CHAPITRE 7 ASPECTS ENERGETIQUES DES PHENOMENES MECANIQUES

I L'énergie cinétique

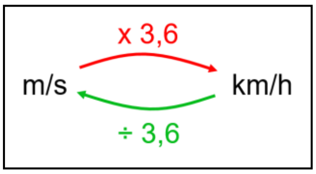
L'<u>énergie cinétique</u> d'un système, notée E_c, est l'énergie liée à la masse et à la vitesse du système. Elle se mesure en joule (J). Pour un système en translation, elle est définie par :

$$\mathbf{E_c = \frac{1}{2}\, m\, v^2}$$

E_c : Energie cinétique en joule (J)
m : masse en kilogramme (kg)
v : vitesse en mètre par seconde ($m.s^{-1}$)

L'énergie cinétique est proportionnelle à la masse du système et proportionnelle à la vitesse au carré.

<u>Attention</u> : il faut bien penser à convertir les vitesses en $m.s^{-1}$ et les masses en kg.



<u>Remarque</u> : L'énergie est une grandeur toujours positive ou nulle. Elle dépend du référentiel considéré puisque la vitesse aussi.

<u>Exercices</u> :

1) *Calculer l'énergie cinétique du footballeur Kylian Mbappé, de masse 78 kg, lorsqu'il atteint sa vitesse maximale de 32,4 km.h^{-1}.*

Conversion de la vitesse en $m.s^{-1}$: $v = \frac{32{,}4}{3{,}6} = 9{,}00\ m.s^{-1}$.

Energie cinétique : $E_c = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} \times 78 \times 9{,}00^2 =$ **<u>$3{,}2 \times 10^3$ J</u>** (= 3 159 J)

2) *Calculer la vitesse en km.h^{-1} d'un TGV de masse m = 444 tonnes ayant une énergie cinétique de 1,53 GJ.*

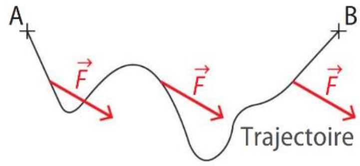
Conversion de la masse en kg : m = 444 t = <u>444×10^3 kg</u>.
Conversion de l'énergie cinétique en J : E_c = 1,53 GJ = <u>$1{,}53 \times 10^9$ J</u>.
Expression de la vitesse : Il FAUT l'obtenir avant de faire le calcul !

- On multiplie les deux côtés de l'égalité par 2 : $E_c \times 2 = \cancel{\frac{1}{2}}\, m v^2 \times \cancel{2}$. On obtient : $2 \times E_c = m v^2$.
- On divise les deux côtés de l'égalité par « m » : $\frac{2 \times E_c}{m} = \frac{\cancel{m}\, v^2}{\cancel{m}}$. On obtient : $\frac{2 \times E_c}{m} = v^2$.
- On met une racine carrée sur chaque côté : $\sqrt{v^2} = v = \sqrt{\frac{2 \times E_c}{m}}$.
- Application numérique : $v = \sqrt{\frac{2 \times E_c}{m}} = \sqrt{\frac{2 \times 1{,}53 \times 10^9}{444 \times 10^3}} = 83{,}0\ m.s^{-1} =$ **<u>299 km.h^{-1}</u>**.

II Le travail d'une force constante

1) Définition du travail

Une force est dite **constante** quand sa valeur (en newton), sa direction et son sens ne varient pas au cours du temps.



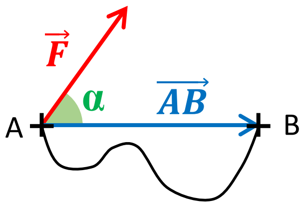
Imaginons un système se déplaçant d'un point A à un point B en subissant une force $\vec{F}$ constante. Il peut se déplacer grâce à cette force, malgré cette force ou sans que cette force ait un impact sur son mouvement.
Il reçoit, par la présence de cette force, une énergie appelée « travail de la force $\vec{F}$ » sur le déplacement de A vers B, et notée $\mathbf{W_{AB}(\vec{F})}$, de l'anglais : **Work** (travail).

Le <u>travail</u> d'une force est une grandeur physique permettant d'évaluer l'effet de cette force sur le mouvement d'un système. Elle est l'énergie transmise (ou retirée) au système par la force appliquée.

Le <u>travail</u> d'une force constante $\vec{F}$ dont le point d'application se déplace de A vers B est égal au produit scalaire entre $\vec{F}$ et le vecteur déplacement $\overrightarrow{AB}$:

$$W_{AB}(\vec{F}) = \vec{F}.\overrightarrow{AB} \qquad \text{Il vaut donc :} \qquad W_{AB}(\vec{F}) = F \times AB \times \cos\alpha$$

$W_{AB}(\vec{F})$: Travail de la force en joule (J)
F : Force d'intensité constante en newton (N)
AB : longueur du déplacement en mètre (m)
α : Angle entre la force $\vec{F}$ et le vecteur déplacement $\overrightarrow{AB}$
lettre grecque « alpha ».

