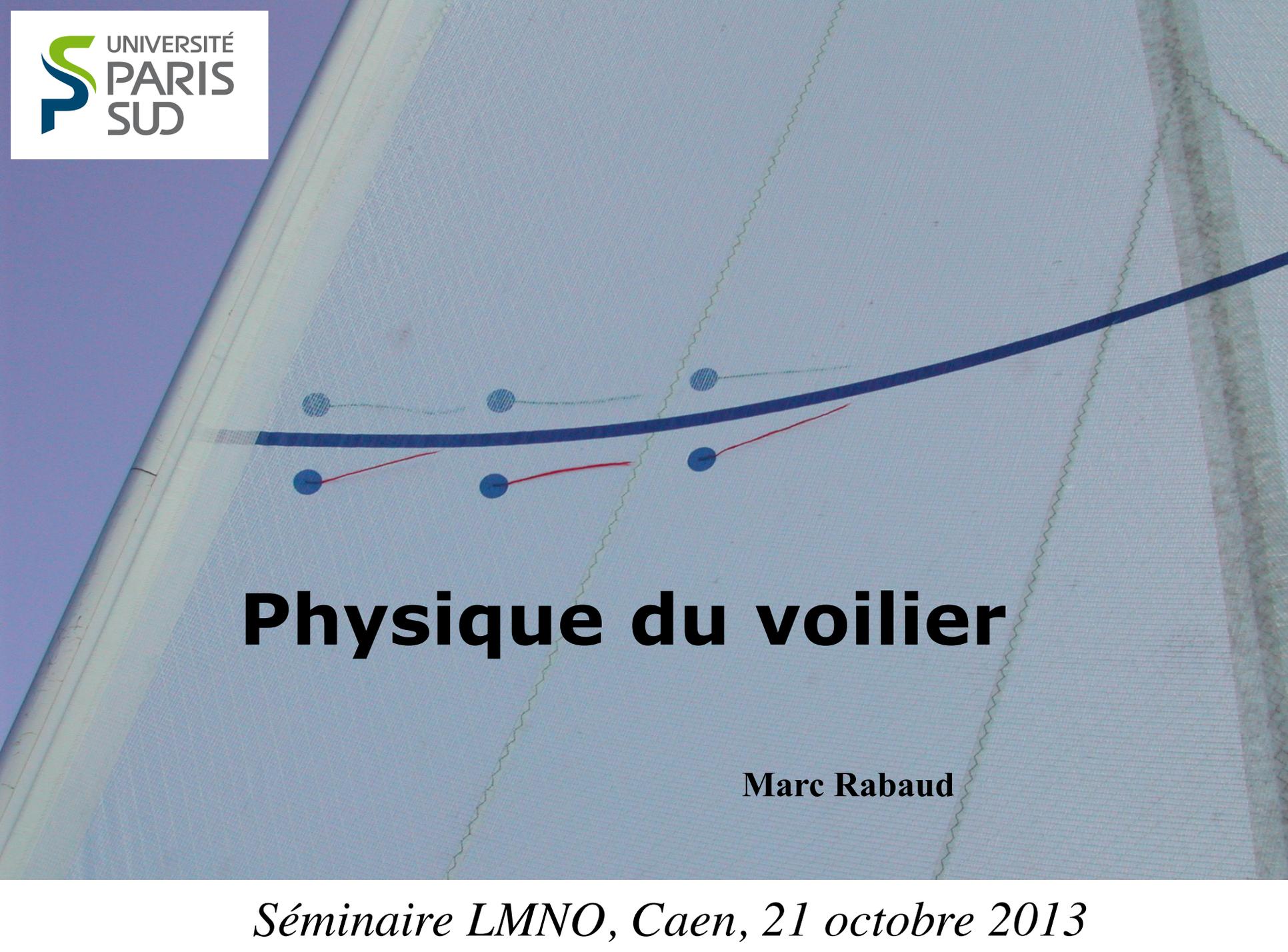




Septembre 2013, finale de la 34ème coupe de l'Amérique



# Physique du voilier

Marc Rabaud

*Séminaire LMNO, Caen, 21 octobre 2013*

# Quelques questions ...

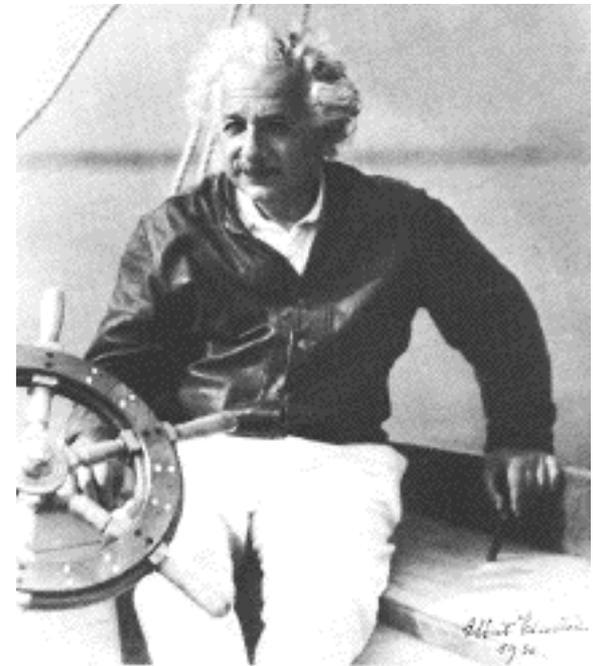
## Quelques évidences et quelques paradoxes

