

Harold Goderniaux




Editions www.Waterstart.be

Théorie voile à l'attention du Moniteur*: *Physique appliquée du dériveur*

***attention: ceci est un manuel de voile privé qui n'est pas reconnu par l'ADEPS ou la LFYB.
La mention « Moniteur » suggère que cette publication est destinée à l'enseignant, quel que soit son
niveau (1, 2 ou 3).**

Merci à Gil Willemot et Yvonne Verbist pour leurs judicieuses recommandations de lecture, à Bertrand Chéret pour son écoute à mes questions tortueuses, à Philippe Deplechin pour m'avoir remis sur le droit chemin et pour sa précieuse relecture, à Sébastien Detry et Thomas Wuilbaut pour leurs conseils de spécialistes, à Frédéric Mermod du club de voile de l'école polytechnique fédérale de Lausanne qui a poncé les dernières imperfections en date.

Photo de couverture : Harold Goderniaux (Championnat du Monde d'Europe Master 1999 – Pieter Van Laer à la barre)

© Editions Waterstart, Belgique, 2003

© www.waterstart.be, Belgique, 2003

Internet : <http://www.waterstart.be>

Auteur : Harold Goderniaux - harold.goderniaux@waterstart.be - N'hésitez pas à m'adresser vos remarques et commentaires

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. Les ouvrages édités en ligne par Waterstart sont le fruit d'un travail d'auteur et protégés par les droits qui lui sont reconnus.

Seules sont autorisées, d'une part, les reproductions à l'usage strictement privé et non destinées à une utilisation collective et, d'autre part, les courtes citations justifiées par le caractère scientifique ou d'information de l'œuvre dans laquelle elles sont incorporées. L'annotation se fera de la manière suivante: Goderniaux, H., *Physique appliquée du dériveur*, Éditions Waterstart, 2003 - www.waterstart.be

Si le manuel est imprimé ou photocopié, on veillera à ce que soit indiqué clairement le nom de l'auteur et la source (le site Internet des éditions Waterstart).

A l'heure où nous écrivons ces lignes, les manuels du brevet A véhiculent des notions simplifiées, parfois fausses, et aussi dépassées. Des approximations et des erreurs qui auraient dû être corrigées au fil des ans, des stages et des formations. Mais force est de constater que de nombreux moniteurs de voile s'appuient encore aujourd'hui sur des concepts caducs et, ce, quel que soit leur niveau. J'ai pu le vérifier durant sept étés passés à donner cours dans les centres Adeps et les écoles de voile: il existe de nombreux cadres en voile qui n'ont pas de bagage théorique sérieux et, qui plus est, de mauvaise facture scientifique. A qui la faute? En partie la leur! Manque de remise en question, manque de dialogue, manque d'intérêt pour la théorie et un indubitable réflexe à se tourner vers une seule et désuète bibliographie. En grande partie la nôtre aussi, nous qui savons (même peu) et ne communiquons rien. Car le moniteur de voile ne semble avaler que matière ancestrale préalablement mâchée par ses 'pères'.

Enfonçons une autre porte: Faut-il réécrire le brevet A, en bannir les erreurs et poser des nouvelles bases solides (comme on nous l'enseigne le premier jour de notre formation)? Faut-il au contraire accepter certains flous pour faciliter la compréhension des jeunes ? Il est peut-être intéressant que le débat s'ouvre.

Quoi qu'il en soit, toutes les notions qui suivent dans ce manuel consacré à la physique appliquée du dériveur sont les « axiomes » du monde de la voile. Nous allons revoir les grandes théories du brevet A. Ce manuel constitue une assise satisfaisante quant aux théories aérodynamiques et hydrodynamiques du dériveur. Il repose notamment sur les dernières recherches scientifiques publiées dans le domaine. Il remet donc en cause quelques grands principes véhiculés jusqu'alors, corrigés par les études récentes en souffleries ou en navigation. En parlant scientifiques, je tiens à remercier deux ingénieurs en aéronautique, Sébastien Detry et Thomas Wuilbaut, pour leurs précieux conseils lors de la rédaction de ce manuel.

Ce manuel n'est en rien parfait, il n'en a pas la prétention. J'espère qu'il sera corrigé et amélioré ou entièrement revu au fil des mois, des années. Car la véritable sagesse est la perpétuelle remise en question. Celui qui croit savoir se trompe souvent. Celui qui avance est souvent celui qui doute. Place à la schématisation et imaginons ensemble la navigation sur dériveur.

Rédaction:

Harold Goderniaux,
*Aide-Moniteur Voile, dans le cadre de sa
formation Moniteur.*

Conseils:

Thomas Wuilbaut et Sébastien Detry,
Ingénieurs en aéronautique

AERO & HYDRODYNAMIQUE

S'il n'est pas compliqué de s'imaginer l'effet du vent dans les voiles au vent arrière ou aux allures dites « portantes », expliquer comment avancer contre le vent avec un dériveur reste d'un point de vue théorique un mystère pour le néophyte et une aventure scabreuse pour l'initié. C'est ce que ce chapitre va tenter de mettre en lumière. Entreprise insurmontable? Si l'on met au clair rapidement quelques grands principes de physique sans trop entrer dans les détails, l'aérodynamique et l'hydrodynamique du dériveur peuvent être résumées en quelques lignes et schémas de base.

I. Principes généraux

Les fluides

A l'échelle du navigateur, l'air et l'eau sont deux fluides qui présentent pratiquement les mêmes propriétés dynamiques. Nous allons donc voir qu'une voile et une dérive sont en fait deux ailes qui évoluent dans deux courants, l'un juste plus épais que l'autre. Mais aux faibles vitesses que nous connaissons dans nos sports nautiques, les gaz (l'air en l'occurrence) ne sont pas comprimés et donc ne subissent pas de variation de masse volumique. Cette considération faite nous permet d'analyser parallèlement les mouvements dans les gaz et les liquides qui sont, par définition, incompressibles.

Nous pouvons donc retenir que ***ce qui est vrai dans l'air pour la voile l'est aussi dans l'eau pour la dérive***¹.

Qu'on parle d'air ou d'eau, il est toujours question de fluide. C'est-à-dire un ensemble de particules qui ne sont pas liées entre elles de façon permanente, contrairement à ce qui se passe à l'intérieur d'un solide. Cette instabilité fait que les particules des fluides roulent les unes sur les autres.

¹ Bernot, J-Y., cité dans Chéret, B., *Les Voiles: comprendre, régler, optimiser*, Editions Gallimard, 2000, p.18.

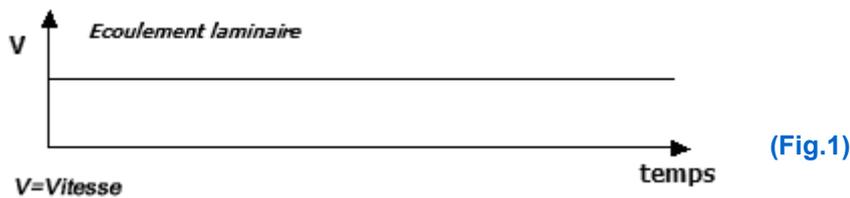
Mais il existe entre les particules de la plupart des fluides (eau et gaz) des forces de cohésion internes qui lui donnent sa viscosité.

- Plus ces forces seront grandes, plus le liquide sera visqueux. La **viscosité est la résistance interne ou le frottement qui s'oppose au mouvement d'un objet immergé dans le liquide**².
- Il en va de même pour les gaz. Cependant, c'est dans les forces que cette différence de viscosité entre les liquides et les gaz se marque le plus. La viscosité de l'eau étant supérieure à celle de l'air, les forces qui s'appliquent sur la dérive sont supérieures par unité de surface à celles qui s'appliquent sur la voile. C'est pourquoi, pour avoir deux forces d'intensité équivalente, la surface de la voile doit mesurer 800 fois la surface de la dérive comme l'explique Jean-Yves Bernot³.

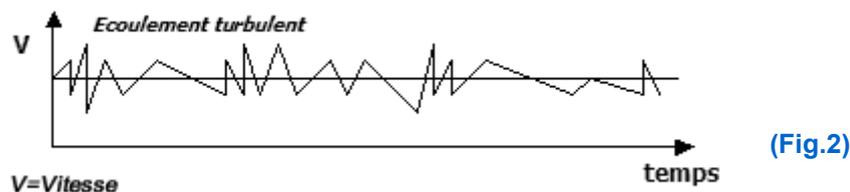
Les écoulements

Lorsqu'un fluide est en mouvement, l'écoulement des particules peut être de différents types. La physique en distingue deux: l'écoulement laminaire et l'écoulement turbulent.

- Si les particules du fluide suivent un itinéraire dans le sens de l'écoulement et qu'*en tout point de l'espace le liquide a la même vitesse (V.) à tout instant*⁴, on dira que l'écoulement est **laminaire (fig.1)**.



- Lorsque le fluide en mouvement, rencontre une discontinuité ou un obstacle, sa vitesse est perturbée et le courant est dit **turbulent (fig.2)**. C'est le cas de l'écoulement autour de voiles mal réglées ou lors du vent arrière. Attention, turbulent ne veut pas dire nécessairement apparition de tourbillons. Il peut y avoir turbulence dans un écoulement linéaire.



² Hecht, E., Physique, De Boek Université, Paris, 1999, p.394.

³ Bernot, J-Y., *op. cit.*, p.18.

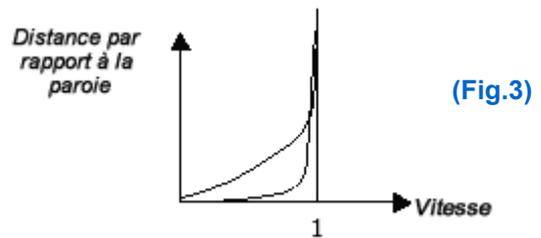
⁴ Hecht, E., *op. cit.*, p.415.

Puisque, comme énoncé en début de chapitre, notre attention va se tourner sur l'explication de la remontée au vent, tout ce que nous allons voir dans ce qui va suivre procèdera de l'écoulement laminaire.

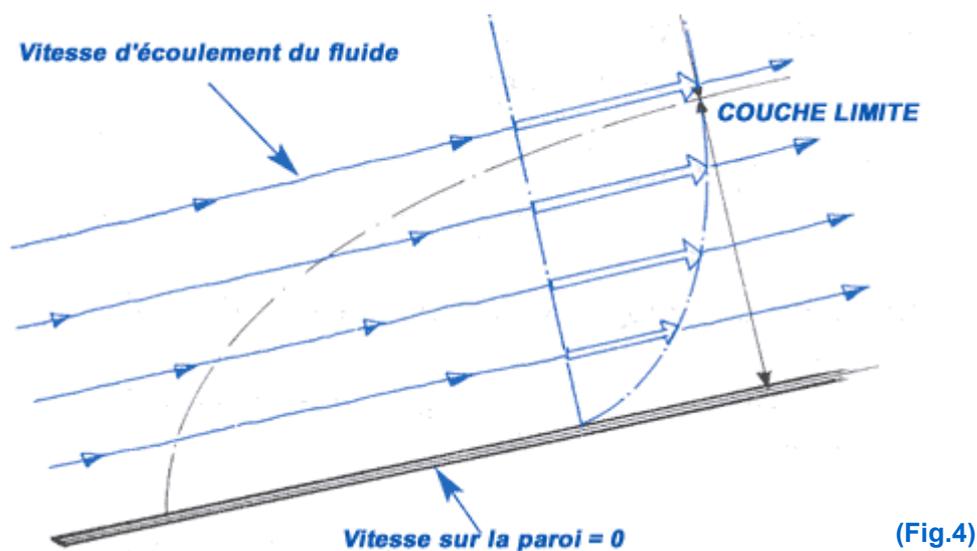
La couche limite

Présentons maintenant une aile (voile, dérive...) à un courant. A y regarder de plus près, tout se passe comme si cette aile était confinée dans un cocon de molécules plus ou moins au repos. Comme nous l'avons vu précédemment, en raison des forces de cohésion, les molécules au contact adhèrent à la surface de la paroi. C'est ce qui explique qu'on a l'occasion d'apercevoir des gouttes d'eau collées aux hublots des avions se déplaçant pourtant très vite, ou plus fréquemment sur le pare-brise d'une voiture. Ces particules adhérant aux parois freinent aussi les particules voisines. *Ce processus se répète jusqu'à ce que, arrivées à une certaine hauteur, les particules retrouvent leur vitesse originelle⁵*, autrement dit la vitesse du fluide (de l'air, pour l'exemple de l'avion) ambiant.

