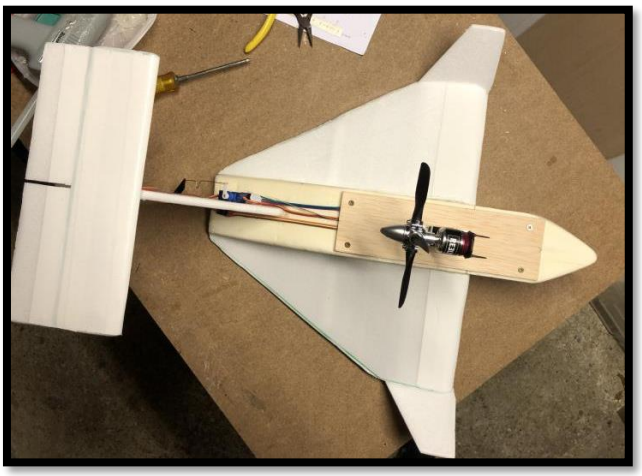
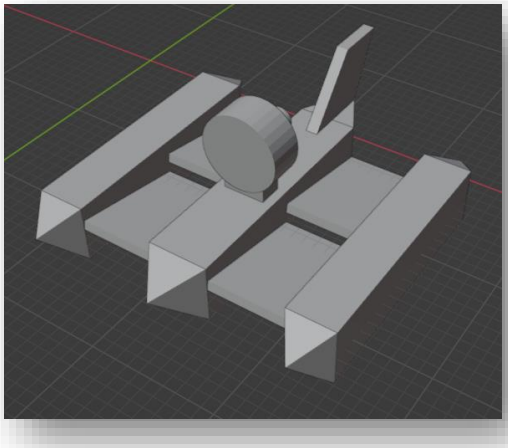
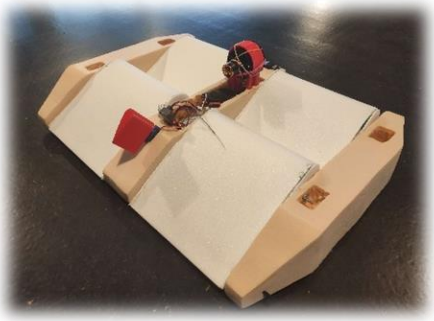
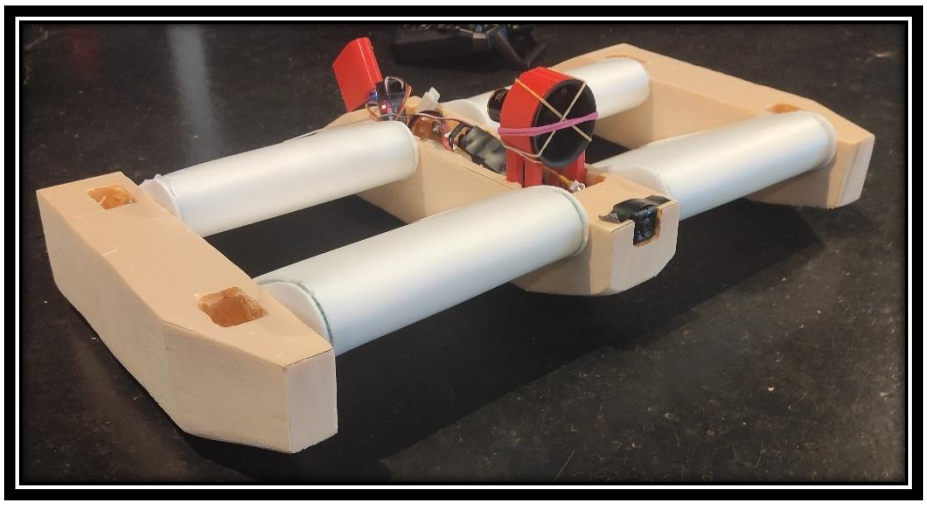
Aéronefs à effet de sol









CONCOURS Collège Lycée CGÉNIAL

Sciences à l'École

FONDATION CGENIAL

Présentation de l'équipe :

Malgré un travail partagé, certaines affinités se sont développées :

Conception réalisation et rédaction : Clarence JUTIER

Assistant réalisation et 3D : Noé LIÉGEOIS

Modélisation 3D et montage vidéo : Clovis GUYOMARD

Electronique et codage: Theo VUJCIC

Réalisation des planeurs et rédaction : Ronan BOUTIER

Table des matières :

Présentation de l'équipe : 2

I. Avant-propos - Introduction 4

1. Cadre du projet 4
2. Définition d'un aéronef à effet de sol (AES) 4
3. Introduction au projet 4

II. Les aéronefs à effet de sol - Problématique 5

1. Un peu d'histoire 5
2. L'effet de sol 5
3. Points positifs intérêt de notre projet 7

III. Conception, réalisation et théorie en lien 8

1. Dimensionnements et bases de l'année précédente 8
   A. La taille des ailes de notre 3ème prototype: 8
   B. Anciennes réalisations 9
2. Modélisation de notre 3ème prototype 12
3. Choix des matériaux/composants utilisés – Réalisation 13
   A. Les capteurs 13
   B. Moteur et "flyware" 14
   C. Matériaux de construction 15
   D. Electronique 17
4. Programmation 18

IV. Tests, expériences et analyses 19

1. Nos expériences 19
2. Résultats et chiffres de notre 2ème maquette motorisée 20
   Détail des graphiques x : 21
   Détail des graphiques y : 21
3. Les expériences de cette année 22

V. Conclusion sur le projet, perspectives 23

1. Nos avancés 23
2. Réponse partielle à la problématique 23
3. Ce que nous pourrions améliorer, ajouter et tester 24

Lien vers la chaîne YTB dédié à ce projet :

https://www.youtube.com/channel/UCzYLD1Bb_SdRvPKEhzui6dA

Lien vers la vidéo concernant le projet :

https://youtu.be/ALgrf2EG5_M

I. Avant-propos - Introduction

1. Cadre du projet

Suite à une première année sur ce projet, nous avons décidé de le reprendre cette année afin d'approfondir nos recherches et de tester un nouveau modèle : **l'avion en tandem**. Cette idée nous est venue en étudiant le projet "aéroptère" de la société Focus 21 (voir ci-contre). Ce type d'avion n'est pas encore industrialisé malgré ses nombreux avantages. C'est cet aspect, entre autres, qui a motivé notre volonté de développer et d'approfondir le sujet, avec pour objectif la réalisation d'une nouvelle maquette. Pour cela, nous utiliserons les connaissances acquises au cours du projet de l'année précédente en approfondissant la partie théorique de notre projet et en corrigeant les points de faiblesse rencontrés.

2. Définition d'un aéronef à effet de sol (AES)

Les AES sont très proches des avions, car ils utilisent la pression sous leurs ailes pour voler. La différence est qu'un AES **l'amplifie avec l'effet de sol**.

Ce phénomène lui permet ainsi d'augmenter sa portance lorsqu'il vole à très basse altitude. C'est la raison pour laquelle il évolue dans des vols de type « rase-motte ». Nous reparlerons de cette partie théorique dans la partie dédiée à « L'effet de sol ».

En résumé, un AES est un avion qui vole à basse altitude en bénéficiant de l'effet de sol.

3. Introduction au projet

Nous allons voir comment certains aéronefs peuvent exploiter l'effet de sol, en quoi cet effet est bénéfique, quelles expériences peuvent démontrer ces avantages et enfin, quelles ont été nos avancées avec nos maquettes, de la conception à la mise en œuvre, en passant par la réalisation.

Pour cela, nous allons commencer par exposer l'histoire, la partie théorique et les intérêts de notre projet dans « Les aéronefs à effet de sol - Problématique ». Ensuite, nous entrerons dans la partie « Conception, réalisation et théorie en lien » de la maquette (schémas, choix des matériaux, modèles 3D….), dans laquelle nous détaillerons la fabrication de la maquette. Pour finir, nous présenterons nos tests, interpréterons leurs résultats et les utiliserons pour ajuster notre modèle dans « Tests, expériences et analyses ».

II. Les aéronefs à effet de sol - Problématique

L'objectif de notre projet est d'évaluer l'intérêt que pourrait avoir l'utilisation des AES. Théoriquement l'effet de sol augmente la portance mais nous n'avons aucun ordre de grandeur quant à cette information c'est donc pour cela et afin de remplir notre objectif que nous voulons étudier son efficacité. Cela nous intéresse car l'effet de sol est assez peu connu du grand public et même dans certains milieux scientifiques et donc peu de projets civils sur cet effet n'existent faisant donc de l'effet de sol une idée **innovante** et qui est **parfois sous-estimée**.

