



La chaleur et la température

LA CHALEUR DANS TOUS SES ÉTATS



La notion de chaleur est sans doute l'une des plus difficiles et délicates de la physique. Il ne faut pas la confondre avec celle de température, bien que les deux soient intimement liées à la notion d'énergie. C'est l'écossais Joseph Black (1728-1799) qui, le premier, fait vers 1760 la distinction entre ces deux notions, bien qu'il ne soit pas en mesure de dire précisément à quoi elles correspondent. L'une des découvertes les plus importantes relatives à la notion de température est celle de l'existence d'une limite inférieure, infranchissable, que l'on désigne par zéro absolu, ou zéro Kelvin, et qui sur l'échelle Celsius des températures correspond à $-273,15\text{ }^\circ\text{C}$. Aujourd'hui, dans les laboratoires, les physiciens sont capables de porter la matière à des températures extrêmement proches de cette limite, un milliardième de degré seulement au-dessus du zéro absolu. À l'autre extrême, des températures de 200 millions de degrés sont obtenues lors de certaines expériences. Mais au fait, qu'est-ce que la chaleur ? Qu'est-ce que la température ? Comment mesure-t-on les températures ?

LA CHALEUR

Malgré les 250 ans qui nous séparent de la découverte de Black, chaleur et température sont souvent pris pour synonymes, encore de nos jours... mais à tort. Il est difficile de donner une définition précise mais non formelle de la chaleur. Il est encore plus difficile de s'en faire une représentation mentale. Cependant, on peut réfléchir quelques instants à la phrase suivante, sans la prendre pour tout à fait exacte : « la chaleur permet de modifier la température d'un corps ». En effet, si l'on fournit de la chaleur à un corps, sa température s'élève ; si au contraire on lui en prend, sa température baisse. Il faut noter que ce que l'on fournit ou l'on prend n'est pas de la température, mais de la chaleur ; pourtant, ce qui augmente lors d'un tel échange, n'est pas la chaleur, mais la température, bien que ce soit la chaleur qui soit reçue ou perdue.

À ce stade, il devient clair que la chaleur n'est pas la température.

LES CHANGEMENTS D'ÉTAT

La chaleur permet de modifier la température d'un corps, mais elle n'est pas toujours nécessaire à cette opération, parce qu'elle ne constitue pas la seule manière d'y parvenir. En effet, si l'on comprime brutalement un gaz, sa température s'élève aussi. Inversement, si le gaz se détend brutalement, sa température chute. Dans ces deux exemples, aucun transfert de chaleur n'a été mis en jeu.

Dans certaines situations, bien que l'on fournisse de la chaleur, la température ne s'accroît pas. De même, parfois, on en retire à un corps, et pourtant ce dernier ne devient pas plus froid.

Imaginons un glaçon à $-10\text{ }^\circ\text{C}$ sorti



du congélateur. Si l'on fournit de la chaleur à ce glaçon, sa température va s'élever progressivement de $-10\text{ }^\circ\text{C}$ à $0\text{ }^\circ\text{C}$, mais une fois à $0\text{ }^\circ\text{C}$, si l'on continue de le chauffer, il ne se transforme pas en un glaçon à $1\text{ }^\circ\text{C}$, puis $2\text{ }^\circ\text{C}$ et ainsi de suite. À $0\text{ }^\circ\text{C}$, le transfert de chaleur vers le glaçon provoquera la formation des premières gouttes : la glace va commencer à fondre, l'eau de fonte étant elle-même à $0\text{ }^\circ\text{C}$.

Si l'on fournit de la chaleur à de l'eau à $20\text{ }^\circ\text{C}$, sa température va progressivement augmenter, mais lorsque l'eau atteindra $100\text{ }^\circ\text{C}$, si l'on continue de lui fournir de la chaleur, elle ne passera pas à $101\text{ }^\circ\text{C}$, puis $102\text{ }^\circ\text{C}$... Cette fois, ce sont des bulles qui vont apparaître : l'eau liquide va se transformer en vapeur au sein du liquide, ce qui provoquera l'apparition de bulles



remplies de vapeur. C'est l'ébullition.

