

Toujours plus vite, tiré par le vent !

Marc Rabaud (marc.rabaud@universite-paris-saclay.fr)

Laboratoire FAST, Bâtiment 530, rue André Rivière, Université Paris-Saclay, 91405 Orsay Cedex

Les Jeux Olympiques (JO) de Paris 2024 sont maintenant terminés. Pour la voile, toutes les épreuves avaient lieu face à la ville de Marseille, entre la Corniche, les îles du Frioul et le village des Goudes.

Pour la première fois, la moitié des épreuves de voile se couraient sur des engins qui volent au-dessus de l'eau, grâce à des surfaces portantes appelées *foils* (abréviation d'*hydrofoils*).

Plongeons dans la physique de ces voiliers très particuliers.

Les mots suivis d'un astérisque (*) sont expliqués dans le glossaire, p. 33.

La voile de compétition est en pleine révolution et de nouveaux engins à voile filent à la surface de l'eau à des vitesses inégalées. Grâce à l'utilisation massive de nouveaux matériaux, notamment les fibres de carbone, il est maintenant possible de réaliser des appendices* (dérives*, safrans* et foils*) performants car à la fois légers, minces et résistants. Les *foils* en particulier génèrent des forces qui permettent de sortir la coque hors de l'eau si l'engin dépasse une vitesse seuil. Lors des JO de l'été 2024, trois séries étaient équipées de *foils*.

Les **Nacra 17** (équipage mixte). Ces catamarans à *foils* de 17 pieds (5,20 mètres) possèdent des foils non seulement sous leurs deux coques, mais aussi au bas des deux safrans situés à l'arrière (fig. 1).

Les **iQFoils** (homme et femme). Ces planches à voile sont équipées de *foils*, une première pour les JO, permettant d'atteindre des vitesses élevées, parfois plus de deux fois la vitesse du vent (voir l'image de la couverture de ce numéro).



1. Tim Mourniac et Lou Berthomieu, sélectionnés olympiques pour la France, suspendus aux trapèzes de leur Nacra 17. Le catamaran est sustenté par ses quatre foils. Deux foils sont situés au milieu des coques et sont en forme de « L ». Ils assurent à la fois la fonction antidérive (partie verticale) en limitant le déplacement latéral, et la fonction de plan porteur (partie horizontale). Les deux autres foils sont à l'arrière, au bas des safrans, formant avec eux deux « T » inversés. (Les parties basses des « L » et des « T » ne sont pas visibles ici, car situées dans l'eau). L'incidence de chacun de ces quatre foils est réglable en navigation.

Les **Kitefoils** (homme et femme). Ces planches, tirées par une aile de cerf-volant (*kite*), sont aussi munies de *foils* qui leur permettent d'atteindre presque trois fois la vitesse du vent et de réaliser des pointes à 70 km/h. C'était aussi la première fois que le *kite* était présent aux JO (fig. 2).

Bien que les engins à *foils* paraissent très différents des dériveurs ou des voiliers de croisière, nous allons voir qu'ils fonctionnent sur les mêmes principes physiques, mais avec des équilibres des forces différents. Entrons maintenant un peu plus dans les détails.

Porté par Archimède ou par Bernoulli ?

Immobile, un voilier flotte à la surface de l'eau grâce à la poussée d'Archimède : son poids est équilibré par « le poids du volume de liquide déplacé ». Pour les voiliers classiques, dits archimédiens, cela reste vrai même en mouvement, car les forces aérodynamiques et hydrodynamiques sont essentiellement horizontales. Depuis quelques dizaines d'années, l'adjonction de *foils* sous les coques permet en navigation de générer des forces de portance hydrodynamiques ayant des composantes vers le haut. Comme ces forces sont proportionnelles au carré de la vitesse d'avancée (une conséquence du théorème de Bernoulli, voir l'encadré ci-dessous) si la vitesse devient suffisante, le volume de coque immergé diminue significativement (cas des monocoques du Vendée Globe par exemple) ou devient pratiquement nul (cas des engins à foil des JO). Ces voiliers déplaçant alors moins d'eau, sont moins freinés et, avec la même surface de voile, ils peuvent aller nettement plus vite. Les engins volants à *foil* ne sont donc plus portés par Archimède mais par Bernoulli !

