

Physique & Voiliers

Marc Rabaud



Colloquium UPMC, 13 juin 2017



AMERICA'S CUP **Finales des challengers**
PRESENTED BY **LOUIS VUITTON** (Louis Vuitton America's Cup Challengers Playoffs finals)
LOUIS VUITTON

Manches du 12 juin 2017

Course 7 - Artemis Racing/Emirates Team New Zealand, arrêtée temps limite dépassé.

Course 8 - Emirates Team New Zealand bat Artemis Racing de 56 secondes.

Classement

Emirates Team New Zealand (NZL), 5 points.

Artemis Racing (SUE), 2 points.

Emirates Team New Zealand est le challenger de la 35^e Coupe de l'America.

35^e Coupe de l'America

(America's Cup Match presented by Louis Vuitton)

Samedi 17 juin

Course 1 - Oracle Team USA - Emirates Team New Zealand

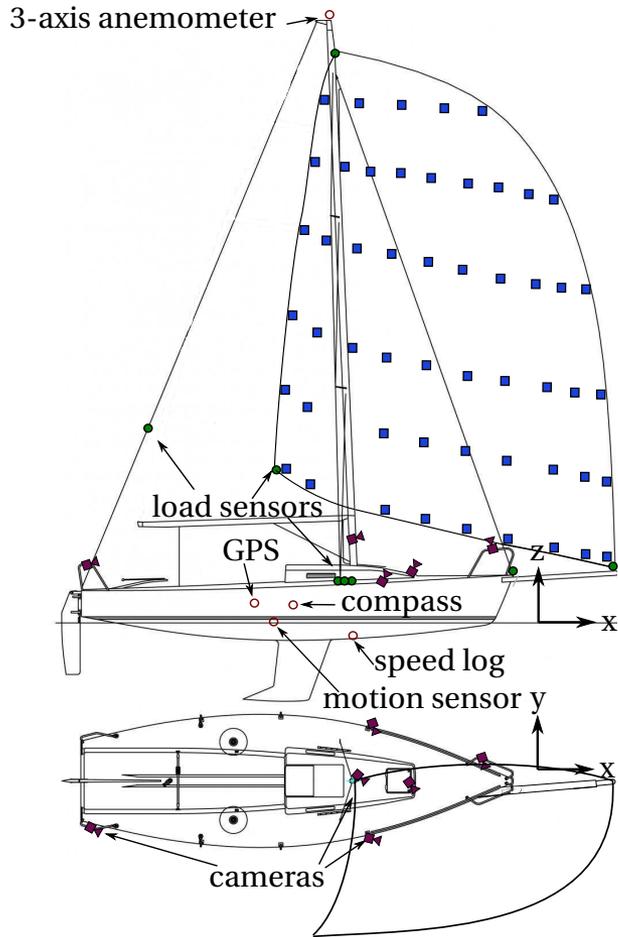
Course 2 - Emirates Team New Zealand - Oracle Team USA

L'équipe victorieuse de la 35^e Coupe de l'America sera la première à gagner sept régates.

Les courses sont prévues les 17, 18, 24, 25 (deux manches par jour) ainsi que les 26 et 27 juin si besoin.



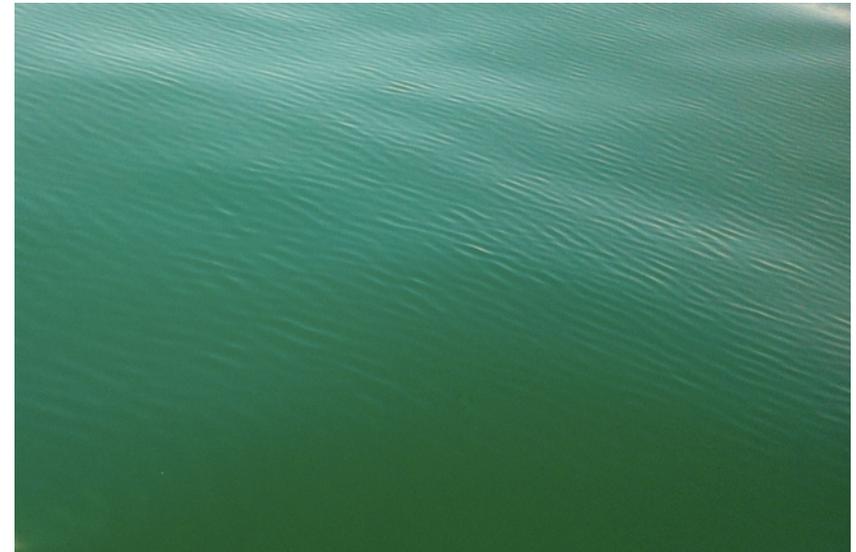
Mes recherches, +/- lié à la voile



Voilier instrumenté
de l'Ecole Navale



Sillage des bateaux



Formation des premières vagues

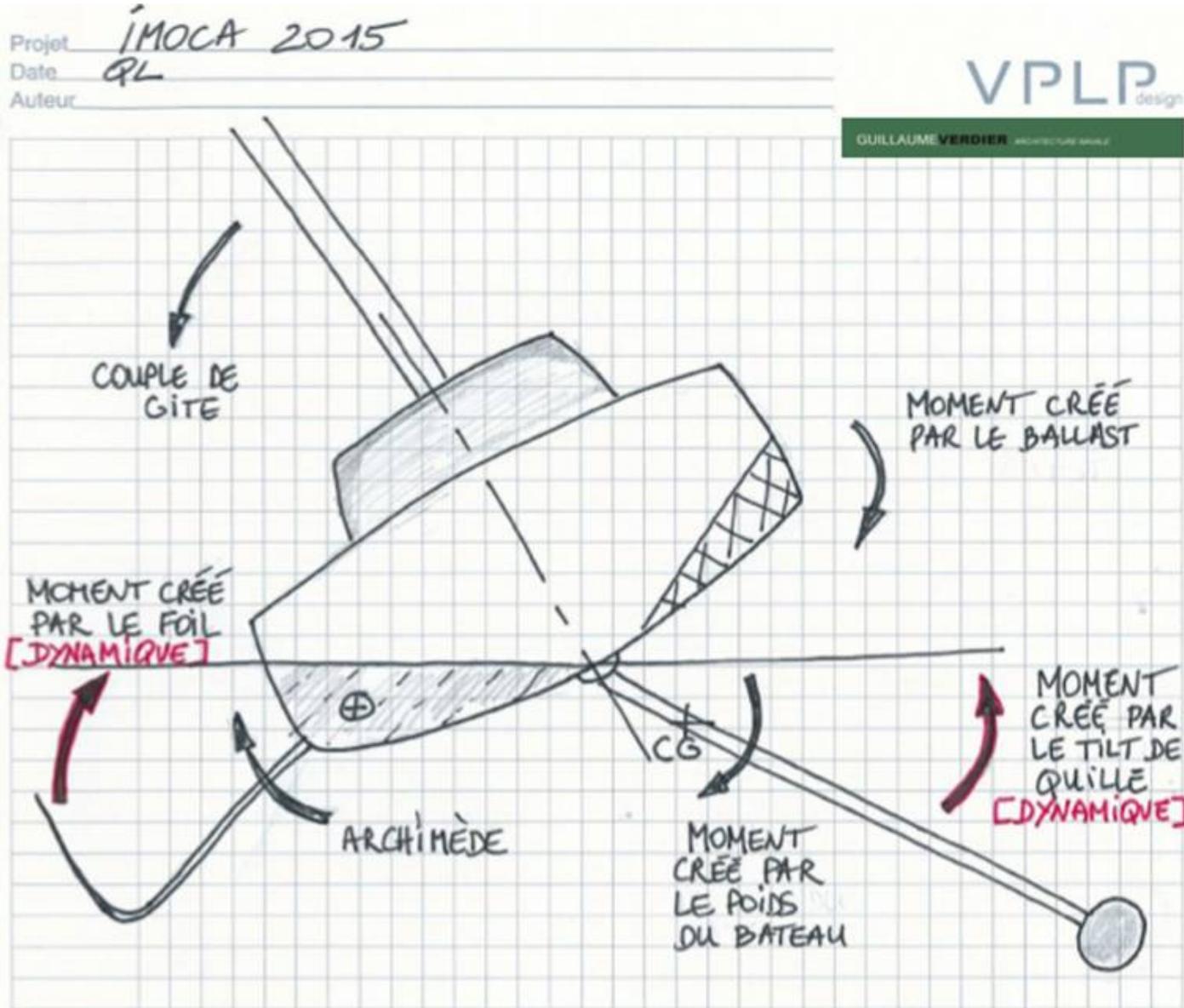
Ils apprennent à voler !



Vendée Globe 2016



Vendée Globe 2016



Pourquoi maintenant ?



Chap. 1

La propulsion

Naviguer contre le vent ?

