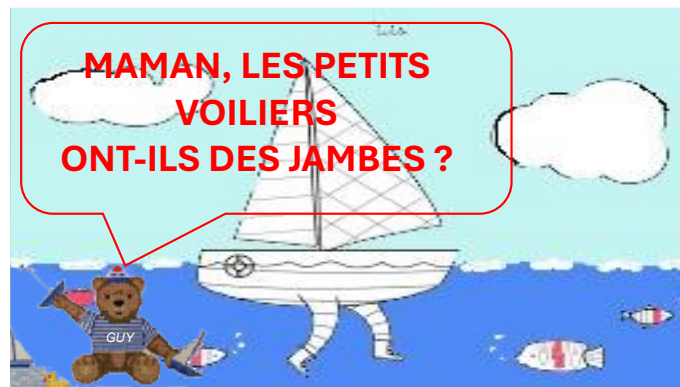




LE REGLAGE DES VOILES

Où

LA PHYSIQUE APPLIQUEE à NOS VOILIERS



CHAPITRE 1 BASES DE PHYSIQUE

"Le voilier avance grâce à ses voiles."

Le principe d'une voile est de récupérer l'énergie du vent et de la transmettre au bateau. La voile redirige l'air arrivant sur elle dans une autre direction, et, en vertu de la Loi de conservation de la quantité de mouvement, (« Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme! ») une force est créée sur la voile, dont l'orientation choisie doit contribuer à faire avancer le bateau

Bien régler ses voiles permet d'optimiser les forces captées par ces dernières.

Le mouvement du voilier est le résultat de son glissement entre deux fluides, l'air et l'eau, dont il capte l'énergie grâce à ses voiles dans l'air et grâce à ses appendices, dans l'eau.

Mais de quoi parle-t-on ici ?

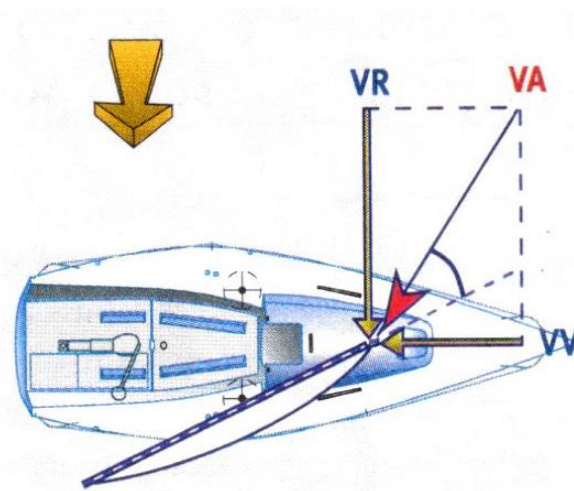
En physique, cela s'appelle la **MECANIQUE DES FLUIDES**.

1 – LE VENT

Le mouvement de l'air est communément appelé vent. Le vent qui souffle dans vos voiles n'est pas le vent réel, mais **le vent apparent**.




Quand le bateau se déplace, il crée un vent qui est égal à sa vitesse. Il en va de même pour les vélos, les voitures, et pour tout objet qui se déplace dans l'air.

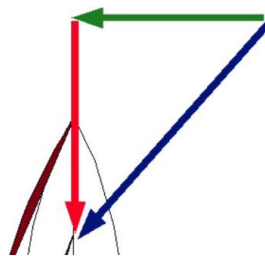
Ce vent vitesse s'additionne au vent réel pour créer un vent que l'on nomme vent apparent. C'est le vent apparent qui souffle sur votre visage, et sur votre girouette quand vous êtes à bord. Pour ressentir le vent réel, il faut que le vent vitesse soit nul, donc il faut être à l'arrêt.



VA = vent apparent, VR = vent réel, VV = vent de la vitesse

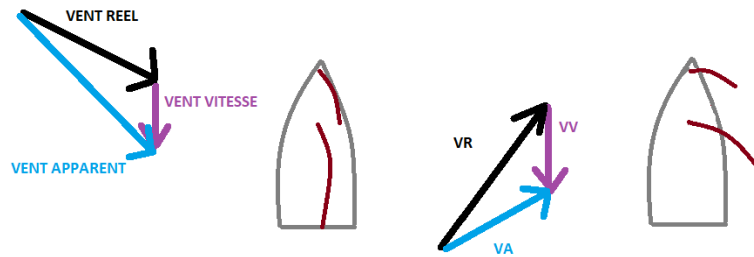
Le vent apparent représente la somme géométrique du vent réel et du vent de la vitesse. Il figure en vecteur bleu sur le schéma qui suit. Sa direction est donnée en tête de mât par votre girouette. Sa force par l'anémomètre.

-  Vent vitesse créé par le déplacement
-  Vent réel, soufflant sur tout objet immobile
-  Vent apparent résultant du vent réel et du déplacement



Le vent réel qu'indique la centrale de navigation n'est qu'un calcul extrapolé du vent apparent, de la vitesse et direction du bateau.

En conséquence, du travers au près, le vent apparent est plus fort que le vent réel. Au portant c'est l'inverse. C'est pourquoi nous ressentons le froid de l'air aux allures de près alors que nous avons chaud sur le bord de vent arrière



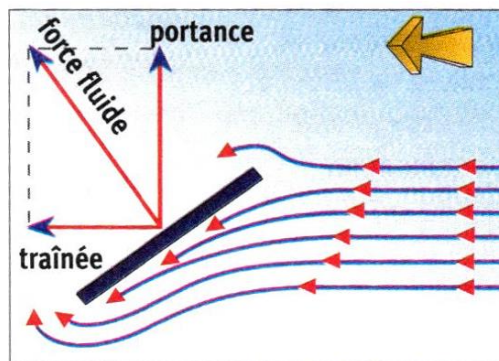
Voyons comment agit ce vent.

2 - LA MECANIQUE DES FLUIDES POUR LES NULS

En mécanique des fluides, un **plan porteur** est une surface qui se déplace dans un fluide et transmet une force de portance à son support.

Le plan porteur qui capte l'énergie du vent a pour rôle de créer un écart de pression, entre ses deux faces. Se manifestent alors une force de trainée, et une force latérale perpendiculaire à celle-ci appelée portance. La résultante de tout ceci est une force utile.

Le plan porteur



Le plan porteur va être optimisé à partir de trois grands facteurs :

- Une surface intéressante

- Une forme propice, dite aérodynamique lorsqu'on parle de voile ou d'une aile d'avion
- Une orientation favorable pour maximaliser la force résultante propulsive.

Donc...

Grâce à ses plans porteurs, le voilier capte les énergies des fluides et il en tire **deux grands modes de propulsion**.

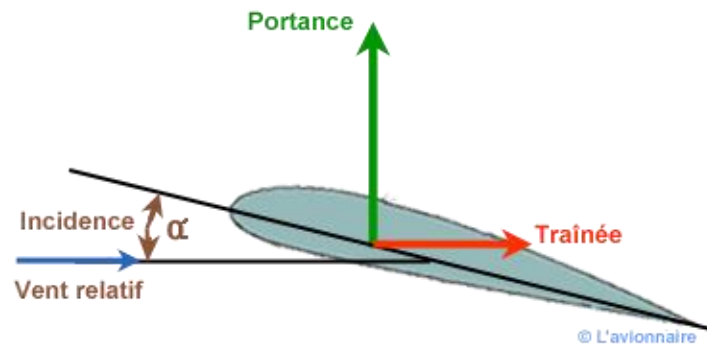
a) LA PROPULSION SUR LA TRAINÉE.

La trainée propulsive est celle que l'on rencontre au portant. Une feuille emportée par le courant, un linge qui sèche sur un fil sont entraînés par un courant d'air, ce dernier constituant la force propulsive

Sur nos voiliers, depuis toujours, le bateau en déployant ses voiles par le travers du vent est entraîné au vent arrière, de la même façon que l'eau pousse les roues d'un moulin. Côté voile, ce qui compte en priorité, c'est la surface projetée en obstacle au vent. Cela explique que sur les barques carrées du temps de l'ancienne marine à voile, on étalait sur des gréements complexes un maximum de toile au travers du vent afin de pousser au mieux les lourds vaisseaux.



b) LA PROPULSION SUR LA PORTANCE



A la propulsion sur la trainée, propre au portant s'oppose **la propulsion sur la portance**, caractéristique du près.

La propulsion sur la portance permet de remonter au vent. Donc d'aller dans le sens inverse de l'agent propulsif initial, ce qui peut sembler paradoxal à un novice.

C'est ce qui explique aussi la sustentation d'un avion développée par l'aile d'avion.

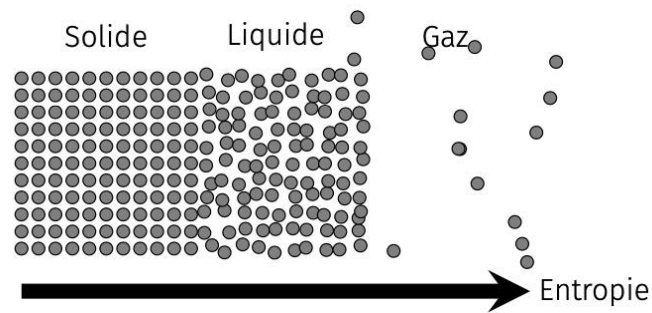


Mais pour appréhender ceci, il faut entrer plus avant dans les principes de la mécanique des fluides.

c) LES FLUIDES

L'air et l'eau sont des fluides.

Un fluide est caractérisé par sa densité. La densité d'un fluide est fonction du nombre de molécules par unité de volume. Ainsi l'eau est plus de 800 fois plus dense que l'air. Le volume de l'eau est peu sujet à varier au contraire de l'air qui a une capacité de détente importante. Néanmoins aux vitesses d'un voilier, la densité de l'air est stable à un instant donné.



