



Association Aéronautique
Astronautique de France

LA SOCIÉTÉ SAVANTE DE L'AÉRONAUTIQUE ET DE L'ESPACE



EXTRAITS THÉMATIQUES IdF N°1

Les bateaux qui volent

Des records de vitesse à la voile

15 Janvier 2021

Articles parus dans La Lettre 3AF n° 27 & 39

SOMMAIRE

1. **LES BATEAUX QUI VOLENT** 
2. **AÉRODYNAMIQUE ET HYDRODYNAMIQUE DES RECORDS DE VITESSE À LA VOILE** 

Par **Philippe Perrier**, ex-directeur technique du programme Rafale au sein de Dassault Aviation, concepteur de l'Hydroptère et membre de la commission technique "Aérodynamique" de la 3AF.

3. **PROCHAINE CONFÉRENCE du Groupe Ile-de-France**
GENÈSE ET DÉVELOPPEMENT DU RÉACTEUR CFM56 par **Pierre Alesi**, ingénieur en chef CFM56 .

- 
-  Tout public
 -  Averti
 -  Expert ou spécialiste

LES BATEAUX QUI VOLENT

Philippe Perrier, Commission technique Aérodynamique

Il y a plus d'un siècle que des ingénieurs ont eu l'idée d'appliquer les principes de l'aviation naissante aux bateaux en faisant supporter leur poids non plus par la poussée d'Archimède mais par des ailes marines. Un des plus fameux engins est celui de l'ingénieur italien Forlanini qui atteint 38 kt (soit environ 70 km/h ; 1 kt= 1,852 km/h) en « volant » sur le lac Majeur en 1905. Ces ailes marines sont désormais connues sous le nom anglais de *foil*.

Depuis ces débuts de nombreux bateaux à foils, aussi appelés hydroptères, ont sillonné les plans d'eau tout autour du globe. Hydroptères à moteur dans un premier temps pour des applications militaires ou de transport de passagers puis à voile pour battre les records de vitesse. On trouvera un historique assez complet des hydroptères sur Wikipédia.

L'intérêt des foils pour des bateaux à grande vitesse est assez facile à comprendre. La poussée d'Archimède permet d'équilibrer le poids d'un bateau sans aucune dépense d'énergie.



Le premier bateau à foils de Forlanini

Une très faible poussée horizontale suffit donc à déplacer un bateau « archimédien ». Mais lorsque l'on veut augmenter la vitesse, la résistance à l'avancement, appelée traînée pour les aéronefs, se manifeste principalement sous deux formes. La première est celle qui est due au frottement de l'eau à la surface de la carène, de façon tout à fait analogue à ce qui se passe pour un aéronef. Il est connu que cette force est proportionnelle au carré de la vitesse. La seconde est très spécifique aux bateaux et provient des vagues créées à la surface par leur déplacement et que l'on appelle le sillage. Ces vagues ont une longueur d'onde principale directement liée à la vitesse et lorsque cette longueur d'onde dépasse celle du bateau celui-ci doit en quelque sorte « monter » sur sa vague d'étrave, ce qui produit une très forte augmentation de la traînée. On considère ainsi que les bateaux archimédiens ont une vitesse limite proportionnelle à la racine carrée de leur longueur. Pour un bateau de 10 m cette vitesse limite est d'environ 8 kt et la traînée est alors de l'ordre de 10% du poids.

Si la puissance de propulsion, à moteur ou à voile, est suffisante le bateau peut dépasser cette vitesse limite et entre alors en régime « planant ». La carène se comporte alors comme une aile dont seul l'intrados serait portant. La traînée dépend alors essentiellement de la surface mouillée, qui est généralement fortement réduite par rapport au régime archimédien, et de l'incidence de la carène qui permet d'équilibrer le poids. Si la forme de la carène est bien dessinée (forme planante), la traînée n'augmente presque plus en fonction de la vitesse au début de cette phase. Hélas, l'équilibre du centre de poussée hydrodynamique par rapport au centre de gravité fait que lorsque la vitesse augmente, l'incidence de la carène doit diminuer ce qui empêche de réduire la surface mouillée. De ce fait la traînée finit par revenir sur une loi sensiblement proportionnelle au carré de la vitesse.

Avec des foils, il est évident que leur surface mouillée augmente la traînée dans la phase archimédienne. Mais quand leur portance augmente ils soulagent la poussée d'Archimède et réduisent la traînée de vague. Mais leur bénéfice apparaît surtout « en vol » lorsqu'ils supportent tout le poids du bateau. Leur surface étant en général très inférieure à celle de la carène, le bénéfice en traînée de frottement est très important. En contrepartie apparaît une composante de traînée induite par la portance hydrodynamique. Et, comme pour les ailes des avions, il faut avoir le plus d'allongement possible des foils pour minimiser cette composante. Si de plus le foil traverse la surface avec un dièdre classiquement de l'ordre de 45° (voir illustration de L'Hydroptère), l'augmentation de la portance en fonction de la vitesse est compensée par une élévation du bateau qui réduit la surface immergée du foil

sans avoir besoin de modifier l'incidence : plus le bateau va vite et plus il vole haut... donc avec une surface mouillée plus faible ! En contrepartie il y a quand même une légère augmentation de la traînée induite par la portance du fait de la réduction simultanée de l'allongement des foils. Mais, au bilan global, la traînée d'un hydroptère est pratiquement constante sur une large plage de vitesse au-delà du décollage, ce qui est très avantageux par rapport à une coque planante.

