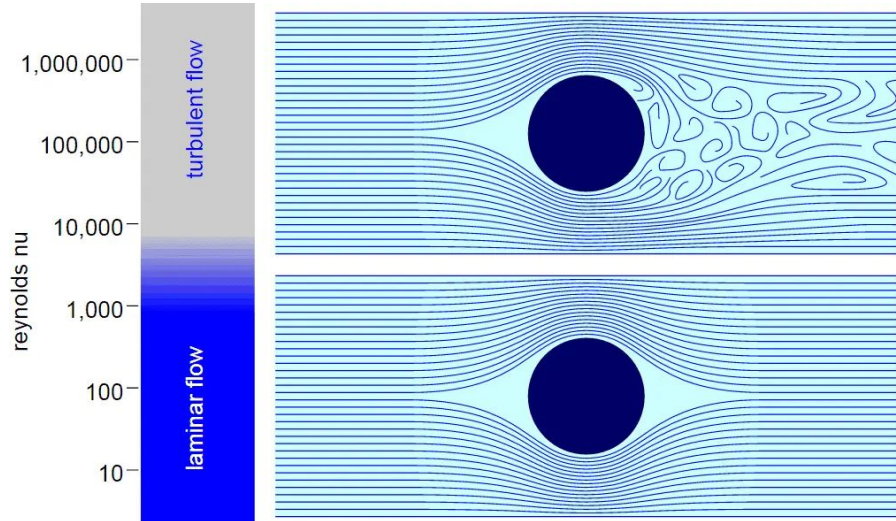


# La propulsion vélique : écoulements & forces



## Ecoulement :

L'écoulement c'est le déplacement d'un fluide. Pour matérialiser le déplacement d'un fluide dans un écoulement on imagine des lignes de courant.



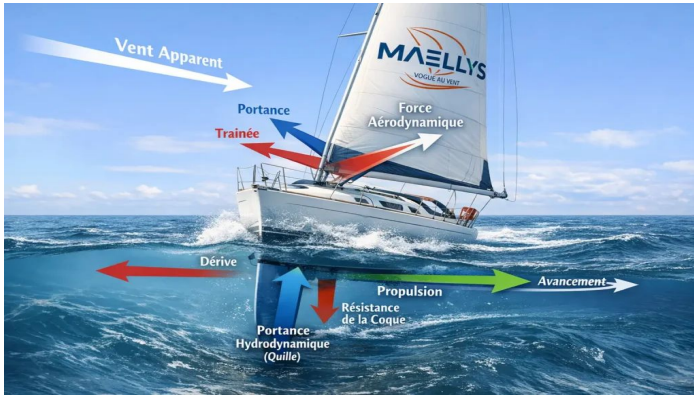
écoulement turbulent : les lignes sont totalement désordonnées, ce qui arrive typiquement aux allures portantes (vent arrière).

écoulement laminaire : les lignes de courant sont presque parallèles. Pour une voile, cet écoulement reste laminaire jusqu'à un angle d'incidence trop élevé (diapo5).

## Ecoulement laminaire créant un déplacement

En aérodynamique, on considère l'air comme incompressible le long d'une voile.

Pression qui engendre le mouvement (vitesse, diapo4)



$P_s$  : pression statique

$P_d$  : pression dynamique

Lorsque la vitesse relative du navire est faible, l'air est incompressible, mais ne l'est pas que lorsqu'il atteint des vitesses proches de celle du son. Un navire évoluant à des vitesses bien inférieures, les variations de pression ne suffisent pas à modifier la densité de l'air.

On pose l'hypothèse que la masse volumique ( $\rho$ ) reste identique en tout point de l'écoulement.

