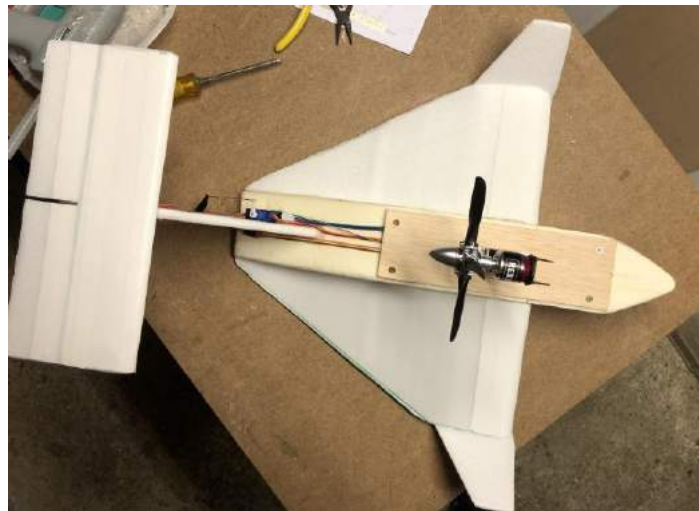


# Aéronef à effet de sol



# Table des matières

Introduction	2
<b>I. Principe des aéronefs à effet de sol</b>	<b>3</b>
L'ekranoplane, un héritage soviétique	3
L'effet de sol	3
Points positifs de notre projet et nos attentes	6
<b>II. Conception &amp; Réalisation</b>	<b>7</b>
Conception, recherche et inspiration	7
Construction matériel et électronique	9
<b>III. Analyses &amp; expériences</b>	<b>14</b>
Nos expériences	14
Résultats et chiffres de notre maquette motorisée	15
<b>Conclusion</b>	<b>17</b>
<b>Remerciements</b>	<b>19</b>

## Introduction

Bonjour, nous sommes un groupe de six élèves de seconde du Lycée Jules Verne. Dans ce mémoire, vous trouverez notre démarche expérimentale visant à comprendre la physique derrière les aéronefs à effet de sol.

Nous présentons aujourd'hui une démarche expérimentale et analytique, (malheureusement) due à notre manque de prédispositions en aérodynamique<sup>1</sup> et en dynamique des fluides, au détriment d'une parfaite compréhension théorique. C'est ainsi que nous avons choisi de réaliser des prototypes.

L'idée de participer aux Olympiades de Physique a été motivée par notre soif de découverte, d'apprentissage et d'expérimentation.

Fabriquer une maquette fonctionnelle a donc été notre principal but, auquel sont venues se greffer différentes expériences, que nous vous présenterons.

---

<sup>1</sup> **Aérodynamique** :

1. (*nom féminin*) Partie de la physique qui étudie les phénomènes accompagnant tout mouvement relatif entre un corps et l'air où il baigne.

2. (*adjectif*) Relatif à l'aérodynamique. (Le Robert en ligne)

# I. Principe des aéronefs à effet de sol

## 1. L'ekranoplane, un héritage soviétique

L'ekranoplane est un aéronef<sup>2</sup> à effet de sol. Il a été créé pendant la guerre froide. Au début des années 1950, Rostislav Alekseïev, ingénieur soviétique, imagine un nouveau type d'appareil : un bateau capable de s'envoler.

Il a d'abord commencé par faire 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 le monstre de la mer Caspienne, aussi appelé le modèle KM, en 1966.

Ce premier aéronef à effet de sol faisait 100 mètres de long et 540 tonnes. Grâce à l'effet de sol, il pouvait voler à 3 mètres de haut, et grâce à sa rigidité, il pouvait faire face à des vagues de plus de 5 mètres. Cet avion servit de laboratoire scientifique jusqu'en 1980. Aujourd'hui, il est appelé "monstre de la Mer Caspienne" à la suite d'un accident qui s'est produit lors de rafales de vents.

Les ekranoplans sont très proches des avions actuels.

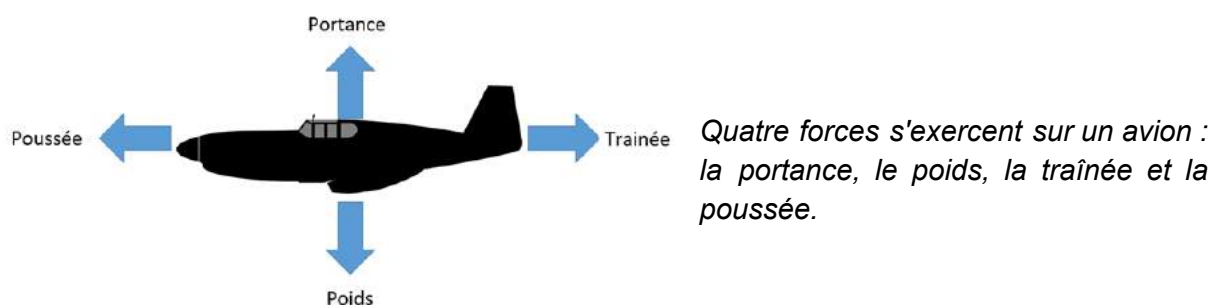
La principale différence avec un avion classique est qu'un ekranoplane utilise la pression pour bénéficier de l'effet de sol, alors qu'un avion classique se sert de la dépression. Un ekranoplane bénéficie ainsi d'une légère augmentation de sa portance du fait qu'il vole à basse altitude.