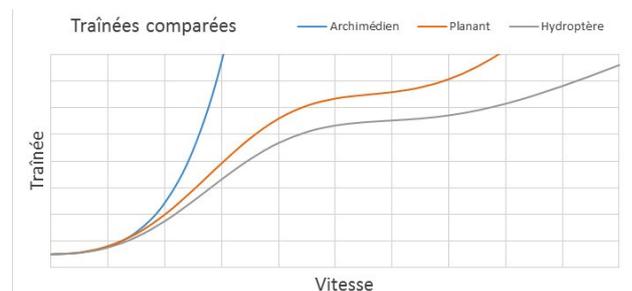


Diagramme comparé des traînées de bateaux archimédiens, planants ou à foils

La faible traînée à grande vitesse est donc l'avantage majeur des hydroptères. Mais la conception d'un tel bateau pose quand même des problèmes très spécifiques. Un des premiers est le mode de propulsion. On comprend facilement qu'une hélice située au bout d'un arbre dans l'axe du moteur ne peut pas permettre au bateau de voler bien haut. D'ailleurs les premiers hydroptères étaient propulsés par une hélice aérienne. Pour des raisons d'encombrement et de sécurité il est évidemment préférable d'avoir une hélice marine. Mais alors la question se pose de la position du moteur : il peut être en pod immergé dans l'axe de l'hélice mais au prix d'une accessibilité très réduite et d'un volume immergé source de traînée supplémentaire ; s'il reste dans la carène c'est au prix d'une transmission plus complexe et moins fiable. L'hydrojet est une autre solution qui nécessite une prise d'eau au niveau des foils pour remonter l'eau au niveau de l'hélice carénée placée dans la carène en face du moteur. Ce problème ne se pose évidemment pas pour les hydroptères à voile dont la propulsion est, par nature, aérienne !

Un autre problème spécifique des hydroptères est celui de la stabilité en vol, aussi bien en roulis qu'en tangage. En roulis, la hauteur du centre de gravité par rapport au plan des surfaces portantes actives, d'autant plus forte que le bateau vole haut, fait que la stabilité naturelle que l'on obtient sur un avion ne peut pas être obtenue avec des foils totalement immergés. Il faut alors soit ajouter des gouvernes sur les foils et créer de la stabilité artificielle par un asservissement, soit avoir des foils traversant la surface de façon à ce que leur portance varie avec leur enfoncement. On peut aussi noter une solution astucieuse qui permet d'asservir la profondeur d'un foil. Elle

consiste à lier le calage d'une partie du foil (volet de bord de fuite par exemple) à un palpeur qui suit la surface libre par une simple tringlerie mécanique. Le calage augmente si le foil s'enfonce et réciproquement. Cette solution a été beaucoup utilisée pour résoudre les problèmes de stabilité. Elle a cependant les inconvénients d'ajouter une mécanique fragile et exposée à des débris de surface et de ne pas permettre la réduction de la surface mouillée lorsque la vitesse augmente, donc de limiter le potentiel de performance. En général la stabilisation en roulis conduit à faire des foils dont l'envergure dépasse la largeur de la carène. Pour des voiliers, un bateau comme l'Hydroptère obtient une stabilité naturelle en roulis avec des foils en V qui traversent la surface libre avec un dièdre de l'ordre de 40° et une largeur beaucoup plus importante qu'un catamaran de mêmes longueur et déplacement.



L'Hydroptère à plus de 90km/h © Gilles Martin-Baget

Concernant le tangage, les critères de stabilité en vol sont proches de ceux d'un avion. On retrouve en particulier la notion de foyer qui correspond à la position la plus arrière du centre de gravité qui assure la stabilité. Cette notion n'existe pas sur les bateaux archimédiens et peut déstabiliser des marins qui craignent de plonger de l'avant en avançant trop le centre de gravité ou qui pensent qu'en le reculant on peut faire cabrer le bateau pour le faire voler plus haut. La variation de la portance des foils avec leur enfoncement participe également à cette stabilité.

Enfin les foils sont soumis à deux phénomènes particuliers inconnus des aérodynamiciens : la ventilation et la cavitation.

La ventilation provient de la proximité de la surface libre avec les zones de faibles pressions à l'extrados des foils. En effet, en raison de la forte masse volumique de l'eau, la pression dans ces zones est souvent très inférieure à la pression atmosphérique, même en tenant compte de la composante hydrostatique apportée par la profondeur. On comprend alors que s'il existe une communication entre ces zones et la surface, elles peuvent être envahies par de l'air à la pression atmosphérique qui prend la place

de l'eau à l'extrados à une pression qui peut être beaucoup plus faible. Il en résulte alors une forte chute instantanée de portance. Les foils traversant la surface sont évidemment plus sujets à la ventilation. Ce phénomène a été très peu étudié pour de tels foils et reste difficile à modéliser par CFD car il est généralement associé à deux états stables dans les mêmes conditions : avec et sans ventilation. Il dépend peu de la vitesse elle-même mais plutôt de la cartographie des zones à faible coefficient de pression ($P/\frac{1}{2}\rho V^2$ où P est la pression statique locale, ρ la masse volumique de l'eau et V la vitesse du bateau) par rapport à la surface.

La cavitation se manifeste de façon très semblable à la ventilation mais par une physique totalement différente. Le seul point commun est la dépression créée à l'extrados des foils. À grande vitesse cette dépression peut passer en dessous de la pression de vapeur saturante de l'eau. Celle-ci se vaporise alors et il se crée une bulle de vapeur d'eau à l'extrados du foil. Si l'on augmente la vitesse ou l'incidence du foil cette bulle s'étend progressivement à tout l'extrados et peut même se prolonger assez loin en arrière en créant un effet de culot. Mais dans ces conditions l'extrados ne contribue plus à l'augmentation de portance et l'effet de culot augmente fortement la traînée. La recondensation de la bulle a lieu de façon implosive au point de pouvoir sérieusement détériorer la surface concernée. Ce phénomène est bien connu des fabricants d'hélices. Pour des foils, avec un coefficient de pression de 0,5 à l'extrados, on atteint le seuil de début de cavitation vers 40 kt. Pour atteindre des vitesses bien plus importantes il faut alors utiliser des profils « supercavitant » conçus pour fonctionner avec un extrados totalement à la pression de vapeur saturante. De tels profils ont leur zone de fonctionnement optimal pour des coefficients de portance et avec des finesses bien inférieurs à ceux des profils classiques. Bien que la physique soit totalement différente, il y a une certaine analogie de conséquences entre les écoulements supersoniques et la cavitation.

