Physique

Chapitre 3

Différentes formes d’énergie

Dr. Benoît CHABAUD

Objectifs

- Comprendre différentes formes d’énergie :
  - Énergie cinétique
  - Énergie potentielle gravitationnelle
  - Énergie thermique
  - Travail d’une force

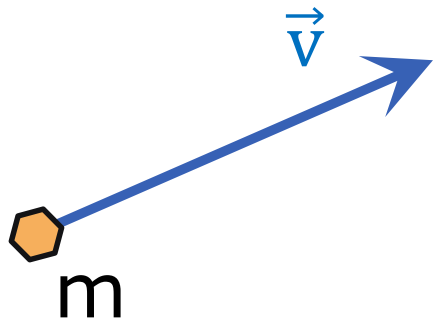
- Comprendre les notions de :
  - Puissance
  - Conservation de l’énergie

1.1. Énergies et puissance

- La notion d'énergie est intuitive, mais difficile à définir. L'énergie caractérise l'état d'un système mais elle n'est généralement pas observable directement.
- L'énergie se manifeste par des transformations entre ses diverses formes, qui produisent un travail, un mouvement, de la lumière, de l'électricité, de la chaleur…
- La dimension d'une énergie est : $[E] = M \cdot L^2 \cdot T^{-2}$ (cf. Chapitre 1)

  (on va retrouver cette dimension à partir des définitions des énergies cinétique E_c et potentielle E_p).
- Dans le Système International, l'unité de l'énergie est le Joule : $1\ J = 1\ kg.m^2.s^{-2}$

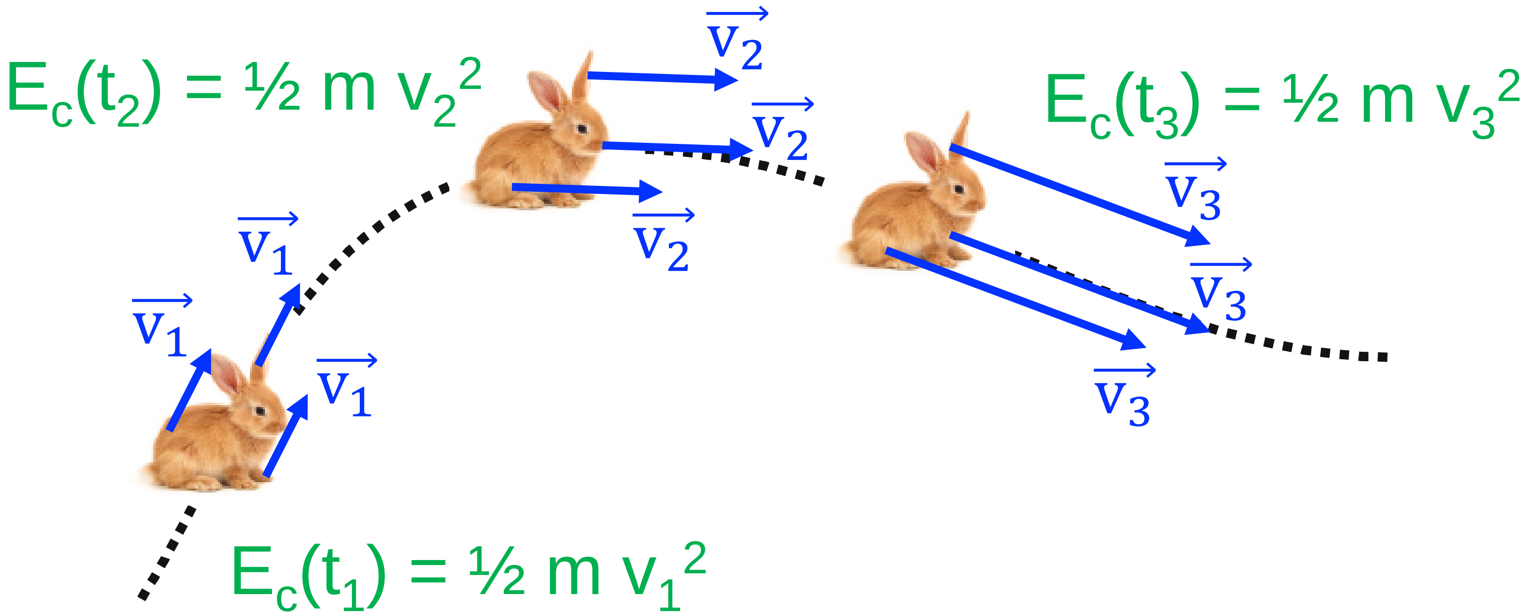
- Énergie cinétique
- L’énergie cinétique est liée au mouvement d'un corps dans un référentiel donné (sa valeur dépend donc du choix de ce référentiel).
- On ne s'intéresse ici qu'à l'énergie cinétique de translation de systèmes macroscopiques.
- L'énergie cinétique s'écrit : $\boxed{E_c = \frac{1}{2}\, m\, v^2}$ [!]
  - où m est la masse du corps (kg),
  - et $v = \|\vec{v}\|$ est la vitesse du corps ($m.s^{-1}$).



