

Chapitre 1

Transferts d'énergie en mécanique

Extrait de BO correspondant

<p>Mesure du temps et oscillateur, amortissement</p> <p>Travail d'une force. Force conservative ; énergie potentielle.</p> <p>Forces non conservatives : exemple des frottements.</p> <p>Énergie mécanique.</p> <p>Étude énergétique des oscillations libres d'un système mécanique. Dissipation d'énergie.</p> <p>Définition du temps atomique.</p>	<p><i>Pratiquer une démarche expérimentale pour mettre en évidence :</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - les différents paramètres influençant la période d'un oscillateur mécanique ; - son amortissement. <p>Établir et exploiter les expressions du travail d'une force constante (force de pesanteur, force électrique dans le cas d'un champ uniforme).</p> <p>Établir l'expression du travail d'une force de frottement d'intensité constante dans le cas d'une trajectoire rectiligne.</p> <p>Analyser les transferts énergétiques au cours d'un mouvement d'un point matériel.</p> <p><i>Pratiquer une démarche expérimentale pour étudier l'évolution des énergies cinétique, potentielle et mécanique d'un oscillateur.</i></p> <p>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.</p> <p>Extraire et exploiter des informations pour justifier l'utilisation des horloges atomiques dans la mesure du temps.</p>
---	---

Ce chapitre est intégré dans la séquence de mécanique de terminale S, après avoir traité toute la mécanique classique. Il pourrait tout aussi bien s'intituler « Analyse énergétique de situation mécanique » puisqu'il s'agit, au regard des instructions officielles, de porter un regard du point de vue de l'énergie sur des situations étudiées préalablement dans le cadre de la mécanique newtonienne. Pour les concepteurs du programme, la finalité de cette partie est de conclure qu'un pendule n'est pas un instrument adapté à la mesure du temps... Ceci nous paraît bien artificiel. De plus, ce n'est pas cette idée qui va poser des problèmes majeurs aux élèves mais bien davantage des aspects formels (expressions et calculs de travaux, bilans...) et conceptuels (lien entre travail d'une force et énergie, définition de l'énergie potentielle, caractère conservatif ou non...) qui vont constituer l'enjeu de l'apprentissage. C'est la raison pour laquelle, tout en exploitant dès le départ des situations de pendules pesants en faisant le lien avec la première S (activités 1 et 2), nous faisons le choix d'insister ensuite sur le sens physique du concept travail. L'activité 3 vise ainsi à justifier, même partiellement, l'expression du travail d'une force constante à partir d'une définition qualitative concernant les transferts d'énergie ; l'activité 4 permet à l'élève de se familiariser avec la notion et la formule introduite sur des cas simples de forces connues ; l'activité 5 fait explicitement le lien, quantitatif, avec des variations d'énergie. Il conviendra alors de conclure le chapitre par une dernière activité donnant lieu à exploitation de documents sur la définition actuelle de la seconde et la « définition du temps atomique » : ces documents étant disponibles dans les manuels, nous laissons le professeur choisir ceux qui lui conviendront le mieux.

Durée prévue : une semaine complète + une séance de TP

Les deux premières activités doivent être réalisées en demi-classe (sauf si les élèves peuvent utiliser des ordinateurs en classe entière dans le cas de l'activité 2).

Compléments au sujet du lien entre caractère conservatif d'une force et définition de l'énergie potentielle

Pour des raisons de temps et au regard des difficultés conceptuelles que cela peut engendrer pour les élèves, nous avons fait le choix de ne pas expliciter le lien entre la possibilité de créer une grandeur « énergie potentielle » et l'indépendance du travail par rapport au chemin suivi lors du déplacement. Ce lien, à la lecture du programme, ne nous semble pas constituer une connaissance exigible même s'il est pourtant essentiel pour la compréhension fine des concepts évoqués dans ce chapitre.

