

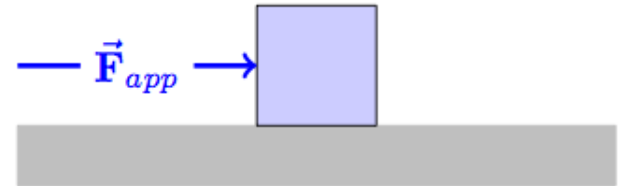
**Encore plus  
dangereux que  
le silence des  
pantoufles,**



**Le frottement des  
chaussettes**

Réveillez vous, Indignez-vous !

A la découverte  
d'une nouvelle force :  
le frottement...

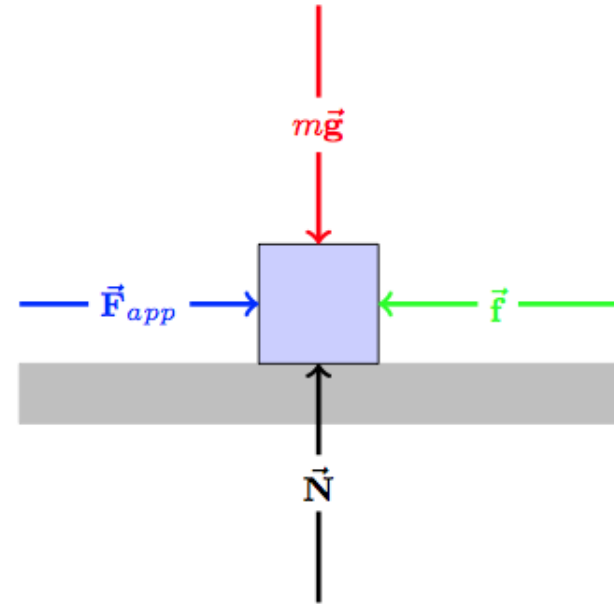


$$m \vec{a}(t) = \sum \vec{F}(t)$$

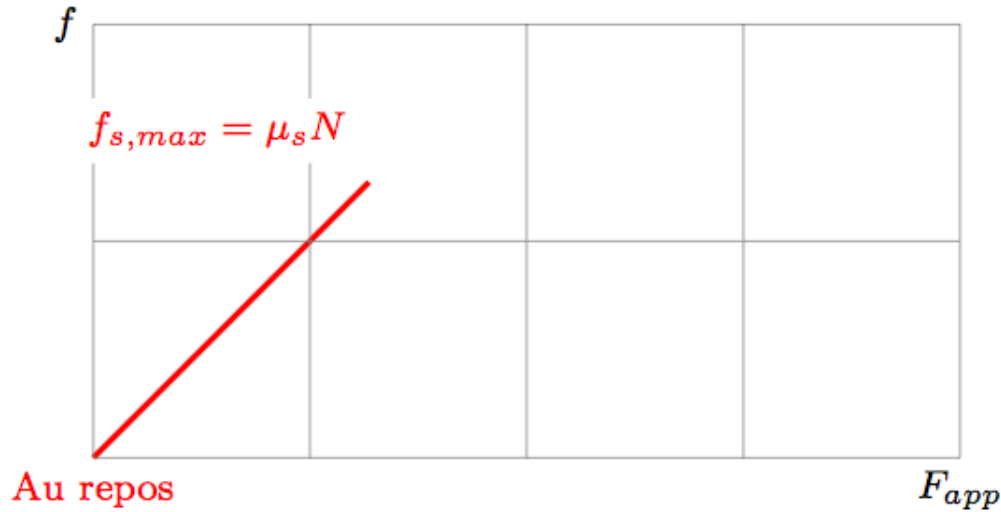
Exerçons  
une force horizontale  
sur un bloc posé sur le sol...



$$m \vec{a}(t) = \sum \vec{F}(t)$$



Quels sont toutes les forces  
qui agissent sur le bloc ?