Pour cette édition du concours CGénial, nous souhaitons ajouter 2 nouveaux défis : réaliser une nouvelle maquette **modulable** et en **tandem** ainsi que d'y ajouter des roues pour pouvoir effectuer des tests en extérieur.

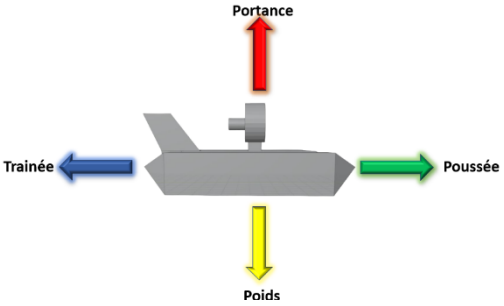
1. Un peu d'histoire

L'ékranoplane est un type aéronef à effet de sol. Au début des années 1950, **Rostislav Alekseïev**, ingénieur soviétique, imagine un nouveau type d'appareil : un bateau capable de s'envoler. Ce concept peut nous rappeler le projet français : l'hydroptère d'Éric Tabarly, un officier de la marine, en 1976.

Il a d'abord commencé par réaliser un prototype en papier mâché qu'il a lancé au-dessus de l'eau, en utilisant un toboggan comme moyen de propulsion. Après la construction de plusieurs prototypes, il construit, à l'aide de l'armée le "modèle KM" qui signifie « navire prototype » (voir ci-contre), en 1966 aussi appelé monstre de la mer Caspienne.

Ce premier aéronef à effet de sol mesurait 100 mètres de long et pesait 540 tonnes. Grâce à l'effet de sol, il pouvait voler à plusieurs mètres au-dessus d'une surface dense, et grâce à sa rigidité, il pouvait affronter des vagues de plus de 5 mètres de haut à condition que la distance entre plusieurs d'entre elles ne soient pas trop élevées. Cet avion servit de laboratoire scientifique jusqu'en 1980. Il a obtenu son titre de "monstre de la Mer Caspienne" à la suite d'espionnage (satellite Corona) de la part des américains qui ont pris peur en voyant les dimensions à la fois titanesque et atypique pour un avion ou un bateau se déplaçant à près de 400km/h.

2. L'effet de sol



Définissons les forces :

Quatre forces s'exercent sur un avion : ***la portance, le poids, la traînée et la poussée****.*

Qu’est-ce qu’une force ? C’est une puissance d'action physique.

$$\sum \vec{F} = m \cdot \frac{d\,\vec{v}}{d\,t}$$

Celle-ci peut être caractérisé par la masse d’un objet que l’on multiplie par son accélération, soit la masse multipliée par la dérivée du vecteur vitesse sur la dérivée du temps.

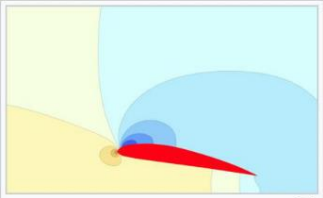
Comme nous l’ont expliqué M. Luc Pastur (enseignant-chercheur en dynamique des fluides à l’ENSTA) et M. Lutz Lesshafft (Directeur du laboratoire d’hydrodynamique de l’école Polytechnique, LadHyX), il y a plusieurs approches pour interpréter ce phénomène aérodynamique agissant sur les vols au ras du sol...

De manière intuitive, le rapprochement de l’aile et du sol appuie sur l’air contenu entre les deux et crée comme un coussin d’air sur lequel repose l'avion et augmente sa portance.

Il est également possible de représenter ce phénomène par des différences de pression. Lorsqu’une force de valeur F s’exerce perpendiculairement et de manière uniforme sur une surface S, on définit la pression P comme le rapport P=F/S, dont la pression, dans le système universel d’unité, s’exprime en pascal (Pa), la force en Newton (N) et la surface en mètre carré (m²). Une aile dirige ses lignes de courants vers le bas, comme l’expliquent les équations d’Euler et l’effet Magnus. L’air apporté est dirigé majoritairement sous l’aile, mais ne dispose que du petit espace formé entre le bord de fuite de l’aile et le sol.

À cause de l’arrivée d’air sous l’aile et du peu d’espace dont elle dispose pour s'échapper, la pression sous l’aile ainsi que le vecteur portance augmentent.

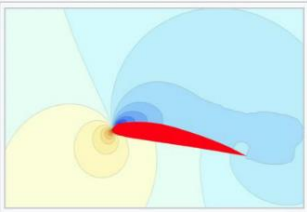
Schéma 1 :



Portance avec effet de sol (le sol se trouve en bas de l'image et la pression sous l'aile a augmenté).

- haute pression
- basse pression

Schéma 2 :



Portance sans effet de sol (l'aile est dans un espace sans limite).

- haute pression
- basse pression

D'après ces deux schémas, on remarque que la pression sous l’aile de l’expérience 1, soumise à l’effet de sol, est bien plus haute que sous l’aile de la 2de expérience.

On en déduit que l'effet de sol engendre cette hausse de pression en tout point sur l’aile.

La pression, et non la portance qui est une force, est plus faible lorsque l’aile est dans un milieu aérien non restreint.

Auteur des images : Michael Schreier disponible sur [https://fr.wikipedia.org/wiki/Effet_de_sol]

D’après Lutz Lesshafft, on pourrait aussi répondre au problème avec l’accélération. Puisque l’air passant sous l’aile devrait ensuite passer dans l’espace restreint formé entre le bord de fuite et le sol, l’air serait accéléré sous l’aile à cause de la pression. Cette différence de vitesse entre l’extrados et l’intrados serait à l’origine de la portance.

3. Points positifs intérêt de notre projet

Notre projet vise à étudier l'effet de sol, un phénomène singulier qui permet à un véhicule de décoller depuis le sol en réduisant les frottements exercés par la surface terrestre. Les nombreuses applications de cet effet sont étudiées dans le cadre de notre projet, avec pour objectif de démontrer ses aspects positifs.

L'effet de sol offre la possibilité à un véhicule de décoller depuis le sol, ce qui permet aux moyens de transport terrestres ou maritimes de **s'affranchir des frottements** exercés par la surface terrestre, qu'elle soit solide ou liquide. Il est envisageable d'exploiter cet avantage pour faire évoluer certaines flottes de transporteurs maritimes vers des transports aériens empruntant des voies maritimes, à l'instar des ékranoplanes qui pouvaient transporter des charges plus lourdes que les avions, en moins de temps que les navires, tout en consommant moins d'énergie.

Cette approche offrirait une opportunité de pouvoir transporter des personnes et des marchandises à travers des zones où les navires conventionnels ne peuvent pas s'aventurer. Les AES peuvent parcourir des zones d'eau peu profondes, de sable, de boue, de neige ou de glace avec une grande facilité, ce qui en fait un choix idéal pour les opérations militaires, les missions de sauvetage, les patrouilles côtières, les inspections d'infrastructure marginalisé ou bien les loisirs.

Par exemple, les AES peuvent être utilisés pour transporter des passagers et des voitures entre continents et îles, tout en réduisant le nombre de vols et générant des économies à grande échelle. En outre, l'utilisation de l'effet de sol serait une solution écologique pour réduire les émissions de gaz à effet de serre générées par les échanges entre villes portuaires.

III. Conception, réalisation et théorie en lien

Pour illustrer l'effet de sol, nous avions construit des maquettes d'AES. L'année précédente, nous avions construit 2 maquettes distinctes et cette année, nous nous sommes lancés dans la fabrication d'un nouveau prototype : un aéronef dit en « tandem ». Les prototypes de l'année dernière présentaient de nombreuses faiblesses, notamment le premier qui était très fragile.

Pour améliorer ce projet, nous avons pensé que tester un nouveau modèle nous permettrait d'aller plus loin dans nos recherches et que cela nous permettrait de montrer qu'il y a différents moyens d'utiliser l'effet de sol. Nous devions également revenir sur certains des choix que nous avions faits sur nos anciens prototypes, en particulier la forme des ailes de notre seconde maquette, en delta inversé. En effet, au cours de notre entretien avec Lutz Lesshafft, il nous a été expliqué que cette forme présentait in fine plus d'inconvénients que d'avantages – La forme en delta inversé ne permet pas de conserver jusqu'à l'arrière de notre aéronef l'air arrivant par l'ouverture des ailes – l'air s'échappe sur les côtés ce qui enlève en partie l'intérêt de l'effet de sol en plus de rendre notre aéronef plus difficile à contrôler.

