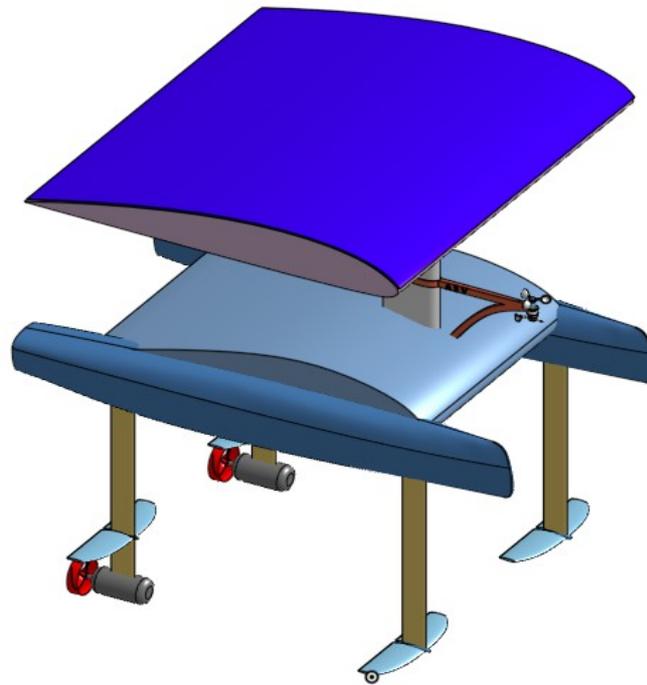


Laboratoire de Mécanique et Génie Civil
UMR - 5508 , UM/CNRS

Rapport technique Design d'un ASV 2020



Equipe : Mcube
Responsable : Daridon Loïc
Stagiaire : Wamytan Loïc

www.lmgc.univ-montp2.fr

Table des matières

Remerciement	4
Introduction.....	5
Les besoins du nouveau système	6
Design de l'ASV.....	7
1.Coques de l'ASV.....	7
2.Choix des ailes	8
2.1. Les foils.....	9
2.1.1.Modèles de foil.....	9
2.1.2.Asservissement des foils.....	11
2.1.2.1 Solutions techniques des foils avants.....	12
a. Solution 1 (système avec pivot + vérin électrique).....	12
b. Solution 2 (système avec glissières en arc de cercle + moteur électrique).....	15
2.1.2.2 Solutions techniques des foils arrières.....	16
a. Solution 1 (système avec deux vérins électriques).....	16
b. Solution 2 (système avec vérin électrique + engrenages).....	18
2.2. L'aile supérieure	21
2.2.1. Modèle de l'aile supérieure.....	21
2.2.2. Plate-forme de test de l'aile supérieure	22
2.3. Plate-forme.....	23
3.Autres composants du modèle	24
4.Assemblage	25
5.Centre de masse de l'ASV.....	28
Conclusion.....	31
Annexes	31
1.Liens.....	31
2.Annexe (état de l'art).....	32
3.Annexe de calculs.....	42

Index des illustrations

Illustration 1: Diagramme APTE de l'ASV.....	7
Illustration 2: Coque (3000 mm).....	8
Illustration 3: Coordonnées des quatre profils sélectionnés.....	9
Illustration 4: Ailes du foil avec esquisse.....	10
Illustration 5: Jambe du foil avec esquisse.....	11
Illustration 6: Diagramme APTE de du système de réglage des foils.....	12
Illustration 7: Modèle 2D de la solution avant 1.....	13
Illustration 8: Modèle 3D de la solution avant 1.....	13
Illustration 9: Modèle 3D de la solution avant 2.....	16
Illustration 10: Modèle 3D de la solution arrière 1.....	18
Illustration 11: Modèle 3D de la solution arrière 2.....	22
Illustration 12: Aile supérieure de l'ASV.....	25
Illustration 13: Esquisse de l'aile supérieure.....	25
Illustration 14: Plate-forme de test de l'aile supérieure.....	26
Illustration 15: Plate-forme et esquisse.....	27
Illustration 16: Anémomètre.....	28
Illustration 17: Support anémomètre.....	28
Illustration 18: Assemblage de l'ASV.....	29
Illustration 19: Aile à 40° selon l'axe vertical et 10° selon l'axe du mât.....	29
Illustration 20: Aile en position 40° selon l'axe verticale.....	29
Illustration 21: Centre de masse foil avant (vue de coté).....	30
Illustration 22: Centre de masse de l'ASV (vue de face).....	31
Illustration 23: Centre de masse de l'ASV (vue du dessus).....	31

Index des tableaux

Tableau 1: Masse d'une aile de foil.....	9
Tableau 2: Masse de jambe de foil.....	10

Remerciement :

Je tiens, tout d'abord, à remercier M. Loïc Daridon qui m'a fait confiance pour ce stage de fin d'étude, et qui m'a encadré en tant que maître de stage. Je le remercie pour son soutien, sa disponibilité et toute l'aide qu'il m'a apportée ainsi que son suivi constant tout au long de la mission.

Je remercie Thierry LAURENT, responsable des stages, et mon tuteur pédagogique Laurent Waltz pour leurs implications et leurs disponibilités.

Je remercie enfin l'ensemble du département de mécanique qui nous offre une formation de qualité et nous permet d'être à la hauteur des attentes des employeurs au sortir de notre formation.

Introduction

L'ASV (Autonomous surface véhicule) est un projet visant à concevoir un prototype de drone marin, ayant de nombreuses fonctions telles que le contrôle des parcs hydroliens pour des sondages. Ce projet prévoit que l'ASV ait une propulsion vélique en cas de faible source énergétique, et ainsi de réduire cette consommation énergétique des moteurs par le biais d'autres systèmes propulsifs. Inspiré des kitesurfs, l'ASV possèdera une aile supérieure rigide qui sera équipée de panneaux solaires sur toute sa surface. Les quatre foils que possèdera l'ASV seront dans le plan anti-dérive, et seront pilotables.

Après une étude de Mr. Yann Robert, sur un ensemble de profils d'aile, et après un tri selon plusieurs critères, quatre profils ont été sélectionnés et ont servi pour la suite du projet.

Cette étude porte sur le design de l'ASV en utilisant les profils préalablement sélectionnés, et de faire un modèle 3D de l'ASV en respectant l'aérodynamisme du système. Ensuite, il a fallu déterminer des solutions techniques pour l'asservissement des foils, et pour cela modéliser un modèle 3D, puis calculer les efforts dans les différentes liaisons avant de dimensionner les solutions techniques. Une solution technique sera retenue pour le pilotage des foils avant, et de même pour les foils arrière (les foils avant ont une rotation et ceux à l'arrière en posséderont deux).

Pour le pilotage de l'aile supérieure, une plate-forme de test a été modélisée en 3D, et pourra être réalisée par la suite.

Les besoins du nouveau système

Tout d'abord, le nouveau modèle doit avoir un design qui lui permet un bon rendu aérodynamique, ainsi de nouveaux systèmes mécaniques seront mis en place pour l'articulation des foils. Ce nouveau modèle possèdera quatre foils comme le précédent, mais les deux foils avant auront une seule rotation, et les foils arrières posséderont d'une part les moteurs, et d'autre part deux rotations. Ce modèle aura également les mêmes fonctions que l'ancien, comme le montre le diagramme APTE ci-dessous.

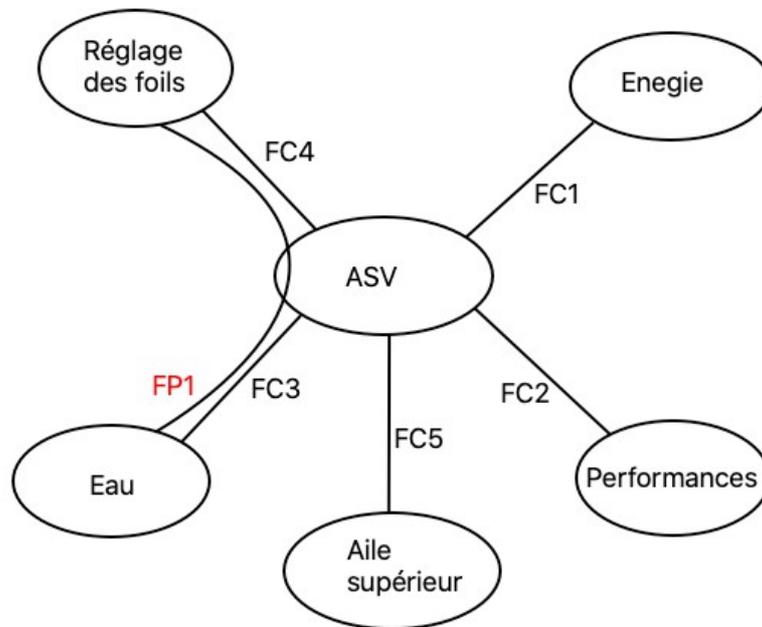


Illustration 1: Diagramme APTE de l'ASV

FC1 : Être énergétiquement indépendant (panneaux photovoltaïques et batteries).

FC2 : Assurer les déplacements dans les zones voulues.

FC3 : Assurer un bon rendu aérodynamique sur l'eau.

FC4 : Assurer le pilotage de l'ASV.

FC5 : Assurer une propulsion alternative pour réduire la consommation énergétique.

FP1 : Limiter le contact entre l'eau et les coques et limiter les pertes par trainé avec l'eau.

Design de l'ASV

1. Coques de l'ASV

Caractéristiques :

Longueur : 3,00 m
 Largeur : 0,35 m
 Hauteur max : 0,50 m
 Masse :

Matériaux	Masse volumique (g/cm ³)	Masse (kg)
Aluminium	2,7	7,9
Fibre de verre	2,6	7,6
Fibre de carbone	1,8	5,3

Tableau 1: Masse de la coque

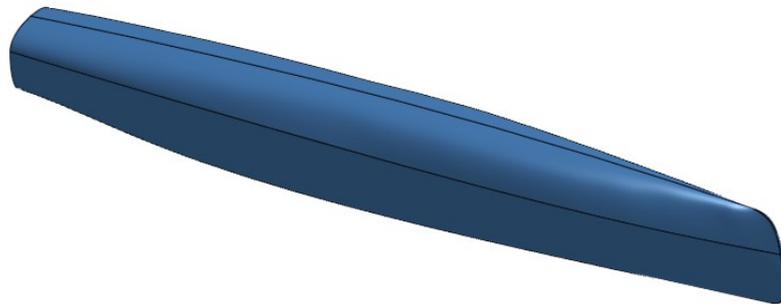


Illustration 2: Coque (3000 mm)

Certaines pièces, telles que les coques, ont été modéliser par Monsieur Daridon. Il y a eu deux coques de différentes tailles (2500 mm et 3000 mm). Et pour la suite du projet de modélisation, j'ai utilisé la coque de 3000 mm pour l'assemblage, car il semble plus judicieux d'utiliser la coque la plus longue, car si le système est validé, il pourrait être mise en place pour des systèmes comme les catamarans ou autres.

2. Choix des ailes

Après une étude avancée de Mr. Robert sur 34 profils présélectionnés des 4 familles différentes de profils, seuls 4 profils ont été sélectionnés comme le montre le graphique ci-dessous. Le choix a été fait pour le design de l'aile supérieure et la plate-forme. Pour l'aile supérieure, notre choix s'est porté sur le NACA4418 pour la plate-forme, et le modèle ClarkY pour l'aile supérieure. De plus, pour les ailes des foils j'ai gardé le même modèle que sur la première modélisation, mais en l'agrandissant de 30% ses dimensions.

