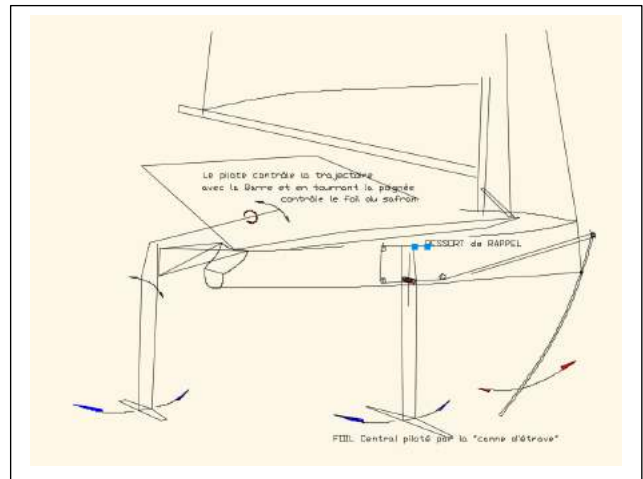


VOLER sur des FOILS, mais surtout PILOTER, telle est la QUESTION.

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, ou 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, était 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 XXième 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 machines¹ » 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.

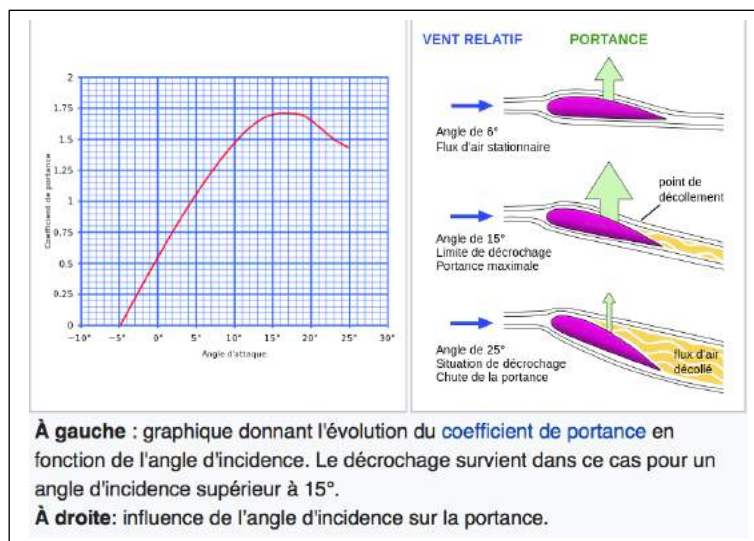
Ce Nombre de Reynolds est un nombre sans dimension, il correspond au rapport entre les forces d'inertie des molécules d'un fluide et les forces de viscosité de ce même fluide. Il dépend du profil du corps, de la vitesse de déplacement et de la viscosité du fluide.

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, EPLLER 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.

¹ 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.

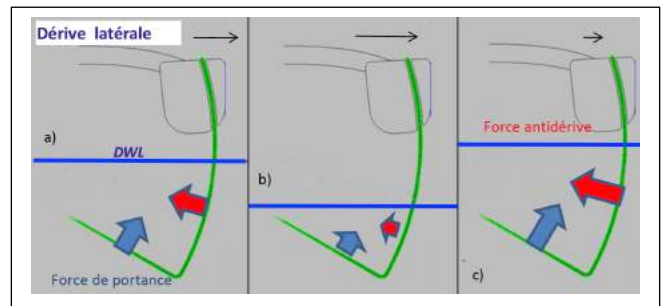
L'Hydroptère a amélioré ce système en ajoutant un plan porteur horizontal réglable sur le safran central, mais les déboires ont été nombreux. En fait la stabilité de vol était trop tributaire du pilotage.



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.

