15. Études énergétiques en mécanique

Mise en situation

Le mot « énergie » est tellement galvaudé dans notre langage courant que l'on a parfois perdu de vues la véritable signification et que celle-ci paraît inutilement complexe. Il faut dire que ce mot est vraiment utilisé à toutes les « sauces » : « énergie » du sportif prêt pour sa compétition, « énergie » produite par les centrales électriques, « énergie » du pétrole ou du gaz…

Alors qu'est-ce vraiment l'énergie ? Historiquement, on fait remonter cette notion au physicien allemand du XVIIe siècle Gottfried Wilhelm Leibniz qui a donné une première description de la chute des corps en disant que ceux-ci possédaient, durant la chute, une « force vive » pour laquelle il établit une formule de calcul encore utilisée de nos jours pour ce qu'on nomme désormais « énergie cinétique ». L'idée d'énergie va fortement se développer au XVIIIe et surtout au XIXe siècle avec l'avènement de la révolution industrielle qui s'appuie sur les découvertes des physiciens sur le « travail » qui a donné naissance aux machines à vapeur.

Définie comme la capacité d'un système à fournir un travail, l'énergie est intimement liée à l'étude des transformations chimiques et aux mouvements mécaniques. Ce sont ces derniers qui sont d'ailleurs les plus simples à étudier en première approche.

Retour sur la chute libre

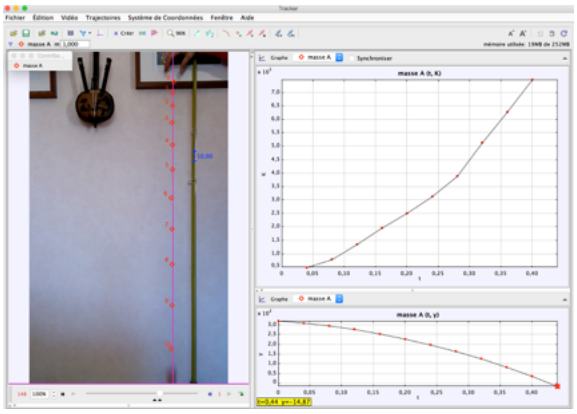
Lorsqu'un objet tombe d'une certaine hauteur sous l'effet de la gravité sans être attaché à un autre objet fixe, on parle de chute libre. Chaque objet que vous lâchez, volontairement ou non, va donc effectuer une chute libre avant de toucher le sol. Ce phénomène avait déjà été étudié par Isaac Newton, qui en a déduit les lois de la gravitation, puis par le physicien et philosophe français René Descartes qui pensait que l'énergie d'un corps en chute libre était un produit de sa masse par la vitesse. C'est donc Leibniz qui découvre la bonne relation entre les caractéristiques de la chute et l'énergie acquise par le mobile.

Alors qu'il fallait, au XVIIe siècle, de nombreuses expériences successives, beaucoup de patience, des échafaudages compliqués et de la terre glaise (pour mesurer la profondeur à laquelle s'enfonçaient les boules que l'on lâchait de hauteurs diverses), il est aujourd'hui très facile d'**étudier le mouvement et l'énergie d'une chute libre** (ou de n'importe quel mouvement) **grâce à l'analyse vidéo**.

Des logiciels comme Tracker ou Aviméca permettent de suivre un point particulier d'un objet en mouvement depuis une vidéo de celui-ci (capturée par un smartphone par exemple). **Si l'on a pris soin de placer un repère de taille sur la vidéo au moment de la prise de vue**, le logiciel enregistre alors (de façon automatique pour Tracker) la position de l'objet sur toutes les images de la vidéo. A l'aide d'un repère placé par l'utilisateur, on obtient alors immédiatement la trajectoire, la vitesse, l'accélération et même l'énergie cinétique d'un objet au cours de sa chute.

Comme pour toute étude de mécanique, **il est fondamental de bien placer le repère** car tout mouvement est défini par rapport à celui-ci et vous avez vu, en classe de

seconde, que selon le repère choisi un mouvement peut avoir une trajectoire bien différente, voir paraitre immobile si le repère est fixe par rapport à l'objet !



Exemple d'étude d'une chute libre avec Tracker.

