Plaidoyer pour Dulong et Petit

par Jean-Pierre LECARDONNEL
Lycée Louis-le-Grand - 75005 Paris

RÉSUMÉ

Critique de la réduction de l'énergie d'agitation thermique d'un système à sa seule énergie cinétique microscopique. Rappel à cette occasion de la célèbre loi de Dulong et Petit et de son interprétation statistique.

VOUS AVEZ DIT MICROSCOPIQUE ?

Dans un récent article [1], Édith SALTIEL critique la présentation des concepts énergétiques, notamment microscopiques, par l'ensemble des manuels de première, et en particulier par celui dont j'ai dirigé la publication [2]. Je ne songe pas à nier les insuffisances éventuelles des différents manuels, notamment du nôtre. Et je suis bien conscient de la difficulté des notions en question, notamment pour leur enseignement. C'est dans cet esprit que je souhaite exprimer mon désaccord avec l'auteur sur l'un des points de son argumentation. Il va de soi que ce désaccord ne met pas en cause l'utilité et l'intérêt de l'article cité.

- J'en viens au fait : l'auteur assimile de façon très explicite ce qu'il est courant d'appeler énergie d'agitation thermique d'un système à son énergie cinétique microscopique :

«Nous appellerons énergie d'**agitation thermique** d'un système l'énergie cinétique moyenne de ses constituants. Cette énergie est reliée à la température...».

Il n'y a aucun doute sur le fait que l'énergie cinétique microscopique soit bien «reliée à la température». Cependant, une question physique pertinente paraît être de savoir si, à l'inverse, la température rend bien compte de cette seule forme d'énergie.

- Édith SALTIEL ne se prononce pas sur l'existence d'une contribution *potentielle* à l'énergie, typiquement microscopique et reliée elle aussi à la température. Mais aucun des deux bilans qu'elle présente en exemples n'y fait référence. Et, bien qu'elle conclue : «Pour traiter ces exemples, nous n'avons jamais parlé d'énergie potentielle ou cinétique microscopique»,

elle «parle» pourtant bel et bien dans chaque cas de l'énergie cinétique microscopique, sous le nom choisi par elle d'énergie d'agitation thermique, mais pas d'une éventuelle contribution microscopique *potentielle*. Ainsi, dans le cas de la chute d'un objet s'immobilisant au sol, si l'énergie mécanique ne se conserve pas, c'est que :

«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».

- L'auteur laisse à penser, sans le revendiquer explicitement, que les contributions microscopiques à l'énergie potentielle se trouvent toujours prises en compte au niveau macroscopique par des expressions spécifiques sans lien avec la température. Ainsi, l'énergie potentielle élastique d'un ressort «correspond à des interactions microscopiques» s'exprimant «en fonction d'un paramètre macroscopique, ici la 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». Et en effet, qui songerait à nier que l'énergie potentielle élastique d'un ressort trouve son origine dans les interactions entre particules* ?

- Les exemples cités par Édith SALTIEL concernant des solides, je traiterai du cas des solides dans la suite. Mais des considérations analogues pourraient être développées dans le cas des gaz réels.

LA LOI DE DULONG ET PETIT

- En 1819, les physiciens Pierre Louis Dulong (1785-1838) et Alexis Thérèse Petit (1791-1820) établirent la loi empirique qui porte leur nom [3], et dont on peut dire qu'elle marque le début de la physique du solide. En termes contemporains : pour une température suffisamment élevée, la capacité thermique molaire des solides s'écarte peu de la valeur $25 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$. Cette loi, bien vérifiée malgré quelques exceptions par les solides monoatomiques (des adaptations existent pour les cristaux polyatomiques), trouva d'abord une explication simple dans le cadre du théorème d'équipartition de l'énergie, conséquence de la mécanique statistique de Boltzmann.

* Je reconnais volontiers que la formulation suivante, extraite de notre manuel par E. SALTIEL, n'est pas satisfaisante :

«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».

- Considérons un atome d'un réseau cristallin vibrant autour d'une position moyenne [4]. Le rappel à cette position se traduit par l'existence, au niveau du site, d'une énergie potentielle :

$$\varepsilon_p = \frac{1}{2} K (x^2 + y^2 + z^2)$$

où K est une constante de rappel caractéristique du réseau, et x, y, z les coordonnées de l'atome comptées à partir de sa position moyenne. L'atome possède de plus l'énergie cinétique :

$$\varepsilon_c = \frac{1}{2} m (v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)$$

où v_x, v_y et v_z désignent ses coordonnées de vitesse. L'énergie mécanique de l'atome s'écrit donc :

$$\varepsilon = \frac{1}{2} K (x^2 + y^2 + z^2) + \frac{1}{2} m (v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)$$