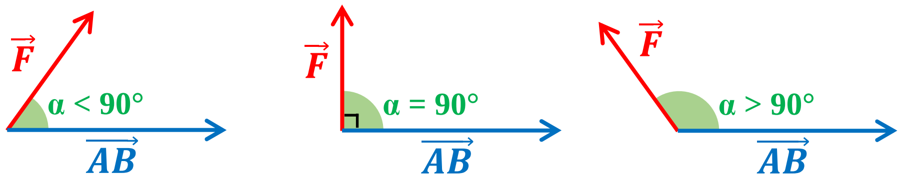


<u>Remarques</u> :

- L'angle α est parfois noté θ (lettre grecque « thêta »).
- Le **produit scalaire** est le produit de deux vecteurs, mais le résultat est bien une valeur numérique. F et AB (en normes) étant toujours positifs, le signe positif ou négatif du travail dépend de l'angle α.

L'angle selon lequel une force s'applique est donc important :

- Si α est compris entre 0° et 90°, alors cos α est positif, le travail de cette force est **positif**, il est **moteur** et fait augmenter l'énergie cinétique du système. La force exercée **favorise le déplacement de l'objet**.
- Si α est compris entre 90° et 180°, alors cos α est négatif, le travail de cette force est **négatif**, il est **résistant** et fait diminuer l'énergie cinétique du système (il le freine). La force exercée tend à **s'opposer au déplacement**.
- Si **α = 90°**, alors cos α = cos 90 = 0, le travail est nul. **La force ne travaille pas** et n'a pas d'effet sur le déplacement. Ce cas est très souvent rencontré en exercice. Il faut donc le connaître.

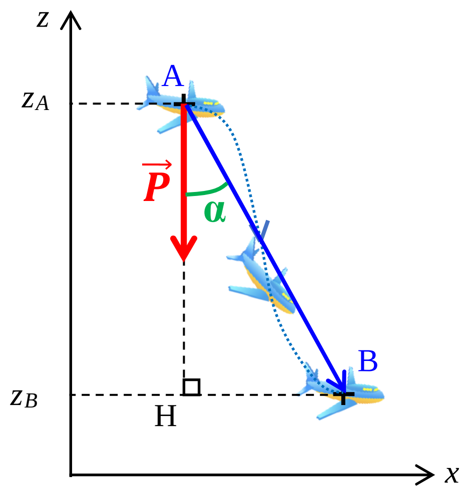


Travail moteur **W > 0** | **Travail nul** **W = 0** | **Travail résistant** **W < 0**

Le travail d'une force constante entre deux points A et B ne dépend pas du chemin suivi entre A et B.

<u>Exercice</u> : *Calculer le travail d'une force motrice de 120 N appliquée à un système sur une distance de 2,0 km. La force motrice est parallèle au déplacement.*
La force est motrice, on a donc α = 0°. $W_{AB}(\vec{F}) = F \times AB \times \cos\alpha = 120 \times 2{,}0 \times 10^3 \times \cos 0 = \underline{\mathbf{2{,}4 \times 10^5\ J}}$.

2) Travail du poids



Prenons un système se déplaçant d'un point A d'altitude y_A à un point B d'altitude y_B, que ce soit en montant ou en descendant.

Le système est placé dans un champ de pesanteur $\vec{g}$. Il est soumis à son poids $\vec{P}$. Cette force s'exerce à la verticale vers le bas suivant la relation : $\vec{P} = m\,\vec{g}$. En norme, elle s'écrit : $P = m \times g$.

Le travail du poids $\vec{P}$ sur le déplacement de A vers B s'exprime suivant la relation :

$$W_{AB}(\vec{P}) = \vec{P}.\overrightarrow{AB}$$
$$W_{AB}(\vec{P}) = P \times AB \times \cos\alpha$$
$$W_{AB}(\vec{P}) = m \times g \times AB \times \mathbf{\cos\alpha}$$

$$\text{« cosinus »} = \frac{\text{côté adjacent}}{\text{hypoténuse}}$$

Dans le triangle rectangle AHB, on a : $\mathbf{\cos\alpha} = \frac{AH}{AB} = \frac{(z_A - z_B)}{AB}$.

On remplace « cos α » dans l'expression du travail du poids : $W_{AB}(\vec{P}) = m \times g \times \cancel{AB} \times \frac{(z_A - z_B)}{\cancel{AB}}$

On en déduit l'expression du travail du poids : $W_{AB}(\vec{P}) = m \times g \times (z_A - z_B)$.

Attention : cette expression n'est valable que si l'axe *y* est orienté vers le haut !

