

# Une « foil » histoire de bateau volant ou Comment limiter la trainée d'un bateau ?

Projet du lycée Margueritte (Verdun).

Elèves : Julian Laborde et Honoré Claisse.

Professeur référent : Emmanuel Claisse.



## Résumé :

Le foil est la nouvelle avancée technologique la plus performante des voiliers de course.

Le domaine est très vaste et demande un apport de connaissances dans de nombreuses disciplines.

Dans ce projet, nous voulions comprendre les raisons de ces performances étonnantes.

Nous avons contacté trois architectes navals et deux écoles d'ingénierie supérieures.

Nous avons abordé les notions suivantes : le nombre de Reynolds, le nombre de Froode, les profils laminaires et turbulents, la notion de couche limite, la notion d'hydrostatique, les coefficients de portance et de trainée, les notions de cavitation et de ventilation, le comportemental lié à la réduction d'échelle.

Nous avons également modélisé à l'aide de logiciels 3d plusieurs foils que nous avons imprimé en 3d et testé sur un banc d'essais afin d'étudier la portance pour les expériences à l'échelle 1/50 du foil réel (ou 1/10 du foil final).

# Sommaire

<u>Introduction</u>	3
<u>I / Les différentes résistances qui s'opposent à l'avancement</u>	4
<u>II / Le foil</u>	
1 - Présentation.....	6
2 - Évolution... ..	6
3 - Schéma de fonctionnement.....	7
4 - Profils hydrodynamiques... ..	8
5 - Coefficients et angle d'incidence... ..	10
6 - Étude comportementale... ..	11
<u>III / Les différentes notions</u>	
1 - La cavitation... ..	12
2 - La ventilation... ..	12
<u>IV / Expériences</u>	
1 - Introduction... ..	13
2 - Études 3D... ..	13
3 - Impression et pose d'époxy.....	16
4 - Réalisation du banc d'essai.....	17
5 - Test comportemental. ....	18
6 - Compte rendu de l'expérience... ..	18
<u>V / Les risques et limites du foil</u> .....	19
<u>VI / Innovation « affoillante »</u> .....	20
<u>VII / Conclusion</u> .....	21
<u>VIII / Remerciements</u> .....	22
<u>IX / Bibliographie et Lexique</u> .....	23
<u>X / Vidéo, résultats de l'expériences</u> .....	24
<u>XI Allons plus loin !</u> .....	25

# INTRODUCTION

Notre collaboration à ce projet naît d'une passion commune pour les bateaux. Honoré est plus axé sur le bateau à moteur tandis que Julian est plus orienté sur le voilier de course au large. Néanmoins, le foil s'est de nos jours répandu sur tous ces supports.

Le foil est la nouvelle avancée technologique la plus performante des voiliers de course, autant inshore que offshore. Le domaine d'étude est très vaste et demande un apport de connaissances dans de nombreuses disciplines tels la physique, les mathématiques, la modélisation 3D, les matériaux composites et les méthodes d'infusion et de stratification. Par conséquent, nous voulons comprendre ce qui se cache derrière ces performances flagrantes.

Pour cela, nous avons fait appel à des professionnels de renom de la course au large principalement situés dans le Morbihan, ou Nantes.

Pour débiter notre projet après avoir fixé un planning, nous nous sommes répartis chacun un domaine d'application. Honoré est responsable des calculs, de l'impression 3D ainsi que du banc d'essai tandis que Julian est responsable de la modélisation 3D, de la conception des foils finaux ainsi que de la communication extérieure.

## I / LES DIFFÉRENTES RÉSISTANCES QUI S'OPPOSENT À L'AVANCEMENT

La principale force qui s'oppose à l'avancement d'un bateau est la force de trainée  $F_x$  dont la même formule est  $F_x = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V^2 \cdot C_x$  exprimée en Newton

Où :

- $\rho$  : la masse volumique de l'eau, en  $\text{kg/m}^3$
- $S$  : la surface immergée en  $\text{m}^2$
- $V$  : la vitesse en  $\text{m/s}$
- $C_x$  : le coefficient de trainée

Concernant les bateaux, deux coefficients sont importants : le nombre de Reynolds et le nombre de Froude

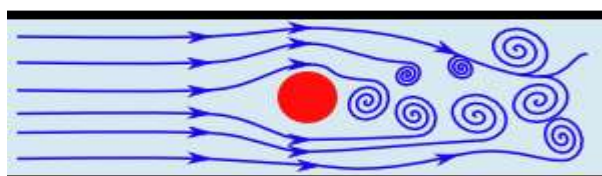
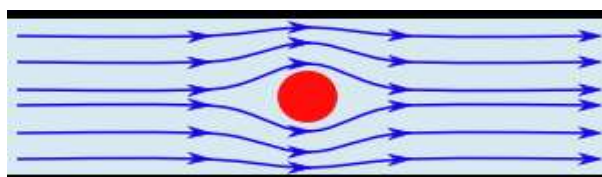
### Le nombre de Reynolds

Le nombre de Reynolds est un nombre sans dimension qui correspond à la résistance due aux frottements de l'eau qui s'écoule le long du bateau.

Le nombre de Reynolds caractérise la forme des écoulements (laminaire ou turbulent).

Lorsque l'écoulement s'effectue sans tourbillons et est quasiment parallèlement à la direction d'avancement, on parle d'écoulement laminaire.

Lorsqu'il se crée des tourbillons, on parle d'écoulement turbulent.



Le nombre de Reynolds s'écrit :  $\frac{\rho \times V \times D}{\mu}$  où :

$\rho$  est la masse volumique de l'eau,  $V$  est la vitesse du fluide en m/s,

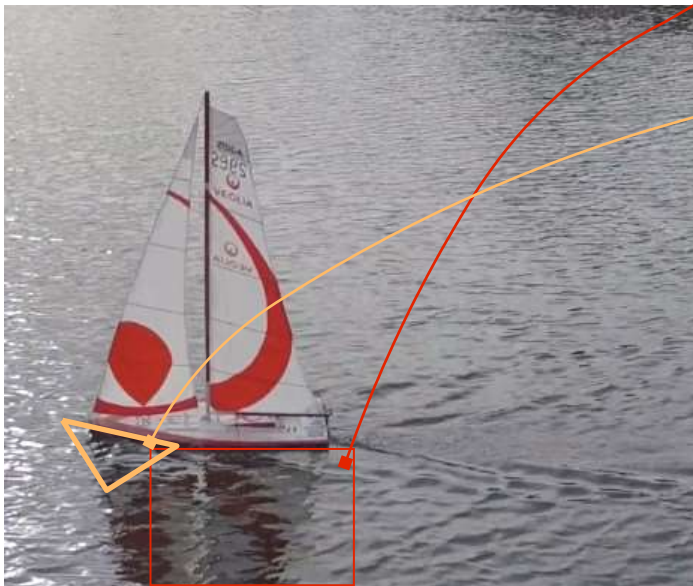
$D$  est la dimension caractéristique en m qui dépend de la surface immergée du bateau,

$\mu$  est la viscosité cinématique du fluide en  $\text{m}^2/\text{s}$  pour une température en °C donnée



Lorsque  $Re < 2300$ , l'écoulement est dit **laminaire**.  
Lorsque  $2300 < Re < 3000$ , l'écoulement est dit **transitoire**.  
Lorsque  $Re > 3000$ , l'écoulement est dit **turbulent**.

