



J.SANS (30/11/2017)

Le nouvel AC 75 NZ.

https://www.youtube.com/watch?v=rx2qG_YMrDs

La vidéo des NZ est à la fois surprenante et très riche d'enseignements. Il est évident que nous souhaiterions déjà en savoir plus.

Bien qu'il n'y ait pas beaucoup de données techniques à l'exception de la mention d'une vitesse de 22 nds lorsque le bateau est sustenté sur son foil central (sous le vent) et celui accolé au safran, il est possible d'analyser les images vidéo et d'en extraire quelques idées et réalités.

Ajoutons que quelques datas ont été communiqué par différentes sources :

Longueur hors tout : 75' (22.86 m)

Longueur de coque : 68' (20.72 m)

Bau maxi : 5.30 m

Déplacement en régate 7000 kg

Equipage 10 à 12 : Soit une moyenne de 850 kg à 1020 kg.



Premières impressions

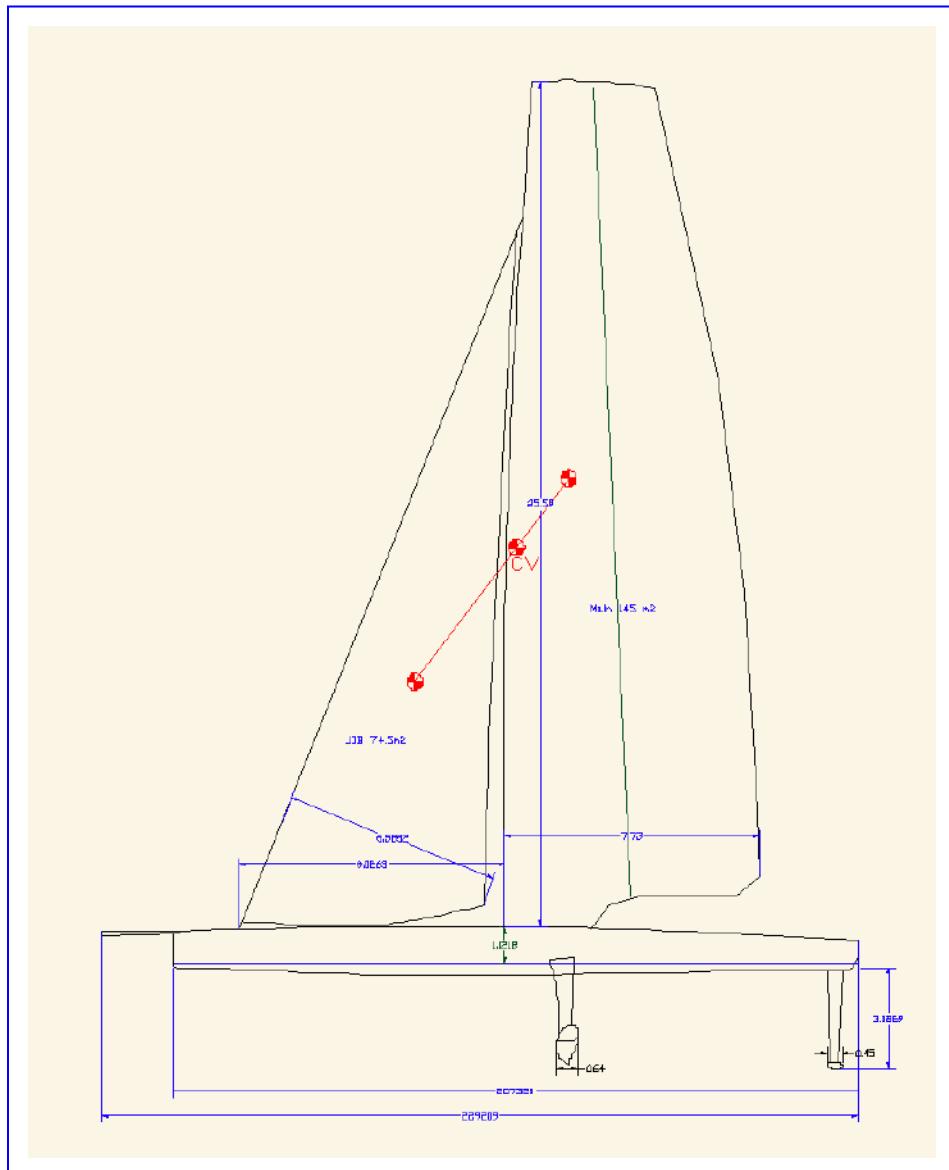
Bien que ce bateau ressemble à un MOTH, car il est entièrement sustenté sur deux foils en T, ce n'est pas, au moins dans sa configuration optimale (1 seul foil sous le vent + 1 foil en extrémité du safran) un foiler symétrique, comme l'est le MOTH.

Dans cette configuration, la force verticale correspondante au déplacement de 7000 kg, se répartie sur les deux foils en T (Central et safran).

On en déduit que pour que l'équilibre soit respecté, la portance fournie par ces deux foils sera égale¹ (7000 daN) et opposée (verticale).

¹ Pour simplifier la lecture j'ai pris 1kg = 1daN = 10N

Transversalement, le couple de chavirage (produit pas la force vélique) s'équilibre avec le couple de redressement (Déplacement X distance horizontale CG, Centre de portance).

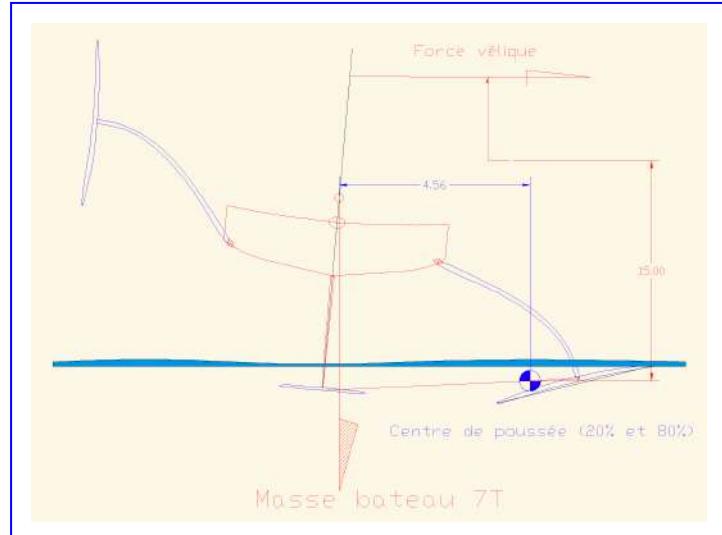


Le bateau se comporte comme un dériveur, bien qu'il ne soit plus archimédien.

Tout repose sur :

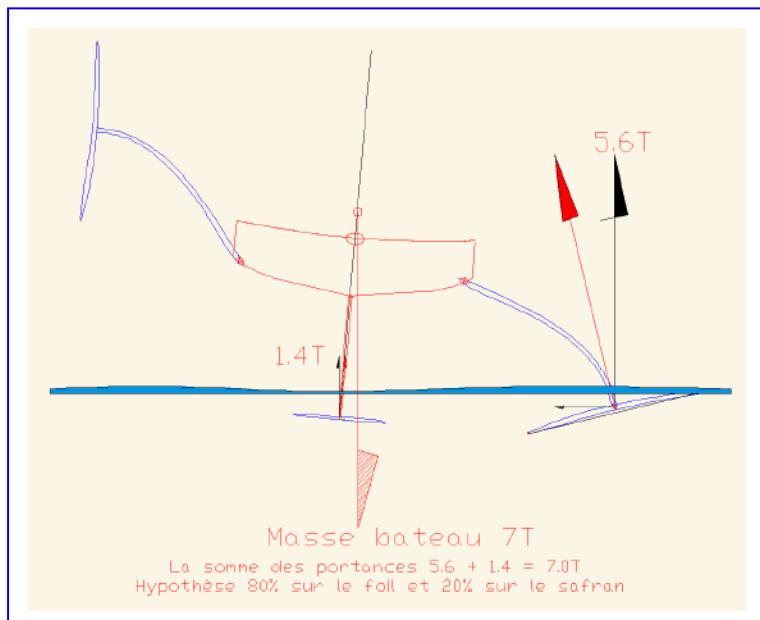
 **L'équilibre Couple Vélique / Couple de redressement.**

Le couple Vélique est instable à cause de l'irrégularité du vent. Le couple de redressement est presque constant, en fait il dépend des variations de la gîte du bateau, par contre la masse du bateau est stable.



 **La Portance fournie par les Foils.**

La portance est directement liée à la vitesse (et aussi un peu à la gîte). Exactement au Carré de la vitesse V^2 , ce qui amplifie les effets générés par l'irrégularité de la vitesse. Toutefois, comme le bateau n'est plus en régime archimédien, il n'est plus soumis aux perturbations créées par l'effet des vagues sur sa carène. On peut dire que les foils évoluent dans un fluide qui s'apparente à celui que rencontre (à la masse volumique près) une aile d'avion dans l'air.



Navigation sur deux foils centraux + le foil du safran

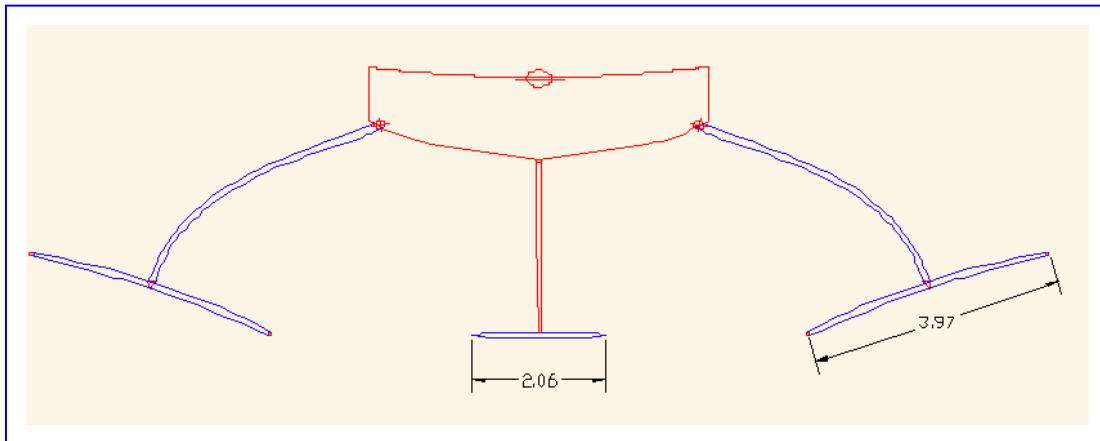
C'est évidemment l'allure la plus stable (le bateau est posé en 3 points), si la force vélique l'est aussi.

Par contre lorsque le vent devient instable, et augmente (risée), le couple de chavirement nécessairement augmente, cela de traduit par deux évènements :

- ✓ Les foils au vent sort de l'eau, puisque tout l'appui est reporté sur le foil sous le vent.
- ✓ La vitesse du bateau augmente (plus de vent, moins de trainée dans l'eau), la portance suit.

Un nouvel équilibre se met en place.

La gestion de la décélération éventuelle, qui se traduira par l'immersion brutale du foil au vent, s'il n'est pas encore entièrement relevé, devra être bien gérée. Dans le cas où le foil au vent est en position haute, la gestion par l'équipage sera plus complexe.



Quelle vitesse

Les dessins reconstruits à partir de images de la vidéo, permettent d'avoir une idée de la surface active de foils centraux en T ainsi que la surface du foil équipant le safran.

Foil central : Envergure : 3,9 m – Corde moyenne : 0,55 - Surface évaluée : 2,14 m²

Hypothèse du centrage des poids (répartition des 7000 kg sur les foils centraux et le foil du safran) :
 80% sur le ou les foils centraux actifs
 20 % sur le foil du safran.

La charge du foil central sera donc de :

- i. **Phase de décollage, la bateau s'appuie sur les deux foils** : 2800 daN
- Portance du foil en prenant en compte son inclinaison : 2873 daN (28730 N)
- ii. **Phase de navigation optimum (appui sur un foil)** : 5600 daN
- Portance du foil en prenant en compte son inclinaison : 5747 daN (57470 N)

Portance (en N) = $0,5 * 1025 * C_x * \text{Surface active (m}^2\text{)} * V^2$ (vitesse en m/s)

$C_x = 0,38$ (évaluation du coefficient de portance des foils de bateaux)

$1025 = \text{masse volumique d'un m}^3 \text{ d'eau de mer}$

Soit pour la période de navigation optimale (sur un seul foil central) :

$$57470 = 0,5 * 1025 * 0,38 * 2,14 * V^2$$

$$V^2 = 57470 / (0,5 * 1025 * 0,38 * 2,14) = 137,90$$

$$\mathbf{V= 11,74 \text{ m/s ou } 22,82 \text{ Nds}}$$

Pour la phase de décollage (appui sur les deux foils centraux), le calcul est identique et donne :

$$\mathbf{V= 8,30 \text{ m/s ou } 16,14 \text{ Nds.}}$$

La portance sur le foil associé au safran est plus faible que le 20% théorique, cela donnerait du cabrage au bateau, ce qui ne devrait pas être un handicap dans la phase de décollage.

Quelle stabilité ?

Le bateau étant faiblement lesté, le centre de gravité avec l'équipage qui manœuvre se situe à environ 1,6 à 1,8 m du fond de la carène.

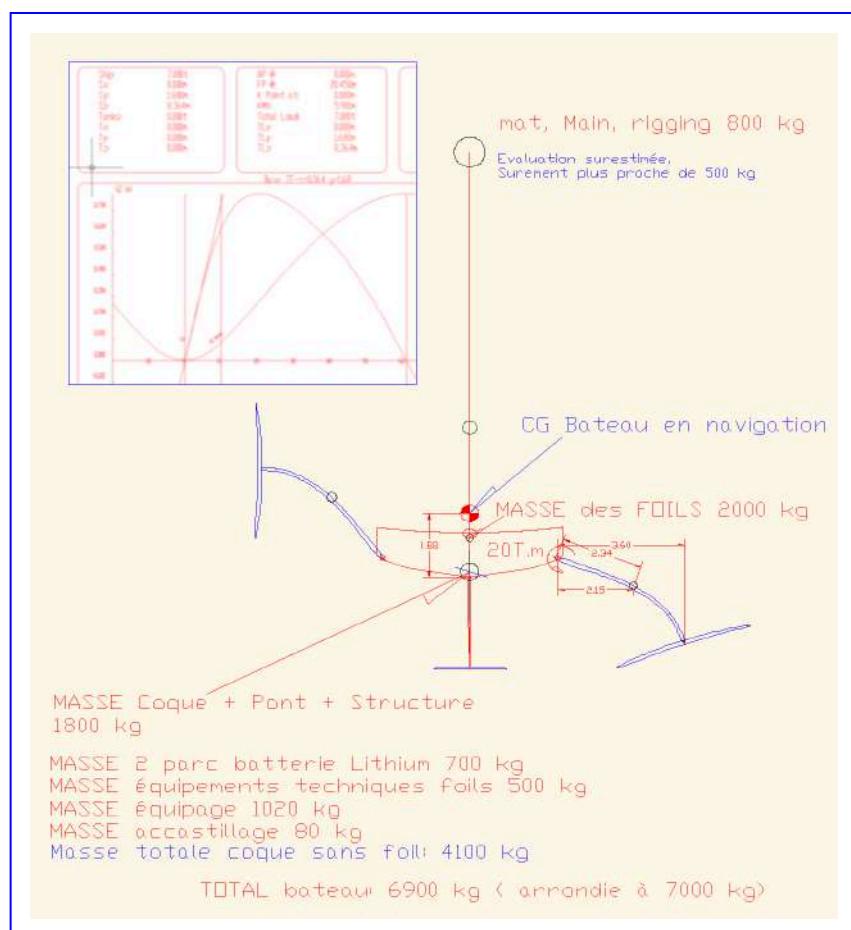
Le franc-bord en régime archimédien est de l'ordre de 1,2m.

Une analyse de la stabilité (régime archimédien) en utilisant un modèle volumique (en bleu) proche du dessin de la vidéo NZ, donne un Avs de 60 à 65° et un Moment de redressement maximum de 5 T.m à 19° de gîte. Ce qui permet de naviguer afin de préparer la sustentation intégrale

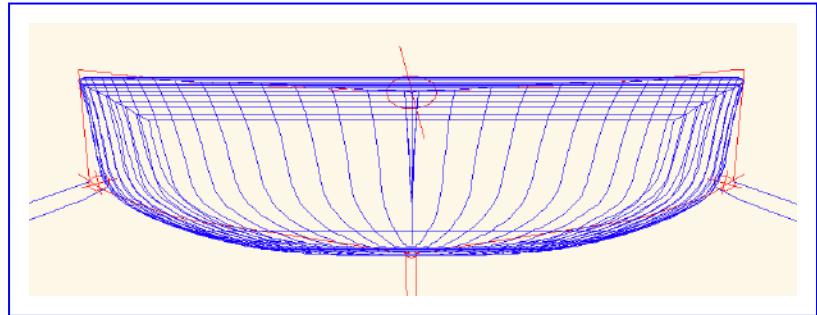
Mais lorsque le bateau est posé sur son foil latéral sous le vent et contrôlé par le foil qui équipe le safran, nous ne sommes plus dans un calcul de stabilité hydrostatique, mais dans une phase d'équilibre en vol.

Tout reposera alors sur :

- Le contrôle de la portance, c'est à dire du trim longitudinal du bateau et aussi du réglage de l'angle d'incidence du foil. Ce contrôle doit être réalisé en temps réel et en continu. Comment... ? Centrale à inertie, etc.
- Le contrôle de la surcharge du moment vérique... même question ?



La période de « roulage », c'est à dire le passage de la navigation Archimédienne afin d'atteindre la vitesse de décollage, à la sustentation hors de l'eau, le bateau risque de manquer de stabilité. Il peut être envisagé de fabriquer les foil en acier, mais un ballastage liquide latéral dégressif au fur et à mesure que le bateau s'élève peut être une solution technique. Le devis de poids autorise l'utilisation de cette technologie.



Instabilité, risque de « chavirage »

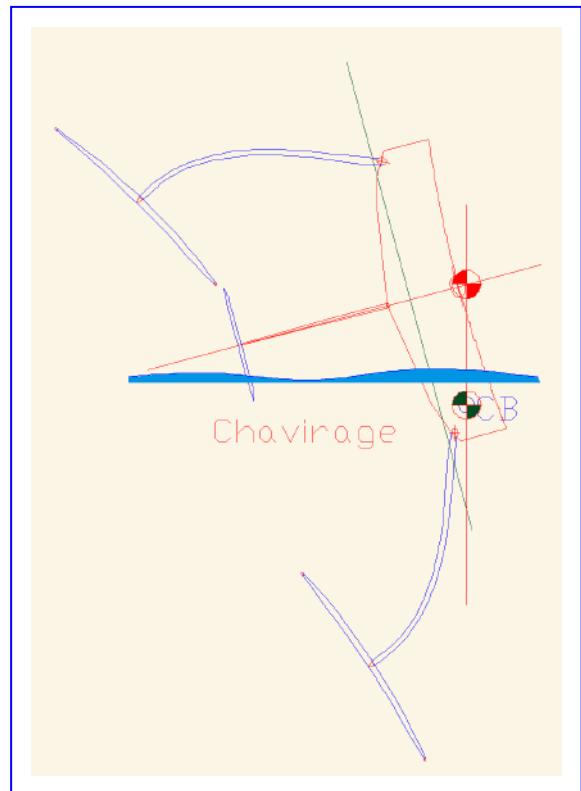
Finalement cet AC75, lorsqu'il navigue sur son foil sous le vent (et celui du safran) se comporte comme un dériveur.

Le risque n'est pas le chavirage (capsize) mais ce que l'on nomme communément le dessalage. C'est à dire cette gîte où le bateau redevient archimédien avec une vitesse nulle, et où l'équipage tente de le redresser (position Upright – gîte 0° -) en s'installant sur la dérive.

Sur ce bateau, il est prévu de remplacer l'action des équipiers pour redresser le bateau, par la manœuvre du foil au vent. Je rappelle que le support de ce foil est en acier (masse 1000 kg).

Les calculs montrent que l'angle de chavirage (Avs) se situe à un angle de gîte de 65 à 75 ° suivant le devis de poids.

Reste qu'un dessalage aura des effets pour le moins négatif sur les résultats de la régate.



Quelques calculs

Devis de poids

Les NZ annonce un déplacement de 7T en régime archimédien pour cette coque de 68'. C'est un déplacement léger (DLR IRC =21). Par comparaison en VOLVO 70 a une DLR de 45 pour un déplacement de 14T (avec une quille/bulbe de 6500 kg).

Il ne faut pas oublier qu'avant de voler, le bateau doit acquérir la vitesse de décollage, comme un avion qui roule sur la piste, d'où l'importance d'une carène rapide.

De plus les 3 foils en T représentent dans la phase de « roulage » une trainée importante sous l'eau, ce qui accentue l'importance de la carène.

MASSE Coque + Pont + Structure 1800 kg
MASSE 2 parc batterie Lithium 700 kg
MASSE équipements techniques foils 500 kg
MASSE équipage 1020 kg
MASSE accastillage 80 kg
Masse totale coque sans foil: 4100 kg
TOTAL bateau 6900 kg (arrondie à 7000 kg)

La masse des deux foils centraux est d'environ 2000 Kg, ce qui laisse 5000 kg pour le reste des composants du bateau.

J'ai chiffré la masse du gréement, voiles, mat à 800 kg, c'est sûrement exagéré, 500 kg paraît plus raisonnable.

Les manœuvres des foils

Point N°1 : Il faut de l'énergie pour manœuvrer les deux foils centraux et les foils équipant le safran. On comprend facilement que les foils centraux consommeront 90% de l'énergie.

Les solutions « coureurs cyclistes » ou « winchmen » ne fonctionnent plus. Rappelons que Christopher FROOME a été estimé à 0,436 kW/h lors du Tour de France. Cela ne fait jamais de 2 kW/h pour une régate de 5 heures. Pour arriver à manœuvrer les foils centraux, il faudra plus que le Top TEN du Tour de France cycliste sur le pont, ou dans les soutes.

L'AC75 NZ n'est plus un « engin de plage » comme l'était le catamaran de la dernière AC.

Les manœuvres de foils de cet AC 75 NZ, demanderont :

- ✓ De l'énergie
- ✓ Des temps de réponse rapides
- ✓ Une fiabilité mécanique, électrique et électronique importante.

Pour manœuvrer un foil central de la position navigation (bâbord amure) à la position relevée au vent Tribord amure (cas d'un virement de bord), un rapide calcul montre qu'il faut disposer de :

Couple pour soulever le foil au vent : $17500 \text{ N} * 3.867 \text{ m} = 67670 \text{ m.N}$

Bras de levier minimal durant la rotation pour réaliser cette opération : 0.630 m

Force nécessaire à exercer sur ce bras de levier : $67670 / 0.630 = 107400 \text{ N}$

Angle à Parcourir : 65°

Temps de manœuvre : 10 secondes

Vitesse angulaire : 0.113 rad/s

Puissance nécessaire : 7673 Watts (7.6 kW)

Chaque manœuvre demande $7600 \text{ W} * (10 \text{ sec}) = 76000 \text{ Joules}$, soit $76000 / 3600 = 21 \text{ Wh}$.

À chaque virement de bord dans une régate (2 manœuvres de foils TB et BB), la consommation est donc de 42 Wh, soit avec un rendement électrique de 0.7 : 60 Wh.

Soit près de 6.0 kWh pour 100 virements dans la journée (2 régates).

Pour information, actuellement il faut compter 85 kg de batterie pour 10 KWh (batterie Lithium).

J'exclue d'utiliser comme source d'énergie primaire, un moteur thermique qui fonctionnerait en permanence. Ce moteur étant associé à une génératrice, un stock de batteries tampons et les moteurs électriques accouplés aux organes mécaniques.

De même, je pense qu'un système hydraulique (vérin linéaire ou rotatif) n'est pas approprié, car les déplacements linéaires ou angulaires sont difficiles à contrôler. De plus l'hydraulique impose de la tuyauterie, une réserve d'huile importante et surtout une pression du fluide à 80 ou 100 Bars.

Naturellement la technologie « tout électrique » s'imposera. Ainsi le moteur électrique de chaque système mécanique sera associé à une vis à bille (faible frottement, excellent rendement, réversibilité, masse). C'est par exemple une technologie très utilisée sur les avions pour la commande de sortie de volets hypersustentateurs.

Un des avantages de vis à bille est d'être réversible, cela se traduit par deux transformations de mouvement :

- 1) La vis est motrice et l'écrou se déplace en translation
- 2) L'écrou est moteur (translation) et la vis est entraînée en rotation.

Cela permet de « laisser tomber » par gravité le foil lorsqu'il est position haute et de récupérer l'énergie électrique fournie par le moteur électrique qui devient génératrice. C'est toujours cela qui est gagné, et c'est gratuit.

Quid des batteries : Oublions la technologie « au plomb ». Un rapprochement avec les initiateurs des Formules E (Formule 1 électrique). Ces voitures (250 km/h) sont équipées d'un pack batterie au Lithium de 30 kWh, pour un poids unitaire de 320 kg.

Le poids de 640 kg, 700 avec la structure de stockage dans le bateau, ne pose pas de problème, car il faut atteindre un déplacement de 7000 kg.

On constate que la proposition des NZ développera le travail neuronal des équipes.

Une question de matériaux

Un bateau archimédien est un engin relativement soft. Les efforts ne sont pas d'une violence extrême.

Dès que l'on aborde la navigation dans deux configurations très différentes ou la vitesse archimédienne peut être multipliée par deux et où apparaissent des pics de sollicitations violent, le choix des matériaux devient prépondérant.

Sur ce type de bateau, les actions mécaniques sur les foils sont du même type que celles auquel est soumis un train d'atterrissement.

A 25 nds, l'eau est un obstacle solide, combiné à des décélérations très fortes, les lois de la dynamique génèrent des sollicitations destructrices.

Sur ce bateau, du fait qu'il n'y a pas de lest sous forme de bulbe, il n'y a pas de problème de devis de poids pour ne pas dépasser les 7000 kg.

Les concepteurs n'ont aucun intérêt à utiliser des matériaux de faibles densités (type composite carbone) dans la fabrication des supports des foils centraux. Cette démarche n'est évidemment pas valable pour la conception du safran et de son foil et « T » associé.

Reste alors les matériaux métalliques à haute limite élastique (environ 2000 MPa). Ce sont des aciers, mais la contrepartie d'une limite élastique élevée se trouve dans une très grande sensibilité à la corrosion sous tension. La moindre pique de rouille peut générer une fissure qui se développera ultra rapidement. Sur le train d'atterrissement, ces aciers sont cadmierés et peints et surtout inspectés avant chaque décollage.

Il existe aussi des « inox » qui atteignent 1700 MPa de limite élastique, mais ces inox sont très chers.

Déjà que le forgeage est complexe, l'usinage de finition, est loin d'être une opération aisée.

Les poutres qui font office de supports des foils centraux sont encastrées dans la coque.

Le moment de flexion à l'encastrement est de l'ordre de 30T.m.

J'exclue les alliages de Titane, bien que certaines nuances arrivent à 1200 MPa, parce la densité du Titane est bien inférieure à celle des Aciers et corolaire son Module de Young est 30% moins élevé que celui de l'Acier. Cela signifie que sa déformation élastique sera bien supérieure à celle de l'acier, ce qui poserait des problèmes pour un bateau qui s'appuie sur foil par l'intermédiaire d'un bras de 3,6m en porte à faux.

Conclusion

L'idée paraît géniale, ce sera un bateau ludique ou il faudra maîtriser les compétences techniques et le savoir faire des équipages.

Le bateau sera difficile à maîtriser et nous assisterons à des figures de voltiges impressionnantes.

Pour autant, il ne faudra pas négliger le développement de la carène, car avant de voler il est nécessaire de décoller et celui qui décollera le plus vite prendra un ascendant sur son adversaire.

Ces quelques secondes bien capitalisées seront complexes à reprendre. C'est un peu comme le premier virage en Formule 1.

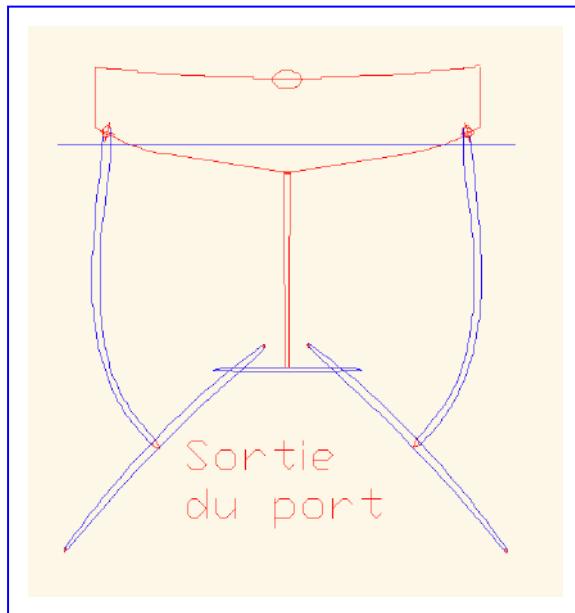
Les conceptions mécaniques, électriques et électroniques rassembleront des pools d'ingénieurs (y compris les Architectes Navals) de haut niveau.

N'est ce pas le but de la COUPE ?

Jean SANS
30 Novembre 2017

Durant la lecture de cette analyse, il garder en mémoire que les seules informations disponibles sont une vidéo de 3 minutes et quelques textes sur le site officiel NZ.

PS: Configuration pour les manœuvres de port (stabilité archimédienne maximale)





J. SANS (08/01/2018)
Version 2 (Suite du papier V1.0)

<https://www.uncl.com/2017/12/01/techniques-innovations/nouvel-ac-75-nz-jean/>

Préambule

Mon précédent papier du 12 décembre 2017 était la traduction de la vidéo (image de synthèse), d'excellente qualité de TEAM NZ, qui présentait les grandes lignes du nouveau AC75.

Les plans ont été déduits et dimensionnés (c'est le plus important) à partir des images. Les calculs ont été réalisés en utilisant les très rares paramètres connus, à savoir un déplacement archimédien d'environ 7000 kg et une vitesse annoncée de 22 noeuds sur un seul foil central et le foil arrière.

Ce papier n'était que le résumé technique des plans reconstitués et des calculs mais aussi de mon imagination.

En effet, le passage d'une **configuration Archimédienne** à une **configuration Foiler** n'est pas simple, surtout pour un monocoque de 75'. Il ne suffit pas de décoller, il faut ensuite évoluer.

Et si on se réfère à l'histoire, les premiers vols des frères WRIGHT ont réellement préfiguré ce que serait un avion parce qu'ils avaient aussi inventé les moyens techniques permettant de contrôler leur avion, c'est à dire, décoller, virer, atterrir.

Pour l'AC75, le problème est identique : voler, OK c'est assez « facile », mais prendre un départ de régate, virer une bouée et répondre à un engagement présente d'autres difficultés.

Si on ajoute que pour être performant, il faudra voler à une altitude relativement constante en permanence, on conçoit que les difficultés ne sont pas mineures.

Quelques hypothèses nouvelles depuis mon dernier papier

Cet AC75 évolue donc dans deux configurations, la première est Archimédienne, la deuxième est le vol en appui sur des plans sustentateurs (Foiler).

D'abord la configuration Archimédienne

J'élimine la configuration « Dock Configuration » où le bateau est pris en charge par les « tenders ». Dans cette configuration le bateau est évidemment archimédien.

Ensuite avant de voler il faut nécessairement se mettre en bout de piste et lancer l'engin pour s'extraire de l'eau, comme l'avion roule sur la piste et décolle. Pour cela dans les deux cas il faut une vitesse cible (VR puis V2 pour les avions, vitesse qui dépend de la masse au décollage et de la surface alaire).

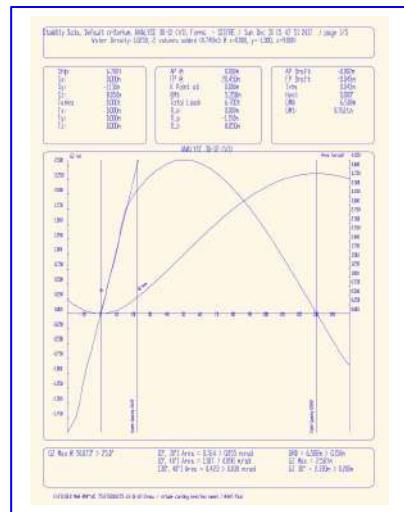
Dans cette phase préparatoire, l'AC 75 devra avoir une bonne stabilité.

L'étude présentée dans le premier papier prenait d'hypothèse que les bras des deux foils centraux seraient fabriqués en acier et que la partie foil serait en composite carbone.

Les devis de poids supposés, et les calculs de stabilité montraient que la surface sous la courbe de stabilité devait être augmentée. Cela signifiait qu'il était nécessaire de « descendre les poids des appendices », sans pour autant installer un bulbe.

J'ai donc inversé les matériaux : bras des foils en composite Carbone (monolithique) et foil en Acier (soit une masse de 1750 kg), j'ai imaginé le safran, auquel est fixé le plan porteur horizontal, en Acier. Mais cette dernière option peut évoluer.

Ainsi on obtient, un Moment de redressement maximal de 17.2 T.m (Tonnes*mètre) à 50° de gîte (courbe ci-dessus).



Ensuite la configuration Foiler

Lorsque la vitesse est atteinte, il faut donner une impulsion « à cabrer » afin d'augmenter l'angle d'incidence des deux foils latéraux et « faire décoller l'AC75 ».

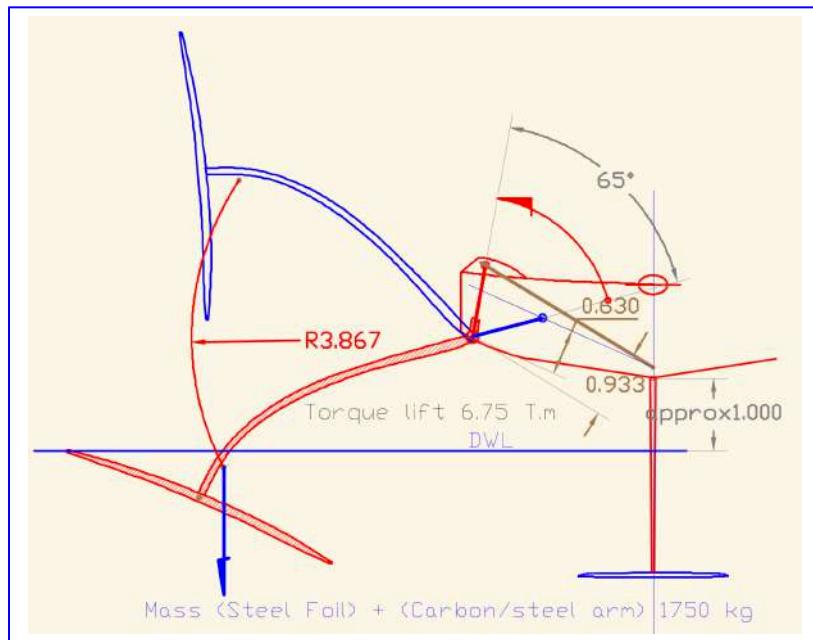
Rapidement le bateau va s'extraire du régime Archimédien. Il devient alors nécessaire de contrôler l'AC75 afin d'obtenir un vol stable (hauteur constante par rapport à l'eau) quel que soit la trajectoire de l'AC75. Je reviendrai sur la notion de vol dans le prochain paragraphe.

A ce stade :

- **Appui sur les deux foils centraux + le plan porteur arrière.**

Ce sera la configuration Régate de l'AC75.

Normalement il ne devrait jamais retrouver la configuration Archimédienne durant toute la régate.



Puis arrive le passage en configuration « FOILER Optimale », c'est à dire :

- **« Voler » sur 1 seul foil central + le plan porteur AR »,**

Cette action demande des moyens techniques.

En effet, il faut relever le foil au vent, ce qui nécessite de l'énergie. La masse du foil et de son bras est de 1750 kg et son centre de gravité est éloigné de 3.8 m de son centre de rotation.

Quelques chiffres

Couple pour soulever le foil au vent : $17500 \text{ N} * 3.867 \text{ m} = 67670 \text{ m.N}$

Bras de levier minimal durant la rotation pour réaliser cette opération : 0.630 m

Force nécessaire à exercer sur ce bras de levier : $67670 / 0.630 = 107400 \text{ N}$

Angle à Parcourir : 65°

Temps de manœuvre : 10 secondes

Vitesse angulaire : 0.113 rad/s

Puissance nécessaire : 7673 Watts (7.6 kW)

Chaque manœuvre demande $7600 \text{ W} * (10 \text{ sec}) = 76000 \text{ Joules}$, soit $76000 / 3600 = 21 \text{ Wh}$.

À chaque virement de bord dans une régate (2 manœuvres de foils TB et BB), la consommation est donc de 42 Wh, soit avec un rendement électrique de 0.7 : 60 Wh.

Soit près de 6.0 kWh pour 100 virements dans la journée (2 régates).

Pour information, actuellement il faut compter 85 kg de batterie pour 10 KWh (batterie Lithium).

