



La VITESSE, symbole de la puissance au fil des siècles

Jean SANS

Le 14/02/2025

<https://experts-yachts.fr/blog-js.html>

Remerciements

Patrice Carpentier, pour son œil de marin et de journaliste.

Etienne Billiet pour ses relectures et commentaires.

Yannick Abgrall, architecte, avec qui j'ai beaucoup échangé.

Claude Charbonnier, pour son expérience dans le domaine aéronautique.

Robert Lainé, spécialiste des missions spatiales (ESA) et avec qui j'écris souvent des communications.

Hubert Schaff, plaisancier et aussi métallurgiste émérite.

Nina Sans, graphiste, pour le dessin de la première de couverture

SOMMAIRE

1. A l'origine
2. Les mathématiques ouvrent une nouvelle approche
3. On s'intéresse alors à l'écoulement de l'eau autour de la carène.
4. La course au gigantisme maritime apparaît
5. L'idée de régate à la voile prend naissance
6. Comment naît la transition du mode archimédien au mode planning ?
7. Quel est l'ordre de grandeur de la vitesse en mode planning ?
8. La vitesse devient la cible
9. L'essor des motorisations.
10. La naissance de la technique du vol en avion.
11. [**Du vol avion au vol navire**](#)
 12. Mais d'abord décoller
 13. Puis maintenir le vol stabilisé
 14. L'état de l'art sur la conception des foilers
 15. L'équilibre en vol stabilisé d'un foiler vélique (Moth foiler)
 16. Les systèmes de régulations de Moth à foils
 17. Transposer le vol du Moth sur un voiler hauturier ?
 18. D'abord les multicoques
 19. Les foils : le meilleur (la vitesse) mais aussi le pire (la perte de contrôle)
 20. Le « mur » des 40 nœuds
 21. Pourrait-on dépasser ce « MUR » ?
 22. Les baleines à bosses donnent des idées aux architectes
 23. Les ULTIMS évoluent « SODEBO 2024 »
24. [**Passage du foiler multicoque au foiler monocoque**](#)
 25. Le passage de l'environnement archimédien au mode vol intégral
 26. Les compromis hydrodynamiques (aérodynamiques)
 27. La déformation de la forme des foils afin de remplacer les volets ?
 28. L'état de l'art, côté foiler intégral monocoque océanique
 29. Mode archimédien vs Mode foiler intégral
 30. Équilibre en vol : Centrage AR ou centrage AV ?
 31. Pilotage : L'Homme ou la Machine
 32. Du contrôle d'une route sur l'océan à celui du foiler en vol.
 33. Quelles applications sur un PA ?
 34. Rappel sur les modes de pilotage (en mode vol)
 35. L'acquisition de données
 36. Comment un PA « universel » devient « MyPA » ?
 37. On parle beaucoup d'IA sur les pontons
 38. La RCV 52 – Énergie Manuelle
 39. L'énergie nécessaire à bord d'un foiler océanique
 40. La quête de vitesse justifie-t-elle les contraintes liées au vol ?
41. [**Les IMOCA « Foiler or not Foiler » ?**](#)
42. Toujours plus vite... à travers les siècles, mais ...

Résumé

De la navigation vélique archimédienne à la navigation vélique en sustentation sur l'eau en passant par la propulsion mécanique.

Comment sommes-nous passés de l'idée de se déplacer en utilisant un engin flottant sans pour autant connaître les lois qui lui permettaient de flotter, à celles de la sustentation sur l'eau basée sur les lois de l'aérodynamisme ?

Pourquoi depuis plus de 3000 ans la technologie relative à la mobilité dans l'environnement maritime passionne ?

La quête de performances, identifiée notamment par le concept de vitesse devient l'objectif durant tous ces siècles. Les marins et rapidement les états comprennent alors que la vitesse de leurs navires assoit le succès de leur puissance commerciale, la victoire dans les nombreuses batailles navales, la démonstration de leurs puissances impériales. Même la découverte de nouveaux continents, de nouvelles routes maritimes devient une course où il faut être le premier pour planter son drapeau.

Ces gains de vitesse impliquent des découvertes scientifiques et alimentent progressivement la démesure des navires conçus.

Aujourd'hui la vitesse reste l'apanage de l'art de la régate avec un voilier.

Certes la régate sous la forme de compétitions entre amateurs fortunés faisant appel à des équipages de marins professionnels n'apparaît qu'à la fin du 19^{ème} siècle, mais le souhait de toujours aller plus vite et de rattraper une vague silhouette que l'on discerne sur le fond de l'horizon hante tous les marins.

Ce domaine particulièrement vaste s'étend de 2000/1500 avant notre ère jusqu'à aujourd'hui, avec un intrus inattendu apparu à la fin du 19^{ème} siècle quoique déjà présent dans la mythologie grecque, l'aviation.

1- A l'origine

A l'origine, marcher, courir, danser, rien de plus naturel. Gérer la longueur et la fréquence des pas, l'écartement des pieds, l'équilibre dû à un centre de gravité du corps relativement haut, le délai de réaction devant un obstacle, etc... impose que le nombre d'acquisitions de données et d'ordres implicites s'accordent dans l'espace de la milliseconde afin de permettre un déplacement fluide. Tout cela nous paraît naturel, normal. Pourtant dès que l'on utilise un mobile pour se déplacer, la gestion de l'interface entre le mobile dans son environnement et le barreur se complique et surtout montre que des limites existent.

Ainsi la navigation en mer ou en rivière s'établit au fil des milliers d'années de manière très ponctuelle et progressive. La période de l'antiquité en Méditerranée orientale est relativement très documentée sur ce désir de naviguer et cela dès 1500 avant notre ère.

Pour cela il faut maîtriser la navigation d'abord techniquement en construisant des bateaux adaptés et ensuite être capable d'aller d'un point à un autre.

Les Phéniciens, les Grecs, puis plus tard les Romains développent et acquièrent ainsi un haut niveau de compétences dans la construction de trières (aussi nommées galères), bateaux à un ou deux masts pouvant atteindre jusqu'à 35 mètres, (voile et avirons) et être armé par des 170 rameurs (3 par rame).

Ainsi ces peuples sillonnent, colonisent, toute la Méditerranée orientale puis occidentale et s'offrent même des incursions au-delà de la Méditerranée comme le Grec Pythéas qui atteint Thulé (Groenland) vers 320 avant notre ère. D'autres navigateurs grecs téméraires contournent aussi l'Afrique.



S'il ne reste pas de traces écrites d'une tentative de théorisation des méthodes de navigation ou de conception et de construction, les évolutions architecturales restent visibles sur les bas-reliefs sculptés pendant plus d'un millénaire.

Archimède théorise pour la première fois la mécanique statique et notamment la notion de centre de gravité (d'équilibre) de tout corps pesant.

Ce qui autorise, lors d'éventuels calculs, de concentrer tout le poids du corps en ce point que l'on nomme aussi barycentre ou centre de gravité.



Il pose aussi les lois fondamentales de l'hydrostatique et Archimède déclame, alors qu'il se trouve dans sa baignoire, le célèbre « EUREKA », qu'on lui attribue, « *tout corps plongé dans un liquide... etc...etc...* ».

Pour autant la conception et donc la construction des bateaux durant ces presque deux millénaires repose uniquement sur la transmission générationnelle de la pratique acquise par les constructeurs. Aucun calcul lié à la pratique n'est conceptualisé ni formalisé.

Cela est possible car l'équilibre d'un bateau en mer se trouve assuré implicitement par les lois physiques de l'hydrostatique. Ainsi dès que l'on écarte un bateau de son point d'équilibre initial (Gîte 0°) on constate qu'il revient toujours (enfin normalement) à la gîte 0°.

Certes cette loi s'applique uniquement tant que la gîte n'atteint pas l'angle de chavirage. Ce concept scientifique de chavirage n'est pas encore énoncé et surtout paraît ne pas concerner l'architecture des bateaux, lourds, longs, peu profonds et dessiné avec une flottaison elliptique qui lui conférait une relative stabilité de forme et une raideur suffisante aux faibles angles de gîte. Les plans de voilure ne permettaient pas de naviguer au près serré, liston dans l'eau...

Mais outre la destination commerciale de ces bateaux nécessaire économiquement pour les états, la conception de navires de guerre devient progressivement nécessaire, ce qui oriente les architectes vers toujours plus de vitesse, de puissance (voiles et rameurs), et de maniabilité.

2- Les mathématiques ouvrent une nouvelle approche

De l'antiquité aux années 1500, seules des évolutions technologiques se diffusent très progressivement.

D'abord venu d'Europe du Nord, naît le gouvernail d'étambot. On le nomme safran sur nos bateaux de régates.

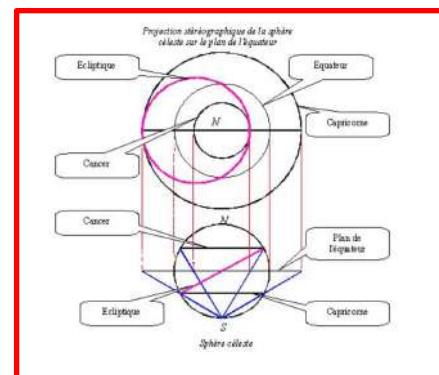


Ensuite l'astrolabe. Avant d'être un instrument de navigation l'astrolabe résulte d'une étude de deux astronomes grecs Hipparche (-150 av. JC) et Ptolémée (150 ap. JC).

A l'origine les buts de leurs travaux consistaient à proposer une transformation géométrique de la voute céleste demi-sphérique sur un disque circulaire plan afin d'améliorer la compréhension. Pour cela ils posent les bases de la trigonométrie sphérique qui leur permet de situer durant chaque 24 heures les positions successives de certaines étoiles, du soleil, de la lune, etc...



Plus tard les astronomes arabes amplifient et matérialisent ces travaux en créant un appareil de navigation. L'astrolabe devient indispensable et s'améliore au fil des années de navigations.



Vers le 12^{ème} siècle un deuxième instrument de navigation révolutionne la navigation au-delà de l'horizon, la boussole. Cet instrument, une simple aiguille avec une extrémité aimantée s'oriente automatiquement et en permanence vers le nord, semble avoir fait un très long voyage depuis la Chine avant d'arriver en Méditerranée et en Europe occidentale.

Toutefois toutes ces évolutions portent sur les techniques de navigations. L'important est d'abord d'améliorer la conduite des navires et surtout de bien identifier sa route et la précision de la cartographie.

Paradoxalement il n'y a pas jusque vers les années 1500 de traces de travaux scientifiques sur l'architectures des navires et surtout d'échanges entre les différentes civilisations qui bordent principalement l'arc méditerranéen.

Pendant toute cette longue période, on regarde, on modifie, on copie et on adapte les différentes architectures de navires.

Une des raisons se trouve être dans les systèmes de numération qui ne favorisent pas la transmission des savoirs mathématiques. Lesquels existent pourtant. La numération est loin d'être uniformisée ou facile d'utilisation dans les calculs durant toute l'antiquité et le premier millénaire de notre ère.

Par exemple le système babylonien est à base¹ 60 et celui des égyptiens s'appuie sur une base décimale utilisant 7 hiéroglyphes mais sans le « chiffre 0 ». La numération romaine se matérialise par des lettres symboles combinées entre elles (les fameux nombres romains). En fait il existe une pléthore de systèmes de numération principalement liés aux activités commerciales. Notamment toutes ces civilisations utilisent en parallèle la notation fractionnaire pratique pour le commerce. Les romains s'orientent vers le système duodécimal (base 12). Il est intéressant de noter que cette méthodologie fractionnaire survivra jusqu'à notre époque avec les mesures en pieds, pouces et les monnaies, etc...

Apparaît alors la numération dite de position d'origine indo-arabe. Ce procédé d'écriture des nombres, se base sur chaque position de droite à gauche d'un chiffre et la relie à un multiplicateur. Ainsi lorsque l'on écrit 249, cela se décompose en une addition de 9 unités puis 4 dizaines et 2 centaines. Le système utilise 10 chiffres (base 10) notés 0 à 9.

La diffusion du système de notation décimal positionnel représente l'une des plus grandes avancées, car implicitement normative, de toute l'histoire des mathématiques.

Ce concept ne fut pas l'œuvre d'une seule personne, ni d'une seule civilisation, mais d'échanges durant l'antiquité et le premier millénaire.

¹ Le système décimal est à base 10 (0 à 9), un ordinateur travaille en base 2 (0 ou 1).

Cette méthodologie d'écriture des nombres apparaît assez tardivement en Europe, vers le début des années 1200, grâce à Leonardo Fibonacci (Mathématicien italien vivant à Pise). Fibonacci se déplace dans toutes les grandes villes de l'arc méditerranéen recueille les savoirs mathématiques et les consigne notamment dans deux ouvrages nommés « *Liber abaci* » puis dans le « *Practica Geometriae* ». Fibonacci ouvre alors la voie à des évolutions décisives pour sa discipline. Il explique notamment cette nouvelle méthode d'écriture des nombres, basée sur le système de notation positionnel.

Fibonacci présente aussi les chiffres arabes que l'on connaît de nos jours et celle du « zéro » qui permet de travailler sur des nombres décimaux.

L'œuvre de Fibonacci ne se limite pas à conceptualiser et à diffuser un système d'écriture des nombres qui permet d'améliorer la pratique du calcul, elle produit aussi nombre d'études sur l'algèbre, le calcul géométrique, etc...

Ensuite, progressivement, en Europe, des hommes férus de sciences, de mathématiques, comme Simon Stevin (1548 -1620), Pierre Bouguer (1698-1758), Leonhard Euler (1707-1783) reprennent les travaux des mathématiciens Grecs et Arabes et se lancent dans la théorisation de l'objet physique que représente le bateau.

Ainsi en 1746, P. Bouguer étudie la relation entre les positions relatives du CG (centre de gravité) et du CB (Centre de carène qui correspond au centre de gravité de la carène) avec les lois archimédiennes (hydrostatique) en associant les poids et les moments.

Pour cela il utilise des concepts mathématiques nouveaux comme les bases du calcul différentiel et intégral conceptualisées (vers 1687) par Newton (1643-1727) puis Leibnitz (1646-1716).

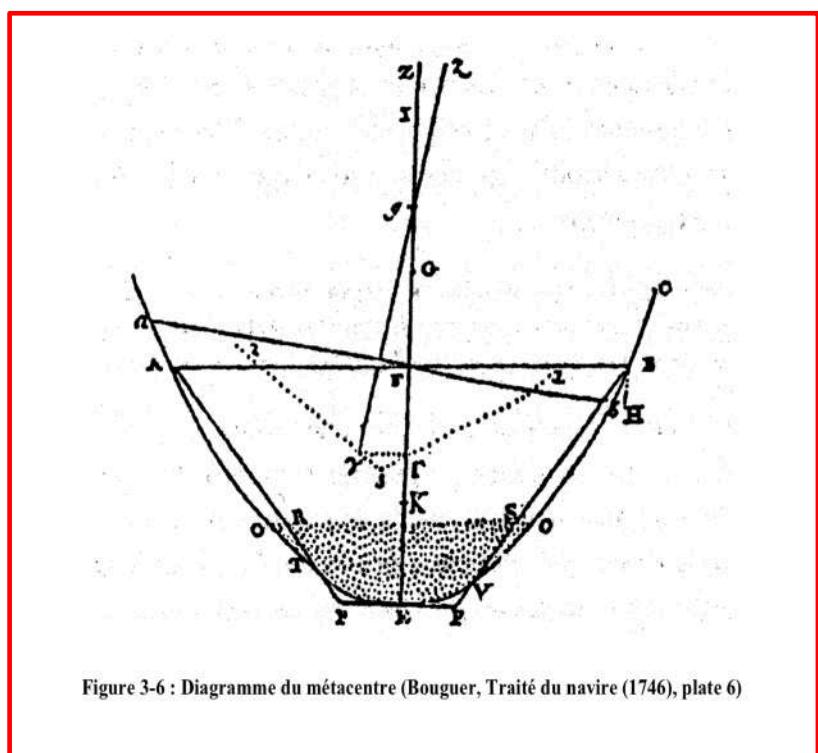


Figure 3-6 : Diagramme du métacentre (Bouguer, *Traité du navire* (1746), plate 6)

De ses calculs il déduit que pour des inclinaisons de faibles amplitudes (quelques degrés de gîte), le centre de carène décrit un arc de cercle dont le centre est un point fixe par rapport au navire, et se trouve dans son plan de symétrie. Bouguer nomme ce point : le métacentre (référence toujours utilisée de nos jours).

Assez rapidement les ingénieurs déduisent que lors de la rotation du navire durant la gîte, le centre de gravité doit toujours être situé au-dessous de son métacentre sous peine de retournement du navire.

Cette déduction représente une découverte majeure, qui ouvre alors l'imagination des concepteurs vers de nouveaux types de navires. Rappelons toutefois, que cette époque fut marquée par le naufrage du navire de guerre suédois², le VASA, construit entre 1626 et 1628, désastre qui valide la nécessité d'étudier la stabilité en navigation.

Le navire « Vasa » est un trois-mâts de 62 mètres de long, 52 mètres de tirant d'air et 11.7 mètres de large. Il déplace 1200 Tonnes et embarque 64 canons. Le 10 aout 1628, lorsque le navire quitte le port pour la première fois, il chavire brusquement pour couler en l'espace de quelques minutes. Ce chavirage, premier du genre, va précipiter l'avancée scientifique.

A partir de ces années charnières, l'architecture navale entre dans une ère réellement scientifique dans le sens où on devient capable d'étudier le comportement hydrostatique d'un bateau lorsqu'il gîte.



Le naufrage du Vasa – Peinture de Nils Stödberg

² https://experts-yachts.fr/images/STABILITE/PRESENTATION_de_la_STABILITE.pdf

Rapidement se diffuse alors à travers toute l'Europe une floraison de « Traité sur la Conception et la Construction des navires », principalement de guerre.

En France, P. Bouguer rassemble dans un ouvrage de 350 pages, l'intégralité des connaissances de l'époque nécessaires pour la conception et la construction d'un navire performant.

L'objectif étant d'optimiser la manœuvrabilité, la vitesse et les durées de construction des navires... tout en conservant la conception archimédienne.

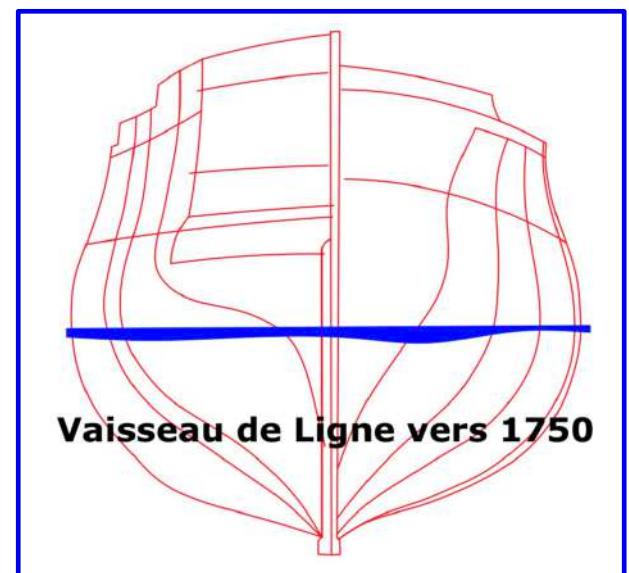


3- On s'intéresse alors à l'écoulement de l'eau autour de la carène.

La technique (matériaux, propulsion et construction), l'armement évoluent au fil de temps, mais les tendances géométriques architecturales s'uniformisent en forme d'amphore romaine. Un deuxième choc se produit lorsque les scientifiques s'intéressent à l'écoulement des fluides autour d'une carène en mouvement.

D'abord le physicien Suisse Daniel Bernoulli (1700-1782) démontre (Théorème de Bernoulli) le principe de la conservation de l'énergie emmagasinée sous certaines hypothèses de l'écoulement du fluide.

Ensuite l'ingénieur Britannique William Froude (1810/1879) propose des lois fiables à propos de la résistance à l'avancement que l'eau oppose aux carènes des navires. Il présente aussi de travaux sur la prédition de la stabilité des navires.



Puis le physicien-ingénieur irlandais, Osborne Reynolds (1842/1912), théorise l'hydrodynamique et la dynamique des fluides. Certes ces travaux s'amplifient depuis cette fin du 19^{ème} siècle, mais les bases énoncées alors restent d'actualité.

Les travaux de Froude et de Reynolds représentent après ceux des années 1600/1700 une deuxième évolution des recherches en architecture navale. L'avancée précédente portait uniquement sur l'approche scientifique relative au comportement de l'objet (le bateau) soumis aux forces extérieures créées par le couple inclinant (voilure par exemple, mais aussi le chargement) et sur ses réactions statiques en présence de ces forces variables en directions et intensités. L'introduction d'outils de calculs mathématiques nouveaux permettait au concepteur de quantifier les réactions et de prévenir des situations aléatoires. Toutefois l'influence du fluide et celles des formes de la carène n'étaient pas prise en compte dans la quantification des performances. Certes les concepteurs regardaient les analogies avec les poissons, mais tout ce domaine reste très pragmatique et très empirique.

Froude démontre que le frein à l'avancement du bateau dépend de la résistance visqueuse du fluide mais aussi de la résistance qu'opposent les vagues que la carène rencontre. Il évalue d'abord le frottement de l'eau sur la coque par la formule suivante :

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

(Cx : Coefficient de trainée, ρ : masse volumique de l'eau, S : surface mouillée, V : vitesse de navire)

Puis il s'intéresse à la résistance de vagues et démontre que cette force contraire à l'avancement dépend de l'interface eau/air qui se développe depuis la vague d'étrave jusqu'au sillage au niveau du tableau arrière.

Il constate que la carène, lors de son déplacement sur ce plan d'eau horizontal, creuse cette surface.

Il en déduit que la résistance à l'avancement résulte de l'énergie nécessaire pour produire cette déformation de la surface libre (un plan horizontal) de l'eau. Froude quantifie cette force par l'expression :

$$R_w = 0.5 * C_w \rho S V^2.$$

(Cw : coefficient de résistance aux vagues)

La somme de ces 2 forces contraires à l'avancement se nomme : trainée induite. On remarque deux paramètres importants dans les deux formules : la surface de la carène (surface mouillée) et surtout celle de la vitesse du bateau qui s'exprime au carré.

Le travail de Froude montre ainsi aux ingénieurs que toutes les augmentations des caractéristiques géométriques générales d'un navire dont le but est de gagner en vitesse et/ou du volume, génèrent physiquement une augmentation de la trainée induite croissante avec le carré de la vitesse et qui s'opposera aux performances que l'on souhaite obtenir.

Cette analyse est intéressante, mais Froude se trouve alors confronté à l'évaluation de la vitesse pour quantifier la trainée induite. Pour cela il invente le bassin de carène en travaillant sur des modèles de coques construits à une échelle réduite. Progressivement il développe une technique d'évaluation de la trainée à partir de maquettes tractées dans un bassin. En 1871, un centre d'essai de maquettes de bateaux est opérationnel à Chelston Cross (près de Dartmouth).

Ce premier bassin de carène sera remplacé quelques années plus tard par un nouvel équipement de 150 m de long, 6 m de large et 2.75 m de profondeur implanté à Haslar (Portsmouth).

De ces expériences Froude et son équipe déduisent :

- Lorsque la vitesse du bateau est faible, le déplacement de la carène génère peu de vagues. En conséquence la résistance due aux effets des vagues R_w se trouve réduite. C'est la résistance visqueuse R_f qui devient prépondérante, d'où l'intérêt d'avoir d'une faible surface mouillée et une carène propre et d'une faible rugosité.

Le nombre de Froude (Fn) est alors inférieur à 0,4.

Le nombre de Froude est sans unité, 0,4 représente une référence.

- Lorsque la vitesse augmente, la résistance des vagues R_w progresse plus vite que la résistance visqueuse R_f . La longueur d'onde maximale de la vague est celle de la longueur à la flottaison dynamique (LFLOT). LFLOT correspond à LWP + un pourcentage des élancements du bateau. Sur un voilier, LFLOT augmente dès que le bateau gîte par l'effet des voûtes rasantes et les étraves élancées. Le bateau atteint alors sa vitesse limite archimédienne que l'on nomme « Vitesse critique de carène ».

Le nombre de Froude (Fn) est égal à 0,4.

Finalement Froude démontre que la longueur à la flottaison dynamique représente la base de la vitesse maximale atteignable en régime archimédien pur.

Froude évalue la vitesse critique archimédienne par la formule :

$$V_c = Fn * (g * LFLOT)^{0.5} \text{ où } g = 9,81 \text{ m/s}^2, LFLOT \text{ en m, } Fn=0,4, V_c \text{ en m/s.}$$

Soit V_c (m/s) = $1,25 * (L_{FLOT})^{0.5}$ ou $V_c = 2,44 * (L_{FLOT}^{0.5})$ pour obtenir V_c en nœuds.

Ce calcul du potentiel de vitesse se base sur les calculs théoriques de R_f et R_w , recoupés lors du déplacement linéaire de la maquette dans le bassin de carène. Une « balance » évalue les forces générées par la forme de la carène lors de ce déplacement à différentes vitesses dans le bassin, jusqu’au moment où la formation de la vague se creuse entre l’étrave et le tableau arrière, signifiant qu’à cet instant la carène a atteint sa vitesse critique archimédienne.

L’expérimentation en bassins de carène permet aussi de mouvoir la maquette gîtée. Les concepteurs de ces bassins intègrent très vite des générateurs de vagues ou de houles. Il faudra attendre 130 ans environ pour que la CFD (Computational Fluid Dynamics) remplace (pas complètement) les bassins de carène.

Un navire à voile « de ligne », désignation militaire de l’époque de Louis XIV ou de Nelson, possède une longueur à la flottaison (LWL) de 55 à 65m, un déplacement de 1500 Tonnes, un bau de 10 à 12m et 6 à 7m de tirant d’eau. Pour ce type de navires, la formule de Froude donne :

$$V_c = 2.44 * (60)^{0.5} = 18.50 \text{ nœuds.}$$

Cette approche mathématique ne peut pas se réaliser, car les bateaux ne disposent pas, à cette époque, de la puissance motrice vélue nécessaire pour atteindre cette vitesse.

	HERMIONE (1779)	STAR of INDIA (1863)	LE BELEM (1896)	HORST WESSEL (1936)	CLASS 40	WILD OATS XI	CLASS J (1935)
LHT Hors Tout	66.00	84.50	58.50	90.00	14.23	34.02	42.64
L Coque	44.20	65.70	51	83.50	12.19	30.48	42.64
LWL (L_{FLOT})	44.20	60.00	48	71.00	12.40	30.48	30.10
BAU	11.24	11.80	8.80	11.90	4.50	5.10	6.76
Tirant d’air	46.90	45.00	34.00	44.90	18.50	43.50	50.00
Tirant d’eau	5.78	6.70	3.50	5.20	3.00	5.89	4.64
DSPL	1250	1197	800	1784	4.580	28.12	174.5
S Voilure	2200	2050	1200	2065	252	1185	920
Vitesse effective	13 Nœuds	14.5	12	19	18	27	14.5
Vitesse critique archimédienne V_c	16.22 Nœuds	18.90	16.90	21.48	8.60	13.47	13.40
DSPL^(1/3)/S^{0.5}	0.230	0.235	0.268	0.268	0.105	0.088	0.184

Le ratio $DSPL^{(1/3)}/S^{0.5}$ exprimé en unité homogène donne une image du déplacement (poids) par unité de surface de voilure.

En effet, durant plusieurs siècles les technologies (et surtout les matériaux) limitent les tirant d'air des gréements, les longueurs des vergues mais aussi les contraintes liées aux manipulations des espars par les marins. Ensuite augmenter la surface de voilure amplifie les sollicitations mécaniques dans la structure et élève le centre de gravité du bateau, donc diminue sa stabilité initiale et diminue la manœuvrabilité, ce qui représente un grand handicap dans une bataille navale.

Il est intéressant de voir que le ratio des CLASS J (années 1935) est assez performant. Ces CLASS J sont conçus avec une très grande stabilité de poids. Cette configuration leur autorise des surfaces de voilure gigantesques grâce à un mat en acier. Ainsi ils peuvent dépasser leur vitesse critique, chose qui étaient technologiquement hors de portée des voiliers 3 ou 4 mats.

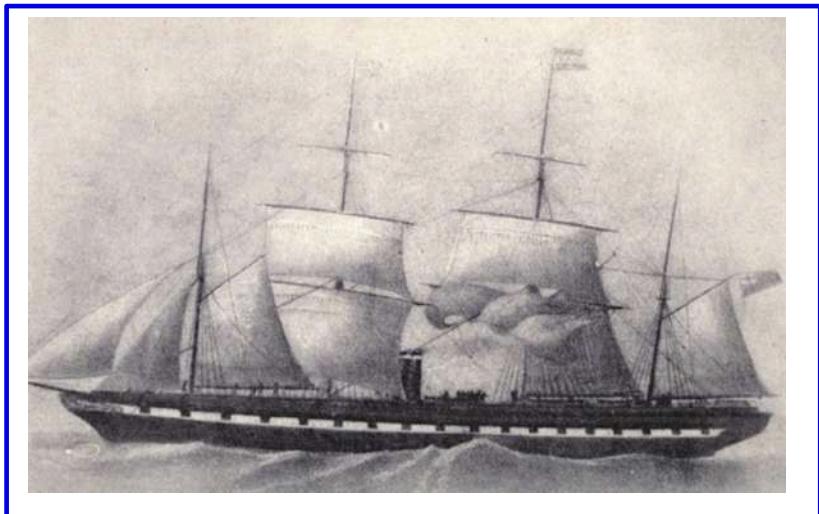
Le ratio $DSPL^{(1/3)}/S^{0.5}$ (en unité homogène) exprime la charge en tonnes par m^2 propre à chaque bateau.

4- La course au gigantisme maritime apparaît

Vers le milieu du 19^{ème} siècle, la machine à vapeur, puis l'adoption de l'hélice transforme le paysage maritime.

En 1845 le « Great Britain » possède une coque en fer, il est propulsé non plus par des voiles ou par des roues à aubes, mais par une hélice, il mesure 98 mètres avec un bau de 15.5m pour un déplacement de 3 500 tonnes et peut embarquer 360 passagers, 130 hommes d'équipage et charger 1 100 tonnes de charbon. Sa machine possède 4 cylindres en V et développe une puissance de 1600 CV.

En Juillet de son année de lancement il arrive à New York (Cap Lizard / New York 2900 milles) après moins de quinze jours de mer (soit environ 9 nœuds de moyenne).



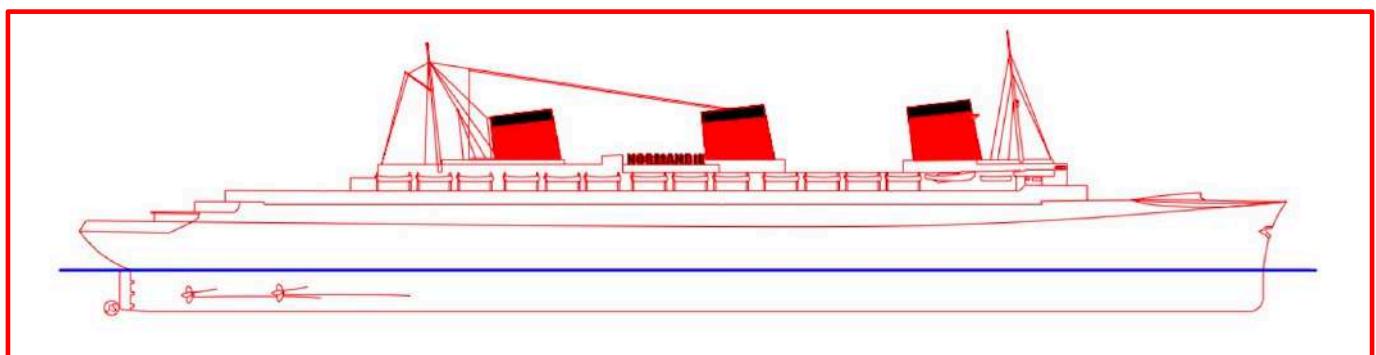
En appliquant les travaux de W. Froude, il dispose d'une vitesse de carène de près de 24 Nœuds. On constate donc que les architectes privilégient entre autres la régularité à la performance en termes de vitesses, mais ils sont bridés à cause de l'emport de charbon (consommation excessive lorsque la vitesse augmente) dont la quantité reste limité si on souhaite conserver une jauge nette favorable économiquement (maximum de marchandises et passagers).

Jusqu'aux années 1960, les objectifs des recherches portent uniquement sur l'amélioration des performances (vitesse et armement) des navires de guerre et de commerce (tonnage embarqué).

Les grands voiliers commerciaux au long cours (4 mats ou 3 mats barque) disparaissent en 40 ans non pas à cause de l'arrivée des navires à vapeur, mais de l'implantation de moteurs diesel, plus compacts et surtout d'un meilleur rendement énergétique.

Cette course au gigantisme et à la vitesse s'illustre notamment avec les paquebots (le fameux Ruban Bleu). Elle naît dès 1836, puis se codifie au début du 20^{ème} siècle sur la route Europe/USA. Les donneurs d'ordre deviennent plus ou moins directement les États, dont l'Allemagne, la France, la Grande-Bretagne, les USA et l'Italie, qui ainsi affichent leur puissance politique, technologique et économique.

La France remporte deux fois ce trophée avec le « Normandie ».
Longueur 313,75 m Bau 36.40m LFLOT 300m Tirant d'eau 11.20m DSPL 70100
T Puissance 160000 CV
Vitesse Maximale réalisée 32 nœuds



De la traversée (2900 milles) du « Great Britain » en 14,5 jours en 1836 on passe à 4 J 3H à 29.32 Nœuds de moyenne pour le « Normandie » en 1935.

La vitesse moyenne est passée de 8.4 nœuds à 29.32 soit un gain de 350% !!! Le déplacement augmente de 2000% et la puissance de 10000% pour simplement un navire 3 fois plus long (98 à 313 m).

Notons que l'application de la formule de W. Froude prévoit pour le « Normandie » une vitesse critique archimédienne de 42.2 Nœuds.

Cet aparté technologique pour montrer que l'histoire des techniques liée à la mobilité converge toujours vers une asymptote et se matérialise par une stabilisation, notamment de la vitesse que seul un changement de paradigme peut modifier. La traversée de l'Atlantique en paquebots s'éteindra avec l'arrivée des avions subsoniques quadrimoteurs à réaction. Le passage au vol commercial supersonique permettra de penser qu'une nouvelle évolution, soutenu par les États, s'ouvrira. L'impact économique et surtout écologique anéantira cette idée.

5- L'idée de régate à la voile prend naissance

En 1835 apparaissent les premières régates entre voiliers, d'abord au Sud de l'Angleterre et ensuite en 1838 avec la création de la Sté des Régates du Havre. Le premier Défi America Cup se déroule à Cowes en 1851.

Les flottes restent toutefois peu importantes. Au niveau architectural en Europe les architectes privilégient la stabilité de poids, aux USA les dessins s'orientent vers la stabilité de forme avec souvent des dérives, environnement des baies de la côte Est oblige.

Durant la période 1835 / Ww2, bien que les longueurs et les déplacements des voiliers de plaisance (régates) croissent, la tendance générale se développe avec des bateaux lourds, étroits, surtoilés. On mettra plus de 30 ans à taxer la surface de voile dans les formules de jauge. Les techniques de constructions se limitent à la construction à bordés jointifs calfatés sur membrures et pièces de quille. Seules des bateaux comme les « Classe J » utiliseront l'acier et aussi l'alliage d'aluminium pour certaines pièces. Mais quel que soit la tendance architecturale, les déplacements de bateaux restent imposants.

Dans ce conservatisme très installé, en 1928 l'architecte britannique Uffa Fox (1898-1972) perturbe cette ambiance intellectuelle en dessinant des petits dériveurs qui planent et arrivent à naviguer à une vitesse supérieure à la vitesse critique archimédienne (V_c) édictée par W. Froude.

L'idée générale consiste à dessiner une carène large à la flottaison et de faible profondeur, sans pour autant la surcharger en surface de voilure.

6- Comment naît la transition du mode archimédien au mode planning ?

Il faut repartir de la logique hydrostatique. Lorsque le bateau est immobile, la poussée d'Archimède est la seule force qui permet au bateau de flotter. Elle équilibre naturellement le poids du bateau.

À faible vitesse, la poussée d'Archimède exercée sur la carène diminue car la surface de cette carène produit en avançant une force de portance qui soulève le bateau. Son volume immergé diminue alors.

Au fur et à mesure que la vitesse augmente, la force de portance augmente et corollaire, la poussée d'Archimède continue à diminuer. Toutefois la trainée générée par la forme de la carène augmente aussi.

A partir d'une certaine vitesse, qui diffère suivant les formes de carène (l'immense majorité des carènes ne connaissent jamais cette félicité), le bateau se trouve dans une situation de planning.

A cet instant la force de portance (verticale) peut représenter jusqu'à 60 à 70% de la poussée (poids du bateau) d'Archimède initiale. Le bateau ne « flotte plus », il se déplace alors à la surface de l'eau : il est au planning.

Durant la phase d'accélération du bateau, la résistance des vagues augmente et atteint son maximum juste avant que le phénomène hydrostatique nommé planning se déclenche. A cet instant la résistance physique à l'avancement diminue considérablement.

Cette transition demande un pic d'énergie afin que le bateau monte sur sa vague d'étrave et parte au planning, c'est à dire en survitesse permanente tant que les conditions de vents restent relativement stables.

Mais la résistance visqueuse, résultante du frottement de l'eau sur la surface de la coque croissant avec le carré de la vitesse, ($R_f = 0.5 * C_x \rho S V^2$), explique que, bien que planant, donc au-delà de sa vitesse critique de carène, le bateau ne peut pas continuer à accélérer indéfiniment... A moins d'être sustenté verticalement par d'autres appendices et que sa carène sorte de l'eau. Ce qui représente un autre domaine de déplacement mais non archimédien !

7- Quel est l'ordre de grandeur de la vitesse en mode planning ?

En mode planning établi, le nombre de Froude (Fn) est de l'ordre de 0,65.

La vitesse critique théorique dans ce mode devient alors :

Vpla = 3,96 (LFLOT^{0.5}) pour obtenir Vpla en noeuds.

Ou Vpla (m/s) = 2.04 * (LFLOT^{0.5})

Quelques chiffres :

LFLOT= 10 m	Vpla= 12.52 nds	LFLOT= 12 m	Vpla= 13.72 nds
LFLOT= 18 m	Vpla= 16.80 nds	LFLOT= 30m	Vpla= 21.69 nds

Cette approche, bien que scientifique, reste toutefois théorique. Les résultats obtenus avec cette formule n'expriment que des ordres de grandeur car la transposition dans la réalité dépend essentiellement des formes de chaque carène, de l'évolution de la position du centre de carène, de l'assiette de chargement (position longitudinale et transversale du centre de gravité) et du centre de voilure. Autant de paramètres qui influent sur l'aptitude à planer d'un bateau.

Ce domaine sera réellement conceptualisé que plusieurs décennies après l'initiative d'Uffa Fox. Une des raisons et peut-être la principale, se trouve dans les technologies de construction employées et les matériaux disponibles, avant le milieu du 20^{ème} siècle, pour construire des carènes relativement légères donc à faible déplacement.

8- La vitesse devient la cible

Quel que soit le domaine, militaire où commercial, depuis la nuit des temps, puis plus récemment en régate, le gain de vitesse reste l'objectif des architectes. Gagner quelques dixièmes de noeuds sur le concurrent ou l'adversaire nécessite plus de puissance, plus de technologie tout en prenant en compte les recherches scientifiques.

Toutefois les ratios entre les progressions des gains de vitesses rapportés à la consommation, à l'autonomie, à l'augmentation de poids deviennent rapidement peu rentables à la fois techniquement et économiquement. Les améliorations apportées par les architectes se heurtent inexorablement à la trainée matérialisée par la résistance visqueuse du fluide (eau de mer) et celle qu'opposent les vagues dans lequel évolue la carène.

Puis au tout début de ce 20^{ème} siècle, on découvre comment voler avec un engin motorisé nommé avion, ce qui donne immédiatement des idées à certains.

9- L'essor des motorisations.

Dès le début des années 1800, des inventeurs comme l'américain Fulton conçoivent des moteurs à vapeur innovants afin de remplacer le système à piston alternatif, lent et volumineux.

Ils utilisent une injection de vapeur sur des ailettes d'une roue circulaire (une turbine). Le système est compact, performant mais possède un désavantage important car sa vitesse de rotation est élevée, difficilement ajustable et réversible.

