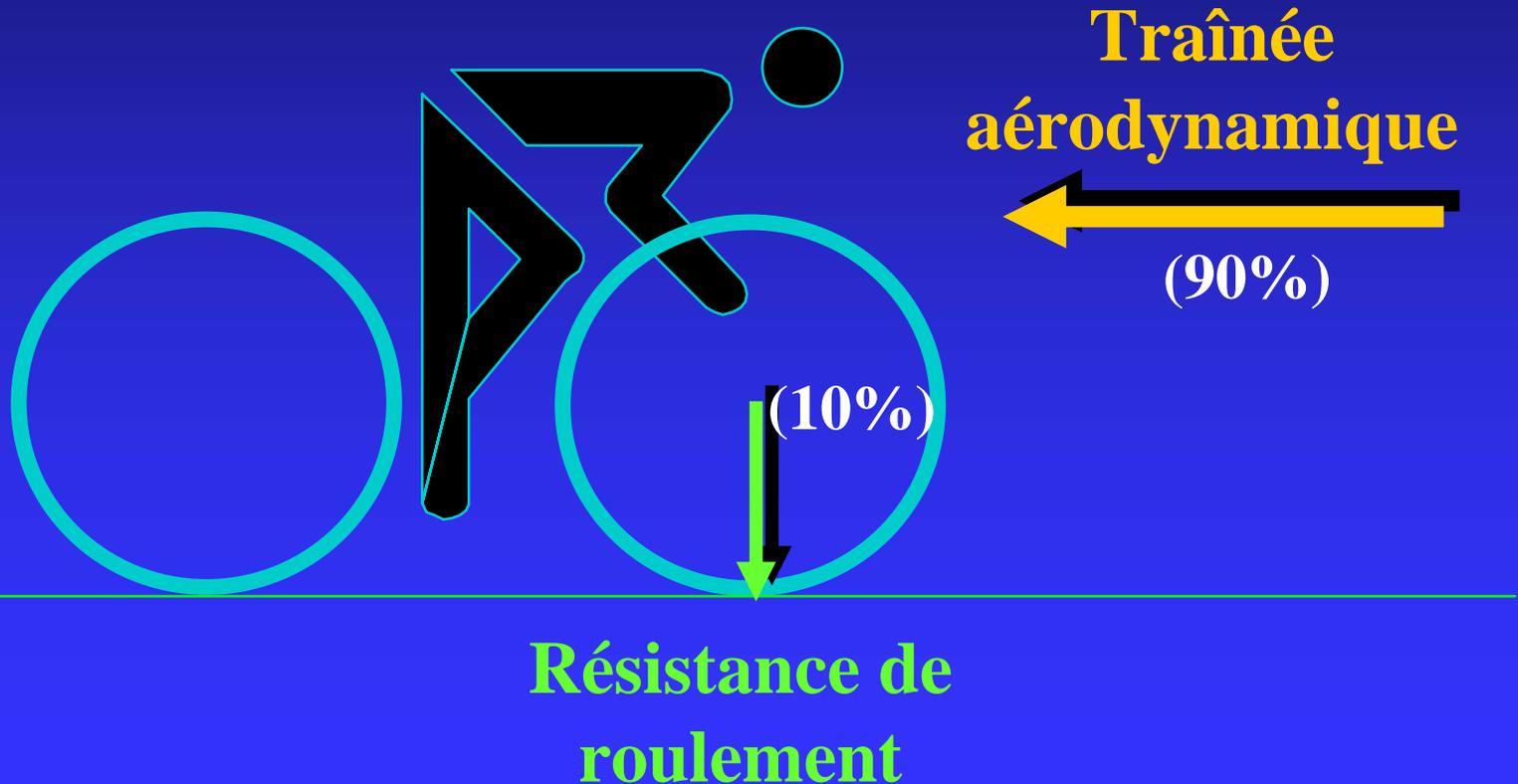
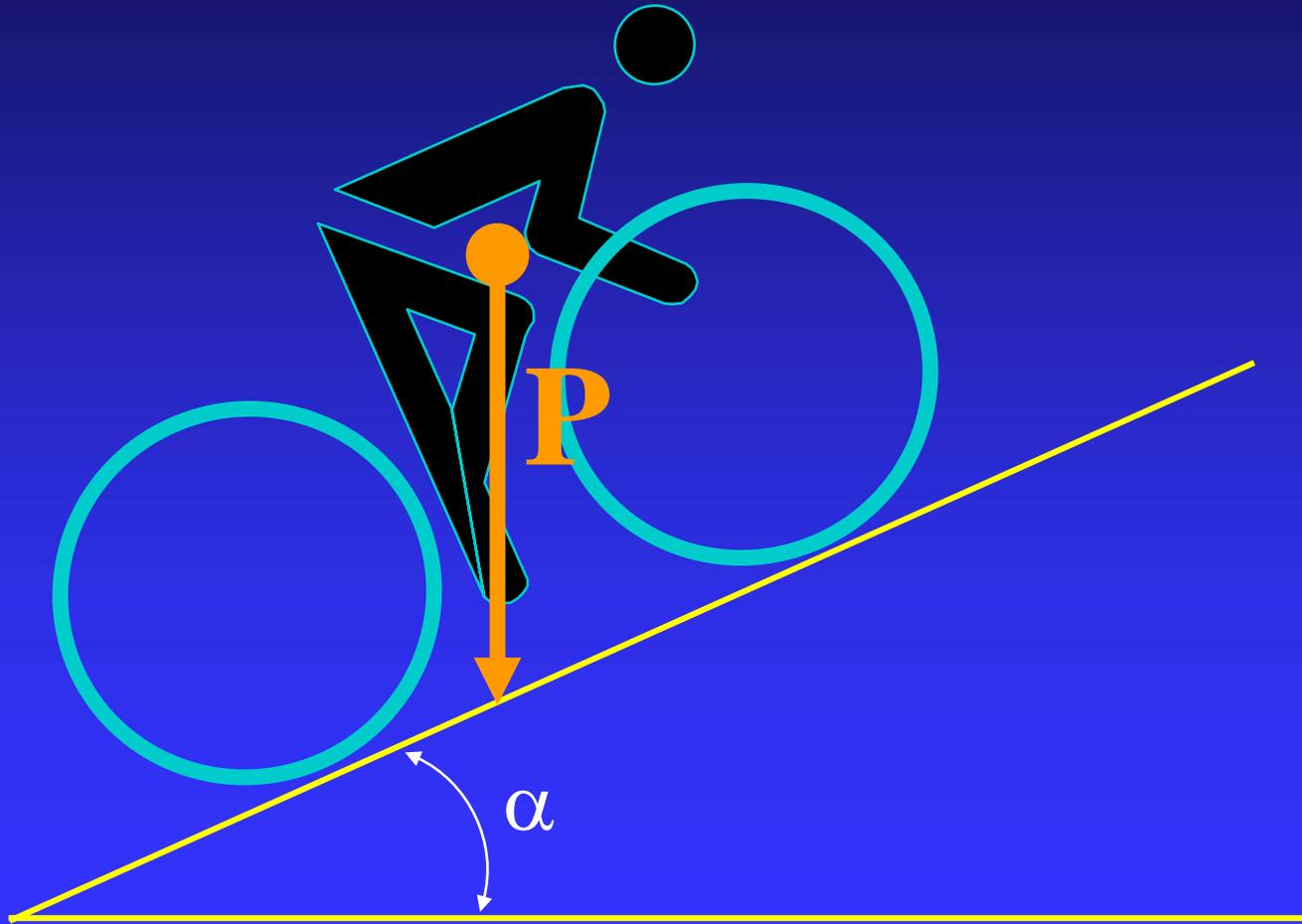


# Résistances à l'avancement

# Résistance totale à l'avancement



# Importance de la gravité dans les montées



# Résistance totale à l'avancement ( $R_T$ ) lors de la locomotion terrestre

$$R_T \equiv R_a + R_r + R_g$$

Trainée aérodynamique

(X%)

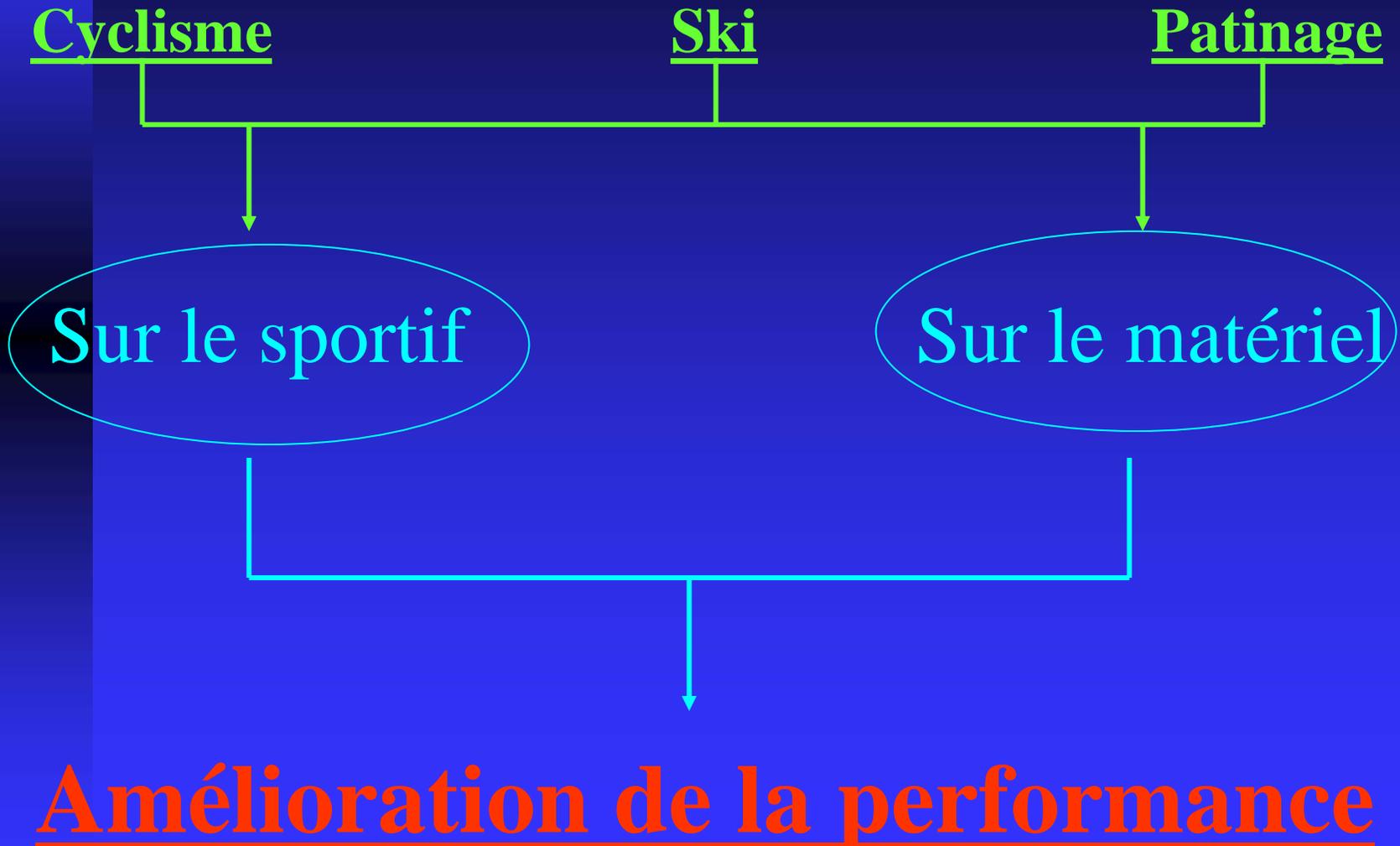
Résistance de roulement

(Y%)

# **Résistance de l'air :**

## **Traînée et portance aérodynamiques**

# Objectifs de la mesure de la résistance à l'avancement dans le milieu sportif



# Importance de la recherche sur la résistance à l'avancement au niveau sportif

Cyclisme ++++++

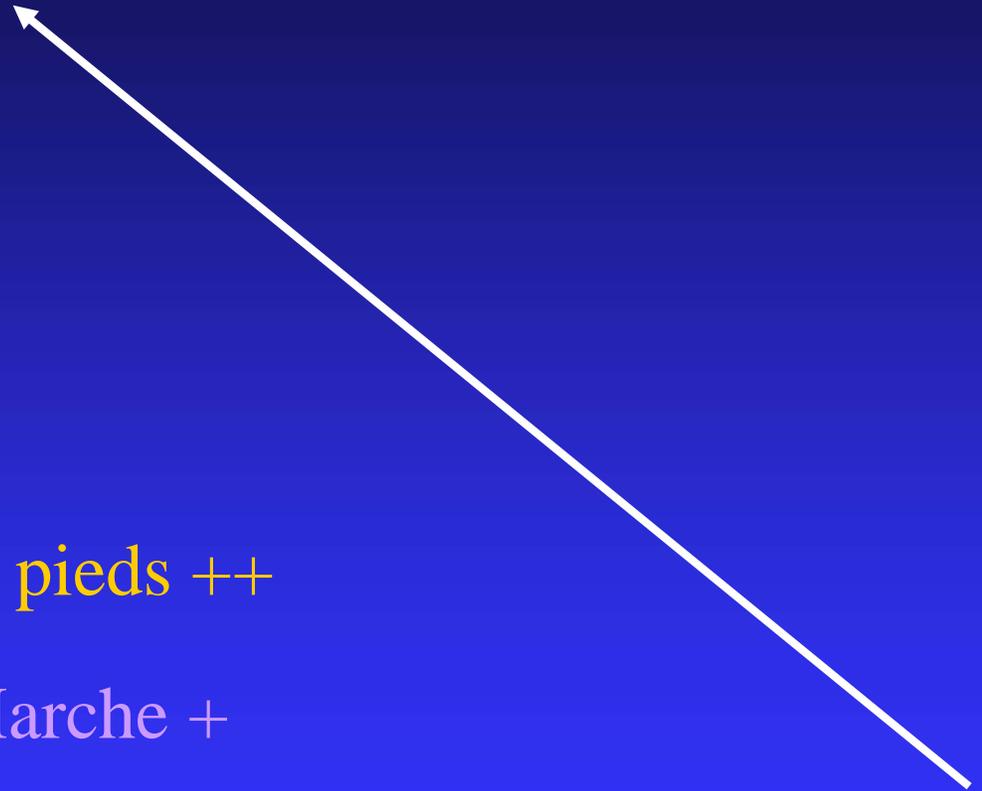
Ski ++++

Patinage +++

Course à pieds ++

Marche +

Véhicule à propulsion humaine +



# ATTENTION !!!



La résistance aérodynamique ne représente qu'une partie de la résistance à l'avancement dans les fluides



Résistance aérodynamique

Poids

Résistance de friction

- ski-neige
- glace-patin
- route-pneu

*Traînée*

*Portance*

*aérodynamique*

**Théoriciens**



**Eiffel (1909)**



Recherches expérimentales sur la résistance de l'air effectuées pour la construction de la Tour Eiffel



Terme originel  
Résistance aérodynamique



Pression exercée par le vent sur des objets solides pour une vitesse donnée

**Hoerner (1965)**



Livre sur la résistance à l'avancement dans les fluides

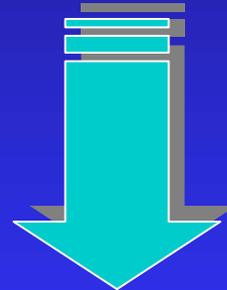
# Premières investigations au niveau sportif



**DU BOIS-REYMOND (1925)**

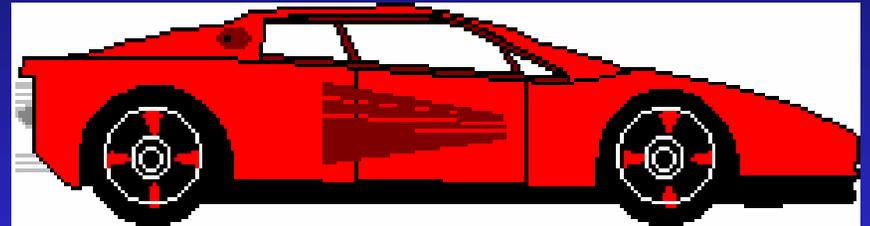
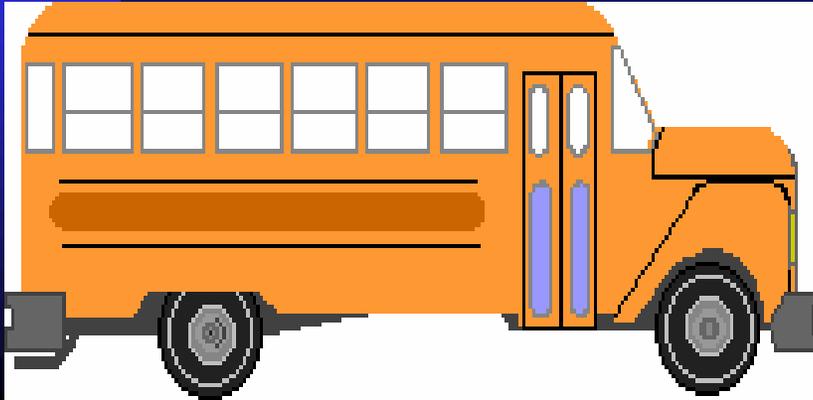


**HILL (1927)**



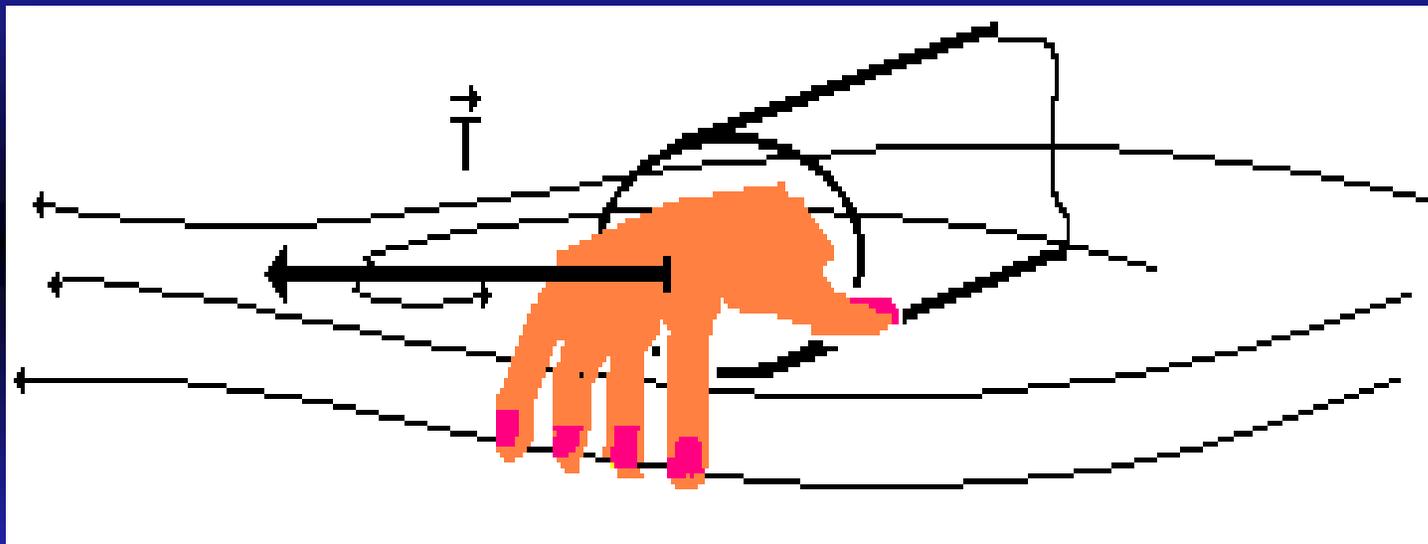
*Analyse de l'influence de la  
résistance aérodynamique  
en course à pieds*

# LA TRAINEE

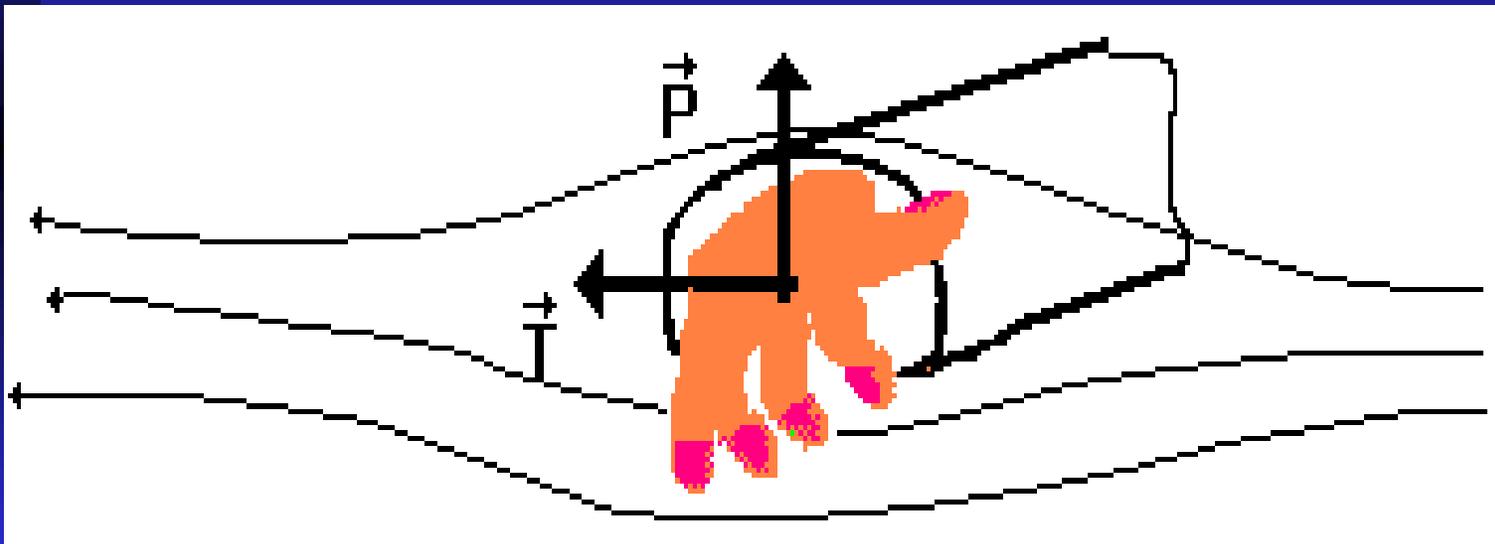


La carrosserie profilée d'une voiture de sport offre moins de résistance à l'air qu'un bus aux formes carrées. Elle a moins de traînée de forme et de surface offerte au vent relatif.

