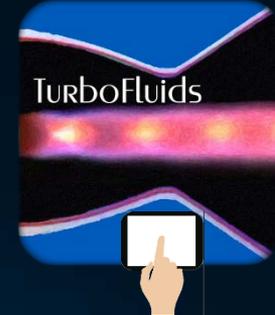




Mécanique des fluides



La force des écoulements

Chapitre 7: Écoulements externes

7.5

7.6

7.5 Couche limite avec gradient de pression

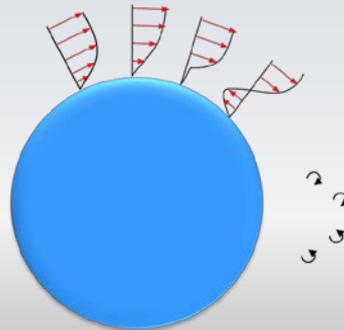
7.6 Écoulements externes +

Le gradient de pression

7.5 Couche limite avec..

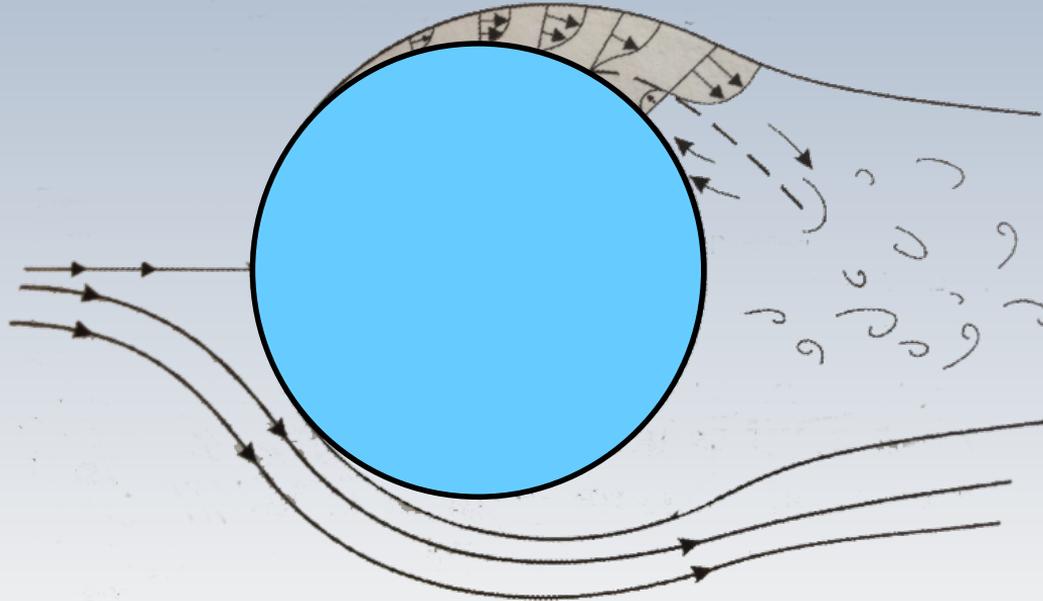
Un gradient de pression adverse ou défavorable ($\partial p / \partial x > 0$) peut renverser un écoulement et provoquer un **décollement**.

La conséquence d'un décollement est la présence d'une grande **traînée de pression** et l'apparition d'un **sillage** accompagné d'une forte **dissipation d'énergie**



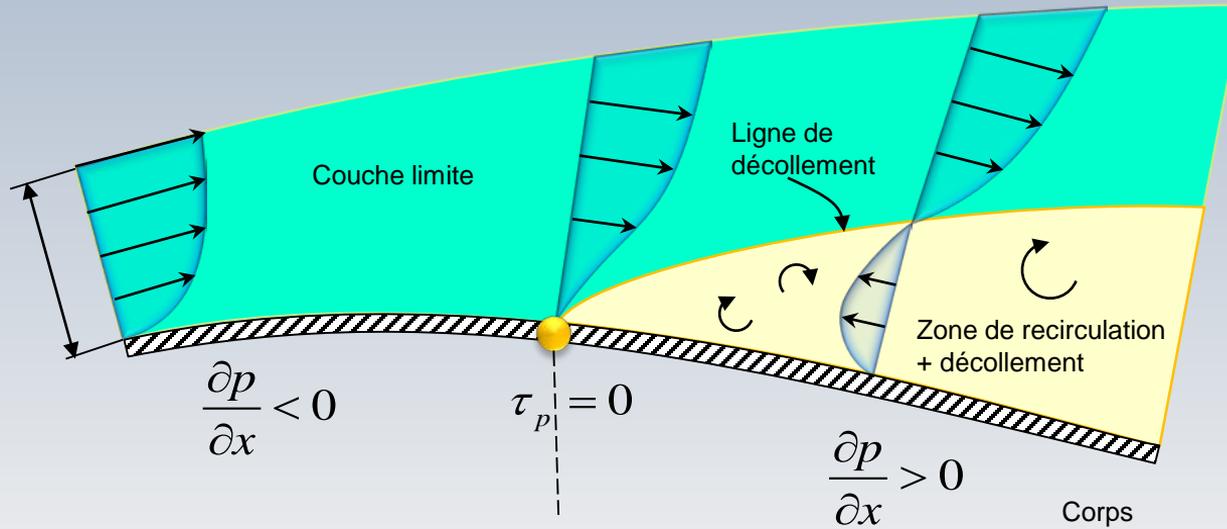
Le gradient de pression

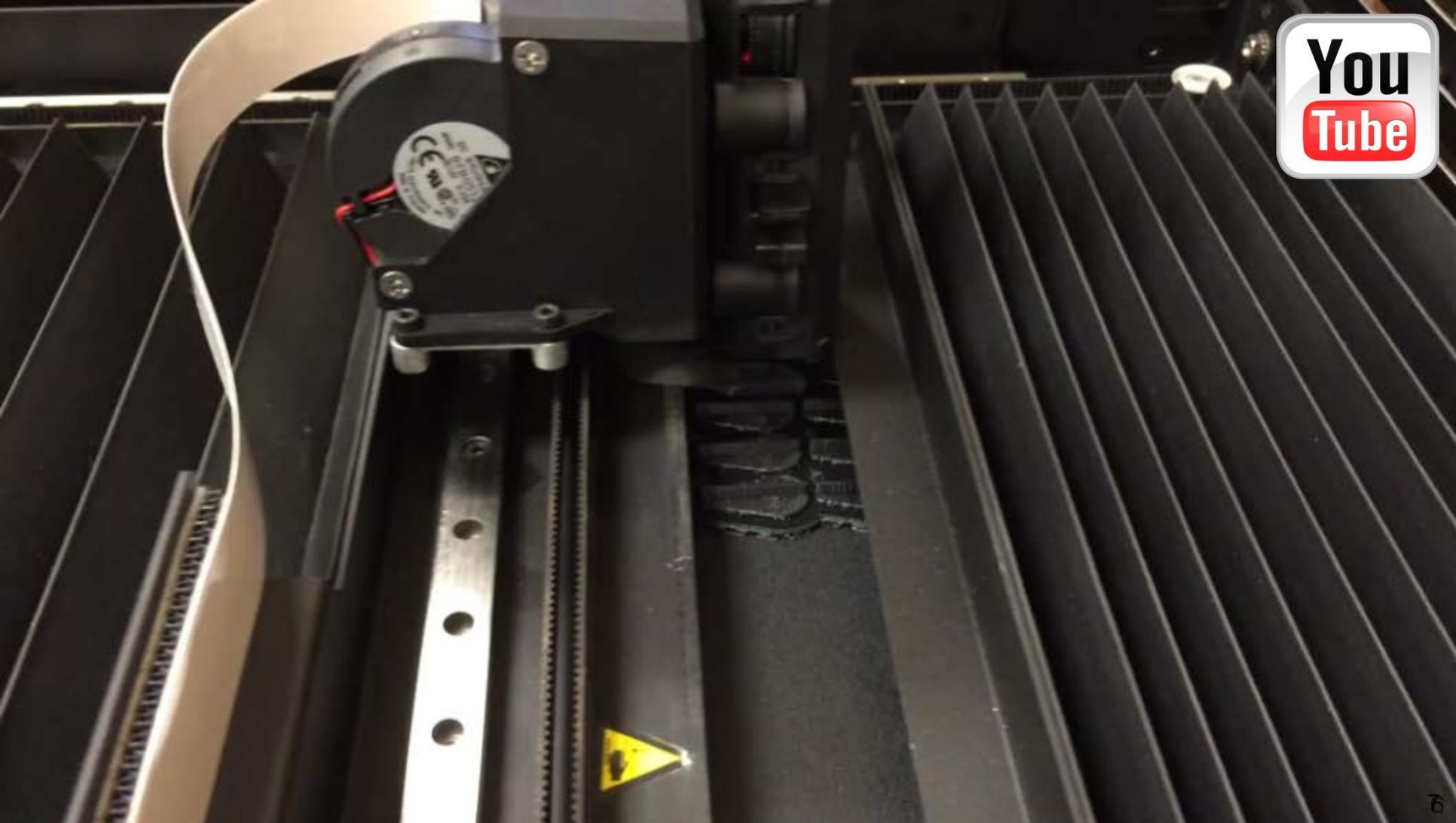
7.5 Couche limite avec..