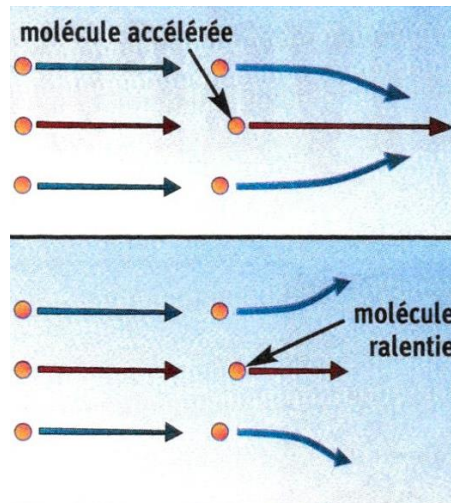
Enfin... Un fluide enfin n'a pas de forme propre.

d) LE PRINCIPE DE CONTINUITÉ.

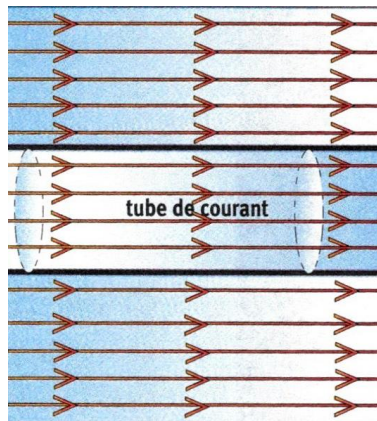
On entend par équation de continuité une relation qui traduit la conservation de la masse...

Un fluide est un système composé de nombreuses particules libres de se mouvoir les unes par rapport aux autres. Dans un liquide comme dans un gaz, le mouvement des molécules est désordonné : c'est l'agitation thermique. Les molécules d'un fluide sont en perpétuel mouvement, dans tous les sens. Mais les forces dites d'interaction moléculaire jouent donc un rôle important dans l'état liquide. Elles réagissent entre elles de façon collective et pour d'infimes distances, elles se repoussent. Mais pour des distances à peine plus grandes, elles s'attirent. C'est le principe de continuité.

Une molécule accélérée entraîne ses voisines, une molécule arrêtée freine ses voisines. Retenez bien cela !

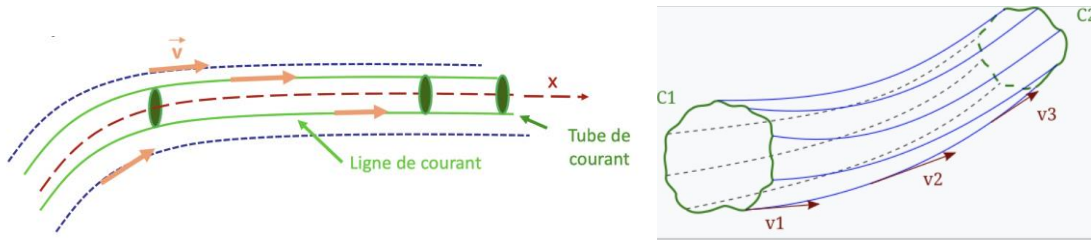


Le principe de continuité provoque des réactions en chaîne. Les molécules se déplacent alors entraînées les unes par les autres selon une trajectoire commune ou **ligne de courant**. Tant que la force motivant le déplacement des molécules s'applique, il se crée un **écoulement**... Voici figuré les lignes de courant d'un écoulement !



L'écoulement créé est uniforme si les molécules qui le composent se déplacent à la même vitesse en lignes de courant parallèles aboutissant à la création d'un « **tube de courant** »

En écoulement permanent, le débit entrant dans le tube de courant égale le débit sortant. Ce qui explique l'effet Venturi

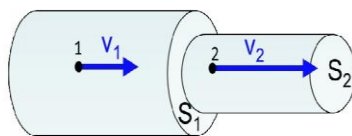


e) l'effet Venturi

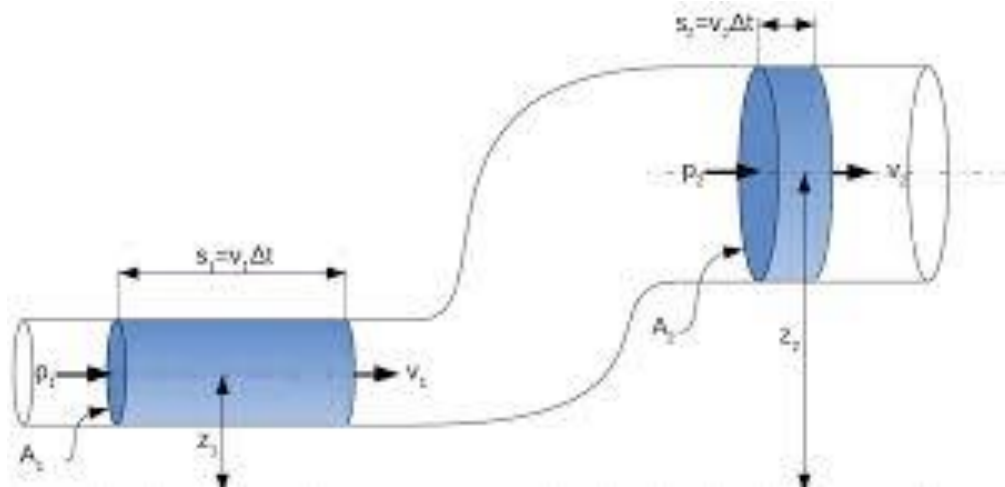
Si un fluide en mouvement rencontre un étranglement, sa vitesse augmente afin de garder le même débit avant, pendant et après l'étranglement.

Ce que laisse entendre l'expérience du tuyau d'arrosage. Vous pincez son extrémité et le jet d'eau est accéléré et porte plus loin.

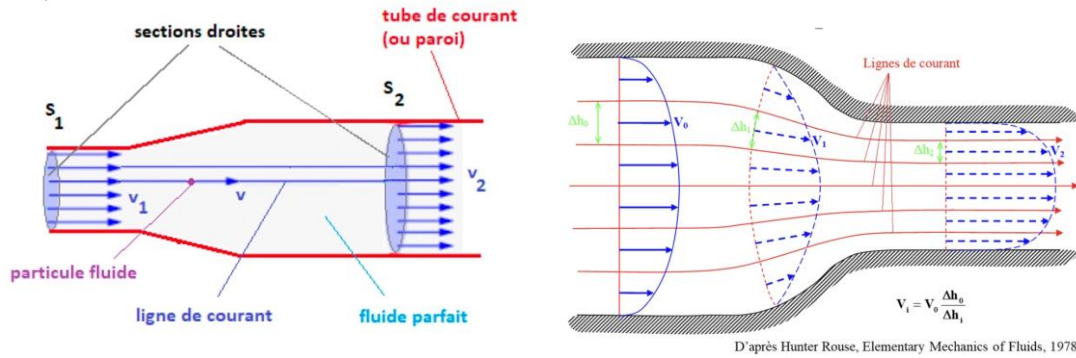
Si changement de section alors changement de vitesse



$$S_1 > S_2 \rightarrow v_2 > v_1$$



L'augmentation de la vitesse d'écoulement compense la réduction d'espace de telle façon que le débit (c à d la quantité de molécules qui traverse le tuyau) reste le même tout au long du tube. En résumé, on peut dire que cela accélère quand on « écrase » et que ça ralentit quand on « évase ».

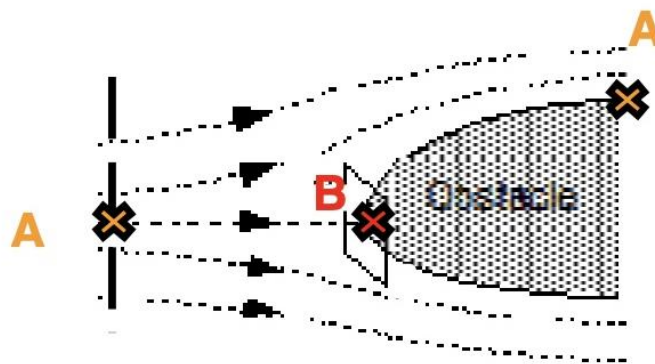


Le schéma de droite tient compte de la viscosité sur les parois...

Nous allons voir que la cambrure, le braquage d'un plan porteur provoquent une sorte d'effet Venturi avec création de différences de vitesse de l'écoulement et de pression entre les deux faces du plan porteur.

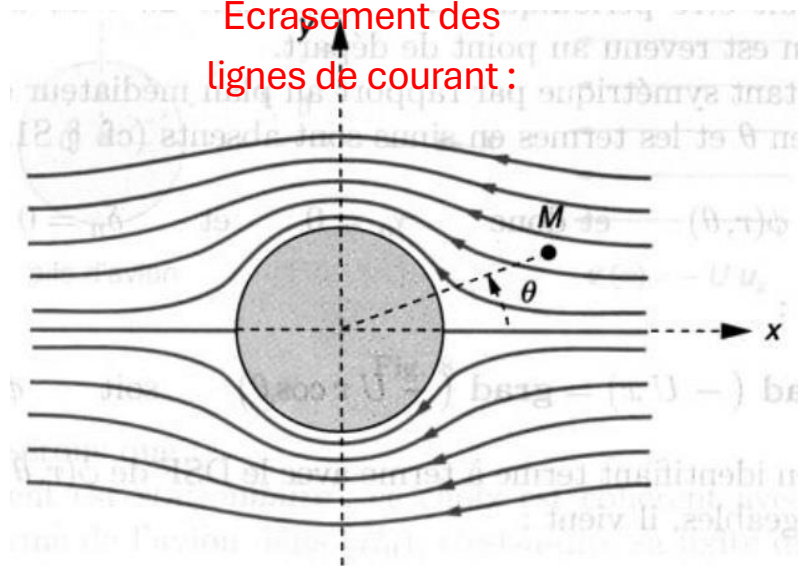
f) LES FLUX FACE A UN OBSTACLE.

