École Européenne de Bruxelles 4 :

"Même le papier peut voler ! "

MOTORISATION D'UN AVION EN PAPIER

Sommaire :

Table des matières :

Qui sommes nous ? 3

1. **Résumé & Introduction....4**

Problématique....4

2. **Méthode....5**

Modèles....5

Soufflerie....6

Carte des vitesses du vents....6

3. **Capteurs....7**

Accessoires....7

4. **Mesure de la portance....8**

5. **Mesure de la traînée....9**

6. **L'avion....10**

7. **Mesure de la poussée....13**

Essai....13

8. **Finesse....16**

Polaire....18

9. **Foyer de portance....19**

Centre de gravité....19

10. **Résultante des forces....20**

Volets....21

11. **Consommation....21**

12. **Vols de l'avion....22**

13. **Perspectives....23**

Conclusion....24

14. **Remerciements....24**

Bibliographie....25

Annexe....25

Qui sommes-nous ?

- BARBIER-KERP Aaron.
- CHIOVARI Marc.
- KRIEGER Arthur.
- MEYSSONNIER Jean.
- VEDRINE LE GOFF Elliot.

Dans le Club Scientifique de l'École Européenne de Bruxelles 4 (EEB4).

Notre référent :
CLEMENCE Olivier.

Étudiants en Première (S6).

De gauche à droite : CHIOVARI Marc ; KRIEGER Arthur ; BARBIER-KERP Aaron ; VEDRINE-LE GOFF Elliot ; MEYSSONNIER Jean.

"Avec l'avion, nous avons appris la ligne droite",
disait Saint-Exupéry.
Pour nous, l'avion nous a transmis la passion des sciences.

1. Résumé & Introduction :

Rien d'extraordinaire à faire voler un avion en papier, mais pouvoir **prolonger son vol** et pouvoir le diriger dans les **3 dimensions** présente un caractère **innovant**.

Pendant **9 mois**, nous avons conçu un **système motorisé** sur un avion capable d'être **contrôlé à distance**, pouvant ainsi voler de **8 à 10 minutes**. C'est un **rêve pour beaucoup** d'enfants (compte tenu de l'accueil reçu par notre prototype en S3) et d'adultes. Le dispositif sera ensuite utilisé pour **éveiller et/ou motiver** les élèves de S3, S4 et S5 aux sciences (cinématique, dynamique, électricité, énergie et ondes…) de manière ludique.

Nous avons donc collecté toutes les mesures nécessaires concernant l'avion, pour ensuite s'en servir lors de la **conception du système**. Ce projet très intéressant va nous amener à réfléchir comme un ingénieur.

Force, vitesse, accélérations, frottements, lois de Newton, vitesse de rotation, programmation, incertitudes de mesures, chaine de transmission de données, optimisation... L'idée est d'utiliser une **soufflerie faite maison** pour mesurer les **forces de portance et de traînée** s'appliquant sur l'avion ainsi que des capteurs (forces, lumière, accélération...) pour prédire les conditions de vol, choisir les composants permettant la programmation, la propulsion et le contrôle à distance pendant une durée satisfaisante, et enfin **optimiser son vol**.

A cette heure, nous faisons des **tests en conditions réelles**. Il passent par un enregistrement vidéo. Nous pourrons alors rectifier, abandonner ou s'extasier ! Viendra enfin la phase d'optimisation qui nous permettra d'avoir la plus grande autonomie possible. Viendra enfin la phase d'**optimisation** qui nous permettra d'avoir la plus grande autonomie possible.

Problématique :

Quelle frustration de lancer un avion réalisé à partir d'une simple feuille de papier A4 et de le voir retomber quelques secondes plus tard...

Mais est-il possible grâce à la physique et ses lois, de le contrôler à distance pendant plusieurs minutes (8-10 min) ?

2. Méthode :

Pour notre défi, nous avons pris une simple **feuille de papier** 210 x 297 millimètres (A4) qui pèse environ **5 grammes** (grammage de 80 g/m²).

Après avoir plié la feuille pour concevoir l'avion, nous avons découpé des stabilisateurs sur les ailes. Il y a en a un sur chacune.

Volets sur les ailes.

Modèles :

Nous avons tout d'abord créé plusieurs **modèles** d'avion en papier que voici :

Nous avons finalement sélectionné l'avion du haut de la page car il possède la **plus grande surface alaire** et donc nous permet d'avoir une meilleure portance.

Pour que l'avion puisse voler, il faut impérativement que son **poids maximum** soit inférieur à sa **portance**. Lorsqu'on connaîtra la valeur de cette portance, on pourra déduire le meilleur choix possible des composants à mettre sur l'avion. Il a donc fallu mesurer la portance. Pour mesurer cette portance, il a fallu concevoir une **soufflerie**.

Soufflerie :

Avec une soufflerie, nous pourrons mesurer les différentes forces s'exerçant sur l'avion (ici, on mesure la force de portance et de traînée) avec différentes incidences. C'est dans la soufflerie que l'on met l'avion, relié à des **capteurs**.

L'incidence est l'angle d'inclinaison de l'avion formé entre la corde de la section longitudinale de l'aile de l'avion et le vecteur vitesse du vent relatif.

La soufflerie est une grosse boîte composée d'une planche en bois qui fait office de sol, ainsi que de trois vitres en **plexiglas** pour voir à l'intérieur. Il y a au fond un ventilateur, à la bonne taille, qui va aspirer l'air dans la soufflerie. L'air va passer sur l'avion et ressortir par derrière.

Ensuite, nous avons assemblé des **rouleaux de carton** pour homogénéiser le flux d'air entrant afin de pouvoir effectuer des mesures plus précises. Nous avons néanmoins rencontré un problème : le diamètre des rouleaux étant élevé, ils obstruaient trop l'espace, ce qui ralentissait fortement le flux d'air et perturbait son homogénéisation.

Nous avons songé à remplacer les rouleaux de cartons par des **pailles**, mais il en fallait un trop grand nombre et nous avons finalement décidé de ne rien mettre à l'entrée.

Voici à droite des images de la soufflerie.

1. Ventilateur.
2. Vitre en plexiglas.

Rouleaux de cartons.

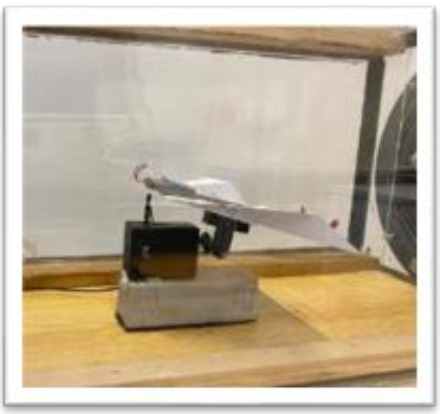
Carte des vitesses du vent :

Nous avons dû faire une carte du champ des vents qui nous permettrait d'identifier l'endroit où le vent serait le plus homogène et puissant. Nous avons finalement décidé de fixer l'avion au centre-avant de la soufflerie.

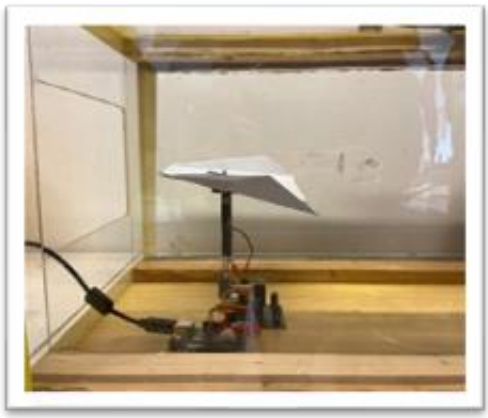
3. Capteurs :

Pour ce projet, il nous fallait bien évidemment quelques appareils de mesures en plus de tout le système dans la soufflerie. Nous avons utilisé un **anémomètre** qui a servi à mesurer la vitesse du vent. Nous avons également utilisé un **dynamomètre** qui nous a notamment permis de mesurer, en le fixant à l'avion, la force de poussée. Nous verrons par la suite qu'il fallait aussi mesurer la fréquence de rotation des hélices de l'avion. Nous l'avons fait grâce à un **capteur de lumière**. Ce capteur comptait combien de fois la lumière s'occultait par minute, c'est-à-dire combien de fois une des hélices passaient devant le capteur chaque minute… Finalement, nous avons eu besoin d'un ***LabQuest 2 – Vernier***, qui permet tout simplement de collecter toutes les données au cours du temps, de les afficher et les traiter.

L'élaboration d'une soufflerie a pris beaucoup de temps et nous avons récemment conçu un **nouveau système de capteurs** plus sophistiqué qui nous donne des mesures bien plus cohérentes qu'avant. Voici ci-dessous l'ancienne et la nouvelle soufflerie.



AVANT



APRÈS

Anémomètre :

Dynamomètre :

Capteurs de lumière :

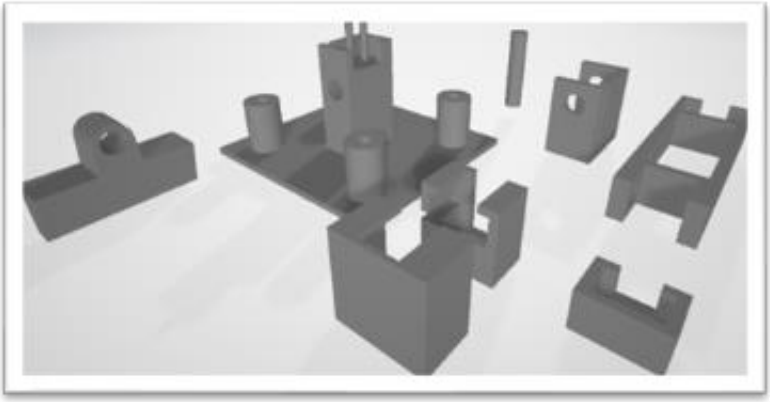
LabQuest 2 – Vernier

Accessoires :

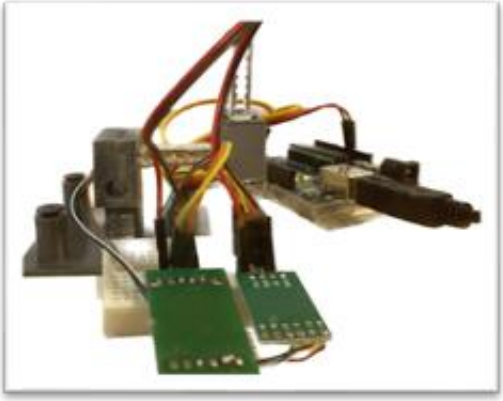
Il a fallu imaginer un **système** qui serait posé dans la soufflerie et qui pourrait à la fois servir de « **monture orientable** » pour l'avion et de système de mesure.

