

OLYMPIADES DE PHYSIQUE 2020

Ça Plane sur l'eau !!!
Ou toujours plus vite
Ou encore comment faire voler un bateau ?



LYCEE DES FLANDRES HAZEBROUCK

ROMMELAERT Thibaut

TRICART Théophile

THEUNIS Louis

I. Présentation

En cours d'année de 1^{ière}, nous avons travaillé sur la conception d'un drone. A cette occasion, nous avons trouvé dans les armoires du labo de technologie un système permettant à un drone de propulser une maquette de bateau. C'est à ce moment que nous est venue l'idée de travailler sur la possibilité de faire avancer ce bateau le plus rapidement possible. Les images de trimarans géants parcourant les océans en restant en lévitation au-dessus de l'eau nous ont inspirés et nous ont permis de décider de concevoir des foils pour que le bateau s'élève le plus rapidement possible pour avoir la plus grande vitesse.

Le système du labo possédait déjà des foils, mais ceux-ci sont introuvables. Nous avons décidé d'en recréer et de les rendre les plus efficaces possibles.

II. Choix des foils

1. Conditions

En réfléchissant, à notre problématique, nous avons remarqué que le déplacement dans l'eau de notre bateau est limité par les frottements de l'eau sur sa coque. L'intérêt des foils est bien de limiter le contact entre l'eau et la coque et donc de minimiser les forces de frottement. Nous devons donc créer des foils qui permettent de lever le bateau le plus haut possible (hors de l'eau).

Pour soulever le bateau, ils doivent exercer une force verticale la plus grande possible pour compenser le poids du bateau qui lui devra être le plus faible possible. D'un autre côté, il faut minimiser les forces de frottement entre ces foils et l'eau

2. Portance et trainée

a. Portance

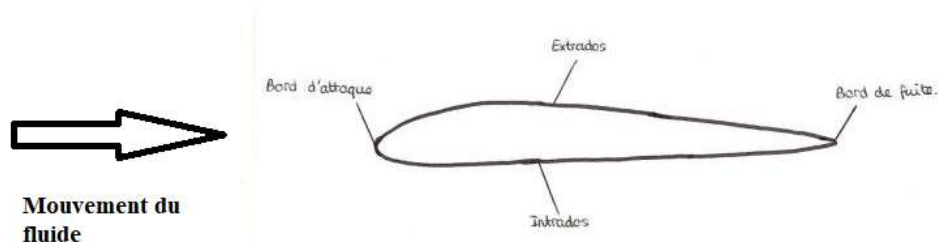
La portance est une force verticale exercée par un fluide sur un objet en mouvement par rapport à ce dernier.

Cette force s'exprime sous la forme : $F_z = \frac{1}{2} \times \rho \times S \times C_z \times v^2$

Où ρ est la masse volumique du fluide (kg.m^{-3}), S la surface de référence de l'objet (m^2), v la vitesse de déplacement de l'objet par rapport au fluide (m.s^{-1}) et C_z le coefficient de portance qui dépend principalement de la géométrie de l'objet.

Considérant l'objet suivant :

Le bord d'attaque est la partie qui est située à l'avant du profil, le bord de fuite la partie située à l'arrière, l'extrados au-dessus et l'intrados en dessous.



Quand le fluide parvient au bord d'attaque, il peut passer par l'intrados ou par l'extrados pour se rejoindre au bord de fuite. Dans ces conditions et dans l'exemple précédent, le fluide qui passe par l'extrados parcourt une distance plus grande et doit avoir une vitesse plus grande que la partie du fluide qui passe par l'intrados.

