

LA QUETE DE LA VITESSE A LA VOILE

François LEFAUDEUX

Ingénieur général de l'armement (2S) Paris (France)

SOMMAIRE

Il est dans la nature humaine de toujours vouloir se surpasser. La navigation à voile est, de ce point de vue, exemplaire. L'enjeu peut être guerrier ou commercial, les perfectionnements et évolutions ont été quasi continus de l'Antiquité au XIX^e siècle, date d'apparition de la propulsion mécanique. Le relais a alors été pris par la compétition sportive, dont une des branches, récente, est la poursuite des records de vitesse. Cette recherche exacerbée de la plus grande vitesse possible a suscité beaucoup plus l'imagination des architectes et des scientifiques que la conception des voiliers répondant aux formules de jauge classiques, fusse la jauge de la Coupe de l'America. Par le procédé classique de la sélection par les échecs, les bonnes voies nouvelles ont été trouvées et explorées, les vitesses atteintes ont crû dans des proportions considérables. Ce document tente de faire le point sur cette quête à un moment où les cinquante nœuds à la voile paraissent à portée de main et même, peut-être, les cent kilomètres à l'heure...

SUMMARY

It is in the human nature to try to go faster. The history of Sailing and sailing ships is a good example of this permanent will. From Antiquity to the nineteenth century, the impetus has been War and Trade. With the introduction of mechanical power for ship propulsion, sail has become the exclusive domain of Sport. One of the branches of this Sport, the search for maximum speed, has known recent developments. This quest for speed has interested Naval Architects and Scientists far more than the design of sailing ships under any given Rule, such as the America's Cup Rule. By the classical process of trial and failure, the best ways ahead have been found and explored. Record speeds have been increased tremendously. This paper tries to discuss the state of the art in this very specific domain at a time where the breaking of the symbolic fifty knots threshold seems at hand and even, may be, the one hundred kilometres per hour limit...

1. INTRODUCTION

Il est dans la nature de l'homme de toujours vouloir se surpasser. Depuis les premières olympiades, il met son énergie et dépense des trésors d'ingéniosité pour augmenter ses propres performances et celles des machines qu'il a inventées. Cette recherche de performances est finalement assez semblable dans ses principes, qu'il s'agisse du domaine professionnel ou du domaine sportif.

Pour rester dans le domaine ici traité, celui de la voile, les architectes navals du XIX^e siècle cherchaient à améliorer tant les performances

des grands clipper que celles des yachts de la Coupe de l'America.

Comme dans les autres domaines, l'augmentation des performances se heurte à des seuils physiques plus ou moins sévères. Les lois physiques sont immuables, mais on peut parfois espérer franchir ou contourner l'obstacle. Il arrive même que l'ingéniosité humaine y parvienne. Prenons l'aviation : à la fin des années 1930 et pendant les premières années de la deuxième guerre mondiale, le challenge a été de dépasser la vitesse du son.

Les ingénieurs ont réussi à le faire avant la fin du conflit et si, contrairement aux espérances d'alors, le transport supersonique n'est plus vraiment d'actualité, c'est pour des raisons économiques et environnementales et non pour des raisons techniques, comme l'a montré Concorde.

Le milieu marin impose aussi à l'ingénieur son diktat physique, et ceci d'autant plus que la densité de l'eau est huit cent fois supérieure à celle de l'air, ce qui pose de sérieux problèmes bien avant d'arriver à la vitesse du son (qui, de plus, est dans l'eau environ cinq fois ce qu'elle est dans l'air !)

Le problème essentiel du navire de surface, tant par rapport à l'aéronef que par rapport aux véhicules terrestres est qu'il doit fonctionner à l'interface entre deux fluides. Ceci conduit aux paradoxes du bateau de surface. Doté de performances énergétiques incomparables à faible vitesse, son avantage, tant par rapport à l'avion qu'aux véhicules terrestres, se dégrade très vite dès que la vitesse augmente, en raison des ondes de gravité que son déplacement génère à l'interface air-eau auquel il doit sa sustentation gratuite à faible vitesse.

Toute l'histoire de l'architecture navale se résume à la recherche des moyens de minimiser les ondes de gravité à vitesse et déplacement donnés ou, solutions plus extrêmes, à s'efforcer de dépasser ce problème en le contournant.

Dans cette quête, il y a une différence sensible entre voiliers et navires à moteurs. Un navire à moteur dispose de sa propre source d'énergie, alors que le voilier non seulement profite du "dioptré" pour sa sustentation, mais utilise, en outre, les paramètres physiques différents des deux milieux pour en extraire son énergie de propulsion. Autrement dit, il est beaucoup plus lié au dioptré que les engins à moteur...

Les chapitres suivants sont consacrés à la description des moyens qui ont été explorés et ont passé le test de la pertinence expérimentale pour progresser dans la quête incessante de vitesse à la voile.

La trame de l'exposé est essentiellement historique, puisque les vitesses augmentant au fil du temps, c'est effectivement successivement au fil du temps que les problèmes ont été rencontrés et ont dû être résolus, jusqu'aux problèmes d'aujourd'hui.

2. DES MONOCOQUES AUX MULTICOQUES

Je ne m'étendrai pas sur cette transition. Comme en économie le prix est la rencontre entre l'offre et la demande, pour la voile la vitesse est la rencontre entre la traînée et la poussée. À déplacement donné du voilier, le multicoque génère une poussée de cinq à dix fois supérieure à celle du monocoque : la messe est dite. Un seul petit complément à signaler : alors que dans un monocoque les trois quarts du déplacement sont dans un lest sans aucun intérêt structural, au contraire, dans un multicoque toute la masse participe à la qualité de la structure. Or, plus on atteint des vitesses élevées, plus les structures sont sollicitées.