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



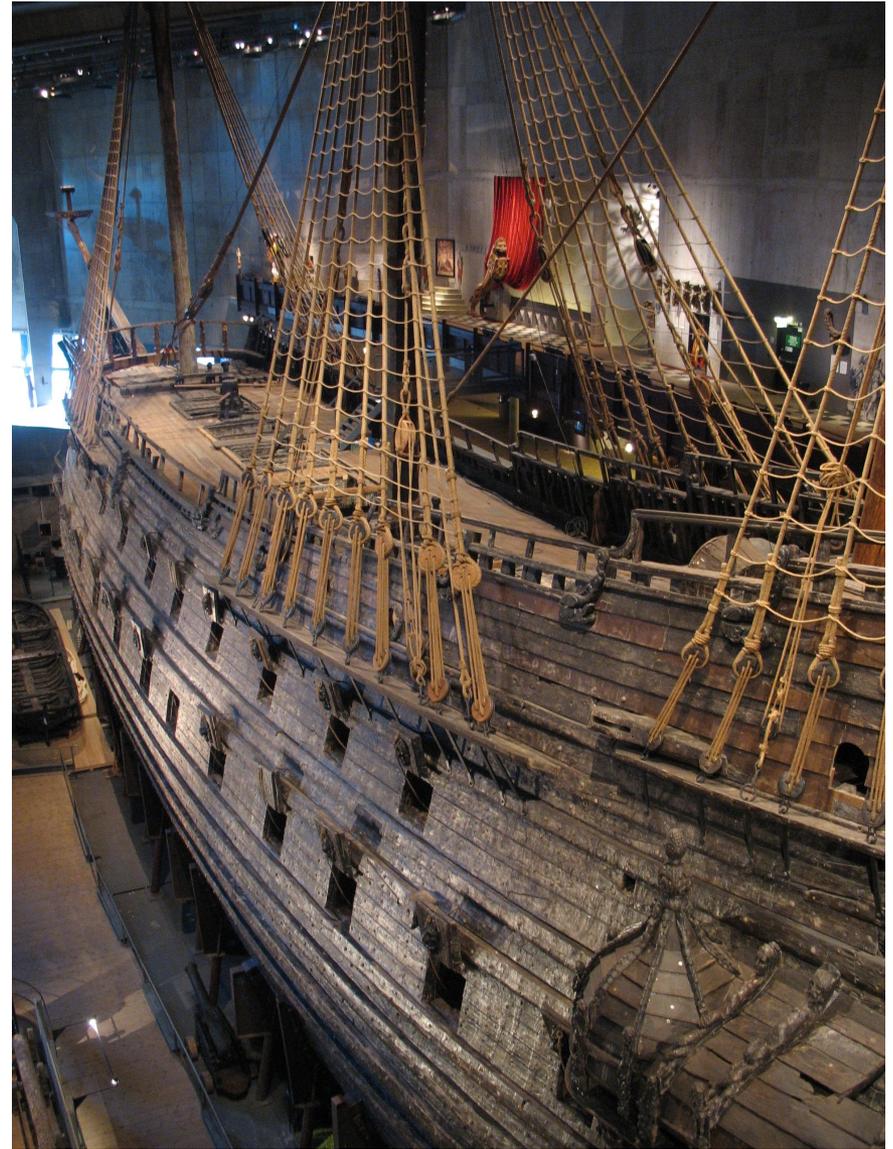
Archimède de Syracuse  
Grec (-287 ; -212)

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



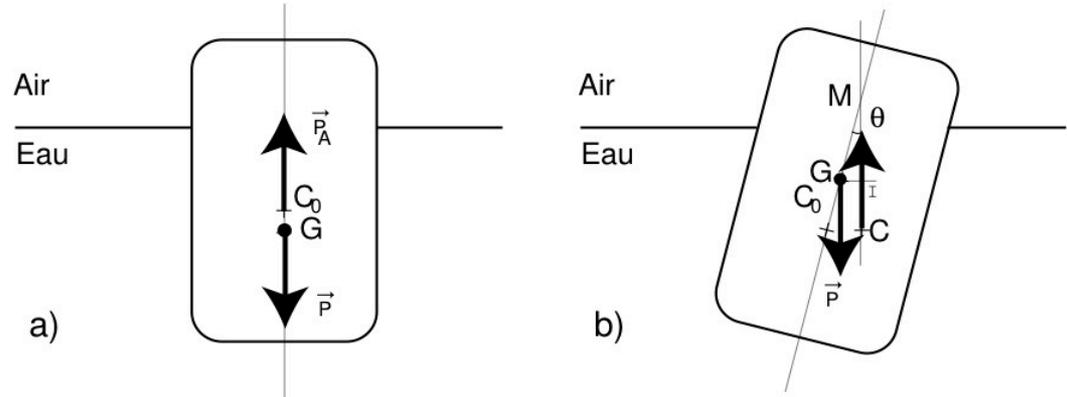
# 1) Plus lourd que l'eau ?



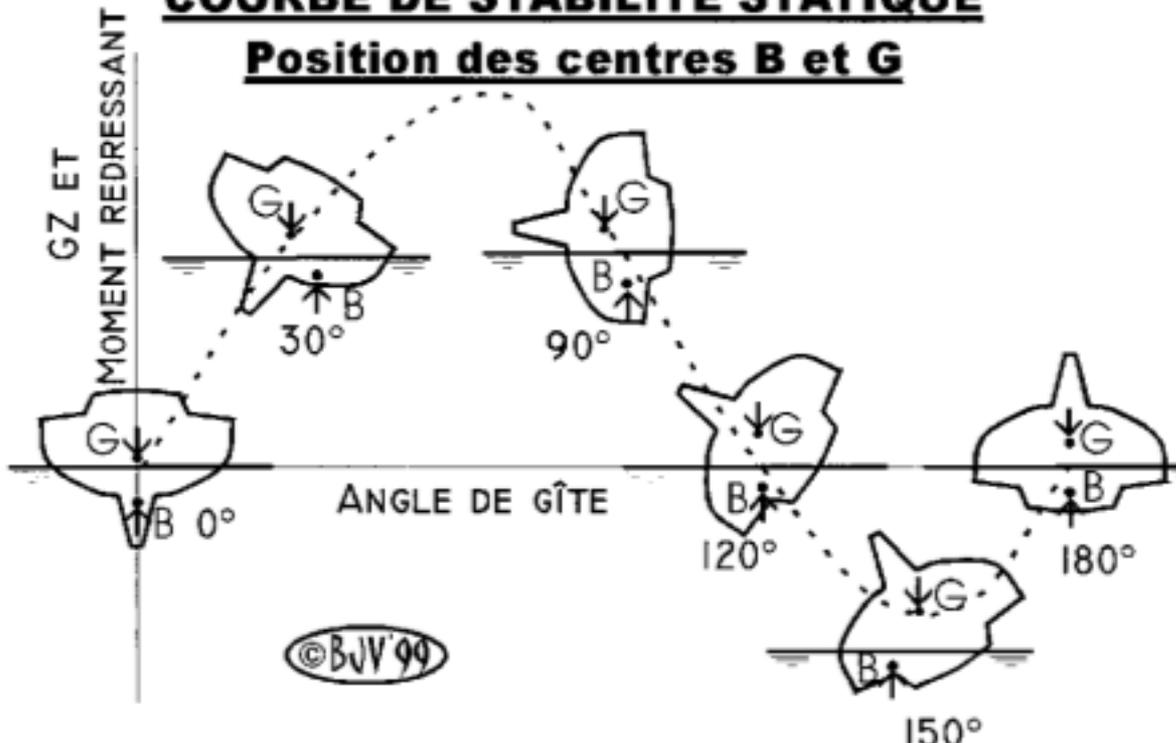
Où est le centre de gravité ?

