

VOLER AVEC UN FOILER OCÉANIQUE



Voler sur la surface de l'eau avec un bateau à voile océanique permet d'aller nettement plus vite qu'en mode archimédien. Mais parce que la route est cabossée et que la puissance du mobile dépend du vent, l'exercice s'avère compliqué et nécessite la combinaison subtile de plusieurs appendices pour y parvenir. Explications et commentaires.

Jean Sans.

Avec la collaboration éditoriale de Patrice Carpentier.

Sommaire.

Partie 1 : La technique du VOL stabilisé

- Un peu de sémantique.
- La sustentation sur foils (Foiler) vs sur des ailes (Avion)
 - Les lois de l'aérodynamique
- Le plafond de verre des 40 nœuds pour les Foilers
- La conception du Foil et la gestion de la portance
- L'instabilité de la vitesse d'un Foiler
- La recherche d'une vitesse de décollage basse
 - L'hyper-sustentation
 - L'arrondi au décollage
- Obtenir un vol stabilisé
- Les différentes approches du pilotage en vol
 - Le vol à vue ou aux instruments
 - Le pilotage manuel assisté
 - Une référence horizontale
 - La surface du plan d'eau
 - Mesurer l'altitude de vol
- Les algorithmes du contrôleur de vol
- Le pilote automatique (PA)
- Les limites du pilotage en vol
- Quid du nombre d'appendices mobiles à gérer ?
- La RCV 52 Energie Manuelle

Partie 2 : Les conceptions des Foilers

- La genèse
 - **Flying Nikka**
- Le choc de l'AC75 monocoque
- Le projet **FERRARI Hypersail**
 - La conception
 - L'énergie nécessaire pour voler
- Un ULTIM nec plus ultra **Gitana 18**
 - La plateforme
 - Les surfaces sustentatrices
 - Les appendices régulateurs
 - L'aile de raie

Conclusions

Partie 1 : La technique du vol stabilisé

Un peu de sémantique

Foiler vélique ou motorisé : Plateforme archimédienne sustentée intégralement sur un ou plusieurs foils.

PHR : Plan horizontal régulateur. Surface profilée à section symétrique, implantée en extrémité du safran. Suivant son calage (incidence) elle crée de la portance (action de piquer) ou de la déportance (action de cabrer).

Aile de raie : Surface profilée à section symétrique, implantée en extrémité du voile de quille, d'un bulbe ou d'une dérive. Elle agit comme un PHR. Elle peut avoir un mouvement pendulaire.

La sustentation sur foils (Foiler) vs sur des ailes (avion)

Des lois physiques identiques de l'aérodynamique s'appliquent pour extraire un Foiler de l'eau comme un avion du sol.

Le Foiler ou l'avion reste en sustentation sous l'action de 3 forces :

- La force **Fv** produite par sa propulsion (vélique ou mécanique).
- La force **P**, verticale et orientée vers le bas, issue de sa masse (Poids = masse*accélération de la pesanteur).
- La portance aérodynamique **Fz** de l'aile ou du foil. $Fz = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot Cz \cdot S \cdot V^2$

Dans cette formule :

- **Fz** = portance aérodynamique
- **ρ** = Masse volumique du fluide (Kg)
- **Cz** = Coefficient unitaire de portance (sans unité)
- **S** = Surface projetée sur un plan horizontal
- **V²** = Vitesse, exprimée au carré, du mobile (c'est à dire la vitesse de l'écoulement du fluide autour de l'aile ou du foil)

On doit la réalisation du premier vol aux frères Wright en 1903. En 1910 l'ingénieur italien Forlanini conçoit un bateau auquel il ajoute des ailes immergées (que l'on nommera « foils »). L'ensemble, propulsé par un moteur thermique, s'extrait de l'eau et vole sur ses foils immergés.

Forlanini et les frères Wright appliquent les mêmes lois de l'aérodynamique et les mêmes systèmes de contrôle du vol. La seule différence entre leur deux mobiles porte sur le fluide qui s'écoule autour des surfaces sustentatrices, l'air pour l'avion, l'eau pour le Foiler.

Dans le calcul de la portance aérodynamique ($F_z = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_z \cdot S \cdot V^2$) de l'aile ou du foil, cette différence se matérialise par la valeur de la masse volumique du fluide exprimée par « ρ ».

Pour l'air, ρ varie autour de 1.230 kg/m^3 en fonction de la $T^\circ\text{C}$ et de l'humidité relative. Dans le cas de l'eau : $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ pour l'eau douce et 1025 kg/m^3 pour l'eau de mer.

Le plafond de verre des 40 nœuds

Lorsque la vitesse assurant la portance est acquise, le Foiler s'extrait de l'eau. Sa vitesse croit alors très vite pour atteindre un plafond de verre de l'ordre de 40 nœuds qui apparaît infranchissable.

Ce phénomène de butée de la vitesse se retrouve aussi sur les avions subsoniques¹ (équipés de réacteurs), aux environ de Mach 0.84 lorsqu'ils sont à l'altitude de croisière (10000m). A cette altitude la vitesse du son est de l'ordre de 1070 km/h (300 m/s). Mach 0.84 correspond à 900 km/h.

Ces 2 mobiles en sustentation sur l'eau ou sur l'air utilisent des types identiques de profils pour leurs foils ou ailes. Ce sont des profils asymétriques cambrés, d'épaisseurs relative de 12% environ (Type NACA 64-12 ou 2412 par exemple²) implantés sur des formes rectangulaires ou trapézoïdales ou elliptiques d'ailes ou de foils.

En fait, ce mur existe réellement sur chacun des deux mobiles, mais pour des raisons physiques très différentes.

Sur un avion, la limite provient du passage subsonique (Mach <1) au supersonique (Mach >1). À cet instant, la compressibilité de l'air, les ondes de choc et la traînée génèrent des vibrations qui affectent la structure de l'aile et/ou provoquent des phénomènes de décrochages de l'écoulement autour de l'extrados et de l'intrados. Ces phénomènes conduisent à la ruine du vol.

Sur un Foiler, le foil évolue dans l'eau où la vitesse du son est de l'ordre de 1500 m/s. Voler à 40 nœuds (20 m/s) dans l'eau, qui est un fluide totalement incompressible, cela correspond à Mach 0.013. Il n'y a donc pas de risque d'onde de choc.

Par contre, aux environs de 18 m/s (35 nœuds) des phénomènes de cavitation apparaissent sur l'extrados puis sur l'intrados.

Ils provoquent, entre autres, la perte de portance du foil.

¹ Valable pour les avions motorisés avec des réacteurs, les motorisations avec des moteurs thermiques ne permettant pas d'atteindre des vitesses supérieures à 600 km/h et des altitudes de 6000 m.

² Différents types de profils aérodynamiques sont catalogués dans le monde. On notera les profils Joukowski, Eppler, NACA, Göttingen.... Les types NACA étant les plus connus.

Le décrochage affecte d'abord l'extrados (surface en dépression) puis l'intrados.

Ce phénomène ne dépend pas exclusivement de la vitesse, mais de l'instant où la pression locale existante sur la surface de l'extrados atteint le niveau de la pression de vapeur saturante PV.

Le phénomène cavitation ressemble au phénomène d'ébullition dans une casserole, mais à température plus basse, la phase gazeuse étant constituée de vapeur d'eau. La seule différence entre ébullition et cavitation se situe dans le « moteur » qui déclenche le phénomène.

Pour l'ébullition, la température varie à pression constante alors que pour la cavitation, la pression (sur surface de l'extrados) évolue à température constante de l'eau qui circule autour du foil.

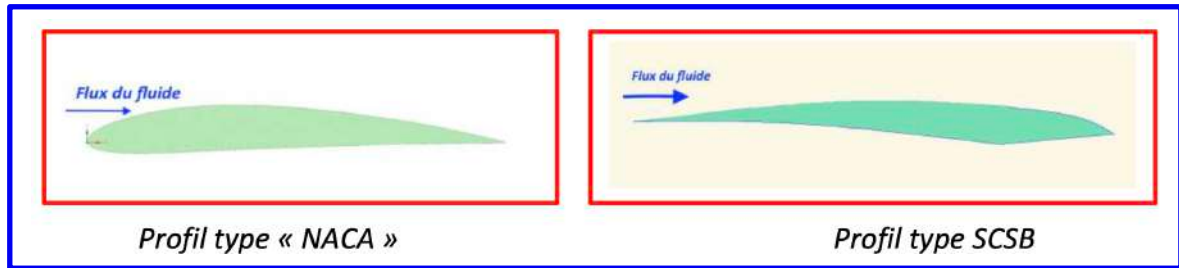
A cet instant, l'eau qui circule autour d'un foil, change brusquement de phase, elle passe de l'état liquide à l'état de vapeur. La vapeur ayant une densité 55 fois plus faible que le liquide, une bulle se forme localement sur l'extrados, l'écoulement de l'eau se détache alors de l'extrados et entraîne simultanément la perte de portance du foil et l'érosion de sa surface (augmentation de la rugosité et donc de la trainée). La cavitation dépend essentiellement de la pression absolue au niveau des surfaces du foil et de la température de l'eau.

S'ajoute à ce phénomène le risque de ventilation. La ventilation est une aspiration de l'air depuis l'interface air/eau au niveau du bras qui supporte le foil (liaison avec la coque du Foiler). L'air se propage alors le long du bras en direction du foil. Cela amplifie les efforts de trainée hydrodynamiques ainsi que les contraintes structurelles. Tous ces phénomènes perturbateurs rendent le système instable.

En conclusion, pour un Foiler, le mur n'est pas physique comme Mach 1 pour les avions, mais hydrodynamique et technologique.

On entend souvent parler de Foiler ayant atteint des vitesses de 45 et même 50 nœuds. C'est possible, mais la performance reste très éphémère car la ruine de l'état de surface de l'extrados et de l'intrados s'amplifiant très rapidement (la surface s'apparente très vite à du papier abrasif « gros grains »), et cela quel que soit le matériau (Titane, Acier à haut module élastique, carbone...), conduit à une chute inexorable de la portance donc des performances du foil.

Paradoxalement, on franchit cette vitesse limite en remplaçant les profils « cavitants » des foils (ou des ailes) par des profils « super cavitants ». La forme du profil de ces derniers se rapprochant d'un losange curviligne très allongé et de faible épaisseur.



Cette famille de profils « super cavitants » permet d'atteindre des vitesses de 100 nœuds (!!). La difficulté n'est pas de concevoir et de fabriquer ce type de foil, mais d'atteindre la vitesse où ils deviennent opérationnels.

En effet, leur défaut principal porte sur un manque important de portance à faible vitesse, qui interdit le décollage sans des artifices complexes à mettre en œuvre. Décoller avec un profil super cavitant nécessite de posséder une puissance de propulsion temporaire très importante au moment du décollage. Par exemple, utiliser la postcombustion d'un réacteur (30 à 40% de plus sur un Rafale durant une dizaine de secondes).

Mais si la postcombustion se conçoit sur un réacteur, elle reste du domaine du rêve pour une propulsion vélique.

La conception du Foil et la gestion de la portance

Avant d'aborder le contrôle 3D de la plateforme du Foiler, il faut gérer la portance produite par les surfaces sustentatrices.

Sur un foil ou une aile on dispose de 4 leviers techniques :

- ⇒ **L'enveloppe.** Ce paramètre concerne uniquement les foils. Cela se matérialise visuellement par leurs formes en « U », en « V », en « Y », en « T inversé », en arc de cercle. Ces options, à l'exception du « T inversé » permettent d'avoir un foil presque auto-régulateur. Quand le foil s'immerge, la portance augmente et inversement. « Presque régulateur », car le temps de réponse et l'amortissement ne sont pas toujours optimum.
- ⇒ **L'allongement** de la forme (rectangulaire, trapézoïdale, elliptique). Ce paramètre est figé lors de la conception. On exclut la forme delta qui ne s'applique qu'aux profils super cavitants. L'allongement **AR** (nommé Aspect-Ratio en anglais) correspond au ratio de l'envergure du foil exprimée au carré, divisée par sa surface projetée sur un plan horizontal. La performance d'un foil ou d'une aile croît avec l'allongement (**AR**).
- ⇒ **L'incidence** par rapport au flux du fluide. L'angle d'incidence du foil ou de l'aile est implanté à la conception par rapport à la plateforme ou la carlingue en position de vol horizontal. Les Foilers équipés de foils en « U », en « V », en « Y » ou encore en arc de cercle, n'ont pas cette contrainte.

Le skipper modifie l'angle d'incidence comme il le souhaite. Pour les foils en T, l'incidence est implantée lors de la conception.

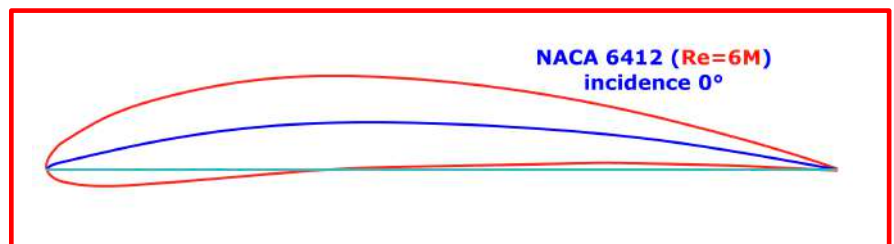
⇒ **Le profil aérodynamique** du foil ou de l'aile. C'est un choix du concepteur. Il définit :

- L'épaisseur relative par rapport à la corde du profil.

Par exemple, si le choix aboutit à un « **NACA 6412** » cela correspond à une cambrure maximale de 6 % à 40 % à partir du bord d'attaque et à une épaisseur maximale de 12 % à 30% du même point.

- La portance unitaire **Cz** et la trainée **Cx** dépendent de l'angle d'incidence choisi dans l'assiette de vol.

Dans cette formule **Fz**, seuls 2 paramètres sont ajustables : le **Cz** (portance unitaire propre au profil du foil) et la surface **S** du foil et implicitement sa forme.

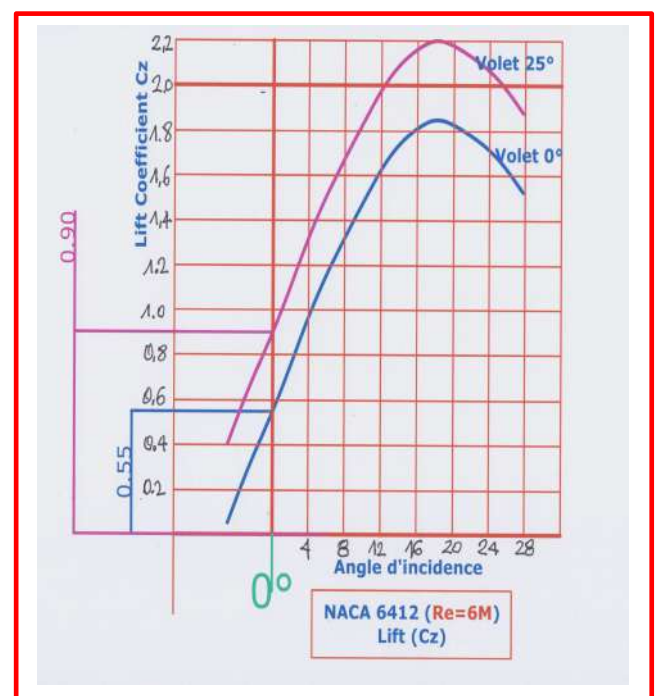


Le concepteur recherche dans le tableau des performances aérodynamiques de différents profils, le **Cz** et le **Cx** qui lui paraît optimal pour son projet. Le choix du **Cz** définit l'angle d'incidence donné au profil du foil.

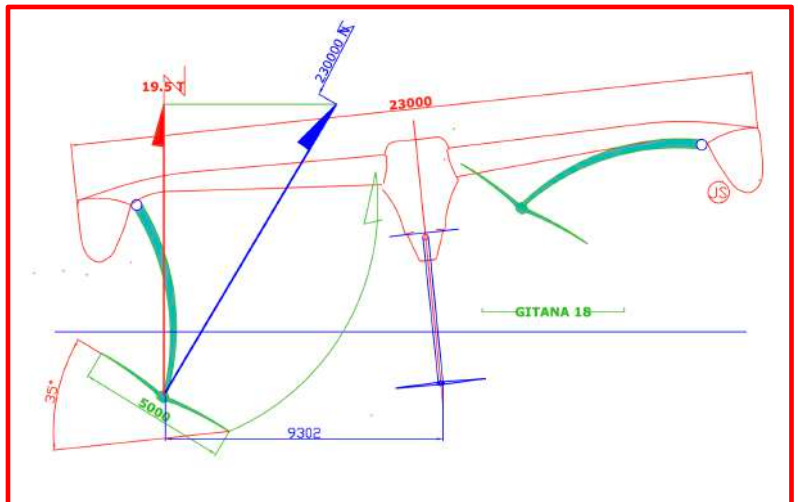
Lors de la conception, la vitesse maximale de 35 nœuds (18 m/s) s'impose comme limite supérieure avant l'apparition de la cavitation.

L'ajustement de la surface et de la forme du foil (elliptique / trapézoïdal / Etc...) permet alors d'obtenir le lift vertical pour maintenir le Foiler en vol.

Le choix du concepteur correspond aux performances maximales recherchées en vol stabilisé. Il recherche toutefois la trainée minimale, qui dépend, à la fois, de la cambrure du profil et de l'angle d'incidence (Rake) choisi. Une augmentation de la trainée se traduisant par plus de puissance disponible.



Pour obtenir avec le nouveau **Gitana 18** lancé au printemps 2026 (19.5 tonnes, LH 32m, Bau 23m TE 4.2m, SVoiles : 450m²/630m²), les performances maximales annoncées de l'ordre de **30/35 nœuds** en vitesse stabilisée, soit **16.7 m/s en moyenne et 18m/s pour la vitesse maximale**, il faut disposer **d'une composante verticale (lift) de la portance de 19500 kg *9.81 = 191000 Newtons.**



*La conception de **Gitana 18** est particulière car elle fait appel à des foils en « T inversés » orientés (comme les AC 75). Alors que les **ULTIM** de la génération précédente utilisent des foils en « L incliné » qui leur confère une relative auto-régulation sous 6 à 8° de gîte. Ces foils en « L incliné » sont escamotables par translation.*

Mais cette technologie en « L » oblige à gérer en permanence l'angle d'incidence car il est techniquement impossible d'implanter des volets sur leur bord de fuite.

La forme en « T » possède un calage (incidence) fixe (5° dans cette étude) par rapport à la plateforme dans sa position horizontale. Choix identique à celui pratiqué sur des ailes d'un avion.

Ce type de foil « T inversé » symétrique par rapport à un bras de liaison est équipé de volets de bord de fuite, qui peuvent être indépendants. Cette technologie apparaît plus simple à contrôler et moins énergivore que la gestion directe de l'incidence que l'on pratique sur le foil en « L ».

Le foil en « T » est incliné d'environ 35° par rapport à l'horizontale. Cela correspond à une portance réelle du foil de 191000 N / cos (35° environ) = 230000 N.

Pour atteindre cet objectif, le BE doit choisir un profil de foil qui possède un **Cx** le plus faible possible (trainée), tout en ayant un coefficient de portance **Cz** suffisant pour assurer une vitesse en vol de 35 nœuds.

Par exemple, un profil NACA 6412 calé à 0° (angle d'incidence) évoluant dans l'eau de mer (Re= environ 6*10⁶ à 18 m/s) génère un :

Cz = 0.55 et un Cx = 0.045.

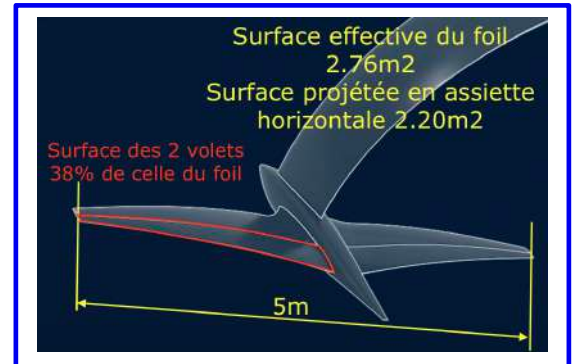
Afin d'obtenir une vitesse maximale de 35 nœuds en vol stabilisé, et compte tenu d'une gîte de la plateforme de 5 à 7°, le foil de **Gitana 18**, doit produire une portance de l'ordre de 230000 N qui se décompose en un vecteur vertical (Lift) de 191000 N (19.5T) et un vecteur horizontal (anti-dérive).

Dans cette configuration où on recherche le minimum de trainée, le volet du foil est à 0° (profil parfait du NACA 6412) et l'aile de raie est utilisée en mode porteur ou déporteur afin de contrôler uniquement la gîte de la plateforme. Ce contrôle est important car une variation de la gîte (+ ou -) influe sur la portance du foil. En pivotant le foil, la surface projetée augmente ou diminue : ce qui modifie le lift vertical.

