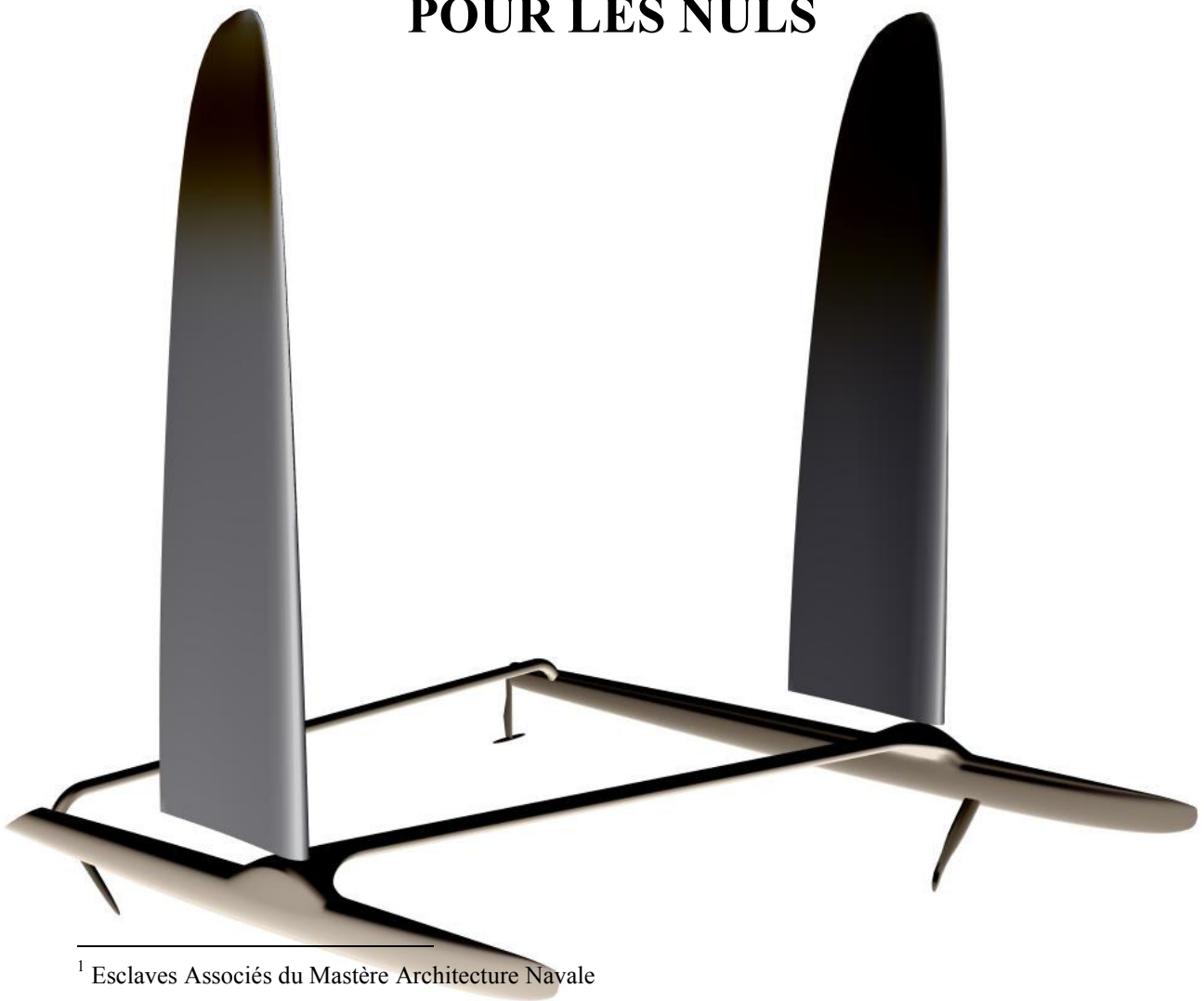


LE CATAMARAN ENSTA

POUR LES NULS



¹ Esclaves Associés du Mastère Architecture Navale

I - Introduction

Ce document a pour objectif de présenter de façon simple et imagée les différents principes de fonctionnement du catamaran dans l'état actuel de sa conception, ainsi que certaines des améliorations envisagées depuis 1998 et qui devrait lui permettre de passer la barre des 49 nœuds. Toutes les informations contenues dans ce document proviennent d'une réunion organisée avec M. Lefodeux au début du mois de mars 2004.

