

## Le chaud et le froid : des notions bien connues ?

Les enfants savent très vite la différence entre un corps chaud et un corps froid. La température n'est pourtant pas une notion simple et il suffit d'écouter, sur une plage, des baigneurs se mettre à l'eau pour penser que, de plus, cette notion peut être subjective. Le froid ou le chaud sont, apparemment, des idées très relatives !

Un regard sur l'histoire de la température, ou de la chaleur, sera très rapide, car ce n'est que dans la seconde moitié du XIX<sup>e</sup> siècle qu'on eut, enfin, une définition correcte de ces quantités. Les Grecs anciens décrivaient le monde à partir de quatre éléments : la terre, l'air, l'eau et le feu. Mais ils avaient déjà rajouté une cinquième substance qu'ils appelaient « le calorique ». Si les quatre éléments ont évolué au cours des siècles, le calorique, lui, a continué longtemps à exister puisque l'excellent chimiste qu'était Lavoisier en parle encore dans son *Traité élémentaire de chimie*, publié en 1789 : « Dans toute espèce de gaz, on doit distinguer le calorique, qui fait en quelque sorte l'office de dissolvant, et la substance qui est combinée avec lui et qui forme la base. »

Ce n'est pas pour cet acte de foi envers le calorique que Lavoisier fut guillotiné – et c'est heureux ! – car sa croyance était partagée par nombre de ses collègues. Le calorique était défini comme un fluide immatériel, subtil et indestructible, et il expliquait assez bien ce qu'on savait déjà sur les échanges de chaleur. On savait, en particulier, que si l'on met un corps chaud au contact d'un corps froid, les températures s'égalisent à une température intermédiaire. Il était donc tentant de décrire cela par un fluide allant du corps chaud vers le corps froid ; et ce fluide devait être immatériel, car les mesures montraient qu'un corps ne change pas de masse quand on change sa température.

On s'était déjà servi de cette égalisation des températures par contact pour construire des thermomètres, depuis presque deux siècles : car on savait déjà mesurer la température, même si on ne savait pas du tout à quelle propriété physique du corps elle correspondait. Il semble que ce soit un médecin istrien, Santorio Santorio, professeur de médecine théorique à Padoue, qui eut, le premier, l'idée de mesurer « le chaud » par un thermoscope en 1612 : il désirait, en fait, suivre l'évolution de la fièvre chez ses malades et utilisait une sorte de thermomètre à air, qui permettait de voir le changement de température du malade lorsque celui-ci l'introduisait dans sa bouche ou le tenait dans le creux de la main. Signalons que plusieurs biographes de Galilée lui ont gentiment attribué l'invention de Santorio. Signalons aussi que ce premier thermomètre était fort mauvais, c'est-à-dire que les mesures n'étaient pas du tout reproductibles, car elles dépendaient fortement de la pression de l'air, ce qu'on ignorait à l'époque.

Ce thermomètre fut perfectionné par le grand-duc de Toscane, Ferdinand II, qui, en 1654, fit fabriquer le premier thermomètre véritable, à alcool, constitué par un tube de verre fermé à une extrémité et terminé à l'autre par un réservoir en forme de boule. Les thermomètres florentins seront pour quelque temps les meilleurs sur le marché et leur principe restera longtemps la base de tous les thermomètres. Restait à fixer l'échelle pour obtenir une mesure en nombres. En effet, sur un thermomètre simple, tout ce qu'on peut constater c'est que, lorsque la température augmente, le liquide monte dans le tube. Mais ce n'est pas très précis. On va alors définir deux points fixes sur le tube auxquels on attribue arbitrairement deux valeurs. Le XVIII<sup>e</sup> siècle vit trois propositions d'échelle qui nous sont restées.

Fahrenheit fixa le zéro de son échelle comme étant la plus basse température mesurée durant le rude hiver 1708-1709 dans sa ville natale de Danzig, ce qui lui permettrait, pensait-il, d'avoir des températures toujours positives. Il prit comme valeur supérieure la température du sang humain, c'est-à-dire la température interne du corps, à laquelle il attribua une valeur de 96 degrés. Mais il utilisa un cheval pour ses premiers calibrages et ses mesures n'étaient pas totalement exactes ; aussi, l'échelle dite de Fahrenheit a-t-elle été légèrement redéfinie. Cette température est toujours utilisée dans de nombreux pays anglo-saxons : avec l'échelle redéfinie, la température d'un corps humain sain est de 98,6 °F et non plus de 96 °F.