Cette structure est donc composée d'une partie imprimée à l'**imprimante 3D** et qui peut supporter l'avion. La partie où l'on pose l'avion peut se pencher pour que l'on puisse mesurer les forces à différentes incidences.

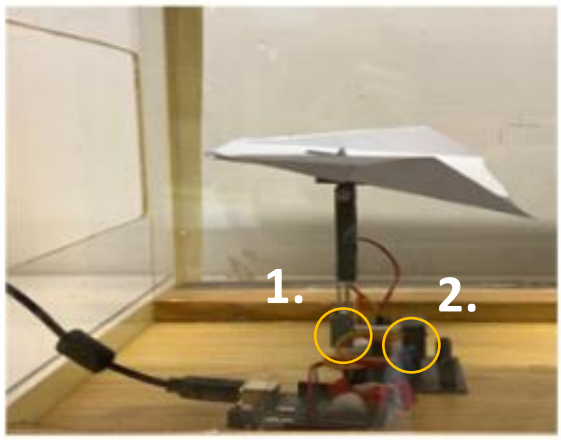
Modélisation 3D des pièces de la structure soutenant l'avion.



Système électronique.



En plus de cette monture, il y a tout un système électronique, relié à un ordinateur. Il est notamment composé de deux **jauges de contrainte** pilotées par un **HX711** qui font office de capteurs de portance et de traînée. Nous mesurons **simultanément** ces deux forces. Le module HX711 pour Arduino est conçu pour amplifier le signal de la jauge de contrainte et transférer les données au microcontrôleur. Les capteurs sont reliés à un circuit électronique qui va intégrer toutes les valeurs en direct dans l'application ***Arduino IDE***, une plateforme électronique open-source.

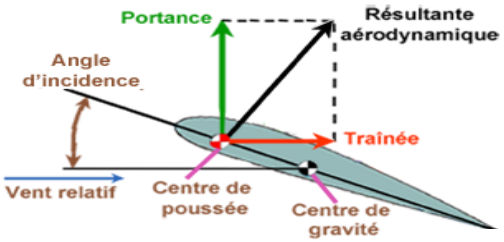


Intérieur de la soufflerie :

Jauges de contraintes permettant de capter la force de trainée (1) et de portance (2).

4. Mesure de la portance :

La portance est la force perpendiculaire à la direction du mouvement (vent relatif) qu'a un corps dans un fluide.



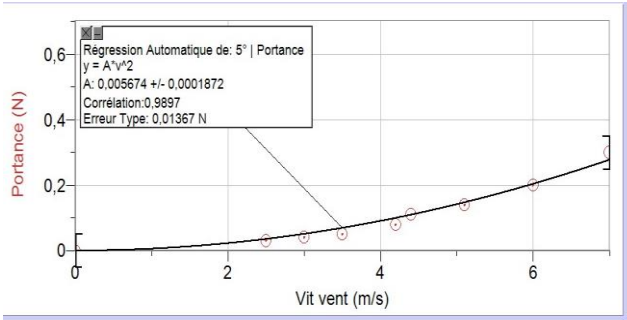
Pour mesurer la portance, nous avons fixé l'avion sur sa « monture », dans la soufflerie. Le vent, en traversant la soufflerie, va soulever l'avion et appliquer une contrainte sur l'une des jauges de contrainte, nous donnant la force de portance en direct sur un ordinateur.

Nous avons alors mesuré l'angle d'inclinaison de l'avion à l'aide d'une **application de téléphone** *Apple* qui s'appelle « Mesures ». Il suffit de poser le téléphone sur l'avion et on le règle à la bonne

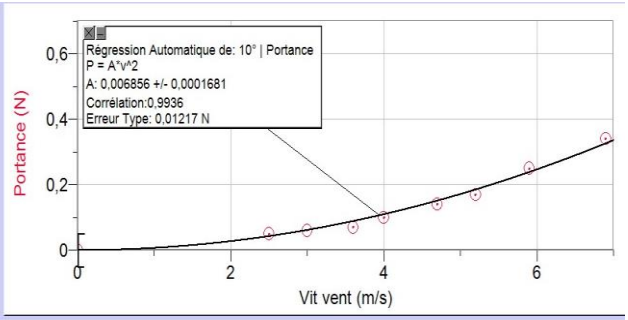
incidence. Il ne reste plus qu'à prendre les mesures pour différentes vitesses du vent à l'aide de l'anémomètre.

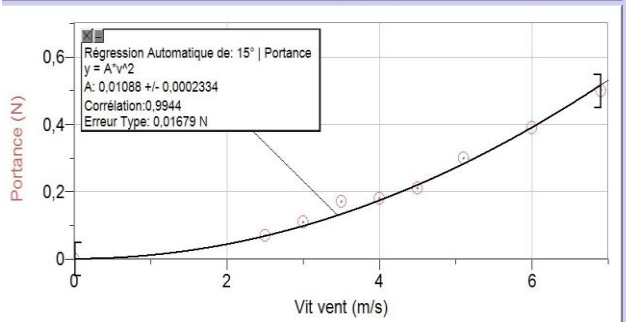
Voici quelques graphiques des forces de portances obtenues en fonction de la vitesse du vent et selon quatre incidences (tous les 5°) :

5°

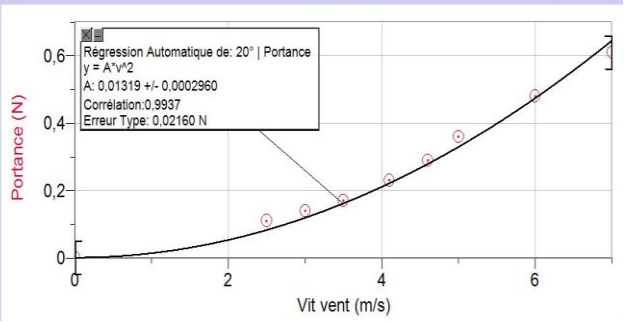


10°





15°



20°

D'après les données récoltées, la **portance est maximale** à incidence de 20° et vitesse du vent quelle que soit V. Cette portance est de **0,26 N**. Le Poids maximum ne devra donc pas excéder 0, 26 Newtons. On peut donc déduire la masse maximale de l'avion grâce à la formule de la force de pesanteur terrestre (poids) : $\vec{P} = m \cdot \vec{g}$. La masse maximale de l'avion est donc de 26 grammes.

On peut dès lors choisir les composants de l'avion. La masse de notre avion avec ses composants est de **23, 9 grammes**.

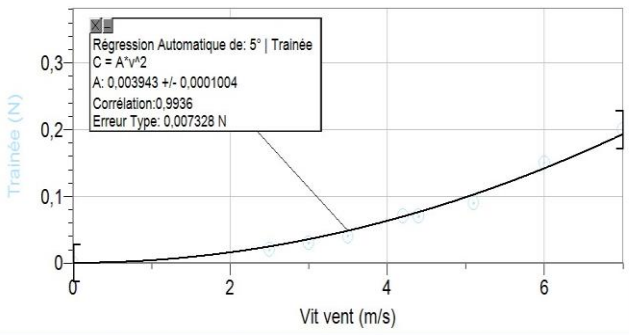
Il faut ensuite mesurer la traînée :

5. Mesure de la traînée :

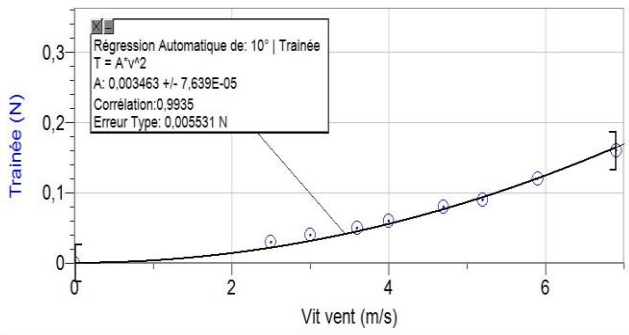
De la même sorte que nous obtenons la force de portance, en même temps, une **jauge de contrainte** nous informe sur la **traînée**.

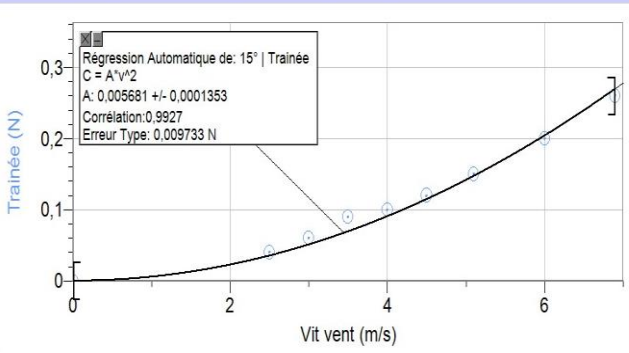
Voici, page suivante, les mesures obtenues pour quatre incidences :

5°

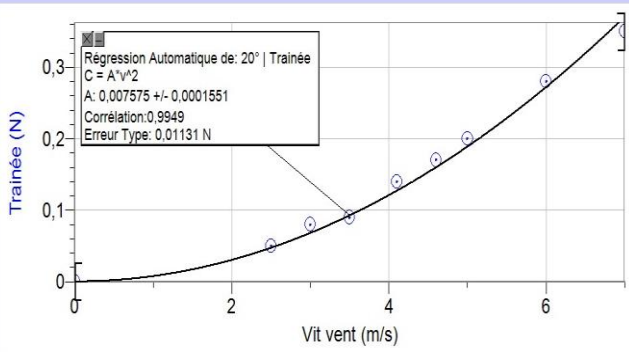


10°





15°



20°

6. L'avion :

La structure :

Il a fallu réunir quelques composants électroniques pour que notre projet aboutisse tout en considérant la contrainte évidente du poids.

