PARTIE II : COMPRENDRE

- Pratiquer une démarche expérimentale pour mettre en évidence :
  - les différents paramètres influençant la période d'un oscillateur mécanique ;
  - son amortissement.
- Établir/exploiter les expressions du travail d'une force constante (force de pesanteur, force électrique dans un champ uniforme).
- Établir l'expression du travail d'une force de frottement d'intensité constante dans le cas d'une trajectoire rectiligne.
- Analyser les transferts énergétiques au cours d'un mouvement d'un point matériel.
- Pratiquer une démarche expérimentale pour étudier l'évolution des énergies cinétique, potentielle et mécanique d'un oscillateur.
- Extraire et exploiter des informations sur l'influence des phénomènes dissipatifs sur la problématique de la mesure du temps et la définition de la seconde.
- Extraire et exploiter des informations pour justifier l'utilisation des horloges atomiques dans la mesure du temps.

Chapitre 7

Travail et énergie

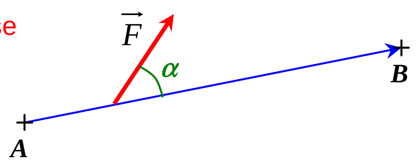
I. Travail d'une force

I.1 Définition

Le travail $W_{AB}(\vec{F})$ d'une force $\vec{F}$ constante dont le point d'application se déplace de A vers B est égal au produit scalaire $\vec{F} \cdot \overrightarrow{AB}$

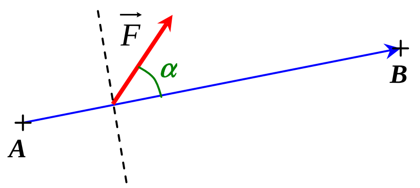
$$\boxed{W_{AB}(\vec{F}) = \vec{F} \cdot \overrightarrow{AB} = F \times AB \times \cos\alpha}$$

| F en N
| AB en m
| W en J



⇧ *Figure 1 : Travail d'une force constante*

⇩ *Figure 2 : Travail moteur ou résistant*

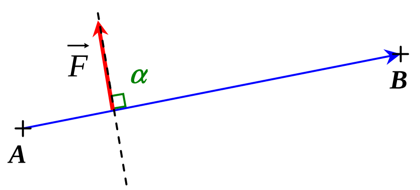


Si 0° < α < 90° alors 0 < *cos* α < 1

Et donc $W_{AB}(\vec{F}) = F \times AB \times \cos\alpha > 0$

Le travail de la force est positif.

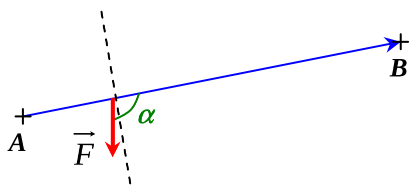
Le travail est dit moteur.
La force favorise le déplacement.



Si α = 90° alors *cos* α = 0

Et donc $W_{AB}(\vec{F}) = F \times AB \times \cos\alpha = 0$

Le travail est nul.
La force n'a pas d'effet sur le déplacement.



Si 90° < α < 180° alors -1 < *cos* α < 0

Et donc $W_{AB}(\vec{F}) = F \times AB \times \cos\alpha < 0$

Le travail de la force est négatif

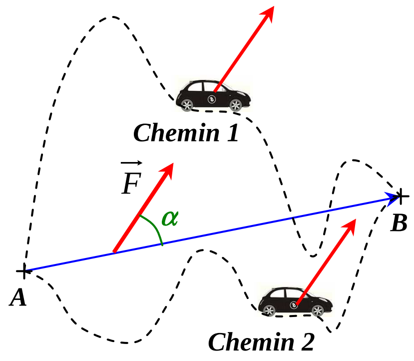
Le travail est dit résistant
La force s'oppose au déplacement.

I.2 Travail d'une force conservative

Définition :

Une force est dite conservative si son travail ne dépend pas du chemin suivi par son point d'application, mais uniquement des positions de départ et d'arrivée.