- Navigation en poussée
(écoulement décollé)

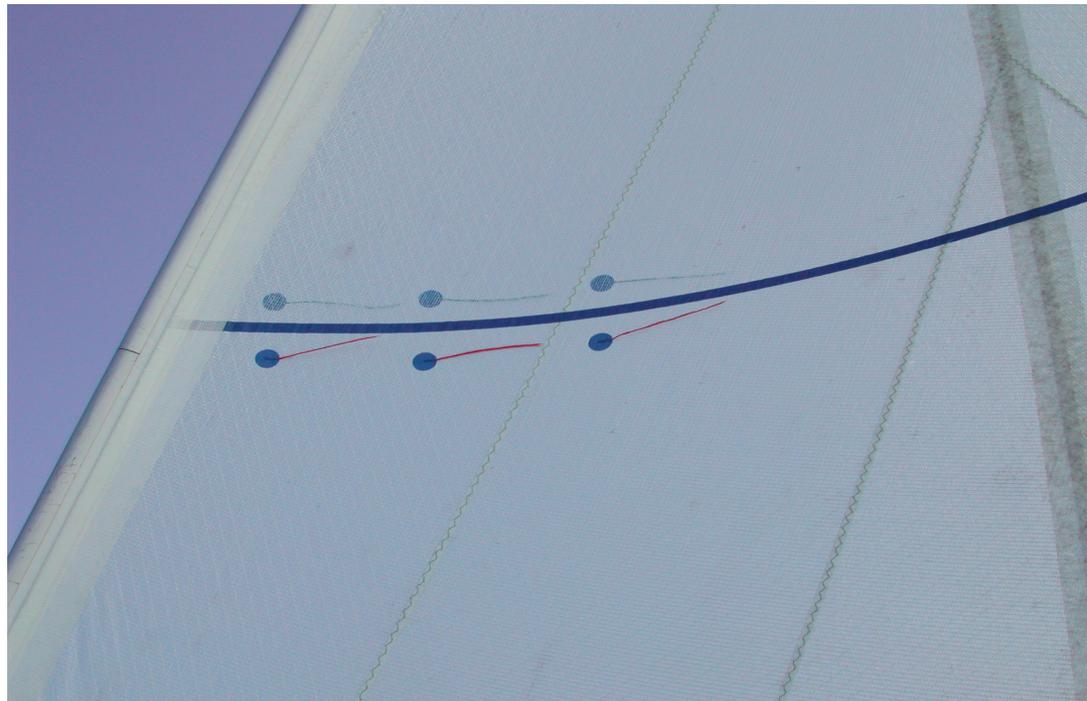


- Navigation en finesse
(écoulement laminaire)



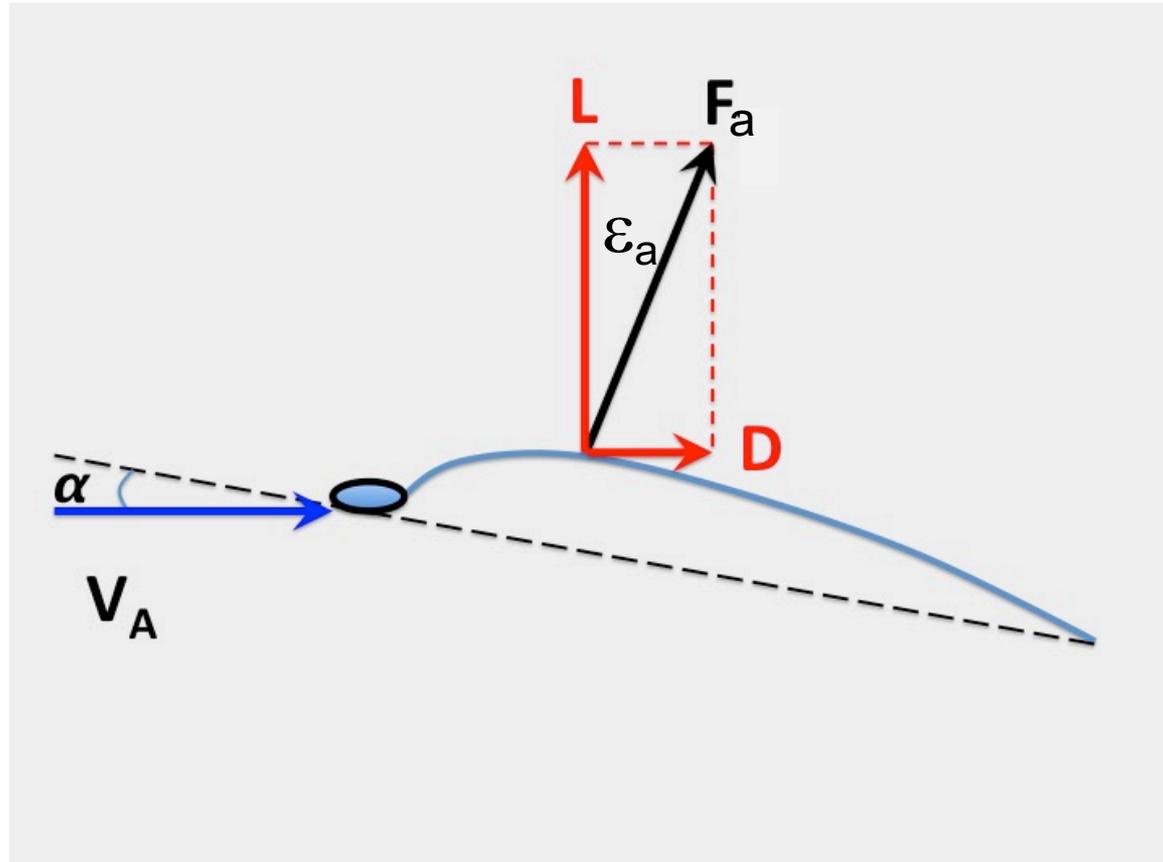


Écoulement
décollé et turbulent



Écoulement laminaire

Naviguer en “finesse”



$$\text{Finesse} = L / D = 1 / \tan(\epsilon_a)$$

Explication de la portance

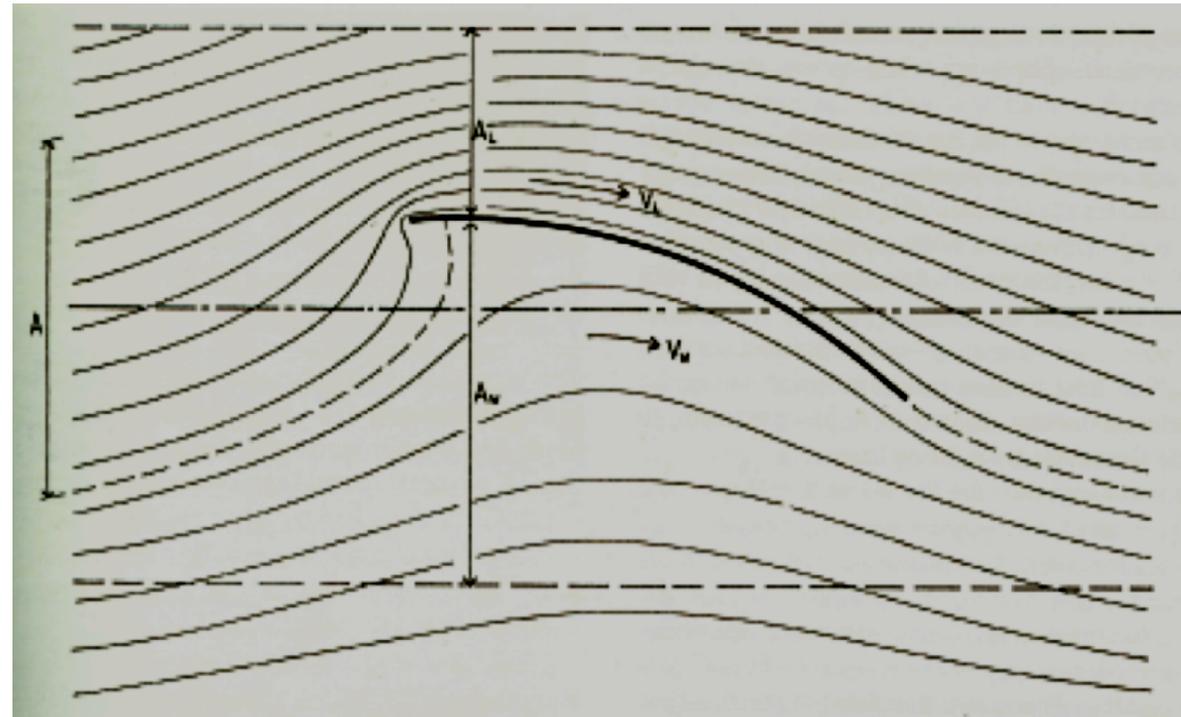
$$P + \frac{1}{2} \rho V^2 = \text{Constante}$$

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

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



Daniel Bernoulli (1700-1782)

