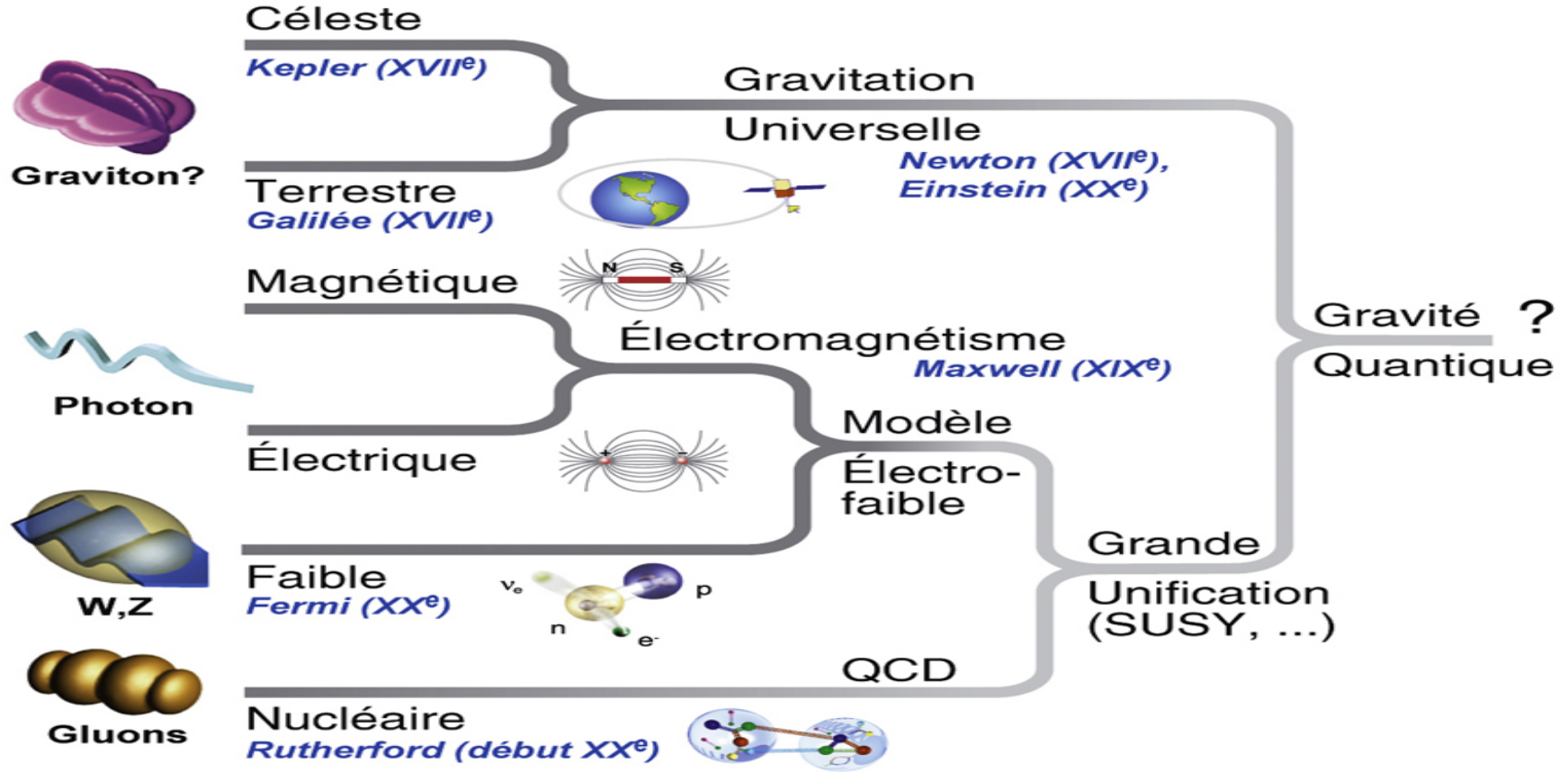
