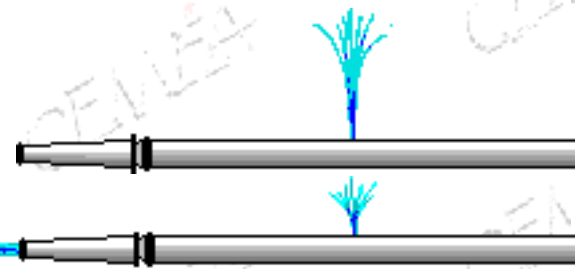


# AÉRODYNAMIQUE APPLIQUÉE A LA VOILE

## ⚓ Théorème de Bernoulli (Loi de conservation de l'énergie)

### ● Mise en évidence :

Le tuyau est fermé. Une pression s'exerce sur ses parois : c'est la pression statique. On peut l'évaluer en perçant le tuyau. La hauteur du jet s'écoulant par la fuite ainsi créée donnera une indication de sa valeur.



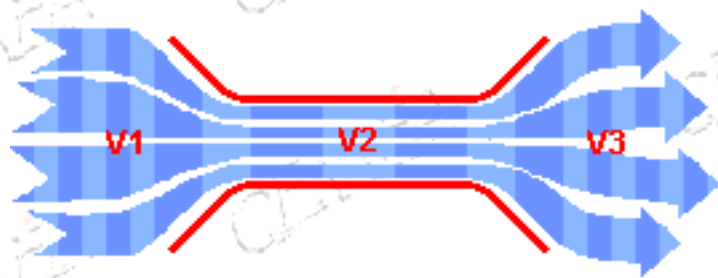
Le tuyau est ouvert. La pression statique diminue (Le jet sortant de la fuite est moins important). Au contraire, à l'embouchure du tuyau, c'est l'abondance. La pression dynamique est matérialisée par le jet sortant du robinet. On en conclut que la pression dynamique augmente lorsque la pression statique diminue et inversement.

### ● Le Théorème de Bernoulli affirme que :

**Pression dynamique + Pression statique = Pression totale (constante)**

## ⚓ L'effet Venturi

L'écoulement d'un fluide dans un tube à étranglement est particulier. Le débit à l'entrée est égal au débit de sortie. On en conclut que, dans l'étranglement, il y a accélération du fluide.



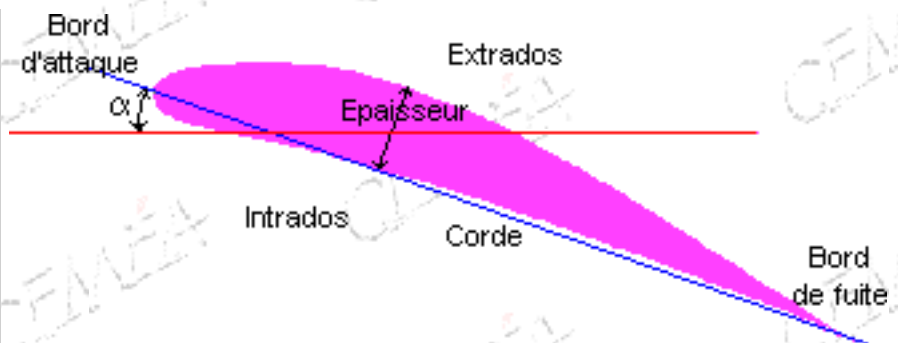
$$V1 = V3 < V2$$

La vitesse du fluide en 1 est égale à celle en 3 et inférieure à la vitesse en 2

Ces deux lois expliquent bien des choses dans le domaine de la voile, à commencer par la création des forces aérodynamique et hydrodynamique

## ⚓ Notion de profil

$\alpha$  : angle d'incidence entre direction du fluide / corde du profil



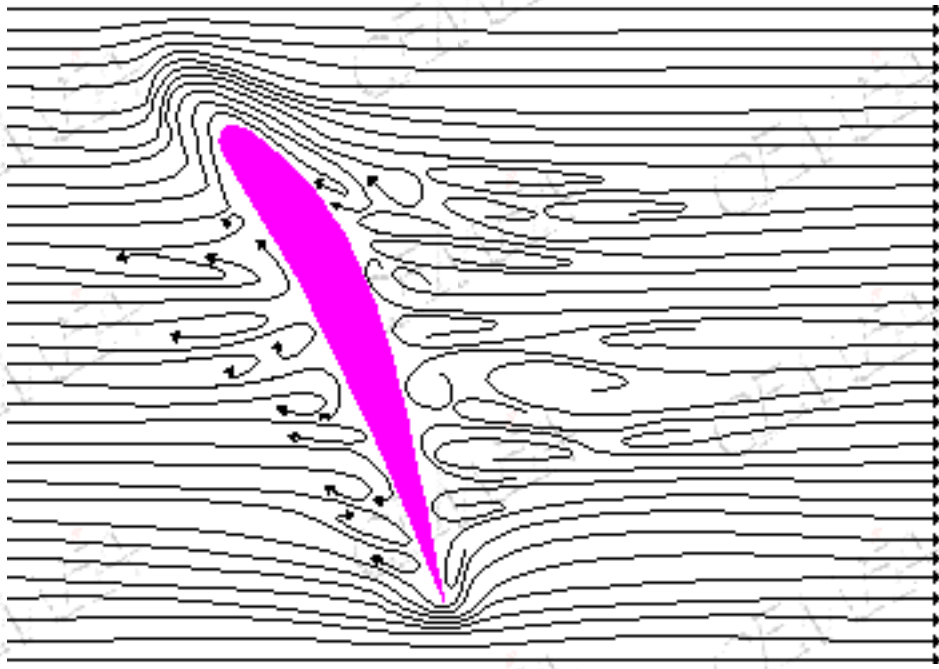
## ⚓ Notion d'écoulement

### ● Ecoulement laminaire

Se dit d'un écoulement de fluide qui, au voisinage d'une paroi, suit les formes de celle-ci.