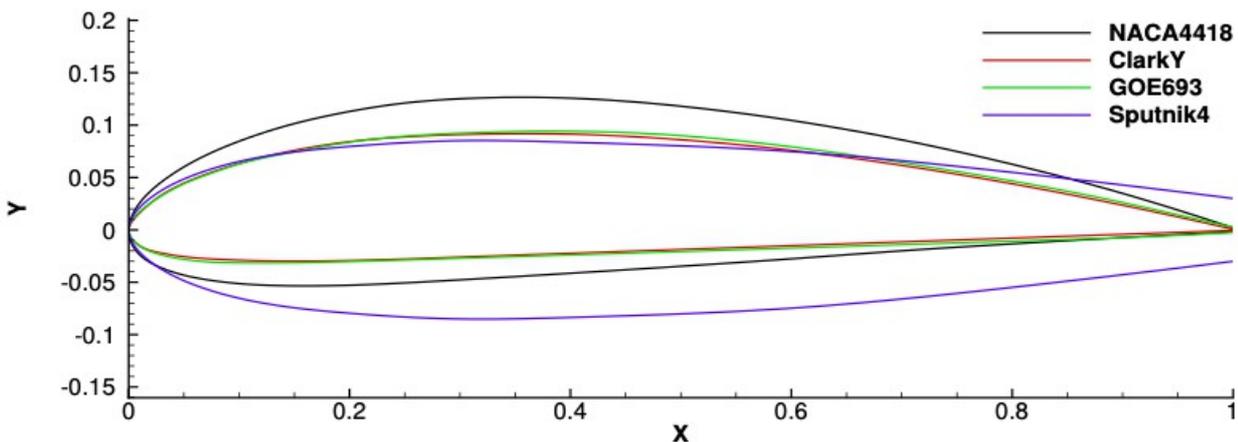


Illustration 3: Coordonnées des quatre profils sélectionnés

Concernant la modélisation de l'aile supérieure et la plate-forme, j'ai utilisé le modèle ClarkY et NACA4418 préalablement sélectionnés par Monsieur Daridon. J'ai ensuite récupéré les profils et j'ai adapté les tailles, par rapport au modèle de l'ASV, avec une plate-forme large de 1500 mm, c'est-à-dire que les deux coques sont séparées de cette distance. L'aile supérieure a été adaptée par rapport à la configuration du modèle, avec certains critères à prendre en compte de sorte que l'aile recouvre la totalité du bateau et puisse effectuer une rotation de 40° sans toucher les coques.

2.1. Les foils

2.1.1. Modèle de foil

Ailes du foil :

Profil : Clark YH

Longueur : 195,91 mm

Largeur : 373,41 mm

Hauteur max: 25,137 mm

Masse :

Matériaux	Masse volumique (g/cm ³)	Masse (kg)
Aluminium	2,7	0,49
Fibre de verre	2,6	0,47
Fibre de carbone	1,8	0,3

Tableau 2: Masse d'une aile de foil

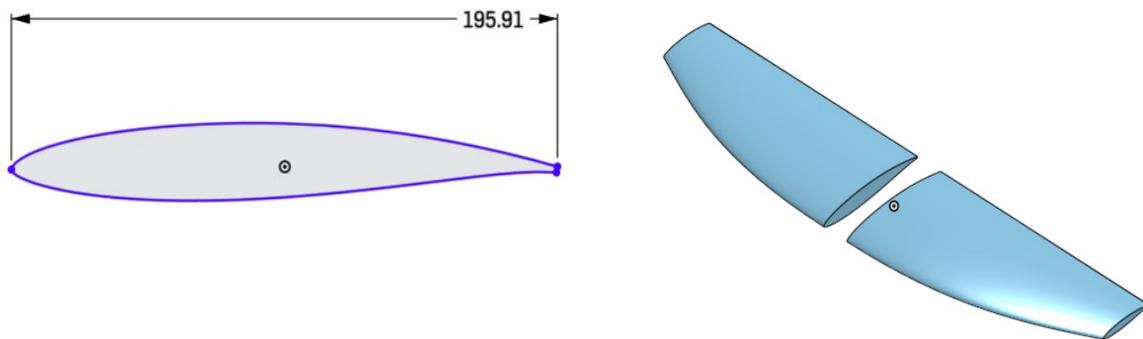


Illustration 4: Ailes du foil avec esquisse

Jambe du foil :

Profil :

Longueur : 143 mm

Largeur : 1253 mm

Hauteur : 20,745 mm

Masse :

Matériaux	Masse volumique (g/cm ³)	Masse (kg)
Aluminium	2,7	1,1
Fibre de verre	2,6	1
Fibre de carbone	1,8	0,75

Tableau 3: Masse de jambe de foil

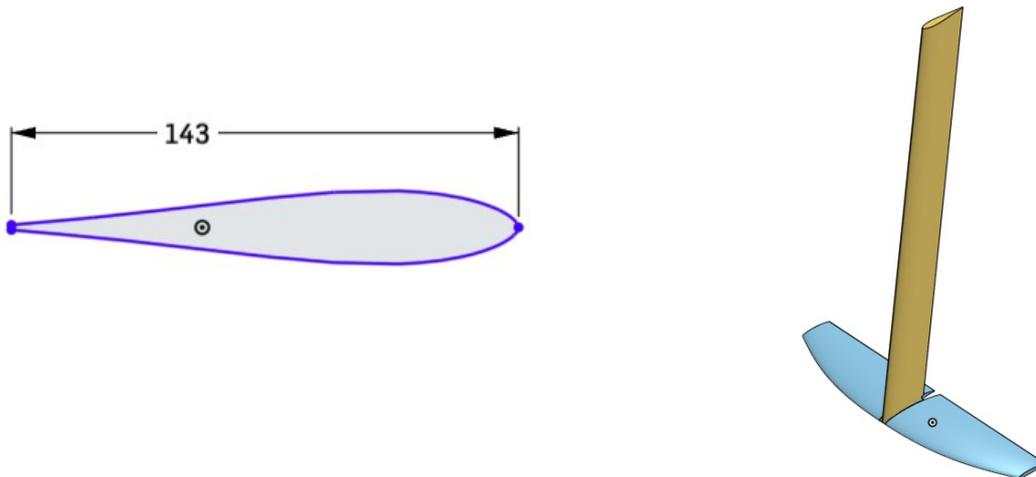


Illustration 5: Jambe du foil avec esquisse

Les foils de l'ASV ne sont pas les mêmes à l'avant et à l'arrière, car ceux qui se situent à l'arrière possèdent des moteurs, et les foils avant ne possèdent que des ailes. De plus, les deux foils arrières permettront de diriger l'ASV, et seront l'équivalent d'un safran d'un voilier, car contrairement aux foils avant qui possèdent une rotation, les foils arrières en possèdent deux.

Puis, les foils de l'ASV seront équipés de capteurs à leurs extrémités.

2.1.2. Asservissement des foils

Pour l'articulation des foils, étant donné que les foils avant et arrières ne possèdent pas les mêmes mobilités, car les foils arrières possèdent chacun un moteur, cela doit être pris en compte pour la mise place des liaisons (liaison plus solide).

De plus, les foils avants ne possèdent qu'une rotation alors que ceux de l'arrière en possèdent deux (plus ou moins 45° selon l'axe y, et plus ou moins 10° selon l'axe z). J'ai proposé deux solutions techniques pour les foils avants et arrières. Et j'ai notamment modélisé ces solutions sur Onshape pour avoir un aperçu des solutions techniques. Une fois validées, j'ai dimensionné les différentes pièces du système après avoir effectué les calculs des efforts dans les liaisons.

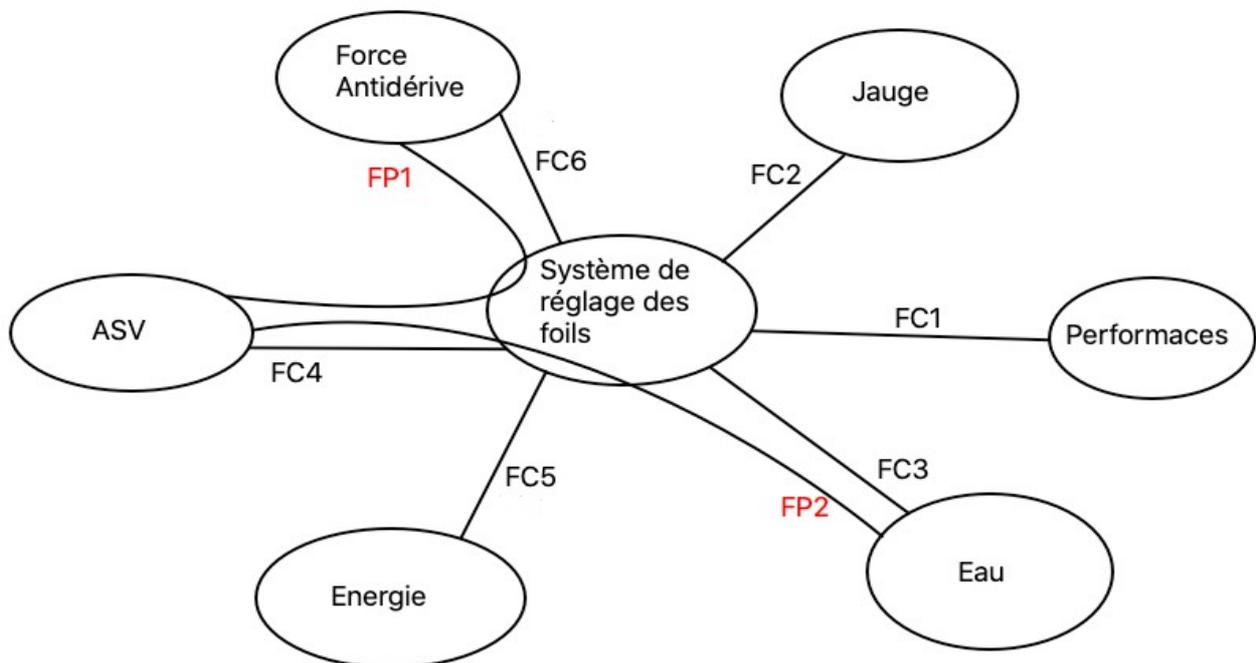


Illustration 6: Diagramme APTE du système de réglage des foils.

FC1 : Assurer la stabilité de vol (stabilité en hauteur et longitudinal).

FC2 : Respecter les règles de la jauge.

FC3 : Limiter les pertes par trainé avec l'eau.

FC4 : Ne pas déranger les autres fonctions de l'ASV.

FC5 : Respecter les sources d'alimentations présentes (panneaux photovoltaïques et batteries). FC6 : S'adapter aux besoins de force anti-dérive.

FP1 : -

FP2 : Limiter le contact entre l'eau et les coques.

2.1.2.1 Solutions techniques des foils avant

a. Solution 1 (système avec pivot + vérin électrique)

Modèle 2D et 3D

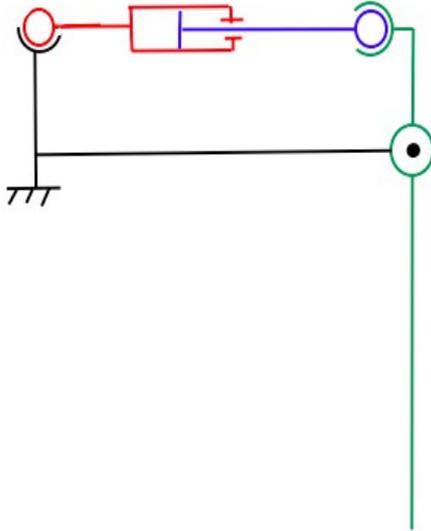


Illustration 7: Modèle 2D de la solution avant 1

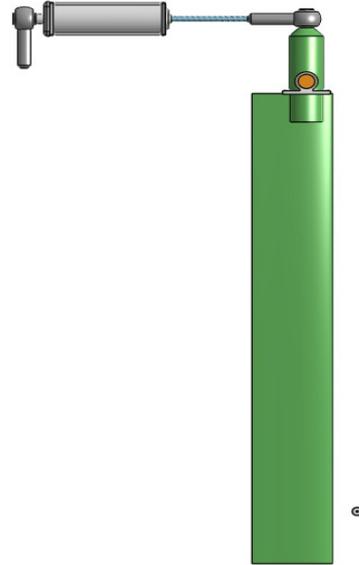


Illustration 8: Modèle 3D de la solution avant 1

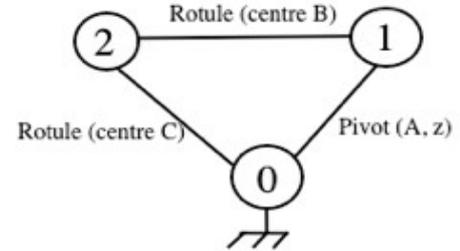
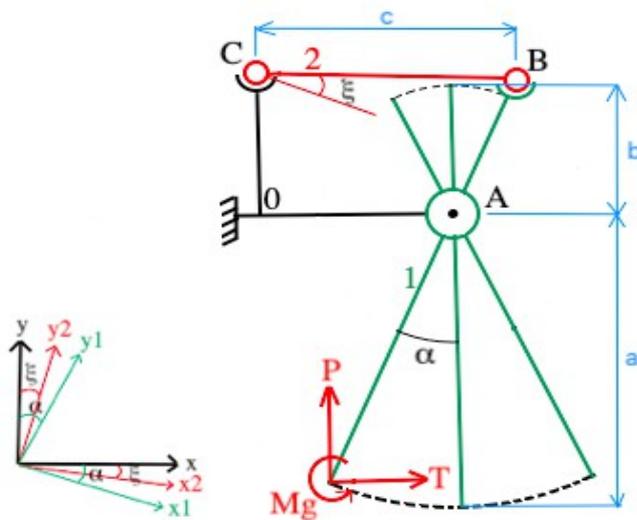
Etude statique

En utilisant le principe fondamentale de la statique:
(calculs détaillés en annexe)

Théorème du moment statique :

- L'équilibre de la pièce 1 en A
- L'équilibre de la pièce 2 en B

La distance c correspondant à la course maximale du vérin.