air :  $P_{atm}$

$$P_{totale} = \sum P = P_s + P_d \quad \leftarrow \frac{1}{2} \rho v^2$$

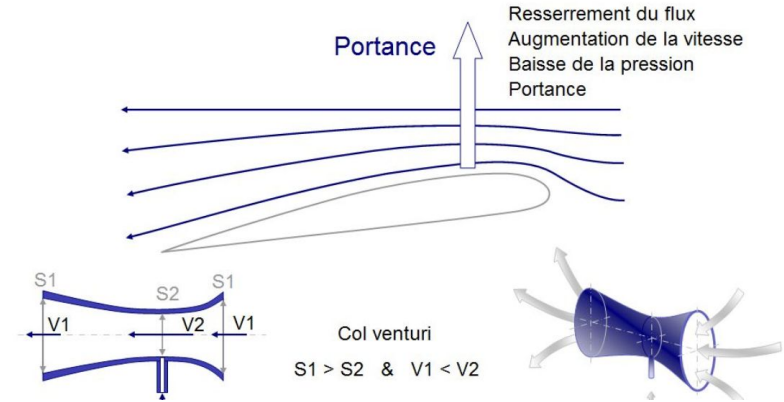
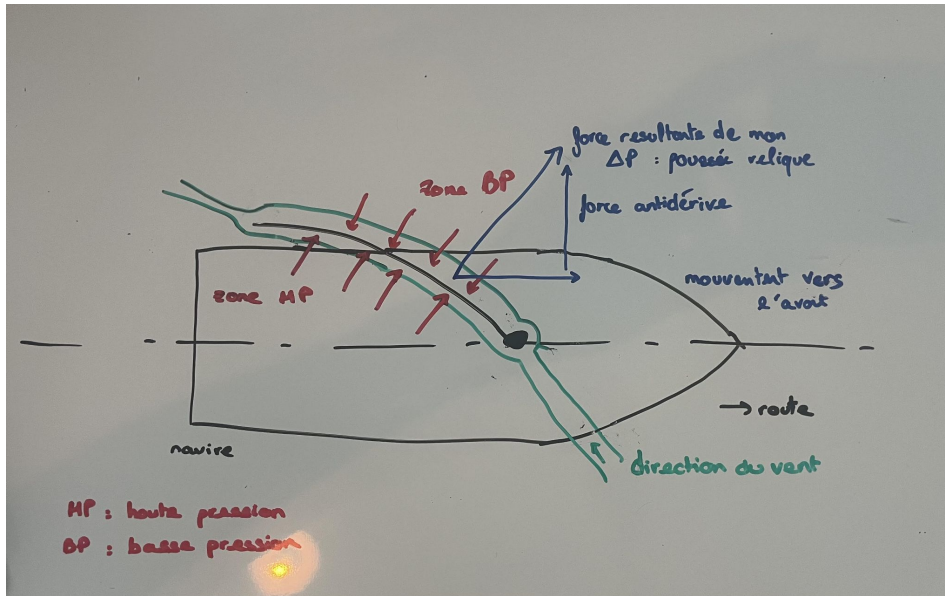
$v$  : vitesse d'écoulement

en écoulement incompressible :  $P_{tot} = cste$

bernavilli  $\rightarrow \frac{v^2}{2} + \frac{P_s}{\rho} = cste$



L'effet Venturi est un phénomène de la dynamique des fluides, selon lequel un fluide en écoulement subit une dépression là où la vitesse d'écoulement augmente, ou là où la section d'écoulement se rétrécit.



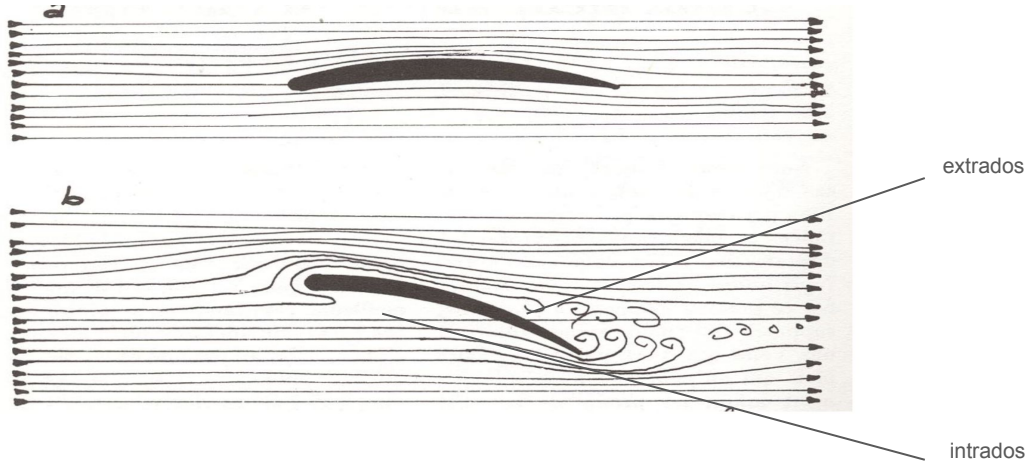
différentiel de pression : la courbure de la voile accélère l'air sur l'extrados, créant une dépression qui génère la force aérodynamique.