Traînée aérodynamique (T, N) qui s'applique sur la main lorsqu'elle est soumise à la force du vent



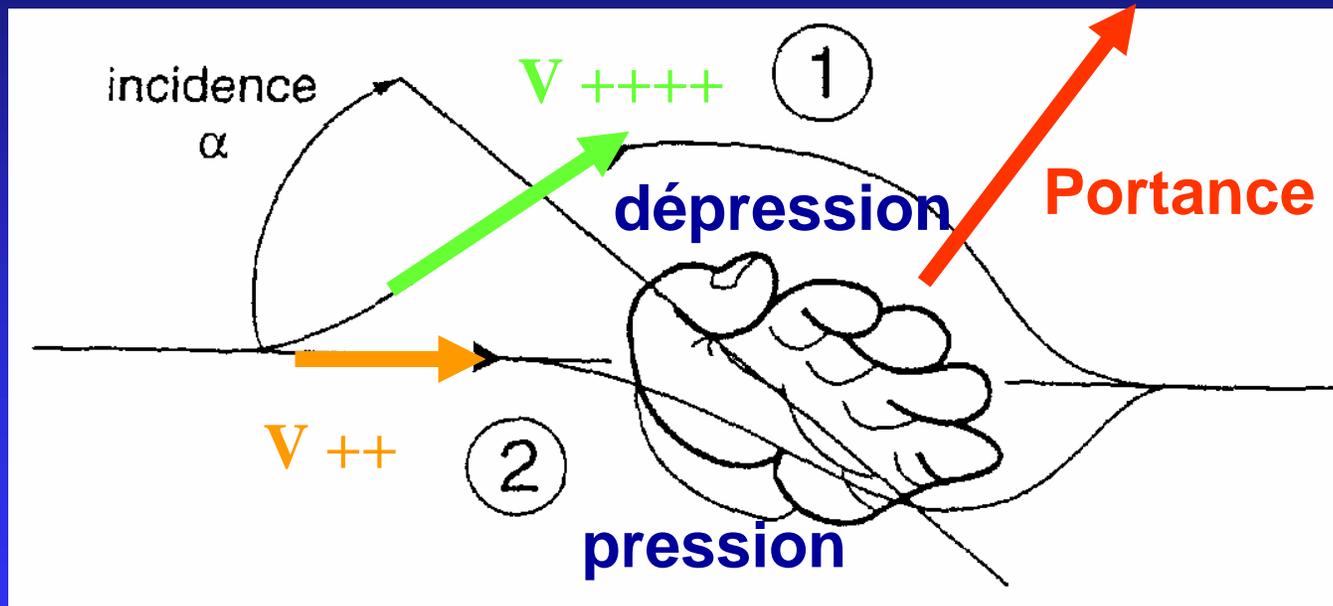
Traînée (T, N) et portance (P, N) qui s'appliquent sur la main lorsqu'elle est soumise à la force du vent et incliné selon une incidence positive



# Phénomène de la portance



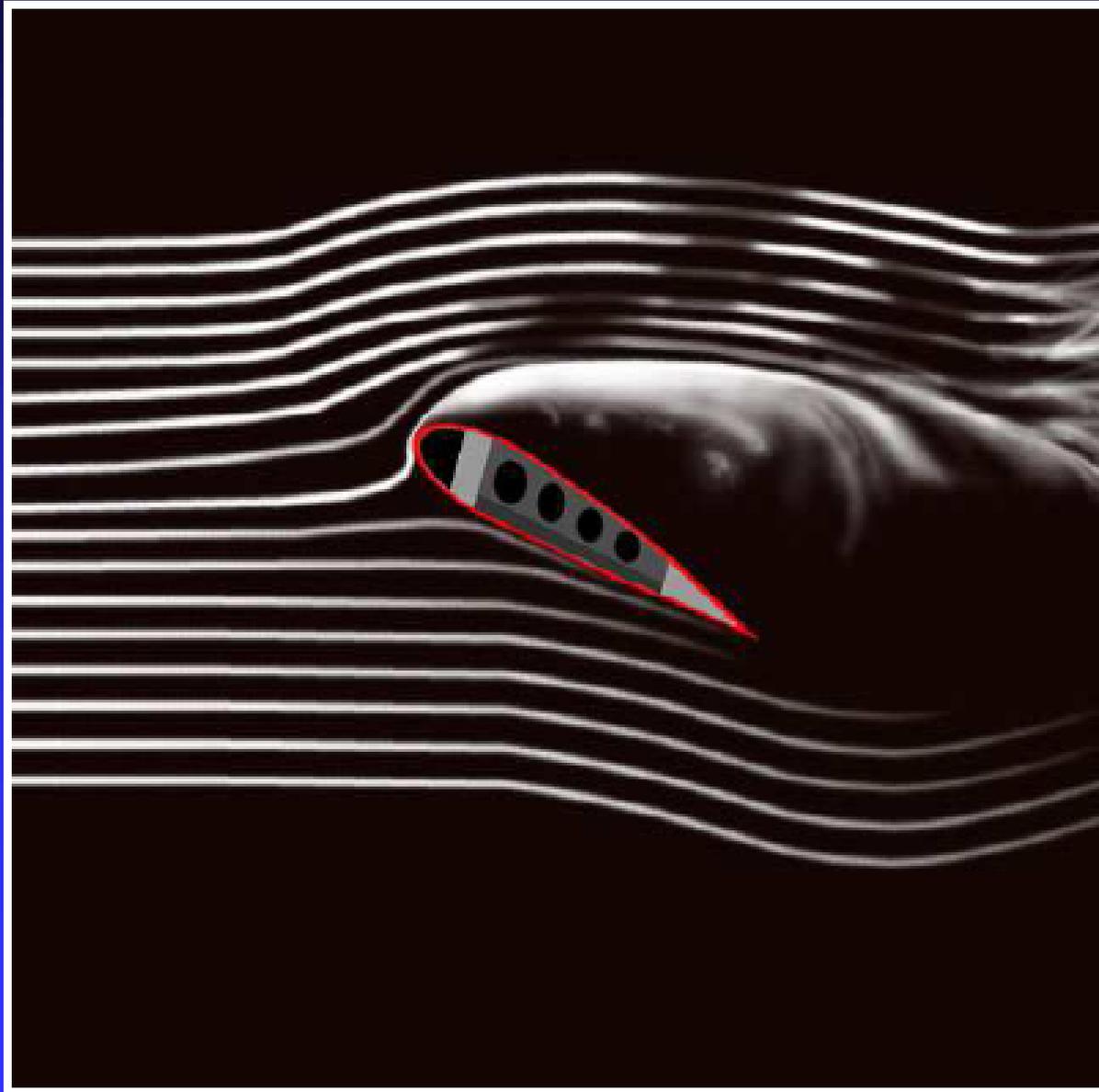
Main inclinée dans le vent



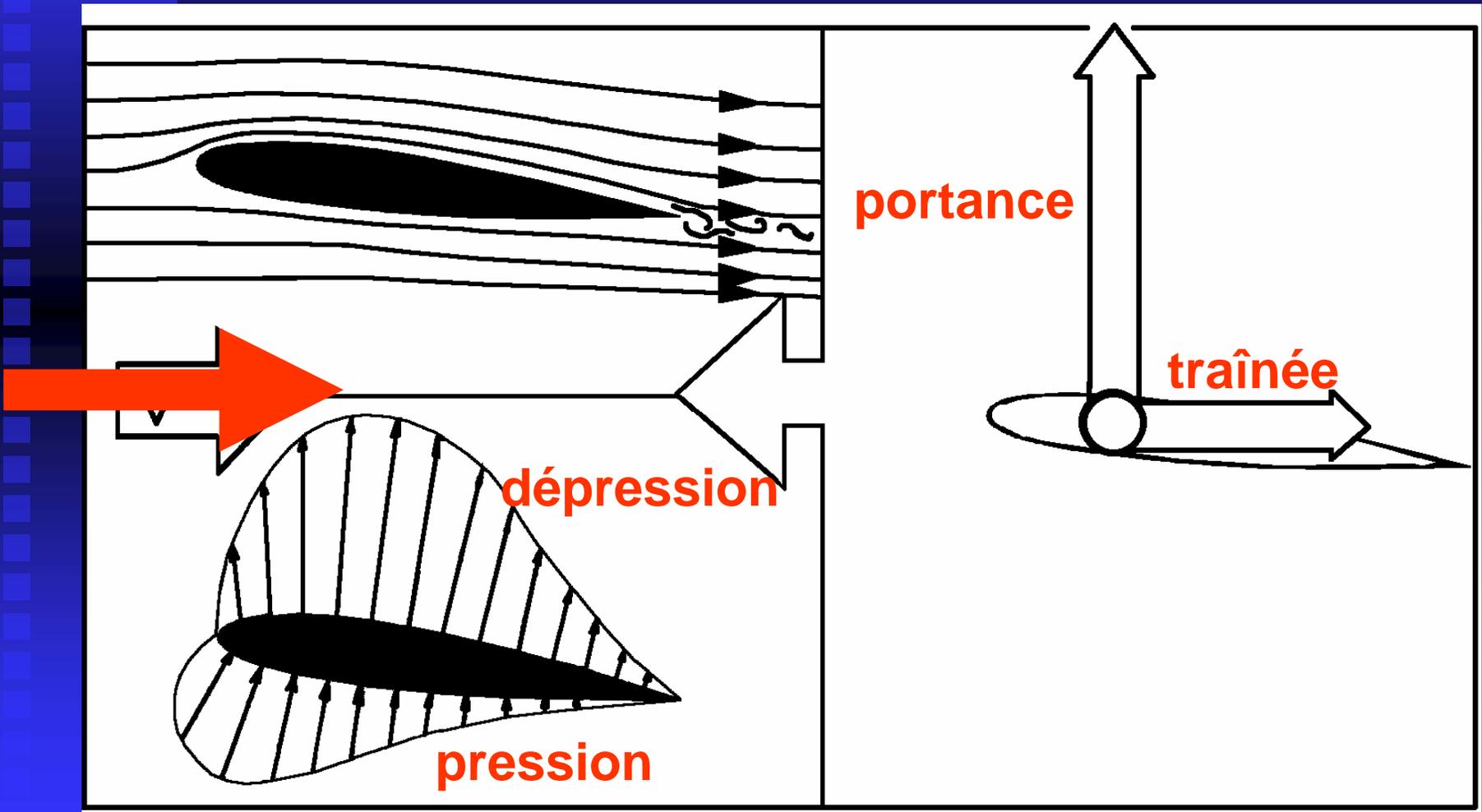
trajet 1 : certains la contournent par le dessus (extrados)

trajet 2 : certains la contournent par le dessous (intrados)

# Écoulement autour d'un profil d'aile d'avion



# Illustration du phénomène de portance sur une forme en aile d'avion

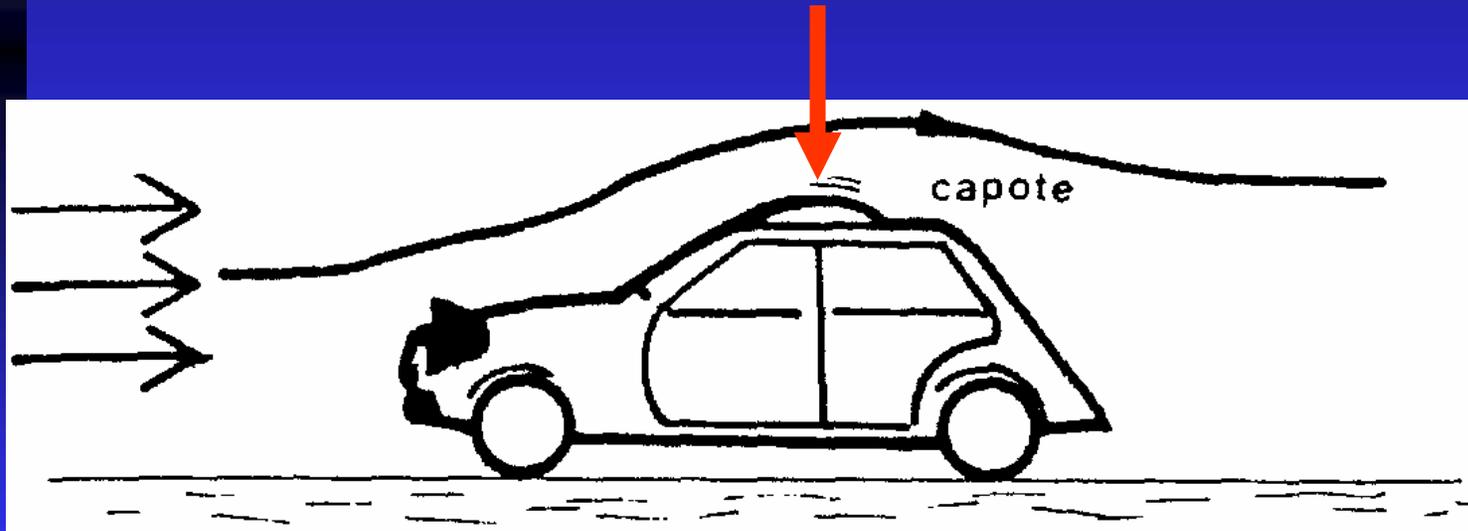


# Pression - dépression



Lorsqu'une 2 CV avance à une certaine vitesse, la bâche à tendance à gonfler

dépression



Lorsque la vitesse d'un écoulement augmente, la pression diminue

# Portance dynamique



résulte de l'action du fluide en mouvement sur le corps

Une force quasi-normale à la vitesse apparaît  
(ricochet d'un caillou plat sur l'eau, ski nautique).

Ce terme est essentiel pour les plus lourd que l'air.

# Portance statique



Correspond à la poussée d'Archimède

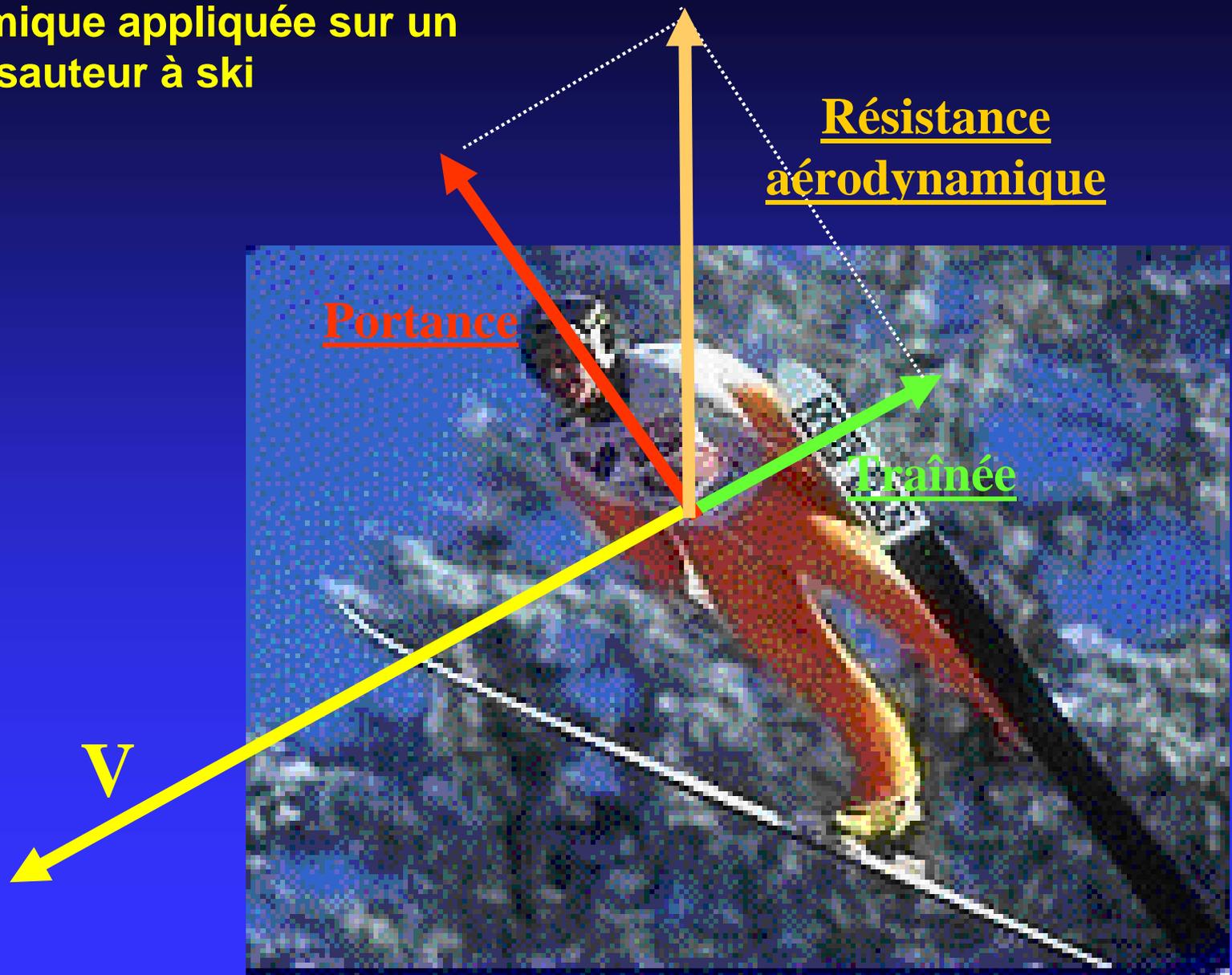
Tout corps plongé dans un fluide subit une poussée verticale, dirigée de bas en haut, égale au poids du fluide déplacé

Ce terme qui représente le poids d'air déplacé est toujours négligeable pour les plus lourds que l'air (y compris les parachutes), mais reste essentiel pour les plus légers que l'air (ballons à hélium, ...)

# Charge aérodynamique d'une formule 1



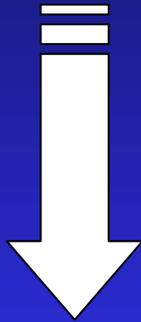
**Composantes de la résistance  
aérodynamique appliquée sur un  
sauteur à ski**



# 2.3

# Écoulements laminaire et turbulent

# Écoulement théorique en fluide parfait

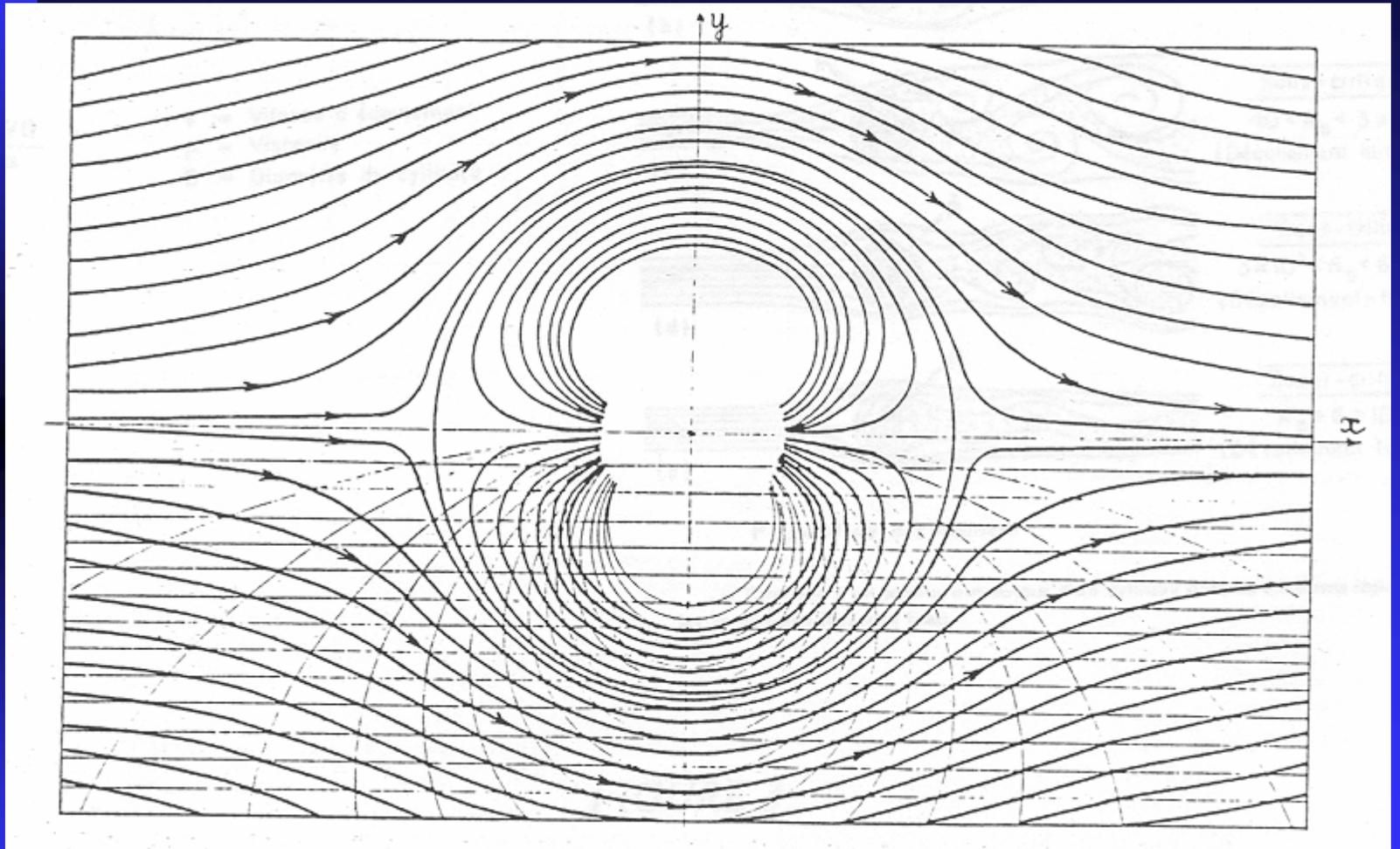


Cas d'un liquide dans un tube



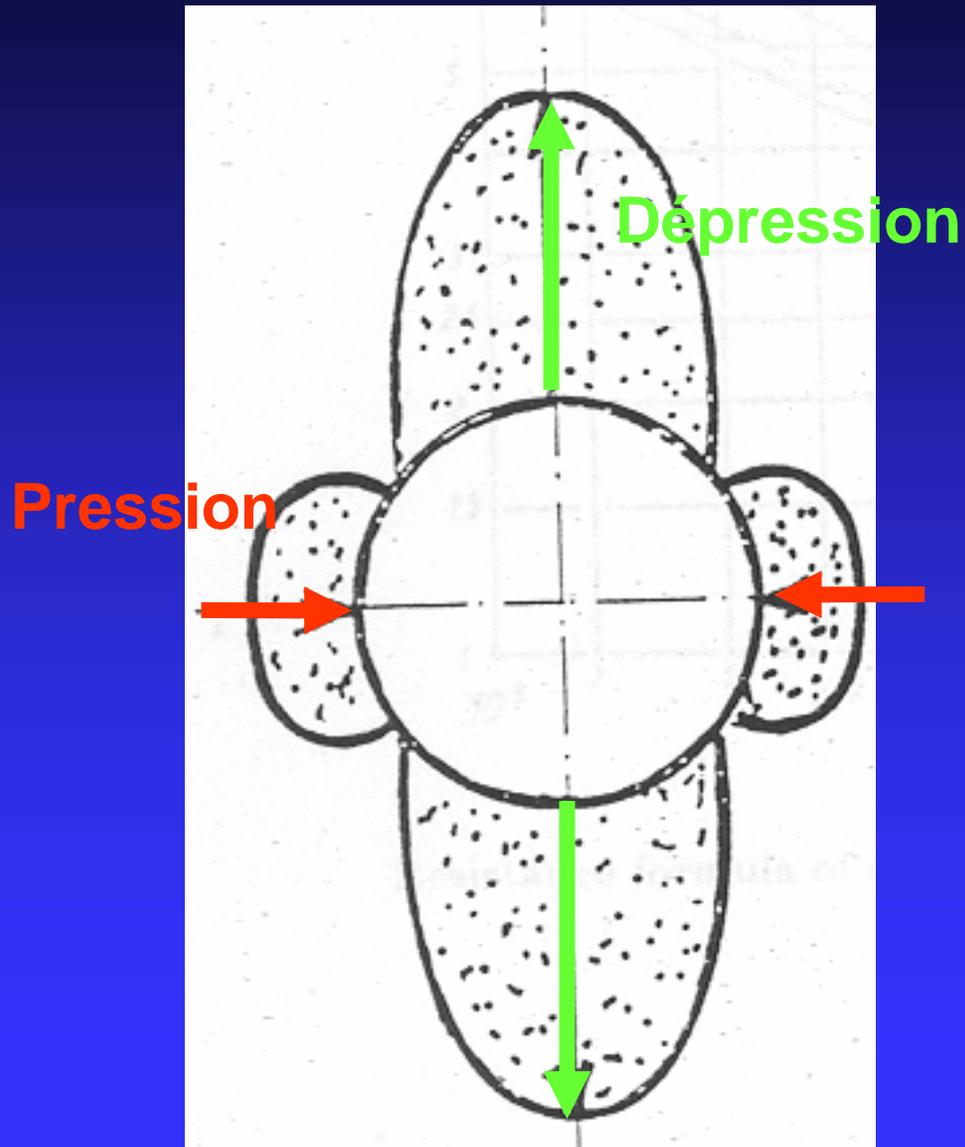
Cas d'un objet qui se déplace

# Illustration du phénomène



L'écoulement est symétrique: aucune résistance à l'avancement

# Écoulement théorique en fluide parfait

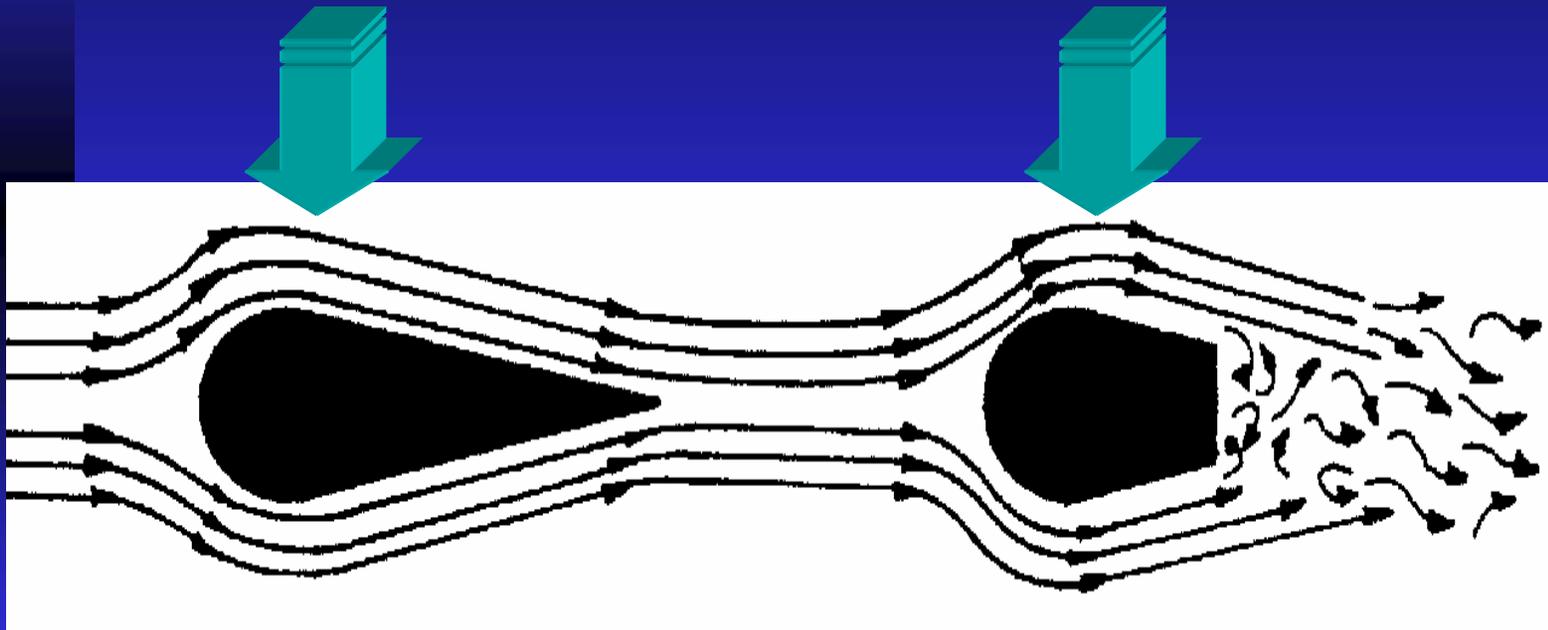


# Écoulement en fluide visqueux

# A - ETUDE DU MOUVEMENT DE L'AIR

Dans un fluide, on étudie le mouvement d'ensemble des particules d'air par ligne de courant. On étudie l'ensemble des particules qui passent en un point donné de l'espace en fonction du temps.