II - Architecture générale

1) *Le catamaran*



Optimisé pour une navigation tribord amure le catamaran est conçu pour naviguer en vole stationnaire avec les coques au dessus de la surface de l'eau à l'aide de foils. En vole le catamaran est entièrement en appui sur un foil et son safran situés sur la coque bâbord. Le catamaran a une géométrie très dissymétrique :

- Longueur de la coque tribord (au vent) 8,5 m
- Longueur de la coque bâbord (sous le vent) 10,5 m
- Largeur hors tout 8,5 m
- Surface de voile 27 m²

2) *Le foil tribord*



Le foil tribord est une aide au décollage. Une fois le catamaran en vol ce foil n'est plus en contact avec l'eau et ne joue par conséquent aucun rôle. Durant la phase de décollage il génère une portance qui permet de sortir la coque tribord hors de l'eau. Son profil ne présente aucune particularité.

3) *Le foil bâbord*



Le foil bâbord est l'organe principal du catamaran : allié au safran pour l'équilibrage en tangage et pilonnement, il permet le vol stabilisé du catamaran. En vol la totalité du poids du catamaran est supportés par ce foil. Son profil très complexe a été optimisé afin de garantir la meilleure stabilité de vol possible.

Le foil bâbord est également utilisé pour générer une force anti-dérive horizontale.

4) *Le safran*



Situé sur la coque bâbord et composé de deux plan porteurs, l'une vertical, l'autre horizontal, le safran permet bien sur contrôler le cap du catamaran, mais aussi d'en assurer la stabilité en vol en équilibrant le fort moment de pilonnement généré par le foil bâbord. Il s'agit également d'un organe très important du catamaran.

