Chapitre 4 Force de portance

Rappels : force de traînée et force de portance exercée par le fluide sur un corps en mouvement relatif

Force de traînée $\mathbf{F_t}$ ("drag force" F_D)

force **parallèle** à la vitesse relative entre le corps et le fluide

cf cours "Traînée"

Force de portance $\boldsymbol{F_p}$ ("lift force" F_L)

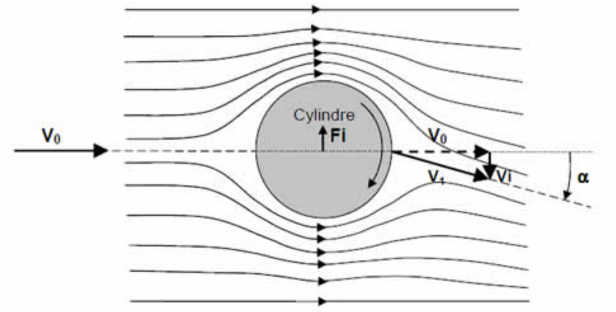
force **perpendiculaire** à la vitesse relative entre le corps et le fluide

Quand la portance ?

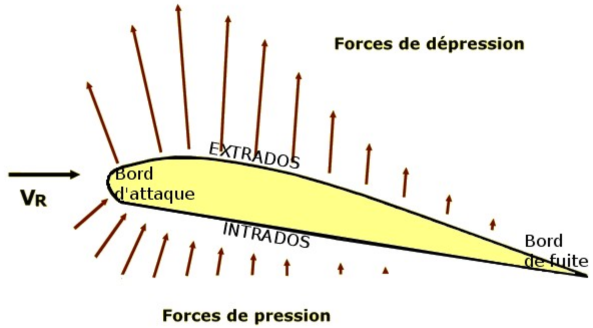
Quand la portance ?

avec une disymétrie de l'écoulement non pas amont/aval mais d'un côté à l'autre
qui peut être générée

par la rotation



par la forme ou l'incidence



dans les sports de balles :
lift ou slice (coupé) ou brossé

avions, oiseaux, voiliers…

dans les bateaux

l'Alcyone (Malavard & Cousteaux 1985)

D’où vient la portance ? (à grand nombre de Reynolds)

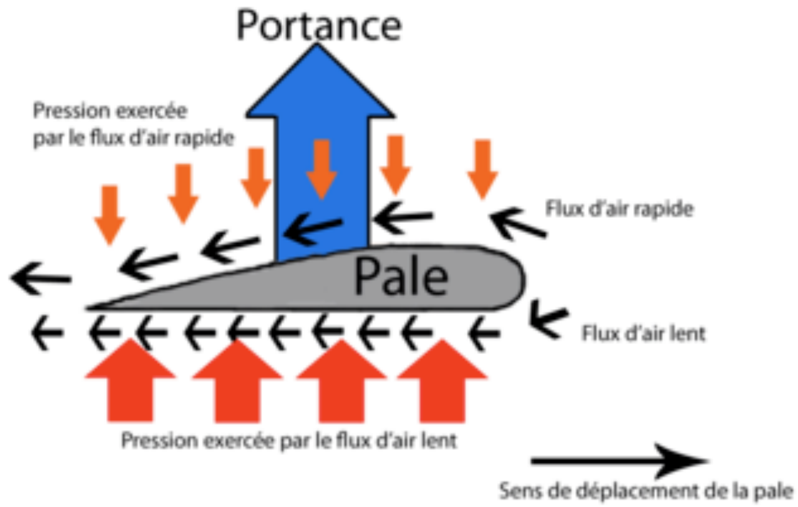
D'où vient la portance ? (à grand nombre de Reynolds)

La **relation de Bernoulli** qui implique la conservation de l'énergie (par unité de volume de fluide) le long d'une ligne d'écoulement lorsque les effets de dissipation visqueuse sont négligeables (cas Re >> 1) s'écrit :

$$\frac{1}{2}\rho u^2 + p + \rho g z = cte$$

Si les effets de gravité sont négligeables ($z \approx$ cte), alors cette relation implique qu'aux endroits de fortes vitesses sont associés une faible pression (dépression) et inversement. Une différence de vitesse des deux côtés d'un objet impliquera donc une différence de pression et donc une force associée tenant compte de la surface S de l'objet. L'échelle de cette force sera donc naturellement $(1/2)\rho U^2 S$ où U est la vitesse typique loin de l'obstacle. Un préfacteur numérique, appelé coefficient de portance et noté C_p, tient compte de la forme précise de l'objet et de son orientation vis-à-vis de l'écoulement (incidence) :

$$F_p = C_p \frac{1}{2}\rho S U^2$$



Le coefficient de portance C*p*, parfois noté C_L car la Portance se dit **Lift** en anglais ou C_z, est un coefficient de proportionnalité numérique sans dimension défini tel que :

$$C_p = \frac{F_p}{\frac{1}{2}\rho S U^2}$$

Ceci n'est pertinent que si le nombre de Reynolds est grand (devant 1) : $\mathrm{Re} = \frac{\rho U L}{\eta} >> 1$
où L est la taille typique de l'objet

Le coefficient de portance C*p*, parfois noté C_L car la Portance se dit **Lift** en anglais ou C_z, est un coefficient de proportionnalité numérique sans dimension défini tel que :

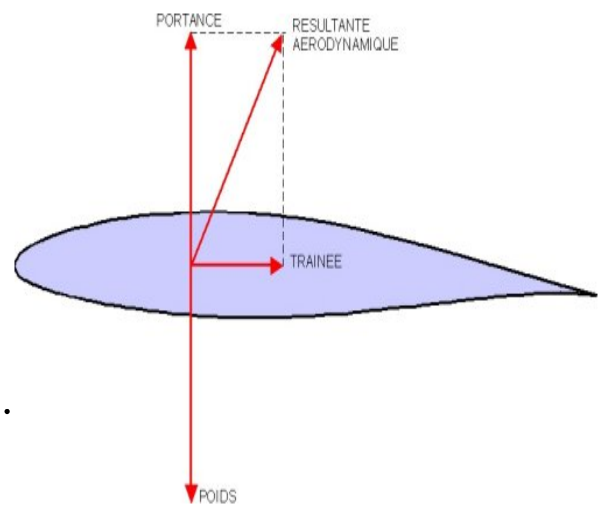
$$C_p = \frac{F_p}{\frac{1}{2}\rho S U^2}$$

Ceci n'est pertinent que si le nombre de Reynolds est grand (devant 1) : $\mathrm{Re} = \frac{\rho U L}{\eta} >> 1$
où L est la taille typique de l'objet

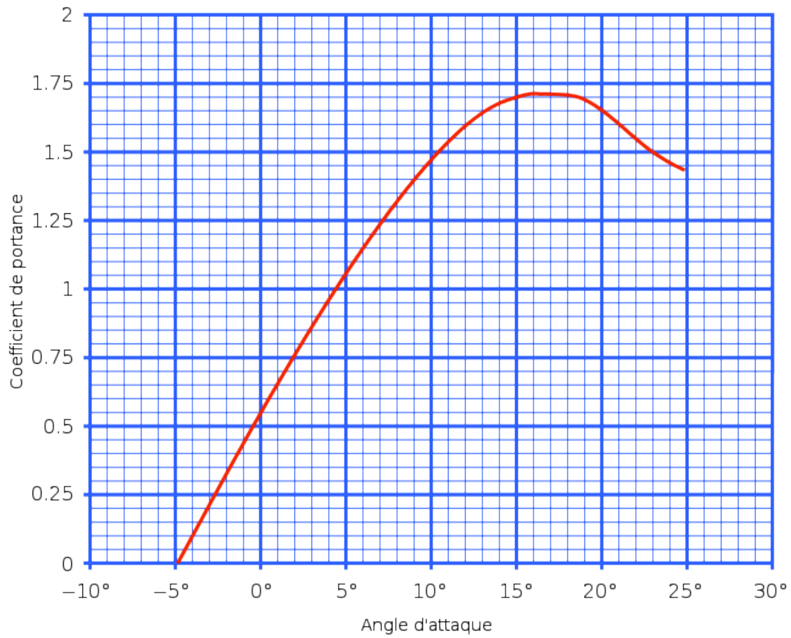
C_p dépend de différents paramètres : forme et incidence, Re