# 1) Plus lourd que l'eau ?

Condition d'un équilibre stable ?



## COURBE DE STABILITE STATIQUE Position des centres B et G



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)

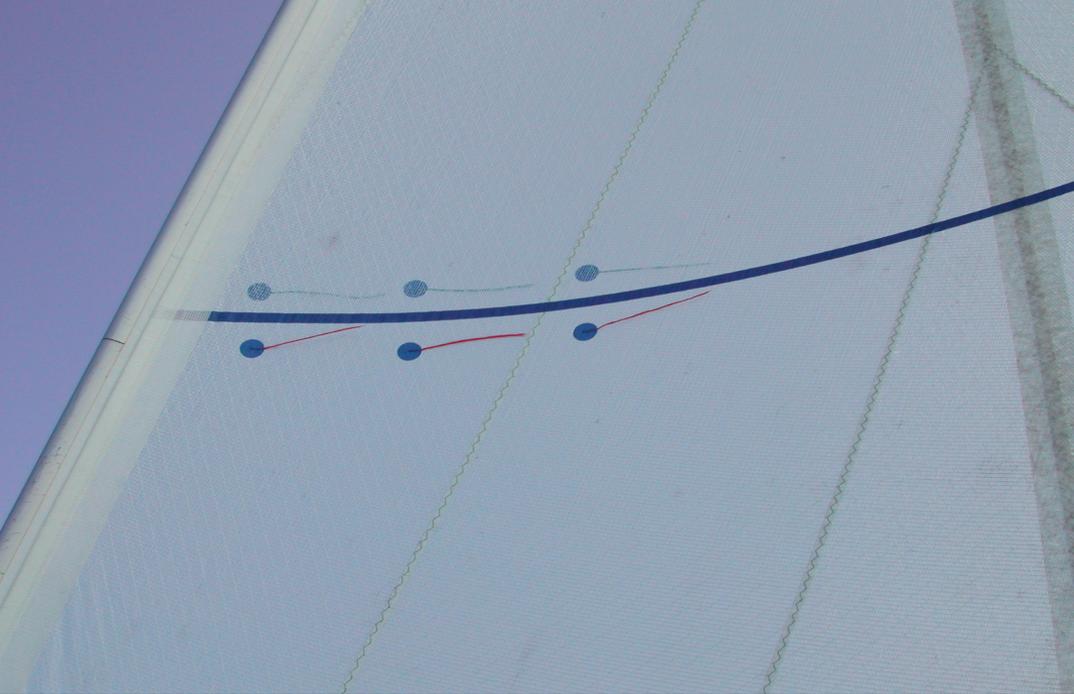


*Le Belem*

- Navigation en finesse  
(écoulement laminaire)



*Pen Duick*



Écoulement laminaire



Écoulement décollé

## 2) Naviguer contre le vent ?

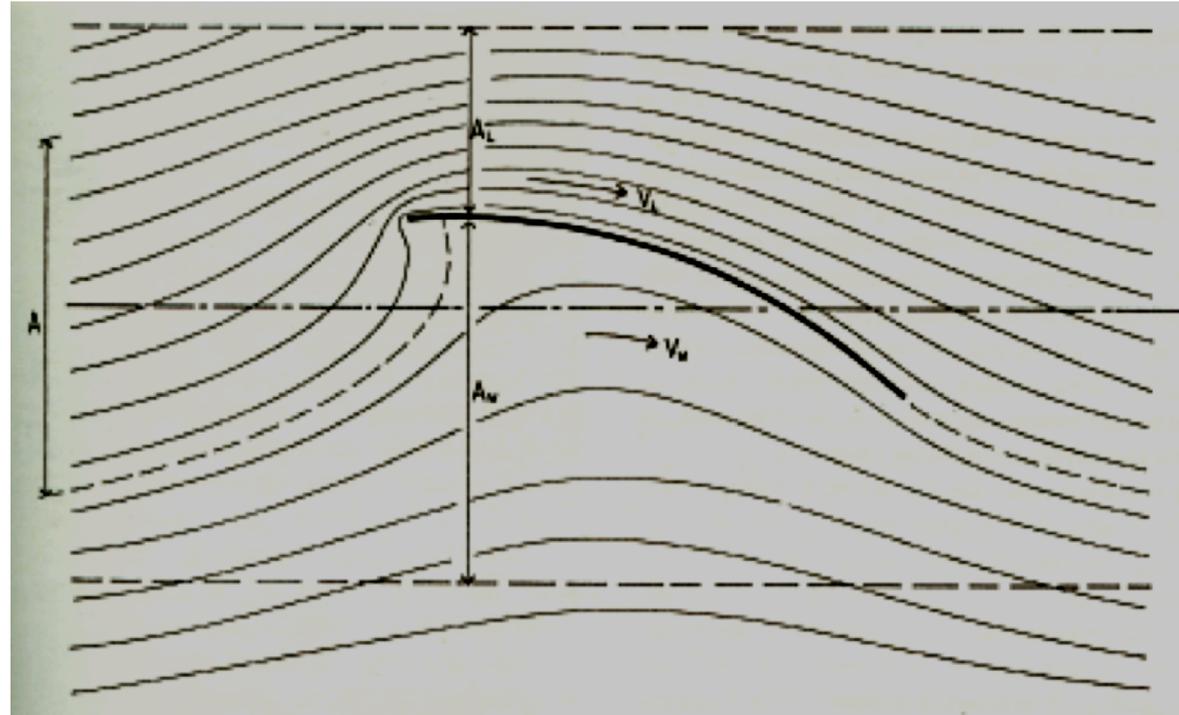
$$P + \frac{1}{2} \rho V^2 = \text{Constante}$$

