

Bilans énergétiques : une mise au point conceptuelle

par Ugo BESSON
Lycée italien «Leonardo da Vinci»
12, rue Sédillot - 75007 Paris

RÉSUMÉ

Les concepts nécessaires pour établir les bilans énergétiques deviennent très délicats à manipuler dans les situations dans lesquelles il y a des objets en mouvement et en même temps des variations de température et/ou des échanges de chaleur. Il y a alors l'exigence d'une clarification des notions de travail, de chaleur, d'énergie (interne, potentielle, etc.) et des relations entre les niveaux macroscopique et microscopique.

Dans cet article je propose d'abord mon point de vue sur la définition d'énergie interne et sur la distinction entre travail et pseudotravail et entre travail et chaleur. Ensuite je traite le problème des bilans énergétiques en présence du frottement. J'essaie, entre autre, de démontrer que le travail total des forces de frottement, et plus en général des forces non conservatives, est toujours égal à zéro.

1. INTRODUCTION

Les concepts nécessaires pour établir les bilans énergétiques deviennent très délicats à manipuler dans certaines situations, à la frontière entre la mécanique et la thermodynamique.

Il s'agit des situations dans lesquelles il y a des objets macroscopiques en mouvement et en même temps des variations de température et/ou des échanges de chaleur.

On ressent alors l'exigence d'une clarification concernant les notions de travail, de chaleur, d'énergie (interne, potentielle, etc.) et les relations complexes entre les niveaux macroscopique et microscopique.

L'existence de cette exigence est bien montrée d'ailleurs par le nombre d'articles parus sur ce sujet dans le BUP (réf. [4], [5], [10], [11], [20], [23], [26], [27]) et dans

l'*American Journal of Physics* (réf. [12], [21], [22], [24], [28], [29], [31]). Et surtout par le fait que ces articles ne sont pas toujours en accord entre eux.

Les articles publiées dans l'*American Journal of Physics* ont donné une contribution importante et ont clarifié et résolu beaucoup de points obscurs. C'est pour cela que je m'appuierai largement sur ces résultats par la suite.

Mais le sujet n'est pas épuisé.

Les points faibles me semblent surtout les suivants :

- définir quels types d'énergie macroscopique font partie de l'énergie interne,
- la distinction entre travail et chaleur,
- comment traiter le travail des forces de frottement.

Dans cet article je proposerai d'abord mon point de vue sur la définition de l'énergie interne, ensuite je présenterai quelques définitions et résultats fondamentaux concernant le travail et l'énergie des systèmes de points, enfin j'aborderai le problème des bilans énergétiques en présence du frottement. J'essayerai, entre autres, de démontrer que le travail total des forces de frottement, et plus en général des forces non conservatives, est toujours égal à zéro.

2. L'ÉNERGIE INTERNE

En ce qui concerne la définition d'énergie interne, on discute et on dispute s'il faut y retenir aussi l'énergie cinétique et l'énergie potentielle macroscopique.

Sur ce point je concorde dans l'essentiel avec d'autres auteurs qui ont déjà abordé ce sujet dans le BUP, par exemple ROULET (1981) et SALTIEL (1997).

Je considère comme faisant partie de l'énergie interne *toute énergie que possède le système dans un référentiel galiléen dans lequel le centre de masse a vitesse nulle, à un instant donné*. J'appellerai ce référentiel *le référentiel galiléen du centre de masse du système*. Si le centre de masse a un mouvement accéléré, ce référentiel changera d'un instant à l'autre.

L'énergie potentielle est prise en compte si les objets en interaction appartiennent tous deux au système. Par exemple, l'énergie potentielle gravitationnelle entre la Terre et un livre fera partie de l'énergie interne du système Terre + livre, mais ne fera pas partie de l'énergie interne du livre. Et elle ne fera pas partie non plus de l'énergie totale du

livre : elle n'existe que comme énergie interne *appartenant à l'ensemble des deux objets en interaction*.

L'énergie totale, ou l'énergie tout court, du système sera alors la somme de l'énergie interne U et de l'énergie cinétique du mouvement de translation du centre de masse du système $K_o = \frac{1}{2} Mv^2$.

$$E = U + K_o \quad (1)$$

L'énergie cinétique des objets appartenant au système, dans le référentiel du centre de masse du système, est comptabilisée dans l'énergie interne du système.

Par exemple, si l'on veut étudier le choc entre deux balles, leur énergie cinétique fera partie de l'énergie interne du système formé par les deux balles, mais pas du système comprenant une balle seule.

On aura alors pour chacune des deux balles 1,2 :

$$E_1 = U_1 + K_{o1} \quad ; \quad E_2 = U_2 + K_{o2} \quad (2)$$

Et pour le système des deux balles :

$$E = E_1 + E_2 + \phi_{12} \quad (3)$$

ϕ_{12} étant l'énergie potentielle mutuelle de l'interaction entre les deux balles, *qui sera nulle avant et après l'interaction*. Introduisant les équations (1) et (2) dans la (3) on obtient :

$$E = U + K_o = U_1 + U_2 + K_{o1} + K_{o2} + \phi_{12} \quad (4)$$

Dans cette équation, même dans le cas où $\phi_{12} = 0$, on ne peut pas égaliser séparément U à $U_1 + U_2$ ni K_o à $K_{o1} + K_{o2}$. Si l'on se met dans le référentiel galiléen du centre de masse du système des deux balles, la quantité K_o est nulle, tandis que K_{o1} et K_{o2} ne le sont pas, en général.

Les équations précédentes ont une validité plus générale que celle du cas spécifique des deux balles. Elles s'appliquent bien à toutes les situations, simples mais importantes, dans lesquelles il est utile de diviser un système en deux sous-systèmes, éventuellement en interaction entre eux.

Si cette interaction a une durée limitée dans le temps et si l'on considère comme état initial celui du système avant le début de l'interaction et comme état final celui après la fin de l'interaction, on peut dire qu'on considère une *interaction complète* entre

les deux sous-systèmes. Dans le cas de forces dérivant d'un potentiel, on a alors $\phi_{12} = 0$ dans l'état initial et dans l'état final, et donc évidemment aussi $\Delta\phi_{12} = 0$. C'est le cas d'un choc entre deux particules, par exemple. La quantité $-\Delta\phi_{12}$ étant égale, par définition, à la somme des travaux des deux forces d'interaction F_{12} , F_{21} , on peut conclure que *dans une interaction complète le travail total des forces de l'interaction est égal à zéro.*

La démarche et les définitions qu'on vient de proposer s'imposent, à part les autres motivations qui existent, parce que la distinction entre microscopique et macroscopique peut devenir bien difficile à gérer et à définir, dans certains cas. Et il existe bien des phénomènes mésoscopiques, tel que les frottements, qui brouillent le jeu. Autant alors mettre dans l'énergie interne toutes les énergies, qu'elles soient macroscopiques ou microscopiques, cinétiques ou potentielles, pourvu qu'elles soient interne au système, ce qui d'ailleurs ne pose aucun problème et rend tout le discours beaucoup plus linéaire et clair.