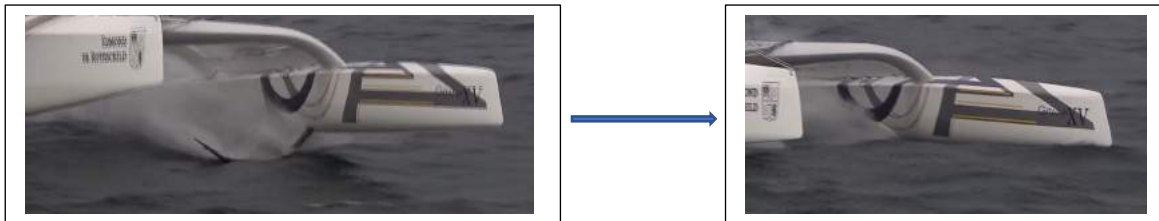
La vitesse étant une composante de l'effet « lift », elle intervient nécessairement, ce qui impose de modifier l'incidence afin de voler à une altitude constante.

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 + DSS² + 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.

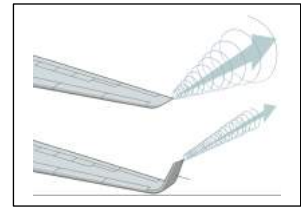
Degrés de liberté :

- ✓ 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 :

² « 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 BMAX / LH 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 : 8m², 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.

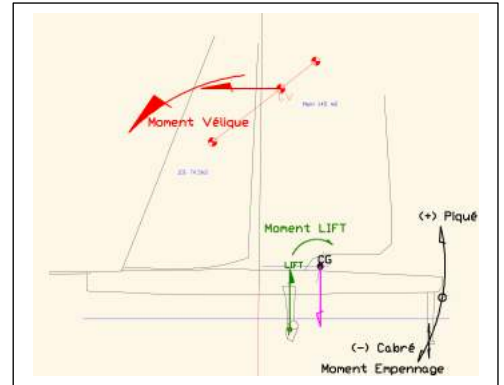


Conditions d'équilibre longitudinal

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 :

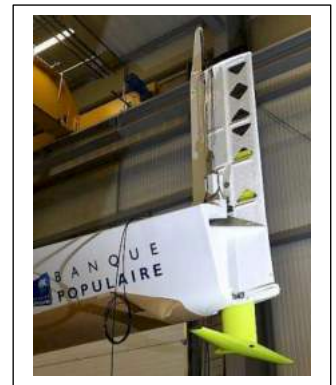
- ✚ Le couple créé par la force propulsive des voiles. C'est **un couple à piquer** autour du CG.
- ✚ Le couple créé par le LIFT (portance) des Foils (de sens contraire au précédent). C'est **un couple à cabrer** autour du CG.
- ✚ Le couple généré par le calage du foil horizontal qui équipe le safran 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 :

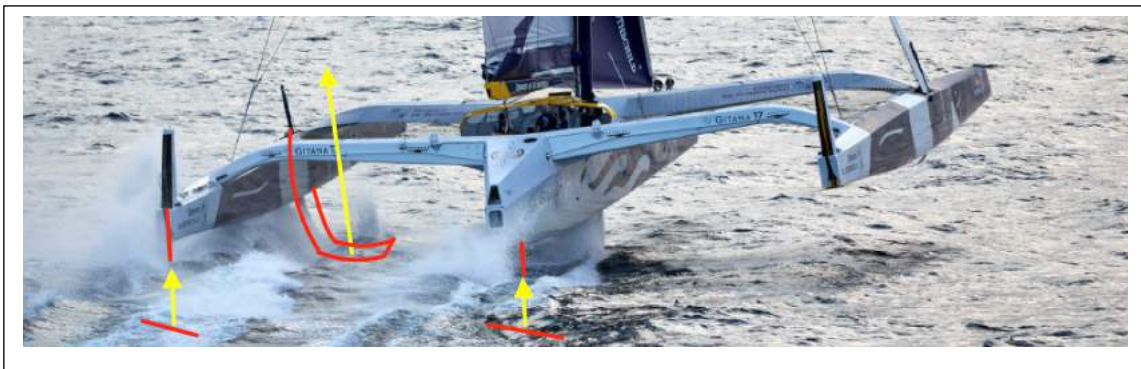
- ✚ Poids du bateau
- ✚ Poussée produite par les foils
- ✚ Poussée produite par la voilure (sa composante transversale).