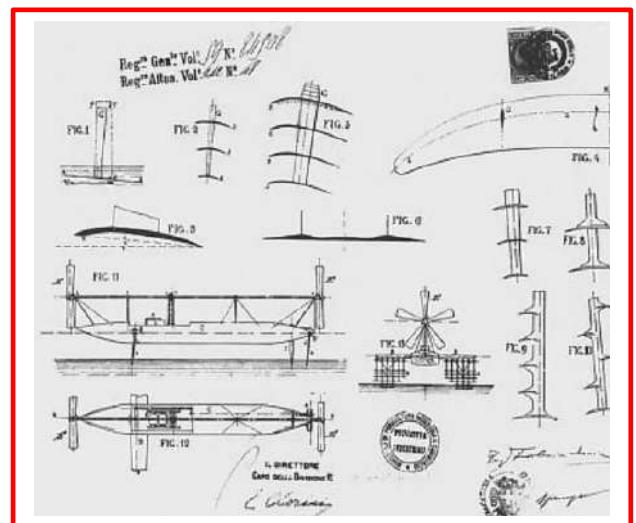
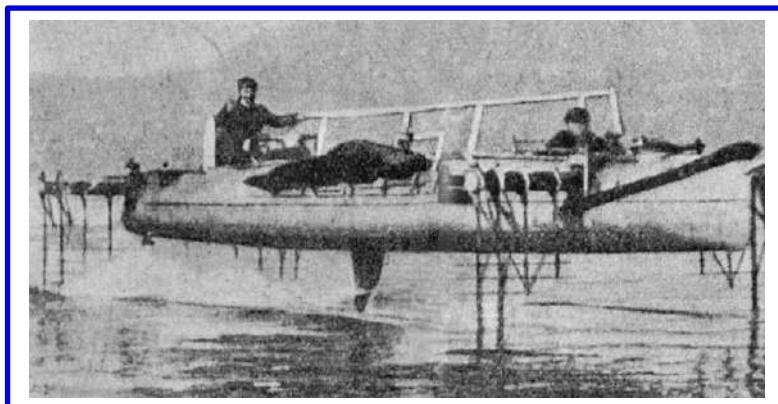
A l'époque les machines à vapeur pouvaient tourner dans les deux sens, ce qui permettait de naviguer en MAV ou en MAR.

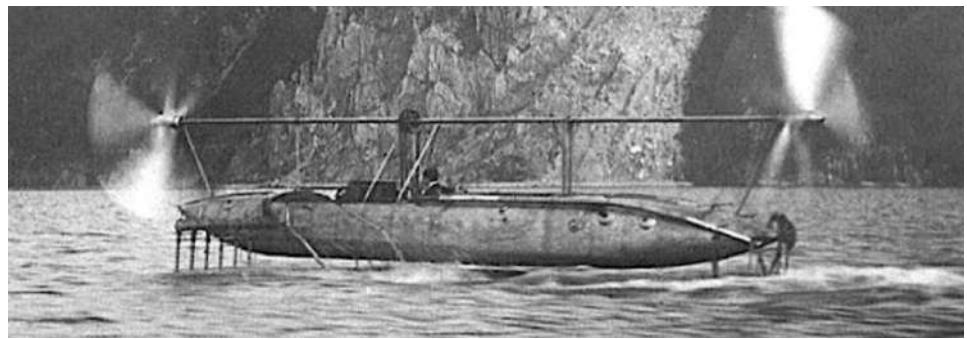
Devant la difficulté à fabriquer des réducteurs / inverseurs fiables, la turbine met plusieurs décennies à s'implanter sur les navires. Les solutions passent par de nouveaux matériaux comme l'acier qui devient exploitable qu'à partir de 1855 et l'aluminium industriel vers 1880.

Toutefois, des groupes d'ingénieurs ou d'autodidactes se lancent dans l'idée d'augmenter la vitesse des bateaux en appliquant les travaux et les recherches d'autres confrères dont l'objectif est de créer un avion et de voler, ce qui revenait à « poser » le bateau sur des ailes immergées dans l'eau. Ils avaient compris que la densité de l'eau étant 800 fois supérieure à celle de l'air, le pari devenait réalisable.

Une des plus célèbres réalisations de cette époque sera celle de l'ingénieur italien Forlanini en 1910.

La planche de dessins ci-dessous préfigure une transformation de la version originale du foiler qui utilise une hélice immergée en la remplaçant par deux hélices aériennes, un tractrice et une propulsive.





Versions hélice immergée et hélices aériennes

10- La naissance de la technique du vol en avion.

Le désir de voler nous ramène à Icare lorsqu'il s'extract du labyrinthe où il était prisonnier. Mais ses rêves de grandeur lui seront fataux puisque le soleil fit fondre la cire qui assemblait la voilure faite de plumes d'oiseaux.

Le vol commence par quelques sauts vers 1890, de « la chauve-souris », baptisée « Éole », puis « Avion » de Clément Ader.

En réalité dans l'environnement technologique de la 1^{ère} révolution industrielle, l'idée de voler traîne chez beaucoup de scientifiques et d'ingénieurs. Énormément de recherches circulent en Europe et aux USA sur la conception d'un engin capable de décoller et de se déplacer dans les airs.

Entre autres, le Britannique George Cayley (1773-1857) décrit les phases à explorer pour voler, c'est à dire la propulsion, la trainée, la portance et son corollaire le décrochage. Il comprend aussi que le plan de voilure doit être fixe et ne doit pas reproduire la mécanique de vol des oiseaux.

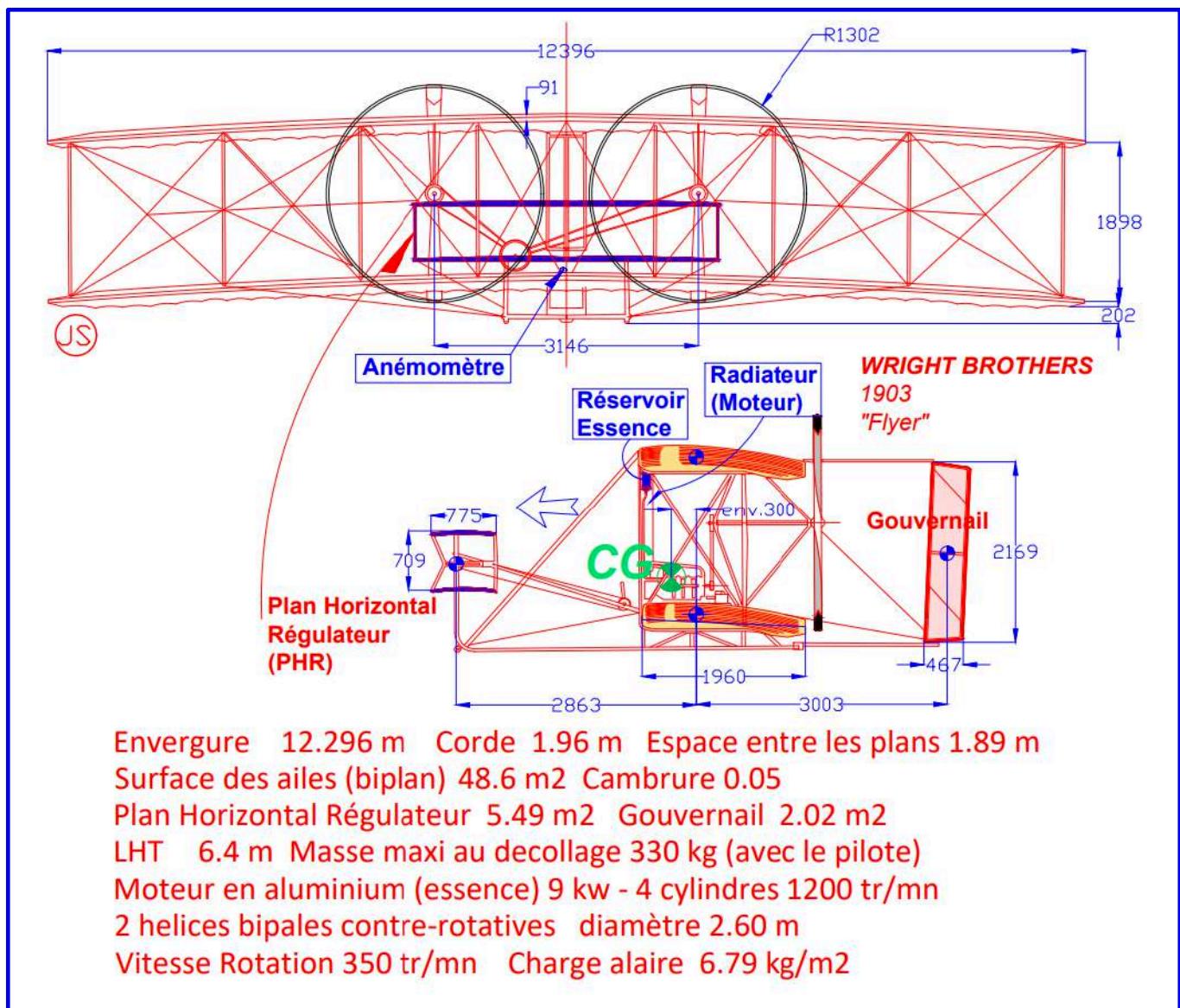
Enfin il voit la nécessité de concevoir un empennage pour stabiliser horizontalement le vol. D'autres chercheurs reprennent ses travaux, les conceptualisent, mais se heurtent à une difficulté majeure qui se nomme la motorisation (propulsion).

En effet vers 1850/60 le moteur à pétrole qui vient juste d'être finalisé manque sérieusement de fiabilité. Seule la machine à vapeur, largement diffusée est disponible, mais cet ensemble mécanique, même miniaturisé, pose un problème de poids insurmontable pour être installé sur un avion, d'autant que ces machines à vapeur fonctionnent au charbon. Franchement pas pratique sur un avion.

Aux USA après beaucoup d'essais, notamment sur des planeurs (maquettes ou réels), les frères Wright, grands observateurs du vol des oiseux lorsqu'ils planent, comprennent, que voler, c'est-à-dire créer une portance verticale supérieure au poids de l'avion ne représente qu'un élément du problème.

L'autre partie concerne le contrôle du vol, qui se décompose en 3 degrés de liberté (rotations) : le roulis, le tangage, le lacet. Cette réflexion des frères Wright représente leur plus grande contribution dans la maîtrise du vol et permet réellement de voler.

En effet, la portance seule ne permet pas de choisir sa route. Un avion n'existera que lorsqu'il sera capable de décoller d'un point A et de revenir à ce même point après un vol.



Ainsi les frères Wright conçoivent un engin (monomoteur à pétrole, bi-hélices) ou les ailes (portance) sont équipées d'un système mécanique qui, en imprimant de la torsion aux extrémités des ailes par un jeu de câbles, permet de gérer la différence de portance de chacune des ailes dans le flux d'air. Cette instabilité crée le roulis. On nomme cette fonctionnalité le gauchissement des ailes.

Mais la contribution majeure des frères Wright concerne l'ajout de deux doubles appendices parallèles :

- 1) Le gouvernail vertical, situé à l'arrière, qui contrôle le lacet, et sert à suivre le cap. Ils s'inspirent pour cela du gouvernail initié par les marins.
- 2) Surtout, ils implantent un élévateur (Plan Horizontal Régulateur) qui se situe à l'avant.

Cet élévateur a pour rôle de contrôler le tangage en impulsant des actions à piquer ou à cabrer.

Quelques cinq ans après leur premier vol, le frères Wright rassembleront à l'arrière la gouverne verticale et l'élévateur horizontal.

On est alors en 1903 et cette configuration correspond toujours aux architectures (PHR + Gouverne vertical) des avions d'aujourd'hui, bien que quelques variantes en « V » de l'empennage arrière existent, elles ne remettent pas en cause le principe du contrôle du lacet et du tangage.

L'avion des frères Wright est intéressant à analyser.

D'abord il possède une voilure en biplan, qui bien que moins performante aérodynamiquement qu'un modèle en monoplan est surtout plus simple à gérer mécaniquement. En fait 48.6 m^2 en biplan équivaut à environ 35 m^2 en monoplan. Pour voler cet avion doit produire une force de sustentation égale à son poids au décollage, c'est-à-dire avec le pilote et les pleins de carburant et d'eau (refroidissement du moteur), soit $330 \text{ kg} * 9.81 = 3237$ Newtons (9.81 représente l'accélération de la pesanteur).

Cette valeur représente F_z que l'on devra atteindre pour voler.

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

Dans cette formule du F_z , seuls deux paramètres sont inconnus des frères Wright.

Il s'agit de la vitesse V de décollage disponible, c'est-à-dire produite effectivement par la propulsion des 2 hélices et le coefficient de portance de la voilure biplan C_z .

En effet, à l'époque, la connaissance du rendement des hélices aériennes relève de l'inconnue. On ne fait pas encore d'essai de traction au point fixe.

Les frères Wright conçoivent et fabriquent deux hélices bipales vrillées en lattes de bois collées. Elles tournent à 350 tr/mn (36.6 tr/s) en sens inverse afin d'éviter l'effet de couple de giration.

Leurs diamètres de près de 2.6 m associés à une faible largeur de corde de l'ordre de 0.146 m, assure un allongement aérodynamique important (AR environ 8.5), ce qui améliore les performances de traction.

Concernant le coefficient de portance de la voilure, là encore c'est le flou le plus complet, aucune étude n'existe. Les frères Wright très observateurs s'inspirent des cerfs-volants et de leurs essais sur quelques prototypes de planeurs biplans de leur fabrication. Ainsi ils optent pour des profils d'ailes très cambrés, qui possèdent en fait une portance à basse vitesse élevée, de l'ordre de 0.7.

Ce qui correspond à une vitesse de décollage de l'ordre de :

$$V^2 = F_z / (\frac{1}{2} * \rho * S * C_z) = 3237 / (0.5 * 1.292 * 0.7 * 48.6) = 147 \text{ et } V = 12 \text{ m/s (43km/h)}$$

43 Km/h, représentent le vent vitesse de l'air nécessaire pour décoller

Conscients que la puissance du moteur (9kW), accouplé aux 2 hélices, ne produit pas suffisamment de propulsion afin d'obtenir cette vitesse de 43km/h les frères Wright installent l'avion sur un plan incliné en bois (bien graissé) d'une bonne vingtaine de mètres angulé à environ 8, 10°.

Le moteur lancé à plein régime et la poussée de bras musclés permettent à l'avion d'obtenir en fin de glissade un vent vitesse suffisant pour décoller.

Les premières tentatives permettent de réaliser des sauts de puces, 37m à une vitesse de 11 km/h soit 3m/s, puis 284 m en 59 secondes soit encore que 4.89 m/s ou 18 km/h. On reste encore très éloignés des 17 m/s nécessaires pour obtenir 3237 Newtons de sustentations et ainsi un vol stabilisé.

« L'avion » se comporte plutôt comme un planeur qui tente un envol.

En fait l'engin se révèle assez instable en roulis pendant la période de décollage, certes le pilote allongé sur une plateforme implantée au niveau de l'aile inférieure dispose d'un système lui permettant de se déplacer latéralement, mais le temps de réaction ne suffit pas à juguler le roulis.

Les frères Wright, décidément très inventifs, installent un mécanisme de gauchissement asymétrique³ manuel des extrémités du plan de voilure supérieur. Ce système peut s'ajuster en vol.

³ Système existant toujours sur les avions.

À force d'essais, de casses, ils reconstruisent un 3^{ème} prototype, avec des surfaces des éléments de contrôles (Gouvernail et PHR) augmentées, de meilleures performances dans le dessin des hélices et un léger allègement de l'avion. Tout ce travail leur permet ainsi de réaliser un vol de 38km en 39 minutes, soit une vitesse de 58.5 km/h (16.23 m/s).

Les précisions des mesures du temps de vol, comme d'ailleurs celui du nombre de km parcourus restent sujet à caution, mais il est un fait... on décolle, on vole et on atterrit. N'ergotons pas, en 1905, deux années après leur première tentative, les frères Wright posent les bases techniques qui s'appliqueront sur les générations à venir d'avion subsoniques.

Il est intéressant de voir qu'avec leur système de plan incliné d'aide au décollage, les frères Wright inaugurent la catapulte⁴...

11- Du vol avion au vol navire

Immédiatement après la réussite des frères Wright, l'emballement pour l'aviation se diffuse instantanément en Europe et évidemment aux USA, les frères Wright réalisent une tournée Européenne afin de présenter leur avion. Déjà dès 1860, certains imaginaient remplacer l'air par l'eau afin d'obtenir un bateau motorisé sustenté entièrement hors de l'eau afin qu'il s'affranchisse des contraintes liées à ce fluide (Trainée résultante de la résistance visqueuse et des vagues).

Au début 20^{ème} siècle les travaux scientifiques sur les ailes d'avions (profils, allongements), donc sur la portance, se développent. On sait que la portance d'une aile est proportionnelle à sa surface alaire projetée horizontalement et au carré de sa vitesse de déplacement⁵.

La portance appliquée à une aile immergée dans l'eau (un « foil »), dépend aussi de la masse volumique de l'eau de mer (1025 kg/m³) qui est 793 fois supérieure à celle de l'air 1.292 kg/m³ à une vingtaine de mètres d'altitude.

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

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

⁴ Ils améliorent ce système en créant la catapulte à poids. Une masse de 700kg tombait d'une dizaine de mètres. Elle était reliée par un câble et propulsait d'avion...

⁵ La forme du profil, l'environnement, l'incidence influent aussi.

Appliqué par exemple à un bateau de 2000 kg en prenant un C_z de 0.3 (valeur moyenne), on obtient le produit $(V^2) * S$ suivant :

$$(V^2) * S = F_z / \frac{1}{2} * \rho * C_z$$
$$(V^2) * S = (2000 * 9.81) / (0.5 * 1025 * 0.3) = 19620 / 153.75 = 127.61$$

Ainsi un hydrofoil motorisé, conçu avec une surface active de foils de 2.08 m² (soit 2 foils de 2.6m * 0.4m) décolle à une vitesse de 15.21 Nœuds.

$$V = (127.61 / 2.08)^{0.5} = 7.83 \text{ m/s}$$

Si le concepteur décide de décoller à 18 nœuds soit +20%, (9.26 m/s), la surface de foils nécessaire au décollage descend à 1.48 m² (-30%) soit 2 foils de 1.86m * 0.4m environ.

12- Mais d'abord décoller

La difficulté première pour un bateau sera d'atteindre une vitesse qui génère suffisamment de portance pour soulever la coque hors de l'eau, sans avoir recours à des surfaces actives de foils démesurées. Contrairement à un avion, un navire change de milieu conceptuel entre le moment où il flotte (il est alors « Archimédien ») et le moment où il vole en appui sur ses foils et que sa coque ne touche plus l'eau (il est alors en sustentation hydrodynamique). Pour un navire motorisé, c'est presque trop simple. Il suffit d'avoir une vitesse de propulsion, donc une puissance (moteur + hélice) pour que la surface active, associée à un profil adéquat du foil, génère une force ascensionnelle (portance) égale à la masse du bateau. Voir le calcul ci-dessus.

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

13- Puis maintenir le vol stabilisé

En vol, le bateau se comporte comme un avion, « porté par ses foils (Surfaces sustentatrices) ». N'étant plus soumis aux contraintes du passage de la coque dans l'eau, sa vitesse augmente. Mais les lois hydrostatiques n'existant plus, il n'y a plus de centre de carène (CB), donc plus de couple de rappel défini par le produit « Poids du navire X distance horizontale entre le CG et le CB », couple qui assure la stabilité d'un navire.

L'équilibre en vol dépend alors de l'action de 3 forces, le poids appliqué au centre de gravité (CG), la portance au centre aérodynamique des foils (CP), et la poussée de la motorisation à l'hélice ou du centre vélique pour un voilier (CV).

C'est dans l'interactions entre ces 3 forces que se trouve la difficulté car la vitesse de déplacement d'un voilier fluctue à tout moment suivant la force et la direction du vent. Cette dépendance apparait comme le facteur de déséquilibre principal puisque la portance générée par le foil repose sur la vitesse de déplacement du bateau et son angle d'incidence par rapport au fluide.

Ce déséquilibre permanent impose donc un réglage continu dans le temps des paramètres de vol.

Le plan horizontal régulateur (PHR) n'assure pas de fonction de sustentation. Il peut être « porteur », la portance est dirigée vers le haut où « déporteur », la portance est alors dirigée vers le bas. Son rôle consiste à stabiliser la plateforme en tangage et ainsi d'adapter l'équilibre (longitudinal) dans la limite des variations de la portance et de la force vérique.

14- L'état de l'art sur la conception des foilers

Avant de développer l'état de l'art relatif à la navigation hauturière sur foil, constatons que depuis la nuit des temps, les gains de vitesses des navires restent l'objectif des scientifiques, des ingénieurs, des architectes navals, des navigateurs. Certes conjointement, l'augmentation des déplacements se poursuit, mais les lois de la physique stabilisent cet accroissement, que ce soit dans le domaine commercial ou militaire. Une raison majeure à cette autolimitation est l'interaction entre les mesures linéaires, celles des volumes qui croissent au cube et celles des surfaces au carré.

Pour matérialiser ces relations, prenons un cube de 1 mètre de côté. Si on multiplie chaque arête par 3, on obtient un cube de 3 m de côté, le volume passe de $1m^3$ à $(3 \times 3 \times 3)$ soit $27 m^3$.

Le facteur d'échelle du volume devient 27. Rempli d'eau, le cube de 1m, affiche une masse de 1 000 kg. Celui de 3m, 27 000 kg (27 Tonnes) ! Au niveau des surfaces, le cube de 1m de côté représente une surface développée de 6 m^2 , celui de 3 m affiche 54 m^2 (facteur d'échelle 9).

L'évolution de ces facteurs d'échelle se traduit entres autres par une augmentation de la puissance nécessaire et son corollaire l'augmentation du volume de carburant embarqué.

Certes, des foilers motorisés ont été assez largement développés, notamment par les militaires sous formes de prototypes et dans le domaine commercial pour le transport de passagers (certains sont encore en exploitation).

Beaucoup d'entre nous se souviennent des foilers « Condor », en service entre 1964 et 1993, au départ de Saint-Malo en route vers Jersey, Guernesey et Weymouth (31m X 12.6m X 3.7m, 2 moteurs V12 de 1400 kW chacun, Vitesse 30 Nœuds, consommation 600 L/Heure).

Une liaison Brest / Ouessant avec un hydrofoil soviétique « Kometa » existe entre 1970 et 76, puis le navire se retrouve stocké sur le quai du port de commerce de Brest pour terminer au cimetière des navires de Landevennec où il est déconstruit en 2010.

Une autre initiative en 1979 qui reliait Dieppe à Brighton en 2 heures, avec un foiler développé par Boeing, tourne rapidement court⁶. Les principaux ennemis de ces types de navires, se trouvent être les mini épaves qui traînent en mer, voire les filets et les casiers de pêche difficilement identifiable lorsque l'on navigue à 15m/s soit 30 nœuds.

Même la liaison Southampton Cowes avec les foilers « Shearwater » bien connus des régatiers du Solent, s'éteindra en 1992 par manque de rentabilité, l'armateur revient alors vers des navires catamarans archimédiens.



La recherche de vitesse s'oriente vers les navires à coussins d'air, type Hovercraft ou Naviplane. L'aventure s'étale sur une quinzaine d'années. Certes les capacités d'emport sont importantes, mais la vitesse obtenue, 50 à 60 nœuds, supérieures à celles des foilers, impose des puissances diaboliques puisqu'il faut à la fois sustenter le navire (ventilateurs verticaux) et le translater (Hélice aérienne).

Ainsi le « Jean Bertin », 50m X 23 m, 2300 kW accuse une consommation de 5 Tonnes de kérosène à l'heure. La fin de la détaxe du kérosène, l'arrêt des subventions, condamne presque irrémédiablement ces types de navire.

⁶ Deux années d'exploitations

Les Britanniques exploitent toujours une liaison entre Portsmouth et Ryde (Île de Wight) par Hovercraft. Pour l'avoir pris plusieurs fois, la liaison est certes rapide (15 minutes) mais l'engin est relativement spartiate (70 passagers), très bruyant et odorant (Kérosène).

En fait, les ingénieurs de ces Hovercraft doivent concilier une plateforme motorisée et aménagée la plus légère possible, afin de la sustenter en utilisant un minimum d'énergie et de surface au sol, tout en offrant un maximum de sièges passagers pour optimiser son rendement à chaque voyage.

Cette équation tourne rapidement au cauchemar.



Le vol à voile...

En régates offshores, qui nous intéressent plus particulièrement, l'évolution et la gestion technique vers des tentatives de vol de multicoques hauturiers se réalise très lentement, bien que les architectes et les ingénieurs soient assez rapidement au fait de l'état de l'art théorique.

Par exemple dans les années 95/ 2005, l'Hydroptère d'Alain Thebault vole réellement dans une assiette horizontale stable. Certes il accumule les records de vitesse sur des très courtes distances, mais il manque de fiabilité.

Sa conception et sa mise au point se sont focalisées sur les technologies nécessaires pour voler, ce qui a été réussi. Mais parallèlement l'adaptation à la navigation hauturière avec ses contraintes propres n'a pas été imaginée.

La surprise du lancement des AC75 en 2017 (monocoque foiler pour la Coupe America), relance l'idée d'un foiler océanique intégral.

Beaucoup prédisent que cette technologie sur foil deviendra dans les années à venir l'alpha et l'oméga de la course au large. La réalité balbutie encore.

Avant de décrire les phénomènes physiques liés à la portance d'une surface sustentatrice circulant dans l'eau (le foil), regardons comment se réalise le vol stabilisé d'un foiler vélique et aussi quelle différence existe entre le vol et l'environnement archimédien, même lorsqu'un bateau navigue au planning.

15- L'équilibre en vol stabilisé d'un foiler vélique (Le Moth)

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

Au facteur d'échelle près, l'étude de la navigation en Moth⁷ permet de bien cerner l'ensemble des contraintes qu'il faut nécessairement gérer afin de contrôler le vol.

En mode archimédien, la stabilité d'un voilier s'exprime par l'équilibre entre un couple de redressement positif qui s'oppose à la gîte produite par le couple vérique. Ce couple s'exprime par l'action conjointe du poids du bateau multiplié par la distance horizontale latérale entre le CG (Centre de gravité du bateau et le CB (centre de carène).

Ce process est automatique, dans le sens où l'équipage n'a rien à entreprendre pour que l'équilibre entre ces deux couples soit conservé. On constate aussi que l'équilibre du bateau ne pose aucun problème lorsqu'un pilote automatique est enclenché alors qu'il agit exclusivement sur le cap.

Dans l'hypothèse où le contrôle de la trajectoire du bateau échappe au pilote automatique, les lois hydrostatiques ramènent⁸ toujours le bateau à la gîte 0°.

Comme nous l'avons déjà énoncé, les lois hydrostatiques ne sont plus applicables sur un Moth car aucun élément de la coque touche l'eau après son décollage.



Un foiler en vol intégral, devient une plateforme (coque + structure) où s'installe un barreur.

⁷ L'idée de faire voler un Moth naît en Australie en 1972 à Brisbane (Australie). Le Moth est dériveur solitaire créé en 1928 aux USA. Son architecture s'appuie sur une formule de jauge à restriction.

⁸ Dans cette démonstration j'exclue l'hypothèse où l'angle de chavirage est atteint (Avs) ce qui se traduit par une stabilité négative et le chavirage obligatoire du bateau.

Deux ailes (foils) symétriques implantées en extrémité de la dérive centrale soutiennent cette plateforme au-dessus de l'eau. Pour que la sustentation reste intégrale et surtout stable, il faut que la portance générée par ces foils soit en permanence égale au poids de l'ensemble plateforme + barreur + mat + voile. Toutefois cette condition (deux forces opposées : Portance vs Poids) ne suffit pas pour assurer l'équilibre du Moth au-dessus de l'eau. L'équilibre final doit intégrer obligatoirement la poussée vérique.

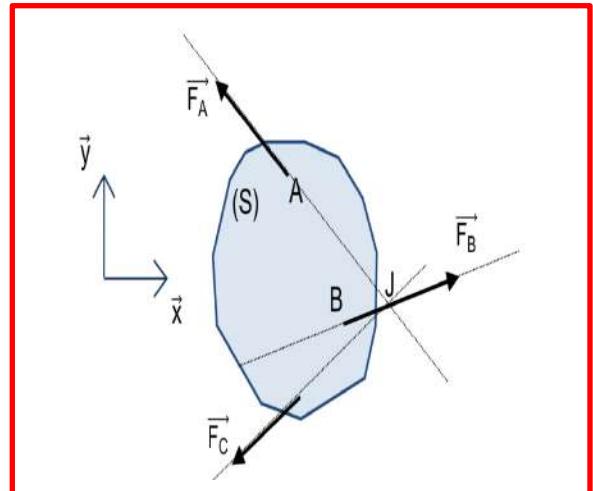
On se retrouve en présence de 3 forces dans l'espace :

- Le poids de l'ensemble plateforme + barreur + mat + voile.
- La portance créée par des surfaces sustentatrices (foils)
- La poussée vérique.

Le principe fondamental de la statique⁹ s'énonce ainsi :

Pour qu'un corps solide soit en équilibre dans l'espace, il faut :

- Que la somme vectorielle des forces soit nulle.
- Que la somme des moments de chacune des forces par rapport à un point quelconque de l'espace soit égale à Zéro.



⁹ Le domaine de la statique considère que les éléments mécaniques étudiés sont indéformables et immobile. Il existe conjointement au domaine de statique, ceux de la dynamique, de la résistance des matériaux, de l'hydrostatique, etc...

Mais cette situation d'équilibre parfait qui assemble ces 3 forces ne peut exister que très temporairement, car au-delà de quelques dixièmes de seconde (à 30 nœuds le foiler parcourt 15 mètres par seconde), au moins un des paramètres définissant n'importe qu'elle force change et détruit cette condition d'équilibre précaire.

Analyse de chacune des trois forces :

- Le poids (P) de l'ensemble plateforme + barreur + mat + voile.

L'intensité du poids (exprimé en Newtons) de l'ensemble plateforme + barreur + mat + voile est constante.

La direction de cette force est verticale et dirigée vers le bas.

La position du CG correspond au barycentre entre les CG de la plateforme, du mat, de la bôme, de la voile et du barreur.

La position du barreur évolue en permanence, comme la gîte, le trim et l'orientation de la voile. Cela se traduit par une variabilité spatiale de la position finale du CG.

- La portance de la surface sustentatrice centrale (Foil)

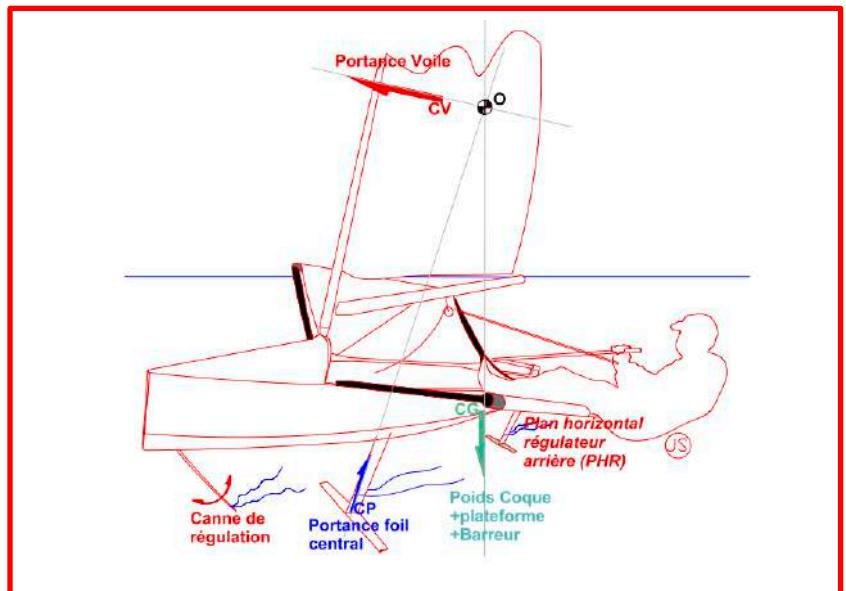
L'intensité de la portance dépend de plusieurs paramètres dont le coefficient unitaire de portance (C_z), le profil de foil, sa surface, son incidence et la vitesse du foiler.

- Par exemple pour un profil NACA 64-12 (usuel pour ces types de foils) le C_z varie de 0.4 pour 4° d'incidence à 1.42 pour 14° (Le C_z est un nombre sans unité).

- La vitesse

Un Moth foiler naviguer en mode vol entre 10 et 25/28 nœuds, mais reste sensible sur sa

trajectoire aux variations de vitesse du vent réel (molle ou risée). Cela se traduit instantanément par un ralentissement ou une accélération du bateau. Par exemple, une chute effective de la vitesse instantanée du Moth de 14 à 13.5 nœuds provoquera une baisse de la portance de 7.02% (calcul sur le carré des variations de vitesse).



Sur une base de 30kg pour le bateau armé et de 80 kg pour le barreur, soit 110 kg, une portance de $110*9.81 / \cos(\text{gîte } 10^\circ) = 1095$ Newtons est nécessaire pour voler.

Une chute de la portance à 1000 Newtons (influence des -7.02%), qui correspond à une chute de 3.57% de la vitesse de bateau, rendra l'équilibre du foiler très précaire.

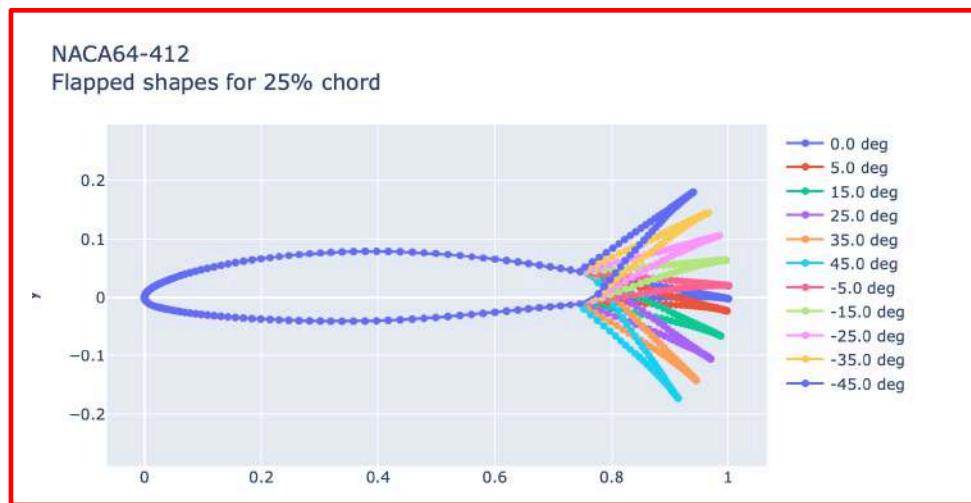
Mais la baisse où l'augmentation de la vitesse se répercute de fait sur le coefficient unitaire de portance C_z . Un passage de 1.2 à 1.0 de C_z (baisse de 16%) provoque une chute la portance à 833 Newtons. Cela démontre que la régulation de la vitesse devient primordiale pour voler.

- Le foil

Il se situe perpendiculairement en extrémité de la dérive. En vol le barreur contrôle la gîte par le déplacement de son poids mais le Moth n'est jamais parfaitement vertical.

Il peut même naviguer contre-gîte. Dans tous les cas la poussée de la sustentation créée par le foil suit l'angle de gîte, ce qui impose d'augmenter le C_z (coefficient unitaire de portance) afin d'obtenir en permanence une portance égale à $P/\cos(\text{gîte})$. L'assiette longitudinale (Trim) intervenant aussi, la poussée du foil doit être de :

$$P / (\cos(\text{gîte}) * \cos(\text{trim})).$$



Un volet de bord de fuite mobile implanté sur le foil cambre son profil transversal et augmente la valeur de C_z . La portance croît alors avec l'angulation du volet de bord de fuite, jusqu'à une certaine limite fixée par l'apparition du phénomène de cavitation du profil. Lequel produit le décrochage du foil.

Toutefois en mode vol le domaine d'évolution spatiale de la plateforme autour du « centre » du foil doit rester dans un cône de 25 à 30° d'angle au sommet afin que le barreur conserve le contrôle du foiler.

- La poussée vélique.

Son intensité dépend de la vitesse du vent apparent, donc du vent vrai et du cap et implicitement du réglage de la voile. La gîte et le trim (angle d'assiette longitudinale) du bateau interfèrent de fait sur la position spatiale de force vélique.

Ainsi l'équation de vol : Σ (des 3 forces extérieures =0) apparaît complexe à satisfaire en permanence tant les paramètres relatifs à chacune de ces forces sont instables. Une régulation continue doit donc exister pour obtenir un vol stabilisé.

16. Les systèmes de régulations des Moth à foils

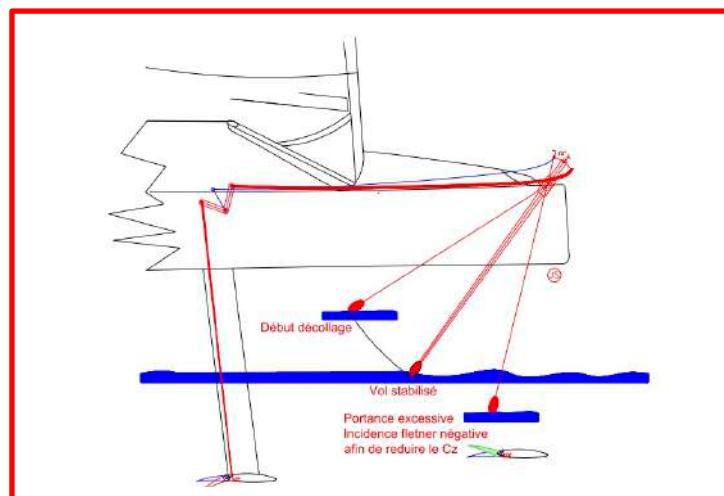
Un Moth foiler dispose de 3 systèmes de régulation :

- Un système détecteur entièrement autonome, connecté au volet implanté sur le bord de fuite du foil et qui assure de manière permanente l'équilibre entre la portance produite par le foil central et le poids du foiler
- Un élévateur arrière commandé par le barreur et implanté sur le safran (aussi nommé PHR pour plan horizontal de régulation). Il permet de gérer le Trim positif ou négatif du foiler (cabrer/piquer).
- Les actions du barreur sur le lacet (safran), la puissance de la voile et la position spatiale du centre de gravité du foil.

Le système détecteur qui ajuste la portance du foil central

Il se compose d'une canne pivotante dont le centre de rotation se situe à l'étrave au niveau du pont.

À l'extrémité de cette canne, on trouve une cuillère ou un flotteur (gros comme un œuf) qui au contact de l'eau produit une poussée hydrostatique vers le haut ou qui retombe par gravité. Le couple produit est utilisé pour piloter le volet de bord de fuite du foil central.

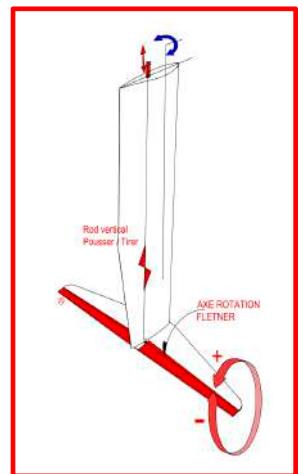


La rotation de la canne déplace horizontalement sur une tige qui par un renvoi d'angle à 90° pousse ou tire une tige verticale implantée dans la partie arrière de la dérive afin de manœuvrer le volet de bord de fuite du foil.

L'angulation du volet augmente ou diminue la valeur du coefficient unitaire de portance (C_z) du profil du foil.

Schématiquement 3 cas se produisent :

- Durant le décollage, le volet est très angulé ce qui augmente le C_z au maximum de sa valeur.
- En vol stabilisé, le volet est tel que le profil se superpose au profil de base NACA.
- En cas de surpuissance, l'incidence du volet devient négative afin d'éviter que le foil crève la surface de l'eau. Ce qui provoque une cavitation de l'extrados et une perte de portance, donc une réduction d'altitude de vol.



Ce système de régulation est parfaitement continu et ne demande aucun apport énergétique hormis la trainée de la cuillère ou de l'œuf dans l'eau générée par le déplacement du bateau et celle de la gravité universelle.

Un élévateur arrière implanté en extrémité du safran

Le safran se situe sur un « pylône » tubulaire assemblé sur le tableau arrière.

Le PHR est implanté à l'extrémité inférieure du safran. Pour situer dans l'espace l'ensemble foil sur la dérive et PHR sur le safran, les tirants d'eau respectifs en régime archimédien sont de 1.10m et 0.95m. L'altitude de vol oscille autour de 0.80m / DWL du mode archimédien.

Il est nécessaire que le PHR soit plus bas que le foil central afin qu'il n'évolue pas dans le sillage perturbé du foil central.



Le profil du PHR est symétrique. Sa fonction permet de contrôler le tangage donc le trim du vol. En conséquence son angle d'incidence peut être positif ou négatif par rapport au plan horizontal. Cela signifie qu'il est porteur (il élève alors l'arrière du bateau et le fait piquer) ou déporteur (il abaisse l'arrière et cabre le bateau).

En aucun cas il contribue à la sustentation générale du bateau, celle-ci étant assurée uniquement par le foil central contrôlé par la canne de régulation.

L'installation sur un pylône (déport vers l'arrière de 0.5m environ) permet de réduire la surface active du PHR.