- E_c est une grandeur scalaire positive.
- À partir de cette définition, on vérifie aisément que la dimension de l’énergie cinétique est : $M \,.\, L^2 \,.\, T^{-2}$

- Cette relation s'applique uniquement aux mouvements de translation.

Pour mémoire, dans un mouvement de translation, à un instant donné, tous les points du système ont le même vecteur vitesse :



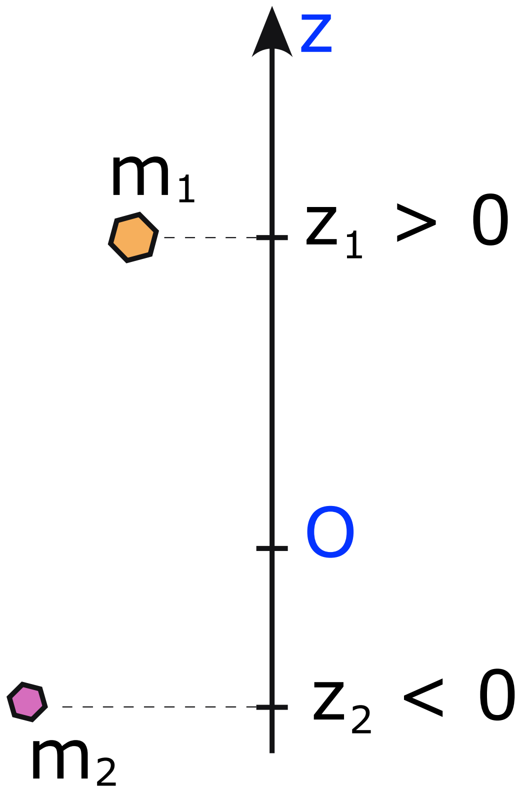
- (Pour des mouvements de rotation l'expression de l'énergie cinétique fait intervenir la géométrie de l'objet (moment d'inertie) et sa vitesse angulaire. Mais on n'en parlera pas dans ce cours).

- Énergie potentielle de pesanteur
- L’énergie potentielle gravitationnelle est liée à l’altitude d'un corps dans le champ de pesanteur terrestre.
- On ne s'intéresse ici qu'à l'énergie potentielle de systèmes macroscopiques.
- L'énergie potentielle s'écrit : $\boxed{E_p = mg\, z}$ [!]
  - où m est la masse du corps (kg),
  - la grandeur $g = \|\vec{g}\|$ est l’accélération de la pesanteur (cf. Chapitre 1),
  - et z est l’altitude du corps (en mètres) mesurée sur un axe Oz dirigé vers le haut.
- À partir de cette définition, on vérifie aisément que la dimension de l’énergie potentielle est : $M \,.\, L^2 \,.\, T^{-2}$

- L’énergie potentielle peut être positive ou négative suivant le choix (arbitraire) de l’origine O de l’axe Oz (vertical) :

- Sur le schéma ci-contre :

$$E_{p1} = m_1 g\, z_1 > 0 \quad \text{et}$$
$$E_{p2} = m_2 g\, z_2 < 0$$



- Si l’axe Oz était orienté vers le bas, il faudrait écrire l’énergie potentielle sous la forme :

$$E_p = mg\,(-z) = -mgz$$

- On retiendra que l’énergie potentielle est toujours croissante lorsque l’altitude augmente.

- Énergie mécanique
- Par définition, l'énergie mécanique d'un système est la somme de son énergie Cinétique et de son énergie potentielle :

$$\boxed{E_m = E_c + E_p}$$

[!]