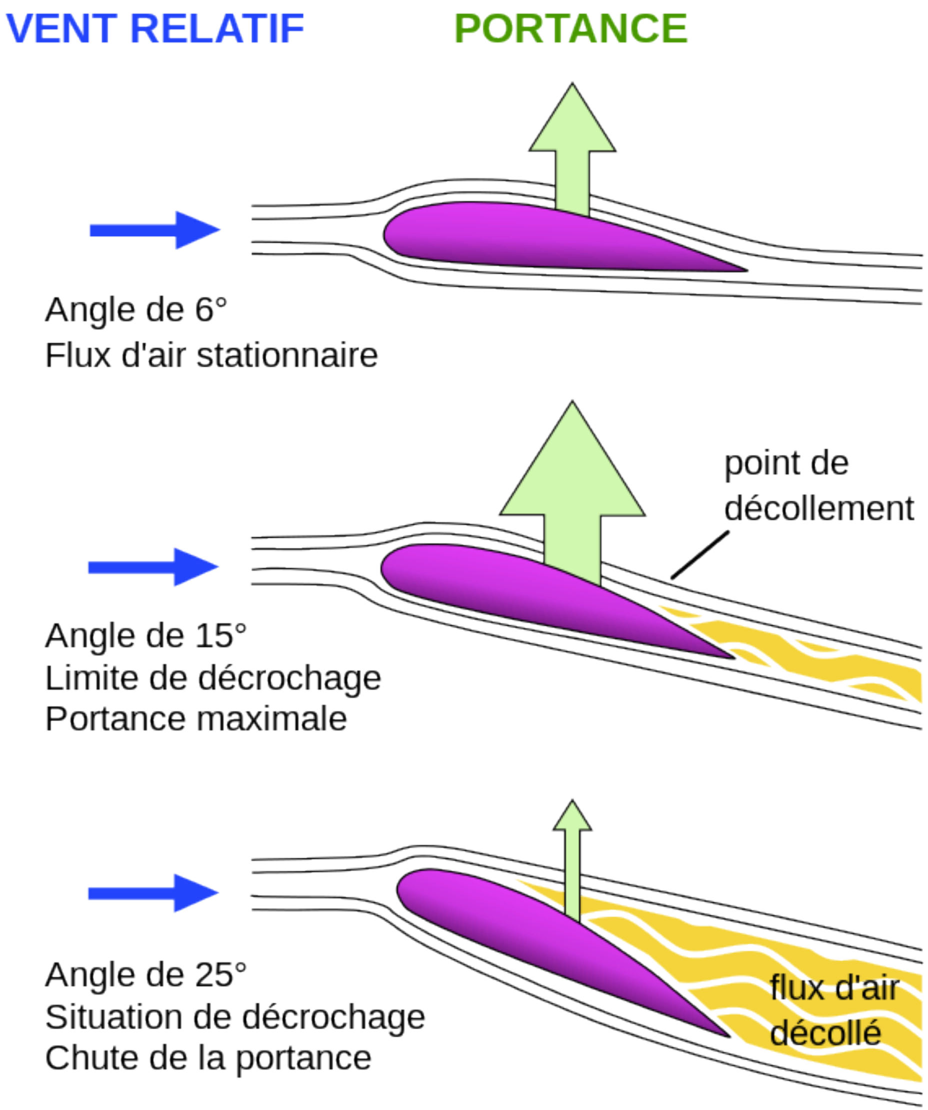
La somme vectorielle des deux forces de traînée et de portance est appelée **résultante hydro ou aérodynamique.**

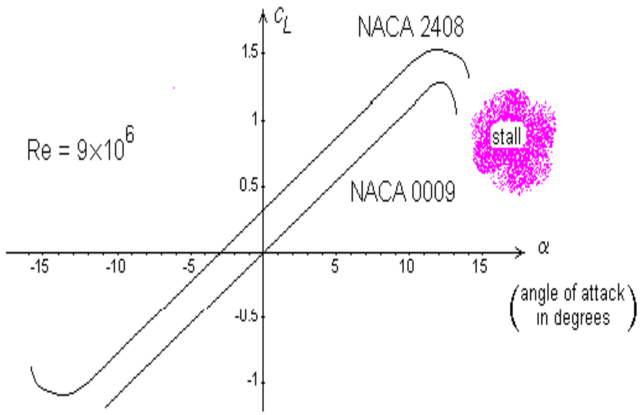
Le rapport C_p/C_t est appelé **finesse**. Plus ce rapport est grand, plus l'effet de portance est grand par rapport à l'effet de traînée.



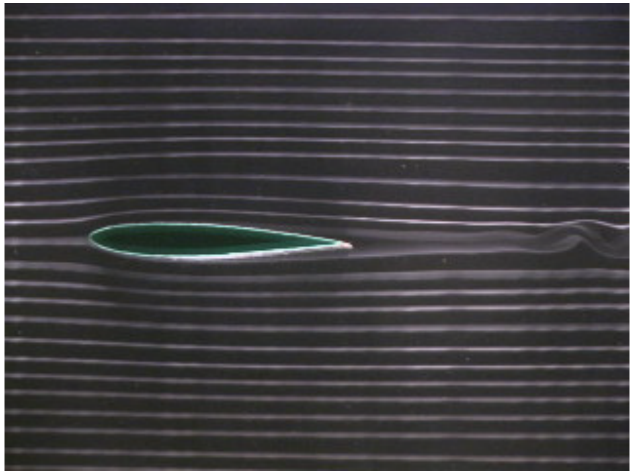
Coefficient de portance en fonction de l'incidence



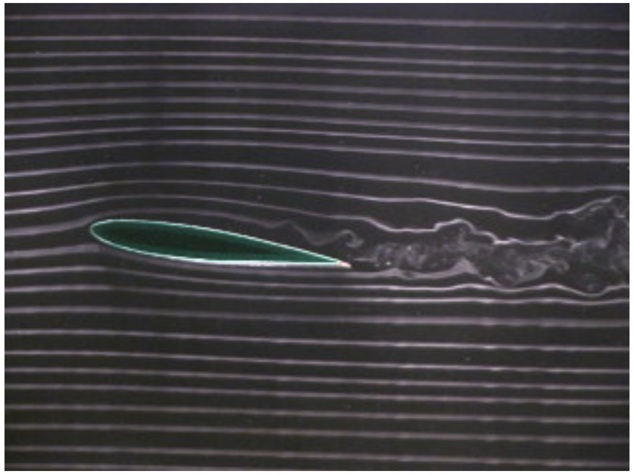




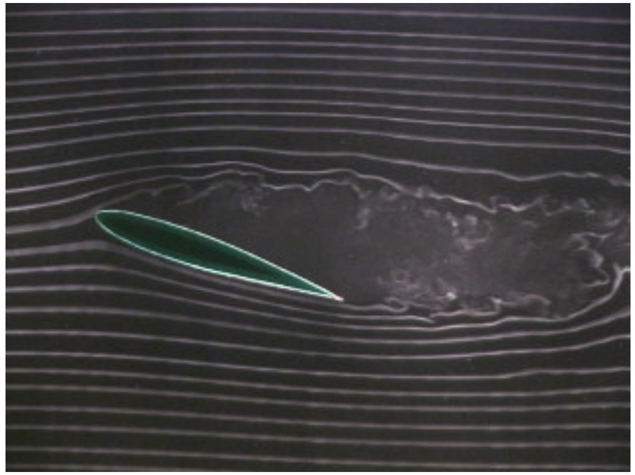
Structure de l’écoulement autour d’une aile pour des angles d’incidence croissants