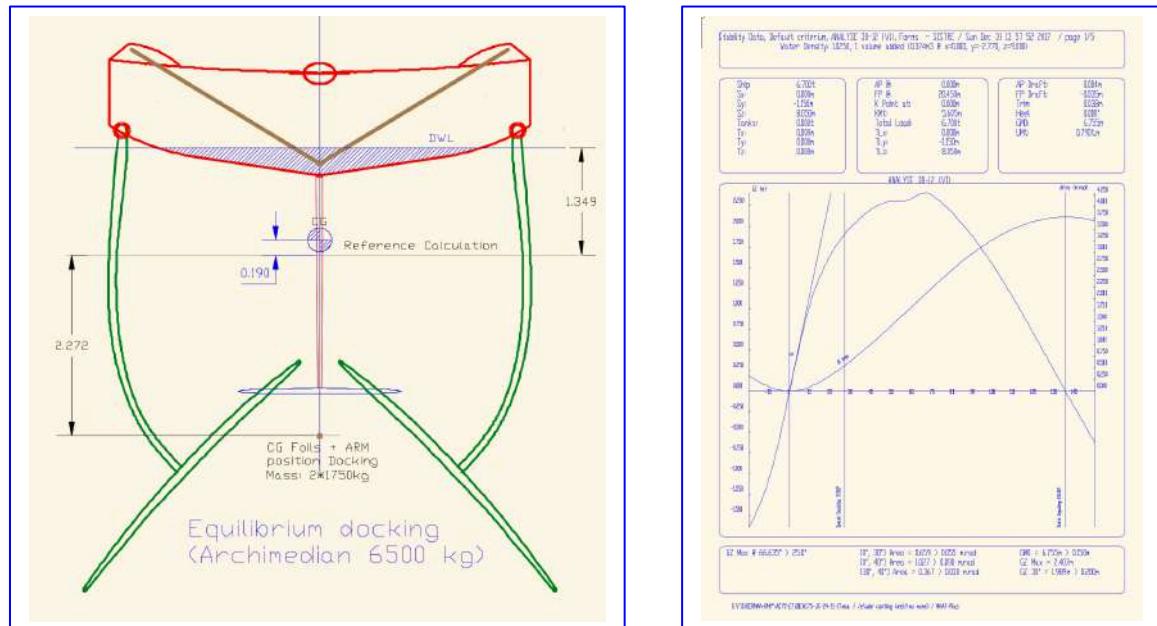
Étudions maintenant la navigation de l'AC75.

En navigation

Ce bateau (qui devient un avion) possède 3 configurations de navigation.

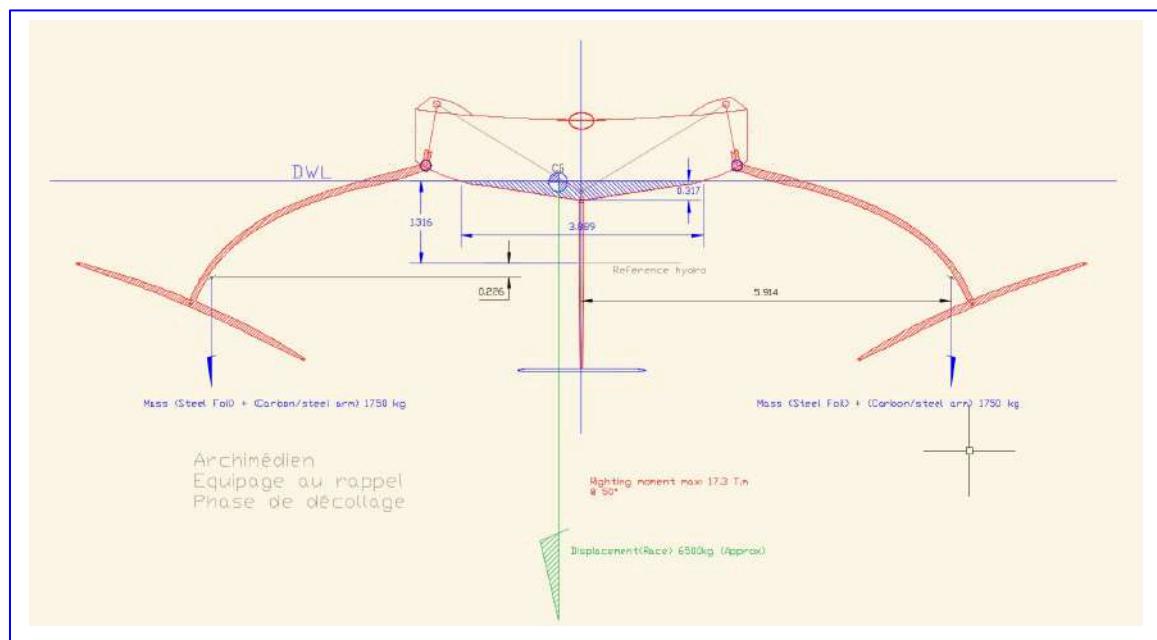
Configuration 1 (mode Archimédien)

C'est le moment où il faut quitter le ponton et rejoindre la zone où se dérouleront les régates. Les foils sont repliés sous la coque, le bateau est remorqué (à couple) par un ou deux semi-rigides. La stabilité est maximale.



Configuration 2 (mode Archimédien)

Le bateau est toujours Archimédien, les foils sont déployés pour être en configuration « régate ».



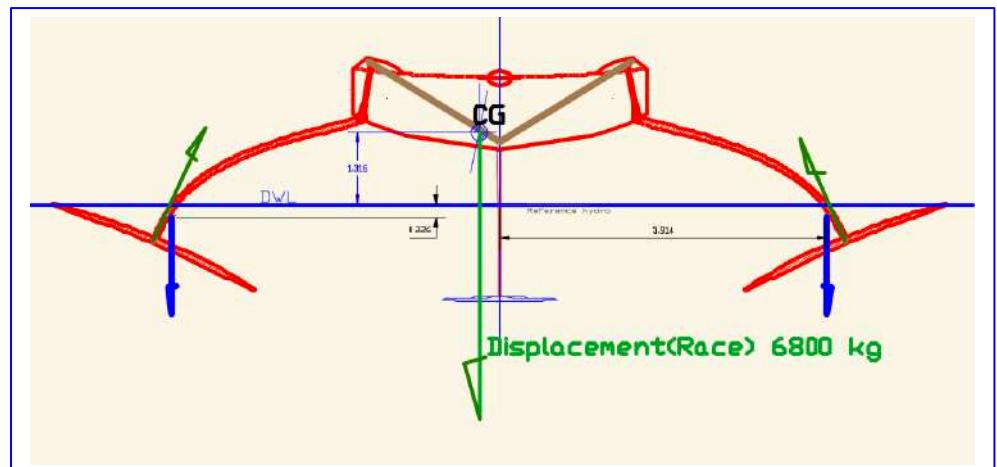
L'équipage est au vent, ce qui explique que le CG (Centre de gravité soit excentré).

Le bateau se place dans une position de navigation qui produit le maximum de vitesse (16 nœuds environ) afin d'accéder au domaine de vol en s'appuyant sur les 2 foils.

Configuration 3 (passage du mode Archimédien au mode Foiler)

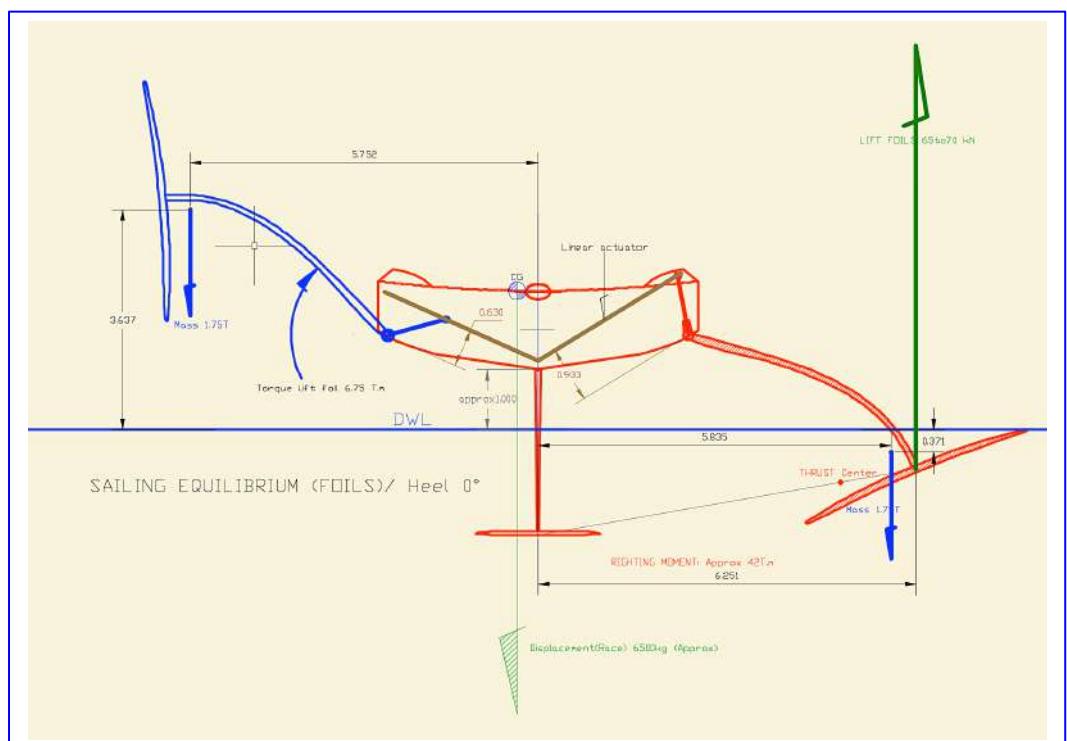
Dans cette configuration, si les conditions météorologiques le permettent, le bateau passe alors en **Configuration 4** pour naviguer sur un seul foil et le plan porteur du safran.

Configuration 4 (passage au mode Foiler « optimum »)



Cette opération sera la plus délicate, car l'AC75 passera d'un **appui sur 3 points** à un **appui sur 2 points** :

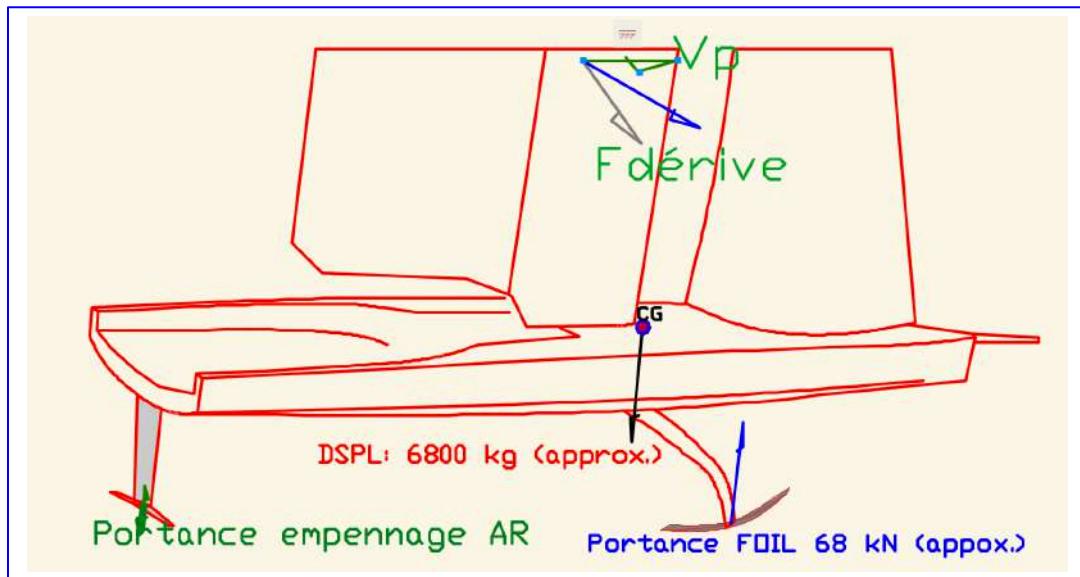
- Les deux foils latéraux produisent le « LIFT » équivalent au Déplacement d'environ 7000kg, répartit sur les 2 foils.
- Lors du passage en configuration 4, ce « LIFT » de 70000 N, devra pratiquement s'appliquer sur un seul foil latéral.
- Un plan en « T » en extrémité de safran permet de contrôler l'assiette longitudinale et à maintenir l'altitude de vol, c'est à dire environ 1mètre. Il apporte une portance de 10 à 15% environ.



Contrairement à ce qui se dit, le foil relevé, qui se trouve au vent, n'augmente pas la stabilité car il y a un foil de chaque côté (BB et TB). La résultante des masses de ces deux foils est même sous le vent, car le bras de levier du foil actif est plus important que celui du bras qui est relevé !!!

En fait c'est l'équipage qui produit le déplacement (très faible) au vent du centre de gravité du bateau.

En 3 D on obtient la configuration de navigation suivante:



La représentation 3D met en évidence l'asymétrie totale de cette configuration.

Les points d'appui (sustentation et contrôle) sont sur une droite, alors que sur les AC45, ils étaient en triangle (deux « T » sur les safrans et un foil en « L » sous le vent)

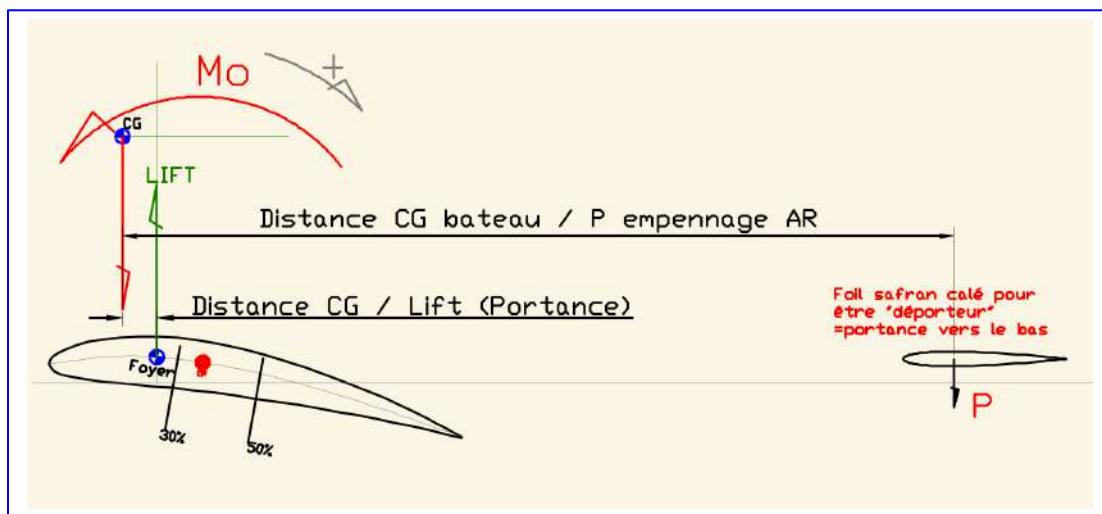
Cette configuration compliquera le pilotage...

De la stabilité longitudinale théorique (mode avion)

L'AC75, tant qu'il vole sur ses deux foils latéraux en étant contrôlé par l'empennage arrière est assez proche de la configuration d'un avion.

Dans un premier temps, la propulsion ne sera pas prise en compte.

L'étude porte sur les ailes et l'empennage arrière.



Les deux ailes sont calées avec un angle d'incidence « fixe » par rapport au corps de l'avion.
Le trait horizontal gris représente une parallèle à la piste.

Le **Centre de Portance CP (point rouge ci-dessus)** d'un profil est le point de sa corde autour duquel le moment résultant des efforts aérodynamiques appliqués au profil est nul.
La Portance (LIFT) verticale et la Trainée horizontale s'appliquent en ce point.

Mais en plus de la Portance et de la Trainée l'effet de la distribution asymétrique des pressions sur la surface de l'aile, génère un **moment de rotation à piquer** autour de ce Centre de Portance. Ce moment de rotation sera noté **Mo** sur le dessin.

Le Centre de Portance (**CP**) évolue en position longitudinale en fonction de l'incidence du profil. Il recule lorsque l'angle d'incidence augmente.

Le **CP** varie en position sur une plage de 30 à 50% de la corde du profil.

Au final un **profil cambré** d'une aile est pratiquement toujours instable en tangage à cause du **Moment « piqueur »**.

L'empennage arrière horizontal contrôle cette instabilité en tangage.

L'empennage horizontal est utilisé pour compenser cette tendance à « piquer ».
La partie verticale de l'empennage contrôle la trajectoire.

La particularité de l'**empennage horizontal** réside dans son calage « déporteur ». Ce qui signifie qu'il génère **une portance dirigée vers le bas**.

Le pilote ajustera l'intensité de cette portance, pour contrôler le tangage.
En fait on rend l'empennage arrière plus moins efficace.

À cause de sa mobilité longitudinale, le Centre de Portance (CP) ne peut pas être pris comme référence pour étudier la stabilité longitudinale d'un avion.

Pour réaliser ces calculs, on utilise le Centre Aérodynamique du profil (Aussi appelé « FOYER ») qui est indépendant de l'angle d'incidence. Ce foyer se situe à environ 25% du bord d'attaque.

Pour garder une trajectoire rectiligne constante, il faut que :

La somme des Moments des forces autour du CG (centre gravité) de l'avion soit nulle. (1)

Soit l'égalité algébrique suivante :

$$P * (\text{bras de levier portance empennage}) - Mo - (\text{Bras de levier portance Aile}) * \text{LIFTaile} = 0$$

Dans la configuration ci-dessus le CG (avion) est en avant du « foyer », donc toujours en avant du Centre de Portance quel que soit sa position en fonction de l'angle d'incidence.

Vol stable

Le CG est situé en avant du « foyer ».

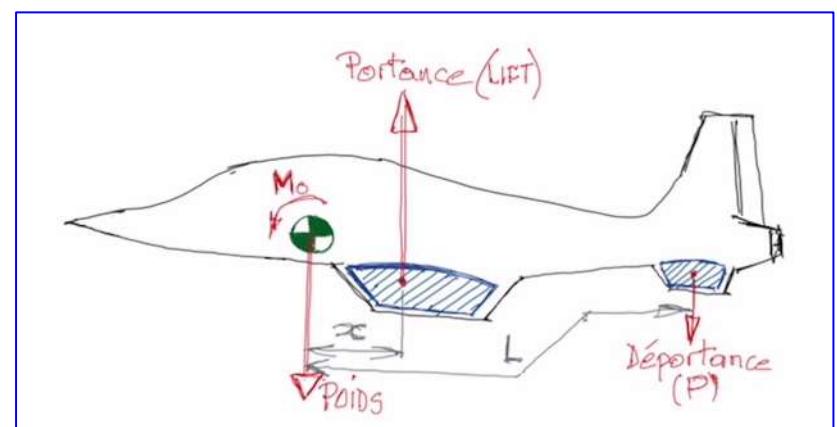
On parle de Centrage avant.

C'est la « déportance » (P est dirigée vers le bas) de l'empennage arrière (profil symétrique) qui assure la stabilité du vol.

Le pilote (automatique ?) va moduler la valeur de cette portance (P) en jouant légèrement sur l'incidence aérodynamique de ce plan arrière.

La règle étant lorsque l'équation (1) **ci-dessus** est vraie:

- P diminue, donc le couple par rapport à CG diminue et l'avion « pique du nez »
- P augmente, le couple augmente et l'avion se « cabre ».



Le bras de levier étant tellement grand entre l'empennage arrière et le CG, que les variations d'incidence à générer sur l'empennage arrière (donc de sa portance) sont très faibles. Un fletner sur le bord de fuite assure cette fonction pour une consommation d'énergie minimale.

Pour autant, il faut gérer de manière équilibrée cette succession de « piqué / cabré » afin de ne pas générer des oscillations longitudinales incontrôlables.

Vol instable

La position du « CG avion » se situe en arrière du foyer. On parle de Centrage arrière.

Comme l'empennage arrière est monté déporteur (c'est à dire qu'il exerce une poussée vers le bas, le contrôle par l'empennage horizontal devient impossible).

Les couples créés autour du CG par la portance et par l'empennage arrière se retrouvent dans le même sens.

L'avion se cabre est n'est pas récupérable.

Si le CG est légèrement en arrière du « foyer », la situation est alors ambiguë, car la position longitudinale de la portance évoluant, le CG peut se retrouver en avant (donc en configuration stable), mais la situation peut se dégrader et il est alors possible de retrouver une configuration instable.

S'assurer d'un CG en avant du « foyer » permet d'être certain d'avoir toujours un vol stable. Mais il ne faut pas exagérer, car plus le CG est avancé, plus la portance de l'empennage arrière doit alors être importante. Cela impose de voler avec une incidence élevée de cet empennage horizontal, donc de voler avec de la trainée (Frein).

Dans le cas d'un FOILER, la motricité (le moteur) complique l'équilibre longitudinal.

Lorsque l'on observe le dessin en 3D en haut de la page 5, il y a la poussée des voiles qui se décompose en V_p (force propulsive dirigée vers l'avant) et une force latérale qui fait gitter le bateau.

V_p est située à environ 12 mètres de la flottaison en navigation archimédienne et légèrement plus haute lorsque l'AC75 sera sur ses foils.

V_p crée un couple très important qui aura tendance à faire plonger le bateau sur le nez.

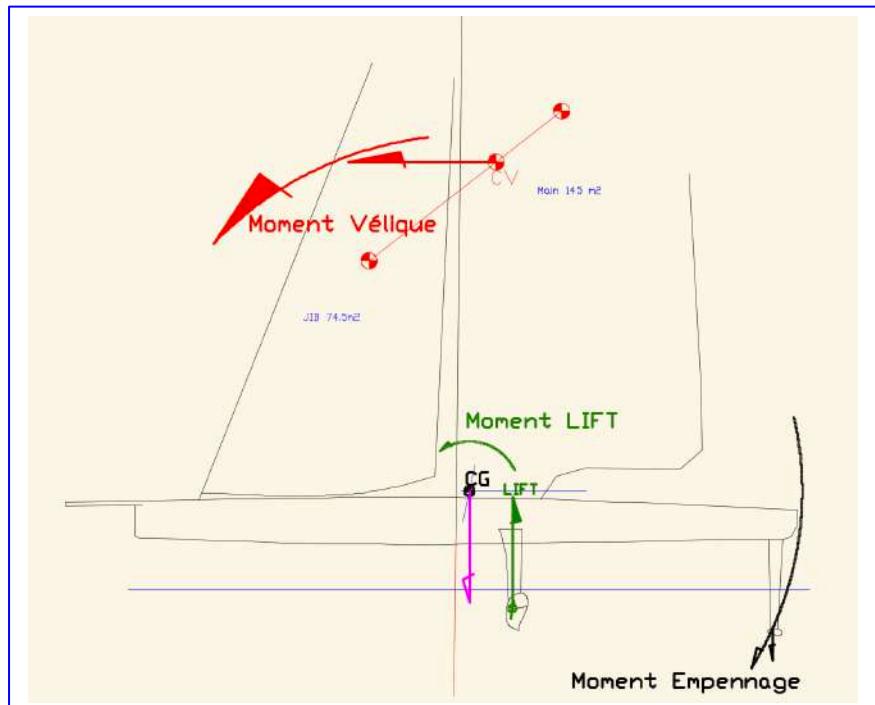
Ci-contre :

Forces et Moment en présence dans le cas d'un centrage avant. Le CG du bateau est en avant du Foyer et donc du Centre de Portance dynamique des foils.

On visualise très bien que dans cette configuration « centrage avant », le couple vélique est dans le même sens que celui généré par la portance.

Le seul couple antagoniste est alors fourni par l'empennage arrière.

Il faudra braquer fortement (incidence) cet empennage donc générer une trainée très importante.



Ce n'est pas le cas pour l'équilibre longitudinal de l'avion, car la poussée moteur ou la traction de l'hélice est réalisée pratiquement dans le plan horizontal du Centre de Portance ou alors avec un bras de levier peu important (cas des réacteurs sous les ailes).

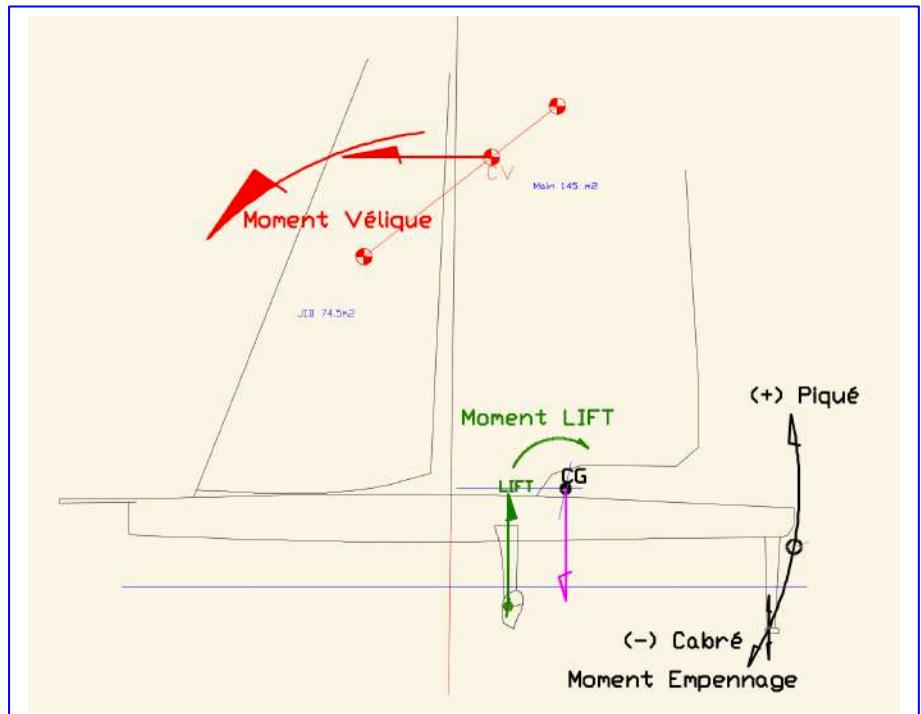
La position du centre vélique élevée, impose obligatoirement un « centrage arrière ».

L'AC75, qu'il soit sur ses deux foils latéraux ou sur un seul foil (sous le vent) se trouvera ainsi dans un équilibre autour du CG (centre de gravité), soit :

Le couple Vélique et le couple Portance sont opposés.

L'empennage arrière qui peut générer une portance vers le haut ou vers le bas permettra d'assurer l'équilibre entre ces deux couples.

Il est évident que la position de G se situera dans une plage longitudinale.



$$Mt \text{ vélique} = Mt \text{ Lift} + Mt \text{ Empennage}$$

Dans cette hypothèse, le calage initial du foil (angle d'incidence) est défini et fixe. Lorsqu'il faut contrôler un cabrage intempestif :

- On place l'empennage arrière en « piqué ». Cette action provoque une diminution de l'angle d'incidence et donc la baisse du Moment LIFT.
- Inversement l'empennage arrière en « cabré » provoquera une augmentation de l'angle d'incidence et donc une augmentation du Moment LIFT.

L'autre solution est de modifier les portances en modifiant l'incidence des foils avant et réguler avec l'empennage arrière.

Cette méthode est viable sur un petit foiler mais pratiquement impossible techniquement sur un AC75 car cela revient à faire pivoter, autour de l'axe horizontal perpendiculaire à l'axe du bateau, des deux bras oscillants des foils avant.

Toutefois on arrive au même résultat, en modifiant la cambrure des foils avant avec des volets sur leurs bords de fuite. La trainée est sûrement plus élevée que dans le cas d'une variation d'incidence, mais mécaniquement cette opération est relativement facile à mettre en œuvre.

Désignation	Forme d'Aile	Angle de braquage	Augmentation portance
Profil de base			
Volet de courbure		45°	51%

Mais il faut aussi prendre en compte l'équilibre transversal produit par la voilure

En supposant que l'équilibre longitudinal soit sous contrôle, il faut aussi considérer que la poussée vélique produit une force perpendiculaire à la trajectoire du bateau. Cette force peut provoquer le chavirage. Elle produira aussi de la gîte et de la dérive.

Cette force est environ 5 à 6 fois plus forte que la force propulsive. Son point d'application est au centre vérique soit environ à 12 ou 13 mètres des foils.

Condition d'équilibre transversal :

Les trois forces :

- Poids du bateau
 - Poussée produite par les foils
 - Poussée produite par la voilure.

Doivent être concourantes.

Cette relation est très complexe à obtenir en permanence car un paramètre est totalement indépendant du pilote : La vitesse du vent réel.

Les variations de vitesse (et d'angle) du vent réel influent sur la gîte, et sur la vitesse du Foiler, donc sur la poussée produite par les Foils.

Certes, il est possible d'adapter la navigation à une chute de la vitesse du vent réel en modifiant la voilure et le cambrage des foils, mais c'est une opération complexe qui demande des temps de réaction très courts.

La situation est plus compliquée lorsque le vent réel augmente.

Il est possible d'ajuster la voilure en diminuant sa performance.

Par contre il sera impossible de limiter les performances du foil sous le vent.

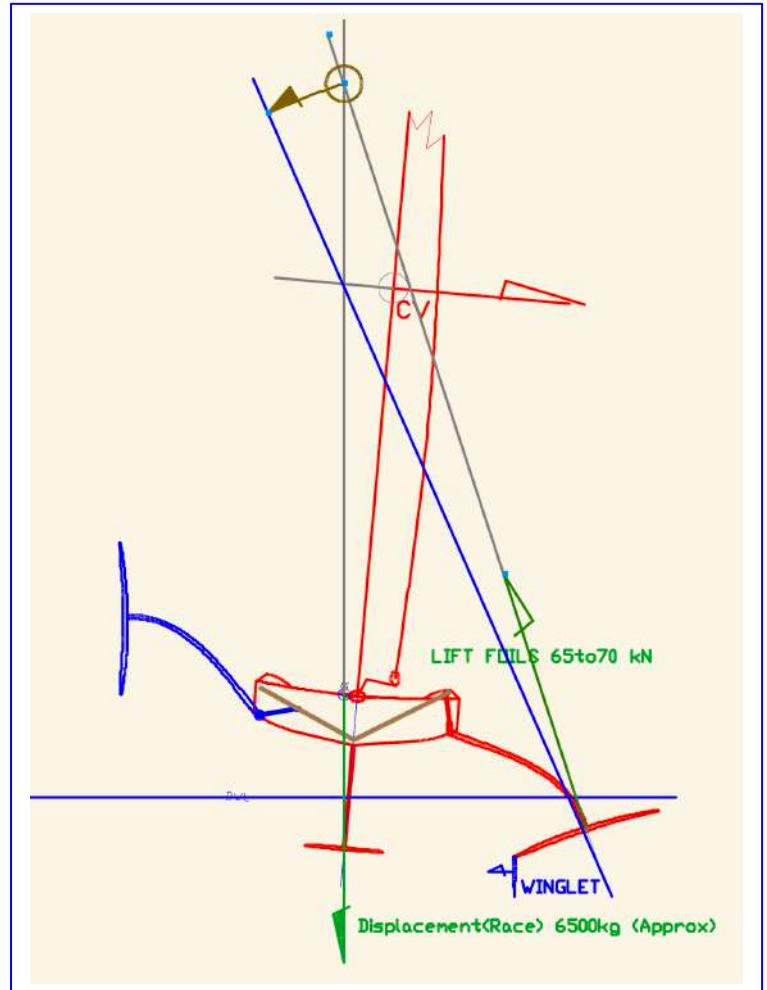
Modifier le TRIM longitudinal du Foiler en jouant sur l'empennage arrière aura une influence très faible sur l'angle d'incidence (donc sur la poussée produite) du foil sous le vent.

L'augmentation de poussée du foil, va se matérialiser par une augmentation de la dépression sur l'extrados. Cela provoquera un phénomène de ventilation et le décrochage brutal du foil.

Le résultat se traduira par une chute du bateau (il pivote brutalement autour du foil sous le vent).

Sur un petit Foiler, comme le MOTH par exemple, le pilote compensera en permanence ces variations de vitesse du vent et du bateau en jouant sur la position transversale du centre de gravité [Bateau + pilote]. Le pilote sera constamment en mouvement vers l'avant ou l'arrière pour assurer l'équilibre longitudinal et transversalement pour assurer l'équilibre transversal.

Ce mode de navigation est impossible sur un Foiler de 7000 kg de déplacement. La solution passera sûrement par l'installation d'un Winglet à l'extrémité du foil.



La charge sur le Winglet qui est créée par le dérapage sous le vent du Foiler permettra de faire basculer la direction de la poussée générée par le foil (voir ci-dessus la flèche qui montre la rotation de cette direction).

De plus le Winglet générera, de fait, une force antidérive qui s'ajoutera à la composante antidérive produite par le foil. Le Winglet limitera aussi le Vortex en extrémité du foil.

Il est aussi possible de modifier l'angle du dièdre du foil, c'est à dire son « ouverture ». Plus l'angle du dièdre est « ouvert » plus la poussée du foil se rapproche de la verticale et vice-versa. Toutefois cette opération est mécaniquement complexe, à cause des efforts créés l'encastrement du bras de liaison et aussi par l'énergie nécessaire pour faire pivoter le bras autour de son axe longitudinal.

De la fragilité de l'équilibre et de la stabilité du vol

On perçoit donc que la mise au point de l'AC75, comme son pilotage, sera compliquée. De plus contrairement aux Foilers de record, dont la plage d'utilisation est très courte, l'AC75 devra « VOLER » et surtout « EVOLUER dans cette configuration » pendant toute la régate. Un retour dans le domaine Archimédien sera sûrement fatal.

Mais avant de « VOLER » il faut décoller (Take Off)

L'AC75 possède un avantage par rapport aux autres Foilers, c'est qu'il peut choisir sa « piste de décollage ». Celle-ci correspondra à sa meilleure polaire de vitesse dans les conditions du moment.

Il peut ainsi bénéficier d'une piste assez longue afin de décoller progressivement.

En effet, l'élévation à réaliser est faible : **environ 1,3 mètre**. Cette condition impose de quitter le mode Archimédien avec une pente très faible, si on ne veut pas crever la surface.

D'après la surface des foils identifiés sur la vidéo, la vitesse doit être d'environ 16 noeuds pour voler sur les deux foils centraux.

La question qui se pose est : Est-il possible d'atteindre une vitesse suffisamment proche des 16 noeuds, afin de s'extraire progressivement du mode Archimédien ?

Le DLR (ratio Déplacement/LWL) est de 21, ce qui montre que nous sommes en présence d'un déplacement très léger. Le ratio [Déplacement/surface de voile] est de 0,78, ce qui est favorable.

Mais il y a la trainée cumulée des deux [Bras + Foils], du safran et de l'empennage arrière.

Cette trainée est plus importante que celle d'une quille conventionnelle à bulbe.

Seul un VPP très optimisé peut dire si avec tous ces éléments perturbateurs, il est possible d'atteindre une vitesse qui permet de soulever progressivement l'AC75.

La méthode (éventuelle) :

- a) En mode Archimédien, conserver en jouant sur l'empennage arrière une assiette horizontale, c'est à dire avec l'angle d'incidence initial du calage des foils (avoir le moins de trainée possible). La portance soulève progressivement le bateau.
- b) Lorsque la vitesse augmente, le pilote augmente la portance sur les Foils avant en modifiant la cambrure. Il génère un couple qui cabre le Foiler.
- c) Avec l'empennage arrière horizontal (« T »), il limite de cabrage afin d'obtenir un passage « soft » du mode Archimédien au mode Foiler. Mais attention de ne pas « crever la surface ». Ce moment du pilotage sera le plus sensible, car il faudra arrondir la trajectoire afin de conserver les foils dans l'eau...
- d) Les plans sustentateurs de l'AC75 évoluent dans l'eau comme ceux d'un avion dans l'air, à la différence de la masse volumique des deux fluides.
- e) Si tout se passe bien, le pilotage à suivre consistera à gérer les deux équilibres (Longitudinal et Transversal).

De l'équipage

Il est prévu un équipage de 10, cela risque d'être nécessaire.

On peut imaginer la répartition suivante :

- Un Barreur qui assure la trajectoire du Foiler.
- Un Pilote qui gère le vol afin de ne jamais revenir en mode Archimédien (décollage et ensuite le vol stable).
- Un Navigateur qui fait la stratégie sur l'eau.
- Plusieurs « Motoristes » qui s'occupent du Moteur (réglage des voiles) afin d'assurer une vitesse qui permet de voler en permanence sur deux foils ou un foil. Les « Motoristes » devront être en communication permanente avec le Pilote.
- Deux « Mécaniciens » qui assurent les mouvements des bras lors de manœuvres (virements de bord, Empannage)

De la mécanique assurant les manœuvres des Foils centraux et arrière

Plusieurs solutions mécaniques sont possibles, il en est de même des sources d'énergie.

Sources d'énergie

Deux sources d'énergie seront utilisées :

- ✓ L'électricité stockée sous forme de batteries probablement au Lithium.
- ✓ L'hydraulique produite par une pompe entraînée par un moteur électrique. Je ne pense pas que l'on utilise une pompe mécanique (moulin à café), pour des raisons de vitesse de déplacement des foils et surtout d'effort à produire pour soulever le foils (10 T).

Le système hydraulique impose 4 systèmes en série :

Batterie + Moteur électrique + Pompe hydraulique + vérin hydraulique.

Soit le produit de 4 rendements qui même s'ils sont chacun égal à 0.9, génère un rendement final de 0.66.

Il faut aussi ajouter la réserve d'huile nécessaire, car l'huile s'échauffe ce qui oblige à travailler avec un volume important d'huile afin de la laisser refroidir.

Systèmes mécaniques

Plusieurs systèmes sont envisageables :

- ✓ Vérins hydrauliques
- ✓ Vérins à vis à billes à commande par moteur électrique.
- ✓ Système « roue et vis sans fin » entraîné par un moteur électrique (avec un réducteur)

Conclusion

L'histoire des Foilers propulsés par des voiles a été plus souvent écrite par des Ingénieurs que par des Architectes Naval qui sont naturellement très attachés au domaine Archimédien.

C'est encore plus vrai pour des Foilers monocoques, car le respect des critères de stabilité limite les initiatives architecturales.

L'idée de TEAM NZ est intéressante, car elle permettra de faire réfléchir et de mettre en concurrence des équipes multidisciplinaires compétentes et à priori disposant de moyens financiers.

Il me paraît certain qu'après la prochaine AC, nous aurons une vision des Foilers Monocoques à voiles très différentes de ce qu'elle est aujourd'hui.

