Le principe de conservation de l'énergie et le théorème de l'énergie mécanique en classe de première

Edith SALTIEL
L.D.P.E.S.
Université Paris VII - 75000 Paris

RÉSUMÉ

La lecture des programmes de la classe de première ainsi que celle de tous les manuels de cette classe fait surgir beaucoup de questions, souvent sans réponses immédiates. Le but de cet article est de faire une mise au point (ou plutôt une mise au clair) sur le principe de conservation de l'énergie, le théorème de l'énrgie mécanique, les notions de systèmes, de forces intérieures et extérieures, et enfin la notion d'échange avec le milieu extérieur. Deux exemples seront traités.

Le programme de première sur l'énergie s'appuie fortement sur le principe de conservation de l'énergie et définit un certain nombre d'énergies de types différents, comme les énergies cinétique, potentielle, chimique, nucléaire, etc. La lecture de ce programme et de tous les manuels laisse parfois perplexe.

En effet, à la rubrique énergies cinétique et potentielle, on peut lire «Différentes formes d'énergie : énergie cinétique et énergie potentielle. Aspects microscopique et macroscopique».

– On croit comprendre ce que signifie le terme énergie cinétique microscopique; mais si on regarde dans les manuels, on est un peu perdu. En effet, l'un parle d'énergie *d'agitation thermique* comme étant l'énergie microscopique des molécules, un autre parle d'énergie *d'agitation microscopique* d'un système comme étant l'énergie qui s'y trouve emmagasinée à l'échelle microscopique sous forme cinétique **et/ ou** potentielle, un autre définit l'énergie cinétique microscopique qui caractérise l'*agitation moléculaire*, etc. S'agit-il bien de la même chose, de la même énergie ? Tous les termes utilisés ont en commun le mot agitation et le fait qu'il s'agisse d'une énergie microscopique. En revanche, on ne sait pas si cette énergie est seulement de l'énergie cinétique ou s'il y a aussi de l'énergie potentielle ? Comment s'y retrouver ? Comment savoir laquelle est laquelle ?

– Nous rencontrons une autre difficulté avec l’énergie potentielle. Beaucoup d’auteurs commencent par la définir comme étant une énergie mise en réserve dans un système déformable, ou comme une énergie qui dépend de la position du système par rapport à une référence. Ensuite, apparaît, pour la majorité des auteurs de manuels, une distinction entre énergie potentielle macroscopique et énergie potentielle microscopique. La différence entre les deux n’est pas très claire : est-elle liée à la nature microscopique ou macroscopique des interactions comme le laisse penser certains (mais ne sont-elles pas toutes microscopiques ?), est-elle liée comme le dit un manuel à la portée de l’interaction ? «L’énergie potentielle microscopique concerne des interactions à très courte distance entre constituants élémentaires tandis que l’énergie potentielle macroscopique concerne des interactions à grande distance» ; mais comment pouvoir dire que l’interaction responsable de l’énergie potentielle élastique, qui est considérée par tous les auteurs comme étant une énergie potentielle macroscopique, est une interaction à grande distance ? Comment s’y retrouver ?

Plus loin dans le programme, on peut lire «La définition de l’énergie mécanique d’un système». Dans les compétences exigibles, on peut lire : «Qu’un système mécanique isolé n’échange ni travail ni chaleur avec le milieu extérieur et que la variation d’énergie cinétique est opposée à la variation d’énergie potentielle. Que la variation d’énergie d’un système mécanique qui ne reçoit que du travail est égale à ce travail». Puis «frottements : conservation de l’énergie totale, non conservation de l’énergie mécanique...». Dans les commentaires, on peut lire : «**Le principe de conservation de l’énergie** d’un système isolé est le point de départ de toute analyse... Le comportement des systèmes réels qui montre l’omniprésence des phénomènes dissipatifs conduit à la non conservation de l’énergie mécanique. Diverses situations où interviennent les frottements illustreront ces phénomènes dissipatifs. Dans le cas des systèmes à énergie mécanique non constante, il y a lieu de distinguer d’une part les situations où les variations d’énergie par transfert sous forme de travail résultent d’une action extérieure et d’autre part les situations des systèmes isolés dissipatifs dont l’énergie mécanique varie à cause des frottements sans variation de l’énergie totale». Le programme insiste beaucoup sur la conservation et la non conservation de l’énergie mécanique, tout en insistant également sur le principe de conservation de l’énergie, qui est le point de départ de toute analyse. Si on regarde les manuels, on ne sait pas très bien pourquoi l’énergie mécanique est ou non conservée, on ne sait pas très bien pourquoi, dans les cas dissipatifs, il y a un échange de chaleur qui s’exprime (pour les auteurs de manuels) par $Q = -\Delta E_m$, formule qui est utilisée dans les exercices et rarement démontrée (un livre le fait) ou bien «$\Delta E_m = -W_{fourni}$» pour aboutir à «la quantité de chaleur produite est égale à la valeur absolue de la variation de l’énergie mécanique» sans que l’on sache bien pourquoi cela. De même, on trouve «l’énergie mécanique perdue se retrouve essentiellement sous forme d’énergie cinétique microscopique. Lorsque le système atteint une température constante, l'énergie est dissipée en chaleur dans l'atmosphère : on parle de phénomène dissipatif». On voit apparaître ici l'idée que la température du système doit être constante ? Qu'est-ce que cela veut dire ? le système chauffe et ensuite ? Cela signifie-t-il que l'on attende que le système ait retrouvé la température qu'il avait initialement ou cela signifie-t-il que tout le système reste, à partir d'un certain temps, à la même température ? Que se passe-t-il et quelles sont les lois, principes qui nous permettent de dire ceci plutôt que cela ? De même, on lit «De plus, la conservation de l'énergie nous permet de déduire que l'énergie thermique produite par le travail des forces de frottement est égale à la variation d'énergie mécanique». Comment déduit-on cela ? Est-ce vraiment le principe de conservation de l'énergie ? ou y-a-t-il autre chose ? Quand peut-on raisonner à partir de l'énergie mécanique d'un système, quand peut-on raisonner à partir de l'énergie totale ?