● Écoulement turbulent



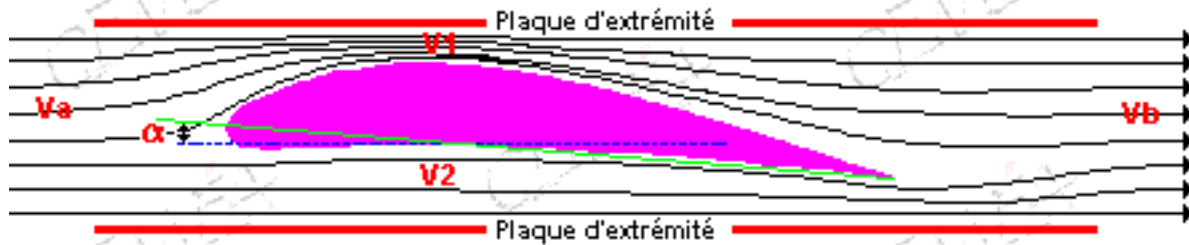
Exemple : au vent arrière, la voilure interrompt brutalement le flux. L'écoulement est turbulent.

Nous allons, pour la suite de ce chapitre, ne considérer que les écoulements laminaires.

# LA FORCE AÉRODYNAMIQUE (et hydrodynamique)

## La force aérodynamique

Cette force (et ses composantes) provient de la différence de pression entre l'intrados et l'extrados d'un profil placé au sein d'un écoulement, c'est à dire des différences de vitesse d'écoulement entre l'intrados et l'extrados.



Les plaques d'extrémité sont virtuelles. Elles représentent la limite à partir de laquelle l'écoulement du fluide n'est pas perturbé par l'obstacle.

Le débit de fluide en A est égal au débit du fluide en B (vitesse d'écoulement égale en A et en B)

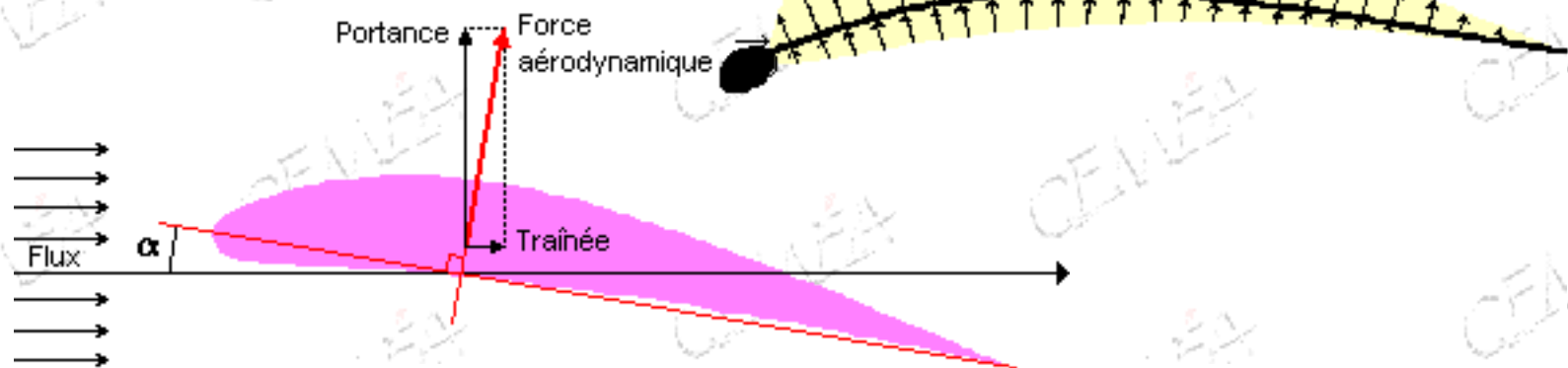
• Que se passe-t-il sur l'extrados ?

$V_1 > V_a$  : Accélération du flux. Effet Venturi entre le bord d'attaque et la plaque d'extrémité supérieure. Cette accélération sur l'extrados entraîne une dépression (Bernoulli : Quand la pression dynamique augmente, la pression statique diminue).

• Que se passe-t-il sur l'intrados ?

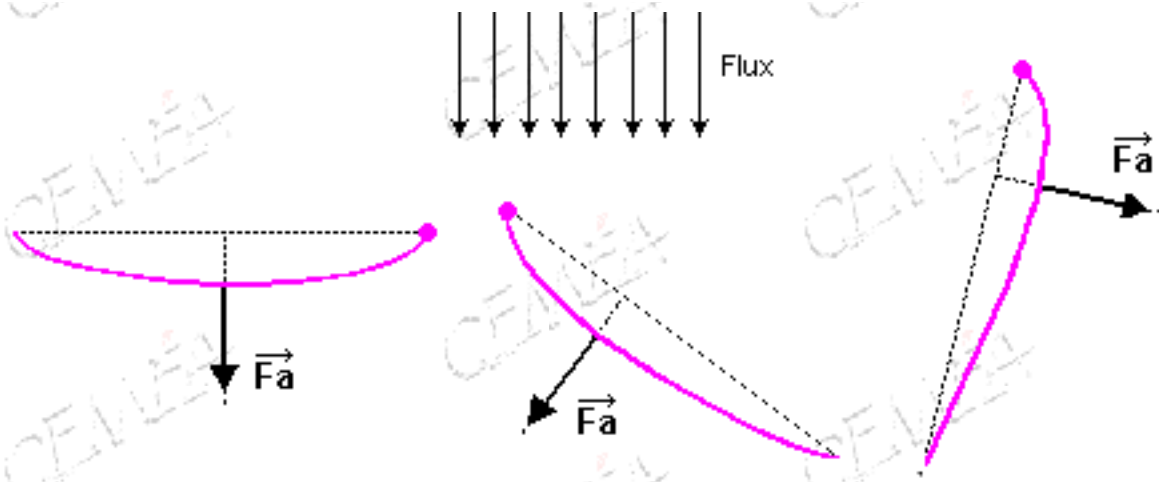
$V_2 < V_a$  : Ralentissement, entassement des molécules de fluide avant le goulet formé par le bord de fuite et la plaque d'extrémité inférieure. Ce ralentissement va entraîner une surpression sur l'intrados (Bernoulli : Quand la pression dynamique diminue, la pression statique augmente).