En résumé, un ekranoplane est un avion qui vole à basse altitude grâce à l'effet de sol.

## 2. L'effet de sol

Mr Pastur, enseignant-chercheur en dynamique des fluides, a gentilement accepté de nous aider à comprendre sur la partie théorique, nous tâcherons de restituer du mieux que nous le pouvons ce que nous avons compris.

Définissons les forces :



<sup>2</sup> **Aéronef** : n. m. - 1844 de aéro- et nef "navire"

- 1 Machine volante plus lourde que l'air, propulsée par des ailes battantes ou tournantes (opposé à odrostat).
- 2 Tout appareil capable de se déplacer dans les airs aérodyne, aérostat

L'effet de sol est un phénomène aérodynamique concernant les vols au ras du sol. Il consiste à exploiter la pression entre un objet en mouvement et portant avec le sol grâce à sa surface portante, créant une pression entre cette dernière et le sol.

La pression étant plus forte sur la surface du dessous de l'appareil que sur celle du dessus, alors une différence est créée.

Cette différence influe sur la portance du prototype (force portant un corp vers le haut) et réussit à compenser le poids (force tirant un corp vers le sol)

Pour que le véhicule s'équilibre et soit maintenu dans l'effet de sol, il faut que le poids et la portance se compensent, quand ces 2 facteurs s'équilibrent la somme est égale à 0 et le prototype reste en l'air.

La pression est une force qui joue un rôle primordial dans le cas de l'effet de sol. En effet, lorsqu'un avion se déplace près du sol, le déplacement de l'air est limité, et la pression sous l'aile augmente. Sans cette force, l'effet de sol ne pourrait pas avoir lieu.

L'effet de sol agit principalement sur la portance. Celui-ci fonctionne tout aussi bien sur un sol solide que liquide, tant que la surface est plane. En effet, afin que pression et vols puissent être stables, un sol plat est absolument primordial.

La pression  $P$  est la force  $F$  s'exerçant sur la surface de contact  $S$  (La formule s'écrit :  $P=F/S$ ).

Dans cette formule la pression de mesure en Pascal (Pa), la force de mesure en Newton (N) et la surface en mètre carré ( $m^2$ ).

Cela forme comme un coussin d'air qui permet de maintenir l'avion au ras du sol.

Cela pourrait lui permettre lors d'une utilisation de porter de plus lourdes charges.

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. L'intégralité de notre écranoplane a été fabriqué de manière à exploiter au maximum l'effet de sol mais nous en reparlerons dans la partie Conception et Réalisation.

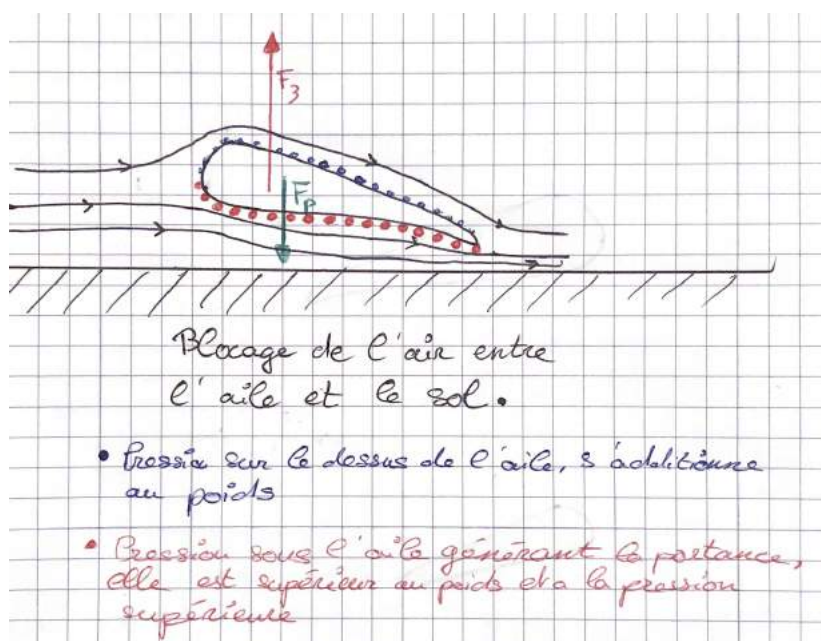
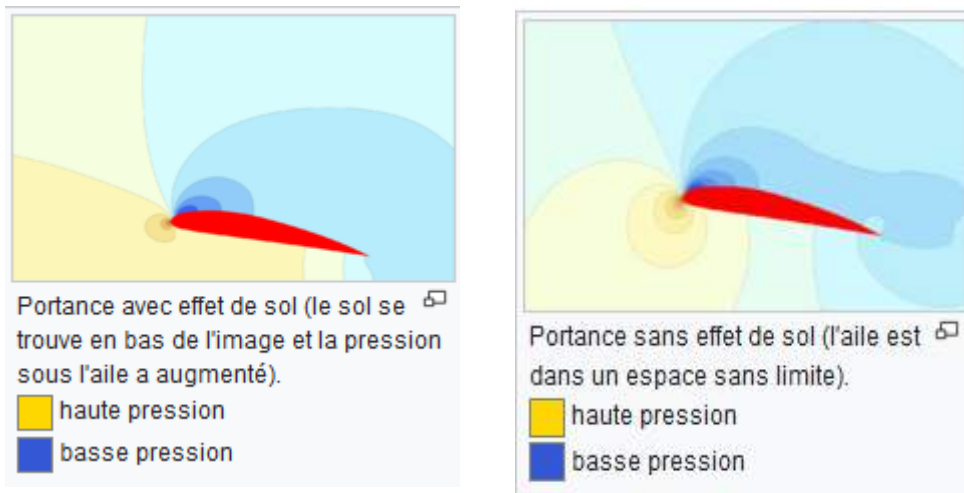