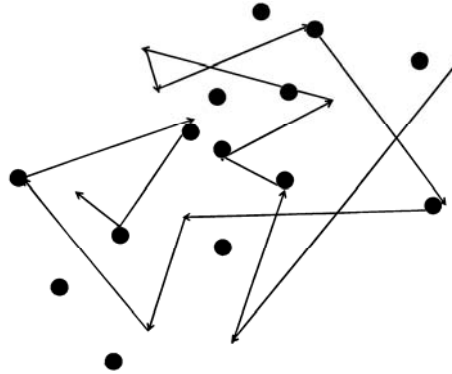
Mentionnons aussi René-Antoine Ferchault de Réaumur, naturaliste vendéen, qui proposa, en 1730, de prendre comme points fixes la solidification et l'ébullition de l'eau mais les sépara par 80 divisions.

Et arrivons-en au père de notre échelle centigrade, Anders Celsius, astronome et physicien suédois, qui inventa, en 1742, l'échelle des températures qui porte son nom, mais en choisissant la graduation 0 pour l'ébullition et la graduation 100 pour la glace fondante : le résultat était que la température diminuait quand un corps devenait de plus en plus chaud ! Carl von Linné, collègue de Celsius à l'université d'Uppsala, inversa cette échelle et lui donna l'aspect actuel.

À la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle, on savait bien mesurer un phénomène dont on ignorait complètement les causes et la nature. Les études thermiques se poursuivirent, avec beaucoup de succès, au XIX<sup>e</sup> siècle, mais toujours sans comprendre la nature exacte des phénomènes observés : en particulier, les machines à vapeur fonctionnaient avant qu'on ait compris pourquoi l'eau décidait brusquement, à 100 °C, de devenir de la vapeur d'eau ! Il a fallu attendre l'acceptation, par certains physiciens, de la théorie atomique pour qu'on puisse

avancer : cette hypothèse fut proposée par John Dalton, dès 1808, dans son livre intitulé *Nouveau Système de philosophie chimique* où il montrait que tous les résultats déjà connus en chimie s'expliquaient si l'on supposait que toute la matière – solide, liquide ou gazeuse – est composée de petites boules, les atomes. Si les chimistes utilisèrent cette idée avec beaucoup de succès, les physiciens, eux, s'intéressèrent peu à cette hypothèse jusqu'au milieu du siècle, où l'idée que les propriétés thermiques étaient liées au mouvement des atomes gagna du terrain, et il faut citer les noms de Clausius et Krönig comme pionniers. Mais, c'est avec Maxwell et Boltzmann que la théorie cinétique atomistique des fluides prit vraiment naissance : l'un et l'autre, indépendamment, appliquèrent la statistique à des gaz composés d'atomes pour expliquer, de façon mathématique, la plupart des propriétés connues, en particulier la pression et la température.

Maxwell, en 1859, modélisa un gaz comme un ensemble de sphères dures, subissant d'innombrables collisions aléatoires : un litre de gaz contient environ 25 000 milliards de milliards d'atomes... d'où la difficulté de calculer le résultat de leurs mouvements ! À l'intérieur d'un récipient, chaque atome se déplace suivant un parcours fait de milliers de lignes brisées :