Concernant les conditions aux limites, l'angle α est dans l'intervalle $[-10^\circ; 10^\circ]$.

Selon les différentes liaisons de cette proposition technique, et après un état de l'art des différentes solutions de liaisons existantes (*voir en annexe de calculs*), on pourra choisir les solutions les plus adéquates pour cette solution technique, c'est-à-dire qui respectent les exigences demandées.

Applications numériques :

D'après les calculs sur le foil (*en annexe calcul*):

$$P = 173,3 \text{ N}$$

$$T = 23,9 \text{ N}$$

$$M_0 = -18,4 \text{ N.m}$$

On obtient : (*valeur en mm*)

$$(a+b) = 1051,4 \text{ mm}$$

$$c = 295,6 \text{ mm}$$

En position droite, c'est-à-dire avec un angle de 0° , on a $c = 281,5 \text{ mm}$. Et avec un angle de -10° , on obtient $c = 267,4 \text{ mm}$.

On en déduit : (*en N*)

$$T_{0/1} = \begin{bmatrix} -348,6 & 0 \\ -747,7 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ en } A \quad T_{1/2} = \begin{bmatrix} 372,4 & 0 \\ 574,5 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ en } B \quad T_{2/0} = \begin{bmatrix} -348,6 & 0 \\ -747,7 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ en } C$$

On peut donc en déduire que l'effort maximal du vérin ($372,4 \text{ N}$) est nécessaire pour le déplacement du foil à 10° .

b. Solution 2 (système avec glissières en arc de cercle + moteur électrique)

Modèle 3D / Etude statique

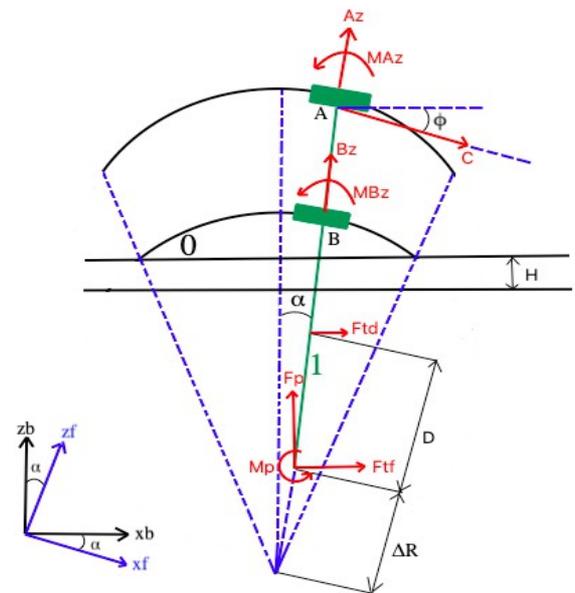
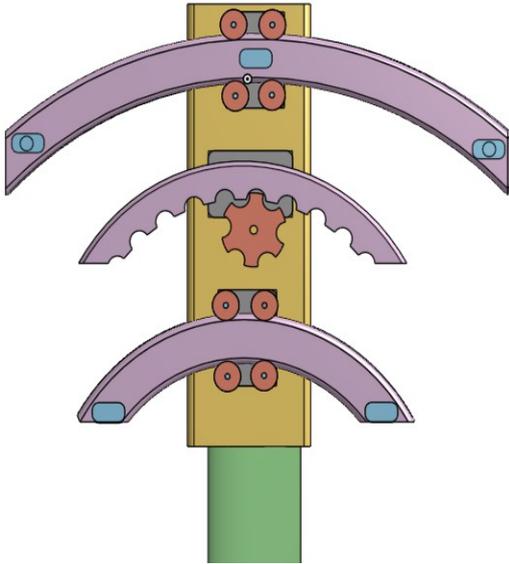


Illustration 9: Modèle 3D de la solution avant 2

Le support du foil est tenu par deux appuis en A et B, l'appui A et l'appui B sont des glissières à piste courbe.

- F_p → Force de portance
- M_p → Moment piqueur
- F_{tp} et F_{td} → forces de trainés
- A_z , B_z , M_{Az} , M_{Bz} → Réaction au appuis
- C → Force pour le déplacement du foil

D'après les calculs sur le foil (en annexe):

$$\alpha = 10^\circ$$

$$P = 173,3 \text{ N}$$

$$T = 23,9 \text{ N}$$

$$M_o = -18,4 \text{ N.m}$$

$$(S+R-\Delta R) = 1253 \text{ mm}$$

On obtient :

$$\Delta R = 51 \text{ mm}$$

$$R = 1418 \text{ mm}$$

$$S = 114 \text{ mm}$$

Ainsi, on obtient un rayon de courbure d'environ $1,418 \text{ m}$. De plus, l'effort C maximal est de l'ordre de 430 N . Pour la suite du projet, il serait judicieux de trouver un système qui permettra l'actionnement du foil. Certains systèmes existent déjà, tels que le système avec engrenages actionné par un moteur électrique, ou le système avec des cordes reliées à des poulies actionné par un winch électrique.

2.1.2.2 Solutions techniques des foils arrière

a. Solution 1 (système avec deux vérins électriques)

Modèle 3D

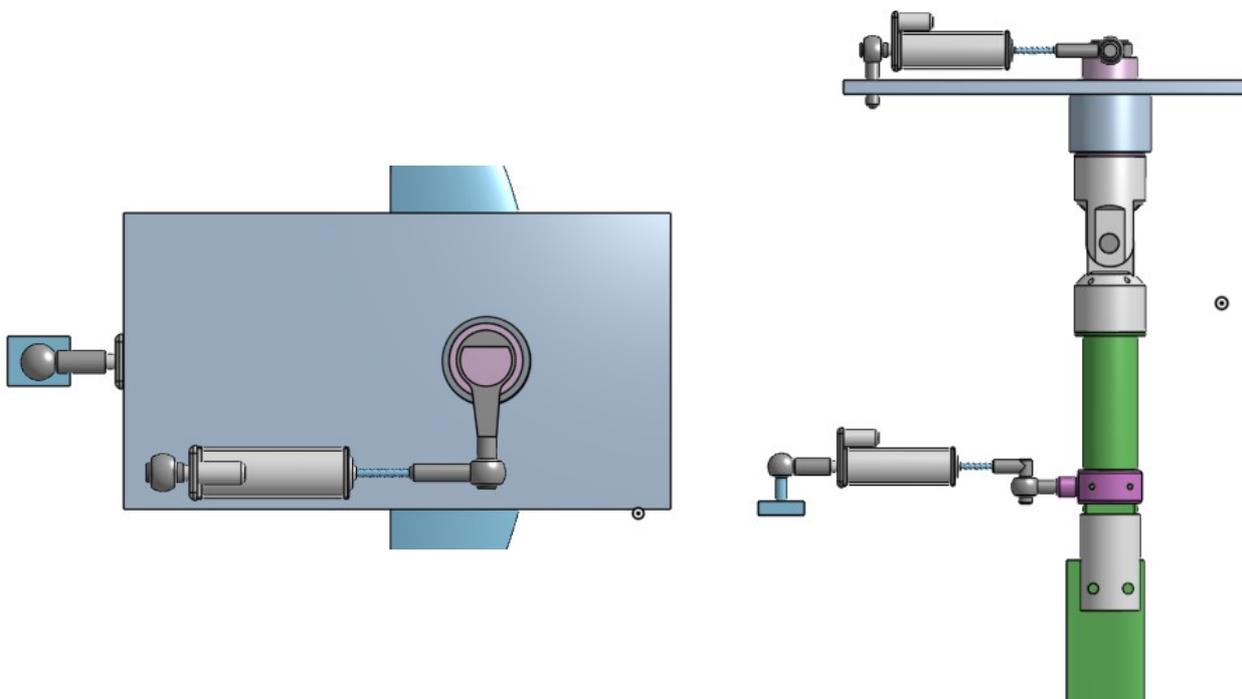


Illustration 10: Modèle 3D de la solution arrière 1

$$T_{0/1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 123,3 & -0,7 \\ -7 & 0,7 \end{bmatrix} \text{ en } A$$

$$T_{1/2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -123,3 & 0,7 \\ 7 & -0,7 \end{bmatrix} \text{ en } B$$

$$T_{2/3} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 123,3 & 0 \\ 7 & 0 \end{bmatrix} \text{ en } C$$

$$T_{3/4} = \begin{bmatrix} 23,9 & -10,4 \\ -296,6 & 10,9 \\ 7 & 0 \end{bmatrix} \text{ en } D$$

$$T_{4/5} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -527 & 0 \\ 159,7 & 0 \end{bmatrix} \text{ en } F$$

$$T_{4/0} = \begin{bmatrix} -23,9 & -48,4 \\ 823,6 & 0 \\ -166,7 & -61,6 \end{bmatrix} \text{ en } E$$

$$T_{6/0} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -557 & 5,9 \\ 159,7 & -1,8 \end{bmatrix} \text{ en } H$$

$$T_{5/6} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 557 & -16,9 \\ -159,7 & 55,9 \end{bmatrix} \text{ en } G$$

Cela nous permet de déterminer les efforts dans les vérins ($T_{1/2}$ et $T_{5/6}$), et ainsi de choisir les vérins adéquates pour ce système.

b. Solution 2 (système avec vérin électrique + engrenages)

Modèle 3D

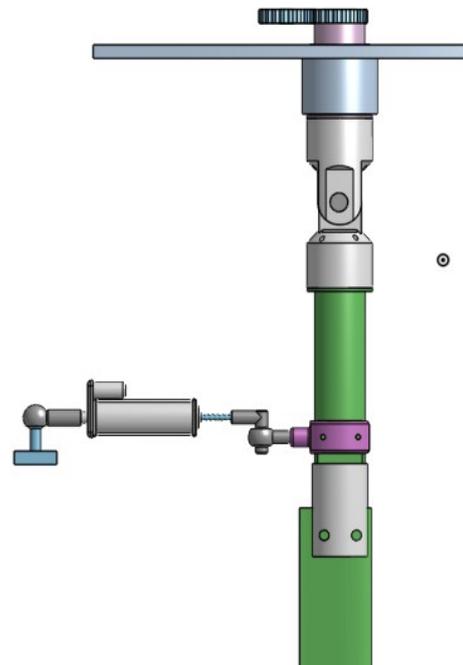
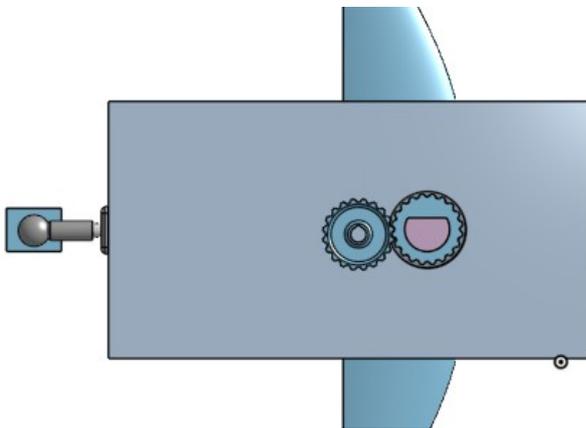
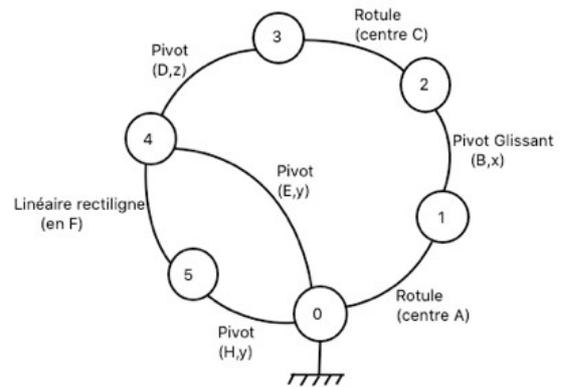
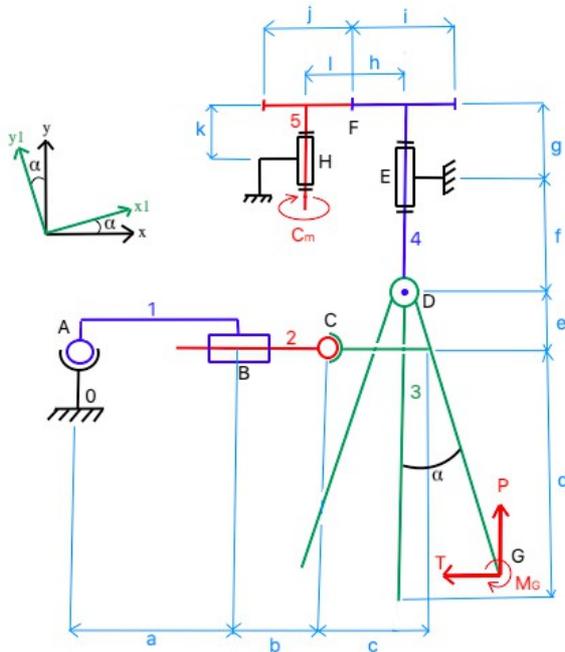


