

Figure – Expérience historique de frottement solide, d'après *théorie des machines simples* (1781), C.-A. Coulomb.



Définition :

Notons \vec{R} la force exercée par le support sur un solide. L'action de contact entre deux solides se décompose de la manière suivante :

$$\vec{R} = \vec{N} + \vec{T}$$

- \vec{T} est la force de frottement de glissement et s'oriente à l'opposé du mouvement. Cette composante est dans le plan de contact ;
- \vec{N} est la composante normale de l'action de contact, perpendiculaire à la surface de contact entre les solides.

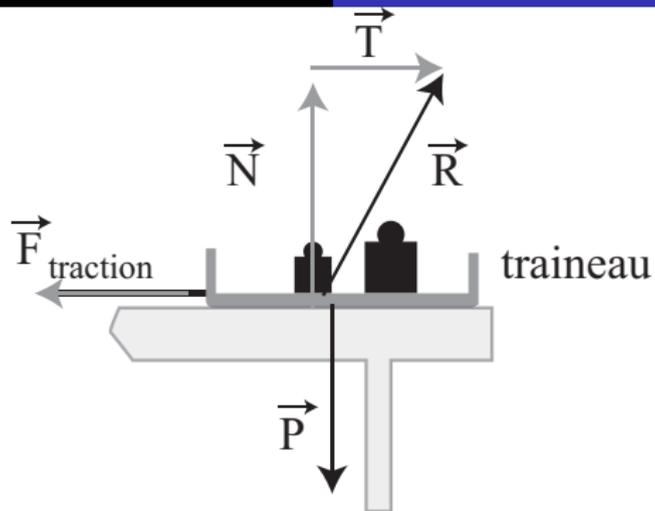


Figure – Bilan des forces exercées sur un traineau.



Définition :

La vitesse de glissement d'un solide (1) par rapport à un solide (2) est donnée par :

$$\vec{v}_g(1/2) = \vec{v}(1)|_{\mathcal{R}} - \vec{v}(2)|_{\mathcal{R}}$$

où $\vec{v}(1)|_{\mathcal{R}}$ et $\vec{v}(2)|_{\mathcal{R}}$ sont les vitesses des solides (1) et (2) dans le référentiel d'étude \mathcal{R} .





Définition : : lois de Coulomb

Dans le cas du glissement ($\vec{v}_g(2/1) \neq \vec{0}$), la force de frottement solide \vec{T} s'oppose au mouvement du solide. Elle est colinéaire et de sens opposé à la vitesse de glissement du solide par rapport à son support. Sa norme vérifie :

$$\|\vec{T}\| = f_d \|\vec{N}\|$$

où f_d est appelée coefficient de frottement dynamique.

Dans le cas du non-glissement ($\vec{v}_g(2/1) = \vec{0}$) alors

$$\|\vec{T}\| \leq f_s \|\vec{N}\|$$

où f_s est appelée coefficient de frottement statique.

Ces forces ne dépendent pas de la surface de contact.

Matériaux en contact	f_s	f_d
Acier sur acier	0,1	0,1
Caoutchouc sur acier	0,4	0,3
Caoutchouc sur bitume sec	0,6-0,8	0,6-0,8
Caoutchouc sur bitume humide	0,3	0,1

Table – Coefficients de frottements usuels



Définition :

Le coefficient de frottement statique peut encore se définir par l'angle maximal ϕ que pourra faire le vecteur \vec{R} avec sa composante normale \vec{N} :

$$\tan \phi \leq f$$

ϕ est alors appelée l'angle du cône de frottement. La force \vec{R} est contenue dans le cône d'angle ϕ et de sommet le point de contact (cf. fig. 3).