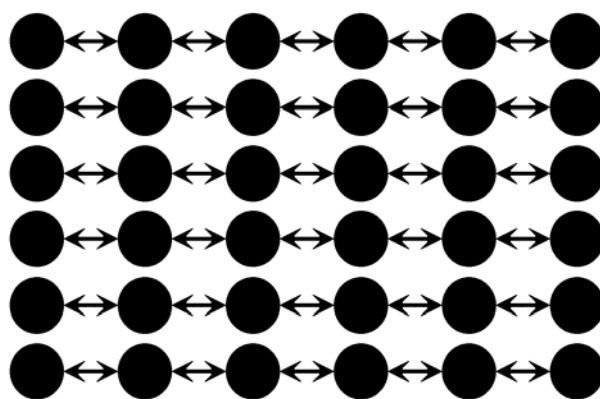


Il y a, en effet, des collisions entre atomes à l'intérieur du gaz. Chaque fois qu'on a une collision, les deux atomes concernés changent de direction et de vitesse. Pour fixer les idées, les vitesses moyennes des atomes pour un gaz à la température ambiante et sous la pression atmosphérique sont supérieures à la vitesse du son, de l'ordre de 1 800 km/h ! Dans ces conditions, la distance moyenne entre deux collisions est de 0,3 micron, le micron étant le millième d'un millimètre : ce qui semble petit, mais c'est tout de même 3 000 fois le rayon d'un atome. On peut donc considérer que les atomes sont trop loin les uns des autres pour interagir, sauf au moment de la collision. Enfin, pour compléter les ordres de grandeur, il se produit environ un milliard de collisions par seconde ! Pensez à tous les atomes contenus dans l'air qui sont entrés en collision avec vous depuis que j'ai commencé à parler ! Heureusement, leur masse est si faible par rapport à la nôtre que nous ne nous en rendons absolument pas compte, sauf que c'est ce qui explique ce que nous appelons la « pression atmosphérique ». En effet, lorsqu'un atome rencontre la paroi du récipient qui le contient, il rebondit mais en exerçant une force sur cette paroi : la force exercée par un atome est certes faible, mais il y a tellement d'atomes que l'ensemble de ces chocs produit une pression sur la paroi. C'est ce qu'on appelle la « pression du gaz ». Depuis le XVII<sup>e</sup> siècle, des études expérimentales ont permis de connaître les variations de la pression et du volume d'un gaz en fonction de la température – NB : on utilisait couramment la température à l'échelle macroscopique mais sans savoir ce à quoi elle correspondait ! Maxwell calcula cette pression en fonction de la vitesse moyenne des particules et, en comparant les résultats de ses calculs aux lois expérimentales, il montra que la température était liée, de façon très simple, à la valeur moyenne de la vitesse des particules : plus cette vitesse est grande et plus la température augmente. Si on met en contact deux gaz à températures différentes, les collisions des atomes plus rapides avec les atomes moins rapides vont conduire à une accélération des atomes lents et à un ralentissement des atomes rapides jusqu'à ce que les deux populations aient la même vitesse moyenne, c'est-à-dire, la même température. Le processus n'est évidemment pas instantané.

Une des conséquences de cette découverte est de pouvoir fixer l'échelle des températures : lorsque les atomes d'un corps sont tous au repos, la température de ce corps est nulle. On ne peut, bien évidemment, aller en dessous de cette température. Il existe donc un zéro absolu, c'est-à-dire ne dépendant pas de l'imagination d'un savant – qu'il s'appelle Fahrenheit, Réaumur, Celsius ou Von Linné ! Ce zéro se situe à environ - 273 °C et la température mesurée en prenant cette valeur comme zéro s'appelle la « température absolue ». Elle ne comprend que des températures positives et est mesurée en Kelvin, en hommage au physicien William Thomson lord Kelvin. Comme tout le monde était habitué aux degrés Celsius, on a gardé la même valeur de degré pour les deux échelles. Donc un Kelvin représente la même variation de température qu'un degré Celsius, mais l'échelle est décalée de 273 °C. Par exemple, la température de solidification de l'eau est égale à 273,16 K ou à 0 °C.