Lorient le 8 Janvier 2017

Jean SANS



08/04/2018

Version 2.3 (Suite du papier V1 du 30/11/2017 & V2 du 08/01/2018)

Préambule

Mes deux précédents papiers du 12 décembre 2017 et du 10 Janvier 2018 étaient basée sur la vidéo d' excellente qualité produite par TEAM NZ, (image de synthèse), qui présentait les grandes lignes du nouveau AC75.

J'ai décortiqué les images pour en déduire les plans du bateau et surtout pour le dimensionner (c'est le plus important).

En m'appuyant sur des calculs basés sur les très rares paramètres connus, à savoir un déplacement archimédien d'environ 7000 kg et une vitesse annoncée de 22 noeuds sur un seul foil central et le plan porteur arrière, j'ai imaginé ce que pourrait être ce bateau révolutionnaire.

Pour la première fois on nous propose de faire régater, d'une **configuration Archimédienne** à une **configuration Foiler** un monocoque de 20 mètres et de 7 tonnes.

Tout simplement cela signifie qu'il sera nécessaire de générer une portance verticale de 70000 Newtons (soit en langage courant 7 tonnes de portance verticale). Ce qui est loin d'être évident.

D'autant plus qu'il ne suffit pas de décoller, il faut ensuite évoluer car c'est une régate.

Si on se réfère à l'histoire, les premiers vols des frères WRIGHT ont réellement préfiguré ce que serait un avion parce qu'ils avaient aussi inventé les moyens techniques permettant de contrôler leur avion, c'est à dire, décoller, virer, atterrir.

Pour l'AC75, le problème est identique : voler, OK c'est assez « facile », mais prendre un départ de régate, virer une bouée et répondre à un engagement présente d'autres difficultés.

Si on ajoute que pour être performant, il faudra voler à une altitude relativement constante en permanence, on conçoit que les difficultés ne sont pas mineures.

La transition Archimédienne / Foiler

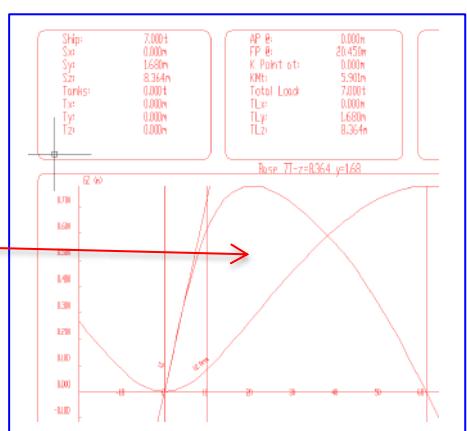
Avant d'aborder l'analyse des règles de classe de l'AC75 fournies par TEAMS NZ, il faut présenter les particularismes de ces deux modes de navigation.

<https://drive.google.com/file/d/1jlbGdGZ-XERd63SGESoMamTgGZdRiPZJ/view>

Navigation Archimédienne : Le voilier est un monocoque, sa stabilité (ne pas chavirer) dépend essentiellement de la position verticale de son centre de gravité.

En d'autre terme, cela dépend de la surface située sous la partie positive de la courbe. La stabilité est proportionnelle à cette surface.

L'obtention de la vitesse dépend entre autres de la surface de voile. La surface de voile se traduit par une force propulsive (qui permettra peut-être de décoller) et une force latérale, qui va générer la gîte et au pire provoquer le chavirage.



Navigation Foiler : C'est un domaine proche du vol d'un avion.

Conditions d'équilibre longitudinal

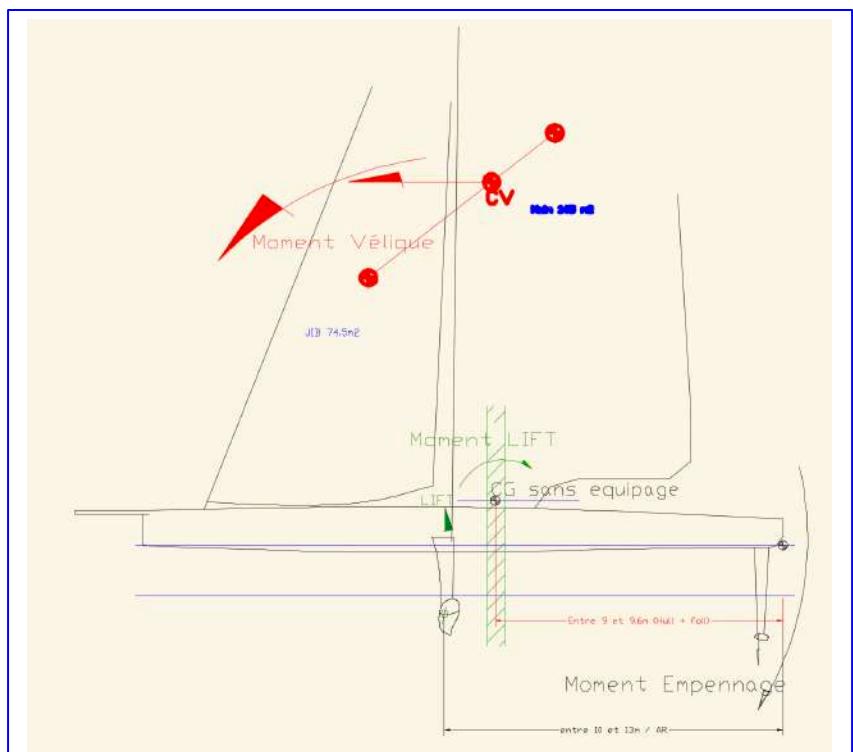
Le point d'équilibre est celui de l'application du Centre de Gravité du bateau.

Pour synthétiser il y a trois couples:

- Le couple créé par la force propulsive des voiles. C'est un couple à piquer autour du CG.
- Le couple créé par le LIFT (portance) des Foils (de sens contraire au précédent). C'est un couple à cabrer autour du CG.
- Le couple à Cabrer ou à Piquer dépend du calage du foil qui équipe le safran. Ce couple va permettre d'équilibrer la somme des couples vélique et portance.

Cette synthèse est correcte à condition que le « Centrage du bateau soit un **Centrage Arrière** », c'est à dire que le centre de Gravité du bateau soit en arrière du centre de portance des foils.

Soit : **Mt Vélique = Mt Lift + Mt Empennage AR.**



Conditions d'équilibre transversal

Les conditions d'équilibre longitudinales sont, dans la forme, identiques à celle d'un avion (à l'exception de la hauteur de la force propulsive).

Sur un foiler, la composante transversale de la force propulsive existe toujours (réminiscences du mode Archimédien). Cette composante devra être prise en compte si on ne veut pas chavirer.

Cela implique que les trois forces suivantes:

- Poids du bateau
- Poussée produite par les foils
- Poussée produite par la voilure (composante transversale).

Doivent être concourantes.

Cette relation est très complexe à obtenir en permanence car un paramètre est totalement indépendant du pilote : La vitesse du vent réel.

On comprend que les critères de stabilité relatifs aux deux modes (Archimédien et Foiler) sont différents. Cela va rendre chaque mode problématique, tout comme la transition entre ces deux modes.

Les règles de Classe AC 75 (publication TEAM NZ)

C'est un texte très complet (63 pages) qui est allé très loin dans les détails.

Le but recherché étant de limiter les interprétations de la règle en cas d'incertitude sur la compréhension de certaines parties du texte.

Ces cas d'incertitudes déstabilisent les TEAMS, car elles interrompent momentanément leurs travaux ou les orientent sur des analyses erronées.

La règle paraît très ouverte malgré le fait qu'elle impose une monotypie à restriction.

Les objectifs des Règles de Classe AC 75 sont :

- ✓ D'avoir des bateaux puissants qui ne chavirent pas latéralement lorsqu'ils naviguent en mode Archimédien ou Foiler.
- ✓ D'avoir des bateaux qui ne risquent pas de chavirer longitudinalement.
- ✓ D'avoir des bateaux ayant un potentiel de vitesse assez proche.
- ✓ De fournir des équipements de base comme **le mat, les bras des foils et leurs système de commande (vérin de relevage et descente du Foil)** afin que les TEAMS ne se lancent pas dans des recherches compliquées et chères mais aussi risquées mécaniquement donc moins fiables.
- ✓ Limiter les caractéristiques des matériaux et les techniques de mise en œuvre.

De ces quatre items, vont découler des prescriptions que les TEAMS devront respecter.

Toutefois les TEAMS gardent une grande liberté d'action puisqu'ils ont à concevoir:

- La coque du bateau en respectant une longueur comprise entre 20.6 et 20.7m et une largeur minimale pour le BMAX de 4.8m et de 4m pour le tableau arrière.
- les Foils et les volets de bord de fuite (flaps) qui leur sont associés
- l'attache des Foils sur les bras
- les systèmes de commande mécanique ou électrique des volets de bord de fuite
- le safran (avec ses deux axes de rotation vertical et horizontal), son plan porteur arrière
- les voiles, bien qu'il y ait des prescriptions à respecter.

Le devis de poids de base détaille les différents postes du bateau :

A	COQUE + SAFRAN + BOWSPRIT + SYSTEME + EQUIPEMENT	6195				
B	FOIL (BRAS + ATTACHE + WING + FLAP)	1175	2350	CG EXTERIEUR D4UN CERCLE DE 3.5M CENTRÉ sur l'AXE de ROTATION		
	SAIL (JIB)	50				
C	SAIL (MAIN SAIL)	100				
D	COQUE + SAFRAN + BOWSPRIT + MAST + MAINSAIL + EQUIPEMENT	3720	CG en dessous de 2.9 m / DWL			
E	CREW MAXI	990				
F	CREW MINI	960				
G	GUEST	100				
DISP/M	DEPLACEMENT MAXI	7500				
DISP/m	DEPLACEMENT MINI	7450				
	COQUE + SAFRAN + BOWSPRIT + MAST + MAINSAIL + EQUIPEMENT + JIB + FOILS + CREW MAX + GUEST	7210				
	COQUE + SAFRAN + BOWSPRIT + MAST + MAINSAIL + EQUIPEMENT + JIB + FOILS + CREW min + GUEST	7180				

La lecture des « CLASS RULES AC 75 – REGLES de CLASSE AC75 » montre que TEAM NZ souhaite que les bateaux soient réellement sûrs dans les deux modes de navigation, Archimédien et Foiler.

En mode Archimédien, le risque est le chavirage latéral car le bateau dont le ratio BMAX / LH minimale est de 0.23 (un JPK 10.10 possède un ratio de 0.33, un IMOCA qui est certes un plus lourd -7800 kg- à un ratio de 0.31) n'a pas de bulbe alors que sa conception est plutôt basée sur une stabilité de poids.

En effet en mode Archimédien, il sera nécessaire de produire de la puissance pour atteindre la vitesse de décollage afin de s'extraire de l'eau. C'est dans cette condition de navigation que le risque de chavirage sera maximale.

Le lest se résumera aux foils (Bras + Wings) immergé, soit 2350 kg, soit un ratio Lest / Déplacement de 31%.

Les Règles de Classes imposent deux prescriptions importantes :

- 1) que le centre de gravité de l'ensemble (Bras + Wings) soit au moins à 3.5 m du centre de rotation du bras. Comme c'est TEAM NZ qui fournit le bras, tout laisse à penser que la masse de ce dernier sera la plus faible possible (composite Carbone) et que les TEAMS devront fabriquer des Wings dont une partie des matériaux auront une masse volumique élevée (acier ou plomb). Que le centre de gravité de la **coque + safran + Bowsprit** soit à moins de 2.9 m de la flottaison Archimédienne.

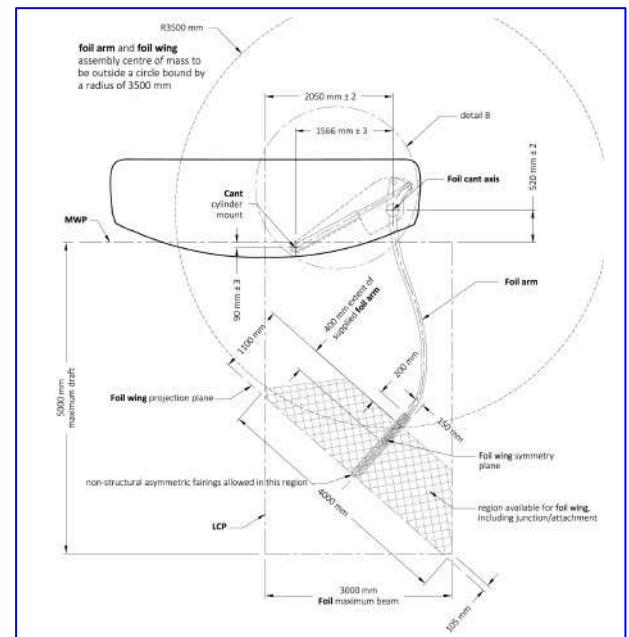
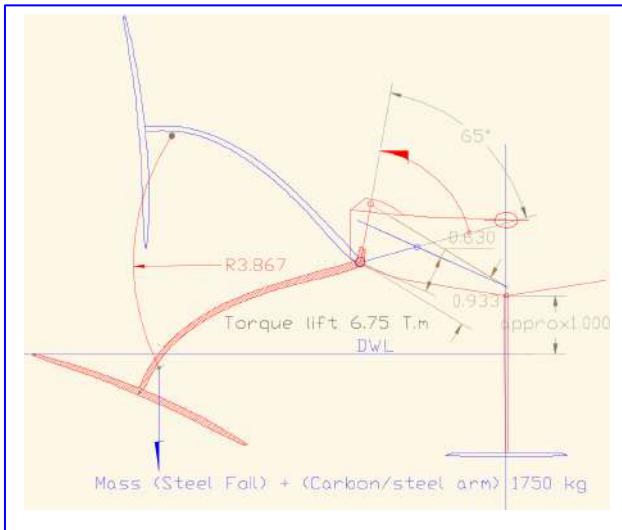
La conception de la coque est basée sur une monotypie à restriction très contraignante. Pas moins de 25 articles devront être respectés par les designers des TEAMS. Les Règles imposent un volume de coque minimal de 70 m^3 dont 40 m^3 de volumes étanches, ce qui traduit encore la volonté de garder les bateaux à flot en cas de chavirage ou de capsized.

- 2) Que la position longitudinale de l'ensemble **coque + safran + mat + Bowsprit + Grand-voile + Foils** (sans l'équipage) soit situé entre 9 m et 9.6 m du point de référence situé sur la verticale du tableau arrière. Que le centre de portance des foils soit situé entre 10 et 12 m du même point de référence sur le tableau arrière.

Ces deux ensembles de prescriptions traduisent bien, pour l'item (1) la volonté d'éviter les chavirages en mode Archimédien et pour l'item (2) de s'assurer d'un centrage arrière (le centre de gravité du bateau avec l'équipage est constamment en arrière du centre de portance en mode Foiler ce qui limite les possibilités de Capsize par l'avant).

Class Rules (position Docking)

▪ **Item (1)**



Afin d'assurer la stabilité transversale j'avais fixé la masse du Foil (Bras + Wing + Flap) à 1750 kg. Pour arriver à cette masse j'avais considéré que le Bras était en fabriqué en composite Carbone et le Wing en acier, dans le but d'attribuer deux fonctions au Wing : générer de la « Portance » (foil) pour décoller et assurer la fonction « Bulbe » pour conserver de la stabilité latérale lorsque la puissance demandée est maximale.

Cette option à deux inconvénients, elle impose de fabriquer un ensemble Coque / Pont / Mat plus légère et surtout elle surenchérit la fabrication du Wing en imposant pratiquement un usinage 3D sur une machine-outil.

Il faut aussi bien voir qu'en mode Archimédien, le centre de gravité des Foils (Bras + Wing) se situe à environ 1.5 m sous la flottaison, ce qui est loin d'être usuel sur un bateau de 20 mètres.

Les Règles de Classes précisent pour chaque « **Foil** » (Bras et foil porteur) que le **Bras** est fourni et que la masse totale de l'ensemble, énuméré ci-dessous, ne doit pas dépasser 1175 kg:

- ✓ **Bras** (Foil Arm)
- ✓ **Flap**

Foil (Foil Wing) : plan porteur

Liaison d'assemblage mécanique entre le Bras et le Foil

Dans le dessin ci-dessous je n'ai pas pris volontairement la partie du bras (longueur 0.285 m) à l'intérieur de la coque (accrochage du vérin de commande).

Arm:

Longueur 4.4 m

Corde moyenne 0.52

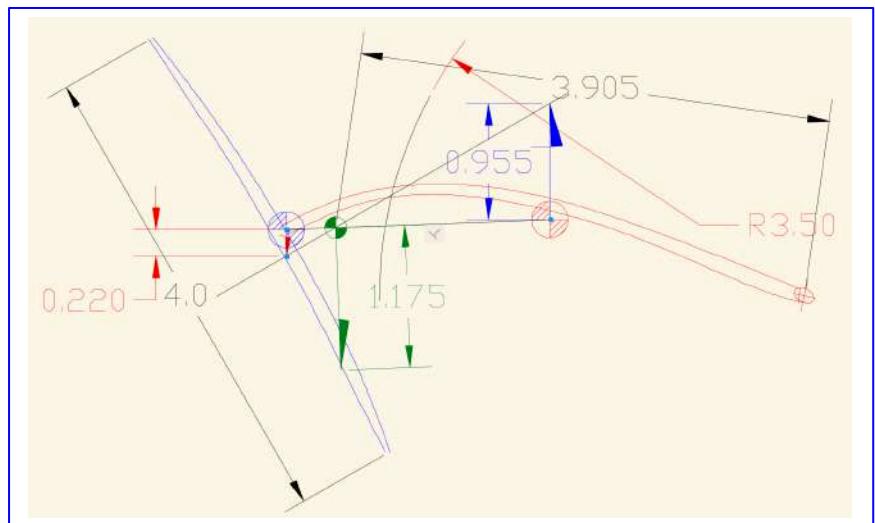
Section moyenne des profils:

NACA 0012-64 = 0.0244 m²

Volume évalué: 110 dm³

Approximation avec une fabrication en structure carbone ;

Masse = 220 kg



Foil + Flap + Liaison:

Longueur 4 m

Corde moyenne 0.52m

Profil 12% (section : 0.0224 m²)

Masse Foil à respecter = 1175 - 220 = 955 kg

La construction géométrique du barycentre (position du Centre de Gravité de l'ensemble Bras + Foil) montre qu'avec cette distribution des masses (220 kg et 955 kg) on est largement au delà du cercle de 3.5 m imposé par les Règles de Classe.

En translatant parallèlement le segment de droite oblique de la cible verte à l'intersection avec le rayon de 3.5 m imposé, on obtient une masse du bras de 440 kg, ce qui impose une masse du Wing + Flap de 735 kg.

Il faut attendre de connaître exactement la masse complète du Foil-Arm pour déterminer celle du Foil-Wing + Flap.

Sur cette base le couple maxi pour relever le Foil (Arm + Wing + Flap) est de $1175 * 3.5 = 4.1$ T.m.

Avec l'hypothèse d'un bras plus léger (220 kg) :

Le couple maximal nécessaire pour relever le Foil sera de $1175 * 3.905 = 4.588$ T.m

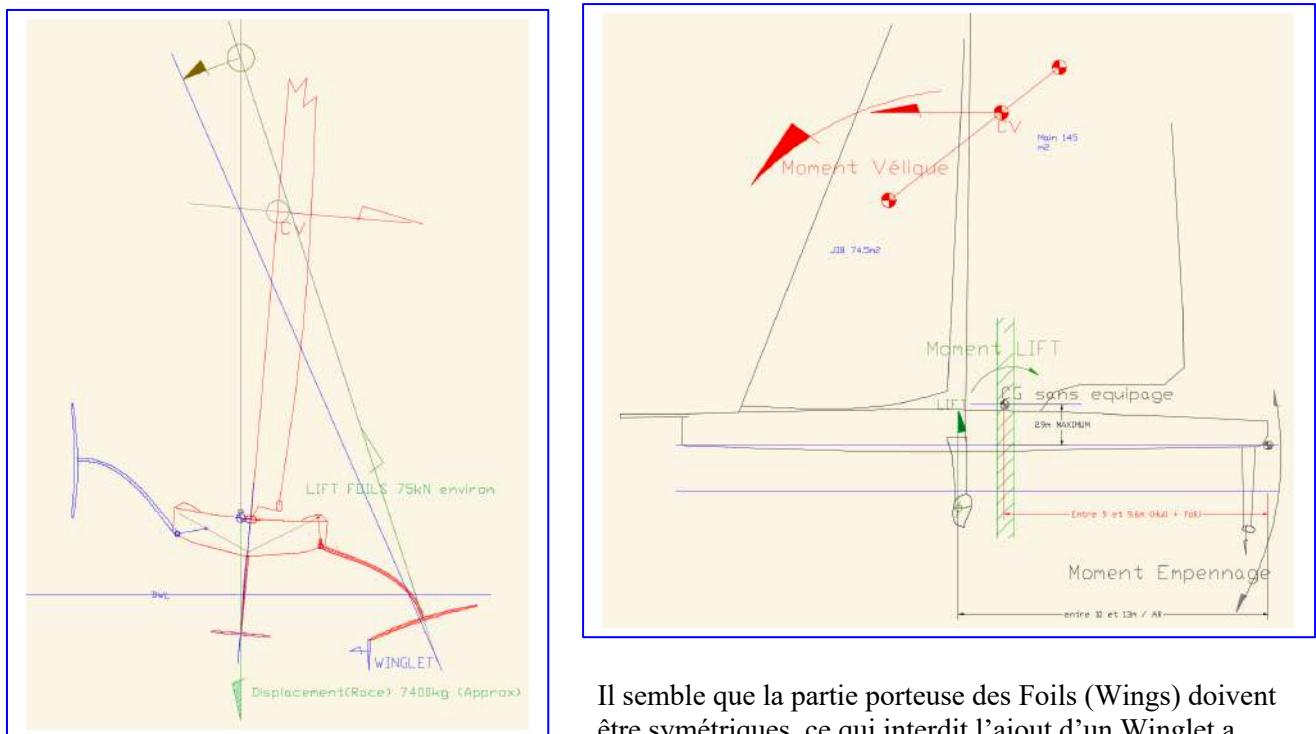
En fait les TEAMS vont travailler sur la conception des éléments suivant :

- a) La liaison entre le Bras et le Wing, sachant que c'est une liaison à 90° dans laquelle devront s'encastrer l'extrémité du Bras et le Wing.

Pour le Wing le problème sera plus complexe car le Wing se partagera en deux demi-plans porteur, évidemment fabriqué avec des fibres continues, mais dans cette zone le moment fléchissant de chaque demi-plan porteur sera maximal.

- b) L'intégration des flaps et des commandes de ces flaps, qu'elles soient mécaniques ou électriques. Les commandes électriques devraient toutefois avoir les faveurs des TEAMS, car l'amplitude angulaire de 122° entre la position « Docking » et la position « Relevage intégral » ne sera pas simple à gérer.

▪ Item (2)



Il semble que la partie porteuse des Foils (Wings) doivent être symétriques, ce qui interdit l'ajout d'un Winglet à l'extrémité intérieure du Foil, ce Winglet permettant d'améliorer la stabilité transversale en mode Foiler.

Le système de relevage des Foils (FCS : Foil Cant System)

Le FCS assure la rotation des Foils (Bras + Wing + Flap) autour d'un axe longitudinal, parallèle à l'axe longitudinal du bateau ainsi que celui du safran autour d'un axe transversal (contrôle de l'incidence de l'empennage arrière).

Dans mon précédent papier je suggérais, qu'il serait nécessaire de détacher le vérin pour passer de position Docking à Navigation et vice-versa. En fait les CLASS RULES ne parle à aucun moment de la position « Docking ». Cela signifie que le vérin assurera l'ensemble du mouvement des foils depuis la position où le bras est « vertical » (ex position « Docking ») à la position la plus élevée (rotation de 120°)

Autre précision des Règles de Classe AC 75: Le FCS sera équipé d'un dispositif du type « fusible » si un équipage est tenté d'utiliser un des Foils comme élément améliorant le moment de redressement. En fait le Foil est prévu pour avoir uniquement trois positions : position « Docking », position intermédiaire (largeur maximale) et position haute, soit environ 120° entre les positions extrêmes.

Le FCS, qui est fourni par TEAM NZ, comportera une batterie intégrée. Il est autorisé d'ajouter des batteries supplémentaires.

La source électrique utilisée par le FCS sera suffisante pour couvrir une régate.

L'hydraulique sera utilisée comme source d'énergie pour alimenter des pompes hydrauliques nécessaire à la manœuvre des voiles, mais avec deux restrictions :

- Uniquement avec les mains.... Donc plus de vélo sur le pont.
- Sans utiliser d'accumulateurs d'énergie.

Enfin les systèmes d'asservissement en « boucle fermé » sont interdits (Feedback).

Le passage du mode Archimédien au mode Foiler : « décollage »

Le calage initial des Foils (angle d'incidence) est défini par le TEAM.

Il devient ainsi fixe durant toute une régate car le FSC ne permet pas de modifier l'inclinaison longitudinale de l'axe de rotation du Foil.

La navigation en mode archimédien est un élément important, on évoque que le bateau décollerait avec 9 noeuds de vent.

La puissance (voiles) sous-entend que le bateau possède un RM1° important (raideur).

Il sera donc nécessaire de jouer dans un premier temps avec les deux positions (« Docking » et « Intermédiaire ») pour obtenir un couple de redressement qui permette d'utiliser la puissance fournie par les voiles.

On utilisera sûrement au début le foil en position « Docking », comme quille verticale et le foil « intermédiaire » au vent comme « quille pendulaire ».

Pour contrôler les intentions « à cabrer » ou « à piquer » il faut jouer (en utilisant le FCS) sur la rotation autour d'un axe transversal de l'empennage fixé au bas du safran :

L'empennage arrière est un profil symétrique.

- a) Si on donne à l'empennage arrière une incidence positive (sens horaire), cette action provoque un couple antihoraire et au final une action « à piquer ».
- b) inversement si on donne à l'empennage arrière une incidence négative (sens antihoraire), cette action provoque un couple horaire et une action « à cabrer ».

Mais avant de réguler l'assiette (position par rapport au plan d'eau) de vol, il faut décoller.

L'élévation à réaliser est faible : **environ 1.3 mètre**.

Cette condition impose de quitter le mode Archimédien avec une pente très faible, si on ne veut pas crever la surface.

En mode Archimédien, la vitesse va progressivement augmenter puis se stabiliser (vitesse cible des polaires de vitesses).

Pour que la vitesse augmente, le bateau doit « s'alléger », c'est à dire qu'il doit être progressivement sustenté vers le haut par les Foils.

Alors le cycle **Augmentation de Vitesse = Augmentation de la Portance** s'amorce et s'entretien.

A condition que le pilote possède les moyens de moduler la Portance ce qui revient à rechercher une méthode pour que les Foils génèrent une portance significative à la vitesse archimédienne.

Les flaps appelés aussi volets de courbure permettent d'augmenter la portance (mais aussi la Trainée).

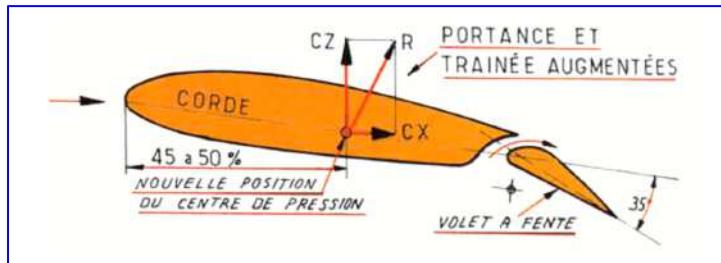
L'aviation a développé des centaines de modèles volets, dont la cinématique est de plus en plus complexe.

Sur les AC72 un vérin hydraulique générait le pivotement de la cage contenant le Foil, autour d'un axe transversal.

Ainsi le pilote agissait directement sur l'angle d'incidence de la partie active du foil.

La méthode est simple, la mécanique aussi, l'ensemble fonctionne correctement, car la portance à générer est sans commune mesure ce qui est nécessaire sur AC 75 de 7 Tonnes.

Désignation	Forme d'Aile	Angle de braquage	Augmentation portance
Profil de base			
Volet de courbure		45°	51%



Les Flaps seront-ils le secret de certains TEAMS ?

Rapidement après le premier vol d'un avion, le Volet de bord de fuite (Flap) a été inventé.

Pendant des décennies, le fonctionnement des flaps utilise des système de bielles, de câbles, des vérins hydrauliques et depuis 20 ans les commandes de vol électriques associées à des vis à billes assurent ce fonctionnement. Mais la philosophie générale est toujours basée sur les volets que l'on déploie ou oriente mécaniquement.



Exemple de foils monoblocs et déformables.
(Morphing wing)

<https://youtu.be/TfHUZ2C3HyA>

<https://youtu.be/RU78IAJRIIsQ>

<https://youtu.be/bC5BUuDFhmg>



Conclusion

Ces CLASS RULES AC 75 sont un modèle de genre. Précisions, inventivité, création, innovation.

Il est certain que le bateau volera, mais faute d'avoir vu un **démonstrateur** (8m, 10 , ou 12m) il est difficile d'imaginer le binôme **Conditions Météorologiques / Propension à Décoller**.

Comment se dérouleront les Matches Race ? That is the question!

Jean SANS
8/04/2018

J. SANS (03/03/2019)

Version V4
36th AMERICA CUP 2021
Le nouvel AC 75 NZ.



Vidéo de lancement https://www.youtube.com/watch?v=rx2qG_YMrDs

ANALYSE de la STABILITE

En navigation, un Foiler est en équilibre sous 4 systèmes de forces.

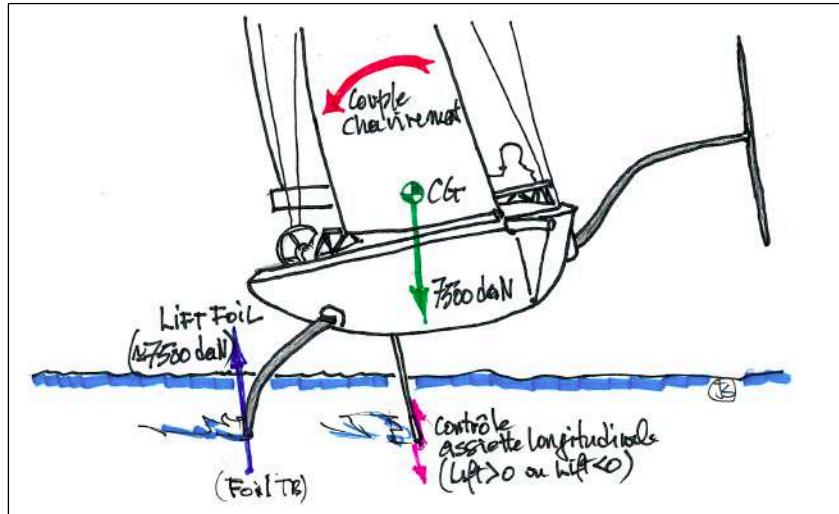
Chaque force est un vecteur 3D, qui évolue durant la navigation en intensité et en direction.
 Seul le vecteur représentant la masse du bateau et de son équipage est toujours vertical et constant en intensité.

Le bateau se déplace dans un environnement orthonormé, c'est-à-dire :

Oz : Direction longitudinale (le cap du bateau)

Oy : direction verticale

Ox : Direction latérale (Dérive latérale).



Chacune des 3 forces possède dont trois composantes sur (Ox, Oy, Oz) :

Force Vélique : Elle est produite par la portance des voiles, elle évolue en fonction du vent, de l'orientation de la voile, du type de voile et de la gîte.

- Composante sur Ox : la dérive, le bateau glisse généralement sous le vent.
- Composante sur Oy : elle se traduit par une poussée vers le bas (le bateau s'enfonce légèrement)
- Composante sur Oz : c'est la force qui assure la propulsion vers l'avant

Force produite par le Foil : Elle est produite par la portance du foil.

Elle dépend du :

- ✓ Réglage de l'angulation transversale de l'intérieur vers l'extérieur (Nommé « CANT »)
- ✓ Réglage de l'angulation d'avant en arrière (Nommé « RAKE »)
- ✓ Réglage de l'angulation transversale de l'intérieur vers l'extérieur (Nommé « CANT »)
- ✓ Réglage d'orientation (axe vertical), (Nommé « YAW »).

Cette force est orientée vers le haut, sa composante verticale (parallèle et opposé au vecteur POIDS du bateau) se nomme habituellement le LIFT.

En fait cette composante soulève le FOILER et lui permet de quitter le mode Archimédien pour évoluer dans le mode Foiler.

L'intensité de cette force est le facteur prépondérant d'un Foiler.

Que le foil décroche et tout l'édifice s'effondre.

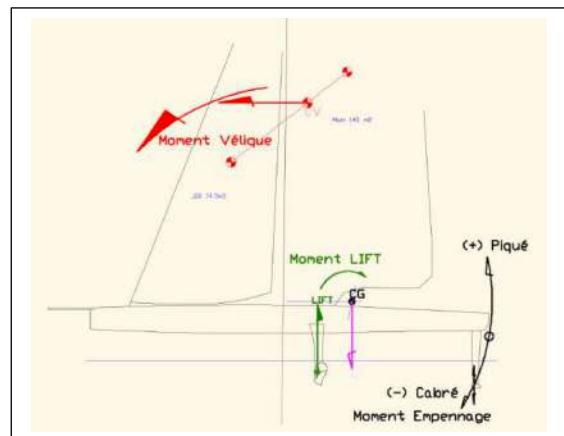
Force verticale produite par le plan horizontal arrière.

Ce plan horizontal est un profil symétrique car sa portance doit pouvoir être alternée, c'est-à-dire dirigée vers le haut ou vers le bas.

C'est cette portance qui permet de réguler l'assiette horizontale du Foiler.

Il ne faut pas oublier qu'un foiler comme l'AC75 est à « *centrage AR* », c'est-à-dire que son centre de gravité est situé en arrière de la poussée des foils avant.

Dans ces conditions l'empennage arrière, suivant son angle d'incidence produit un couple (+) ou un couple (-), soit « *cabré* » ou « *piqué* ».

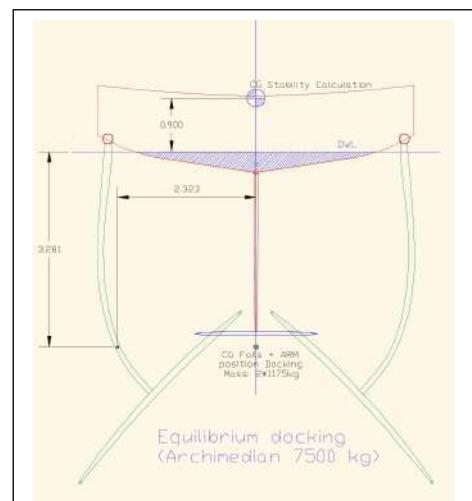


La masse du bateau génère une force verticale appliquée à son centre de gravité CG. Le CG est pratiquement invariant en navigation **dans une configuration définie**.

L'étude de la stabilité, va porter sur 3 configurations :

- « **DOCKING** », le bateau sort de son « stand » et est remorqué jusqu'à la sortie du port. Les deux foils sont repliés sous la coque.

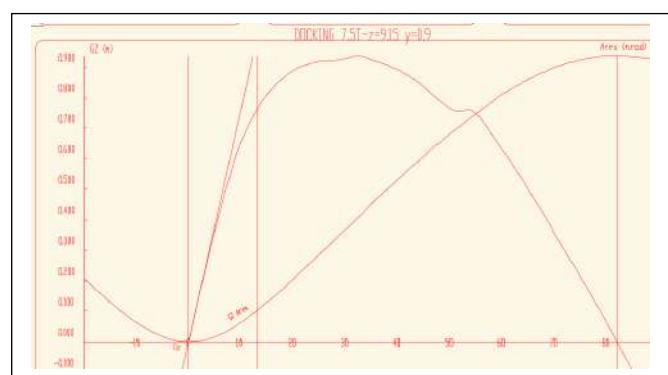
Description	masse (Kg)	/Axe (x)	/Ref (y)	/ AR (z)	m*x	m*y	m*z
Foil Port	1150	2.323	-3.281	8.77	2871.45	-3773.15	10086
Foil Starboard	1150	-2.323	-3.281	8.77	-2871.45	-3773.15	10086
HULL Renfort / équipement technique Fouls / Bowsprit / équipement technique Fouls / Mast / Main Sail / Rudder	3720	0	2.9	10	0	10788	37206
Foc	55	0	8.53	13.41	0	489.15	738
Equipage	1150	0	1.6	6	0	1640	8900
Code 0	100	0	9	15	0	900	1500
Accastillage / électronique / Media	175	0	1.8	9	0	315	1975
Total Déplacement mesuré	7500				0	6785.85	68084
CG (x lateral, y vertical DWL Foil, Z Longi)		0.00	0.90	9.08			
Jean SANS www.experts-yachts.fr		masse	/Axe (x)	/DWL foiler (y)	/ PPAR (z)		



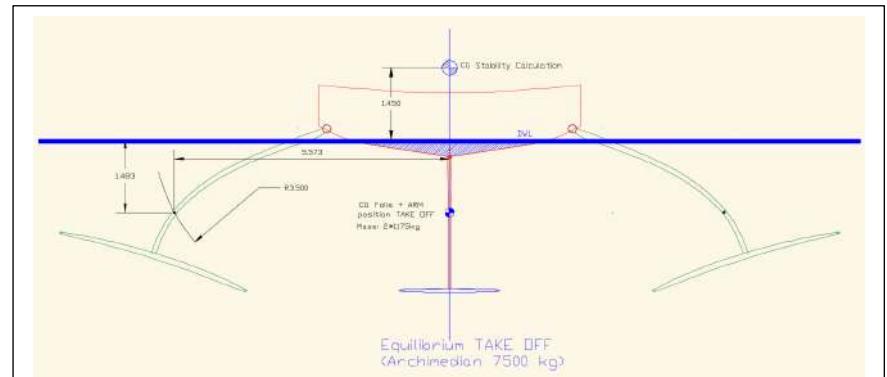
Dans cette configuration, la plateforme est relativement stable, avec GZ (bras de levier) max 0.936 m soit un Righting Moment maximum de $7.5 * 0.936 = 7$ T.m

Le bateau chavire à 82° de gîte.

