

**VOLER sur des FOILS, mais surtout PILOTER, telle est la QUESTION.**

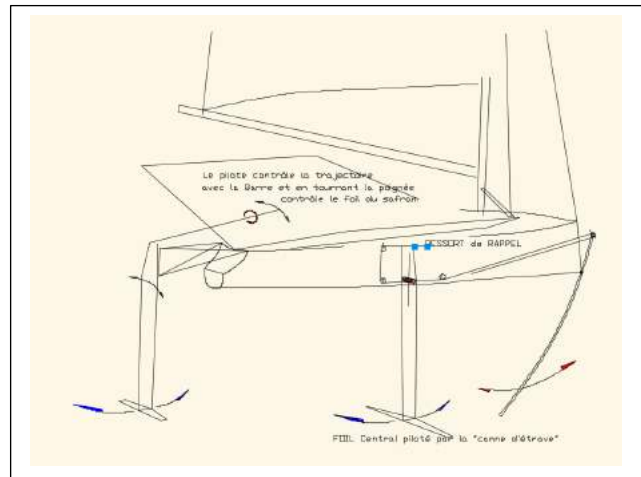
### La découverte du vol sur des foils

Cette technique est restée très longtemps confidentielle car étant l'apanage de quelques amateurs éclairés.

Le vol des MOTH nous a montré que c'était impressionnant, et apparemment facile hormis l'agilité du pilote (barreur ?).



Tout paraît simple, aucune énergie additionnelle, juste le vent et la mer, un système d'asservissement très simple (mais intelligent) associé à la dextérité d'un pilote funambule.



Pourtant l'expérience montre que la réalité du pilotage apparaît beaucoup plus complexe lorsque le bateau (Foiler) pèse 7 tonnes (IMOCA) ou 15 Tonnes (Trimaran ULTIME).

Il semble que les masses en mouvement de ces foilers dépassent les réactions des pilotes.

### Au commencement était...

L'idée de quitter le mode archimédien, où le bateau trace son sillon dans l'océan et évolue porté par des plans porteurs ne date pas d'aujourd'hui.

Mais les initiateurs de cette méthode ont rapidement compris qu'il fallait d'abord décoller avant de trouver un régime de vol plus ou moins stable et s'appuyant sur l'eau.

On remarque que tout cela est apparu dans les années 1890 / 1910, en même temps que les premiers avions, et les moteurs thermiques de plus en plus puissants et légers.

Je dirais même qu'un foiler se comporte comme un hydravion.

Avant de voler en appui sur ses ailes ou sur ses foils, il faut quitter le mode « archimédien » et pour cela il faut de la puissance, beaucoup de puissance.

L'analogie avec l'avion continue. Les premiers vols, étaient des sauts de puces : on décollait et on franchissait une certaine distance à une altitude incertaine et on se reposait tant bien que mal.

Au tout début du XX<sup>ème</sup> siècle, eurent lieu les premiers vols motorisés contrôlés, cela signifiait que le pilote décollait d'un point A, effectuait un vol plus ou moins long en contrôlant sa route et son altitude et revenait se poser au point A.

En fait on avait inventé le gouvernail (qui existait déjà depuis plusieurs siècles sur les navires) et on était capable de faire varier l'incidence de la voilure afin de voler, de décoller et d'atterrir, mais aussi de conserver une altitude la plus constante possible.

Aujourd'hui tout cela paraît évident, mais l'était quand même beaucoup moins lorsque l'aérodynamique était balbutiante.

Le plus amusant est que tous les ingénieurs passionnés d'avions, mais aussi les « merveilleux fous volants sur leur drôles de machines<sup>1</sup> » se jettent sur les travaux en hydrodynamique qu'Osborne REYNOLDS (ingénieur Anglais 1842 -1912) avait réalisés en 1883 pour les navires. Ces travaux ont été immortalisés sous le nom de Nombre de Reynolds.

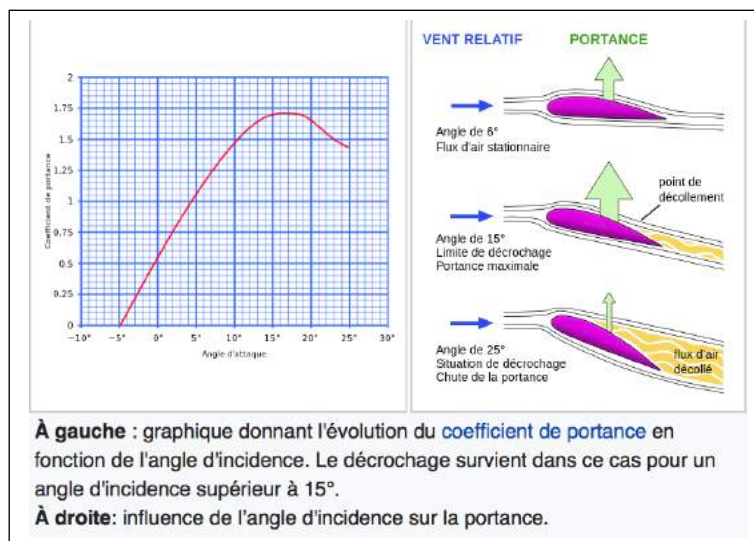
Ce Nombre de Reynolds est un nombre sans dimension, il correspond au rapport entre les forces d'inertie des molécules d'un fluide et les forces de viscosité de ce même fluide. Il dépend du profil du corps, de la vitesse de déplacement et de la viscosité du fluide.

Le plus surprenant est que Reynolds réalisera l'ensemble de ses études pour les navires et particulièrement les hélices donc pour l'eau comme fluide. Tout ce travail sera transposé sur des ailes et les fuselages d'avions, que ce soit en mode subsonique et supersonique, 70 ans plus tard.

### Mais revenons aux foils.

La partie aérodynamique des foils a rapidement été résolue. Naturellement il y a eu des évolutions dans le choix de profils, mais les ingénieurs disposent maintenant d'une littérature très complète (profils NACA, GOE, SOKOLOV, EPLER etc.).

Un foil est une aile et sa portance dépend évidemment de sa forme (symétrique, épais, cambré etc.) mais cette portance est étroitement liée à l'angle d'incidence, c'est-à-dire l'angle entre la direction du fluide et la corde de profil de l'aile.



Pour chaque profil, la zone de portance maximale correspond à un angle d'incidence très précis. La portance est relativement proportionnelle à l'angle d'incidence jusqu'à une valeur maximale. Mais quelques degrés en plus et c'est le décrochage pratiquement immédiat, c'est-à-dire une portance nulle. On remarque que la phase de progression presque linéaire de la portance s'accompagne de l'augmentation de la trainée (élément « négatif »)

La marge de réglage pour obtenir la portance maxi est très étroite. Certains profils sont plus tolérants que d'autres, mais c'est un compromis, qui se traduit par des performances plus faibles.

En résumé, l'objectif est :

- ✓ De choisir un profil qui produit de la portance, n'oublions pas que c'est la portance qui extrait le bateau du régime archimédien et le fait « voler » en appui sur ses foils, le fluide étant l'eau.

<sup>1</sup> Film de 1965 retraçant de manière humoristique cette période.

- ✓ De contrôler l'angle d'incidence afin de ne pas décrocher et de voir la portance chuter, ce qui se traduira par un passage brutal du régime foiler au régime archimédien. La vitesse peut alors chuter de 60% à 70%. Ce changement hydrodynamique peut se traduire par un chavirage.

Il est aussi possible que suite à un effet de tangage, le bateau se retrouve avec une assiette longitudinale négative, c'est-à-dire qu'il se met subitement à piquer du nez.

Alors la direction du fluide qui attaque l'intrados du foil change de côté et attaque l'extrados. Cela inverse immédiatement la direction de la portance, et le foil plonge (il agit alors comme les barres de plongée d'un sous-marin), ce qui n'est pas très agréable, ni l'effet recherché.

### Quand le pilotage d'un foiler devient alors très complexe.

Sur un voilier archimédien le barreur gère la trajectoire (safran) et régule la portance de la Grand-voile. Son équipier (par exemple sur un dériveur) régule la portance du foc et assure l'assiette transversale et longitudinale du bateau.

Mais le bateau reste en permanence dans le domaine archimédien, il prend toutefois quelques libertés, lorsqu'il plane, mais encore faut-il que la carène s'y prête.

Les réactions peuvent alors devenir plus surnoises.

Sur un foiler, il faut en plus s'occuper du Foil.

Plusieurs voies seront explorées avec plus ou moins de succès.

En courses « OPEN » (années 80), les foils étaient installés avec une incidence fixe par rapport à la géométrie du multicoque (Voir « PAUL RICARD » par exemple)

On a vite compris que ce n'était pas vraiment la solution.

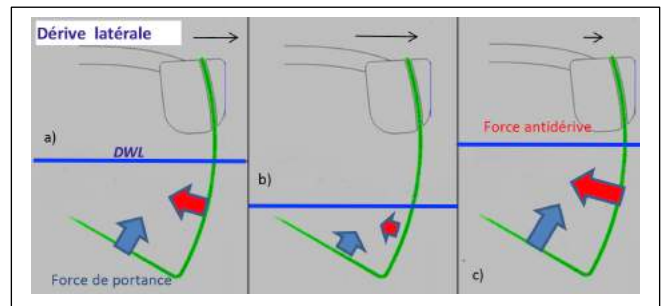
L'Hydroptère a amélioré ce système en ajoutant un plan porteur horizontal réglable sur le safran central, mais les déboires ont été nombreux. En fait la stabilité de vol était trop tributaire du pilotage.



Fort de ces expériences, les ingénieurs se sont orientés vers les foils « **auto régulés** », puis rapidement vers des foils à **régulation contrôlée**.

**L'auto régulation** implique une forme de foil en V plus ou moins immergée entre le mode archimédien et le mode foiler.

Avec un foil (ou plusieurs) en V, l'effet du lift en soulevant le bateau provoquera la sortie partielle du foil, cela se traduira par une diminution de la surface active, donc une diminution de la portance, donc un effet de « descente » du bateau... ce qui augmente la surface active, donc le lift... On crée ainsi une régulation quasi automatique de l'altitude du vol. C'est cet effet « d'ascenseur » qui est sensé générer une hauteur de vol plus ou moins constante par modulation de la surface active.



Lorsque l'incidence du foil est fixe, l'équipage utilise l'assiette longitudinale (TRIM) du bateau afin de l'ajuster finement.

Mais dès que le bateau est grand, cette solution n'est plus utilisable.

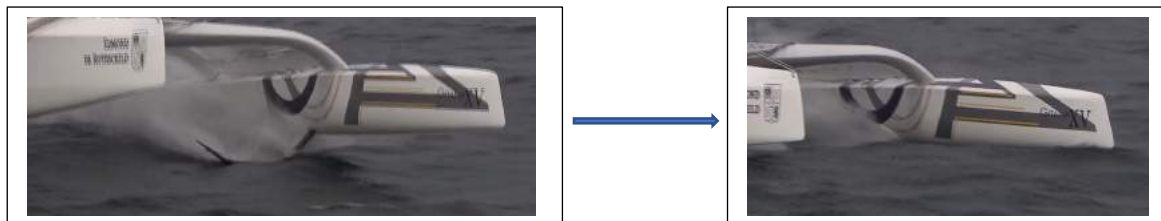
La vitesse étant une composante de l'effet « lift », elle intervient nécessairement, ce qui impose de modifier l'incidence afin de voler à une altitude constante.

On voit que l'auto régulation n'est pas la quintessence pour assurer un vol stable.

L'encombrement, le poids des foils auto régulés et les efforts en présence, imposent des structures internes très robustes.



Enfin les Foils en « V » autorisent une altitude de vol assez faible (à cause du « V »), ce qui augmente les risques d'enfouissement et les coups de frein générateur de contraintes lors de l'auto régulation.



Les IMOCA sont les « grands consommateurs » de foils « V ».

Qu'ils soient nommés « DALI » ou autrement, la forme de ces foils dépend étroitement de la règle de Classe des IMOCA.



« V pur »



« V évasé + dérive verticale »



« V + DSS<sup>2</sup> + dérive verticale »

Les Règles de Classe limite le nombre d'appendices et le nombre de degrés de liberté de chaque appendice.

Nombre d'appendices : **maximum 5**, soit 2 foils (ou dérive), 2 safrans, 1 voile de quille.

Degrés de liberté :

- ✓ Pour les Foils / Dérive : 2, une translation de haut en bas et vice-versa et une rotation d'avant en arrière et réciproquement limitée à 5°.
- ✓ Pour le voile de quille : une rotation avec l'axe dans le plan de symétrie
- ✓ Pour les safrans : une rotation qui permet de gouverner le bateau (une rotation pour relevage du safran est autorisée si elle ne contribue pas à améliorer la performance du safran)

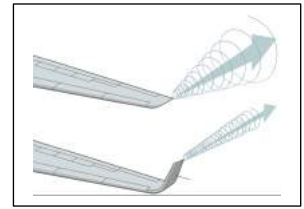
Il est donc interdit de créer un plan porteur horizontal sur les safrans, ce qui est un sérieux handicap.

Ces contraintes conduisent les architectes à rivaliser d'idées pour trouver le Foil du type « **mouton à 5 pattes** », c'est-à-dire à la fois :

<sup>2</sup> « DSS » = nomme un foil droit ou courbe sensiblement horizontal (comme une aile d'avion)



- ✓ Foil auto régulateur (« V ») afin de limiter l'utilisation du contrôle de l'incidence et d'amortir les effets des modifications de Trim (cabrage, piqué, gîte) et aussi de la dérive.
- ✓ Foil horizontal (DSS) car c'est la forme qui génère le plus de portance.
- ✓ Dérive s'il est implanté sous le fond du « V » ou sous le « DSS ».
- ✓ Winglet anti vortex



Winglet (anti vortex)

Ce cahier des charges est quand même très complexe.

Traduction en navigation : un IMOCA s'élève en appui sur son foil sous le vent et sur sa quille pendulaire, qui du fait de son axe incliné fournit un peu de portance malgré son profil symétrique et sur la partie arrière de la surface de sa carène.



### L'assise du bateau sur l'eau en mode Foiler

Quel que soit le type de bateau, le point important est la surface d'assise sur l'eau en mode foiler. En effet on peut assimiler chaque plan porteur au contact avec l'eau comme un point unique.

Pour qu'un solide soit automatiquement stable, il suffit de 3 points d'appuis.

Les paysans avaient rapidement découvert que pour fabriquer un tabouret pour traire les vaches, 3 pieds suffisaient afin d'avoir une bonne stabilité quand on est assis.

Pour un foiler, la règle est identique (!).



L'avantage du multicoque se situe dans sa forme naturelle qui génère un triangle dont la base arrière est importante (distance entre les safrans).