schéma simplifié montrant la différence de pression entre le dessous de l'aile (gros points) et la pression de dessus d'aile (point plus petit). La quantité plus importante d'air sous l'aile est aussi représentée.

De l'air va s'accumuler sous l'aile pour pouvoir soulever celle-ci et créer un blocage, augmentant la pression sous l'aile. Pour bénéficier au mieux de cet effet, il est possible de donner une inclinaison à l'aile afin d'amplifier davantage la courbure de l'aile créant cette sorte de bulle d'air, comme sur le dessin.

L'ekranoplane n'est pas le modèle le plus connu parmi les moyens de locomotion exploitant l'effet de sol. Les plus connus sont d'autres véhicules supprimant les frottements et induisant l'effet de sol : l'aérotrain sur la terre, et le hovercraft sur mer.



Source: [https://fr.wikipedia.org/wiki/Effet\\_de\\_sol](https://fr.wikipedia.org/wiki/Effet_de_sol)

Nous allons maintenant utiliser deux schémas pour illustrer nos propos.

Dans le premier schéma (à gauche), nous constatons une grande zone de haute pression (colorée en jaune foncé). Cela montre que l'aile est soumise en tout point à l'effet de sol car l'air le maintiendra en l'air.

Contrairement à l'aile du second schéma qui elle n'y est pas soumise car elle n'est pas en contact proche avec le sol. Cela forme alors une plus faible zone de haute pression en dessous de l'appareil. L'effet de sol ne peut donc pas avoir lieu.

### 3. Points positifs de notre projet et nos attentes

Notre projet de physique n'est pas sans but. En effet, nous pouvons observer de nombreux avantages à utiliser l'effet de sol. Notre projet a pour but d'observer et de démontrer les nombreux effets positifs liés à son utilisation.

Ce dernier permet au véhicule qui l'exploite de voler au ras du sol, qu'il soit solide ou liquide, c'est donc un atout majeur pour voler au-dessus de la terre et de l'eau. Cet atout pourrait justifier, dans un futur non déterminé, une utilisation progressive des véhicules aériens par voie maritimes qui auraient la capacité de soulever une charge plus lourde qu'un avion classique.

Cela permet de transporter plus de monde et de marchandises d'une côte à une autre, tout en consommant moins de carburant. L'usage de l'effet de sol est donc une solution écologique pour réduire les émissions de gaz à effet de serre générés par les vols entre villes portuaires.

Le trafic aérien étant très élevé dans les zones maritimes, les véhicules à effet de sol représentent une possibilité de les diminuer. En effet, ces véhicules accueilleront plus de personnes et de marchandises et ainsi le nombre de vols pourra être diminué. De plus, ils sont moins coûteux et pour finir, comme dit plus tôt, leur consommation d'énergie est très réduite car la prise d'altitude est gérée par l'augmentation de la portance créée par l'effet de sol. Ils produisent donc moins de gaz à effet de serre.

Lors de ce projet, nous avons aussi vu nos attentes comblées : nous attendions un prototype volant avec l'effet de sol, et nous l'avons. Il peut en outre être le modèle réduit d'un plus grand qui lui, pourrait transporter des passagers ou des marchandises dans les conditions citées ci-dessus. Cela pourrait être très utile dans certaines situations tout en permettant d'économiser du carburant et ainsi permettre des vols écologiques.

