

Les Foils (Partie 2 Amplifiée –Avril 2016 -)

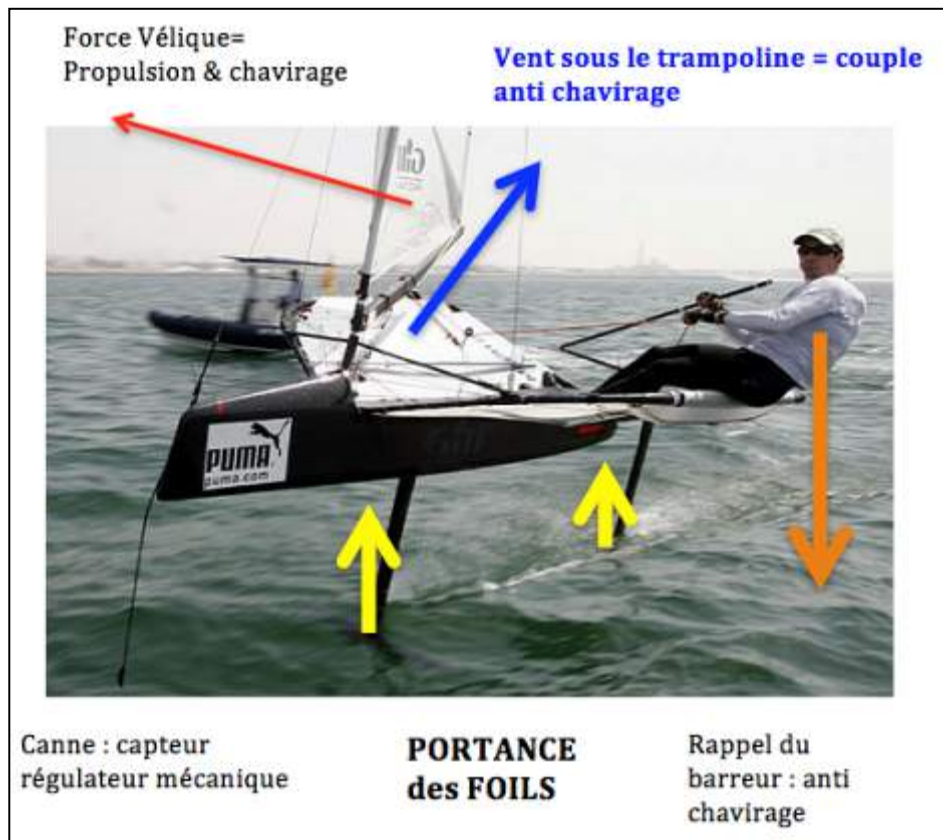
Dès que l'on parle de foils sur un voilier, on se met à rêver d'une coque en lévitation au dessus des flots...

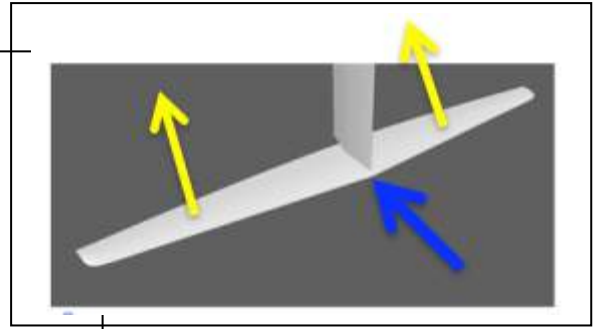
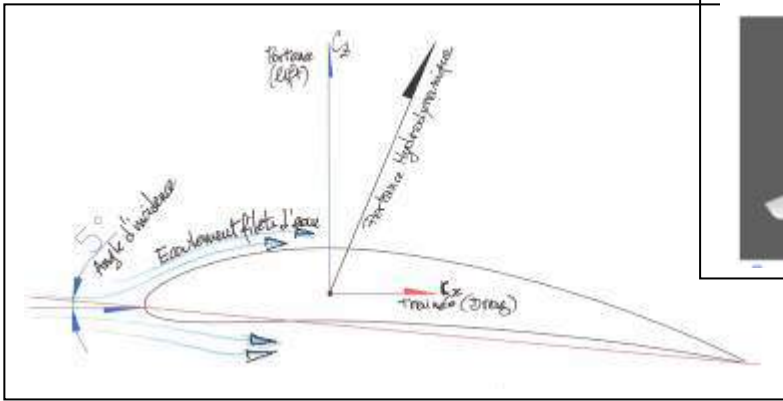
Si la phase vol, avec bien sur la phase préalable de décollage, est assez facile sur un multicoque, on comprend rapidement que c'est pratiquement impossible sur un monocoque lesté, surtout s'il est équipé d'une quille. Je pense que le MOTH est le seul monocoque qui vole réellement et qui peut régater, c'est à dire évoluer librement sur un parcours entre deux ou trois bouées.