Selon le niveau de sa classe, le professeur pourra donc évoquer les points suivants, que nous aurions explicités si les conditions d'enseignement actuelles étaient plus favorables (temps disponible et aisance des élèves).

- La règle donnée (théorème de l'énergie mécanique) est de même nature que la 2^e loi de Newton : faire un lien entre mouvement (l'énergie cinétique est l'énergie qu'à un système du fait de son mouvement) et actions (l'énergie fournie par l'action est quantifiée par le travail) ; c'est parce que la distinction entre forces conservatives et non conservatives est faite que le travail d'une force quantifie soit un changement de forme d'énergie mécanique (cas d'une force conservative) soit un transfert d'énergie (cas d'une force non conservative).
- L'énergie potentielle (et donc l'énergie mécanique) est une création du physicien qui permet d'assurer la conservation de l'énergie mécanique du système dans de nombreux cas.
- Le théorème de l'énergie mécanique prend aussi une autre forme, celle du théorème de l'énergie cinétique : il convient juste de remplacer chaque ΔE_p par l'opposé du travail de la force conservative correspondant.
- Ceci assure un lien qualitatif avec la 2^e loi de Newton : la 2^e loi de Newton fait un lien entre mouvement et actions. De la même façon ce nouvel énoncé fait un lien entre mouvement et actions.

Le professeur qui souhaiterait approfondir le lien entre caractère conservatif d'une force (avec le critère de non dépendance du chemin suivi) et énergie potentielle, peut modifier l'activité 5 en abordant les situations dans cet ordre :

1. Le théorème de l'énergie cinétique est posé dès le début de l'activité $\Delta E_c =$ somme de tous les travaux comme conséquence de la signification physique du travail (activité 3).
2. Chute libre verticale : $\Delta E_c =$ travail du poids. Mais comme le travail du poids ne dépend que des deux positions initiale et finale, on peut définir une nouvelle fonction E_p telle que $\Delta E_p = -$ travail du poids, ce qui permet de retrouver (les élèves peuvent le faire) la conservation de l'énergie mécanique. Ceci donne du sens à ce qui a été vu en 1^{ère} sous la forme du « théorème de l'énergie mécanique » ou « conservation de l'énergie mécanique ». C'est à ce stade qu'il peut être pertinent de justifier l'appellation **Force conservative** définie par « travail indépendant du chemin suivi entre les deux points » : on comprend que c'est grâce à cette propriété qu'on peut définir une énergie potentielle qui ajoutée à l'énergie cinétique va donner une somme constante. La signification physique du travail doit alors être aménagée : ce n'est plus seulement le moyen de quantifier un transfert d'énergie, mais ce peut être un moyen, dans le cas conservatif, de quantifier un changement de forme d'énergie.
3. Cas où il y a des frottements : on ne peut plus faire la même opération de définition d'une énergie potentielle, le travail de la force supplémentaire indique la perte d'énergie mécanique (calcul littéral à faire par les élèves) : $\Delta E_m =$ somme des travaux des forces non conservatives. C'est pour cette raison que les forces dont le « travail dépend du chemin suivi entre les deux points » sont dites **non conservatives**. Mais s'il n'y a que des travaux de forces conservatives, l'énergie mécanique se conserve ! On peut ajouter, en guise de ré-exploitation, un cas où il y a une force non conservative motrice pour ne pas laisser croire que l'énergie mécanique diminue toujours (cas d'une force dite « de poussée » par exemple).

Activité 1 : réalisation d'un étalon de durée

étude expérimentale de la période d'un pendule

- **Objectif de l'activité** : obtenir un pendule qui bat la seconde et étudier quelles grandeurs physiques peuvent modifier la période de son mouvement ; discuter la pertinence d'un tel dispositif comme étalon de durée.

Comment mesurer la période d'un pendule ?

(a) On dispose du matériel suivant :

- une boîte de masses marquées ;
- une bobine de ficelle
- une potence,
- des tiges et des noix de serrages ;
- une grande règle graduée.