## II. Conception & Réalisation

Nous avons décidé d'illustrer l'effet de sol en fabriquant nos propres versions d' avion à effet de sol. Pour ce faire nous avons réalisé un premier prototype radiocommandé en vue des sélections régionales, mais une série d'imprévus nous a empêchés de présenter les images des tests aux jury.

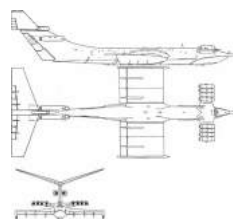
Toutefois nous avons corrigé les erreurs que nous avons commises lors de la création du premier ekranoplane dans le mois qui a suivi, et nous avons décidé de remanier notre approche pour la réalisation d'un nouvel appareil, en tenant compte des informations que nous avons obtenues au cours de nos expériences précédentes.

Par conséquent, dans cette partie beaucoup de comparaisons entre les deux prototypes motorisés seront faites afin d'appuyer l'évolution de notre dernier prototype.

### 1. Conception, recherche et inspiration

Depuis le début du concours, nous avons conçu plusieurs maquettes en utilisant des procédés variés reflétant l'avancement de nos connaissances dans les domaines de la physique et du radiomodélisme.

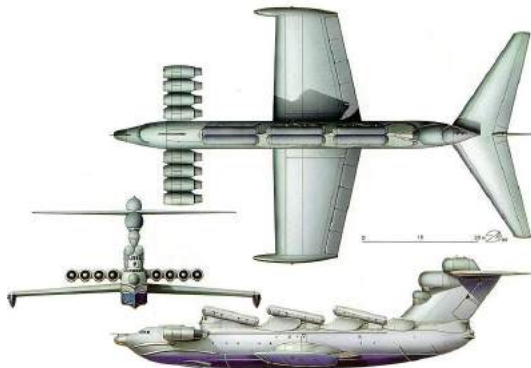
Le prototype pour les régionales a été notre toute première expérience à tous dans la conception d'un avion radiocommande. Nous avons donc entrepris la construction et la réalisation en même temps. Nous avons eu l'idée de partir sur un corps en forme de prisme pour la facilité d'en découper un dans du carton plume, matériau dont nous disposions déjà. Les surfaces portantes ont été quant à elles dimensionnées en fonction de photos d'autres ekranoplans radiocommandés dont nous disposions .



Suite à l'échec des tests sur ce modèle et à notre réussite lors des sélections régionales nous avons décidé de repartir sur de nouvelles bases, mais cette fois nous avons décidé de bien différencier notre période de construction avec celle de conception. Pour ce faire nous avons porté un regard critique sur notre ancien modèle et fait une liste des problèmes que nous avons rencontrés.



Nous avons cru que nous pouvions réaliser notre design de manière relativement simple, ce qui s'est avéré être une erreur. Nous sommes donc partis à la recherche de plans d'ekranoplans ayant été construits à taille réelle. Sur ce point plusieurs choix s'offraient à nous:



le *Lun*, (ekranoplane soviétique)

Avantages :

- ailes simples à réaliser
- origine de notre projet

Désavantages :

- nécessite une vitesse élevée au décollage
- emplacement des moteurs
- mauvaise expérience de notre précédent ekranoplane



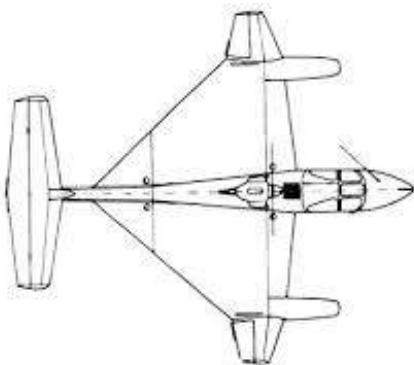
*Sea falcon*, (avion à effet de sol allemand)

Avantages :

- placement des moteurs
- aérodynamisme<sup>3</sup>

Désavantages :

- ailes extrêmement complexes
- portance faible



*Gruning eska*, (avion à effet de sol russe)

<sup>3</sup> **Aérodynamisme:** L'aérodynamisme des véhicules. De manière générale, on parle d'aérodynamisme pour faire référence à la science permettant d'étudier les nombreux phénomènes qui accompagnent tout mouvement entre un objet et l'air qui l'entoure.(Ornikar/Google)



### Avantages :

- simple géométriquement
- grande surface portante
- aile spécialisée (Lippisch)
- moteur simple à positionner

### Désavantages :

- centre de portance différent dans et en dehors de l'effet de sol

Nous avons donc préféré prendre le gruning eska comme modèle (plan en haut à gauche) en raison de son grand nombre d'avantages pour un désavantage ne concernant pas la démonstration de l'effet de sol.