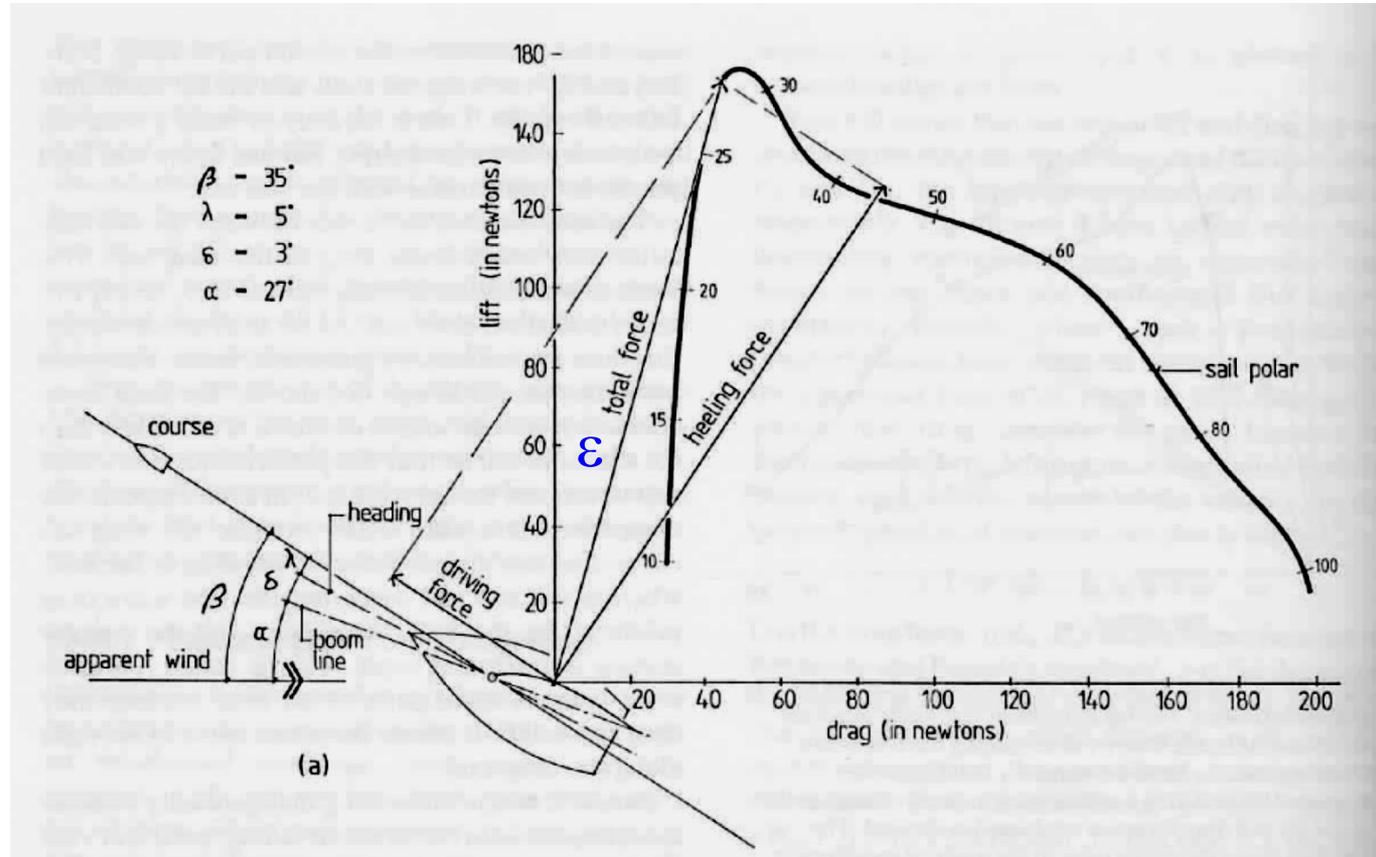


Écoulement d'un fluide parfait autour d'une voile mince

Utilisation de la polaire « Eiffel » : $L = f(D)$



Gustave Eiffel
(1832-1923)

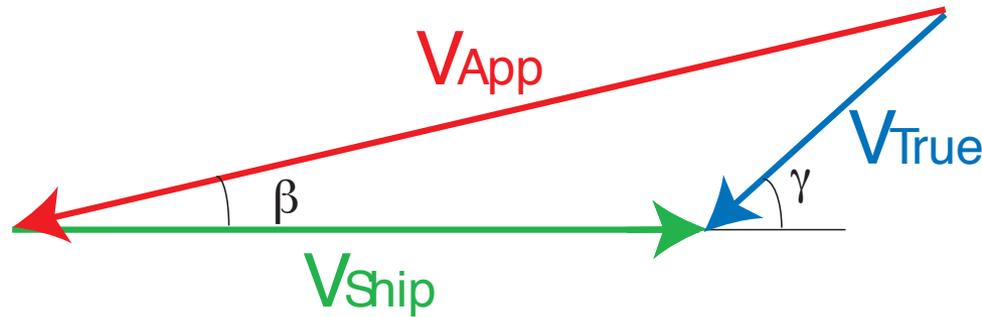


- Navigation « au près » : finesse = $\frac{L}{D} = 1/\tan \epsilon$

- Il existe toujours un angle limite β_{\min} de remonté au vent

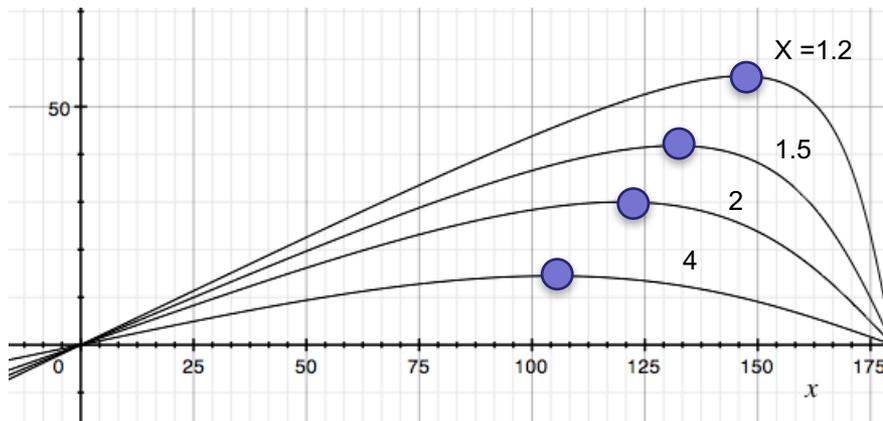
Vent réel ou apparent ?

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



$$V_A^2 = V_T^2 + V_S^2 + 2V_T V_S \cos \gamma$$

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



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

⇒ Un voilier rapide navigue toujours près du vent apparent :

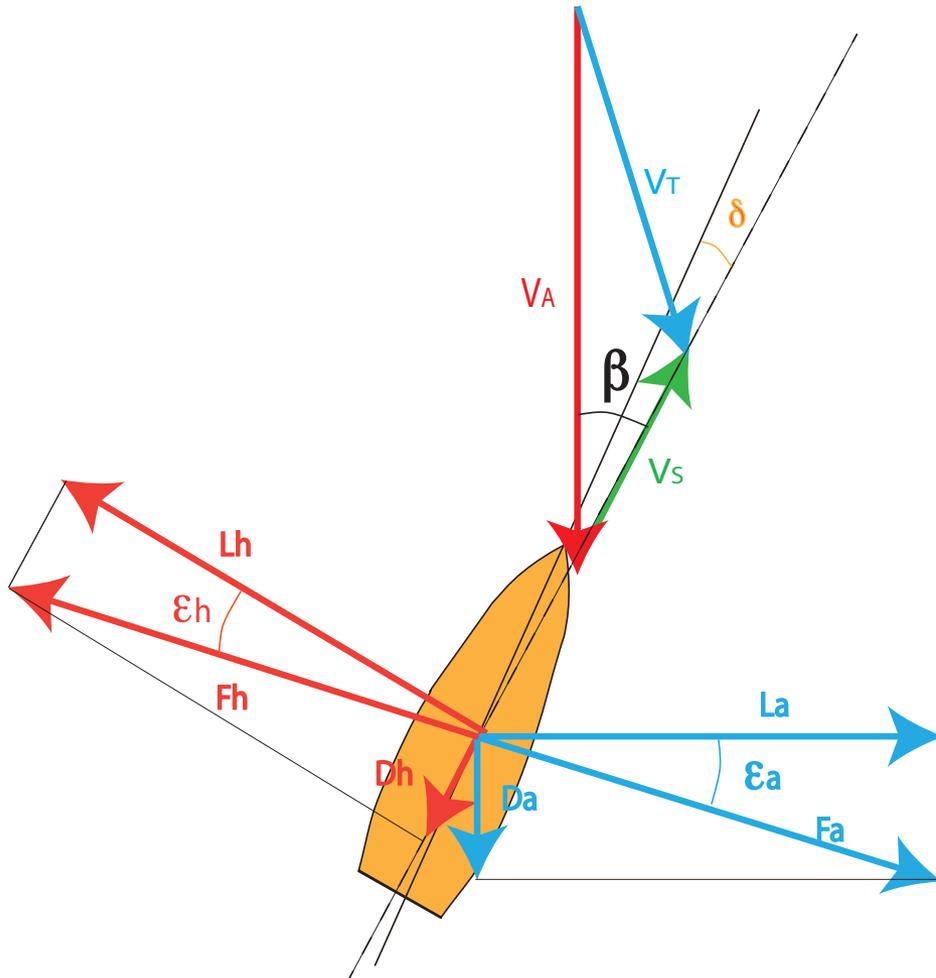
⇒ Si $X \gg 1$ alors β est toujours très petit !

Pourquoi augmenter la finesse ?

Théorème de Lanchester (1907)

L'angle de remonté au vent apparent est égal à la somme des angles de plané aéro et hydrodynamique :

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



Equilibre aéro/hydro (ici 2D)

$$X = 3 \Rightarrow \beta_{\max} = \varepsilon_a + \varepsilon_h \approx 20^\circ, f \sim 6$$

$$X = 5 \Rightarrow \beta_{\max} = \varepsilon_a + \varepsilon_h \approx 11^\circ, f \sim 10$$

Quille et voile/aile ayant de bonnes finesses

Des machines à
faire du vent !