Pour voler, il faut quitter le régime archimédien, donc soulever et extraire la carène de l'eau. Cela signifie qu'il faut créer une force verticale supérieure au poids du bateau et de son équipage en utilisant la portance générée par les foils.

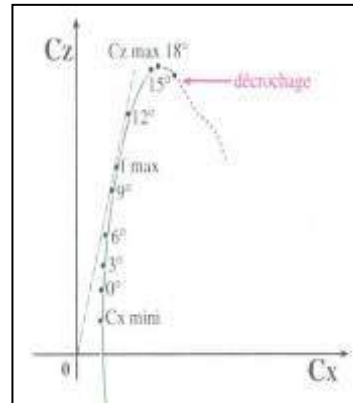
Je rappelle les caractéristiques de base d'un **Moth Foiler** : Longueur de Coque 3.55m, Surface de Voile : 8m², Poids gréé : 25 kg, Déplacement en navigation :15 kg avec un barreur de 80 kg et des extras, comme 5litres d'eau dans le bateau par exemple . Cela signifie que la force verticale est d'environ 60daN par foil en « T ». Le deux foils en « T » sont réglés mécaniquement (orientation d'un volet sur le bord de fuite), sans aucune énergie électrique. C'est une « vulgaire canne articulée » immergée à l'étrave qui traîne dans l'eau et assure cette fonction de régulation.

Le barreur est un funambule dont le comportement en navigation est plus proche de celui d'un surfeur que de celui d'un navigateur sur un bateau comme on l'entend communément. En comparaison, les utilisateurs de 49^{ers} font figure de « retraités de la marine ».





L'angle d'incidence est directement lié à l'assiette longitudinale du bateau. On voit que la fourchette est relativement étroite (6° à 12°).



Flèche bleue : la vitesse du fluide (directement liée à celle du bateau)

Flèche jaune : Portance aéro ou hydrodynamique générée par le foil.

La portance hydro se décompose en deux forces :

La poussée vers le haut (lift) (C_z ou R_z)

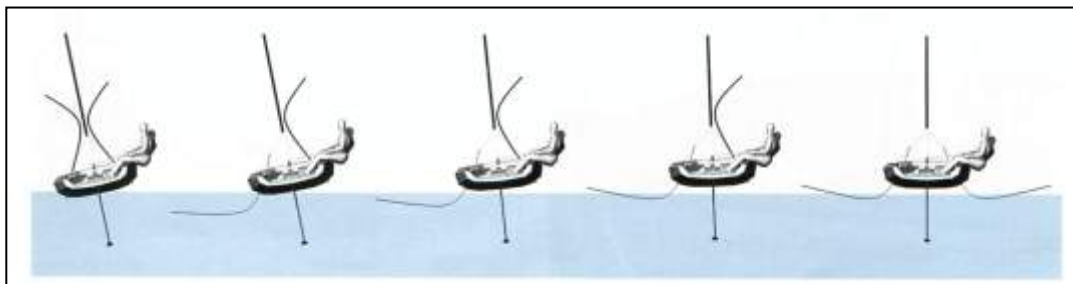
La trainée (C_x ou R_x) qui s'oppose au déplacement.

L'angle d'incidence du profil correspond à l'orientation du profil par rapport au filet d'eau. Le Lift maxi dépend de la forme du profil, et de l'angle d'incidence. Toutefois si on dépasse cet angle le décrochage brutal se produit (Lift = 0).

On voit que pour le lift maxi ($i=15^\circ$), le C_x (drag) est aussi maxi. Il faut donc rechercher l'incidence optimale qui correspond au ratio Lift/Draa le plus favorable.

Conclusion : le Moth vole, c'est une réalité, mais il est impossible de transposer ce « Vol » sur un monocoque même classé dans la catégorie « super light boat ».

Pourtant le QUANT 23, qui n'est pas exactement un monocoque¹, bien qu'il y ressemble, vole aussi.