1. Dimensionnements et bases de l'année précédente

A. La taille des ailes de notre 3ème prototype:

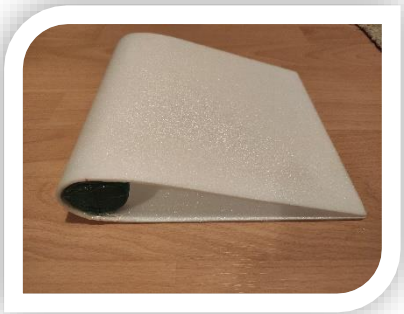
Afin d'obtenir une maquette reflétant d'abord des conditions de vols normale à des vols classique pour ensuite y ajouter les avantages de l'effet de sol, nous nous sommes basés sur la formule de la portance pour calculer la surface des ailes nécessaire :

$$L = \frac{1}{2}\,\rho \cdot S \cdot V^2 \cdot Cz$$

L : portance (en Newtons)
ρ : masse volumique de l'air (1,204 g/l à 20° et à pression normal de 1013 hPa)
V : vitesse (en m•s^{-1})
S : surface au sol (en m²)
Cz : coefficient de pénétration dans l'air/ coefficient de portance (sans unité)

La force à compenser pour se maintenir à la même distance du sol est, en faisant abstraction des forces de frottements nécessitant les formules de N. Stokes, uniquement celle du poids – nous avions estimé que 750g serait le poids de notre prototype équivalent donc, à la surface de la terre, à 7.35N –.

Pour définir la vitesse approximative à laquelle notre prototype se déplacera nous nous sommes basés sur des valeurs empruntées à nos précédentes expériences. Nous avons raisonnablement pris une valeur légèrement inférieure : 12 m•s^{-1}.



Avec un Cz se situant entre 0,3 et 0,7 pour des ailes sans système supra-sustentateur (efforts de conceptions supplémentaires pratiqué lors de vol à distance au sol variable, pour augmenter ce coefficient) nous avons choisi de prendre 0,5 pour référence et nous trouvions une surface au sol de 0,169m². **Soit des ailes de 20cm de côté**.

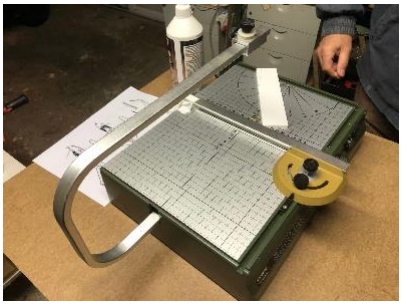
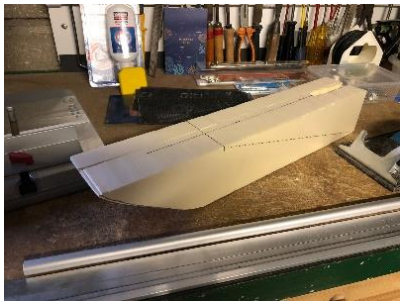
B. Anciennes réalisations

Nous avions avant notre 3ème version (2023) construit deux ékranoplanes motorisés (fin 2021- début 2022). Pour décider quel modèle choisir, nous avons tout d'abord réalisé des modèles en "dépron" de 3mm (feuille de polystyrène). Nous avons choisi ce matériau pour sa simplicité de manipulation pour ce genre de réalisation.

Ainsi, avec ce type de profil puisqu'aucune électronique n'est embarquée, nous avons pu nous consacrer entièrement au travail sur les forces extérieures exercées sur l'ékranoplane, et considérer cette expérience comme une invitation au monde théorique de l'aérodynamique, en faisant des liens avec nos ékranoplanes motorisés.

Ces expériences nous ont d'abord permis de confirmer nos hypothèses sur la capacité des ailes Lipschitz (delta inversé) à pouvoir voler en effet de sol, pouvant alors mener à des comparaisons avec d'autres types d'ailes. Nous avons également remarqué que la queue ramenait trop le centre de gravité vers l'arrière. Pour contrer cela, nous avons prévu des contrepoids avec des vis et boulons.

Ainsi, en nous appuyant sur les informations collectées lors des expériences précédentes et de la première maquette, nous avons pu commencer la réalisation de notre prototype motorisé n°2. Nous avons commencé par rassembler les matériaux nécessaires à la fabrication de notre ékranoplane.

Images des différentes étapes de la découpe du fuselage

Par la suite, nous avons découpé les pièces de dépron qui constituent la queue de l'appareil (Figure A, B et C). Nous avons décidé d'augmenter leurs dimensions. Nous avons également réalisé un profil bombé sur l'élévateur (partie horizontale de la queue, Figure A) afin de compenser le surpoids de la partie arrière de notre avion. Nous avons ensuite motorisé les surfaces de contrôle à l'aide de servomoteurs (moteur très léger et précis, Figure C).

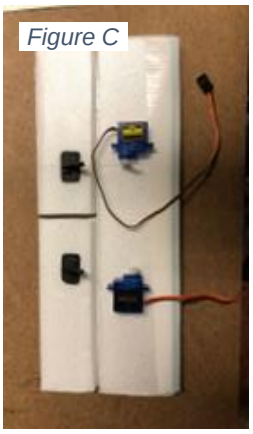


Figure C

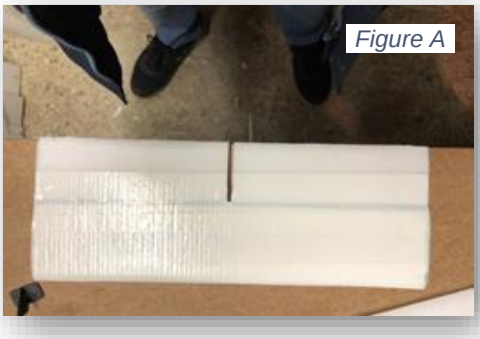


Figure A

Figure B

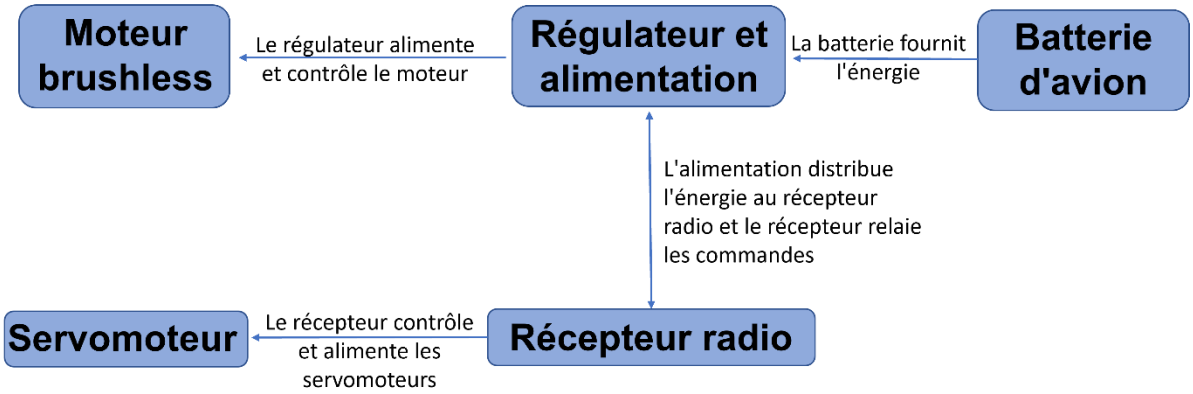
Puis nous avons réalisé les ailes, la technique que nous avons utilisée a été le pliage de dépron (plus fine) car ce dernier devient malléable à moyenne température (voir ci-contre).

Une fois les ailes formées, nous les avons placées sur notre appareil pour vérifier nos mesures et avons ajouté des winglets, des petits ailerons verticaux permettant de stabiliser notre appareil.

Montage a blanc (sans colle).

Nous nous sommes ensuite attelés à la partie électronique de notre appareil. Notre premier système a été récupéré d'un motoplaneur radiocommandé que l'un de nous possédait et qui prenait la poussière dans un sous-sol. Voici son fonctionnement :

Schéma de notre système électronique :



Hélice permettant à notre maquette de se déplacer.

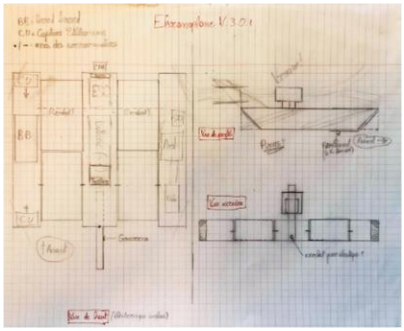
Une partie de l'électronique se trouvant à l'intérieur du corps.

Nous avons ensuite installé tous les éléments ensemble à l'aide de colle cyanoacrylate et de colle chaude afin d'obtenir notre modèle fini.