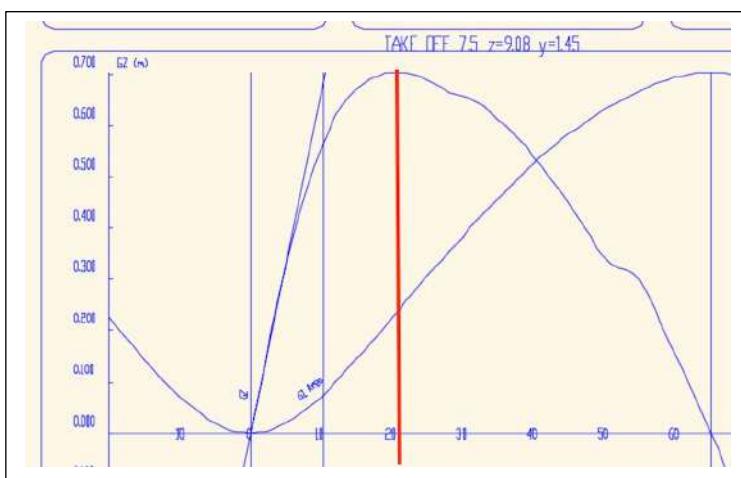
Sans vouloir caricaturer, disons que dans cette configuration, l'AC75 est « *biquille* ».



- « **TAKE OFF** »
Afin de préparer le décollage, l'équipage quitte le mode DOCKING et installe mécaniquement les foils en mode archimédien afin de « rouler sur la piste » et passer ainsi en mode « FOILER ».



Les bras s'étant déployés depuis la position Docking, le CG final de l'AC75 est passé de 0.90 m à 1.45m / DWL



Description	masse (Kg)	l'Axe (x)	l'Ref (y)	l'AR (z)	m^x	m^y	m^z
Foil Port	1150	0.573	-1.483	0.77	6406.92	-1702.45	10086
Foil Starboard	1150	-0.583	-1.483	0.77	6420.45	-1702.45	10086
HULL Renfort / équipement technique							
Foils / Bowsprit / équipement technique	3720	0	2.9	10	0	10768	37200
Foc	55	0	8.93	13.41	0	469.15	738
Equipage	1150	0	1.6	6	0	1840	6900
Code 0	100	0	9	15	0	900	1500
Accessoires / électronique / Media	175	0	1.8	8	0	315	1575
Total Déplacement mesures	7500					-11.5	10901.3
CG (x Internal, y vertical DWL, Z Long)		0.00	1.45	9.08			
Jean SANS www.experts-yachts.fr							
Ref = DWL, Foiler							

La stabilité transversale doit être sérieusement contrôlée en navigation.

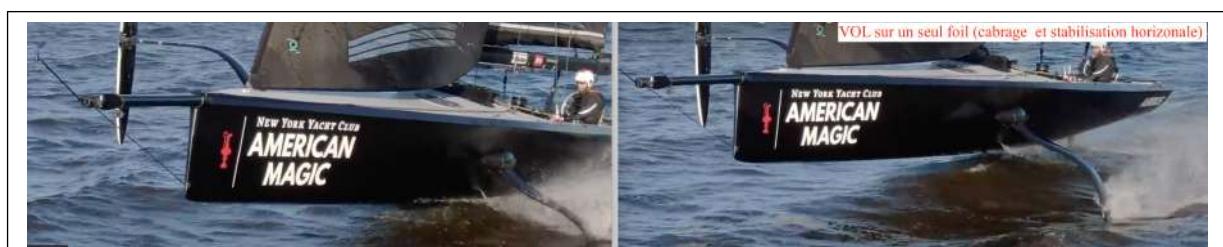
Le GZ (bras de levier) max 0.704m à 22° soit un Righting Moment maximum de $7.5 * 0.704 = 5.28$ T.m
Le bateau chavire à 62° de gîte.

Le « **TAKE OFF** » est la phase la plus sensible. En effet le creux de carène étant relativement faible (environ 0.370 m), dès que le bateau va prendre de la vitesse et se créer du « LIFT » sur ces deux foils, la carène va rapidement complètement sortir de l'eau et quitter le domaine Archimédien.

Les calculs basés sur la flottabilité, le centre de carène, n'ont plus aucun sens. Le foiler devient un avion avec ses deux ailes et son empennage arrière.

Sa stabilité de vol dépend alors de la dextérité du pilote et de l'équipage qui règle les foils et le « moteur », les voiles.

Cela va se traduire par le cabrage de la plateforme afin d'augmenter l'angle d'incidence des foils, puis par un retour à une assiette horizontale ou l'angle d'incidence diminue, puisque la vitesse s'est stabilisée.



Les deux photos ci-dessus, qui montrent la progression du foiler sont prises avec un seul foil actif, mais le « **TAKE OFF** » sur deux foils procède de la même évolution du vol.

A regarder, tout paraît simple..... et facile.

Il est peut-être possible de décoller sur un seul foil, le foil au vent étant en position haute, donc hors de l'eau en régime Archimédien.

Mais l'opération demandera un sérieux savoir-faire à cause de l'effet dissymétrie des plans porteurs.

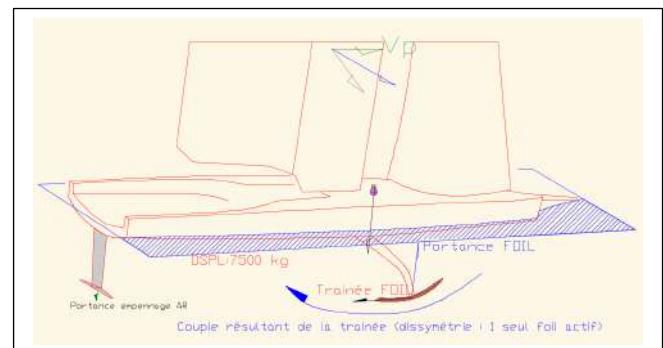
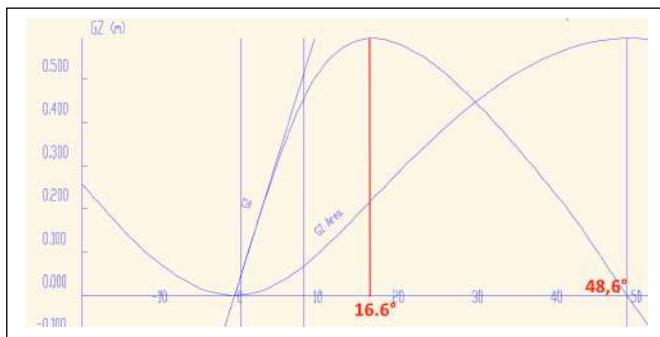
En effet cette dissymétrie génère un déséquilibre du « LIFT » sous le vent, à environ 6m du centre de carène lorsque le bateau est encore en archimédien.

Ensuite, avec deux plans porteurs, les 7500 kg du bateau sont répartis sur chacun des 2 foils, ce qui permet de décoller à une vitesse plus basse, donc sur une longueur de « piste » moins importante.

Foil :

Envergure : 3,9 m – Corde moyenne : 0,55 – Surface évaluée : 2,14 m²

Hypothèse du centrage des poids (100% sur les foils, un ou deux)



Le GZ (bras de levier) max 0.535 m à 16.6° soit un Righting Moment maximum de $7.5 * 0.535 = 4.0$ T.m

Le bateau chavire à 48.6° de gîte.

Il est évident qu'à « l'allumage » des moteurs, la stabilité est équivalente à celle d'un catamaran comme le TORNADO.

Mais dès que le foil immergé produira de la portance et le Righting Moment augmentera. Cela permettra d'assurer un compromis acceptable.

Toutefois seuls les essais permettront de réellement vérifier les calculs et les modèles.

Par contre les conditions de décollage sont différentes entre la configuration **2 foils actifs** ou **1 seul foil actif**.

- ✓ **Phase de décollage, lorsque le bateau s'appuie sur les deux foils** : 39000 N sur chaque foil.

Les foils ne sont pas horizontaux en navigation, mais possède une géométrie en « V ». L'angle est d'environ 18°, ce qui nécessite une portance réelle du foil supérieure à celle du poids du bateau. Dans la configuration géométrique de ce foiler, pour soulever le déplacement de 7500 kg, il faut une portance totale de 78000 N.

Portance (en N) = $0.5 * 1025 * C_x * \text{Surface active (m}^2\text{)} * V^2$ (vitesse en m/s)

$C_x = 0.38$ (évaluation du coefficient de portance des foils de bateaux)

1025 kg = masse volumique d'un m³ d'eau de mer

On en déduit :

$$V^2 = 39000 / (0.5 * 1025 * 0.38 * 2,14) = 93.57$$

Soit **V= 9.67 m/s ou 18.8 Nds**

- ✓ **Phase de décollage, lorsque le bateau s'appuie sur un seul foil** : 78000 N sur le foil.

$$V^2 = 78000 / (0.5 * 1025 * 0.38 * 2,14) = 187$$

Soit **V= 13.68 m/s ou 26.6 Nds**

On peut ajouter que dans la configuration TAKE OFF sur un seul foil, la trainée du foil actif étant proportionnelle à la portance (et donc à la vitesse), le couple résultant de cette trainée augmentera, ce qui rend le pilotage très sensible lors de cette phase du passage Archimédien à la phase Foiler.

Ci-contre, le devis de poids de l'AC75 avec un seul foil immergé. Cela illustre les conditions physiques du Foiler (CG : 2.06m /DWL) durant le décollage sur un seul foil.

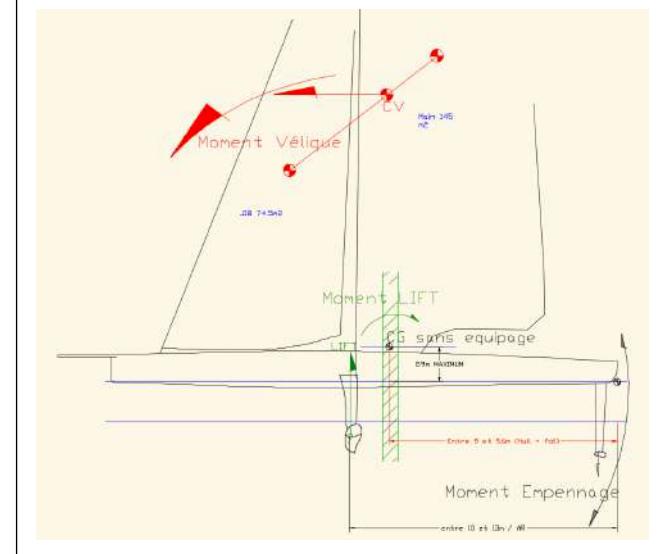
Description	masse (Kg)	l'Axe (x)	l'Ref (y)	l'AR (z)	Im'x	m'y	m'z
Foil Port	1150	5.226	2.442	8.77	8509.6	2669.3	10386
Foil Starboard	1150	-0.583	-1.483	8.77	-6420.46	-1705.45	10386
HULL Renfort / équipement technique							
Foils / Bowsprit / équipement technique	3720	0	2.9	10	0	10788	37200
Foils / Mast / Main Sail / Rudder							
Foc	55	0	8.53	13.41	0	469.15	738
Équipage	1150	0	1.8	8	0	1840	8900
Code 0	100	0	9	15	0	900	1500
Accastillage / électronique / Media	175	0	1.8	8	0	315	1575
Total Déplacement mesuré	7500				410.55	13415	48054
CG (x lateral, y vertical DWL, Z Long)					-0.05	2.06	9.08
					mesuré	(Axe (x) DWL foil / PPAR (x))	

Jean SANS www.experts-yachts.fr

Mais en vol, de nature instable, les équilibres peuvent dégénérer...

Un foiler sur 2 appuis et un plan régulateur arrière présente une assise de stabilité beaucoup plus importante et surtout moins instable que ce qui se produira sur l'AC75 qui doit voler sur un point d'appui sous le vent et dont l'assiette longitudinale est contrôlée par le plan porteur du safran.

En mode « VOL », il n'est plus question de centre de carène, de flottabilité, de lois Archimédiennes. Tout se passe autour du centre du Foiler, centre qui étant obligatoirement un centre arrière.



Dans ces conditions de vol, le chavirage est possible par contre il y a peu de chance que le chavirage soit uniquement latéral.

En effet, le chavirage résultera d'une chute de la portance sur un foil, chute d'autant plus brutale qu'il sera très compliqué, voir impossible, d'associer le décrochage du foil, même repéré avec des capteurs, avec le temps de réaction pour agir sur la gouverne arrière (plan porteur du safran) afin de retrouver de la portance.



Le bras de levier (15 mètres) de la portance vélique est très grand. J'ajoute que ce n'est pas la composante transversale qui provoque le chavirage mais la composante propulsive dirigée vers l'avant mais la causalité du chavirage reste le décrochage du foil sous le vent.

L'équilibre sur un foil est de l'ordre de :

(Lift de 7800 daN) * (Distance horizontale entre l'appui du foil et le centre de gravité du bateau)
= **Force propulsive** * 15 m (voir le dessin ci-dessus)

Des configurations suite à un chavirage.

Il certain que contrairement aux AC45 et AC72, les nouveaux AC75 ne resteront pas chavirés (à 90°) l'étrave immergée jusqu'à la base du mat (approximativement).

La raison est simple, l'AC75 est un monocoque qui sera totalement instable dans cette position.

Dans l'hypothèse où il sancirait, cette configuration sera très temporaire et très rapidement l'AC75 se retrouvera chaviré comme un 505 ou un simple Dinghy.

Il faut préciser qu'il est prévu que le tube profilé du mat soit étanche. Cela empêche en théorie de faire un Capsize.

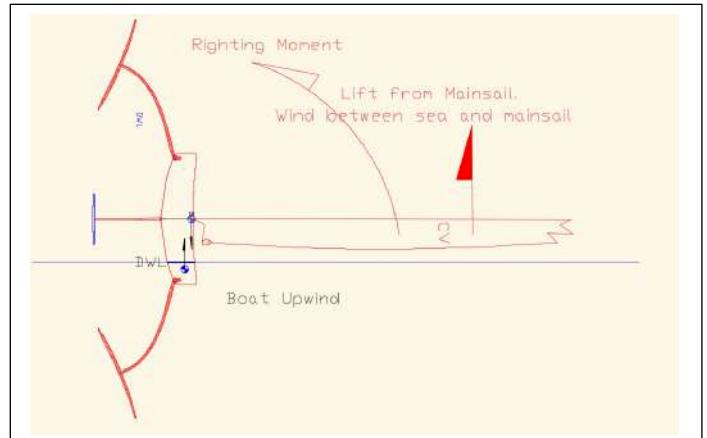
Chavirage avec les deux foils en position basse.

C'est la configuration qui apparaît comme la plus facilement récupérable, pour revenir « Upright ».

En effet dans cette configuration (bateau à 90°), le centre de gravité de l'AC75 se situe sensiblement en avant du centre de carène, environ 300 mm.

Bien sûr le moment de redressement n'est pas favorable puisque le CG du bateau a dépassé la verticale du centre de carène, mais avec la flottabilité du mat (partie haute), l'AC75 se stabilisera vers 95°.

La coque gitée à 90° est enfoncée d'environ 900 mm.



Une méthode, déjà utilisée par Loïc PEYRON sur les AC45, pour redresser le bateau consistait à placer le catamaran face au vent avec l'aide d'un semi-rigide.

Dans cette position, le vent s'engouffre entre l'aile rigide et la surface de l'eau. Avec cet effet de « sol » combiné à la portance de l'aile dirigée vers le haut, un moment de redressement apparaît et permet de remettre les bateaux « Upright » (en théorie).

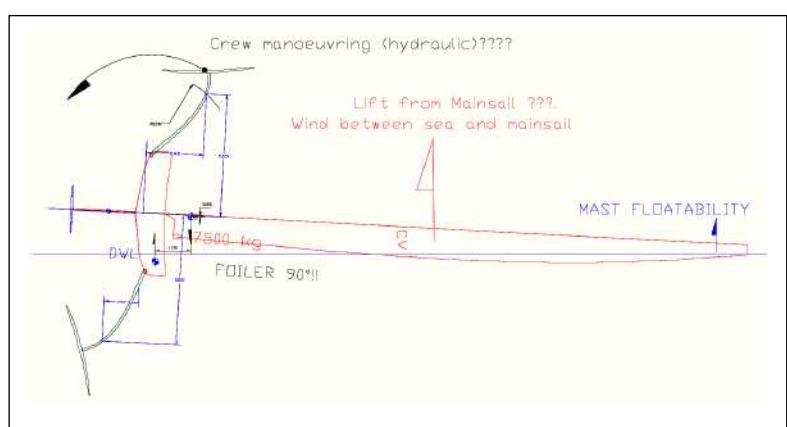
Mais il ne faut pas se leurrer, c'est une manœuvre de sauvegarde qui sous-entend que le bateau abandonne la régate.

Chavirage avec le foil au vent en position haute.

C'est la configuration qui apparaît comme la plus difficilement récupérable, pour ramener le bateau en position « Upright ».

C'est aussi, lorsque le bateau est couché à 90°, la configuration des foils qui paraît la plus dangereuse pour l'équipage.

En effet, le foil qui est en position haute se trouve entièrement au-dessus de la zone de travail de l'équipage (cockpits).



Cela représente 1.150 T d'acier (foil) articulé autour d'un point de rotation avec un bras de levier de 2.5 m, soit un couple vers le bas de $1.15 \times 2.5 = 2.87$ T.m.

Les efforts sur la structure du bateau sont moins importants que lorsque l'AC75 navigue sur un foil, mais cette configuration résulte de la rotation non contrôlée du bateau pendant le chavirage. Le choc du mat sur l'eau amplifie les sollicitations.

On remarque la verticale du centre de gravité du bateau se situe à 1.5m de celle du centre de carène. Cela sous-entend qu'il faudra vaincre ce couple pour revenir en position Upright.

Certes, l'équipage (mais dans quelles conditions ergonomiques) peut utiliser l'hydraulique pour ramener le foil supérieur dans la position symétrique du foil immergé.

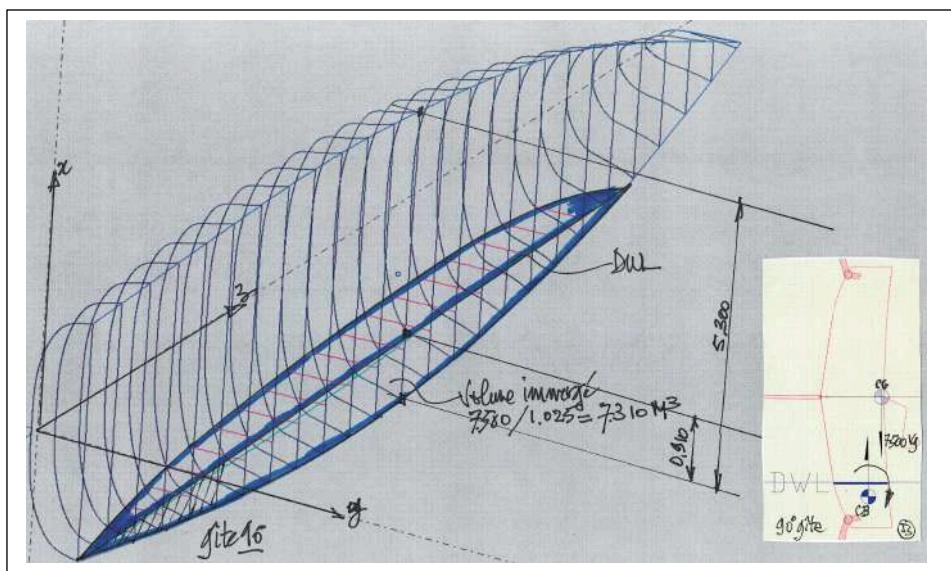
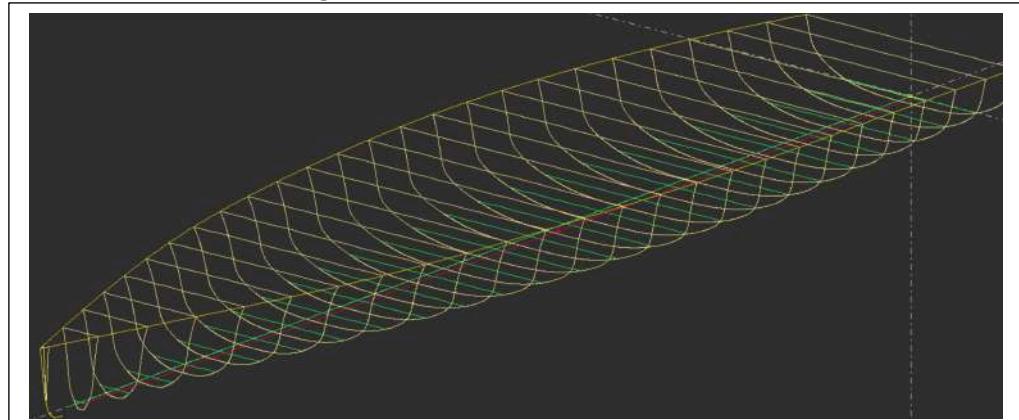
Cela sous-entend que la centrale hydraulique (10000 psi / 800 Bars) fonctionne lorsque le bateau est chaviré à 90°.

Certes en cas de chavirage, la régate est terminée, mais il ne faut pas que cet incident, qui paraît possible mette en danger les équipages.

Tous ces calculs ont été réalisés en utilisant les valeurs minimales des positions des centres de gravité imposées par les règles de classe de l'AC75.

Je pense que les architectes des différents Teams seront au-delà (dans le bon sens) de ces limites afin d'assurer une meilleure stabilité en navigation.

J'ai construit un modèle volumique, mon objectif étant d'étudier la stabilité et non le potentiel de vitesse d'une carène.



Jean SANS
(3 Mars 2019)

Version V5 : Analyse des paramètres de vol de l'AC75

[Suite des documents V1, V2, V3, V4](#)
www.experts-yachts.fr

Préambule

Dans mes précédents articles, les études ont porté dans un premier temps sur la réalité de la navigation d'un foiler et la découverte de l'AC75 avec principalement le passage de la **configuration Archimédienne** à la **configuration Foiler**.

Deux analyses étaient indispensables :

- La stabilité en mode Archimédien
- Les situations de chavirages (L'AC 75 se retrouve alors, de fait et contre son gré, en mode archimédien) lors de la navigation en mode Foiler.

Il est apparu qu'il ne suffit pas de décoller, encore faut-il ensuite évoluer sur deux foils et un plan porteur arrière ou encore un foil et ce même plan porteur arrière.

C'est lors de ces phases d'évolution (en régate) en mode Foiler que la stabilité de vol devra être maîtrisée parfaitement, d'abord afin de conserver la vitesse et ensuite, et ce sera primordial, éviter un décrochage du ou des foils.

Si on ajoute que pour être performant, il faudra voler à une altitude relativement constante en permanence, on conçoit l'importance de la stabilité et de la maniabilité en vol.

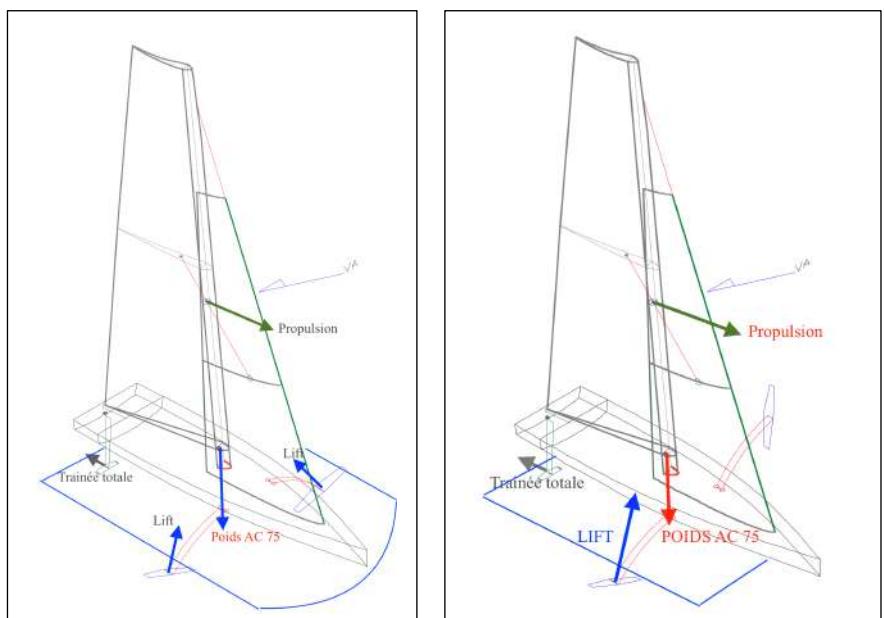
Le vol en mode Foiler

D'abord se représenter les forces en présence, que ce soit avec deux foils ou un foil.

Au total, en schématisant, il y a quatre forces qui s'exercent sur l'AC 75.

- Le POIDS de l'ensemble prêt à naviguer (masse 7500 kg soit 7430 daN¹)
- Le LIFT apporté par le ou les foils. Pour voler ce LIFT doit être équivalent au POIDS.
- La FORCE PROPULSIVE qui procure la vitesse nécessaire à la production du LIFT.
- La TRAINEE, qui s'oppose au déplacement

On comprend immédiatement que l'on aura très peu d'influence directe sur le POIDS, tout au plus une certaine possibilité de modifier longitudinalement la position du Centre de Gravité (l'équipage est prévu pour 1100 kg, mais sa plage d'évolution dans le cockpit est limitée).



¹ Les unités de force s'expriment en N ou daN. Usuellement dans le langage courant on parle plutôt de Kg. Un daN correspond à sensiblement un Kg.

Sur la FORCE PROPULSIVE, l'équipage apportera nécessairement une grande contribution, mais sera tributaire de vent. Mais à elle seule la FORCE PROPULSIVE ne suffit pas pour passer du mode Archimédien au mode FOILER.

Le LIFT et son corollaire la TRAINEE apparaissent alors comme le pivot des conditions de vol, puisque le mode FOILER repose sur les appuis nécessaires du bateau sur les foils ou le foil.

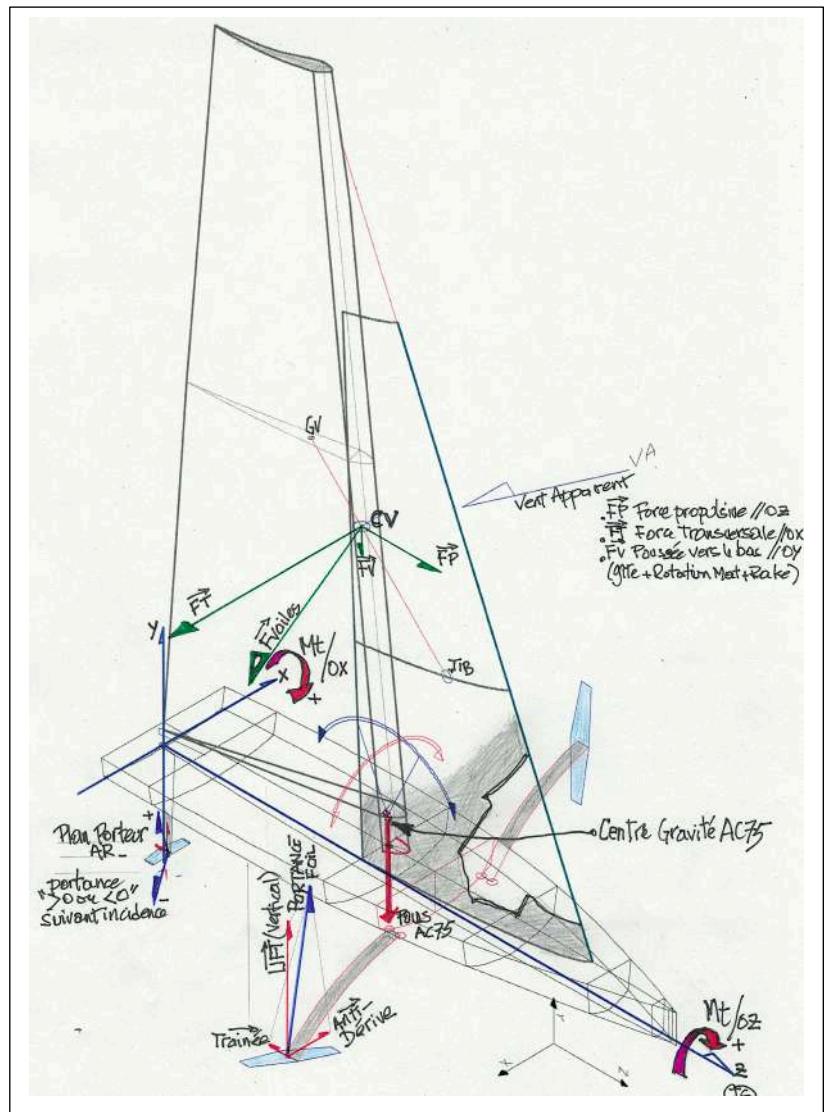
Le LIFT et la TRAINEE sont intrinsèquement liés, le contrôle de ces deux forces contribuera à assurer un vol stable et de la maniabilité nécessaire pour régater.

Le dessin ci-contre met en évidence qu'en mode Foiler, l'ensemble des forces qui entre en jeu paraît plus complexe.

Seuls deux mouvements de rotation sont pris en compte :

- La rotation autour de l'axe XX', soit le risque de sancir.
- La rotation autour de l'axe ZZ', soit le chavirage transversal.
- Il faut noter que mouvement de rotation autour de l'axe YY' (axe vertical), que l'on nomme le « lacet » n'est pas représenté.

En réalité le chavirage, s'il se produit, est une combinaison des deux rotations XX' et ZZ'.



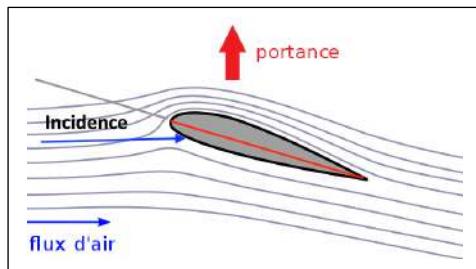
Les causes du chavirage en mode Foiler sont entièrement différentes de celles qui existent en régime archimédien, ou tout se situe dans la position relative entre le Centre de Gravité et le Centre de Carène au fur et à mesure que le bateau gîte.

En mode Foiler, l'AC 75 est posé sur un ou deux foils. Le plan porteur arrière joue de rôle de stabilisateur.

Dans cette configuration, seule la perte de portance sur les foils ou une modification du « centrage » du Foiler provoquera un retour non contrôlé au mode archimédien avec un risque de chavirage.

Pour bien appréhender le domaine de la perte de portance (qui produit le LIFT), il faut repartir de la base, c'est-à-dire de l'aile, que les marins connaissent avec le réglage des voiles mais dont ils ne connaissent rien (ou presque) comme moyen de sustenter.

La Portance aérodynamique ou hydrodynamique, son application.



Vocabulaire propre au profil d'une aile (ou d'un foil) :

- ✓ L'extrados : surface ou s'exerce la dépression du flux d'air ou d'eau
- ✓ L'intrados : surface ou s'exerce la pression du flux d'air ou d'eau.
- La dépression est plus importante que la pression.
- ✓ Le profil géométrique : Symétrique ou Dissymétrique
- ✓ Le bord d'attaque : ligne qui coure le long de l'aile et qui reçoit le fluide en premier
- ✓ Le bord de fuite : ligne qui relie l'intrados et l'extrados à la « sortie » du fluide.
- ✓ La corde : ligne qui joint le point du bord d'attaque au bord de fuite.
- ✓ L'épaisseur : % qui identifie l'épaisseur du profil. Exemple NACA 6412 (Épaisseur 12%)
- ✓ Le **Foyer** : C'est le centre de gravité aéro (ou hydro) dynamique du profil. Pour faire simple, le **Foyer** est le point d'équilibre du profil. Attention c'est un calcul géométrique qui ne prend pas en compte la fabrication réelle (longeron, tôles etc).

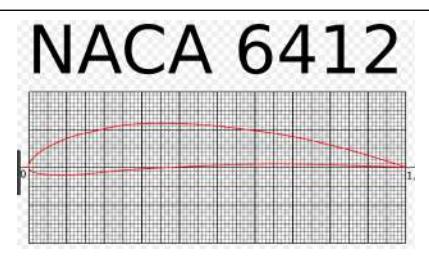
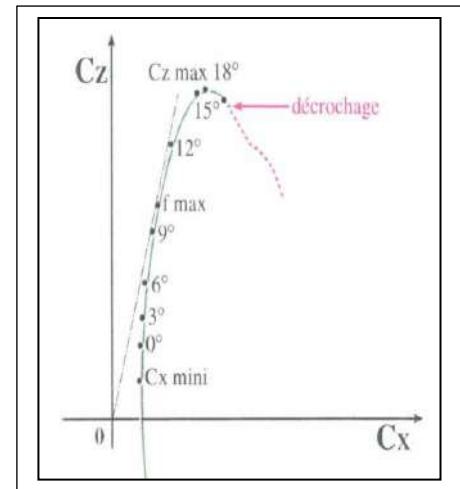
Le foyer est un point fixe propre à chaque forme de profil.

- ✓ Le **Centre de Poussée** est le point où s'applique la résultante des forces résultantes de la pression et dépression sur l'intrados et extrados.

Ce point se déplace le long de la corde en fonction de l'angle d'incidence.

- ✓ **Cz** représente la portance (lift)
- ✓ **Cx** représente la traînée (frein)

En fonction de l'incidence du profil le Cz augmente (avec une limite), mais au fur et à mesure que le Cz augmente, la traînée suit.

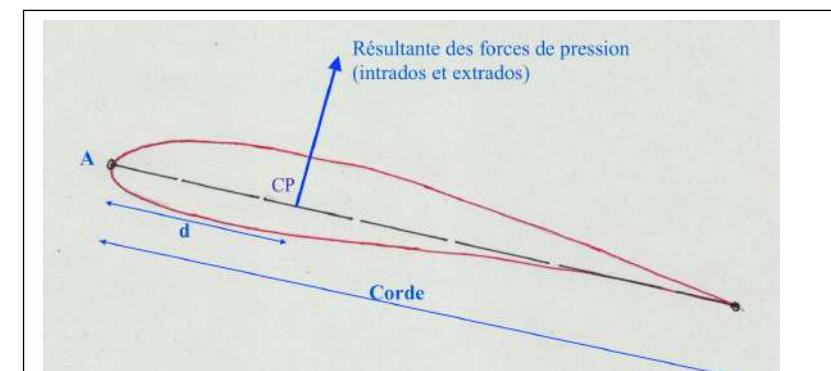


Les deux points (**Foyer** et **Centre de Poussée**) représentent les bases de la stabilité du vol.

Analyse du Centre de Poussée (CP) pour un profil dissymétrique

La position du centre de poussée est définie par sa distance (d) par rapport au bord d'attaque (point A) de l'aile. La distance d est exprimée fraction de corde prise égale à 1.

Angle d'incidence. (En degré)	Valeur de (d) par rapport à la corde de valeur 1
0	0.465
2	0.370
4	0.337
6	0.319
8	0.307
10	0.299



On constate que lorsque l'angle d'incidence augmente, le CP se déplace vers le bord d'attaque et vice versa évidemment.

Exemple sur un profil du même type

Cas des profils symétriques.

Sur un voilier les profils symétriques sont obligatoires sur les voiles de quille et sur les safrans, puisque l'incidence est située alternativement d'un côté et de l'autre, en d'autres mots l'intrados devient extrados et vice-versa.

La symétrie se traduit par le fait que quel que soit l'incidence, le Centre de Poussée est fixe et se trouve sensiblement à 25% de la corde du bord d'attaque.

Calcul de la force de Portance produite par le foil.

Je fais ce rappel pour la forme.

La force de portance d'une aile est exprimée par la relation :

$$P = \frac{1}{2} * \rho * S * V^2 * Cz, \text{ où}$$

ρ : masse volumique de l'eau

V : vitesse du foil dans l'eau

S : surface du foil

Cz : coefficient de portance. Il dépend de l'incidence
(α) de l'aile et de son allongement.

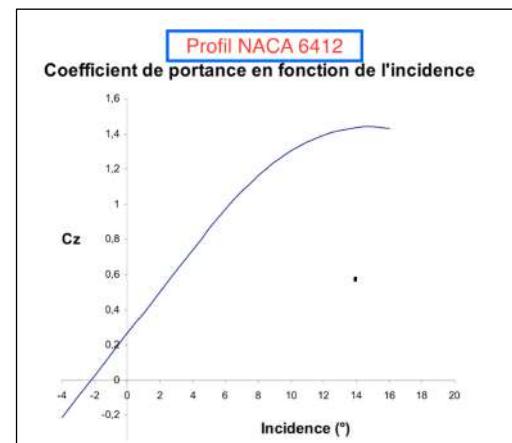
L'allongement (λ) d'un foil, à ne pas confondre avec son envergure, a pour valeur :

$$\lambda = Env^2 / S \text{ avec :}$$

Env = l'envergure de l'aile et S = la surface de l'aile

La courbe $Cz = f(\alpha)$ pour les profils NACA 6412. Cette courbe montre que pour $\alpha = 0$, le coefficient de portance est nul. On remarque que sur 60% la progression de la portance est linéaire.