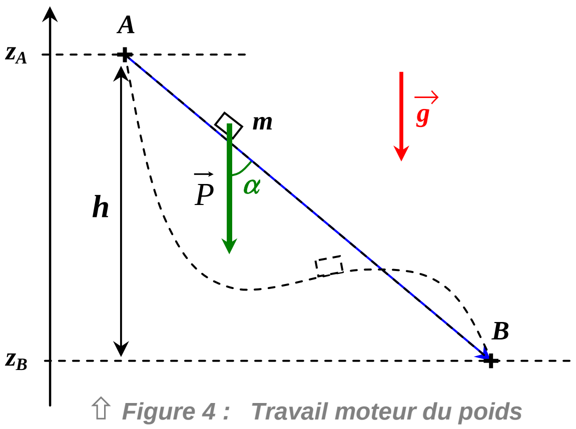
$$W_{Chem\,1}(\vec{F}) = W_{Chem\,2}(\vec{F})$$



⇧ *Figure 3 : Force conservative*

Exemple 1 : **Travail du poids**

Soit une masse m se déplaçant d'un point A vers un point B tels que $z_A > z_B$.



⇧ *Figure 4 : Travail moteur du poids*

$$W_{AB}(\vec{P}) = \vec{P} \cdot \overrightarrow{AB}$$

$$\Leftrightarrow \; W_{AB}(\vec{P}) = P \times AB \times \cos\alpha$$

$$\Leftrightarrow \; W_{AB}(\vec{P}) = mg \times AB \times \cos\alpha$$

Or $\cos\alpha = \dfrac{h}{AB} \;\Leftrightarrow\; h = AB\cos\alpha$

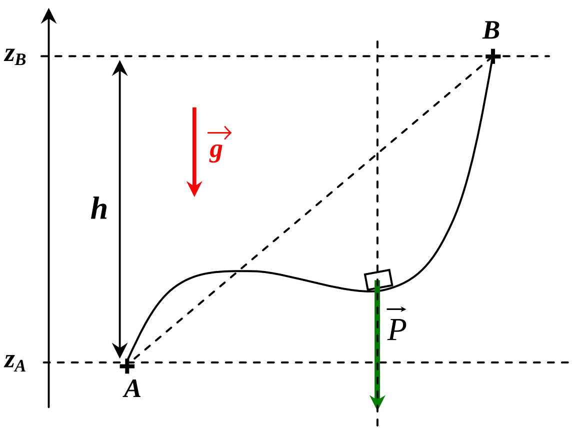
$$\boxed{\text{D'où : } W_{AB}(\vec{P}) = mg \times h}$$

m en kg
g en N/kg
h en m
W en J

A noter :

- Le travail du poids ne dépend que du point de départ et du point d'arrivée. Le poids est une force conservative.
- Lorsque l'objet de masse m descend dans le champ de pesanteur, le travail du poids est moteur.
  $$W_{AB}(\vec{P}) = +\,mgh$$
- Lorsque l'objet de masse m monte dans le champ de pesanteur, le travail du poids est résistant.
  $$W_{AB}(\vec{P}) = -\,mgh$$

⇩ *Figure 5 : Travail résistant du poids*



Exercice :

On considère un objet de masse m qui se déplace d'un point A d'altitude z_A vers un point B d'altitude z_B telle que $z_B > z_A$.

Montrer que le travail du poids de cette masse peut alors s'écrire $W_{AB}(\vec{P}) = -\,mgh$ avec h une longueur telle que $h = |z_A - z_B|$

Exemple 2 : **Travail d'une force électrique**

Soit une particule de charge q et de masse m plongée dans un champ électrique d'intensité E. Si la particule se déplace du point A vers le point B alors le travail de la force électrique que subit cette particule vaut :

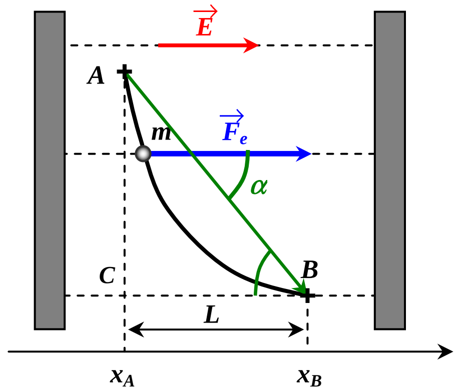
$$W_{AB}(\overrightarrow{F_e}) = \overrightarrow{F_e} \cdot \overrightarrow{AB}$$
$$\Leftrightarrow \; W_{AB}(\overrightarrow{F_e}) = F_e \times AB \times \cos\alpha$$
$$\Leftrightarrow \; W_{AB}(\overrightarrow{F_e}) = qE \times AB \times \cos\alpha$$

