



Rapport projet foil Twino

Réalisé par

Arthur CHAN LOCK, Aliénor CLUET, Hugo DELANNOY, Alice FOURNIER, Romain GHIRLANDA,
Pierre-Louis HERVEAU, Guillaume JOUY, Vincent KAPFER, Léa MANU, Néo MARTINEZ

Encadrants

Sophie BERLIOZ, Mehmet ERSOY, Ghizlane KINANI, Vincent REY, WANG ZHIPING

Travail présenté à l'entreprise
Tuiva Nauticlub

Porteur de projet :
M. Olivier JEANJEAN

Date de remise :
Le 7 Juin 2024

Remerciements

Par ces quelques lignes, l'équipe souhaite remercier les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce projet. Cela nous a permis de mettre en pratique une démarche scientifique rigoureuse tout en gérant l'organisation d'un projet complexe.

Nous souhaitons remercier tout particulièrement, d'une part les professeurs encadrants, et d'autre part Monsieur Jeanjean.

En premier lieu, nous tenions à exprimer notre gratitude à :

- Madame Kinani, pour son soutien constant et ses précieux conseils en matière de gestion de projet, qui nous a permis d'appréhender le sujet afin de structurer efficacement notre travail.
- Monsieur Ersoy, pour nous avoir aidés à maintenir un moral élevé et une motivation constante, tout en nous permettant d'avancer et d'approfondir nos recherches scientifiques à l'aide de ses suggestions indispensables à la compréhension du projet.
- Madame Berlioz, pour ses recommandations avisées relatif à la partie matériau.
- Monsieur Rey, pour son aide qui a été essentielle pour orienter notre réflexion et nos choix techniques.
- Monsieur Wang, pour son assistance dans la maîtrise du logiciel Catia.
- Madame Orquera, pour nous avoir permis de réaliser notre maquette par l'impression 3D.
- Monsieur Meradji, pour son accompagnement dans l'utilisation du logiciel Fluent.

Nous souhaitons remercier également monsieur Jeanjean de l'entreprise Tuiva, pour sa collaboration, sa vivacité et sa motivation face à un projet aussi innovant que Twino. Son expérience industrielle et ses recommandations constructives ont grandement enrichi notre démarche.

Grâce à l'implication de chacun, nous avons pu mener à bien ce projet audacieux et acquérir des compétences essentielles.

Résumé

Le projet TWINO propose une version de catamaran de loisir adaptée et accessible au grand public (familles, amateurs, vacanciers...), tout en offrant des sensations inédites grâce à l'utilisation de foils. Le défi est de faire "voler" le catamaran au-dessus de la surface de l'eau, à une vitesse faible.

Le bateau, étant destiné à une utilisation de loisir, doit donc être accessible à des usagers non expérimentés en navigation. Il doit donc être facile à utiliser.

Des pistes ont déjà été exploitées par l'entreprise et plusieurs équipes d'étudiants de Seatech, qui ont travaillé sur ce projet en 2023.

L'une des principales pistes, proposée par l'entreprise, a été de s'intéresser à un modèle de foil inspiré du biomimétisme des limules. Cependant, les études et expériences réalisées sur ce modèle ont montré que l'utilisation du biomimétisme n'était pas concluant. En nous appuyant sur les recherches antérieures, nous avons décidé de nous concentrer sur une autre idée.

Nous avons alors proposé une nouvelle configuration, après une étude approfondie, basée sur des foils en forme de U.

Cette forme a été choisie car elle permet, notamment, d'avoir une certaine stabilité du bateau à faible vitesse. Certaines caractéristiques (grande surface de foil, épaisseur d'aile importante) ont dû être adoptées en fonction de nos contraintes. Par la suite, nous avons sélectionné le profil de notre foil pour nous permettre de déterminer l'angle optimal et de pouvoir, ainsi, gérer la portance.

Les solutions proposées, telles que le revêtement texturé inspiré des peaux de requin et la forme de foil en U, ont été choisies car elles satisfaisaient au mieux les exigences du cahier des charges.

Mots clés :

Loisir, Foils, Biomimétisme, Profil, Catamaran, simulation

Abstract

The TWINO project offers a leisure catamaran designed to be accessible and enjoyable for the general public (families, enthusiasts, vacationers, etc.), while providing unique sensations through the use of foils. The challenge is to make the catamaran "fly" above the water's surface at a low speed.

Since the boat is intended for recreational use, it needs to be user-friendly for individuals without navigation experience. Therefore, it must be easy to operate.

Several approaches have already been explored by the company and various student teams from Seatech who worked on this project.

One of the main approaches proposed by the company involved looking into a foil model inspired by the biomimicry of horseshoe crabs. However, studies and experiments conducted on this model showed that it was not conclusive. Based on previous research, we decided to focus on a different idea.

After thorough study, we proposed a new configuration based on U-shaped foils. This shape was chosen because it provides, among other things, a certain stability to the boat at low speeds. Certain characteristics (large foil surface, significant wing thickness) had to be adopted according to our constraints. Subsequently, we selected the profile of our foil to determine the optimal angle and thus manage lift.

The proposed solutions, such as the textured coating inspired by shark skin and the U-shaped foil design, were chosen because they best met the requirements of the specifications.

Key words :

Leisure, Foils, Biomimicry, Profile, Catamaran, Simulation

Table des matières

1	Introduction	4
1.1	Etat de l'art	4
1.1.1	Fonctionnement d'un foil	4
1.1.2	Historique	5
1.1.3	Biomimetisme	6
1.2	Objectif du projet	7
2	Etude théorique	8
2.1	Forme	8
2.2	Profil	9
2.3	Etude des matériaux	10
2.3.1	Quels matériaux pour la structure du foil ?	10
2.3.2	Optimisation de la texture	12
2.4	Modélisation en un point matériel	14
2.4.1	Dynamique du point	14
2.4.2	Modèle numérique et résultat	15
2.5	Modèle numérique FLUENT	16
3	Etude expérimentale	17
3.1	Calcul de l'échelle	17
3.2	Modélisation Catia	17
3.3	Experimentation	17
3.4	Protocole expérimental et déroulement de l'expérience	18
3.5	Conclusion sommaire et rapprochement au modèle théorique	19
4	Conclusion	20
5	Glossaire	21
6	Annexes	25
6.1	Programme de la modélisation MatLab	25
6.2	Convergence de la modélisation de l'annexe 6.1	28
6.3	Fiches Granta des matériaux	29
6.4	Modélisation de la peau de requin	30
6.5	Tableau de Bord	31

1 Introduction

Twino et Tuiva proposent des activités attractives pour tous les publics qui sont ludiques et écoresponsables. Afin d'améliorer l'expérience des clients, l'entreprise NOVA Design cherche à développer l'utilisation des foils sur le catamaran Twino.

Dans le cadre de notre projet, nous avons comme principal objectif d'élaborer et de réaliser un foil destiné à élever un catamaran d'un poids de 650kg allant à une vitesse entre 6 et 8 km/h, à 20 cm de la surface de l'eau. Ce projet innovant a pour mission de créer un foil qui améliorera les performances du catamaran tout en proposant des solutions durables et respectueuses de l'environnement.

Ce projet se base sur des recherches détaillées sur les principes de fonctionnement des foils, une analyse des matériaux disponibles, une modélisation du point matériel ainsi que des simulations numériques et une étude expérimentale approfondie.

Pour finir, ce rapport détaille les processus de conception, les choix techniques, les défis rencontrés et les résultats obtenus. En outre, il propose des perspectives d'amélioration et des pistes pour de futures recherches, contribuant ainsi à l'avancement de l'innovation dans le domaine maritime.

1.1 Etat de l'art

Cette section présente le fonctionnement et l'historique des foils, ainsi que l'inspiration biomimétique, avant de définir les objectifs de notre projet.

1.1.1 Fonctionnement d'un foil

Tout comme une aile d'avion, le fonctionnement du foil repose sur le mouvement du fluide autour de sa surface. Sa forme bombée crée deux passages pour les particules de fluide de longueurs différentes, induisant ainsi des zones de vitesses distinctes. Cette variation de vitesse génère une différence de pression : une zone de surpression se forme en dessous du foil, tandis qu'une zone de dépression se forme au-dessus. Cette dynamique des fluides engendre des forces : la portance soulève le foil et le bateau, tandis que la traînée, due à la viscosité du fluide, agit comme une force de frottement. En fonction de l'objectif visé pour le foil, il est envisageable d'ajuster son profil, sa taille et son matériau afin de modifier ses propriétés et son utilisation.

De plus, un des objectifs crucial des foils est de fournir un amortissement vertical au navire. En effet, lorsqu'il est exposé à des mouvements de roulis et de tangage sur une mer agitée, la présence d'un foil joue un rôle essentiel dans l'atténuation de ces agitations. Cela s'explique par le fait que la surface du foil en mouvement génère des forces hydrodynamiques significatives, contribuant ainsi à stabiliser le navire.

Dans l'intérêt de notre étude, l'augmentation de la surface du foil augmente le phénomène de portance, ce qui induit une augmentation de la traînée.

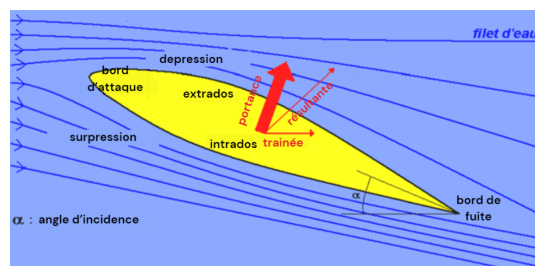


FIGURE 1 – Modélisation des forces de portance et de traînée en fonction des lignes de courant [1]

1.1.2 Historique

Les premiers foils font leur apparition en 1861 en Grande-Bretagne. Thomas Moy construit sur un bateau tiré par des chevaux, deux plans horizontaux en bois. La vitesse générée par les chevaux permet alors d'élever le bateau, donnant naissance aux hydrofoils.

Huit ans plus tard, en 1869, Emmanuel Denis Farcot invente une embarcation dotée de plusieurs plans porteurs le long de sa coque. Ces derniers s'inclinent lorsque le bateau prend de la vitesse. Dès lors, il dépose un brevet le 3 décembre de cette année-là.

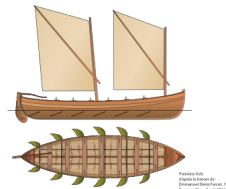


FIGURE 2 – Foil d'Emmanuel Farcot [2]

Durant les 50 années suivantes, les projets se succèdent à travers le monde mais il faut attendre 1919 pour observer la performance des foils. En effet, Alexander Graham Bell et Frederick W. Baldwin réalisent un record de vitesse de 61,5 noeuds ($=114\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$) avec un hors-bord de 60 pieds équipé de foils.

En 1932, le professeur O. Tietjens dépose un brevet de foil en V et réussit à atteindre $40\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. 18 ans plus tard, le premier voilier équipé de foils décolle grâce à J. G. Baker.

Par la suite, la compétition pour les foils est enclenchée, avec une série de projets qui se suivent, alternant entre échecs et succès. Par exemple, dans les années 60, la marine canadienne crée un prototype de navire sur foil devant atteindre 50 noeuds pour chasser les sous-marins soviétiques. Le projet est abandonné en raison du coût et de sa longueur.

En 1966, l'utilisation de foils sur les petits bateaux à voile se démocratise réellement, notamment avec le trimaran Véliplane I. Les records de vitesse de voiliers apparaissent peu à peu jusqu'à atteindre 42 noeuds en 1997 et 50 noeuds en 2007 avec le trimaran Hydroptère.

Partout dans le monde, de nombreux navires équipés de foils voient le jour entre 1950 et 1985, dans un premier temps à des fins militaires puis civiles, comme le VS-8, le Sarancha Russe, l'USS Pegasus PHM. Ces navires sont fréquemment équipés de foils en U qui leur permettent d'atteindre des vitesses élevées tout en transportant des passagers et en étant relativement massif.