3. EXEMPLES D'AUGMENTATION DES VITESSES A LA VOILE DEPUIS TRENTE ANS

Nous avons construit Paul-Ricard en 1978, premier voilier hauturier moderne partiellement sustenté par foils. Il était capable d'environ 25 nœuds à une époque où les trimarans de course classiques affichaient plutôt 20 nœuds. Nous pensions, à tort, que les trimarans classiques de 60 pieds approchaient alors de leurs limites pratiques de vitesse. Les trimarans de 60 pieds sont maintenant autour de 30 nœuds, soit un gain d'un facteur 1.5. Je pense cependant qu'ils sont maintenant effectivement très proches de la performance maximum accessible avec cette formule, je n'en veux pour preuve que le fait que tous les skippers qui veulent aujourd'hui battre des records hauturiers et leurs architectes construisent des voiliers nettement plus grands, d'un facteur deux sur les longueurs environ, ce qui ne va pas sans poser quelques problèmes constructifs, amplifiés par le fait que la vitesse de pointe de ces grands engins approche dorénavant les 38 nœuds. La difficulté mécanique est fonction de deux facteurs :

- un facteur de taille, en principe bien connu de tous les ingénieurs structures, que celles-ci soient navales ou aéronautiques : si λ est le facteur d'échelle linéaire, les efforts dans les structures, toutes choses étant supposées égales par ailleurs, croissent plus vite que λ , le plus souvent au moins en $\lambda^{4/3}$

- un facteur lié à la vitesse : la loi de base de l'hydrodynamique comme de l'aérodynamique est la loi du carré de la vitesse : c'est la loi qui régit les efforts sur les bordés, etc.

On retrouvera évidemment ces facteurs pour les voiliers hydrofoils : les lois de la physique se veulent et sont universelles.

L'évolution des vitesses est tout aussi impressionnante dans le domaine de la vitesse pure. Dans les années 1980, le record était détenu par *Crossbow II*, magnifique et grand catamaran asymétrique, avec 36 noeuds. Il est actuellement détenu, depuis le début de cette année, par Antoine Albeau sur une minuscule planche à voile avec 49,09 noeuds.

4. LA SOLUTION HYDROFOIL, UNE DES APPROCHES POUR ALLER PLUS VITE

L'idée fondamentale, et déjà ancienne, est que, pour limiter la résistance de vagues qui est le facteur essentiel de limitation de performance des navires, il faut sortir le plus possible de l'eau. Le premier brevet de navire à hydrofoils date du milieu du XIX^e siècle... Rien, donc, de nouveau sous le soleil. La difficulté est évidemment de passer du papier à la démonstration pratique. Ce pas a été franchi pour les navires hydrofoils à moteur dès la première décennie du XX^e siècle par un ingénieur italien Enrico Forlanini, inventeur fécond. Il a, par exemple, fait voler un hélicoptère propulsé par une machine à vapeur dès 1877. Son canot hydrofoils a atteint un peu plus de 40 mph sur le lac Majeur en 1906 (figure 1). Il était motorisé par un moteur de 60 hp (normes de l'époque).



Figure 1. Canot hydrofoil de Forlanini

Quelques années (1919) plus tard, Bell inspiré par un article de William E. Meacham de 1906

doublait la vitesse atteinte avec son HD4 à 114 km-h.

Autre solution retenue pour les canots automobiles de record de vitesse, en particulier par les Anglais : le principe des aéroglisseurs (figure 2). Malgré un aspect visuel très différent, il s'agit du même principe que le principe des foils : créer une portance hydrodynamique qui se paie évidemment d'un certain prix (traînée), mais réduit fortement (hydroglisseurs) ou supprime quasi totalement (foils immergés) la traînée de vague.

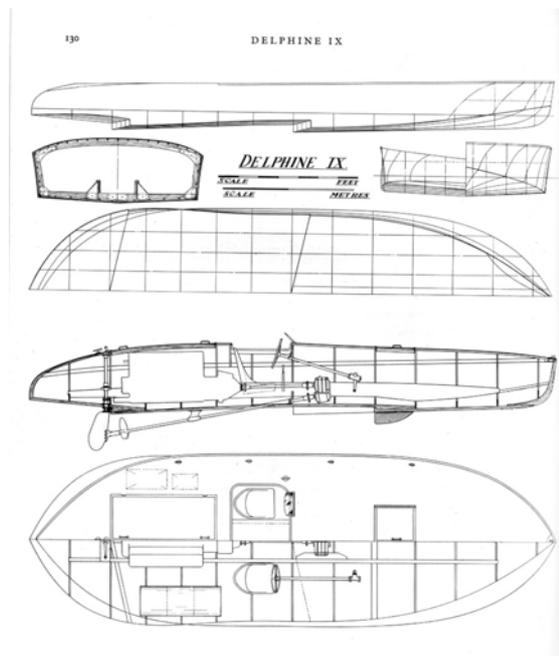


Figure 2. Coque planante

La différence la plus sensible entre foils et coques planantes est que la coque planante est une aile sans extradors, alors que le foil est, aux vitesses « normales » une aile complète avec extradors. Les spécialistes de l'aérodynamique pourront trouver la différence importante puisque les deux tiers de la portance d'une aile subsonique classique sont générés par l'extrados. Cette différence est effectivement importante, mais joue plus sur la surface d'aile nécessaire que sur sa traînée, comme je le préciserai plus loin.

Y a-t-il d'autres solutions envisageables ? Pour les navires à moteurs et tant que nous sommes dans un univers euclidien à trois dimensions, non. Pour les voiliers, il y en a encore une : assurer tout ou partie de la sustentation par l'aérodynamique. Ici encore, deux sous-catégories :

- la voile inclinée, très fréquemment utilisée. Un calcul trigonométrique apparemment simple, mais que je dois mal expliquer, car je n'ai pas convaincu grand monde, montre que le procédé est vite limité. À défaut de suivre le raisonnement géométrique, mes interlocuteurs sont en général vite convaincus par un simulateur simple d'un voilier générique ayant à la fois des foils et une voile inclinée : au-delà de 10-15° d'inclinaison de la voile, selon les autres caractéristiques du bateau, on perd en efficacité...
- le cerf-volant, ici le plus souvent appelé « Jacob's ladder » du nom de l'amateur anglais qui a mis le procédé à l'honneur dans les années 1970. L'intérêt du procédé n'est pas réellement dans la sustentation, très difficile à contrôler, ce qui conduit parfois à des baptêmes de l'air involontaires, que dans la possibilité de placer le centre de voilure quasiment au niveau de la flottaison. Si l'antidérive est bien calculée, ceci permet de générer des forces propulsives aérodynamiques ahurissantes et donc, de passer en force.

Je me dois de citer une dernière géométrie, non pas parce qu'elle me paraît intéressante, mais parce que l'université de Southampton y croit et que *SpeedRocket* essaie actuellement de battre le record absolu de vitesse en l'utilisant : il consiste à faire fonctionner de manière antagoniste une voile inclinée et un foil, le foil enfonçant le bateau et la voile l'extrayant de l'eau. Quand le foil décroche...

