

Physique des voiliers

Marc Rabaud

Peyresq, Cours 1, 2 juin 2015



Un mini 6.50 au planing (mai 2013)

Septembre 2013, finale de la 34ème coupe de l'Amérique

Quelques questions ...

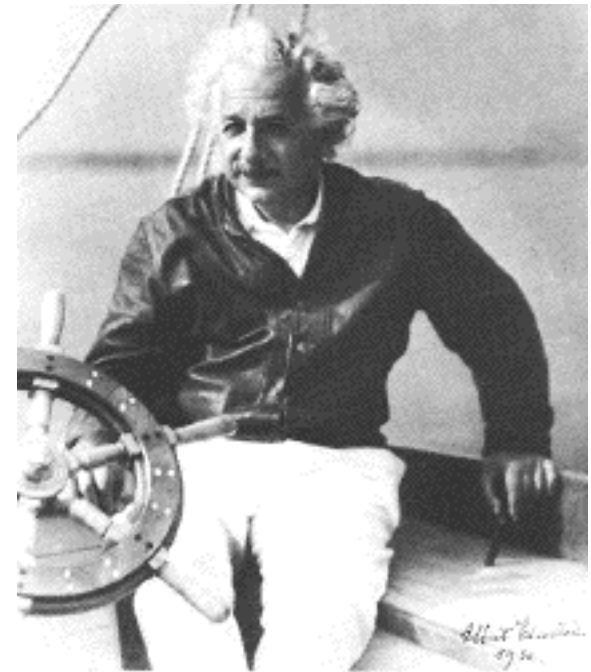
Quelques évidences et quelques paradoxes

1) Plus lourd que l'eau peut-il flotter ? Archimède

2) Naviguer contre le vent ? Bernoulli

3) Plus vite que le vent ? Lanchester

4) Quelle est la vitesse limite ?
Froude, Kelvin



1) Plus lourd que l'eau ?

La poussée d'Archimède



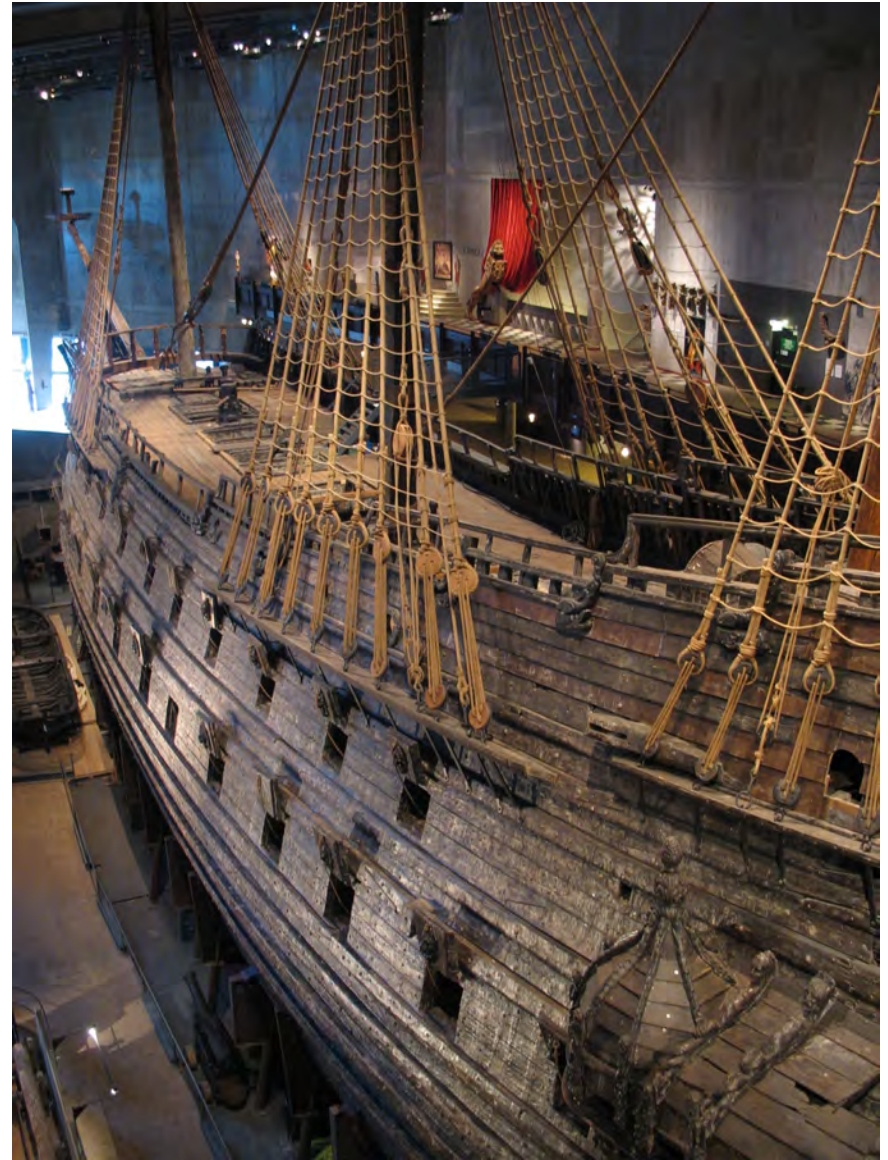
Archimède de Syracuse
Grec (-287 ; -212)

Bateau de granit (Jean-Yves Menez)

1) Plus lourd que l'eau ?

Mais flotter ne suffit pas !

Naufrage du Vasa en 1628
devant Stockholm après avoir
navigué ... 1 mille nautique



