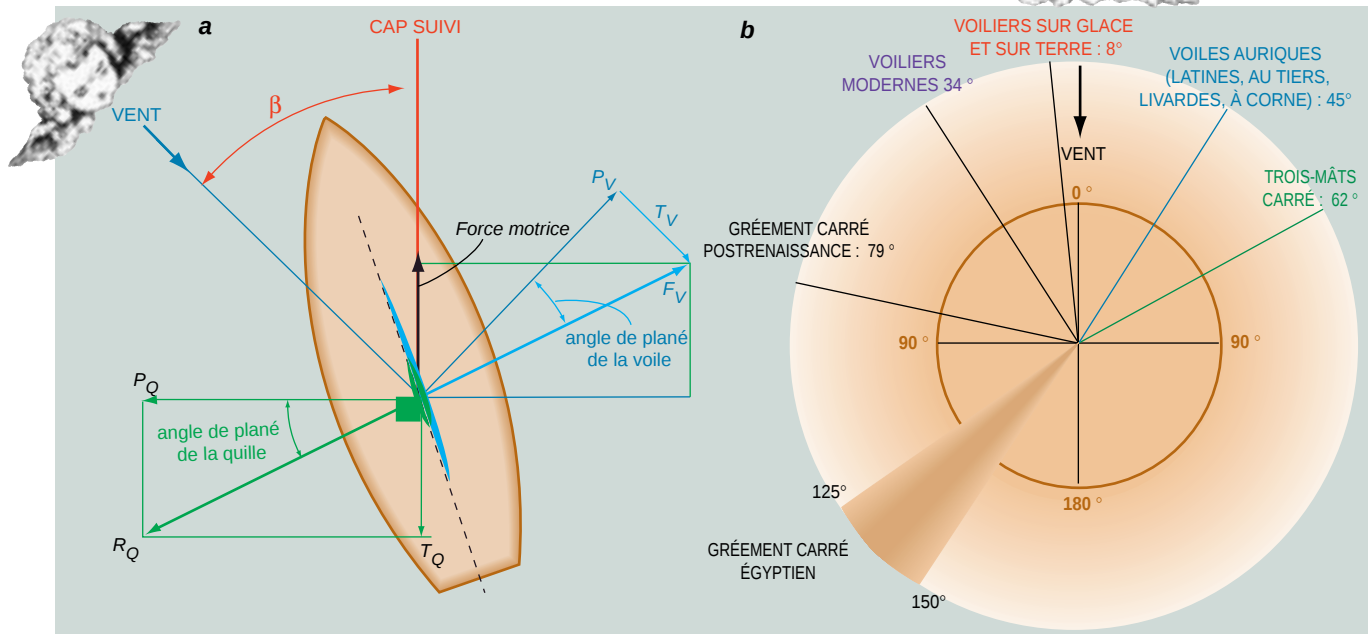




4. FORCES QUI S'EXERCENT SUR LA VOILE ET SUR LA QUILLE. (a). L'écoulement de l'air autour de la voile (en bleu) crée une force de portance P_V , perpendiculaire à la direction du vent, et une traînée T_V dans la direction du vent. La force résultante sur la voile F_V se décompose aussi en une composante 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.

