

L'énergie interne en classe de première

Les lignes qui vont suivre ont été inspirées par la lecture des manuels de première. Elles ont pour but tout d'abord de faire une critique comparée de quelques-uns de ces manuels sur le(s) chapitre(s) qui traite(nt) de l'énergie interne et du premier principe de la thermodynamique, mais surtout de rappeler quelques points rarement explicités et qui sont indispensables à la compréhension et à la résolution d'exercices.

Pour la clarté de l'exposition, rappelons qu'on appelle : *énergie mécanique d'un corps* : la somme de son énergie cinétique et de son énergie potentielle. Au niveau de la classe de première, l'énergie potentielle est de deux types : énergie potentielle élastique (ressort, fil de torsion) et énergie potentielle de pesanteur. Dans ce dernier cas, rappelons que lorsqu'on parle d'énergie potentielle d'un corps pesant, on parle en fait de l'énergie potentielle d'interaction du *système corps - terre*.

I. DEFINITION DE L'ENERGIE INTERNE.

Avant toute discussion, donnons les définitions suivantes [1] :

énergie totale d'un système E_T : c'est la somme des énergies cinétiques et potentielles de toutes les particules du système,

énergie interne d'un système U : c'est l'énergie totale d'un système, mesurée dans un repère dans lequel le système est « macroscopiquement au repos ».

Cette dernière définition appelle les remarques suivantes :

- (i) on trouve habituellement l'expression « dans lequel le centre de masse du système est au repos ». La formulation proposée ci-dessus est préférable puisqu'elle élimine les repères dans lesquels le système serait en rotation autour du centre de masse et certains systèmes hors d'équilibre (gaz en expansion par exemple),
- (ii) insistons une fois de plus : quand on parle d'énergie potentielle des particules, il s'agit de l'énergie *potentielle d'interaction* de toutes les particules prises deux à deux,
- (iii) en toute rigueur, la thermodynamique définit comme énergie interne la valeur moyenne de l'énergie totale, moyenne

prise sur tous les états compatibles avec les contraintes imposées au système. En fait, la mécanique statistique nous apprend que tout écart à cette moyenne est hautement improbable pour les systèmes macroscopiques et cette restriction est, en pratique, sans importance.

Il est alors facile de montrer que l'énergie totale d'un système, mesurée dans un repère quelconque est la somme de son énergie interne et de son énergie cinétique globale E_c :

$$E_T = U + E_c.$$

Dans le cas d'un repère en translation par rapport au repère dans lequel le système est au repos, la démonstration est tout à fait accessible à un élève de première. Un seul manuel [3] le signale.

En aucun cas, l'énergie totale n'est la somme de l'énergie interne et de l'énergie mécanique [2, 3, 4] :

- cela est tout à fait clair dans le cas de l'énergie potentielle élastique : l'énergie potentielle d'un ressort n'est autre que la somme des énergies potentielles des particules constituant. En tenir compte pour le calcul de l'énergie totale à la fois par l'énergie interne et par l'énergie mécanique revient à compter deux fois le même terme,
- cela peut paraître moins évident dans le cas de l'énergie potentielle de pesanteur ; on pourrait penser pouvoir séparer l'énergie potentielle d'interaction des particules du système (qu'on compterait dans l'énergie interne) de l'énergie potentielle de pesanteur (comptée dans l'énergie mécanique). Outre que cette façon de voir fait jouer à l'énergie potentielle de pesanteur un rôle différent de celui que joue l'énergie potentielle élastique, elle est à rejeter car incohérente : en effet, il faut savoir quel système on considère ; ou bien le système est l'ensemble corps-terre et alors l'énergie potentielle de pesanteur est comprise dans l'énergie interne, ou bien le système est le corps isolé, et il n'a pas à proprement parler d'énergie potentielle de pesanteur.

La confusion vient donc de ce qu'on n'a pas pris la peine de définir proprement le système. Cette confusion est à la source de nombreuses erreurs en thermodynamique. En effet, *contrairement au théorème de l'énergie cinétique*, qui prend en compte le travail de toutes les forces aussi bien intérieures qu'extérieures, le premier principe de la thermodynamique ne prend en compte que les échanges avec *l'extérieur*. La définition du « système » et de « l'extérieur » devient alors essentielle ; dans le cas du sys-

tème corps + Terre, la pesanteur est une force *intérieure* (1), dans le cas du corps isolé, elle devient une force *extérieure*.