D'ailleurs rien n'empêche de faire ensuite une analyse des différents types d'énergie qui composent l'énergie interne d'un système donné, de distinguer ce qui est macroscopique ou microscopique, cinétique ou potentielle, comme nous avons commencé à le faire dans l'exemple des deux balles.

Mais cela n'est pas obligatoire, et surtout ne rentre pas dans notre définition d'énergie interne, qui est très simple et glisse bien de la mécanique à la thermodynamique sans changements notables. Et qui permet d'étudier de façon simple les cas simples, tout en permettant de bien aborder les cas plus compliqués. Ce qui me semble très important du point de vue didactique.

D'ailleurs il ne faut pas trop faire de subtilités, à mon avis, car finalement la grandeur importante et physiquement la plus significative est l'énergie (totale) du système.

A bien regarder, l'utilité de la grandeur énergie interne est justement dans la possibilité d'en parler et d'en calculer les variations sans bien connaître tout ce qui se passe à l'intérieur du système, car ses variations ne dépendent que des échanges avec l'extérieur. C'est le premier principe de la thermodynamique,

$$W + Q = \Delta E = \Delta(U + K_o) \quad (5)$$

qui dans le référentiel galiléen du centre de masse du système devient :

$$W + Q = \Delta U \quad (6)$$

Si l'on change la définition de l'énergie interne, il faut modifier cette loi et compliquer les choses avec des ajouts et des distinctions, qui, à ce premier niveau d'analyse, sont inutiles.

En plus, notre définition me semble la seule cohérente avec l'idée d'*emboîtement de structures* ou de *décomposition hiérarchique*, qui est à la base de la description de la physique. Pour expliquer ce point, reprenons l'exemple des deux balles prêtes au choc. Les équations écrites restent valables même si, au lieu de deux balles, on met deux grandes boîtes dans chacune desquelles il y a deux balles qui vont se choquer. Et encore si l'on considère le choc entre deux boîtes, dans chacune desquelles il y a un choc entre deux boîtes, dans chacune desquelles il y a un choc entre deux balles. Et l'on pourrait bien continuer. A chaque niveau il y a une énergie interne de la boîte qui comprend l'énergie de tout ce qui est à l'intérieur d'elle, dans le référentiel de son centre de masse. On peut bien considérer cette énergie, sans savoir exactement ce qui se passe à l'intérieur de la boîte, où s'arrête cet emboîtement et où commence le microscopique.

On a objecté (cf. par exemple [23]) que, avec ces choix l'énergie interne deviendrait une grandeur en général non additive. C'est effectivement le cas, l'énergie interne n'est pas en général une grandeur additive, tout comme, d'ailleurs, l'énergie tout court. Et comme, en relativité restreinte, la masse (cf. [33], § 5.6). Cette conclusion pourrait gêner peut-être ceux qui veulent garder une idée de l'énergie comme une substance, un fluide, mais je pense que cette idée n'est pas vraiment importante pour la compréhension physique.

Ce qui n'empêche que dans beaucoup de situations typiques de la thermodynamique elle peut bien être considérée comme si elle était additive.

Une fois tout cela bien établi, et bien ancré dans les idées de l'élève, il ne faut pas le prendre trop dogmatiquement. Il vaut mieux, le cas échéant, savoir l'adapter à des situations spécifiques.

Considérons par exemple une interaction entre deux objets de taille énormément différente, dans laquelle nous sommes intéressés surtout aux effets sur l'objet petit. C'est le cas de la pierre qui tombe par la gravité de la Terre ou d'une particule chargée qui passe entre les plaques d'un condensateur. On peut alors considérer l'objet grand comme ayant masse infinie et restant tout à fait indifférent aux déplacements de l'objet petit, ce qui signifie que son énergie n'est pas affectée du tout et qu'on peut prendre en considération *le petit objet seul dans un champ extérieur*. On pourra alors parler, comme l'on fait même trop souvent dans les textes, de l'énergie potentielle du petit objet due au champ, gravitationnel ou électrique. Il s'agit d'un abus de langage, mais pas trop grave, si l'on fait bien attention à prévenir les élèves.

Toujours est-il qu'on peut éviter ce type de tournure et continuer à parler de l'énergie potentielle du système des deux objets ou s'exprimer en termes de travail et de *potentiel des forces extérieures*, plutôt que d'énergie potentielle de l'objet.

3. TRAVAIL ET ÉNERGIE DANS UN SYSTÈME DE POINTS MATÉRIELS

Rappelons quelques résultats concernant les relations entre travail et énergie en mécanique non relativiste des systèmes de points.

Par intégration de la loi de Newton, appliquée à un point matériel de masse m , sur lequel agissent les forces F_i , on obtient les équations de l'impulsion et de l'énergie cinétique :

$$\int \sum F_i dt = mv_2 - mv_1 \quad (7)$$

$$\int \sum F_i \cdot ds = \frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2 \quad (8)$$

La généralisation à un système de points en interaction, avec des forces intérieures obéissant à la loi des actions réciproques, conduit à deux équations dans lesquelles ne figurent que les forces extérieures et des grandeurs relatives au centre de masse (M est la masse totale du système, v_c et ds_c sont la vitesse et le déplacement du centre de masse) :

$$\int \sum F_{ext} dt = Mv_{c2} - Mv_{c1} \quad (9)$$

$$\int \sum F_{ext} \cdot ds_c = \frac{1}{2}Mv_{c2}^2 - \frac{1}{2}Mv_{c1}^2 \quad (10)$$

La première de ces équations ne pose pas de problèmes, parce que le temps dt y est le même pour tous les points du système. Elle exprime l'égalité bien connue entre l'impulsion totale des seules forces extérieures et la variation de la quantité de mouvement du centre de masse, dans lequel on pense être concentrée toute la masse du système.

La seconde, au contraire, favorise une ambiguïté, car son terme de gauche *semble être un travail*, mais il ne l'est que si tous les déplacements ds sont égaux entre eux et à celui du centre de masse, ce qui n'arrive que dans le cas d'un corps rigide en translation. La définition de travail impose de calculer le produit scalaire entre la force et le déplacement du point d'application de la force. Dès qu'il y a une déformation ou une rotation, le terme à gauche de l'équation ne représente pas le travail des forces extérieures.

On ne peut pas dire, donc, que la variation de l'énergie cinétique du centre de masse est égale au travail des forces extérieures, ni d'ailleurs que ce travail est égal à la variation de l'énergie cinétique totale du système.

Et pourtant l'équation (10) est exacte. C'est son interprétation qui peut être fautive. Étant donné qu'elle peut bien être utile, il ne faut pas la jeter à la poubelle, mais faire un effort de clarté, en donnant un autre nom spécifique à cette grandeur, *produit de la résultante des forces extérieures et du déplacement du centre de masse*. On a déjà proposé *pseudotravail*, *pseudowork* en anglais (PENCHINA 1978, SHERWOOD 1983, ARONS 1990, LEFF & MALLINCKRODT 1992, SOUSA & PINA 1997), ou travail sur le centre de masse (HALLIDAY & RESNICK 1988). Je suivrai ici le premier choix, avec la notation W_{ps} .