Pour un Monocoque c'est plus compliqué à cause de sa largeur et de son ratio Largeur / Longueur. S'il est équipé de 2 safrans, la configuration :

- ✓ Un plan porteur sur chaque safran + un plan porteur sur le foil sous le vent (et la quille au centre ou basculée au vent) est réalisable pour des bateaux ayant un ratio  $B_{MAX} / L_H$  de 0.45 environ. Le Mini SEAIR 747 qui fait 6.5 X 3.0 en est l'exemple (voir ci-dessous à gauche).



S'il est équipé d'un seul safran, la configuration devient :

- ✓ Deux plans porteurs très écartés et très en avant + un plan porteur horizontal sur le safran (voir ci-dessus à droite)

Mais il y a toujours des exceptions à la règle, voir le MOTH.

LOA 3.55m, SVoile : 8m<sup>2</sup>, Poids gréé : 35kg,

Déplacement en navigation 115 kg avec un barreur de 80 kg

- Plan porteur principal symétrique en « T » au centre.
- Plan porteur secondaire symétrique en « T » sur le safran.

**Pour l'équilibre... un skipper funambule.**

Cela fonctionne très bien, mais ce n'est pas transposable.

Enfin presque...



**La régulation contrôlée** de l'altitude de vol devient indispensable dès que l'on utilise des plans porteurs horizontaux. Le Foiler se pilote alors comme un avion.

Exemple de plan porteur central en « L » sur un multicoque.

Cela signifie qu'il doit exister un ou plusieurs systèmes de commande qui permettent de modifier l'équilibre du Foiler lorsqu'il est en vol.

La carène évolue relativement près de la surface de l'eau.

Le Trim (tangage) dépend du contrôle de l'équilibre longitudinal du foiler. C'est ce que l'on nomme « centrage » sur un avion, c'est-à-dire le mouvement du foiler autour de son centre de gravité suivant l'incidence de son empennage arrière.

La modification de l'incidence sur les foils centraux agit sur la valeur de la portance, mais en aucun cas permet de contrôler la trajectoire de vol.



### Conditions d'équilibre longitudinal

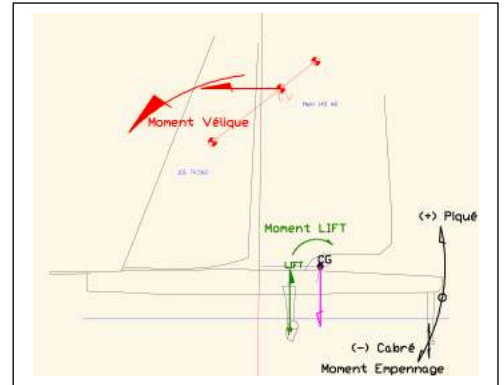
Le point d'équilibre est le Centre de Gravité du bateau. Le Foiler pivote en permanence autour de ce point.

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.

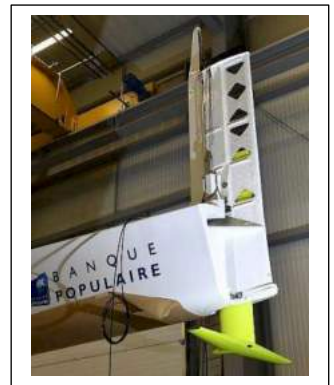
✚ Le couple généré par le calage du foil horizontal qui équipe le safran est soit un **couple à Cabrer**, soit un **couple à Piquer**.



**Le contrôle de ce couple (plan porteur du safran) permet d'équilibrer la somme des couples générés par la force vélique et la force de portance.**

**Cela correspond à la régulation contrôlée.**

Ci-contre : plan porteur escamotable verticalement sur un safran et fletner pilotant la rotation du safran.



Cet équilibre est possible que si le Centrage du bateau est un

**Centrage Arrière** », c'est à dire

que son centre de Gravité en navigation se situe en arrière du centre de portance des foils avant.

Ce qui correspond à l'équilibre :

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

### 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 :

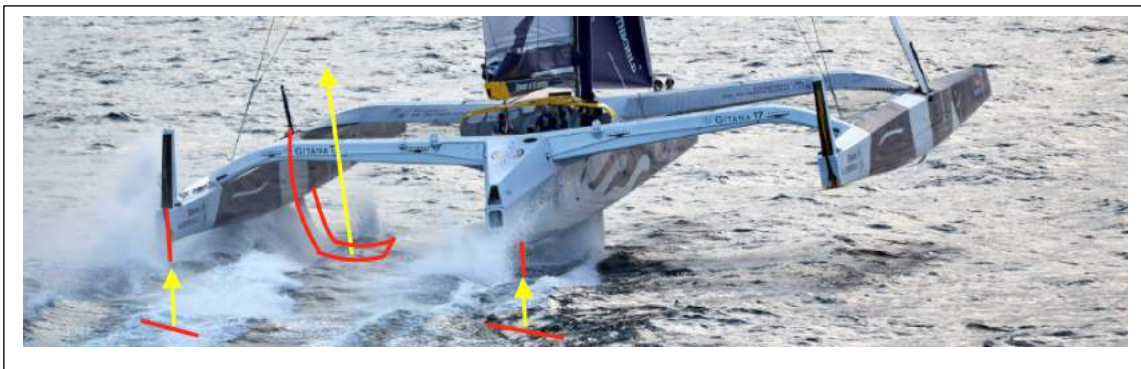
- ✚ Poids du bateau
- ✚ Poussée produite par les foils
- ✚ Poussée produite par la voilure (sa composante transversale).

**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 qui est une des composante du vent apparent.

### Mise en œuvre afin d'assurer les conditions de vol.

**Le nombre d'appendices et leurs degrés de liberté**, ils dépendent essentiellement des règlements des Classes.





Certaines Classes, dont la Classe IMOCA, imposent les règles restrictives.  
À l'opposé d'autres Classes laissent toutes libertés.

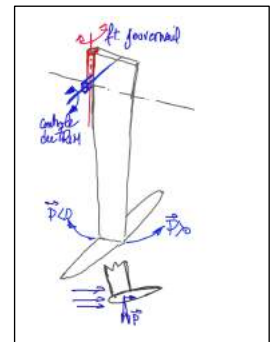
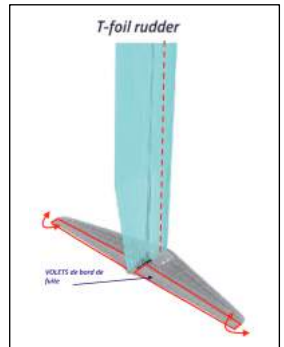
Revenons aux moyens à mettre en œuvre afin d'assurer de bonnes conditions de vol en prenant l'exemple des trimarans « ULTIME » :

- **Deux plans porteurs horizontaux à l'arrière solidaires des safrans** (coque centrale et flotteur sous le vent). Le plan porteur implanté sur le safran de la coque au vent est relevé.

Ce plan porteur horizontal aura un profil symétrique car sa portance devra alterner, soit vers le haut, soit vers le bas afin de générer le couple à piquer ou le couple à cabrer de la plateforme.

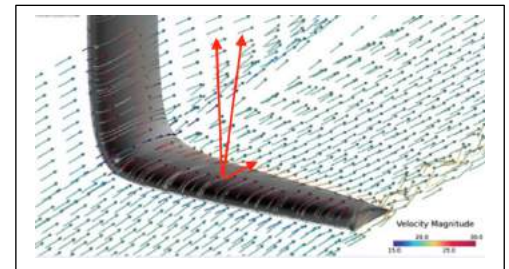
Deux méthodes sont utilisées soit :

- Le safran ne possède que le mouvement de rotation conventionnel (axe vertical) et le plan porteur est équipé d'un volet qui s'oriente par exemple de  $-20^\circ$  à  $+20^\circ$ , ce qui permet d'inverser le sens de la portance. C'est efficace car l'angle de réglage important du volet permet d'obtenir une grande sensibilité de la Portance. Par contre, c'est plus complexe en terme d'ingénierie.
- Le plan porteur, qui est aussi symétrique, est fixe sur le safran. L'obtention de l'inversion de la portance est réalisée avec la rotation du safran autour d'un axe perpendiculaire au plan de symétrie du flotteur ou de la coque centrale (ce système fonctionne un peu comme le TRIM d'un moteur hors-bord). Le système mécanique apparaît comme moins souple à gérer que la technique du volet de bord de fuite.



- **Un appui principal sur la coque sous le vent (foil en « L »).** La « puissance » du Lift se trouve dans ce foil. Il sera donc animé du maximum de possibilité de réglages.

- Un réglage de l'angulation transversale de l'intérieur vers l'extérieur et vice versa (nommé le « Cant »)
  - Un réglage de l'angulation d'avant en arrière et vice versa pour modifier l'angle d'incidence (nommé le « Rake »).
  - Un réglage de l'orientation (axe vertical) (nommé « Yaw »)
- Ces réglages sont utilisés pour moduler la « puissance » de la Portance et indirectement de diminuer la Trainée.



Au final chaque foil possède 4 degrés de libertés (3 rotations  $O_x$ ,  $O_y$ ,  $O_z$  et une translation  $T_y$ )

Chaque mouvement (hors translation), sera obtenue par un vérin électrique ou hydraulique car les forces en présence sont importantes et les bras de levier pour les appliquer sont de faibles dimensions.

### Les moyens technologiques afin d'obtenir ces mouvements

La règle 52 « ENERGIE MANUELLE » des RCV (World Sailing) précise que « *les voiles, les appendices mobiles de coque doivent être réglés et manœuvrés uniquement par la force fournie par l'équipage* ».

Par réalisme, les règlements de Classes amendent obligatoirement cette règle.

Sur un Foiler de 30 mètres, les masses en mouvement, la vitesse de déplacement engendrent des efforts très importants et nécessitent des temps de réactions qui dépassent les capacités de l'équipage.



L'industrie produit des actionneurs (combinaison d'un vérin hydraulique et de son système de contrôle). Certains possèdent aussi leur source d'énergie intégrée.

Ces équipements sont nombreux notamment dans le domaine aéronautique.

Sur les Foilers, les courses de vérins nécessaires sont relativement faibles 100 à 350 mm.



À la vitesse à laquelle le bateau vole, au-dessus de l'eau, le contrôle du foil et des plans porteurs arrière est essentiel. Ce contrôle doit être réactif, précis et fiable.

Ce qui vient d'être énoncé pose déjà un problème car si mécaniquement cette technologie est connue et universellement utilisée, son implantation sur un bateau imposera aux responsables des Classes, une réflexion et une rédaction de la règle 52 (ci-dessus) très précise.

### Du concept de « boucle ouverte » ou de « boucle fermée »

Ce sont les concepts de base pour toute action mécanique quel qu'elle soit.

La « **Boucle ouverte** » (BO) est la solution la plus simple : Il s'agit d'une régulation sans aucun contrôle, ni retour d'information entre l'entrée (ce que l'on souhaite obtenir) et la sortie du système (ce qui est réellement réalisé).

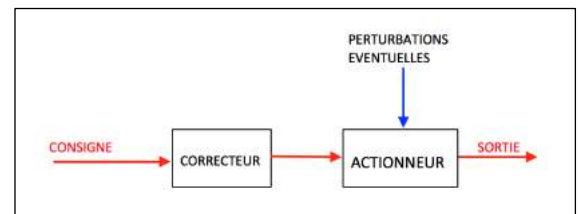
*Exemple* : Un mobile possède une vitesse de 1m/s.

La consigne à réaliser est un déplacement de 100m.

En boucle ouverte, vous actionnez le moteur pendant 100s.

Normalement au bout de ces 100s, le mobile est arrivé à destination, sauf s'il y a du vent de face.

En « boucle ouverte », vous supposez que tout s'est correctement déroulé, ce qui n'est pas le cas dans cet exemple.



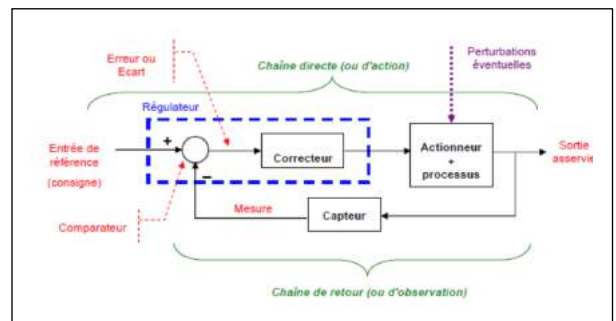
La « **Boucle fermée** » (BF) est beaucoup plus subtile.

Le principe est le suivant :

La consigne que l'on souhaite atteindre, ici 100m, est constamment comparée à la valeur effective à l'instant t.

On a ajouté un comparateur qui calcule en permanence la différence entre l'objectif à atteindre et la route réellement parcourue.

C'est uniquement lorsque cette différence est nulle que le système est stoppé.



La « **Boucle fermée** » correspond à l'homme.

Nous nous déplaçons, entre autres actions, en permanence en « boucle fermée »

### La « Boucle fermée », est-elle l'unique clef d'un vol stable pour un foiler ?

Il apparaît rapidement que ce n'est pas en installant des boucles fermées sur tous les actionneurs (vérins de commande) que les problèmes de la stabilisation du vol seront résolus. Et cela simplement parce que le nombre de réglages est trop important pour que le pilote puisse les contrôler de manière cohérente et adéquate.

Un actionneur (par exemple un vérin hydraulique ou électrique de barre franche) peut très bien fonctionner en boucle ouverte (BO), on considère alors qu'il réalise ce qu'on lui impose, sans contrôle du résultat, ou alors fonctionner en boucle fermée (BF), les informations de mouvement lui sont envoyées tant que la consigne recherchée n'est pas réalisée.

Les pilotes automatiques de nos bateaux en BF sont préférables à ceux en BO, bien que ces derniers donnent satisfaction. Mais nous sommes en mode archimédien ou les vitesses sont faibles et l'influence du milieu plus stabilisée.

Sur un foiler, il ne faut pas raisonner en contrôlant chaque actionneur, mais en contrôlant des groupes d'actionneurs.

Il faut gérer des sous-ensembles, par exemple pour le FOIL qui possède 3 degrés de liberté (3 rotations possible) en plus de sa Translation verticale, ce FOIL sera équipé de 3 actionneurs hydrauliques.

Que chaque actionneur remplisse la consigne qui lui est imposé ne suffit pas, il faut nécessairement qu'elles correspondent de manière cohérente à ce que l'on attend du FOIL, à cet instant.

En fait le problème est inversé.

Devant une situation, le pilote décide **d'une réaction immédiate**.

Cette **réaction** suppose que des consignes différentes soient immédiatement envoyées à chacun des actionneurs tant que la fin de la demande du pilote (sa réaction) n'est pas validée.

C'est sur la **demande en tant que telle**, que se trouve reporté la « boucle fermée ».

Les BF de chaque actionneur sont évidemment nécessaires, mais le fondamental se trouve **dans le contrôle de la demande du pilote**. Tant que les consignes liées à cette demande ne sont pas atteintes les différents actionneurs doivent être indépendamment alimentés en information (l'incidence d'un volet est augmentée, celle d'un autre volet l'est moins, etc.)