Le travail du poids exercé sur un système se déplaçant d'un point A d'altitude z_A à un point B d'altitude z_B a pour expression :

$$\mathbf{W_{AB}(\vec{P}) = m \times g \times (z_A - z_B)}$$

| $W_{AB}(\vec{P})$: Travail du poids en joule (J)
| m : masse en kilogramme (kg)

y_A et y_B : altitude en mètre (m)
g : intensité du champ de pesanteur $g = 9{,}81\ N.kg^{-1}$

Cette expression est valable quelle que soit la trajectoire du système ! Elle ne dépend que de l'altitude de départ et d'arrivée. On parle de « force conservative ».

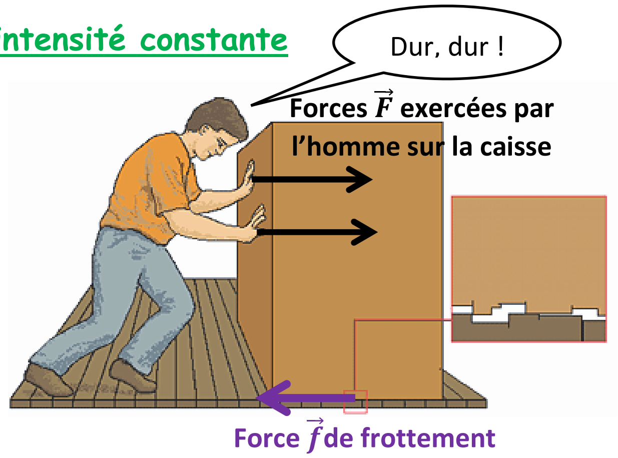
On fait **toujours** : « altitude du point de départ » moins « altitude du point d'arrivée ». Pas d'inversion !

- Dans le cas d'une **descente** : $z_A > z_B$. On a donc $z_A - z_B > 0$. Le travail du poids est donc positif, c'est un **travail moteur**. Le poids favorise la descente.
- Dans le cas d'une **montée**, c'est l'inverse : $z_A < z_B$. On a donc $z_A - z_B < 0$. Le travail du poids est donc négatif, c'est un **travail résistant**. Le poids freine la montée.

Remarques :

- La différence d'altitude $y_A - y_B$ se note parfois h, le travail du poids s'exprime alors plus simplement : $\mathbf{W_{AB}(\vec{P}) = m \times g \times h}$.
- L'axe *y* est parfois remplacé par l'axe z.

3) Travail d'une force de frottement d'intensité constante



Une force de frottement d'intensité constante, notée $\vec{f}$, subie par un système en mouvement est en permanence parallèle au déplacement, et de sens opposé à ce dernier.

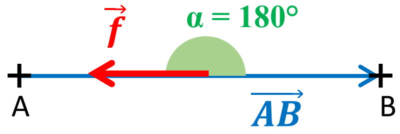
Le travail de cette force de frottement $\vec{f}$, de norme *f* constante, lors du **déplacement rectiligne AB** du système d'un point A à un point B a pour expression :

$$W_{AB}(\vec{f}) = \vec{f}.\overrightarrow{AB} = f \times AB \times \cos\alpha.$$

Or, comme $\vec{f}$ est opposé au déplacement, l'angle α vaut : α = 180°. On a donc : cos α = cos 180 = –1.

Le travail d'une force de frottement d'intensité *f* constante, sur un déplacement rectiligne d'un point A à un point B a pour expression : $$W_{AB}(\vec{f}) = -f \times AB$$

$W_{AB}(\vec{f})$: Travail de la force de frottement en joule (J)
f : force de frottement en newton (N)
AB : longueur du déplacement en mètre (m)



Remarques :

- $W_{AB}(\vec{f})$ est **négatif**, la force de frottement s'oppose au déplacement.
- Le travail de la force de frottement dépend du chemin suivi. On parle de « force non conservative ». C'est la raison pour laquelle on ne considèrera que des déplacements rectilignes.

III Théorème de l'énergie cinétique

1) Enoncé du théorème

On considère un système se déplaçant d'un point A à un point B. L'énergie cinétique du système vaut $E_c(A)$ au point A et $E_c(B)$ au point B.

La variation d'énergie cinétique, notée ΔE_c, du système entre les points A et B est égale à la somme des travaux des forces qu'il subit au cours de son déplacement.

$$\Delta E_c = E_c(B) - E_c(A) = \Sigma\, W_{AB}(\vec{F})$$

Δ : lettre grecque majuscule « delta », utilisée pour écrire une variation.
Σ : lettre grecque majuscule « sigma » représentant la somme. $\Sigma\, W_{AB}(\vec{F}) = W_{AB}(\vec{F_1}) + W_{AB}(\vec{F_2}) + \ldots$
ΔEc et $W_{AB}(\vec{F})$ s'expriment en joule (J)

Si la somme des travaux des forces appliquées au système est positive, son énergie cinétique augmente, donc la valeur de sa vitesse augmente.
Le théorème de l'énergie cinétique permet de relier la somme des travaux des forces qui s'exercent sur un système et la variation de sa vitesse.