5. DES HYDROFOILS A MOTEURS AUX HYDROFOILS A VOILE. L'EPOQUE DES PIONNIERS.

Deux géométries de foils sont explorées :

- les foils dits en V traversant : la sustentation est obtenue par deux foils inclinés en opposition, chacun à environ 45° de la verticale ou de l'horizontale, au choix, et traversant, c'est-à-dire étant partiellement dans l'eau et partiellement dans l'air. Ces deux conditions sont nécessaires pour obtenir un fonctionnement satisfaisant.
- Les foils porteurs horizontaux non traversants, géométrie dite de deuxième génération.

Alors que, tant pour les navires à moteur que pour les voiliers, on peut rendre la première géométrie autostable autour de tous les axes, ce qui élimine tout problème de pilotage, la deuxième demande absolument un asservissement. Sur les navires à moteur rapides, il n'est pas totalement trivial ; la première difficulté consiste à trouver un capteur d'altitude fiable et, quand on parle ici d'altitude, il s'agit d'obtenir une précision de quelques centimètres sans trop d'intégration...

La théorie des hydrofoils de première génération à moteur est expliquée dans tous les ouvrages ; elle est, à ce niveau, d'une simplicité absolument biblique : les foils en V produisent deux forces symétriques autour du plan vertical de symétrie longitudinal, les composantes horizontales se neutralisent, les forces verticales se conjuguent pour soulever le bateau. Si la vitesse augmente, le bateau sort plus de l'eau et la surface utile de l'aile diminue : on compense dans la formule de base de l'aéro et de l'hydrodynamique du V^2 par du S. Dès que l'on creuse un peu plus, que l'on s'intéresse à la composante transversale induite par le vent traversier, à un changement de centrage latéral parce que les passagers se mettent au poste d'admiration, etc., les choses se compliquent un peu, mais l'expérience, confortée *a posteriori* par la théorie, a montré que le système était assez robuste. La seule chose qui demande un peu de doigté est la stabilité en tangage couplée à celle en pilonnement. C'est, à peu de choses près, le problème rencontré dans les débuts de l'aviation. On aboutit sans surprise à une géométrie canonique assez proche de la géométrie canonique des avions « classiques », avec une équation de stabilité longitudinale qui fait aussi intervenir le centrage longitudinal du centre de gravité.

On notera que le système en V comporte, pour les navires à moteur, un inconvénient significatif : pour générer une portance verticale égale au déplacement, on génère une portance qui est (avec une inclinaison à 45° des ailes) de $\sqrt{2}$ plus grande que le strict nécessaire. Ceci a un prix, puisque la traînée est quasi proportionnelle à la portance générée, à la traînée de friction près qui est faible aux vitesses habituelles, la surface mouillée des foils porteurs étant très faible (on peut utiliser des charges alaires de plusieurs tonnes au m²).

C'est une des raisons pour lesquelles l'US Navy a opté, dans les années 1960, pour une solution de deuxième génération pour ses PH maintenant retirés du service, mais, depuis, construits sous licence par les marines italienne et japonaise.

Le problème se pose différemment pour les voiliers, puisque le principe de propulsion à la voile est de générer une poussée aérodynamique longitudinale à partir de la résistance à la dérive transversale de la coque et de ses appendices.

L'optimisation de conception des voiliers de record, qu'ils soient hauturiers ou de vitesse pure, consiste à utiliser au mieux la masse du navire et de l'équipage pour générer de la poussée. Sans que ce soit réellement mathématique, on arrive presque toujours à une composante anti-dérive très proche du déplacement du voilier ce qui, pour un voilier hydrofoil en condition de vitesse maximale, correspond au fonctionnement avec le seul foil porteur sous le vent réellement actif et à une inclinaison du foil de 45° , à la gîte près que l'on s'arrange pour maintenir faible. On n'est donc pas réellement gêné par ce coefficient multiplicateur de $\sqrt{2}$. La pénalité est même, dans ce cas, nettement inférieure à celle induite par la configuration à plans porteurs horizontaux car on doit alors générer séparément les deux portances et la pénalité est de $\sqrt{2}$ par rapport au foil incliné !

Le problème des foils traversants est donc ailleurs, dans le problème du contrôle de la ventilation sur ces foils.

6. L'APPROPRIATION PAR LA FRANCE DE CETTE TECHNIQUE GRACE A ÉRIC TABARLY.

Je passe sur toute une période de l'histoire. Dans l'entre-deux-guerres on trouve quelques exemples d'essais de conception et de réalisation de voiliers hydrofoils à voile. Dans les années d'après la deuxième guerre mondiale, les vedettes à passagers à hydrofoils de première génération se développent rapidement pour les liaisons en eaux relativement abritées telles que l'express côtier norvégien, les liaisons rapides dans le golfe Saronique, les liaisons de la Volga, etc. Quelques milliers d'hydrofoils ont été

construits et l'échec de la liaison avec Ouessant ne doit pas faire oublier que la formule a donné et continue de donner satisfaction sur de nombreuses liaisons.

Concernant les voiliers, l'impulsion a été donnée par la création de la semaine de vitesse de Weymouth. Cette semaine a une simplicité toute anglaise. Un cercle de bouées de 500 m de diamètre est établi dans le port de Portland, les officiels chronomètres officient du matin au soir. N'importe qui peut participer moyennant une petite contribution. On entre quand on veut par la bouée que l'on souhaite, on doit sortir par la bouée opposée, tout ce qui entre doit ressortir ! On peut faire autant d'essais dans la semaine que l'on désire. Un tel règlement a vivement suscité l'imagination. Les amateurs anglais ont découvert ou redécouvert bien des approches, dont celle des voiliers hydrofoils. Les plus persévérants ont transmis leur savoir dans le mythique livre « Hydrofoil Sailing » [1].

Cependant, les ingénieurs de Dassault qui ont pris contact avec Éric Tabarly en 1975 n'étaient pas au courant de ces essais qui, d'ailleurs, les auraient peut-être un peu refroidis, tant les premiers résultats étaient décevants (alors que les Américains, grâce à un investissement intellectuel sans doute assez considérable du David Taylor Model Basin, avaient, dès la fin des années cinquante, réussi avec le voilier *Monitor* (Figure 3) un quasi sans faute, réalisant, au premier essai, un bateau viable et, au deuxième, un bateau rapide !).



Figure 3. *Monitor*

Le schéma retenu par ces ingénieurs était, évidemment, le schéma traditionnel aéronautique : ailes portantes à l'avant, empennage stabilisateur à l'arrière. Ils n'avaient, au demeurant, pas tort : cette géométrie, on le sait maintenant, est la plus

efficace tant du point de vue possibilité de rendre l'ensemble autostable que de son efficacité globale en terme de traînée, mais, encore aujourd'hui, je rencontre des ingénieurs de l'aéronautique qui n'imaginent pas qu'il puisse y avoir une différence entre un hydrofoil et un avion ; ainsi, tout récemment, l'un d'eux était incrédule quand je lui disais qu'un voilier hydrofoil tournait par action sur la gouverne de direction et non par action sur le roulis !

