

# Etude des moyens de stabiliser un bateau en aviron de compétition



## Étudiants :

**Clémentine ASTIER  
Cédric DASSONVILLE  
Claude PARENT**

**Maxime CHUCHE  
Valentin DUPIF  
Perrine PHAM**

Enseignant-responsable : Didier VUILLAMY



Date de remise du rapport de projet : 17/06/2011

Référence du projet : STPI/P6-3/2011 – sujet n°19

Intitulé du projet : **Étude des moyens de stabiliser un bateau en aviron de compétition**

Type de projet : Recherche et simulation

Objectifs du projet :

*L'objectif de ce projet s'inscrit dans un objectif plus global. L'objectif final, qui sera atteint dans plusieurs années lors d'autres projets de P6-3, est de comparer la trainée des bateaux d'aviron. Pour cela, il faut tout d'abord, mettre en place un système de stabilisation de bateau. En effet, un aviron n'est stable que grâce à l'action du rameur. Pour comparer des bateaux, il faut donc mettre en place un système qui simule l'action du rameur et un système de stabilisation. Le but de notre projet a donc été de trouver tous les systèmes de stabilisation que l'on peut imaginer et de se rendre compte de leur faisabilité.*

Mots-clefs du projet : Stabilisation - skiff

# Introduction

Dans le cadre du projet de Physique du quatrième semestre, 52 sujets nous ont été proposés. Nous avons, tous les six, choisi ce sujet concernant la stabilité d'un aviron ; n'y connaissant rien, il nous a en effet paru intéressant de découvrir cette discipline peu médiatisée. De plus, nous avons la possibilité d'appliquer des modèles mathématiques et physiques, que nous avons abordé lors des semestres précédents.

En pratique, lors de sa fabrication, la coque d'un aviron ne suit pas de « modèle » : en effet, la forme de cette dernière ne répond pas à des critères très précis. De même, la traînée d'un bateau d'aviron n'est pas réellement connue non plus.

C'est pourquoi ce projet a vu le jour ; en effet, son but est de chercher à connaître la traînée réelle d'un aviron. Cependant, pour cela, il faut un système mécanique qui simule le mouvement d'un rameur ; il faut aussi équilibrer le bateau. C'est pourquoi nous devons en premier lieu étudier sa stabilisation.

L'objectif final de cette étude est de chiffrer des données que l'on ne connaît pas précisément aujourd'hui ; ainsi, connaissant exactement la traînée d'un bateau d'aviron, il serait possible de pouvoir concevoir une forme de coque qui minimiserait cette traînée, et qui maximiserait donc la vitesse d'un bateau. Ces données seraient très appréciées par les rameurs de compétition.

*Remarque : pour la clarté de l'exposé, il a été nécessaire d'insérer beaucoup de schémas ; nous prions le lecteur de nous excuser de ne pas avoir respecté la directive qui impose un nombre limite de pages.*

## Remerciements

Nous tenons à remercier tout d'abord et surtout Mr VUILLAMY, notre tuteur de projet, pour l'aide qu'il nous a apporté, de par ses connaissances du domaine de l'aviron, mais aussi par son investissement concernant notre projet.

Nous remercions aussi le Club Nautique et Athlétique de Rouen, pour nous avoir accepté au sein du bâtiment pour que nous puissions observer les avirons.

## Sommaire

Introduction.....	1
Remerciements.....	2
Sommaire.....	3
1 Méthodologie – Organisation du travail.....	4
2 Travail réalisé et résultats.....	5
2.1 Présentation de l'aviron.....	5
2.1.1 Le sport.....	5
2.1.2 Le bateau.....	5
2.1.3 La technique : s'équilibrer, se diriger, se propulser.....	6
3 Différentes solutions pour résoudre le problème d'équilibre.....	7
3.1 Système « crémaillère + tige + masselottes ».....	7
3.1.1 Idée initiale.....	7
3.1.2 Problème.....	7
3.1.3 Résolution pour un modèle en contact avec le sol.....	8
1) Équation du moment cinétique de la tige.....	9
2) Équation de la dynamique appliquée à la tige.....	9
3) Étude du mouvement du point O.....	10
Conclusion.....	11
4) Examen des efforts sur la coque.....	11
Équation du moment cinétique de la coque au point C :.....	12
Conclusion :.....	12
Analyse des résultats :.....	13
3.2 Système balancier.....	17
3.2.1 Idée initiale.....	17
3.2.2 Problème.....	17
3.3 Étude du système de masselotte en fond de coque.....	18
3.3.1 Principe.....	18
3.3.2 Analyse statique.....	18
3.3.3 Étude dynamique.....	21
3.3.4 Étude restreinte de la masselotte.....	21
3.3.5 Étude restreinte de la coque.....	22
3.3.6 Exploitation de l'équation de mouvement.....	23
3.3.7 Conclusion.....	26
3.4 Système « poids - coulisse ».....	27
4 Réalisation matérielle du prototype.....	29
5 Conclusion et perspectives.....	32
Bibliographie.....	33

# 1 Méthodologie – Organisation du travail

Nos connaissances dans le domaine de l'aviron étant très réduites, les deux premières semaines ont été consacrées aux recherches sur le sujet et à des discussions avec M Vuillamy. Nous avons pris le temps de nous familiariser avec le langage technique et de comprendre l'intérêt de notre projet.

Une visite au club d'aviron de Rouen nous a été très bénéfique. Nous avons pu observer des bateaux de très près et ainsi nous rendre compte de la forme des coques.

Puis nous avons, chacun de notre côté, cherché des moyens de stabilisation d'un bateau. Lors de la troisième séance, un premier système a été retenu par l'ensemble du groupe et approuvé par M Vuillamy.

Nous nous sommes très vite confrontés à deux problèmes ; le premier étant un problème d'organisation horaire. En effet, nous étions trois groupes dans le même créneau horaire, ce qui limitait le contact avec notre tuteur. Il a donc fallu mettre en place un planning ; nous venions deux fois sur trois voir M Vuillamy.

Le deuxième problème, dont nous nous sommes vite rendus compte, fut le manque de connaissances scientifiques en mécanique générale et en mécanique des fluides. Ces lacunes nous ont empêché de pouvoir travailler seuls sans l'aide de notre tuteur. Nous ne pouvions pas mettre en équations les problèmes de stabilisation que nous avons trouvés et donc nous ne pouvions pas vérifier nos hypothèses.

Le projet a ainsi été ralenti et réduit à cause de ces problèmes, pourtant ce n'était pas la motivation qui manquait dans notre groupe.

## 2 Travail réalisé et résultats

### 2.1 Présentation de l'aviron

#### 2.1.1 Le sport

Inscrit aux Jeux Olympiques depuis 1896, l'aviron est un sport nautique de glisse et de vitesse, qui consiste à propulser un bateau à l'aide de rames, que l'on appelle des avirons. Ce sport mobilise l'ensemble des groupes musculaires du rameur et nécessite donc de bonnes conditions physiques ; de plus, l'aviron exige une très bonne coordination gestuelle.

En effet, pour pouvoir se déplacer correctement et rapidement, le rameur doit en permanence propulser, équilibrer et diriger son bateau, le tout en coordonnant l'ensemble « rameur-bateau-avirons »

#### 2.1.2 Le bateau

Le bateau d'aviron possède une coque longue et étroite, afin de limiter la résistance de l'eau. En effet, un skiff, par exemple (aviron pour un seul rameur), mesure 8 mètres de long, pour seulement 27 cm de largeur. Les différents types d'embarcations, avec leurs tailles, sont présentées en Annexe 1.





Le rameur, quant à lui, est assis au-dessus du niveau de l'eau, sur un siège roulant que l'on appelle la « coulisse », qui se déplace dans le sens inverse de l'avancement du bateau.

Le mouvement d'un rameur est cyclique, et se compose de deux phases principales :

- La phase d'appui, durant laquelle la coordination de l'action des jambes, du tronc et des bras permet la propulsion et l'accélération du bateau,
- La phase de remplacement, pendant laquelle le rameur se replace pour pouvoir entamer une nouvelle phase d'appui.

Ces deux phases sont illustrées en Annexe 2.

### **2.1.3 La technique : s'équilibrer, se diriger, se propulser**

- s'équilibrer :

La stabilité du bateau permet d'assurer la sécurité du rameur, ainsi qu'une bonne installation, afin de pouvoir exercer des mouvements efficaces.

Pour cela, l'athlète doit en permanence bouger : en effet, il doit maintenir son corps à la verticale du bateau, et doit aussi le stabiliser en jouant sur la hauteur des poignées des avirons.

- Se diriger :

Pour pouvoir se diriger, le rameur doit s'aider des avirons et/ou du gouvernail pour se déplacer.

Pour cela, il peut effectuer différentes manœuvres : il peut en effet avancer en tirant sur les avirons (ce qu'on appelle « nager »), il peut aussi reculer en poussant sur ceux-ci (« dénager »), tourner en nageant plus fort ou avec plus d'amplitude d'un côté (« virer »), et enfin il peut faire un demi-tour en nageant d'une bordée et en dénageant de l'autre (« rabattre »).

- Enfin, la propulsion est l'action motrice qui permet de faire avancer le bateau ; elle est faite à partir de la phase d'appui (voir Annexe 2).

Les rameurs doivent aussi prendre en compte l'environnement qui les entoure ; en effet, le vent, la pluie, les courants, les obstacles... influent forcément sur la manière de se déplacer, ainsi que sur les règles de navigation.

## 3 Différentes solutions pour résoudre le problème d'équilibre

### 3.1 Système « crémaillère + tige + masselottes »

#### 3.1.1 Idée initiale

Ce mécanisme se base essentiellement sur la force de gravitation terrestre. Il permettrait en fait de déplacer le centre de gravité du système, ce qui aurait pour conséquence de créer un moment inverse au moment pré-existant de déséquilibre et ainsi rééquilibrer le bateau.