Or dans le triangle rectangle ABC on a :

$$\cos\alpha = \frac{L}{AB} \quad \Leftrightarrow \quad L = AB\cos\alpha$$

D'où : $\boxed{W_{AB}(\overrightarrow{F_e}) = qE \times L}$

E en V/m
q en $coulomb\ C$
L en m
W en J



⇧ ***Figure 6 : Travail d'une force électrostatique***

Or la **tension** (ou **différence de potentiels**) U_{AB} existant entre deux points A et B d'un champ électrostatique constant E est telle que :

$\boxed{U_{AB} = E \times L}$ avec $L = x_B - x_A$

E en V/m
U en V
L en m

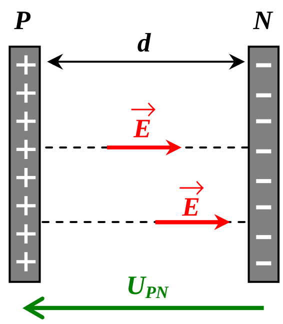
D'où $E = \dfrac{U_{AB}}{L}$

Et comme $W_{AB}(\overrightarrow{F_e}) = qE \times L$

On a alors : $W_{AB}(\overrightarrow{F_e}) = q\dfrac{U_{AB}}{L} \times L$

Soit : $\boxed{W_{AB}(\overrightarrow{F_e}) = qU_{AB}}$

⇩ ***Figure 7 : Champ et potentiels***



A noter :

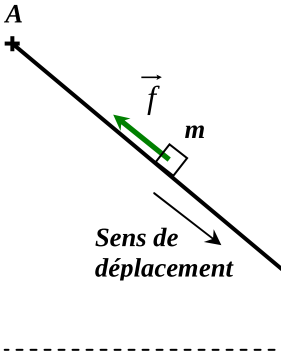
La tension U_{PN} existant entre les deux armatures P et N distantes d'une longueur d est donc liée à la valeur du champ E par la relation :

$$V_P - V_N = U_{PN} = E \times d \quad \Leftrightarrow \quad \boxed{E = \frac{U_{PN}}{d}}$$

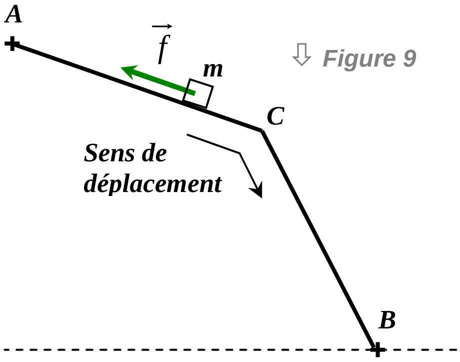
E en V/m
U en V
d en m

I.3 Travail d'une force non conservative

Exemple : **Travail de la force de frottement**



⇩ *Figure 8*



⇩ *Figure 9*

On considère une masse m qui glisse de A vers B le long d'une pente avec une force de frottement f opposée au mouvement et supposée constante.

Questions :

a. Donner l'expression littérale du travail de la force de frottement en fonction de f et AB dans le cas 1.

b. Même question dans le cas 2 en fonction de f, AC et CB.

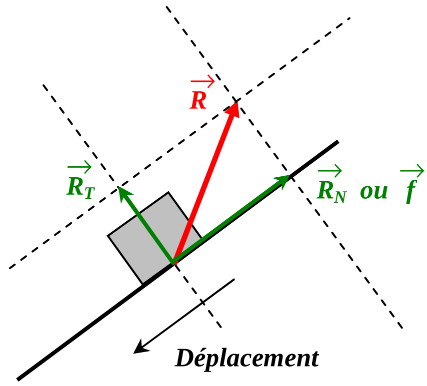
c. Quelle condition doivent satisfaire les longueurs AB, AC et CB pour que la force de frottement f puisse être qualifiée de force conservative ?

d. Conclure.