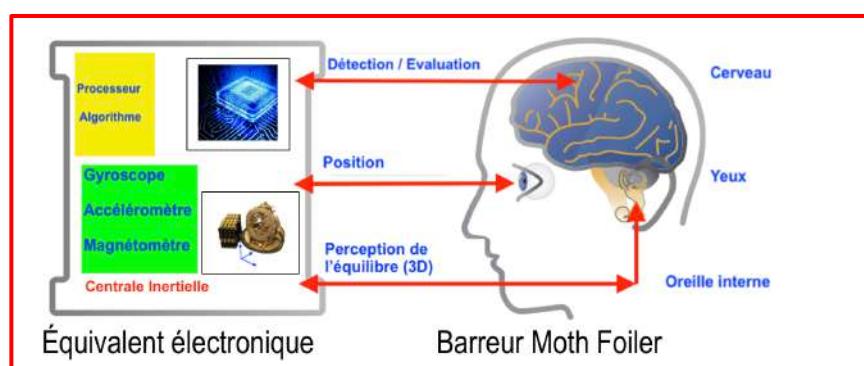
L'action piquer ou cabrer résultant du couple produit par la portance ou la déportance du PHR est liée à sa distance horizontale avec le foil central (foyer charnière).

Les actions du barreur.

Sur Moth foiler, le barreur dispose d'un stick qui possède 2 fonctions :

- ✓ Le stick par lui-même qui permet d'orienter le safran et permet de contrôler le lacet.
- ✓ Une poignée rotative en extrémité de stick qui actionne l'angulation du PHR.
- ✓ Il contrôle aussi le réglage de la voilure, donc la puissance disponible et nécessaire.
- ✓ Enfin il gère la position spatiale du centre de gravité du bateau en vol.

Le pilotage manuel d'un foiler intégral fait appel à des fonctions cognitives (cerveau, oreille interne, yeux, fessier, muscles) qui lui permettent d'être en interaction permanente avec l'environnement et les situations immédiates qui surviennent.



Ainsi il perçoit, se concentre, acquiert, traite des dizaines d'informations à la seconde (gîte, assiette longitudinale, risées, molles, bruits, risques de collision, obstacles, etc...) et interagit afin de conserver l'équilibre dynamique nécessaire à la stabilité du vol.

Sur un Moth, le système humain n'a pas besoin d'aides électroniques pour gérer un vol.

Au final, le barreur représente presque une centrale inertielle parfaite, dans le sens où il est capable, jusqu'à une certaine limite quand même, de gérer la complexité de l'équilibre dynamique en vol du Moth.

On reviendra dans un prochain chapitre sur les types de pilotages possible et l'apport d'équipement comme une centrale inertielle dans la gestion de la stabilité du vol.

En résumé le barreur dispose en plus du régulateur automatique d'altitude de vol de 5 leviers de commandes :

- ✓ Le contrôle du PHR (poignée sur le stick).
- ✓ Le contrôle du cap (rotation usuelle du safran).
- ✓ Le contrôle de la puissance avec l'écoute de grand-voile.
- ✓ Le contrôle de l'assiette finale sur ses déplacements sur la plateforme afin de s'adapter aux évolutions de la portance générées par la canne de régulation.

Les seuls obstacles sont la fatigue qui altère progressivement les fonctions cognitives mais aussi la disparition de certaines fonctions de repérage dans des environnements très particuliers. Par exemple, un barreur de Moth se trouvera dans l'incapacité de réaliser un vol stabilisé par nuit noire et couverture nuageuse à 100% et sans aucun repère sur la côte.

Certes ces conditions n'existeront jamais en régates de Moth foiler.... Mais par contre un équipage les rencontrerait dans des courses au large.

Le pilotage exclusivement « humain » parait donc impossible dans certaines conditions sans aides technologiques embarquées ou extérieures.

17. Transposer le vol du Moth sur un voilier hauturier ?

La réalité visible sur le Moth montre que depuis le tout début des années 2000 un voilier monocoque peut voler et surtout évoluer sans difficulté en régate.

Certes depuis plus de 60 ans, des monocoques volent temporairement avec plus ou moins de succès, mais ces vols concernent des essais, des tentatives de records, mais en aucun cas des navigations sous forme de régates qu'elles soient côtières, autour de trois bouées où encore hauturières.

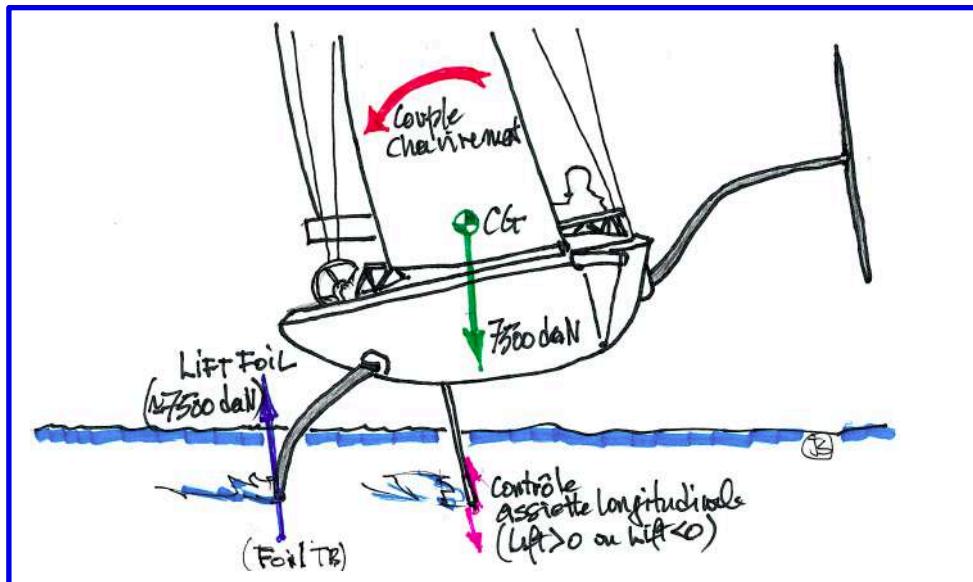
Image de synthèse extraite d'une vidéo publiée le 30/11/2017 par TEAM NEW ZEALAND, Défendeur à la 36^{ème} AMERICA CUP



En novembre 2017, un peu plus de 15 ans après le Moth, le projet de monocoques AC 75 comme support à la 36^{ème} AMERICA CUP apparait dans une présentation d'images de synthèse sans qu'aucun bateau réel de ce type existe.

La vidéo diffusée sur Internet par Team New Zealand surprend beaucoup. Certes on était habitué aux performances du Moth, mais de là à passer d'un dinghy de 3.35 m et 135 kg, barreur compris à un monocoque non lesté de 22m et 7000 kg de déplacement, intrigue.

Bien que seules des images de synthèse soient disponibles, elles permettent quand même d'extraire rapidement, en plus des caractéristiques de cette nouvelle classe AC75, énormément d'informations sur ce monotype à restrictions (Box Rule) choisi pour l'AMERICA CUP de 2021.



Longueur hors tout : 75' (22.86 m)

Longueur de coque : 68' (20.70 m)

Bau maxi : 5.30 m

Hauteur du mat : 26.5 m Voilure GV+Foc : 220 m²

Déplacement en régate : 7500 kg (6800 kg version 2024)

Équipage (à l'origine) 10 à 12 : Soit une moyenne de 850 kg à 1020 kg.

Les règles de classe publiées quatre mois après la présentation de novembre 2017, limiteront l'équipage à 8.

En plus de ces données techniques, la vidéo fait état d'une vitesse de 22 nœuds lorsque le bateau est sustenté sur son foil sous le vent. Les régates à venir montreront que cette estimation de la vitesse était globalement très pessimiste.

La reconstitution des plans de ce monocoque foiler intégral à partir des images vidéo permet d'affiner ses caractéristiques, sachant que certaines hypothèses devaient être fixées notamment sur les différents matériaux utilisés pour la construction.

Par exemple foils, sont-ils en carbone ou en acier, même question pour les bras ? Quels types de vérins, hydrauliques ou à vis. Quelle énergie, tout électrique, tout hydraulique, mixte ?

Quelles limites pour les asservissements liés au pilotage ?

Tout une série de questions sans réponse tant que la règle de monotypie n'est pas publiée, ce qui sera fait en Mars 2018. Toutefois il n'est pas interdit de réfléchir et d'imaginer.

Ce foiler reprend l'ensemble des analyses présentées dans les pages précédentes au sujet du Moth, à savoir : en vol l'AC 75 se trouve en équilibre sous 3 systèmes de forces.

Chaque force est un vecteur 3D, qui évolue durant la navigation en intensité et en direction. Seul le vecteur représentant la masse du bateau et de son équipage est toujours vertical et constant en intensité, ce qui n'est pas le cas pour le Moth.

Le bateau se déplace dans un environnement orthonormé, c'est-à-dire :

Oz : Direction longitudinale (le cap du bateau)

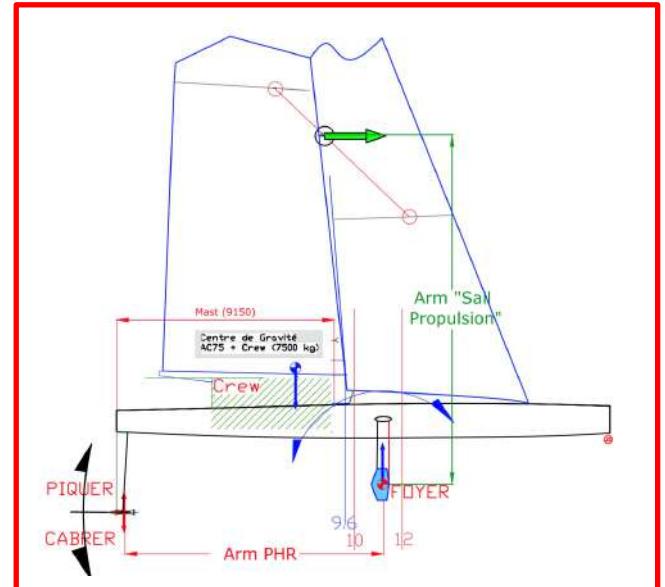
Oy : Direction verticale

Ox : Direction latérale (Dérive latérale).

Chacune des 3 forces possède donc trois composantes sur (Ox, Oy, Oz) :

Force Vélique : Elle est produite par la portance des 2 voiles, elle évolue en fonction du vent, de l'orientation de la voile, du type de voile et de la gîte.

- Composante sur Ox : la dérive, le bateau glisse généralement sous le vent.
- Composante sur Oy : elle se traduit par une poussée vers le bas (le bateau s'enfonce légèrement)
- Composante sur Oz : c'est la force qui assure la propulsion vers l'avant



Force produite par le Foil : Elle est générée par la portance du foil.

Elle dépend en théorie du :

- ✓ Réglage de l'angulation transversale de l'intérieur vers l'extérieur (Nommé « CANT »)
- ✓ Réglage de l'angulation d'avant en arrière (Nommé « RAKE »)
- ✓ Réglage d'orientation (axe vertical), (Nommé « YAW »).

Cette force est orientée vers le haut, sa composante verticale (parallèle et opposé au vecteur POIDS du bateau) se nomme habituellement LIFT.

En fait cette composante soulève le foiler et lui permet de quitter le mode Archimédien pour évoluer en mode VOL.

L'architecture du système de foils (bras pivotant et foil type « patin ») limite les possibilités de réglage en navigation. Ainsi seule l'incidence (RAKE) du foil reste modifiable et encore pas directement mais en jouant sur le cambrage du profil en utilisant un volet de bord de fuite.

L'intensité de cette force représente le facteur prépondérant d'un foiler.

Quand le foil décroche et tout l'édifice s'effondre.

Force verticale produite par le plan horizontal arrière : Ce plan horizontal est identique dans son principe à celui du Moth soit : un profil symétrique car sa portance doit pouvoir être alternée, c'est-à-dire dirigée vers le haut ou vers le bas. Cette portance ou déportance du PHR permet de réguler l'assiette horizontale du foiler.

La règle de jauge impose un « *centrage AR* », cela signifie que le centre de gravité du foiler équipage à bord, se situe en arrière de la poussée des foils avant (Foyer). Une fourchette dimensionnelle précise encadre la position de l'équipage par rapport au tableau AR.

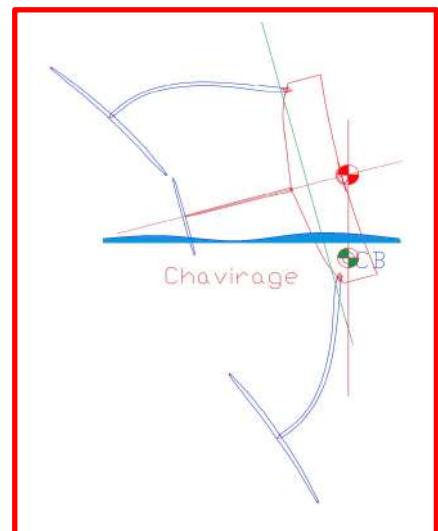
Dans ces conditions l'empennage arrière produit, selon son angle d'incidence un couple (+) ou un couple (-), soit « cabré » ou « piqué ».

La masse du bateau génère une force verticale appliquée à son centre de gravité CG. Dans une configuration définie, le CG reste pratiquement invariant en navigation

Mais aussi bien pour le Moth (ou le Persico 69 et d'autres) que pour l'AC75 (aujourd'hui complété par l'AC40), ces monocoques foilers évoluent dans un environnement de vol sensiblement identiques, c'est-à-dire : zone protégée, à la rigueur avec du clapot, un vent réel limité à 25/30 nœuds et sans lest extérieur (au mieux une dérive) et navigation diurne.

L'absence de lest extérieur leur confère une stabilité non conforme avec les critères de navigation côtière ou hauturière. Certains protos de la Classe MINI 650 tentent l'expérience du vol intégral sur foils mais en conservant le voile de quille et le bulbe. Lors des essais ces protos montrent un potentiel impressionnant (de l'ordre de 25, 28 nœuds) dès qu'ils naviguent au reaching.

Mais sur des courses offshore même très orientées sur des vents portants, qui sont la base de la Classe Mini 650, les résultats montrent que les appendices qui assurent la stabilité archimédienne (Voile de quille et bulbe) génèrent beaucoup de trainée et pénalisent ces foilers.



Les résultats ne mettent pas en évidences de réelles supériorités en course par rapport aux protos archimédiens naviguant au planning.

Les tentatives d'intégrer des appendices sustentateurs (dérives inclinées puis courbes) sur les multicoques océaniques apparaissent dès les années 80, ces appendices peuvent être éventuellement escamotables, mais restent toutefois non pilotables au niveau du calage de l'incidence. Aucun système de stabilisation de l'assiette longitudinale existe. L'objectif n'est pas de voler.

Les architectes cherchent surtout à soulager partiellement les carènes pour réduire la trainée et à augmenter le couple de redressement afin de gagner de la puissance.

Ces évolutions apparaissent surtout sur la flotte des multicoques ORMA de 60 pieds de long.

Le développement progressif du composite carbone / époxy et de sa mise en œuvre en remplacement de la fibre de verre / polyester contribue à diminuer énormément les échantillonnages des structures et les bordés, donc le poids de plateforme.

18. D'abord les multicoques

Dès 1998, la Classe ORMA limite la force de cette sustentation en encadrant la surface projetée des dérives implantées dans les flotteurs.

Cette décision permet de contenir les excès et surtout évite que lorsque le flotteur sous vent s'extract trop de l'eau l'assiette longitudinale (Trim) de la plateforme devient totalement incontrôlable, ce qui augmente les risques inhérents de chavirage. En effet, personne n'aborde réellement le contrôle de l'assiette longitudinale et la conservation de l'altitude de vol.

Toutes ces tentatives, ces recherches afin d'améliorer les performances des bateaux, qu'ils soient monocoques où multicoques amènent à repenser le contexte de la notion de vol, comme ce fut le cas en son temps pour l'aviation.

Voler pour un foiler signifie exécuter sur un parcours imposé, les manœuvres usuelles d'un voilier archimédien, mais en se déplaçant en sustentation au-dessus de l'eau, à une altitude relativement constante et une assiette proche du plan horizontal. Les retours au mode archimédien devant être le plus rare possible.

Il faut attendre 2017 pour qu'un team (Gitana) présente une plateforme d'un trimaran océanique réellement conçue pour le vol intégral.

Tout n'est évidemment pas entièrement mis au point pour la course au large, mais les bases d'appuis et de contrôles indispensables sont bien définies et implantées.

Toutes ces plateformes que se soient celles des AC72 initiées en 2013 ou celles ULTIMS se calquent sur les grandes idées finalisées sur le Moth.

Les multicoques (AC 72, CLASS C, ULTIMS¹⁰ par exemple) bénéficient de la stabilité apportée par la largeur de leurs plateformes, ce qui les rend beaucoup moins sensibles à la gîte et surtout produit un couple de redressement utilisable en vol mais aussi en régime archimédien.

CATÉGORIE Maxi-multicoque volant			
LONGUEUR 32 m	LARGEUR 23 m	POIDS 15,5 t	
TIRANT D'AIR 37,4 m	AU PRÈS 450 m ²	AU PORTANT 650 m ²	
APPENDICES	2 safrans de flotteurs en T 2 foils en L 1 dérive coque centrale 1 safran de coque centrale en T		
ÉNERGIE	Moteur diesel avec génératrice Éoliennes		



Sur les catamarans l'ensemble foil (en « L » intérieur) et PHR actif se situe toujours dans le flotteur sous le vent.

Pour les trimarans hauturiers la sustentation de la plateforme s'appuie sur le foil sous le vent (aussi en « L » intérieur) qui en assure 75% et le foil implanté en extrémité de la dérive centrale (25%) nommé « Aile de raie¹¹ ».



¹⁰ Multicoque ULTIM 32/23 : LHT 32m / Largeur 23m / Tirant d 'air 35m / Volume flotteur 220% du poids du bateau.

¹¹ La répartition des portances Foil / Aile de Raie est de cet ordre.

L'aile de raie dont le profil est asymétrique (type NACA 64-412¹²) produit une partie de la sustentation de la coque centrale. La ligne entre le centre de portance du foil (actif) en « L » et celui de l'aile de raie est sensiblement transversale (la Dérive se trouve en arrière d'environ 1.5m des foils), cette ligne représente la charnière dans l'équilibre (piquer/cabrer) lorsque le trimaran vole.



Pour obtenir une plateforme horizontale longitudinalement, l'équilibre entre le couple vélique (Force aérodynamique X distance entre le Centre de Voilure et la charnière) et celui produit par le poids du bateau (Déplacement du bateau X distance horizontale à la charnière) est nécessaire.

On explicitera plus loin une configuration identique pour les foilers monocoques océaniques.

Toutefois dans certaines conditions de navigations, la portance de l'aile de raie peut augmenter la gîte de la plateforme, cette rotation génère une diminution de la portance du foil en L et une élévation de la coque centrale.

Afin de rétablir l'assiette optimale, proche de 0°, l'incidence de l'aile de raie est alors inversée (déportance).

¹² 64-412 correspond à une identification NACA (National Advisory Committee for Aeronautics), les deux derniers chiffres expriment l'épaisseur en %. Le 64-412 est cambré, le 64-1é est symétrique. Ce type de profil est souvent utilisé pour les foils dont les planches IQ.

Cette opération descend l'altitude de la coque centrale autour du foil sous le vent, redresse la plateforme et soulage ce foil. Sur un foiler, voler avec une plateforme proche du plan horizontal, améliore la vitesse.

Le PHR actif implanté dans le foil sous le vent est escamotable. En navigation il est associé à celui situé en extrémité du safran central. Ces deux surfaces sustentatrices jouent de rôle de stabilisateur d'assiette longitudinale.

Les PHR utilisent des profils symétriques que l'on rend porteur ou déporteur en jouant sur l'angle du volet de bord de fuite (>0 ou <0) ce qui crée sur la plateforme une action à piquer, l'arrière du trimaran se soulève où une action à cabrer, l'arrière descend. Les performances du PHR situé dans le flotteur sont meilleures que celles de son homologue dans la coque centrale, car il plus immergé.

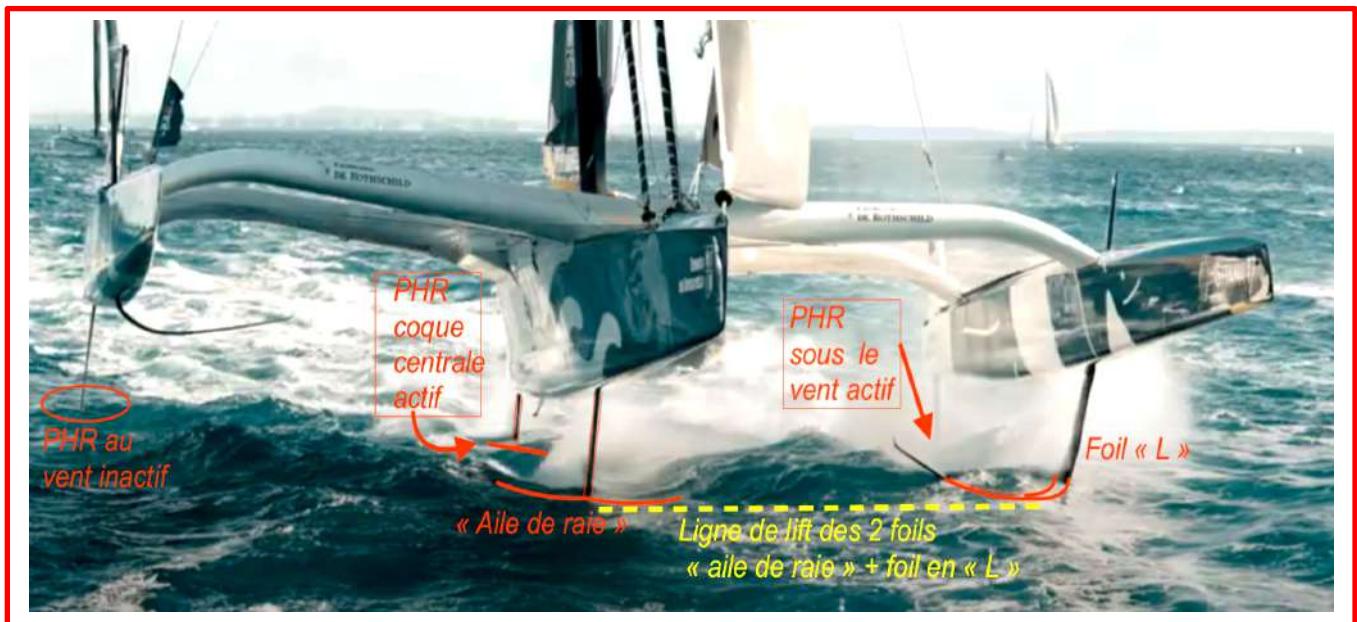
Globalement les plateformes des multicoques, permettent d'éloigner géométriquement les surfaces sustentatrices de celles affectées aux contrôles de l'assiette de vol. La stabilité initiale d'une plateforme de multicoque, avec un net avantage au trimaran, autorise une maniabilité en vol très largement supérieure à celles des monocoques.

On comprend facilement qu'un monocoque en vol souffrira de la particularité de sa plateforme. En effet celle-ci se trouvant très réduite en largeur, deux architectures d'implantations des surfaces sustentatrices s'imposent. Soit un double foil symétrique central identique au Moth, soit un foil dont la partie active est largement déportée sous le vent.



PHR et son safran, implantés dans le flotteur (en position relevée)

Équilibre en navigation sur un trimaran océanique.



Mais comme un monocoque hauturier ou côtier navigue aussi en mode archimédien et ainsi doit répondre à des critères de stabilité et de performances (contrer l'effet dérive), un voile de quille et souvent un bulbe deviennent nécessaires. La trainée du bulbe (qui reste toujours immergé) existe dans les deux modes, archimédien et vol.

Le banc d'essai de 26000 milles, qu'a représenté le tour de monde en solo à bord d'ULTIMS (l'ARKEA ULTIM 2024), permet aux équipes d'appréhender la résilience des appendices, leurs résistances aux effets de la cavitation et de comparer les résultats issus des simulations numériques sur les profils, les envergures (aspect ratio), les proportions des volets, les géométries spatiales des appendices et ceux enregistrés (quelques millions) en navigation.

Les analyses de cette base de données réelles permettent de calibrer les algorithmes gérant les asservissements qui commandent les réglages des appendices. Cette calibration basée sur des données réelles est indispensable pour voler dès qu'un pilote automatique est enclenché.

Cela intéresse particulièrement les asservissements complexes du type boucle fermée (PID : pour Proportionnelle / Intégrale / Dérivée, au sens mathématique des termes).

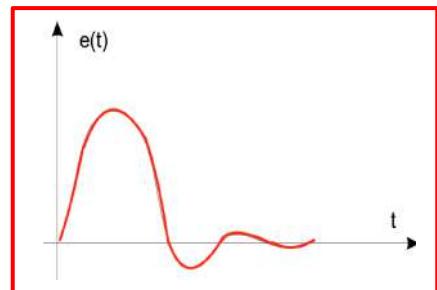
Ce système d'asservissement en boucle fermé se base sur la comparaison en temps réel entre une consigne à respecter, par exemple une hauteur de vol où un angle d'incidence d'un foil et la mesure effective réelle à l'instant « t ».

Le résultat de la comparaison entre le réel et les paramètres du plan de vol alimente un algorithme qui commande les organes physiques en action pour la stabilité du vol.

Ce sera le Plan Horizontal Régulateur (PHR), où les volets des foils, où de « l'aile de raie », ou encore directement l'incidence des foils... Voir la trajectoire ?

Ce type de régulation nommé « **Boucle fermée** » utilise les éléments suivants :

- Une consigne d'entrée
- Un process à réguler
- Un capteur pour détecter la valeur instantanée du process
- Un algorithme régulateur qui gère le contrôle : le « **PID** ».
- Une sortie vers un actionneur ou un dispositif afin de faire converger l'état du système vers la consigne d'entrée du process.



L'autre méthode d'asservissement utilise le principe d'une régulation en « **Boucle ouverte** ». Le point de départ est l'objectif d'état du système souhaité par le barreur. Pour atteindre cet objectif, le barreur donne des consignes afin que des algorithmes traitent et pilotent des actionneurs dans le but de modifier cet état d'origine. Mais au lieu d'avoir un système automatique qui compare la réalité à l'objectif à atteindre, on fait confiance au barreur pour réaliser cette évolution. Par contre dans ce type d'asservissement à boucle ouverte, il n'est pas obligatoire que les consignes données par le barreur permettent de réaliser l'objectif souhaité.

En effet, un aléa technique interne où générée par l'environnement extérieur peut échapper (ou perturber) à l'algorithme de traitement.



Dans ce cas la stabilité de vol risque d'échapper au pilote, car il est possible qu'il ne puisse pas identifier le paramètre indésirable et donc revenir à une situation stable de vol. C'est apparemment ce qui est arrivé aux AC75 « American Magic » et « Prada ».

Dans cette séquence d'une dizaine de secondes (vitesse du foiler 15 à 18 m/s), le pilote perd totalement le contrôle du foiler, qui se cabre alors à plus de 20°, étrave à 8 m de l'eau, pour retomber en endommageant la coque au point de pratiquement couler (« American Magic »).



Lors de cette édition, les règles de classe encadraient et limitaient les asservissements à des systèmes en boucle ouverte afin de mettre en valeur le pilotage et donc l'équipage.

Cet incident particulièrement spectaculaire s'est limité à « casser du bois¹³ », mais aurait pu être beaucoup plus grave.

Lors de la 37^{ème} Cup qui s'est déroulée en 2024 à Barcelone, les règles de classe autorisaient une introduction du contrôle de certains asservissements par des boucles fermées. Cela n'a pas éliminé des chavirages « mât dans l'eau », mais on n'a quasiment plus observé des pertes de contrôle se terminant par des « doubles axel incontrôlés ».

19. Les foils : le meilleur (la vitesse) mais aussi le pire (la perte de contrôle)

Que ce soit une voile (écoulement aérodynamique laminaire) ou un appendice immergé (écoulement hydrodynamique), les lois relatives à l'évolution de ces surfaces sustentatrices sont identiques. Toutefois, le fluide circulant autour de l'extrados et de l'intrados change dans un rapport 800, puisque la masse volumique de l'air est de 1.295 kg/m³ et celle de l'eau de mer 1025 kg/m³.

¹³ Expression utilisée au début de l'aviation lors d'atterrissements quelque peu en dehors de règles de l'art du pilotage.

Bien que les vitesses d'écoulement des deux fluides, air et eau, soient sensiblement identiques, entre 10 et 40 nœuds, il faut se garder d'une conclusion trop hâtive à cause de leurs différences de densités et aussi du fait que l'air est compressible contrairement à l'eau.

Deux phénomènes physiques existent, la cavitation et la ventilation des appendices.

La cavitation se traduit par une perte de portance de l'extrados de la surface sustentatrice (foil par exemple).

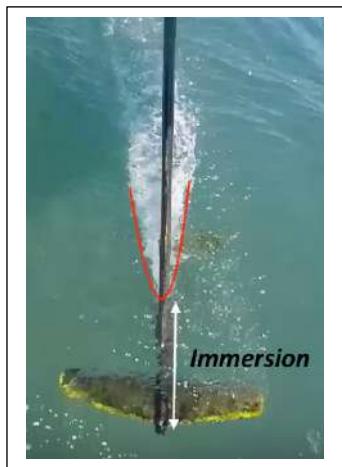
La ventilation résulte de problèmes d'écoulement sur des appendices partiellement immergés.

Tout d'abord la ventilation :

Tous les appendices, qu'ils soient safran, dérive, foil sont sujet, lorsqu'ils sont en mouvement au phénomène hydrodynamique de ventilation.

Ce phénomène prend naissance à l'interface entre les deux fluides, air et eau.

Le déplacement de l'appendice (vitesse du bateau archimédien ou du foiler) génère à l'interface air/eau, un creusement de la surface de l'eau et une aspiration de l'air le long de l'appendice, ce qui annihile immédiatement sa portance.



Même dans le cas d'un appendice à profil symétrique, il n'y a toujours un extrados et un intrados par rapport à la direction du fluide (angle de barre pour un safran ou lacet d'un foil). La dépression hydrodynamique aspire l'air vers la surface de l'extrados.

On voit très bien le creusement local de la surface de l'eau. L'air de se propage alors le long de l'appendice et détruit pratiquement instantanément sa portance.

Cet effet peut se produire sans qu'il existe au préalable un phénomène de cavitation sur l'extrados de l'appendice. On dit communément, par exemple, que le safran décroche.

Conséquence : sur safran équipé d'un PHR en extrémité, l'air en se propageant instantanément le long de l'extrados du profil détruit la portance de l'extrados du PHR lorsqu'il arrive sur le « T » du PHR.

Sur les trois photos ci-dessus, lorsque le phénomène de ventilation débute, l'extrados de PHR évolue encore dans un régime hydrodynamique non perturbé.

Lorsque la ventilation atteint la jonction entre les deux appendices ils perdent instantanément leurs fonctions hydrodynamiques :

- Contrôle de la direction : appendice vertical (safran)
- Portance positive ou Déportance négative : PHR.

Paradoxalement dans le déclenchement du phénomène de ventilation l'élément vitesse n'est pas primordial comme cela se passe pour la cavitation.

Quelles solutions ?

La solution la plus retenue consiste à empêcher que la cavité gazeuse (air et eau) qui se crée à la surface soit aspirée.

Les aérodynamiciens puis les hydrodynamiciens ont résolu cette difficulté en installant des barrières perpendiculaires au profil afin de dévier le déplacement de la cavité gazeuse.



Ce sont les « **fences** » que l'on voit assez souvent sur les ailes des avions.

Certes cela ne résout pas toutes les conditions d'immersions ou les présences de vagues subites, mais c'est une approche intéressante pour améliorer l'écoulement.

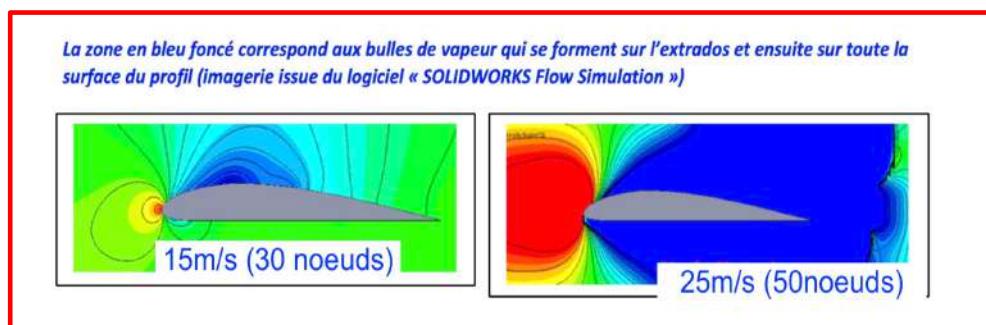
La tendance actuelle des hydrodynamiciens consiste à protéger le **PHR**, le **foil en T**, ou encore **l'aile de raie**, en décalant cette surface sustentatrice par rapport au safran où au bras qui le porte, afin que la trajectoire de la cavité gazeuse qui produit la ventilation ne se diffuse pas sur l'extrados du **PHR**, du **foil en T**, ou encore de **l'aile de raie** mais se disperse dans le sillage. Par contre cette disposition augmente la complexité structurelle (conception et sollicitations mécaniques) de la pièce de raccordement entre le safran et le PHR.

Une autre solution consiste à épaisser le profil de la partie pénétrante au niveau de l'interface air / eau. Cette option augmente très localement la trainée.

Ensuite la cavitation :

La vitesse d'écoulement du fluide autour du foil représente un des facteurs dans le phénomène de cavitation. D'autres existent comme l'état de surface ou la forme du profil ou encore un aspect ratio inadapté à l'appendice.

Le potentiel de vitesse maximale accessible à tous les foilers équipés de profils de foil « subsonique » est sensiblement identique.



Il faut entendre par « **profils des séries classiques** » des profils autour de 12% d'épaisseur et de faible cambrure. Ces profils correspondent à des potentiels de vitesse optimales possibles jusqu'à 40 noeuds¹⁴ pour un foiler, à condition, bien entendu, de disposer de la puissance nécessaire.

On constate qu'à partir d'une certaine vitesse le foiler se trouve devant un mur infranchissable car l'extrados commence à caviter puis décroche (portance nulle).

L'instant « t » où l'extrados décroche radicalement (surface en dépression) et que l'intrados suit, ne dépend pas exclusivement de la vitesse, mais aussi du moment où la pression locale existant sur la surface de l'extrados atteint le niveau de la pression de vapeur saturante P_v .

¹⁴ Ces mêmes types de profil permettent de voler à 850/ 900 km/h sur un avion de ligne équipé de réacteurs.

Le phénomène cavitation est identique 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 il s'agit de faire varier la température à pression constante et pour la cavitation il s'agit de faire varier la pression à température constante.

A ce moment-là, l'eau 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 sur l'extrados, l'écoulement de l'eau est détaché de l'extrados ce qui entraîne la perte de portance du foil et en plus l'érosion de sa surface.

La cavitation dépend essentiellement de la pression absolue au niveau du foil et de la température de l'eau.

La pression absolue est la somme de la **pression hydrostatique (hauteur de la colonne d'eau plus pression atmosphérique)** et de la pression/dépression causée par l'écoulement de l'eau sur le foil par exemple, ou sur une aspérité en n'importe quel point de sa surface.

Température °C	Pression Vapeur (Pa)
20°	2300
22°	2800
25°	3200
28°	3800
100°	101300

Lorsqu'à la température de l'environnement, la **pression absolue** est inférieure à **la pression de vapeur saturante P_v** , l'eau passe alors en phase vapeur¹⁵. La valeur de la pression de vapeur saturante n'est pas une valeur universelle, elle varie notamment en fonction de la température.

Pour un foil qui évolue dans une zone où l'eau est à une température pratiquement constante, **la cavitation se limitera à la variation de pression**.

Quelques chiffres pour rendre plus tangible le risque de cavitation :

- Température 28°C : $P_v = 3800 \text{ Pa (Pascal)}$
- Immersion : $h = 1\text{m}$ Densité de l'eau : $d = 1020 \text{ kg/m}^3$
- Pression atmosphérique $P_{atmo} = 101300 \text{ Pa}$

¹⁵ Cette partie est écrite en collaboration avec Robert Lainé. Un corps reste liquide si la pression exercée sur lui est suffisante. Si on remplit d'eau (par exemple) à moitié un récipient dans lequel on fait le vide, une partie du liquide s'évapore instantanément.

Mais toute l'eau ne s'évaporera pas. L'évaporation s'arrêtera toute seule lorsque le point de vapeur saturante sera atteint. A ce point, la pression exercée sur le liquide par le liquide évaporé est trop forte pour que l'évaporation continue.

Le foil est à 1m sous la surface, la pression hydrostatique totale est :

$$P_{\text{hydro}} = P_{\text{atmo}} (101300 \text{ Pa}) + (10006 \text{ Pa}) = 111306 \text{ Pa}$$

La valeur additionnelle (10006 Pa) représente la pression de la colonne d'eau, soit le produit de sa hauteur(m) X densité (kg / m³) X accélération de la pesanteur g.

Application

- Vitesse du foiler : V = 20 m/s (38,87 nœuds)
- Coefficient de (dé)pression local maximum Cp = -1
- Pression dynamique max : $P_{\text{dyn}} = 1/2 * d * V^2 * Cp = -204000 \text{ Pa}$
- Pression totale = $P_{\text{hydro}} + P_{\text{dyn}} = 111110 - 204000 = -92694 \text{ Pa !}$

Dans ces conditions la pression locale se trouve largement inférieure à la pression de vapeur saturante à 28°C (3800 Pa, voir le tableau ci-dessus).

Conséquence, la cavitation est certaine !

Afin de diminuer le risque de cavitation sur un foil classique évoluant à haute vitesse il faut réduire l'angle d'incidence et utiliser un profil de foil adapté, c'est-à-dire moins épais.

Si à la suite d'une fausse manœuvre de pilotage à grande vitesse, l'angle d'incidence devient trop important, même pour un court moment, la cavitation s'amorcera et la portance chutera brutalement quasiment instantanément, ce qui provoquera une composante à piquer du nez le bateau.

Voyant le nez du bateau piquer vers le bas, le réflexe naturel du barreur consistera à augmenter l'incidence du foil afin de regagner de la portance.

Réflexe logique puisque le Cz croit théoriquement avec l'angle d'incidence. Toutefois ce n'est pas la bonne réaction, car cette augmentation de l'angle d'incidence accroît de fait la cavitation... et alors le bateau plonge carrément.

Ce qui signifie qu'il est très difficile de naviguer en permanence autour de cette vitesse critique (sorte de « ligne rouge ») dont on connaît uniquement l'ordre de grandeur (38-40-42-45 nœuds) et qui dépend étroitement de la hauteur de vol (Pression de la colonne d'eau). L'amplitude des variations de l'immersion du foil (dont les vagues), par rapport à l'altitude de vol ne permet pas d'asservir la pression hydrodynamique (P_{hydro}) en temps réel avec suffisamment de précisions pour commander notamment l'incidence du foil et du PHR.

L'autre effet connexe néfaste de la cavitation se situe dans l'altération de la rugosité des surfaces du foil (effet de sablage de la surface, qu'elle soit métallique ou en composite). Cette augmentation de la rugosité provoque une chute (« aérodynamique ») irrémédiable des performances de l'appendice.

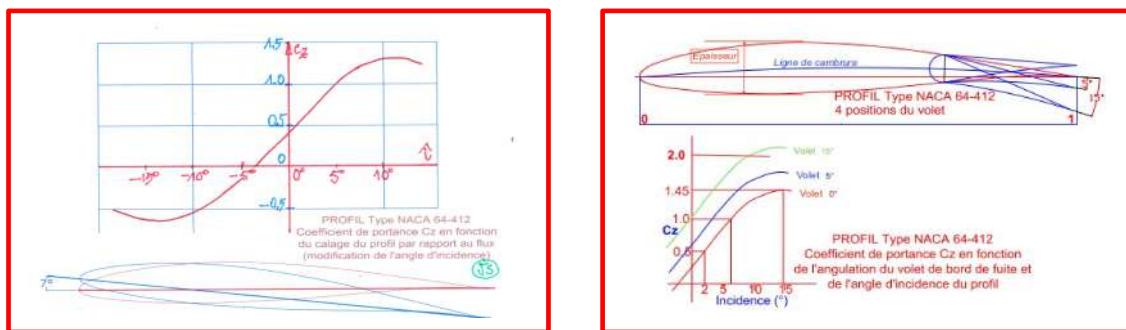
Certes l'aptitude à voler des hautes vitesses rapidement accessibles. Les difficultés apparaissent lorsque l'on souhaite trouver un vol stabilisé à une vitesse maximale qui ne provoque pas de phénomène de cavitation.

L'ingénieur chargé du vol doit alors faire des compromis dans le choix du profil des foils, car avant de voler, il faut décoller à une vitesse très inférieure.

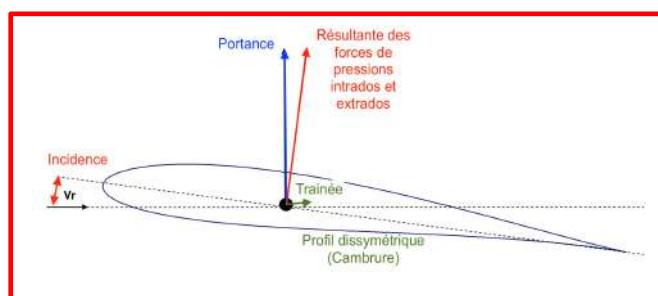
La vitesse de décollage et la transition très rapide vers la vitesse maximale possible dépendent évidemment de la puissance disponible mais surtout du coefficient de portance C_z du profil du foil. Le C_z dépend de l'épaisseur relative et du cambrage du profil.