Une tige métallique d'une certaine longueur (à déterminer), sur laquelle on fixe aux extrémités une masselotte de masse identique  $m$ , est entraînée par un système « crémaillère+moteur », dans le sens positif ou négatif sur l'axe  $Ur$  (cf schéma).

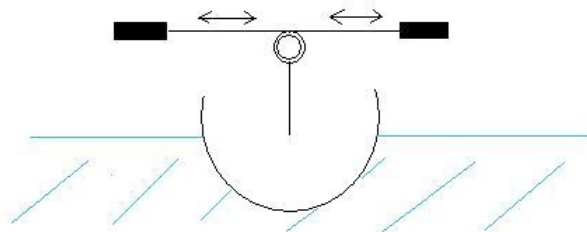
Ce dispositif à balancier pourrait permettre de rééquilibrer le skiff à chaque écart d'angle  $\theta$  par rapport à la verticale. Le système sera incrémenté d'un ou plusieurs capteurs permettant, à chaque instant, de détecter l'angle  $\theta$ , la vitesse et l'accélération du roulis, pour que le moteur puisse s'adapter à ces variations.

#### 3.1.2 Problème

L'effort du moteur sur la tige, au niveau de la crémaillère (engrenage) crée aussi un effort inverse qui compense le premier. Cette force se propagerait en fait au niveau de la coque et augmenterait le moment de rotation, ce qui tendrait à déséquilibrer encore plus le système.

D'où la question de l'angle de déséquilibre : est-ce que ce système pourrait fonctionner pour des petites valeurs de l'angle  $\theta$  ?

De plus, pour l'instant, nous n'avons pas encore pris en considération le fait que le bateau puisse dériver (déplacement latéral de la coque). Sur tous les skiff il existe déjà un aileron ; mais celui-ci sert presque exclusivement à garder une trajectoire droite, il n'a pas vraiment un rôle de stabilisateur.



*Illustration 1 : Système au repos*

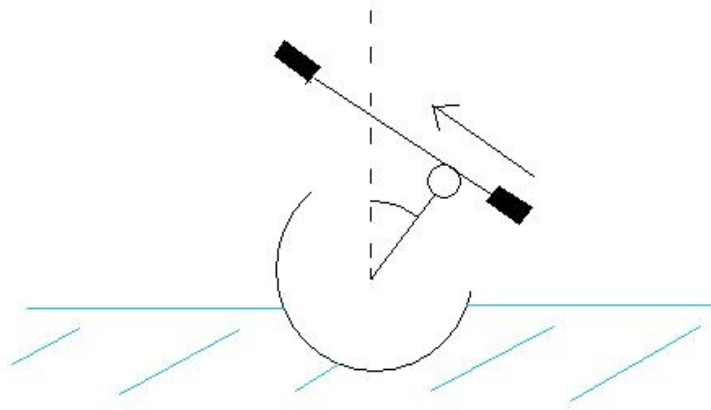
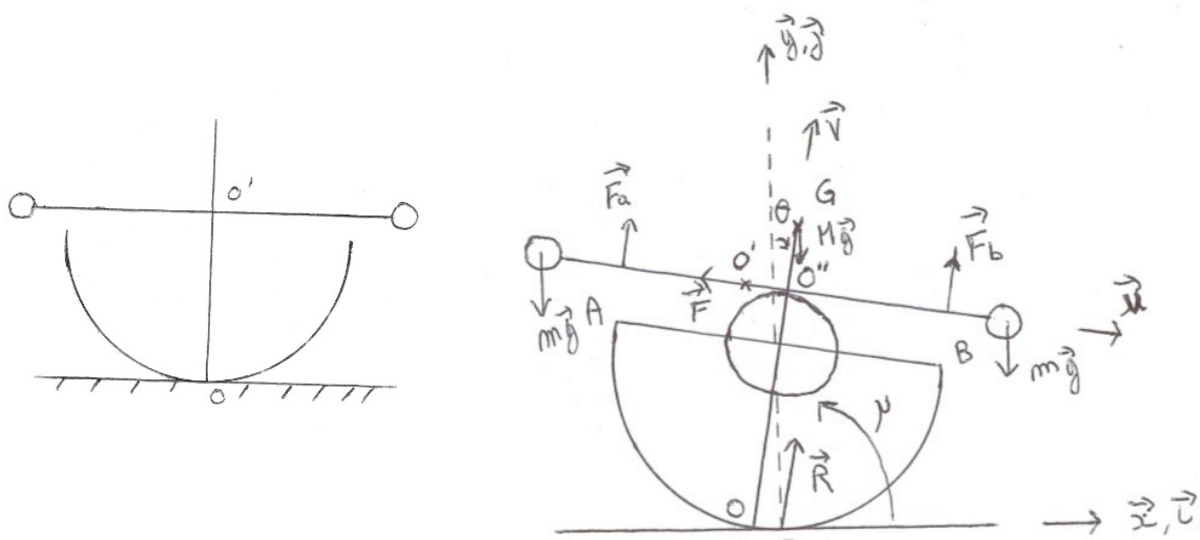


Illustration 2 : Système en équilibre

### 3.1.3 Résolution pour un modèle en contact avec le sol



#### Description du modèle :

O : point de la coque en contact avec le sol à l'état initial non perturbé

O' : centre de la tige d'équilibrage

O'' : point de contact entre la tige et la crémaillère

$\theta$  : angle algébrique donnant l'inclinaison de la coque

$\mu$  :  $\mu - \theta = \pi/2$

C : point de contact de la coque avec le sol

A et B : points de contact entre la tige et la coque

m : masse d'une masselotte d'extrémité de tige

G : centre de gravité de l'ensemble de la coque et du moteur , on considère que G est toujours situé sur l'axe OO''

On considère donc que les positions de A, B, O, O'' sont en positions relatives constantes. O'O'' représente le déplacement de la tige que l'on notera  $\delta$  en valeur algébrique.

### Nature des efforts :

Aux points A et B, on suppose que les actions de la coque sont normales à la tige. On nomme ces actions  $\vec{F}_a$  et  $\vec{F}_b$ .

On désigne par  $\vec{u}$  le vecteur unitaire porté par la tige et par  $\vec{v}$  le vecteur unitaire suivant O'O''.

Soit  $\vec{u} = (\cos \theta ; \sin \theta)$  et  $\vec{v} = (-\sin \theta ; \cos \theta)$

F est la force d'entraînement du moteur sur la tige,  $\vec{F} = F \vec{u}$ , F est algébrique.

### 1) Équation du moment cinétique de la tige

$$J_{O'} d^2(\mu - \pi/2)/dt^2 = J_{O'} d^2\mu/dt^2 = \Sigma M_{t/O'}$$

$J_{O'}$  : moment d'inertie de la coque par rapport au point O'

$M_{t/O'}$  : moment des forces appliquées sur la coque par rapport au point O'

$$\Sigma \vec{M}_{t/O'} = -\vec{F}_a \wedge \vec{O'A} - \vec{F}_b \wedge \vec{O'B} + M_t(\vec{F})/O'$$

On considère que la tige est suffisamment fine pour que  $\vec{M}_t/F$  soit négligeable devant les autres moments.

Si on pose  $l = O''B$ , on a donc :

$$\vec{O'B} = \vec{O'O''} + \vec{O''B} = (l - \delta) \vec{u}$$

et le moment de  $F_b$  en O' :  $-\vec{F}_b \wedge \vec{O'B} = F_b(l - \delta) \vec{k}$

De même le moment de  $F_a$  en O' :  $-\vec{F}_a \wedge \vec{O'A} = F_a(-l - \delta) \vec{k}$

L'équation du moment cinétique de la tige est donc :

$$\begin{aligned} J_{O'} d^2\mu/dt^2 &= F_b(l - \delta) + F_a(-l - \delta) \\ &= F_b(l - \delta) - F_a(l + \delta) \end{aligned}$$

### 2) Équation de la dynamique appliquée à la tige

Les efforts appliqués à la tige sont  $F_a$ ,  $F_b$ , F et le poids. Le principe fondamental de la dynamique nous donne donc :

$$\vec{F}_a + \vec{F}_b + \vec{F} + 2m \vec{g} = 2m \gamma \vec{o}'$$

On pose h tel que  $\vec{O'O''} = h \vec{v}$

On a donc  $O\vec{O}' = h\vec{v} + \delta\vec{u}$

On en déduit la vitesse en O' : 
$$\vec{V}_{O'} - \vec{V}_O = h \frac{d\vec{v}}{dt} + \delta \frac{d\vec{u}}{dt} + \frac{d\delta}{dt} \vec{u} = -h \frac{d\theta}{dt} \vec{u} + \delta \frac{d\theta}{dt} \vec{v} + \frac{d\delta}{dt} \vec{u}$$

La vitesse  $V_O$  est examinée à part, elle dépend de la forme de la coque.

On dérive à nouveau pour obtenir l'accélération :

$$\vec{\gamma}_{O'} - \vec{\gamma}_O = \frac{d(-h\theta' + \delta')}{dt} \vec{u} + (-h\theta' + \delta') \theta' \vec{v} + \frac{d(\delta\theta')}{dt} \vec{v} - (\theta' \delta') \theta' \vec{u}$$

Pour la suite, on fera l'**hypothèse d'un système à petit mouvement**, c'est-à-dire que  $\theta$ ,  $\theta'$  et  $\delta'$  sont faibles.