Un verre d'eau à $20\text{ }^\circ\text{C}$ perd de la chaleur au profit de l'air ambiant d'hiver à $-5\text{ }^\circ\text{C}$. Ce faisant, le verre d'eau voit sa température chuter. Lorsque celle-ci atteint $0\text{ }^\circ\text{C}$, l'eau va continuer le transfert de chaleur vers

l'air plus froid, mais la température de l'eau ne descendra pas en dessous de $0\text{ }^\circ\text{C}$: les premiers cristaux de glace commenceront à se former. Lorsque toute l'eau aura gelé, la température va seulement alors se remettre à diminuer pour se stabiliser à $-5\text{ }^\circ\text{C}$.

Il résulte qu'un transfert (ou échange) de chaleur s'accompagne soit d'une variation de température, ou de l'apparition de gouttes, de bulles, de cristaux, ou de leur disparition. C'est ce que l'on appelle communément les changements d'état. À ce stade, nous avons clarifié un point : ce qui se passe lorsqu'il y a échange de chaleur. Cependant, nous n'avons toujours pas dit ce qu'est la chaleur.

LE PRINCIPE DE CARNOT

Il y a spontanément échange de chaleur entre deux corps, lorsque ces derniers ne sont pas à la même température. Dans ce cas, c'est toujours le corps chaud qui cède de la chaleur au corps froid, jamais le contraire. Pourquoi « jamais le contraire » ? Parce que de mémoire d'homme, on n'a jamais vu un tel processus. Il s'agit là d'un fait d'observation que les physiciens ont érigé en un principe que l'on désigne par « second principe de la



thermodynamique » ou « principe de Carnot ».

LA NATURE DE LA CHALEUR

Intéressons nous à présent à la nature de la chaleur. Il s'agit là d'une question qui a opposé les scientifiques pendant fort longtemps. Pour certains, la chaleur était elle-même un corps, un objet matériel, un fluide... appelé « calorique » qui passait du corps chaud au corps froid. Pour d'autres, ce n'était pas de la matière, mais un mouvement, une agitation, qui était transférée. Aujourd'hui, la représentation que l'on se fait de la chaleur est beaucoup plus proche – sans être la même – de celle d'une agitation désordonnée. Cependant, et c'est le point délicat relatif à cette notion, la chaleur n'est pas une chose qui se possède. Autrement dit, la chaleur ne doit pas être identifiée avec l'agitation des particules (atomes et molécules) qui composent la matière. Elle correspond davantage à l'agitation transférée. En effet, la

chaleur est une grandeur qui quantifie un échange. Certaines choses de la vie courante sont de ce type : un baiser par exemple, ou une gifle... La chaleur fait partie de cette catégorie de choses ; elle est donnée ou reçue, sans qu'à aucun moment elle ne soit possédée. Cela signifie que des phrases comme : « la chaleur de ce corps est... » ou « A possède beaucoup de chaleur » n'ont pas de sens.

LES MODES DE TRANSFERT

Signalons que la chaleur se mesure en joule – car c'est une forme d'énergie – et qu'elle peut se transférer de trois manières différentes.

• Par transfert de proche en proche de l'agitation, grâce aux contacts entre les particules, sans que ces dernières ne soient transportées vers le corps froid : c'est la conduction. Comme exemple, citons l'échauffement des poignets métalliques d'une casserole dont le



fond est en contact avec une flamme.

• Par transport des particules agitées vers une zone où elles le sont moins : c'est la convection. Un vent frais ou chaud nous refroidit ou réchauffe de cette manière.

• Par rayonnement. Contrairement aux deux premiers mécanismes qui ne peuvent se dérouler dans le vide, ce dernier y est très efficace. Le Soleil nous réchauffe de cette manière par delà les 150 millions de kilomètres d'espace vide qui nous séparent.

LA TEMPÉRATURE

À l'inverse de la chaleur, la température, elle, est une grandeur qui ne peut s'échanger. On l'identifie à l'agitation désordonnée des particules qui composent la matière. Elle est en fait une mesure de cette agitation. Plus les particules sont agitées, plus la température est élevée, le degré d'agitation dépendant non seulement de la vitesse des particules, mais aussi de leur masse. Plus précisément, la température est une mesure de l'énergie cinétique moyenne des particules animées d'une agitation désordonnée. À titre d'exemple,