2) Exemples d'application

- **Exemple n°1 « ultra-classique » : La chute libre sans vitesse initiale**

Un pot de fleur de masse m = 800 g posé sur le rebord d'une fenêtre tombe du cinquième étage d'un immeuble (hauteur h = 15 m). Sa vitesse initiale est nulle et les frottements dus à l'air sont négligeables. Déterminer la vitesse avec laquelle le pot de fleur arrive au sol.
Donnée : intensité du champ de pesanteur g = 9,81 $N.kg^{-1}$

On applique le théorème de l'énergie cinétique au pot de fleur, entre son point de départ A et le point d'impact au sol B : $\Delta E_c = E_c(B) - E_c(A) = \Sigma\, W_{AB}(\vec{F})$
Il faut décomposer l'étude en trois parties :

- **Expression des énergies cinétiques :**

$E_c(A) = \frac{1}{2} m v_A^2 = 0$ J car A est le point de départ et la vitesse initiale est nulle.

$E_c(B) = \frac{1}{2} m v_B^2$. On ne peut pas aller plus loin car on cherche à calculer v_B.

- **Travaux des forces :**
La seule force qui agit est le poids, car les frottements de l'air sont négligés.
$W_{AB}(\vec{P}) = m \times g \times (y_A - y_B) = m \times g \times h$. Ce travail est positif car le poids est une force motrice.

- **On reprend le théorème** : $E_c(B) - E_c(A) = \frac{1}{2} m v_B^2 - 0 = m \times g \times h$ $\qquad \frac{1}{2} m v_B^2 = m\, g\, h$

On multiplie par 2 chaque côté de l'égalité : $\cancel{\frac{1}{2}} m v_B^2 \times \cancel{2} = m\, g\, h \times 2$. On obtient : $m v_B^2 = 2\, m\, g\, h$

On simplifie par « m » de chaque côté de l'égalité : $\cancel{m} v_B^2 = 2 \cancel{m}\, g\, h$. On obtient : $v_B^2 = 2\, g\, h$.

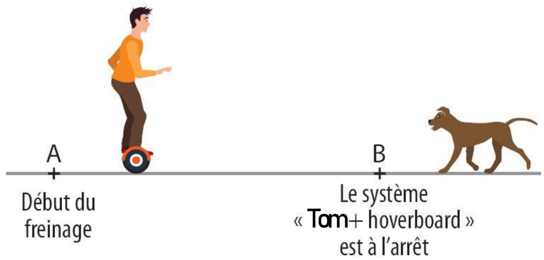
On met une racine carrée de chaque côté : $\sqrt{v_B^2} = \boxed{v_B = \sqrt{2\, g\, h}}$

Application numérique : $v_B = \sqrt{2 \times 9{,}81 \times 15} =$ **<u>17,1 m.s⁻¹</u>**.

<u>Remarque</u> : On constate que la vitesse au moment de l'impact ne dépend pas de la masse de l'objet. Un objet de 10 kg arrivera à la même vitesse qu'un objet de 50 g !
Cela n'est vrai **que** si l'on néglige les frottements qui sont en réalité souvent non négligeables…

- **<u>Exemple n°2 : Distance d'arrêt</u>**

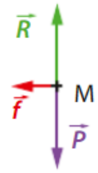
Tom se balade en hoverboard lorsqu'un chien surgit sur la route et l'oblige à freiner pour ne pas le percuter.
Le début du freinage se situe au point A où l'hoverboard a atteint la vitesse $v_A = 5{,}00\ m.s^{-1}$.
Au point B, Tom et son hoverboard est à l'arrêt. On note AB = d.
La route est supposée horizontale et le mouvement rectiligne.
Le système « Tom + hoverboard » a une masse m = 60,0 kg.



1) *Définir le système et le référentiel d'étude.*

Le système étudié est l'ensemble **<u>« Tom + hoverboard »</u>** assimilé à un point M, dans le **<u>référentiel terrestre</u>**.

2) *Quelles sont les forces qui s'appliquent au système pendant le freinage ?*



- Le poids $\vec{P}$ (toujours présent) dirigé à la verticale vers le bas ;
- La réaction du support $\vec{R}$ (toujours perpendiculaire au support, ici à la verticale vers le haut) ;
- La force de frottement $\vec{f}$ permettant le freinage (dans le sens opposé au déplacement).

3) *Donner l'expression des travaux entre les points A et B des différentes forces exercées sur le système.*

- <u>Travail du poids</u> : $W_{AB}(\vec{P}) = m \times g \times (y_A - y_B) = 0$ J car le déplacement est horizontal, on a donc $y_A = y_B$.
On peut également revenir à la définition : $W_{AB}(\vec{P}) = P \times AB \times \cos 90 = 0$ J.
- <u>Travail de la réaction du support</u> : $W_{AB}(\vec{R}) = R \times AB \times \cos 90 = 0$ J.
Les forces $\vec{P}$ et $\vec{R}$ ne travaillent pas car elles sont perpendiculaires au déplacement.
- <u>Travail de la force de frottement</u> : $W_{AB}(\vec{f}) = f \times AB \times \cos 180 = -f \times d$

4) *En appliquant le théorème de l'énergie cinétique, exprimer la distance d'arrêt d.*
Calculer cette distance sachant que la force de frottement vaut : f = 200 N.