Notons toutefois que l'envol complet au-dessus de l'eau n'est pas possible ni souhaitable. Il faut, d'une part, garder un minimum de surface portante immergée pour « soulever » l'engin et, d'autre part, garder aussi un minimum de surface verticale dans l'eau (foils, ailerons, dérives ou safrans), afin d'avoir un appui latéral anti-dérive et ne pas glisser inexorablement dans le sens du vent. Dans le cas des Kitefoils, qui naviguent souvent très inclinés latéralement (fig. 2), les parties initialement verticales et horizontales partagent les rôles de portance et d'antidérive.



2. Lauriane Nolot, médaillée d'argent française en kitesurf, remontant le vent (vent réel dans son dos). L'aile du kite, non visible sur l'image, est à 15 mètres environ, dans le prolongement de la ligne qui est reliée à sa ceinture et qui transmet l'essentiel de la force aérodynamique. La barre horizontale, tenue par les deux mains, permet de régler et d'orienter l'aile.

Si le vent est suffisant, les engins à foils peuvent se déplacer deux à trois fois plus vite qu'en mode archimédien ! Il existe toutefois une vitesse seuil de vent qui dépend du type d'engin — par exemple, pour les planches à voile olympiques, 8 nœuds de vent (15 km/h). Lorsque le vent est inférieur à ce seuil, seul le mode archimédien est possible et les bateaux sont lents. Au-delà, les engins à foils se déplacent en mode volant. Dans les forces de vent intermédiaires, l'engin a un comportement bistable et la navigation n'est pas toujours simple. La transition au mode volant peut être favorisée, au prix d'une grande dépense d'énergie de la part de l'athlète : il/elle doit « pomper »

très énergiquement, c'est-à-dire faire osciller sa voile, comme un oiseau battant des ailes au décollage, ceci afin de développer transitoirement un supplément de vitesse et donc de force sustentatrice. Avant le départ d'une régates par vent faible, comme à Marseille pendant les JO, il n'est pas rare de voir des planches à voile s'éloigner de la zone de départ à la recherche d'un vent un peu plus fort qui leur permettrait sans trop d'effort de passer en mode volant, puis de les voir revenir en mode volant vers la ligne de départ. Le rapport de vitesse entre les deux modes de navigation est tel que ceux qui n'arrivent pas à voler au moment du départ d'une

>>>

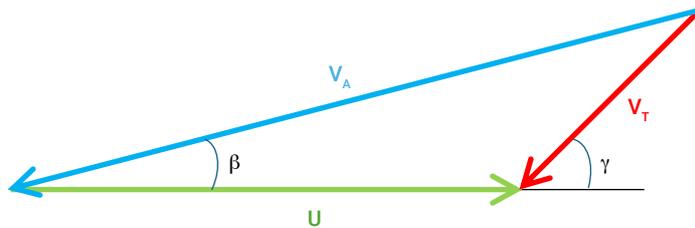
➔ THÉORÈME DE BERNOULLI

Dans les écoulements fluides, dès que la dissipation d'énergie est relativement négligeable, on peut écrire la conservation de l'énergie d'une particule fluide le long de sa trajectoire. Dans les cas les plus simples, où seules les forces de pression travaillent, la conservation de l'énergie sur les lignes de courant s'écrit :

$$P + \frac{1}{2} \rho U^2 = \text{constante},$$

où P est la pression, ρ la masse volumique du fluide et U sa vitesse.

