



De la voile à l'aile

V. RADHAKRISHNAN

La physique des voiliers a beaucoup progressé. Les améliorations résultent de l'implantation des foils et de la structure des mâts ailes.

Les deux tiers de notre planète sont recouverts de mers balayées par les vents et les marins ont exploité la force du vent pour voyager sur l'eau. Aussi la navigation à voile fut-elle longtemps le seul moyen de découvrir, puis de relier, des contrées lointaines. Aujourd'hui, nous franchissons les océans en les survolant de très haut, et la direction et la force des vents d'altitude affectent peu les durées de traversée. Toutefois ces deux modes de transport exploitent les mêmes phénomènes physiques, l'action d'un fluide sur une surface, voile, aile ou dérive.

Sur le Nil, il y a quatre milliers d'années, les conditions de navigation étaient particulièrement favorables : le Nil s'écoule du Sud vers le Nord, et les vents soufflent en sens inverse. Aussi les marins égyptiens remontaient-ils le courant toutes voiles dehors ; vers le Nord, ils carguaient la voile pour descendre le fleuve en profitant du courant. Dans ce dernier cas, les marins immergeaient des planches perpendiculairement à la direction du courant, augmentant ainsi la surface sur laquelle agit le mouvement de l'eau : la poussée du courant devait être supérieure à l'action opposée du vent sur la portion émergée du navire. Cette pratique montre que, dans un système où interagissent un solide, un liquide et un gaz, la vitesse et la direction du solide – le bateau – sont déterminées par les forces qui agissent au-dessus et au-dessous de la ligne de flottaison.

Les forces qui freinent le mouvement du bateau sont essentiellement la résistance visqueuse provenant du frottement de l'eau sur la carène, la traînée due à la forme de la coque, et la résistance de vague. Les deux premières résistances croissent comme le carré de la vitesse du bateau, mais les architectes

navals limitent leurs effets en construisant des coques lisses et effilées. La troisième composante, la vitesse de vague, est un handicap majeur. La longueur de la vague créée par le mouvement du bateau est proportionnelle au carré de sa vitesse. La vague limite la vitesse du bateau à la valeur pour laquelle la vague a la même longueur que la coque : le bateau doit alors remonter en permanence la pente créée par la vague qui résulte de l'accumulation de l'eau à l'avant et de la dépression à l'arrière. Ce phénomène, la résistance de vague (aussi dénommée résistance de carène), découvert au siècle dernier par l'ingénieur anglais William Froude, explique pourquoi les transatlantiques qui dépassaient les quarante nœuds étaient si longs, et pourquoi également tout voilier conventionnel de dix mètres de long, même par vent de vingt nœuds, atteint tout juste sept nœuds (un nœud est environ égal à 0,5 mètre par seconde, soit 1,8 kilomètre par heure).

Sur les hydrofoils la résistance de vague est réduite par la surélévation dynamique de l'embarcation ; la poussée vers le haut est due à la poussée du bateau sur des foils inclinés de type patins. La poussée vers le haut n'est plus uniquement la poussée d'Archimède, c'est principalement la poussée verticale (la portance) exercée sur une petite surface immergée : sur le nouvel *Hydroptère* (voir la figure 2), la résistance de vague est fortement réduite.

Les Vikings savaient que leurs bateaux devaient être longs, lisses et élancés pour «remuer moins l'eau», mais je les soupçonne d'avoir davantage navigué à la rame qu'à la voile. Les progrès vinrent des Chinois, puis des Arabes, qui construisirent et voyagèrent avec de véritables embarcations à voile. Ces marins avaient compris que

les voiles ne se comportaient pas comme des feuilles ballottées par le vent dont on ne peut maîtriser la destination, et ils savaient naviguer vent debout : leurs voiliers pouvaient aller de A à B même quand le vent soufflait de B vers A.