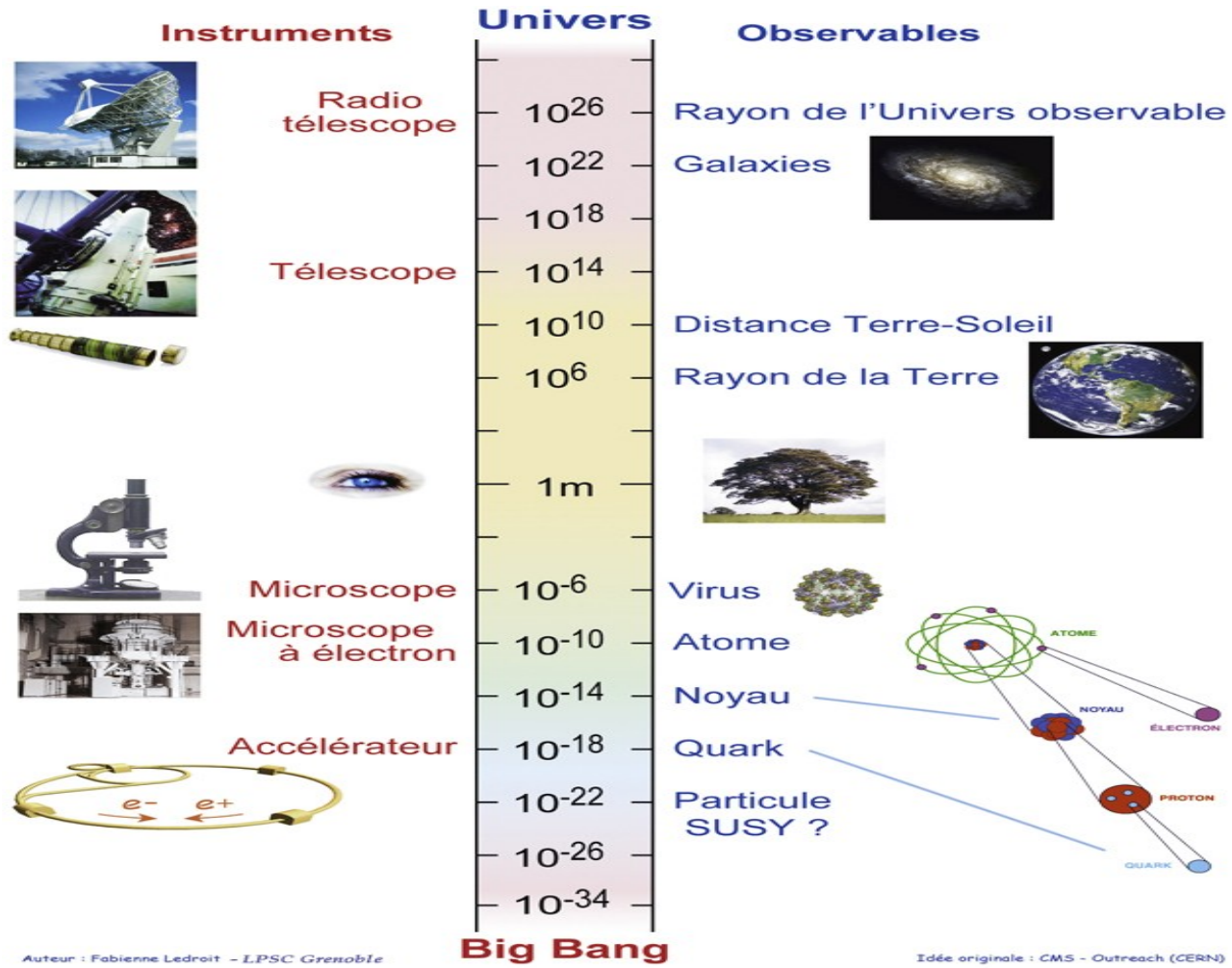