Il résulte de ces phénomènes une force exercée sur le profil : C'est la force aérodynamique (dans l'air) ou hydrodynamique (dans l'eau). Bien sûr, il ne s'agit pas en réalité d'une force unique mais plutôt d'un champ de forces, d'une infinité de petites forces agissant sur l'ensemble de la voile. La force aérodynamique est la somme (la résultante) de toutes les pressions agissant sur l'extrados comme sur l'intrados de la voile.



La force aérodynamique est représentée par un vecteur ( $\vec{F}_a$ ).

Elle peut être décomposée en une portance (perpendiculaire à la direction du flux) et une traînée (parallèle à la direction du flux et de même sens).



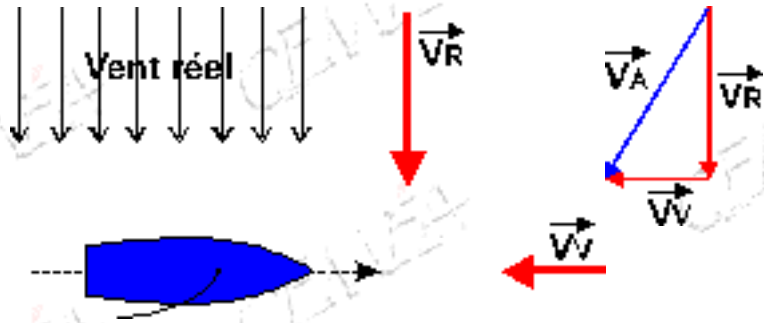
Elle est toujours sensiblement perpendiculaire à la corde du profil (la corde est une droite fictive qui va du bord d'attaque au bord de fuite d'un profil). Elle s'exerce au centre de poussée vélique (sur une voile ou un ensemble de voiles)

Dans l'eau se produit exactement le même phénomène. On parle alors de force hydrodynamique. Celle-ci s'exerce au centre de carène (sur une coque ou un ensemble de coques). Le centre de carène est le centre de gravité de la partie immergée de la coque.

# LE VENT RÉEL - LE VENT VITESSE - LE VENT APPARENT

Un voilier qui se déplace dans des conditions normales subit à la fois le vent atmosphérique (le vent réel) et le vent de sa vitesse (le vent vitesse). La composition de ces deux vents donne le vent apparent. On le représente par un vecteur, tout comme ses composantes.

$$\vec{V}_a = \vec{V}_r + \vec{V}_w$$

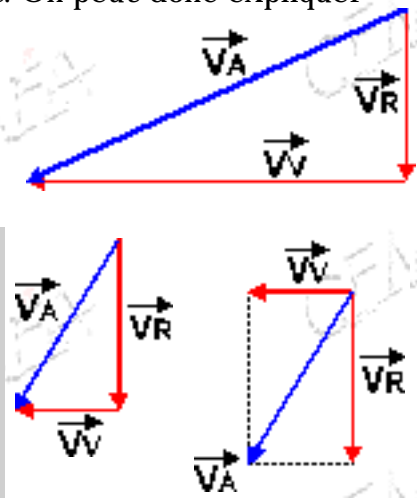


Le vent apparent résulte d'une addition (vectorielle) de deux vecteurs de vent. On peut donc expliquer ainsi le fait qu'un voilier puisse aller plus vite que le vent réel (Il se crée un vent apparent plus fort que le vent réel)

Et on peut constater aussi que cette variation existe aussi pour la direction.

Les variations en direction et en intensité du vent apparent influencent la conduite du bateau, surtout l'ouverture et la fermeture du plan de voilure.

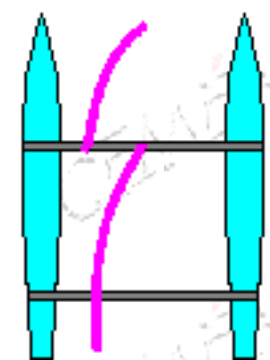
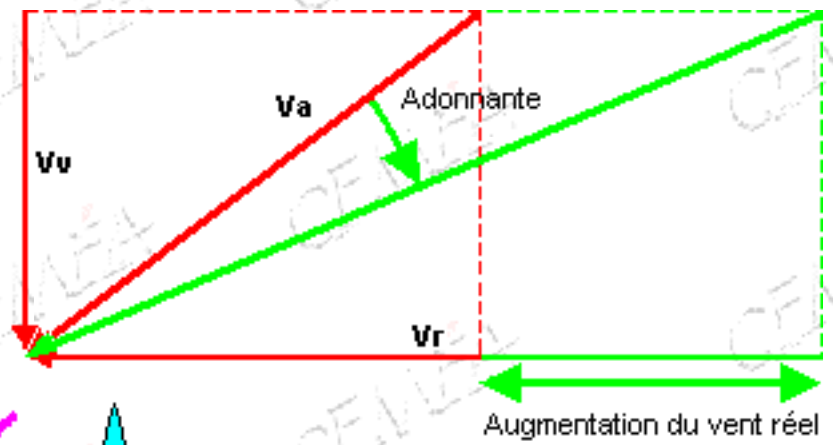
*A noter que ces deux schémas ci-contre sont deux représentations équivalentes de la même composition vectorielle.*



## ⚓ Modifications du vent apparent en fonction du vent réel et du vent vitesse

### • Augmentation du vent réel :

Lorsque le vent réel augmente (cas d'une risée, par exemple), le vent apparent augmente en proportion et s'éloigne de l'axe du bateau (il "adonne").