Illustration 11: Modèle 3D de la solution arrière 2

Etude statique



D'après les calculs sur le foil (en annexe):

$$\alpha = 10^\circ$$

$$P = 173,3 \text{ N}$$

$$T = 23,9 \text{ N}$$

$$M_o = -18,4 \text{ N.m}$$

$$C_m = 0,5 \text{ N.m}$$

Dimensions :

$$a+b = 212 \text{ mm}$$

$$c = 587 \text{ mm}$$

$$d+e = 1051,3 \text{ mm}$$

$$f+g = 1043 \text{ mm}$$

$$i = j = 119 \text{ mm}$$

Après cette étude statique et le dimensionnement des différentes pièces qui composent notre système, on pourra faire un choix des liaisons dans l'état de l'art (*en annexe état de l'art*).

Notre modèle 3D, nous montre déjà un aperçu des liaisons, notamment avec un cardan au point B, de l'utilisation de roulements coniques au point E et des engrenages qui lieront la pièce 5 à la pièce 6 au point F. Le vérin qui sera utilisé sera sans aucun doute un vérin marin, déjà utilisé dans le domaine nautique, notamment sur les voiliers de course.

$$T0/1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 552 & 0 \\ -6,2 & 0 \end{bmatrix} \text{ en } A$$

$$T1/2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -552 & 0,7 \\ 6,2 & 58,5 \end{bmatrix} \text{ en } B$$

$$T2/3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 552 & 0 \\ -6,2 & 0 \end{bmatrix} \text{ en } C$$

$$T3/4 = \begin{bmatrix} 23,9 & -3,1 \\ -725 & -2,3 \\ 6,2 & 0 \end{bmatrix} \text{ en } D$$

$$T4/5 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 2,5 \\ -2,6 & 0 \end{bmatrix} \text{ en } F$$

$$T4/0 = \begin{bmatrix} -23,9 & 3,9 \\ 725 & 0 \\ -3,6 & 0 \end{bmatrix} \text{ en } E$$

$$T5/0 = \begin{bmatrix} 0 & 5,1 \\ 0 & 0 \\ 2,6 & 0 \end{bmatrix} \text{ en } H$$

Cela nous permet de déterminer les efforts dans le vérin (T1/2) et ainsi de choisir le vérin adéquat pour ce système. Et de plus, on a les efforts dans la liaison pivot entre la pièce 4 et 0, qui nous permettront de dimensionner les roulements dans la liaison.

2.2. L'aile supérieure

2.2.1. Modèle de l'aile supérieure

Caractéristiques :

Profil : Clark Y
 Longueur : 2300 mm
 Largeur : 2600 mm
 Hauteur max : 267,29 mm
 Masse :

Matériaux	Masse volumique (g/cm ³)	Masse (kg)
Aluminium	2,7	-
Fibre de verre	2,6	-
Fibre de carbone	1,8	-

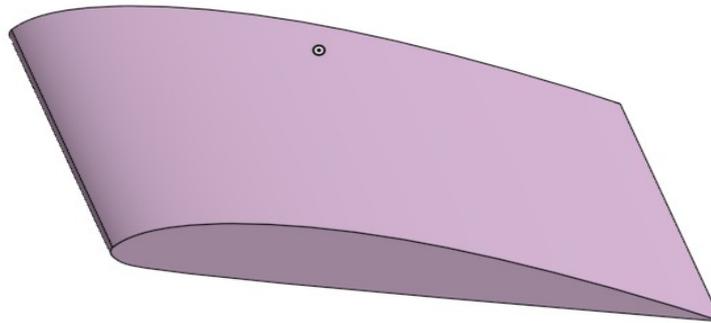


Illustration 12: Aile supérieure de l'ASV

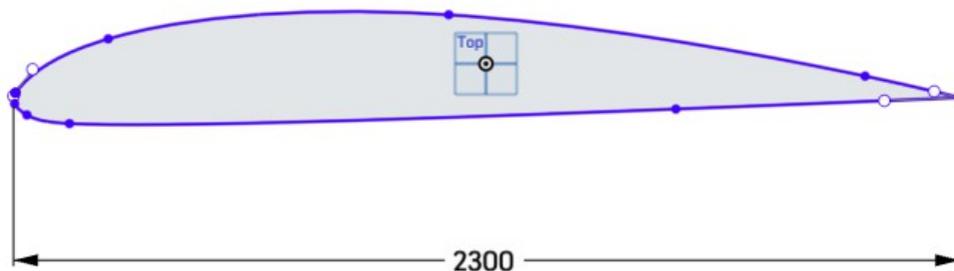


Illustration 13: Esquisse de l'aile supérieure

L'aile supérieure est l'équivalent d'une voile sur un voilier, l'aile sur l'ASV est rigide et se rapproche des ailes de kitesurf. Cette aile sera pilotée grâce à des winchs électriques et des poulies. Le pilotage de l'aile sera testé avec la plate-forme de test de l'aile qu'on pourra voir dans la suite du projet.

2.2.2. Plate-forme de test de l'aile supérieure



Illustration 14: Plate-forme de test de l'aile supérieure

Le but de la plate-forme de test est le pilotage de l'aile supérieure. Cette plate-forme sera équipée de l'anémomètre fixé à l'avant, puis de quatre winchs électriques et de quatre poulies. Les poulies et les winchs permettront le pilotage de l'aile. En effet, sur les quatre extrémités de l'aile il y aura une corde qui passera dans la poulie et sera pilotée par un winch. Les premiers points à prendre en compte sont la position des poulies et des winchs, pour que les positions de l'aile voulues soient respectées. Le second point est l'asservissement des winchs qui sera fait par les roboticiens.

2.3. Plate-forme

Caractéristiques :

Profil : NACA4418

Longueur : 2100 mm

Largeur : 1500 mm

Hauteur max : 364,5 mm

Masse :

Matériaux	Masse volumique (g/cm ³)	Masse (kg)
Aluminium	2,7	-
Fibre de verre	2,6	-
Fibre de carbone	1,8	-

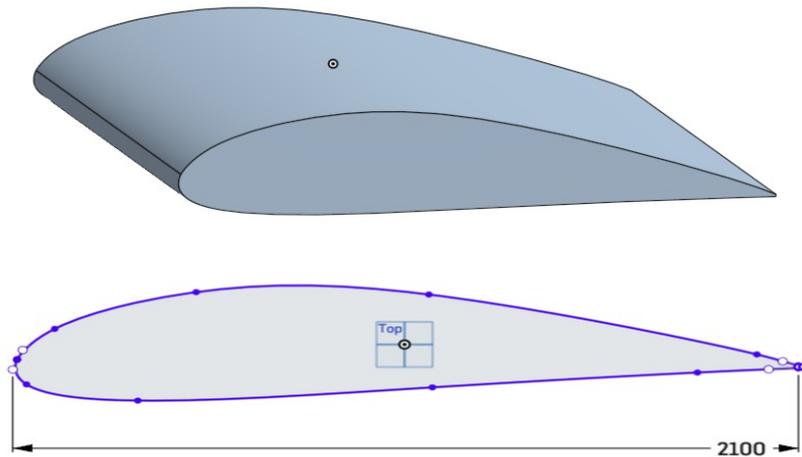


Illustration 15: Plate-forme et esquisse

La plate-forme de l'ASV comme le montre l'illustration ci-dessus, sépare les deux flotteurs de l'ASV. Cette plate-forme a été modélisée selon le profil NACA4418, pour avoir un bon aérodynamisme du prototype. De plus, c'est sur cette plate-forme que se fixera la boîte électronique du prototype. Cette boîte sera positionnée au centre de masse du prototype.

3. Autres composants du modèle

Caractéristiques :



Illustration 16: Support anémomètre

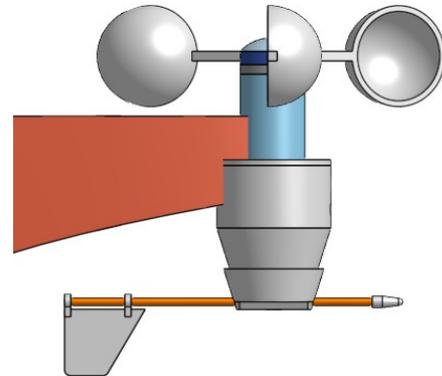


Illustration 17: Anémomètre

J'ai modélisé un support pour l'anémomètre. Le support se positionne à l'avant du bateau, et se fixe sur le mât et la plate-forme. L'anémomètre a été récupéré et fixé sur le support lors de l'assemblage.

De plus les foils arrière possèdent chacun un moteur électrique (masse : 3 Kg). Ces moteurs permettent la propulsion du bateau, et ces batteries rechargées par les panneaux solaires recouvrent la surface supérieure de l'aile supérieure.

4. Assemblage

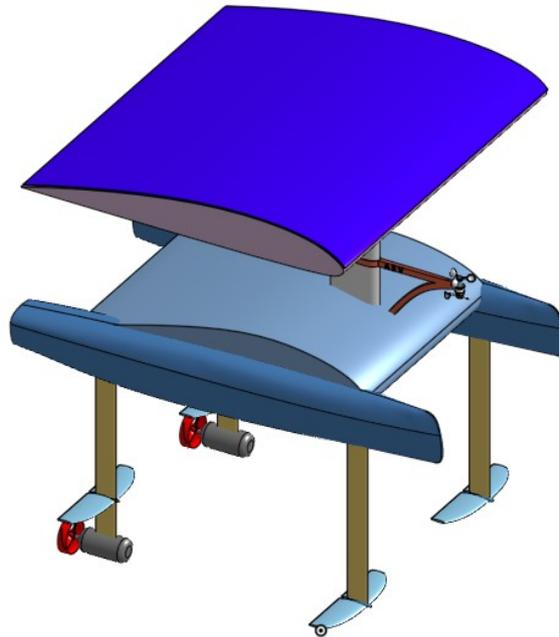


Illustration 18: Assemblage de l'ASV

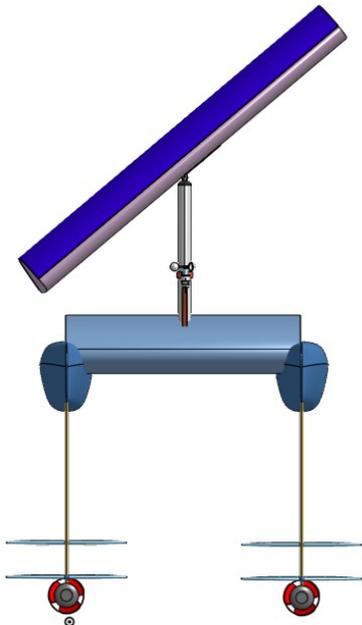


Illustration 19: Aile en position 40° selon l'axe verticale

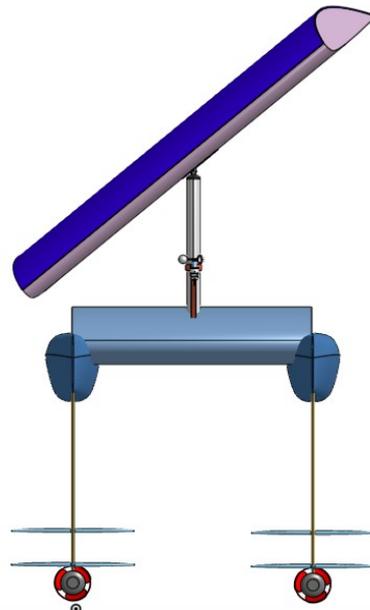


Illustration 20: Aile à 40° selon l'axe vertical et 10° selon l'axe du mât

L'aile supérieure a une double rotation, une rotation selon l'axe vertical du mât (rotation de plus ou moins 10°). La seconde rotation est selon l'axe horizontal au niveau de la fixation de l'aile sur le mât (rotation de plus ou moins 45°). La liaison entre l'aile supérieure et le mât est faite avec un pied de mât cardan (*voir annexe*). De plus l'aile supérieure possède le panneau solaire sur toute sa surface, ce qui permettra l'alimentation de l'ASV.

