

Les limites de la physique

JEAN-MARC LÉVY-LEBLOND

La découverte de limites au refroidissement ou au mouvement a suscité la mise au point de nouveaux concepts en physique.

Selon la théorie cosmologique grecque, le monde existait parce que le fini et le borné, le *péras*, l'emportaient sur l'infini, ou *apeiron*. Quand les mathématiciens grecs découvrirent que $\sqrt{2}$ était un nombre irrationnel, c'est-à-dire un nombre dont la période des décimales est infinie, cette vision de l'Univers s'effondra : ce premier inattendu était la découverte de l'ouverture sur l'infini.

Il y en eut bien d'autres. Plus près de nous, les physiciens du XIX^e et du XX^e siècles ont plutôt été gênés par l'introduction de limites finies, là où l'esprit s'était accoutumé à l'infini : vitesse finie de la lumière, limite au refroidissement (température du zéro absolu), etc. Pourquoi cette gêne inattendue ? Commençons l'examen des limites inattendues de la physique par un exemple : le premier par ordre chronologique qui ait mobilisé l'attention des physiciens nous servira à analyser d'autres crises conceptuelles que nous considérerons ensuite.

La température est une grandeur physique à laquelle nous sommes habitués parce que nous utilisons des thermomètres, où nous voyons varier la hauteur d'une colonne de mercure ou bien les nombres d'un affichage numérique. Nous savons bien, intuitivement, que nous pouvons avoir plus ou moins chaud, mais la science a fait un grand progrès, à la fin du XVIII^e siècle, quand elle a transformé cette impression corporelle en une grandeur physique numérisée. À cette occasion, les physiciens ont défini des notions comme celles de température et de chaleur (ils ont découvert ensuite que cette dernière était une forme particulière d'énergie).

Nous associons le réchauffement à l'augmentation de température, mais cette association est conventionnelle. Elle résulte sans doute de l'observation du sens de variation de la hauteur de la colonne de mercure dans les

thermomètres anciens. D'autre part, l'échelle des températures semble se prolonger indéfiniment vers le bas ou vers le haut. Pour des raisons pratiques et techniques, elle est limitée (on ne veut pas faire des tubes de plusieurs mètres de long), mais nous savons que cette limitation n'a pas d'importance théorique. En outre, le zéro des températures est affaire de convention : celui de l'échelle Celsius est commode, parce que c'est la température de la glace en équilibre avec l'eau, mais d'autres échelles sont encore largement pratiquées à la surface du Globe, celle de Fahrenheit, par exemple, dont l'origine, le zéro des températures, est différent de celui de l'échelle Celsius.

De ce fait, les températures négatives ne sont conceptuellement pas différentes des températures positives. Nous avons donc tendance à penser spontanément que, de même qu'il peut faire de plus en plus chaud, au sens de la sensation, la température peut descendre indéfiniment.

Comment réaliser les thermomètres qui mesureront ces variations ? On peut utiliser la dilatation des solides ou des liquides pour obtenir une mesure de la température, mais les physiciens du XIX^e siècle ont préféré une échelle absolue de températures, fondée sur les propriétés de dilatation des gaz parfaits (qui sont une idéalisation des gaz réels). Le volume d'un gaz à pression constante varie linéairement avec la température, au moins pour les échelles de température que nous connaissons entre 0 et 100 degrés. Quand on extrapole cette échelle vers les températures inférieures, on observe que le volume diminue, mais pas indéfiniment : on ne peut pas concevoir un volume qui soit moins que rien, et le volume d'un gaz parfait tend vers zéro à une température finie, égale à $-273,15$ degrés sur l'échelle Celsius. C'est ce que l'on décide de nommer le zéro absolu.

Pourquoi absolu ? Parce que, insistons, on ne peut pas imaginer un gaz dont

le volume serait négatif : le volume est une grandeur qui, par essence, ne peut être négative.

Voilà qui est inattendu : la température, qui semblait pouvoir monter et descendre indéfiniment, a le même comportement qu'un volume et ne peut pas devenir plus petite qu'une certaine grandeur. Or cette grandeur est de $-273,15$ sur une échelle qui est conventionnelle et arbitraire. Aussi les physiciens ont recalibré l'échelle ancienne en prenant cette température comme zéro de l'échelle des températures et en comptant les températures à partir de cette origine : ils ont ainsi créé l'échelle Kelvin.