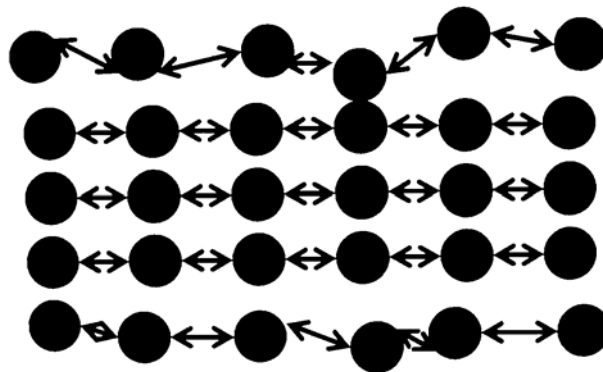
Dans un liquide, les atomes sont beaucoup plus proches les uns des autres et interagissent fortement entre eux : ils sont liés. Il semble alors difficile de les imaginer animés de grandes vitesses, vitesses qui seraient différentes suivant la température. Pourtant, ce mouvement d'atomes dans un liquide était déjà connu depuis 1827, année durant laquelle un naturaliste écossais, Robert Brown, avait observé le pollen d'une plante, *Clarkia pulchella*, au microscope. Il constata, à la surface d'une goutte d'eau, que de très petites particules de ce pollen bougeaient dans tous les sens. Il crut, tout d'abord, à la manifestation d'un fluide vital. Mais, ayant poursuivi ces investigations sur des corps non organiques, il observa le même phénomène. En 1828, il publia ces observations dans un petit opuscule dont le très long titre décrit tout à fait le contenu : *Bref compte-rendu d'observations microscopiques de particules contenues dans le pollen de plantes ; et de l'existence générale de molécules actives dans des corps organiques et inorganiques*. Il faudra attendre presque quatre-vingt ans pour que l'explication de ces mouvements aléatoires soit donnée, en 1905, par Einstein, qui avait décidément beaucoup de compétences diverses ; explications vérifiées expérimentalement par Jean Perrin qui en déduisit une détermination très précise du nombre d'atomes dans un volume donné de gaz. Einstein montra qu'une particule suspendue dans un fluide était soumise à un bombardement incessant par les molécules en mouvement du fluide : chacune de ces collisions donne un tout petit déplacement à la particule, qui est inobservable même au microscope, mais les collisions sont très nombreuses. On pourrait penser que, ces mouvements étant aléatoires en direction comme en grandeur, le mouvement total résultant de quelques milliards de collisions – c'est-à-dire pendant quelques secondes – sera nul et que Brown avait abusé du whisky quand il voyait ses particules se déplacer. Il n'en est rien : Einstein calcula le déplacement moyen des particules et montra que ce déplacement était non nul et augmentait avec le temps ; ses résultats correspondent exactement aux mesures que fit Perrin par la suite. Ce mouvement est décrit avec humour par nos collègues anglo-saxons comme celui du marin qui sort d'un bar et part en direction de son bateau : son état d'ébriété avancée rend ses déplacements complètement aléatoires. Néanmoins, au bout d'un certain temps, on peut montrer qu'il se trouvera à une certaine distance du bar initial et il continuera à s'en éloigner, peu à peu. Je n'ai pas dit pour autant qu'il allait regagner son bateau, car la direction, elle, demeure complètement aléatoire !

Les travaux d'Einstein et de Perrin sur le mouvement brownien apportent la preuve définitive que l'hypothèse atomique était correcte. Car il faut se rappeler que, jusqu'au début du  $xx^e$  siècle, de nombreux physiciens n'accordaient qu'un statut provisoire à la réalité des atomes. Wilhelm Ostwald, chimiste balte et prix Nobel de chimie en 1909, parlait de l'atome comme d'un « concept hypothétique qui permet une description très pratique de la matière ». Et Ernst Mach, qui était pourtant un physicien tchèque remarquable, en particulier connu pour ses études sur les vitesses supersoniques, considérait les atomes comme des fictions commodes ! Mach réussit d'ailleurs à entraver la carrière de Boltzmann, dont il réfutait les théories statistiques atomistiques, et à le pousser dans des crises de dépression qui finiront par conduire Boltzmann au suicide en 1906, juste avant que l'hypothèse atomique ne soit définitivement prouvée par les expériences de Perrin.



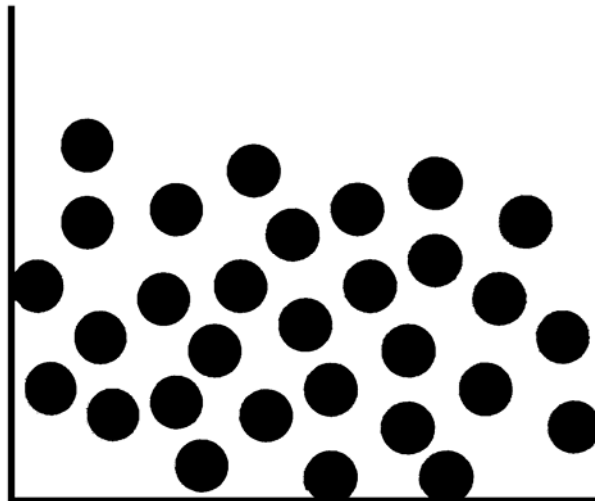
Cristal parfait, température basse

Les solides n'échappent pas à ce problème : ils sont également constitués d'atomes, en général ordonnés très régulièrement dans une structure cristalline. Les atomes ont donc des positions parfaitement fixées, ce qui explique la rigidité d'un solide, comparé à un liquide. Mais les atomes peuvent vibrer autour de ces positions : ce sont la vitesse et l'amplitude de ces vibrations qui vont changer avec la température. Les atomes en surface vont évidemment être moins liés puisqu'ils ne sont pas complètement entourés par des atomes frères :