En Suisse, le Super Jumbo RHS-200 est le plus grand ferry hydroptère construit jusqu'alors. Il peut transporter plus de 250 passagers à une vitesse de 37 noeuds. En Russie, le Polesye transportait une cinquantaine de passagers à $66\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ jusqu'en 2010. Les foils utilisés pour de si gros navires étaient généralement en acier de haute résistance. Ces navires ont progressivement disparu en raison de leur fragilité due à la cavitation au-delà de 50 noeuds, de leur coût de construction et d'entretien.



FIGURE 3 – Super Jumbo RHS-200 [3]

Aujourd'hui, les foils sont principalement utilisés dans le secteur de la voile et de nombreuses sociétés innovent pour rendre le foil accessible à tous. Dans le même esprit que notre projet, le Jet Cycle Max permet de faire du pédalo au-dessus de l'eau, à la seule différence qu'il est nettement plus léger et plus rapide ; ou encore l'Hydrofoil SL3 qui décolle à une vitesse minimale de 6 km.h^{-1} .

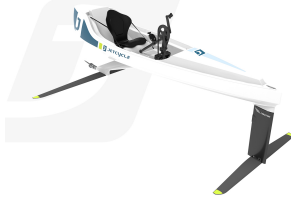


FIGURE 4 – JetCycle Max [4]



FIGURE 5 – Le Bubble et le Smart Bubble [5]

Enfin, SeaBubbles est une entreprise innovante qui développe des véhicules aquatiques à hydrofoils, combinant les avantages des bateaux et des voitures électriques, tout en se préoccupant de l'environnement. L'entreprise a développé le Bubble et le Smart Bubble, son équivalent avec des performances adaptées à sa plus grande taille. Ce dernier a été conçu afin de convenir aux visites touristiques et aux loisirs. En effet, il est capable de décoller à partir de 11 km.h^{-1} et grâce à son système de vol automatisé, le bateau s'équilibre naturellement, permettant une navigation simple qui ne nécessite qu'un permis bateau classique.

Tout comme le foil se développe, le matériau qui le compose évolue avec lui. Dans les années 60, l'acier et l'aluminium étaient majoritairement utilisés. Bien que l'acier soit robuste, ses performances étaient impactées par sa masse. De ce fait, l'aluminium a été introduit afin de réduire la masse, d'améliorer la résistance à l'eau et les performances du foil. Plus tard, en 1980, la fibre de verre est instaurée. Elle renforce les ailes et le mât et rend le foil plus léger et résistant. A partir des années 90, le carbone est utilisé pour améliorer la rigidité, les performances et la légèreté. Il apparaît d'abord en fibre de carbone mélangée avec de l'aluminium puis, est par la suite utilisé tout seul ou en composite Carbone/ Kevlar. Son évolution permet de nos jours d'avoir des fortes performances pour les sports nautiques de compétition.

1.1.3 Biomimétisme

Le biomimétisme s'inspire des solutions de la nature pour les appliquer en ingénierie, favorisant un développement durable et respectueux de l'environnement.

Dans le cadre de notre projet, nous avons examiné les rapports des années passées et plus particulièrement leur approche concernant le biomimétisme. La forme proposée initialement par l'entreprise inspirée de la limule, a été étudiée par les groupes précédents. Ainsi, ils ont dimensionné un modèle réduit et l'ont imprimé afin de réaliser des expériences en bassin. Or, les résultats théoriques et expérimentaux n'étant pas convaincants, ils ont conclu que l'utilisation de foils inspirés des limules ne permettaient pas de répondre au cahier des charges et ne génèrent globalement pas assez de portance pour faire décoller le catamaran. D'autres méthodes ont été proposées telles que des foils inspirés de queue de baleine ou encore de raie Manta.

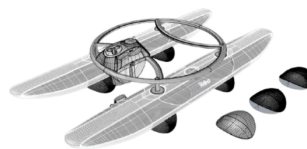


FIGURE 6 – Foil proposé par l'entreprise Twino inspiré par le biomimétisme [6]

1.2 Objectif du projet

Dans le cadre de ce projet, nous avons pour objectif de faire voler le catamaran à 20 cm au-dessus de la surface de l'eau pour une vitesse comprise entre 6 km.h^{-1} et 8 km.h^{-1} , pour un poids total en charge maximale de 650 kg . Ainsi, nous devons concevoir un foil adapté aux faibles vitesses et capable de supporter le poids total de l'embarcation.

Par ailleurs, des normes sécuritaires et environnementales doivent être respectées. La conception des foils doit permettre d'éviter au maximum les risques d'accidents avec les baigneurs, et doit s'intégrer respectueusement dans le milieu aquatique. Le catamaran doit être le plus stable possible durant l'expérience, pour assurer la sécurité des passagers. De plus, le système doit être suffisamment robuste pour rester intact en cas de choc ou d'usure. Enfin, lors de la conception du foil, l'empreinte carbone, le coût de production et le prix des matières premières sont des critères essentiels à considérer.

Dans le contexte actuel, il est primordial de prendre en compte l'impact environnemental du catamaran et du foil. Par conséquent, notre priorité est de garantir que les matériaux que nous sélectionnons présentent une faible empreinte environnementale, aussi bien dans leur processus de production que de recyclage. En outre, afin de minimiser notre impact écologique, il est possible de choisir un moteur électrique qui serait parfaitement adapté à nos besoins.

Contrainte	Critère	Performance
Vitesse	Lente	$6 - 8\text{ km.h}^{-1}$
Résistance	Masse de 4 personnes + Vagues + flotteurs	$M_{max} = 650\text{ kg}$
Eco-responsabilité	Tenir compte de l'environnement	Matériaux
Dimensionnement	Taille catamaran	$l = 230\text{ cm} / L = 460\text{ cm}$
Sécurité	Foil ne dépassant pas la largeur de la structure	
Décollage	En vitesse de croisière, élévation de la structure	$h = 20\text{ cm}$

TABLE 1 – Cahier des Charges

2 Etude théorique

Examinons les divers aspects cruciaux du développement du foil. En se penchant sur la forme, le profil, les matériaux, et la modélisation, elle vise à établir les fondements théoriques nécessaires à la conception optimale du foil pour notre projet de catamaran.

2.1 Forme

Actuellement, deux types de foils existent : les “haut” et “bas” aspect ratio. Un foil à bas aspect ratio présente plusieurs avantages. Ils peuvent porter à faible vitesse ou par vent faible et sont adaptés aux débutants, contrairement à un foil à haut aspect ratio. Ce type de foil a une longue corde, une faible envergure, un profil épais et un petit angle d’incidence ce qui le rend stable, avec beaucoup de portance.

Dans le cadre de notre étude, nous nous sommes fortement intéressés aux différentes formes de foils existantes. Parmi celles recensées [7], nous pouvons citer les plus courantes et plus utilisées : les formes en E (plus adaptée dans le cas de vitesse élevée), en V (stabilité qui décroît fortement avec la hauteur de vol), en T (forme très fragile), en Y (qui présente plusieurs avantages mais la distribution de la portance est souvent moins uniforme, ce qui peut entraîner des variations dans la stabilité du bateau).

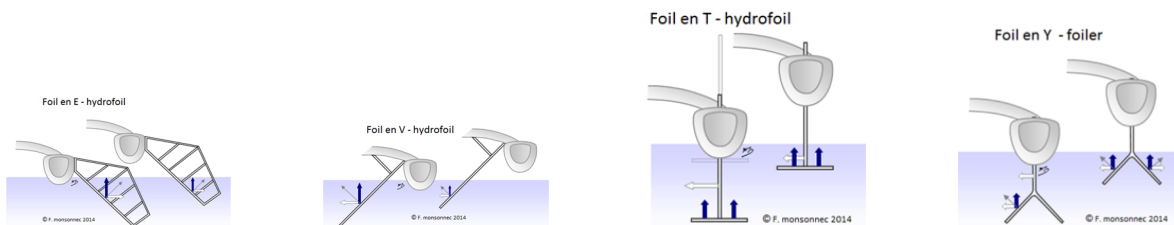


FIGURE 7 – Forme en E FIGURE 8 – Forme en V FIGURE 9 – Forme en T FIGURE 10 – Forme en Y

Enfin, nous avons trouvé lors de nos recherches, l’existence de la forme en U. Cette forme offre une grande solidité et permet une meilleure maniabilité en virage à basse vitesse, grâce à une interaction plus harmonieuse avec l’eau et une meilleure répartition de la portance.

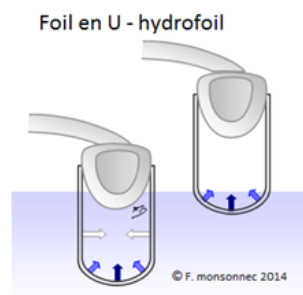


FIGURE 11 – Exemple de forme en U [8]

Concernant le dimensionnement, nous avons plusieurs contraintes : la taille de l’envergure d’un petit foil doit correspondre à la taille d’un flotteur soit 70 cm et un grand foil à la taille du catamaran soit 230 cm, la longueur de la corde i.e. la hauteur du foil doit être supérieure à 20 cm compte tenu du cahier des charges. Enfin la longueur du foil doit être supérieure à la taille de l’envergure donc nous avons choisi par défaut, 1 m.

De plus, nous avons trouvé d’après [9] que l’épaisseur relative, allant de 18 à 22% pour un foil épais, est

égale à l'épaisseur divisée par la corde ($\frac{e}{C}$). Nous avons donc estimé, pour une taille de corde de 53 cm et une épaisseur relative de 22%, une épaisseur de 12 cm.

Afin de confirmer nos dimensions, nous avons calculé le nombre de Reynolds pour une vitesse minimale de 1.67 m.s^{-1} . Nous avons choisi par défaut de considérer la viscosité cinématique de l'eau dans nos calculs du nombre de Reynolds. Or lorsque le catamaran se lève, c'est la viscosité cinématique de l'air qui entre en compte. En se basant sur nos analyses, le mouvement des particules de l'eau étant sensiblement le même que pour l'air, nous considérerons que les performances du profil que nous étudierons sera sensiblement le même dans l'eau et dans l'air.

$$Re = \frac{\rho V e}{\mu} = \frac{1000 \times 1.67 \times 12 \times 10^{-2}}{10^{-3}} = 2 \times 10^6$$

Ce qui correspond à un écoulement turbulent. D'après l'ensemble de nos recherches, le résultat est cohérent donc nous garderons ces dimensions.

2.2 Profil

Le profil du foil doit être conçu pour maximiser la portance tout en veillant à ce que la traînée ne soit pas trop élevée. Les profils aérodynamiques de type NACA (National Advisory Committee for Aeronautics) sont souvent utilisés pour concevoir des ailes efficaces. Il est essentiel de sélectionner des profils NACA qui répondent de manière optimale à nos critères techniques. Analysons les profils suivants :

- 1. NACA 4412** : L'asymétrie du profil NACA 4412 permet une portance plus élevée à des angles d'attaque modérés avec une traînée raisonnable, ce qui le rend parfait pour les applications qui requièrent une portance importante à des vitesses relativement basses.

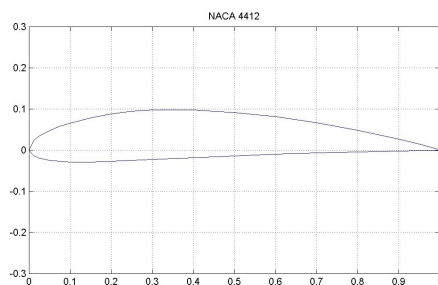


FIGURE 12 – Profil NACA 4412

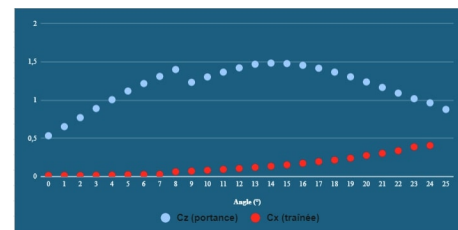


FIGURE 13 – Coefficient de traînée et de portance en fonction de l'angle d'attaque - 4412

- 2. NACA 2412** : Le profil asymétrique NACA 2412, en raison de sa courbure supérieure plus marquée, offre une portance plus élevée à des angles d'attaque plus élevés et convient aux applications qui requièrent une portance importante tout en maintenant des performances acceptables à des vitesses plus basses.