Deux types d'écoulement sont possibles



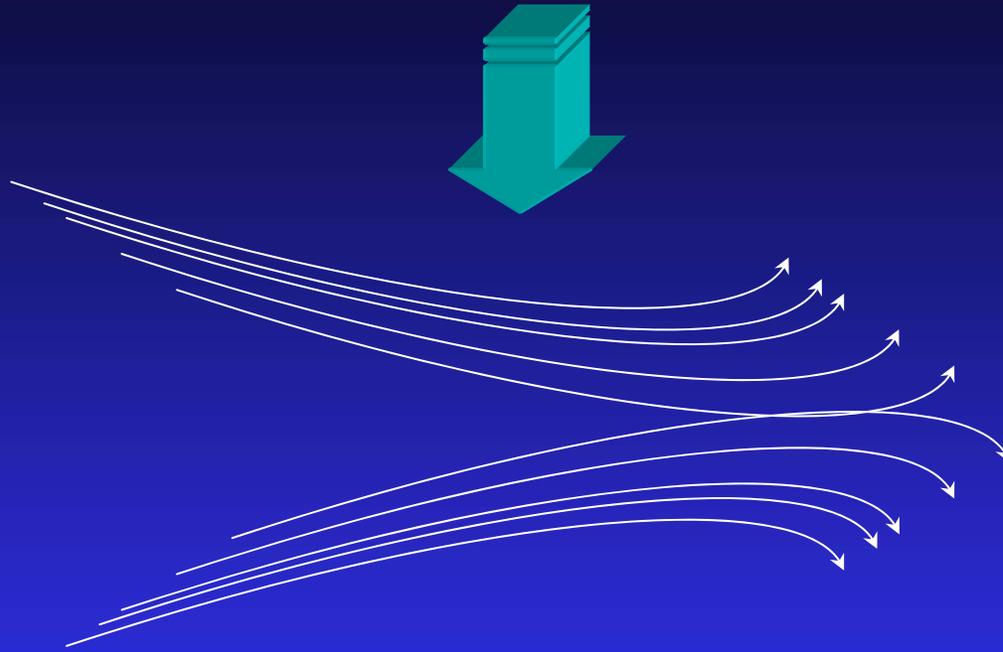
## LAMINAIRES

Les filets d'air sont parallèles les uns par rapport aux autres

## TURBULENTS

Les filets d'air sont désordonnés

# Écoulement laminaire



- Écoulement dans lequel des couches avoisinantes de fluide glissent les unes à côté des autres
- Chaque particule suit alors une trajectoire uniforme qui ne croise celle d'aucune autre particule

**2.4**

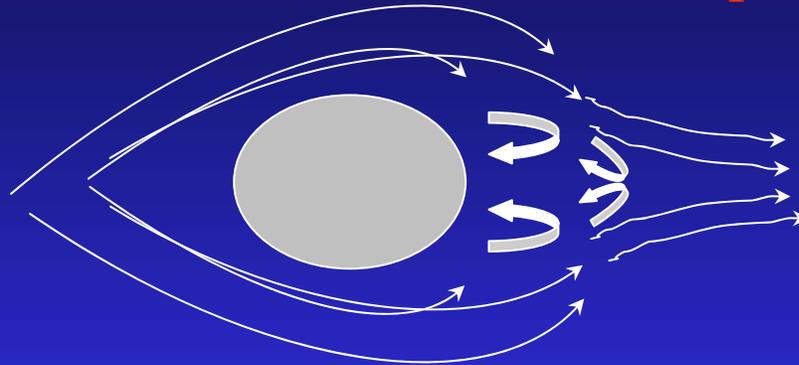
# **Pression cinétique**

# Écoulement turbulent



*Dépend de la vitesse*

**Zone de pression**

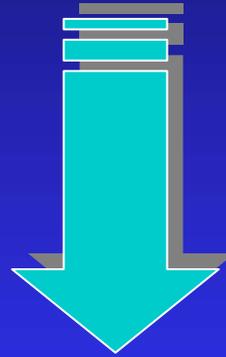


**Zone de dépression**

- présence de petits cercles irréguliers, semblables à des remous (tourbillons) qui absorbent une grande quantité d'énergie
- frottements internes appelé viscosité qui est beaucoup plus important que dans le cas de l'écoulement laminaire

La pression cinétique est la pression qu'exerce tout fluide sur un corps alors que le système est en mouvement.

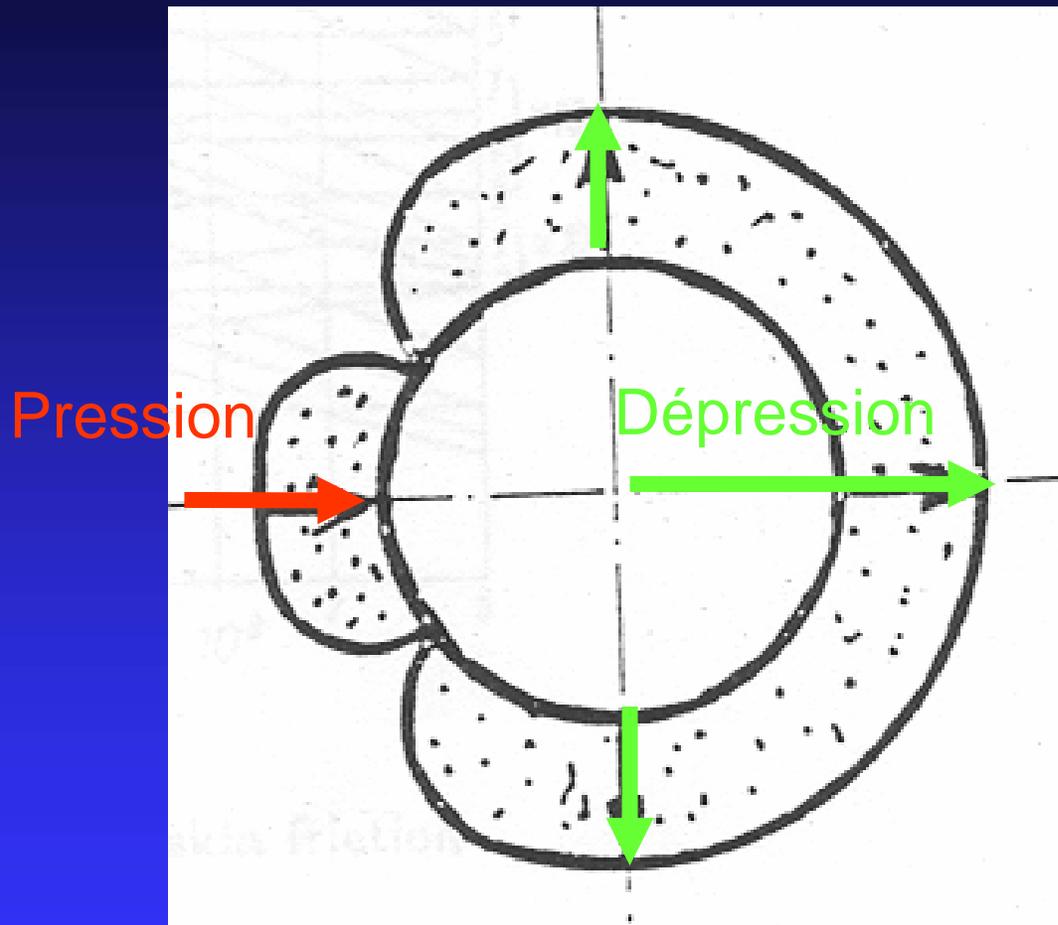
L'augmentation de pression exercée par l'air est appelée "pression cinétique"



$$p = \frac{1}{2} \rho V_a^2$$

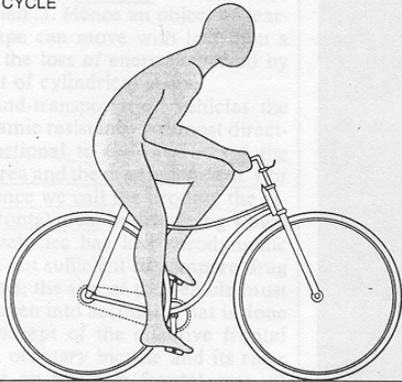
(p en Pascals)

# Illustration du phénomène

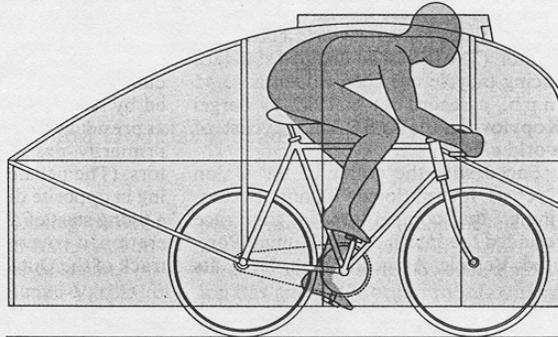


La dissymétrie de l'écoulement donne naissance à une force résistante:  
la traînée de pression

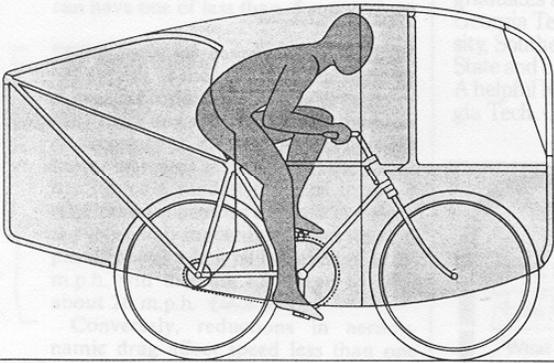
ROVER SAFETY CYCLE



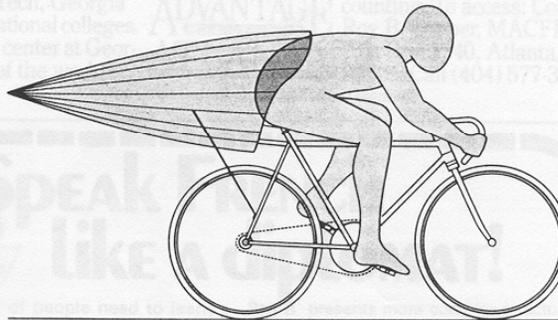
VÉLODYNE



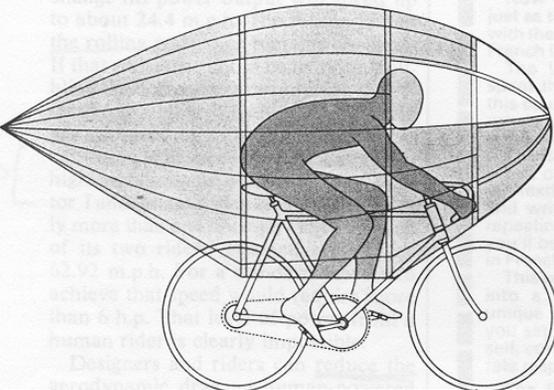
BUNAU-VARILLA DESIGN



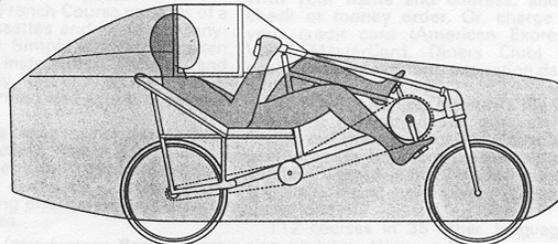
ROCKET



GORICKE



VÉLOCAR

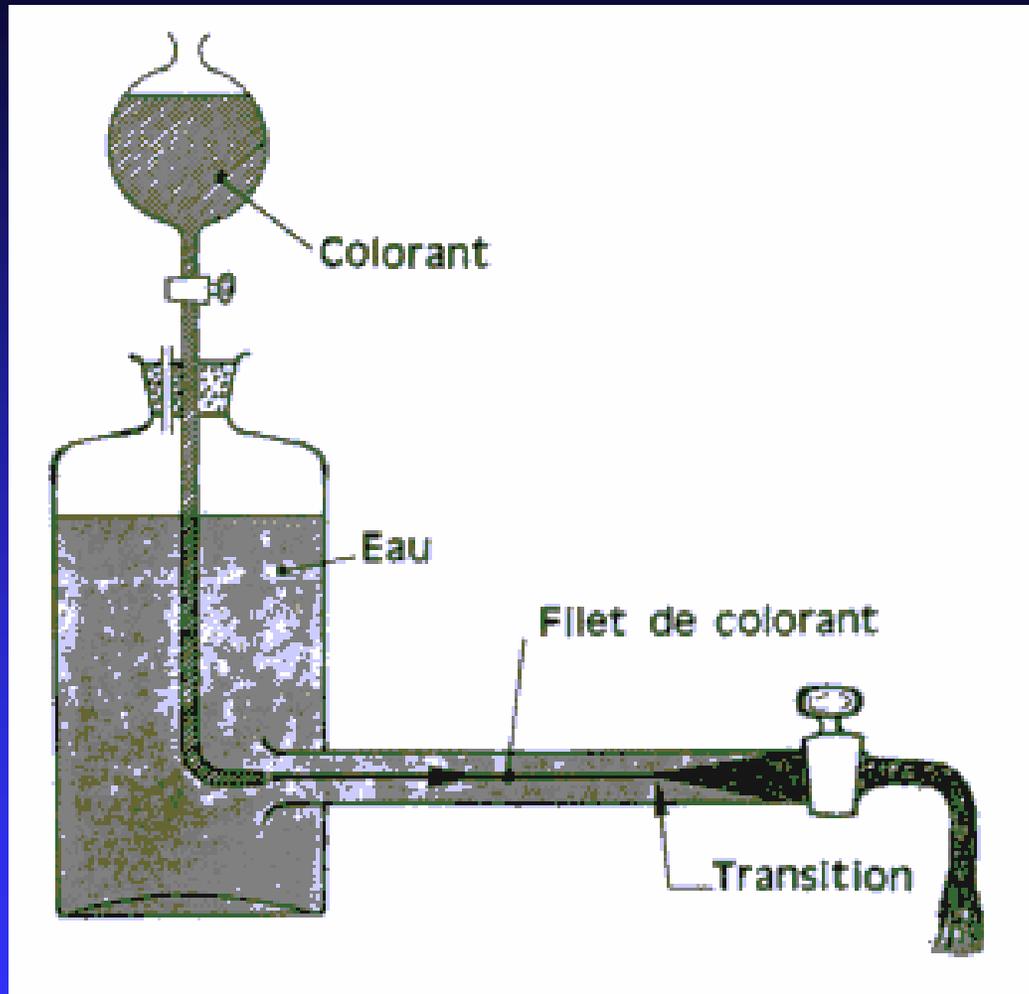


**Véhicules à propulsion humaine développés aux U.S.A.**

**2.5**

**Nombre de  
Reynolds et  
viscosité**

# Expérience de Reynolds



Reynolds démontra expérimentalement que l'écoulement dans un tube était modifié au bout d'une certaine distance en fonction de la vitesse de l'écoulement, du diamètre du tuyau, et de la température du fluide

# VISCOSITE D'UN FLUIDE



- Force de frottement qui s'exerce entre les différentes couches d'un fluide qui glissent les unes à côté des autres.
- Le degré de viscosité varie selon les fluides. De façon générale, les liquides sont plus visqueux que les gaz.
- Cette propriété des fluides s'exprime de façon quantitative par le coefficient de viscosité ( $\eta$ , en  $\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$  ou en  $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ).

# Nombre de Reynolds



Le « nombre de Reynolds représente le rapport des forces d'inertie sur les forces de viscosité d'un objet qui se déplace dans un fluide visqueux

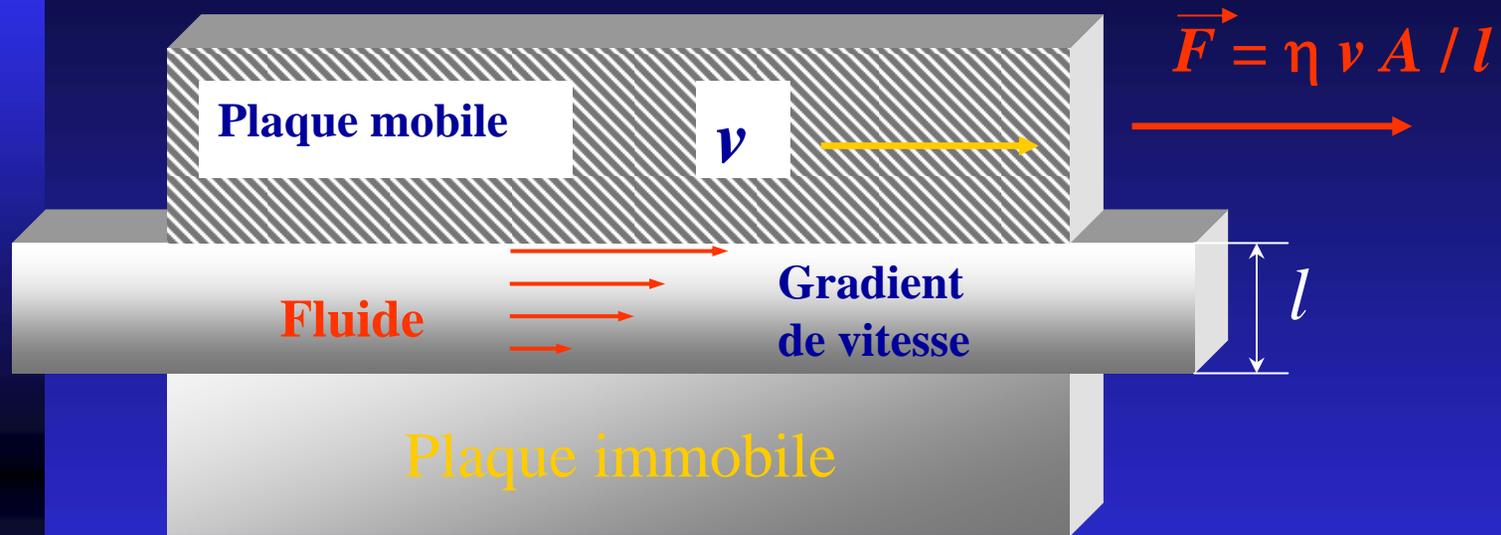
$$R_e = \frac{v D \rho}{\eta}$$

Masse volumique de l'air (kg/m<sup>3</sup>)

$\eta$  coef. de viscosité (N.s/m<sup>2</sup>)

- $v$  = vitesse moyenne du fluide,
- $D$  = diamètre dans lequel s'écoule le fluide

# Détermination de la viscosité d'un fluide



- La vitesse à l'intérieur du fluide varie de façon linéaire de 0 à  $v$  (delta  $v$ )
- Cette variation divisée par la distance sur laquelle elle s'effectue représente le gradient de vitesse

$$\text{Gradient de vitesse} = \text{delta } v / l$$

# Coefficient de viscosité de différents fluides

(Giancoli, 1993)

Fluide	Température (°C)	Coef. de viscosité ( $\eta$ Pa.s)
Eau	0	$1.8 \cdot 10^{-3}$
	20	$1.0 \cdot 10^{-3}$
	100	$0.3 \cdot 10^{-3}$
Sang	37	$\approx 4 \cdot 10^{-3}$
Plasma sanguin	37	$\approx 4 \cdot 10^{-3}$
Alcool éthylique	20	$1.2 \cdot 10^{-3}$
Huile moteur (SAE 10)	30	$200 \cdot 10^{-3}$
Glycérine	20	$1500 \cdot 10^{-3}$
Air	20	$0.018 \cdot 10^{-3}$
Hydrogène	0	$0.009 \cdot 10^{-3}$
Vapeur d'eau	100	$0.013 \cdot 10^{-3}$

# ÉCOULEMENT LAMINAIRE DANS LES TUBES



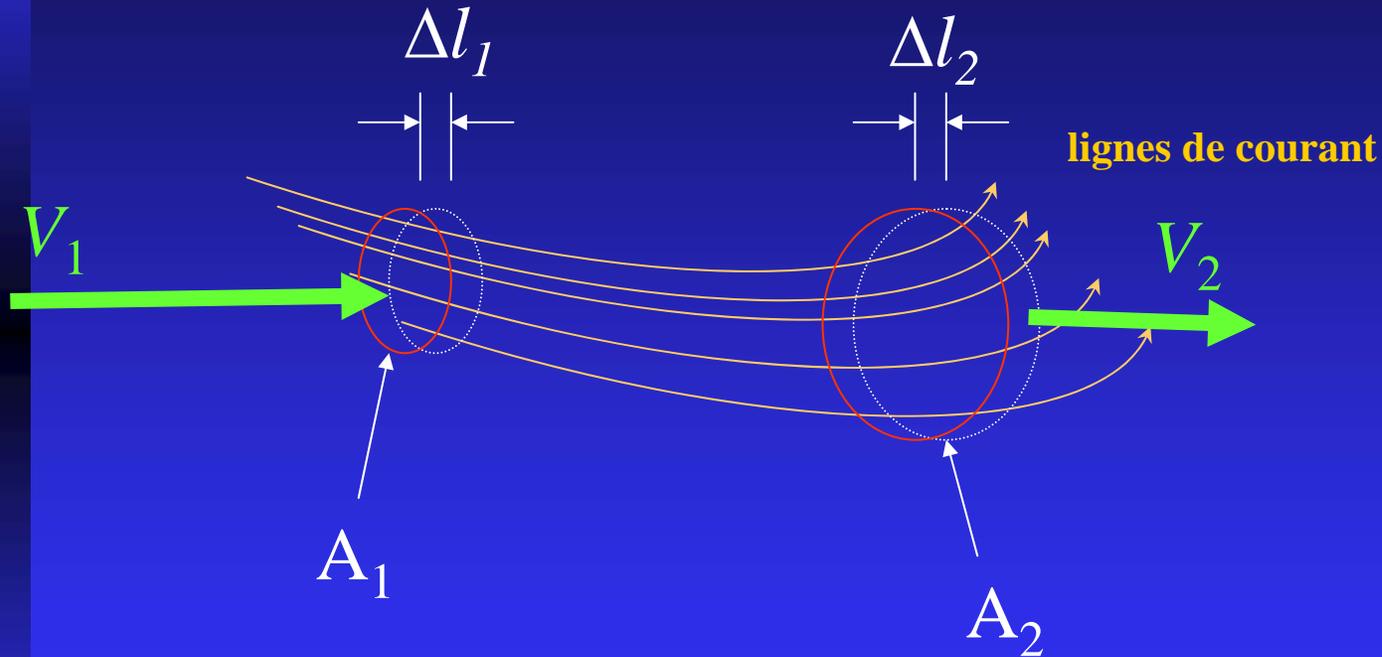
Un fluide totalement dépourvu de viscosité pourrait couler dans un tube sans l'intervention d'une force. Cependant la présence de viscosité requiert une différence de pression entre les extrémités d'un tube pour que les fluides réels aient un écoulement régulier

Le débit d'un fluide dans un tube rond dépend :

- de sa viscosité
- de la différence de pression entre les extrémités du tube
- des dimensions du tube

# DEBIT ET EQUATION DE CONTINUITE

Ecoulement laminaire et régulier d'un fluide



*Représentation d'un tube de courant*

$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$

(fluide incompressible)

# Equation de Poiseuille (1799-1869)



Débit

$$\dot{Q} = \frac{\pi R^4 (P_1 - P_2)}{8 \eta L}$$

où  $R$  est le rayon intérieur du tube,  $L$  sa longueur,  $P_1 - P_2$  la différence de pression entre ses extrémités et  $\eta$  la viscosité du fluide

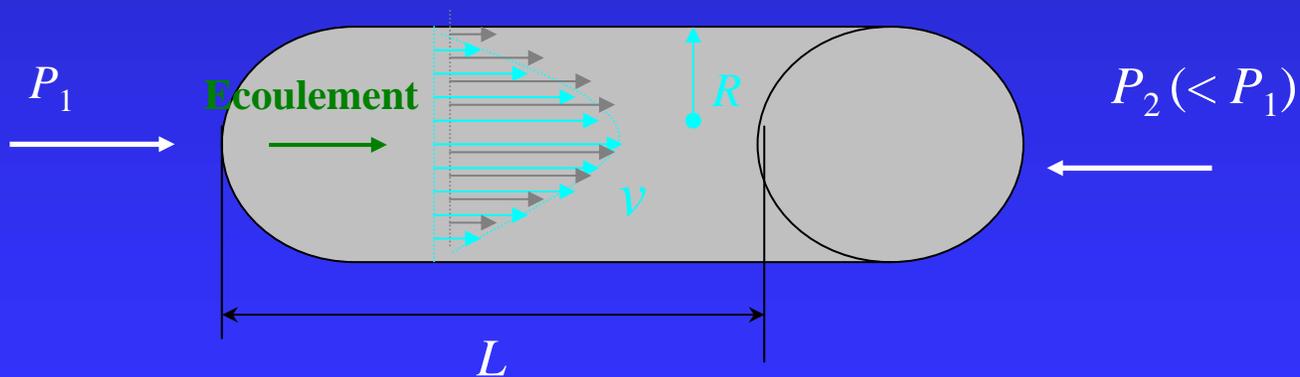


Illustration de la formule de Poiseuille

# ÉCOULEMENT TURBULENT ET NOMBRE DE REYNOLDS



Quand l'écoulement d'un fluide se fait à une grande vitesse dans un tube, il devient turbulent et la formule de Poiseuille ne s'applique plus.