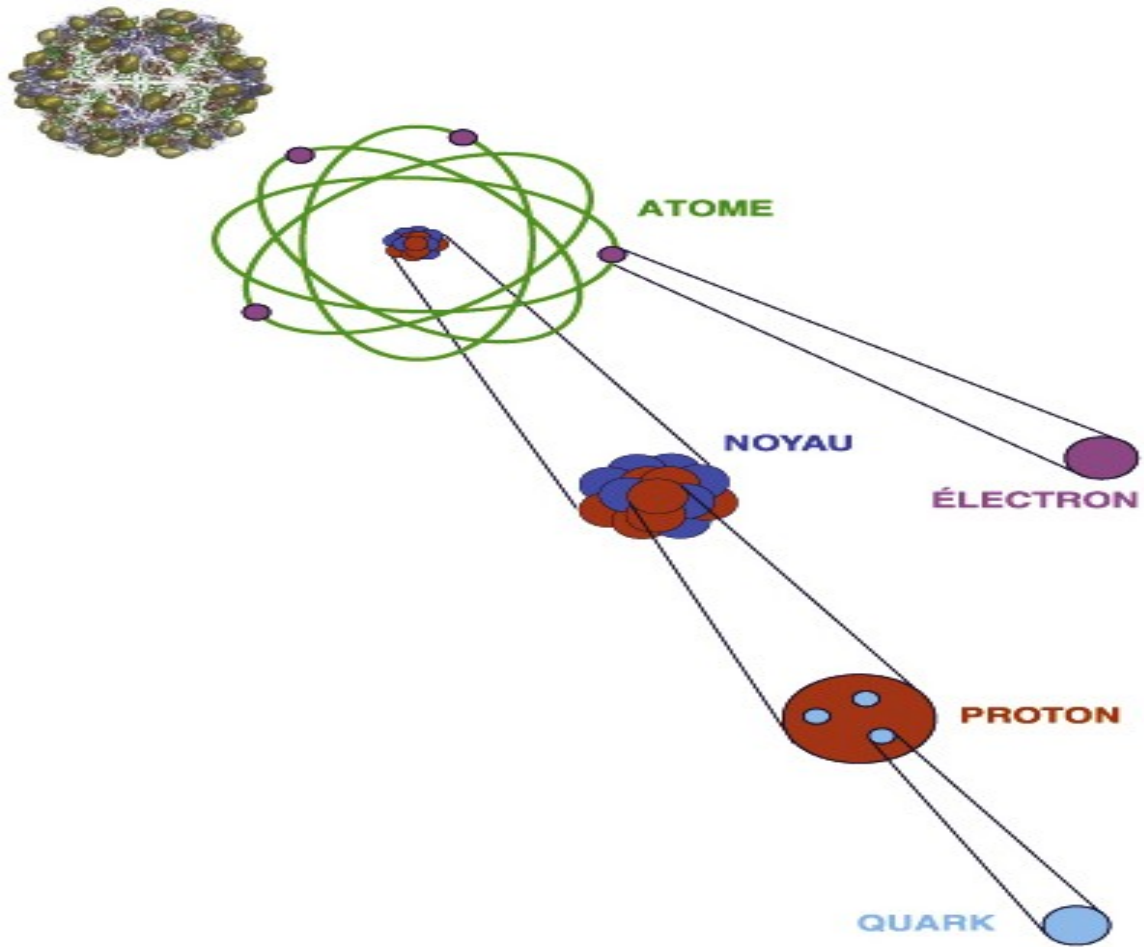
Les Forces





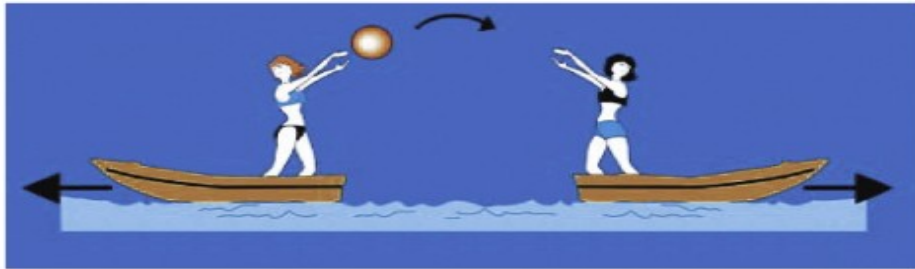
Auteur : Fabienne Ledroit - LPSC Grenoble

Idée originale : CMS - Outreach (CERN)

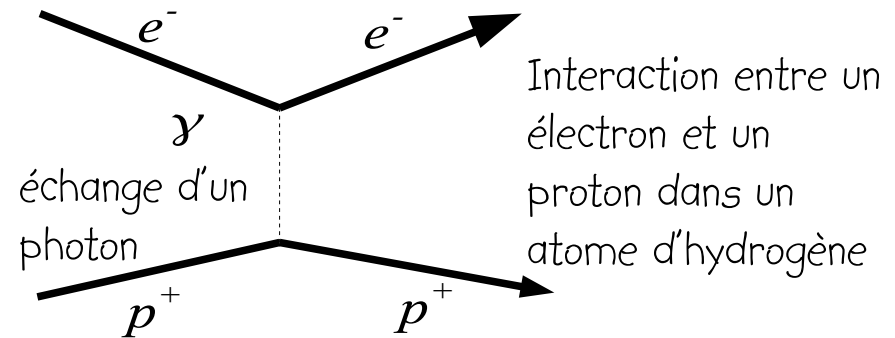


Les forces fondamentales procèdent par des interactions à distance

Newton : «Que la gravité soit infuse, inhérente et essentielle à la matière, de telle façon qu'un corps agisse à distance sur un autre à travers le vide , sans intervention d'un facteur qui acheminerait les forces et leur action d'un corps à l'autre, tout cela me paraît d'une telle absurdité qu'à mon sens, aucun homme capable de réfléchir en philosophe ne pourra s'y laisser prendre.»