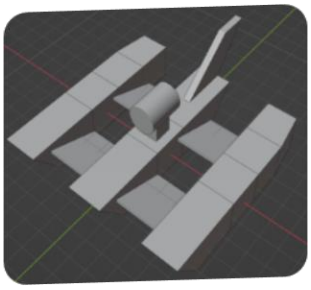
Photos de notre 2ème maquette finie.

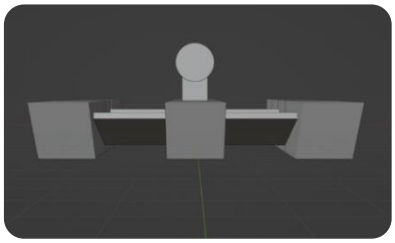
2. Modélisation de notre 3ème prototype

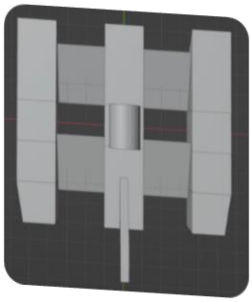
Afin de mieux visualiser notre prototype ainsi que de faciliter sa réalisation, nous avons décidé de le modéliser en 3D, cela nous permettrait de disposer d'une base de travail concrète et d'un visuel. Pour ce faire, nous avons essayé différents logiciels de modélisation, et avons fini par arrêter notre choix sur Blender, un logiciel gratuit dit “open source”.



Pour faire la première modélisation, nous nous sommes beaucoup appuyés sur un schéma fait au préalable lorsque nous voulions être sûr que tout le monde avait plus ou moins la même vision de notre maquette. Cependant, le schéma n’ayant pour objectif que d'esquisser une forme générale, le détail des proportions, des valeurs, des angles n'y figurait pas. Comme nous savions que le concept de la maquette était appelé à évoluer, nous avons fixé les différentes valeurs de manière plus ou moins arbitraire, avec l'idée qu'elles seraient progressivement actualisées à mesure que notre projet progresserait.



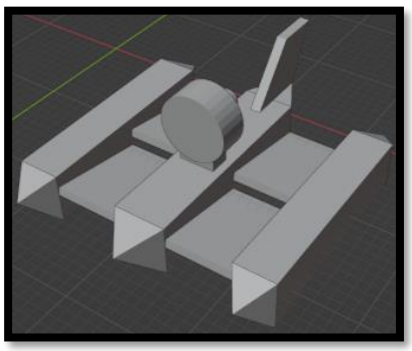




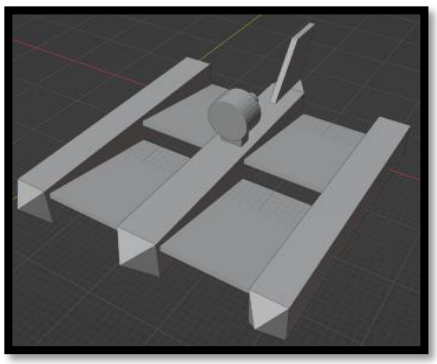
1ère modélisation

Après avoir défini des dimensions plus précises, le problème de refaire une modélisation s’est posé. Comme certains éléments avaient changé de forme et que les proportions étaient entièrement à revoir, tout le modèle était à refaire, mais désormais nous connaissions Blender.

Cette seconde modélisation a eu de nombreux intérêts comme celui de voir la forme que notre aéronef aurait avec des dimensions plus précises. Cet intérêt a été crucial car nous avons pu nous rendre compte de la réelle taille de certaines choses (comme le moteur) et que nos dimensions n’étaient pas vraiment réalisables, conséquence de quoi nous avons encore modifié les dimensions.

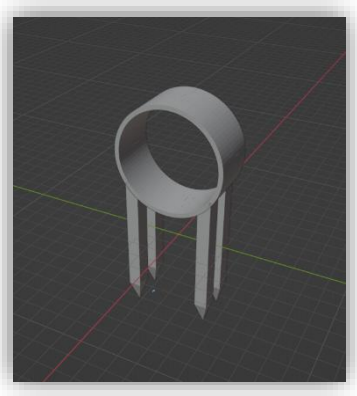


2nd modélisation



Modélisation finale

Nous avons aussi eu besoin de passer par la modélisation pour la création du support pour notre moteur que nous comptions imprimer à l'aide de l'imprimante 3D d'un membre de l'équipe. Celle-ci nous a causé beaucoup de soucis, en effet le diamètre précis du moteur n'étant pas indiqué, il nous a fallu avancer pas à pas. Une autre difficulté que nous avions rencontrée était l'incapacité à faire un cylindre vide depuis notre logiciel de modélisation, à cause de ces facteurs la modélisation a dû être refaite un bon nombre de fois avant que l'on puisse enfin l'utiliser. Finalement nous avons trouvé des solutions à ces problèmes et avons pu avancer dans notre projet.



3. Choix des matériaux/composants utilisés – Réalisation

Cette année, nous avons décidé de rédiger une liste/devis précise de l'intégralité de nos besoins, découpée en plusieurs parties : A. Les capteurs qui nous permettent de récolter des informations, B. Le « flyware » qui concerne tout ce dont notre ékranoplane a besoin pour voler (moteur, télécommande, etc…), C. Les matériaux de construction qui sont les matériaux nécessaires pour les éléments comme la coque ou les ailes et enfin D. L'électronique et le microcontrôleur tout ce qui concerne, ici une carte Arduino.

Au niveau électronique, nous avons recherché des appareils légers, qui prennent peu de place et le moins cher possible. Ces nombreuses restrictions (notamment au niveau budgétaire) ont joué un grand rôle sur nos choix. Nous avons à cette fin eu plusieurs entretiens avec le service de gestion de notre lycée.

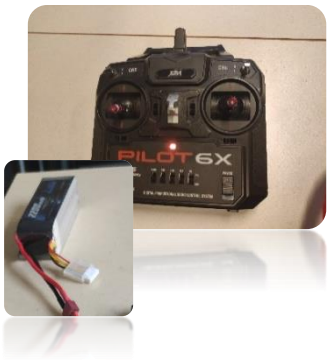
Lien vers notre devis : Devis Ékranoplane-V6 (final).xlsx

A. Les capteurs

Commençons par le choix des capteurs. Nous avons acheté une micro-caméra (voir ci-contre), d'une taille d'une pièce de 1€, qui nous permettra d'avoir une vidéo du vol en vision subjective.

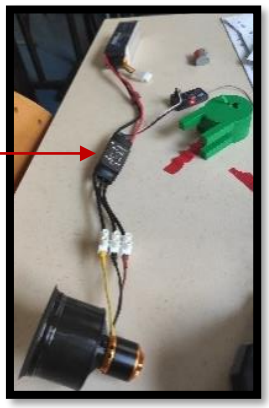
Puis, nous nous sommes fournis des capteurs ultrason pour mesurer les distances avec le sol. Un capteur ultrason émet des ondes sonores à haute fréquence. Ces ondes se propagent dans l'air et lorsqu'elles rencontrent un objet, elles sont réfléchies et retournent vers le récepteur. Le capteur mesure le temps qu'il faut pour que les ondes reviennent et utilise cette information pour déterminer la distance entre le capteur et, dans notre cas, le sol.

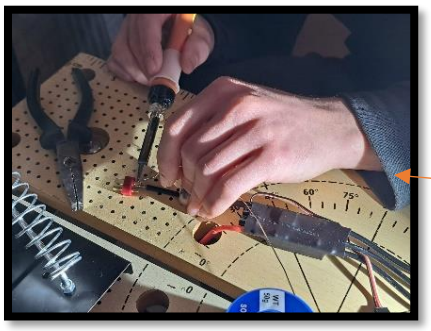
B. Moteur et “flyware”



Pour faire voler notre maquette, nous avions également besoin de matériel que nous avons appelé “flyware”. Nous avons donc fait l'acquisition d'une radiocommande, de 2 batteries de 2200 mAh chacune (2 batteries nous permettent de faire des rotations entre les 2), ainsi que d'un chargeur adapté à ces batterie LiPo (lithium polymère).

Puis il nous a fallu un ESC (*Electronic Speed Controller*) qui nous a été très difficile de trouver. Ce composant, couplé au récepteur radio, reçoit les informations fournies par notre radiocommande et régule la puissance électrique délivrée au moteur en fonction de l'intensité demandée. Ceci permet d'adapter en direct la vitesse de rotation de notre turbine.





Les connectiques n’étant initialement pas compatible, il a été nécessaire de les modifier (souder un adaptateur)

Ensuite, nous avons commandé des servomoteurs pour gérer l’inclinaison des gouvernes ainsi qu’une **turbine**, pour faire avancer notre modèle.

La troisième loi de Newton est le principe de l'action et de la réaction.