Après la modélisation et le redimensionnement de certaines pièces, l'assemblage c'est fait sans liaisons entre les différentes pièces pour avoir un aspect visuel de l'ASV. Avant la mise en place des liaisons entre les pièces, et des solutions techniques d'articulations des foils, le système doit être testé et validé par l'ensemble des collègues travaillant sur le projet. La suite du projet est de proposer des solutions techniques pour les foils.

5. Centre de masse de l'ASV

Centre de masse d'un des foils avant (vue de coté):

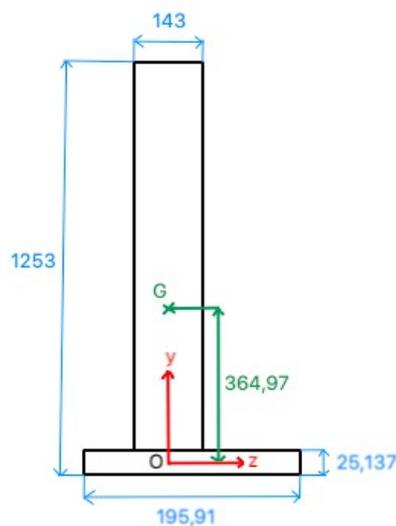


Illustration 21: Centre de masse foil avant (vue de coté)

Centre de masse de l'ASV :

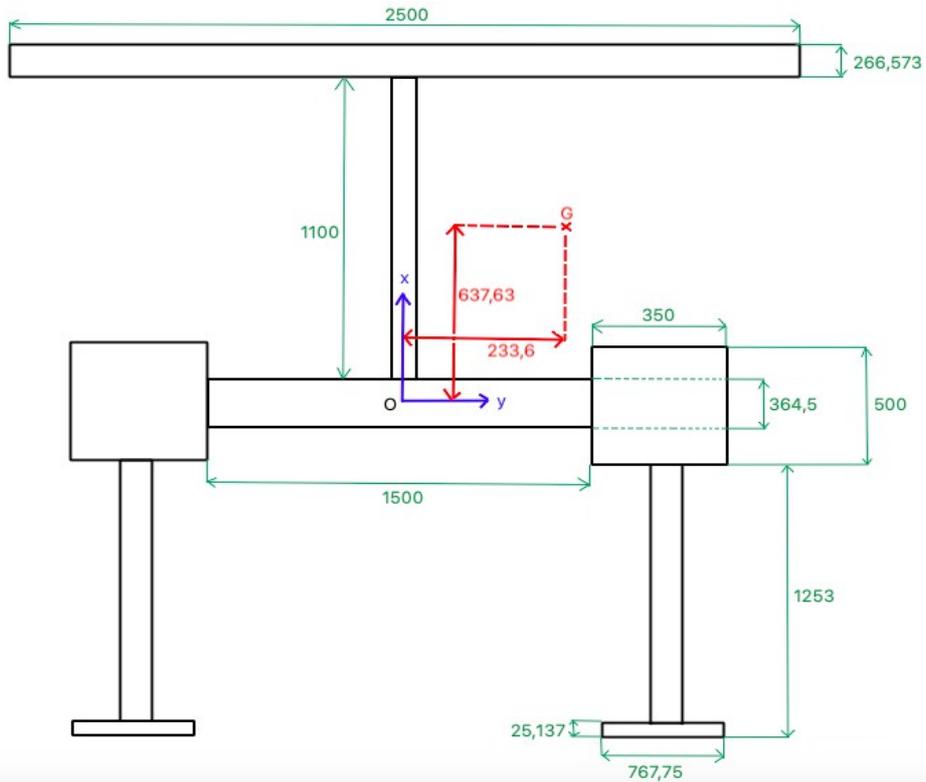


Illustration 22: Centre de masse de l'ASV (vue de face)

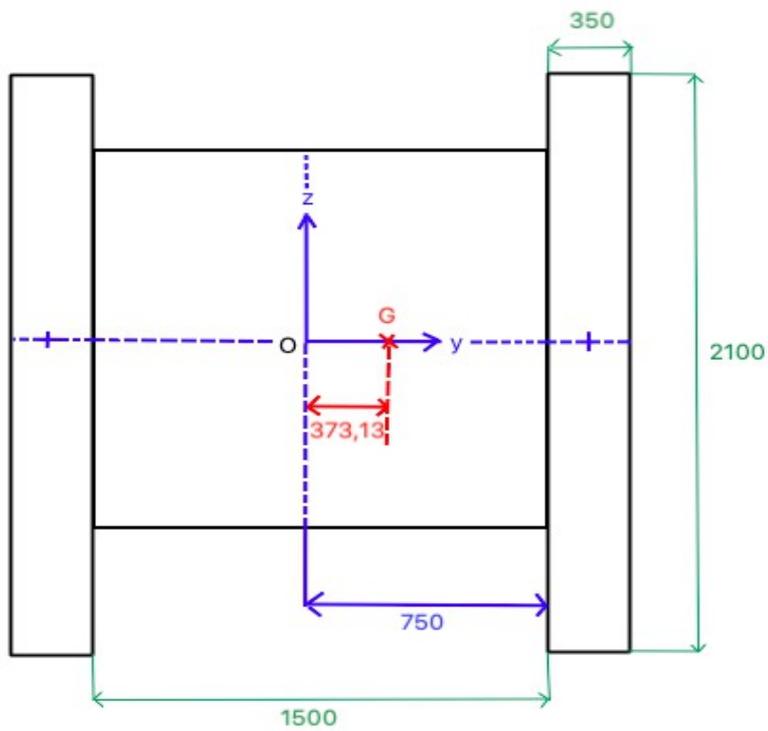


Illustration 23: Centre de masse de l'ASV (vue du dessus)

On constate que le centre de masse ne se situe pas sur le bateau même, mais selon les coordonnées $637,3 x + 233,6 y$. De plus, le centre de masse du foil ne se situe pas à la liaison entre les ailes et la jambe, mais sur la jambe selon $364,67 y$.

Conclusion

Lors de ce projet j'ai dû modéliser le nouveau design de l'ASV, déterminer des solutions techniques pour l'articulation de ses foils et les dimensionner. Grâce à ce projet j'ai pu améliorer mon niveau de modélisation sur CAO et apprendre de nouvelles choses notamment dans le domaine nautique.

Le but final de ce projet fut de designer le nouveau prototype de l'ASV, pour cela il a fallu modéliser en 3D, avec un logiciel de CAO (SolidWorks, Onshape), puis trouver et dimensionner des systèmes pour l'articulation des foils. Après quatre propositions de solutions et après dimensionnement, deux solutions ont été retenues (une solution pour les foils avants et une pour les foils arrières). Le dimensionnement va également permettre de choisir les différentes pièces nécessaires pour les systèmes sélectionnés (vérins, engrenages, etc.).

En conclusion, ce projet a été bénéfique car il m'a permis d'approfondir mes connaissances théoriques de calcul et de modélisation. De plus, j'ai pu découvrir le domaine de la recherche, et étant passionné par le domaine nautique, ce fut un plaisir de travailler sur ce projet.

Annexes

1. Liens

Pied de mât cardan :

<https://www.hotmer.com/A-106913-pied-de-mat-cardan-unifiber-u-pin.aspx>

Calculs solution 2 avant :

DELGADO RODRÍGUEZ, Enrique et MARTIN, Thibault. *Conception d'un système de stabilisation de vol pour un catamaran Classe C*. 2014. Thèse de maîtrise.

Clark HY (informations airfoil) :

<http://www.airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=clarkyh-il>

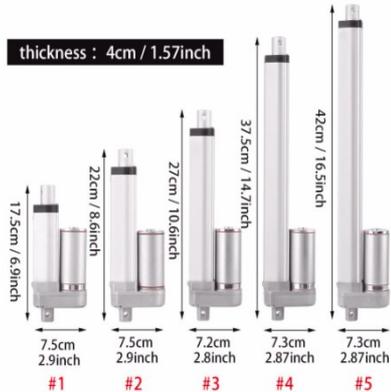
2. Annexe (état de l'art)

Solutions existantes :

Vérins électriques :

Systemes	Caractéristiques																						
 <p> https://fr.rs-online.com/web/p/verins-electriques/8855325?cm_mmc=FR-PLA-DS3A--google--PLA_FR_FR_(FR:Whoop!)&utm_source=google&utm_medium=cpc_bgs&utm_content=frank&utm_campaign=ssc-frg-all-0911&ad_id=381892803114&gclid=CjwKCAjw7-P1BRA2EiwAXoPWA95Lv_uhj-9cRMKIEZiHTh5QQiEkKJ0C3IHpxfNmbae5Lu2QLj7DRoCseQQAyD_BwE&gclid=aw.ds </p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Attribut</th> <th>Valeur</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Charge maximum</td> <td>4500N</td> </tr> <tr> <td>Vitesse maximum</td> <td>14 → 19mm/s</td> </tr> <tr> <td>Longueur de course maximale</td> <td>305mm</td> </tr> <tr> <td>Type d'actionnement</td> <td>Vis à billes</td> </tr> <tr> <td>Tension d'entrée</td> <td>24V c.c.</td> </tr> <tr> <td>Série</td> <td>CAHB-21</td> </tr> </tbody> </table>	Attribut	Valeur	Charge maximum	4500N	Vitesse maximum	14 → 19mm/s	Longueur de course maximale	305mm	Type d'actionnement	Vis à billes	Tension d'entrée	24V c.c.	Série	CAHB-21								
Attribut	Valeur																						
Charge maximum	4500N																						
Vitesse maximum	14 → 19mm/s																						
Longueur de course maximale	305mm																						
Type d'actionnement	Vis à billes																						
Tension d'entrée	24V c.c.																						
Série	CAHB-21																						
 <p> https://fr.rs-online.com/web/p/actionneurs-electriques-miniatures-tige/1808409?cm_mmc=FR-PLA-DS3A--google--PLA_FR_FR_(FR:Whoop!)+Pneumatique+%26+Hydraulique+et+Transmission+de+puissance_Experiment--(FR:Whoop!)+Actionneurs+electriques+miniatures+-+Tige--PRODUCT_GROUP&matchtype=&pla-306008713172&gclid=CjwKCAjw7-P1BRA2EiwAXoPWA0qB7P5c2y0qnNrdiGiABEdSkZVOz9Jioz6a6sSvVfGss8eifGSyYhoCYigQAyD_BwE&gclid=aw.ds </p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Attribut</th> <th>Valeur</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Série</td> <td>PQ12</td> </tr> <tr> <td>Vitesse maximale sans charge</td> <td>10mm/s</td> </tr> <tr> <td>Longueur de course maximale</td> <td>20mm</td> </tr> <tr> <td>Tension d'entrée</td> <td>6V c.c.</td> </tr> <tr> <td>Force maximale levage</td> <td>50N</td> </tr> <tr> <td>Cycle</td> <td>20%</td> </tr> <tr> <td>Gamme IP</td> <td>IP54</td> </tr> <tr> <td>Longueur totale fermé</td> <td>47.5mm</td> </tr> <tr> <td>Poids</td> <td>15g</td> </tr> <tr> <td>Commande</td> <td>R - Servo RC linéaire</td> </tr> </tbody> </table>	Attribut	Valeur	Série	PQ12	Vitesse maximale sans charge	10mm/s	Longueur de course maximale	20mm	Tension d'entrée	6V c.c.	Force maximale levage	50N	Cycle	20%	Gamme IP	IP54	Longueur totale fermé	47.5mm	Poids	15g	Commande	R - Servo RC linéaire
Attribut	Valeur																						
Série	PQ12																						
Vitesse maximale sans charge	10mm/s																						
Longueur de course maximale	20mm																						
Tension d'entrée	6V c.c.																						
Force maximale levage	50N																						
Cycle	20%																						
Gamme IP	IP54																						
Longueur totale fermé	47.5mm																						
Poids	15g																						
Commande	R - Servo RC linéaire																						
 <p> https://fr.banggood.com/DC-12V-1500N-6mms-Linear-Actuator-Motor-50mm-500mm-Aluminum-Alloy-IP54-2-20-Inch-Linear-Actuator-p-1496783.html?gclid=CjwKCAjw7-P1BRA2EiwAXoPWAz7SfGbzXN2H- </p>	<p> Matériel: alliage d'aluminium Capacité de charge: 1500N Vitesse: 6mm / s Tension d'entrée: 12V DC Longueur de trait: 50mm / 2 inch; 100mm / 4 inch; 200mm / 8 inch; 300 mm / 12 pouces; 400 mm / 16 pouces; 500mm / 20 inch Cycle de service: 10% </p>																						