Mais revenons à *Paul Ricard* car tel est le nom du bateau construit pour Éric Tabarly, un sponsor enfin trouvé. Avec Alain de Bergh alors ingénieur structure de chez Dassault et auteur du schéma initial de conception, nous nous sommes vite rendu compte que faire un pur hydrofoil de la taille d'un trimaran de soixante pieds était hors des possibilités des matériaux de l'époque, du moins avec la géométrie qui nous paraissait la plus souhaitable (c'était possible au prix de foils multiples échelonnés en persiennes, comme l'étaient d'ailleurs les foils de Monitor, mais nous ne voulions pas de cette solution mécaniquement complexe et, donc, fragile).

Paul-Ricard (Figure 4) n'est pas un voilier hydrofoil, mais un « foiler », c'est-à-dire un bateau dont une partie de la portance, disons jusqu'aux trois quarts à la vitesse maximale, est le fait des foils, ce qui réduit d'autant la portance d'Archimède et, dans la foulée, la traînée de vagues ...

Je bénis *a posteriori* cette limitation des matériaux, car le voilier hydrofoil que nous aurions pu alors réaliser, matériaux disponibles, aurait été, malgré le bon comportement de la maquette navigante réalisée par l'université de Poitiers, un fiasco !

L'épisode suivant est double : deux initiatives indépendantes qui finissent par se rejoindre.

Toutes deux démarrent dans la deuxième moitié des années 1980.

La première, en ambition scientifique et technique, est celle du corps enseignant de l'ENSTA qui pense à fédérer les enseignements liés à l'architecture navale autour d'un projet d'élèves motivant. Ce sera *Techniques Avancées* (Figure 5). L'ambition est de conquérir le record de vitesse absolu sur cinq cent mètres, alors détenu par *Crossbow II*. Les disciplines participantes sont les

suivantes : aérodynamique (essentiellement voiles), hydrodynamique pour les foils, structures pour tous les éléments : voiles, plate-forme, appendices, enfin, matériaux. Le point de rencontre de tous est dans la simulation. Après deux années d'études, une géométrie efficace est définie et dimensionnée. DCN prend à sa charge la construction et, début des années quatre-vingt-dix, les premiers essais sont décevants !



Figure 4. Paul-Ricard

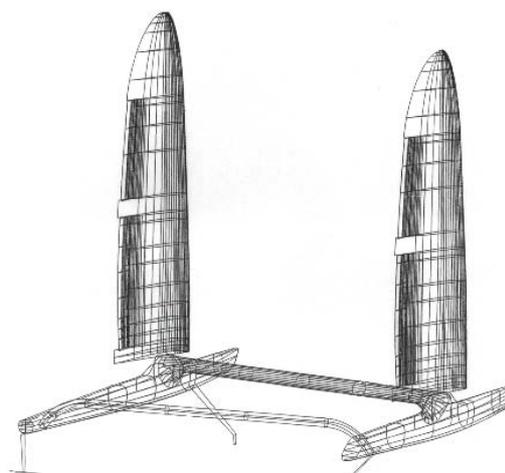


Figure 5. Techniques Avancées

La seconde est la poursuite de l'idée des ingénieurs de Dassault : le carbone offre des

possibilités nouvelles. Alain Thébault, un jeune formé par Éric Tabarly, ne vit que pour réaliser ce rêve et il se lance dans sa concrétisation. L'approche est, comme la première fois, « arrogante » : la solution est la formule « avion ». Une maquette navigante est réalisée : elle navigue avant le voilier de l'ENSTA, mais avec, sans le savoir, les mêmes déboires !

Le hasard rapproche les deux projets sur mon bureau. Je me rappelle la présentation par les élèves de l'ENSTA au premier semestre 1992 : « nous avons fait tous les calculs, la simulation nous affichait 38 nœuds, ce qui est notre objectif. En navigation, le bateau démarre bien, décolle, prend de la vitesse puis, vers 25 nœuds, atterrit brutalement... ». Je leur ai dit que la réalité n'obéissait que rarement à notre volonté et que là commençait réellement le métier de l'ingénieur : qu'ils regardent bien ce qui semblait se passer, qu'ils fassent des hypothèses, essaient de les valider par simulation, puis par essais partiels, au bassin ou à la mer, avec des maquettes *ad hoc*, etc.

L'Hydroptère n'est pas arrivé sur mon bureau pour la même raison, mais la situation était la même, à la différence que les ingénieurs de Dassault étaient des ingénieurs expérimentés et pragmatiques : les symptômes étaient les mêmes — départ en dérapage quand le bateau accélérât. Remède pragmatique : un winglet vertical pour le guider « sur des rails ». Il y avait aussi un winglet horizontal pour pallier un défaut moins simple d'explication...

Bref, sans en avoir encore fait la théorie complète je suggérais aux élèves de l'ENSTA l'ajout d'un winglet vertical. La navigation de la maquette d'Alain Thébault ayant de son côté nettement progressé, la décision de construire *l'Hydroptère* de 60 pieds était prise en 1993, Yves Sillard ayant été convaincant auprès des industriels pour qu'ils s'engagent dans cette aventure.

7. LES VICISSITUDES

La première, citée au § précédent, est le dérapage. Les voiliers anglais de Weymouth avaient, eux, tendance à chavirer, *Techniques Avancées* avait, lui, fait, une fois le grand soleil. Les deux phénomènes sont de nature différente et l'un apparaît avant ou après l'autre selon la géométrie. Le dérapage s'explique sans figure : quand le voilier prend

de la vitesse, l'ajustement de la portance se fait par réduction de surface mouillée et augmentation de la charge alaire, sans modification sensible de l'incidence. La dépression d'extrados croît et le foil ventile brutalement, d'où le décrochage. Le bateau retombe lourdement au vent (et non du côté où a lieu le décrochage...).

Le chavirement s'explique plus facilement à partir d'une figure. On se place en situation de navigation sur un foil, d'abord parce que c'est un point de passage obligé en chavirage, ensuite parce que la navigation sur un foil est la plus efficace : on est au moment de redressement maximum du bateau et en traînée minimale ; il s'agit donc d'une situation importante, enfin, parce que les explications sont beaucoup plus intuitives et simples que quand il faut expliquer les contributions de deux foils.

