



Le paradoxe de l'ir

À l'échelle atomique, on ne peut distinguer la direction du passé de celle du futur. Mais alors, pourquoi la plupart des évolutions sont-elles irréversibles à notre échelle ?

Roger Balian

Source d'inspiration pour les écrivains et les artistes, l'écoulement inexorable du temps suscite depuis l'Antiquité les réflexions des philosophes. La plupart des physiciens, quant à eux, ne s'interrogent guère sur la nature du temps, tout au moins dans leur activité de recherche. Cependant, habitués depuis Galilée et Newton à utiliser un langage mathématique pour appréhender le monde, les physiciens ont défini avec précision l'expression consacrée de « flèche du temps ».

Pour eux, le temps apparaît comme une grandeur mesurable, représentée par un nombre pouvant prendre des valeurs continues et orientées : il a un sens, du passé vers le futur (de même que la température est orientée du froid vers le chaud). Dans cette perspective, le temps constitue,

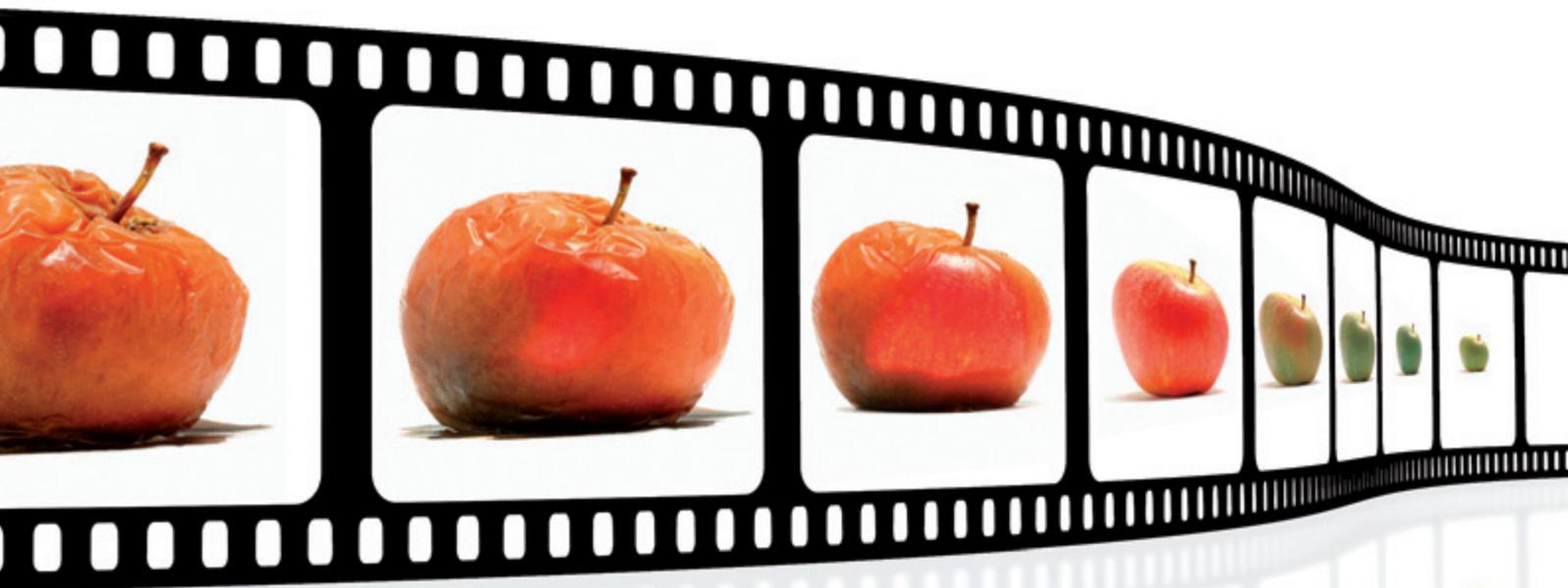
comme les trois coordonnées d'espace, l'une des variables qui figurent dans les lois décrivant un phénomène tel que le mouvement d'une particule ou la propagation de la chaleur dans un matériau.

