Physique

Chapitre 2

Forces macroscopiques

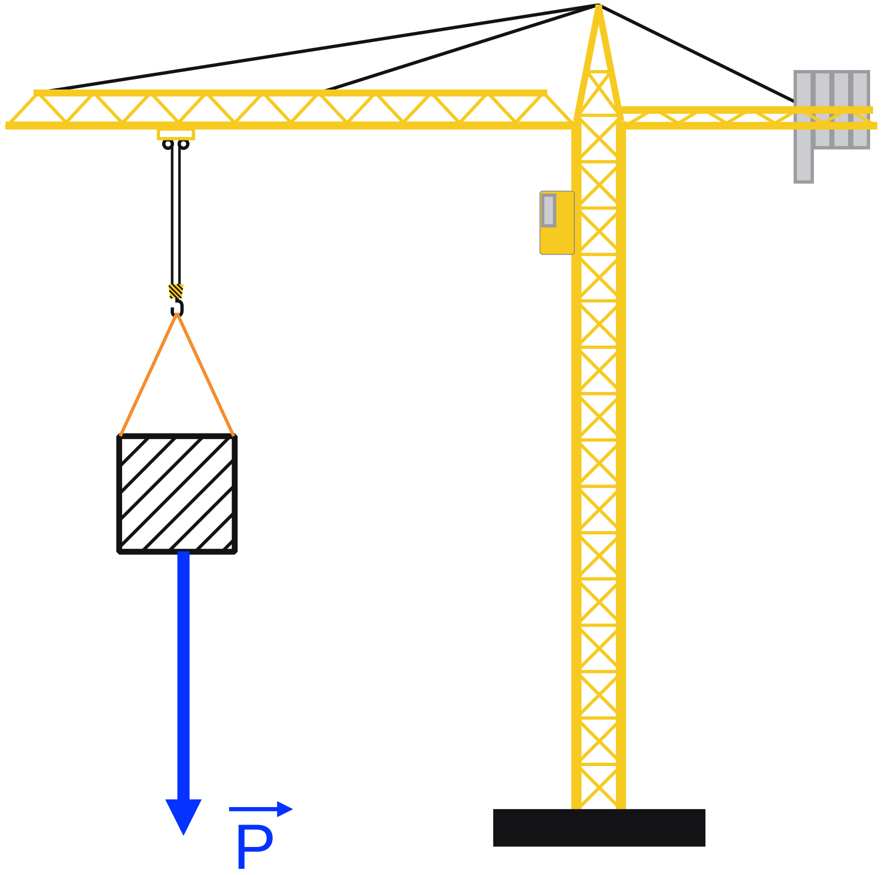
Dr. Benoît CHABAUD

Objectifs

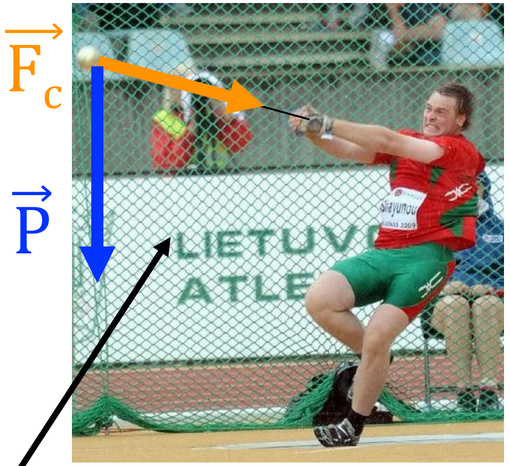
- Comprendre la notion de :
  - Force
- Etudier quelques forces macroscopiques :
  - Force transmise par une corde
  - Force exercée par un ressort
  - Force de frottement fluide
  - Force gravitationnelle

1.1. Notion de force

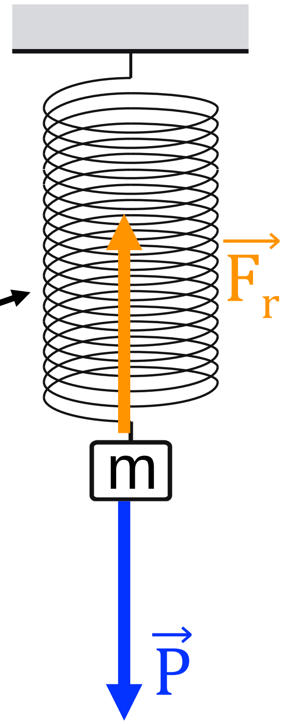
- Une force est une action mécanique exercée par un système sur un autre.
- Toute force possède une direction et un sens. C'est une grandeur vectorielle :
- L' 'intensité' ou le 'module' d'une force $\vec{F}$ correspond à sa norme : $\|\vec{F}\| = F$
- La dimension d'une force est : $M \,.\, L \,.\, T^{-2}$
- Dans le Système International, l'unité correspondante est le Newton : $1\ N = 1\ kg.m.s^{-2}$



- Une force peut :
  - Déformer un corps
  - Modifier la vitesse d’un corps
- On distingue les forces :
  - De contact :
    - force exercée par une corde
    - force exercée par un ressort
    - force de frottement fluide
  - A distance :
    - force gravitationnelle (poids)
    - force de Coulomb
    - force magnétique (aiguille d’une boussole)
    - …

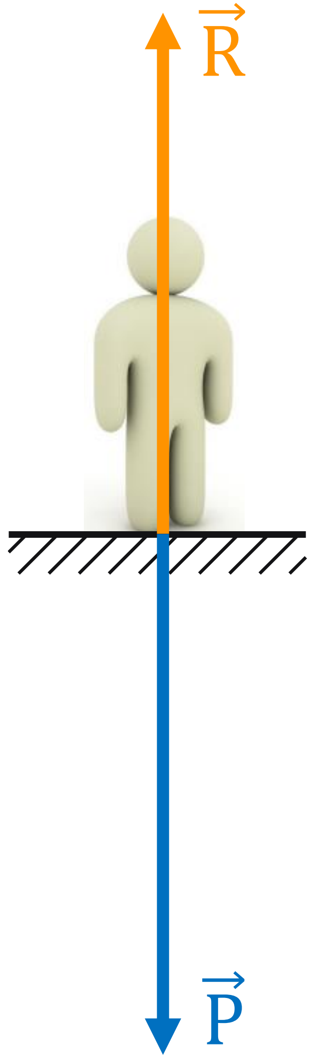


https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Yury_Shayunou.JPG



- Pour déterminer un bilan des forces, il faut soigneusement définir le système auquel on s'intéresse.
- Exemple : le système = une personne :
- Les forces qui s'exercent sur ce système sont :
  – Son poids : $\vec{P}$
  – La réaction du sol : $\vec{R}$
- Lorsqu'un système est à l'équilibre (immobile), les forces qui s'exercent sur ce système se compensent.

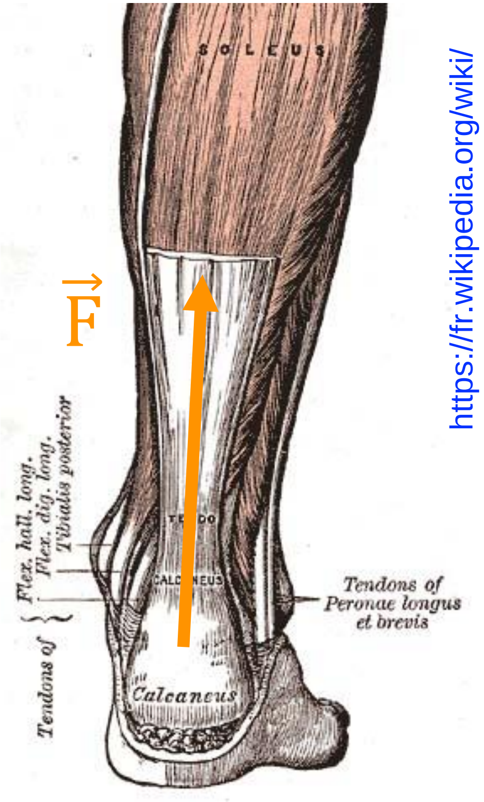
  NB : c'est un cas particulier du Principe Fondamental de la Dynamique, que l'on verra plus loin.
- Ce système est à l'équilibre, et on peut écrire : $\vec{P} + \vec{R} = \vec{0}$ (et donc : $\|\vec{R}\| = \|\vec{P}\|$)