## 2. Construction matériel et électronique

Nous avons construit deux ekranoplans motorisés durant la préparation de ce mémoire. Notre tout premier modèle, conçu pour les qualifications régionales n'est pas d'un très grand intérêt technique, par conséquent nous ne développerons pas d'explications concernant sa réalisation. Nous allons par contre détailler cette partie sur les modèles préparatoires et sur le véhicule à effet de sol que nous vous présenterons lors de notre oral.

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 au regard de la simplicité à le manipuler pour la création de 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'ekranoplane, et considérer cette expérience comme une invitation au monde théorique de l'aérodynamique, en faisant des liens avec nos ekranoplans.

Ces deux expériences nous ont permis de confirmer nos hypothèses sur la capacité des ailes Lippisch à profiter au mieux de l'effet de sol. Nous avons également remarqué que la queue ramenait trop le centre de gravité vers l'arrière. Pour contrer cela, nous avons prévu des contrepoids (comme visible sur l'image). Pour notre prototype final, nous prévoyons d'utiliser la batterie afin de remplir ce rôle.

Ainsi, en nous appuyant sur les informations collectées lors des expériences précédentes et de la première maquette, nous avons donc pu commencer la réalisation de notre dernier prototype, nous avons commencé par rassembler les matériaux nécessaires à la fabrication de notre ekranoplane.



mousse de polystyrène

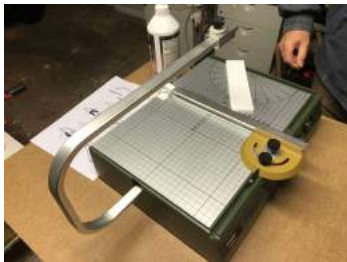


dépron de 3 et 9 mm



pièce de drone

Nous avons ensuite découpé le corps de notre appareil au fil chaud afin de nous donner une idée de la taille qu'aurait notre engin.



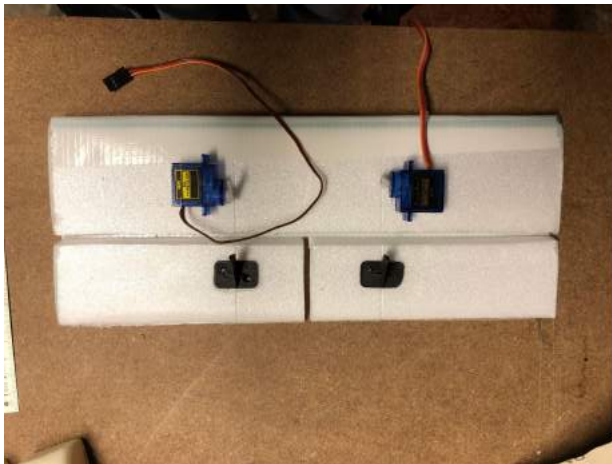
*images des différentes étapes de la découpe du fuselage*

Par la suite, nous avons découpé les pièces de dépron qui constituent la queue de l'appareil. Nous appréhendons un peu cette étape car, lors de notre premier modèle, la taille des surfaces de contrôle n'était pas suffisante et avait mené à un manque de contrôle de l'avion.

Pour régler ce problème, nous avons décidé de surdimensionner cette dernière. Nous avons également réalisé un profil bombé sur l'élévateur (partie horizontale de la queue) 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.)



*queue découpée et  
assemblée*



*servomoteurs en place*

Nous avons ensuite réalisé les ailes, la technique que nous avons utilisée a été le pliage de dépron (feuille de polystyrène très fine) car ce dernier devient malléable à moyenne température. Pour ce faire, nous avons réalisé un patron de notre aile que nous avons plié sur le bord d'attaque (lignes noires sur la photo 1) puis, pour que l'aile garde sa forme, nous avons collé des rectangles de dépron à l'intérieur de l'aile (photo 3), nommés traverses qui ont eu pour double rôle de nous permettre de réaliser des courbures similaires sur les deux ailes et de les solidifier.