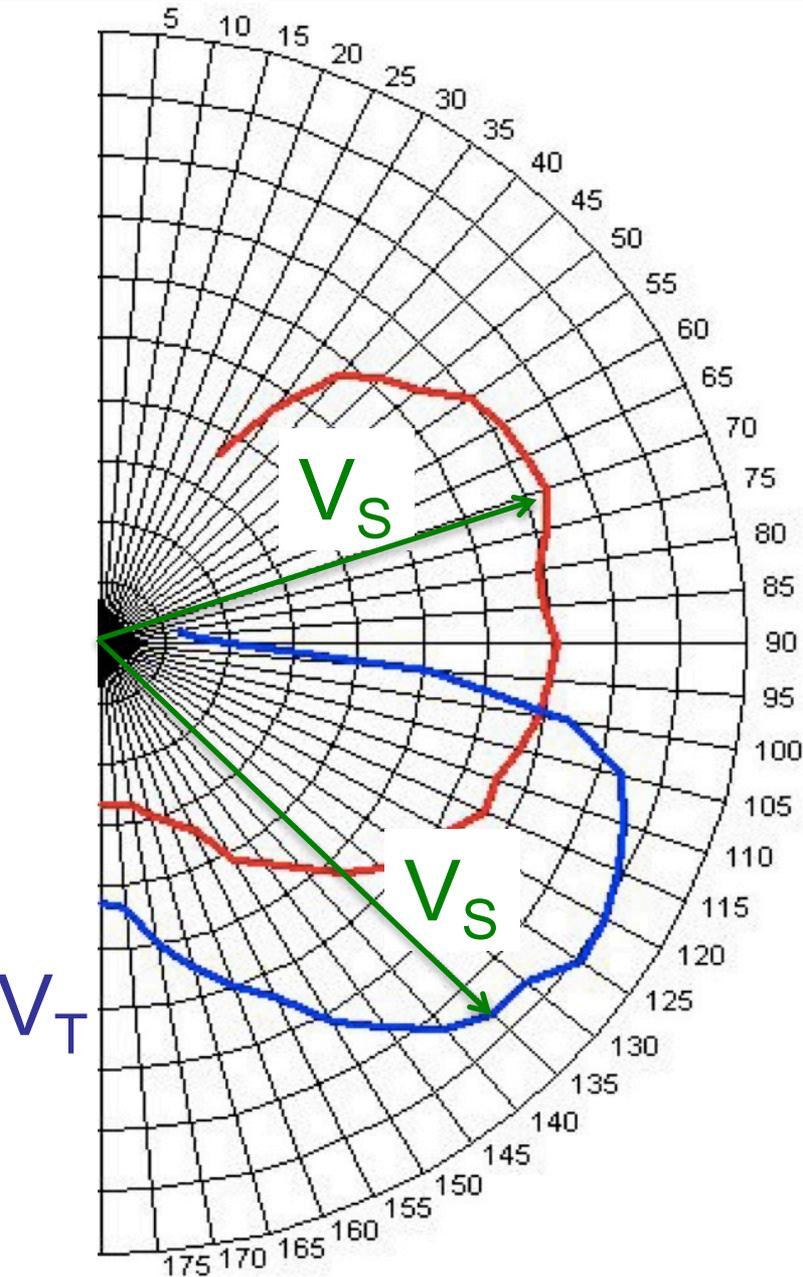


Planeur ayant une bonne finesse

Parenthèse 1

Analogie avec la croissance
des cristaux et l'optique
géométrique

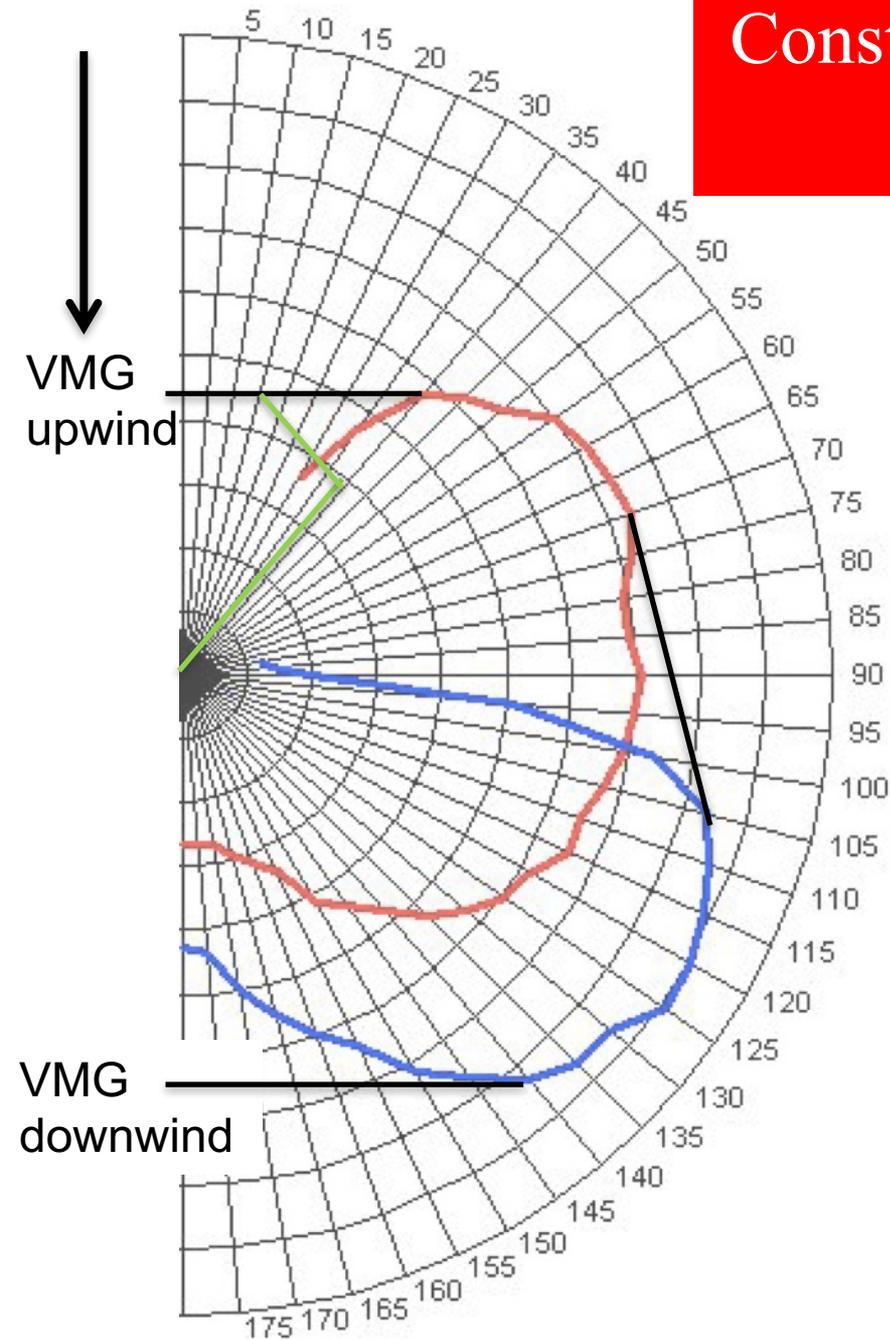
Polaire de vitesse d'un voilier



Courbe $V_S(\theta)$ des vitesses cibles en fonction du cap par rapport au vent réel.

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

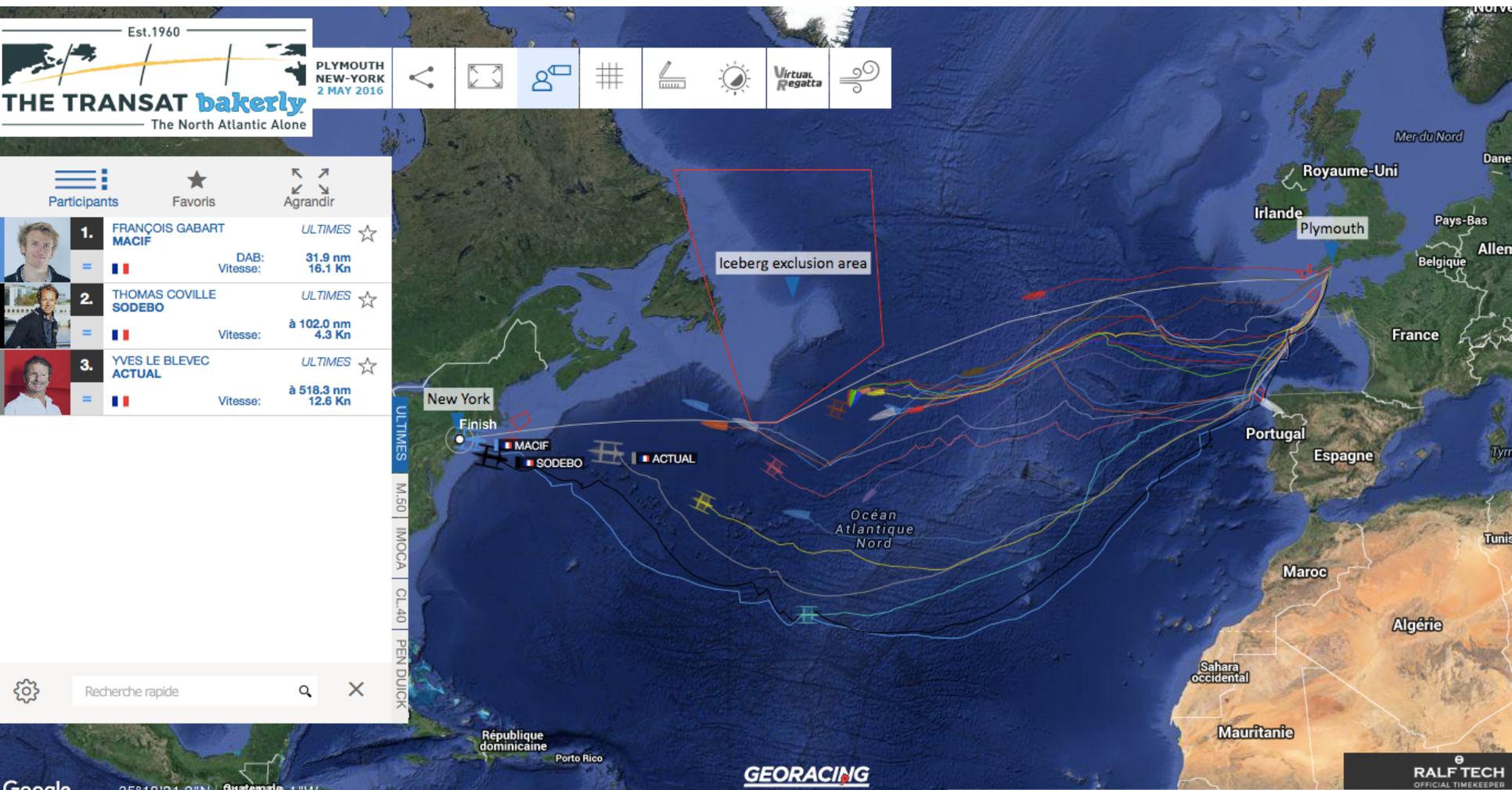
Construction de l'enveloppe convexe : $V(\theta)$



- Les parties plates correspondent aux positions atteignable par virement de bord (VMG).
- Analogue à la construction de Wulff pour les cristaux