Mais cette courbe correspond au Cz d'un foil (ou une aile) dont l'allongement $\lambda = Env^2 / S$ serait infini.



Ce n'est évidemment pas le cas pour un foil, qui, comme une aile d'avion, possède obligatoirement un allongement fini.

En fait, seule la partie linéaire de la courbe du Cz est intéressante (et utilisable) car le ratio (portance / trainé) est constant, ce qui n'est plus le cas dès que la courbe du Cz s'arrondit.

Dans cette zone qui s'incurve, la Traînée augmente plus vite que le Cz (Portance), ce qui est bien moins intéressant, c'est un peu comme si on freinait en accélérant !

A partir de la **zone linéaire** de l'expression du **Cz infini** du profil (Foil d'allongement infini), on calcule en prenant en compte l'expression de l'allongement ($\lambda = Env^2 / S$), le **Cz λ propre à chaque foil ou aile**. **Les aérodynamiciens se sont chargés de ce calcul.**

Au final le **Cz λ** d'un foil réel, c'est à dire d'allongement fini (λ) (on connaît ses dimensions), a pour valeur :

$$Cz_\lambda = Cz / (1 + Cz / \pi \cdot \lambda)$$

Cz étant le coefficient de portance à allongement infini pris dans la courbe ci-dessus.

Par exemple pour un foil de $4 \text{ m} * 0.55 \text{ m}$, soit 2.2 m^2 ($\lambda = 7.23$) et un Cz de 1 (angle d'incidence de 6°), le **Cz λ** de ce foil est de 0.958, soit 4.4% de moins.

La différence entre le Cz (foil infini) théorique et le Cz propre à un dessin réel de foil reste faible.

Si l'allongement augmente et passe à 8, le **Cz λ** devient 0.962.

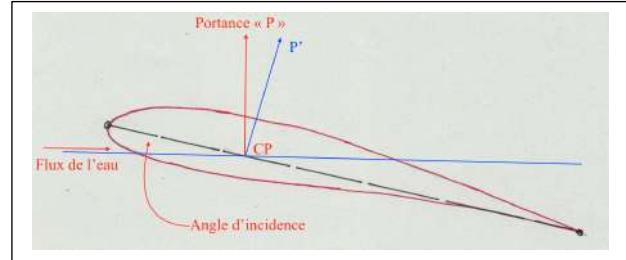
Ce qui est normal, puisque l'allongement tend vers l'infini... toutes proportions gardées.

Représentation sur le profil (foil) de la force de Portance

On vient de voir que le Centre de Poussée (CP) est le point d'application de la force résultante de portance (P).

Le vecteur P est perpendiculaire à la trajectoire (direction du flux d'eau).

L'angle d'incidence se mesure entre la corde du profil (point du bord d'attaque au bord de fuite) et la direction du flux d'eau.



La corde d'un profil est l'élément de base bien identifié de chaque profil. Le Foyer et le Centre de Poussée sont situés sur ce segment de droite.

Afin de simplifier les méthodes de calcul à venir, on utilisera la projection du vecteur P sur la perpendiculaire à la corde en CP.

Pour simplifier, au lieu de calculer $P' = P * \cos(\alpha)$ (incidence α) ou prend $P' = P$.

Le cosinus de 6° ayant la valeur 0.9945, cela ne perturbera pas les calculs.

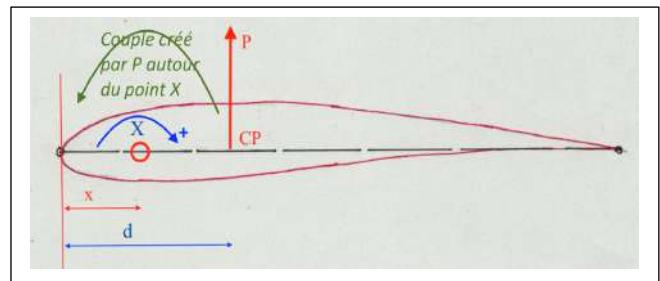
Donc, dans les calculs à venir, la portance appliquée au point CP sera prise comme étant égale à : $P = 1/2 * \rho * S * V^2 * Cz\lambda$

Quid d'une relation entre le Centre de Poussée (CP), le Foyer (F), la Portance (P) ?

La portance P ainsi que sa position longitudinale varient en fonction de l'angle d'incidence du foil par rapport au flux d'eau.

Les seuls éléments intangibles d'un profil, choisis par l'architecte, sont le dessin de ce profil et sa corde.

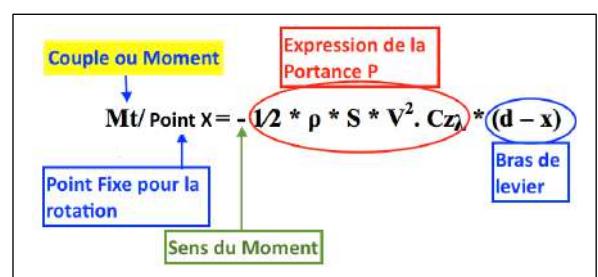
En règle générale lorsque que sur un corps solide on se fixe un point, même quelconque, et une force identifiée en intensité, direction et position par rapport à ce point de référence, il y a création d'un couple, qui générera une rotation autour du point de référence.



En mécanique statique, pour quantifier un couple il faut d'abord définir (arbitrairement) un sens de rotation de référence.

Le sens horaire est pris comme référence.

En conséquence, le couple créé par la portance P appliquée au Centre de Poussée CP, autour d'un point X situé sur la corde à la distance x du bord d'attaque s'exprime ainsi :



Variation du moment Mt en fonction de l'incidence

La connaissance de la stabilité d'un foil demande que l'on connaisse ses caractéristiques de Portance, c'est-à-dire, les dimensions du foil, son allongement, son type de profil, ainsi que les Cz et les positions du Centre de Poussée en fonction de l'incidence du flux d'eau, et enfin de connaître comment la force de portance P agit sur l'équilibre du foil (voir ci-dessus).

Par analyse expérimentale de l'évolution de l'expression $Cz\lambda^* (d - x)$ en fonction de l'angle d'incidence, du $Cz\lambda$ correspondant et de la position du CP (d), on constate² que cette expression reste constante lorsque (x) prend sensiblement la valeur 0,25.

Cela signifie que le Mt/point X (moment par rapport au point X) reste constant lorsque $x = 0,25$ et cela quel que soit l'angle d'incidence.

Cette constatation est vraie quel que soit le type de profil dissymétrique.

Le point X situé à $(0,25 * \text{Corde})$ du bord d'attaque est appelé « Foyer du foil en tangage »

Finalement pour un foil dessiné (comme pour une aile), il y 3 paramètres « fixes » :

- Le profil
- La corde
- La position du foyer

Quantifier la valeur de ce moment de tangage au foyer ?

La relation (1) encadrée en page 5 supra, $Mt / X = - \frac{1}{2} * \rho * S * V^2 * Cz\lambda^* (d - x)$, indique la valeur de ce moment par rapport à un point X que l'on fixe au foyer puisque nous cherchons à évaluer ce moment autour du foyer.

Toutefois il faut remarquer que lorsque l'incidence (α) varie, ce qui se produit pratiquement en permanence, ce sont deux paramètres de cette équation qui sont modifiés, à savoir :

- ✓ Cz qui augmente ou diminue
- ✓ CP qui avance ou recule, ce qui implique que la valeur (d) est en permanence variable

Dans ces conditions quantifier (Mt / X) devient complexe.

La solution passe par l'introduction d'un « **Coefficient de Moment** » (Cmx), ce nouveau paramètre permet de lier la variation du moment (Mt / X) à celle de ce seul paramètre.

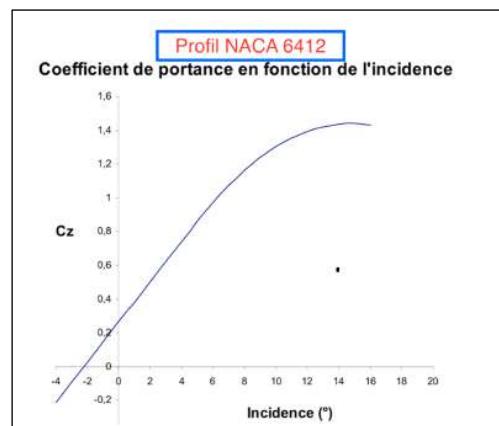
$$Mt / X = \frac{1}{2} * \rho * S * V^2 * Cmx * c \quad (2) \quad (c) \text{ étant la corde du profil.}$$

En égalant les relations (1) et (2) qui sont deux expressions du même élément (Mt / X), on obtient :

$$Cmx * c = Cz\lambda^* (d - x), \text{ soit :}$$

$$Cmx = - (Cz\lambda^* (d - x)) / c$$

Cette expression n'est valable que dans le domaine de « vol » usuel (c'est-à-dire dans la zone rectiligne de la courbe du Cz), c'est-à-dire pour des angles d'incidences où le Cz n'est pas nul ou très proche de zéro.



Les essais et expérience démontrent qu'il existe donc un point du profil qui est indépendant du Cz et de la position du centre de poussée CP.

Le moment autour de ce point s'écrit :

$$Mt / F = \frac{1}{2} * \rho * S * V^2 * Cmf * c$$

² Cette démonstration est faite pour une longueur de corde du profil égale à 1.

Conclusion : Sur un foil, pour chaque section transversale, il existe un point nommé **Focus**. Ce point est fixe et situé à $(0.25 \times \text{corde})$ du bord d'attaque, il appartient à la section du profil. Contrairement au centre de poussée, la position du foyer F est donc fixe et indépendante du Cz et de l'incidence.

Donc tout profil, en plus de la Portance qu'il peut générer et qui sera utilisée pour soulever le Foiler, possède naturellement un Couple de tangage autour du Foyer qui fera piquer le profil. Au final, le moment de tangage du foil aura un impact sur sa portance.

Cette propriété hydrodynamique est importante car elle amène à étudier la notion de stabilité du vol sur foil(s), puisque l'on peut imaginer que la trajectoire du foil soit rectiligne même lorsque le pilote modifie l'angle d'incidence pour compenser une perte de portance... jusqu'à une certaine limite quand même.

Notion de stabilité et d'équilibre

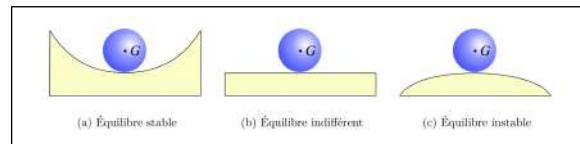
Il est important de bien distinguer la notion de **stabilité** de la notion **d'équilibre**.

La stabilité d'un système ne peut être étudiée que si ce système est en équilibre.

Avant toute chose, il faut différencier l'emploi du nom « stabilité » de celui de l'adjectif « stable ». L'adjectif permet de décrire l'état d'équilibre d'un système.

Le substantif décrit la manière dont se comporte un système dans l'espace (trajectoire).

Par définition, **un équilibre** peut posséder 3 états : être **stable**, **instable** ou **neutre** :



Un système est dit en **équilibre stable** s'il a tendance à revenir de lui-même à sa position initiale lorsqu'on l'en écarte. C'est le cas, par exemple du voilier archimédien entre 0° et l'angle de chavirage.

Un système est dit en **équilibre instable** si, après avoir été légèrement écarté de sa position initiale, il a de lui-même tendance à s'en éloigner encore plus. C'est le cas d'une bille posée au sommet d'une surface convexe, elle reste en place tant que son poids (vecteur force) se trouve strictement confondu avec la normale à la tangente au sommet de la surface.

Un système est dit en **équilibre neutre** si, lorsqu'on l'écarte de sa position initiale, il reste alors immobile dans la nouvelle position. C'est le cas de tous les objets posés sur un plan horizontal (on néglige les frottements). Toutes les positions du plan sont alors des positions d'équilibre.

Prenons l'hypothèse d'un foiler « idéal » navigant uniquement sur deux foils transversaux sans plan porteur arrière : un IMOCA (foil & quille angulée avec incidence du profil) par exemple.

En réalité les IMOCA s'appuient sur la partie arrière de la coque, mais ils peuvent trouver un équilibre stable (temporaire) uniquement sur les plans porteurs avants.



Une perturbation quelconque générera immédiatement une variation d'incidence et donc une variation de portance P appliquée au point CP.

Le Foiler possède évidemment une masse constante pendant le vol (Poids), donc un centre de gravité (CG) dont la position dans l'espace varie très peu pour l'AC75 (au grès du faible déplacement longitudinal de l'équipage).

Lorsque l'on se limite à l'interaction du Lift créé par le ou les Foils et à la Force Propulsive, le Foiler est soumis à 3 forces, les deux énumérées et le poids du Foiler.

On voit très bien que tout se joue, sur les moments du LIFT et de la Force Propulsive par rapport au point d'application du POIDS (le Centre de Gravité CG).

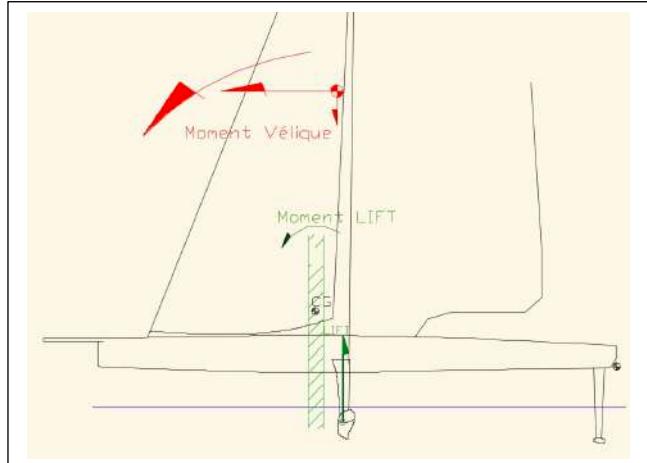
Lorsque la plateforme est dessinée (l'implantation des foils est donc définie), il y a une seule variable utilisable par l'architecte : la position longitudinale du CG.

- **Première configuration** : Le centre de gravité (CG) est situé en avant du Foyer. La portance exercée au point CP génère un moment de tangage autour du CG ce qui provoque de fait une rotation du Foiler autour de son Centre de Gravité (mouvement de piqué).

Le couple vélique augmente cette instabilité puisqu'il est dans le même sens que le couple généré par la portance du foil.

Le moment de tangage du profil s'ajoute à ces deux couples.

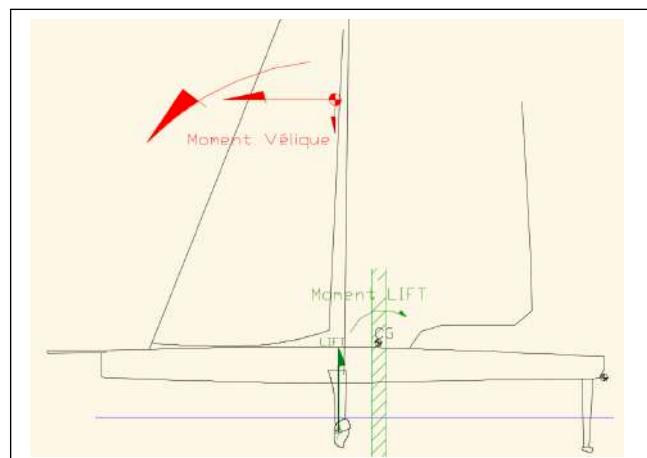
Le Foiler est « centré avant ». Il est instable.



- **Deuxième configuration** : Le CG est situé en arrière du Foyer. La portance exercée au point CP génère toujours un moment de tangage autour du CG qui provoque de fait une rotation du Foiler autour de son Centre de Gravité (mouvement à cabrer). Le couple vélique augmente, il s'oppose au couple généré par la portance du foil.

Le moment de tangage du profil s'ajoute toujours au couple vélique.

Le Foiler est « centré arrière ». Il est possible pendant un temps plus ou moins long que le couple vélique et le couple issu des foils soit identique. On obtient ainsi une « position stable temporaire ».



- **Troisième configuration** : Le CG et CP sont superposés. Si cette configuration dite « neutre » est possible sur un planeur, qui n'a pas de force propulsive, elle est totalement impossible sur un foiler à cause du centre vélique qui produit un moment vélique très important.

Les deux premières configurations sont exploitables sur un Foiler à condition qu'il y ait un couple régulateur qui :

- S'opposera aux couples à piquer (vélique + foil + moment de tangage) de la première configuration
- Équilibrera le couple à piquer vélique (+ le moment de tangage) et le couple à cabrer du foil pour la deuxième configuration.

Dans le cas de l'AC75, les initiateurs des règles de classe, imposent aux architectes une limite avant et une limite arrière pour la position longitudinale du Centre de Gravité, ainsi qu'une position maximale verticale du CG. De cette manière ils imposent un Centrage Arrière (deuxième configuration).

(Extraits simplifiés de la règle de classe)

9.7 Le centre de masse (CG) **longitudinal** de l'ensemble de la plate-forme doit se trouver entre 9 000 m et 9 600 m en avant du point de référence arrière (tableau arrière).

Pour valider cette position, on devra respecter les prescriptions suivantes :

- les deux foils en position basse ;
- tous les flaps de bord de fuite sont placés au centre de leur amplitude de mouvement ;
- le plan de symétrie du safran aligné sur le plan de symétrie ;
- le plan porteur du safran placé au centre de son amplitude de mouvement ;

9.8 Le centre de masse (CG) **vertical** de l'ensemble de l'AC75 ne doit pas être supérieur à 2,900 m au-dessus du plan de référence de la flottaison archimédienne.

Il est ajouté qu'il est interdit d'embarquer des masses additionnelles (hors équipage) pour les régates, de même l'utilisation de ballasts liquide est interdite.

Cette règle sera appliquée en jouant sur le devis de poids.

L'étude de l'équilibre peut être réalisée à partir de n'importe quel point identifié sur un solide soumis à plusieurs forces. Dans le cas présent on peut très bien étudier les conditions d'équilibre autour du Centre de Gravité (CG).

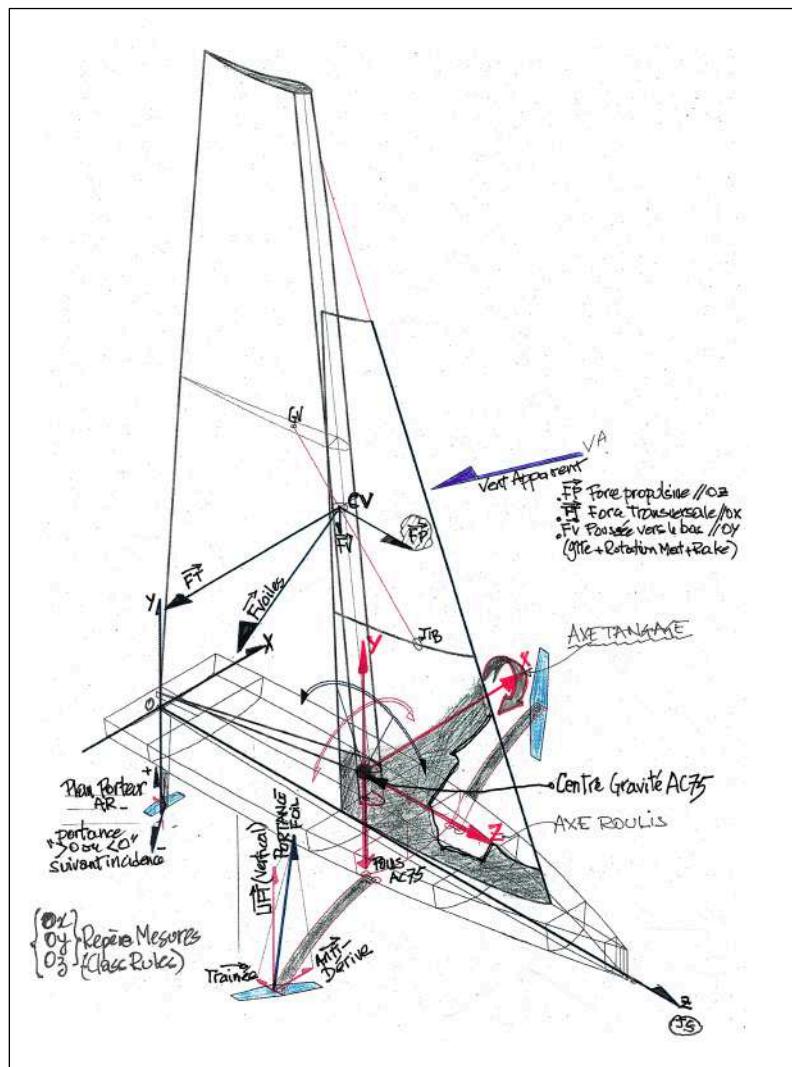
De l'équilibre du Foiler

Le foiler est donc soumis à plusieurs forces : son POIDS, le LIFT généré par le foil, la FORCE PROPULSIVE et la TRAÎNÉE.

D'après le principe d'inertie, dans un référentiel galiléen (0x, Oy, Oz), un solide (le Foiler AC75) est en équilibre à l'instant (t) si la Somme Vectorielle des forces qui lui sont appliquées est nulle : $\sum \vec{F}_{ext} = \vec{0}$

De même pour ce même solide, la somme des moments³ de chacune des forces par rapport à un point quelconque du solide doit être nulle : $\sum Mt F_{ext} / Pt = 0$

Ce qui se traduira pour simplifier le problème : $\sum Mt F_{ext} / CG$ (Centre de Gravité) = 0 (les 3 axes en rouge)



³ Moment d'une force : intensité * bras de levier. Le moment possède un sens noté (+ / -) par rapport à un sens de rotation pris comme référence (par exemple « horaire » ou « anti horaire »).

A/ Inventaire de moments autour de l'axe GX (Mouvement de tangage) :

- i. Moment créé par les Foils (LIFT)
- ii. Moment créé par la portance des voiles : Force propulsive (Fp) perpendiculaire au plan transversal de l'AC75.
- iii. Moment créé par la portance des voiles : Force // plan de symétrie de l'AC75 (Fv)
- iv. Moment généré par le plan porteur arrière.

Ce qui se traduit par l'égalité suivante : (en regardant l'axe GX croissant depuis le point G, on prend le sens horaire comme référence positive)

$$(- \text{Mt créé par Lift}) + (\text{Mt créé par Fp}) - (\text{Mt créé par Fv}) +/-(\text{Mt empennage}) = 0$$

Forces et Bras de levier :

Force LIFT : Projection de la portance du Foil actif sur un plan vertical parallèle au plan de symétrie de l'AC75.

Bras de levier (LIFT) : Distance horizontale entre le Point G (CG) et le plan perpendiculaire à l'axe de l'AC75 passant par le point d'application de la portance des ou du Foil actif.

Force Propulsive Fp : Composante propulsive de la portance des voiles (parallèle à la trajectoire de l'AC75)

Bras de levier (Fp) : Distance verticale entre le point G (CG) et le plan perpendiculaire horizontal parallèle au plan de flottaison et passant par le centre de poussée des voiles.

Force verticale Fv : Composante issue de la portance des voiles orienté vers le bas (à cause de la gîte de l'AC75, bien que cette gîte soit faible).

Bras de levier (Fv) : Distance horizontale entre le Point G (CG) et le plan vertical perpendiculaire au plan de flottaison et passant par le centre de poussée des voiles.

Force poussée empennage AR : Projection sur le plan vertical perpendiculaire à l'axe de l'AC75 et passant par le centre de poussée de l'empennage horizontal arrière.

Bras de levier (poussée empennage) : Distance horizontale entre le Point G et le plan vertical perpendiculaire au plan de flottaison et passant par le centre de poussé de l'empennage horizontal.

B/ Inventaire de moments autour de l'axe GZ (Mouvement de Roulis : gîte du bateau) :

Autour de l'axe GZ se joue l'équilibre transversal de l'AC75, dont deux moments apparaissent prépondérants.

- Moment créé par la composante transversale (Ft) de la portance des voiles. Pour l'AC75, qui navigue, en mode Foiler, à une vitesse pratiquement toujours supérieure à la vitesse du vent réel, le vent apparent (composition du vecteur vent réel et du vecteur vent vitesse) est « de face ».

Cela signifie que l'AC75, navigue globalement très près du vent (apparent).

Dans ces conditions, l'angle de la portance aérodynamique avec l'axe du bateau est de l'ordre de 60/70°. Cela se traduit par une composante propulsive (// axe de la trajectoire) environ 2,5 à 3 fois plus faible que la composante transversale (perpendiculaire à l'axe du bateau).

L'action de la composante Fv (vers le bas) de la portance des voiles amplifie l'action de la composante (Ft).

➤ Moment créé par les Foils (LIFT).

Dans le plan transversal, perpendiculaire au plan de symétrie de l'AC75, la portance du Foil se décompose en deux forces perpendiculaires, le LIFT dirigé vers le haut et la composante ANTIDERIVE dirigé vers l'axe du bateau.

Ces deux forces ont des effets contraires, le LIFT s'opposera au couple de chavirement (composante F_t de la portance des voiles), la composante ANTIDERIVE amplifiera ce phénomène de gîte.

Dans le cas où le Foiler vole sur les deux Foils, les deux composante ANTIDREIVE sont sensiblement égales et opposées, donc les moments qu'elles génèrent s'annulent.

Remarque : Le moment autour de l'axe GZ créé par le plan porteur arrière est négligeable.

L'équation autour de l'axe GZ est la suivante :

$$\text{(Mt créé par Lift)} - \text{(Mt créé par l'Antidérive)} - \text{(Mt créé par } F_t \text{)} - \text{(Mt créé par } F_v \text{)} = 0$$

(1) (2) (3) (4)

Seul le Moment (1) généré par le LIFT est « favorable », mes moments (2), (3), (4) sont défavorables.

Le pilote ne peut pas agir sur les bras de levier qui sont intrinsèquement liés à construction et aux règles de Classe de l'AC75.

Il dispose de deux paramètres sur lesquels il peut agir : la portance du ou des foils ET la portance produite par les voiles.... Et encore, ces deux paramètres sont étroitement liés à la vitesse du vent réel sur lequel le pilote n'a pratiquement aucune prise.

L'empennage arrière horizontal contrôlera la stabilité du vol.

Le Foiler étant en équilibre, **la stabilité du vol doit être prise en compte.**

La stabilité du vol concerne : la manière de voler à une altitude la plus constante possible, mais aussi son aptitude à réagir le plus rapidement et efficacement possible lorsqu'une de perte de portance ou une perte de puissance propulsive apparaissent.

Comme nous venons de voir, le Foiler ne peut naviguer que dans la configuration 2, c'est-à-dire « centré arrière », c'est-à-dire lorsque le couple vérique autour du foyer du bateau et celui issu du devis de poids sont le plus identique possible.

Sauf, lorsqu'à de rares moments (très courts), ces deux couples sont égaux (voir la photo de CHARAL en page 7), il est nécessaire que le Foiler possède un système compensateur qui permettra d'ajuster l'équilibre de ces deux couples antagonistes, tout en produisant le moins de traînée possible (frein !!!).

Ce système compensateur sera sensiblement identique à celui utilisé sur les avions (**Tailplane** en anglais ou nommé aussi **PHR, Plan Horizontal Réglable**), c'est-à-dire l'empennage horizontal arrière.

Techniquement il s'agit d'un plan « horizontal », à profil symétrique, implanté le plus en arrière possible.

L'intérêt de placer ce plan horizontal le plus arrière, répond à deux impératifs :

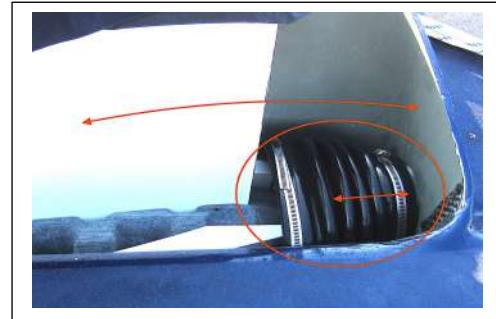
- Se trouver le plus loin possible du sillage (en « V ») perturbé provenant des deux foils (ou même d'un seul).
- Utiliser un bras de levier le plus grand possible autour du **point de rotation** afin de diminuer la surface de ce plan porteur, ce qui revient implicitement à diminuer la traînée de ce plan porteur.

Le pilote⁴ utilisera donc la commande d'angulation (+6° / -6° environ) de l'**empennage horizontal arrière (PHR)** pour maîtriser une assiette de vol horizontale mais aussi afin de pouvoir cabrer plus ou moins la plateforme dans le but de modifier l'angle d'incidence du ou des foils.

Les Foils de l'AC75, ne possèdent pas de réglage du « Rake » (Incidence) en navigation.

Le « Rake » est fixé par chaque Team lors de la conception.

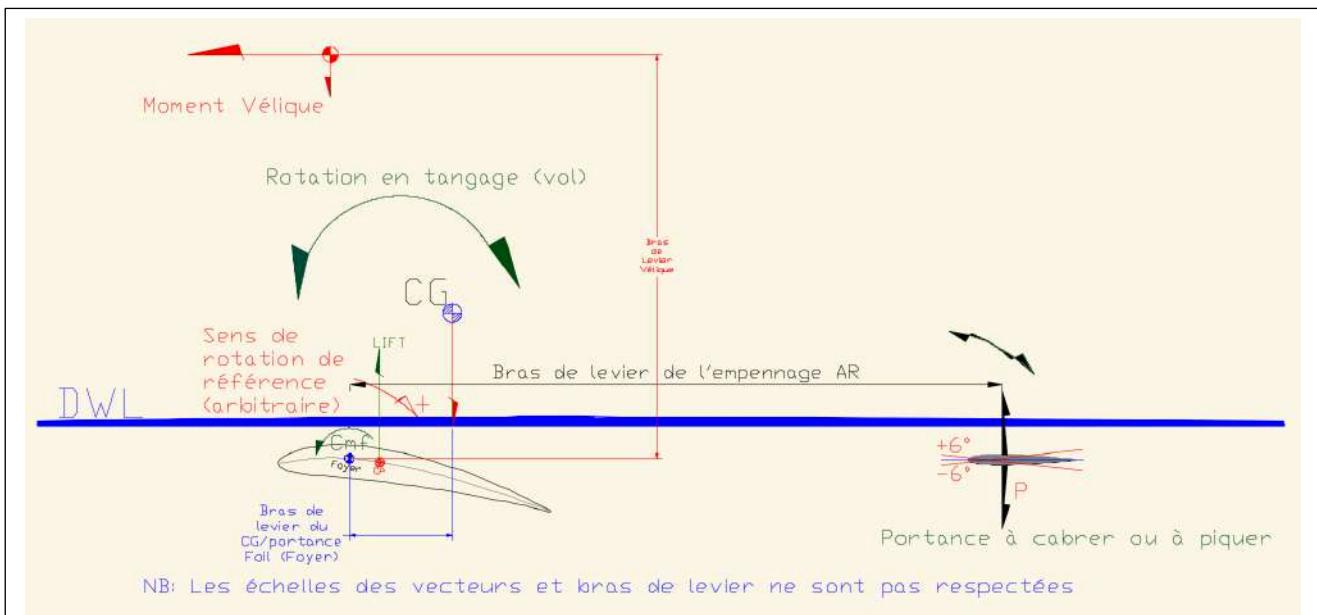
Toutefois le pilote peut moduler (diminution ou augmentation) la portance en jouant sur le volet du bord de fuite du foil.



L'absence du réglage en navigation du « rake » est motivée par le fait qu'en sortie de bordé, il y a déjà le mouvement de rotation de chaque bras (position Docking, en Cloche, Dégagement hors de l'eau).

Ajouter un autre mouvement de rotation, pose des problèmes de conception, et surtout de masse. La photo ci-dessus du vérin hydraulique qui commande le « rake » de chaque foil du Trimaran GITANA, donne une idée des efforts en présence.

La partie verticale de l'empennage (safran) contrôle la trajectoire (lacet et direction).



Remarque : Lors de la phase décollage, le calage de l'empennage arrière (PHR) sera utilisé pour cabrer le Foiler et ainsi augmenter l'incidence du foil.

⁴ « Le pilote » ou le système de pilotage automatique ou d'assistance au pilotage.

Les volets de bord de fuite (flap) de foils centraux

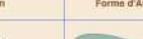
Toutefois s'il reste un domaine, relativement libre, c'est celui des volets (flaps en anglais) de bord de fuite.

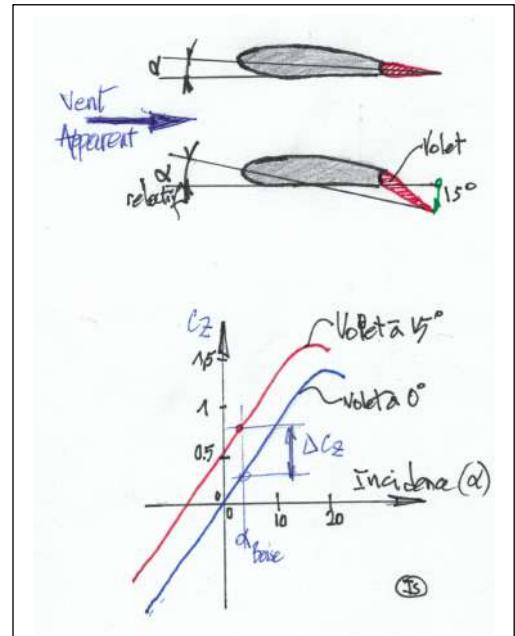
Equipement qui ne faut pas marginaliser. En effet les flaps permettent de réguler le Cz momentanément, d'autant plus que le « rake » des foils n'est pas modifiable en navigation.

L'objectif des flaps sera d'augmenter la portance, en particulier dans les phases de décollage ou de manœuvre comme un virement de bord, une rotation autour d'une bouée.

Toutefois si les flaps génèrent une augmentation de portance, ils créent également une augmentation de la traînée et la traînée est un élément négatif.

Il faut aussi noter, que l'augmentation de portance déplace le CP (Centre de Portance) vers l'arrière du profil et amplifie le moment de tangage.

Désignation	Forme d'Aile	Angle de braquage	Augmentation portance
Profil de base			
Volet de courbure		45°	51%
Volets intrados sans recul		50°	67%



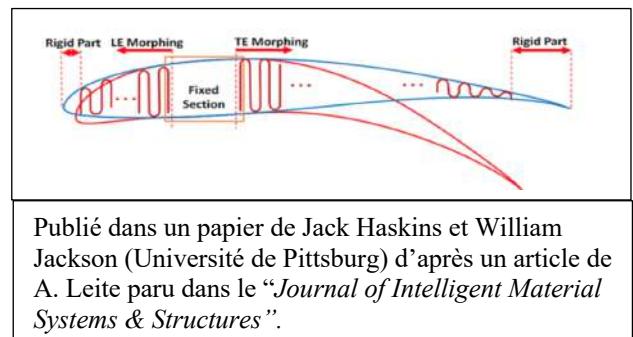
Aujourd'hui la technologie de contrôles et de déploiements des volets de bord de fuite est principalement basée sur de la cinématique extérieure (bielles, articulation, guidage mécanique).

Ces systèmes mécaniques sont efficaces, mais bien qu'ils soient carénés, profilés, ils produisent énormément de traînée, en d'autres mots, leurs rendements aérodynamiques (ce sont plutôt les avions qui les utilisent) sont relativement faibles.

Sur un Foiler et particulièrement sur l'AC 75, la performance demandée aux volets de bord de fuite sera beaucoup moins importante que celle nécessaire sur un avion dans la phase d'atterrissement.



Sur les Foilers, les hydrodynamiciens rechercheront une modification forcée beaucoup plus « soft » du flux de l'eau en utilisant des volets de bord de fuite moins extrêmes. Ces volets seront, certes, moins efficaces, mais leur action sera suffisante pour assurer une modulation de la portance, par exemple, lors de manœuvres de transition ou la vitesse de l'AC75 diminue de fait (passages de bouée, virements de bord) et aussi durant la phase de décollage.



Publié dans un papier de Jack Haskins et William Jackson (Université de Pittsburgh) d'après un article de A. Leite paru dans le "Journal of Intelligent Material Systems & Structures".

Actuellement la cinématique classique, basée sur l'utilisation de système vis/écrou, de cames, de bielles génère de la traînée. Cette technique est de plus, assez complexe au niveau de la conception (elle ne doit pas trop apparaître lorsque les volets ne sont pas utilisés). Elle demeure aussi très complexe au niveau de la réalisation.

Aussi, beaucoup de concepteurs, se sont lancés dans la recherche de technique permettant de déformer l'aile en entier ou juste sur une portion, à l'exception de la poutre centrale nominale. Pour cela ils utilisent la propriété de la déformation élastique de la peau extérieure qu'ils arrivent à modifier en forçant la structure interne.

Ce type de conception utilise la peau ondulée pour les sections de morphing (transformation) et la tension d'un fil comme mécanisme de contrôle (comme un soufflet).

Entre les sections de morphing se trouve une section centrale fixe, représentant 20% à 35% de la longueur de la corde.

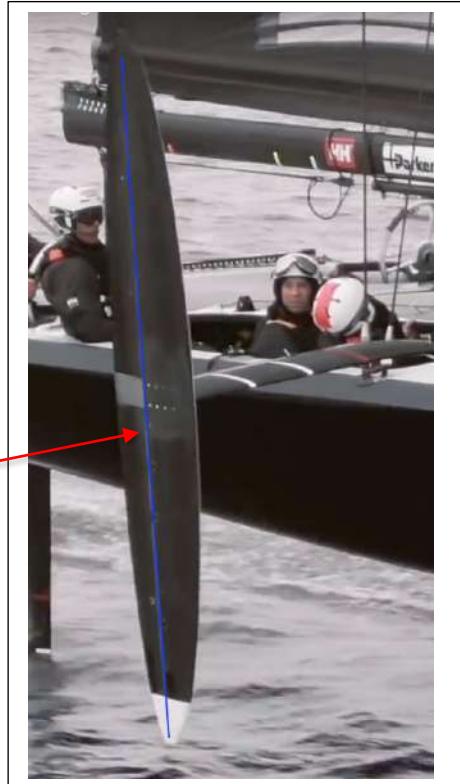
Le système de contrôle des sections de morphing permet d'opérer sur chacune des zones indépendamment.