CL sur une surface

7.5 Couche limite avec..





Chapitre 7: Écoulements externes

7.5

7.6

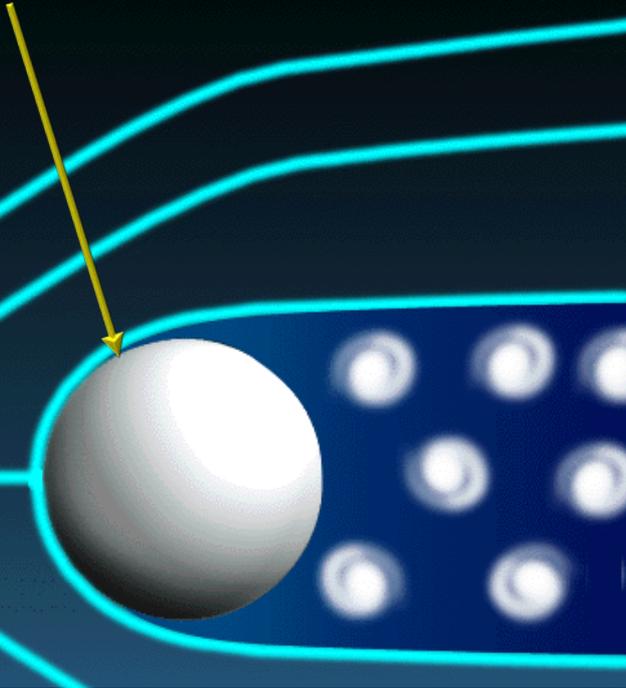
7.5 Couche limite avec gradient de pression

7.6 Écoulements externes +

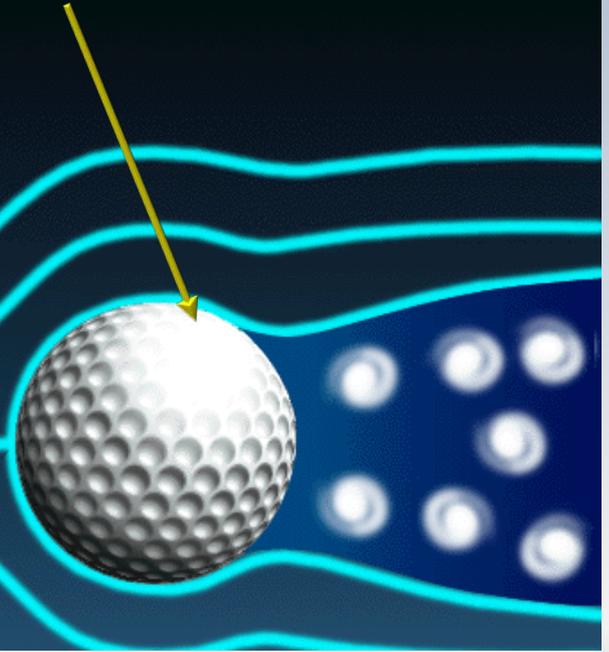
Décollement

7.6 Écoulement ..

Point de décollement pour une couche limite laminaire. La traînée de pression est élevée

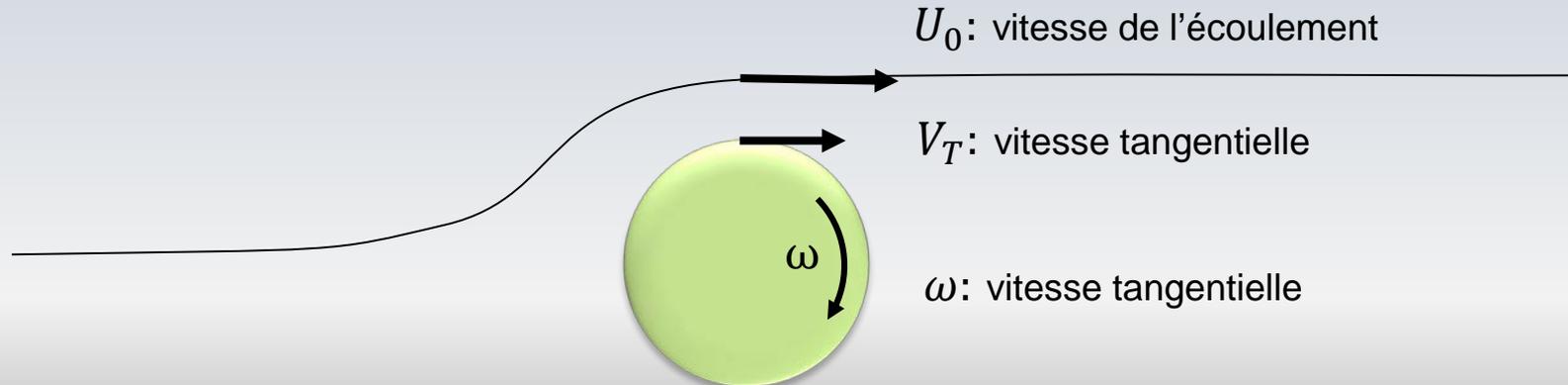


Point de décollement pour une couche limite turbulente. La région de séparation est plus petite est également la traînée de pression

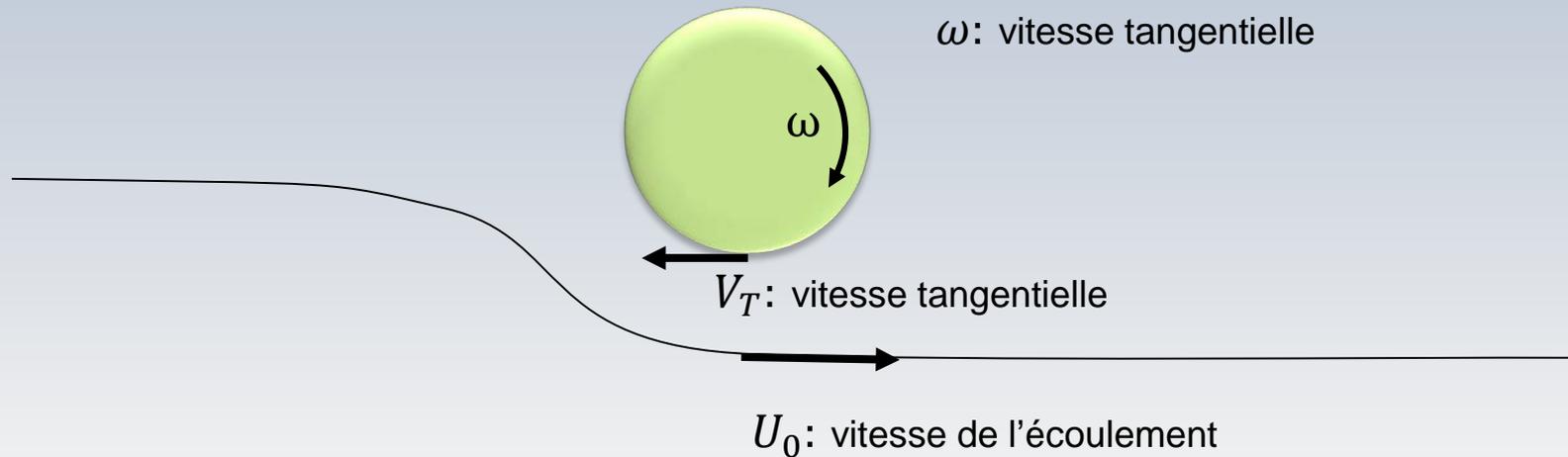


Lorsqu'une balle se déplace dans un fluide et qu'en même temps tourne sur elle-même, l'adhérence à la paroi et le frottement modifient la vitesse du courant de manière dissymétrique.

D'un côté, la vitesse de l'écoulement et la vitesse produite par la rotation s'ajoutent, **le fluide s'accélère** et **la pression diminue**



De l'autre côté, la rotation de la balle freine l'écoulement et **la pression augmente**



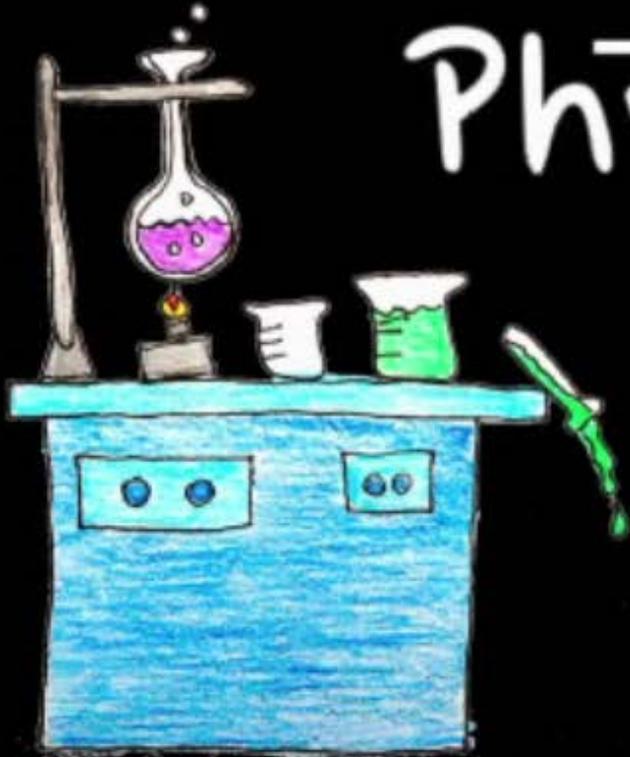
Comme conséquence, **une force de portance est générée**, la balle se déplace du côté où la pression est plus faible et sa trajectoire devient une courbe.

Cette analyse ne tient cependant **pas compte de la présence ni de la nature de la couche limite** qui gouverne l'interaction entre le fluide et l'objet

Ce phénomène, est nommé **effet Magnus** en honneur du scientifique Heinrich G. Magnus (1802-1870) qui l'a découvert.