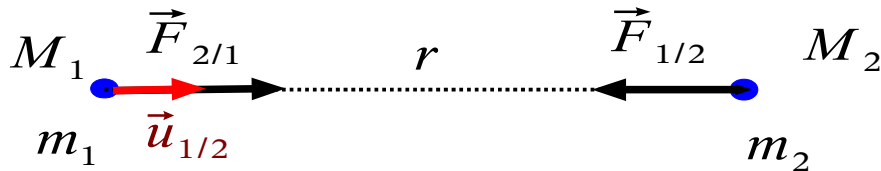
L'échange de bosons est responsable de la force



Force de gravitation

Énoncée par Isaac Newton dans la seconde moitié du XVII^{ème} siècle

Entre deux masses ponctuelles m_1 et m_2 , séparée de la distance r et situées aux points M_1 et M_2 :



$\vec{u}_{1/2}$ vecteur unitaire dirigé de 1 vers 2

$$\vec{F}_{1/2} = -G \frac{m_1 m_2}{r^2} \vec{u}_{1/2} = -K_G \frac{m_1 m_2}{r^3} \overrightarrow{M_1 M_2} \quad \vec{F}_{2/1} = -\vec{F}_{1/2}$$

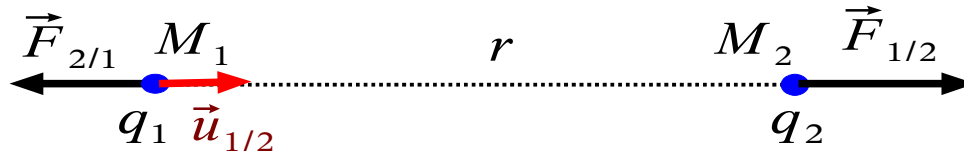
G (cte de gravitation universelle) = $6,67408(31) \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$ (ou $\text{N m}^2 \text{ kg}^{-2}$)

Cette loi s'applique également à des solides présentant des répartitions de masse à symétrie sphérique (théorème de Gauss) (exemple Lune-Terre)

Force de Coulomb introduite en 1784

Ressemble à la force gravitationnelle !

Entre deux charges ponctuelles q_1 et q_2 séparées de la distance r et situées aux points M_1 et M_2 :



Charles-Augustin Coulomb
(1736-1806)

$\vec{u}_{1/2}$ vecteur unitaire dirigé de 1 vers 2

$$\vec{F}_{1/2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \vec{u}_{1/2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^3} \overrightarrow{M_1 M_2}$$

$$\vec{F}_{2/1} = -\vec{F}_{1/2}$$

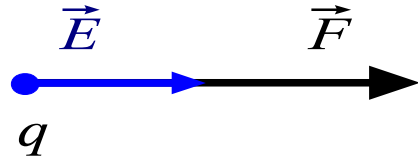
$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \approx 9 \cdot 10^9 \text{ S.I.}$$

ϵ_0 est la permittivité électrique du vide

Cette loi s'applique également à des solides présentant des répartitions de charge à symétrie sphérique (théorème de Gauss).

Force électrique et magnétique

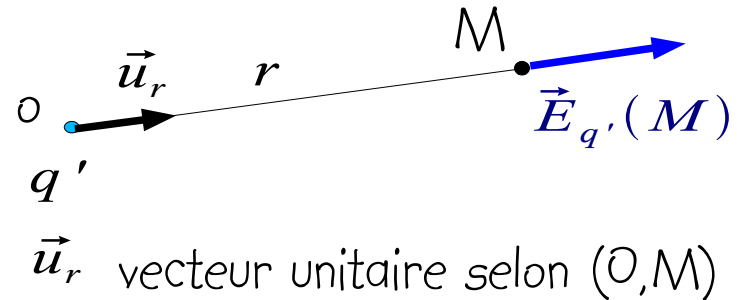
Force électrique sur une charge ponctuelle q dans un champ (field) électrique :



$$\vec{F} = q \vec{E}$$

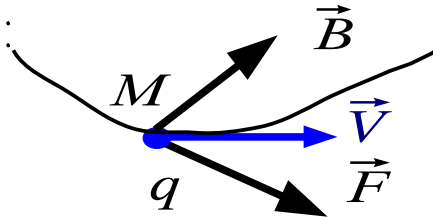
Champ de coulomb :

$$\vec{E}_{q'}(M) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q'}{r^2} \vec{u}_r$$