- Si l'on s'intéresse à un système placé dans le champ de pesanteur gravitationnel, cette énergie s'écrit :

$$E_m = \frac{1}{2} m v^2 + m g z$$

- Mais on verra dans les Chapitres suivants que cette définition de l'énergie mécanique peut s'appliquer à d'autres formes d'énergies potentielles.

- Puissance
- L'énergie produite par un système est égale à la puissance de ce système multipliée par le temps au cours duquel elle agit :

$$\boxed{E = P \times \Delta t}$$ [!]

- Autrement dit, la puissance est une énergie produite ou reçue au cours d'un certain temps : $P = E / \Delta t$

- La dimension d'une puissance est donc :

$$[P] = M.L^2.T^{-2} / T = M \,.\, L^2 \,.\, T^{-3}$$

- Dans le SI, l'unité de la puissance est le Watt : $1\ W = 1\ kg.m^2.s^{-3}$

- On peut aussi écrire : 1 Joule = 1 Watt x 1 seconde [!]

1.2. Ordres de grandeur

- Énergie et puissance
- Pour monter une hauteur h = 50 m, une personne de m = 60 kg doit fournir une énergie : $E_p = mgh = 60\ \text{kg} \times 10\ \text{m.s}^{-2} \times 50\ \text{m} = 30\,000\ \text{J}$.
- Pour cela, la personne peut monter rapidement ou lentement (mais dans les deux cas, l'énergie produite sera la même) :
- Si la personne monte les 50 m en $\Delta t_1 = 100$ s, la puissance fournie pendant la montée est : $P_1 = E_p / \Delta t_1 = 300$ W
- Si la personne monte les 50 m en $\Delta t_2 = 300$ s, la puissance fournie pendant la montée est : $P_2 = E_p / \Delta t_2 = 100$ W

- Ordres de grandeur
- Pour soulever une masse m = 1 kg d'une hauteur h = 10 cm, on fournit une énergie : $E_p = mgh = 1\ kg \times 10\ m.s^{-2} \times 0{,}1\ m = 1\ J$
- Lorsqu'on fait fonctionner un four de 2 kW pendant 1 heure, on consomme une énergie : $E = P \times \Delta t = 2000\ W \times 3600\ s = 7{,}2\ MJ$!

- Unités usuelles d'énergie
- Une autre unité courante pour l'énergie est le kilowatt.heure : kWh
- On peut convertir un kWh en Joules :

$$1\ kW.h = 1\ (1000\ W).(3600\ s) = 3{,}6.10^6\ J = 3{,}6\ MJ$$

- On voit que l'unité kWh est plus adaptée que le Joule pour les énergies courantes : 7,2 MJ = 2 kW x 1 h = 2 kWh

- Autres ordres de grandeur des puissances
- Puissance thermique dégagée par le corps humain au repos :

$P_{th} \approx 100$ W

- Puissance mécanique produite par le corps humain au travail :

$P_m \approx 100$ à 500 W

- Puissance thermique dégagée par un four domestique :

$P_{th} \approx 2000$ W

- Puissance mécanique d'un moteur de voiture :

$P_m \approx 30$ à 100 kW

- Puissance mécanique d'un TGV :

$P_m \approx 10$ MW

- Puissance électrique d'un réacteur de centrale nucléaire :

$P_{él} \approx 1$ GW

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

1.3. Conservation de l’énergie

- Au cours de diverses transformations, l'énergie totale se conserve intégralement…

  … à condition de prendre en compte l'énergie thermique (notée Q) dans les diverses formes d'énergie possibles (on utilise parfois l'expression « perte d'énergie » alors qu'il faudrait dire « transformation ou dégradation en chaleur »).

- Exemples
- Un cycliste qui descend une montagne de hauteur h, « perd » son l'énergie potentielle E_p. En pratique son énergie potentielle initiale ($E_p = mgh$) est intégralement dégradée en chaleur Q dans les freins et à travers les divers frottements (route, air) : $E_p = Q$

- Autre exemple : une voiture vide son réservoir d'essence au cours de divers déplacements : la combustion de l'essence a permis de façon transitoire d'avoir de l'énergie cinétique E_c et/ou de l'énergie potentielle E_p.

  Mais lorsque le réservoir est vide, le bilan global est exactement égal à la production d'une quantité de chaleur Q qui aurait été obtenue en brûlant toute l'essence : $E_{essence} = Q$

- Dernier exemple : une ampoule électrique transforme de l'énergie électrique $E_{élec}$ en lumière.