Bref, tout cela semble compliqué et une mise au point semble s'imposer. C'est l'objectif de ce qui suit.

QUELQUES RAPPELS

1 - Théorème de l'énergie mécanique

Ce théorème dit que la variation d'énergie mécanique d'un système est égale au travail des forces **extérieures** à ce système. Ce théorème n'est cependant applicable que dans certaines conditions, conditions qui sont importantes à expliciter.

Partons du théorème de l'énergie cinétique : la variation d'énergie cinétique d'un système entre deux instants est égale à la somme des travaux de **toutes** les forces (**intérieures** et extérieures à ce système) :

$$E_{cf} - E_{ci} = \Sigma \left(W_{int} + W_{ext} \right)$$

Si les forces intérieures $\vec{F}_{int}$ dérivent d'un potentiel[1] (ou sont conservatives), alors :

$$\vec{F}_{int} = - \vec{grad} E_p$$

1. En classe de première, le travail d'une force ne pouvant pas être calculé à l'aide d'une intégrale curviligne, la notion de force conservative, c'est-à-dire de force dont le travail est indépendant du chemin suivi, ne peut être définie de cette façon.

Le travail de ces forces s'écrit :

$$\int_i^f \vec{F}_{int} \cdot \vec{dl} = -\int_i^f \overrightarrow{grad}E_p \cdot \vec{dl} = E_{pi} - E_{pf}$$

D'où : $$E_{cf} - E_{ci} = \Sigma\, W_{ext} + E_{pi} - E_{pf}$$

ou encore : $$E_{cf} - E_{ci} + E_{pf} - E_{pi} = \Sigma\, W_{ext}$$

$$\mathbf{E_{pf} - E_{pi} = \Delta E_{pot} = -W_{int}}$$

ou encore : $$\mathbf{\Delta E_c + \Delta E_{pot} = \Sigma\, W_{ext}}$$

$$\mathbf{\Delta E_{mec} = \Sigma\, W_{ext}}$$

(relation qui est introduite par des manuels de première)

Cette démonstration appelle quelques remarques :

• Une particule ou un solide indéformable seul a une énergie cinétique, mais n'a pas d'énergie potentielle. Pour qu'il y ait énergie potentielle, il faut qu'il y ait au moins **deux objets en interaction** et que la force d'interaction soit conservative (ou dérive d'un potentiel). C'est l'ensemble de ces deux objets en interaction qui a une énergie potentielle et non l'un seul d'entre eux (cf. énergie potentielle de plusieurs charges). De plus, lorsqu'on parle d'énergie potentielle d'un système, cela suppose que les **forces d'interaction responsables de cette énergie sont intérieures au système considéré**.

• L'expression de l'énergie mécanique d'un système[2] dépend donc du système choisi. Prenons des exemples :

– Considérons tout d'abord *un solide S (par exemple, un objet dense) en chute libre*.

Si on considère comme système le solide seul, son énergie mécanique est simplement égale à son énergie cinétique :

$$(E_{mec})_S = 1/2\, mv^2$$

Le «poids» est une force extérieure au système (solide).

Si on considère le système (solide + Terre) (c'est-à-dire le système qui «englobe» les objets responsables de l'interaction gravitationnelle), les forces correspondant à l'interaction gravitationnelle sont des forces intérieures au système considéré. De plus,

2. On appelle système un ensemble bien défini de particules (en particulier le nombre de particules est fixé et invariable). (Un tel système, en thermodynamique, est dit fermé).

elles dérivent d'un potentiel. L'énergie mécanique d'un tel système vaut : Énergie cinétique du solide + Énergie cinétique de la Terre (qui est nulle dans le référentiel de la Terre) + Énergie potentielle de pesanteur (en ayant auparavant choisi une origine pour cette énergie potentielle) :

$$(E_{mec})_{S+T} = 1/2\ mv^2 + E_{pot-pes}$$

– *<u>Un ressort accroché entre deux clous</u>*

Ce ressort a une énergie potentielle élastique $\left(1/2\ k\,(l - l_0)^2\right)$, énergie due à des forces d'interaction internes au ressort (on suppose bien sûr avoir choisi, là encore, une origine des énergies potentielles). Comme on suppose toujours que les ressorts que l'on étudie sont sans masse, l'énergie mécanique du système ressort seul est égale à l'énergie potentielle du ressort :

$$(E_{mec})_R = 1/2\ kx^2$$

– *<u>Un ressort vertical fixé au plafond et ayant une masse m accrochée à l'autre extrémité</u>*