L'idée floue de flèche du temps laisse alors place au concept scientifique d'irréversibilité. Si changer le sens du temps est impossible dans la réalité, « renverser le temps » présente une signification précise : c'est une opération mathématique qui consiste à changer le signe de la variable temps ($t \rightarrow -t$) dans les équations qui régissent l'évolution du processus considéré. Si ces équations restent inchangées, le processus considéré est réversible, car rien n'interdit en principe au processus inverse, où temps final et initial sont échangés, de se produire. Par exemple, le mouvement

des planètes et des satellites, ou l'oscillation d'un pendule sans frottement (voir l'encadré page 58), sont réversibles ; leurs lois ne changent pas dans un échange (virtuel) entre passé et avenir.

Cependant, dans le monde qui nous entoure, la plupart des phénomènes, tel le mélange de lait dans du café ou le mûrissement d'un fruit, sont irréversibles (voir la figure 1). Les équations qui les gouvernent sont modifiées par renversement du temps, et les équations transformées ne correspondent à aucun phénomène physique observable. Le cinéma nous en donne l'intuition : un film projeté dans l'ordre chronologique inverse donne presque toujours une impression d'absurdité, qui traduit l'impossibilité pour la scène enregistrée de se dérouler à l'envers.

Cette question de symétrie ou d'asymétrie par renversement du temps a fait l'objet d'une multitude de travaux. Nous verrons ci-après que, selon le phénomène et l'échelle considérés, les équations de la physique sont, ou ne sont pas, réversibles. Un problème irritant se pose alors : les lois qui régissent un seul et même système peu-



réversibilité

*Dis, au moins le sais-tu,
Que tout le temps qui passe
Ne se rattrape guère,
Que tout le temps perdu
Ne se rattrape plus*
Barbara

vent être réversibles à l'échelle atomique, mais irréversibles à notre échelle. Nous montrerons sur un exemple simple comment cette contradiction apparente est levée. Nous présenterons enfin quelques aspects conceptuels récents de l'irréversibilité, liés soit à la mécanique quantique, soit au rôle de l'observateur.

Notons au préalable que les propriétés que l'on tendrait à attribuer au temps concernent en réalité des systèmes physiques. Ainsi, lorsque nous parlons de « mesure du temps », nous sous-entendons une opération indirecte : afin de déterminer le délai écoulé entre un événement et un autre, nous les mettons en correspondance avec une horloge, objet qui dénombre les battements d'un pendule ou pour plus de précision les oscillations d'un cristal de quartz – ce qui suppose une analyse préalable, expérimentale et théorique, du mouvement du pendule ou du quartz. De même, l'expression « flèche du temps » est trompeuse, car le concept d'irréversibilité se réfère non pas à une propriété du temps en soi, mais à un processus spécifique concernant tel ou tel objet.

À l'échelle atomique, les distances en jeu sont de l'ordre de la fraction de nanomètre (milliardième de mètre). Tous les systèmes s'y révèlent composés d'électrons et de noyaux atomiques. Ces objets élémentaires, chargés les uns négativement, les autres positivement, interagissent *via* des forces électromagnétiques véhiculées par des photons ; ils s'assemblent ainsi pour former des atomes, des ions, des molécules ou des solides.

Les équations qui gouvernent ces mécanismes, établies avec une précision considérable, permettent en principe d'analyser à cette échelle tous les phénomènes. Mais leur résolution pratique pose des problèmes redoutables si les composants élémentaires sont trop nombreux ou disposés en désordre.

1. LA PLUPART DES PHÉNOMÈNES que l'on observe à notre échelle sont irréversibles. La maturation, puis le pourrissement, d'un fruit en est un exemple. Déroulé dans le sens chronologique inverse, un tel processus ne se produit jamais et nous paraît absurde. Pourtant, les lois physiques qui régissent le monde microscopique sont [à une exception négligeable près] réversibles : elles ne distinguent pas le passé du futur...

L'ESSENTIEL

✓ Selon l'échelle en jeu, les phénomènes physiques peuvent ou non se dérouler dans les deux sens du temps.

✓ À l'échelle macroscopique, l'évolution spontanée d'un système isolé est irréversible : son entropie ne peut pas diminuer.

✓ L'irréversibilité macroscopique, qui semble paradoxale en raison de la réversibilité des lois microscopiques sous-jacentes, s'explique par l'immensité du nombre de composants en jeu.