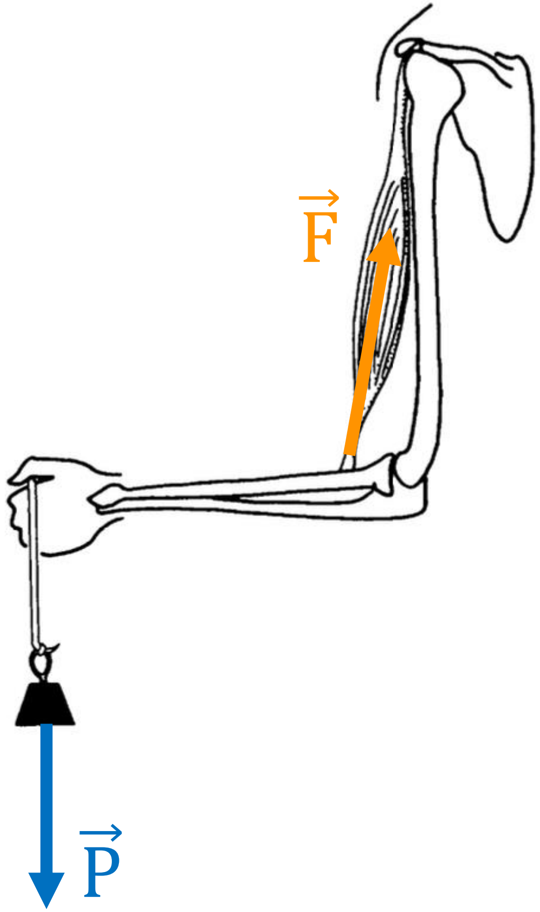
1.2. Force transmise par une corde

- Une corde - ou câble, ou fil inextensible (c'est à dire non élastique) - permet d'exercer une force à distance.

- Un tendon peut être modélisé par une corde.

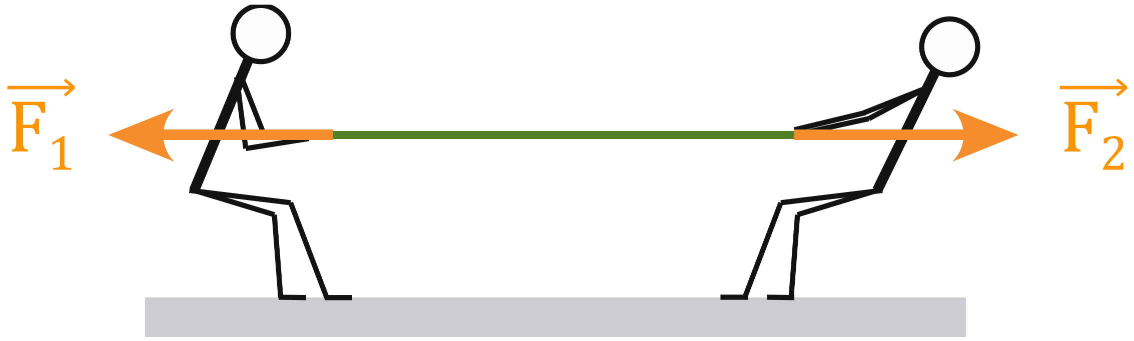


https://fr.wikipedia.org/wiki/Tendon_d%27Achille



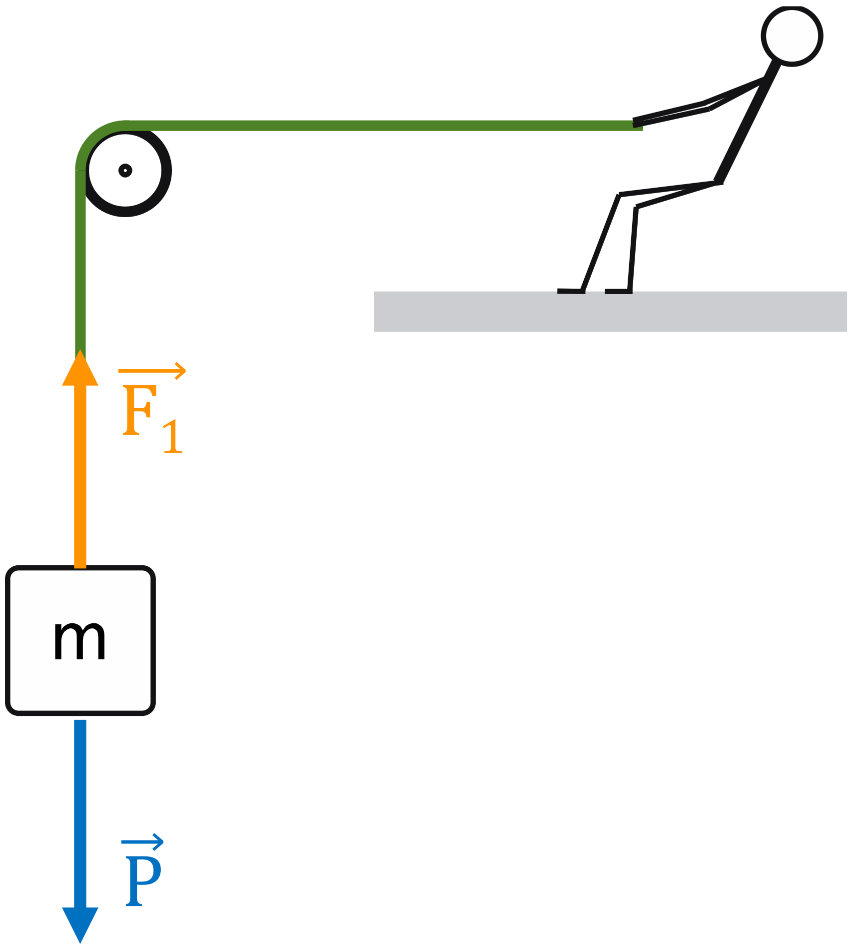
- (les muscles ne sont pas des cordes inextensibles).

- La force transmise par une corde est orientée dans la direction de la corde :