Au final entre le pilote qui agit sur le joystick pour déclencher sa réaction et les actionneurs du sous ensemble, il y aura obligatoirement un algorithme qui calculera, transmettra, contrôlera la réalisation de l'action.

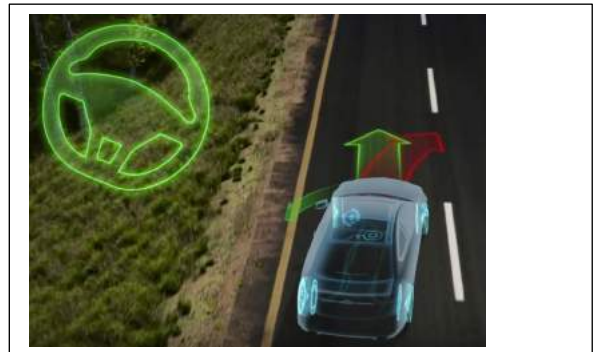
Le tout en Boucle Fermée.

Ce principe est appliqué sur les voitures avec l'ESP et l'ABS.

Confronté à un événement inattendu et imprévisible, le chauffeur réagit en agissant sur le volant.

Réceptionnant ces informations, les deux algorithmes de l'ESP et de l'ABS, agissent en freinant indépendamment les roues afin de corriger la trajectoire de la voiture.

Tout se fait sans l'intervention du pilote, autre que sa perception de la trajectoire qu'il transmet par la rotation du volant et la pression sur la pédale de frein et/ou de l'accélérateur.



Sur un Foiler, c'est encore plus complexe, car la demande du pilote, ne concernera pas le Foil tout seul (et ses actionneurs), mais le mouvement de la plateforme dans son ensemble, c'est-à-dire son vol en 3D alors que pour une voiture on évolue en 2D.

En conséquence l'algorithme gèrera l'ensemble des actionneurs en tenant compte du souhait du pilote mais aussi des paramètres extérieurs (vent, angle par rapport au vent, état de la mer, vitesse, gîte, Trim, etc). L'algorithme devient le DIRECTEUR de VOL.

### **Perception et Réaction du pilote versus Réaction de l'Algorithme.**

Confronté à un événement, un incident, une modification durant le vol, le temps de perception, d'analyse et de réponse du pilote est largement supérieur à celui des capteurs et des analyses de l'algorithme ad-hoc.

On peut ajouter, qu'il n'est pas évident que la réponse (sa réaction) du pilote soit la plus appropriée pour contrecarrer cet événement et cela bien qu'elle paraisse logique à première vue.

Exemple : Choquer la grand-voile en cas de survente paraît être la réaction logique de l'équipage, mais bien souvent cela ne suffit pas pour éviter un départ au lof. L'algorithme, par l'intermédiaire des informations reçues en continu des capteurs (gîte et Trim du bateau, accélération du vent, angle de barre, etc.) anticipera l'évènement et agira sur les actionneurs dédiés au pilotage.

Pour autant le pilotage sans aide d'algorithme est possible. La preuve est fournie par les pilotes d'avions de voltige ou l'ensemble des manœuvres qu'ils initient sont exclusivement manuelles, sans aucun contrôle, ni aide à la décision.

Il ne bénéficie que d'informations visuelles (afficheurs sur le tableau de bord, visualisation de la trajectoire) et de la perception de leur corps des mouvements de l'avion.  
Une seule limite leur est imposée, c'est le temps de pilotage, donc de concentration.

Sur un Foiler, le temps de navigation, de vol, est très long (surtout en solitaire). Ajoutons que contrairement à la volige aérienne, le fluide dans lequel évolue le Foiler est beaucoup moins homogène que celui qui entoure l'avion ainsi que la régularité de la puissance disponible.

Le niveau de technicité d'un Foiler modifie la navigation et principalement son contrôle, les règles du domaine archimédien ne sont plus applicable au mode Foiler.

### **Quel niveau d'aide autorisé au sens de la règle 52 « ENERGIE MANUELLE » des RCV.**

Il y a quatre niveaux d'autorisation.

**Niveau 0** : Tous les actionneurs fonctionnent en « boucle ouverte ».

C'est le cas des voiliers en général.

Quand un équipier actionne le vérin de hale-bas, c'est une « boucle ouverte », dans le sens où c'est la perception de l'équipier qui lui conseille de stopper d'actionner la pompe hydraulique ou le palan.

Quand il lit l'anémomètre, c'est lui qui interprète la lecture.

La seule intervention d'un algorithme apparaît dans un logiciel de navigation et de routage, qui utilise les données immédiates (anémomètre, vitesse, angle par rapport au vent, fichier météo, etc.) afin de proposer des prédictions de route à 12, 24, 36 heures.

**Niveau 1** : Les actionneurs fonctionnent indépendamment en « boucle fermée ».

Les AC75 (catamaran ou Foiler à venir) fonctionnaient sur ce principe.

Le navigateur et le barreur disposent d'un certain nombre de schéma de navigation préétabli qui correspondent chacun à des préréglages des actionneurs.

Le navigateur et le barreur choisissent le schéma le plus approprié au segment de navigation à réaliser. Ils disposent uniquement de la possibilité d'ajuster certains réglages sur des plages très limitées afin d'affiner les paramètres de vol.

Mais tout repose sur le paramétrage des schémas de navigations identifiés préalablement et sur les équipiers.

Les réglages de la voilure sont manuels (BO), avec des winches, des palans ou même des vérins.

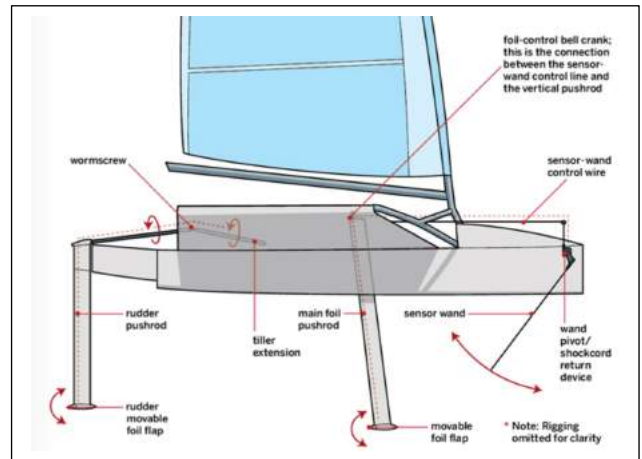
**Niveau 2** : C'est le fonctionnement du vol du MOTH.

Sur un MOTH, il y a un plan porteur principal central et un plan porteur arrière (profil symétrique) qui se trouve à l'extrémité du safran (qui agit comme un empennage arrière d'un avion).

La portance assurant le vol est intégralement fournie par le plan porteur principal. Cette fonction est intégralement asservie (BF) par l'utilisation d'une « canne de détection » articulée, située à l'étrave. Ce palpeur traine dans l'eau et renseigne de la hauteur de vol et de la vitesse.

Cette information est transmise par des jeux de bielles et de renvois à un volet du plan porteur principal (portance).

Sur certains modèles de MOTH, le pilote dispose d'une commande complémentaire de puissance de la portance en pré-orientant le voile de la dérive (sorte de réglage de la quête de la dérive).



Mais cette régulation est entièrement automatique.

Le corps du safran est articulé, en plus de l'axe vertical, autour d'un axe transversal, ce qui a pour effet de permettre au plan porteur arrière de générer une portance vers le bas ou une portance vers le haut. Suivant le sens de la portance, le MOTH se cabre ou pique du nez. Il conserve ainsi une assiette longitudinale presque en permanence horizontale.

Mais c'est le pilote qui assure le contrôle manuel du plan porteur arrière et qui affine les conditions de vol (gite, survente etc)

Le MOTH est un mauvais exemple de monocoque sur foil, car l'équilibre latéral n'existe que parce que **le barreur est un funambule**.

Cette configuration est impossible à imager sur un monocoque qui souhaiterait voler dans une configuration identique intégralement au-dessus de l'eau.

Le classement en **Niveau 2** est justifié par le fait qu'il y a toute une partie de la gestion du vol qui est entièrement automatisée. Le palpeur avant et ses organes de transmission représentent une sorte d'algorithme mécanique autonome.

**Niveau 3 :** L'ensemble des actionneurs fonctionnent indépendamment en « boucle fermée » MAIS ces actionneurs sont regroupés en entités (par exemple tous ceux dédiés à un foil, tous ceux dédiés au safran, etc).

Chaque actionneur appartenant à une entité reçoit en continu des informations de position.

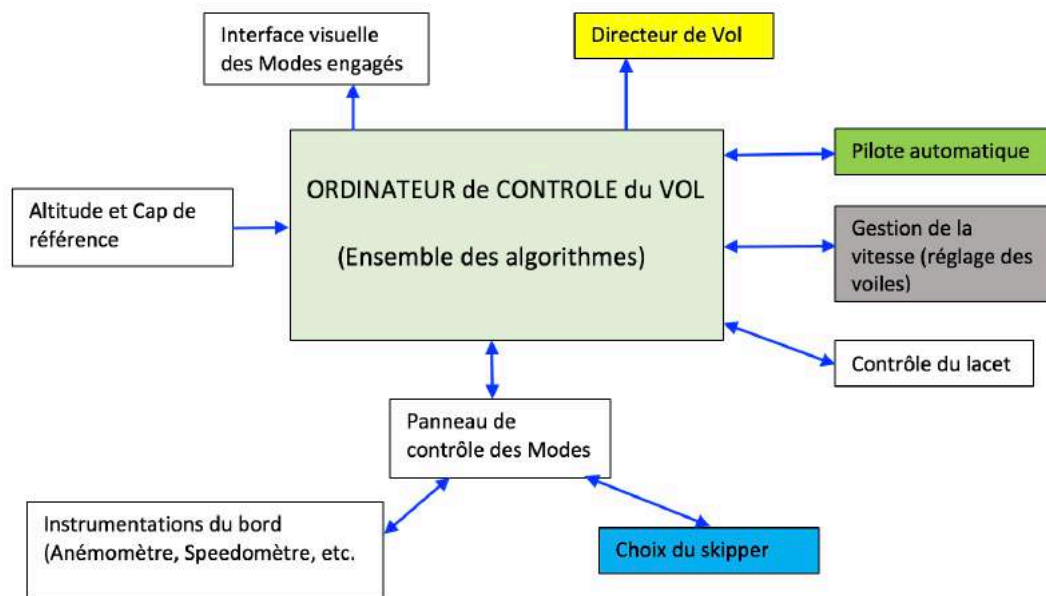
Ces consignes sont gérées en continu par un asservissement en boucle fermée afin que l'entité réponde à sa mission.

Toutes ces entités sont gérées par un algorithme général qui contient les équations de base de vol.

Cet algorithme général intègre les paramètres extérieurs (vent réel, vent apparent, cap, vitesse, etc etc.) ainsi que l'assiette de la plateforme, les réglages de voilure (Trimaran par exemple).

Cet algorithme général fournit à chaque entité un objectif, à charge de chaque entité d'utiliser son algorithme propre pour fournir aux actionneurs qui la compose les consignes nécessaires et de lui rendre compte en continu de l'avancement de la consigne.





La réponse à la question **Quel niveau d'aide autorisé au sens de la règle 52** dépend des règlements édictés par les Classes ou les Organisateurs.

Cela pourrait se résumer en une alternative :

### **Régater avec ou sans « Intelligence Artificielle » ?**

En d'autres mots, si on se limite aux **Niveaux 1 et 2** il faut admettre et c'est d'autant plus vrai en navigation en solitaire :

- ✓ Que le pilote limitera volontairement l'utilisation optimale de son bateau. On parle de 50 à 60% pour un ULTIME naviguant en solitaire.
- ✓ Que dans certains cas, même en pilotage manuel, le pilote sera « dépassé » par la puissance de la machine et qu'il la subira sans pouvoir en reprendre le contrôle.
- ✓ Que, même en régime volontairement « dégradé », le risque de perte de contrôle du bateau et d'un éventuel crash reste important.
- ✓ Que le mythe de la navigation facile par beau temps n'existe plus à cause du vent apparent généré par la navigation sur foils (dernièrement un kite sur foil a navigué à 24 nœuds par un vent réel de 6 nœuds).

Par contre si le **Niveau 3** est la règle, c'est le **mode sportif qui est alors dégradé** car ce sont les performances des algorithmes et des asservissements qui deviennent prépondérantes.

### **Cruel dilemme ?**

#### **Enfin quand est-il de l'énergie ?**

Hormis le MOTH, tous les autres Foilers sont très voraces en énergie électrique et donc pour les Foilers transocéaniques en énergie fossile.

On s'éloigne beaucoup du concept de sport propre qui souhaite être souvent attaché à la course offshore.

Jean SANS  
14 Octobre 2018



**J. SANS (22/01/2020)**

**Classe « Ultim 32/23 » : GITANA se retire de la Classe et vise le trophée Jules VERNE**

## **QUAND le PRINCIPE de REALITE S'IMPOSE.**

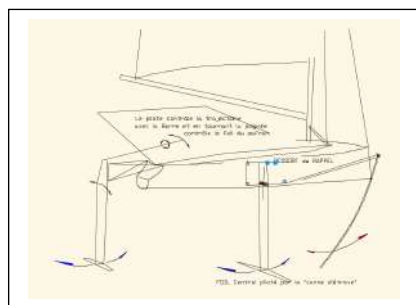
Après avoir publié quelques articles sur les Foilers et les nouveaux AC75, sur le site de l'UNCL, j'évoquais en Octobre 2018 par un titre prémonitoire :  
**« VOLER sur des FOILS, mais surtout PILOTER, telle est la QUESTION ».**

### **La découverte du vol sur des foils**

Cette technique du Vol sur Foils est restée très longtemps confidentielle car étant l'apanage de quelques amateurs éclairés.

Il faut ajouter que les matériaux disponibles ne permettaient pas cette évolution.

Le vol des MOTH nous a montré des images impressionnantes, et c'est « apparemment » facile hors l'agilité du pilote (barreur ?).



Tout paraît simple, aucune énergie additionnelle, juste le vent et la mer, un système d'asservissement très simple (mais intelligent) associé à la dextérité d'un pilote funambule.

Pourtant l'expérience montre que la réalité du pilotage des Foilers apparaît beaucoup plus complexe lorsque le bateau (Foiler) pèse 7 tonnes (IMOCA) ou 15 Tonnes (Trimaran « Ultim 32/23 »). Il apparaît que les masses en mouvement, leurs inerties, la vitesse, le bruit et les mouvements de la plateforme liés au pilotage de ces Foilers ont un effet négatif sur les temps de perception des événements et de l'environnement, ce qui complique et altère sur les capacités de réactions et de décisions des pilotes.

Une régatte en Moth dure une heure environ, l'engin fait 130 kg avec le pilote.