signalons que la vitesse moyenne d'agitation des molécules qui composent l'air à $20\text{ }^\circ\text{C}$ est d'environ 500 m/s . Compte tenu de cette définition, on comprend alors pourquoi il existe une limite inférieure : en effet, on ne peut pas être moins agité que lorsqu'on ne l'est pas du tout ! En fait, même au zéro absolu, il subsiste une agitation résiduelle qui s'explique par la physique quantique où le repos complet ne peut jamais être atteint. Le zéro absolu correspond donc au niveau d'agitation minimale ou degré zéro de l'agitation. Par ailleurs, dans la mesure où la température correspond à une énergie cinétique, on comprend que pour l'augmenter, il soit nécessaire de fournir au corps de l'énergie de sorte que les particules qui la constituent soient davantage agitées. Cela peut se faire de différentes manières, en particulier grâce à un corps dont la température est plus élevée. Et dans ce cas, l'énergie transférée est appelée « chaleur ».

LES PREMIERS THERMOMÈTRES

Pour apprécier la température de l'eau, nous faisons couramment appel à notre sens du toucher. Ce sens fut pendant longtemps le seul moyen d'évaluer la température d'un corps, jusqu'à l'invention des premiers instruments destinés à cela.

Thermomètre à air

L'un des premiers thermomètres, employé vers 1600, était constitué



d'un tube ouvert à un bout et prolongé à l'autre par un récipient sphérique. L'ensemble était partiellement rempli d'eau, puis tenu verticalement avec son extrémité ouverte plongeant dans un vase contenant de l'eau. La partie sphérique ne contenait alors que de l'air, l'eau emplissant une partie du tube. Par temps chaud, le niveau d'eau dans le tube était plus bas que par temps froid. La raison est que par temps chaud, l'air de la sphère se dilate et repousse ainsi l'eau du tube vers le bas. Il suffit alors de graduer le tube afin de repérer la température qu'il fait. Cependant, ce thermomètre dit à « air » était peu fiable, du moins sous cette forme, car la hauteur d'eau dans le tube était également affectée par les variations de pression atmosphérique, un phénomène que

Quelques températures

6 000 °C

Température à la surface du soleil.

30 000 °C

Température de la foudre.

2 500 °C

Température du filament d'une ampoule.

4 °C

Température de l'eau au fond des océans.

-196 °C

Température d'ébullition de l'azote liquide.

14 millions de degrés

Température au cœur du soleil.

200 millions de degrés

c'est ce que l'homme sait produire dans les tokamaks.

10nK (nanokelvin)

Froid extrême en laboratoire.

3 K

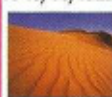
(-270,16 °C) Température moyenne de l'univers.

Enregistrée à Vostok en Antarctique le 28/07/1983



-92 °C

Relevée à El Aziza en Libye le 19/09/1922



58,2 °C

l'on ignorait à l'époque, mais qu'on allait découvrir vers 1650.

Thermomètre liquide

On invente alors le thermomètre liquide à alcool et celui au **mercure**. Un tube fin scellé en verre, et vidé de son air, se prolonge à son extrémité inférieure par une petite sphère creuse contenant l'un des deux liquides. Le volume de ces liquides dépendant de manière



sensible de la température, leur hauteur dans le tube permettait d'évaluer la température à l'aide d'une échelle graduée.

Généralement on préférait l'alcool au mercure en raison de sa plus grande dilatation : cela rendait le thermomètre à alcool plus sensible. Ainsi, entre la température de la glace fondante et de



l'eau bouillante, (que nous désignons aujourd'hui par 0 °C et 100 °C) l'alcool se dilate de 12 %, le **mercure** de seulement 2 %. Il paraît évident que l'augmentation de la sensibilité d'un thermomètre à mercure s'obtient par une réduction de son diamètre : on appelle ce genre de tube « capillaire », c'est-à-dire fin comme un cheveu.

LES ÉCHELLES DE TEMPÉRATURE

La naissance des graduations

Sur les premiers thermomètres, les constructeurs n'adoptaient pas les mêmes graduations. Souvent même, ces graduations n'étaient que des repères qualitatifs permettant seulement de comparer deux températures relativement l'une à

l'autre, mais qui ne permettaient pas de les quantifier... À ce titre, il s'agissait



davantage de « **thermoscopes** » que de « thermomètres ». En 1702, le physicien français Guillaume Amontons (1663-1705) montre que la glace fond toujours à la même température et que l'eau bout elle aussi toujours à la même température (à une pression donnée). Ces deux points naturellement « fixes » pouvaient donc servir de repères pour une standardisation des graduations et l'obtention d'une échelle universelle. Cependant, chacun s'attachant à