II. LE PREMIER PRINCIPE DE LA THERMODYNAMIQUE ET SES APPLICATIONS.

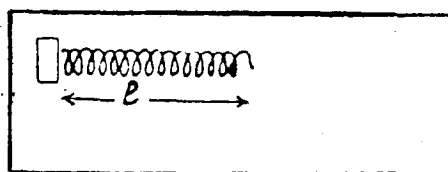
Compte tenu du paragraphe précédent, le premier principe de la thermodynamique s'énonce sans ambiguïté :

l'énergie interne d'un système est une fonction d'état. Sa variation entre deux états de repos macroscopique est égale à la somme des travaux des forces extérieures qui lui sont appliquées et de la chaleur reçue au cours de la transformation.

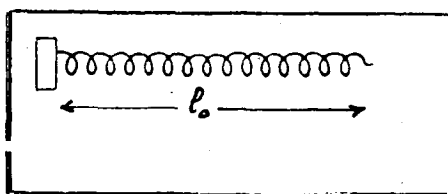
Notons l'expression « travail des forces extérieures » (adoptée par la plupart des manuels) qui fixe automatiquement le signe du travail, le signe de la chaleur est fixé par analogie. Toute application de ce principe suppose donc un *choix précis* du système auquel on l'applique. Dans le cas où plusieurs choix sont possibles, ils doivent tous conduire aux mêmes prévisions physiques.

Prenons quelques exemples (volontairement schématiques et sans nous embarrasser de considérations physiques extérieures à notre propos).

1) Ressort comprimé (dans le vide).



état initial



état final

(1) Mais attention alors à des expressions du genre : « l'énergie interne d'un gaz parfait ne dépend que de la température », dans ce cas, elle dépend *aussi* de l'altitude.

On coupe la ficelle qui maintient le ressort comprimé, le ressort oscille avant de prendre sa position d'équilibre. On cherche à calculer l'échauffement du ressort.

Dans ce cas, le système est défini sans ambiguïté, c'est le ressort. Entre l'instant initial et l'instant final, il n'est soumis à aucune force extérieure et n'est en contact thermique avec aucun corps extérieur, il n'a donc reçu ni travail (sinon celui, négligeable, qu'a dû fournir l'opérateur pour couper la ficelle), ni chaleur. La variation d'énergie interne est donc nulle :

$$\Delta U = U_f - U_i = 0.$$

Il est donc correct de dire que ce système isolé a perdu de l'énergie mécanique, mais *incorrect d'affirmer* [2, 5] *qu'il a gagné de l'énergie interne*.

Pour ramener le ressort dans l'état initial, il faut le comprimer, l'opérateur doit exercer une force égale et opposée à la force élastique exercée par le ressort et lui fournir un travail [6] :

$$W = \frac{1}{2} k (l - l_0)^2$$

il faut aussi le mettre en contact avec un thermostat à la température initiale de la part duquel il recevra une quantité de chaleur :

$$Q = mc (T_i - T_f).$$

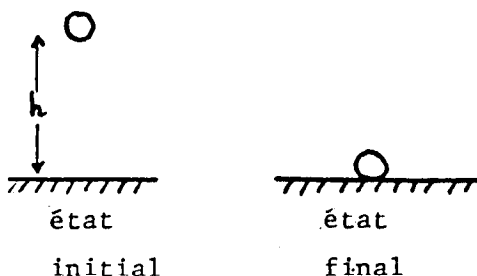
Le système a alors décrit un cycle pour lequel :

$$\Delta U + Q + W = 0 \text{ d'où on déduit } (T_f - T_i).$$

2) Bille qui tombe d'une hauteur h sur le sol.

On suppose pour simplifier que seule la bille s'échauffe au cours du choc. Cette fois, deux choix sont possibles :

(i) SYSTÈME 1 $\equiv$ BILLE SEULE.



La force de pesanteur est alors une force extérieure et :

$$U_f^1 - U_i^1 = \Delta U_1 = mgh.$$

Pour la ramener dans son état initial, il faut mettre la bille en contact avec un thermostat à la température T_i et éventuellement la remonter à son point de départ (c'est en fait inutile car l'état du système bille n'est pas fonction de l'altitude), elle est alors soumise à deux forces égales et opposées de la part de la Terre et de l'opérateur dont le travail total est nul. On en déduit comme pour le ressort :

$$\Delta U_1 + Q = 0 \quad \text{d'où :} \quad (T_f - T_i).$$

(ii) **SYSTÈME 2 $\equiv$ BILLE + TERRE.**

La force de pesanteur est alors une force intérieure et :

$$\Delta U_2 = 0.$$

Là encore, le système isolé bille + Terre a perdu de l'énergie mécanique, mais n'a pas pour autant gagné de l'énergie interne [2, 5].