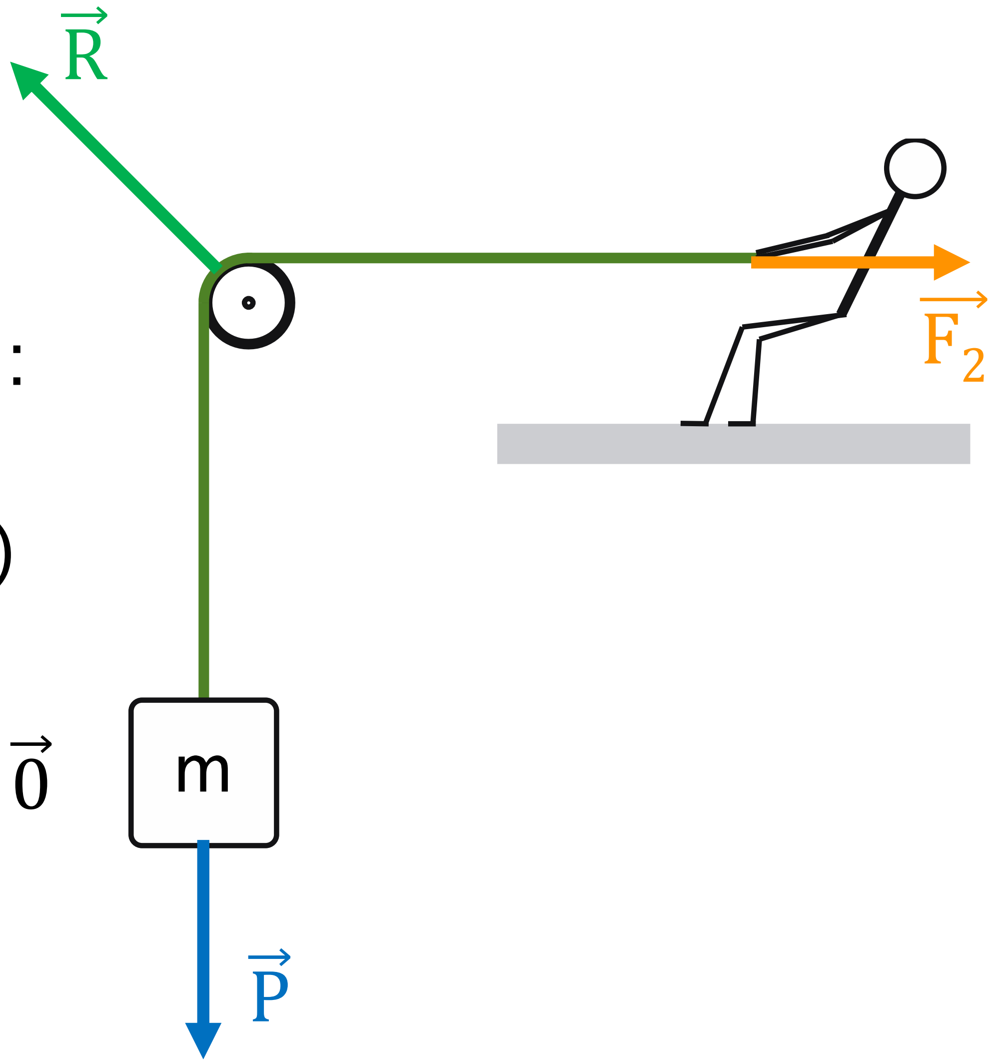
- Le système auquel on s'intéresse ici est la corde.
- A l'équilibre, les forces appliquées aux extrémités de la corde se compensent : $\overrightarrow{F_1} + \overrightarrow{F_2} = \vec{0}$
- et donc : $\|\overrightarrow{F_2}\| = \|\overrightarrow{F_1}\|$

- Une poulie peut modifier la direction des forces :
- Dans l'exemple ci-contre, supposons que le système étudié est la masse m.
- Les forces qui s'exercent sur m sont :
  - Son poids : $\vec{P}$
  - La tension de la corde : $\overrightarrow{F_1}$
- La force $\overrightarrow{F_1}$ est la force de traction exercée par la corde sur la masse m (orientée verticalement vers le haut, dans le sens de la corde).

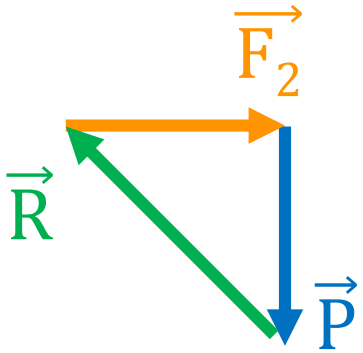


- A l'équilibre, on peut écrire : $\vec{P} + \overrightarrow{F_1} = \vec{0}$ (et donc : $\|\overrightarrow{F_1}\| = \|\vec{P}\|$)

- Supposons maintenant que le système étudié est la corde.
- Les forces qui s'exercent sur la corde (supposée de masse négligeable) sont :
  – Le poids de la masse m : $\vec{P}$
  – La tension de la corde : $\vec{F_2}$ (horizontale)
  – Et la force exercée par la poulie : $\vec{R}$
- A l'équilibre, on doit avoir : $\vec{P} + \vec{F_2} + \vec{R} = \vec{0}$
- Et on a : $\|\vec{F_2}\| = \|\vec{P}\|$ (la corde transmet le module de la tension).

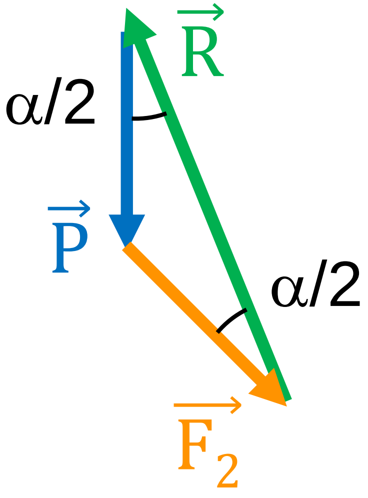


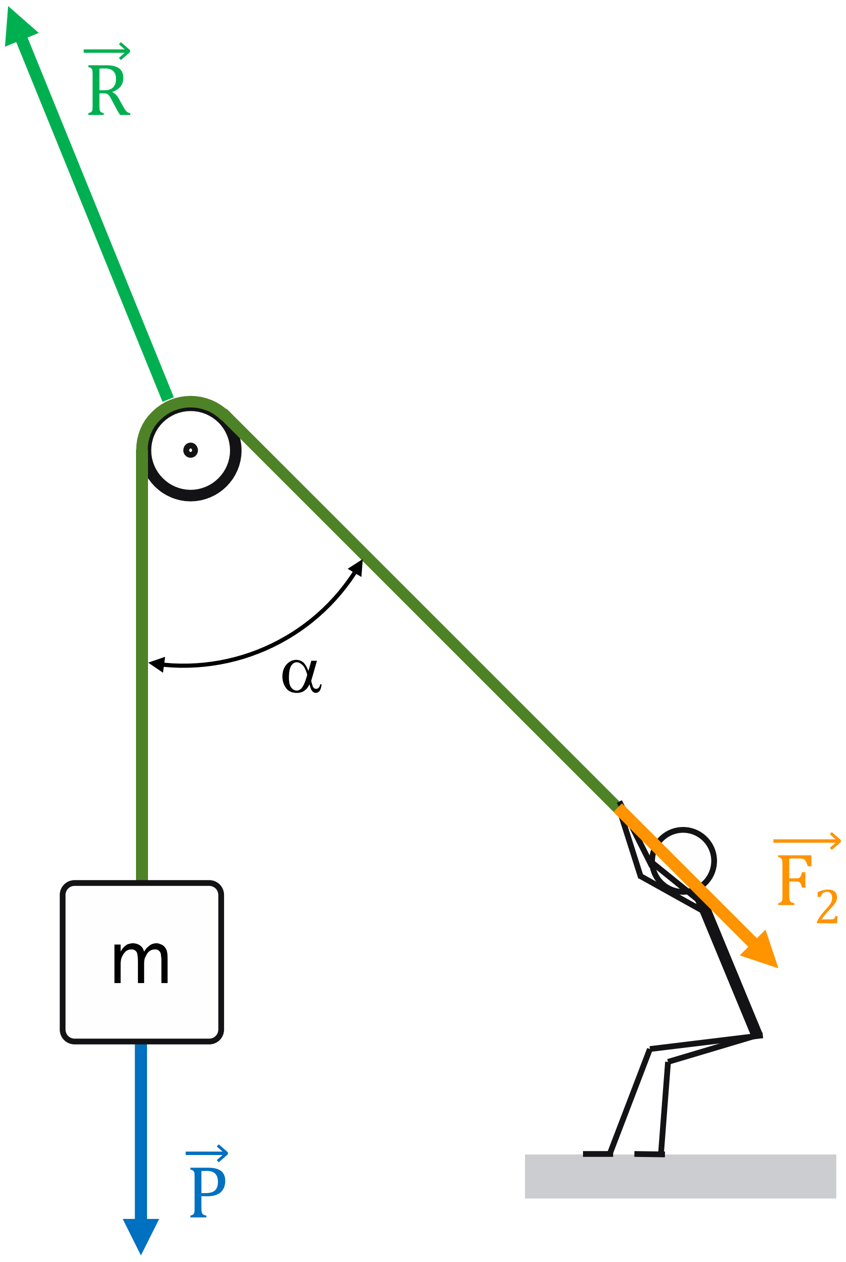
- On peut représenter cette équation vectorielle ainsi :



où : $\|\vec{R}\| = \sqrt{\|\vec{F_2}\|^2 + \|\vec{P}\|^2}$

- Si l'angle de la corde est différent, le principe reste le même :
- Les forces qui s'exercent sur la corde sont : $\vec{P}$, $\vec{F_2}$ et $\vec{R}$. A l'équilibre, on a toujours : $\vec{P} + \vec{F_2} + \vec{R} = \vec{0}$
- La corde transmet le module de la tension : $\|\vec{F_2}\| = \|\vec{P}\|$
- Et on représente la somme nulle des 3 vecteurs en respectant les angles :