5) Les voiles

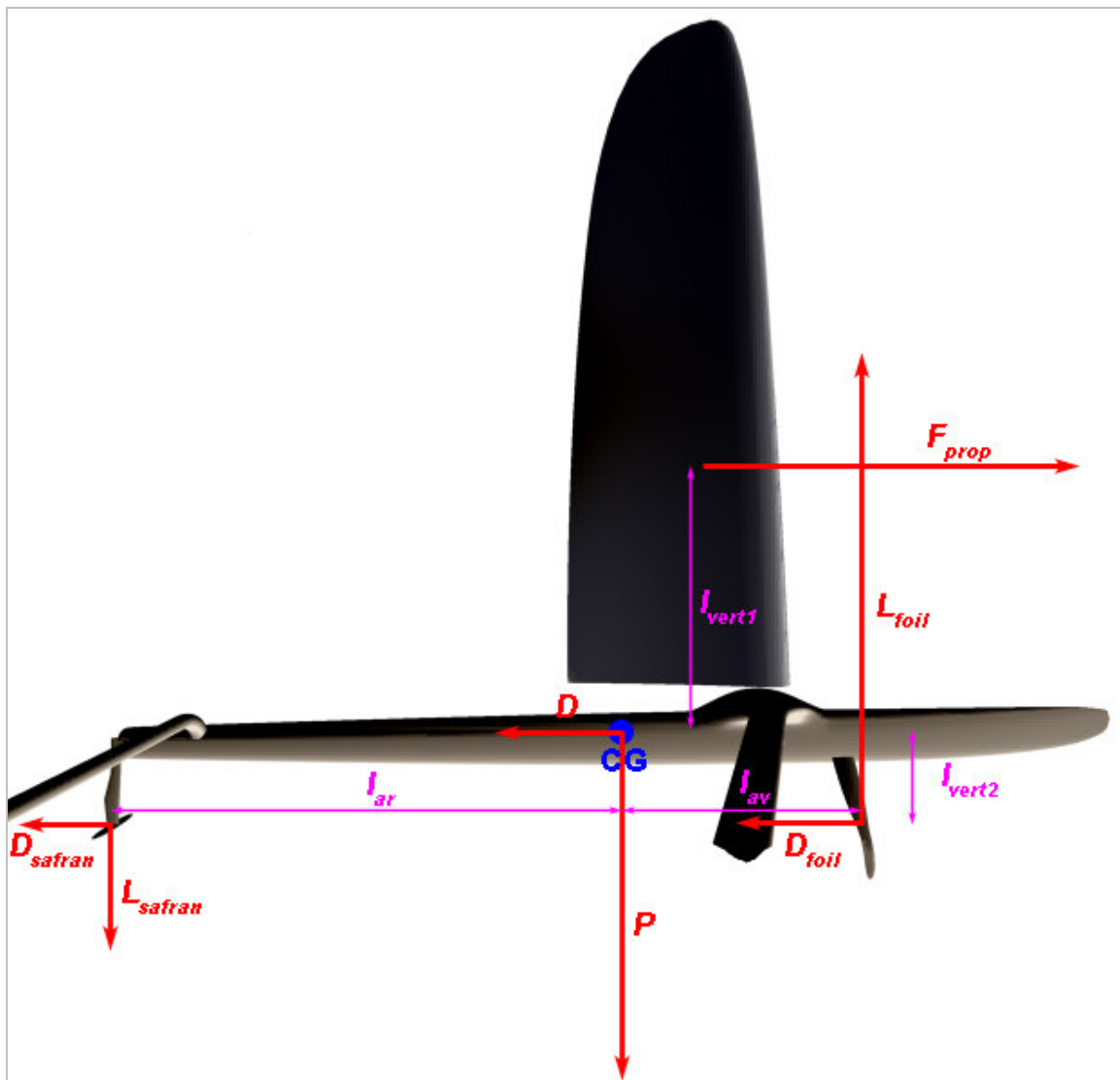


Les voiles sont rigides et possèdent des volets qui permettent d'en changer la courbure et donc les propriétés de portance pour une incidence donnée. Leur forme en plan est elliptique et leur profil relativement complexe.

III - Les équilibres

1) Équilibrage en tangage & pilonnement

- Situation actuelle



L'équilibre des forces verticales est obtenu entre :

- le poids du navire : P
- la portance du foil : L_{foil}
- la portance du plan horizontal du safran : L_{safran}

$$L_{\text{foil}} = P + L_{\text{safran}}$$

L'équilibre des moments autour de l'axe de tangage est obtenu entre :

- le moment créé par la portance du foil : $L_{\text{foil}} \cdot l_{\text{av}}$
- le moment créé par traînée du foil : $D_{\text{foil}} \cdot l_{\text{vert2}}$
- le moment créé par la portance du safran : $L_{\text{safran}} \cdot l_{\text{ar}}$
- le moment créé par la traînée du safran : $D_{\text{safran}} \cdot l_{\text{vert2}}$
- le moment de renversement créé par les voiles : $F_{\text{prop}} \cdot l_{\text{vert1}}$

$$L_{\text{foil}} \cdot l_{\text{av}} + L_{\text{safran}} \cdot l_{\text{ar}} = F_{\text{prop}} \cdot l_{\text{vert1}} + D_{\text{foil}} \cdot l_{\text{vert2}} + D_{\text{safran}} \cdot l_{\text{vert2}}$$

- Remarques

Tangage et pilonnement sont fortement couplés lors de la phase de vol du catamaran. En effet, le tangage a pour conséquence une variation de l'angle d'incidence du profil du foil bâbord, ce qui a pour conséquence une variation de sa portance, qui conduit à une variation de son immersion, donc de la position verticale du centre de gravité du navire : le tangage conduit naturellement à du pilonnement.