  Mais cette lumière est transitoire : une fois l'ampoule éteinte, la lumière a échauffé l'air et les murs de la pièce… et toute l'énergie électrique a été dégradée en chaleur : $E_{élec} = Q$

- Énergie thermique
- Lorsqu'une énergie (cinétique, potentielle…) se dégrade en chaleur, cette transformation se traduit par une élévation de température.
- La relation entre la quantité de chaleur Q (en Joules) et l'élévation de Température $\Delta\theta$ (en degrés Kelvin) s'écrit :

$$\boxed{Q = m\,C\,\Delta\theta}$$

[!]

- où m est la masse du système,
- et C est sa Capacité thermique massique (anciennement appelée 'chaleur massique' ou 'chaleur spécifique').

- Exemple : l'E_c d'une voiture qui freine ne « disparaît » pas ! Elle est dégradée en chaleur dans les freins… puis dans l'air.

https://www.24h-lemans.com/fr/actualites

- Exemple quantitatif : si on chauffe une masse d'eau m dans une casserole posée sur une plaque électrique de puissance $P_{élec}$ pendant un temps t, on a :

$$Q = P_{élec}\, t = m\, C_{eau}\, \Delta\theta$$

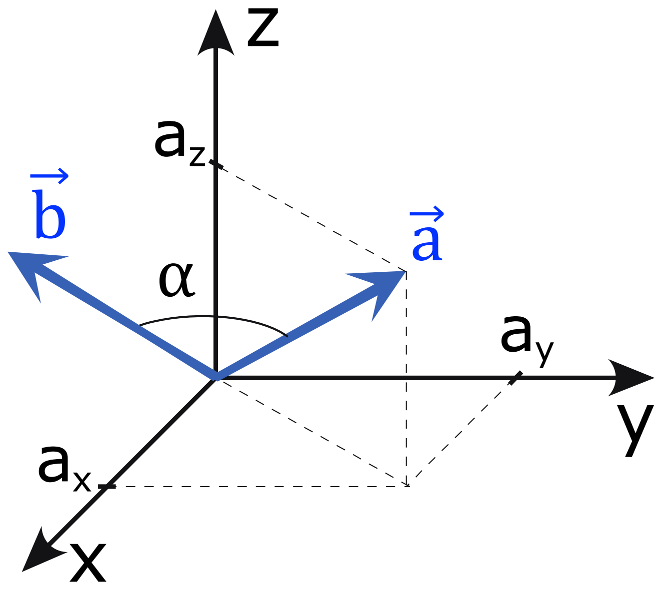
- La Capacité thermique de l'eau est : $C_{eau} = 4180\ J.kg^{-1}.K^{-1}$ (valeur liée à une ancienne unité d'énergie : la calorie).

- Application Numérique : si m = 1 kg, $P_{élec}$ = 2 kW pendant t = 1,5 min.

$$\Delta\theta = \frac{P_{élec}\, t}{m\, C_{eau}} = \frac{2000\ W \times 90\ s}{1\ kg \times 4180\ J.kg^{-1}.K^{-1}} = 43\ K$$

- L'élévation de température $\Delta\theta$ est ici de 43 degrés.

1.4. Rappels sur le produit scalaire



- On considère deux vecteurs $\vec{a}$ et $\vec{b}$, de composantes : $\vec{a}\ (a_x; a_y; a_z)$ et $\vec{b}\ (b_x; b_y; b_z)$
- le produit scalaire $\vec{a}.\vec{b}$ de ces deux vecteurs peut se calculer de deux façons :