Un profil épais et un cambrage important autorise une vitesse de décollage moins élevée, mais génèrent une trainée importante qui limite alors le potentiel de vitesse que l'on doit compenser par l'augmentation de la surface du foil.

L'expérience montre qu'un profil de l'ordre de 12% d'épaisseur associé à un faible cambrage paraît être le meilleurs compromis.



Augmentation du C_z en fonction de l'incidence ou du volet de bord de fuite



$$F_z (\text{Force en « rouge »}) = \frac{1}{2} * \rho * V^2 * S * C_z$$

On module la portance en jouant sur le C_z avec deux techniques (voir ci-dessus).

Soit on modifie directement l'angle d'incidence (le « Rake ») en pivotant le profil (donc le foil), soit on oriente un volet de bord de fuite afin d'augmenter la cambrure du profil.

Le système du volet sur le bord de fuite demande moins d'énergie, mais exige une cinématique plus complexe. A contrario, modifier directement l'incidence impose des efforts importants avec un vérin hydraulique sous forte pression.

Le potentiel de vitesse dépend donc essentiellement de la forme du profil et de son calage géométrique, ce qui ne surprend pas. Sur un voilier, nous appliquons ce principe en modifiant en permanence les formes 3D des voiles afin de les adapter à l'incidence et à la vitesse du vent apparent.

La différence dans le cas d'un foiler, se trouve dans le fait que le foil représente la partie hydrodynamique du « bateau » et que ce sont les performances de cette partie que l'on modifie (calage 3D) et non le moteur que représente les voiles.

L'autre point important se situe dans la fourchette de variations de vitesse obtenu. En effet dès que le foiler se trouve en vol stabilisé à sa vitesse optimale, c'est-à-dire quand la portance équilibre le poids du foiler, cet accroissement de vitesse permet de réduire l'incidence du foil et donc sa trainée. Par diminution successive de l'angle d'incidence, on obtient une trainée minimale et une vitesse cible que l'on cale juste avant le déclenchement du phénomène de cavitation. Le sifflement et les vibrations du foil sont d'excellents signes annonciateurs d'un début de cavitation.

20. Le « MUR » des 40 nœuds

Les phénomènes inévitables de cavitation et de ventilation affectant les surfaces sustentatrices dessinées à partir de profils dits « subsoniques », conduisent les foiler à buter sur un « MUR (40 nœuds) ».

En navigation cela se traduit par :

- Une chute de la portance
- Une forte érosion de la surface du foil (perte de matière)
- Des effets sonores pouvant atteindre 110 dB
- Un régime de vibrations très élevé.

La chute de la portance¹⁶ issue de la cavitation, c'est-à-dire le décrochage du foil, peut n'affecter au début du phénomène que très partiellement l'extrados du foil, mais généralement elle se propage instantanément et devient totale.

Sur un foiler la situation est irrécupérable. La détection du début de cavitation au moyen d'un capteur reste aléatoire car le temps de réponse du

¹⁶ La perte de portance peut aussi provenir d'un angle d'incidence du profil trop important, cette situation est détectable avec une sonde d'incidence.

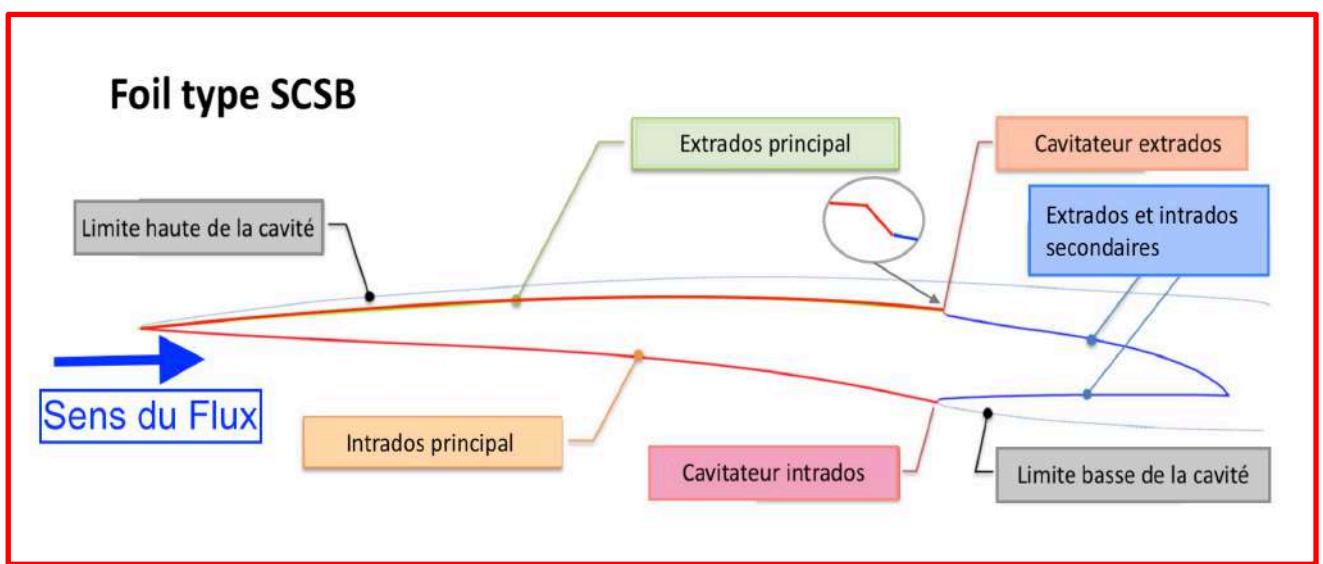
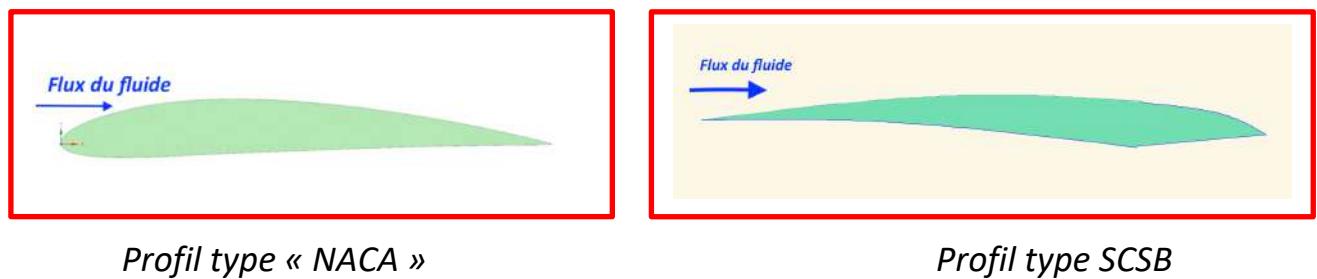
barreur ou du PA est très faible à cause de la vitesse de propagation de la bulle de vapeur.

Tant que le foiler reste en dedans du seuil de vitesse correspondant à ces phénomènes extérieurs perceptibles, il n'y a pas trop de risques de cavitation. Cependant le risque d'érosion, notamment de la surface l'extrados, s'amplifie si on navigue en permanence au plus près de cette zone de vitesse. En définitive voler au maximum du potentiel de vitesse apparaît hasardeux aussi bien au niveau du matériel que pour la stabilité du vol.

21. Pourrait-on dépasser ce « MUR » ?

Pour envisager passer au-delà de cette vitesse limite (donc franchir ce « MUR »), il faut utiliser des profils nommés super-cavitants ou des profils tronqués au point d'épaisseur maximal et ayant une entrée d'air à la troncature (profils dit « base ventilated »). Une troncature consiste à remplacer physiquement un angle une arête par une facette.

Les profils dits « super-cavitants » se distinguent fondamentalement des profils NACA traditionnel, par leurs formes très peu « conventionnelles » et surtout par leur mode de fonctionnement hydrodynamique.



Lors d'une communication faite au « *Fourth International Symposium on Marine, Austin, Texas, USA, June 2015* » sur le thème :
“*A New Family of Dual-Mode Super-Cavitating Hydrofoils Innovative Ship design lab, i-Ship, Department of Mechanical Engineering Massachusetts Institute of Technology (MIT)*”.

L'intervenant Stephano BRIZZOLARA, explique :

« *Cette nouvelle famille d'hydrofoils (foils) est capable d'atteindre des vitesses optimales (100 nœuds !!) aussi bien dans les régimes de super-cavitation que dans les régimes de cavitation entièrement mouillés ou de cavitation de base, contrairement aux foils conventionnels qui génère une traînée importante dans les régimes sans cavitation.* »

La difficulté n'est donc pas de fabriquer ce type de foil, mais d'atteindre la vitesse où ils deviennent opérationnels, car apparemment leur défaut principal porte sur un manque important de portance à faible vitesse. L'idéal paraît être de démarrer sur un profil conventionnel (NACA classique ou similaire) et ensuite de passer sur **un profil super cavitant SCSB...** plus facile à dire qu'à réaliser...

Décoller avec des profils SCSB nécessite de posséder la puissance de propulsion (postcombustion : 33% de plus sur un Rafale durant une dizaine de secondes). Cependant si la postcombustion se conçoit avec un réacteur, elle reste du domaine du rêve pour une propulsion vérique.

22. Les baleines à bosses donnent des idées aux architectes

Ces mammifères marins de 13 à 15mètres de long et pèsent 25 tonnes environ sont équipés de nageoires latérales qui rappellent les foils des IMOCA ou les DSS bien qu'elles soient utilisées en partie pour la propulsion.

Ces nageoires présentent plusieurs caractéristiques surprenantes, d'abord elles possèdent un allongement très important de l'ordre de 6 (Aspect Ratio = Envergure² / surface), ensuite si le bord de fuite de ces nageoires (foils ?) représente une courbe bien lissée, à contrario le bord d'attaque est une sorte de courbe sinusoïdale surprenante.



Par contre le profil transversal se calque pratiquement sur un profil NACA asymétrique de la série des 12% d'épaisseur.

Cette particularité du bord d'attaque « ondulé », contraire aux résultats obtenus lors de centaines de tests en bassin, conduit¹⁷ plusieurs équipes de scientifiques à rechercher l'efficacité de ces protubérances présentes sur bord d'attaque de ces nageoires.

Ces formes assurent-elles un contrôle passif de l'écoulement dans le but de réduire la cavitation et/ou réduire le bruit induit par l'écoulement de l'eau autour de la nageoire ?

Les expériences sont menées sur quatre foils de la série NACA 0012 à des angles incidence de 7° et des vitesses d'écoulement allant jusqu'à 10 m/s. L'un des quatre modèles est un profil « normal » identifié comme la référence, tandis que les trois modèles étudiés présentent des formes du bord d'attaque ondulé avec différentes amplitudes de protubérances sinusoïdales, ce qui modifie localement les cordes de profils (entre 2 à 4%).

Les résultats des écoulements montrent que la cavitation apparaît d'abord dans les creux des surfaces modifiées et se limite juste derrière les creux des protubérances. Ces résultats contrastent avec ce que l'on voit sur le modèle de base, où la cavitation commence sur la ligne du bord d'attaque et s'étend dans le sens de l'envergure.

Il apparaît que dans certaines conditions d'incidence et de vitesses du fluide, les protubérances réduisent la cavitation de 25 à 60 %.

L'analyse acoustique démontre aussi que les protubérances du bord d'attaque réduisent efficacement le bruit induit par l'écoulement sur l'intrados et l'extrados notamment avec des vitesses d'écoulement élevées.

De-là à inspirer les architectes navals, il n'y a qu'un pas. Déjà 1994, Gilles Ollier (fondateur de Multiplast) modifie la quille du premier Figaro (Plan Berret/Finot) dans le même style que le safran équipant le SWAN 50, ce qui tord quand même le cou à la jauge monotype du Figaro et assure la polémique pour le déroulement de la Solitaire au départ de Brest.

¹⁷ Experimental investigation on cavitation and induced noise of two-dimensional hydrofoils with leading-edge protuberances (November 2022). *Physics of Fluids* 34(12) DOI : [10.1063/5.0127170](https://doi.org/10.1063/5.0127170)

Le résultat ne sera pas probant, mais la navigation durant la Solitaire ne rassemble pas l'environnement de réflexion, de rigueur, d'analyse nécessaire pour conduire des travaux scientifiques et analyser des gains de performances éventuels.

Tous les concepteurs essayent d'améliorer les performances des profils mais surtout tentent de contrecarrer les risques de ruine hydrodynamique d'un foil par les phénomènes de ventilation ou de cavitation.



La modélisation numérique n'est pas d'un grand secours, tout comme les essais dans des tunnels hydrauliques (identique aux souffleries), car les mouvements dynamiques de l'ensemble bras/foils est pratiquement impossible à recréer en laboratoire.



23. Les ULTIMS évoluent « Sodebo 2024 »

Après l'ARKEA ULTIM 2024 (janvier/février 2024) les trimarans de la classe ULTIM ont fait l'objet, à la fois d'une opération complète de maintenance mais aussi de nouvelles évolutions déduites de l'expérience acquise durant ce parcours de 26000 milles.

La géométrie des foils latéraux, dont un seul est actif en navigation, s'oriente vers une surface active alaire majoritairement linéaire, ce qui optimise la portance fournie par le foil. Le profil de ces deux foils est peu épais, asymétrique et possède une cambrure faible. Ce choix relève des conditions générales de navigation rencontrées par ces trimarans ULTIM en parcours de courses offshore avec des vents portants.

CLASS ULTIM

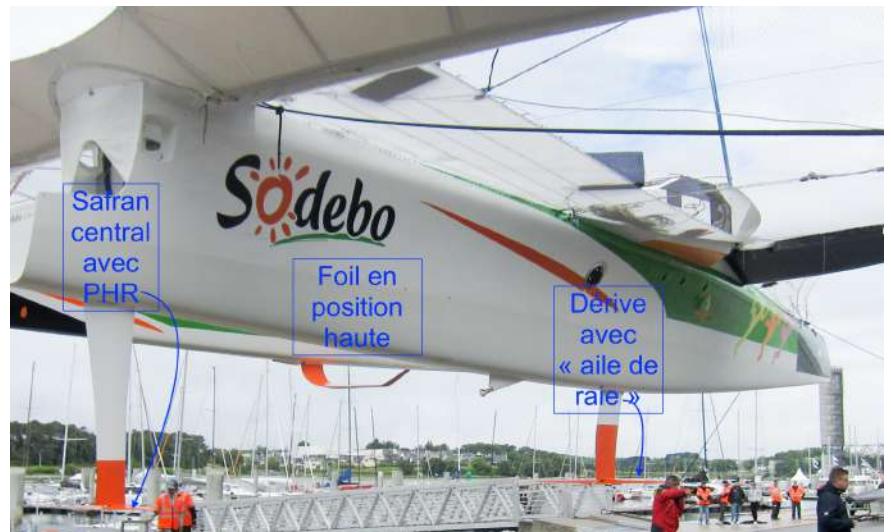
LHT 32 m Bau 23m
DSPL 15 tonnes (environ)
Tirant d'air 37m

Voilure au près 450 m²
Voilure Portant 650 m²

Ratio (S^{0.5}/DSPL^{0.33}) :

Au près : 0.860

Au portant : 1.034



On recherche alors des profils générant moins de trainée (faible épaisseur et moins de cambrure). La plus faible portance unitaire de ce type de profils est compensée par le gain de vitesse acquis (la vitesse agit au « carré » dans le calcul de la portance).

Le contrôle de l'incidence du foil est réalisé en agissant sur la rotation complète du foil et de son puits (axe perpendiculaire au plan de symétrie de la plateforme). Il est certain que l'utilisation d'un volet de bord de fuite pour ajuster en continu la portance, comme cela est réalisé sur le AC75 représente la meilleure solution « aérodynamique » mais cette solution génère une complexité mécanique créée par la forme en « L » du foil.



Les concepteurs préfèrent utiliser un vérin hydraulique intégré sous le pont de chaque flotteur, certes cela représente du poids et la nécessité de travailler avec une pression élevée (environ 250 à 300 bars), mais le système est fiable et aussi plus résilient en cas de chocs mineurs avec des obstacles flottants.

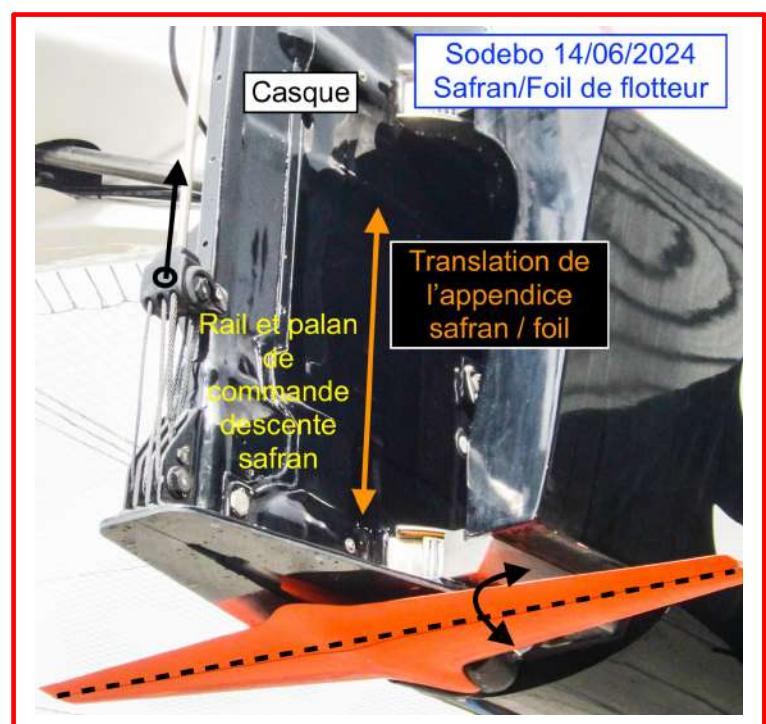
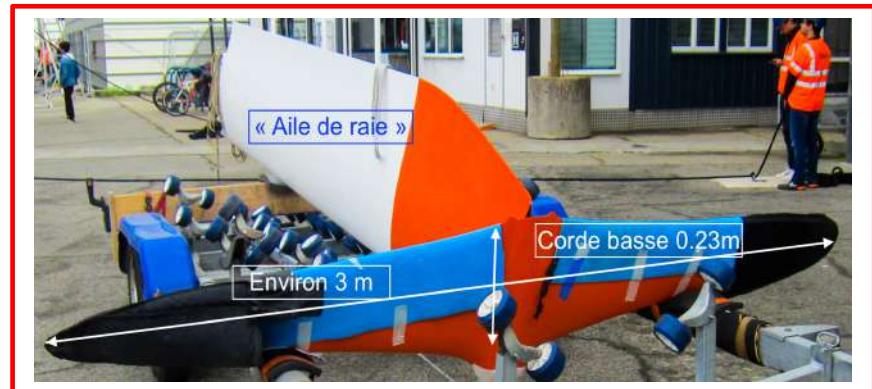
L'aile de raie implantée en extrémité de la dérive centrale possède un statut particulier. D'abord elle est dessinée avec un profil symétrique, ensuite elle possède un volet de bord de fuite qui permet de lui conférer deux fonctions :

- ⇒ Lorsque le bord de fuite du volet est orienté vers bas, l'aile de raie sustente la coque centrale.
- ⇒ Cependant si le volet est orienté vers haut, la portance s'inverse (déportance) et l'aile de raie descend la coque centrale.

Cette gestion de l'aile de raie peut paraître anachronique, en fait, cette fonction déportance permet d'encadrer l'assiette transversale de la plateforme autour de 5 à 10°, notamment en cas de surventes et aussi d'améliorer le contrôle de l'altitude et de l'incidence de vol.

En navigation (vol) le safran sous le vent et le safran central assure le contrôle du lacet (trajectoire). Par contre chaque safran de flotteur est escamotable.

Chaque safran et son PHR implanté dans le flotteur coulisse verticalement dans un casque qui ne possède qu'un mouvement de rotation (axe vertical).

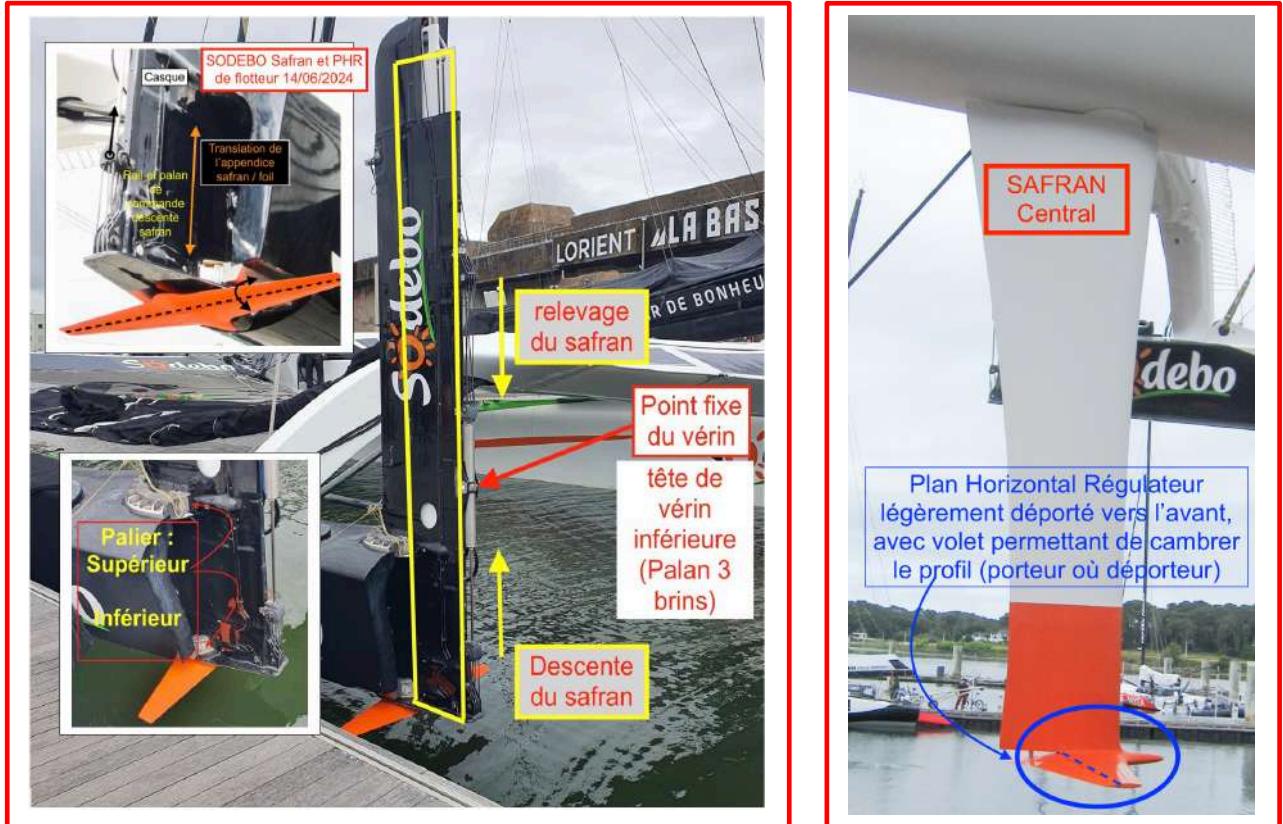


Un vérin hydraulique (à double tige) relié à chaque extrémité de la tige à un palan à 3 brins assure la translation vers le bas ou vers le haut de la pelle de safran et de son PHR.

Une tige interne implantée dans la pelle de safran agit sur un renvoi d'angle qui commande la rotation du volet de bord de fuite.

La conception du safran central reste à première vue assez classique avec une mèche carbone. Toutefois l'appendice possède un allongement voisin de 4.5 et son tirant d'eau relatif en mode archimédien est supérieur à celui de l'aile de raie.

Ce choix est dicté par la volonté d'éviter que les turbulences générées par l'aile de raie viennent affecter le PHR du safran central.



En fait rien de nouveau, si vous regardez un avion de profil, vous constaterez que l'empennage arrière horizontal (PHR) et sa gouverne (safran) sont implantés plus haut que les ailes de l'avion.

En effet les mêmes lois de l'écoulement régissent l'aérodynamique¹⁸ et l'hydrodynamique à la densité près 1.293 g/m^3 vs 1025 kg/m^3 .

Toutefois l'implantation du PHR est légèrement translaté vers l'avant du bord d'attaque du safran et une ogive apparaît dans le plan de symétrie. On remarque que cette particularité apparaît aussi sur l'aile de raie.

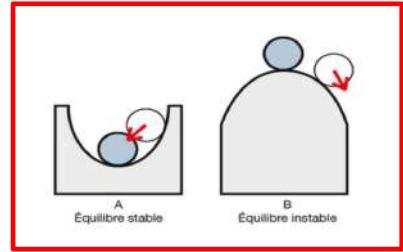
24. Passage du foiler multicoque au foiler monocoque

Premier point, le passage d'un bateau réagissant aux lois archimédiennes à celles d'un foiler sous-entend que l'on change totalement de paradigme.

¹⁸ L'aérodynamique dans le domaine subsonique.

Second point, l'engin, qu'il soit multicoque ou monocoque, verra son évolution alterner dans les deux mondes (archimédien où vol) de manière souvent aléatoire.

En mode archimédien, les lois hydrostatiques liées à l'équilibre du monocoque et d'un multicoque sont dans le principe assez simples. En schématisant ces deux couples s'opposent lorsque le bateau gîte :



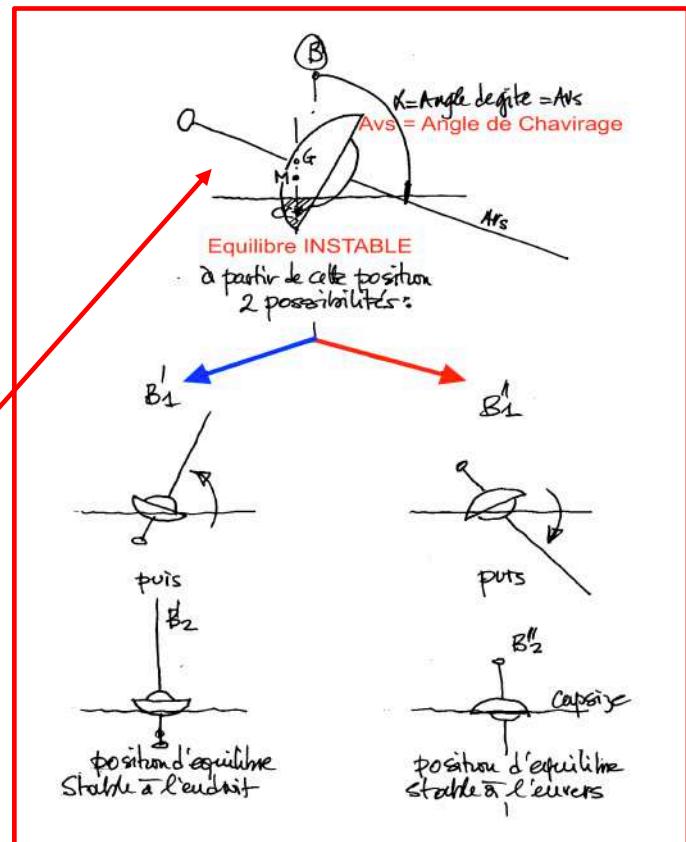
- ⇒ Le couple aéro produit par le vent apparent (Ce couple est le produit de la composante transversale de la force aéro par la distance verticale au centre de carène qui correspond à l'angle de gîte).
- ⇒ Le couple hydro (basé sur le principe d'Archimède) autour du même centre de carène (Ce couple est produit par le déplacement du bateau multiplié par la distance horizontale entre centre de carène et la verticale passant par le centre de gravité du bateau).

En partant de la gîte nulle (mat vertical), sous l'effet du couple aéro, le couple de redressement Archimédien croît, atteint un maximum puis chute jusqu'à un angle de gîte où il devient nul.

Cet angle nommé Avs correspond la position de chavirage du monocoque ou du multicoque. Au-delà de cet angle Avs, le chavirage est inéluctable jusqu'à 180° de gîte. 180° de gîte correspond au deuxième état d'équilibre d'un bateau (on suppose qu'il reste étanche dans cette position avec 180° de gîte).

Pour un monocoque l'angle de chavirage dépend de 2 paramètres : la position verticale du CG et la largeur de la carène qui détermine le déplacement sous le vent du centre de carène.

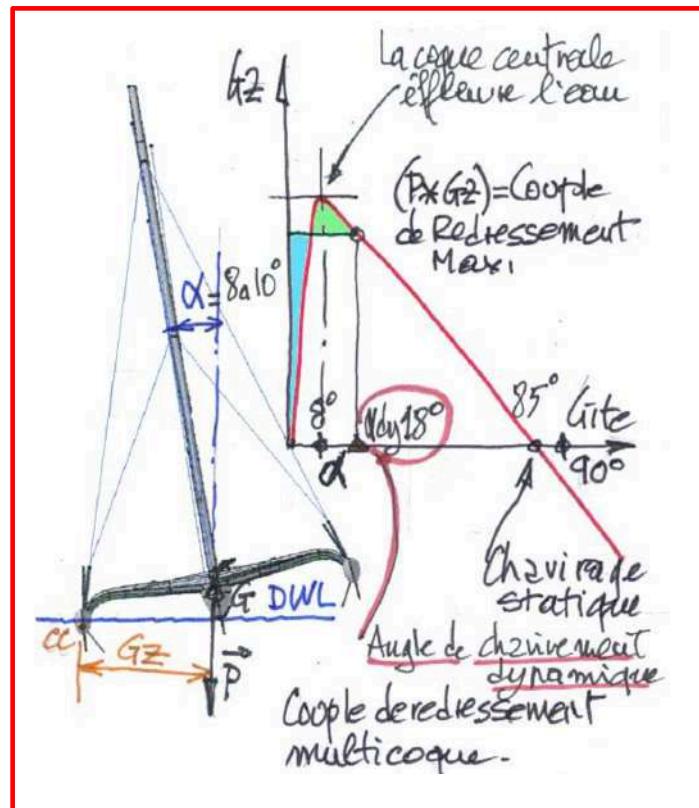
La valeur de l'angle Avs, voisine de 120° pour un monocoque se limite à 80°, 85° environ pour multicoque.



Les lois relatives à l'équilibre en vol sont très différentes. D'abord ces lois s'appuient sur la vitesse relative du fluide qui évolue autour du profil des surfaces sustentatrices et de leur orientation par rapport à ce fluide.

Ensuite lorsque la portance verticale, égale et opposée au poids du bateau, s'écroule, principalement pour une défaillance aérodynamique, la sustentation en vol disparaît et l'équilibre est détruit.

On comprend alors très bien qu'il existe une grande différence entre un foiler qui, lorsqu'il évolue en régime archimédien bénéficie d'un **équilibre stable permanent** entre 0° et Avs° , quelque soient les conditions de pilotage (y compris les erreurs) et ce même foiler qui lorsqu'il est en vol se trouve à **chaque instant en équilibre totalement instable lié à la portance du foil.**



Cela se traduit par des contraintes très différentes entre la navigation conventionnelle (modèle archimédien) et celles appliquées au domaine du vol.

Pour les monocoques en mode archimédien, l'étendue de la zone d'équilibre stable se situe entre 0° et Avs° . Sans entrer dans les détails des normes en vigueur¹⁹, disons que l' Avs doit au moins être égal à :

- $130^\circ - (0.002 * \text{déplacement en kg})$.
- S'ajoute à cette prescription concernant l' Avs , la nécessité de dessiner une forme de carène qui lorsqu'elle gîte entre 0° et Avs , génère une énergie de redressement de 172000 kg.m.deg. Ce qui impose d'avoir une surface importante sous la courbe (partie >0 du moment de redressement).

¹⁹ Les données présentées ci-dessous concernent les voiliers naviguant en catégorie A (Courses hauturières).

Par contre lorsqu'un foiler vole il s'appuie sur là où les surfaces sustentatrices. Autour de « **ce point d'appui** », existe deux couples antagonistes.

- ✓ Le couple lié à la poussée de la voile (force aéro).

Et

- ✓ Celui généré par le poids du bateau appliqué au centre de gravité.

Usuellement deux configurations techniques existent pour l'implantation des appendices sustentateurs :

- ✓ Un foil courbe sous le vent + une quille pendulaire à bulbe angulée au vent. Une quille fixe ne générerait pratiquement pas de portance verticale.
- ✓ Un foil en T sous le vent + une quille fixe équipée d'un bulbe.

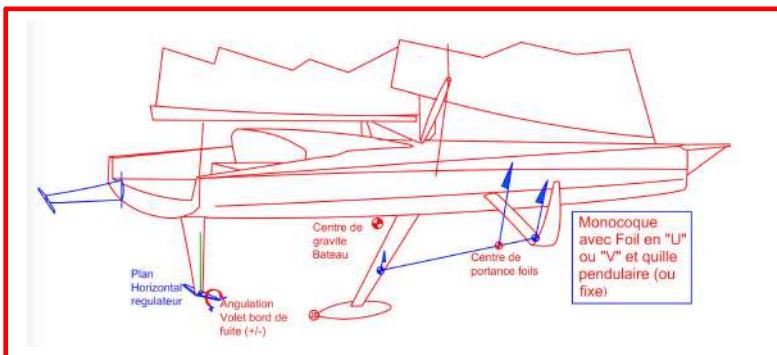
L'option dérive avec un lest intérieur ne fonctionne pas car elle se traduit par une augmentation du déplacement et in fine par des charges alaires trop importante qui limite le domaine de vol possible.



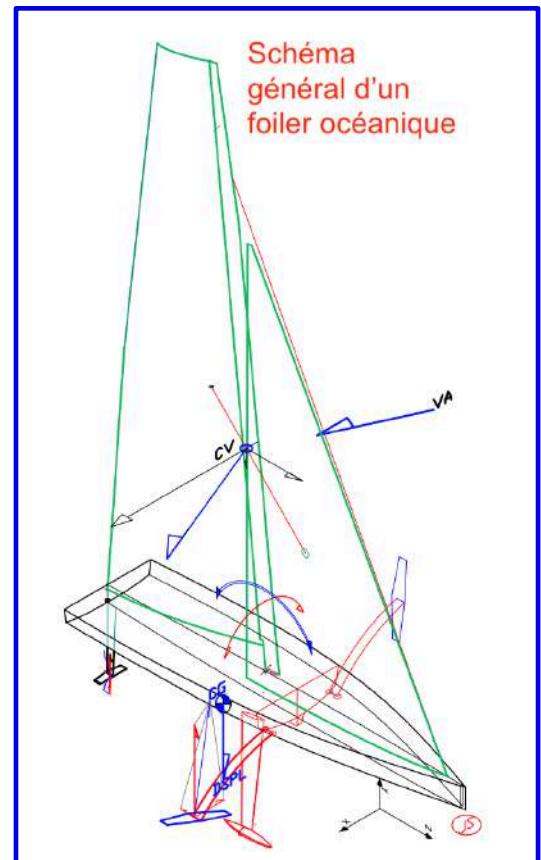
Comme pour les foilers multicoques, le volet arrière (PHR, plan horizontal régulateur) implanté sur le safran assure la stabilité du vol (assiette horizontale, Trim >0 ou <0).

Sans ce système de contrôle, il est impossible de voler... tout au plus peut-on déjauger et cabrer le bateau. Ce qui est actuellement le cas sur les IMOCA où le PHR est interdit par les règles de classe.





Versions « Foil courbe » où « Foil patin »



24. Le passage de l'environnement archimédien au mode vol intégral

Le vol est donc obtenu en utilisant la vitesse de déplacement qui génère une force ascensionnelle verticale « lift » égale au déplacement du bateau.

A la différence de l'avion qui s'allège d'environ 4.5% de son poids durant la phase de décollage (consommation de kérosène), ce qui représente quand même 26 T pour un A380 qui pèse 578 Tonnes, le monocoque foiler navigue à déplacement constant en mode archimédien ou en vol.

Afin d'être plus précis, un foiler monocoque en vol intégral, dont le bulbe se trouve constamment immergé, bénéficie aussi de la portance hydrodynamique verticale (certes faible) égale au poids de son volume en eau de ce bulbe.

A titre d'exemple un foiler monocoque de 7500 kg de déplacement équipé d'un bulbe de 1700 kg, soit 154 dm^3 , reçoit une poussée verticale hydrostatique de 158 daN lorsqu'il est en vol intégral, ce qui contribue pour 2.11% dans la sustentation.

Le décollage consiste à « rouler sur la piste » afin d'atteindre progressivement la vitesse où la force de sustentation (en Newton) devient supérieure à celle exercée par le poids du bateau, soit sensiblement son déplacement en Kg multiplié par 9.81 m/s^2 . Lorsque cette vitesse est atteinte, le pilote cabre le bateau et le stabilise à l'altitude souhaité en vol horizontal.

Cette vitesse de décollage (Take Off) relève du choix du concepteur, mais impose de fixer un compromis entre la surface du foil, son profil « aéro » et l'incidence que le pilote donne.

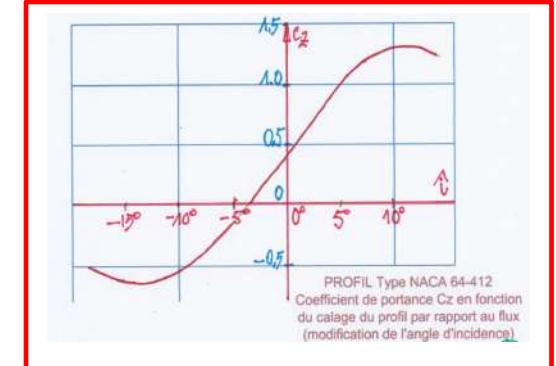
26. Les compromis hydrodynamiques (aérodynamiques)

Chacun des deux types de foils utilisés impose une stratégie conceptuelle différente.

Les foils en « L » escamotable en translation (comme par exemple sur les IMOCA où les ULTIM) ne pouvant pas recevoir de volets de bord de fuite, sauf à imaginer des cinématiques complexes et au final fragiles et peu fiables, possèdent obligatoirement un profil asymétrique figé et défini au moment de la conception.

Cela se traduit par une évolution du C_z lié uniquement à l'angle d'incidence avec le fluide.

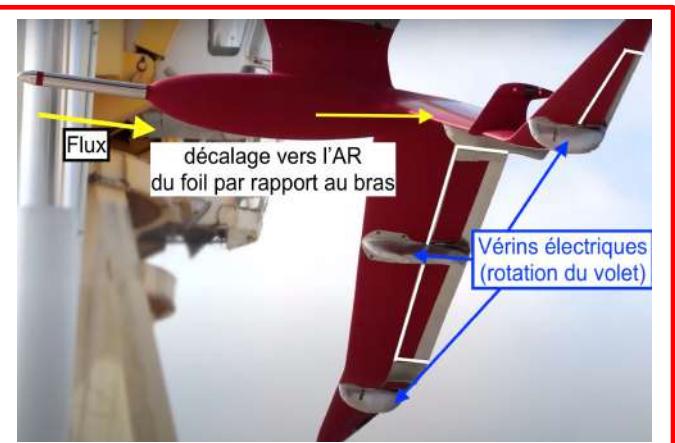
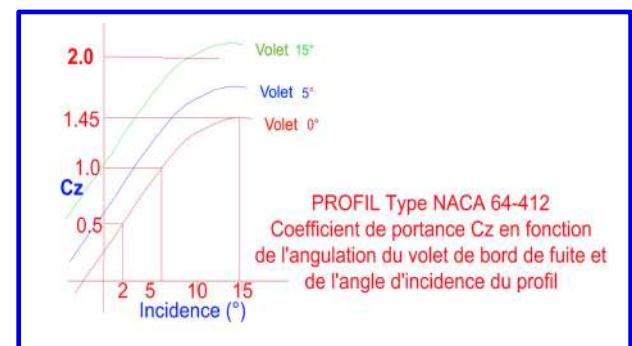
Sur des foils du type « patin » assemblés sur un bras articulé (exemple « Flying Nikka » ou AC75), la cinématique commandant la rotation du bras interdit de modifier l'incidence du profil du foil en navigation.



Cependant, cette technologie permet d'implanter des volets de bord de fuite, et ainsi d'accentuer le cambrage du profil du foil afin d'augmenter le coefficient de portance unitaire de base (C_z).

L'utilisation d'un volet de bord de fuite se fait au détriment de la trainée, mais le volet régule plus finement le C_z en consommant moins d'énergie.

Certains foils « patin » dernière génération s'orientent vers la forme en aile de mouette avec 2 volets de bord de fuite par côté, commandés indépendamment par des petits vérins électriques.



Quel que soit la technologie choisie par les concepteurs, il faut à un moment donné fixer le profil « aéro » du foil : c'est-à-dire son épaisseur relative et son cambrage.

Comme cela a déjà été évoqué, le choix d'un profil « aéro » du foil plus épais et plus cambré produit plus de portance à basse vitesse, donc autorise une vitesse de décollage plus faible. Rappelons que l'objectif d'un foiler est de naviguer le moins longtemps possible en régime archimédien. En contrepartie, ces familles de profils, plus épais et plus cambrés, favorisant le décollage implique des surfaces alaires plus importantes, plus de traîne et, au final, des performances en vol stabilisé plus faibles.