Dans la formule du calcul de la portance $F_z = \frac{1}{2} \rho C_z S V^2$, les paramètres suivants sont connus :

- Portance recherchée ($F_z = 230000 \text{ N}$),
- Vitesse ($V=35 \text{ nœuds } -18\text{m/s}$),
- $C_z (0.55)$,
- $\rho (1025)$
- La surface du foil 2.76 m^2 (soit un allongement $AR= 9$)

$F_z = 252000 \text{ N}$, ce qui est correspond aux conditions de vol recherchées.



L'instabilité de la vitesse d'un Foiler

Notons aussi que sur un Foiler vélique la vitesse de fluide qui circule autour du foil correspond à celle du Foiler (vent vitesse). La composition vectorielle de la vitesse du vent vrai et du vent vitesse produisant le vent apparent.

Ce vent apparent génère une portance vélique qui influe directement sur la vitesse du Foiler et indirectement sur la portance du foil (à C_z identique). On découvre alors que le propulseur vélique n'est pas un moteur dont on pourrait ajuster la puissance de manière continue en fonction de la demande de portance.

Un Foiler vélique souffre de 2 particularités qui compliquent la gestion et son équilibre en vol :

- ✓ L'incontrôlabilité de source de puissance (le vent) qui lui permet de voler.
- ✓ La position sensiblement à mi- mât du vecteur propulsion qui génère un couple à piquer important.

La recherche d'une vitesse de décollage basse

L'objectif principal d'un Foiler vélique est de voler en permanence à une vitesse très proche de la vitesse maximale prévue lors de sa conception. Calculer et ajuster les paramètres permettant de créer ces conditions de vol apparaît au final presque assez simple. Toutefois encore faut-il qu'avec ces paramètres choisis, la vitesse de décollage soit relativement basse afin de quitter le plus

rapidement possible le domaine archimédien pour entrer dans le domaine de vol au-dessus de l'eau.

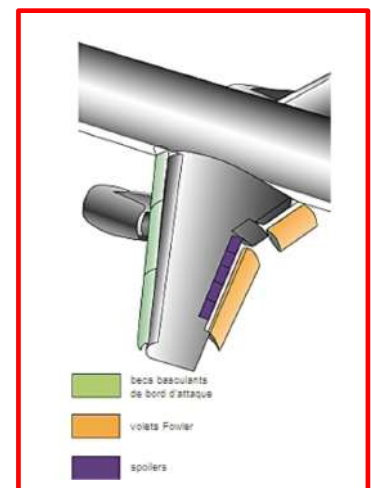
Certes, les paramètres ci-dessus ($C_z=0.55$ et $S_{\text{foil}}=2.76\text{m}^2$) permettent de voler à 18m/s. Après ce choix de la vitesse maximale : le concepteur doit aussi fixer la vitesse de décollage. Sur un Foiler, la phase décollage succède progressivement à une navigation en régime archimédien. La trainée générée par le foil déployé dans l'eau, le PHR sur le safran et le foil qui équipe l'aile de raie handicape cette phase de décollage archimédienne.

Un calcul rapide de la portance appliqué à des vitesses archimédiennes du Foiler comprises entre 12 et 13 nœuds (environ 7m/s) produit des portances (F_z) de l'ordre de 40000 N. Ce qui nous place très loin de l'objectif de 230000 N et des conditions nécessaires au décollage.

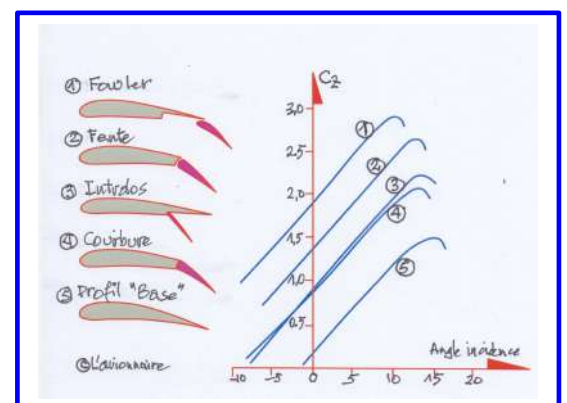
Il faut donc combler ce déficit de performance.

La solution se nomme : **Hyper-sustentation et utilisation de « l'aile de raie » comme surface sustentatrice temporaire.**

Ce problème de défaut de portance au décollage n'est d'ailleurs pas propre aux Foilers océaniques. Les avions ont été confrontés rapidement à cette difficulté.



Avec l'hyper-sustentation, on privilégie l'augmentation du C_z en jouant sur la cambrure d'un profil « aéro » de base (celui qui a été choisi pour la vitesse maximale). Sur les avions, le volume des ailes autorise l'implantation et le déploiement mécanique de volets avant le décollage (ou avant l'atterrissage). Cette technique crée 2 effets : augmentation simultanée du cambrage du profil de l'aile, donc le C_z , et dans une moindre mesure, de la surface alaire. Cette technologie permet d'augmenter le C_z de 45 à 115% de sa valeur initiale suivant les techniques utilisées et les surfaces des volets.



S'ajoute à ces modifications de l'aile, la rotation de l'avion dès que la vitesse de décollage est atteinte. Cette rotation augmente l'angle d'incidence donc le C_z .

Le pilote rentre les volets dès que la phase de décollage est terminée, l'aile retrouve alors son profil initial qui permet de voler à la vitesse maximale choisie par le concepteur.

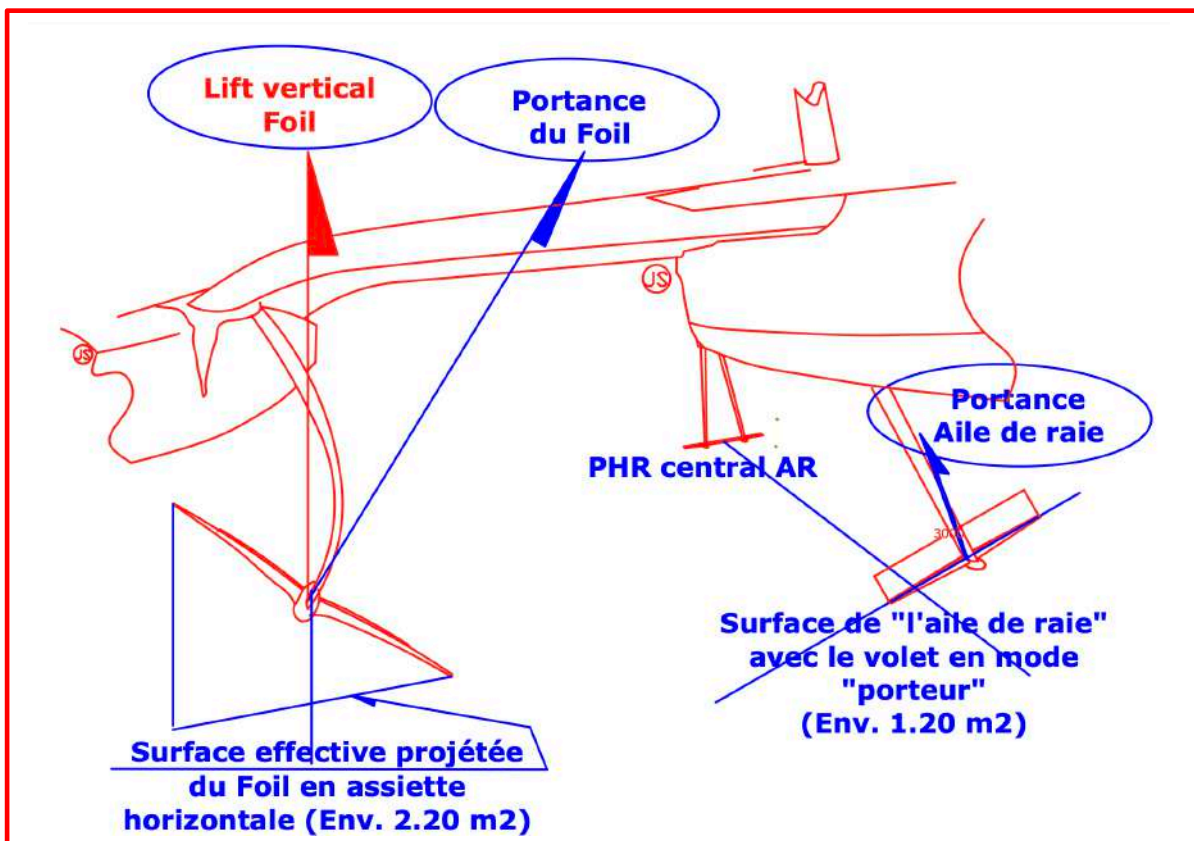
Ainsi, un avion de ligne décolle à 250 km/h environ, pour une vitesse de croisière de 850 km/h.

Sur un Foiler la surface du foil n'est pas modifiable ou alors à la marge : en augmentant la gîte autour de l'axe longitudinal du Foiler. Par contre, il est possible d'augmenter la valeur du C_z en utilisant un volet de bord de fuite. Ce gain de C_z peut s'accroître jusqu'à 60% de sa valeur initiale (celle du profil non déformé). Rapporté à l'exemple précédent, on peut supposer que le C_z de 0.55 devient 1.1.

Par exemple, à 6.5 m/s le foil génère une portance F_z de 66000 N soit un composant verticale de 58000 N.

Augmenter la cambrure produit certes, un C_z plus important, mais augmente rapidement la traînée, ce qui demande plus de puissance vélique...

Durant la phase de décollage, l'aile de raie devient le joker d'un Foiler trimaran.



Sur **Gitana 18**, l'aile de raie se matérialise par un plan sustentateur horizontal à profil symétrique de 1.2 m^2 implanté en extrémité de la dérive centrale pendulaire. La fonction principale de l'aile de raie est de contrôler la gîte de la plateforme lors du vol stabilisé. Suivant l'angulation de ses volets de bord de fuite, l'aile de raie se trouve être porteuse : elle soulève la coque centrale, ou déporteuse : elle diminue la gîte.

Avec un volet de bord de fuite angulé à $15/20^\circ$, le **Cz** de l'aile de raie peut atteindre 0.80. Le profil symétrique est moins performant aérodynamiquement qu'un profil cambré comme le NACA 6412.

À 6.5 m/s , avec un Cz de 0.80 et une surface de 1.2 m^2 , l'aile de raie angulée à 20° génère à elle seule une force verticale de 20000 N.

S'ajoute à cette portance le fait que l'aile de raie est pendulaire, c'est à dire qu'il est possible de la basculer au vent. Son axe de rotation est implanté dans le plan horizontal avec une angulation de 7 à 10° (nommé « tilt »).

Lorsque le volet de l'aile de raie est ainsi angulé au vent, le « tilt » crée une incidence qui génère de la portance. Laquelle s'ajoute à celle des surfaces sustentatrices horizontales implantées à sa base.

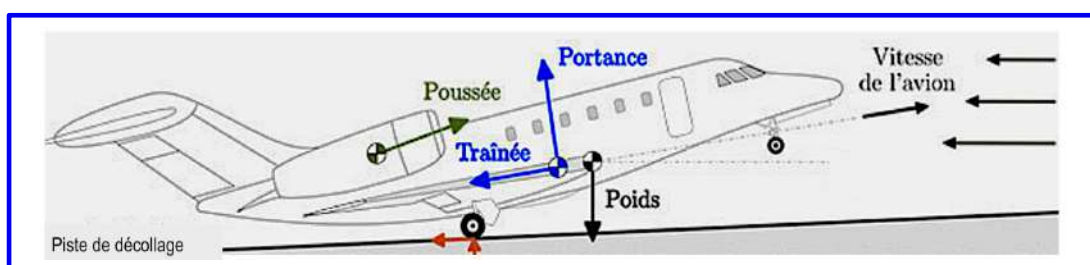
Au final, à 6.5 m/s , (12.6 nœuds), en cumulant la portance du foil et celles de l'aile de raie et de la dérive, on atteint presque 80000 N de composante verticale, évidemment encore assez loin des 191000 N nécessaire.

Mais dans la réalité, le passage du mode « archimédien » au mode « vol » n'est pas binaire.

Déjà, avec une vitesse de 6.5 m/s les portances cumulées du foil et de l'aile de raie produisent un lift vertical de l'ordre de 42% du déplacement du Foiler. Cet effet induit rapidement une diminution de la surface mouillée, donc de la traînée de la carène.

Dans ces conditions, le trimaran accélère, le vent apparent augmente, le trimaran atteint progressivement 8 m/s (15.5 nœuds), le lift augmente... pour atteindre 150000 N (75 à 80% du poids du Foiler).

La phase ascensionnelle se trouve bien engagée.



Le Foiler atteint la vitesse de décollage V_1 puis rapidement la vitesse de rotation V_R .

Le skipper, comme le pilote d'un avion, arrondit (rotation) alors progressivement sa trajectoire.

Cette manœuvre augmente l'angle d'incidence du foil et de l'aile de raie ainsi que les C_z de ces surfaces sustentatrices. Cela amplifie rapidement les 150000 N jusqu'à atteindre la sustentation nécessaire de 191000 N permettant d'extraire le Foiler de l'eau. Le skipper réalise cet arrondi en actionnant le PHR du safran en mode « déporteur ».

La phase de décollage se termine lorsque la vitesse se stabilise à 18 m/s (35 nœuds). Le skipper stabilise alors la plateforme en vol horizontal, avec le PHR (safran) et l'aile de raie.

Phases de
décollage le
27/05/2026



Premier essai en
vol de **Gitana 18**





Photo Yann Riou- Gitana 18

Obtenir un vol stabilisé

Un autre monde commence après le décollage, lorsque la plateforme est stabilisée dans un plan horizontal, à la gîte de quelques degrés.

L'objectif : évoluer à une vitesse de croisière comprise entre 15m/s à 18m/s (30/35 nœuds) à une altitude relativement constante de l'ordre de 2.5 à 3m au-dessus du plan d'eau (critère du BE de **Gitana 18**).

Cette dernière condition est nécessaire à la survie du vol.

Deux types d'équipements permettent de contrôler l'assiette et l'altitude de vol.

- Le PHR, implanté en extrémité du ou des safrans et l'Aile de Raie en extrémité de la dérive. En étant porteur (portance vers le haut) ou déporteur (portance vers le bas) ces appendices permettent de conserver la plateforme horizontale (contrôle du tangage et du roulis).
- L'ajustement de l'angle d'incidence du foil (dans le cas d'une forme en « L ») ou celle du volet de bord fuite (foil en T inversé) permet de modifier le coefficient unitaire de portance **Cz** et ainsi d'ajuster l'immersion du foil sous la surface du plan d'eau.

En vol, ces forces agissent sur un Foiler vélique en sustentation sur le ou les foils :

- La force **Fv** produite par sa propulsion
- La force **P**, verticale, issue de sa masse (Poids = masse*accélération de la pesanteur 9.81 m/s²)
- La portance aérodynamique de l'aile ou du foil. **Fz** = $\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_z \cdot S \cdot V^2$.

Note : La portance de l'aile de raie est utilisée dans la phase de décollage. En vol, du fait de son profil symétrique, l'angulation de son volet de bord de fuite vers le haut ou vers le bas, la rend porteuse ou déporteuse (contrôle du roulis et/ou de l'altitude de vol)

Pour conserver cet équilibre durant la trajectoire imposée par le pilote, le mobile doit toujours être en mouvement et la somme vectorielle de ces 3 forces doit être en permanence nulle dans le repère 3D : Ox , Oy , Oz , c'est à dire concourantes.

Il faut noter que la variabilité des forces **Fv**, **Fz**, appliquées au centre de voilure et au foyer du foil, interagit sur l'équilibre de la plateforme. Seule, celle de la pesanteur **P**, appliquée au centre de gravité est invariante en intensité et en direction. Le foyer d'un foil étant l'équivalent du centre de voilure pour les voiles.

Un Vol stabilisé impose que les 3 paramètres vitesse, portance, altitude de vol qui influent sur **Fv** et **Fz** soient en permanence sous contrôle.

Les différentes approches du pilotage en vol

Le vol à vue ou aux instruments

La stabilité du vol, c'est à dire, maintenir sa plateforme horizontale à une altitude souhaitée (en supposant que la puissance reste sous contrôle) impose que le pilote (ou le barreur) puisse se référer à deux repères :

⇒ **L'horizon**

⇒ **Un repère de hauteur par rapport au plan d'eau.**

Voir l'horizon suppose que le pilote du Foiler, pratique le vol à vue (VFR). Ce type de vol paraît le plus simple et le plus libre, puisqu'il est essentiellement basé sur le principe : voir et éviter.

Cette technique de pilotage s'applique entre autres aux Foilers monocoques AC75 et aux catamarans SAIL GP.

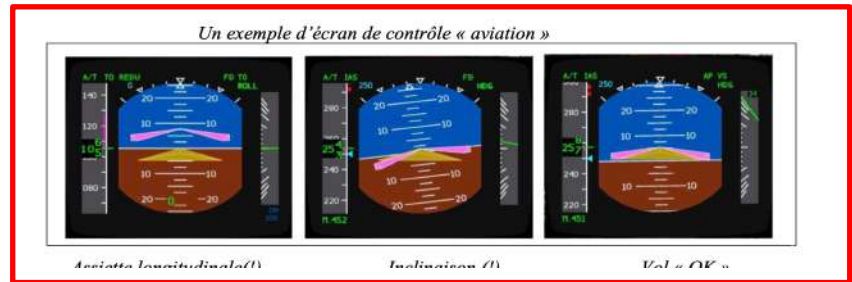
Contrairement au Foiler, un voilier archimédien peut naviguer sans repère « horizon » (de jour comme de nuit) puisque les lois hydrostatiques gèrent le tangage, le roulis et la flottabilité. Le barreur suit alors le vent ou le compas.

Sur un Foiler, dans une course Offshore, la nuit ou le jour sans visibilité, la suppression du repère d'horizontalité, crée un nouveau paradigme :

⇒ **Passer aux techniques dites de « vol aux instruments (IFR) ».**

Le vol aux instruments repose d'abord sur le remplacement de l'horizon (naturel) par la surveillance visuelle du capteur de cockpit nommé « horizon artificiel ». Ce domaine sera explicité dans un prochain paragraphe.

Malgré cette aide, l'appréciation visuelle de la hauteur de vol disparaît, ce qui rend le vol très aléatoire, voire même impossible. En effet l'altitude de la plateforme peut très bien varier tout en conservant une assiette parfaitement horizontale.



En navigation, l'équipage (ou le skipper dans le cas d'une navigation en solitaire) d'un voilier archimédien contrôle 3 paramètres :

- Le lacet (la route suivie) avec le safran
- La gîte avec la régulation de la surface de voile
- La vitesse avec l'adéquation de la carène et du vent.

Dans la réalité, le contrôle peut très bien se limiter, lorsque l'environnement est relativement stable, à l'action manuelle sur le safran. En fait, les lois hydrostatiques qui agissent en permanence sur la carène assurent l'équilibre parfait du voilier (entre 0° et l'angle de chavirage A_{vs}) sans que l'équipage n'intervienne. Le « pilotage » d'un voilier archimédien ne présente pas de réelles difficultés.

Sur un Foiler en vol, le contrôle du vol est plus complexe car l'équilibre du Foiler en vol est précaire. Les lois hydrostatiques ne s'appliquent plus, tout repose sur le fait qu'en vol, les 3 vecteurs forces (lift, poids et propulsion) soient en permanence concourants.

Cela signifie que les équipements qui assurent cet équilibre doivent être opérés par l'équipage ou le skipper (navigation en solitaire).

Ces équipements sont :

- Un safran (contrôle du lacet)
- Un foil dont on maîtrise la portance (contrôle du lift)
- Un PHR implanté à l'extrémité du safran pour contrôler le tangage.
- Des écoutes afin de contrôler la puissance vélique.
- Éventuellement un PHR transversal « aile de raie » qui contrôle le roulis du Foiler.

Remarque : Le poids du Foiler y compris l'équipage et l'approvisionnement sont intégrés comme invariant dès la conception du Foiler. Le concepteur choisit et calcule à partir de ce poids, les caractéristiques du profil du foil et la surface alaire nécessaires pour extraire le Foiler de l'eau.

Au total, le pilote ou son équipage doit régler en permanence et simultanément 5 commandes.

- ✓ Le barreur commande le safran et le PHR implanté sur le safran
- ✓ L'équipier responsable de l'altitude de vol commande soit l'incidence du foil (foil en L) ou l'angle du volet de bord de fuite (foil en T).
- ✓ Deux équipiers chargés des réglages des voiles (GV et Foc), gèrent la puissance (Vecteur vitesse).

Sur un bateau archimédien, le temps de réponse, entre la perception et l'action peut être long. Sur un Foiler, les décisions et actions simultanées des intervenants doivent être hyper rapides, car en vol, la moindre faute ou retard peut se traduire par le décrochage d'une des surfaces aérodynamiques, Rappelons-nous l'incident survenu sur **American Magic** lors de l'AC 2021 ou en juillet 2026 sur **Prada**.

Ce type de pilotage est extrêmement stressant et physique. Pour ces raisons les régates, comme SAIL GP, ne doivent pas durer³ plus de 15 minutes.