L'écoulement autour de la carène à ces endroits est dit turbulent.



L'écoulement autour de la carène à ces endroits est dit laminaire.

## Le nombre de Froude

Le nombre de Froude est un nombre sans dimension qui correspond à la résistance à la vague, essentiellement générée par l'avant du bateau. Il lie la gravité, la vitesse et la longueur du bateau.

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g \cdot h}}$$

Où : -  $g$ , la gravité

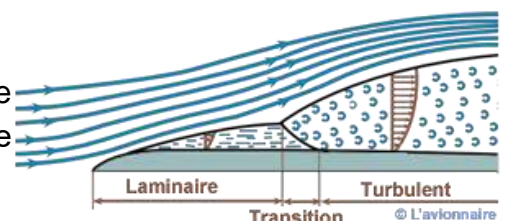
-  $h$ , la longueur du bateau en m

-  $V$ , la vitesse du bateau en m/s

Nous détaillerons davantage ces notions dans la partie consacrée au foil qui est notre objectif principal.

## Notion de couche limite

La couche limite décrit des propriétés physiques au voisinage d'un fluide en écoulement au contact d'un corps. La couche limite d'un bateau est définie sur sa carène.





## II . LE FOIL

### 1 - Présentation

Le foil, aussi appelé l'hydrofoil, est un appendice qui se sert des propriétés aérodynamiques pour l'hydrodynamique ; tel une aile d'avion, il a une force de portance qui soulage le bateau des frottements et lui permet de « décoller » au-dessus de l'eau.

### 2 - Évolution

1861 : le Britannique Thomas Moy découvre le principe de l'hydrofoil, en voulant tester des ailes prévues pour les premiers avions,

1869 : le mécanicien français Emmanuel Denis Farcot dépose un brevet pour un bateau dont la coque est hérissée d'une série de petits foils afin de la soulever et diminuer ainsi la traînée.

C'est au printemps 1898, grâce à Enrico Forlanini, que le premier bateau décolle de l'eau.



Gordon Baker passera la barre des 35 noeuds avec son « Monitor » en 1950, un projet financé par la US- Navy, pour une recherche de dix- sept ans.



Éric Tabarly suit l'évolution de l'hydrofoil en construisant un hydroptère, le « Paul Ricard »

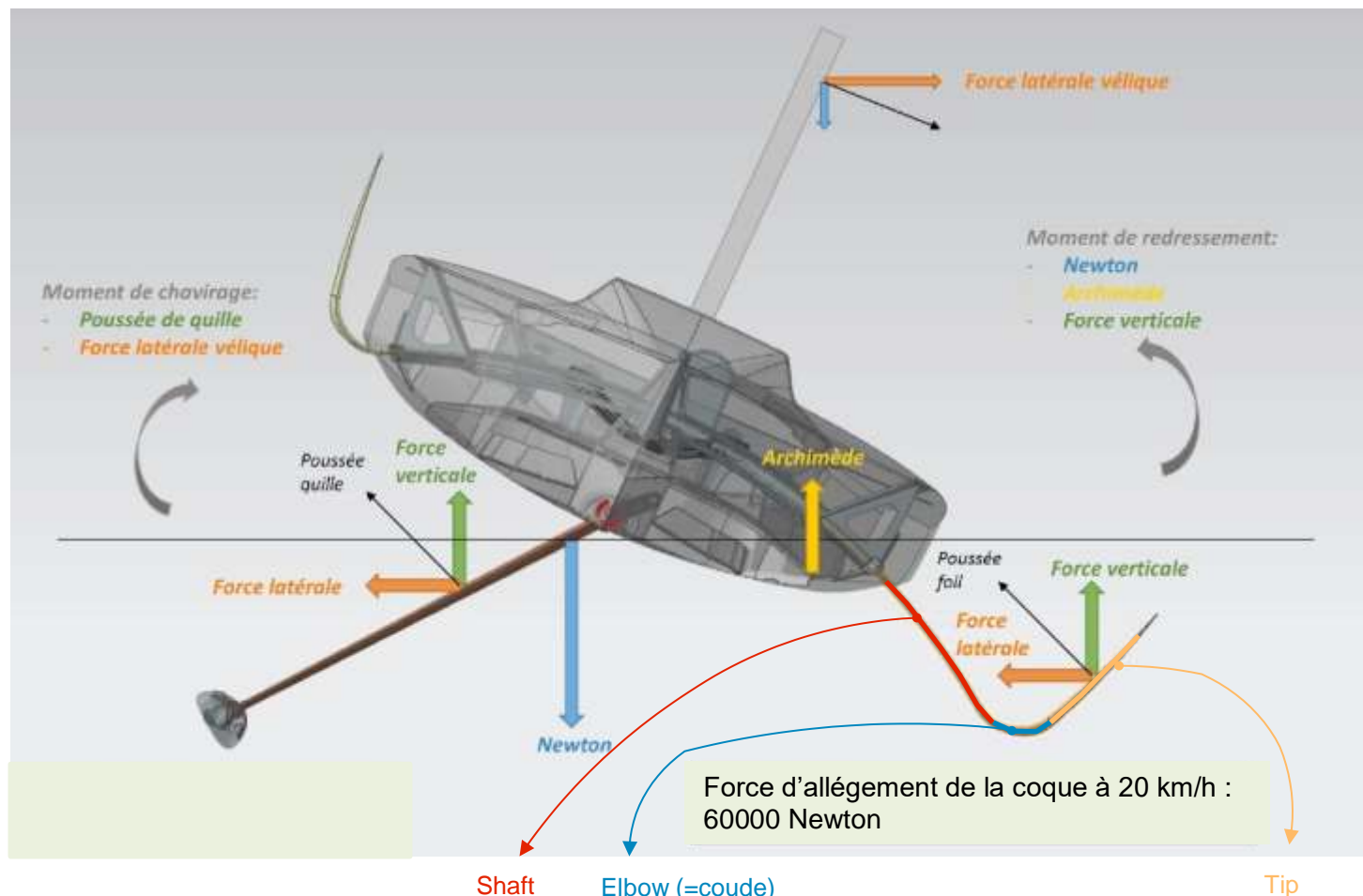


En 2013, Guillaume Verdier, architecte navale basé à Larmor-Baden (56) a remis le foil au goût du jour lors de la Coupe de l'America.

En 2018 le foil est incontournable et est beaucoup plus perfectionné qu'auparavant par les vitesses atteintes sur l'eau.