régimes d'écoulement : le flux est laminaire au près (portance optimale) et devient turbulent au vent arrière selon la viscosité et la vitesse du fluide.

## Décrochage et Limites de Performance

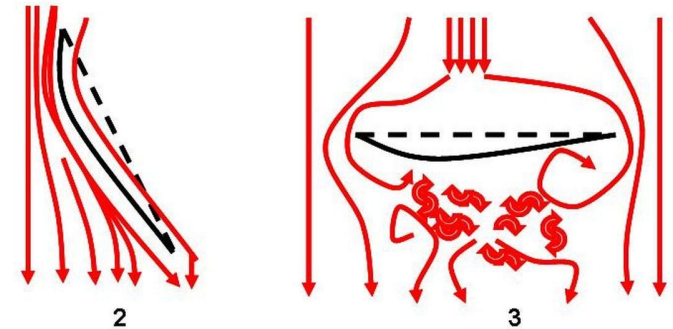
écoulement attaché : en situation normale, les filets d'air collent parfaitement aux deux faces de la voile, ce qui est indispensable pour générer une portance efficace.

angle critique ( $15^\circ$  à  $20^\circ$ ) : au-delà d'une certaine incidence, l'écoulement se décolle brutalement de l'extrados, provoquant une chute de portance : c'est le décrochage.



sur-bordage et traînée : une voile trop bordée génère un écoulement turbulent où la traînée (force de freinage) devient supérieure à la portance, ralentissant le navire.

facteurs d'influence : la stabilité de cet écoulement dépend du profil de la voile, de sa vitesse et de la viscosité de l'air.



### Vecteurs Aérodynamiques :

force aéro : c'est la poussée globale issue du différentiel de pression sur la voile

portance : la composante perpendiculaire au vent apparent qui "tire" le bateau, la trajectoire

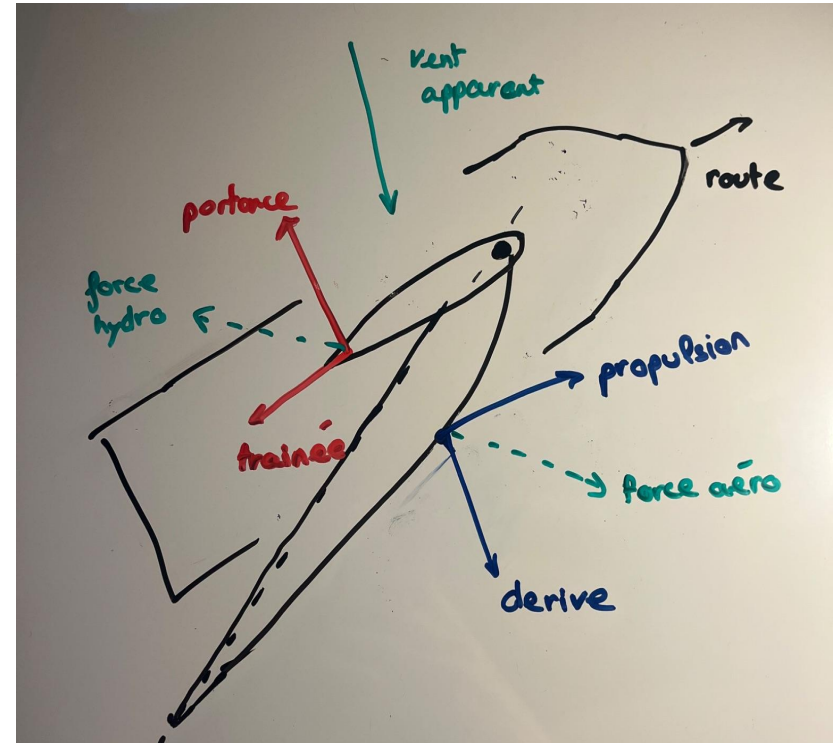
traînée : la force de résistance parallèle au vent qui tend à freiner le mouvement, trajectoire qui s'oppose à l'avancement