Opter pour un décollage plus tardif, c'est-à-dire en tout début de mode planing, permet de réduire la surface du foil et d'utiliser un profil plus fin, moins cambré, et donc produisant moins de traînée. Ce type de profil permet d'atteindre rapidement une vitesse en vol stabilisé horizontal proche de la limite des 40 nœuds.

Même dans la famille des profils « fins », le choix de profil « aéro » n'est pas anodin : une différence de 1 à 1.5% du C_z se traduit rapidement par des écarts non négligeables de distance parcourue en 24H.

C'est ce qui s'est produit en ULTIM, à l'avantage du bateau « Banque Populaire », dans la dernière portion de 2300 milles lors de la TJV de 2023 entre Recife et La Martinique (un « run » de vitesse pure) entre « Banque Populaire » et « SVR Lazartigue ». Lors de cette course, les différences entre les profils étaient faibles, mais suffisantes pour permettre à « Banque Populaire » de franchir la ligne le premier.

A contrario, les foils de « SVR Lazartigue » sont apparus comme plus performants dans la première partie du parcours, mais pas assez pour compenser le défaut de performances aux allures plus arrivées.

Dans l'absolu, tous les foilers, quelques soient leurs caractéristiques, possèdent le même potentiel de vitesse (vers 40 nœuds), à condition évidemment de posséder la puissance, donc la voilure, nécessaire.

27. La déformation de la forme des foils afin de remplacer les volets ?

Pendant des décennies et encore aujourd'hui, les commandes des volets de bord de fuite utilisent des systèmes de bielles, de câbles, de vérins hydrauliques et, depuis une vingtaine d'années, des vérins électriques associés à des vis à billes. Mais la philosophie générale est toujours basée sur les volets articulés que l'on déploie ou oriente mécaniquement afin de modifier la cambrure locale du profil du foil.

Il est évident que dès qu'une charnière est implantée sur un foil, la liaison détruit localement l'écoulement des filets d'air ou d'eau et génère de la trainée inutile. De plus, l'effet cambrage est identique sur toute la longueur du volet en regard du corps du foil qui est généralement trapézoïdal.

Ce qui se traduit par une longueur de la corde du profil du foil variable. Certes, on peut planter longitudinalement plusieurs volets indépendants, mais cela nécessite de nouveaux découpages du foil, de la mécanique de commande supplémentaire... et encore plus de trainée (voir photo page précédente).

En aéronautique, les ingénieurs ont imaginé les possibilités d'adaptation idéale de l'aile aux conditions de vol. Déjà en 1906, les frères Wright²⁰ avaient réalisé une aile adaptative afin de contrôler le vol de leur biplan « Flyer ». Ils avaient la structure en bois de chacune des ailes en jouant sur les tensions des câbles assurant la structure entre les deux ailes du biplan.

S'inspirant de la déformation en vol des ailes des oiseaux, les ingénieurs recherchent les possibilités d'appliquer ce principe à la surface globale de l'aile afin de supprimer toutes les liaisons mécaniques externes qui séparent le corps de l'aile du ou des volets de bord de fuite.

Ces recherches les orientent vers deux modes de contrôle du vol, que l'on peut nommer « macro-réglage » et l'autre « micro-réglage ». Le premier mode concerne le pilotage, c'est-à-dire les actions décisionnelles du pilote, virage, altitude. Le second, qui est beaucoup plus subtil, concerne les variations d'assiette instantanées provoquées par l'environnement (flux d'air).

Avec ce deuxième mode, on revient au vol des oiseaux qui gèrent ce type d'instabilité avec les mouvements des plumes, notamment aux extrémités de leurs ailes.



²⁰ Le français Clément Ader mène des expériences de vols en France dès 1873 sur son avion *La chauve-souris* (quelques sauts de puces, dus à une motorisation à vapeur !!!, mais il n'existe pas d'autres types de moteur) et, dès 1890, propose un concept d'aile déformable, afin d'assurer la stabilité du vol.

Cette conception sous-entend que des capteurs envoient des informations sur l'évolution du vol (assiette, etc...) à une centrale inertielle qui communique avec un calculateur. Ce calculateur adapte alors le mécanisme interne de l'aile afin de corriger ces micro-instabilités du vol. Ces opérations sont transparentes pour le pilote.

Le premier mode « macro-réglage » qui dépend du pilotage (ou du PA) se superpose au deuxième mode (micro-réglage).

<https://youtu.be/bC5BUuDFhmg>

Certes, le volume et la structure interne d'un foil de bateau ne sont pas ceux d'une aile d'avion. Mais la sustentation d'un bateau sur foils et le vol des avions se trouvent étroitement liés à la fois par les lois de la physique et celles régissant la conduite d'un vol stabilisé. On peut imaginer que ces idées d'aile morphing apparaissent un jour sur les foils

28. L'état de l'art côté foiler intégral monocoque océanique

Trouver des solutions techniques afin d'améliorer les performances, donc principalement la vitesse, tel est l'objectif des compétiteurs et des architectes. Les options architecturales des vingt/trente dernières années, formes, canting keel, matériaux, plan de voilure et voiles, améliorent indiscutablement les performances des bateaux.

Ces performances convergent rapidement vers une asymptote pour au moins deux raisons. Les limites du modèle physique archimédien et l'environnement des compétitions ou les classes (sous pression des organisateurs et des coureurs) s'orientent vers des box-rules de plus en plus contraignantes.

Durant les VENDÉE GLOBE, pendant presque deux décennies, le maître mot se résume à générer de la vitesse au portant (fascination des 12000 milles à parcourir dans les océans Indien et Pacifique). Pourtant, les quelques 7000 milles (sur 28000 milles) qui séparent le Cap Horn du Golfe de Gascogne, parcourus principalement au près, peuvent s'avérer déterminants quant à la victoire finale.

Si on ajoute le côté aléatoire des conditions météorologiques rencontrées, force est de constater que lors de tous ces VENDÉE GLOBE les moyennes progressent relativement lentement par rapport à l'évolution techniques investie dans les bateaux.



Elles passeront de 10 nœuds (1989) à 13,8 nœuds (2012). Le remplacement des dérives par des foils en 2016 permet de passer à 14,6 nœuds.

Mais alors comment réaliser un gap important des performances ?

Un **monocoque foiler intégral** océanique est-il la solution ?

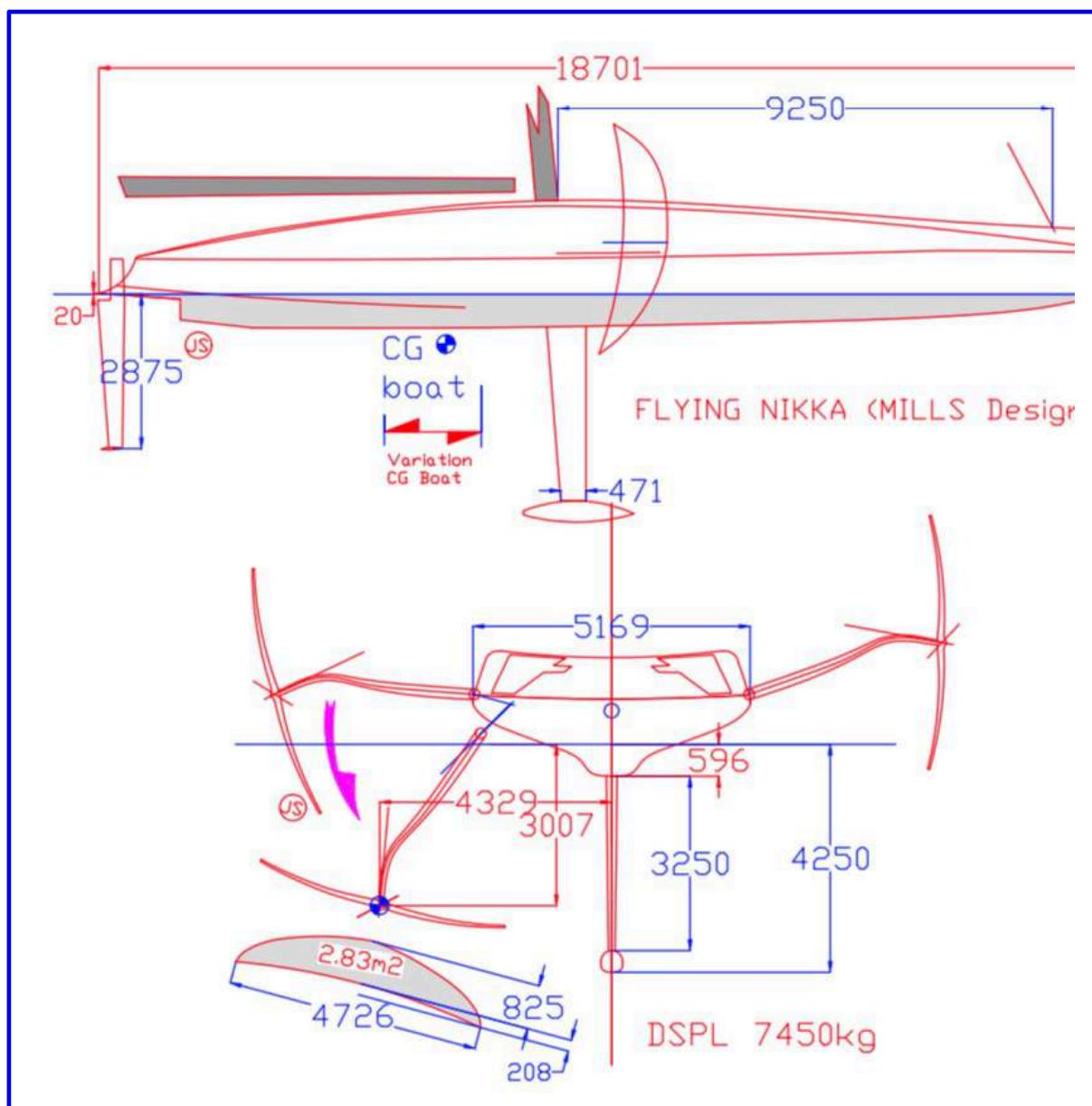
Préciser « intégral » est important, car cela implique que le vol est piloté : ce qui se traduit visuellement par une navigation avec une assiette horizontale.

À ce jour, aucun monocoque possédant la capacité à voler intégralement, c'est-à-dire entièrement en vol stabilisé, ne s'est lancé sur une Transat à l'exception de certains foilers Mini 6.50 évoqués précédemment.

Les monocoques IMOCA n'entrent pas dans la catégorie des foilers intégraux puisque la jauge, en limitant le nombre total d'appendices orientables, interdit de fait, le contrôle de l'assiette longitudinale en utilisant un plan horizontal régulateur (PHR). Il faut noter que l'idée d'implanter un stabilisateur horizontal sans aucun degré de liberté sur le safran ne permet pas d'assurer un vol stable.

Antoine Koch²¹ a publié récemment une étude exhaustive sur les conditions de vol intégral pour un IMOCA. Il arrive logiquement à la conclusion, que sans plan régulateur horizontal (PHR) les IMOCA ne peuvent bénéficier que d'une sustentation aléatoire et non contrôlable produite par leur foil et le voile de quille pendulaire.

²¹ Antoine Koch est architecte naval et navigateur.



« Flying Nikka », conçu par une équipe dirigée par Marc Mills, navigue en régates offshore et côtières en Méditerranée (saison 2024). C'est un 60' sensiblement plus léger que le déplacement lège des IMOCA et aussi un peu moins voilé 233m² contre 260m² en moyenne pour un IMOCA.

Par contre, « Flying Nikka » est moins lesté qu'un IMOCA, son bulbe ayant une masse de 1700 kg contre 2600 kg.

SIMULATION de DÉCOLLAGE FOILER				
TYPE de FOILER	FLYING NIKKA	D'après documents publics		
LHT	18.71	m		
Masse BW (Kg)	7450			
Poids en daNewton	7308.45			
Hull speed Take Off (1 foil)	4.65	m/s	9.04	Noeuds
Foil Area sailing (Chaque foil)	2.83	m ²		
Corde	0.825			
ENVERGURE	4.726			
ASPECT RATIO (AR)	7.89			
Transcription essai en soufflerie du 64-412				
Angle d'incidence du Foil Maximal	8			
Cz "infini" FOIL NACA 64-412	1.238			
Coef unitaire Cz avec cet angle d'incidence	0.939			
Evolution du décollage sur l'angle d'incidence du Foil (Rake)				
Navigation juste avant le déclenchement du Take OFF		Noeuds	9.0	m/s 4.63
ANGLE INCIDENCE FOIL en degré	1.00			
Cz "infini" FOIL NACA 64-412	0.541			
Cz "AR" (avec flap) FOIL NACA 64-412	0.411			
LIFT en daN	1276	daN	-6032	
TAKE OFF (beginning)				
1 FOIL actif Incidence : voir ci-dessous		Noeuds	9.0	m/s 4.63
ANGLE INCIDENCE FOIL en degré	5.00			
Cz "infini" (avec flap) FOIL NACA 64-412	0.983			
Cz "AR" FOIL NACA 64-412	0.746			
LIFT en daN	2319	daN	-4990	
TAKE OFF 75%				
1 FOIL actif Incidence : voir ci-dessous		Noeuds	16.0	m/s 8.23
ANGLE INCIDENCE FOIL en degré	2.50			
Cz "infini" FOIL NACA 64-412	0.716			
Cz "AR" FOIL NACA 64-412	0.543			
LIFT en daN	5333	daN	-1975	
TAKE OFF 100%				
1 FOIL actif Incidence : voir ci-dessous		Noeuds	21.6	m/s 11.11
ANGLE INCIDENCE FOIL en degré	1.00			
Cz "infini" FOIL NACA 64-412	0.541			
Cz "AR" FOIL NACA 64-412	0.411			
LIFT en daN	7352	daN	43	

Caractéristiques principales du Foiler.

Vitesse de décollage choisie

Caractéristiques du Foil

Suivant l'angle d'incidence du foil, on détermine le Cz pour une aile de longueur infinie, que l'on corrige en fonction de son « Aspect Ratio ».

Calage du foil (Incidence 0°) en début de décollage.

Lift généré par l'asymétrie du profil du foil.

Augmentation de l'incidence du foil

Augmentation progressive du Lift.

Diminution de la trainée de la coque.

La vitesse augmente, donc le Lift aussi avec le « carré de la vitesse », ce qui permet de diminuer l'angle d'incidence.

La coque est entièrement hors de l'eau. Il faut alors stabiliser la hauteur de vol en jouant sur l'angle d'incidence.

Ce foiler s'appuie sur le concept des AC75 en ajoutant un voile de quille et un bulbe afin d'obtenir la stabilité océanique lorsqu'il évolue en mode archimédien.

En navigation, « Flying Nikka » montre un bon potentiel de vitesse (25 à 30 nœuds). Il se sustente sur un seul foil porté par un bras articulé au niveau des œuvres mortes de la coque. La construction utilise le composite époxy/carbone mis en œuvre sous vide. Cependant, le foil ne possède pas de volet orientable implanté sur son bord de fuite comme cela existe dans la technologie AC75.

Plutôt que d'utiliser des volets de bord de fuite sur les foils, l'équipe de Mark Mills opte pour l'implantation d'une articulation mécanique au niveau de la liaison entre le bras et le foil qui permet de modifier l'incidence du foil de +/- 10° au moyen d'un vérin hydraulique installé dans le bras.

Cette solution est possible car les foils de 2.8m² et 4.726m d'envergure possèdent une corde haute de l'ordre de 820 mm pour un allongement de 7.80 (l'allongement des foils d'AC75 de 2024 frôle 12 à 13). L'épaisseur (12% de la corde) de la corde haute du foil permet d'implanter techniquement cette articulation et un bras de levier suffisamment important pour alléger la puissance du vérin de commande.



Le ratio Voilure / Masse au décollage (et en vol), en unités homogènes est d'environ 0.763. Cela pour un allongement global (GV + foc) de 2.47. Ces calculs valent pour un fonctionnement en régime laminaire correspondent au vent apparent. A titre de comparaison un AC75 (2024) possède un ratio de 0.780.

Quelques chiffres :

En vol, la motorisation diesel Yanmar 80 kW (4 à 5 L/h à 1700 tr/mn / 35 kW) assure le fonctionnement du système hydraulique (pression de 500 bars) par l'intermédiaire d'une pompe à pistons attelée.

Afin de limiter la dilatation de l'huile sous l'effet de l'élévation température résultante du mouvement de l'huile dans les canalisations et dans la pompe hydraulique, un réservoir d'huile d'assez grand volume est utilisé.

Ce volume d'huile sert à la refroidir afin de supprimer l'effet pernicieux de la dilatation qui diminue la précision des déplacements linéaires des tiges de vérins.

Tout cela se traduit par un emport de quelques 400 kg (moteur, canalisations, vérins, réservoirs... etc), sans compter les 120 à 130 litres de gas-oil journalier (autonomie prévue 750 litres) puisque le vol impose une production électrique (pilote, électronique) et hydraulique permanente.

Le propriétaire en commandant « Flying Nikka » permet à Mark Mills et à son équipe de se lancer dans la conception d'un monocoque océanique foiler Integral. Intellectuellement, l'aventure est intéressante. Par contre, le bilan écologique doit être sûrement assez mauvais, tant pas la construction intégrale en composite carbone (coque, mat, voile, gréement...) que la consommation d'énergie fossile permanente afin d'assurer les fonctions nécessaires au vol stabilisé.

Mais que ce soit le Moth, les AC75, ou les foilers intégraux (multicoque ou monocoque), il faut piloter ces engins à quelques dizaines de centimètres au-dessus de la surface de mer. Laquelle n'est pas toujours et même rarement une surface plane en navigation au large.

29. Mode archimédien vs Mode foiler intégral

Sur un « bon vieux » voilier archimédien, même à pleine vitesse en mode surf sous spinnaker asymétrique par 35 noeuds, 3 cerveaux suffisent pour piloter :

Le barreur, l'équipier à la grand-voile et celui chargé de l'écoute de spinnaker. Le barreur ressent son bateau sous ses pieds (ou sous son cul, s'il est assis) et au toucher de barre (molle, dure, neutre...).

Les deux équipiers perçoivent la vitesse, interprètent les pennons, le refus du bord d'attaque du spinnaker... Autant d'informations visuelles, physiques qui sont automatiquement traduites en réactions : angle de barre, choquer, border etc. Le reste de l'équipage peut contribuer à conserver une gîte qui limite la dissymétrie de la carène.

Si une faute de pilotage est commise, généralement un manque de réactivité, où un appendice en défaut, il est très souvent possible de gérer le désordre. Cependant, il arrive que la situation échappe complètement au barreur et à l'équipage. Dans ce cas, la récupération devient impossible. La trajectoire rectiligne se transforme en giration, le bateau se couche violemment, l'équipage subit puis prend les décisions qu'il juge adéquates.

Les lois archimédiennes interviennent simultanément et ramènent le bateau dans son assiette de base (0° de gîte), et cela sauf exception (dépassement de l'angle Avs) et quel que soit l'attitude de l'équipage.

En archimédien, le temps disponible entre la **perception**, la **décision** et **l'action** est suffisamment grand pour que le système fonctionne. La vitesse du bateau reste dans le domaine du raisonnable et contribue à rendre le pilotage possible par l'homme pendant un temps long.

Les pilotes automatiques (PA), de plus en plus sophistiqués assurent une poursuite fiable d'un cap. En fait, il faut dissocier deux états lorsque l'on suit une route (un cap). Il y a l'objectif final : le cap à suivre pendant « x heures » et la performance du bateau à chaque instant « t ». Si le PA convient très bien pour l'objectif « Cap », on sait que le barreur reste le meilleur pour obtenir la quintessence de son bateau à chaque longueur parcourue.

Aujourd'hui, les algorithmes internes d'un PA connectés à un centrale de navigation adapte l'évolution de la route instantanée en tenant compte des conditions du moment et de l'objectif à atteindre.

Quel que soient les technicités des PA, ils ne gèrent pas l'évolution de l'équilibre hydrostatique, puisque cette fonction est dévolue aux lois physiques du modèle archimédien.

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

En théorie, les équations de vol d'un foiler sont identiques à celles d'un avion. La différence majeure porte sur le milieu dans lequel les éléments sustentateurs évoluent. L'avion évolue en permanence dans l'air. Pour un foiler, la coque se trouve entièrement sustentée dans l'air mais le PHR, le safran, l'aile de raie, le ou les foils évoluent dans un fluide totalement discontinu qui passe de l'eau homogène à de l'eau contenant des bulles d'air et même par moments, certes involontaires, où l'eau est remplacée par l'air.

Cette situation perturbe l'écoulement et la portance du foil de manière significative et non prévisible.

En effet, le ratio de 800 entre la masse volumique de l'eau de mer, 1025 kg/m³ et celle de l'air 1.292kg/m³, provoque par exemple, lorsque le foil quitte l'environnement eau pour se retrouver dans celui de l'air ou même d'un mélange air/eau, une chute de portance fatale.

Ainsi, une portance de 70000N peut passer instantanément à 90 N (7 kg). Ce qui constitue un « désordre » absolument incontrôlable et ingérable.

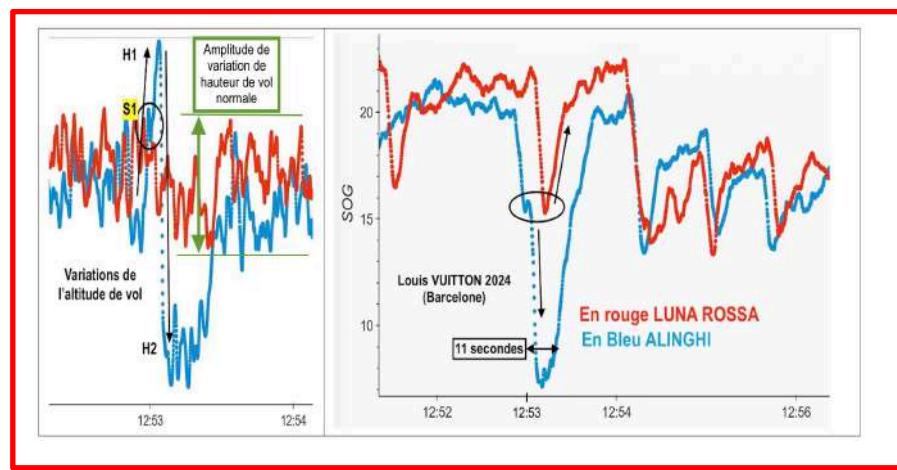
Ensuite, par rapport à la navigation en régime archimédien (2D), le foiler introduit une dimension complémentaire : **l'altitude de vol**.

Le foiler évolue alors en 3D et doit contrôler **6 degrés de liberté** (3 translations et 3 rotations). Cette troisième dimension possède un corolaire : conserver une altitude la plus constante possible.

Cette stabilité en hauteur de vol repose sur la portance des ailes (foils), et dépend de deux paramètres :

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

Ajoutons, comme on l'a vu précédemment, que deux phénomènes parasites, **la ventilation et la cavitation**, peuvent instantanément réduire la portance des foils ou du PHR à « zéro », pour peu que les conditions physiques soient réunies. Cet écroulement instantané de la portance résulte de l'évolution des foils dans un milieu discontinu.



Lors de la Coupe Vuitton en avant-première de la 37^{ème}AC, les enregistrements des altitudes et vitesses de *Luna Rossa* et *Alinghi* qui se suivent à 30 nœuds environ lors d'une manche montrent l'importance de la fiabilité de l'action du PHR.

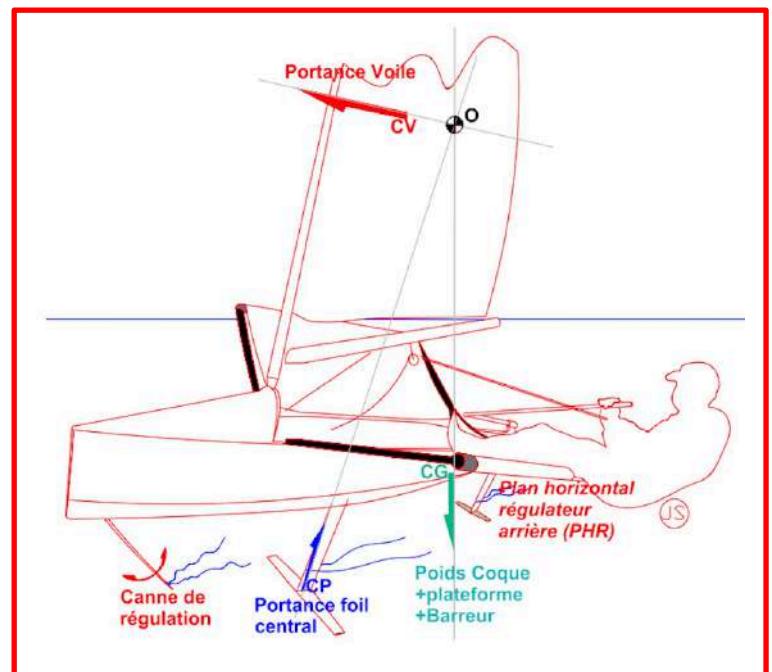
Le graphe de droite représentant les altitudes de vol montre (12H53 en H1) un cabré la plateforme (perte d'action du PHR). Ce cabrage se fait en 2 temps, puisque l'on voit en S1 une tentative de récupération par le pilote.

Ce cabrage est suivi d'une retombée instantanée, d'une perte d'altitude (retour au mode archimédien) et d'une chute de la vitesse (graphe de droite) à 7m/s (13 nœuds).

30. Équilibre en vol : Centrage AR ou centrage AV ?

L'équilibre en vol d'un foilier océanique s'apparente évidemment à celui du Moth (35 kg pour le bateau et 80 kg pour l'équipier), mais, à cause des effets d'échelle, les conditions d'équilibre du Moth ne sont pas intégralement reproductibles sur un monocoque de 18 à 20 m et de 7500 kg.

Revenons à la théorie générale relative au vol.



Les forces en présence (cas de l'avion)

- ⇒ Les forces de sustentation s'appliquent au centre de poussé (CP).
 - La portance principale est produite par les ailes. Cette portance s'applique au foyer du profil de l'aile, soit environ 25% en arrière du bord d'attaque. Elle se décompose en 2 forces : une verticale dirigée vers le haut et une horizontale vers l'arrière (la trainée).
 - Une portance secondaire existe aussi. Elle correspond à celle produite par la forme longitudinale du fuselage. Son point d'application correspond sensiblement à la position longitudinale du centre de gravité du profil du fuselage, gouverne verticale arrière comprise. Notons que la portance secondaire est très faible par rapport à celle produite par les ailes.
- ⇒ Les « forces qui attirent » l'avion vers le sol appliquée en G1 ou G2.
 - En fait il n'y a qu'une seule force. C'est celle qui est créée par la masse de l'avion ($F = \text{Masse en kg} \times 9.81$). Elle s'exprime en newtons (N). Cette force s'applique au centre de gravité de l'avion (devis de poids). Calculs identiques à ceux réalisés sur un bateau.

⇒ Les forces de « contrôle » appliquées sur le PHR.

- Il s'agit de la portance générée par le plan régulateur arrière (PHR). Cette surface sustentatrice possède un profil symétrique. Ce plan régulateur pouvant avoir un angle d'incidence positif ou négatif, induit que le PHR est, selon les conditions de pilotage, porteur ou déporteur. Ce qui se traduit par un mouvement de piqué ou de cabrage de l'avion.

⇒ *La force de propulsion*

- Elle est parallèle à l'axe de l'avion et dirigée vers l'avant. Du fait de sa faible excentration par rapport à l'axe de l'avion, elle a peu d'effet sur la stabilité de vol. Ce qui n'est pas le cas sur un voilier où son point d'application se trouve à mi-hauteur du mât.

Les degrés de liberté, le foyer

La stabilité de vol dépend de la gestion des 3 degrés de liberté en rotation, soit le lacet (rotation d'axe vertical), le tangage (rotation d'axe transversal), le roulis (rotation autour de l'axe de l'avion). Ces 3 axes concourent en un point identifier « foyer ». L'avion, et par analogie le foiler, possèdent donc un centre autour duquel ils pivotent.

Sur un foiler, compte tenu du fait que seul le foil, le PHR et l'extrémité du safran circulent dans l'eau, les effets aérodynamiques sur la carène sont relativement négligeables. Ainsi le foyer d'un foiler se situe sur le foil actif à environ 25% en arrière du bord d'attaque.

Les effets de la portance, du poids et des couples associés par rapport au foyer.

Cela se résume à 2 couples : celui créé par la portance appliquée au point CP et celui produit par l'action de la masse de l'avion appliquée au centre de gravité de l'avion (G1 ou G2).

La portance étant toujours en avant du foyer, ce couple cabre toujours l'avion. Le bras de levier (D1) est quasiment constant. La valeur du couple correspondant dépend donc uniquement de la portance, donc de l'angle d'incidence du profil de l'aile.

La masse de l'avion (à part celle des planeurs) n'est pas constante, puisqu'il consomme du carburant. Mais, en relatif, la masse de carburant est faible par rapport à la masse en charge de l'avion. Le couple créé par la masse de l'avion autour du foyer dépend de la position longitudinale du centre de gravité de l'avion. C'est sur la position longitudinale de ce point que la stabilité de vol se joue.

Cas où le centre de gravité se trouve en avant du foyer (point G1).

L'équilibre est le suivant :

$$\text{LIFT} * D1 - \text{POIDS} * DG1 = 0$$

La position de G1 est globalement fixée par le concepteur.

Les longueurs des 2 bras de levier D1 et DG1 étant constantes en vol stabilisé, on adapte l'incidence en dessous de cet équilibre. On compense cette tendance à piquer en orientant le PHR à cabrer. Le bras de levier du PHR étant très important, l'angle d'incidence du PHR sera très faible : ce qui produira très peu de trainée.

En cas de perte momentanée de portance, le couple généré par le poids fait piquer l'avion. Le pilote ou le PA récupère l'incident en inclinant le PHR à cabrer.

**L'équilibre est réputé « stable ». On parle de Centrage avant.
Corollaire, l'avion devient moins manœuvrant.**

Cas où le centre de gravité se trouve en arrière du foyer (point G2).

L'équilibre est le suivant :

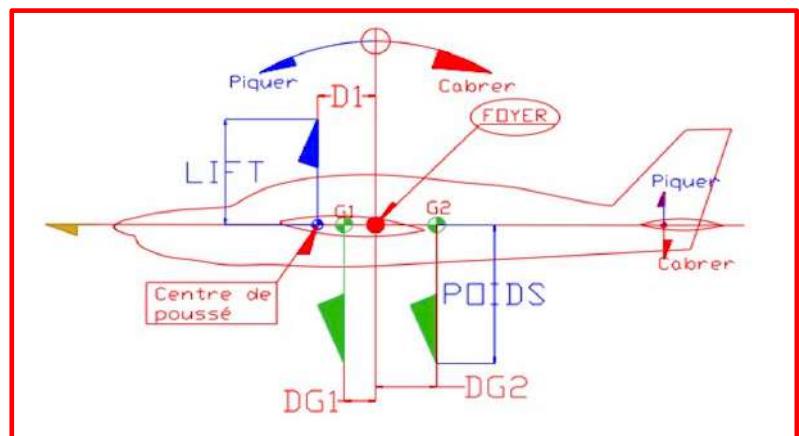
$$\text{LIFT} * D1 + \text{POIDS} * DG2 = 0$$

Les longueurs des 2 bras de levier D1 et DG2 sont toujours constantes en vol stabilisé.

Tout dépend du choix du constructeur dans la position de G2.

Le couple POIDS * DG2 cabre l'avion, qui peut devenir incontrôlable malgré une action à piquer du pilote sur le PHR (la surface du PHR est relativement faible, et bien que le bras de levier soit important le couple produit risque de ne pas contrer celui du poids de l'avion multiplié par DG2) ... L'avion augmente son cabrage, l'angle d'incidence croît jusqu'au décrochage des ailes.

Avec un centrage arrière, l'équilibre devient « Instable », mais confère une excellente manœuvrabilité à l'avion.



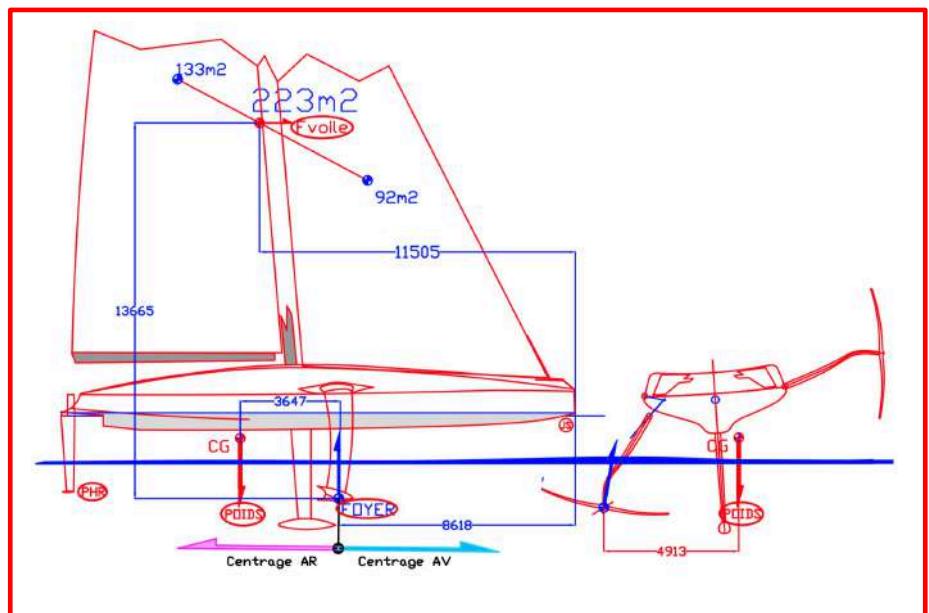
Remarque : la force de propulsion d'un avion influe très peu sur les équilibres car son point d'application est très proche de l'axe de l'avion et sa direction parallèle.

Enfin, cet ensemble évolue dans le même environnement : c'est-à-dire une masse d'air à masse volumique constante, bien que variable avec l'altitude de vol. En conclusion, **un avion pour être stable** doit être conçu avec un « **Centrage Avant** ». Seuls les avions de chasse et de voltige sont à centrage arrière, car ils doivent pouvoir modifier instantanément leurs trajectoires.

Mais revenons à notre foiler océanique... Le nombre de forces, comme leurs positions spatiales sont sensiblement identiques à la configuration présente sur un Moth.

En désaxant sous le vent le foil du foiler monocoque océanique, l'architecte crée un couple de redressement qui s'oppose à celui généré par la composante transversale de la portance vélique. La portance du foil sous le vent produit, en termes de couple de redressement, le même effet que le flotteur sous le vent d'un trimaran.

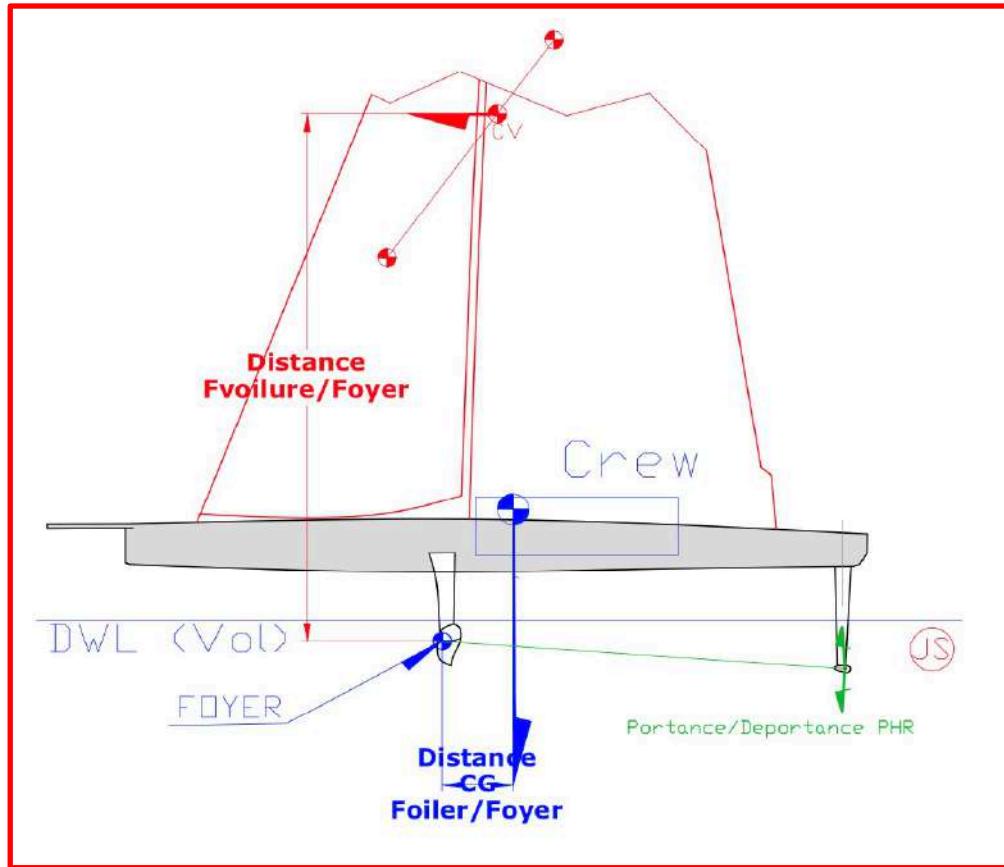
Si nous voulons raisonner par analogie avec l'équilibre en vol d'un avion, il faut situer la position longitudinale du foyer, sensiblement sur le foil, puis celle de son centre de gravité et enfin le point d'appui de la force vélique.



Ce que met en évidence le dessin ci-dessus.

Sur un foiler, le foyer hydrodynamique résultant entre les centres de portance respectifs du foil, du PHR et de la partie immergée en vol du safran, ne recule pratiquement pas par rapport à celui du foil.

Cela se traduit par un foyer global du foiler que l'on peut admettre confondu avec le foyer du profil du foil (25% en AR du bord d'attaque).



L'équilibre en vol revient donc à tenir compte exclusivement des couples produits par la **Force de propulsion (// à la trajectoire)** au centre de voilure et l'action du **poids du foiler appliquée au centre de gravité**.

Soit **Fvoile * 13.665 – (7450 *9.81) * 3.647 = 0**.

Ce qui autorise, avec un centrage AR, une composante de propulsion (Fvoile) de **19505** Newtons.

On comprend immédiatement que l'hypothèse d'un centrage avant sur un foiler est rigoureusement impossible, car, dans ce cas, les deux couples (**Cvoile et Cpoids**) seraient dans le même sens : ce qui conduirait à la culbute sur le nez du foiler...

Dans les conditions d'un centrage AR, le pilote doit toujours essayer de se situer au point d'équilibre tel que couple Fvoile et le couple Poids assure un équilibre presque parfait. Pour se trouver dans cette position, il joue avec la portance ou la déportance du PHR.

Le fait d'avoir un foiler instable, donc très maniable, lui permet d'avoir des temps de réaction très courts, donc un vol horizontal très « linéaire ».

FLYING NIKKA vs MOTH		
LHT	18.70	3.55
LFLOT	18.60	3.55
ANGLE du VENT VRAI / Bateau	50.00	50.00
VENT VRAI (TWA) (Nœuds)	20.00	20.00
VENT VRAI (TWA) (m/s)	10.29	10.29
VENT APPARENT (AWS) (m/s)	14.38	11.95
VENT APPARENT (AWS) (Nœuds)	27.95	23.22
VENT APPARENT ANGLE (AWA)	33.24	41.28
Surface de voilure (m²)	233.00	8.00
Force Aéro (Newton)	43361	1028
Force propulsive (N)	14830	351
Force latérale (N)	37551	890
Puissance de propulsion (Watt)	80284	831
VITESSE ARCHIMEDIENNE (nœuds)	10.52	4.60
VITESSE ARCHIMEDIENNE (m/s)	5.41	2.37
JS 17/08/2024		

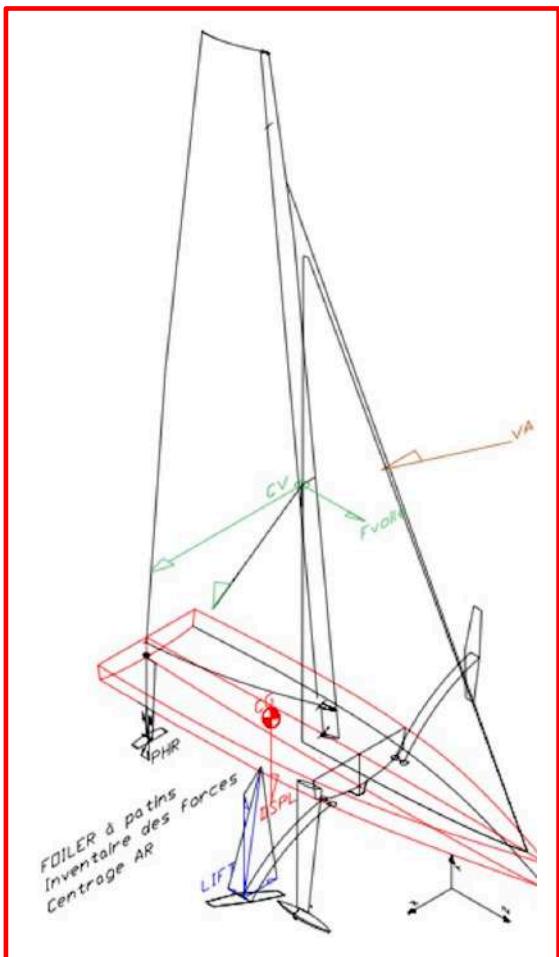
Cette maniabilité est aussi favorisée par la position très en arrière du PHR par rapport au Foyer. Ainsi, la portance ou la déportance pour produire le couple nécessaire au maintien de l'assiette horizontale nécessitera un angle d'incidence très faible, donc très peu de trainée.

