

Un exemple de phénomène réversible est le mouvement d'un pendule simple sans frottement (a). Pour de faibles amplitudes d'oscillation, l'angle $\alpha(t)$ entre le pendule et la verticale est régi par l'équation :

(1) $d^2\alpha(t)/dt^2 + k\alpha(t) = 0$,
où k est une constante positive ($d^2\alpha(t)/dt^2$ désigne la dérivée seconde de la fonction $\alpha(t)$ par rapport au temps t). La réversibilité se traduit par le fait que l'équation garde la même forme lorsqu'on renverse le temps, c'est-à-dire lorsqu'on exprime les choses via le nouveau paramètre temporel $t' = -t$.

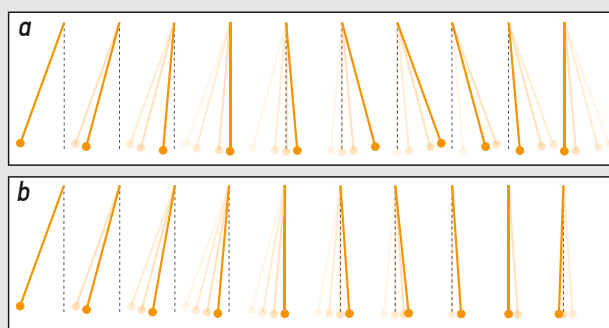
Pour le montrer, exprimons l'équation (1) en termes de : $\beta(t') = \beta(-t) = \alpha(t)$.

La dérivée première $d\alpha(t)/dt$ de $\alpha(t)$ est égale à $-d\beta(t')/dt'$, et la dérivée seconde $d^2\alpha(t)/dt^2$ est égale à $+d^2\beta(t')/dt'^2$. Par suite, dans la transformation $t \rightarrow t' = -t$, l'équation initiale (1) garde exactement la même forme :

$d^2\beta(t')/dt'^2 + k\beta(t') = 0$.
Conséquence : si $\alpha(t)$ est une solution possible de l'équation initiale, $\alpha(t') = \alpha(-t)$ est aussi une solution possible, qui est la forme renversée dans le temps de $\alpha(t)$. Le phénomène décrit par (1) est ainsi réversible.

Dans le cas où le pendule perd de l'énergie par frottement en oscillant (b), son équation est de la forme :

(2) $d^2\alpha(t)/dt^2 + f d\alpha(t)/dt + k\alpha(t) = 0$,
où f est un coefficient de frottement.



Or si l'on pose $\beta(t') = \beta(-t) = \alpha(t)$, l'équation (2) est modifiée en : $d^2\beta(t')/dt'^2 - f d\beta(t')/dt' + k\beta(t') = 0$, qui n'est plus de la même forme. En conséquence, si $\alpha(t)$ est une solution possible de l'équation (2), la fonction « renversée » $\alpha(t') = \alpha(-t)$ n'est pas solution de cette équation.

tion et ne peut décrire un processus réel. Le phénomène décrit par l'équation (2) est irréversible.

Le raisonnement fait ici est le prototype de ceux qui permettent d'étudier d'autres symétries (ou asymétries) des équations ou lois physiques.

L'une des propriétés de ces équations est l'invariance par renversement du temps. La physique et la chimie à l'échelle atomique sont donc réversibles : rien n'y serait changé si l'on échangeait passé et futur.

La flèche du temps, une question d'échelle

Ce qui, à l'échelle atomique, est valable pour le temps l'est aussi pour l'espace. Autrement dit, les équations relatives à cette échelle sont aussi invariantes par changement de signe des coordonnées d'espace. L'opération peut se visualiser en imaginant que l'on remplace le système par son image dans un miroir. Si une molécule est chirale, c'est-à-dire si elle diffère de son image comme notre main droite diffère de notre main gauche (*kheiros* signifie main en grec), l'invariance des lois dans une symétrie par rapport à un plan implique l'existence d'une autre molécule, symétrique de la première, qui aura des propriétés similaires. Ces considérations ont guidé Louis Pasteur dans son étude des deux acides tartriques, dont les cristaux sont chiraux et symétriques l'un de l'autre, mais dont seul l'un est produit dans les processus biologiques.

Depuis le milieu du XX^e siècle, l'échelle subnucléaire, où les distances caractéristiques sont de l'ordre du femtomètre (millionième de nanomètre, soit 10^{-15} mètre), est explorée à l'aide de grands accélérateurs comme le LHC récemment mis en service au CERN, à Genève. Les nombreuses

particules ainsi découvertes ont révélé des composants élémentaires nommés quarks, leptons et bosons de jauge. On a établi que ces composants interagissent par des forces de quatre types différents. Par ordre d'intensité décroissante, il s'agit de l'interaction forte, grâce à laquelle trois quarks se lient pour former un proton ou un neutron ; de l'interaction électromagnétique entre particules chargées ; de l'interaction faible, responsable de la radioactivité bêta ; et de l'interaction gravitationnelle, proportionnelle à la masse.