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.

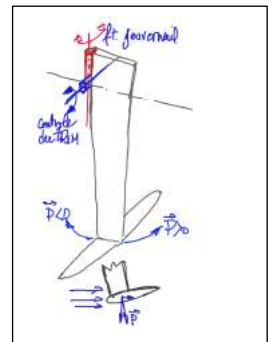
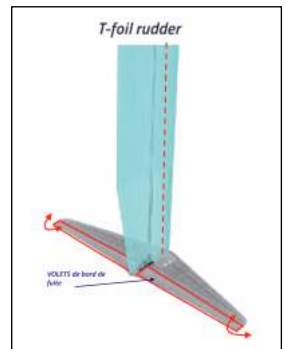
Revenons aux moyens à mettre en œuvre afin d'assurer de bonnes conditions de vol en prenant l'exemple des trimarans « ULTIME » :

- **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.

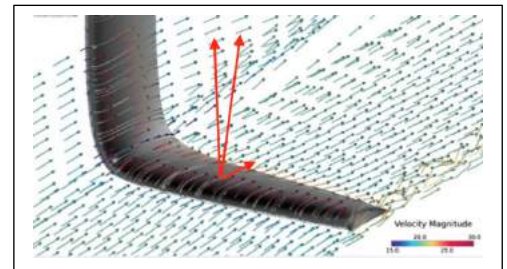
Deux méthodes sont utilisées soit :

- 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° 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 apparait 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 nécessite 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.

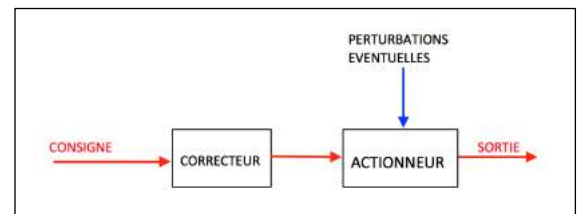
La « **Boucle ouverte** » (BO) est la solution la plus simple : Il s'agit d'une régulation sans aucun contrôle, ni retour d'information entre l'entrée (ce que l'on souhaite obtenir) et la sortie du système (ce qui est réellement réalisé).

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.



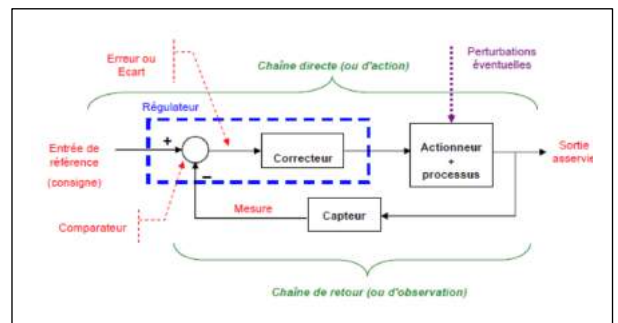
La « **Boucle fermée** » (BF) est beaucoup plus subtile.

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.)

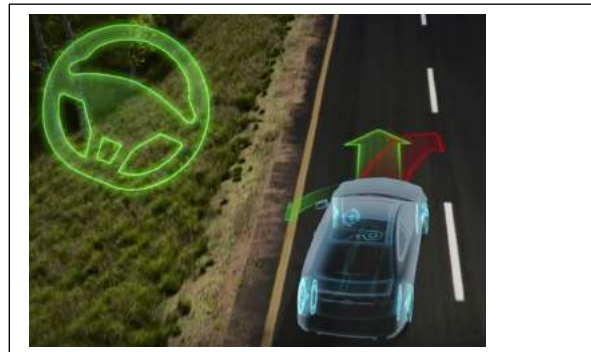
Au final entre le pilote qui agit sur le joystick pour déclencher sa réaction et les actionneurs du sous ensemble, il y aura obligatoirement un algorithme qui calculera, transmettra, contrôlera la réalisation de l'action.