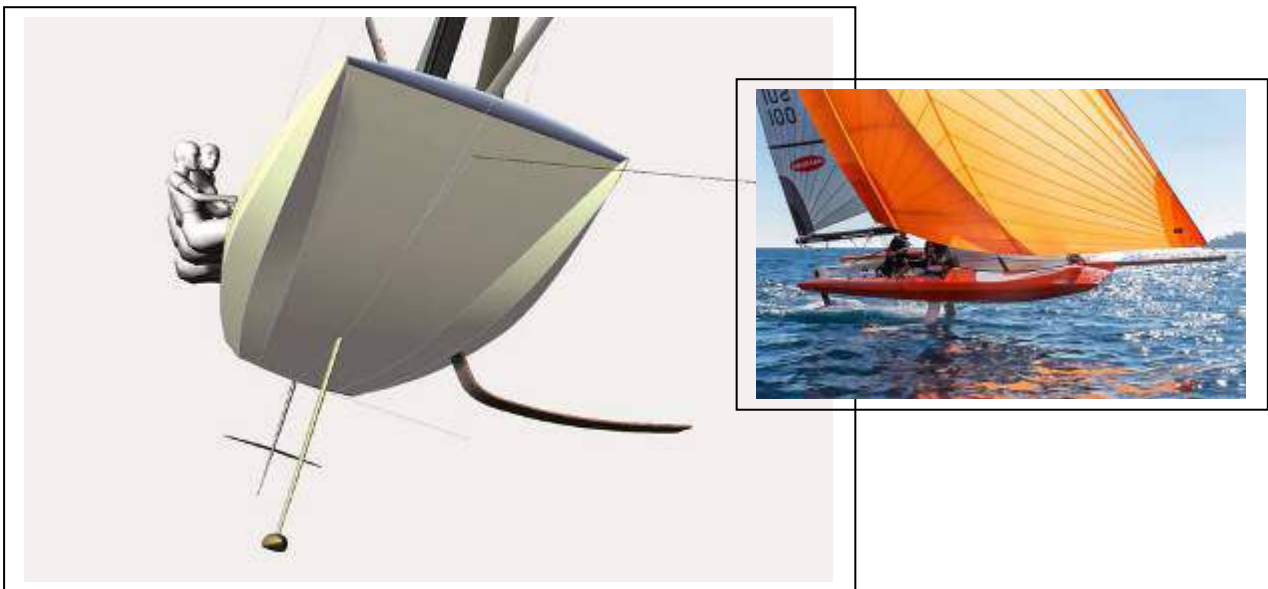


¹Un monocoque doit posséder une carène dont le creux ne diminue pas lorsque l'on se rapproche du plan de symétrie de la carène.



Différentes configurations des foils du QUANT 23.

En fait, le QUANT 23 possède une architecture de catamaran, comme le montre la vue ci-dessous :



L'architecture navale est quand même une science extraordinaire, car avec des matériaux plus performants que ceux de l'époque, les architectes auraient pu imaginer des foils et faire voler les scows.



Alors pourquoi des foils sur un quillard ?

Contrairement au Moth dont les deux foils se situent dans le plan de symétrie du bateau et soulèvent verticalement, tel un ascenseur, le bateau et son équipier ; sur un monocoque lesté, le foil quitte le plan de symétrie du bateau pour devenir un appendice latéral.

En fait l'action **des foils** sur un Moth est « symétrique » et proche du vol d'un avion (les deux ailes portent le fuselage).

Sur un Monocoque lesté, la portance **du foil** sera excentrée puisque le foil est latéral et unique.

Lorsque le foil est actif

La composante verticale (lift – en rouge ci-dessous-) créée, est toujours sensiblement verticale, et son point d'application est excentré par rapport au centre de carène du bateau. La configuration est donc:

- **Une force verticale qui soulève le bateau et donc diminue son déplacement relatif**
- **Un couple de redressement**, comme le fait l'équipage au rappel.
- **Un cabrage du bateau**
(L'assiette longitudinale augmente, l'étrave se soulève)

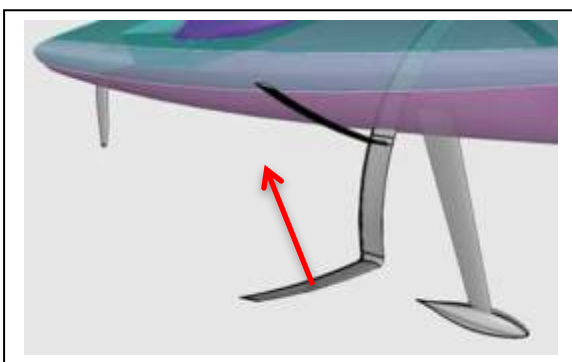
On peut penser que le gain de couple de redressement est primordial. Ce n'est pas le point le plus important, c'est même au final un gain marginal car il ne générera pratiquement pas de gain de vitesse.