Cristal imparfait, température plus haute

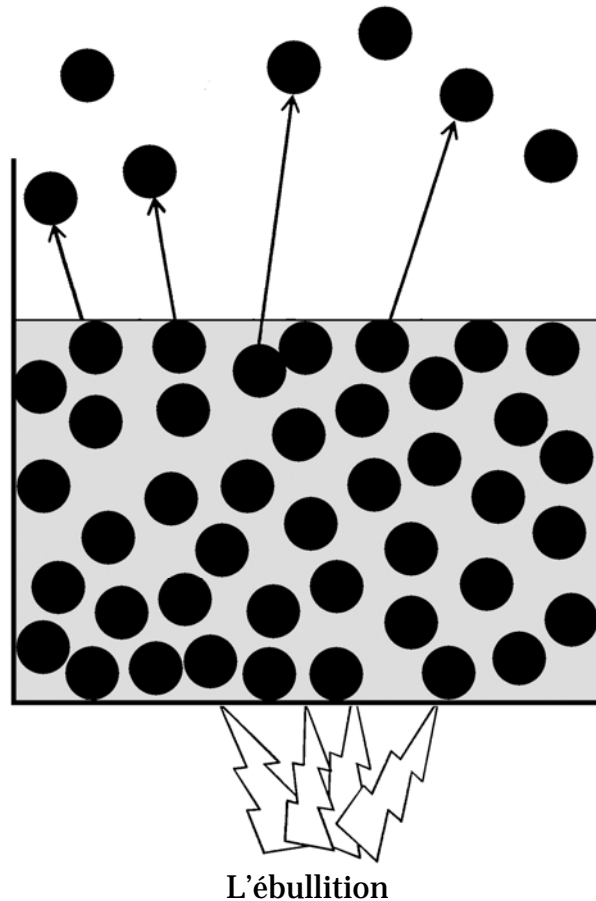
et lorsque le solide est chauffé, c'est-à-dire que les atomes vibrent de plus en plus à des vitesses de plus en plus importantes, les atomes en surface vont avoir tendance à se déplacer un peu par rapport à leurs positions « normales ». Ceci sera également vrai pour les atomes en profondeur, mais moins fréquemment. Le cristal, peu à peu, sous l'effet de la chaleur, voit apparaître des défauts : il devient de plus en plus désordonné. Lorsque la chaleur fournie, c'est-à-dire l'énergie donnée au cristal, devient égale à l'énergie de liaison, le solide cesse d'être un cristal,



Milieu désordonné, liquide

il devient complètement désordonné. Il fond, c'est à dire que les atomes forment alors un liquide.

Ce liquide, qu'il faut maintenant contenir dans un récipient car il est moins rigide que le solide, est composé des mêmes atomes, qui se déplacent toujours. Les atomes interagissent encore entre eux, mais forment un ensemble désordonné. Le liquide va, à son tour, pouvoir se transformer pour donner un gaz, c'est-à-dire un état où les atomes sont suffisamment éloignés les uns des autres pour ne pas interagir, sauf pendant les collisions. Il faut distinguer deux phénomènes différents : l'évaporation et l'ébullition. Nous savons tous qu'il faut chauffer de l'eau à 100 °C pour qu'elle bouille, ce qui correspond à une formation intense de vapeur d'eau ; mais nous savons aussi que, bien en dessous de 100 °C, l'eau va « disparaître » du linge mouillé ou de la surface de notre peau lorsque nous sortons de la mer. L'eau s'évapore, ce qui, de nouveau, correspond à une formation de vapeur d'eau, mais beaucoup moins intense.