sB5OuZdcDtZ7iLFdhhM0lbAseL17FI0njCH3hjR5RoC56AQAvD_BwE&ID=49640&cur_warehouse=USA



https://fr.aliexpress.com/item/32971502034.html?src=google&src=google&albch=shopping&acnt=494-037-6276&isd1=y&slnk=&plac=&mtctp=&albbt=Gpoogle_7_shopping&aff_atform=google&aff_short_key=UmeMJZVf&albagn=888888&bsy=Y&albcpr=7475390357&albag=84967726950&trgt=853557905187&crea=fr32971502034&netw=u&devi ce=c&albpq=853557905187&albpd=fr32971502034&gclid=CjwKCAjw7-P1BRA2EiwAXoPWA-t1CrmpcRGDUmESYBnwXcXp8rog1piX4Kko00ic9V0hX9qpiJPtcBoCXmWQAvD_BwE&gclsrc=aw.ds

Matière: Métal

Tension: cc 12 V

Poussée/traction maximale: env. 150 kg/140 kg

Longueur de course (en option): env. 50mm/1.97 pouces, 100mm/3.94 pouces, 150mm/5.91 pouces, 250mm/9.84 pouces, 300mm/11.81 pouces

Vitesse à vide: 6 mm/s

Relation de vitesse et de traction: 5 mm/s (kg)/-50 s (50 kg)

Température ambiante: -26 ° c à + 50 ° c

Niveau de protection Standard: IP54

Interrupteur de course intégré: oui

Couleur: Argent

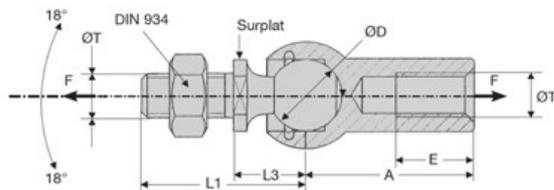
Poids: 723g (50mm), 846g (100mm), 947g (150mm), 1136g (250mm), 1215g (300mm)

Liaisons rotules :

Systèmes



Photos non contractuelles



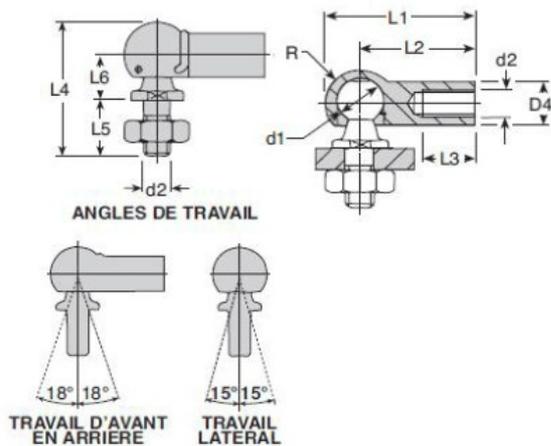
<https://shop.hpceurope.com/fr/produit.asp?prid=1059>

Caractéristiques

Réf.	ØT	A	L1	L3	E	Charge axiale F (N)	ØD	Plan 3D	Prix ht
IBJ-5	M5	22	19,2	9	10,2	30	8	3D	5,30 €
IBJ-6	M6	25	23,5	11	11,5	40	10	3D	6,80 €
IBJ-8	M8	30	29,5	13	14,0	60	13	3D	7,19 €
IBJ-10	M10	35	36,0	16	15,5	80	16	3D	9,96 €
IBJ-14x1.5	M14 x 1,5	45	48,0	20	21,5	100	19	3D	25,43 €



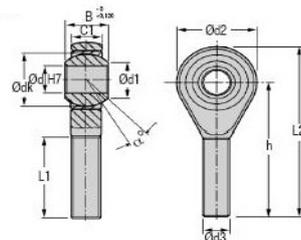
Photos non contractuelles



Réf.	Sens du filetage	d2	L2	L6	d1	D4	Plan 3D	Prix ht
Filtrer par réf	Filtrer par Sens d	Filtrer p						
RAS5/SS	RH	M5	22,0	9,0	8	8	3D	7,63 €
RAS6/SS	RH	M6	25,0	11,0	10	10	3D	7,80 €
RAS8/SS	RH	M8	30,0	13,0	13	13	3D	9,96 €
RAS10/SS	RH	M10	35,0	16,0	16	16	3D	17,66 €
RAS12/SS	RH	M12	35,0	16,0	16	16	3D	20,69 €

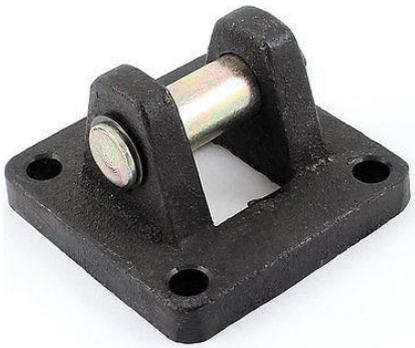


Photos non contractuelles



Réf.	Ød	Ød3	Ød2	Charge statistique radiale (daN)	B	C1	L2	Plan 3D	Prix ht
Filtrer par	Filtre	Filtre	Filtre	Filtrer par Charge sta	Filtr	Filtre	Filtre		
CMM.00.05/LH	5	M5 x 0,8	18	300	8	6,00	42	3D	22,49 €
CMM.00.06/LH	6	M6 x 1	20	400	9	6,75	46	3D	13,77 €
CMM.00.08/LH	8	M8 x 1,25	24	800	12	9,00	54	3D	14,54 €
CMM.00.10/LH	10	M10 x 1,5	28	1 300	14	10,50	62	3D	16,33 €
CMM.00.12/LH	12	M12 x 1,75	32	1 700	16	12,00	70	3D	19,80 €
CMM.00.16/LH	16	M16 x 2	42	4 800	21	15,00	84	3D	43,13 €

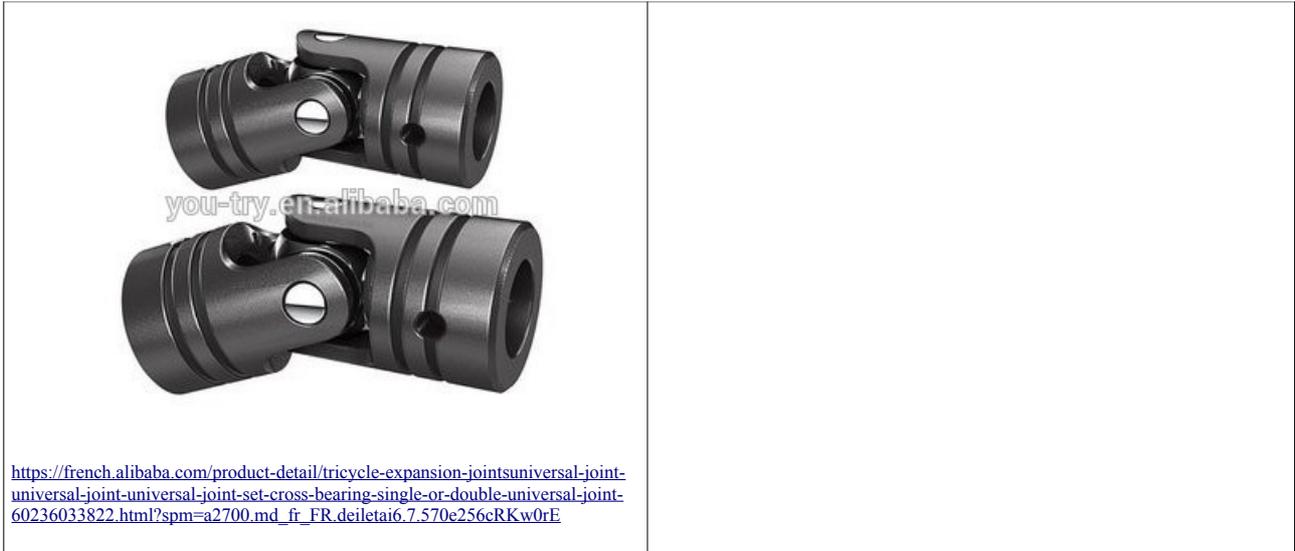
Liaisons pivots :

Systèmes	Caractéristiques																				
 <p>http://www.resma.com/supports/2620-support-fixe-06mm-j200090.html</p>	<p>Ø6mm</p> <p>F1= 1200N maximum</p>																				
 <p>https://fr.aliexpress.com/item/2019321299.html</p>	<table border="1"> <tr> <td>Nom du produit</td> <td>Cylindre chape support de montage</td> </tr> <tr> <td>Matériel</td> <td>Métal</td> </tr> <tr> <td>Chape Pin diamètre</td> <td>18mm/0.7"</td> </tr> <tr> <td>L'écart entre deux plaque intérieure</td> <td>30mm/1.2"</td> </tr> <tr> <td>Fixation diamètre du trou</td> <td>10mm/0.4"</td> </tr> <tr> <td>Trou distance (sur les centres)</td> <td>75mm/3"</td> </tr> <tr> <td>Taille totale</td> <td>90x90x60mm/3.5 "x 3.5" x 2.4 "(L * W * H)</td> </tr> <tr> <td>Couleur</td> <td>Noir</td> </tr> <tr> <td>Poids</td> <td>938g</td> </tr> <tr> <td>Contenu de l'emballage</td> <td>1 x Cylindre chape support de montage</td> </tr> </table>	Nom du produit	Cylindre chape support de montage	Matériel	Métal	Chape Pin diamètre	18mm/0.7"	L'écart entre deux plaque intérieure	30mm/1.2"	Fixation diamètre du trou	10mm/0.4"	Trou distance (sur les centres)	75mm/3"	Taille totale	90x90x60mm/3.5 "x 3.5" x 2.4 "(L * W * H)	Couleur	Noir	Poids	938g	Contenu de l'emballage	1 x Cylindre chape support de montage
Nom du produit	Cylindre chape support de montage																				
Matériel	Métal																				
Chape Pin diamètre	18mm/0.7"																				
L'écart entre deux plaque intérieure	30mm/1.2"																				
Fixation diamètre du trou	10mm/0.4"																				
Trou distance (sur les centres)	75mm/3"																				
Taille totale	90x90x60mm/3.5 "x 3.5" x 2.4 "(L * W * H)																				
Couleur	Noir																				
Poids	938g																				
Contenu de l'emballage	1 x Cylindre chape support de montage																				
 <p>https://www.mabeo-direct.com/A-486480-parker-chape-arriere-pour-verin-plq</p>																					