Afin de pouvoir fixer les moteurs et les hélices à l'arrière de l'avion et les relier avec **une tige de plastique** jusqu'à l'avant, où seraient regroupés les composants principaux, il a également fallu imprimer un **squelette de plastique** avec une imprimante 3D qui permettrait de fixer chacun des composants. Les deux parties principales sont en fait reliées par un « **mât** », lui-même fixé à d**eux branches** qui sont collées aux ailes de l'avion. Les moteurs se trouvant à l'arrière de l'avion, pour des raisons **d'équilibre structurel** et de balance des poids en vol, le reste des composants doit se trouver à la tête de l'avion.

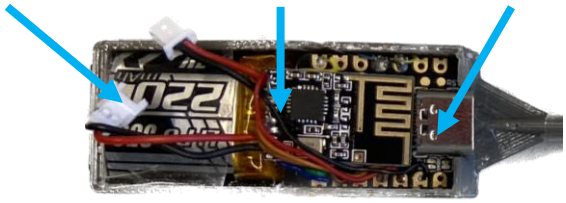
Composants électroniques :

L'avion est composé entre-autre des hélices reliées aux moteurs à l'arrière de l'avion. Des fils de connexion lient l'arrière et l'avant. Sur le nez de l'avion, il y a basiquement une petite **batterie** qui permet d'alimenter les moteurs, une carte **réceptrice radiofréquence** qui reçoit

le signal par onde de la télécommande et un **microcontrôleur XIAO** qui a pour but de transmettre le signal aux moteurs.

Voici une photographie, du nez de l'avion. On peut y voir les différents **composants électroniques :**

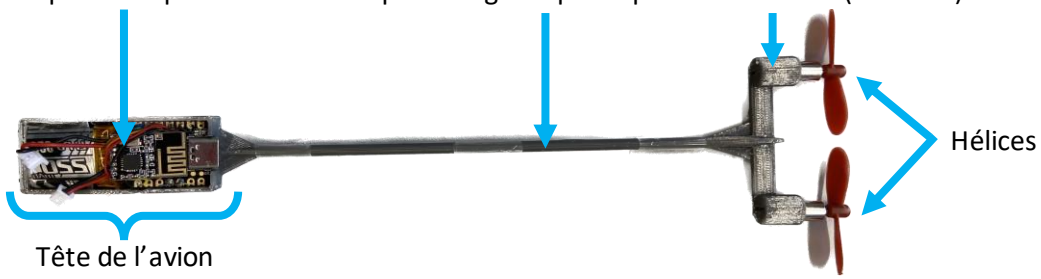
Batterie Récepteur radiofréquence Carte *Seeeduino XIAO*



Pour les vols, on fixe également un nez en mousse antichoc.

Voici une modélisation 3D, page suivante, de la structure sur l'avion (non assemblé) ainsi que de la structure avec les composants (assemblés) :

Principaux composants électroniques Tige en plastique Arrière (moteurs)



Modélisation 3D de la structure de l'avion :

Branches collées aux ailes

Tête de l'avion

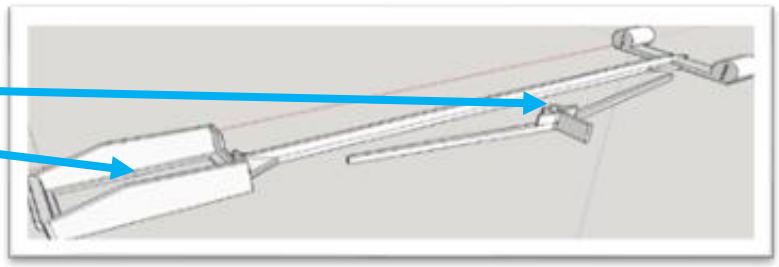


Tableau des masses des composants de l'avion :

	Masses (g) :
Papier :	4,9
Plastique :	4
Électronique :	10,4
Batterie (petite) :	3,1
Batterie (grande) :	4,6
Total :	**23,9** (avec grande batterie)

Télécommande :

Écran

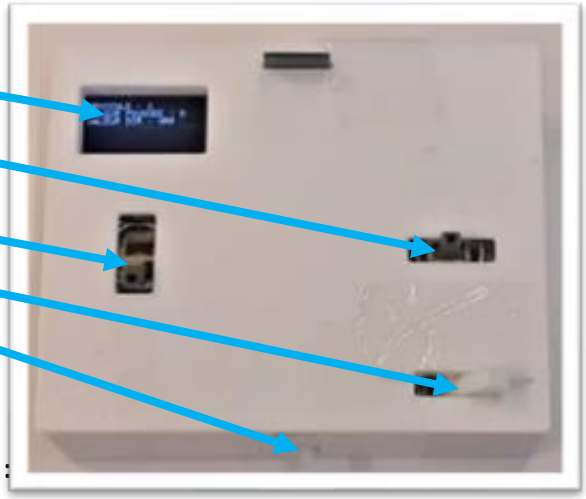
Joystick gauche-droite (puissance des hélices)

Joysticks avant-arrière

Bouton compensation gauche-droite ou « trim »

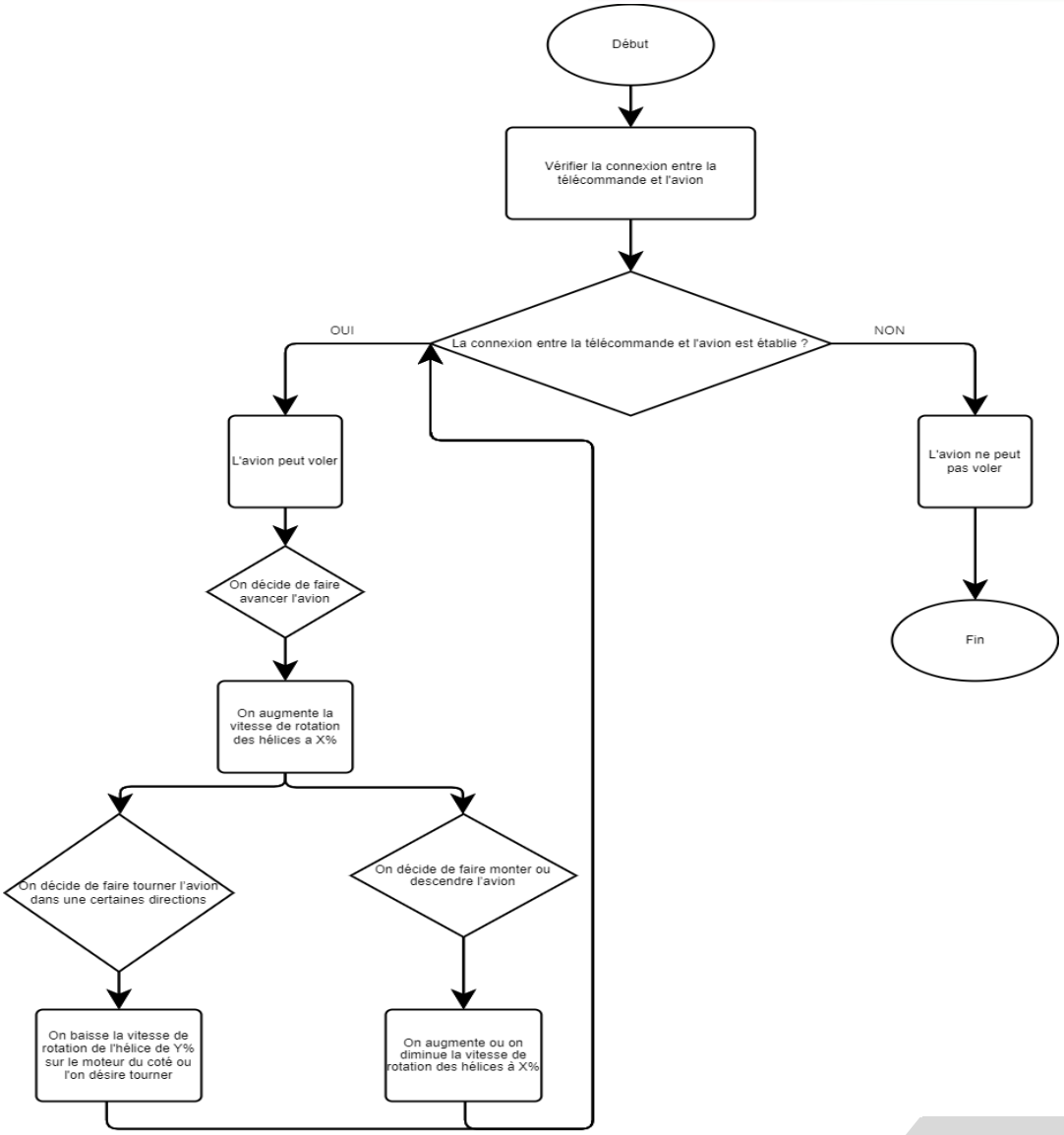
(fait tourner plus ou moins vite une des hélices)

Bouton éteindre / allumer



Code :

Voici une visualisation du code de la télécommande :



7. Mesure de la poussée :

La poussée est la force de propulsion créée grâce à des hélices poussant l'air vers l'arrière.

Maintenant que nous avions la force de portance ainsi que le poids, déterminant ainsi la masse et donc les composants (dont les moteurs), il nous a fallu nous concentrer sur la **force de poussée**. Elle doit permettre d'atteindre 5,5 m/s ou moins si la masse est inférieure à 26 g.