Le début d'une turbulence est généralement soudain et peut se caractériser par :

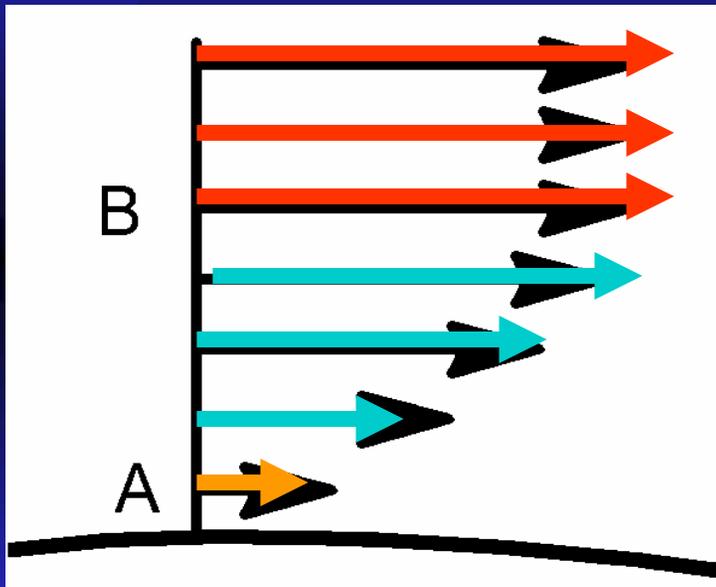
**Le nombre de Reynolds**

**2.6**

# **Couche limite**

# Couche limite

Au voisinage immédiat d'un objet, la viscosité de l'air se traduit par un freinage des molécules d'air (couche limite) dû aux forces de frottement



- en B, le flux d'air n'est plus influencé par les frottements. Sa vitesse est  $V$ .
- de A à B, les forces de frottement diminuent et la vitesse de l'air augmente,
- en A les molécules d'air adhèrent au corps. La vitesse des filets d'air est nulle.

On appelle couche limite, le film d'air dans lequel la vitesse d'écoulement varie (quelques dixièmes de millimètres sur une surface lisse et plus sur une surface rugueuse).

# Illustration du phénomène de la couche limite

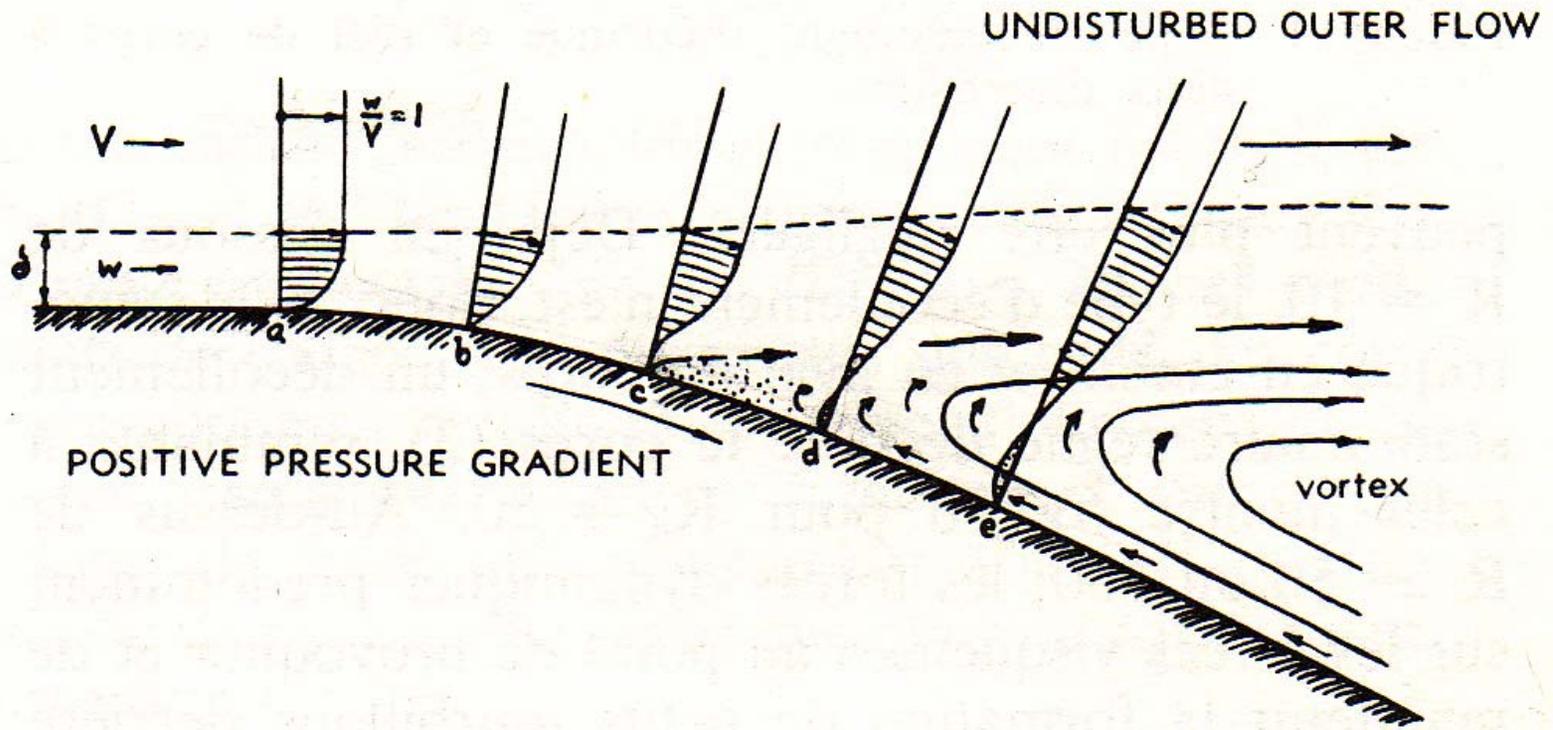
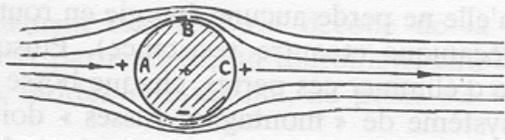


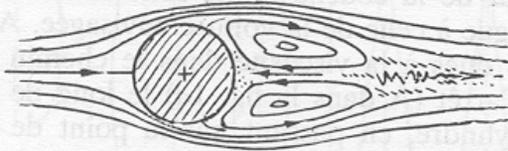
FIGURE 4. Répartition de célérité et type d'écoulement de la couche limite avec un gradient de pression positif (adverse), y compris le décollement.

## 2.7

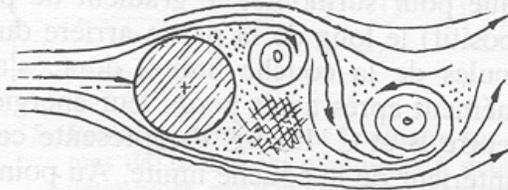
# Caractérisation des différents types d'écoulements



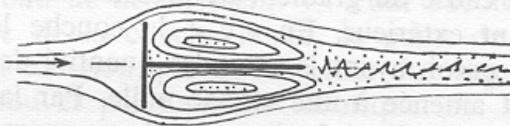
a) Type d'écoulement de cylindre circulaire dans un écoulement non visqueux. Pas de traînée.



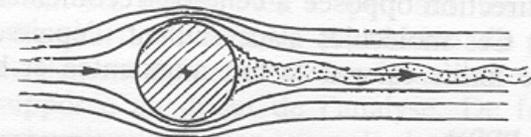
b) Cylindre à un nombre de Reynolds de l'ordre de 40.  
 $C_{D_0} = 1,2$ .



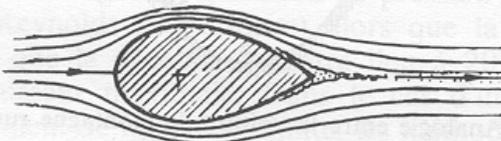
c) Cylindre avec  $R_a$  entre  $10^4$  et  $10^5$ .  
Rue de tourbillon avec  $C_{D_0} = 1,2$ .



d) Plaque avec deux sillages séparés  $C_{D_0} = 1,6$ .



e) Cylindre au-dessus du nombre de Reynolds critique :  
 $C_{D_0} = 0,3$ .



f) Corps profilé avec  $C_{D_0}$  de l'ordre de 0,06.

## Caractère d'un écoulement autour d'un cylindre dans différents régimes de $R_e$

# *Re* sert à décrire le type d'écoulement



- ***Re* < 1** = écoulement laminaire
- ***Re* = 1** = pour un objet d'une longueur de 1 mm se déplaçant à une vitesse de 1 mm/s dans l'eau ou pour un objet de 2 mm de long parcourant 7 mm/s dans l'air
- **$1 < Re > 10$**  = turbulence derrière l'objet. Dans ce cas il y a présence d'une force de résistance :

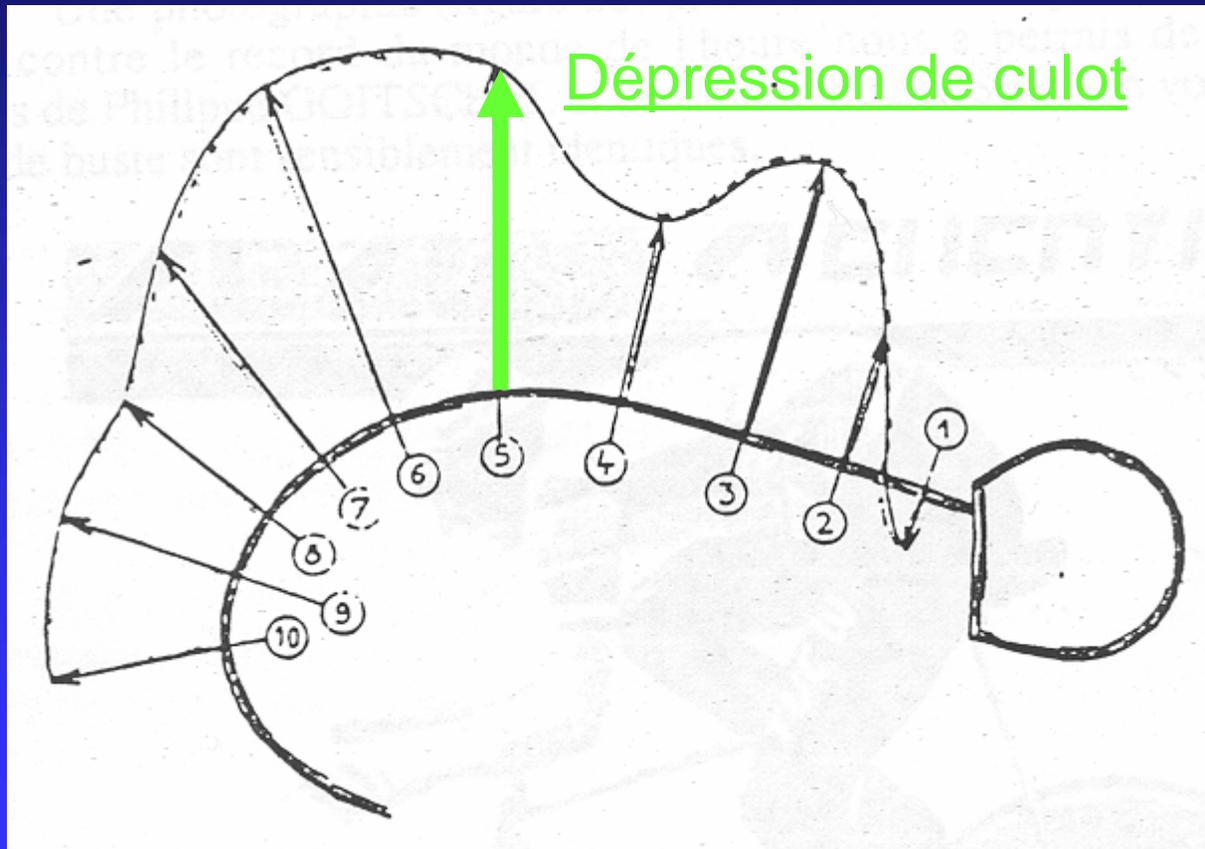
$$R_a = \frac{1}{2} \rho S C_x V_a^2$$

- ***Re* proche de  $10^6 = Ra$**  augmente brusquement
- ***Re* >  $10^6$**  = turbulence également dans la couche de fluide qui entoure l'objet (couche périphérique).

# 2.8

## Détermination de la traînée d'un sujet en mouvement

# Traînée de pression



# Traînée de frottement

Force tangentielle qui prend naissance aux endroits où l'air se déplace au voisinage de la surface d'un corps comparable à celle qui apparaît lorsque des surfaces solides glissent les unes contre les autres.

La traînée de frottement dépend du nombre de Reynolds et de la rugosité de la paroi.

# Traînée aérodynamique

Surface frontale effective (m<sup>2</sup>)

$$R_a = \frac{1}{2} \rho S C_x V_a^2$$

Masse volumique de l'air (kg.m<sup>-3</sup>)

Coef. de pénétration dans l'air

Vitesse de l'air (m.s<sup>-1</sup>)

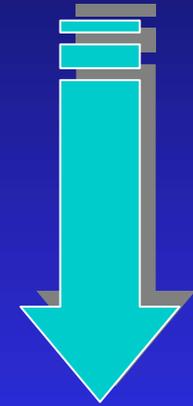
# 2.9

## Variables de la traînée aérodynamique

# Masse volumique de l'air ( $\rho$ )

Trois variables affectent la masse volumique de l'air :

- la température (T)
- l'humidité de l'air
- la pression barométrique ( $P_B$ )



$$\rho = \rho_0 \left( P_B / 760 \right) \left( 273 / T \right)$$



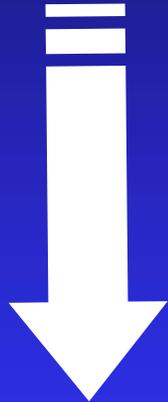
( $\rho_0 = 1.292 \text{ kg/m}^3$  ; densité de l'air sec à 273°k et 760 mmHg)

# Qu'est ce que l'humidité de l'air ?

Le taux d'humidité représente la quantité de vapeur d'eau qui se trouve dans l'air.

L'humidité relative représente le pourcentage d'humidité (ou de vapeur d'eau) contenu dans l'air par rapport à la quantité maximum que peut contenir cet air avant de se condenser, c'est-à-dire avant de se transformer en gouttelettes d'eau.

Plus la masse d'air est **chaude**, plus elle peut absorber de vapeur d'eau sans se condenser alors que plus elle est **froide**, moins elle peut en contenir.



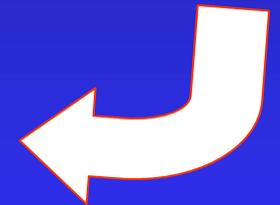
A 60% d'humidité relative, l'inconfort relié à l'humidité sera plus grand s'il fait 30°C que s'il fait 20°C

### Humidité absolue de l'air à saturation (grammes de vapeur d'eau par mètre cube d'air)

Temp (°C)	Pression (mmHg)	g/m <sup>3</sup>
-10	1,95	2,16
0	4,58	4,87
5	6,54	6,8
10	9,21	9,40
15	12,8	12,8
20	17,5	17,3
25	23,8	23,0
30	31,8	30,4
40	55,3	51,1

Masse volumique de l'air ( $\text{kg.m}^{-3}$ ) à 760 mmHg (1013 mbar) en fonction du pourcentage d'humidité dans l'air. La dernière colonne montre la variation de masse volumique de l'air entre 100% d'humidité et 1% d'humidité. La valeur « 1,292 » en rouge est proche de la valeur  $\rho_0$  (1,293)

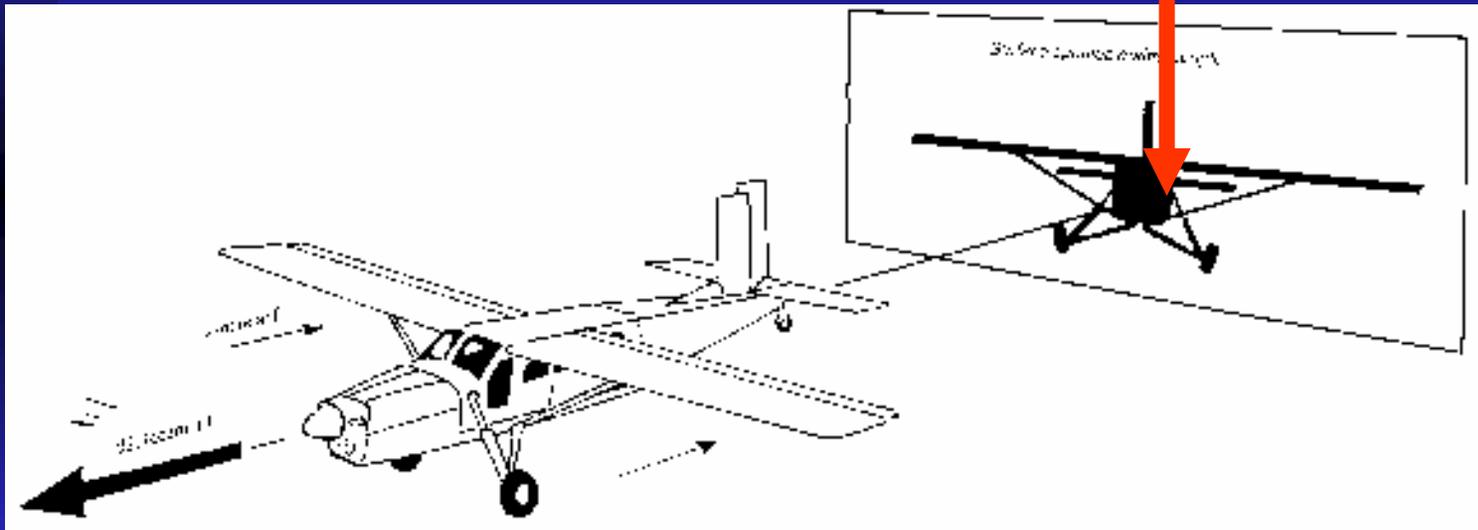
Temp sèche (°C)	100% Humidité relative	90% Hr	80% Hr	70% Hr	60% Hr	50% Hr	40% Hr	30% Hr	20% Hr	10% Hr	1% Hr	100% Hr / 1% H
0°C	1.289	1.29	1.29	1.29	1.29	1.291	1.291	1.291	1.292	1.292	1.292	-0.23
5°C	1.265	1.265	1.266	1.266	1.267	1.267	1.267	1.268	1.268	1.269	1.269	-0.32
10°C	1.241	1.241	1.242	1.243	1.243	1.244	1.244	1.245	1.245	1.246	1.247	-0.48
15°C	1.217	1.218	1.219	1.22	1.22	1.221	1.222	1.223	1.223	1.224	1.225	-0.65
20°C	1.194	1.195	1.196	1.197	1.198	1.199	1.2	1.201	1.202	1.203	1.204	-0.83
25°C	1.17	1.171	1.173	1.174	1.176	1.177	1.178	1.18	1.181	1.183	1.184	-1.18
30°C	1.146	1.148	1.15	1.151	1.153	1.155	1.157	1.159	1.161	1.163	1.164	-1.55
35°C	1.121	1.124	1.126	1.129	1.131	1.133	1.136	1.138	1.141	1.143	1.145	-2.10
40°C	1.096	1.099	1.102	1.105	1.109	1.112	1.115	1.118	1.121	1.124	1.127	-2.75



Peut d'influence de l'humidité sur la masse volumique de l'air

Davantage d'effets sur la perception de l'effort

# La surface du maître couple (S)



$R_T$  est proportionnel à  $S$

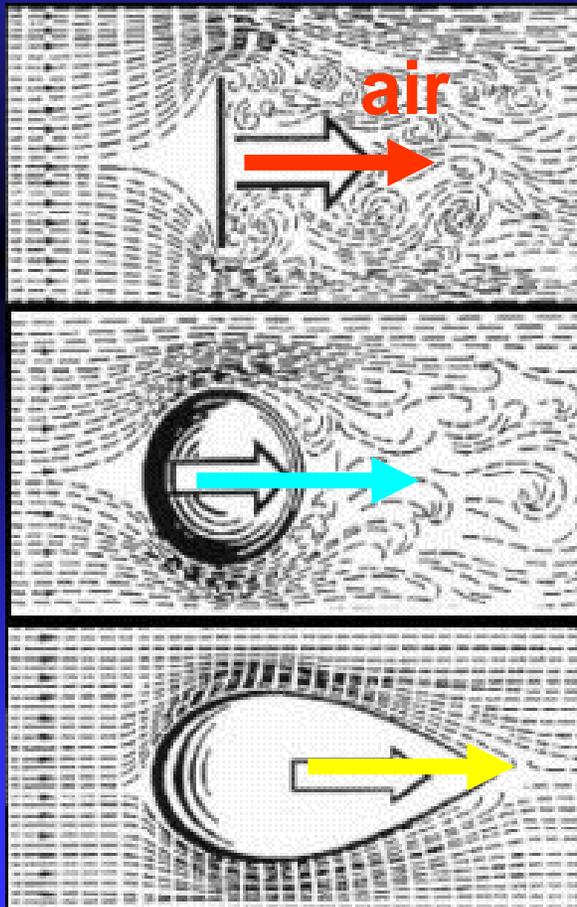


- La résistance de l'air dépend de la forme du corps.
- La forme la meilleure est celle d'un solide de forme convexe à l'avant, pointe à l'arrière (profil goutte d'eau). Elle offre jusqu'à 25 fois moins de résistance à l'air qu'un disque plat de même maître couple.

**$R_T$  est proportionnel au  $C_x$**

# Coefficient de forme ( $C_x$ )

Le coefficient de pénétration dans l'air est un paramètre propre à chaque corps.

