



Les FOILS et la Jauge IRC (vaste débat qui commence au début des années 2000)

Tout s'est déclenché avec les premiers foils sur les IMOCA, sur un MOTH prêt à appareiller (décoller) depuis la plage de Kernevel à Lorient, et la demande à la Jauge IRC de WILD OATS XI (Plan REICHEL-PUCH) qui était nouvellement équipé d'un « Foils type DSS ». Ce dernier bateau m'interrogeait un peu puisque le bureau de design qui l'avait créé avait aussi dessiné le MELGES 24, dont j'ai été un des très nombreux propriétaires et régatiers pendant 10 ans.

J'avais aussi côtoyé Alain THEBAULT, dans les années 2005/2006 lors du refit de son HYDROPTERE au Chantier de l'Atlantique et à la Trinité sur Mer. Mais à cette époque l'HYDROPTERE représentait un prototype, certes impressionnant par sa vitesse, mais dont il était très difficile d'imaginer une évolution vers un multicoque océanique foiler et encore moins vers un monocoque foiler.

Le Moth a été le premier un voilier Foiler à régater (début années 2000), entièrement sustenté au-dessus de l'eau. C'est sous l'impulsion d'un jeune Australien, Rohan Veal, que des foils ont été adaptés sur les carènes de Moth et qu'un système de réglages très rustique mais efficace de l'incidence du foil central permettait à ces bateaux de voler sur l'ensemble d'un parcours de régate, sans aucune autre énergie que celle du vent et de la mer. Le tout à une vitesse impressionnante (plus de 18/20 à 25 nœuds).

De l'épopée Course Open, il y avait eu des tentatives, sinon de voler mais au moins d'augmenter la puissance disponible, c'est-à-dire le Moment de Redressement (RM) en implantant des foils sous le flotteur sous le vent des trimarans.

Alain Labbé associé à Loïc Caradec équipe ainsi chaque flotteur de son trimaran HYDROPHOLIE d'un foil incliné escamotable. De mémoire le système mécanique utilisait des vérins de suspension de DS Citroën.

Sylvestre Langevin, architecte naval (catamaran ELF AQUITAINESkipp   par Marc Pajot, vainqueur de la 2  meRoute du Rhum en 1982)   quipe les coques latérales de certains trimarans de foils en Y inversés.



A la fin de années 2000, les matériaux aidants, principalement le carbone, les trimarans ORMA s'équiperont progressivement de dérives inclinées implantées sur les flotteurs, puis vers les dérives courbes à profil asymétriques équipées de winglets et d'un système de calage (Rake) variable (ce qui les transformait en « foils »).

Afin de ne pas autoriser les évolutions vers des multicoques « volants », la Classe ORMA bloque leurs effets sustentateurs en limitant leur surface projetée. Il est intéressant de constater que les navires motorisés équipés de foils ont été des monocoques alors que les essais de foils sur des navires à propulsion vélique l'ont été sur des multicoques, et à de très rares exceptions près sur des monocoques non lestés.

De ces réflexions j'ai publié plusieurs études relatives aux foils adaptés sur différents bateaux.

Voir en fin de cette introduction les 2 documents :

- **Les FOILS en Architecture Navale**
- **Les FOILS sur différents monocoques véliques**

L'IRC, système de Jauge de monocoques    caractère hauturier, a rapidement compris que l'étude de l'impact de ces surfaces sustentatrices sur la vélocité des monocoques lestés (Keelboat) devenait nécessaire.

Dans un premier temps, une méthodologie a été mis au point afin de taxer ces équipements en fonction de leurs surfaces et du voilier sur lequel ils étaient installés.

Les bateaux IRC étant typiquement archimédiens lestés, il était peu probable que les applications de foils que l'on voyait, par exemple sur les MOTH, soient transposables sur ces monocoques. Tout au plus, sur un monocoque lesté, les foils augmentent le Moment de Redressement (RM) et ouvrent la voie à un domaine relativement étroit de survitesse qui dépassait le planning déjà connu.

La présentation des nouveaux bateaux de l'AMERICA CUP ébranle ces certitudes, malgré le caractère très particulier de ces monocoques. Ce constat nous a amené à évoquer l'éligibilité en IRC des bateaux équipés de surfaces sustentatrices autres que la carène. En d'autres mots, les algorithmes de la jauge IRC étant basés, pour l'essentiel, sur les équations hydrostatiques et l'écoulement de l'eau autour des œuvres vives et des appendices, ces algorithmes devenaient inapplicables à des bateaux qui volent intégralement. Un Foiler se déplace dans le domaine de Vol « aérodynamique » dans un fluide qui est l'eau. Ce qui est totalement différent. Il n'existe pas de passerelle possible pour rattacher les deux environnements.

Il a donc été nécessaire de légiférer.

A lire en fin de cette introduction :

- **L'ÉLIGIBILITÉ des FOILS en Jauge IRC**

De l'utilisation des FOILS en architecture navale

Jean SANS

1^{ère} Partie

Depuis des lustres on a imaginé utiliser des foils porteurs sur les bateaux dans le but de sortir la coque hors de l'eau et ainsi réduire la résistance à l'avancement de la coque.

Les travaux sur les ailes d'avions, donc sur la portance, ont montré que la portance d'une aile est proportionnelle à sa surface alaire et au carré de sa vitesse de déplacement¹. De là, l'idée d'installer des « ailes sous-marines » (Foils) sur un navire a vite effleuré l'esprit des ingénieurs et des architectes navals.

La lecture de la formule de la portance ...

$$F_z = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot S \cdot C_z$$

F_z : portance (en Newton),
ρ : masse volumique du fluide (en kg/m³),
V : vitesse (en m/s)
S : surface de référence (en m²)
C_z : coefficient de portance

... montre qu'à fluide (eau de mer dans notre cas), surface (S) et forme (C_z) du foil identiques, la portance est 4 fois plus grande à 16 nœuds qu'à 8 nœuds (V est exprimé en m/s).

La difficulté première pour un navire sera d'atteindre une vitesse qui générera suffisamment de portance pour soulever la coque hors de l'eau. Ajoutons que pour compliquer les choses, contrairement à un avion, un navire change de milieu conceptuel entre le moment où il flotte (il est alors « Archimédien ») et le moment où il vole lorsqu'il est en appui sur ses foils et que sa coque ne touche plus l'eau. En fait c'est encore plus compliqué que cela.

Pour un navire motorisé, c'est presque trop simple. Il suffit d'avoir une vitesse de propulsion (moteur + hélice) pour que la surface active, associée à un profil adéquat du foil, génère une force ascensionnelle (portance) supérieure à la masse du bateau. Ainsi la coque du bateau sort de l'eau.



Dans ces conditions, la carène n'a plus de fonction « archimédienne », elle sert uniquement de « contenant » (passagers, moteur, carburant etc).

Le navire se comporte comme un avion, puisqu'il est « porté par ses ailes », les foils. Il est facile de comprendre que la vitesse du navire augmente au fur et à mesure que la coque sort de l'eau. Il n'y a plus de centre de carène. L'équilibre étant fonction de la position relative entre le centre de gravité du navire et la résultante de la portance des différents foils. Cet équilibre se gère comme sur un avion avec des gouvernes.