© Shutterstock/Leigh Prather (film), © Martin Gallagher/Corbis (pommes)

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 $t' = -t$.

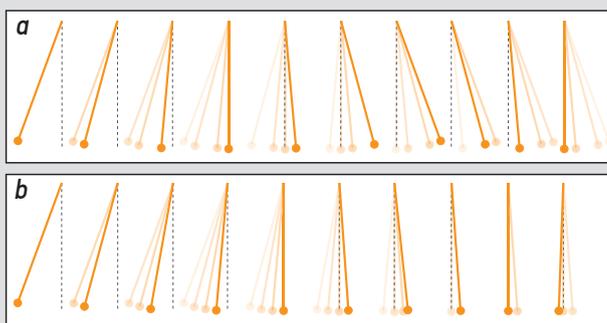
Pour le montrer, exprimons l'équation (1) en termes de : $\beta(t') = \beta(-t) = \alpha(t)$.

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 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 suggèrent 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

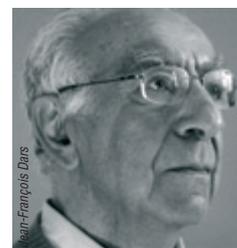
de vue synthétique. Sa formulation initiale est due à Sadi Carnot, dans ses *Réflexions sur la puissance motrice du feu* parues en 1824. Dans un contexte où les machines à vapeur commençaient à se développer de façon purement empirique, Carnot analysa une machine thermique en la considérant comme un 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/Docspht_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.

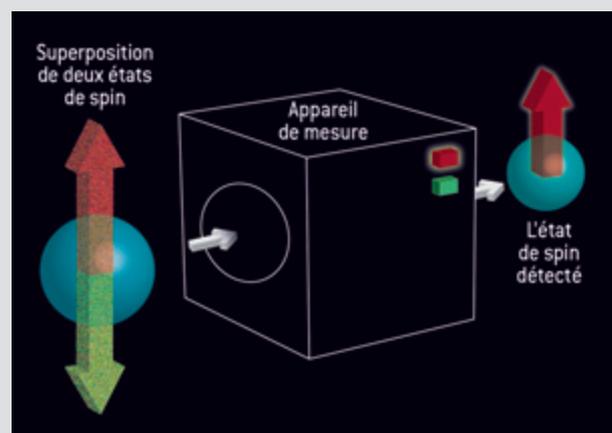
Ce « problème de la mesure », posé dès les années 1920, fait encore l'objet de discussions. On invoque souvent une décohérence due à l'environnement. Une autre solution, proposée en 2003 par

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 le 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.



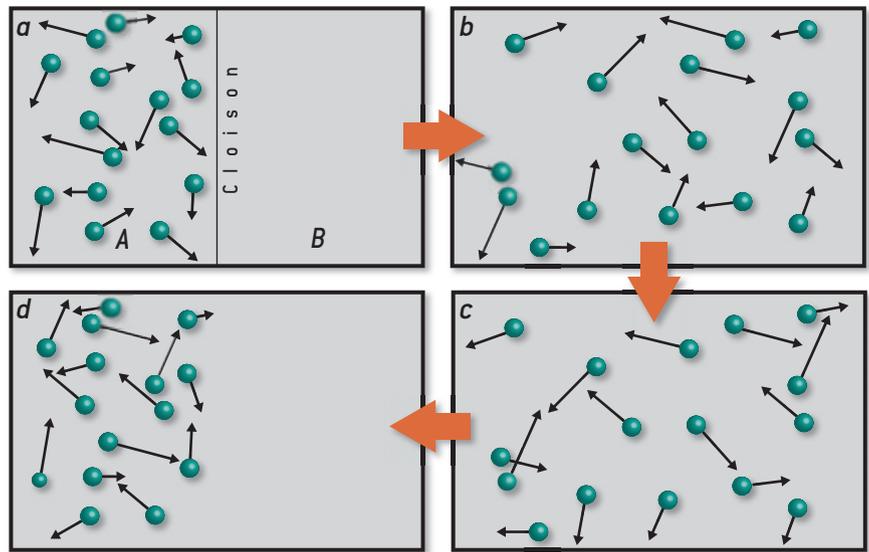
notée (a), est caractérisé par la densité N/V du gaz (ainsi que par sa température, qui ne jouera ici aucun rôle). Après un certain délai T , les molécules se sont dispersées et ont atteint une configuration, notée (b), où le gaz occupe tout le volume de l'enceinte, avec une densité égale à $N/(2V)$. L'expansion (a) \rightarrow (b) est irréversible à notre échelle : on n'a jamais vu de processus inverse où un gaz se contracterait spontanément en laissant vide une partie de l'espace disponible.