Un Foiler océanique n'échappe pas à ces conditions de vol, même si le poste de pilotage est plus grand et les forces inertielles moins violentes. Le temps de pilotage manuel devient rapidement très limité. Une assistance extérieure au pilotage manuel devient indispensable.

Dans le cas d'une navigation en solitaire, cela apparaît encore plus compliqué.

Le pilotage manuel assisté

Au départ le pilote perçoit deux informations fiables :

- ⇒ Sa perception de l'horizontalité de sa plateforme
- ⇒ Celle de son altitude de vol.

Le principe du **pilotage manuel assisté** repose sur la chaîne suivante :

- a) Le pilote donne un ordre en agissant sur un joystick ou un volant multifonctions.

³ Une compétition ou une présentation de voltige aérienne est limitée à 12 minutes et l'ensemble des commandes de vol est réalisée par des câbles.

- b) Des capteurs électroniques qui identifient cet ordre. En fait, la réaction du pilote pour corriger une anomalie de vol ou le souhait de prendre une nouvelle route.
- c) La transmission de ces informations aux algorithmes du contrôleur de vol embarqué. Ce contrôleur de vol calcule la meilleure réponse globale à donner au souhait du pilote en se basant sur la situation réelle de vol de l'instant « t » et des capacités aérodynamiques du Foiler. Plusieurs actions peuvent être décidées.
- d) Ces actions sont converties en données numériques et envoyées aux actionneurs hydrauliques ou électriques. Les gouvernes bougent
- e) La correction ou la nouvelle route est actée.

La gestion du vol ne dépend donc pas d'une **relation directe** comme le ferait un barreur d'un voilier archimédien, mais d'une suite d'interactions :

- ✓ **Cognitive (intention)**
- ✓ **Informatique (calculs entre l'état réel celui souhaité)**
- ✓ **Mécanique/hydraulique/électrique (exécution)**
- ✓ **Aérodynamique/Hydrodynamique (réalité physique)**

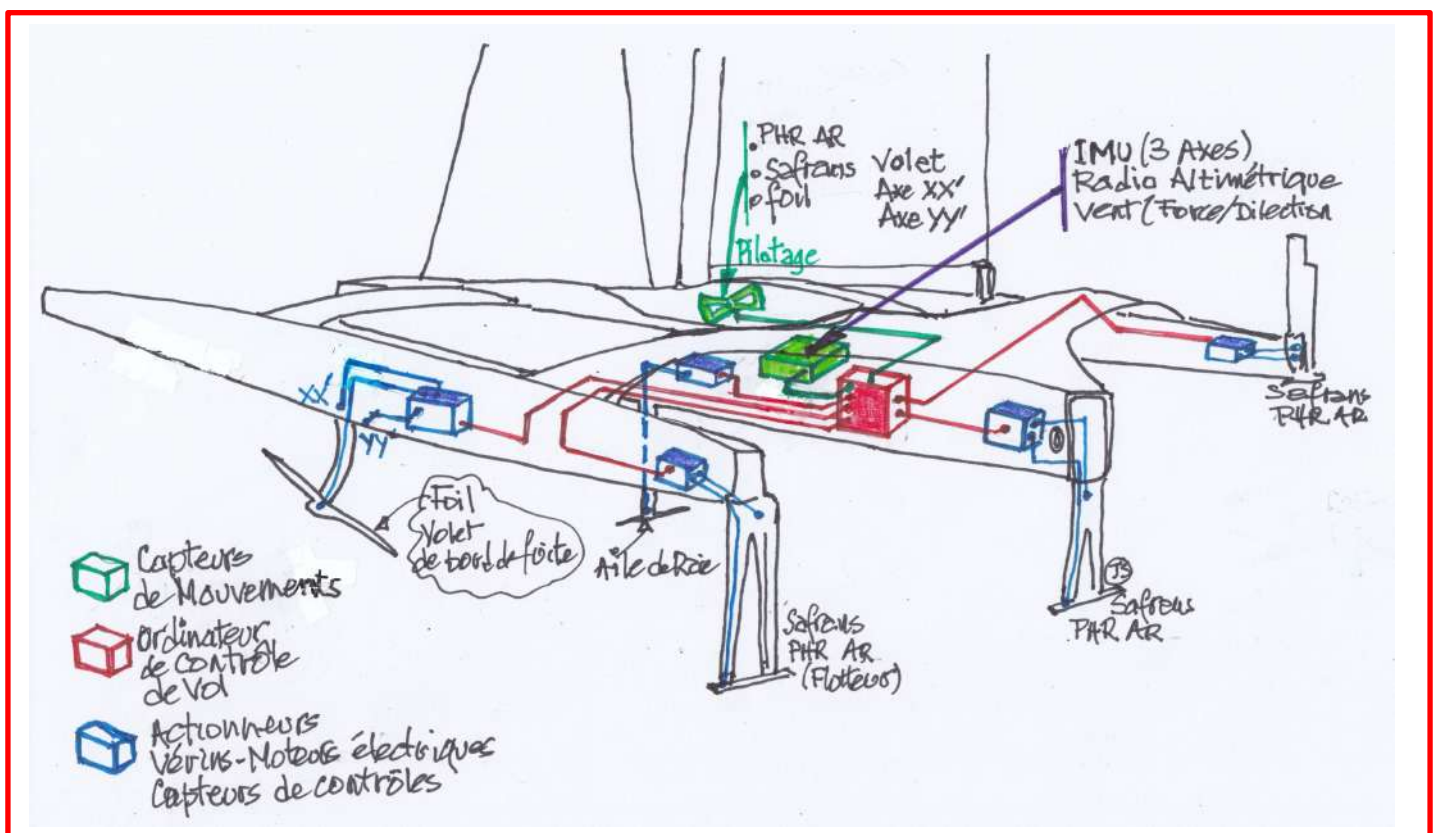


Schéma d'implantation de cette chaîne de commande sur un Foiler.

Le Développement de ce processus apparaît nécessaire.

Trois paramètres doivent être identifiés :

1 / Une référence horizontale

La vision de l'horizon naturel n'étant pas permanente, le risque de désorientation existe. Remplacer la perception d'une ligne d'horizon lointaine par la lecture permanente d'un horizon artificiel (boîtier de 80 mm de diamètre) implanté sur le tableau de bord ou même encastré dans l'alignement du champ de vision du skipper (pilote) relève de la gageure. Ce type d'équipement demande une attention de lecture (graduations verticales et angulaires) incompatible avec l'environnement du poste de navigation d'un Foiler (vibration, accélérations angulaires, bruits...).



Le pilote doit pouvoir suivre la projection d'un « point » matérialisant sa plateforme par rapport à un horizon récréé artificiellement. Lire des graduations impose au cerveau de convertir les valeurs lues en ordres correctifs.

Cette interprétation est à la fois trop longue, possiblement fausse (erreur de lecture) et surtout fatigante.

Les réactions doivent être intuitives, de la même manière que le conducteur d'une voiture enchaîne des séries de virages. La chaîne de décisions étant basée sur la vision de l'environnement, l'espace routier, et sa position par rapport à ce tracé. A aucun moment le pilote regarde simultanément son compteur de vitesse et son compte-tours.

Sur un Foiler, les données fournies par l'Unité de Mesure Inertielle (IMU⁴) permettent de construire un horizon artificiel basé sur la cartographie de la surface de la mer. Cette ligne horizontale matérialise la référence « altitude Zéro ». Cette référence est totalement différente de celle utilisée en aérien, où l'altitude Zéro correspond à la pression barométrique à un endroit du globe.

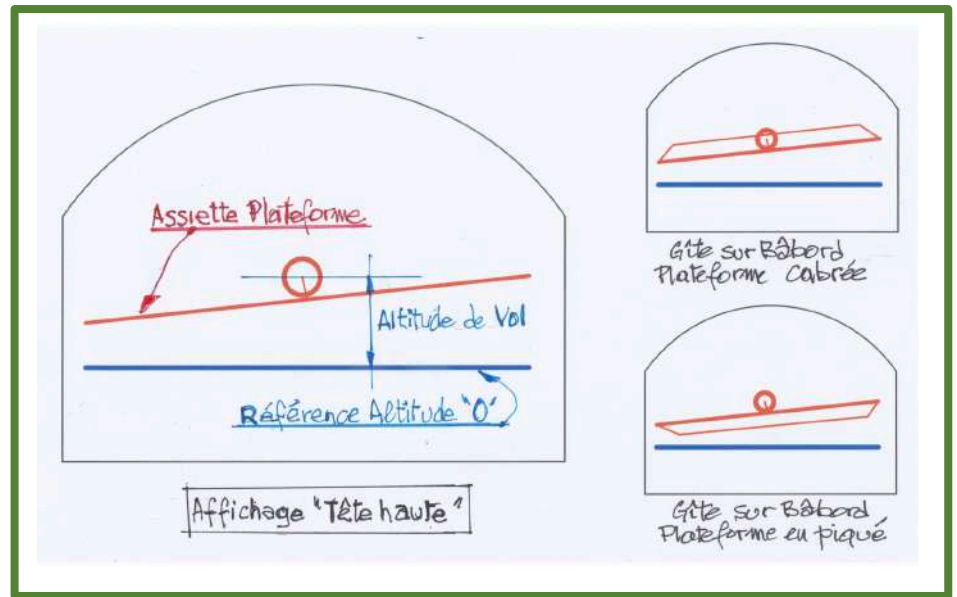
L'ensemble est corrélé en permanence et vu par le skipper.

Encore faut-il que cette représentation soit en permanence dans le champ de vision du pilote qu'il a devant lui.

Un système de vision dit « à tête haute » simplifié devient nécessaire.

Le pilotage manuel devient un pilotage manuel assisté puisque le pilote ne fournit qu'une « intention ». Cette intention se matérialise par l'interprétation de ce qu'il voit sur l'afficheur « tête haute » et que le pilote traduit en manœuvrant son joystick ou son volant multifonction.

⁴ Une unité de mesure inertielle (IMU) est un composant électronique. Il mesure l'accélération, la vitesse angulaire et l'orientation à l'aide d'une combinaison d'accéléromètres, de gyroscopes et de magnétomètres.



On peut ajouter qu'en utilisant des enrouleurs électriques (border / choquer) des écoutes de GV et Foc, il devient possible d'adapter la puissance nécessaire à l'équilibre du vol.

2/ La « surface » du plan d'eau

Le plan d'eau représente la surface de référence permettant de situer l'altitude de vol du Foiler. Durant une course offshore océanique, cette surface, sauf cas très exceptionnel, est rarement une surface plane.

Globalement, la forme de cette surface peut s'analyser macro-géométriquement (la houle) et micro-géométriquement (le clapot).

L'analyse micro-géométrique se superposant sur la houle. Pour autant, la surface de la mer identifiée n'est jamais horizontale à cause de l'effet « houle » sous-jacent.

Ces formes ondulées des trains de vagues (même de faibles amplitudes) rendent très difficile le pilotage de jour. La nuit, l'absence de repères visuels, rend alors le contrôle du vol impossible ou au mieux très hasardeux, et cela même en utilisant des réglages moyens au niveau de la gestion de la portance et de l'assiette.

L'approche logique, consiste à réaliser l'analyse dimensionnelle des vagues qui se trouve au droit l'étrave. Cette méthode paraît naturelle, sauf que dans le cas d'un Foiler océanique, l'objectif n'est pas de négocier le passage de l'étrave dans une vague, mais de conserver une altitude de vol stable quel que soit l'amplitude de la vague. Notre pratique de la navigation archimédienne perturbe notre réflexion. Un Foiler en vol s'affranchit des lois hydrodynamiques, contrairement à un voilier archimédien qui les subit.

Le domaine de vol d'un Foiler se situe entre 1.5 et 3 m d'altitude au-dessus du plan d'eau. Cette notion de plan d'eau, qui n'a rien d'une surface plane, rend complexe l'identification du point utilisé comme référence : altitude Zéro.

Devant une vague, l'outil chargé de la détection de l'attitude se trouve confronté à l'alternative suivante : affecter le point Zéro au sommet ou au creux de cette vague ?

Surtout que la détection de la vague suivante, dont l'amplitude sera obligatoirement différente, introduit un doute sur la mesure précédente... Et ainsi de suite. Le changement permanent de référence du point « Zéro » engendre un vol « yo-yo » qui vise à reproduire une trajectoire au-dessus de l'eau qui voudrait se calquer sur celle de l'état de la mer...

Pour un Foiler, l'important se trouve dans la qualité physique du fluide qui enveloppe le foil lors de sa progression et dans la stabilité du réglage de la portance indispensable au vol. Toute modification du profil du foil (cambrage avec le volet de bord de fuite), afin de respecter l'altitude vol, crée de la trainée, donc un frein dans la progression.

Le passage d'une vague à la suivante et ainsi de suite, s'appuie sur un algorithme qui lisse la portance afin de conserver la consigne d'altitude programmée.

D'où l'idée de s'orienter vers une approche prédictive, souvent nommée « Look-Ahead control » ou « Model Predictive Control », afin d'anticiper la surface de la mer rencontrée devant l'étrave.

En fait, ce n'est pas l'état réel des vagues qui nous intéresse, puisque les surfaces sustentatrices évoluent obligatoirement sous l'eau, mais la recherche d'une méthode qui assure que le flux circulant autour des surfaces sustentatrices soit le plus homogène possible.

Cette méthodologie prédictive s'appuie sur l'analyse de l'état de la mer que l'on vient de parcourir durant un temps donné et son traitement numérique associé.

On admet alors que la configuration que l'on vient d'identifier sur une distance donnée, se reproduit à l'identique devant l'étrave, pour parcourir sensiblement la même distance à venir.

La cartographie des vagues successives rencontrées permet de construire une surface fictive « plane » de référence, statistiquement représentative. Cette référence se situant entre les sommets et les creux successifs.

En reproduisant ce cycle, (mesures, transpositions durant toute la progression du Foiler), on crée un environnement prédictif glissant.

La cartographie réalisée s'appuie sur des segments successifs de 30m, soit 2 secondes à 30 nœuds -15m/s-. Cette distance peut être augmentée.

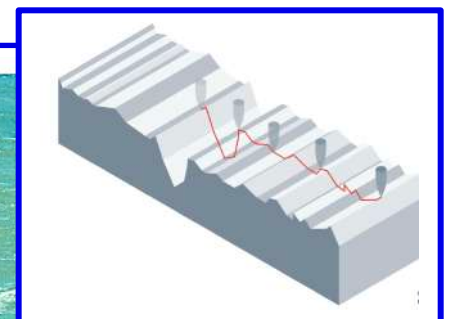
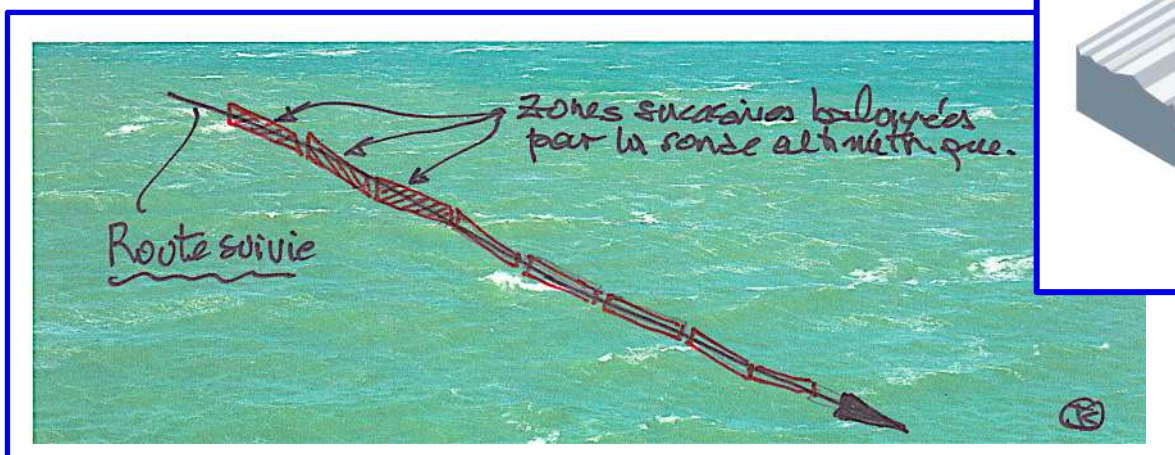
Durant ce parcours de 30m, l'état de la mer est échantillonné tous les 0.1 m ou moins. Pour chaque point, on note sa position longitudinale (x) par rapport au début de l'opération de cartographie et son altitude (y).

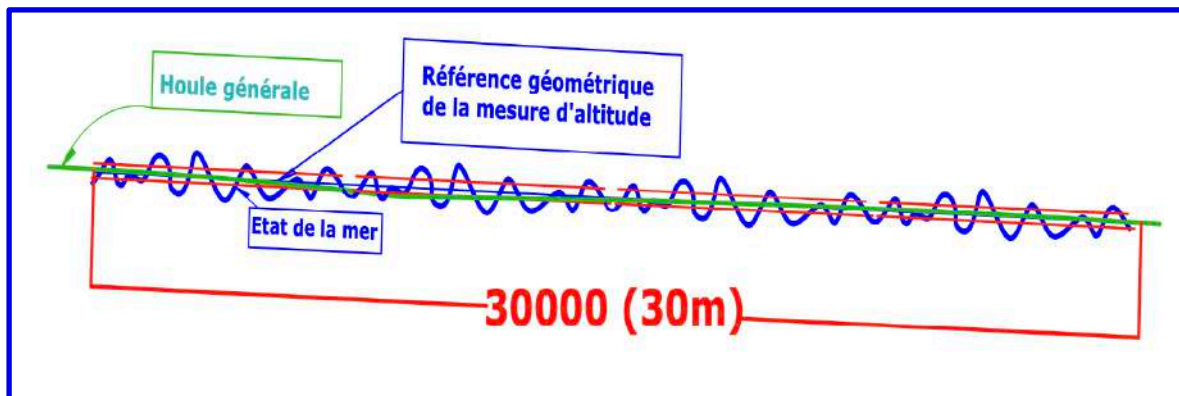
La position longitudinale (x) peut être déterminée par les 2 données que sont la vitesse et le temps : $x = v * t$.

Méthodologie :

Après le décollage, le Foiler est stabilisé en condition de vol (vitesse, altitude et assiette horizontale par rapport à la surface du plan d'eau). On conserve ces paramètres durant toute l'approche prédictive initiale.

- ⇒ Le Foiler navigue durant 2 secondes à 15m/s et parcourt 30m. Durant ce tronçon N°1 de 30 m, on cartographie l'état de la mer. Du traitement de cette cartographie, on déduit une ligne courbe directrice d'une surface gauche de référence. Ce qui permet, de caler une altitude de vol. Afin d'avoir une plateforme parallèle à cette surface gauche, on agit sur les PHR. Ces informations sont transmises aux vérins et/ou moteurs électriques qui gèrent le foil (incidence ou volets) et les PHR.
- ⇒ Pour aborder le tronçon N°2 à suivre, de même longueur, on admet que l'état de surface de la mer, que l'on va rencontrer, sera identique à celui du tronçon N°1. Ce qui conduit à reconduire les réglages issus de la cartographie du tronçon N°1, et autorise un vol stabilisé dans le tronçon N°2 à venir.
- ⇒ Durant le parcours du tronçon N°2, on cartographie l'état de mer réellement rencontré. Simultanément, au fur et à mesure de la progression du Foiler, on recalcule les paramètres de réglages correspondants à ces mesures.
- ⇒ Ces nouveaux paramètres sont injectés dans les vérins et/ou moteurs pour réaliser le tronçon N°3, toujours de 30m... on reproduit ensuite ce modèle « indéfiniment ».

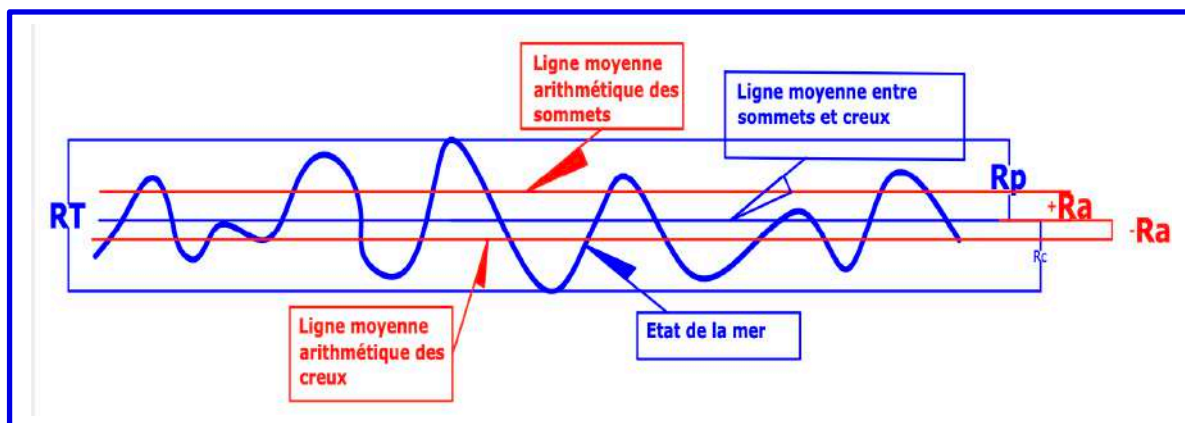




Si les écarts dimensionnels cartographiés entre chaque nouveau tronçon de 30 m et le précédent sont faibles, on peut en déduire une stabilité de l'amplitude de l'état de la mer.