D'après la relation de Bernoulli ($\rho \frac{v^2}{2} + P + \rho gz = \text{constante}$) qui traduit la conservation de l'énergie lors de l'écoulement d'un fluide, on peut en déduire que lorsque la vitesse augmente, la pression diminue. On a ainsi une pression sur l'intrados plus élevée que sur l'extrados. Il en résulte une force de pression verticale qu'on appelle la portance.

b. Trainée

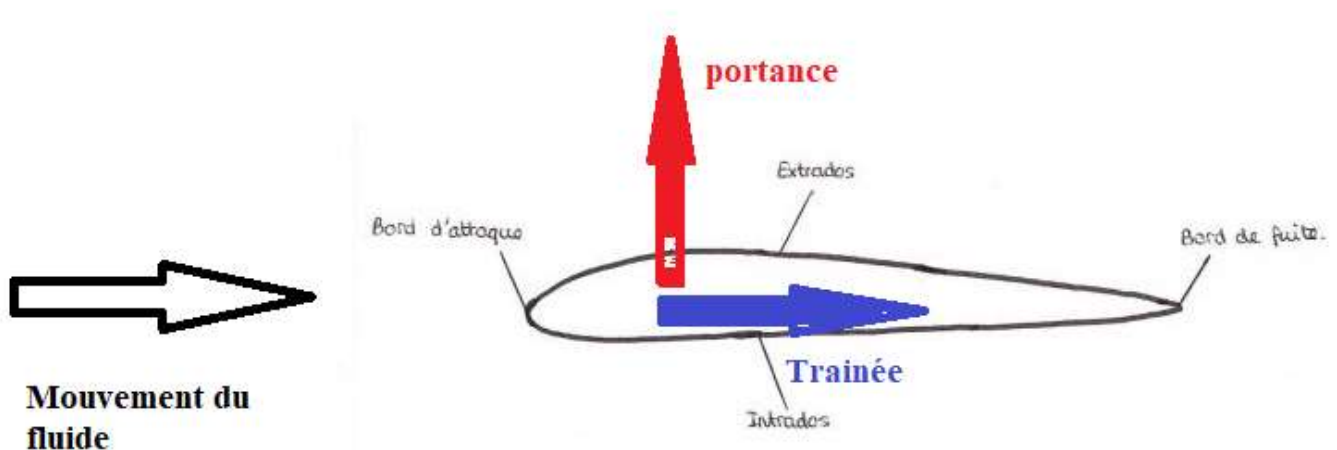
La trainée est une force exercée par un fluide qui s'oppose au mouvement d'un objet qui s'y déplace. Elle est donc dans la direction du mouvement et opposé à ce dernier.

Elle s'exprime sous la forme : $F_x = \frac{1}{2} \times \rho \times S \times C_x \times v^2$

Où ρ est la masse volumique du fluide (kg.m^{-3}), S la surface de référence de l'objet (m^2), v la vitesse de déplacement de l'objet par rapport au fluide (m.s^{-1}) et C_x le coefficient de trainée qui dépend principalement de la géométrie de l'objet.

c. Récapitulatif

Quand un objet se déplace dans un fluide, il est soumis à une action mécanique de la part du fluide qui se décompose en deux forces : La portance et la trainée



Pour la conception de nos foils, nous devons nous arranger pour avoir une portance maximale, une trainée minimale et un poids le plus faible possible.

3. Profil choisi

L'idée qui vient directement à l'esprit est l'aile d'avion. En effet ce profil permet quand même de créer une portance suffisante pour maintenir un avion de poids non négligeable en altitude.

Nous avons choisi de respecter ce profil, mais avant sa conception il nous faut définir sa géométrie exacte par rapport à nos conditions. Pour cela nous avons utilisé le logiciel mécaflux qui permet de trouver les approximations de C_x et C_z en fonction de la géométrie des foils.