Sur un voilier c'est beaucoup plus compliqué car la propulsion longitudinale n'est plus obtenue par une hélice mais par un ensemble de voiles. Cette propulsion vélique va introduire un paramètre complexe : le couple de chavirement. En fait la force propulsive possède une composante latérale qu'il va falloir gérer : la composante parallèle à l'axe du voilier fournissant la vitesse du voilier.

¹ La forme du profil, l'environnement, l'incidence ont aussi une influence.

On peut classer les voiliers en deux types :

- 1) Les multicoques pour lesquels c'est la géométrie de la plateforme qui permet de contrecarrer le couple de chavirage.
- 2) Les monocoques pour lesquels c'est le couple généré par le produit du déplacement par la distance entre le centre de gravité et le centre de carène qui va s'opposer au couple de chavirement.

Dans cette catégorie il y a deux familles de voiliers :

- a) les dinghies pour lesquels le poids de l'équipage est important et crée le couple qui s'oppose au chavirement.
- b) les voiliers à déplacement, dessinés avec des lests plus ou moins lourds. Dans ce cas c'est la masse du lest qui contribue pour une grande part au couple qui s'oppose au chavirement.



Sur le Moth on comprend très bien que le déport de barreur, donc de sa masse (flèche rouge), et de la distance sensiblement horizontale (flèche bleue) entre sa position et le centre de portance du foil, génère le couple qui empêche de chavirer.



Sur le catamaran (AC72), ce sont les foils sous le vent qui servent de pivot au couple de chavirement. Le centre de gravité de l'AC72 est sensiblement entre le pied de mat et la coque au vent. La masse de l'équipage déplace un peu le centre de gravité de la plateforme et du gréement qui est pas définie dans le plan de symétrie du catamaran.

Dans ces deux cas, la surface de la dérive ou la partie verticale du foil encore immergée, combinée avec l'augmentation de vitesse suffit à générer une force antidérive suffisante pour réaliser des performances correctes au près.

Pour un voilier monocoque à déplacement les choses se compliquent car si on veut de la puissance (P) il faut de la surface de voilure afin de générer de la force propulsive ($P = F * V$). Et rien n'étant jamais gratuit, la force propulsive créée par la voilure va produire évidemment une force dans l'axe du voilier, celle qui donne la vitesse, mais aussi une force non négligeable qui va vouloir faire chavirer le voilier !

Pour contrecarrer ce couple de chavirage et de faire augmenter la puissance, l'architecte va déplacer le centre de gravité du voilier en utilisant une quille pendulaire souvent accompagnée de ballasts liquides. Pour ajouter à la complexité du problème, l'utilisation d'une quille pendulaire diminue la surface antidérive, ce qui oblige à mettre en place des dérives.

L'équation commence à être compliquée pour installer des foils. On comprend facilement qu'extraire entièrement la coque de l'eau, comme le fait le Moth, est sûrement impossible pour un monocoque à déplacement si on souhaite que les performances au près soient correctes, de plus en prenant l'exemple d'un IMOCA, le tirant d'eau est de 4.5 mètres.

Des essais réels ont été réalisés il y a pas mal d'années, en utilisant des foils assemblés au bout d'un bras transversal.



Ce prototype est un dinghy, ses performances en régime archimédien sont sûrement très faibles (pas de quille ou de dérive).

Si on fait le bilan, pour un monocoque lesté, imaginer sustenter entièrement le monocoque sur deux foils principaux et le safran (3 points) est illusoire. Alors pourquoi utiliser des foils ? Pour améliorer les performances de trois manières :

- augmenter, en plus du travail de la quille pendulaire, le couple qui s'oppose au chavirement... Ce qui revient à augmenter la puissance², donc in fine la vitesse.
- Soulager la carène c'est à dire la sustenter vers le haut, ce qui revient à diminuer la surface mouillée... Et donc d'augmenter la vitesse à puissance identique
- Créer de la portance antidérive en plus de la portance verticale de manière à supprimer les dérives transversales. Cette portance antidérive dépend du dessin du foil.
-

Il est évident que la conception d'un foil qui remplit ces 3 fonctions ne sera pas une entreprise simple. Comme il est évident que les performances finales seront bien moins spectaculaires pour un monocoque à déplacement que pour un vrai foiler qui passe du régime archimédien à un régime de vol, entièrement sustenté.



Les performances annoncées et les simulations réalisées pour un IMOCA prévoient un gain de 5 jours sur le Vendée-Globe. Rapporté au dernier Vendée-Globe (28600 milles parcourus en 78J 2H, soit une moyenne de 15.3 nds) cela conduirait à boucler le Tour du Monde en 73J 2H. Sur la base d'une distance parcourue identique, la moyenne passerait à 16,3 nds. Calculs éminemment théoriques, je le concède.

En 2013 et 2014, une expérimentation a été réalisée sur WILD OATS XI (Foil DSS). Techniquement la mise en place n'a entraîné de désordre. Toutefois WO est un voilier totalement différent des IMOCA. C'est un voilier de 100', étroit (BAU 5.91m), de 32 tonnes de déplacement.

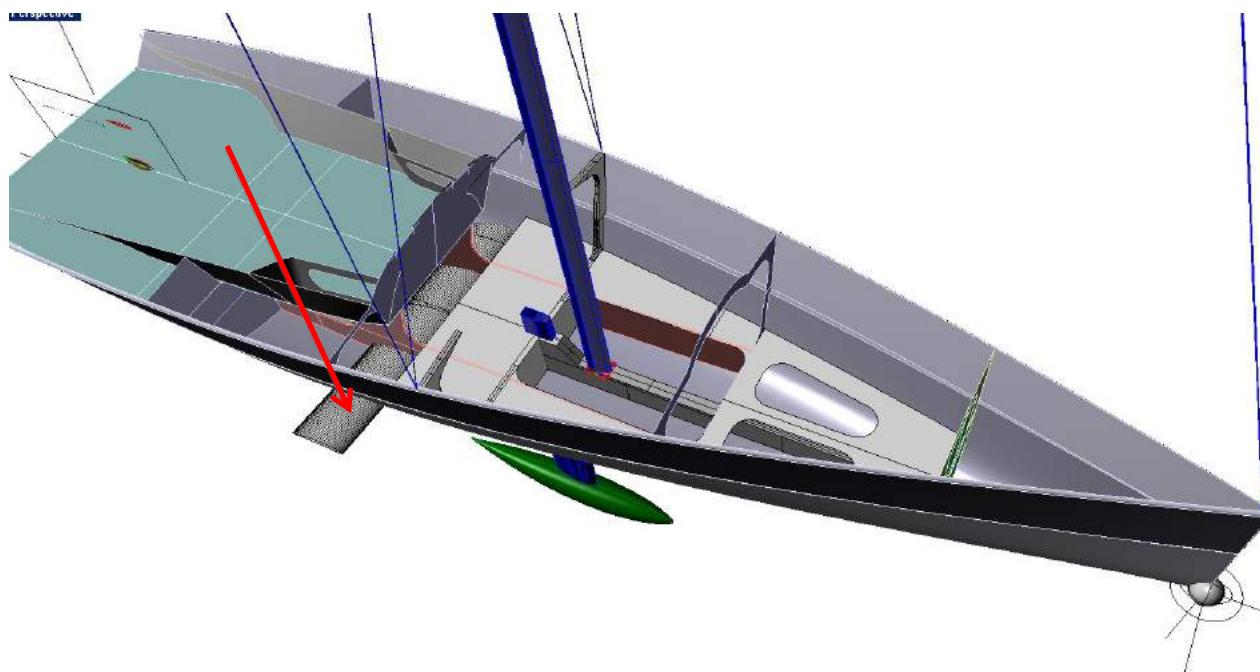
² A surface de voile identique, la puissance augmente aussi si on réduit l'angle de gîte du bateau.