On dira alors que la variation de l'énergie cinétique du centre de masse ΔK_o est égale au pseudotravail, et l'équation (10) devient *l'équation du centre de masse* ou *l'équation du pseudotravail* :

$$W_{ps} = \Delta K_o \quad (11)$$

La relation véritable entre travail total et énergie donne :

$$W_{tot} = W_{ext} + W_{int} = \Delta K \quad (12)$$

C'est-à-dire le travail des forces intérieures et extérieures est égal à la variation de l'énergie cinétique totale. Si l'on décompose l'énergie cinétique en la somme de celle du mouvement de translation du centre de masse K_o et celle dans le référentiel du centre de masse K_{int} , on a :

$$W_{tot} = W_{ext} + W_{int} = \Delta K_o + \Delta K_{int} \quad (13)$$

Dans cette équation il n'est pas possible de séparer les deux quantités en addition de chaque côté et les égaliser une à une : travail des forces extérieures égal à ΔK_o et travail des forces intérieures égal à K_{int} .

En isolant, dans la (12), le travail des forces extérieures, on a :

$$W_{ext} = \Delta K - W_{int} = \Delta K + \Delta \phi_{int} = \Delta E \quad (14)$$

Dans ce dernier passage on a fait l'hypothèse que les forces intérieures dépendent toutes d'un potentiel, c'est-à-dire qu'elles sont toutes conservatives, et donc leur travail est égal à l'opposé de la variation de leur énergie potentielle ϕ_{int} .

On peut se demander : mais alors les forces non conservatives ? Les forces de frottements ? Sont-elles négligées ?

La réponse pourrait être celle donnée par Feynman ([15] § 14-4), c'est-à-dire simplement que les forces non conservatives n'existent pas. En effet, à un niveau fondamental, microscopique, toutes les forces sont conservatives. D'ailleurs, s'il n'en était pas ainsi, la loi de conservation de l'énergie ne serait pas valable. Les forces de frottement sont une représentation macroscopique, assez grossière, de phénomènes complexes à petite échelle, *mésoscopique*, effet d'interactions microscopiques en tout cas conservatives. On reviendra sur cet aspect important.

Donc les équations (13) et (14) nous disent que le travail des forces extérieures est égal à la variation de l'énergie (totale) du système, tandis que le travail de toutes les forces (intérieures et extérieures) est égal à la variation de la seule énergie cinétique (totale).

Beaucoup de problèmes ont leur origine dans la confusion entre travail et pseudo-travail et dans la conviction répandue que le travail des forces extérieures est égal à la variation de l'énergie cinétique du centre de masse. Par exemple, il peut sembler impossible que l'énergie cinétique du centre de masse varie, alors que le travail des forces extérieures est nul. Et pourtant il est bien possible de faire arrêter ou démarrer un objet sous l'action de forces extérieures qui font un travail nul ou presque nul (cf. [17], [22], [24], [28]).

Exemples typiques : un garçon sur des patins à roulettes s'arrête en s'appuyant sur une paroi ou repart en poussant contre la paroi. Dans ce cas les points d'application des forces extérieures sont tous sur la paroi qui reste immobile, donc leur travail est nul¹.

Un autre cas typique est celui d'une voiture : la force externe qui cause l'accélération et la force de frottement statique entre pneus et route. Il s'agit de frottement statique, le point de contact ne glisse pas sur la route et sa vitesse instantanée est perpendiculaire à la route et à la force de frottement, donc le travail est nul.

Ce qu'on calcule souvent dans ces cas est le *pseudotravail*, qui, lui, effectivement n'est pas nul, étant égal au produit entre la force extérieure et le déplacement du centre

1. Ou presque, si l'on considère les petites déformations de la paroi. Ou si l'on se pose dans le référentiel du centre de masse du système garçon + paroi + bâtiment (+ Terre ?), et l'on considère le déplacement de la paroi, qui prendrait une vitesse mv/M ou $mv/(M + m)$, selon le cas du garçon qui démarre ou qui s'arrête. Mais, étant $M \gg m$, on peut bien négliger tout cela et en tout cas cette petite correction n'affecterait pas le résultat que le travail de la force extérieure est, sinon égal à zéro, beaucoup plus petit que la variation d'énergie cinétique du centre de masse.

de masse. Et, dans les exemples du garçon sur les roulettes et de la voiture, ce déplacement justement n'est pas nul et il est parallèle à la force.

Dans tous ces cas le travail est nul, ou presque, mais pas l'impulsion, ce qui explique bien la variation de la quantité de mouvement du système.

La différence ici importante entre l'impulsion et le travail est due au fait que l'impulsion des forces intérieures est toujours nulle, tandis que leur travail peut bien ne pas être nul, car les déplacements des points d'applications sont différents entre eux.

Un autre exemple intéressant : deux ressorts identiques A, B sont lancés l'un contre l'autre à la même vitesse. Après le contact ils ralentissent et à un certain instant ils auront vitesse nulle. Considérons le système formé par le seul ressort A : son énergie cinétique diminue jusqu'à zéro, mais le travail de la force extérieure, exercée par l'autre ressort, est nul, étant nul le déplacement de son point d'application, qui est le point de contact entre les deux ressorts. Donc le travail des forces extérieures n'est pas égal à la variation de l'énergie cinétique. Le pseudotravail, au contraire, n'est pas nul, car le déplacement du centre de masse du ressort A n'est pas nul², et il est égal à la variation de l'énergie cinétique.

4. TRAVAIL ET CHALEUR

Dans les formules trouvées au § 3. on n'a pas fait de distinction entre le microscopique et le macroscopique. Le système est modélisé par un ensemble de points matériels, c'est-à-dire de sous-systèmes dont on peut négliger les variations d'énergie interne. On peut accepter cette modélisation si les phénomènes étudiés ne produisent pas des interactions avec les degrés de liberté internes des sous-systèmes. Si ce n'est pas le cas, il faut *aller à l'intérieur* des sous-systèmes et envisager un autre niveau, de plus petite échelle, et y définir des nouveaux points matériels : billes, particules de fluide, molécules, atomes...

Mais si l'on veut étudier des situations dans lesquelles sont impliquées des variations de température et/ou des échanges de chaleur, il faut introduire une distinction entre travail et chaleur. On entre alors dans le domaine de la thermodynamique.

-
2. Le déplacement du centre de masse est égal à la moitié du déplacement de l'extrémité libre du ressort, donc à la moitié de la variation de la déformation du ressort : $dx_c = dx / 2$. La force exercée par un ressort sur l'autre est $F = 2k \cdot x$, k étant la raideur. Le pseudotravail est alors $W_{ps} = \int F \cdot dx_c = \int 2kx \cdot dx / 2 = \int kx dx = \frac{1}{2} kx^2$.

D'un point de vue mécaniste, réductionniste, les équations du § 3. s'appliquent bien toujours, il s'agit simplement (si l'on peut dire !) de distinguer la partie du travail des forces extérieures à traiter comme une chaleur.