Utiliser ce matériel pour obtenir un pendule dont le mouvement soit périodique.

Mettre au point une méthode permettant de mesurer sa période au $100^{\text{ème}}$ de seconde près. Décrire cette méthode.

- **Donnée** : on estime que l'incertitude sur une durée mesurée au chronomètre vaut : 0,2 s.

Obtention d'un étalon de durée :

- (b) Utiliser le matériel proposé afin de réaliser un pendule qui bat la seconde. Lorsque vous y êtes parvenu, décrire votre pendule en détails : donner toutes ses caractéristiques et indiquer comment il faut le mettre en mouvement.

Expression de la période du pendule

- (c) D'après ce que vous avez observé, parmi les grandeurs qui décrivent ce pendule, la(les)quelle(s) a (ont) une influence sur sa période ?
- (d) On admet que la période du pendule « fil – masse marquée » dépend aussi du champ de pesanteur dans lequel il évolue. Proposer une expression de la période du pendule « fil – masse marquée » qui soit à la fois homogène et compatible avec les observations de la question précédente.

Donnée : la dimension du champ de pesanteur est : $L \cdot T^{-2}$ et son unité SI est le $m \cdot s^{-2}$.

Un bon étalon de durée ?

DOCUMENT : notion d'étalon

Objet ou instrument qui matérialise une unité de mesure et sert de référence pour l'étalonnage d'autres objets ou instruments.

Toute mesure suppose la définition d'une valeur de référence, l'étalon, pour la grandeur concernée, qui prend le nom d'unité pour une réalisation particulière. Par exemple, la mesure des longueurs a été longtemps fondée sur un mètre étalon constitué par une barre de platine iridié sur laquelle étaient tracés deux traits, la distance entre ces traits étant par définition l'unité de longueur : le mètre.

source : encyclopédie Larousse

- (e) Le pendule que vous avez réalisé n'est pas un bon étalon de durée : proposer au moins deux raisons.

À la fin de cette activité, l'amortissement des oscillations doit émerger, et éventuellement sa cause, les frottements. Cet amortissement peut être interprété comme une perte d'énergie (elle peut être évoquée spontanément par certains élèves mais si ce n'est pas le cas, le professeur le fera). Ceci légitime l'activité suivante puis l'introduction du travail.

Activité 2 : analyse énergétique du mouvement d'un pendule

Energie cinétique, potentielle et mécanique

- **Objectif de l'activité** : obtenir expérimentalement les évolutions temporelles des énergies dans le cas d'un pendule et faire le lien entre la perte d'énergie mécanique et les frottements.

Cette activité 2, si elle ne peut pas être faite en demi-classe à la suite de l'activité 1, peut être placée à la fin du chapitre, ajouter alors la dernière question de l'activité 5.

Le professeur veillera à adapter la formulation de cette activité en fonction de la vidéo et du matériel utilisés.

On dispose d'une vidéo d'un pendule simple en train d'osciller.

1. Acquisition des données

Le pointage des positions successives du centre de la boule est effectué avec le logiciel **Aviméca**.

- Ouvrir le logiciel Aviméca puis le fichier Pendule1.avi
- Aggrandir l'image (**Clip** → **Adapter** → OK)
- Regarder la vidéo

**Attention : les pointages effectués conditionnent la qualité des résultats.
L'utilisation du zoom est vivement conseillée.**

Étalonnage

Origine du repère et sens des axes

- Sur l'image 1, cliquer sur le centre de la balle pour fixer l'origine du repère, puis sélectionner un système d'axe adapté au mouvement (axe vertical vers le haut).

Choix de l'échelle

- La longueur du fil du pendule est de 32 cm.

Pointage

- Fixer l'origine des dates à l'image 9
- Faire précisément la saisie manuelle des positions successives de la balle à partir de l'image 9 et pendant une période complète du pendule.