### 3 - Schéma des forces



La **force verticale** qui crée la portance sera désignée par son terme plus technique, anglais « Lift ». La trainée créée par le foil sera elle aussi désignée par son terme anglais « Drag ».

Le Tip du foil procure une **force latérale**, qui est celle de l'anti-dérive.

Les bateaux non-foilers et ceux d'ancienne génération disposent de dérives droites, qui sont des appendices profilés droits, sans Shaft ni Elbow situés à la même position des foils.

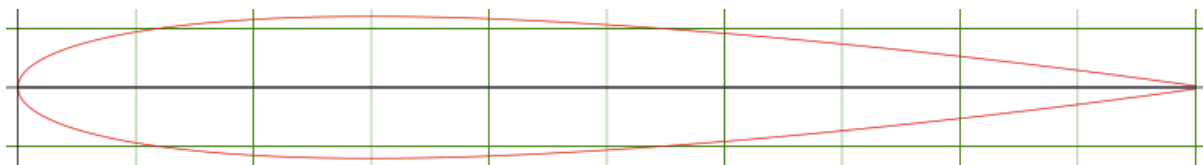
Grâce à la composition de vitesse autour du foil, on a :

**force latérale** + **force verticale** = poussée foil



### 4 - Profils hydrodynamiques

Les profils symétriques seront utilisés pour les safrans ou les dérives.



Ceux qui nous intéressent sont les profils asymétriques, ou dissymétriques. Ils sont conçus d'un intrados et d'un extrados qui génèrent la portance verticale.

La portance peut être expliquée par le Théorème de Bernoulli :  $\frac{v^2}{2} + g \cdot z + \frac{p}{\rho} = \text{constante}$

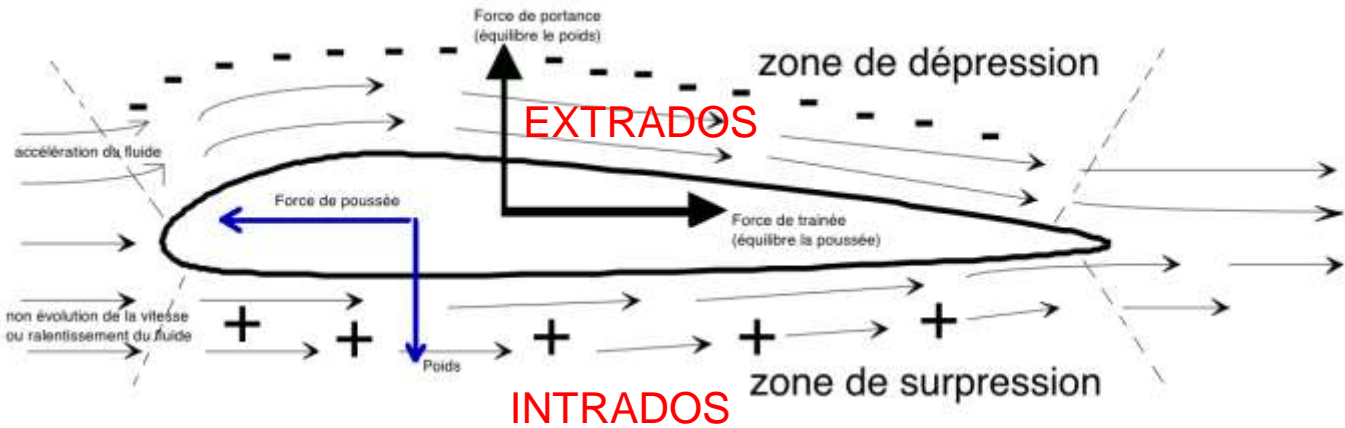
Où : -v : la vitesse du fluide (en m/s)

- g : la force de pesanteur

- z : l'altitude du fluide, ici négligeable pour calculer la portance

- ρ : la masse volumique du fluide

- p : la pression statique



A l'aide de la formule de Bernoulli :

- sur l'intrados, la vitesse diminue et ainsi la pression augmente

- sur l'extrados, la vitesse augmente et ainsi la pression diminue.

Ceci génère la force de portance.

Les profils sont consultables sur « Airfoil Tools » avec leur dénomination, plus de 3600 profils sont référencés.

## 5 - Coefficients et angle d'incidence

Ces coefficients sont propres à chaque profil. Ces coefficients oscilleront selon le profil choisi et le nombre de Reynolds qui s'applique sur la géométrie de l'appendice.

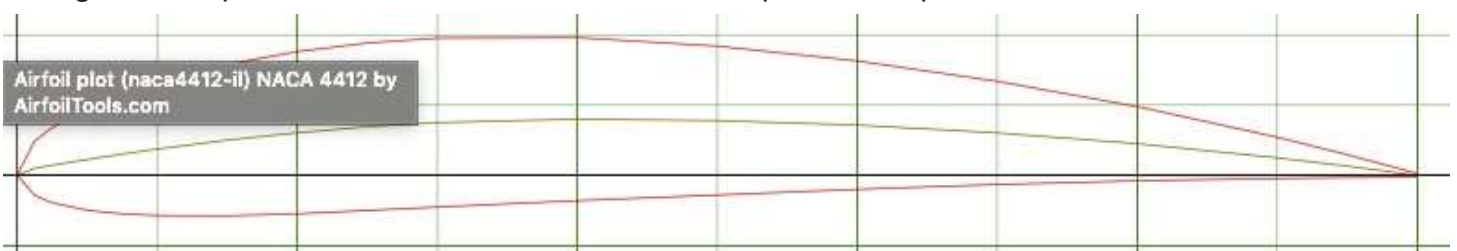
Les coefficients sont Cl, « coefficient of lift », Cd, « coefficient of drag » et d'angle d'incidence « alpha ».

On peut également les trouver sous la forme Cz, coefficient de portance, Cxcoefficient de trainée.

Les coefficients se trouvent sous forme de courbe, appelées polaire.

## 5 - Étude comportementale

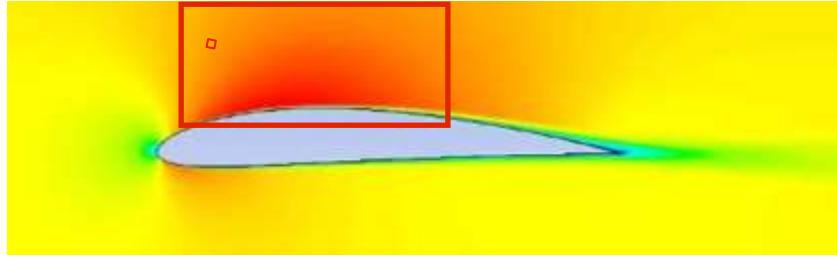
Il s'agit de comprendre ces coefficients suivant les expériences qui vont suivre :



D'après les conseils prodigués par Boris, le profil le plus performant pour les foils devra être le NACA 44/12.