Formes d'énergie

L'énergie existe sous différentes formes et la physique, particulièrement en mécanique (étude des mouvements) en considère deux principales : l'**énergie cinétique et l'énergie potentielle**.

L'énergie cinétique (de « kine », mouvement en grec) est l'énergie associée aux objets en mouvement. Cela s'entend au sens large et concerne donc les objets qui bougent, comme une voiture ou une éolienne, mais également l'énergie due à la chaleur (énergie thermique) puisque celle-ci est liée au déplacement plus rapide des molécules. On pourrait également y inclure l'énergie électrique, due au déplacement des électrons dans les fils conducteurs.

L'énergie potentielle est l'énergie potentiellement disponible et susceptible de se transformer. Ainsi, si on élève un objet en hauteur, on créer les conditions pour que celui-ci libère de l'énergie lors de la chute quand il va acquérir de la vitesse. En élevant un objet on lui donne donc une énergie « potentielle ». Au sens large, on parlera aussi d'énergie potentielle pour celle contenue dans source d'énergie, comme le gaz, le bois ou le pétrole.

Il est également possible de classer les énergies en fonction des interactions fondamentales auxquelles elles sont liées :

- **Interaction gravitationnelle** : énergie potentielle de pesanteur.
- **Interaction électromagnétique** : énergie électrique, énergie chimique
- **Interaction forte et faible** : énergie nucléaire

Cette multiplicité de notions fait qu'un objet possède généralement plusieurs formes d'énergies et que des transferts peuvent s'effectuer d'une forme à l'autre. L'étude de ces transferts est la thermodynamique. Souvent ces transferts s'accompagnent de « pertes » (chaleur, frottements…), ce qui fait que l'énergie d'un système fermé a tendance à toujours diminuer. **Mais l'énergie ne disparait jamais et il s'agit donc juste d'un transfert vers un autre système**.

Énergie cinétique

 J.L.Richter ©Creative Common BY NC SA – 2019-2020

Revenons à notre chute libre : c'est un mouvement type de translation car l'objet se déplace en ligne droite (selon une même direction). Dans ce cas, Leibnitz a établi que l'**énergie cinétique** , **Ec** (de mouvement) est définie par la relation suivante :

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

Unités :

- Ec : énergie cinétique en Joule (J).
- m : masse de l'objet en kilogramme (kg).
- v : vitesse de l'objet en mètre par seconde ($m.s^{-1}$).

L'énergie cinétique étant définie par rapport à la vitesse d'un mobile, elle dépend donc du référentiel dans lequel on se place et elle ne peut jamais être négative.

Si vous êtes passager sur un scooter en mouvement et que vous donnez une petite tape sur l'épaule du conducteur, l'énergie de mouvement de votre main n'aura rien à voir avec une tape que vous pourriez faire à un passant situé à côté du scooter !

Énergie potentielle

L'énergie potentielle Ep, nous l'avons vu plus haut, est liée à l'altitude en mécanique. Plus un livre sera placé haut au-dessus d'une table, plus sa chute sur celle-ci sera violente. D'autre part, elle est liée à la gravitation puisque la chute d'un livre depuis une hauteur de 1m ne sera pas la même sur la Terre et sur la Lune. Enfin, elle dépend également de la masse de l'objet selon la relation :

$$E_p = m \times g \times z$$

Unités :

- Ep : énergie potentielle en Joule (J).
- m : masse de l'objet en kilogramme (kg).
- g : accélération de la pesanteur en Newton par kilogramme ($N.kg^{-1}$)
- z : altitude de l'objet dans le référentiel en mètre (m)

On notera que l'altitude peut être négative selon le référentiel que l'on aura choisi. De ce fait, l'énergie potentielle peut également être négative.

Conservation de l'énergie

Quand un système est isolé, son énergie totale se conserve. C'est un principe de base de la physique qui indique donc que **l'énergie ne peut être ni créée ni détruite, mais seulement transformée ou transférée** d'un système à un autre.

