



Stage assistant-ingénieur : « Construction d'un voilier hauturier autonome »

Promotion FISE 2021



ENSTA Bretagne  
2 rue F. Verny  
29806 Brest Cedex 9, France

Colin Baumgard  
[Colin.baumgard@ensta-bretagne.org](mailto:Colin.baumgard@ensta-bretagne.org)

## Remerciements

Je tiens à remercier mes professeurs ainsi qu'aux doctorants du laboratoire STIC pour leur aide précieuse. Je pense notamment à M.Jaulin, pour son aide théorique, M.Le Bars pour ces nombreux conseils et pour la mise à disposition de matériel et M.Le Mézo pour notre formation sur le tour. Merci aux initiateurs du projet micro-transat, et particulièrement Mathéo Sacaze pour sa vision du projet et son aide technique.

## Résumé

L'objectif final de notre projet est de faire une transatlantique à un voilier autonome. Traverser l'atlantique en voilier, cela se fait depuis 1492. Mais une traversé autonome n'a jamais été réalisée par un voilier. La difficulté réside dans la robustesse du système qui doit subir des conditions extrêmes tout en conservant toutes ces capacités de communication et de guidage.

La construction du voilier à été commencé depuis quelques mois, et une bonne partie de la réalisation technique reste à faire. Lors de ce stage nous avons avancé sur la construction de l'aile rigide, l'étanchéité de la coque, le mécanisme de safran le mécanisme de rotation du mât ainsi que la réalisation d'un lest en plomb.

## Abstract

The final objective of our project is to make a transatlantic crossing to an autonomous sailing boat. Crossing the Atlantic in a sailboat has been done since 1492. But an autonomous crossing has never been made by a sailing ship. The difficulty lies in the robustness of the system, which has to withstand extreme conditions while retaining all its communication and guidance capabilities.

The construction of the sailboat has been started a few months ago, and a good part of the construction remains to be done. The objectives of the course are the construction of the rigid wing, the waterproofing of the hull, the rudder mechanism, the mast rotation mechanism as well as the realization of a lead ballast.

## Sommaire

Remerciements.....	2
Résumé .....	3
Abstract .....	3
Introduction.....	4
1. Construction de l’aile rigide .....	6
Etat des lieux.....	6
Bord d’attaque .....	6
Bord de fuite .....	8
Travail restant .....	8
2. Mécanisme du safran .....	9
3. Mécanisme de rotation du mât.....	10
Conception.....	10
Réalisation.....	10
4. Etanchéité.....	11
Position du problème .....	11
Réalisation.....	11
5. Lestage de la quille .....	11
Préparation .....	12
Premier essai.....	12
Deuxième essai .....	13
Conclusion .....	14

## Introduction

L'objectif annoncé du projet est de concourir à la MicroTransat. Cela consiste à faire traverser à un voilier de 2.4m l'océan atlantique en autonomie complète.

Le niveau de complexité est élevé puisque jusqu'à présent un seul bateau a réussi le défi : de l'est vers l'ouest. Les difficultés sont nombreuses, il est nécessaire de construire un bateau suffisamment robuste et stable car la traversée est parsemée d'obstacles : bateaux de commerce, houle, algues et tempêtes. Une difficulté majeure est la consommation d'énergie car au cours de la traversée il n'est pas possible recharger les batteries. Il s'agit donc de concevoir un bateau assez économe tout en restant suffisamment réactif pour pouvoir contrôler sa trajectoire. Nous avons d'abord choisi les composants du bateau en s'inspirant de SailDrone (bateau orange ci-dessous), qui est commercialisé par une compagnie américaine et sert en tant que plateforme d'observation mobile de l'océan.

Sa principale caractéristique est la voile rigide munie d'un aileron comme sur un avion permettant de régler l'orientation de l'aile. En nous inspirant de SailDrone, nous nous proposons de construire deux bateaux : un bateau d'essai destiné à naviguer en rade à presque toutes les allures et un bateau pour le challenge Micro-Transat conçu pour naviguer au portant.