On projette donc cette dernière équation suivant  $\vec{u}$  :

$$2m \vec{g} \cdot \vec{u} + \vec{F} = 2m (\vec{\gamma}_O \cdot \vec{u} + \frac{d(-h\theta' + \delta')}{dt} - \delta' \theta'^2)$$

Or  $\vec{g} \cdot \vec{u} = -g \sin \theta$  et appliquant notre hypothèse de petit mouvement on a :

$$F = 2m (\vec{\gamma}_O \cdot \vec{u} + \delta'' - h\theta'') \quad (1)$$

En projetant suivant  $\vec{v}$  :  $F_a + F_b - 2mg \cos \theta = 2m (\vec{\gamma}_O \cdot \vec{v} + \theta'(-h\theta' + \delta') + \frac{d(\delta\theta')}{dt})$

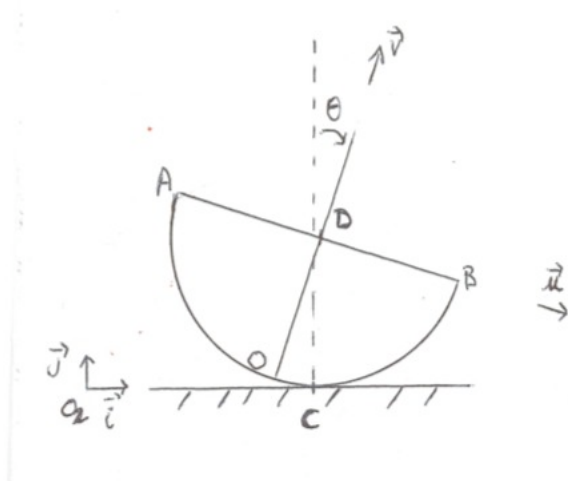
Aux petits mouvements :  $F_a + F_b = 2m \vec{\gamma}_O \cdot \vec{v}$

### 3) Étude du mouvement du point O

Comme il a déjà été dit, l'accélération du point O dépend uniquement de la forme de la coque. On suppose en effet que le roulement sur le sol se fait sans glissement.

En fait, à chaque angle  $\theta$  correspond une position du point O par rapport à un repère fixe. Par conséquent l'accélération et la vitesse de O sont reliées à celles de  $\theta$ .

Prenons le cas d'une coque circulaire.



On désigne par D le centre du disque.

On a :  $\vec{DO} = -R\vec{v}$  avec R le rayon du disque.

Si on désigne par  $(O_2; i; j)$  un repère absolu a une distance L de O à l'état initial, on a :

$$\vec{O_2D} = \vec{O_2C} + \vec{CD} = (L - R\theta)\vec{i} + R\vec{j}$$

D'où  $\vec{O_2O} = \vec{O_2D} + \vec{DO} = (L - R\theta)\vec{i} - R\vec{v} + R\vec{j} = (L - R\theta + R\sin\theta; R - R\cos\theta)$

On dérive pour obtenir la vitesse du point O : 
$$\vec{V}_O = R(-d\theta/dt + \cos\theta d\theta/dt; \sin\theta d\theta/dt)$$
  

$$= R\theta'(\cos\theta - 1; \sin\theta)$$

### Conclusion

Considérons que F soit fonction de  $\theta$ , la relation (1) relie essentiellement deux variables  $\theta$  et  $\delta$ . Il est nécessaire d'avoir une seconde relation différentielle indépendante sur  $\delta$  et  $\theta$ . On la recherche en étudiant le mouvement de la coque. Et dans ce cas on sait que  $\delta$  ne pourra pas intervenir puisque c'est une grandeur attachée à la tige.

### 4) Examen des efforts sur la coque

Les efforts qui s'exercent sont  $-\vec{F}_a, -\vec{F}_b, -\vec{F}, M\vec{g}$  et la réaction du support  $\vec{R}$ .

Hypothèse : On négligera la masse de la coque.

On applique le PFD :  $M \vec{\gamma}_G = \vec{F}_a + \vec{F}_b + \vec{F} + \vec{R}$

On projète suivant  $\vec{v}$  :

$$M \vec{\gamma}_G \cdot \vec{v} = -\vec{F}_a \cdot \vec{v} - \vec{F}_b \cdot \vec{v} - M \vec{g} \cos\theta + \vec{R} \cdot \vec{v} \quad (2)$$

Et sur  $\vec{u}$  :  $M \vec{\gamma}_G \cdot \vec{u} = -M \vec{g} \sin\theta + \vec{R} \cdot \vec{u} \quad (3)$

**Équation du moment cinétique de la coque au point C :**

$$\Sigma \vec{M}_t|_c = \frac{d(\vec{\sigma}_c)}{dt} + M \vec{v}_c \wedge \vec{v}_g \quad (4)$$

Avec  $\vec{\sigma}_c$ , le moment cinétique calculé au point C, et  $v_c$  la vitesse au point C calculée précédemment comme étant égale à la dérivée de  $O_2C = L - R\theta$ , c'est-à-dire  $-R\theta'$ .

$$\vec{\sigma}_c = J_c \frac{d\theta}{dt} \vec{z} \quad \text{avec } J_c \text{ l'inertie au point C une grandeur variable qui dépend de C.}$$

On calcule le moment des efforts au point au C :

$$\Sigma \vec{M}_t|_c = \vec{F}_a \wedge \vec{C}_A + \vec{F}_b \wedge \vec{C}_B + \vec{F} \wedge \vec{C}\vec{O}'' - M \vec{g} \wedge \vec{C}_G \quad (5)$$

On calcule le moment des efforts au point au A :

$$\Sigma \vec{M}_t|_a = \vec{F}_b \wedge \vec{A}_B + \vec{F} \wedge \vec{A}\vec{O}'' - M \vec{g} \wedge \vec{A}_G \quad (6)$$

On calcule le moment des efforts au point au B :

$$\Sigma \vec{M}_t|_B = \vec{F}_a \wedge \vec{B}_A + \vec{F} \wedge \vec{B}\vec{O}'' - M \vec{g} \wedge \vec{B}_G \quad (7)$$

Pour la suite, on impose F puisque cette force est appliquée par le moteur.

Comme  $\Sigma M_t$  est connue grâce à l'équation (4) que l'on est capable d'écrire en A et en B, on peut déduire de (6) et (7) les valeurs de  $F_a$  et  $F_b$ .

Connaissant,  $F_a$  et  $F_b$ , on obtient  $R_v$  grâce à (2). On connaît donc R car  $R_u$  nous est donné par (3)

Le système est donc entièrement connu.

**Conclusion :**

Nous avons donc un modèle décrivant le comportement de la coque en fonction de ses

caractéristiques physiques et des différentes masses.

Ce modèle a des limites et ne traduit pas la réalité à cause des hypothèses qui ont été faites :

- étude du comportement au sol (différence sur le contact et l'effet dissipatif de l'eau que l'on ne prend pas en compte)
- on néglige la masse de la coque
- forme de coque cylindrique
- étude sur de petits mouvements (peu d'influence car un système d'équilibrage travaille en effet sur de très faibles mouvements)

Ne pas faire ces hypothèses aurait cependant complexifié beaucoup les équations et aurait nécessité des connaissances que nous ne possédions pas encore.

### **Analyse des résultats :**

Ce modèle a servi à construire un tableau Excel décrivant le comportement de la coque dans le temps. La résolution des équations différentielles a été faite avec la méthode de Runge Kutta.

Attention : Dans l'exemple ci dessous  $F$  représente l'effort exercé sur la coque par la tige (c'est l'inverse de l'inverse du sens attribué jusqu'à présent dans le texte).

Il se compose :

- d'une zone de saisie des paramètres (voir ci dessous)
- d'un tableau de résultats de simulation temporelle de grandeurs dont  $\delta$  et  $\theta$ , d'un graphique donnant l'inclinaison  $\theta$  en fonction du temps.

Voici un exemple de données :

On précise dans ces données la géométrie du système, la position et la vitesse initiales de la tige ou de la coque, ainsi qu'un paramètre de la loi de commande  $K$  (voir explication ci dessous) . Dans l'exemple la coque est inclinée de -10 degrés et elle est à l'instant initial sans vitesse.



h, rayon de la coque (m)	0,2
d distance du centre de gravité à O" (m)	0,1
Masse associée au centre de gravité (kg)	5
constante du champ de gravité (m/s <sup>2</sup> )	9,81
condition initiale en teta (degré)	-10
vitesse initiale en degré/s	0
pas de temps d'intégration	0
pas de temps d'écriture	0,02
facteur d'amplification du coefficient K	4
temps final de simulation	6
masse unitaire des masselottes (kg)	1
position initiale des masselottes ( delta) m)	-0,01

Le facteur K d'amplification, correspond au coefficient utilisé dans le cas d'une réponse linéaire entre F et  $\theta$ , c'est-à-dire que  $F = K\theta$ . L'idée de cette réaction est la suivante : lorsque la coque s'incline d'un côté, on réagit en déplaçant la tige de l'autre côté.

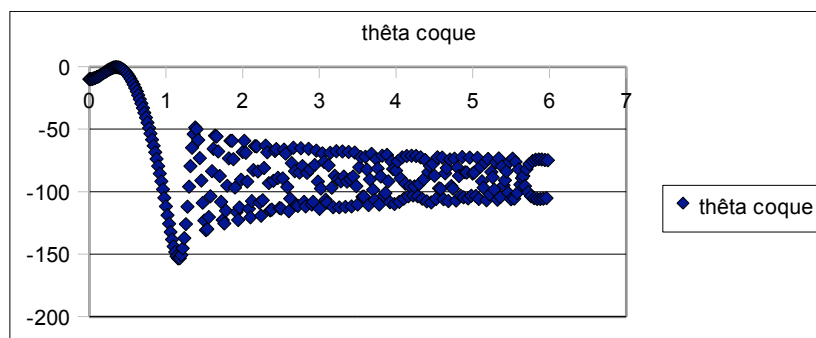
C'est la première forme de réponse que nous avons envisagé. En effet, cela permet de décaler beaucoup les barres quand l'angle est important et de faire revenir les barres vers l'équilibre en même temps que  $\theta$  se rapproche de 0.