Comme nous le verrons, la forme du foil bâbord permet de minimiser ce phénomène en introduisant une très grande raideur de rappel à l'équilibre du foil.

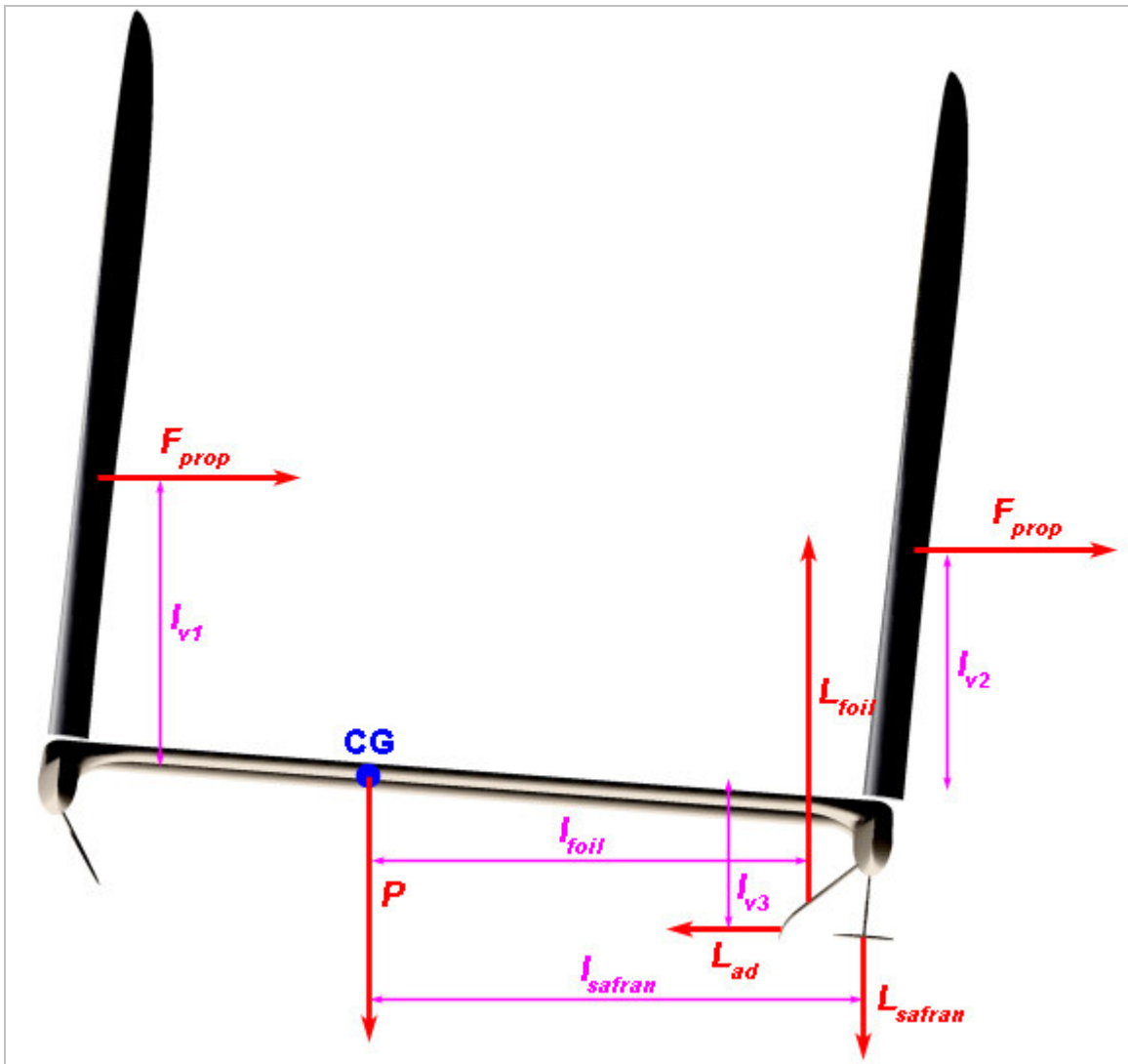
Si l'on veut augmenter la force propulsive il faut compenser le moment de renversement des voiles :

- soit par un avancement du foil
- soit par une augmentation de la portance du foil
- soit par une portance négative sur le plan horizontal du safran

Nous voyons également clairement que le foil est très sollicité mécaniquement.