Dans le cadre de notre stage d'une durée de 8 semaines nous allons nous concentrer sur la construction du voilier, avec comme gros chantier : la voile rigide, l'étanchéité de la coque, le mécanisme de safran, le mécanisme de rotation du mât et le lest en plomb.

## 1. Construction de l'aile rigide

### Etat des lieux

La structure de l'aile a déjà été réalisée pendant l'année. Elle est constituée d'un mât central qui est inséré dans une série de nervures en Airex stratifié ainsi que de renforts pour assurer la rigidité.



Figure 1: structure interne de l'aile

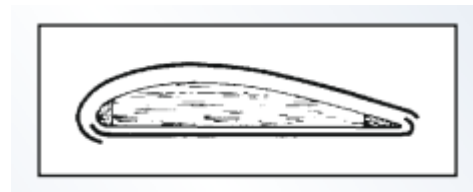


Figure 2: Oracover, pour faire la peau de notre aile

Il restait à trouver un moyen de faire un bord d'attaque et un bord de fuite, pour pouvoir ensuite poser un film sur toute la surface. La solution du film permet de limiter grandement la masse globale de l'aile, ce qui joue beaucoup sur la stabilité du voilier, en rehaussant le centre de gravité. Ce film pour couvrir les ailes est utilisé dans l'aéromodélisme et certains ULM.

### Bord d'attaque

Le bord d'attaque est la partie la plus importante de l'aile en influant énormément sur la portance générée. Nous devons donc imaginer un moyen de le former.

Nous avons dans un premier temps pensé faire une pièce en fibre de verre. Pour cela nous avons besoin d'un moule. Nous avons donc découpé au fil chaud des morceaux de

mousse en nous aidant de profil découpé à la CNC. Les tronçons obtenus ont été ensuite collés ensemble pour former notre support pour la fibre.

Nous avons ensuite fait une stratification sous vide. Malheureusement plusieurs points ont fait que le résultat c'est révélé inexploitable. Premièrement, il est assez compliqué de faire des belles découpes au fil chaud. Cela réside dans le fait qu'il faut synchroniser parfaitement la vitesse d'avance du fil, pour ne pas enlever trop de matière. De plus la difficulté est encore augmentée par le fait que les profils n'ont pas la même dimension. Deuxièmement le vide a déformé la mousse, notre pièce en fibre c'est donc retrouvé bombée.

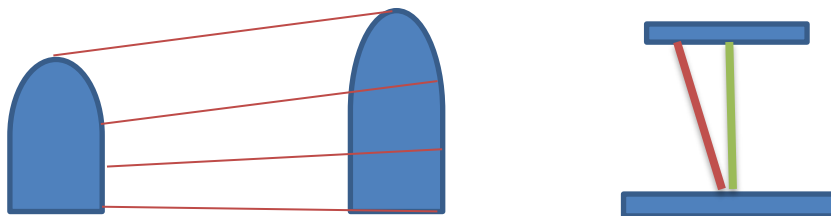


Figure 3: schéma expliquant les problèmes de la découpe au fil chaud

Nous nous sommes donc tournés vers une autre technique : le thermoformage.

Pour cela nous découpons un morceau d'Airex que nous chauffons puis que nous appliquons sur nos profils. L'airex garde sa forme en refroidissant, laissant un bord d'attaque régulier.

Nous avons ensuite pu venir appliquer une couche de fibre de verre et de résine epoxy.



Figure 4: Thermoformage des plaques d'Airex

## Bord de fuite

Le problème est plus simple pour le bord de fuite. Nous avons imprégné de la fibre de verre pour former deux bandes plates, que nous sommes venus appliquer et coller sur le



Figure 5: Collage du bord de fuite

bord de fuite. Pour renforcer celui-ci et pouvoir ensuite coller le film, nous avons mis entre deux couches de fibre une nervure en airex.