Pour remettre le système dans son état initial, on doit cette fois obligatoirement remonter la bille à la hauteur h en lui fournissant le travail :

$$W = mgh$$

(seul l'opérateur exerce une force extérieure) et la mettre comme précédemment en contact avec le thermostat. On en déduit :

$$\Delta U_2 + W + Q = 0$$

ce qui donne le même échauffement $(T_f - T_i)$ que le choix (i).

3) Bille suspendue à un ressort comprimé (dans le vide).

Cette fois trois choix sont possibles :

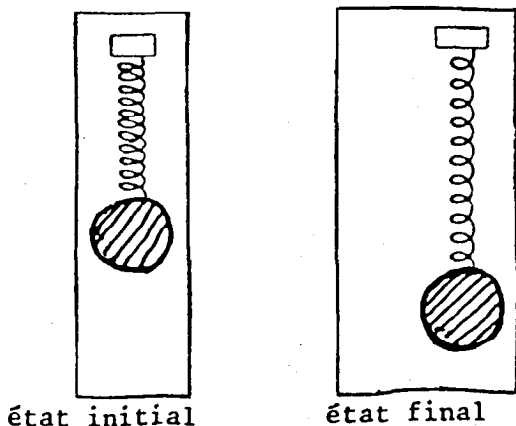
système 1 : bille seule,

système 2 : bille + ressort,

système 3 : bille + ressort + Terre.

Le lecteur vérifiera facilement que les variations d'énergie interne des trois systèmes sont différentes mais conduisent toutes les trois au même échauffement (2).

(2) Remarquons qu'en l'absence de tout frottement, si on veut étudier le mouvement de la bille par conservation de l'énergie mécanique, on ne peut le faire qu'en appliquant cette conservation à un système isolé (système 3) et en négligeant la variation de l'énergie cinétique du ressort (parce que sa masse est nulle), et celle de l'énergie cinétique de la Terre (parce que sa masse est infinie !)



CONCLUSION.

Nous avons essayé de montrer l'importance de la notion de système dans les applications du premier principe de la thermodynamique. En particulier, toute solution d'un exercice (même si elle donne le résultat juste !) est sans valeur si elle ne commence pas par préciser le système auquel elle s'applique.

D'autre part, il est très pédagogique de montrer que plusieurs choix sont possibles et conduisent au même résultat : ce n'est qu'en voyant fonctionner le raisonnement sur plusieurs de ces choix qu'un élève comprendra vraiment la différence entre intérieur et extérieur et pourra donc apprendre à raisonner correctement (ceci est d'ailleurs aussi vrai pour un étudiant de licence et de maîtrise que pour un élève de première). Il est donc étonnant que peu de manuels insistent sur ces notions (qui sont tout à fait dans l'esprit du programme où l'énergie interne vient immédiatement après l'énergie mécanique) et qu'aucun ne traite au moins *un même* exemple en raisonnant sur *deux* systèmes différents.

Enfin, dans le cas où plusieurs choix sont possibles (cas où intervient la pesanteur, par exemple) lequel conseiller aux élèves ? C'est probablement le système le plus large qui donnera les meilleurs résultats (système incluant la Terre ; système (2) dans l'exemple 2 ; système (3) dans l'exemple 3) : le travail des forces extérieures se ramène alors au travail effectué par un opérateur extérieur. L'élève doit alors seulement répondre à la question : « qu'est-ce que je dois faire pour... ? » C'est aussi ce système qui est le mieux adapté à l'étude de problèmes thermodynamiques dans des champs variables, mais ceci est (encore) en dehors du programme de première...

REFERENCES

- [1] F. REIFF. — *Physique statistique*. Cours de Physique de Berkeley, Tome V. Armand Colin éditeur.
- [2] R. CHARLOT, J. GOUGEAU, C. WALTER. — *Fondements de la Physique*. 1^{re} C.E. Collection A. Cros. Eugène Belin éditeur.
- [3] G.R.E.P. — *Dictionnaire de Physique et de Chimie*. Tome 2 : 1^{res} C. D.E. Hachette éditeur.
- [4] A.-M. DEGURSE, L. ROSENFELD-GIPCH, L. SOULIÉ, T. ZEMB. — *Physique*. 1^{res} C.D.E. Hatier éditeur.
- [5] A SAISON, G. ALLAIN, M. BLUMEAU, C. HERCHEN, R. MERAT, J. NIARD. — *Physique*. 1^{res} C.E. Fernand Nathan éditeur.
- [6] *On suppose ici k indépendant de la température* : voir J.-P. BARRAT et G. GUINIER. B.U.P. n° 627, p. 115 (1980).
- [7] P. BOTTARO, E. CUPISSOL, J. LACOURT, L. ROUZAUT. — *Physique*. 1^{res} C. D.E. Collection J. Lacourt. Armand Colin éditeur.

Bernard ROULET,
(Université Paris VII).