

Température ou chaleur ?

Les sensations du corps humain

par Jean JANDALY
76000 Rouen
jjandaly@normandnet.fr

RÉSUMÉ

Des expressions telles que «il fait chaud» ou «quelle chaleur dans cette pièce» sont-elles correctes ? L'organisme humain est-il sensible à la température du milieu extérieur, ou aux échanges d'énergie sous forme de chaleur avec ce milieu ? Après des rappels sur les notions de température et de chaleur, on examine la thermorégulation et les transferts thermiques entre le corps et le milieu extérieur sous l'angle du premier principe de la thermodynamique.

Le langage courant, on le sait, entretient souvent la confusion entre température et chaleur. De précédents articles du BUP¹ ont fait le point sur les difficultés rencontrées par les élèves.

Si certaines expressions employées couramment - et pas seulement à l'école ! - telles «la chaleur a atteint 30 degrés aujourd'hui», sont explicitement incorrectes, d'autres sont plus ambiguës, en particulier toutes celles faisant appel à l'adjectif «chaud», qui se rapporte par sa racine au substantif «chaleur». Une expression comme «il fait chaud» est-elle donc incorrecte : devrait-on plutôt dire «la température est élevée» ?

La question mérite d'être examinée au-delà du seul purisme sémantique.

1. RAPPELS SUR LES NOTIONS DE TEMPÉRATURE ET DE CHALEUR

1.1. La température

Les Grecs connaissaient déjà le phénomène de dilatation des gaz, comme en atteste le dispositif décrit par Philon de Byzance, au III^e siècle avant notre ère (figure 1).

1. Voir par exemple : E. LEYMARIE et A. LAVAL : «Chaleur ou température ?» - BUP n° 630.

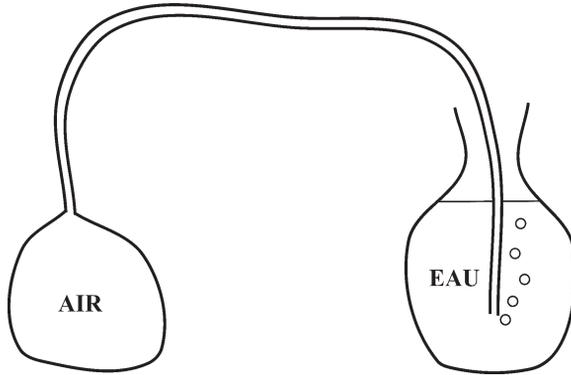


Figure 1 : Le dispositif de Philon.

Lorsque le récipient de gauche est chauffé, l'air s'en échappe.
Lorsqu'il se refroidit, l'eau remonte par le tube.

De tels appareils sont repris au XVI^e siècle pour évaluer la température, en particulier par Galilée en 1593. Cependant, ces appareils ne peuvent être qualifiés de thermomètres car leurs indications varient non seulement en fonction de la température, mais aussi de la pression atmosphérique. Au milieu du XVII^e siècle apparaissent les premiers thermomètres à liquide (thermomètre à eau de Jean Rey en 1632, thermomètres à alcool des savants florentins en 1646, thermomètre à mercure de Halley en 1680...). Différentes échelles sont utilisées (Fahrenheit en 1714, Réaumur en 1730, Celsius en 1742...) faisant généralement appel à deux points fixes et à un découpage régulier (en cent parties égales dans le cas des échelles dites centésimales comme celle de Celsius).

Dès le début du XVIII^e siècle, certains appareils utilisent comme grandeur thermométrique la pression d'un volume constant d'air. Ces études sont généralisées à d'autres gaz, et en 1848, Lord Kelvin introduit l'échelle de température absolue : elle présente le grand avantage d'être indépendante de la nature du gaz employé dans le thermomètre (quand la pression tend vers zéro, le rapport des produits pression \times volume d'un gaz pris dans des conditions de température différentes est indépendant de la nature du gaz).

La théorie cinétique des gaz, développée en particulier par Clausius au milieu du XIX^e siècle, permet de montrer que l'énergie cinétique d'un gaz parfait monoatomique est donnée par la formule :

$$E_c = \frac{3}{2} n k_B T \quad (1)$$

où n désigne le nombre de molécules du gaz, T la température absolue et k_B la constante de Boltzmann ($k_B \approx 1,38 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$). La formule est en très bon accord avec les résultats de mesures de capacité calorifique. On dispose ainsi d'une représentation mentale : *la température T est proportionnelle (\propto) au carré de la vitesse quadratique moyenne v_m d'une molécule de gaz parfait monoatomique², soit :*