Tous les bateaux rapides font également face au problème de l'état de la mer : traverser un champ de bosse à grande vitesse est forcément éprouvant. Le comportement des bateaux est une combinaison de modes typiques. Dans un premier mode le bateau suit le profil de la mer : c'est le cas lorsque le bateau est sur une houle longue de grande période de rencontre, typiquement plusieurs secondes. Lorsque la période de rencontre diminue les accélérations verticales qui permettraient de suivre la mer augmentent rapidement au point que le bateau peut finir par décoller sur la crête des vagues, ce qui est une des figures favorites des planches à voile et des kite-surfs. Mais si le bateau est assez lourd il peut arriver dans un mode où il « traverse » les vagues avec peu de mouvement vertical. Le partage entre les deux modes dépend essentiellement de la

raideur à l'enfoncement rapportée à la masse du bateau en fonction de la période de rencontre. Les coques planantes ont un très faible tirant d'eau donc une très forte raideur à l'enfoncement rapportée à la masse : un faible écart d'enfoncement induit une forte accélération de rappel. Avec un tirant d'eau de 20 cm, un bateau qui « traverserait » des vagues de 20 cm de creux subirait des accélérations verticales de +/-0,5 g. Sauf dans le cadre d'une compétition, le confort des passagers oblige à réduire la vitesse bien avant ce seuil. Pour un foil traversant la surface la variation de poussée verticale induite par les variations d'enfoncement se répartie sur l'envergure immergée et la raideur à l'enfoncement est beaucoup plus faible. De ce fait un hydroptère peut traverser des creux beaucoup plus importants qu'une coque planante... à condition que la hauteur de vol de la carène soit suffisante. C'est ainsi que, dans la deuxième moitié du XXème siècle, un certain nombre d'hydroptères de transport de passagers ont été en service sur des plans d'eau plus ou moins abrités. On peut citer entre autres une liaison Ouessant-Continent, des liaisons entre les îles grecques ou Hawaï, autour de la mer Baltique ou sur de grands lacs intérieurs. Boeing en particulier a commercialisé le Boeing 929 propulsé par hydrojets qui pouvait transporter jusqu'à 400 passagers. Cependant ce mode de transport n'a jamais supplanté les navires plus conventionnels, malgré sa vitesse, sans doute en raison des conditions de mer qui limitaient trop souvent son emploi.



Boeing 929

Depuis quelques décennies l'usage des foils est revenu d'actualité par le biais des voiliers de course. En effet les progrès des matériaux, composites en particulier, ont permis un allègement considérable des structure et une meilleure performance des voiles qui ont rendu possible le décollage d'hydroptères à voile. Les premiers hydroptères à voile ont été conçus pour les records de vitesse sur

plan d'eau parfaitement calme. Ainsi dès 1956, l'hydroptère américain Monitor a été chronométré à plus de 30 kt. Mais le premier hydroptère à voile conçu pour des traversées océaniques est l'Hydroptère d'Alain Thébault, mis à l'eau en 1994, qui a traversé la Manche entre Douvres et Calais à 33,3 kt (61km/h) de moyenne et a battu le record absolu de vitesse à la voile sur 500 m en 2009 à plus de 51 kt (95km/h) en rade d'Hyères avec 30 kt de vent et près de 1 m de clapot. Bien qu'il n'ait pas pu battre le record de l'Atlantique pour lequel il avait été conçu avec le soutien d'Eric Tabarly, les performances et les images de l'Hydroptère ont marqué le milieu de la voile et les foils sont maintenant incontournables sur tous les voiliers de compétition. Parmi les plus spectaculaires, tout le monde a vu des images des deux dernières éditions de la Coupe de l'America avec des catamarans qui volent à 40 kt par 20 kt de vent réel. Leur configuration est cependant très différente de celle de l'Hydroptère pour des raisons de jauge qui limite strictement la largeur. De ce fait les architectes ont été contraints de dessiner des foils qui traversent la surface verticalement. Le bateau n'a donc aucune raideur naturelle d'enfoncement en vol et le contrôle de la hauteur de vol est assuré par le pilotage des foils en incidence avec l'assistance d'équipiers qui « moulinent » les winches en permanence pour remplir l'accumulateur hydraulique de puissance.



Entraînement pour la Coupe de l'America

Le record du monde de vitesse à la voile avait été repris à l'Hydroptère dès 2010 par Alex Caizergues en kite-surf. Mais il a depuis été pulvérisé par l'australien Paul Larsen à 65,45 kt (121 km/h) avec Vestas Sailrocket, un engin dissymétrique original dont le foil fonctionne à l'envers en tirant le bateau vers le bas pour permettre de tirer plus de puissance de la voile. Il est intéressant de noter que Paul Larsen a établi son record avec seulement 25 kt de vent réel ce qui illustre la finesse remarquable de son engin.

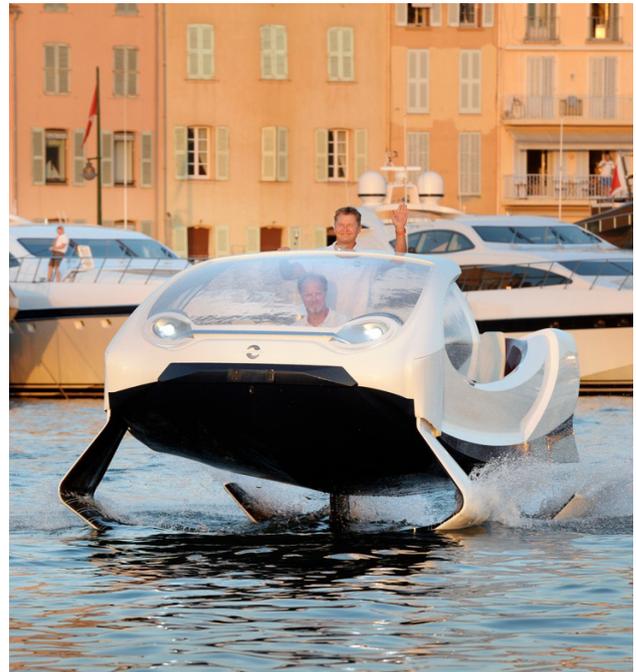


Vestas Sailrocket dans les conditions du record de vitesse à 121 km/h

Du côté des hydroptères à moteur, plusieurs équipes ont actuellement en projet des appareils de la taille d'une automobile destinés à transporter quelques personnes sur des plans d'eau calmes. La Ville de Paris s'intéresse en particulier au projet de Seabubble, à propulsion électrique pour servir de bateau-taxi sur la Seine.

Dans ce cas l'avantage des foils est de produire moins de traînée et moins de sillage qu'un bateau conventionnel de même capacité. Cependant sur la Seine dans Paris la vitesse des bateaux est limitée à 18 km/h, ce qui ne permet pas de tirer le meilleur parti des foils. Mais il existe aussi de très nombreuses villes au monde situées autour d'un plan d'eau abrité sur lequel la limitation de vitesse est beaucoup moins stricte et où les foils pourraient être adaptés au mieux de leurs performances.