2. Exploitation des mesures

- (a) Pour quelles positions du pendule l'énergie cinétique est-elle maximale ? Pour quelle position du pendule est-elle nulle ?
- (b) En déduire l'allure du graphe donnant l'énergie cinétique $E_c(t)$ du pendule pendant l'intervalle de temps qui correspond au pointage effectué.
- (c) Pour quelles positions du pendule l'énergie potentielle de pesanteur est-elle maximale ? Pour quelle position du pendule est-elle nulle ?
- (d) Sur le même graphe, mais avec une autre couleur, indiquer l'évolution de l'énergie potentielle $E_p(t)$ pendant le même intervalle de temps.
 - Dans Aviméca, transférer les données sur Regressi (ou autre).
 - Dans regressi, afficher le tableau de vos valeurs t , x et y .
 - Créer successivement les nouvelles variables suivantes : v_x ; v_y ; v_2 ; E_c ; E_p ; E_m .
Aide : $v^2 = v_x^2 + v_y^2$
 - Afficher dans le même repère les trois graphiques $E_c(t)$, $E_p(t)$ et $E_m(t)$.

Données : masse de la balle $m = 45\text{g}$; $g = 9,8\text{ N.kg}^{-1}$.

- (e) Comparer les courbes avec celles de vos prévisions des questions 2. et 4.
- (f) Commenter les changements de forme d'énergie au sein du système au cours du mouvement.
- (g) Comment seraient modifiées les courbes si le pointage avait été effectué sur une durée beaucoup plus longue ou en cas d'amortissement plus important du système ?
 - Vérifier votre réponse en utilisant la vidéo Pendule2 (longueur du fil 47 cm ; masse de la balle 8g). Pourquoi le pendule 2 est-il plus amorti que le 1 ?

Activité 3 : comment céder le plus d'énergie au wagon ?

Le travail comme mode de transfert de l'énergie

- **Objectifs de l'activité** : introduire le transfert d'énergie par travail et obtenir une relation entre travail, force et déplacement.

À la fin de cette activité, le travail peut être défini comme la grandeur qui quantifie l'énergie fournie (au sens algébrique) par un système à un autre en exerçant une action sur lui.

On cherche aussi par cette activité à rendre moins arbitraire l'expression introduite pour le travail au début de l'activité suivante, en faisant sentir que pour une force de valeur donnée, on fournit d'autant plus d'énergie qu'on agit dans un sens proche de celui du mouvement : le produit scalaire est l'outil mathématique adapté pour rendre compte de cette propriété.

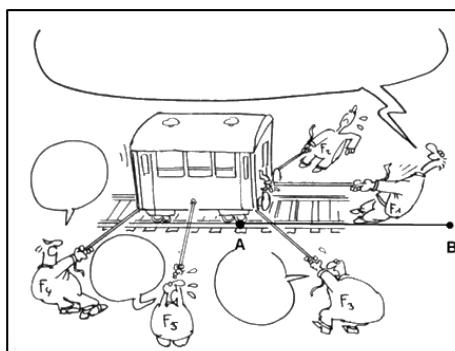
Les 2 premières questions ont pour objectif de prendre en charge la différence entre le concept de travail en physique et dans la vie de tous les jours. En physique le travail est totalement lié à la notion de déplacement alors que dans la vie de tous les jours quelqu'un peut « travailler » sans qu'il y ait de mouvement.

- (a) Selon vous, faut-il qu'il y ait mouvement pour qu'il y ait travail ?

- oui
 non

- (b) Décrire une situation pour laquelle il y a selon vous transfert d'énergie par travail.

- (c) Cinq personnes (notées de F_1 à F_5) tentent de déplacer un wagon vers la droite en exerçant chacun une force de même valeur ; le wagon se déplace effectivement de A à B.