Plus nous nous éloignons de la surface de l'avion, plus les molécules d'air vont être entraînées par l'écoulement de l'air autour de l'appareil. *La vitesse du fluide augmente alors de zéro sur la paroi jusqu'à la vitesse d'écoulement libre au sein du fluide⁶* (fig.3).



La **couche limite** est cette enveloppe mince autour d'un corps plongé dans un fluide où les particules sont ralenties (fig.4). C'est à l'intérieur de cette couche limite que vont se trouver les principales résistances à l'avancement telle que la traînée.



⁵ Gombert, P., Aéro-hydrodynamique d'un voilier, Ecole nationale de voile Beg-Rohu, 1988, p.19.

⁶ Hecht, E., *op. cit.*, p.416.

La traînée

Lorsqu'un fluide est en mouvement, la viscosité (cette solidarité entre les molécules) engendre le phénomène suivant; si une molécule de ce fluide freine, elle freine ses voisines et si elle accélère, elle accélère également les molécules dans son entourage. Cette solidarité interne est la source des forces de friction qui peuvent ralentir ou entraîner les particules entre elles.

Si nous passons notre index dans le filet d'eau d'un robinet, nous constatons que le liquide coule tranquillement de part et d'autre de notre doigt et ce jusqu'à ce que l'écoulement devienne perturbé. Le fluide passe d'un écoulement laminaire à un écoulement turbulent. Cette séparation s'explique par un épaississement de la couche limite et un décollement du fluide de la surface du solide. Cela provient des forces de friction rencontrées à l'intérieur de la couche limite. Apparaît alors une force de résistance que l'on appelle **la traînée**. Plus la largeur du sillage sera grande (dans l'exemple, la largeur du doigt), plus la traînée sera importante.

On appelle **traînée** cette *force de résistance à l'avancement (...)* Elle cherche aussi à entraîner les corps dans la direction de l'écoulement général⁷.

Equation de continuité

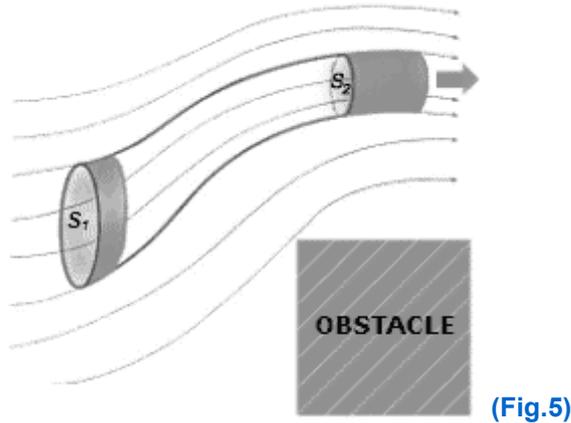
Prenons un fluide qui rencontre un obstacle. La surface présentée au fluide est donc rétrécie (**fig.5**). Ce phénomène revient à considérer un tuyau de section variable, plus large à son début et plus étroit à son autre extrémité.

Comme nous l'avons vu au début de ce chapitre, nous supposons que l'air et l'eau sont deux fluides incompressibles aux vitesses que nous connaissons en navigation.

L'équation de continuité dit que, durant le même intervalle de temps, la distance parcourue par les particules de fluide sera plus grande dans la deuxième section que dans la première. La vitesse du fluide est donc plus élevée en bout de tuyaux, comme nous l'explique l'équation de continuité.

Exemple: si je pince l'extrémité d'un tuyau d'arrosage, la vitesse du jet est augmentée puisque je diminue la section du tuyau.

⁷ Chéret, B., *Les Voiles: comprendre, régler, optimiser*, Editions Gallimard, 2000, p.24.



S_1 = La surface traversée par le fluide au point 1.
 S_2 = La surface traversée par le fluide au point 2.
 V_1 = La vitesse du fluide au point 1.
 V_2 = La vitesse du fluide au point 2.
 K = constante

Equation de continuité:

$$S_1 * V_1 = S_2 * V_2$$

En fin de tuyau, pour garder l'égalité, si la section diminue, alors la vitesse doit augmenter:

$$S_2 * V_2 \nearrow$$

$S * V = K$ ce qui revient à dire que $S_1 * V_1 = S_2 * V_2$ (dans le même intervalle de temps)

Equation de Bernoulli

Nous venons d'expliquer, avec l'équation de continuité, la variation de vitesse. Considérons un fluide en mouvement tel que l'air. Lorsqu'il y a du vent, on admet que ce fluide est mis sous pression et, donc, contient de l'énergie car un travail a été nécessaire pour le mettre en mouvement. De même qu'une canette de soda secouée libère un fluide plein d'énergie cinétique une fois ouverte. On peut donc conclure qu'un fluide dont la pression varie subit une variation d'énergie⁸.

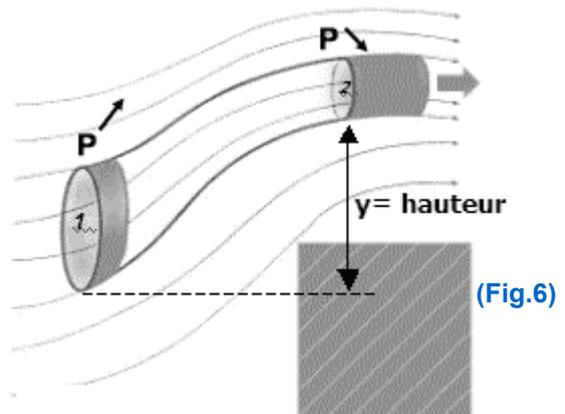
Les travaux de Bernoulli vont conduire à une équation mettant en évidence la loi fondamentale de la dynamique des fluides, qui n'est autre que la loi de la conservation de l'énergie. Soit **la somme de la pression et des énergies (cinétique et potentielle) d'un fluide est une constante.**

soit l'écriture simplifiée de l'équation simplifiée de Bernoulli:

$$P + E_c + E_p = K$$

D'où on peut conclure sur le schéma (fig.6), que nous avons déjà lors de la mise en évidence de l'équation de continuité, que: $P_1 + E_{c1} + E_{p1} = P_2 + E_{c2} + E_{p2}$

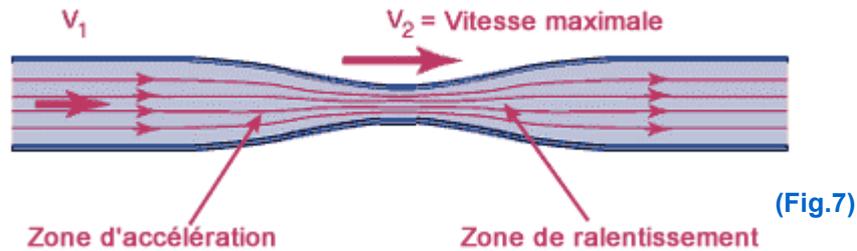
Comme la vitesse est plus grande dans la section 2 ($E_{c1} < E_{c2}$) et que la hauteur (y) est supérieure toujours dans la deuxième section ($E_{p1} < E_{p2}$), il en résulte que **la pression est plus importante dans la section 1 que dans la section 2** ($P_1 > P_2$) pour satisfaire l'équation de Bernoulli.



⁸ Hecht, E., op. cit, p.429.

Effet Venturi

Venturi n'a pas inventé la poudre. Il a juste repris le travail de Bernoulli. Alors que Bernoulli a utilisé un système à déplacement vertical qui fait intervenir une variation d'énergie potentielle, Venturi adopte un système linéaire (fig.7). Il constate une chute de pression dans la partie étroite. En reprenant l'équation de Bernoulli et en y remplaçant l'énergie potentielle par zéro (puisque'il n'y a plus de variation de hauteur).



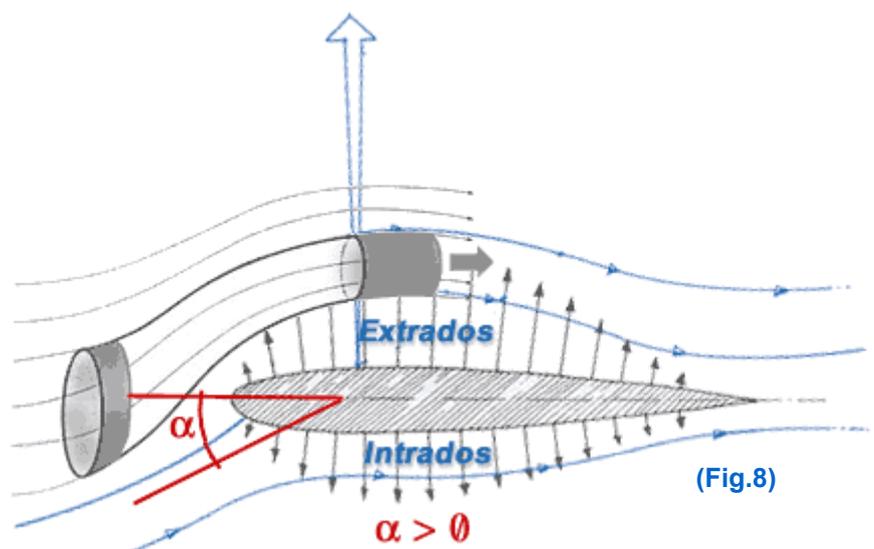
La nouvelle équation devient donc: $P_1 + E_{c1} = P_2 + E_{c2}$

Comme la vitesse (V_2) est plus grande dans la section rétrécie ($E_{c1} < E_{c2}$), il en résulte également que la pression est plus importante dans la section large que dans la section étroite ($P_1 > P_2$).

En conclusion générale, on peut déduire que lors d'un rétrécissement de la section où s'écoule un fluide incompressible, il s'en suit une augmentation de la vitesse et une diminution de pression.