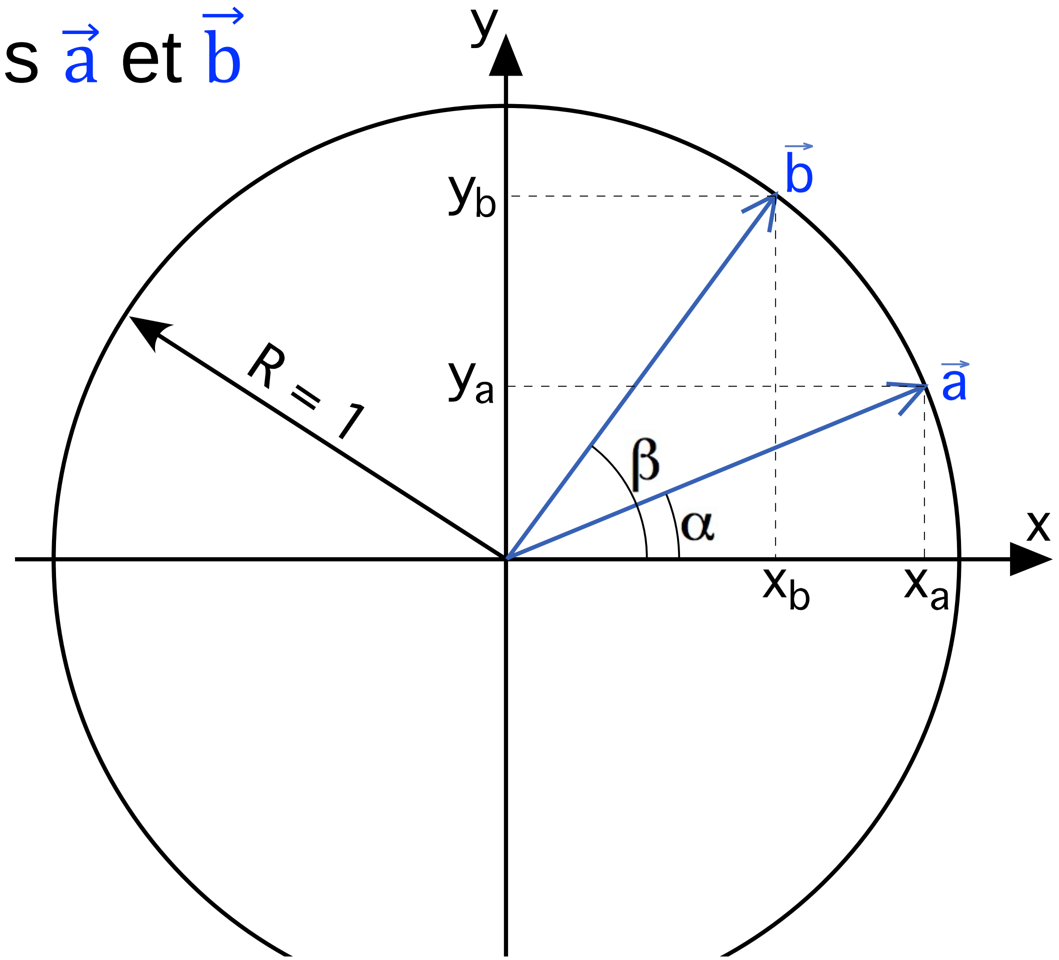
1) $\vec{a}.\vec{b} = ||\vec{a}||.\,||\vec{b}||\cos(\alpha)$

- On voit que cette grandeur est un nombre positif ou négatif suivant l'angle α (entre 0 et 180°).
- Si les deux vecteurs sont perpendiculaires (α = 90°), le produit scalaire est nul : $\vec{a}.\vec{b} = 0$.

2) $\vec{a}.\vec{b} = a_x b_x + a_y b_y + a_z b_z$

- Ces deux définitions du produit scalaire permettent de retrouver quelques règles de trigonométrie :

- Considérons les deux vecteurs unitaires $\vec{a}$ et $\vec{b}$ inscrits dans le cercle trigonométrique (de rayon R = 1).



- On peut écrire :

$$\begin{aligned}\vec{a}.\vec{b} &= ||\vec{a}||.||\vec{b}|| \cos(\beta - \alpha) \\ &= \cos(\beta - \alpha)\end{aligned}$$

- Et aussi :

$$\begin{aligned}\vec{a}.\vec{b} &= x_a x_b + y_a y_b \\ &= \cos(\alpha)\cos(\beta) + \sin(\alpha)\sin(\beta)\end{aligned}$$

- On en déduit : $\cos(\alpha)\cos(\beta) + \sin(\alpha)\sin(\beta) = \cos(\beta - \alpha)$ (1)

- On peut en déduire une autre relation en remplaçant “α” par “- α” :

$$\cos(-\alpha)\cos(\beta) + \sin(-\alpha)\sin(\beta) = \cos(\beta + \alpha)$$

- Comme la fonction cosinus est paire et la fonction sinus est impaire, on en déduit :

$$\cos(\alpha)\cos(\beta) - \sin(\alpha)\sin(\beta) = \cos(\beta + \alpha) \qquad (2)$$