Le foil est latéral, sa principale fonction est d'accroître le couple de redressement. La fonction sustentation paraît minimale quand on voit la position très reculée du foil. Elle permet toutefois de déjauger la carène.



Cette carène de REICHEL-PUGH est de la même famille que le MELGES 24 (mêmes architectes) et un des points forts du MELGES était de se cabrer au portant sous spi asymétrique par 30 nds de vent. Le foil doit très bien remplir cette fonction.

Ci-dessous une application DDS sur un racer-cruiser. Notons que la jauge IRC autorise les foils. Elle les taxe en conséquence mais ne les pénalise pas.



Force est de constater que la conception des foils sur un monocoque à déplacement n'a pas la même finalité que sur un « foiler pur », dont le but est d'équiper un voilier de foils assurant une sustentation totale afin de sortir du régime archimédien et passer en régime « vol ».

Pour autant il ne faut pas rejeter cette technologie, elle évoluera avec les différents essais. Elle dépend aussi des recherches sur les formes de foils et aussi sur le pilotage de l'incidence. La technique du Moth, très « agricole » mais d'une fiabilité et d'une efficacité à toute épreuve, est très peu transposable sur un monocoque de 12, 14, 20 ou 30 m !

Les Foils (Partie 2 Amplifiée –Avril 2016 -)

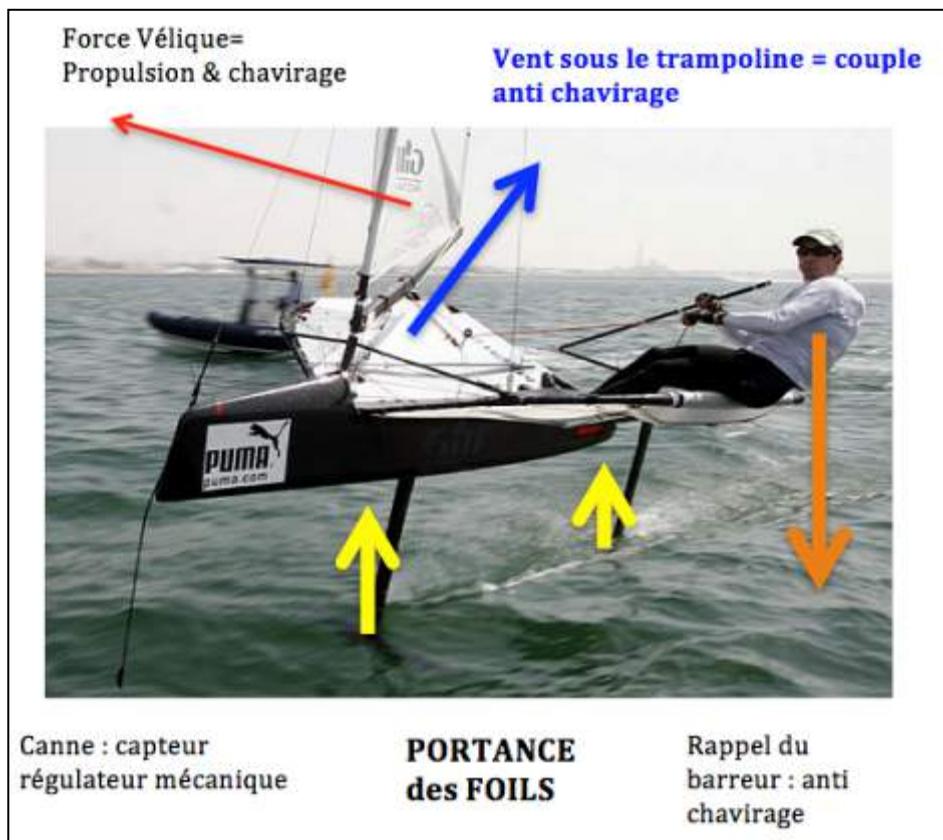
Dès que l'on parle de foils sur un voilier, on se met à rêver d'une coque en lévitation au dessus des flots...

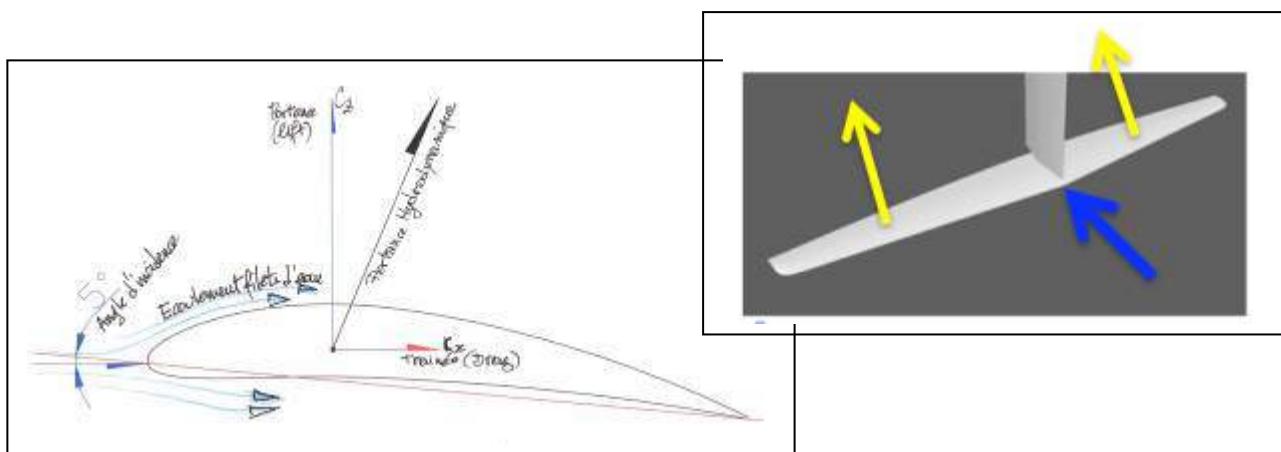
Si la phase vol, avec bien sur la phase préalable de décollage, est assez facile sur un multicoque, on comprend rapidement que c'est pratiquement impossible sur un monocoque lesté, surtout s'il est équipé d'une quille. Je pense que le MOTH est le seul monocoque qui vole réellement et qui peut régater,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