$$T \propto v_m^2$$

Il faut cependant généraliser avec une certaine prudence la représentation *«température \equiv énergie d'agitation»* (\equiv pour «équivalent à»). Tout d'abord, les unités de température et d'énergie sont évidemment différentes. Ensuite, la relation (1) valable pour un gaz parfait monoatomique ne l'est pas pour tous les systèmes. Ainsi, on démontre que l'énergie cinétique d'un gaz de n électrons libres dans un métal est de la forme :

$$E_c = n(\alpha + \beta T^2)$$

où α et β sont des constantes : elle varie donc ici comme le carré de la température ; en outre la capacité calorifique $2 n\beta T$ est de l'ordre de cent fois plus faible, à température ambiante, que celle, $3/2 n k_B$, d'un gaz classique : l'énergie cinétique varie donc relativement peu avec la température.

1.2. La chaleur

Le feu et la chaleur furent longtemps représentés comme des fluides. A la fin du XVIII^e siècle, Lavoisier observa que ce fluide, qu'il nommait «calorique», n'avait pas de masse décelable. Le concept de chaleur se construisit progressivement et avec difficulté tout au long du XIX^e siècle, grâce notamment aux travaux de Carnot, Joule et Thomson. La chaleur n'apparaît plus alors comme un fluide indestructible : elle peut se transformer en travail (et réciproquement) ou encore provoquer un changement d'état sans variation de température. A la suite des théories cinétiques de Clausius et de Maxwell, Boltzmann interprète l'énergie calorifique en termes d'énergie cinétique d'agitation désordonnée. On est vers la fin du XIX^e siècle assez proche du concept actuel, selon lequel *la chaleur est un des deux modes d'échange d'énergie entre un système³ et*

-
2. Dans le cas de gaz parfaits polyatomiques, l'expression théorique de l'énergie cinétique est analogue, mais le coefficient n'est plus égal à 3/2 : il dépend non seulement de la forme de la molécule, mais aussi de la température, du fait du «gel» de certains degrés de liberté aux basses températures et des vibrations anharmoniques à hautes températures.
 3. On considère ici un système fermé, c'est-à-dire un système qui n'échange pas de matière avec le milieu extérieur.

son milieu extérieur, l'énergie étant dans le cadre de la mécanique classique⁴ la somme des énergies cinétiques et potentielles des particules constituant le système.

L'autre mode d'échange d'énergie, le travail, est en fait plus facile à définir que la chaleur. Le travail élémentaire fourni par le système au milieu extérieur s'écrit en effet :

$$\delta W = \vec{F} \cdot d\vec{l}$$

où \vec{F} désigne la force exercée par le système sur le milieu extérieur et $d\vec{l}$ le déplacement du point d'application de cette force. Pour qu'il y ait travail, il faut donc que l'on soit en présence d'une force macroscopique mesurable par l'opérateur. La chaleur, c'est tout échange d'énergie qui n'est pas du travail, c'est-à-dire qui ne peut s'exprimer en terme de force et de déplacement mesurables.

Dans le cadre de la mécanique classique, il est possible de donner une forme analytique à la chaleur. Soit un ensemble de N particules, supposées sans interactions. Une particule i est soumise à l'instant t de la part du milieu extérieur à une force :

$$\vec{F}_i = \vec{F}_m + \vec{F}_{fi}$$

(\vec{F}_m moyenne des forces et \vec{F}_{fi} fluctuation par rapport à \vec{F}_m de la force subie par la particule i).

Entre t et $t + dt$, le déplacement de cette particule est :

$$d\vec{l}_i = d\vec{l}_m + d\vec{l}_{fi}$$

($d\vec{l}_m$ déplacement moyen des N particules et $d\vec{l}_{fi}$ fluctuation de déplacement de la particule i).

4. Pour des photons, par exemple, les notions d'énergie cinétique et potentielle sont sans signification. Pour un gaz de photons en équilibre thermique avec les parois de l'enceinte à température absolue T , on démontre que l'énergie totale des photons vaut : $U = K V T^4$, où K désigne une constante ($K \approx 7,5 \times 10^{-16} J \cdot m^{-3} \cdot K^{-4}$) et V le volume du gaz. Cette expression montre que la variation d'énergie ΔU d'un gaz de photons dans une enceinte de volume $V = 1 L$ à température ambiante vaut environ $2 \times 10^{-11} J$ pour une variation $\Delta T = 1 Kelvin$. Cette valeur est à rapprocher de la variation d'énergie interne d'un même volume de gaz parfait monoatomique à température ambiante pour une même variation de température de 1 Kelvin, soit $0,56 J$. La variation d'énergie des photons est tout à fait négligeable devant celle des atomes.