conserver son échelle, vers 1750, le thermomètre de l'Allemand Gabriel Fahrenheit (1686-1736) indiquait 32 et 212 pour ces deux points



fixes, alors que celui du naturaliste français **Réaumur** (1683-1757) donnait 0 et 80. Quant au thermomètre de Anders Celsius (astronome suédois ; 1701-1744) qui venait d'être

achevé, il indiquait 100 pour la glace fondante et 0 pour l'**eau bouillante**, une échelle dont le sens était inversé par rapport aux deux autres et que l'on pouvait diviser en 100 pour obtenir le degré Celsius. Mentionnons aussi l'échelle de l'Allemand Ole Römer (1644-1710) où 60 était la température de l'eau bouillante et 7,5 celle de la glace fondante. Toutes ces graduations, mise

à part celle de Celsius que nous employons de nos jours (mais inversée par rapport à sa forme d'origine), nous paraissent curieuses. Mais elles étaient toujours fondées sur une certaine logique, comme on peut s'en douter. Pour Römer par exemple, 60 allait de soi, dans la mesure où il était astronome et s'intéressait donc aux mesures de temps... Pourquoi 7,5 ? Parce que Römer fondait son échelle sur le système binaire, c'est-à-dire un comptage qui s'appuie sur les puissances de 2 (comme en informatique), soit 1, 2, 4, 8, 16... et non en base 10 où nous avons 1, 10, 100, 1000... Or, en base 2, le nombre 8 joue un rôle quelque peu privilégié (voir l'octet en informatique) et $60/8 = 7,5$... Sans entrer dans de longs développements détaillés, signalons que Fahrenheit établit son échelle en s'inspirant de celle de Römer. Tout d'abord, pour diverses raisons, il multiplie l'échelle de Römer par 4 ; puis il prend comme points fixes la température de la glace fondante et celle du corps humain. Comme sur l'échelle de Römer ces deux températures valaient 7,5 et 22,5, après multiplication par 4, Fahrenheit obtient 30 et 90. Mais souhaitant travailler avec des multiples de 16, il passe à 32 et 96. Mais ce faisant, si 32 °F est identifié à la température de la glace fondante, 96 ne correspond plus tout à fait à celle du corps, laquelle est située en fait à 98,6 °F. Le passage des degrés Fahrenheit aux degrés Celsius, les deux grands systèmes employés couramment de nos jours s'effectue de la manière suivante :

LA THERMOMÉTRIE

Dans la mesure où ingénieurs et scientifiques sont amenés à mesurer des températures allant de 10° K à 10° K, on se doute que les méthodes et les instruments employés sont nombreux et très divers. Aussi, nous allons indiquer ici seulement les principes mis en jeu par les méthodes les plus courantes.

L'expansion

Le principe des thermomètres qui fonctionnent par expansion s'appuie sur le fait que le volume de la matière augmente avec la température. Parfois on emploie un gaz dans un volume clos et on mesure sa pression d'où on déduit la température. D'autres fois, il s'agit d'un liquide dont on mesure le volume. Enfin, il peut s'agir d'un solide, plus précisément d'une bilame : l'expansion inégale de deux lamelles métalliques accolées l'une à l'autre provoque la courbure de la bilame du côté du métal la moins expansive.

La résistivité

La résistance électrique des métaux augmente avec la température. On applique donc un voltage (tension) et on mesure l'ampérage (intensité). Comme ce dernier diminue lorsque s'élève la température, on déduit la valeur de celle-ci. On emploie du **platine** (entre -200 °C et +850 °C), du

pression – s'annulent ? Cette température, lue par extrapolation des droites obtenues sur les graphiques est définie comme étant le zéro absolu : elle correspond à -273,15 °C. William Thomson (1824-1907), alias **Lord Kelvin**, donne de cette échelle qui



a pour zéro le zéro absolu une interprétation thermodynamique qui s'appuie sur le « principe de Carnot ». C'est la raison pour laquelle on désigne cette échelle par « échelle Kelvin » ou « échelle thermodynamique ». La température en kelvin s'obtient en ajoutant 273,15 à la température exprimée en degrés Celsius. Ainsi, l'eau gèle à 273,15 K et bout à 373,15 K. Notons qu'on ne parle pas de « degrés » Kelvin, mais de kelvin tout court.