Le pilote est « le cerveau » de l'asservissement, cela signifie qu'à tout instant, à chaque modification de l'environnement et de la position dans l'espace (3 Dimensions) de l'engin (peut-on parler de bateau ?) doit modifier de manière corrélée :

- L'énergie disponible et nécessaire (manœuvre des voiles)
- La trajectoire longitudinale de l'engin (le cap)
- L'assiette longitudinale afin d'être parallèle au plan d'eau (tangage)
- L'assiette transversale (gîte, stabilité)

Certes le pilote est aidé par un système mécanique de détection de l'assiette et de l'altitude de vol, système qui commande l'incidence du foil central horizontal installé à l'extrémité de la dérive.

Mais, il reste au pilote à contrôler manuellement (aussi en s'aidant de son poids) le plan horizontal arrière (PHR) implanté à l'extrémité du safran (Range d'orientation de -3 à +3° environ).

Sur un Moth, le pilote (barreur) est un véritable funambule hyper concentré, ce qui est inimaginable sur un ULTIME, ou même en IMOCA avec un équipage réduit et sur des durées de navigation de plusieurs dizaines de jours.

La Classe AC 75 en autorisant un système d'asservissement (qui n'est pas intégral), mais qui est intégré implicitement un équipage surentraîné, des conditions météorologiques encadrées, des régates diurnes et surtout des durées de régates courts (45 minutes), permet d'assurer des conditions quasi permanentes de VOL fiables.

#### **Le rejet de la réalité**

La volonté de battre des records montrent que dans un sport mécanique (même en Athlétisme, si on considère l'homme comme une machine biomécanique), on se trouve rapidement devant un mur.

Au début les progressions sont rapides, puis, l'évidence montre qu'il faut améliorer le support.

Dans un premier temps, la recherche et l'utilisation de nouveaux matériaux permet de réaliser des grands pas en avant. Je citerais par exemple le passage des mats en bois aux mats en alliage d'aluminium, puis en stratifié carbone.

Pour les régates, une fois que les équipes techniques ont créé toutes les améliorations possibles attachées au régime archimédien dans lequel évoluent les bateaux, il faut tenter de franchir un pas encore plus important, non pas en améliorant l'existant, ce qui est physiquement impossible, mais en changeant de milieu.

Ce sera l'abandon du mode « ARCHIMEDIEN » pour le mode « VOL 3D ». A ce moment on entre dans un domaine relativement inconnu pour des voiliers, bien qu'au début des années 1900 un bateau à moteur ait réellement volé de manière contrôlée.

La Voile (la régate) est un sport-aventure entre l'homme et la nature (la mer, les conditions météorologiques). Toutes les aides extérieures ou mécaniques sont interdites ou encadrées.

Tant que l'on est en régime Archimédien, les aides mécaniques sont faciles à contrôler et à limiter. Cela devient plus compliqué lorsque les moyens de communications évoluent « à la vitesse de la lumière » : MOITESSIER signalait sa position en envoyant deux pavillons du code international des signaux dans son mat lorsqu'il croisait un navire marchand (Signalez ma position au LLYODS de Londres), aujourd'hui le poste communication satellitaire est budget très conséquent pour un IMOCA durant le Vendée Globe.

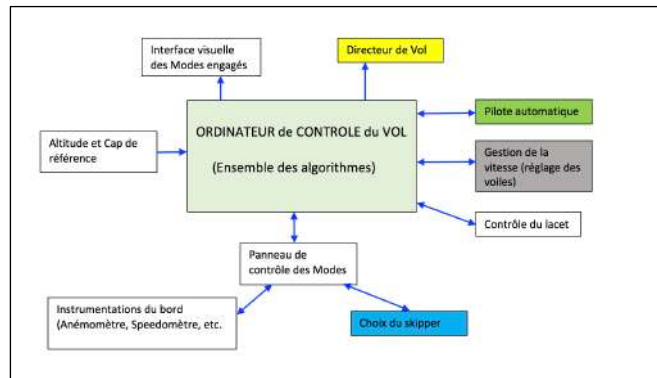
En mode « VOL » c'est le pilotage du Foiler qui devient le problème. En effet maintenir un engin de 15 tonnes à 1,5 à 2 mètres d'altitude au-dessus de l'eau et cela 24H sur 24 en limitant les asservissements, donc en pilotage manuel ou semi manuel est une gageure.

Le débat est engagé depuis plus de deux ans pour les « Ultim 32/23 »

Tous les acteurs sont conscients que créer un système d'asservissement sur les ULTIMES représente des dépenses très importantes.

Mais ces engins ne peuvent réellement naviguer (plutôt voler) autour du monde sans cette technologie.

C'est la raison du retrait de GITANA de la Classe « Ultim 32/23 ».



Et même ainsi équipés, ce ne sera pas une promenade de santé, car voler à 35/40 nœuds, « tous temps », même avec un CONTROLEUR de VOL (voir ci-dessus) demandera une qualification et des compétences réservées à peu de Marins.

Je pense que CAMMAS et CAUDRELIER, ont réellement perçu cela lors de BREST / RIO / LE CAP / BREST.

Jean SANS (22/01/2020)



## Deux analyses à suivre sur les Foilers :

- L'homme confronté à la technique du pilotage des Foilers (Jean SANS 18/03/2020)
- Méthodologie de développement du pilote automatique d'un voilier type « Foiler » (Robert LAINÉ 18/03/2020)

## L'HOMME confronté à la TECHNIQUE de LE PILOTAGE des FOILERS (J. SANS)

### 1- Préambule

Sur un « bon vieux » voilier Archimédien, même à pleine vitesse sur des surfs sous spinnaker asymétrique par 35 nœuds, il suffit de 3 cerveaux : Le barreur, l'équipier à la Grand-Voile et celui qui est à l'écoute de spinnaker.

Le barreur ressent son bateau sous ses pieds (ou sous son cul, s'il est assis) et au toucher de barre (molle, dure, neutre...)

Les deux équipiers perçoivent la vitesse, lisent les pennons, le refus du bord d'attaque du spinnaker... autant d'informations visuelles, physique qui sont automatiquement traduites en réaction : angle de barre, choquer, border etc.

Sur un petit bateau, le reste de l'équipage peut contribuer à conserver une gîte qui limite la dissymétrie de la carène.

Mais dans tout cela, point de connexion électronique, juste un sens marin très développé.

Et si une faute est commise, généralement une anticipation avec un peu en retard, il est souvent possible de la réparer. Il peut aussi arriver que la récupération soit impossible.



En fait en Archimédien, le temps disponible entre la **perception**, la **décision** et l'**action** est suffisamment grand pour que le système fonctionne. La vitesse du bateau, qui reste raisonnable, bien que 16, 20 nœuds paraissent la quintessence, contribue à rendre le pilotage possible par l'homme.

Les pilotes automatiques, de plus en plus sophistiqués s'en sortent pas mal, dans le sens où ils assurent la poursuite fiable d'un cap.

En fait il faut dissocier deux choses lorsque l'on suit une route (un cap). Il y a l'objectif final : le cap à suivre pendant « x heures » et la performance du bateau à l'instant « t ».

Si le pilote convient très bien pour l'objectif « Cap », on sait que le barreur est bien meilleur pour obtenir la quintessence de son bateau à chaque longueur parcourue. Ce sont que des dixièmes de nœuds mais c'est important en régate.

Le pilotage d'un voilier Archimédien est plus facilement contrôlable (homme et/ou machine<sup>1</sup>) parce que le bateau évolue en deux dimensions et que sa forme en tant que modèle hydrodynamique lui fournit une stabilité de route plus facilement contrôlable.

Avec un Foiler, on change de monde et surtout d'environnement, puisque le « bateau » quitte l'environnement Archimédien pour entrer dans un environnement totalement discontinu.

Pour un Foiler, on se base beaucoup sur le Vol des avions.

---

<sup>1</sup> Par le mot « machine », il faut comprendre : pilote automatique, des capteurs électroniques, etc.

En théorie, les équations de vol sont identiques pour un avion comme pour un Foiler, avec toutefois une différence majeure qui se trouve être le milieu dans lequel l'élément sustentateur évolue.

Les ailes de l'avion se trouvent en permanence dans un milieu continu (l'air : 1.025 kg/m<sup>3</sup>), les foils du Foiler rencontrent un fluide totalement discontinu qui passe de l'eau homogène à de l'eau contenant des bulles d'air et même au remplacement de l'eau par l'air, ce qui perturbe l'écoulement et la portance du profil du foil.

Le ratio de 1000 entre l'air 1.025kg/m<sup>3</sup> et l'eau 1025 kg/m<sup>3</sup> constitue un « obstacle » incontrôlable à 100%.

Ensuite le Foiler introduit une dimension complémentaire : **l'altitude de vol**. On passe en évolution 3D, c'est-à-dire que l'on se trouve obligé de contrôler **6 degrés de liberté** (3 translations et 3 rotations) alors qu'en mode Archimédien (2D) on ne gère que 4 degrés de liberté (2 translations et 2 rotations).

Certes en Archimédien le bateau « monte et descend », mais il le fait « au gré de l'état de la mer », ce qui est incontrôlable.

En réalité en 3D, seul les contrôles directs des 3 rotations (Tangage, Roulis, Lacet) et de la translation verticale (Altitude de vol) sont nécessaires. En effet la translation latérale correspond à la dérive qui est incontrôlable et la translation longitudinale relève de la vitesse et du cap à suivre.

Le mode « Vol », possède un corolaire qui est de conserver une altitude la plus constante possible.

Cette stabilité en altitude repose sur la portance des ailes (foils).

Cette portance dépend de deux paramètres :

- La vitesse dans le fluide (eau pour un foil)
- La portance du profil des foils, cette dernière s'écroulant brutalement dès que l'angle d'incidence du foil flirte avec le 12 ou 15°.

Ajoutons que deux phénomènes parasites : la ventilation et la cavitation peuvent instantanément réduire la portance à « zéro », pour peu que les conditions physiques soient réunies.

Cet écroulement instantané de la portance est lié au fait que les Foils évoluent dans un milieu discontinu.

## 2- L'Homme ou la Machine

L'homme est-il capable de piloter un Foiler ?

Ce qui est certain et admis, c'est que le pilotage « manuel » ne peut plus se faire sans assistance technique (efforts nécessaires pour la manœuvre des appendices, des voiles, etc.).

Ce qui est aussi certain, c'est que plus la vitesse est importante, plus le temps de pilotage durant lequel l'attention du pilote (mais aussi de l'équipage) est maximale est court.

Ce qui est aussi vrai, c'est que piloter un Foiler ne sera pas ouvert à tout le monde.

Pour prendre un exemple plus courant : Piloter un Foiler revient à conduire à grande vitesse sur une route verglacée ou l'anticipation en termes de pilotage représente la clef de la trajectoire de la voiture.

Un retard décisionnel de 0.1 (ou même moins) seconde suffit pour toucher la barrière de sécurité !

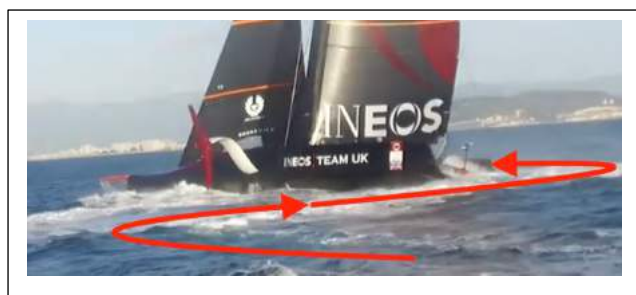
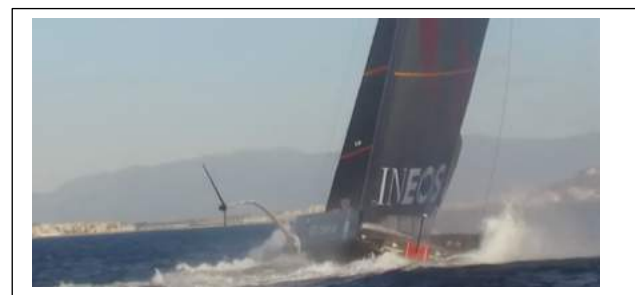
Le pilotage d'un Foiler est un enchaînement de séquences :

Manœuvre d'empannage sur la route à suivre : la vitesse du vent apparent chute, de fait la vitesse du Foiler chute aussi, donc la portance du foil diminue et l'altitude de vol décroît.

Réaction, le pilote (ou l'équipage) augmente la cambrure du profil du foil (avec le Flap) ou l'incidence du foil, la portance revient, le Foiler reprend de l'altitude MAIS l'empannage termine sa transition, le nouveau cap redonne du vent apparent ET comme la cambrure (ou l'incidence) est élevée, la portance du foil « explose » (carré de la vitesse), le Foiler est subitement sustenté... comme simultanément l'assiette a été contrôlé avec le PHR... ce dernier sort de l'eau et le bateau plonge dans la mer... se bloque irrémédiablement.

L'enchaînement des événements tel qu'ils sont présentés ci-dessus, paraît confus, mais c'est volontaire, afin de montrer que toutes ces manœuvres et décisions se déroulent en moins de 2 secondes... durant ce laps de temps, le cerveau doit identifier, quantifier, hiérarchiser des informations de très faibles intensités (accélérations en 3D, angles, etc.), les interpréter et décider des opérations à réaliser immédiatement en les ajustant en permanence à la configuration du moment (boucle fermée).

Les dernières vidéos de AMERICAN MAGIC ou de INEOS (ci-dessous)



*Le pilotage d'un Foiler revient à anticiper plusieurs manœuvres conjointes (et dans le bon ordre), dans un laps de temps hyper court.*

#### La Machine s'ajoute à l'Homme ?

A priori en régate, remplacer l'homme par la machine paraît aberrant, car autant faire des régates avec Virtual Skipper. Pourtant la complexité du Foiler amènera à accepter cette aide.

En fait, toute cette analyse met en évidence que bien que l'Homme ne soit pas intrinsèquement le point faible des « sorties de route », elle montre simplement que **dans le temps impartit par la vitesse de l'engin**, il est impossible à l'Homme de gérer les décisions et manœuvres appropriées. Non pas qu'il ne sache pas comment faire, mais ses moyens sensoriels ne lui permettent pas de dominer la situation.

Par exemple, le cerveau humain perçoit très mal les accélérations dans un plan horizontal. L'important n'est pas la perception de la vitesse par elle-même, mais la perception de l'instant où le Foiler commence son accélération (ou sa décélération). Cette perception de l'accélération, sera l'origine d'une série d'action à engager afin que les équations de vol à venir restent opérantes.

Si le pilote ne perçoit pas ou alors identifie cette accélération avec un très léger temps de retard, les actions mise en œuvre ne s'opposeront pas à une sortie de route.