- On peut déterminer une autre relation en formant (1) + (2) :

$$2\cos(\alpha)\cos(\beta) = \cos(\beta - \alpha) + \cos(\beta + \alpha) \qquad (3)$$

- Ou encore en en formant (1) - (2) :

$$2\sin(\alpha)\sin(\beta) = \cos(\beta - \alpha) - \cos(\beta + \alpha) \qquad (4)$$

- Avec d’autres combinaisons, on peut retrouver toutes les relations trigonométriques…

1.5. Travail d'une force

- Lorsqu'il y a un déplacement du point d'application d'une force, celle-ci produit un travail.
- Le travail élémentaire δW, correspond au produit scalaire de $\vec{F}$ par le déplacement infinitésimal $\overrightarrow{d\ell}$ du système :

$$\boxed{\delta W = \vec{F}.\overrightarrow{d\ell}}$$ [!]

(au cours de ce petit déplacement $\overrightarrow{d\ell}$, la force $\vec{F}$ est constante).

- Dimension du travail

$$[\delta W] = \left[\vec{F}.\overrightarrow{d\ell}\right] = [F][d\ell] = M.L.T^{-2} \times L = M \,.\, L^{2} \,.\, T^{-2}$$

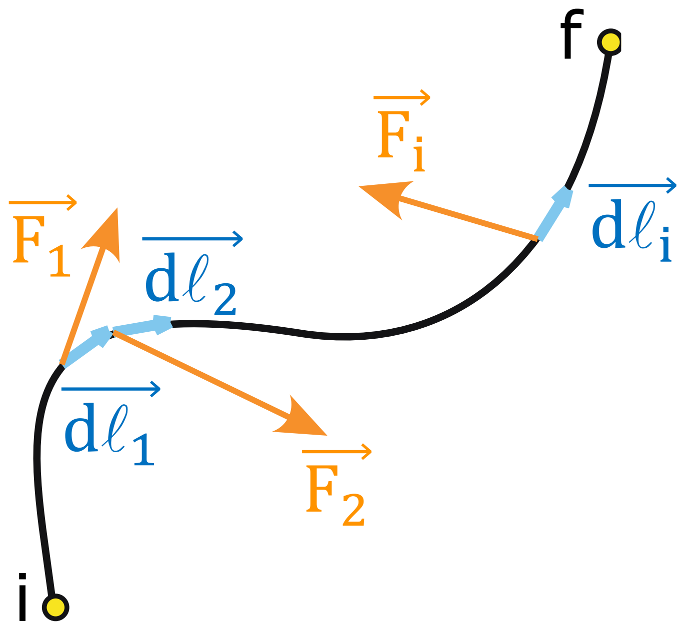
- On retrouve la dimension d'une énergie : le travail est une autre forme d'énergie (et il se mesure donc en Joules).

- Le travail macroscopique W est la somme des travaux élémentaires, de la position initiale à la position finale du système :

$$W = \int_i^f \delta W = \int_i^f \vec{F}.\overrightarrow{d\ell}$$

- Dans le cas général, la force $\vec{F}$ n'est pas constante et le calcul de W est compliqué :

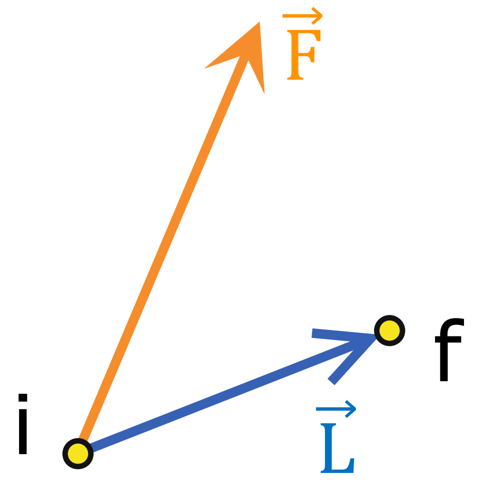
- Il faut découper la trajectoire en segments $\overrightarrow{d\ell}$ élémentaires, et faire la somme de tous les produits : $\vec{F_i}.\overrightarrow{d\ell_i}$