Cette relation, établie par Daniel Bernoulli en 1738, porte le nom d'équation de Bernoulli. En conséquence, toutes les forces aéro ou hydrodynamiques, qui s'écrivent comme l'intégrale sur la surface solide (voiles, ailes, dérives, ou foils) des différences de pression de part et d'autre de chaque élément de surface, peuvent s'écrire dimensionnellement comme proportionnelles au terme d'énergie cinétique $\frac{1}{2} \rho U^2$.



3. Composition des vecteurs vitesse permettant de passer du vent réel V_T au vent apparent V_A , compte tenu de la vitesse U de déplacement du voilier.

>>>

régate l'abandonnent aussitôt. À cause de cette bistabilité, il faut parfois savoir rallonger sa route, même durant une régata, pour rester en vol et pour finalement rejoindre plus vite la ligne d'arrivée !

Poussé ou tiré par le vent ?

Si l'on pense qu'un voilier est simplement poussé par l'air et freiné par l'eau, on se trompe. Si c'était le cas, un voilier ne pourrait aller que dans le sens du vent et moins vite que le vent. Mais un voilier profite des deux fluides, l'air et l'eau, qui se déplacent à des vitesses différentes. En premier lieu, prenant appui sur l'eau par l'intermédiaire de sa quille ou de sa dérive, un voilier peut aller dans pratiquement n'importe quelle direction par rapport au vent. S'il est léger et avec une bonne surface de voile, il peut en plus se déplacer plus vite que le vent ! Un peu comme une machine thermique qui a besoin d'être reliée à deux thermostats à des températures différentes pour pouvoir produire de l'énergie, un engin à voile a besoin de la différence de vitesse entre l'air et l'eau pour récupérer de la force motrice. Décrivons cela un peu plus en détail. Mais d'abord de quel vent parle-t-on ? Du vent réel ou du vent apparent ? Les voiliers devenant rapides, il est fondamental de distinguer ces deux vents. Le vent réel (noté ici V_T pour *true wind* en anglais) est celui que mesurerait un bateau immobile ; c'est aussi celui mesuré par les stations météo. L'autre, le vent apparent V_A , est celui mesuré à bord d'un voilier en mouvement. Ces deux vents diffèrent en direction et en force, à cause de la vitesse U de déplacement du voilier (fig. 3). Ils sont reliés par la relation vectorielle :

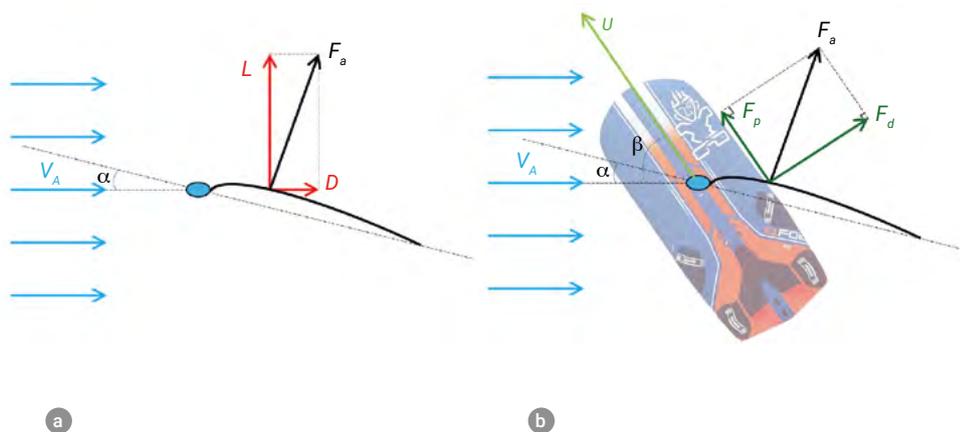
$$V_A = V_T - U \quad (1).$$

Si on note γ l'angle d'où vient le vent réel par rapport à la direction de déplacement du bateau et β l'angle du vent apparent par rapport à cette même direction de déplacement, cet angle β du vent apparent est toujours plus petit que γ . Sur la figure 3, l'angle du vent réel γ vaut 45° , et $U = 2 V_T$. L'angle β ne vaut alors que $14,6^\circ$. En remontant vers le vent réel, le vent apparent est aussi plus fort que le vent réel. Sur la figure 3, on a ainsi $V_A \approx 2,8 V_T$.