Le barreur peut alors :

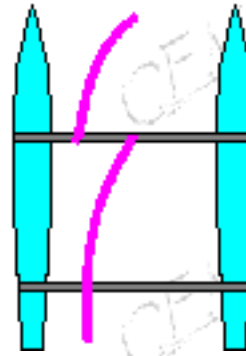
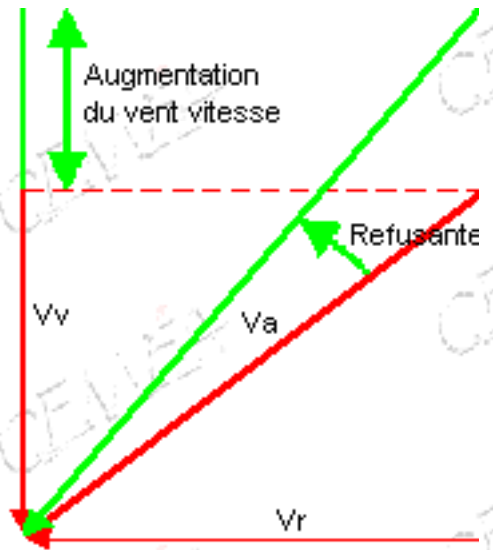
- soit choquer sa voile, s'il veut conserver sa direction (maintien de l'angle vent apparent / voile)
- soit loffer (gain au vent)

● Augmentation du vent vitesse

Lorsque le vent vitesse augmente (cas d'un surf ou d'une survente bien gérée), le vent apparent augmente en proportion et se rapproche de l'axe du bateau (il "refuse").

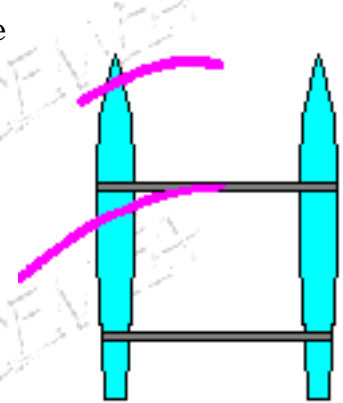
Le barreur doit alors :

- soit border sa voile, s'il veut conserver sa direction (maintien de l'angle vent apparent / voile)
- soit abattre



● Cas du vent arrière

Le vent vitesse et le vent réel sont directement opposés. Pour un même vent réel, le vent apparent est donc inversement proportionnel au vent vitesse.



## LA POUSSÉE VÉLIQUE

La poussée vélique, ce n'est rien d'autre que la **force aérodynamique**. Née du passage du vent sur la voile, elle est perpendiculaire à la **corde** de celle-ci et s'applique au centre de poussée vélique.

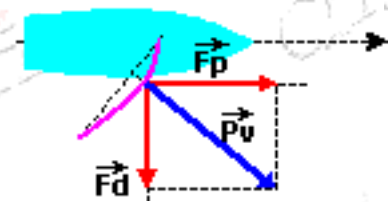
La grandeur de la poussée vélique est fonction de plusieurs paramètres :

- L'angle d'incidence (direction du vent apparent/ plan de voilure). L'optimum varie selon les voiles.
- La concavité de la voile (le "creux") .
- La vitesse du flux d'air (la force aérodynamique varie proportionnellement au carré de la vitesse du fluide).

### Décomposition de la poussée vélique

La Poussée vélique ( $\vec{P}_v$ ) peut être décomposée en plusieurs autres forces. La décomposition la plus courante donne :  
la Force propulsive ( $\vec{F}_p$ ), orientée parallèlement à l'axe du bateau. C'est la composante qui fait avancer le voilier.

La Force de dérive ( $\vec{F}_d$ ), orientée perpendiculairement à l'axe du bateau. C'est elle qui fait déraper le bateau sous le vent.



### Cas particulier du vent

arrière

Il n'existe que deux forces :

- La poussée vélique, qui s'exerce dans l'axe du bateau. L'écoulement n'étant plus laminaire, la poussée vélique est beaucoup moins forte.
- La force de traînée, elle aussi dans l'axe du bateau, mais de direction opposée. Elle est générée par le frottement de la coque dans l'eau.



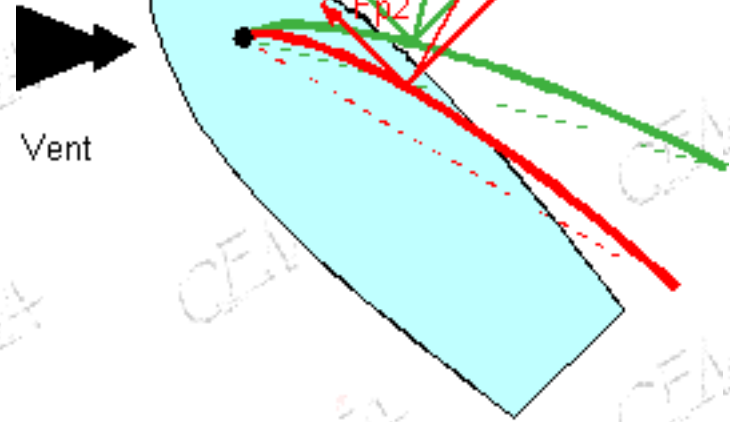
## 🌀 Influence du réglage des voiles

Régler correctement sa voile, c'est produire une poussée vélique :

- la plus importante possible
- la plus orientée vers l'avant possible.