La découverte d'une borne inférieure des températures n'a pas été une grande surprise, parce qu'elle s'est faite progressivement, en quelques décennies, en même temps que les études de la dilatation des gaz ; la surprise s'était émoussée. Cependant la découverte du zéro absolu a engendré un malaise pédagogique et épistémologique.

Puis les physiciens modernes ont construit des appareils à froid de plus en plus perfectionnés, et atteint des températures de plus en plus faibles. Ils ont refroidi des échantillons à quelques dixièmes de degré, puis à quelques millièmes de degré... mais les progrès devenaient difficiles. Alors que le zéro absolu semblait numériquement à portée de main, il se révélait hors d'atteinte pratique : comme l'infini, on ne peut pas l'atteindre.

Face à cet infini de la pratique, les théoriciens ont cherché des équations plus agréables à manipuler, plus simples à écrire, et ils ont proposé un changement de variable, afin que l'échelle classique, qui est apparemment bornée d'un côté, par $-273,15^{\circ}\text{C}$, soit transformée en une échelle infinie à gauche comme à droite. Dans le cadre théorique qui est le nôtre, il ne semble pas exister de limite supérieure pour les températures, mais rien n'indique que nous n'en découvrirons pas un jour, en vertu de principes... inattendus.

Si le zéro de l'échelle Kelvin est absolu, revenons-y, c'est qu'il correspond à une limite de la diminution des températures, qui est universelle : tous les gaz cessent leur contraction à cette température parce que, comme les physiciens l'ont progressivement compris, la vitesse des molécules et des atomes devient progressivement nulle ? À la température de zéro Kelvin, il n'y a plus de mouvement.

L'INATTENDU DE LA VITESSE

Ce phénomène du mouvement est cher aux physiciens, parce que c'est lui qui nous donne l'essentiel de notre percep-

tion du monde. Pendant longtemps, les physiciens se sont demandés quelle était la vitesse de propagation de la lumière. Galilée, déjà, savait que le son se propage à une vitesse finie. Il avait mesuré cette vitesse, puis il avait tenté de mesurer la vitesse de la lumière en plaçant des assistants, de nuit, sur des collines distantes de quelques kilomètres : il ouvrait la porte d'une petite lanterne et mesurait le temps après lequel il voyait une autre lanterne s'ouvrir sur une colline voisine ; en divisant la distance entre les collines par la moitié du temps mesuré, il espérait déterminer la vitesse de la lumière. L'expérience n'a pas donné de mesure fiable, mais Olaf Römer, au XVII^e siècle, obtint une valeur de la vitesse de la lumière en utilisant des bases astronomiques. La première bonne mesure de la vitesse de la lumière fut toutefois l'œuvre des physiciens français Léon Foucault et Hippolyte Fizeau, au milieu du XIX^e siècle.

Ces derniers trouvèrent une valeur de la vitesse de la lumière égale à environ 300 000 kilomètres par seconde. Les physiciens ne furent pas surpris de cette valeur particulière, mais une caractéristique inattendue apparut quand on observa, vers la fin du XIX^e siècle, que cette vitesse de la lumière semblait intervenir aussi dans des phénomènes électriques ou magnétiques, qui paraissaient tout à fait indépendants des phénomènes optiques : quand on effectue des mesures de magnétostatique, avec des aimants qui ne bougent pas, et d'électrostatique, avec des charges électriques immobiles, une relation numérique simple entre les constantes électriques et magnétiques permet de retrouver une vitesse qui, numériquement... est voisine de celle de la lumière!

Est-ce une coïncidence? Le physicien écossais James Clerk Maxwell montra que non, lorsqu'il intégra l'électricité et le magnétisme dans une théorie plus générale, l'électromagnétisme, prédisant du même coup l'existence d'ondes électromagnétiques, qui se propagent à la vitesse de la lumière. Ainsi la lumière est un phénomène électromagnétique, une forme d'ondes électromagnétiques parmi d'autres. On comprend alors que la vitesse de la lumière caractérise une immense classe de phénomènes. Au lieu de parler de vitesse de la lumière,

on devrait parler de vitesse électromagnétique.