L'événement physique le plus important, généré par le foil sera de soulever le bateau au dessus de sa flottaison archimédienne. Certes un IMOCA ou WILD OATS ne voleront pas entièrement au dessus des flots à l'image d'un MOTH, mais si le lift créé par le foil permet de diminuer le déplacement de 5% ou 10%, c'est l'aptitude à planer qui va augmenter : même surface de voile, moins de surface mouillée, moins de déplacement et un appui naturel du bateau sur ses formes arrière... comme au bon vieux temps du 505.

Les deux types de foils actuellement présent sur des monocoques, sont ceux conçus pour les IMOCA (dessin de gauche) et les foils transversaux, sensiblement horizontaux nommés « DSS » pour Dynamic Stability System.

Le foil « IMOCA »

La forme de cet appendice se présente comme un « L » orienté vers l'extérieur.



Foil déployé au vent, mais inactif

Position basse : **le foil est actif**

La complexité de la règle de jauge IMOCA est la cause du dessin complexe du foil. Cette complexité résulte d'une règle de classe qui limite le nombre d'appendices à 4.

Afin de respecter cette règles, les architectes regroupent sur un même appendice, **la fonction dérive² (partie verticale) et la fonction foil (partie horizontale)**, association inévitablement contradictoire.

Evaluation de la portance (flèche rouge ci-dessus) du foil :

$$P = \frac{1}{2} * \rho * C_z * S * V^2 = \text{Force en Newton}$$

Je rappelle que 10N = 1 daN = sensiblement 1 kg dans le langage courant.

V = vitesse du bateau en m/s, S= Surface du foil en m² = 1,20 m², ρ = masse volumique de l'eau en kg/m³ soit 1025 kg/m³ et Cz le coefficient de portance (0,3).

Portance (lift)	ρ	Cz	S m ²	V en Nœuds	V m/s	V ²
78 daN	1025	0.3	1.20	4	2.06	4.23
313 daN	1025	0.3	1.20	8	4.12	16.97
704 daN	1025	0.3	1.20	12	6.18	38.19
957 daN	1025	0.3	1.20	14	7.20	51.87

Une surface de 1.20 m² représente quand même un foil de 2.2m X 0.55m, ce qui est assez encombrant.

En supposant que l'on souhaite créer une architecture équivalente au **Moth**, sur un monocoque lesté, en utilisant 2 foils latéraux et un foil sur le safran (chaque foil faisant 1.2m²), au mieux, à 14 nœuds, on obtiendra une poussée verticale de 2871 daN.

On comprend pourquoi il est un peu utopique de penser qu'un monocoque lesté type IMOCA puisse « voler ».

J'ajoute que dans le petit temps, le foil est totalement inopérant, car la vitesse du bateau est trop faible pour générer une portance utilisable.

Par contre la dérive est indispensable et doit être en position basse. Ainsi le foil **se retrouve obligatoirement immergé et ainsi génère de la trainée parasite (frein).**

Le système DSS est « plus intelligent » car il se rétracte entièrement dans la coque et ainsi n'offre plus de trainée parasite lorsqu'il n'est pas utilisé.

le Foil IMOCA évoluant plus profondément n'est pas perturbé par l'effet de surface. En d'autre terme le fluide qui l'entoure est plus homogène (pas de bulles d'air qui perturbe l'écoulement) que dans le cas du DSS.



Si on revient à l'IRC, la règle de jauge est beaucoup plus ouverte, dans le sens où elle n'interdit aucun type ou nombre d'appendices. Il est donc possible d'avoir sur un même bateau, deux safrans, une quille pendulaire, une dérive et deux foils latéraux. La seule « contrainte » sera le prix à payer³ en terme de taxation du TCC.

Quel gain ?

C'est la seule question que le propriétaire ou le skipper se pose, qu'est ce qu'un (ou plusieurs) foil peut apporter en terme de gain de performance sur un bateau

²La quille pendulaire nécessite que le bateau soit équipé d'une ou deux dérives.

³Mais aussi pour la conception et la fabrication des foils.