A noter :

La réaction totale $\boldsymbol{R}$ du support sur un objet peut être décomposée en deux forces :

- La réaction normale du support $\boldsymbol{R_N}$
- La réaction tangentielle du support $\boldsymbol{R_T}$ équivalente à la force de frottement $\boldsymbol{f}$ du support.



⇧ *Figure 10 : Réaction du support*

Questions :

a. Déterminer l'expression du travail de la réaction normale $\boldsymbol{R_N}$ du support lors du mouvement de la figure 8.

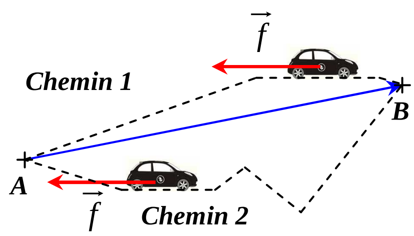
b. Même question pour la figure 9.

c. En déduire l'expression du travail de la réaction totale $\boldsymbol{R}$ dans ces deux situations.

Définition :

Une force est dite non conservative si son travail dépend du chemin suivi par son point d'application.

$$W_{Chem\,1}(\vec{F}) \neq W_{Chem\,2}(\vec{F})$$



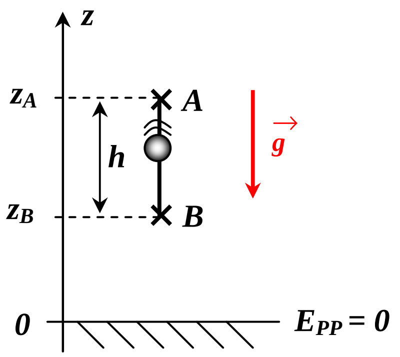
⇧ *Figure 11 : Force non conservative*

II. Transferts énergétiques

II.1 Energies potentielles et forces conservatives

A toute force conservative on peut associer une énergie potentielle E_P.

Energie potentielle de pesanteur E_{PP} :



⇧ *Figure 12 : Energie potentielle de pesanteur*

En $\boldsymbol{A}$: $E_{PP_A} = mgz_A$

En $\boldsymbol{B}$: $E_{PP_B} = mgz_B$

$W_{AB}(\vec{P}) = mg \times h = mg \times (z_A - z_B)$

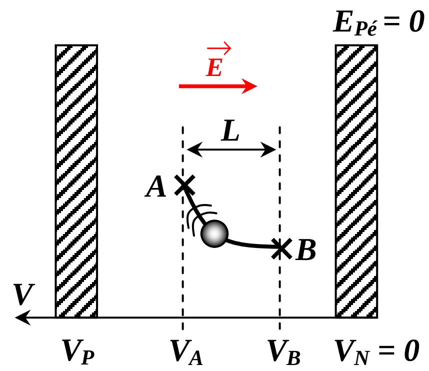
⇔ $W_{AB}(\vec{P}) = mgz_A - mgz_B$

⇔ $W_{AB}(\vec{P}) = E_{PP_A} - E_{PP_B} = -\left(E_{PP_B} - E_{PP_A}\right)$

Or $\Delta E_{PP} = E_{PP_B} - E_{PP_A}$

Donc : $\boxed{W_{AB}(\vec{P}) = -\Delta E_{PP}}$

Energie potentielle électrostatique $E_{Pél}$:



⇧ *Figure 13 : Energie potentielle électrostatique*

En $\boldsymbol{A}$: $E_{Pél_A} = qV_A$

En $\boldsymbol{B}$: $E_{Pél_B} = qV_B$

$W_{AB}(\vec{F_e}) = q \times U_{AB} = q \times (V_A - V_B)$

⇔ $W_{AB}(\vec{F_e}) = qV_A - qV_B$

⇔ $W_{AB}(\vec{F_e}) = -\left(E_{Pé_B} - E_{Pé_A}\right)$

Or $\Delta E_{Pél} = E_{Pél_B} - E_{Pél_A}$

Donc : $\boxed{W_{AB}(\vec{F_e}) = -\Delta E_{Pél}}$

Conclusion :