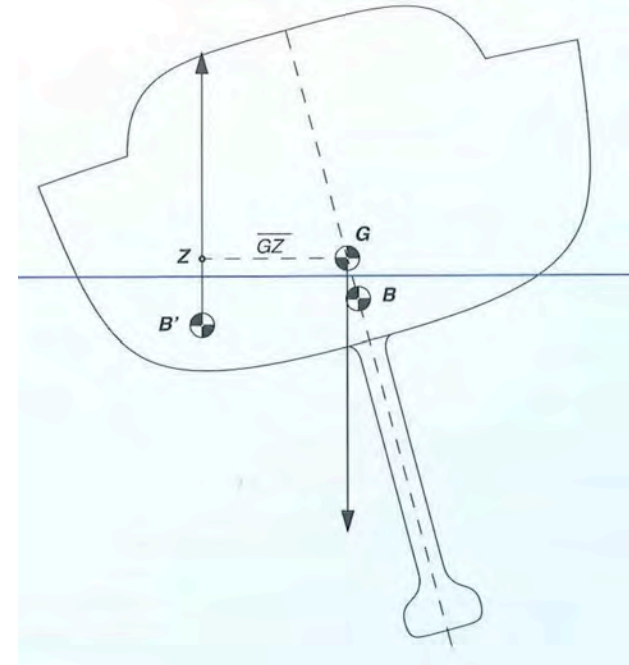
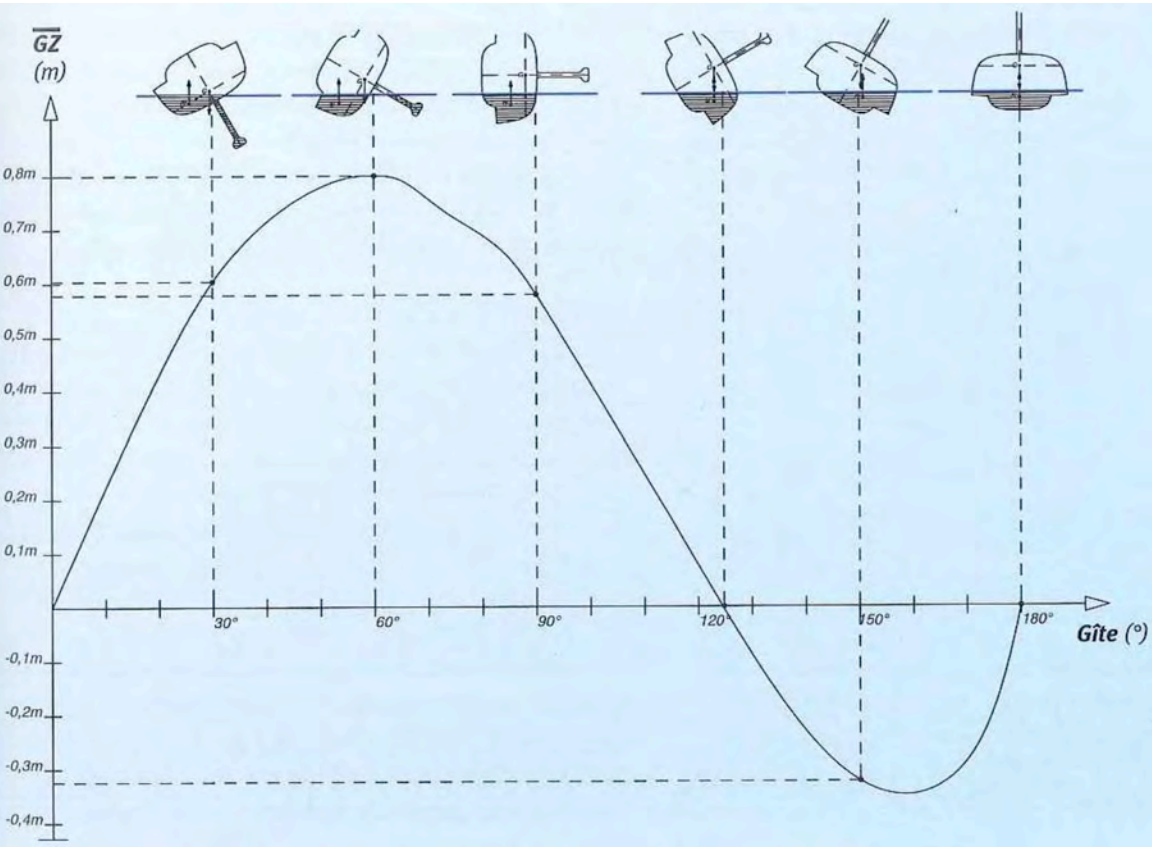
1) Plus lourd que l'eau ?



Où est le centre de gravité ?

1) Plus lourd que l'eau ?

Condition d'un équilibre stable ?



1) Plus lourd que l'eau ?

Stabilité de poids ou de forme ?



Class America ... (2007)
20 tonnes de lest pour 24 tonnes !
5 m de tirant d'eau, 4 m de largeur !

Trimaran BMW Oracle (2010)
27 m de large, poids 3,5 tonnes ?

2) Naviguer contre le vent ?

- Navigation en poussée
(écoulement décollé)

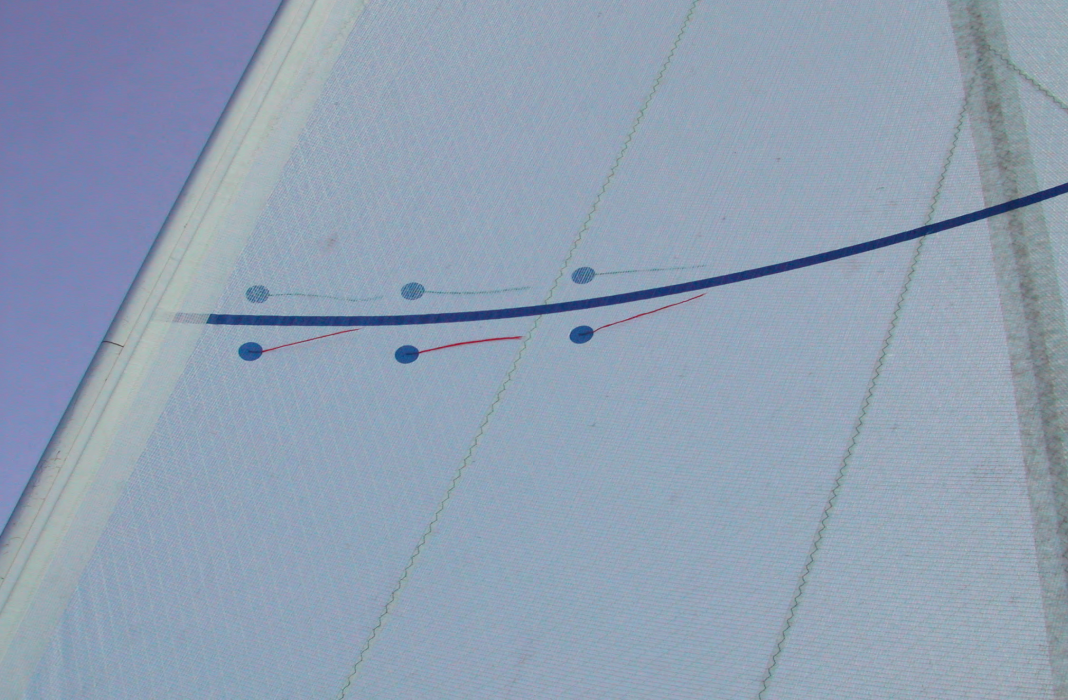


Le Belem

- Navigation en finesse
(écoulement laminaire)



Pen Duick



Écoulement laminaire



Écoulement décollé

2) Naviguer contre le vent ?