Nous avons utilisé un **capteur de lumière** qui mesure combien de fois que la lumière est occultée devant son « œil », et ainsi nous calcule la **fréquence de rotation des hélices**. La structure de l'avion est également reliée à un dynamomètre qui mesure donc la force de poussée.

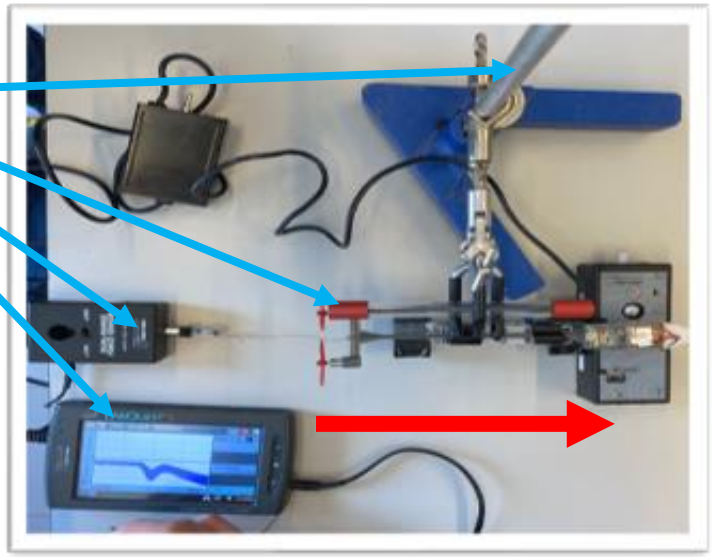
Potence

Capteur de lumière

Dynamomètre

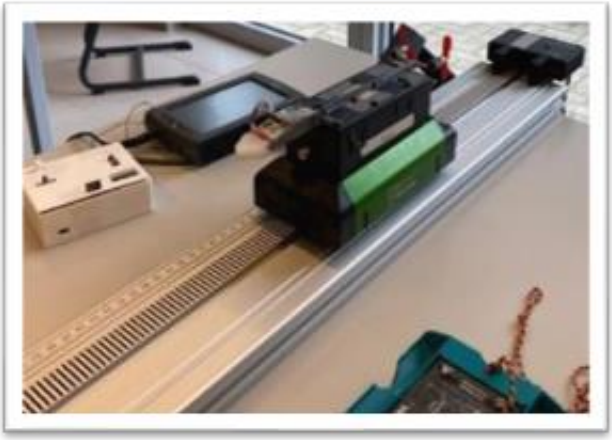
LabQuest 2 – Vernier

Les hélices de l'avion tournent. L'avion part dans le sens de la flèche rouge mais est retenu par le dynamomètre. Elles touchent presque le capteur de lumière.



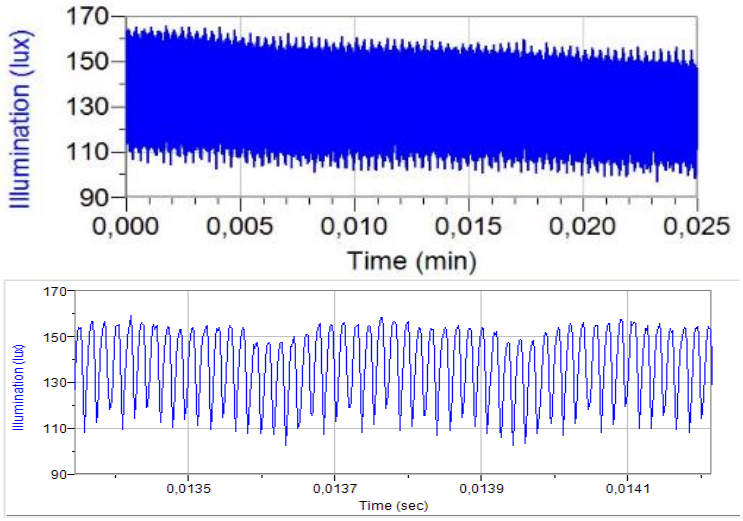
Essai :

Pour mesurer la force de poussée de l'avion, nous avions d'abord essayé d'utiliser un **rail**. L'avion, sur un **wagon,** avait été attaché à une **ficelle** et selon les différentes vitesses des moteurs, l'avion avait roulé sur le rail et tendait la ficelle avec plus ou moins de force. Les essais étaient trop imprécis et donc **non utilisables**.

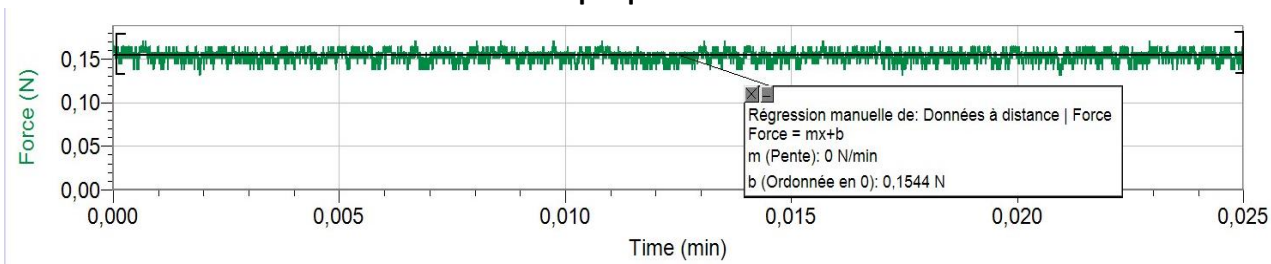


Voici une série de graphiques portant sur la poussée de l'avion :

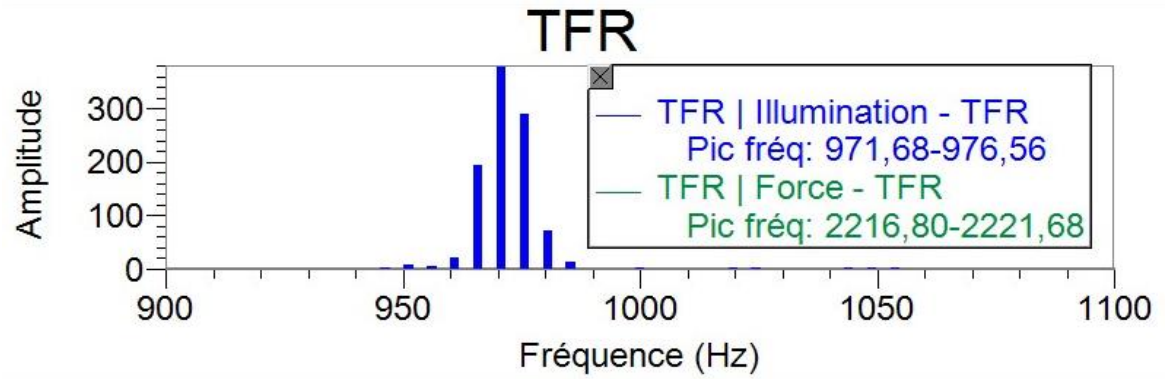
Graphique n°1



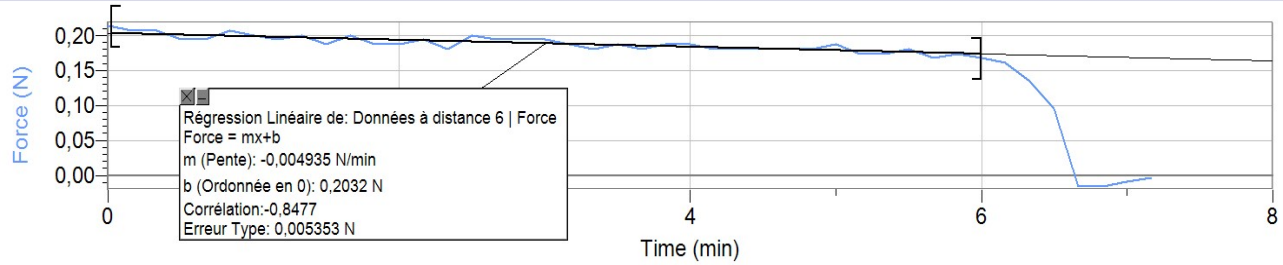
Graphique n°2 :



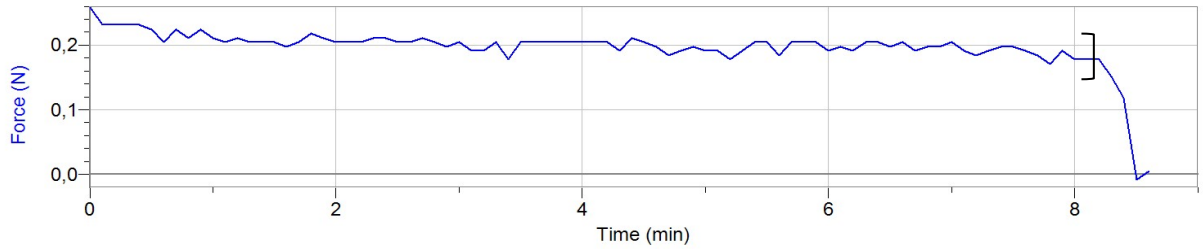
Graphique n°3 :