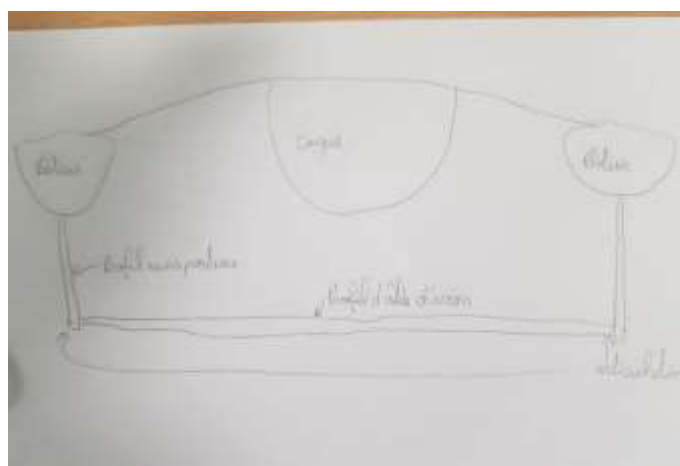
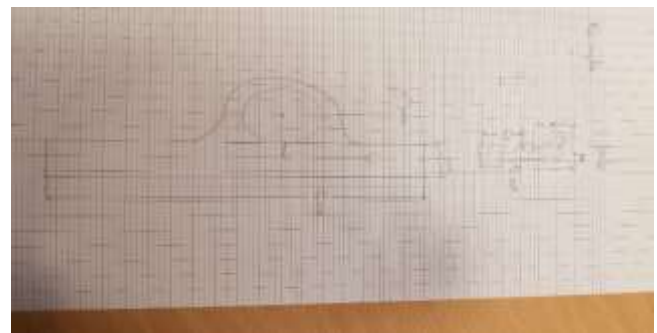
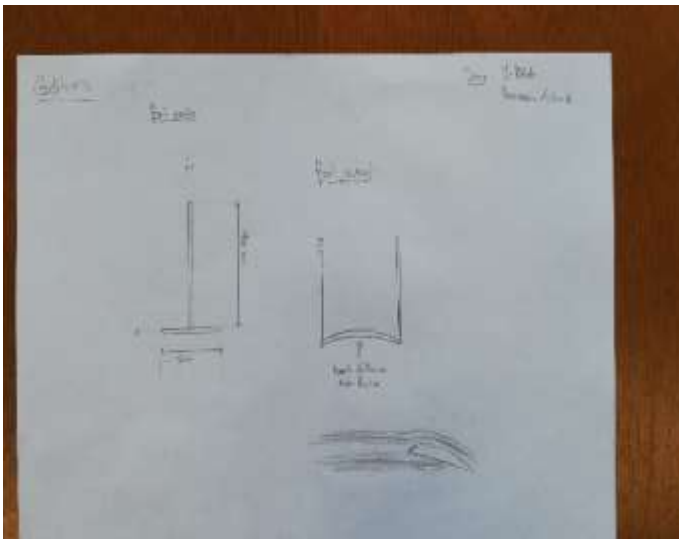
Pour simplifier notre conception nous avons choisi un profil plat concave

III. Conception

Il nous faut maintenant créer grâce au logiciel SOLIDWORKS les profils choisis et lancer l'impression.

Nous avons d'abord simulé notre profil à l'aide des logiciels pour observer la répartition des lignes de courant autour de ce dernier. Puis nous l'avons dimensionné par rapport au bateau sur lequel nous souhaitons les adapter. Il a fallu réaliser des croquis rassemblant les différentes cotes et modéliser dans SolidWorks. En effet, il faut adapter les foils conçus sur des flotteurs existants : Nous avons donc les foils et leurs supports.

Nous avons choisi un foil à l'avant d'une pièce que rejoint les deux flotteurs du bateau et un foil unique à l'arrière qui doit permettre l'équilibrage. Voici nos schémas et nos modélisations





Voici les résultats de notre conception après impression 3D :

Vu en coupe du profil et demi foils



Fixation des foils sur le bateau :



IV. Mesure de de la portance et de la trainée de notre profil

1. Appareils de mesure

Dans le labo de physique, nous avons retrouvé une vieille balance aérodynamique qui ne semblait plus en très bon état

Elle est constituée d'un ressort spiral qui permet de rééquilibrer un éventuel déséquilibre.