2) Équilibrage en roulis

- Situation actuelle



L'équilibre des forces verticales est obtenu entre :

- le poids du navire : P
- la portance du foil : L_{foil}
- la portance du plan horizontal du safran : L_{safran}

$$L_{\text{foil}} = P + L_{\text{safran}}$$

L'équilibre des moments autour de l'axe de roulis est obtenu entre :

- le moment créé par la portance du foil : $L_{\text{foil}} \cdot l_{\text{foil}}$
- le moment créé par la force anti-dérive du foil : $L_{\text{ad}} \cdot l_{\text{v3}}$
- le moment créé par la portance du safran : $L_{\text{safran}} \cdot l_{\text{safran}}$
- le moment créé par les voiles : $F_{\text{prop}} \cdot l_{\text{v1}} + F_{\text{prop}} \cdot l_{\text{v2}}$

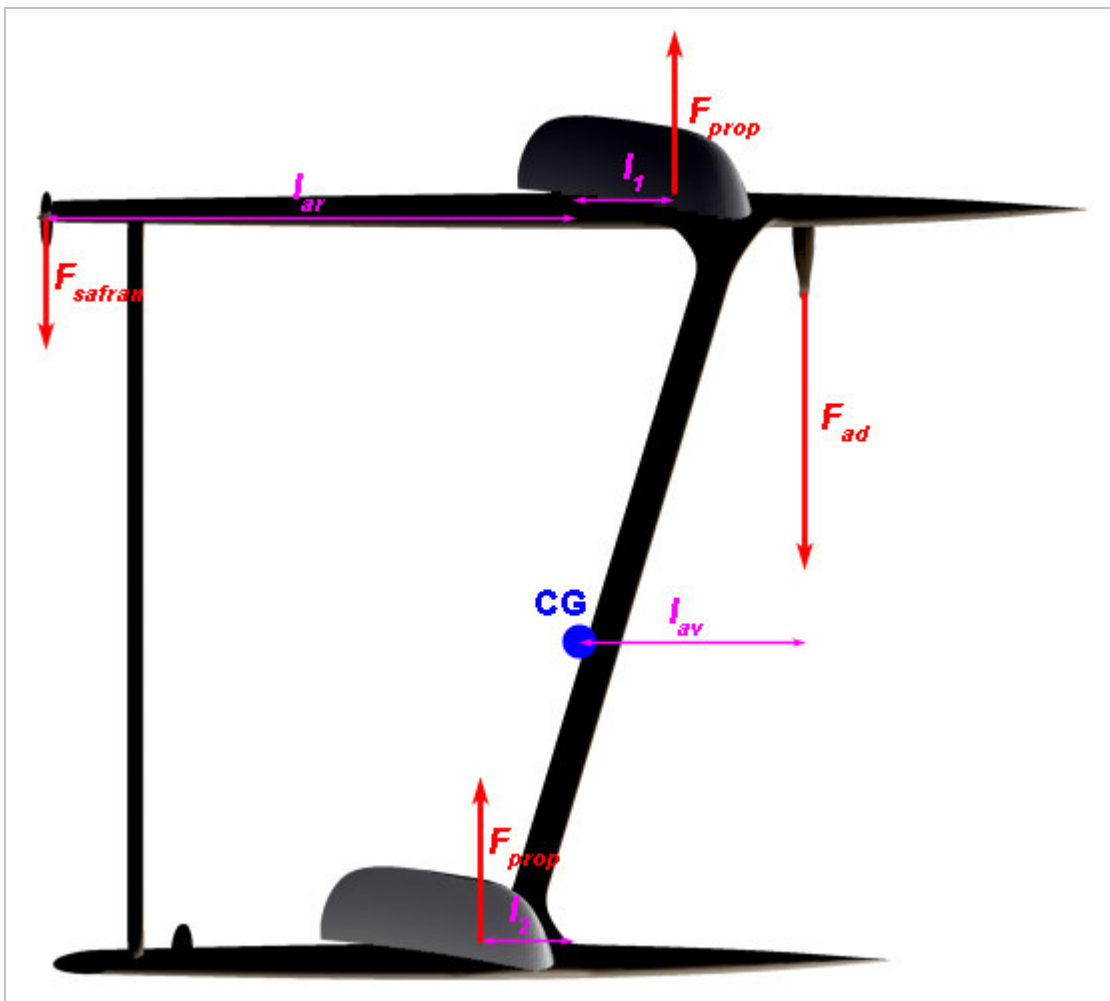
$$L_{\text{foil}} \cdot l_{\text{foil}} = F_{\text{prop}} \cdot l_{v1} + F_{\text{prop}} \cdot l_{v2} + L_{\text{safran}} \cdot l_{\text{safran}} + L_{\text{ad}} \cdot l_{v3}$$