L'énergie totale reçue de la part du milieu extérieur par ces N particules est :

$$dU = \sum_{i=1, N} \vec{F}_i \cdot d\vec{l}_i = \sum_{i=1, N} \vec{F}_m \cdot d\vec{l}_m + \sum_{i=1, N} \vec{F}_{fi} \cdot d\vec{l}_m + \sum_{i=1, N} \vec{F}_m \cdot d\vec{l}_{fi} + \sum_{i=1, N} \vec{F}_{fi} \cdot d\vec{l}_{fi}$$

Le premier terme $\sum_{i=1, N} \vec{F}_m \cdot d\vec{l}_m$ représente le travail reçu par les particules.

Le deuxième terme $\sum_{i=1, N} \vec{F}_{fi} \cdot d\vec{l}_m$ s'annule (car $\sum_{i=1, N} \vec{F}_{fi} = \vec{0}$), de même que le troisième ($\sum_{i=1, N} d\vec{l}_{fi} = \vec{0}$).

Le quatrième terme représente la chaleur. Elle apparaît comme un terme de fluctuation dans l'expression générale de la variation d'énergie. Une telle signification n'est cependant pas toujours valable, car elle suppose que l'énergie reçue par une particule puisse s'exprimer sous la forme d'un produit «force \times déplacement». Ce n'est à l'évidence pas le cas lorsqu'un atome absorbe un photon, par exemple.

La chaleur, tout comme le travail, peut se *mesurer* par les effets qu'elle produit, comme par exemple :

- une élévation de température (augmentation de l'énergie cinétique),
- un changement d'état (augmentation de l'énergie cinétique des particules jusqu'à rupture des liaisons),
- le déplacement d'un équilibre chimique (réarrangement des particules sur les niveaux électroniques).

L'ancienne unité de chaleur, la calorie, était définie comme la chaleur nécessaire pour élever un gramme d'eau de 14,5 à 15,5°C sous la pression atmosphérique normale. A présent, la chaleur s'exprime dans la même unité que le travail et l'énergie, donc en joules (1 cal = 4,1868 J).

On distingue la chaleur de rayonnement, la chaleur de conduction et la chaleur de convection :

- La chaleur de rayonnement se fait par transfert de photons ; c'est la seule de ces trois formes de chaleur qui puisse exister dans le vide ; on sait que les photons sont constamment émis et absorbés par les corps ; l'absorption d'un photon provoque une transition énergétique affectant les niveaux vibrationnels, rotationnels ou électroniques suivant les cas ; si la transition est électronique, l'énergie peut être transférée aux niveaux

vibrationnels et rotationnels lors de la désexcitation ; la température du corps augmente donc, conformément à la représentation «température \equiv énergie d'agitation».

- La chaleur de conduction est une transmission d'énergie de proche en proche entre les particules, sans mouvement organisé de celles-ci ; dans les gaz, la conduction est un transfert d'énergie cinétique désordonnée lors des collisions ; dans les solides cristallins électriquement isolants, la conduction s'explique par la propagation de vibrations au sein du réseau cristallin (cette conduction est bien analysée en faisant appel au modèle du gaz de phonons) ; dans le cas des métaux et alliages, la contribution des électrons de conduction à la conduction est au moins égale à celle des phonons (elle est même prépondérante dans le cas de métaux purs).
- La chaleur de convection est un transfert d'énergie lié à un déplacement de matière ; elle concerne les fluides.

2. LES SENSATIONS DU CORPS HUMAIN

Il est facile d'observer, par exemple :

- que l'on a nettement plus «froid» dans de l'eau à 18°C que dans l'air à même température,
- qu'un métal à température ambiante paraît nettement plus froid que du bois à la même température,
- qu'en hiver, à températures égales, il fait beaucoup plus froid quand il y a du vent, ou lorsque l'atmosphère est humide.

Ces observations montrent que la sensation de chaud ou de froid n'est pas tant liée à la température du milieu extérieur qu'à la chaleur échangée avec ce milieu.

Les aliments et le dioxygène apportent à l'homme de l'énergie «chimique», c'est-à-dire en fait de l'énergie potentielle de liaison entre les atomes. Le métabolisme est l'ensemble des réactions biochimiques qui transforment les substances dans l'organisme. L'homme est un animal «homéotherme», c'est-à-dire qu'il maintient sa température centrale pratiquement constante, contrairement, par exemple, aux animaux aquatiques. Cette thermorégulation est contrôlée par le cerveau au niveau de l'hypothalamus qui réagit en fonction de la température du sang qui l'irrigue, diverses corrections étant apportées par des récepteurs périphériques (peau) et centraux. Cette thermorégulation se traduit par des actes volontaires (action sur la température du milieu extérieur, utilisation de vêtements, absorption de nourriture ou de boisson, activité musculaire) ou réflexes (augmentation ou diminution de l'activité métabolique, dilatation ou contraction des vaisseaux sanguins, transpiration, frissons). C'est essentiellement par l'activité

musculaire que l'organisme peut élever sa température : cette activité peut être volontaire, ou non (frissons de froid).