LA THERMOMÉTRIE

Dans la mesure où ingénieurs et scientifiques sont amenés à mesurer des températures allant de 10° K à 10° K, on se doute que les méthodes et les instruments employés sont nombreux et très divers. Aussi, nous allons indiquer ici seulement les principes mis en jeu par les méthodes les plus courantes.

L'expansion

Le principe des thermomètres qui fonctionnent par expansion s'appuie sur le fait que le volume de la matière augmente avec la température. Parfois on emploie un gaz dans un volume clos et on mesure sa pression d'où on déduit la température. D'autres fois, il s'agit d'un liquide dont on mesure le volume. Enfin, il peut s'agir d'un solide, plus précisément d'une bilame : l'expansion inégale de deux lamelles métalliques accolées l'une à l'autre provoque la courbure de la bilame du côté du métal la moins expansive.

La résistivité

La résistance électrique des métaux augmente avec la température. On applique donc un voltage (tension) et on mesure l'ampérage (intensité). Comme ce dernier diminue lorsque s'élève la température, on déduit la valeur de celle-ci. On emploie du **platine** (entre -200 °C et +850 °C), du



cuivre (-200 °C, +250 °C) ou encore d'autres métaux...

La thermoélectricité

Si l'on relie deux fils métalliques différents par leurs extrémités respectives et si l'on maintient les deux jonctions à la même température, on n'observe rien d'intéressant. En revanche, si les jonctions ne sont pas à la même température, apparaît alors

EXPÉRIENCES DE TRANSFERT DE CHALEUR

• **Conduction**
Insérer des thermomètres dans une barre de métal de 1 m de long et percée de trous tous les 15 cm. Chauffer l'une des extrémités de la barre et observer l'échauffement progressif de la barre, par conduction.

• **Convection**
Une spirale est découpée dans du carton et suspendue à la base d'un bouchon à l'aide d'une épingle. Elle doit pouvoir tourner librement autour de cet axe. En maintenant l'ensemble au dessus d'une bougie, la spirale se met à tourner sous l'effet du courant d'air chaud descendant.

• **Rayonnement**
Le rayonnement solaire, concentré à l'aide d'une loupe sur une petite surface de papier entraîne un échauffement local de celui-ci, suffisant pour l'enflammer. Une autre expérience pour mettre en évidence le rayonnement : la flamme d'une bougie rayonne de l'énergie qui se transfère à l'observateur sous forme de chaleur.

entre elles une différence de potentiel, c'est-à-dire un voltage non nul dont la valeur dépend de l'écart de température entre les deux jonctions. Fixant la température à l'une des jonctions, on mesure le voltage, et de là on déduit la température de l'autre



En fonction des métaux employés on peut mesurer des températures allant de -200 °C à +2000 °C.

La pyrométrie

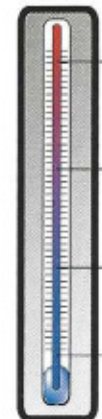
Le principe de la pyrométrie repose sur le fait bien connu que la matière est source de rayonnement : elle émet toujours un rayonnement quelle que soit sa température. Par exemple, la surface de notre corps émet des ondes électromagnétiques dont une partie est située dans la gamme infrarouge. En première approximation, le spectre émis ne dépend pas de la nature du corps rayonnant, mais uniquement de sa température de surface. Ainsi, qu'il s'agisse de la surface de notre corps à 35 °C ou de celle d'une plaque de marbre à 35 °C, les deux émettent le même spectre de rayonnement. L'analyse du spectre révèle donc la température.

L'effet Doppler

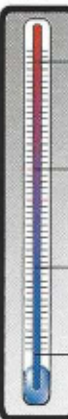
Si l'on « éclaire » un gaz avec un laser, la lumière diffusée par le gaz aura une fréquence légèrement différente de celle d'origine en raison de l'agitation des atomes ou molécules du gaz. Cette différence est due à ce que l'on appelle l'effet Doppler et permet de déterminer la température du gaz : plus le gaz est chaud et plus l'écart des fréquences est important.

Échelles de température

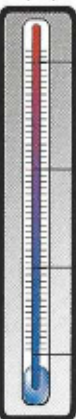
Fahrenheit
(°F)



Kelvin
(K)



Celsius
(°C)



Ébullition de l'eau

Température du corps humain

Congélation de l'eau

Zéro absolu