On a exactement le même phénomène pour un cycliste pédalant sur une route avec un vent latéral : compte tenu de sa vitesse de déplacement, il ressentira un vent apparent qui viendra plus de face que le vent réel.

La force propulsive

Les voiles sont réglées pour générer la meilleure force aérodynamique possible en défléchissant le vent qu'elles reçoivent, c'est-à-dire le vent apparent. Cette force est proportionnelle à la surface de voile, au carré de la vitesse du vent apparent (cf. encadré sur le théorème de Bernoulli, p. 29), mais dépend aussi de l'importance de la déflexion de l'écoulement d'air, et donc de l'angle d'incidence α du vent sur la voile, et de la forme et de la surface de celle-ci. Selon les réglages, la force aérodynamique F_a sera plus ou moins importante et plus ou moins bien orientée (fig. 4). En mécanique des fluides, cette force est classiquement séparée en deux composantes : l'une dans le sens du vent, dite force de trainée et notée D pour *drag* en anglais, l'autre dans la direction perpendiculaire, dite force de portance et notée L pour *lift* en anglais. La portance L est faible si l'incidence α est faible, mais elle augmente avec l'incidence jusqu'à 10 à 20° d'incidence maximum (cette valeur dépend de la forme de la voile). Ensuite, la portance diminue rapidement car l'écoulement de l'air devient fortement décollé et



4. Force aérodynamique F_a générée par le vent apparent (ici venant de la gauche) sur une grand-voile (ligne courbe en noir) fixée au mât (ellipse bleue à gauche de la voile) au niveau de son bord d'attaque. (a) Cette force peut se projeter en ses deux composantes (en rouge) : la trainée D et la portance L . L'angle d'incidence α est mesuré entre la direction du vent apparent loin en amont de la voile (V_A) et un plan de référence de la voile (en pointillés sur l'image). (b) La force aérodynamique F_a peut aussi se décomposer en sa composante propulsive F_p (dans la direction de la vitesse du bateau U) et une composante perpendiculaire de dérive F_d .

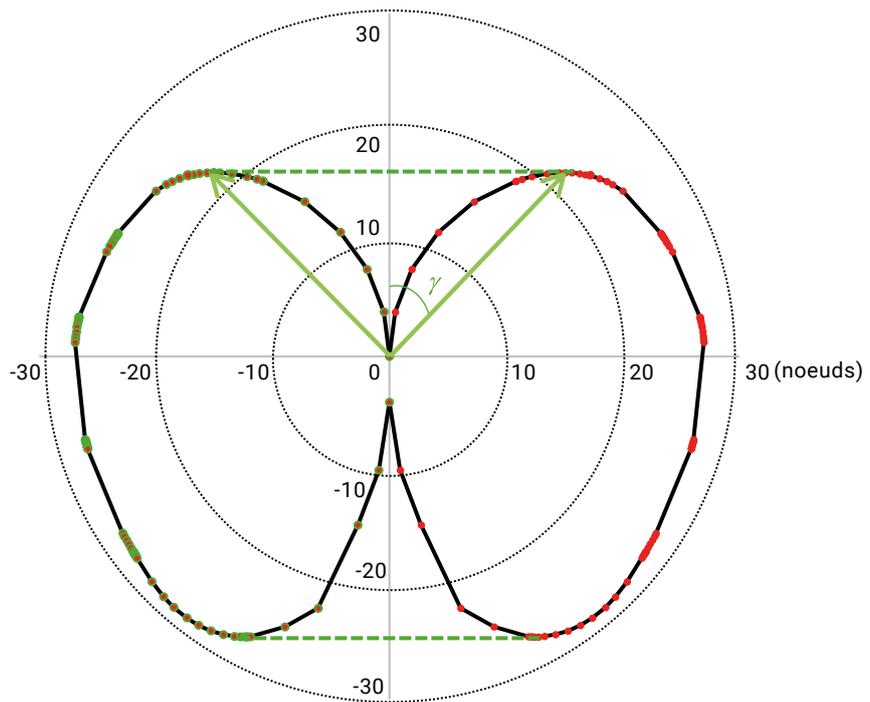
turbulent derrière la voile. La force de traînée augmente, elle, sans cesse lorsque l'incidence α passe de 0 à 90°.