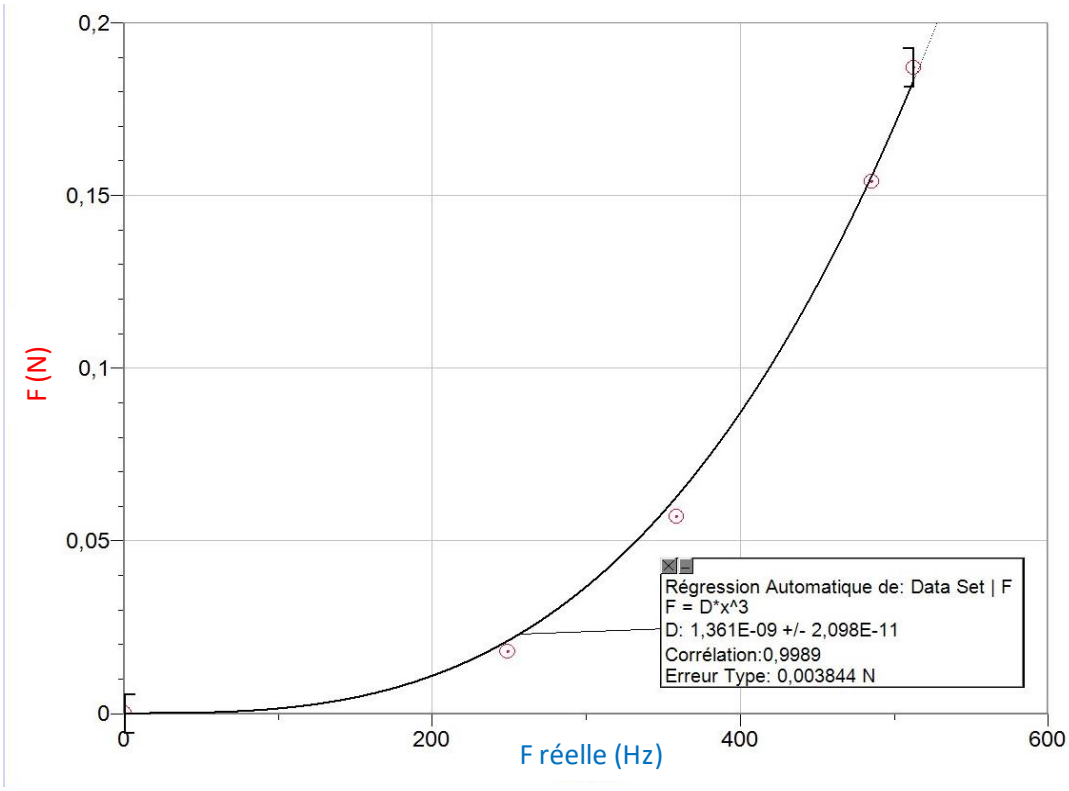
Graphique n°4 :



Graphique n°5 :



Graphique n°6 :

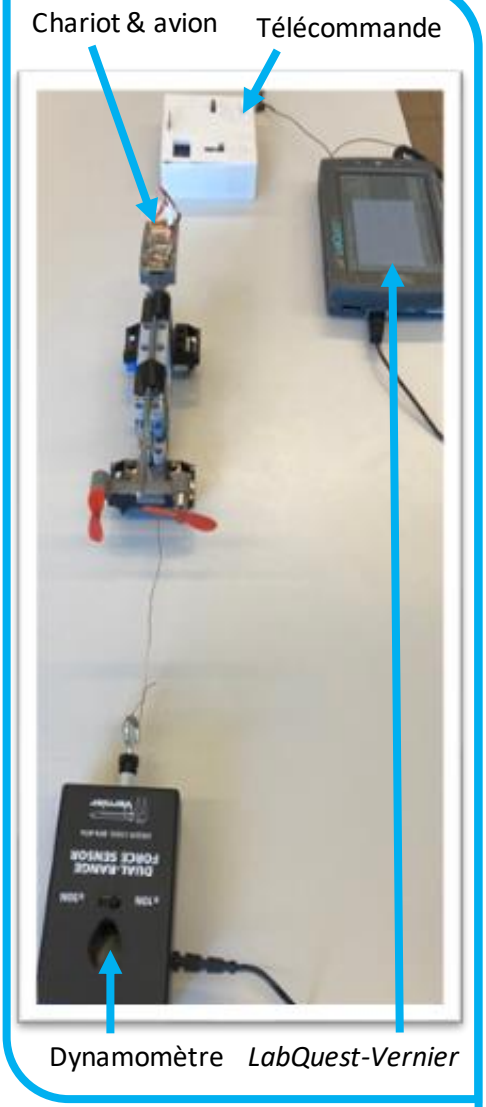


Le graphique n°1 donne le nombre d'**occultations** du capteur de lumière au cours du temps et donc la vitesse des hélices. Le graphique n°2 donne la **force de poussée** en fonction de la fréquence donnée au cours du temps. Le graphique n°3 donne la **fréquence** où il y a le meilleur nombre d'occultation : à 970 Hertz. En fait, la fréquence indiquée est le double de la fréquence de rotation du moteur car il y a deux pales par hélices. La fréquence de rotation du moteur est donc de 485 Hertz. En combinant les données du dynamomètre on obtient des graphiques intéressants : le graphique n°6, qui représente la **force de poussée en fonction de la fréquence de rotation des hélices.**

Le graphique n°4 fût obtenu en laissant les moteurs allumés à une vitesse maximale. Il représente l'autonomie de la batterie, donc le temps maximum de poussée.

Avec une nouvelle batterie, nous avons pu avoir une **meilleure autonomie**. Cette nouvelle autonomie est représentée par le graphique n°5 qui fût obtenu de la même façon que le graphique n°4 (illustration à droite). La nouvelle autonomie est de **8,2 minutes** (contre 6 minutes avant). La **batterie** pèse 1 gramme de plus que l'ancienne et a une capacité de **220mAh**.

On peut conclure de ces mesures et notamment du graphique n°5 que l'avion peut voler durant maximum 8 minutes à puissance maximale, et donc un peu plus longtemps avec des phases **planées**. Notre but est maintenant d'optimiser les forces s'exerçant sur de l'avion pour arriver à une durée de vol supérieure (vers les **10 minutes**). La finesse de l'avion peut nous être utile pour cela.



8. Finesse :

La finesse est définie comme le rapport entre la portance et la traînée. En vol plané à vitesse vraie constante, c'est le rapport entre la distance horizontale parcourue et la hauteur de chute.

Grâce aux données des forces de portance et de traînée, on peut accéder à la **finesse** de l'avion, nous communiquant ainsi des informations sur le **décrochage** de l'avion et donc sur son efficacité, ce qui nous permettra d'optimiser son autonomie. En fait, la finesse représente la distance parcouru (horizontalement) sur la hauteur qu'il a perdue et donc combien notre avion peut **planer**.

Voici comment on calcule la finesse :

Force de portance : $F_z = \frac{1}{2}\rho S C_z V^2$

Force de traînée : $F_x = \frac{1}{2}\rho S C_x V^2$

Sur nos graphiques (force en fonction de vitesse) :

ρ : masse volumique du fluide (ici l'air) en kg/m³.
V : vitesse en m/s.
S : surface de référence en m².
C_x / C_z : coefficient de portance / traînée.

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

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

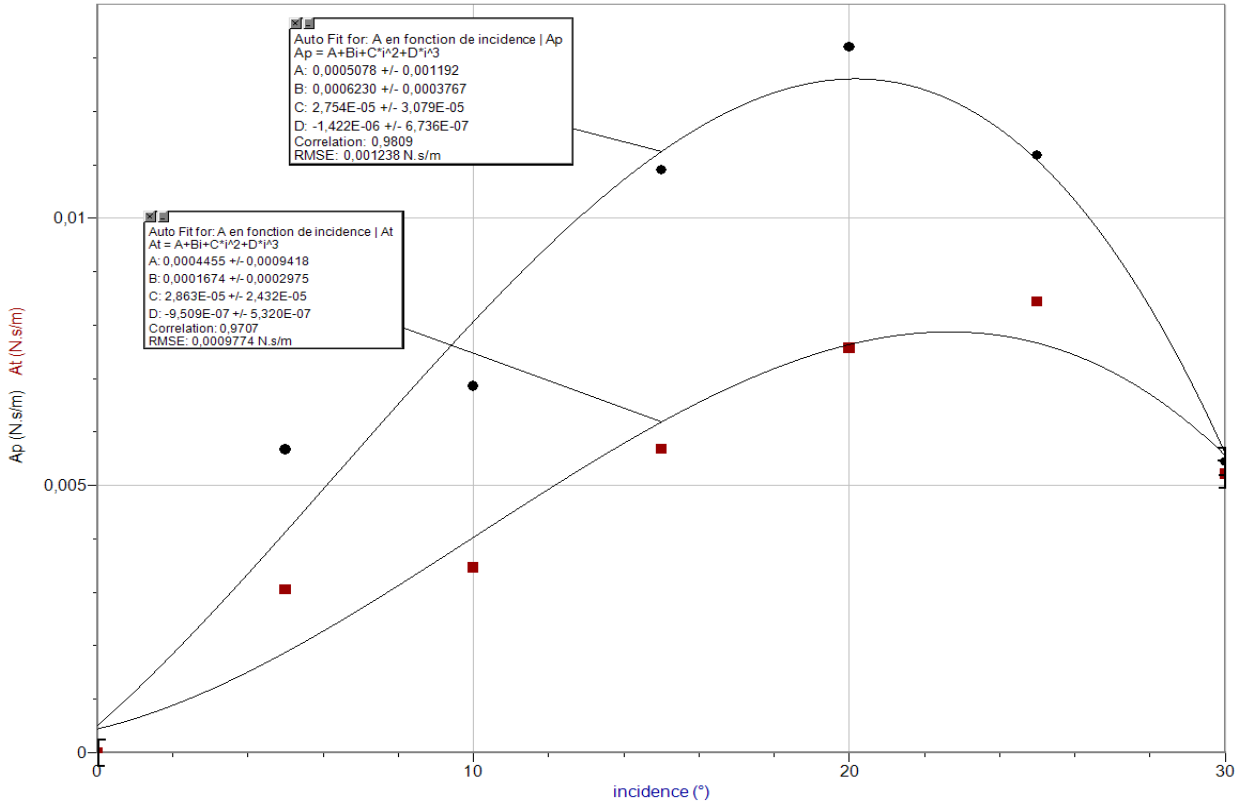
Donc :

$F_z/V^2 = \frac{1}{2}\rho C_z S =$ Coefficient directeur de la courbe (appelé A_P en N.s/m).