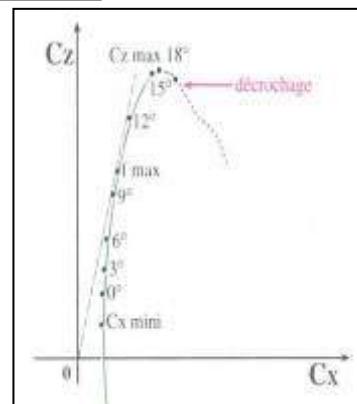
Je rappelle les caractéristiques de base d'un **Moth Foiler** : Longueur de Coque 3.55m, Surface de Voile : 8m², Poids gréé : 25 kg, Déplacement en navigation : 15 kg avec un barreur de 80 kg et des extras, comme 5litres d'eau dans le bateau par exemple . Cela signifie que la force verticale est d'environ 60daN par foil en « T ». Le deux foils en « T » sont régulés 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 :

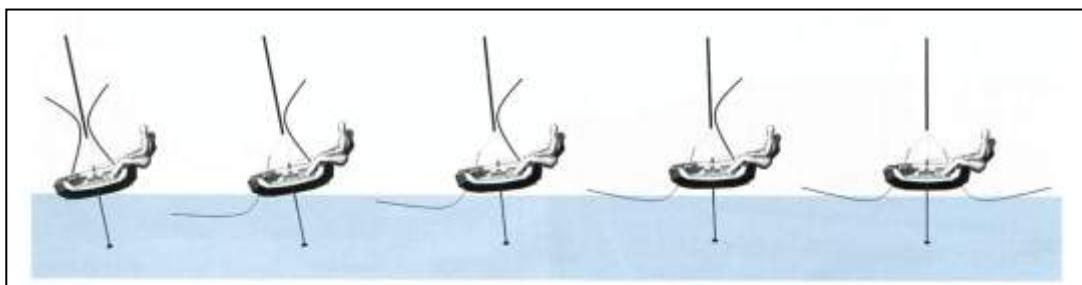
- La poussée vers le haut (lift) (Cz ou Rz)
- La trainée (Drag Cx ou Rx) qui s'oppose au déplacement.

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 Cx (drag) est aussi maxi. Il faut donc rechercher l'incidence optimale qui correspond au ratio Lift/Drag 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.

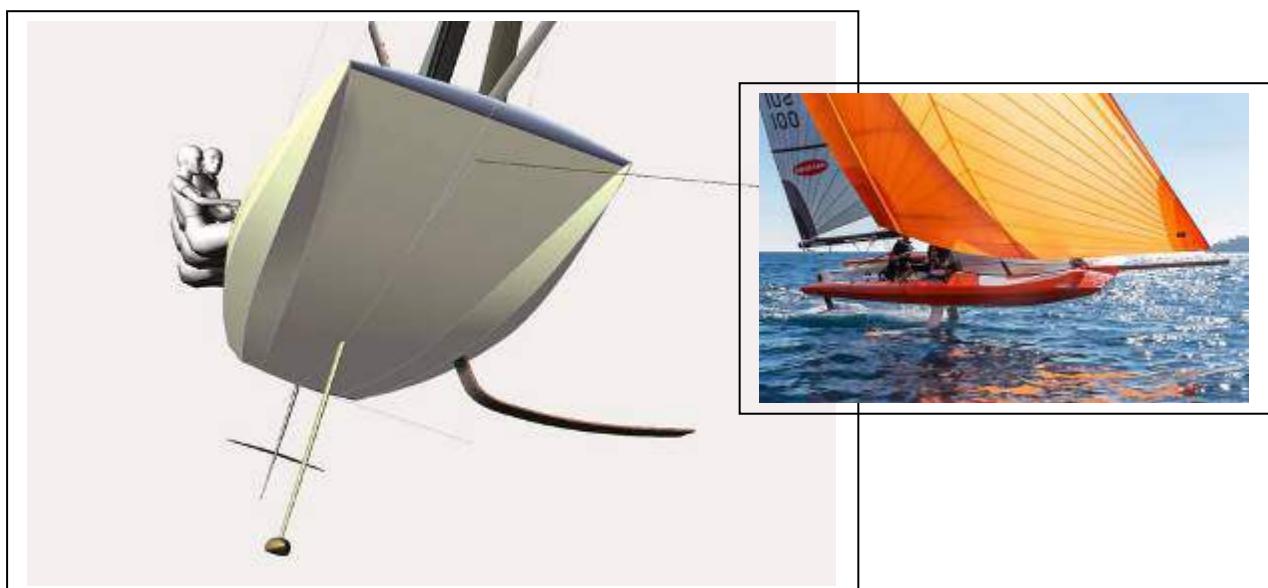


¹Un monocoque doit posséder une carène dont le creux ne diminue pas lorsque l'on se rapproche du plan de symétrie de la carène.



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)

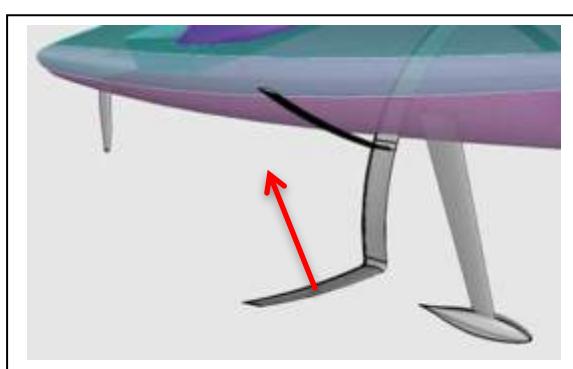
On peut penser que le gain de couple de redressement est primordial. Ce n'est pas le point le plus important, c'est même au final un gain marginal car il ne générera pratiquement pas de gain de vitesse.

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 :

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

Je rappelle que $10N = 1 \text{ daN} = \text{sensiblement } 1 \text{ kg dans le langage courant.}$

$V = \text{vitesse du bateau en m/s}$, $S = \text{Surface du foil en m}^2 = 1,20 \text{ m}^2$, $\rho = \text{masse volumique de l'eau en kg/m}^3$ soit 1025 kg/m^3 et Cz le coefficient de portance (0,3).

| Portance (lift) | ρ | Cz | $S \text{ m}^2$ | $V \text{ en Nœuds}$ | $V \text{ m/s}$ | 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 m^2 représente quand même un foil de $2.2\text{m} \times 0.55\text{m}$, 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 1.2m^2), 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'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.