En effet, du point de vue microscopique, la conduction de chaleur est un échange d'énergie dû aux interactions entre les atomes ou les molécules des deux objets, proches de la zone de contact. Ce sont en général des interactions de courte durée pendant lesquelles les particules d'un objet 1 exercent des forces sur les particules de l'objet 2, en faisant un travail, dont la somme sur toutes les interactions de ce type dans un intervalle de temps donné constitue la chaleur Q_{12} donnée par l'objet 1 à l'objet 2.

Avec cette distinction, le terme W_{ext} se sépare en la somme du travail de type travail $W_t = W$ et le travail de type chaleur $W_q = Q$. La (14) devient alors :

$$W_{ext} = W + Q = \Delta E = \Delta U + \Delta K_o \quad (15)$$

On voit bien que dans cette démarche la conservation de l'énergie et le premier principe de la thermodynamique découlent de l'hypothèse que *toutes les forces intérieures sont conservatives*. On reviendra sur cette hypothèse.

Mais le problème demeure de distinguer entre chaleur et travail ou, dans la démarche réductionniste, entre travail de type travail et de type chaleur.

C'est la différence entre chauffer par la main un objet froid en le touchant et le déplacer en le poussant. Au fond, au niveau microscopique, il s'agit dans les deux cas d'une interaction entre les molécules superficielles de la main et de l'objet, mais l'effet y est bien différent.

En effet cette distinction, évidente dans la plupart des situations typiques, devient difficile dans certains cas critiques. Mais on ne peut pas s'en passer, étant donné que justement sur elle se fonde le deuxième principe de la thermodynamique. Malgré qu'on puisse envisager pour elle un rôle moins important, en abordant la thermodynamique par les concepts d'énergie et d'entropie plutôt que par ceux de travail et chaleur (cf. [6]). On voit là souvent un héritage fossile de l'origine historique de la thermodynamique, liée aux moteurs thermiques et aussi à la théorie du fluide calorique.

Le sujet est traité dans les textes de thermodynamique et a été longtemps débattu.

Les cas d'interactions entre la radiation et la matière sont parmi les plus difficiles. On parle de transmission de chaleur par rayonnement entre deux objets à différente température. Mais dans le cas du rayonnement laser l'énergie absorbée par la matière pourrait bien être classée comme travail, étant donnée la cohérence de l'interaction et la

possibilité de transformer cette énergie en travail mécanique avec un rendement proche du 100 % (cf. [19]).

Écrivons maintenant les bilans énergétiques pour la situation de deux objets en interaction entre eux. Soient K_{01}, K_{02} les énergies cinétiques des deux objets, Q_1, Q_2 et W_1, W_2 les chaleurs et les travaux fournis par l'extérieur aux deux objets, W_{12}, W_{21} les travaux des forces entre les deux objets, Q_{12}, Q_{21} les chaleurs échangées entre les deux objets. Le premier principe de la thermodynamique appliqué à chaque objet s'écrit :

$$\Delta E_1 = \Delta(U_1 + K_{01}) = W_1 + Q_1 + W_{21} + Q_{21} \quad (16)$$

$$\Delta E_2 = \Delta(U_2 + K_{02}) = W_2 + Q_2 + W_{12} + Q_{12} \quad (17)$$

Pour l'ensemble des deux objets on a :

$$\Delta E = \Delta(U + K_0) = W_1 + W_2 + Q_1 + Q_2 \quad (18)$$

Il faut rappeler que $E = E_1 + E_2 + \phi_{12}$, ϕ_{12} étant l'énergie potentielle mutuelle de l'interaction entre les deux objets.

5. BILANS ÉNERGÉTIQUES EN PRÉSENCE DU FROTTEMENT

Considérons un objet sur une table horizontale. On tire l'objet par une force constante F_1 , de façon à ce que, à cause du frottement, il se déplace à vitesse constante par rapport à la table, qui est tenue immobile dans un référentiel galiléen par une force F_2 . Dans la figure 1 sont représentées les forces agissant. Étant donné que la vitesse de l'objet est constante et que la table est immobile, la loi de Newton nous dit que $F_1 + F_{21} = 0$ et $F_2 + F_{12} = 0$. Il est aussi $F_{12} + F_{21} = 0$, par la loi des actions réciproques, et donc $F_2 = -F_1$.

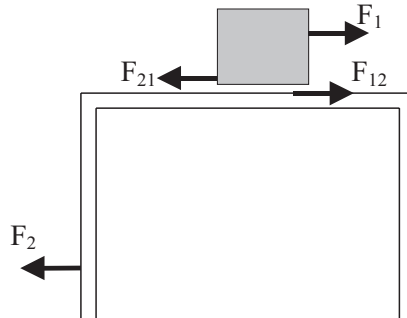


Figure 1

Faisons les bilans énergétiques :

- a) Système : table + objet. La force F_2 ne fait pas de travail parce que la table est immobile, la force F_1 fait un travail $W_1 = F_1 \cdot \Delta x$, positif, donc l'équation de l'énergie nous donne $W_1 + Q = \Delta U + K_o$. L'énergie cinétique K_o étant constante, cette équation explique bien le fait qu'il y a une augmentation de la température de l'objet et de la table, donc $\Delta U > 0$, et éventuellement de la chaleur cédée à l'air ($Q < 0$).
- b) Système : objet seul. La force F_1 fait un travail positif $W_1 = F_1 \cdot \Delta x$, la force de frottement F_{21} fait un travail négatif $W_{21} = F_{21} \cdot \Delta x = -W_1$. Le travail total des forces extérieures agissant sur l'objet est donc zéro, ce qui est bien cohérent avec la constance de la vitesse et de l'énergie cinétique de l'objet. Tout va bien, semble-t-il. Mais l'on sait qu'il y a un réchauffement de l'objet. D'où vient alors l'énergie nécessaire à produire ce réchauffement ? Mystère et scandale ! L'énergie ne se conserve pas ?
- c) Système : table seule. Les forces agissant sur la table ne font pas de travail, car la table demeure immobile. Mais elle aussi se réchauffe : d'où vient l'énergie produisant ce réchauffement ?

Il y a ici quelque chose qui ne marche pas bien. D'ailleurs il ne s'agit pas d'un cas isolé, on trouve des contradictions du même type dans beaucoup d'autres situations comportant l'action des forces de frottement. Pourquoi le bilan énergétique marche-t-il bien si l'on considère le système objet + table, tandis qu'il tombe en défaut pour les systèmes objet seul ou table seule ?

Comment résoudre cette difficulté, d'ailleurs mise en évidence depuis longtemps (cf. [29]) ?

Il n'y a pas d'accord entre les auteurs sur la solution à donner à ce problème.

Une première solution (cf. [4], [5], [13]) est celle qui, en identifiant dans le frottement la source des difficultés, établit que pour faire des bilans énergétiques corrects il n'est pas permis de considérer des systèmes ayant les forces de frottement parmi les forces extérieures. Il serait donc obligatoire d'élargir le système de façon à ce que les forces de frottement deviennent des forces intérieures. Cela parce que «il faut que les échanges de travail et de chaleur avec l'extérieur soient bien définis et calculables» et «lorsqu'il y a un contact entre deux corps (cas de chocs ou de frottements), de la chaleur est échangée entre eux de manière incontrôlable dans les régions du contact». On cite Fabry : «il faut délimiter un système de manière qu'on puisse mettre à ses frontières des douaniers capables de comptabiliser les échanges de chaleur et de travail».