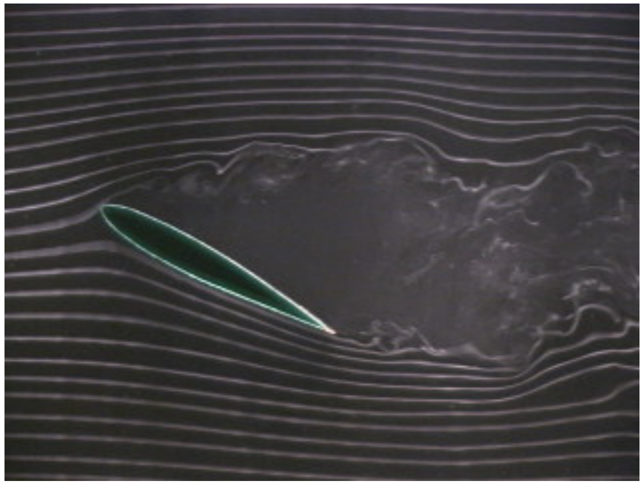
$\theta = 0°$



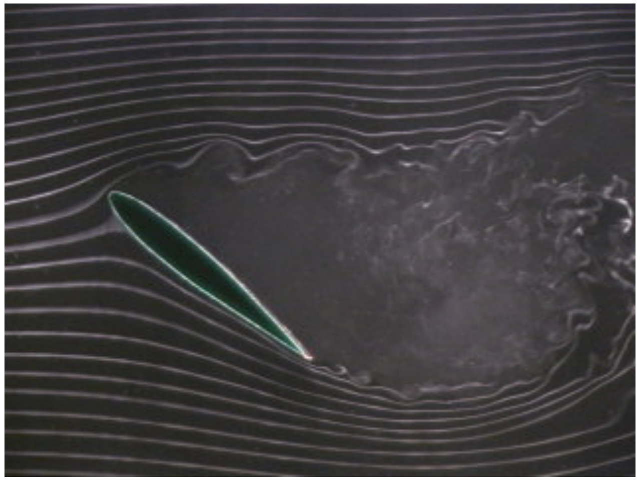
$\theta = 10°$



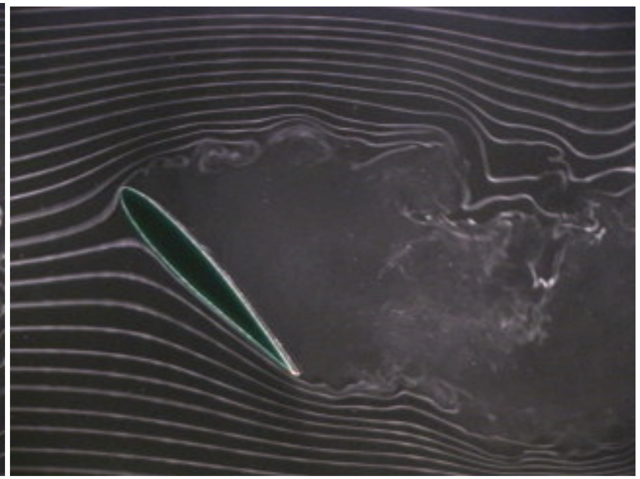
$\theta = 20°$



$\theta = 30°$



$\theta = 40°$



$\theta = 50°$

Coefficients de portance et de traînée en fonction de l'incidence

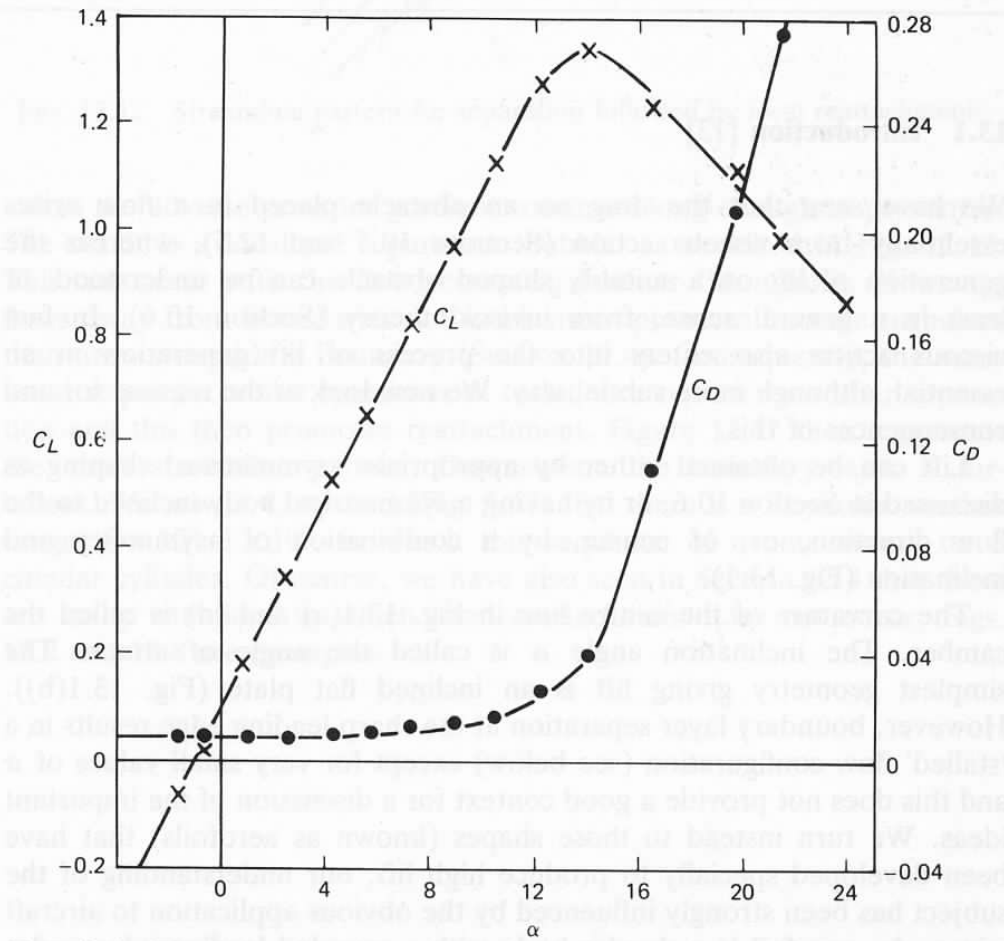
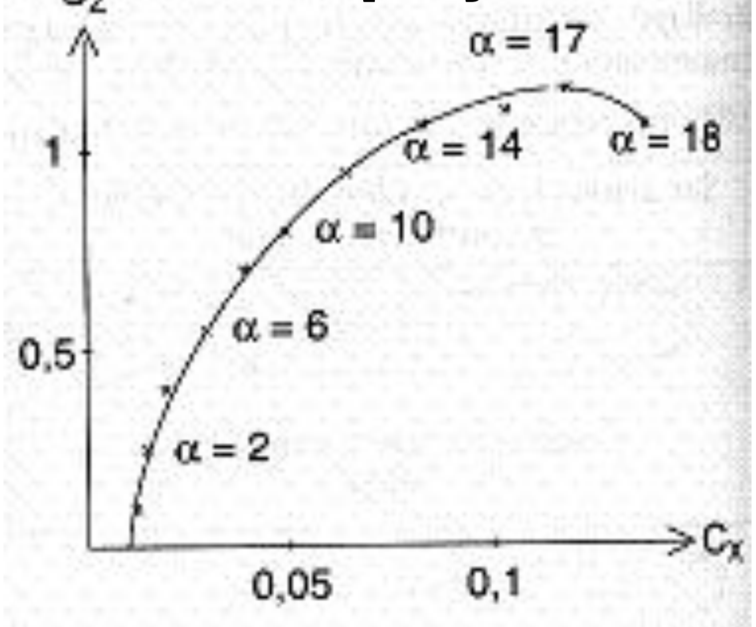


Fig. 13.2 Example of variation with angle of attack of lift coefficient and drag coefficient for an aerofoil. Note different scales for C_D and C_L. (Aerofoil type RAF 34 at Re based on chord of 4.5×10^6; measurements by Relf, Jones, and Bell, given in Ref. [7]).

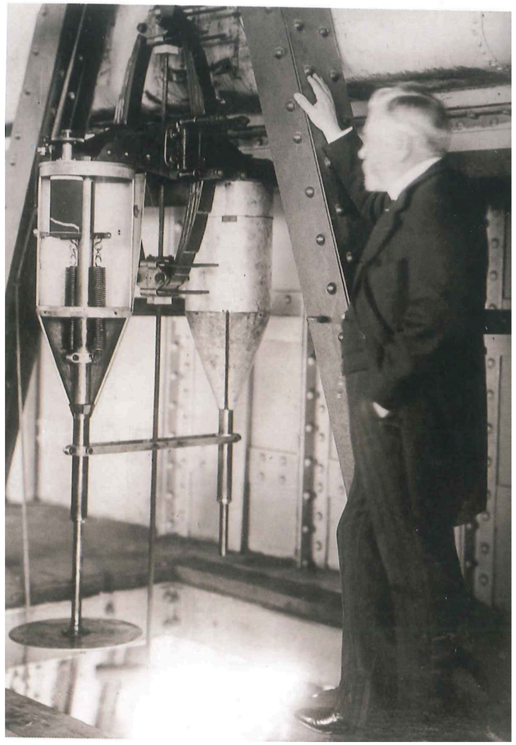
Gustave Eiffel
(1832-1923)
ingénieur

La polaire « Eiffel »

$C_L = f(C_D)$



Les expériences de Gustave Eiffel du 2ème étage de sa Tour (1903-1906)



Depuis sa construction en 1889, la tour de l'ingénieur français Gustave Eiffel sur le Champ-de-Mars a été très visitée. Pourtant, en ce jeudi 30 juillet 1903, ce ne sont pas des touristes qui arpentent la plate-forme mais monsieur Eiffel en personne. Il s'y livre à une expérience bien particulière en précipitant un objet très lourd depuis le deuxième étage le long d'un câble en acier. Sa vitesse augmente de plus en plus jusqu'à ce qu'un frein l'arrête à 20 m au-dessus du sol. Trois années durant, l'expérience va être répétée, et on en analyse méticuleusement les résultats. Dans quel but ?

Avec les débuts de l'aviation, les problèmes de frottements de l'air commencent à préoccuper les ingénieurs. Eiffel s'engouffre dans la brèche de l'aérodynamisme avec passion. Et sa tour lui semble être le lieu idéal pour mener ses expériences.

En faisant chuter un objet, Eiffel s'intéresse à la phase transitoire de son mouvement, la phase d'accélération. Par la suite, la gravité est compensée par la résistance de l'air et l'objet se déplace à vitesse constante (voir *Un peu de physique*). Eiffel teste ainsi une quarantaine d'objets de surfaces et de volumes différents (sphères, cylindres, cônes) en changeant les angles d'attaque de l'air sur l'objet. Il atteint des vitesses de chute de près de 40 m/s, soit à peu près la vitesse des avions de l'époque. L'ingénieur montre la faible résistance à l'air des cônes ; le « nez pointu » de certains avions, comme, plus tard, le *Concorde*, n'est pas le fait du hasard ! De même, Eiffel apporte la preuve, chiffres à l'appui, de la très grande résistance des demi-sphères concaves comme les parachutes (le fait était connu depuis les premiers sauts à la fin du XVIII^{e} siècle). Les données des coefficients de résistance à l'air sont extrêmement précises et les expériences d'Eiffel passent pour être un succès.

Description de l'expérience

Au deuxième étage de la tour, à plus de 110 m au-dessus du sol, Eiffel a pratiqué une ouverture carrée de 1,40 m. Deux tubes cylindriques glissent le long d'un câble. À l'intérieur d'un cylindre, se trouvent deux ressorts reliés à l'objet à tester.

Pour effectuer un essai, il faut attendre qu'il n'y ait plus de vent. On coupe les cordelettes qui retiennent l'appareil avec une serpe. Celui-ci tombe alors sur une hauteur d'environ 95 m et est ralenti puis stoppé à environ 20 m au-dessus du sol. La force de l'air qui s'exerce sur la surface à tester comprime les ressorts. Deux techniciens installés sur une plate-forme sont chargés de récupérer le dispositif. Ils l'accrochent alors à un treuil pour le remonter. Eiffel enchaîne quatre à cinq lancers par jour.

Lors de la chute, le mouvement des ressorts est gravé sur tambour enduit de noir de fumée. Les résultats renseignent sur l'accélération de l'appareil et donc sur la résistance de l'air.