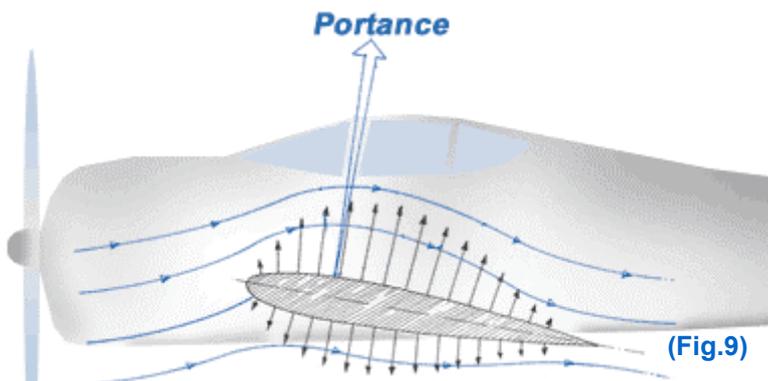
La portance

Prenons une aile, dont l'angle d'attaque du profil par rapport au flux est non nul, comme illustrée ci-contre (fig.8). L'air s'y déplace plus rapidement dans sa partie supérieure (extrados) que dans sa partie inférieure (intrados). La raison de cette accélération n'en est pas moins due à l'équation de continuité. En effet, en arrivant sur l'aile, le fluide



passant au-dessus se retrouve dans la situation d'un courant arrivant dans un tuyau rétréci. A cette augmentation de vitesse se joint une diminution de la pression. La différence de pression entre

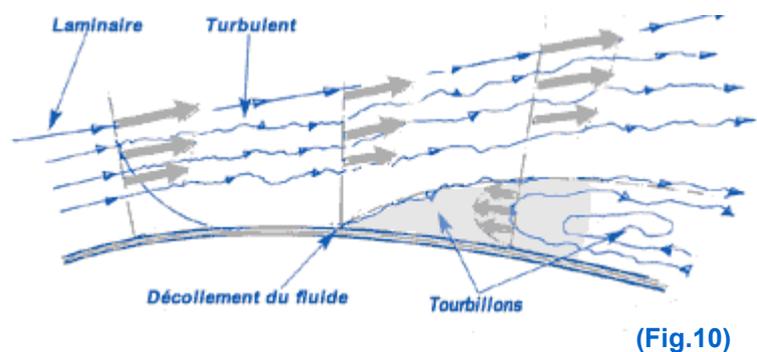
le dessus de l'aile (extrados, donc basse pression) et le dessous de l'aile, crée une force ascendante (dirigée vers le haut) appelée portance. C'est cette portance qui permet à l'avion de tenir en l'air, comme suspendu (**fig.9**).



Le décollement

C'est donc la courbure de l'aile qui permet l'apparition de la portance. Plus la courbure est importante, plus la portance est grande... jusqu'à une certaine limite: le décollement.

Le décollement peut être assimilé à un dérapage sur le fluide. Lorsque l'inclinaison de l'aile par rapport à l'écoulement du fluide est trop importante, les particules de ce fluide ne parviennent plus à 'lécher' la surface du profil. *Le flux décolle alors de la paroi pour rejoindre une direction proche de l'écoulement général⁹.*

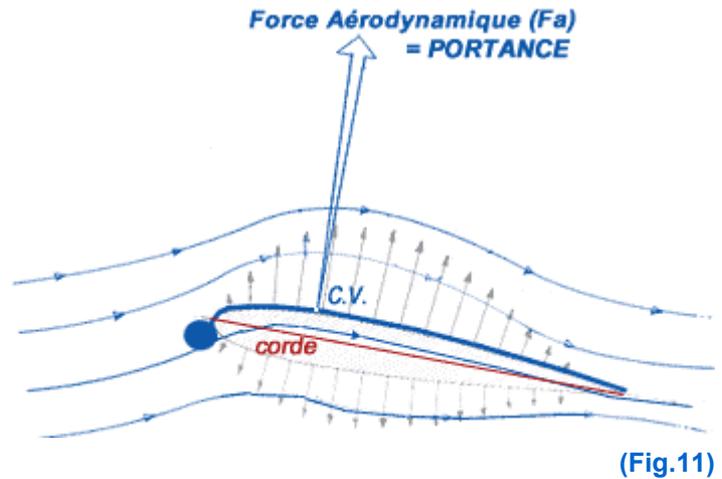


Comme nous le voyons sur le dessin (**fig.10**), l'écoulement devient plus turbulent, voire tourbillonnaire. La traînée est donc importante. La force aérodynamique en est considérablement réduite, puisqu'une partie de l'aile seulement est alors efficace. C'est notamment le cas lorsqu'une voile est sur-bordée. Nous verrons plus loin, le phénomène est identique pour un coup de barre exagéré.

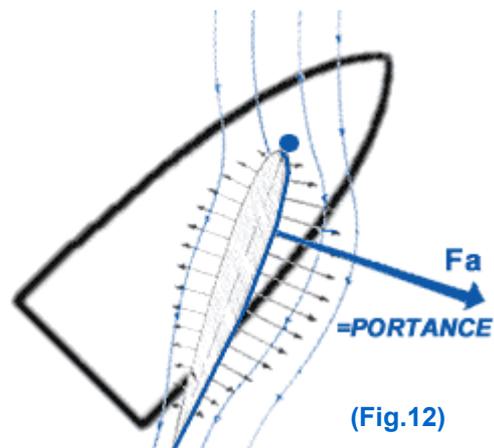
⁹ Chéret, B., *Les Voiles: comprendre, régler, optimiser*, Editions Gallimard, 2000, p.30.

II. Vue aérodynamique du voilier

Tout comme nous venons de le voir avec l'avion, la voile d'un dériveur est une aile «creuse» pourvue d'un intrados (côté concave où l'on observe une surpression) et d'un extrados (côté convexe où l'on observe une dépression). Sa coupe est donc primordiale pour lui assurer ce profil (**fig.11**). La force aérodynamique (ou portance) est la résultante des forces qui s'exercent en tout point de la voile. Le point d'application de cette force aérodynamique 'totale' est le centre vélique (**C.V.**) de la voile. La résultante s'exerce perpendiculairement à la corde du profil.



Si je dessine mon voilier et que j'y place ma voile (**fig.12**), je peux enfin discerner cette force aérodynamique qui est dirigée cette fois vers l'avant du bateau. On parlera de force aérodynamique et plus de portance comme c'était le cas avec mon aile d'avion puisque la force de la voile n'est plus ascensionnelle. Notons que, pour ne pas trop compliquer les schémas, nous avons écarté volontairement certains facteurs secondaires tels que le fardage ou la forme hydrodynamique de la coque. Ces éléments ont leur influence, mais elle est secondaire par rapport au travail de la voile.



Le phénomène de portance ascensionnelle réapparaît en planche à voile, lorsque le planchiste incline son mât vers lui. La force aérodynamique est alors dirigée vers le haut et permet ainsi au flotteur de sortir de l'eau.

Remarque : Plus ma voile est plate, moins ma dépression à l'extrados sera forte et ma force aérodynamique importante. Plus je creuse ma voile, plus je gagnerai en puissance. Mais pas de trop, car je dois garder une forme aérodynamique suffisante pour éviter le décollement.

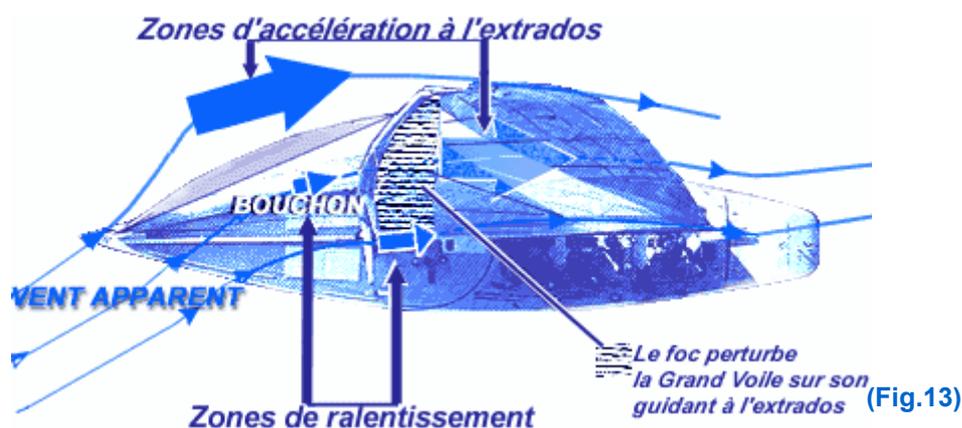
Le cas du sloop

Deux voiles valent mieux qu'une. Mais pourquoi ? Plus de surface vélique, donc plus de force ! C'est un fait mais il n'est pas le seul. La position du foc par rapport à la grand voile sur les voiliers a aussi un autre objectif : améliorer l'écoulement général du vent dans les voiles.

Vous a-t-on déjà parlé de «*l'effet de cheminée*¹⁰» ou «*l'espèce de cheminée*¹¹» ? Ce principe qui voudrait que le foc travaille comme un catalyseur de vent, où l'air serait accéléré entre lui et la grand voile pour augmenter encore la vitesse du fluide à l'extrados et ainsi portance ? Si oui, mieux vaut tout oublier ! Cette théorie est erronée ! L'air passant entre la grand voile et le foc est même ralenti, si bien que parfois nous pouvons observer le guindant de la grand voile se 'dégonfler'.

Que se passe-t-il alors dans les faits ? Ce serait long à détailler, mais si le phénomène vous intéresse, je vous conseille de vous référer au chapitre 5 du livre de Bertrand Chéret¹². Nous allons simplifier, car tout dépend de l'allure à laquelle nous naviguons. Au près, le ralentissement de l'écoulement entre le foc et le mât crée un bouchon. *Au moindre empêchement, nos petites molécules, qui répugnent à l'effort, s'échappent et débordent à l'extérieur du couloir*¹³. La dépression à l'extrados du foc augmente grâce à ce débordement. Un phénomène qui est encore accentué par la présence de la grand voile derrière le foc. Puisque la grand voile connaît aussi une dépression à l'extrados, les particules d'air qui s'échappent du foc vont être à nouveau accélérées par cette succion de la grand voile.

Il faut donc parler d'amélioration du rendement du foc grâce à la présence de la grand voile et non l'inverse. La grand voile est même pénalisée dans son rendement par la présence du foc qui crée un bouchon au niveau de son guindant (**fig.13**). Toutefois, le rendement général des deux voiles est meilleur que si ce même bateau naviguait en catboat (une seule voile de surface égale à la somme des surfaces des deux autres voiles).



¹⁰ Foncoux, J., *Éléments abrégés de théorie voile*, sources ADEPS, p.20.

¹¹ Curry, M., *L'aérodynamique de la voile*, Editions Chiron, 1994, p.79.

¹² Chéret, B., *Les Voiles: comprendre, régler, optimiser*, Editions Gallimard, 2000, p.96-117.

¹³ Chéret, B., *Les Voiles: comprendre, régler, optimiser*, Editions Gallimard, 2000, p.98.

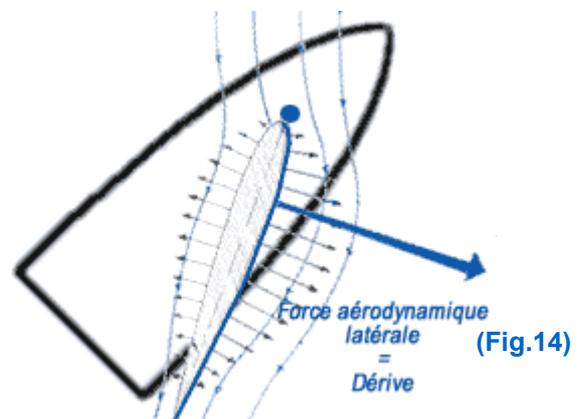
III. Vue hydrodynamique du voilier

Tout ce que nous venons de voir pour la voile vaut également pour les ailes sous-marines. Nombreux sont ceux d'entre vous qui ont déjà remarqué que la forme de la dérive, du safran ou de la coque n'est pas laissée au hasard. Tout est profilé sur le modèle de l'aile.