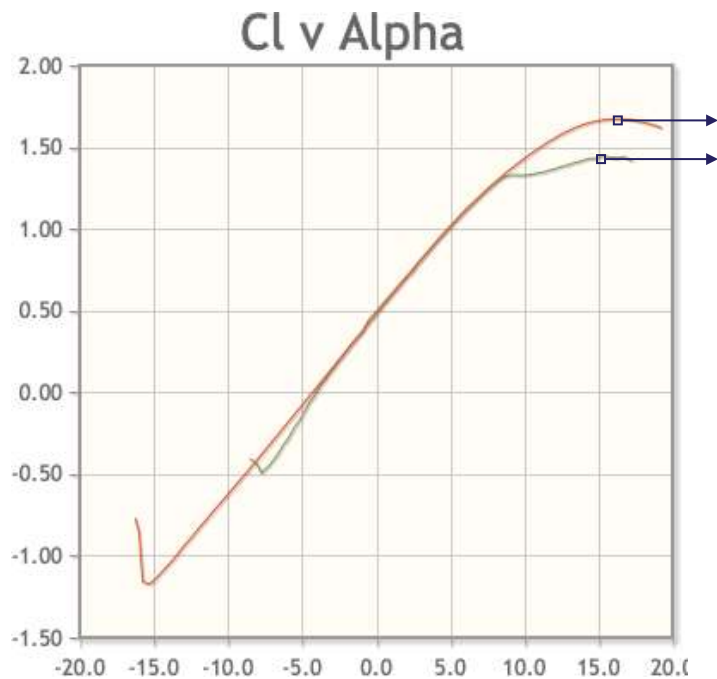
La corde du profil est la cote entre le bord d'attaque et le bord de fuite.

En rouge : zone de dépression du fluide, créant la portance

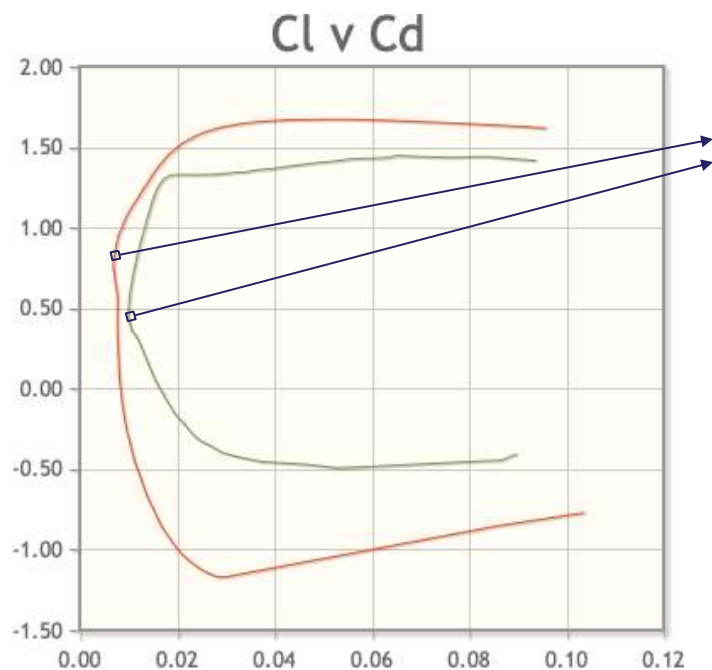


Le cambre est dessinée en brun, il s'agit de la ligne moyenne.

Ci-dessous, voici les courbes représentées sont pour un solide de 200 000 Rheynolds en verte ainsi qu'un solide de 1 000 000 Rheynolds en brun. Il s'agit des polaires du profil NACA 44/12.



Ce point critique est le début du décrochage. En comportementale, l'aile perd sa portance pour un angle d'incidence de 15° ou 16°.



Le point qui suggère le minimum de force de trainée se situe lorsque  $Cl = 0,8$ , et  $Cl = 0,5$ .

Pour nos expériences, nous avons choisi le point finesse, soit le point qui a le meilleur rapport  $Cl/Cd$ .



# III / LES DIFFÉRENTES NOTIONS

Les formules théoriques, bien qu'elles soient efficaces ponctuellement, ne peuvent prendre en considération les phénomènes de décrochage ou de cavitation, phénomènes qui entraînent de grandes diminutions de la portance et infirmant les valeurs théoriques.

Ainsi, seules des expériences permettent d'élaborer des modèles permettant d'analyser l'évolution de ces coefficients et ce après avoir fixé bon nombre de variables.

## 1 - La cavitation

Du latin cavus, « trou », le phénomène de cavitation affecte le milieu hydraulique. Il s'agit d'une ébullition locale dans un liquide en raison d'une baisse de la pression statique, soit dit d'une dépression. Elle est souvent due à une augmentation de la vitesse d'écoulement.

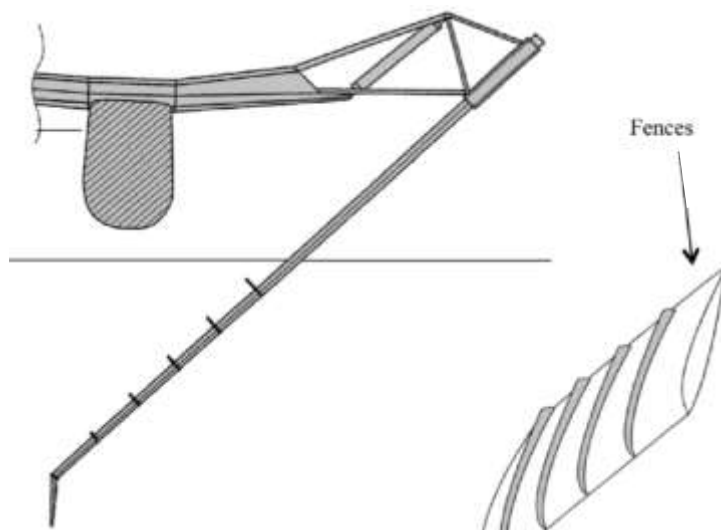
La cavitation peut se produire lorsque la dépression sur le foil devient telle qu'elle peut descendre sous la valeur de la tension de vapeur saturante de l'eau de mer.

Malheureusement, la cavitation a des effets néfastes : sans compter le bruit qu'elle engendre, elle n'est pas négligeable sur les performances du bateau. Elle affecte la structure et provoque des vibrations voire le décrochage du profil.

Ce phénomène est assez présent pour les hélices, ou les pompes.

## 2 - La ventilation

Ce phénomène est dû à la présence d'une interface aire/eau trop importante sur le foil. En raison de la dépression présente lors du déplacement sur la partie supérieure du foil, une aspiration d'air se crée. L'air aspiré longe alors la partie verticale des foils causant une diminution de la portance. La solution la plus simple pour supprimer la ventilation consiste à empêcher l'air de passer en ajoutant des « fences » ou barrières sur l'extrados des foils.