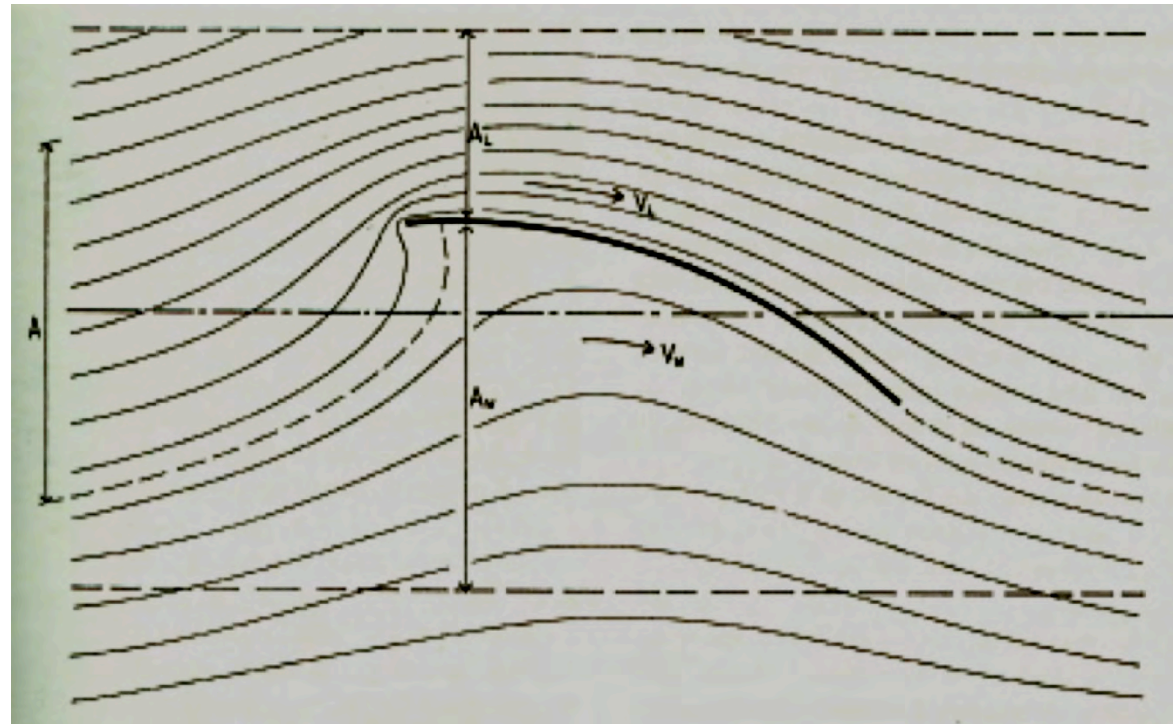
$$P + \frac{1}{2} \rho V^2 = \text{Constante}$$

$$L = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_L$$

$$D = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_D$$



Daniel Bernoulli (1700-1782)



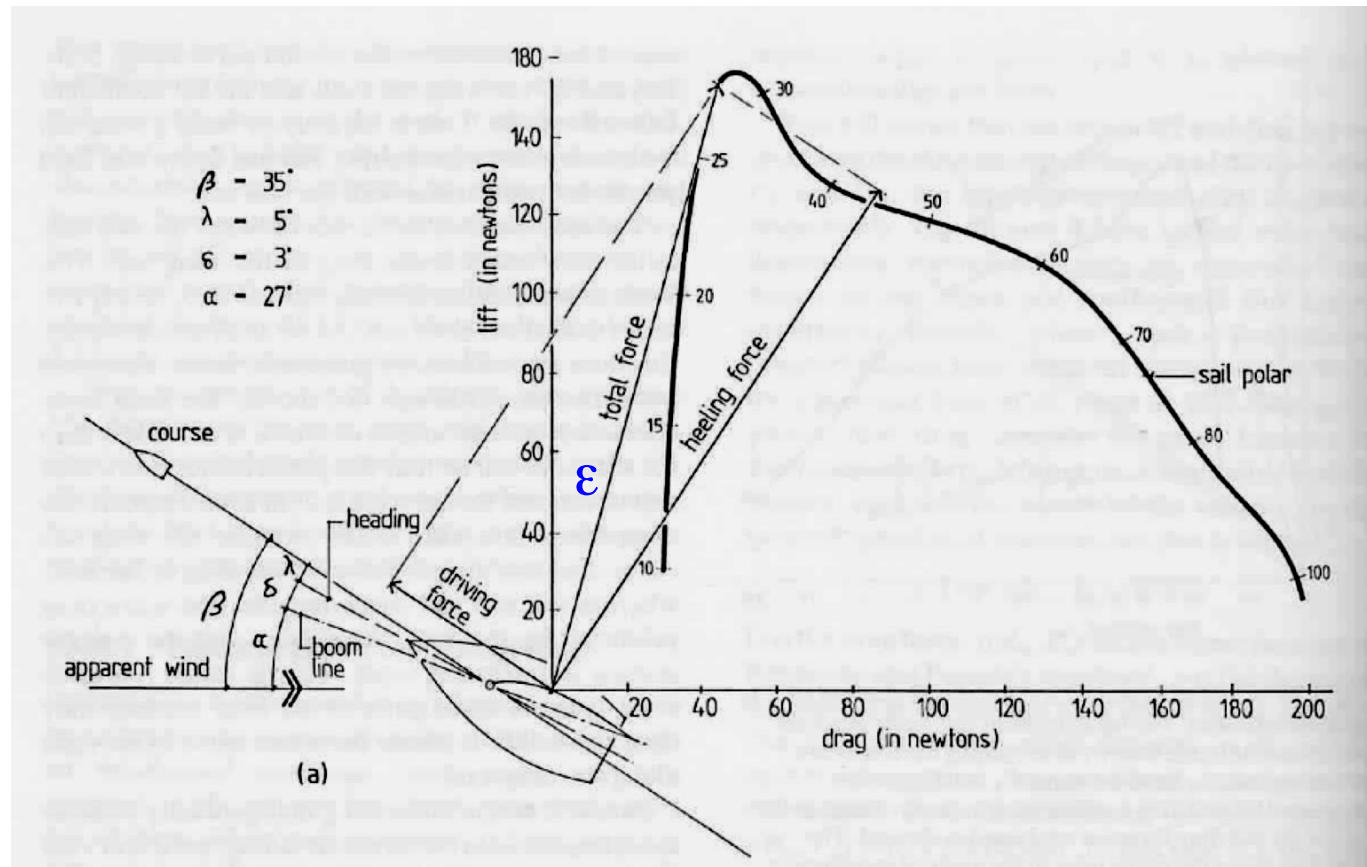
Écoulement d'un fluide parfait autour d'une voile

2) Naviguer contre le vent ?

La polaire « Eiffel » $C_L=f(C_D)$



Gustave Eiffel
(1832-1923)



Navigation « au près »