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

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



Daniel Bernoulli (1700-1782)



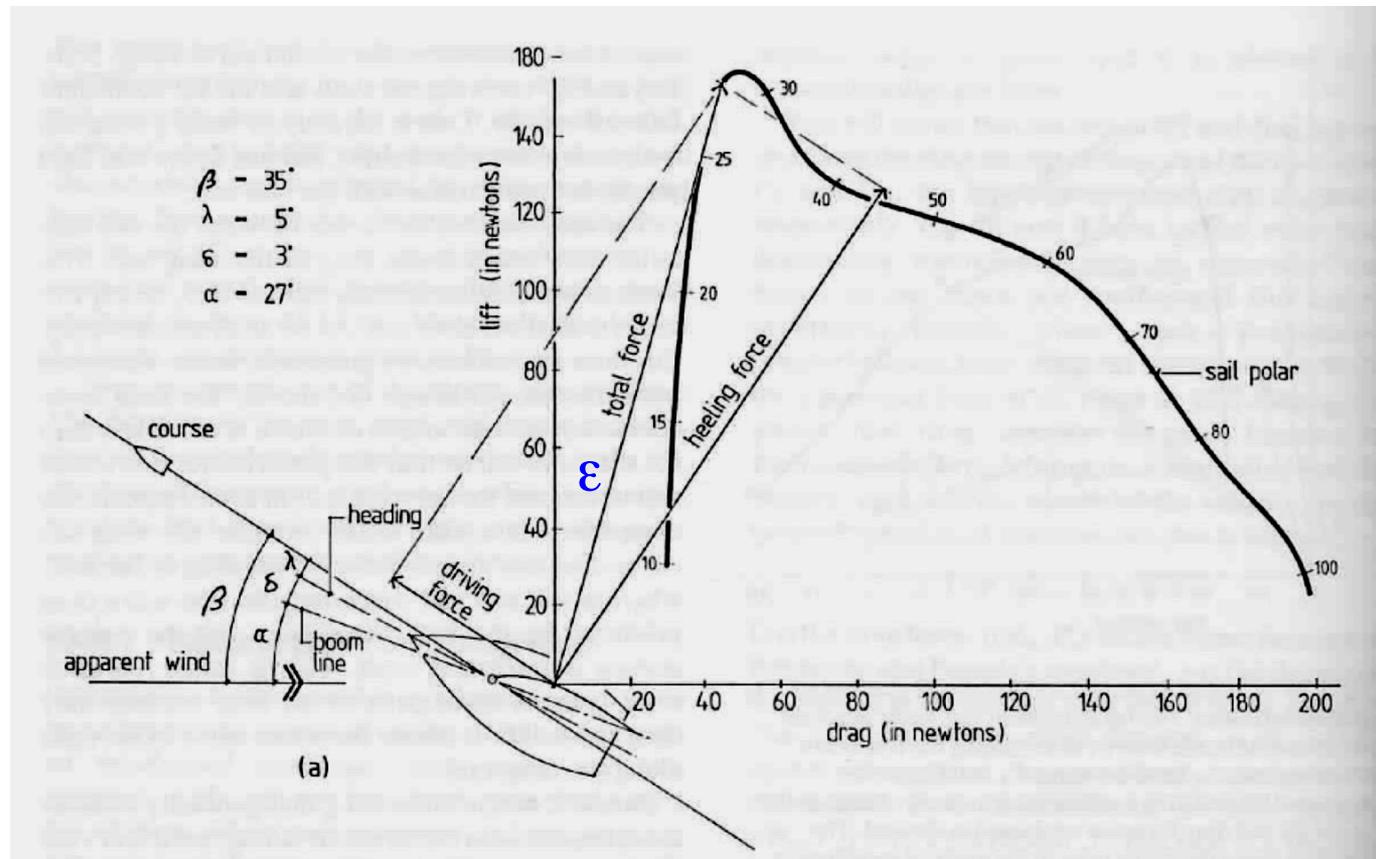
Écoulement d'un fluide parfait autour d'une voile

## 2) Naviguer contre le vent ?

# La polaire « Eiffel » $C_L=f(C_D)$



Gustave Eiffel  
(1832-1923)



Navigation « au près »