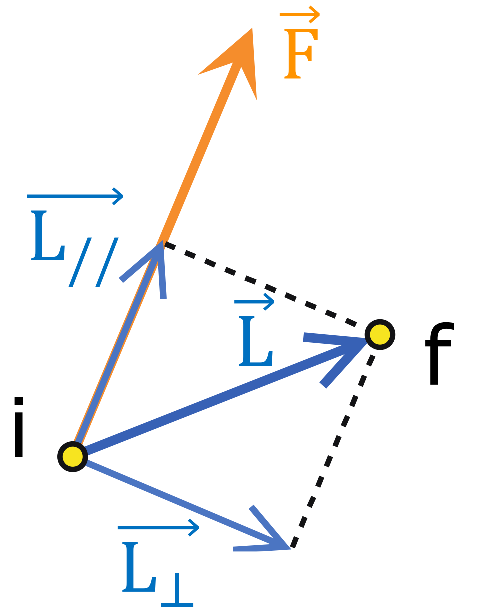
- Simplification du calcul
- Si la force $\vec{F}$ est constante et que le déplacement du système est rectiligne, le travail s'écrit simplement :

$$W = \int_i^f \vec{F}.\overrightarrow{d\ell} = \vec{F}.\int_i^f \overrightarrow{d\ell} = \vec{F}.\vec{L}$$

où $\vec{L}$ est le déplacement macroscopique.



- On peut toujours décomposer le déplacement $\vec{L}$ en deux composantes :
  - une composante parallèle à la force : $\overrightarrow{L_{//}}$
  - une composante perpendiculaire à la force : $\overrightarrow{L_{\perp}}$

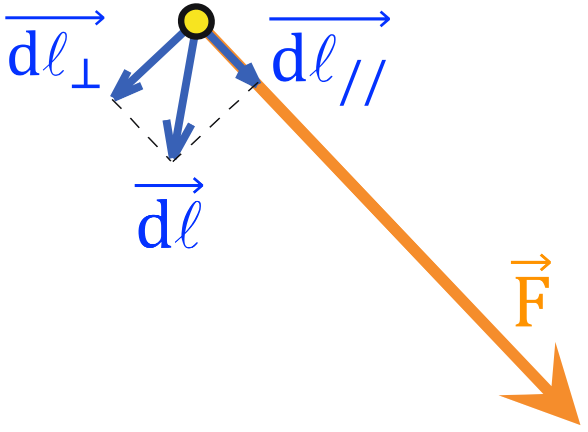


- On voit alors que le travail s'écrit :

$$\vec{F}.\vec{L} = \vec{F}.\overrightarrow{L_{//}} + \cancel{\vec{F}.\overrightarrow{L_{\perp}}}$$
$$= \vec{F}.\overrightarrow{L_{//}}$$

- Dans le Produit Scalaire, seule la composante du déplacement parallèle à la force : $\overrightarrow{L_{//}}$ est à prendre en compte.

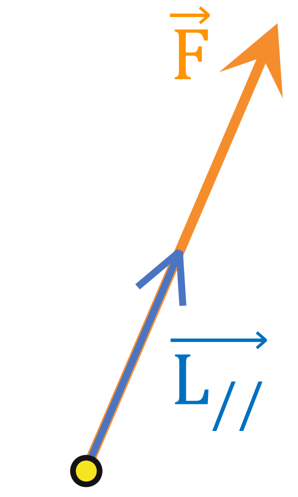
- (remarquons que ceci est vrai également pour des déplacements infinitésimaux : $\vec{F}.\overrightarrow{d\ell} = \vec{F}.\overrightarrow{d\ell_{//}} + \cancel{\vec{F}.\overrightarrow{d\ell_{\perp}}} = \vec{F}.\overrightarrow{d\ell_{//}}$)



- On peut alors distinguer 2 situations :

- Travail moteur : lorsque la force $\vec{F}$ et le déplacement $\overrightarrow{L_{//}}$ sont orientés dans le même sens, le travail est positif. On dit que la force est motrice :

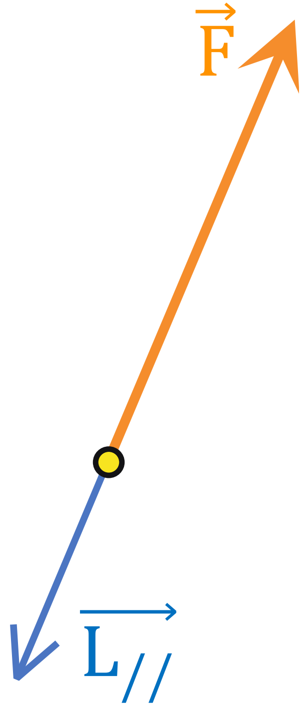
$$\vec{F}.\vec{L} = \vec{F}.\overrightarrow{L_{//}} = \|\vec{F}\|.\|\overrightarrow{L_{//}}\| > 0$$



- On verra plus loin que cette situation correspond à une accélération du mouvement.