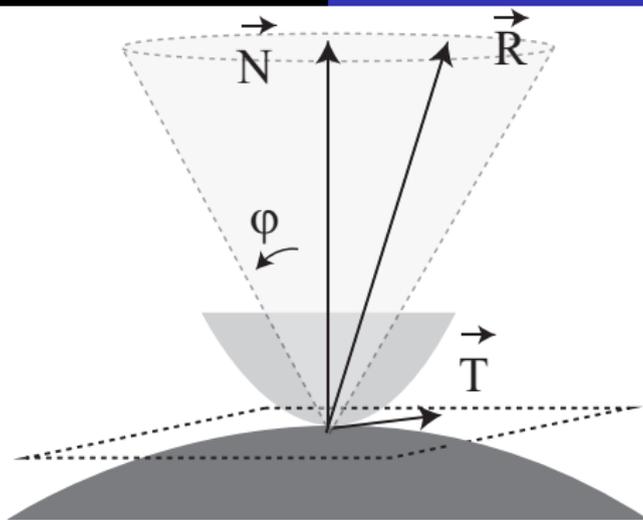


Figure – Cone de frottement

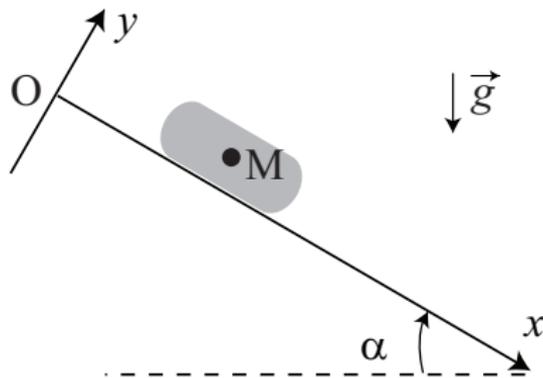
Exemple 1

On pose sur une plaque de verre inclinée d'un angle α variable, un morceau de bois de masse m . On note $\vec{R} = \vec{T} + \vec{N}$ la réaction du sol sur l'objet.

1 - En supposant que le morceau de bois soit immobile, exprimer \vec{T} et \vec{N} en fonction de m , α et g , l'accélération de la pesanteur.

2 - Le morceau de bois commence à glisser si $\alpha = 35^\circ$, en déduire la valeur de f .

3 - Le morceau de bois commençant à glisser en $x(t = 0) = x_0$, déterminer $x(t)$, en fonction de g , α , f et x_0 .



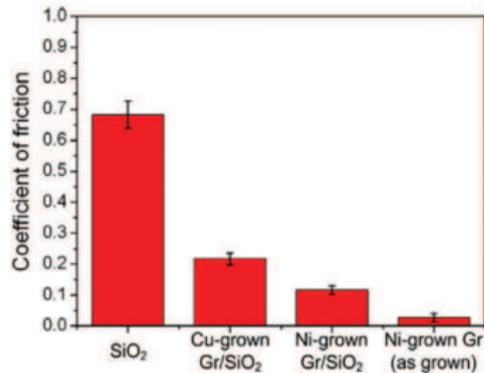
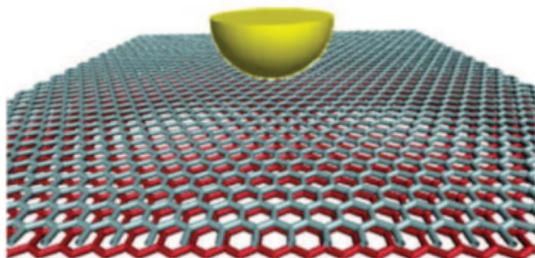


Figure – Coefficient de friction avec un dépôt de graphène comme lubrifiant solide, d'après *Chemical Vapor Deposition-Grown Graphene : The Thinnest Solid Lubricant*, Kim et al. *ACS Nano*, 2011