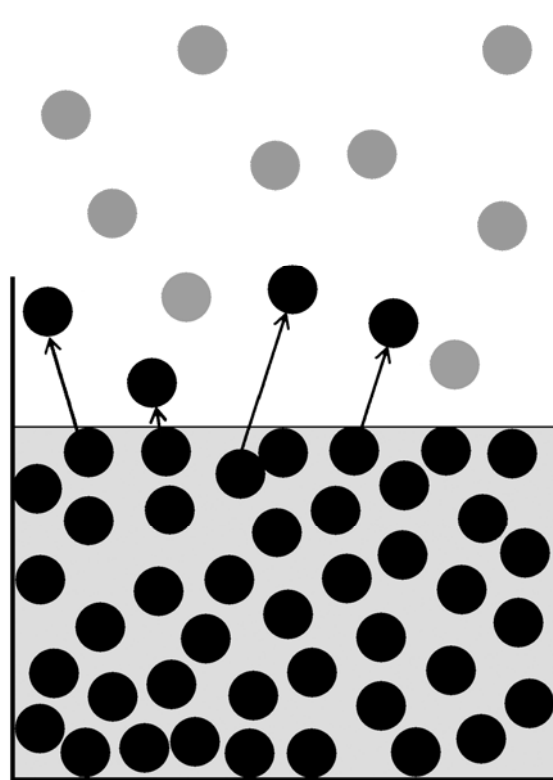


Commençons par l'ébullition et prenons l'exemple de l'eau, composée de molécules formées d'un atome d'oxygène et de deux atomes d'hydrogène. C'est un peu le même processus que pour la fusion : au fur et à mesure que la température monte, les molécules d'eau acquièrent une énergie de plus en plus grande. A une certaine température, 100 °C pour l'eau sous la pression atmosphérique, cette énergie va être suffisante pour compenser l'énergie de liaison entre les molécules. Celles-ci vont donc se libérer et partir dans l'espace. Là aussi, ce sera plus facile pour les molécules en surface qui commenceront l'ébullition ; mais, si la chaleur continue à arriver toutes les molécules voudront s'en aller et l'ébullition gagnera tout le liquide. Tant qu'il restera des molécules dans le liquide, la température n'augmentera pas car l'énergie fournie sert à « libérer » les molécules : dès qu'elles dépassent une certaine vitesse, elles ne sont plus liées à l'intérieur du liquide : il est donc inutile de faire bouillir de l'eau à gros bouillons pour faire cuire plus vite ce qu'il y a dedans, la température ne dépassera pas 100 °C ! Alors, comment faire pour augmenter cette température de l'eau en ébullition ? La solution est simple : il faut empêcher les molécules d'eau de quitter le liquide quand elles ont atteint l'énergie correspondant à 100 °C. Pour cela, une possibilité est d'exercer une pression sur les molécules c'est-à-dire sur le liquide : pour quitter le liquide, les molécules devront avoir une énergie suffisante non seulement pour vaincre les forces de liaison entre elles dans le liquide, mais encore pour repousser les forces de pression. En termes plus scientifiques, on dira que la température d'ébullition d'un liquide dépend de la pression exercée sur ce liquide.

Une application immédiate est évidemment la cocotte-minute : visser le couvercle de la cocotte empêche l'air qui chauffe de se répandre dans l'atmosphère. Sa pression augmente et, lorsque l'eau contenue dans la cocotte arrive à 100 °C, la pression au-dessus d'elle est nettement plus forte que la pression atmosphérique. L'eau ne peut se vaporiser et restera sous forme liquide au-dessus de 100 °C. Pour éviter les accidents, une soupape empêche de faire monter la pression à des valeurs excessives : dans nos cocottes, elle est réglée pour limiter la pression au double de la pression atmosphérique. Sous cette pression, la température d'ébullition de l'eau est d'environ 130 °C, ce qui explique que la cuisson se fasse plus vite que sous atmosphère normale. Une autre application concerne la cuisine en haute altitude : la pression atmosphérique diminue avec l'altitude ; dans une station de ski à 2 100 m d'altitude, la pression ne sera plus que de 760 hPa, soit les trois quarts de la pression au niveau de la mer. Le phénomène inverse à la cocotte-minute se produit : la température d'ébullition de l'eau est plus basse, car il est plus facile aux molécules d'eau de quitter le liquide. Aussi, la cuisson des œufs à la coque s'avère plus longue que d'habitude ; quand au thé fait avec de l'eau à 93 °C, j'aurais tendance à dire qu'il n'est pas bon !