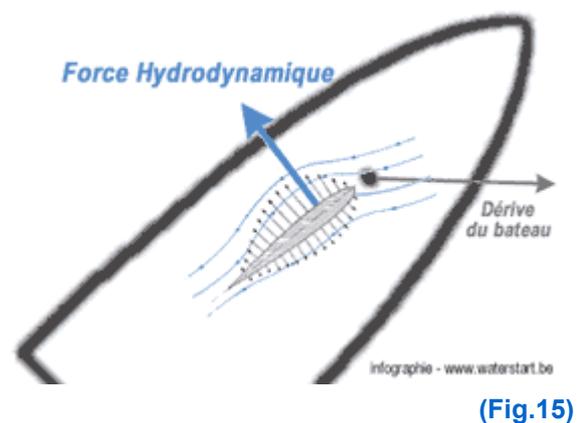
Entre l'air et l'eau, seule la densité du fluide change. C'est pour cela qu'un dériveur possède une dérive proportionnellement plus petite que la voile, car les forces qui s'y appliquent sous l'eau sont plus importantes que dans l'air (*un rapport de 800 fois la surface et 28 fois la longueur, comme nous le signale Bernot¹⁴*).

La dérive est une anti-dérive

Vent arrière excepté, la force aérodynamique d'un bateau l'entraîne, non pas dans le sens de la marche, mais en diagonale par rapport au cap désiré. Le bateau avance en crabe dans la direction de sa force aérodynamique. On dit alors qu'il dérive (**fig.14**). Pour contrer cette glissade latérale, en plus d'avoir une coque polarisée, une dérive a été installée.



La dérive fonctionne comme une aile, mais une aile sous-marine cette fois. La dérive du voilier (entendez: 'son déplacement en crabe') crée un écoulement de l'eau autour de ses appendices sous-marins. Sa dérive (entendez cette fois: 'son aileron mobile'), soumise à ce courant, voit apparaître à son extrados une force hydrodynamique (**Fig.15**). C'est cette force hydrodynamique qui permet au bateau de moins dériver. Elle est parfois appelée 'force anti-dérive'.



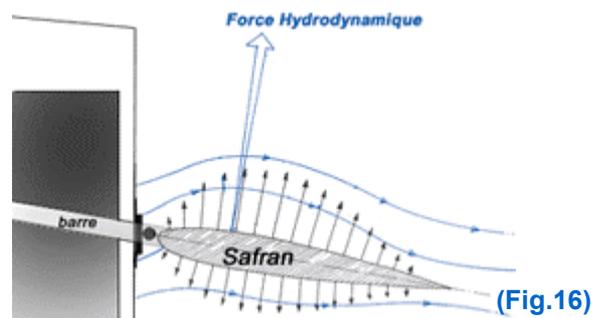
Si mon dériveur n'avance pas, ma dérive n'a aucun effet. C'est le problème rencontré dans le démarrage ou la relance de mon dériveur lors du virement.

¹⁴ Bernot, J-Y., *op. cit.*, p.18.

Le safran, encore une aile !

« *Ca ne sert à rien de pousser sa barre à fond pour tourner plus vite* » ! Cette phrase, nous l'avons souvent entendue mais la raison est rarement explicitée par les moniteurs.

Etant également un appendice hydrodynamique du voilier travaillant dans le plan anti-dérive, le safran travaille comme une aile. Le jeu de la barre oriente le safran dans le flux d'eau qu'il fend. En présentant une certaine inclinaison, il crée une accélération de ce flux à son extrados et donc une dépression. Une force hydrodynamique apparaît, entraînant l'arrière du dériveur et le faisant ainsi pivoter (**fig.16**).



Exagérer le 'pousser' ou 'tirer' de sa barre conduit au décollement des particules de fluide du safran, soit une diminution de la force hydrodynamique et une augmentation de la traînée (frein). Le bateau tourne alors moins bien et est fortement ralenti.

Toutefois, comme nous l'avons vu à la page 9, l'angle d'attaque d'un profil doit être non nul ($\alpha > 0$). Il est donc important de noter qu'au fur et à mesure que le dériveur tourne, l'axe du flux (eau) rejoint l'axe du profil de mon safran. Cela veut dire que le barreur doit progressivement augmenter l'angle de barre tout au long du virement pour assurer l'angle d'attaque et donc la portance du safran.

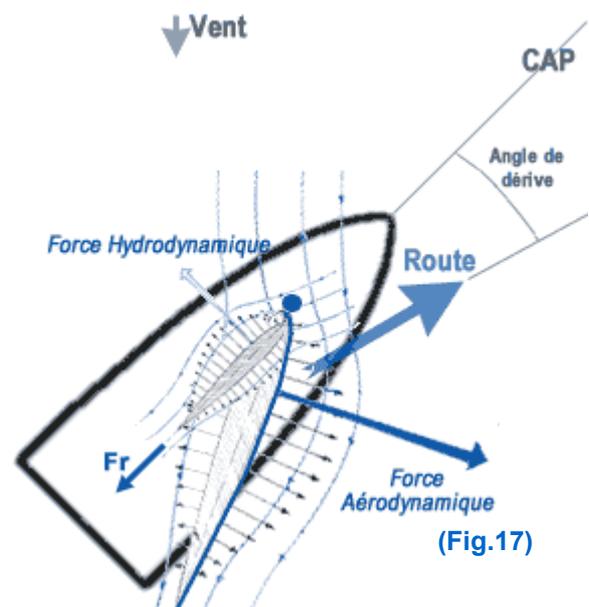
IV. Théorie de l'avancement

Pour répondre à la question originelle «comment mon dériveur arrive à avancer contre le vent», il suffit de rassembler les forces aérodynamique et hydrodynamique sur un même schéma.

Prenons un dériveur naviguant au près (**fig.17**). Sa voile bordée va faire naître une force aérodynamique qui va tout d'abord le faire dériver. Une fois que le bateau a atteint un peu de vitesse, c'est la dérive qui va accrocher, opposant ainsi à la force aérodynamique une force hydrodynamique (anti-dérive) qui limitera la dérive du bateau.

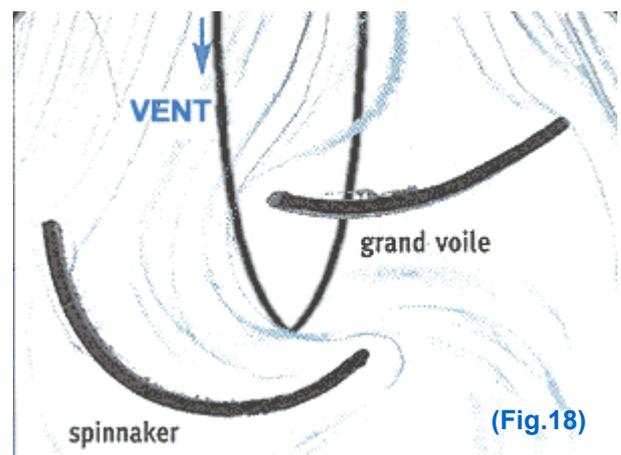
La résultante des deux forces, nous indique la route du bateau. Cette route est différente du cap suivi. Il y a toujours, excepté pour l'allure du vent arrière, un angle de dérive à corriger.

Reste qu'en avançant, le volume de la coque immergée freine également le dériveur dans sa progression. Cette force, opposée à l'avancé du bateau, est la **force de résistance de carène (Fr)**.



Remarque: Le vent arrière, c'est bateau!

Il nous faut encore voir rapidement une allure où les données aérodynamiques et l'hydrodynamiques ne sont plus les mêmes. Au vent arrière, nous n'avons plus la possibilité d'offrir à nos voiles un écoulement laminaire qui jouerait le jeu de la portance. Les surpressions sont plus importantes que les dépressions. Côté voile, ce qui compte en priorité, c'est la surface offerte au vent. Foc en ciseaux, envoi du spi... tout est bon pour tenter d'augmenter la rentabilité de cette allure très lente (**fig.18**).



Au vent arrière, le bateau ne fait que dériver dans la bonne direction. Vu qu'il n'y a plus de déviation latérale dans la marche du bateau, la dérive est inutile. Pour éviter le frein hydrodynamique de sa présence (traînée), on la relève.

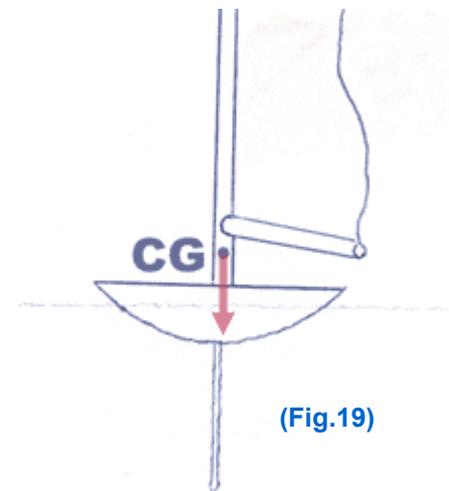
LES GRANDS EQUILIBRES

I. Equilibre statique

Le centre de gravité

Le dériveur, comme tout objet entrant dans le champ d'attraction d'une planète, possède un centre de gravité (**C.G.**), point d'application de la force de Newton: La pesanteur (**fig.19**). Cette force s'exerce verticalement de haut en bas.

En prenant le dériveur isolément (sans son équipage), son centre de gravité est invariable quelle que soit la position du bateau. Par contre, une fois son équipage à bord, ce centre de gravité peut être modifié en fonction de la position du (des) navigateur(s). Il peut aussi varier en fonction de l'eau qui est entrée dans le bateau durant la navigation.

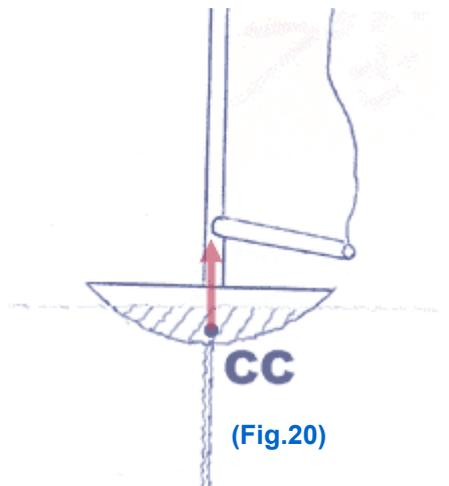


(Fig.19)

Le centre de carène

Le centre de carène (**C.C.**) d'un dériveur est le centre de gravité de sa partie immergée (**fig.20**). Au centre de carène s'applique la poussée d'Archimède¹⁵. Elle s'exerce verticalement de bas en haut.

Le centre de carène varie selon l'inclinaison du voilier sur l'eau, sa gîte, son assiette longitudinale ou son enfoncement dans celle-ci.