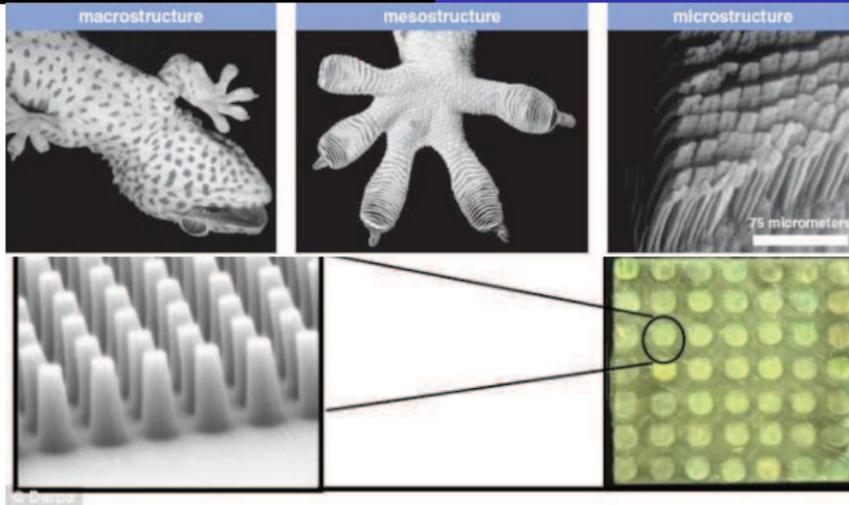


Figure – Nanostructuration de la surface de la peau d'un Gecko. *D'après Frictional adhesion : a new angle on gecko attachment, K. A et al. Journal of Experimental Biology 2006*

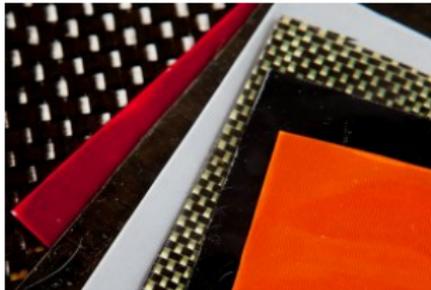


Figure – Geckskin, une start-up américaine propose des adhésifs repositionnable avec une adhésion exceptionnelle. D'après <https://geckskin.umass.edu/>



Exemple 2

Pour passer, le code de la route, on peut lire les informations suivantes sur un site d'auto-école :

Distance d'arrêt = Distance parcourue avant réaction (1 s) + Distance de freinage. Je multiplie le chiffre des dizaines de km/h (vitesse à laquelle je roule) par lui même. Exemple :

- Je circule à 50 km/h, mon véhicule s'arrête en $5 \times 5 = 25$ m.
- Je circule à 90 km/h, mon véhicule s'arrête en $9 \times 9 = 81$ m.
- Je circule à 110 km/h, mon véhicule s'arrête en $11 \times 11 = 121$ m.

Sur chaussée mouillée, la distance d'arrêt est multipliée par 1,5!

- 1 - Effectuer un schéma légendé en faisant apparaître les forces lors des différentes phases du mouvement d'une voiture.
- 2 - À l'aide du théorème de l'énergie cinétique, exprimer la distance d'arrêt en fonction de la vitesse du véhicule.
- 3 - Commenter les valeurs numériques proposées avec $g \approx 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ et une masse de voiture $m = 1,2 \cdot 10^3 \text{ kg}$. On pourra représenter les valeurs obtenues à l'aide d'un tableau pour comparaison.

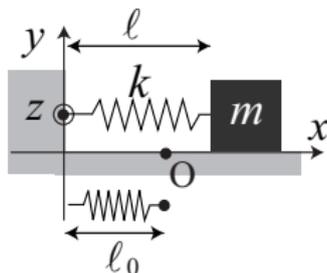
Données : coefficient de frottement du caoutchouc

- sur bitume sec : $f = 0,6$
- sur bitume mouillé : $f = 0,3$

distance d'arrêt (m)	50 km.h ⁻¹	90 km.h ⁻¹	110 km.h ⁻¹
auto-école	25	81	121
route sèche	30	77	108
route humide	46	129	186

Exemple 3

On considère une masse m accrochée à une ressort et oscillant sur un plan horizontal. On note f le coefficient de frottement entre le support et le mobile. Le mouvement du mobile est repéré par $x(t)$, l'origine O de l'axe Ox coïncide avec la position du mobile lorsque le ressort est au repos.



- 1 - Déterminer l'élongation minimale et maximale permettant la mise en oscillation. On posera $x_c = fmg/k$.
- 2 - Cette condition étant réalisée, déterminer l'équation horaire $x(t)$ lorsque le mobile se déplace de la droite vers la gauche. On prendra comme condition initiale : $x(0) = h$ et $\dot{x}(0) = 0$ et on posera $\omega_0 = \sqrt{k/m}$.
- 3 - En déduire l'équation horaire lorsque le mobile se déplace vers la droite et conclure sur l'évolution de l'amplitude des oscillations.