$F_x/V^2 = \frac{1}{2}\rho C_x S =$ Coefficient directeur de la courbe (appelé A_T en N.s/m).

$f = F_z/F_x = \text{Coef}_{\text{Portance}} / \text{Coef}_{\text{Traînée}} = C_z/C_x$

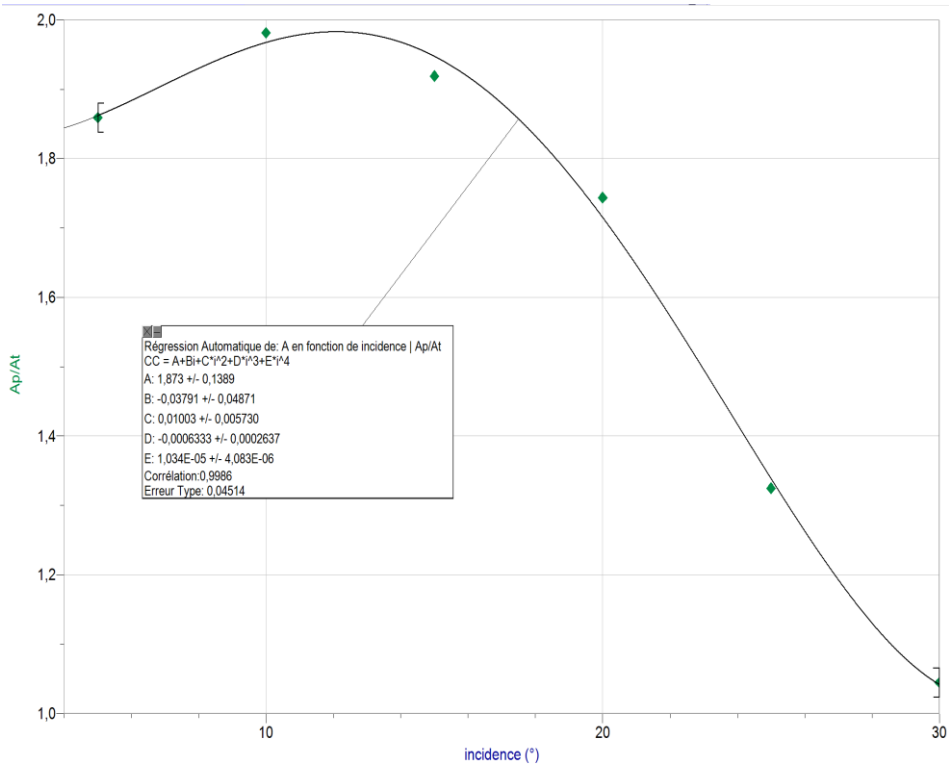
Donc, grâce aux mesures de portance et de traînée, **on obtient ces graphiques :**



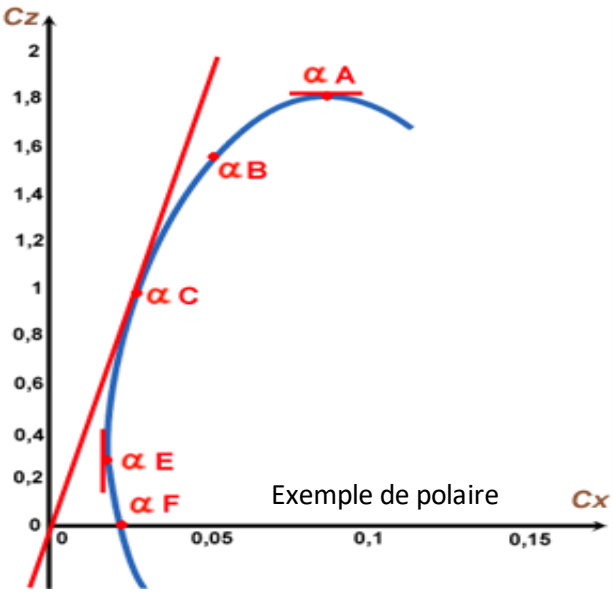
Le graphique des coefficients directeurs Ap (de portance) et At (de traînée) des courbes obtenues grâce à la soufflerie en fonction des différentes incidences (en degrés). On voit ici que **la portance est maximale à 20° d'incidence.**

Le graphique de la finesse de notre avion (Ap/At) en fonction de différentes incidences (page suivante). On peut voire que la **finesse maximale de notre avion est de 2.** Sachant que celle d'un avion est en moyenne de 17,5 la finesse de notre avion est très faible mais suffisante pour un avion en papier.

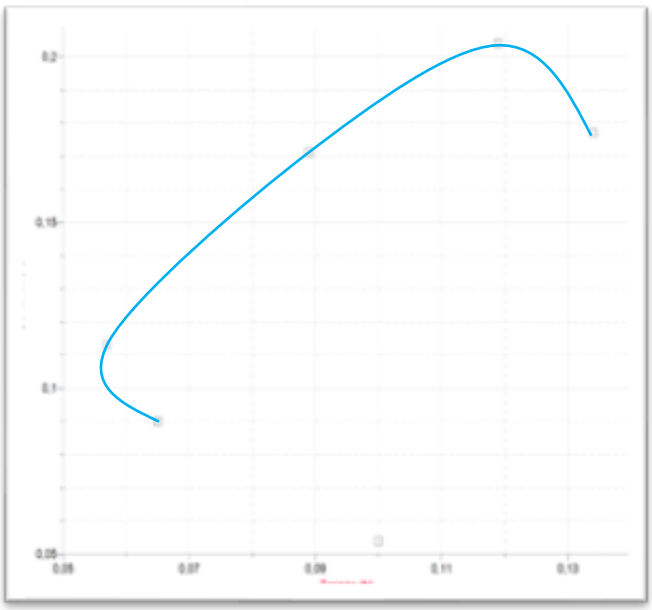
Toutes ces données nous permettent d'accéder à la polaire de notre avion.



Polaire :



Exemple de polaire

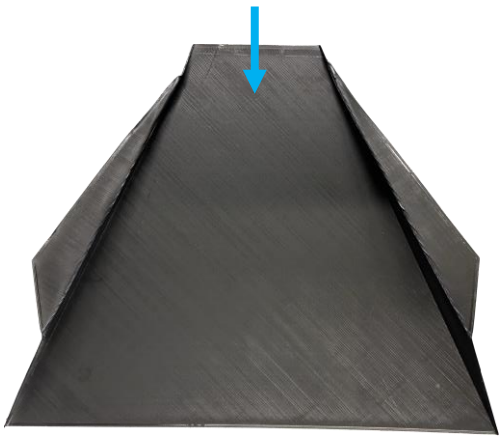


La polaire permet d'avoir un bon aperçu des **performances** de l'avion. Elle représente la **portance maximum**, sa **trainée minimum** et sa **finesse maximum**. Grâce à plusieurs données que nous avons calculé, nous avons pu déterminer celle de notre avion (à droite), et déterminer que sa finesse maximum est de 2.

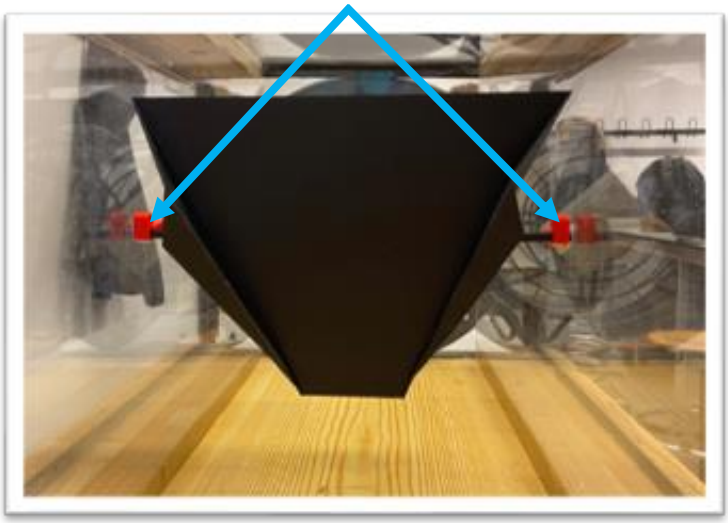
9. Foyer de portance :

Nous avons imprimé une **version 3D** (à gauche) en acide polylactique (PLA) de notre avion afin d'en définir le foyer de portance (le point d'application des variations de la portance). Nous l'avons fixé à une **armature amovible** (*lego*) accrochée à une tige en plastique afin que l'on puisse déplacer la tige par rapport à l'avion. Grâce à cela nous avons pu déterminer la position dans laquelle la force du vent est identique sur les deux faces, de part et d'autre de la barre centrale, alors que l'avion est perpendiculaire à la direction du vent. On peut alors faire tourner l'avion autour de la barre sans contrainte.

Voici la version imprimée de l'avion :

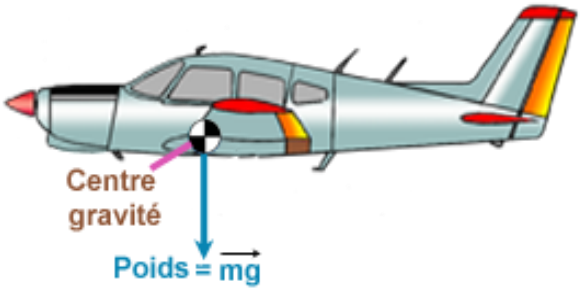


Ici, fixé à sa tige pour déterminer le foyer de portance :



Centre de gravité :

Il a également fallu rechercher le **centre de gravité** de l'avion. C'est le point d'application de forces comme le poids. C'est aussi l'endroit où il serait en **équilibre** s'il était suspendu. Nous l'avons suspendu avec un **fil à plomb** par deux points différents et avons tracé chaque fois la verticale passant par l'axe de rotation. Le croisement de ces deux droites résultantes est le centre de gravité de l'avion.