- Remarques

À partir de cet équilibre nous voyons clairement l'intérêt d'avoir un foil tribord en T qui générerait une portance négative et permettrait ainsi d'augmenter la force propulsive du navire sans devoir augmenter la portance du foil bâbord. Afin de contrôler l'incidence de la partie en T d'un tel foil un mécanisme de cuiller simple pourrait être employé.

3) Équilibrage en lacet

- Situation actuelle



L'équilibre des forces horizontales est obtenu entre :

- les forces de propulsion : $2 \cdot F_{\text{prop}}$
- la force anti-dérive du foil : F_{ad}
- la force horizontale du safran : F_{safran}

$$F_{ad} + F_{safran} = 2.F_{prop}$$

L'équilibre des moments autour de l'axe de lacet est obtenu entre :

- le moment créé par la force anti-dérive du foil : $F_{ad} \cdot l_{av}$
- le moment créé par la force horizontale du safran : $F_{safran} \cdot l_{ar}$
- le moment créé par la les voiles : $F_{prop} \cdot l_1 + F_{prop} \cdot l_2$

$$F_{ad} \cdot l_{av} + F_{prop} \cdot l_2 = F_{prop} \cdot l_1 + F_{safran} \cdot l_{ar}$$

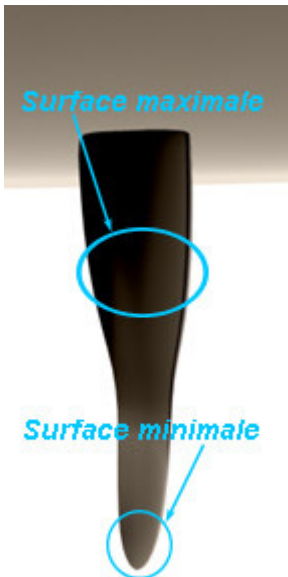
- Remarques

La force horizontale générée sur le safran est une force de compensation qui peut être diminuée moyennant une diminution du moment créé par la force anti-dérive, en reculant le foil bâbord par exemple. Cette force présente sur le safran en permanence rend la barre difficile à manœuvrer et fragilise grandement le safran.