# IV / EXPÉRIENCES

## 1 - Introduction

Notre objectif est de comparer trois foils différents pour une même surface alaire qui ont fait leur preuve lors de courses au large. Il s'agit du foil de l'IMOCA « Charal », « Banque Populaire », vainqueur du Vendée Globe 2016-2017, et « Hugo BOSS ».



## 2 - Études 3D

La première modélisation a eu lieu sur le logiciel de 3Dimensions « SolidWorks ».

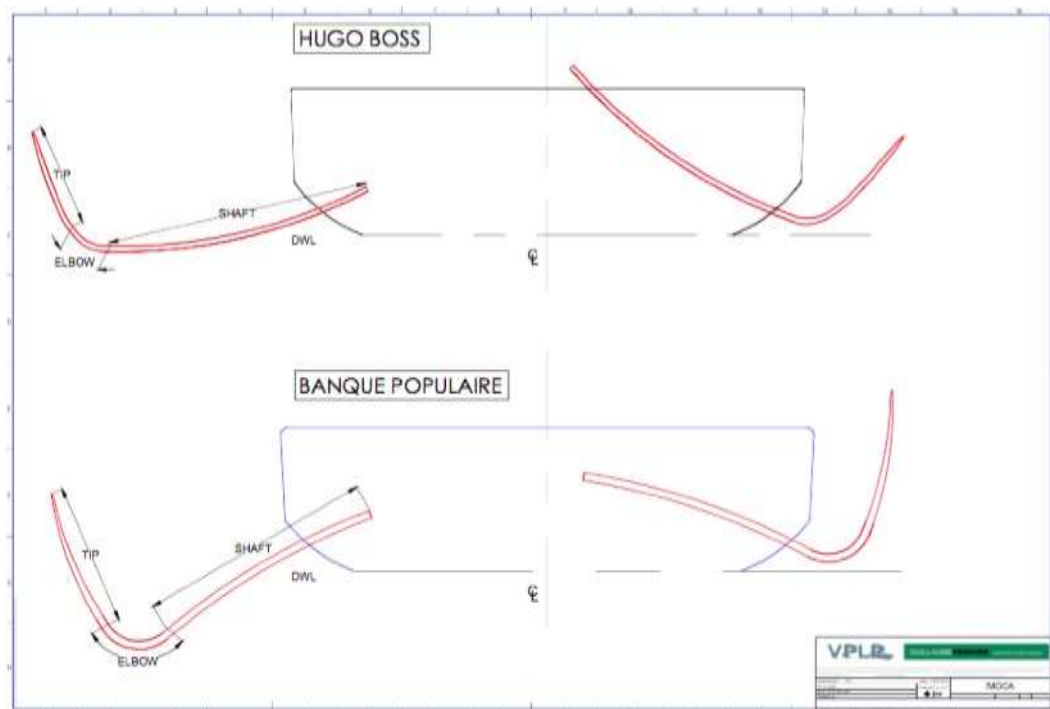
La modélisation fut ratée car nous n'avions pas assez d'expérience dans ce logiciel.

Nous avons recommencé les modélisations sur le logiciel « Rhino3D », conseillé par Guillaume Verdier.



### Résumé du protocole de modélisation

- À partir du site « Airfoil Tools », nous avons repris la matrice des points qui constituent le profil. Ensuite, à partir d'une Spline, nous avons rejoint les points.
- À partir d'une image de Charal prise de l'étrave de l'IMOCA, nous l'avons mise en arrière plan pour redessiner sa forme. Pour celui de Banque Populaire et de Hugo BOSS, les plans architecturaux sont disponibles sur le site de Guillaume Verdier.



- Le profil et la forme dessinés, il faut donc, d'après la commande Rhino, « Extruder une courbe selon une autre courbe » ou d'après la commande Inventor « Balayage ».

Les modélisations sont correctes et prévoient la fixation de l'arbre du dynamomètre.

Grâce à cette vue de coupe, on distingue les trois formes complètement différentes.

« Charal » : l'Elbow (coude) est conséquent, le Shaft est réduit.