> *“Si un corps A exerce une force sur un corps B, alors B exerce sur A une force d'égale intensité, de même direction et de sens opposé.”*

Notre moteur fonctionne sur ce même principe. En aspirant l’air vers l’arrière, l’appareil se propulse, par réaction, vers l’avant.

En pratiquant nos premiers tests, nous nous sommes rendus compte que notre aéronef dérivé irrémédiablement vers la gauche en oppositions au sens de rotation de notre moteur. Il s’agit en fait, « d’effets de moteur », générant un « moment de lacet », soit un mouvement qui fait tourner notre prototype.

C. Matériaux de construction

Comme matériel de construction le polystyrène nous est apparu avantageux car : léger, peu cher, facilement découplable, et pouvant nous servir de bloc que nous viendrons sculpter à l'aide d'un appareil à fil chaud (Figure 3). Ce matériau offre ainsi une combinaison très intéressante entre résistance et poids.

Pour le corps nous avons choisi de la mousse isolante en polystyrène épaisse de plusieurs centimètres et afin d'obtenir une découpe précise nous tracions au préalable les lignes de découpe de chaque côté de la partie à découper puis nous utilisions soit un miroir soit un téléphone en mode selfie pour nous guider (Figure 2 et 3).

Figure 1

Figure 2

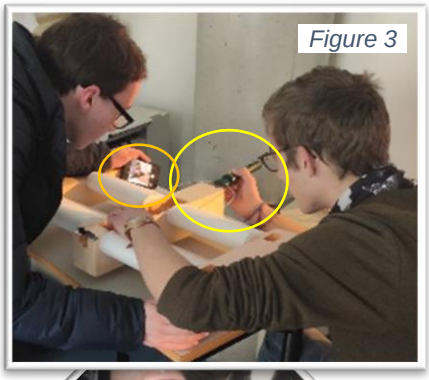


Figure 3

Pour créer les orifices (comme les passages de roues) et les autres axes traversant les coques nous utilisons un embout habituellement utilisé pour la gravure afin de percer ces trous (Figure 4).

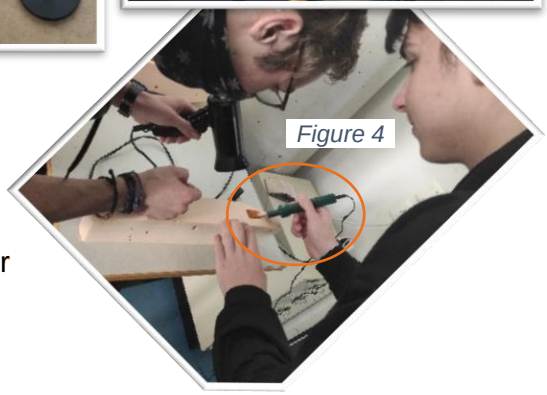


Figure 4

Des plaques de Dépron® fins de quelques millimètres ont été utilisé pour les ailes. Ces dernières sont déformables à la chaleur, nous avons utilisé un sèche-cheveux pour leurs donner leur formes (voir Figure 5 et 6).

Pour conserver un bord d'attaque identique entre les ailes et dans le temps nous avons collé à la colle chaude une traverse en dépron à l'intérieur ainsi que des bouchons de boissons qui, nous nous en sommes rendu compte relativement aléatoirement, correspondaient à nos dimensions. Ces ailes seront fixées par paires de 2 sur un axe chacune, puis l'orientation sera donnée avec des vis et des positions percer dans les coques (Figure 6).

Figure 5

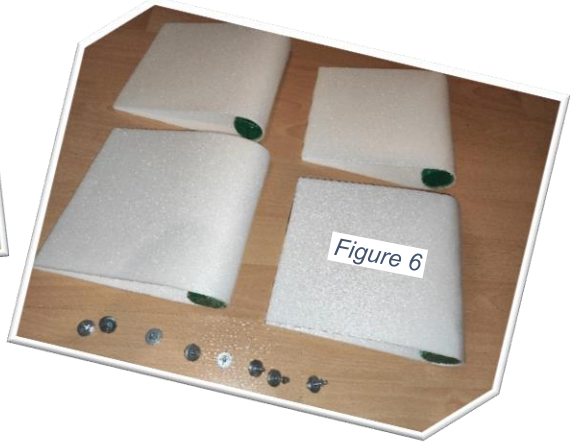
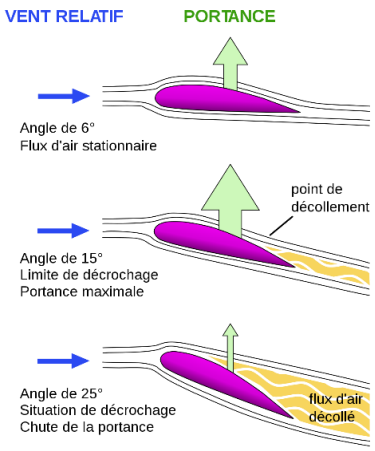
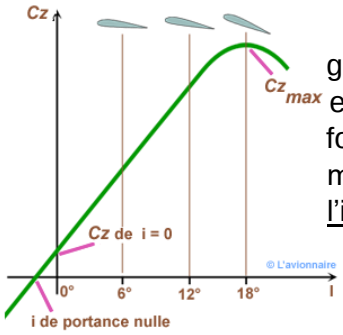


Figure 6

La portance générée par les ailes varie en fonction de leur forme et de leur angle. Dans le cas d'un ékranoplane, il n'y a pas grand intérêt à trouver une forme d'aile particulière, car la portance est déjà augmentée avec l'effet de sol. Néanmoins, l'angle donné à l'aile peut accentuer davantage la portance sans avoir à augmenter la taille de l'aile (voir schéma à droite).

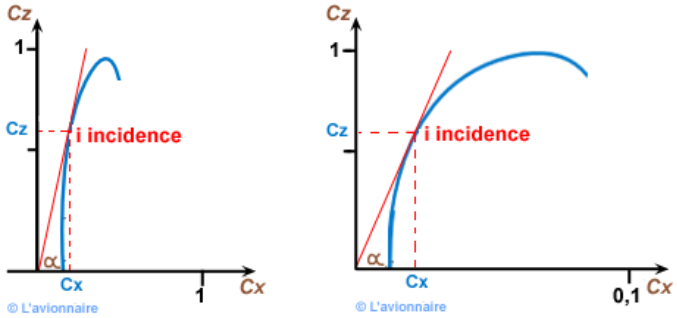




On peut reporter sur un graphique (voir à gauche, un exemple illustratif) les valeurs en fonction des inclinaisons d'un modèle d'ailes, ont ce rend compte que l'aile perd en efficacité quand l'inclinaisons devient trop forte.

L'angle de l'aile augmente la portance, mais il augmente également la trainée (composante horizontale "retenant" l'avion vers l'arrière, Cx). Il est possible de tracer un graphique donnant le coefficient de traînée d'une aile en fonction de sa portance. Ce graphique est appelé polaire d'une aile.

Exemple de polaire :



Nous souhaitions initialement rendre mobile en vol la paire d'aile avant et maintenir la **paire arrière avec un angle de 15°**, un angle présenté comme optimal.

Suite à une visite au X-FAB[1], et à une discussion que nous avons eu la chance de mener avec L. Lesshafft et C. Hasson, il nous a été suggéré de fixer les ailes arrières comme prévu mais de prévoir uniquement une variété de position à changer manuellement pour les ailes avant.

Il nous a été conseillé de garder des objectifs clairs et de ne pas vouloir tester trop de paramètres au même instant.

[1] l'espace de prototypage de l'école Polytechnique

D. Electronique

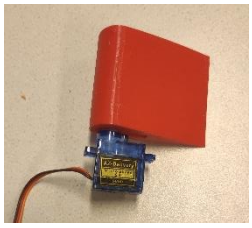
Nous avons eu besoin d'une carte électronique afin de pouvoir coordonner l'ensemble des capteurs et effecteurs de notre maquette. Nous l'aborderons plus amplement dans la partie qui suit.

Pour relier tout ce matériel, il nous a fallu des câbles, mais surtout des jonctions électroniques et des cartes perforées dites "PCB". Pour finir, nous avons décidé d'utiliser des piles de 9V rechargeables pour alimenter notre microcontrôleur et nos capteurs, avec donc un chargeur pour piles et un porte-piles pour pouvoir les relier à notre maquette.

Nous avions initialement commandé un gyroscope mais nous n'arrivons pour l'instant pas à nous en servir comme souhaité. Une carte SD et son adaptateur ont été ajouté afin de stocker des données à récolter. Les servos moteurs nous permettent de déplacer les parties mobiles du prototype.

Nous avons pour objectif final de valider l'entièreté de la chaîne d'exécution se situant au bas de cette page.