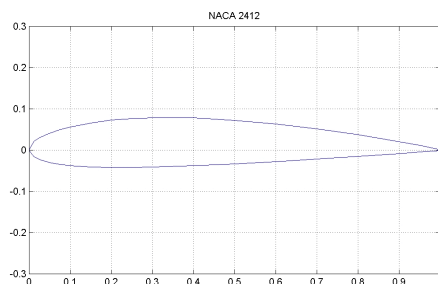


FIGURE 14 – Profil NACA 2412

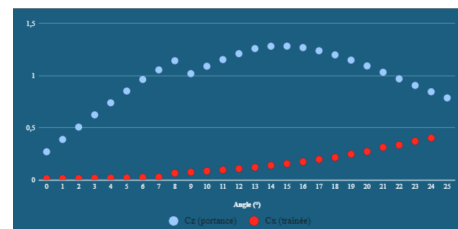


FIGURE 15 – Coefficient de traînée et de portance en fonction de l'angle d'attaque - 2412

3. NACA 0012-34 : Le profil symétrique NACA 0012-34 propose un équilibre entre la portance et la traînée, adapté aux applications qui exigent une portance modérée à des vitesses relativement basses, et garantit une stabilité optimale à divers angles d'attaque.

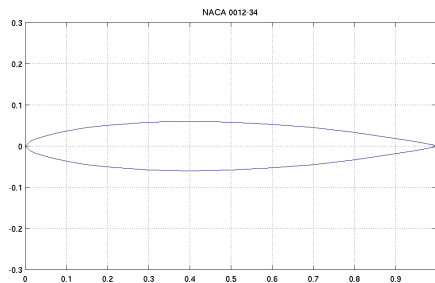


FIGURE 16 – Profil NACA 0012-34

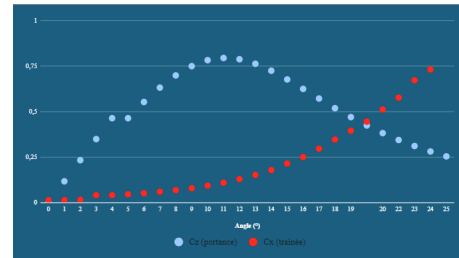


FIGURE 17 – Coefficient de traînée et de portance en fonction de l'angle d'attaque - 0012-34

Modèle retenu

En comparant les coefficients de traînée et de portance pour les trois profils de foil (NACA 4412, NACA 2412, et NACA 0012-34) avec JavaFoil [10], qui est un logiciel de soufflerie numérique 2D gratuit créé par le chercheur et modélisateur allemand Martin Hepperle, nous avons retenu le NACA 4412. Ce profil promet de générer la portance nécessaire à des angles d'attaque modérés tout en maintenant une traînée raisonnable, ce qui permet de ne pas freiner l'avancée du bateau tout en assurant une stabilité suffisante.

Un exemple concret de l'utilisation du profil NACA 4412 est, dans les hydrofoils, des voiliers de classe AC45 en Coupe de l'America. Ce profil permet au voilier de se soulever au-dessus de l'eau, réduisant la résistance hydrodynamique, tout en maintenant une vitesse élevée et une bonne stabilité grâce à sa portance accrue et sa traînée raisonnable.

2.3 Etude des matériaux

2.3.1 Quels matériaux pour la structure du foil ?

Le choix des matériaux utilisés pour concevoir le foil représente un défi primordial. En effet, il s'agit de trouver des matériaux offrant à la fois une densité minimale et une résistance maximale, tout en limitant autant que possible l'impact environnemental, le coût de production et d'utilisation des matériaux choisis.

Choix de la résine : résine époxy bio sourcée

Avant de s'attaquer au choix des fibres, il convient de sélectionner la résine avec laquelle les fibres seront liées car il est indispensable d'associer la fibre à une résine.

La résine habituellement utilisée pour la conception de foils est la résine époxy. Elle convient tout à fait aux applications marines, grâce à sa bonne résistance au contact de l'eau salée, et sa résistance mécanique élevée (2.35 - 2.47 GPa, voir 6.3) ce qui augmente la durabilité du foil.

Cependant, ce type de résine est particulièrement néfaste pour l'environnement, de par son processus de fabrication énergivore, contribuant également de manière non négligeable à la pollution de l'air et de l'eau, et dépendant aux ressources fossiles. De plus, la toxicité de ses composants, notamment les bisphénols et les épichlorhydrines, présente un risque pour la santé lors de sa manipulation, ainsi que pour l'environnement.

Dans le but de minimiser l'empreinte écologique des résines époxy, des entreprises comme Sicomin ([11]) s'attachent à développer et commercialiser des résines époxy biosourcées. Il pourrait donc être intéressant, afin de limiter l'impact environnemental de la conception de notre foil, d'utiliser ce type de résine époxy biosourcée.

Etude sur la fibre de carbone et le composite carbone/Kevlar

Pour ce qui est du choix des fibres, il est important de choisir des fibres présentant un rapport résistance/densité optimal, c'est-à-dire alliant une faible densité à une forte résistance.

Pour cela, nous avons souhaité nous inspirer des matériaux actuellement utilisés dans la conception de foil et de structures navales. Après avoir effectué des recherches sur des sites de commercialisation (voir [12]), nous avons pu voir que les fibres de verre et de carbone, ainsi que l'aluminium sont les plus utilisées à ce jour.

En termes de performance (nous parlons ici de rapport résistance/densité, appelée résistance spécifique), la fibre de carbone semble être le meilleur candidat, avec une densité allant de 1,550 à 1,580 et un module de Young de 110 - 131 GPa (voir annexe 6.3). Elle est ainsi très prisée dans le domaine des foils. En particulier, le Kevlar renforcé de carbone pourrait offrir plusieurs avantages. Réputé pour « absorber » les chocs [13], le Kevlar allie la résistance aux chocs et aux fissurations, la légèreté et la longévité. L'ajout de couches de Kevlar permet, ainsi, d'améliorer la résistance aux chocs et aux impacts, ce qui est particulièrement intéressant en cas de collision avec des débris flottants ou des obstacles sous-marins. En revanche, que ce soit la fibre de carbone « seule » ou le carbone/Kevlar, l'exploitation de ces matériaux nécessite des procédés de fabrication très énergivores et des matériaux synthétiques, ce qui peut entraîner un impact environnemental particulièrement élevé. Par ailleurs, le recyclage du composite est contraignant. Il est difficile de séparer le renfort d'un thermoset de sa matrice. Enfin, un autre inconvénient à l'utilisation de la fibre de carbone et de ses composites réside dans le coût de production élevé.

Le composite fibre de carbone et époxy et le carbone/Kevlar présentent donc des propriétés de densité et de résistance intéressantes, ce qui confère au foil ainsi conçu une portance et une résistance aux chocs optimales. Ils constituent d'excellents candidats pour la conception de nos foils, si la performance est privilégiée devant le coût de production et l'impact environnemental. En revanche, nous avons jugé nécessaire de s'intéresser fortement à ces deux derniers points et de trouver une alternative qui pourrait être appropriée.

Matériau retenu pour notre foil : la fibre de basalte

Grâce à l'utilisation de la base de données Granta, un matériau a particulièrement retenu notre attention. En comparant la fiche de données de la fibre de carbone à celle de la fibre de basalte, nous avons remarqué que cette dernière présente des propriétés physiques et mécaniques comparables à celles de la fibre de carbone : notamment en termes de densité et de module de Young, mais aussi pour d'autres propriétés intéressantes comme la flexibilité et la ténacité.

Pour pouvoir mener à bien cette comparaison, nous avons effectué la loi des mélanges, afin d'obtenir les valeurs caractéristiques du composite basalte/époxy.

En effet, la base de données Granta ne nous donne accès qu'aux informations relatives à la fibre de basalte "pure". Or, pour pouvoir exploiter les valeurs de densité, de module de Young et autres, il convient de prendre en compte la proportion en masse de résine époxy et de fibre de basalte du matériau final. Elle se présente selon les pourcentages de poids suivants : environ 65% de fibre de basalte, et 35% de résine époxy.

En appliquant la loi des mélanges (voir 6.3 pour le détail des calculs), nous obtenons pour la fibre de basalte renforcée en époxy des valeurs du module de Young comprises entre 46.9725 GPa et 72.3645 GPa. D'après les extraits de fiches Granta en annexe (6.3), le module de Young de la fibre de carbone est compris entre 110 - 131 GPa.

Au premier abord, ces deux plages de valeurs ne paraissent pas très proches : pour une valeur de module de Young du basalte égale à 50,405 GPa, il y a un facteur 2 entre les valeurs de module de Young des deux

composites. Malgré cet écart conséquent, l'intervalle du module de Young du basalte/époxy reste largement acceptable pour la conception d'un foil.

Il semble donc que la fibre de basalte soit un candidat légitime pour assurer la bonne résistance de la structure.

D'autre part, concernant la densité, nous obtenons d'après la loi des mélanges des valeurs comprises entre 2.014 et 2.3685.

La fiche Granta du composite fibre de carbone et époxy indique des valeurs de densité comprises entre 1.55 et 1.58 (voir annexe 6.3).

On remarque que, bien que la densité de la fibre de basalte soit légèrement supérieure à celle de la fibre de carbone, elles sont du même ordre de grandeur.

Ainsi, en considérant les propriétés à optimiser pour notre foil (densité et module de Young), la fibre de basalte constitue une bonne alternative pour la fibre de carbone.

Ce nouveau candidat présente, finalement, des avantages considérables par rapport à la fibre de carbone. En effet, la fibre de basalte est disponible à des prix nettement plus abordables. Toujours grâce à la loi des mélanges effectuées à partir des données sur les fiches Granta (en annexe 6.3), on constate qu'elle est environ 7 fois moins chère que la fibre de carbone.

Enfin, la fibre de basalte offre une alternative plus respectueuse de l'environnement, dans la mesure où elle est produite à partir d'une source naturelle, d'après [14] : le basalte, une roche volcanique abondante et naturellement disponible. Ainsi, sa production libère moins de gaz à effet de serre et utilise moins de produits chimiques. Enfin, la fibre de basalte est plus facilement recyclable et réutilisable que les fibres de carbone.

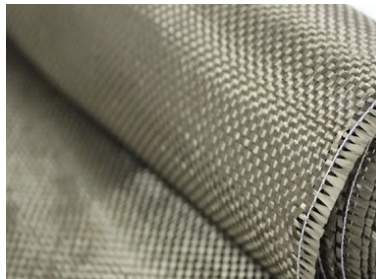


FIGURE 18 – Fibre de basalte [15]

2.3.2 Optimisation de la texture

Le choix de la texture du foil représente un défi intéressant, car celle-ci a une influence non négligeable sur l'hydrodynamisme du système.

Ajout d'un revêtement "peau de requin"

Notre recherche d'optimisation de la texture nous a mené à l'étude du biomimétisme « peau de requin ». Le requin doit son impressionnante vitesse aux écailles striées qui composent sa peau, d'après [16]. Appelées denticules dermiques (voir figure 20) et recourbées vers l'arrière du requin, elles jouent un rôle considérable dans la réduction des forces de frottements.

Le biomimétisme lié à cette caractéristique morphologique a déjà fait ses preuves dans le cadre du projet de l'entreprise Aeroshark (voir [13]), et a également été une source d'inspiration pour la conception de l'Airbus A340 et de divers bateaux. Ce concept pourrait permettre de minimiser la traînée de notre foil.

En effet, les rainures caractéristiques de la peau de requin, du nom de « riblets », contribuent à une réduction importante sur le frottement turbulent : cela est dû à un fort ralentissement de l'écoulement des fluides dans les creux des rainures ([17]).