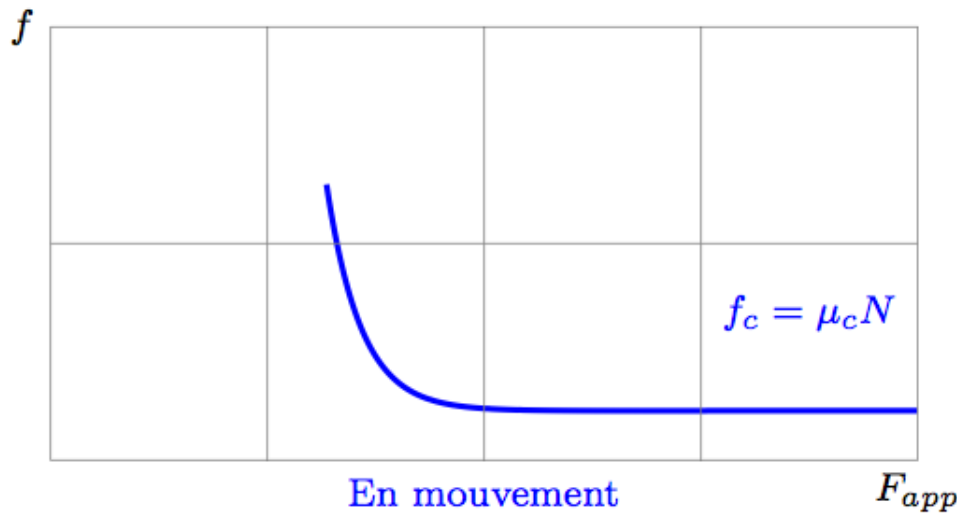


© Can Stock Photo - csp8902540

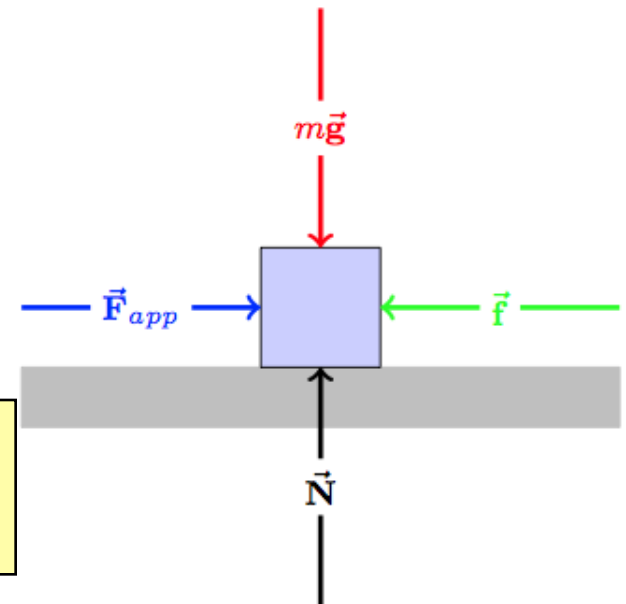
**D'abord,  
rien ne bouge !**

**C'est le **frottement statique** !**

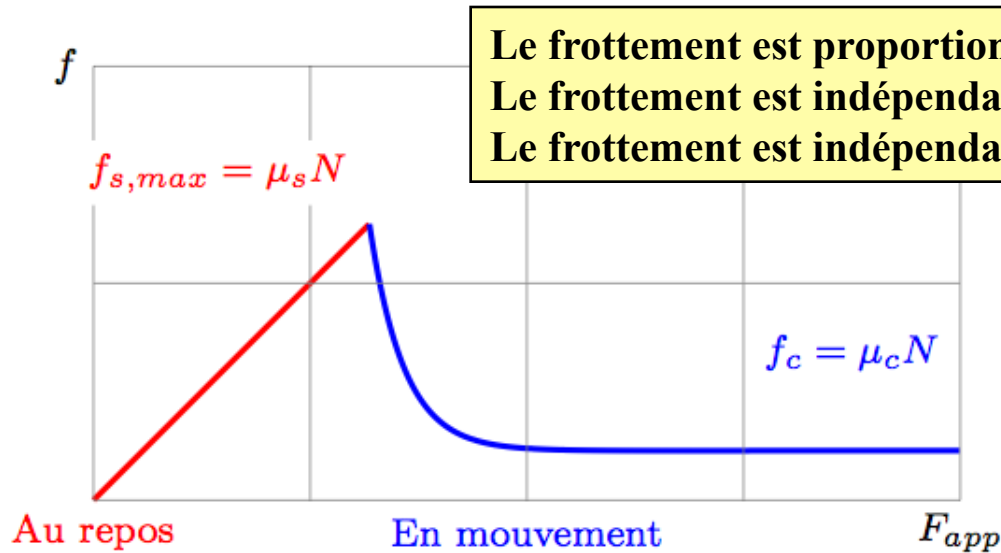
**Une force de frottement statique ajuste automatiquement sa valeur pour compenser la force appliquée, jusqu'à un module de valeur maximale  $f_{s,max}$  proportionnel au module de la force normale.**



Et puis, le bloc commence à glisser

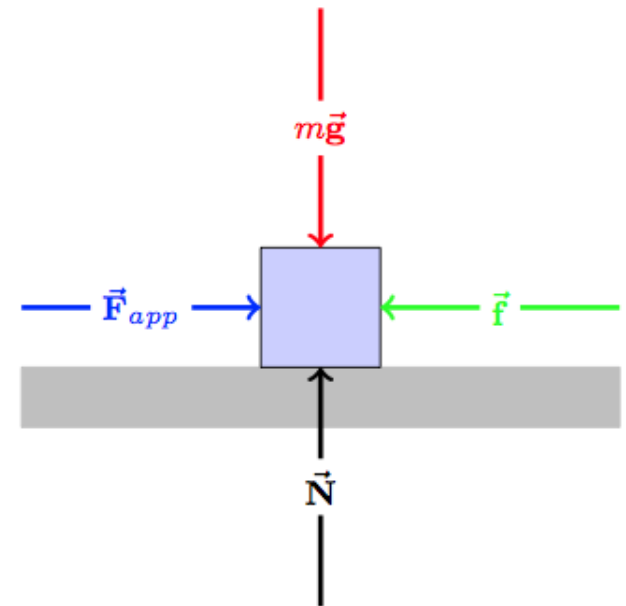


C'est le **frottement cinétique** !  
Le module de la force cinétique tend vers une valeur  $f_c$  proportionnelle au module de la force normale.