Étonnamment, bien qu'aucune composante de la force aérodynamique ne soit dirigée dans la direction d'où provient le vent apparent, un voilier peut remonter contre le vent ! En effet, ce qui est important c'est d'avoir une projection de F_a dans la direction U du déplacement du bateau qui soit positive : $F_p > 0$. Une voile est bien réglée, en forme et en orientation, lorsque F_p est maximale. Le voilier peut alors remonter le vent, « en moyenne », par une succession de déplacements en biais, alternés : on dit que le bateau « tire des bords ». Si la trajectoire du bateau fait un angle de l'ordre de 30 à 40° avec le vent apparent, on peut encore avoir une projection de la force aérodynamique F_a propulsive (fig. 4). Pour être exact, il faut calculer la résultante de toutes les forces aérodynamiques : celles des diverses voiles et celles dues au « fardage », c'est-à-dire aux traînées aérodynamiques sur le mât, sur l'équipage et sur la partie émergée de la coque.

Équilibre des forces et des moments

La résultante propulsive F_p est fonction de la vitesse du bateau par l'intermédiaire du vent apparent. Cette vitesse du bateau intervient aussi, plus directement, dans le calcul de la force de traînée hydrodynamique sur les volumes immergés, force qui s'oppose au mouvement (dirigée selon $-U$) mais qui est significativement plus faible en mode « volant ».

En régime permanent, pour aller en ligne droite, il faut équilibrer toutes les forces et tous les moments. Pour la force aérodynamique horizontale, transverse à la trajectoire, F_d , ce sont les dérives (ou les parties verticales des foils et des safrans) qui génèrent une portance qui s'oppose à F_d . Pour le couple de chavirage exercé par les forces aérodynamiques (au-dessus de l'eau) et hydrodynamiques (au-dessous de l'eau), l'équilibre est réalisé sur les voiliers classiques par l'inclinaison de la coque, qui déplace latéralement le point d'application de la poussée d'Archimède d'une part, et déplace dans l'autre sens le centre de gravité



5. Courbe établie à partir de mesures en mer et donnant la vitesse U (en nœuds) d'un kite à foil pour un vent réel de 12 nœuds sur une mer plate. Cette courbe est tracée en coordonnées polaires et donne U pour chaque angle γ de déplacement par rapport au vent réel (supposé venir du haut de la figure). L'axe vertical vers le haut ($\gamma = 0^\circ$) correspond à la direction « vent debout », l'axe vertical vers le bas ($\gamma = 180^\circ$) à la position « vent arrière ». On y lit par exemple que, pour $\gamma = \pm 42^\circ$ (lignes vertes en tirets), la vitesse du kite est de 21 nœuds et que dans d'autres directions le kite peut aller à près de 30 nœuds, soit plus de deux fois la vitesse du vent. On peut tracer toute une série de telles courbes polaires, selon la force du vent, les surfaces de voile choisies et l'état de la mer.

d'autre part. Pour les engins légers, l'équilibre est réalisé en continu par le décalage de l'équipage du côté au vent (fig. 1).