L'inattendu, cette fois, était complet, car, avant son apparition, nul ne savait comment le problème serait résolu. En outre, le travail de Maxwell eut un fruit merveilleux : il introduisit en physique le concept, nouveau, de champ. Jusque vers 1860, la physique vivait sur l'acquis newtonien, lequel admettait que le monde était composé de corpuscules et de forces qui agissent entre eux. La théorie de l'électromagnétisme nous apprit à penser en termes d'entités globales, étendues, non localisées.

Cette découverte eut d'autres conséquences, notamment sur les théories cosmologiques. Avant la théorie électromagnétique, on croyait que la lumière se propageait dans un milieu étrange, que l'on avait nommé l'éther. Ce mot, tiré du grec, désignait n'importe quelle substance extrêmement volatile ; les pharmaciens et les chimistes avaient depuis longtemps nommé éther un corps effectif, volatil, et les physiciens employaient ce même mot pour désigner une substance hypothétique qui avait la propriété d'entrer dans tous les pores de la matière : puisque la lumière se propage dans le verre, si l'éther est

le support de la propagation des ondes lumineuses, tout comme l'eau est le support de la propagation des vagues, c'est que l'éther s'infiltrait dans le verre ; plus généralement, il était présent, pensait-on, dans tous les matériaux.

On avait inventé l'éther pour que les ondes électromagnétiques puissent se propager dans le vide, mais cet éther créa plus de difficultés qu'il n'en résolut : il devait être incroyablement plus ténu et plus fluide que tous les milieux matériels connus, mais, en même temps, il devait être incroyablement rigide. Pourquoi incroyablement rigide? Parce que la vitesse de propagation d'une onde dépend de la rigidité du milieu : le son, par exemple, se propage beaucoup plus vite dans l'acier, rigide, que dans l'air, qui est mou. Cette relation entre rigidité et vitesse du son résulte du fait que, quand on fait bouger une molécule à une extrémité du milieu matériel de propagation, les interactions moléculaires propagent l'ébranlement de proche en proche, avant de mettre en mouvement des molécules de l'autre extrémité ; plus le milieu est dense,

plus les interactions sont nombreuses, et plus l'ébranlement se propage rapidement. Par conséquent, si la lumière se propageait dans l'éther à une vitesse si élevée, c'était, semblait-il, que l'éther était incroyablement rigide.

ÉLECTROMAGNÉTISME ET RELATIVITÉ

Pouvait-on mettre en évidence le mouvement de la Terre dans l'éther? L'éther semblait traverser la Terre, comme tous les autres milieux matériels, mais la Terre en mouvement dans l'Univers transportait-elle son éther avec elle? C'était improbable pour plusieurs raisons. D'abord l'éther semblait si fluide qu'il devait traverser la Terre sans être entraîné par elle. Deuxièmement, des mesures astronomiques montrèrent que la lumière émise par les étoiles permettait de mettre en évidence le mouvement de la Terre par rapport aux étoiles lointaines (phénomène d'aberration), ce qui prouvait que la lumière n'était pas entraînée par l'hypothétique éther.

La notion de champ débarrassa la physique de la notion d'éther : elle permit de concevoir la propagation d'une



1. Appareil utilisé par Léon Foucault pour mesurer la vitesse de la lumière.

Musée des arts et métiers - CNAM - Paris

onde sans milieu sous-jacent. Autrement dit, la notion d'onde, qui, jusque vers 1865, ne semblait correspondre qu'à la déformation d'un milieu, devint brusquement un être à part entière, qui n'avait plus besoin de substrat. L'onde, ou plutôt le champ, devient un objet physique.

Pouvait-on alors mesurer directement la vitesse de la lumière par rapport à la Terre? Dans un train, on peut mesurer la vitesse des sons émis à une extrémité du wagon : elle est différente de celle que l'on mesure à partir du repère immobile des rails : le son, qui se propage dans le couloir du wagon à 300 mètres par seconde, se propage à 300 mètres par seconde plus 10 ou 20 mètres par seconde (la vitesse du train) pour quelqu'un qui est immobile sur le quai d'une gare. Peut-on faire la même expérience avec la lumière? C'est la fameuse expérience du physicien américain Albert Michelson (1851-1931), qui donna un résultat négatif, au début du siècle. Le résultat était inattendu : la vitesse de la lumière ne s'additionnait pas avec celle de la Terre, comme on s'y attendait depuis Galilée.