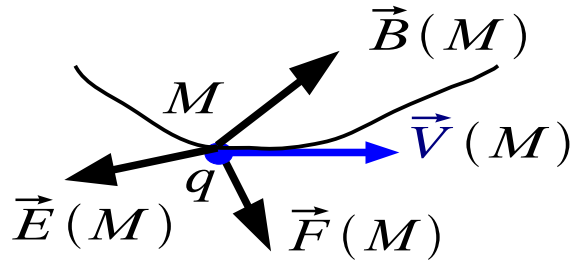
\vec{u}_r vecteur unitaire selon (O, M)

Force magnétique :



$$\vec{F}(M) = q \vec{V}(M) \wedge \vec{B}(M)$$

Force électromagnétique ou de Lorentz



Charge ponctuelle se
déplaçant dans un champ
électrique et un champ
magnétique == un champ
électromagnétique

$$\vec{F}(M) = q(\vec{E}(M) + \vec{V}(M) \wedge \vec{B}(M))$$

La partie magnétique est la force de Laplace.

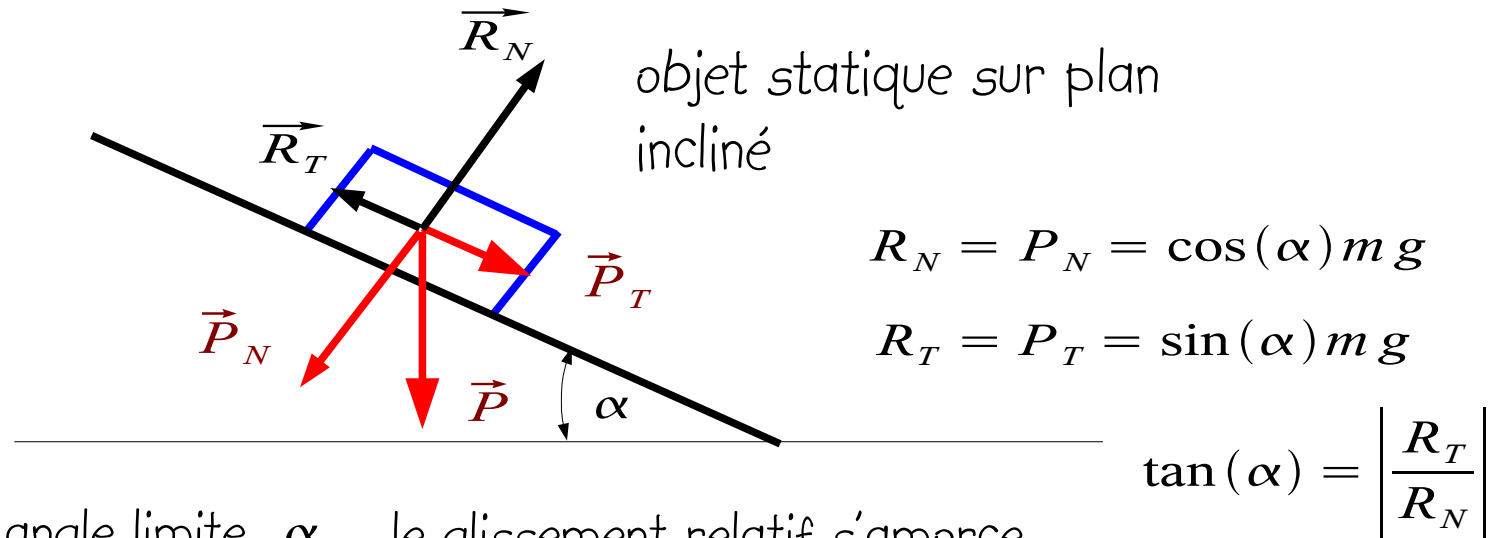
Forces de contact

Résultent d'une multitude de forces élémentaires exercées simultanément sur les systèmes considérés.

Exemple : forces de frottement : interactions électromagnétiques entre les atomes des corps en contact.

- Forces de frottement solide (solid friction)
- Forces de frottement visqueux (viscous friction)
- Poussée d'Archimède (buoyant force)
- Forces de tension (ressorts) (springs)

Frottement statique (ou de Coulomb)



Pour un certain angle limite α_s , le glissement relatif s'amorce.