Le système ressort seul a, dans le référentiel terrestre, une énergie mécanique qui est égale à l'énergie potentielle élastique, les forces internes au ressort étant des forces qui dérivent d'un potentiel :

$$(E_{mec})_R = 1/2\ kx^2$$

Le système (ressort + masse) a, dans le référentiel terrestre, une énergie mécanique qui est égale à l'énergie potentielle du ressort seul + l'énergie cinétique de la masse (si celle-ci est en mouvement). Ici, le «poids» s'exerçant sur la masse m est une force extérieure :

$$(E_{mec})_{R+m} = 1/2\ kx^2 + 1/2\ mv^2$$

Le système (ressort + masse + Terre) a, dans le référentiel terrestre, une énergie mécanique qui est constituée de l'énergie potentielle élastique du ressort, de l'énergie potentielle de pesanteur et de l'éventuelle énergie cinétique de la masse (si celle-ci est en mouvement). Ici, toutes les forces en jeu sont intérieures au système choisi :

$$(E_{mec})_{R+m+T} = 1/2\ kx^2 + 1/2\ mv^2 + E_{pot-pes}$$

Ainsi, pour une même situation physique donnée, l'expression de l'énergie mécanique change selon le système choisi : il n'y a donc pas pour une situation physique donnée une seule énergie mécanique.

• L'énergie mécanique d'un système comprend l'énergie cinétique des différents solides qui se trouvent dans le système considéré (ce qui paraît être une évidence) et l'énergie potentielle correspondant à des forces d'interaction conservatives, à condition qu'elles soient **internes** au système considéré. Ainsi dire que l'énergie mécanique d'un système dépend du système paraît être une trivialité. Ce qui est moins habituel, c'est d'expliciter le(s) système(s) pour le(s)quel(s) on peut appliquer le théorème de l'énergie mécanique, explicitation absolument nécessaire. En effet, s'il existe, pour la situation physique étudiée, des forces non conservatives, elles doivent impérativement **être extérieures au système choisi pour que l'on puisse appliquer le théorème de l'énergie mécanique**, ce qui restreint considérablement les possibilités.

• Lorsque l'on dit qu'un système est conservatif (celui pour lequel l'énergie mécanique est conservée), qu'un système est non conservatif (celui pour lequel l'énergie mécanique n'est pas conservée), de quel(s) système(s) s'agit-il ? Si nous reprenons l'exemple du solide en chute libre, s'agit-il du système solide seul, du système (solide + Terre) ? Le langage, ici, est particulièrement ambigu, car il s'agit en fait du système «complet». En effet, la situation physique est tout d'abord étudiée dans sa globalité : après avoir fait l'inventaire de toutes les interactions, on regarde si ces interactions dérivent ou non d'un potentiel. Si l'une quelconque des interactions intervenant dans la situation physique étudiée n'est pas conservative, le système «complet» (c'est-à-dire comprenant toutes les interactions en jeu dans la situation physique étudiée) est déclaré non conservatif et si l'ensemble des interactions dérive d'un potentiel, on dit alors que le système «complet» est conservatif. Ceci n'empêche pas, pour résoudre le problème, de choisir un système particulier qui ne soit pas forcément le système «complet».

2 - Énergie totale d'un système, énergie potentielle, énergie interne, énergie d'agitation thermique

L'énergie totale d'un système est égale à la somme de l'énergie cinétique de chacune des particules (atomes, molécules, électrons, etc.) constituant le système et de l'énergie potentielle d'interaction entre ces particules :

$$E_{tot} = \sum_{i=1}^{N} \frac{1}{2} m_i v_i^2 + E_{pot}\left(\vec{r}_1, \vec{r}_2 \ldots \vec{r}_N\right)$$

E_{pot} dépend seulement des $\left(\vec{r}_i - \vec{r}_j\right)$.

On montre facilement (il suffit de faire un changement de référentiel) que cette énergie totale peut s'écrire (on suppose pour simplifier que le solide a un mouvement de translation dans le référentiel terrestre) :

$$\mathbf{E_{tot} = U + \frac{1}{2} M\, V_G^{\,2}} \qquad \text{avec : } \mathbf{U = \sum_{i=1}^{N} \frac{1}{2} m_i\, v_{io}^{\,2} + E_{pot}\left(\vec{r}_1, \vec{r}_2 \ldots \vec{r}_N\right)} \qquad (1)$$

où :

– U est l'énergie totale du système dans le référentiel du centre de masse (E_{pot} a la même expression dans les deux référentiels puisque $\left(\vec{r}_{io} - \vec{r}_{jo}\right) = \left(\vec{r}_i - \vec{r}_j\right)$).