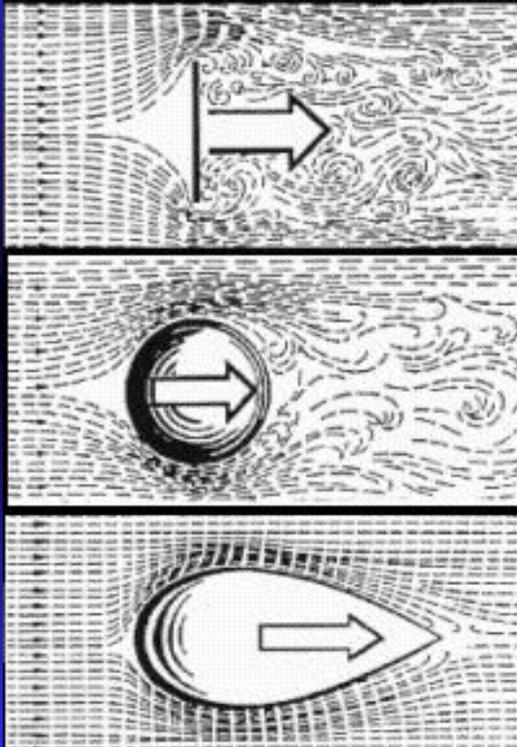


- Plaque :  $C_x=1$

- Sphère :  $C_x=0.2$

- Profile aérodynamique :  $C_x=0.04$

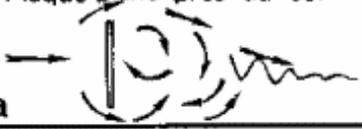
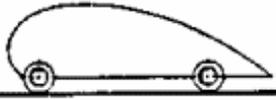
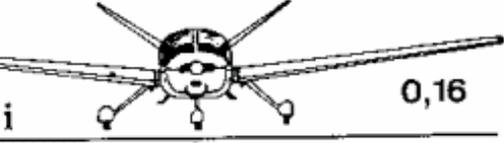
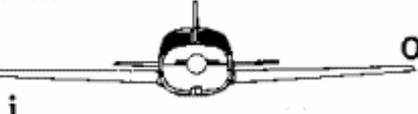
# $C_x$ pour trois corps de forme différentes mais de même surface frontale



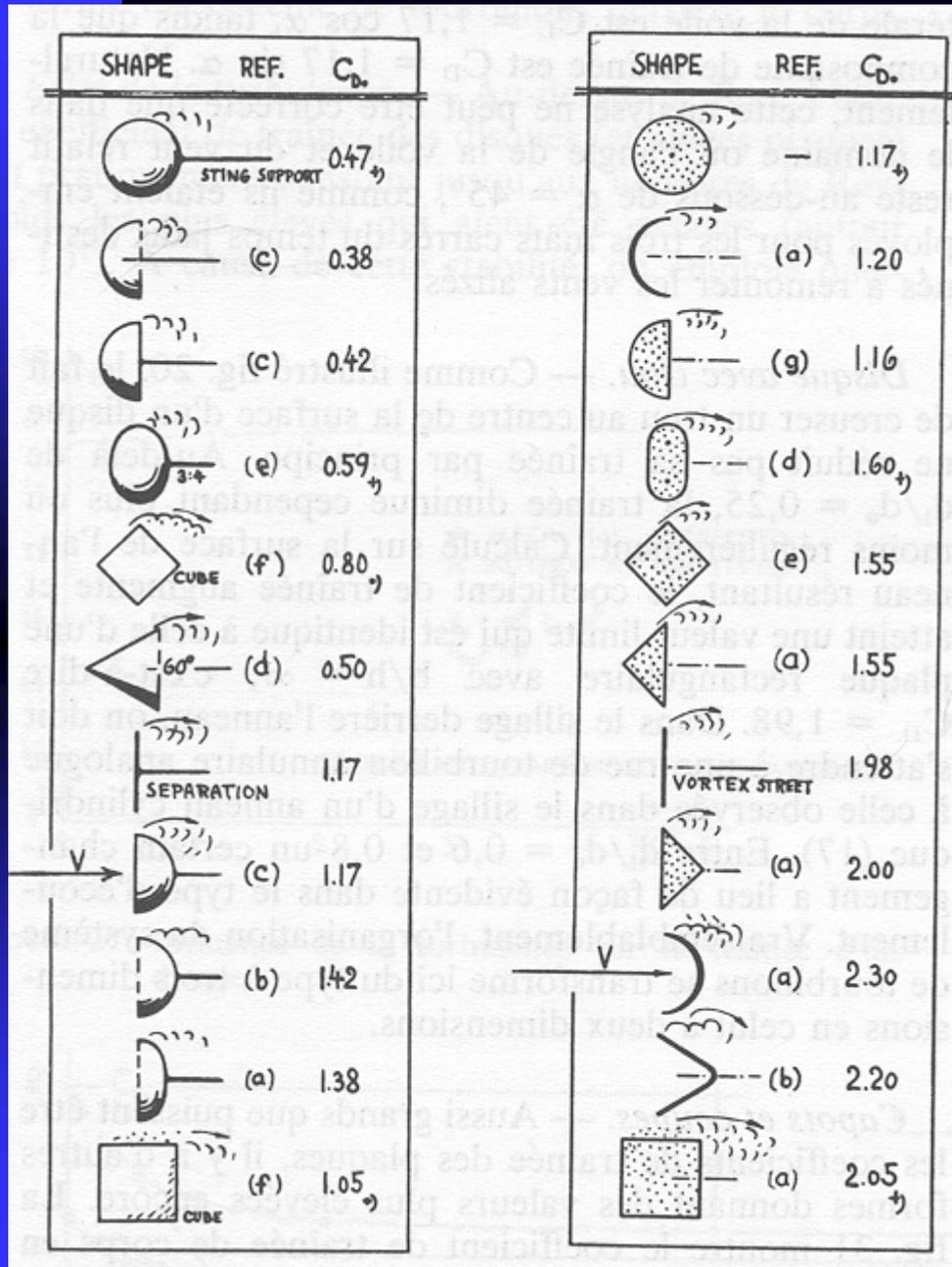
Plaque :  $C_x = 1$

Sphère :  $C_x = 0,2$

Profil aérodynamique :  $C_x = 0,04$

Plaque plane près du sol		$C_x$
a		1,27
b		0,9
c		0,52
d		0,34
e		0,2
f		0,43
g		0,75 à 0,9
h	 Premier régime	0,51
	Second régime	0,1
i		0,16
j		0,054

## Cx pour différents véhicules utilitaires



## Figure de gauche

$C_x$  de différents corps à 3D  
( $10^4 < R_e < 10^6$ )

## Figure de droite

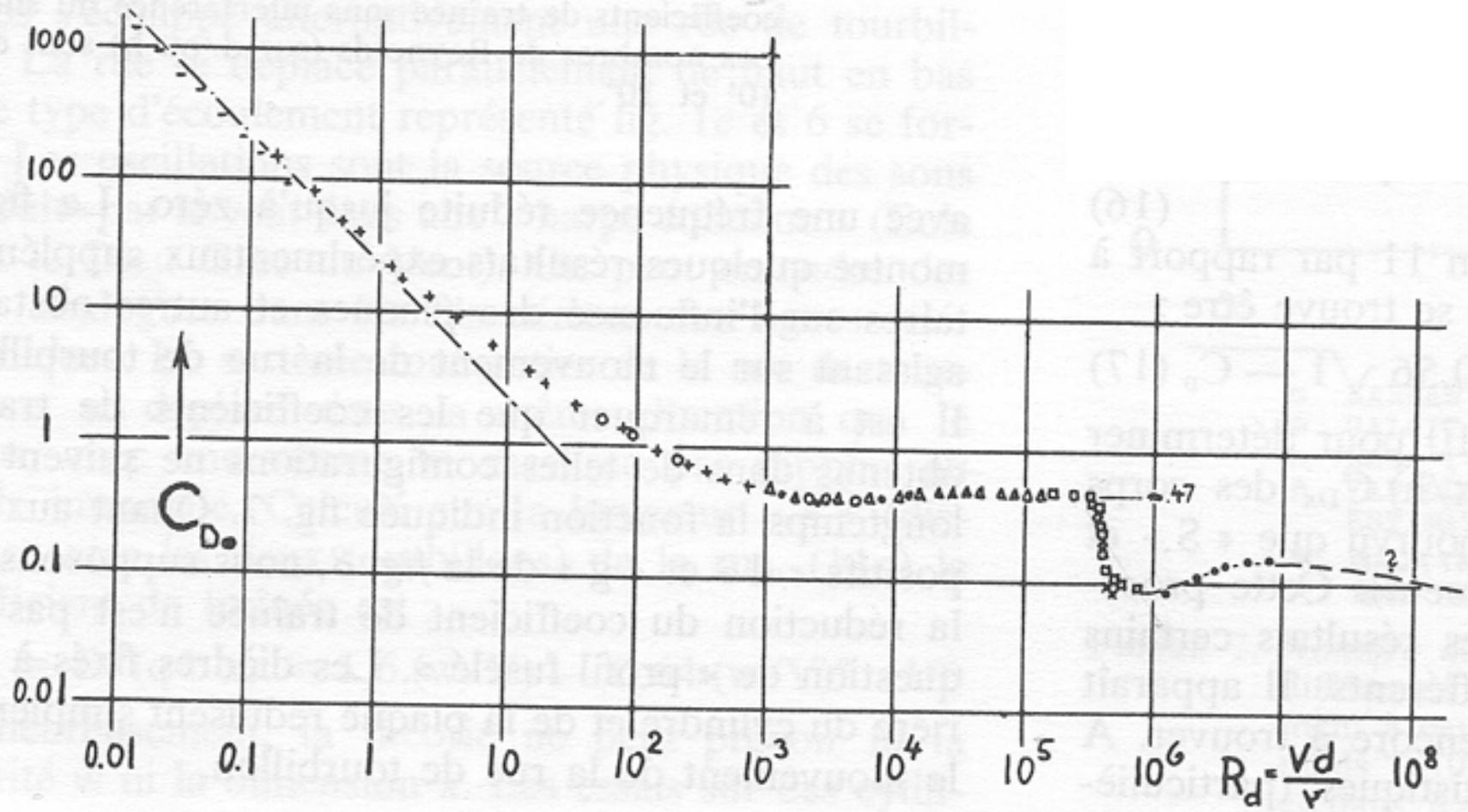
$C_x$  de différents corps à 2D  
( $10^4 < R_e < 10^6$ )

# Variation de la charge aérodynamique d'une formule 1

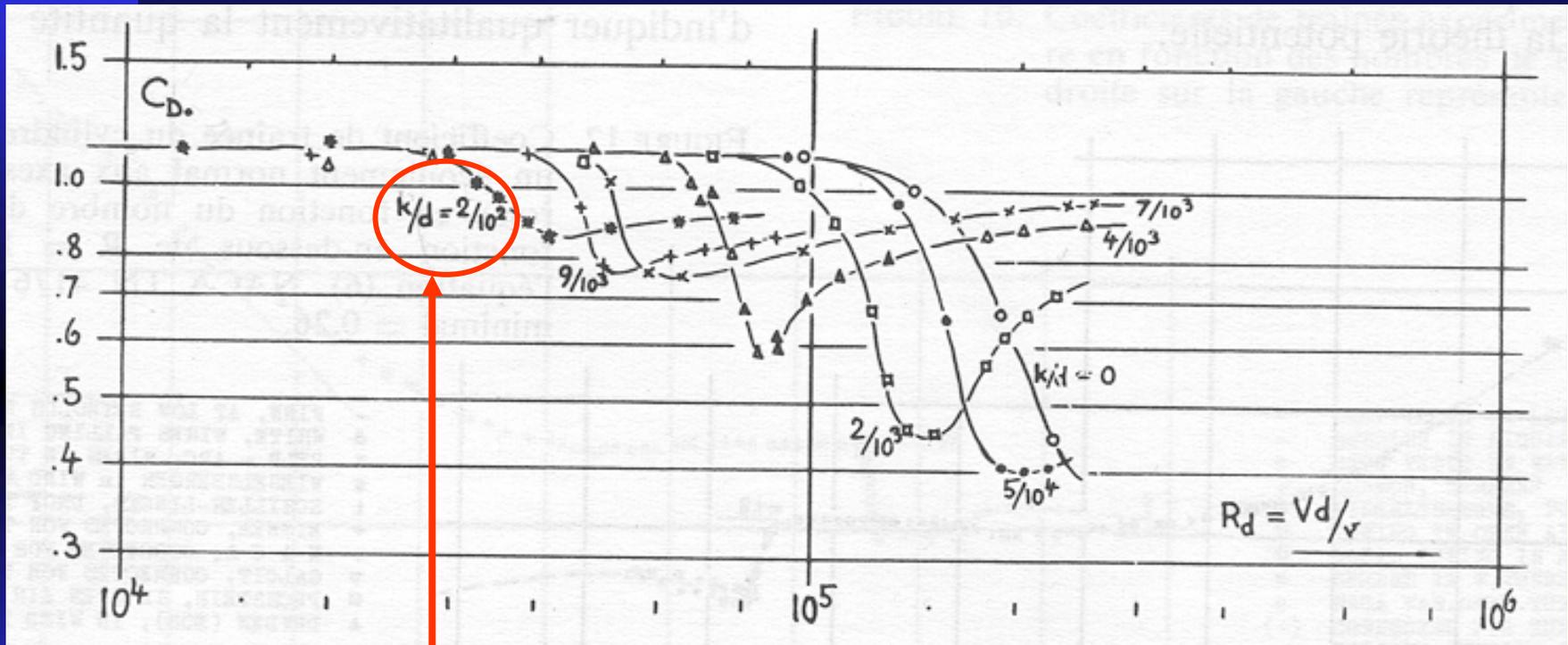


$C_x$  d'une formule 1 qui passe de 1,1 à 0,75 (-30%)  
au Grand Prix de Monza (circuit très rapide)

# Evolution du $C_x$ en fonction du nombre de Reynolds ( $R_e$ )

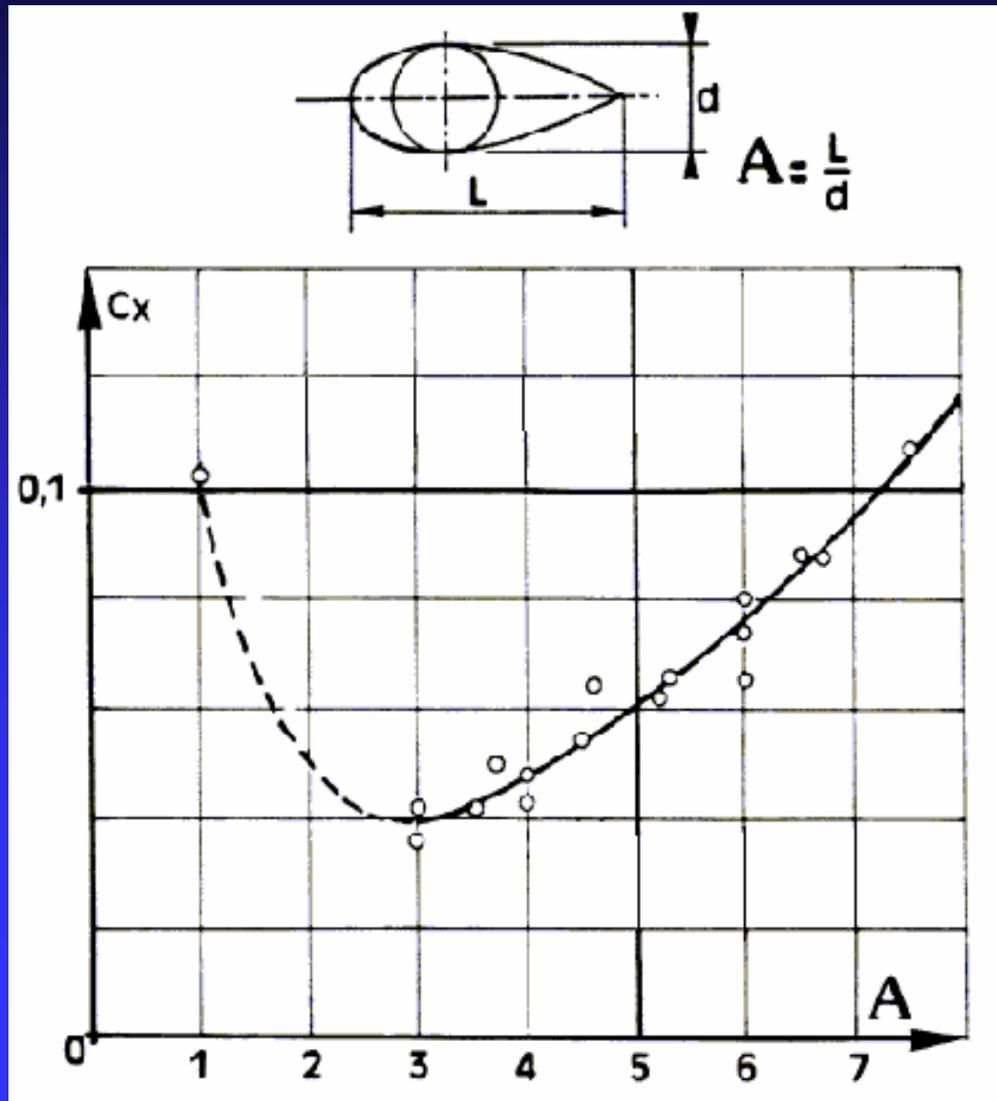


# Evolution du $C_x$ en fonction du degré de rugosité de la surface ( $k/d$ )

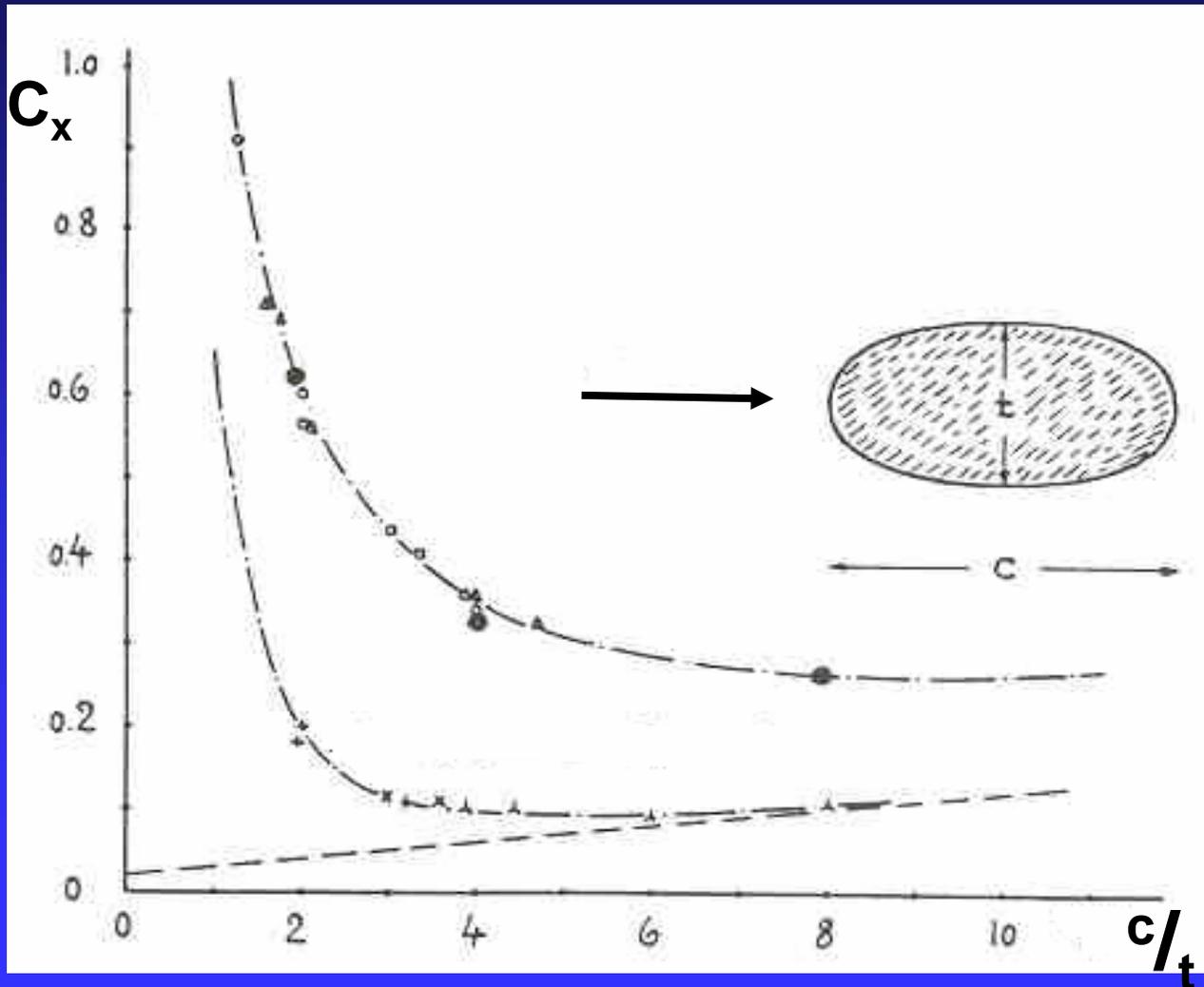


$K$  : dimension du grain  
 $d$  : diamètre du cylindre

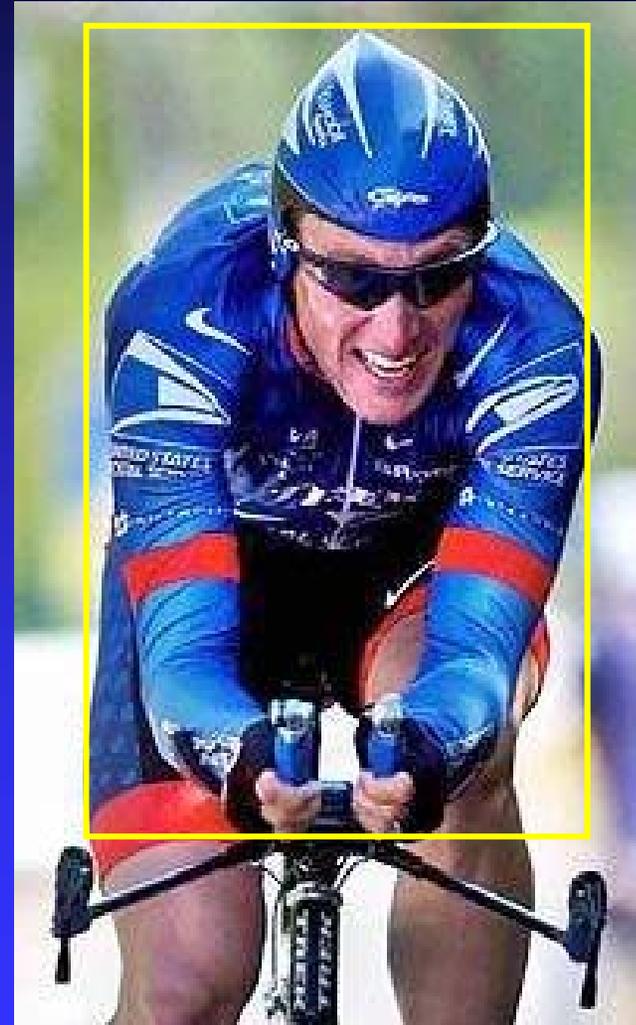
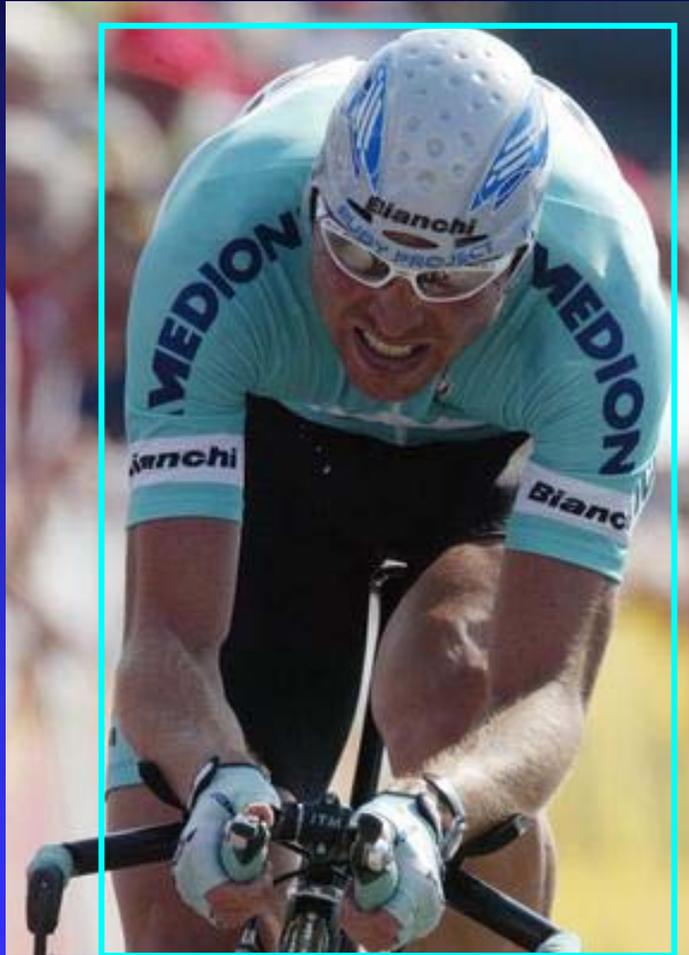
# Evolution du $C_x$ pour un corps fuselé (casque) en fonction de sa longueur et de sa largeur



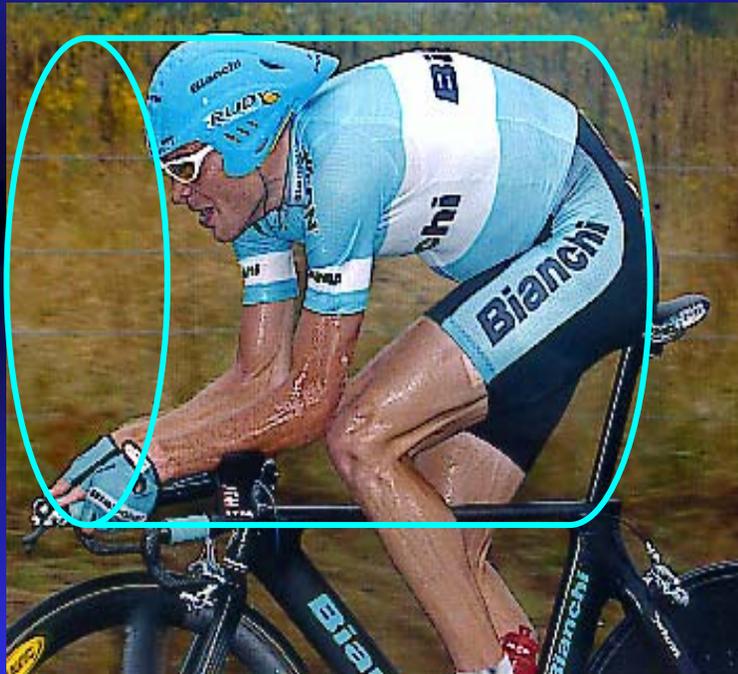
Evolution du  $C_x$  pour un corps à profil elliptique (tubes de cadre) à des nombres de Reynolds sub-critiques (a) et sur-critique (b) en fonction de la longueur (c) et de la largeur (t) de l'ellipse



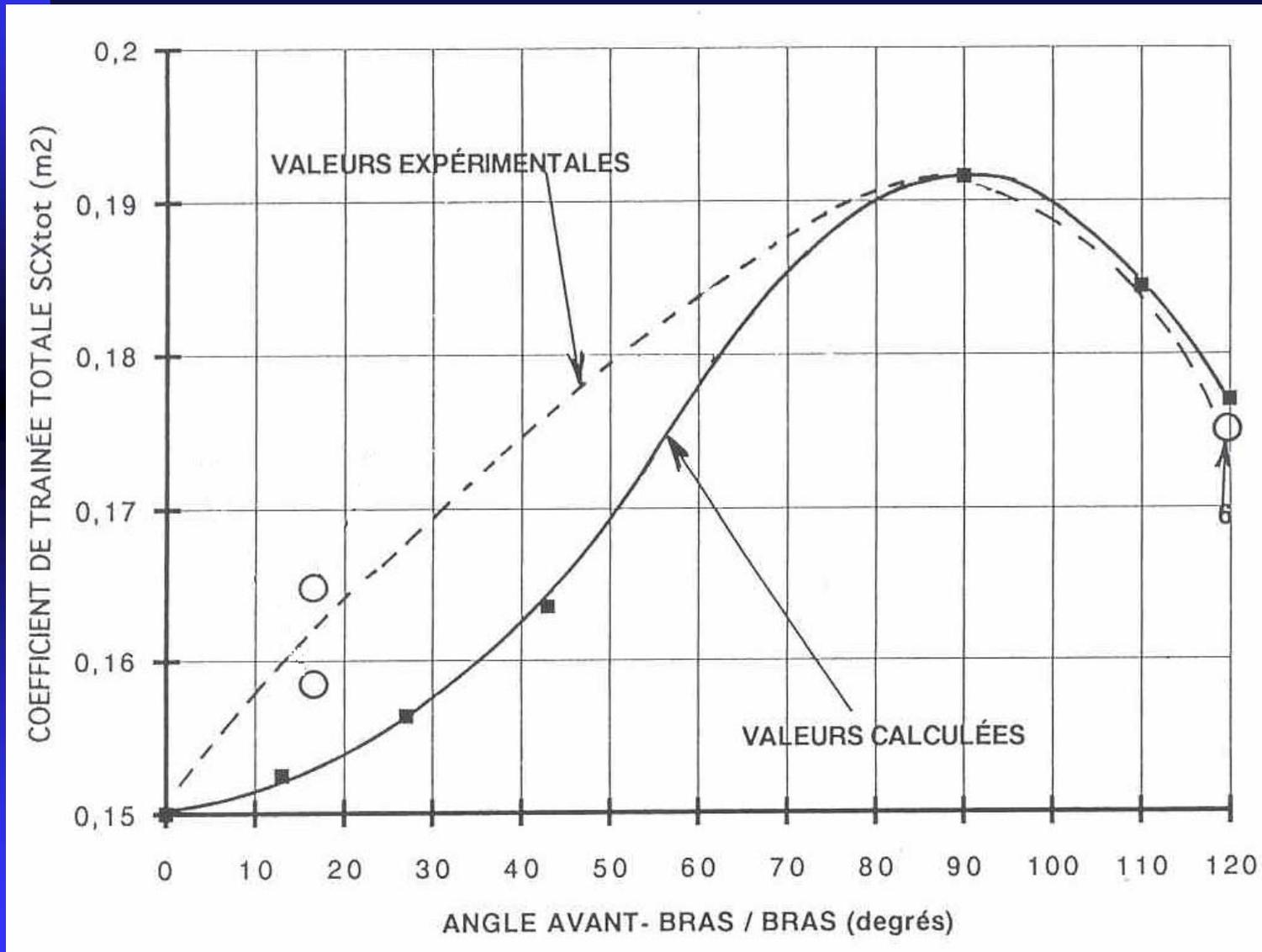
# Surface frontale effective ( $SC_x$ )



# Surface frontale effective ( $SC_x$ )



# Evolution du $SC_x$ des bras en fonction de l'angle bras-avant bras en position de triathlon (avant-bras horizontaux)



# Vitesse de l'air ( $V_a$ )

Vent nul



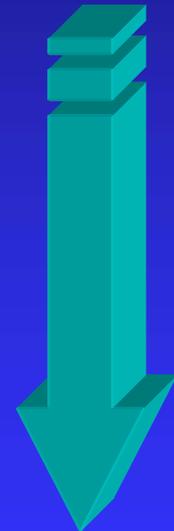
$$V_a = V_{\text{déplacement}}$$

Vent de face



$$V_a = V_{\text{vent}} + V_{\text{déplacement}}$$

Vent de dos



$$V_a = V_{\text{déplacement}} - V_{\text{vent}}$$

## La résistance de l'air varie avec :

$$R_T = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_x$$

- la masse volumique de l'air :  $\rho$
- la vitesse de l'écoulement :  $V_a$
- la surface frontale :  $S$
- du coefficient de pénétration dans l'air :  $C_x$

Attention: La résistance de l'air dite traînée, est due à l'action combinée de la dépression (à l'arrière du corps) et de la surpression (à l'avant du corps).

