



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 basés 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 nœuds 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 régaté.

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 régaté, 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

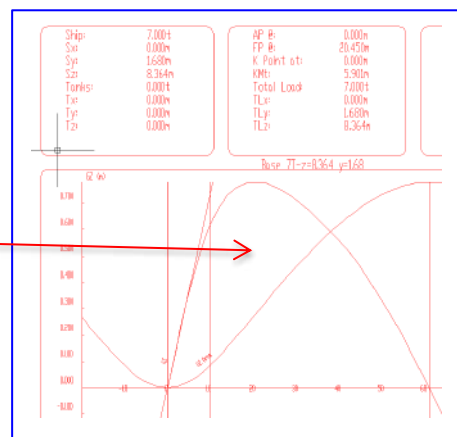
Avant d'aborder l'analyse des règles de classe de l'AC75 fournies par TEAMS NZ, il faut présenter les particularismes de ces deux modes de navigation.

<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

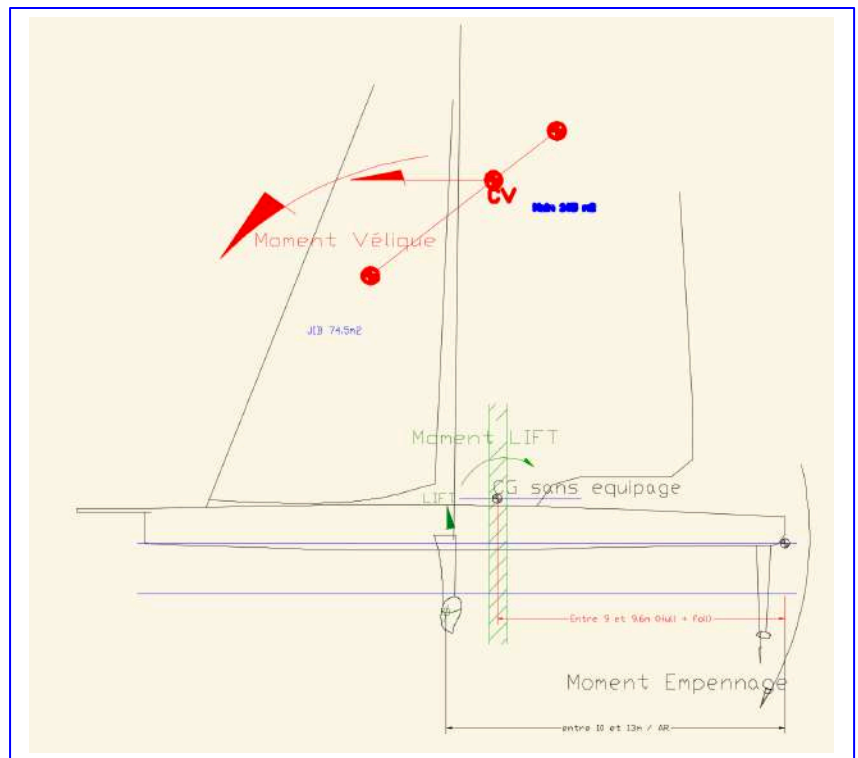
Le point d'équilibre est celui de l'application du Centre de Gravité du bateau.

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 : $Mt \text{ Vélique} = Mt \text{ Lift} + Mt \text{ Empennage AR.}$



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 mini + 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.

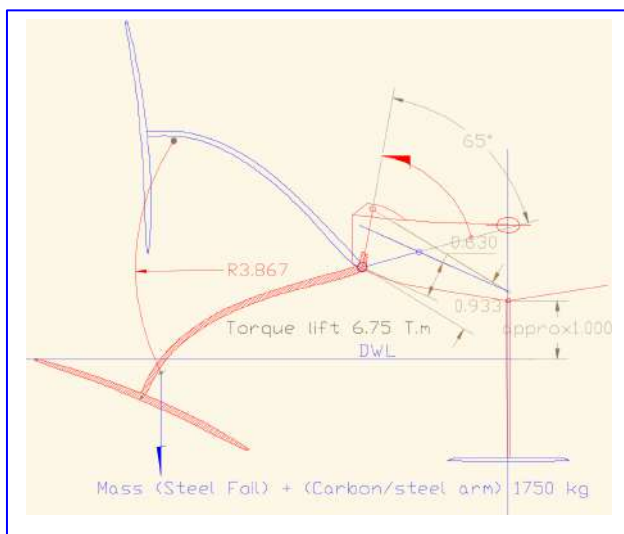
Le lest se résumera aux foils (Bras + Wings) immergé, soit 2350 kg, soit un ratio Lest / Déplacement de 31%.