Mais identifier l'accélération ne suffit pas, encore faut-il que son identification corresponde ou s'intègre dans une manœuvre structurée, qui correspond à des équilibres en vol à venir dans les secondes qui suivent. Ce qui sous-entend l'existence d'un domaine de vol prédéfini lié à cette manœuvre.

A cet instant la « Machine » intervient.

### 3- Le Pilotage d'un Foiler

Avant de parler de pilotage il faut préciser ce que l'on entend par « pilotage ».

Il y a trois modes possibles de pilotage :

- **Le pilotage manuel** assuré par un barreur et des équipiers. Ce type de pilotage concerne l'instant « t », il optimise les performances du bateau en fonction du vent à l'instant et de l'état de la mer rencontré et en maintenant une altitude et une assiette de vol correcte. Le cap à suivre est sous-jacent dans le sens ou il reste l'objectif global. Cela signifie que le cap à un instant peut être différents du « cap objectif ». Ce type de pilotage convient pour certaines utilisations de Foilers et reste limité à des bateaux de petites dimensions.
- **Le pilotage manuel assisté**. Il faut entendre par « assisté » une assistance intellectuelle, c'est-à-dire une aide à l'analyse, à la décision et à l'action.  
Les ordres donnés par le pilote vers les actionneurs des appendices transitent par un calculateur qui impose ses propres actions permettant d'assurer le contrôle de la plateforme (voir organigramme en page suivante). On parle de « **Boucle Court Terme** ».  
La « Boucle Court Terme » génère un pilotage fin, longueur après longueur de bateau.  
L'assistance fournie peut être graduée en fonction des prescriptions sportives.

**Le pilotage automatique** assure la gestion du Cap<sup>2</sup> imposé ET le vol à une altitude choisie la plus constante possible, sans pour autant optimiser les performances du bateau. On parle alors de « **Boucle Long Terme** ».

#### 3-1 **Le pilotage Manuel assisté**

Actuellement les Foilers sont plus ou moins équipés de systèmes d'assistance au pilotage.

Dans le domaine de l'assistance continue (asservissement du Foil central), le plus abouti est le Moth. Mais la technique utilisée sur ce monocoque Foiler n'est pas transposable sur un Foiler offshore, ou même sur un AC75 à cause de l'effet d'échelle.

En effet sur un Moth le skipper pèse plus lourd que le bateau, il peut donc jouer le rôle d'un funambule pour maintenir le centrage du poids idéal et ajuster manuellement avec le Plan Horizontal Arrière.

L'idée est donc de concevoir une sorte de « shadow » système qui agit entre les ordres du pilote et les informations fournies par les capteurs vers les commandes des actionneurs des appendices afin d'arriver à obtenir l'objectif souhaité.

Il faut comprendre que ce système ne pilote pas le bateau (au sens de cap global à suivre), mais assiste le skipper dans ses décisions sur tous ces courts moments qui se suivent et se répètent d'ailleurs à l'infini pour maintenir le Foiler en Vol (réglage des voiles, réglage des flaps, réglage du PHR).

Ce système devient un « **directeur de vol** ».

Il est indépendant de la trajectoire générale (par exemple le cap pour aboutir à un waypoint distant de 50 ou 200 milles). Sa fonction est, si on simplifie, de maintenir le Foiler au-dessus de l'eau à une altitude la plus constante possible.

Il devra gérer :

- a) Des éléments mécaniques qui contrôlent la Micro-Trajectoire<sup>3</sup> (évolution en 3D)
- b) La puissance du « Moteur » : vitesse du Foiler (soit la vitesse du fluide qui passe autour des Foils).
- c) Le Lift des foils : la portance disponible.

Ces 3 paramètres possèdent chacun des arborescences, liées entre elles par des « ponts ».

C'est cette osmose qui rend le « directeur de vol » très complexe.

---

<sup>2</sup> Le cap est imposé par le skipper, soit par rapport au vent réel, ou au vent apparent, ou encore par rapport aux polaires.

<sup>3</sup> On peut dire que la Micro-Trajectoire est celle qui correspond aux quelques dizaines de mètres parcourus et qui s'enchaînent à l'infini, la Macro-Trajectoire étant la route à faire (le cap)



### Dans la pratique que devient la relation entre le pilote et le « Directeur de Vol » ?

Le directeur de vol assiste le pilote dans sa tâche de pilotage en mode manuel assisté.

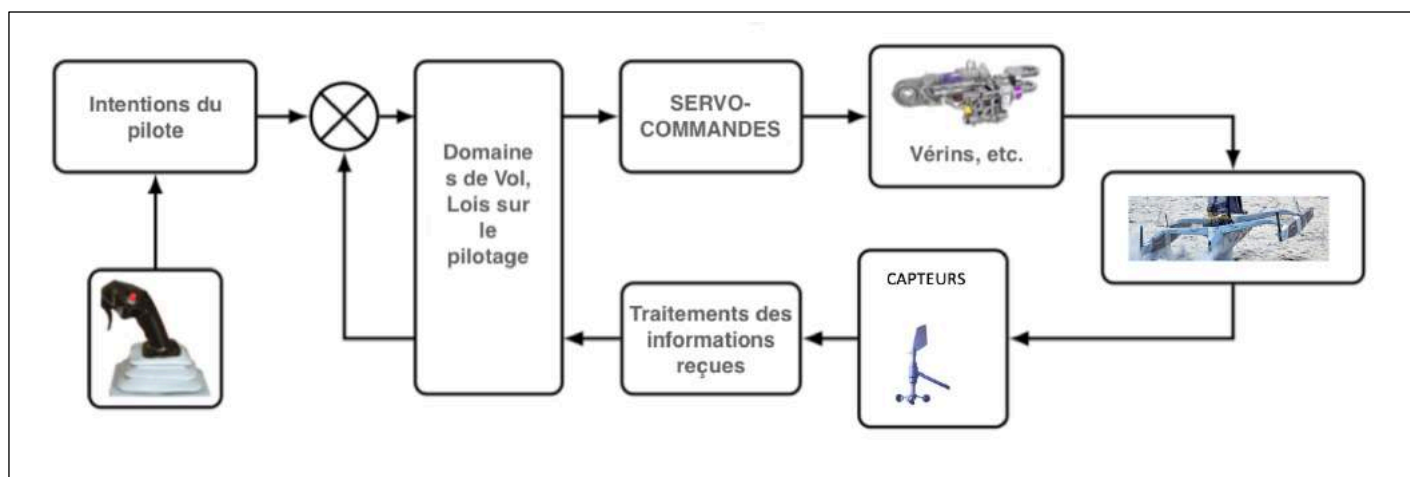
Ainsi, lorsque le pilote lance sur une route définie (cap), une manœuvre et/ou une modification de trajectoire à un instant « t », il n'agit pas directement sur ces actionneurs (flaps, vérins, etc.) mais il fournit au « directeur de vol » une **intention** qui peut être : un cabré, un piqué, une modification très temporaire de la route, une modification de puissance, etc.

Cette intention est analysée par le « directeur de vol », comparée aux domaines possibles de vol du Foiler, aux conditions extérieures de l'instant, aux paramètres instantanés de vol du Foiler. A l'issue de l'analyse, les informations sont envoyées aux appendices, au contrôle de la puissance.

Le système est tel que les résultats sont comparés en permanence aux consignes à atteindre (boucle fermée) et tout cela s'enchaîne, s'adapte au fur et à mesure que le Foiler se déplace en 3D (Vol).

Il me semble clair que très rapidement les Foilers seront pilotés activement par des processeurs. Pour le moment c'est pratiquement interdit par les règles de course et de classe, mais vu le gain de vitesse et surtout de sécurité à attendre de l'automatisation du pilotage des Foilers, ce n'est qu'une question de temps avant que ces barrières tombent.

L'**Ultim** « Edmond de Rothschild » s'est déjà affranchi des règles de la classe Ultimate, d'autres suivront. Côté America Cup (AC), ce type de pilotage assisté est interdit en course, mais il a été utilisé pour mettre au point les algorithmes de pilotage et entraîner les équipages à essayer de faire aussi bien que le processeur !

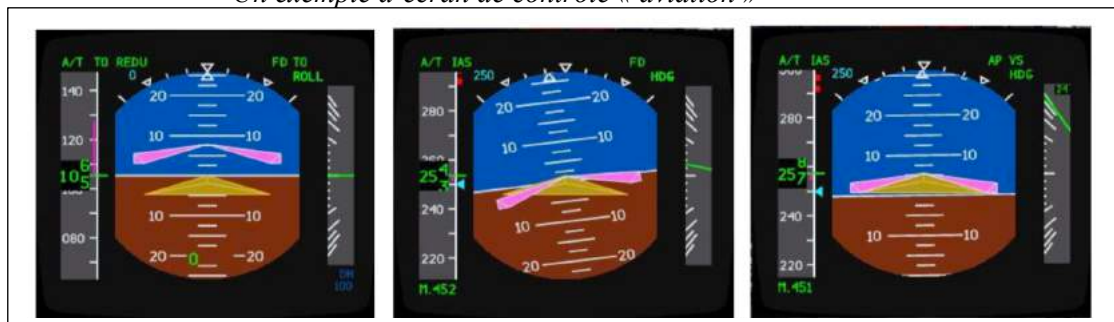


### Comment le pilote agit ?

On peut imaginer de multiples systèmes.

En aéronautique on demande au pilote de suivre l'imagerie renvoyée sur un écran en agissant sur le « manche ».

#### *Un exemple d'écran de contrôle « aviation »*



*Assiette longitudinale(!)*

*Inclinaison (!)*

*Vol « OK »*

Cela paraît simple, la réalité est quand même plus complexe car le paramètre puissance (c'est-à-dire la vitesse) disponible est très difficile à maîtriser. Il n'y a pas de manette de gaz sur un voilier.

En effet, la force propulsive vélique découle de la projection sur la trajectoire du Foiler, du vecteur portance vélique des voiles.

Ce vecteur propulsif est potentiellement moins important que la portance aérodynamique de la voile qui dans le cas d'un Foiler travaille en régime laminaire.

Cela rend le Foiler sous motorisé, malgré une surface de voile importante. Une grande partie de la portance aérodynamique est « convertie » en dérive (d'où le risque de chavirage).

### 3-2 Le pilotage en mode « pilote automatique (PA) »

En mode pilotage automatique, le skipper passe théoriquement intégralement la main à la « machine ».

Le skipper fixe trois paramètres :

- **Le Cap**
- **La Vitesse**
- **L'altitude vol**

En pratique fixer le Cap et le tenir ne pose pas de problème. Les Pilotes Automatiques existants réalisent très bien cette fonction.

C'est beaucoup plus compliqué pour que le pilote automatique respecte la Vitesse et l'Altitude de Vol. Avec ces deux paramètres étroitement liés, la nature même du Foiler apparaît en vraie grandeur.

En mode Foiler, **l'Altitude de Vol**, c'est-à-dire l'âme même du Foiler, est intrinsèquement liée à la vitesse. Certes on peut compenser une baisse de vitesse momentanée par une augmentation du cambrage du foil (Flap) ou si cela est techniquement possible par une augmentation de l'incidence du Foil. Mais cette adaptation est très limitée, car à trop en faire, on risque le décrochage

La deuxième solution serait d'accélérer pour retrouver plus de portance, mais un système vélique n'a pas vraiment de réserve de puissance disponible qui plus est, instantanément.

De plus les Foilers naviguant avec un vent apparent supérieur au vent réel, un déséquilibre des deux vecteurs, vent vitesse et vent réel, impose une adaptation immédiate du réglage des voiles, ce qui est compliqué, même si les Foilers évoluent pratiquement en permanence en régime laminaire.

En fait autant, le réglage des Flaps ou même directement de l'incidence des foils ou du PHR peuvent être asservis, donc intégré dans un soft qui gère le vol, autant, en mode PA, le réglage (et l'adaptation) de la vitesse paraît très difficile, voire impossible à réaliser.



Un ordre de grandeur :

Une baisse de vitesse de 25 à 24 nœuds soit 4%, produit une chute de la portance (à incidence égale) de 7.8%.

### 3-3 L'acquisition des données nécessaires au « Vol »

Il y a deux familles de données :

- Les données internes au Foiler
- Les données relatives à l'environnement.

#### Les données internes :

Ce sont celles qui sont collectées à partir des capteurs installés sur les appendices, les équipements, les structures.

### Les données externes :

Pour certaines données l'acquisition ne pose pas de problèmes :

- Les données GPS
- Le cap
- L'anémomètre, la girouette
- Le speedomètre (pour le régime archimédien)
- Les accélérations dans les 3 axes (accélérations linéaires et en rotations)
- Les assiettes (TRIM) longitudinale et transversale

Pour d'autres cela peut devenir très compliqué

- L'altitude de vol est très difficile à quantifier car la plateforme n'est pas toujours horizontale et aussi parce que la surface de l'eau est loin d'être un plan.
- L'état de la mer devant « l'étrave ». Des systèmes embarqués de reconnaissances et de quantifications des formes du plan d'eau (situé devant le Foiler) par caméra numérique ou balayage laser existent.

Ces technologies embarquées sont souvent encore à l'état de prototypes, mais demandent des moyens techniques à la fois hors de prix et/ou énergivore.

Il est évident qu'une bonne connaissance du terrain dans lequel le Foiler évoluera dans une ou deux secondes est indispensable. A 30 nœuds un Foiler parcourt 15,4 m à la seconde, cela suppose une très grande réactivité du système de détection et d'analyse.

Seul les Foilers motorisés peuvent passer en force, un Foiler vélique est handicapé par sa sous-motorisation (le vecteur portance des voiles n'est dans la sens de la trajectoire) et aussi par le manque de réactivité des voiles et des systèmes mécaniques (et humain ?) qui règlent les différentes voiles.

## **4- Conclusion**

Le pilotage d'un Foiler paraît être étroitement lié aux capacités neuronales du pilote (et de l'équipage).

En effet le nombre d'informations à ordonner, à traiter ainsi que les décisions à prendre, en un temps hyper court, paraît dépasser les capacités du cerveau humain.

Il faut noter que l'élément qui paraît rendre inopérant les résultats des décisions prises par le pilote, est uniquement temporel.

Certaines personnes possèdent des capacités neuronales plus développées que d'autres, comme c'est le cas pour les capacités physiques. Mais il est certain que c'est la vitesse et l'afflux de données à traiter quiature les « capacités du cerveau ».

Les neurosciences peuvent-elles nous aider à développer nos capacités cérébrales, voire à en créer de nouvelles et combler ce déficit décisionnel ?

On lit des communications scientifiques qui évoquent des recherches de techniques biomédicales regroupées sous le terme de « neuro-amélioration ». Surprenant, est-ce une nouvelle forme de dopage ?

Cela me rappelle une lecture de jeunesse, « *Le meilleur des mondes* » d'Aldous HUXLEY ou l'auteur, en évoquant les « bébés éprouvettes » recommandait, pour la formation des pilotes d'avion de combat, de retourner tous les jours l'éprouvette afin de les habituer à avoir la tête en bas...