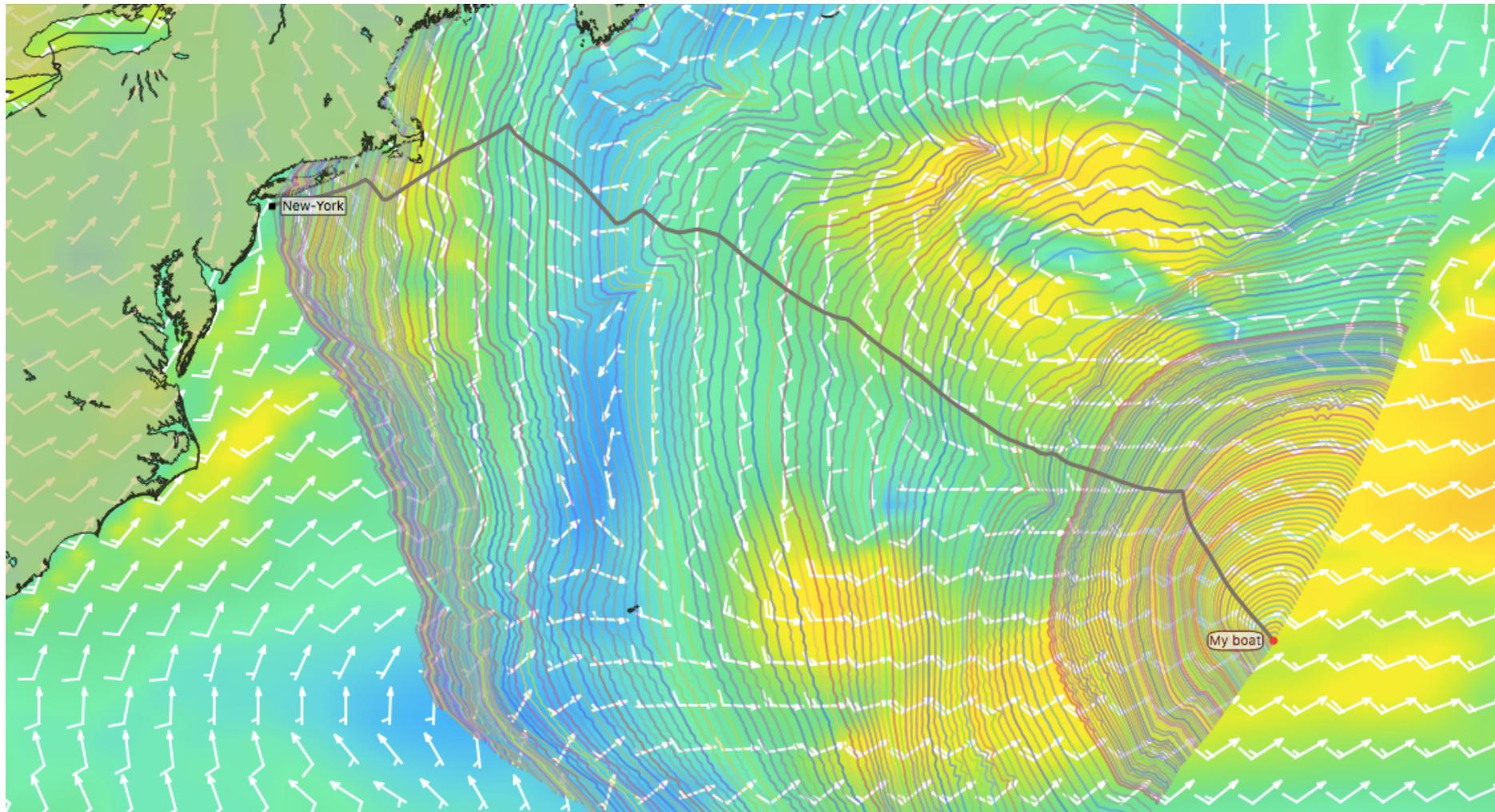


Trajectoire de François Gabart (2016)



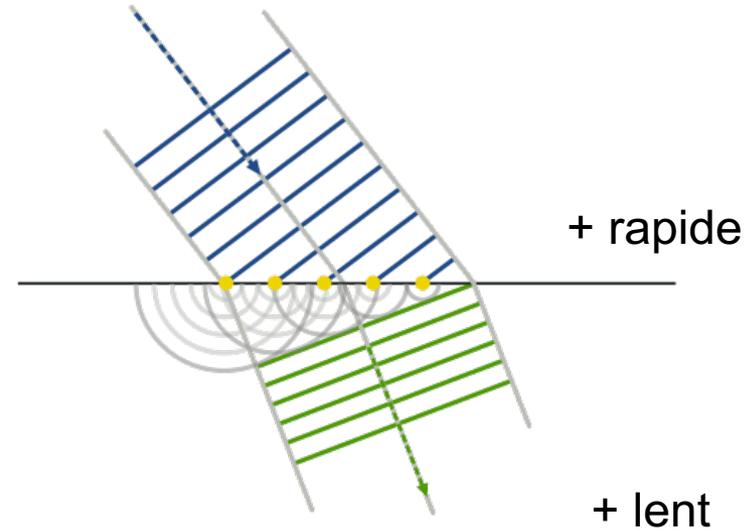
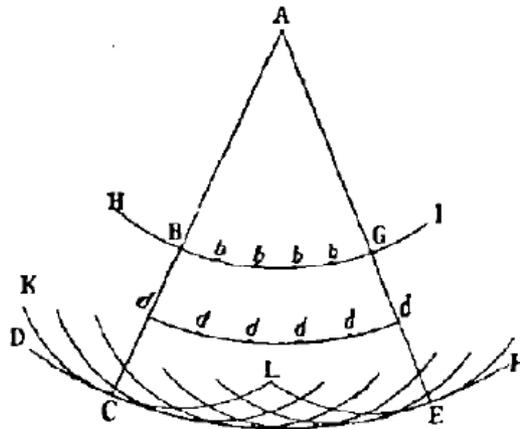
<http://www.thetransat.com>

Exemple d'une simulation de routage



Méthode des isochrones

Analogie avec la construction de Huygens en optique



Christian Huygens, *Traité de la lumière* (1690)

Surtout utile avec des indices variables (mirages) : $n(x,y,z)$

Mais en mer, l'indice dépend du temps ... et ce n'est pas un scalaire ! Pire que les milieux optiques anisotropes (ellipsoïde des indices)

En mer : $V(\theta) \neq V(\theta+\pi)$: $A \rightarrow B \neq B \rightarrow A$

Fin de la parenthèse 1

Plus vite que le vent ?

- Existe-t-il un X_{\max} ?
- Le théorème de Lanchester est-il vraiment une limite ?
- Ne pourrait-on aller directement contre le vent ?

Naviguer face au vent... est-ce possible ?

1920 – Constantin (sur la Seine)



1933 – Lord Brabazon

1980 – Jim Bates

Autogiro, gyrovoile, Archinaute ...



Peter Worsley, 2008

Et dans le sens du vent ?

Peut-on aller plus vite que le vent ?

Oui ?

Non ?

Directly downwind, faster than the wind (DDWFTTW)



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

Chap. 2

La résistance à l'avancement

Comment diminuer la résistance à l'avancement

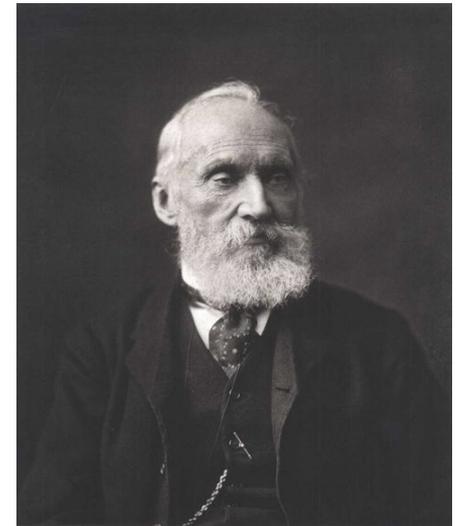
- Profiler la coque
- Augmenter la longueur de coque. Pourquoi ?

Qu'est-ce que le sillage de vague ?



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

- Ondes de gravité
- Motif stationnaire

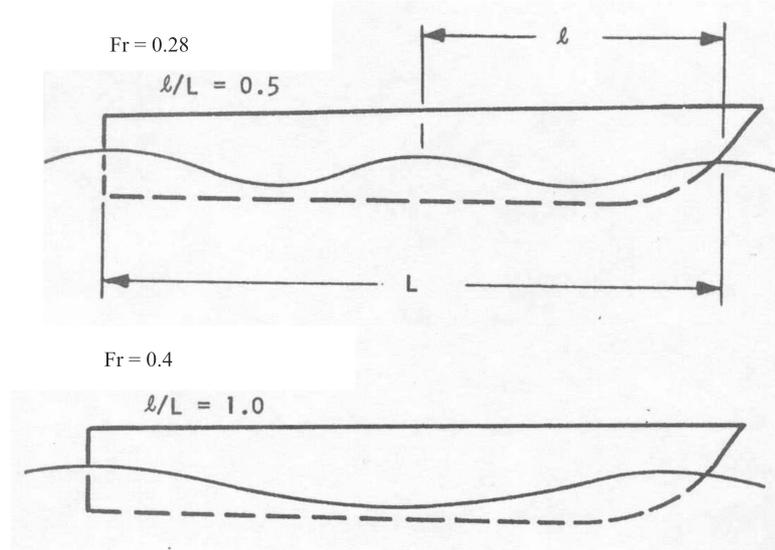


Lord Kelvin
(William Thomson)
1824-1907

Quelle est la vitesse limite ?