Avec des foils sans winglets (Figure 6), la résultante hydrodynamique est fixée en direction et à quelques centimètres près en position. Les deux autres forces agissant sur l'ensemble du voilier dans le plan transversal, le poids et la composante transversale de la force vélique, doivent se croiser sur cette droite si on veut que l'équilibre, stable ou instable, soit possible. Sans modification de la position du centre de gravité et du centre de gîte...

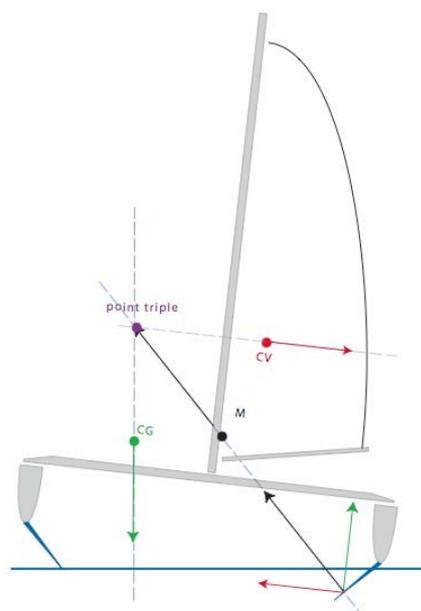


Figure 6. Équilibre transversal

Sur les voiliers hydrofoils légers, l'équipage peut faire varier rapidement la position du centre de gravité, comme sur tout dériveur léger ou petit catamaran. Il peut aussi assez facilement régler la voile (avec une constante de temps un peu supérieure). Sur les grosses unités, aucune de ces manœuvres n'est possible ; l'architecte doit introduire une stabilité moins précaire et moins sensible à la hauteur du centre de voilure.

C'est ce que donne simplement le winglet : selon l'angle de dérive, le chargement hydrodynamique horizontal sur le winglet vient modifier la direction de la résultante hydrodynamique, permettant l'obtention d'une position d'équilibre malgré les variations de la hauteur du centre de voilure et sans une variation trop conséquente de la gîte (Figure 7).

Concernant le dérapage, l'action du winglet est évidente : si le dérapage augmente brutalement, la portance sur le winglet augmente aussi et bloque le dérapage. L'ensemble du foil récupère de la portance rapidement. C'est le concept du « foil virgule », nom finalement donné au système, les réalisations pratiques pouvant aller de l'arc de cercle à la forme cassée représentée.

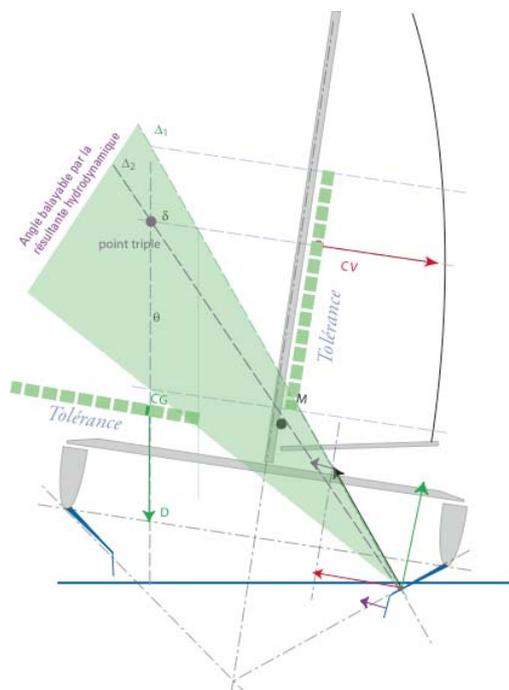


Figure 7. Équilibre avec foil virgule

La force hydrodynamique peut balayer un angle important, d'où une véritable tolérance sur les positions du centre de voilure et du

centre de gravité. L'équilibre est possible, sa stabilité est une question plus délicate..., mais on a déjà franchi une étape importante.

8. LES PERCEES

Cet apport du winglet a permis de rendre les voiliers hydrofoils pilotables, ce qui, à l'expérience, n'était pas le cas pour les voiliers à foils rectilignes dès que la vitesse augmentait. La vitesse de pointe tant de *Techniques Avancées* que de *l'Hydroptère* a alors pu augmenter progressivement. Non sans, cependant, quelques incidents sur les deux bateaux : avec l'augmentation de la vitesse, la moindre faiblesse conduit à une casse. Bien qu'ayant toujours été attentifs aux problèmes de divergence possible des interactions structures écoulement (la structure est déformée par la charge hydrodynamique, cette charge augmente de ce fait et on finit, si la vitesse est importante, par ne plus trouver de situation d'équilibre en dessous de la limite de rupture) nous nous sommes fait piéger. Des structures comme les empennages en T inversé (\perp), utilisés à l'arrière et sollicités en portance et en dérapage dans un large domaine d'efforts, sont particulièrement délicats à stabiliser, d'autant, bien sûr, que pour limiter leur traînée, on s'efforce naturellement de faire passer les efforts dans des sections réduites ! (ces empennages en T, à une époque à la mode sur les avions de ligne, y ont donné lieu aux même type de difficultés).

Finalement, *Techniques Avancées* a battu le record de vitesse pure dans sa catégorie en 1998 avec 42,12 nœuds et, bien que n'ayant pas du tout été construit avec cet objectif, *l'Hydroptère* le lui a repris en 2007 avec 44,81 nœuds, il est vrai avec un aménagement conséquent des règles d'établissement et de contrôle de ce type de record, *l'Hydroptère* ayant bénéficié de la souplesse apportée par les mesures GPS. Je considère que le gain apporté par ce changement des conditions de mesures que j'ai négocié avec le WSSRC est de l'ordre de 2 nœuds !

9. LES LIMITATIONS

Pour aller encore plus vite, trois limitations principales de natures très différentes ont été identifiées. Ces trois limitations n'ont pas du tout le même statut.