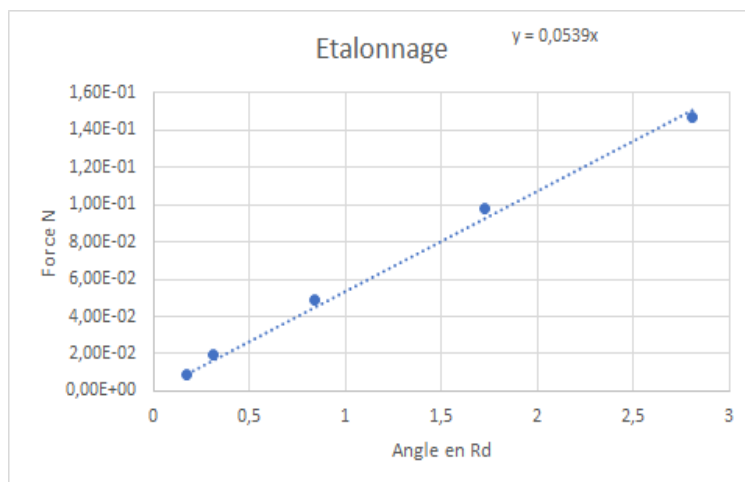
Nous avons commencé par placer un profil quelconque d'un côté de la balance, nous avons alors remarqué un déplacement du profil dans la direction opposée au mouvement relatif : C'est donc la trainée. En

utilisant le ressort, il est donc possible de compenser cette force et d'en déduire la valeur de la trainée. Mais il est nécessaire de connaître la constante de raideur du ressort c'est pourquoi nous avons commencé par un étalonnage du ressort.



Etalonnage : Calcul de la raideur du ressort (k)

Pour cela nous avons placé des masses sur le plateau de la balance et mesuré les angles qui permettaient de rétablir l'équilibre. A l'équilibre le poids des masses est compensé par la force de rappel du ressort. Il nous est alors possible de retrouver la constante de raideur k du ressort car $F=k*\Delta\theta$



Le coefficient directeur de la droite correspond à la constante de raideur du ressort. On trouve ici $k=0,0539 \text{ Nrad}^{-1}$

Cet appareil va nous permettre de mesurer dans de bonnes conditions les valeurs de trainée.

Pour ce qui est de la portance nous avons imaginé deux systèmes :

-un système simple constitué d'une balance sur laquelle se trouve un support de profil. Quand le profil est posé sur ce support le tout placé dans la soufflerie, la variation de masse permet de retrouver la valeur de la portance.

-Un système qui utilise la balance aérodynamique utilisée pour la trainée en plaçant la soufflerie dans une direction perpendiculaire et en orientant correctement le profil



2. Mesure de la trainée

- Vérification du fonctionnement des dispositifs de mesure :

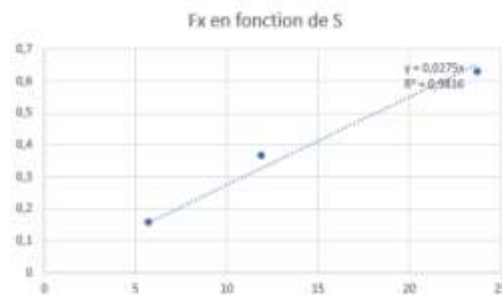
Pour vérifier le bon fonctionnement de notre dispositif, nous avons commencé par vérifier expérimentalement l'expression de la valeur de la trainée. Nous avons choisi de vérifier la dépendance de la trainée par rapport à la vitesse, par rapport à la surface et par rapport au C_x .



Voici nos résultats :

-Nous avons commencé par étudier l'évolution de la trainée en fonction de la surface :

S(cm ²)	Fx(N)
23.7	0.63
11.9	0.37
5.7	0.16



La trainée est bien proportionnelle à la surface

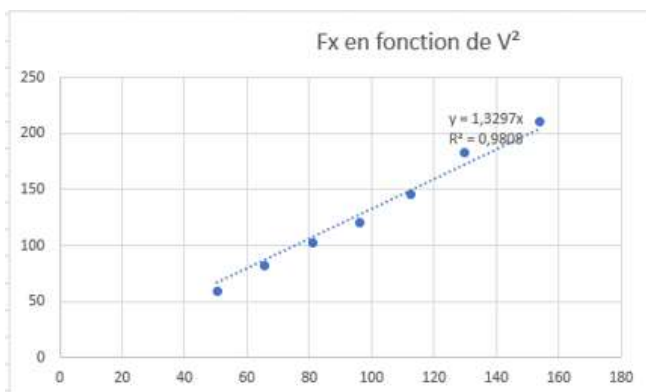
-Nous avons ensuite étudié les variations de la trainée en fonction de la vitesse :

Pour cela, nous avons dû utiliser une soufflerie dont la vitesse d'écoulement de l'air est réglable et qui est équipée d'un capteur appelé jauge de contrainte qui est sensible aux déformations.