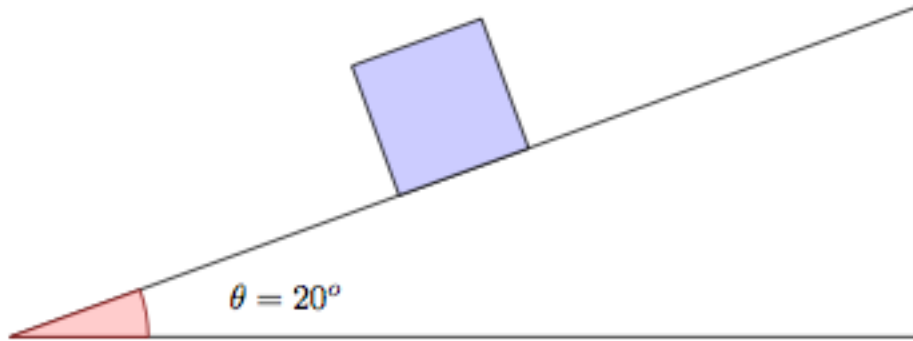
Le frottement est proportionnel au module de la force normale.  
 Le frottement est indépendant de l'aire de contact.  
 Le frottement est indépendant de la vitesse.

Nous avons  
 un modèle  
 pour le frottement  
 entre deux surfaces !



Un skieur glisse  
sur une pente...



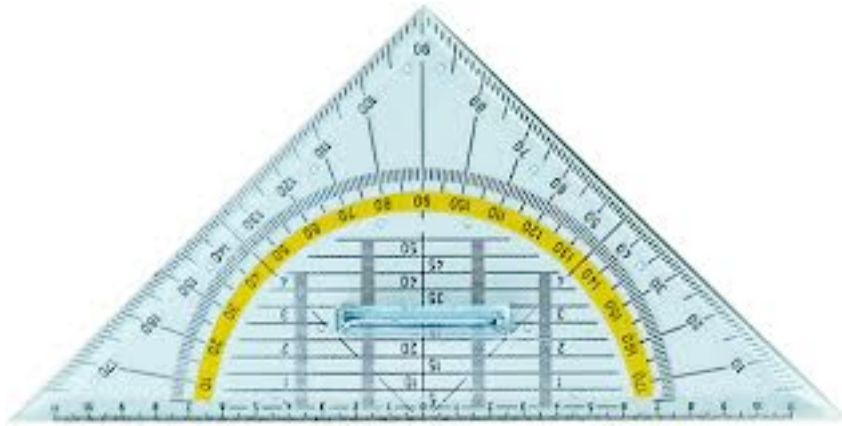


Comment choisir  
les axes...