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



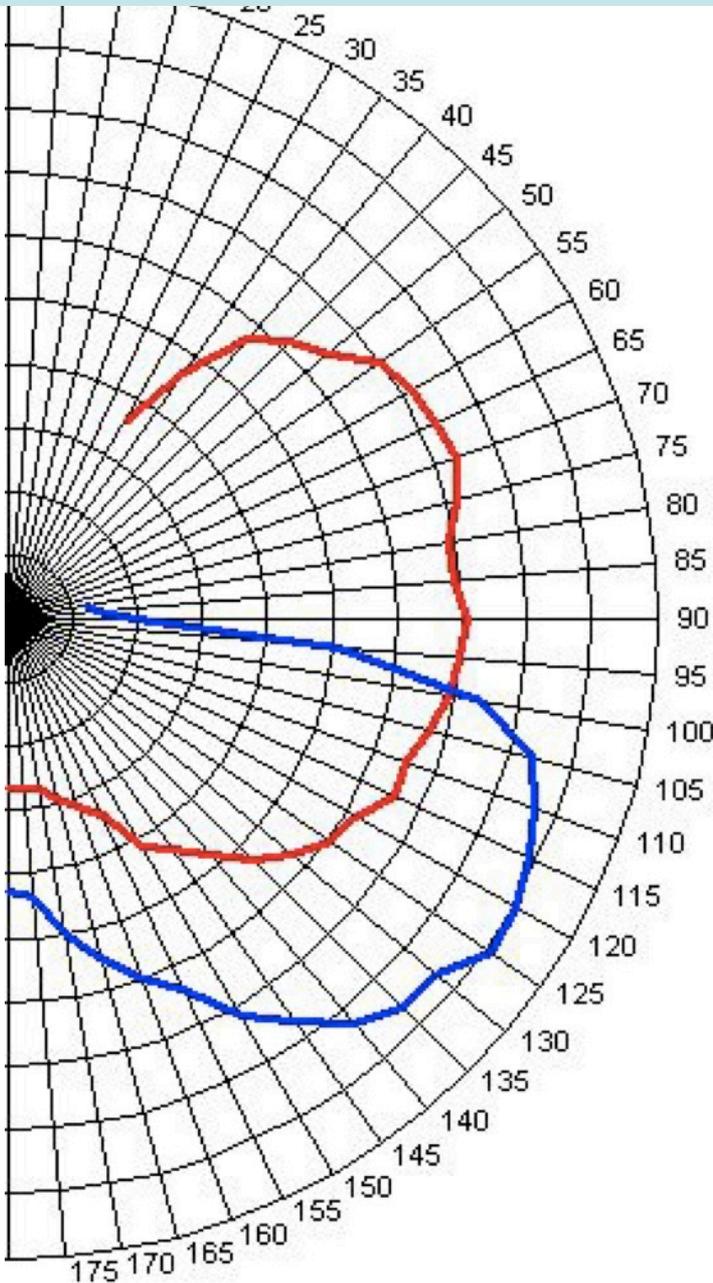
## 2) Naviguer contre le vent ?

# 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 ?

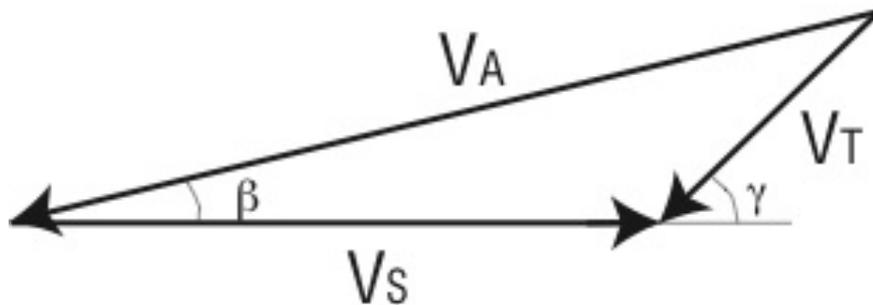


### 3) Plus vite que le vent ?

- 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 ?

## Vent réel ou apparent ?



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

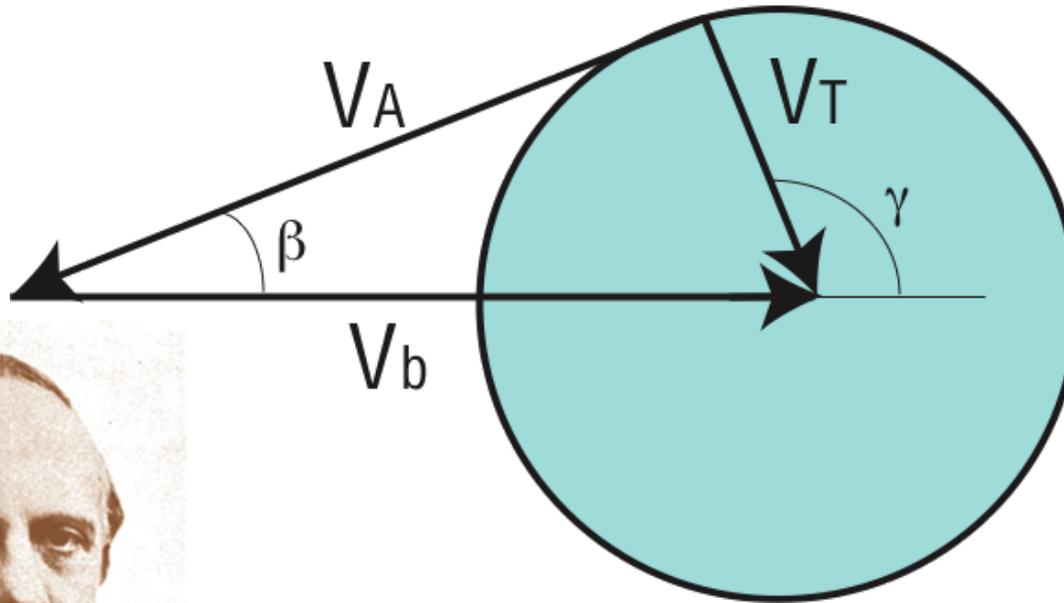
$$V_A^2 = V_T^2 + V_S^2 + 2V_T V_S \cos \gamma$$
$$\tan \beta = \frac{V_T \sin \gamma}{V_T \cos \gamma + V_S} = \frac{\sin \gamma}{\cos \gamma + X}$$

*=> 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 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) ?

## 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 ?

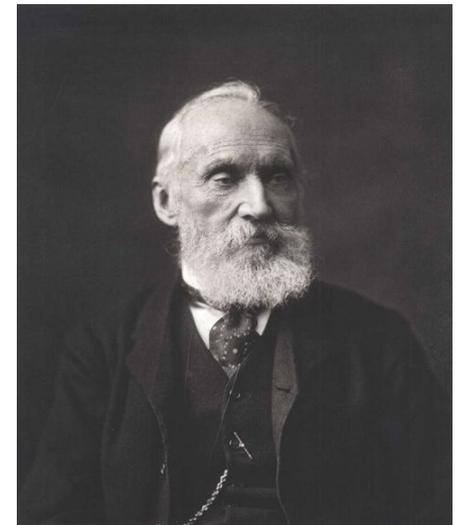
### La vitesse limite de coque ?