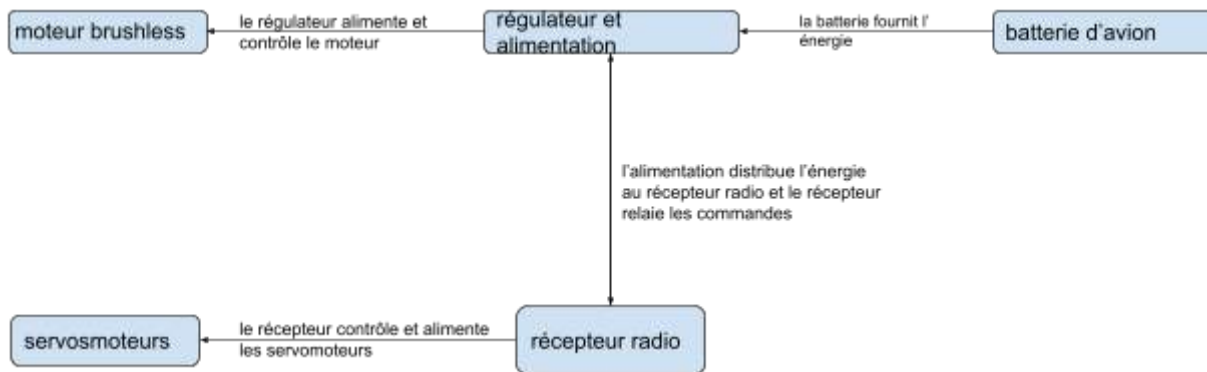


Une fois les ailes formées, nous les avons placées sur notre appareil pour vérifier nos mesures et avons ajouté des winglets, des petits ailerons verticaux permettant d'augmenter la portance et de stabiliser notre appareil.



*montage a blanc (sans colle)*

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





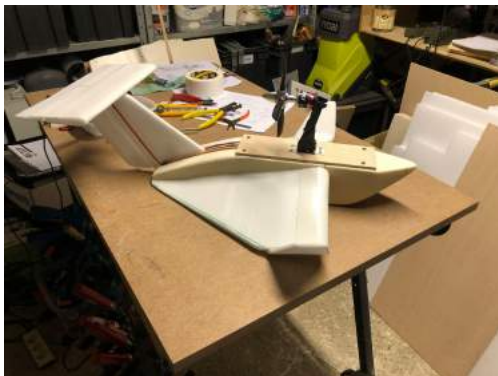


*Hélice permettant à notre maquette de se mouvoir*



*Toute 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 maquette finie*

### III. Analyses & expériences

#### 1. Nos expériences

Une fois que notre premier prototype 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 nous avons remarqué que l'ekranoplane avait tendance à tourner tout seul à cause de la rotation de l'unique hélice présente sur l'aéronef. Malheureusement ceci combiné à 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 trentaine 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.

Pour permettre à l'ekranoplane de mieux voler une solution est d'augmenter la portance de celui-ci. Pour augmenter la portance intéressons-nous aux facteurs qui l'augmentent qui sont définies par la formule de Navier-Stock.

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

L : portance

$\rho$  : masse volumique de l'air

V : vitesse

S : surface au sol

$Cl_i$  : coefficient de pénétration dans l'air/ coefficient de portance

Comme nous pouvons le voir sur la formule plusieurs solutions s'offrent à nous comme 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.

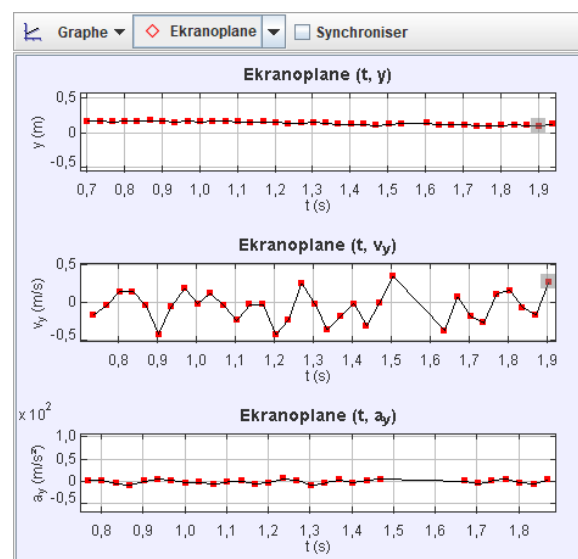
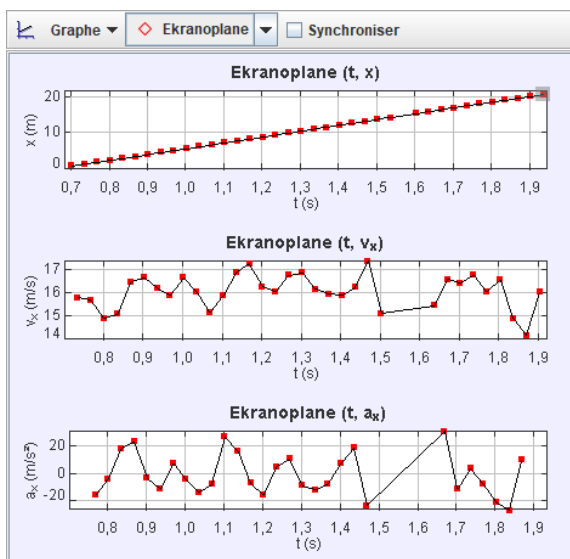


Une autre solution possible est d'augmenter la surface de sol ce qui est plus complexe que d'augmenter la vitesse puisqu'elle demande forcément un changement au niveau de la forme de l'avion.

Suite à ce que nous avons vu précédemment les voies d'améliorations réalisables en temps et en heure seraient l'augmentation de la puissance du moteur et l'ajout de roues ce qui permettra de réaliser ces tests en extérieur et aussi d'augmenter la vitesse en réduisant la friction avec le sol.