**Skieur de 60 kg qui glisse parfaitement**

**Comment calculer son accélération et la force exercée par le sol sur le skieur ?**

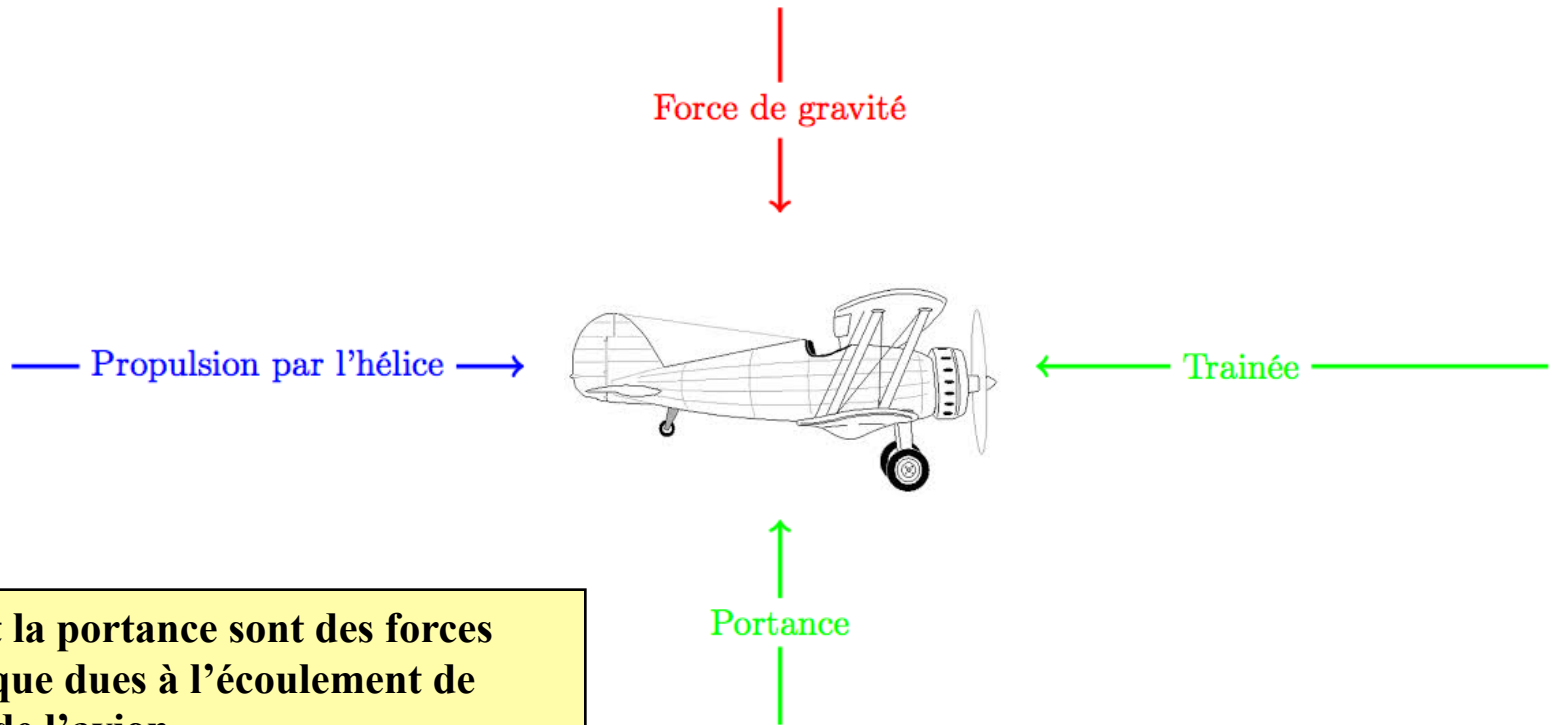




Matériel  
réellement  
indispensable  
pour l'examen !



# Et quid du frottement de l'air sur un avion ?



**La trainée et la portance sont des forces aérodynamique dues à l'écoulement de l'air autour de l'avion. Ces forces grandissent avec la vitesse de l'avion et sont nulles à vitesse nulle !**

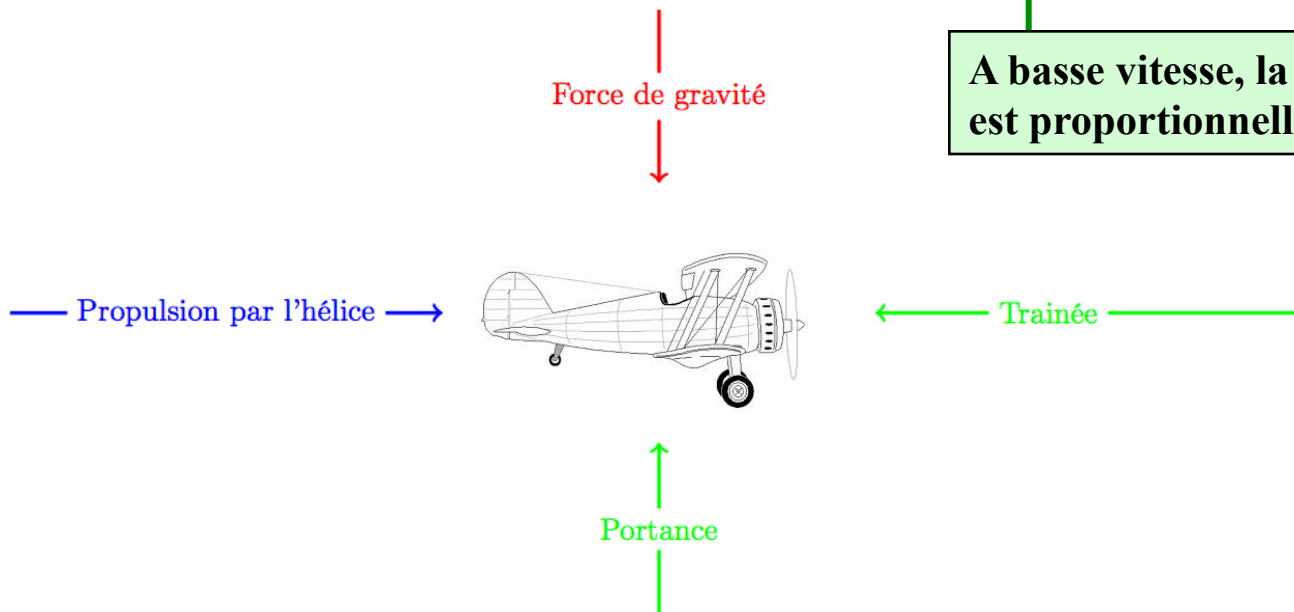
# Coefficients de frottements

A haute vitesse, le module de la trainée (et de la portance) est proportionnel au carré de la vitesse !

$$\vec{F}_D = - \underbrace{\frac{1}{2} C_D \rho A v}_{k} \vec{v}$$

$$\vec{F}_D = -\gamma \vec{v}$$

A basse vitesse, la force de résistance est proportionnelle à la vitesse !