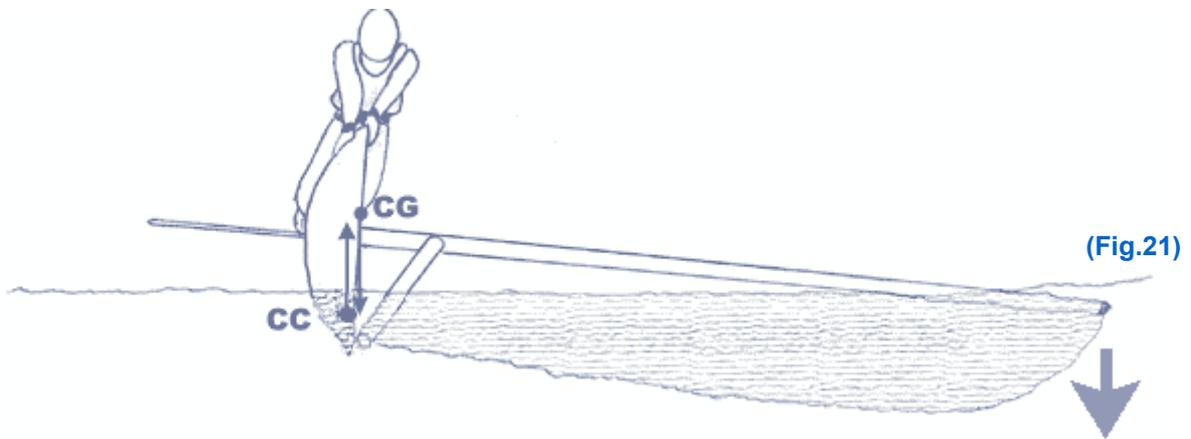


(Fig.20)

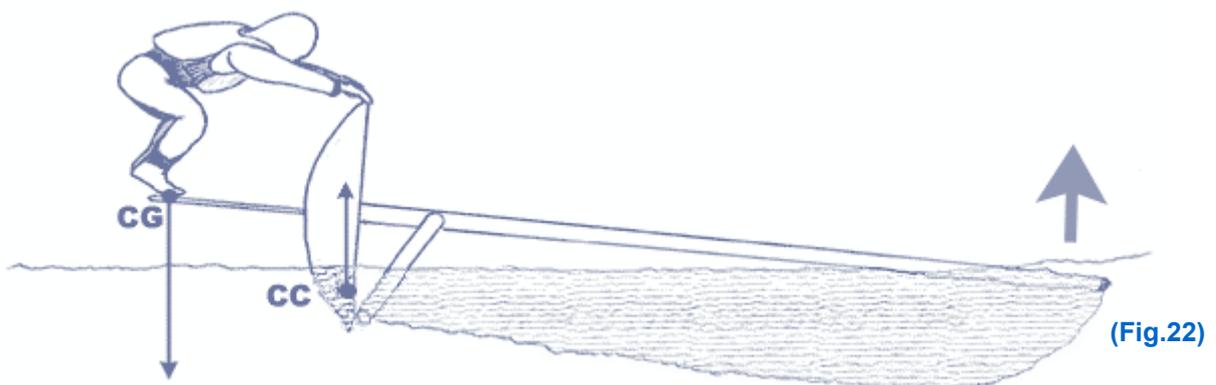
¹⁵ Poussée d'Archimède: Un fluide exerce sur un solide immergé une force verticale ascendante s'appliquant au centre de gravité du fluide déplacé (centre de carène). Son intensité est égale au poids du volume du fluide déplacé.

Faire la cloche

Dans la stabilité latérale du dériveur, la pesanteur et la poussée d'Archimède forment un couple de forces. Un bateau chaviré, comme décrit à la **figure 21** risque de faire la cloche à cause de ce couple de forces appelé ici **couple de chavirage**.



Si je me mets sur la dérive de mon bateau (**fig.22**), je déplace mon centre de gravité et la conjonction des forces forme cette fois un **couple de redressement**.



II. Equilibre dynamique

A. Le centre vélique

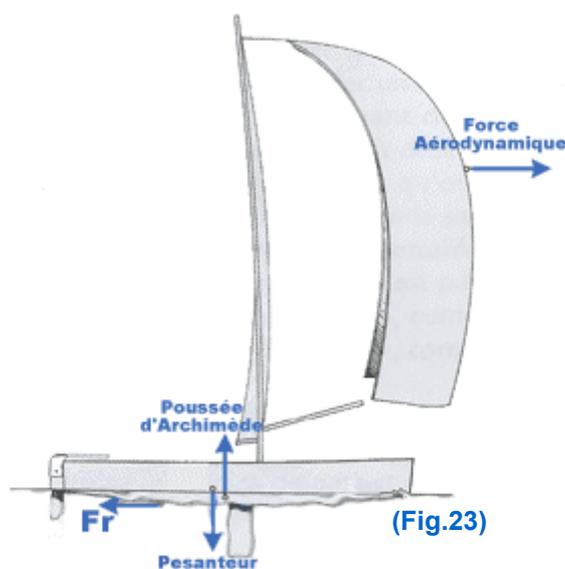
Comme nous l'avons évoqué dans le paragraphe consacré à l'aérodynamique, le point d'application de la force aérodynamique est le centre vélique.

Attention, le centre de poussée n'a rien à voir avec le centre géométrique de la voile (intersection des médianes pour une voile triangulaire) parfois évoqué dans certains livres. Le centre vélique où

s'applique la résultante des forces aérodynamiques sur la voile varie en fonction du creux de la voile, son vrillage, de l'écoulement...

B. Les forces à bord

Outre la pesanteur, la poussée d'Archimède et les forces aéro et hydrodynamique, nous avons évoqué la résistance à l'avancement (traînée) engendrée par la carène. Cette dernière force joue un rôle important dans l'équilibre du bateau, comme nous allons le voir. Voici, pour vous aider à bien vous représenter ces forces, une vue latérale de mon dériveur (**fig.23**).



C. Mou ou ardent

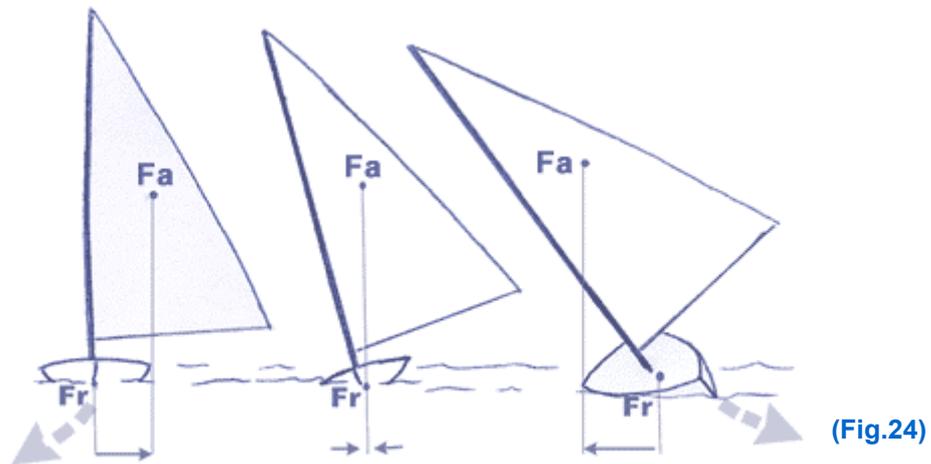
On dira qu'un dériveur est **ardent** lorsque, sans action du barreur, une tendance au lof lui sera remarquée.

Inversement, on dira d'un bateau qu'il est **mou** lorsqu'il aura tendance à partir de lui-même à l'abattée.

Remarque: Quel réglage choisir pour le bateau de ses stagiaires ? Tout dépend de leur niveau et des conditions météorologiques. Un bateau ardent peut être le choix de la sécurité, puisque au moindre problème à bord le bateau se mettra de lui-même face au vent. Mais ce choix peut conduire aussi à ce que les stagiaires restent bloqués face au vent à chaque virement vent devant. Dans un vent modéré et avec une surface de voile limitée, un bateau mou peut éviter ce désagrément. Une solution de facilité pour le premier jour de navigation, par exemple.

D. Equilibre au vent arrière

L'équilibre latéral au vent arrière est souvent délicat. En cause, le couple de forces créé par la force aérodynamique (F_a) et la résistance de la coque (F_r). Pour supprimer ce couple, sur les dériveurs à coque ronde, on préférera une légère contre-gîte de sorte que le point d'application de la force aérodynamique et celui de la résistance de carène s'alignent et équilibrent le bateau (fig.24).



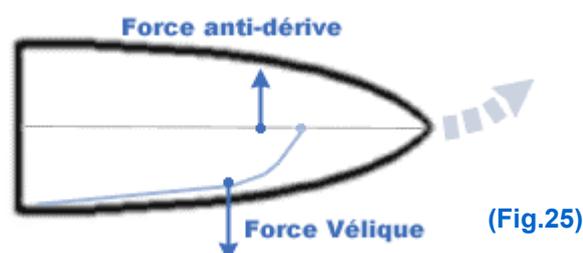
Remarque: Sur le laser, cette contre-gîte n'est pas recommandée en initiation (mais fortement recherchée en compétition). Vu que sa coque est relativement plate, l'écoulement de l'eau sur la coque sera modifié et la conduite du dériveur sera plus délicate.

E. Equilibre sous les autres allures

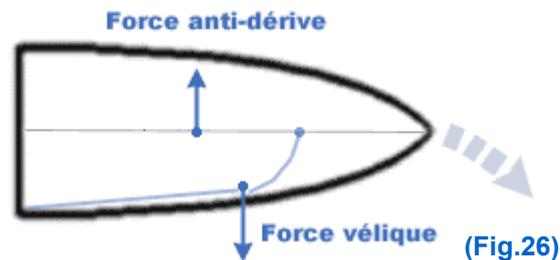
1. Bateau à plat

C'est le cas le plus simple. Supposons que la pesanteur, la poussée d'Archimède, les forces aéro et hydrodynamique ainsi que la résistance de carène s'exercent dans le même plan vertical (ce qui est rarement le cas). Nous supposons donc qu'il n'y a pas de problème d'assiette latérale.

Si le point d'application de la poussée vélique se trouve en arrière de la force anti-dérive, le voilier lofe (fig.25) car il est ardent.



Inversement, il abat (**fig.26**) si la force vélique s'exerce sur l'avant (le bateau est mou) C'est ce principe qu'utilisent entre autre les planchistes pour contrôler leur direction.



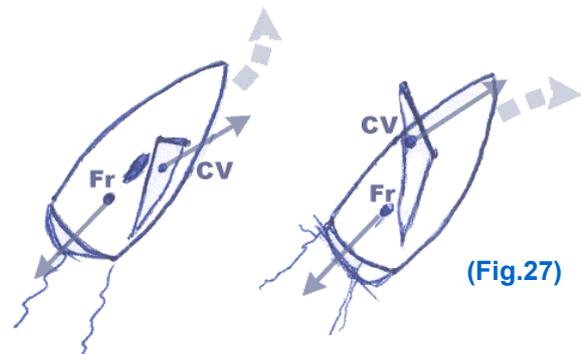
Le recul ou l'avancée du centre vélique est possible en dériveur grâce à :

- L'avancée ou le recul du mât
- Le réglage de la quête du mât
- La modification de l'assiette longitudinale du bateau (avancée ou recul de l'équipage)
- Le réglage du creux de la voile

2. Bateau gité

Avec la gîte, dans l'équilibre latéral du dériveur (**fig.27**), le couple de lof entre la force vélique et la résistance de la coque augmente (remarque: La force anti-dérive accentue aussi la gîte). Si mon bateau lofe, cette auloffée réduit l'incidence du vent sur les voiles (la force vélique) et mon bateau se remettra alors à plat de lui-même.