Cette solution a l'avantage d'éviter toute contradiction ou erreur, mais elle est renonciataire : il y a une difficulté qu'on n'arrive pas à surmonter, alors on l'évite par une interdiction à se plonger dans les situations qui sont la source de la difficulté. D'ailleurs pourquoi ne pourrait-on pas considérer les forces de frottement en tant que forces extérieures dans les bilans énergétiques, tandis qu'on peut bien le faire dans l'application de la loi de Newton ? Pourquoi la loi de Newton s'applique-t-elle bien au système de l'objet seul, et pas l'équation de l'énergie ?

Il y a quelque chose de gênant dans tout cela.

6. LA CHALEUR CRÉÉE

D'autres auteurs introduisent l'idée de «*chaleur créée*» dans la zone de contact avec frottement. Selon ces auteurs ([10], [14], [20]) les chaleurs échangées entre deux objets ne sont pas nécessairement opposées. Elles peuvent être aussi toutes deux positives ([20], p. 1497). Plus précisément «si on appelle dQ_{12} la chaleur donnée par un premier système à un second, et dQ_{21} la chaleur donnée par le second au premier, ... on doit dire en général que $dQ_{12} + dQ_{21} \neq 0$, même si la réunion des deux systèmes est thermiquement isolée !» ([10], p. 1060). Ils appellent alors *chaleur créée* cette quantité $dQ_{crée} = dQ_{12} + dQ_{21}$.

Suivons le raisonnement de ces auteurs, par exemple Fer ([14], p. 57) ou Dettwiller ([10], p. 1061 et p. 1069), appliqué à la situation très simple d'un objet solide S_1 qui glisse sur un autre objet solide S_2 .

On peut appliquer les équations (16), (17), (18).

Étant donné que $E = E_1 + E_2$, parce qu'il n'y a pas d'énergie potentielle mutuelle ϕ_{12} entre S_1 et S_2 , en faisant (16) + (17) – (18), on déduit que :

$$(Q_{12} + Q_{21}) + (W_{12} + W_{21}) = 0 \quad (19)$$

Jusqu'ici pas de problème, on est d'accord. C'est au passage suivant que les difficultés commencent.

Le raisonnement des auteurs cités est à peu près le suivant : puisqu'en général le travail des forces de frottement n'est pas nul, précisément dans ce cas il est négatif, $(W_{12} + W_{21}) < 0$, alors la quantité $(Q_{12} + Q_{21})$ est elle aussi en général non nulle, précisément elle est positive. C'est la chaleur créée, qui serait donc égale au travail total exercé par les forces non conservatives agissant entre les deux objets.

Plus précisément, dans le cas de l'objet glissant sur la table on aurait $W_2 = W_{12} = 0$ et $W_{21} = -W_1$. Donc, en négligeant les échanges de chaleur avec l'air, $\Delta U_1 = Q_{21} > 0$ et $\Delta U_2 = Q_{12} > 0$. L'objet recevrait de la chaleur de la table et la table recevrait de la chaleur de l'objet.

Cette description se heurte à l'idée selon laquelle la chaleur est un transfert d'énergie dû à une différence de température et allant du système à température plus élevée vers celui à température mineure, une idée qu'on retrouve chez de nombreux auteurs (cf. par exemple [8]³, [34], [16], [9]⁴, [32]⁵, [30]⁶) et qu'il me semble utile de garder. Le sens du passage de la chaleur est aussi considéré par quelques auteurs le point de départ pour la définition d'une échelle de température (cf [25], [2]⁷).

Au contraire, selon la conception de la chaleur créée, même dans une situation parfaitement symétrique, dans laquelle la température serait égale pour les deux objets glissant l'un sur l'autre, il y aurait de la chaleur donnée à chacun de deux objets par l'autre. Il est vrai qu'en Thermodynamique on étudie les transformations *quasi-statiques*, dans lesquelles l'on considère des passages de chaleur entre un système et un thermostat à la même température, mais il s'agit là d'un cas limite idéal, qui n'existe pas dans la réalité et auquel les transformations réelles peuvent s'approcher, en utilisant des différences de température très petites, infinitésimales. Ce qui confirme que sans différence de température il n'y aurait pas de passage de chaleur. D'ailleurs il est difficile de comprendre ce qui serait la cause de ce passage de chaleur.

-
3. «we expect that heat should tend to flow from regions of high temperature toward regions of low temperature», p. 39.
 4. «... it can be shown that the heat lost by a system A equals the heat gained by a system B when both systems are placed in thermal contact», pp. 679-680.
 5. «To conclude, heat is the name assigned to energy as it is transferred across the boundary of a system by virtue of a difference in temperature. Quantitatively, it is the difference between the adiabatic and nonadiabatic work required to achieve a given change in state of a system. ... The successful teaching of the concept of heat... is presented by an emphasis on the necessity of a temperature *difference* between the system and the surroundings...», p. 784.
 6. «Heat is defined as the form of energy that is transferred across the boundary of a system at a given temperature to another system at a lower temperature by virtue of the temperature difference between the two systems. That is, heat is transferred from the system at the higher temperature to the system at the lower temperature, and the heat transfer occurs solely because of the temperature difference between the two systems.», p. 82.
 7. «... temperature is hotness measured on some definite scale. In turn, "hotness" ... is the tendency to transfer energy "as heat". We can order objects according to their hotness. ... To say that object A is "hotter" than object B is to say that if A and B are placed together, then energy flows from A to B.» p. 94.

Il y a en effet un échauffement intense dans les parties des deux solides proches de la surface de contact, ce qui entraîne un passage de chaleur vers l'intérieur des solides, mais ça n'a rien à voir avec les échanges de chaleur entre les deux solides, parce qu'il s'agit de conduction de chaleur *entre les parties de chaque solide* et non *entre les deux solides*. D'ailleurs c'est justement cet échauffement intense proche de la surface qu'il faut expliquer. Il ne faut pas confondre l'effet avec la cause.

En conclusion, la chaleur créée me semble plutôt une *hypothèse ad hoc*, artificielle et très discutable, qui ne correspond pas à des phénomènes physiques réels.

Du point de vue microscopique, dans un modèle particulier de la matière, la chaleur est l'effet macroscopique des interactions désordonnées ou incohérentes à courte distance entre les atomes ou les molécules des deux objets en contact. Ces interactions sont toutes conservatives, au niveau microscopique, et donc leur travail dérive d'une énergie potentielle mutuelle des deux particules. Dans ces interactions les particules d'un objet font un travail sur celles de l'autre. C'est la somme de ces travaux qui donne la chaleur. Il est vrai que dans l'interaction entre deux particules le travail reçu par l'une n'est pas nécessairement l'opposé de celui reçu par l'autre, car les vitesses et donc les déplacements sont différents, (c'est l'argument proposé par DETTWILLER [10], p. 1060), mais dans le cas de la conduction thermique il s'agit toujours d'*interactions complètes*, leur durée étant très petite face aux temps d'observation macroscopiques. Alors, au début de chaque interaction l'énergie potentielle est nulle, tout comme à la fin. La somme des travaux des deux forces étant égale à l'opposé de la variation de l'énergie potentielle – ϕ_{12} , elle est donc toujours nulle (cf. aussi le § 2.).