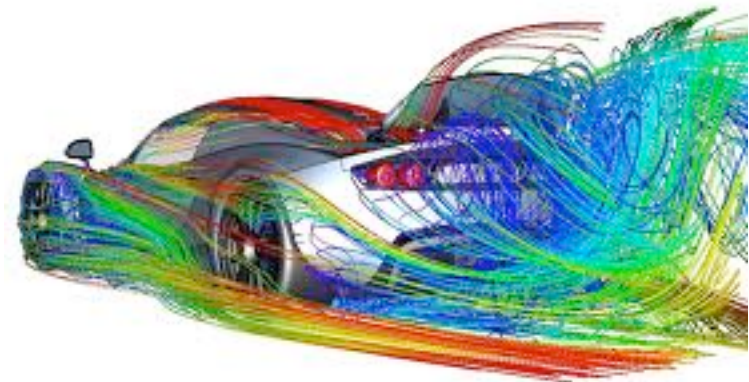
Aujourd'hui,  
on peut calculer  
l'écoulement et  
prédire exactement  
ces forces !

A haute vitesse, le module de la trainée  
(et de la portance) est proportionnel au  
carré de la vitesse !

$$\vec{F}_D = - \underbrace{\frac{1}{2} C_D \rho A}_{k} v \vec{v}$$

$$\vec{F}_D = -\gamma \vec{v}$$

A basse vitesse, la force de résistance  
est proportionnelle à la vitesse !



# Pourquoi mettre des ailerons aux voitures de formule 1 ?

**Voitures légères et profilées !**

**Peu d'inertie !**

**Peu de trainée !**

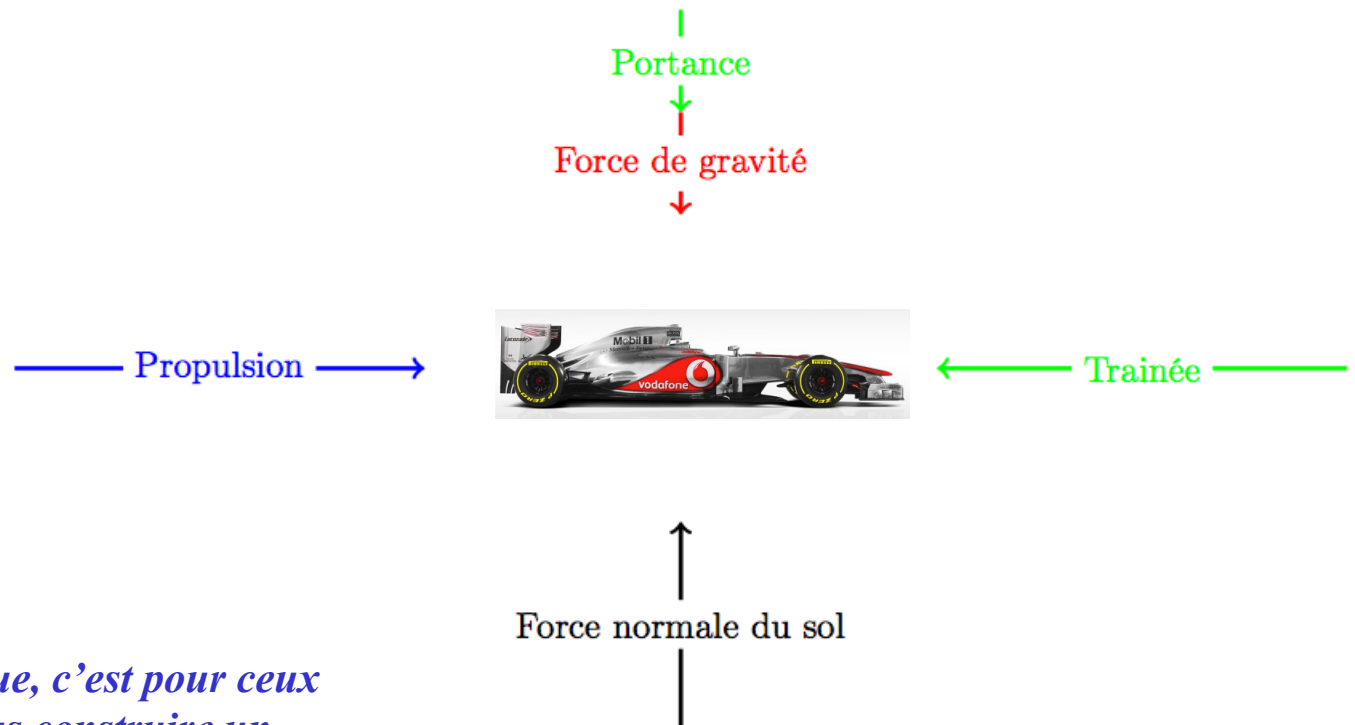
**Mais pas de tenue de route (car petite force normale)**