Ph \vec{y} sics Girl

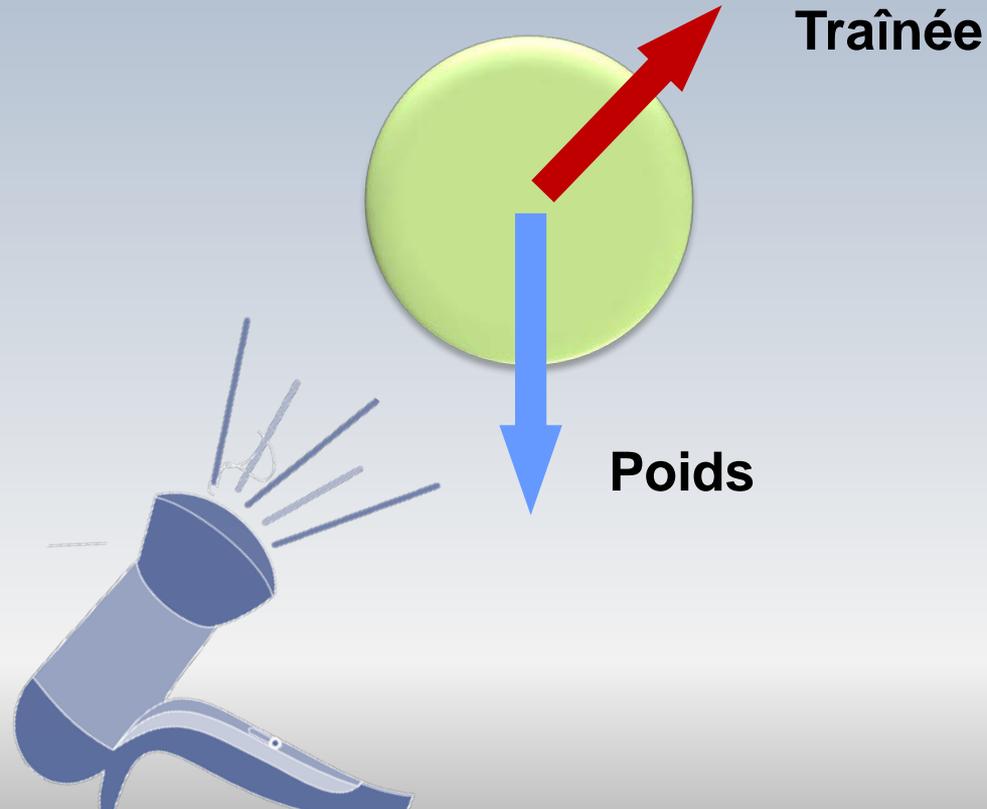


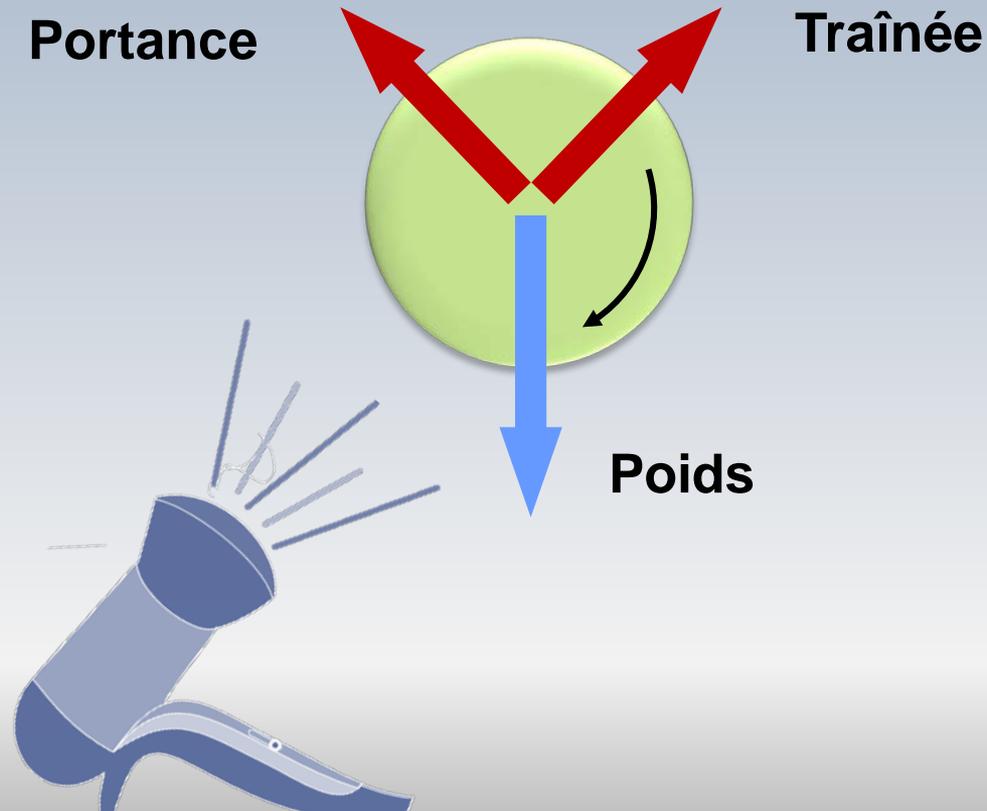


DIGITAL
STUDIOS



Bernoulli Floater
Saint Mary's University
Astronomy & Physics

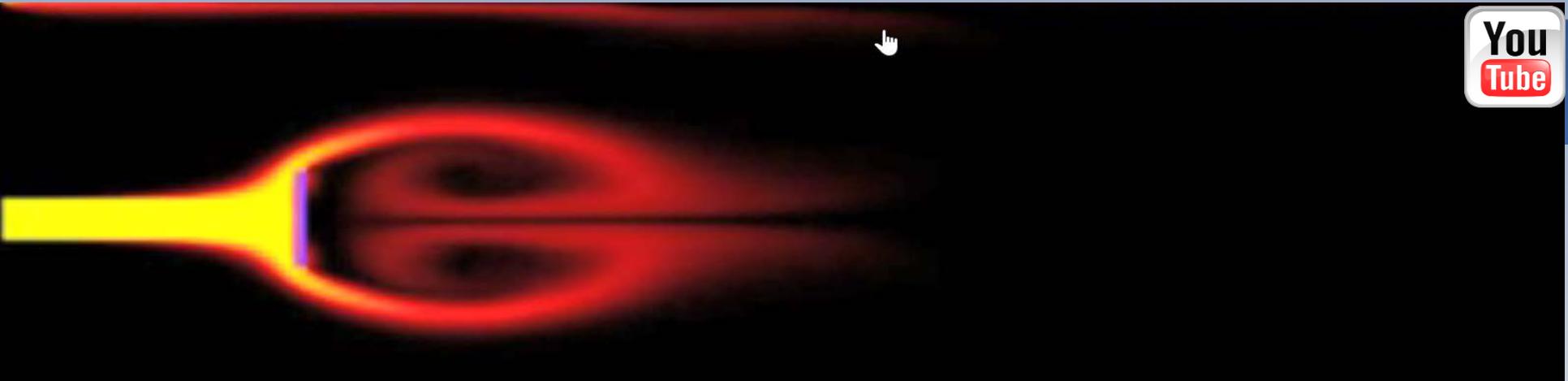






LES ROTORS

FLETTNER



Laminaire



Turbulent

La traînée dans Le sport





Windkanal
wind tunnel



Constructions



Empire State

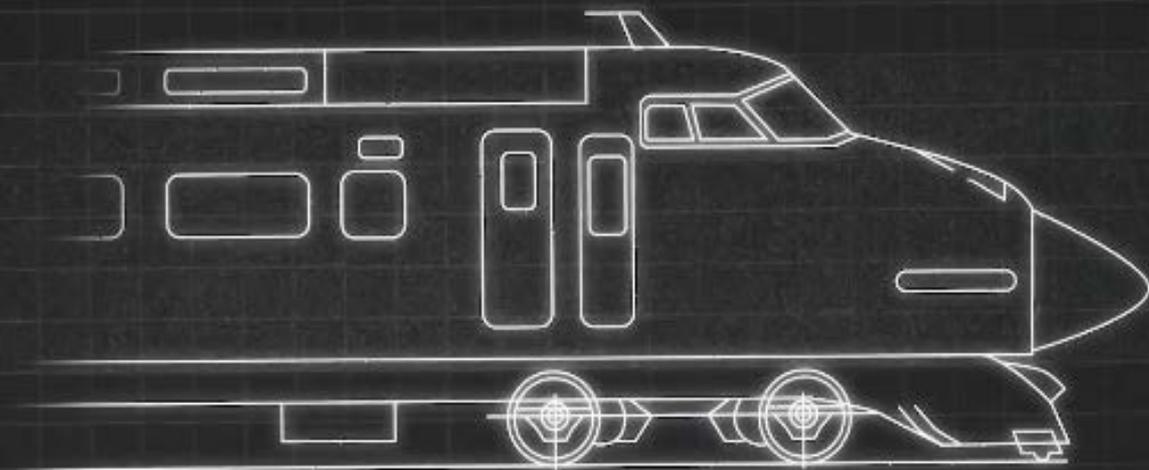


Tour Eiffel

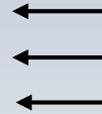
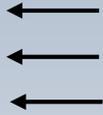








100 SERIES SHINKANSEN
150 mph



A.Hedenström and F. Liechti The Journal of Experimental Biology
204, 1167–1175 (2001)

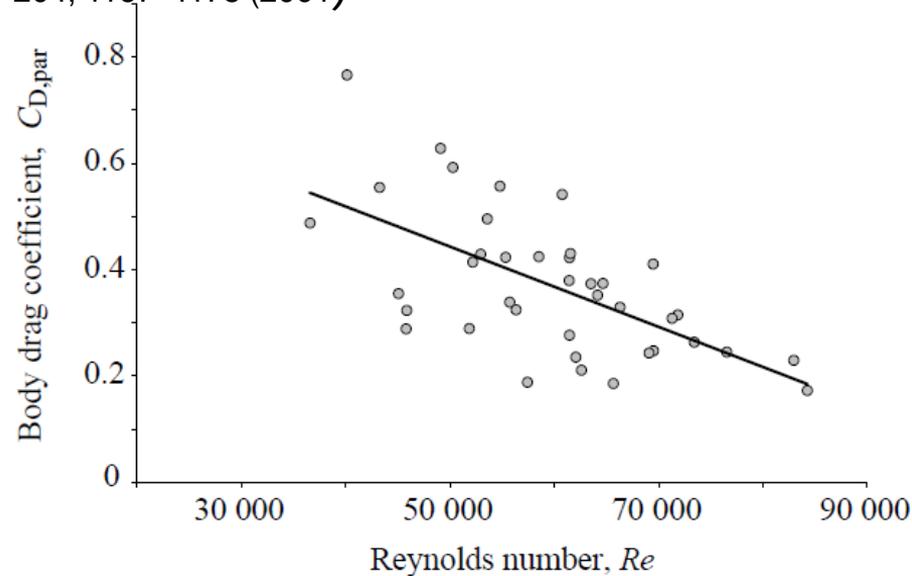
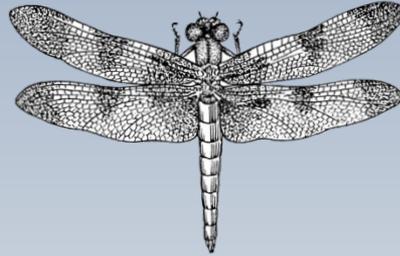


Fig. 3. Estimated body drag coefficients ($C_{D,par}$) versus Reynolds number (Re) for 39 dive measurements of passerine birds tracked by radar. Reynolds number was calculated using the diameter of the body frontal area as the reference length. The regression equation was $C_{D,par}=0.82-7.5\times 10^{-6}Re$ ($t=4.77$, $P<0.001$).

C_D pour une libellule

7.6 Écoulement ..