## Travail restant



Il faudra ensuite déposer le film pour couvrir l'aile. Mais avant cela il faut fixer un tube pour placer l'aileron et la centrale météo et prévoir des caissons étanches.

## 2. Mécanisme du safran

Pour le safran, nous avons fait le choix de le faire amovible et de ne pas le faire



Figure 6: safran

totalemment mobile, mais seulement le tiers environ. Pour le rendre amovible, nous avons fait un puit de safran dans la coque. Le puit est prolongé par deux parois venant maintenir en place un servo moteur. Le servo moteur sera relié au safran par une courroie cranté, que nous avons acheté mais que nous n'avons pas eu le temps de monter. Il restera également à percer la coque et faire passer l'axe du gouvernail.

### 3. Mécanisme de rotation du mât

#### Conception

Nous avons fait dans un premier temps une conception du mécanisme sur Fusion 360, un logiciel de dessin assisté par ordinateur. Voici le mécanisme que nous avons imaginé. Le mat est libre en rotation grâce à deux paliers lisse. Il est bloqué en translation par une rotule en bas du puit et par un chapeau en haut. Une pièce est collée au mât et le palier, vissé à la coque, empêche la translation vers le haut. Les paliers sont en POM-C, le mât en carbone.

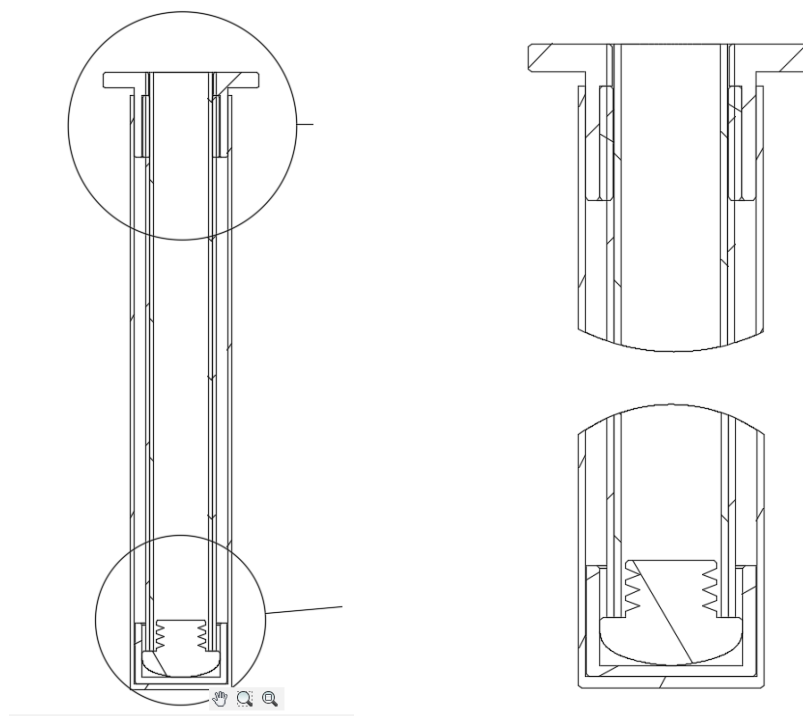


Figure 7: dessin technique du système de rotation du mât

#### Réalisation

Pour réaliser les pièces du mécanisme nous avons une tour numérique dans le labo de robotique. Nous avons pu nous en servir sous la supervision de Thomas Le Mézo.