« Hugo BOSS » : l'Elbow et le Shaft sont plongeants, le Tip est conséquent

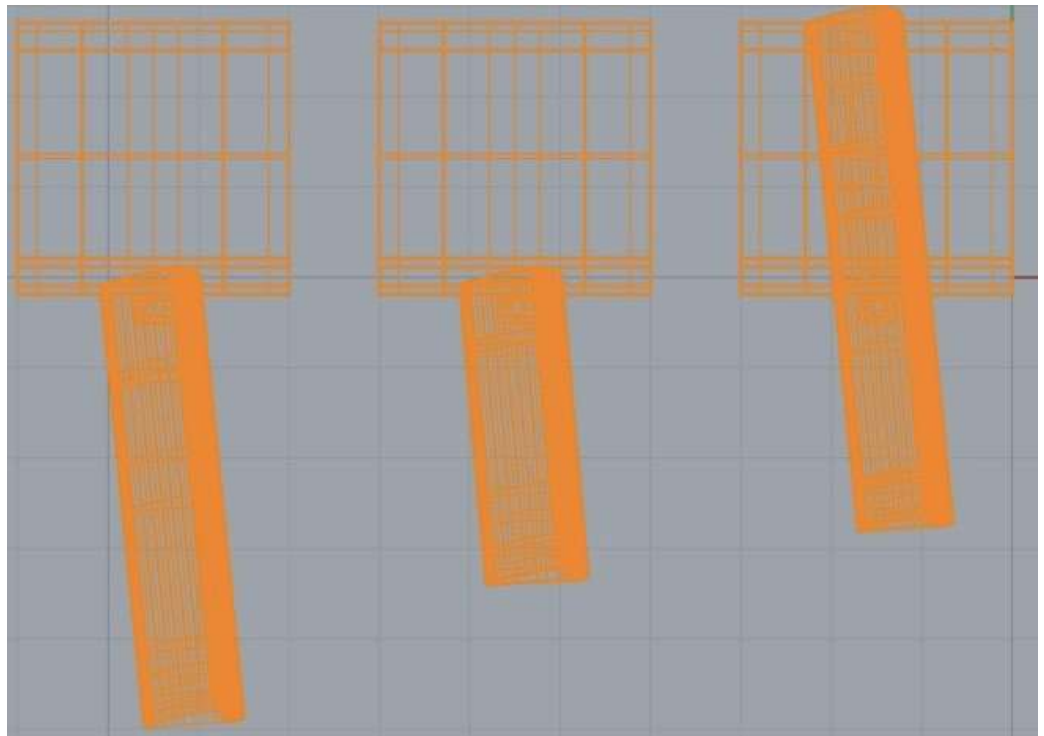
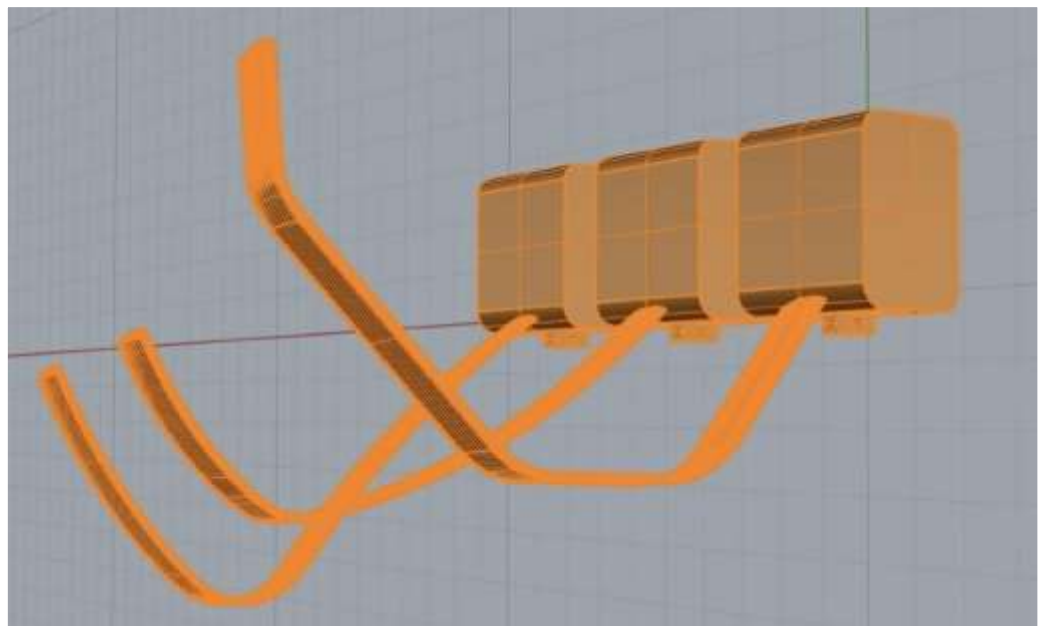
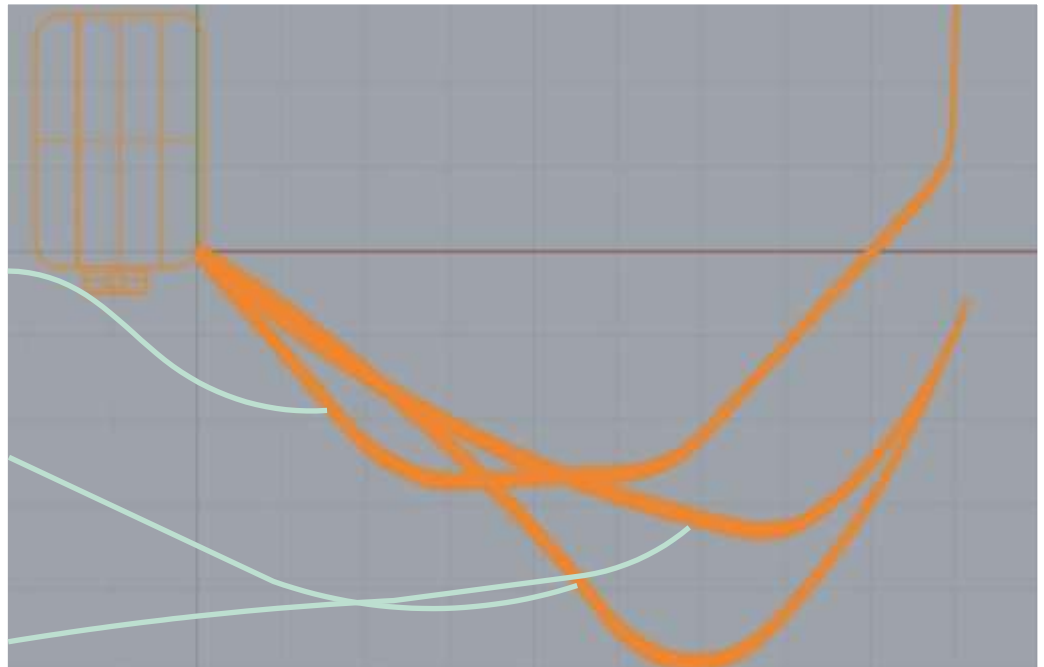
« Banque Populaire » : contrairement à H- Boss, l'Elbow et le Shaft dessinent une droite légèrement remontante.

La gîte d'un IMOCA est en moyenne de  $15^\circ$ . De ce fait, nous avons imposé une **rotation de  $15^\circ$**  selon le bloc.

L'angle d'incidence d'un foil se règle sur certains bateaux.

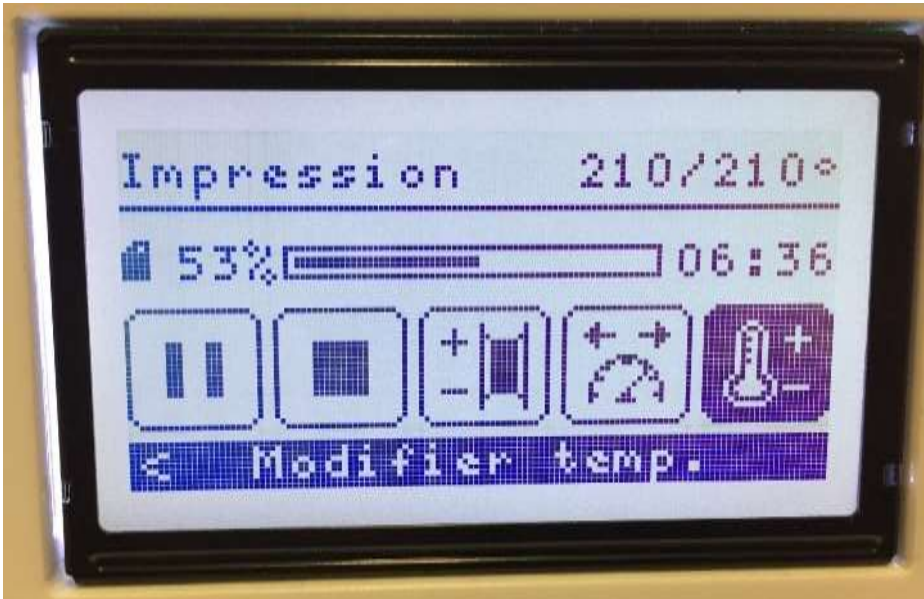
Néanmoins, sur les IMOCA, cette régulation est interdite d'après les Règles de Classe. (voir Bibliographie p. 20)