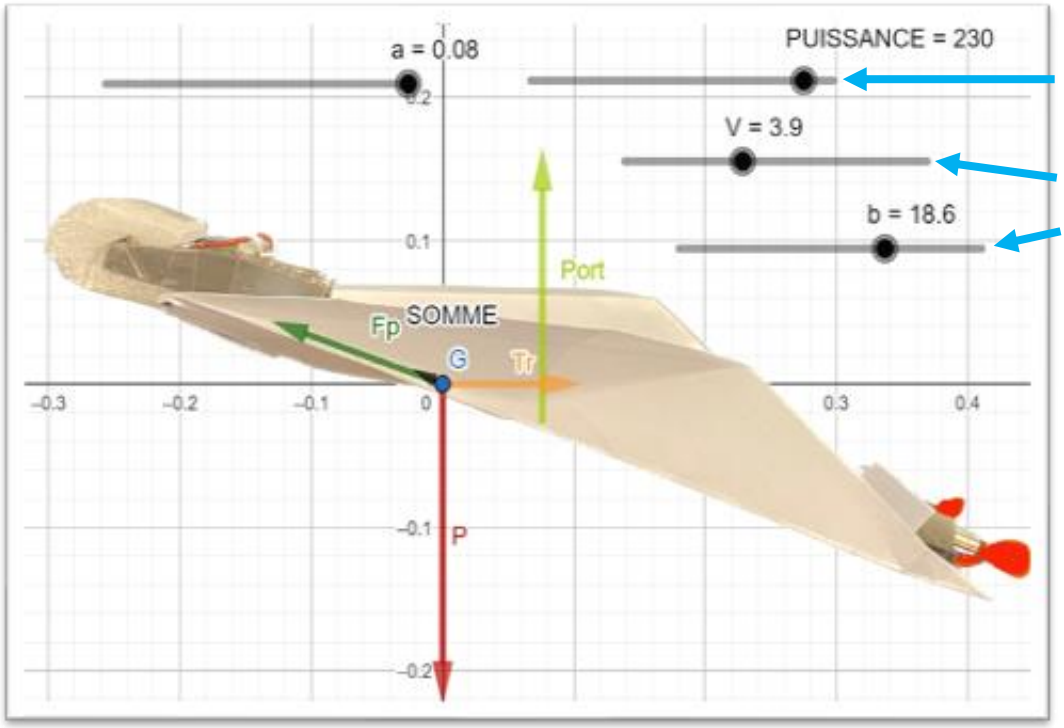
10. Résultante des forces :

Enfin, maintenant que nous connaissons toutes les forces interagissant sur l'avion ainsi que le foyer de portance et le centre de gravité, il faut pouvoir calculer la **résultante (somme) des forces** en fonction des différentes variables qui sont : **l'incidence**, la **puissance** des moteurs et la **vitesse** du vent. Tout ceci afin de prédire et donc d'optimiser son vol.

Nous avons lié tous ces vecteurs pour obtenir le vecteur somme sur *GeoGebra*. Sur l'image, la portance est représentée par le vecteur vertical vers le haut (noté Port en vert clair), la trainée par le vecteur horizontal (noté Tr en orange), la poussée par le vecteur vert foncé (noté Fp) et le poids par le vecteur vertical vers le bas (noté P en rouge). Nous avons décidé de créer un fichier *GeoGebra* donnant la direction, le sens et l'intensité de chaque force en fonction des quatre curseurs. Nous prévoyons d'améliorer encore ce document au fur et à mesure que nous récupérerons plus de données afin d'avoir accès à un fichier interactif nous donnant les valeurs de toutes les forces. Il nous faut encore notamment déterminer le foyer de portance (point d'application du vecteur vert clair)…

On retrouve entre-autres dans ce modèle le coefB, variant selon l'incidence (b) qui correspond à la finesse. Il nous permet d'obtenir de façon plus précise le coefficient de traînée.

$$\text{coefB} = 1.034 \cdot 10^{-5}\, b^4 - 0.0006333\, b^3 + 0.01003\, b^2 - b \cdot 0.03791 + 1.873 \qquad Tr_1 = \frac{Por}{\text{coefB}}$$



Puissance de la télécommande

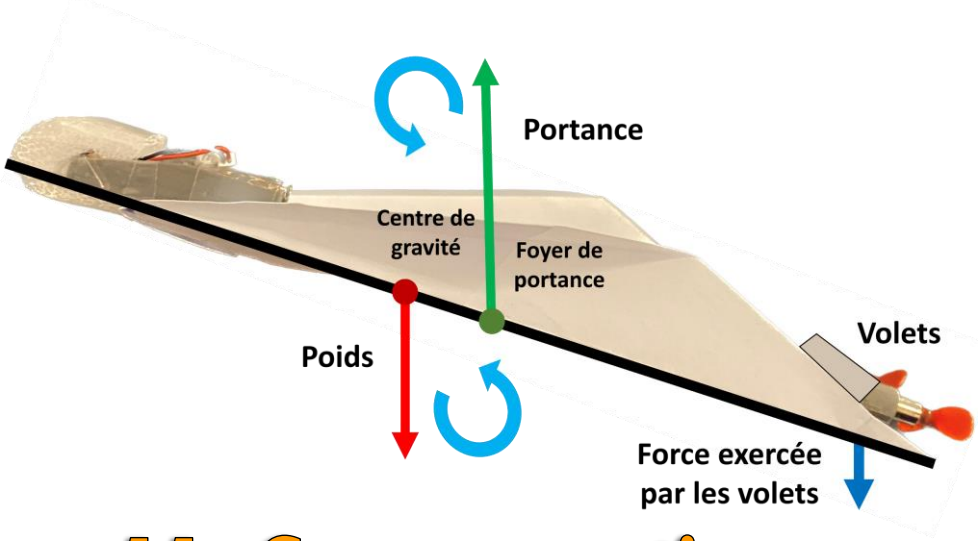
Vitesse

Incidence

Grâce à l'expérience permettant de déterminer le foyer de portance, le curseur a est réglé sur 0,08.

Volets :

Notre avion possède deux volets. Bien qu'ils possèdent un caractère approximatif, ces **volets sont indispensables** pour le bon vol de notre avion. En effet, le centre de gravité et le foyer de portance ne coïncident pas. Lorsque la force de portance est plus élevée que le poids de l'avion, il aura tendance donc à tourner et plonger vers l'avant. Grâce aux volets, on peut **compenser** cette force. On peut donc régler l'inclinaison des volets et ainsi faire plonger l'avion, le faire voler en ligne droite ou bien le faire monter, comme illustré ci-dessous.

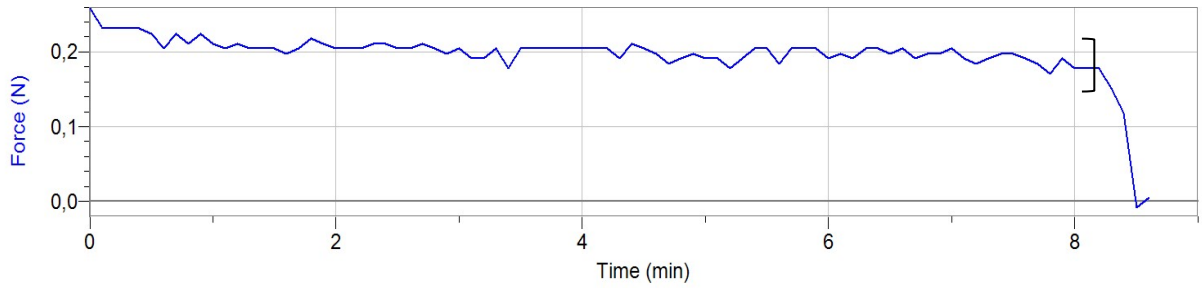


11. Consommation :

Notre avion possède une batterie avec une quantité d'électricité Q de **220 mAh** et une tension de **3,7 V**. Comme vu dans la partie « Mesure de la poussée », à pleine puissance, notre avion peut voler pendant **8,2 minutes**. Donc : $Q = 220\,mAh$

$$U = 3{,}7\,V$$

$$\Delta t = 8{,}2\,\text{min} = 8{,}2 \cdot 60 = 492\,\text{s à } 100\%$$



Grâce à ces deux formules :

$$P = U \cdot I$$

$$E = P \cdot \Delta t$$

Alors, on peut dire que :

$$E = 3{,}7 \cdot 0{,}220 \cdot 3600 = 2930\,J$$

$$P = E/\Delta t$$

Grâce à une règle de trois :

$$255 \rightarrow 5{,}9\,W$$

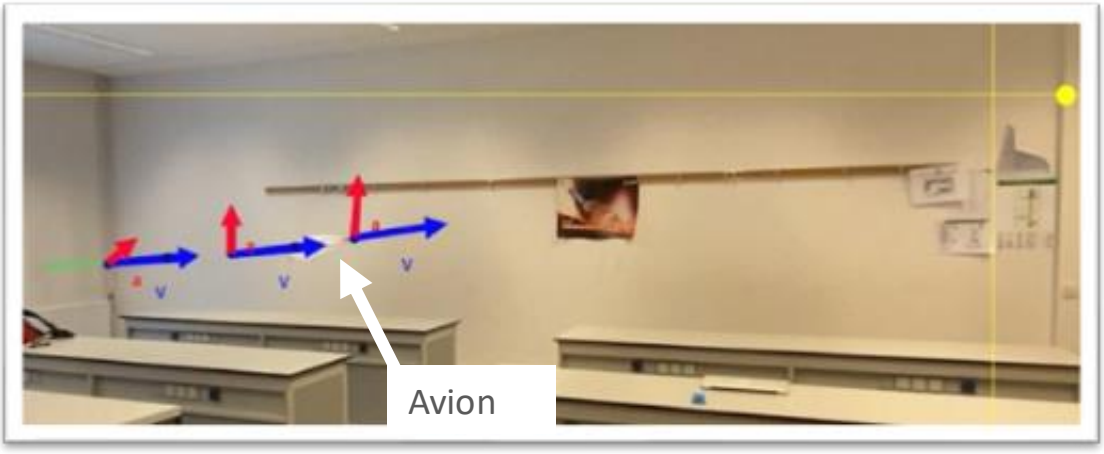
$$220 \rightarrow 5{,}1\,W$$

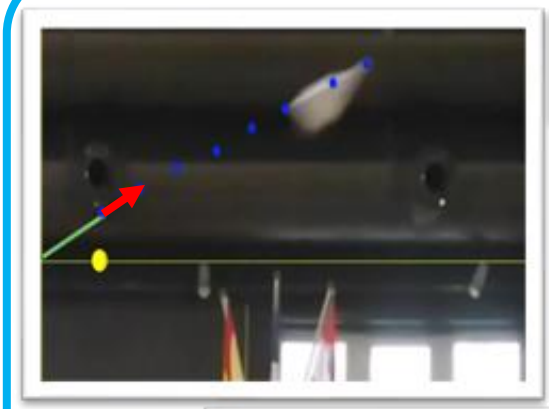
$$\Delta t = \frac{E}{P} = \frac{2930}{5{,}1}/60 = 9{,}57\,min$$

On en conclue que notre avion peut voler pendant **9,57 minutes**. Nous sommes donc très près de notre objectif de **10 minutes**.