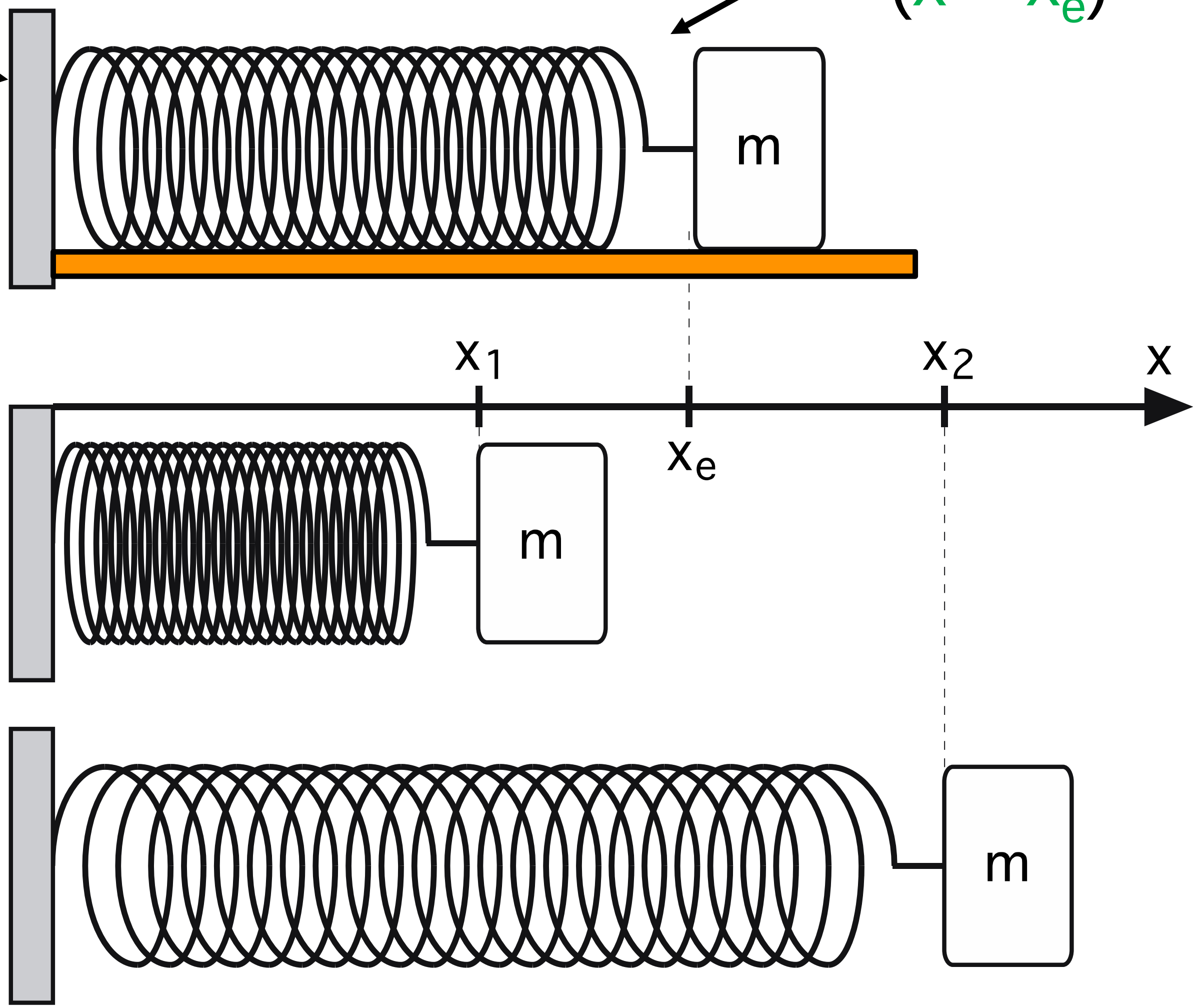


1.3. Force exercée par un ressort

- Un ressort est un système élastique :

Point d'attache fixe du ressort

Position d'équilibre ($x = x_e$)

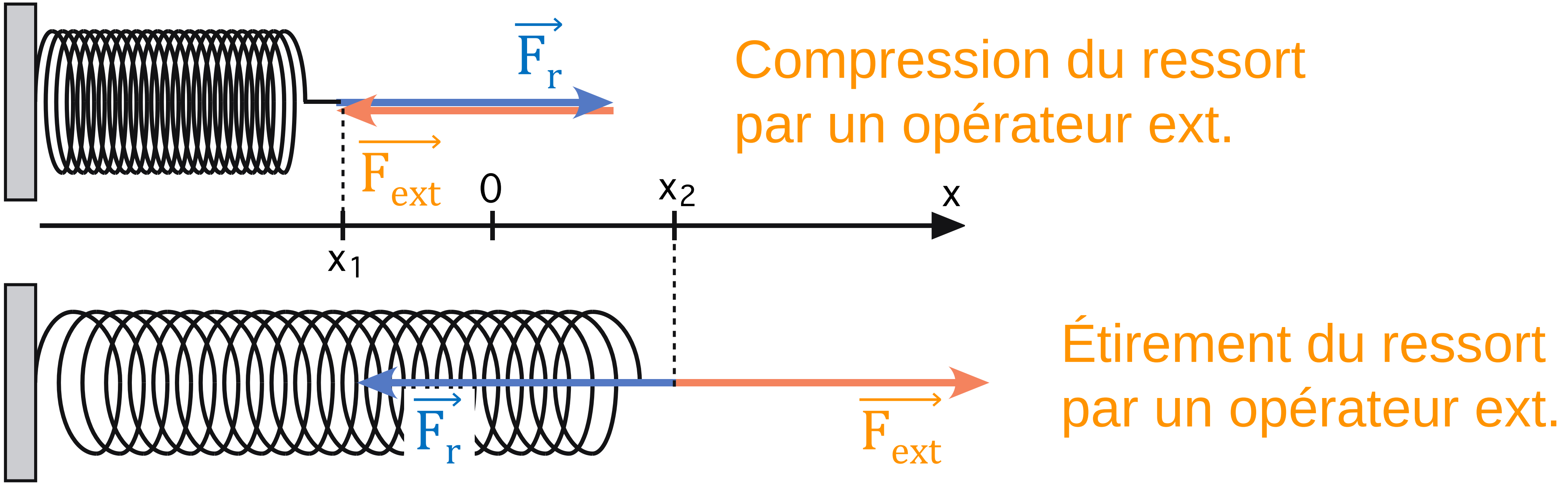


- En configuration horizontale, on suppose que la masse m glisse sans frottements sur un plan.