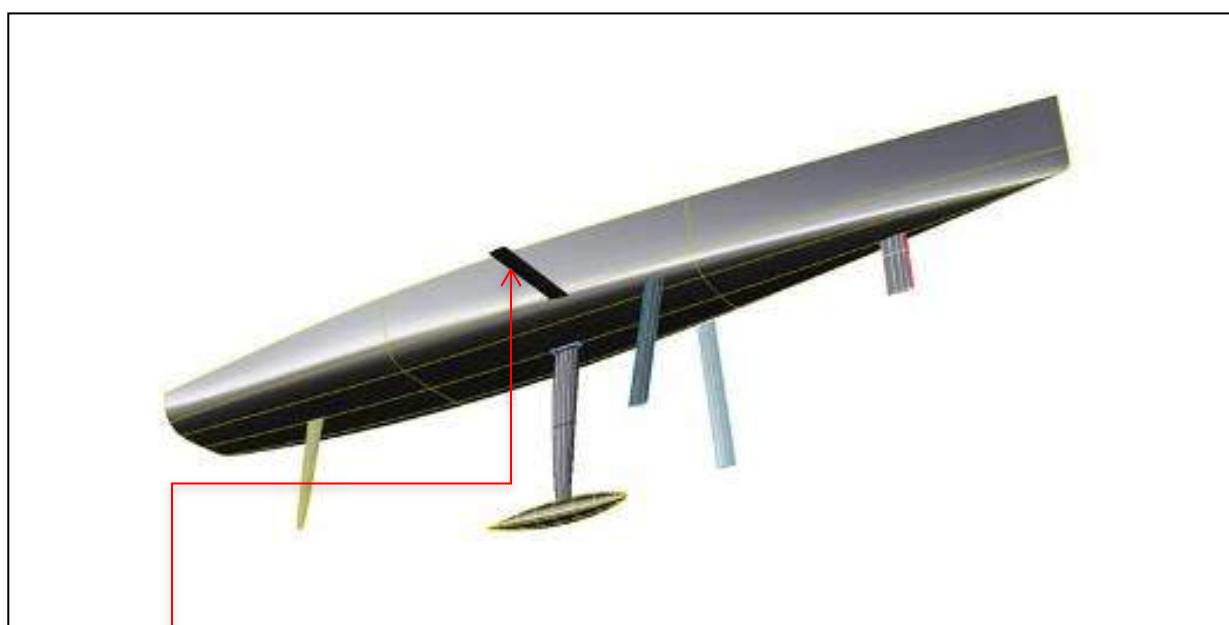
- Lorsque le foil est actif c'est à dire que la vitesse du bateau est telle qu'elle produit suffisamment de portance sur le foil, cette portance génère une force verticale (Lift)
- En contrepartie, le foil comme tout profil hydrodynamique immergé, génère de la trainée (drag) et donc freine le bateau. 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 voilure 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 noeuds à la trainée générée par le foil.

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

Les FORCES en présence :

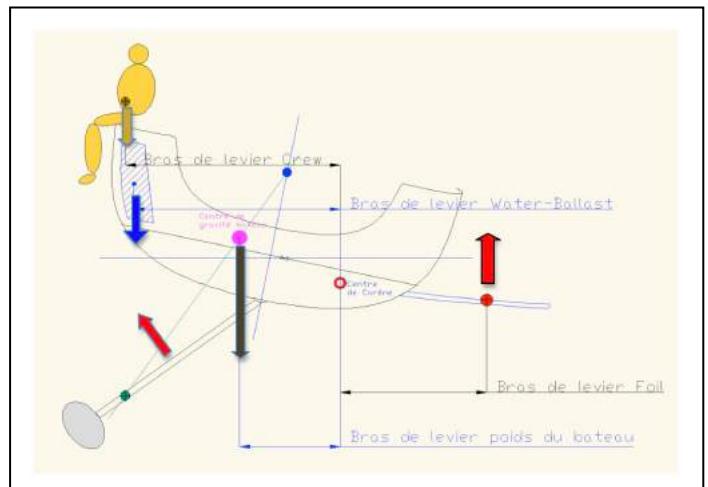
Le bilan se décompose comme suit :

■ Les forces liées à la gravité, elles sont dirigées vers le bas :

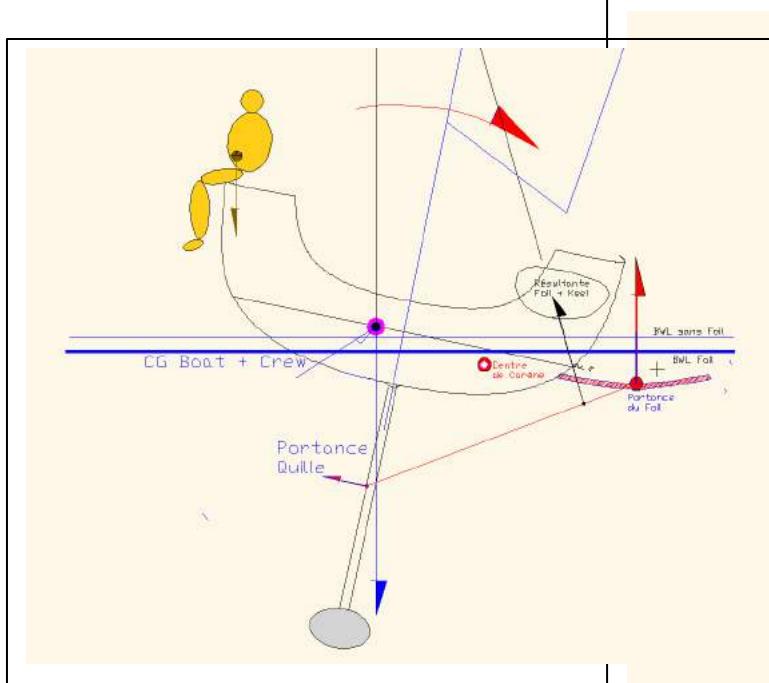
Crew, Water Ballast,
Poids du bateau.

■ 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:

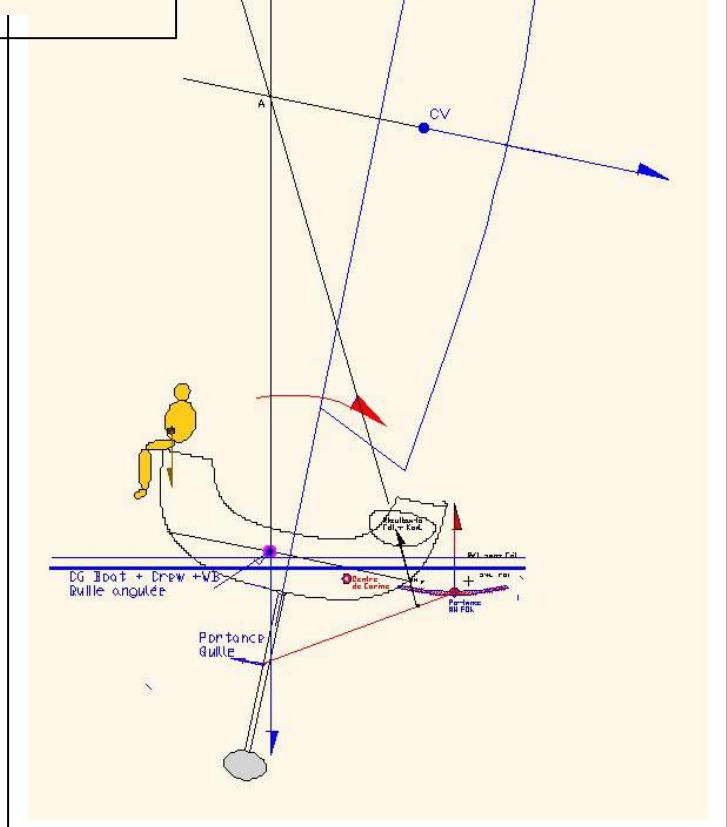


Les forces liées à la gravité enfoncent le bateau, et crées le déplacement archimédien. Les forces hydrodynamiques se composent en une seule force qui sera dirigée vers le haut, donc opposée aux forces gravitationnelles.