– $\vec{V}_G$ est la vitesse du centre de masse du solide dans le référentiel terrestre, $\vec{v}_{io}$ est la vitesse de la particule i dans le référentiel du centre de masse (c'est-à-dire le référentiel dans lequel le centre de masse est au repos).

– $1/2\, MV_G^{\,2}$ est ce que l'on appelle l'**énergie cinétique macroscopique** du système : dans le cas de la translation, cette énergie dépend d'une variable macroscopique qui est la vitesse du solide. Si le solide avait un mouvement de rotation[3] par rapport à son centre de masse, on ajouterait à cette énergie cinétique macroscopique un terme en $1/2\ I\Omega^2$.

– $\sum_{i=1}^{N} \frac{1}{2} m_i\, v_{io}^{\,2}$ forme l'énergie cinétique microscopique.

Par définition, U est l'énergie interne du système. C'est l'énergie totale d'un système dans un référentiel où ce système est macroscopiquement au repos.

L'énergie d'un système est une fonction d'état : elle dépend donc de l'état du système, état déterminé par un «petit» nombre de **variables macroscopiques** (c'est-à-dire mesurables à «l'échelle humaine» : masse, volume, forme, longueur, position, $\vec{V}_G$ ...).

Dans $E_{pot}\left(\vec{r}_1, \vec{r}_2 \ldots \vec{r}_N\right)$, il y a des termes qui s'expriment en fonction d'une **variable macroscopique de position** : dans le cas de l'interaction solide-Terre, il s'agit de l'énergie potentielle de pesanteur, dans le cas d'un ressort, il s'agit de

3. Ce cas n'est pas si simple, voir référence [1].

l’énergie potentielle élastique. Nous remarquons que ces énergies potentielles qui correspondent à des interactions microscopiques (à plus ou moins longue portée) s’expriment toutes deux en fonction d’un paramètre macroscopique, ici une longueur. Si les auteurs de manuels peuvent appeler cette énergie potentielle, énergie potentielle macroscopique, c’est uniquement parce qu’elle s’exprime en fonction d’une variable macroscopique.

Nous appellerons **énergie d’agitation thermique** d’un système, l’énergie cinétique moyenne de ses constituants. Cette énergie est reliée à la température : «la notion macroscopique de température d’un système est généralement reliée à... l’énergie d’agitation thermique. [...]. La température d’un gaz parfait en équilibre macroscopique est une mesure macroscopique de l’énergie cinétique moyenne de ses constituants microscopiques» (Valentin).

L’énergie mécanique d’un système comprend l’énergie cinétique macroscopique de chacun des objets constituant le système et l’énergie potentielle des objets se trouvant dans le système à condition que les forces d’interaction correspondantes dérivent d’un potentiel (ou soient conservatives).

3 - Principe de conservation de l’énergie (Feynman)

Feynman présente la «loi de conservation de l’énergie» dans l’un des tomes de Lectures on physics : l’intérêt de cette présentation est de mettre le doigt sur la nature du raisonnement sous-jacent à ce principe ou cette loi. Il écrit :

«...la loi est appelée conservation de l’énergie. Elle affirme qu’il y a une certaine quantité que nous appelons énergie, qui ne change pas dans les multiples modifications que peut subir la nature. C’est une idée très abstraite, car c’est un principe mathématique ; ce principe dit qu’il existe une quantité numérique, qui ne change pas, lorsque quelque chose se passe. Ce n’est pas la description d’un mécanisme ou de quoi que ce soit de concret ; c’est simplement ce fait étrange que nous puissions calculer un certain nombre et que, lorsque nous avons terminé d’observer l’évolution de la nature et que nous recalculons ce nombre, il soit le même. Puisque c’est une idée abstraite, nous illustrerons sa signification par une analogie. Imaginons un enfant qui possède des cubes absolument indestructibles et qui ne peuvent pas être divisés en morceaux. Tous les cubes sont identiques. Supposons qu’il ait vingt-huit cubes. Sa mère le met dans une chambre au début de la journée avec ses vingt-huit cubes. A la fin de la journée, étant curieuse, elle compte les cubes avec attention et découvre une loi phénoménale - quoiqu’il fasse avec ses cubes, il en reste toujours vingt-huit ! Ceci se répète plusieurs jours durant, jusqu’au jour où il n’y a que vingt-sept cubes, mais un peu de recherche montre qu’il y en a un sous le tapis - elle doit regarder partout pour s’assurer que le nombre de cubes n’a pas changé. Un jour, cependant, le nombre semble changer - il n’y en a que vingt-six. Une recherche attentive montre que la fenêtre était ouverte, et en regardant dehors, elle retrouve les deux autres cubes. Un autre jour, un compte précis indique qu’il y en a trente ! Ceci lui causa une consternation considérable, jusqu’au moment où elle réalisa que Bruce était venu en visite, amenant ses cubes avec lui et qu’il en laissa quelques-uns à la maison de Denis. Après s’être débarrassée de ces cubes supplémentaires, elle ferme la fenêtre, ne laisse pas rentrer Bruce et tout, alors, se passe bien, jusqu'au moment où recomptant elle ne trouve que vingt-cinq cubes. Néanmoins, il y a une boîte dans la chambre, une boîte de jouets, et la mère essaie d'ouvrir la boîte, mais le garçon dit “Non, n'ouvre pas la boîte à jouets”, et se met à crier. La mère n'a pas le droit d'ouvrir la boîte à jouets. Étant extrêmement curieuse et quelque peu ingénieuse, elle invente un stratagème ! Elle sait qu'un cube pèse 100 grammes, aussi pèse-t-elle la boîte au moment où elle voit vingt-huit cubes, et elle trouve 500 grammes. A la vérification suivante, elle repèse la boîte, soustrait 500 grammes et divise par 100. Elle découvre la chose suivante :

$$(\text{nombre de cubes observés}) + \frac{(\text{poids de la boîte}) - 500 \text{ grammes}}{100 \text{ grammes}} = \text{constante}$$