Dans le cadre de notre projet, nous avons pensé à revêtir notre structure en composite de fibre de basalte

avec un film en silicone, dont la surface aura été texturée par des rainures semblables à celles de la figure 19.

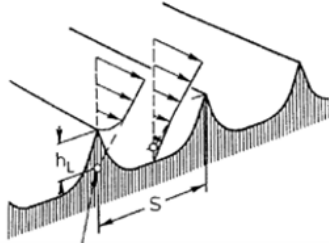


FIGURE 19 – Rainures "peau de requin" appliquées au foil [18]

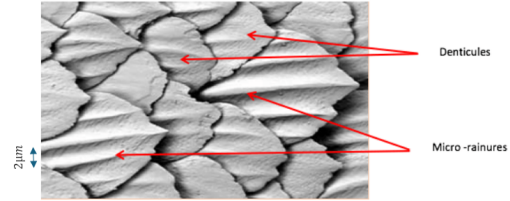


FIGURE 20 – denticules dermiques sur la peau de requin [19]

Afin d'optimiser ce système, il convient d'adapter les valeurs des différents facteurs qui interviennent dans la définition du nombre de Reynolds :

$$Reh = \frac{\rho v h}{\mu}$$

Avec $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, la masse volumique de l'eau, $\mu = 10^{-3} \text{ Pa.s}$, la viscosité dynamique, h : la hauteur de la strie en mètres et $v = 1.67 \text{ m/s}$ la vitesse du fluide.

Enfin, Reh est le nombre de Reynolds correspondant à l'écoulement de l'eau dans les rainures. On cherche à obtenir un écoulement laminaire dans le creux de ces rainures, donc on prendra une valeur de Reh assez faible ($\approx 10^3$).

Le nombre de Reynolds, la vitesse, la viscosité et la masse volumique du fluide étant fixés, il reste alors à calculer la hauteur qui convient :

$$h = \frac{\mu Reh}{v\rho} = \frac{10^3 \times 10^{-3}}{1000 \times 1.67} = 6 \times 10^{-4} \text{ m}$$

La dimension retenue pour la hauteur des stries est donc de l'ordre de 0.5 mm .

Pour ce qui est de l'écart entre chaque strie, il doit être minimal, afin de maximiser le nombre de stries sur la surface du foil : les stries doivent se succéder autant que possible. Enfin, concernant la largeur des stries, l'étude présentée dans [18] montre qu'une augmentation du rayon de courbure dans le creux des rainures mène à une optimisation de l'écoulement proche-paroi. Il convient donc de maximiser la largeur des rainures.

Dans le cadre de notre projet, nous n'avons pas bénéficié de suffisamment de temps pour mener des études et recherches plus approfondies à propos de l'optimisation de ces dimensions : il pourrait être intéressant, pour une prochaine équipe travaillant sur ce projet, d'effectuer des tests et simulations à cet effet (par exemple sur Fluent) dans le but d'obtenir les meilleurs résultats possibles en terme d'hydrodynamisme.

Forme et disposition des nervures sur la structure

Par ailleurs, il serait intéressant d'adapter le nombre et la taille des stries en fonction du placement sur le foil, afin de limiter la traînée.

Pour cela, nous proposons de suivre l'exemple de certaines espèces marines dont les écailles de l'avant du corps ont des stries plus réduites en hauteur et en espacement que celles de l'arrière, ce qui diminue au maximum les turbulences de l'eau et permet une nage rapide. (voir [20])

Finalement, pour maximiser la largeur des stries, les formes de rainures trapézoïdales et en "u" (comme sur la figure 19) sont à privilégier devant les formes en "v" d'après [18]. En effet, elles permettent d'optimiser la surface exposée à l'écoulement de l'eau au niveau des creux, que l'on veut la plus grande possible.

Expérience et modélisation

Nous avons tenté de réaliser une modélisation de ces rainures sur une partie de notre modèle de foil sur

Catia (voir figure 6.4 en annexe).

Malheureusement, nous n'avons pas pu effectuer l'expérience (section 3) en canal avec ces stries, à cause des difficultés rencontrées lors de la modélisation Catia et d'un manque de temps.

Par ailleurs, si nous avions pu utiliser Fluent (section 2.5), nous aurions simulé le comportement du foil dans un courant d'eau, d'une part avec une surface lisse, d'autre part avec une surface nervurée telle que sur la figure 19. Nous aurions mis en valeur le fait que les rugosités modifient le champ de vitesses de l'écoulement "proche paroi", ce qui induit une réduction importante des forces de frottements aqueux au niveau de ces surfaces.

Choix du matériau pour le revêtement

L'utilisation de silicone dit « antifouling », littéralement "anti-salissure", nous a paru pertinente pour concevoir notre film « peau de requin ».

En effet, d'après [21], ces revêtements, très prisés dans le domaine naval, empêchent les organismes marins de s'attacher à ces structures, et réduisent ainsi fortement la traînée. De plus, ce type de revêtement contribue à prolonger la durée de vie des coques des navires et réduisent la fréquence de nettoyage ou de maintenance coûteuse.

Les revêtements antifouling en silicone ont particulièrement retenu notre attention, car ils constituent des alternatives plus éco-responsables que les revêtements en cuivre, souvent utilisés dans le domaine naval. En effet, leur principe est de créer une surface anti-adhérente qui empêche l'accumulation des organismes, sans relâcher de substances biocides contrairement au cuivre.

2.4 Modélisation en un point matériel

Pour pouvoir s'intéresser à la partie expérimentale, nous voulions réaliser une étape de modélisation des phénomènes. En effet, prévoir le comportement du catamaran permet de pouvoir ajuster certains paramètres du foil afin d'éventuellement modifier nos paramètres ou de valider nos calculs théoriques.

Dans un premier temps, nous allons réaliser la modélisation du catamaran en l'approximant en tant que point matériel. L'origine de ce point sera le point le plus bas du flotteur et on se pose sur un référentiel terrestre avec \vec{x} l'axe des abscisses et \vec{z} l'axe ascendant des ordonnées.

2.4.1 Dynamique du point

Afin de pouvoir connaître le comportement du catamaran, il faut commencer par appliquer le principe fondamental de la dynamique. La deuxième loi de Newton nous donne :

$$m\vec{a} = \sum \vec{F}$$

Nous avons donc la masse du point de $m = 650 \text{ kg}$, \vec{F} les forces qui s'y appliquent et \vec{a} son accélération.

Poussée d'Archimède

Avec $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ la masse volumique de l'eau, V le volume déplacé des flotteurs et du foil et $\vec{g} = -9.81\vec{z}$ l'accélération de la pesanteur, la poussée d'Archimède est donnée par :

$$\vec{P}_a = -\rho V \vec{g} = \rho V g \vec{z}$$

Le volume immergé dépend de \vec{z} . En effet, plus le catamaran est hors de l'eau, moins l'eau est déplacée ce qui diminue la poussée. De plus, étant donné que la densité de l'air est 1000 fois plus petite que celle de l'eau, la poussée de l'air est négligeable devant la poussée de l'eau. Nous avons donc décidé de négliger la poussée d'Archimède dans l'air.

Poids

Le poids est donné par

$$\vec{P} = m\vec{g} = -mg\vec{z}$$

Force du moteur

La force donnée par le moteur, que nous pourrions modifier afin de faire voler le catamaran, s'applique uniquement horizontalement. Notons :

$$\vec{F}_m = F_m \vec{x}$$

Frottement du catamaran

On décompose les frottements horizontalement et verticalement. On suppose que la forme des flotteurs a un coefficient de frottement horizontal $c_{x_{\text{horizontal}}} = 0.1$ et vertical $c_{x_{\text{vertical}}} = 2$. On a donc :

$$\begin{aligned} F_x &= \frac{\rho}{2} S v_x^2 c_{x_{\text{horizontal}}} \\ F_z &= \frac{\rho}{2} S v_z^2 c_{x_{\text{vertical}}} \end{aligned}$$

On appliquera cette force dans l'eau et dans l'air, donc elle dépend aussi de la position du catamaran. S est donc la surface où les frottements ont lieu, donc $S = 2 \times h \times l$ où h est la hauteur du flotteur et l sa longueur.

Frottement et portance du foil

La portance et la traînée sont des forces liées à l'écoulement du fluide sur le foil. Comme le vecteur vitesse du catamaran est opposé à l'écoulement, la portance est orthogonale au vecteur vitesse et la traînée opposée à la vitesse. De plus, l'angle d'attaque influe sur le coefficient de portance $c_z(\theta)$ et de traînée $c_x(\theta)$. Puis en revenant sur le plan (\vec{x}, \vec{z}) , on obtient :

$$\begin{aligned} \vec{P} &= \frac{\rho}{2} S v_x^2 c_z(\theta + \phi) (\sin \theta \vec{x} + \cos \theta \vec{z}) \\ \vec{T} &= \frac{\rho}{2} S v_x^2 c_x(\theta + \phi) (-\cos \theta \vec{x} + \sin \theta \vec{z}) \end{aligned}$$

avec S la surface portante du foil, θ l'angle entre le vecteur vitesse du catamaran et l'axe horizontal \vec{x} et ϕ l'angle d'incidence du foil que l'on va mettre à 14° . Notons que la portance et la traînée s'annulent si le foil sort de l'eau.

Ainsi, on calcule θ de la sorte : $\theta = \arccos\left(\frac{\vec{v} \cdot \vec{x}}{\|\vec{v}\|}\right) \frac{\vec{v} \cdot \vec{y}}{\|\vec{v}\| \|\vec{y}\|}$

2.4.2 Modèle numérique et résultat

Une fois toutes les forces implémentées au modèle programmé sous MatLab (annexe 6.1), il nous faut intégrer l'accélération pour obtenir la vitesse puis intégrer cette dernière pour avoir la position. Pour faire cela, nous allons utiliser la méthode d'Euler explicite par soucis de facilité de programmation et nous allons modéliser le comportement sur 140 secondes avec un maillage de $10^6 + 1$ points. En utilisant les propriétés du foil que nous avons retenu (voir section 2.1 et section 2.2) et en mettant une force de moteur de 3350 m.s^{-2} , on obtient les figures 21 et 22.

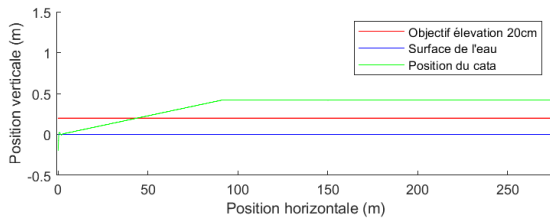


FIGURE 21 – Position du catamaran dans l'espace

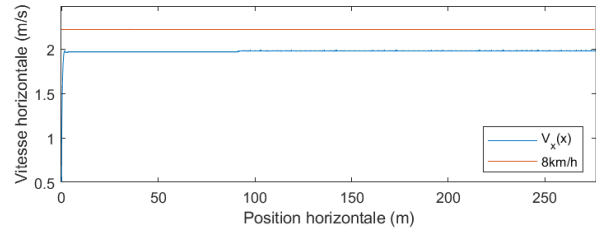


FIGURE 22 – Vitesse horizontale du catamaran en fonction de sa position horizontale

On voit donc que le catamaran décolle effectivement de l'eau (figure 21) et ne dépasse pas la vitesse maximale possible de 8 km.h^{-1} (figure 22). Cela aide alors à appuyer les résultats obtenus lors des calculs théoriques, les choix de profils et d'angles d'incidences.

Bien que la méthode converge (Annexe 6.2), il se peut qu'elle s'éloigne de la réalité à cause des approximations effectuées. En effet, afin d'approuver ce modèle, nous avons prévu d'effectuer le calcul de l'écoulement des fluides en 3 dimensions sur FLUENT (Section 2.5) afin d'affirmer ou non les résultats de la modélisation en un point matériel. Ainsi, si nous avons à changer des paramètres, pour économiser des ressources de calcul car une telle modélisation sur Fluent est très coûteuse en temps, nous aurions pu effectuer tous les calculs sur la modélisation la plus simple, celle effectuée sous Matlab en un point matériel.