$$\text{finesse} = \frac{C_L}{C_D} = 1/\tan \varepsilon$$

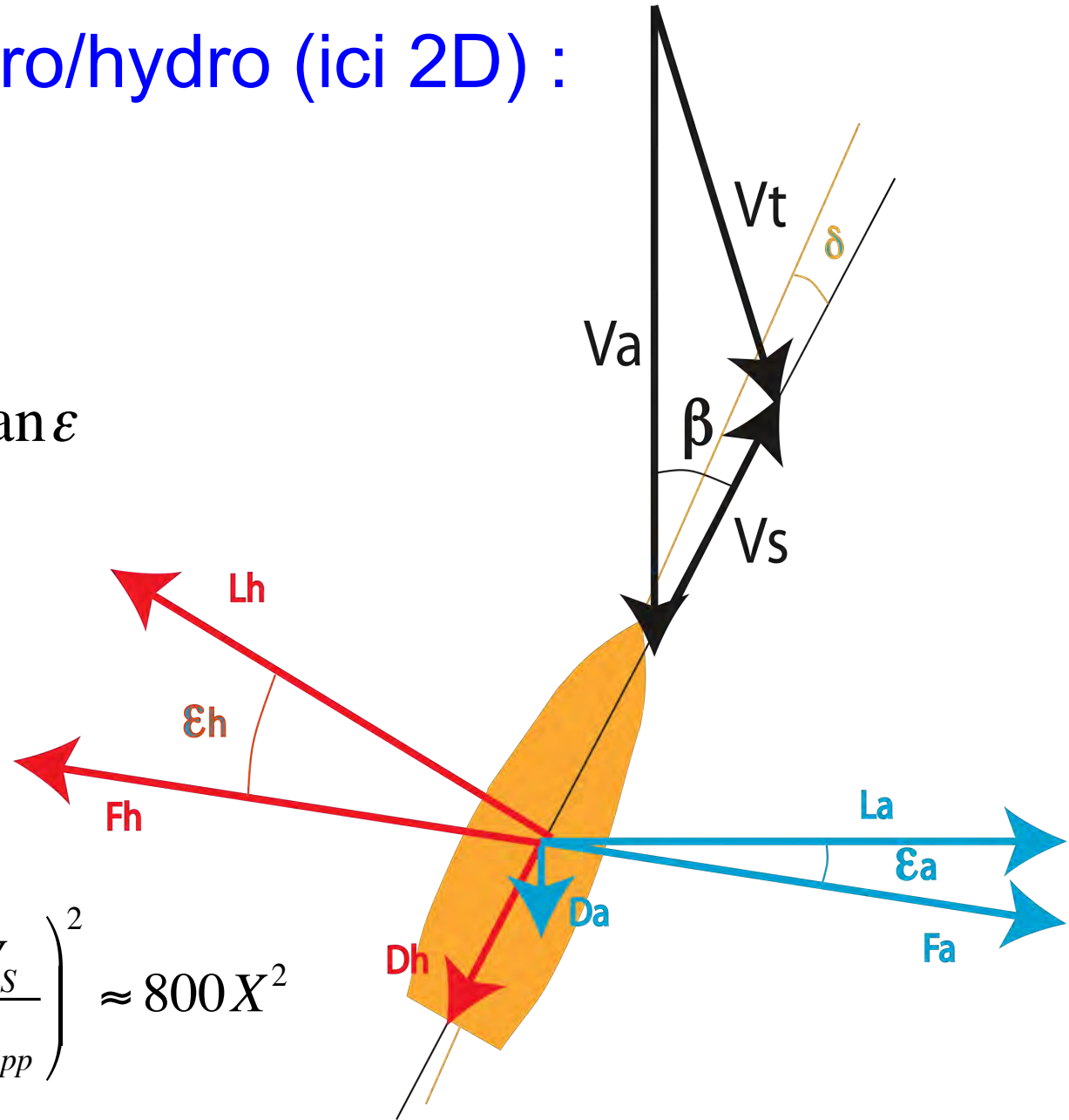
2) Naviguer contre le vent ?

Equilibre aéro/hydro (ici 2D) :

$$\vec{F}_a + \vec{F}_h = 0$$

$$\beta = \varepsilon_a + \varepsilon_h$$

$$\text{ finesse} = 1/\tan \varepsilon$$



$$\frac{S_{voile}}{S_{quille}} \approx \frac{\rho_h C_h}{\rho_a C_a} \left(\frac{V_s}{V_{app}} \right)^2 \approx 800 X^2$$

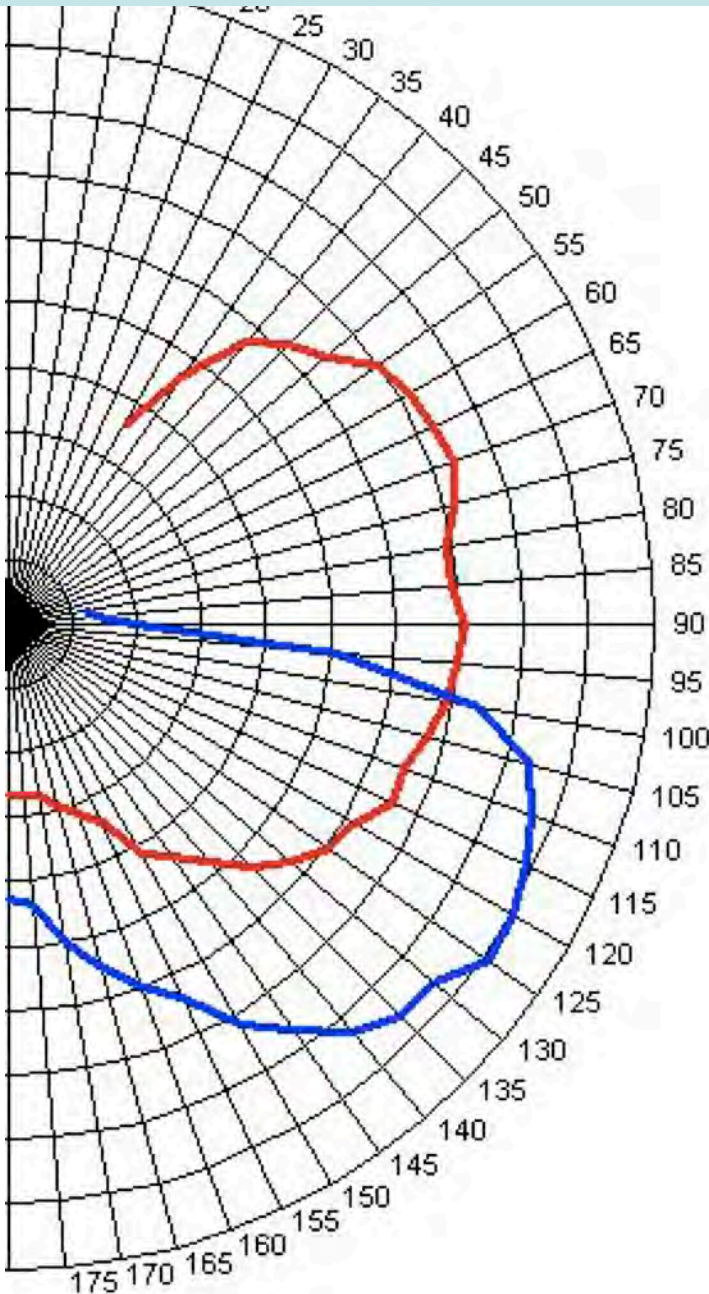
2) Naviguer contre le vent ?

Les polaires de vitesse (VPP ou mesurées)

- fonction du jeu de voile,
- de la force du vent
- de l'état de la mer

Permet de prédire le VMG
(Velocity Made Good) dans *toutes*
les directions.

Similitude avec **la croissance des cristaux**
(enveloppe convexe, construction de Wulff) et le
Principe de Fermat (routage) !



2) Naviguer contre le vent ?

Face au vent...est-ce possible ?

2) Naviguer contre le vent ?

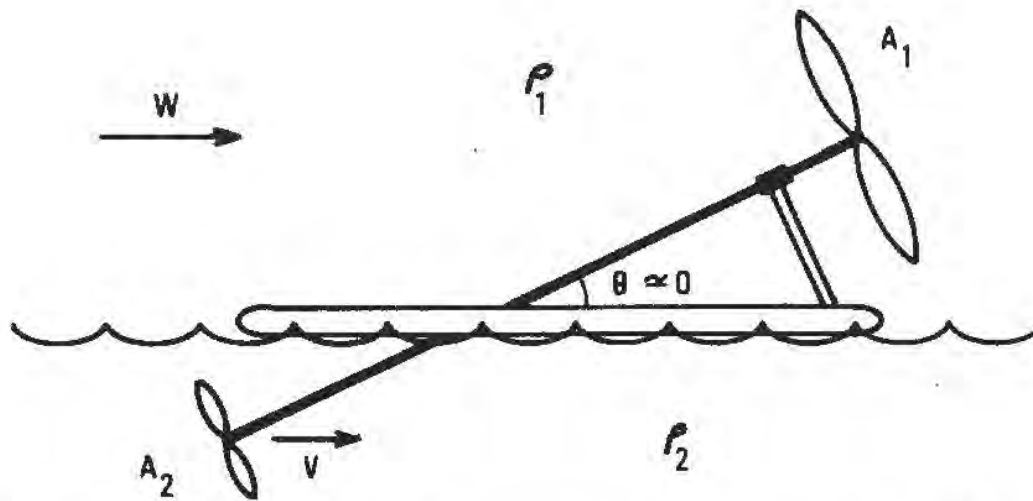


Sur terre... oui !