On entend les phrases suivantes :

- « Je résiste ! »
- « Je contribue comme je peux... »
- « C'est moi le meilleur ! »
- « Je ne sers à rien ! »

1. Attribuer à chacun des personnages la phrase qu'il prononce parmi les quatre précédentes.
2. Du point de vue courant, peut-on dire que les cinq personnages dépensent de l'énergie ?
3. Du point de vue de la physique, quel est le personnage qui donne le plus d'énergie au wagon ?
4. L'énergie cédée au wagon par chacun des personnages représentés est appelée *un travail*. Si l'on note \vec{F} la force exercée par un personnage sur le wagon et α l'angle entre cette force et le déplacement du wagon, quelle(s) expression(s), parmi celle(s) proposée(s) ci-dessous, vous semble(nt) valide(s) ?
 - a) $W_{AB}(\vec{F}) = F \times AB$
 - b) $W_{AB}(\vec{F}) = F \times AB \times \cos(\alpha)$
 - c) $W_{AB}(\vec{F}) = F \times AB \times \sin(\alpha)$
 - d) $W_{AB}(\vec{F}) = F \times AB \times \tan(\alpha)$
 - e) $W_{AB}(\vec{F}) = \vec{F} \cdot \overrightarrow{AB}$

À la fin de cette activité, le professeur distribue le modèle des transferts d'énergie en mécanique et étudie les paragraphes 1 et 2.

Activité 4 : le « jeu de force »

Travail du poids et travail d'une force de frottement

- **Objectifs** : après que l'expression formelle du travail du poids du système a été établie dans le modèle, donner du sens à l'expression « force conservative ». Plus précisément :
- mettre en évidence que si le système effectue un trajet entre deux altitudes égales, le travail du poids est nul quel que soit le trajet suivi et, donc, ne fait pas perdre d'énergie cinétique au système. D'où le terme « force conservative ».
 - À l'inverse, mettre en évidence que le travail de la force de frottement est toujours négatif et fait forcément perdre de l'énergie cinétique au système.

Le « jeu de force », installé dans certaines fêtes de villages, consiste à lancer sur un rail courbé et incliné vers le haut un chariot lesté afin qu'il atteigne l'altitude la plus élevée possible. Si le chariot touche l'extrémité du rail, une cloche annonce que le lanceur a gagné.



On envisage un lancer raté, le chariot n'ayant pas déclenché la cloche. On modélise ainsi la situation :

- le chariot lesté a une masse de valeur $m = 30 \text{ kg}$, on le représente par un point ;
- il quitte la main du lanceur en A avec une vitesse $v_A = 2,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;
- il atteint le point B, où il rebrousse chemin ;
- il revient en A avec une vitesse v_A' ;
- le profil du rail est le suivant :



Si aucun frottement ne s'exerçait sur le charriot...

On envisage dans cette partie le cas (théorique) où aucune force de frottement ne s'exerce sur le chariot. La réaction du rail (force exercée par le rail sur le chariot) est alors en permanence perpendiculaire à la trajectoire.

1. Dans cette hypothèse, avec quelle vitesse v_A' le chariot revient-il au point A après avoir effectué un aller-retour ? Répondre intuitivement, sans faire de calcul.
2. Que vaut le travail de la réaction du rail ? Justifier en utilisant la direction de cette réaction.
3. Calculer le travail du poids du chariot sur la portion $A \rightarrow B$, puis sur la portion $B \rightarrow A$.
4. En exploitant le théorème de l'énergie cinétique, montrer que la réponse précédente permet de justifier la réponse donnée à la question 1.
5. Restons dans le registre de la fête foraine : représenter le profil du trajet d'un manège le long duquel le travail du poids serait également nul.
6. Qu'ont en commun tous les trajets le long desquels le travail du poids est nul ?