Dans ce cas il est possible d'envisager d'augmenter la longueur des tronçons analysés.

Analyse de la cartographie



Rp : Sommet maximal mesuré avec l'appareil altimétrique sur la longueur analysée. $R_p = y_{\max}$. Voir diagramme ci-dessus.

Rc : Creux maximal observé sur la longueur analysée (voir diagramme ci-dessous). $R_c = y_{\min}$.

RT : Amplitude maximale totale mesurée avec l'appareil altimétrique sur la longueur analysée. Elle correspond à la somme du sommet maximal et du creux maximal mesurée sur la longueur analysée. $RT = R_p + R_c$.

Ra : Écart moyen, ou moyenne arithmétique des distances entre tous les sommets et les creux successifs. **Ra** correspond à la différence entre cette distance moyenne et la ligne centrale. Ce paramètre moyen permet de donner une indication générale de l'état de la mer sur la longueur mesurée et déjà parcourue. Cette valeur permet de situer la plateforme au-dessus de la surface de la mer.

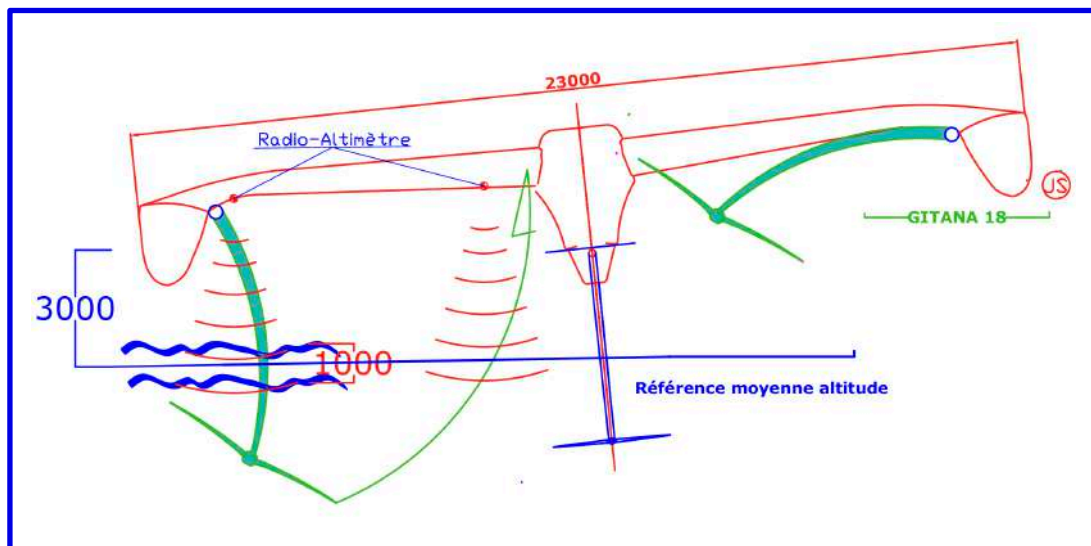
La cartographie lisse la surface réelle de la mer, et l'apparente à un plan ondulé limité à la longueur parcourue, environ 30 m pour un Foiler ULTIM.

3/ Mesurer l'altitude de vol par rapport à la référence du plan d'eau.

Cette opération, continue durant tout le vol, dépend de 3 paramètres :

- ✓ La surface qui représente la référence suite aux mesures successives réalisées.
- ✓ L'appareil de mesure adéquat
- ✓ L'exactitude des mesures d'altitudes obtenues par rapport au plan de vol.

Sur **Gitana 18**, l'appareil altimétrique est implanté sous le bras du flotteur sous le vent, ce qui paraît logique puisque le foil se situe au droit de ce flotteur. Une autre sonde altimétrique implantée sur la coque centrale permet d'améliorer l'acquisition des mesures.



La véracité de l'altitude de vol, même mesurée finement, dépend de l'horizontalité de la plateforme.

La gestion de l'horizontalité de la plateforme (tangage et roulis), impose que l'on dispose d'un repère fixe, extérieur à celle-ci. L'horizon est le seul repère fixe naturel pour un pilote (humain).

Un automate ne pouvant pas identifier l'horizon, il faut donc lui fournir cette référence horizontale indispensable afin qu'il calcule les écarts entre la réalité de la plateforme et l'horizontalité.

Un gyroscope produit ce repérage dans les 3 axes. Le module qui assure cette fonction constitue une centrale inertielle. La technologie des centrales inertielles a évolué depuis les modèles électromécaniques vers des versions sans partie mécanique, mais elle reste encore assez volumineuse et gourmande en énergie.

Le développement des drones a orienté la recherche vers de nouveaux équipements inertiels miniaturisés. C'est ainsi que sont nés les capteurs type Unité de Mesure Inertielle (IMU).

Les caractéristiques de ces équipements sont stupéfiantes : poids environ 200 gr, volume : un cube de 60 mm, consommation : <2W, pour une excellente précision et un coût très abordable.



L'IMU implantée dans la plateforme du Foiler, fournit ainsi les paramètres accélérations, vitesses angulaires et les orientations pour chaque déplacement dans l'espace 3D.

Ces résultats résultent de la combinaison d'accéléromètres, de gyroscopes et de magnétomètres. Une IMU gère les 3 axes simultanément, donc les 6 degrés de liberté.

Les informations sur l'altitude de vol associées aux évolutions de l'assiette détectées par l'IMU sur chaque axe, permettent à l'algorithme de définir les réglages de vol pour le segment à venir.

Toutefois, cette approche heuristique ne produira pas l'exact état de la mer que le Foiler rencontrera dans les 2 secondes à venir. Mais l'échantillonnage très court de 2 secondes augmente la possibilité que les nouvelles amplitudes des vagues à venir soient très proches de celles que le Foiler vient de rencontrer durant les 2 secondes précédentes.

Trouver l'appareil de mesure d'altitude adéquat

Si le choix du modèle d'IMU ne pose pas de réelles difficultés, celui de trouver l'équipement capable de mesurer une altitude de vol de l'ordre de 2 à 3 m, avec un intervalle de tolérance de +/- 0.25m, en se référant à une zone d'eau peu homogène, est plus complexe. S'ajoute aussi la nécessité d'obtenir un résultat numérique.

La cible visée (la mer) limite les types d'équipements au LiDAR, au Radio-altimètre (FMCW) et au Sonar (ultrasons).

Le **LiDAR** (Light detection and Ranging) utilise une technique de mesure de distance basée sur la différence entre la fréquence du faisceau laser incident et celle du faisceau réfléchi par la surface cible. Afin de ne pas pénétrer la surface de l'eau, les LiDAR « altimétriques » émettent dans le domaine de l'infrarouge. Ils permettent des mesures très précises des distances (précision de 50 mm) mais sont apparemment plus sensibles aux embruns et à la pluie. Le BE de **Gitana 18** a opté pour le LiDAR.

Le **Radio-Altimètre** (FMCW - Frequency-Modulated Continuous-Wave Radar) utilise des ondes modulées en fréquence. Ils sont très performants pour les mesures à courte portée. Ce type d'équipement est moins précis (70 à 100 mm) que le LiDAR, mais il est très peu sensible à l'environnement notamment dans une ambiance de brouillard salin. Son faible volume (une demi boîte de sucre) et son poids (500 à 700 gr) le rend très utilisé sur certains drones. Les consommations affichées sont de l'ordre de 35W.

Le **Sonar à ultrasons** n'est pas utilisable. Bien que peu onéreux, simple et fiable, il est très perturbé par le vent et surtout l'interface air/eau.

Les avis techniques en aéronautique semblent donner un avantage au **Radio-Altimètre** pour sa robustesse et son adaptation à l'environnement.

Afin d'être exploitable dans un algorithme le signal analogique retour est échantillonné et numérisé.

Les algorithmes du Contrôleur du Vol

Dans le mode pilotage manuel assisté, l'architecture du contrôleur de vol doit être pensée comme un système de stabilisation 3D, et non comme un autopilote (PA).

Décrit globalement, en mode pilotage assisté, le pilote⁵ (ou le skipper) transmet une intention dynamique au Contrôleur de vol embarqué. Les algorithmes du Contrôleur de vol vérifient que l'intention se situe dans le cadre défini dans le domaine de vol, c'est à dire les limites physiques du Foiler.

Les concepteurs du Foiler définissent des limites du domaine de vol. Ces limites servent de base aux calculs des structures, à la prédiction des performances et encadrent les possibilités évolutives du Foiler en vol.

Si les intentions du pilote entraînent le Foiler au-delà de cet environnement, le domaine de vol recadre alors les calculs du contrôleur de vol.

Lorsque le pilote est confronté à une anomalie dans le déroulement du vol ou lorsqu'il souhaite le modifier, Il exprime uniquement une intention globale en manœuvrant le joystick soit pour revenir à l'état spatial de référence, soit pour accéder à un nouvel état spatial s'il souhaite modifier sa route. Sa manœuvre peut agir sur :

- Modification du cap (lacet) (axe vertical Oy)
- Correction de l'assiette de vol (tangage et roulis). Cela correspond à réaliser 2 rotations (axe transversal Oz et axe longitudinal Ox)
- Correction de l'altitude vol (translation Oy)

⁵ Pilote ou skipper... Sur un foiler la notion de skipper se confond de plus en plus avec celle d'un pilote.

Les algorithmes du Contrôleur de Vol embarqué :

- Réceptionnent cette intention globale, c'est à dire non détaillée.
- Vérifient sa compatibilité avec le Domaine de Vol du Foiler.
- Calculent les ordres à transmettre aux différents appendices à partir des données de l'instant fournies par l'IMU et le radar altimétrique.
- Hiérarchisent et priorisent ces différents ordres.
- Exécutent ces ordres jusqu'à ce que les données issues de l'IMU signalent que la ou les corrections demandées ont été exécutées.

La complexité de ces algorithmes est évidente, d'abord parce que les équations qui gèrent le vol relèvent des mêmes lois physiques que celles qui s'appliquent aux avions et ensuite parce que le Foiler doit voler à une altitude très basse de quelques m au-dessus d'une surface en perpétuel mouvement.

En fait, lorsque le pilote perçoit un dérèglement spatial, il provoque une intention de correction, transmise au contrôleur de vol. Les algorithmes de ce dernier interviennent alors sur les appendices afin de retrouver la position 3D du vol stabilisé initiale.

Si c'est une nouvelle route à suivre, le pilote valide une « IMU objectif ». On applique le même raisonnement que pour la correction de trajectoire.

Le retour de la position spatiale correspondante à l'instant « t » à celle de l'état spatial de référence (vol stabilisé idéal) constitue un asservissement en boucle fermé.

Toutefois, même si au final les positions spatiales (angulaires 3D et altitude) se superposent, la boucle fermée ne sera pas une simple comparaison afin d'aboutir à une parfaite superposition.

En effet, les volets implantés sur le PHR, l'aile de raie, le foil et le safran ne sont pas directement la grandeur à asservir.

Ils sont uniquement des actionneurs intermédiaires. Par exemple, la partie de l'algorithme qui gère l'altitude de vol n'est pas écrite dans le Contrôleur de Vol, afin de fournir au volet du foil un angle d'orientation pour lui-même. Son rôle est de produire une variation angulaire qui permet de réduire l'erreur d'attitude constatée par le radar altimétrique, tout en prenant en compte les actions sur les autres appendices. Au final, le Contrôleur de Vol gère un ensemble hiérarchique de plusieurs boucles fermées imbriquées. Chaque boucle se référant à un volet de bord de fuite, avec pour seul objectif et de retrouver la position spatiale Initiale 3D ou celle recherchée en cas de nouvelle route.

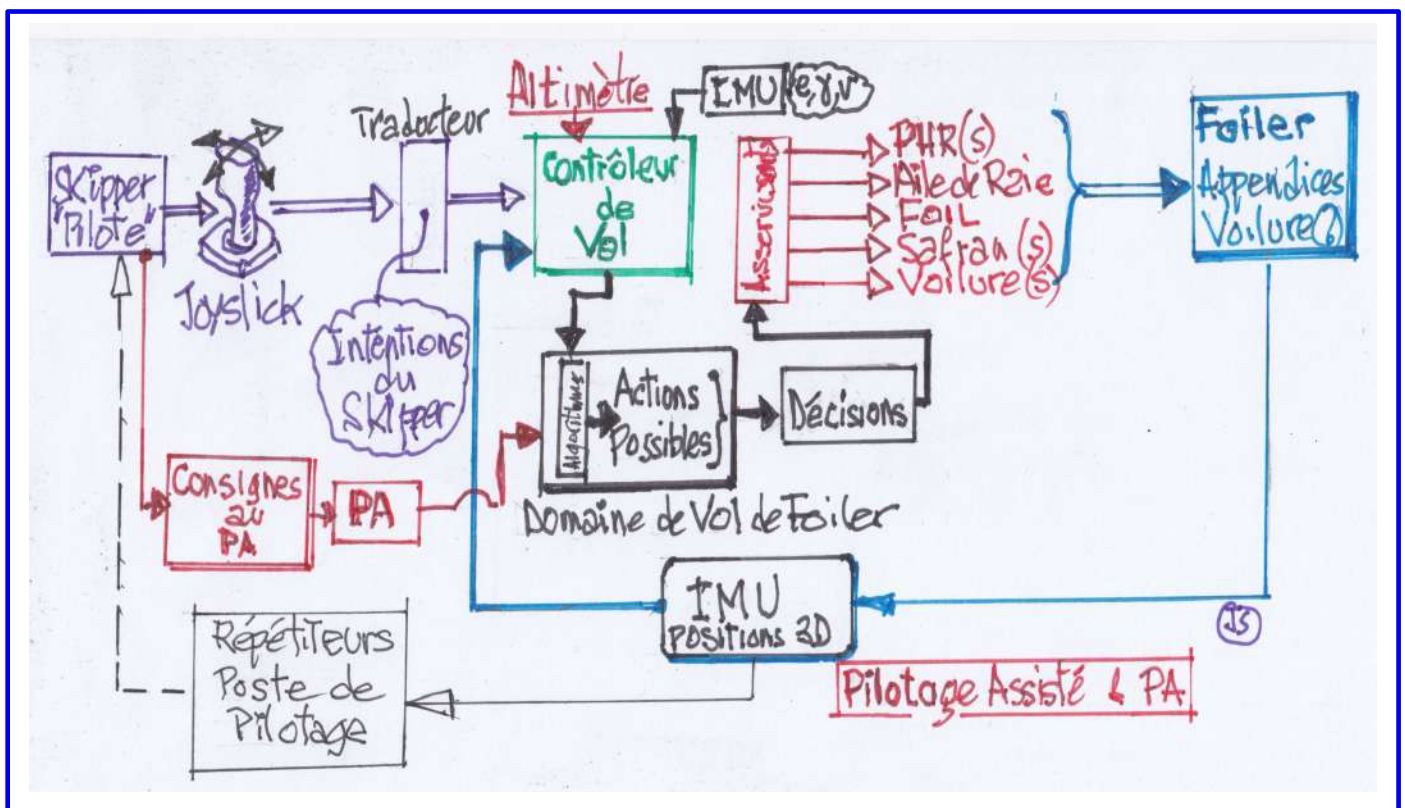
Conclusion : en mode « **vol manuel assisté** », le **pilote** :

- Ne commande plus directement les appendices.
- Fournit uniquement une intention dynamique.

Le **calculateur de vol**, après s'être assuré que cette intention reste dans l'environnement du **domaine de vol** :

- « Ferme⁶ » toutes les boucles qui contrôlent les différents volets des appendices. Cela signifie que les manœuvres angulaires des volets des appendices ont permis de satisfaire l'intention exprimée par le pilote.
- Transforme l'intention en une manœuvre globale.
- Stabilise la plateforme en diminuant l'erreur entre l'IMU de l'instant et l'IMU de référence (ou objectif).

Mais, tout cela sous-entend qu'il y a un pilotage manuel donc un pilote attentif à tout instant. Si on souhaite s'affranchir de l'action du pilote, il faut enclencher le PA (Pilote Automatique).



Le Pilote Automatique (PA)

Les paramètres de navigation souhaités par le skipper remplacent l'intention dynamique qu'il communiquait en mode Pilotage Manuel Assisté, au contrôleur de vol par l'intermédiaire du joystick. Toutefois, cette nouvelle architecture ne modifie pas la philosophie générale du contrôleur de vol.

⁶ « Ferme » au sens où chaque boucle d'asservissement a abouti indirectement à l'objectif recherché au niveau de l'IMU

L'adaptation aux nouvelles contraintes porte principalement sur la sensibilité du pilotage automatique.

Il faut entendre par sensibilité, l'écart acceptable des positions spatiales entre l'**IMU de référence**, qui correspond à la position 3D de la plateforme au moment de l'enclenchement du PA, et celle de l'**IMU à chaque instant « t » du vol**.

Le PA fonctionne à partir des paramètres suivants :

- ✓ Vitesse du Foiler
- ✓ Vitesse et direction du vent vrai
- ✓ Cap de référence
- ✓ IMU de référence
- ✓ L'altitude de vol prévue

Par contre, l'IMU de référence, l'altitude de vol prévue et le cap de référence sont intangibles, par contre les deux autres paramètres évoluent en permanence.

A partir de ces données introduites dans le contrôleur de vol, le cycle du mode pilotage assisté s'applique :

- Vérifier la compatibilité avec le domaine de vol du Foiler.
- Calculer les ordres à transmettre aux différents appendices à partir des données de l'instant fournies par l'IMU et le radar altimétrique.
- Hiérarchiser et prioriser ces différents ordres.

Conclusion : en mode « PA », le pilote :

- Fournit les objectifs relatifs au plan de vol.
- Active / Désactive le PA

Les limites du pilotage en vol

Dans cette étude sur le vol des Foilers véliques, un paramètre est négligé, ou plutôt, considéré comme gérable en permanence : c'est la puissance vélique disponible.

Déjà, cette puissance s'exerce à une hauteur sensiblement à mi-hauteur du mât et génère deux couples. Celui créé par la composante transversale provoque la gîte, celui issu de la composante longitudinale produit la propulsion.

Cette portance vélique résulte de la composition dynamique de deux vecteurs vitesses : la vitesse du vent vrai et la vitesse du Foiler.

Vent Vitesse (Boat Speed) Noeuds	Vent Vitesse (Boat Speed) m/s	Perte de vitesse FOILER en %	Vent Vitesse ² (Boat Speed) m/s	Perte de portance en %	Évolution de la portance en Newton
35.00	18.01		324		191000
34.50	17.75	1.45	315	2.84	185582
34.00	17.49	2.86	306	5.63	180242
33.50	17.23	4.29	297	8.39	174979
33.00	16.98	5.71	288	11.10	169795
30.00	15.43	14.29	238	26.52	140327

Le vent vitesse crée en vol par un Foiler vélisque étant largement supérieur au vent vrai, le vent apparent résultant produit un écoulement laminaire sur les voiles.

Une baisse de 0.5 nœud du vent vitesse par rapport à la vitesse maximale prévue, soit -1.45%, se traduit immédiatement par une chute de la portance du foil de 5400 Newtons. Pour 1.0 nœud, la perte de portance atteint 10000 N, soit 1 tonne pour un déplacement de 19.5 Tonnes. La propulsion vélisque dépend du vent vrai qui oscille autour d'une valeur moyenne.

Sans parler de rafales, comme dans des situations de vent fort, la vitesse du vent n'est jamais stable en mer par vent moyen.

Avec une motorisation thermique, la régulation de la vitesse du Foiler ne pose pas de difficultés car la gestion du débit de carburant solutionne le problème.

Sur un Foiler en vol, le vecteur vent apparent, composition du vent vrai et du vent vitesse, génère la portance vélisque.

Cette portance varie avec l'angle d'incidence des voiles par rapport au vecteur vent apparent. Donc, en modifiant l'angle d'incidence des voiles, sans modifier leurs réglages par rapport au vent apparent, il devient possible d'interférer sur le vent vitesse, par contre sur la vitesse du Foiler. Lofer augmente le vent apparent et augmente la vitesse, par contre abattre diminue le vent apparent et réduit la vitesse du Foiler.

En modifiant la route de quelques degrés, le Foiler dispose d'un moyen détourné pour réguler sa vitesse autour d'une valeur cible. Ce qui permet de stabiliser la portance du foil.

Toutefois, si ce process fonctionne bien pour des faibles variations de vitesse du vent vrai, il ne convient pas lorsque le vent vrai est très instable, surtout que cette instabilité en force s'accompagne de variations angulaires (refus ou adonnant) qui perturbent cette possibilité d'ajustement de la vitesse.