JS.

## Méthodologie de développement du pilote automatique d'un voilier type « Foiler » (R. LAINÉ)

Une fois posée la problématique du pilotage automatique d'un Foiler, il faut aborder la question suivante : comment développer efficacement le pilote automatique ?

### 1- Les bases du pilotage d'un Foiler

#### 1.1 Cas d'étude simple

Prenons comme cas d'étude, un Foiler équipé de 4 foils porteurs (2 foils dans l'axe essentiellement pour pouvoir tenir l'assiette longitudinale et l'altitude et 1 foil de chaque côté pour contrer la force aérodynamique de la voilure et assurer la stabilité latérale).

Le foil arrière fera aussi office de safran, bien que ceci puisse aussi être assuré par le foil avant et même partiellement par les foils latéraux.

Ce type de plateforme est plus stable que celle des AC75, et étant plus stable elle sera plus « facile » à piloter.

Pour simplifier la propulsion sera assurée par une aile unique, dont la portance (réglage de l'incidence) sera régulée par rotation autour de l'axe vertical.

Pour maintenir l'équilibre stable en vol il faut deux conditions :

- Que la somme vectorielle des forces qui interagisse sur le Foiler soit nulle.
- Que la somme des moments de chacune des forces (ci-dessus) par rapport à un point quelconque soit aussi nulle.

Les forces sont celles générées par les foils, la voile, la gravité qui s'exerce sur la masse totale du Foiler.

Si ces deux équilibres sont rompus, le Foiler va : ou accélérer, ou ralentir, ou monter, ou descendre, ou tourner, ou chavirer etc. En fait, le déséquilibre (la variation d'une seule force suffit pour causer ce déséquilibre) va amener le Foiler à se mouvoir selon un ou plusieurs des 6 degrés de liberté.

Il faut aussi garder à l'esprit que la vitesse du Foiler est le paramètre déterminant dans l'équilibre du vol. La raison est que la portance « hydrodynamique » d'un foil ou « aérodynamique » d'une voile varie avec le carré de la vitesse.

Passer de 10 à 12m/s augmente la portance de 44% alors que la vitesse n'augmente que de 20%.

Mais une fois l'équilibre du Foiler atteint à l'instant « t », il faut l'adapter immédiatement et rapidement aux variations du vent (force et direction) comme aux conditions de mer et implicitement aux conditions de portance et cela à l'instant suivant « t' » ( $t' = t + \varepsilon$ ).

En effet si aucune action n'est lancée dès que le Foiler rencontre une vague, il va buter dedans, donc ralentir et obligatoirement retomber brutalement derrière la vague.

Comme il est impossible de maîtriser les fluctuations du vent et les vagues, il ne reste comment variable d'ajustement que l'incidence de la voile par rapport au vent afin de maintenir la vitesse (qui assure la portance), et l'incidence des foils pour maintenir le Foiler hors de l'eau.

**Ces multiples réglages en permanence interconnectés, devront être continus et d'autant plus rapide que la vitesse du Foiler sera élevée.**

#### 1.2 Quelques ordres de grandeur

Chiffrage de l'ordre de grandeur des variations de portance nécessaires afin de suivre la surface de la mer à une altitude la plus stable possible.

Hypothèse d'un cas théorique :

- Houle sinusoïdale dont l'amplitude est  **$h=1m$  (soit 2 m entre le haut et les creux)** avec une longueur d'onde  **$L=100m$**
- Foiler : **longueur 20m, masse 6500 kg, inertie au tangage 200 000 kg·m<sup>2</sup>**
- Vitesse du Foiler face à la houle :  **$V_x=20 m/s$  (40 nœuds).**

La période de houle vue par le Foiler est égale à :

**$T = L/V_x = 5s$** , ce qui correspond à une pulsation  **$\omega = 2\pi / T = 1,256 \text{ rad/s}$** .

Sur la base d'un Vol à une altitude constante au-dessus de la surface de l'eau, en « épousant » la houle, le centre de gravité suivra une variation temporelle verticale de la forme :  **$z = h * \text{Sinus}(\omega * t)$**

L'accélération verticale au centre de gravité est donc de la forme :  $\gamma_z = -h * \omega^2 * \text{Sinus}(\omega * t)$ .

La valeur maximale de cette accélération sera de :  $h * \omega^2 = 1,579 \text{ m/s}^2$ . Soit  $\gamma_{z\text{Max}} = 0.16 \text{ g}$ .

On revient maintenant à la portance effective des foils :

- Sur eau plate, pour extraire le Foiler de l'eau, il faut produire une portance  $F_z = 6500 * 9,81 = 63765 \text{ N}$ .
- Pour « escalader » la houle il faut une portance  $F_{z\text{max}} = 6500 * (9.81 + 1,579) = 74\,028 \text{ N}$
- Pour « descendre » la houle il faut une portance  $F_{z\text{min}} = 6500 * (9.81 - 1,579) = 53\,501 \text{ N}$

On remarque que dans ces conditions le pilote automatique devra changer l'incidence des foils afin d'obtenir une **variation cyclique de portance totale de  $\pm 10\,263 \text{ N}$  avec une période de 5s**.

Toujours dans ce cadre de houle théorique, il faut s'intéresser à la **rotation en tangage (autour de l'axe transversal) nécessaire** pour que l'avant et l'arrière du Foiler conservent une altitude constante par rapport à la surface de l'eau.

- La pente maximale de la houle est égale à :  $h * (2 * \pi / L) = 0.1256 \text{ radians}$
- L'accélération angulaire maximale sera :  $w'' = 0.1256 * \omega^2 = 0.198 \text{ rd/s}^2$
- Le couple de tangage nécessaire pour obtenir cette accélération angulaire est égal à :  
 $C = I * w''$ , ou I est le moment d'inertie du Foiler (ou quadratique) en tangage.

**Cela donne :  $C = 39\,600 \text{ N.m}$**

Sur ce modèle de Foiler, équipé d'un foil AV et d'un Foil AR, la distance entre foils est de 15m.

Dans cette condition de vol, la **différence de portance à appliquer entre les foils AV et AR sera de  $63200 / 15 = 2\,640 \text{ N}$** , différence qui devra être décalé de 1/4 de période par rapport à la houle.

On voit dans cette hypothèse relativement simple (une « bonne houle mathématique »), que le pilotage des foils porteurs AV et AR apparaît déjà complexe puisqu'il faut appliquer sur ces foils AV et AR des variations alternatives d'incidence synchrones afin de faire monter et descendre le Foiler. Et ces manœuvres doivent être répétées toutes les 5 secondes (**Période de la houle :  $T = L/V_x = 5\text{s}$** ).

Mais tout ce calcul n'est valable que dans l'**hypothèse où la vitesse reste constante pendant tout le cycle de 5s (Période de la houle)**.

### **1.3 La relation entre portance et traînée**

Toute variation de la portance d'un foil est réalisée soit par changement de son angle d'incidence soit par sa cambrure, avec comme corollaire que cette modification de portance se traduit par une variation de la traînée correspondante du foil.

Le problème est que la relation entre la traînée et la portance n'est pas linéaire. Autour du point moyen de portance, la traînée varie pratiquement avec le carré de la portance.

Autrement dit : lorsque l'on demande un surcroît de portance, la traînée augmente plus qu'elle ne diminue lorsqu'on impose une réduction de portance.

Au total, si la portance varie cycliquement (nécessaire pour suivre la surface de la houle), la traînée totale sera nettement supérieure à la traînée qui correspondrait à la portance moyenne sur eau plate. Il faut donc prévoir que la voilure puisse fournir la surpuissance nécessaire pour compenser la variation de traînée. Mais si on garde en permanence cette surpuissance, il y aura une survitesse dès que le Foiler rencontrera une ou deux vagues moins hautes que les précédentes. On comprend qu'il devient donc nécessaire de moduler la puissance de la voilure en fonction de la hauteur de la houle.

### **1.4 Voir avec un « œil » d'avance...**

La problématique est la suivante : La surface de la mer n'est pas une onde sinusoïdale théorique donc la pente de cette surface va être mathématiquement imprévisible. Quelle sera la forme de la surface de la mer lorsque le Foiler escaladera la houle et franchira la crête ?



Mesurer à l'instant « t » la hauteur de vol au-dessus de l'eau à l'avant et à l'arrière, est nécessaire, mais ces paramètres ne sont utiles qu'à cet instant « t ».

Extrapoler à partir des derniers instants pour anticiper la situation à l'instant « t + 1 » revient à faire un pari très incertain dès que la mer est très agitée et encore plus au sommet de la vague qui peut présenter une discontinuité notoire.

Donc, pour assurer la stabilité de vol, la connaissance de la pente de la houle devant le bateau et de l'autre côté de la ligne de crête est indispensable afin d'anticiper la rotation en tangage nécessaire en plus de l'accélération verticale à donner pour éviter de planter le nez du Foiler dans la houle.

On comprend que toute observation prise au niveau du pont ne donnera pas d'information sur ce qui se passe de l'autre côté de la crête de la houle, il faut élever l'élément détecteur pour voir l'état réel de la mer.

Apparaît ainsi la nécessité de disposer sur le mât d'une caméra, ou d'un LIDAR (télédétection par laser) ou encore d'un radar afin de cartographier la forme de la houle que le Foiler va rencontrer à « t+ 1 », de l'autre côté de la crête.

**BILAN :** Les actions nécessaires au **pilotage en 3 dimensions** nécessitent que le pilote et ses équipiers traitent et interprètent dans un espace-temps hyper court le « volume » d'informations qui vont affluer en régime continu depuis les divers capteurs.

Le temps de réponse moyen d'un humain est de 0.2s (à 40 nœuds, soit 20 m/s cela représente du déplacement de 4 m).

Les calculs présentés ci-dessus montrent que le pilotage nécessite des ajustements cycliques des réglages dont la période est de 5 secondes. Cela induira que l'humain aura un retard de phase d'au moins 15° dans chacune de ses décisions.

Force est d'en déduire que le pilotage entièrement manuel est en pratique impossible.

Mais cela sous-entend aussi que les données collectées par les capteurs soient cohérentes et surtout fiables, ce qui n'est pas évident à réaliser lorsque les capteurs sont implantés sur une plateforme très peu stable.

Par exemple, prenons cette plateforme de 20 m équipée d'un mat de 25 m, où est installé en tête de mat, une source détectrice qui vise à 75 mètres devant l'étrave (angle plongeant de 71°).

Un moment de tangage de 1°, génère à 75 mètres un « glissement » de la visée de l'ordre de 7 mètres. Et encore cette hypothèse ne prend pas en compte la déformation du mat que ce soit en dévers, en cintrage.

Il faudra que le capteur soit gyrostabilisé ou plus probablement qu'il intègre une centrale inertielle pour corriger les données des mesures.

Cela montre que la fiabilité des données reçues devra être excellente si on veut un vol stable sans incident.

## 2- Quid d'un système de pilotage ?

### Les Modes de réglage des incidences

Un Foiler lorsqu'il est en vol dépend de deux paramètres :

- La vitesse de vol (puissance vélique)
- La portance fournie par les foils (Lift)

#### La vitesse de vol :

Sur un Foiler vélique, la puissance disponible peut-être modulée en ajustant l'angle d'incidence sur la voile par rapport au vent apparent.

Le pilote dispose de deux méthodes, soit agir sur le réglage de l'écoute de voile soit modifier le cap du bateau.

La première méthode demande beaucoup d'énergie et son temps de réponse est très important.

La seconde méthode en agissant sur la barre est par contre très réactive et surtout peu énergivore.

Le pilote automatique devra donc conçu sur ces deux bases :

- Agir sur la barre pour les ajustements rapides et de faible amplitude de l'incidence de la voilure.
- Activer des vérins ou des motorisations puissants afin de border/choquer le plan de voilure, lorsque le réglage doit être plus important.

La modulation de la portance :

Trois méthodes sont possibles :

- Soit on agit directement sur l'orientation du foil autour d'un axe perpendiculaire au profil. Cette rotation peut être réalisée avec un vérin, mais cela demande de l'énergie. Il aussi possible d'utiliser un système de « Trim-tab » très peu énergivore (système utilisé sur certains avions pour l'empennage arrière).
- Soit on agit sur la forme du profil du foil. On utilise alors un volet de bord de fuite qui modifie la cambrure du foil
- Soit on agit sur le cabrage de la plateforme. C'est plus délicat et l'amplitude de la modification de l'incidence est plus faible. En fait on utilise le plan régulateur arrière pour enfonceur ou soulever l'arrière du Foiler.

Il faut garder à l'esprit que le temps de réponse de tous ces actionneurs doit être inférieur à 0.1s afin de maîtriser le Foiler lorsqu'il est lancé à 20 m/s (40 nœuds) dans une houle raisonnable.

### **3- Méthodologie de développement**

On aura compris que l'enjeu majeur du pilotage automatique d'un Foiler se situe dans la variabilité de l'environnement dans lequel le Foiler évolue, c'est à dire la variabilité du vent et surtout celle de la surface de la mer.

A partir de ce constat, deux options sont envisageables pour développer un pilote automatique.

#### **3.1 Cycle de développement classique dans le nautisme**

On conçoit et calcule le bateau, sa voilure, ses foils avec les connaissances du moment ;

- On demande à des électroniciens et informaticiens de concevoir un pilote automatique et d'évaluer la puissance nécessaire pour le rendre opérationnel.
- On lance une campagne d'essais en mer sur le premier bateau afin d'ajuster les paramètres du pilote automatique et vérifier son comportement dans des conditions plus ou moins représentatives mais en préservant le matériel.
- En cas de désordres ou de bugs, retour à la case conception afin d'envisager une autre combinaison du trinôme : FOILS-VOILURE-PILOTE, etc. Cette opération n'est pas évidente car n'ayant que quelques cas de test, il est complexe de déduire toutes les bonnes évolutions à réaliser.
- Au final, le meilleur réglage possible est mis en place pour différentes conditions sélectionnées, en intégrant les limites à ne pas dépasser.  
Comme on n'a pas pu explorer physiquement tous les cas possibles, on peut être conservateur et rester loin des limites afin d'assurer la sécurité, ou alors être plus joueur en faisant des hypothèses sur la marge restante au-delà de ce qui a été réellement essayé.
- Il arrive qu'à la fin le bateau soit ce que les anglo-saxons appellent un « *lemon* » (un « loupé »), reste alors à trouver un client pour le racheter, et concevoir le bateau suivant sur la base des leçons apprises...

#### **3.2 Cycle de développement des systèmes complexes**

Le Foiler est compris comme étant un système complexe car les interactions sont trop imbriquées pour être traitées de manière isolée, par exemple, le bateau d'un côté, ses foils d'un autre côté, idem pour la voilure, le pilote automatique et l'énergie.