Par contre, on arrive très vite à la limite technique du vol de tous ces foilers. En effet, si un avion, de par son altitude de vol, dispose d'une marge d'évolution en manœuvres verticales qui lui permet normalement de récupérer un décrochage ou un autre incident lié à l'instabilité de l'environnement, un foiler se trouve prisonnier de ses faibles capacités de variations d'altitude de vol (50 à 80 cm).

Voler avec une aussi faible amplitude verticale, qui, plus est, lorsqu'il y a de la mer, impose un pilotage permanent très réactif.

Sur le Moth, le skipper obtient ce résultat en se déplaçant au vent et longitudinalement sur le trampoline : ce qui décale en continu le centre de gravité du Moth. Cette action, associée au réglage permanent du PHR par le skipper et au système automatique (canne sur l'étrave) de la gestion de l'attitude de vol, permet de voler horizontalement à une altitude très stabilisée. Mais, rappelons-nous que le ratio entre le poids du Moth gréé et celui du skipper est de 1 à 2.6 environ.

Il est évident que modifier la position de CG du bateau de manière continue sur un foiler monocoque est totalement impossible à réaliser.



Conclusions

A première vue, cela peut paraître paradoxal d'abandonner la stabilité du vol (Il faut se rappeler qu'on évolue en 3 dimensions, donc avec 6 degrés de liberté) au profit de la maniabilité. En fait, cette décision se justifie par le fait que le pilote du foiler doit répondre immédiatement, en utilisant un minimum d'énergie, à des défaillances affectant les performances des appendices ou des variations de l'environnement maritime.

Ensuite, le pilote d'un foiler vélisque, contrairement à un avion, n'est pas maître de la puissance (vélisque) disponible. Ainsi, une variation importante (baisse de la vitesse du vent ou l'inverse) de la force de propulsion n'étant pas obligatoirement maîtrisée par l'équipage, peut se traduire instantanément par une perte de contrôle et un décrochage du foil. Il est évident que le retour dans le domaine archimédien doit privilégier une chute sur l'arrière et non un enfournement.

La stabilité de vol, c'est aussi le contrôle du tangage et du lacet. Ces deux degrés de liberté dépendent de l'efficacité hydrodynamique du PHR et du safran. Un effet de ventilation sur le safran qui se propage sur le PHR rend en 2 secondes ces deux appendices totalement inopérants.

Cela provoque principalement soit une action à cabrer de la plateforme si le « couple Poids » est supérieur au « couple Fvoile », soit une action à piquer si les valeurs de ces couples sont inversées.

Les deux pouces du pilote semblent actionner en continu la portance ou déportance du PHR en même temps que la trajectoire du foiler.



Concrètement, la position très en hauteur du centre de voilure par rapport au foyer requiert la pratique obligatoire du centrage AR pour un foiler.

31. Pilotage : L'Homme ou la Machine

Lors du pilotage d'un foiler océanique en vol intégral, le pilote abandonne le domaine sécuritaire lié à l'environnement archimédien. Il découvre l'importance du plan horizontal de vol (assiette et altitude) nommé repère de référence visuelle, sachant qu'il n'existe aucune sécurité active en vol.

Si le foilier perd les effets hydrostatiques (portance) fournis par ses surfaces sustentatrices, le crash se produit. En vol, au moment du crash, le passage et le retour du foilier en mode archimédien, se traduisent par des différentiels de vitesses passant de 30 à 35 nœuds à 6 à 8 nœuds et peut-être moins encore en quelques secondes. Lors de cette transition brutale, l'énergie cinétique emmagasinée chute de 3,5 fois. La plateforme, le gréement et l'équipage subissent ce ralentissement brutal.

L'homme est-il capable de piloter un foilier océanique ?

En mode archimédien, depuis longtemps le pilotage « manuel à vue » utilise des assistances techniques. Hormis les cartes marines, la boussole, le chronomètre, les premières réelles avancées ont été les radiophares puis le speedomètre, l'anémomètre et l'angle du vent, d'abord apparent, puis dès que le compas devient électronique, le vent vrai obtenu grâce à un calculateur intégré.

Au fil des années et des évolutions de l'électronique, ces assistances visuelles (écrans) se développent. Mais, dans ce mode archimédien, le barreur conserve de jour comme de nuit sa référence naturelle à la verticalité : ce qui permet à son cerveau de visualiser le plan horizontal... Et cela même sans aucun repère d'horizon. On remarquera qu'en mode archimédien, on peut barrer un voilier en toute sécurité avec uniquement la perception sensorielle du vent (on suit alors le vent).

Les régates en Moth sur des parcours en baie montrent que des skippers bien entraînés volent en permanence et font figure de véritables funambules sur l'eau.

Pour autant, transposer ce pilotage sur un foilier en Offshore ou Inshore à 30 et même 40 nœuds (15m/s et 20m/s) de vitesse en vol intégral apparaît beaucoup plus complexe à gérer.

Le pilotage « manuel à vue » d'un foilier océanique reste possible mais uniquement dans certaines conditions. En effet, et malgré l'aide d'équipements techniques d'aide au pilotage, des situations existent où le pilote perd ses références extérieures nécessaires pour conserver une stabilité de vol correcte.

Cela se traduit, par exemple, par la perte de l'identification de l'horizon en cas de dégradation de la visibilité. La technique du vol à vue (VFR²², *Visual flight rules*) s'appuie sur la vision de l'ensemble des références extérieures et de quelques références instrumentales par le pilote.

²² En aviation le pilote naviguant en mode VFR doit disposer d'une visibilité minimale de 1500 à 8 000 m et rester hors des nuages (à une distance minimale de 1500 m horizontalement et 300 m verticalement).

La perception de l'horizon constitue la base des prises de décisions par le pilote comme celle du traitement des informations que le cerveau identifie.

L'identification des informations nécessaires à la stabilité du vol est multi sensorielle, la vision restant l'élément primordial. L'ensemble de la perception visuelle est traité dans le cerveau du pilote simultanément avec des informations non visuelles perçues via d'autres capteurs (l'oreille interne, les muscles, les appuis, les articulations, etc). Tout cela contribue à produire une interprétation correcte de la situation.

Les difficultés provoquées par une visibilité réduite ne peuvent pas être résolues uniquement en lisant des instruments mais en décodant simultanément et correctement des sensations non visuelles perçues bien que le cerveau ne soit plus alimenté par les images habituelles qui lui parviennent de l'extérieur.

Mais réciproquement, et c'est là toute la difficulté de la gestion du vol par un humain, ce que le nerf optique transmet au cerveau n'est pas suffisant pour que le pilote ait la conscience exacte de la situation. Sans les compléments d'informations non visuelles, l'apparition de phénomènes de désorientation spatiale existe, et cela, même durant un très court instant.

Piloter un foilier monocoque océanique en vol intégral imposera une formation pratique assez longue. On constate d'ailleurs, de plus en plus, que les pilotes d'AC75, passent des heures devant un simulateur de vol. Cette pratique apparait aussi pour le pilotage des IMOCA, bien que ce type de bateaux ne volent pas. Cependant, cette pratique ne sera jamais accessible physiquement à tout le monde.

Mais alors, pourquoi les foilers multicoques océaniques intégraux (pratiquement exclusivement les trimarans de grandes longueur et largeur) volent effectivement alors que les foilers monocoques intégraux balbutient ?

La réponse se trouve dans la stabilité latérale de la plateforme d'un trimaran qui, par les lois hydrostatiques et sa surface sur le plan d'eau, reste toujours proche de l'horizontale et permet l'implantation des éléments sustentateurs sur une grande surface. Ainsi l'assiette de vol proche du plan de vol parfait devient plus facile à contrôler et à corriger en utilisant de l'ingénierie dédiée.

La Machine s'ajoute à l'Homme ?

A priori, remplacer en régate **l'homme/pilote** par une « machine » paraît aberrant, car autant faire des régates avec Virtual Skipper. Pourtant la complexité du foiler intégral oblige à intégrer cette aide.

L'analyse développée précédemment met en évidence que bien que l'homme ne soit pas intrinsèquement le point faible des « sorties de route », elle montre simplement que **dans le temps imparti par la vitesse de l'engin pour les prises de décisions**, il est très difficile au pilote de gérer les manœuvres appropriées. Non pas que le pilote ne sache pas comment faire, mais ses moyens sensoriels ne lui permettent pas de maîtriser la situation.

Par exemple, un humain perçoit très mal les accélérations dans un plan horizontal. L'important n'est pas la perception de la vitesse par elle-même²³, mais la perception de l'instant où le foiler commence son accélération (ou sa décélération). Cette perception de l'accélération définit l'origine d'une série d'action à engager afin que les équations de vol à venir restent opérantes.

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

Mais percevoir l'accélération ne suffit pas. Encore faut-il que la quantification de cette accélération ou décélération s'intègre dans une manœuvre structurée qui corresponde aux équilibres en vol à venir dans les secondes qui suivent. Ce qui sous-entend l'existence d'un domaine de vol prédéfini lié à cette manœuvre.

A cet instant la « Machine » intervient.

32. Du contrôle d'une route sur l'océan à celui du foiler en vol.

Durant les navigations, pendant longtemps le point de départ sera le seul point parfaitement identifié. Après l'astrolabe, viendra l'octant, puis le sextant qui permettent de mesurer à une heure précise (le matin par exemple) la hauteur d'un astre au-dessus de l'horizon.

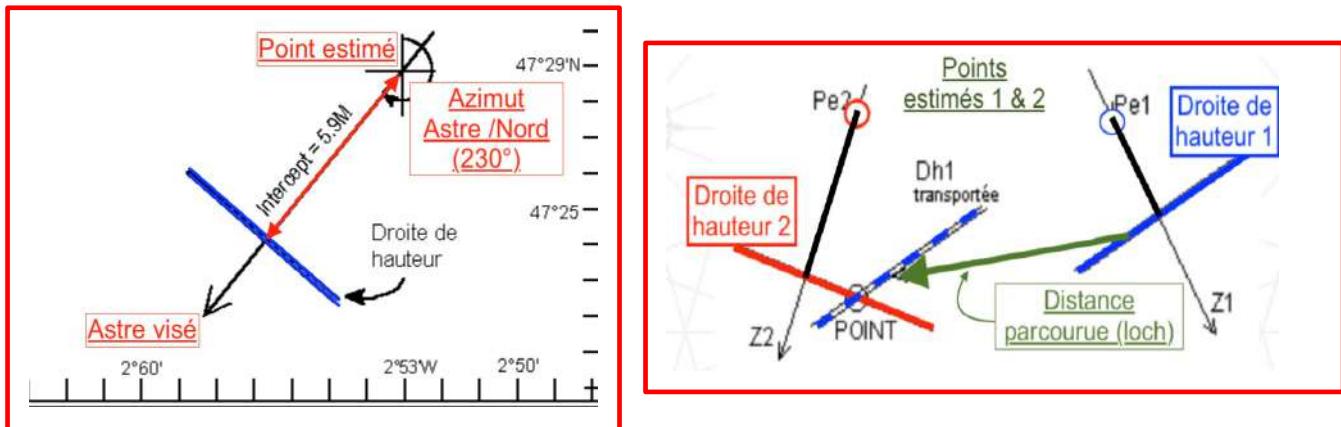
De cette mesure associée au gisement de l'astre par rapport au nord et d'un point estimé de la position du bateau, le navigateur en déduit par calculs un intercept et une droite de hauteur.

²³ Dans un train, le fait que la vitesse stabilisée soit de 150 ou 300 km/h, n'est absolument pas perceptible, tant qu'il n'y a pas de freinage (décélération).

A l'issue d'une mesure le navigateur sait, au mieux, qu'il se situe sur cette droite de hauteur.

Pour connaître sa position en longitude et latitude, le navigateur doit refaire cette même opération le soir avant le coucher du soleil ou à midi (méridienne).

Il suffit alors de translater la droite de hauteur du matin du cap et de la route parcourue (loch) pour que les deux droites de hauteur de coupent et donnent la position cartésienne du bateau.



Cette méthode de navigation au large se pratiquera jusque dans les années 1950/60 et cela malgré l'invention en 1852 du gyroscope mécanique. Cet appareil est basé sur l'effet gyroscopique produit par un disque tournant très grande vitesse de rotation autour d'un axe. Le disque une fois lancé, tend à résister à toutes modifications de l'orientation spatiale de son axe de rotation.

L'expérience la plus simple et la plus parlante pour comprendre cet effet gyroscopique consiste à tenir à bout de bras une roue de vélo par son moyeu et de demander à une tierce personne de la lancer en rotation à assez grande vitesse. Si, durant la rotation, celui qui tient la roue tente alors de l'incliner sur un côté, il perçoit une grande résistance pour modifier la position spatiale initiale de la roue.

C'est ce moment de rotation (vitesse) et le mouvement autour de l'axe masse située en périphérie (jante + pneumatique) qui génèrent l'opposition à ce mouvement.



Cette particularité physique est exploitable que si on est capable physiquement de quantifier les variations dans le temps et dans les 3 dimensions des angles par rapport à la position initiale et des accélérations. L'interface entre l'effet mécanique et son évaluation trouve très lentement une solution, d'abord avec les capteurs analogiques, puis bien plus tard avec le passage au numérique.

Jusque dans les années 1970, la base mécanique des gyroscopes forme l'ossature des centrales Inertielles (CI). Cet équipement très sophistiqué, lourd, volumineux et énergivore, dont le gyroscope (disque) tourne à 25 ou 30000 tr/mn et évolue dans les 3 axes X, Y, Z perpendiculaires entre eux, est abandonné au début des années 2000 au profit de composants comme la fibre optique, les lasers et l'électronique.



Rapidement ce type d'équipement se miniaturise et devient surtout beaucoup moins énergivore. Par exemple la centrale iXBlue qui utilise 3 réseaux de gyromètres laser (plusieurs km de fibre optique chacun) ainsi que 3 accéléromètres, a sensiblement le volume d'une demie boîte de sucre en morceaux.

En navigation le tracé de la route suivie jusqu'au port d'arrivée reste l'objectif des centrales inertielles. Cela s'applique aux navires dans un premier temps, puis aux avions²⁴⁾. Toutefois la route effective du mobile calculée à partir des données provenant de la centrale inertuelle, reste soumise à la précision des capteurs et du gyroscope (qu'il soit mécanique ou autres technologies). Une centrale inertuelle fournit une quantification très précise entre chaque écart de route (en 3D), du roulis, du tangage et du lacet. Les imprécisions (inférieure à 0.1°) du roulis et du tangage implémenté à chaque infime variation de position spatiale sont utilisées en mode relatif.

Par contre celles affectant le lacet se cumulent dans la construction de la route et provoque une déviation réelle par rapport à la route théorique. Au fil du temps, cela génère une dérive.

²⁴⁾ Pendant quelques décennies, les avions qui traversaient les océans étaient équipés d'un dôme ou le navigateur réalisait les points astronomiques.

Actuellement les centrales inertielles produisent une dérive du lacet de :

- Normal : 0.1 à 0.01°/h Aéronautique : 0.01 à 0.001°/h
- Sous-Marins²⁵ : 0.001 à 0.0001°/h

Aujourd’hui cette fonction « route » paraît presque superflue, puisque les systèmes GPS (USA), Galileo (EUR), Glonass (RUS) donne la position dans l'espace en temps réel. Ces systèmes de positionnement satellitaires permettent de recaler les centrales inertielles et ainsi de compenser la dérive du lacet. Remarquons que la pollution électromagnétique n'affecte pas les centrales inertielles.

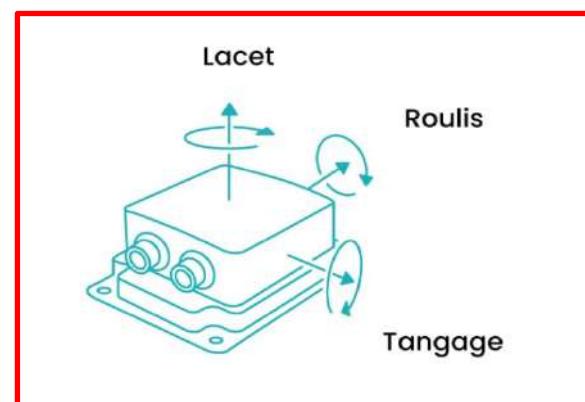
Si la fonction « route » apparaît souvent comme la plus usuelle des centrales inertielles, ce type d'équipement trouve sa place dans la stabilisation des fusées, puisque lors d'un lancement vertical, la poussée des moteurs et celle du poids de la fusée²⁶ (masse *g) additionné de la résistance de l'air sur le corps de fusée doivent être opposés et rigoureusement sur la même ligne. Pour conserver cet équilibre le flux des moteurs générant la poussée est orienté en continu à partir des données fournies par une centrale inertielle embarquée.

En intégrant des éléments de micromécaniques, des capteurs, des actionneurs et des composants électroniques sur un substrat de silicium, les ingénieurs révolutionnent la conception des centrales inertielles. Ainsi naît la technologie MEMS²⁷, qui autorise une minimalisation à l'extrême (volume divisé jusqu'à environ 300) d'une centrale inertielles et surtout une production en grande série.

Parmi les autres avantages, citons une consommation d'énergie et un coût moindres, ainsi qu'une fiabilité et une robustesse accrues.

Ces centrales MEMS possèdent une faiblesse au niveau du suivi de trajectoire.

La dérive est beaucoup plus importante que sur les centrales Giro-laser.



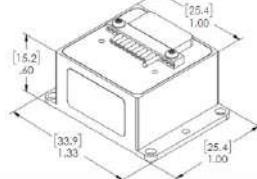
²⁵ Les sous-marins nucléaires n'étant en surface qu'au départ et à l'arrivée (même base), sont dans l'impossibilité de recaler leur centrale inertielles, d'où la très grande précision des capteurs angulaires.

²⁶ À chaque mètre d'élévation le niveau de carburant baisse et la masse diminue.

²⁷ MEMS est l'acronyme de Micro Electro-Mechanical Systems.

Ce « défaut » n'est pas obligatoirement un problème, puisqu'un GPS embarqué permet à intervalles réguliers de recaler la position initiale. Ces équipements assurent toutefois une précision inférieure à 0.1° degrés pour les valeurs des angles du tangage et de la gîte.

L'ensemble de ces évolutions et caractéristiques techniques permettent d'évaluer et de piloter l'horizontalité du vol des foilers.

Electrical	
Input Voltage	+3.8 V to +5.5 V Max (single sided)
Power Consumption	250 mW Typical / 400 mW Maximum
Mechanical	
Mass	19 grams
Size	Metric: 2.54 x 2.54 x 1.52 = 9.81 cm ³ US: 1.0 x 1.0 x 0.6 = 0.6 in ³
 	

33. Quelles applications sur un PA ?

Les contraintes de pilotage en vol, imposent que le PA corrige en continu le tangage (PHR) et le roulis (gîte) afin que l'assiette longitudinale de vol soit la plus proche possible l'horizontale et que la gîte (en fonction du vent) génère une orientation latérale du foil telle que la portance ne décroisse pas.

Seule une centrale Inertielle permet de réguler ces deux conditions en accord avec la contrainte d'altitude de vol à quelques dizaines de centimètres au-dessus du plan d'eau, tout en évoluant à des vitesses pouvant atteindre 15 à 20m/s.

Dans cette configuration de vol, l'élément variable de base reste l'instabilité de la vitesse du bateau puisqu'elle est liée à la puissance vérique, donc au vent réel en force et/ou en direction.

L'ensemble des voyants sont aux « vert » lorsque, PA enclenché, le bateau est stable en vol.

Si à un moment donné, la vitesse du vent réel diminue ou augmente, le vol devient instable.

La traduction immédiate se caractérise par une chute ou une augmentation de la portance, puisque cette dernière dépend majoritairement de la vitesse du bateau (« V^2 » dans la formule de calcul de la portance).

Simultanément, l'assiette longitudinale et la gîte du bateau (plateforme) se trouvent affectées. Avec moins de puissance, le bateau s'écroule sur l'arrière et l'angle de gîte diminue, la trainée des éléments immergés augmente.

A l'inverse, avec plus de puissance, l'arrière du bateau se soulage, le moment inclinant augmente, l'efficacité du safran en pâtit, le PHR se rapproche de la surface (fluide moins homogène) et voit son efficacité diminuer.

La comparaison de l'assiette réelle en navigation avec la référence horizontale fournie par la centrale inertielle permet de rétablir une situation conforme au plan de vol. De la précision de ces corrections, essentiellement liées à la sensibilité de la centrale inertielle (CI), dépend le résultat de l'information produite par les algorithmes du PA. L'unité de commande transmet alors aux vérins de commande de la barre, de cambrage du profil du foil ou de son incidence, ainsi qu'au PHR afin de retrouver l'assiette optimale de vol prévu.

34. Rappel sur les modes de pilotage (en mode vol)

Il y a trois modes possibles de pilotage :

- **Le pilotage manuel** assuré par un barreur et des équipiers. Ce type de pilotage concerne l'instant « t ». Il optimise les performances du bateau en fonction du vent perçu à cet instant et de l'état de la mer rencontré, tout en maintenant une altitude et une assiette de vol la plus correcte possible. Le cap à suivre est sous-jacent dans le sens où il reste un objectif global. Cela signifie que le cap à un instant peut être différent du « cap objectif ». Ce type de pilotage convient pour le vol à vue (**VFR**). Les Moth ou les AC75 qui régatent sur un plan d'eau très délimité utilisent ce mode, il est par contre inadapté aux foilers monocoques océaniques dès qu'ils envisagent une navigation hauturière.
- **Le pilotage manuel assisté**. Il faut entendre par « assisté » une assistance sous forme d'algorithmes et aussi physique (vérins...). Cela revient à fournir une aide à l'analyse, à la décision et à l'action. Le pilotage manuel assisté n'utilise pas de PA. Les ordres donnés par le pilote transitent directement vers le « Directeur de Vol » (algorithmes) qui calcule ses propres actions en fonction du domaine de vol possible. On parle de « **Boucle Court Terme** ». Une « Boucle Court Terme » génère un pilotage fin, longueur après longueur, de la trajectoire en vol du foiler. L'assistance fournie peut être graduée en fonction des prescriptions sportives imposées.
- **Le pilotage automatique** gère la gestion du Cap²⁸ ou du Way Point imposés, les conditions réelles de vol et la puissance vérique nécessaire choisie par le pilote, sans pour autant optimiser les performances du foiler. On parle alors de « **Boucle Long Terme** ».

Le pilotage Manuel Assisté

Actuellement les systèmes d'assistance au pilotage équipent de manière très inégale les foilers intégraux.

²⁸ Le cap est imposé par le skipper, soit par rapport au vent réel, ou au vent apparent, ou encore par rapport aux polaires.

En pilotage manuel assisté, l'idée revient à concevoir une sorte de « shadow » système qui agit entre les ordres du pilote et les commandes réelles des actionneurs manœuvrant les appendices, afin d'arriver à obtenir l'objectif souhaité.

Ce système devient un « **directeur de vol** ». Sa fonction, si on simplifie, consiste à maintenir le foiler horizontal au-dessus de l'eau à une altitude la plus constante possible, tout en respectant le « domaine de Vol » établi par les ingénieurs.

Ce « **domaine de vol** » dépend de la surface alaire des foils, du profil choisi, donc de leur coefficient unitaire de portance (C_z), mais aussi de l'efficacité du volet de bord de fuite, du poids du foiler... etc.

Il gère :

- a) Les éléments mécaniques qui contrôlent la Micro-Trajectoire²⁹ (évolution en 3D)
- b) La puissance du « Moteur » : vitesse du foiler (soit la vitesse du fluide qui passe autour des foils).
- c) Le Lift des foils : la portance nécessaire.

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



Dans la pratique comment s'établit la relation entre le pilote et le « directeur de vol » ?

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

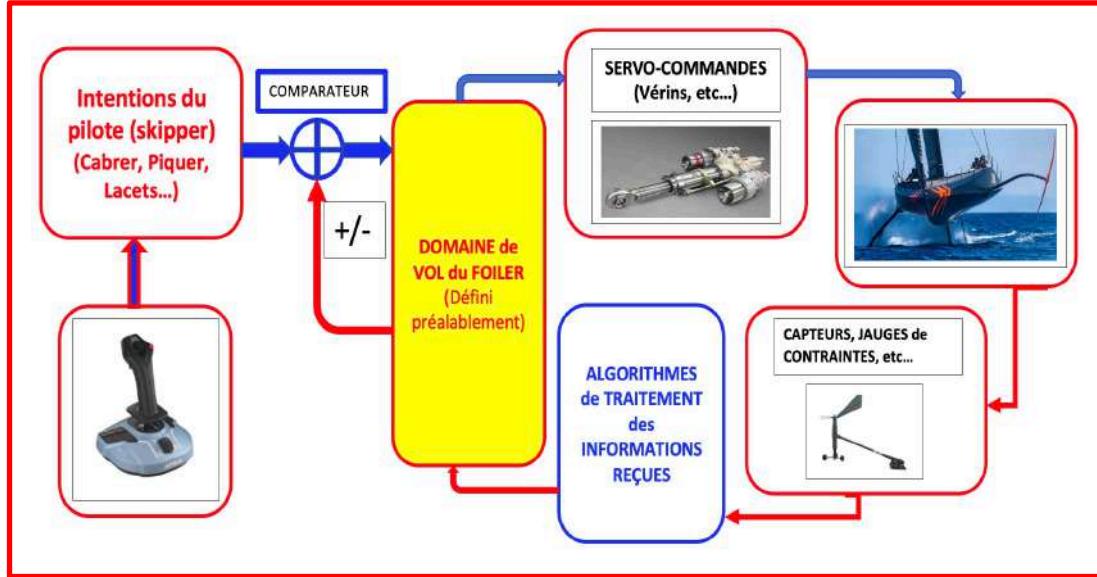
Ainsi, lorsque le pilote lance durant une route définie (cap), une manœuvre et/ou une modification de trajectoire à un instant « t », il n'agit pas directement sur ces actionneurs (flaps, vérins, etc.) mais il fournit au « directeur de vol (algorithmes) » une **intention** qui peut être : un cabré, un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

Cette intention est analysée par le « directeur de vol », puis comparée au « domaine possible » de vol du foiler, aux conditions extérieures de l'instant et aux paramètres instantanés de vol du foiler.

²⁹ On peut dire que la Micro-Trajectoire est celle qui correspond aux quelques dizaines de mètres parcourus et qui s'enchaînent à l'infini. La Macro-Trajectoire est la route à faire (le cap)

A l'issue de l'analyse, les informations sont envoyées aux appendices et aux éléments de contrôle de la puissance.

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



Il me semble évident que, très rapidement, les foilers seront pilotés activement par des processeurs.

Pour le moment, c'est pratiquement interdit par les règles de course et de classes, mais, vu le gain de vitesse et surtout de sécurité à attendre de l'automatisation du pilotage des foilers, ce n'est qu'une question de temps avant que ces barrières tombent.

L'Ultim « Edmond de Rothschild » s'est déjà affranchi pendant un temps des règles de la classe Ultim. Coté America's Cup (AC), ce type de pilotage assisté est interdit en course, mais il a été utilisé pour mettre au point les algorithmes de pilotage et entraîner les équipages à essayer de faire aussi bien que l'algorithme !

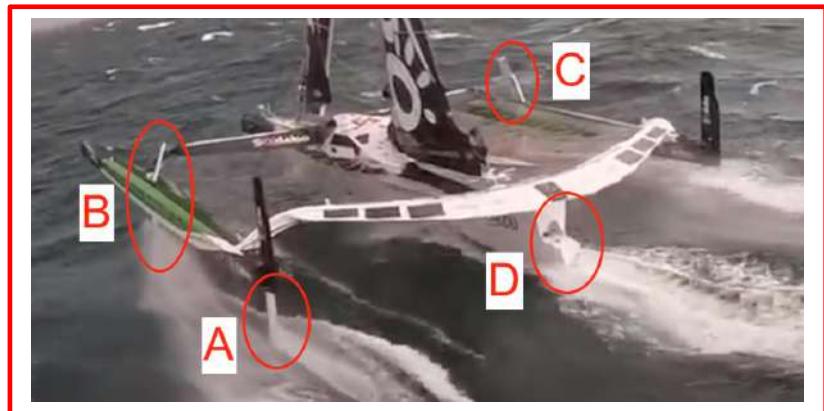
Aujourd'hui la règle de jauge des ULTIM autorise, lors des records, l'utilisation d'une boucle d'asservissement. Cela permet, par exemple, de confier au PA la commande les élévateurs arrière implantés sur les safrans de flotteur et de la coque centrale.

Deux vidéos de SODEBO de décembre 2024 publiées durant le record Jules Verne (juste avant de passer le cap de Bonne Espérance puis aux abords des Kerguelen à partir d'un drone) renseignent sur le fonctionnement du pilotage de l'ULTIM en équipage et son comportement à la mer.



L'équipier de quart manœuvre en permanence un volant transversal qui agit sur le volet de bord de fuite de l'aile de raie. Dans son commentaire il précise « *je contrôle l'élévateur de la dérive centrale* ». Durant cette vidéo, on voit la barre à roue située dans son dos qui oscille pratiquement en permanence.

Sur la vidéo prise à partir du drone, en « A » on voit très bien que pratiquement l'ensemble du safran sous le vent se trouve hors de l'eau, à limite du PHR (en fait tout le flotteur est sustenté).



En « B » le foil est entièrement en position basse, seule la chèvre de relevage est visible.

En « D » l'extrémité basse du tableau arrière de la coque centrale se trouve à la limite de la flottaison. En « C » le foil est en position haute maximale.

Le contrôle de la hauteur de la coque centrale en agissant sur la portance ou la déportance effective du foil implanté sur la dérive (appelée aile de raie) permet d'élever cette coque ou de la laisser retomber par son propre poids. Cette action régule l'angle de gîte de quelques degrés mais surtout évite que les plans régulateurs arrière (PHR) se retrouvent trop près de la surface dans un flux très perturbé (eau + bulles d'air).

Comment le pilote agit ?

En aéronautique, en vol à vue (VFR), le pilote en plus de sa vision de l'horizon qu'il voit devant lui, contrôle son assiette en s'aidant notamment de l'imagerie (capteur inertiel) « Avion / Horizon » renvoyée sur un écran.

Cela paraît simple. La réalité est toutefois plus complexe car sur un foiler vélique le paramètre puissance (c'est-à-dire la vitesse) disponible est très difficile à maîtriser puisqu'il dépend de la force et de la direction du vent à l'instant « t ».

Le vecteur propulsif vélique est potentiellement moins important que la portance aérodynamique de la voile. Cela rend le foiler sous motorisé, malgré une surface de voile importante. Une grande partie de la portance aérodynamique étant « convertie » en dérive (d'où le risque de chavirage).

L'ensemble de ces contraintes rend le pilotage manuel assisté possible en équipage mais très aléatoire en solitaire.

Le pilotage en mode « pilote automatique (PA) »

En mode pilotage automatique, le skipper passe intégralement la main à une « boîte » intégrant le « Domaine de vol » et le « Directeur de Vol ». Cette « boîte » délivre alors les informations nécessaires à l'Unité de Commande qui exécute et contrôle les actions).

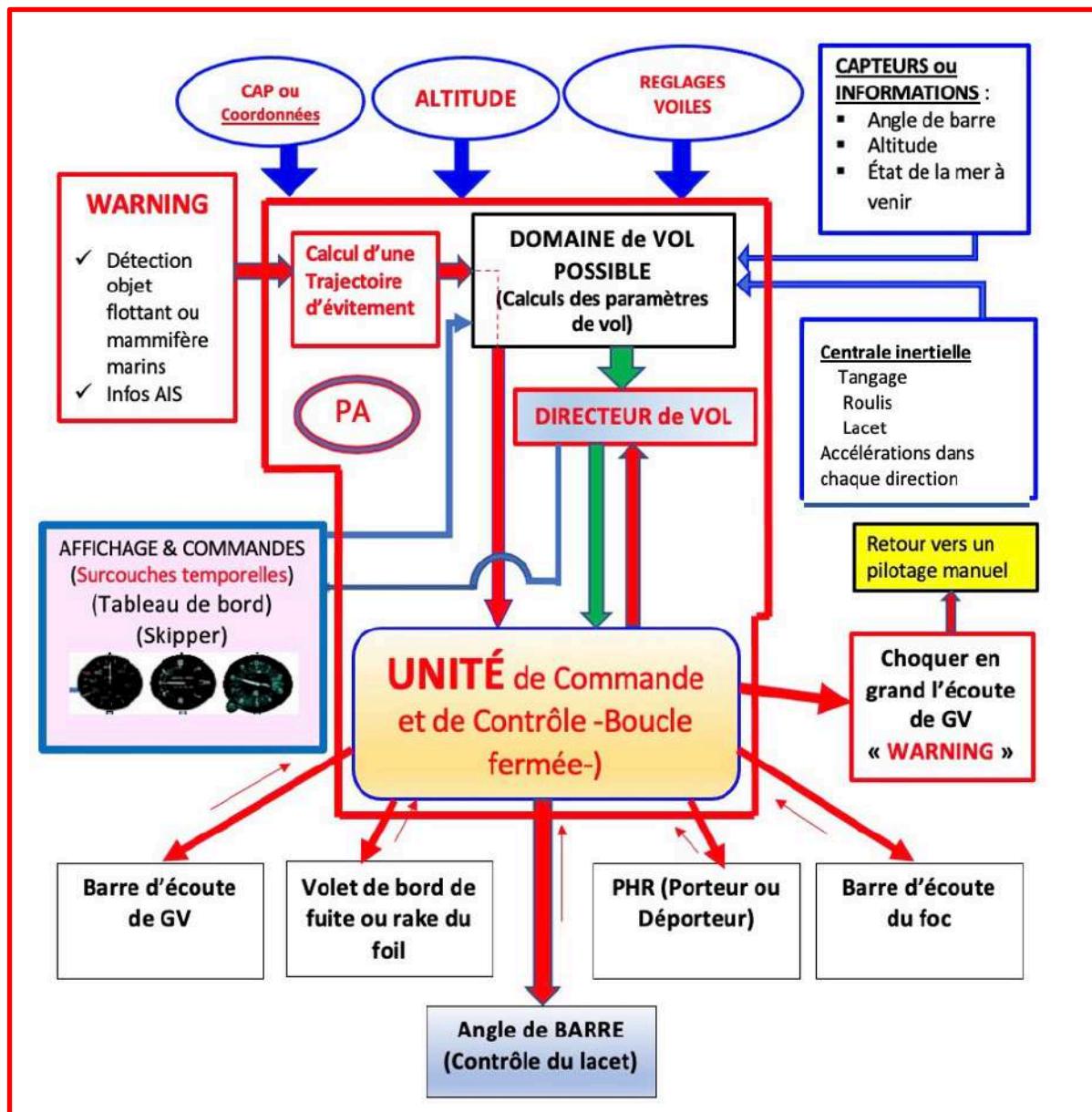
Cet ensemble forme le « PA »

Le skipper fixe trois paramètres :

- **Le cap (ou un Way Point)**
- **Le réglage des voiles de base**
- **L'altitude vol**

Fixer le cap ou un Way Point représente l'objectif principal dans un parcours de régate.

Les contraintes liées à l'altitude de vol, à l'assiette de vol (horizontale) et au vent vitesse (portance des surfaces sustentatrices) rendent la conception d'un pilote automatique de monocoque foiler intégral très complexe.



L'assiette de vol du foiler dépend de la vitesse du flux d'eau qui passe autour des surfaces sustentatrices. Elle intervient à la puissance 2 dans le calcul de la poussée verticale.

En théorie, une baisse ou une augmentation de la vitesse du foiler, par exemple de 25 à 24 (ou 24 à 25) noeuds, soit 4%, produit une chute ou un accroissement de la portance de 7 à 8% et, de fait, un risque élevé de perte de contrôle du foiler par le skipper.

La forme du foil par son cambrage modifié par le volet de bord de fuite ou son calage spatial (modification de l'angle d'incidence) influe sur la portance unitaire (C_z) du profil. Cela se traduit aussi sur la portance (lift vertical) dans le calcul.

Vu l'importance (puissance 2) du paramètre vitesse, en cas de chute de cette vitesse, il faut agir rapidement afin de conserver le niveau de la portance : clef de l'altitude de vol.

Sur un foiler, trois types d'actions sont alors envisageables pour réguler la vitesse :

- ✓ Soit agir sur la géométrie du foil en augmentant le cambrage, ou directement sur l'angle d'incidence.

Cette adaptation modifie le coefficient unitaire de portance C_z mais reste quantitativement relativement limitée (6 à 10%). De plus, à trop cambrer ou trop augmenter l'incidence, on risque le décrochage.

- ✓ Soit modifier la vitesse d'écoulement du fluide, c'est-à-dire la vitesse du foiler.

La solution le plus optimale et la plus rapide consiste à modifier très temporairement le cap du foiler de quelques degrés (lofer) afin de conserver un vent apparent le plus constant possible. Ce raisonnement fonctionne aussi dans l'autre sens : c'est-à-dire lorsque la vitesse augmente (risée). Dans ce cas, il faut abattre.

- ✓ Soit adapter en continu la propulsion vélique, en jouant sur les réglages principaux des voiles et leurs interactions mutuelles.

Reste alors à fournir au PA les données relatives l'environnement extérieur instantané et ses évolutions. Actuellement, les règles de course en vigueur doivent être largement réécrites afin que ce « PA Idéal » soit utilisable en Offshore ou en Inshore.

35. L'acquisition de données

La navigation en mode sustentée reste très instable et dépend de la précision de pilotage par le PA. Or l'algorithme de pilotage, certes respecte les 3 consignes de base ci-dessus, mais dépend aussi et surtout des effets de l'environnement extérieur sur le foiler.

Il existe donc deux familles de données :

- Les données propres aux conditions de vol, issues de capteurs ou d'équipements implantés sur le foiler
- Les données relatives à l'environnement immédiat.

Les données issues de capteurs ou d'équipements :

Elles sont collectées à partir des capteurs installés sur le foiler :

- Jauge d'évaluations des sollicitations mécaniques
- Les données GPS et le cap

- L'anémomètre, la girouette. Le speedomètre (pour le régime archimédien)
- Les accélérations dans les 3 axes (accélérations linéaires et en rotations)
- Les valeurs angulaires du tangage, du roulis et du lacet
- L'altitude de vol. Cette information primordiale pour assurer un vol stabilisé apparaît très difficile à quantifier car la plateforme d'un foiler intégral n'est pas toujours horizontale, notamment à cause de sa gîte et aussi parce que la surface de l'eau est loin d'être un plan parfait.

Les données relatives à l'environnement.

- L'environnement physique devant le foiler. C'est d'abord les autres navires généralement identifiés sur l'AIS. Le différentiel important de vitesse avec ces navires génère des situations de rapprochement qui peuvent devenir rapidement problématiques. Il existe aussi des possibilités de heurts avec des mammifères marins ou des objets flottants. La vitesse des foilers amplifie le niveau des dommages résultants de ces collisions. L'AIS permet de gérer les navires environnants et d'être identifié dans sa zone de navigation.

Les alarmes permettent de prendre des décisions d'évitement. Par contre la détection des mammifères marins ou d'épaves au-delà d'une cinquantaine de mètres de l'étrave (3.3 secondes à 15m/s) paraît difficile et surtout peu fiable.

Et quand bien même la détection serait effective, la décision d'évitement, et surtout la trajectoire à choisir dans un temps aussi court, semble illusoire.

- L'état de la mer devant « l'étrave ».

Une bonne connaissance du terrain que le foiler volant à l'altitude d'environ 1.5m rencontrera dans les 3, 4 secondes à venir (soit une cinquantaine de mètres à parcourir) paraît nécessaire afin d'assurer un pilotage sous PA conforme au domaine de vol. Cela suppose une très grande réactivité du système de détection et d'analyse de la surface du plan d'eau.

Des systèmes embarqués de reconnaissances et de quantifications des formes du plan d'eau (situé devant le foiler), par caméra numérique ou balayage laser, existent. Toutefois, ces technologies embarquées (souvent encore à l'état de prototypes), demandent des moyens technologiques complexes à planter, hors de prix, et très énergivores.

Les mathématiques offrent une possible solution qui s'appuie sur les fonctions heuristiques.

Une fonction heuristique est un outil mathématique qui classe les évènements perçus à l'instant « t » (par exemple l'état de la mer, le vent, etc.) et qui, par un algorithme de comparaison (successions logiques de

« oui/non ») avec des configurations antérieurement acquises en naviguant, propose une solution pour ce qui va se passer à « t+1 ».