**Les ailerons créent une portance dirigée vers le bas.**

**Meilleure tenue de route (car plus grande force normale)**

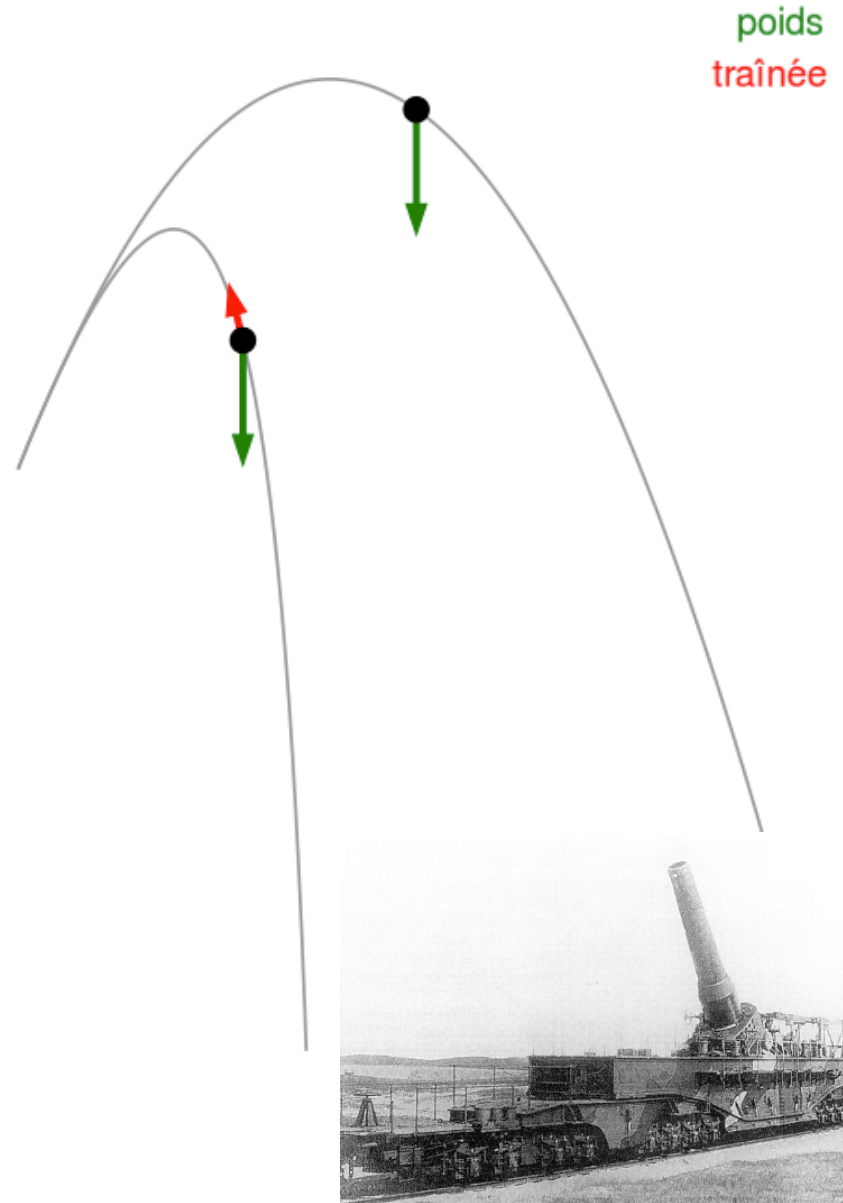


# Pourquoi mettre des ailerons aux voitures de formule 1 ?



*L'aérodynamique, c'est pour ceux qui ne savent pas construire un moteur (attribué à Enzo Ferrari)*

Effet  
de la friction  
de l'air  
sur la trajectoire  
d'un obus...