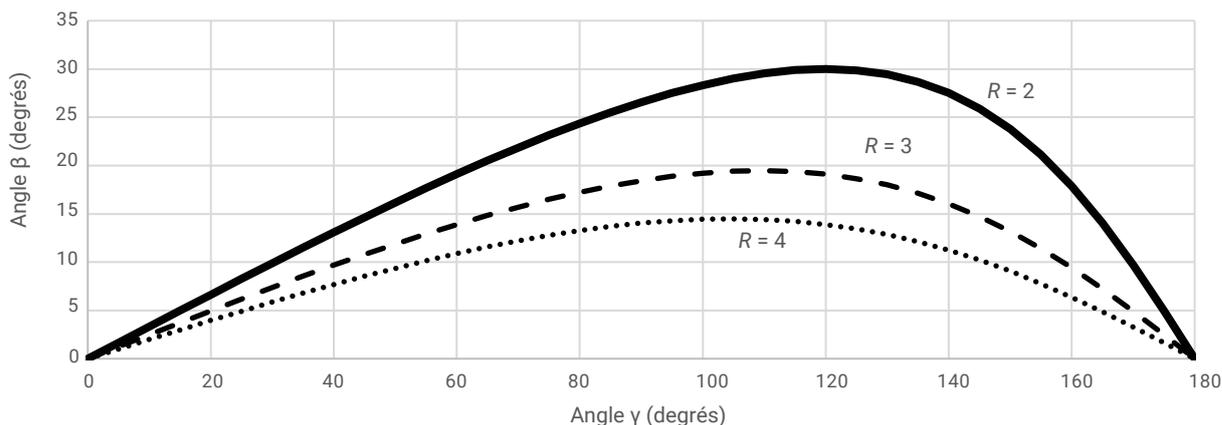
Mais, alors que les voiliers classiques naviguent simplement à deux dimensions à la surface de l'eau (le poids étant équilibré par la poussée d'Archimède), il faut avec les engins à foils maintenir en permanence la hauteur de vol, la poussée des foils équilibrant le poids. Les sportifs réalisent cet équilibre en se déplaçant longitudinalement sur la planche, réglant ainsi l'angle d'incidence des foils sustentateurs.

Les polaires de vitesse

En collectant des mesures en navigation ou à l'issue de simulations numériques, il est possible de tracer les courbes représentant les vitesses U de navigation atteignables en fonction de l'angle γ entre la direction du déplacement et le vent réel (fig. 5).

Les polaires de vitesse illustrent bien le fait qu'un voilier ne peut remonter directement face au vent — la force aérodynamique projetée sur la trajectoire n'aurait alors plus aucune composante propulsive. Sur la figure 5, la vitesse décroît rapidement vers zéro lorsque l'angle du vent réel devient inférieur à 30° environ. Les voiliers remontent pourtant le vent, mais en alternant des déplacements faisant des angles $+\gamma$ et $-\gamma$ par rapport au vent réel (vecteurs verts sur la figure 5). Selon la proportion du temps passé sur chacun des bords (et en négligeant la durée des virements de bord), il est possible d'avoir une vitesse moyenne donnée par la ligne horizontale tangente en deux points à la courbe (en pointillés verts sur le haut de cette même figure). Les polaires, ou l'expérience du navigateur, permettent de choisir l'angle de navigation qui maximise la vitesse de remontée au vent. Cette vitesse cible, issue du meilleur compromis cap/vitesse, est appelée le VMG (pour *Velocity Made Good*) de remontée au vent.

>>>



6. Évolution de l'angle du vent apparent β (°) en fonction de l'angle du vent réel γ (°) pour différents rapports $R = U/V_R$ (équation 2). Pour un voilier naviguant par exemple à deux fois la vitesse du vent, quelle que soit sa direction de navigation, son angle de vent apparent sera toujours inférieur à 30° (20° si $R = 3$, et moins de 15° si $R = 4$).