Un peu de physique

Dans son livre de 1907 sur les *Recherches expérimentales sur la résistance de l'air, exécutées à la tour Eiffel*, Eiffel rapporte : « Toutes nos expériences conduisent à des conclusions analogues et donnent des résultats sensiblement conformes à la formule de Newton : la résistance de l'air est égale à $R = KSV^2$, dans lequel K est constant pour une surface déterminée : c'est le coefficient de résistance de la surface. » S est la surface du modèle et V sa vitesse. Ainsi, la résistance de l'air augmente proportionnellement au carré de la vitesse. FIGURES 1 ET 2

EXPÉRIENCE DE GUSTAVE EIFFEL DU 2E ÉTAGE DE LA TOUR

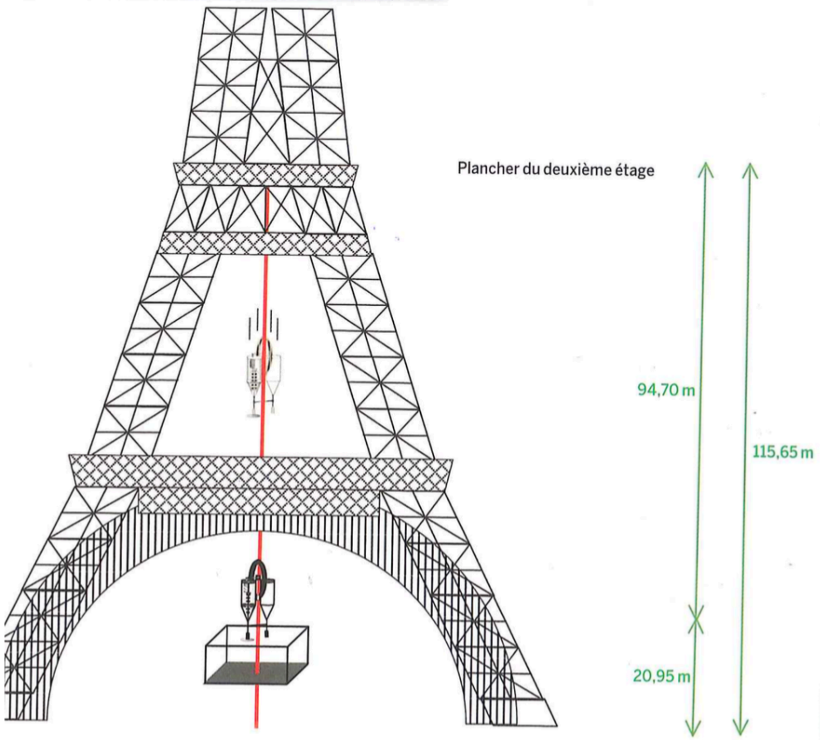
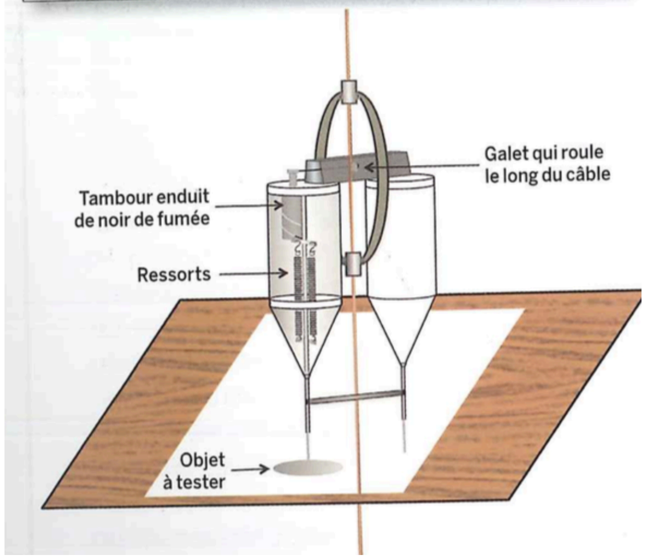


FIG. 1 - DISPOSITIF INSTALLÉ AU DEUXIÈME ÉTAGE DE LA TOUR EIFFEL



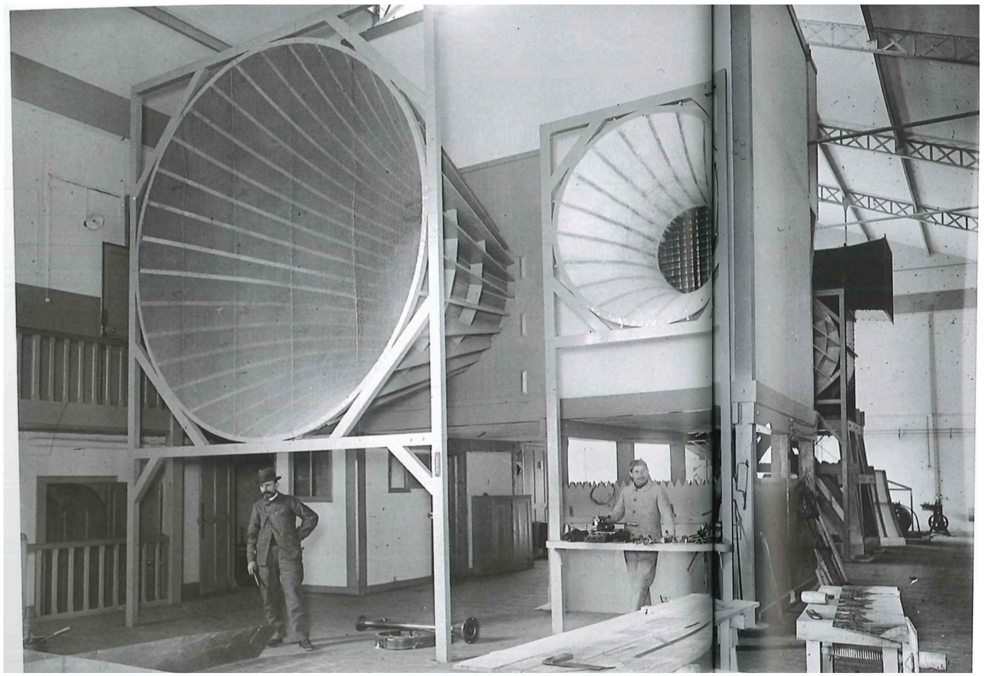
Et après

Malgré la précision de ses mesures, Eiffel est conscient des limites de son dispositif. Premièrement, pour qu'ils puissent être étudiés convenablement, les objets ne doivent être ni trop légers, ni trop lourds. Deuxièmement, l'ingénieur a observé une différence de pression quand l'air s'écoule autour d'une plaque. Ce phénomène est de nos jours appelé portance et explique l'élévation des avions dans les airs. Or, pour étudier cette portance, il faut des essais qui puissent durer plus longtemps qu'une chute libre de quelques secondes. Eiffel songe alors à une soufflerie.

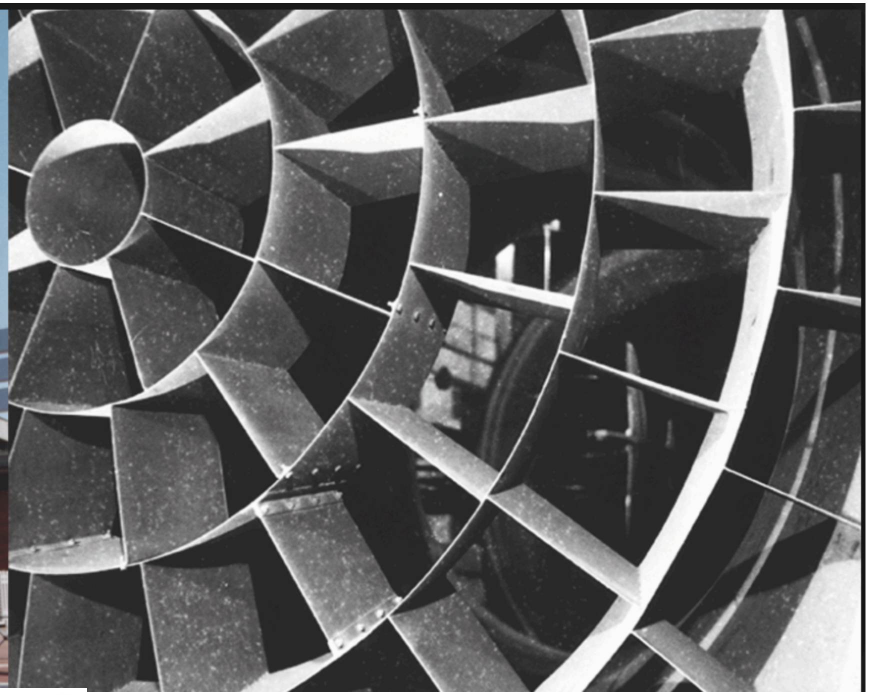
Cependant, celles qui existent à l'époque lui paraissent insuffisantes : elles débitent de l'air à 10 m/s quand il en voudrait 20. En 1907, Eiffel aménage donc sa propre soufflerie au pied de la tour. Avec l'aide de son collaborateur Léon Rith, il y réalise plus de quatre mille expériences jusqu'en 1911, pour la plupart sur des ailes d'avions. À partir de 1910, l'ingénieur engage des tests sur des avions complets pour en évaluer la stabilité. Édouard Nieuport, Henri Farman, les frères Charles et Gabriel Voisin ou encore Louis Blériot lui soumettent leurs modèles.