- la première est, théoriquement, la plus simple à surmonter, même si la solution mécanique n'est pas nécessairement évidente. Sur un voilier de record pur comme l'était *Techniques Avancées*, la position en hauteur du centre de voilure est fixe ou quasi fixe : la surface de voile est donnée, le vrillage de la voile est fixe. Il y a de légères variations de la hauteur du centre de voilure, en fonction de l'incidence adoptée sur la voile et du profil de vitesse du vent en fonction de l'altitude, mais cette variabilité est gérable. On peut donc fixer avec précision l'angle de dièdre du foil sous le vent de manière à avoir la répartition la plus efficace possible de portance horizontale entre sa partie principale et le winglet, par exemple 5 % du déplacement D (pour avoir des grandeurs adimensionnelles) sur le winglet. Ceci permet aussi de fixer la surface de ce winglet. Reste son calage géométrique : là, en raison de l'interaction forte entre partie principale du foil et winglet, plus rien n'est réellement linéaire et, si on veut éviter les tâtonnements pénibles, il faut passer par l'artillerie lourde, c'est-à-dire un logiciel comme FLUENT.

Pour un voilier à voilure souple et avec ris, comme *l'Hydroptère* ou tout autre voilier hauturier, l'excursion en hauteur du centre de voilure est extrêmement importante. Si on veut être en antidérive positive sur le winglet dans toute la plage de fonctionnement, ce qui est pratiquement indispensable, il faut caler l'ensemble pour avoir les 5 % déjà cités de portance antidérive pour la position la plus haute de la voile. On en déduit aisément le chargement du winglet pour la position la plus basse du centre de voilure, voilier toujours en navigation optimale sur un seul foil : le chargement du winglet est alors impressionnant (voisin de 0.5 D pour une géométrie d'ensemble classique). Ceci demande une taille de winglet significative et un calage en incidence pénalisant en fonctionnement sur deux foils. De plus, le moment de flexion à la transition winglet foil devient extrêmement difficile à tenir structurellement dans une zone où on aimerait éviter les surépaisseurs. La solution est théoriquement simple : rendre l'angle d'inclinaison de la partie du foil dans la plan transversal réglable de manière à toujours orienter correctement la normale au foil sous le vent vers le point P de rencontre du poids et de la force vélique transversale. C'est, hélas,

mécaniquement moins simple à faire qu'à demander ! Typiquement, la plage d'angles de dièdre à couvrir va de 28° voilure haute à 45° au bas ris trinquette.

- la deuxième limitation constitue la vraie frontière théorique, l'équivalent de la transition entre vol subsonique et vol supersonique, image pertinente, car il s'agit aussi d'un changement radical et éventuellement brutal de mode d'écoulement. Quand j'ai commencé à m'intéresser aux grandes vitesses, il y a exactement trente ans, l'expérience acquise sur les hélices, l'expérience des amateurs anglais avec leurs foils usinés dans leur garage, tout semblait indiquer une limite pratique d'utilisation des foils « classiques » autour de 40 nœuds. Les progrès faits sur la définition des profils et, encore plus, sur leur précision d'usinage grâce au fraisage numérique multiaxes a permis de repousser sérieusement cette limite. Nous savons aujourd'hui spécifier les précisions considérables nécessaires et les obtenir. Tant *Techniques Avancées* que *l'Hydroptère* ont atteint de l'ordre de 48 nœuds en pointe avec des foils classiques. Quant à la dérive de la planche à voile détentrice du record, elle a réussi à fonctionner correctement à environ 50 nœuds. Mais on est, là, à l'extrême limite d'apparition de la cavitation sur des profils même peu chargés.

La figure 8 montre la séparation des zones cavitantes et non-cavitantes en fonction de l'incidence et du nombre de cavitation ou nombre d'Euler :

$$\sigma = \frac{P_{\infty} - P_v}{\frac{1}{2} \rho V_{\infty}^2}$$

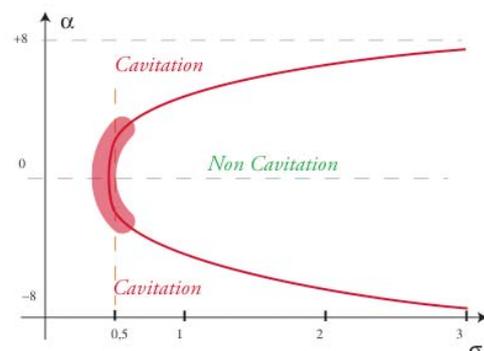


Figure 8. Zones de cavitation

La pointe est épaissie, la zone est en effet instable.

Il faut de toutes manières, à ces vitesses, charger les foils en valeur moyenne, même si on travaille à C_z relativement faible, sinon il faudrait des surfaces mouillées importantes extrêmement pénalisantes en traînée : comme toujours, l'équilibre est autour de moitié-moitié. Mais savoir passer la portance moyenne est loin d'être suffisant, il faut aussi passer les pointes d'efforts liées aux variations inéluctables d'incidence sans « décrocher », le « sol » étant au mieux à quarante centimètres ! On est donc obligé de passer aux foils dits supercavitants. C'est la transition qui est en cours avec les deux options : passer à la géométrie des hydrofoils de deuxième génération, comme pour les hydrofoils à moteur ou garder les foils traversants, ce qui veut dire, en fait, passer aux foils superventilés puisqu'il est impossible de maintenir une poche de cavitation en quasi communication avec l'air et qu'il vaut mieux, dans ce genre de situation précéder que subir ! Ma position est que c'est cette deuxième solution qui s'impose : en effet, contrairement à ce qui se passe pour un navire à moteur, on a à reprendre autant de transversal que de vertical : la jambe travaille autant en incidence que le foil horizontal : elle cavite et ventile tout autant : on ne gagne donc rien ! On perd même puisque, tant qu'à faire, en combinant les deux on gagne un facteur $\sqrt{2}$ sur la portance totale à générer et donc sur la traînée. La difficulté n'est pas tant de dessiner un foil superventilé, c'est même plutôt plus simple que de dessiner un foil classique, mais de faire en sorte que la transition du fonctionnement du mode classique au mode supercavitant, puis en mode superventilé (les deux transitions pouvant être réduites à une), se fassent sans mettre le bateau en péril. Or ces transitions se font avec une modification importante des coefficients de portance et de traînée, de l'ordre de deux pour la portance... Il y a donc, là, toute une stratégie à élaborer.