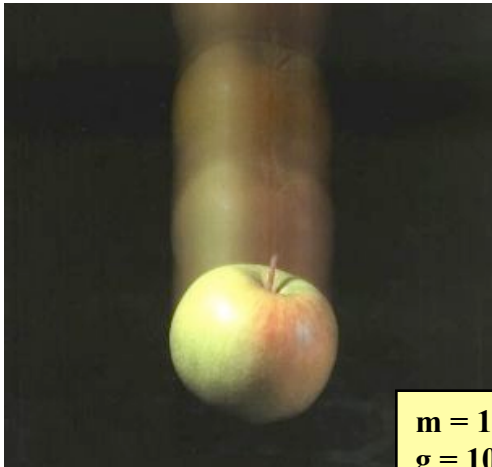
# Chute libre sans traînée

$$m \frac{dv}{dt}(t) = -mg$$

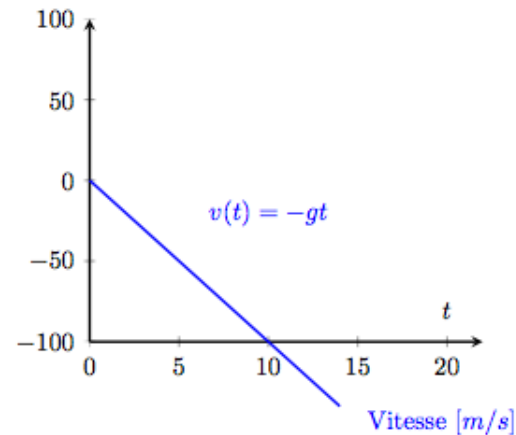


En imposant que  $v(0) = 0$

$$v(t) = -g t$$



**m = 1 kg**  
**g = 10 m/s<sup>2</sup>**





# Chute libre avec trainée



$m = 1 \text{ kg}$   
 $g = 10 \text{ m/s}^2$   
 $\gamma = 0.2 \text{ kg/s}$

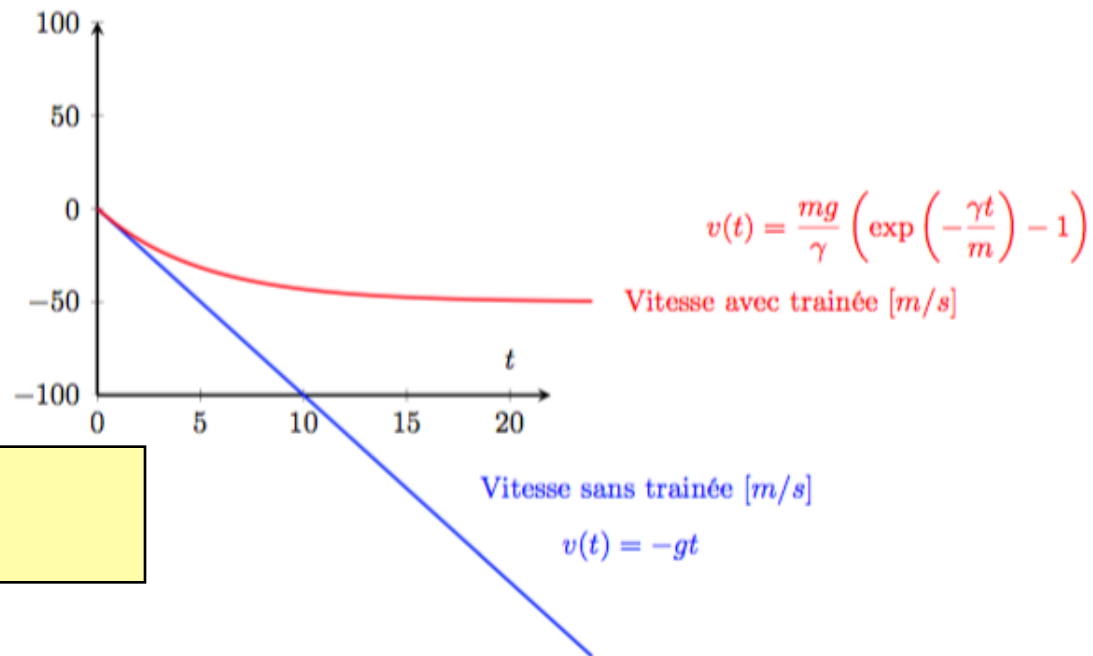
Obtenir cette solution nécessite le calcul différentiel et ne vous sera pas demandé : c'est promis !

Par contre, vous **devez pouvoir vérifier** que cette expression de la vitesse satisfait la loi de Newton !

$$m \frac{dv}{dt}(t) = -mg - \gamma v(t)$$

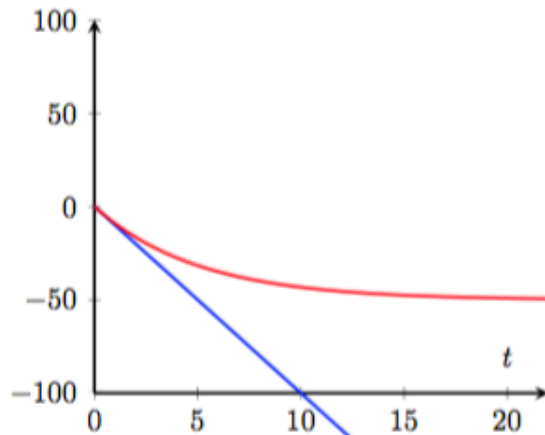
En imposant que  $v(0) = 0$

$$v(t) = \frac{mg}{\gamma} \left( \exp\left(-\frac{\gamma t}{m}\right) - 1 \right)$$



Progressivement  
on atteint  
une vitesse  
limite...

$$\begin{array}{l}
 \cancel{m \frac{dv}{dt}}(t) = -mg - \gamma v(t) \\
 \downarrow \\
 v_L = -\frac{mg}{\gamma}
 \end{array}$$



$$v(t) = \frac{mg}{\gamma} \left( \exp\left(-\frac{\gamma t}{m}\right) - 1 \right)$$

Vitesse avec trainée [m/s]