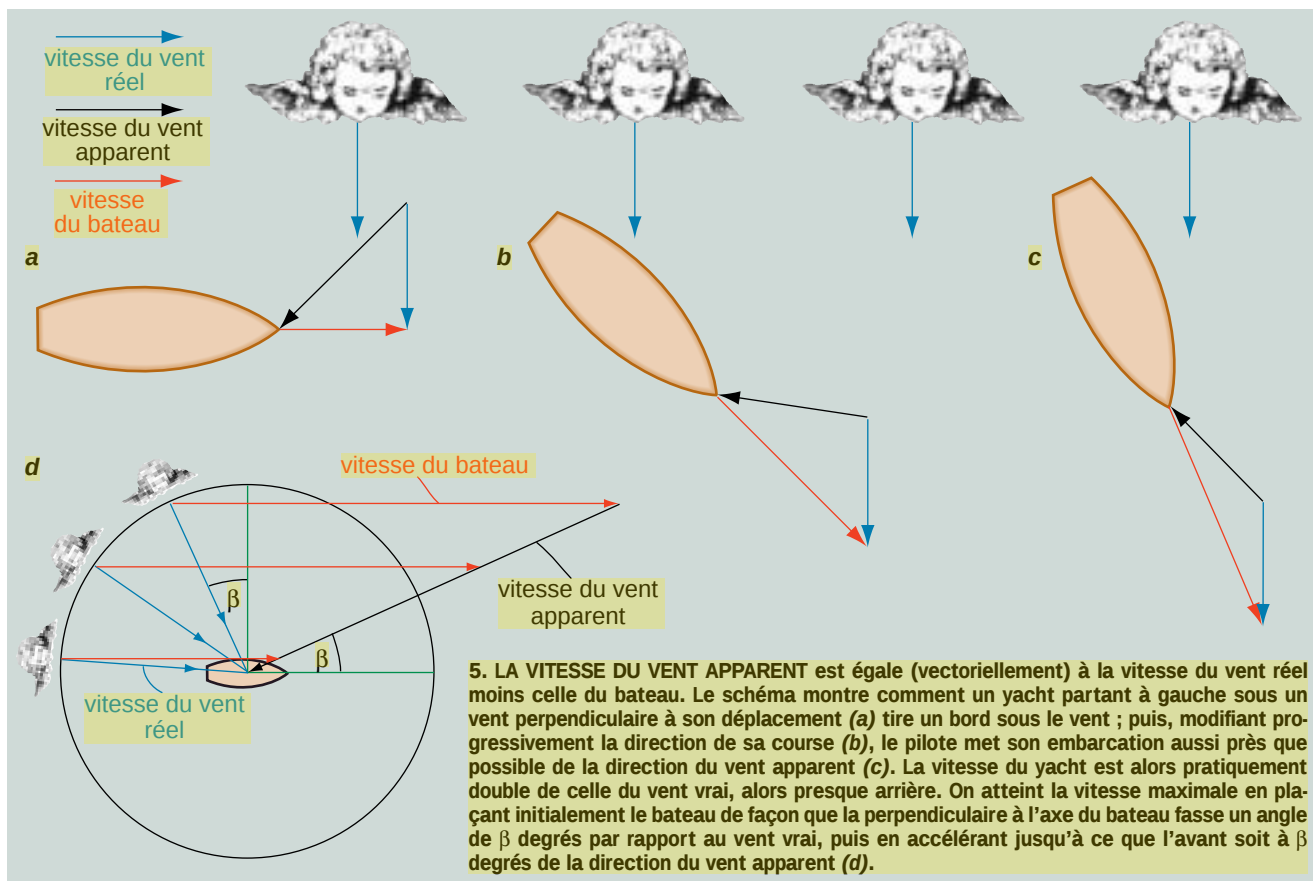
La mesure absolue de la qualité d'un foil est sa finesse, c'est-à-dire le quotient de la force transverse par la force longitudinale, correspondant à l'angle d'attaque optimal, habituellement de quelques degrés. Ce rapport, également appelé rapport portance/traînée indique qu'une surface courbe, une 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



nombre, l'angle β . La figure 4b donne les valeurs de cet angle pour divers voiliers. Les performances exceptionnelles des yachts à glace s'expliquent simplement par le fait que les patins empêchent tout mouvement latéral et que l'angle β dépend uniquement de la voile. Un char à voile possède aussi un très petit angle β : parce qu'il est posé sur des roues, le quotient résistance au mouvement latéral / résistance au mouvement avant est extrêmement élevé.

La navigation réelle

Revenons sur l'eau. Il est clair que l'engin à voile idéal se composerait uniquement d'un foil dressé verticalement dans l'air et d'un autre plongé dans l'eau. La meilleure approximation de cet engin idéal est bien entendu la planche à voile. Ingénieuse, portable, peu coûteuse et riche en sensations, elle a mis à la portée de millions de gens un sport de voile autrefois réservé aux seuls milliardaires.

Nous avons vu qu'un voilier peut naviguer pour tout angle au vent supérieur à β , et nous allons maintenant examiner plus en détail l'effet du vent apparent sur la vitesse du voilier. Lorsque le voilier navigue vent arrière,

la vitesse du vent apparent est inférieure à celle du vent vrai. Au contraire, pour certaines allures vent debout, la vitesse du vent apparent dépasse celle du vent vrai. La navigation de course exige ainsi que l'on maximise le vent apparent pour rendre maximale la vitesse du voilier. Toutefois, plus le vent apparent augmente, plus il arrive par l'avant. Quelle est alors l'angle limite ? C'est l'angle β , le plus petit angle au vent pour lequel un voilier peut naviguer : la vitesse maximale est atteinte lorsque le vent apparent est opposé au sens de la marche ! Nous verrons que cette conclusion étonnante amène d'autres surprises.