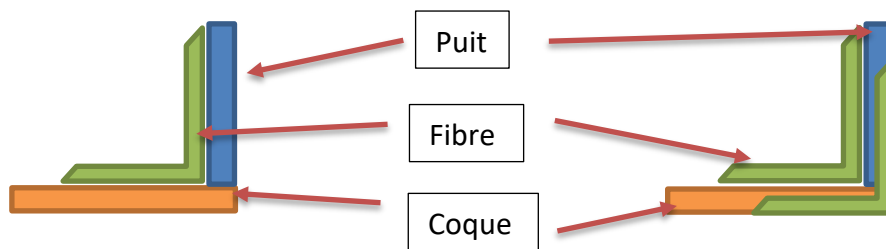
## 4. Etanchéité

### Position du problème

Pour que le bateau puisse naviguer durant une longue période, il est impératif d'assurer une étanchéité parfaite. Chaque découpe de la coque et points de liaisons et propice à une fuite. Il y a donc le tube de l'axe de safran, le puit de mât, de quille et de safran qui doivent recevoir une attention particulière. Lors de notre test d'étanchéité au début de stage nous nous sommes rendus compte d'une fuite d'eau au niveau des deux puits. Voici notre démarche pour essayer de régler le problème.

### Réalisation

Nous avons choisi de fraiser le bord du puit pour venir mettre une couche d'époxy à l'extérieur. Voici deux schémas pour expliquer notre démarche.



Nous avons pu ainsi éliminer toutes les fuites que nous avions.

## 5. Lestage de la quille

Pour assurer la stabilité d'un voilier monocoque, on leste la quille, afin de placer le centre de gravité du bateau en dessous du centre de carène, c'est-à-dire au centre de la poussée d'Archimède.

## Préparation

Pour fabriquer le leste, il faut couler du plomb. La technique la plus simple et la plus appropriée pour ce genre de moulage est le sable de fonderie. Cela demande une préparation.

Premièrement il faut réaliser un « Master », c'est-à-dire une pièce au même volume que la pièce que l'on veut obtenir. Nous avons choisi de la faire en bois. Nous avons découpé des tranches avec la CNC puis nous les avons collés, poncés, enduites et reponcés.

Pour fondre le plomb nous avons choisi une grande marmite à laquelle nous avons fixé deux barres de fer pour pouvoir la manipuler une fois le plomb liquide.

Il faut aussi construire deux bacs afin d'accueillir le sable. On remplit de sable le premier bac, on insère la pièce pour en enfoncer exactement la moitié dans le sable que l'on tasse le mieux possible. On met du tacle sur toute la surface, on place le deuxième bac dessus, on remplit de sable que l'on tasse également, on soulève le bac du haut, on enlève notre master, on perce des ouvertures pour couler le plomb et laisser échapper l'air, on repose le bac du dessus et on vient verser le plomb dans l'ouverture.

## Premier essai

Pour notre premier essai nous avons 20kg de sable et 25kg de plomb. Nous avons fait un feu de bois et posé la marmite dessus. Nous avons rencontré une première difficulté : la marmite était en aluminium, qui devient assez malléable à une certaine température, notamment avec 25kg de plomb dedans. Cela pose un problème de sécurité et de manipulation.

L'autre problème est que nous n'avons pas assez de sable pour remplir parfaitement les bacs, et quand nous avons versé le plomb dedans le sable s'est effondré.



Figure 8: chauffage du plomb

## Deuxième essai

Nous avons acheté une marmite en acier inoxydable et 40kg de sable pour notre deuxième essai. Nous avons également passé plus de temps à tasser le sable pour éviter un effondrement comme lors de notre premier essai.

Nous avons pu avoir un résultat très satisfaisant !



Figure 9: résultat obtenu

## Conclusion

Ce stage m'a permis de maîtriser une grande variété de technique de fabrication : la commande de CNC et de tour numérique, la stratification, le coulage de plomb, le thermoformage, la conception de mécanisme... qui sont des techniques utilisées pour la réalisation de robots. Je pense que les connaître et les maîtriser est un vrai atout pour pouvoir mieux concevoir ensuite un prototype. Ce stage à également été l'occasion de tester et améliorer des compétences en gestion de projet, et notamment de bien gérer le planning. Les choses à faire ne manquent pas sur le voilier, et une organisation efficace permet de mieux optimiser chaque tâche.