- Troisième élément limitatif de la vitesse : l'évolution des efforts structuraux. L'avantage indéniable de la solution voilier à foil, ainsi que, dans une moindre mesure, des voiliers planants, est la croissance lente de la traînée avec la vitesse : la partie principale de la traînée est la contrepartie de la sustentation et est sensiblement constante ; viennent s'ajouter à cette traînée une composante de traînée aérodynamique classique en V^2 , ainsi qu'une

composante de traînée de frottement hydrodynamique croissant également en V^2 , mais pondérée par la décroissance de la surface mouillée avec la vitesse, réduction qui reste vraie au passage au supercavitant et au superventilé, car si la surface de foil dans l'eau augmente, une seule face donne lieu à traînée ! Les deux partent de très bas et il faut arriver à des vitesses élevées avant qu'elles ne prennent une réelle importance. Sur un voilier hauturier, comme *l'Hydroptère*, la traînée aérodynamique l'emporte sur la traînée hydrodynamique de frottement car, quel que soit le soin apporté à la réalisation de la partie aérienne, on n'échappe pas à quelques haubans, bastaques, pataras, étais, etc. Sur un voilier de record pur, nettement plus petit, les efforts sont proportionnellement plus faibles et on peut éliminer quasi totalement le grément dormant. C'était le cas sur *Techniques Avancées* dont le tendon d'Achille était finalement la poutre transversale avant, de section légèrement ovoïde mais présentant un C_x loin d'être optimisé. À traînée faible, faible force propulsive et donc efforts généraux moyens maîtrisés, on pourrait donc s'estimer satisfait.

Le problème vient d'ailleurs : des efforts variables autour de l'effort moyen. Alors que les efforts moyens ne dépendent que peu de la vitesse, les efforts variables dus aux fluctuations de la vitesse du vent, et, pour les voiliers hydrofoils aux variations d'incidence sur les foils et aux variations de la surface immergée de ceux-ci, croissent en V^2 et leur écart-type devient nettement supérieur à la valeur moyenne des efforts ! On retrouve le même phénomène sur les pressions sur les bordés lorsque pour une raison ou une autre une coque vient à toucher l'eau, ce qui ne peut être exclu.

C'est cette prépondérance croissante des efforts fluctuants qui a entraîné les casses successives sur *l'Hydroptère*. Le bateau avait été dessiné initialement pour 28-30 nœuds, il monte aujourd'hui à plus de 45. L'augmentation des efforts moyens est sans doute de l'ordre de 30 %, les efforts fluctuants sont, eux, multipliés par 2.5 à 3 ! Sur ce bateau nous avons mis un dispositif du genre suspension destiné à limiter les efforts transmis par les foils, de même qu'une suspension automobile limite les efforts fluctuants transmis à la caisse. Il a permis de gagner

quelques nœuds, mais, comme toute suspension, il a une butée qui, si on n'y prend garde, est vite atteinte...

Cette question des efforts fluctuants est à examiner ici dans le contexte du dessin d'un bateau visant plus de cinquante nœuds. Cette vitesse impose les foils supercavitants, en fait superventilés. Pour ces foils, l'incidence optimale, meilleur rapport portance / traînée est plus grande que pour les foils classiques (figure 9), la surface étant, elle aussi, supérieure, d'un facteur 1.5. Le paradoxe n'est qu'apparent, puisque l'on compense ainsi la perte de portance en agissant simultanément sur l'incidence et sur la surface...

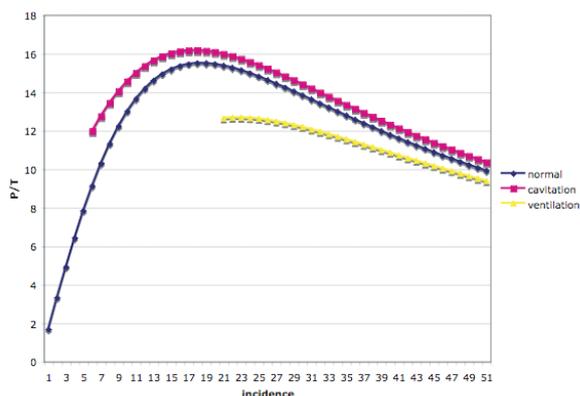


Figure 9. Performances comparées des foils

Sur cette figure, les incidences sont en 1/10 de degré, l'optimum en superventilé est proche de l'incidence de 2.3° pour 1.9° pour un foil en régime classique ; l'ordonnée est le rapport portance / traînée, il reste honorable...

Le rapport des surfaces à l'optimum est de 1,5. C'est ce facteur qui est le plus pénalisant du point de vue des efforts fluctuants et, bien sûr aussi du point de vue structural si on s'éloigne des tailles minimales, ceci, d'autant que la taille des foils croît plus vite que le facteur d'échelle linéaire du voilier (facteur $\lambda^{3/2}$ sur les dimensions linéaires du foil)...

10. L'AVENIR

Les perspectives sont très différentes selon que l'on pense voilier de régates, voilier de record de vitesse pure, voilier hauturier de compétition open, voilier hauturier de record. Je vais aborder rapidement ces quatre catégories.

10.1. Voiliers de régates

Plusieurs séries admettent les foils, notamment les Moth Europe et les 18 pieds australiens (figures 10 et 11).



Figure 10. Moth



Figure 11. 18 pieds (sur le lac de Genève)

Dans ces deux catégories, des voiliers hydrofoils à la formule hydrodynamique assez particulière s'alignent régulièrement et obtiennent des succès de plus en plus fréquents au fur et à mesure que les barreaux réussissent à les contrôler et que les architectes les rendent plus faciles à contrôler. Le challenge pour ces deux catégories est de faire des bateaux qui aient un large « domaine de vol » à la fois selon l'axe des vitesses de vent et selon celui des caps par rapport au vent vrai. La manœuvrabilité et l'aptitude à virer de bord en restant sur les foils joue aussi un rôle. Je ne m'étendrai pas sur cette catégorie, qui est illustrée par deux photos.

Une remarque cependant : plus on va vers les séries de grande taille, moins le passage à des formules avec foils ou coques planantes est facile. Ce n'est pas un hasard si cette évolution a commencé par les Moth (avec, aussi, l'aide d'une formule de jauge très peu contraignante).

10.2. Voilier de record de vitesse pure

La question du pilotage est toujours importante, mais elle s'intègre, là, dans l'équilibre général du dessin, optimisé pour une vitesse de vent choisie a priori ainsi que sa direction. On est conduit à rechercher des formules permettant une vitesse élevée avec des vents modérés ; typiquement, une vitesse de l'ordre de 2.5 fois la vitesse du vent vrai (les chars à glace sont bien au-dessus, mais ils ne dépendent quasiment rien pour leur sustentation, l'essentiel de leur traînée est aérodynamique).

Ces caractéristiques ne peuvent s'obtenir que par une aérodynamique digne de celle d'un planeur de compétition et une hydrodynamique également d'une grande propreté (figure 12).



Figure 12. Voilier de record absolu

Pourquoi cette option plutôt que le « passage en force » avec des vents forts ? Deux raisons à cela :

- plus on a besoin d'un vent fort, moins on a de chances de le rencontrer...
- plus le vent est fort, moins la mer est lisse et plus les efforts fluctuants vont devenir dimensionnants...

