



# LA VITESSE, symbole de la puissance au fil des siècles

Jean SANS

Le 14/02/2025

## 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 apparait
5. L'idée de régates 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 voilier 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, coté 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 ...

.....

## 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 Moth<sup>1</sup> 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 vélique. Ce couple s'exprime par l'action conjointe du poids du bateau

---

<sup>1</sup> 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.

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 ramènent<sup>2</sup> 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.

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 vélique.

---

<sup>2</sup> 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.

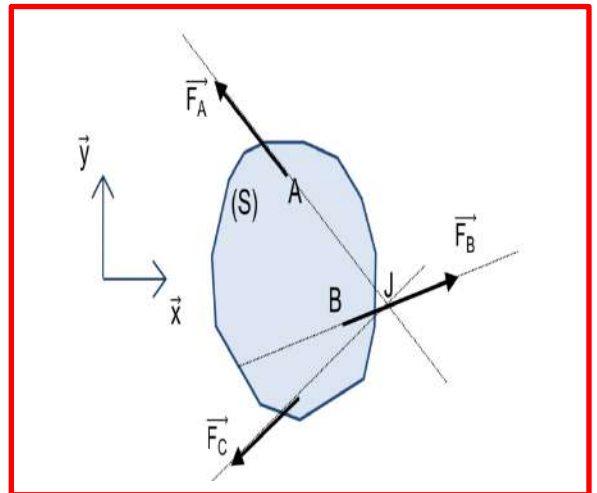
On se retrouve en présence de 3 forces dans l'espace :

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

Le principe fondamental de la statique<sup>3</sup> 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.



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 quelle force change et détruit cette condition d'équilibre précaire.

Analyse de chacune des trois forces :

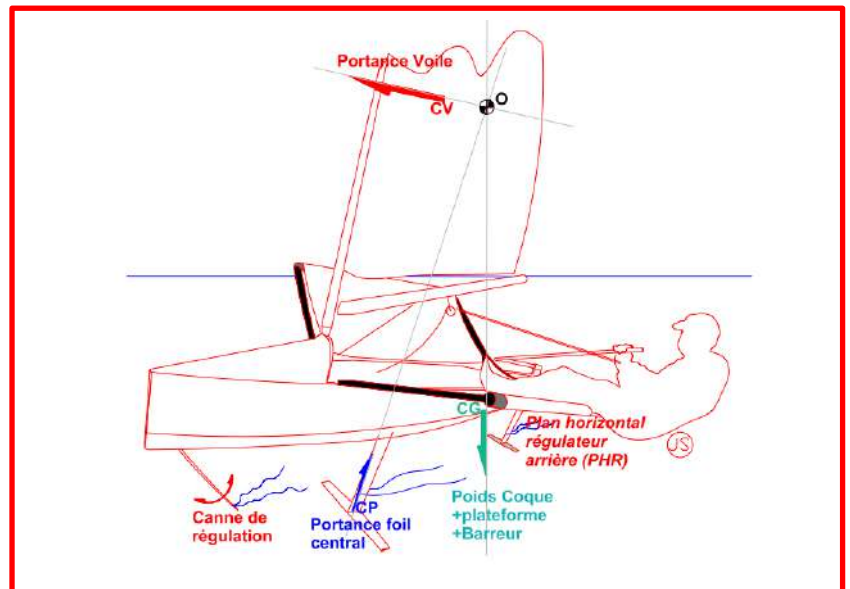
<sup>3</sup> Le domaine de la statique considère que les éléments mécaniques étudiés sont indéformables et immobile. Il existe conjointement au domaine de statique, ceux de la dynamique, de la résistance des matériaux, de l'hydrostatique, etc...

- 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  $4^\circ$  d'incidence à 1.42 pour  $14^\circ$  (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  $110 \cdot 9.81 / \cos(10^\circ) = 1095$  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.



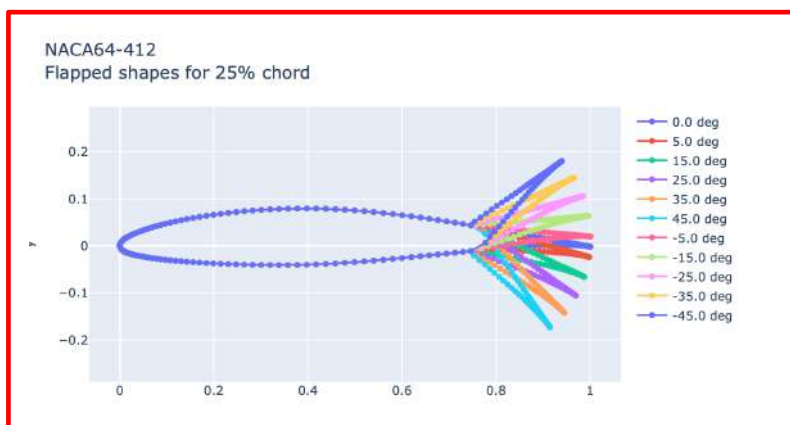
Mais la baisse où l'augmentation de la vitesse se répercute de fait sur le coefficient unitaire de portance  $C_z$ . Un passage de 1.2 à 1.0 de  $C_z$  (baisse de 16%) provoque une chute la portance à 833 Newtons. Cela démontre que la régulation de la vitesse devient primordiale pour voler.

○ 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-gîté. 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 :  $\Sigma$  (des 3 forces extérieures =0) apparait 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.

.....

.....

## **28. L'état de l'art coté 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 coté 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 Koch<sup>4</sup> 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.

---

<sup>4</sup> Antoine Koch est architecte naval et navigateur.



**FLYING NIKKA**

Dessins JS d'après des documents publics