En revanche, la contre-gîte offre un couple qui fait abattre le dériveur. D'où l'importance de naviguer bateau plat pour éviter les corrections de cap avec la barre, ce qui freine énormément le voilier. Si par petit temps, mieux vaut un peu de gîte, c'est pour aider les voiles à se placer correctement.



F. Le creux

Le creux, autrement dit la profondeur du volume de la voile (calculé en % par rapport à la longueur du profil et de la flèche), agit directement sur le centre vélique. Nous savons déjà qu'une modification du creux va modifier l'intensité de la force aérodynamique. Mais par quel moyens puis-je modifier le creux de ma voile.

- **Le hâle bas**: Etarqué, il cintre le mât, donne moins de creux à ma voile et ferme sa chute. Largué, il ouvre la chute. Dans la survente, l'ouverture de la chute est une bonne soupape de sécurité pour éviter les départs au lof.

- **La bordure:** Etarquée, elle aplatit la voile et avance le creux. Comme elle travaille sur le bas de la voile, son étarquage fait également monter le creux.
- **Le cunningham:** Il travaille sur le guindant de la voile. Etarqué, il aplatit la voile en son milieu et avance le creux. Il facilite également l'ouverture du volet supérieur de la voile.
- **La latte forcée:** Présente sur certains dériveurs, la latte forcée permet le contrôle du creux du haut de la voile. Contrairement aux réglages précédents, l'augmentation de la tension de la latte forcée creuse la voile dans sa partie supérieure.

G. Tableau récapitulatif

Rendre son dériveur ardent	Moyens	Rendre son dériveur mou
Reculer le mât	Mât	Avancer le mât
Incliner le mât vers l'arrière	Quête	Incliner le mat vers l'avant
Augmenter la surface	Grand-Voile	Diminuer la surface
Reculer le creux		Avancer le creux
Diminuer le creux		Augmenter le creux
Diminuer la surface ¹⁶	Foc	Augmenter la surface
Augmenter le creux		Diminuer le creux
Abaisser la dérive ¹⁷	Dérive	Relever la dérive
Avancer le poids	Assiette longitudinale	Reculer les poids
Donner de la gîte	Assiette latérale	Donner de la contre-gîte

¹⁶ Ce n'est pas toujours exact. Tout dépend s'il s'agit d'un foc à recouvrement (génois) ou d'un autre.

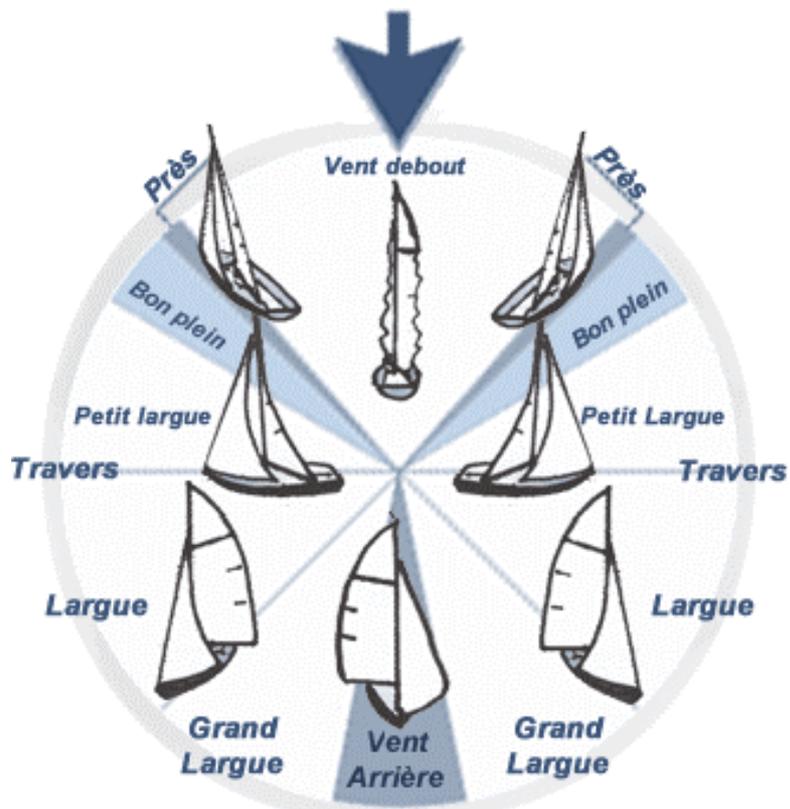
¹⁷ Ici aussi, ce n'est pas toujours exact. Tout dépend du type de dérive utilisé. A savoir une dérive sabre droite ou inclinée vers l'arrière jouera différemment sur l'avancée du centre anti-dérive. De même qu'une dérive pivotante fera évoluer ce même centre d'avant en arrière en plus de le faire monter ou descendre.

LE REGLAGE 'THEORIQUE' DES VOILES

A. Le vent et les allures

Le vent est un déplacement des particules d'air entre deux masses d'air de températures et donc de pressions différentes. Selon la direction relative du vent par rapport à l'axe longitudinal du bateau, des allures sont définies. Ces allures sont décrites sur le schéma suivant (fig.28) :

ALLURES	
Face au vent	0°
Au plus près ¹⁸	45°
Largue	90°
Grand Largue	135°
Vent arrière	180°



(Fig.28)

¹⁸ L'angle du plus près dépend du type de dériveur. Certains remontent bien mieux au vent que d'autres.

B. Rappel: L'échelle de Beaufort

L'équation complète de Bernoulli ($P + \frac{1}{2} \rho \mathbf{V}^2 + \rho gy = K$), notons-le quand même une fois, montre que la portance est proportionnelle au produit du carré de la vitesse de l'air et de la surface de l'aile. L'augmentation de la surface de l'aile ou de la vitesse du fluide va donc augmenter la portance de manière très importante, si bien qu'au regard de l'échelle de Beaufort, la force aérodynamique doublera à chaque échelon. *Elle sera par exemple multipliée par quatre en passant de force 5 à force 7*¹⁹.

Bfts	Météo	Nœuds ²⁰	Km/h	Repères	Actions
0	Calme	0 – 1	0 – 1	Les pavillons et les voiles pendent.	Pas de vent pour naviguer. Privilégier les jeux autour du dériveur, la théorie ou le matelotage.
1	Très légère brise	1 – 3	1 – 5	Les voiles choquées battent légèrement, comme le pavillon.	Peu de vent, mais il est suffisant pour travailler des petits exercices.
2	Légère brise	4 – 6	6 – 12	Les voiles et les pavillons portent complètement.	Le temps idéal pour les débutants : sensations de vitesse et sécurité.
3	Petite brise	7 – 10	13 – 20	Les bateaux prennent une bonne gîte. Les voiles sont plus difficiles à hisser.	Les bateaux se mettent à gîter. Il faut être vigilant car certains stagiaires peuvent commencer à ressentir des difficultés.
4	Joli brise	11 – 16	21 – 29	Les bateaux chavirent. On observe des vaguelettes sur le plan d'eau.	Les débutants naviguent avec une surface de toile réduite, groupés et les consignes de sécurités ont été renforcées.
5	Bonne brise	17 – 21	30 – 38	Le plan d'eau moutonne. Il n'y a pratiquement plus d'initiation sur l'eau.	Seuls les plus expérimentés s'en sortent. Les autres ont pris plusieurs ris. Les plus jeunes naviguent avec un moniteur à bord.
6	Vent frais limite	22 – 27	39 – 49	Le plan d'eau se ride d'une multitude de vagues au sommet blanc.	Moniteur à la barre, des tours en caravelle peuvent être encore envisagés. Des activités à terre sont organisées.
7	Grand frais limite	28 – 33	50 – 60	Le plan d'eau est fortement agité.	Plus personne sur l'eau. On vérifie l'amarrage des bateaux au ponton avant toute autre activité.

¹⁹ Barbanson, G. et Besson, J., *Connaître et bien mener son voilier*, Nathan, 2000, p.40.

²⁰ 1 nœud = 1 mille à l'heure, soit 1,852km/h

	limite			fortement agité.	au ponton avant toute autre activité.
8	Petit coup de vent	34 – 40	61 – 70	Le plan d'eau blanchi de plus en plus.	On vérifie l'amarrage des bateaux à terre avant toute autre activité.
9	Coup de vent	41 – 47	71 – 80	Le plan d'eau blanchi de plus en plus.	On vérifie l'amarrage des bateaux à terre avant toute autre activité.
10	Fort coup de vent	48 – 55	81 – 98	Le plan d'eau est démonté, couvert d'écume.	On évite le plus possible les activités extérieures pour prévenir toute collision avec des objets arrachés et/ou emportés par le vent.
11	Tempête	56 – 63	99 – 117	Le plan d'eau est démonté, couvert d'écume.	Restez à tout prix à l'intérieur, loin des fenêtres exposées au vent.
12	Ouragan	64 et +	118 et +	Le plan d'eau est démonté, couvert d'écume.	Clouez fenêtres et volets, éloignez-vous des vitres.

C. Le vent apparent

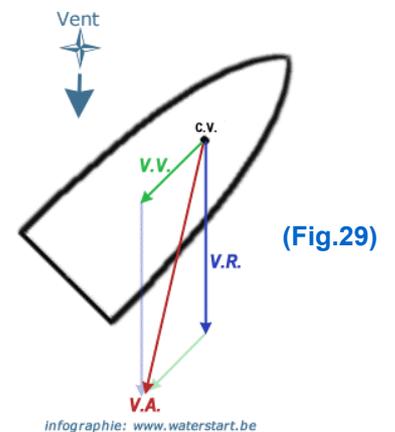
Jusqu'à présent, nous avons généralement raisonné autour de profils véliques statiques. Nous avons pris, comme 'courant' agissant sur le plan de voilure, le vent atmosphérique également appelé **vent réel (VR)**. Mais dès que le voilier se déplace, ses voiles reçoivent en plus de ce vent réel, un vent opposé à la marche et égale à l'intensité du déplacement ; le **vent de vitesse²¹ (VV)**. C'est le courant d'air que le cycliste reçoit en roulant alors que le vent atmosphérique est nul. La résultante des deux (vent réel et vent de vitesse) donne le **vent apparent (VA)**. Mais pour le navigateur, le vent apparent est le seul vent réel. Cette dissection du vent n'est intéressante que dans le cadre de ce paragraphe théorique. A oublier très vite une fois sur l'eau !

D. Le parallélogramme des forces (rappel)

Toute force est caractérisée par :

- Un point d'application ; Un sens ; Une direction ; Une intensité

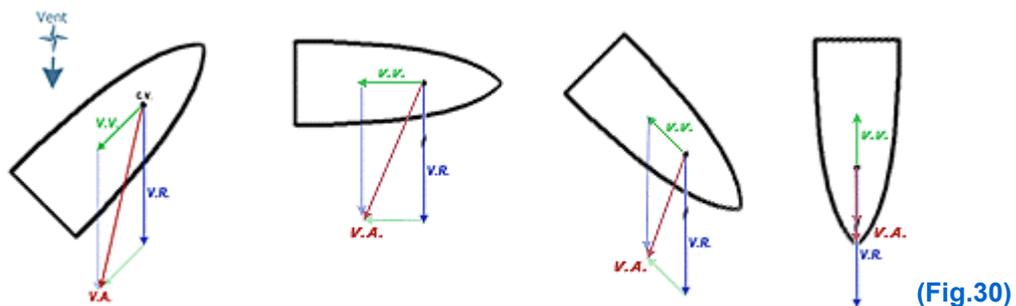
Lorsque deux forces se combinent, on peut symboliser le produit des deux par une troisième force imaginaire appelée résultante. Pour ce faire, il suffit de tracer un parallélogramme des forces (**fig.29**).