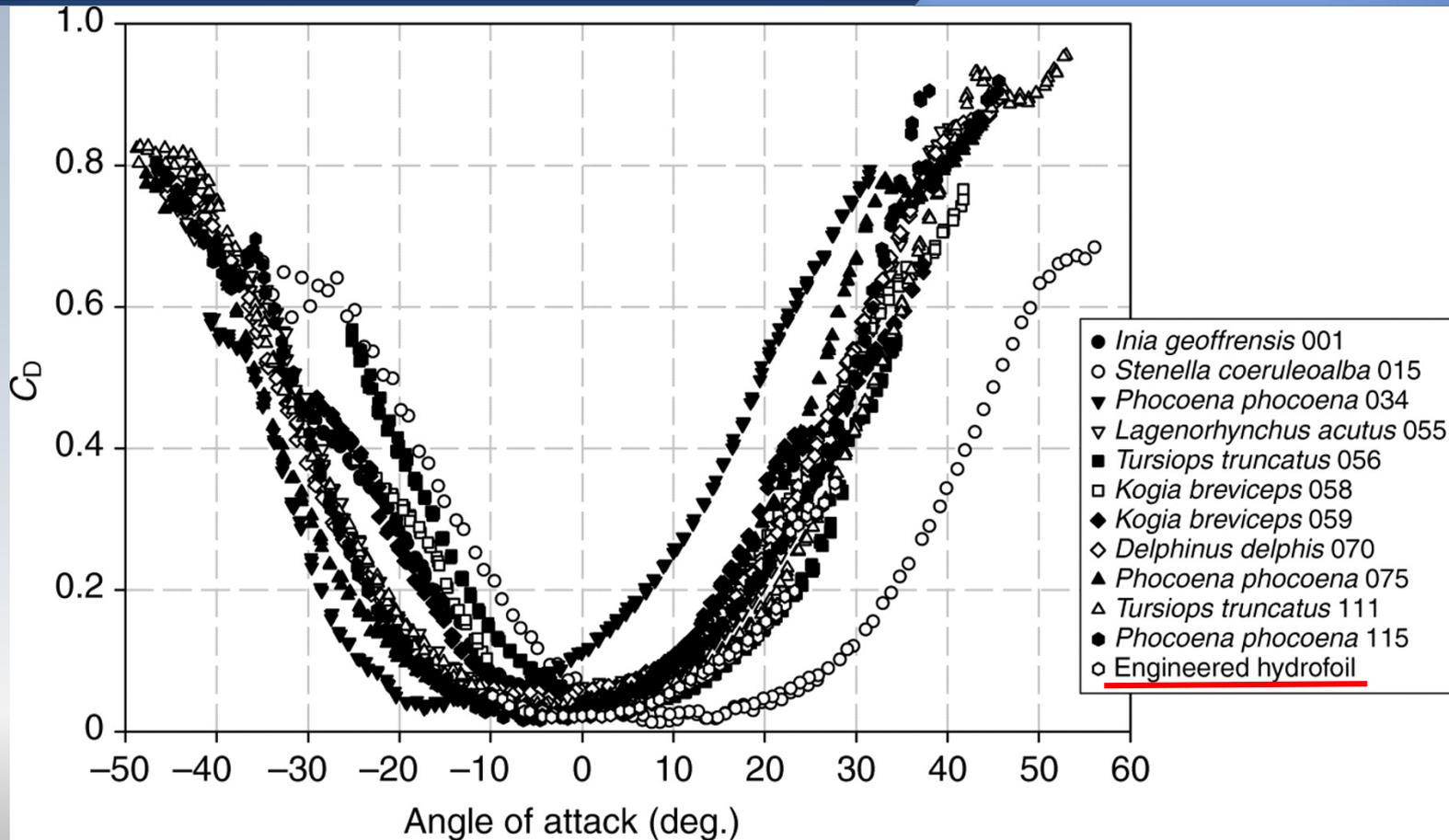
Jie Zhang and Xi-Yun Lu,
PHYSICAL REVIEW E 80, 017302 2009

TABLE I. Comparison of the forces for the forewing/hindwing interaction and the corresponding isolated wing case at $\alpha_1=2^\circ$, $\alpha_2=12^\circ$, $c_1/c_2=0.9/1.1$, $H/c=0.2$, and $G/c=0.1$. The superscript i denotes the isolated wing.

	C_D	C_L	L/D	C_D^i	C_L^i	L^i/D^i
Forewing	0.079	0.782	9.899	0.097	0.168	1.732
Hindwing	0.207	0.723	3.493	0.264	0.958	3.629
Total	0.286	1.505	5.262	0.361	1.126	3.119

C_D pour les cétacés

Reynolds=250,000



Penguins et tortues

La variation de C_D est attribuée aux différentes indentations sur la carapace



$C_D=0.27-0.56$

Penguin Adélie



$C_D=0.036-0.04$

Hydrodynamic drag of diving birds: effects of body size, body shape and feathers at steady speeds

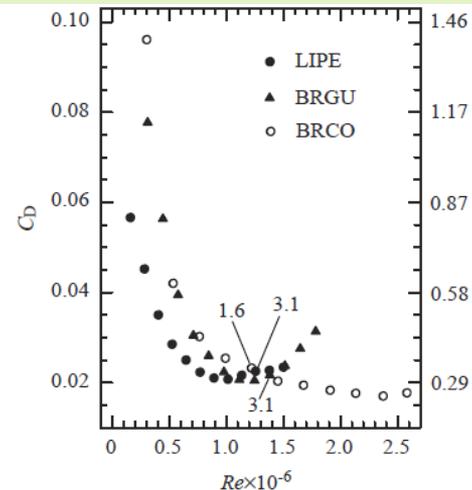
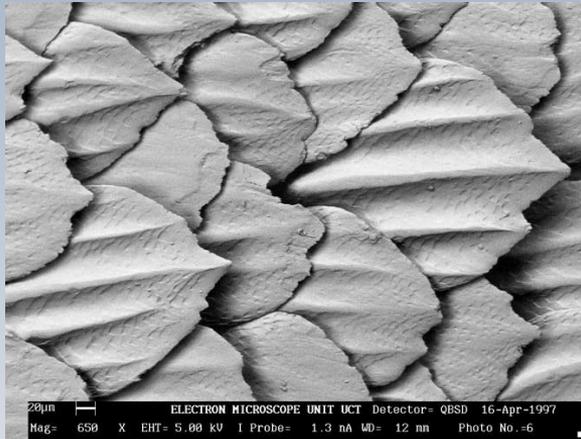


Fig. 8. Drag coefficient C_D versus Reynolds number Re for single frozen specimens of two wing-propelled divers that swim with their neck retracted (LIPE and BRGU) and a foot-propelled diver that swims with its long neck extended (BRCO). Species codes are in given Table 2. C_D on the left ordinate is based on wetted surface area A_{sw} , and C_D on the right ordinate is based on frontal area. Speeds (in $m s^{-1}$) corresponding to Re where the BRCO curve crosses the curves for the wing-propelled species are annotated. The C_D/Re curve for the foot-propelled male KIEI is very similar to that for the BRCO (cf. Fig. 7C) and crosses the C_D/Re curves for these wing-propelled species at a corresponding speed of approximately $2.2 m s^{-1}$.

J. R. Lovvorn¹, G.Y A. Liggins, M. Borstad, S.R M. Calisal, J. Mikkelsen, The Journal of Experimental Biology 204, 1547–1557 (2001)1547

Peau de requin

B. Dean and B. Bhushan Shark-skin surfaces for fluid-drag reduction in turbulent flow: a review, September 2010, Phil. Trans. R. Soc. A



Les écailles ou denticules sur la peau des requins permettent de modifier la couche limite conduisant ainsi à une réduction de la traînée. En effet, sur la surface des écailles il y a des petites rainures (riblets) qui réduisent la traînée de frottement en régime turbulent. Il y a également des écailles disposées sur quelques endroits du corps qui agissent pour contrôler la séparation de l'écoulement. Ceci permet de réduire la traînée de pression lorsque le requin manœuvre.



La peau des dauphins a des qualités qui jouent un rôle surprenant dans leur prestance hydrodynamique. La peau de ces cétacés peut subir une microdéformation et agir ainsi sur la couche limite.

En effet, leur peau se comporte comme un revêtement compliant qui retarde la transition laminaire–turbulent, et ce entraîne une diminution de la traînée.

À haute vitesse (40-50 km/h), les tourbillons générées par la naissance d'une couche limite turbulent sont absorbés par les microdéformations. Il en résulte un écoulement laminaire et ce permet aux dauphins de garder une vitesse élevée avec une consommation énergétique réduite

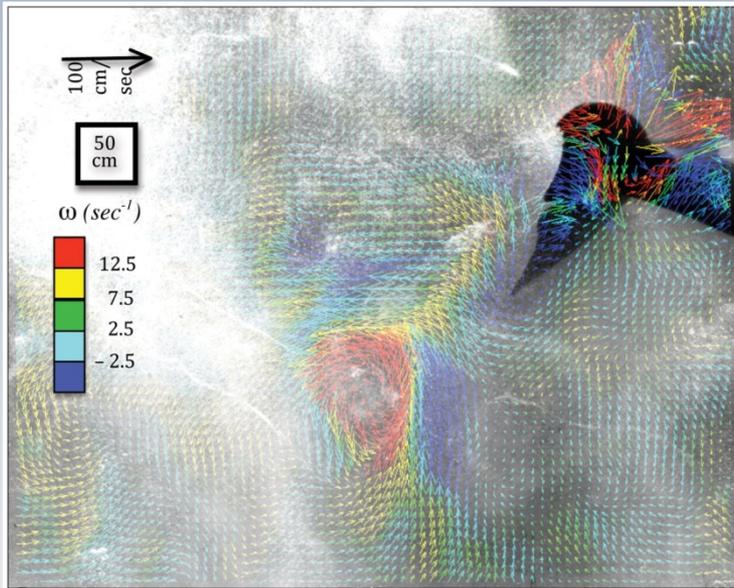
En 1936 J. Gray*, a étudié la traînée du dauphin *Tursius Truncatus* en le modélisant comme un plaque plane rigide en considérant que la transition avait lieu à $\text{Re}_x = 2 \times 10^6$. Dans son étude, il a trouvé que pour nager à **10 m/s** la puissance requise était de **7 fois** la puissance musculaire moyenne des mammifères (**40 W/kg**). Ce résultat a été appelé "*le paradoxe de Gray*".

Il a ainsi parvenu à conclure que la peau du dauphin devait permettre une diminution importante de la traînée. Cette hypothèse a ouvert la voie à une longue controverse et des nombreux travaux ont été réalisés afin de vérifier sa véracité

Pendant presque 80 ans on a estimé que l'écoulement laminaire était la réponse au paradoxe de Gray.

Cependant, la technique de DPIV* a récemment permis d'évaluer que les dauphins sont capables de générer une poussée importante, en mettant en question l'idée qu'un mécanisme pour diminuer la traînée était la seule raison de leur excellente performance hydrodynamique.