Les interactions forte, électromagnétique et gravitationnelle sont invariantes sous l'effet d'un changement de signe du temps ainsi que des coordonnées d'espace. Toutefois, l'interaction faible présente moins de symétries. Jusque dans les années 1950, il était admis comme une évidence que toutes les lois de la nature étaient symétriques par réflexion dans un miroir. En 1956, les théoriciens sino-américains Tsung-Dao Lee et Chen-Ning Yang mirent ce dogme en question pour l'interaction faible et suggérèrent à l'expérimentatrice Chien-Shiung Wu (connue, même aux États-Unis où elle travaillait, comme « Madame Wu ») des tests sur la radioactivité bêta, qui révélèrent une asymétrie miroir maximale ; ce résultat inattendu valut à T.-D. Lee et C.-N. Yang le prix Nobel dès 1957.

L'asymétrie spatiale suggéra de tester aussi le comportement des lois de l'interaction faible par rapport au renversement

du temps. En 1964, les Américains James Cronin, Val Fitch, James Christenson et le Français René Turlay découvrirent à l'accélérateur de Brookhaven une violation indirecte de cette symétrie dans la désintégration du méson K^0 (voir l'article de Marie-Hélène Schune). Cette violation est minuscule (elle est de 1 pour 300) et n'a aucune conséquence sur les phénomènes terrestres ; mais la légère distinction qu'elle crée entre matière et antimatière pourrait avoir joué un rôle dans les circonstances extrêmes qui régnaient peu après le Big Bang : l'absence d'antimatière dans l'Univers pourrait trouver là son explication.

À l'autre extrême, en sautant à l'échelle du Système solaire (une minute-lumière, ou 18 millions de kilomètres), les lois de la mécanique céleste sont réversibles : si l'on imaginait que les vitesses de toutes les planètes et de tous les satellites soient instantanément et exactement inversées, on retrouverait dans 50 ans ces objets exactement dans les mêmes positions qu'il y a 50 ans. Pour des distances plus grandes encore, à l'échelle cosmologique (des milliards d'années-lumière), on observe une évidente flèche du temps : l'Univers est en expansion, et non en contraction. Cependant, les lois à cette échelle sont encore réversibles et rien n'empêche, dans les théories actuelles, d'imaginer un Univers qui serait en contraction.

C'est aux échelles intermédiaires, les nôtres, que l'irréversibilité se manifeste le plus clairement. L'expérience quotidienne

met en évidence une multitude de processus irréversibles. Un morceau de sucre se dissout dans une tasse de café, un glaçon fond dans un verre d'eau, mais on n'a jamais vu ce morceau de sucre ou ce glaçon se reconstituer. La combustion de l'essence propulse une voiture en dégageant des gaz d'échappement, mais faire reculer la voiture en l'alimentant de gaz brûlés ne saurait produire de l'essence. De même, l'action du frein ralentit la voiture en transformant son énergie cinétique en chaleur, mais il est impensable d'accélérer le véhicule en réchauffant ses freins.

L'irréversibilité, phénomène quotidien

L'analyse scientifique de tels phénomènes a été amorcée au XVIII^e siècle et accomplie au cours du XIX^e. Il importe d'abord de préciser que les concepts de réversibilité et d'irréversibilité ne concernent que les systèmes isolés. En mettant une pincée de sel dans un verre d'eau et en isolant cet ensemble, on aboutit après évolution à un équilibre où le sel s'est dissous. Si l'on part d'une eau salée isolée du monde extérieur, elle ne peut se séparer d'elle-même en ses constituants; cependant, cette séparation est possible pour de l'eau salée non isolée, puisqu'on peut en extraire de l'eau pure et du sel par distillation. De même, la chaleur ne s'écoule jamais spontanément d'un corps froid vers un corps chaud; mais on peut, grâce à un apport extérieur d'énergie électrique, transférer de la chaleur de l'intérieur d'un réfrigérateur vers l'air de la cuisine.

C'est Newton qui, le premier, a formulé à la fin du XVII^e siècle une loi irréversible, qui ne garde pas la même forme lorsque t est changé en $-t$; elle portait sur la viscosité d'un fluide. Au début du XIX^e siècle, Joseph Fourier élucida un autre phénomène irréversible, la propagation de la chaleur, et parvint à en résoudre les équations. Et au cours du demi-siècle suivant, les lois de nombreux autres processus irréversibles ou dissipatifs ont été établies: la loi de Coulomb du frottement, les équations de Navier-Stokes de l'écoulement d'un fluide visqueux, l'effet Joule (échauffement d'un conducteur parcouru par un courant), la loi de Fick gouvernant la diffusion de particules dans un solvant, les équations de la cinétique chimique, etc.