Lorsqu'un tube de courant rencontre un obstacle, voile, aile de quille, pour ce qui nous préoccupe, le tube de courant se divise en deux avec une ligne de séparation. Les lignes de courant contournent l'obstacle en se déformant. Selon un gauchissement qui s'atténue au fur et à mesure que l'on s'éloigne des parois de l'obstacle.



L'écrasement des lignes de courant ainsi produit provoque une accélération des flux sur les flancs de l'obstacle

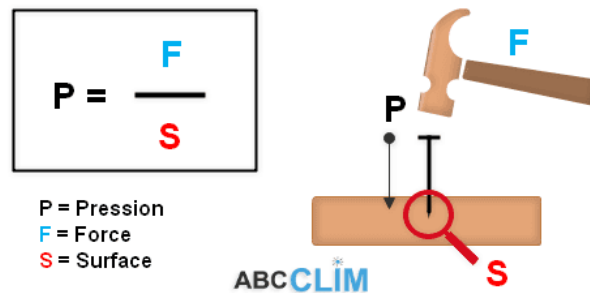
Écrasement des
lignes de courant :



g) La loi de Bernoulli fait le lien entre la vitesse et la pression

Mais auparavant, pour rappel, quand la grande activité des molécules se manifeste sur les objets solides, elles frappent leur surface par milliards et donnent naissance aux **pressions**.

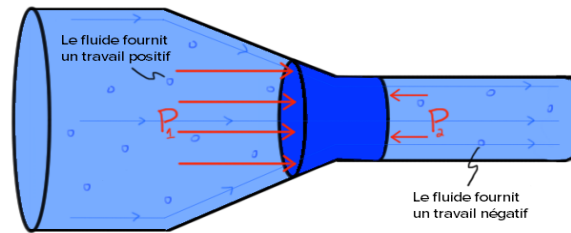
La pression exercée sur un objet dans un fluide est le résultat des chocs des particules du fluide contre les parois de cet objet.



Donc ...

Selon le théorème de Bernoulli, sur la trajectoire d'une ligne de courant, la somme des pressions locales et dynamique donne une pression absolue constante.

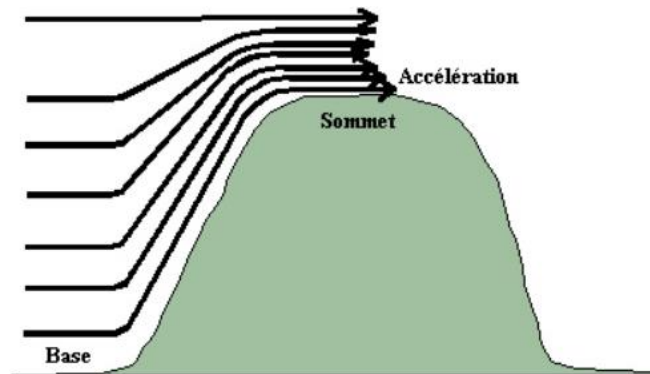
(Lors de l'écoulement permanent d'un fluide parfait incompressible, dans un tube de courant, la charge de ce fluide reste constante. En d'autres termes, il y a conservation de l'énergie en tout point de l'écoulement.)



Sur ce tube, la vitesse est augmentée en aval du rétrécissement. Et c'est parce que la pression P_1 en amont est supérieure à la pression P_2 en aval que l'écoulement se produit. C'est un peu contre-intuitif mais une réalité !

De sorte que, sur une ligne de courant pression et vitesse évoluent inversement.

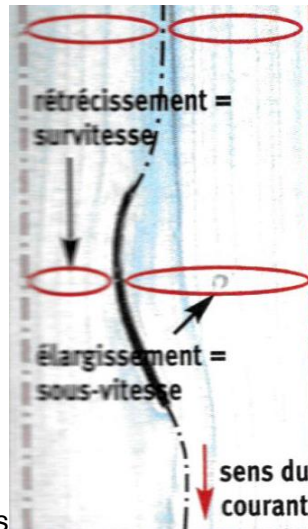
Voici figuré un écrasement des lignes de courant au sommet d'un obstacle.



Lorsqu'un relief de surface provoque un écrasement des lignes de courant, avec le rétrécissement que l'on voit, les flux accélèrent tandis que le martèlement moléculaire faiblit. "Quand on écrase on accélère le flux, avions nous dit" On enregistre alors une baisse de pression par rapport à celle de l'écoulement d'amont.

Par contre dans les cuvettes ou sur des surfaces en courant non organisé et couvertes de tourbillons, apparaissent un ralentissement des flux et une montée de pression. "Quand on évase, on observe un ralentissement du flux"

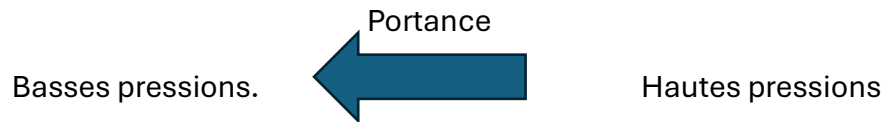
Ces pressions s'exercent perpendiculairement à la surface de l'obstacle.



Baisse des pressions hausse des pressions

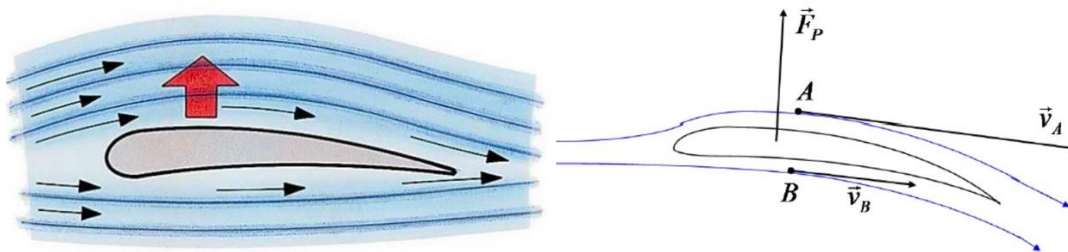
g) La portance

S'il existe une différence de pression entre les deux faces de l'obstacle apparait alors **une force de portance**

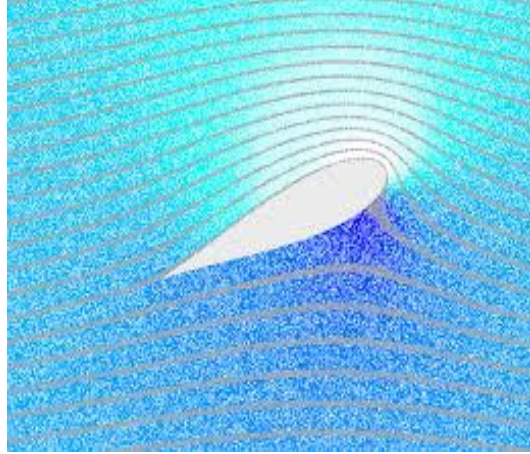


L'objet est sollicité pour un déplacement des hautes vers les basses pressions.

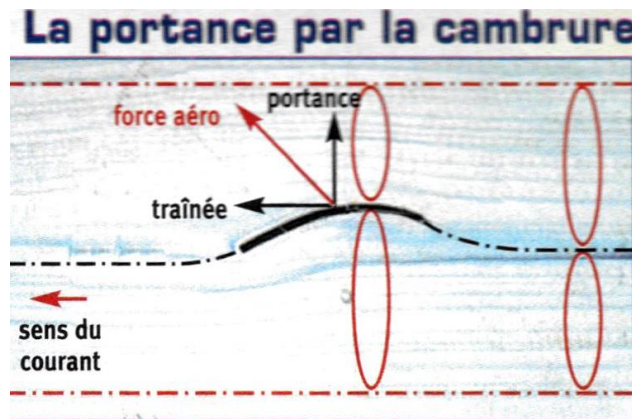
C'est sur ce principe que repose la sustentation d'un avion. En prenant l'exemple de l'avion, une aile d'avion sépare l'écoulement en deux tubes de courant.



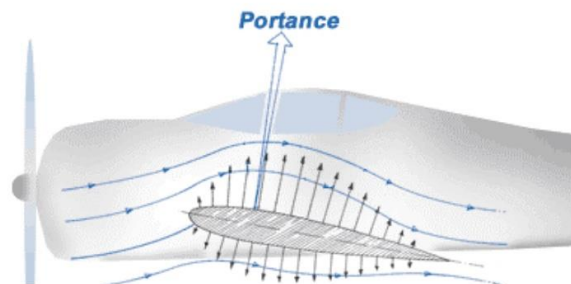
- L'un au-dessus appelé **extrados** ou le resserrement du tube provoque une accélération du flux et une chute de pression.
- L'autre au-dessous de l'aile, ou **intrados**, qui est habituellement concave et le tube en profite pour se dilater. Le courant ralentit et les pressions augmentent



- Différence de densité moléculaire sur les deux faces du plan porteur

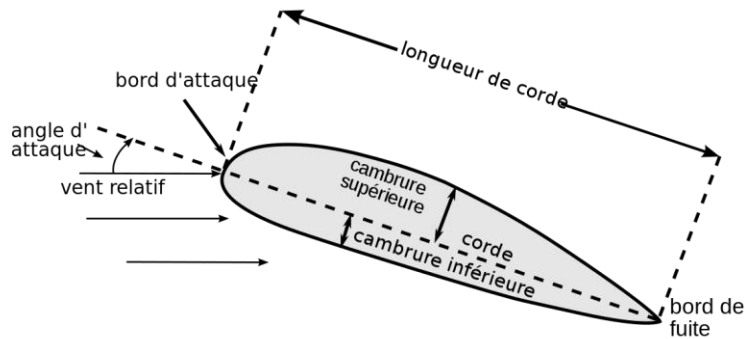


- Nous obtenons ainsi une force résultante générée par le différentiel de pression et dirigée vers le haut : c'est la portance
- Pour un avion, cette portance caractérise **la force de sustentation de l'avion**