Ce sont bien les progrès technologiques tirés par l'industrie aéronautique, en particulier dans le domaine des matériaux, qui ont permis aux bateaux de voler et on peut dire que tous les projets innovants dans ce domaine ont été soutenus par cette industrie.



SeaBubble à Saint-Tropez. © Francis Demange

Si, du point de vue de la Mécanique des Fluides, l'eau et l'air à basse vitesse ont des comportements tout à fait semblables, c'est surtout le fait de naviguer à l'interface entre ces deux éléments qui fait la spécificité des bateaux volants. Et les vagues qui agitent cette interface sont le principal défi à relever. Il est difficile d'imaginer un renouveau des hydroptères pour le transport de passagers sur des mers ouvertes. Mais les foils sont désormais incontournables pour les voiliers de compétition et il est assez probable que les hydroptères deviennent des moyens de transport communs sur des plans d'eau abrités. Et l'industrie aéronautique restera évidemment un acteur majeur de ces innovations. ■

AÉRODYNAMIQUE ET HYDRODYNAMIQUE DES RECORDS DE VITESSE À LA VOILE

par Philippe Perrier, membre de la Commission technique Aérodynamique

Une feuille morte tombée sur l'eau est entraînée par le moindre souffle de vent. Il y a presque 10 millénaires que les hommes ont exploité ce phénomène pour imaginer les bateaux à voile. Mais, contrairement à la feuille morte qui ne va que dans le sens du vent, les premiers marins se sont rapidement aperçu qu'avec une voile orientable et une coque allongée, ils pouvaient choisir, dans une certaine mesure, leur direction par rapport au vent. La recherche de la vitesse maximale s'en est rapidement suivie, poussée en particulier par le besoin militaire et la navigation commerciale pour laquelle les délais de transport étaient l'objet d'une compétition féroce. Avec la naissance de la voile sportive, des voiliers se sont spécialisés dans la recherche de vitesse et, en 1972, le WSSRC (*World Sailing Speed Record Council*) a été créé et a défini des règles pour disputer et homologuer un certain nombre de records de vitesse. Le record le plus rapide correspond à une vitesse moyenne sur 500 m. Le premier a été homologué en 1972 par Crossbow à la vitesse moyenne de 26,3kt¹. Les marins utilisent généralement le nœud (kt) comme unité de vitesse : 1 kt = 1,852 km/h. Entre 1986 et 2010 le record a été essentiellement détenu par des planches à voile ou des kitesurf qui lui ont fait franchir le seuil des 50 kt. L'Hydroptère a porté le record à 51kt en 2009 jusqu'à ce qu'il soit pulvérisé par Vestas Sailrocket homologué à 65,45 kt (121 km/h) en 2012 soit un facteur d'environ 2,5 en 40 ans !

Un voilier est essentiellement soumis à 3 forces : son poids et les efforts aérodynamiques et hydrodynamiques (voir Figure 1). Par principe, les efforts aéro et hydrodynamiques ont des points d'application éloignés verticalement. Pour que le bateau soit en équilibre, il est donc nécessaire que les 3 forces convergent et s'équilibrent en un même point, que l'on appellera centre d'efforts.

La plupart des voiliers monocoques sont équilibrés par une quille lestée permettant de créer un couple de redressement entre le poids et la poussée d'Archimède lorsque le bateau gîte (voir Figure 1 à gauche). Mais, dans cette configuration, le rapport entre la force vélique et le poids reste faible, ce qui limite forcément la performance. Les voiliers de vitesse ont donc recherché des architectures qui permettent d'augmenter ce rapport, en commençant par se débarrasser du lest.

Un fort excentrement du centre de gravité par rapport aux efforts hydrodynamiques permet de supprimer le lest et de développer une force vélique bien plus importante par rapport au poids (voir Crossbow sur la figure 1). Pour des planches à voile et des kitesurfs l'essentiel du poids est celui du marin et il se positionne de façon à ce que les efforts aéro et hydrodynamiques convergent pratiquement en son centre de gravité.

L'Hydroptère s'affranchit totalement de la poussée d'Archimède avec un foil sous le vent incliné qui permet de reprendre une poussée vélique du même ordre de grandeur que le poids (voir Figure 2). Vestas Sailrocket a une configuration très particulière : la portance du foil est orientée vers le bas et pratiquement opposée à la force vélique. Cette configuration autorise une force vélique bien plus grande que le poids mais ne peut être stable en enfoncement qu'avec des surfaces portantes en contact avec la surface de l'eau. Ceci le rend très sensible au clapot. Les vibrations étaient telles pendant le record que Paul Larsen, le barreur, n'arrivait pratiquement plus à lire ses instruments de pilotage.

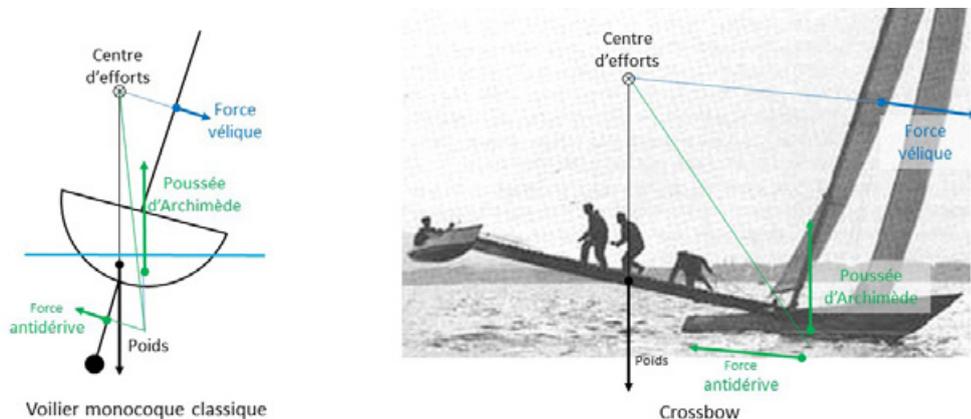


Figure 1. Equilibre en roulis d'un voilier

¹ Le nœud (nd ou kt) est une mesure de vitesse : 1 kt = 1 mille marin/h soit 0,154 m/s