Pour comprendre le pourquoi et le comment de la navigation contre le vent, nous examinerons l'aérodynamique des voiles, mais pas seulement les voiles, car, pour extraire l'énergie motrice du vent, nous devons «mettre un pied dans l'eau». Imaginez une éolienne portée par un ballon : elle ne produit de l'électricité que si le ballon est arrimé au sol. Si on libère le ballon, il dérive à la vitesse du vent ; l'éolienne ne ressent alors aucun vent apparent et ne tourne plus. Il en va de même de la voile du bateau.

La voile carrée

L'imposante voilure des grands navires d'autrefois était, pour l'essentiel, constituée de voiles carrées suspendues à des vergues. Une voile carrée fonctionne comme un parachute et engendre une force, la traînée de la voile, orientée dans le sens du vent. Avec un tel gréement, quelle que soit votre destination, il faut un vent arrière raisonnablement fort, car à mesure que vous accélérez, le vent apparent faiblit : la poussée du vent, proportionnelle au carré de cette vitesse apparente, diminue, tandis que la traînée sur la coque augmente plus vite que le carré de la vitesse de l'eau. Par vent modéré, pour approcher la vitesse limite de vague du navire, il faut déployer l'énorme surface de toile des grands voiliers. Ces voiles, équivalent des gigantesques spinnakers modernes, jouent le même rôle, au-dessus de l'eau, que la dérive transverse immergée par les Égyptiens pour profiter du courant.



V. Radhakrishnan

1. LES TROIS-MÂTS à la formidable voilure présentaient des dangers. Les trois-mâts étaient les plus grands bateaux et les plus rapides au début du xx^e siècle. Ils restaient contrôlables, mais leur vitesse était limitée par la résistance de carène sur la partie immergée de la coque. Quand le vent soufflait fort, la vitesse ne pouvait augmenter pour diminuer le vent apparent, et la force exercée sur les voiles augmentait jusqu'à briser les mâts ; aussi les marins devaient rapidement carguer les voiles. Par gros temps, l'opération était difficile et périlleuse.



Photos Plisson La Trinité

2. L'HYDROPTÈRE permet d'atteindre, à quatre mètres au-dessus de l'eau, une vitesse de 40 nœuds pour seulement 25 nœuds de vent réel. Les coques sortent de l'eau grâce à la poussée verticale des

plans porteurs immergés, les hydrofoils. Au lieu de pousser des tonnes d'eau, l'hydroptère égratigne la surface des océans : la limite liée à la vague de carène est notablement diminuée.

Hélas, quand la vitesse limite du bateau est atteinte, le vent continue à pousser voiles et mâts ; cette confrontation paradoxale entre «une force irrésistible et un objet inamovible» peut amener la rupture du mât. Quand le vent augmente par trop, il faut vite carguer les voiles, manœuvre dangereuse comme en témoigne la perte moyenne d'un membre d'équipage, passé par dessus bord, lors de chaque contournement du cap Horn.

La précipitation avec laquelle on réduit ou abat une voile, est une obsession nécessaire, aujourd'hui comme hier ; hélas, une pièce de toile battant au vent lors d'une tempête est un objet démoniaque, car incontrôlable. Nombre de marins sont morts en tentant de maîtriser une voile par vent violent. Je suis passablement irrité par le romantisme associé au «bon temps de la marine à voile». La conception des navires imposait aux équipages des performances physiques inouïes ; pour que les marins accomplissent ces tâches, la hiérarchie imposait une discipline de fer d'une rigueur inhumaine.

Au contraire, sur les jonques chinoises, un ingénieux mécanisme de type store vénitien, permettait à un seul homme, debout sur le pont, de hisser et d'abattre les voiles. Pour comprendre comment les marins apprirent à naviguer contre le vent, nous allons maintenant relier l'hydrodynamique à l'aéronautique.

La poussée sur une voile

De nombreux physiciens s'interrogèrent sur l'intensité et sur la direction de la force engendrée par un fluide s'écoulant dans une direction faisant un petit angle avec une lame solide.