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, gite, 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 pré-réglages 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.

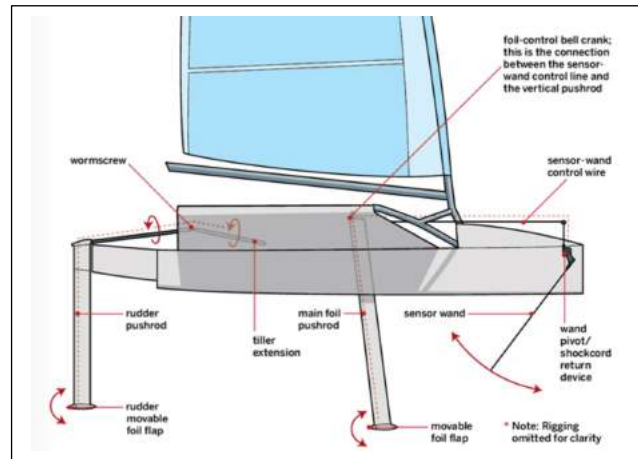
Sur un MOTH, il y a un plan porteur principal central et un plan porteur arrière (profil symétrique) qui se trouve à l'extrémité du safran (qui agit comme un empennage arrière d'un avion).

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 traîne 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 imaginer 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).

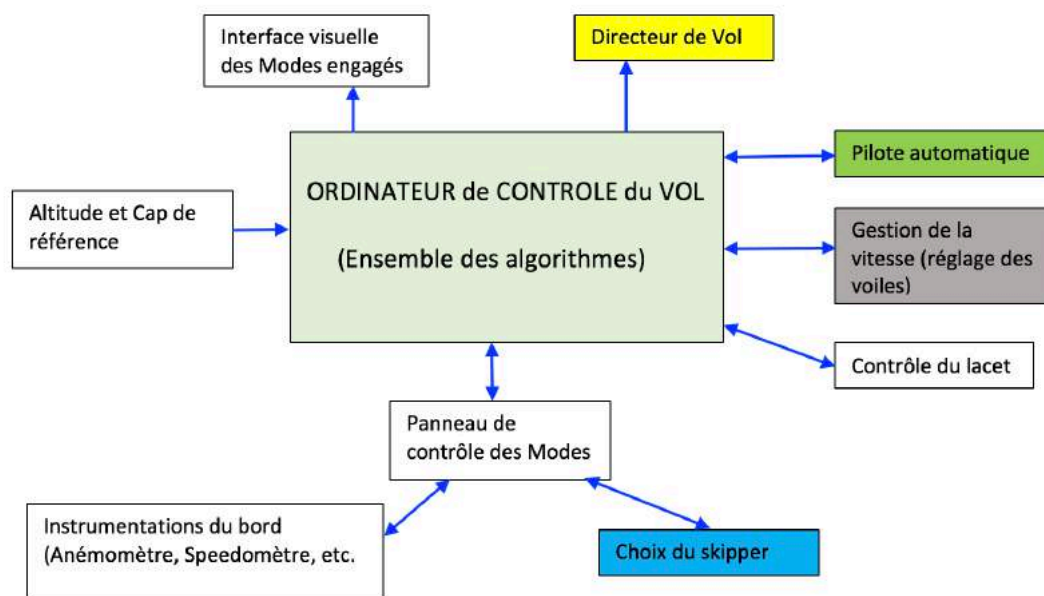
Chaque actionneur appartenant à une entité reçoit en continu des informations de position.

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 navigant 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