SCIENCES ET TECHNIQUES AÉROSPATIALES

AÉRODYNAMIQUE ET HYDRODYNAMIQUE DES RECORDS DE VITESSE À LA VOILE

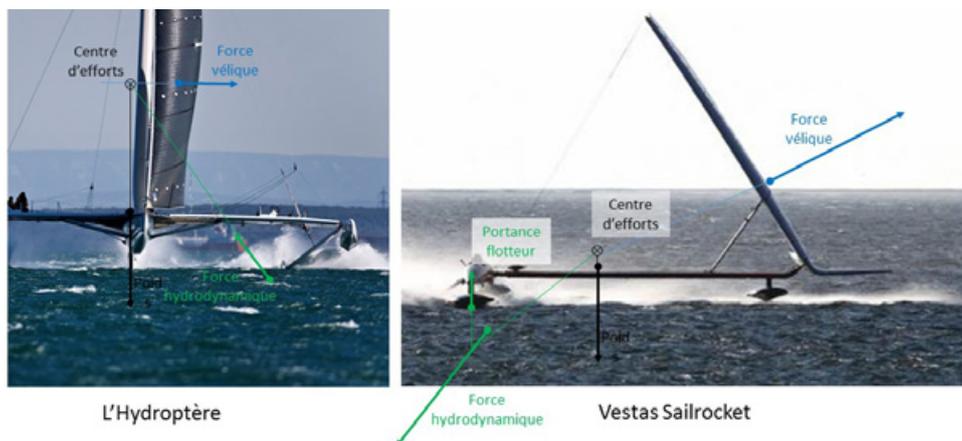


Figure 2. Hydroptère et Vestas Sailrocket

On peut remarquer que l'inclinaison par rapport à la verticale de la résultante des forces hydrodynamiques (flottaison et antidérive) définit directement le rapport entre la poussée aérodynamique et le poids. Les planches à voile, kitesurfs et Vestas Sailrocket profitent également d'une voile inclinée au vent dont la composante verticale de poussée soulage d'autant le poids du bateau avec une faible pénalité sur la composante propulsive horizontale.

Il est aussi intéressant de noter que les records ont été battus dans des conditions de vent très différentes résumées dans le tableau ci-après :

Records de vitesse	Planches et kitesurfs	Hydroptère	Vestas Sailrocket
Vitesse maximale (kt)	55	51	65
Vent réel (kt)	45	30	25
Finesse bateau = Vitesse/Vent réel	1,2	1,7	2,6

Les planches à voile et kitesurfs vont légèrement plus vite que le vent. L'Hydroptère pouvait aller à presque 2 fois la vitesse du vent malgré une voile conçue pour les traversées océaniques et non pour un record de vitesse absolue. Vestas Sailrocket n'avait que 25 kt de vent pour son record à 65 kt ; ce qui lui a permis de profiter d'un état de la mer (clapot) encore compatible avec la vitesse de l'engin.

On constate donc que la force de vent nécessaire pour le record est un paramètre critique principalement par l'état de mer associé. Les petits engins comme les planches à voile et les kitesurf ont pu détenir les records de vitesse pendant plus de 20 ans en navigant sur des canaux étroits bien orientés par rapport à un vent dominant régulier pouvant atteindre 40 ou 50 kt sans lever de clapot. Le premier canal a été creusé spécialement aux Saintes-Maries-de-la-Mer, mais c'est maintenant sur la côte namibienne (Luderitz) que se déroulent la plupart des

tentatives de record. Au-delà de 50 kt, le problème n'est plus l'engin mais la capacité du marin à tenir debout sur la plage ! L'Hydroptère, par la grande profondeur de ses foils pouvait supporter un clapot beaucoup plus important et Vestas Sailrocket était à la limite du clapot supportable malgré un vent très modéré. Une voie d'amélioration du record consiste donc à améliorer la vitesse du bateau sans augmenter, et si possible en réduisant, la force de vent nécessaire.

La figure 3 illustre les composantes horizontales des efforts qui équilibrent le déplacement d'un voilier.

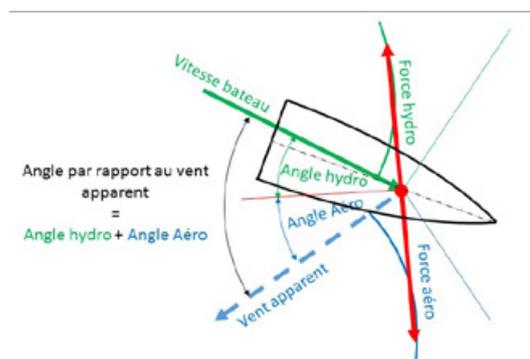


Figure 3. Efforts équilibrant le déplacement d'un voilier

Les deux flèches rouges opposées représentent respectivement les efforts aérodynamiques et hydrodynamiques qui sont égaux et de sens opposés lorsque le bateau est en navigation à vitesse et cap constants. La courbe bleue représente la polaire aérodynamique et l'« angle aéro » représente l'angle entre la perpendiculaire à l'effort aéro et le vent apparent. En analogie aéronautique, cet angle serait la pente de descente d'un planeur qui aurait la même polaire aérodynamique. La courbe verte est l'équivalent pour la partie hydrodynamique. On voit sur la figure 3 que l'angle que fait la direction de déplacement du bateau avec la direction du vent apparent est la somme exacte des angles aéro et hydro. Mais il est important de noter

que le vent que reçoivent les voiles est le vent « apparent » c'est-à-dire la combinaison des vitesses du vent réel (par rapport à l'eau immobile) et du bateau. Cette combinaison est illustrée sur le schéma de la figure 4.

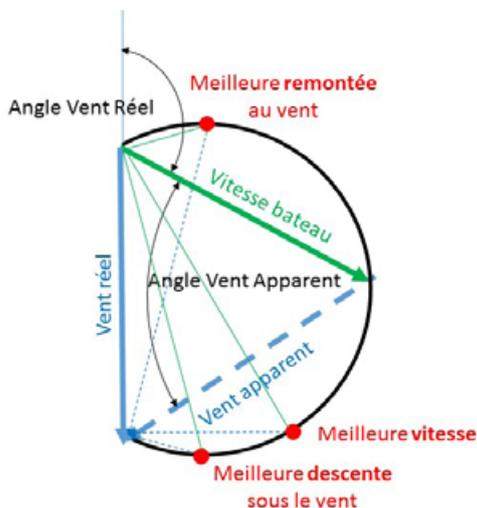


Figure 4. Combinaison des vitesses du vent réel (par rapport à l'eau immobile) et du bateau.