## 2. Résultats et chiffres de notre maquette motorisée

Après avoir testé et filmé notre ekranoplane, 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'incompatibilité 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  $V_x$  et  $V_y$ , et pour finir l'accélération entre deux images  $A_x$  et  $A_y$ .



Détail des graphique 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 est 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, à 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  $V_x$  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).

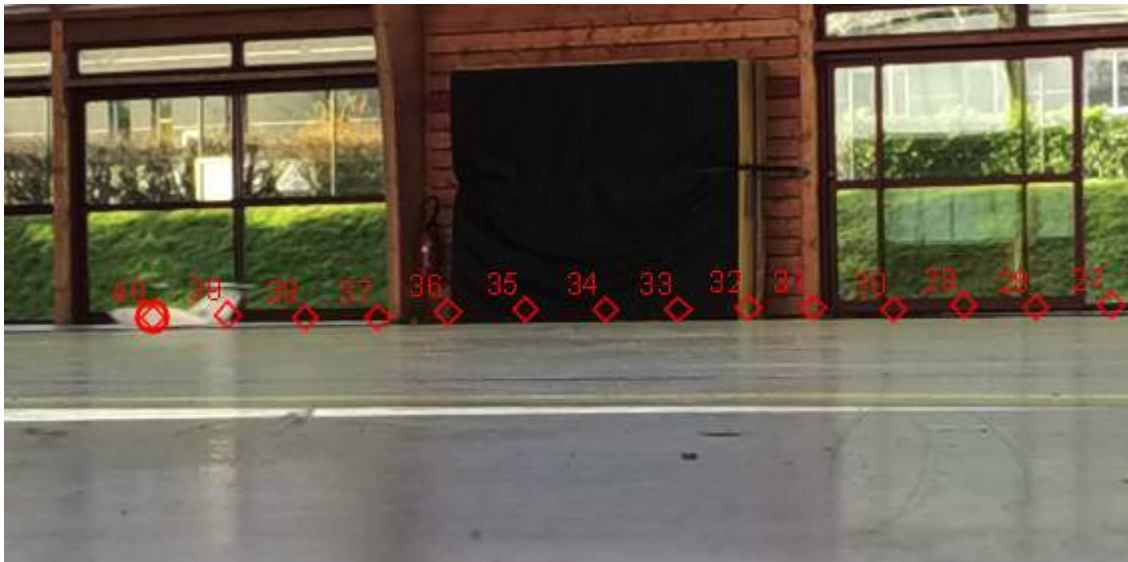
Sur le dernier graphique, présentant l'accélération de  $x$   $A_x$  en  $m/s^2$  en fonction du temps en secondes, on peut voir que les accélérations ne sont pas régulières et passent même dans la partie négative du graphique. Cela peut montrer une hétérogénéité de la poussée fournie par le moteur ou 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  $y$  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 grande variation de la vitesse.

Sur le dernier graphique de  $y$ , nous étudions l'accélération en  $m/s^2$  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 accélérer.



*Image de pointage vidéo*

## Conclusion

Tout d'abord, un ekranoplane est un avion qui vole uniquement à basse altitude, sa hauteur de vol est égale à la moitié du diamètre des ailes. Ceci est une contrainte importante mais il faut savoir qu'une grande partie des vols en avion se font au-dessus d'une surface plane et un ekranoplane pourrait donc faire ces trajets sans aucun problème.

De plus, notre ekranoplane pourrait remplacer certains bateaux voire même la totalité des bateaux. Il pourrait notamment les remplacer dans les archipels comme les Maldives. En effet, dans les Maldives on utilise essentiellement des bateaux à moteur, ce qui pollue la planète, sachant que la pollution est un enjeu majeur pour les générations futures. Certaines personnes utilisent des rames pour les petits voyages mais le voyage est long et épuisant.

Nous avons donc construit un ekranoplane pour surmonter ces problèmes que certains vivent au quotidien. En effet, notre ekranoplane consomme moins de carburant et émet donc moins de gaz à effet de serre, ce qui bien pour le futur de notre planète. En plus il est rapide, finis les longs trajets. On pourra voyager d'une île à l'autre très rapidement.

De plus, l'ekranoplane peut aussi faire des voyages entre les pays et même entre les continents. Premièrement, il pourrait transporter des marchandises mais aussi des touristes car sa portance est assez élevée pour pouvoir transporter plusieurs personnes. Deuxièmement, l'ekranoplane peut faire différentes tailles et en fonction de sa taille, sa portance et sa vitesse changeront. Pour finir, en cas de problèmes, il vole à basse altitude donc on peut plus facilement évacuer l'avion s'il y a un problème technique.