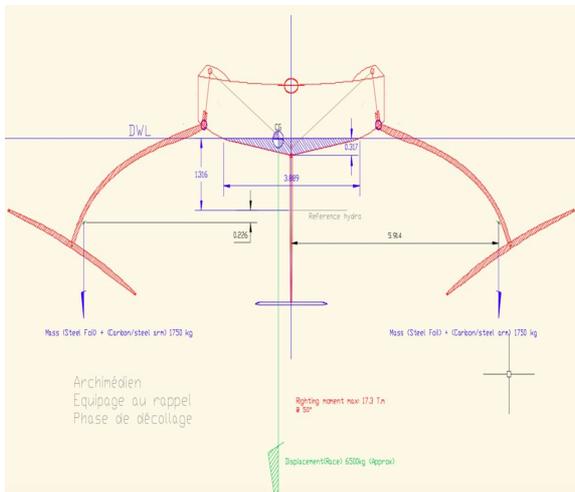
 <p> https://www.usinenouvelle.com/expo/chape-de-tringlerie-avec-axe-et-rondelle-p159782.html </p>	<p>MATIERE - Acier 11SMnPb30 galvanisé. - Filetage à droite. - DIN71751. FOURNITURE - Axe - Rondelle - Goupille</p>
 <p> https://www.directindustry.fr/prod/norelem-elements-standard-mecaniques/product-7884-1942805.html </p>	

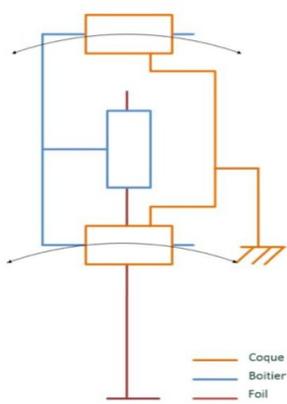
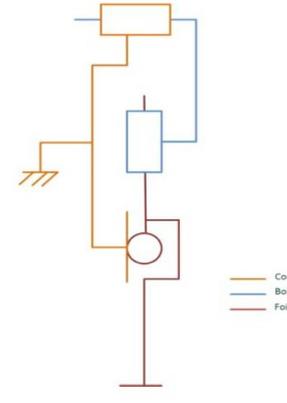
Cardans :

Systèmes	Caractéristiques
 <p> https://french.alibaba.com/product-detail/cardan-joint-hand-socket-accessory-universal-swivel-joint-single-or-double-universal-joint-60227300724.html </p>	



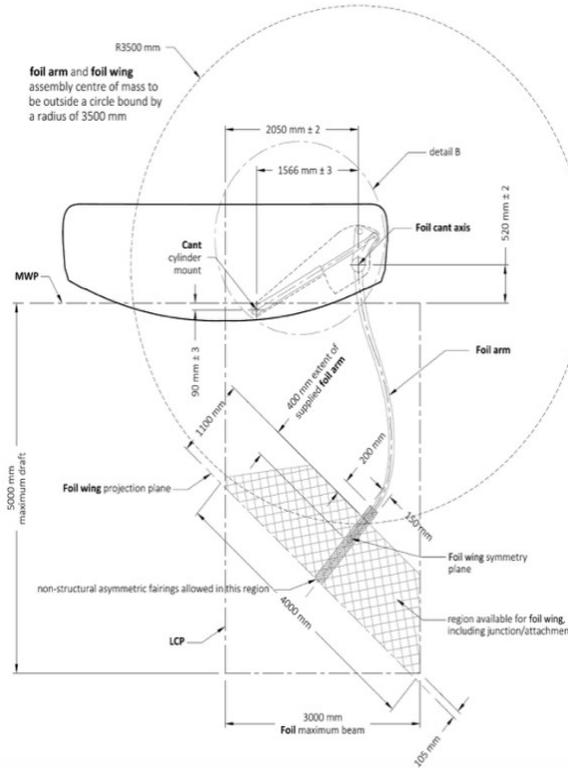
Etat de l'art solutions techniques :

Liens bibliographiques	Systèmes	Actionnement possible
<p> https://www.uncl.com/2019/05/17/techniques-innovations/le-nouvel-ac-75-nz-par-jean-sans-partie-5-analyse-des-parametres-de-vol/ </p>		<p>Système avec des vérins hydrauliques</p>

<p> DELGADO RODRÍGUEZ, Enrique et MARTIN, Thibault. <i>Conception d'un système de stabilisation de vol pour un catamaran Classe C.</i> 2014. Thèse de maîtrise. </p>		<p> Système pignon/ crémaillère actionné avec un moteur électrique </p>
<p> DELGADO RODRÍGUEZ, Enrique et MARTIN, Thibault. <i>Conception d'un système de stabilisation de vol pour un catamaran Classe C.</i> 2014. Thèse de maîtrise. </p>		<p> Système pignon/ crémaillère actionné avec un moteur électrique </p>

<http://www.cuplegend.com/ac75-foils-basculants-jauge-expliquee-martin-fisher-partie-3-5/>

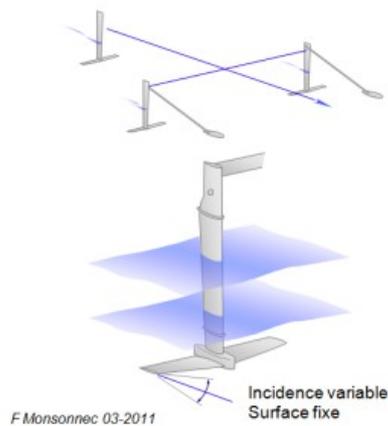
<http://www.cuplegend.com/jauge-de-lac75-expliquee-jean/>



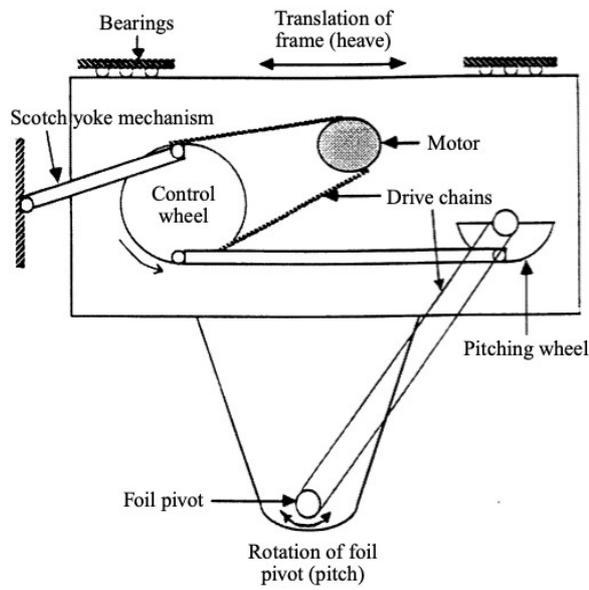
Système avec vérin hydroliques

http://foilers7.rssing.com/channel/30478684/all_p3.html

Foils de deuxième génération
 Foils asservis
 (Force 8 1976 - Philly 1984)

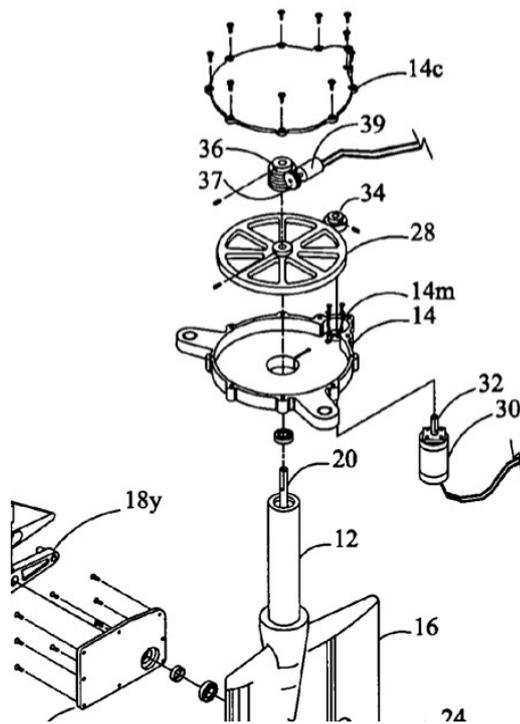


ANDERSON, J. M.,
 STREITLIEN, K.,
 BARRETT, D. S., *et al.*
 Oscillating foils of high propulsive efficiency. *Journal of Fluid mechanics*, 1998, vol. 360, p. 41-72.



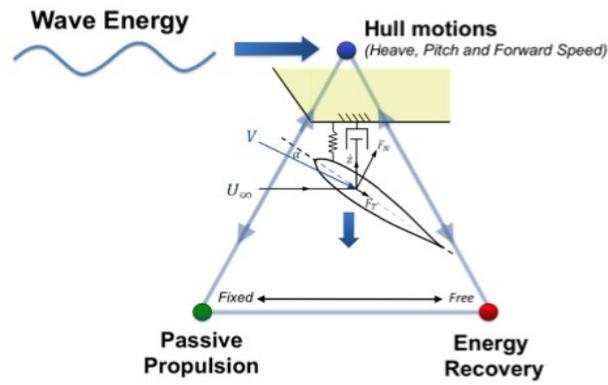
Système avec moteur électrique

WALKER, Jeff. *Boat rudder with integrated dynamic trim foils*. U.S. Patent No 7,568,443, 4 août 2009.



Système de moteur électrique

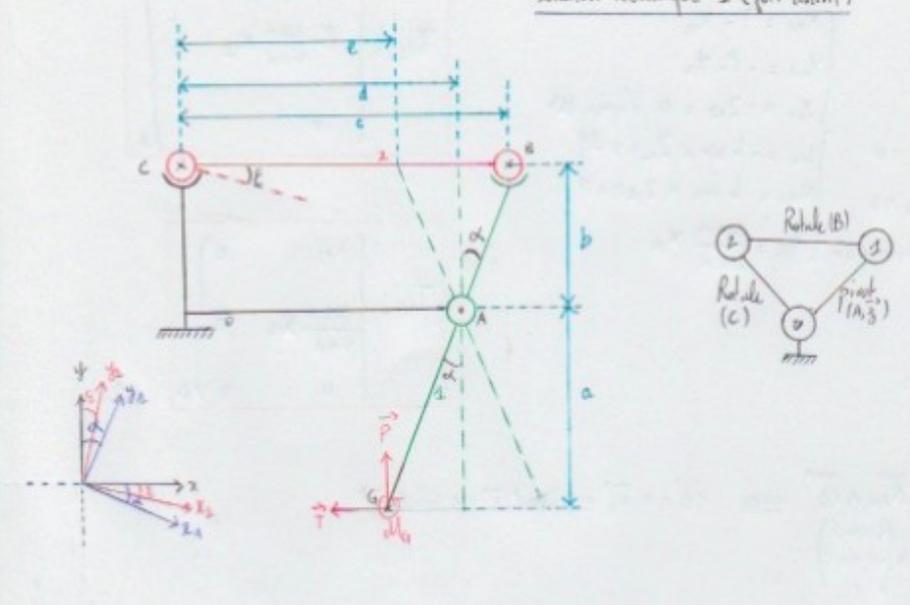
BOWKER, J. A.,
 TOWNSEND, N. C.,
 TAN, M., *et al.* Experimental analysis
 of submerged flapping
 foils; implications for
 autonomous surface
 vehicles (ASVs).
 In : *OCEANS 2016
 MTS/IEEE Monterey.*
 IEEE, 2016. p. 1-10.