On peut voir que le vent apparent peut être très différent du vent réel et que l'angle par rapport au vent réel est toujours supérieur à l'angle de vent apparent. Sur ce schéma, l'angle de vent apparent est nettement inférieur à 90° alors que l'angle de vent réel est nettement supérieur. On peut aussi voir que, dans cette configuration, la vitesse du bateau est presque égale à celle du vent réel. L'arc noir passant par les extrémités des vecteurs vent réel et vitesse bateau est l'arc capable correspondant à toutes les combinaisons de vitesses pour lesquelles l'angle de vent apparent reste constant. Ce type de schéma représentant l'ensemble des vecteurs-vitesse du bateau par rapport au vent réel est appelé « polaire du voilier ». Le schéma présente quelques points remarquables (points rouges) très importants pour la navigation à voile avec les vecteurs-vitesse et vent apparent représentés en traits fins :

- Le point de meilleure remontée au vent (dit « près serré ») est celui pour lequel la composante de la vitesse du bateau sur le vent réel est la plus négative. Il est facile de comprendre que si l'angle de vent apparent est supérieur à 90°, le bateau ne peut pas remonter au vent. Ainsi, même avec une voile de très bonne finesse (angle aéro très faible), si la coque n'a aucune composante de portance (angle hydro = 90°), le bateau ne peut jamais remonter au vent. C'était pratiquement le cas pour les premiers voiliers jusqu'à ce que les marins inventent la « dérive », véritable aile sous-marine profonde qui améliore considérablement la finesse hydrodynamique. On peut aussi noter, pour ce point de fonctionnement, que la vitesse du bateau est très faible par rapport à celle du vent apparent et du vent réel.

- Le point de meilleure vitesse (dit « au largue ») est obtenu lorsque la vitesse est un diamètre de l'arc capable. Dans ce cas les trois vecteurs forment un triangle rectangle dont la vitesse du bateau est l'hypoténuse. Cependant, sur un voilier classique, la résistance à l'avancement augmente très fortement avec la vitesse et, avec elle, l'angle hydro. Associé à la diminution du vent apparent, donc de la puissance propulsive, ceci fait qu'aucun voilier « archimédien » classique ne peut atteindre cette situation. Mais c'est exactement le point qui nous intéresse pour les records de vitesse. Nous y reviendrons donc en détail.
- Le point de meilleure descente au vent (dit « grand largue ») est exactement l'opposé du point de meilleure remontée et permet, théoriquement, de descendre sous le vent plus vite que le vent lui-même. Pour les mêmes raisons qu'au « largue », les bateaux classiques ne peuvent pas atteindre cette performance. Mais tous les multicoques et même certains monocoques modernes ont des finesesses hydros suffisantes, même à grande vitesse, et « tirent des bords » au « portant », ce qui leur permet de descendre plus vite que s'ils étaient plein vent arrière et même plus vite que le vent !

Si l'on se concentre sur le point de vitesse maximale, on peut voir sur le schéma de la figure 4 que le rapport entre la vitesse du bateau et celle du vent réel, rapport que l'on peut appeler « finesse bateau », ne dépend que de l'angle de vent apparent :

$$\frac{\text{Vent Réel}}{\text{Vitesse bateau}} = \sin(\text{Angle Vent Apparent}) = \sin(\text{Angle Aéro} + \text{Angle Hydro})$$

Lorsque l'angle de vent apparent devient assez faible la « finesse bateau » peut aussi s'écrire sous la forme :

$$\frac{1}{\text{Finesse bateau}} = \frac{1}{\text{Finesse Aéro}} + \frac{1}{\text{Finesse Hydro}}$$

Par exemple, un bateau qui aurait des finesesses aéro et hydro de 4 peut aller à 2 fois la vitesse du vent réel. Il est donc évident que c'est l'augmentation des finesesses aéro et hydro qui permet d'augmenter la vitesse du bateau pour une même force de vent. Un gros avantage de cette approche est que si l'on peut aller vite avec moins de vent, il est beaucoup plus facile de trouver des lieux et des périodes présentant les meilleures conditions pour le record. On peut aussi noter que, dans ces conditions, le bateau crée son propre vent :

$$\text{Vent apparent} = \frac{\text{Vent Réel}}{\tan(\text{Angle Vent Apparent})}$$

Pour une finesse bateau de 2, le vent apparent est 1.7 fois supérieur au vent réel.

De ce point de vue, il est intéressant de comparer les finesesses des différents engins de record sur les graphiques de la figure 5. À noter cependant que seules les vitesses

SCIENCES ET TECHNIQUES AÉROSPATIALES

AÉRODYNAMIQUE ET HYDRODYNAMIQUE DES RECORDS DE VITESSE À LA VOILE

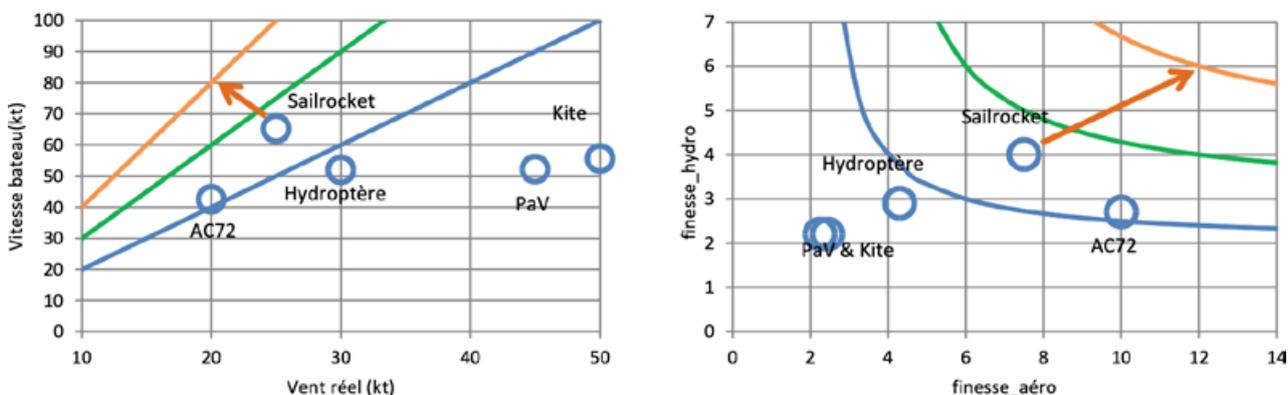


Figure 5. Comparaison des finesses des différents engins de record

des bateaux sont « officielles ». Les vitesses de vent réel et les finesses aéro et hydro sont des estimations de l'auteur à partir des conditions du record et de l'architecture des bateaux.