Au point B, Tom et son hoverboard est à l'arrêt. On a donc $E_c(B) = 0$ J.

Théorème de l'énergie cinétique entre les points A et B : $\underbrace{E_c(B)}_{= 0\ J} - E_c(A) = \underbrace{W_{AB}(\vec{P})}_{= 0\ J} + \underbrace{W_{AB}(\vec{R})}_{= 0\ J} + W_{AB}(\vec{f})$.

On en déduit : $W_{AB}(\vec{f}) = -E_c(A)$

c'est-à-dire : $-f \times d = -\frac{1}{2} m v_A^2$

On obtient l'expression de d : $\boxed{d = \frac{m v_A^2}{2 \times f}}$ $\qquad$ Application numérique : $d = \frac{60 \times 5{,}00^2}{2 \times 200} =$ **<u>3,75 m</u>**.

I Forces conservatives et non conservatives

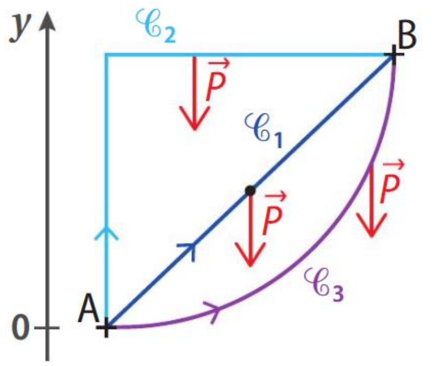
1) Forces conservatives

Une force conservative est une force dont le travail entre deux points est indépendant du chemin suivi entre ces deux points. Le travail ne dépend que de leurs positions initiale et finale.

Nous avons démontré dans le chapitre précédent que le travail du poids exercé sur un système s'exprime en fonction de l'altitude y_A du point de départ A et de l'altitude y_B du point d'arrivée B selon la relation :

$$W_{AB}(\vec{P}) = m \times g \times (z_A - z_B)$$

$W_{AB}(\vec{P})$: Travail du poids en joule (J)
m : masse en kilogramme (kg)
g : intensité du champ de pesanteur g = 9,81 N.kg^{-1}
y_A et z_B : altitude en mètre (m)



Le travail du poids est donc indépendant du chemin suivi entre A et B.

Exemple : Sur le schéma suivant, le travail du poids aura la même valeur que le système suive les chemins $\mathscr{C}_1$, $\mathscr{C}_2$ ou $\mathscr{C}_3$ car les altitudes des points A et B sont les mêmes.

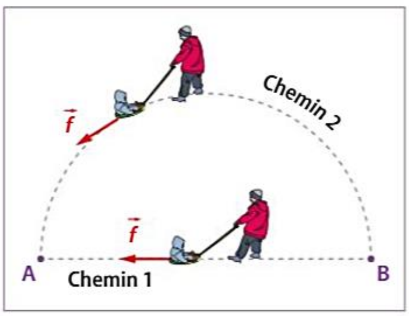
Le poids est une force conservative.

Autres exemples : Force électrostatique, force de rappel d'un ressort

2) Forces non conservatives

Une force non conservative est une force dont le travail entre deux points dépend du chemin suivi entre ces deux points.

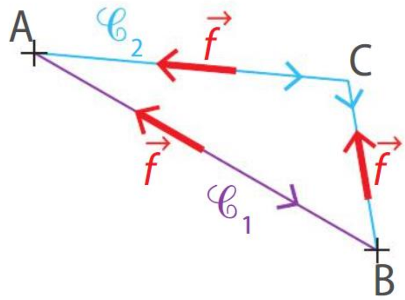
Exemple : les forces de frottement avec une surface ou un fluide.



Doc. 3. Le travail de la force de frottement dépend du chemin suivi : $|W_{AB}(\vec{f})\,(\text{chemin 1})| < |W_{AB}(\vec{f})\,(\text{chemin 2})|$.

Nous avons vu au chapitre précédent que l'expression du travail d'une force de frottement **d'intensité** constante f, sur un déplacement rectiligne d'un point A à un point B est : $W_{AB}(\vec{f}) = -f \times AB$

$W_{AB}(\vec{f})$: Travail de la force de frottement en joule (J)
f : intensité de la force de frottement en newton (N)
AB : longueur du déplacement en mètre (m)



La force de frottement reste en permanence parallèle au déplacement, son travail dépend alors de la longueur de ce déplacement.

Exemple : Sur le schéma suivant, le travail de la force de frottement $\vec{f}$ vaut :

- Sur le chemin $\mathscr{C}_1$, $W_{AB}(\vec{f}) = -f \times AB$
- Sur le chemin $\mathscr{C}_2$, $W_{AB}(\vec{f}) = -f \times (AC + CA)$ car le système passe par C, le trajet est donc plus long.