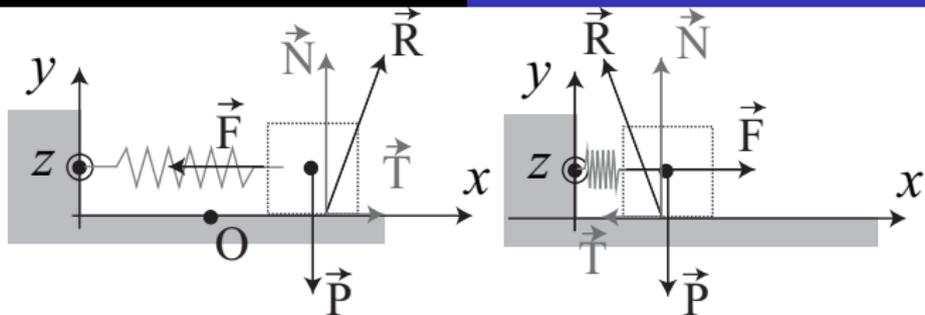


Figure – Bilan des forces selon le sens de déplacement

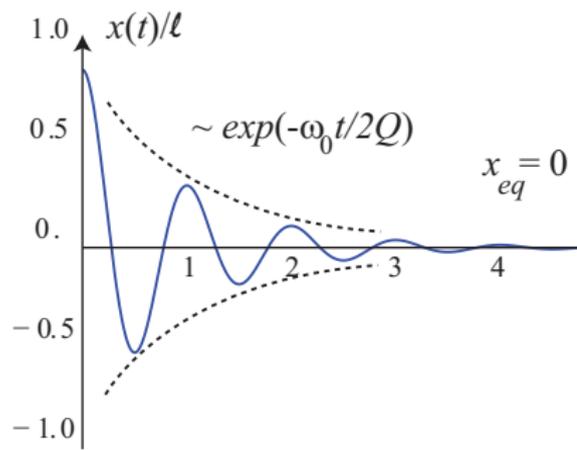
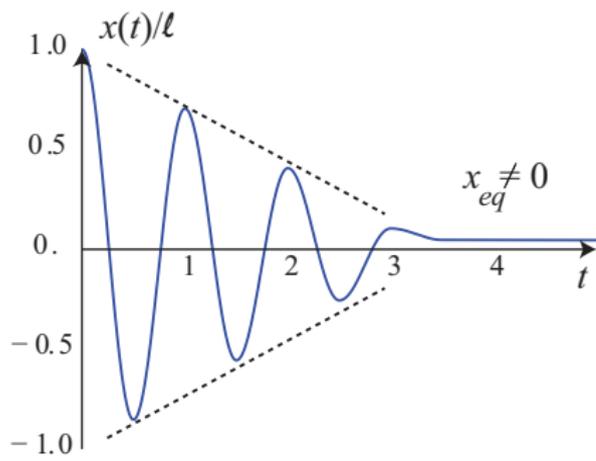
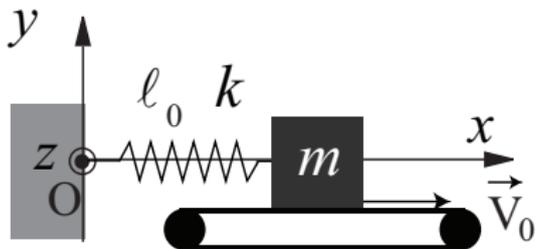
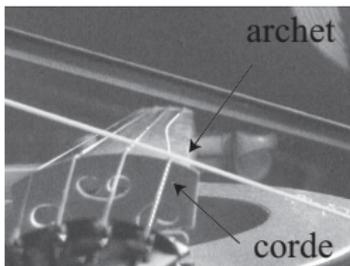


Figure – Oscillations avec force de frottement solide (gauche) ou visqueux (droite)





Exemple 4 On modélise l'action d'un archet de violon sur une corde par un mobile de masse m , accroché à un ressort de constante de raideur k et de longueur à vide ℓ_0 est posé sur un tapis roulant se déplaçant à la vitesse V_0 selon Ox . On note f le coefficient de frottement et l'on suppose que le coefficient de frottement statique est identique au coefficient de frottement dynamique.



Initialement le mobile est en $x(0) = \ell_0$ et sa vitesse est celle du tapis roulant : $\dot{x}(0) = V_0$.

