

Vulgarisation de la physique de la voile en 3 chapitres :

I. Coques

Vitesse limite de coque et planning

Trainée de surface

Trainée de forme

Trainée parasite

II. Quilles et Dérives

Principe de Bernouilli et Portance

Formation des vortex ou trainée induite

Résistance totale coque/quille

III. Voiles

Théorie de base

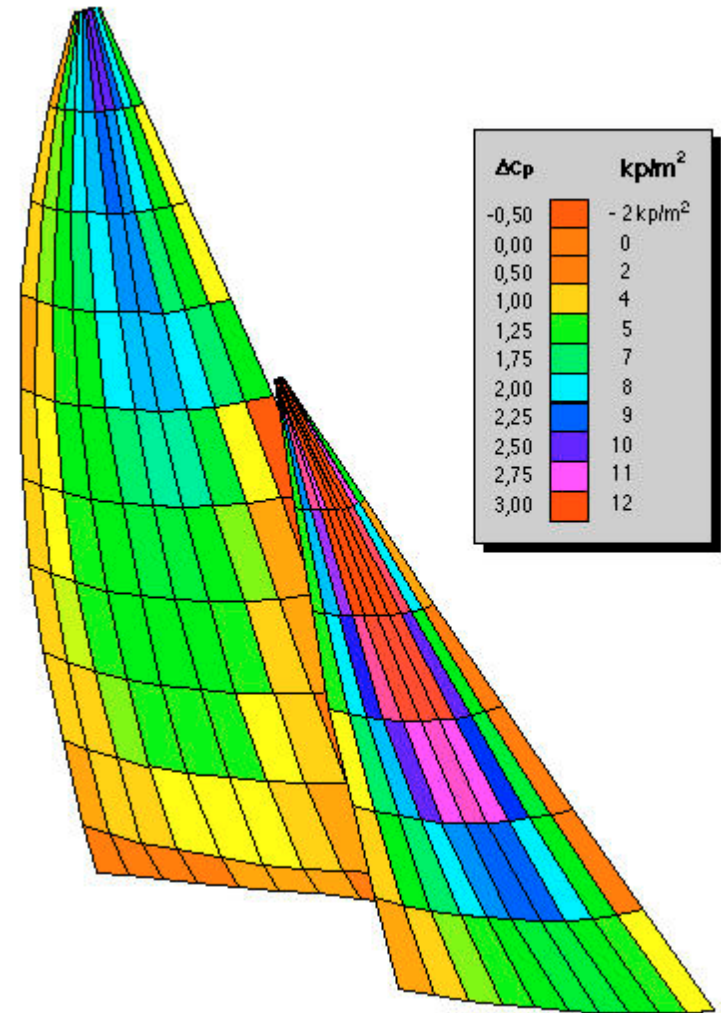
Trainée induite

Turbulances

Intéraction GV-Foc

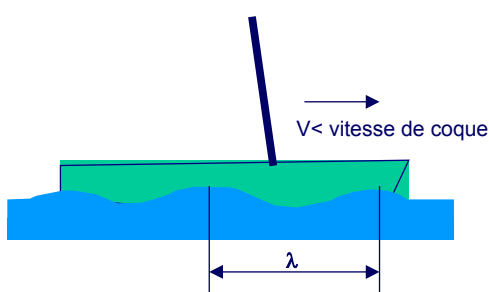
Forme optimale d'une voile en fonction de l'amure

Réglages

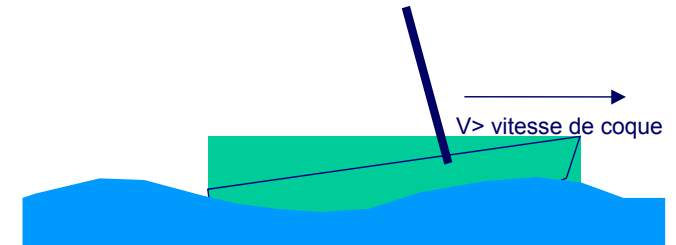
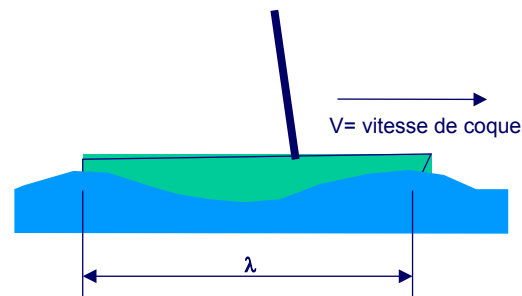


Ref: WB-Sails

- Lorsqu'une coque se déplace dans l'eau, elle génère des **vagues** car les molécules d'eau se trouvant devant l'étrave doivent reculer et monter.
- Lorsque le bateau commence juste à bouger, il génère de petites vagues au niveau de son étrave. Celles-ci se déplacent vers l'arrière et font ainsi le tour de la coque pour la laisser passer.
- Lorsque le bateau accélère, il génère des vagues qui ont des **longueurs d'onde λ** toujours plus grandes
- Il faut alors de moins en moins de vagues pour atteindre l'arrière du bateau jusqu'à ce que finalement, il n'y ait plus qu'une seule vague entre l'étrave et le tableau arrière. On atteint alors ce qu'on appelle la **vitesse de coque** en mode "Déplacement"
- Si le bateau accélère encore, il va devoir monter sur sa vague d'étrave et entre en mode "Forcé".



Mode "Déplacement"



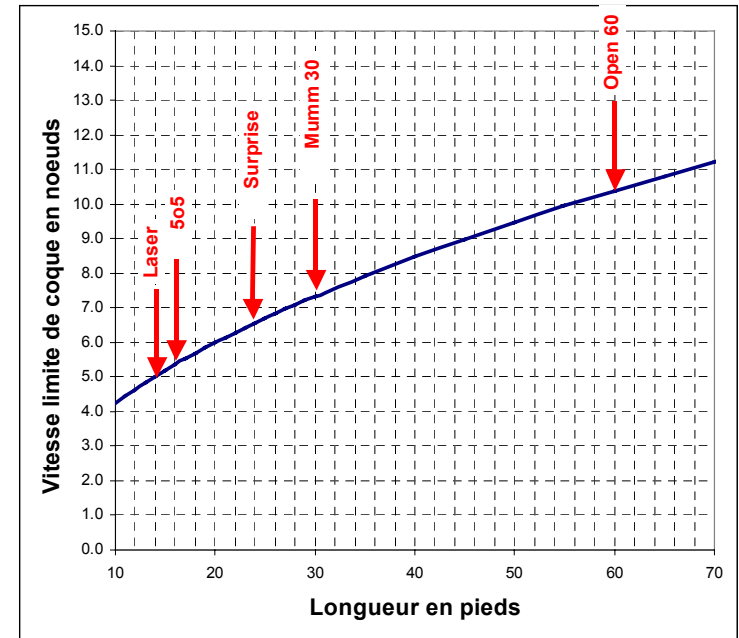
Mode "Forcé"

