de dire quelle est la variation de l'accélération en fonction du temps. Pourtant, nous pouvons calculer l'accélération moyenne, qui est à  $a_{aile} \sim 23 \text{ cm/s}^2$  vers le haut de l'axe verticale.



Nous nous regardons seulement l'axe verticale et nous ne considérons que de la portance de l'air et le poids de l'aile comme des forces exercées sur l'aile, et nous négligeons au premier temps le frottement dynamique. La deuxième loi de Newton s'écrit :

$$\vec{f}_{aile} + m_{aile} \cdot \vec{g} = m_{aile} \cdot \vec{a}_{aile} \quad (11)$$

avec  $\vec{g} = -g\vec{u}_z$  la champ de pesanteur vers le bas,  $g \approx 981 \text{ cm/s}^2$  la valeur du champ de pesanteur.

Nous pouvons alors estimer la portance de l'air en moyenne

$$\begin{aligned} f_{aile} &= m_{aile}(a_{aile} + g) \\ &= 1 \text{ g} \times (981 + 23) \text{ cm/s}^2 \\ &= 10^{-3} \text{ kg} \times (9.81 + 0.23) \text{ m/s}^2 \\ &= 10.04 \times 10^{-3} \text{ N} \sim 10^{-2} \text{ N} \end{aligned} \quad (12)$$

Notons que cette force est bien trop petite pour être mesurée avec le dynamomètre de précision 1 N de notre lycée. Elle est aussi trop petite pour dépasser le frottement statique. la valeur réelle de la portance pourrait être plus importante car en réalité, le frottement dynamique est présenté dans le problème.

Nous remarquons également que cette force a la même ordre de grandeur attendue par l'estimation théorique ci-dessus.

## 5 Conclusion et perspective

Dans cette expérience, nous avons fabriqué un écoulement laminaire à partir d'un écoulement avec une soufflerie. Grâce à cette fabrication, nous avons pu estimer théoriquement et démontrer expérimentalement la présence d'une force de portance de l'écoulement laminaire l'air  $\sim 10^{-2} \text{ N}$  sur une aile d'avion.

Même si nous avons un bel écoulement laminaire et stable, cette expérience pourra encore être améliorée en réduisant les frottements dynamique et statique. Ça nous permettra de reserrer les murs pour réduire la variation d'angle d'inclinaison de l'aile sans bloquer le déplacement. Ainsi, nous pouvons observer la trainée de l'air si ceci dépasse le frottement statique.

Nous pouvons également réaliser cette expérience avec un ventilateur industriel plus puissant que celui que nous utilisons dans la famille, avec un caméra plus rapide.

## Remerciements

Nous voudrions remercier Prof. Trung Dung PHAM pour nous avoir supervisés et pour nous avoir aidés à contacter Prof. Laurent BRAULT, à qui nous dédions de sincères remerciements pour ses conseils perspicaces. Nous remercions également Hoang Van DO, la soeur de Hoang Vu DO, qui était de façon conveniente souvent à la maison pour nous donner un coup de main pour l'expérience.

## Références

- [1] O. Wright, Télégramme d'Orville Wright à Kitty Hawk, en Caroline du Nord, adressé à son père annonçant quatre vols réussis 17 décembre 1903, [World Digital Library](#), (1903).
- [2] F. Ferber, L'aviation - ses débuts - son développement : de crête à crête, de ville à ville, de continent à continent, [Berger-Levrault](#), p. 250 (1908).
- [3] L'histoire de l'aviation, [L'école du Dirlo](#)
- [4] Newton's Third Law of Motion, [NASA](#)
- [5] Les différents profils des ailes, [L'avionnaire](#)