Racing Aeolus
(Den Helder, Netherlands)

2) Naviguer contre le vent ?

Face au vent...est-ce possible ?



Sur l'eau aussi ...

B. Blackford. The physics of a push-me pull-you boat. Am. J. Phys, **46** (10), 1978.

2) Naviguer contre le vent ?

Face au vent...est-ce possible ?

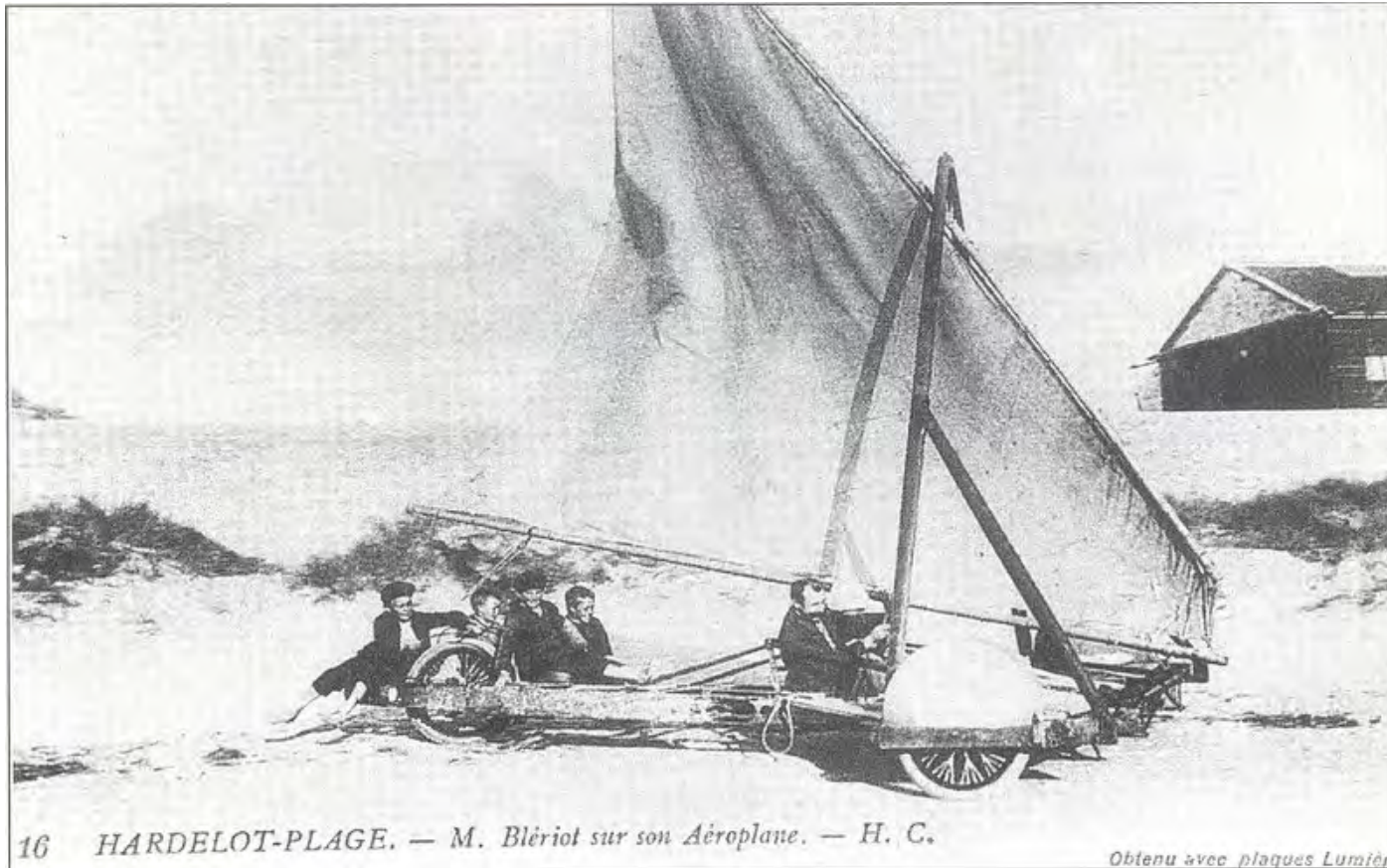


3) Plus vite que le vent ?

- Peut-on aller plus vite que le vent ?
- Combien de fois la vitesse du vent ?
- Peut-on aller dans le sens du vent ... plus vite que le vent (DDWFTTW) ?

3) Plus vite que le vent ?

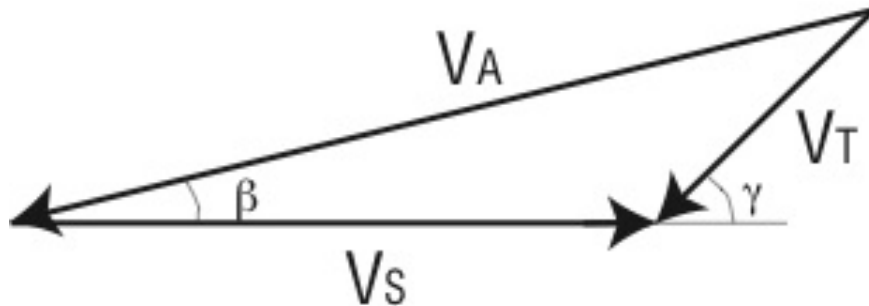
- Peut-on aller plus vite que le vent ?



Les aéroplages de Blériot : 100 km/h vers 1910

3) Plus vite que le vent ?

Vent réel ou apparent ?



$$X = \frac{V_S}{V_T}$$

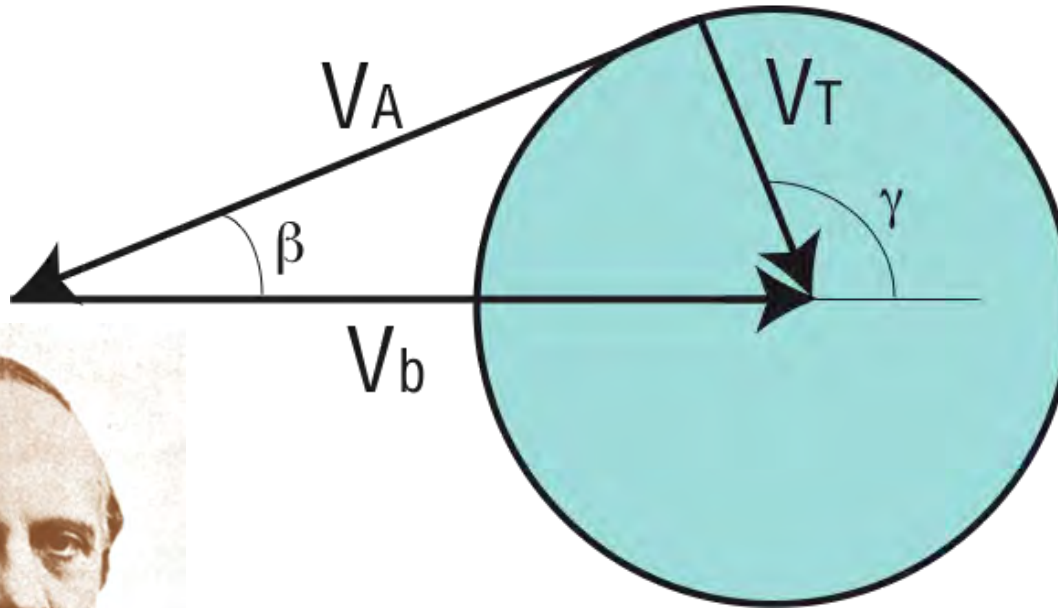
$$V_A^2 = V_T^2 + V_S^2 + 2V_T V_S \cos \gamma$$
$$\tan \beta = \frac{V_T \sin \gamma}{V_T \cos \gamma + V_S} = \frac{\sin \gamma}{\cos \gamma + X}$$