Cependant ce type de réponse ne semble pas adapté. Quelque soit le coefficient K, on obtient un retour vers l'équilibre au début, puis le système s'emballe de l'autre côté. Ceci est la conséquence du déplacement de la tige. En effet pour retrouver l'équilibre

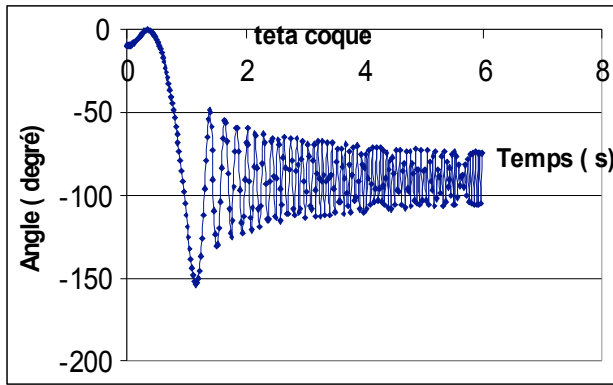
Exemple avec un coefficient  $K=4$  : le graphe 1 montre que l'angle initialement négatif de -10 degré commence par revenir à zéro (c'est à dire que la coque se redresse) mais que peu de temps après l'angle redevient négatif et finit par diverger.

Le graphe 2 montre le déplacement de la tige. On voit que s'il est faible au début il devient très important par la suite (et sans lien avec la physique). La tige est propulsée vers la gauche ( delta est positif).

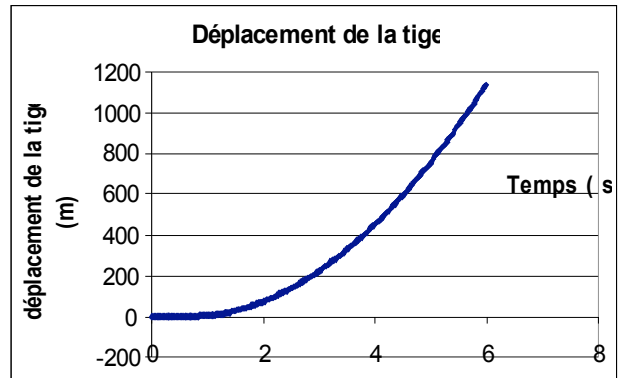
Les graphes 5 et 6 détaillent ce qui se passe plus précisément. Quand la coque atteint la position d'équilibre, la tige s'est beaucoup déplacée vers la droite et produit un couple qui tend à faire retomber la coque vers sa position initiale. La réaction est telle que le système relance encore davantage la tige vers la droite pour essayer de redresser la coque. Mais le système diverge.



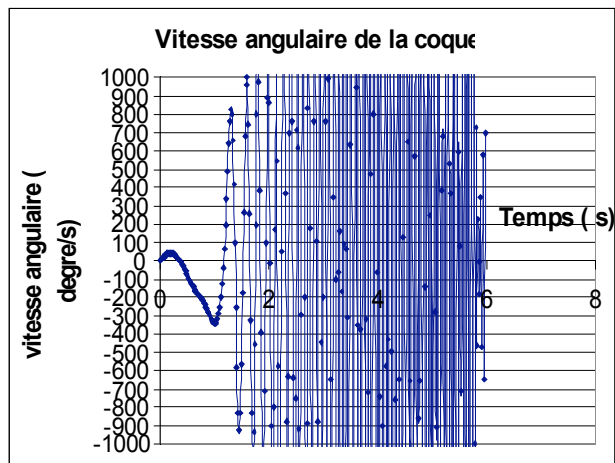
Graphe 1



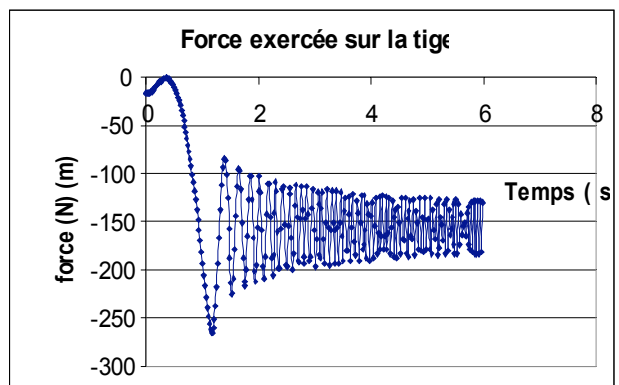
Graphe 2



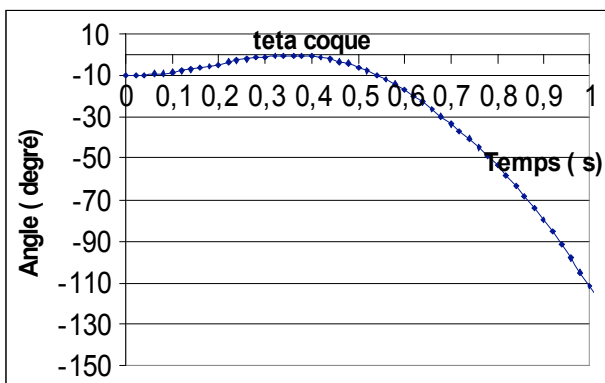
Graphe 3



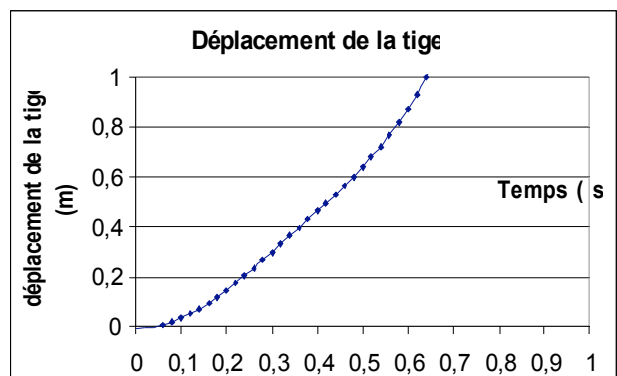
Graphe 4



Graphe 5



Graphe 6



On voit que l'angle diminue au départ, puis augmente rapidement. Les oscillations qui suivent ne sont pas prises en compte, car le modèle n'a pas été conçu pour étudier ce qui se passerait si le bateau se renversait.

Le graphe 3 montre que la force est bien aussi dans le sens imposé (elle s'annule quasiment lorsque l'angle  $\theta$  devient quasi nul lui aussi). Mais on observe en comparant les graphes 5 et 6 que, lorsque la coque a une valeur d'inclinaison quasi nulle, la tige est très déplacée et va déséquilibrer la coque.

## 3.2 Système balancier

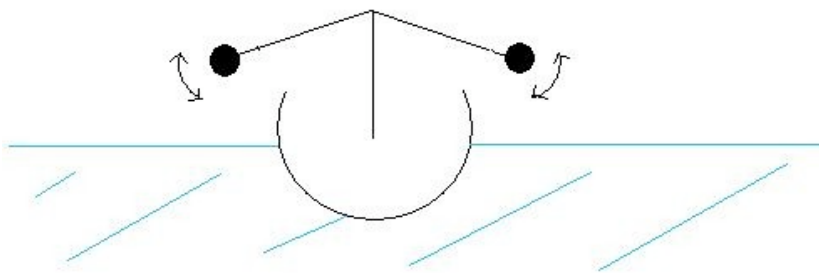
### 3.2.1 Idée initiale

Il s'agirait de créer un système de balancier. Il consisterait en deux bras de balancier, munis d'une masselotte à chaque extrémité. Dans ce cas là, les masses peuvent pivoter autour du centre du cercle de rayon égal à la longueur du bras. Les deux bras sont soit collés entre eux par une liaison encastrement, soit indépendants l'un de l'autre : auquel cas, il ne faudrait plus un mais deux moteurs pour actionner de manière indépendante les deux bras.

### 3.2.2 Problème

Ce système semble être trop volumineux.

De plus, le moteur utilisé ici pour faire pivoter les bras devra être plus puissant que pour le système précédent. En effet, il faut une puissance plus importante pour pouvoir rééquilibrer rapidement le bateau.



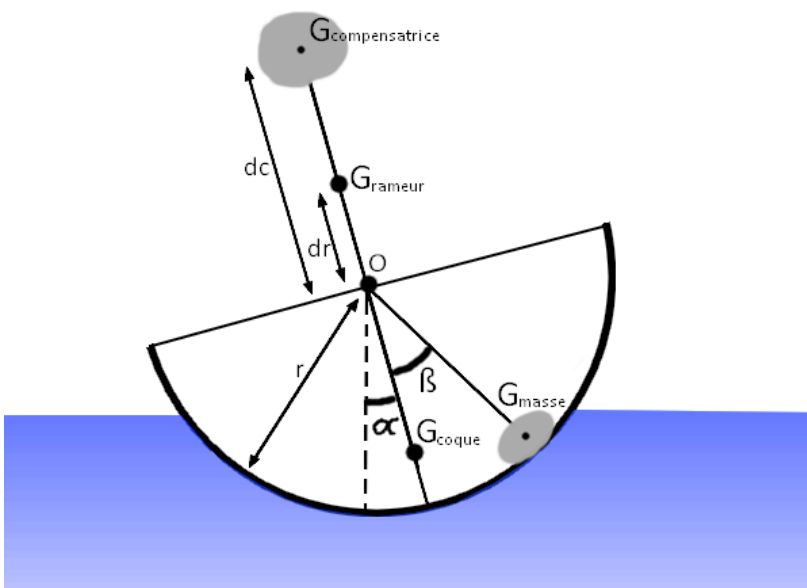
*Illustration 3: système balancier avec liaison encastrement des deux bras*

## 3.3 Étude du système de masselotte en fond de coque

### 3.3.1 Principe

Dans ce système, on divisera la masse représentant le rameur en deux parties : la masselotte d'équilibrage qui se situe au fond de la coque, et la masse de compensation se situant au dessus du centre de gravité du rameur, de telle façon à ce que le barycentre des deux masses soit le centre de gravité du rameur (de poids  $M$ ).