**Notre angle d'incidence est fixé à  $8^\circ$ .**

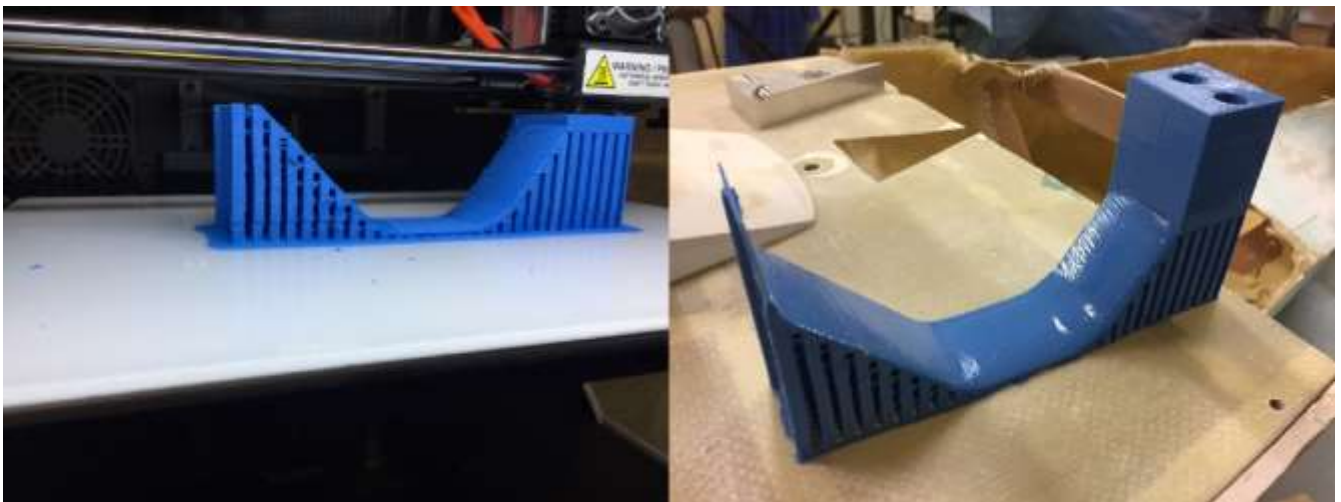




### 3 - Impression et pose d'époxy



La première impression a échoué car nous avons créé un foil avec une corde trop petite, pas assez solide pour l'expérience. De ce fait, nous avons augmenté la corde du profil afin d'obtenir un profil plus conséquent. Nous avons donc imprimé nos deux foils, pour raison de consommation de PLA, nous avons sélectionné les deux foils les plus performants à l'échelle 1. Ensuite nous y avons apposé une couche de résine polyépoxyde (qui a pour avantage de ne pas ronger certaines matières contrairement à la résine de polyester) et avons pu réaliser nos expériences.



Apposition d'une couche d'époxy par Julian.

### 4 - Réalisation du banc d'essai

Pour réaliser le banc, nous avons coupé dans le sens de la longueur à l'aide d'une scie vibrante, un tuyau de PVC de diamètre 200mm. Nous l'avons posé et fixé sur un châssis d'établi. Ensuite, nous avons réalisé le circuit d'eau fermé à l'aide d'une pompe à eau immergée dans un bac.



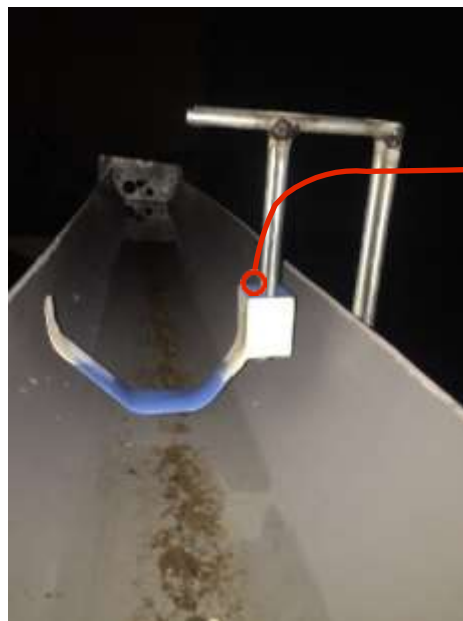
## Conception du porte-foil



Découpe à la disqueuse de jonc de fer rond 10mm par Honoré



Soudage à l'arc par Honoré



Deux glissières de direction

Porte-foil ; le foil peut translater selon l'axe y.

## 5 - Test comportemental

Le test fut une réussite, les deux sortes de foils ont été testés. Les deux foils se sont élevés de l'eau.

Nous avons pris la mesure à l'aide d'un dynamomètre des deux types de foil. La portance du foil type « Charal » est meilleure, elle est de 1.3nm tandis que le foil type « Banque Populaire » a une portance de 0.8 nm.

Voici notre vidéo : [Vidéo FOILS BATEAUX.wmv](#)

Cette différence de portance provient, selon notre conclusion, de l'Elbow de « Charal » qui est plus imposant.

« Nos foils sont grands et profonds afin de pousser fort tout en restant immergés, ce qui réduit le risque de décrochage. » dicit Jérémie Beyou, skipper de CHARAL, [voir conclusion](#).

## 6 - Compte rendu de l'expérience

Les expériences nous ont permises d'envisager la modélisation 3D des foils type « Charal » à l'échelle 1/12ème et serviront d'appendices pour l'IMOCA VEOLIA, illustré dans les représentations du nombre de Rheyolds. Nos modélisations seront réalisées sur Inventor afin d'avoir une meilleure compatibilité avec , « Stratoconcept » logiciel de mise en strates pour le Stratoconception.

Ensuite, l'âme imprimée par strates, nous pourrons procéder à la mise sous vide pour l'infusion époxy/carbone sergé 200gr/m<sup>2</sup>.

# V / LES RISQUES ET LIMITES DU FOIL

Le foil est rentré dans une nouvelle ère grâce à l'apparition des Maxi- Trimaran de la classe « ULTIME ».

