

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.

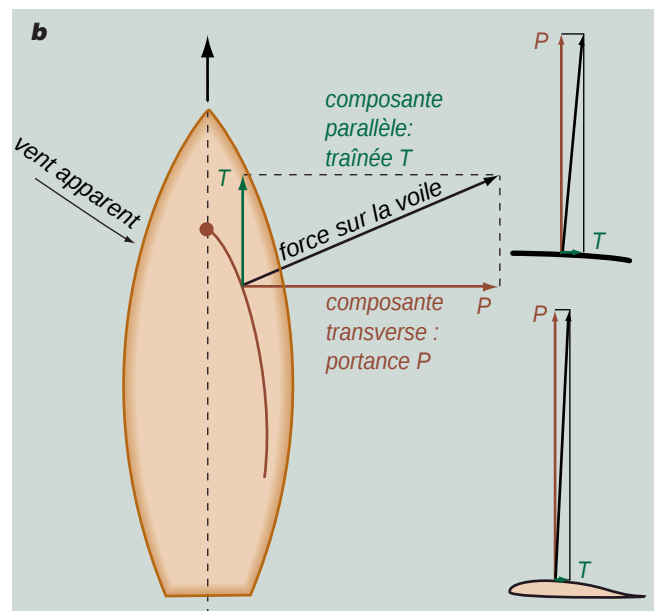
Pour revenir à notre problème, c'est cette portance perpendiculaire à l'écoulement de l'air sur la voile qui permet au navire d'avancer contre le vent. La composante transverse de cette force, bien plus importante que la composante orientée vers l'avant, tend à pousser le navire latéralement. Ainsi, 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.

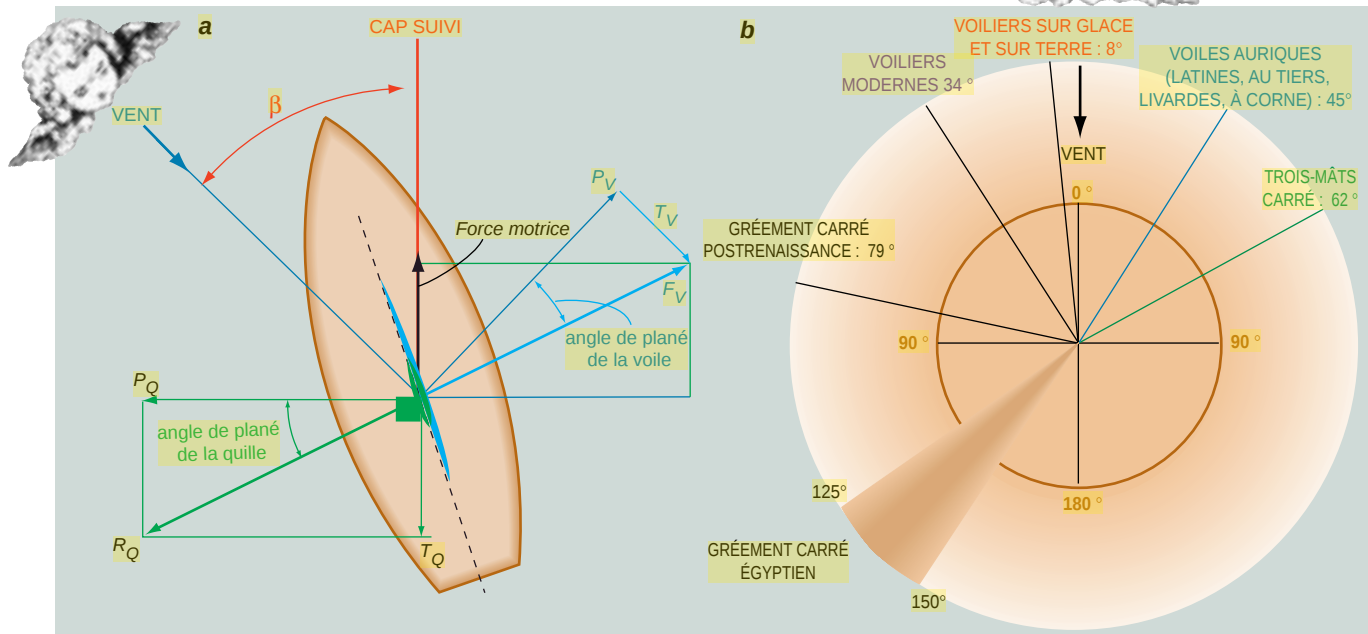
Cette dérive fonctionne comme un hydrofoil vertical plongé dans l'eau, à l'instar de la voile qui se comporte comme un airfoil vertical dans l'air. Ces forces horizontales, longitudinale et transverse s'exerçant sur ces foils, sont dénommées traînée et portance.