Afin d'équilibrer la structure, la masselotte d'équilibrage se déplacera le long de la coque afin de rattraper et stabiliser la structure en cas de perturbation.



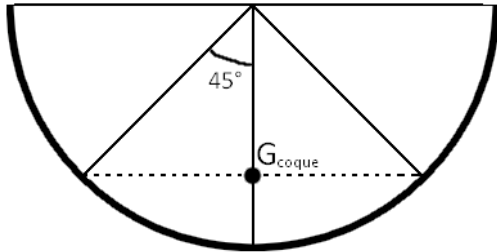
### 3.3.2 Analyse statique

Dans un premier temps, nous allons analyser l'angle  $\alpha$  maximal pour lequel le système est à l'équilibre. Cette étude nous permettra d'avoir un ordre de grandeur de l'angle maximal récupérable, ainsi que de calibrer la masselotte d'équilibrage (de masse  $m_m$ ).

#### Hypothèses

- La coque est parfaitement cylindrique, son poids est uniformément réparti, l'épaisseur de la coque est infiniment fine et  $G_{\text{masse}}$  se situe sur la coque.
- Le problème est plan (on néglige les effets de bord et la géométrie de la coque en pointe)

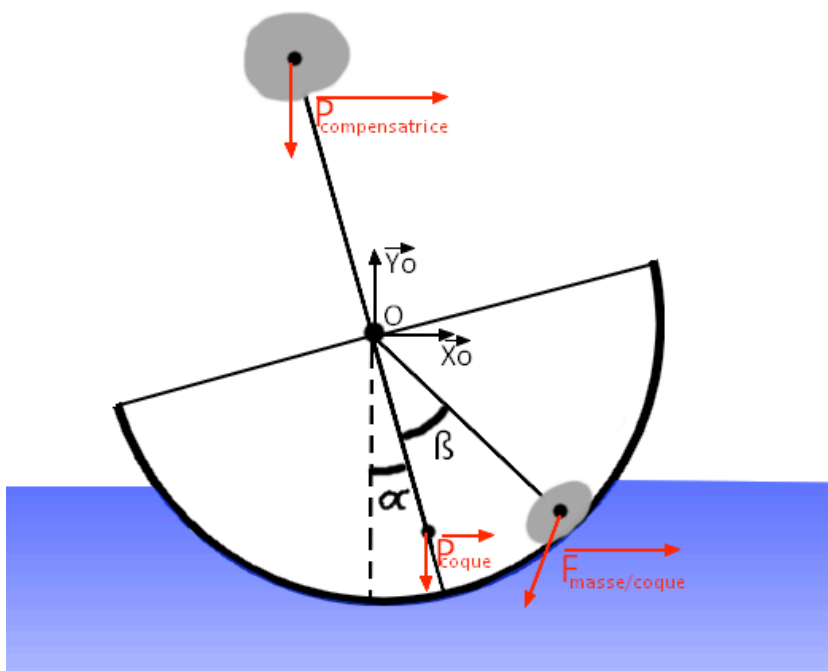
- L'action de l'eau sur la coque compense toutes les autres forces appliquées à la coque. Les actions de l'eau tangentielle à la coque sont négligées (frottements, viscosité).
- Suite aux hypothèses précédentes, le seul mouvement autorisé est une rotation autour de O.



Pour continuer, on doit situer le centre de gravité de la coque.

$G_{\text{coque}}$  se trouvera dans l'axe de symétrie de la coque ; pour trouver la distance entre O et  $G_{\text{coque}}$ , on divise la coque en 4 arcs de cercle égaux. On remarque qu'il y a 2 arcs de cercle au dessus de la ligne en pointillé et 2 en dessous.

On en déduit que  $G_{\text{coque}}$  est le centre de gravité de la coque et  $OG_{\text{coque}} = d_{Gc} = \frac{r}{\sqrt{2}}$



La coque étant supposée fixe, la somme des moments en O est nulle. Ainsi on obtient l'équation suivante :

$$g m_c d_c \sin(\alpha) = g m_m r \sin(\alpha + \beta) + g d_{Gc} m_{coque} \sin(\alpha)$$

Dans le cas où la masselotte d'équilibrage agit le plus,  $\sin(\alpha + \beta) = 1$ , ce qui signifie que  $Og_{masse}$  est à l'horizontale. Ainsi,

$$m_c d_c \sin(\alpha_{limit}) = m_m r + d_{Gc} m_{coque} \sin(\alpha_{limit})$$

$$(m_c d_c - d_{Gc} m_{coque}) \sin(\alpha_{limit}) = m_m r$$

$$\sin(\alpha_{limit}) = \frac{m_m r}{m_c d_c - d_{Gc} m_{coque}}$$

Or, comme  $G_{rameur}$  est le barycentre de la masse d'équilibrage et de la compensatrice (de masse  $m_c$ ) :

$$M d_r = m_c d_c - m_m(r + d_r)$$

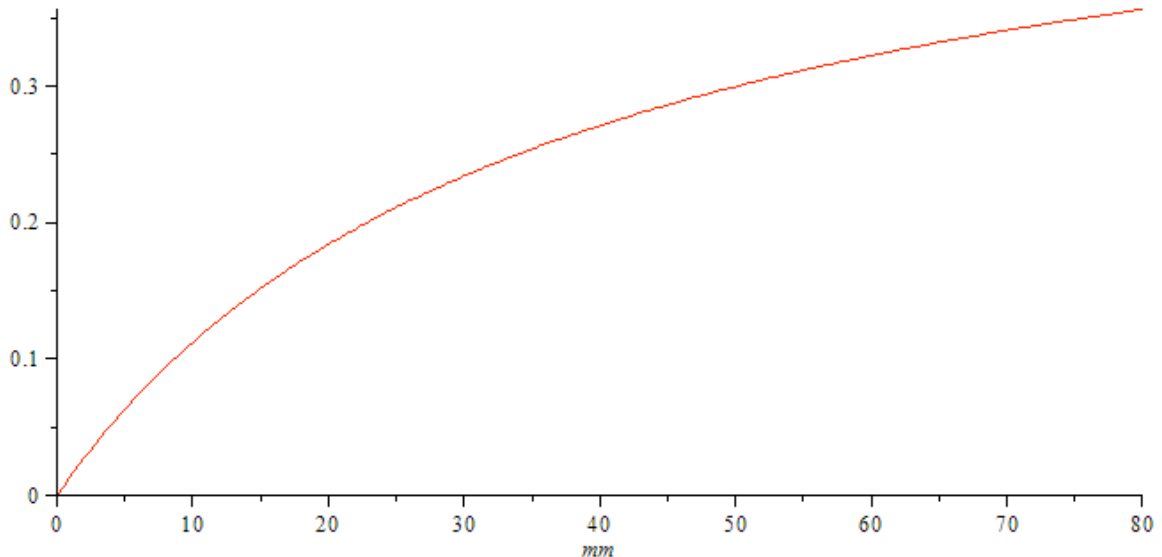
$$\sin(\alpha_{limit}) = \frac{m_m r}{m_c d_c - d_{Gc} m_{coque}}$$

$$\sin(\alpha_{limit}) = \frac{m_m r}{M d_r + m_m(r + d_r) - d_{Gc} m_{coque}}$$

$$\alpha_{limit} = \arcsin \left( \frac{m_m r}{M d_r + m_m(r + d_r) - d_{Gc} m_{coque}} \right)$$

On cherche donc à tracer  $\alpha_{limit}$  (en radians), en fonction de  $m_m$ , et avec les valeurs numériques suivantes :

$$\begin{aligned} M &= 80 \text{ kg} \\ r &= 15 \text{ cm} \\ d_r &= 15 \text{ cm} \\ m_{coque} &= 15 \text{ kg} \end{aligned}$$



On remarque alors les valeurs particulières suivantes :

$$\begin{aligned} \alpha_{\text{limit}}(15) &= 8,6^\circ \rightarrow d_c = 25 \text{ cm} \\ \alpha_{\text{limit}}(20) &= 10,5^\circ \rightarrow d_c = 30 \text{ cm} \\ \alpha_{\text{limit}}(30) &= 13,4^\circ \rightarrow d_c = 42 \text{ cm} \\ \alpha_{\text{limit}}(40) &= 15,5^\circ \rightarrow d_c = 60 \text{ cm} \\ \alpha_{\text{limit}}(50) &= 17,2^\circ \rightarrow d_c = 90 \text{ cm} \\ \alpha_{\text{limit}}(60) &= 18,5^\circ \rightarrow d_c = 150 \text{ cm} \end{aligned}$$

Afin d'avoir un bon compromis entre angle maximum et réalisabilité, on choisira  $m_m = 30$  kg. Ces résultats soulèvent malgré tout la question de la réalisabilité technologique du système, à cause de la puissance nécessaire au moteur.

### 3.3.3 Étude dynamique

L'étude statique du système nous a permis de calibrer les éléments du système, et de nous laisser penser qu'il est bien réalisable. Nous allons maintenant déterminer l'équation de mouvement du système, afin de pouvoir étudier comment l'équilibrer.

On commence donc par faire une étude restreinte sur la masselotte d'équilibrage, afin de déterminer l'effort qu'elle applique sur la coque.