Le régime de frottement statique tient tant que : $\tan(\alpha_s) \geq \tan(\alpha)$

coefficient de frottement statique est constant $k_s = \tan(\alpha_s)$

$$k_s \geq \left| \frac{R_T}{R_N} \right| \Rightarrow k_s |R_N| \geq |R_T|$$

Frottement statique dynamique

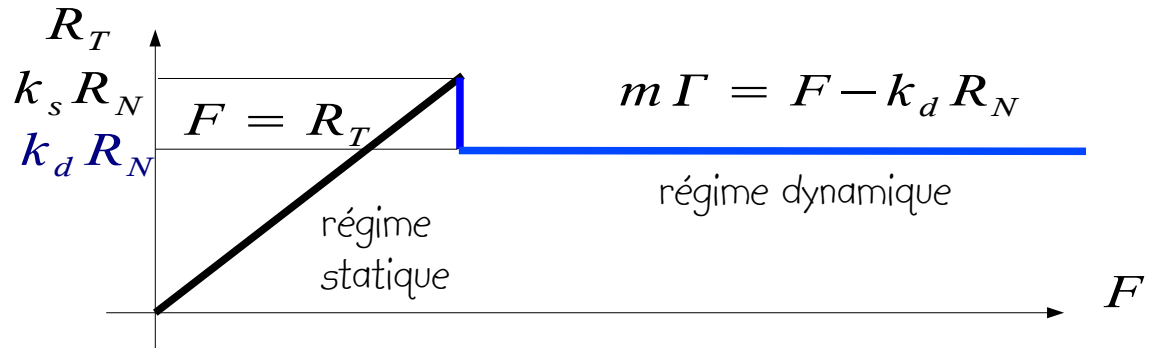
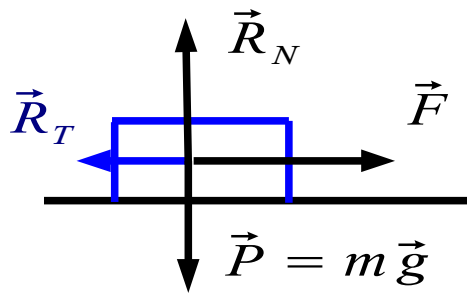
glissement relatif de deux solides

$$|\mathbf{R}_T| = k_d |\mathbf{R}_N|$$

Coefficient de frottement dynamique, constant.

Dépend de la nature des matériaux et de l'état des surfaces

$\vec{\mathbf{R}}_T$ s'oppose au mouvement. Il est important de noter que : $k_s \geq k_d$



Coefficients de frottement

	k_s	k_d
Acier / Acier, dur et sec	0,78	0,42
Acier / Acier, dur et gras	0,1	0,05
Acier / Acier , surfaces polies	100	100
Bois / bois , sec	0,5	0,3
Métal / glace	0,03	0,01
Pneu sur route sèche	0,8	0,6
Pneu sur route mouillée	0,15	0,1
Téflon / téflon	0,04	0,04

Frottement visqueux dans un fluide



si objet symétrique autour de l'axe de déplacement alors la force résultante est colinéaire à la vitesse mais de sens opposé. C'est la force de traînée (dragging force).

Vitesse faible (régime laminaire) :

$$\vec{F}_f = -k \vec{\eta} \vec{V}$$

k coefficient **constant** fonction de la géométrie, $[k] = m$

Pour une sphère : $k = 6\pi R$

Viscosité du milieu :

$[\eta] = \text{Pa}\cdot\text{s}$ ou Poiseuille (Jean-Louis-Marie

1797 - 1869)

vecteur unitaire

tangent à la trajectoire

Vitesse élevée (régime turbulent) :

$$\vec{F}_f = -\frac{1}{2} C_x S \rho \vec{V} \vec{V} = -\frac{1}{2} C_x S \rho V^2 \vec{T}$$

coefficient de pénétration sans dimension

masse volumique du fluide

surface apparente perpendiculaire au mouvement

Viscosité

Liquide	η en $Pa\ s$	Gaz	η en $Pa\ s$
eau 0 ⁰ C	$1,8 \cdot 10^{-3}$	Air 0 ⁰ C	$1,7 \cdot 10^{-5}$
eau 20 ⁰ C	$1 \cdot 10^{-3}$	Air 20 ⁰ C	$1,8 \cdot 10^{-5}$
eau 40 ⁰ C	$0,66 \cdot 10^{-3}$	Air 40 ⁰ C	$1,9 \cdot 10^{-5}$
Glycérine	1,49	H ₂	$0,93 \cdot 10^{-5}$
Huile	$1 \cdot 10^{-2}$	Ammoniaque	$0,97 \cdot 10^{-5}$
Alcool	$0,37 \cdot 10^{-3}$	CO ₂	$1,5 \cdot 10^{-5}$