Ces deux valeurs sont différentes car A, B et C ne sont pas alignés, donc $\vec{f}$ est une force non conservative.

Une force de frottement d'intensité constante est une force non conservative.

II L'énergie potentielle

1) Définition de l'énergie potentielle

On considère une force conservative notée $\vec{F}$. Le travail de cette force ne dépend que des positions initiale et finale A et B du trajet.
Ce travail peut alors s'exprimer comme la différence entre la valeur d'une grandeur, nommée **énergie potentielle E_p**, prise en A, et la valeur de cette même grandeur prise en B.

A chaque force conservative $\vec{F}$ est associée une énergie potentielle E_p telle que :

$$W_{AB}(\vec{F}) = E_p(A) - E_p(B)$$

Comme on peut définir une énergie potentielle pour chaque force conservative, on peut distinguer par exemple :

- l'énergie potentielle de pesanteur, reliée au poids $\vec{P}$ notée E_{pp} ;
- l'énergie potentielle élastique, reliée à la force de rappel d'un ressort ;
- l'énergie potentielle électrostatique, reliée à la force électrostatique.

Soit une grandeur X dont la valeur varie d'une valeur initiale X_i à une valeur finale X_f. La **variation de la grandeur X** est notée ΔX et s'écrit $\Delta X = X_f - X_i$. Δ est la lettre grecque delta majuscule.

Exemples : - Variation de température entre T_i et T_f : $\Delta T = T_f - T_i$
- Variation de l'énergie cinétique entre les points A et B : $\Delta E_c = E_c(B) - E_c(A)$

On en déduit la variation d'énergie potentielle d'un système qui va d'un point A à un point B :
$\Delta E_p = E_p(B) - E_p(A)$. Or, d'après la définition de l'énergie potentielle, on en déduit que :

$$\Delta E_p = E_p(B) - E_p(A) = -W_{AB}(\vec{F})$$

La variation d'énergie potentielle d'un système qui va d'un point A à un point B est égale à l'opposé du travail de la force conservative sur le trajet AB.

Remarque : on ne peut pas associer à une force non conservative une énergie potentielle car son travail dépend du chemin suivi.

2) Energie potentielle de pesanteur E_{pp}

L'énergie potentielle de pesanteur E_{pp} est associée au poids $\vec{P}$ qui est une force conservative.

D'après le paragraphe précédent, la variation d'énergie potentielle de pesanteur d'un système qui va d'un point A à un point B est égale à l'opposé du travail du poids sur ce trajet :

$$\Delta E_{pp} = E_{pp}(B) - E_{pp}(A) = -W_{AB}(\vec{P})$$

Par ailleurs, le travail du poids s'écrit : $W_{AB}(\vec{P}) = m \times g \times (y_A - y_B) = m\,g\,y_A - m\,g\,y_B$

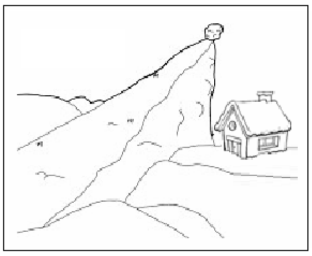
On en déduit que : $\Delta E_{pp} = \boxed{E_{pp}(B)} - \boxed{E_{pp}(A)} = -(m\,g\,y_A - m\,g\,y_B) = \boxed{m\,g\,y_B} - \boxed{m\,g\,y_A}$

On en déduit qu'un système de masse m, situé à une altitude y, possède, à cause de son altitude, une énergie potentielle de pesanteur E_{pp} définie par :

$$E_{pp} = m\,g\,y$$

E_{pp} : énergie potentielle de pesanteur en joule (J)
m : masse en kilogramme (kg)
g : intensité du champ de pesanteur g = 9,81 N.kg^{-1}
y : altitude en mètre (m)

L'**énergie potentielle de pesanteur** E_{pp} est l'énergie emmagasinée par l'objet et due à la hauteur à laquelle il se trouve. Plus l'objet est haut, plus son énergie potentielle de pesanteur est élevée.
Du fait de son altitude par rapport au sol, un objet possède de l'énergie en réserve, qu'il peut « potentiellement » restituer.



Attention : Pour cette formule, l'axe *y* doit être orienté vers le haut ! Sinon, $E_{pp} = -m\,g\,y$.

Remarque 1 : Cette démonstration est au programme et vous devez savoir la refaire ! Elle a fait l'objet d'une question dans un sujet des épreuves communes : *« 1.3.2. Montrer que l'expression de l'énergie potentielle de pesanteur est $E_{pp} = m\,g\,z$ si on choisit une altitude de référence à préciser. »*

Remarque 2 : En réalité, l'énergie potentielle de pesanteur est définie par : $E_{pp} = m\,g\,y$ + **constante**. Cependant, on peut choisir comme on veut le niveau de référence de l'énergie potentielle de pesanteur.
On choisit donc en général le niveau de référence pour avoir l'expression simplifiée : $E_{pp} = m\,g\,y$. **On prend pour cela E_{pp} = 0 J au niveau du sol** car : « ça ne peut pas tomber plus bas ». Bref, ne pas trop se préoccuper de cette constante mais garder à l'esprit que E_{pp} est défini « à une constante près ».