Ce principe a de nombreuses applications et est à la base de notre économie puisque l'énergie que nous transformons tous les jours pour nous chauffer, nous éclairer ou faire fonctionner nos voitures était stockée dans les combustibles fossiles, comme le pétrole, le charbon ou le gaz ou encore dans les matières radioactives qui alimentent nos réacteurs nucléaires. Mais nous ne savons pas encore récupérer et retransformer toutes les énergies qui sont transférées à des systèmes extérieurs comme

l'atmosphère ou l'espace. L'un des grands enjeux du développement durable est donc de parvenir à équilibrer les gains d'énergies que nous recevons, essentiellement par le Soleil, et les pertes dues aux transfert hors de notre « système Terre » ou même dans son atmosphère (qui sont à l'origine du réchauffement global).

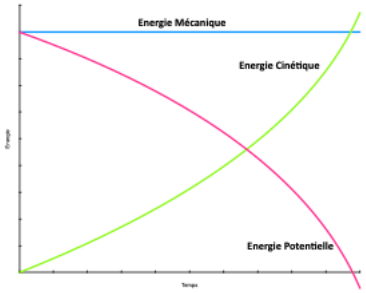
Énergie mécanique

Lors d'une chute libre, on peut considérer que l'objet n'est soumis qu'à son poids et que les autre forces (frottement de l'air par exemple) peuvent être négligées. **Le système est alors isolé et son énergie totale, que l'on nomme énergie mécanique, Em, est donc constante**.

Or cette énergie est la somme de l'énergie cinétique, due à la chute, et à l'énergie potentielle, due à la hauteur que l'objet a dû avoir pour pouvoir tomber vers la Terre (donc sans être en contact avec une surface).

$$E_m = E_c + E_p$$

Ce qui peut se traduire graphiquement de la manière suivante :



On voit ici, en bleu, que l'énergie mécanique est constante au cours du temps alors que l'énergie potentielle diminue (puisque z diminue et peut même être négatif) à mesure que l'objet tombe, tandis que sa vitesse, et donc l'énergie cinétique augmente.

Transfert d'énergie

Une telle situation de chute libre « idéale » est rare car le plus souvent une chute s'effectue dans un « fluide », que celui-ci soit l'atmosphère, ou un liquide pour le plongeur qui saute dans l'eau.

Dans ces cas, une partie de l'énergie est **transférée** au fluide par les frottements avec celui-ci. Le système n'est donc pas isolé. L'énergie est transférée à l'extérieur du système ou peut être **transformée** en une autre forme d'énergie, comme la chaleur due aux frottements.

Mais si on considère l'ensemble de l'objet en chute libre et du fluide qui l'entoure comme un seul système, l'énergie y est bien conservée.

Cela s'applique également au transfert de chaleur entre deux corps : **il se fait toujours d'un corps chaud** (qui possède beaucoup d'énergie) **vers un corps froid** (qui en possède moins).

Travail d'une force

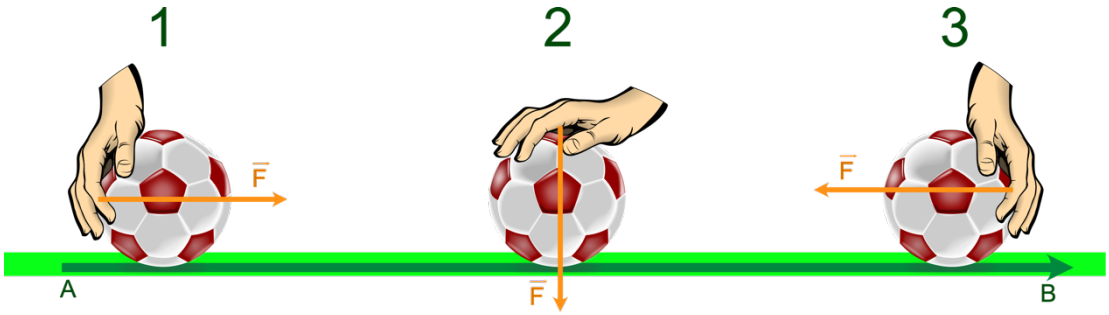
 J.L.Richter ©Creative Common BY NC SA – 2019-2020