Les panneaux de peau ondulée sont construits en stratifiés de fibres de carbone, pour assurer des formes complexes à l'épaisseur variable et aussi pour réduire le poids structurel.

Mais je doute que cette technique soit utilisée sur les AC75. En effet il faut pouvoir intégrer un vérin (actuator) dans le foil dans une zone où l'espace est très restreint, de plus le foil doit être en acier, puisqu'il contribue à la stabilité archimédienne.

L'examen des Foils de ~~AMERICAN MAGIC~~ montre une **charnière linéaire** sur toute la longueur du Foil. Un système de câble unique push/pull à billes doit, à priori, courir à l'intérieur du bras pour arriver un levier de commande du volet.

[La technologie du Plan Horizontal Réglable /PHR/ \(empennage horizontal\)](#)



L'empennage arrière est obligatoirement symétrique, son but est de créer **un couple à piquer ou à cabrer de même valeur** pour un même angle d'incidence positif ou négatif.

Toutefois son domaine de réglage angulaire en positif ou négatif peut être différent.

Sur l'AC 75, ce couple possède un bras de levier important, entre 10 et 12 mètres par rapport aux appuis des Foils, ce paramètre du couple compensera la faible surface de l'empennage. Comme le profil est symétrique, la performance hydrodynamique du PHR sera identique, au facteur d'échelle près, à celle d'un safran suspendu à grand allongement.

Le calage positif ou négatif de l'incidence obtenu par la rotation autour du foyer du PHR est souvent piloté par un fletner implanté sur son bord de fuite. Ce fletner provoque sa rotation la rotation du PHR.

Avec cette technologie, il suffit de piloter le volet fletner. Ce volet étant de très faible surface, peu de puissance est nécessaire pour assurer sa commande.

Mais cette technologie paraît peu appropriée à l'AC75, toujours pour des problèmes des volumes disponibles, mais avec une contrainte complémentaire qui est le passage des mécanismes depuis la coque (fixe) à la pelle de safran qui pivote autour d'un axe vertical.

Il ne reste alors que deux méthodes possibles :

- Un volet de bord de fuite implanté sur le bord de fuite du PHR. En pivotant (axe horizontal) le volet vers le bas ou vers le haut, on transforme l'empennage, qui a un profil symétrique (portance nulle), en un profil asymétrique, donc avec une portance orientée vers le haut (moment à piquer), ou vers le bas (moment à cabrer). C'est une technologie identique à celle utilisée sur les Foils.

- L'ensemble pelle de safran / PHR est solidaire. C'est la rotation de la mèche de safran autour d'un axe horizontal et perpendiculaire au plan de symétrie de l'AC75, qui assurera le changement d'incidence du PHR (5 à 6° doivent suffire).

La technologie est plus simple, elle se résume à une liaison sphérique de la mèche de safran au niveau du palier de coque et d'un vérin qui assure la rotation d'avant en arrière du palier supérieur, lui-même guidé longitudinalement.

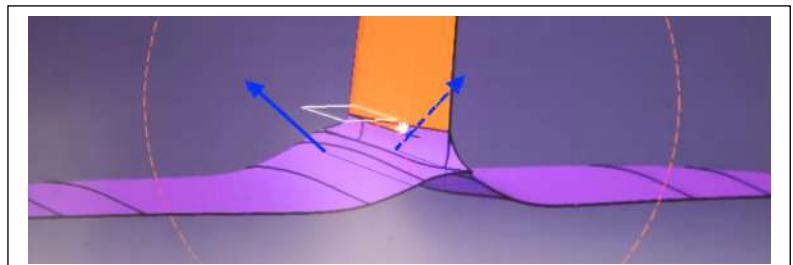
J'ajoute que le volume disponible à l'intérieur de la coque est largement suffisant pour installer le vérin hydraulique ou une vis à billes commandée par un moteur électrique (réglage plus fin).

Si on regarde bien la vidéo d'AMERICAN MAJIC, on constate que le haut du safran n'est pas très près de la coque, ce qui laisse penser que c'est la technique qu'ils ont utilisée.



On distingue aussi que leur PHR est solidaire de la pelle de safran.

La liaison en aile de mouette entre la pelle du safran et le PHR, n'est pas que décorative, elle génère deux composantes de portance inclinées qui doivent permettre de stabiliser la flèche (sollicitation en flexion) de l'extrémité de la pelle de safran.



Les phénomènes de traînées.

C'est sûrement ce phénomène parasite (frein) que les concepteurs de chaque Team chercheront à minimiser.

Outre la traînée résultante de l'incidence du foil, il existe une traînée nommée « traînée induite ».

Cette traînée est générée par la rencontre des flux de fluide qui circulent sur l'extrados et l'intrados du Foil et se rejoignent à son extrémité pour former un vortex (le flux se transforme en une spirale entrelacée).

Sur un avion, on atténue ce phénomène avec un Winglet à l'extrémité de l'aile ou une extrémité de l'aile arrondie.

La traînée induite augmente lorsque la vitesse diminue et que l'angle d'incidence augmente. Toutefois un allongement important du Foil diminue le Vortex.

Mais la traînée induite ne concerne que le passage du Foil dans l'eau (masse volumique 1025 kg/m³), fluide incompressible.



Lorsque l'AC75 est en configuration « Vol », c'est l'ensemble du « flotteur », qui est hors de l'eau, il est donc en contact avec l'air (1,025 kg/m³) qui lui est compressible.

Cette évolution génère obligatoirement des traînées parasites, comme la traînée de frottement, de forme (friction), d'interférence entre les différents éléments (liaison des bras à la coque, liaison du mat avec le pont, gréement, équipage, etc.).

Un Avion et un Foiler, n'évoluent pas à la même vitesse, ni dans le même fluide.

Le foiler sur déplace dans deux fluides

totalelement différents et même si les équations physiques relatives à l'écoulement sont semblables, leurs comportements restent très différents.

Pour autant il est intéressant de regarder l'inventaire des traînées sur un avion, et de constater que la traînée issue de la portance des ailes représente à peine 50% de la traînée totale.

Le centrage des masses de l'AC75 (suivant les règles de classe)

Les règles de la classe AC75 sont très dirigistes, afin de limiter les velléités des architectes vers des figures « acrobatiques » lorsque les bateaux voleront.

En plus les initiateurs de cette Classe souhaitent lui donner un esprit monotype, ce qui n'est pas simple quand le bateau est aussi innovant que l'AC75.

Certes il y avait l'expérience de la précédente Coupe avec les AC72, mais c'était des catamarans, donc une configuration Foiler plus facile contrôler (pour l'écriture des règles, ne pas généraliser au pilotage) du fait de la largeur de la plateforme et surtout à cause des 3 points d'appuis sur l'eau.

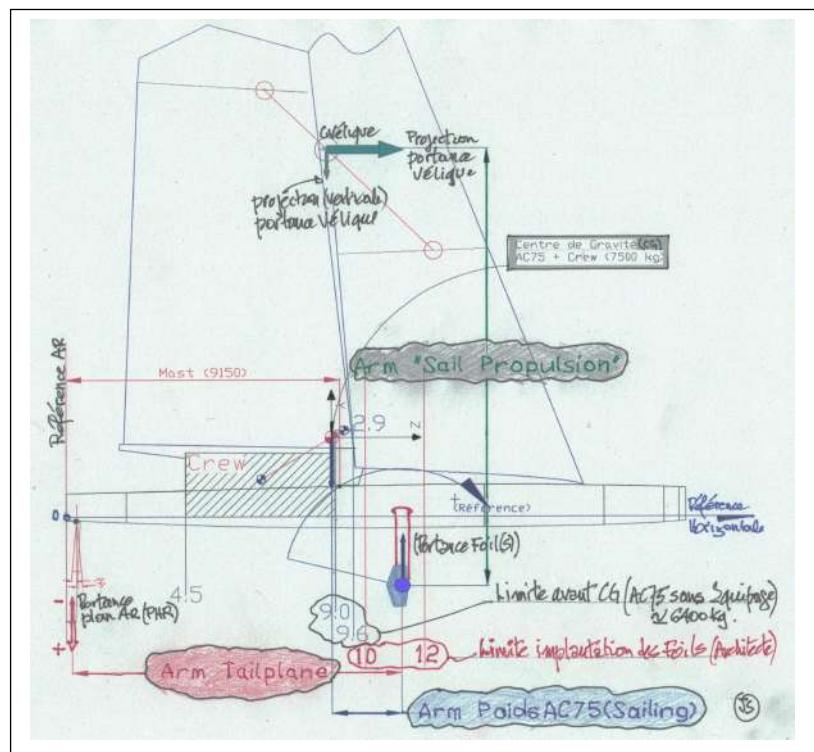
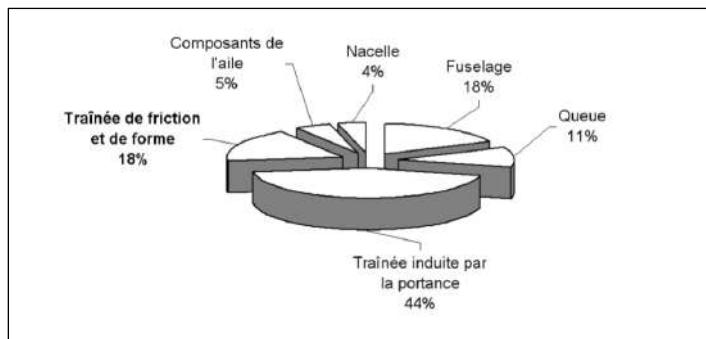
Avec l'AC75, le Foiler va se retrouver en appui sur un Foil qui portera 95% (voir 100%) du poids du bateau (y compris l'équipage) et dont le vol sera contrôlé avec un empennage arrière situé à 10 ou 12 mètres en arrière du Foil.

En plus le Foil est excentré par rapport à l'axe de la trajectoire.

Le « Guest racer » est installé entre 0 et 2m par rapport au tableau arrière.

Si le centrage est absolument limité vers l'avant, (la barrière vers l'avant devrait se situer aux alentours de 9.3m du tableau arrière), elle paraît libre vers l'arrière de l'AC75 pour l'équipage (jusqu'au domaine du « Guest racer »).

Le ratio des masses est : 6400 kg pour l'AC75 prêt à naviguer et 900 kg pour l'équipage (le barreur devant rester à son poste de barre).



Comme je pense que l'équipage sera particulièrement affrété et concentré sur le vol de l'AC75, et que les ballasts longitudinaux sont interdits, il n'y aura pas de velléité à utiliser l'équipage pour faire des transferts de masses longitudinaux.

De l'intérêt de modifier le centrage des masses en navigation ?

Ce n'est pas une idée maritime, mais une idée exploitée par les avions.

Pourtant le Foiler comme l'avion volent.

L'avion possède un avantage, hormis au décollage (et à l'atterrissement) il évolue dans un seul fluide, l'air (1.025 kg/m³).

Pour le Foiler, sa sustentation est produite au contact de l'eau (1025 kg/m³), mais la « cabine », comme son moteur (mat, voiles) sont au contact de l'air. La poussée (parallèle à la trajectoire) des voiles est obtenue à partir de leur portance aérodynamique, portance qui est loin d'être parallèle à la trajectoire du Foiler. C'est même pire, des deux composantes de cette portance aéro, c'est la composante transversale qui est prépondérante par rapport à la composante qui fournit le déplacement. J'ajoute que ce point d'application de cette portance aéro se situe à plus de 12 m de haut (pour l'AC75).

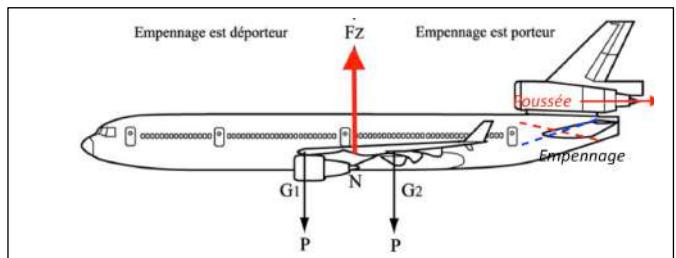


Mais revenons au vol de l'avion.

Les avions ballastent le carburant (pas les passagers), ils le consomment aussi.

Le ballastage permet de modifier la position de CG résultant de l'ensemble des masses.

Pour un Airbus A320 la masse au décollage est de 70 tonnes avec 22 tonnes de kérósène (valeurs moyenne suivant les nombreux modèles d'A320). Donc, en jouant sur les nombreux différents réservoirs on arrive à positionner le CG en avant ou en arrière du foyer de la corde de référence de la voilure (MAC⁵: Mean Aerodynamic Chord), point N sur le dessin ci-dessus.



Lorsque G est en avant de N (position G1), l'avion est plus stable, mais moins maniable. C'est logique plus la trajectoire est stable, plus elle sera difficile à modifier avec les gouvernes, ce qui rend l'avion moins maniable. En fait, l'avion devient plus « lourd » à piloter.

Mais il consomme plus, **il lui faut donc plus de puissance.**

Lorsque G est en arrière de N (position G2), l'avion est moins stable, mais plus maniable. Il est plus facile de modifier sa trajectoire, l'avion devient de plus en plus maniable, mais aussi plus « volage ». L'avion consomme moins, donc pour des performances identiques, il utilise moins de puissance.

Pour le Foiler, le point N se situe sur le Foil, les règles de classe imposant un centrage arrière, les initiateurs des Règles de Classe privilégiént à priori la maniabilité à la stabilité de vol.

Cela paraît normal, contrairement à l'avion à qui on impose une trajectoire « rigide, ne laissant aucune liberté aux pilotes, sauf cas de force majeure », pour **l'AC75 on souhaite qu'il régate au contact.**

Vu la configuration de cet engin (l'AC75) avec des « grandes pattes latérales » il vaut mieux qu'il soit très évolutif, au détriment de sa stabilité de vol.



⁵ Pour un Foil trapézoïdal (A=Corde supérieure, B=Corde Inférieure, Y=Envergure)
 $MAC (\text{longueur de la corde}) = A - (2 * (A - B) * (0.5 * A + B)) / (3 * (A + A + B))$
 $MAC \text{ position / corde sup} = Y * ((A - MAC) / (A - B))$

Les configurations de vol

DECOLLAGE

Au début je pensais que la phase de décollage devrait se faire sur les deux Foils.

J'en suis beaucoup moins convaincu aujourd'hui, pour la raison suivante : La transition, c'est-à-dire le passage d'un lift de 3750 daN sur chaque Foil à 7500 pour le Foil unique sera trop brutal et ne pourra pas être contrôlée. Cette transition suppose que le Foil sous le vent qui est calé (incidence) pour produire 3750 daN devra en quelques petites secondes être calé à une nouvelle incidence (sa traînée augmente) permettant de produire 7500 daN de Lift. Le risque d'effondrement sera trop important.

Le décollage sur un Foil paraît plus logique.

Au fur et à mesure que le bateau accélère en régime archimédien, le pilote remonte rapidement le Foil au vent.

Il faut noter que dans ma configuration « Foil au vent relevé » et « foil sous le vent en position navigation (immergé) » le centre de gravité du Foiler se trouve toujours pratiquement dans le plan de symétrie du Foiler, car la répartition transversale des masses a été très peu modifiée.

Le couple de chavirement est encaissé par le foil sous le vent.

En fait, dans cette phase archimédienne, le Foiler se comporte comme un dériveur ou le couple de chavirement est encaissé par l'équipier au trapèze, sur le Foiler c'est la portance sous le vent qui fait office d'équipier au trapèze.

Rapidement le Foil au vent sort de l'eau, le pilote augmente l'incidence (volet sur le bord de fuite), l'AC75 s'appuie sur le foil sous le vent, ce qui l'empêche de chavirer et progressivement il se sustente verticalement sur le lift de ce Foil, lift qui atteint les 7500 daN. L'augmentation d'incidence du Foil est obtenue par le volet de bord de fuite et aussi par le PHR qui est réglé au maximum de couple de cabrage, voir le schéma ci-dessous.



Archimédien

(Extraits de la vidéo « AMERICAN MAGIC »)



Début du décollage (cabrage)



Décollage (assiette à plat)

✓ **Archimédien :**

Foil immergé : volet du foil angulé au maximum (Portance maximale)
PHR : neutre

✓ **Début du décollage (cabrage) :**

Foil immergé : volet du foil angulé au maximum (Portance maximale)
PHR : Angulé en négatif (Portance vers le bas) afin de cabrer la plateforme.
Augmentation de fait de l'angle d'incidence du foil principal

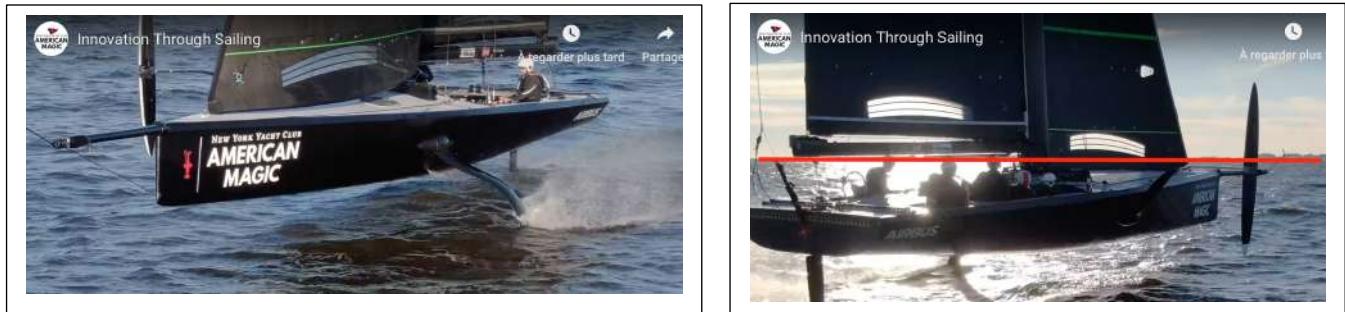
✓ **Décollage (assiette à plat) :**

Foil immergé : L'angulation du volet du foil est réduite, l'angle d'incidence diminue
La vitesse augmente ce qui permet compenser de la réduction de l'angle d'incidence.
PHR : Angulé en position neutre
L'angle du volet alterne en positif ou négatif (portance vers haut ou bas).

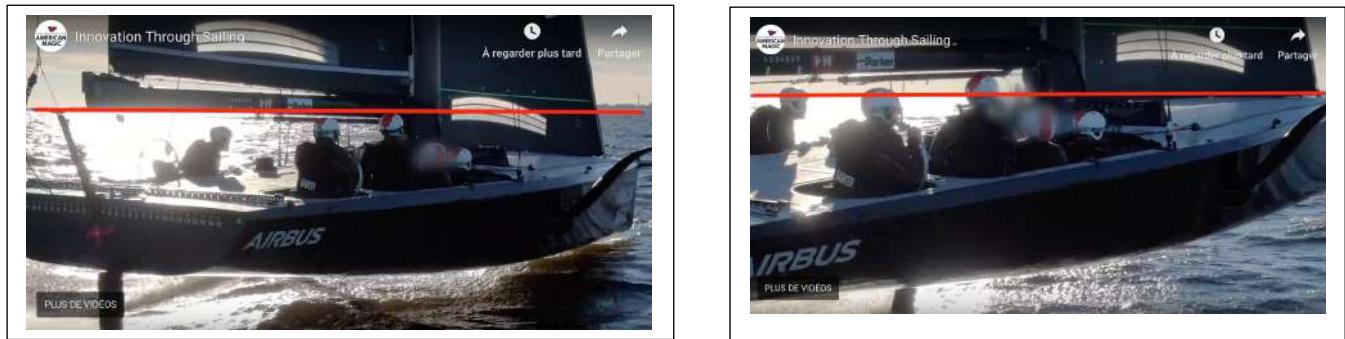
Le VOL STABILISÉ

En vol stabilisé l'équipage doit gérer :

- La force propulsive. Elle dépend directement de l'environnement maritime et de la route du bateau par rapport au vent. L'équipage peut adapter la voilure (Remplacer le Foc par le Gennaker).
Mais la vitesse de l'AC75 qui est importante en mode Foiler, rendra le vecteur Vent réel moins prépondérant dans la composition vectorielle du Vent apparent.
- La portance du foil sous le vent. Elle est régulée par le volet de bord de fuite, qui augmente la cambrure du profil du foil et de ce fait ajuste le Cz (voir haut de page 13).
Il est aussi possible d'augmenter l'angle d'incidence du foil (en évitant le décrochage) de 1.0° à 2.0° environ en cabrant la plateforme en modifiant l'incidence du PHR (ce qui immerge de quelques 10 à 30 centimètres le plan porteur arrière).
- La gîte de la plateforme (au pire le chavirage). A voir les mouvements de la plateforme sur la vidéo, c'est ce qui paraît le plus facile à gérer (Vidéo de AMERICAN MAGIC) parce que la gîte résulte d'une survente. Cette survente momentanée est encaissée par le réglage des voiles, sans faire perdre de vitesse au Foiler.



Assiette longitudinale (TRIM) « parfaite » (le trait rouge est calqué sur la ligne d'horizon)



Le TRIM devient subitement négatif (piquer).... Correction avec le PHR(?).... Le Foiler se cabre.

Toute la difficulté du vol sera d'éviter le mouvement de tangage que l'on voit très bien sur la vidéo d'AMERICAN MAGIC. Ce rapide mouvement de rotation provoquera des désordres aérodynamiques à 26 m de hauteur dans l'écoulement des filets d'air qui circulent autour de la grand-voile et du haut du foc.

La conservation de l'assiette horizontale de la plateforme est très complexe, d'autant plus que les Règles de Classe de l'AC75 interdisent l'utilisation de gyroscope ou de volant d'inertie.

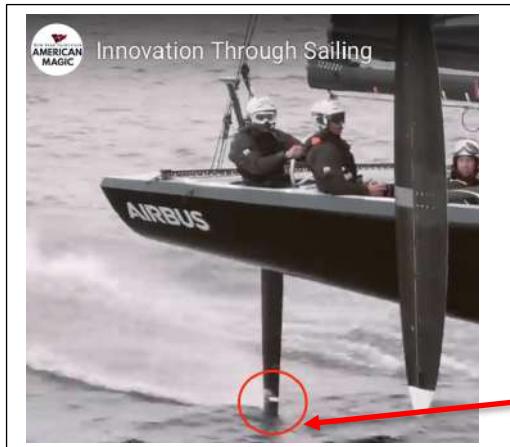
20.6 The use of flywheels or gyroscopes to store energy or mechanically stabilize the yacht is prohibited. Any rotating mass on the yacht shall be no larger than required for its permitted purpose.

Faute de stabilisation gyroscopique, c'est à la commande du PHR que reviendra de gérer cette assiette horizontale.

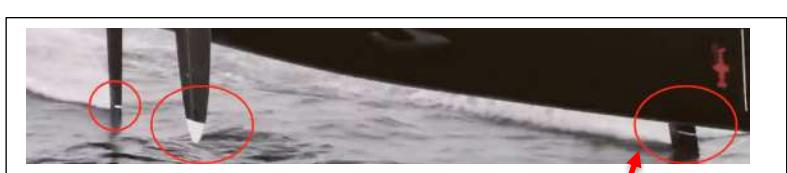
Le bras de levier du PHR (10 à 12m) offre plus de sensibilité dans la modulation du couple nécessaire pour corriger une insuffisance momentanée de portance au niveau du Foil, et cela de manière plus souple et précise qu'une commande qui augmenterait la cambrure du foil, pour augmenter ou diminuer sa portance.

De plus, l'immersion du safran offre un support idéal pour installer deux ou trois capteurs. Ces capteurs permettront d'évaluer l'enfoncement du PHR.

Le point milieu entre ces deux capteurs étant sur le plan horizontal qui passe par le Foyer du foil avant.



La marque supérieure est visible



On distingue aussi un des repères sur le bras immergé.



Les bras sont en position « Docking »



Un capteur sur l'extrémité du « foil relevé » indiquera une perte de stabilité au vent.

Le principe peut être très simple : par exemple pour le safran, un orifice de quelques mm sur le bord d'attaque, un tuyau qui remonte dans le safran et à 50/60 cm de l'orifice, un pressostat connecté actionne un contact électrique.

Si l'orifice est immergé, le pressostat délivre « 1 », si l'orifice est hors de l'eau, l'information est « 0 ».

Ces informations électriques sont collectées par un programme qui commande le « rake » du safran (Incidence positive ou négative du PHR) et qui peut aussi commander le cambrage du Foil immergé.

Le VOL en période de TRANSITION

Ce sera sûrement la partie du vol le plus complexe à contrôler, à cause de plusieurs paramètres perturbateurs :

- ✓ Le risque de proximité des deux bateaux (c'est la Coupe AMERICA), ce qui se traduit par une zone de vent perturbé dans les phases de contact.
- ✓ Le changement de cap lié au passage des bouées.
- ✓ Les manœuvres de l'équipage (adaptations des performances véliques au nouveau cap)
- ✓ Le ralentissement inéluctable puis la relance du bateau
- ✓ Le risque de devoir répondre de manière impromptue à une injonction de l'adversaire (Règle de Course)

Il faut garder à l'esprit que l'AC75, c'est quand même une masse de 7.5 tonnes, lancée à 25 /30 nœuds, (13 m/s), soit une énergie cinétique de :

$$Ec = 0.5 * 7500 * 13^2 = 633750 \text{ Joules.}$$

Les équipages devront apprendre à maîtriser ce bateau « volant ».

Figures de style du bateau d'entraînement du Team UK « INEOS » dans le SOLENT vers le 24/04/2019

<https://www.youtube.com/watch?v=NVQtQWx3rmM>



Chrono : (5 sec)



(6 sec)

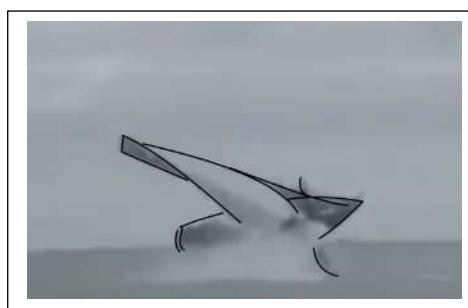
Tribord amure

Le bateau lofe..... Le pilote perd le contrôle, la rotation continue

(7 sec)



Le bateau passe le lit du vent...



Se cabre et vire de bord....

(9s)



Pour se coucher sur tribord

Le « crash » est des plus spectaculaire, d'abord par le temps écoulé entre le début l'anomalie de trajectoire et le crash final : 4 à 5 secondes, ensuite par la trajectoire : 180° environ.

Il n'y a pas de chavirage, sauf à la fin ou ce n'est plus un bateau mais un « truc » qui semble tomber du ciel (chute libre).

Il n'y a pas de perte de portance du foil. Le foil porte « très » longtemps (2 secondes !!).

Il paraît évident que c'est le safran qui décroche, à ce moment, le bateau part violement au lof et se cabre très rapidement.

A partir de là, avec un vent refusant et une vitesse de giration très grande (120° en 2 ou 3 secondes), la portance de la coque étant tellement cabrée, qu'elle génère une portance très importante (surface et vitesse) qui augmente encore plus le cabrage.

Si on ajoute l'énergie développée dans cette rotation, on voit que le bateau se retrouve à décoller avec 15 à 20° d'incidence.

Ce n'est plus un Foiler mais un engin totalement incontrôlable qui est soulevé comme feuille de platane à l'automne.

Tout aussi rapidement, la tentative de « décollage » s'arrête, et c'est la chute libre.



Le foil tribord est toujours déployé vers le haut, Le safran n'est pas cassé, on voit très bien le PHR. Le dessin est extrait de mon article V4 (stabilité et chavirage)

Ne soyons pas pessimiste, tant qu'il n'y a pas d'accident humains, ce n'est jamais que « casser du bois » comme le disait les pionniers de l'aviation.

Ce crash met en évidence, que transposer ces deux « mules » (UK and AMERICAN MAGIC) en un AC75 de 7500 kg, posera quelques problèmes et périodes de mise au point.

AMERICAN MAGIC, chavire à son tour, d'une manière beaucoup soft et reste à 90° .

Contrairement à INEOS, la perte de contrôle est beaucoup moins violente, AMERICAN MAGIC ce couche à 90° sur l'eau comme cela arrive sur un Laser.

Dans les mêmes conditions sur un dériveur, l'équipage enjamberait le livet instantanément afin de monter sur la dérive et remettait le bateau vertical.

Avant le chavirage, la vitesse du bateau est de l'ordre de 25 à 30 noeuds, soit 12 à 15 m/s.

L'analyse de la vidéo, montre que le temps écoulé pour amener le mat dans l'eau est de 3 à 4 secondes.

Angulairement, la rotation du bateau (axe longitudinal) est de 20 à 25° /s.

Pendant la gîte jusqu'à 90° , le bateau continue sa route rectiligne (il ne lofe pas contrairement à INEOS), sur environ 40 mètres (en fait la vitesse initiale de 15m/s décroît rapidement).

Dès qu'il n'est plus porté par le foil sous le vent, la vitesse chute.

C'est certain qu'il y a une bonne décélération, mais c'est très différent de l'équipage d'INEOS qui perd totalement le contrôle du bateau.

Dans le cas de AM, on a l'impression qu'il « perd » le foil sous vent !!! en fait c'est réellement le cas, non pas physiquement, mais à cause d'une chute brutale de la portance sur ce Foil crée par la cavitation autour de l'extrados et de l'intrados du profil.

La cavitation se produit lorsque l'eau qui circule autour du Foil passe de la phase liquide à la phase vapeur.

La vapeur ayant une densité 1000 fois inférieure à celle de l'eau la portance va se dégrader instantanément.

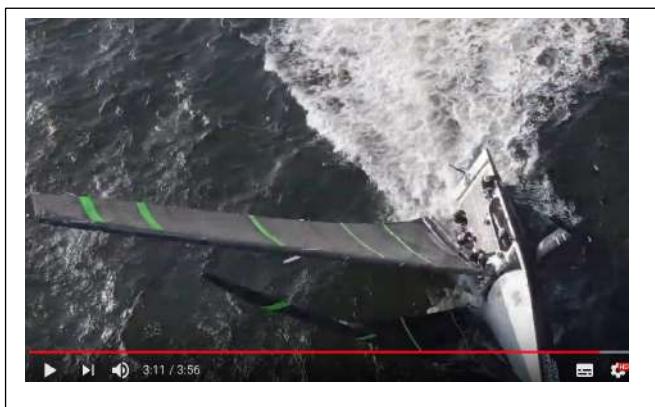
S'ajoute le phénomène de ventilation qui perturbe l'écoulement autour du profil du Foil.

La ventilation se traduit par un apport d'air (de dehors) sur la surface de l'extrados, apport d'air qui arrive par le long de l'élément de liaison (le bras).

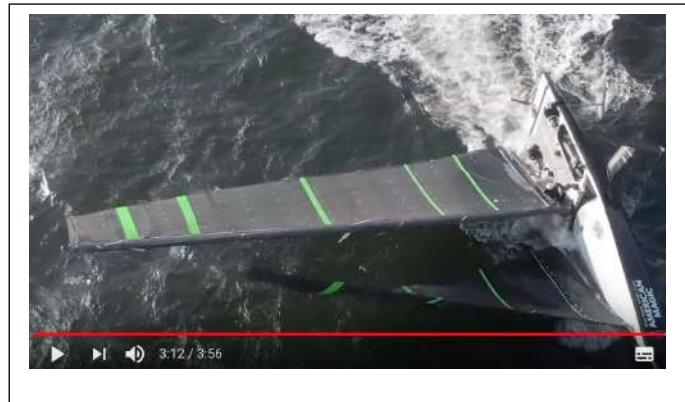
La conséquence de ces deux phénomène parasites se traduit par un effondrement de la portance du Foil.

La gîte augmente, le bateau pique du nez.

Corolaire l'angle d'incidence passe du mauvais coté du foil, ce se traduit par une « déportance », même si elle plus faible du fait que le foil cavite (la force est dirigée vers le bas) !!!



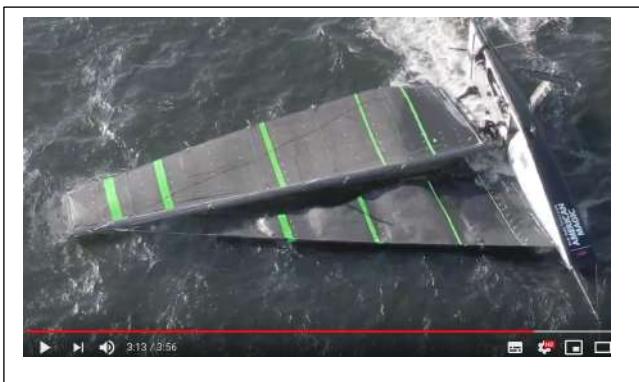
3 :11

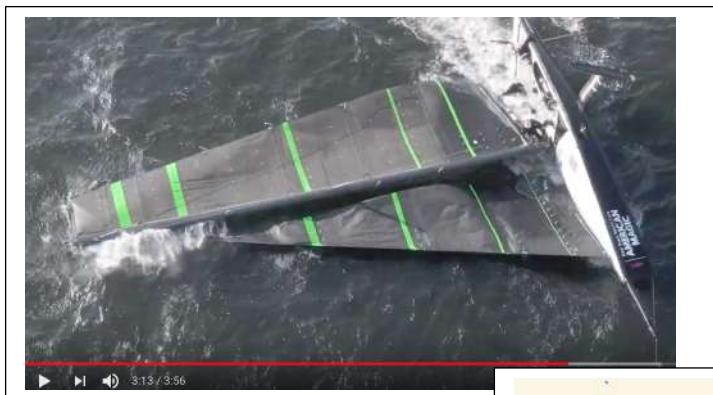


3 :12

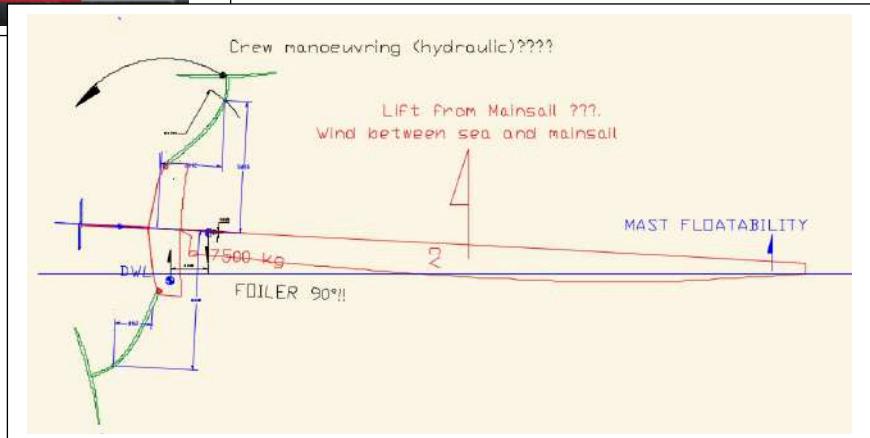


3 :12.....





3 :13



Ce problème de cavitation et de ventilation⁶ limite le potentiel de vitesse des Foilers équipés de profils de Foil standards.

Il existe des profils « super-cavitants », le problème est que ces profils ne « fonctionnent » que lorsque l'environnement du foil produit de la cavitation.

Pas simple de trouver une solution....

Pour terminer je livrerais la conclusion de Robert Lainé :

« *Si le bateau prend un coup de contre gîte du à une molle, le foil va sortir de l'eau ou au moins s'approcher de la surface et la ventilation s'amorcer le long du bras. Si ensuite le bateau gîte car le vent reprend ou le batteur abat, le chemin pour l'air va se refermer à terme, mais entre-temps le foil va avoir perdu sa portance et là c'est la bataille entre la vitesse de rotation en roulis, l'angle d'incidence sur le foil qui va augmenter à cause de cette vitesse de rotation et potentiellement augmenter la dépression ou décrocher, et la poussée des voiles.*

La bataille n'est pas gagnée d'avance par l'équipage, même s'il est « MAGIC » ... »

Si on ajoute, aux problèmes de fonctionnement des foils et de maintien de l'assiette de vol, l'essence même de l'esprit de l'AMERICA CUP, c'est-à-dire la navigation au contact (au sens de contrôle de l'adversaire), la mise au point de ce cocktail risque d'être compliquée, d'autant plus qu'il faut intégrer la vitesse, la masse de l'AC 75, l'énergie développée.

Restera ensuite à régler le problème de l'arbitrage ou la perception par les Arbitres des fautes commises par les concurrents risque de ne pas pouvoir suivre.

Les drones entreront ils en action lors de la prochaine AC ?

Jean SANS (12/05/2019)

⁶ Merci à mon ami Robert Lainé, « spacinover@gmail.com » (ancien de l'Agence Spatial Européenne « ESA ») de m'avoir éclairé sur ces problèmes de cavitation et ventilation. En association nous préparons une Version 6 « Les FOILS des AC75 : ENVIRONNEMENT, FONCTIONNEMENT, LIMITES »

EXperts-Yachts

Jean SANS
Expert honoraire près la cour d'Appel de Rennes
7 rue du Ltv Bourelly - BSM de Kéroman , 56100 LORIENT - France
+33 (0)6 07 10 24 03 Jean.Sans@wanadoo.fr www.experts-yachts.fr

Expertises Maritimes (Privées ou Judiciaires) - Consultant technique
Arbitrage - Relevés de carènes (Photogrammétrie)
Mesures et calculs de stabilité - Jauge IRC

SPACINOV

Robert LAINE
21 Rue de la Fontaine au Blanc
17138 SAINT-XANDRE

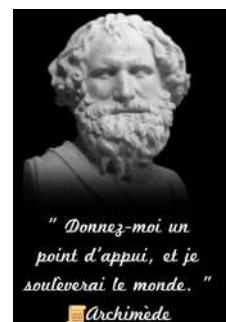
J. SANS / R. LAINE (27/05/2019)

Version V6 : Analyse des phénomènes de cavitation et ventilation.