Une voile trop bordée entraîne une poussée vélique plus faible, mais surtout une mauvaise orientation de cette poussée.

Conséquence : le bateau avance moins (la force propulsive diminue) et dérive plus.

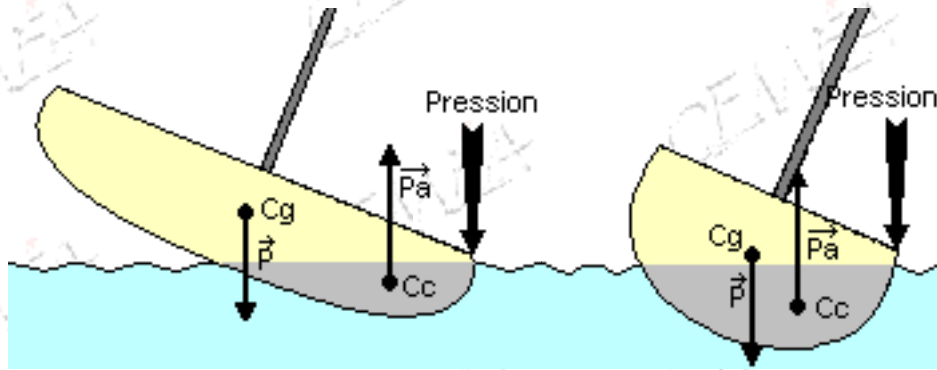




# HYDRODYNAMIQUE APPLIQUÉE A LA VOILE

## Le rôle de la carène

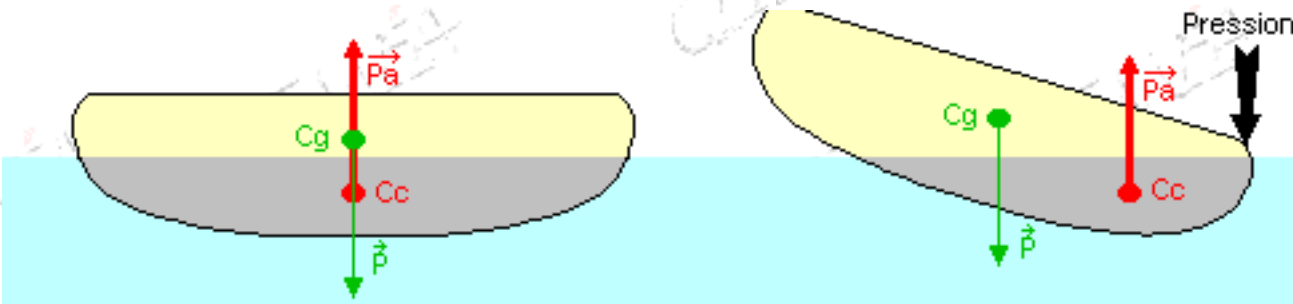
Il existe différents types de carène, plus ou moins stables.



C'est à dire que pour une même pression, le point d'équilibre sera obtenu plus ou moins vite, et avec des variations d'assiette importante. Et cela parce que la forme, le poids (et sa répartition) sont des paramètres qui influencent la stabilité.

## Stabilité de forme

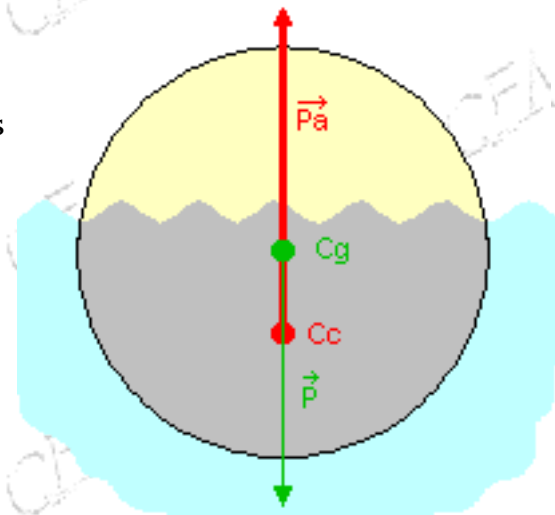
Sous l'effet d'une pression sur la carène se produit une variation d'assiette entraînant un déplacement du centre de carène. Cela fait apparaître un couple de redressement. Donc si la pression cesse, la coque retrouve sa position initiale.