• La vitesse de coque est donc identique à celle d'une vague ayant la même longueur d'onde. Comme les ondes liquides de surface sont dispersives, leur vitesse de propagation V dépend de leur longueur d'onde selon l'équation

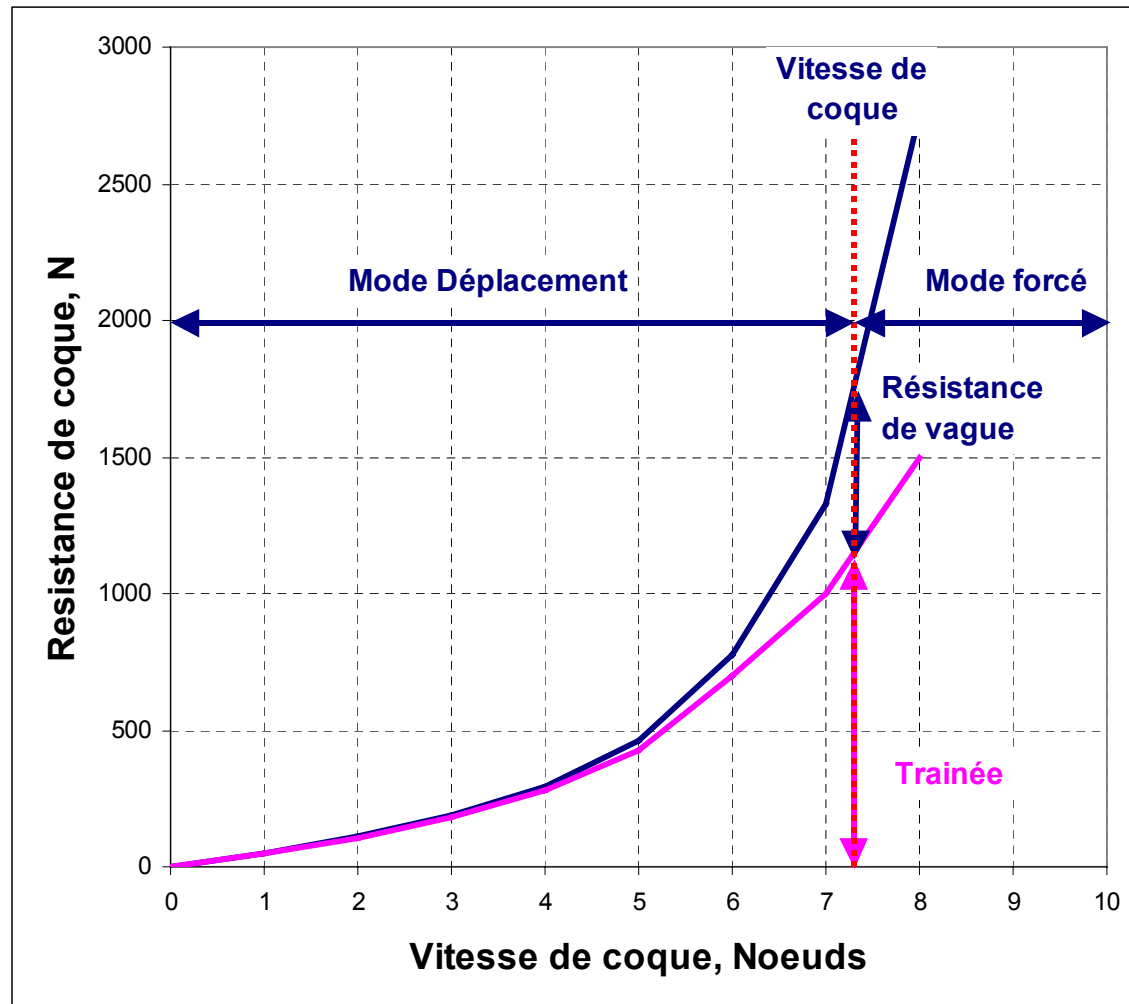
$$V = \sqrt{g / 2\pi} \cdot \sqrt{\lambda} \cong 1.34 \cdot \sqrt{\lambda}$$