**Puissance développée par  
le sportif lors de la  
locomotion pour lutter  
contre  $R_a$**

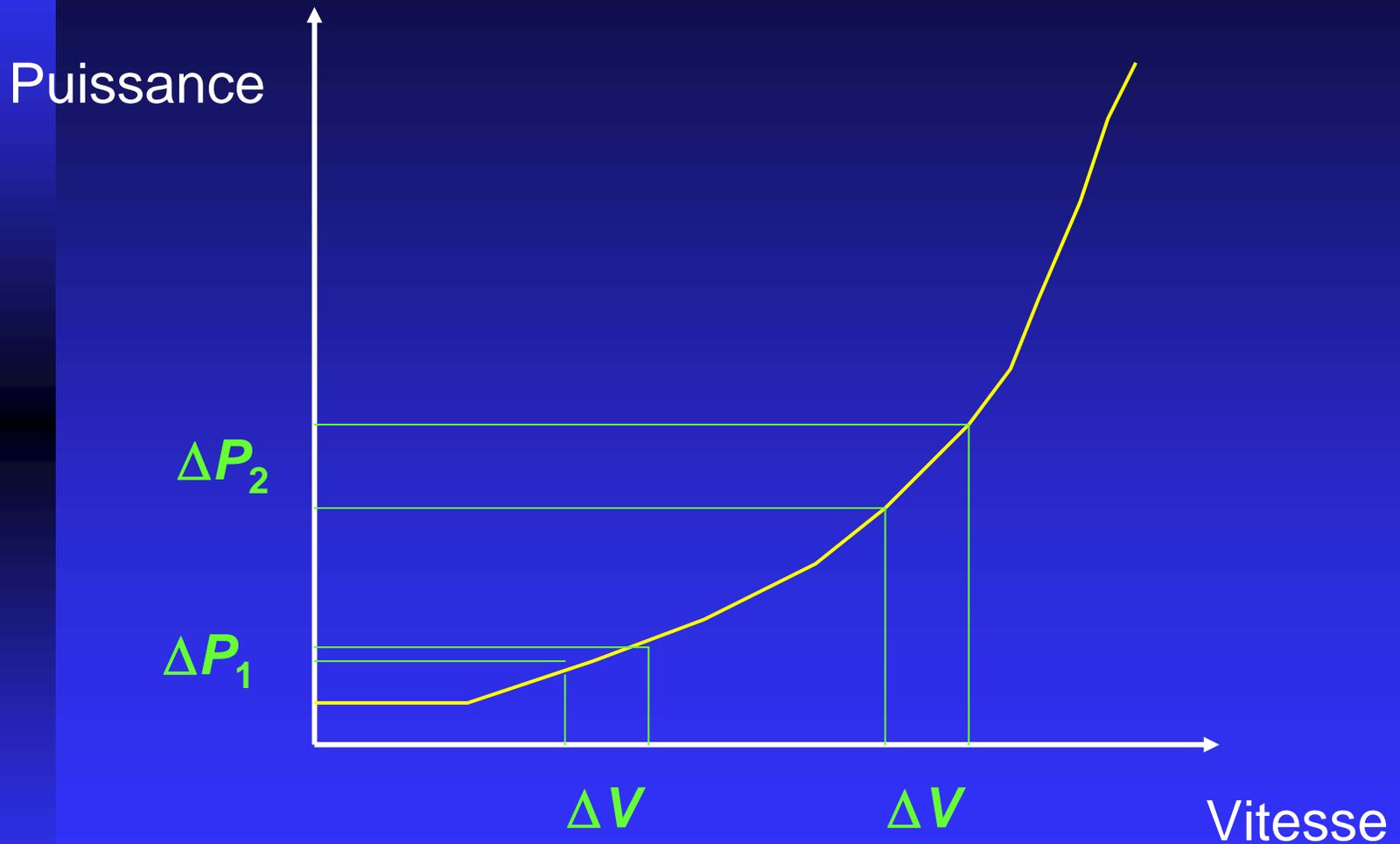
$$P_{Ra} \equiv \left( \frac{1}{2} \rho S C_{x_a} V_a^2 \right) \cdot V_d$$

Par vent nul

$$P_{Ra} \equiv \frac{1}{2} \rho S C_{x_d} V_d^3$$

La puissance développée par un athlète pour lutter contre Ra augmente avec le cube de la vitesse de déplacement

# Conséquences directes ...



$\Delta P_1 < \Delta P_2$  pour  $\Delta V$  identique

# Résistance de roulement



Une évolution aérodynamique, une poignée de chevaux, une nouvelle suspension peuvent faire gagner, au mieux, quelques dixièmes de seconde à une monoplace de F1. Une trouvaille côté pneus ? Cinq fois plus.

## QU'EST-CE QU'UN PNEU DE F1 ?

### Pluie



**DIAMÈTRE :**  
Ne doit pas dépasser 670 mm

**LARGEUR :** entre 305 et 355 mm à l'avant et entre 365 et 380 mm à l'arrière

Température optimale très basse, de l'ordre de 30°C à 50°C

Très sculptés afin d'évacuer une grande quantité d'eau provenant de la piste, ce qui évite le phénomène d'aquaplaning

### Sec



**DIAMÈTRE :**  
Ne doit pas dépasser 660 mm

**LARGEUR :** entre 305 et 355 mm à l'avant et entre 365 et 380 mm à l'arrière

L'enveloppe fonctionne à une température optimale proche de 100°C

Quatre sillons longitudinaux imposés par le règlement

Source : Michelin et FIA

Un pneumatique de F1 pour piste sèche mesure 660 mm de diamètre extérieur pour 380 mm de large (355 mm pour l'avant). Il est entaillé de 4 sillons longitudinaux imposés par le règlement. Largés d'au moins 14 mm, profonds d'au moins 2,5 mm, ceux-ci sont disposés symétriquement par rapport au milieu de la bande de roulement, et sont espacés de 50 mm d'axe à axe. L'enveloppe, qui peut être tendre ou dure, fonctionne à une température optimale proche de 100°C, qui doit être,

en théorie, idéalement répartie entre l'extérieur, le centre, et l'intérieur de la bande de roulement. Théoriquement, cette température doit également être identique entre la gauche et la droite, l'avant et l'arrière.

Seuls deux types de gomme (développés pour chaque écurie) sont autorisés en essais libres le vendredi. Les équipes doivent en choisir un seul le samedi matin. Il est interdit de changer de gommes des qualifications jusqu'à la fin de la course.

## 3.2

# Définition de la résistance de roulement

du type

$$R_{\mathbf{R}} = a_0 + a_1 V_{\mathbf{d}}^{\mathbf{x}}$$

# Equations relevées dans la littérature

Kamm (1939) :  $R_R = a_0 + a_1 V_d^2$  ( $V_d < 150 \text{ km.h}^{-1}$ )

Andreau (1948) :  $R_R = a_0 + a_1 V_d^{3.7}$  ( $V_d < 160 \text{ km.h}^{-1}$ )

Nagler et Razak (1950) :  $R_R = a_0$  ( $V_d < 50 \text{ km.h}^{-1}$ )

$$R_R = a_0 + a_1 V_d$$
 ( $V_d > 50 \text{ km.h}^{-1}$ )

Stiehler et al. (1960) :  $R_R = a_0 + a_1 V_d$  ( $V_d < 80 \text{ km.h}^{-1}$ )

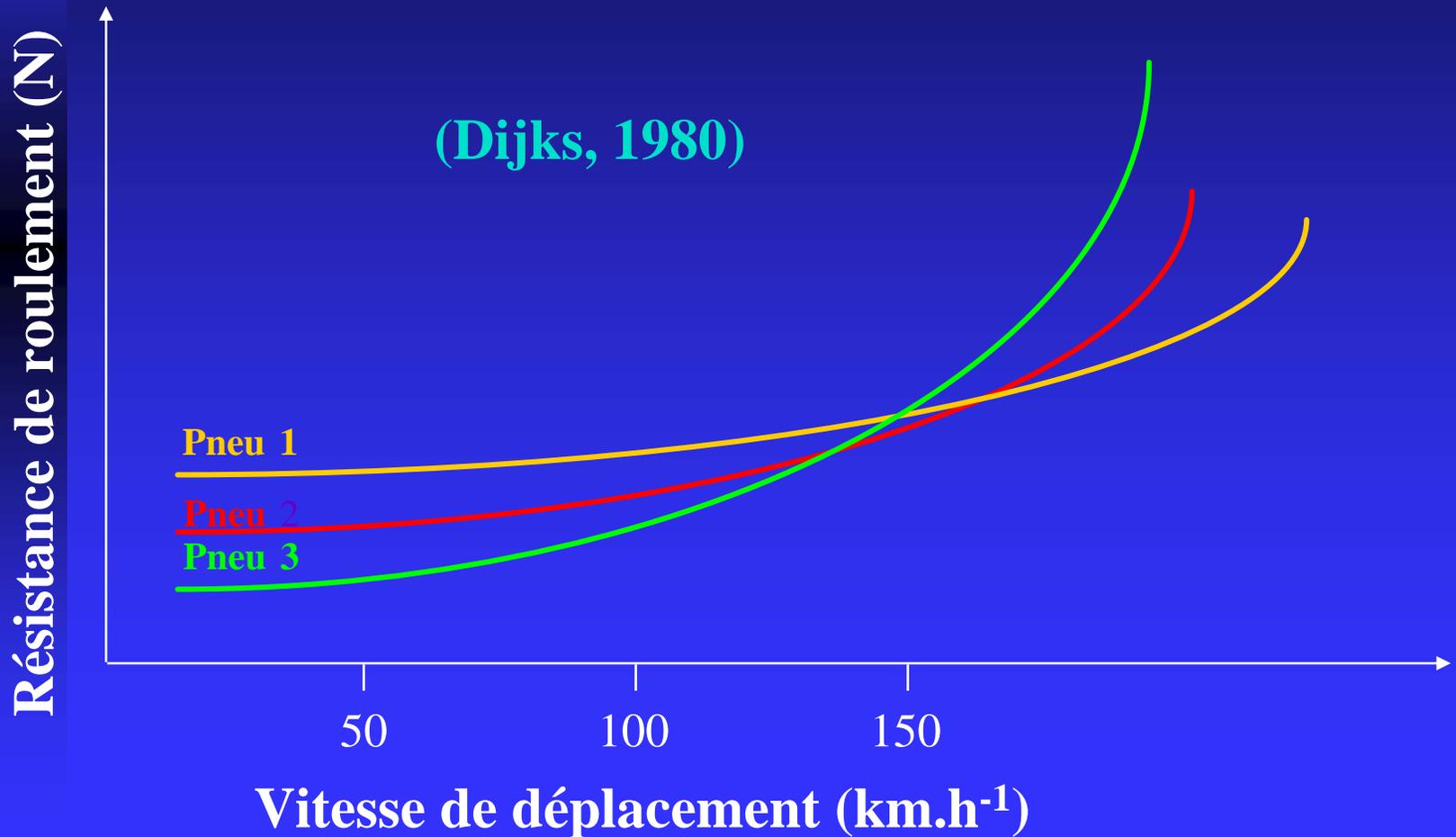
Curtiss (1969) :  $R_R = a_0 + a_1 \exp(a_2 V_d)$  ( $20 < V_d < 100 \text{ km.h}^{-1}$ )

Seki et al. (1969) :  $R_R = a_0 + a_1 V_d^{4.4}$  ( $V_d < 140 \text{ km.h}^{-1}$ )

Elliot et al. (1977) :  $R_R = a_0 + a_1 V_d + a_2 V_d^2 + a_3 V_d^3 + a_4 V_d^4$

$$(V_d < 160 \text{ km.h}^{-1})$$

# Evolution de $R_R$ en fonction de $V_d$ pour des véhicules de transport



# Résistance de roulement sur deux roues

du type

Kyle *et al.* (1973)

Kyle and Burke (1984 )

$$\mathbf{R_R = a_0 + a_1 V_d}$$

Grappe (1998), Pugh (1974), Whitt (1971), Capelli *et al.* (1993),

Davies (1980), Di Prampero *et al.* (1979), Ménard *et al.* (1990)

$$\mathbf{R_R = a_0}$$

Accélération de la pesanteur ( $9.81 \text{ m.s}^{-2}$ )

$$a_0 = C_r m g$$

Coefficient  
de roulement

Masse du cycliste et  
de la bicyclette (kg)

En fonction de la pente....

$$R_r = C_r m g \cos \alpha$$

## **3.3**

# **Différentes variables influençant la résistance de roulement**

# Pression de gonflage

Plus la pression des pneus est faible, plus la surface de frottement au sol est grande et par conséquent, plus la résistance de roulement augmente. Or,  $C_r$  n'augmente pas linéairement avec la pression de gonflage.

# Type de pneumatique

- Pneus qui ne contiennent pas de chambre à air
- Boyaux

## Épaisseur de la gomme à déformer

Plus importante est l'épaisseur de la gomme du pneumatique à déformer et plus élevées sont les pertes hystérétiques.

Par conséquent,  $C_r$  a tendance à augmenter avec l'épaisseur de la chape.

## Nature des matériaux utilisés

Les pertes hystérétiques semblent correspondre à un frottement interne entre les macromolécules constituant le caoutchouc.

Des gains de 20 % ont été obtenus en changeant les proportions des constituants chimiques du caoutchouc.

## Sculpture de la chape du pneumatique

La forme de la sculpture a, par son aptitude à se déformer, une influence sur  $C_r$ .

Une bande de roulement très lisse peut diminuer la résistance de roulement de 14 % à 18 % comparé à une bande de roulement qui présente des irrégularités.

## Section transversale du boyau

Les contraintes de torsion et de cisaillement locales générées sur le pneu de grosse section sont moins importantes comparé à celui de petite section qui augmente  $C_r$ .

Cependant, un compromis avec la traînée aérodynamique due à la largeur du pneu doit être établi si les vitesses de déplacement sont importantes. La traînée ne doit pas devenir trop importante.

## Ellipse de contact

La surface de contact observée entre le boyau et le sol a une forme d'ellipse. Il existerait une relation étroite entre la forme de l'ellipse et le  $C_r$ .

## Diamètre de la roue

Plus le diamètre de la roue est grand et plus la forme de l'ellipse de contact induit une diminution de  $C_r$  mais, avec en contre-partie, une augmentation de la traînée de la roue.

## Angle de dérive

C'est l'angle que fait le plan de roulage du pneu avec la trajectoire de la bicyclette.

Cette dérive permet d'annuler la force centrifuge au virage.

$C_r$  augmente rapidement en fonction de l'angle de dérive.

# Nature du sol

$C_r$  augmente si la compacité diminue.

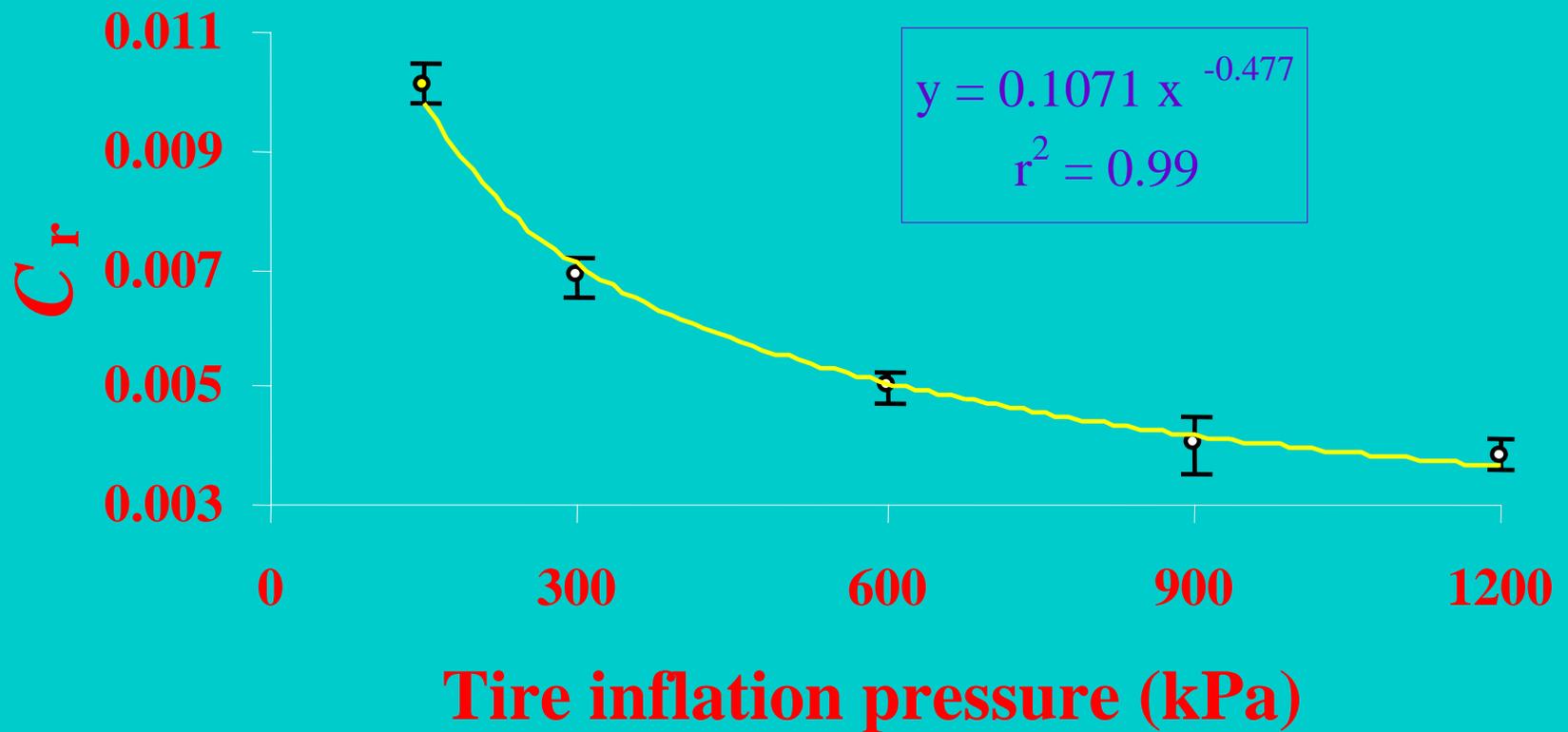
L'idéal est de trouver un sol qui soit le plus élastique possible afin de diminuer les pertes par déformation hystérétique.

# Température

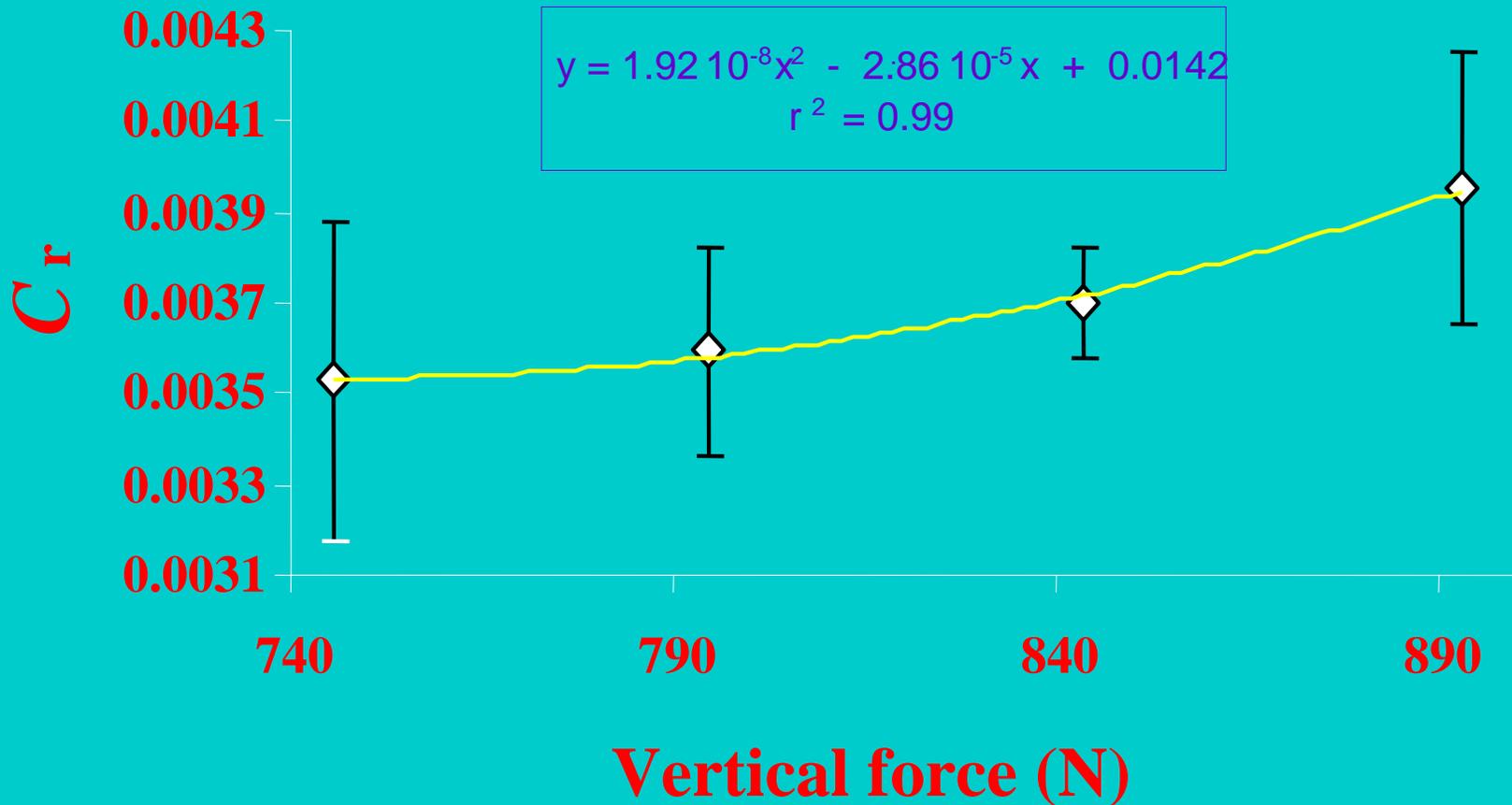
Pour une température variant entre  $0^{\circ}\text{C}$  et  $30^{\circ}\text{C}$ , les pertes par déformation hystérétiques peuvent diminuer de près de 40 %.