Exemple : Calculer l'énergie potentielle de pesanteur d'un pot de fleur de masse m = 3,0 kg, posé sur le rebord d'une fenêtre située à 5,0 m du sol. On fixe la référence d'E_{pp} au niveau du sol.

$E_{pp} = m\,g\,y = 3{,}0 \times 9{,}81 \times 5{,}0 = \underline{\mathbf{147\ J}}$

III L'énergie mécanique

1) Définition de l'énergie mécanique

Si le poids est la seule force conservative que subit un système, l'énergie mécanique du système, notée E_m, est égale à la somme de son énergie cinétique E_c et de son énergie potentielle de pesanteur E_{pp} :

$$E_m = E_c + E_{pp}$$

On considère un système en mouvement entre A et B. On se place dans le cas où il n'est soumis qu'à son poids $\vec{P}$ et à des forces non conservatives notées $\overrightarrow{F_{nc}}$.

- La variation de l'énergie mécanique du système entre A et B s'écrit : $\Delta E_m = E_m(B) - E_m(A)$
- On remplace E_m de chaque point par $E_c + E_{pp}$: $\Delta E_m = [\, E_c(B) + E_{pp}(B)\,] - [\, E_c(A) + E_{pp}(A)\,]$
- On rassemble les « E_c » et les « E_{pp} » ensemble : $\Delta E_m = [\, E_c(B) - E_c(A)\,] + [\, E_{pp}(B) - E_{pp}(A)\,]$
- Or, nous savons que : $E_c(B) - E_c(A) = \Delta E_c$ et que : $E_{pp}(B) - E_{pp}(A) = \Delta E_{pp}$

On en déduit que : $$\boxed{\Delta E_m = \Delta E_c + \Delta E_{pp}}$$

C'est la même expression que précédemment, avec des « delta » en plus.
La variation d'énergie mécanique d'un système est égale à la somme de la variation de son énergie cinétique et de la variation de son énergie potentielle de pesanteur.

2) Théorème de l'énergie mécanique

On va exprimer les variations d'énergie cinétique et d'énergie potentielle de pesanteur ΔE_c et ΔE_{pp} avec ce qui a déjà été vu, puis on va les « réinjecter » dans l'expression : $\Delta E_m = \Delta E_c + \Delta E_{pp}$

- D'après le théorème de l'énergie cinétique, la variation d'énergie cinétique ΔE_c du système entre les points A et B est égale à la somme des travaux des forces qu'il subit : $\Delta E_c = E_c(B) - E_c(A) = \Sigma\, W_{AB}(\vec{F})$
  Or les forces que le système subit sont le poids $\vec{P}$ et des forces non conservatives $\overrightarrow{F_{nc}}$.
  Donc : $\Delta E_c = E_c(B) - E_c(A) = W_{AB}(\vec{P}) + W_{AB}(\overrightarrow{F_{nc}})$

- On a vu que la variation d'énergie potentielle du système qui va d'un point A à un point B est égal à l'opposé du travail de la force conservative sur le trajet AB : $\Delta E_{pp} = E_{pp}(B) - E_{pp}(A) = -W_{AB}(\vec{P})$

- Dans l'expression $\Delta E_m = \Delta E_c + \Delta E_{pp}$, on remplace ΔE_c et ΔE_{pp} par celles avec les travaux des forces :
  $\Delta E_m = \cancel{W_{AB}(\vec{P})} + W_{AB}(\overrightarrow{F_{nc}}) + [\, \cancel{-W_{AB}(\vec{P})}\,]$. Cela se simplifie en : $\Delta E_m = W_{AB}(\overrightarrow{F_{nc}})$

Soit un système soumis uniquement à son poids $\vec{P}$ et à des forces non conservatives $\overrightarrow{F_{nc}}$.
La variation d'énergie mécanique, notée ΔE_m, du système entre les points A et B est égale à la somme des travaux des forces <u>non conservatives</u> qu'il subit au cours de son déplacement.

$$\Delta E_m = E_m(B) - E_m(A) = \Sigma\, W_{AB}(\overrightarrow{F_{nc}})$$

ΔEm et $W_{AB}(\overrightarrow{F_{nc}})$ s'expriment en joule (J)

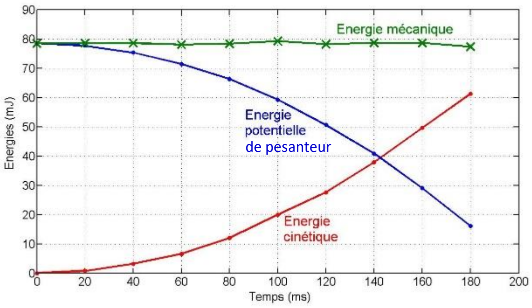
3) Conservation de l'énergie mécanique

Si le système ne subit pas de forces non conservatives (en général : pas de frottements), ou quand leur travail est nul (forces perpendiculaires au déplacement), alors $\Delta E_m = E_m(B) - E_m(A) = 0$.
On en déduit que $E_m(B) = E_m(A)$. Il n'y a pas de variation d'énergie mécanique entre les points A et B. Cette énergie se conserve.

