Energie

Chapitre 2 **Energie des systèmes mécaniques**

Introduction

Les lois de Newton nous ont permis d'accepter le lien entre force et mouvement d'un système matériel, la relation directe se faisant entre la dérivée de la quantité de mouvement et la force résultante ($2^{ème}$ loi).
La notion d'énergie qui nous intéresse reste assez vague (*lecture Feynman)*, mais elle est quotidienne et selon les situations proposées qui vont suivre, nous saurons intuitivement si de l'énergie est mise en jeu, consommée, produite…

Un élève est invité à pousser une chaise sur quelques mètres…
De l'énergie est mise en jeu ?
Et si l'on demande à l'élève de répéter l'opération sur toute la longueur du couloir ?
Et si l'on demande à l'élève de répeter l'opération sur toute la longueur du couloir en deux fois moins de temps.
Et si l'on demande à l'élève de tout recommencer avec un camarade assis sur la chaise (qui n'est pas sur roulettes, nous avions oublié de le signaler…)

L'énergie nécessaire semble liée à la valeur de la force exercée par l'élève, ainsi qu'à la distance parcourue.

Mais d'autres forces s'exerçaient sur notre système chaise :
- Bilan des forces exercées ?
- Quelle est la contribution de chacune de ses forces au déplacement entre les deux points A et B ?

La réponse se fera en termes de contribution :
- *nulle ;*
- *positive ou motrice ;*
- *négative ou résistante.*

Nous allons donner à tout cela une forme plus construite sous la forme d'une nouvelle grandeur, une forme d'énergie associant force exercée sur un système et déplacement (du centre d'inertie) de ce système : le travail d'une force au cours du déplacement de A vers B.

Nous proposons en fait de définir une grandeur qui réunit les deux aspects de la mécanique : la cause (la force) et l'effet (le déplacement)…
… tout simplement en les multipliant l'un par l'autre (cela semble cohérent).

I Travail d'une force

1) Travail W (« work ») d'une force constante ($\vec{F}$ vecteur constant pendant tout le déplacement)

$$\mathbf{W_{A\to B}(\vec{F}) = \vec{F}.\overrightarrow{AB} = F\times AB\times\cos\alpha}$$

α est l'angle entre les deux vecteurs $\vec{F}$ et $\overrightarrow{AB}$

Si $0° < \alpha < 90°$, $W_{A\to B}(\vec{F}) > 0$ la force est motrice (elle exerce un travail moteur)

Si $90° < \alpha < 180°$, $W_{A\to B}(\vec{F}) < 0$ la force est résistante (elle exerce un travail résistant)

Si $\alpha = 90°$, $W_{A\to B}(\vec{F}) = 0$ la force ne travaille pas (elle exerce un travail nul)

2) Premiers exemples

Situations pour lesquelles il peut être discuté du fait que les forces exercées “travaillent” ou “ne travaillent pas”.

- Skieur dévalant tout droit une pente sans se pousser.
- Plongeur se laissant remonter à la surface de l’eau.
- Satellite en orbite circulaire.
- Satellite en orbite elliptique allongée.

3) Force qui travaille

Lorsque le point d’application de la force se déplace dans une direction qui n’est pas perpendiculaire à celle de la force, cette force <u>travaille</u>, elle peut provoquer en particulier une variation de la valeur de la vitesse du point du système sur lequel elle s’applique (*d’autres exemples d’effets de la force exercée : déformer le système provoquer son échauffement, mais ce ne sont pas des domaines que nous étudierons*)**.**

Version alternative : une force $\vec{F}$ s’exerçant sur le système ne peut le pas mettre en mouvement ou modifier la valeur v de sa vitesse dans une direction perpendiculaire à $\vec{F}$. Si l’on choisit de décomposer le vecteur $\vec{v}$ en un vecteur $\vec{v}_n$ perpendiculaire (normal) à $\vec{F}$ et un vecteur $\vec{v}_t$ parallèle (tangentiel) à $\vec{F}$, on peut établir que $\vec{F}$ ne modifie jamais $\vec{v}_n$.

Exemples déjà rencontrés :

- *nous avions remarqué que la composante horizontale de la vitesse d’un corps en chute libre dans le champ de pesanteur uniforme reste constante au cours du mouvement.*
- *Le satellite, la Lune, en mouvement circulaire… uniforme, car la force exercée est en permanence perpendiculaire à la vitesse du satellite.*

Donc, pas de travail si :

- $\vec{F}$ constamment perpendiculaire à la trajectoire en son point d’application ;
- le point d’application de $\vec{F}$ n’est pas en mouvement.

4) Forces conservatives

Une force est dite conservative, si le travail de cette force $W_{A\to B}(\vec{F})$ est indépendant du chemin suivi entre les points A et B.

Exemples (à retenir) de forces conservatives :

- **poids ;**
- force électrique ;
- force élastique de rappel (d’un ressort par exemple).