avec V en noeuds et λ en pieds
 g est la constante de gravitation

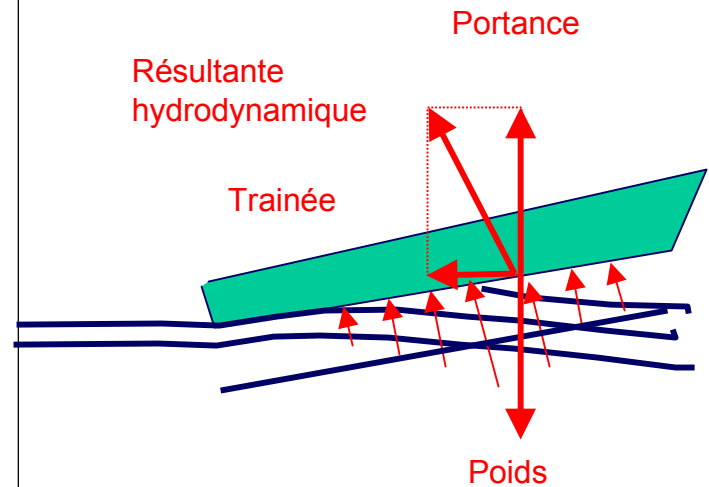
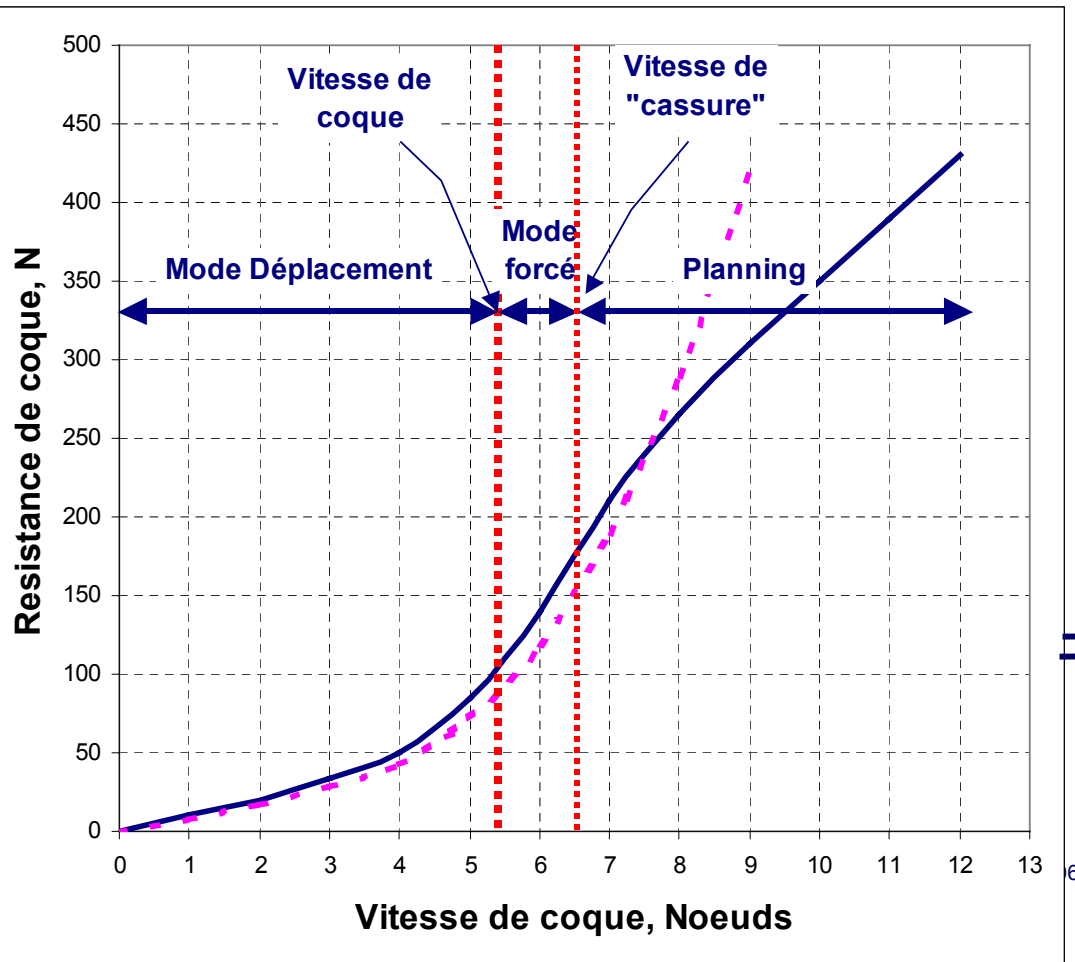
Waterline length in feet	Hull speed knots	Hull speed mph	Hull speed kmph	Waterline length in feet	Hull speed knots	Hull speed mph	Hull speed kmph
8	3.8	4.4	7.0	20	6.0	6.9	11.1
9	4.0	4.7	7.4	21	6.2	7.1	11.5
10	4.3	4.9	8.0	22	6.3	7.3	11.7
11	4.5	5.2	8.3	23	6.5	7.5	12.0
12	4.7	5.4	8.7	24	6.6	7.6	12.2
13	4.9	5.6	9.1	25	6.7	7.8	12.4
14	5.0	5.8	9.3	26	6.9	7.9	12.8
15	5.2	6.0	9.6	27	7.0	8.1	13.0
16	5.4	6.2	10.0	28	7.1	8.2	13.2
17	5.6	6.4	10.3	29	7.3	8.4	13.5
18	5.7	6.6	10.5	30	7.4	8.5	13.7
19	5.9	6.8	10.9	31	7.5	8.6	13.9



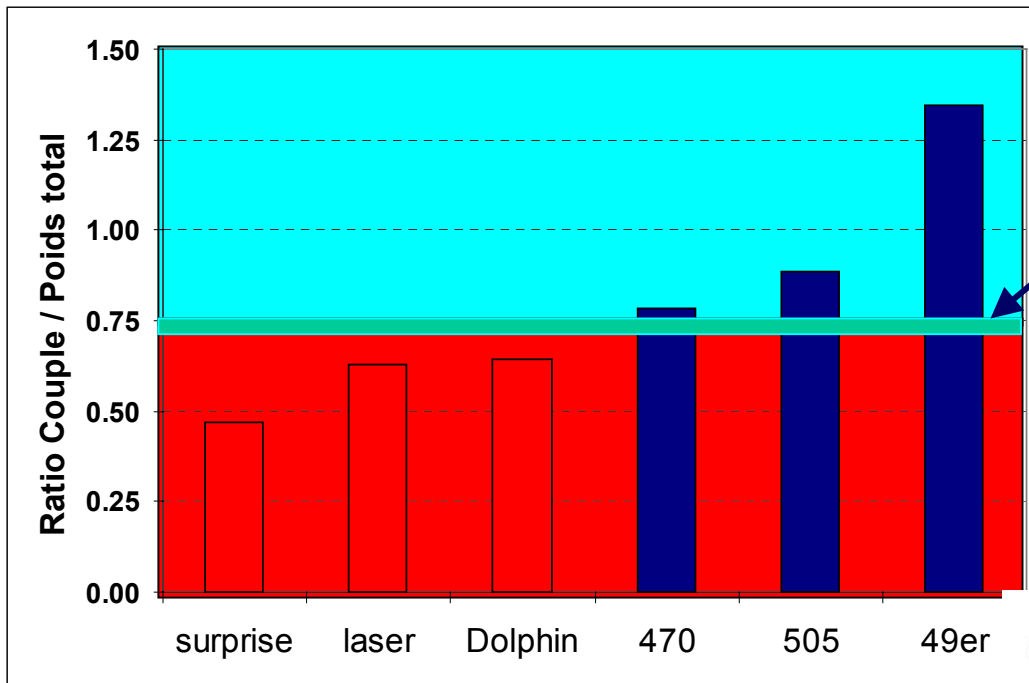
- Résistances et vitesse de coque typique pour un quillard ayant une longueur à la flottaison de 30 pieds. La résistance de vague augmente de façon drastique lorsque le bateau dépasse sa vitesse de coque théorique. Elle devient alors prédominante par rapport à la trainée et empêche le bateau d'accélérer.



- Resistances et vitesse de coque typique pour un dériveur ayant une longueur à la flottaison de 15 pieds (470). Le bateau a assez de puissance et est assez léger pour pouvoir accélérer encore dans le mode forcé et atteindre la vitesse de cassure, c'est à dire la vitesse à laquelle la portance hydrodynamique due à la vitesse de la coque sur sa vague et à son angle est assez grande pour alléger le bateau et lui permettre de partir au planning



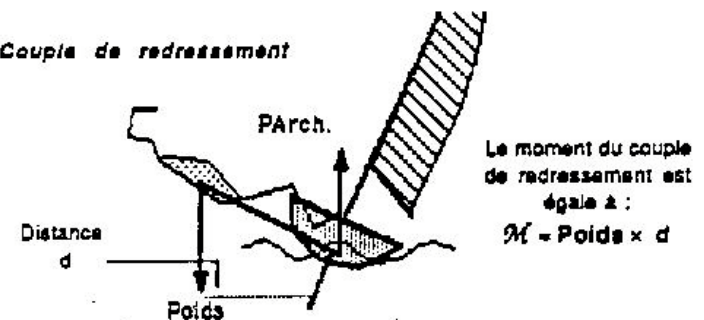
- Capacité à planer au près séré: Une histoire de **rapport** entre le couple de redressement et le poids (et aussi la forme de la coque pour promouvoir la poussée hydrodynamique)