Les variations de température ont un effet significatif sur les propriétés mécaniques des matériaux composants le peu et modifient l'élasticité de la structure.

### 3.4 - Influence de la pression de pression de gonflage sur $R_r$



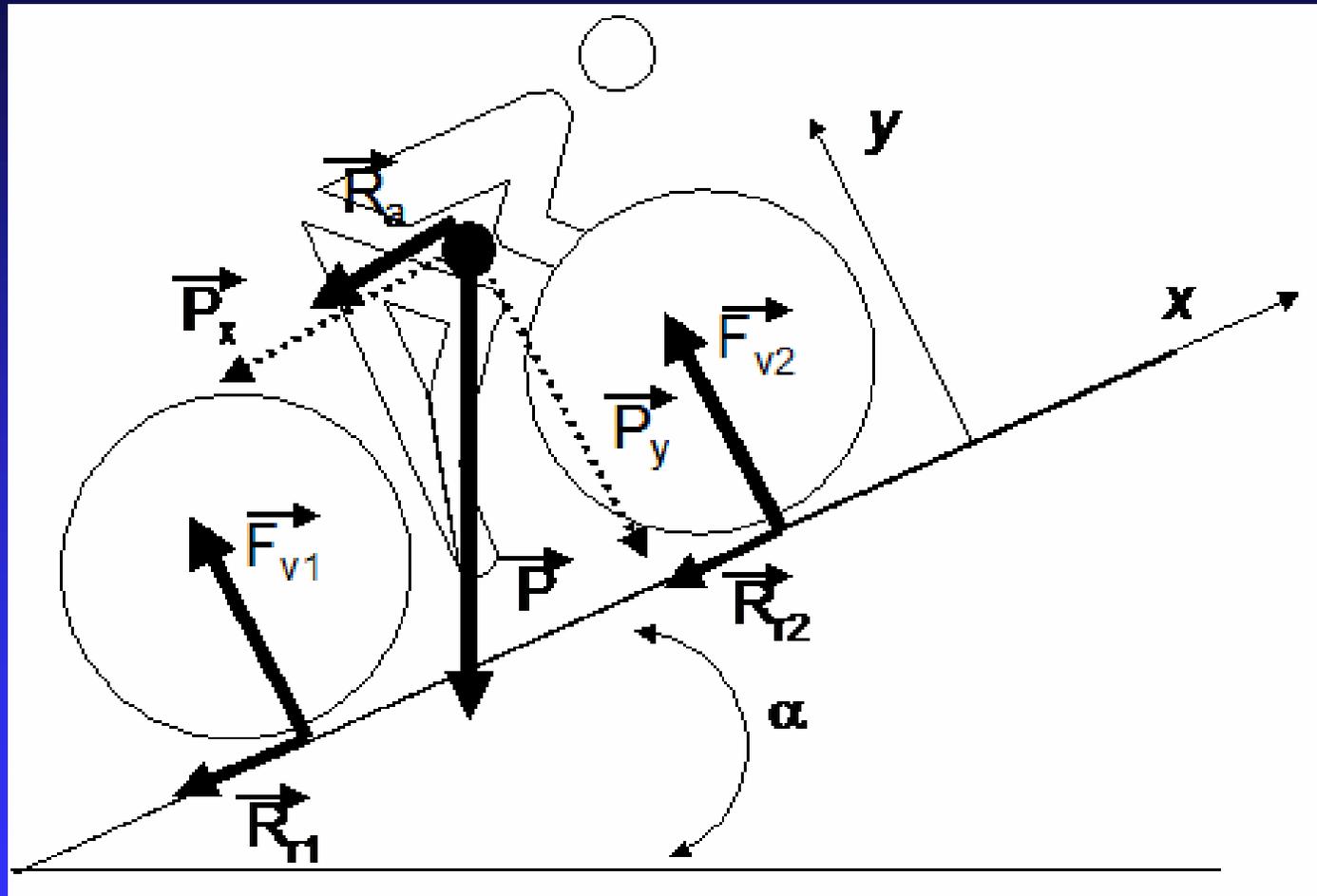
## 3.5 - Influence de la force verticale sur $R_r$



Studies	$R_r$ (N)	$C_r$	Place and type of surface	Type of tire	Inflation pressure (kPa)	Vertical load (kg)
Pugh (1974)	6.9	0.0081	Aerodrome, asphalt surface	Tubular 220 g	630	86
Kyle and Edelman (1975)	NA*	0.0019 to 0.0039	NA	Different tubulars	NA	NA
Di Prampero et al., (1979)	3.2	0.0046	Car track, asphalt surface	NA	700	70
Davies (1980)	0.76	0.001	Treadmill, linoleum surface	NA	NA	79
Gross et al., (1983)	NA	0.0030 to 0.0045	NA	NA	NA	NA
Kyle and Burke (1984)	NA	0.0016 to 0.0035	Hallway, smooth surface	Different tubulars	500 to 1100	NA
Kyle and Van Valkenburgh (1985)	NA	0.0017 to 0.0043	Road, smooth asphalt	Different tubulars Clincher	540 to 1500 400 to 820	NA
Ménard (1992)	1 to 3	0.0028 to 0.0058	Treadmill	Different tubulars	300 to 500	20 to 61
Capelli et al., (1993)	2.43	0.0031	Indoor velodrom, wood surface	NA	1000 – 1100	80
Grappe et al., (1997)	1.95	0.0030	Outdoor velodrom, synthetic surface	Tubular Corsa Cx section of 22 mm	800	78
Grappe et al. 1998 (changes in inflation pressure)	7.5 to 2.8	0.010 to 0.0038	Hallway, tiled floor	Tubular Corsa Cx	150 to 1200	76
Grappe et al. 1998 (change in weight added)	2.6 to 3.5	0.0035 to 0.0039	Hallway, tiled floor	Clincher techno kevelar	1000	76 to 91

# Résistance due à la gravité

**Figure 38** : Représentation des différentes forces qui s'appliquent sur le cycliste lors de l'exercice en montée.  $R_a$  : traînée ;  $R_{r1}$  et  $R_{r2}$  : résistances au roulement appliquées sur chaque pneu ;  $F_{v1}$  et  $F_{v2}$  : force verticale appliquée sur chaque pneu.



$$P = m g \sin \alpha$$

# Résistance totale qui s'oppose au déplacement

Le poids :

$$R_G = m g \sin \alpha$$

La résistance au roulement :

$$R_R = C_r m g \cos \alpha$$

La traînée :

$$R_A = \frac{1}{2} \rho S C_x V_a^2$$

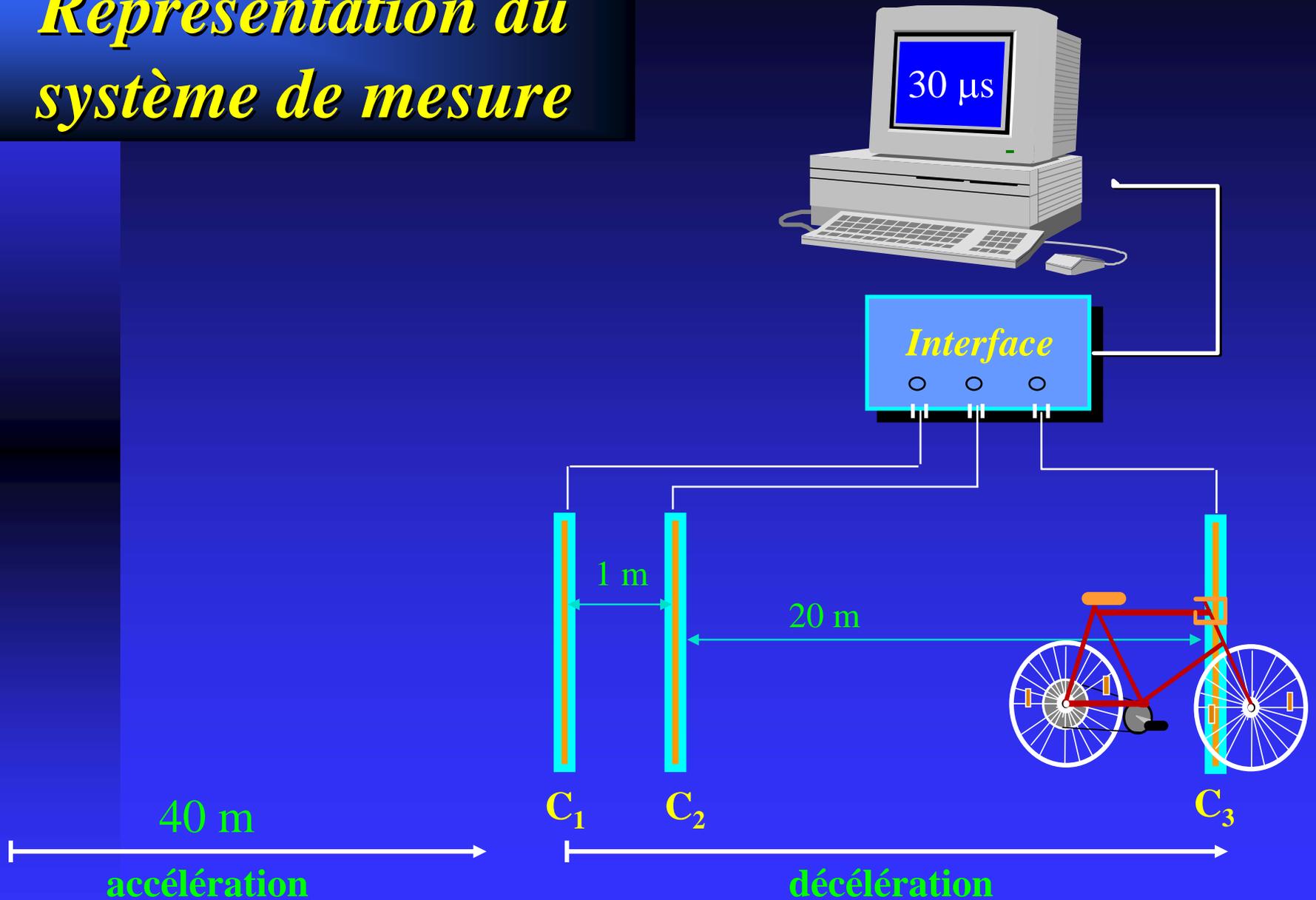
Puissance développée :

$$P_{\text{méca}} = (m g \sin \alpha + C_r m g \cos \alpha + \frac{1}{2} \rho S C_x V_a^2) V_d$$

# Résultats d'expériences



# Représentation du système de mesure



# Détermination de $SC_x$ et $R_r$



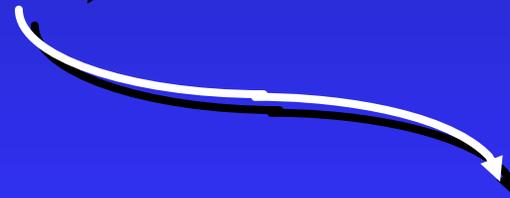
En minimisant par itérations :

$$\sum_{i=1}^{30} (D - D^*)^2$$



Distance mesurée ( $D$ )

et

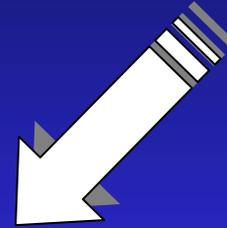
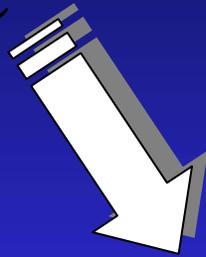


Distance prédite ( $D^*$ )

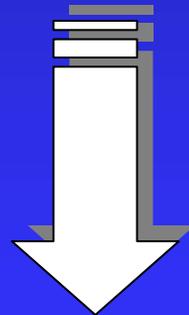
# Méthode de décélération

Sensibilité

Reproductibilité



Préalablement testées



**Erreur moyenne = 0,52%**

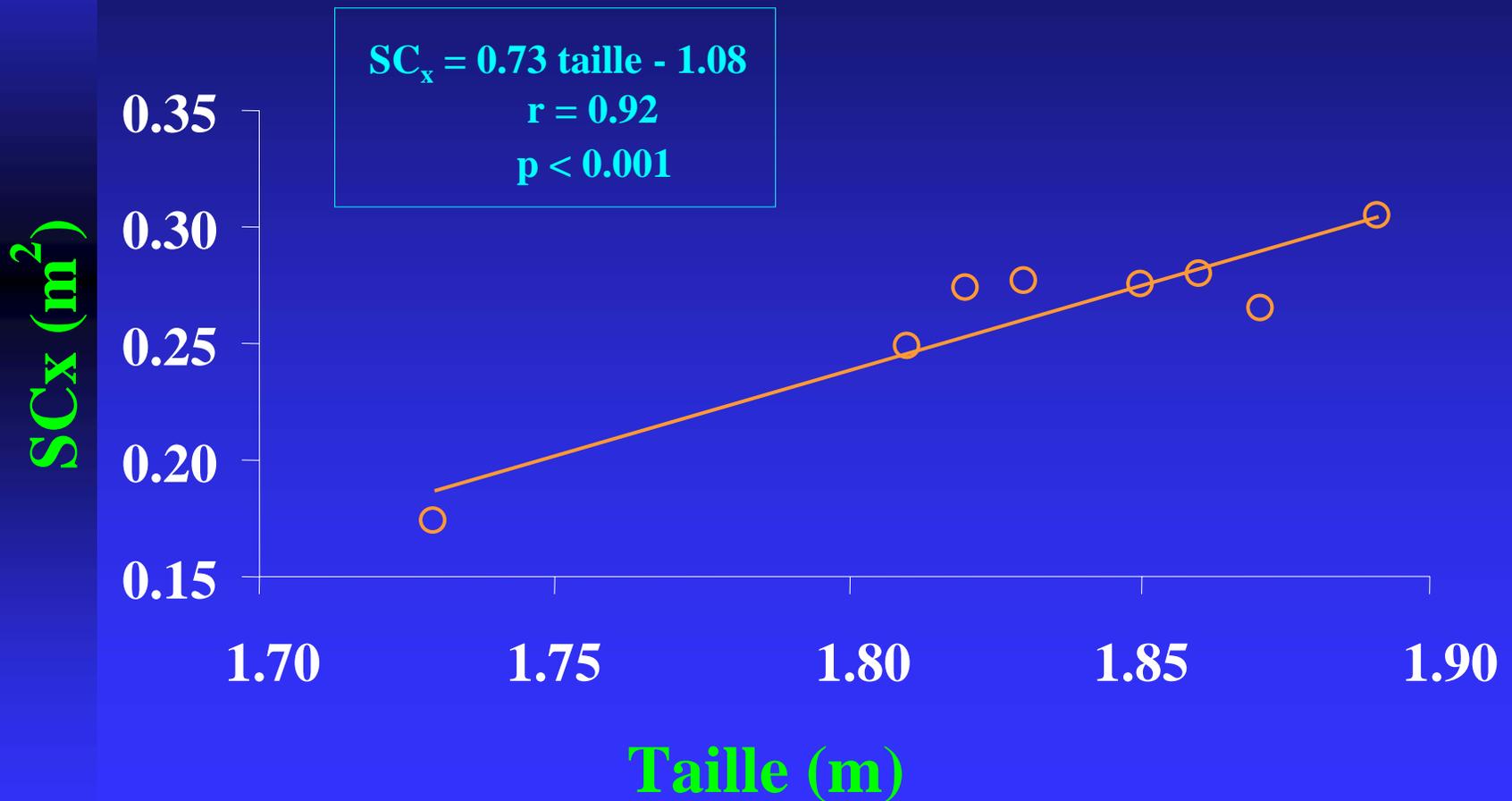
# **1 - Influence de la position sur la traînée aérodynamique**

# *Evaluation de la pénétration dans l'air du coureur*

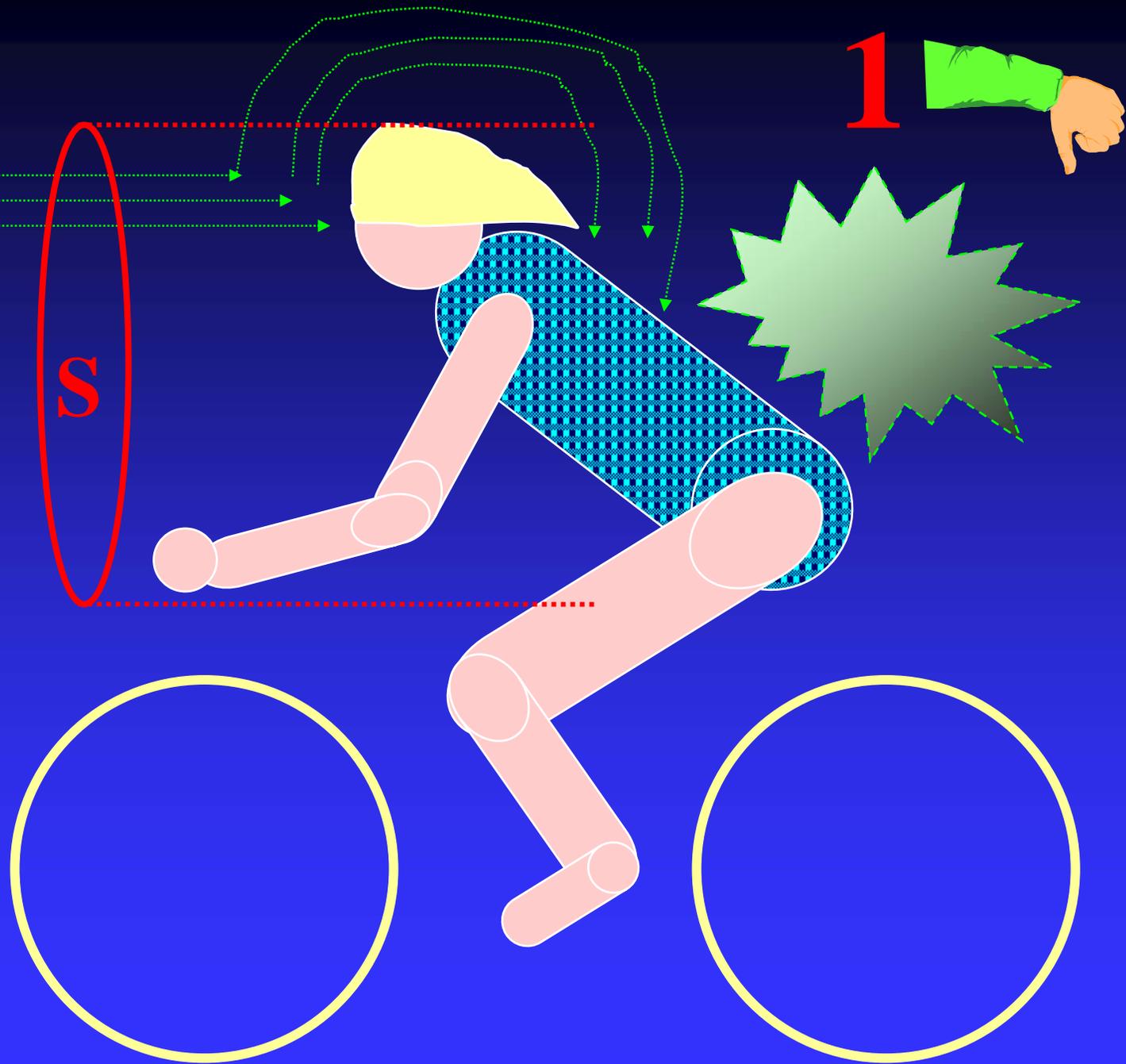
- ⇒ **Détermination du  $SC_x$  (m<sup>2</sup>)**
- ⇒ **En conditions réelles de locomotion**
- ⇒ **En position de CLM**
- ⇒ **Avec le matériel de compétition**
- ⇒ **Détermination de la position optimale**
- ⇒ **Détermination du ratio  $P_{ext} / SC_x$  (W.m<sup>-2</sup>)**

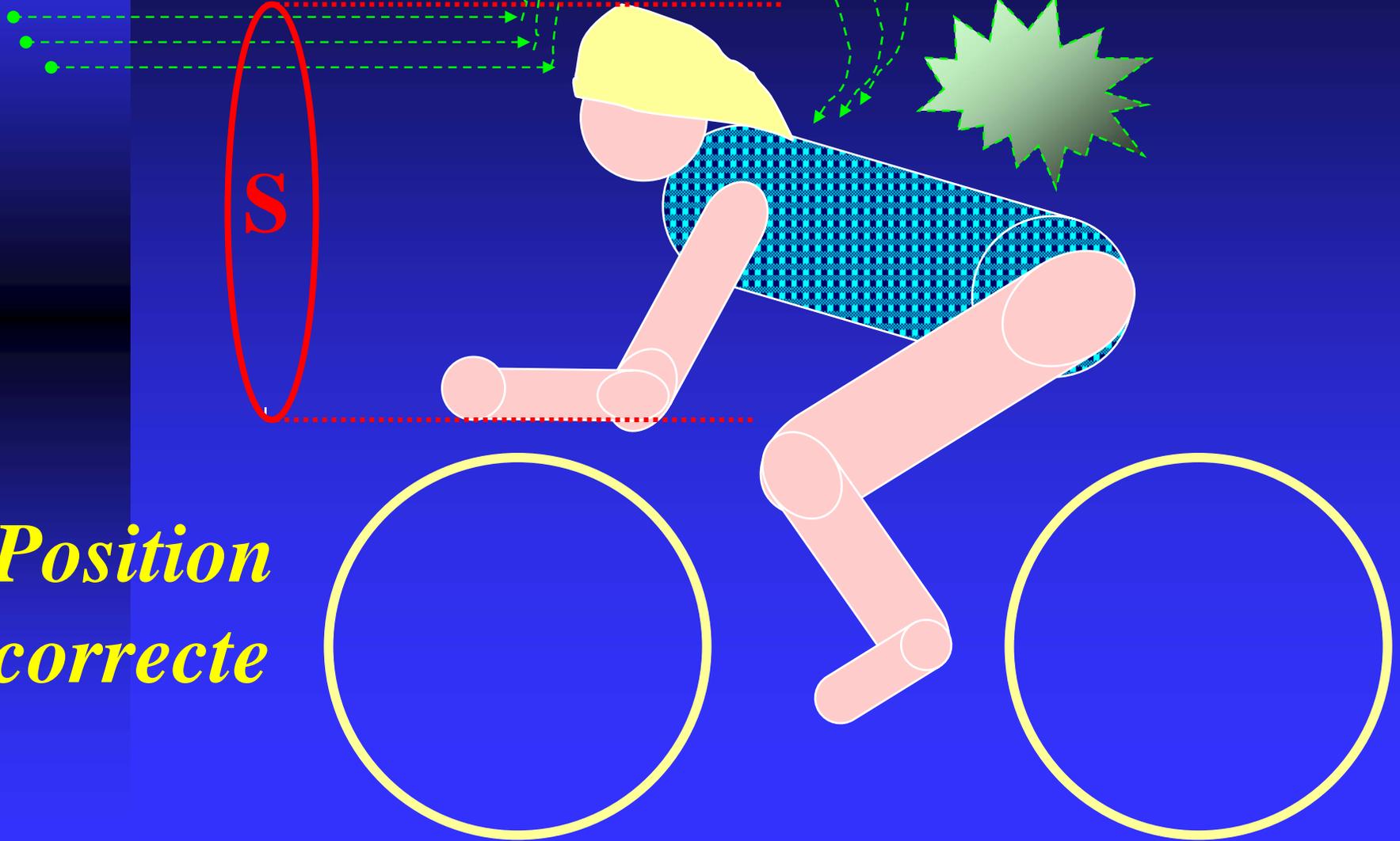
<i>Sujets</i>	<i>Taille</i>	$SC_x$	$\Delta \% / A$	$SC_x$	<i>Gains</i>
		<i>Besançon</i>		<i>Madine</i>	<i>/ Besançon</i>
<b>B</b>	<b>1.89</b>	<b>0.31</b>		<b>0.27</b>	<b>- 13 %</b>
<b>C</b>	<b>1.86</b>	<b>0.28</b>	<b>- 10 %</b>	<b>0.26</b>	<b>- 7 %</b>
<b>F</b>	<b>1.83</b>	<b>0.28</b>	<b>- 10 %</b>		
<b>D</b>	<b>1.85</b>	<b>0.28</b>	<b>- 10 %</b>		
<b>H</b>	<b>1.82</b>	<b>0.27</b>	<b>- 13 %</b>		
<b>E</b>	<b>1.87</b>	<b>0.27</b>	<b>- 13 %</b>	<b>0.26</b>	<b>- 4 %</b>
<b>A</b>	<b>1.81</b>	<b>0.25</b>	<b>- 19 %</b>	<b>0.22</b>	<b>- 12 %</b>
<b>G</b>	<b>1.73</b>	<b>0.17</b>	<b>- 45 %</b>		