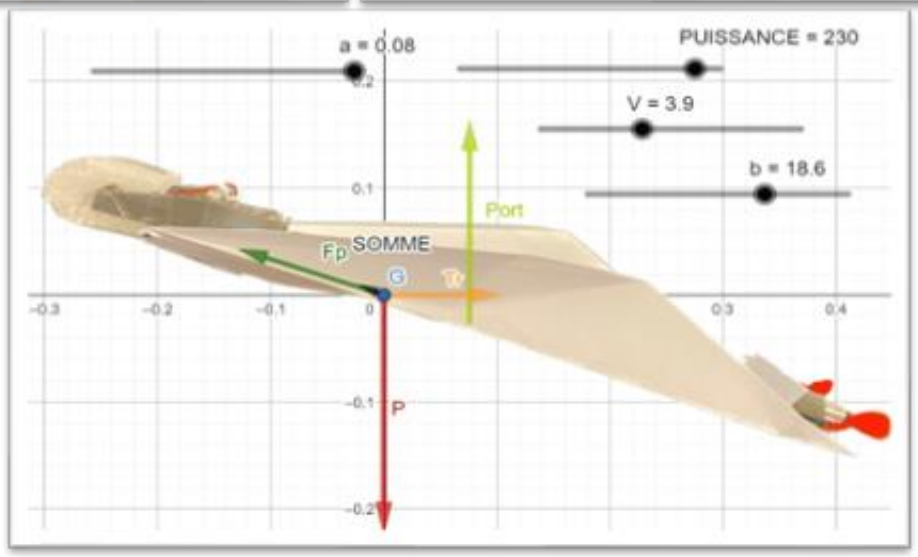
12. Vols de l'avion :

A cette heure, nous faisons des **tests en conditions réelles**. Il passent par un **enregistrement vidéo.** Cet essai nous a permis de constater que l'avion vole bien en milieu **intérieur**. Malheureusement, nous n'avons pas encore pu essayer le vol de l'avion à l'extérieur dû aux **mauvaises conditions météorologiques**. L'étude de la vidéo prise sur ***Logger Pro*** nous a d'abord permis de voir que (ici le vecteur accélération) la portance est bien dirigée vers le haut.





Time (s)	X (m)	Y (m)	Vx (m/s)	Vy (m/s)	VITESSE (m/s)	i (°)
1.233	0.4547	0.2146	3.742	1.261	3.949	18.614
1.267	0.5865	0.2528	3.753	1.366	3.994	19.985
1.300	0.7047	0.3036	3.708	1.428	3.973	21.043
1.333	0.8214	0.3480	3.958	1.492	4.230	20.638
1.367	0.9781	0.4058	3.973	1.489	4.243	20.527
1.400	1.094	0.4491	3.744	1.397	3.996	20.453



Ensuite un deuxième vol intérieur, dans une salle plus grande, nous a permis de **confirmer notre modèle** des forces *GeoGrebra*.

Par exemple, lorsque l'on prend une incidence de 18,6° et une vitesse de 3,9 m/s, on constate effectivement que le vecteur Somme des forces pointe dans la bonne direction. On constate donc une **très faible accélération**. L'exploitation sur *Logger Pro* de ces vidéos pourra confirmer et éventuellement **améliorer** les résultats de la soufflerie et l'ensemble des mesures réalisées.

13. Perspectives :

Nous tenterons d'aller plus loin encore, en augmentant la stabilité grâce à un **PID** corrigeant les lacets ou tangages non désirées ou gérer une éventuelle rafale de vent. Il nous faut encore relier sur notre modèle *GeoGebra* le curseur **de vitesse et de puissance** de la télécommande qui sont pour le moment indépendant. Après cela, nous pourrons encore essayer d'augmenter la durée de vol.

Nous allons prochainement utiliser une application de téléphone qui pourra diriger l'avion à distance par ***Bluetooth***. Nous n'aurons donc plus besoin d'une télécommande.

Dernièrement, nous avons obtenu accès à une soufflerie bien plus sophistiquée à l'**ULB** (Université Libre de Bruxelles), dans laquelle nous pourrons donc bientôt avoir des mesures encore plus précises qu'actuellement.

Photo de leur soufflerie :

Conclusion :

Pour conclure, ce projet nous a énormément appris dans beaucoup de domaines, mais pas seulement… Nous avons réellement fait le lien entre la mesure (et son incertitude) et la modélisation qui permet ensuite la prédiction. L'avion peut voler, il en a les capacités. Il est désormais question d'améliorer la durée et la prédiction de son vol. Cela s'apparente à l'idée que nous nous faisons du métier d'ingénieur qui avance par aller-retour entre réalité et modélisation pour créer et améliorer.

14. Remerciements :

Nous remercions tous ceux qui nous ont aidés et qui ont contribués à la réalisation de ce projet. Nous remercions spécialement notre professeur de Physique et de Chimie à l'École Européenne de Bruxelles 4 (EEB4) : Monsieur **Olivier Clémence**, qui nous a proposé ce projet et sans qui nous n'aurions jamais pu l'entreprendre. Nous lui devons un grand merci car c'est grâce à ses conseil pertinents entreprendre et mener à bien ce projet. 😀😊

Nous remercions chaleureusement **Stéphane Vandenborre** qui a assuré les surveillances et rempli toutes les formalités administratives tout en apportant son soutien à notre groupe. Également un immense MERCI à **Bruno Da Silva et Petar Yanev** qui ont si aimablement et bien construit la soufflerie. Sans eux, il n'y aurait tout simplement pas eu de mesures possibles…

Finalement, nous remercions l'école qui nous a permis d'établir ce groupe scientifique !

Ici vous pouvez voir le QR code de notre vidéo

Notre Vidéo

Bibliographie :

Voici quelques bons sites que nous avons utilisés :

- https://dronebotworkshop.com/seeeduino-xiao-intro/
- https://wiki.seeedstudio.com/Seeeduino-XIAO/
- http://www.msc.univ-paris-diderot.fr/~phyexp/pmwiki.php/Avion/AvionsEnPapier
- https://www.poweruptoys.com/
- https://fr.wikipedia.org/wiki/Wikip%C3%A9dia:Accueil_principal
- Découvrez le Seeeduino XIAO - Alternative Arduino minuscule mais puissante (dronebotworkshop.com).
- https://www.lavionnaire.fr/MecaStabilite.php

Annexe (code) :

```
#include <SPI.h
#include <nRF24L01.h>
#include <RF24.h>
#include <Servo.h>  //To create PWM signals we need this lybrary
#include <Wire.h>
const uint64_t pipeIn = 0xE8E8F0F0E1LL;
RF24 radio(6,7);  //CSN and CE pins
long timer = 0; // The size of this struct should not exceed 32 bytes
struct Received_data {
  byte ch1;
  byte ch2;
  byte ch3; };
Received_data received_data;
Servo channel_1;
Servo channel_2;
int ch1_value = 0;
int ch2_value = 0;
int ch3_value = 0;
int dir = 0;
int poussee = 0;
int comp =0;
void reset_the_Data() { // 'safe' values to use when NO radio input is detected
  received_data.ch1 = 255;  //Throttle (channel 1) to 0
  received_data.ch2 = 127;
  received_data.ch3 = 50; }
void setup() {  Serial.begin(9600); //Attach the servo signal on pins from D2 to D8
channel_1.attach(2);
  channel_2.attach(3); //We reset the received values
  reset_the_Data(); //Once again, begin and radio configuration
    radio.begin();
  radio.setAutoAck(false);
 radio.setDataRate(RF24_250KBPS);
  radio.openReadingPipe(1,pipeIn);
//We start the radio comunication
  radio.startListening();
Serial.setTimeout(1000); // 1000 ms time out
 Wire.begin(); }
unsigned long lastRecvTime = 0; //We create the function that will read the data each certain time
void receive_the_data() {
while ( radio.available() ) {
  radio.read(&received_data, sizeof(Received_data));
  lastRecvTime = millis(); //Here we receive the data } }
void loop() { //mpu6050.update(); //Receive the radio data
  receive_the_data(); //This small if will reset the data if signal is lost for 1 sec.
unsigned long now = millis();
  if ( now - lastRecvTime > 1000 ) {
    reset_the_Data(); }
dir = map(received_data.ch2,255,0,+35,-35);
poussee = map(received_data.ch1,255,0,90,180);
comp = map(received_data.ch3,0,100,+20,-20);
  ch1_value = poussee-dir+comp;
  ch2_value = poussee+dir-comp; //Creathe the PWM signals
  channel_1.write(ch1_value);
  channel_2.write(ch2_value);
  delay(50);  }
```