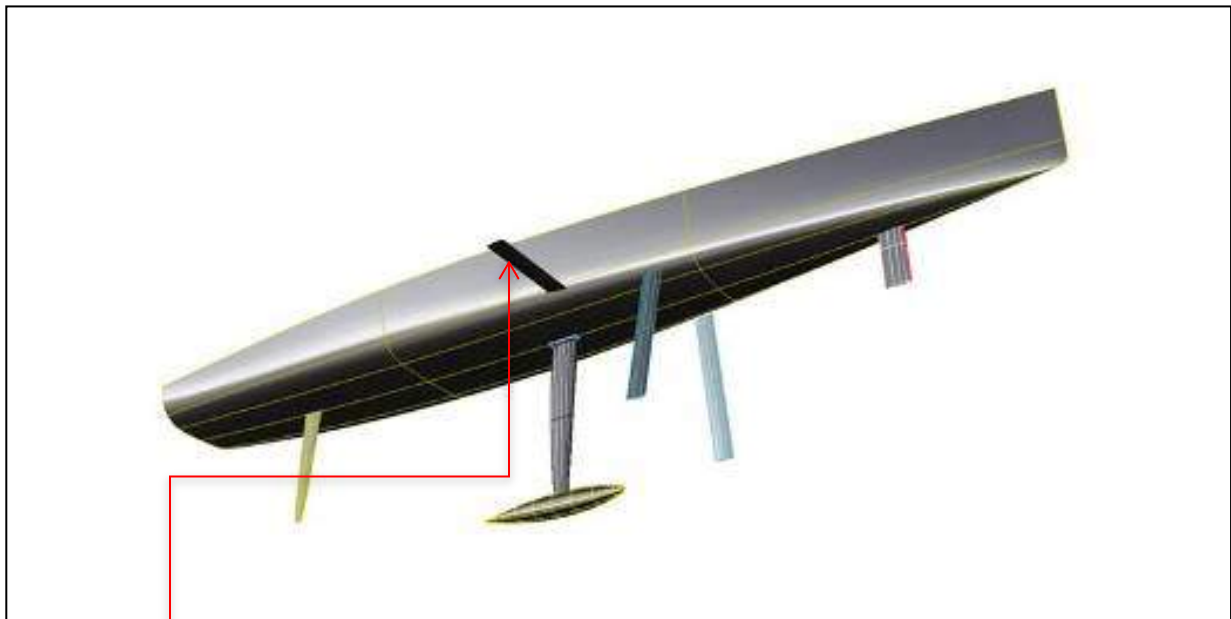
- Lorsque le foil est actif c'est à dire que la vitesse du bateau est telle qu'elle produit suffisamment de portance sur le foil, cette portance génère une force verticale (Lift)
- En contrepartie, le foil comme tout profil hydrodynamique immergé, génère de la trainée (drag) et donc freine le bateau. Il y aura donc un compromis **Lift / Trainée** à prendre en compte.
- Le foil permet d'augmenter le cabrage du bateau aux allures portantes principalement pour les bateaux équipés de spinnakers asymétriques.

En matière de foil, il faut aussi prendre en considération la carène.

Les DSS ou équivalent carène assez étroite. Je me souviens des runs sous spi asymétriques en Melges 24 avec 30/35 nds de Mistral tout l'équipage agglutiné dans le balcon arrière pour éviter l'enfournement. On peut constater que sur des carènes dessinées par les mêmes architectes, le phénomène est identique (photo : le 100 pieds australien Wild Oats XI).



Il y a deux configurations de navigation sur ce maxi : avec ou sans foil (La photos de droite ci-dessus ne signifient pas qu'il y a un DSS)



Foil « DSS »

Le DSS sous le vent cabre le bateau. Il réduit l'asymétrie de la carène, soulève le bateau ET fait déjauger,


On va voir que le foil va « alléger le bateau ».


Dans ces conditions, le gain de vitesse obtenu à voile constante est notable. Le rapport Déplacement / longueur est plus favorable et l'assiette longitudinale est meilleure. Ce gain de vitesse permet de sacrifier quelques dixièmes de nœuds à la trainée générée par le foil.


Equilibre du bateau sous l'effet d'un foil latéral

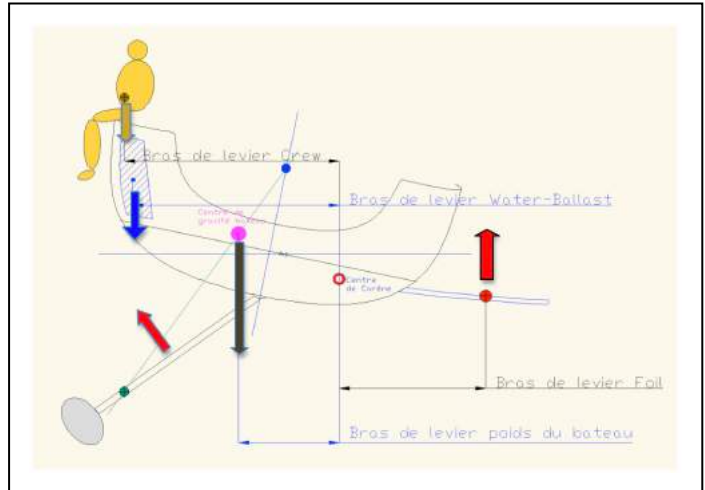
Les FORCES en présence :