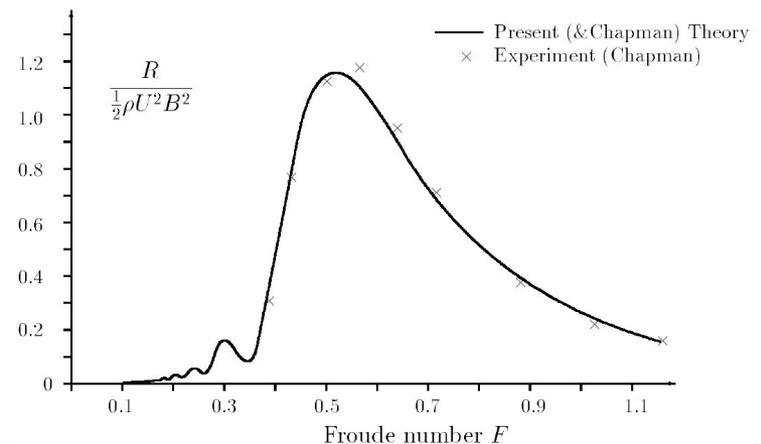
$$Fr = \frac{U}{\sqrt{gL}}$$



La résistance de vague augmente rapidement avec l/L

William Froude
(1810-1878)

$$l \approx L$$



Vitesse limite de coque en mode « archimédien »

Quelle est la vitesse limite ?



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

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)

Une solution, le planing



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



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

Parenthèse 2

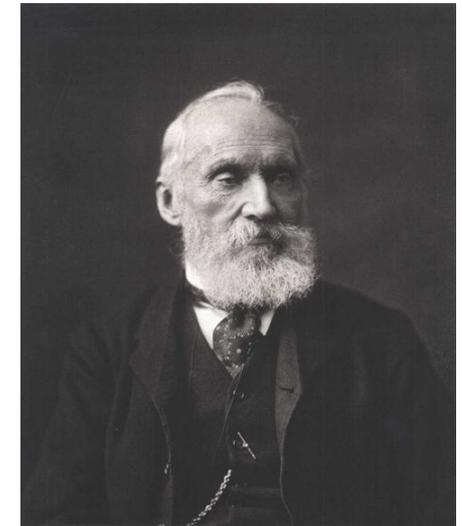
L'angle de Kelvin est-il vraiment constant ?

L'angle du sillage est-il vraiment constant ?



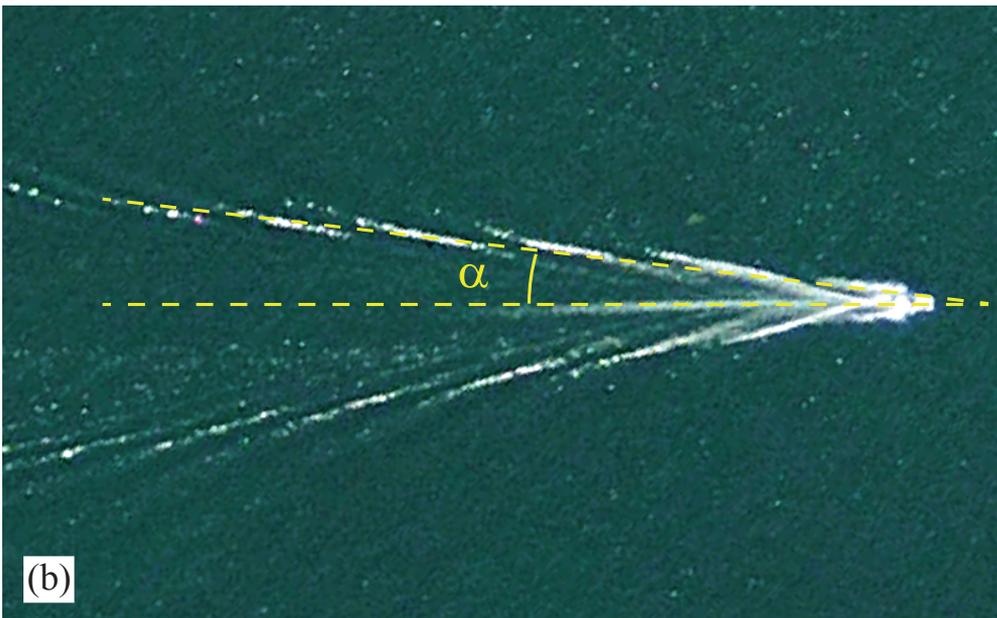
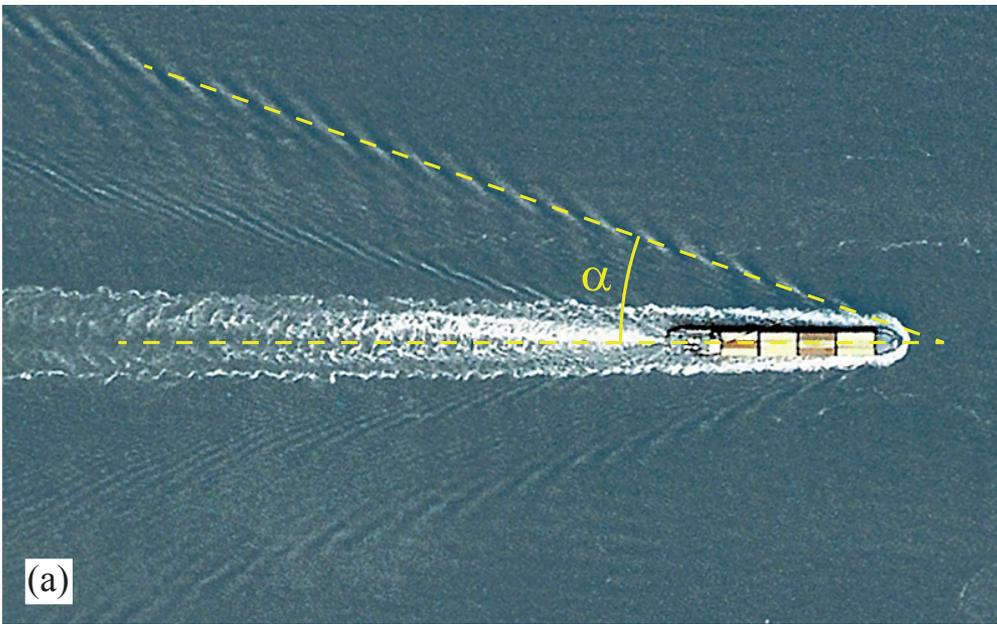
- Ondes de gravité
- Résistance de vague

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



Lord Kelvin
(William Thomson)
1824-1907

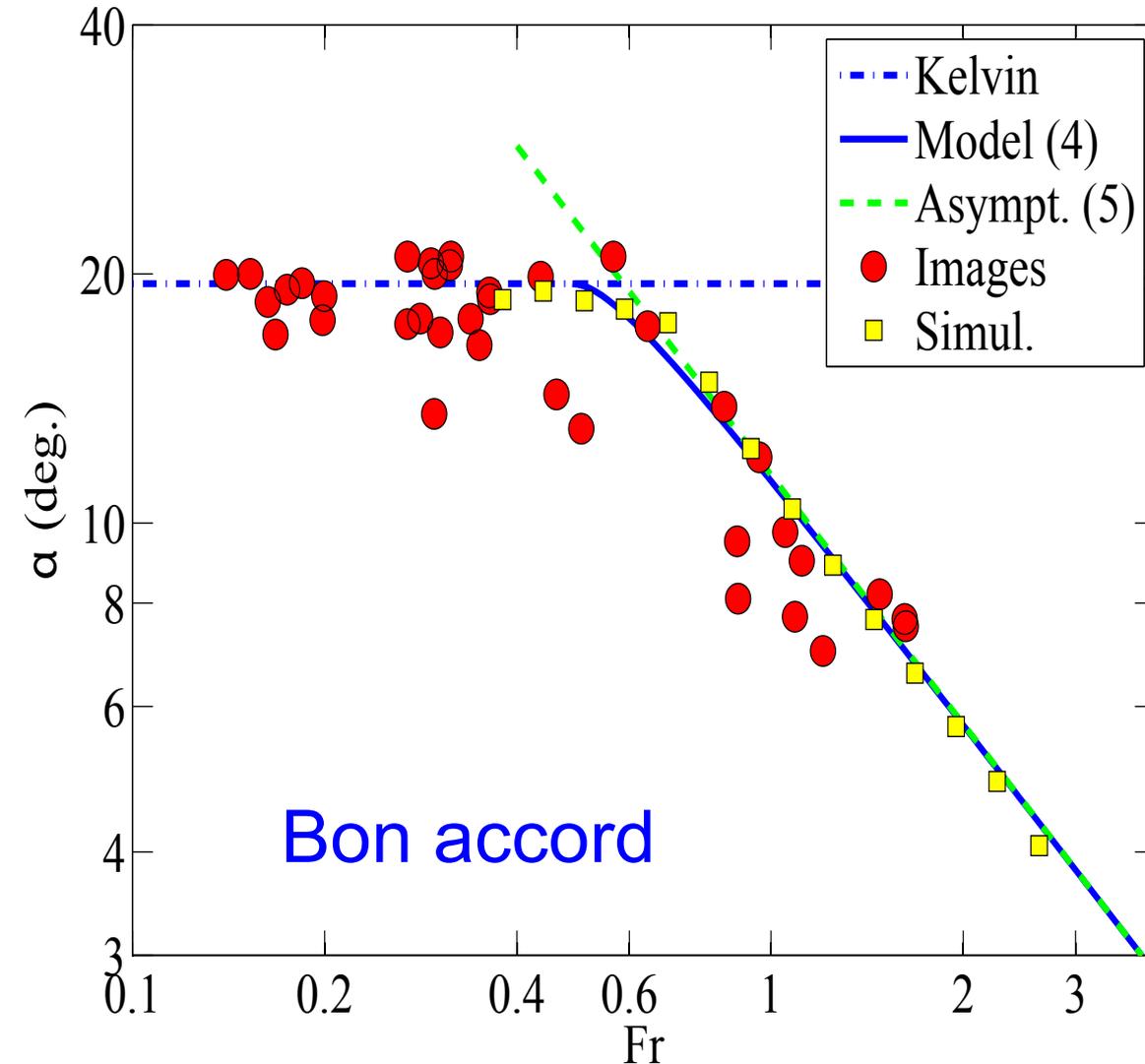
Images Google Earth



- mesure de l'angle α
- mesure de la longueur L du bateau
- détermination de sa vitesse U et donc du Froude :