Une gouverne imprimée en 3D monté sur un servo



Un bras de soudage improvisé sur un support pour tube a essai :

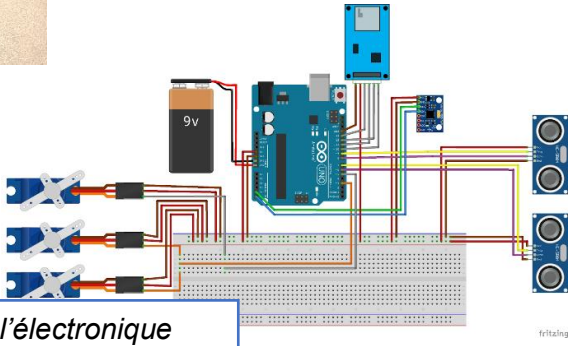
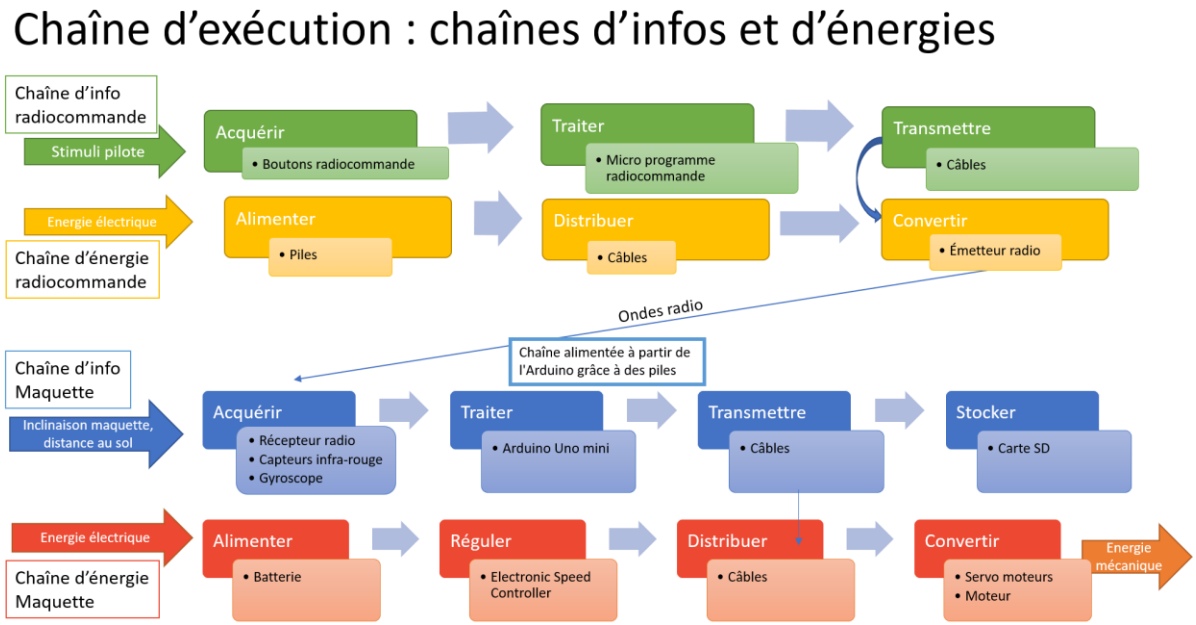


Schéma de l'électronique embarqué initialement prévu



4. Programmation

Notre maquette motorisée embarque un panel électronique ayant pour but une meilleure interprétation de son vol. Pour contrôler tous nos capteurs, nous avons besoin d'un microcontrôleur. Notre choix s'est porté sur une Arduino Uno mini, programmable en C++, ayant des pins déjà soudées et étant de toute petite taille, pour être facilement glissée dans la coque. Utiliser une Arduino présente aussi l'avantage d'être largement connue et donc d'être très bien documentée.

Nous avons donc réussi, sans trop d'antécédents en programmation Arduino, à rédiger un programme permettant de mesurer la hauteur de l'ékranoplane et d'ensuite enregistrer ces données sur une carte SD. La lecture de différents programmes sur internet nous a permis d'optimiser notre code, notamment pour le fonctionnement de la carte SD qui, selon les méthodes, peut avoir besoin de plus ou moins de bibliothèques.

Dans le but de pouvoir rajouter des capteurs, pour mieux comprendre le comportement de l'aéronef, il devient intéressant et même nécessaire d'optimiser le code, car l'Arduino a beau être puissante, sa capacité de stockage du code se limite vite. L'électronique et sa programmation sont donc des outils puissants qu'il nous faut maîtriser si nous voulons obtenir des résultats de mesure fiables, variés (pour les entrecouper) et rapides, en bref, le nécessaire pour des expériences de qualité.

A therme, nous aimerions pouvoir écrire un programme mimant une stabilisation automatique et prenant la forme d'une assistance au pilotage, mais ce projet ambitieux ne verra le jour qu'après de bien plus amples expérimentations.

```
1  //Librairies
2  #include <NewPing.h>
3  #include <SD.h>
4  #include <SPI.h>
5
6  //Fichier
7  File file;
8
9  //Pins du sonar1
10 #define trigger_pin_1 7
11 #define echo_pin_1 6
12
13 //Pins du sonar2
14 #define trigger_pin_2 9
15 #define echo_pin_2 8
16
17 //Distance maximum
18 #define max_distance 400
19
20 //Définition des sonars
21 NewPing sonar1(trigger_pin_1,
   echo_pin_1, max_distance);
```

```
17 //Distance maximum
18 #define max_distance 400
19
20 //Définition des sonars
21 NewPing sonar1(trigger_pin_1,
   echo_pin_1, max_distance);
22 NewPing sonar2(trigger_pin_2,
   echo_pin_2, max_distance);
23
24 void setup() {
25   //Terminal
26   Serial.begin(9600);
27
28   while (!SD.begin(10)) {
29     Serial.println("Carte SD non
   detectee.");
30     delay(500);
31   }
32
33   Serial.println("Carte SD detectee
   !");
34
```

```
   !");
34
35   for (int i = 0; i < 10; i++) {
36     file = SD.open("donnees.txt",
   FILE_WRITE);
37     //file.println("Mesure " +
   String(i++) + " (sonar 1) = " +
   String(sonar1.ping_cm()) + "cm");
38     //file.println("Mesure " +
   String(i++) + " (sonar 1) = " +
   String(sonar1.ping_cm()) + "cm");
39     file.println("Test");
40     file.close();
41     delay(1000);
42   }
43 }
44
45 void loop() {
46   //Ecris les données sur la carte SD
47 }
```

Captures d'une partie du code illustrant l'inclusion de bibliothèques, la définition de certaines variable suivi des premières boucles dédiées aux mesures.

IV. Tests, expériences et analyses

L'aéronef que nous avons fabriqué va donc exploiter ce phénomène physique. L'effet de sol permet ainsi à notre aéronef de voler plus longtemps.

Pour permettre à l'ékranoplane de mieux voler, une solution est d'augmenter la portance de celui-ci. Pour augmenter la portance, intéressons-nous aux facteurs qui permettent de l'augmenter.

Reprenons la formule de la portance :

$$L = \frac{1}{2}\,\rho \cdot S \cdot V^2 \cdot Cz$$

L : portance
ρ : masse volumique de l'air
V : vitesse
S : surface au sol
Cz : coefficient de pénétration dans l'air/coefficient de portance

Premièrement nous pouvons modifier la forme des ailes pour obtenir un coefficient de portance plus important sur ces dernières.
Plus efficacement, nous pouvons augmenter la vitesse, ce qui est possible dans notre cas en augmentant la puissance du moteur (ce qui est prévu) ou en ayant plus d'élan.
Une autre solution possible est d'augmenter la surface de sol, ce qui est plus complexe que d'augmenter la vitesse puisqu'elle demande forcément un changement au niveau de la forme de l'avion. Toujours est il que la modularité de notre modèle permet ce genre d'adaptation.

Nous vous invitons à regarder, sur la même chaîne YouTube que celle sur laquelle la vidéo de rendu a été déposé, les vidéos de tests qui figureront.

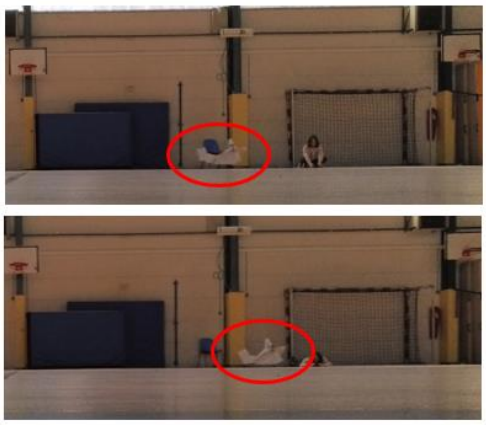
1. Nos expériences

Une fois que notre premier prototype (2022) fut réalisé, nous voulions voir si celui-ci volait. Au vu des différentes caractéristiques de ce prototype (comme l'absence de roues ou la perméabilité à l'eau) peu de lieux s'offraient à notre expérience, mais après réflexion, notre gymnase remplissait toutes les conditions nécessaires au vol, du moins toutes les conditions auxquelles nous avions pensé.