Le travail est une grandeur, notée W_{AB}, qui s'exprime en Joule (J) correspondant à la part d'énergie due à une force au cours de son mouvement d'un point A vers un point B, en fonction de l'angle de cette force par rapport à la direction du déplacement :

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

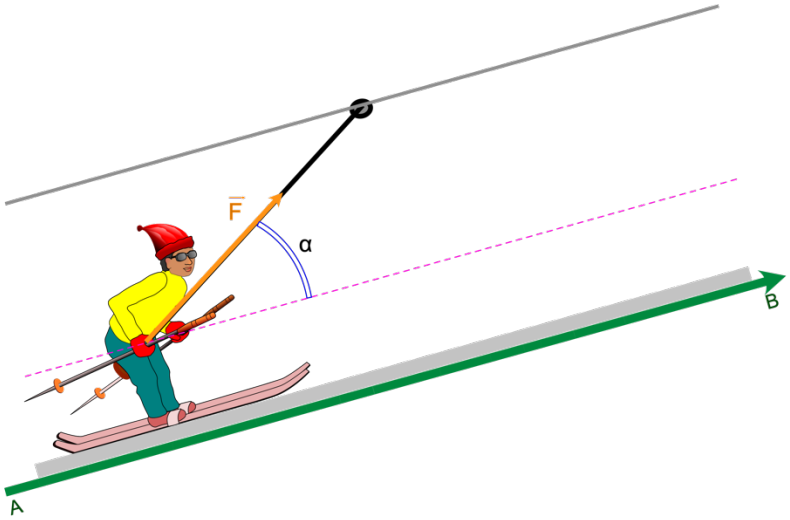
Unités :

- W_{AB} $(\vec{F})$: Travail de la force $\vec{F}$ en Joule (J)
- F : valeur de la force en Newton (N)
- AB : déplacement en mètre (m)
- α : angle entre la direction de la force et la direction du déplacement en prenant en compte le sens de ces deux vecteurs.



Dans l'exemple des trois forces ci-dessus :

1. La force travaille dans le sens du déplacement. On dit qu'elle est moteur et
$$W_{AB}(\vec{F}) = \vec{F} \times \overrightarrow{AB} = F \times AB \times \cos(\alpha) > 0$$
2. La force ne travaille pas car elle est orthogonale au déplacement et
$$W_{AB}(\vec{F}) = \vec{F} \times \overrightarrow{AB} = F \times AB \times \cos(\alpha) = 0$$
3. La force travaille et on dit que ce travail est résistant car à l'opposé du déplacement et
$$W_{AB}(\vec{F}) = \vec{F} \times \overrightarrow{AB} = F \times AB \times \cos(\alpha) < 0$$



Dans le cas le plus fréquence où le travail est moteur, l'angle s'évalue par rapport au déplacement, comme dans le cas de ce skieur tiré par un tire-fesse.

 J.L.Richter ©Creative Common BY NC SA – 2019-2020

Théorème de l'énergie cinétique

Dans un référentiel galiléen (dans lequel le principe d'inertie, vu en seconde, est vérifié), pour un corps, dont la masse reste constante, parcourant un trajet de A vers B, la variation d'énergie cinétique est égale à la somme des travaux des forces qui agissent sur le corps en question.

On traduit cela par la relation suivante où tous les éléments sont en Joule (J) :

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

Cette relation permet donc de calculer la variation d'énergie cinétique d'un système si on sait quelles forces s'appliquent à celui-ci.

Forces non conservatives : travail et énergie mécanique

Entre la théorie et la réalité il y a souvent des différences et dans les exemples que nous avons vu plus tôt, nous n'avions pas pris en compte les forces de frottement. Celles-ci transforment l'énergie en chaleur. On peut exprimer leur travail de la même façon que précédemment, mais ce sont des forces qui s'opposent généralement au mouvement et donc la valeur de travail est donc négative (cas 3 précédent avec le ballon). **On dit que ce sont des forces non conservatives**.

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

Dans ce cas, il y aura donc une variation de l'énergie mécanique (qui n'est donc pas conservée) qui sera égale à la somme des travaux des forces non conservatives (F_{nc}) qui s'appliquent au système :

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

 J.L.Richter ©Creative Common BY NC SA – 2019-2020