*F. E. Fish,, P. Legac, T. M. Williams and T. Wei., Measurement of hydrodynamic force generation by swimming dolphins using bubble DPIV. J. Exp. Bio. (2014) 217, 252-260 doi:10.1242/jeb.087924



Tourbillon généré par un coup de grand amplitude de la queue d'un dauphin.



Tourbillons dans un éventail de microbulles générés par les oscillations de la queue d'un dauphin

Des nos jours, la bio ingénierie déplie se ailes dans plusieurs directions. Pourquoi pas regarder les serpents. Les serpents?

Oui, on étudié* le vol plané de serpents du genre *Chrysopelea paradisi* dont leur section transversale est adaptative. Celle-ci change de circulaire vers une aile portante triangulaire lorsque le serpent plane.

Sur la figure suivante, on compare le coefficient de portance du serpent avec celui de divers profils aérodynamiques, en fonction du nombre de Reynolds.

*D. Holden, J. Socha,, N.D. Cardwell and P.P. Vlachos., Aerodynamics of the flying snake *Chrysopelea paradisi*: how a bluff body cross-sectional shape contributes to gliding performance J. Exp. Bio. (2014) 217, 382-394 doi:10.1242/jeb.090902



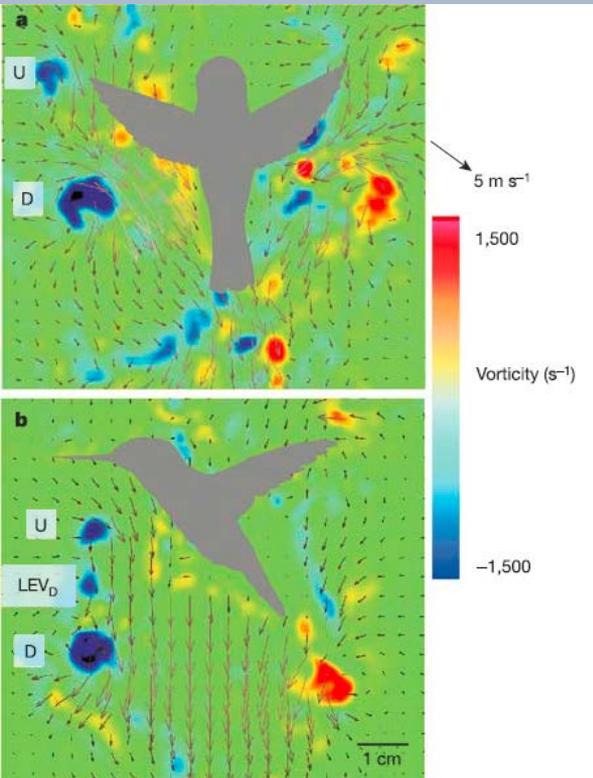
TIMESVIDEO



Le colibri possède une anatomie unique que lui permet de faire du vol stationnaire et, même de voler en arrière. La fréquence de battement des ailes est très élevée. En déplacement régulier, elle peut atteindre 80 battements/seconde, selon les espèces.

La performance aérodynamique de cet oiseau a attiré un nombre croissant de chercheurs des milieux biologiques et de la mécanique des fluides*. En effet, l'absence de déplacement permet de analyser les tourbillons qui ne sont générés que par le mouvement des ailes lors du vol stationnaire.

*Warrick, D. R., Tobalske, B. W. and Powers, D. R. (2005). Aerodynamics of the hovering hummingbird. *Nature* **435**, 1094-1097.



L'importance réside dans le fait que le sillage des tourbillons est une sorte “d’empreinte” des forces aérodynamiques agissant sur le colibri. On peut ainsi mieux comprendre sa performance.

Sur les figures*, au point de transition ascendant-descendant, on illustre le champ de vitesse ainsi que des tourbillons générés durant les mouvements ascendant (U) et descendant (D).

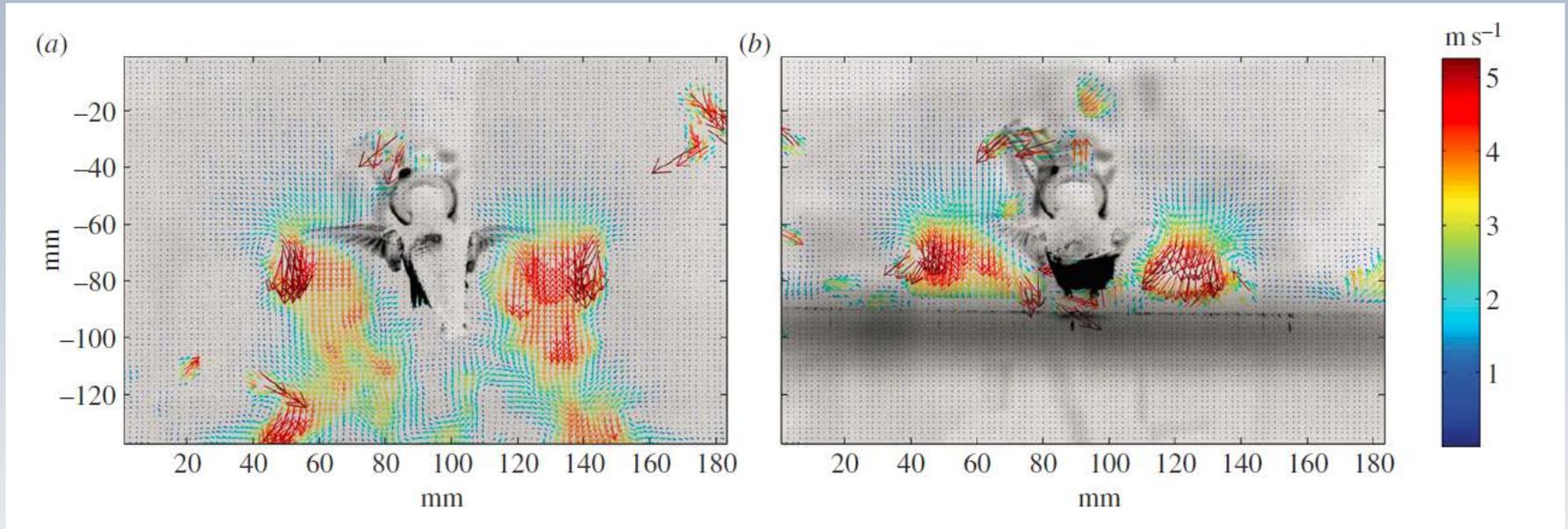
*Warrick, D. R., Tobalske, B. W. and Powers, D. R. (2005). Aerodynamics of the hovering hummingbird. *Nature* **435**, 1094-1097.

L'étude de Warrick* a conclut que 75% de la portance pour équilibrer le poids du colibri est obtenue lors du mouvement descendant et que seul 25% est due au mouvement ascendant.

Le nombre de Reynolds basé sur la corde des ailes varie de 5000 à 20000. Cependant, ce n'est pas encore déterminé si l'écoulement autour du colibri est laminaire ou turbulent

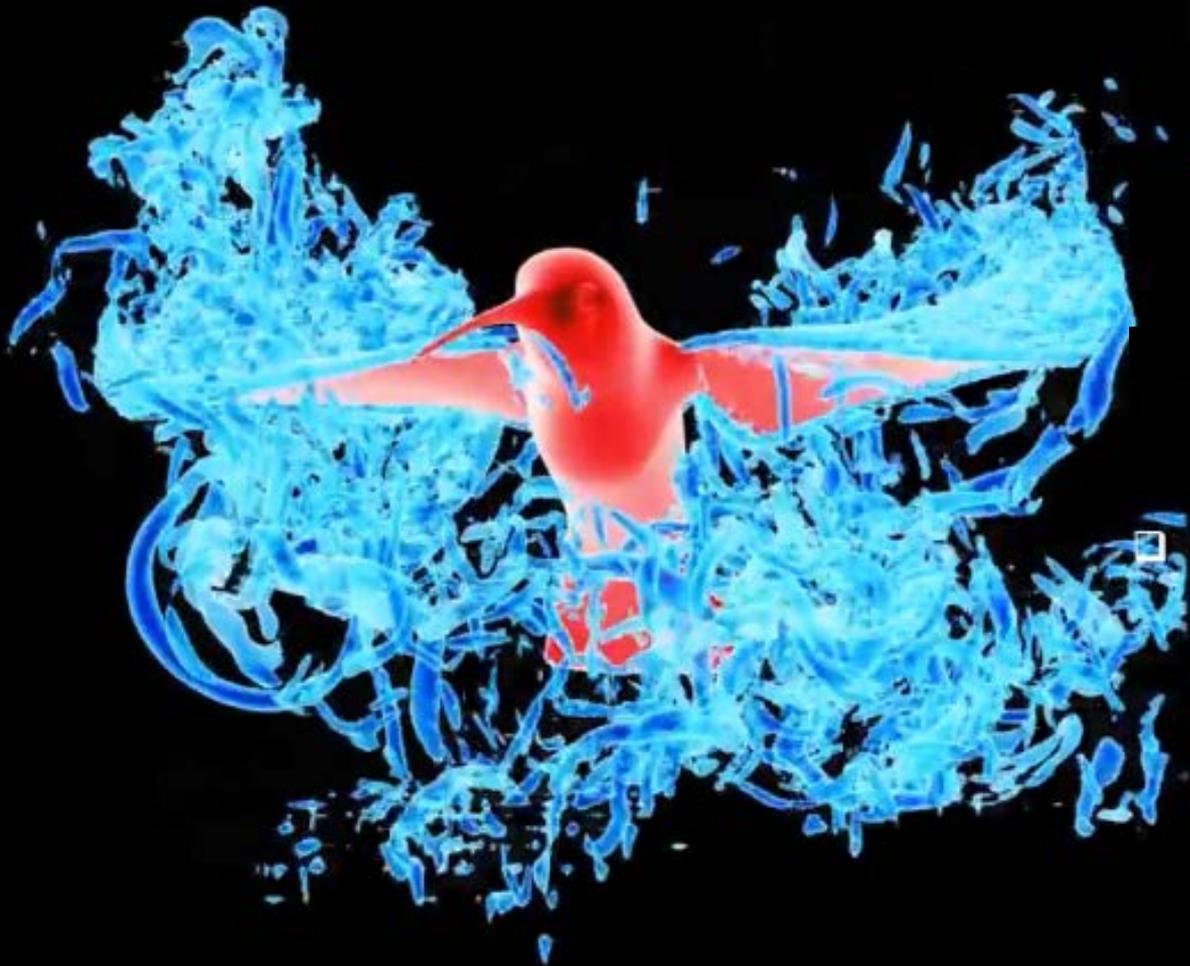
Des recherches récentes** suggèrent que, comme les hélicoptères, les colibris bénéficient de l'effet de sol (gain en portance) lorsqu'ils se positionnent à une distance inférieure à 1.7 fois l'envergure des ailes

**Kim EJ, Wolf M, Ortega-Jimenez VM, Cheng SH, Dudley R. 2014 Hovering performance of Anna's hummingbirds (*Calypte anna*) in ground effect. *J. R. Soc. Interface* 11: 20140505.