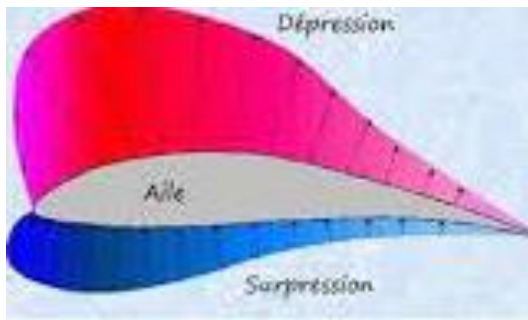


C'est la différence de pression entre le dessus de l'aile et le dessous de l'aile qui crée une force ascendante appelée portance. C'est cette portance qui permet à l'avion de tenir en l'air, comme suspendu

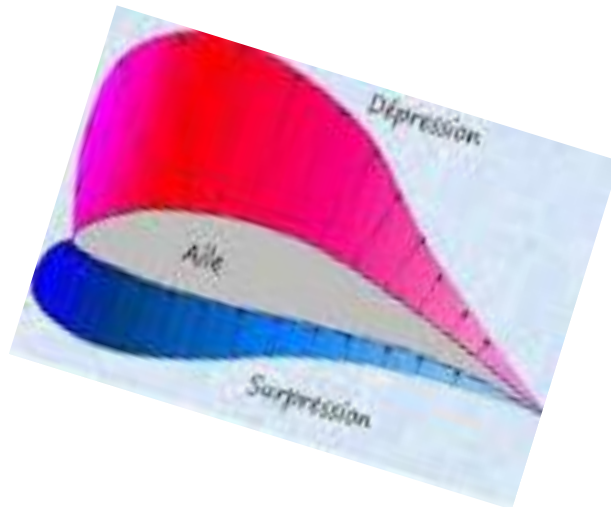
Les courbes de portance sont fonction de l'angle d'attaque et dépendent de la **cambrure** de l'aile,



Imaginez tenir votre main à plat dehors, en roulant dans une voiture à grande vitesse. Si vous inclinez légèrement la main vers le haut, vous sentirez l'air la pousser vers le haut

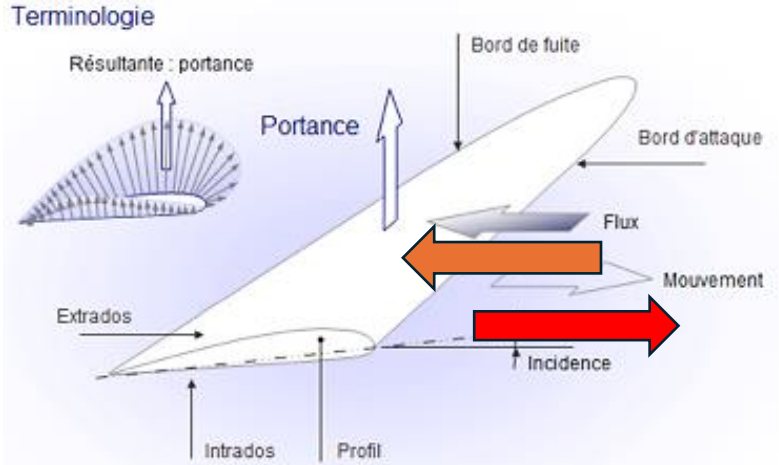


Si on augmente la cambrure de l'aile, on augmente la dépression (en rouge) sur l'extrados et le différentiel de pression entre

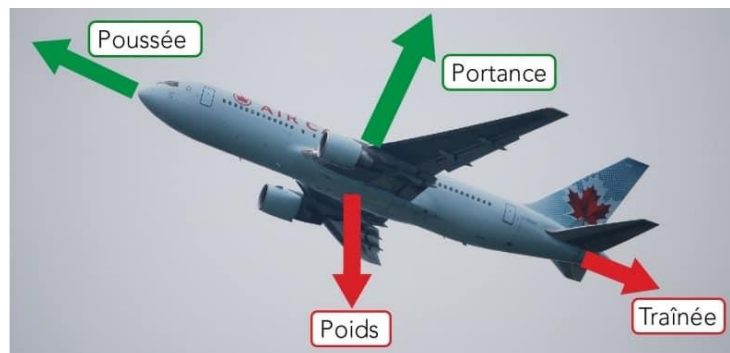


les deux surfaces s'accroît.

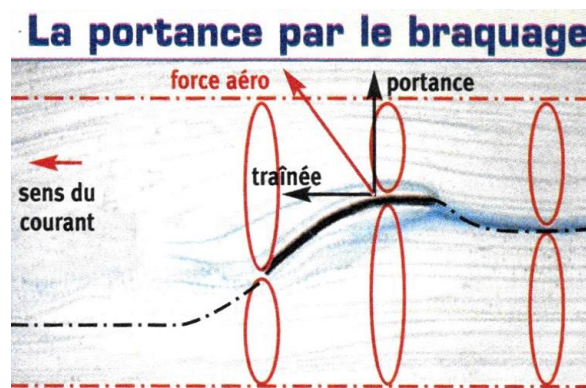
Une aile à forte cambrure a un coefficient aérodynamique plus élevé, donc potentiellement une portance plus importante.



Tout ceci n'est possible que si l'avion avance et atteint une certaine vitesse. Dans un avion, cette vitesse est produite par les moteurs, qu'ils soient à hélices ou à réaction. Pour qu'un avion décolle, il faut que ses moteurs lui donnent suffisamment de poussée pour que l'air qui passe sur ses ailes le soulève, tout en surmontant son poids et la résistance de l'air.

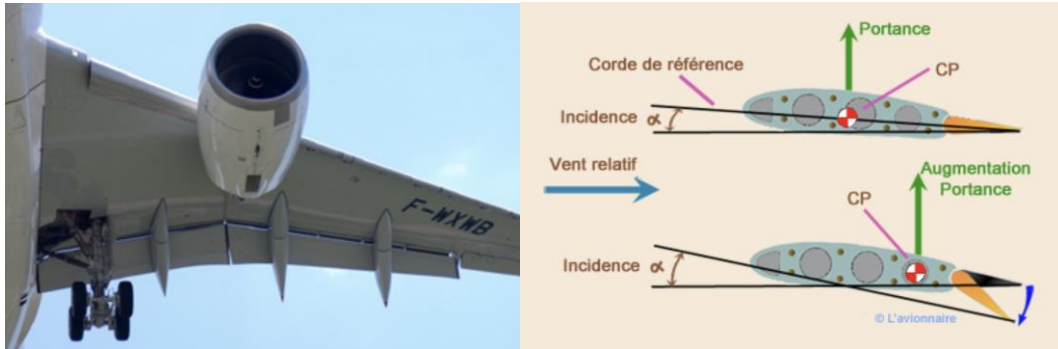


La portance par le **braquage** optimise la portance par la cambrure !

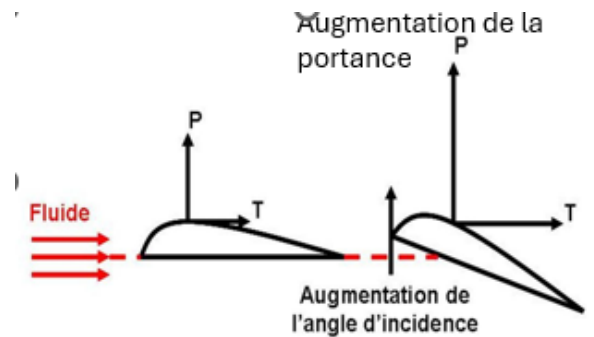
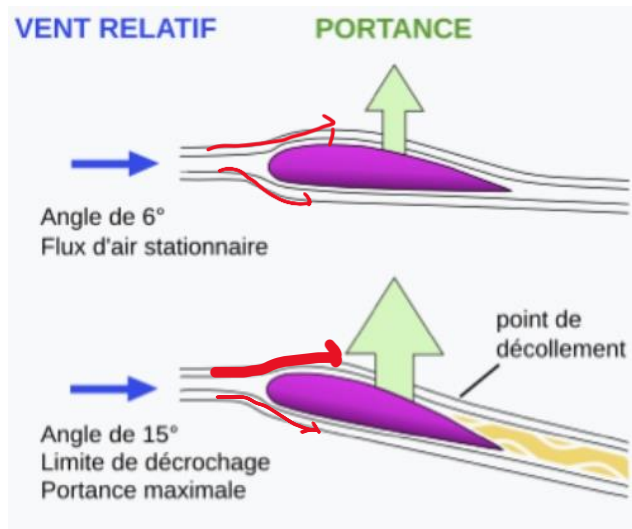


C'est ce que provoque l'aileron mobile d'une aile d'avion...Les volets sont un dispositif hypersustentateur et ont un double rôle : tout en augmentant la portance,

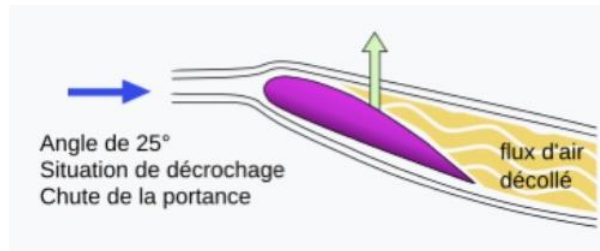
ils permettent une augmentation de la traînée et par conséquent, autorisent de plus faibles vitesses, ce qui est important au décollage et à l'atterrissage !