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

Evolution de l'angle du sillage



- 2 longueurs L et λ_g ,
- 1 nombre sans dim. Fr

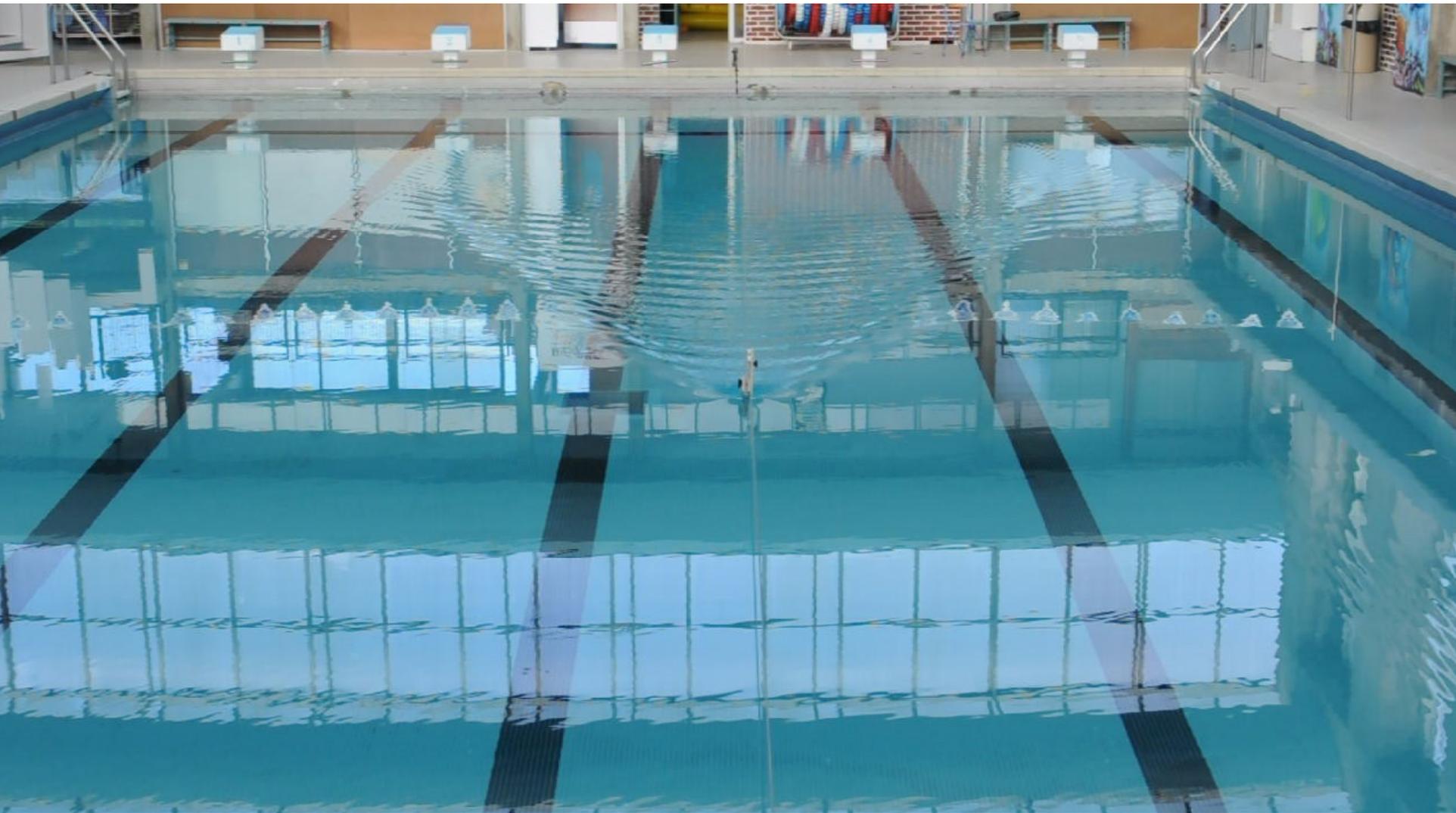
A grand Froude :

$$\sin(\alpha) \sim \frac{1}{Fr} = \frac{\sqrt{gL}}{U}$$

Comme dans le régime de Mach !

$$\sin(\alpha) = \frac{c}{U}$$

Cylindre de diamètre 3 cm, $U = 0.75$ m/s



Cylindre de diamètre 3 cm, $U = 2.6$ m/s



Lord Kelvin avait-il tort ?

Comment expliquer que l'angle du sillage décroisse à haute vitesse ?

=> Effet de la taille L de l'obstacle

- **Ship wakes: Kelvin or Mach angle?** M. Rabaud and F. Moisy, *Phys. Rev. Lett.* **110**, 214503 (2013).
- **Mach-like capillary-gravity wakes**, F. Moisy and M. Rabaud, *Phys. Rev. E* **90**, 023009 (2014).
- **Scaling of far-field wake angle of non-axisymmetric pressure disturbance**, F. Moisy and M. Rabaud, *Phys. Rev. E* **89**, 063004 (2014).
- **Narrow ship wakes and wave drag for planing hulls**, M. Rabaud and F. Moisy, *Ocean Eng.* **90**, 34 (2014).

Fin de la parenthèse 2

Chap. 3

Les bateaux volants et les records de vitesse



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

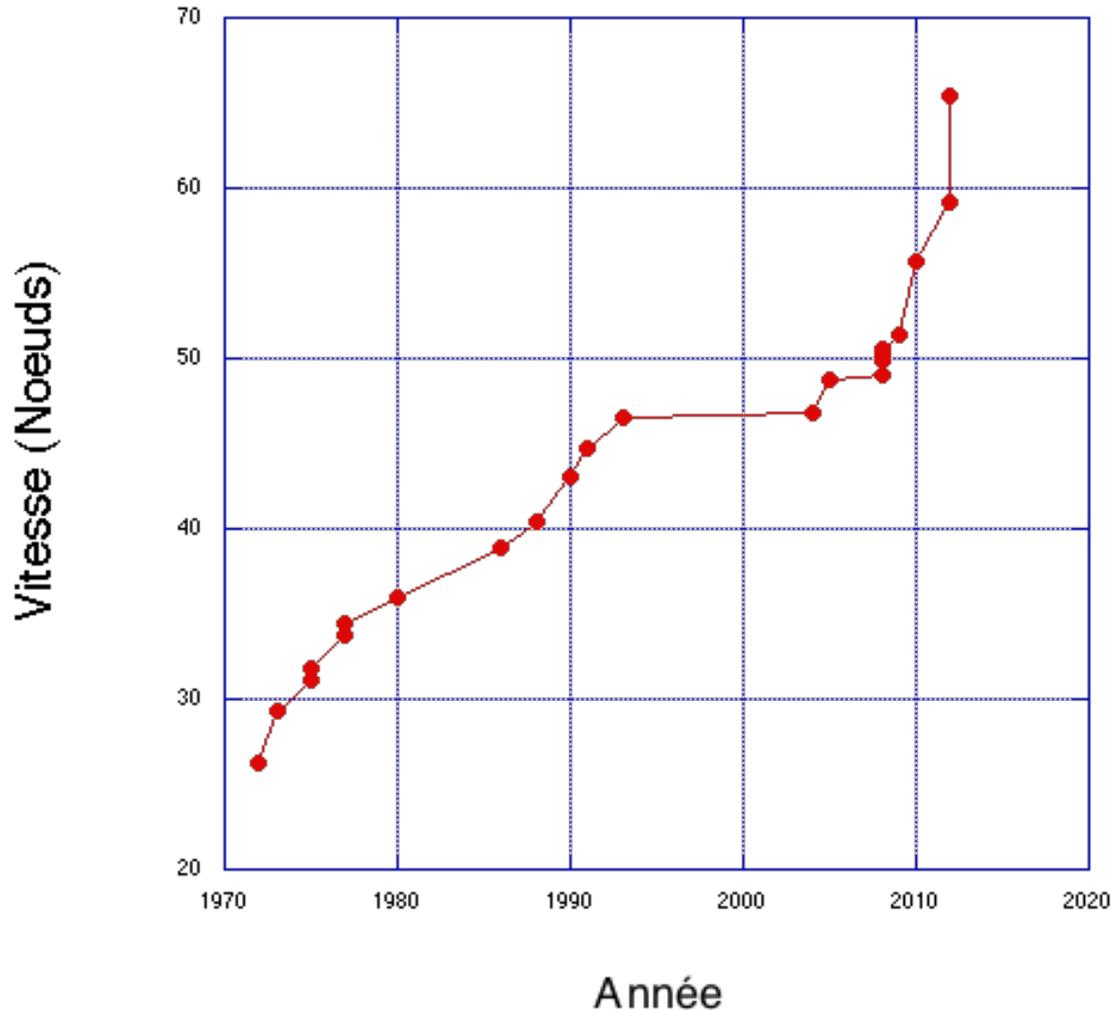
Quelles limites pour les foils ?

- 1) Résistance mécanique
(plusieurs fois le poids du bateau)
- 2) Cavitation
- 3) Passage dans les vagues
- 4) Stabilité dynamique
(asservissement)
- ... Jusqu'où ira-t-on ?

Quelle est la vitesse limite d'un voilier ?