Ainsi le bateau va se comporter comme l'avion lorsqu'il atteint la vitesse « V1 » et « décolle ». 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 vérique (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 vérique.

Il faut remarquer que si il y a une 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.

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

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

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 préréglage du plan porteur pour le largue dès la stratification est possible mais, ce préréglage ne sera pas optimum pour la navigation au près.

Mais d'autres difficultés risque 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.

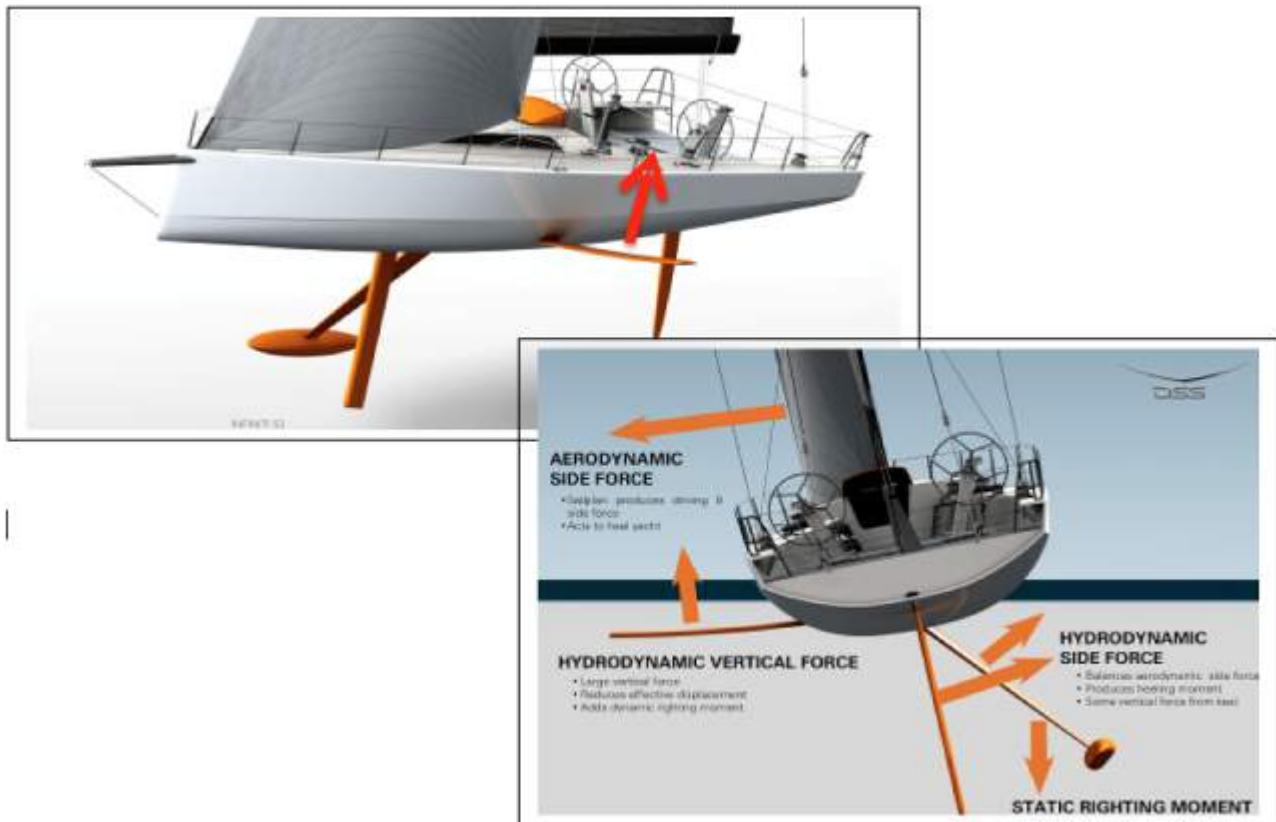
En régime « vol » c'est à dire en régime stabilisé, tout ira bien, mais en cas de décrochage, attention aux dégâts.

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

Les mouvements incontrôlables du bateau à cause des vagues risque 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 remplacé 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),

ÉLLIGIBILITÉ des FOILERS¹ en IRC (J. SANS 31/10/2020)

On sait depuis très longtemps qu'il est possible d'extraire de l'eau la coque d'un navire en utilisant des surfaces sustentatrices hydrodynamiques.

Les lois régissant ce mode de sustentation et l'équilibre sont celles de l'aérodynamisme, à la différence que le fluide « air » est remplacé par « l'eau ».

A la différence d'un avion qui vole intégralement, la sustentation d'un navire peut être partielle. Il devient donc nécessaire de bien sérier les limites de cette sustentation.

1- Environnement Archimédien vs Foiler.

1-1 Le régime Archimédien

La règle IRC, comme d'ailleurs toutes les règles de Jauge pour voilier est une règle « Archimédienne ». En navigation, l'eau qui est devant le bateau passe derrière.

Elle est écartée, accélérée, passe sous le bateau, pour remonter et propulser le bateau vers l'avant.

En ressortant sous la voute du bateau ou contre le tableau arrière, l'eau forme une vague turbulente qui paraît accrochée à l'arrière du bateau.

La distance horizontale entre la crête de la vague à l'étrave et celle de sa sortie arrière correspond à la longueur à la flottaison dynamique (LFLOT).

Plus le bateau est lourd, donc profond, plus l'eau doit augmenter sa vitesse afin de « faire le tour »

de la carène. Il se forme alors un creux qui constraint le bateau à s'enfoncer. Au final le volume d'eau déplacée est supérieur au volume de la carène du bateau.



Les TCC sont basés sur cette vitesse limite des carènes qui est approximativement égale à :

$$V = 2,4 * LFLOT^{0.5} \text{ (LFLOT en m et V en noeuds).}$$

Mais la réalité est plus complexe.

La résistance à l'avancement R_x d'un navire (trainée), est la force qu'il faut exercer pour le déplacer d'un mouvement rectiligne uniforme à vitesse constante sur un plan d'eau parfaitement calme.

On montre que cette résistance R_x est principalement la somme de deux résistances :

- Une résistance visqueuse R_f
- Une résistance de vagues R_w

$$R_x = R_f + R_w$$

La résistance visqueuse dépend du frottement de l'eau sur la coque et peut se mettre sous la forme :

$$R_f = 0.5 * C_x \rho S V^2$$

Où ρ représente la masse volumique² de l'eau, C_x le coefficient de trainée qui dépend **des formes** plus ou moins hydrodynamiques du navire, de la **rugosité** de la coque, du **nombre de Reynolds**³, de la surface mouillée S et V la vitesse du navire.