2.5 Modèle numérique FLUENT

La modélisation de l'écoulement dans FLUENT se fait via la méthode des volumes finis, une méthode de résolution d'équations, utilisée pour la mécanique des fluides. Elle permet de résoudre des équations de conservation telles que la masse, l'énergie ou encore la quantité de mouvement pour un maillage donné.

Tout d'abord, le maillage permet de créer une représentation géométrique du modèle sur laquelle les équations sont intégrées. Les équations différentielles deviennent des équations aux différences finies, définies pour chaque cellule du maillage. Les équations de flux servant de liens entre chaque cellule. Le schéma de discrétisation des équations est choisi par l'utilisateur en fonction de la précision souhaitée. La convergence des modèles est déterminée par FLUENT via un critère d'arrêt.

FLUENT peut utiliser deux principaux algorithmes de couplage vitesse-pression pour résoudre les équations de Navier-Stokes : SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations), une méthode itérative implicite permettant de résoudre de manière couplée les équations, et PISO (Pressure-Implicit with Splitting of Operators), une méthode améliorée de SIMPLE qui permet d'améliorer la convergence en ajoutant des itérations pour corriger la pression et la vitesse. Après avoir obtenu la convergence pour les modèles utilisés, il est possible d'obtenir des courbes ou des profils à analyser.

Pour visualiser un exemple, on pourra se référer au document [22].

À partir de Airfoil Tools, nous avons extrait les coordonnées du profil NACA 4412, choisi en partie 2.2, pour modéliser le foil sous FLUENT. À l'aide des outils à notre disposition, nous avons pu tracer la forme du foil souhaité.

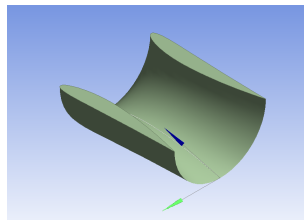


FIGURE 23 – Modélisation de la forme du foil souhaité.[23]

Cependant, nous sommes limités par la licence étudiante du logiciel Ansys FLUENT qui ne nous permet pas de réaliser un maillage en 3 dimensions suffisamment précis pour être pertinent et exploitable. Afin de poursuivre l'étude, il faut modéliser l'enveloppe de fluide autour du foil, réaliser le maillage du fluide, rentrer les paramètres de la simulation - vitesse d'entrée, pression de sortie, masse volumique - et lancer la simulation. Enfin, il faudra exploiter les résultats, notamment en les comparant avec la simulation Matlab réalisée en partie 2.4. Ainsi, nous pourrions voir si la modélisation de la forme proposée est en adéquation avec notre projet et en accord avec nos expérimentations, réalisées en partie 3.3.

3 Etude expérimentale

3.1 Calcul de l'échelle

Dans le but de valider nos modèles théoriques par un modèle expérimental, nous avons fabriqué une maquette du foil afin d'étudier son comportement en bassin. Pour cela, il était primordial d'analyser les contraintes que l'on avait vis-à-vis de l'expérimentation. Tout d'abord, nous avons choisi de réaliser uniquement la maquette d'un foil et de l'étudier dans un petit canal. La première contrainte est la largeur du canal de 30 cm, pour éviter les problèmes de bords, nous avons fixé la largeur maximale du foil à 20 cm étant donné que la largeur d'un flotteur du catamaran est de 71.8 cm. Par proportionnalité, on en déduit les dimensions réduites du foil dans le canal. Notre deuxième but était d'étudier la similitude cinématique donc d'avoir la vitesse à imposer dans le canal en fonction de la vitesse nous permettant de faire décoller le catamaran, à savoir 8 km.h^{-1} . Comme il était nécessaire de conserver le même type d'écoulement, nous avons choisi de conserver le nombre de Froude vis à vis du nombre de Reynolds.

$$\text{Celui-ci étant défini par : } F_r = \frac{v}{\sqrt{gL}} \text{ avec } \begin{cases} v : \text{vitesse du fluide} \\ L : \text{longueur caractéristique de l'écoulement} \end{cases}$$

Ce choix s'explique simplement par le fait que le nombre de Froude est utilisé pour caractériser les écoulements à surface libre ce qui est notre cas ici. De plus, celui-ci fait intervenir les effets de la gravité sur le mouvement du fluide. Ainsi, par égalité entre les coefficients réduit et réel, on peut en déduire un intervalle de vitesse en régime réduit, ici $[3.19, 4.27] \text{ km.h}^{-1}$.

3.2 Modélisation Catia

Afin de procéder à l'impression 3D de notre foil modèle réduit - calculé précédemment pour pouvoir rentrer dans le canal à houle - nous avons dû préalablement le modéliser sur le logiciel Catia. L'imprimante 3D ne permettant pas d'imprimer la totalité du foil en raison de sa longueur trop importante, nous avons dû le modéliser en deux parties. Pour cela nous avons récupéré les coordonnées des points correspondant au profil NACA 4412 sur le site de l'UIUC Airfoil Coordinates Database [23]. Après avoir modélisé l'esquisse, nous l'avons étiré le long d'une courbe en U dimensionnée à l'aide des calculs d'échelle pour former le foil.

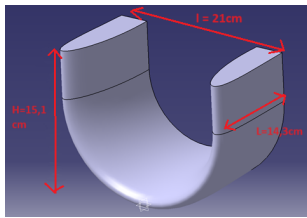


FIGURE 24 – Modélisation sous Catia de la 1ère moitié du foil

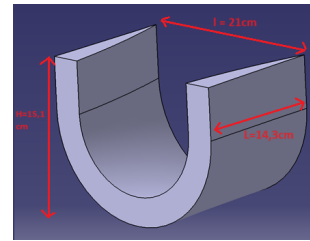


FIGURE 25 – Modélisation sous Catia de la 2ème moitié du foil

3.3 Experimentation

Tout d'abord, l'intérêt de cette partie expérimentation est d'établir un protocole fiable pour nos essais en canal. Le but de l'expérience est d'imposer une vitesse d'écoulement dans le canal puis d'évaluer certaines capacités de notre foil étudié théoriquement au préalable. Nous avons choisi d'étudier un unique foil car réaliser la structure globale du bateau aurait été très contraignant. Ainsi, nous considérons qu'un seul foil doit pouvoir soulever 1/4 de la structure nautique globale. Le foil a donc été imprimé à l'aide d'une imprimante 3D en dimensions réduites en matériau PLA. En revanche, nous savons d'ores et déjà que notre expérience ne

sera pas fidèle à notre modèle théorique à cause de l'impression 3D. En effet, il n'est pas possible d'imprimer avec les matériaux choisis sur un modèle réel.

Les résultats seront analysés en prenant en compte le changement de matériau, et les conditions d'expérimentation en dimension réduite dans le but de réaliser un protocole pouvant fonctionner et ainsi faciliter les essais suivants.

3.4 Protocole expérimental et déroulement de l'expérience

Tout d'abord, on place le canal horizontalement et l'on mesure la densité (0.266) de notre foil, au travers de sa masse volumique de $266.168 \text{ kg.m}^{-3}$ (avec une masse de 653 g et un volume de 0.002453 m^3), pour exploiter au mieux les résultats.

Dans un deuxième temps, nous fixons sur le dessus de notre foil des barres métalliques avec un degré de liberté qui vont permettre de réaliser un système de bras de levier avec un dynamomètre, placé à l'autre extrémité, et de fixer le foil au canal. L'ajout des barres porte la masse du système à $1,71 \text{ kg}$.

Dans un troisième temps, nous plaçons le système dans le canal où il y a déjà un certain niveau d'eau qui permet au foil de flotter.

Ensuite, nous imposons un écoulement contrôlé avec une vitesse cohérente vis à vis de la similitude cinématique. Grâce au bras de levier, quand le foil va se soulever grâce à la portance, le dynamomètre renverra la valeur de la force de portance exercée. C'est pourquoi il est nécessaire de bien mettre à zéro le dynamomètre au début de la manipulation pour ne pas prendre en compte le poids apparent qui est la somme du poids propre du foil et de la poussée d'Archimède.

Enfin, on relève la force exercée à l'aide du dynamomètre. On réalise l'expérience pour 4 vitesses différentes. À l'aide de ces mesures de force, nous pourrons en déduire quant à la capacité du foil à élever une partie de notre structure.

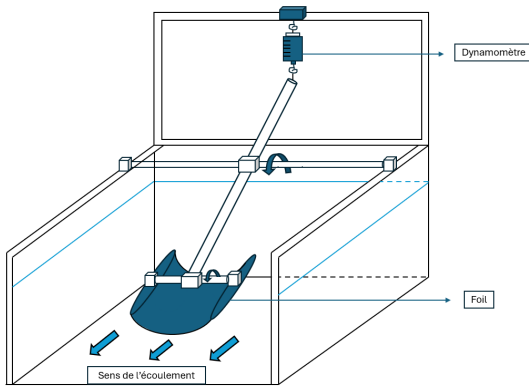


FIGURE 26 – Schéma de l'expérience : Global

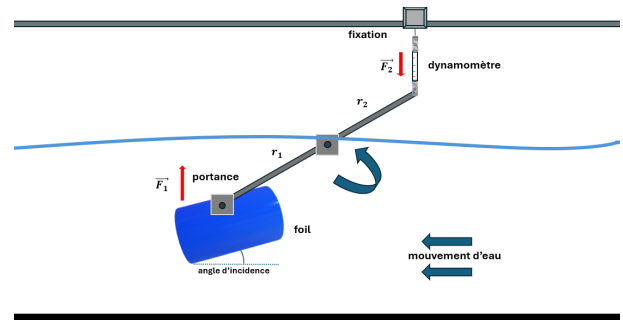


FIGURE 27 – Schéma de l'expérience : Profil

On relève donc différentes plages de valeurs de force sur le dynamomètre selon la vitesse. Il sera nécessaire de la recalculer à l'aide de la formule de bras de levier pour les deux dernières vitesses (v_3 , v_4) puisque les longueurs adjacentes au pivot ne sont plus égales. Effectivement, on a désormais $r_1 = 86 \text{ cm}$, $r_2 = 39 \text{ cm}$ et donc $F_1 = \frac{F_2 r_2}{r_1}$.

Par ailleurs, on relève un angle d'attaque de $14,6^\circ$ ce qui nous donne un coefficient de portance $C_z = 1,5$ et l'on mesure, sur notre foil, une surface apparente approximative $S_{app} = 0,0572 \text{ m}^2$. Ainsi, grâce à toutes ces données, nous obtenons la force de portance calculée : $F_p = \frac{\rho}{2} S_{app} C_z v^2$.

Vitesse écoulement	Force mesurée F_1	Force calculée F_p	Erreur relative
$v_1 = 0,26 \text{ m.s}^{-1}$	$1,1 - 1,4 \text{ N}$	$2,96 \text{ N}$	$52,7\% - 62,8\%$
$v_2 = 0,35 \text{ m.s}^{-1}$	$1,3 - 1,7 \text{ N}$	$5,26 \text{ N}$	$67,7\% - 75,3\%$
$v_3 = 0,45 \text{ m.s}^{-1}$	$1,8 - 2,5 \text{ N}$	$8,69 \text{ N}$	$71,2\% - 79,3\%$
$v_4 = 0,50 \text{ m.s}^{-1}$	$2,2 - 3,0 \text{ N}$	$10,73 \text{ N}$	$72,0\% - 79,5\%$

TABLE 2 – Mesures et exploitation de l'expérience

3.5 Conclusion sommaire et rapprochement au modèle théorique

Suite à cette expérience, nous avons pu observer que notre foil revenait à sa position d'équilibre après une perturbation, ce qui est conforme à nos attentes. Par ailleurs, les résultats obtenus, quelle que soit la vitesse de l'écoulement, sont assez concluants puisque les forces de portance mesurées - F_1 - et calculées - F_p - sont du même ordre de grandeur. En effet, l'erreur relative est du même ordre de grandeur et la plage d'erreur est assez restreinte - entre 52,7% et 79,5%.