Pourquoi la vitesse de la lumière refusait-elle obstinément de s'ajouter? Albert Einstein montra qu'elle est une limite absolue, valable pour tous les corps. On découvrit d'abord que la vitesse de la lumière est identique dans tous les repères : la lumière émise par un corps qui se déplacerait aux neuf dixièmes de la vitesse de la lumière serait, pour nous, toujours, de 300 000 kilomètres par seconde. À la fin du XIX^e siècle, la vitesse de la lumière apparut ainsi comme une limite.

Naturellement des physiciens proposèrent alors de procéder comme pour les températures, afin que la vitesse de la lumière, valeur inaccessible (sauf pour la lumière), soit considérée comme infinie : de même qu'il est de plus en plus difficile de s'approcher de la température du zéro absolu, il est de plus en plus difficile de s'approcher de la vitesse de la lumière. En revanche, une différence apparut, parce qu'il semble exister deux types d'objets matériels. Nous sommes habitués aux objets massifs, tels les atomes ou leurs particules : quand on les accélère, leur masse, c'est-à-dire leur quantité de matière, ne change pas, mais

leur inertie, c'est-à-dire la résistance à la transformation de l'état de mouvement, croît indéfiniment. D'autre part, les photons, ou «grains de lumière», ont toujours la vitesse de la lumière : comme les neutrinos, sans doute, ils ont une inertie nulle.

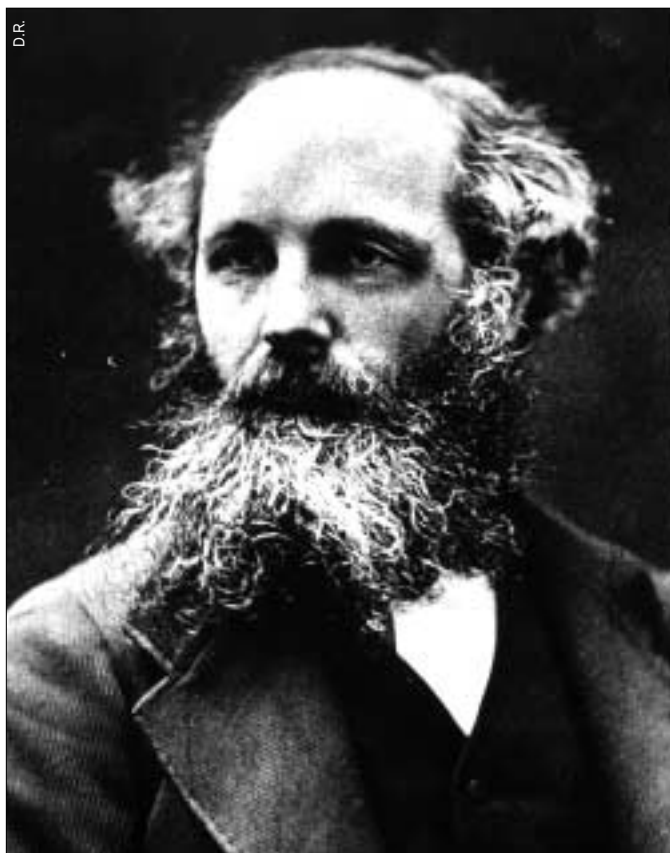
Ces considérations approfondissent la notion de vitesse. Dans un train, il existe plusieurs façons de mesurer la vitesse

d'un système physique. Or l'accélération est le taux de variation de la vitesse avec le temps : ayant mesuré l'accélération, on peut l'«intégrer» en fonction du temps, afin de calculer la vitesse moyenne. Dans le cadre de la mécanique classique, galiléenne, ces deux mesures de vitesse donnent les mêmes résultats. La deuxième mesure, c'est-à-dire l'intégration de l'accélération dans le train, est une mesure beaucoup plus naturelle, intrinsèque. Or cette mesure-là, curieusement, dans le cadre einsteinien, donne un nombre qui peut aller jusqu'à l'infini.