Puis de nouvelles déviations apparaissent, mais une étude précise indique que le niveau de l'eau sale de la baignoire s'est modifié. L'enfant jette les cubes dans l'eau, et elle ne peut les voir parce que cette eau est trop sale, mais elle peut savoir combien de cubes se trouvent dans l'eau, en ajoutant un autre terme à sa formule. Puisque la hauteur initiale de l'eau était de 15 centimètres, et que chaque cube élève le niveau d'un demi-centimètre, cette nouvelle formule sera :

$$(\text{nombre de cubes observés}) + \frac{(\text{poids de la boîte}) - 500 \text{ grammes}}{100 \text{ grammes}} + \frac{(\text{hauteur de l' eau}) - 15 \text{ cm}}{0{,}5 \text{ cm}} = \text{constante}$$

Dans l'augmentation progressive de la complexité de son univers, elle trouve toute une série de termes représentant des manières de calculer combien de cubes se trouvent dans des endroits où il ne lui est pas permis de regarder. En conclusion, dans son cas, elle trouve une formule complexe, une quantité qui doit être calculée et qui reste toujours la même.

Quelle est l'analogie entre ceci et la conservation de l'énergie ? L'aspect le plus remarquable qui doit être écarté de ce schéma est qu'il n'y a pas de cubes. Éliminez les premiers termes dans les deux expressions et vous allez découvrir que vous calculez des choses plus ou moins abstraites. L'analogie est réalisée sur les points suivants. D'abord, lorsque nous calculons l'énergie, une certaine quantité de cette énergie quitte quelquefois le système et s'en va, ou d'autres fois un peu d'énergie rentre dans le système. L'énergie apparaît sous un très grand nombre de formes différentes, et il existe une formule pour chacune. Ce sont l'énergie gravitationnelle, l'énergie cinétique, l'énergie thermique, l'énergie électrique, l'énergie élastique, l'énergie chimique, l'énergie de rayonnement, l'énergie nucléaire, l'énergie de masse. Si nous additionnons les formules pour chacune de ces contributions, il n'y aura pas de changement à l'exception de l'énergie qui entre et qui sort.

Il est important de réaliser que dans la physique d'aujourd'hui, nous n'avons aucune connaissance de ce qu'est l'énergie. Nous n'avons pas de représentation comme quoi l'énergie viendrait en petits paquets d'une certaine quantité. Ce n'est pas ainsi. Cependant les formules permettent de calculer une certaine quantité numérique et lorsque nous les ajoutons ensemble, cela donne “28”- toujours le même nombre. **C'est une chose abstraite en cela qu'elle ne nous donne pas le mécanisme ou les raisons des diverses formules... nous avons des formules pour elles, mais nous ne possédons pas les lois fondamentales**. Nous savons que telle énergie n'est ni électrique, ni gravitationnelle... mais nous ne savons pas exactement ce que c'est... A partir de notre discussion, il est évident que la loi de conservation de l'énergie est extrêmement utile pour analyser les phénomènes sans connaître toutes les formules... Si nous disposions des formules pour toutes les sortes d'énergie, nous pourrions analyser comment de nombreux processus doivent fonctionner sans avoir à entrer dans les détails».

4 - Principe de conservation de l'énergie et premier principe de thermodynamique

D'après le principe de conservation de l'énergie, l'énergie d'un système isolé énergétiquement) reste constante au cours du temps. D'après ce même principe, l'énergie d'un système non isolé ne peut changer que par transfert d'énergie entre le système et le milieu extérieur. Ceci peut se faire :

– soit par travail des forces extérieures (W_{ext}),
– soit en fournissant de la chaleur (Q).

D'après le premier principe de thermodynamique : la variation d'énergie interne d'un système entre deux états de repos macroscopiques est égale à la somme des travaux des forces extérieures qui lui sont appliquées et de la chaleur reçue au cours de la transformation.

Soit : $$\Delta U = W + Q$$

Ainsi, comme l'écrit Hulin et al, «Le travail ne suffit pas à décrire **tous les échanges** d'énergie possibles **entre un système et son environnement**[4]**. Par définition "le reste" sera dénommé chaleur**».