- Dans ce cas on commence par développer un simulateur numérique de l'environnement que verra le bateau. Ceci permettra de simuler tous les états possibles de la mer et du vent. Sur ce simulateur d'environnement on greffera un modèle numérique du système complexe, dans notre cas le Foiler ;

- Ensuite on développe un modèle numérique du Foiler qui comprend bien sûr les modèles de coque, de voilure, des foils, le calculateur du pilote et ses algorithmes ainsi les vérins de réglage. Étant donné la vitesse de l'engin, il faudra porter une grande attention à ce que ce modèle numérique soit bien représentatif de la vitesse des actionneurs permettant d'ajuster les incidences sur les foils et la voilure ;
- On mène des campagnes d'essais sur le simulateur complet (environnement + Foiler) pendant lesquelles on va explorer aussi bien les conditions normales que les conditions limites et dégradées, conditions que l'on espère ne jamais rencontrer. Tout ceci afin de déterminer en toute sécurité le comportement du Foiler, les efforts sur les points critiques et la stabilité du pilote automatique dans ces conditions extrêmes ;
- Si ce n'est pas concluant, on retourne à la case développement du modèle numérique du Foiler pour changer coque, foils, voilure, vérins et les algorithmes du pilote, pour ensuite repartir sur une nouvelle campagne d'essais sur le simulateur. Cette boucle est répétée autant de fois que nécessaire pour trouver le design optimum, sans faire prendre de risque à un équipage, ni avoir à fabriquer coque, foils, voilure, etc ;
- Un fois que l'on a exploré tout le domaine d'environnement, on est sûr d'avoir identifié tous les efforts induits aussi bien par l'environnement que par le pilote automatique (les changements rapides d'incidence sur les foils induisent des efforts dynamiques conséquents) et on peut passer en toute sérénité à la conception détaillée du bateau et ses appendices. On aura aussi identifié l'énergie nécessaire à tout instant pour les actionneurs, ce qui permettra d'optimiser sa génération et son stockage.
- La fabrication du bateau et du pilote automatique se font alors sur la base de spécifications claires et validées par les essais sur simulateur. De même écrira le manuel d'utilisation qui comportera des procédures claires à suivre en mode dégradé. Un entraînement de l'équipage sur le simulateur leur donnera confiance dans les capacités du bateau.
- Les essais à la mer porteront essentiellement sur la vérification que le Foiler réalisé se comporte bien comme prévu. On ne cherche pas à aller aux limites qui ont déjà été explorées sur le simulateur.

#### **4- Conclusion**

L'arrivée des Foilers dans le monde de l'hyper compétition va contraindre ces équipes à basculer dans un environnement proche des industries de pointe, lequel utilise déjà largement la méthodologie de développement des systèmes complexes.

Les Nouveaux Zélandais ont déjà utilisé une telle méthodologie pour mettre au point les AC de la génération précédente, gageons que tous les challengers font de même sur les AC75.

Finalement faire des simulations avant de construire un bateau coûte probablement moins cher que d'avoir à en faire un second pour corriger les défauts du précédent.

Franchir le pas de la simulation est surtout faire un pas intellectuel qui sort les concepteurs de leur zone de confort.

RL.



## IMOCA : Voilier ARCHIMEDIEN mais aussi FOILER

A l'origine (1989) les bateaux du Vendée Globe sont des voiliers archimédiens répondant à 4 prescriptions :

Longueur hors tout	: 18,28 m
Longueur du bout dehors	: 1,82 m
Tirant d'eau	: 4,50 m (limité par le Port Olonna)
Gîte sous l'effet des ballasts	: 10° (Il n'y avait pas encore en 1989 de quille pendulaire)

Depuis ces temps anciens, de l'eau est passé sous les carènes et après les épisodes chavirages dans le pacifique sud (quelques fois dramatiques), les ruptures de quille et bien d'autres problèmes, les règlements se sont sérieusement étoffés.

Globalement pendant toute cette période archimédienne, la sécurité de bateaux a été très améliorée, les velléités à innover dans le domaine des voiles de quille, des mats ont été stoppées lorsque la Classe IMOCA a standardisé les mâts et les voiles de quille (entres autres réglementations).

Le désir de voler qui flotte dans l'air du temps depuis quelques années s'est propagé petit à petit chez les skippers.

Beaucoup de gens rêve de s'inspirer du MOTH, la difficulté étant alors de vaincre le facteur d'échelle.

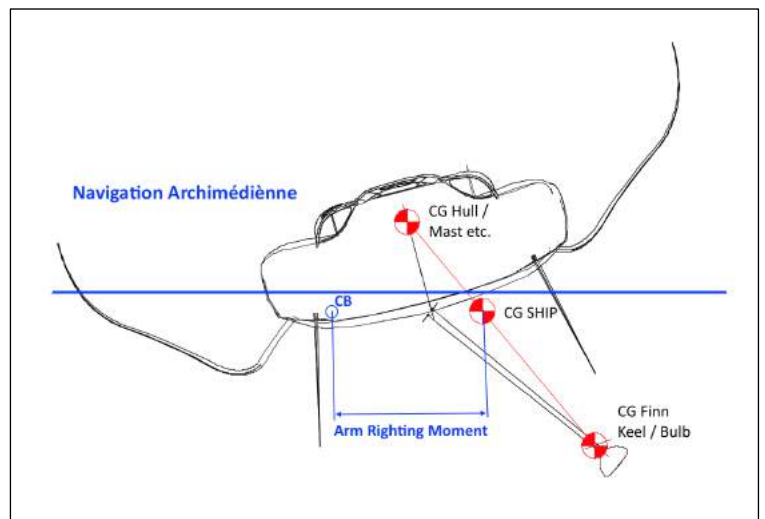
Vouloir voler, impose que l'on dispose des moyens qui assure le vol, sachant que la notion de vol ne se limite pas au décollage.

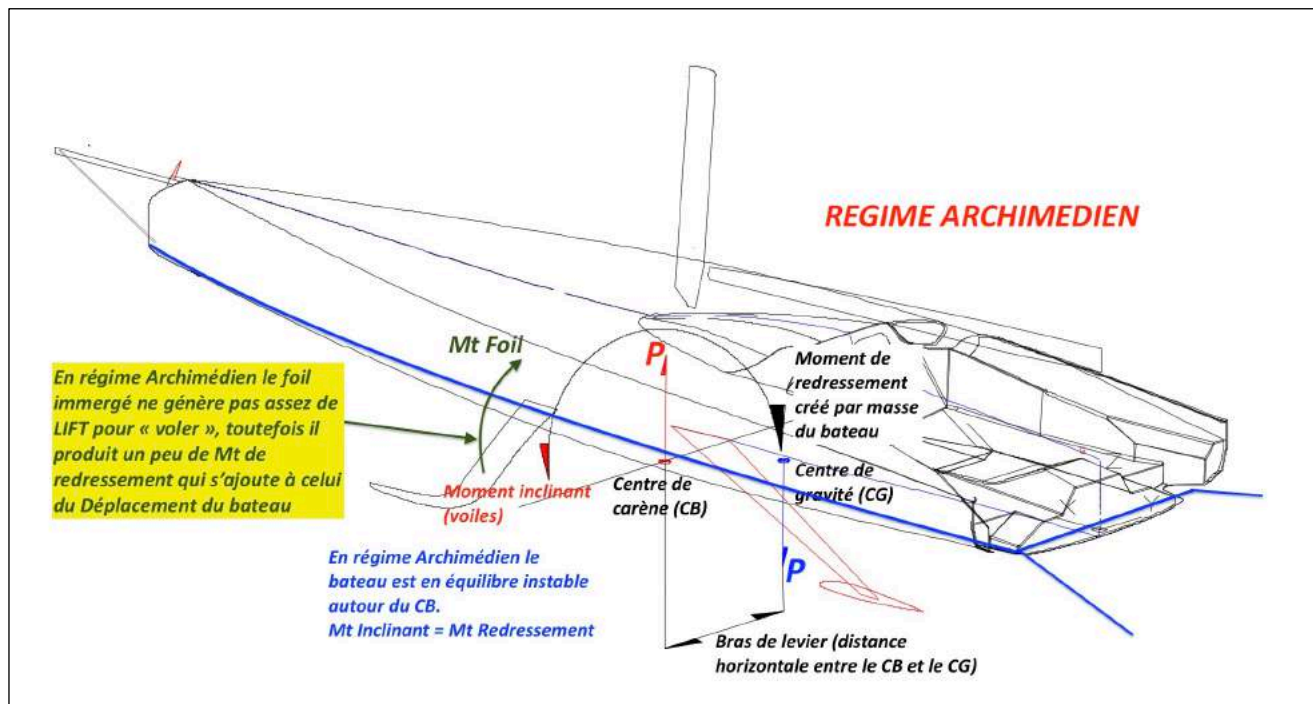
### Le régime Archimédien

Un IMOCA avant de penser voler doit respecter des critères de stabilité lorsque qu'il évolue dans le domaine archimédien avec un déplacement de l'ordre de 7600 kg.

Cela se traduit par les paramètres généraux suivants à respecter :

- Angle de chavirage quille dans l'axe (Avs) : 130° / 133°
- Angle de basculement latéral de la quille (Max 38°) : Avs mini 110 °
- Test d'auto-redressement à 180°
- RM Max (quille dans l'axe): 15.54 T.m
- RM 25° Max (quille angulée et ballasts pleins): 25.5 T.m





Comme on le voit la rotation de la quille au vent (jusqu'à 36°) décale au vent le centre de gravité général du bateau.

Le Foil sous le vent génère une force verticale, qui à cause de la vitesse n'est pas suffisante pour voler. Toutefois cette force crée un couple de redressement qui s'ajoute à celui produit par le poids du bateau.

### Le régime de transition

Pour être complet, la quille, lorsqu'elle est angulée, génère aussi du Lift.

Ce Lift provient du fait que l'Architecte donne de l'inclinaison longitudinale à l'axe de rotation. Ainsi, le profil symétrique du voile de quille, bien que moins performant qu'un profil asymétrique d'un foil, créera du Lift et paradoxe pour le régime archimédien, générera un couple de chavirage (!!!) puisque le voile de quille est au vent.

Le safran actif étant sensiblement vertical, ne produit par contre aucun Lift.

Au fur et à mesure que la vitesse augmente, les Lifts du Foil et du voile de quille augmentent (avec le carré de la vitesse) provoquant progressivement le décollage du bateau.

Le Foils comme le Voile de quille sortent donc progressivement de l'eau, leurs surfaces actives diminuent, mais cette baisse de surface est compensée par une augmentation de la vitesse.

### Le régime Foiler

Pour voler, il faut nécessairement dessiner et installer des surfaces (aérodynamiques) portantes qui produiront un LIFT vertical de l'ordre de 7600 daN.

Mais dans cette position de vol, l'équilibre est très fragile.

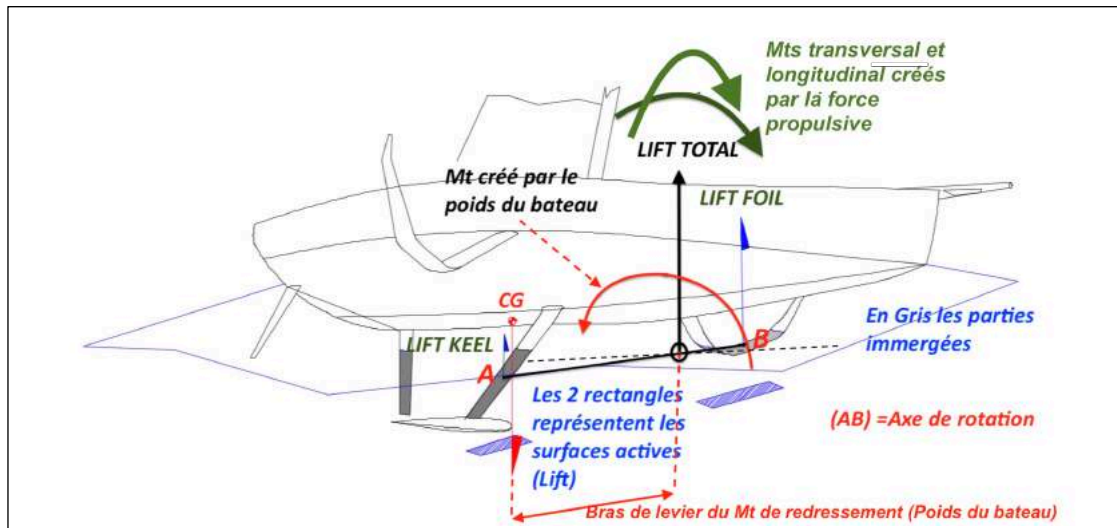
Les critères archimédiens sont totalement abandonnés.



On peut dire que le bateau fait du ski nautique en étant propulsé par une force « horizontale » située à environ 12 mètres du niveau de l'eau. Cette configuration augmente la propension à l'instabilité à cause de couple (à piquer) généré par la propulsion : (Force Propulsive X distance du plan d'eau).

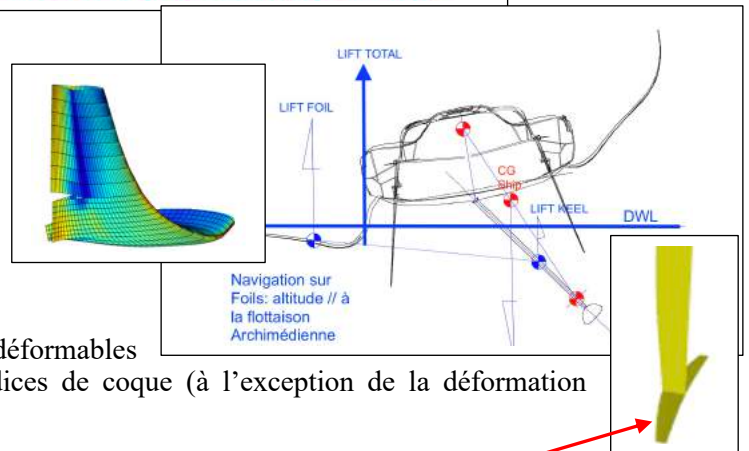
Pour se situer, un avion vole aussi, mais la force propulsive est très proche du plan alaire, ce qui diminue le couple qui est d'ailleurs généralement un couple à cabrer.





La règle de jauge de la Classe IMOCA limite le nombre d'appendices à 5 « Un appendice de coque doit être obligatoirement soit une Quille, un Safran, un Foil ». Les degrés de libertés autorisés sur ces appendices sont définis pour chaque appendice, soit un seul pour la Quille et pour le Safran et deux pour le Foil. (Le mouvement hélicoïdal est interdit).

A cela il faut ajouter que tous volets et surfaces déformables (Morphing Winglet) sont interdits pour les appendices de coque (à l'exception de la déformation plastique propre à chaque matériau).