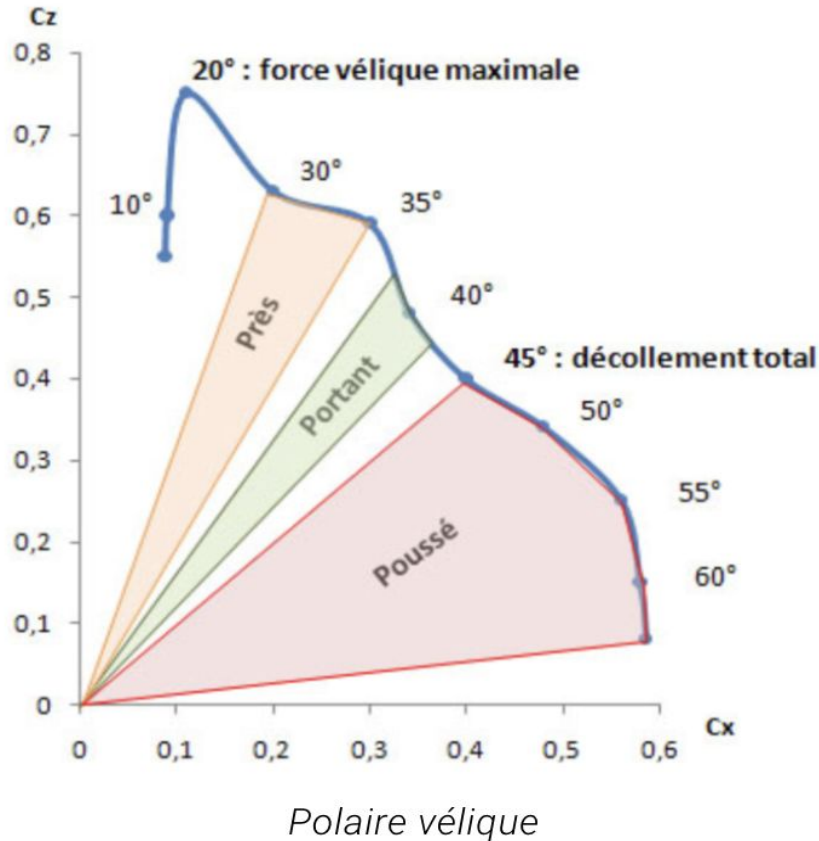
### Comportements du navire :

propulsion : la projection de la force aérodynamique vers l'avant, alignée avec la route du bateau

dérive : la force latérale que le bateau doit compenser pour ne pas glisser sur le côté

force hydro : la résistance de l'eau sur la coque et la dérive qui s'oppose à la dérive latérale





source: [https://armandfardeau.github.io/dinghy-ffv4/docs/dinghy\\_mecanic/str-engths/](https://armandfardeau.github.io/dinghy-ffv4/docs/dinghy_mecanic/str-engths/)

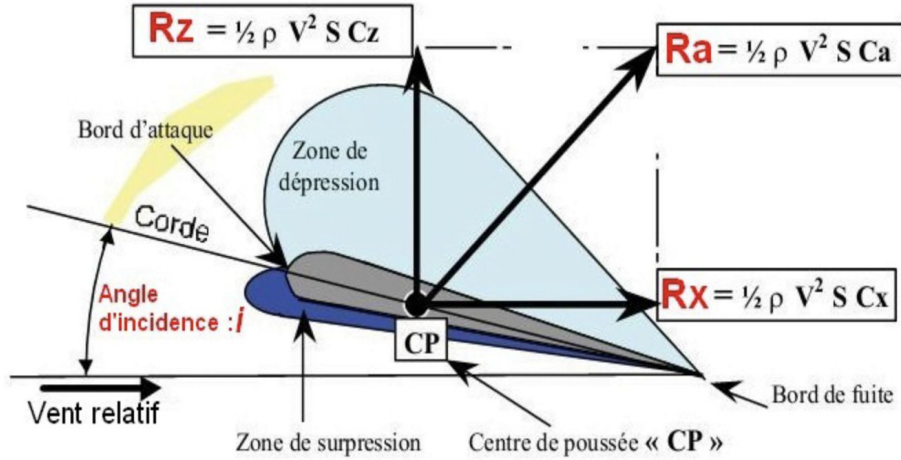
## Rendement de la voile

Deux couples de forces majeures interagissent :