On peut conclure que dans chaque interaction thermique élémentaire l'énergie reçue par un objet est l'opposée de celle reçue par l'autre, ce qui entraîne, au niveau macroscopique, que $Q_{12} + Q_{21} = 0$.

D'ailleurs DETTWILLER aussi, dans l'article cité, précise que «la notion de chaleur créée est inconsistante (mais présente l'avantage d'une simplification qui peut être pédagogiquement intéressante à certains points de vue)... sur le plan des principes fondamentaux, la chaleur créée est inexistante ; mais pour simplifier la présentation de certains résultats et la rendre plus mnémotechnique, cela peut être un abus de langage intéressant».

Du point de vue didactique on peut bien douter de l'utilité d'introduire une notion qui est jugée inconsistante et inexistante. On connaît tellement les obstacles à l'apprentissage posés par les conceptions erronées des élèves qu'il semble vraiment inopportun d'en introduire d'autres. En plus, s'il s'agit de répondre à la demande du nouveau programme de la classe de première de favoriser la formation de l'idée «qu'un système

dont la température croît n'a pas forcément reçu de chaleur : effet Joule... échauffement des freins...», l'invention d'une chaleur fictive va justement dans le sens opposé, car elle renforce l'idée qu'il y a toujours une chaleur s'il y a échauffement.

Ces considérations didactiques à part, même si on laisse tomber l'abus de langage de la chaleur créée, il reste l'idée physique d'une quantité $Q_{12} + Q_{21}$ non nulle, que je considère inacceptable.

7. LE TRAVAIL TOTAL DES FORCES DE FROTTEMENT EST TOUJOURS ÉGAL À ZÉRO

Mais alors, comment résoudre les difficultés des bilans énergétiques en présence du frottement ?

La solution que je propose est très simple, mais elle se heurte aux habitudes établies dans le calcul du travail des forces de frottement. La difficulté prend origine dans la confusion entre travail et pseudotravail, qui sont bien différents, en présence de déformations (cf. § 3.). Et s'il y a frottement, il y a nécessairement déformation.

Reprenons l'exemple de l'objet solide glissant sur la table, analysé au § 5.

Comment peut-on affirmer que le déplacement du point d'application de la force de frottement F_{21} agissant sur l'objet est égal au déplacement $\Delta x = d_o$ du centre de masse et celui de la force de frottement F_{12} agissant sur la table est égal à zéro ? Ne s'agit-il de forces de contact, appliquées l'une et l'autre à un même point ? Si le point d'application est le même, le déplacement aussi sera le même.

D'ailleurs chaque petite partie de l'objet glissant subit une petite déformation locale, dont la valeur est bien difficile à évaluer. Et il n'est pas du tout assuré que la somme de ces petites déformations soit égal à d_o , mais en tout cas elle devra être égale pour l'objet et pour la table. Chaque partie de la table touchée par l'objet glissant subit, elle aussi, une petite déformation locale, dans le sens de la force de frottement, donc on pourra bien dire que la force de frottement F_{12} agissant sur la table fait un travail non nul, positif.

Les deux forces de frottement étant opposées $F_{21} = - F_{12}$ et le déplacement du point d'application étant le même, on peut bien conclure que **le travail total des forces de frottement est égal à zéro.**

Certains auteurs ont objecté que dans le calcul du travail en thermodynamique il ne faut pas prendre en considération les aspects microscopiques : il faudrait calculer le travail avec le déplacement macroscopique du point d'application de la force.

Mais cette condition ne me semble pas respectée dans le cas du travail électrique sur un résistor, pour lequel il n'y a aucun déplacement macroscopique. Selon ce point de vue il ne faudrait donc pas parler de travail électrique dans les bilans énergétiques sur l'effet Joule. Faudrait-il parler de chaleur créée ou de chaleur reçue par le résistor du générateur ou du champ électrique ?

Un autre exemple : une balle de billard choque une autre balle identique et immobile de façon que la première s'arrête et la deuxième part avec la même vitesse qu'avait la première avant le choc. Comment expliquer l'augmentation d'énergie de la deuxième balle ou la perte d'énergie de la première ? Du point de vue «macroscopique» on ne voit pas de déplacement pendant l'interaction et donc le travail serait nul. Faudrait-il conclure que c'est de la chaleur reçue qui fait bouger la deuxième balle ? Évidemment non, il faut au contraire prendre en considération les petites déformations des deux balles pendant le choc pour obtenir le travail non nul de la force agissant sur une balle et ainsi expliquer sa variation d'énergie.

Il est important d'ailleurs de mieux préciser le sens donné au mot «microscopique». Si l'on se réfère aux dimensions atomiques, comme c'est le cas le plus souvent, alors dans l'exemple du choc entre les deux balles les déformations sont à considérer comme «macroscopiques», même si elles sont «petites» à l'échelle humaine.

En ce qui concerne le frottement solide, dans le cas fréquent où les forces de frottement sont dues aux aspérités des surfaces, ces aspérités et leurs déformations, bien que petites, sont encore «macroscopiques» (dans des conditions usuelles de polissage, l'on trouve une hauteur moyenne $h = 1 \div 10 \mu\text{m}$ et un rayon de courbure $r = 10 \div 100 \mu\text{m}$,

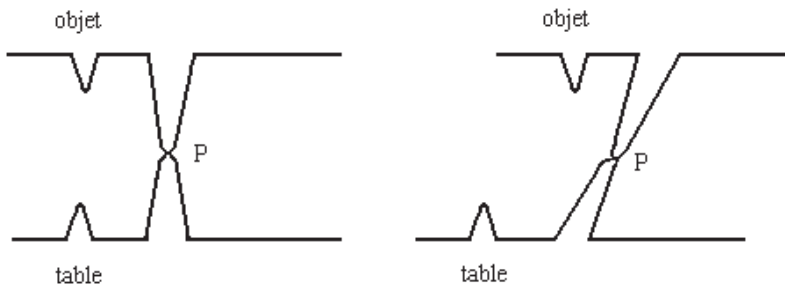


Figure 2

cf. [7]) et donc il faut les considérer dans les raisonnements concernant le travail. Pour ces cas SHERWOOD [29] a développé une analyse très intéressante, en concluant que le déplacement effectif d_{eff} qu'il faut comptabiliser dans la formule du travail est différent du déplacement du centre de masse et il est le même pour les deux objets. On peut comprendre ce résultat en regardant la figure 2, où le déplacement du point de contact P entre les deux aspérités des surfaces de l'objet et de la table est presque la moitié du déplacement de l'objet (de son centre de masse).