D'après le théorème d'équipartition de l'énergie, chaque terme de cette somme contribue statistiquement à l'énergie de l'atome par la quantité :

$$\frac{1}{2} k_B T$$

où k_B désigne la constante de Boltzmann, et T la température («absolue»). L'énergie moyenne d'un atome est donc :

$$\langle \varepsilon \rangle = 6 \times \frac{1}{2} k_B T = 3 k_B T$$

Pour une mole :

$$U = 3 \eta_A k_B T = 3 R T$$

et :

$$\frac{dU}{dT} = 3 R$$

Application numérique : $\frac{dU}{dT} = 3 \times 8,31 = 25 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$

- Bien sûr, cette théorie classique sommaire a été profondément remaniée par la suite, notamment par Einstein (1907) et Debye (1912). Mais les idées physiques essentielles sur lesquelles elle repose, reformulées dans un cadre quantique, ne sont pas périmées pour autant !

Nous en retiendrons que l'origine de la capacité thermique des solides réside, à l'échelle microscopique, pour moitié environ dans l'énergie cinétique des atomes, et pour moitié environ dans leur énergie potentielle. Insistons sur le fait que, dans la situation considérée, le solide n'est pas supposé «étiré», et que l'énergie potentielle dont il est question ne se traduit par aucune énergie potentielle élastique macroscopique.

- Je suis maintenant en mesure de préciser pourquoi j'ai qualifié jusqu'ici de *typiquement microscopique* la contribution *potentielle* dont il vient d'être question. C'est qu'elle est associée aux positions prises par les différents atomes par rapport à leurs positions moyennes. Au contraire, l'énergie potentielle élastique d'un ressort est associée à un déplacement des positions moyennes des atomes les uns par rapport aux autres. C'est pourquoi elle peut s'exprimer en fonction d'un paramètre macroscopique autre que la température : l'allongement du ressort.

POUR CONCLURE

- Peut-être le mot «agitation» fait-il obstacle. Dans le langage courant en effet, il évoque d'abord le mouvement (Petit Robert : «État de ce qui est agité, parcouru par des mouvements irréguliers dans divers sens»). Et il est donc tentant de ne prendre en compte dans l'agitation thermique que le désordre des vitesses prises par les particules. Il convient pourtant de prendre en compte également le désordre dans les positions prises. Cette rémanence au niveau du vocabulaire se trouve confortée par le rôle didactique ambigu du gaz parfait monoatomique. Précieux pour la simplicité avec laquelle ce modèle permet de construire différentes grandeurs énergétiques macroscopiques, il peut faire obstacle dès que les interactions entre particules interviennent.

- Sur un plan plus concret, si l'énergie d'agitation thermique pouvait être interprétée comme traduisant uniquement l'énergie cinétique microscopique d'un système, la capacité thermique des solides serait de l'ordre de $12,5 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$ au lieu de $25 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$! Cette division par un facteur 2 se manifesterait par des variations de température doubles de celles effectivement observées lors de l'écrasement d'un solide au sol, ou en présence de frottements solides. Notre environnement quotidien en serait sans doute profondément affecté. Ainsi, lors du freinage d'une voiture (qu'il n'est pas sans intérêt d'évoquer dans le cadre du programme de première), les disques de frein devraient atteindre une température de l'ordre de 1500°C ! Adieu freinage...

- Quel que soit le nom choisi pour la désigner, un bilan énergétique effectué sans considérer la contribution typiquement microscopique et reliée à la température de l'énergie *potentielle* est fatalement erroné (sauf dans le cas tout à fait particulier du gaz parfait... monoatomique). Pour éviter la périphrase que je viens d'utiliser, l'expression

énergie potentielle microscopique me semble convenir, mais d'autres sont certainement recevables. Par exemple : énergie potentielle d'agitation thermique. Je ne pense pas que l'argument de simplification didactique soit pertinent pour escamoter une telle contribution, du moins si l'on évoque, comme le prescrit le programme de première, l'énergie cinétique microscopique.

- Quant à cette dernière considérée **seule**, elle est en général physiquement inaccessible, puisqu'**à elle seule**, elle ne saurait rendre compte de la température (sauf pour le gaz parfait monoatomique). Aussi, et sauf à prendre comme objet d'étude le gaz parfait, j'avoue avoir beaucoup de mal à comprendre pourquoi on tient tant à faire jouer à une grandeur physiquement inaccessible, et dont l'évocation soulève de nombreuses difficultés, un rôle pédagogique central dans l'enseignement de la physique, comme le fait le programme actuel de nos classes de première.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] E. SALTIEL : «*Le principe de conservation de l'énergie et le théorème de l'énergie mécanique en classe de première*» - BUP n° 794 - pp. 957-972.
- [2] Collection GALILÉO : «*Physique première S*» - Bordas, 1994.
- [3] J.-P. PÉREZ : «*Thermodynamique*» - 2^e édition - Masson, 1997.
- [4] A. GUINIER et R. JULLIEN : «*La matière à l'état solide*» - Hachette CNRS, 1987.