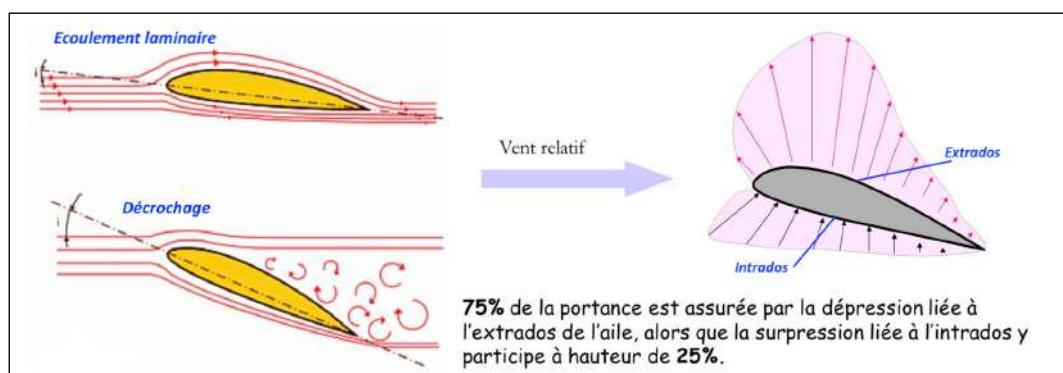
[Suite des documents V1, V2, V3, V4, V5](http://www.experts-yachts.fr)
www.experts-yachts.fr

Autant le fameux principe d'Archimède est la base de la stabilité des navires, autant la citation attribuée à cet homme illustre « donnez-moi un point d'appui et je soulèverais le monde » n'est pas vrai pour un Foiler (En fait Archimède n'a jamais dit ou écrit cela).

Plus simplement, la stabilité en vol d'un Foiler ne repose pas sur l'appui statique sur l'eau. Comme pour un avion le Foiler s'appuie dynamiquement sur le fluide qui entoure ses foils, la seule différence étant que l'avion évolue dans l'air (densité 1.225 kg/m³) alors que les foils évoluent dans l'eau (densité 1000 kg/m³).



Les bases de l'environnement d'un foil



Lorsque l'écoulement est laminaire, c'est-à-dire un écoulement non perturbé où les filets d'air ou d'eau sont déviés « en douceur », la distribution de la dépression (extrados) et celle de la pression (intrados) est distribuée pour 75% par l'extrados et pour 25% par l'intrados.

Le « travail » produit par l'extrados de l'aile ou du foil est prépondérant.

Lorsque l'angle d'incidence, c'est à dire l'angle que fait l'axe longitudinal du profil par rapport au vecteur vitesse dans le fluide, atteint 10 à 12°, les filets d'air ou d'eau qui évoluaient de manière harmonieuse autour du profil, se transforment en tourbillons désordonnés.

La dépression à l'extrados s'effondre instantanément (on dit que l'aile ou le foil décroche) et la portance globale chute de 75%.

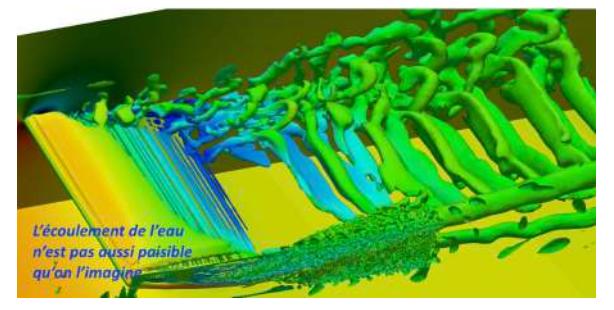
Pour un AC75 (masse 7500 kg) en vol sur un foil, la composante verticale portance générée par ce foil unique doit être égale à $7500 \text{ kg} * 9.81 \text{ m/s}^2 = 73575 \text{ Newtons}$.

Si cette portance chute de 75%, la portance verticale devient 18393 Newtons et tout s'écroule.

Les choses se compliquent sérieusement

Le foil évolue dans l'eau, milieu beaucoup moins homogène que l'air autour de l'aile de l'avion, simplement parce qu'il est près de la surface (interface eau / air).

Dans la couche des 5 premiers mètres, le fluide réel « eau » est « pollué » par des bulles d'air. Ces bulles d'air peuvent être provoquée par les mouvements des vagues, le passage d'un autre bateau, mais aussi par des éléments appartenant au Foiler. Par exemple le Foil avant perturbera le safran et son empennage horizontal. Tant que la vitesse du foil dans l'eau reste basse, ces petites bulles d'air sont sans importance. Mais lorsque la vitesse augmente, deux gros problèmes peuvent apparaître :



La cavitation et la ventilation.

La Cavitation

La cavitation n'est pas propre aux foils. Elle affecte aussi les hélices, safrans, turbines, en fait tout élément qui évolue à grande vitesse dans un fluide.

Pour les foils, la cavitation se traduira physiquement par une perte radicale de la portance générée par la surface en dépression.

Physiquement le phénomène de cavitation se déclenche lorsque la pression locale atteint le niveau de la pression de vapeur saturante P_v .

A ce moment-là, l'eau change brusquement de phase, elle passe de l'état liquide à l'état de vapeur.

La vapeur ayant une densité 55 fois plus faible que le liquide, une bulle se forme sur l'extrados, l'écoulement de l'eau est détaché de l'extrados ce qui entraîne la perte de portance du foil et érosion de sa surface.

Ce phénomène dépend essentiellement de la pression absolue au niveau du foil et de la température de l'eau.

La pression absolue est la somme de la **pression hydrostatique (hauteur de la colonne d'eau plus pression atmosphérique)** et de la pression/dépression causée par l'écoulement de l'eau sur le foil par exemple, ou sur une aspérité en n'importe quel point de la surface du foil.

Lorsqu'à la température de l'environnement, la **pression absolue** est inférieure à **la pression de vapeur saturante P_v** , l'eau passe alors en phase vapeur¹.

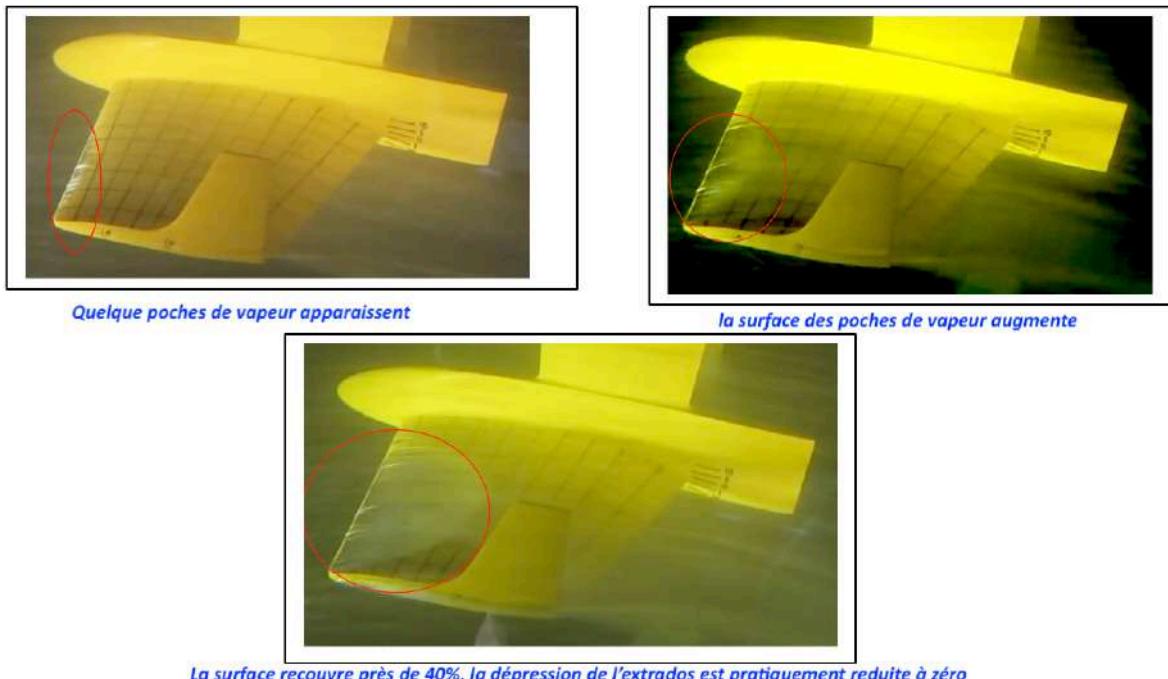
La valeur de la pression de vapeur saturante n'est pas une valeur universelle, elle varie notamment en fonction de la température.

Température °C	Pression Vapeur (Pa)
20°	2300
22°	2800
25°	3200
28°	3800
100°	101300

¹ Un corps reste liquide si la pression exercée sur lui est suffisante. Si on remplit d'eau (par exemple) à moitié un récipient dans lequel on fait le vide, une partie du liquide s'évapore instantanément.

Mais toute l'eau ne s'évaporera pas. L'évaporation s'arrêtera toute seule lorsque le point de vapeur saturante sera atteint. A ce point, la pression exercée sur le liquide par le liquide évaporé est trop forte pour que l'évaporation continue.

Le phénomène cavitation est identique au phénomène d'ébullition dans une casserole mais à température plus basse, la phase gazeuse est constituée de vapeur d'eau.



Photos extraites d'une expérience dans un tunnel, sur un foil équipé d'un Winglet.

La seule différence entre ébullition et cavitation se situe dans le « moteur » qui déclenche le phénomène.

Pour l'ébullition il s'agit de faire varier la température à pression constante et pour la cavitation il s'agit de faire varier la pression à température constante.

Pour un foil qui évolue dans une zone de régate où l'eau est à une température pratiquement constante, la cavitation se limitera à la variation de pression.

Quelques chiffres pour rendre plus tangible le risque de cavitation :

- Température 28°C : $P_v = 3800 \text{ Pa (Pascal)}$
- Immersion : $h = 1\text{m}$
- Densité de l'eau : $d = 1020 \text{ kg/m}^3$
- Pression atmosphérique $P_{atmo} = 101300 \text{ Pa}$

Le foil est à 1m sous la surface, la pression hydrostatique totale est :

$$P_{hydro} = P_{atmo} (101300 \text{ Pa}) + \text{pression colonne d'eau} [(\text{hauteur(m)} * \text{densité (kg / m}^3) * g] (10006 \text{ Pa})$$

$$P_{hydro} = 111306 \text{ Pa}$$

- Vitesse du Foiler : $V = 20 \text{ m/s (38,87 noeuds)}$
- Coefficient de (dé)pression local maximum $C_p = -1$
- Pression dynamique max : $P_{dyn} = 1/2 * d * V^2 * C_p = -204000 \text{ Pa}$
- Pression totale = $P_{hydro} + P_{dyn} = 111110 - 204000 = -92694 \text{ Pa !}$

Dans ces conditions on a une pression locale largement inférieure à la pression de vapeur saturante à 28°C (3800 Pa, voir le tableau ci-dessus).

Conséquence, la cavitation est certaine !

Réalisons le calcul inverse afin d'évaluer le coefficient de pression tolérable afin de ne pas avoir de phénomène de cavitation :

$$C_p = (P_{\text{hydro}} - P_v) / (1/2 * d * V^2) = 0,4875.$$

Pour réussir à faire fonctionner un foil classique à haute vitesse sans trop de risque de cavitation, il faut être capable de réduire l'incidence et surtout avoir un profil de foil adapté.

Si à la suite d'une fausse manœuvre de pilotage à grande vitesse, l'angle d'incidence est trop fort, même pour un court moment, la cavitation s'amorcera et la portance chutera brutalement, ce qui provoquera une composante à piquer du nez le bateau.

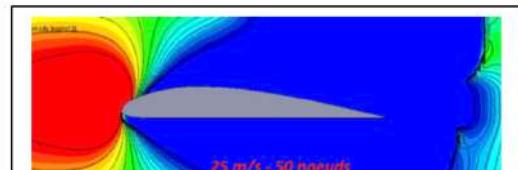
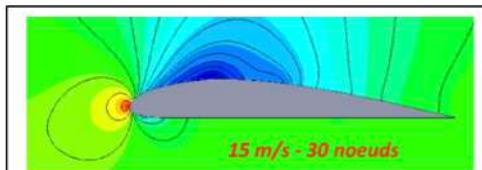
Voyant le nez du bateau piquer vers le bas, le réflexe naturel du pilote risque être une augmentation de l'incidence du foil dans le but de regagner de la portance.

Réflexe logique puisque le Cz croît théoriquement avec l'angle d'incidence. Mais ce n'est pas la bonne réaction, car cette augmentation de l'angle d'incidence augmente de fait la cavitation... et alors le bateau plonge carrément.

Conclusion : A moins de 30 nœuds, les conditions de création du phénomène de cavitation existent peu, toutefois il peut apparaître quelques points de cavitation l'extrados du foil au niveau du bord d'attaque car à ce point le Cp peut-être localement élevé.

Ce phénomène de cavitation se trouve corrélé avec l'accroissement de la vitesse du flux du fluide.

La zone en bleu foncé correspond aux bulles de vapeur qui se forment sur l'extrados et ensuite sur toute la surface du profil (imagerie issue du logiciel « SOLIDWORKS Flow Simulation »)

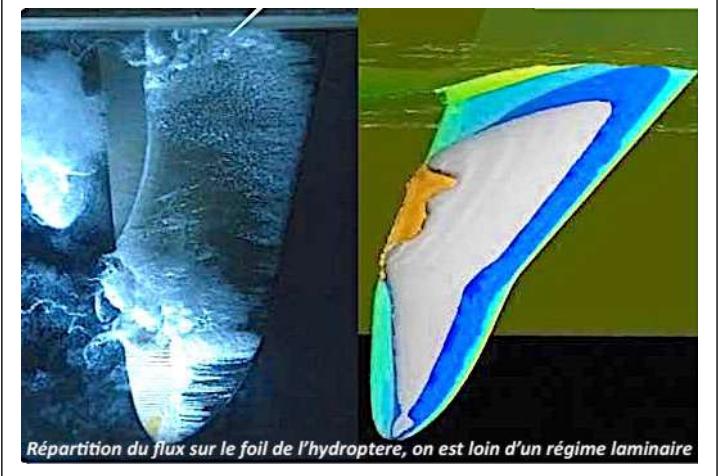


Au final, au-delà d'une certaine vitesse l'ensemble de l'extrados du foil évolue dans une bulle de vapeur d'eau.

Pour les profils usuels (NACA ou équivalent subsonique), la vitesse limite située entre 40 et 45 nœuds. Dans certaines conditions de faible charge la vitesse de 50 nœuds pourra être atteinte.

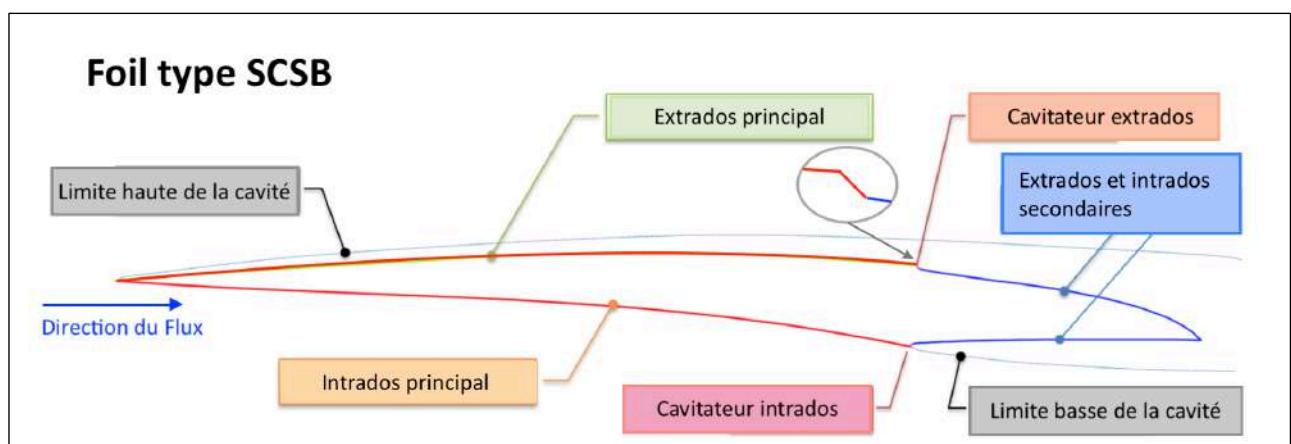
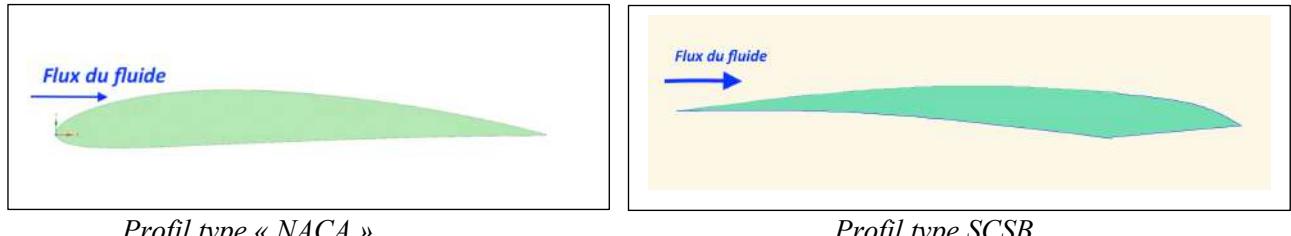
Le Foil, (donc le Foiler) bute alors sur un « MUR » qui se traduira par :

- Une chute de la portance
- Une érosion de la surface du foil (perte de matière)
- Des effets sonores pouvant atteindre 110 dB
- Un régime de vibration très élevé.



Pour aller au-delà de cette vitesse limite (donc franchir ce « MUR »), il faut utiliser des profils dit super-cavitants ou des profils tronqués au point d'épaisseur max et ayant une entrée d'air à la troncature (profils 'base ventilated').

Les profils dits « super-cavitants » se distinguent fondamentalement des profils NACA traditionnel, par leurs formes très peu « conventionnelles » et surtout par leur mode de fonctionnement hydrodynamique.



ANATOMIE DU NOUVEAU SC-HYDROFOIL²

Le croquis, ci-dessus, présente les principaux éléments géométriques de la nouvelle famille de « Foil / Hydrofoil SC », appelés SCSB.

La forme du profil est composée de six éléments topologiquement différents :

- Extrados principal ;
- Intrados principal ;
- Extrados secondaire arrière ;
- Intrados secondaire arrière ;
- « Cavitateur » extrados.
- « Cavitateur » intrados.

Le « Cavitateur » est une discontinuité de forme géométrique dont le but est de fixer le point de départ du phénomène de cavitation et limiter son instabilité et les vibrations associées.

Sur le plan fonctionnel, les Hydrofoils SCSB peuvent être considérés comme composés de deux éléments principaux :

- Le **corps principal** défini par a) et b)
- La **queue pointue**, définie par c) et d).

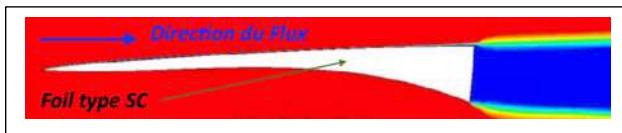
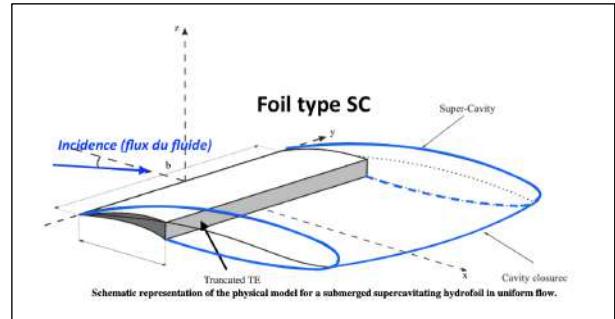
²

Fourth International Symposium on Marine, Austin, Texas, USA, June 2015

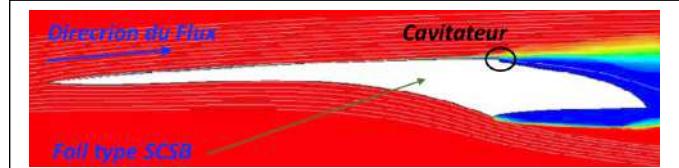
A New Family of Dual-Mode Super-Cavitating Hydrofoils (Stephano BRIZZOLARA)

Innovative Ship design lab, i-Ship, Department of Mechanical Engineering Massachusetts Institute of Technology.

En mode de fonctionnement à grande vitesse, l'Hydrofoil SCSB se comporte comme un profil SC classique, la queue (cône arrière du profil) étant immergée à l'intérieur de la cavité (vapeur d'eau) qui prend naissance à la fin de l'extrados et au bord du cavitateur de l'extrados (f).



Le foil SC est une sorte de coin curviligne tronqué

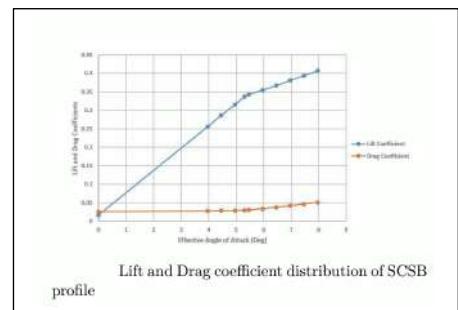


Le foil SCSB ajoute au foil SC une partie courte conique « immergée » dans le flux de vapeur.

Extraits de la conclusion de cette communication : « Cette nouvelle famille d'hydrofoils (foils) est capable d'atteindre des efficacités optimales (100 nœuds !!) aussi bien dans les régimes de super-cavitation que dans les régimes de cavitation entièrement mouillés ou de cavitation de base, contrairement aux hydrofoils conventionnels de super-cavitation à bord de fuite profilé qui payent une grande quantité de traînée dans les régimes sans cavitation. »

La difficulté n'est pas de fabriquer ce type de foil, mais d'atteindre la vitesse où ils sont opérationnels, car apparemment leur défaut principal serait un manque de portance à faible vitesse.

L'idéal serait de démarrer sur un profil conventionnel (NACA) et ensuite de passer sur **un profil super cavitant SCSB...** plus facile à dire qu'à réaliser...

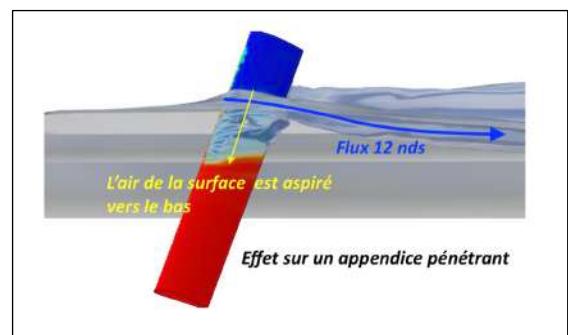


La Ventilation

La ventilation est un phénomène très courant sur les appendices profilés **opérant à proximité** de l'interface liquide-air.

Le résultat de la ventilation est physiquement identique à celui de la cavitation, c'est-à-dire une perte d'efficacité pratiquement instantanée de la fonction de cet appendice.

Toutefois l'élément vitesse n'est primordial dans le déclanchement du phénomène de cavitation.



La ventilation frappera les appendices pénétrants dans l'eau comme les safrans, les bras support de Foils, mais aussi les Foils (comme d'ailleurs les hélices) lorsqu'ils sont totalement immergés.

Le risque de ventilation étant plus important pour les appendices pénétrants.

L'effet sur les appendices pénétrants (voir dessin ci-dessus)

L'appendice évolue comme un volume profilé en régime archimédien.

Souvent ce type d'appendice se trouve orienté par rapport au flux, ce qui se traduit par un angle d'incidence et un effet de portance. C'est le cas, par exemple d'un safran.

A partir de cette situation, à l'interface Eau / Air, la vitesse de déplacement et l'incidence génèrent sur l'extrados du profil un creusement de la vague liée au déplacement. Une aspiration de l'air situé à l'interface se crée alors.

L'extrados se retrouve alors localement dans un environnement gazeux, environnement évidemment beaucoup moins dense que l'environnement liquide.

Le problème est que cette aspiration vers le bas va s'amplifier naturellement et se propager très rapidement en suivant la génératrice de l'appendice jusqu'à recouvrir entièrement l'extrados et ainsi annihiler complètement son effet hydrodynamique (dépression).

Sur un safran, c'est ce que l'on nomme « décrochage », qui peut se produire lorsque le barreur souhaite contrer (angle d'incidence) une trajectoire non prévue.

Au final l'extrados de l'appendice, que sa forme soit rectiligne ou courbe, se comporte comme une sorte d'autoroute qui guide et diffuse le mélange gazeux sur toute la surface balayée en se dirigeant vers l'extrémité de l'appendice.

L'effet sur les appendices totalement immergés

Un appendice totalement immergé peut être soumis au phénomène de cavitation, mais son immersion le protège normalement de la ventilation.

En fait il existe une zone frontière peu définie où le risque de ventilation existe.

C'est le cas lorsque le Foil (comme d'ailleurs les pales d'hélice) se rapproche de l'interface Eau / Air (la « surface » du fluide) et cela sans même crever la surface.

C'est d'autant plus possible lorsque le Foil n'est pas horizontal, ce qui signifie qu'une de ses extrémités se trouver très proche de la surface.

Cette situation spatiale peut aussi être provoquée par le passage dans le creux d'une vague.

Sans qu'il y ait de perçement de la surface, le simple rapprochement de l'interface (l'expérience montre que la limite est sensiblement égale à la corde de l'appendice) provoquera le même effet que celui qui se produit sur un appendice pénétrant.



L'effet sur les appendices partiellement immergés et localement pénétrants

Dans le cas ci-contre, il y a deux zones de déclenchement possible de la ventilation, sans qu'il y ait, pour autant, un effet préalable de cavitation :

- L'endroit où le foil, depuis sa sortie de coque pénètre dans l'eau.
- L'endroit où l'extrémité du « Tip » peut dans certaines conditions crever la surface (diminution de la gîte du bateau ou creusement d'une vague).



Quand l'effet de ventilation qui affecte un appendice pénétrant se propage sur le Foil



La ventilation commence sur l'appendice pénétrant, le safran sur cette photo, mais c'est identique pour le bras du Foil de l'AC75. A ce stade on constate que le PHR (plan horizontal réglable) n'est pas affecté.

La ventilation se propage inexorablement vers le bas et glisse sur l'extrados du PHR et détruit la portance initiale générée par l'extrados du PHR.

Au final les deux appendices perdent instantanément leurs fonctions :

- Contrôle de la direction : appendice vertical (safran)
 - Portance positive ou négative : PHR.

Les deux événements qui ont affecté « ENEOS » et « AMERICAN MAGIC » relèvent de ces deux phénomènes de cavitation et/ou ventilation.

ENEOS : « perte de portance » du safran et du PHR
AMERICAN MAJIC : « perte de portance » de l'extrados du Foil sous le vent.

La réalité physique pour ces assemblages de deux appendices (Safran/PHR et Bras/Foil)

Physiquement, le phénomène de ventilation se déclenche potentiellement lorsque la pression locale sur l'extrados de l'appendice devient inférieure à la pression de la colonne d'eau au-dessus.

Comme nous venons de le voir, lorsque la vitesse augmente, la surface libre de l'eau est « aspirée » par la dépression³ de l'extrados du bras, elle descend le long de l'extrados et lorsqu'elle rejoint la jonction de l'extrados du foil ou du PHR, elle se diffuse sur le Foil ou le PHR.

La portance du foil ou du PHR, qui est directement proportionnelle à la densité du fluide dans lequel ils évoluent, chute instantanément car l'air à une densité 900 fois plus faible que l'eau.

Pour reprendre de la portance le Foil ou le PHR doivent « plonger » plus profond pour se débarrasser de la bulle d'air qui s'est attachée sur l'extrados, ce qui n'est pas très facile à réaliser.

Quelques chiffres pour rendre plus tangible le risque de ventilation :

- Densité de l'eau : $d = 1020 \text{ kg/m}^3$ Immersion : $h = 1\text{m}$ (jonction bras/Foil)
 - Pression colonne d'eau : $P_{\text{eau}} = g * d * h = 10006 \text{ Pa}$ (Pascal)
 - Vitesse $V = 20 \text{ m/s}$ (38,87 nœuds) Coefficient de (dé)pression $C_p = -0.5$
 - **Pression dynamique max : $P_{\text{dyn}} = 1/2 * d * V^2 * C_p = -102000 \text{ Pa}$**

³ La portance augmente avec le carré de la vitesse, donc la dépression créée par l'extrados augmente très vite.

Dans les conditions du calcul ci-dessus, $P_{dyn} = -102000 \text{ Pa}$, on constate que cette dépression est plus importante que celle de colonne d'eau.

Cette dépression est donc potentiellement capable d'aspirer la conne d'eau.

Dans la réalité cette réaction ne se produit pas obligatoirement.

Question : Pourquoi n'est pas le cas ?

En fait lorsque les lignes d'écoulement du fluide se trouvent éloignées de la surface du Foil ou du Bras, leurs rayons de courbure augmentent et la dépression associée est réduite d'autant.

En pratique on constate que la dépression sur l'extrados devient négligeable à une distance du profil de l'ordre de la corde du profil.

Au final, pour évaluer le risque de ventilation il faut :

- Connaître les caractéristiques dimensionnelles du Foil ou du Bras et comparer la valeur de la corde du profil à l'immersion du Foil.
- Prendre en compte le C_p moyen sur toute la surface du foil.

En résumé, pour un foil ayant une corde de 0.3m, on admet qu'il se comporte normalement jusqu'à 0.3m de la surface, mais attention, s'il traverse une vague de plus de 15cm de creux, la condition d'immersion est rompue et la portance peut être gravement affectée...

Comme on vient de le voir, un bras porteur du foil qui traverse la surface et qui se connecte directement sur l'extrados du Foil, favorisera la circulation de la cavité gazeuse de l'extrados du bras sur l'extrados du Foil.

Par contre si le bras est fin et parfaitement aligné avec le vecteur vitesse (angle d'incidence = 0°), il ne posera aucun problème particulier.

A contrario, avec :

- Un bras profilé est conçu avec une épaisseur non négligeable (sûrement nécessaire pour obtenir la résistance mécanique).
- Une incidence de plusieurs degrés (le Foil est désaxé par rapport au plan de voilure et le bateau dérive toujours un peu), ce qui se traduit par un coefficient C_p important.

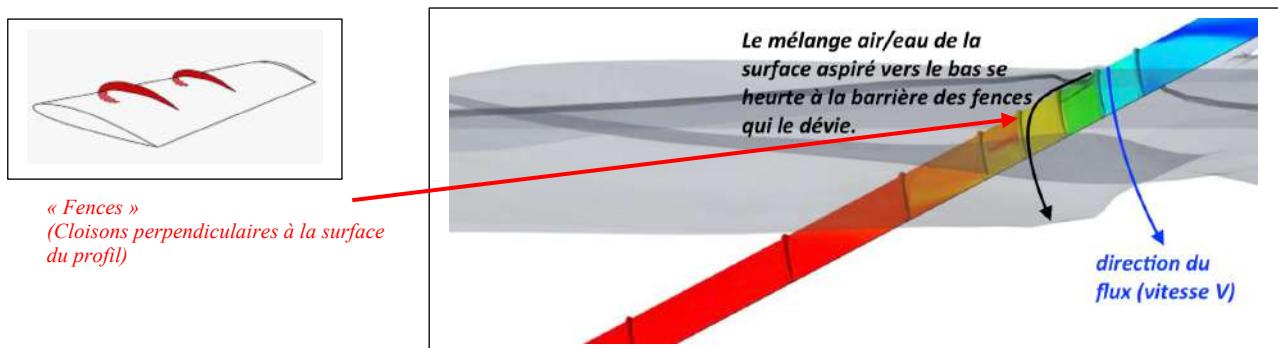
Alors son extrados générera un creusement local de la surface libre de l'eau, et créera un chemin pour l'aspiration de l'air vers l'extrados du foil qui travaille en forte dépression.

L'air remplace alors l'eau et corollaire, la portance du foil chute immédiatement.

Quelles solutions ?

La solution la plus rependue consiste à empêcher que la cavité gazeuse (air et eau) qui se crée à la surface soit aspirée, et atteigne l'extrados du Foil ou du PHR.

Les aérodynamiciens puis les hydrodynamiciens ont résolu cette difficulté en installant des barrières perpendiculaires au profil afin de dévier le déplacement de la cavité. Ce sont les « **fences** » que l'on voit assez souvent sur les ailes des avions.

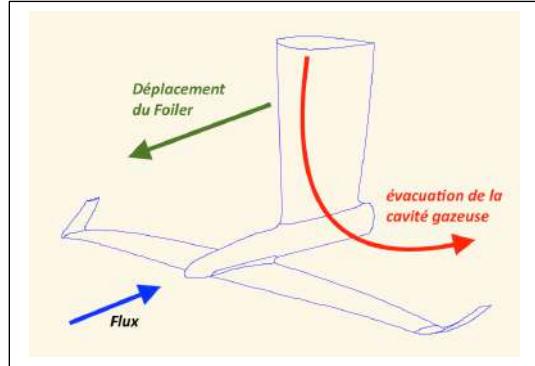


Certes cela ne résoud pas toutes les conditions d'immersions ou les présences de vagues subites, mais c'est une approche intéressante.

Pour beaucoup de Foiler, dont ceux qui ne possèdent pas de plan régulateur arrière (PHR), ce serait un réel élément de sécurité.

Une autre solution pour réduire ce risque consiste à installer le foil en avant du bras qui le porte, afin que la trajectoire de cavité gazeuse qui produit la ventilation ne se diffuse pas sur l'extrados du Foil ou du PHR et se disperse dans le sillage du safran ou du bras.

Mais cette conception augmente la complexité structurelle (conception et sollicitations mécaniques) de la pièce de raccordement entre le bras et le Foil ou le PHR.



Bilan

La conception archimédienne est un art dans les mains et le crayon des Architectes Navals.

Certes les outils informatiques ont permis d'améliorer, d'optimiser les dessins des carènes, comme d'ailleurs les nouveaux matériaux mais les évolutions, les gains de performances progressent lentement.

La régate sur un support archimédien est un **Sport Technique**, dans le sens où la création architecturale doit s'adapter à certaines contraintes imposées par les Box-Rules (la régate sans règle de jauge n'existe pas), ce qui impose d'associer le génie de la création à des solutions techniques plus ou moins complexes.

Par contre le Foiler, abandonne le domaine archimédien, puisque la carène devient presque optionnelle. Un Foiler, se décline principalement par sa stabilité de vol étroitement liée aux performances hydrodynamiques de ses Foils et de ses éléments de liaisons et aussi aux fonctions d'aide au pilotage.

Contrairement au voilier archimédien qui évolue dans 2 dimensions, l'équipage d'un Foiler doit gérer une évolution dans l'espace, c'est-à-dire dans 3 dimensions et avec de temps de réaction beaucoup plus courts.

La performance d'un Foiler dépend essentiellement du ratio **portance/trainée** des Foils.

Le fait d'obtenir la portance dans un fluide non homogène génère des phénomènes parasites décrits ci-dessus et qui compliquent encore plus l'équation.

La résistance mécanique du Foiler sera évidemment à considérer, mais c'est un problème plus classique.

Avec le Foiler, l'Architecte Naval laisse sa place à l'Ingénieur de la mécanique des fluides, l'Architecte interviendra encore sur le plan de voilure bien que l'encadrement dimensionnel et géométrique de la règle de classe AC75 soit très contraignant.

Au final le Foiler devient une recherche d'ingénierie, ce qui transforme la régate en **Sport mécanique**.

L'étape suivante sera de concevoir avec beaucoup de \$ ou d'€ un vrai simulateur de vol afin d'entrainer les équipages.

Jean SANS & Robert LAINE

OCTOBRE 2019 : Les Acteurs entrent en scène.

Acte 1 La présentation

Cela a d'abord commencé par l'AC75 NZ lors d'une cérémonie de lancement avec Champagne, Musique et Discours, puis l'AC 75 USA avec plus de discréction, en utilisant le site Internet, où sont présentées quelques photos et des images de synthèse (très bien réalisées) d'AMERICAN MAGIC. Mais les Américains ne souhaitant pas rester sur le bord de la route, ils présentent rapidement un lancement très Bostonien, à NEWPORT.

Après une très (très) courte vidéo anonyme d'AMERICAN MAGIC qui a aussi circulé sur Internet (voir Sailing Anarchy), le team US met en ligne une « vraie » vidéo. Quelques jours plus tard, les NZ suivent. Petite régate à la communication.

Début Octobre les Italiens se lancent à CAGLIARI. Cérémonie grandiose dans la tradition du Yachting Italien, accompagnée d'une très belle vidéo, mais pas d'image en navigation.

Quelques jours plus tard à Portsmouth, INEOS TEAM UK présente son bateau et le baptise « BRITANNIA » en hommage au CLASS J ayant appartenu au Roi GEORGE V. Une cérémonie plus discrète mais qui permet de découvrir le bateau. Une vidéo très technique, résume le travail préparatoire de 18 mois où l'on découvre que l'équipage s'est même entraîné au test « réel » de l'immersion de la cabine d'un hélicoptère en piscine. Quelques dessins, notamment des foils sont rapidement présenté dans cette vidéo.

Voilà pour le décor....

Un Défendeur et 3 Challengers (à ce jour).

AC75 NZ (Défendeur)



Chaque Team a le droit de construire deux bateaux, certains Teams ont testé des démonstrateurs d'une dizaine de mètres, mais le passage à 75', soit environ 20 mètres de coque et 7,5 tonnes de déplacement, ne se résume pas à multiplier par deux les dimensions du démonstrateur.