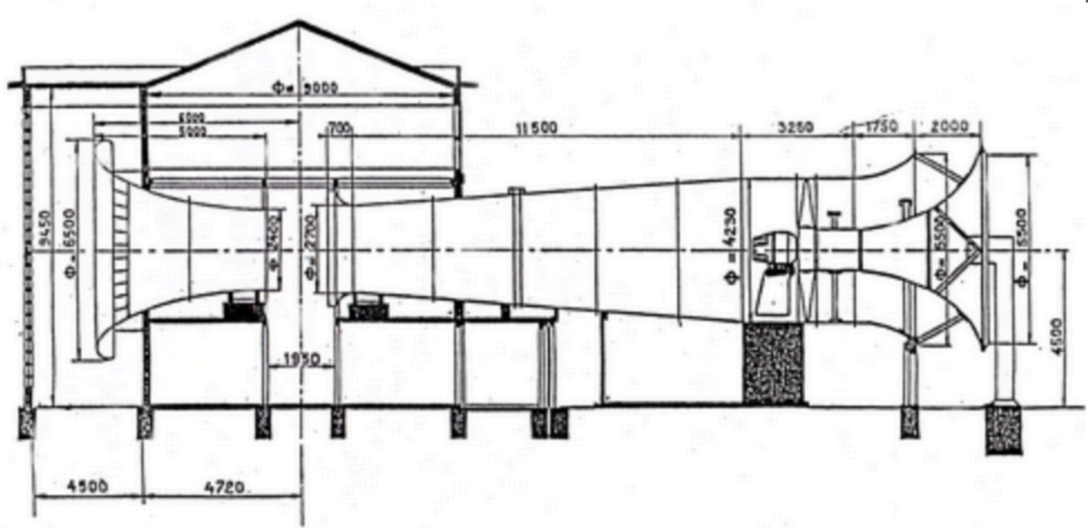
Les plaintes des riverains gênés par le bruit de la soufflerie obligent Eiffel à quitter son laboratoire du Champ-de-Mars. En 1912, il s'installe au 67, rue Boileau, dans le 16e arrondissement. Sa soufflerie permet d'obtenir une vitesse régulière de 2 m/s à 32 m/s ; elle est alors la plus puissante au monde.

Soufflerie Eiffel à Paris



La soufflerie Eiffel
de l'Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse
en activité depuis 1938





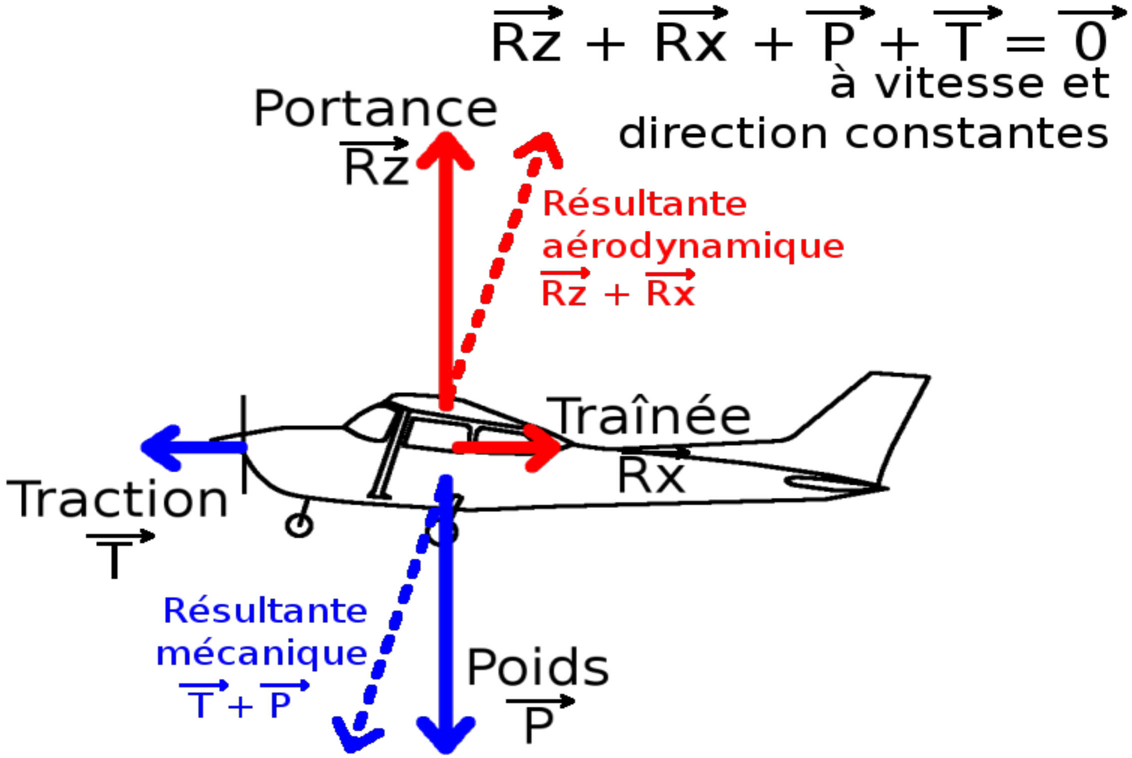
Veine circulaire : Ø 2,40 m x 2,00 m
Gamme de vitesse : 1 à 30 m/s
(110 km/h)

Le régime de vol de “croisière” (cf TD 4)

On considère ici un vol stationnaire (vitesse contante) horizontal (pas de vitesse verticale)

Le régime de vol de “croisière” (cf TD 4)

On considère ici un vol stationnaire (vitesse contante) horizontal (pas de vitesse verticale)



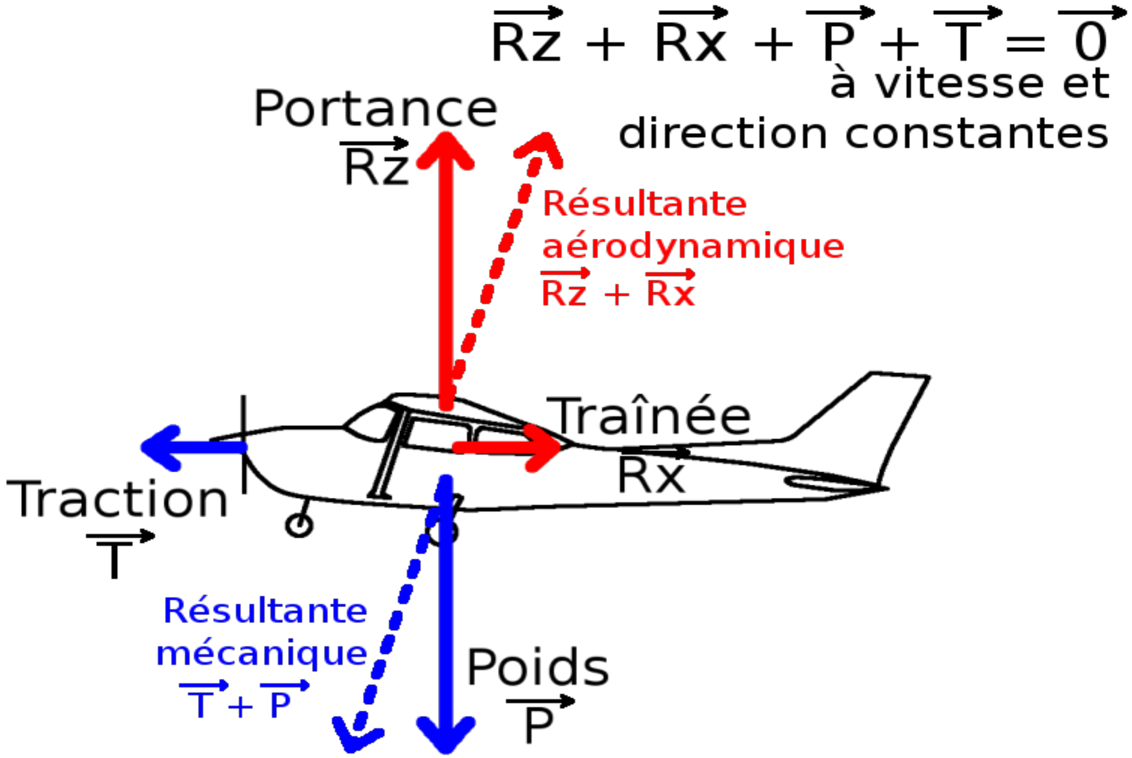
Dans ce cas, on a donc la portance qui est égale (et opposée) au poids et la traînée qui est égale et opposée à la force de traction (ou de propulsion) de l’avion.

La puissance nécessaire à maintenir ce régime de vol ?

L’énergie pour parcourir la distance L dans ce régime ?

Le régime de vol de “croisière” (cf TD 4)

On considère ici un vol stationnaire (vitesse contante) horizontal (pas de vitesse verticale)



Dans ce cas, on a donc la portance qui est égale (et opposée) au poids et la traînée qui est égale et opposée à la force de traction (ou de propulsion) de l’avion.

La puissance nécessaire à maintenir ce régime de vol est Puissance = Traînée x Vitesse ~ U^3

L’énergie pour parcourir la distance L dans ce régime est Energie = Traînée x Distance ~ LU^2

Existerait-t-il une relation entre la vitesse U d'un objet volant et sa masse M ?

Existerait-t-il une relation entre la vitesse U d'un objet volant et sa masse M ?

