

Tirés par le vent

En utilisant le vent créé par leur mouvement, les bateaux et les chars à voile avancent plus vite que le vent !

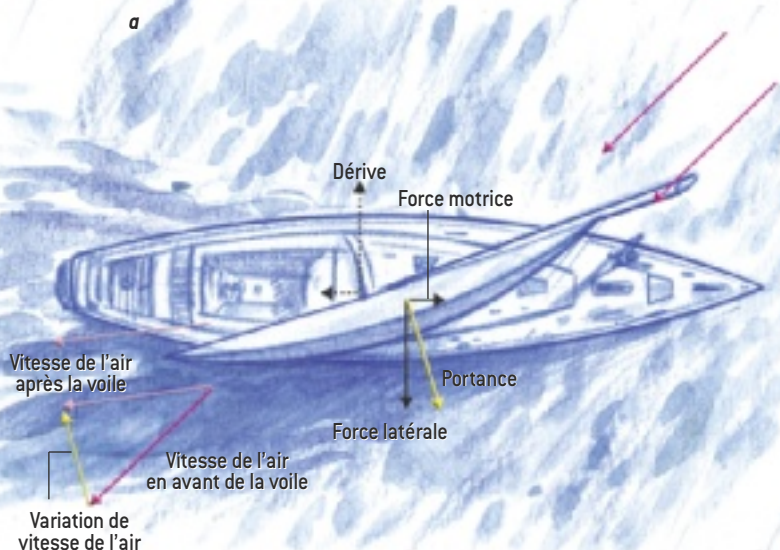
Quelle est la vitesse maximale d'un char à voile propulsé par un vent soufflant à 50 kilomètres par heure ? La réponse du Breton Tadeq Normand est... trois fois la vitesse du vent, soit 151,9 kilomètres par heure : son record du monde datant de l'an 2000 et établi sur la plage de Leucate, en Méditerranée. Pour réaliser cet exploit, il faut tout d'abord maîtriser la voile qui, telle une aile d'avion verticale, tire le véhicule vers l'avant plus qu'elle ne le pousse. Et, en profitant de la vitesse acquise, on peut parvenir à aller plus vite que le vent. Cela ne se fait pas sans une grande habileté où l'expérience du marin rencontre... l'analyse du physicien.

Forces aérodynamiques

Intuitivement, on pense que le vent pousse un navire ou un char à voile. Comment le vent peut-il tirer un navire ? Grâce à la force hydrodynamique que subit tout obstacle qui modifie la vitesse d'un écoulement, et que l'usage décompose en une force parallèle à l'écoulement, la traînée, qui entraîne l'obstacle dans le flux, et une force perpendiculaire, la portance. Ces forces, présentes dès qu'un fluide et un objet sont en mouvement relatif, croissent avec leur vitesse relative. Lorsqu'un navire est vent arrière (soufflant dans l'axe du bateau) et gonfle son spinnaker (la « voile parachute » que l'on hisse à cette allure), la voile stoppe l'écoulement et c'est la force de traînée qui pousse le navire dans le sens du vent. En revanche, lorsque le navire est vent de travers ou s'il « remonte » le vent (en ayant de plus en plus le vent de face), la voile ne stoppe pas le flux d'air, mais le dévie. L'écoulement de l'air qui arrive de biais sur le voilier est redirigé par la voile vers l'arrière. Il en résulte – selon le principe classique de l'action et de la réaction – une force propulsive vers l'avant. À cette force, s'en ajoute une latérale, mais les roues du char à voile ou la dérive du navire évitent – ou du moins réduisent – le mouvement de dérive (voir la figure 1). Avant le démarrage, lorsque le navire ou le char à voile sont immobiles, la situation est relativement simple : vent arrière, la voile est poussée tel un parachute, tandis que vent de côté, elle est tirée comme une aile d'avion.