La résistance de vagues est spécifique à l'interface eau/air qui produit les vagues d'étrave et de sillage (au niveau du tableau arrière) par déformation de la surface libre de l'eau. Le passage de la carène creuse le plan d'eau. Elle est de la forme : $R_w = 0.5 * C_w \rho S V^2$

¹ Voilier équipé de surfaces sustentatrices additionnelles.

² La masse volumique ρ de l'eau de mer est de l'ordre de 1020 kg/m³.

³ Le nombre de Reynolds lie la viscosité du fluide, la géométrie de son écoulement et sa vitesse.

C_w étant un coefficient sans dimension qui dépend du nombre de Froude⁴, les autres coefficients sont les mêmes que pour la résistance visqueuse.

Pendant plusieurs décennies d'utilisation de la règle du RORC, de l'IOR et de l'IRC, ces deux grands principes ont formé les fondations du calcul des TCC's.

Le planing va écorner quelque peu cette base scientifique.

En effet lorsque le bateau est en « survitesse », on parle de « planing », le bateau dépasse la vitesse limite de la carène.

Il le fait aussi, occasionnellement, lorsqu'il est en survitesse sur une vague.



1-2 Le Planing

- A l'arrêt, la poussée d'Archimède équilibre le poids du bateau.
- Lorsque le bateau navigue à faible vitesse, la poussée d'Archimède diminue car la force de portance (générée par la surface de la coque) apparaît.
- Au fur et à mesure que la vitesse augmente, la force de portance augmente et corollaire, la poussée d'Archimède diminue.
- A partir d'une certaine vitesse, qui diffère suivant les formes de carènes (BWL, Creux, Déplacement, etc....), le bateau se trouve dans une situation de planning pratiquement permanente. La force de portance peut représenter jusqu'à 60 à 70% de la poussée d'Archimède initiale.

Le bateau ne « flotte plus », il se déplace alors à la surface de l'eau : il est au planing.

L'IRC calcule un coefficient d'aptitude à planer basé sur les paramètres archimédien de chaque bateau. Ce coefficient multiplie la vitesse de carène initiale et produit la vitesse de début du planing.

Mais la vitesse de carène ou la vitesse de planing, sont toujours propres au régime Archimédien.

1-3 Le régime Foiler

Dans cette configuration, le bateau n'est plus sustenté par la carène mais par des surfaces profilées qui évoluent dans l'eau et ainsi génèrent une portance **P** (et une trainée **T**) hydrodynamique de la forme :

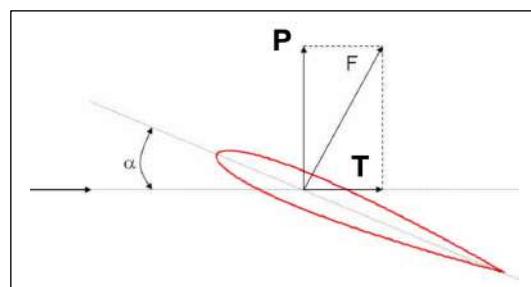
$$P = 0.5 * C_z \rho S V^2$$

$$T = 0.5 * C_x \rho S V^2$$

Exemple de caractérisation d'un profil :

C_z étant le coefficient de portance

C_x celui de trainée



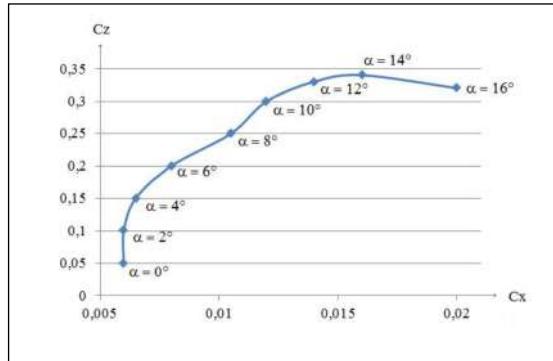
| Incidence | 0° | 2° | 4° | 6° | 8° | 10° | 12° | 14° | 16° |
|-----------|-------|-------|--------|-------|--------|-------|-------|-------|------|
| C_z | 0.05 | 0.1 | 0.15 | 0.2 | 0.25 | 0.3 | 0.33 | 0.34 | 0.32 |
| C_x | 0,006 | 0.006 | 0.0065 | 0.008 | 0.0105 | 0.012 | 0.014 | 0.016 | 0.02 |

⁴ William Froude, Ingénieur hydrodynamicien anglais (1810-1878).

Le Nombre de Froude est un nombre sans dimension égal au ratio Vitesse (m/s) sur Racine carré de L(m)*9.81.

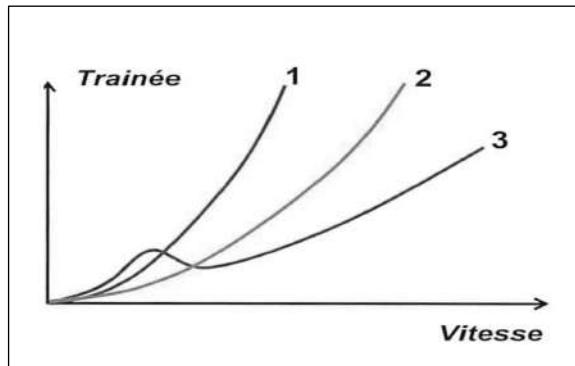
La représentation polaire ci-contre met en évidence l'interaction de la portance C_z et de la trainée C_x .

Afin de pouvoir « yoler au-dessus de l'eau », c'est-à-dire extraire entièrement la carène du contact de l'eau, et de fait, supprimer à la fois la résistance visqueuse et celle des vagues qui s'exercent sur la carène, la somme des portances des surfaces sustentatrices (foils, etc...) doit être supérieure au poids du bateau (déplacement en kg * g).



Les 3 courbes ci-contre montrent l'évaluation des trainées, pour un monocoque (1), un multicoque (2) et un Foiler (3).

La petite cloche visible au début de la Courbe 3, correspond à la navigation en mode archimédien du Foiler, avant le décollage.



Il est évident que le ratio Trainée / Vitesse est nettement favorable au Foiler.

1-4 L'intégration du régime Foiler dans l'IRC

Les Foilers, à partir du moment où ils peuvent intégralement extraire la coque de l'eau, possèdent une caractéristique commune qui est leur vitesse critique de l'ordre de 40 nœuds. Cette vitesse critique est liée au phénomène de cavitation qui affecte les profils des appendices sustentateurs (Foils).

La sustentation intégrale dépend de la puissance disponible (surface de voilure) corrélée avec la surface active des appendices sustentateurs.

En d'autres mots, c'est un peu comme si un JPK ou un SUNFAST « FOILER » possédaient le même potentiel de vitesse que RAMBLER (en mode Foiler) dans la mesure où ces bateaux pourraient voler.