Si on raisonne en considérant le régime de vol stationnaire alors :

$$\text{Portance} = \text{Poids}$$

$$\text{et donc Traînée} = (C_t/C_p) * \text{Poids}$$

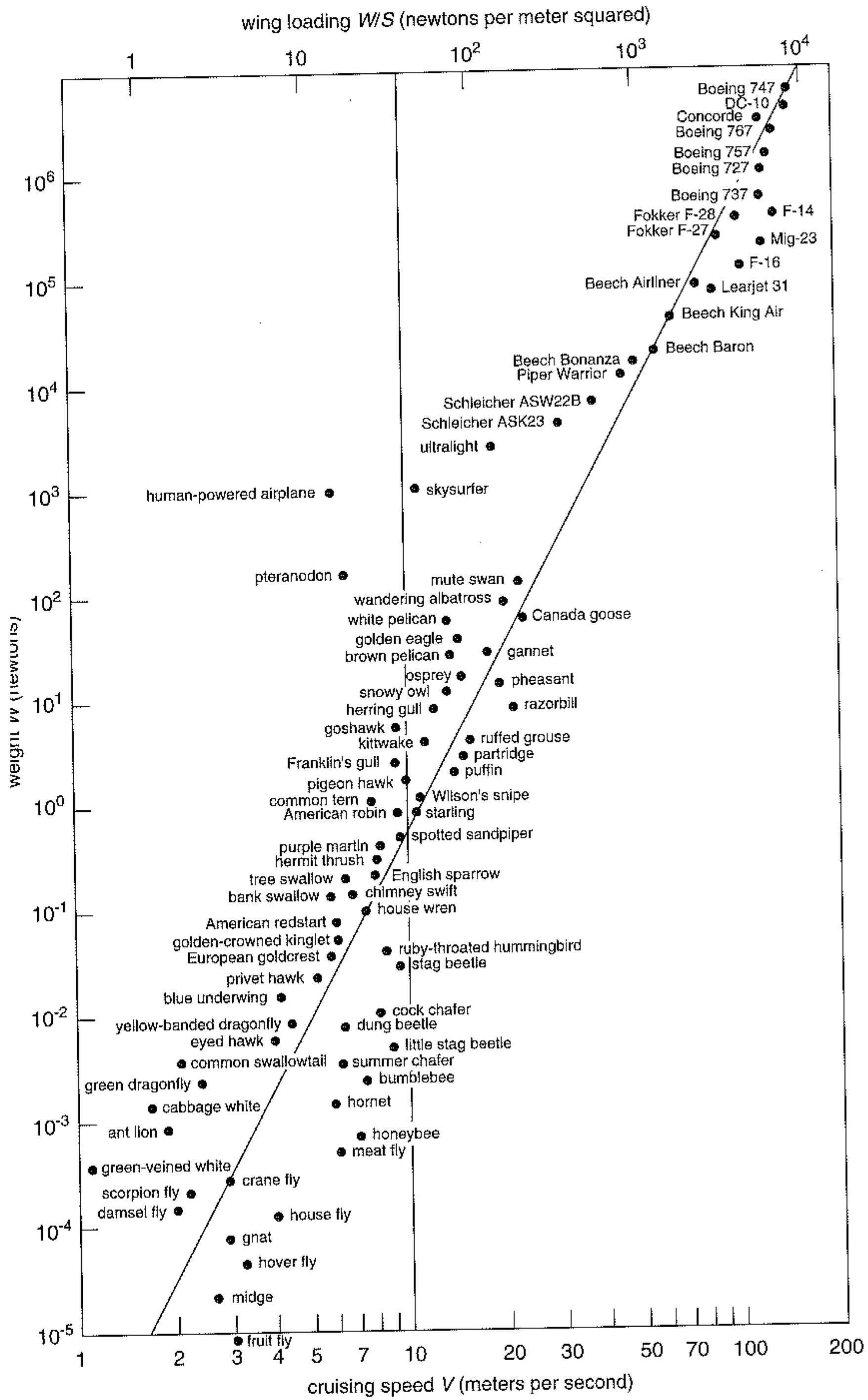
Si on met de côté les variations de C_t et C_p liées à la forme précises des objets, il y a donc proportionnalité entre SU^2 et la masse M de l'objet:

$$SU^2 \sim M$$

Mais attention la surface de l'objet est reliée bien sûr à sa taille et donc à son poids. En supposant pour simplifier une relation homothétique entre des objets de différentes taille : $S \sim M^{2/3}$ car $M \sim V \sim L^3$ et $S \sim L^2$ où L est la taille typique de l'objet

Cela conduit alors à la relation vitesse – masse suivante :

$$U^6 \sim M \text{ ou } U \sim M^{1/6}$$



wing loading W/S (newtons per meter squared)
1
10
10^2
10^3
10^4
10^6
10^5
10^4
10^3
10^2
10^1
10^0
10^-1
10^-2
10^-3
10^-4
10^-5
Boeing 747
DC-10
Concorde
Boeing 767
Boeing 757
Boeing 727
Boeing 737
Fokker F-28
Fokker F-27
F-14
Mig-23
F-16
Beech Airliner
Learjet 31
Beech King Air
Beech Baron
Beech Bonanza
Piper Warrior
Schleicher ASW22B
Schleicher ASK23
ultralight
human-powered airplane
skysurfer
pteranodon
mute swan
wandering albatross
Canada goose
white pelican
golden eagle
gannet
brown pelican
osprey
pheasant
snowy owl
razorbill
herring gull
goshawk
ruffed grouse
kittwake
partridge
Franklin's gull
puffin
pigeon hawk
common tern
Wilson's snipe
American robin
starling
spotted sandpiper
purple martin
hermit thrush
tree swallow
English sparrow
bank swallow
chimney swift
house wren
American redstart
golden-crowned kinglet
ruby-throated hummingbird
European goldcrest
stag beetle
privet hawk
blue underwing
cock chafer
yellow-banded dragonfly
dung beetle
eyed hawk
little stag beetle
common swallowtail
summer chafer
green dragonfly
bumblebee
cabbage white
hornet
ant lion
honeybee
meat fly
green-veined white
crane fly
scorpion fly
damsel fly
house fly
gnat
hover fly
midge
fruit fly
1
2
3
4
5
7
10
20
30
50
70
100
200
cruising speed V (meters per second)

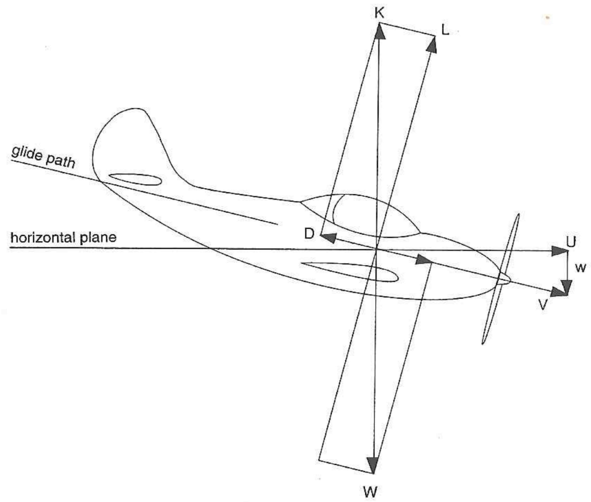
	Takeoff weight W (tons)	S (m^2)	b (m)	Sea-level thrust T (tons)	Fuel consumption (liters/hour)	Cruising speed V (km/hour)	Range (km)	Seats
Boeing 747-400	395	530	65	4×25.7	12300	900	12200	421
Boeing 747-300	378	511	60	4×23.8	13600	900	10500	400
Boeing 747-200	352	511	60	4×21.3	13900	900	9500	387
Douglas DC-10-30	256	368	50	3×23.1	10400	900	9900	248
Airbus A310	139	219	44	2×22.7	5500	860	6400	200
Boeing 737-300	57	105	29	2×9.1	2700	800	4200	124
Fokker F-100	43	94	28	2×6.7	2400	720	1800	101
Fokker F-28	33	79	25	2×4.5	2500	680	1700	80
A380	560	845	80	4 x 31	-	1040	14800	555-856

Le régime de vol “plané” (cf TD 4)

On considère ici un vol plané (sans moteur) stationnaire

Le régime de vol “plané” (cf TD 4)

On considère ici un vol plané (sans moteur) stationnaire



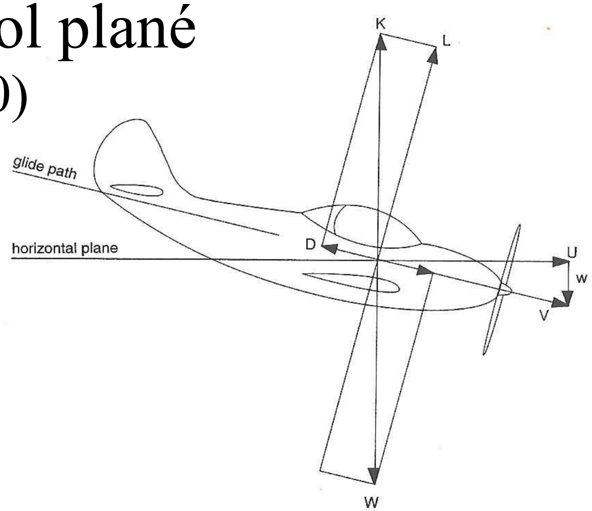
Dans ce cas, la somme des forces doit toujours être égale nulle, ce qui n’est possible que si la vitesse de l’avion n’est plus horizontale mais comporte une petite composante verticale, avec donc un angle $\alpha \neq 0$ par rapport à l’horizontale. On a alors les relations :