C'est sans doute un résultat très important de la thermodynamique que de pouvoir traiter beaucoup de situations physiques sans prendre en considération les détails à une échelle plus petite ou microscopique, mais si l'on considère cette possibilité comme une interdiction absolue, l'on risque de s'empêcher de bien analyser et comprendre certains cas plus éloignés de la typologie thermodynamique classique. D'ailleurs c'est justement dans des situations à la frontière entre thermodynamique et mécanique que des problèmes conceptuels et de cohérence surgissent et ce sont les cas que nous sommes en train d'analyser dans cet article.

Il ne faut pas toujours s'interdire de regarder derrière les rideaux...

En tout cas, je ne veux pas entrer ici dans les détails d'un modèle de fonctionnement du frottement, ce qui demanderait une étude à part⁸. Je me propose plutôt de démontrer quelques résultats généraux, comme conséquence des lois de Newton et du premier principe de la thermodynamique, en donnant aussi une justification de ces résultats sur la base de quelques considérations élémentaires sur ce qui peut se passer à une échelle microscopique ou mésoscopique.

Ma conclusion générale est donc que **le travail total des forces de frottement s'exerçant entre deux objets est toujours égal à zéro.**

8. Il faudrait en effet considérer, entre outre, les déformations élastiques et plastiques (cf. [3]), la variation du coefficient de frottement avec la vitesse, le fluage des contacts, le régime de glissement «stick-slip» (cf. [7]), le rôle des vibrations du réseau atomique, les résultats des études sur le frottement à l'échelle atomique, la nanotribologie (cf. [18]). D'ailleurs les recherches sur ce sujet sont en plein développement. Les moyens techniques actuels permettent d'étudier le phénomène à une échelle bien plus petite qu'auparavant. Il est donc toujours moins justifiable de ne pas considérer, dans l'enseignement, ce qui se passe au niveau mésoscopique. Au contraire, il me semble important de donner une description, même très simplifiée et élémentaire, des phénomènes physiques à cette échelle qui sont à la base du frottement solide.

Du point de vue microscopique ce résultat général peut bien être expliqué par un raisonnement pareil à celui utilisé dans le cas de la chaleur au § 6. En effet les forces de frottement sont, elles aussi, dues à des interactions microscopiques conservatives à courte distance entre les atomes ou les molécules des deux objets en contact. La différence par rapport à la chaleur est que les forces de frottement ont une certaine cohérence et donnent une résultante macroscopique dans une direction bien déterminée. Tout comme dans le cas de la chaleur, il s'agit en tout cas d'*interactions complètes*, dans lesquelles l'énergie potentielle initiale et celle finale sont égales à zéro. Donc le travail total $W_{12} + W_{21}$ des deux forces, étant égal à l'opposé de la variation de l'énergie potentielle $-\phi_{12}$, est toujours nul.

Si l'on adopte cette conclusion, les difficultés et les contradictions citées aux § 5 et 6 disparaissent complètement.

Reprenons l'équation (19) : en étant $W_{12} + W_{21} = 0$, on aura aussi $Q_{12} + Q_{21} = 0$, ce qui signifie que les chaleurs Q_{12} et Q_{21} sont toujours opposées. Il devient alors tout à fait inutile d'introduire la *chaleur créée*, en évitant ainsi les complications de ce concept bien discutable, sinon erroné. La chaleur peut bien garder son caractère d'*énergie échangée* entre deux systèmes.

Reprenons encore l'exemple de l'objet glissant sur la table. En négligeant les échanges de chaleur avec l'air ($Q_1 = Q_2 = 0$) et en rappelant que, la vitesse étant constante, les variations de l'énergie cinétique sont nulles ($\Delta K_{01} = \Delta K_{02} = 0$), les bilans énergétiques deviennent :

$$S_1 : \text{Objet seul} : \quad W_1 + W_{21} + Q_{21} = \Delta E_1 = \Delta(U_1 + K_{01}) = \Delta U_1 \quad (20)$$

$$S_2 : \text{Table seule} : \quad W_{12} + Q_{12} = \Delta E_2 = \Delta U_2 \quad (21)$$

$$S_1 + S_2 : \text{Objet + table} : \quad W_1 = \Delta E = \Delta(U + K_0) = \Delta U \quad (22)$$

où l'on a $W_{12} > 0$, $W_{21} < 0$ et $W_{12} + W_{21} = 0$. On a aussi $\Delta E = \Delta E_1 + \Delta E_2$, parce qu'il n'y a pas d'énergie potentielle mutuelle ϕ_{12} .

En faisant (20) + (21) - (22), on obtient :

$$Q_{12} + Q_{21} = 0$$

En faisant (20) + (21), on obtient alors :

$$\Delta U_1 + \Delta U_2 = W_1$$

Tout cela explique bien l'échauffement de l'objet et de la table et le fait que la variation de l'énergie interne exprimant cette augmentation de température est égale au

travail de la force extérieure qui tire l'objet. Si l'on néglige les échanges de chaleur entre la table et l'objet, ce qui ne modifie rien de notre discours et d'ailleurs n'est pas une hypothèse trop lointaine de la réalité, étant donné la rapidité des contacts, on peut annuler les termes Q_{12} et Q_{21} . On trouve alors que la table augmente son énergie interne d'une quantité $\Delta U_2 = W_{12} > 0$, ce qui explique son réchauffement, l'objet augmente son énergie interne de $\Delta U_1 = W_1 + W_{21} = W_1 - |W_{21}| > 0$, ce qui explique encore son réchauffement. La mesure relative de ces augmentations d'énergie interne dépend de la nature des deux surfaces en contact. Dans un cas parfaitement symétrique on aura $|W_{12}| = |W_{21}| = W_1 / 2$ et donc $\Delta U_1 = \Delta U_2$.

Examinons un autre exemple typique : un objet de masse m , lancé avec une vitesse v sur un plan horizontal de masse $M \gg m$, ralentit et enfin s'arrête à cause du frottement.

Le pseudotravail, négatif, de la force de frottement que la table exerce sur l'objet est égal à la variation de l'énergie cinétique de l'objet : $W_{ps} = \Delta K_0 < 0$.

Le travail, négatif, de cette force de frottement est plus petit en valeur absolue, et donc plus grand en valeur réelle, que le pseudotravail, car le déplacement effectif à considérer dans le calcul du travail est plus petit que le déplacement du centre de masse de l'objet : $d_{eff} < d_c$, donc $|W| < |W_{ps}| = |\Delta K|$ et $W > W_{ps} = \Delta K$.

Le bilan énergétique de l'objet devient, en négligeant les échanges de chaleur : $W = \Delta U + \Delta K_0$ et donc $\Delta U = W - \Delta K_0 > 0$, ce qui explique bien le réchauffement de l'objet.

Il me semble que la démarche que je propose résout bien le problème de décrire correctement les bilans énergétiques en présence du frottement, sans poser des interdictions sur les systèmes envisageables et sans introduire la notion, confuse et très artificielle, de chaleur créée.

Il s'agit plutôt d'examiner de façon plus critique et approfondie la définition de travail en présence de déformations et de bien distinguer entre travail et pseudotravail.