IV - Le foil bâbord

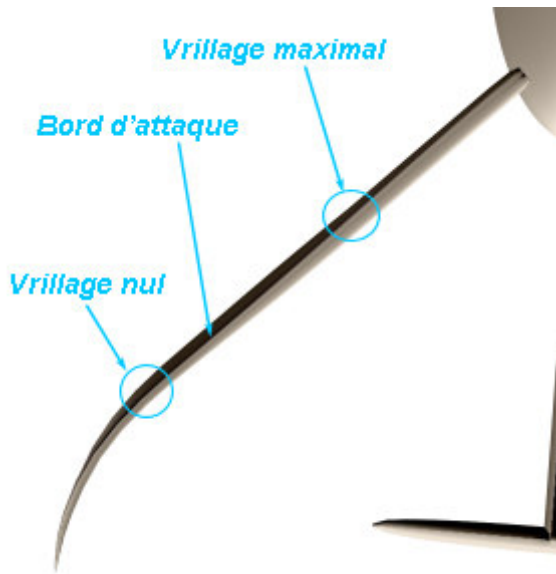
Comme mentionné dans la partie concernant l'équilibrage en tangage & pilonnement il est primordial de minimiser le couplage entre tangage et pilonnement si l'on veut assurer un vol stabilisé du navire. Ceci est réalisé en jouant sur la forme en plan et sur le profil du foil.

1) La forme en plan



La forme en plan du foil bâbord est trapézoïdale afin de garantir une augmentation de la surface immergée plus rapide que l'immersion du foil : une variation d'immersion de Δh va donc générer une variation de surface immergée, et donc de portance, en $k\Delta h$ ($k > 1$).

2) Le profil



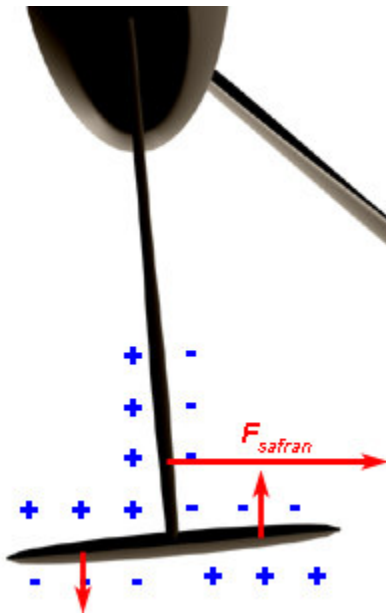
Chaque section du foil est un profil NACA légèrement modifié. Afin d'assurer une portance différente pour chaque immersion les sections sont vrillées le long du foil : vrillage nul des section les plus éloignées de la coque et de plus en plus prononcé vers la coque.

La loi de vrillage est linéaire.

Le vrillage permet d'accentuer la « raideur » du foil : une variation de l'immersion se traduisant par une variation de portance liée à la variation d'incidence des sections.

L'orientation globale du foil ne peut pas être modifiée une fois le catamaran en route.

V - Le safran



Comme nous l'avons vu précédemment le safran est une pièce essentielle à l'équilibre en vol du catamaran. Il est composé de deux plans porteurs : l'un classique, vertical, l'autre horizontal. Les forces qui s'exercent sur le safran conduisent à une sollicitation mécanique très forte de celui-ci, notamment en torsion comme l'explique le schéma ci-contre. Sur ce schéma les zones de pression et dépression sont représentées : elles découlent des différentes circulations créées sur les plans porteurs par la seule présence de la force horizontale F_{safran} .

L'orientation des plans porteurs du safran est réalisée par le barreur à l'aide de deux systèmes de contrôles séparés : un pour chaque plan.

Comme nous l'avons remarqué précédemment la force horizontale exercée sur le plan vertical du safran est le résultat de l'équilibre en lacet du navire. Une diminution de cette force conduirait à une diminution notable des efforts de torsion.

VI - Les voiles

Les voiles ont été élaborées en considérant une augmentation exponentielle classique de la vitesse du vent depuis la surface de l'eau (vitesse très faible) jusqu'à une hauteur d'une dizaine de mètres (vitesse du vent).

Leur forme en plan est elliptique.

Les sections de la voile sont vrillées : très fortement en pied de mât et pas du tout en tête de mât. Ce vrillage permet de compenser la perte de portance liée à une faible vitesse de vent par une incidence plus élevée des sections basses de la voile.

Chaque voile est également munie de 2 volets orientables qui permettent d'en modifier la cambrure et par conséquent d'en augmenter la portance par vent faible notamment.