- Travail récepteur : lorsque la force $\vec{F}$ et le déplacement $\overrightarrow{L_{//}}$ sont en sens contraire, le travail est négatif.
 On dit que la force est réceptrice :

$$\vec{F}.\overrightarrow{L_{//}} = \|\vec{F}\|.\|\overrightarrow{L_{//}}\|\cos(180°) = -\|\vec{F}\|.\|\overrightarrow{L_{//}}\| < 0$$



- On verra plus loin que cette situation correspond à une décélération du mouvement.

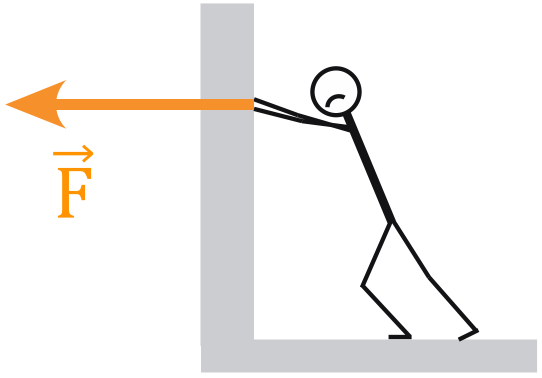
- Puissance d'une force
- Si on divise l'expression $\delta W = \vec{F}.\overrightarrow{d\ell}$ par l'intervalle de temps dt correspondant au déplacement $\overrightarrow{d\ell}$, on obtient :

$$\frac{\delta W}{dt} = P = \vec{F}.\frac{\overrightarrow{d\ell}}{dt} = \vec{F}.\vec{v}$$

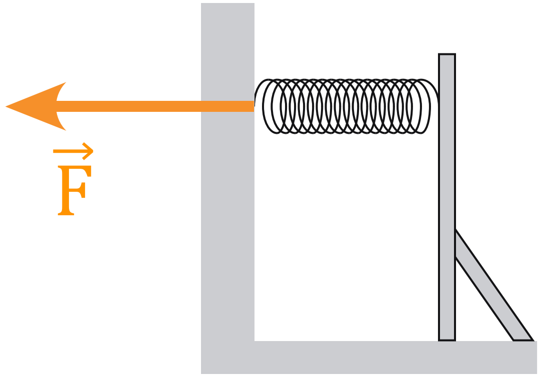
où $\frac{\overrightarrow{d\ell}}{dt} = \vec{v}$ est la vitesse du système.

- Cette relation relie la puissance P (en Watt) à la force $\vec{F}$:
- Si la force est motrice ($\vec{F}.\overrightarrow{d\ell} > 0$), la puissance est positive : la force augmente l'énergie du système.
- Si la force est réceptrice ($\vec{F}.\overrightarrow{d\ell} < 0$), la puissance est négative : la force diminue l'énergie du système.

- Dans un prochain Chapitre, on donnera des exemples de calculs de travail d’une forces.
- Remarque : le corps humain n’est généralement pas un bon système pour illustrer les Lois de la mécanique : même en restant immobile, un individu produit du travail - et de la chaleur - à travers son tonus musculaire.
- Sur le schéma ci-contre, l’individu se fatigue (chaleur), même si le mur reste immobile !



- Par contre, un ressort qui exerce une force sur le mur immobile ne travaille pas...
- De façon générale, on évitera de prendre le corps humain comme exemple de système mécanique…



Conclusion

- Dans ce Chapitre, on a vu différentes formes d'énergies :
  - Énergie cinétique
  - Énergie potentielle gravitationnelle
  - Énergie thermique
  - Travail d'une force
- Et on a introduit les notions de :
  - Puissance
  - Conservation de l'énergie
- Dans le Chapitre suivant, on verra la notion de :
  - Force conservative et énergie potentielle

Mentions légales