=> Un voilier rapide navigue toujours près du vent (apparent).

3) Plus vite que le vent ?

Théorème de Lanchester (1907)

$$\beta = \varepsilon_a + \varepsilon_h$$



$$X = \frac{V_s}{V_T}$$

$$X_{\max} = \frac{1}{\sin(\beta_{\min})}$$

$$\gamma_{opt} = 90^\circ + \beta_{\min}$$

$$X = 3 \Rightarrow \beta \approx 20^\circ, f \sim 6$$

$$\text{Ex: } X = 5 \Rightarrow \beta \approx 11^\circ, f \sim 12$$



Frederick William Lanchester
(1868-1946)

3) Plus vite que le vent ?

- Peut-on aller dans le sens du vent ... plus vite que le vent (DDWFTTW) ?



A haute vitesse, le vent vient toujours de devant

Directly downwind, faster than the wind (DDWFTTW)



Blackbird, juillet 2010, record à 2.8 fois la vitesse du vent.

4) Quelle est la vitesse limite ?

- Vitesse limite de coque ?
- Phénomène de cavitation ?
- jusqu'où ira-t-on ?

4) Quelle est la vitesse limite ?

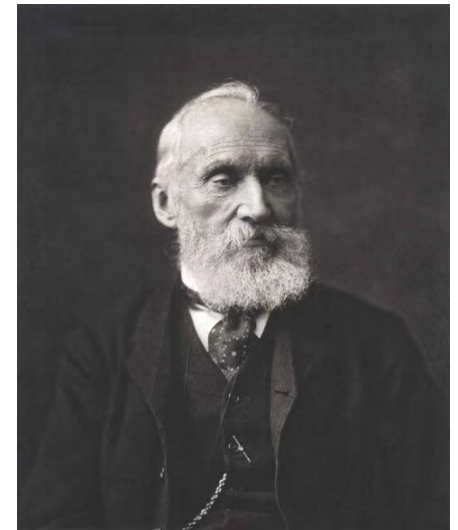
La vitesse limite de coque ?



$$\alpha_{\max} = 19,5^{\circ}$$

- Ondes de gravité
- Résistance de vague :

$$R_w = \frac{1}{2} \rho V^2 B^2 C_w$$



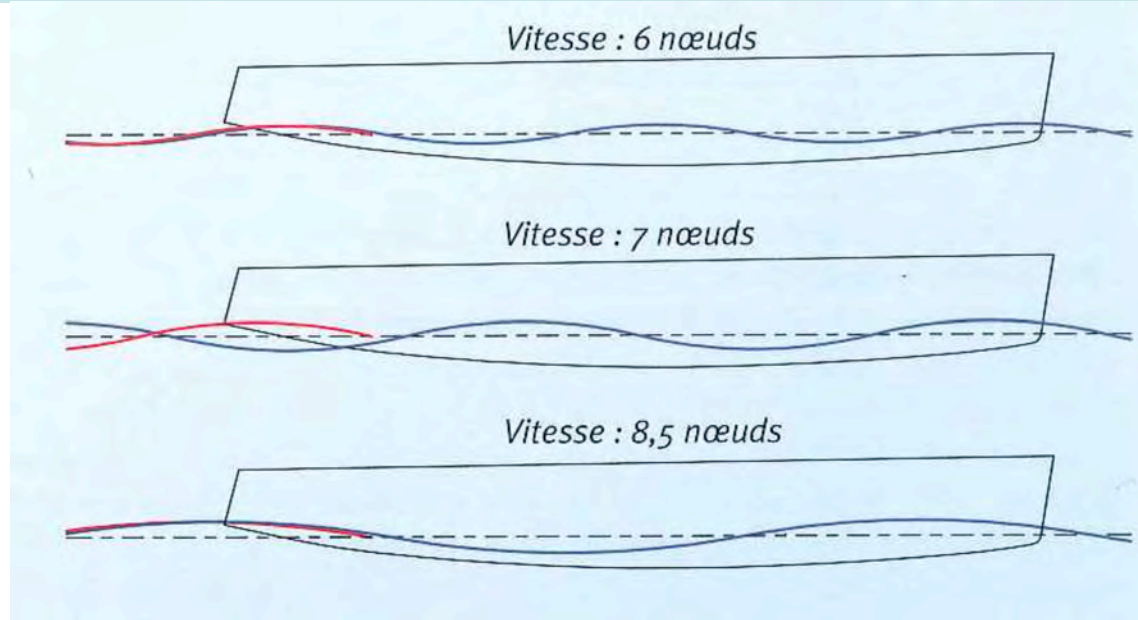
Lord Kelvin
(William Thomson)
1824-1907

Résistance de vague

4) Quelle est la vitesse limite ?



$$Fr = \frac{U}{\sqrt{gL}}$$

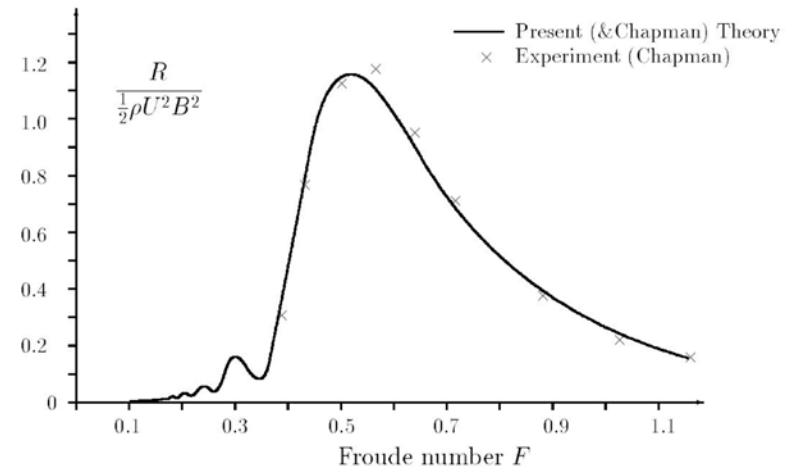


William Froude
(1810-1878)

La résistance de vague augmente très rapidement avec ℓ / L

$$l \approx L$$

$$V_{\text{lim}} = \sqrt{\frac{gL}{2\pi}}$$



Vitesse limite de coque en « déplacement »

4) Quelle est la vitesse limite ?