Face à cette profusion de phénomènes irréversibles, le « deuxième principe de la thermodynamique » a fourni un point

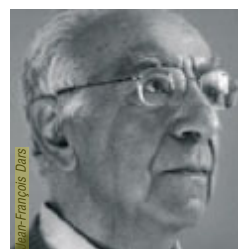
de vue synthétique. Sa formulation initiale est due à Sadi Carnot, dans ses *Réflexions sur la puissance motrice du feu* parues en 1824. Dans un contexte où les machines à vapeur commençaient à se développer de façon purement empirique, Carnot analysa une machine thermique en la considérant comme un dispositif qui produit un travail mécanique par exploitation de la tendance naturelle de la chaleur à s'écouler irréversiblement d'une source chaude vers une source froide. Il montra que son rendement ne pouvait dépasser une certaine borne, qui est fonction des températures de ces deux sources – prototype des raisonnements afférents au deuxième principe.

L'universalité du principe de Carnot fut reconnue vers le milieu du XIX^e siècle, et divers énoncés équivalents furent donnés. Celui imaginé par Rudolf Clausius conduisit ce physicien allemand à introduire en 1865 une nouvelle notion, celle d'« entropie », une certaine fonction S des diverses variables physiques caractérisant l'état d'un système. Ce concept est au cœur de la formulation actuelle due au physicien américain Herbert Callen et datant du milieu du XX^e siècle.

Dans cette forme moderne, le deuxième principe s'exprime ainsi: lorsqu'un système isolé évolue spontanément, l'entropie de son état final ne peut être inférieure à celle de son état initial. Cet énoncé met en évidence une flèche du temps, associée au sens de variation de l'entropie. Il est général, car les variables d'état dont dépend l'entropie peuvent inclure des grandeurs de natures diverses, telles l'énergie, la densité, la concentration d'un mélange, la déformation d'un solide ou la composition chimique. Mais l'énoncé est abstrait, en raison de la nature assez mystérieuse dans ce cadre de l'entropie – sa signification ne se clarifie, comme nous le verrons, qu'en comparant les échelles macroscopique (la nôtre) et microscopique (celle des molécules).

Peut-on se satisfaire de la coexistence de théories impliquant l'une un comportement réversible à l'échelle atomique, l'autre un comportement irréversible à notre échelle? Pour la plupart des chercheurs, la réponse est non, car ils adhèrent au réductionnisme: même lorsque cela n'a pas d'incidence sur leur activité quotidienne, ils admettent que les lois auxquelles obéit un système macroscopique doivent pouvoir se déduire des propriétés, considérées

L'AUTEUR



Roger BALIAN est chercheur à l'Institut de physique théorique du CEA (Commissariat à l'énergie atomique), à Saclay près de Paris. Il est aussi membre de l'Académie des sciences.

BIBLIOGRAPHIE

R. Balian, *From Microphysics to Macrophysics*, Springer Verlag, 2007.

A. Allahverdyan et al., *Curie-Weiss model of the quantum measurement process*, *Europhysics Letters*, vol. 61, pp. 452-458, 2003.

É. Klein et M. Spiro (éds.), *Le temps et sa flèche*, Flammarion, 1996. Voir aussi: http://ipht.cea.fr/Docs/pht_publications/t94/009_t94/130_et_t04/185.

H. D. Zeh, *The Physical Basis of the Direction of Time*, Springer-Verlag, 1989.

S. Brush, *The Kind of Motion we Call Heat*, North-Holland, 1986.

P. C. W. Davies, *The Physics of Time Asymmetry*, University of California Press, 1977.

M. Fink, *Les miroirs à retournement temporel*, *Pour la Science*, n° 103, mai 1986.

comme plus fondamentales, de ses constituants et de leurs relations mutuelles.

Cependant, ce changement d'échelle fait apparaître des propriétés nouvelles, émergentes, dues à l'organisation et au comportement collectif des composants, propriétés *a priori* imprévisibles en raison du nombre gigantesque de composants. Les succès de la biologie moléculaire dans la compréhension des êtres vivants, les apports de la physique moléculaire à la chimie, illustrent l'efficacité de cette démarche unificatrice.

En physique, on a commencé à la fin du XIX^e siècle à montrer que les lois régissant les matériaux à notre échelle peuvent se déduire de lois relatives à l'échelle atomique. Tel est l'objet de la mécanique statistique, dont les premiers succès ont porté sur les gaz.