Champ de vitesse obtenu par PIV lorsque l'effet de sol est présent à 4 cm du sol (à gauche) et sans effet de sol, à 9 cm (à droite).

**Kim EJ, Wolf M, Ortega-Jimenez VM, Cheng SH, Dudley R. 2014 Hovering performance of Anna's hummingbirds (*Calypte anna*) in ground effect. *J. R. Soc. Interface* 11: 20140505.



Les combinaisons pour les nageurs fabriqués par *Speedo* et par la société *Jaked*, qualifiées de "*dopage technologique*" par ses détracteurs, s'attaquent à la diminution de la résistance à l'avancement sur trois fronts:

- Réduction de la traînée de pression par contention musculaire sur l'ensemble du corps ("allongement du corps")
- Réduction de la traînée de frottement grâce à des rainures ultrafines (riblets) inspirées de la peau des requins. Ceci est jumelé à un tissu hydrophobe de sorte que l'eau glisse sur la combinaison.
- Augmentation de la flottaison produite par l'air attrapé dans la combinaison. De cette façon, le nageur peut se concentrer davantage la propulsion.



- On a regardé les forces de **traînée** et de **portance** engendrées par le mouvement d'un corps dans un fluide
- Dans un cadre général, on a accordé une attention spécifique à **la traînée** qui est directement reliée à **la consommation énergétique**
- En régime incompressible, et en **2D**, on a distingué une **traînée de frottement** due au cisaillement pariétal et une **traînée de forme ou de pression**, causée par le décollement de l'écoulement de l'objet.

- Les pertes causées par le déplacement d'un objet immergé sont concentrées au *voisinage de la paroi et dans les sillages*. On a regardé alors les résultats les plus importants de **la théorie de la couche limite** pour quantifier ces pertes **en régime laminaire**
- Deux approches ont été présentées pour le calcul du coefficient de traînée C_D lors d'un écoulement sur **une plaque plane en régime laminaire** : les solutions de *Blasius* et de *von Karman*

- La solution de *Blasius* (plus précise) mène à l'expression

$$C_D = 1.33 / Re_L^{1/2}$$

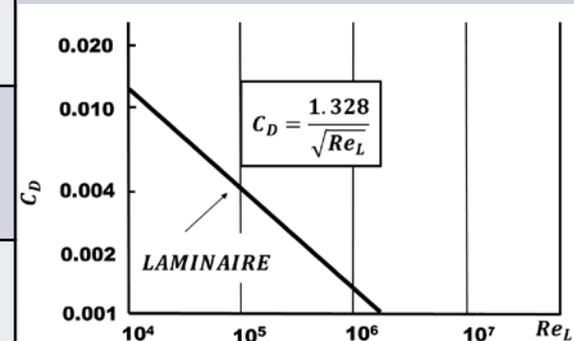
où $Re_L = UL/\nu$ indique le nombre de Reynolds évalué à l'extrémité L de la plaque.

- L'ensemble de formules utiles pour un écoulement laminaire se retrouve au tableau suivant:

Résumé IV

Écoulement laminaire

Paramètre	Définition
$\delta(x) = \frac{5x}{Re_x^{1/2}}$	Épaisseur de la couche limite à la position x
$\tau_w = \frac{0.332\rho U_0^2}{Re_x^{1/2}}$	Contrainte locale de cisaillement pariétal
$C_f(x) = \frac{0.664}{Re_x^{1/2}}$	Coefficient de frottement local
$C_D = 1.328Re_L^{-1/2}$	Coefficient de traînée global pour une plaque de longueur L



- Le seuil laminaire-turbulent est estimé à $Re_L = 5 \times 10^5$
- Pour un écoulement turbulent sur une plaque, la formule de Prandtl (**paroi lisse**) permet d'estimer le coefficient de traînée C_D

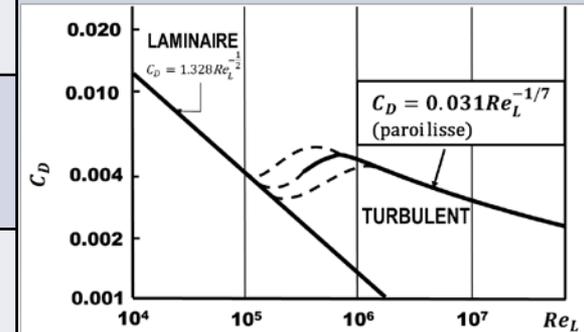
$$C_D = 0.031 / Re_L^{-1/7}$$

- L'ensemble de formules utiles pour un écoulement turbulent se retrouve au tableau suivant:

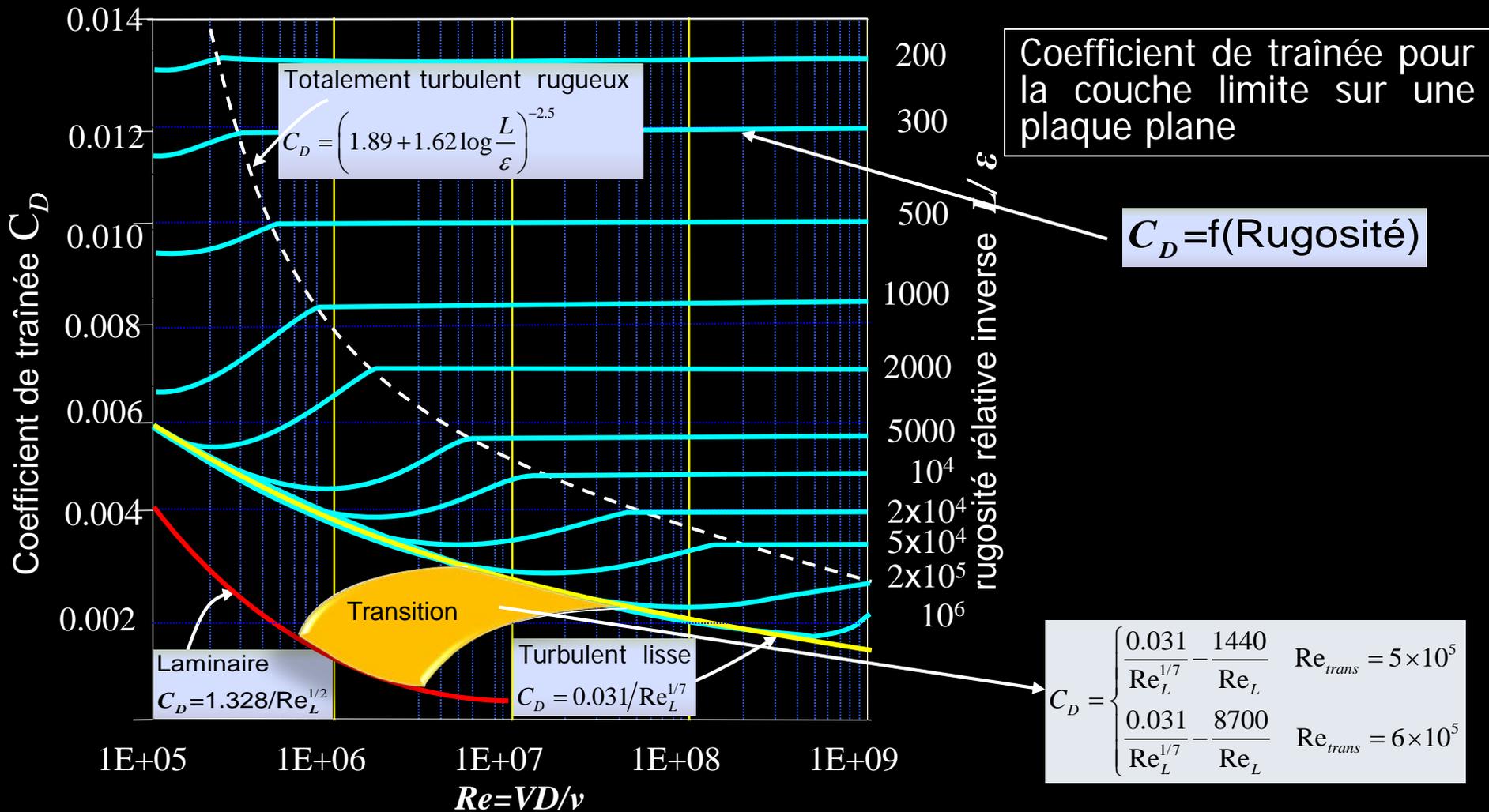
Résumé VI

Écoulement turbulent

Paramètre	Définition
$\delta(x) = \frac{0.16}{Re_x^{1/7}}$	Épaisseur de la couche limite à la position x
$\tau_w = \frac{0.0075\rho U_0^2}{Re_x^{1/7}}$	Contrainte locale de cisaillement pariétal
$C_f(x) = \frac{0.027}{Re_x^{1/7}}$	Coefficient de frottement local
$C_D = 0.031Re_L^{-1/7}$	Coefficient de traînée global pour une plaque (« lisse ») de longueur L

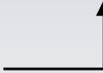


- Si l'on veut tenir compte de la rugosité de la paroi, on peut utiliser un abaque, comparable à celui de Moody employé pour les écoulements dans des conduites
- On note que le coefficient C_D augmente avec la rugosité