Le bilan se décompose comme suit :

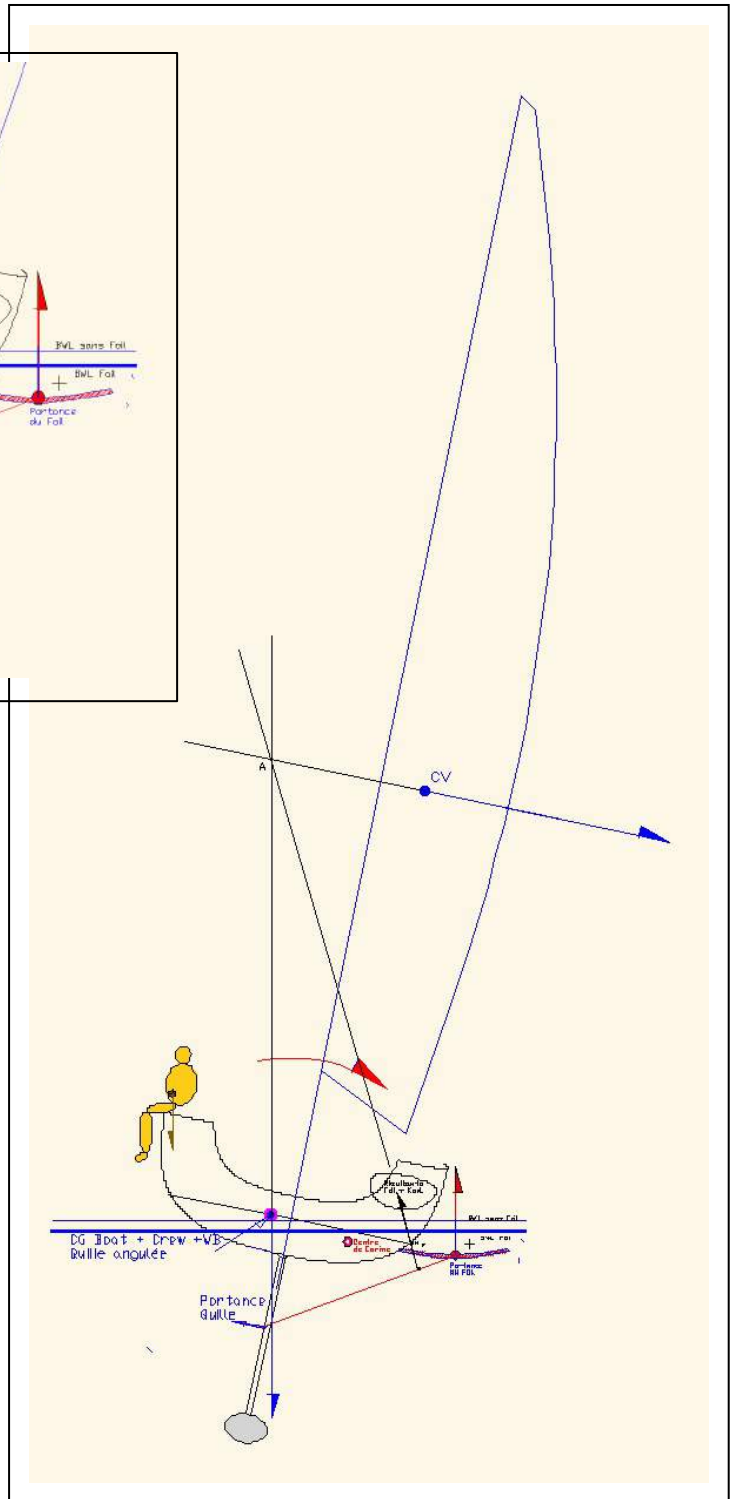
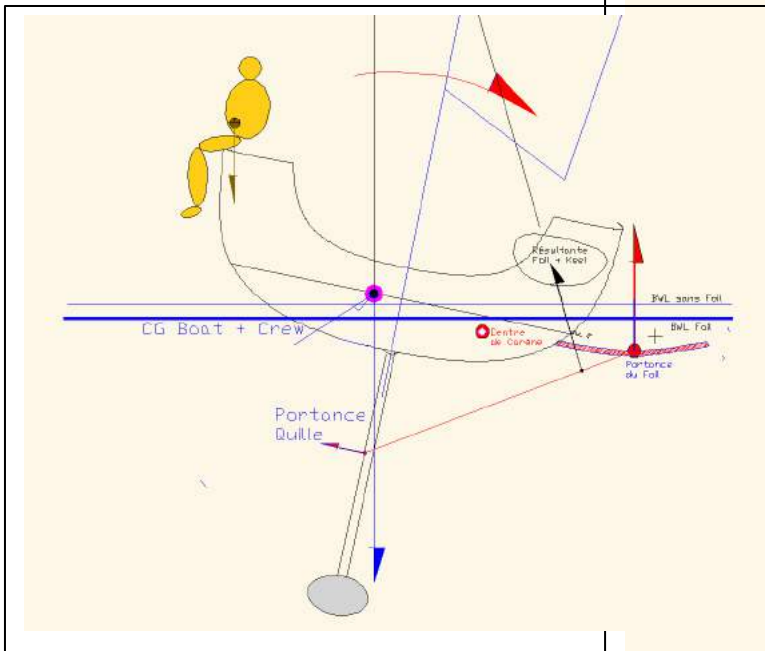
 Les forces liées à la gravité, elles sont dirigées vers le bas :
Crew, Water Ballast,
Poids du bateau.