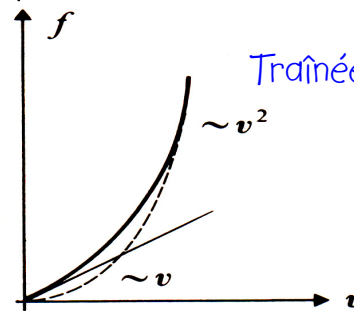
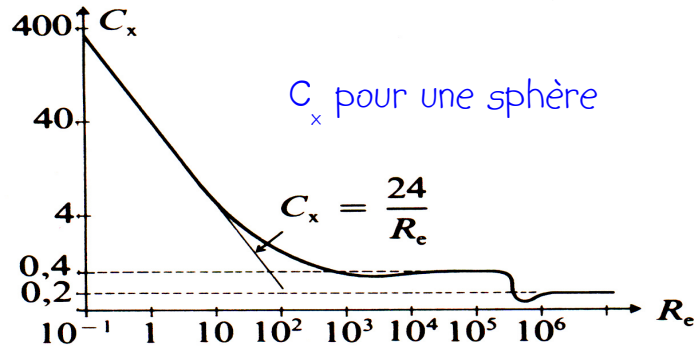
Frottement visqueux dans un fluide

Formulation générale : $\vec{F}_f = -f(V)\vec{T} = -\frac{1}{2} C_x(R_e) S \rho V^2 \vec{T}$

dimension linéaire du solide , exemple $d=2R$ pour une sphère

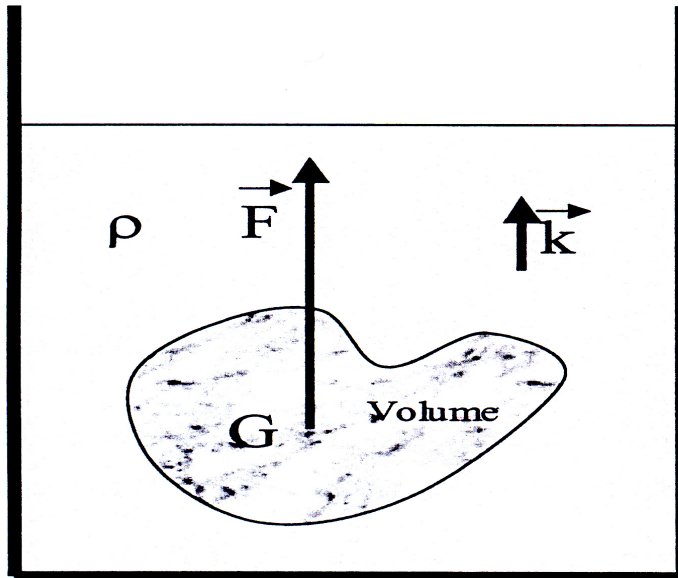
$$R_e = \frac{\rho d}{\eta} V$$

R_e est appelé le nombre de Reynolds (sans dimension) et caractérise les propriétés de l'écoulement du fluide.



Pour une sphère de 10 cm de diamètre se déplaçant dans de l'air, le régime en V est limité aux cas où $V < 1,5 \text{ mm s}^{-1}$