- Le ressort peut être comprimé ($x_1 < x_e$) :
- ou étiré ($x_2 > x_e$) :

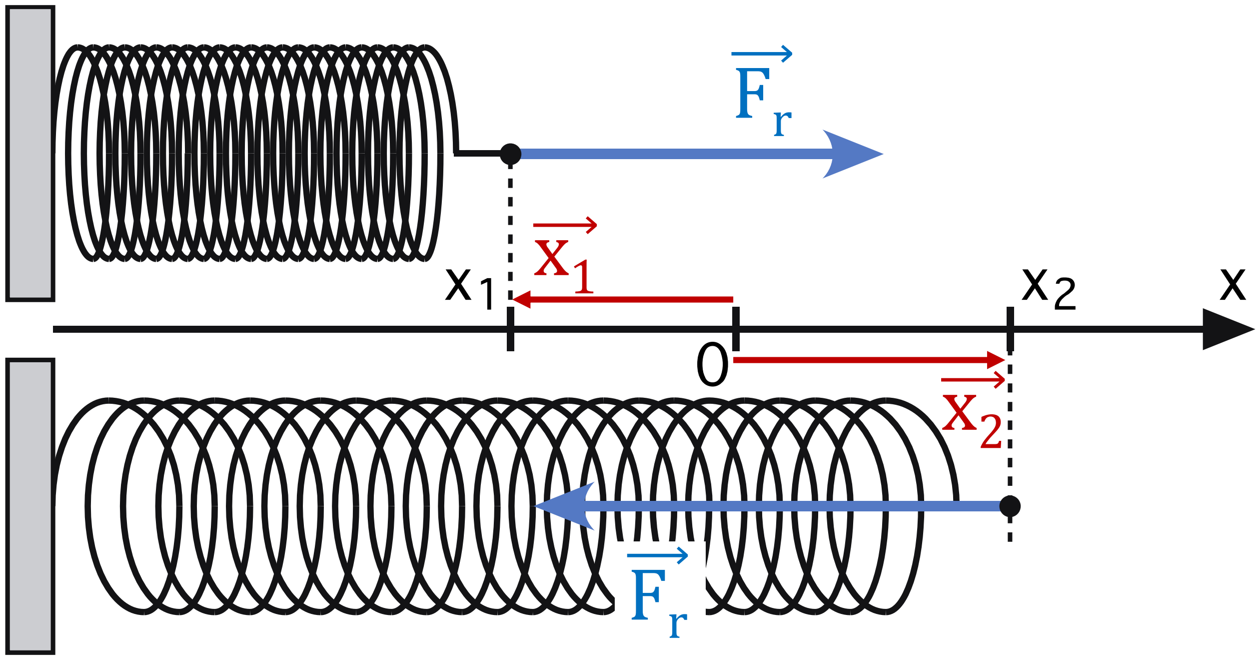
- Dans toutes les situations, le ressort exerce une force de rappel qui tend à le faire revenir vers sa position d'équilibre :

  si $\overrightarrow{F_{ext}}$ est une force appliquée par un opérateur extérieur, alors le ressort exerce une force de rappel $\overrightarrow{F_r}$ qui lui est opposée :



- Pour simplifier, on choisira en général l'origine de l'axe Ox au point d'équilibre du ressort : $x_e = 0$.

- Dans ce cours, on s'intéressera à des ressorts linéaires, pour lesquels la force est proportionnelle à la déformation.
- On écrira donc : $\|\overrightarrow{F_r}\| = k\,\|\vec{x}\|$ où k > 0 est la constante de raideur du ressort.



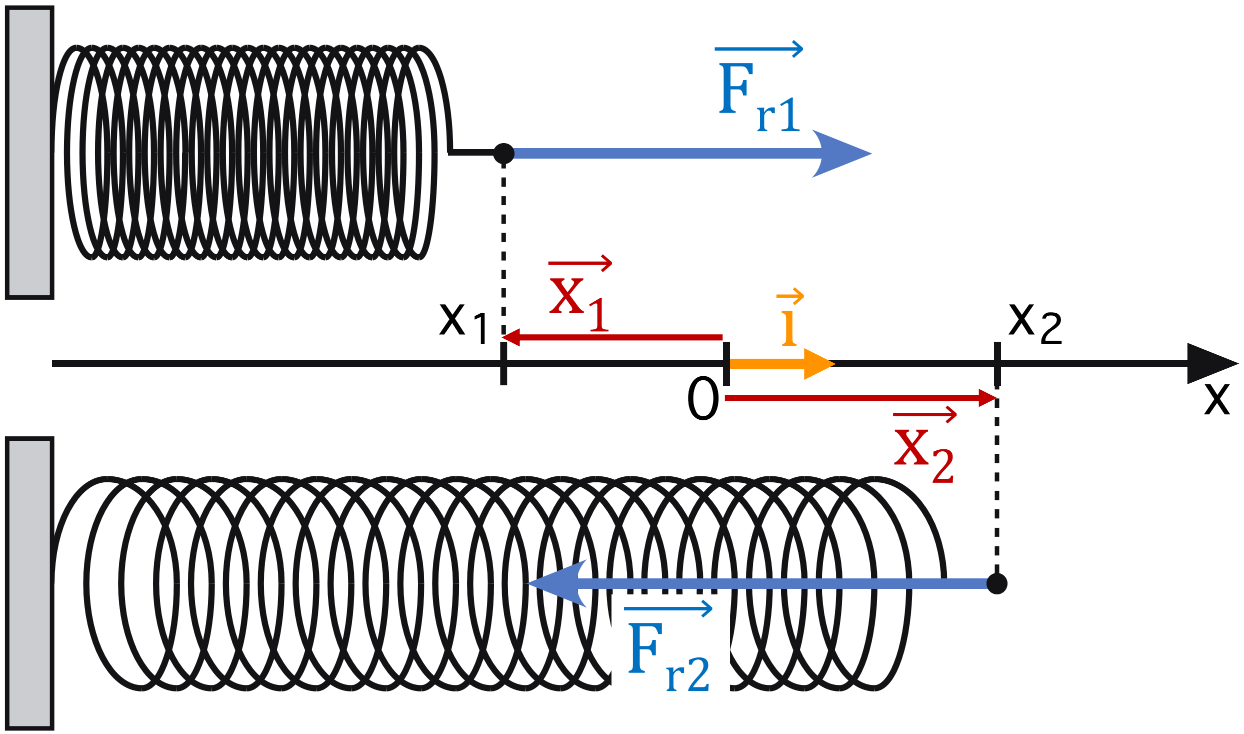
- Vectoriellement, on voit que la force $\overrightarrow{F_r}$ est toujours en sens contraire de la déformation $\vec{x}$.
- On a donc : $\overrightarrow{F_r} = k\,(-\vec{x})$ $\rightarrow$ $\boxed{\overrightarrow{F_r} = -k\,\vec{x}}$ [!]

- Dimension de la constante de raideur k d'un ressort
- À partir de la relation $\overrightarrow{F_r} = -k\,\vec{x}$, on voit que k est homogène à une force divisée par une longueur :

$$\left[\overrightarrow{F_r}\right] = \left[-k\,\vec{x}\right] \;\rightarrow\; [F] = [k][x] \;\rightarrow\; [k] = [F]/[x]$$

- (À proprement parler, comme on a vu qu'une force est homogène à $M.L.T^{-2}$, la dimension de k est $M.L.T^{-2} / L = M.T^{-2}$. Mais il est plus parlant d'exprimer k sous la forme : Force / Longueur).
- Autrement dit, k se mesurera généralement en Newton / mètre ($N.m^{-1}$)
- Précisons qu'à un ressort donné correspond une constante de raideur k donnée.

- Projection sur un axe
- On peut projeter toutes les relations qui précèdent sur un axe Ox, de vecteur unitaire $\vec{i}$:



- Les déformations $\overrightarrow{x_1}$ et $\overrightarrow{x_2}$ s'écrivent alors :

$\overrightarrow{x_1} = x_1\,\vec{i}$ avec $x_1 < 0$

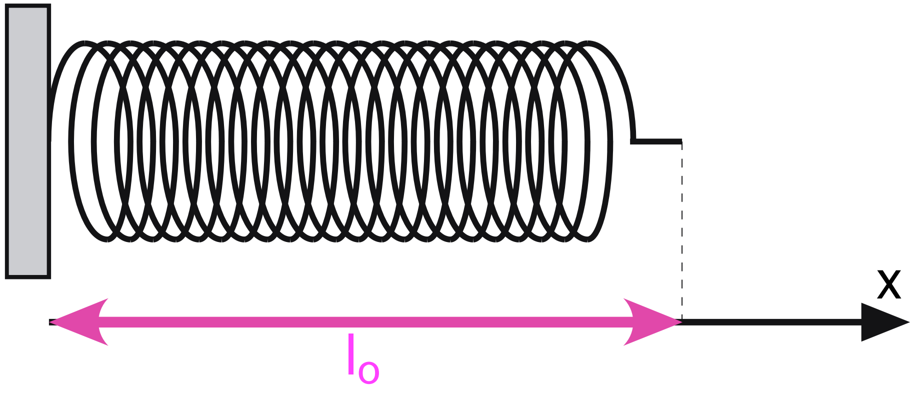
$\overrightarrow{x_2} = x_2\,\vec{i}$ avec $x_2 > 0$.