À l'échelle microscopique, le mouvement des molécules, caractérisé à chaque instant par leurs positions et vitesses, est complexe en raison des collisions, mais réversible. Pour mettre cette caractéristique en évidence, imaginons que l'on renverse toutes les vitesses des molécules dans la configuration (b), où tout l'espace disponible a été occupé. Notons (c) la configuration renversée ainsi obtenue. En repartant de là, les trajectoires remonteraient le temps ; à la fin du délai T , les molécules se retrouveraient toutes groupées dans la partie A, dans une configuration, notons-la (d), qui ne diffère de la configuration initiale (a) que par le sens des vitesses.

Or on n'observe jamais de transformations du type (c) \rightarrow (d), bien que le raisonnement précédent semble montrer leur possibilité ! Pourquoi ? Notons d'abord que la description microscopique du gaz est nécessairement probabiliste en raison du nombre gigantesque de constituants (un litre d'air contient $2,7 \times 10^{22}$ molécules). Lorsqu'on injecte N molécules dans A, on ne peut connaître leurs positions individuelles, et il convient d'attribuer la même probabilité p_1 à toutes les Ω_1 configurations microscopiques de type (a) compatibles avec l'état macroscopique du gaz.

Dénombrons les Ω_1 configurations possibles de type (a). Pour ce faire, remplaçons les positions dans le volume V par une grille de Q sites discrets (cet artifice se justifie par la mécanique quantique, qui fournit pour Q , après élimination des vitesses, un nombre de l'ordre de 10^{100} par litre de gaz). Or il existe $\Omega_1 = Q!/[N!(Q-N)!]$ façons de disposer les N molécules sur les Q sites. Ainsi, chacune de ces Ω_1 configurations a la probabilité $p_1 = 1/\Omega_1$.

De la même façon, si les N molécules se répandent dans le volume $A + B$, elles ont la probabilité $p_2 = 1/\Omega_2$ de prendre l'une ou l'autre des $\Omega_2 = (2Q)!/[N!(2Q-N)!]$ configurations possibles dans le volume $2V$.



2. L'EXPANSION D'UN GAZ illustre le paradoxe de l'irréversibilité. Le gaz occupe la partie A du récipient (a), puis on retire la cloison. Au bout d'un temps T , il s'est répandu dans le volume $A + B$ en suivant des trajectoires qui, au niveau microscopique, sont réversibles (b). Imaginons que toutes les vitesses des molécules soient alors subitement et exactement inversées (c). À l'instant $2T$, le gaz se retrouverait spontanément confiné dans le volume A (d). Mais cela ne se produit jamais : d'une part, les configurations du type (c) sont en nombre négligeable par rapport à toutes celles qui sont possibles pour un gaz occupant le volume $A + B$; d'autre part, on est incapable, expérimentalement, d'inverser toutes les vitesses microscopiques pour passer d'une configuration (b) à son inverse (c).

Mais les configurations du type (c), obtenues en renversant les vitesses des configurations de type (b), bien qu'elles occupent le volume $A + B$, sont exceptionnelles : elles sont en correspondance biunivoque avec celles du type (b), donc du type (a), de sorte qu'il n'y en a qu'un nombre Ω_1 .

Par conséquent, la probabilité pour qu'un gaz occupant tout le volume $A + B$ soit dans une configuration renversée du type (c), qui donnerait lieu à une contraction vers (d), vaut $\Omega_1/\Omega_2 = 2^{-N}$. Il s'agit d'un nombre dont la petitesse

certain délai, nommé temps de récurrence. Le gaz, initialement dans l'état (a), devrait donc retourner au bout de ce temps dans un état voisin de (a), en se concentrant à nouveau à l'intérieur du volume A. La résolution du paradoxe tient encore à l'immensité du nombre des configurations, qui implique un temps de récurrence incomparablement supérieur à l'âge de l'Univers. On n'a donc aucune chance de voir un jour un gaz se contracter spontanément après s'être dilaté – même si c'est mathématiquement assuré.