Dans les deux cas extrêmes, une chute du vent vrai provoque une perte importante de la vitesse donc de la portance, le Foiler redevenant immédiatement archimédien.

Sous l'effet d'une forte rafale, la vitesse du Foiler croît immédiatement, entraînant une portance incontrôlée de son foil. Cette configuration ayant pour conséquence un accroissement instantané de l'énergie cinétique, ce qui se traduit par une sortie de l'eau et une chute violente.

Le contrôle de la régulation de la vitesse passe aussi par un réglage permanent de la voilure. Réguler en jouant sur le lacet, comme cela a été présenté ci-dessus, apparaît pertinent.

Toutefois ce process doit être accompagné des réglages permanents des voiles (border / choquer) par rapport au vent apparent résultant des lacets. Il existe chez les fournisseurs d'accastillage des winches qui enroulent ou déroulent l'écoute unique de la grand- voile ou du foc. Leur motorisation électrique permet de les utiliser en mode manuel IN/OUT ou de les asservir en continu suivant les variations angulaire du vent.

En mode asservissement, on se rapproche de l'accélérateur d'un moteur thermique. Enfin presque, car à la différence du moteur thermique ou du réacteur d'avion, le vent n'est pas un carburant que le pilote ou le PA peuvent doser afin de maintenir la vitesse et assurer une portance stable.

Au-delà de l'efficacité des lacets pour conserver un vecteur vitesse le plus constant possible, le pilote ou le PA modifient la cambrure du foil en augmentant ou diminuant le calage des volets bord de fuite du foil. En agissant ainsi, on adapte la portance, donc l'altitude de vol, mais l'angulation des volets augmente la traînée... donc réduit la vitesse... qui de fait diminue la portance... « Caressez un cercle, il devient vicieux » (Ionesco dans Rhinoceros).

De l'Interférence des actions de pilotage qui introduit le paragraphe suivant.

Le nombre d'appendices mobiles

On vient de l'évoquer en fin du chapitre précédent, une variation du vent vrai en force et/ou direction se traduit par une modification de la force vélique disponible. Cet aléa impose une adaptation du cap et la modification du réglage des voiles afin de conserver, autant que faire se peut, la vitesse du Foiler.

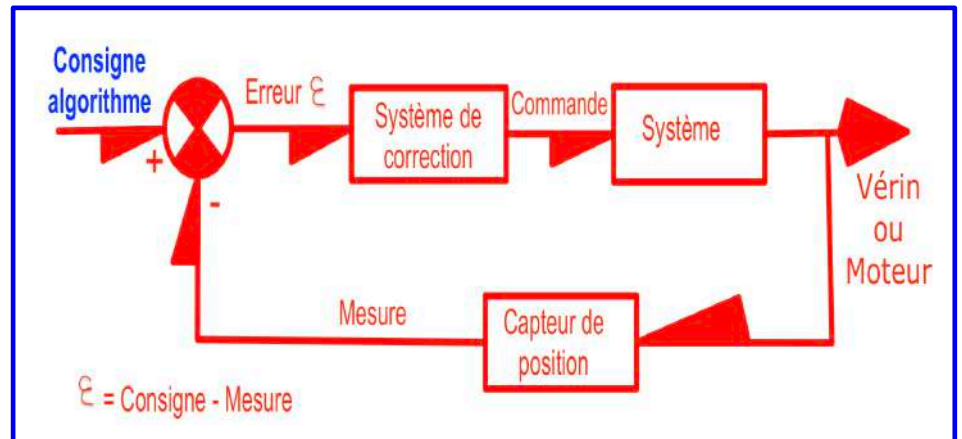
Sur un Foiler, la vitesse représente le facteur prépondérant dans le calcul de la portance car le vecteur vitesse agit au carré dans le calcul. Une chute ou un accroissement de ce paramètre déséquilibre instantanément les conditions de vol.

Dans le cas d'un trimaran ULTIM comme **Gitana 18**, un PA sollicite à minima 6 appendices pour voler : le safran (lacet), les réglages des voiles GV et Foc (propulsion), les volets de bord de fuite du foil, le PHR du safran (tangage), celui de l'aile de raie (roulis). Pour un foiler monocoque, l'aile de raie peut être remplacée par une quille à bulbe pendulaire équipée de foils à profil symétrique (voir **Ferrari Hypersail**).

Lors de cette succession d'actions se situant dans un laps de temps obligatoirement très court, le Foiler se déplace à 18m/s (35 nœuds), le risque d'interactions entre les effets « aérodynamiques » de certains appendices devient possible et peut déséquilibrer le Foiler.

Par exemple, rétablir l'assiette longitudinale (tangage) avec le PHR du safran produit une modification de l'angle d'incidence du foil par rapport au fluide... qu'il faudra compenser simultanément en augmentant ou en réduisant l'angulation du volet de bord de fuite du foil.

Chaque motorisation d'appendice, vérins hydrauliques et/ou moteurs électriques, utilise nécessairement un asservissement en boucle fermée afin de contrôler si la consigne de



déplacement demandée par l'algorithme est bien atteinte. Cela impose d'équiper chaque appendice d'un capteur de position en plus de sa motorisation. Lequel retourne sa position réelle à la boucle d'asservissement.

Afin d'améliorer les performances, les concepteurs sont tentés de doubler ou même d'ajouter des appendices pour augmenter les options de réglages.

Ainsi, par exemple, le bras du foil actif possède 2 degrés de liberté.

Une rotation principale autour d'un axe longitudinal permet d'escamoter le foil sous le filet de la plateforme et de le sortir lorsque sa fonction sustentatrice est nécessaire.

Sur les AC40 ou AC75, cette fonction est du type tout ou rien. Sur **G18**, la programmation du vérin de commande de sortie du foil, permet, dans sa phase finale, d'ajuster l'angle de déploiement. Cette option permet de modifier l'angle du foil avec l'horizontale, donc d'augmenter ou diminuer la composante de la portance verticale.

Une deuxième rotation de l'ensemble de l'articulation existe autour d'un l'axe transversal. Un vérin permet d'ajuster l'angle d'incidence du foil afin de diminuer sa trainée initiale. Cette manœuvre permet un léger gain de vitesse à certaines allures.

Ajoutons que les deux volets de bord de fuite du foil possèdent des commandes indépendantes. Ainsi l'adaptation de la cambrure de chaque demi foil permet de déplacer transversalement le foyer de la portance globale le long du foil. On augmente ou on diminue ainsi le couple de redressement.

En vol, tout cela représente 12 systèmes de motorisation et autant de capteurs de contrôle de la réalisation de la consigne :

⇒ Foil (4), safran central et PHR (2), safran de flotteur et PHR (2), aile de raie, PHR, basculante (2), commande (éventuelle) de la voilure (2).

Et c'est sans compter les données fournies par les 2 radio-altimètres ou LiDAR, celles des 3 axes de l'IMU et celles relatives à l'environnement vélique.

L'ensemble de cette gestion technique relève de l'architecture algorithmique du contrôleur de vol. Architecture et calculs qui deviennent de plus en plus complexes.

L'ensemble des appendices ne constitue pas la finalité de la boucle d'asservissement finale qui est de superposer l'IMU de départ à celle de la consigne.

Les appendices ne représentent que des actionneurs statiques d'un système global dynamique, soumis à des accélérations violentes puisqu'il est en permanence en mouvement.

Par exemple :

- Une action à cabrer ou à piquer du PHR accolé au safran modifie l'assiette, mais aussi la vitesse, l'accélération...
- Un roulis modifie la portance... donc crée un effet dynamique.
- Un changement d'altitude modifie indirectement l'assiette... en créant des effets inertiels
- Etc...

L'ensemble des algorithmes du calculateur de vol s'appuie sur le modèle dynamique que représente le Foiler et non simplement sur une correction géométrique de la position dans l'espace de ce Foiler, comme lorsque l'on déplace un objet dans un espace 3D stable.

L'IMU avec notamment ses accéléromètres intégrés, permet de corréliser ces effets dynamiques induits résultants des actions multiples des appendices.

La RCV 52 ⁷ Energie Manuelle

Globalement, seules les règles internationales de route et celles qui précisent comment une flotte doit contourner les bouées sont intangibles. Les autres règles peuvent être modifiées par les organisateurs de régates.

La règle 52 fait partie de ces règles modifiables.

⁷ La règle 52 est extraite des règles de course à la voile édictés par « World Sailing, acronyme qui a succédé à ISAF ». Des modifications ont lieu tous les 4 ans (cycle Olympique).

RCV 52 (Règles de course à la voile RCV)

"Le gréement dormant d'un bateau, son gréement courant, ses espars et appendices mobiles de coque doivent être réglés et manœuvrés uniquement par la force fournie par l'équipage."

Lors du congrès de World Sailing de 2013, l'expression « *force fournie par l'équipage* » a remplacé l'ancienne écriture « *force manuelle* ». En fait, la règle précise que seul l'effort physique produit par l'équipage doit agir directement sur la manœuvre et les réglages. Un palan et un winch manœuvrés par un équipier sont conformes à cette expression « *force fournie par...* ». Par contre, le stockage de l'énergie n'est pas toléré par la règle 52, même si elle est générée au départ par la force physique de l'équipage, comme un cycliste qui fait tourner une pompe hydraulique ou un générateur électrique. C'est aussi vrai si elle provient d'une éolienne, alors qu'il s'agit bien de la force du vent.

Avec la création au début des années 60 de courses océaniques en solitaire ou en double, les organisateurs sont contraints d'amender cette règle afin d'autoriser qu'une énergie autre que celle produite par le skipper actionne directement le safran. On comprend qu'en course océanique en solitaire, le skipper doit dormir.

L'écriture de la première modification de la règle autorise tout naturellement le contrôle du lacet par l'action d'un PA, type conservateur d'allure. Les premiers PA fonctionnent par rapport au vent apparent et la réaction d'un aérien agissant directement sur la barre ou sur un appendice immergé qui modifie l'angle de barre par un système de drosses. C'est donc une force non produite par l'équipage qui actionne la barre du bateau. Pendant une bonne décennie, l'énergie vélique remplit cette fonction.

Progressivement, les PA s'améliorent, le compas électronique remplace l'aérien vélique. Cette innovation permet de programmer le cap à suivre. Ainsi une énergie non-vélique actionne le safran par l'intermédiaire d'un vérin, lui-même géré par un ordinateur associé à des capteurs.

L'électronique évoluant très vite, les concepteurs proposent des PA dits intelligents.

En fait, cette intelligence n'est autre qu'un certain nombre de filtres électroniques permettant d'amortir ou d'améliorer la sensibilité de la réponse sur l'action de la barre en fonction des mouvements du bateau en navigation.

Lors de l'étape suivante, le calculateur du PA s'enrichit de plusieurs paramètres : la vitesse du vent et sa direction à l'instant « t ».

La progression exponentielle des capacités de traitement des processeurs libère alors complètement l'innovation, notamment pour les PA, les traitements des datas, etc...

Toutefois, ces évolutions fonctionnent avec de l'énergie électrique. Paradoxalement ce n'est pas trop la production de l'énergie électrique qui pose problème, mais le contenu du calculateur du PA.

C'est à dire le niveau technique des algorithmes intégrés dans le PA. Tant que le PA agit comme conservateur de cap, l'équité sportive est respectée, même s'il y a des filtres qui régulent plus ou moins le lacet. Par contre, dès que des données liées à l'environnement extérieur interviennent dans l'action du PA, notamment pendant que le skipper dort mais pas exclusivement, on entre dans le domaine de la réalité augmentée.

La réalité augmentée est la superposition de la réalité représentée par le comportement du bateau avec d'autres éléments comme des datas, des images 2D ou 3D, des vidéos, etc... Un algorithme agissant en temps réel interprète, assemble, améliore cet ensemble et propose une évolution de la réalité

A titre d'exemple simple, une quille pendulaire, pilotée par des vérins hydrauliques ou des vis à billes peut être asservie en fonction de l'évolution du cap, de la gîte du bateau, de la courbe de stabilité relative au modèle hydrostatique de la carène, des données anémométriques, etc. Dans ces conditions, le PA fonctionne en « réalité augmentée ».

L'écriture de la règle 52 devient ainsi très compliquée. Des classes très structurées comme celles de l'IMOCA, de la CLASS 40 ou de la classe MINI 6.50 arrivent à gérer ce sujet. Par contre, pour des bateaux de jauge archimédiens, par essence d'architectures très diverses, comme d'ailleurs les formats très variés des courses proposées, cela relève de la quadrature du cercle.

Cela oblige les organisateurs, à insérer dans chacun des Avis de Course un texte réglementaire relatif à la règle 52 qui encadre ce qui est autorisé.

Lorsque le bateau devient Foiler, la gestion du domaine de vol n'est plus possible en agissant uniquement sur le safran qui n'assure que le lacet et la translation longitudinale.

Il faut piloter simultanément les 6 degrés de liberté : Lacet / Tangage / Roulis / Translation / Dérive / Altitude.

Ce nouveau paradigme impose l'écriture de nouvelles RCV entièrement dédiées aux Foilers, ce qui est réalisé pour la Coupe de l'America.

Dans le cas de ces Foilers océaniques, les textes devront encadrer les conditions de pilotage dans les configurations « solitaire », « double » et « équipage ».

En équipage, l'organisation en quarts de veille permet de piloter en mode pilotage manuel assisté. Ce mode de pilotage sera indirect puisque c'est le contrôleur de vol qui assure la stabilisation finale de la plateforme, mais c'est l'équipier qui possède le Joystick en main et traduit en commandes manuelles sa perception des instabilités de vol du l'instant « t ». La particularité de la propulsion vélique impose à l'équipage de quart, le réglage manuel de la voilure afin de maintenir la vitesse. Ainsi, se met en place une forme de navigation globale, certes très assistée, mais toujours dépendante de la compétence de l'équipage.

En solitaire ou même en double, la résistance physique et physiologique de l'homme limite sa capacité à piloter un Foiler 24/24H, et cela même en Pilotage Manuel Assisté.

Sur un voilier archimédien, on peut décorréler le suivi de la trajectoire des autres fonctions qui assurent la stabilité et la sécurité du voiler. L'équilibre général du voilier relève des lois de l'hydrostatique. Sa vitesse dépend, par contre, du réglage des voiles par rapport au vent ou à la route imposée au PA. Toutefois, ces réglages autorisent une grande tolérance quant à leurs efficacités aérodynamiques. Certes, cela rejaillit sur la vitesse. Par exemple à 10 nœuds, 2% de perte de vitesse, représente 0.2 nœud, mais ne provoque pas un déséquilibre fatal.

Même en supposant que le voilier se trouve face au vent ou vire inopportunément, ou encore soit couché sur l'eau, il n'y a pas danger immédiat hormis une vitesse nulle.

Dans ces conditions on peut confier la fonction lacet, c'est dire la trajectoire à suivre, à un PA.

A bord d'un Foiler, il est impossible de décorréler la sustentation au-dessus de l'eau, qui relève des lois de l'aérodynamique, de la trajectoire à suivre. Cela impose que le PA gère l'ensemble des appendices et des équipements qui assurent cet équilibre spatial.

Dans ces conditions, le rôle de l'équipage se limite presque à fournir au PA les données liées au vol que sont la route, l'altitude, la vitesse, les polaires, etc... Des mauvaises langues argumenteront que si le PA dédié à ce Foiler, a accès à des fichiers MTO, des banques de données et aux conditions du moment, l'algorithme embarqué peut très bien déterminer en permanence la route optimale afin d'atteindre le point d'arrivée programmé. La course océanique s'élance dans un autre univers.

PARTIE 2 : Les conceptions des Foilers

La genèse

Les premiers Foilers véliques océaniques utilisent des technologies de constructions aujourd'hui complètement obsolètes, aussi bien dans les domaines des matériaux que dans ceux de l'électronique, de la micromécanique et de l'informatique.

L'optimisation du ratio poids/résistance et de la gestion de sa stabilité en vol représentent les principales difficultés à surmonter lors de la conception d'un Foiler océanique. La manière de piloter apparaît aussi très complexe.

Le choix d'une architecture monocoque, complique aussi la conception par rapport à une plateforme type trimaran réputée plus stable en gîte.

Durant les dernières années de 1990, la classe des trimarans ORMA comprend, au regard des évolutions architecturales rapides de ces trimarans de 60 pieds, notamment avec les dessins de dérives courbes implantées dans les flotteurs, qu'il devient possible d'extraire entièrement la plateforme de l'eau donc de voler.

Mais, extraire entièrement le trimaran de l'eau, bien que cela constitue une étape importante dans la technique du vol, n'assure en aucun cas un vol stabilisé.

Confrontée à cette tentation de voler, qui reste toutefois très compliquée à réaliser avec les ressources technologiques disponibles à cette époque, la classe ORMA bloque l'évolution vers le vol.

En réalité, la classe ORMA comprend que le vol des trimarans devient possible. Elle ne souhaite pas ce changement de paradigme. Ce sera aussi le cas une décennie plus tard, pour la classe IMOCA, qui rédigera un règlement bloquant le vol des monocoques en limitant le nombre d'appendices à 5. Cette décision n'interdit toutefois pas de naviguer avec des surfaces sustentatrices.

La relative monotypie des ORMA permet à la classe d'encadrer la sustentation produite par l'utilisation de ces dérives courbes latérales, en limitant leurs surfaces projetées sur un plan horizontal. Les trimarans ORMA restent donc archimédiens.

Des performances des trimarans ORMA, les architectes déduisent qu'une plateforme de catamaran ou trimaran paraît très adaptée pour concevoir un Foiler océanique intégral. Elle offre un ratio demi-largeur/ longueur qui favorise le couple s'opposant au chavirage aussi bien en mode archimédien qu'en vol et que l'angle de gîte reste encadré entre 6° et 8°.

Les catamarans de la Classe C, les AC72 (America Cup 2012), LH 26.2 m, Bau 22 m, déplacement 5900 kg, ceux de la première génération des catamarans F50 de SailGP utiliseront les foils en L, dérivés des foils courbes. En janvier 2025 les F50 de SailGP seront équipés de « high speed T-Foils ».



Le choc de l'AC75 Monocoque

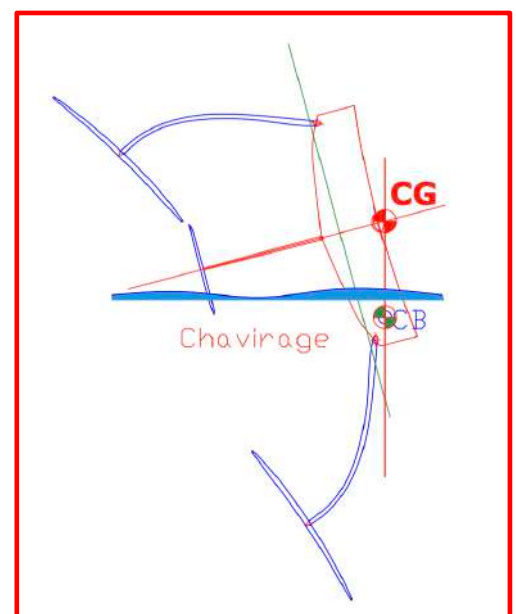
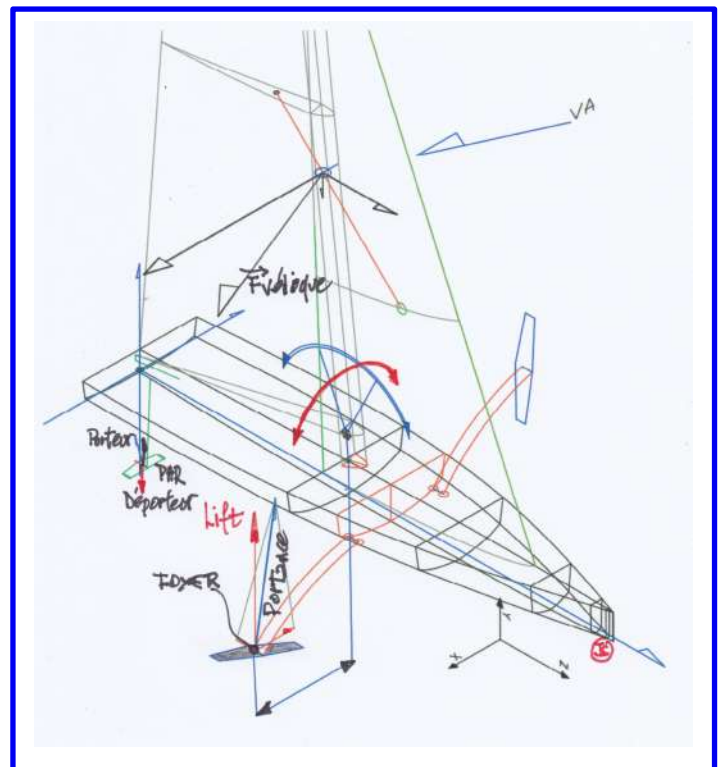
Le choix, en novembre 2017 d'un AC75 monocoque de 21m et 7 tonnes de déplacement, non lesté mais équipé de foils, bouscule bien des idées reçues, bien que les Moth à foil jouent depuis plusieurs années les libellules sur les plans d'eau.