AC75 USA (Challenger)



L'impression est que l'AC75 des Américains vole plus haut que celui des Néo-Zélandais. Il faut toutefois se méfier des prises de vues photos ou des extraits instantanés de vidéos, car ces bateaux contrairement aux monocoques archimédien ont une très faible stabilité horizontale lorsqu'ils sont en vol.

Vingt centimètres de perte ou de gain d'altitude ne sont pas un handicap, si la période d'oscillation longitudinale est grande.

AC75 ITA (Challenger)



Les Italiens innovent (?) en dessinant un aileron (Bustle) devant le safran. C'est assez étonnant car cette forme de carène ne peut avoir d'intérêt que durant la période archimédienne qui à priori ne sera pas ce qui assurera la victoire.

Les Italiens utilisent aussi des bulbes assez volumineux à la liaison entre les Foils et les Bras. Ils ne sont pas les seuls, on reviendra sur ce type de dessin.

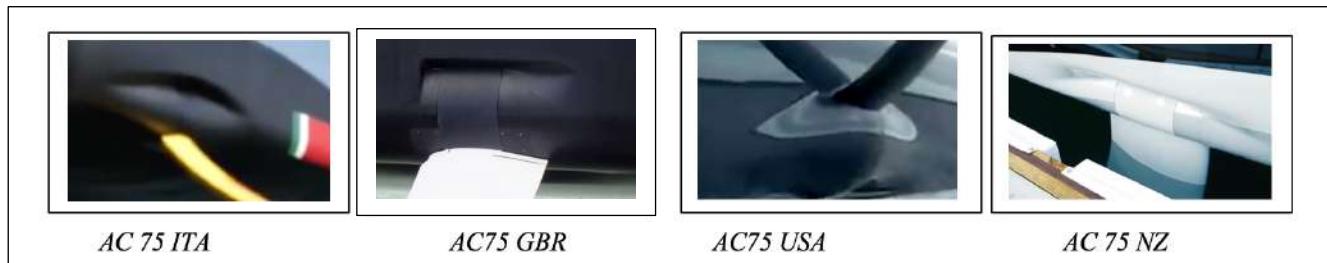
AC75 GBR (Challenger)



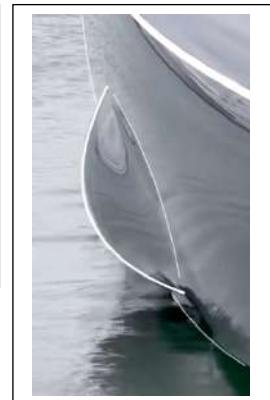
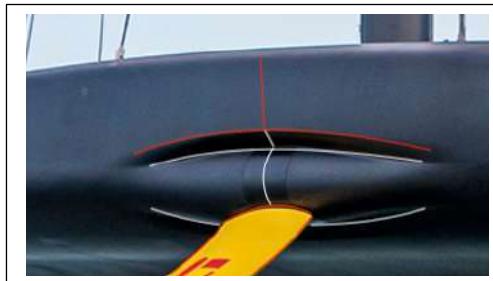
Pour les formes avant de la coque, c'est plus que de l'innovation, c'est presque de la provocation. INEOS (BRITANNIA) opte aussi pour les bulbes aux extrémités des Bras, mais ils sont implantés sous la jonction des foils sur le bras.

Voilà pour les premières impressions au moins visuelles.

Il faut ajouter que les 4 bateaux présentent une déformation « anormale » et très limitée des œuvres mortes autour de la zone où est implanté l'axe de rotation (Docking, Position basse, Position haute) des bras des Foils.



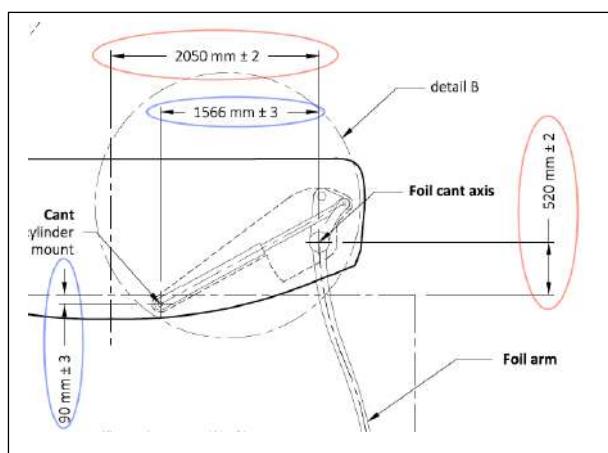
La raison de cette déformation locale du bordé est directement liée aux critères dimensionnels imposés par les Règles de Classe et par la cinématique de la rotation du bras qui impose une rotation du bras de quelques 143° entre le Docking et la Position haute.



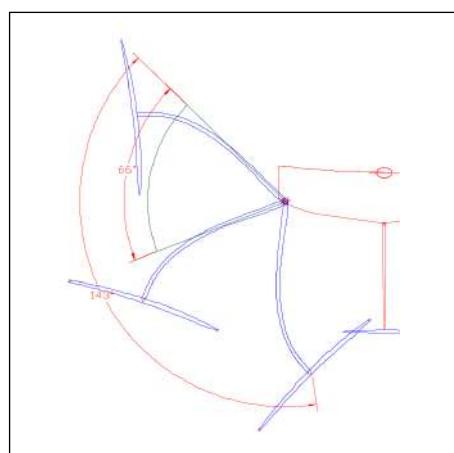
La position de l'axe de rotation du bras étant imposée par la Règle de Classe, elle gène les architectes car ils doivent adapter localement le bordé à la structure qui soutient cet axe. Dans ces conditions, il est nécessaire de déformer le bordé afin que les bielles de commande des bras puissent évoluer durant la rotation du bras. Seul l'AC75 GBR montre les axes de rotation franchement en retrait du bordé, ce qui signifie qu'il utilise une coque assez large.

Il faut préciser que les Règles de Classe n'imposent pas de largeur pour la coque, mais une succession de prescriptions dimensionnelles qui contrôle indirectement la largeur.

Toutefois ces « bosses profilées » n'ont pas de conséquence négative sur l'aptitude à voler. Suivant les formes de carenes choisies par les Teams la « bosse » évolue un peu.



La Règle de Classe



La cinématique des Foils

Finalement, on reste dans l'esprit « AMERICA CUP » où une Règle de Classe très stricte impose une architecture, tout en laissant quelques libertés, pour au final produire des bateaux dont les potentiels de vitesses sont très proches.

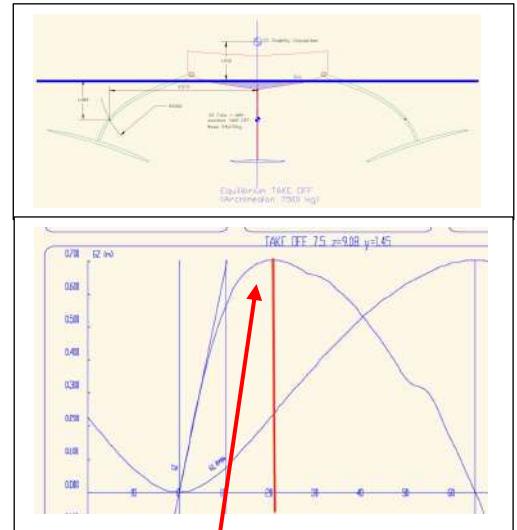
Ce fut, avec succès, l'esprit des Class J, 12mJI, CLASS AMERICA, AC72, AC 45.

Les formes des coques

Peut-être pour la première fois dans l'histoire de la COUPE, on constate que les observateurs s'intéressent plus aux **formes des œuvres mortes** qu'à celles des œuvres vives à l'exception des formes avant.

Avant d'envisager de voler, il faut évidemment décoller, cela conduit obligatoirement les Teams à respecter les règles Archimédiennes. Comme le bateau n'est pas très lesté (grossièrement c'est un « biquille » Archimédien) il faut nécessairement dessiner une coque assez large, dans les limites des Règles de Classe. Cela permet d'obtenir une stabilité de forme suffisante et une trainée minimale pour acquérir le plus vite possible la vitesse de décollage imposée par la somme des surfaces actives des 2 Foils.

Les bras sont déployés depuis la position Docking (l'AC 75 ne peut pas naviguer sous voile en position Docking), le Centre de Gravité final de l'AC75 passe alors de 0.90 m à 1.45m / au-dessus de la DWL.

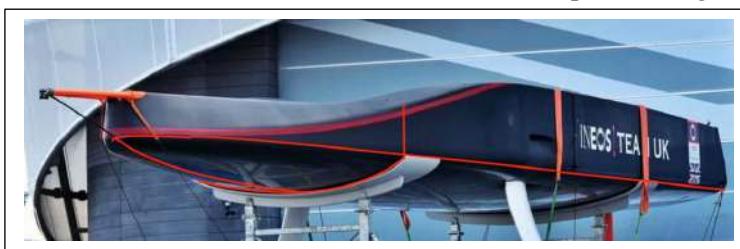


La stabilité transversale devient délicate d'autant plus que dans cette phase de « TAKE OFF » la surface de voile est obligatoirement maximale.

Le GZ (bras de levier) maximal 0.704m à 22° soit un Righting Moment maximum de 7.5 *
0.704 = 5.28 T.m.

Le bateau chavire à 62° de gîte (ces calculs sont des évaluations basées sur un modèle personnel).

Les formes avant présentent deux options architecturales opposées, la forme en « V profond » ou « U très arrondi » ou la forme dite « SCOW » très plate et largeur maximale autorisée.



AC 75 GBR

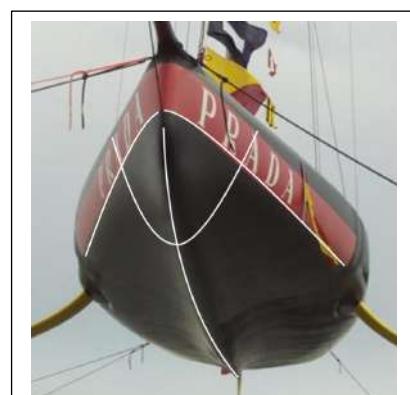


AC75 USA



AC 75 NZ

AC 75 ITA



Ce qui est intéressant, c'est de connaitre quel est le but recherché par les Architectes lors de leur choix de ces options.

Dans un environnement Archimédien, où le bateau navigue en permanence du près au portant, les options architecturales carènes planantes ou à déplacements se comprennent et respectent des théories.

Pour les AC 75, c'est plus complexe, en effet le temps de navigation **en mode réellement**

Archimédien sera à priori très court et surement en dehors du « mode course ». En fait dès que les voiles seront bordées, les Foils (et les bras totalement immergés) apporteront de la portance et de la trainée. Rapidement la trainée des Bras et des Foils sera inférieure à la portance fournie par les Foils. Alors la coque s'élèvera progressivement, son volume immergé diminuera, la carène déjaugera et la vitesse augmentera jusqu'au décollage complet.

On peut en conclure que les choix Architecturaux des formes avant auront très peu d'importance sur l'obtention de la vitesse nécessaire au décollage.

Quelle qu'en soit les formes avant, les AC 75 décolleront.

La réalité lors des régates sera tout autre, elle se situera dans **les « TOUCH and GO », évidemment non volontaires du plan d'eau**.

Ces « **TOUCH and GO** » se produiront quelque fois lors des phases de transition (bouées, virement de bord, etc.) ou autres évènements (erreur de l'équipage, perte subite de portance : ventilation, cavitation).

Cette période de transition entre le mode Vol et le mode « presque » Archimédien doit être obligatoirement très courte si l'équipage souhaite rester dans le match.

Deux, même trois écoles se dessinent, mais aucune n'a vraiment de recul en mode régate au sujet des « **TOUCH and GO** ».

Avec la forme en « **SCOW** », on espère **pratiquement rebondir sur la surface de l'eau** (le plan d'eau des régates est très protégé, la vitesse est élevée), comme le skieur sur une bosse, et malgré le coup de frein inéluctable lié au contact, on espère retrouver le mode VOL très rapidement.

Avec la forme plus creuse (« **V** » ou « **U** »), les Italiens étant les plus extrêmes, les Néozélandais ayant choisi un dessin intermédiaire, on espère limiter le coup de frein (la carène s'enfonce doucement) et **ressortir en utilisant la poussée hydrostatique générée par l'immersion de la partie avant de la carène**. Toutefois je suis un peu dubitatif, mais Italiens et Néozélandais ont surement des arguments.

Impossible d'arbitrer aujourd'hui laquelle de ces écoles aura raison, il faut attendre les premières régates.



Une vidéo de l'AC 75 USA, montre que sur un empannage, lors du changement de Foil actif (passage de 1Bâbord à 2 Foils puis 1Tribord) le bateau perd rapidement de l'altitude et devient Archimédien pendant 15 secondes. A 30 nœuds, c'est 15m/s, si la vitesse tombe à 8/10 nœuds durant 15 secondes, on perd 150 mètres...

L'aérodynamisme

Les formes des œuvres mortes et du pont étonnent, **pourtant cela me paraît logique pour un mobile qui doit voler**, même si ce n'est qu'à 75 à 80 km/h au maximum.

Nous ne sommes plus dans le domaine Archimédien, même si le bateau plane.



Le premier constat en regardant les vidéos, par mer plate, met en évidence que les AC75 sont très rapides malgré une masse de 7500 kg. Le vol est stable, les trajectoires horizontales sont très coulées. L'AC75 NZ parait voler plus bas que l'AC75 US, c'est toutefois difficile d'être affirmatif, car on ne peut pas voir si les NZ volent sur un ou deux foils comme les Américains.



Un point commun : les bateaux utilisent actuellement des gréements de type conventionnel. Le mât profilé, les voiles à double profil ce sera pour plus tard.

L'AC75 US et l'AC75 GBR montrent que le paramètre pénétration dans l'air a été très étudié.

Le nez est plongeant, comme en F1 ou en LMP1, la surface frontale est fluide. Au niveau de l'encastrement du bout dehors, il n'y a pas d'aspérité.

Les sorties des filets d'air à l'arrière des bateaux sont aussi canalisées latéralement afin de réduire la trainée.



La surface des voiliures autorisée par les règles de Classe se traduit par des bateaux surpuissants en mode Foiler, car ce mode demande beaucoup moins de puissance qu'en mode Archimédien.

Conséquences : L'aérodynamisme des coques lorsqu'elles sont en vol devient un paramètre non négligeable, d'autant que la vitesse finale de l'AC 75 est asymptotique au foil non cavitant. Donc autant s'approcher le plus vite et le plus près de cette vitesse.

Cela est visible sur les ponts avant qui sont très dépouillés et sur la zone de travail de l'équipage. Tous les Teams ont séparé en deux parties cette zone de travail afin de canaliser le flux d'air. Pour cela les équipages sont « encastrés », seuls pratiquement les casques dépassent du livet.



Sur l'AC75 GBR, les équipiers, le barreur sont installés dans de véritables cockpits d'avion.... Les petites bouteilles jaunes sont des réserves d'oxygène en cas de Capsize.

On peut en déduire que **les études pour réduire la trainée de la coque dans l'air** ont été très approfondies.

La trainée augmentant avec le carré de la vitesse, il est important de la réduire au maximum... c'est toujours quelques dixièmes de nœuds de grappillé.



Mais revenons à l'expression de la trainée en vol, physiquement c'est la force qui s'oppose au mouvement d'un corps dans un fluide. Son expression est donnée par la formule :

$$\text{Trainée} = 0.5 * C_x \rho S V^2$$

Où ρ est la masse volumique de l'air, C_x le coefficient de trainée qui dépend des formes plus ou moins aérodynamiques du mobile, de la **rugosité** de la surface et du nombre de **Reynolds**, S la surface frontale maximale (maître couple pour une voiture) et V la vitesse du mobile. La masse volumique ρ de l'air est de l'ordre de 1,20 kg/m³.

Les AC75 ont une surface de maître couple de l'ordre de 7.7m².

Par contre le vent n'est jamais de face comme sur une voiture. Si on considère que le vent apparent est orienté de 45° à 50°, la surface exposée au vent vitesse est de 14m * 1,80m = 25 m².

A 35 nœuds la Trainée en vol de la coque est de 1652 N (avec un C_x de 0.40, la trainée des voiles, du mat) n'est pas prise en compte, elle baisse de 13% avec un C_x de 0,36.

L'expérience des Foilers et les limites physiques des profils des Foils (non cavitant) nous ont montré que la vitesse maximale possible accessible sera de l'ordre de 40 nœuds (20 m/s).

Le C_x de ces quatre Foilers sera à quelques décimales près identique, de l'ordre de 0,40 (le C_x est un nombre sans unité). La trainée des voiles et du mat sera quasiment identique pour tous les bateaux.

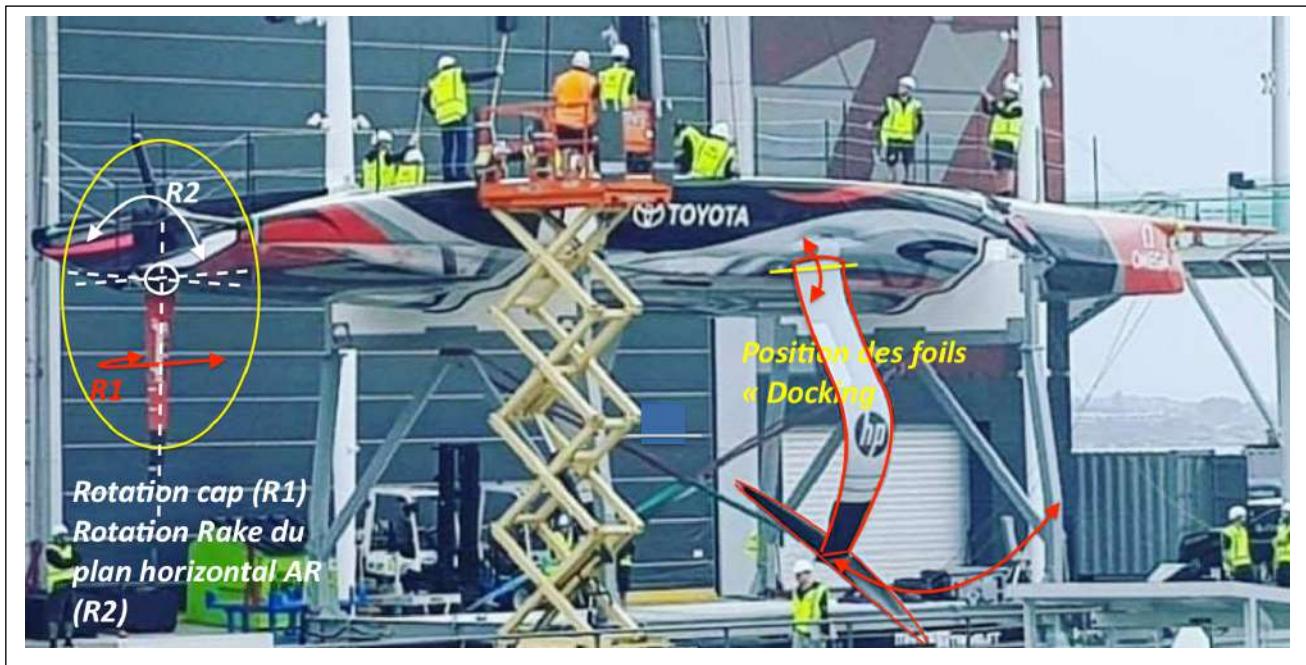
Dans ces conditions, le gain possible en C_x restera toujours très faible. Diminuer cette trainée demandera une énergie intellectuelle assez importante, mais ce sera quelques dizaines de secondes gagnées.

Lorsque l'on voit la « carrosserie » de l'AC75 GBR mais aussi du bateau Américain, il ne fait aucun doute qu'il y a eu des essais sur des maquettes (soufflerie ?).

Les deux plans verticaux qui forment le bordé (10m * 1.5 = 15m2 chacun) canalisent les filets d'air, améliorent la stabilité de route, réduisent les turbulences arrière et contribuent à diminution du Cx.

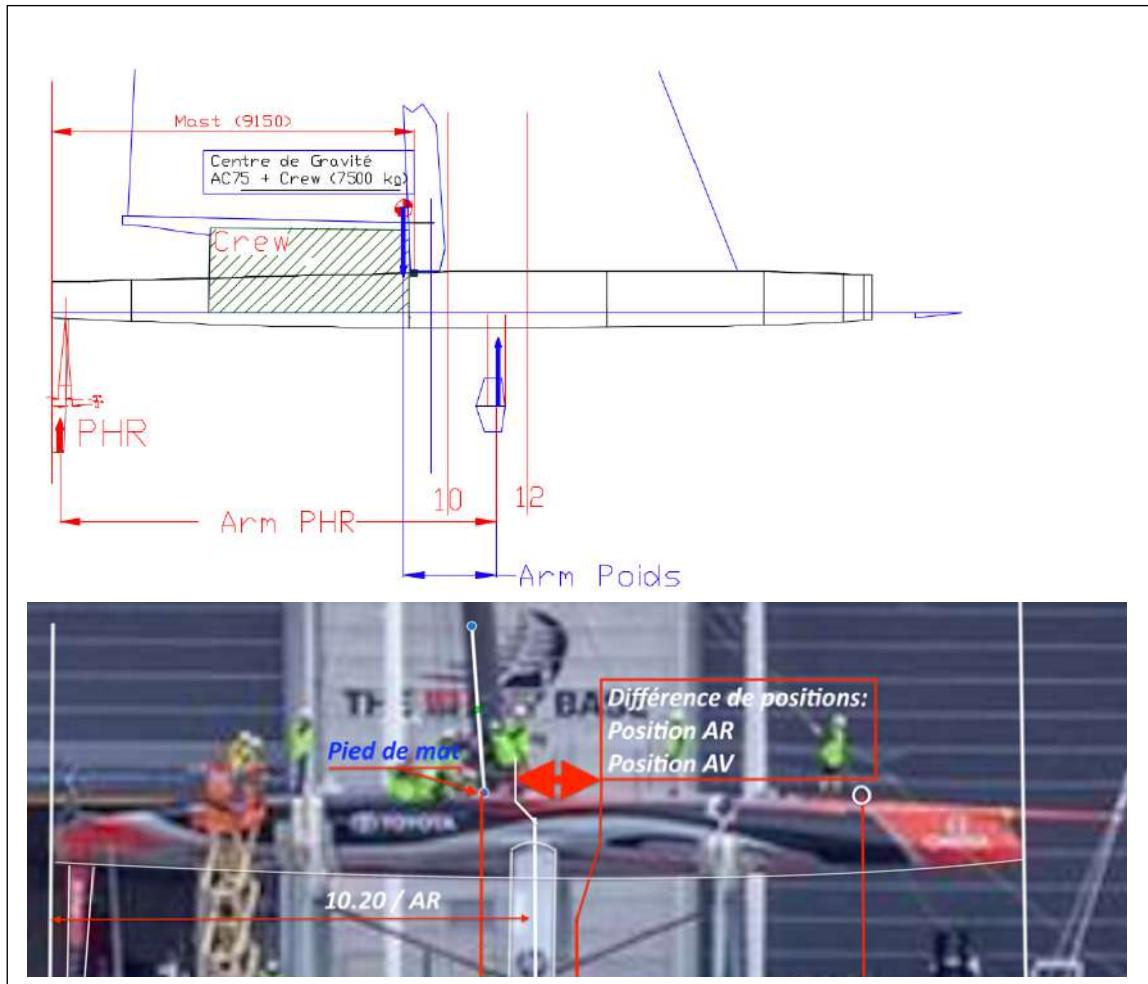
Les paramètres dimensionnels de l'AC75 NZ et de l'AC75 US

D'abord un rappel des éléments mobiles qui entrent dans la conception de ces AC75 (en fait les Règles de Classe).



Les positions longitudinales du mat (9.150 m /AR), comme celle de l'étai (8.2 m /base du mat) sont imposées par les règles de classe.

Seule la position longitudinale de l'ancrage des Foils bénéficie d'un degré, mais est toutefois limitée entre 10 et 12 mètres de l'arrière. Cela laisse le choix entre plus de stabilité de route ou plus de d'évolutivité.



Les bras, les foils

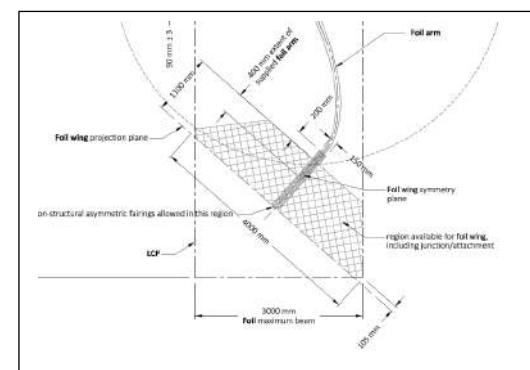
Les deux bras sont fabriqués sur une base monolithique carbone. Ils sont fournis par le Défendeur. La seule liberté laissée aux Teams, se situe dans le carénage et sa forme.

Comme je l'ai précisé précédemment, la position du centre de rotation des bras dans le plan transversal est imposée par les Règles de Classe.

La position spatiale des foils doit se situer dans la zone hachurée ci-contre.

L'envergure totale des deux Foils est limitée à 4 m. Les valeurs des cordes des profils ne sont pas imposées, toutefois comme tous les Teams utiliseront des allongements (Aspect Ratio) identiques pour leurs dessins de foils, les surfaces effectives seront très proches.

En tout état de cause, pour voler en régate, il faut que la composante verticale du Lift soit égale au déplacement du bateau, soit pour une masse de 7500 kg, un Lift (sur un seul foil) de 73500 Newtons et cela avec une vitesse de vent « minimale ».



Le système de bras basculant interdit qu'il y ait un possible réglage mécanique de l'incidence du Foil (Rake) en jouant sur la position par rapport à l'horizontale de l'axe de rotation du bras.

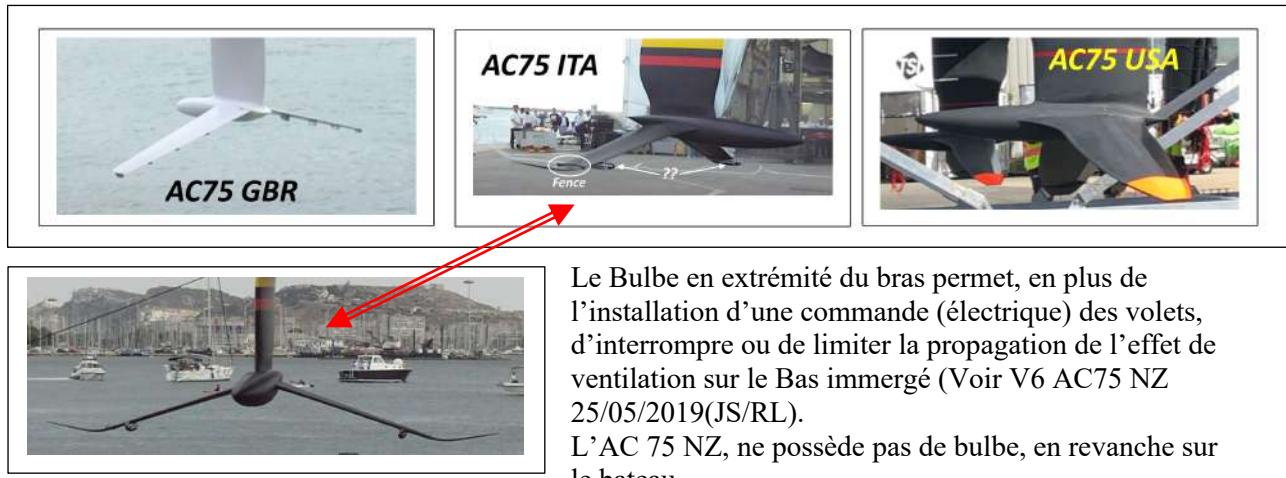
Toutefois, à priori, à la lecture des Règles de Classe (mais la rédaction est « tordue »), rien n'interdit de caler à la construction l'axe de rotation avec 2° ou 3° de Rake.

En conséquence, pour modifier la portance des Foils, il faut jouer avec un volet installé sur le bord de fuite. Sa corde est limitée à 25% de la corde du Foil au droit de la mesure.

La difficulté est de concevoir un système de commande pour assurer la rotation (Maximum 25° à 45°). D'abord par ce que le bras est courbe, ensuite parce qu'il décrit en navigation un angle de 64° environ et enfin parce que le système mécanique de commande doit « quitter le bras » pour « passer » dans le Foil et en plus des deux cotés du bras. L'équation est compliquée.

Désignation	Forme d'Aile	Angle de braquage	Augmentation portance
Profil de base			
Volet de courbure		45°	51%

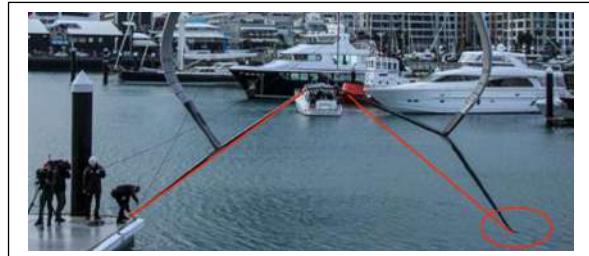
Une ingénierie électrique (moteur pas à pas par exemple) est possible. Cette méthode demande peu d'énergie, des circuits électriques simples, mais il faut loger le moteur entre les deux foils.



N°1, deux types de Foils avec des dièdres différents sont testés.

A l'exception de cet essai sur l'AC75 NZ tous les Foils possèdent un dièdre relativement important.

Je ne souscris pas au fait que ces bulbes (remplis de plomb ?) soient présents afin d'augmenter la stabilité en mode Archimédien. Certes ils représentent 300 kg, s'ils sont remplis de plomb, sur un déplacement total de 7500 kg en navigation, mais l'effet sur le CG final restera assez faible. De plus l'AC 75 NZ décolle sans difficulté sans ces bulbes, donc sans la trainée inhérente à ces bulbes et elle n'est pas négligeable.



Deux bateaux sont équipés de « Fences » (cloisons extérieures perpendiculaires au profil afin de créer une barrière au phénomène de ventilation et donc à une perte de portance subite).

C'est le cas de l'AC75GBR (3 par Foils sur l'intrados) et un sur chaque Foil de l'AC 75 ITA.

Le PHR (Plan Horizontal Régulateur)

C'est l'élément physique qui permet de voler horizontalement. C'est un profil symétrique qui suivant son incidence **positive ou négative** permet de faire **Piquer** le Foiler ou de le **Cabrer**.

Le PHR est assemblé en extrémité du safran. La Règle de Classe interdit à priori de commander sa portance et son sens (vers le haut ou vers le bas) avec un volet de bord de fuite (comme pour les foils).

L'inversion de portance sera ainsi obtenue en basculant le safran vers l'avant ou l'arrière de -8° à +8° autour d'un palier sphérique situé en fond de coque autour de la mèche de safran (commande par vérin hydraulique).

L'AC75 GBR, tout comme l'AC75 USA a translaté le PHR vers l'arrière de l'extrémité du safran afin d'éviter que si le phénomène de ventilation (verticale), s'il se déclare, ne se propage pas sur l'extrados du PHR.

Une telle situation provoquerait une action à Piquer ou à Cabrer incontrôlable.



Conclusion

Les très nombreuses contraintes imposées par les Règles de Classe s'appliquent principalement au mode Archimédien.

Le mode Foiler n'est pas contrôlé directement par la surface et la forme générale des Foils.

Les règles de Classe laissent les Architectes et Ingénieurs développer la recherche des performances dans le mode Foiler.

Cela se voit sur la recherche dans l'optimisation de l'aérodynamisme, dans les différentes formes de foil (et non apparemment des profils), des carénages des bras et des jonctions avec les foils.

Reste une grande inconnue : La conception des interfaces entre la partie « contrôle des systèmes » qu'ils soient électroniques ou hydrauliques, les contraintes imposées par les Règles de Classe (et elles sont nombreuses) et le Pilotage.

Cette partie est totalement invisible pour les observateurs.

La première confrontation

Lors de l'America's Cup World Series qui devait se disputer à Cagliari sur quatre jours en Avril 2020, a été annulée à cause du COVID.

Pour autant chacun dans leur territoire, les quatre Teams, ont continué leurs essais, ce qui a abouti à la version 2 des bateaux :

- **America's Cup Defender:**
 - **Emirates Team New Zealand,**
- **Challenger of Record :**
 - **Luna Rossa Prada Pirelli Team (ITA),**
 - **INEOS Team UK (GBR),**
 - **NYYC American Magic (USA)**

ACTE 2 : Présentation de la VERSION 2 des Foilers

Avec les mesures de confinement et les restrictions de circulation dans le monde, l'ensemble du projet America' Cup est complètement stoppé.

Les teams réalisent leurs essais sur place et prépare le nouveau AC75 (version 2) pour une CUP en 2021.

Les évolutions visibles portent principalement sur la carène et sur les œuvres mortes.

Comme le montre les nombreuses vidéos disponibles réalisées avec le modèle AC75-V1 de chaque team, l'assiette de vol (Trim) est négative, cela avait été déjà constaté sur les deux générations précédentes de catamarans, et l'altitude de vol faible.

Que l'altitude de vol soit faible (< 1 mètre pour le fond de coque), ce n'est pas une réelle découverte, mais le Trim sur le nez pose problème en cas de perte momentanée de portance sur le foil. Le risque étant d'engager la carène dans un mode archimédien très pénalisant (vitesse).

Deux solutions apparaissent, la première étant d'avoir une sorte de double carène obtenue avec un retour de galbord. C'était déjà embryonnaire sur le modèle V1 de PRADA, c'est beaucoup plus marqué sur les versions V2 d'AMERICAN MAGIC (USA), de TE REHUTAI (NZ) et PRADA (ITA).

La seconde solution est plus radicale, puisqu'elle consiste à dessiner le bas des œuvres vives avec une spatule absolument plate (comme un Ski) afin de rebondir sur l'eau... visible sur INEOS (GBR).

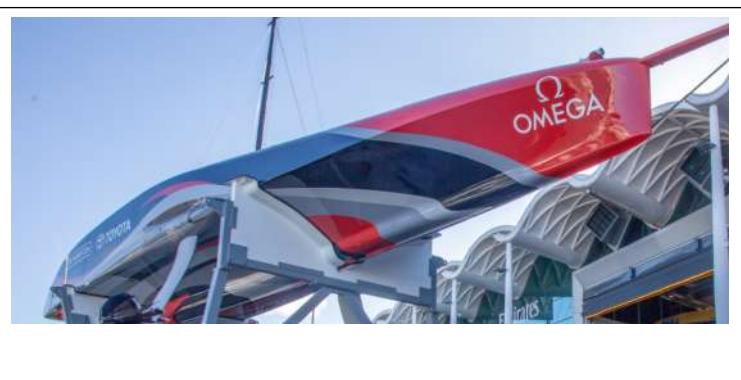
PRADA (ITA)



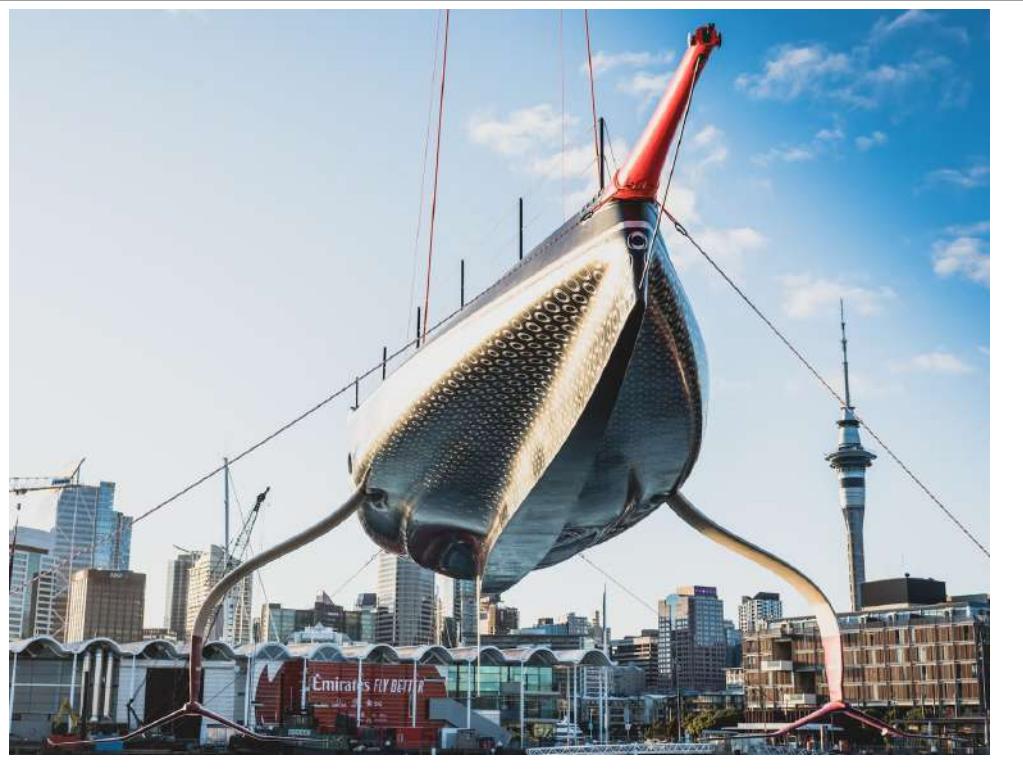
AMERICA MAGIC PATRIOT (USA)



TE REHUTAI (NZ)



INEOS (GBR)



INEOS présente l'architecture la plus extrême... Wait and See !!!

Reste que ces bateaux (?) sont capables de figures libres impressionnantes mais plutôt incontrôlées.



J. SANS (15/10/2019 & 19/11/2020)