En revanche, il faut évidemment mettre tous ces résultats face à la réalité et il est important de noter que nous avons observé :

- Des effets de bords très importants dus à la taille de la maquette et du canal ;
- L'angle d'attaque n'était pas maîtrisé et imposé ;
- Le foil a été conçu en deux parties et a généré de la traînée et réduit la portance au niveau de la jointure ;
- La vitesse maximale obtenue avec le canal était très inférieure à celle souhaitée initialement.

De plus, il est nécessaire de prendre en compte les erreurs suivantes :

- Calcul d'erreur relative ;
- Canal pas contrôlé précisément en terme de vitesse d'écoulement ;
- Erreur de lecture sur le dynamomètre ;
- Matériaux du foil ne correspondant au matériau réel utilisé ;
- L'arc de cercle du foil est une addition de plusieurs plan ;
- Foil imprimé en deux fois (jonction imparfaite).

Enfin, cette expérience pourrait être améliorée. Notamment en réalisant un système quatre-barres sur le bras de levier pour rigidifier la structure et empêcher le retournement du foil lors des essais avec des vagues. Aussi, des expérimentations réalisées avec le bon nombre de foils, placés dans leur disposition finale et avec les bons matériaux serait plus adéquate.

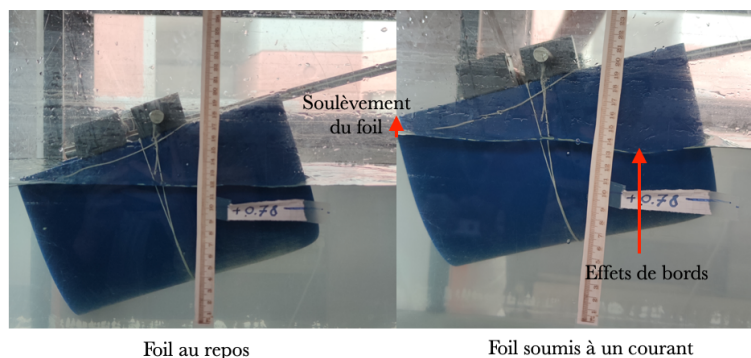


FIGURE 28 – Expérience en canal : réaction du foil en U à un courant

4 Conclusion

Les recherches réalisées ont porté sur les exigences du cahier des charges définissant des critères tels qu'une vitesse faible, une élévation à 20 cm au-dessus de l'eau, la durabilité des matériaux ainsi que le respect environnemental et sécuritaire.

Pour mieux appréhender notre projet, nous avons étudié le fonctionnement d'un foil ainsi que les projets existants. Nous avons ensuite comparé les différentes formes et profils de foils afin de désigner le foil qui, selon nos recherches, répondra le mieux au cahier des charges. À cet effet, nous avons choisi un foil en U composé d'un profil NACA 4412.

La modélisation numérique a joué un rôle important dans la validation ou l'invalidation de notre choix. En effet, la simulation de la dynamique du point s'appliquant sur le catamaran a permis de prédire le comportement de ce dernier. Ainsi, nous avons pu déterminer si le profil choisi permettait au foil de s'élever entre 6 et 8 $km.h^{-1}$.

Les tests dans le canal, réalisés à échelle réduite, ont permis d'établir un protocole et d'évaluer les performances en matière de portance et de traînée. La comparaison entre les résultats obtenus et les données théoriques nous a permis d'affirmer que le protocole était plutôt concluant au regard des erreurs à prendre en compte. Enfin, nous avons pu repérer des imperfections et des erreurs lors de nos tests.

Pour conclure, il était essentiel de prendre en compte les critères de "durabilité des matériaux" et de "respect environnemental". Une analyse détaillée des matériaux a conduit à l'introduction de la fibre de basalte, associée à une résine époxy d'origine biosourcée, proposant des performances similaires à celles des matériaux couramment utilisés comme la fibre de carbone, mais avec un impact environnemental moindre, et des prix plus accessibles.

Nageoires de baleines

Une autre piste d'optimisation serait d'ajouter une série de petites bosses sur le bord d'attaque du foil. Cette technologie s'inspire directement de la forme des nageoires de la baleine à bosse. Des études ont montré que la portance se voit ainsi augmentée de 8%, et la traînée, de 32%. Et pour cause : bordées de crans, ces tubercules canalisent les flux d'air. Cela crée des minuscules tourbillons qui permettent au flux d'eau de s'écouler immédiatement de manière laminaire dans les zones proches-parois, après le passage des bosses. Cette invention a été co-brevetée en 2005, par Fish et ses collègues Loren Howle et Mark Murray, sous le nom de « Tubercle technology ».

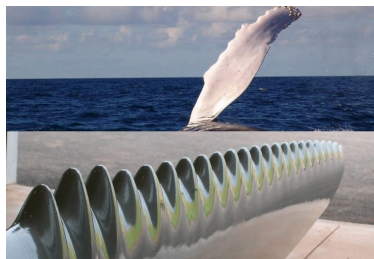


FIGURE 29 – Aile inspirée de la forme des nageoires des baleines à bosses [24]

5 Glossaire

Angle d'attaque : L'angle d'attaque ou d'incidence d'un hydrofoil est l'angle entre le foil et l'écoulement.

Aspect ratio : L'aspect ratio d'un foil est un rapport mathématique qui permet de décrire la forme de l'aile. C'est le rapport entre l'envergure de l'aile et sa corde.

Biomimétisme : Le biomimétisme désigne un processus d'innovation et une ingénierie. Il s'inspire des formes, matières, propriétés, processus et fonctions du vivant.

Bras de levier : Le bras de levier est la distance entre la direction de la force et l'axe de rotation. Cette distance est toujours exprimée en mètre (m). L'augmentation du bras de levier permet d'amplifier une force pour soulever ou déplacer un objet.

Catia : CATIA (« Conception Assistée Tridimensionnelle Interactive Appliquée ») est un logiciel de conception assistée par ordinateur (CAO) créé au départ par la société Dassault Aviation pour ses propres besoins.

Composite : Un matériau composite est un assemblage ou un mélange hétérogène d'au moins deux composants, non miscibles mais ayant une forte capacité d'interpénétration et d'adhésion, dont les propriétés mécaniques se complètent. Le nouveau matériau ainsi constitué possède des propriétés avantageuses que les composants seuls ne possèdent pas.

Corde : On appelle "la corde" la largeur de l'aile avant (celle qui va du centre du bord d'attaque au centre du bord de fuite).

Degré de liberté : Un degré de liberté dans une liaison est le mouvement relatif indépendant d'un solide par rapport à un autre autorisé par cette liaison.

Dépression : Pression inférieure à la pression du fluide.

Dynamomètre : Un dynamomètre est un appareil de mesure d'une force ou d'un couple.

Equations aux différences finies : En analyse numérique, la méthode des différences finies est une technique courante de recherche de solutions approchées d'équations aux dérivées partielles.

Foil : Un foil ou hydrofoil est un aileron placé sous la coque d'un bateau. Son rôle est de soulever partiellement ou totalement la coque hors de l'eau pour gagner en vitesse.

Fibre de basalte : La fibre de basalte est un matériau fait à partir de fibres extrêmement fines de basalte.

Fibre de carbone : La fibre de carbone se compose de fibres extrêmement fines, d'environ cinq à dix micromètres de diamètre, et est composée principalement d'atomes de carbone. Ceux-ci sont agglomérés dans des cristaux microscopiques qui sont alignés plus ou moins parallèlement à l'axe long de la fibre.

Fluent : C'est un logiciel de simulation de fluides connu pour ses capacités avancées de modélisation physique et sa précision inégale.

Force de frottement : La force de frottement est une force créée par l'interaction de deux surfaces en contact qui glissent l'une sur l'autre et qui s'oppose au mouvement.

Force de portance : La portance aérodynamique est la composante de la force subie par un corps en mouvement dans un fluide qui s'exerce perpendiculairement à la direction du mouvement.

Force de traînée : La force résistante qu'exerce un fluide sur un objet lorsque le fluide ou l'objet sont en mouvement l'un par rapport à l'autre. Dans notre cas, c'est la force exercée par l'eau sur notre foil en mouvement.

Granta : Ansys Granta Selector est un outil facilitant la sélection d'un matériau à partir d'un ensemble de critères de considération comme les propriétés physico-chimiques, thermo-mécaniques, environnementales, les processus de fabrication ou encore le coût des matières premières.

Ligne de courant : Une ligne de courant est une courbe de l'espace décrivant le mouvement d'un fluide.

Loi des mélanges : La loi des mélanges indique que, pour un composite, les gandeurs ne peuvent pas être additionnées comme cela. Il faut prendre en compte dans les calculs les matériaux présents en fonction de leur pourcentage.

Maillage : Le maillage en MATLAB est le processus de division d'une géométrie continue en un réseau de points et de petits éléments, afin de faciliter les calculs numériques pour résoudre des problèmes physiques.

Matlab : MATLAB est une plateforme de calcul numérique et de programmation utilisée par des millions d'ingénieurs et de scientifiques pour analyser des données, développer des algorithmes et créer des modèles.

Méthode d'Euler explicite : Bien souvent, on ne sait pas résoudre exactement une équation différentielle, c'est-à-dire qu'on ne sait pas donner la forme explicite des solutions. Il faut alors recourir à des méthodes qui donnent des solutions approchées. La méthode d'Euler est l'une d'entre elles. L'idée principale est d'approcher, au voisinage d'un point (x_0, y_0) , une fonction inconnue par sa tangente, qui elle est connue.

Module de Young : Le module de Young, également appelé module d'élasticité longitudinal ou module d'élasticité, est une propriété mécanique des matériaux qui décrit leur rigidité ou leur résistance à la déformation élastique lorsqu'une force externe est appliquée.

Nombre de Froude : Dans un chenal, l'écoulement est hypocritique, critique ou hypercritique selon que son nombre de Froude est plus petit que, égal à ou plus grand que 1. Le nombre de Froude (Fr) est un rapport des forces d'inertie et de gravitation. En dynamique des fluides, il fait partie des trois nombres sans dimension les plus utilisés : il caractérise l'importance de la pesanteur alors que le nombre de Reynolds prend en compte la viscosité et le nombre de Mach la compressibilité.

Nombre de Reynolds : Le nombre de Reynolds (Re) est une dimension sans unité utilisée en mécanique des fluides pour caractériser le régime d'écoulement d'un fluide. Il permet de déterminer si l'écoulement est laminaire (mouvement ordonné des particules de fluide) ou turbulent (mouvement chaotique des particules de fluide).

PLA : L'acide polylactique est un polymère biodégradable en compostage industriel. Il s'agit en réalité d'un polymère de type polyester.

Point matériel : On appelle point matériel ou masse ponctuelle un système mécanique qu'il est possible de modéliser par un point géométrique M auquel est associée sa masse m .

Poussée d'Archimède : La poussée d'Archimède est la force particulière que subit un corps placé entièrement ou partiellement dans un fluide et soumis à un champ de gravité.

Profil de foil : Le profil est la section longitudinale (parallèle à la vitesse) d'une aile portante. Les profils sont généralement définis par leurs caractéristiques géométriques principales et leurs caractéristiques hydrodynamiques (coefficients de portance, traînée). Les profils les plus connus (NACA) sont classés géométriquement par familles (distribution d'épaisseur, cambrure, épaisseur).

Résine époxy : Les résines époxy sont des composés contenant des groupes époxydiques susceptibles de réagir avec un durcisseur pour donner un film de peinture très résistant. Ce sont des résines thermodurcissables présentant de bonnes propriétés mécaniques et chimiques.

Similitude cinématique : Ce sont des conditions qui doivent obligatoirement être respectées pour que les résultats obtenus sur un modèle réduit puissent être transposées au système réel.