La contraction spontanée d'un gaz dans une partie du volume qu'il occupait n'est pas mathématiquement interdite, mais elle est totalement improbable.

défie l'entendement tant N , de l'ordre de 10^{22} , est grand : pour seulement $N = 60$ molécules, cette probabilité Ω_1/Ω_2 est inférieure au milliardième de milliardième ! Autrement dit, le processus inverse (c) \rightarrow (d) n'est pas mathématiquement interdit, mais il est totalement improbable dans la réalité.

Le paradoxe de l'irréversibilité a été formulé d'une autre façon : Poincaré a démontré qu'un système régi par une dynamique réversible revient au voisinage de sa configuration initiale au bout d'un

Tant en mécanique statistique qu'en physique quantique (voir l'encadré page 60), l'émergence de l'irréversibilité se comprend grâce à l'emploi de probabilités. Or ce concept ne se rapporte pas seulement à l'objet étudié, mais aussi à son observateur : la probabilité d'un événement caractérise l'information dont nous disposons sur cet événement dans les circonstances considérées. C'est parce que nous ne sommes pas capables de contrôler ou de connaître les positions des N molécules dans le volume A que nous attribuons à chaque configuration

de type (a) la probabilité $p_1 = 1/\Omega_1$, et nos prévisions ultérieures se font à partir de là.

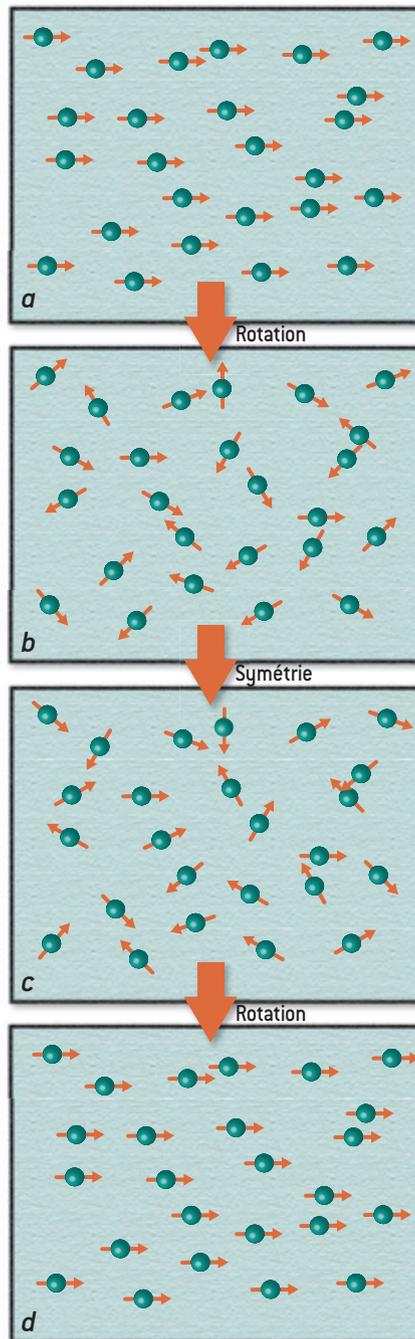
La théorie de l'information, créée en 1948 par le mathématicien américain Claude Shannon, permet de mesurer notre incertitude, c'est-à-dire la quantité d'information qui nous manque en raison du caractère probabiliste de la description ; cette quantité est proportionnelle au logarithme de la probabilité. On a pu alors montrer que l'entropie S introduite en thermodynamique s'interprète (à une constante multiplicative près) comme une mesure de notre incertitude à l'échelle microscopique lorsque notre connaissance du système se limite à ses grandeurs macroscopiques, ou encore comme notre perception du désordre.

Par exemple, l'entropie S_1 de l'état où le gaz occupe le volume A s'identifie à $S_1 = k_B \ln \Omega_1$, où $k_B = 1,38 \times 10^{-23}$ joule/kelvin est la constante de Boltzmann ; cette formule, qui a clarifié la signification de l'entropie, est si remarquable qu'on l'a gravée sur la tombe de Boltzmann, à Vienne. Lorsque le gaz se répand dans le volume $A + B$, notre incertitude augmente puisque les positions des molécules sont encore moins bien précisées ; l'accroissement $k_B(\ln \Omega_2 - \ln \Omega_1) = N k_B \ln 2$ de l'entropie mesure l'augmentation de notre incertitude. C'est en ce sens que le deuxième principe de la thermodynamique exprime la croissance du désordre.