En ce qui concerne le frottement, il suffit d'ajouter une analyse qualitative et assez générale de ce qui se passe au niveau mésoscopique, pour mieux comprendre la nature physique du phénomène et les difficultés spécifiques dans le calcul du travail des forces de frottement.

Je veux préciser que le résultat obtenu pour les forces de frottement est aussi valable pour toutes les forces de contact et les forces dites non conservatives, qui ne dépendent pas d'un potentiel.

En effet la démonstration donnée n'utilise aucune hypothèse spécifique sur la nature des forces agissant entre les deux objets en interaction.

On obtient encore que $W_{12} + W_{21} = 0$, c'est-à-dire que *le travail total des forces qui ne sont pas associées à une énergie potentielle, soit des forces non conservatives, est toujours égal à zéro.*

La source de ce résultat est justement dans le fait qu'il n'y a pas d'énergie potentielle associée à ces forces. Dans le cas des forces conservatives, au contraire, dans l'énergie du système élargi $S_1 + S_2$ il faut considérer aussi le terme représentant la variation d'énergie potentielle $\Delta\phi_{12}$ de l'interaction entre les deux sous-systèmes et la relation (19) devient :

$$(Q_{12} + Q_{21}) + (W_{12} + W_{21}) + \Delta\phi_{12} = 0 \quad (23)$$

et donc aussi :
$$(W_{12} + W_{21}) + \Delta\phi_{12} = 0 \quad (24)$$

Ce qui montre qu'il peut bien être $(W_{12} + W_{21}) \neq 0$.

On retrouve encore la relation $(W_{12} + W_{21}) = 0$, même pour les forces conservatives, dans le cas d'*interactions complètes*. On pourrait dire aussi que les interactions non conservatives sont le résultat macroscopique d'un grand nombre d'interactions complètes conservatives microscopiques. C'est le fait qu'elles soient toujours complètes à l'échelle des temps macroscopiques qui entraîne la valeur nulle du travail total. Même si au niveau macroscopique l'interaction n'est pas terminée, toutes les petites interactions mésoscopiques dont elle se compose sont terminées, mais d'autres, nouvelles, recommencent. On ne peut pas vraiment dire dans ces cas qu'il s'agit d'une seule interaction qui continue, mais plutôt d'une série de petites interactions qui s'enchaînent.

REMERCIEMENTS

Je remercie vivement Laurence VIENNOT pour ses conseils et ses remarques pertinentes.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] A.B. ARONS : *A Guide to Introductory Physics Teaching* - John Wiley & Sons, 1990.
- [2] R. BAIERLEIN : «*The meaning of temperature*» - The Physics Teacher, février 1990.
- [3] M. BARQUINS : «*La tribologie*» - BUP n° 764 et n° 765, mai et juin 1994.
- [4] J.-P. BARRAT et H. GIÉ : «*Quelques remarques sur l'énergie potentielle et l'énergie interne*» - BUP n° 642, mars 1982.
- [5] J.-P. BARRAT : «*Remarques sur les bases de la thermodynamique*» - BUP n° 724, mai 1990.
- [6] G.M. BARROW : «*Thermodynamics should be built on energy - not on heat and work*». Journal of Chemical Education, 65, 2, 1988, pp.122-125.
- [7] T. BAUMBERGER, O. RONSIN, F. HESLOT et B. PERRIN : «*Dynamique du frottement solide : un système modèle*» - Bulletin de la SFP, mai 1994.
- [8] H.B. CALLEN : *Thermodynamics* - John Wiley & Sons, 1960.
- [9] S.G. CANAGARATNA : «*A critique of the definitions of heat*» - Am.J.Phys., 37 (7), 1969, pp. 679-683.
- [10] L. DETTWILLER : «*Création de chaleur et échanges énergétiques*» - BUP n° 775, juin 1995.
- [11] L. DETTWILLER : «*Création de chaleur et échanges énergétiques II*» - BUP cahier ens. sup., juin 1995.
- [12] H. ERLICHSON : «*Work and Kinetic energy for an automobile coming to a stop*» - Am.J.Phys., 45 (8), 1977, p. 769.
- [13] J.-P. FAROUX, J. RENAULT : *Thermodynamique* - Paris, 1997.
- [14] F. FER : *Thermodynamique macroscopique* - Tome I, Gordon & Breach, Paris 1970.
- [15] R.P. FEYNMAN, R.B. LEIGHTON et M. SANDS : *The Feynman Lectures on Physics* - Tome I, Addison-Wesley Company, 1963.
- [16] E.A. GUGGENHEIN : *Thermodynamics* - Amsterdam, 1967.
- [17] D. HALLIDAY et R. RESNICK : *Fundamental of Physics*, Wiley, New York, 1988, 3^e édition.
- [18] J. KRIM : «*Les frottements à l'échelle atomique*» - Pour la Science, décembre 1996.
- [19] G. LAUFER : «*Work and heat in the light of (thermal and laser) light*» - Am.J.Phys., 51(1), 1983, pp. 42-43.
- [20] G. LAVERTU : «*Les bases de la thermodynamique*». BUP n° 719, décembre 1989.

- [21] H.S. LEFF et J. MALLINCKRODT : «*All about work*» - Am.J.Phys., 60 (4), 1992, pp. 356-365.
- [22] H.S. LEFF et J. MALLINCKRODT : «*Stopping objects with zero external work : Mechanics meets thermodynamics*» - Am.J.Phys., 61 (2), 1993, pp.121-127.
- [23] J. LE HIR : «*L'énergie interne est-elle une grandeur extensive ?*» - BUP, cahier ens. sup., juin 1995.
- [24] C.M. PENCHINA : «*Pseudowork-energy principle*» - Am.J.Phys., 46 (3), 1978, pp. 295-296.
- [25] E.M. ROGERS : «*Physics for the Inquiring Mind*» - Princeton, 1960.
- [26] B. ROULET : «*L'énergie interne en classe de première*» - BUP n° 631, février 1981.
- [27] E. SALTIEL : «*Le principe de conservation de l'énergie et le théorème de l'énergie mécanique en classe de première*» - BUP n° 794, mai 1997.
- [28] B.A. SHERWOOD : «*Pseudowork and real work*». Am.J.Phys., 51 (7), 1983, pp. 597-602.
- [29] B.A. SHERWOOD, W.H. BERNARD : «*Work and heat transfer in the presence of sliding friction*». Am.J.Phys., 52 (11), 1984, pp.1001-1007.
- [30] R.E. SONNTAG, C. BORGNACKE, G.J. VAN WYLEN : *Fundamentals of Thermodynamics* - John Wiley & Sons, 1998.
- [31] C.A. SOUSA, E.P. PINA : «*Aspects of mechanics and thermodynamics in introductory physics : an illustration in the context of friction and rolling*» - Eur. J. Phys. 18, 1997, pp. 334-337.
- [32] T.B. TRIPP : «*The definition of heat*» - Journal of Chemical Education, 53 (12), 1976, pp. 782-784.
- [33] V. UGAROV : «*Théorie de la relativité restreinte*» - Mir, Moscou, 1977.
- [34] M.W. ZEMANSKY : *Heat and Thermodynamics* - McGraw Hill, New York, 1968.