- Et la force exercée par le ressort s'écrit :

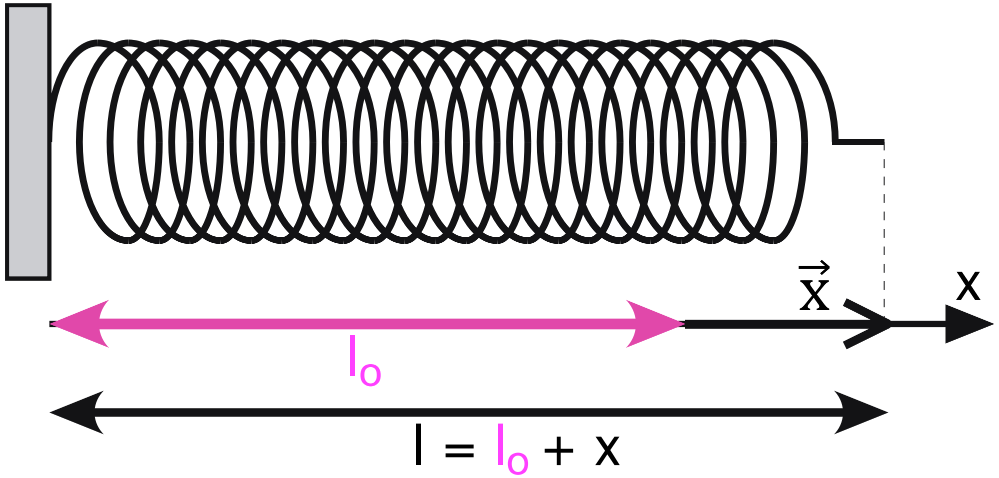
$\overrightarrow{F_{r1}} = -k\,x_1\,\vec{i}$ avec $-k\,x_1 > 0$ (force dans le sens des x croissants), et

$\overrightarrow{F_{r2}} = -k\,x_2\,\vec{i}$ avec $-k\,x_2 < 0$ (force dans le sens des x décroissants).

- Longueur à vide du ressort
- On exprime parfois la longueur à vide du ressort : l_o



Exemple si le ressort est étiré :



- Lorsqu'il est déformé, la longueur totale du ressort peut s'exprimer sous la forme : $l = l_o + x$ (si le ressort est étiré : $x > 0$; si le ressort est comprimé : $x < 0$).

- Mais l_o n'intervient pas dans l'expression de la force du ressort. La force s'écrit toujours : $\overrightarrow{F_r} = -k\,\vec{x}$

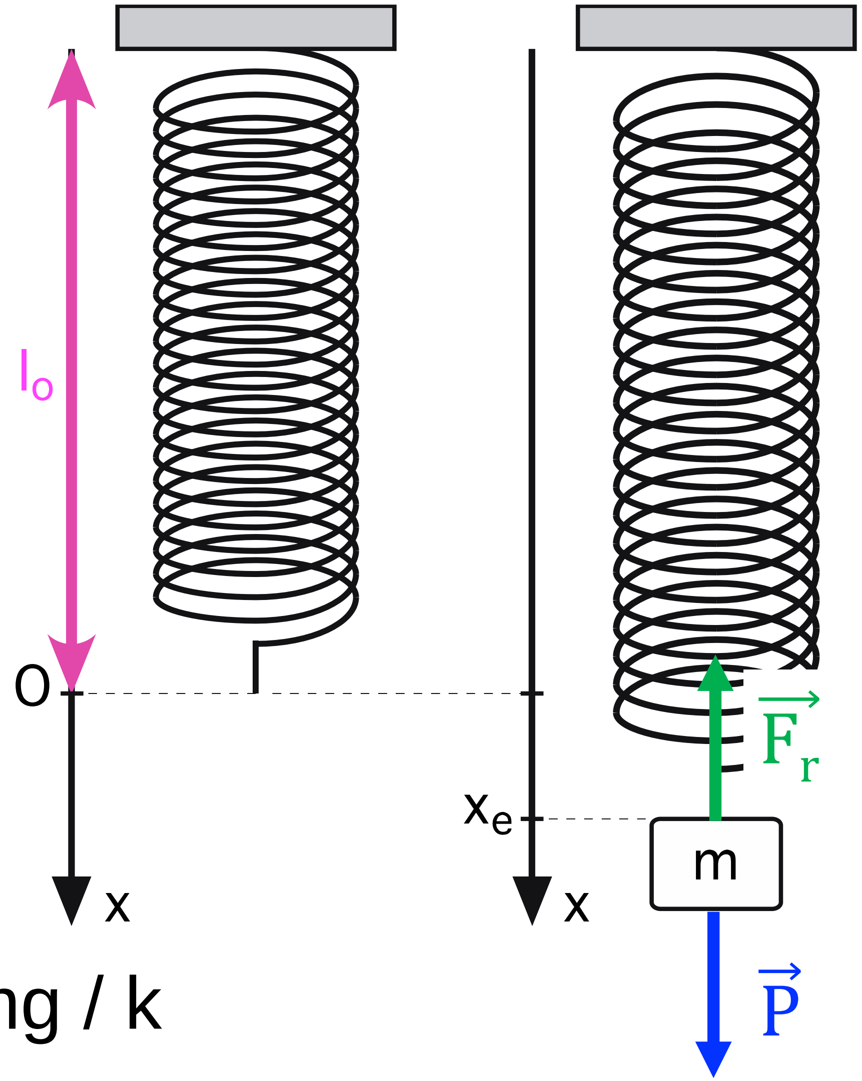
- Ressort suspendu

- Si un ressort est suspendu, sa longueur à vide l_o n'est pas modifiée, à condition de supposer que la masse propre du ressort est négligeable.

- Si on suspend une masse m à un tel ressort, la position d'équilibre x_e correspond à la nullité de la somme des forces sur la masse m :

$$\vec{P} + \vec{F_r} = \vec{0}$$

avec : $\|\vec{F_r}\| = \|\vec{P}\|$

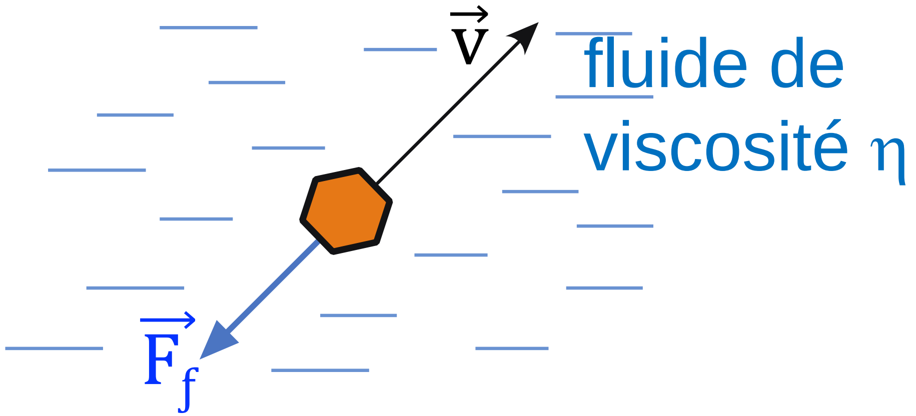


- C'est à dire : $k\,|x_e| = mg$ où $g = \|\vec{g}\|$

L'allongement à l'équilibre est : $|x_e| = mg / k$

1.4. Force de frottement fluide

- Tout objet qui se déplace dans un fluide (liquide ou gaz) subit une force de frottement visqueux $\vec{F}_f$ qui s'oppose au mouvement.
- Cette force de frottement dépend de :
  - La vitesse de l'objet,
  - La forme (aérodynamisme) de l'objet,
  - La viscosité η du fluide.