Vitesse sans trainée [m/s]

$$v(t) = -gt$$

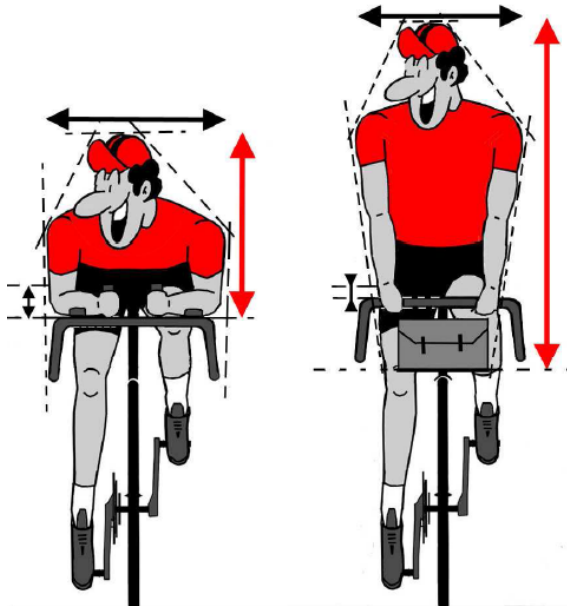
Vitesses limites

Corps	$v_L$ (m/s)
Parachutiste en chute libre	
position verticale	85
position du saut de l'ange	55
Parachutiste	6,5
Balle de tennis de table	7
Balle de base-ball	40
Balle de golf	30
Balle en fer (2 cm de rayon)	80
Pierre (1 cm de rayon)	30
Goutte de pluie	10

# Comment diminuer la traînée ?

A haute vitesse, le module de la traînée (et de la portance) est proportionnel au carré de la vitesse !

$$\vec{F}_D = - \underbrace{\frac{1}{2} C_D \rho A}_k v \vec{v}$$

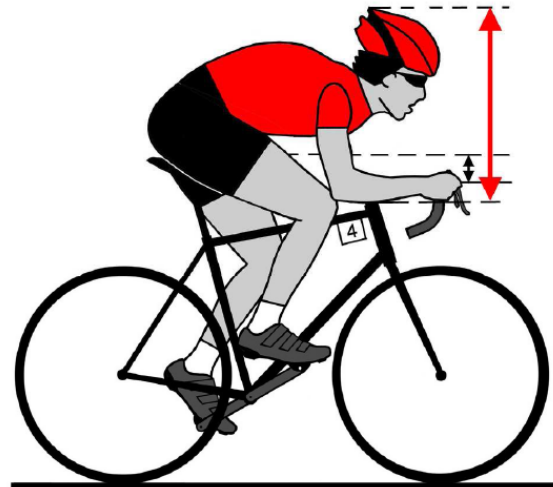
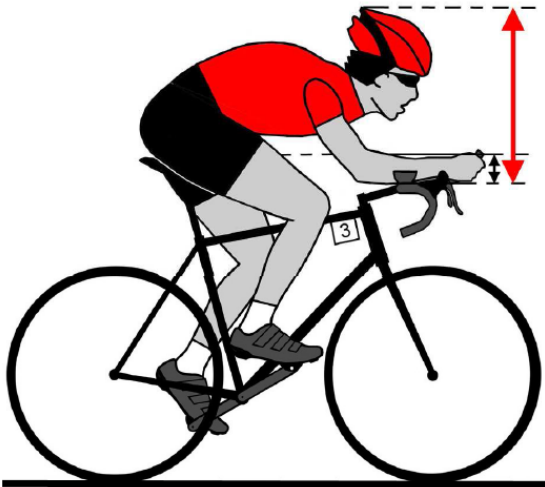


$C_D$  coefficient adimensionnel qui dépend de la forme  
 $\rho$  masse volumique du fluide  
 $A$  aire du corps projeté sur un plan perpendiculaire au mouvement

# Comment diminuer la traînée ?

A haute vitesse, le module de la traînée (et de la portance) est proportionnel au carré de la vitesse !

$$\vec{F}_D = - \underbrace{\frac{1}{2} C_D \rho A}_{k} v \vec{v}$$



$C_D$  coefficient

Cylindre	1.2
Personne	0.9
Sphère	0.5
Auto	0.4
Aile d'avion	0.01

$C_D$  coefficient adimensionnel qui dépend de la forme

$\rho$  masse volumique du fluide

$A$  aire du corps projeté sur un plan perpendiculaire au mouvement

Ne pas  
oublier !



- Les forces de frottement tendent à s'opposer au mouvement relatif de deux corps
- Entre deux solides, on distingue le **frottement statique** et le **frottement cinétique**. La norme de la force de frottement est **indépendante de la vitesse** et est proportionnelle à la norme de la force de contact normale.
- La force de traînée due à l'écoulement d'un fluide autour d'un solide **dépend de la vitesse**, de la forme et de l'orientation du corps.
- La chute d'un corps dans un fluide tend toujours vers une situation où la traînée et la force de gravité s'annulent. On atteint alors la vitesse limite de chute.