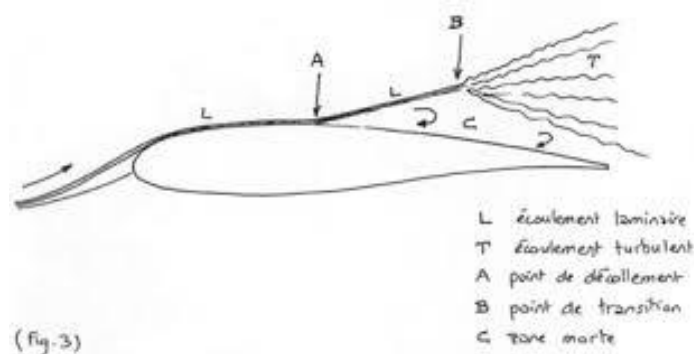
En augmentant le braquage, une partie du flux va buter sur l'intrados mais une bonne partie s'échappent vers l'extrados selon le principe de continuité car une partie des molécules sont attirées par les molécules déjà accélérées par la convexité de l'aile. Ce détournement des flux augmente le nombre de molécules qui circule sur cette face convexe et donc le différentiel de pression et au final la portance.



Mais on ne peut pas braquer l'aile au-delà d'une certaine limite.

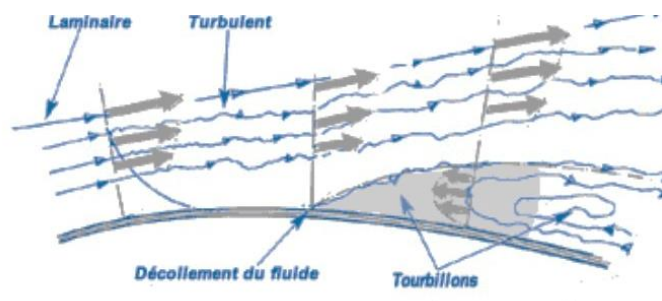


En continuant de braquer une aile, on arrivera à un angle où les flux sur l'extrados, emportées par leur vitesse, n'arrivent plus à suivre la surface et se décolle pour reprendre la direction de l'écoulement général.



On peut assimiler le décollement à un dérapage ...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.

En aval d'une ligne de décollement, les flux organisés laissent la place à d'importants tourbillons. L'écoulement devient turbulent.



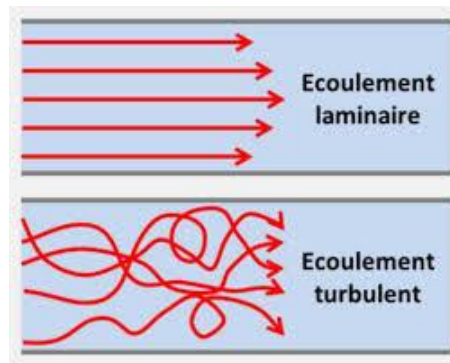
Les pressions sur l'extrados remontent. La traînée devient plus importante. Le différentiel de pression entre les deux faces diminue : autrement dit, la portance diminue

La force aérodynamique en est considérablement réduite,

h) Flux laminaire ou flux turbulent.

Il faut en effet distinguer **deux types de flux** : les **écoulements laminaires** et les **écoulements turbulents**.

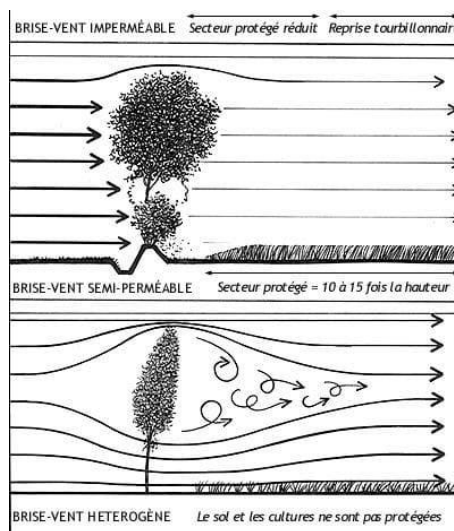
On dit d'un écoulement qu'il est laminaire quand il dessine des lignes orientées, non perturbées ni mélangées entre elles et si sa vitesse est constante en un point donné de l'espace.



Un écoulement est turbulent s'il est irrégulier et variable en butant sur un objet ayant une mauvaise pénétration.

Un flux laminaire génère une traînée presque nulle contrairement à un flux turbulent

Ces principes physiques s'appliquent dans la vie courante



Voici l'exemple de brise-vents végétaux...

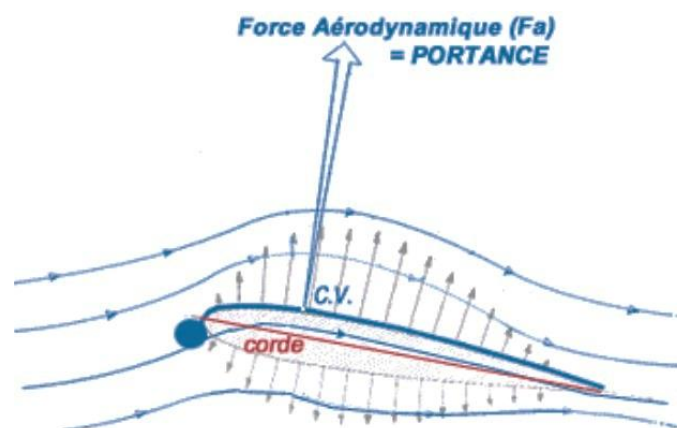
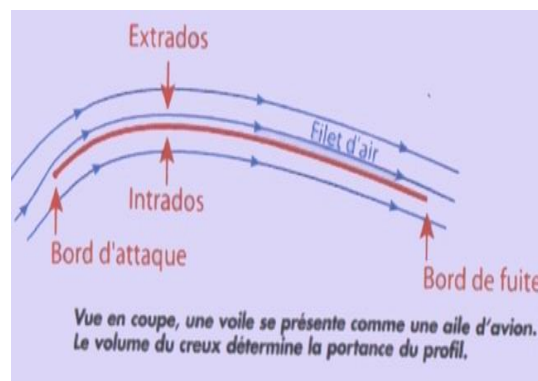
2 - APPLICATIONS A NOS VOILES

Ces règles de mécanique des fluides s'appliquent parfaitement aux voiles de nos bateaux.

Selon ces règles de physique, le vent ne pousse pas votre voilier, il l'aspire ! Exactement comme un avion ne s'appuie pas sur l'air pour voler, mais est aspiré par la dépression générée par la circulation de l'air sur les deux faces profilées de ses ailes.

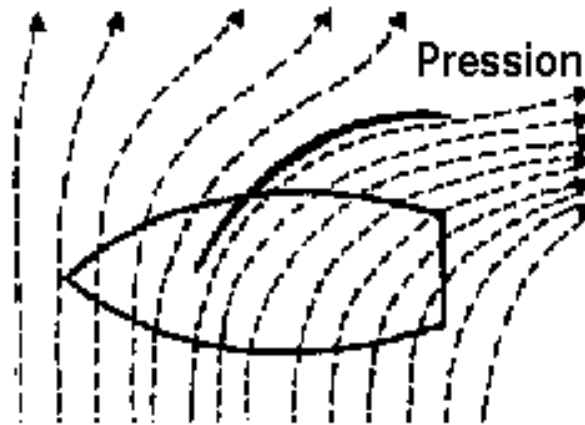
AU PRES, la voile d'un voilier est une aile «creuse» pourvue d'un intrados et d'un extrados. qui sont dans un plan vertical et non par horizontal, c'est là la différence.

Lorsque le vent rencontre la voile, il se sépare en deux filets d'air qui longent, l'un la face externe (l'**extrados**,) et l'autre la face interne (l'**intrados**) de la voile.



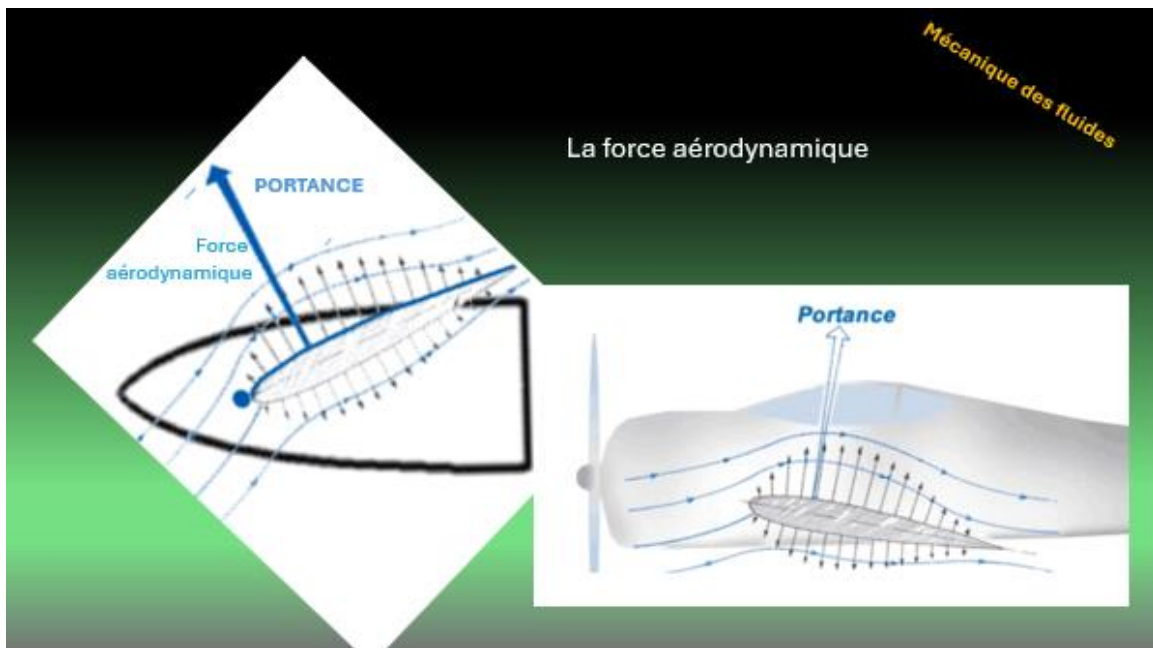
Parce que **sous le vent de la voile** (selon nos termes marins au vent et sous le vent bien sûr) l'air dévié par la voile accélère, il **se crée une dépression**.