Conclusion : L'intégration des bateaux équipés de surfaces sustentatrices extérieures (Foils, etc..) dans la flotte IRC, impose que l'IRC limite l'effet sustentateur à un régime que nous pouvons nommer « super planing ». Notre objectif étant de rester dans le domaine d'application des algorithmes de la jauge IRC, c'est-à-dire l'environnement Archimédien.

En conséquence, **un monocoque qui possèderait la capacité de voler intégralement** ne peut pas être éligible en IRC.

1-5 Quelle limite de sustentation fixer ?

L'aptitude à s'extraire de l'eau dépend du **ratio LIFT / POIDS du BATEAU**.

Le LIFT étant la composante verticale produite par l'ensemble des surfaces sustentatrices (exprimée en Newtons) et le POIDS du BATEAU étant le produit de sa masse par l'accélération de la pesanteur (g).

Un ratio >1 le bateau vole.

Un ratio <1, bateau ne vole pas.

Afin de conserver l'homogénéité de la flotte IRC, ce ratio est fixé à 0.3.

1-6 Application ?

Pour chaque bateau, le déplacement à vide est connu.

Par contre le LIFT doit être calculé.

Le LIFT est associé à une vitesse de référence, qui est celle à laquelle le bateau commence à planer. Le LIFT est lié au carré de la vitesse de planing, il est donc nécessaire de déterminer cette vitesse.

Choix de la vitesse qui produit le LIFT nécessaire :

- **Lorsque la vitesse est faible** (vent faible), le déplacement de la carène provoque peu de vague, en conséquence la résistance due aux vagues est réduite. C'est la **résistance visqueuse** qui est prépondérante, où l'intérêt d'avoir d'une faible surface mouillée et une carène propre.
Le nombre de Froude (Fn) est < 0,4.
- **Lorsque la vitesse augmente**, la **résistance de vague** augmente plus vite que la résistance visqueuse. La longueur d'onde maximale de la vague est celle de la longueur à la flottaison dynamique (LFLOT). Le bateau atteint alors sa vitesse limite archimédienne que l'on nomme « **vitesse critique de carène** ».
Le nombre de Froude (Fn) = 0,4.
La vitesse critique est : $V_c = F_n * (g * LFLOT)^{0.5}$ avec $g = 9,81 \text{ m/s}^2$, LFLOT en m et $F_n = 0,4$.
 $V_c (\text{m/s}) = 1,25 (\text{LFLOT})^{0.5}$ ou **$V_c = 2,44 (\text{LFLOT}^{0.5})$** pour obtenir V_c en Nœuds.
- Un pic d'énergie permet au bateau de « monter sur sa vague d'étrave », et de partir au **planing**. La résistance de vague atteint son maximum juste avant que le planing se déclenche. Ensuite cette résistance diminue considérablement (ce qui explique que l'on peut réduire la puissance motrice d'une vedette lorsqu'elle commence à planer, et cela sans perdre de vitesse).

Par contre la **résistance visqueuse**, qui dépend du carré de la vitesse, augmente beaucoup.

Cela démontre que **le bateau ne peut pas accélérer indéfiniment...à moins qu'il ne sorte de l'eau mais alors il faut qu'il soit sustenté autrement !**

Dans ce mode début du planing établi, le nombre de Froude (Fn) est de l'ordre de 0,65.

La vitesse critique est alors :

$V_{pla} = 3,96 (\text{LFLOT}^{0.5})$ pour obtenir V_{pla} en Nœuds.

Ou $V_{pla} = 2,04 * (\text{LFLOT}^{0.5})$ pour obtenir V_{pla} en m/s.

Pour qu'un bateau équipé de Foils soit éligible en IRC, l'Architecte devra calculer la surface active des foils (en assiette Upright) à partir de cette vitesse et concevoir son bateau avec une surface active de foils (globale) inférieure ou égale à ce calcul.

Afin de permettre aux architectes de calculer cette surface active maximale, les paramètres utilisés seront :

- ✓ **LWP (Flottaison statique = LH-BO-SO)**
- ✓ **BW (déplacement à vide en Kg).**

Exemple :

LH = 16,5m

LWP = 14,74m

BW = 10033 kg

$$V_{pla} = 3.96 * (14,74)^{0.5} = 15,20 \text{ noeuds (7,82 m/s)}$$

$$\text{LIFT autorisé} = BW * 0.3 = 3009 \text{ kg (3000 * 9.81 = 29527 N)}$$

$$\text{LIFT autorisé} = 0.5 * 1025 * 0.3 * S_{maximale} * V_{pla}^2$$

$$S_{maximale} = 29527 / (0.5 * 1025 * 0.3 * 7,82^2) = 3.14 \text{ m}^2$$

$$\text{Soit } S_{active} (\text{Foils}) = 3,14 \text{ m}^2$$

La formulation littérale devient :

$$\text{LIFT (N)} = 0.5 * 1025 * 0.3 * S * (2.04 * (\text{LWP}^{0.5}))^2$$

$$\text{LIFT Max (N)} = 0.3 * \text{BW} * 9.81$$

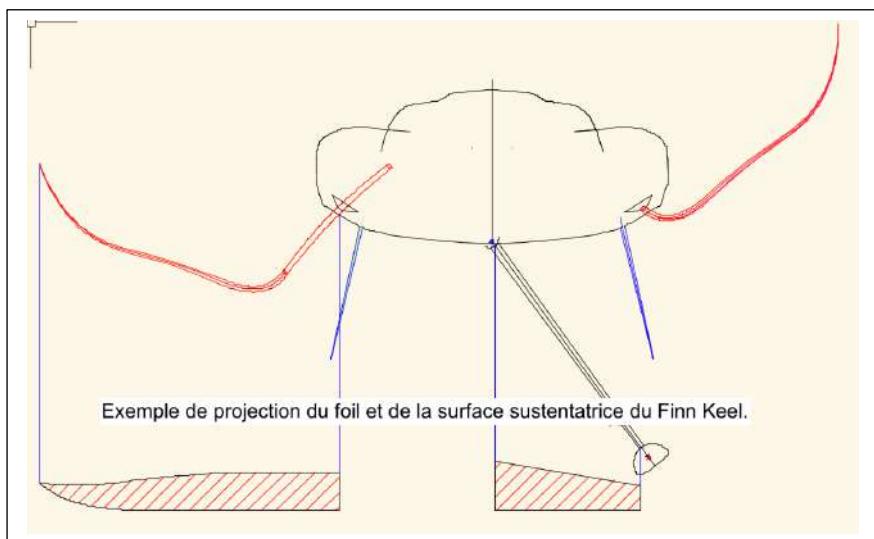
$$\text{Soit } S = (0.3 * 9.81 * \text{BW}) / (0.5 * 1025 * 0.3 * 4.16 \text{ LWP})$$

On en déduit la règle IRC définissant l'éligibilité des bateaux équipés de foil(s) et/ou de surfaces sustentatrices :

S maximale = 0.0046 * (BW / LWP)

BW en Kg, LWP en m,

Pour les détails de calculs de la surface projetée réelle, il faut se référer aux modalités décrites dans l'Annexe F de la règle IRC relative aux Foils et surfaces sustentatrices.



JS / 31/10/2020