Surpression : Pression supérieure à la pression du fluide.

Viscosité : La viscosité est une propriété physique qui caractérise l'état d'un fluide dont les molécules sont entravées dans leur déplacement par des interactions, des collisions ou des associations moléculaires.

Viscosité cinématique : La viscosité cinématique évalue la capacité d'un fluide à se répandre. Elle se note ν (nu).

Références

- [1] *Mécanique des fluides : LES FOILS*. URL : <http://bertrand.joly3.free.fr/pages/projet/systeme%20energetique/Pre-dimensionnement.pdf>.
- [2] *L'origine du foil*. URL : <https://surftpefoil.wixsite.com/foil/l-origine-du-foil#:~:text=C'est%20en%201861%20avec,y%20parviendra%20de%20quelques%20centim%C3%A8tres.htm>.
- [3] *RHS 200 Superjumbo*. URL : <https://www.naviarmatori.net/ita/foto-74813-1.html>.
- [4] *JetCycle Max*. URL : <https://jetcycle.fr/jetcycle-max/>.
- [5] *SeaBubble*. URL : <https://www.seabubbles.com/fr/nos-bateaux/#smart-bubble>.
- [6] *Tuiva*. URL : <https://tuiva.fr/>.
- [7] *L'alphabet du Foil*. URL : <https://foils.wordpress.com/2014/10/26/lalphabet-du-foil/.htm>.
- [8] *L'alphabet du foil*. URL : <https://foils.wordpress.com/2014/10/26/lalphabet-du-foil/>.
- [9] *Théorie hydrodynamique des foils*. URL : https://www.rivieres.info/antho/theorie_foil/theorie_du_%20foil.htm.
- [10] *javaFoil*. URL : <http://www.mh-aerotoools.de/airfoils/javafoil.htm>.
- [11] *Sicomini*. URL : <https://sicomin.com/>.
- [12] *Comment fonctionne un foil*. URL : <https://www.hotmer.com/cms/comment-fonctionne-un-foil.aspx>.
- [13] *Kevlar composites*. URL : <https://material-properties.org/fr/kevlar-composites/>.
- [14] *Une revue sur la fibre de basalte et ses composites*. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359836815000062>.
- [15] *Fibre de basalte*. URL : <http://fr.bhfiberglass.com/basalt-fiber/basalt-fiber-fabric.html>.
- [16] *QUAND LES ANIMAUX MARINS INSPIRENT LES INGÉNIEURS*. URL : <https://hal.inrae.fr/hal-02916403/document>.
- [17] *Analyse de l'influence de rugosités organisées sur les écoulements cavitants instationnaires*. URL : <https://pastel.hal.science/pastel-01062146/document>.
- [18] *Effet des parois rainurées (« riblets ») sur la structure d'une couche limite turbulente*. URL : <http://inter.action.free.fr/faq/ribletsonera.pdf>.
- [19] *Des recherches Scientifiques sur les écailles du requin*. URL : <https://le-biomimetisme-06.websself.net/leffet-riblet.htm>.
- [20] *Quand les animaux marins inspirent les ingénieurs*. URL : <https://hal.inrae.fr/hal-02916403/document>.
- [21] *Les peintures antifouling à base de silicone : des solutions sans cuivre plus écologiques pour protéger les coques des navires*. URL : <https://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/articles/les-peintures-antifouling-a-base-de-silicone-des-solutions-sans-cuivre-plus-ecologiques-pour-protger-les-coques-des-navires-119579/>.
- [22] *Exemple 2D écoulement fluide dans une conduite*. URL : https://perso.centrale-marseille.fr/~oboiron/visible/presentation_fluent2019.pdf.
- [23] *UIUC Airfoil Coordinates Database*. URL : https://m-selig.ae.illinois.edu/ads/coord_database.html.
- [24] *Quand le biomimétisme inspire les fabricants d'éoliennes*. URL : <https://www.revolution-energetique.com/quand-le-biomimetisme-inspire-les-fabricants-deoliennes/>.
- [25] *Instagantt*. URL : <https://app.instagantt.com/r#projects/660aa474df36492d0ae09520/1206887608622557>.

6 Annexes

6.1 Programme de la modélisation MatLab

```

1 close, clc;
2
3 NACA4412 = readmatrix("NACA4412.txt",DecimalSeparator=","); NACA0012 = NACA0012(:,1:3);
4
5 % Variables
6 g = 9.81;
7 rho = 1000;
8 % Proprietes cata
9 l = 4.41;
10 L = 0.711;
11 h = 0.34;
12 m = 650;
13 cx_cata = 0.1;
14 cx_cata_vert = 2;
15 % Proprietes du foil
16 nb_foil = 4;
17 S = 0.65; %surface portante
18 S_foil = 0.718;
19 h_foil = 0.12; % epaisseur
20 profil = NACA4412;
21 %angle d'incidence
22 angle_init = 14*pi/180;
23 x_foil = [cos(angle_init);sin(angle_init)];
24 y_foil = [-sin(angle_init);cos(angle_init)];
25 % Acceleration moteur
26 Moteur = 3350;
27
28 %temps
29 tf = 140; %temps final
30 dt = tf*1e-6; %subdivision
31 t = 0:dt:tf;
32
33 % Position, Vitesse et Acceleration
34 Pos0 = [0;-m/(rho*(l*L+S_foil*h_foil))]; % Position initiale a l equilibre
35 Vit0 = [0;0];
36
37 Pos = zeros(2,length(t)); Pos(:,1) = Pos0;
38 Vit = zeros(2,length(t)); Vit(:,1) = Vit0;
39 Acc = zeros(2,length(t));
40
41 % Calculs
42 teta = 0;
43 incidence = angle_init + teta;
44
45 Portance = Po(Pos(2,1),Vit(1,1),cz(incidence,profil),S);
46 Trainee = T_foil(Pos(2,1),Vit(1,1),cx_foil(incidence,profil),S);
47
48 Acc(:,1) = [nb_foil*(Portance*sin(teta) + Trainee*cos(teta)) + T_cata(Pos(2,1),Vit(1,1),
49     cx_cata) + Fm(Pos(1,1),Moteur); %Trainee + Portance + Moteur
50     nb_foil*(Portance*cos(teta) - Trainee*sin(teta) + Pa_foil(Pos(2,1),S_foil,h_foil
51     )) + P() + Pa(Pos(2,1)) + frott_vert(Pos(2,1),Vit(2,1),cx_cata_vert)]/m; % Portance,
52     Trainee, Archimede et Poids frottement vertical
53
54 for i = 2:length(t) %Euler explicite
55     Vit(:,i) = [Vit(1,i-1)+dt*Acc(1,i-1);
56                 Vit(2,i-1)+dt*Acc(2,i-1)];
57     Pos(:,i) = [Pos(1,i-1)+dt*Vit(1,i-1);
58                 Pos(2,i-1)+dt*Vit(2,i-1)];
59
60     ta = Vit(:,i)/norm(Vit(:,i));
61     teta = acos(ta(1))*(-ta(2)/abs(ta(2)));

```

```

59     Portance = Po(Pos(2,i),Vit(1,i),cz(incidence,profil),S);
60     Trainee = T_foil(Pos(2,i),Vit(1,i),cx_foil(incidence,profil),S);
61
62     Acc(:,i) = [nb_foil*(Portance*sin(teta) + Trainee*cos(teta)) + T_cata(Pos(2,i),Vit(1,i),
63     cx_cata) + Fm(Pos(2,i),Moteur);
64     nb_foil*(Portance*cos(teta) - Trainee*sin(teta) + Pa_foil(Pos(2,i),S_foil,
65     h_foil)) + P() + Pa(Pos(2,i)) + frott_vert(Pos(2,i),Vit(2,i),cx_cata_vert)]/m;
66
67 % Affichage
68 subplot(2,1,1) %position
69 hold on
70 plot(Pos(1,:), 0.2*ones(1,length(t)),'r')
71 plot(Pos(1,:), zeros(1,length(t)),'b')
72 plot(Pos(1,:), Pos(2,:), 'g');
73 xlabel('Position horizontale (m)')
74 ylabel('Position verticale (m)')
75 legend('Objectif elevation 20cm',"Surface de l'eau",'Position du cata')
76 axis([-1 Pos(1,end) -0.5 1.5])
77
78 subplot(2,1,2) %vitesse horizontale selon la position horizontale
79 plot(Pos(1,:),Vit(1,:))
80 hold on
81 plot(Pos(1,:),8/3.6*ones(1,length(t)))
82 hold off
83 xlabel('Position horizontale (m)')
84 ylabel('Vitesse horizontale (m/s)')
85 legend('V_x(x)','8km/h','location','southeast')
86 axis([-1 Pos(1,end) min(Vit(1,:)) max(Vit(1,:))+0.5])
87
88 %Fonctions:
89 function Po = Po(z,v_x,cz,S) % Portance
90     h_elevation = 0.42;
91     rho = 1000;
92     if z > h_elevation
93         Po = 0;
94     else
95         Po = 1/2*rho*S*cz*v_x^2;
96     end
97 end
98
99 function T = T_foil(z,v_x,cx,S) % Trainee du foil
100     h_elevation = 0.42;
101     rho = 1000;
102     if z > h_elevation
103         T = 0;
104     else
105         T = -1/2*rho*S*cx*v_x^2;
106     end
107 end
108
109 function T = T_cata(z,v_x,cx) % Trainee du catamaran
110     l = 4.41;
111     h = 0.34;
112     rho = 1000;
113     rho_air = 1.225;
114     if z <= -h %totalement immerge
115         S = abs(2*h*l);
116         T = -1/2*rho*S*cx*v_x^2;
117     elseif z < 0 && z >= -h %partiellment immerge
118         S_eau = abs(2*z*l);
119         S_air = abs(2*(z+h)*l);
120         T = -1/2*rho*S_eau*cx*v_x^2 -1/2*rho_air*S_air*cx*v_x^2;
121     else %pas immerge

```

```

122     S = abs(2*h*1);
123     T = -1/2*rho_air*S*cx*v_x^2;
124 end
125 end
126
127 function P=P() % Poids
128     m = 650;
129     g = 9.81;
130     P = -m*g;
131 end
132
133 function Pa = Pa(z) % Poussee archimede des flotteurs
134     l = 4.41;
135     L = 0.711;
136     h = 0.34;
137     g = 9.81;
138     rho = 1000;
139
140     if -h<z && z<0 %partiellement immerge
141         Pa = abs(rho*l*L*z*g);
142     elseif z <=-h %totalement immerge
143         Pa = abs(rho*l*L*h*g);
144     else %pas immerge
145         Pa = 0;
146     end
147 end
148
149 function Pa_foil = Pa_foil(z,S_foil,h_foil) % Poussee archimede du foil
150     g = 9.81;
151     rho = 1000;
152     h_elevation = 0.42;
153     z = z-h_elevation;
154     if 0<z && z<h_foil %partiellement immerge
155         Pa_foil = abs(rho*S_foil*z*g);
156     elseif z <= 0 %totalement immerge
157         Pa_foil = abs(rho*S_foil*h_foil*g);
158     else %pas immerge
159         Pa_foil = 0;
160     end
161 end
162
163 function Fm = Fm(z,Moteur) % Force moteur
164     if z < 0.1
165         Fm = Moteur;
166     else
167         Fm = 1*Moteur;
168     end
169 end
170
171 function ft_v = frott_vert(z,v_z,cx)
172     l = 4.41;
173     h = 0.34;
174     rho = 1000;
175     rho_air = 1.225;
176     if v_z == 0
177         ft_v = 0;
178     elseif z <= -h %totalement immerge
179         S = abs(2*h*1);
180         ft_v = -(v_z/abs(v_z))*abs(1/2*rho*S*cx*v_z^2);
181     elseif z < 0 && z >= -h %partiellement immerge
182         S_eau = abs(2*z*1);
183         S_air = abs(2*(z+h)*1);
184         ft_v = -(v_z/abs(v_z))*abs(1/2*rho*S_eau*cx*v_z^2 + 1/2*rho_air*S_air*cx*v_z^2);
185     else %non immerge
186         S = abs(2*h*1);

```

```

187         ft_v = -(v_z/abs(v_z))*abs(1/2*rho_air*S*cx*v_z^2);
188     end
189 end
190
191 function Cz = cz(teta, profil)
192     for i=1:length(profil(:,1))
193         if teta <= profil(i,1)
194             Cz = profil(i,2);
195         else
196             Cz = 0;
197         end
198     end
199 end
200
201 function cx_foil = cx_foil(teta,profil)
202     for i=1:length(profil(:,1))
203         if teta <= profil(i,1)
204             cx_foil = profil(i,3);
205         else
206             cx_foil = 0;
207         end
208     end
209 end

```

6.2 Convergence de la modélisation de l'annexe 6.1

Afin de voir si la modélisation converge, on augmente le nombre de points de la subdivision, puis, on effectue la norme infinie entre le résultat à n points et le résultat avec le maximum de points. On obtient donc l'erreur maximale entre chaque courbe et la dernière. On observe que la modélisation converge (figure 30).