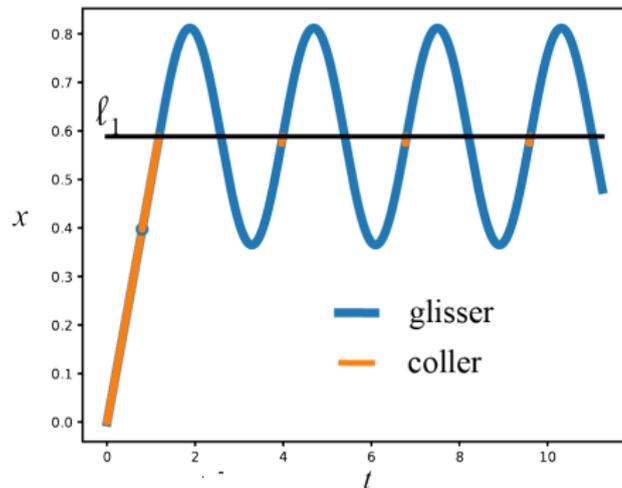
1 - Déterminer l'instant t_1 à partir duquel le mobile commence à glisser. Exprimer alors la longueur du ressort ℓ_1 en fonction de f , m , k , ℓ_0 et g .

2 - On pose $t' = t - t_1$. Déterminer l'équation du mouvement lors

de la phase de glissement et donner l'expression de $x(t')$.
3 - En déduire une représentation de $x(t)$.



a)



b)

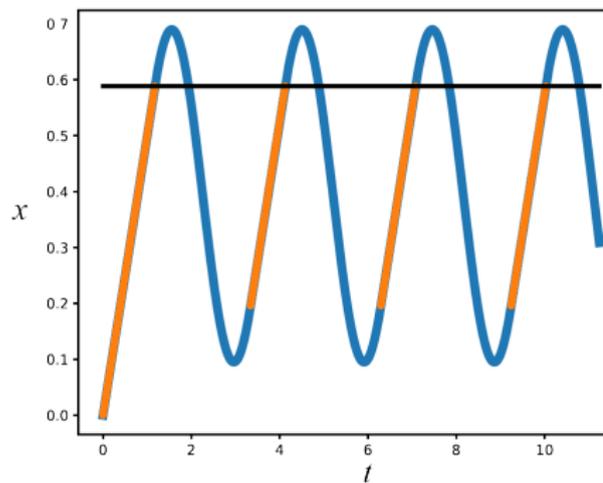


Figure – Simulation de collé-glissé (a : $f_s = f_d$, b : $f_s > f_d$)

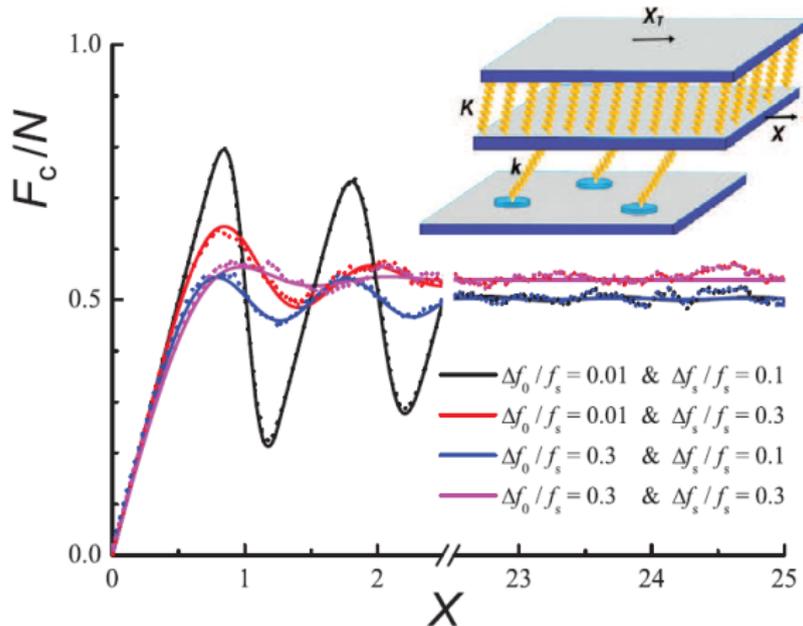


Figure – Évolution de la force lors d'un tremblement de terre grâce au phénomène du collé-glissé. D'après *Stick-slip vs. smooth sliding in the multicontact interface*, EPL, 2015