²¹ Chéret, B., *Les Voiles: comprendre, régler, optimiser*, Editions Gallimard, 2000, p.333.

E. Réglage des voiles

Le vent apparent donne la direction de l'écoulement reçu à bord. Le navigateur, qui cherche à présenter son profil aérodynamique au plus juste du vent, se reportera à ce vent apparent. Excepté pour le vent arrière, où il ne faut pas régler les voiles dans le sens de l'écoulement, le vent apparent peut donner schématiquement l'idée du réglage idéal des voiles. Sur le dessin (fig.30), il suffit de positionner la voile par rapport au V.A. pour connaître le réglage idéal aux différentes allures.



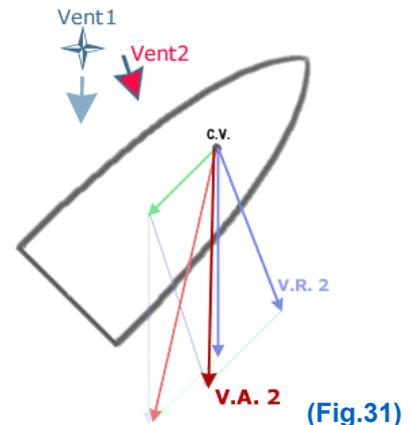
infographie: www.waterstart.be

Nous pouvons en conclure que plus nous allons vers le vent arrière, plus nous allons devoir choquer la voile. Plus nous allons vers le vent arrière, plus l'intensité du vent apparent est faible.

F. Variations de direction: adonne ou refuse

Petite précision lexicale avant la mise à l'eau. Les variations de direction du vent peuvent être appelées « adonnante » ou « refusante ».

Lorsque le vent adonne, c'est qu'il tourne en faveur de ma remontée au vent. Je peux donc lofer, comme l'indique le dessin ci-contre (fig.31), ou choquer ma voile pour respecter le bon écoulement dans celle-ci.



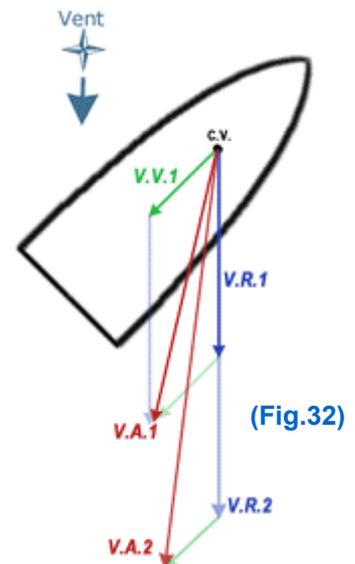
infographie: www.waterstart.be

Par opposition, le refus est un changement dans la direction du vent qui m'oblige soit à abattre, soit à border, soit virer pour profiter de l'adonnante sur l'autre bord.

G. Variations d'intensité

Un changement d'intensité dans la force du **vent réel** et/ou du **vent de vitesse** (donc la vitesse du bateau) déforme également le parallélogramme des forces et donc le **vent apparent**. Celui-ci se modifie tant au niveau de sa direction que son intensité.

Une augmentation de vent réel (une brise passagère, par exemple) aurait pour conséquence, sur un bateau naviguant au près, d'éloigner le **vent apparent** de l'axe du bateau. Elle équivaut à une adonnante (**fig.32**).



Pour que le barreur trouve le réglage de voile adapté à son nouveau **vent** apparent (V.A.2), il devra soit:

- Agir sur sa barre en lofant
- Agir sur son écoute en choquant sa voile

Une augmentation de la vitesse de ce même bateau naviguant au près aurait pour conséquences d'augmenter son vent de vitesse et de rapprocher le vent apparent de l'axe du bateau. Elle équivaut à une refusante.

Pour que le barreur trouve le réglage de voile adapté à son nouveau vent apparent, il devra soit:

- Agir sur sa barre en abattant
- Agir sur son écoute en bordant sa voile s'il est encore en mesure de le faire.

H. Lof dans la risée (ou barrer en escalier)

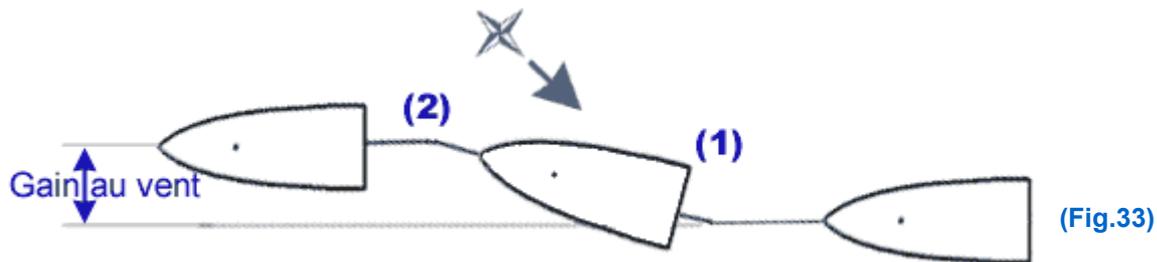
Un petit exercice classique en guise de conclusion : le fameux « lof dans la risée » que nos amis régatiers appellent plus facilement « barrer en escalier ». Une action qui n'est avantageuse que dans une configuration de recherche de gain au vent (chercher à remonter au vent). Dans la pratique, et parce qu'on navigue dans l'hémisphère Nord, le vent a tendance à tourner vers la droite lorsqu'il augmente. *Grossièrement, on peut escompter un léger refus si on navigue bâbord amure, et une bonne adonnante si on est tribord amure*²². Dans un vent soutenu (à partir de 3 Beauforts), les risées ne sont pas le fruit du hasard: *elles sont conduites par des vents d'altitude (vers 100m). Ceux-ci sont un peu plus forts et décalés vers la droite (de 20° à 30° sous nos latitudes)*²³. Pour éviter ce refus à bâbord, mieux vaut virer de bord. Une risée, comme nous l'avons vu plus haut, est

²² Chéret, B., *Les Voiles: comprendre, régler, optimiser*, Editions Gallimard, 2000, p.362.

²³ Bernot, J-Y., *op. cit.*, p.133.

une augmentation de vent réel qui a pour conséquence d'augmenter la vitesse de mon bateau (**VV**). Après la risée, le vent réel faiblit sans que le bateau perde immédiatement sa vitesse acquise. Puis, le voilier ralentit pour se retrouver dans les conditions initiales.

Résumons les quatre étapes : (1) VR ↗ ; (2) VV ↗ ; (3) VR ↘ ; (4) VV ↘



Lors de l'étape (1), je lofe pour profiter de l'adonnante. A l'étape (2), l'augmentation de ma vitesse fait l'effet d'un refus dans mes voiles et je dois abattre pour compenser (**fig.33**). Etape (3), nouveau refus qui devrait m'obliger à abattre de nouveau. C'est là que la théorie doit laisser passer la pratique. Pour ne pas perdre le gain au vent de l'étape (1), le barreur préférera attendre dans cette « molle de vent » quelques brefs instants et repartir déjà bien réglé pour les conditions de l'étape (4) qui se retrouvent être les conditions initiales.

Remarques:

Il s'agit bien ici d'une théorie, d'un concept pour vous aider à comprendre dans les grandes lignes le travail des forces qui s'appliquent sur le plan de voilure durant la navigation.

Sur l'eau, tout peut dépendre des conditions météo ou du type de bateau. Par vent faible, les bascules de vent étant souvent aléatoires, il est parfois plus intéressant d'utiliser les risées pour virer. Le coup de frein d'une manœuvre telle qu'un virement serait atténué par une meilleure relance dans la risée.

Jean-Yves Bernot²⁴ nous explique dans son livre que, avec un bateau plus lourd, il vaut mieux retarder le lof et attendre que le bateau ait profité de l'augmentation de vent réel pour accélérer. C'est ce moment précis, où le bateau a atteint sa nouvelle vitesse, qu'il est intéressant de lofer pour optimiser le rendement du bateau.

²⁴ Bernot, J-Y., *Vent et Régate: les stratégies*, Chiron, 1994, p.66-67.

BIBLIOGRAPHIE DE RÉFÉRENCE

- | | |
|---|---|
| Barbanson, G. et Besson, J., Connaitre et bien mener son voilier, Nathan, 2000. | <i>Sans doute l'un des ouvrages de base les plus complets en format de poche. Clair et bien illustré.</i> |
| Bernot, J-Y., Vent et Régate: les stratégies, Chiron, 1994. | <i>Polaires de vitesse, allongement, CMG, VMG... tout pour exploiter au mieux le vent, le plan d'eau et son voilier.</i> |
| Chéret, B., Bien régler ses voiles et son gréement, Voiles et Voiliers, hors série n°17, Paris, 2000. | <i>Une synthèse en images et tableaux d'une des têtes les mieux faites du monde de la voile.</i> |
| Chéret, B., Les Voiles: comprendre, régler, optimiser, Editions Gallimard, 2000. | <i>La bible de l'aérodynamique. Volumineux, il faut s'accrocher pour suivre, mais quel plaisir!</i> |
| Curry, M., L'aérodynamique de la voile, Editions Chiron, 1994. | <i>Le pionnier de la recherche aérodynamique (1925). Les mémoires d'un chercheur fou. Des théories parfois révolutionnaires.</i> |
| Giordan, J., Le yachting, collection «Que sais-je?», Presses universitaires de France, Paris, 1959. | <i>Même si elle est dépassée, son édition crédite son honnêteté intellectuelle. Historiquement parfaite.</i> |
| Gombert, P., Aéro-hydrodynamique d'un voilier, Ecole nationale de voile Beg-Rohu, 1988. | <i>Un mémoire sur la physique du voilier, bardé de formules mais plus qu'intelligible.</i> |
| Hecht, E., Physique, De Boek Université, Paris, 1999. | <i>Une complète vue d'ensemble sur la physique à destination des étudiants de première année dans nos universités scientifiques. D'une lisibilité remarquable et illustrée.</i> |
| Van Der Vorst, A., Introduction à la physique, Tome 1: mécanique, De Boek Université, Bruxelles, 1991. | <i>Malheureusement moins illustré que le livre de Hecht, ce manuel d'un professeur de physique de l'Université de Liège gagne en concision et en exemples.</i> |
| Verbist, Y., Bribosia, A., Nachtergaele, L., Vanderperren, M., Villers, P., Physique, 5^e option complémentaire, De Boeck, Bruxelles 1992. | <i>Principes généraux de physique destinés aux options complémentaires de fins de cycle secondaire. La base de la physique à portée de tous.</i> |

Autres ouvrages consultés

- | | |
|---|--|
| Foncoux, J., Eléments abrégés de théorie voile, sources ADEPS. | <i>Le premier ouvrage consacré au brevet A.</i> |
| Foncoux, L., Théorie du dériveur, cours initiateur voile, ADEPS, 1994. | <i>Un complément théorique et terminologique du manuel de Jean Foncoux.</i> |
| Heimermann, B. et Joubin, Ph., L'abcdaire de la voile, Flammarion, Paris, 1998. | <i>Très sommaire, c'est un faux tour d'horizon sous forme de dictionnaire. Amusant.</i> |
| Henrion, J., Théorie du dériveur, cours aide moniteur voile, ADEPS, 1993. | <i>Rapide et dense rappel des notions de physique. Aéro & hydrodynamique pour les purs et durs qui n'ont pas besoin d'un dessin.</i> |
| Le nouveau cours des Glénans, 5^{ème} édition, Editions du Seuil, Paris, 1995. | <i>Ouvrage touche à tout, surtout axé sur la mer. Volumineux, il en dit soit trop ou pas assez.</i> |

LEXIQUE DU DÉRIVEUR

Abattre: Se dit d'un voilier qui change de direction en écartant son étrave de l'origine du vent, se rapprochant ainsi du vent arrière.