force aérodynamique (vélique) : c'est la résultante des pressions sur la voile. Elle se décompose en portance ( $C_z$ ), qui tire le bateau, et en traînée ( $C_x$ ), qui le freine. Le rendement maximal est atteint quand le rapport  $C_z/C_x$  est optimisé.

force hydrodynamique : l'eau étant un fluide, la coque et la dérive subissent des forces similaires à la voile. Cette force se décompose en force antidérive (pour contrer le dérapage latéral) et en traînée.

source :  
<https://dessindeconstruction.go.yo.fr/portance-et-trainees-des-aeronefs/>



## Rendement de la voile



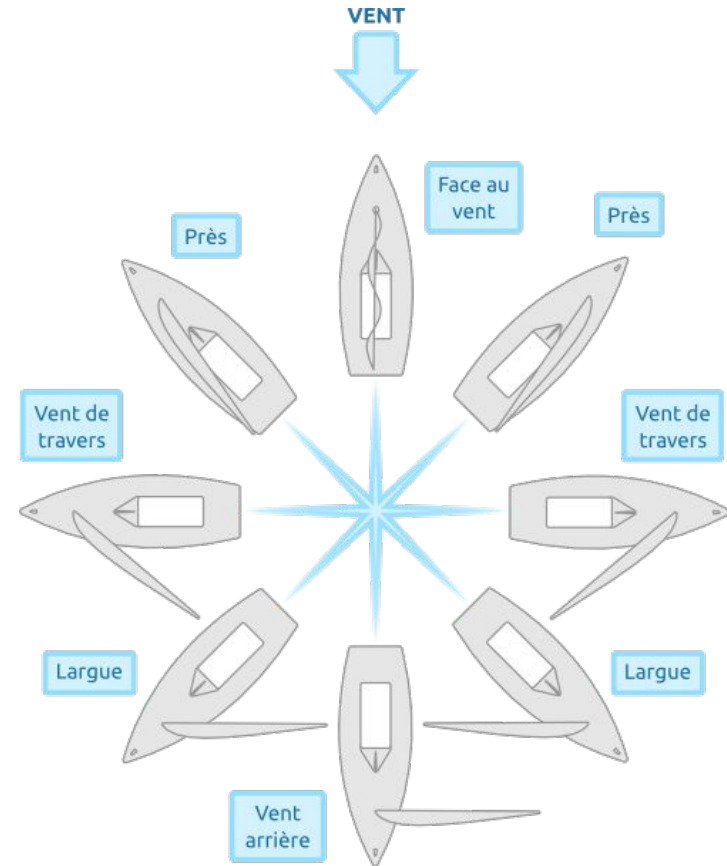
$\| \frac{1}{2} \rho V^2 S C_z \| \gg \| \frac{1}{2} \rho V^2 S C_x \|$   
 donc,  $\| R_z \| \gg \| R_x \|$   
 $\Rightarrow$  augmentation zone dépression  
      $\hookrightarrow$  création portance  $>$  trainée



deux régimes de fonctionnement de la voile:

- au près (remonter le vent  $\sim 30^\circ$ ) : la voile fonctionne comme une aile d'avion, la propulsion est générée par la portance
- au vent arrière : la voile fonctionne par poussée directe, la propulsion est générée par la traînée (pression dynamique pure)

orienter la résultante aérodynamique (somme vectorielle des pressions) le plus possible dans l'axe de la route du navire afin de maximiser la vitesse