### 3.3.4 Étude restreinte de la masselotte

On commence par chercher le torseur cinématique.

$$\{v(G_m/R_0)\} = \begin{Bmatrix} (\dot{\alpha} + \dot{\beta})\vec{z}_0 \\ \vec{0} \end{Bmatrix}_o$$



$$\{v(G_m/R_0)\} = \left\{ \begin{array}{l} (\dot{\alpha} + \dot{\beta})\vec{z}_0 \\ -\vec{r} \wedge (\dot{\alpha} + \dot{\beta})\vec{z}_0 \end{array} \right\}_{G_m}$$

$$\{v(G_m/R_0)\} = \left\{ \begin{array}{l} (\dot{\alpha} + \dot{\beta})\vec{z}_0 \\ r(\dot{\alpha} + \dot{\beta}) \cos(\alpha + \beta) \vec{x}_0 + r(\dot{\alpha} + \dot{\beta}) \sin(\alpha + \beta) \vec{y}_0 \end{array} \right\}_{G_m}$$

On en déduit la quantité de mouvement.

$$\overrightarrow{p(G_m/R_0)} = m_m r (\dot{\alpha} + \dot{\beta}) \cos(\alpha + \beta) \vec{x}_0 + m_m r (\dot{\alpha} + \dot{\beta}) \sin(\alpha + \beta) \vec{y}_0$$

$$\frac{d\overrightarrow{p(G_m/R_0)}}{dt} = \left[ m_m r (\ddot{\alpha} + \ddot{\beta}) \cos(\alpha + \beta) - m_m r (\dot{\alpha} + \dot{\beta})^2 \sin(\alpha + \beta) \right] \vec{x}_0$$

$$+ \left[ m_m r (\ddot{\alpha} + \ddot{\beta}) \sin(\alpha + \beta) + m_m r (\dot{\alpha} + \dot{\beta})^2 \cos(\alpha + \beta) \right] \vec{y}_0$$

$$\sum \overrightarrow{F_{ext}} = -g m_m \vec{y}_0 + \overrightarrow{F_{coque/masse}}$$

En appliquant le principe fondamental de la dynamique (on néglige ici les moments appliqués à la masselotte car la charge est considérée ponctuelle),

$$\overrightarrow{F_{coque/masse}} = \frac{d\overrightarrow{p(G_m/R_0)}}{dt} + g m_m \vec{y}_0$$

$$\overrightarrow{F_{masse/coque}} = -\frac{d\overrightarrow{p(G_m/R_0)}}{dt} - g m_m \vec{y}_0$$

### 3.3.5 Étude restreinte de la coque

On utilise dans cette étude les mêmes hypothèses que dans l'étude statique ; on cherche ainsi les moments appliqués à la structure en O.

$$\vec{r} \wedge \overrightarrow{F_{masse/coque}} = r m_m \left[ -g \sin(\alpha + \beta) - r(\ddot{\alpha} + \ddot{\beta}) \sin^2(\alpha + \beta) - r(\dot{\alpha} + \dot{\beta})^2 \cos(\alpha + \beta) \sin(\alpha + \beta) - r(\ddot{\alpha} + \ddot{\beta}) \cos^2(\alpha + \beta) + (\dot{\alpha} + \dot{\beta})^2 \cos(\alpha + \beta) \sin(\alpha + \beta) \right] \vec{z}_0$$

$$\vec{r} \wedge \overrightarrow{F_{masse/coque}} = r m_m \left[ -g \sin(\alpha + \beta) - r(\ddot{\alpha} + \ddot{\beta}) \right] \vec{z}_0$$

$$I_{O, \vec{z}_{coque}} = \int_{coque} x^2 + y^2 dm$$

$$I_{O,\vec{z} \text{ coque}} = \int_0^{r\pi} r^2 \rho \, dl = \pi r^3 \rho \quad \text{or} \quad m_{\text{coque}} = \pi r \rho$$

$$I_{O,\vec{z} \text{ coque}} = m_{\text{coque}} r^2$$

$$\text{Ainsi: } I_{O,\vec{z} \text{ global}} = I_{O,\vec{z} \text{ coque}} + d_c^2 m_c$$

En appliquant le principe fondamental de la dynamique une seconde fois, on obtient l'équation de mouvement suivante :

$$(m_{\text{coque}} r^2 + d_c^2 m_c) \ddot{\alpha} = r m_c [-g \sin(\alpha + \beta) - r(\ddot{\alpha} + \ddot{\beta})] - g d_{Gc} m_{\text{coque}} \sin(\alpha) + g m_c d_c \sin(\alpha)$$

### 3.3.6 Exploitation de l'équation de mouvement

Une fois que l'équation de mouvement est trouvée, il faut déterminer une stratégie afin d'équilibrer le système étudié, en s'assurant de ne pas dépasser les limites techniques. Afin que le système soit considéré viable, 4 conditions sont nécessaires :

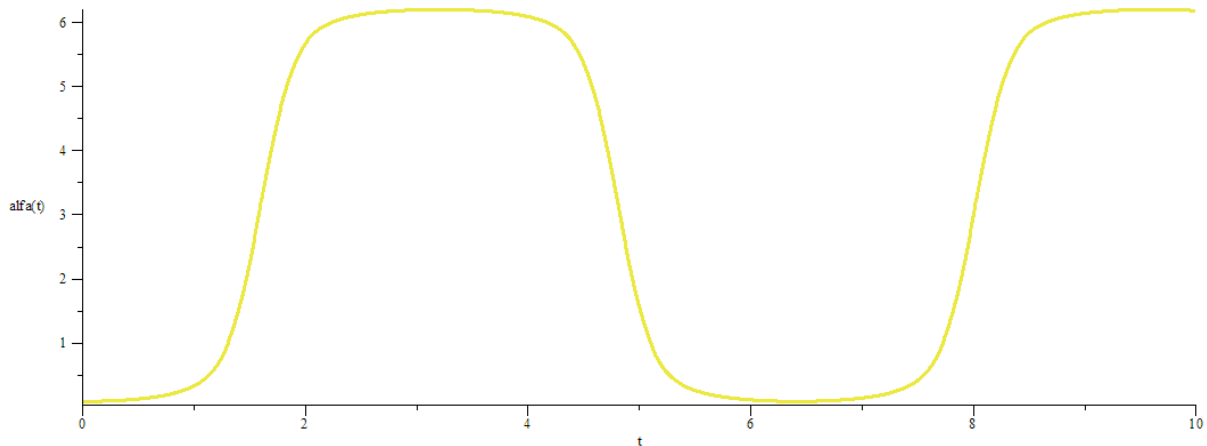
- L'angle  $\alpha$  doit être compris entre  $-30^\circ$  et  $30^\circ$ , limites au-delà desquelles on considèrera que la coque prend l'eau.
- L'angle  $\beta$  doit être compris entre  $-90^\circ$  et  $90^\circ$ , limites au-delà desquelles on ne pourra pas assurer le mouvement de la masselotte d'équilibrage
- Les fonctions de  $\alpha$  et  $\beta$  doivent être continues.
- A la fin de la manœuvre de récupération, les angles  $\alpha$  et  $\beta$  doivent être nulles.

#### Méthode 1 : stratégie de récupération

Cette méthode consiste à chercher une expression de  $\beta$ , fonction de  $\alpha$ , qui assurera le rééquilibrage de la coque. On cherche donc une solution simple à ce problème et on pose  $\beta(t) = a \alpha(t)$

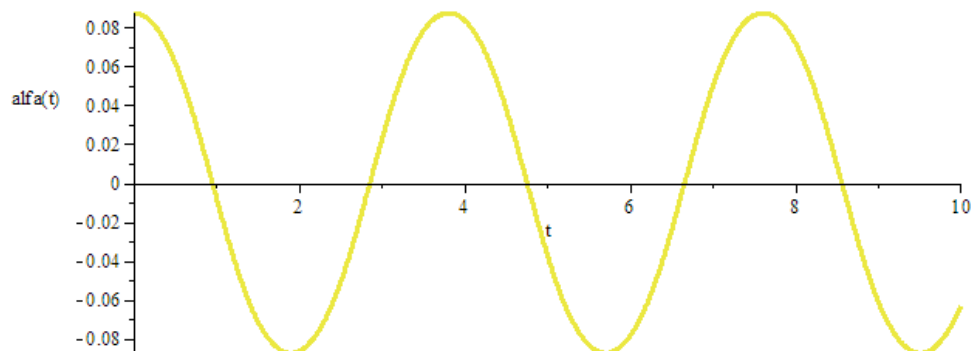
Pour un angle de perturbation initial  $\alpha(0) = 5^\circ$ , sans vitesse angulaire initiale, on obtient deux types de résultats différents :

### Cas 1 : pour a trop petit



Ici,  $a = 5$ . La courbe montre que la coque s'est complètement retournée et a entamé un mouvement de balancier manifestement infini. De plus, compte tenu de l'angle atteint par  $\alpha$ , la masselotte a tourné plusieurs fois à l'intérieur de la coque.

### Cas 2 : pour a suffisamment grand



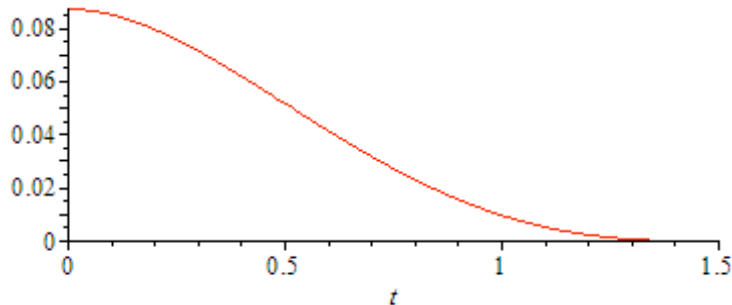
Ici,  $a=7$ . Encore une fois, la coque a entamé un mouvement de balancier ; mais cette fois, elle est resté hors de l'eau. Cela montre que l'on peut donc éviter de chavirer. Cependant, on n'a aucune solution -pour l'instant- permettant d'arrêter le balancement.