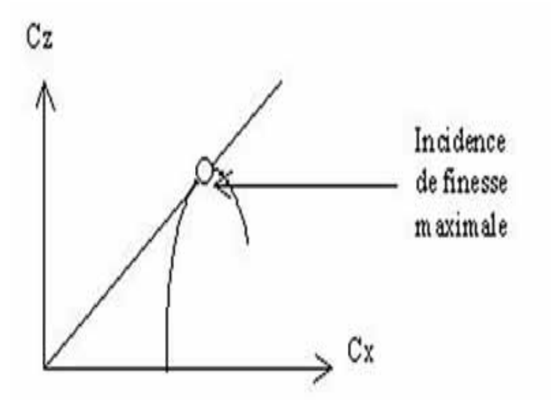
$$F_p \cos\alpha = P \text{ suivant la verticale}$$
$$\text{et } F_p \sin\alpha = F_t \cos\alpha \text{ suivant l'horizontale}$$

L’angle de vol plané est donc directement lié à la finesse : $\tan\alpha = C_t/C_p = 1/f$

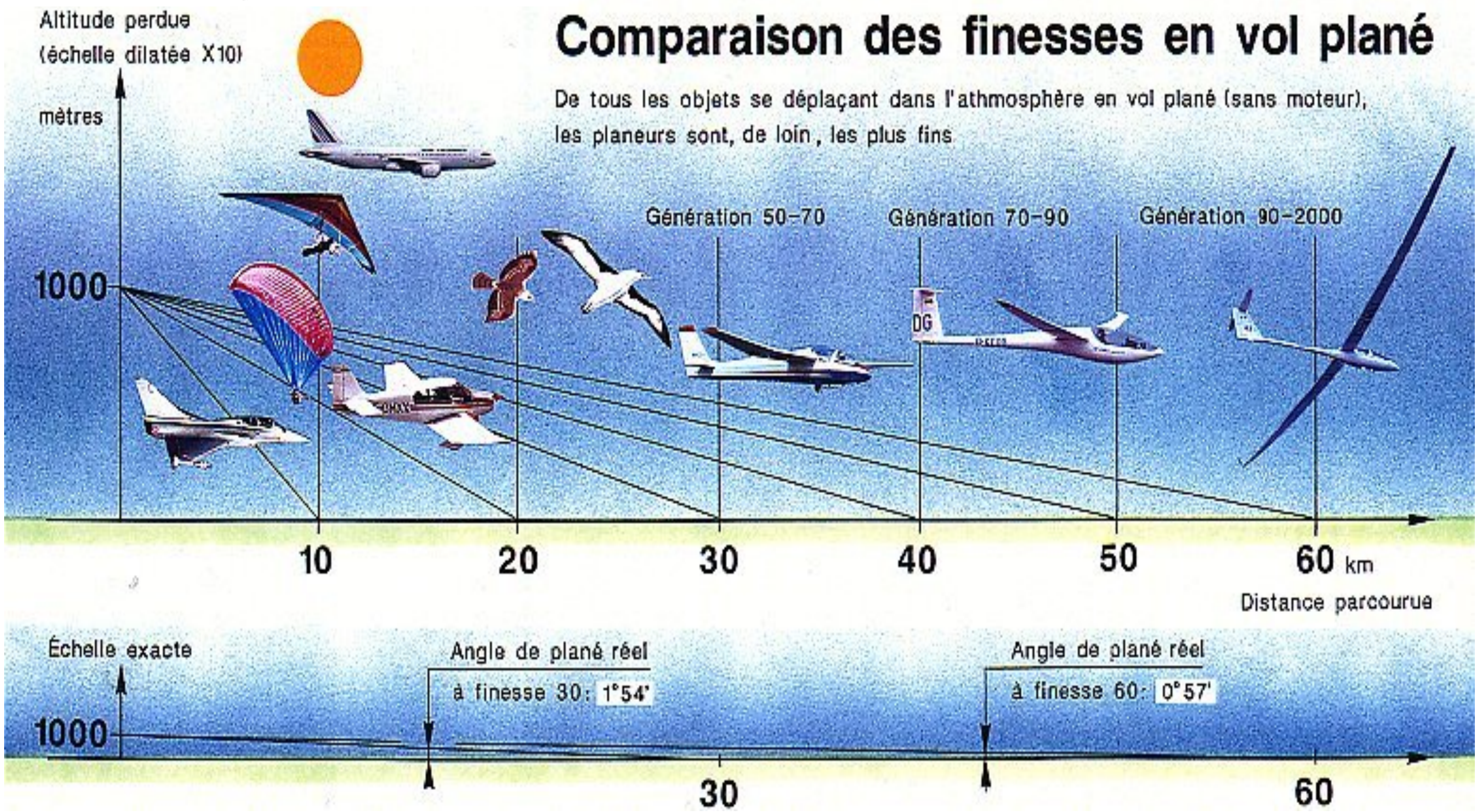
Plus la finesse f est grande, plus l’angle sera donc petit.

Le vol plané
($\alpha \neq 0$)





Pour une aile, la finesse est maximale pour un certain angle d'incidence qu'il est facile de trouver dans la polaire Eiffel caractérisant l'aile



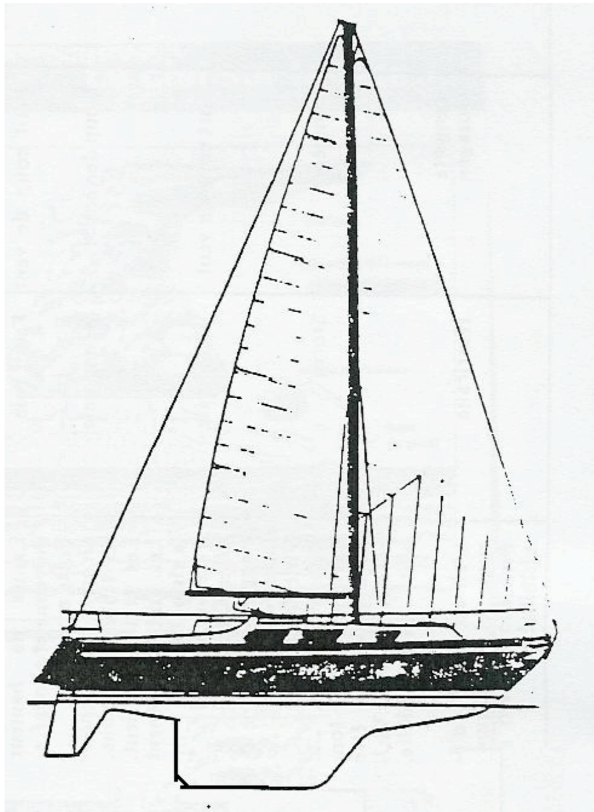
Planeur de finesse 60 !
ASH-25 (D-1529)

Grand rapport d’aspect (élancement = envergure/corde)

Solar-Impulse

L'envergure d'un Airbus : 63,40 m
Le poids d'une voiture : 1600 kg
La puissance d'un scooter : 4 moteurs de 10 CV

Hydrodynamique des voiliers

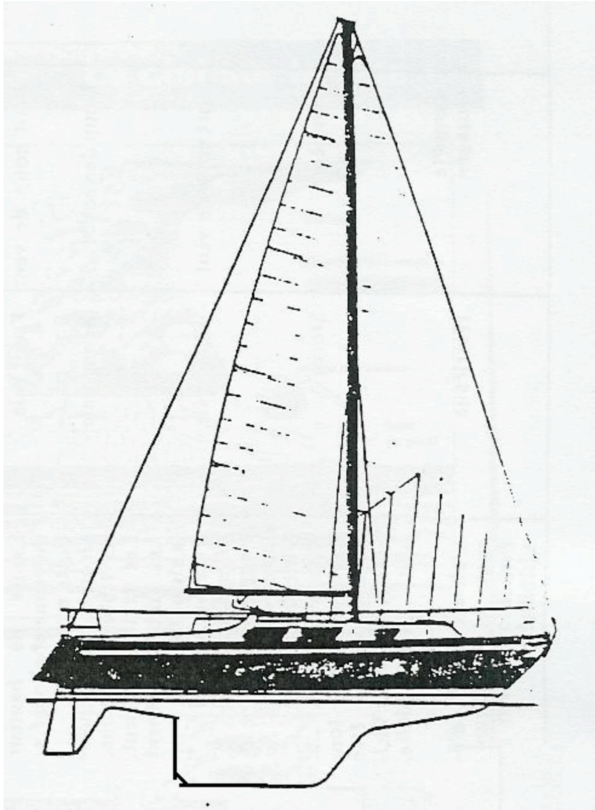


Hydrodynamique des voiliers

Le mouvement d'un voilier résulte des forces fluides qui s'exerce d'une part dans l'air et d'autre part dans l'eau. La(es) voile(s) et la quille sont des "ailes" au sens aérodynamique du terme.

En régime stationnaire (vitesses constantes du vent et du bateau), la somme de toutes les forces doit être nulle.

La résultante hydrodynamique sur la quille compense la résultante aérodynamique sur la(es) voile(s) suivant l'horizontale,
et la poussée d'Archimède compense bien sûr le poids suivant la verticale.