- Les coefficients de traînée de quelques géométries de base trouvés dans la littérature ont été repris. Les coefficients de certains véhicules de transport terrestre ont aussi été présentés.
- Une fois le coefficient C_D connu, on peut calculer la force de traînée D utilisant la formule:

$$D = C_D A \rho U^2 / 2$$

Aire caractéristique A connue 

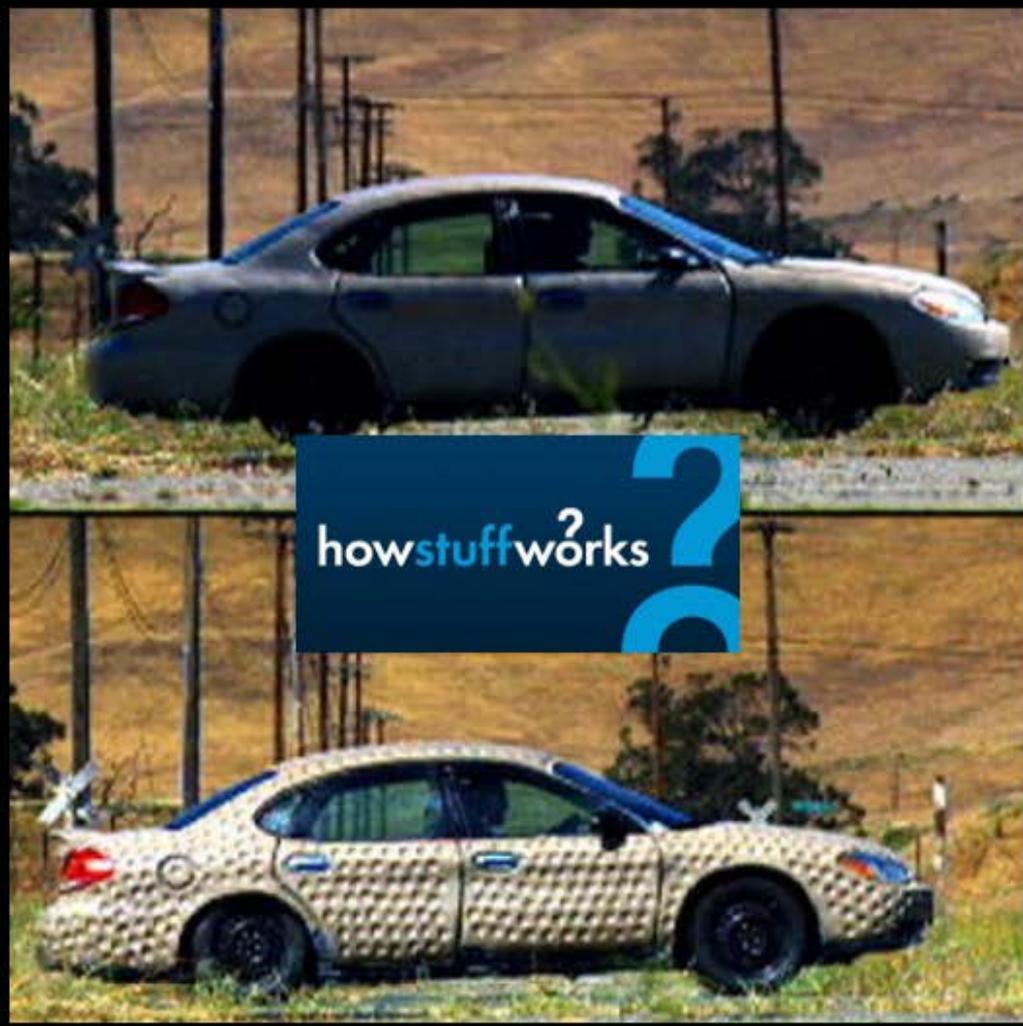
où U indique la **vitesse relative** de l'écoulement et ρ la masse volumique du fluide.

- Une fois que la **force de traînée** D , est connue, on peut calculer la **puissance (énergie)** $P = DU$ associée au déplacement d'un corps (véhicule) à une vitesse U
- L'étude de la traînée est un défi pour l'ingénieur moderne afin de réduire la puissance consommé par un véhicule de transport: voiture train, avion, navire, et la production des gaz à effet de serre*

*Le secteur du transport génère environ un quart des émissions de gaz à effet de serre,"Rapport d'inventaire national 1990-2010 : Sources et puits de gaz à effet de serre au Canada", 2012.

- Aujourd'hui, le génie s'inspire des espèces vivantes pour optimiser la conception de nouvelles formes aéro(hydro)dynamiques.
- Les coefficients de traînée de quelques espèces biologiques ont été rapportés. Le mécanisme de contrôle de la couche limité employé par les requins et les dauphins a été mentionné.





howstuffworks?

Solving for
the Force of Drag
on an
Accelerating Car





Average Power
Delivered by a
Car Engine

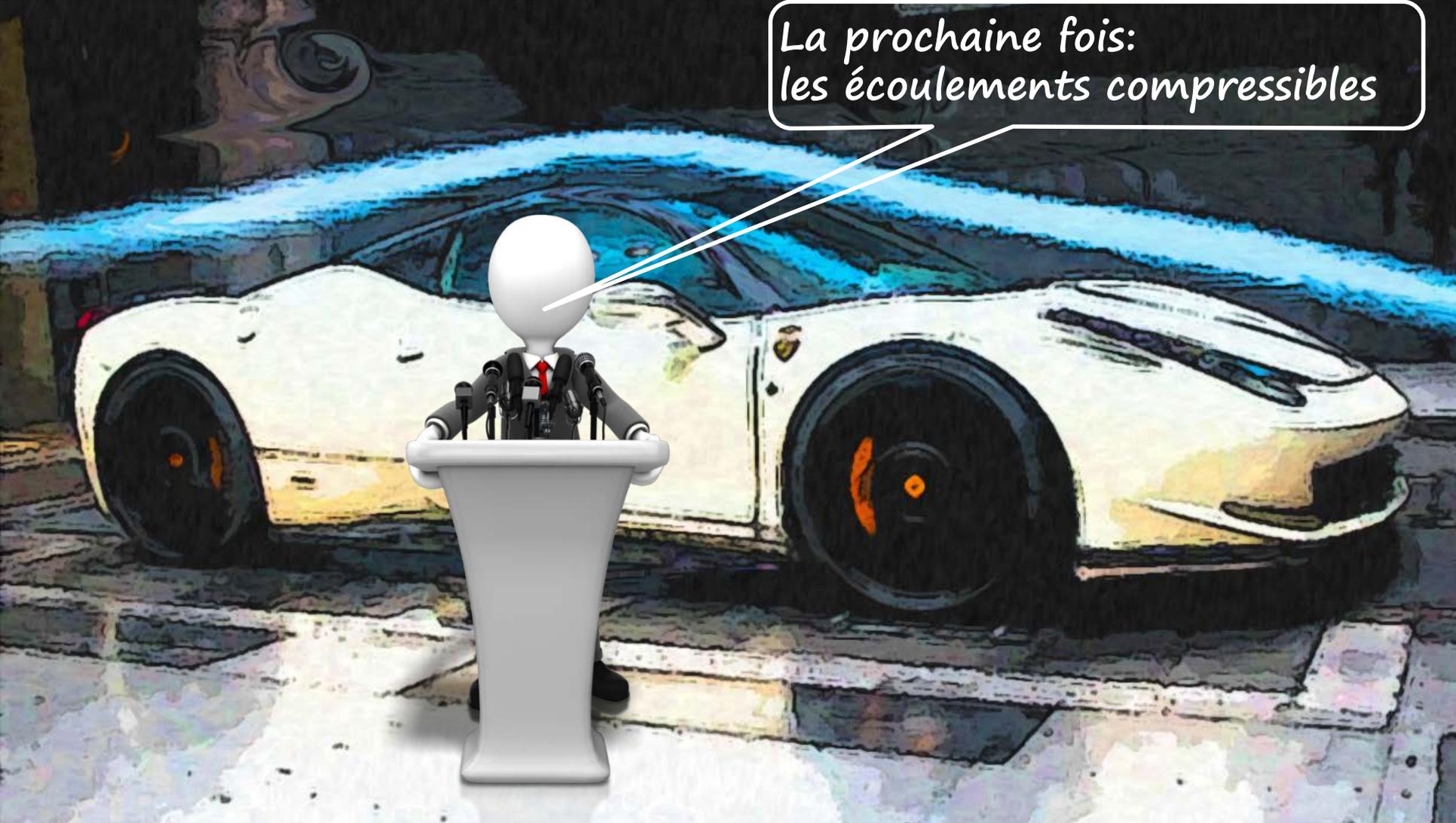




Instantaneous Power
Delivered by a
Car Engine

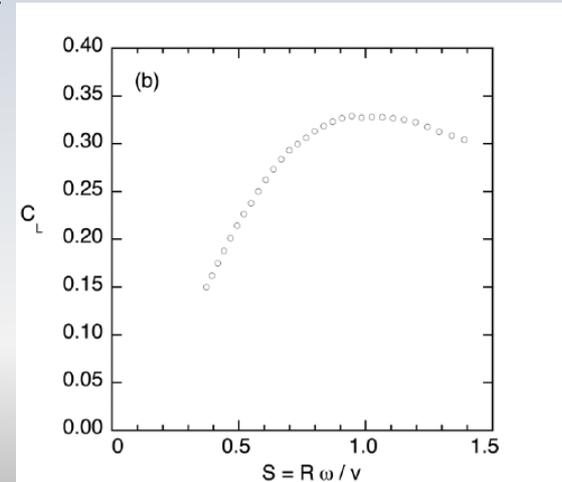


*La prochaine fois:
les écoulements compressibles*



Le coefficient de portance C_L d'une balle en rotation avec une vitesse angulaire ω , dans un écoulement avec une vitesse (relative) U , peut être exprimé en fonction du *taux de rotation* $S=R\omega/U$, où R indique le rayon de la balle. Ce chiffre adimensionnel exprime le rapport de la vitesse tangentielle de la balle et celle de la vitesse de l'écoulement U