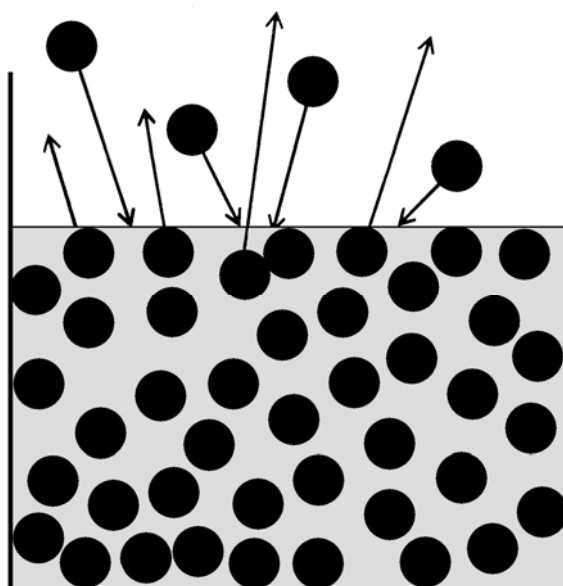
Considérons maintenant un liquide non chauffé, abandonné à lui-même au contact de l'air : une flaque d'eau dans la rue, du linge mouillé pendu, etc. Nous savons que le linge sèche, du moins dans nos régions ! Mais vous-êtes vous jamais demandé pourquoi l'eau disparaissait, sans que vous chauffiez votre linge à 100 °C ? Que se passe-t-il ?

Considérons un système simple, par exemple un récipient contenant de l'eau : les molécules de surface sont moins liées et, comme les autres, elles sont animées d'une certaine vitesse. Nous savons que les vitesses des molécules dans le liquide ont des directions aléatoires et une valeur moyenne fixée par la température du liquide : mais ces vitesses ne sont pas toutes identiques, certaines sont plus grandes que la vitesse moyenne et d'autres plus faibles. Il va donc arriver que certaines molécules,



Début de l'évaporation

près de la surface, aient une vitesse suffisante pour quitter le liquide : la probabilité est faible mais, comme il y a beaucoup de molécules, cela se produira, en fait, assez souvent. Ces molécules vont rencontrer les molécules d'air qui sont au-dessus et, après quelques collisions, il y aura des molécules d'eau qui auront changé de direction et rentreront dans le liquide.



À l'équilibre

Un équilibre va s'établir quand il y aura autant de molécules sortant du liquide que de molécules rentrant dans le liquide. Néanmoins, s'il y a un grand volume d'air autour du liquide, l'équilibre sera lent à s'établir. C'est ainsi qu'il est conseillé de faire sécher son linge dans un grand volume, si possible dehors où on peut considérer que le volume est infini, plutôt que dans une toute petite pièce. Un courant d'air, qui emportera les molécules d'eau évaporées, sera encore une meilleure solution puisqu'il évitera l'équilibre et que, donc, toutes les molécules d'eau pourront s'évaporer. Une dernière application intéressante de cette évaporation concerne la température du liquide restant : il est évident que les molécules qui réussissent à quitter le liquide sont celles qui ont les vitesses les plus grandes, en particulier elles ont des vitesses bien supérieures à la vitesse moyenne des molécules d'eau. Par conséquent, après leur départ, la vitesse moyenne aura diminué, donc la température du liquide sera plus basse. Si l'équilibre s'établit, ce refroidissement du liquide sera très lent. Mais, si vous rompez l'équilibre en soufflant sur votre tasse de thé ou de café, vous accélérerez ce refroidissement. Le même phénomène se produit lorsque vous êtes mouillés, soit en sortant de l'eau, soit parce que vous avez de la sueur sur votre peau : je pense que vous avez tous remarqué que l'évaporation des gouttes d'eau refroidit votre peau.

On pourrait multiplier à l'infini les exemples de conséquences de ces quelques remarques sur la théorie atomistique et je vous laisse le soin d'observer autour de vous les multiples champs d'application de cette communication. Je voudrais néanmoins insister sur le fait que j'ai considérablement simplifié les phénomènes : à mon avis, la thermodynamique est une des branches de la physique parmi les plus difficiles. Mais j'espère vous avoir montré que la température n'est ni une notion subjective ni un concept flou. J'espère surtout vous avoir fait comprendre que, comme M. Jourdain, vous faites tous de la physique sans le savoir.

**Geneviève NIHOUL**