### Méthode 2 : Calcul de l'angle $\beta$ nécessaire à la récupération

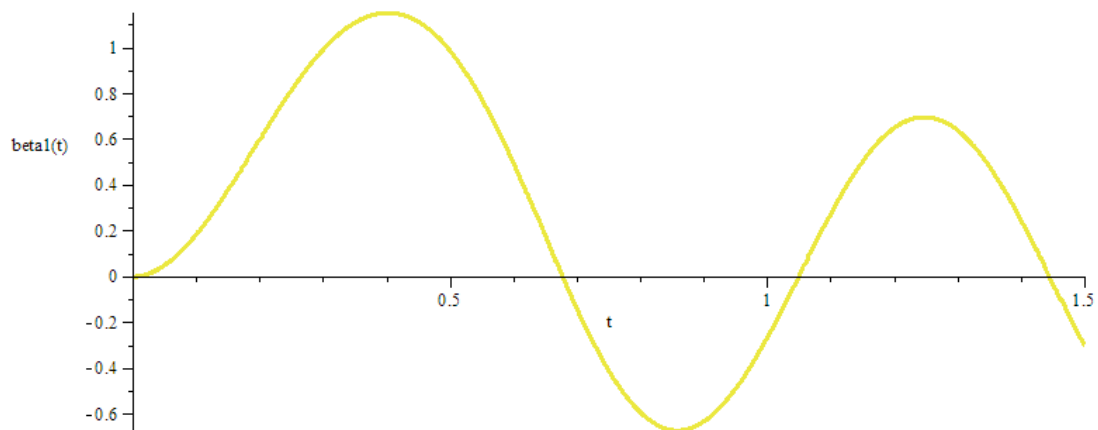
Ici, on déterminera une fonction de  $\alpha$  et on déterminera numériquement la fonction de  $\beta$  correspondante.

On choisit donc la fonction :

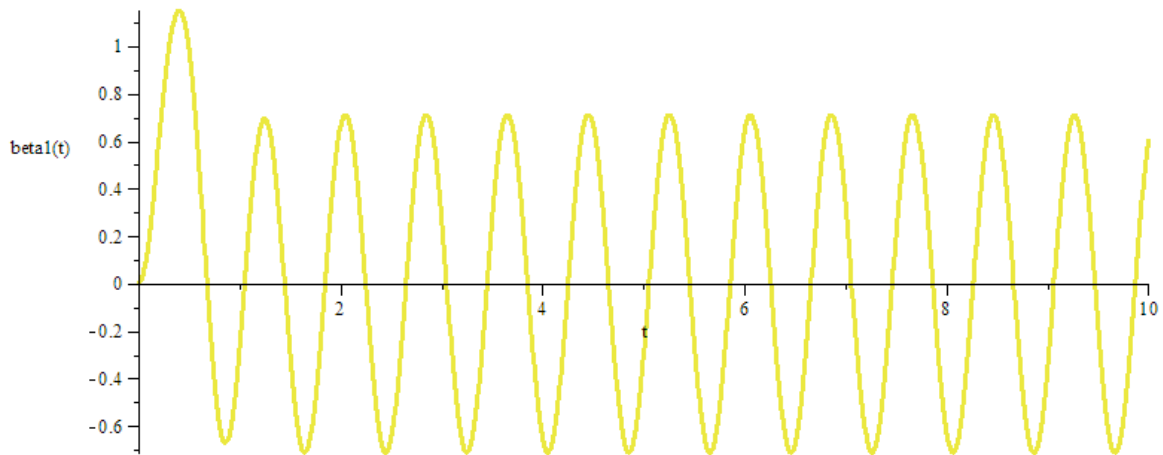
$$\alpha(t) = \begin{cases} \alpha_0 - \frac{12 \alpha_0}{T^4} \left( \frac{t^4}{4} - \frac{2 t^3}{3} + \frac{T^2 t^2}{2} \right) & \text{pour } t < T \\ 0 & \text{pour } t \geq T \end{cases}$$



Ce polynôme a pour particularité d'être continu, d'avoir une dérivée nulle en 0 et T et d'avoir une dérivée seconde nulle en T. Plus particulièrement, on prendra un angle initial de 5° et un temps de rétablissement de 1,5 seconde. En voilà la représentation graphique :



Cette courbe montre que l'on est capable de maîtriser l'angle  $\alpha$  dans certaines limites. Cependant on remarque que l'angle final de  $\beta$  n'est pas nul. Pour comprendre ce qu'il se passe, il faut regarder le reste de la courbe.



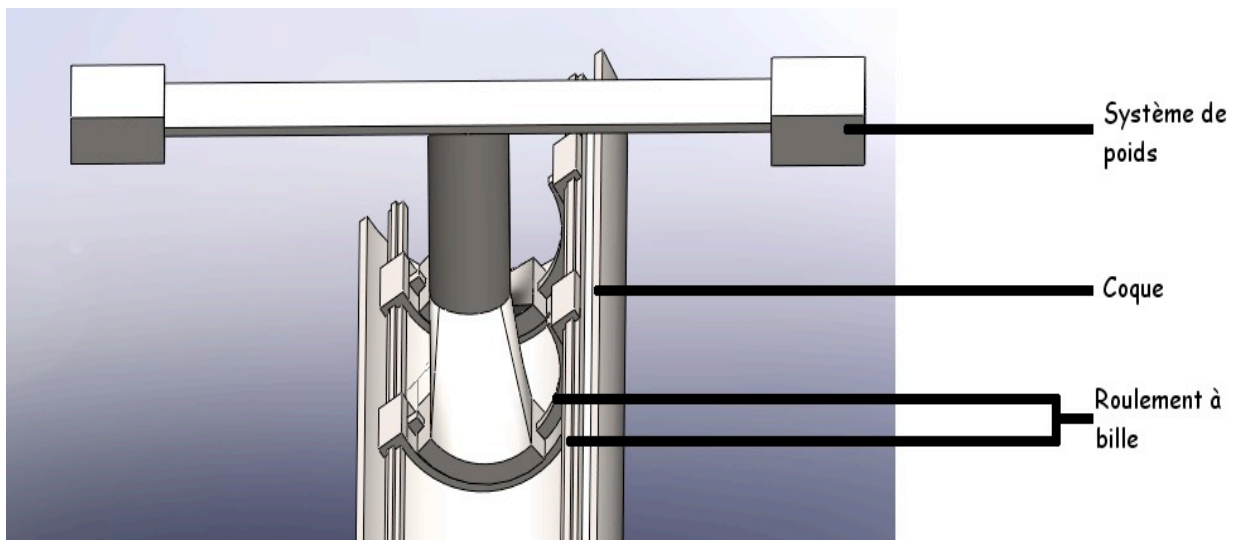
On s'aperçoit que bien que l'angle  $\alpha$  soit nul, la masselotte continue d'osciller de façon permanente. Physiquement, la masselotte d'équilibrage est en train de rouler sans frottement au fond de la coque. La coque étant cylindrique, la force de contact entre la masselotte et la coque passe par le point O, centre de rotation. Ainsi ce mouvement n'influence pas l'angle  $\alpha$ , ce mouvement est donc autorisé par le modèle et n'entre pas en contradiction avec ce dernier.

### 3.3.7 Conclusion

Le système présenté ci-dessus permet bien d'éviter le chavirement de l'embarcation. Cependant, il semble difficile de trouver une stratégie de rétablissement permettant de retrouver un angle  $\beta$  stable en fin de perturbation. D'une certaine manière, le système présenté transforme l'énergie nécessaire au rétablissement de l'embarcation en oscillation car elle ne peut être transmise nulle par ailleurs. On peut néanmoins imaginer utiliser l'énergie emmagasinée contre une nouvelle perturbation ou utiliser la forme non cylindrique de la coque (facteur de stabilité) pour ralentir progressivement la masselotte d'équilibrage.

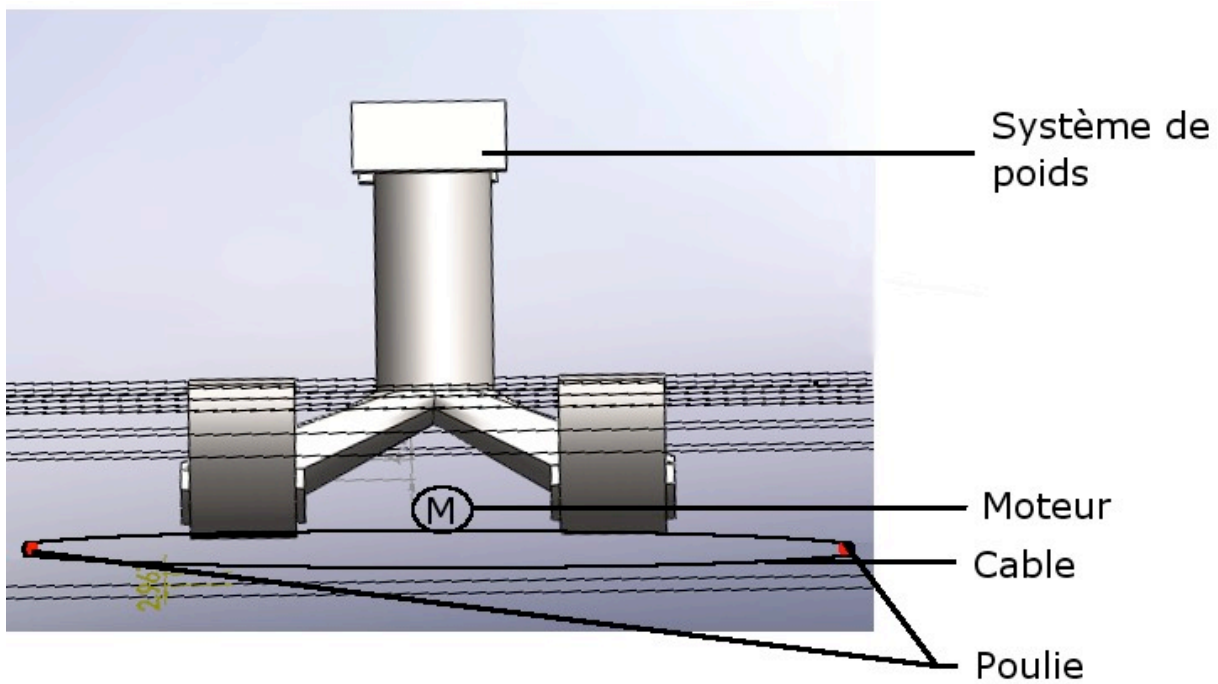
### 3.4 Système « poids - coulisse »