ÉTUDE DE DEUX EXEMPLES

Étudions deux situations physiques différentes : un objet tombe en chute libre et un solide descend un plan incliné puis continue sa route sur un sol horizontal. Nous utiliserons deux approches différentes, l'une qui s'inspire de la démarche suggérée par Feynman, l'autre qui commence en utilisant le théorème de l'énergie mécanique.

a - Raisonnement à partir de l'énergie totale du système «complet»

Pour chacune des situations étudiées, on considérera à chaque fois le système le plus large possible, afin qu'il puisse être considéré comme système isolé.

Objet tombant en chute libre

• *Première phase :* on néglige la résistance de l'air et on veut connaître la vitesse de l'objet juste avant qu'il ne touche le sol.

4. Il est donc incorrect de parler de transfert de chaleur à l'intérieur d'un système.

Le système isolé est constitué de l'objet et de la terre.

État initial : $v_{objet} = 0$ (dans le référentiel de la terre ; $v_{terre} = 0$).

État final : $v_{objet} = v_f$ et $v_{terre} = 0$.

La variation d'énergie $\left(\Delta E = \frac{1}{2} m v_f^2 - mgz\right)$ vaut 0, puisque le système est (énergétiquement) isolé.

• *Deuxième phase :* on s'occupe maintenant de la collision. On a alors le même état initial que précédemment, mais l'état final est, pour l'objet : $v_{objet} = 0$.

La variation de l'énergie totale du système vaut (– mgz) et devrait être égale à 0 puisque ce système continue à être isolé (on continue à négliger la résistance de l'air). z n'étant pas nul, on arrive à une absurdité. Il y a un terme dans l'expression de l'énergie que l'on a oublié de considérer : il s'agit de l'énergie d'agitation thermique. Si T_i est la température initiale et T_f la température finale juste après la chute, on a :

$$\Delta E = -mgz + \Delta\varepsilon(T) \qquad (1)$$

qui, cette fois, peut être nulle, ce qui signifie que la température de l'objet et du sol au niveau de l'impact a augmenté, ce qui est vérifié expérimentalement. La comparaison de l'expression obtenue pour la vitesse finale dans la première phase et de l'expression (1) permet de dire que l'énergie cinétique de l'objet juste avant le choc avec le sol s'est transformée en énergie d'agitation thermique de l'objet et du sol.

• *Troisième phase :* on sait qu'en attendant suffisamment longtemps, la température de l'objet et du sol retrouve sa valeur initiale. Si on écrit la nouvelle variation d'énergie ΔE, on obtient (l'état final étant alors la température T_i pour tout le monde) :

$$\Delta E = -mgz + 0 \qquad (2)$$

On retrouve la même absurdité que plus haut, absurdité qui peut être levée grâce au principe de conservation de l'énergie. En effet, on ne voit pas quelle énergie a été oubliée. En revanche, on constate que le système n'est plus isolé, qu'il y a eu échange d'énergie avec le milieu extérieur (ici l'air) et que cet échange s'est fait sous forme de chaleur (en effet, durant le passage de T_f à T_i, il n'y a pas eu de force extérieure qui a travaillé). (2) devient (3) $\Delta E = Q$. En comparant (1) et (2), on trouve que la température du système étudié a tout d'abord augmenté, puis est revenue à sa valeur initiale en échangeant de la chaleur avec le milieu extérieur. En utilisant (1), (2) et (3), on constate effectivement que $Q = -\Delta\varepsilon(T)$: inutile de préciser que le chemin pour arriver à cette expression n'est pas difficile, mais pas immédiat.

Solide glissant sur un plan incliné

• *Première phase :* on néglige la résistance de l'air ainsi que les frottements solides. Le solide, au départ, a une vitesse nulle (dans le référentiel de la terre), puis accélère et continue à vitesse constante sur le sol horizontal. Le système que l'on considère isolé est constitué du solide et de la terre.

La vitesse initiale du solide est nulle et la vitesse finale non nulle, soit v_f.

La variation d'énergie de ce système $\left(\Delta E = \frac{1}{2} m v_f^2 - mgz\right)$ vaut 0, puisque le système est isolé durant toute cette phase.

• *Deuxième phase :* on constate que le solide, au lieu de continuer à avancer à vitesse constante sur le sol, est freiné à cause des frottements. La vitesse de ce solide est nulle à l'état initial et l'état final.

La variation d'énergie totale du système vaut alors (– mgz), terme qui ne peut absolument pas être nul. Nous avons donc oublié un terme dans l'expression de l'énergie totale, l'énergie d'agitation thermique. On obtient :

$$\Delta E = -mgz + \Delta\varepsilon(T) = 0 \qquad (1)$$

ce qui signifie que la température du solide et du sol a augmenté.

(Il aurait été possible de traiter de la même façon le problème en prenant comme instant final, un instant où le solide n'est pas encore arrêté, c'est-à-dire avec une vitesse non nulle, soit v. Dans ce cas, nous aurions une variation de l'énergie totale $\Delta E' \neq \Delta E$ avec $\Delta E' = \frac{1}{2} mv^2 - mgz + \Delta\varepsilon(T)$).

• *Troisième phase :* on attend suffisamment longtemps après l'arrêt du solide pour que ce dernier et le sol aient retrouvé leur température initiale. On trouve alors, en écrivant la conservation de l'énergie totale :

$$\Delta E = -mgz \qquad (2)$$

Comme pour le cas de la chute libre, on en déduit que ce système n'est plus isolé et qu'il a échangé de la chaleur avec le milieu extérieur. On a alors : $Q = \Delta\varepsilon(T)$.