Pourquoi? Parce que la notion de vitesse galiléenne a plusieurs propriétés. C'est le rapport de l'espace parcouru au temps mis à le parcourir. C'est aussi une grandeur qui s'ajoute, mais dans le cadre einsteinien, cette seconde propriété correspond à une nouvelle grandeur. Les physiciens la nomment plutôt rapidité. Les deux grandeurs sont liées : connaissant l'une, on peut calculer l'autre et réciproquement, mais ce sont deux généralisations différentes de la notion initiale de la vitesse.

D'autres inattendus sont-ils... attendus? Toutes les constantes de la physique peuvent-elles être considérées comme infinies, par une méthode analogue à celle que nous avons déjà examinée deux fois? Ne généralisons pas, mais ne soyons pas non plus surpris ou choqués, si l'on découvre une nouvelle limite : pen-

sons par exemple à l'âge de l'Univers, que les astrophysiciens calculent égal à 15 milliards d'années environ. On peut montrer que cette valeur finie a, en réalité, un contenu infini. Ainsi, l'Univers peut être à la fois âgé de 15 milliards d'années et infiniment vieux...



2. Le physicien écossais James Clerk Maxwell (1831-1879) expliqua la relation inattendue entre l'électrostatique, où les charges électriques sont immobiles, la magnétostatique, où les aimants ne bougent pas, et la propagation de la lumière.

par rapport aux rails. La plus banale consiste à regarder par la fenêtre et à examiner les bornes kilométriques, ainsi que les horloges sur les quais des gares. En divisant la distance parcourue par le temps écoulé entre deux gares, on obtient la vitesse moyenne entre les deux gares. La vitesse ainsi mesurée est toujours inférieure à celle de la lumière, quelle que soit l'accélération du train. Imaginons maintenant que nous soyons enfermés dans un wagon, que quelqu'un ait baissé le rideau et que nous voulions connaître la vitesse du train. Dans le wagon, on ne ressent pas l'impression de vitesse, mais on sent l'impression d'accélération éventuelle : une valise peut tomber d'un filet quand le train accélère beaucoup, et un pendule s'incline. La mesure d'une accélération peut ainsi se faire de l'inté-

Jean-Marc LÉVY-LEBLOND est professeur de physique à l'Université de Nice. Il publie aux éditions Gallimard le livre *Aux contraires (L'exercice de la pensée et la pratique de la science)*.

Ce texte est une transcription partielle du débat enregistré avec Émile Noël au Palais de la Découverte. Ce débat sera diffusé sur France Culture le 6 novembre 1996.

Le champagne dans la flûte

Les bulles de champagne sont plus stables dans des verres lavés sans produit de rinçage.

Le coup d'œil que l'on jette sur le vin avant de le boire est une promesse de bonheur, quand la robe est d'une parfaite limpidité. C'est pourquoi les vignerons évitent les «voltigeurs» qui troublent le vin. Dans le cas du champagne, le plaisir annoncé n'est parfait que si l'on voit une mousse fine, de quelques millimètres de hauteur, qui se rassemble sur la périphérie de la flûte pour former une collerette alimentée en permanence par des bulles de petite dimension (diamètre inférieur au millimètre).

L'absence de mousse est-elle le signe infaillible d'une mauvaise qualité? Pas nécessairement : nous avons utilisé la technique des plans d'expériences pour étudier expérimentalement l'effet des verres sur la mousse du champagne. Un robot verseur, qui reproduit le geste de l'opérateur, versait du champagne dans des flûtes où nous suivions l'effervescence à l'aide d'un système de vision artificielle qui enregistrerait le temps de versement et la hauteur de mousse en fonction du temps, pendant et après le versement.

La théorie de la formation des bulles est simple : le champagne n'est pas en équilibre stable quand il est à l'air libre,

et le gaz s'échappe en formant des bulles sur les défauts présents à la surface du verre. La taille des bulles dépend de l'énergie de surface du récipient, c'est-à-dire de la facilité avec laquelle il accepte le contact avec d'autres matériaux (gaz ou liquide). Puis, une fois formées, les bulles grossissent par diffusion du dioxyde de carbone dissous, jusqu'à ce que la poussée d'Archimède devienne supérieure aux forces d'adhésion : la bulle se détache alors de la paroi.