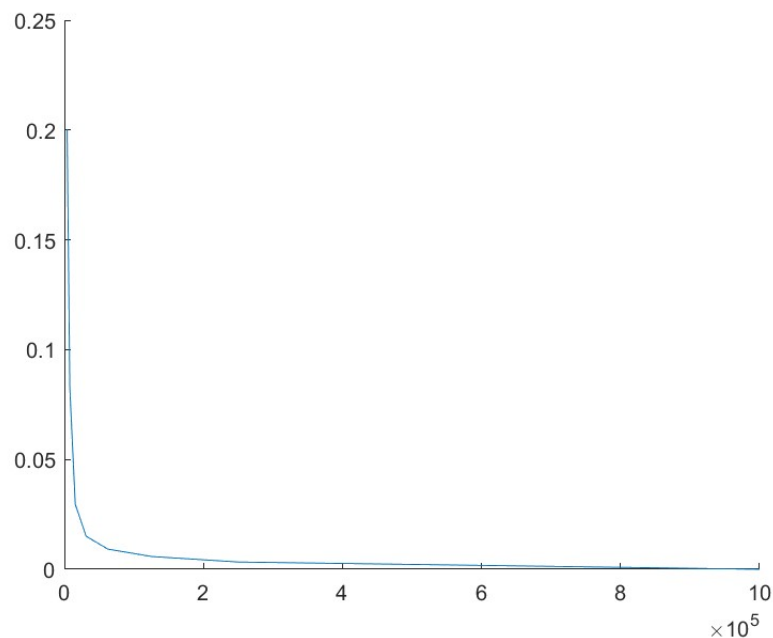


FIGURE 30 – Erreur maximale entre le résultat à n points et celui à 10^6 points

6.3 Fiches Granta des matériaux

Epoxy resin (unfilled)				
Mechanical properties				
Young's modulus	2,35	-	2,47	GPa

Basalt (f)				
Mechanical properties				
Young's modulus	71	-	110	GPa

Epoxy/HS carbon fiber, resin infused non-crimp fabric, UD lay-up				
Mechanical properties				
Young's modulus	* 110	-	131	GPa

FIGURE 31 – Comparaison des propriétés mécaniques

Détail du calcul du module de Young du composite basalte/époxy :
 D'après la loi des mélanges, et les données ci-dessus, le module de Young de ce composite est compris entre $0.65 \times 71 + 0.35 \times 2.35 = 46,9725 \text{ GPa}$ et $0.65 \times 110 + 0.35 \times 2.47 = 72.3645 \text{ GPa}$

Basalt (f)				
Physical properties				
Density	2,5e3	-	2,89e3	kg/m³

Epoxy resin (unfilled)				
Physical properties				
Density	1,11e3	-	1,4e3	kg/m³

Epoxy/HS carbon fiber, resin infused non-crimp fabric, UD lay-up				
Physical properties				
Density	1,55e3	-	1,58e3	kg/m³

FIGURE 32 – Comparaison des masses volumiques

Détail du calcul de la densité du composite basalte/époxy :
 D'après la loi des mélanges, et les données ci-dessus, la densité de ce composite est comprise entre $0.65 \times 2.5 + 0.35 \times 1.11 = 2.014$ et $0.65 \times 2.89 + 0.35 \times 1.4 = 2.3685$

Epoxy resin (unfilled)			
Price			
Price	* 3,14	- 4,11	EUR/kg
Price per unit volume	* 3,49e3	- 5,75e3	EUR/m ³

Basalt (f)			
Price			
Price	* 2,02	- 2,23	EUR/kg
Price per unit volume	* 5,06e3	- 6,44e3	EUR/m ³

Epoxy/HS carbon fiber, resin infused non-crimp fabric, UD lay-up			
Price			
Price	* 16,6	- 19,2	EUR/kg
Price per unit volume	* 2,57e4	- 3,04e4	EUR/m ³

FIGURE 33 – Comparaison des prix

Détail du calcul du prix du composite basalte/époxy :

D'après la loi des mélanges, et les données ci-dessus, le prix de ce composite est compris entre $0.65 \times 2.02 + 0.35 \times 3.14 = 2.412 \text{ €/kg}$ et $0.65 \times 2.23 + 0.35 \times 4.11 = 2.888 \text{ €/kg}$

6.4 Modélisation de la peau de requin

Nous avons tenté de modéliser les stries inspirées de la peau de requin, à l'aide du logiciel Catia. Des difficultés ont été rencontrées pour effectuer cette modélisation sur l'ensemble du foil. C'est pourquoi cette modélisation sur une partie du foil réduit d'échelle 2/7 est uniquement à but illustratif dans le cadre de notre projet :

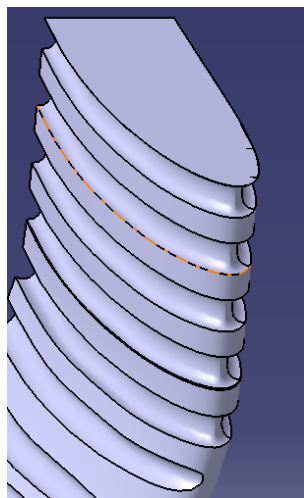


FIGURE 34 – Essai de modélisation sur Catia du biomimétisme "peau de requin" sur une partie du foil réduit d'échelle 2/7

Il pourrait être intéressant de reprendre cette modélisation, afin de l'exploiter sur Fluent dans le but d'ajuster les paramètres (formes et dimensions des stries). Une expérience en bassin pourrait également être menée avec une maquette de foil munie de ce biomimétisme "peau de requin".

6.5 Tableau de Bord

Pour ce projet, nous avons dû apprendre à utiliser des logiciels tels que Instagantt et Asana mais aussi à organiser nos séances afin d'optimiser les recherches faites lors de celles-ci. Une matrice Raci a donc été créée pour chaque tâche réalisée.

Voici à quoi ressemblait le tableau de bord de notre dernière séance :

Présentation du Projet

- Objectif : faire voler Twino (un catamaran de $230 \times 460 \text{ cm}^2$ et 650 kg) à 20 cm de la surface de l'eau et à une vitesse comprise entre 6 et 8 km/h .
- Date de mise à jour : le 5 Juin 2024

Futurs objectifs

- Rédiger le rapport
- Réaliser le support visuel
- S'entraîner pour la soutenance

Tâches

- Tâches au total :30
- Tâches terminées :27
- Tâches non terminées :3

Avancement de la dernière séance

- Réaliser le support visuel
- Rédiger le rapport
- Expériences dans le canal
- Comparaison des résultats avec les données théoriques

Alertes

- Logiciel Fluent qui est très difficile à prendre en main.

Météo d'équipe

- Grand Soleil, nous avons obtenu des résultats cohérents avec nos attentes.
- Un peu de nuage, il a été difficile d'avancer pour certaines séances.
- Expériences dans le canal
- Comparaison des résultats avec les données théoriques

Tableau de Gantt et Matrice Raci

Voici à quoi ressemblent notre tableau de Gantt et la matrice Raci à la fin du projet :

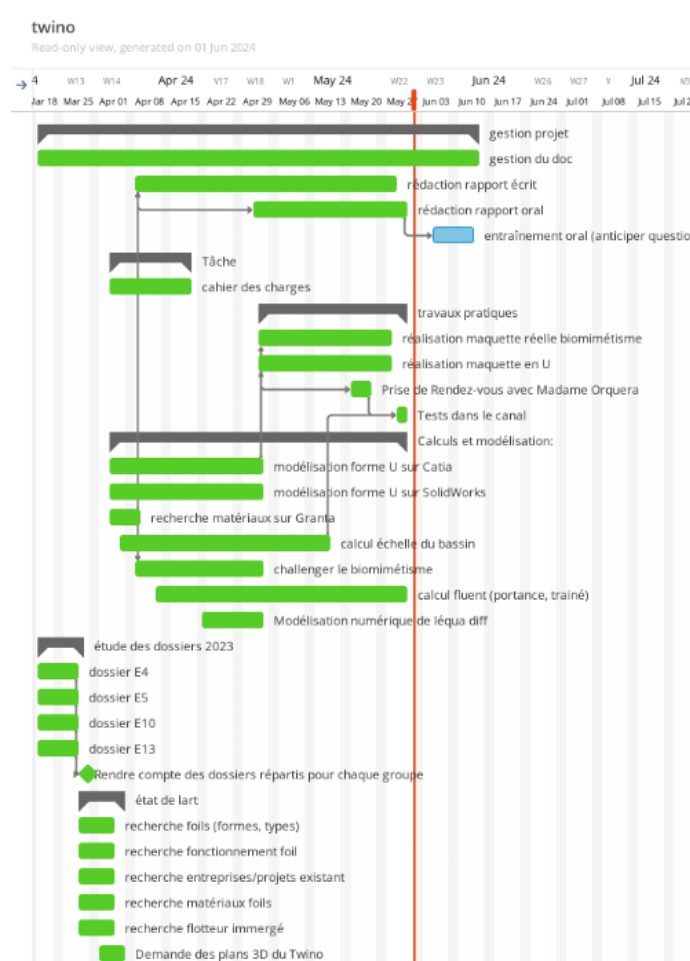


FIGURE 35 – Tableau de Gantt de notre dernière séance [25]

Projet TWINO	Léa	Alice	Alienor	Arthur	Guillaume	Hugo	Néo	Pierre-Louis	Romain	Vincent
gestion asana	A	I	I	I	I	I	I	I	I	R
Etude des dossiers 2023	R	R	R	R	R	R	R	R	R	A
recherche foils (forme, type)	R	I	R	I	I	I	I	I	I	A
recherche fonctionnement foil	A	I	I	I	R	I	R	I	I	I
recherche état de l'art	A	I	I	R	I	I	I	R	I	I
recherche matériaux foils	A	R	I	I	I	R	I	I	I	I
recherche flotteur immergé	A	I	I	I	I	I	I	I	R	R
confection du cahier des charges	R	A	R	C	C	C	C	C	C	R
recherche matériaux sur Grants	A	R	I	I	I	R	I	I	I	I
challenge le biomimétisme	A	I	R	I	I	I	I	I	R	I
calcul dimension du foil	R	A	R	I	I	I	I	I	I	R
programme pour le PFD sur matlab	A	I	I	R	I	I	I	I	I	I
modélisation forme U sur catia	A	I	I	I	I	R	I	I	I	I
calcul échelle du bassin + prendre rdv	A	I	I	I	R	I	R	I	I	I
calcul Fluent (portance, trainé)	A	I	R	R	I	I	I	R	R	I
compréhension profil NACA sur airfoilttools	A	I	I	I	I	I	R	I	I	I
Impression et confection maquette en U	R	R	A	A	A	A	A	A	A	A
TP dans bassin	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R
réduction rapport écrit	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R
réduction rapport oral	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R
entraînement oral (anticiper questions)	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R

FIGURE 36 – Matrice Raci