Notons que ce projet d'AC75 est prévu pour naviguer sur un plan d'eau plat et protégé

L'AC75 vole en appui sur son foil largement excentré sous le vent. Ce foil, en « T inversé », se trouve implanté en extrémité d'un bras courbe oscillant. Un PHR situé à la base du safran gère l'angulation longitudinale et indirectement l'angle d'incidence du foil par rapport au fluide lors d'une action à cabrer.

Toutefois, cette architecture présente l'inconvénient majeur de chavirer vers 80°, lorsqu'elle évolue en mode archimédien, avant le décollage ou suite à une perte contrôle en vol.

Ce faible critère de stabilité interdit de transposer intégralement le modèle global d'un AC75, tel qu'il est, c'est à dire non lesté, sur un Foiler océanique.



La raison est simple, un Foiler océanique peut être amené à évoluer dans 2 situations où il est soumis : aux lois archimédiennes, donc au risque de chavirage. Ce sont : pour décoller et pour se poser sur l'eau lorsqu'il n'a pas assez de vent pour voler et trop pour assurer un vol stable.

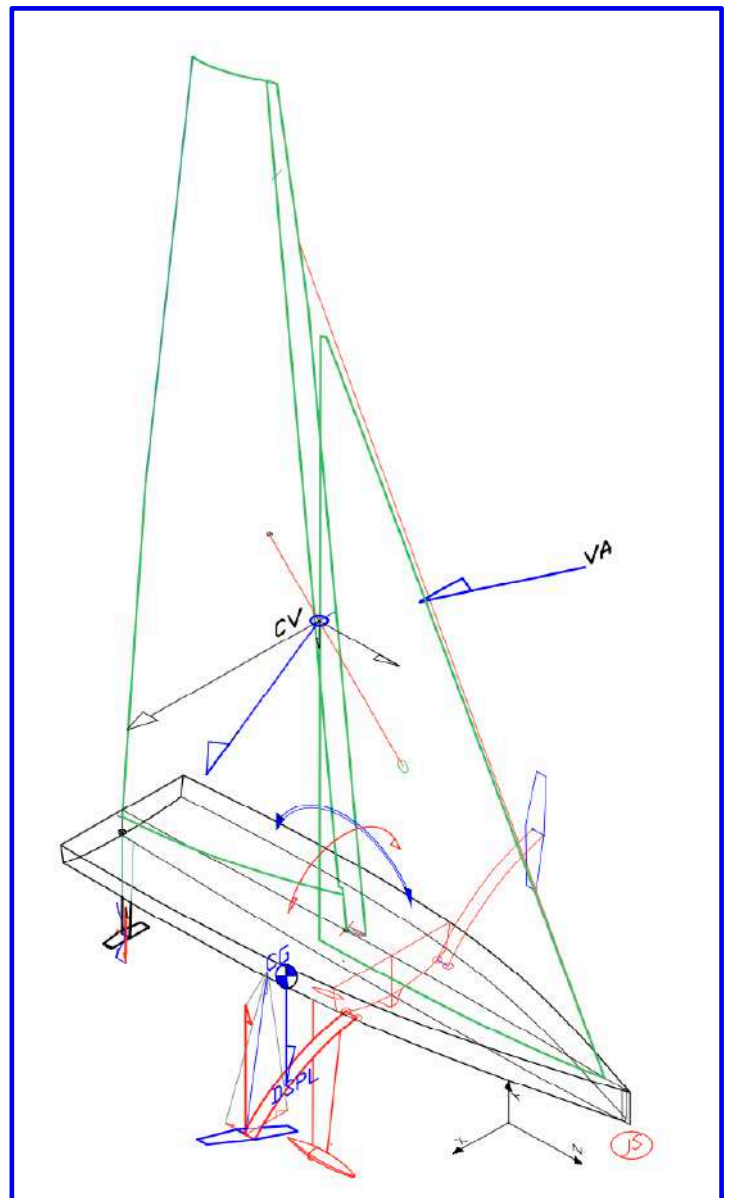
On rappelle que lors de navigations océaniques, un monocoque archimédien doit posséder à minima un angle de chavirage de l'ordre de $115/120^\circ$. World Sailing impose la norme ISO 12217-2 pour les monocoques de moins de 24m et par extension pour les voiliers plus grands comme les Maxi qui atteignent 100 pieds, soit 30 m.

Un Foiler intégral dédié à la course océanique n'échappe pas à cette règle puisqu'à tout moment il peut passer de l'équilibre en vol au régime archimédien.

Afin de respecter ce critère de stabilité, l'implantation d'un bulbe en extrémité d'une voile de quille central devient obligatoire afin de descendre le centre de gravité du bateau et ainsi d'atteindre un angle de chavirage conforme. Ce qui sera fait sur le premier monocoque Foiler océanique **Flying Nikka**.

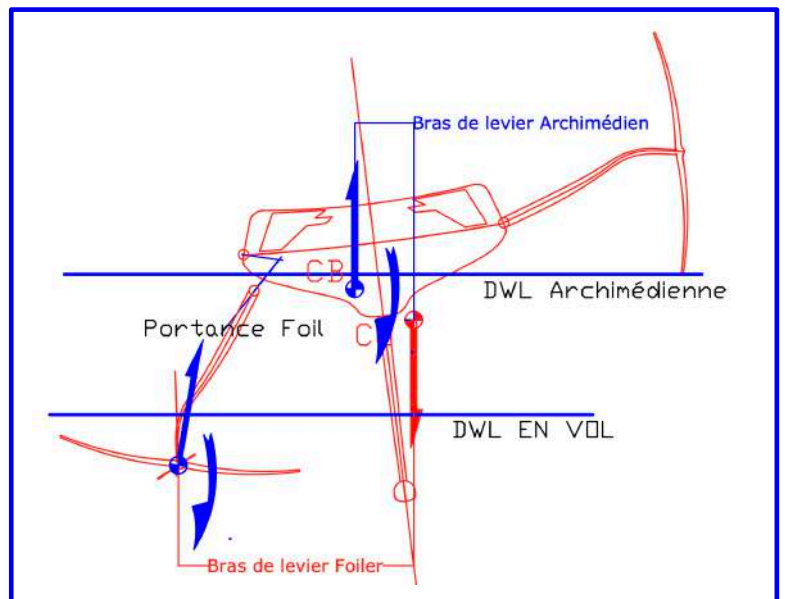
Certes, les lois de l'hydrostatique permettent la conception d'une carène archimédienne avec un lest intérieur en remplacement d'une quille (bulbée ou non) rapportée.

Ce type d'architecture (genre dériveur intégral) impose une carène plus volumineuse à longueur hors tout identique. Cela se traduit par une augmentation du déplacement, donc du poids... Ennemi N°1 du Vol. Plus de poids au décollage, signifie une augmentation de la surface allaire, de la puissance vélique, donc du poids supplémentaire à extraire de l'eau.



A contrario, la conception avec un bulbe n'augmente pas le déplacement initial prévu du Foiler, puisque la masse du bulbe s'intègre dans l'allègement de l'ensemble coque/pont/structure interne.

Par contre, dès que le Foiler vole, l'équation d'équilibre devient totalement différente de celle liée au régime archimédien. Le centre de carène **CB** ou s'applique la poussée hydrostatique (centre de gravité du volume de la coque immergé) liée au mode archimédien disparaît. Il est remplacé par le **Foyer** du foil ou s'exerce la poussée sustentatrice.



Conséquence : en navigation archimédienne, le couple de redressement généré par le produit du poids du Foiler par le bras de levier horizontal (la distance) entre le CG et le CB, se trouve multiplié, en mode vol, par un facteur 7 lorsque le Foyer remplace le CB.

Même si, en vol, le bulbe n'a plus d'utilité en termes de stabilité, il se trouve toujours immergé et produit une trainée non négligeable, qui affecte négativement la vitesse.

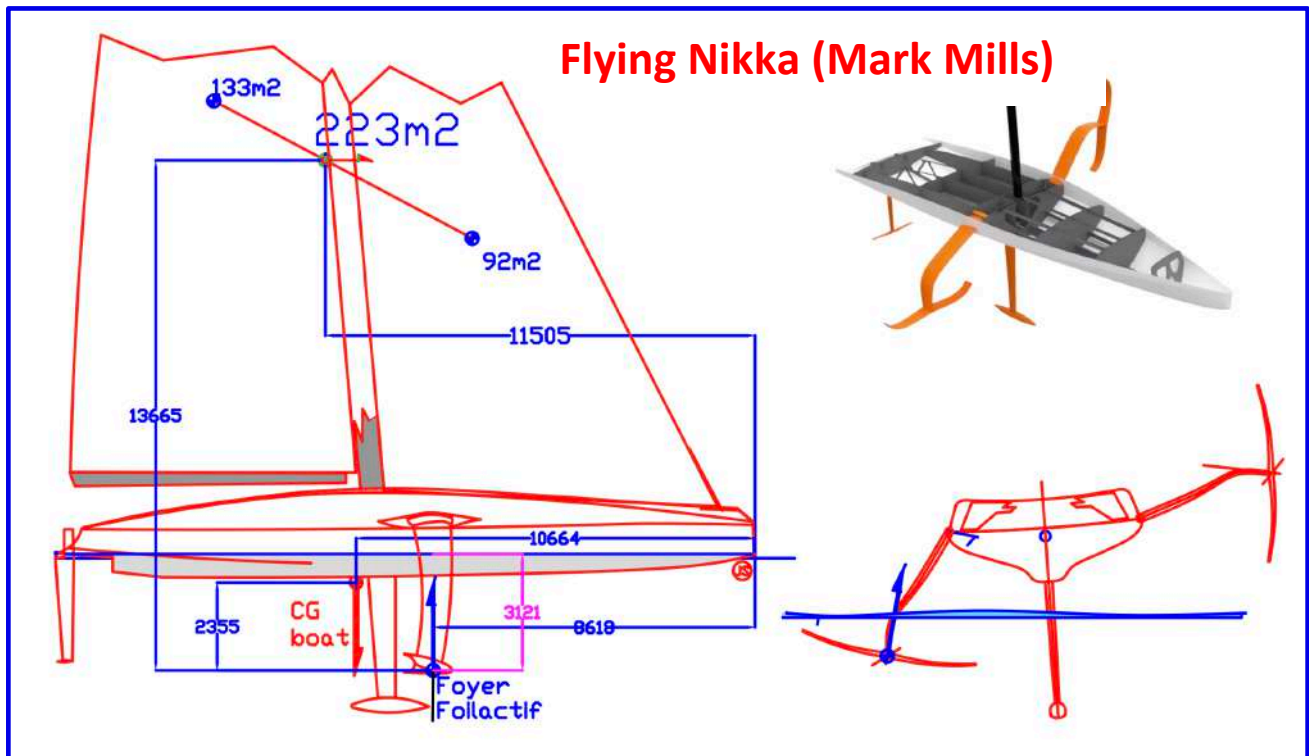
Le Foiler monocoque Flying Nikka

Alors que les Foilers multicoques se développent, dont la création de la Classe ULTIM, il faut attendre 5 ans après le lancement des AC75 pour qu'un monocoque Foiler **Flying Nikka**, LH 18.72m, déplacement 7450 kg, conçu par Marc Mills et son équipe, soit étudié et lancé.

Le projet du propriétaire n'est pas de concevoir un Foiler pour des traversées océaniques mais un Foiler s'inspirant des AC75 afin de participer aux courses offshores côtières en Méditerranée, entre-autres la Giraglia.

Sur ce projet, la manipulation des bras des foils (rotation) reprend la technique utilisée sur les AC75. Par contre, sur la version présentée au neuveage, il n'y a pas de volets de bord de fuite sur les foils.

L'angulation, c'est à dire l'incidence du foil, s'obtient par une rotation de l'ensemble de la surface sustentatrice.



Ces choix technologiques se traduisent par une installation hydraulique conséquente (pression de l'ordre de 500 bars) pour la commande des bras, de l'angulation de 5 à 15° des foils, de la commande du PHR et du safran.

La technique de pilotage mise en place découle du programme de navigation se résumant à des courses en équipage, à la journée ou d'une durée maximale de 24 à 48 heures.

A l'identique d'un bateau archimédien, chaque membre de l'équipage de ce Foiler assure une fonction précise. En plus du réglage des voiles pour assurer en permanence la vitesse, l'équipage doit réagir en continu pour :

- Fournir la portance nécessaire au vol
- Conserver l'assiette de vol horizontale
- Conserver le cap imposé.

L'équipage commande manuellement la propulsion vélique et chacun des appendices, foil, safran et PHR. La stabilité du vol dépend de la coordination parfaite entre toutes ces actions individuelles.

Au neuveage, l'installation d'un automate permet d'optimiser les relations entre les demandes d'actions et les temps de réponses des opérateurs et de gérer la coordination des décisions. Cet automate n'est pas vraiment un PA, mais une assistance technique entre les actions de l'équipage et le domaine de vol du Foiler. Avec cet automate, l'équipage reste plus opérationnel.

La réalité montre que ce Foiler monocoque vole, mais sa stabilité en vol apparaît très complexe à gérer. S'ajoute aussi le caractère particulièrement énergivore des systèmes de contrôle et de gestion.

Le projet **Flying Nikka** apparaît plus, comme un démonstrateur à l'échelle 1, qu'un véritable Foiler, prêt à naviguer pendant plusieurs jours en régate offshore océanique, dans des conditions de mer quelques fois chaotiques. Toutefois, **Flying Nikka** existe et montre qu'il vole. Reste à l'adapter au domaine de vol d'un Foiler océanique.

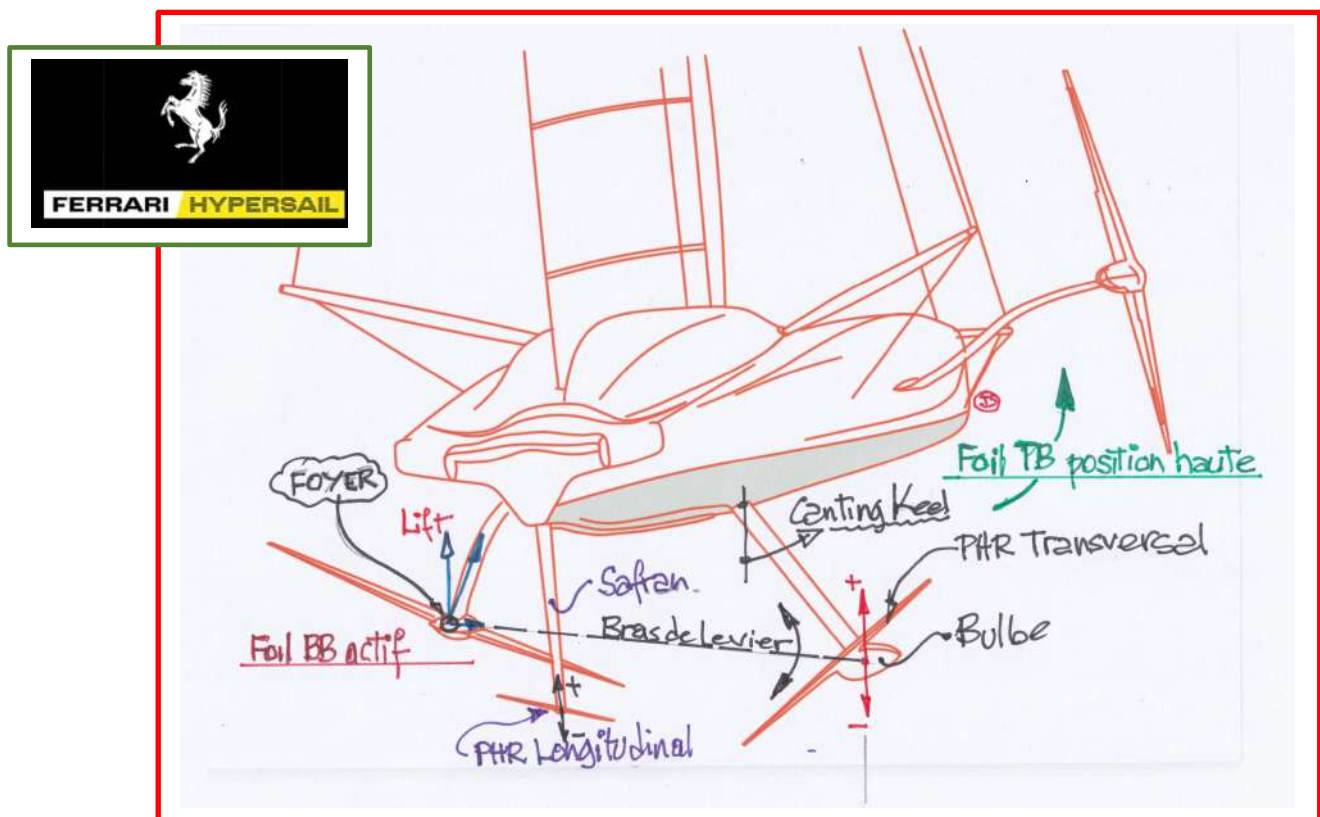
Le projet FERRARI Hypersail

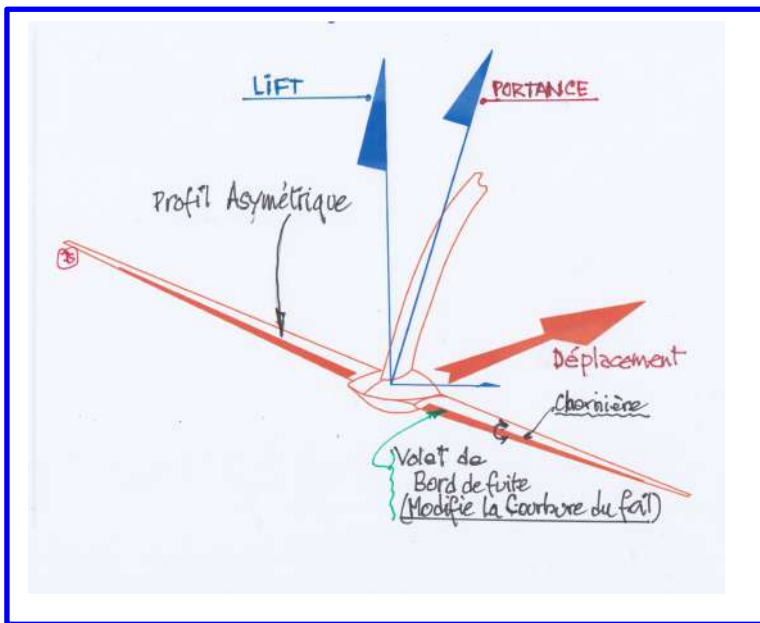
Le Foiler monocoque **FERRARI Hypersail** dont le projet a été présenté en Décembre 2025, reprend la sustentation principale sur un foil en « T inversé », à l'identique des AC75, mais innove en implantant 2 surfaces sustentatrices de chaque côté des flancs du bulbe d'une quille pendulaire.

En fait, le Foiler **FERRARI Hypersail** adapte l'idée, développée sur les ULTIMS, d'une l'aile de raie équipée de 2 surfaces sustentatrices latérales.

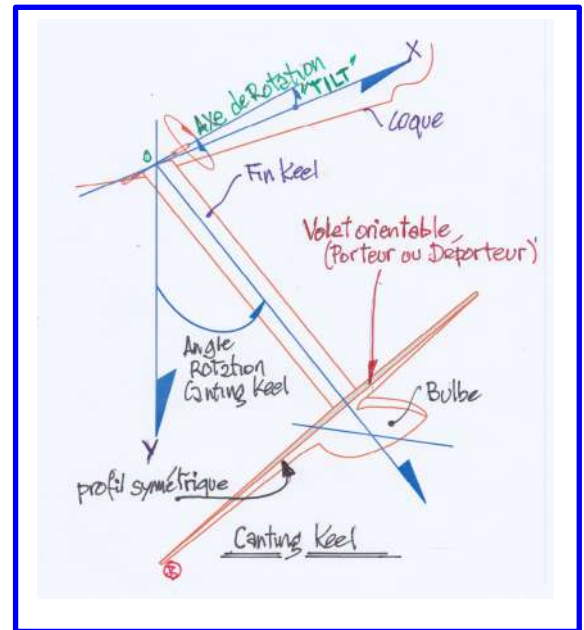
Le Foil en T inversé, sous le vent, produit le maximum de la sustentation.

Possiblement, les 2 foils implantés de chaque côté du bulbe contribuent en plus à cette sustentation. J'écris possiblement, car ces deux foils implantés latéralement sur le bulbe de la quille pendulaire possèdent une autre fonction.





FOIL en « T inversé »



Fin Keel Bulb pendulaire et Aile de Raie

En effet, son axe de rotation situé dans le plan vertical de symétrie de la coque possède une angulation cabrée de 7 à 10° (nommée « tilt ») par rapport à l'horizontale. Cette technique initiée à l'origine sur les IMOCA et a été employée sur **Gitana 18**.