Question : que ce serait-il passer si chacune de ces deux expériences avaient eu lieu dans le vide ?

b - Raisonnement à partir du théorème de l'énergie mécanique

Le raisonnement qui s'appuie sur le théorème de l'énergie mécanique suppose que l'on fasse tout d'abord un inventaire des différentes interactions qui interviennent dans la situation physique étudiée, tout en précisant si ces interactions sont ou non conservatives. Pour appliquer le théorème de l'énergie mécanique, nous devons impérativement choisir des systèmes pour lesquelles les forces non conservatives sont **extérieures** au système considéré. Les forces conservatives peuvent être soit internes soit externes au système considéré : toutefois, si dans l'expression de l'énergie mécanique apparaît un terme d'énergie potentielle, cela suppose obligatoirement que les forces dont dérivent ce potentiel sont internes au système choisi. Nous allons voir ce que cela signifie avec les exemples étudiés plus haut.

Dernière remarque : le théorème de l'énergie mécanique ne permet absolument pas de savoir ce qui se passe au niveau de la température des corps en jeu dans la situation physique étudiée. Nous serons donc amené, à un moment donné, à raisonner, comme plus haut, sur l'énergie totale du système complet, c'est-à-dire le système qui englobe toutes les interactions (et donc les objets responsables de ces interactions) qui interviennent dans la situation physique étudiée.

Objet tombant en chute libre

• *Première phase :* on néglige la résistance de l'air et on veut connaître la vitesse de l'objet juste avant qu'il ne touche le sol. L'application du théorème de l'énergie mécanique peut se faire pour deux systèmes différents :

– Premier système possible : l'objet seul. Pour ce système particulier, le poids est une force extérieure. Le théorème de l'énergie mécanique dit que : $\Delta E_{mec} = W_{ext}$

$$(\Delta E_{mec})_{objet} = \frac{1}{2} m v_f^{\,2} \qquad \text{et} \qquad W_{ext} = mgz$$

– Deuxième système possible : l'objet et la terre (c'est-à-dire un système pour lequel les forces correspondant à l'interaction gravitationnelle sont internes). Ce système n'est soumis à aucune force extérieure. Le théorème de l'énergie mécanique s'écrit :

$$(\Delta E_{mec})_{obj+ter} = \frac{1}{2} m v_f^{\,2} - mgz = 0$$

Ces deux choix conduisent au même résultat.

Pour traiter les deuxième et troisième phases, nous sommes obligés de considérer le système complet et de raisonner sur l'énergie totale (cf. plus haut).

Solide glissant sur un plan incliné

• *Première phase :* le solide descend le plan incliné et continue à vitesse constante sur le sol horizontal, les frottements étant négligés. Les interactions en jeu sont de deux sortes : interaction gravitationnelle et interaction de contact entre le solide et le plan. La première interaction est conservative, l'autre non.

Pour trouver la vitesse finale v_f du solide, il est possible de choisir plusieurs systèmes différents :

– Premier choix : le solide seul. Pour ce système, le poids et la réaction du plan sont des forces extérieures. Le théorème de l'énergie mécanique permet d'écrire :

$$\Delta E_{mec} = \Sigma(W_{ext}) \qquad \text{avec : } (\Delta E_{mec})_{solide} = \frac{1}{2} m v_f^{\,2} \qquad \text{et : } W_{ext} = mgz$$

car la réaction du plan, normale au déplacement, ne travaille pas.

– Deuxième choix : le solide + la terre, c'est-à-dire les objets responsables de l'interaction gravitationnelle. Le poids est une force intérieure au système et la réaction une force extérieure. Le théorème de l'énergie mécanique permet d'écrire :

$$(\Delta E_{mec})_{solide + terre} = \Sigma\,(W_{ext}) \qquad (\Delta E_{mec})_{solide + terre} = \frac{1}{2} m v_f^{\,2} - mgz = 0$$

• *Deuxième phase :* on tient compte du frottement solide. Il y a toujours deux interactions, l'interaction gravitationnelle qui est conservative et l'interaction de contact qui ne l'est pas.

a) Prenons tout d'abord comme état final, celui où le solide a une vitesse non nulle égale à $v < v_f$. Pour appliquer le théorème de l'énergie mécanique, on peut faire les choix suivants :

– Premier choix : le solide seul.