Système vérins

3. Annexe de calculs

Solution technique 1 (feuille avant)



$$\begin{cases} \vec{x}_1 = \cos \alpha \vec{x} - \sin \alpha \vec{y} \\ \vec{y}_1 = \sin \alpha \vec{x} + \cos \alpha \vec{y} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \vec{x}_2 = \cos \alpha \vec{x} - \sin \alpha \vec{y} \\ \vec{y}_2 = \sin \alpha \vec{x} + \cos \alpha \vec{y} \end{cases}$$

Equilibre de la pièce 1 en A:

$$\vec{T}_{012} + \vec{T}_{1A} + \vec{T}_{ext} = 0$$

$$\rightarrow \vec{M}(A \in 1/0) = \vec{M}(G \in 1/0) + \vec{R}_G \wedge \vec{GA} \quad \text{avec } \vec{GA} = a \vec{y}_1 = a \sin \alpha \vec{x} + a \cos \alpha \vec{y}$$

$$= \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -T \\ P \\ 0 \end{pmatrix} \wedge \begin{pmatrix} a \sin \alpha \\ a \cos \alpha \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ aT \cos \alpha - aP \sin \alpha \end{pmatrix}$$

$$\rightarrow \vec{M}(A \in 1/2) = \vec{M}(B \in 1/2) + \vec{R}_2 \wedge \vec{BA} \quad \text{avec } \vec{BA} = -b \vec{y}_2 = -b \sin \alpha \vec{x} - b \cos \alpha \vec{y}$$

$$= \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X_{12} \\ Y_{12} \\ Z_{12} \end{pmatrix} \wedge \begin{pmatrix} -b \sin \alpha \\ -b \cos \alpha \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} b \cos \alpha Z_{12} \\ -b \sin \alpha Z_{12} \\ -X_{12} b \cos \alpha + Y_{12} b \sin \alpha \end{pmatrix}$$

$$\vec{T}_{012} = \begin{Bmatrix} X_{01} & L_{01} \\ Y_{01} & M_{01} \\ Z_{01} & 0 \end{Bmatrix}_A$$

$$\vec{T}_{112} = \begin{Bmatrix} X_{12} & 0 \\ Y_{12} & 0 \\ Z_{12} & 0 \end{Bmatrix}_B$$

$$\vec{T}_{210} = \begin{Bmatrix} X_{20} & 0 \\ Y_{20} & 0 \\ Z_{20} & 0 \end{Bmatrix}_C$$

$$\vec{T}_{extG} = \begin{Bmatrix} -T & 0 \\ P & 0 \\ 0 & aM_G \end{Bmatrix}_G$$

Soit :

$$\begin{Bmatrix} X_{01} & L_{01} \\ Y_{01} & M_{01} \\ Z_{01} & 0 \end{Bmatrix}_A + \begin{Bmatrix} -T & 0 \\ P & 0 \\ 0 & a(M_G - a(T \cos \alpha + P \sin \alpha)) \end{Bmatrix}_A + \begin{Bmatrix} X_{12} & b \cos \alpha Z_{12} \\ Y_{12} & -b \sin \alpha Z_{12} \\ Z_{12} & b(-X_{12} \cos \alpha + Y_{12} \sin \alpha) \end{Bmatrix}_A = 0$$

Résultat Système 1 avant :

$$\vec{x}1 = \cos \alpha \vec{x} - \sin \alpha \vec{y}$$

$$\vec{y}1 = \sin \alpha \vec{x} + \cos \alpha \vec{y}$$

Avec :

$$\vec{x}2 = \cos \zeta \vec{x} - \sin \zeta \vec{y}$$

$$\vec{y}2 = \sin \zeta \vec{x} + \cos \zeta \vec{y}$$

$$T0/1 = \begin{bmatrix} X01 & L01 \\ Y01 & M01 \\ Z01 & 0 \end{bmatrix} \text{ en } A$$

$$T1/2 = \begin{bmatrix} X12 & 0 \\ Y12 & 0 \\ Z12 & 0 \end{bmatrix} \text{ en } B$$

$$T2/0 = \begin{bmatrix} X20 & 0 \\ Y20 & 0 \\ Z20 & 0 \end{bmatrix} \text{ en } C$$

$$TextG = \begin{bmatrix} -T & 0 \\ P & 0 \\ 0 & MG \end{bmatrix} \text{ en } G$$

$$T0/1 = \begin{bmatrix} T - X12 & 0 \\ -P - \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha} X12 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ en } A$$

$$T1/2 = \begin{bmatrix} X12 & 0 \\ \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha} X12 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ en } B$$

$$T2/0 = \begin{bmatrix} -X12 + T & 0 \\ \frac{-\cos \alpha}{\sin \alpha} X12 - P & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ en } C$$

Avec :

$$X12 = \frac{-c(T \sin \zeta + P \cos \zeta) - A}{-c \sin \zeta + \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha} c \cos \zeta}$$

$$A = MG - (a + b)(T \cos \alpha + P \sin \alpha)$$

Résultat Système 2 avant :

Avec : $\overline{AB} = S$

$$T0/1(A) = \begin{bmatrix} X01(A) & 0 \\ 0 & M01(A) \\ Z01(A) & 0 \end{bmatrix} \text{ en } A$$

$$T0/1(B) = \begin{bmatrix} X01(B) & 0 \\ 0 & M01(B) \\ Z01(B) & 0 \end{bmatrix} \text{ en } B$$

$$T0/1(A) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \frac{S}{2}(Fpf \sin \alpha - (Ftf + Ftd) \cos \alpha) \\ C \sin(\varphi - \alpha) & 0 \end{bmatrix}$$

$$T0/1(B) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & (R - \Delta R + \frac{S}{2})(Fpf \sin \alpha - (Ftf + Ftd) \cos \alpha - Mp) \\ -(Fpf \cos \alpha + (Ftf + Ftd) \sin \alpha) & 0 \end{bmatrix}$$

Avec :

$$C = \frac{Fpf \sin \alpha - Ftf \cos \alpha - Ftd \cos \alpha}{\cos(\varphi - \alpha)}$$

Résultat Système 1 arrière :

Avec :

$$\vec{x}l = \cos \alpha \vec{x} + \sin \alpha \vec{y}$$

$$\vec{y}l = -\sin \alpha \vec{x} - \cos \alpha \vec{y}$$

$$T0/1 = \begin{bmatrix} X01 & 0 \\ Y01 & 0 \\ Z01 & 0 \end{bmatrix} \text{ en } A \quad T1/2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ Y12 & M12 \\ Z12 & N12 \end{bmatrix} \text{ en } B \quad T2/3 = \begin{bmatrix} X23 & 0 \\ Y23 & 0 \\ Z23 & 0 \end{bmatrix} \text{ en } C$$

$$T3/4 = \begin{bmatrix} X34 & L34 \\ Y34 & M34 \\ Z34 & 0 \end{bmatrix} \text{ en } D \quad T4/5 = \begin{bmatrix} X45 & 0 \\ Y45 & 0 \\ Z45 & 0 \end{bmatrix} \text{ en } F \quad T4/0 = \begin{bmatrix} X40 & L40 \\ Y40 & 0 \\ Z40 & N40 \end{bmatrix} \text{ en } E$$

$$T6/0 = \begin{bmatrix} X60 & 0 \\ Y60 & 0 \\ Z60 & 0 \end{bmatrix} \text{ en } H \quad T5/6 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ Y56 & M56 \\ Z56 & N56 \end{bmatrix} \text{ en } G \quad \text{Text } I = \begin{bmatrix} -T & 0 \\ P & 0 \\ 0 & MI \end{bmatrix} \text{ en } I$$

On obtient :

$$T0/1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ Y23 & -aZ23 \\ Z23 & aY23 \end{bmatrix} \text{ en } A \quad T1/2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -Y23 & bZ23 \\ -Z23 & -bY23 \end{bmatrix} \text{ en } B \quad T2/3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ Y23 & 0 \\ Z23 & 0 \end{bmatrix} \text{ en } C$$

$$T3/4 = \begin{bmatrix} T & -e \cos(\alpha) Z23 \\ -P - Y23 & 2hT \\ -Z23 & 0 \end{bmatrix} \text{ en } D \quad T4/5 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -(Y40 - P - Y23) & 0 \\ -(Z40 - Z23) & 0 \end{bmatrix} \text{ en } F$$

$$T4/0 = \begin{bmatrix} -T & L40 \\ Y40 & 0 \\ Z40 & fT \end{bmatrix} \text{ en } E \quad T5/6 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ Y40 - P - Y23 & j(Z40 - Z23) \\ Z40 - Z23 & j(Y40 - P - Y23) \end{bmatrix} \text{ en } E$$

$$T6/0 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -(Y40 - P - Y23) & kj(Y40 - P - Y23) \\ -(Z40 - Z23) & kj(Z40 - Z23) \end{bmatrix} \text{ en } H$$

Avec :

$$Y23 = \frac{MI + (d+e)(T \cos(\alpha) - P \sin(\alpha))}{c - e \sin(\alpha)}$$

$$Z23 = \frac{-2hT}{c - e \sin(\alpha)} \quad Y40 = Y23(a-b) + P - \frac{fT}{j-kj}$$

$$Z40 = \frac{(a-b+j)}{j} Z23 + Y23k(b+1-a) - \frac{2hT}{j} + \frac{kfT}{j-kj}$$

$$L40 = Y23((h+k)(b-a+1)) + Z23\left(\frac{(b-a)}{j} + 1 + e \cos \alpha + f + g\right) + \frac{fT(h-k)}{j-kj} - \frac{2hT}{2}$$

Résultat Système 2 arrière :

Avec :

$$\vec{x}l = \cos \alpha \vec{x} + \sin \alpha \vec{y}$$

$$\vec{y}l = \sin \alpha \vec{x} - \cos \alpha \vec{y}$$

$$T0/1 = \begin{bmatrix} X01 & 0 \\ Y01 & 0 \\ Z01 & 0 \end{bmatrix} \text{ en } A$$

$$T1/2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ Y12 & M12 \\ Z12 & N12 \end{bmatrix} \text{ en } B$$

$$T2/3 = \begin{bmatrix} X23 & 0 \\ Y23 & 0 \\ Z23 & 0 \end{bmatrix} \text{ en } C$$

$$T3/4 = \begin{bmatrix} X34 & L34 \\ Y34 & M34 \\ Z34 & 0 \end{bmatrix} \text{ en } D$$

$$T4/5 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & M45 \\ Z45 & 0 \end{bmatrix} \text{ en } F$$

$$T4/0 = \begin{bmatrix} X40 & L40 \\ Y40 & 0 \\ Z40 & N40 \end{bmatrix} \text{ en } E$$

$$T5/0 = \begin{bmatrix} X50 & L50 \\ Y50 & 0 \\ Z50 & N50 \end{bmatrix} \text{ en } H$$

$$\text{Text}H = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & Cm \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ en } H$$

$$\text{Text}G = \begin{bmatrix} -T & 0 \\ P & 0 \\ 0 & MG \end{bmatrix} \text{ en } G$$

On obtient :

$$T0/1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ Y23 & 0 \\ -BZ45 & 0 \end{bmatrix} \text{ en } A$$

$$T1/2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -Y23 & aBZ45 \\ BZ45 & aY23 \end{bmatrix} \text{ en } B$$

$$T2/3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ Y23 & 0 \\ -BZ45 & 0 \end{bmatrix} \text{ en } C$$

$$T3/4 = \begin{bmatrix} T & c \cos(\alpha) BZ45 \\ -P - Y23 & (c + e \sin(\alpha)) BZ45 \\ BZ45 & 0 \end{bmatrix} \text{ en } D$$

$$T4/5 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & ((c + e \sin(\alpha))(A+1) - h) Z45 \\ Z45 & 0 \end{bmatrix} \text{ en } F$$

$$T4/0 = \begin{bmatrix} T & (gA + (g + f - c \cos(\alpha)) B) Z45 \\ P + Y23 & 0 \\ -(B+1) Z45 & -(B+1) Z45 \end{bmatrix} \text{ en } E$$

$$T5/0 = \begin{bmatrix} 0 & -kZ45 \\ 0 & 0 \\ -Z45 & 0 \end{bmatrix} \text{ en } H$$

Avec :

$$Y_{23} = \frac{-(d+e)(T\cos(\alpha) - P\sin(\alpha))}{c + e \sin(\alpha)}$$

$$A = \frac{-(Cm - i + c + e \sin(\alpha) - h)}{c + e \sin(\alpha)} \quad B = \frac{(Cm - i + c + e \sin(\alpha) - h)}{c + e \sin(\alpha)} - 1$$

$$Z_{45} = \frac{Cm}{(c + e \sin(\alpha))(A + B + 1) + Ba - h + i}$$

Calculs de la portance, de la trainée et du moment de tangage :

ρ (kg/m ³)	1025
S (m ²)	0,252
V (m/s)	2,5722
C _x	0,02793
C _z	0,2028
C _m	-0,0576
l (m)	0,37341

$$P = \frac{1}{2} \rho C_z S V^2$$

$$T = \frac{1}{2} \rho C_x S V^2$$

$$M_o = \frac{1}{2} \rho C_m l S V^2$$

Avec :

V : Vitesse du bateau en m/s

ρ : Masse volumique de l'eau en kg/m³, soit 1025 kg/m³

C_x : Coefficient de trainée

C_z : Coefficient de portance

C_m : Coefficient de tangage

l : Longueur de référence

Nombre de Reynold : 50 000

Angle: -1,250°

Lien :

<http://www.airfoiltools.com/polar/details?polar=xf-clarkyh-il-50000>

Les coefficients de portance, de trainée et de tangage sont déterminés grâce aux graphiques ci-dessous. Ces graphiques correspondent aux différents coefficients par rapport à l'angle alpha pour le profil Clark YH (Airfoil).