Dépression - Suction (lift)



Les filets d'air arrivent à espacements réguliers

Au vent de la voile, à l'inverse, l'air s'étale dans le creux et ralentit créant une surpression.



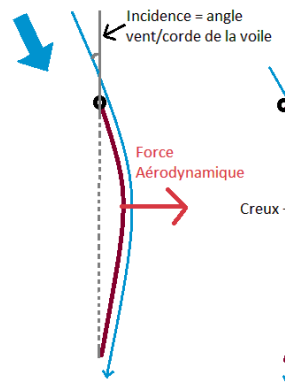
On retrouve des schémas similaires à ce que nous avons vu pour une aile d'avion. Le cumul des deux forces donne la force aérodynamique totale qui s'exerce sur la voile.

Voilà pourquoi on considère que les voiles sont plus aspirées que poussées au près

Si on développe...La voile interagit avec l'air, un fluide dont les molécules possèdent entre elles une force attractive qui les rattache...

Aux faibles angles de braquage, donc au près, le vent glisse sur la voile ; l'écoulement le plus important est sous le vent (extrados), et il est accéléré sans décollement. Au

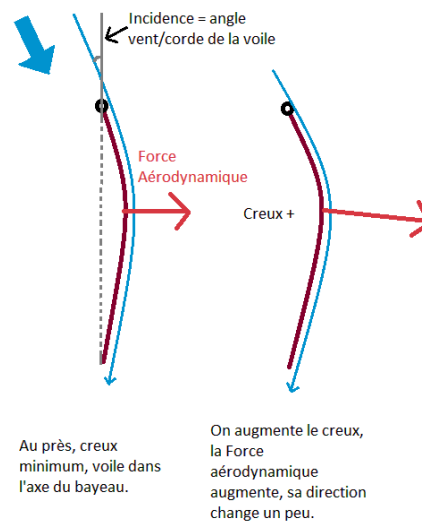
près, quand les voiles sont bien réglées, l'air circule sans former de tourbillons, on dit



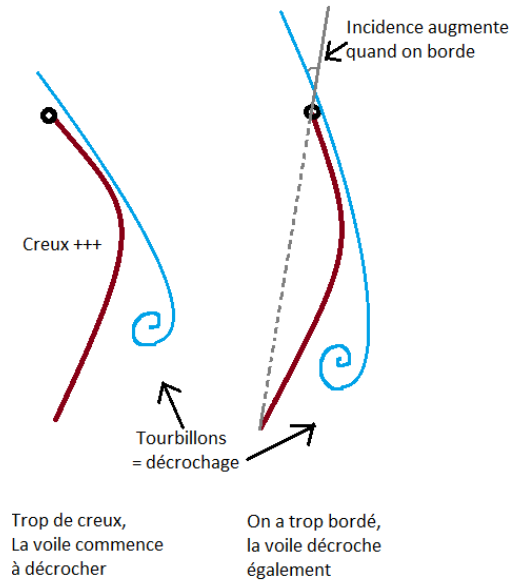
que l'écoulement est laminaire.

Les écarts de vitesse et de pression entre les deux faces de la voile sont à l'origine d'une portance ou force aérodynamique.

Si on augmente légèrement le creux de la voile, situation qui suit, la force aérodynamique augmente mais elle change légèrement de direction. Elle tire un peu moins vers l'avant. Si vous voulez naviguer au près vous ferez donc moins de cap avec une voile légèrement plus creuse. Cette solution fonctionne bien dans le petit temps, ou dans le clapot, deux situations où on a besoin de puissance !



Si on augmente légèrement le creux de la voile, la force aérodynamique augmente mais elle change légèrement de direction. Elle tire un peu moins vers l'avant. Si vous voulez naviguer au près vous ferez donc moins de cap avec une voile légèrement plus creuse. Cette solution fonctionne bien dans le petit temps, ou dans le clapot, deux situations où on a besoin de puissance !



De façon que l'on pourrait juger paradoxale, trop border une voile provoque également un décrochage et la vitesse en pâtit.

Si vous bordez trop vous cassez le flux laminaire et vous passez en flux perturbé. Le bateau se « scotch » et gîte exagérément sans pouvoir accélérer, il se trouve comme bridé. Il faudra choquer de l'écoute pour raccrocher les filets d'air

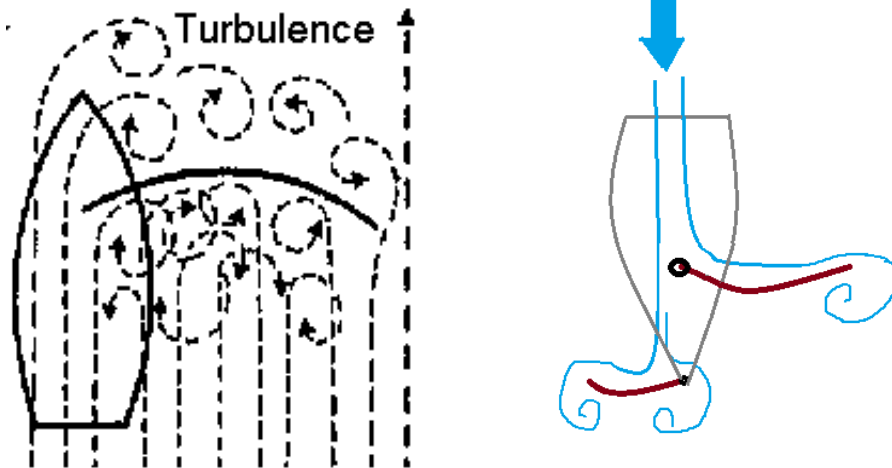
Du près et jusqu'au largue, la voile doit travailler en finesse, ce qui signifie que son attaque est placée parallèlement ou peu s'en faut à l'axe du vent : et l'écoulement est dit laminaire.

Les penons matérialisent le type d'écoulement sur les faces d'une voile. Ils permettent de visualiser les zones affectées par des tourbillons dus à un décollement : les penons s'agitent alors au lieu d'être tendus vers l'aval. Les penons serviront de guide d'abord au régleur puis au barreur.



Au contraire de l'allure de près, DU LARGUE AU VENT ARRIÈRE, on travaille en poussée, en flux perturbé.

Au portant, l'écoulement de l'air est très perturbé comme on le voit sur ce schéma !



Sur un voilier de croisière, les filets d'airs commencent à décrocher à partir du travers. Ensuite plus vous abattez, plus la pression directe du vent dans l'intrados prend le dessus. Au vent arrière, la force aérodynamique devient proportionnelle à la poussée du vent apparent dans vos voiles. A ce moment-là on peut vraiment dire que nos voiliers sont poussés par le vent.

Inutile de lire les penons, nous ne sommes plus en flux laminaire, mais en flux perturbé et de ce fait ils n'indiquent plus rien d'exploitable.

En poussée, le meilleur réglage est grosso modo la bôme perpendiculaire à la direction du vent. Et à cette allure, des voiles creusées sont préférables.

L'importance est mise sur la surface projetée des voiles. La meilleure voile pour ces allures est le spi, voile creuse par excellence.

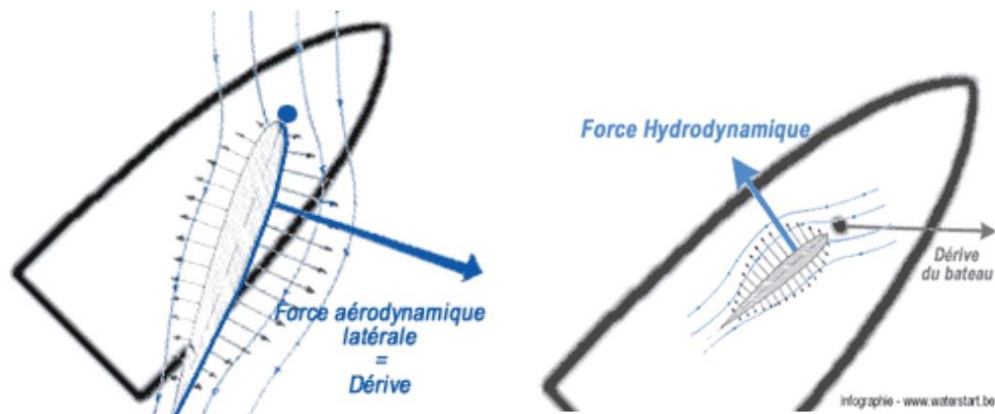
3 - LES FORCES HYDRODYNAMIQUES

Sur une voile d'avion, les ailes contribuent à la sustentation de l'appareil tandis que le moteur pourvoit à son avancement.

Sur un voilier, le plan porteur aérien a pour rôle de faire avancer le bateau tandis que sa flottabilité est assurée par la loi d'Archimède.