DPPI
AGENCE DE PRESSE

SAILING HISTORY - AJAX NEW COLLECTION - PHOTO : JONATHAN EASTLAND / AJAX NEWS / DPPI
OSTAR 1976 - SINGLE-HANDED TRANSATLANTIC RACE - CLUB MEDITERRANÉE / SKIPPER : ALAIN COLAS (FRA) / 72 M / 4 MASTS

Alain Colas sur Club Méditerranée (72 m de long, Transat anglaise en 1976)

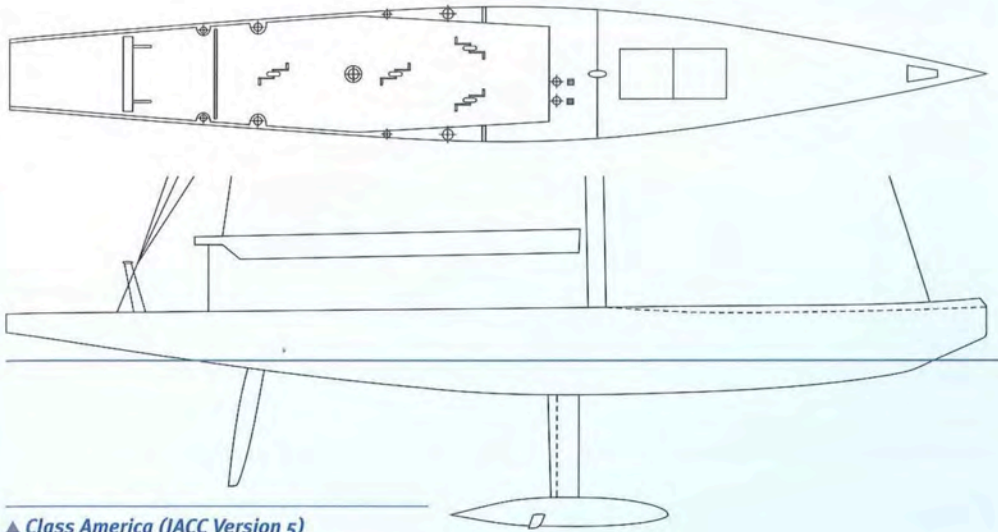
4) Quelle est la vitesse limite ?



Coque à déplacement
à sa vitesse limite de coque
($Fr \approx 0.5$)



Coque planante
Bateau de la mini-transat au
planing ($Fr > 1$)

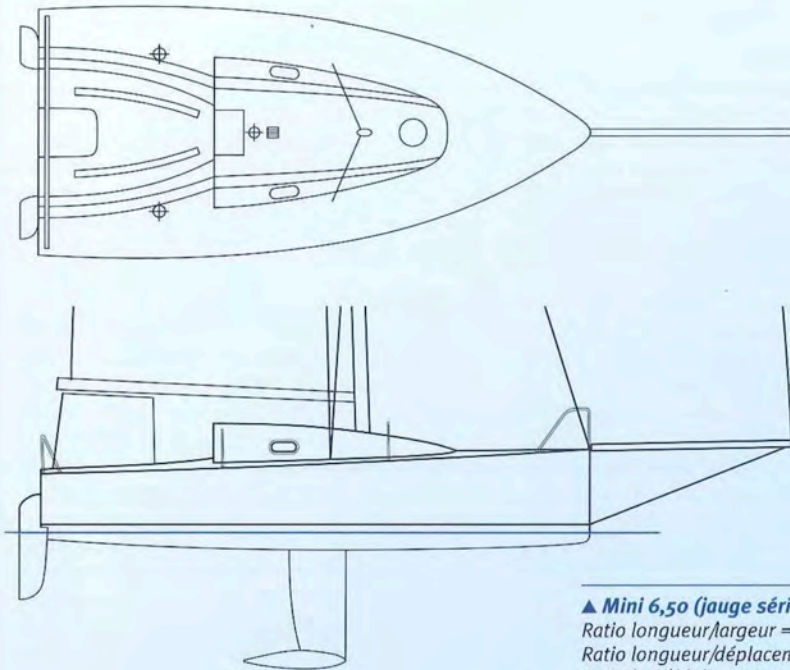


▲ **Class America (IACC Version 5)**

Ratio longueur/largeur = 7,2 environ

Ratio longueur/déplacement = 0,72 environ

Ratio lest/déplacement = 0,80 environ



▲ **Mini 6,50 (jauge série)**

Ratio longueur/largeur = 2,16 environ

Ratio longueur/déplacement = 0,67 environ

Ratio lest/déplacement = 0,42 environ

Les formes
changent !



Magnum, David Raison

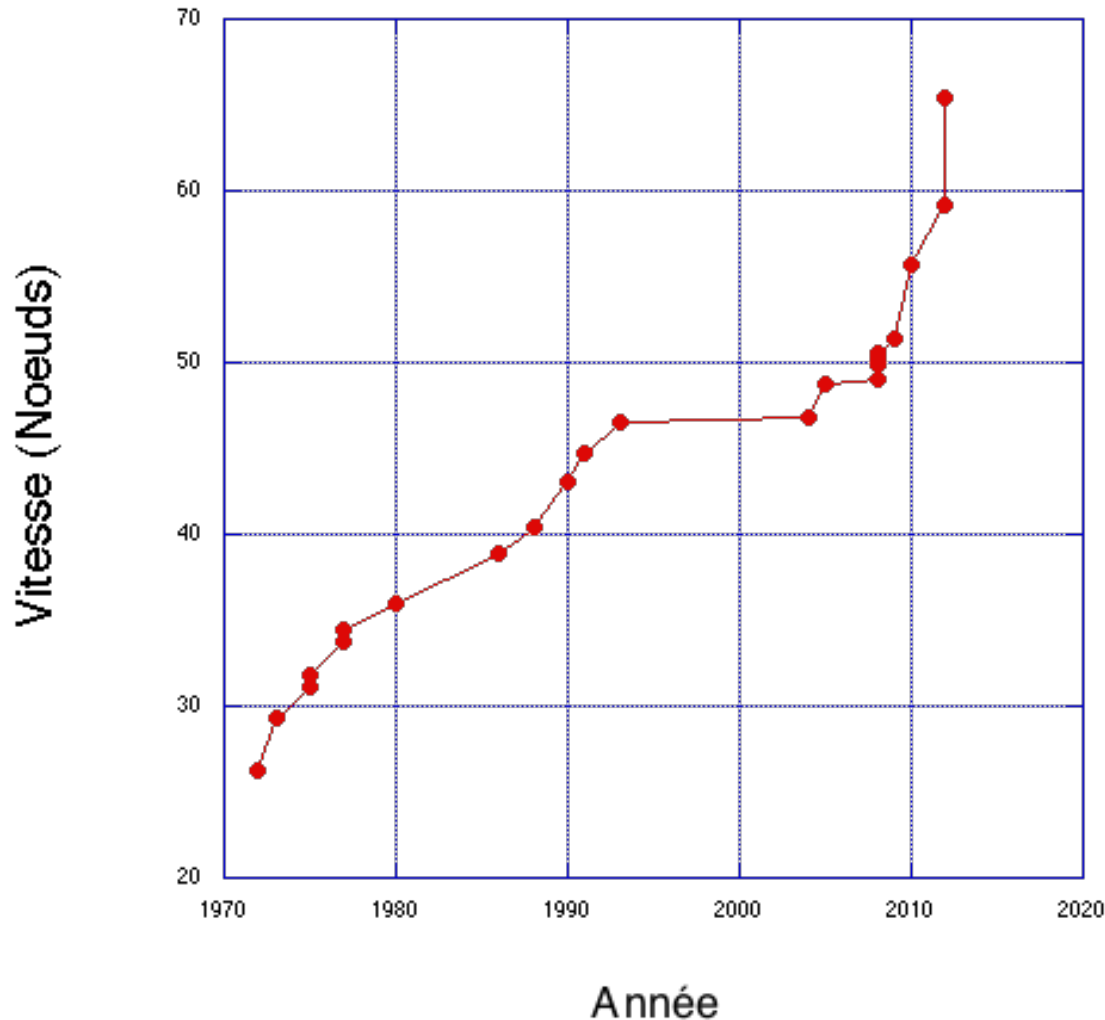


Safran Sailing Team, Morgan Lagravière

4) Quelle est la vitesse limite ?