Les courbes bleu, verte et orange sur les deux graphiques de la figure 5 représentent des iso-finesse bateau avec des valeurs respectives de 2, 3 et 4. Les planches à voile et les kitesurf ont des finesses aéro et hydro assez faibles mais ont détenu le record en étant capables de faire des tentatives par vent très fort sur des canaux sans aucun clapot. L'Hydroptère a pu battre ce record, pour lequel il n'avait pas été conçu, grâce à ses foils ayant une bonne finesse et une voile meilleure que celle d'une planche mais cependant peu optimisée pour ce type de record. La grande taille des foils de l'Hydroptère lui a permis d'atteindre 51 kt sur un plan d'eau peu abrité avec 30 kt de vent et presque 1 mètre de clapot. Vestas Sailrocket a considérablement amélioré les finesses aussi bien aéro que hydro pour atteindre 2,5 fois la vitesse du vent. On a aussi porté sur ces graphiques un AC72, jauge des multicoques à foils qui ont disputé la Coupe de l'America en 2013 et 2017. Grâce à un gréement et des foils très sophistiqués, ces catamarans sont capables de « voler » à 2 fois la vitesse du vent.

La flèche orange indique une voie de conception d'un nouvel engin qui pourrait porter le record jusqu'à 80 kt avec un vent de seulement 20 kt. Dans ces conditions, les voiles reçoivent un vent apparent de 77 kt. Cette voie consiste à améliorer les finesses aéro et hydro pour atteindre une finesse du bateau de 4.

L'amélioration de la finesse aéro par rapport à celles de Sailrocket ou d'un AC72 semble tout à fait accessible avec une aile rigide de grand allongement et un profil optimisé pour les conditions du bord choisi. La plupart des avions commerciaux ont des finesses de l'ordre de 20 et certains planeurs ont des finesses de 60 !

Cependant certains éléments de l'engin (haubans) peuvent avoir un fardage qui n'existe pas sur ces aéronefs. Une finesse de 12 est donc certainement accessible. Dans ces conditions il suffit d'obtenir une finesse hydro au moins égale à 6 ($1/4 = 1/12 + 1/6$) pour pouvoir naviguer à 4 fois la vitesse du vent. L'angle du vent apparent est alors seulement de 15°.

En fait l'hydrodynamique pour des vitesses supérieures à 50 kt est soumise aux phénomènes de cavitation (l'eau se vaporise sur toutes les parties en dépression) et de ventilation (l'air envahit les parties en dépression). Dans ces conditions, les caractéristiques d'un profil d'aile sont très fortement affectées : la courbe de portance chute dans un rapport jusqu'à 2 (il n'y a plus que l'intrados qui permet d'augmenter la portance) et la trainée augmente du fait du culot de vapeur d'eau qui se crée. On doit alors utiliser des profils de type « supercavitant » comme illustré Figure 6.

Même en bidimensionnel, les finesses maximales de tels profils sont généralement inférieures à 10 et sont obtenues pour de faibles coefficients de portance. Compte tenu du fait qu'il faut aussi assurer une composante verticale de portance hydrodynamique, une finesse globale de 6 est sans doute accessible mais reste ambitieuse.

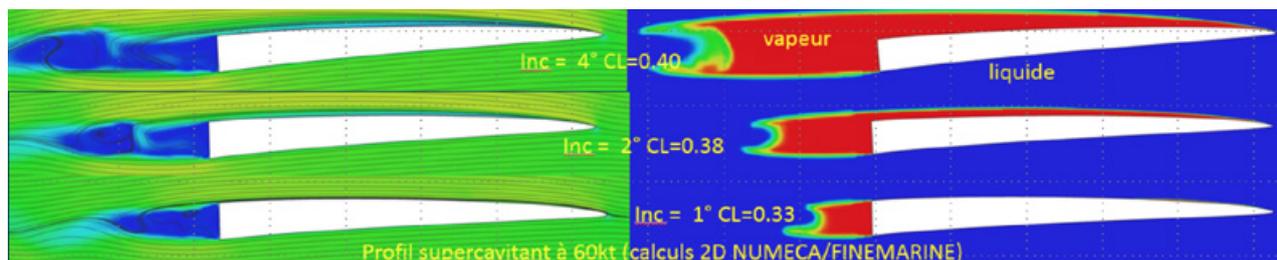


Figure 6. Profils supercavitants

Pour réduire la sensibilité au clapot et préserver la finesse hydro, il est souhaitable d'éliminer toute surface hydrodynamique autre que le foil lui-même dans les conditions du record. Ceci exclue une configuration du type de Sailrocket qui implique au moins une surface planante pour assurer la stabilité d'enfoncement. Le foil doit donc être porteur. Ceci conduit à une architecture du type de la figure 7.

Connaissant les polaires du foil et de l'aile, il est facile de calculer leurs dimensions en fonction des vitesses du bateau (80 kt) et du vent apparent (77 kt). Le choix de leurs inclinaisons respectives définit la position du centre de gravité et le dimensionnement général de l'engin. Il reste cependant au moins deux problèmes capitaux à traiter : l'engin doit pouvoir accélérer par lui-même depuis l'arrêt et il doit être pilotable par un humain.