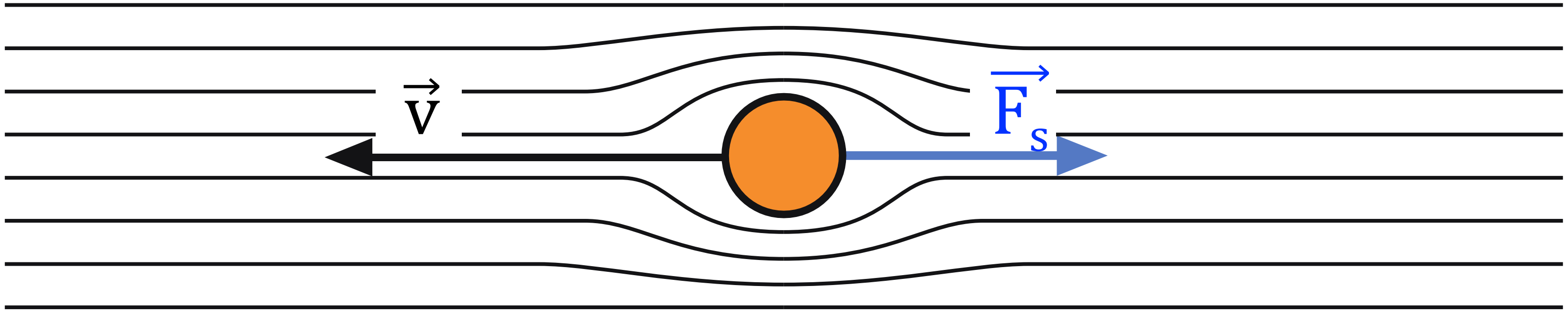


- Lorsque la vitesse de l'objet est faible, l'écoulement du fluide autour de l'objet reste laminaire (pas de tourbillons) et la force de frottement $\vec{F}_f$ est proportionnelle à l'opposé du vecteur vitesse :

$\vec{F}_f = \alpha\,(-\vec{v})$ (où α est un coefficient > 0)

c'est à dire : $\boxed{\vec{F}_f = -\,\alpha\,\vec{v}}$ [!]

- (Si la vitesse de l'objet est grande, l'écoulement devient turbulent et la force de frottement peut être proportionnelle à $||\vec{v}||^2$, voire à $||\vec{v}||^3$. Mais cela sort du cadre de ce cours).
- Pour un objet sphérique (et se déplaçant à vitesse faible), le coefficient α peut être exprimé de façon explicite : $\alpha = 6\pi\eta R$ où η est la viscosité du fluide et R est le Rayon de la sphère.



c'est à dire : $\boxed{\vec{F_s} = -6\pi\eta R\,\vec{v}}$ [!]

- C'est la force de frottement de Stokes.

- Dimension de la viscosité η d'un fluide
- À partir de la relation $\overrightarrow{F_s} = -6\pi\eta R\,\vec{v}$, on peut écrire :

$$\left[\overrightarrow{F_s}\right] = \left[-6\pi\eta R\,\vec{v}\right] \;\rightarrow\; [F_s] = [-6][\pi][\eta][R][v]$$

- Les coefficients -6 et π sont sans dimension et il reste :

$$[F_s] = [\eta][R][v] \;\rightarrow\; [\eta] = [F_s]/[R][v]$$

- On voit que η est homogène à une force divisée par le produit (longueur x vitesse) :

$$\rightarrow\; [\eta] = M.L.T^{-2} / (L.L.T^{-1}) = M \,.\, L^{-1} \,.\, T^{-1}$$

- Dans le Système International, une viscosité se mesure en $kg.m^{-1}.s^{-1}$
- Cette unité s'appelle également le Poiseuille : symbole : Pl

- Quelques ordres de grandeur
- Les ordres de grandeur de la viscosité de quelques fluides usuels sont indiqués ci-dessous :

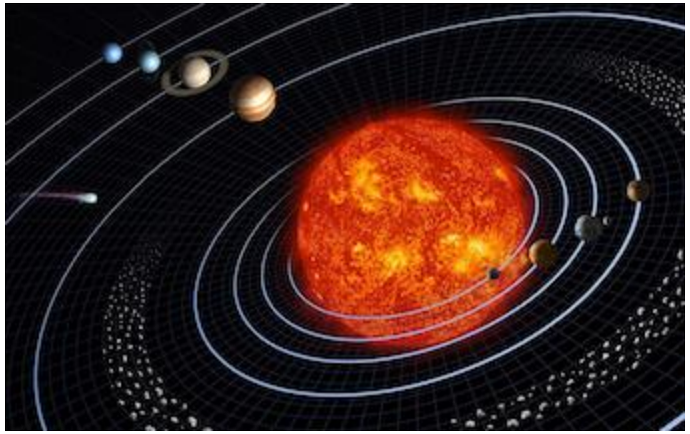
Corps (à 20°C)	Viscosité ($kg.m^{-1}.s^{-1}$ ou Poiseuille)
Air	$1,8.10^{-5}$
Eau	1.10^{-3}
Huile de Colza	8.10^{-2}
Miel	2 à 10

(ces valeurs ne sont pas à apprendre par cœur !

1.5. Force gravitationnelle

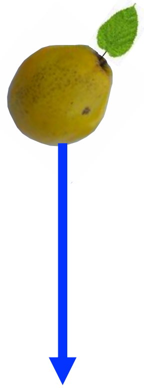
- La force gravitationnelle est sensible pour des objets de taille macroscopique (≥ millimètre).

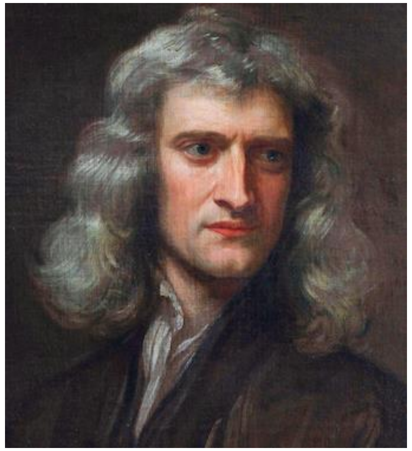
- Par exemple aux échelle astrophysiques,



https://fr.wikipedia.org/wiki/Gravitation

- ou aux échelles humaines.

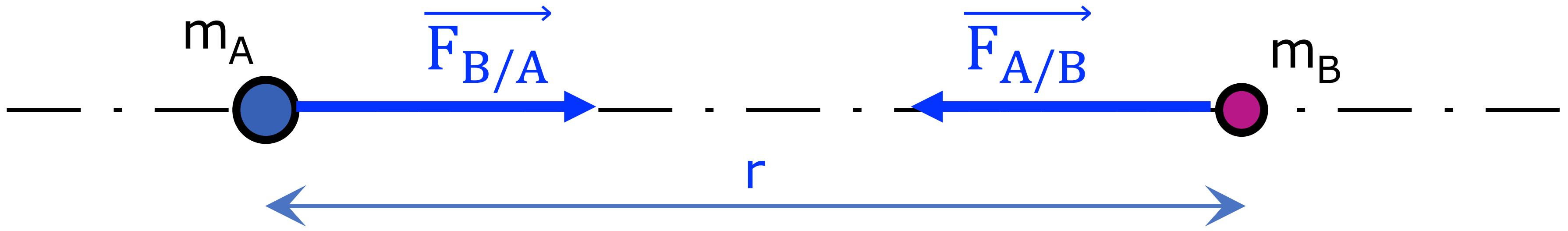




https://fr.wikipedia.org/wiki/Isaac_Newton

- A des échelles plus petites (mm, µm, nm), d’autres phénomènes peuvent masquer (dominer) la gravité (frottements visqueux, capillarité, forces électriques…)

- La force de gravitation existe entre des corps matériels massifs.
- Considérons deux systèmes A et B, de masses m_A et m_B, situés à une distance r :



- La force gravitationnelle $\overrightarrow{F_{B/A}}$ est la force que la masse B exerce sur la masse A (et inversement pour $\overrightarrow{F_{A/B}}$).
- Cette force est toujours attractive et orientée suivant l'axe AB.
- La force gravitationnelle dépend :
  - des masses en présence,
  - et de leur distance.