—●— Vitesse (Noeuds)

Vitesse 500m



Evolution des
records
de vitesse
(sur 500 m)

1 nœud = 1 mille marin/heure
= 1,852 km/h

Source : World Sailing Speed
Record Council

4) Quelle est la vitesse limite ?

Les records de vitesse (sur 500 m)

- Planche à voile : 49,09 N (2008)
- Kite surf : 50,98 N (16 nov 2009)
- Hydroptère : 51,36 N (5 sept 2009)
- Kit surf : 55,65 N (28 oct 2010)
soit plus de 103 km/h ...
- **SailRocket 2 : 65,45 N (24 nov 2012)**
soit plus de 121 km/h ...



Sailrocket 2



Nouveau record du monde de vitesse à la voile !
121 km/h !

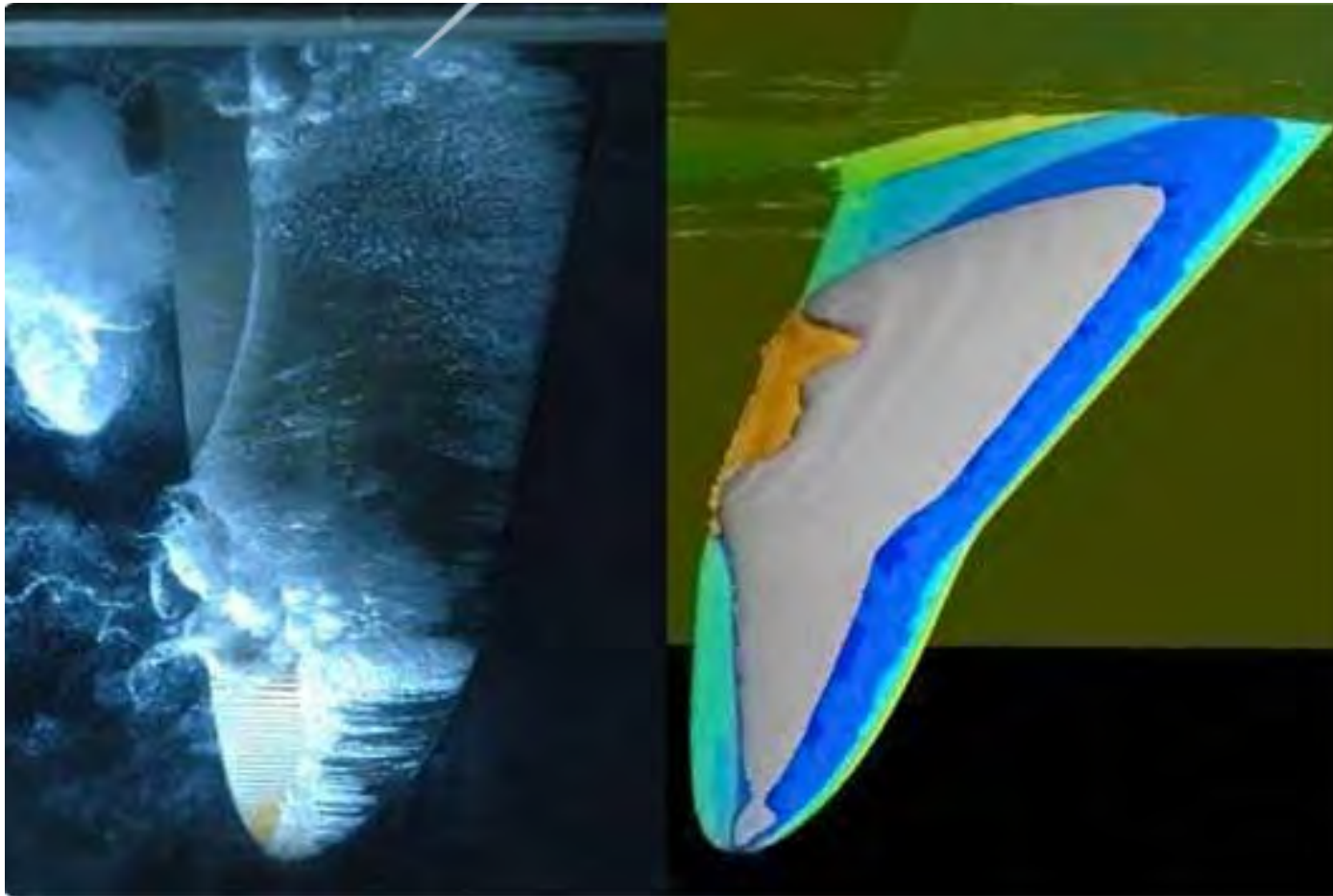


4) Quelle est la vitesse limite ?

Cavitation ou ventilation

A 50 Noeuds, $\frac{1}{2} \rho_{eau} V_S^2 \approx 3P_{atm}$

Foils supercavitants



4) Quelle est la vitesse limite ?

Les autres records à la voile

Char à voile : 202,9 km/h (mars 2009)
<http://www.greenbird.co.uk/>



De 4 à 6 fois
plus vite que le vent réel !

$$\beta = \varepsilon_a + \varepsilon_h \approx \varepsilon_a \approx 10^\circ$$

Et pour aller encore plus vite et plus loin ?

Quelques pistes ...

- Matériaux (coque et voiles) ?
- Attendre d'avoir plus de vent ? Non
- Augmenter la surface de voile ?
- Sortir de l'eau ?
- Voile rigide ?
- Eoliennes ?
- Voiles dynamiques (Kite) ?

Augmenter la surface de voile ?



49er

Voile rigide ?



BMW Oracle racing 90, avec son aile de 57 mètres !

Sortir de l'eau ?



L'Hydroptère (Alain Thébault) : record à 51 Nœuds




Nicolas Parlier

Team France, AC45, mai 2015

Franck Cammas





Maman les p'tits bateaux
Qui vont sur l'eau
Ont-ils des jambes?
Mais oui, mon gros bêta
S'ils n'en avaient pas
Ils ne march'raient pas.

Allant droit devant eux,
Ils font le tour du monde,
Mais comme la Terre est ronde,
Ils reviennent chez eux.

Maman les p'tits bateaux
Qui vont sur l'eau
Ont-ils une âme?
Mais oui, mon gros bêta
S'ils n'en avaient pas
Ils n'voyageraient pas.

...