 Les forces hydrodynamiques : elles sont plus ou moins dirigées vers le haut, elle résulte de l'effet de portance des appendices (Keel, Foil, Safran)

 Les forces véliques
(aérodynamiques) non représentées.






En prenant l'exemple d'un voilier à quille fixe en navigation, on obtient l'équilibre subtil suivant:



Les forces liées à la gravité enfoncent le bateau, et créent le déplacement archimédien. Les forces hydrodynamiques se composent en une seule force qui sera dirigée vers le haut, donc opposée aux forces gravitationnelles.

Ainsi le bateau va se comporter comme l'avion lorsqu'il atteint la vitesse « $V1$ » et « décoller ». Sur le MOTH se sera un réel décollage, puisque la carène « flotte dans l'air », pour le monocoque, l'effet sera plus modeste, mais le déplacement va de fait diminuer ? Comme le montre le dessin la DWL « baisse ».

L'équilibre final du bateau sera celui d'un corps soumis à trois forces :

-  Force vélique (voiles)
-  Force gravitationnelle (poids du bateau)
-  Force hydrodynamique (Foil et Keel et Safran(s))

Pour que le bateau soit en équilibre, ces trois forces sont concourantes (point A).

Le « DSS » soulève (de 5 à 10%) le bateau, car sa portance s'ajoute à celle de quille (vecteurs) et la résultante de ces 2 forces passe par l'intersection du déplacement et de la force vélique.

Il faut remarquer que si il y a un Canting Keel, la portance de la quille se déplace au vent (sous l'équipage au rappel) et ainsi la résultante se rapproche du centre de carène (bateau gité à 15 ou 20°).

Conséquence: le Bras de levier diminue et le RM généré par le foil devient très faible.

Donc seule la poussée vers le haut est active et « sort le bateau de l'eau ».

On comprend que le couple de redressement apporté par le Foil est secondaire.

Exemple : Evaluation de l'évolution du Ratio Déplacement / Longueur en unités homogènes sur un voilier de 53', dont le DSPL est de 8800 kg et LFLOT= 16 mètres.

Reprenons le calcul de la portance du foil à 14 nœuds :

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

V : vitesse en m/s (7,2 m/s, 14 Nds),

S : Surface du foil en m² (1,21 m² dans le cas présent : 2.2 X 0.55m)

ρ : masse volumique de l'eau en kg/m³(1025 kg/m³),

Cz : = coefficient de portance (0,35).

On obtient P = 11251 Newtons soit 1125 daN (approximativement 1150 kg).

En prenant 9000 kg (8800 daN) comme base du déplacement IRC du bateau avec son équipage et son armement, on peut déduire :

$$100 * DLR = 9000 / 16^3 = 219$$

En prenant en compte un lift qui soulage le bateau de 1000 kg, ce ratio devient :

$$100 * DLR = 8000 / 16^3 = 195$$

Soit un gain de 12.3 % de potentiel de vitesse.

Pour s'en convaincre imaginons qu'au portant, il soit possible d'alléger le bateau de 1 Tonne !!! et aussi de diminuer la surface mouillée etc...

Un point délicat se situe dans le contrôle du TRIM longitudinal. A moins d'avoir des usines à gaz destinées à régler l'angle d'incidence en fonction de l'assiette du bateau, comme c'est le cas des anciens AC 72, des nouveaux AC45 et des CG 32, il faut déplacer longitudinalement le poids de l'équipage pour ajuster l'angle d'incidence. C'est souvent la solution employée sur un monocoque, mais elle manque de souplesse et de finesse d'ajustement.