Un organisme vivant constitue un système thermodynamique qui échange de la matière, du travail et de la chaleur avec le milieu extérieur : la première étude en fut faite par Robert Mayer en 1842, ce qui permit à Helmholtz d'énoncer en 1847 le principe de conservation de l'énergie, c'est-à-dire le premier principe de la thermodynamique. De nombreuses études expérimentales confirment que le corps humain est un système thermodynamique qui suit parfaitement ce premier principe.

Entre l'organisme et l'extérieur, les échanges d'énergie sous forme de chaleur - ceux qui nous intéressent au premier plan - se font sous diverses formes :

- La chaleur de conduction

Depuis Biot (1804) et Fourier (1807 et 1811), on connaît la loi expérimentale de la conduction thermique ; soit δQ la chaleur échangée pendant un temps δt au travers d'une surface d'aire S : on définit le flux de chaleur J par :

$$J = \frac{1}{S} \frac{\delta Q}{\delta t}$$

la loi de Fourier relie ce flux de chaleur à celle du gradient de la température T sur l'axe x normal à la surface :

$$J = -k \frac{\partial T}{\partial x}$$

le coefficient de conductivité thermique k est environ vingt-cinq fois plus élevé pour l'eau que pour l'air sec, environ mille fois plus élevé pour un métal que pour du bois : ces valeurs expliquent les sensations rappelées au début de ce paragraphe ; les vêtements dont les fibres emprisonnent de l'air immobile sont comme chacun sait de bons isolants thermiques.

- La chaleur de convection

Même en l'absence de vent, l'air au contact du corps humain n'est pas immobile. En effet le gradient de température qui existe entre le corps et l'air crée un gradient de masse volumique au sein de l'air qui a pour conséquence de le mettre en mouvement. Tandis que la conduction tend à égaliser les températures, les mouvements convectifs renouvellent constamment le milieu extérieur et tendent à maintenir un flux de chaleur élevé ; de plus, les mouvements de l'air tendent à évacuer la vapeur d'eau produite par la transpiration et à favoriser cette dernière ; la chaleur de convection est très difficile à quantifier, d'autant que le régime d'écoulement de l'air est le plus souvent turbulent ; on a évalué très qualitativement l'effet du vent sur la sensation de température : pour

une température ambiante de 0°C, la baisse apparente est de 5°C environ par 20 km.h^{-1} de vent supplémentaire ; dans les maisons dont les murs sont mal isolés, on peut avoir une sensation de froid alors même que la température indiquée par le thermomètre est élevée : ce sont les mouvements de convection de l'air qui en sont responsables.

• La chaleur de rayonnement

Le corps humain émet en permanence un rayonnement infrarouge aux alentours de $10 \mu\text{m}$; réciproquement, il reçoit le rayonnement de la part des objets qui l'entourent, en particulier celui des vêtements, et pour les régions où la peau est à nu celui du Soleil (en cas d'exposition directe), celui de la Terre et celui de l'eau de l'atmosphère ; exactement comme pour la Terre en l'absence de couverture nuageuse, le bilan radiatif peut être très négatif la nuit en l'absence de couverture vestimentaire suffisante.

• La chaleur de vaporisation

La transpiration, ou plus exactement l'évaporation qui l'accompagne, joue également un rôle important dans le bilan énergétique ; en effet, l'évaporation nécessite, afin de séparer les molécules d'eau entre elles (la sueur est composée d'eau à 99 %), un transfert d'énergie sous forme de chaleur de conduction de la peau vers la sueur ; un bilan analogue accompagne la production de vapeur d'eau évacuée par la respiration ; sans effort particulier, le corps humain évacue chaque jour environ 0,5 L d'eau par transpiration et autant par expiration (ces valeurs peuvent être beaucoup plus élevées en cas d'effort physique).

3. LE «BIEN PARLER»

Comme on l'a souligné, les sensations de «chaud» et de «froid» du corps humain sont effectivement davantage liées à l'énergie échangée sous forme de chaleur avec le milieu extérieur qu'à la température de ce dernier (étant entendu que les deux notions sont liées).

Par conséquent, des expressions comme «il fait chaud», ou même «quelle chaleur dans cette pièce» sont très acceptables d'un point de vue scientifique !