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

- Ondes de gravité
- Résistance de vague :

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

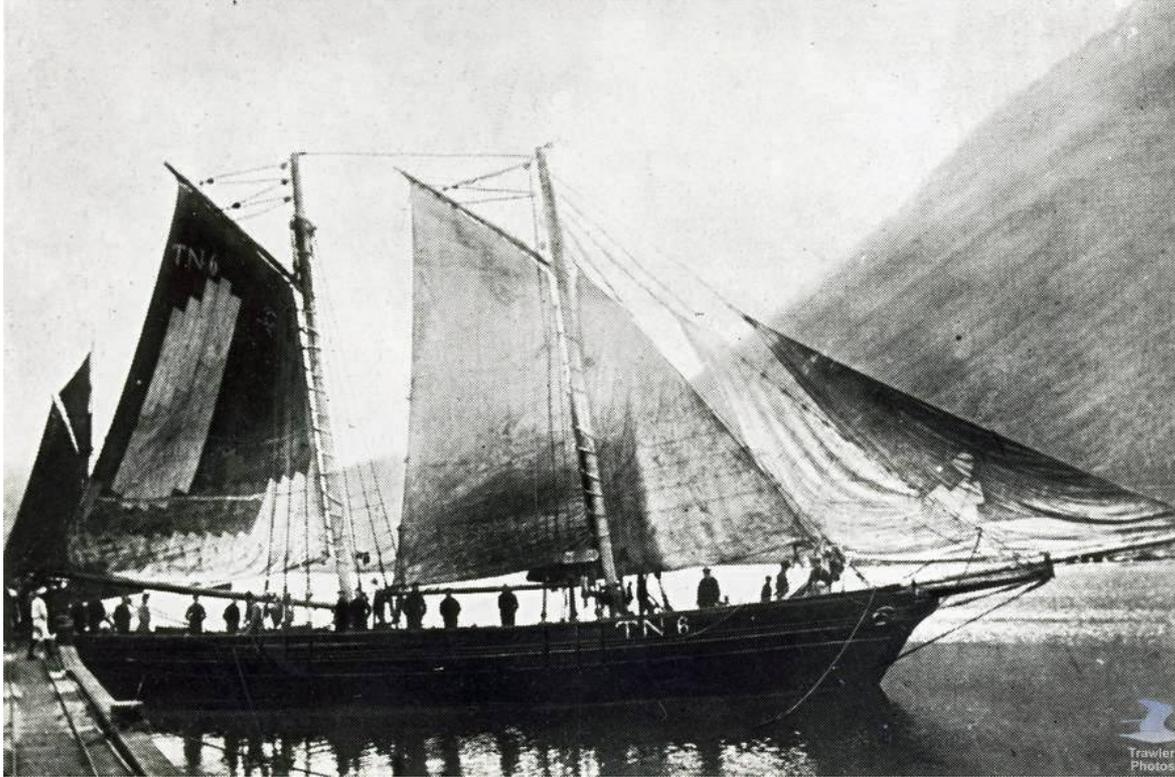


Lord Kelvin  
(William Thomson)  
1824-1907

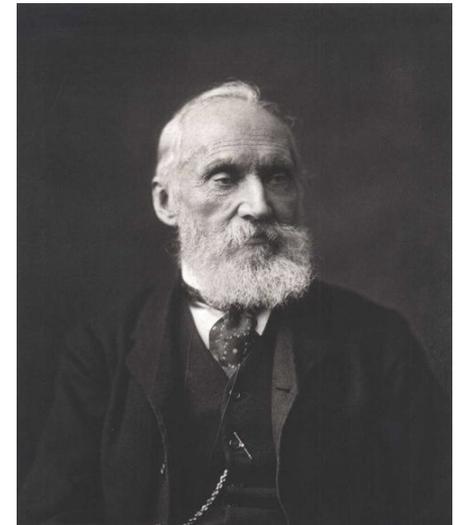
Résistance de vague

## 4) Quelle est la vitesse limite ?

### Sillage de Kelvin



Lalla Rookh



Lord Kelvin  
(William Thomson)  
1824-1907

Résistance de vague

## 4) Quelle est la vitesse limite ?



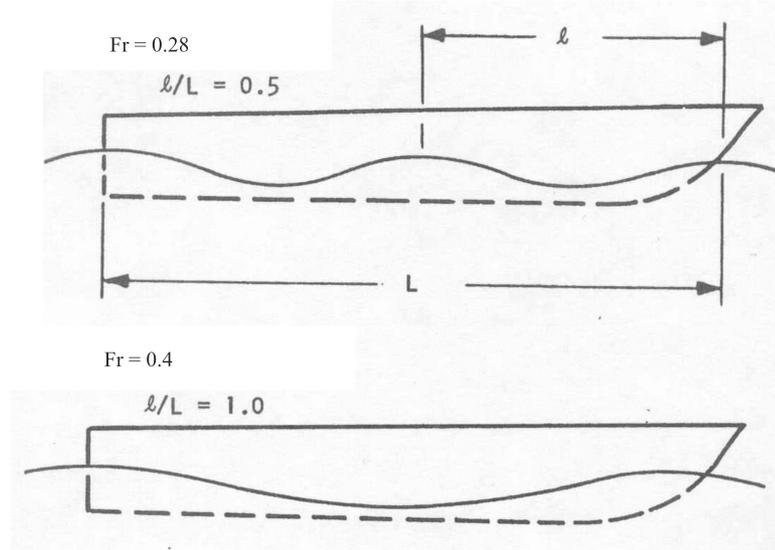
Cylindre 30 mm à 1,1 m/s

Résistance de vague

## 4) Quelle est la vitesse limite ?



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



La résistance de vague augmente 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 MEDITERRANEE / 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  
( $Fr \approx 0.5$ )