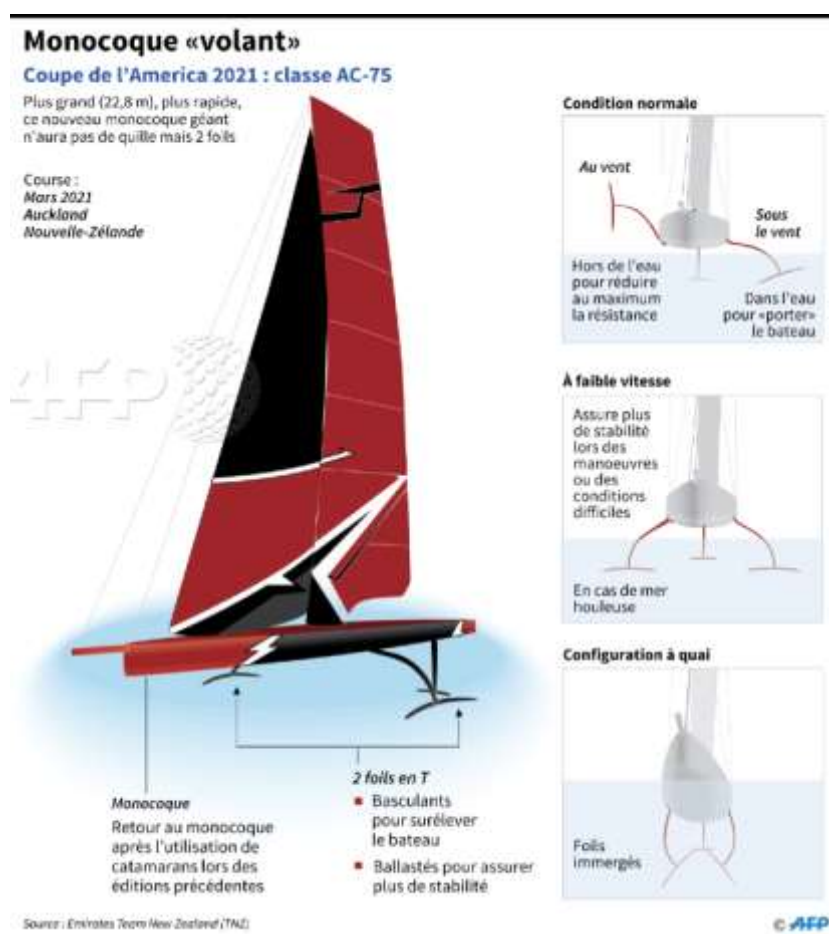


Les vitesses atteintes atteignent facilement les 45 nœuds !  
Par conséquent, lorsque le bateau « vole », la moindre vague qui touche le bateau est telle un sol de béton.



Le « Maxi Edmond de ROTHSCHILD », pionnier en la matière a subi cette expérience lors de la dernière Route du Rhum et a arraché toute son étrave tribord !

## VI / INNOVATION « AFFOILANTE »



Les architectes navals de renommée travaillent en ce moment sur la prochaine Coupe de l'America 2021 à Auckland, en Australie. Le prototype de ce monocoque volant a vu le jour en Décembre 2018. Il est des plus futuristes par son absence de quille, donc de couple de redressement. Par conséquent, ce couple est compensé par la portance excentrée par rapport au bateau. Il s'agit d'une véritable avancée futuriste !



## VII/ CONCLUSION

Le foil est une ancienne innovation, néanmoins ce n'est qu'à partir de cette dernière décennie qu'il est utilisé pour les performances dans la course au large.

Notre ère marque une grande révolution du foil qui est un outil indispensable à la performance de course !

Cet appendice s'est développé dans le loisir et offre de très belles sensations. Son coût reste désormais assez élevé... sur un IMOCA, la paire chiffre à 200 000€ !

### PAROLE DE SKIPPER : Jérémie BEYOU, Skipper de « Charal »

« Pour faire court, on peut dire que CHARAL est un foiler, quand les précédents Imoca étaient des bateaux à foil. J'entends par là qu'il y a 4 ans nous avons intégré des foils sur des carènes classiques qui restaient puissantes.

Sur CHARAL la puissance vient essentiellement des foils. La carène est moins cubique, la traînée moins importante. On mise tout sur le foil... donc il ne faut pas qu'il casse!

De ce point de vue on a beaucoup progressé: les études dynamiques, les matériaux, les modes de fabrication nous permettent d'avoir des grands foils très résistants. Ils prennent le poids du bateau avec du coefficient dynamique.

La différence avec la génération précédente vient aussi de notre réglementation Imoca qui nous autorise depuis 2017 le réglage des foils en incidence: on peut braquer ou débraquer le tip du foil. Malheureusement la jauge nous interdit l'usage de plans porteurs sur les safrans, ce qui rend le vol intégral instable et donc limité.

Enfin, nos foils sont grands et profonds afin de pousser fort tout en restant immergés, ce qui réduit le risque de décrochage. »





## VIII / REMERCIEMENTS

Nous remercions notre professeur, Emmanuel Claisse du lycée Margueritte qui nous a encouragé et aidé dans notre projet.

Nous tenons également à remercier tout particulièrement Boris HOREL, Docteur- Ingénieur en Hydrodynamique navale à l'École Centrale de Nantes.

Boris travaille activement sur l'évolution du foil, notamment avec une équipe néo-zélandaise en vue de la prochaine Coupe de l'America à Auckland en Australie. Il reçu deux prix sur ses thèses proposées dont un prix par la Marine Nationale.

Nous remercions Guillaume VERDIER, du cabinet VPLP-Verdier à Vannes (56) qui nous a répondu en nous conseillant « Rhinoceros3D » comme logiciel 3D.

Nous remercions Mark JOHNSON, « leader de l'innovation maritime », ingénieur chez Raymarine à Vannes (56), de nous avoir permis « d'aller plus loin » dans notre raisonnement et de connaître la stabilité des foils chez les planchistes.

Nous remercions Cyril DARDASHTI, directeur de l'écurie de course au large GITANA Edmond de ROTHSCHILD, basé à Lorient (56) d'avoir échangé sur les foils présents sur leur Maxi Trimaran de 32m.

Nous remercions Jérémie BEYOU, skipper de l'écurie CHARAL d'avoir répondu à nos questions. Ses réponses nous ont été très bénéfiques !

# IX / BIBLIOGRAPHIE & LEXIQUE



INTERNATIONAL MONOHULL OPEN CLASS ASSOCIATION

WORLD SAILING INTERNATIONAL CLASS

Règles de Classe 2019

Version française

## .4 FOIL

- (a) Un foil doit être rétractable et doit utiliser un seul degré de liberté pour ce mouvement.
- (b) Il est expressément autorisé un second degré de liberté à un foil si un jeu de deux paliers est utilisé pour guider cet appendice [Voir E.4 (a)].
- (i) Un de ces deux paliers doit être un palier non réglable positionné à proximité de la carène de coque.
  - (ii) Il est expressément autorisé d'avoir un degré de liberté pour l'autre palier. S'il existe, ce degré de liberté doit être de type translation et doit limiter la rotation du foil à un angle de 5 degrés.
  - (iii) Cet angle est mesuré à partir du palier non réglable positionné à proximité de la carène de la coque.
- (c) Pour obtenir un CDJE, le foil et son installation dans le bateau doivent respecter les critères de talonnage définis par l'IMOCA.

Appendice : terme générique désignant toute partie dépassant sous la coque ou la prolongeant, par exemple la dérive, la quille, le safran, le foil.

Carène : partie immergée de la coque d'un navire.

Course Inshore : course le long de la côte, intra-portuaire, ou sur un bassin.

Course Offshore : course au large.

Gîte : inclinaison sur le côté d'un bateau sous l'effet du vent latéral dans les voiles ou d'un mauvais équilibrage des masses embarquées

Noeud : vitesse des navires. Un noeud est égal à 1 mile marin par heure. Environ 1800m en 3600s, soit 0,5m/s.

PLA : Acide PolyLactique, matière bio plastique

ULTIME 32/23 : classe regroupant les maxi-trimarans d'une longueur maximale de 32m et d'une largeur maximale de 23m.

Vendée Globe : course en solitaire autour du monde destinée aux IMOCA, sans escale, ni assistance.