Dès les premiers tests, une forte sensibilité du système de direction, provoque une perte de vitesse, ce qui rend le décollage plus difficile.

Enfin, alors que nous pensions le gymnase assez grand pour faire les tests (~40m), il n'en était rien, plusieurs fois, notre prototype a heurté le mur. Redoutant que cela ne se reproduise et que notre aéronef ne se casse, nous devions freiner bien avant le mur du gymnase, mais cela entraînait une perte d'élan, et donc de vitesse.

Finalement, notre prototype réussissait quand même à décoller de quelques centimètres et à se maintenir dans l'effet de sol sur une vingtaine de mètres avant de se reposer. Cela dit, il nous était impossible de voler en dehors de cette limite à cause d'un manque de stabilité et de puissance. Aussi dû à une portance de l'aileron trop élevée, parfois la maquette piquait du nez et le devant touchait le sol avant de se remettre à voler normalement.

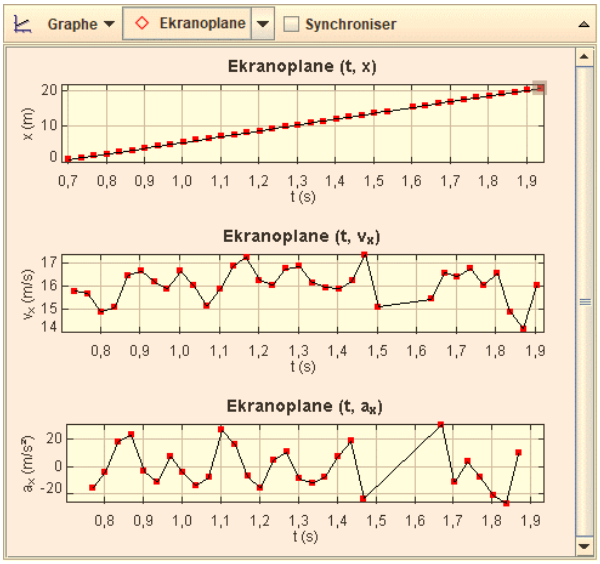


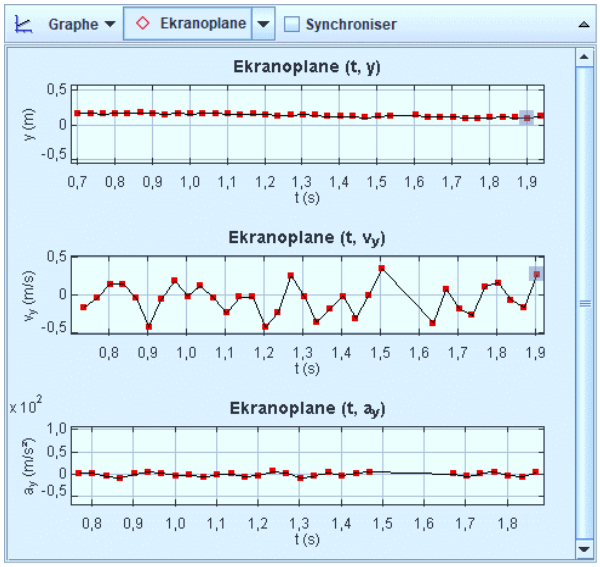
Ronds rouges : l'Ekranoplane se redressant

Rond vert : l'Ekranoplane profitant de l'effet de sol

2. Résultats et chiffres de notre 2ème maquette motorisée

Après avoir testé et filmé notre ékranoplane, nous avons pu nous diriger vers une analyse de son vol. Les analyses numériques ont pu débuter. Premièrement, nous avons installé une alternative à *Aviméca* nommé *Tracker Analysis,* en raison de l'incompatible du format des vidéos prises, qui permet, après pointage des vidéos, d'obtenir l'évolution du déplacement horizontal et vertical (x et y) ainsi que de calculer la vitesse Vx et Vy, et pour finir l'accélération entre deux images Ax et Ay.





Détail des graphiques x :

Sur le premier graphique de x, présentant la valeur de x en mètres en fonction du temps en secondes, il est intéressant, non pas de noter que la courbe du graphique tend vers le haut, puisque l'avion avance et ne recule jamais, mais bien que la distance entre les points soit relativement constante (sauf entre les points (1,55 ; 1,5) et (1,6 ; 15,25) ou un point, ne pouvant être placé précisément sur la vidéo, a été retiré).

Ainsi, nous pouvons en déduire que la vitesse reste à peu près constante durant le vol, et que les accélérations seront, elles aussi, sûrement autour de mêmes valeurs.

Nos estimations sont par la suite confirmées par les autres graphiques. Sur le graphique présentant la vitesse Vx en mètre par seconde en fonction du temps en secondes, nous pouvons effectivement constater que la majorité des points se situent à une vitesse comprise aux alentours de 16 m/s (avec une tolérance de 0,5, soit environ entre 15,5 et 16,5).

Sur le dernier graphique, présentant l'accélération de Ax en m/s² en fonction du temps en secondes, on peut voir que les accélérations ne sont pas régulières et passent même dans la partie négative du graphique. Cela peut montrer une hétérogénéité de la poussée fournie par le moteur ou une irrégularité de la traînée, surpassant durant quelques instants la poussée du moteur.

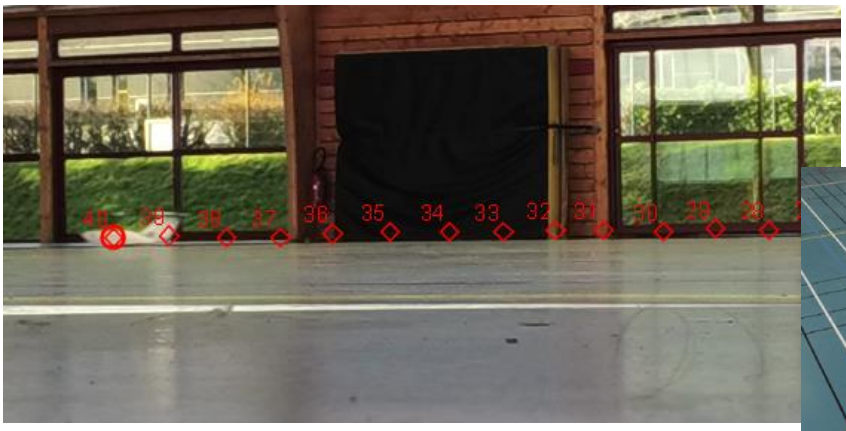
Détail des graphiques y :

Sur le premier graphique de y, nous étudions la hauteur exprimée en mètre par rapport aux temps en secondes. On observe que l'avion reste à hauteur constante. Cela prouve que notre aéronef est bien dans l'effet de sol. Si l'avion n'était pas dans l'effet de sol, il aurait pris plus d'altitude.

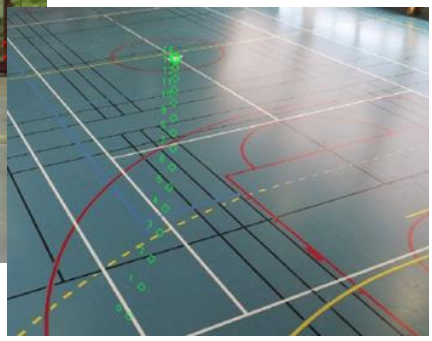
Sur le deuxième graphique de y, nous étudions la vitesse en m/s par rapport aux temps en secondes. On observe une très faible variation de la vitesse traduisant une stabilité verticale lors de l'essai.

Sur le dernier graphique de y, nous étudions l'accélération en m/s2 par rapport aux temps en secondes. On observe que l'accélération est constante. Cela montre que l'effet de sol permet à l'avion de rester en altitude sans accélération.