Les véliplanchistes et les pilotes de yachts à glace, comme tous ceux dont la vitesse de l'engin n'est pas limitée par la vitesse de vague, savent tout cela et utilisent ces connaissances pour tirer leurs bords *sous le vent*. Partant avec le vent de travers et obliquant progressivement dans le sens du vent à mesure qu'ils accélèrent, ils se retrouvent au près par rapport au vent apparent, alors que le vent vrai vient de derrière. Si le vent souffle de A vers B, les conducteurs peuvent partir de A, virer de bord à mi-chemin, puis arriver en B avant l'air avec lequel il était parti. Cette

stratégie montre qu'une petite voile qui se comporte comme un airfoil et engendre une portance, peut conduire une embarcation en un point situé droit sous le vent plus vite que ce vent.

Un spinnaker ou tout autre dispositif donnant une traînée ne peut, au mieux, qu'approcher la vitesse du vent et devrait avoir des dimensions extravagantes pour que la coque soit propulsée avec un vent apparent proche de zéro. Une autre leçon est que les navires rapides tirent généralement des bords bien plus ouverts à cause de la plus grande différence entre les vents vrai et apparent. On considère trop souvent que les performances des catamarans sont médiocres au vent comparés aux bateaux plus lents dont les bords font des angles plus petits. L'angle entre les bords n'atteint la valeur minimale 2β que pour les navires dont la vitesse est négligeable comparée à la vitesse du vent vrai.

Si l'objectif est la vitesse, l'angle β détermine aussi la vitesse maximale que vous pouvez atteindre par rapport au vent et la direction dans laquelle vous devez naviguer pour atteindre cette vitesse. La cosécante de β représente la valeur maximale du rapport vitesse du bateau / vitesse du vent, valeur

atteinte lorsque le vent vrai est à β degrés sur l'arrière. Le vent apparent se trouve alors exactement à β degrés sur l'avant. La faible valeur de l'angle β pour les chars à voile évoluant sur les lacs asséchés de Californie leur permet d'atteindre la vitesse record de 160 kilomètres/heure ; la même raison explique pourquoi des yachts à glace ont dépassé les 180 kilomètres/heure sur la glace. L'endroit idéal pour établir des records de vitesse sur engins à voile est une étendue d'eau balayée par un vent pratiquement perpendiculaire aux trajectoires et dépourvue de vagues ralentissant ces trajectoires.

En Angleterre, à Weymouth, une bande de terre sépare l'océan du port, arrêtant ainsi les vagues tout en laissant passer le vent. Chaque année, en octobre, époque à laquelle souffle souvent un vent très violent, des amateurs venant des quatre coins du globe s'y retrouvent pour tenter, à bord d'étranges engins, de naviguer aussi vite que possible. Cette *Speedweek*, ainsi qu'on la dénomme, est organisée par l'*Amateur Yacht Research Society* (AYRS), une remarquable association qui, durant les quarante dernières années a promu les diverses innovations apparues en navigation à voile, notamment le développement des multicoques.

Les ailes de Phoebus

Au cours des compétitions qui s'y déroulent, les planches à voile, photographie dominant leurs concurrents. Le vainqueur dans la catégorie masculine dépasse 50 kilomètres/heure sous un vent de 30 kilomètres/heure. La figure 7a montre deux planches à voile reliées par un pont, l'idée étant d'obtenir ainsi un meilleur moment antigitte que celui offert par le seul poids du véliplanchiste. La photographie 7b est celle d'un trimaran équipé d'une voile de type polynésien. Les planches sont censées planer au-dessus de l'eau, les ailerons de leur partie inférieure fournissant la résistance latérale dont nous avons évoqué plus haut la nécessité. La troisième embarcation (figure 7c) possède une aile asymétrique réellement tridimensionnelle, autrement dit un véritable airfoil, munie d'un dispositif inverseur haut-bas lors des changements de bord. Un petit aileron blanc situé à l'arrière fonctionne exactement comme le gouvernail de profondeur d'un avion : placé sous un certain angle, il maintient automatiquement l'aile dans la direction désirée

par rapport au vent apparent. C'est sur ce principe que repose la propulsion de la plupart des «bateaux à ailes».