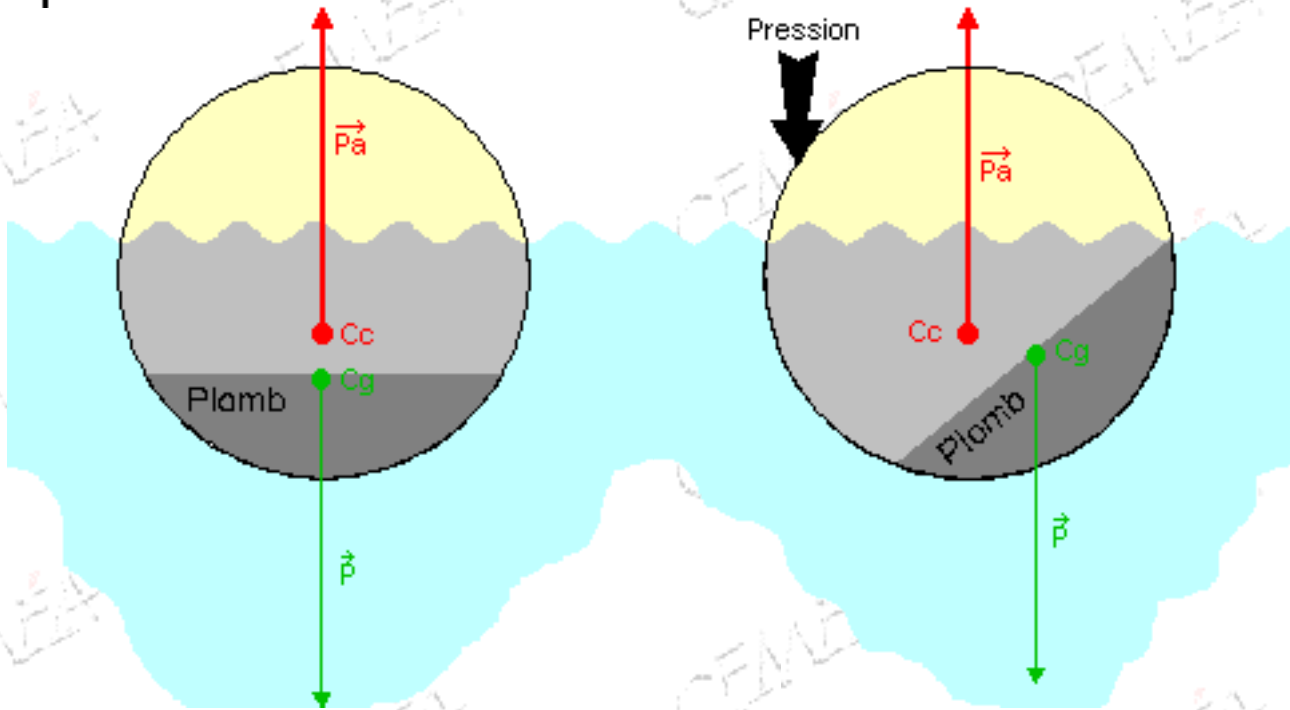
Le bateau est stable du fait de la forme de sa coque.

Prenons un cylindre

La stabilité de forme n'existe pas car lorsqu'on exerce une pression latérale, le volume immergé reste le même. Cc reste donc à la même place. Il n'y a pas de couple de redressement, le cylindre tourne sans revenir à sa position initiale.