Étude plus réaliste

7. La vitesse du chariot, lorsqu'il revient en A, vaut en réalité $v'_A = 1,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Comment peut-on l'interpréter ? Utiliser la notion de travail pour répondre.
8. Intuitivement, existe-t-il un trajet le long duquel le travail de la force de frottement serait nul ?
9. Justifier la réponse précédente en étudiant le signe du travail de la force de frottement sur la portion A → B, puis sur la portion B → A.
10. Parmi le travail du poids et celui de la force de frottement, lequel dépend du chemin suivi par le système ?
11. Une force dont le travail ne dépend pas du chemin suivi est appelée « force conservative ». Donner deux exemples de forces conservatives (l'une étant évoquée dans cette activité, l'autre pas). Donner deux exemples de forces non conservatives.

Activité 5 : « Chute libre »

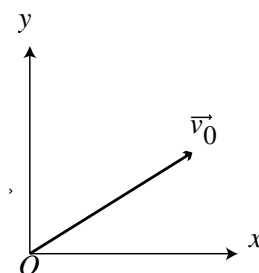
Lien quantitatif entre variation d'énergie et travail

► **Objectifs :**

- Observer que l'expression obtenue pour le travail du poids correspond à la perte d'énergie potentielle de pesanteur : l'expression du travail du poids est $-\Delta E_p$, résultat généralisable dès qu'on définit une énergie potentielle.
- Connaître une règle claire (le théorème de l'énergie mécanique) pour faire des bilans d'énergie dans le cas de situations mécaniques : $\Delta E_m =$ somme des travaux des forces non conservatives, ce qui induit de connaître la différence entre les forces conservatives et les forces non conservative.

Partie 1 : rappel de 1ère S : cas d'une chute sans vitesse initiale

On étudie un système en mouvement de chute avec une vitesse initiale (mouvement parabolique) dans le champ de pesanteur uniforme en considérant que le point d'arrivée est à la même altitude que le point de départ. On suppose que le mouvement s'effectue sans frottement. Pour repérer la position du centre d'inertie du système, on utilise un repère plan (Oxy) dont l'origine est la position initiale du centre d'inertie du système.



1. Rappeler l'expression de l'énergie potentielle de pesanteur du système en considérant que l'énergie potentielle est nulle lorsque $y=0$.
2. Remplir le tableau suivant en respectant bien les consignes de la première ligne.

	Instant initial ($y=0$) (mettre <i>nulle</i> , <i>minimale</i> ou <i>maximale</i>)	Pendant la montée (mettre ↗, ↘ ou →)	Au sommet de la trajectoire (mettre <i>nulle</i> , <i>minimale</i> ou <i>maximale</i>)	Pendant la descente (mettre ↗, ↘ ou →)	Instant final ($y=0$) (mettre <i>nulle</i> , <i>minimale</i> ou <i>maximale</i>)
Altitude					
Vitesse					
Énergie cinétique $E_c = \frac{1}{2}mv^2$					
Énergie potentielle de pesanteur E_p					
Énergie mécanique	X		X		X

$E_m = E_c + E_p$				
-------------------	--	--	--	--

3. Donner l'expression de la variation de l'énergie potentielle ΔE_p entre deux points A et B et comparer à l'expression du travail du poids entre A et B.
4. Justifier alors que le poids soit qualifié de force *conservative*.
5. Si les frottements n'étaient pas négligeables quelles seraient les variations d'énergie qui changeraient (par rapport à la situation sans frottement) : ΔE_p ΔE_c ΔE_m
6. Justifier alors que les forces de frottements soient qualifiées de forces non conservatives.

Partie 2 : retour sur le pendule

Le pendule pesant étudié lors de l'activité 2 est soumis à trois forces : le poids, la tension du fil et la force de frottement exercée par l'air.

1. Indiquer comment on peut justifier que le travail de la tension du fil est nul (ce que l'on admettra).
2. En utilisant le théorème de l'énergie mécanique, indiquer pour chaque force si son travail sur un déplacement donné correspond à un transfert ou à changement de forme d'énergie.
3. Estimer la valeur du travail de la force de frottement sur la durée analysée pour le pendule le plus amorti.

Activité 6 : mesure du temps, définition de la seconde, définition du « temps atomique »