Zone de transition entre bateaux planants et bateaux non-planants au près séré

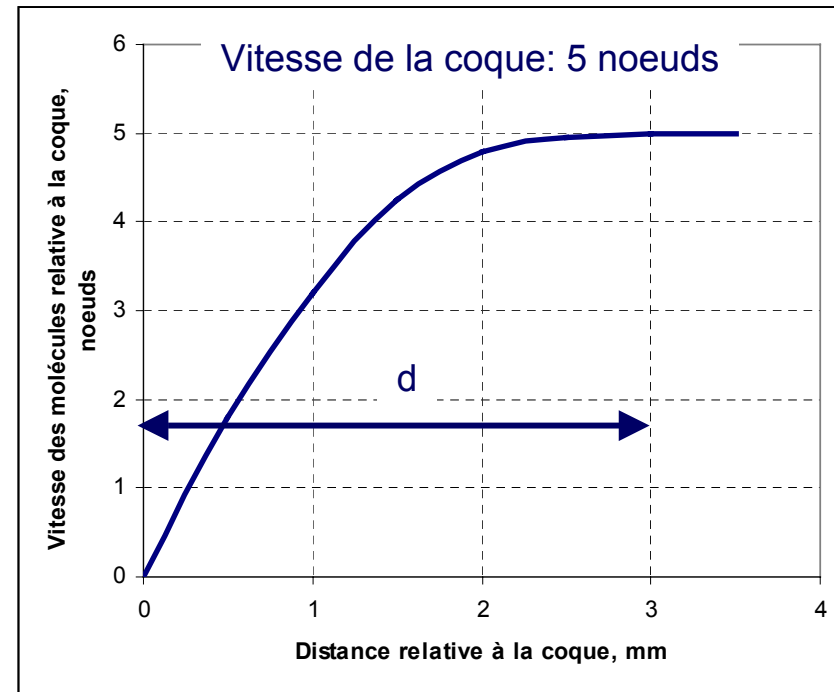
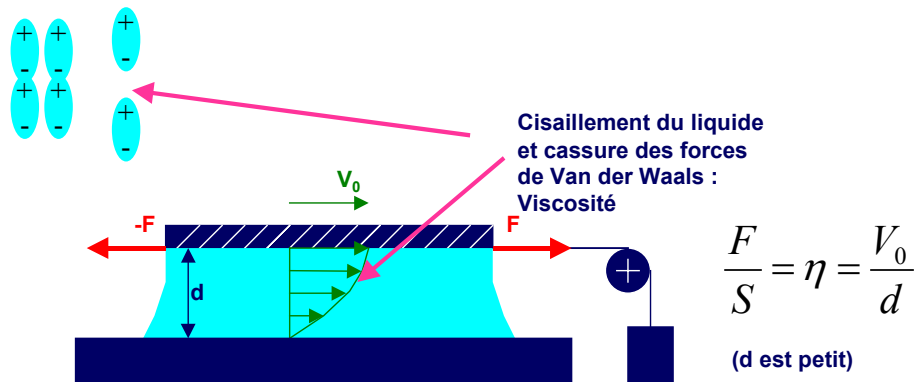
Bateau	Couple de redressement kgxm	Poids total kg	Ratio Couple/Poids
surprise	788	1680.0	0.47
laser	88	140.0	0.63
Dolphin	855	1330.0	0.64
470	201	255.0	0.79
505	255	287.5	0.89
49er	350	260.0	1.35

Couple de redressement



- Trainée de surface (mouillée): la faute à Van der Waals et à la **viscosité**
- Les liquides sont fait de molécules neutres au niveau électrique mais polarisées. Elles se tiennent ensemble grâce aux forces de Van der Waals. La viscosité est une grandeur qui exprime l'amplitude de ces forces qu'il faut briser pour cisailier un liquide (cisaillement moléculaire).
- La distance sur la quelle se fait le cisaillement est de quelques mm.

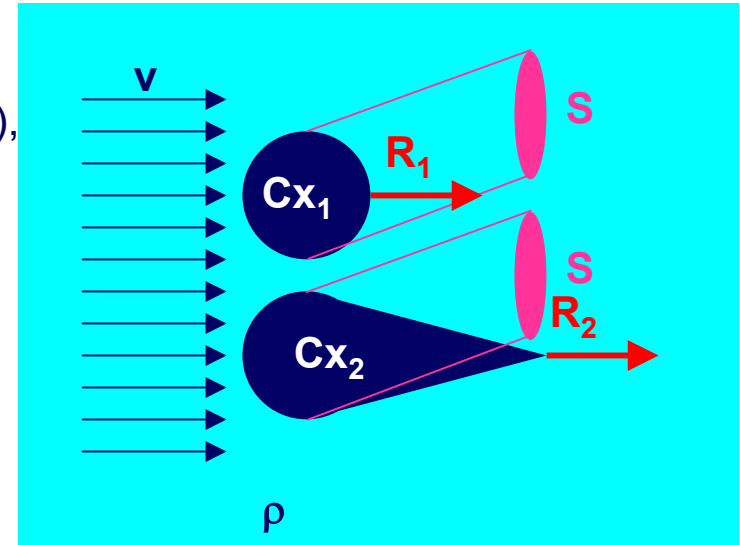
• A noter que la rugosité de la coque n'a pas d'importance sur la trainée de surface pour autant que $R \ll d$ (soit $R < 0.05 \text{ mm}$)



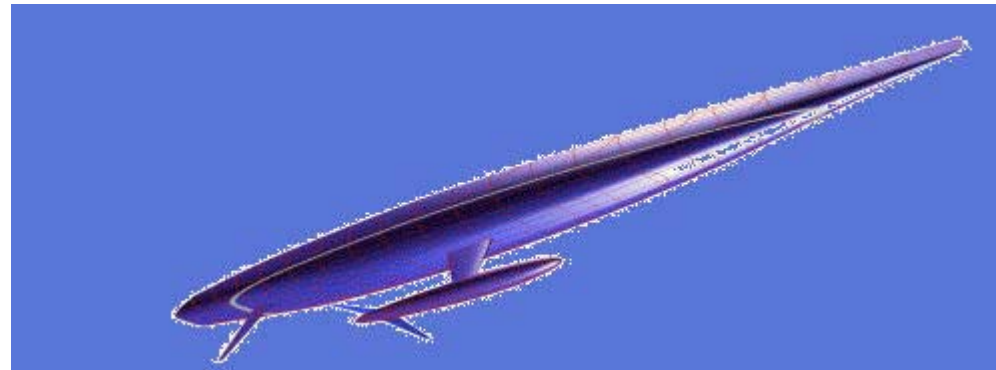
• La **traînée** de forme est la force de résistance qu'exerce un fluide sur un objet l'orsque le fluide ou l'objet sont en mouvement l'un par rapport à l'autre. Cette force est parrallèle et opposée à la trajectoire du fluide