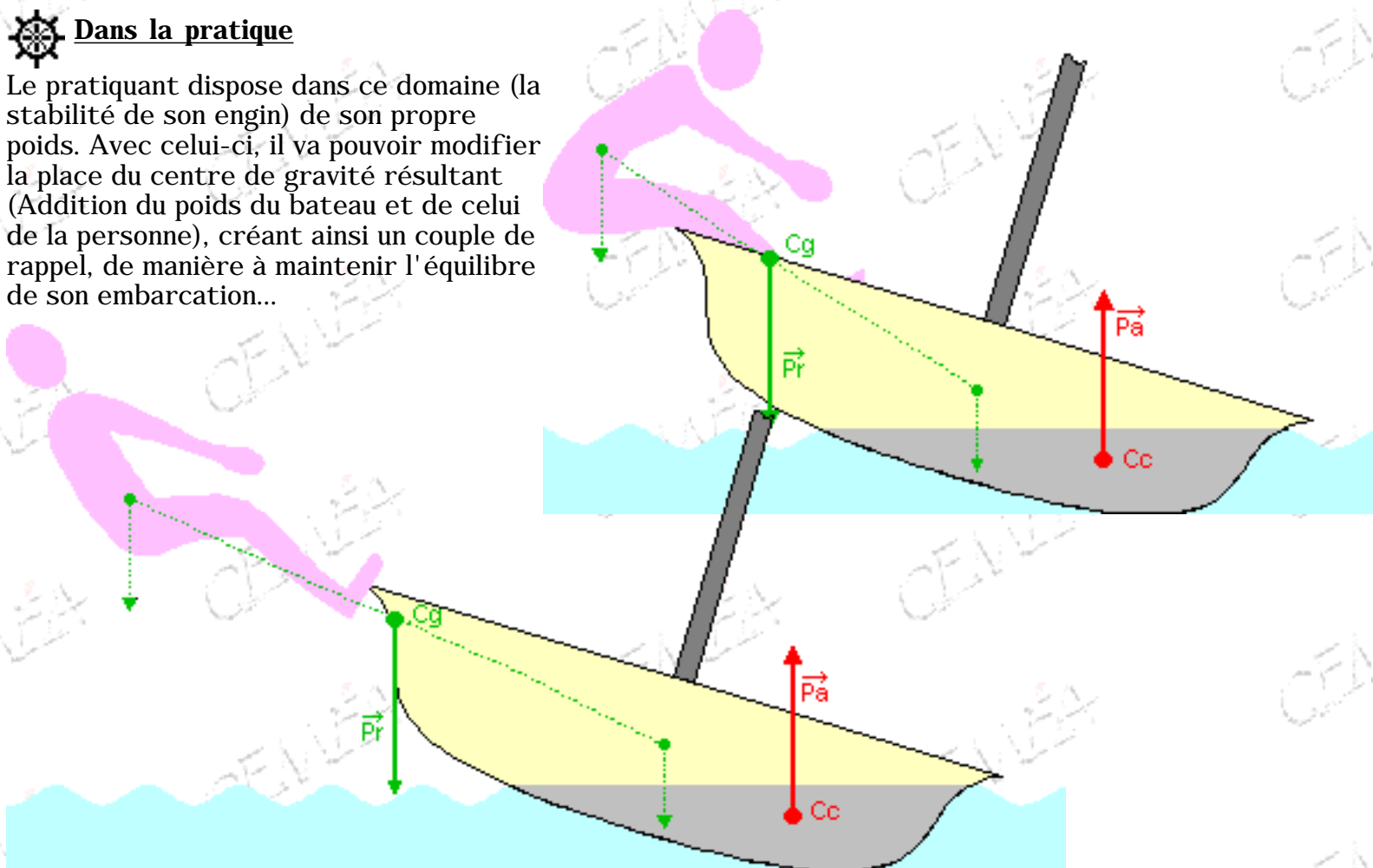
## Stabilité de poids



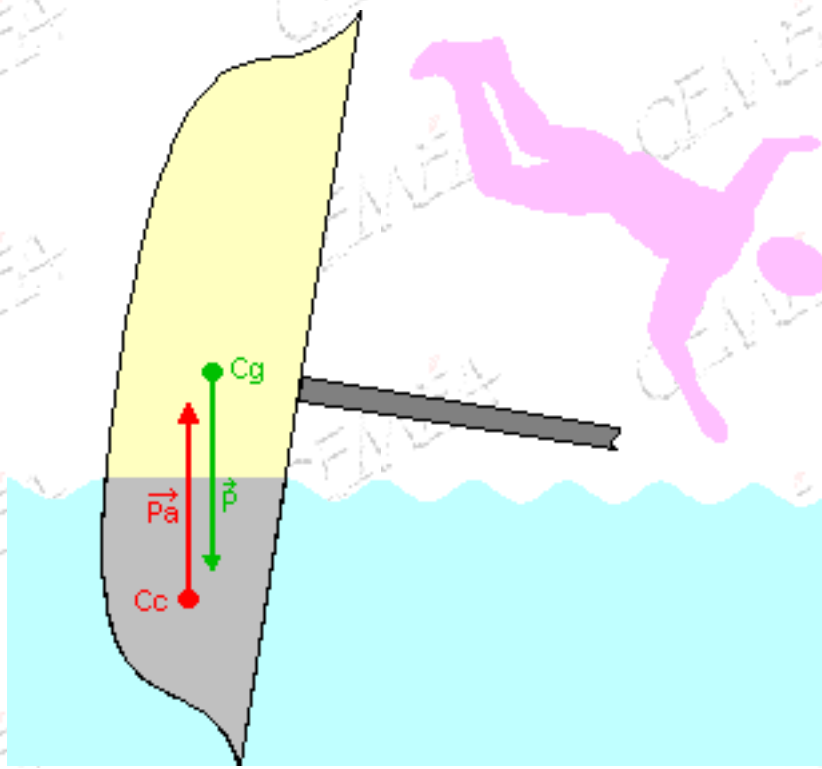
La stabilité est fonction de la position de  $C_c$  et  $C_g$ . Dans ce cas,  $C_c$  ne bouge pas, au contraire de  $C_g$  créant ainsi un couple de redressement. On parle ici de stabilité de poids.

## Dans la pratique

Le pratiquant dispose dans ce domaine (la stabilité de son engin) de son propre poids. Avec celui-ci, il va pouvoir modifier la place du centre de gravité résultant (Addition du poids du bateau et de celui de la personne), créant ainsi un couple de rappel, de manière à maintenir l'équilibre de son embarcation...



...et éviter le chavirage, qui survient lorsque le centre de gravité ( $C_g$ ) passe devant le centre de carène ( $C_c$ ).



## SYNTHÈSE AÉRO - HYDRODYNAMIQUE

### Equilibre des forces

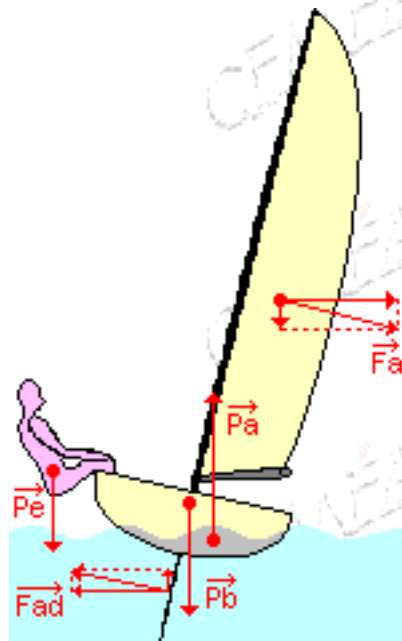
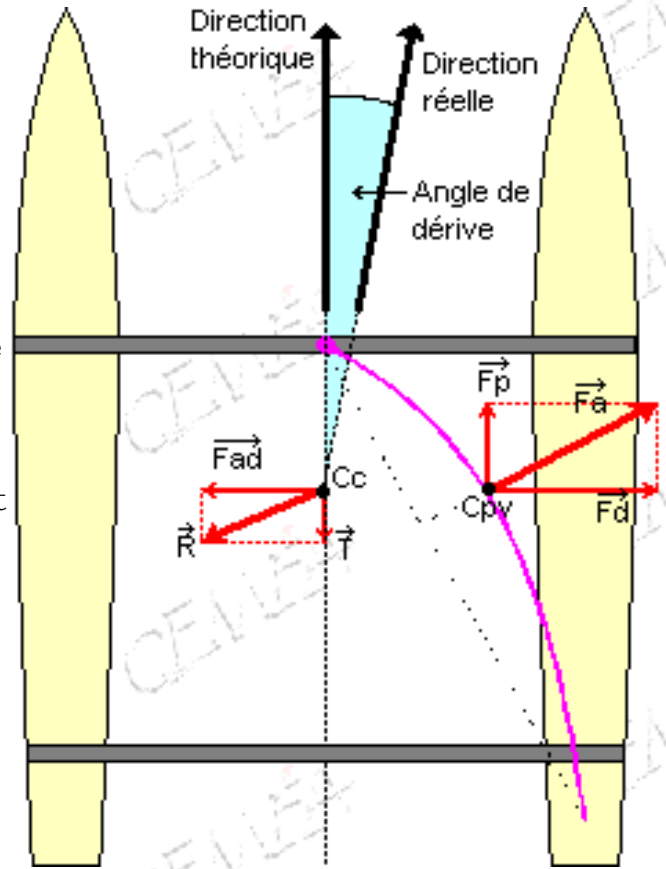
La composante  $\vec{F}_p$  (force propulsive) de la force aérodynamique ( $\vec{F}_a$ ) propulse le bateau vers l'avant.