Les Règles de Classes imposent deux prescriptions importantes :

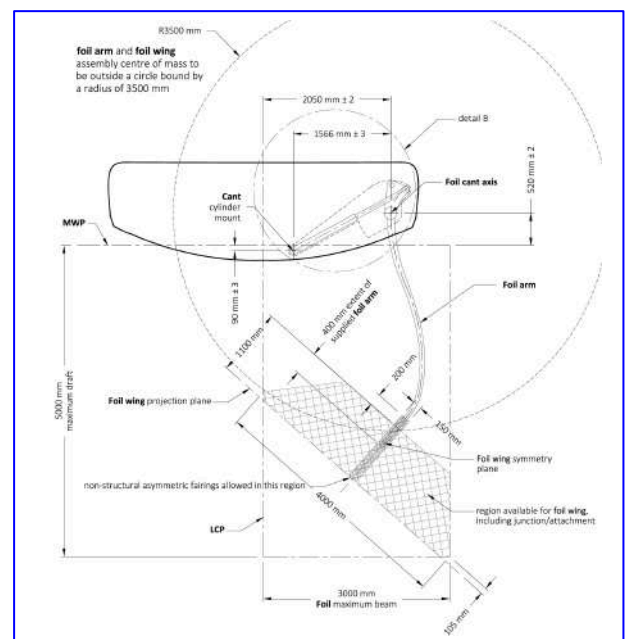
- 1) que le centre de gravité de l'ensemble (Bras + Wings) soit au moins à 3.5 m du centre de rotation du bras. Comme c'est TEAM NZ qui fournit le bras, tout laisse à penser que la masse de ce dernier sera la plus faible possible (composite Carbone) et que les TEAMS devront fabriquer des Wings dont une 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 m³ dont 40 m³ 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 Capsized par l'avant).

▪ Item (1)



Class Rules (position Docking)



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 inconvénient, 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

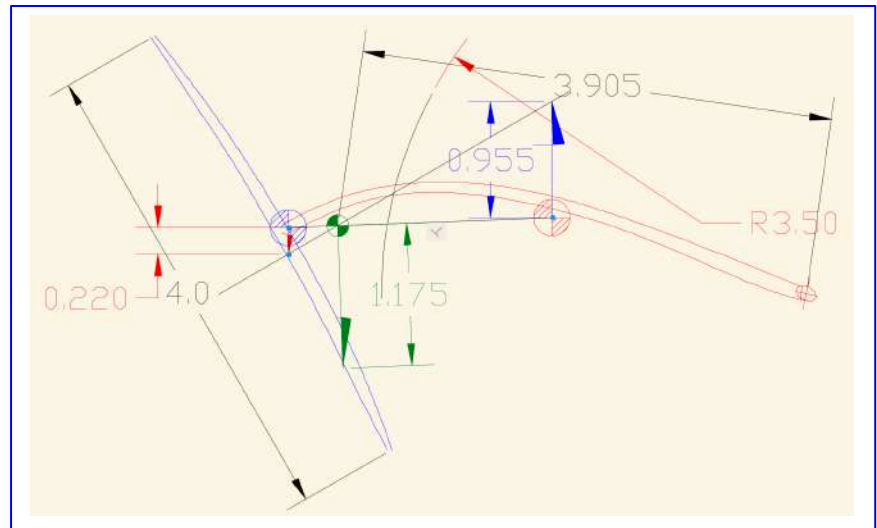
Section moyenne des profils:

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

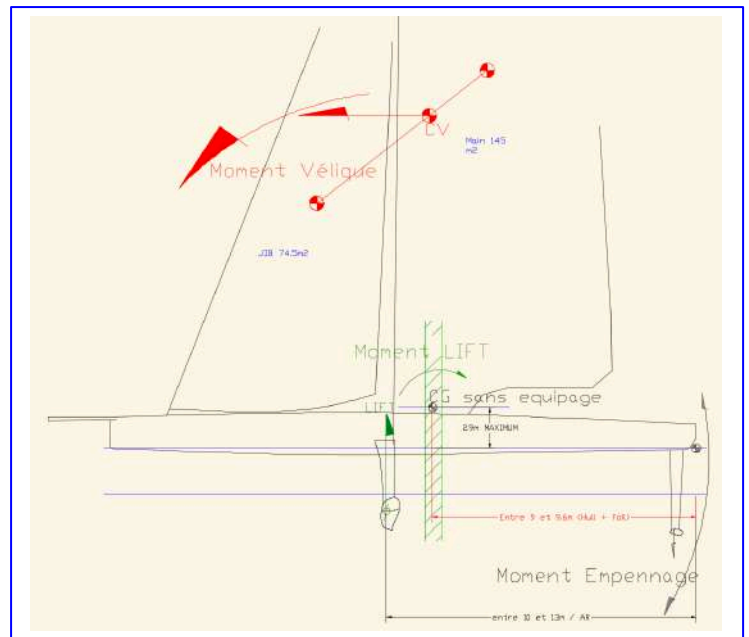
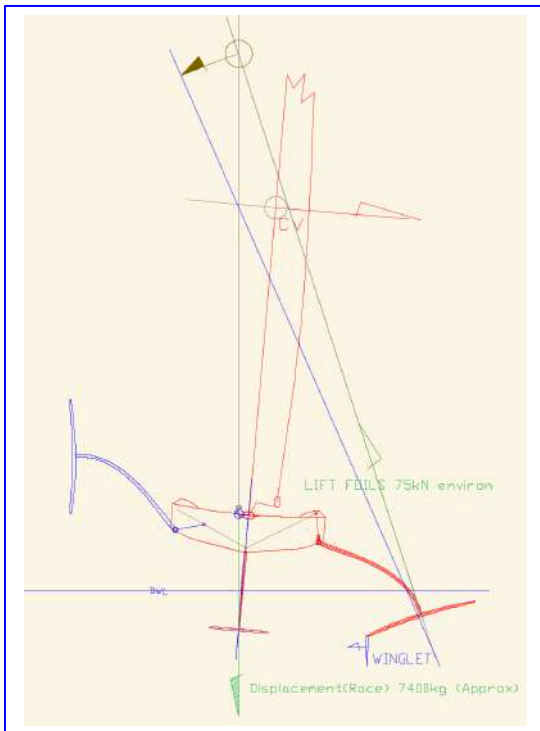
En fait les TEAMS vont travailler sur la conception des éléments suivant :

- a) La liaison entre le Bras et le Wing, sachant que c'est une liaison à 90° dans laquelle devront s'encastrent 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 a 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 ou 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 utilisé par le FCS sera suffisante pour couvrir une régaté.

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

- i. Uniquement avec les mains.... Donc plus de vélo sur le pont.
- ii. 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 régata 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 nœuds 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 régler 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'entretient.

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).

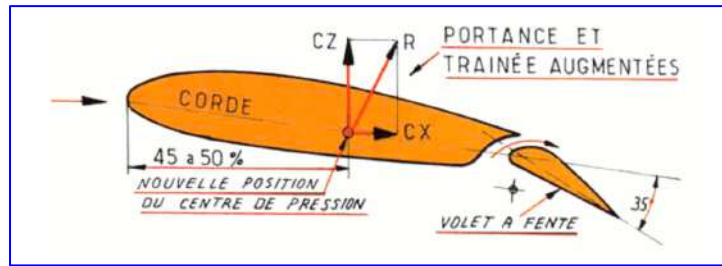
L'aviation a développé des centaines de modèles volets, dont la cinématique est de plus en plus complexe.

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

Ainsi le pilote agit 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 systèmes 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/RU781AJRIsQ>

<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