• La force de trainée R peut être calculée à partir de:

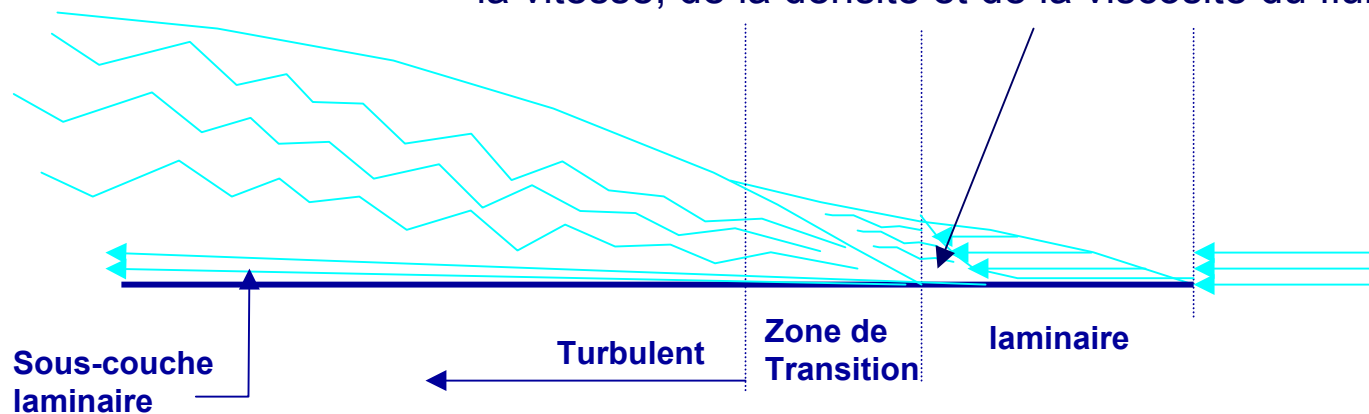
- Un coefficient appelé C_x (coefficient de trainée), déterminé en soufflerie ou en bassin de carène
- De la vitesse du fluide, v
- De sa densité, ρ
- Et de la surface offerte perpendiculairement au fluide (maître couple ou surface frontale), S



$$R = C_x \cdot \rho \cdot S \cdot \frac{v^2}{2}$$



- En plus de la trainée de surface, la trainée de forme, et la résistance de vague, il y a une résistance qui vient de la création de **turbulences** lorsque l'eau s'écoule le long de la coque, des tourbillons créés derrière la coque, ou des vortex générés au bout de la quille, de la dérive et du safran(s).
- La trainée due au vortex sera traitée sous le chapitre dédié aux quilles et dérives. Traitons les turbulences générées le long de la coque
- Au début l'eau s'écoule sans turbulences
- Très rapidement, le cisaillement qui se passe entre les différentes couches de liquide vont induire un mouvement de "twist" de ces couches
- Ce phénomène de twist se transforme en la formation de turbulences
- Une sous-couche laminaire se reforme
 - Le point où les turbulences commencent dépend de la vitesse, de la densité et de la viscosité du fluide



- Cet effet a été expliqué et mis en équation par Osborne Reynolds, à la fin du 19ème siècle grâce à une quantité que l'on appelle le Nombre de Reynolds.

$$R = \frac{L \cdot v}{(\eta / \rho)}$$

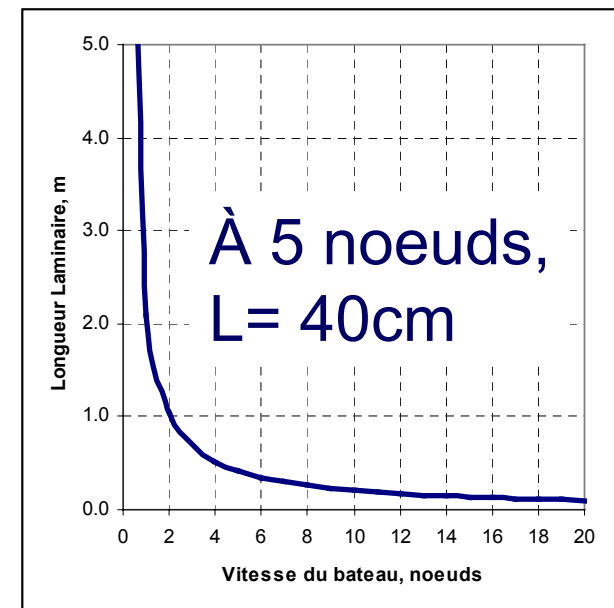
Où L est la distance à laquelle les turbulences apparaissent, v la vitesse de la coque, où η est la viscosité et ρ est la densité du fluide.

- Reynolds a mis en évidence que les turbulences apparaissent invariablement lorsque R est égal à 1 million, soit 10^6 .
- Ceci est vrai pour tous les fluides, y compris l'air (On y reviendra donc pour les voiles).
- Pour l'eau, η vaut 10^{-3} N·sec/m² et ρ vaut 10^3 kg/m³, le nombre de Reynolds devient donc:

$$R = \frac{L \cdot v}{10^{-6}} = L \cdot v \cdot 10^6$$

- Les turbulences commencent donc lorsque:

$$L \cdot v \cong 1$$



Pour conclure le chapitre sur les phénomènes physiques liés aux coques, qu'a-t-on vu?

→ Une coque en mode "déplacement" a une vitesse limite qui dépend de sa longueur selon la relation $v = 1.34\sqrt{L}$ ou v est en noeuds et L en mètres

→ Il faut suffisamment de puissance, une coque plate et un rapport minimum entre le couple de redressement et le poids total pour qu'un voilier puisse partir au planning au près séré. Un quillard ne peut pas planer au près séré.

→ Il y a plusieurs composantes à la trainée d'une coque:

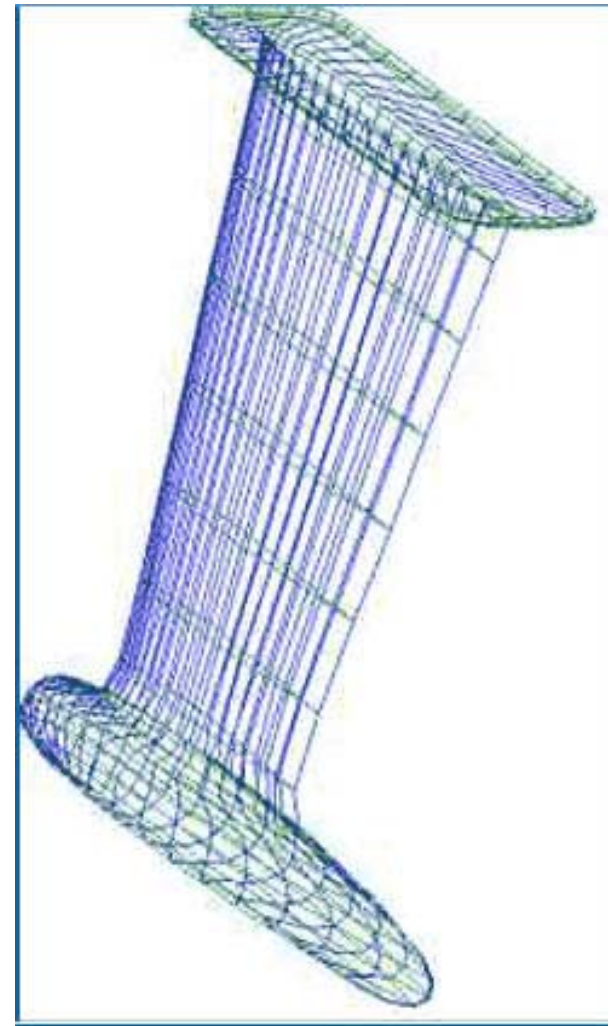
→ La trainée de friction due au cisaillement des couches de liquide

→ La trainée de forme (C_x)

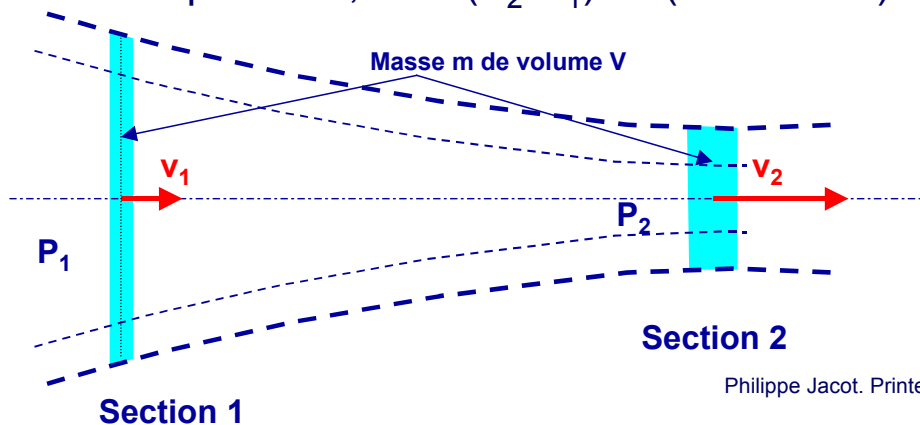
→ La trainée parasite due à la formation de turbulences le long de la coque (expliquée par le nombre de Reynolds).

II. Quilles et dérives

- Principe de Bernouilli et Portance
- Formation des vortex ou trainée induite
- Résistance totale coque/quille



- Le théorème de Bernouilli (physicien suisse du 17ème !) est la théorie de base qu'il faut avoir pour comprendre comment une quille, une dérive un safran ou une voile travaille.
- En effet Bernouilli a découvert que la pression d'un fluide diminue lorsque la vitesse de son flux augmente.
- Une démonstration commune de ce phénomène est faite en soufflant en 2 feuilles de papier. Comme vous soufflez en les feuilles, celles-ci se collent ensemble, résultat d'une baisse de pression en les 2 feuilles due à la vitesse accrue de l'air induite par votre souffle.
- Tout cela découle de la loi de la conservation de l'énergie. (rien ne se gagne, rien ne se perd, tout se transforme).
- Soit m , une masse de fluide se déplaçant entre les sections 1 et 2. Comme la section 2 est plus petite que la section 1, la masse de fluide va plus vite en 2 que en 1.
- L'énergie cinétique du système augmente donc de $(m(v_2^2 - v_1^2))/2$. Pour compenser cette augmentation d'énergie cinétique, il faut qu'une autre forme d'énergie diminue, soit celle liée à la pression, soit $-(P_2 - P_1) \cdot V$. (V =Volume). Il s'ensuit que:

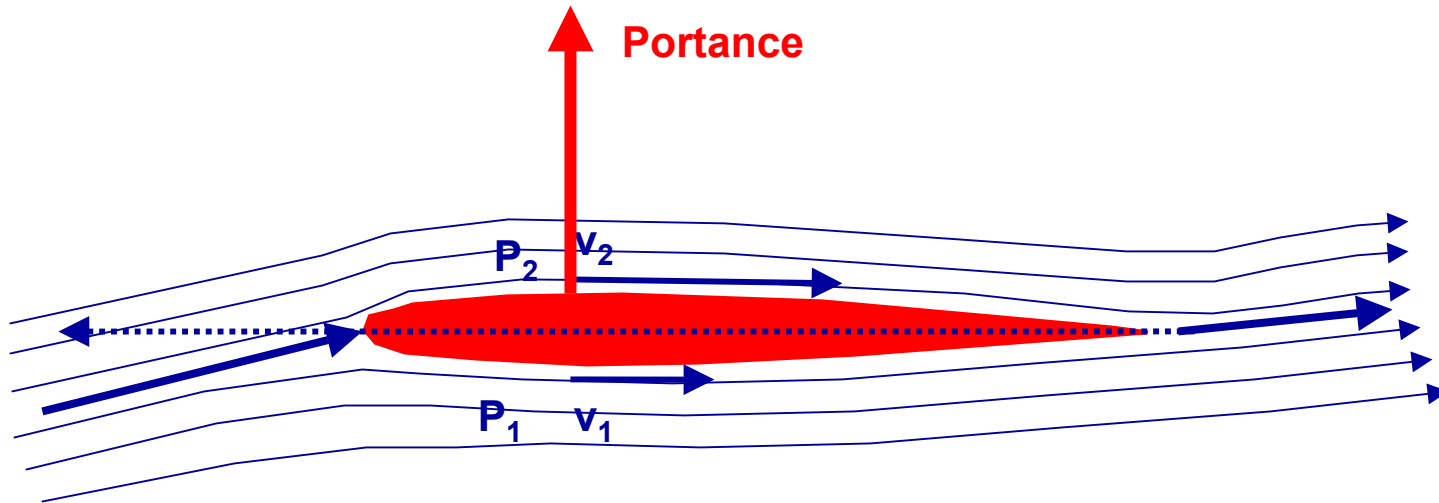


$$\frac{m(v_2^2 - v_1^2)}{2} = -(P_2 - P_1) \cdot V$$

$$m = \rho V$$

$$\frac{\rho}{2} \cdot \Delta v^2 + \Delta P = \text{const}$$

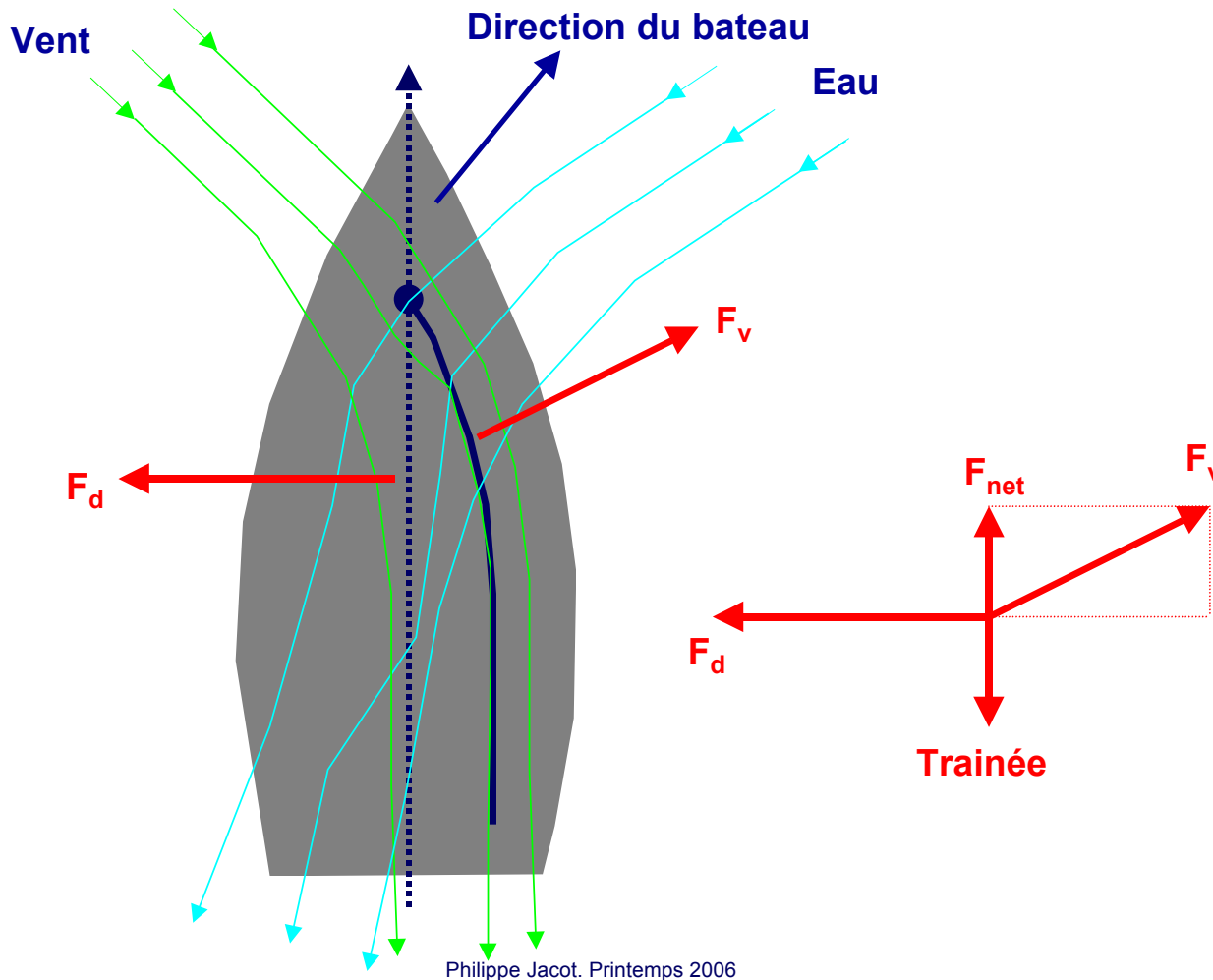
- Lorsque qu'un fluide s'écoule autour d'un profil même symétrique, avec un angle d'incidence, les molécules qui passent sur le "dessus" du profil ont un chemin à faire plus long que celles qui passent au "dessous". Elles doivent donc aller plus vite.



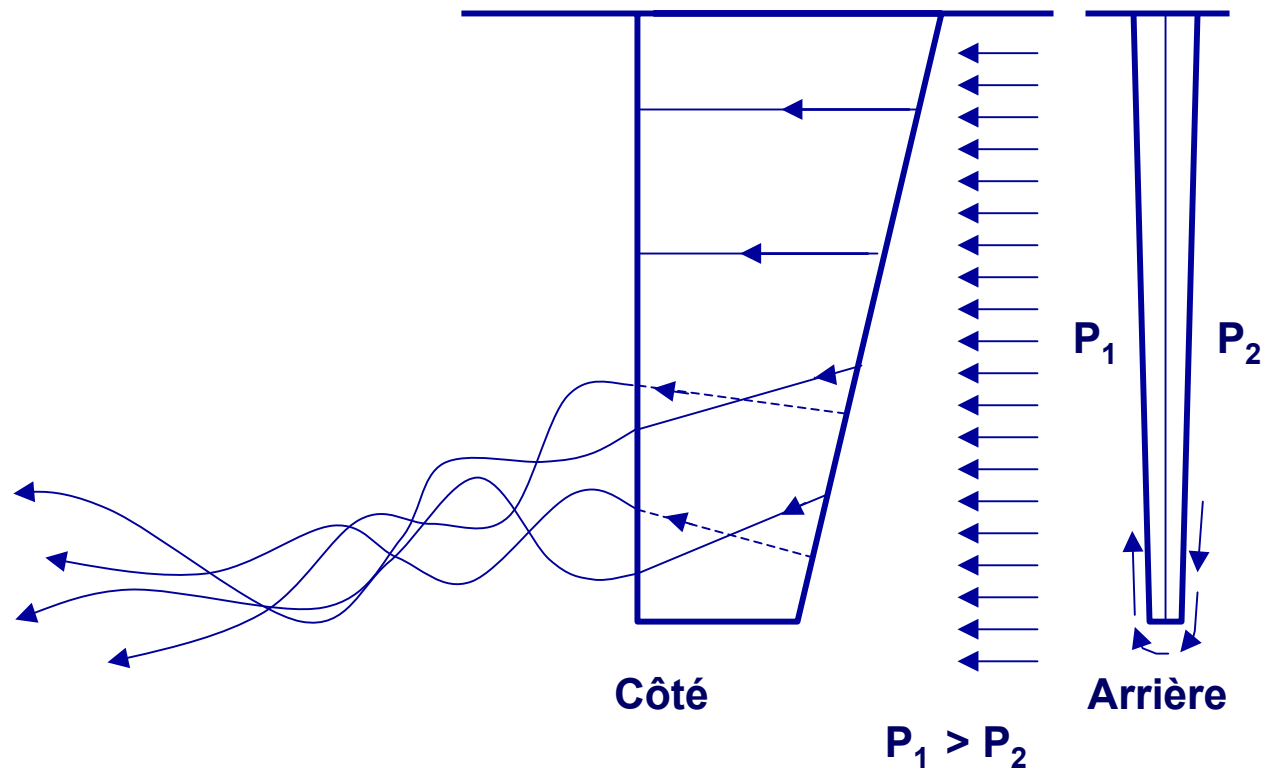
Bernouilli: $v_2 > v_1$
 $P_2 < P_1$ \Rightarrow **Portance = $(P_1 - P_2) \times$ Surface de la quille**

- En accord avec la loi de Bernouilli, si il y a augmentation de vitesse, il y a diminution de pression. Il s'ensuit une différence de pression entre les deux faces de la quille, responsable d'une force perpendiculaire au flux, que l'on appelle **Portance** et qui permet à la quille de jouer son rôle anti-dérive.