Or l'énergie d'adhésion d'une bulle sur la surface du verre est proportionnelle à l'aire de la surface de contact de la bulle et du verre, aire qui dépend elle-même de l'énergie de surface. Cette dernière peut être évaluée à partir de l'angle de contact d'une goutte d'eau sur le matériau qui constitue le récipient : si le récipient a une forte énergie de surface, c'est-à-dire si le liquide mouille bien le verre, la surface de contact est faible et la bulle est quasi sphérique ; la bulle se détache alors dès que son diamètre atteint quelques dixièmes de millimètre. C'est le cas des flûtes propres en verre sodocalcique (le verre le plus ordinaire) ou en cristal. Au contraire, si l'énergie de surface est faible, c'est-à-

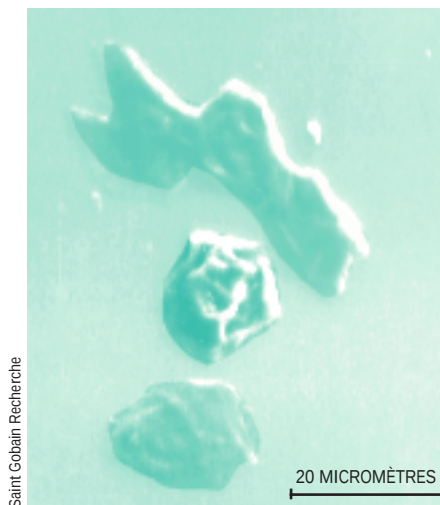
dire si le liquide mouille mal la surface, la bulle ne se détache que lorsqu'elle est assez grosse (plus de un millimètre de diamètre pour les parois en polyéthylène). On observe même des bulles pathologiques, de plusieurs millimètres de diamètre, quand la surface des flûtes est recouverte d'un polymère fluoré tel que celui qui tapisse les poêles anti-attachantes. Ce type d'analyses explique pourquoi les bulles sont fines quand le champagne est versé dans les flûtes en verre, et pourquoi elles sont plus grosses dans les gobelets en plastique.

Toutefois les surfaces de haute énergie se contaminent rapidement (en quelques heures, pour le verre), en fixant les molécules organiques de l'air (elles sont nombreuses dans les cuisines). Ainsi l'avantage du verre ou du cristal sur le plastique diminue quand les flûtes ont été salies par une longue station en atmosphère contaminée, tel le repos sur une planche de bois (qui libère des essences organiques).

Par diverses méthodes de microscopie, nous avons également étudié la naissance des bulles : contrairement aux idées reçues, elles ne se forment pas souvent sur des défauts du verre (les rayures sont rares), mais plutôt sur des dépôts de calcaire, de tartre, et sur les fibres de cellulose qui sont abandonnées sur la surface des verres par les torchons d'essuyage.

Les bulles qui se forment alimentent la collerette, dont la hauteur dépend du nombre et des dimensions des bulles, mais aussi de leur stabilité. Certains composés sont connus pour modifier celle-ci : on savait que les agents anti-moussant des rouges à lèvres nuisent à la mousse, mais nous avons découvert qu'il en était de même des produits de rinçage fréquemment utilisés dans les lave-vaisselle. Adsorbés par les surfaces de verre, ces produits organiques se dissolvent dans le champagne au cours du remplissage des flûtes. Ils ne perturbent pas l'effervescence, mais nuisent à la stabilité de la mousse : les bulles éclatent dès qu'elles arrivent en surface. Les produits de lavage sont également nocifs, mais ils sont moins gênants, car le rinçage les élimine en grande partie.

Patrice LEHUÉDÉ,
Saint Gobain Recherche
Bertrand ROBILLARD, Moët & Chandon



Deux des principaux sites de formation des bulles de champagne : les cristallisations (à gauche) et les fibres de cellulose laissées par les torchons, lors de l'essuyage (à droite).

Prochain rendez-vous France Info et Pour la Science, le 22 novembre 1996, avec la chronique Info Sciences de Marie-Odile Monchicourt.