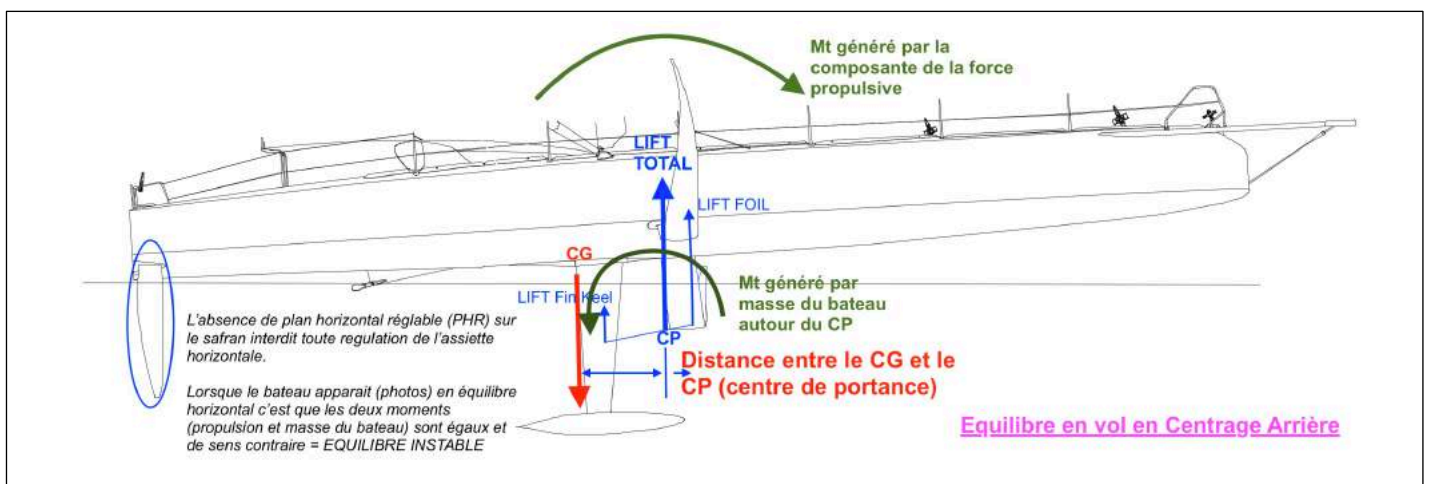


Cela interdit de fait un **plan horizontal de régulation** (PHR) sur chaque extrémité de safran.

Le respect de toutes ces contraintes se traduit par une assiette de vol très cabrée afin d'obtenir une surface d'appui sur « 3 points » :

- Le Foil sous le vent
- Le voile de quille au vent
- La coque au niveau du tableau AR sous le vent.

Ce qui impose un « centrage arrière » volontairement important, puisque qu'il est impossible de contrôler en navigation l'assiette longitudinale.



Le « centrage arrière » se traduit par la position du Centre de gravité du bateau en arrière du centre de portance des surfaces sustentatrices (Foil + Voile de quille).

Mécaniquement cela se traduit schématiquement par :

Moment créé par le poids du bateau autour du Centre de portance > Moment créé par « la voilure ».

L'absence de possibilité d'ajustage de la régulation de l'assiette de vol, introduit une incertitude sur l'équilibre en vol, comme le montre ces deux photos :



Le safran sous le vent est visible (tableau AR décollé).



Le cabrage est maximum (appui Foil/Quille + Tableau AR)

Le visionnage de la vidéo <https://www.youtube.com/watch?v=3WotTHU3wYk> montre que l'assiette de vol est assez aléatoire, ce sont les forces extérieures (véliques et sustentations) qui pilotent l'assiette de vol.

Il faut ajouter que le contrôle de l'incidence du Foil (Rake en anglais) ne gère pas l'assiette longitudinale de vol, le « Rake » permet uniquement de contrôler l'intensité du Lift.

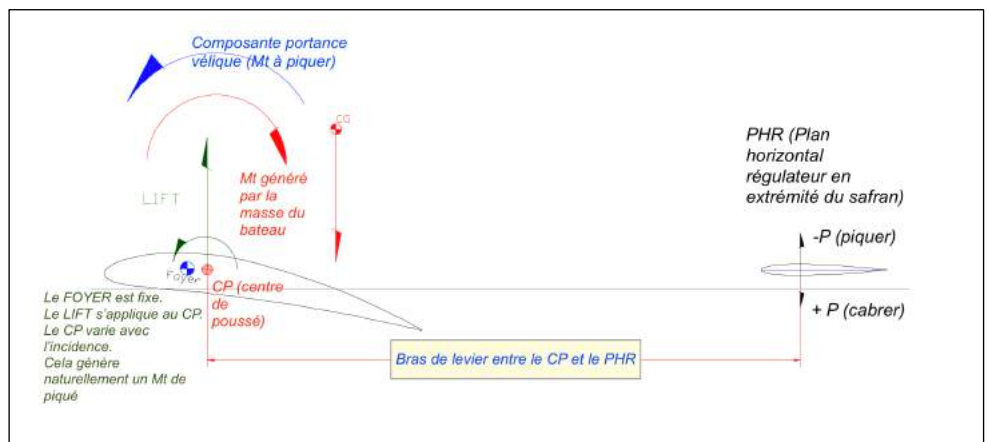
### Quelle évolution prévisible ?

Dans le principe il n'y a rien à inventer, la seule solution possible est d'autoriser le plan horizontal arrière (PHR) sur ces bateaux.

C'est une technique issue de l'aviation (depuis les premiers vols), qui a été reprise sur les Moth, les catamarans de l'AMERICA CUP et maintenant sur les AC75 (Monocoque).

Son principe est le suivant :

- Le point de rotation se situe sur le centre de portance des plans sustentateurs centraux (CP).
- La portance vélique crée un couple à Piquer.
- Le poids du bateau enfonce le bateau sur l'arrière



Le PHR implanté en extrémité de safran (profil symétrique) pivote sur son axe longitudinal (axe perpendiculaire à l'axe de rotation du safran) et génère une portance positive ou négative qui assure une assiette horizontale au bateau.

Comme le PHR est éloigné du Centre de Portance (CP), le bras de levier est important, ce qui permet de voler avec un PHR ayant une surface relativement faible et d'obtenir une régulation douce.

Le contrôle de l'assiette de vol est donc réalisé en ajustant en permanence le calage du PHR. Le contrôle de l'incidence (Rake) assure le Lift en fonction des variations de vitesses du bateau, qui dépendent de la pression du vent, qui contrairement à un réacteur d'avion n'est pas constante.

## De l'intégration des Foils et du contrôle de la stabilité en vol.

La vitesse dans l'absolu n'est pas l'objectif principal des compétiteurs et cela quel que soit la discipline. En fait c'est la vitesse relative par rapport aux autres concurrents et la capacité évolutive qui y est liée qui importe.

On peut traduire ce gain comme un « *petit plus* » par rapport aux autres concurrents.

Tous les sports mécaniques sont encadrés par des règles techniques très strictes. Les équipes d'ingénieurs des différents teams, connaissent la forme générale d'une évolution technique.

Dans le cas des foils, des centaines de milliers de pages résumant des essais, des calculs, des compte-rendu d'essais ont été publiés et sont disponibles.

Les grandes lignes de l'équilibre en vol sont aussi connues.

**Il est donc très difficile de trouver l'adéquation entre ce qui serait optimum pour intégrer ces nouveaux équipements (les Foils) et ce que le règlement autorise de développer.**

**Le respect des prescriptions impose quelque fois de dégrader la technicité du système.**

**C'est par exemple le cas pour le IMOCA ou le nombre d'appendices étant limité, l'implantation d'un PHR n'est pas possible.**

Pour autant, il est évident que les Teams ne vont pas abandonner l'idée technique (implantation et utilisation des Foils), cela va les conduire à rechercher des adaptations ou faire des impasses et naviguer ainsi.

Les périodes de vitesses extrêmes sont visibles sur les vidéos disponibles, mais ce sont des instantanés au regard de ce que l'on attend de ces bateaux, naviguer autour du monde pendant une longue période en étant à la merci de conditions météorologiques difficiles.

J'ajoute qu'il n'y a qu'un seul marin à bord et qu'il confie le pilotage à 90% au pilote automatique.

Malgré toute la technicité du pilote automatique, cet équipement sera handicapé par l'impossibilité de réguler l'horizontalité du vol.

Si on met en équation, **l'homme** (il doit pouvoir dormir), **le potentiel des foils**, **les conditions de navigation** (vent et état de la mer), **les performances du pilote automatique**, **le passage du régime Foiler au régime Archimédien** (et vice-versa), on obtient très vite une équation impossible à résoudre.

### Quels risques sans PHR ?

Le risque, s'il n'y a pas de PHR, se situe dans l'impossibilité de réaliser un vol horizontal, puisque que le skipper ne dispose pas de moyens techniques lui permettant de réguler l'altitude du vol.



*Avec les foils ancienne génération au dernier VENDEE GLOBE*

L'action à piquer peut résulter d'une perte de Lift, mais elle sera d'autant plus forte qu'un cabrage préalable et les forces d'inertie qui en résultent amplifieront l'action à piquer.

Comme dans tous les sports mécaniques, la tendance est toujours d'ajouter, de concevoir « plus grand », ainsi entre deux VENDEE GLOBE (4 ans) la surface des Foils augmente.

*Pourquoi ?* Simplement afin de posséder un « petit plus supplémentaire » par rapport à la « concurrence ».

Il est évident que lorsque la surface du foil augmente, le bateau décolle plus vite, donc se cabre encore plus, mais avec l'absence de PHR, l'action à cabrer, dès que l'équilibre est rompu, se termine par un piqué plus violent.

Une surface de Foil plus importante signifie que lorsque le vent monte, le « moteur » devient plus puissant, même à la limite surpuissant, de là à favoriser les « sorties de route ».

Il faut aussi ajouter un paramètre important, lors des actions violentes de cabrage, non contrôlées, l'angle d'incidence du foil augmente avec le risque de décrochage (perte instantanée du Lift), à moins de compenser en temps réel le « Rake » (incidence).

Cette action est techniquement possible. Elle est « simple » et peu gourmande en énergie si on agit sur un volet de bord de fuite, comme sur les AC75 de la COUPE. Elle est beaucoup plus difficile à mettre en œuvre si on agit directement sur la rotation du Foil.

Pour les IMOCA, l'ajout d'un volet sur le bord de fuite afin de modifier la cambrure du profil du Foil est assimilé à un appendice supplémentaire, donc interdite.

A l'opposée, celles résultantes d'un piqué violent peuvent générer une incidences « négative » qui inverse le LIFT (de bas en haut, il devient de haut en bas !), et fait plonger le bateau.

Dans ce cas de figure, le bateau sera bloqué quasiment instantanément (quelque secondes), et toute l'énergie emmagasinée se transformera en couple de chavirement totalement incontrôlable.

Les actions collatérales sont une perte de contrôle du safran (ventilation) et un pivotement du bateau sur lui-même.

On peut même ajouter que si le bateau étant stoppé sur sa trajectoire, le vent apparent adonne instantanément sur des voiles bordées, ce qui amplifie encore plus le couple de chavirage.

Ainsi le domaine du vol sur un Foiler, qui n'est déjà pas simple à gérer lorsqu'il est contrôlé, à cause des paramètres vent et mer, devient quelque peu hasardeux lorsqu'aucun moyen de pilotage efficace et précis existe.

Mais le PHR seul ne résout pas tout le problème, son contrôle doit être actif en permanence (dès que les foils sont opérationnels), ce qui signifie qu'il faut un pilote automatique qui gère en 3 dimensions soit :

- La route à suivre avec le Safran
- L'assiette du bateau (Trim longitudinal) avec le PHR
- Le Lift avec l'incidence du Foil (le lift de la quille est quasiment incontrôlable)

### **De l'adaptation des règlements aux innovations technologiques**

C'est le problème le plus complexe à résoudre.

Il faut se souvenir qu'à l'origine, le VENDEE GLOBE est une Course Offshore où la route des bateaux est libre, la définition du parcours se limitant à laisser l'Antarctique à tribord et que les bateaux autorisés sont de monocoque OPEN, régit par une règle très libre, sans les contraintes d'une règle de jauge.

Les évolutions des bateaux montreront que l'idée d'une route libre sur ces océans (hémisphère sud en été), comme celle d'une règle OPEN sont des utopies.

Aujourd'hui c'est le Directeur de Course qui définit pratiquement la route à suivre dans l'Océan Indien et le Pacifique.

Au fil des années, la règle s'est enrichie de prescriptions techniques visant à conserver à la flotte une certaine homogénéité et aussi à limiter les accidents.

Mais avec trop de prescriptions, on se retrouve avec des bateaux strictement monotypes, ce qui n'est pas dans l'imaginaire du VENDEE GLOBE.

L'autre difficulté se situe dans le contrôle des évolutions techniques. Tant qu'une évolution permet d'améliorer la vitesse de 0.5 ou même 1.5 nœuds par moment, elle est assimilable et acceptée. En plus l'amplitude de ce gain n'altère pas la fiabilité ou la sécurité des bateaux.

Par contre lorsque le bateau quitte, même si ce n'est pas en permanence, le régime Archimédien qui est à la base des règlements de ces bateaux, pour évoluer en régime Foiler, c'est un réel changement

de logiciel. Il n'existe pas de liaison entre les caractéristiques des Foils équipant les IMOCA (principalement leurs surfaces actives) et les équations Archimédiennes.

Une libéralisation totale du nombre d'appendices amènerait à dessiner des bateaux totalement différents des dessins actuels.

Toutefois ces nouveaux dessins répondraient aux critères archimédiens actuels.

Dans ce nouveau régime de navigation, les paramètres qui évoluent le plus spectaculairement sont la Vitesse (+ 10 à 15 nœuds) et le Vol du bateau.

Un spectateur voit que le bateau va très vite et se trouve au-dessus de l'eau.

Il est certain que le plan horizontal de régulation (PHR), indispensable au contrôle du bateau, sera autorisé dans quatre ans, ce sera la fin des générations exclusivement Archimédiennes.

Il sera aussi nécessaire d'encadrer techniquement cet appendice (PHR), comme il sera impératif de limiter le nombre de Foil actif (un seul en plus du voile de quille et du PHR) et sa surface active (projection du foil sur un plan horizontal en Gîte 0°. Solution qui avait été retenue, il y a 20 ans sur les Trimaran ORMA (1 m2 maximum).

Alors se posera une autre question cruciale :

**Est-ce que les Hommes pourront piloter, contrôler ce type de bateau pendant 60 ou même 50 jours ?**

Premier VENDEE GLOBE, 109 jours	: Moyenne 10 Nœuds.
Dernier VENDEE GLOBE (avec dérives courbes) 78 jours	: 14.9 Nœuds
Premier VENDE GLOBE ou les Foils apparaissent, 74 jours	: 15.7 Nœuds
Projection sur 70 jours	: 16,6 Nœuds
Sur 60 jours	: 20 Nœuds
Sur 50 jours	: 23 Nœuds

Jean SANS  
2 Octobre 2019