Mais on est encore, là, à la périphérie des problèmes.

Deux d'entre eux retiennent particulièrement l'attention :

- la supercavitation : ne pouvant l'éviter, même avec la formule foils en \perp , il faut la maîtriser. Il faut relativiser son inconvénient

en termes de rapport portance / traînée. La figure 9 montre que ce rapport est dégradé, mais pas dans des proportions insupportables. Comme dans l'aviation, il faut aussi maîtriser la transition entre les deux régimes : il ne faut jamais oublier que, pour un voilier d'une dizaine de mètres, la tolérance d'altitude est de l'ordre de trente centimètres...

- les efforts fluctuants, déjà cités. Qu'il s'agisse d'efforts moyens ou d'efforts fluctuants, un regard même rapide sur les équations aux dimensions montre clairement que dans ce domaine « Small is beautiful ». La taille choisie doit l'être en fonction du clapot franchissable sans taper, d'où la boucle par le facteur de vitesse et la sélection des plans d'eau... Il faut bien entendu pouvoir embarquer le pilote et, éventuellement, un équipier...

Si on fait abstraction des planches à voile (détentrices du record actuel) qui passent en force avec une facteur de vitesse proche de un, à vingt centimètres du bord du canal des Saintes-Maries, toutes les propositions actuelles pour franchir les cinquante nœuds arrivent à une longueur comprise entre 10 et 13 mètres... bien qu'avec des formules variées. Une équipe australienne utilise les coques planantes, une autre les foils traversants, une équipe liée à l'université de Southampton une formule à foil, mais enfonçant le bateau (voir figure 13).

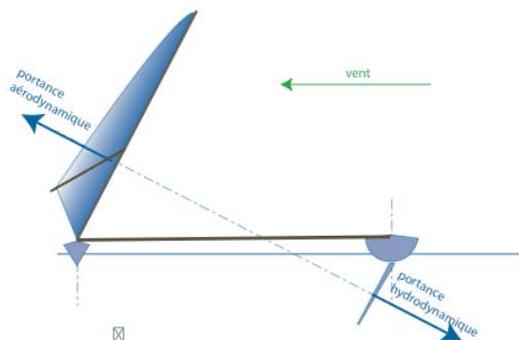


Figure 13. Principe de *SpeedRocket*

Si le foil décroche, les impressions fortes sont garanties. Cette équipe a fait une campagne de tentatives à la fin 2007 sur le site de Walvis Bay en Namibie où on trouve fréquemment un bon vent de terre et la possibilité de naviguer juste derrière un banc de sable très bas. L'engin a échappé au contrôle directionnel

avant d'atteindre une vitesse réellement importante à l'aune des records actuels.

Peut-on se risquer à un pronostic ? Pour moi, les cinquante nœuds sont à échéance de deux ans pour une équipe compétente et bien financée, la conjonction des deux n'est hélas pas simple à provoquer... Les 100 km/h, le but d'*Objectif 100* de Jean-Marie Finot, il y a une vingtaine d'années, est déjà plus problématique. Il s'agit de passer de 50 à 54,5, soit, *grosso modo*, une augmentation de performance de 10 %. Le changement de niveau est semblable à celui consistant à passer de 10 secondes au 100 m à 9 secondes. La difficulté croît beaucoup plus vite que l'échelle linéaire, mais je pense cependant qu'une fois passés les cinquante nœuds, ce qui impose de dominer la supercavitation et la « superventilation », y compris pour les gouvernes qui ne seront plus vraiment linéaires, un verrou aura sauté et je ne vois pas arriver de nouveaux problèmes insurmontables entre ces deux niveaux de vitesse.

10.3. Voiliers hauturiers de compétition

On ne choisit ni son vent ni son cap moyen au rapport au vent. Il faut donc réaliser un voilier à large spectre. Le problème est théoriquement voisin de celui rencontré pour les voiliers de régates, mais il est pratiquement très différent. Ainsi, sur un Moth, la stabilité latérale est assurée par les déplacements rapides de l'équipage et le réglage de la voile. Sur un voilier hauturier, tout ceci est impossible ; ainsi, si on peut choquer rapidement grâce à une décharge du circuit hydraulique, ce qui constitue une sécurité quasi vitale, il faut, par contre, plusieurs minutes pour border à nouveau et l'équipage est vite épuisé...

La solution actuelle « mixte » du genre foiler, c'est-à-dire avec des foils un peu atrophiés permettant de faire déjauger partiellement la coque sous le vent est bien au point et a fait ses preuves. Il est douteux qu'une formule « tout foils » puisse prendre rapidement le dessus. Des navigateurs concepteurs comme Yves Parlier expérimentent des formules à coques plus ou moins planantes. L'avenir dira si c'est une issue ou une impasse...

10.4. Voiliers hauturiers de record

On peut distinguer les records courts et les records longs, Sur les records « courts », y

compris l'Atlantique d'ouest en est, vu les temps actuels, on part avec une couverture météo assez bien connue pour l'ensemble du parcours. On peut donc utiliser un voilier à spectre de performances assez limité.

Pour des records longs, tels le tour du monde, le spectre de conditions de mer et de vent susceptibles d'être rencontrées est très large, les records se jouent plus sur les périodes de petit temps que sur les périodes de vent soutenu.

Alors que, pour les records courts, je pense que les voiliers à foils deviendront la règle, je suis beaucoup plus réservé pour les records longs : les voiliers hydrofoils, même foils relevés, sont patauds dans le petit temps. Ils souffrent du handicap de masse de leurs foils et de ce qui va autour : *grosso modo* 800 kg pour un soixante pieds, ce qui constitue un handicap important.

11. VARIABLES

- λ facteur d'échelle.
- V vitesse (du voilier ou du vent selon les cas).
- S surface (du foil le plus souvent ici).
- D déplacement
- CG centre de gravité
- CV centre de voilure (point d'application de la résultante aérodynamique).
- P_∞ pression à l'infini.
- P_v pression de vapeur saturante
- ρ densité de l'eau.
- Cx coefficient de traînée (aéro ou hydrodynamique)
- Cz coefficient de portance (aéro ou hydrodynamique)

12. RÉFÉRENCES

- [1] Alan Alexander & al - « Hydrofoil Sailing » - Juanita Kalergi, Londres 1972
- [2] James Grogono - « Icarus, The Boat that flies » - ISBN 02291180308 - Adlard Coles, Londres 1987