$$F_L = C_L A \rho U^2 / 2$$

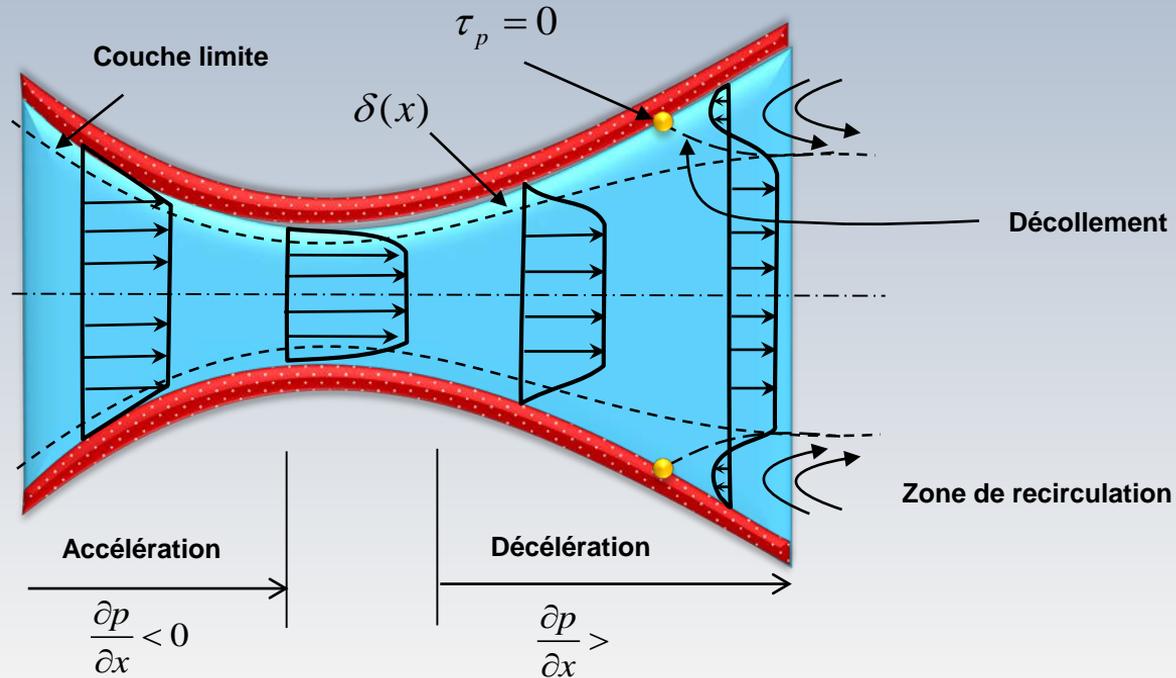


Lorsqu'une balle se déplace dans un fluide et qu'en même temps tourne sur elle même, le frottement modifie la vitesse du courant de manière dissymétrique. D'un côté, la vitesse du courant et la vitesse de rotation s'ajoutent, le fluide s'accélère et la pression diminue. De l'autre côté, la rotation de la balle freine l'écoulement et la pression augmente. Comme conséquence, une force de portance est générée, la balle se déplace du côté où la pression est plus faible et sa trajectoire devient une courbe.

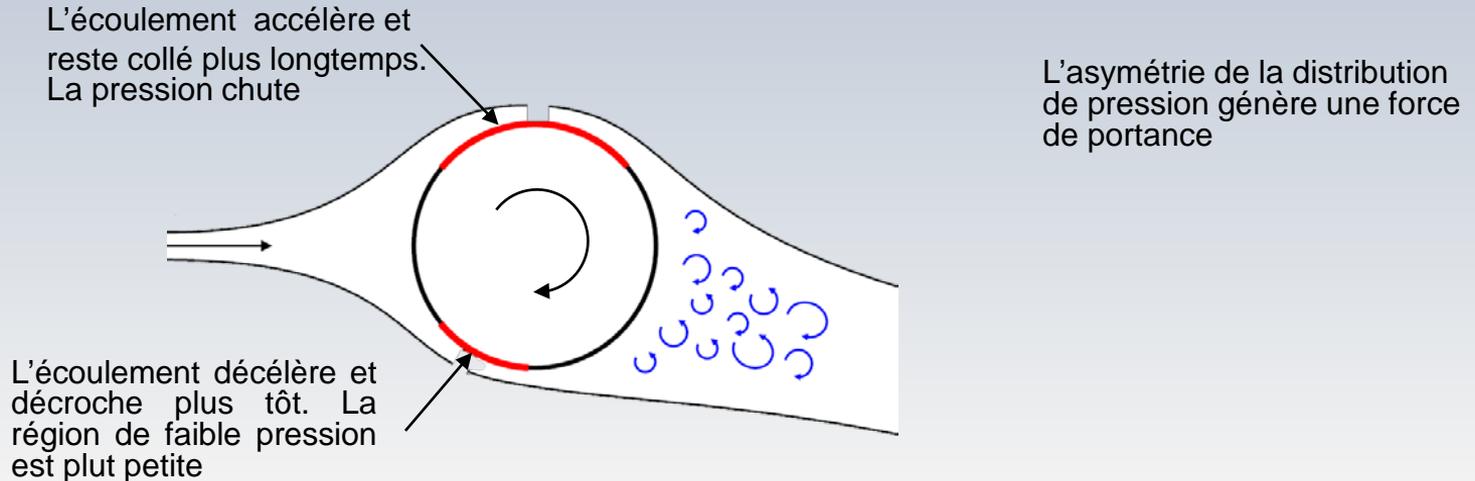
Ce phénomène, est nommé **effet Magnus** en honneur du scientifique Heinrich G. Magnus (1802-1870) qui l'a découvert.

CL dans un convergent-divergent

7.5 Couche..

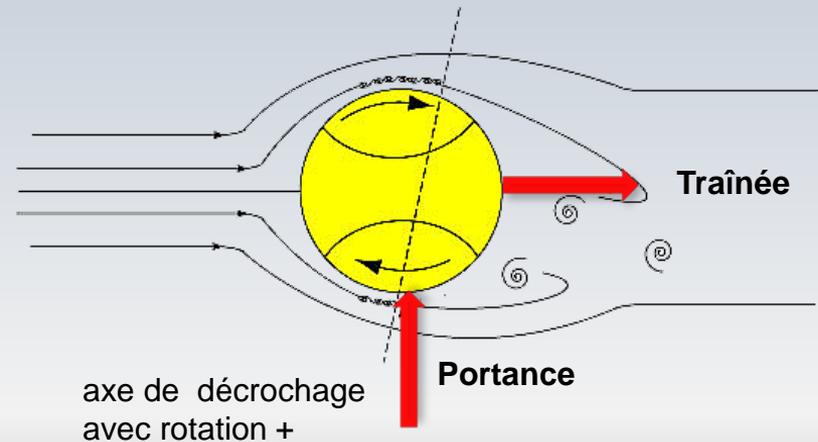
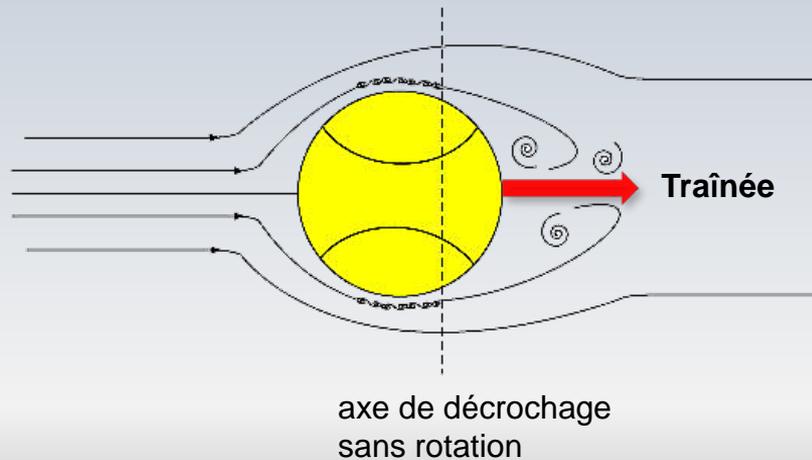


Le point décrochage de la couche limite se déplace vers l'avant du coté où l'écoulement est ralenti le plus, puisque gradient le pression adverse est plus fort.



L'effet Magnus III

On note ainsi que l'axe de décrochage tourne dans le même sens que celui de la rotation de la balle. Il n'est plus alors orthogonal à la direction de l'écoulement (ou celle de la balle) en amont



Exemple 7.5

Une véhicule se déplaçant à $V=100 \text{ m/s}$ freine à l'aide d'une parachute
Calculer la distance parcourue par le véhicule ainsi que sa vitesse
après 1, 10, 100 et 1000 s.

Données: $m = 2000 \text{ Kg}$; $C_{Dc} = 0.3$; $A_c = 1 \text{ m}^2$, $\rho_{\text{air}} = 1.2 \text{ kg/m}^3$

Solution:

2ème loi de Newton, selon x

$$F_x = m \frac{dV}{dt} = -F_c - F_p = -\frac{1}{2} \rho V^2 (C_{Dc} A_c + C_{Dp} A_p) \rightarrow$$

$$\int_{v_0}^v \frac{dV}{V^2} = -\frac{K}{m} \int_0^t dt$$

$$K = \frac{\rho}{2} \sum C_D A$$

$$\rightarrow V_0^{-1} - V^{-1} = -\frac{K}{m} t$$

$$\rightarrow V = \frac{V_0}{1 + (K/m)V_0 t}$$

Intég

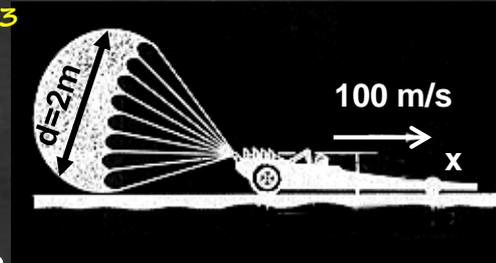
$$S = \frac{V_0}{\alpha} \ln(1 + \alpha t)$$

$$\alpha = \frac{K}{m} V_0$$

Table

$$\rightarrow C_{Dp} \approx 1.2$$

$$C_{Dc} A_c + C_{Dp} A_p = 0.3 \times 1 \text{ m}^2 + 1.2 \times \pi (2 \text{ m})^2 / 4 = 4.07 \text{ m}^2$$



Exemple 7.5

Solution:

$$C_{Dc}A_c + C_{Dp}A_p = 0.3 \times 1\text{m}^2 + 1.2 \times \pi(2\text{m})^2 / 4 = 4.07\text{m}^2$$

$$K = \frac{\rho}{2} \sum C_D A = \frac{1.2}{2} \times 4.07\text{m}^2 = 2.442 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

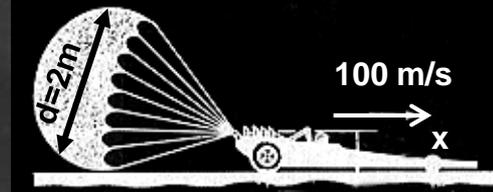
$$V = \frac{V_0}{1 + (K/m)V_0 t}$$

$$\alpha = \frac{K}{m} V_0 = \frac{2.442\text{kg/m}}{2000\text{kg}} \times 100\text{m/s} = 0.122(1/s)$$

$$S = \frac{V_0}{\alpha} \ln(1 + \alpha t)$$



$$S = \frac{100}{0.122} \ln(1 + 0.122t)$$



$$V_0 = 100\text{ m/s}$$
$$m = 2000\text{ kg}$$

t(s)	1	10	100	1000
V (m/s)	89	45	7.6	0.8
S (m)	94	654	2110	3940