Lorsque la vitesse augmente, les forces changent, car le vent est modifié. Imaginons un char à voile se déplaçant dans la même direction que le vent (venant par l'arrière) et à la même vitesse. Accompagnant l'écoulement, la voile ne le modifie pas, elle ne subit aucune force motrice : le char à voile ralentit. S'il va plus vite que le vent, la voile reçoit un vent apparent provenant de l'avant : le char est freiné. Il semble par conséquent impossible d'aller plus vite que le vent quand on se déplace dans la même direction. Essayons de nous placer vent de travers, c'est-à-dire perpendiculairement au vent. Orientons la

Voilà, c'est à dire perpendiculairement au vent. Orientons la



Dessins de Bruno Vaazaro

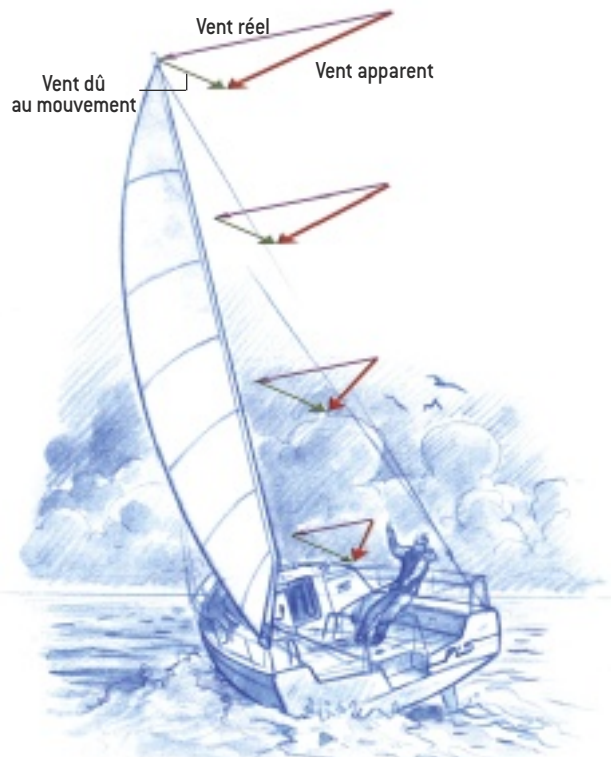
1. La composition du vent réel et du vent apparent impose sa vitesse au bateau (a). La force de portance (en jaune) naît de la déviation de l'air par la voile, et de la variation de la vitesse de l'air qui en résulte (en rose foncé avant la voile et en rose clair après). Cette force se décompose en une force motrice et une force latérale, laquelle donne naissance à la dérive (en partie compensée par la quille d'un bateau). La vitesse d'un char à voile sur glace (b) dépasse parfois celle du vent réel : le vent apparent (en rouge) est la résultante du vent réel (en violet) et du vent dû au mouvement (en vert) qui est opposé à la vitesse du char (en jaune).

voile de sorte qu'elle dévie l'air vers l'arrière et commençons à avancer. Lorsque nous prenons de la vitesse, le vent apparent (celui que nous recevons et qui agit sur la voile) est dû à la composition du mouvement de l'air et du mouvement du char. Si nous sommes vent de travers, la composante latérale du vent est inchangée, mais un vent de face dont la vitesse est égale et opposée à celle de notre mouvement s'ajoute à ces mouvements. Lorsque nous nous déplaçons à une vitesse égale à la vitesse du vent, nous recevons un vent orienté à 45 degrés dont la vitesse est égale à la vitesse du vent réel multipliée par la racine carrée de deux : nous avançons plus vite que le vent réel. Puisque la direction du vent qui arrive dans la voile a changé, il faut revoir les réglages et « border » la voile, c'est-à-dire réduire l'angle qu'elle fait avec la direction du char. Ensuite, puisque la vitesse du vent apparent a augmenté, la force qui s'exerce sur la voile (proportionnelle au carré de cette vitesse) a également augmenté (dans notre exemple, elle double). La force latérale qui s'exerce sur le véhicule croît : les efforts latéraux sur les roues deviennent importants, de même que le couple qui tend à faire basculer le char sur le côté.

Remonter le vent arrière !