—●— Vitesse (Noeuds)

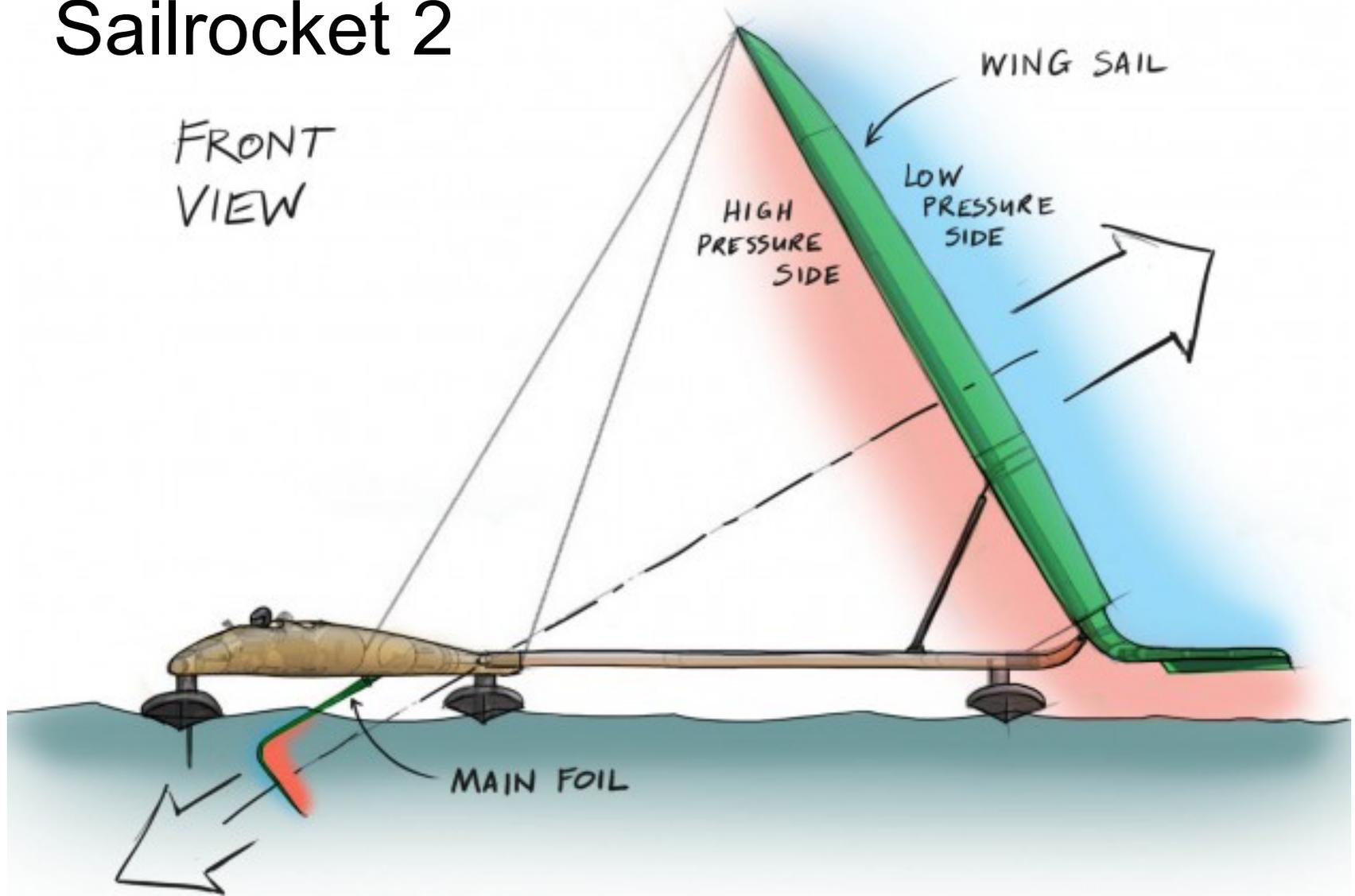
Vitesse500m



Evolution des
records
de vitesse
(sur 500 m)

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

Sailrocket 2



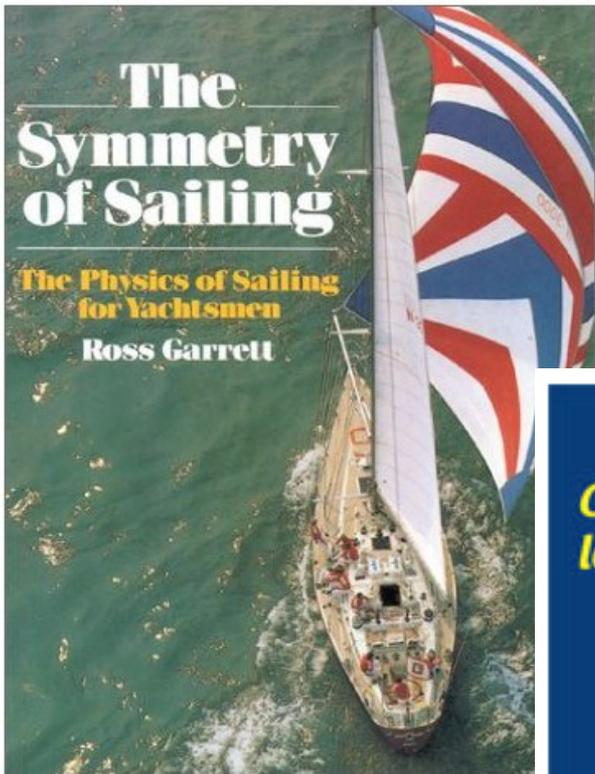
(record du monde à 121 km/h en 2012)

Record du monde de vitesse à la voile !

121 km/h !

Qu'est ce qui limite encore la vitesse des voiliers ?

- vitesse du vent ? **Non**
 - vitesse limite de coque ? **Non**
 - cavitation sur les foils ? **Non**
 - couple d'inclinaison (gite) ? **Non**
 - finesse max ? **Oui, $\beta > \beta_0$**
-
- Des pistes à creuser même si elles ne sont pas encore autorisées :
 - les engins à éolienne et hélice...
 - l'asservissement des foils



The Symmetry of Sailing

The Physics of Sailing
for Yachtsmen

Ross Garrett



COMPRENDRE

Charles Bertrand

Comment MARCHENT les VOILIERS

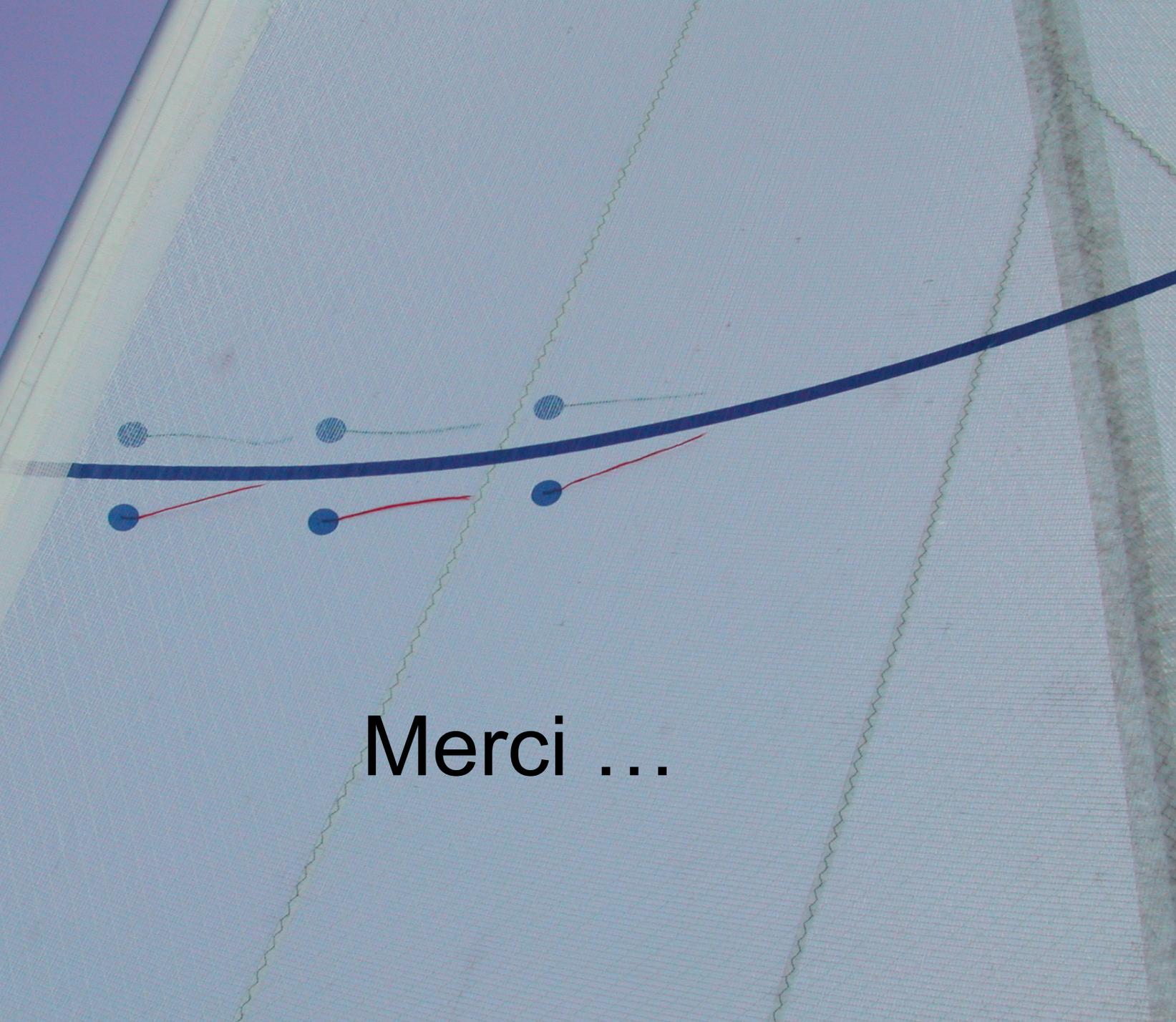
VOILES



LES BATEAUX QUI VOLENT

TEXTES FRANÇOIS CHEVALIER
PHOTOGRAPHIES GILLES MARTIN-RAGET

Gallimard



Merci ...