Notez que c’est une force à priori non constante

Exemples de forces non conservatives :

- frottements ;
- tension d’un fil inextensible. (*discussion autorisée*)

5) Exemples détaillés

Rappelons que dans les exemples traités, la ***force est constante****, ce qui simplifie énormément les choses… (dans le cas de la force de frottement, si le trajet n'est pas rectiligne, cette force n'est plus constante (notamment au niveau de sa direction)*

a) travail du poids

Pour que la démonstration soit efficace, il est judicieux de considérer l'autre présentation du produit scalaire, vue en cours de mathématique :
Considérant deux vecteurs et leurs coordonnées respectives, $\overrightarrow{u_1}$ (x_1, y_1) et $\overrightarrow{u_2}$ (x_2, y_2), l'expression du produit scalaire de ces deux vecteurs est :

$$\overrightarrow{u_1}.\overrightarrow{u_2} = x_1 \times x_2 + y_1 \times y_2$$

Considérons donc le poids d'un corps exercés sur un parcours entre deux points A et B, sans nous préoccuper du chemin suivi.
Le champ de pesanteur est considéré uniforme sur toute la zone de travail, le vecteur $\vec{P}$ est donc un vecteur constant et le travail du poids peut donc s'écrire :

$$\mathbf{W_{A\rightarrow B}(\vec{P}) = \vec{P}.\overrightarrow{AB}}$$

L'espace est repéré grâce à un repère à deux dimensions (O, $\vec{\imath}$, $\vec{k}$), la coordonnée verticale est ici notée z (c'est une tradition) et l'axe de coordonnées verticales Oz est orienté positivement vers le haut.
Nous allons tout simplement exprimer le produit scalaire $\boldsymbol{\vec{P}.\overrightarrow{AB}}$ sous la forme (1) présentée précédemment.
Dans le repère choisi :
- Les coordonnées du vecteur $\vec{g}$ sont (on à l'habitude) : $g_x = 0$ et $g_z = - g$
- Les coordonnées du vecteur $\vec{P}$ sont donc $P_x = 0$ et $P_z = - mg$
- Les coordonnées du vecteur $\overrightarrow{AB}$ sont ($x_B - x_A$) et ($z_B - z_A$)

$$W_{A\rightarrow B}(\vec{P}) = \vec{P}.\overrightarrow{AB} = 0\times(x_B - x_A) + (- mg)\times (z_B - z_A) = mg(z_A - z_B)$$

$$\mathbf{W_{A\rightarrow B}(\vec{P}) = mg(z_A - z_B)}$$

(Attention, c'est bien $z_A - z_B$, altitude initiale – altitude finale)

Cette formule est clairement indépendante du chemin suivi,
le poids est une force conservative.

Nous remarquons bien sûr que :
- si A est plus haut que B ($z_A - z_B > 0$), le travail du poids est moteur
- si A est plus bas que B ($z_A - z_B < 0$), le travail du poids est résistant

b) travail d'une force de frottement solide (frottement d'un objet solide sur un support solide)

Une telle force, que l'on note $\vec{f}$, a les caractéristiques suivantes :

- valeur constante f
- direction : du mouvement ($\vec{f}$ constamment tangent à la trajectoire)
- sens : opposé à celui du vecteur vitesse $\vec{v}$

Si la parcours de A vers B est constant, la formule $W_{A\rightarrow B}(\vec{f}) = \vec{f}.\overrightarrow{AB}$ peut s'appliquer.
D'après les données concernant le vecteur $\vec{f}$, nous comprenons qu'il fait avec le vecteur $\overrightarrow{AB}$ un angle α = 180°.
Nous avons donc $W_{A\rightarrow B}(\vec{f}) = f\times AB\times\cos 180° = -f\times AB$

Ce travail est résistant, toujours dissipateur d'énergie.

Nous réalisons aussi que la force de frottement n'est pas conservative. Si le chemin parcouru pour aller de A vers B s'allonge, la force de frottement s'appliquera sue une plus grande distance et provoquera plus de dissipation d'énergie (cette discussion peut être prolongée et la proposition démontrée… Voir en AP)

6) Unité

Le joule (J) : travail produit par une force de 1 N pour un déplacement de 1 m.

7) Puissance du travail (d'une ou plusieurs forces)

C'est en quelque sorte le travail ramené à ou par unité de temps.
Lorsqu'une force s'exerçant pendant une durée Δt a produit un travail W, elle est caractérisée par une puissance (une puissance moyenne pendant l'intervalle Δt) :

$$P = \frac{W}{\Delta t}$$

L'unité de P est le watt (W), 1 W correspond à 1 $J.s^{-1}$.

II - Le travail est un mode de transfert d'énergie

1) Introduction : la notion d'énergie

"Il est important de réaliser que,
dans la physique d'aujourd'hui,
nous n'avons aucune connaissance
de ce que l'énergie est "
(Richard Feynman, 1965)

Photocopie Hecht p 312
(tout le paragraphe "le transfert d'énergie")

2) Energies mécaniques

a) Présentation : Energies « mécaniques » (énergies liées aux forces ou aux mouvements)

L'énergie associée aux forces dissipatrices, par exemple les forces de frottement, n'est pas évoquée pour l'instant, puisque nous avons choisi de nous limiter aux systèmes évoluant sans dissipation, sans pertes.