Ainsi, lorsque la quille pendulaire, donc son bulbe et ses 2 surfaces sustentatrices latérales, est angulée au vent de 20 à 25° ou plus, le tilt de 7 à 10° choisit par l'architecte lors de la conception, donne au voile de quille une incidence, donc de la portance, qui s'ajoute à celle des foils latéraux implantées sur les flancs du bulbe. On remarquera que le fond du bulbe plat, génère aussi un peu portance et aussi de la trainée.

Le profil des foils latéraux du bulbe est symétrique. Ils sont équipés de volets de bord de fuite qui, suivant leurs angulations (+/-), produisent une portance vers le haut ou une portance vers le bas (déportance).

Ainsi, les foils équipant le bulbe de la quille pendulaire peuvent produire de la sustentation qui s'ajoute à celle du foil en « T ». Mais ils peuvent aussi travailler en déportance, comme un PHR, afin d'adapter l'angle de gîte.

Le réglage en mode portance maximale des foils de la quille pendulaire associé à la portance créée par le foil sous le vent, améliore la phase de décollage que les concepteurs souhaitent vers 12 nœuds de vitesse.

Ensuite, en vol horizontal stabilisé, les ajustements d'assiettes en roulis et en tangage se produisent autour du Foyer du foil en T inversé.

Cela passe par des actions simultanées du PHR implanté en extrémité du Safran et des foils du bulbe qui se transforment en PHR gérant le roulis.

Les volets de bord de fuite du foil implantés à l'extrémité du bras permettent de moduler la sustentation du Foiler et de respecter l'altitude de vol.

L'invention révolutionnaire de ce PHR -Elevator- revient au Frères Wright en 1903 qui cherchaient une méthode pour contrôler le tangage. Ce système de régulation du tangage (cabrage ou piqué) d'un avion existe toujours.

Souvent, sur les Foilers à voile, on parle de foil sur le safran pour désigner ce plan horizontal régulateur (PHR) et on lui attribue un rôle dans la sustentation du Foiler. C'est une erreur car un foil est toujours porteur, alors qu'un PHR -ELEVATOR- peut être suivant, les ordres du pilote, porteur ou déporteur, cela signifie que la poussée créée est dirigée vers le haut ou vers le bas avec la même efficacité.

D'ailleurs le profil d'un PHR est symétrique et non asymétrique et ni cambré comme c'est le cas pour un foil (aile). Si on souhaite que le foil ne produise plus de portance, soit on déploie un volet de surface qui perturbe l'extrados, soit on cale le volet de bord de fuite temporairement en négatif.

En résumé, la conception du **Foiler FERRARI Hypersail** s'articule autour des appendices suivants :

- Un foil en T inversé implanté à l'extrémité de chaque bras articulé. Son C_z évolue en fonction du calage du volet de bord de fuite et de l'assiette longitudinale, notamment dans la phase de décollage.
- Une quille pendulaire, dont l'axe de rotation est cabré de 7 à 10° par rapport à l'horizontale. Cet angle génère géométriquement de l'incidence au profil symétrique du voile de quille dès que la quille est angulée. Le lift produit s'additionne à celui du foil sous le vent. Le bulbe en extrémité du voile de quille, toujours immergé, produit de la trainée. Son fond plat génère un peu de portance.
- Un safran avec son PHR, permet de contrôler le lacet et le tangage. Ce Foiler est toujours conçu avec un centrage arrière⁸, ce qui le rend instable, dans le sens où le pilote peut répondre rapidement et surtout efficacement à toute évolution de son équilibre en vol.
- Un autre plan régulateur (porteur ou déporteur) apparaît perpendiculairement au voile de quille... Et c'est là l'innovation, Il est implanté au niveau du bulbe. Ce PHR-Elevator- possède presque la même envergure que le foil.
C'est dire, l'efficacité que les concepteurs attendent de cet appendice. L'objectif est de créer une portance ou une déportance afin d'obtenir une rotation horaire ou antihoraire autour du foyer et ainsi de contrôler le roulis en vol.

⁸ Voir sur le blog de www.experts-yachts.fr le document « La vitesse symbole de la puissance au fil des siècles (Chapitre 30 : Équilibre en vol : Centrage AR ou Centrage AV)

Soit 3 degrés de liberté en rotation R_x (Tangage), R_y (Lacet), R_z (Gîte) contrôlés par le pilote/skipper et 3 translations :

- La translation longitudinale T_z (la route à suivre),
- La translation verticale T_y (l'altitude de vol produite par la portance des surfaces sustentatrices),
- La translation transversale T_x (la dérive, indirectement gérée par la composante transversale de la portance du foil et du Fin Keel).

L'Energie nécessaire pour voler

Flying Nikka utilise en permanence un groupe thermique (80 kW) électrohydraulique afin de disposer de l'énergie hydraulique (500 bars) et électrique pour la charge du parc batteries. Cette énergie est nécessaire pour assurer le contrôle des appendices et celui des équipements annexes. Remarquons que cette pratique de l'utilisation permanente en régate d'un groupe électrogène est largement répandue par l'ensemble des Maxi.

Dès le début de la conception du **Foiler FERRARI Hypersail**, le BE de Maranello fait le choix de l'autosuffisance énergétique totale pour le fonctionnement du Foiler. Cela signifie que ce Foiler n'utilisera pas d'énergie fossiles.

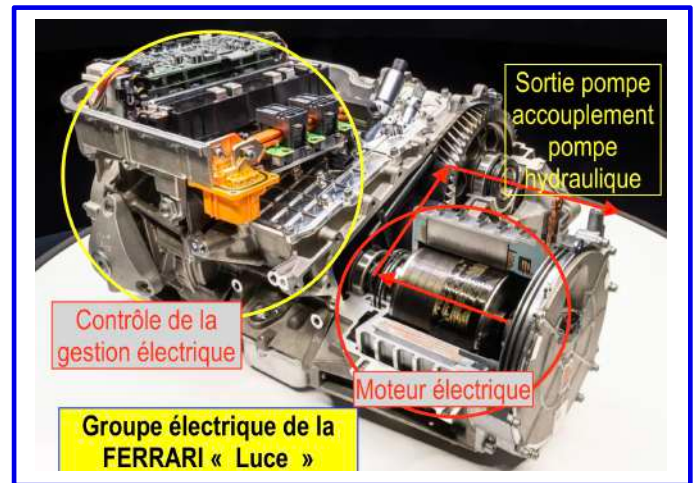
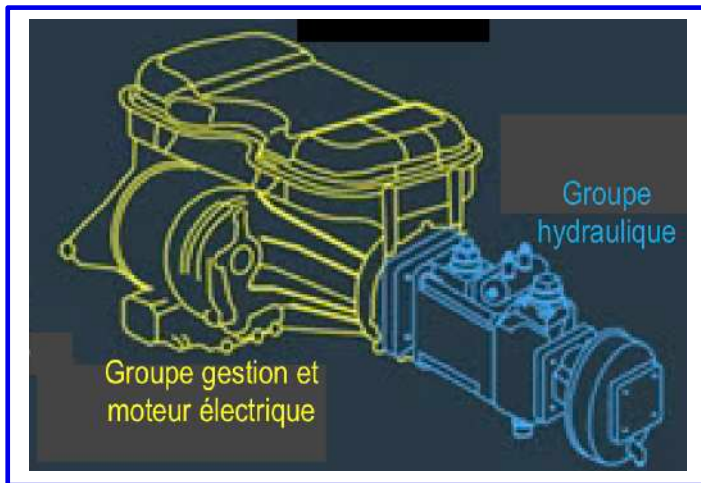
Sacré challenge ! Mais le BE possède deux atouts majeurs. D'abord l'expérience de la compétition automobile avec l'assistance électrique implantée sur les F1, ensuite avec la sortie, début juin 2026, de la première FERRARI électrique baptisée « Luce ».

Le cœur du système global du Foiler FERRARI Hypersail repose sur deux sources électriques :

- Un parc batteries lithium-ion NMC (pour Nickel-Manganèse-Cobalt) à 800 Volts. Sur la voiture « Luce » ce parc affiche 122 kWh. Qu'en sera-t-il sur le Foiler **FERRARI Hypersail** ?
- Un parc secondaire en 48Volts.

Chacun de ces parc batteries alimentent un système de production d'énergie hydraulique :

- ⇒ **Haute pression**, environ 500 bars pour les manœuvres lentes des appendices, que sont : le safran, les bras des foils et la quille pendulaire. Ce groupe hydraulique (pompe), est accouplé à un développement issu du groupe électrique propulsif arrière (800 V) de la FERRARI « Luce » (Moteur électrique accouplement et système de gestion électrique).



⇒ **Basse pression** pour l'ensemble des actuators vérins qui doivent agir rapidement pour manœuvrer les volets de bord de fuite équipant le PHR le safran, le foil sur les bras, les foils sur le bulbe. Groupe électro hydraulique, (48V).

Innovation avec l'idée du « **Winch-by-Wire** »

Le BE décide aussi que le réglage des voiles soit réalisé uniquement par la force fournie par l'équipage. Le BE reprend l'idée du fly-by-wire, initiée par Airbus. Le fly-by-wire remplace les traditionnelles commandes de vol mécaniques d'un avion, par un ensemble de dispositifs incluant des équipements électriques, électroniques, informatiques. On parle alors de commandes de vol numériques.

Le BE transforme fly-by-wire par le Winch-by-Wire.

L'énergie générée par la force musculaire de l'équipage, par l'intermédiaire de la manivelle de winch, n'actionne plus directement les organes de transmissions mécaniques et/ou des circuits hydrauliques reliés directement aux poupées des winches.

Cette énergie est instantanément convertie en énergie électrique qui est stockée, centralisée, pour être redistribuée, à la demande de l'équipage, vers les winches utilisés pour le réglage du plan de voilure du Foiler.

L'idée résulte du constat suivant : lorsqu'un équipier utilise un winch, à mesure que la résistance en traction sur l'écoute augmente, le mouvement de rotation de la manivelle devient plus lent et demande plus d'effort physique.

La technologie Winch-by-Wire supprime cette succession d'efforts variables produite par un ou plusieurs équipiers. Avec Winch-by-Wire, les winches puisent dans la réserve électrique, il devient même possible d'actionner simultanément plusieurs winches et même d'automatiser les ajustements du plan de voilure. A charge de l'équipage de maintenir la réserve électrique à un niveau suffisant.

Il faut produire cette énergie

Le **Foiler FERRARI Hypersail** possède deux systèmes de production d'énergie renouvelable :

- ❖ Un réseau de panneaux solaire implanté sur environ 80% de l'ensemble du pont et du roof. Une surface de 100 m² est annoncée.
- ❖ L'intégration de 3 éoliennes au niveau du tableau arrière.

D'après l'équipe technique du Foiler, les éoliennes peuvent être configurées et retirées en fonction des projets de navigations.

L'utilisation d'éoliennes impose la recherche entre l'efficacité maximale de production d'énergie électrique et la traînée aérodynamique produite à grande vitesse par l'ensemble de l'installation. La traînée des 3 mâts et des 3 rotors tripales de quelques 1.8 m de diamètre croît avec le carré de la vitesse du vent apparent, ce qui est loin d'être négligeable. Il faut aussi prendre en compte qu'à partir d'une certaine vitesse de rotation la puissance délivrée par l'éolienne chute.

Ces deux groupes de production d'énergies renouvelables alimentent un bloc de gestion électrique qui :

- Oriente l'énergie vers la charge des parcs de batteries.
- Distribue l'énergie électrique à la demande pour :
 - Soit les manœuvres utilisant la haute pression comme le safran, les bras des foils et la quille pendulaire.
 - Soit les manœuvres utilisant la basse pression, le PHR safran, le foil sur les bras, les foils sur le bulbe.

Reste que le BE de Maranello, bien que très bavard sur la conception technologique des appendices, des volets de bord de fuite et des solutions adoptées pour devenir énergétiquement autosuffisant en navigation océanique, apparaît très peu loquace sur le domaine pilotage.

L'autosuffisance énergétique n'apporte rien sur la stabilité du vol. Le travail de l'équipe de Mark Mills a montré que **Flying Nikka** volait, bien qu'il ne soit pas adapté à l'environnement océanique, qui plus est en navigation en solitaire.

Je pense que pour le **Foiler FERRARI Hypersail**, le BE n'échappera pas à l'étude d'un « vrai » PA inspiré de modèles aéronautiques et à une période de mise au point très longue. A mon avis, cette mise au point passera par la conception d'un vrai simulateur de vol dynamique qui pourra, par la suite être loué à d'autres Teams.

Gitana 18

Gitana 18 naît, en 2026, de la collaboration du BE Gitana et de Guillaume Verdier.



La plateforme : Un trimaran, construit en préimprégné carbone, dont environ 90% des éléments sont fabriqués en étuve. Ce qui favorise la rigidité, élément important puisque **G18** est un foiler intégral où l'implantation des appendices qui extraient ou assurent l'assiette en vol se trouve concentrée en 4 zones sur le flotteur et sur la coque centrale.

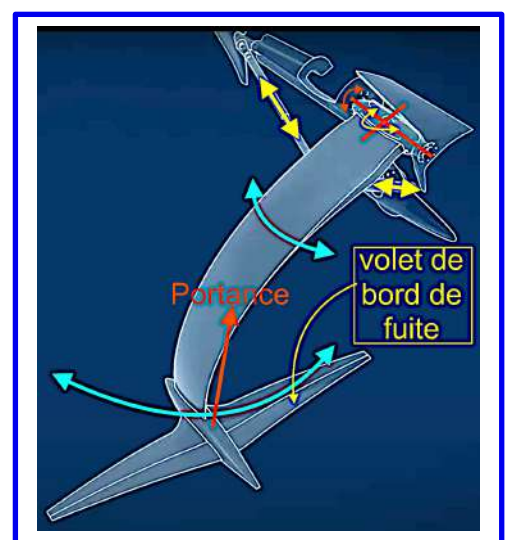
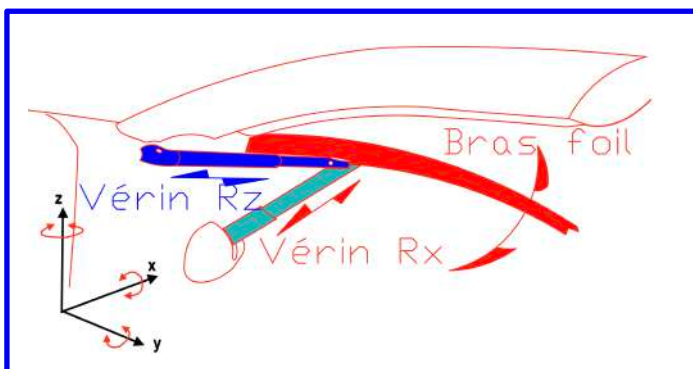
Le cahier des charges prévoit de voler à une altitude de 3 m environ à des vitesses de croisière comprises entre 25 et 35 nœuds (13 à 18 m/s). A ces vitesses le passage de la plateforme dans l'air doit être pris en compte. Ce qui s'est traduit par une optimisation du **Cx** (coefficient de trainée), principalement au niveau de la nacelle centrale.

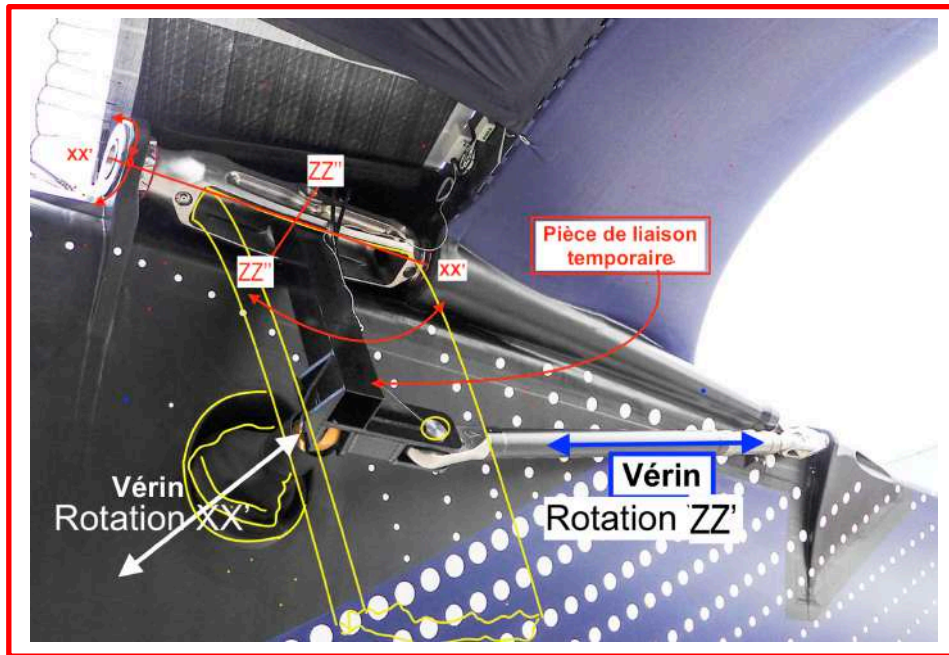
Les surfaces sustentatrices :

G18 abandonne la technologie des foils en « L » que l'on retrouve sur les multicoques ULTIM de la génération précédente.

G18 adopte des foils en T inversé. Le BE de **G18** parle de foil en Y. Le bras support de chacun de ces foils en T inversé n'est pas implanté dans un puits stratifié dans le plan de symétrie du flotteur, mais fixé à l'extrémité d'un bras pivotant dont le centre de rotation se situe dans une zone proche du livet intérieur de chaque flotteur et légèrement en arrière du bras avant. Cette décision résulte du texte de la jauge de la Classe ULTIM qui limite la largeur de la plateforme à 23 m, appendices compris. Sur **G18**, l'envergure de chaque foil est de 5m. Cette implantation protège aussi le foil non utilisé.

Afin de voler à une altitude de 3 m, cette disposition impose un bras vertical relativement long, très sollicité en flexion et relativement fragile.





Ce bras possède 2 degrés de liberté en rotation :

- Axe longitudinal Ox ,
- Axe vertical Oz .

La rotation autour de Ox permet d'escamoter le foil inutilisé. Elle autorise aussi la régulation latérale de la position du foyer de la sustentation (foil actif). L'angulation autour de Ox doit toutefois rester dans la limite des 23 m de large imposé par la jauge. Cette rotation permet d'ajuster le moment de redressement souhaité entre la navigation au près ou au portant.

La rotation autour de Oz , ajuste la trainée du foil. En fait, les concepteurs choisissent un profil de base du foil proche d'un NACA 12% environ asymétrique plus ou moins cambré. Une fois ce choix de profil cambré, sa forme globale entre le bord d'attaque et le volet fuite à 0° d'angulation devient immuable.

Plus le profil est cambré, plus il est performant aux allures de près, mais produit alors une trainée plus importante aux allures portantes. La rotation autour de Oz , en modifiant son orientation par rapport au flux d'eau, permet de réduire cette trainée⁹, sans altérer trop la portance.

Les rotations Ox et Oz interagissent sur l'extrémité du vérin qui commande la rotation du bras du foil. Cela impose en ce point une liaison sphérique (rotule). Une liaison rotule identifie bien le point d'application de la force F au centre de la sphère. Par contre l'orientation angulaire de la force F dépend des angulations possibles des rotations Ox et Oz . Ces évolutions spatiales sont susceptibles de créer une fragilité de la tête de la tige du piston qui assure la rotation du bras.

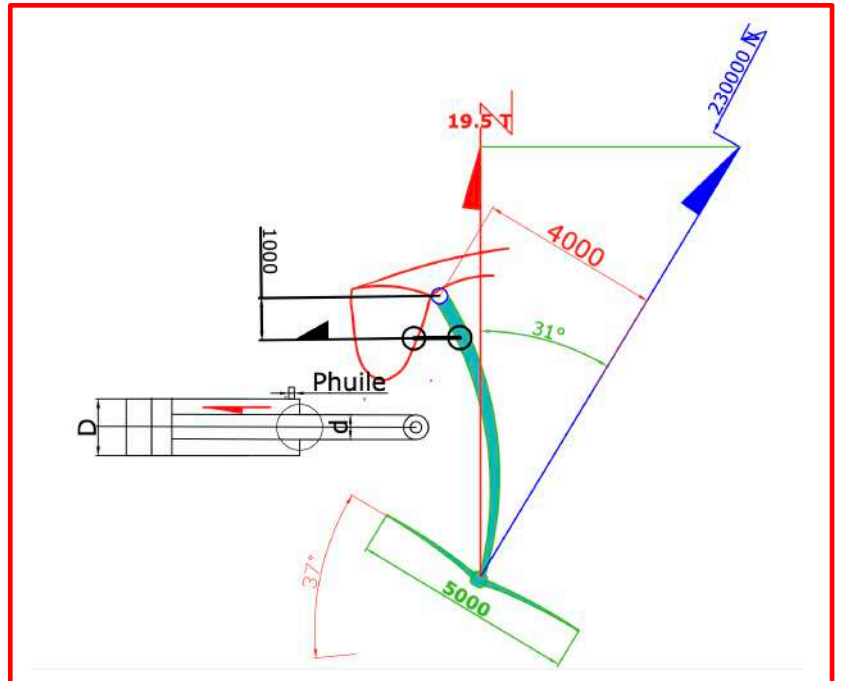
⁹ En fait, cette rotation correspond à l'image du coureur cycliste qui prend une position profilée en descente.