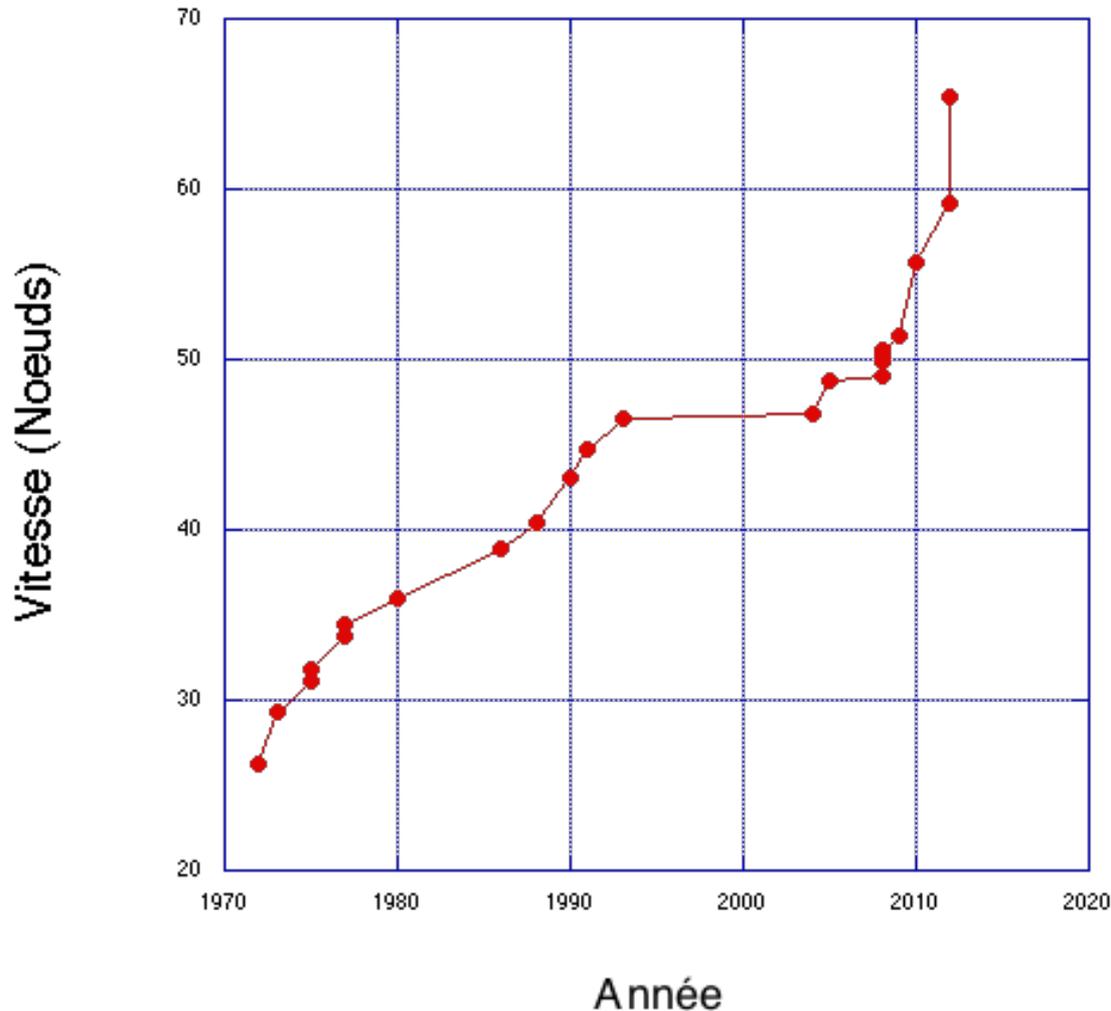


Coque planante  
Bateau de la mini-transat au  
planing ( $Fr > 1$ )

## 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 !*

VESTAS  
SAILROCKET

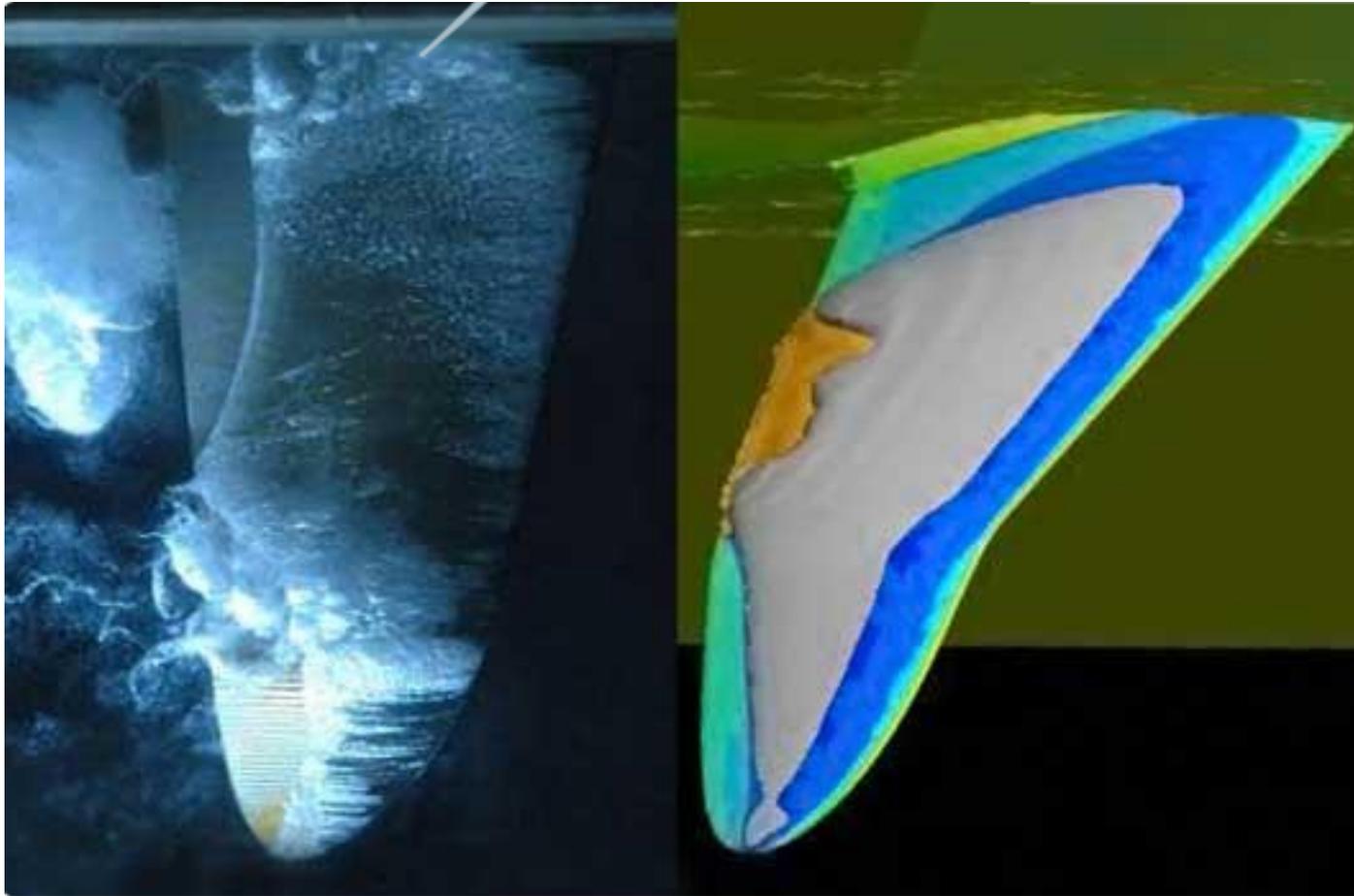
[WWW.VESTASSAILROCKET.COM](http://WWW.VESTASSAILROCKET.COM)