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.



4. FORCES QUI S'EXERCENT SUR LA VOILE ET SUR LA QUILLE. (a). L'écoulement de l'air autour de la voile (en bleu) crée une force de portance P_V , perpendiculaire à la direction du vent, et une traînée T_V dans la direction du vent. La force résultante sur la voile F_V se décompose aussi en une composante orientée dans l'axe du cap, la force motrice, et une composante de dérive, perpendiculaire au cap. Cette dérive est compensée par la portance P_Q engendrée par l'écoulement de l'eau autour de la quille (il faut pour cela que la quille

ait un angle d'attaque par rapport à l'écoulement de l'eau, donc que l'axe du bateau ne soit pas parallèle au cap). Toutefois cet écoulement crée aussi une traînée T_Q dans l'axe du cap, qui s'oppose à l'avancée du bateau. Cette traînée équilibre la force motrice. Il en résulte (théorème de Lancaster) que la somme des angles de plané de la voile et de la quille est égale à l'angle β entre le cap et le lit du vent. Le plus petit angle β sous lequel un bateau peut remonter au vent est représenté (b) pour différentes embarcations.

Airfoils et hydrofoils

De multiples facteurs déterminent les performances d'un airfoil ou d'un hydrofoil. Nous n'en mentionnerons que trois : la symétrie, la forme (la section) et le rapport longueur sur largeur.

Les oiseaux et la plupart des avions ont des ailes dont on peut difficilement confondre les faces supérieure et inférieure. Apparemment, les oiseaux n'ont pas besoin de voler sur le dos, pas plus que les avions de ligne. Mais les avions d'acrobaties aériennes ont des ailes symétriques qui restent efficaces dans les deux positions de vol. L'angle d'attaque correspond à l'inclinaison de l'aile par rapport à la direction du flux d'air.

Pour les bateaux, il est clair que le vent peut frapper la voile d'un côté ou de l'autre. La dérive, située sous la coque du bateau, doit s'opposer à un déplacement latéral, vers la droite comme vers la gauche. Aussi les dérives, fixées à la coque ou abaissées en son centre, sont-elles symétriques ; en revanche, les dérives latérales, situées sur chaque bord du bateau, peuvent être asymétriques. Les navires hollandais possèdent des dérives latérales images miroir l'une de l'autre, afin d'être plus efficaces.

Une voile en toile, et donc bidimensionnelle, s'incurve aussi facilement dans un sens que dans l'autre. Cette souplesse d'utilisation a pour contrepartie la diminution de l'efficacité de la voile par rapport à un airfoil véritablement tridimensionnel et présente, nous l'avons vu, des dangers. En ce qui concerne le rapport longueur sur largeur, la physique nous enseigne qu'une voile longue et mince est plus efficace, ce qui explique pourquoi la grande voile triangulaire a remplacé les anciennes voiles rectangulaires.

La mesure absolue de la qualité d'un foil est sa finesse, c'est-à-dire le quotient de la force transverse par la force longitudinale, correspondant à l'angle d'attaque optimal, habituellement de quelques degrés. Ce rapport, également appelé rapport portance/traînée indique qu'une surface courbe, une voile par exemple, est moins performante qu'un véritable airfoil rigide. Si vous pilotez un avion monomoteur, et que l'engin tombe en panne, cette finesse détermine le nombre de kilomètres dont vous disposez, à une altitude d'un kilomètre et en l'absence de vent pour trouver une piste d'atterrissage d'urgence. Dans le cas d'un voilier, il existe une finesse associée à la voile et une finesse déterminée par la performance de l'hydrofoil

correspondant au système dérive-carène. Ces deux finesesses déterminent le comportement du voilier.

La théorie des ailes fut développée au début de ce siècle, notamment par Frederick William Lanchester, un mathématicien amateur qui élaborait en solitaire la théorie des écoulements sur les «airfoils». Il fut le premier à expliquer correctement la traînée engendrée par les ailes réelles en la reliant à la cascade de vortex se développant à leurs extrémités. Industriel entreprenant, il construisit aussi une usine de fabrications d'automobiles en Angleterre.

La raison pour laquelle je tiens Lanchester en si haute estime est qu'il a posé en quelques lignes, et bien avant tout le monde, les fondements de la théorie de la navigation à voile. En 1907, il écrit : «Le problème de la mécanique de la navigation à voile se réduit à une association de foils où celui opérant dans l'air (une envergure de voile) et celui opérant dans l'eau (la quille ou la dérive) exercent l'un sur l'autre une réaction.

L'angle minimum par rapport au vent déterminant la course optimale du navire est la somme des angles de plané au-dessus et en dessous de l'eau.» Le brillant théorème de Lanchester montre immédiatement que la performance d'un voilier se caractérise par un seul