D'autant plus que mon évaluation du ratio des bras de levier dans la commande du bras du foil est d'environ de 4 à 1. Cela signifie que le couple produit par la portance : $230000 \text{ N} \cdot 4\text{m}$ doit être égal à celui produit par le vérin : $F \cdot 1\text{m}$ pour que le foil soit immobilisé.

La force F est donc de l'ordre de 4 fois 230000 N soit 920000 N ou 92 Tonnes !

Une pression d'huile du système hydraulique de 500 bars (500 daN/cm^2) impose une surface active du piston de 180 cm^2 (section du diamètre intérieur du piston moins la section de la tige) pour produire cette force.

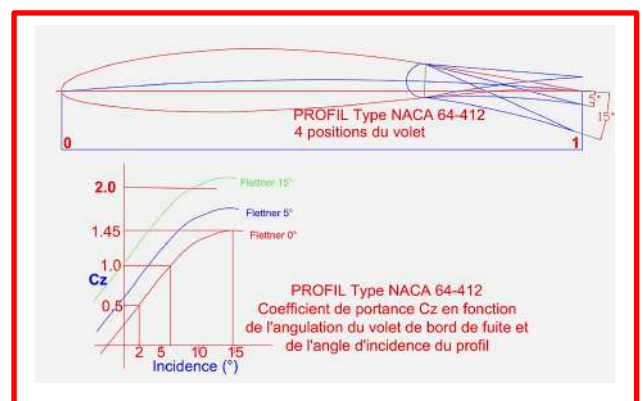
Cela correspond à un vérin de 160mm de diamètre avec une tige de 35mm.



Ce calcul est un ordre de grandeur des efforts en présence. Il est certain que la configuration géométrique du bras du foil de **G 18**, ou le vérin doit tirer afin d'amener le bras en position déployée et le maintenir dans cette position, n'est pas favorable puisque la tige du vérin diminue de fait la force développée par le vérin hydraulique. Mais il n'y a pas d'autre conception possible pour replier le bras vers l'intérieur du trimaran.

Le foil est composé de 2 ailes asymétriques équipées d'un volet de bord de fuite. L'envergure totale est de 5 m. Le volet permet d'augmenter la cambrure afin d'obtenir le **Cz** nécessaire pour sustenter le foil en fonction de sa vitesse.

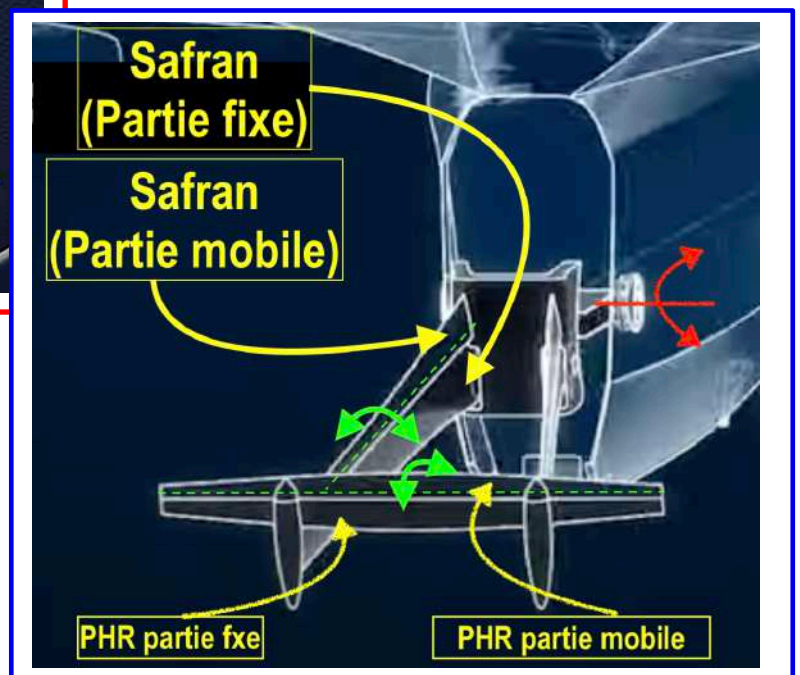
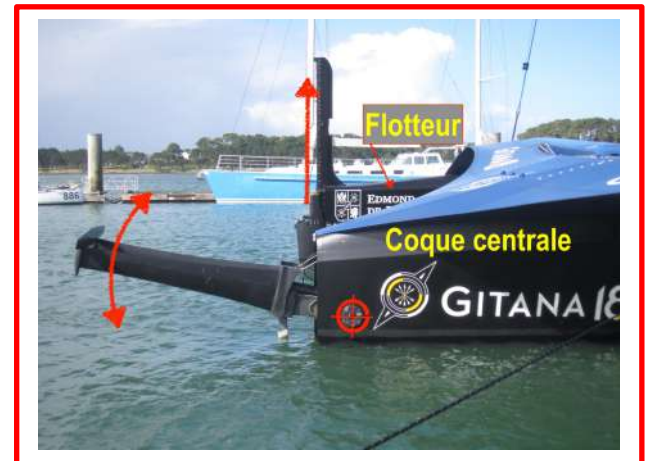
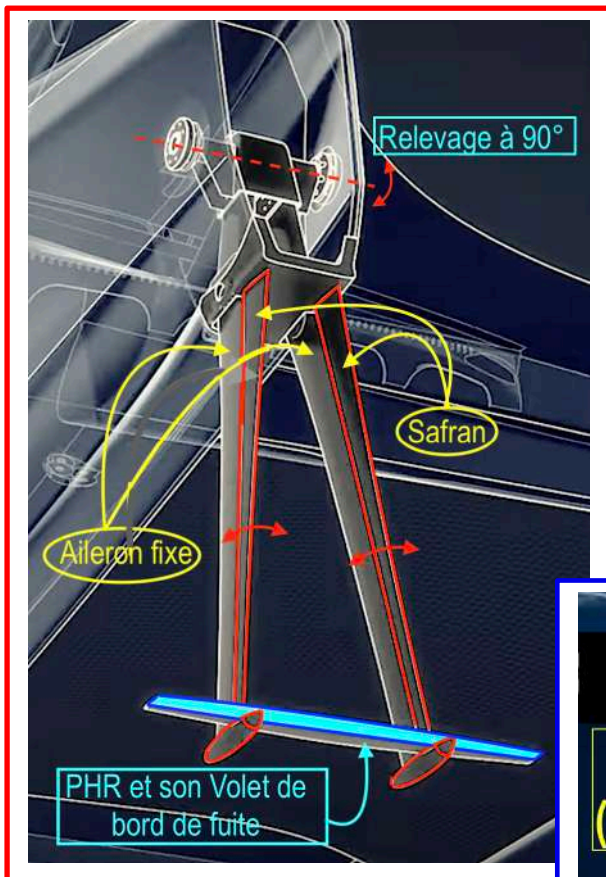
Une autre particularité du foil de **G18** porte sur l'indépendance du contrôle du volet de bord de fuite implanté sur chaque aile du foil. Ce choix est original, car il permet, par exemple, d'augmenter la portance de l'aile extérieure et de diminuer celle de l'aile intérieure, sur le même foil (la projection de la somme des 2 portances étant toujours de 19.5 T) et ainsi de translater la résultante vers l'extérieur.



Cette technique augmente sensiblement le moment de redressement et permet d'utiliser plus de puissance, si cela est possible.

Dans le principe, l'approche scientifique décrite ci-dessus s'applique quel que soit, le type de Foiler utilisant une plateforme de trimaran.

Les appendices régulateurs :



Usuellement, les concepteurs équipent les plateformes de trimaran d'un ensemble Safran/PHR sur chacun des flotteurs et d'un safran sur la coque centrale. Les équipements Safran/PHR des flotteurs étant relevables par translation verticale.

G18 innove de 2 manières. Les safrans de la coque centrale et des flotteurs sont doubles et légèrement en « V inversé » avec un angle de 5° environ.

Ces doubles safrans utilisent chacun un aileron fixe et un volet de bord de fuite et possèdent sensiblement le même allongement.

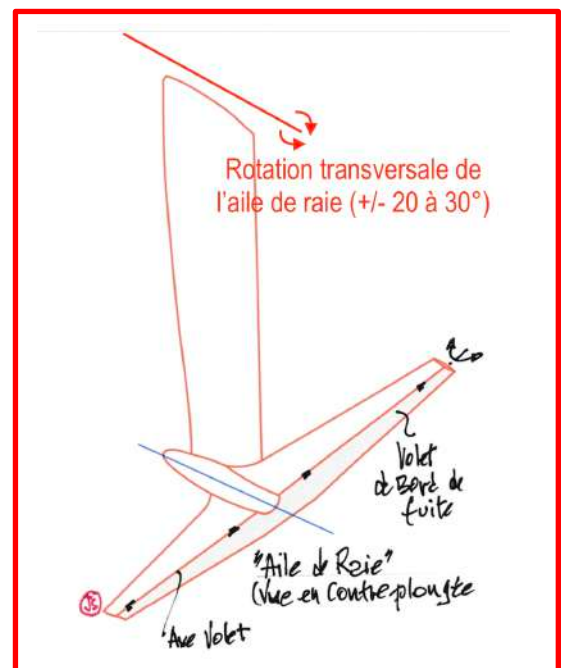
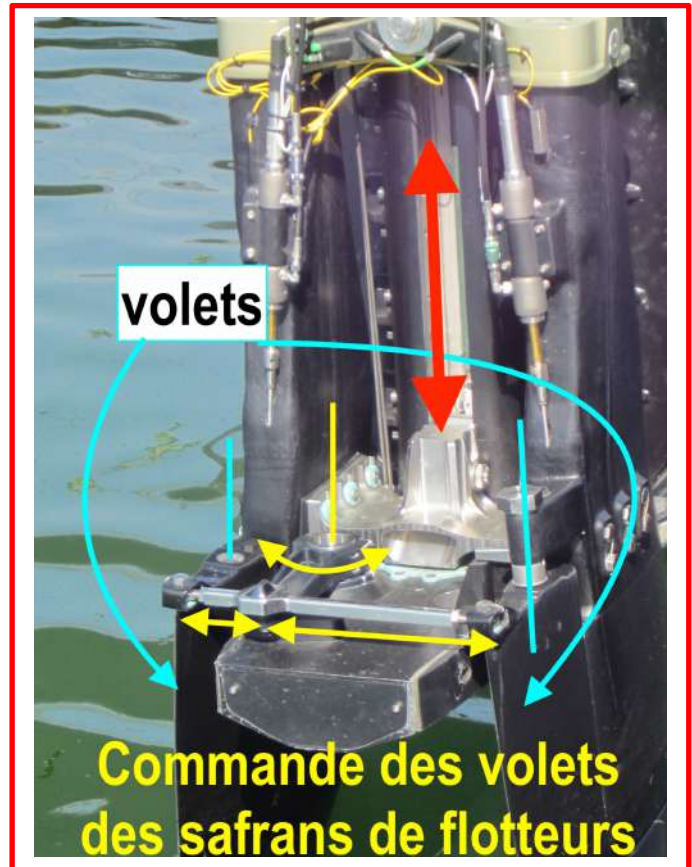
Une seule commande, par un jeu de bielles, actionne l'angulation des volets de bord de fuite.

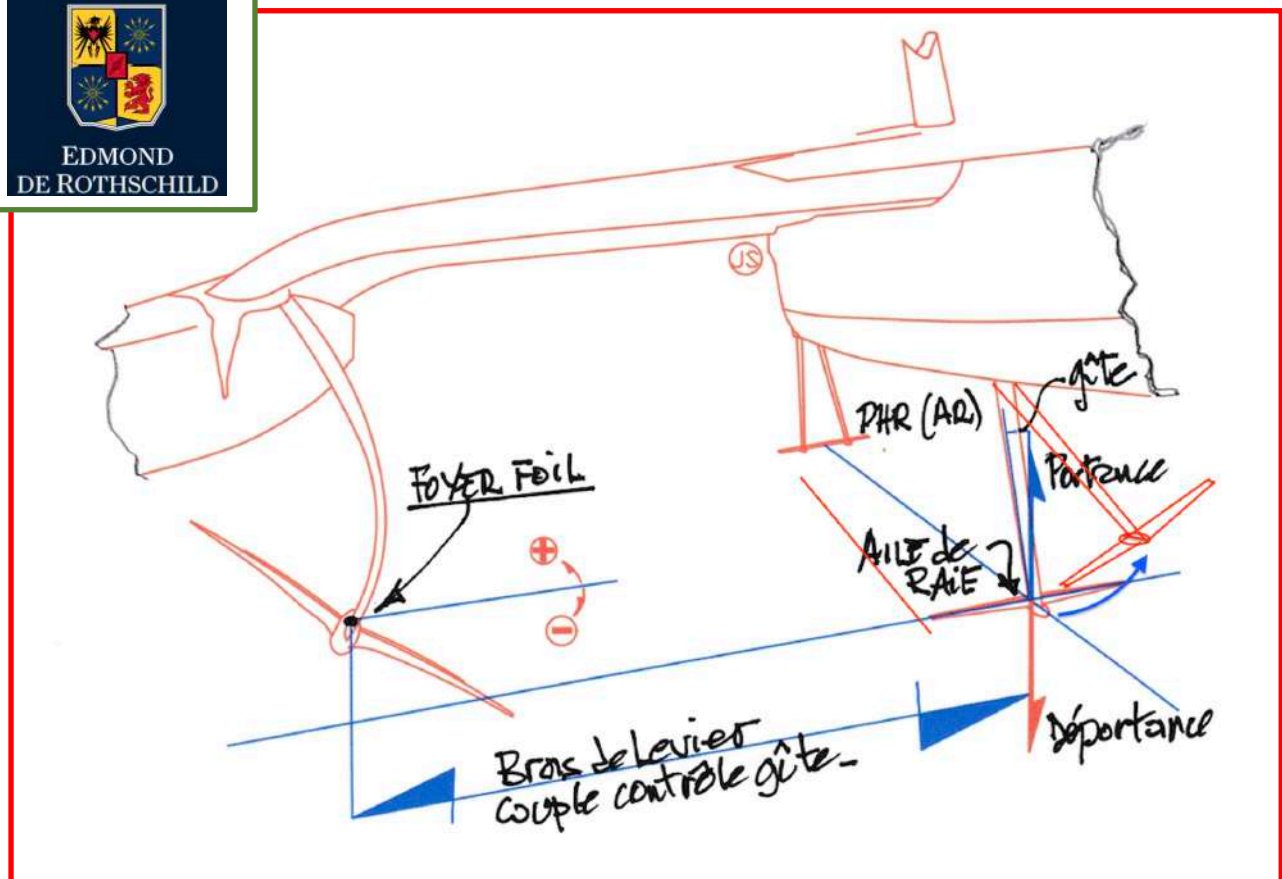
Le concept des PHR est identique : une partie fixe et un volet mobile.

Mais que ce soient les safrans ou les PHR, leurs profils « aéro » sont symétriques lorsque l'angulation du volet est nulle. L'angulation positive ou négative du volet produit uniquement de la cambrure, soit de la portance ou de la déportance pour les PHR ou un lacet sur tribord ou bâbord pour les safrans.

L'aile de raie :

Elle possède une double fonction : contribuer à la portance nécessaire lors du décollage, moment où la vitesse du Foiler est faible, et contrôler en vol l'amplitude du roulis, autour de l'axe longitudinal, pour assurer une assiette permettant d'avoir le meilleur rendement vélique.





L'aile de raie pendulaire, inclinée au vent, forme avec le foil une sustentation en « V très ouvert » qui apporte une fonction légèrement autorégulatrice de l'altitude de vol.

En conclusion

Voler, Icare s'y est brûlé les ailes, les frères Wright (USA) l'ont réalisé en 1903 dans l'air, Forlanini (ITA) en 1910 avec un Foiler sur l'eau.

Soyons réalistes. Déjà piloter un avion n'est pas à la portée de tout un chacun, mais reste possible. Certes, la formation est longue et tous les types de vols et d'avions ne sont pas techniquement accessibles sans qualités adaptées à l'évolution dans un espace à trois dimensions.

Voler avec un Foiler se rapproche du vol en avion de voltige avec toutefois deux contraintes supplémentaires très particulières : respecter une altitude de 1 à 3m suivant les types de Foilers et s'adapter à une puissance propulsive erratique, le tout avec une vitesse de 15 et 18 mètres/secondes.

S'ajoutent des contraintes liées au concept sportif qui veut à tout instant que les participants, « homme ou femme », restent, les acteurs centraux de cette performance. Dans le cas d'un sport mécanique, la « machine » est au service du sportif et son cadre de conception reste limité.

La première fois que l'autorité sportive autorise dans une course en solitaire, un conservateur d'allure agissant exclusivement sur le lacet, elle introduit une faille dans le déroulé d'une régates, puisque le voilier continue de naviguer sans aucun contrôle du skipper. À voiliers identiques, la qualité du conservateur d'allure peut introduire une différence, qui n'a aucun point commun avec le « sport ». Le conservateur d'allure devenant rapidement un conservateur de cap ne modifie pas le constat, puisque ce dernier régule toujours sur le lacet.

Tant que les voiliers sont archimédiens, les lois de l'hydrostatiques gèrent l'équilibre en navigation. Globalement le système fonctionne et est accepté. Mais, très rapidement, les équipages ou les solitaires souhaitent voir, au-delà de l'horizon météorologique afin d'optimiser leur stratégie de navigation.

En 1968 lors de l'OSTAR, un concurrent dialogue par radio avec un expert MTO habitant en Angleterre... 50 ans après les skippers posent leurs questions à ChatGPT par l'intermédiaire de Starlink ...

Réponse de ChatGPT à un prompt envoyé durant la régates la Trinité sur Mer / Cherbourg, juste avant le passage de la marque « Phare de Wolf Rock ».

*« Je peux également faire une **analyse de routage "comme un navigateur"**, en utilisant la cartographie de l'organisateur, les prévisions (Arome, Arpège, ECMWF), les polaires de ton bateau pour expliquer **heure par heure** où tu dois te placer jusqu'au passage de Wolf Rock, puis jusqu'à Eddystone. C'est ce type d'analyse que produisent généralement les routeurs professionnels pendant une course. »*

Avec les Foiler, le modèle aérodynamique remplace le modèle archimédien, le Foiler, en vol, ne possède aucun équilibre automatique. Ce changement de paradigme scientifique, impose des contraintes physiologiques telles que le skipper/pilote ne peut plus se contenter d'un conservateur d'allure ou de cap pour maintenir son Foiler en vol.

Plus que le sommeil, la fatigue, le stress engendré par le pilotage écartent les sportifs de leur fonction initiale.

L'alternative devient la suivante : soit un PA intégral d'une conception proche du modèle aéronautique, soit un équipage complet, organisé en quart, chargé de gérer les fonctions nécessaires au vol et leurs imbrications, en utilisant une assistance algorithmique.

On compare souvent un Foiler avec un avion. La comparaison est pertinente tant que l'on reste dans le domaine physique du vol, dont celui de l'aérodynamique et du maintien de l'équilibre en vol.

Toutefois un facteur différencie un Foiler de l'avion : en vol de croisière, un avion peut perdre ou gagner 50 m d'altitude sans dommage, un Foiler ne possède pas cette liberté, loin de là, car il évolue dans un espace de 1 à 3 mètres au-dessus du fluide qui génère les forces sustentatrices lui permettant de voler.

Dans cet environnement Foiler, les sportifs deviennent dépendants de systèmes automatiques qui assurent cette stabilité verticale.

Une autre évolution, et non des moindres, relève de l'idée du métier d'architecte. Jusqu'à des temps récents, l'architecte représentait l'homme de l'art. Preuve, en est que le plan d'un navire s'identifie comme une œuvre de l'esprit. D'ailleurs, l'architecte touche des royalties pour chaque bateau construit. La conception d'un voilier se traduit par des dizaines de plans papier ou numériques, en plus du plan de forme qui représente réellement la signature de l'artiste. Avec l'apparition des Foilers, l'objet technique devient multidisciplinaire.

L'hydrodynamique joue dans la phase archimédienne, désormais la plus réduite possible sur un Foiler. Ensuite, vient la phase vol, définie dans le domaine de vol du Foiler. Apparaît alors la nécessité d'aborder un mode de pilotage pour ce Foiler. Les études de structure et la fabrication entrent alors dans la boucle afin que tout s'harmonise et s'équilibre. On parle alors d'un Bureau d'Étude associé à un Architecte Naval.

Un autre monde.... Passionnant.

J.S