La force est mesurée en mN



V	V ²	Fx
7,1	50,41	59
8,1	65,61	82
9	81	102
9,8	96,04	120
10,6	112,36	146
11,4	129,96	183
12,4	153,76	211



La trainée est bien proportionnelle au carré de la vitesse

-Enfin, nous avons voulu vérifier l'impact d'un C_x différent en changeant la géométrie des profils



Quand on change la géométrie, la déviation est différente et donc la valeur de la trainée aussi.

- Mesure du coefficient de trainée et de portance de notre profil

Nous souhaitons obtenir un coefficient de trainée faible pour un coefficient de portance élevé.
En mesurant la trainée de notre profil nous espérons réussir à obtenir la coefficient C_x .

Nous avons donc accroché notre profil sur le support de la balance placé la soufflerie. La trainée provoque un déséquilibre de la balance que nous rééquilibrions avec le ressort.

Pour obtenir le coefficient C_x , il nous faut alors déterminer la surface, la masse volumique du fluide et sa vitesse. Malheureusement nous ne possédons pas d'outils assez précis pour mesurer tout cela.

Par contre nous cherchons à obtenir un C_x faible et un C_z fort. Nous pourrions avoir acces au rapport de C_z

sur C_x à partir des portances et des trainées :

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

Pour cela, il faut mesurer la valeur de la portance également

Nous avons refait nos mesures pour trois angles d'attaque et avons avec la balance aerodynamique mesuré à la fois la trainée et la portance dans les mêmes conditions de vitesse d'écoulement , de fluide et de surface.

Voici nos résultats :

Angle d'attaque	Trainée F_x	Portance F_z	$C_z/C_x = F_z/F_x$
7°	0.0066N	0.0245N	3.7
15°	0.0078N	0.0395N	5.8
30°	0.0143N	0.0595N	4.8



On remarque que le rapport C_z/C_x augmente avec l'incidence. Il nous faut alors choisir correctement l'angle d'incidence pour optimiser nos foils.

Les mesures sont malgré tout délicates à mettre en place avec notre balance surtout quand l'angle d'incidence augmente. Nous voyons qu'au-delà d'une certaine incidence la portance chute. Il nous faut alors déterminer la limite de manière à pouvoir choisir un angle d'attaque pour notre foil. Nous ne pouvons pas mesurer avec une grande précision cette limite alors nous avons choisi d'observer l'écoulement autour de notre profil en fonction de l'angle d'attaque.

- Visualisation de l'écoulement du fluide autour de notre profil

En plaçant le profil dans la soufflerie et en injectant un brouillard de vapeur d'eau, il est possible de visualiser l'écoulement autour du profil.

Voici les photos prises dans l'ordre croissant de l'angle d'attaque :



Observations : Pour des angles d'attaque faibles, les lignes de courant restent bien au contact du profil. Au-delà d'une certaine limite, elle se décolle du profil et des turbulences apparaissent à l'arrière

Conclusion : Il nous faut éviter cette situation car si le fluide ne reste plus au contact du profil, il y aura forcément une modification des équilibres de forces de pression et donc une perte de portance .

Pour évaluer l'angle optimale pour le réglage de notre foils, nous avons cherché la limite qui donnait naissance à ce décollement des lignes de courant et nous nous sommes arrêtés au alentour de 17°

CONCLUSION : Nous travaillerons donc avec une incidence de 15° pour être sûr d'être dans de bonnes conditions.