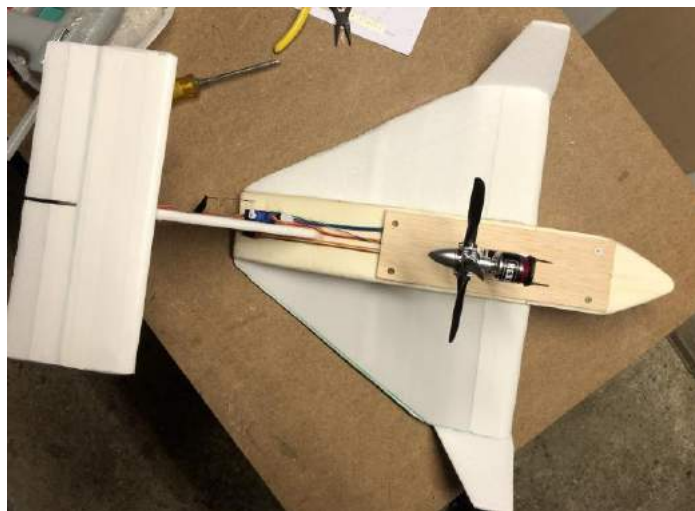
Ensuite, l'ekranoplane peut être une bonne arme en cas de guerre. En effet, on s'est inspiré des avions de l'URSS pour faire ce projet. Les russes les avaient utilisés pour le transport de passagers, le débarquement de troupes et les activités de combat et ils avaient été efficaces contre l'ennemi. En effet, cet avion évite les radars en hauteur et esquivé les mines marines. Donc l'ekranoplane pourrait être utilisé comme arme s'il avait une autre guerre comme dans le passé.



*Sur cette photo on voit le LUN, c'est un des ekranoplane soviétique qui a été utilisé dans les années 1990. Il a été conçu par Rostislav Evgenievich Alekseïev. Cet avion a été utilisé pour transporter des missiles.*

Source: [https://stringfixer.com/fr/Lun-class\\_ekranoplan](https://stringfixer.com/fr/Lun-class_ekranoplan)  
(vidéo du lun en vol [https://www.youtube.com/watch?v=\\_symWK4T7n0](https://www.youtube.com/watch?v=_symWK4T7n0) )

Pour conclure, notre ekranoplane a de nombreux avantages. Il pourrait, dans une grande majorité, des cas remplacer les bateaux. Il pourrait aussi remplacer certains avions pour les vols au-dessus de surfaces planes. Il pourrait aussi être utilisé dans les grands archipels.



## **Remerciements**

Pour réaliser ce projet nous avons eu recours à l'aide de plusieurs personnes à qui nous devons une mention spéciale dans ce paragraphe car cette aide à été bénéfique au bon déroulement du projet.

Premièrement, nous tenions à remercier notre professeur principal et professeur de physique-chimie, M. Garrigues avec qui, durant toute la durée du projet en suivant l'avancée de notre maquette et de nos recherches, en organisant des réunions hebdomadaires, ou en nous donnant des conseils nous a soutenus et aidé. Il nous a aussi mis en relation avec un enseignant-chercheur, Luc Pastur, associé à l'ENSTA Paris - Institut Polytechnique de Paris.

M. Pastur a pris de son temps pour discuter avec nous de notre projet et nous donner des conseils autant théoriques que pratiques et nous a éclairé sur de nombreux points.

Nous remercions aussi M. Jeanne notre proviseur ; et M. Authesserre qui nous a donné accès aux deux gymnases pour effectuer des tests avec notre prototype.

Nous voudrions également remercier la professeur documentaliste de notre lycée, Mme Tancogne qui nous a fourni de nombreux documents qui nous ont permis de nous ouvrir sur les travaux déjà réalisés et avec qui nous avons corrigé certains points de notre mémoire avec l'aide de Mme Lucas Viillard professeur de Lettres.

Et pour terminer nous sommes fiers de ce que nous avons accompli et réussi à réaliser.

Merci d'avoir pris le temps de lire ce mémoire pour lequel nous avons investi beaucoup de notre temps...

L'équipe des Olympiades du Lycée Jules Verne.

# Les sources utilisées

## Bibliographie :

- manuel de physique chimie, 2nd, programme 2019, hachette édition
- *Encyclopædia Universalis*, Encyclopædia Universalis SA. , 2012
- *Grand Larousse Universel*, 1989
- *le petit Robert*, Les Dictionnaires Le Robert, 2013
- *Atlas de la physique*, Hans Breuer, 1997 (édition française)
- *Dictionnaire de physique*, J.P. Mathieu, A. Kastier et Fleury, 1991

## Sites internet :

- <https://fr.wikipedia.org/>
- <https://www.techno-science.net/>
- <https://www.universalis.fr/>
- <https://www.futura-sciences.com/>
- <https://www.youtube.com/c/rctestflight/featured>
- <https://www.youtube.com/c/MustardChannel>
- <https://www.lavionnaire.fr/AerodynEffetSol.php>