•Equilibre entre la portance due au flux d'air autour de la voile, la portance due au flux d'eau autour de la dérive et à la trainée totale (coque, dérive, safran, voile, mat, équipage, vague,...) . A vitesse constante, toutes ces forces sont en équilibre.

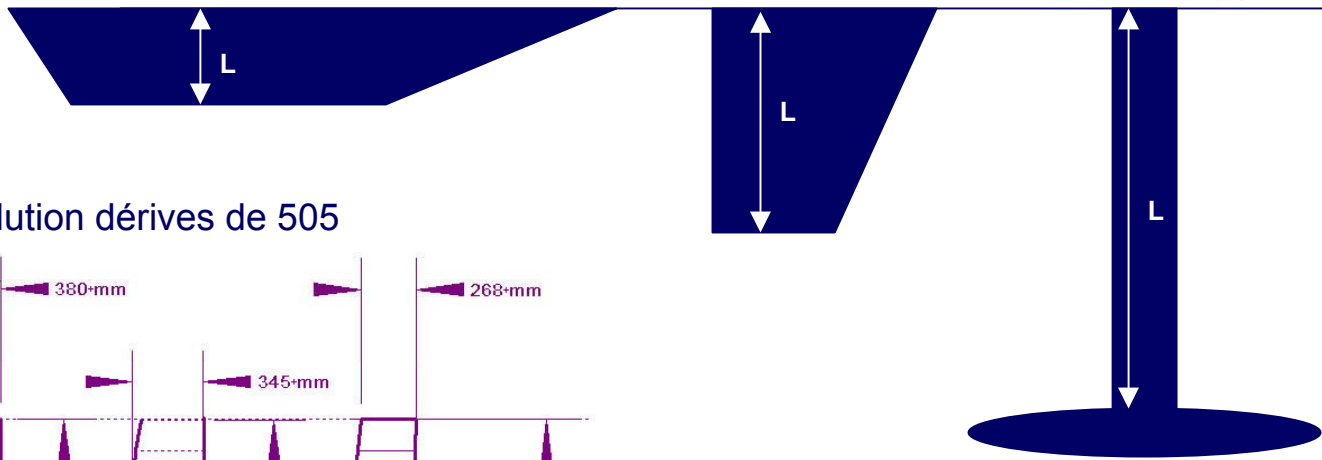
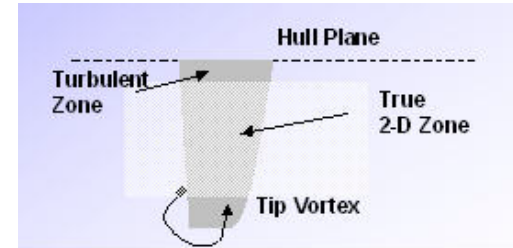


- Lorsqu'une quille, une dérive, un safran ou une voile produit de la portance grâce au flux de fluide qui les traverse, il produit également des turbulences sous la forme de **vortex**.
- Lorsque le flux se met en marche autour de la quille, il produit une différence de pression entre les 2 côtés de la quille, ce qui crée la portance
- Toutefois, en bout de quille, les molécules de fluide qui passent autour du profil vont essayer de compenser cette différence de pression. Elles vont alors fléchir de leur trajectoire et former les fameux vortex lorsqu'elles auront quitté le profil.

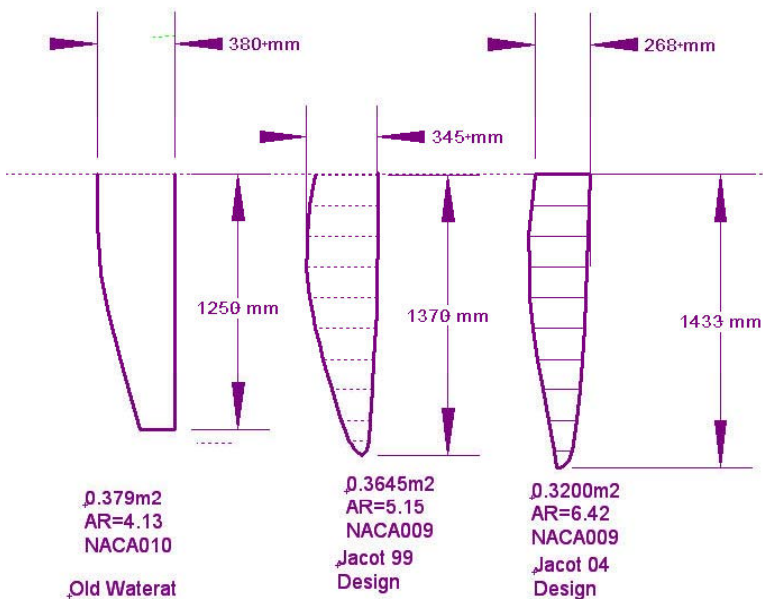


- Au fil des années, on a compris que l'on pouvait radicalement diminuer la surface mouillée d'une quille tout en améliorant la portance et en diminuant sa trainée, ceci en augmentant son allongement ou son **aspect ratio**

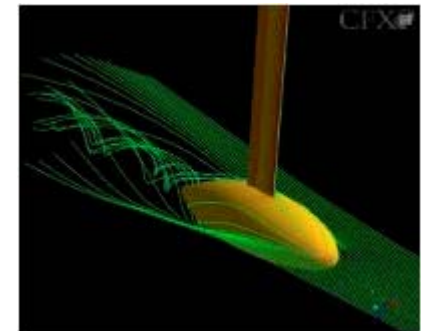
$$\text{Aspect Ratio} = L^2 / \text{surface}$$



Evolution dérives de 505



ippe Jacot. Printemps 2006



Ref: EPFL

- A ce stade il est possible de faire la somme de tous les phénomènes responsables de la trainée et ceci en fonction de la vitesse du bateau
- A faible vitesse, la trainée est dominée par la résistance de surface (surface mouillée de la coque, quille et safran)
- A vitesse moyenne, la résistance due à la formation de turbulences le long des surfaces mouillées ainsi que celle induite par les vortex commencent à être significatives
- A vitesse élevée, c'est à dire proche de la vitesse de coque, la résistance de vague devient le facteur le plus important

Résistances typiques pour un quillard monocoque naviguant à environ 90% de sa vitesse de coque