- Le module de la force gravitationnelle s’écrit :

$$\boxed{\left\|\vec{F}\right\| = G\,\frac{m_A\, m_B}{r^2}}$$ [!]

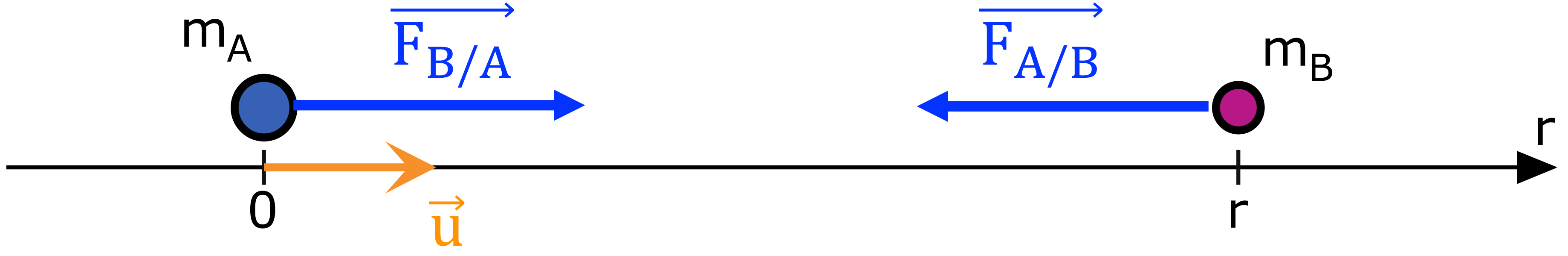
- Dans cette expression :
  - G est la constante universelle de Gravitation,
  - m_A et m_B sont les masses (en kg),
  - et r est la distance (en m).

- La constante universelle de Gravitation vaut :

$$G = 6{,}67.\ 10^{-11}\ \mathrm{N.m^2.kg^{-2}}$$

(on pourra vérifier que l’expression de $\left\|\vec{F}\right\|$ est homogène).

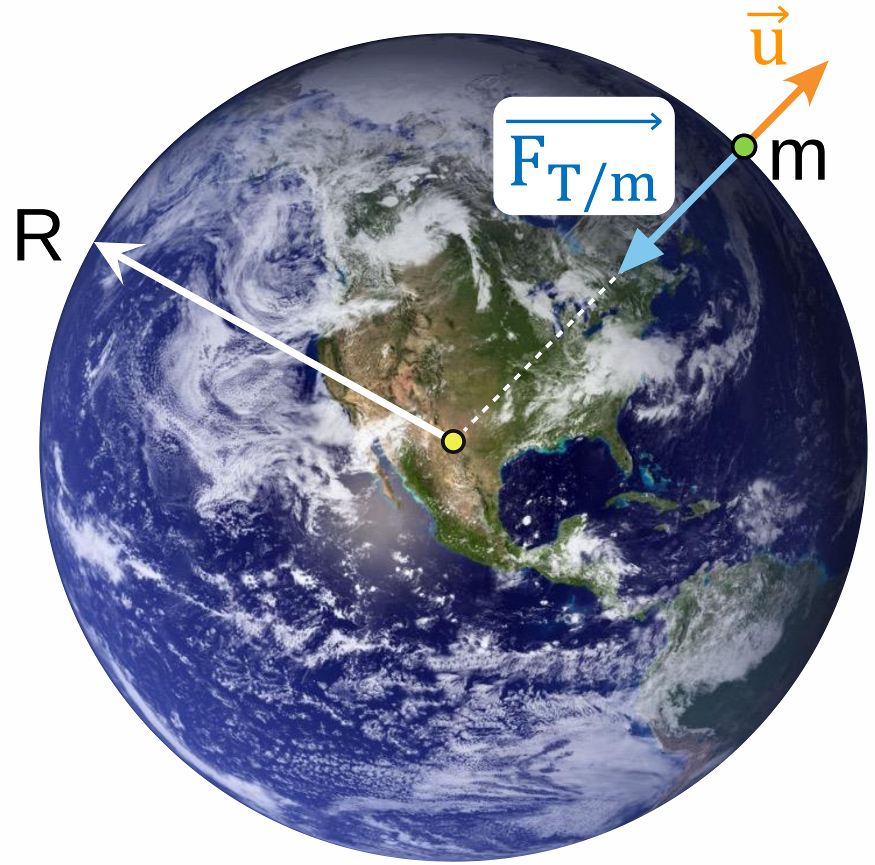
- Expression vectorielle
- On peut écrire les forces à l'aide d'un vecteur unitaire $\vec{u}$:



- Force de la masse B sur la masse A : $\overrightarrow{F_{B/A}} = G\frac{m_A m_B}{r^2}\,\vec{u}$
- Force de la masse A sur la masse B : $\overrightarrow{F_{A/B}} = -G\frac{m_A m_B}{r^2}\,\vec{u}$
- On voit que les 2 forces sont opposées : $\overrightarrow{F_{A/B}} + \overrightarrow{F_{B/A}} = \vec{0}$
- Ces forces s'appliquent aux centres de gravité des systèmes A et B.

- Champ de pesanteur terrestre
- Au voisinage de la surface de la Terre (r = R), on peut simplifier l'expression en écrivant la force d'attraction exercée par la Terre sur une masse m sous la forme :

$$\overrightarrow{F_{T/m}} = m\, G \frac{m_T}{R^2} \left(-\vec{u}\right)$$



- où :
  - ➢ m_T est la masse de la Terre (m_T = 5,972.10^{24} kg),
  - ➢ R est le Rayon de la Terre (R = 6371 km),
  - ➢ et $\vec{u}$ est un vecteur unitaire orienté vers le haut.

- Cette expression peut s'écrire : $\overrightarrow{F_{T/m}} = m\,G\,\frac{m_T}{R^2}(-\vec{u}) = m\,g\,(-\vec{u})$

- On retrouve l'expression connue du poids :

$$\overrightarrow{F_{T/m}} = \boxed{\vec{P} = m\,\vec{g}}$$

où $\vec{g}$ est le vecteur accélération de la pesanteur, qui est dirigé vers le centre de la Terre.

- Numériquement, $\|\vec{g}\| = g = G\,\frac{m_T}{R^2} = 6{,}67.10^{-11}\,N.m^2.kg^{-2} \times \frac{5{,}972.10^{24}\ kg}{(6371.10^3\ m)^2}$

soit : g = 9,81 m.s^{-2}

- On prendra souvent l'approximation : $g \approx$ 10 m.s^{-2}

- Validité de l'expression $\vec{P} = m\,\vec{g}$
- On a obtenu cette expression en écrivant que la distance r (entre les 2 masses) était égale au Rayon : R = 6371 km de la terre.
- Vérifions si cette expression reste valable lorsqu'on se trouve (par exemple) à une altitude z = 10 km au dessus du niveau de la mer (≈ altitude de vol des avions de ligne).
- Pour cela, on peut comparer les modules des forces : $F_{T/m}(R)$ et $F_{T/m}(R+z)$ en formant le rapport :

$$\frac{F_{T/m}(R+z)}{F_{T/m}(R)}$$

- On écrit :

$$\frac{F_{T/m}(R+z)}{F_{T/m}(R)} = \frac{G(m.m_T)/(R+z)^2}{G(m.m_T)/R^2} = \left(\frac{R}{R+z}\right)^2$$

- Soit :

$$\frac{F_{T/m}(R+z)}{F_{T/m}(R)} = \left(\frac{6371}{6371+10}\right)^2 \approx 99{,}7\ \%$$

- On voit que l'expression $\vec{P} = m\,\vec{g}$ reste valable à 0,3 % près, jusqu'à une altitude de 10 000 m. Elle sera donc utilisable dans la majorité des situations courantes.

Conclusion

- Dans ce Chapitre, on a vu plusieurs forces :
  - Force transmise par une corde
  - Force exercée par un ressort
  - Force de frottement fluide
  - Force gravitationnelle
- Dans le Chapitre suivant, on va introduire :
  - Différentes formes d'énergies
  - Et notamment le travail d'une force

Mentions légales