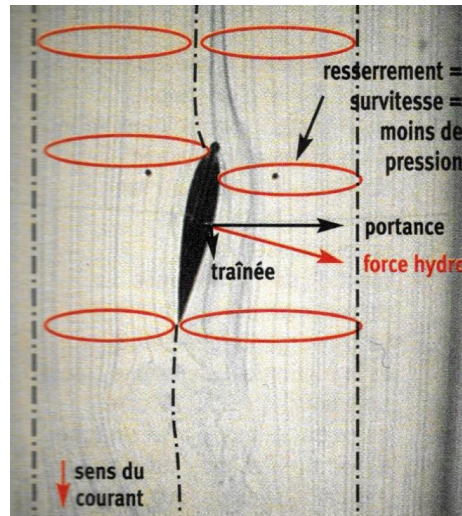
Mais vent arrière excepté, la force aérodynamique d'un bateau agit non pas dans le sens de la marche, mais en diagonale par rapport au cap désiré. Le bateau avance en crabe dans la direction de la force aérodynamique. On dit alors qu'il **dérive**

Pour gagner au vent, donc remonter au près, il est indispensable qu'une force s'oppose à l'action de dérive donnée par les voiles. C'est pourquoi les voiliers sont munis de plans anti-dérives appelés parfois dérive ou sinon quille et safran : ceux-ci génèrent une force anti-dérive dans l'eau qui va s'opposer à la glissade du voilier. Ce plan anti-dérive a pour objectif de créer une force hydrodynamique qui s'oppose à la force aérodynamique latérale



Le mode d'action des appendices marins est le même que celui des voiles

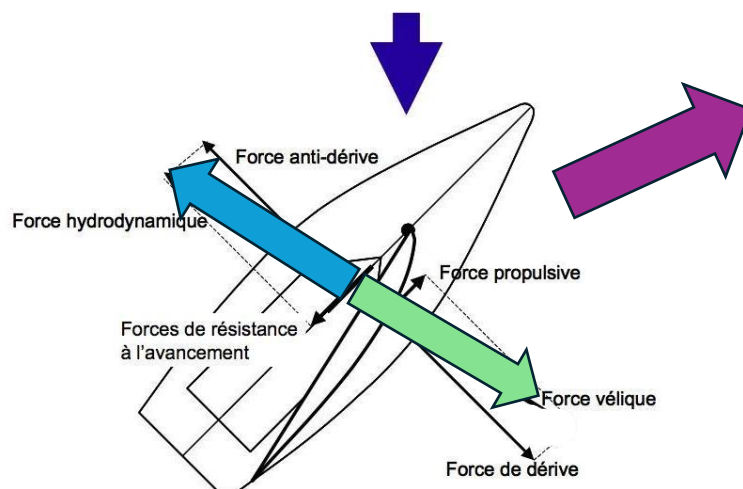
De part et d'autre du voile de quille, les tubes de courant sont divisés. Du côté de l'extrados, le tube de courant se trouve d'abord élargi en amont puis écrasé vers le bord d'attaque du voile de quille. Et l'inverse pour l'intrados. Il s'ensuit un déséquilibre de vitesse et de pression entre les deux faces.



La quille (ou la dérive) soumise à ce courant, voit apparaître à l'extrados une force hydrodynamique selon le même principe que pour la voile. C'est cette force hydrodynamique qui va s'opposer à l'action de dérive et permettre au bateau de moins dériver.

Les voiles de quille et de safrans sur nos voiliers sont toutefois symétriques et biconvexes. Pour qu'ils génèrent une telle portance, il faut que le voilier avance pour créer le flux d'eau mais aussi que son dérapage génère le braquage de la quille. Quand vous naviguez, vous avez perçu la nécessité de faire vitesse pour réduire la dérive.

Notez que le plan porteur de la quille est beaucoup moins grand que celui proposé par les voiles, en raison des différences de densité des deux fluides, bien sûr.



Et au final pour répondre à la question « comment mon voilier arrive à avancer contre le vent », il vous suffira de rassembler les forces aérodynamique et hydrodynamique sur un même schéma.

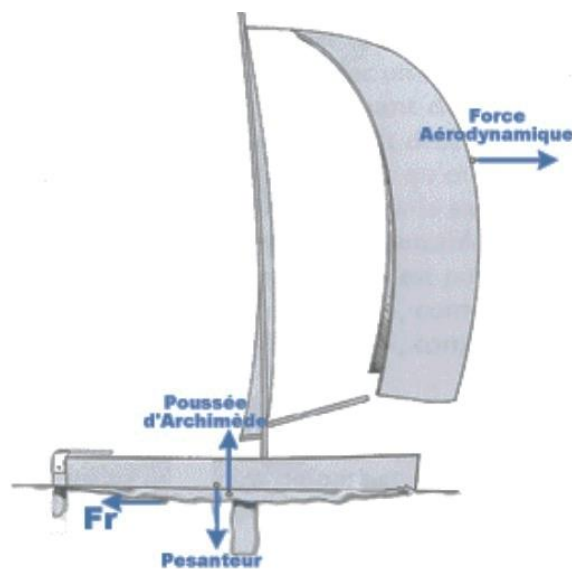
Prenons un voilier naviguant au près : sa voile bordée va faire naître une force aérodynamique qui va tout d'abord le faire dériver. Pour que le voilier avance au moins un peu, il suffit que la force vélique générée tire, même très légèrement vers l'avant.

Et une fois que le bateau a atteint un peu de vitesse, c'est la quille 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.

Au vent arrière, la situation est différente. 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

Au vent arrière, le bateau ne fait que dériver dans la bonne direction sous la poussée du vent. Et vu qu'il n'y a plus de déviation latérale du bateau, le plan anti-dérive est superflue. Pour éviter le frein hydrodynamique de sa présence, on peut même reléver la dérive sur un dériveur. ce qui évite qu'elle ne fasse effet "croche-patte"



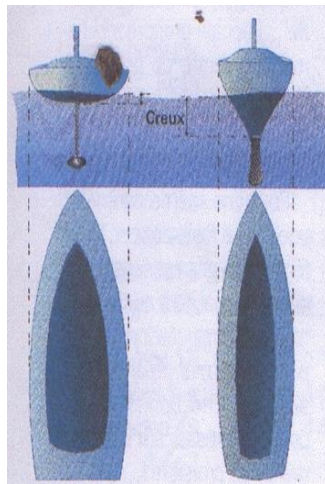
4 - LA TRAINÉE PARASITE DU VOILIER

En avançant, le volume de la coque immergée freine également le bateau dans sa progression. Cette force, opposée à l'avancée du bateau, est la **force de résistance de carène**

Un voilier génère une trainée dans l'eau que l'on peut assimiler à un frein, qui contrecarre l'avancée du voilier. Celle-ci est en grande partie constituée de la résistance de la carène

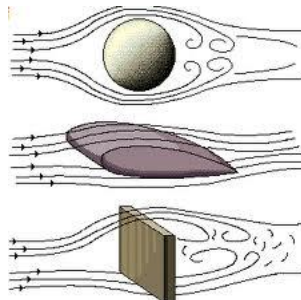
Elle dépend pour beaucoup de la surface mouillée et est toujours défavorable à l'avancée du bateau. Voici deux carènes de formes différentes, avec des surfaces mouillées différentes. Il faudra tout faire pour minimiser cette surface mouillée.

Voici deux carènes différentes qui présentent des surfaces mouillées fort différentes (cf schéma qui suit)



Attention donc à

- **la traînée de forme**, qui concerne le passage de la carène dans l'eau. La traînée de forme dépend de la géométrie de l'objet.
- On voit bien qu'un corps profilé génère un coefficient de traînée réduit



- La forme de carène d'un voilier est bien sûr fixe et ne peut être modifiée en navigation. Mais la surface mouillée, elle, peut être travaillée.

On se doute bien qu'un voilier dont la forme est peu propice à la pénétration dans l'eau, qui plus est trop chargé, va engendrer des forces de carène importantes.

La traînée induite par les plans porteurs dépend de leur dessin et au moins pour le safran de la qualité du barreur : un barreur qui place la pelle du safran de travers freine le bateau. **Les traînées parasites** dépendent aussi de la propreté de la carène : une carène sale peut faire perdre un nœud.

*(Parce que les molécules du fluide qu'est l'eau s'accrochent aux parois solides et que selon le principe de continuité, elles freinent leurs voisines. Ce n'est qu'à une certaine distance qu'elles retrouvent une vitesse libérée de cette friction. La pellicule de transition s'appelle la couche limite et cet échange par frottement s'appelle **la traînée de friction** qui dépend de l'importance de la surface de carène, et de sa préparation*

*Les passe-coques, les crépines, la chaise support d'arbre d'hélice, créent **une traînée parasite** d'où l'utilité de bien les intégrer au dessin de la coque.)*

A cela s'ajoute la résistance de la vague d'accompagnement

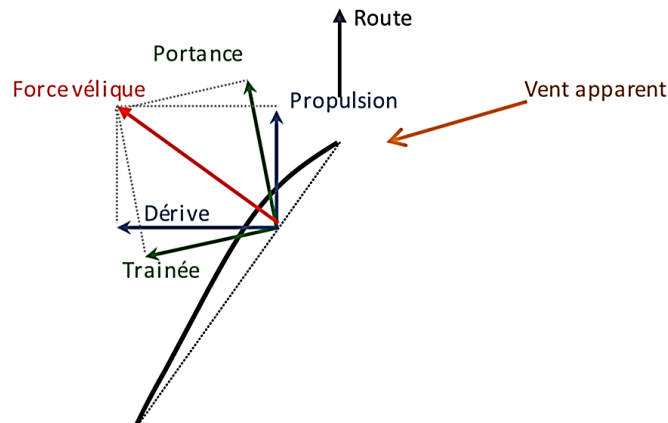
(Lorsqu'un bateau avance, il pousse devant lui une vague d'étrave. Une partie de l'énergie dépensée est récupérée dans une seconde vague arrière. Ces deux vagues l'accompagnent. Le voilier plafonne en vitesse lorsque le soutien de la deuxième vague, arrive proche du tableau. On atteint alors la vitesse de carène qui limite votre vitesse, sauf à déjauger (au planning par exemple))

Et nous avons ici fait abstraction du fait que la surface de l'eau est rarement plate, d'où des perturbations constantes des appendices dans l'eau, des voiles dans l'air sans parler de la carène qui joue dans les deux camps.