Puisque la mécanique, c'est « forces et mouvements », nous allons considérer deux types d'énergies, l'une associée au mouvement, l'autre à la force.
La première, liée au fait que le système en mouvement transporte de l'énergie, est l'énergie cinétique (E_c) ;
La deuxième, liée au fait que le système est soumis à une f**orce conservative qui peut déclencher son mouvement** est l'énergie potentielle (E_P).

C'est un peu vague, soyons plus directs :

8) E_c sera liée à la vitesse du corps ;
9) E_p sera liée à la position du corps dans un champ de forces.

La somme des deux sera appelée énergie mécanique du système. $\mathbf{E_m = E_c + E_p}$

b) Conservation de l'énergie mécanique

S'il n'y a pas de pertes, de dissipations, de transferts divers (frottements, déformation du système, émission de rayonnement, …) l'énergie mécanique reste constante.

Lorsqu'un système matériel évolue à E_m constante, les forces qui s'exercent sur ce système sont conservatives ou ne produisent aucun travail.

D'où un retour à la notion de force conservative : force qui ne provoque pas de modification de l'énergie mécanique du système.

c) L'énergie cinétique (de translation)

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

d) L'énergie potentielle de pesanteur

Remarque : une force conservative (définition vue précédemment) est une force à laquelle on peut associer une énergie potentielle.

Considérons un objet posé sur la table immobile. Son énergie mécanique ne peut pas être connue dans l'absolu, considérons qu'elle vaut $E_0 = 0$ J. Soulevons l'objet d'une hauteur z = 1 m et maintenons-le immobile à cette hauteur. Nous avons produit un travail qui s'est exactement opposé au travail du poids qui résistait. Nous avons produit le travail mgz. (*voir cours*).
Qu'est devenu ce travail ?
Il est présent dans l'objet sous forme d'énergie supplémentaire !
La preuve ? Si nous abandonnons le système il se met en mouvement spontanément.
Comment nommer cette énergie apportée lorsque nous avons soulevé le système de la hauteur z ?
Energie cinétique ? Non, nous maintenons le système immobile.

Nous dirons qu'il s'agit d'énergie potentielle (due à la pesanteur)

Nous pouvons même, en toute logique, conclure avec plus de précision :
Si nous posons qu'à une hauteur z = 0, l'énergie potentielle vaut $E_{p\,0} = 0$ J,
alors l'énergie potentielle de pesanteur d'un système de masse m vaut :

$$\mathbf{E_p = mgz}$$ (*le centre d'inertie de système se trouvant à l'altitude z*)

Aide supplémentaire :

Que devient E_p une fois le solide laché ?
On sait qu'une fois retombé sur la table, le système retrouvera sa valeur $E_{p0} = 0$.
Que devient E_p au cours de la chute de l'objet abandonné depuis la hauteur z = 1 m ?

Le système se met en mouvement et accélère, E_p se transforme en E_c.

Donc :
Lorsqu'un système matériel de masse m s'élève d'une hauteur Δz dans le champ de pesanteur, son énergie potentielle de pesanteur augmente de la valeur $\mathbf{mg\Delta z}$ (on peut vérifier cette expression en considérant l'E_c finale (mesure de v) lorsque le système est abandonné et arrive au sol en chute libre…).
Notez que même si le mouvement du système n'est pas vertical, la variation d'énergie potentielle n'est liée qu'à la variation de la coordonnée verticale z :

$$\mathbf{\Delta E_p = mg(z_2 - z_1)}$$

Comment, alors définir la grandeur « énergie potentielle » (plutôt que « variation d'énergie potentielle ») ?
En choisissant une origine des valeurs de E_p.

Le poids, de valeur mg et s'exerçant verticalement est associé à l'énergie potentielle de pesanteur E_p = mgz, à condition d'avoir fait coïncider l'origine des valeurs de E_p et celle des valeurs de z.

Nous rencontrerons deux autres forces conservatives /à énergie potentielle :
la force électrique et la force élastique (voir chapitres ultérieurs)

e) Forces non conservatives

Une force non conservative (par exemple une force de frottement) ne provoque rien d'autre qu'un ralentissement du système sans lui fournir d'énergie ainsi qu'une diminution de l'énergie mécanique du système parce qu'elle produit un travail négatif. Ainsi dès que le système est soumis, par exemple, à des frottements, son E_m n'est plus constante et diminue.

f) Utile

Théorème de l'énergie cinétique :

$$\Delta E_c = E_{cB} - E_{cA} = \sum W_{A\to B}(\vec{F})$$

Travail d'une force conservative (exemple avec le poids) :

$$W_{(\vec{P})} = -\Delta E_{P(pesanteur)}$$

Conservation de l'énergie mécanique en l'absence de force dissipatrices :

$$E_m = E_p + E_c = \text{constante}$$

g) W, E_c, E_P : même dimension

Expressions, décomposition des unités, équivalences, rappel de la définition du joule.

h) Vérifications à partir d'enregistrements vidéos
Voir « séance énergies mécaniques »