Notre vitesse réelle peut-elle dépasser celle du vent réel ? Oui : grâce à notre vitesse, nous créons un vent qui nous propulse d'autant plus que nous allons vite (voir la figure 1). À mesure que la vitesse augmente, l'intensité de ce vent apparent augmente, ce qui est un avantage, mais la direction de ce vent se rapproche du vent de face. Cette situation n'est pas optimale, car lorsque le vent est trop proche du vent de face, la force exercée sur la voile est quasi perpendiculaire au char et perd sa nature propulsive. Chaque fois que la direction du vent s'approche trop de l'axe du char, il faut changer de direction et augmenter l'angle entre la vitesse et le vent. La direction prise par le char à voile quitte le vent de travers pour se rapprocher du vent arrière. Toutefois, grâce à la vitesse acquise, le vent apparent arrive sur la voile par l'avant du char, plutôt que par l'arrière, ce qui correspond à un fonctionnement de la voile reposant sur la portance. On peut voir un char à voile dont la vitesse est orientée à une trentaine de degrés du vent arrière, mais pour qui le réglage des voiles correspond à un vent apparent dirigé à une trentaine de degrés du vent de face. Ainsi le char peut continuer à accélérer et atteindre des vitesses bien supérieures à la vitesse du vent. Grâce aux frottements moindres, les chars sur glace ont des performances encore supérieures et dépassent 170 kilomètres par heure, le record de 1938 de John Buckstaff étant estimé à 230 kilomètres par heure !

Dans le cas des bateaux, les performances sont inférieures essentiellement parce que les frottements hydrodynamiques sur la quille sont très supérieurs à ceux que subit un char glissant sur la glace. On ne peut espérer atteindre trois fois la vitesse du vent comme pour les chars sur glace : rares sont



2. La direction et l'intensité du vent changent avec la hauteur du mât et s'annulent à la surface de la mer. Pour que le vent apparent (*en rouge*) soit toujours parallèle au bord d'attaque de la voile (près du mât), il faut vriller la voile, soit en la bordant, soit, sur les voiles semi-rigides, en imposant un mouvement de vrille à la partie supérieure de la voile au moyen d'un moteur électrique situé en haut du mât.

les bateaux qui dépassent la vitesse du vent réel, les meilleures performances étant atteintes pour des bateaux qui surfent sur l'eau grâce à des flotteurs. Dans cette course à la vitesse, il reste important de dompter efficacement le vent. Dès lors, pourquoi ne pas remplacer la voile souple par une aile rigide ? Une difficulté surgit : la vitesse du vent réel change assez rapidement avec l'altitude. Elle s'annule au voisinage de la surface de l'eau à cause des frottements avec la mer, mais augmente ensuite avec l'altitude. Dans le cas des voiliers dont la hauteur du mât peut atteindre une trentaine de mètres, l'effet est marqué : le vent apparent est plus intense en haut du mât qu'en bas de quelques mètres par seconde, et sa direction peut tourner d'une dizaine de degrés (voir la figure 2). En conséquence, il faut vriller la voile le long du mât pour qu'elle change d'orientation avec la hauteur, et que le vent apparent reste parallèle à la voile, au niveau du mât. Jusqu'à présent, seule la toile permettait d'ajuster le profil de la voile aux conditions de navigation, en particulier le vrillage sur la hauteur. Aujourd'hui, apparaissent de nouvelles voiles ailes semi-rigides. Plus épaisses, elles sont plus performantes au plan aérodynamique que les voiles « classiques ». On contrôlerait leur vrillage à l'aide d'un petit moteur électrique placé en haut du mât. Indispensable quand le mât atteint – comme sur certains bateaux de course – quasiment la hauteur de l'Arc de triomphe...

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK sont professeurs de physique à l'Université Pierre et Marie Curie, à Paris.

P.J. RICHARDS, A. JOHNSON et A. STANTON, *America's Cup downwind sails : vertical wings or horizontal parachutes ?*, in *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 89, pp. 1565-1577, 2001.

P.J. RICHARDS, *The effect of wind profile and twist on downwind sail performance*, in *J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 67&68, pp. 313-321, 1997.