>>>

Il existe en effet une autre vitesse cible, le VMG dans le sens du vent, car pour les engins modernes, bien que ce soit possible, il n'est pas intéressant d'avancer directement poussé par le vent, à cause de la diminution du vent apparent (équation 1, p. 30), et du ralentissement qui en découle. Il vaut mieux, là aussi, tirer des bords de part et d'autre du vent arrière ($\gamma = 180^\circ$) ; il existe donc sur la polaire une autre ligne horizontale donnant le VMG dans le sens du vent (deuxième ligne en pointillés verts, en bas de la polaire sur la figure 5).

La crise du vent apparent !

Pendant longtemps, on a cherché à augmenter le nombre ou la taille des voiles pour augmenter la force propulsive. De nos jours, pour aller vite, on cherche plutôt à diminuer les forces résistives. En sortant en grande partie de l'eau, les séries à foils des

Jeux Olympiques sont ainsi capables d'aller très vite, plusieurs fois la vitesse du vent réel. Mais cette augmentation de vitesse n'est pas sans limite. Notons R le rapport de la vitesse de l'engin sur la vitesse du vent réel : $R = U/V_R$. Le triangle des vitesses (équation 1, p. 30) et la figure 3 permettent de relier les angles β et γ à ce rapport R :

$$\tan \beta = \sin \gamma / (\cos \gamma + R) \quad (2).$$

Cette équation montre que plus R augmente, plus l'angle β entre le vent apparent et la direction de déplacement va diminuer. On peut par exemple tracer l'évolution de β en fonction de γ , à rapport R constant (fig. 6).

Les engins rapides ont donc un vent apparent qui vient toujours de devant, quelle que soit leur direction de navigation. Pour garder une force propulsive significative, ils doivent alors avoir des voiles très plates et réglées avec un angle d'incidence faible. Sur un trimaran de course ou une planche à voile en navigation rapide, les voiles sont toujours réglées presque dans l'axe car ($\beta - \alpha$) est petit (fig. 4, p. 30). Il est d'ailleurs bien difficile sur une photographie de pouvoir dire si ces engins sont en train de remonter le vent ou de descendre avec le vent !

En allant vite, le vent apparent est aussi plus fort, et la traînée aérodynamique sur le corps des athlètes devient une part significative de la traînée totale. Comme en cyclisme, il convient de travailler sur les positions et sur l'habillement afin de minimiser ce frein.

Pourquoi deux foils sous les planches à voile et les planches de kite ?

Les surfaces portantes des planches à voiles et des kites sont constituées d'une paire d'ailes à l'avant et d'une paire d'ailes plus petites à l'arrière (fig. 7). Ce choix n'est pas dû au hasard ou à un quelconque geste artistique : il est nécessaire pour la stabilité du vol, comme en avion. Les ailes avant assurent l'essentiel de la portance hydrodynamique grâce à un angle d'incidence positif de quelques degrés, les ailes arrière ayant, elles, une incidence nulle ou même faiblement négative et donc une portance à peu près nulle en vol normal. C'est cette différence d'angle d'incidence qui assure le mécanisme stabilisant : si l'ensemble se cabre légèrement, les ailes arrière vont devenir portantes vers le haut et vont créer un couple qui va contrer le cabrage ; inversement, si l'ensemble pique un peu du nez, l'incidence négative sur les ailes arrière va créer une force stabilisante vers le bas.

Cette stabilité a un coût : d'une part, la différence d'incidence des ailes avant et arrière augmente un peu la traînée de l'ensemble ; d'autre part, la stabilité acquise diminue un peu la manœuvrabilité. On a le même choix à faire entre la stabilité et la manœuvrabilité pour un avion, avec des réglages différents pour un avion de ligne, un avion de chasse ou un avion de voltige.



Charles Bertrand, *Comment marchent les voiliers ?*, Voiles et Voiliers (2014).

Ross Garrett, *The Symmetry of Sailing*, Sheridan House Inc. (1996).

Christophe Clanet, Caroline Cohen, Marc Fermigier et David Quéré, *Physique olympique*, Albin Michel (juin 2024).

Marc Fermigier, « Voler sur l'eau, la révolution des foils », *Pour la Science* (juin 2024).