On a : $$\Delta E_{mec} = \Sigma(W_{ext})$$

avec : $$(\Delta E_{mec})_{solide} = \frac{1}{2} m v^2 = W_{ext} = mgz + W_{f\ frt} \qquad (4)$$

– Deuxième choix : le solide + la terre (sans le support)

$$(\Delta E_{mec})_{solide + terre} = \frac{1}{2} m v^2 - mgz = W_{ext} = W_{f\ frt} \qquad (5)$$

ce qui signifie que la variation d'énergie mécanique du système (solide + terre) est égale au travail de la force de frottement. Le théorème de l'énergie mécanique ne permet pas d'en dire plus, car il n'est plus possible, pour appliquer le théorème de l'énergie mécanique, de choisir le système complet (c'est-à-dire celui qui englobe les deux interactions) car l'interaction de contact n'est pas conservative. On est obligé de considérer dans ce cas l'énergie totale, ce qui donne (cf. plus haut) :

$$\Delta E' = \frac{1}{2}\,mv^2 - mgz + \Delta\varepsilon(T)$$

En comparant cette dernière expression à (5), il est possible d'en déduire que le travail de la force de frottement s'exerçant sur le solide est égal à la variation d'énergie d'agitation thermique du solide et du plan ; mais ce n'est pas par application du seul principe de conservation de l'énergie que l'on obtient cela.

b) Considérons maintenant qu'à l'état final, le solide est arrêté. Nous pouvons procéder comme plus haut, et écrire les mêmes relations en remplaçant partout v par sa nouvelle valeur, c'est-à-dire 0.

Ces deux exemples montrent que l'application du théorème de l'énergie mécanique implique des contraintes au niveau du choix du système sur lequel on va raisonner : les forces internes au système doivent être des forces conservatives. Cela met le doigt sur la notion de système. Quand on raisonne sur l'énergie totale, le système considéré comprend tous les objets de la situation ainsi que toutes les interactions en jeu. Lorsque l'on raisonne sur l'énergie mécanique, on choisit un système en fonction des interactions existantes, les interactions non conservatives étant forcément extérieures au système considéré, ce qui suppose de faire un tri et de considérer les objets matériels comme objets responsables d'interaction. Ainsi, dans la situation du solide qui glisse sur le plan incliné, nous sommes amenés à distinguer deux types d'interaction, l'interaction gravitationnelle et l'interaction de contact, ce qui conduit à considérer des systèmes où la zone de contact est ou non dans le système. Ceci est sans doute difficile à faire accepter aux élèves qui ont tendance à raisonner en termes d'objets bien matériels et qui risquent d'avoir du mal à dissocier la terre considérée comme «planète» d'une de ses parties, celle qui est en contact avec le solide.

Pour traiter ces deux exemples, nous n'avons jamais parlé d'énergie potentielle ou cinétique microscopique. En effet, comme le dit Feynman, nous avons des formules qui donnent une expression de l'énergie totale en fonction de variables **macroscopiques** (que l'on peut effectivement mesurer), mais ces formules ne nous donnent pas le mécanisme ou les raisons des diverses formules. Ainsi, nous avons introduit, dans nos exemples, un terme qui dépendait de la variable macroscopique température. Il est inutile, au niveau de la classe de première en tout cas, de préciser davantage, même si on sait que l'énergie d'agitation thermique est «un reflet de l'agitation chaotique des constituants du système considéré» [5]. Considérons maintenant le cas des frottements : les frottements s'expliquent à partir d'interactions microscopiques entre différentes molécules ou atomes et les lois qui permettent d'exprimer ces forces de frottement sont des lois phénoménologiques : on ne sait pas passer de l'échelle microscopique à l'échelle macroscopique bien que la force résultante de frottement s'exprime en fonction de variables macroscopiques. Pas question donc d'associer à cette force une quelconque énergie potentielle, microscopique ou non. Laisser croire que ceci est possible est une erreur et permet d'oublier l'essentiel.

Tout ce qui précède montre combien il est important de définir sans ambiguïté les termes introduits, d'insister sur la différence qu'il y a entre une formule qui permet de calculer une forme d'énergie et les éventuels modèles explicatifs associés et de savoir exactement ce que l'on fait : quel système précis est considéré, quelles interactions existent (sont-elles ou non conservatives ?) et quel théorème ou principe est appliqué, applicable ? Faire prendre conscience aux élèves que plusieurs choix de systèmes, pour le même problème physique, sont possibles, que le théorème de l'énergie mécanique n'est applicable que pour certains systèmes (ceux pour lesquels les forces intérieures sont conservatives), que l'application du principe de conservation de l'énergie ne permet pas de tout résoudre, ne peut qu'aider les élèves à maîtriser et s'approprier les «règles du jeu» : enseignants et élèves ne pourront qu'y gagner en clarté et compréhension.

REMERCIEMENTS

De nombreuses discussions avec B. ROULET ont permis de clarifier certains points. Qu'il en soit vivement remercié.

BIBLIOGRAPHIE

[1] B. DIU, C. GUTHMANN, D. LEDERER et B. ROULET : *«Physique statistique»* - Hermann, 1989.

[2] R. FEYNMAN : *«Le cours de physique de Feynman - Tome 1 : Mécanique»* - Addison-Wesley Publishing Company, 1969.

[3] M. HULIN, N. HULIN et M.VEYSSIE : *«Thermodynamique»* - Dunod, 1994.

[4] B. ROULET : *«L'énergie interne en classe de première»* - B.U.P. n° 631 - pp. 613-619.

[5] L. VALENTIN : «L'univers mécanique». Hermann, 1995.

[6] Tous les manuels de la classe de première S disponibles au 1er septembre 1996.

[7] B.O. numéro hors-série du 24 septembre 1992.