Cependant la composante  $\vec{F}_d$  (force de dérive) a tendance à faire dériver le bateau. La direction réellement suivie n'est donc pas dans l'axe du bateau, mais légèrement décalée sous le vent. De ce fait, le bateau pénètre l'eau non pas de face, mais légèrement de côté. La réaction de la masse liquide sur la carène (toute la partie immergée du bateau) sous l'effet de la force de dérive va constituer une résistance à la dérive : la force anti-dérive ( $\vec{F}_{ad}$ ). Elle s'exerce, sur un catamaran, au niveau du centre de carène ( $C_c$ ). La force anti-dérive est le plus souvent moins importante que la force de dérive et ne peut complètement empêcher le voilier de dériver. Cet effet de la force de dérive se fait de moins en moins sentir au fur et à mesure que la force aérodynamique s'oriente dans l'axe du bateau (c'est à dire plus on s'éloigne du près).

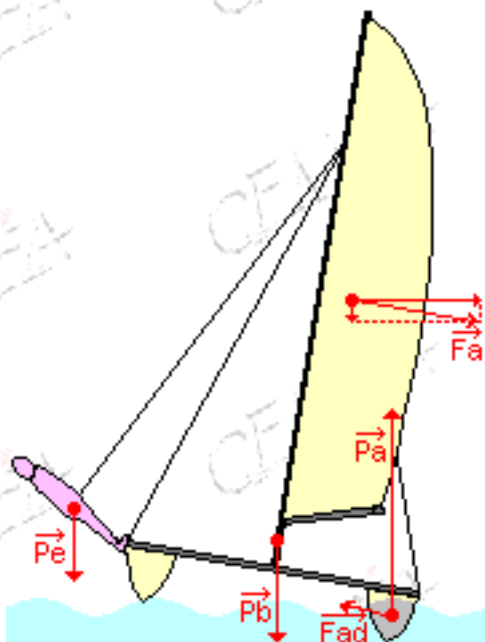
● A noter : Plus le bateau va vite et plus la force anti-dérive augmente. Elle augmente même au carré de la vitesse. Il est donc souvent plus rentable, essentiellement au près, de perdre un peu en cap pour gagner en vitesse, afin de limiter la dérive (compromis cap / vitesse).

Sur le plan vertical, l'équilibre est tout aussi important. On voit sur ce schéma l'ensemble des forces en jeu sur un dériveur.

Ici, la force anti-dérive ne s'applique pas au centre de carène, mais plus bas, à cause de la dérive qui a une efficacité plus importante que la coque. Cela a pour effet de créer avec la force aérodynamique un couple de forces tendant à renverser le bateau (couple de chavirage). Le rôle du barreur (ou de l'équipage) est de s'opposer, grâce à son poids, à ce couple de forces en en créant un second de sens opposé (couple de redressement) avec le poids du bateau et la poussée d'Archimède.

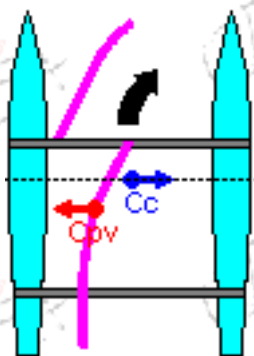
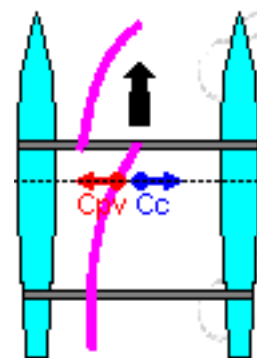


On retrouve les mêmes forces sur un catamaran. Seulement, la plupart des catamarans étant sans dérive, la force anti-dérive s'applique maintenant plus haut, à peu près au centre de carène, ce qui diminue le couple de chavirage. Par contre, le catamaran étant plus large, le couple de redressement est beaucoup plus important, surtout quand l'engin s'élève sur sa coque sous le vent. Le centre de carène passe alors brutalement du milieu du catamaran au flotteur sous le vent, augmentant d'un coup le couple de redressement. C'est ce qui explique la stabilité des catamarans (aux petits angles de gîte).



## Equilibre à la barre

Un bateau équilibré à la barre (ou neutre) est un voilier où le centre de carène est aligné dans un même plan avec le centre de poussée vélique.



Si le centre de poussée vélique est trop en arrière par rapport au centre de carène, alors le bateau devient "ardent" : il ne demande qu'à lofer.  
 Les causes possibles : un mat trop en arrière, un foc mal bordé (ou une grand voile trop bordée), un équipage placé trop en avant.  
 Remèdes possibles : si le bateau reste ardent, malgré de bons réglages de voile et un bon placement de l'équipage, une seule solution, redresser le mat vers l'avant (moins de quête).

Si le centre de poussée vélique est trop en avant par rapport au centre de carène, alors le bateau devient "mou" : il abat tout seul.  
 Les causes possibles : un mat trop vertical, une grand voile mal bordée, un équipage placé trop en arrière.  
 Remèdes possibles : si le bateau reste mou, malgré de bons réglages de voile et un bon placement de l'équipage, une seule solution, incliner plus le mat vers l'arrière (donner de la quête).