En l'absence de forces non conservatives (en général de frottements), ou lorsque ces forces ne travaillent pas, l'énergie mécanique se conserve : $$E_m(B) = E_m(A)$$

<u>*Remarque*</u> : cela explique le nom des forces « conservatives » : elles entrainent la conservation de l'énergie mécanique.

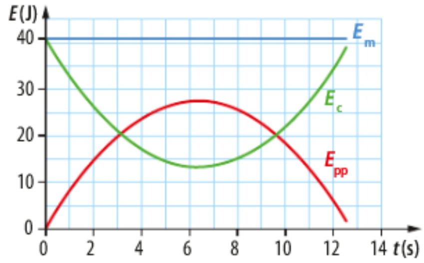
Exemple : Graphique représentant l'évolution des énergies d'un solide **en chute libre sans frottements**.



- Son altitude diminue : son énergie potentielle de pesanteur diminue.
- Au cours de la chute, sa vitesse augmente : son énergie cinétique augmente.
- Son énergie mécanique est constante.

L'énergie potentielle de pesanteur du solide est transformée en énergie cinétique. On dit qu'il s'effectue un **transfert d'énergie**.

Exemple : Graphique représentant l'évolution des énergies d'un solide lancé en l'air et **en chute libre sans frottements**.



- Son altitude augmente puis diminue, ainsi que son énergie potentielle de pesanteur ;
- Sa vitesse et donc son énergie cinétique diminuent jusqu'à son altitude maximale, puis augmentent à nouveau ;
- Son énergie mécanique est constante.

Exercice : Une bille de masse m = 15 g est lâchée sans vitesse initiale d'une hauteur h = 1,5 m. On néglige tout frottement. Calculer la vitesse finale atteinte par la bille. On fixe la référence d'E_{pp} au niveau du sol.

La seule force qui s'exerce est le poids $\vec{P}$ de la bille, si on néglige les frottements. Son énergie mécanique est donc conservée.

- Au point de départ A, d'altitude h, on a : $E_m(A) = E_c(A) + E_{pp}(A) = 0 + m\,g\,h$. En effet, la bille est lâchée sans vitesse initiale.
- Au point d'arrivée B, d'altitude 0, on a : $E_m(B) = E_c(B) + E_{pp}(B) = \frac{1}{2}\,m\,v_B^2 + 0$. En effet, la référence d'E_{pp} est fixée au niveau du sol, donc $E_{pp}(B) = 0$ J.

- La conservation de l'énergie mécanique donne : $0 + m\,g\,h = \frac{1}{2}\,m\,v_B^2 + 0$ soit : $m\,g\,h = \frac{1}{2}\,m\,v_B^2$

  On simplifie par « m » de chaque côté : $\frac{1}{2}\,\cancel{m}\,v_B^2 = \cancel{m}\,g\,h$. On obtient : $\frac{1}{2}\,v_B^2 = g\,h$

  On en déduit : $\mathbf{v_B = \sqrt{2\,g\,h}}$

  Application numérique : $v_B = \sqrt{2 \times 9{,}81 \times 1{,}5} = \underline{\mathbf{5{,}4\ m.s^{-1}}}$.

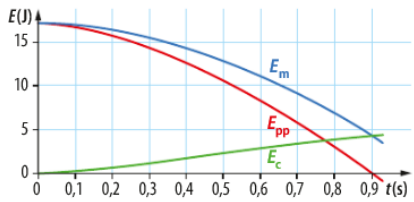
Cette expression a déjà été obtenue dans le chapitre précédent avec le théorème de l'énergie cinétique.

4) Non-Conservation de l'énergie mécanique

Quand un solide chute dans l'air (comme une météorite entrant dans l'atmosphère), il apparaît des frottements entre le solide et l'air que l'on ne peut pas toujours négligés.

On observe que l'énergie cinétique augmente moins vite que l'énergie potentielle de pesanteur ne diminue.

L'énergie mécanique va donc diminuer au fur et à mesure de la trajectoire car les forces de frottements sont résistantes.



En présence de forces non conservatives qui travaillent, l'énergie mécanique ne se conserve pas. On observe :

- **un <u>gain d'énergie mécanique</u> si les forces non conservatives sont motrices : $W_{AB}(\overrightarrow{F_{nc}})$ positif.**
- **une <u>perte d'énergie mécanique par dissipation d'énergie</u> si les forces non conservatives sont résistantes : $W_{AB}(\overrightarrow{F_{nc}})$ négatif.**