Auparavant, vers 1865, la physique du continu triomphait. Mais la nature de la chaleur et, en conséquence, la signification de l'entropie restaient à élucider. L'hypothèse selon laquelle la matière serait constituée de molécules, dont le mouve-

ment se manifesterait à nous sous forme de pression et de chaleur, n'avait encore aucun support expérimental ; elle était devenue hétérodoxe après avoir été courante un siècle auparavant. En s'appuyant néanmoins sur cette idée, James Clerk Maxwell en Écosse, puis Ludwig Boltzmann à Vienne, face à l'hostilité de scientifiques éminents, parvinrent non seulement à expliquer les propriétés, déjà connues, des gaz à l'équilibre, mais surtout à prévoir avec succès les comportements, inattendus, de la viscosité et de la conductivité calorifique des gaz en fonction de leur densité et leur température.

Un tel succès se heurtait pourtant à une objection mathématique sérieuse, le « paradoxe de l'irréversibilité », souligné par l'Autrichien Josef Loschmidt en 1876, le Français Henri Poincaré en 1889, et l'Allemand Ernst Zermelo en 1896. La théorie cinétique des gaz de Maxwell et Boltzmann repose uniquement sur les équations du mouvement des molécules, qui décrivent leurs déplacements dans une enceinte et les collisions élastiques qu'elles

subissent entre elles ou sur les parois. Or ces équations sont invariantes lorsqu'on y change le signe du temps. Comment comprendre alors que ces seules équations, réversibles, puissent donner naissance aux lois qui gouvernent le comportement macroscopique du gaz constitué par ces molécules, et en particulier aux irréversibilités exprimées par le deuxième principe de la thermodynamique ? Tel est le paradoxe de l'irréversibilité.

Comment émerge l'irréversibilité

L'élucidation de ce paradoxe a été suggérée par Boltzmann et rendue rigoureuse au cours des décennies suivantes. Nous allons l'esquisser sur un modèle simple. Considérons une enceinte constituée de deux parties A et B de même volume V . Un gaz de N molécules est initialement introduit dans la partie A, qui est ensuite mise en communication avec la partie B (voir la figure 2). L'état macroscopique de sa configuration initiale,

IRRÉVERSIBILITÉS QUANTIQUES

Depuis une vingtaine d'années, de nombreux travaux sont consacrés à des irréversibilités d'un type différent. À l'échelle atomique, les objets obéissent aux règles de la mécanique quantique. C'est là une source de phénomènes étranges tels que la « cohérence », possibilité pour un système d'être dans un état où se superposent deux configurations différentes. On peut par exemple préparer un atome en sorte qu'il soit à la fois dans son état fondamental et dans un état excité ; si cette situation pouvait se présenter à notre échelle, un « chat de Schrödinger » pourrait être à la fois mort et vivant. L'exploitation de telles propriétés singulières est susceptible de conduire à des « ordinateurs quantiques » extrêmement puissants ; elle est cependant difficile, car la cohérence quantique est souvent détruite en un temps extrêmement bref.

Ce phénomène irréversible, nommé décohérence, est causé par les faibles interactions incontrôlées du système avec son environnement. S'il était isolé, le système évoluerait de façon réversible selon l'équation de Schrödinger (qui régit son comportement au cours du temps) et conserverait sa cohérence quantique ; ici, l'irréversibilité est due au couplage avec le grand nombre de degrés de liberté de l'environnement.

La théorie quantique est irréductiblement probabiliste. Lorsqu'on effectue des mesures sur des objets quantiques préparés dans des conditions identiques, on trouve en général des résultats différents, affectés de certaines probabilités. Mais chaque mesure fournit un résultat unique, bien défini, même lorsque l'objet est dans un état superposé. Cette propriété, nommée « réduction du paquet d'ondes », implique une irréversibilité, et semble donc en contradiction avec la réversibilité de l'équation de Schrödinger.

Ce « problème de la mesure », posé dès les années 1920, fait encore l'objet de discussions. On invoque souvent une décohérence due à l'environnement. Une autre solution, proposée en 2003 par

Armen Allahverdyan, de l'Institut de physique d'Erevan (Arménie), Theo Nieuwenhuizen, de l'Université d'Amsterdam, et l'auteur (R. Balian), repose sur le caractère macroscopique de l'index de l'appareil de mesure. En résolvant l'équation de Schrödinger du système appareil-objet, on détermine, pour un ensemble de mesures, la loi de probabilité qui gouverne les configurations finales issues d'un état initial donné. On déduit alors du grand nombre de degrés de li-

berté de l'index qu'une indication bien définie émerge avec une quasi-certitude lors de chaque mesure.

Cette solution du problème de la mesure, comme celle du paradoxe de l'irréversibilité, est probabiliste : les propriétés de la mesure quantique ne sont pas établies dans l'absolu, mais avec une probabilité qui tend vers 1 lorsque l'appareil devient grand.

La mesure en mécanique quantique est un processus qui met en jeu de l'irréversibilité.