Poussée d'Archimède



$$\vec{F}_{\text{Archimède}} = \rho \cdot \text{Volume} \cdot g \cdot \vec{k}$$

La force s'applique au centre de masse

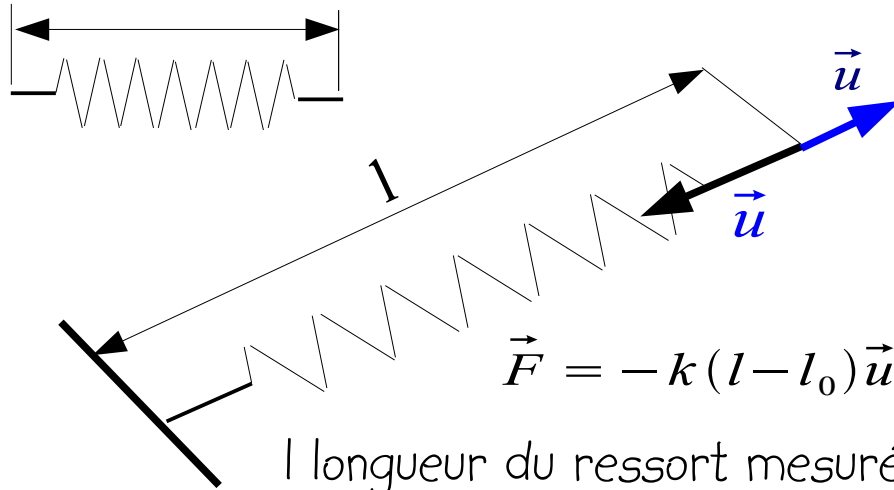
Si une partie du volume est émergée,
ce volume **EMERGE**
reçoit de la même manière
une poussée **VERS LE HAUT**
de la part du fluide supérieur ...
alors que la résultante des forces de pression
de ce fluide supérieur
est manifestement dirigée vers le bas ...

A méditer ... en pensant à effectuer
une séparation fictive à la surface

Forces de tension

Ressort (spring) à spires

l_0 longueur du ressort lorsqu'il n'exerce aucune force



l longueur du ressort mesurée sur son axe

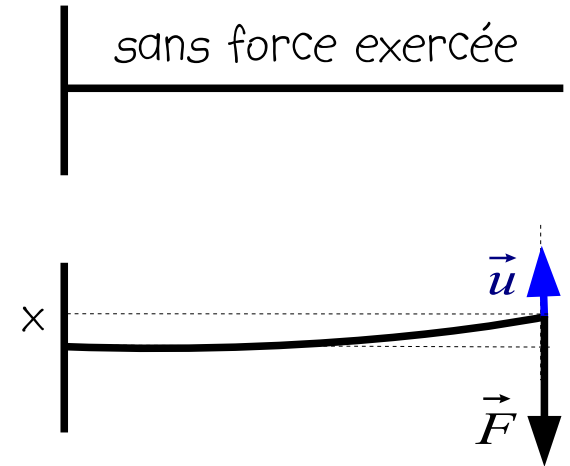
k constante de raideur du ressort

$[k]$ en N m^{-1}

\vec{u} est un vecteur unitaire qui peut être variable

Ressort à lame

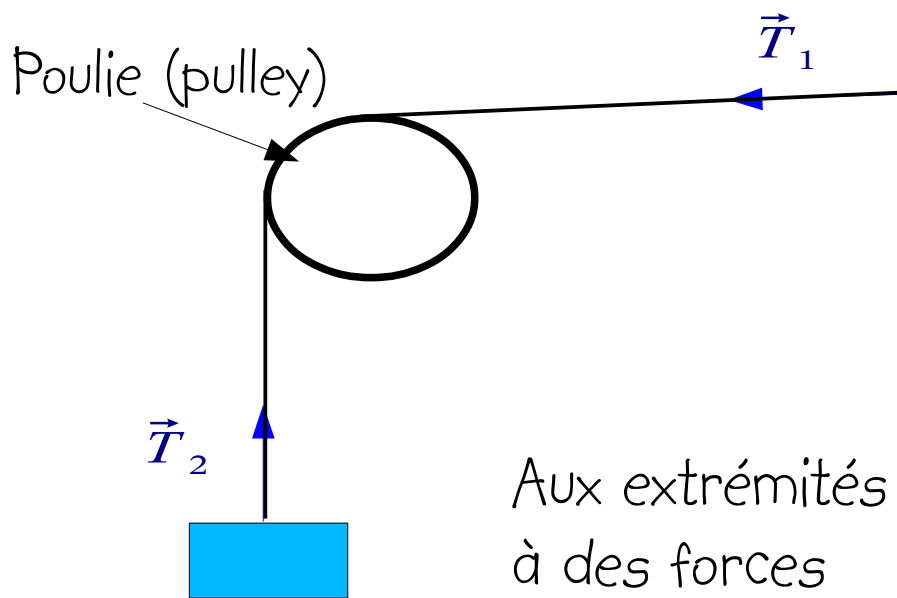
sans force exercée



$$\vec{F} = -k x \vec{u}$$

Tension d'un fil (string) ou d'une corde (rope)

fil ou corde de masse négligeable



Tension a toujours la même, direction que le fil ou la corde, mais pas de sens défini

Son module est le même tout le long du fil ou de la corde

Aux extrémités la tension donne naissance à des forces

$$T_1 = T_2$$