Au terme de cette revue aérodynamique, on peut en conclure que la force vélique représente l'ensemble des forces aérodynamiques qui s'appliquent sur une voile ou sur un ensemble de voiles

Elle se décompose en deux vecteurs : la traînée toujours dans le sens de l'écoulement et une portance perpendiculaire à la traînée.

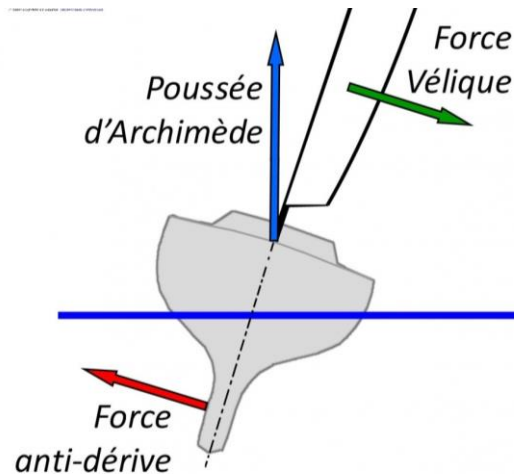
Il suffit, mais c'est une condition nécessaire, qu'elle soit au moins légèrement orientée vers l'avant pour contribuer à faire avancer le voilier.



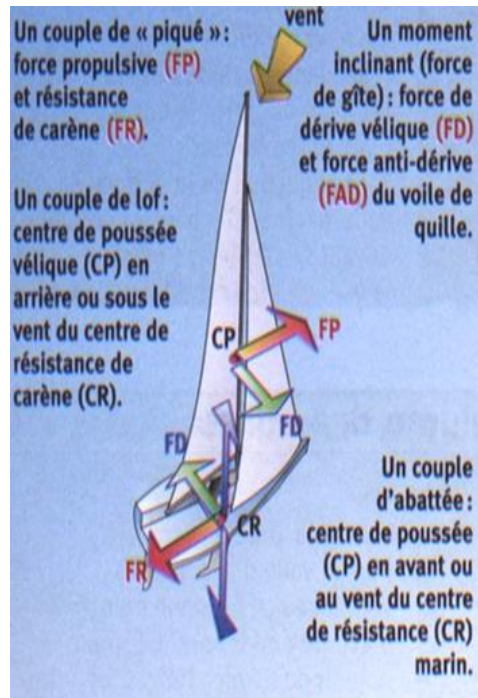
Les forces qui s'appliquent sur un voilier ne se résument pas à ces seules forces. Elles sont bien plus nombreuses et sont à l'origine de **couples de forces**. *Les couples de force représentant des forces qui se manifestent de façon égale mais opposée.*

Parce que le centre vélique s'applique à une certaine hauteur, nous avons **un couple de piqué** (divisé en la force propulsive et la résistance de carène) et **un moment inclinant**.

Parce que la gîte déplace le centre de carène sous le vent du centre de gravité, l'écart entre ces deux centres forme un **couple de redressement**.

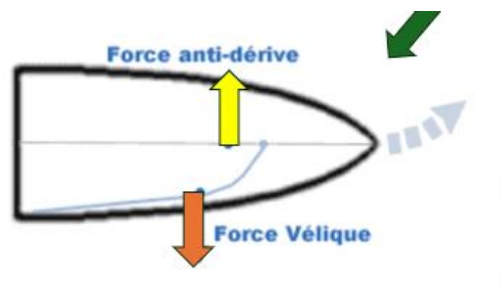
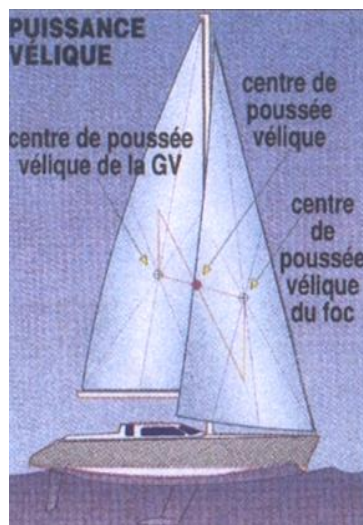


Enfin situé à l'aplomb du centre de carène, le centre vélique génère un **couple de lof ou d'abattée**.

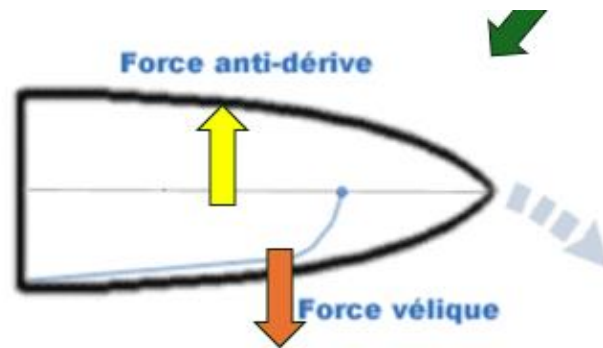


Ce couple de lof ou d'abattée favorise la rotation d'un voilier sur un axe passant par le centre anti-dérive des parties immergées. Toutes les forces en avant le feront abattre, toutes les forces en arrière le feront lofer. Donc là c'est très simple à comprendre j'augmente la force en avant, il abat ; en arrière, il lofe.

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



Inversement, le voilier abat si la force vélique s'exerce sur l'avant (le bateau est mou)



Le recul ou l'avancée du centre vélique est possible sur certains voiliers grâce à l'avancée ou le recul du mât, au réglage de sa quête, à la modification de l'assiette longitudinale du bateau (avancée ou recul de l'équipage), au réglage du creux de la voile ; tous éléments qui vont agir sur ce couple et son point d'application.

5 - SUR QUELS ÉLÉMENTS AGIR EN DEHORS DU RÉGLAGE DES VOILES POUR AMÉLIORER L'ÉQUILIBRE ET BONIFIER LA VITESSE DU VOILIER !

Comment améliorer ce qui permet d'accélérer

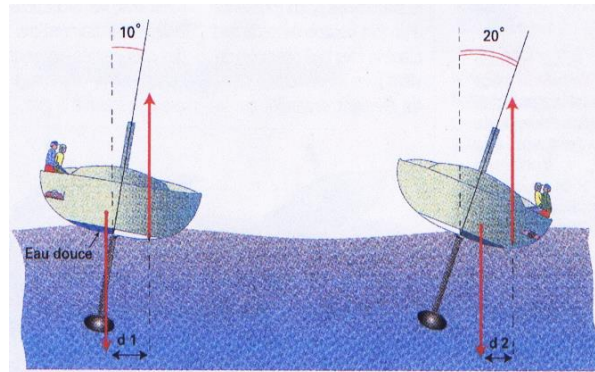
Hormis mieux profiter des vagues si elles sont dans le sens de la marche, c'est-à-dire bien barrer, et dans une moindre mesure, augmenter la longueur de coque immergée grâce à une gîte contrôlée, ou la recherche du planning, on a peu de moyens

Comment réduire ce qui freine le bateau. Nous avons plus de leviers à notre disposition

Le poids : on peut débarquer les équipements inutiles, utiliser le matassage, s'il est autorisé, pour mieux répartir les poids, et on peut mieux répartir l'équipage sur le bateau. De la même façon, il peut être favorable au portant et dans le petit temps d'avancer l'équipage pour sortir la voute arrière du bateau de l'eau et éviter une trop grande surface mouillée...

Le fait de gîter modifiera la stabilité de route, car le gréement s'incline et se déporte sous le vent. Il est faux de penser que plus un bateau gîte, plus il va vite. C'est

plutôt le contraire : un bateau qui gîte se vautre, dérape et marche en crabe. La gîte est à la fois un ennemi de l'équilibre, de la vitesse et de la sécurité. Elle provoque :



- chute de la vitesse du fait que la carène immergée est considérablement modifiée, et que la surface voilure projetée est considérablement réduite,
- augmentation de la dérive car la quille est moins efficace,
- barre qui devient ardente car l'axe de carène est dévié sous le vent et à tendance à faire lofer le bateau. Le bateau devient plus ardent. On vient de le voir. Et plus vous gîtez, plus vous lofez. Le « bateau passe sur sa barre » comme il se dit dans le jargon. C'est le départ au lof !

Dès que la gîte du bateau dépasse 15°, il faut réagir. Le fait de déporter l'équipage au vent d'un voilier réduit la gîte en augmentant le couple de redressement du voilier. Le rappel efficace est important en régate tout particulièrement. On maintient le bateau dans ses lignes en réduisant la gîte et on réduit le moment où il faudra réduire la surface de voile.



A l'inverse il est souvent bénéfique de placer les équipiers sous le vent dans le tout petit temps pour favoriser une petite gîte qui va réduire la surface mouillée. Accessoirement, cela aidera la voile à basculer sous le vent par ce biais si le vent n'est pas assez fort pour le faire lui-même.

L'équilibre d'un voilier est l'élément clé de sa vitesse et de sa facilité de conduite.

Un voilier aux voiles équilibrées va vite sans réclamer d'incessantes corrections de barre. (Un safran au travers de la route freine plus qu'une voile mal réglée.) Le travail du barreur et des équipiers en est facilité. Ou bien le pilote automatique consomme beaucoup moins.

Cet équilibre dépend de trois critères :

- l'assiette longitudinale du bateau,
- l'assiette latérale du bateau (la gîte), dont nous avons déjà parlé
- et bien sûr **LE RÉGLAGE DES VOILES.**