Pour simplifier cela revient à dire : « *voilà 3 vagues successives que je viens de subir et dont je viens d'analyser les caractéristiques. En associant ces 3 vagues aux apprentissages et historiques antérieurement acquis, je peux présager des évolutions possibles des vagues à venir (sous-entendu la 4^{ème} et la 5^{ème} vague), et régler le PA et les appendices afin de faire face à cette prédition*

En plus de donner une solution ponctuelle nécessaire pour l'instant « t »), les interconnexions des algorithmes entre eux l'intègrent dans la base de données globale. Avec cet enrichissement continu de la base de données, on parle d'apprentissage et d'IA générative (Intelligence Artificielle).

L'IA, à condition d'être embarquée, (nous reviendrons dans un prochain chapitre sur le fonctionnement de l'IA) devient un possible recours pour trouver une solution approximative aux problèmes lorsque les méthodes d'analyses prévisionnelles ou de détection en temps réel s'avèrent impossibles à mettre en œuvre³⁰.

On troque alors l'optimalité, l'exhaustivité, l'exactitude ou même la précision de ce qu'on devrait faire dans un mode idéal contre la vitesse de décision des corrections à anticiper et appliquer au pilotage du foilier.

Au final, la solution produite et implémentée sur le PA apparaît comme suffisamment bonne pour résoudre le problème en question : piloter le voilier d'une manière optimale. Pour autant, elle ne sera pas la meilleure de toutes les solutions. On peut simplement espérer qu'elle se rapproche le plus possible de la solution exacte et qu'elle reste viable car elle est très réactive.

Reste qu'un PA capable de fournir un pilotage dans ces conditions, dépend d'éléments techniques (capteurs, centrale inertuelle, unité de puissance, capteurs de positions, algorithmes) de haut niveau technologiques et surtout homogènes entre eux au niveau de leurs caractéristiques.

36. Comment un PA « universel » devient « MyPA »

Sur le schéma général du PA décrit précédemment, les concepteurs greffent et corrèlent le PA avec la réalité physique propre à chaque bateau.

³⁰ Lorsque le bateau vole à 15m/s, il est très difficile de détecter et d'éviter les « nids de poules » et autres obstacles qui se trouvent devant l'étrave et surtout devant les surfaces sustentatrices.

En effet, toutes les carènes ne possèdent pas les mêmes caractéristiques : longueur, largeur maximale, formes avant, largeur du tableau arrière, déplacement, voilure, etc... D'autres paramètres comme les moments d'inertie sur chacun des 3 axes X, Y, Z, les polaires de vitesses archimédiennes, la position du CG (centre de gravité), l'évaluation de centrage AR, entrent aussi dans le calibrage du PA.

A ce niveau, le travail en simulateur commence. Les dizaines d'heures de vol en simulateur permettent de valider l'ensemble de cette technologie afin d'établir le domaine de vol propre à ce foiler.

Commencent alors les fastidieuses campagnes « d'essais » en mer. Lors de ces essais, l'équipe compare point par point tout le travail réalisé en simulateur et procède aux validations. Normalement, à la fin des essais, le domaine de vol est établi.

A partir de ce PA en osmose avec le bateau, les concepteurs proposent aussi des « surcouches algorithmiques personnalisées » qui permettent, au skipper, une fois le PA enclenché, d'adapter finement les informations générées aux conditions du moment qui peuvent être légèrement différentes de celles, théoriques, prévues dans les algorithmes. Et cela malgré les essais.

Ces surcouches portent principalement sur la réactivité entre la détection et les actions de réglages. Les concepteurs proposent souvent un filtrage du vent afin de réaliser un écrêtage de l'instabilité angulaire du vent et de sa force. En d'autres mots, on souhaite régler le PA afin qu'ils ne répondent pas instantanément à un shift du vent. Certains concepteurs de PA affinent les performances avec des surcouches plus techniques qui superposent la consigne de base (le cap) sur les polaires réelles de vitesses propre au bateau. On cherche alors à pondérer les critères cap ou polaires dans les options de routes prises par le PA. Certains constructeurs de PA évoquent des fonctionnalités intelligentes !

37. On parle beaucoup d'IA sur les pontons

Dans les chapitres précédents je fais référence de manière restrictive à l'IA. Aujourd'hui la presse s'enflamme beaucoup sur l'Intelligence Artificielle (IA) qui devrait, à la place de l'homme, aider, remplacer, proposer, différentes solutions à des problèmes quels qu'ils soient.

La régate côtière ou océanique n'échappe pas à cet engouement. Mais d'abord définissons bien les sens des mots.

Quelques rappels : Un algorithme est une suite séquentielle d'instructions qui, lorsqu'il est alimenté en données par un opérateur ou un capteur, permet de résoudre un problème (calculs ou autres types de résultats). La fonction d'un algorithme est unique. La notion d'algorithme remonte à une invention d'un mathématicien persan vers l'an 900 de notre ère. Une époque où personne n'imaginait l'informatique.

L'IA n'est pas un nouveau concept. Alan Turing³¹ en a posé les bases dans les années 1950 en proposant de dissocier l'analyse algorithmique, donc séquentielle, qui permet de produire les résultats de calculs, de l'approche conceptuelle et cognitive, et ainsi de construire des machines qui se rapprochent de l'intelligence humaine.

Pour Alan Turing, ce qui est calculable donnera un résultat toujours identique. Par contre, le non-calculable peut évoluer de manière imprévisible. L'exemple typique de ce non-calculable se constate dans les évolutions subites des masses d'air en météorologie.

Les évolutions de la technologie (Data Center, processeurs hyper rapides, etc....) permettent maintenant le développement de l'IA dans la sphère publique.

Comment travaille l'IA ?

Dans l'IA on trouve des algorithmes comme ceux du **Machine Learning** et du **Deep Learning**. Ces types d'algorithmes peuvent présenter un intérêt pour la gestion d'une course offshore (pilotage, météo, contrôles...).

Le Machine Learning ou apprentissage automatique consiste à laisser des algorithmes découvrir des éléments récurrents dans les ensembles de données dont on dispose. Ces données peuvent être des chiffres, des mots, des images, des méthodologies de calculs, etc... Ainsi un algorithme de Machine Learning apprend de manière autonome à effectuer une tâche ou à réaliser des prédictions à partir de ces données. De plus, à force de tourner, ils améliorent leurs performances au fil du temps. Une fois entraînés, ces algorithmes peuvent trouver les réurrences dans de nouvelles données.

Le Deep Learning ou apprentissage profond (au sens « approfondi ») est un sous-ensemble du Machine Learning, en somme une amélioration de la manière d'apprendre.

³¹ Alan Turing (1912-1954) : Mathématicien et cryptologue britannique qui pose les bases de de l'intelligence artificielle. Il est connu pour ses travaux lors des opérations de cryptanalyse de la machine de codage allemande durant la Ww2.

Il utilise des algorithmes conçus pour apprendre à partir de grandes quantités de données en fonctionnant vaguement comme le cerveau humain (ne soyons pas trop prétentieux). On parle alors de réseaux neuronaux artificiels.

En fait ce sont des couches de nœuds électroniques qui s'apparentent à des neurones³² du cerveau humain. Matériellement il y a une couche d'entrée, une ou plusieurs couches cachées et une couche de sortie.

A chaque passage par un nœud, une analyse algorithmique déclenche l'alternative suivante : blocage de l'information ou transmission à la couche suivante, etc... Jusqu'à la couche de sortie qui produit le résultat. Un modèle Deep Learning utilise des centaines ou des milliers de couches cachées. L'objectif du Deep Learning est d'améliorer l'automatisation d'une ou plusieurs tâches.

Par contre, le Machine Learning exige, comme le Deep Learning, des énormes capacités de calculs et de stockage car il traite de très grandes quantités de données. Pendant longtemps, seuls les Data Center pouvaient fournir à la fois la capacité de stockage et la puissance de calcul. Grâce aux besoins de l'informatique dédiée aux jeux vidéo, les industriels ont créé de nouveaux processeurs qui fonctionnent en parallèle de la CPU (Unité Centrale de Traitement) qui équipe tous les PC.

Deux types de processeurs :

Le GPU (Graphic Processing Unit) : créé pour le traitement du graphisme et les photos (jeu vidéo), il permet aussi d'exécuter des milliards de calculs simultanément et répétitifs.

Le nPU (neurol Processing Unit) : de manière identique, les **nPU** sont particulièrement conçus pour accélérer les calculs associés aux réseaux neuronaux, donc aux Deep Learning. Ces unités peuvent traiter les tâches de calcul matriciel et vectoriel, que l'on retrouve dans les algorithmes possiblement utilisables en navigation.

Les processeurs GPU dédiés au graphisme étant relativement gourmands en énergie, environ 350 à 500 Watts sans compter le PC, ils ne peuvent pas être embarqué sur un bateau. Par contre, les processeurs nPU, orientés spécialement vers les calculs consomment 10 fois moins (30 à 50 Watts).

³² Le cerveau est composé de 100 milliards de cellules nerveuses, appelés neurones. Cet ensemble constituent un réseau câblé très précis qui perçoit et transmet des informations.

On peut donc imaginer qu'ils puissent être implantés dans un PC et embarqué à bord d'un voilier océanique, fut-il un monocoque foiler. Même en supposant que l'on embarque 2 PC (système redondant), on se limite à 200 watts (PC + nPU + stockage).

En résumé...

Les **nPU** et, à fortiori, le **GPU** constituent aujourd’hui les composants essentiels pour l’IA car ils permettent d’effectuer des calculs parallèles et spécialisés.

Ces types de processeurs permettent aussi de concevoir des algorithmes qui interprètent les données de la base de connaissances et assurent, suivant des stratégies générales ou particulières, l’enchaînement automatique vers la résolution d’un problème donné.

Dans l’état actuel, l’IA se divise en plusieurs domaines, mais cette classification peut largement évoluer :

- i. **L'apprentissage contrôlé** : à une question posée, un algorithme analyse des données existantes et vérifiées et, par successions séquentielles de « vrai ou faux », propose un ou plusieurs résultats à la question.
- ii. **L'apprentissage non contrôlé** : dans cette configuration, l'algorithme explore les données, quel qu'elles soient sans aucun contrôle sur leurs véracités par rapport à la question. De ces résultats, l'algorithme propose l'assemblage le plus logique possible entre toutes ces données. Le résultat étant nécessairement très influencé par le programmeur, c'est à dire l'intelligence humaine.
- iii. **L'apprentissage par l'erreur** : **L'apprentissage par l'erreur** : une analyse d'une erreur ou d'un incident permet d'identifier et de lier les causalités avec cet évènement.

Un algorithme peut donc inventorier tout ce qu'il ne faut pas faire dans une situation bien précise. Suite à une proposition d'action, cet algorithme propose une réponse par comparaison avec ce qu'il ne faut pas faire.

Ainsi, on tend progressivement et théoriquement vers des prédictions sans faute en réponse à une action bien précise.

De l'utilisation de l'IA sur des foilers

L'intelligence artificielle (IA) peut certainement jouer un rôle dans la conception de foilers. L'IA par sa capacité à analyser de très grand nombre de données, permet de situer ou en est l'état de l'art avant le début d'une conception, de navigations, d'expertises dans le domaine des matériaux, de thèses traitant de l'hydrodynamique, l'aérodynamique, etc.... Ensuite elle peut devenir l'outil de travail des architectes et des ingénieurs durant toute la conception et la réalisation. Pour autant l'IA toute seule ne produira jamais le « foiler du siècle », sans le talent des hommes qui tiennent le crayon.

Parmi d'autres utilisations possibles se trouve le domaine du routage, même s'il est réalisé depuis la table à carte du bateau. L'IA peut fournir une évolution des données météorologiques du moment augmentées par une analyse scientifique des données antérieures et cela sur plusieurs années.

L'IA et les Pilotes Automatiques ?

Actuellement les PA utilisent des algorithmes basés sur des règles fixes et des modèles de contrôles traditionnels. S'il n'est pas certain que l'IA intervienne directement dans la conception technique (au niveau des matériels) des PA, il paraît évident que l'IA offre la possibilité d'améliorer les phases d'apprentissage d'un PA, donc son optimisation, par sa capacité à analyser des volumes importants de compilations des données issues des nombreuses heures de pratique sur simulateur (réussites, échecs).

Rapidement les développements de l'IA, permettront à un PA de gérer simultanément le pilotage du foiler et les contrôles en temps réels des équipements (mat, gréement, etc....) afin de prévenir des ruines mécaniques.

Le développement de l'IA et son incursion dans la gestion du pilotage par le PA se trouve en conflit avec les règles de course (RCV) dont la rédaction ne concerne que l'action de l'humain et non d'algorithmes.

38. La RCV³³ 52 – Energie Manuelle :

"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."

Pour piloter un foiler (en vol) de jour comme de nuit, qui plus est en solitaire, la règle 52 des RCV (Règles de course à la voile) doit être amendée. En effet cette règle impose l'utilisation exclusive de l'énergie d'origine musculaire pour tous les types de manœuvres à opérer sur un bateau, fusse-t-il un foiler.

³³ RCV : Acronyme pour Règles de Course à la Voile (Règle internationale)

Depuis des décennies, les organisateurs adaptent cette règle afin d'autoriser qu'une énergie autre que celle produite par le skipper actionne certains appendices. Cette dérogation s'applique aux courses en solitaire ou en double, et autorise le contrôle du safran par un PA.

D'autres équipements comme les quilles pendulaires peuvent aussi bénéficier d'une dérogation et être manœuvrés par les vérins. Par contre en aucun ces opérations doivent être associées au PA ou un autre automate.

La régate est un sport mécanique. Les évolutions permanentes des développements techniques pour améliorer des performances contribuent à l'engouement des équipages pour la régate. Ce schéma fonctionne très bien lorsque les bateaux restent dans le domaine archimédien. Lorsque le bateau devient foiler son gap de vitesse est de 80 à 100%.

Ce nouveau paradigme impose une refondation des RCV dont la règle 52 afin de tenir compte des techniques de pilotage des foiler. Mais à parler d'énergie, dont on voit qu'elle n'est pas toujours uniquement manuelle, amène à évoquer la consommation énergétique journalière et son corolaire sa production.

39. Energie nécessaire à bord d'un foiler océanique....

Au fil des années, la demande en énergie croît afin de suivre les évolutions technologiques et d'assurer le fonctionnement de tous les équipements implantés à bord,

C'est d'autant plus vrai pour des foilers monocoques océaniques dont le pilotage passe obligatoirement par un PA agissant sur l'ensemble des paramètres qui gèrent l'assiette de vol.

Quelques repères s'appuyant sur les foilers AC75 et sur les IMOCA (monocoque archimédien s'appuyant sur deux surfaces sustentatrices) bien que leurs types de navigation soient très différentes.

Un **AC75** qui navigue obligatoirement en vol à vue, utilise quatre équipiers cyclistes afin de produire l'énergie nécessaire pour assurer le vol en respectant la règle 52 amendée des RCV³⁴. Les expériences en salle de sport montrent qu'un cycliste peut produire 1100 watts environ pendant 30 secondes, ou 530 watts pendant 5 minutes ou encore 400 watts sur 20 minutes. Quatre cyclistes développent donc une puissance potentielle de 1300 à 1600 watts durant les 30 à 40 minutes que dure chaque régate.

Soit une énergie de $1450 * (30/60) = 725$ Wh sur 30 minutes.

³⁴ Toutefois cette règle 52 est plus ou moins aménagée par l'organisateur.

En extrapolant, un tel foiler que l'on souhaiterait faire naviguer 24H d'affilé, consommerait en moyenne 34000 Wh/jour d'énergie (1450 * 24).

Un IMOCA de la dernière génération consomme près de 7000 Wh/jour soit 80% de moins qu'un AC75 sur 24 H. Cette comparaison donne uniquement un ordre de grandeur des consommations respectives. En effet les types de navigation influent sur la quantité d'énergie nécessaire à chaque support pour naviguer. Par exemple et contrairement à un AC75 qui peut entreprendre une trentaine de virements de bord ou d'empannages sur une manche de 30 à 40 minutes, un IMOCA limite ces types de manœuvres. Lors du Vendée Globe 2024/25, Charlie Dalin effectue 25 empannages entre le Cap de Bonne Espérance et le Sud de la Nouvelle Zélande (6500 milles).

Un virement de bord ou un empannage sur un AC75 se caractérise par le basculement de 65° de chacun des deux bras alors que sur un IMOCA le quillage se limite à une rotation de 36° environ.

Les AC75 utilisent, comme les IMOCA, des vérins hydrauliques pour ces manipulations. Mais là s'arrête la comparaison. Les 4 cyclistes des AC75 agissent sur la pression interne d'un ou plusieurs accumulateurs hydrauliques qui permettent de piloter chacun des vérins de commande des bras des Foils.

Le quillage au vent de la quille pendulaire d'un IMOCA utilise un process particulier. Pour chaque manœuvre (virement de bord ou empannage), la première phase est réalisée par gravité jusqu'à la gîte 0° du bateau, puis la pompe électrohydraulique prend le relai pour envoyer la quille au vent (70A en 24V durant 2 minutes environ soit une puissance développée de 1680 W et 56Wh par manœuvre).

Des batteries de service ou des super-condensateurs alimentent un moteur électrique couplé à une pompe hydraulique à pistons (250 à 300 Bars) afin d'assurer ces manœuvres de quillage. Le choix d'utiliser des super-condensateurs se justifie par un temps de recharge très court, 4 à 5 minutes, à partir de l'énergie sur le parc batteries de service.

Afin de conserver un vol le plus stable possible, les manœuvres des bras de foils (AC75 et foiler intégral de conception générale similaire) demandent beaucoup de réactivité donc de puissance électrohydraulique mais aussi une infrastructure identique sur chaque bras.

Ajoutons que ce type de conception à patins (foils) latéraux oblige à avoir les 2 foils opérationnels durant un court instant, donc les vérins sous pression lors de chaque virement de bord ou empannage.

Les postes généraux de consommation électrique comprennent :

- ⇒ L'implantation d'une centrale inertielle et ses périphériques (les micros centrales inertielle du type NEMS affichent une puissance 1 à 3 W en permanence soit 72 Wh/jour),
- ⇒ Les instruments de navigation, dont le PA,
- ⇒ L'équipement informatique (Unités Centrales, écrans ...)
- ⇒ L'éclairage, la ventilation, le dessalinisateur, les pompes de ballastage éventuelles,
- ⇒ L'ensemble de capteurs, des automates et des systèmes d'acquisitions gérant le contrôle en continu de l'évolution des sollicitations mécaniques de la plateforme, du PHR, des volets de foil, du mat, du gréement, des bras, du voile de quille, du PA.
- ⇒ Les PC équipés de nPU (200 W)
- ⇒ Le stockage des données sur disque dur SSD haute capacité (8 à 10 To) demande entre 5 et 7 W, soit 144 Wh/jour.
- ⇒ Les communications satellitaires.

Le bilan total s'approche de 800 W soit environ 19000 Wh/jour.

Cette consommation énergétique, n'est pas en soi exceptionnelle pour un foiler de 19 m et 7 à 8 tonnes de déplacement dont le potentiel de vitesse en navigation est en théorie de 35 à 40 nœuds en permanence. Ce n'est jamais que l'équivalent d'un petit radiateur électrique.

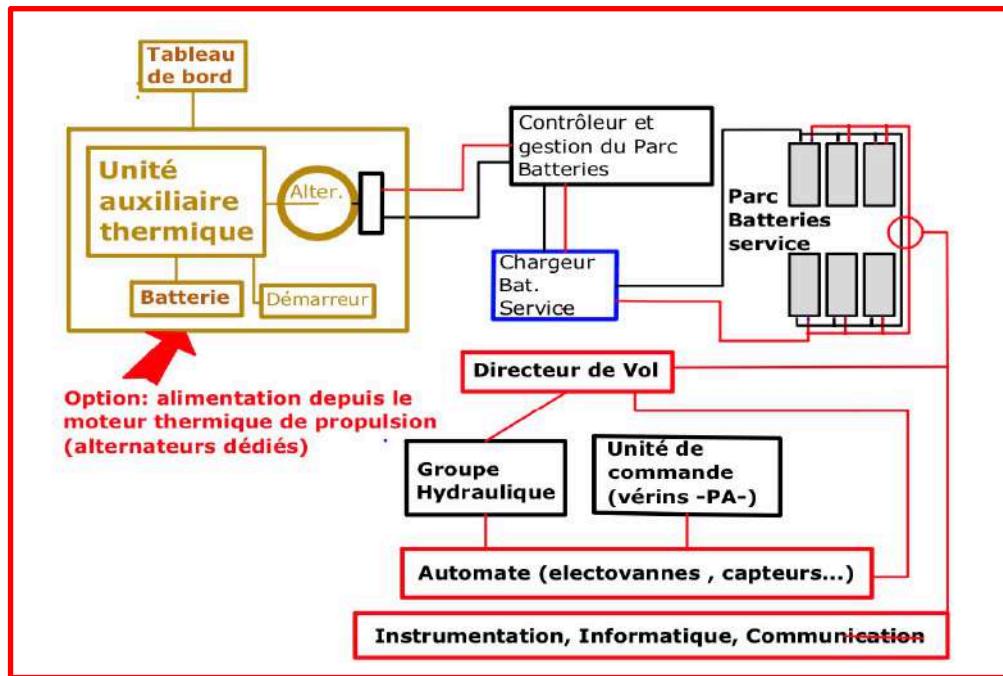
Pour disposer d'énergie électrique à bord il faut la produire et la stocker. Deux solutions fiables permettent d'en disposer en continu.

Soit, on utilise le moteur thermique de propulsion comme source mécanique auquel on couple un alternateur adapté ou alors, on opte pour un groupe électrogène dédié uniquement à la production permanente d'électricité (Unité de puissance auxiliaire).

La différence entre les deux modes de production réside dans leur utilisation. Dans premier cas le moteur thermique de propulsion (30 à 40 kW, 1500 cm³) fonctionne uniquement lorsque le niveau électrique du parc batterie atteint la limite basse admise par le type de batteries (Plomb, Lithium, autres...), soit une à deux heures par jour selon la capacité du parc batteries de service embarquées et la consommation.

L'autre solution s'appuie sur un groupe électrogène (batterie + moteur + alternateur) qui fonctionne en permanence. Ce groupe conçu à partir d'un moteur thermique diesel de 200 cm³ d'une puissance de 2 kW fournit à mi régime une puissance électrique nécessaire pour une consommation de 0.15 litre / heure.

Un groupe électrogène indépendant permet aussi de disposer d'un système de production d'énergie redondant, puisqu'en cas de défaillance du groupe, on peut basculer sur le moteur de propulsion.



Ce système de production de l'énergie utilise uniquement des hydrocarbures (GO) comme source d'énergie pour produire l'électricité. La technique du vol intégral nécessitant une alimentation fiable de l'ensemble des équipements nécessaires au pilotage (dont le PA), le groupe électrogène autonome apparaît comme la meilleure solution technique.

Une amélioration de l'empreinte carbone est possible. Les manœuvres portuaires mais aussi des éventuelles interventions sécuritaires imposent d'équiper le foiler d'un moteur de propulsion. L'habitude veut que cette motorisation soit thermique.

Le remplacement de la motorisation thermique par un moteur électrique d'une quinzaine de kW (environ 20CV) semble possible en combinant une augmentation de la capacité du parc batterie avec le fonctionnement du groupe électrogène. Cette configuration impose un protocole d'utilisation assez rigide de l'énergie disponible, entre la capacité du parc batterie et celle produite par le groupe.

Toutefois l'autonomie électrique ne sera jamais celle offerte par le gas-oil, mais permettra de faire les approches et les manœuvres portuaires.

L'utilisation de panneaux solaires, d'hydroliennes (difficile à implanter sur un foiler), d'éoliennes permettent de réduire la quantité de carburant consommé. L'électricité éolienne ou photovoltaïque reste une énergie intermittente et non maîtrisable. On peut imaginer combiner l'ensemble de ces moyens de production, mais pour un foiler dont le poids représente l'ennemi n°1, cela apparaît comme rédhibitoire. Cette approche paraît donc inadaptée dans le cas d'un foiler intégral.

Ces derniers chapitres traitent des conditions de vol, des modes de pilotage, de l'assistance d'un PA, de l'introduction de l'IA, de l'énergie nécessaire, de l'environnement maritime... Autant de contraintes qui compliquent la navigation océanique sur un foiler monocoque mais aussi multicoque. Peut-on alors se poser la question évoquée dans le chapitre qui suit ?

40. La quête de vitesse justifie-t-elle les contraintes liées au vol ?

La gestion technique du vol appliquée aux multicoques océaniques (trimarans ULTIM) fonctionne correctement, bien que le niveau autorisé d'automatismes soit différent entre les courses offshore (règles de base de World Sailing) et les records comme le Jules Verne (règlement propre à chaque record). Les performances obtenues apparaissent assez proches des prévisions recherchées.

Aujourd'hui, les vitesses moyennes de 24 à 28 nœuds sur de longues distances deviennent courantes. Elles se situent entre 35 et 40 nœuds lorsque l'état de la mer et la force du vent le permettent.

Toutefois l'environnement et la spécificité de ces foilers multicoques se trouvent confrontés à certaines contraintes.

D'abord les collisions avec des mammifères marins ou des objets flottants.

Les conséquences d'une collision avec un « objet » flottant dépend de l'énergie cinétique emmagasinée par le bateau, qu'il soit archimédien ou foiler, et de la vitesse, de la trajectoire et de la masse de l'obstacle rencontré.

Ces derniers paramètres étant très aléatoires. Un container de 40' (12.19m) vide pèse environ 3 tonnes pour un volume de 70 m³. Sa masse maximale peut atteindre dans les 25 tonnes. Sa vitesse de dérive est très faible.

La nature très variée des contenus des containers comme celle de leur flottabilité rend impossible toute évaluation des conséquences d'un tel abordage. Les navires signalent la perte de containers aux autorités maritimes, qui mettent en place une surveillance de la zone.



Pour les mammifères marins, c'est sensiblement le même problème. Une baleine, un rorqual, cachalot affichent des masses de 140 à 15 tonnes suivant les espèces. Un baleineau fait 2.5 tonnes à la naissance...



Par contre, beaucoup d'objets flottants, souvent isolés, billes de bois, fûts métallique ou plastique constituent des sources de collisions fréquentes.

En navigation, les collisions avec des objets ont toujours existé. Pour autant les conséquences apparaissent moins catastrophiques sur les voiliers archimédiens.

Le passage de la vitesse de 8 / 12 nœuds à 28 / 30 nœuds change la donne au niveau de l'énergie cinétique emmagasinée par le bateau.

$$E = 0.5 * m * V^2 \quad (E \text{ en Joules, } m \text{ en kg, } V \text{ en m/s})$$

Quelques exemples :

Monocoque de 100 pieds. $E = 0.5 * 28000 * 7.71^2 = 833000 \text{ Joules (15 nds)}$

Trimaran ULTIM $E = 0.5 * 16000 * 15^2 = 1800000 \text{ Joules (30 nds)}$

Monocoque de 60' $E = 0.5 * 9000 * 6.1^2 = 171000 \text{ Joules (12 nds)}$

Foiler 60' $E = 0.5 * 8500 * 15^2 = 956000 \text{ Joules (30 nds)}$

$E = 0.5 * 8500 * 17^2 = 1224000 \text{ Joules (33 nds)}$

Dans la formule du calcul de l'énergie « E », l'expression de la vitesse élevée au carré (V^2) multiplie par 4 l'énergie lorsque la vitesse double et par 9 lorsqu'elle triple.

Il est aussi certain que depuis 30 ans le nombre d'objets perdus en mer chaque année et flottants a suivi la courbe de la mondialisation. En 1989 (premier Vendée Globe), 0.65 million de containers (EVP³⁵) circulaient autour du monde. Ils étaient 22.6 millions en 2023. Sans suivre la même progression, la probabilité de risque d'abordage a augmenté très sérieusement.

La combinaison des deux phénomènes (vitesse et probabilité) amplifiée par l'envergure des foils, la présence du PHR contribue en cas de collision à des dommages matériels importants.

Certes, les ingénieurs structures prennent des coefficients de sécurité, mais ils ne peuvent en aucun cas assurer que les encastrements et les appendices résisteraient à l'effort tranchant issu de ces types de collisions.

Ensuite, les conditions de pilotage en vol à vue manuel.

Pour avoir gouté aux glissades à 16/18 nœuds sous spinnaker asymétrique en Melges 24, je pense que le pilotage d'un foiler au-dessus des flots, représente sûrement le graal pour le timonier.

Barrer un monocoque au planning peut-être très physique, mais reste accessible aux passionnés de régates. En navigation, même à grande vitesse, hormis les contrôles de la force vérique en jouant sur les écoutes et celui du cap à suivre, les lois de l'hydrostatique gèrent l'équilibre dynamique du bateau.

Comme nous l'avons vu précédemment, naviguer sur un monocoque foiler en volant au-dessus de l'eau, exclut le bateau du domaine archimédien donc des lois hydrostatiques et nous ramène à l'équilibre permanent d'un solide soumis à 3 forces : Poussée vérique – Poids du bateau – Portance du foil.

En équipage, le pilotage à vue (diurne) d'un foiler monocoque océanique, comme il est pratiqué sur un AC 75 (Coupe de l'America), c'est-à-dire avec juste une assistance permettant de modifier l'état physique des appendices, paraît très difficile, à cause principalement de l'état de la mer lié précisément à l'environnement océanique.

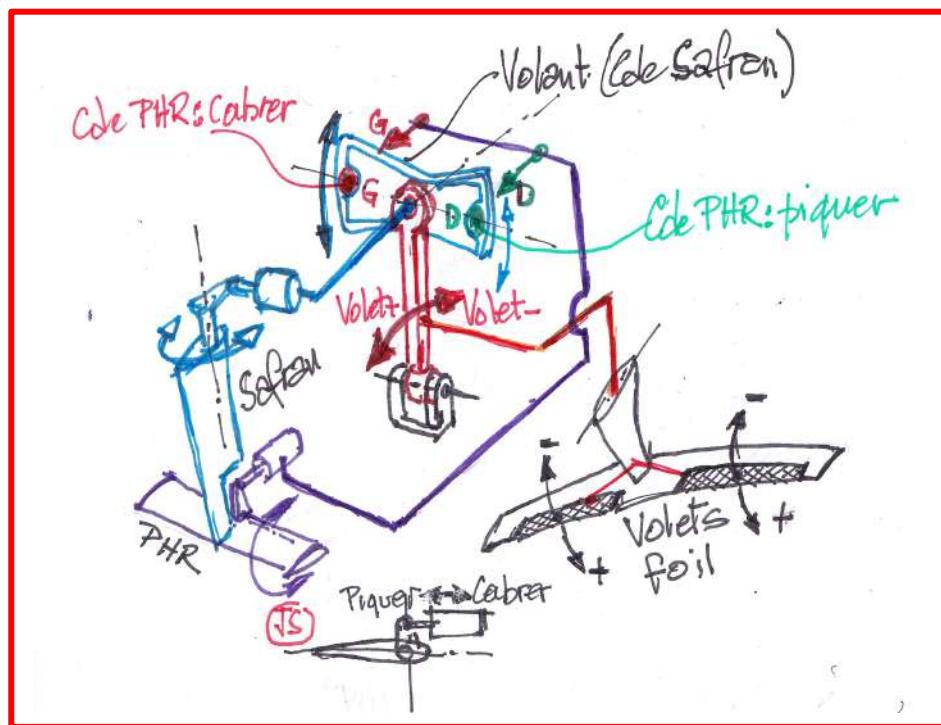
Pour un équipage de foiler monocoque naviguant en mode vol à vue à des vitesses de l'ordre de 35/40 nœuds, la navigation nocturne ou sans visibilité, devient compliquée voire impossible.

La difficulté de conserver des repères physiques d'horizontalité facilement identifiables perturbe ou annihile le contrôle de l'assiette de vol par le barreur-pilote.

³⁵ EVP : Équivalent Vingt Pieds (Container de 6.09 m de longueur)

Le pilotage aux seuls instruments de bord (altimètre, horizon artificiel, compas) sous-entend :

- A. Que la cinématique implantée sur le Moth au niveau de la barre (cap) et de la commande du PHR contrôlant l'horizontalité du bateau en vol (piquer, cabrer), soit reproduite sur le foiler. Techniquement, la solution du volant de direction qui manœuvre le safran, associé à 2 boutons poussoir sur ce volant (pouce gauche et droit +/- du PHR) pour actionner le vérin de commande du PHR, fonctionne. Cette configuration existe sur le AC75 et les GP50.
- B. Qu'une commande permettant de contrôler l'altitude de vol en modifiant la portance du foil actif soit implantée. L'idéal étant d'associer cette commande à la colonne supportant le volant (le « barreur ») pousse vers l'avant pour descendre et tire vers lui pour monter) en ajoutant une articulation à la base de la colonne autour d'un axe transversal.
- C. Que le réglage des voiles soit réalisé par un ou plusieurs équipiers.



À priori, la gestion par le barreur des fonctions A (Cap et PHR) et B (portance du foil) apparaît très proche de celles effectuées en pilotage manuel par un pilote d'avion qui commande les volets d'ailes avec les palonniers (pieds) et simultanément en tirant ou poussant le « manche » pour manœuvrer le PHR (cabrer/piquer) tout en manœuvrant le volant pour contrôler le lacet.

Sur un monocoque foiler, en vol à vue, le poste de pilotage peut s'inspirer de celui des avions. Le pilote-barreur gère 3 fonctions simultanément (cap, PHR, volets de foil). L'avantage de confier le pilotage total du foiler réduit pratiquement à zéro le temps de réponse pour réaliser un ajustement des conditions de vol.

Le pilote-barreur possédant l'ensemble du contrôle peut palier aux faibles variations (risée/molle) de vitesses du vent en lifiant ou en abattant autour du cap initial.

En cas de fortes variations du vent, l'équipage intervient.

La singularité du vol en foiler se caractérise par sa faible altitude de vol (de l'ordre de 1m à 1.5m). Cela implique une marge d'évolution de la hauteur de vol de quelques dizaines de centimètres (+/- 30 cm maxi). Cette faible fluctuation complique les réglages de la portance du ou des foils.

L'état de la mer complique aussi l'appréciation de l'altitude de vol. Il faut ajouter à cette contrainte de pilotage manuel très minutieux l'attention visuelle permanente à trois écrans : l'horizon artificiel, le compas, l'altimètre.

Cette configuration de pilotage très fine n'existe pas sur un avion ou les variations instantanées d'altitude peuvent atteindre plusieurs mètres.

En solitaire, en situation de vol à vue manuel, le skipper ne peut pas abandonner ce poste afin de régler la voilure. Cette contrainte interdit de fait le pilotage manuel en solitaire.

Ces deux contraintes, risque de collisions et pilotage à vue manuel, n'interdisent pas de naviguer en équipage sur ces foilers multicoques océaniques. Toutefois la limitation du vol à vue par bonne visibilité limite l'étendue des navigations.

Sur les monocoques à foils, s'ajoute la gestion de l'assiette transversale (gîte) qui doit être régulée en ajustant la voilure. Des deux composantes de la poussée vénique, la transversale est de loin la plus importante.

Contrairement aux monocoques archimédiens qui peuvent être barrés en manuel quel que soient leurs dimensions, de jour comme de nuit et même sans visibilité, le pilotage manuel à vue d'un foiler monocoque est pratiquement impossible.

La forte stabilité transversale générée par la surface de la plateforme d'un trimaran foiler océanique permet de plus ou moins déroger à cette contrainte du pilotage sans visibilité.

En contrepartie, sur un trimaran, la surface balayée par le foil sous le vent, la dérive équipée d'une aile de raie et les deux safrans en « T » actifs

(flotteur et coque centrale) sont autant d'appendices exposée à des collisions. Les incidents vécus sur les ULTIMS le montrent.

Le pilotage en vol assisté par un PA

On retrouve toujours la contrainte principale, gérer l'assiette du foiler monocoque océanique par rapport à l'horizontalité en navigation nocturne ou par faible visibilité.

Comme cela a été déjà évoqué, seul un système inertiel associé à des asservissement gérant les appendices, permet d'assurer un vol stabilisé.

41. Les IMOCA : « foiler or not foiler ?»



L'idée de régater autour du Monde se concrétise en 1973, mais en équipage, sur des bateaux de jauge IOR³⁶ largement contrôlée par les anglo-saxons. Les architectures IOR privilégient les carènes à déplacements relativement élevés donc limitées à leurs vitesses archimédiennes.

Base Devis de poids IMOCA							
Description à déduire	masse	/Axe (x)	/DWL (y)	/PPAR (z)	m^*x	m^*y	m^*z
Plateforme	2.400	0.000	0.500	7.680	0.000	1.200	18.432
EQUIP FIXE	1.170	0.000	0.380	5.550	0.000	0.445	6.494
VOILE de QUILL	0.980	0.000	-1.600	7.690	0.000	-1.568	7.536
BULBE	2.590	0.000	-4.350	7.530	0.000	-11.267	19.503
Gréement complet	0.480	0.000	11.000	6.790	0.000	5.280	3.259
Foil 1 rentré	0.250	2.300	0.730	8.900	0.575	0.183	2.225
Foil 2 sorti	0.250	-3.300	0.060	9.000	-0.825	0.015	2.250
GO + etc	0.350	0.000	-0.150	5.000	0.000	-0.053	1.750
BALLAST AR	0.560	2.100	0.265	2.430	1.176	0.148	1.361
DIVERS + voiles	0.600	0.000	2.500	5.000	0.000	1.500	3.000
Total	9.630				0.926	-4.117	65.809
	masse	/Axe (x)	/DWL (y)	/PPAR (z)			
CG	9.630	0.096	-0.427	6.834			

³⁶ Voir le livre « ÉVOLUTION de l'ARCJTECTURE NAVALE en COURSE au LARGE durant le 20^{ème} siècle et les années de transition au début du 21^{ème} »

Dès la fin des années 70, règne dans l'environnement des courses offshore l'idée de s'affranchir des règles contraignantes de l'IOR et aussi d'agrandir le terrain de jeu des courses à tous les océans.

Skippers et architectes créent le BOC Challenge (la course inclut 3 escales) en 1982. En 1989, Philippe Jeantot qui a gagné les deux premiers BOC Challenge (149 et 134 Jours) propose le Vendée Globe, mais sans escale, ni assistance. La vitesse aux allures portantes s'imprime, dès le BOC Challenge et encore plus avec la création du Vendée Globe, comme l'ADN de cette course offshore qui laisse l'Antarctique sur tribord.

Les architectes se lancent alors dans une approche non conventionnelle et alternative de l'architecture navale. C'est surtout après le premier Vendée Globe (1989) que des innovations totalement débridées apparaissent et conduisent certes à des gains de vitesse, mais se traduisent par des dessins très typés (Pont plat, faibles francs-bords, minuscule roof, voile de quille fragile), qui génèrent beaucoup de sinistres et d'accidents. Les organisateurs et les responsables de la future classe IMOCA prennent conscience de ces dérives et interviennent pour freiner ces ardeurs architecturales.

La longue évolution des voiliers IMOCA commence en fait en 1998 avec la création officielle de cette classe.

Jusqu'en 2014, les carènes restent archimédiennes et se stabilisent. L'idée d'introduire les foils³⁷ sur des carènes IMOCA voit le jour vers 2013/14 (entre le Vendée de 2012 et celui de 2016). L'IMOCA valide cette utilisation mais l'encadre drastiquement en limitant le nombre d'appendices mobiles à 5 (2 safrans, 1 quille pendulaire et 2 foils) et en restreignant le nombre de degrés de liberté des foils. Lors de la Transat Jacques Vabre 2015 les quelques IMOCA équipés de foils montrent que malgré une mise au point technique complexe les foils permettent de progresser en termes de performances.

Lors du Vendée Globe 2016, 7 IMOCA sur 29 sont équipés de foils. A l'arrivée, le classement est sans appel, les 4 premiers³⁸ sont équipés de foils. Armel Le Cleac'h gagne et établit le nouveau record en 74 Jours.

Se pose alors la question de définir ce nouveau type d'architecture. Ces nouveaux IMOCA appartiennent-ils à la catégorie « semi-foiler » ou « foiler intégral » ?

<https://experts-yachts.fr/blog-js.html>

³⁷ L'UNCL publie dès 2014 l'état de l'art sur l'utilisation des foils sur des monocoques de course au large.

³⁸ Banque Populaire, Hugo Boss 3, Maître Coq II, St Michel/Virbac.