Un pré réglage du plan porteur pour le largue dès la stratification et possible mais, ce pré réglage ne sera pas optimum pour la navigation au près.

Mais d'autres difficultés risquent d'apparaître.


En régate, il est certes intéressant d'augmenter sa vitesse mais l'équilibre du bateau étant liée étroitement aux performances hydrodynamiques du foil, qui par essence est un appendice relativement instable, il y aura des « pit stop » violents donc des pics d'efforts nouveaux sur le gréement, les voiles, la coque.


Il ne faut pas oublier que la portance du foil est liée au carré de la vitesse du bateau.

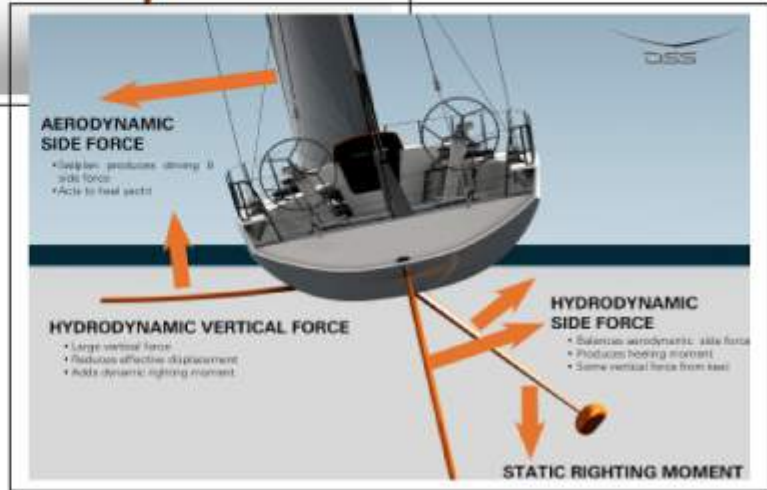
En régime « vol » c'est à dire en régime stabilisé, tout ira bien, mais en cas de décrochage, attention aux dégâts.

La finesse du pilotage, comme celle de l'assiette générale du bateau deviennent très primordiales.

Les mouvements incontrôlables du bateau à cause des vagues risquent aussi de perturber le « vol »:

 L'angle d'incidence passe au dessus du foil. La portance hydrodynamique s'inverse et cela se traduit immédiatement par un violent enfournement et un stop brutal.

 L'angle d'incidence dépasse les 15°. Le foil décroche instantanément, c'est sûrement un peu moins pire que dans le cas précédent, mais il est certain que les performances attendues ne sont plus au rendez-vous.



INFINITI 53

Quel avenir ?

La règle IRC n'est pas une jauge basée sur les performances effectives des bateaux à chacune des allures, mais sur les paramètres et équipements susceptibles d'être à un moment donné des facteurs de vitesse, propres à chaque bateau.

Les foils sont des équipements qui augmenteront les performances, dans certaines conditions d'allures et de vent, comme c'est le cas pour la quille pendulaire, des ballasts latéraux, la grand-voile à corne, du gréement réglable en tension, le mat carbone, etc.

Il ne faut oublier que la taxation inhérente à l'installation d'un foil est appliquée même lorsque le foil reste dans sa boîte à malice et donc n'est pas utilisé.

Alors on « transporte » des millièmes pour rien du tout.

Il faut se rappeler que les Water Ballasts sont historiquement apparus il y a plusieurs décennies avec Pen Duick V, puis sur les Mini-Transat, les IMOCA, les Figaro et les VOR mais aussi sur quelques IRC. Les quilles pendulaires ont remplacés rapidement les Water Ballast. Ces Water-Ballasts ont alors été affectés, au contrôle de l'assiette longitudinale du bateau et à l'augmentation de l'inertie.

L'introduction des Foils⁴, en régate en monocoque (IRC par exemple), nécessitera d'intégrer dans le calcul du handicap la diminution du déplacement en navigation.

C'est quand même une petite révolution.

Une combinaison des 3 systèmes existe déjà sur quelques rares bateaux IRC, pour le moment tout cela reste embryonnaire.

Mais les idées flottent déjà dans certains cabinets d'architectes qui officient en IRC, tout est à construire, à inventer et à oser.

Jean SANS
Avril 2016

⁴ Si on peut parler de nouveauté, pour des équipements qui ont été expérimentés dès la fin du 19^{ème} siècle (et oui), comme par exemple sur le canot à moteur de FORLANINI (40 Nds sur le lac majeur),