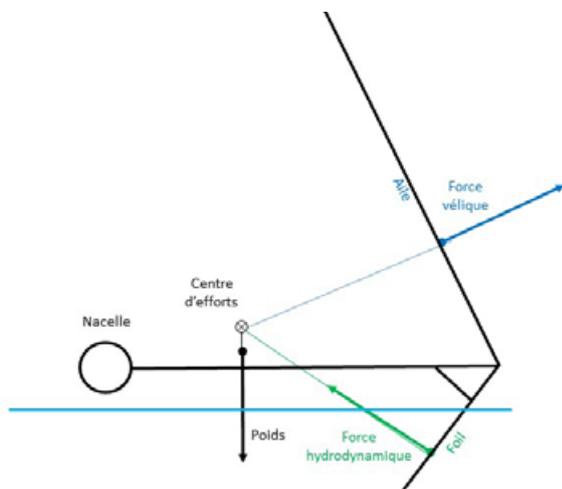


Figure 7. Architecture avec foil porteur

La flottabilité de l'engin à l'arrêt ne peut être assurée que par la poussée d'Archimède, ce qui suppose les volumes de flottaison correspondants. Or, lors de l'accélération, ces volumes créent une traînée importante avant que les efforts conjugués du foil et de l'aile ne leur permettent d'être totalement émergés. Heureusement, au début de l'accélération, l'angle de vent apparent peut être important et l'aile peut être orientée pour fonctionner à une incidence proche de sa portance maximale. Même si la vitesse du vent apparent n'est pas aussi forte qu'à la vitesse du record, il est ainsi possible de passer la bosse de traînée correspondant aux volumes de flottaison.

La stabilité et la pilotabilité de l'engin sont aussi des aspects critiques comme le montre la fin de la première tentative de record de Sailrocket (voir Figure 8).



Figure 8. Fin de la première tentative de record de Sailrocket

En roulis on considère que l'équilibre doit pouvoir être assuré par le barreur, comme c'est le cas sur de nombreux voiliers de compétition. Pour cela il doit avoir à sa disposition une gouverne qui peut être, par exemple, un aileron de bord de fuite placé en extrémité de l'aile. Cette gouverne doit lui permettre de maintenir la nacelle émergée pendant le run du record. L'axe de tangage doit avoir une stabilité naturelle, ce qui implique d'en déterminer le foyer (de même que pour le lacet) et de placer le centre de gravité en avant de celui-ci, comme pour un avion ! Cependant l'accélération au départ crée un fort moment à piquer qui impose une limite avant au centre de gravité. Ceci dimensionne donc un plan horizontal stabilisateur. Le contrôle en lacet nécessite une surface de contrôle verticale comme une dérive. Celle-ci pourrait être aérodynamique ou hydrodynamique. Comme on a vu que la finesse hydro est la plus difficile à obtenir, on préférera une dérive aérienne qui a, de plus, l'avantage d'être efficace même lorsque l'engin est à l'arrêt, avec le seul vent réel.

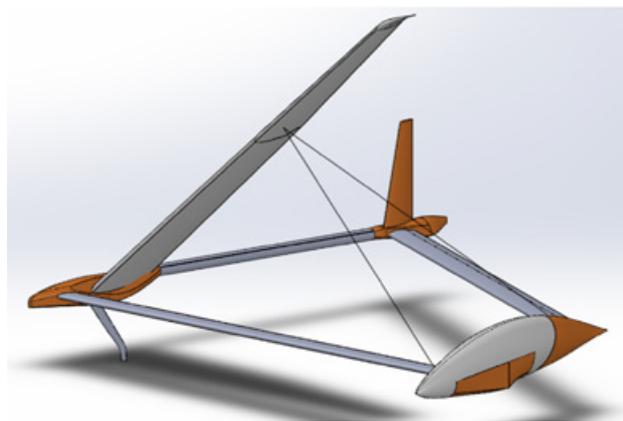


Figure 9. Projet pour un nouvel engin de record

La figure 9 illustre ce que pourrait être un tel engin avec une aile solide à grand allongement, une nacelle fermée et carénée pour l'équipage et des bras de liaison et haubans créant une structure triangulée, rigide et bien carénée. Cet engin aurait des dimensions comparables à celles de Sailrocket mais un poids plus faible puisque les efforts sont moins importants. La portance hydrodynamique assurée par le seul foil lui assure une bonne tolérance au clapot qui sera d'autant moins marqué que le vent nécessaire sera faible. ■

3AF

www.3af.fr

Les Conférences du Groupe Ile-de-France

LES MARDIS DE L'AÉRONAUTIQUE ET DU SPATIAL
RECHERCHE, CONCEPTION, FABRICATION, PROJETS, ÉTUDES, ESSAIS...

Association Aéronautique et Astronautique de France

GENÈSE ET DÉVELOPPEMENT DU RÉACTEUR CFM56

Par **Pierre Alesi**, ingénieur en chef CFM56.

Une conférence en visiophonie organisée par le Groupe
Ile-de-France de la 3AF en partenariat avec la Mairie du 15ème

MARDI 26 JANVIER 2021 de 18h30 à 20h

L'histoire commence en janvier 1968 lorsque la SNECMA met en évidence un créneau disponible pour un **moteur moderne de 10 tonnes de poussée**, plus silencieux, consommant moins, pour remplacer les vieux moteurs JT8D et JT3D et capables d'équiper les futurs avions court et moyen-courriers. **Plus de 30 000 moteurs seront livrés !** Un énorme succès technique, industriel, commercial et financier.

INSCRIPTION OBLIGATOIRE sur le site 3AF

<https://www.3af.fr/agenda/genese-et-developpement-du-reacteur-cfm56-2081>

Suite à la **crise sanitaire de la Covid-19**, les conférences du groupe 3AF Ile-de-France sont provisoirement et exclusivement proposées en visiophonie via **le service de téléconférence ZOOM**. Cette disposition nécessite le respect d'un protocole d'accès et d'utilisation qui sera transmis aux membres inscrits.



De gauche à droite : Jean Deviese directeur technique de SNECMA, Pierre Alesi ingénieur en chef CFM56, le président René Ravaut et le président de la division moteur de General Electric.



© par Michael Krahe.

Accès gratuit sur inscription, membres et non membres 3AF

Voir le site 3AF à l'adresse : <https://www.3af.fr/evenements-1001>

PROCHAINES CONFÉRENCES 3AF ILE-DE-FRANCE

Altair : lancement aéroporté de petits satellites, par Nicolas Bérend et Jean Hermetz, ONERA, mardi **9 février**, 18h30/20h.

Démonstrateurs miniatures pour la réutilisation des lanceurs, par Stéphane Querry, Polyvionics, mardi **16 mars**, 18h30/20h.



Association Aéronautique
Astronautique de France

6, rue Galilée - Paris
Tél. : 01 56 64 12 30
Email : 3af.idf@gmail.fr

www.3af.fr/groupe-regional/idf