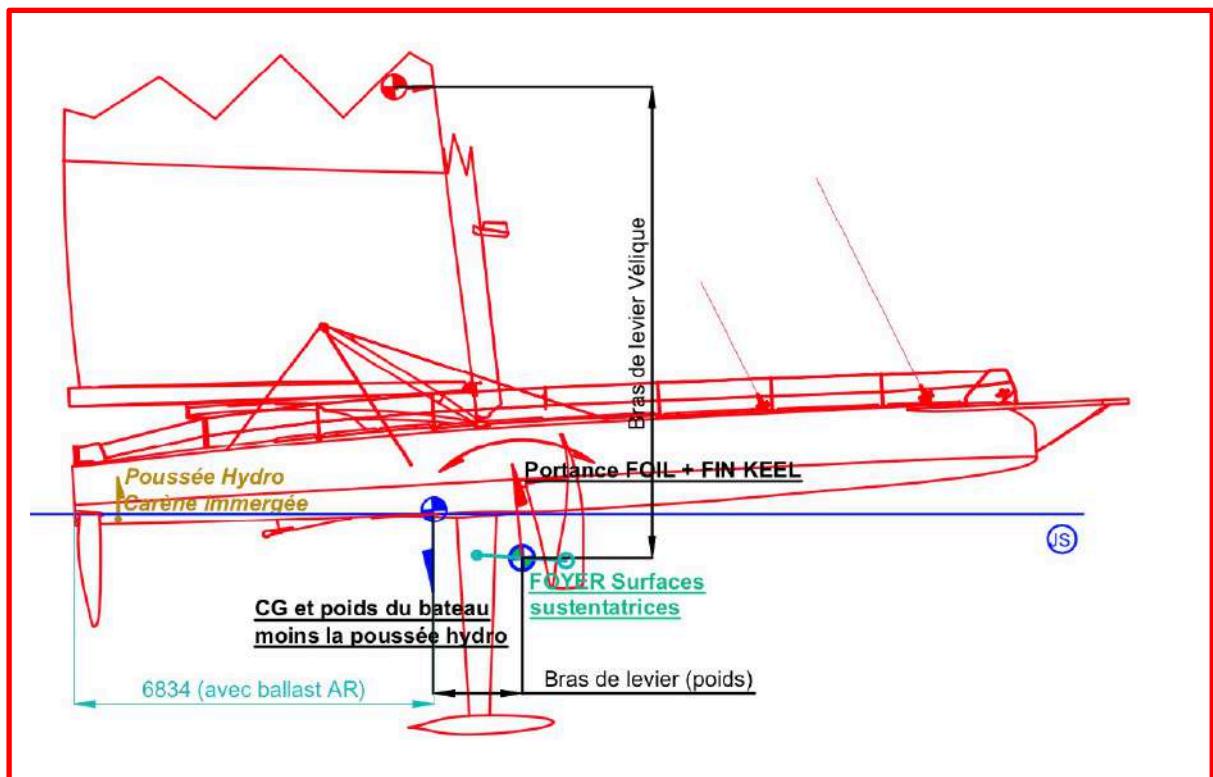
La classification sportive internationale différencie ainsi ces 2 types : pour le semi-foiler la coque joue encore un rôle (phénomène hydrostatique) dans la génération du moment de redressement, et pour le foiler intégral, la coque est complètement soulevée hors de l'eau.

Un IMOCA ne possédant pas de PHR (Plan Horizontal Régulateur) implantés sur ses safrans, le vol horizontal stabilisé et piloté lui est impossible. Un IMOCA est donc un semi-foiler.

Cela signifie que le volume arrière de sa carène reste toujours partiellement immergé en navigation et que les règles archimédiennes d'appliquent en prenant en compte en plus de la poussée hydrostatique de la carène immergée et du poids du bateau, la composante « poussée du foil – poussée du voile de quille » appliquée au barycentre des foyers de ces deux forces.

Cela se traduit par l'égalité vectorielle³⁹ suivante :

$$\mathbf{F}_{\text{foil-finKeel}} + \mathbf{F}_{\text{hydrostatique}} - \mathbf{Masse}_{\text{bateau}} * 9.81 = 0$$



³⁹ Dans le cas d'un foiler intégral l'égalité vectorielle est : $\mathbf{F}_{\text{foil-finKeel}} - \mathbf{Masse}_{\text{bateau}} * 9.81 = 0$



Avec les foils anciennes générations au VG 2020

Lorsque cette égalité vectorielle est rompue, le semi-foiler redevient un « pur » voilier archimédien comme le montre cette photo de Hugo Boss.

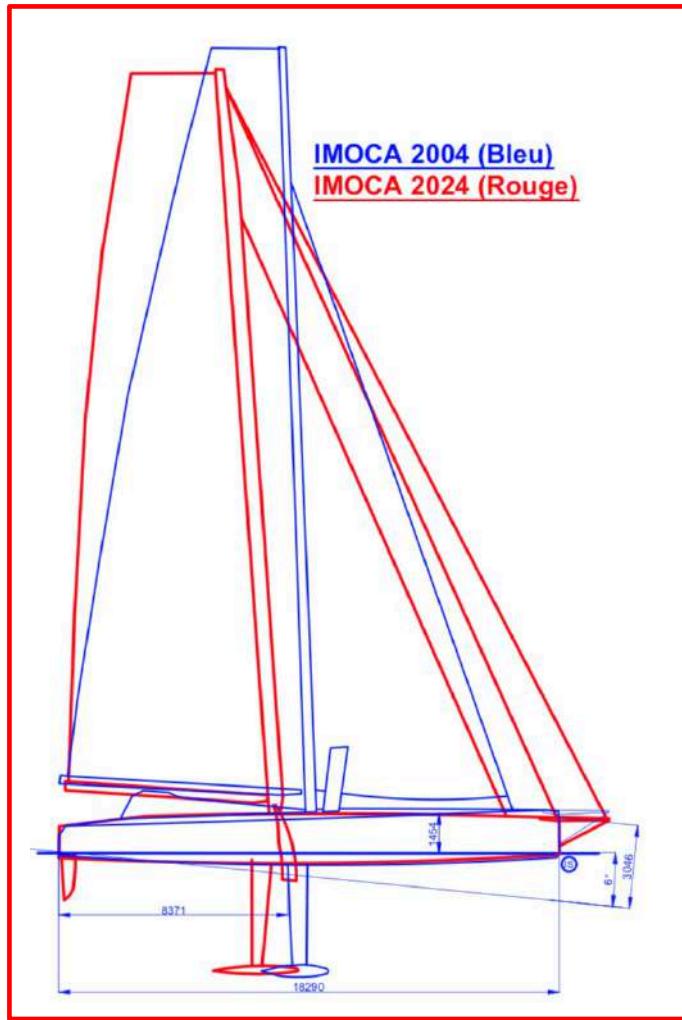
Comme dans tous les sports mécaniques, la tendance est toujours de concevoir « plus grand » pour gagner plus de performances. Ainsi entre deux Vendée Globe (2016/2020) la surface des Foils augmente... les formes avant prennent du volume, les mats reculent, la chute de grand-voile se rapproche de la verticale.

Ajoutons que la mutualisation des voiles de quille et des mats restreint les choix architecturaux des concepteurs.

Pourquoi ces évolutions ?

L'association de surfaces sustentatrices avec des carènes aux formes avant plus porteuses impose d'adapter le plan de voilure et de reculer le centre de gravité des bateaux. Les dessins tendent de plus en plus vers une uniformité amplifiée par les contraintes de la règle de jauge IMOCA. Pratiquement la seule liberté d'innover consiste à jouer sur la forme et l'envergure des foils. La démesure s'installe alors, ce qui conduit l'IMOCA à légiférer après le Vendée Globe 2020 en encadrant le « volume » des foils, mais sans trop obliger les teams à couper ou à mettre au rebut les foils déjà construits.





Ce fameux PHR

La règle de classe IMOCA interdit de fait d'implanter des PHR sur les safrans des IMOCA.

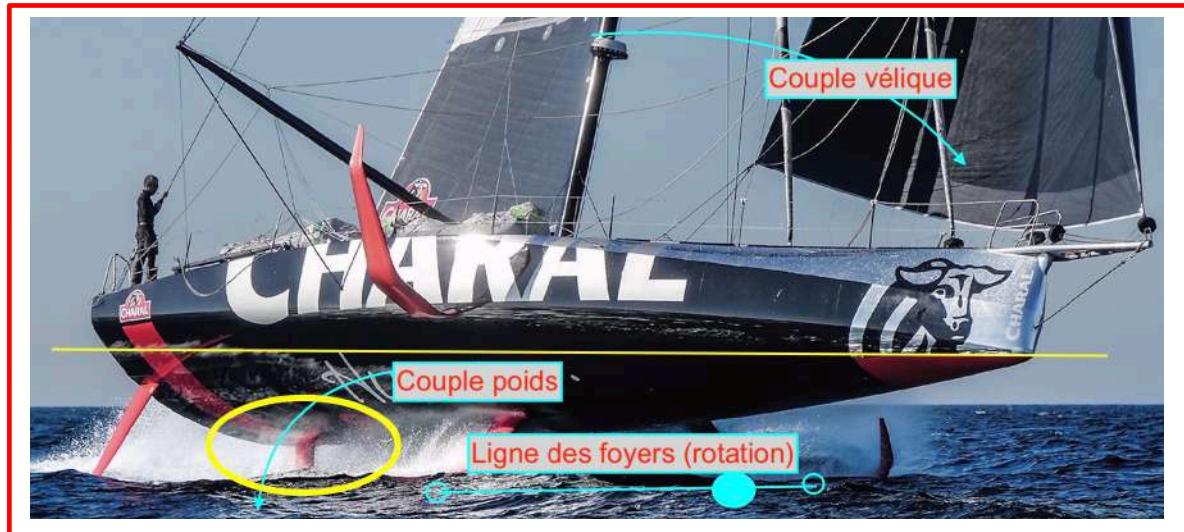
Sachant que l'équilibre en vol d'un foiler intégral impose le contrôle de l'assiette longitudinale (action à cabrer ou à piquer) avec un Plan Horizontal Régulateur (PHR), un IMOCA qui est dépourvu de PHR, naviguera dans l'environnement archimédien avec toujours un volume de carène arrière immergée et une assiette longitudinale très cabrée.

Pour autant, un IMOCA peut-il naviguer à pleine capacité de son potentiel de vitesse en mode foiler intégral, ce qui correspond avec une assiette de vol longitudinale horizontale ?

Comme le montre la photo ci-dessous, voler « intégralement » parait techniquement possible.

En simplifiant, l'équilibre en vol résulte principalement de 2 couples autour de la ligne des foyers des plans sustentateurs (voile de quille et du foil). Soit :

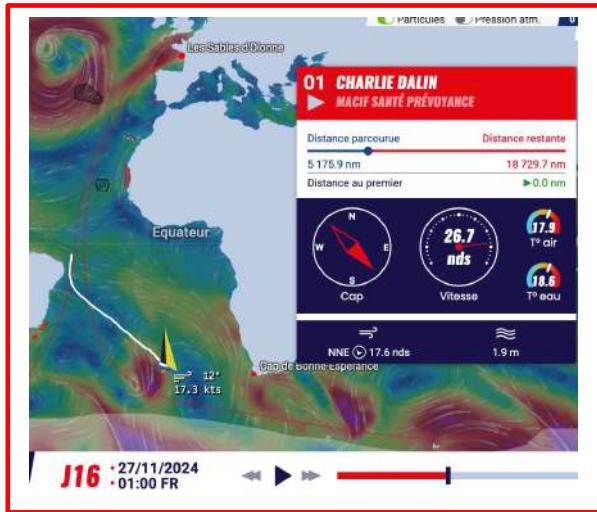
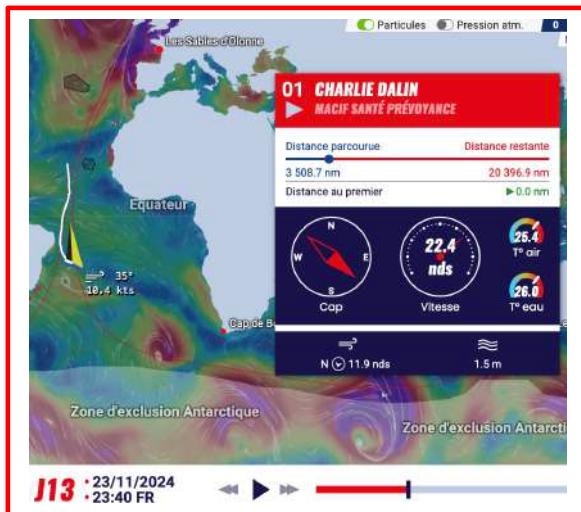
- Le couple vélique
- Le couple poids du bateau



L'équilibre parfait entre ces deux couples peut exister, à condition d'avoir un vent vrai très régulier et un état de la mer parfaitement plat. Cette configuration d'équilibre est toutefois éphémère. Dans cette configuration, le foiler atteindra des vitesses proches du mur des 40 nœuds pendant quelques secondes ou minutes.

La ruine inévitable de l'équilibre provoquera brutalement soit l'enfournement de l'étrave ou l'écrasement sur le tableau arrière et se traduira par une chute drastique de la vitesse et surtout un temps relativement long de remise en route normale du bateau en mode archimédien. Tout cela en supposant qu'il n'y a pas de dommages matériels. Mais dans cette configuration spatiale, la fiabilité du pilotage géré par le PA est illusoire, car il agit que sur le lacet (règle de classe).

Le record (27/11/2024) établi en solitaire par Sébastien Simon sur 24H à 25.55 nœuds (613.33 milles) représente une belle performance, d'autant plus qu'elle est réalisée lors d'un Vendée Globe qui est plutôt une course d'endurance. Cette performance se trouve corroborée par les vitesses maximales qui tournent souvent autour de 23/25 nœuds du trio vainqueur et d'autres IMOCA à la même période dans l'Atlantique sud.



ZONE : ATLANTIQUE SUD

Performance de Charlie Dalin entre le J13 et le J18 (23/11/2014 au 28/11/2024):

Trajectoire superposée à la route orthodromique.

Distance parcourue : 2565 milles

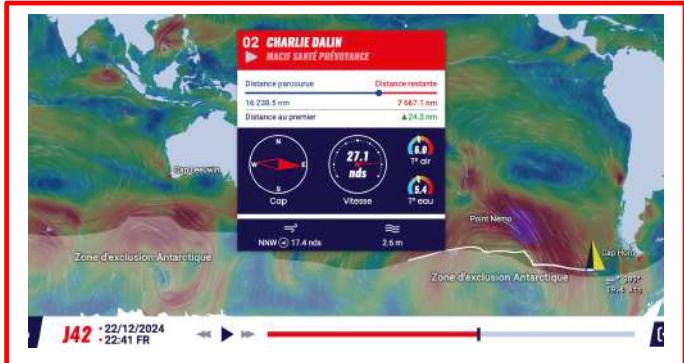
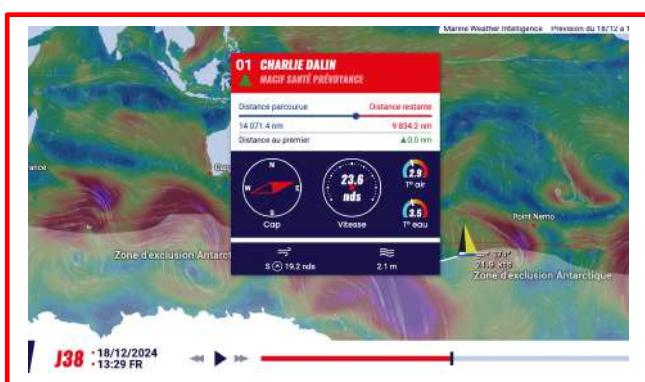
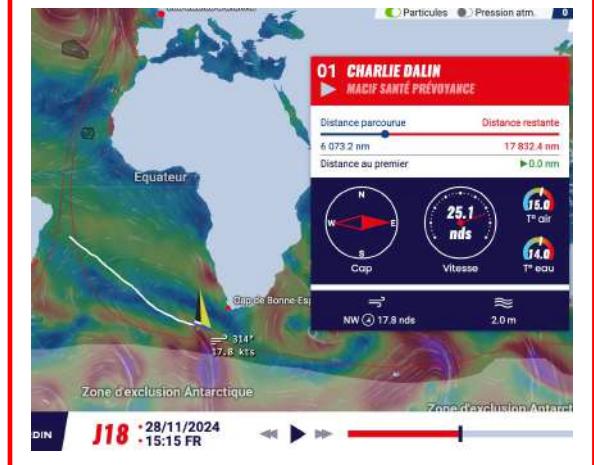
Temps écoulé : 110 H

Vitesse moyenne : 23.31 Nœuds soit :

23.31 x 24 = 559.63 milles

Moyenne par 24H : 554.4 milles

(23.1 x 24 = 554.4)



ZONE : PACIFIQUE SUD

Performance de Charlie Dalin entre le J38 et le J43 :

Trajectoire superposée sur la limite des glaces.

Distance parcourue : 2700 milles

Temps écoulé : 128 H

Vitesse moyenne : 21.09 Nœuds

Moyenne par 24H : 506.25 milles

Vitesse maximale enregistrée : 27.1 nœuds



Ces relevés, comme les moyennes réalisées par les 3 premiers sur leurs routes réelles pour l'ensemble du parcours (entre 17.2 et 17.9 nœuds), montrent que la conception semi-foiler est 30% plus performante que celle des IMOCA à dérives latérales inclinées (Vitesse de 13.7 nœuds sur fond établit lors du Vendée Globe 2024 par Tanguy le Turquais).

Toutefois globalement les vitesses des semi-foiler restent très largement inférieures au potentiel d'un foiler intégral.

Les questions suivantes se posent :

- ⇒ Doit-on passer par la transformation d'un IMOCA semi-foiler vers IMOCA foiler intégral
- Ou
- ⇒ Améliorer la conception des semi-foiler au niveau des dessins et des contrôles des surfaces sustentatrices actuellement utilisées ?

Transformer un IMOCA semi-foiler vers IMOCA foiler intégral

En théorie, il est techniquement possible de faire évoluer la conception actuelle des IMOCA vers un modèle **foiler intégral** mais pour cela il faut 4 conditions :

- a) Modifier profondément les règles de classe (notamment en autorisant plus de 5 appendices).
- b) Être capable de voler horizontalement, donc implanter un PHR sur le safran actif et l'asservir au PA.
- c) Être capable de mesurer et de gérer une altitude de vol avec une amplitude de variation de 40 à 60 cm, voire moins.
- d) Accepter de donner la conduite du foiler intégral à un PA qui gère l'équilibre spatial général du foiler (vol sans visibilité). C'est à dire donner au PA le contrôle de l'ensemble des équipements (lacet, puissance, foils, altitude et stabilité du vol).

De ces 4 contraintes l'item **d)** paraît le plus rédhibitoire, car **il transfère intégralement la conduite** du foiler à un automate, contrairement à la règle actuelle qui limite l'action du PA au seul contrôle du lacet.

On imagine mal, la classe IMOCA accepter ces conditions de pilotage (PA). En effet ces contraintes technologiques dénaturent complètement l'idée originelle du Vendée Globe telles qu'elles ont été imaginées par Ph Jeantot et ses copains du BOC Challenge.

Certains évoquent l'idée d'implanter un « stabilisateur horizontal fixe » sur les safrans à la place d'un PHR. Cet appendice obligatoirement à profil symétrique, n'est absolument pas viable.

En effet, pour offrir le moins de trainée possible, ce stabilisateur doit être calé parallèlement à l'assiette de navigation correspondant à une vitesse de l'IMOCA inférieure à la vitesse archimédienne (navigation par vents faibles).

Dès que le vent augmente en intensité, le bateau déjauge progressivement sous l'effet des formes avant tulipées et du voile de quille angulé au vent (effet du tilt⁴⁰ de l'axe de pivotement de la quille). Si le foil est déployé, la portance du foil sous le vent s'ajoute.

Ces forces verticales provoquent le cabrage de la carène autour de sa zone arrière, le stabilisateur passe en mode portance et génère immédiatement de la trainée, donc freine.

Par vent fort, les foils, vu leurs dimensions, deviennent surpuissants. Conséquence, le cabrage de l'IMOCA augmente et le stabilisateur devient de plus en plus porteur. Ces deux forces verticales « lift du foil » + « lift du stabilisateur fixe AR » auxquelles il faut ajouter « le lift du voile de quille » provoquent alors une instabilité et une perte de contrôle de l'IMOCA, jusqu'au percement de la surface de l'eau et l'écroulement total de portance⁴¹.

Penser qu'un stabilisateur AR horizontal fixe résoudrait le problème du vol d'un IMOCA, revient à affirmer qu'un safran immobilisé dans l'axe de la carène permettrait de suivre une trajectoire absolument rectiligne et se passer de PA.

Introduire le foil du semi-foiler dans un environnement dynamique⁴².

Comme cela a déjà été évoqué, la règle de l'IMOCA interdit toute modification du profil du foil au moyen de volets ou de morphing (voir § 27). Seules les géométries en « L » des foils sont autorisées.

La règle de classe autorise 3 degrés de liberté :

⁴⁰ Le tilt désigne l'angle de l'axe de rotation de la quille pendulaire par rapport à l'assiette horizontale d'étude du bateau. Cet angle voisin de 6° est orienté dans le sens antihoraire.

⁴¹ Ce même phénomène de perte de portance se produit aussi sur un avion qui garderait l'incidence de décollage jusque vers 15000 m d'altitude et percerait l'atmosphère pour tenter de pénétrer dans la stratosphère.

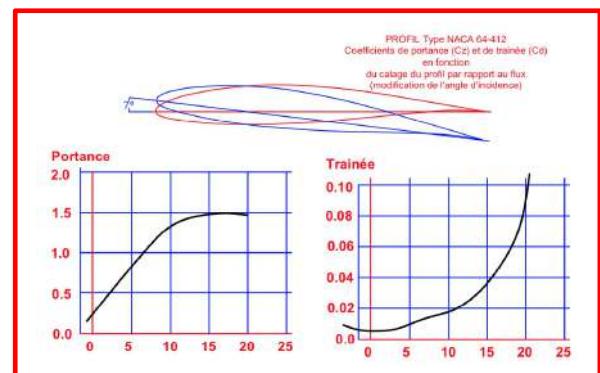
⁴² Paragraphe développé en collaboration avec Robert Lainé.

- Translation du corps nommé le « tip ». Cette partie, d'une section constante, coulisse dans la coque. Elle débouche de la carène par une ouverture fixe nommée « gate » dans la règle de classe.
- Une rotation « rake » permet de donner au foil une incidence limitée à 5° par rapport au flux du fluide dans lequel il se déplace.
- Un pivotement « cant » est possible autour de l'axe longitudinal du bateau afin de modifier la position spatiale de la pointe du foil.

Les commandes de ces 3 degrés de liberté sont obligatoirement manuelles à partir de mécanismes simples (sic). Cette règle de classe rend notamment impossible de régler en continu l'angle d'incidence du foil dont dépend la portance et ainsi d'éviter les périodes de surpuissance ou l'inverse.

Le skipper ne peut que chercher un réglage moyen valable pour les heures de navigation à venir.

Entre deux réglages fixes consécutifs, le flux de l'eau en raison des vagues, du tangage, du roulis modifie l'incidence réelle, donc le coefficient unitaire de portance C_z (voir § 26) et corollaire le coefficient de trainée (voir ci-contre).



L'assiette longitudinale d'un semi-foiler se caractérise par un appui hydrostatique sur la zone arrière de la carène. Une augmentation subite de la portance du foil et du voile de quille provoque une rotation autour du volume proche du tableau AR. Ces surfaces sustentatrices se situent en moyenne à 8.30 m du point du tableau AR.

Lorsque l'IMOCA navigue à 20 nœuds (10.3 m/s), une vitesse verticale de 1.0 m/s au niveau foil génère une variation de l'angle d'incidence de 4°44⁴³.

Le foil réglé à 5° par rapport à l'horizontale génère un C_z de 0.75.

Une augmentation de 4°44 transforme l'angle d'incidence de 5° à 9°44, c'est-à-dire génère un C_z de 1.15.

La courbe de portance montre qu'un C_z de 1.15 se rapproche de la forme arrondie de la courbe pour aboutir à la valeur de décrochage $C_z = 1.4$ et à la perte instantanée de la portance.

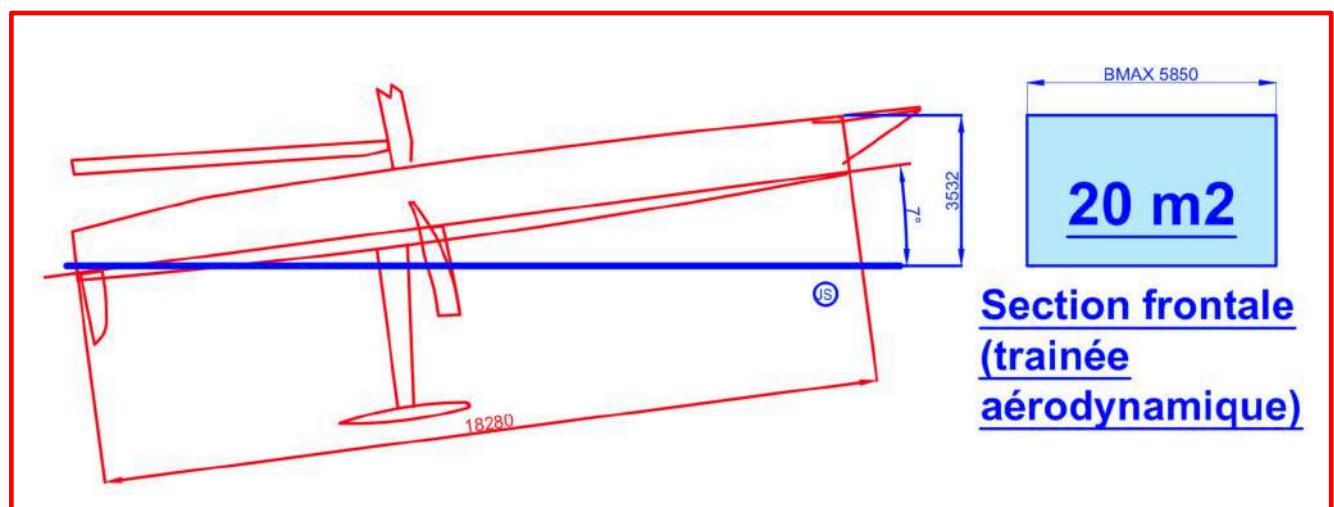
⁴³ Résultat obtenu à partir du temps mis pour parcourir 8.30 m à 10m/s (0.805s) et de l'élévation à la vitesse de 1m/s du foil en ce même temps.

Mais lorsque l'angle d'incidence augmente, la trainée croît aussi. Le coefficient unitaire de trainée passe de 0.0067 à 0.0145. Soit une multiplication par 2.16, alors que la portance ne croît que de 1.5 fois (0.75 à 1.15).

⇒ Incidence initiale du foil : $0.75 / 0.0067 = 111.94$
 ⇒ Incidence dynamique du foil : $1.15 / 0.0145 = 79.06$
 Soit une perte d'efficacité de -29%.

Le cabrage résultant de cet effet dynamique augmente le fardage frontal de la coque, donc la trainée, qui, dans le pire des cas, frôle les 20m². Certes dans cette configuration très cabrée, la surface mouillée de la carène diminue, pour autant je ne suis pas certain que le bilan en termes de vitesses soit positif.

Avec cette assiette longitudinale et 10 à 15° de gîte le carénage du roof, hormis la protection et le confort du skipper, n'a pas beaucoup d'effets aérodynamiques.



Surpuissance : Cabrage

Assiette idéale (faible cabrage)



Commentaire de Thomas Ruyant skipper de « VULNERABLE » :

La « vitesse max » n'est pas une finalité. Ce qu'on veut c'est surtout de la vitesse moyenne sur la durée. Parce que, parfois, le bateau peut monter à 36 nœuds mais si derrière on retombe à 12, le compromis n'est pas bon. Alors que si on trouve une vitesse stable de 25-26 nœuds, c'est parfait.

Quel type de régulations d'assiette longitudinale sont possible dans le cadre de la Règle de jauge IMOCA pour un semi-foiler.

D'abord rappelons les hypothèses :

- Les bateaux naviguent en permanence sous pilote automatique (PA)
- Le PA, aussi « intelligent » soit-il, contrôle exclusivement le lacet.
- Le réglage de l'incidence du foil est obligatoirement manuel et ne peut pas être asservi à l'assiette ou à d'autres paramètres comme la force du vent (déttection des survenues).
- Du fait de leur envergure, les foils utilisés apparaissent très souvent surpuissants.

A partir de ces hypothèses, les seules possibilités envisageables sont les suivantes :

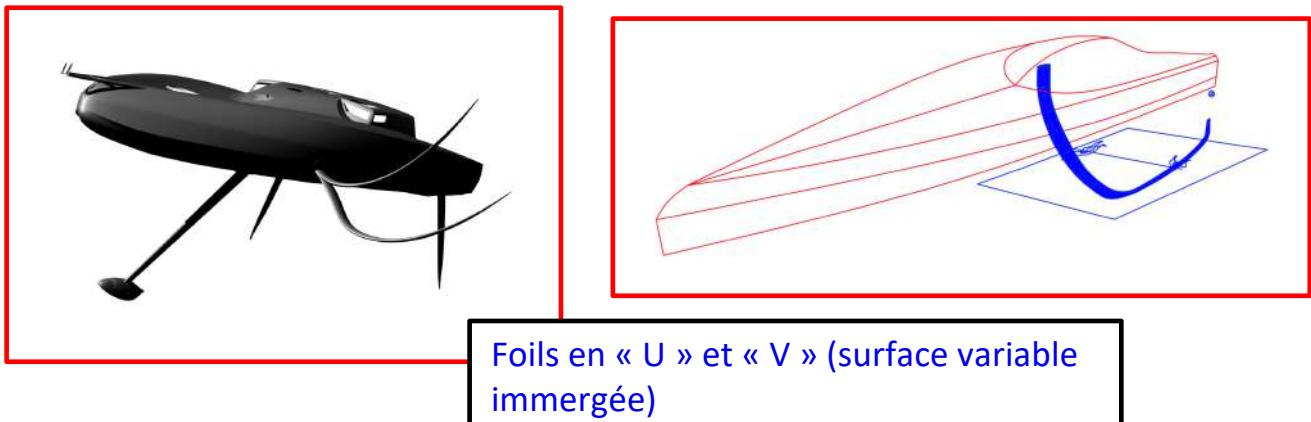
- Concevoir des foils moins extrêmes dimensionnellement.
- Rechercher une technique de régulation de la portance du foil actif sans jouer sur l'angle d'incidence prégréglé pour les conditions du moment.
- Réaliser ce contrôle sans faire appel à un asservissement relié au PA. Ce qui revient à imaginer une auto régulation de la portance du foil.

Surface immergée variable

La surface portante du foil qui compte est celle qui est dans l'eau. **L'air** ayant une densité 800 plus faible que l'eau on négligera la portance de la partie du foil hors de l'eau.

Pour ajuster la surface sustentatrice du foil, on doit incliner cette surface par rapport à la surface de l'eau (incidence). Ainsi, plus le foil s'élève, plus sa surface diminue et vis-versa.

Cette solution est aussi vieille que les hydrofoils car elle est auto régulatrice et simple à mettre en œuvre. Lorsque la vitesse augmente, la poussée générée par le foil croît, le foil sort plus de l'eau et réduit ainsi sa surface : ce qui réduit la portance jusqu'à ce que le nouveau point d'équilibre soit atteint.



Cette solution possède toutefois quelques limites :

- La première limite vient de la ventilation (voir §19) induite par le foil lorsqu'il traverse l'interface air-eau. Ce phénomène peut amener à une perte de portance brutale et cela même à des basses vitesses.
- La deuxième limite vient de la variation non contrôlée de la portance lorsque le foil traverse les vagues. Quand il rencontre la face avant de la vague, l'enfoncement du foil augmente et le même effet se produit sur la portance. Le bateau se cabre.

Après passage du sommet de la vague, la surface immergée du foil diminue brutalement entraînant une action à piquer du bateau.

Dans le cas de vagues courtes et d'amplitudes limitées, un régime vibratoire au rythme des vagues se crée : phénomène à prendre en compte dans le calcul de la structure du bateau.

Lorsque les vagues sont d'amplitudes plus fortes, une chute brutale du bateau (écoulement de la portance) se produit après le sommet de la vague. La vitesse de chute verticale augmente l'incidence de l'écoulement sur le foil au-delà de 12° (voir supra), le foil décroche brutalement. La coque du bateau retombe en mode archimédien. Le processus recommence à la prochaine vague ...

Volet de bord de fuite

C'est la technologie utilisée en aéronautique, mais aussi sur le Moth Foiler et les AC75. Le volet de bord de fuite (§ 15) modifie la cambrure et module la portance. L'intérêt est que suivant l'angle du volet (positif ou négatif) le foil passe de porteur à déporteur ce qui régule l'altitude du foil par rapport à la surface de l'eau. Mais pour un IMOCA, l'implantation de volet est d'abord interdite par les règles de classe et ensuite, même si cette interdiction était levée, la forme en « L » des foils rend l'implantation de volet de bord de fuite technologiquement hyper complexe et surement peu fiable.

Ventilation de l'extrados

Sur un profil type NACA, l'extrados du profil produit 75% de la portance et l'intrados 25%. Une solution possible et efficace, consiste à créer un phénomène de ventilation contrôlée en injectant de l'air depuis l'âme du foil sur une surface délimité de l'extrados. Dans cette zone de l'extrados ventilée, l'air remplace alors l'eau, et détruit localement la portance. On provoque ainsi une chute contrôlée du foil.

Le foil étant en immersion, lorsque l'on supprime l'effet de ventilation, la couche d'eau se rétablit quasi instantanément et le foil retrouve sa portance initiale.

Cette méthode de régulation suppose que surface sustentatrice du foil évolue dans une zone assez profonde par rapport à l'interface air/eau.

L'idée est de dessiner des foils avec une zone sustentatrice sensiblement horizontale aux angles de gîte de navigations usuelles.

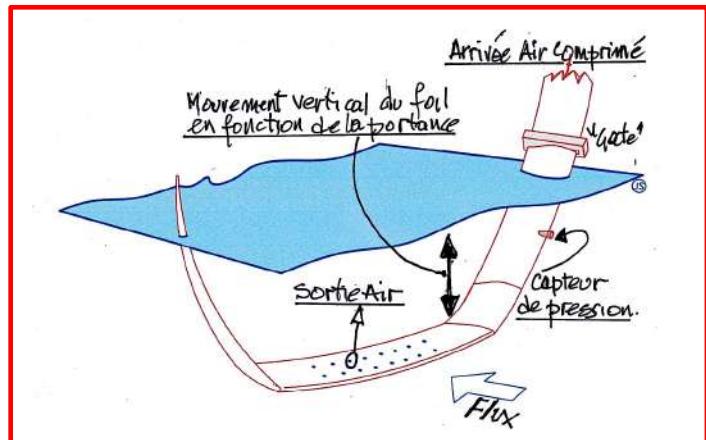
Techniquement, le système peut être très simple. Un groupe air comprimé (5 à 6 bars) connecté à un tuyau (diamètre intérieur 16 mm) alimente une clarinette de 40 cm de long intégrée dans la partie horizontale du foil. Cette clarinette alimente une douzaine de buses de diamètre 8 mm implantées à fleur de la surface de l'extrados

(pratiquement aucune trainée). L'ensemble de ces éléments est surmoulé dans l'âme du foil.

Un capteur de pression noyé dans le bord d'attaque du « shaft », connecté à un boîtier de régulation, commande l'électrovanne qui envoie l'air comprimé sur l'extrados. Dès que le capteur de pression se trouve proche de l'interface eau/air (la partie horizontale du foil se rapproche de la surface), la pression diminue et l'électrovanne laisse passer l'air comprimé.

Sous l'effet de la ventilation créée sur l'extrados, la portance chute et l'immersion du foil augmente. La pression augmente et l'électrovanne se ferme. L'eau remplace l'air et la ventilation de l'extrados est stoppée. Le foil retrouve sa portance initiale. La gestion de la ventilation de l'extrados régule automatiquement l'immersion du foil par rapport à l'interface eau/air.

La gestion de la ventilation de l'extrados peut être techniquement améliorée, mais son principe d'autorégulation est conservé.



42. Toujours plus vite... à travers les siècles, mais ...

C'est une réalité, en trois millénaires la vitesse et les développements des bateaux n'ont pas cessé de croître. Toutefois quel que soit les époques et surtout leurs environnements technologiques, on constate de manière récurrente que durant chaque période une stabilisation des gains de vitesse s'installe plus ou moins rapidement, comme si la technique du moment balbutiait et ne permettait plus de progresser. Il devenait alors nécessaire de changer de paradigme.

Ce sera le passage des galères principalement propulsées par des rameurs aux vaisseaux véliques à voilures carrées.

Ensuite, durant deux siècles et demi, l'apport de l'analyse scientifique améliore les dessins des carènes. Des navires de guerre et de commerce à voiles, dont les longueurs de coque atteignent les 90 mètres, sillonnent alors les océans.

Vers le milieu du 19^{ème} siècle se conjuguent simultanément plusieurs événements : le travail sur l'hydrodynamique et son corollaire le passage des carènes dans l'eau, la révolution industrielle qui conduit à la fiabilisation de la machine à vapeur et la découverte de l'hélice. Pendant une centaine d'années, le gigantisme maritime s'exprime sans limite.

Chacune de ces périodes connaît un développement scientifique et technologique effréné où tout paraît possible. Pourtant, malgré la démesure technologique mais aussi financière des projets, les gains de vitesse ne progressent plus.

À la croisée du 19^{ème} et du 20^{ème} siècle, l'avion surgit. Immédiatement après les premiers vols, des ingénieurs rêvent d'appliquer cette technique sur l'eau. L'idée n'est pas saugrenue. L'eau, l'air sont deux fluides, certes de densités différentes. Pourtant, certains se posent la question : une aile sustente un avion dans l'air, alors pourquoi un bateau ne volerait pas s'il est équipé d'une aile (foil) qui évoluerait dans l'eau ? L'hydrofoil devient réalité.

Mais le désir de voler pousse d'autres à créer des sortes d'avion-navire, engins hybrides démesurés. Le premier sera l'Ekranoplan⁴⁴ conçu dans les années 1960 et construit par les Soviétiques. L'aventure dure une petite vingtaine d'années, bien que des projets existent encore de nos jours. Il faudra attendre le mitan du siècle dernier pour voir les premiers hydrofoils exploser les compteurs de vitesse. Là encore la réalité (le prix de l'énergie) ou le pragmatisme (la maintenance, les chocs avec des objets flottants) se rappelle brutalement aux concepteurs.

⁴⁴ <https://www.lecurionaute.fr/ekranoplan-geant-avion-bateau-russe-effet-de-sol/>

Les marins (de plaisance) reprennent alors le concept et se lancent dans l'aventure du « Foiling ». La finalisation d'un foiler vélique capable de voler lors de navigations océaniques prendra quand même près de 60 ans.

Aujourd'hui, les développements techniques des foilers véliques océaniques intégraux ou semi-foilers apparaissent assez aboutis et fiables. Toutefois, on découvre qu'un foil « aéro » (subsonique) cavite inexorablement et perd toute sa portance lorsque la vitesse s'approche de 40 nœuds (voir §20 ci-dessus). En théorie, on peut dépasser ce mur en utilisant des profils super cavitants, mais la puissance vélique nécessaire pour décoller n'est pas (et ne sera jamais) disponible avec une motricité vélique. Il n'existe pas de voilure équipée de post combustion.... On restera alors avec des foils de type cavitant. Dans ces conditions, les foilers intégraux, quels que soient leur longueur et leur poids, voleront sensiblement à la même vitesse pour peu qu'ils aient des ratios Poids^{1/3}/Svoile^{0.5} équivalents.

On observe par ailleurs que voler quelques dizaines de centimètres au-dessus d'un plan d'eau agité par des vagues parait dépasser les capacités humaines. Cela est d'autant plus vrai dans le cas d'une course offshore en solitaire. L'assistance d'un PA devient indispensable. Ce PA doit agir sur l'ensemble des facteurs permettant de contrôler le lacet, le tangage, le roulis et l'altitude de vol.

Les règles du jeu de la régate offshore (utilisation de l'énergie manuelle pour manœuvrer un bateau, fut-il un foiler), interdisent actuellement le contrôle continu du vol horizontal par des PA. Certes, on peut amender ces règles, mais alors c'est toute la philosophie de la course offshore qui change de paradigme. A ce jour seuls les ULTIMS s'affranchissent des règles de course lors des records (Trophée Jules Vernes).

On atteint ainsi la limite de l'exercice. Transférer la conduite du vol d'un foiler intégral à un PA revient à éliminer l'homme du pilotage pour lui laisser uniquement le choix des routes à travers les fichiers prévisionnels Grib. C'est sans compter l'intervention possible de l'IA dans les prévisions de l'évolution de ces fichiers. Dans ce contexte, l'avenir des foilers océaniques intégraux me parait sportivement pas viable.

Par contre les foilers semi-intégraux peuvent encore largement progresser à condition d'abandonner la recherche de vitesse maximale, proche du mur des 40 nœuds car cette quête de vitesse génère une instabilité hydrodynamique permanente résultante du cabrage incontrôlable du « bateau », et interdit d'aligner des vitesses moyennes conséquentes stables en haute mer.

Cette évolution passe par l'autocontrôle de la portance de l'extrados de la surface active du foil (voir § 41 ci-dessus) en fonction de son immersion. Cela revient à réguler le cabrage de la coque autour d'une assiette plus stable et ainsi d'améliorer les vitesses moyennes, tout en laissant au PA le contrôle exclusif de la route programmée.

Cette technique paraît beaucoup plus souple qu'un choix », par le skipper, de la valeur fixe du « *rake*, pour chaque tronçon de navigation. Ce choix d'incidence du foil n'étant jamais en corrélation avec la puissance développée, à chaque instant, par la voilure préréglée.

Lorient le 14 Février 2025

J.S