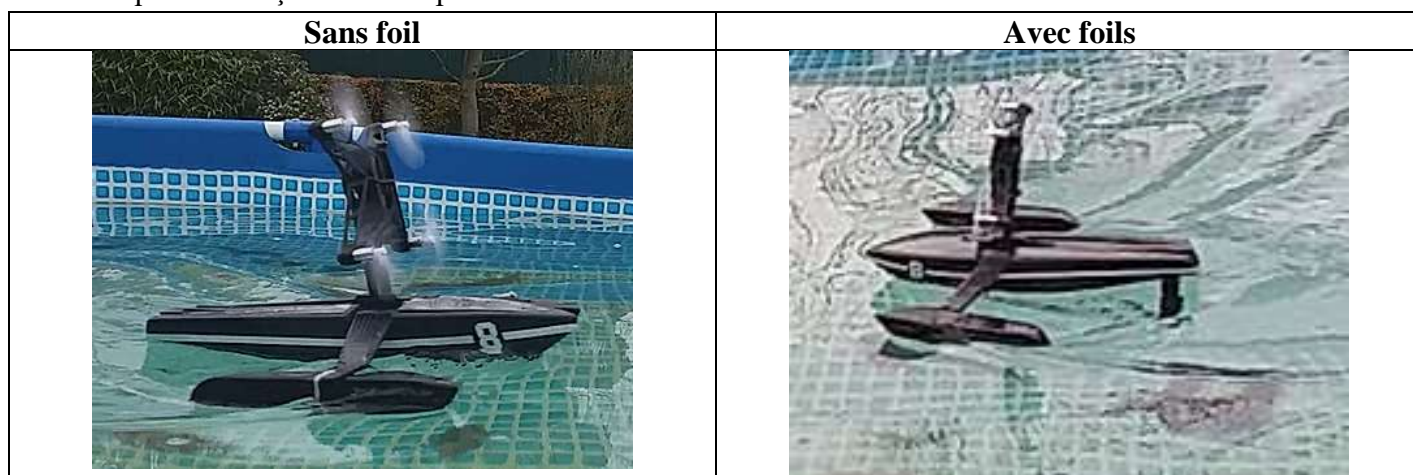


V. Essai

1. Influence des foils sur le mouvement du bateau

Le but est de montrer la différence entre la présence et l'absence de foils ; Pour cela nous avons fait l'essai sur une piscine de jardin de 4,5m de long.

En présence de foils, le bateau semble vouloir se lever mais ne décolle pas suffisamment de la surface de l'eau ce qui nous déçoit beaucoup.



L'étude des séquences vidéo doit nous permettre au moins de montrer que sa vitesse est plus élevée avec les foils.

- Sans foils

Un traitement vidéo par le logiciel avitep permet de déterminer la vitesse de déplacement du bateau

Tableau des valeurs						
Fichier Edition Affichage Calculs Aide						
	t	x	y	Vx	Vy	v
	s	m	m	m/s	m/s	m/s
	temps	Abcisse	Ordonnée	Composant	Composant	Valeur de
1	0	0.139	0.031	0.343	0.896	0.350
2	0.033	0.154	0.032	0.675	0.822	0.676
3	0.067	0.168	0.032	0.729	0.811	0.720
4	0.100	0.204	0.033	0.753	0.033	0.754
5	0.133	0.238	0.038	0.841	-0.044	0.843
6	0.167	0.261	0.038	0.841	-0.022	0.842
7	0.200	0.291	0.029	0.731	-0.008	0.734
8	0.233	0.309	0.028	0.820	-0.066	0.823
9	0.267	0.332	0.034	0.753	-0.033	0.754
10	0.300	0.359	0.034	0.797	0.044	0.798
11	0.333	0.388	0.021	0.808	-0.089	0.812
12	0.367	0.428	0.018	0.574	-0.111	0.880
13	0.400	0.456	0.014	0.789	-0.022	0.786
14	0.433	0.472	0.016	0.775	0	0.775
15	0.467	0.502	0.014	0.888	-0.006	0.888
16	0.500	0.531	0.012	0.562	-0.055	0.954
17	0.533	0.566	0.018	0.919	-0.022	0.919
18	0.567	0.593	0.018	0.841	-0.022	0.841
19	0.600	0.628	0.888E-3	1.841	-0.077	1.843
20	0.633	0.662	1.162E-3	0.388	-0.144	1.807



En raisonnant sur la vitesse maximale mesurée, nous avons ici 1m/s

- Avec foils

Un traitement vidéo par le logiciel avitep permet de déterminer la vitesse de déplacement du bateau. La trajectoire étant plus complexe que sans foils nous choisirons la vitesse la plus grande mesurée dans le tableau.