La variation d'énergie potentielle d'un système se déplaçant d'un point A vers un point B est égal à l'opposé du travail effectué par la force conservative associée :

$$\boxed{\Delta E_P = E_{P_B} - E_{P_A} = -W_{AB}(\vec{F})}$$

W en J
E en J

II.2 Energie mécanique

L'énergie mécanique d'un système de masse m se déplaçant à la vitesse v s'écrit :

$$\boxed{E_m = E_C + E_P}$$

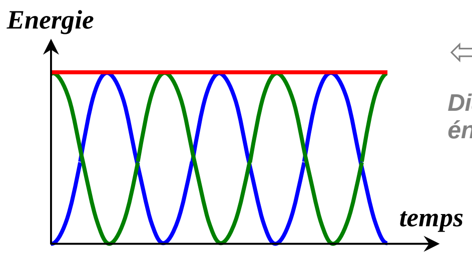
avec E_C l'énergie cinétique du système
et E_P la somme des énergies potentielles du système

Rappels :
- $E_{Pé} = qV$ (avec V la tension)
- $E_{PP} = mgz$
- $E_C = ½\, m\, v^2$

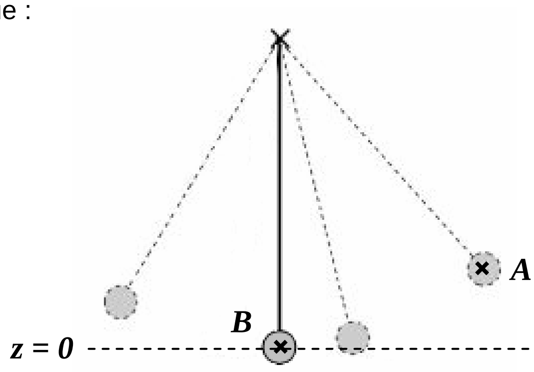
Exemple 1 : **Conservation de l'énergie mécanique**

Si l'on peut négliger les forces de frottement (forces non conservatives), l'énergie de la masse de ce pendule est telle que :

$$\boxed{E_m = cste \quad \Leftrightarrow \quad \Delta E_m = 0}$$



⇦ *Figure 14*
Diagramme énergétique



⇧ *Figure 15 : Oscillations périodiques*

Exercice :

On libère sans vitesse initiale le pendule de masse m au point A à l'origine du temps. Toutes les forces de frottement peuvent être négligées ainsi que la poussée d'Archimède qui s'exerce sur m et le fil.

a) Donner les caractéristiques des forces qui s'exercent sur la masse lorsqu'elle est lâchée.

b) Indiquer pour chacune d'elles l'expression de leur travail sur le déplacement de A vers B.

c) Que vaut l'énergie cinétique en A à la date t = 0 ? Justifier.

d) Que vaut l'énergie potentielle de pesanteur au point B ? Justifier.

e) Parmi les trois courbes du diagramme énergétique, indiquer celle de l'énergie mécanique, celle de l'énergie cinétique et celle de l'énergie potentielle du pendule.

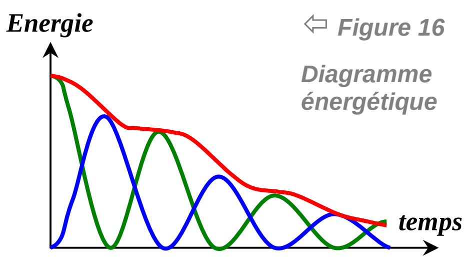
f) Quelle relation existe-t-il entre ΔE_P et ΔE_C entre les positions A et B ? Justifier mathématiquement.

Exemple 2 : **Non conservation de l'énergie mécanique**

Si les forces de frottement ne peuvent être négligées, des forces non conservatives travaillent.

Dans l'exemple du pendule, le diagramme énergétique est alors celui de la figure 16.

L'énergie mécanique ne se conserve pas et sa variation au cours du temps est égale au travail de la résultante des forces non conservatives appliquées au système.



⇦ *Figure 16*
Diagramme énergétique

$$\boxed{E_m \neq cste \quad \Leftrightarrow \quad \Delta E_m = W\left(\sum \vec{f}\right)}$$

Lorsqu'un système est soumis à des forces non conservatives qui travaillent, alors son énergie mécanique ne se conserve pas.