Image de pointage vidéo :



(Il n'existe aucun lien entre les points rouges et les ronds rouges ni entre les points verts et le rond vert)

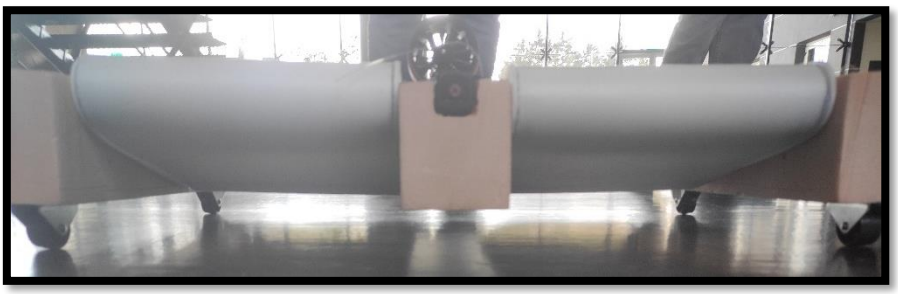


3. Les expériences de cette année

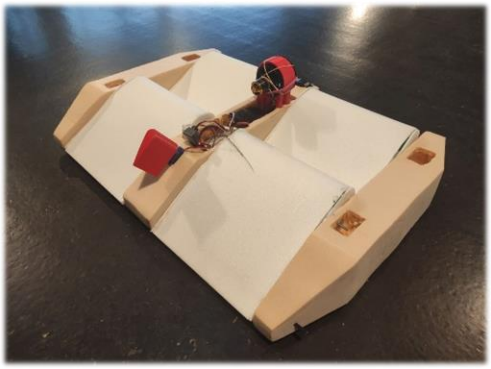
Le premier test a été interrompu en raison d'un défaut de fabrication du moteur envoyé par l'entreprise qui a conduit à la destruction des pales de notre moteur. Nous avons donc dû acheter un nouveau moteur pour pouvoir reprendre les tests.

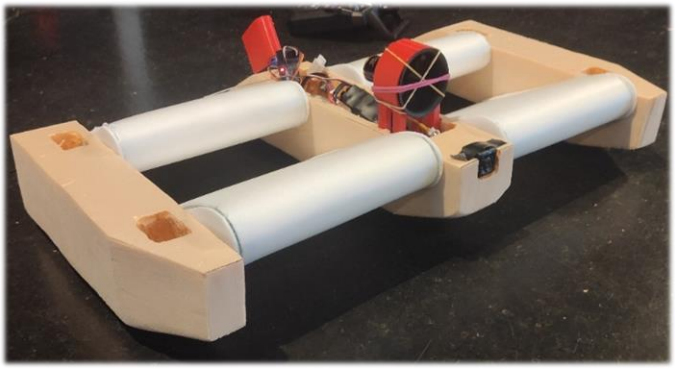
Lors du deuxième test, l'aéronef a rencontré des frottements excessifs qui ont empêché son décollage en raison d'une adhérence élevée du polystyrène sur le carrelage. On a donc décidé de **rajouter 4 roues** sur notre maquette afin que celle-ci puisse prendre de la vitesse et donc théoriquement se décoller du sol.

Les roues ajoutées pour tenter de résoudre ce problème lors du troisième test ont causé des déviations sur les côtés. Notre prototype n'a donc pas pu prendre assez de vitesse pour se décoller du sol. Une gouverne a donc été installée pour remédier à cette situation, le pilotage n'en reste pas moins très compliqué.



Lors du quatrième test, nous avons également retiré une roue pour n'en laisser que trois et donc diminuer la masse de la maquette mais aussi enlever des surplus de polystyrène pour améliorer l'aérodynamisme. Cela n'a pas suffi à régler les problèmes rencontrés et le temps imparti pour trouver une autre solution était écoulé.





V. Conclusion sur le projet, perspectives

1. Nos avancés

Ce projet de physique nous a permis de découvrir un effet aérodynamique assez complexe : l'effet de sol. Nous avons appris beaucoup de choses sur cet effet et sur son histoire à l'aide de nombreuses recherches. Nous avons découvert de nouvelles formules (dépassant parfois largement nos connaissance) en rapport avec l'aérodynamique comme la loi de Bernoulli ou les équations d'Euler et de Navier Stokes, l'effet Venturi et l'effet Coanda.

Nous avons essayé de mettre en pratique ces nouvelles connaissances en réalisant une nouvelle maquette d'aéronef à effet de sol, en utilisant des matériaux légers et en respectant les principes de l'aérodynamique. Cette expérience nous a permis de mieux comprendre les défis techniques liés à la conception et à la construction d'un tel engin, ainsi que les avantages et les inconvénients de cette technologie.

Nous avons réalisé des tests qui ne nous ont malheureusement pas permis de démontrer pour l'instant, en raison de la direction prise par le prototype avant même de profiter pleinement de l'effet de sol… Nous ne désespérons pas et continuerons d'avancer afin de finir le développement de ce projet, un des plus vastes auquel nous participons.

Ce projet nous offre une expérience enrichissante et nous a permis de découvrir un aspect fascinant de la physique aéronautique. Nous gardons à l'esprit qu'il nous reste encore beaucoup à apprendre. Nous avons par ailleurs appris à encore mieux nous connaître et à travailler ensemble.

2. Réponse partielle à la problématique

Les AES sont capables de traverser aisément des zones plane mais variées, ce qui les rend parfaitement adaptés à une variété de tâches d'ordre militaire, de gestion ou bien humaine. Ils peuvent en plus être plus économes en carburant que les bateaux ou les avions, car ils ne subissent plus de résistance à l'eau, ce qui leur permet de parcourir de plus longues distances avec une consommation de carburant réduite. Ensuite, l'utilisation des AES offre une alternative intéressante pour le transport de personnes et de marchandises, avec une efficacité énergétique améliorée par rapport aux modes de transport traditionnels.

En bref, l'intérêt de l'utilisation des AES réside dans leur capacité à se déplacer rapidement et efficacement comparé aux véhicules conventionnels tels que les bateaux.

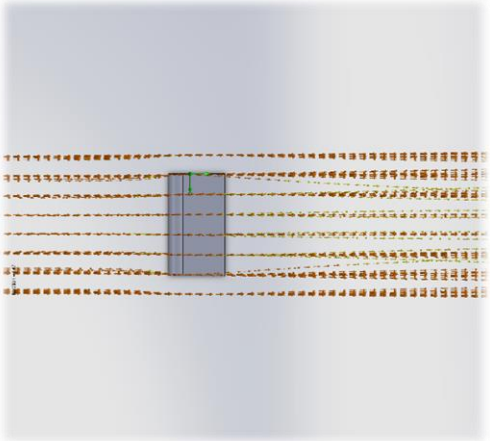
Des tests approfondis, nous en avons conscience, seraient évidements nécessaires pour pouvoir avancer des chiffres concrets au sujet de la consommation d'énergie ainsi que de la charge utile embarqué à l'aide de tests concluant (comme en mesurant un « coefficient d'effet de sol »). En revanche un point sur lequel nous avons été relativement surpris et qui est indéniable c'est la rapidité avec laquelle nos prototypes se déplace, le concept de haute vitesse est bien avéré.

3. Ce que nous pourrions améliorer, ajouter et tester

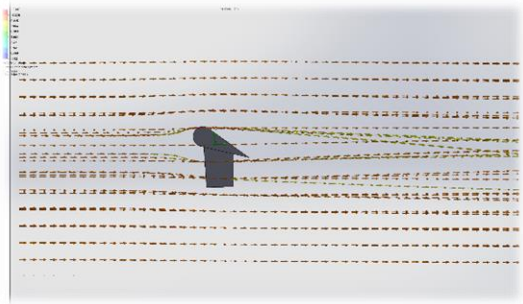
Pour améliorer ce projet, il nous faut tout d'abord stabiliser la direction afin de pouvoir démarrer réellement des tests dans différentes conditions.

Ensuite, nous pourrions rendre la coque étanche, tout en conservant des matériaux légers pour la tester sur l'eau – un grand avantage pour les ékranoplanes –. Cela nous permettrait de prouver que l'effet de sol fonctionne sur l'eau et ainsi montrer que cet avion peut être utilisé pour le transport de marchandise à travers les océans.

Nous pourrions effectuer des tests en soufflerie afin de tester les différentes formes d'ailes et leurs inclinaisons. mais aussi tester la maquette dans des conditions variées (vent, température, altitude, etc.) pour mieux comprendre son comportement et identifier les points à améliorer. Nous sommes dans les procédures pour pratiquer ces tests mais plusieurs obstacles de dimensionnement et de compatibilité des infrastructures doivent être franchis.



Nous commençons à nous familiariser avec les logiciels de simulations de flux d'air, ce type d'outils nous permettrais d'anticiper les comportements de certaines modifications de notre appareil.



Nous souhaitions remercier grandement les personnes qui nous ont épaulés durant toutes nos avancées. Que ce soit nos amis, nos familles, les chercheurs mentionnés dans ce compte rendu et enfin notre professeur référent qui nous ont soutenus contre vents et marées.

L'équipe des Olympiavionneurs, du lycée Jules Verne