Selon Newton, cette force était négligeable pour de petits angles, croissant seulement comme le carré du sinus de l'angle entre la direction du vent et la lame. Dans un article d'une remarquable perspicacité rédigé il y a plus d'un siècle, Lord Rayleigh réfuta cette loi et affirma que la force était bien supérieure. Il écrivait en 1876 : «Le fait que la résistance au mouvement [...] d'une lame dans un fluide au repos puisse être accrue considérablement par la superposition d'un mouvement en biais présente un grand intérêt. Par exemple, ce fait se révélera d'une importance vitale pour le problème du vol artificiel.»

Il calcula une force bien plus élevée aux petits angles, valeur que l'on sait aujourd'hui être encore supérieure. Elle est correctement donnée par la théorie des écoulements sur les lames solides, théorie élaborée par les physiciens depuis le début du XX^e siècle. C'est cette force qui permet à un oiseau de descendre en planant plus lentement qu'un parachute dont l'aire serait égale à celle des ailes de l'oiseau. Et c'est ce qui maintient les avions dans le ciel avec une force proportionnelle à l'aire de l'aile.

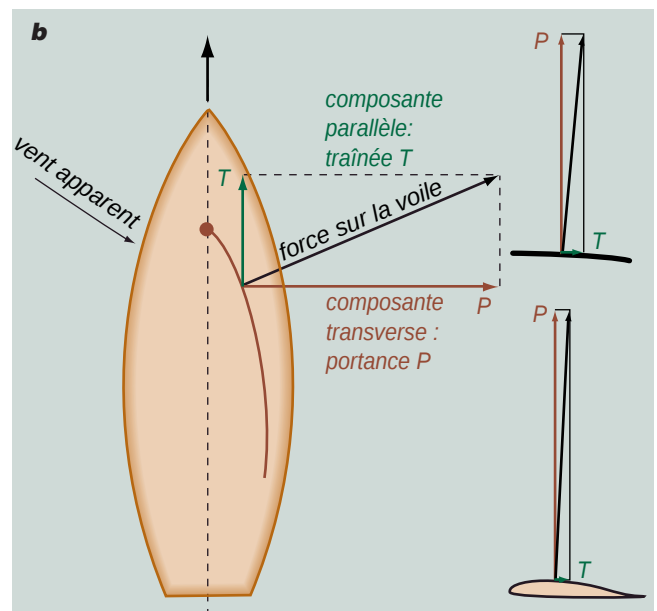
Pour revenir à notre problème, c'est cette portance perpendiculaire à l'écoulement de l'air sur la voile qui permet au navire d'avancer contre le vent. La composante transverse de cette force, bien plus importante que la composante orientée vers l'avant, tend à pousser le navire latéralement. Ainsi, toute embarcation naviguant à la voile est dotée d'un dispositif immergé qui s'oppose au mouvement latéral, tout en facilitant le mouvement vers l'avant. C'est pour remplir cette fonction que les Chinois ont inventé les dérives latérales utilisées aujourd'hui encore aux Pays-Bas sur les navires traditionnels. La même fonction peut être obtenue à l'aide d'ailerons, fixes ou rétractables, de dérives ou de quilles, placés sur les planches à voile, les canots et les voiliers.

Lord Rayleigh et William Froude avaient compris que la force qui empêche le bateau de chasser latéralement n'est pas la traînée de la dérive qui se déplace latéralement dans l'eau, mais la portance engendrée par son mouvement vers l'avant dans une direction qui forme un petit angle avec son plan de symétrie.

Cette dérive fonctionne comme un hydrofoil vertical plongé dans l'eau, à l'instar de la voile qui se comporte comme un airfoil vertical dans l'air. Ces forces horizontales, longitudinale et transverse s'exerçant sur ces foils, sont dénommées traînée et portance.



3. LA VOILE PRINCIPALE d'une jonque chinoise (a) pouvait être hissée ou abattue depuis le pont par un seul homme. Ces jonques furent les premières embarcations à remonter au vent. Composantes de la poussée de la voile sur une embarcation remontant au vent (b). Pour



contrer la grande composante latérale, il faut recourir à un dispositif immergé, une dérive. Portance et traînée s'exerçant sur une lame incurvée et sur un airfoil (c) pour un angle au vent inférieur à 4 degrés. La lame et l'airfoil ont même rapport longueur/largeur, égal à 6.