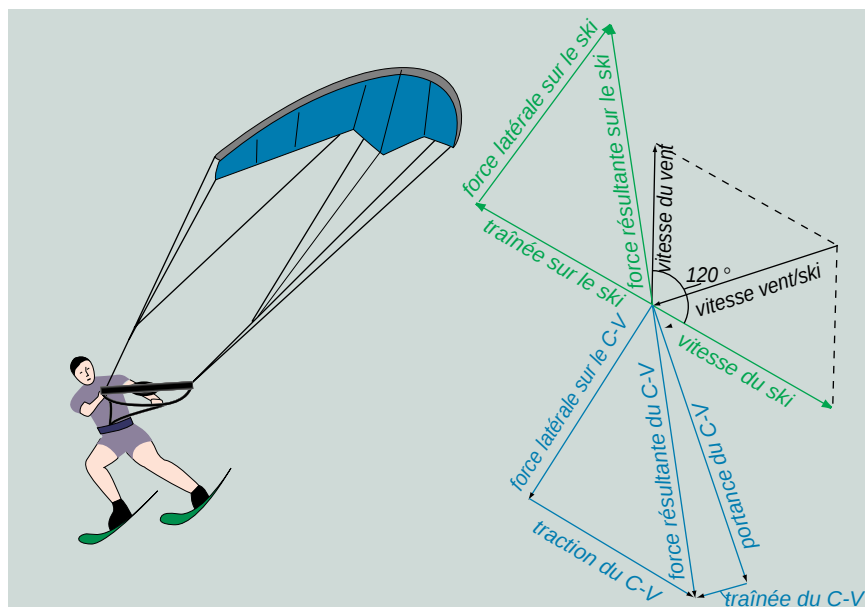
On assiste depuis peu à un retour des voiliers dans les courses de vitesse, dominées depuis 20 ans par les planches à voile. Un hydrofoil trimaran à ailes, baptisé *Yellow Pages Endeavour*, a en effet atteint 46,52 nœuds sous un vent de 18 à 20 nœuds. On pourrait penser que les ailes sont réservées à des prototypes de compétition, et que la voile traditionnelle restera encore, et pour longtemps, la seule praticable et sans danger. Je m'inscris en faux contre cette allégation, et je vais essayer de vous convaincre de la justesse de ma vision.

Naviguer comme un avion

L'un des membres les plus éminents de l'*Amateur Yacht Research Society*, John Walker, construisit, il y a plus d'un quart de siècle, un navire équipé de quatre ailes. Une vingtaine d'années de recherches plus tard, il construisit le prototype plus élaboré, équipé de deux ailes, une sorte de gréement biplan. Ce navire traversa l'Atlantique dans les deux sens et se sortit sans dommage d'un ouragan. Un ordinateur règle l'orientation d'un aileron derrière les deux ailes, le vent fait le reste. La photographie 7d est celle de la toute dernière et plus belle création du spécialiste Walker ; à l'instar des avions, celle-ci a aujourd'hui évolué vers une configuration monoplane. L'aile plus petite, en arrière, est ici encore la dérive, dont l'orientation ajuste la direction du vent à la direction

de course souhaitée ; et là aussi cette orientation est déterminée par un ordinateur alimenté par des panneaux solaires recevant leur énergie du soleil, comme le vent. Ces panneaux solaires sont visibles à l'avant de l'aile principale sur la photographie prise d'avion. Le problème de la symétrie a été résolu à l'aide d'un volet mobile situé sur le bord d'attaque, semblable à ceux que vous voyez sortir des ailes d'un avion de ligne juste avant l'atterrissage. Ce volet peut être orienté d'un côté ou de l'autre de l'aile et engendre un énorme accroissement de poussée.

Toute la partie «avion» est libre de pivoter sur un support clairement visible, et le petit moteur qui fixe l'angle de la dérive est lui aussi alimenté par des panneaux solaires. Bien entendu, il y a un système de secours, lui-même relayable par un contrôle manuel en cas de besoin. Tout est contrôlé par un microprocesseur. Il y a un levier pour enclencher les mouvements avant et arrière, situé à gauche du volant, dans un cockpit qui ressemble désormais à celui d'un avion. Comme tout multicoque qui se respecte, lorsqu'il est face au vent, il navigue lui aussi à la verticale, et non penché sur le côté. Sa version monoplane est construite en série à Plymouth, en Grande-Bretagne. Ces ailes n'ont pas besoin d'être affalées à l'accostage ; libres de pivoter sur elles-mêmes et de s'aligner au vent, elles présentent moins de fardage que le mât et le gréement nus d'un voilier classique, et ne cliquettent pas lorsque le vent souffle. En outre, elles se satisfont des



6. LE DISPOSITIF KITESKI : la force d'un vent de 72 km/h permet une vitesse de 90 km/h.