## types de propulsion vélisque

### rotor flettner

performance ( $C_z$  élevé) : avantage majeur est le coefficient de portance ( $C_z$ ). là où une voile classique plafonne à un  $C_z$  de 1.5 à 2, un rotor peut atteindre un  $C_z$  de 10 à 14 en ajustant sa vitesse de rotation

système asservis : contrairement à une voile, on peut "border" instantanément en modifiant simplement la vitesse ou le sens de rotation



coefficient de pression :  $C_p = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2}$

$\Delta p$  : pression locale  
 $\rho$  : masse volumique fluide  
 $v$  : vitesse fluide (vent apparent)

entre 2 pts, bernoulli :

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = p_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2$$

$$\Rightarrow \underbrace{p_1 - p_2}_{\Delta p} = \frac{1}{2} \rho [v_1^2 - v_2^2]$$

donc,  $C_p = \frac{\frac{1}{2} \rho [v_1^2 - v_2^2]}{\frac{1}{2} \rho \cdot v^2} = 1 - \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^2$

or, kutta-joukowski

$$L = \rho \cdot v_\infty \cdot \Gamma$$

et  $\Gamma = \oint_C \vec{v} \cdot d\vec{l} = 2\pi \cdot R \cdot \omega$   
 $= 2\pi \cdot R^2 \cdot \omega$

$\Gamma$  : circulation  $\rightarrow$  l'intégrale du vecteur vitesse  
 $\hookrightarrow$  quantifie l'intensité du tourbillon généré par le rotor

$R$  : rayon rotor  
 $L$  : portance générée

circulation possible grâce à la viscosité de l'air

effet magnus : asymétrie  
 la rotation entraîne l'air  
 haut : air accéléré car même sens que paroi rotor (vert)  
 bas : ralenti

$\oplus$  traînée nulle : asymétrie gauche/droite  
 $\hookrightarrow$  création portance

$\hookrightarrow$  cylindre ne tourne pas  $\Rightarrow$  pression en dessous et au dessus identique  
 $\hookrightarrow$  pas de portance

## les profils aspirés

système d'aspiration active le long d'un profil épais pour optimiser l'écoulement de l'air et maximiser la portance.

un ventilateur interne (turbine) aspire la couche limite, ce qui permet de maintenir un écoulement attaché même à des angles d'incidence élevés

peut être installée en "retrofit", permet d'atteindre des économies de carburant allant de 10 à 20 %.

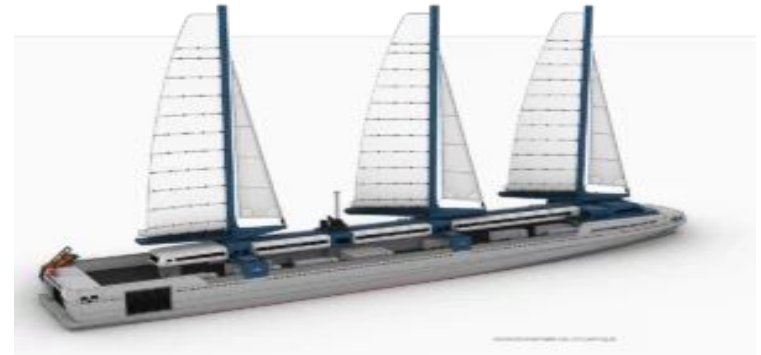


## les profils minces

testés sur des paquebots de croisière (*Le Ponant*)

structures aérodynamiques fines, souvent automatisées, pour capter l'énergie du vent avec un encombrement réduit sur le pont

réduction potentielle de la consommation de carburant de l'ordre de 30 %.



## les profils épais

voiles rigides en composites, semi-rigides ou même gonflables

dispositifs de renversement ou de réglage asymétrique pour optimiser la prise au vent selon l'allure du navire.

excellent rendement aérodynamique par rapport aux voiles souples traditionnelles, particulièrement pour les porte-conteneurs.



## les kites

ailes géantes (+1000 m<sup>2</sup>) sont déployées à environ 300 mètres d'altitude, là où les vents sont plus forts et plus stables

kite effectue des trajectoires en "huit" pour multiplier sa vitesse relative

système est automatisé pour les phases de décollage, de pilotage, minimisant l'impact sur l'équipage

inconvénients, repliage (tensions câbles énorme)