Après avoir vu des vidéos sur la maîtrise du skiff, il nous est apparu que le moyen le plus simple pour stabiliser un aviron pour une personne est de rester toujours perpendiculaire au plan d'eau. Nous avons donc décidé de créer un système qui aurait le même comportement, et nous l'avons imaginé, puis modélisé de la façon suivante :



Comme on le voit sur le schéma ci-dessus, il y a deux systèmes de coulissement, faits de roulement à bille. Le premier permet aux poids de coulisser de manière circulaire sur un portant. Le deuxième permet au système de se translater de l'avant vers l'arrière dans le but de reproduire le déplacement du rameur, pour permettre une meilleure reproduction du mouvement de l'aviron.

Il faut noter que le système de stabilisation pèse le poids d'un pratiquant, soit entre 60 et 80 kg. Ce système était censé reposer directement sur la coque du skiff. D'autre part il avait l'avantage de ne nécessiter aucun moteur pour stabiliser le bateau, en effet ce système fonctionne simplement grâce à son poids. De plus le système est assez facile à fabriquer.



Ce système, comme illustré ci-dessus, ne nécessite qu'un moteur, un câble et deux poulies,. Mais nous n'avons pas étudié l'efficacité de ce système car il ne peut pas être installé sur les avirons récents.

En effet, pour que ce système soit efficace, il faudrait que le système soit à l'intérieur de la coque ; or, le seul endroit où ce serait possible serait au niveau où le rameur pose ses pieds, car le reste de l'aviron est inaccessible (du fait que l'aviron, en fibre de carbone, ne peut être ouvert sans être abimé).

Ceci implique qu'on ne peut pas installer le système d'oscillation de l'avant vers l'arrière, ni y mettre tout le poids du système. De plus, ce système doit avoir une masse proche de celle de l'ensemble du skiff. En effet, si il ne fait pas plus de la moitié du poids total du bateau, il ne pourrait pas stabiliser le skiff (du fait qu'il serait plus déstabilisé par l'autre masse que stabilisé par notre système).

## 4 Réalisation matérielle du prototype



L'objectif de l'activité est de fournir au groupe STPI N° 21 (CAO et réalisation électronique aviron de compétition), piloté par Mr Delamare, un prototype de la forme de la coque d'un bateau , équipé du dispositif imaginé pour le contrôle, de façon à tester la performance du dispositif.

Les étapes de la réalisation ont été les suivantes :




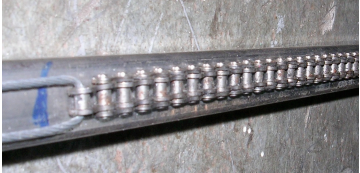

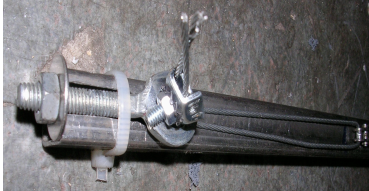
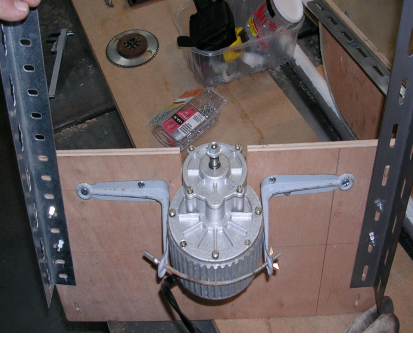
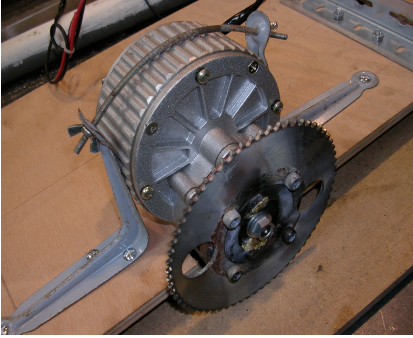
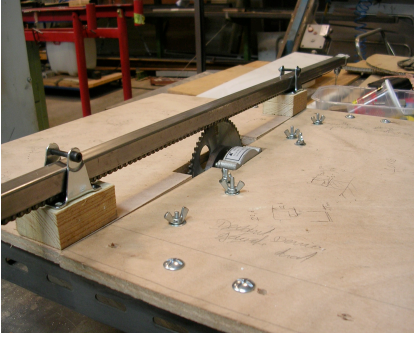
- réalisation d'un moulage en plâtre d'une partie de la coque du skiff, qui sert de contre moule pour la réalisation de la coque en fibre de verre et résine : l'objectif est d'obtenir une forme la plus fidèle possible,
- adjonction de côtés en contre plaqué et leur fixation par des vis à bois : ces cotés apportent de la rigidité à la coque, et permettent également une étanchéité du moule,
- adjonction d'équerres sur les cotés (voir figure 1) de façon à fixer la plaque support de matériel,
- réalisation de la plaque support en contre plaqué, qui vient fermer le volume précédent, et qui sert de point de fixation du moteur d'entraînement, de la tige supportant les masselottes et de l'électronique de contrôle.

Cette plaque support est en deux parties ; l'une porte le moteur, l'autre la tige.

L'ensemble est totalement démontable, ce qui permet les ajustements nécessaires à l'équilibrage. Nous remercions Mr Pegard pour son aide quant à la réalisation de ce système.

Vue partielle du skiff, revêtu de sac plastique pour éviter que le moulage en plâtre adhère à la coque en bois	Skiff après dépôt des couches de plâtre
	



<p>Forme en plâtre après démoulage</p>	<p>Forme en résine et fibre de verre</p>	<p>Plaque support de matériel, et coque dotée des côtés en contre plaqué, et cornières</p>
		
<p>Vue partielle de la tige équipée de la chaîne permettant son entrainement</p>	<p>Fixation de la chaîne sur la tige métallique à l'une des extrémités par simple attache et câble</p>	<p>Fixation de la chaîne sur la tige sur l'autre extrémité avec câble et tendeur de chaîne</p>
		
<p>Vue du moteur et de son système de fixation à la plaque support</p>	<p>Moteur et sa roue dentée</p>	<p>Vue de la tige montée sur la roue dentée, et guidée en extrémité</p>
		

## Autre vue de l'ensemble



## 5 Conclusion et perspectives

Notre travail a consisté en un travail de recherche et d'imagination. Du fait de nos manques de connaissances scientifiques, nous n'avons pas pu réaliser et mettre en place un système de stabilisation comme prévu au début du semestre. Cependant, à l'heure actuelle et ayant suivis les enseignements P8, mécanique de fluides, et P9-12, mécanique générale, nous serions plus aptes à réaliser ce projet.

Ce projet nous a donc permis de nous rendre compte de l'importance des mathématiques et de la physique pour un problème concret. Il nous a, également, permis de se familiariser avec ce sport qu'est l'aviron, peu connu du grand public.

Cet E.C. Projet, nous a montré que lors de d'un projet de recherche, les objectifs qu'on se fixe au début sont rarement atteints. En effet, nous ne pouvons pas toujours prévoir les obstacles que nous allons rencontrer.

Les perspectives pour la poursuite de ce projet sont d'arriver à mettre en place un système mécanique de stabilisation. Nous avons dégrossi le projet. Les suivants devront choisir le système qui leur semble le plus approprié et le réaliser. Par la suite, d'autres projets pourront ainsi étudier la traînée des bateau d'aviron. Notre projet a donc été une base pour les projets à venir.

# Bibliographie

<http://www.avironfrance.asso.fr>

[http://fr.wikipedia.org/wiki/Aviron\\_\(sport\)](http://fr.wikipedia.org/wiki/Aviron_(sport))

youtube : de nombreuses vidéos nous ont permis de mieux voir le fonctionnement d'un aviron.

Annexe 1 : les différents types d'embarcations et leurs proportions (longueur, largeur, poids)



1. Skiff : 8m, 0,27m, 14 kg.
2. Deux rameurs de couple ou double scull : 10,20 m, 0,47 m, 27 kg.
3. Deux rameurs en pointe sans barreur : 10,20 m, 0,37 m, 34 kg.
4. Deux rameurs en pointe avec barreur : 10,80 m, 0,40 m, 36 kg.
5. Quatre rameurs en pointe sans barreur : 13,30 m, 0,50 m, 65 kg.
6. Quatre rameurs en pointe avec barreur : 13,50 m, 0,48 m, 70 kg.
7. Huit rameurs en pointe avec barreur : 18,50 m, 0,57 m, 110 kg.
8. Avirons

## Annexe 2 : les phases d'appui et de remplacement

### **La phase d'appui**

La phase d'appui commence lorsque la palette (la rame) est totalement immergée, et se termine lorsque celle-ci est hors de l'eau. Le rameur va d'avant en arrière.



### **La phase de remplacement**

La phase de remplacement commence lorsque la palette est hors de l'eau et se termine lorsqu'elle est à nouveau immergée ; ici, le rameur passe de la position « arrière » à la position « avant ».