Tableau des valeurs						
Fichier Edition Affichage Calculs Aide						
	t	x	y	Vx	Vy	v
	s	m	m	m/s	m/s	m/s
	temps	Abcisse	Ordonnée	Composant	Composant	Valeur de
1	0	2.481	0.062	-1.124	-0.374	1.184
2	0.033	2.438	0.066	-1.124	-0.374	1.184
3	0.067	2.406	0.037	-1.030	-0.328	1.081
4	0.100	2.369	0.044	-1.264	-0.140	1.272
5	0.133	2.322	0.028	-1.217	0	1.217
6	0.167	2.298	0.044	-1.077	0.140	1.086
7	0.200	2.250	0.037	-0.796	-0.281	0.844
8	0.233	2.235	0.025	-1.170	-0.234	1.194
9	0.267	2.172	0.022	-1.498	-0.094	1.501
10	0.300	2.135	0.019	-1.170	-0.094	1.174
11	0.333	2.094	0.016	-0.796	-0.047	0.797
12	0.367	2.082	0.016	-0.749	-0.094	0.755
13	0.400	2.044	9.36E-3	-0.749	-0.094	0.755



La vitesse maximale n'est que de 1,5 m/s. Le gain de vitesse est de 0,5 m/s

Il semble que la portance apportée par nos foils ne soit pas suffisante pour lui permettre de décoller de la surface de l'eau. Le seul paramètre sur lequel il est encore possible de jouer est la vitesse.

2. Condition de vitesse sur les foils

Pour obtenir un vol de notre bateau son poids doit être inférieur à la portance.

Ici le bateau possède une masse de 200g ce qui correspond à un poids $P=mg=2N$.

La portance doit donc être supérieure à ce poids :

$$F_z = \frac{1}{2} \times \rho \times S \times C_z \times v^2 > P \Rightarrow v^2 > \frac{P}{\frac{1}{2} \times \rho \times S \times C_z} \Rightarrow v > \sqrt{\frac{P}{\frac{1}{2} \times \rho \times S \times C_z}}$$

Il nous faut donc une valeur du coefficient de portance du profil pour déterminer la vitesse v

Comme nous avons un angle d'attaque de 15° , nous avons montré que le rapport $C_z/C_x=5.8$

Il nous suffit de déterminer le C_x pour obtenir le C_z

Nous avons repris l'expérience de la soufflerie de vitesse variable et nous avons déterminé à partir de la force de trainée le coefficient de trainée C_x :

On mesure pour une vitesse maximale de 15.1m/s , une force de trainée de 97mN ce qui donne

$$F_x = \frac{1}{2} \times \rho \times S \times C_x \times v^2 \Rightarrow C_x = \frac{F_x}{\frac{1}{2} \times \rho \times S \times v^2} = 0,14 . \text{ On en déduit que } C_z=5,8 \times C_x=0,82$$

Il est maintenant possible de déterminer la vitesse minimale pour que notre bateau

$$\text{s'envole : } v > \sqrt{\frac{P}{\frac{1}{2} \times \rho \times S \times C_z}} = \sqrt{\frac{2}{0,5 \times 1000 \times 0,0010 \times 0,82}} = 2,2\text{m/s}$$

On en déduit vu nos mesures que la vitesse atteinte par le bateau n'est pas suffisante pour le faire voler ($1,5\text{M/s}$ max mesuré dans les essais) Nous devons donc modifier notre mode de propulsion. Nous avons choisi de commander une nouvelle batterie pour le drone.

Conclusion :

Après quelques réflexions et une grande frustration avec la nouvelle, nous avons décidé de changer la méthode d'étude de créer un système dans lequel le bateau serait fixe et l'eau en mouvement. A ce jour, nous sommes encore dans le scotch, le téflon, les pompes de piscine et les découpages. Nous espérons être en mesure de vous montrer tout cela à l'occasion de la finale.