Adonnante: Désigne un changement de direction du vent (temporaire en général) donnant la possibilité obligeant un voilier à augmenter (en lofant) son angle de remontée vers une marque ou un objectif au vent.

Affaler: Descendre une voile hissée au mât.

Allure: Cap du voilier par rapport à la direction du vent. Il existe différentes allures: face au vent, près, travers, large, vent-arrière...

Ardent: caractéristique d'un voilier qui tend à lofer, à remonter au vent de lui-même (par opposition à « mou »).

Bâbord: Partie gauche du bateau lorsque l'observateur regarde vers l'avant.

Bon plein: Allure qui porte un bateau au vent. Si l'angle entre l'axe du vent le cap du bateau est inférieur à 45°, on parle de près serré.

Bord d'attaque: extrémité d'un profil qui pénètre le premier dans l'écoulement (le guindant pour une voile).

Bord de fuite: extrémité d'un profil par où s'échappe l'écoulement (la chute pour une voile).

Bordure: côté inférieur d'une voile.

Catboat: Dériveur dont le gréement est continué d'une seule voile (par opposition à un sloop).

Centre de dérive: Point d'application de la force anti-dérive.

Centre vélique: Point d'application de la poussée vélique, résultante de toutes les forces aérodynamiques qui s'appliquent à la voile. Attention, le centre vélique n'est pas le centre géométrique de la voile.

Chute: Bord de fuite d'une voile (partie arrière).

Couche limite: Espace compris entre les lignes de courant et la paroi de l'aile à laquelle elles sont fixées.

Creux: Profondeur du volume d'une voile (calculé en % par rapport à la longueur du profil et de la flèche). Désigne aussi le point où cette profondeur est maximale.

Cunningham: Œillet situé juste au-dessus du point d'amure d'une voile et qui permet d'en étarquer le guindant.

Départ au lof: Lof incontrôlé du bateau, intervient dans une survente en général et lorsque le bateau porte trop de surface de voile.

Dépression: Zone de basse pression barométrique générant souvent des vents forts. Chute de la pression à l'extrados d'une aile (voile, safran, dérive) due à une accélération du fluide.

Dérive: Aile sous-marine escamotable permettant d'empêcher au voilier de dériver.

Dériver: Action d'un voilier lorsqu'il se déplace dans une direction contraire à celle qu'il devrait prendre. La dérive vient de la poussée du vent ou/et des courants.

Dériveur: Petit voilier doté d'une dérive escamotable, par opposition au quillard (à quille lestée).

Dévent: Zone de vent perturbée derrière un obstacle ou une voile.

Drisse: Cordage permettant de hisser une voile le long d'un mât ou d'un étai.

Écoute: Cordage attaché sur la partie inférieure d'une voile (généralement sur la bôme) pour la manœuvrer.

Empanner: Faire passer les voiles d'un bord sur l'autre en passant par le vent arrière (Syn. virement vent arrière).

Energie cinétique: Energie d'un objet lié à sa masse et à sa vitesse de déplacement.

Espar: Terme général désignant tous les tubes servant à établir une voile (mât, bôme, tangon...).

Étai: Câble en inox ou en matériaux composites soutenant le mât dans le sens longitudinal vers l'avant. Il complète les haubans en reliant la partie haute du mât à l'étrave ou à la poupe.

Étarquer: Tendre une drisse après avoir hissé la voile.

Étrave: Partie mince de la coque à l'avant du bateau.

Extrados: Côté d'un profil d'une aile situé sous le vent de l'écoulement général. Pour une voile, c'est son côté convexe.

Fardage: Prise au vent de tout ce qui dépasse sur l'eau (à l'exception des voiles réglées). Le fardage est une traînée parasite.

Faseyer: Se dit de voiles qui battent soit parce qu'elles sont insuffisamment bordées soit que le bateau est face au vent.

Ferler: Ranger une voile à bord.

Fluide: (Liquide et gaz) Ensemble de particules qui ne sont pas liées entre elles de manière permanente. L'une des grandes particularités d'un fluide est de pouvoir prendre la forme de son contenant.

Foc: Voile triangulaire établie à l'avant d'un dériveur.

Force anti-dérive: Force qui s'oppose au dérapage latéral du dériveur, à la dérive.

Force vélique: Composante de toutes les forces de surpression et de dépression qui s'exercent sur une voile.

Génois: Grand foc dont le point d'écoute arrive à l'arrière du mât

Gîte: Inclinaison latérale du voilier due à l'effet du vent dans les voiles.

Gouvernail: Pièce du dériveur permettant de le diriger et constitué du safran et de la barre.

Grain: Danger! Craindre de très violentes rafales au passage annoncé des cumulo-nimbus.

Guindant: Bord d'attaque d'une voile, sa partie avant qui s'attache au mât pour la grand voile ou à l'étau pour le foc.

Hauban: Câbles servant à maintenir les mâts latéralement.

Haubanage: Ensemble des câbles qui maintiennent le mât sur l'avant (étau), et sur les côtés du bateau (haubans, bastaques...).

Hisser: Envoyer une voile. Elever, faire monter au moyen de cordes, de cordages. Hisser un pavillon, hisser un mât.

Intrados: Côté d'un profil d'une aile situé au vent de l'écoulement général. Pour une voile, c'est son côté concave.

Largue: Allure sous laquelle navigue un bateau recevant le vent de 3/4 arrière.

Lofe: À l'inverse d'abattre, se dit d'un bateau dont l'étrave se rapproche de l'origine du vent. Par exemple, si le bateau passe d'une allure vent de travers à une allure de près, le bateau lofe.

Louvoier: Tirer des bords de près afin de remonter dans le lit du vent.

Mât: Espar vertical qui supporte longitudinalement les voiles.

Mille Marin: 1852 mètres. Mesure moyenne d'une minute de latitude.

Molle: Zone de vent faiblissant se distingue par une couleur légèrement plus claire de la surface de l'eau.

Nœud: Unité de vitesse, 1 nœud c'est 1852 m à l'heure ou 1 mille marin à l'heure.

Pétole: Calme plat.

Portant: Ensemble des allures entre le travers et ce compris le vent arrière (allures portantes).

Poupe: Partie arrière d'un voilier.

Près: Allure à laquelle le bateau navigue très près de l'axe du vent (environ 45°). Dès que l'on s'éloigne du près, on dit que l'on navigue à une allure débridée.

Proue: Partie avant d'un voilier.

Quête: Degré d'inclinaison du mât vers l'arrière.

Rafales: Augmentation brutale du vent pouvant dépasser de 50 % la vitesse du vent moyen.

Refusante: Désigne un changement de direction du vent (temporaire en général) obligeant un voilier à diminuer (en abatant) son angle de remontée vers une marque ou un objectif au vent. La solution peut être de virer pour trouver une adonnante sur l'autre bord.

Risée: Augmentation temporaire de la vitesse du vent accompagné d'une légère variation de direction du vent (dépendant de l'hémisphère dans lequel on se trouve. Dans l'hémisphère nord cette survente tourne généralement vers la droite).

Route: Se dit du chemin tenu avec la même allure ou plan d'eau parcouru avec la même direction.

Safran: partie immergée du gouvernail sur laquelle s'exerce la pression de l'eau.

Sloop: Dériveur dont le gréement est continué d'une grand voile et d'un foc (par opposition à un catboat).

Sous le vent: Coté abrité du vent, où va le vent.

Spinnaker: Foc triangulaire très concave et d'une grande superficie, employé pour allures portantes et de vent arrière. Le spi asymétrique ne permet plus de naviguer vent arrière, mais oblige à tirer des bords large-large.

Tangon: Tube métallique ou en matériaux composites permettant de positionner dans l'espace le bord d'attaque du spi au vent.

Travers: Allure intermédiaire entre le près et le large, sous laquelle le voilier reçoit le vent perpendiculairement.

Tribord: Partie droite du bateau lorsque l'observateur regarde vers l'avant.

Vent arrière: Allure sous laquelle le dériveur reçoit le vent par l'arrière dans l'axe du bateau.

Vent debout: Signifie que le bateau fait face au vent.

Virer (de bord): Changer d'amure en faisant passer le bateau par la position vent debout. On peut aussi virer en passant par le vent arrière (empannage).

Viscosité: Résistance interne qui s'oppose au mouvement d'un objet immergé dans un fluide.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	3
AÉRO & HYDRODYNAMIQUE	4
I. PRINCIPES GÉNÉRAUX	4
<i>Les fluides</i>	4
<i>Les écoulements</i>	5
<i>La couche limite</i>	6
<i>La traînée</i>	7
<i>Equation de continuité</i>	7
<i>Equation de Bernoulli</i>	8
<i>Effet Venturi</i>	9
<i>La portance</i>	9
<i>Le décollement</i>	10
II. VUE AÉRODYNAMIQUE DU VOILIER	11
<i>Le cas du sloop</i>	12
III. VUE HYDRODYNAMIQUE DU VOILIER	13
<i>La dérive est une anti-dérive</i>	13
<i>Le safran, encore une aile !</i>	14
IV. THÉORIE DE L'AVANCEMENT	15
<i>Remarque: Le vent arrière, c'est bateau!</i>	15
LES GRANDS ÉQUILIBRES	16
I. EQUILIBRE STATIQUE	16
<i>Le centre de gravité</i>	16
<i>Le centre de carène</i>	16
<i>Faire la cloche</i>	17
II. EQUILIBRE DYNAMIQUE	17
A. <i>Le centre vélique</i>	17
B. <i>Les forces à bord</i>	18
C. <i>Mou ou ardent</i>	18
D. <i>Equilibre au vent arrière</i>	19
E. <i>Equilibre sous les autres allures</i>	19
1. <i>Bateau à plat</i>	19
2. <i>Bateau gîté</i>	20
F. <i>Le creux</i>	20
G. <i>Tableau récapitulatif</i>	21
LE RÉGLAGE 'THÉORIQUE' DES VOILES	22
A. <i>Le vent et les allures</i>	22
B. <i>Rappel: L'échelle de Beaufort</i>	23
C. <i>Le vent apparent</i>	24
D. <i>Le parallélogramme des forces (rappel)</i>	24
E. <i>Réglage des voiles</i>	25
F. <i>Variations de direction: adonne ou refuse</i>	25

<i>G. Variations d'intensité</i>	26
<i>H. Lof dans la risée (ou barrer en escalier)</i>	26
TABLE BIBLIOGRAPHIQUE	28
LEXIQUE DU DERIVEUR	29
TABLE DES MATIÈRES	32