

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,



1. Appareil utilisé par Léon Foucault pour mesurer la 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