# $SC_x$ en fonction de la taille



*Position  
trop  
relevée*

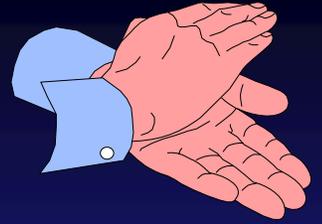




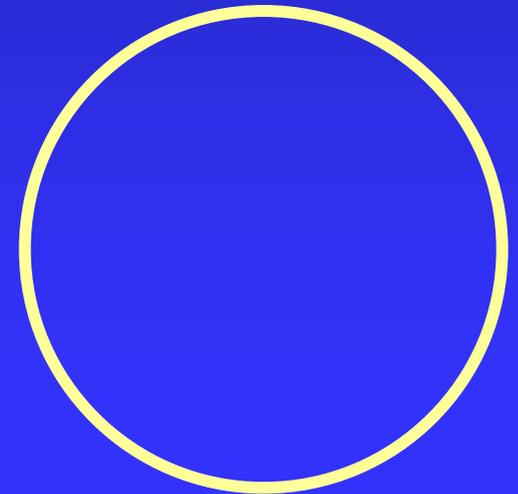
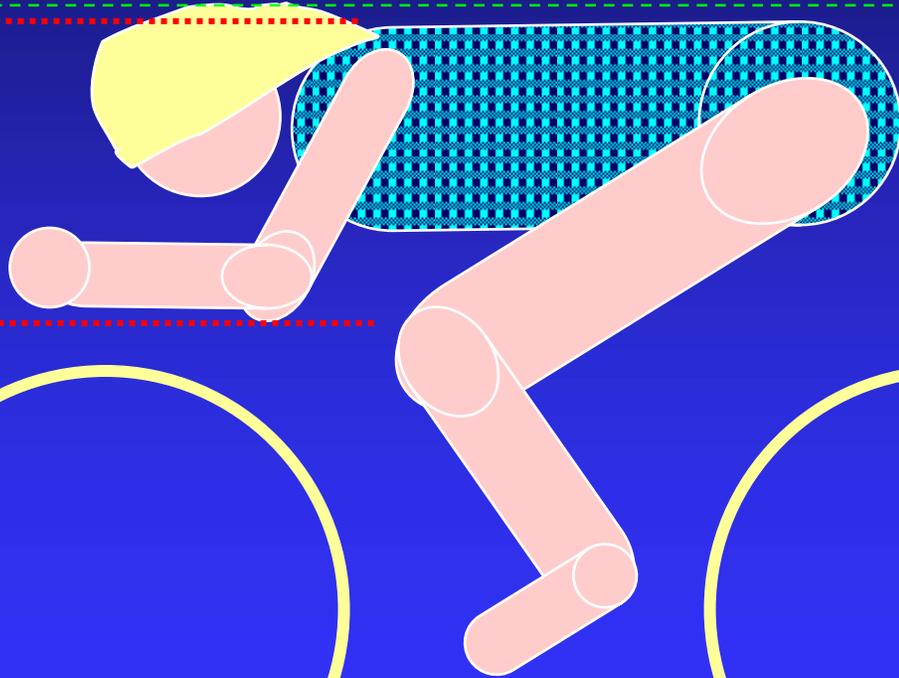
*Position  
correcte*

# *Position optimale*

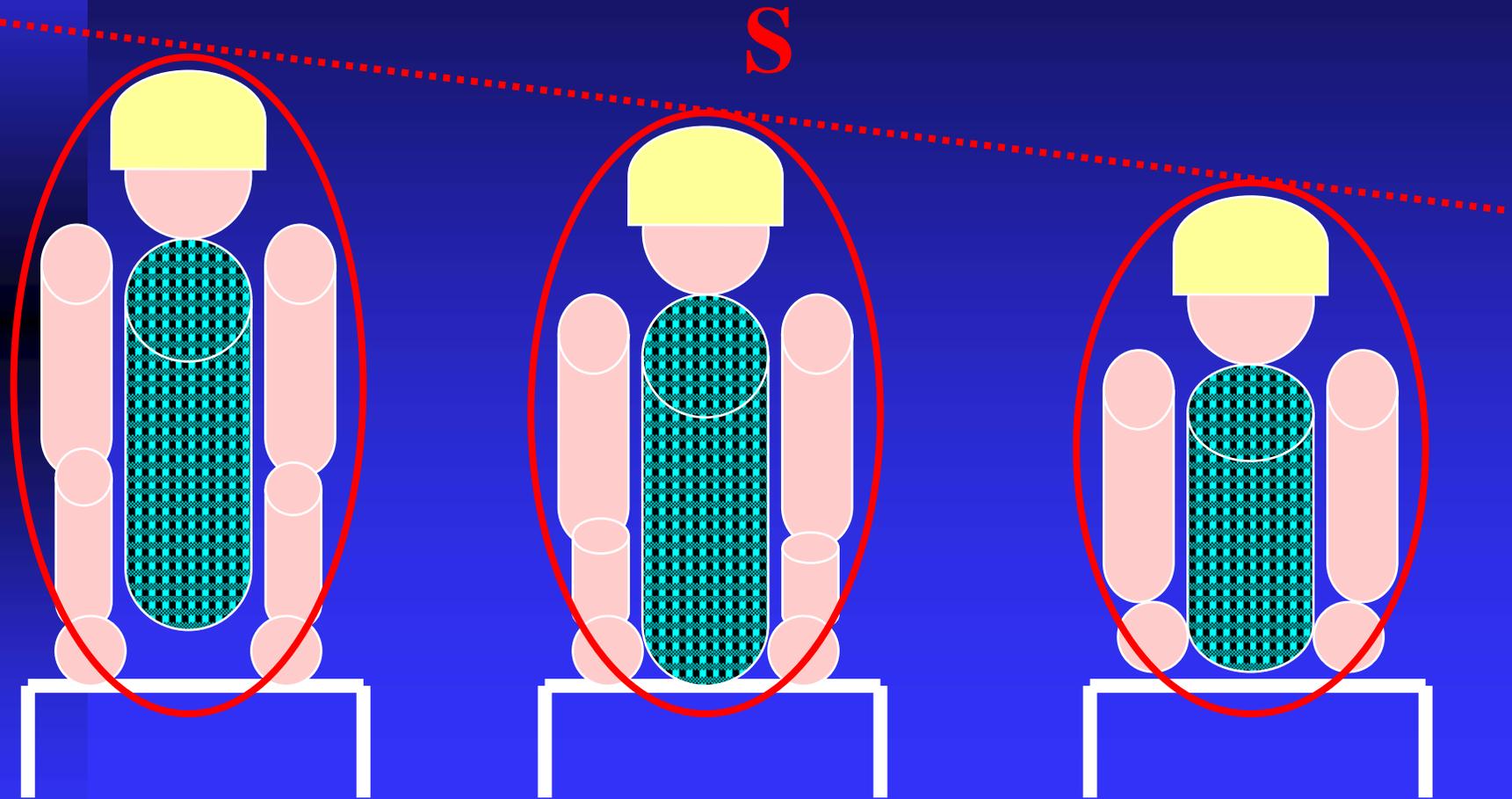
3



S

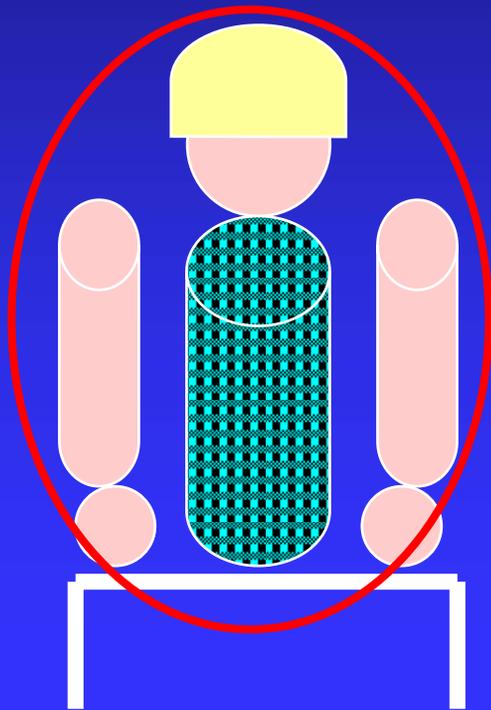


*Illustration de la diminution de la surface frontale avec la flexion du buste*

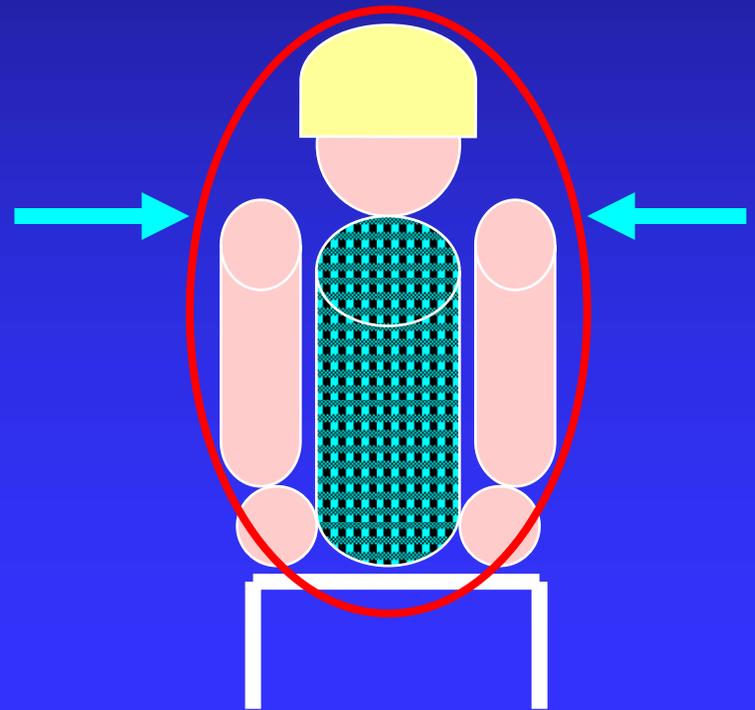


*Illustration de la diminution de la surface frontale avec la diminution de l'écartement des membres supérieurs*

**S supérieure**



**S inférieure**



*Détermination du ratio  $P_{ext} / SC_x$   
qui est le déterminant principal  
de la vitesse de déplacement*

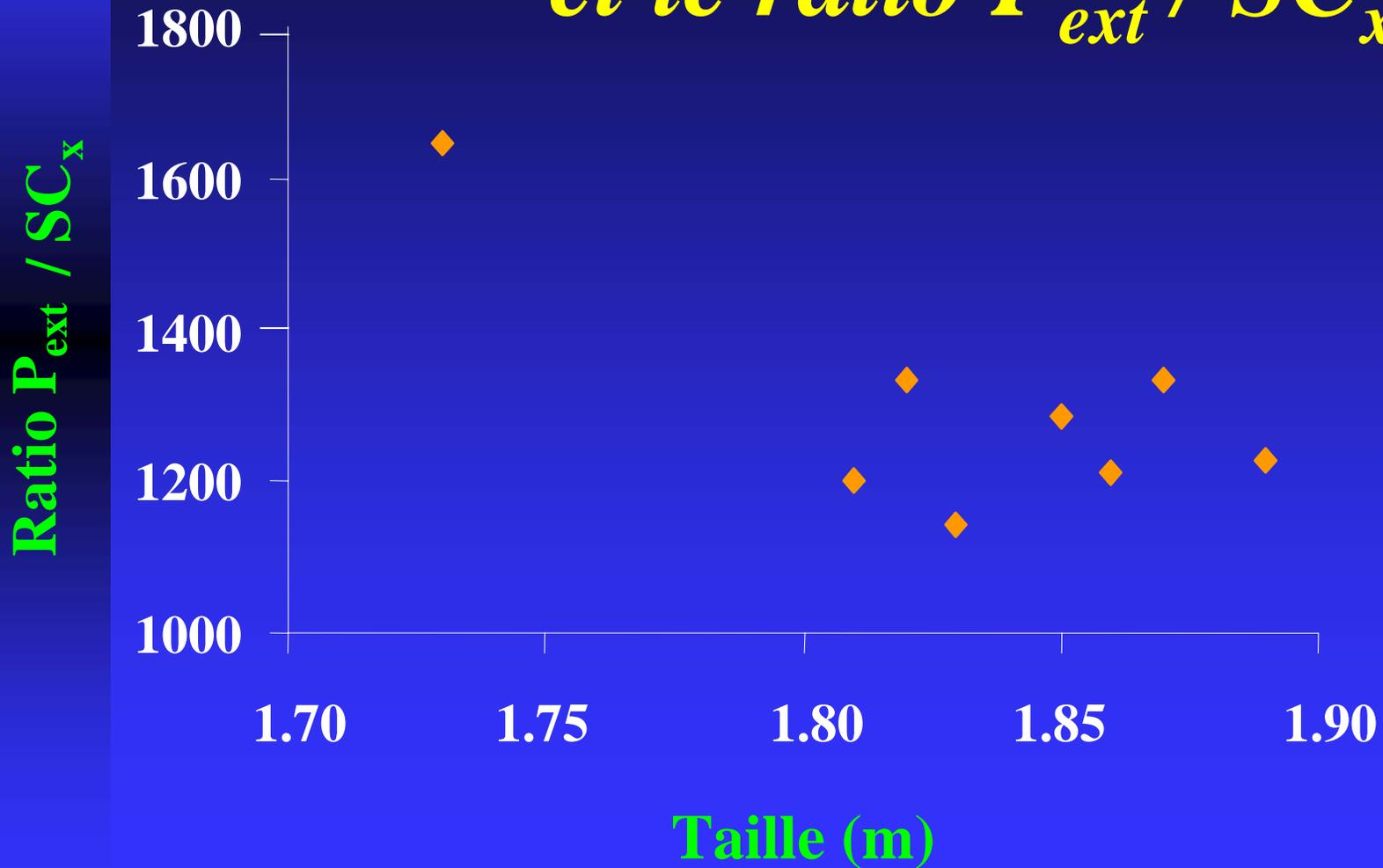
*car :*

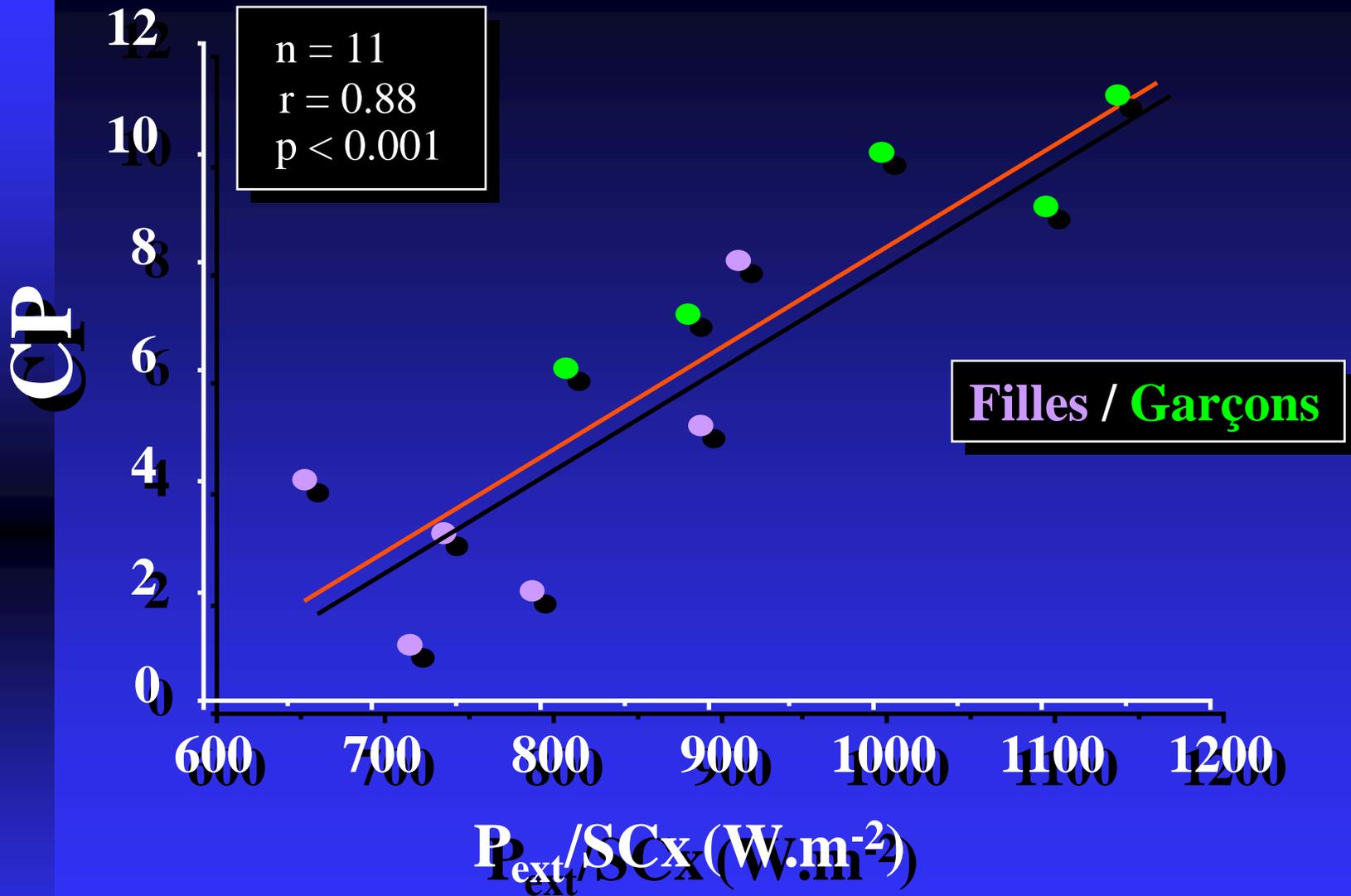


$$V_d = \sqrt[3]{(0.9 \rho P_{ext} / 2 SC_x)}$$

<i>Sujets</i>	$P_{ext} SA / SC_x$ <i>SC<sub>x</sub> Besançon</i> (W/m <sup>2</sup> )	$V_d$ (km/h) Poids vélo = 10 kg Cr = 0.003 T = 20° PB = 760	$P_{ext} SA / SC_x$ <i>SC<sub>x</sub> Madine</i> (W/m <sup>2</sup> )	$V_d$ (km/h)	
<b>B</b>	1226	44.3	1462	46.3	(+ 2)
<b>C</b>	1214	44.2	1308	45.2	(+ 1)
<b>F</b>	1143	43.2			
<b>D</b>	1286	45			
<b>H</b>	1333	45.5			
<b>E</b>	1333	45.6	1385	46.2	(+ 0.6)
<b>A</b>	1200	44	1364	45.9	(+ 1.9)
<b>G</b>	1647	48.5			

# *Relation entre la taille et le ratio $P_{ext} / SC_x$*





Relation entre la performance en cyclisme (CP) et  $P_{ext}/SCx$   
 ( $P_{ext}$  = puissance mécanique externe,  $SCx$  = surface frontale effective)

**Il est possible d'estimer la performance en cyclisme à partir de données physiologique et biomécanique**

**Le ratio  $P_{\text{ext}} / SC_x$  constitue un index intéressant à prendre en considération pour estimer la performance d'un cycliste au CLM.**

**Les dimensions corporelles du cycliste ne sont pas déterminantes pour la performance en CLM**

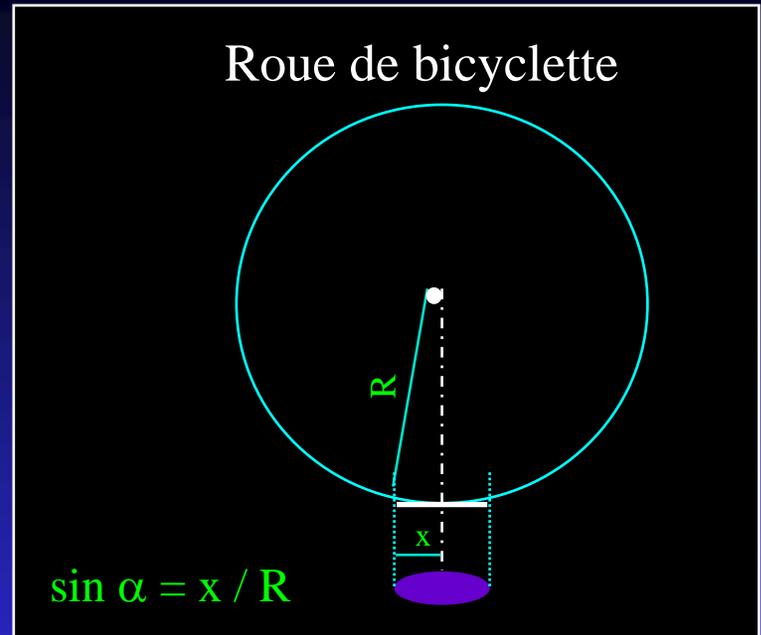


# Pression différente

Déformation du  
boyau différente

Pertes hystérétiques  
différentes

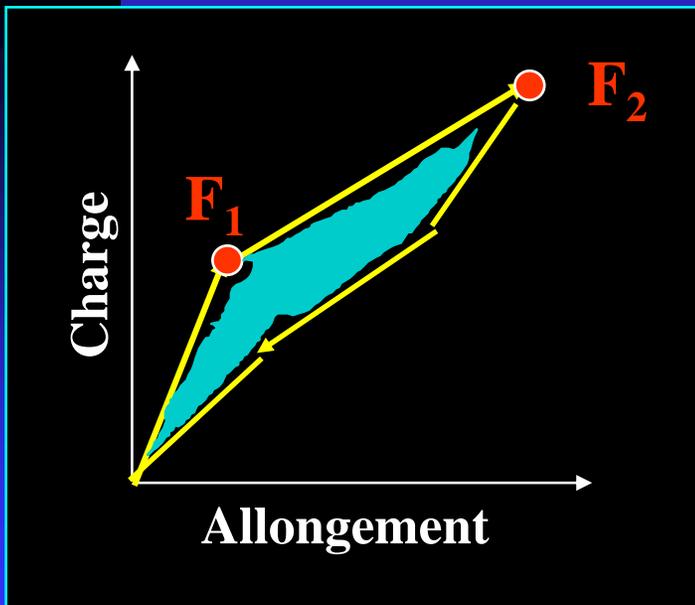
Ellipse de contact  
(fonction de l'angle  $\alpha$ )  
différente



**Relation non linéaire  
entre  $R_R$  et pression**

# Pertes hystérétiques

Matériau non élastique



Dégagement de chaleur  
inversement proportionnel à  
l'élasticité du boyau

# Pertes hystérétiques

/// pour  $p < 5$  bars

$R_R$  ///

Elasticité du boyau ↘

Ellipse de contact ↗

# Résistance de roulement

1,5 bars

12 bars

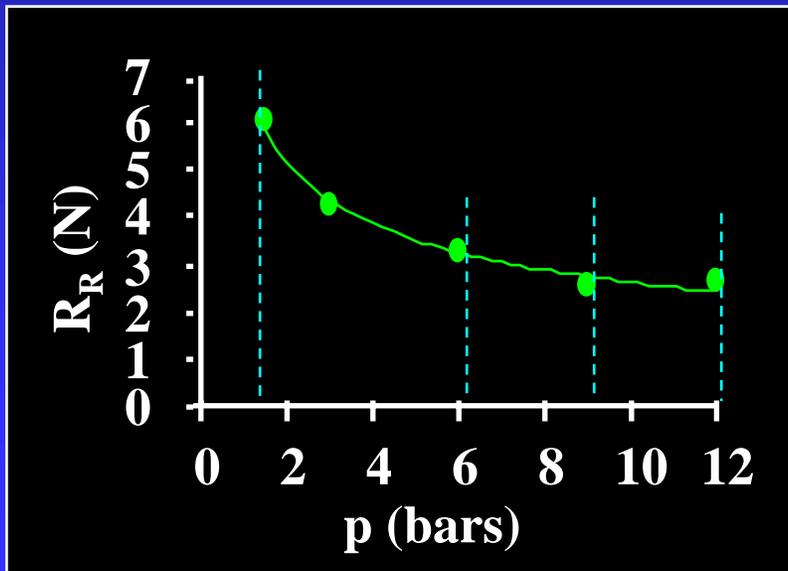
6 bars

9 bars

$R_R \searrow 57\%$

$R_R \searrow 21,8\%$

$R_T \searrow 2\%$  (à 45 km.h<sup>-1</sup>)





Influence de la  
pression de gonflage  
et de la charge sur le  
record de 1'heure en  
cyclisme

# Evolution des variables biomécaniques sur le record de l'heure d'un cycliste en fonction de différentes pressions de gonflage

Estimées à partir d'un modèle mathématique

$$P_{\text{ext}} = 400 \text{ W}, SC_x = 0.2 \text{ m}^2, \rho = 1.19 \text{ kg/m}^3$$

Pressure (kPa)	150	300	600	900	1200
$C_f$	0.0101	0.0069	0.0050	0.0040	0.0038
$R_{Ra}$ (W)	298	328	347	357	359
$R_{Rr}$ (W)	102	72	53	43	41
$v$ (km/h)	48.9	50.5	51.5	52.0	52.1

# Evolution des variables biomécaniques sur le record de l'heure d'un cycliste en fonction de différentes surcharges

Estimées à partir d'un modèle mathématique

$$P_{\text{ext}} = 400 \text{ W}, SC_x = 0.2 \text{ m}^2, \rho = 1.19 \text{ kg/m}^3$$

Overload (kg)	0	5	10	15
$G_r$	0.0035	0.0036	0.0037	0.004
$P_{Ra}$ (W)	362	359	355	350
$P_{Rr}$ (W)	38	41	45	50
$\bar{x}$ (Km/h)	52.2	52.0	51.9	51.6