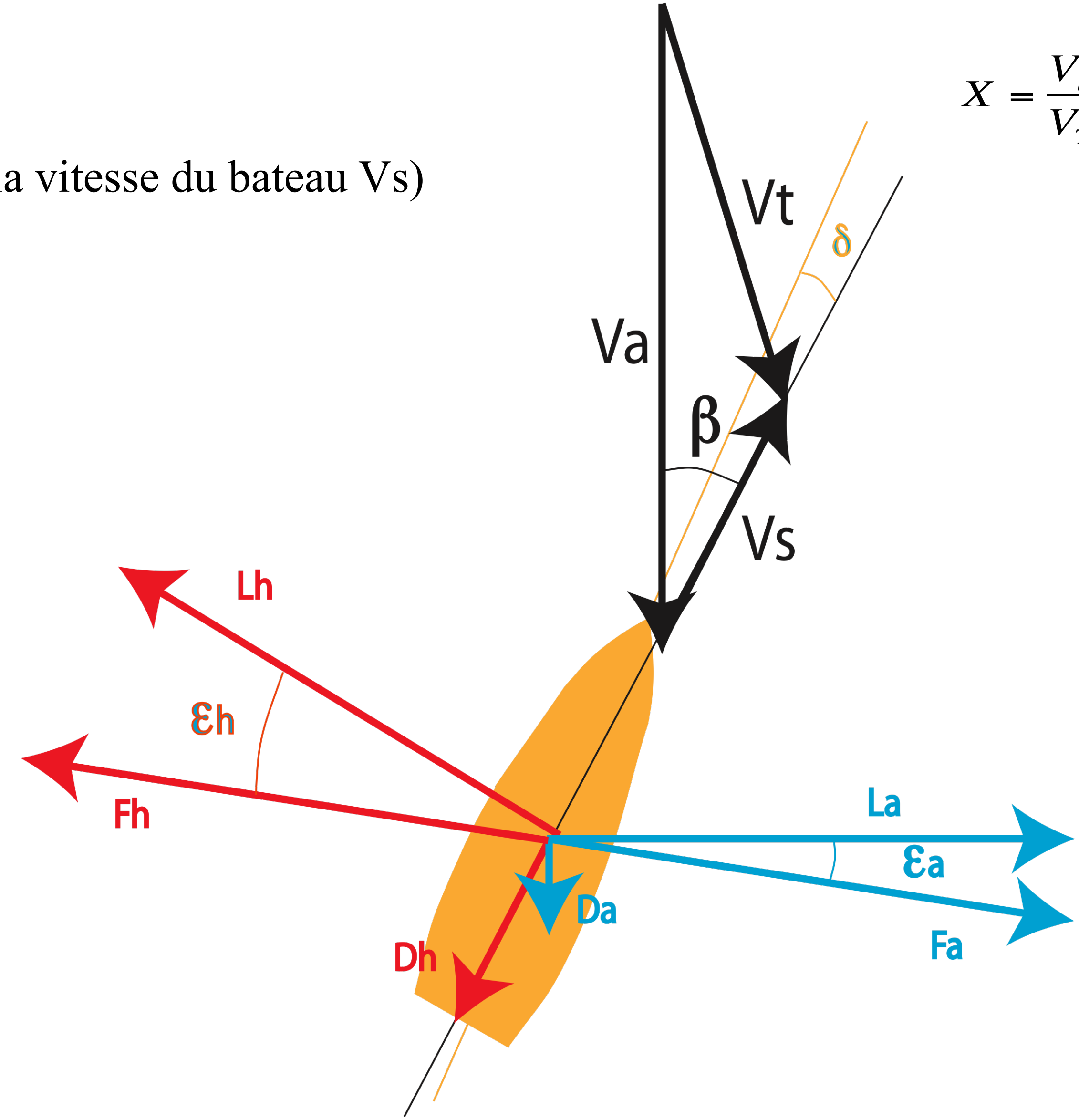


- portance et traînée des voiles (en bleu)
- portance et traînée de la quille (en rouge)

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

- vent réel Va
- vent apparent Vt (fonction de la vitesse du bateau Vs)

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



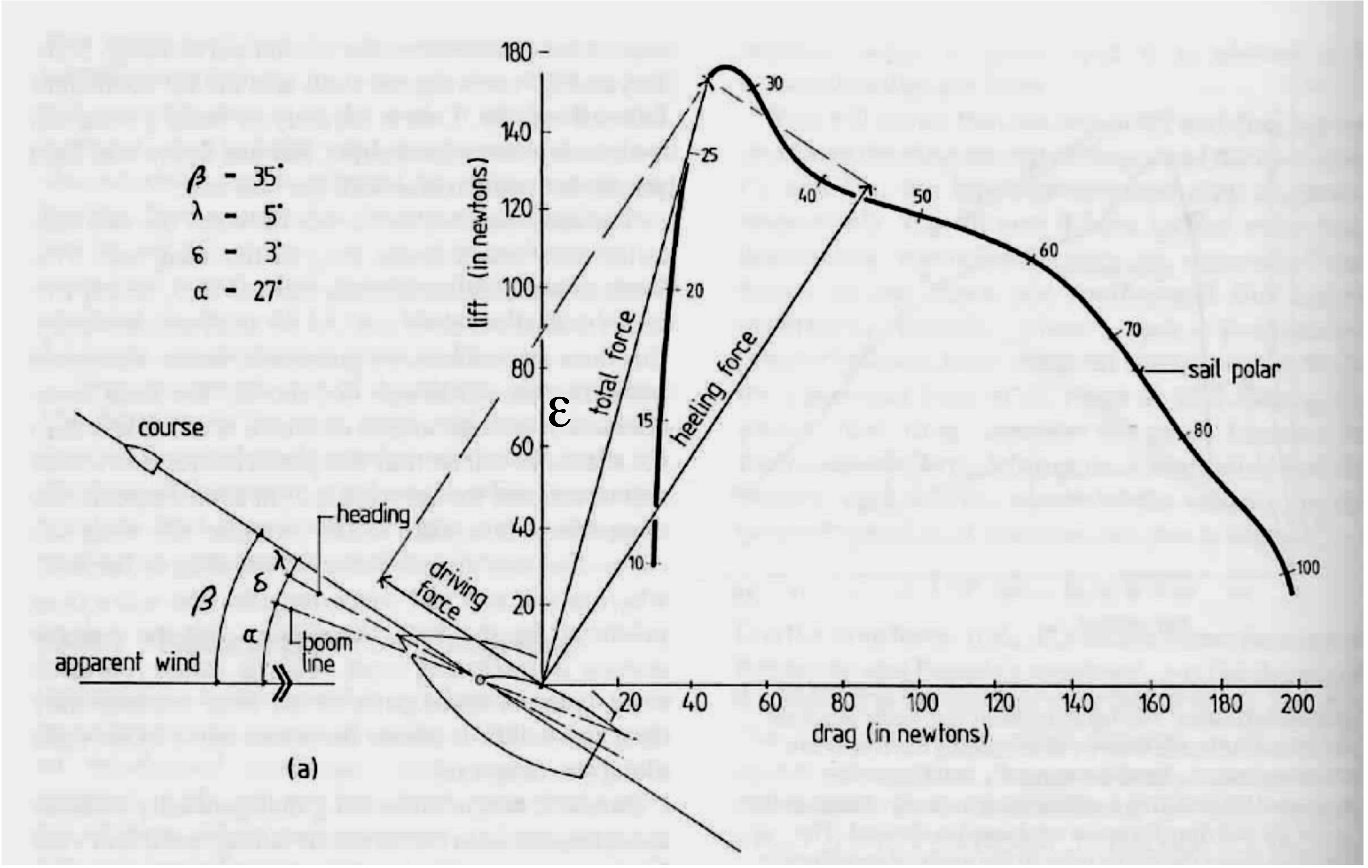
$$\vec{F}_a + \vec{F}_h = 0$$

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

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

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

Polaire « Eiffel » C_L=f(C_D) d'un voilier



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

Comment aller plus vite ?

Augmenter la surface de voile

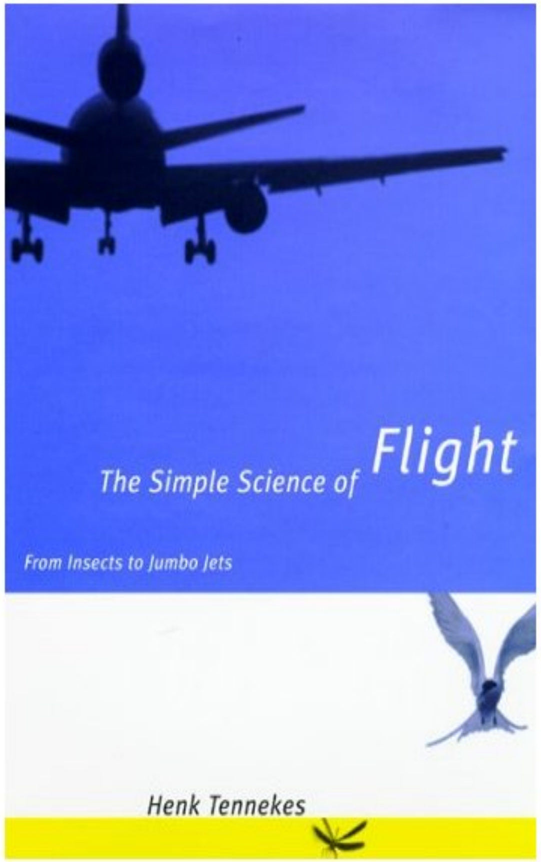
Comment aller plus vite ?

Sortir de l’eau

BLADERIDER FOILING MOTH - SEBASTIEN JOSSE - CONCARNEAU LE 30/10/2007
© B.STICHELBAUT

Moth international

l’Hydroptère (Alain Thébault) : record à 51 Nœuds



Pour en savoir plus …