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 sur glace : 135 km/h

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

# Sortir de l'eau ?



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

# Voile rigide ?

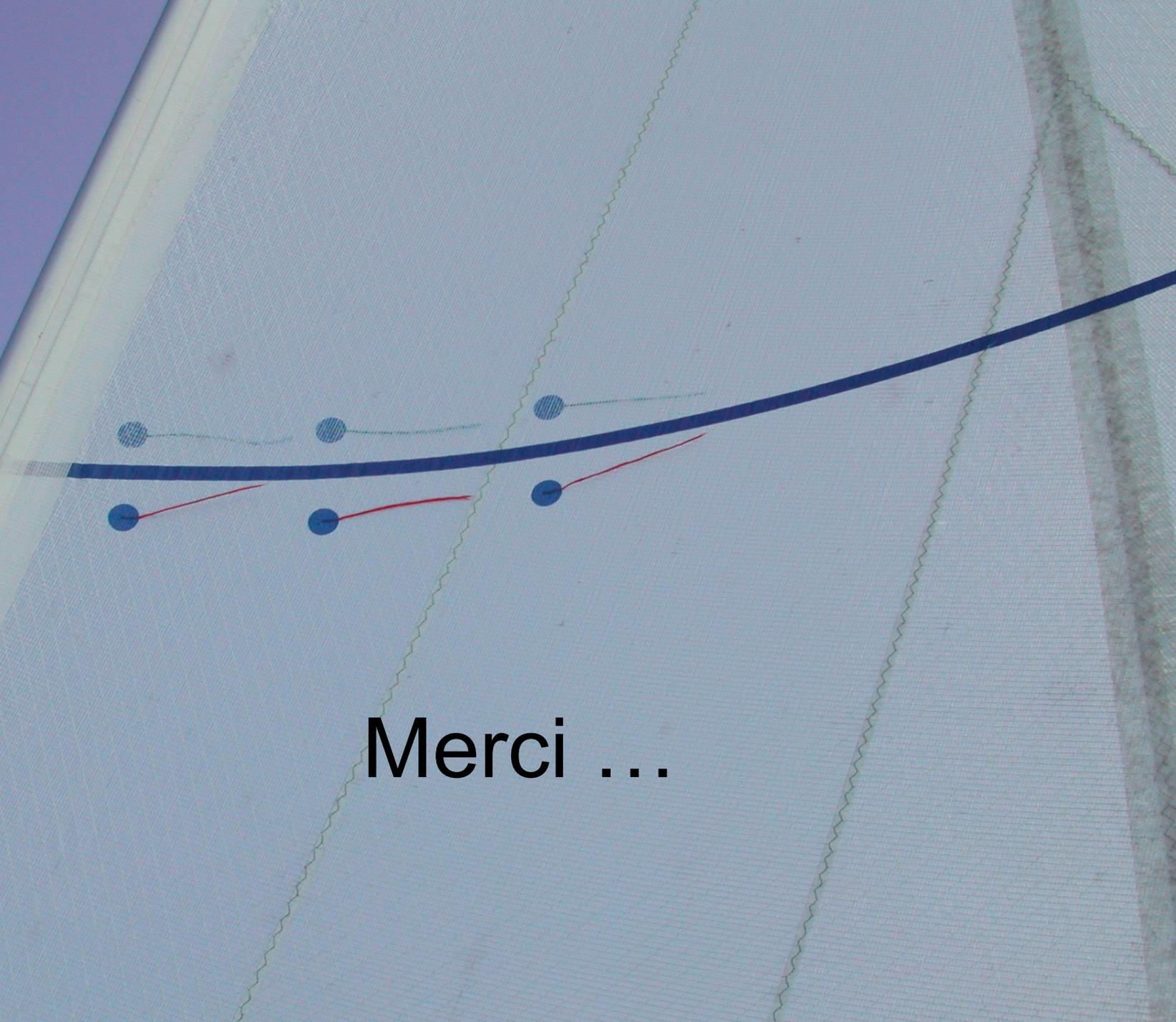


BMW Oracle racing 90, avec son aile de 57 mètres !

# Plus utile : projet d'Yves Parlier



(Beyond the sea ®)



**Merci ...**