L'observateur à son rôle

Dans l'expérience de pensée sur le gaz qui se répand dans le volume $A + B$, l'irréversibilité de l'expansion, alors que les équations microscopiques du mouvement sont réversibles, est liée à notre incapacité à renverser exactement les vitesses de toutes les molécules. Cependant, depuis les travaux de l'Américain Erwin Hahn, vers 1950, les expérimentateurs savent réaliser une opération analogue sur des systèmes particuliers, les substances paramagnétiques (voir la figure 3). Celles-ci comportent des moments magnétiques élémentaires, ou spins, qui, lorsqu'on applique un champ magnétique extérieur horizontal, s'alignent dans la direction de ce champ ; le matériau est alors aimanté, situation ordonnée analogue à l'état initial de notre gaz.

La suppression brusque de ce champ laisse les spins libres de tourner indépendamment, chacun avec une vitesse bien



3. LES « ÉCHOS DE SPIN » sont l'un des rares cas où l'on est capable d'inverser l'évolution spontanée d'un système. L'état initial d'un échantillon de matériau paramagnétique, aimanté dans la direction horizontale du plan (a), est préparé en appliquant à l'échantillon un champ magnétique dans cette direction, qui oriente tous les spins. La suppression de ce champ laisse les spins tourner dans le plan, chacun avec une vitesse propre (sous l'effet d'un champ non homogène perpendiculaire au plan de la figure). L'aimantation a ainsi disparu au bout d'un temps T (b). Une brève impulsion électromagnétique, bien choisie, effectue alors une symétrie par rapport à l'axe horizontal de tous les spins (c). Les rotations inégales des spins les ramènent à l'instant $2T$ dans leur état initial (d).

définie qui dépend de sa position en raison de l'hétérogénéité du milieu ; la désorientation relative des spins se traduit à notre échelle par une désaimantation progressive, un processus irréversible analogue à l'expansion de notre gaz. Au bout d'une durée T , les spins pointent dans des directions qui semblent quelconques, avec une apparence de désordre.

Remarquablement, en appliquant à l'échantillon une brève impulsion de champ magnétique convenablement choisie, les expérimentateurs sont capables d'effectuer globalement sur tous les spins une symétrie par rapport à l'axe horizontal, réalisant ainsi une opération analogue au renversement hypothétique des vitesses des molécules du gaz. La rotation spontanée des spins, chacun avec sa vitesse propre, se poursuit et les ramène alors tous au bout du délai T dans leur orientation initiale : l'échantillon s'est réaimanté malgré l'absence du champ horizontal externe. On a ainsi produit un « écho de spin » : le système est revenu à son état initial comme s'il avait remonté le temps. En fait, l'observateur savait que l'état désaimanté présentait un ordre caché, car il était issu de l'état aimanté, et il a réussi à tirer parti de cette information. Les échos de spin sont devenus une technique courante en imagerie par résonance magnétique.

Une idée similaire est exploitée en acoustique par Mathias Fink et son équipe à l'ESPCI (École supérieure de physique et chimie industrielles de la ville de Paris). La diffusion par un objet complexe d'ondes ultrasonores originellement émises par une source simple est un processus à première vue irréversible, car les ondes diffusées ont une apparence aléatoire. Imaginons cependant que l'on entoure l'objet diffuseur de capteurs pouvant détecter et enregistrer les signaux reçus, puis émettre une onde identique mais variant en sens inverse dans le temps, les premières oscillations émises reproduisant les dernières reçues. Cela permet d'effectuer un « retournement temporel » des ondes ultrasonores, qui convergent alors vers l'objet en reproduisant à l'envers les ondes divergentes originales.

Une telle focalisation, produite en dépit de l'hétérogénéité du milieu diffuseur, est à la base de techniques innovantes notamment pour briser des calculs rénaux ou pour détecter des tumeurs. Voilà un exemple remarquable d'application d'un renversement de la flèche du temps ! ■