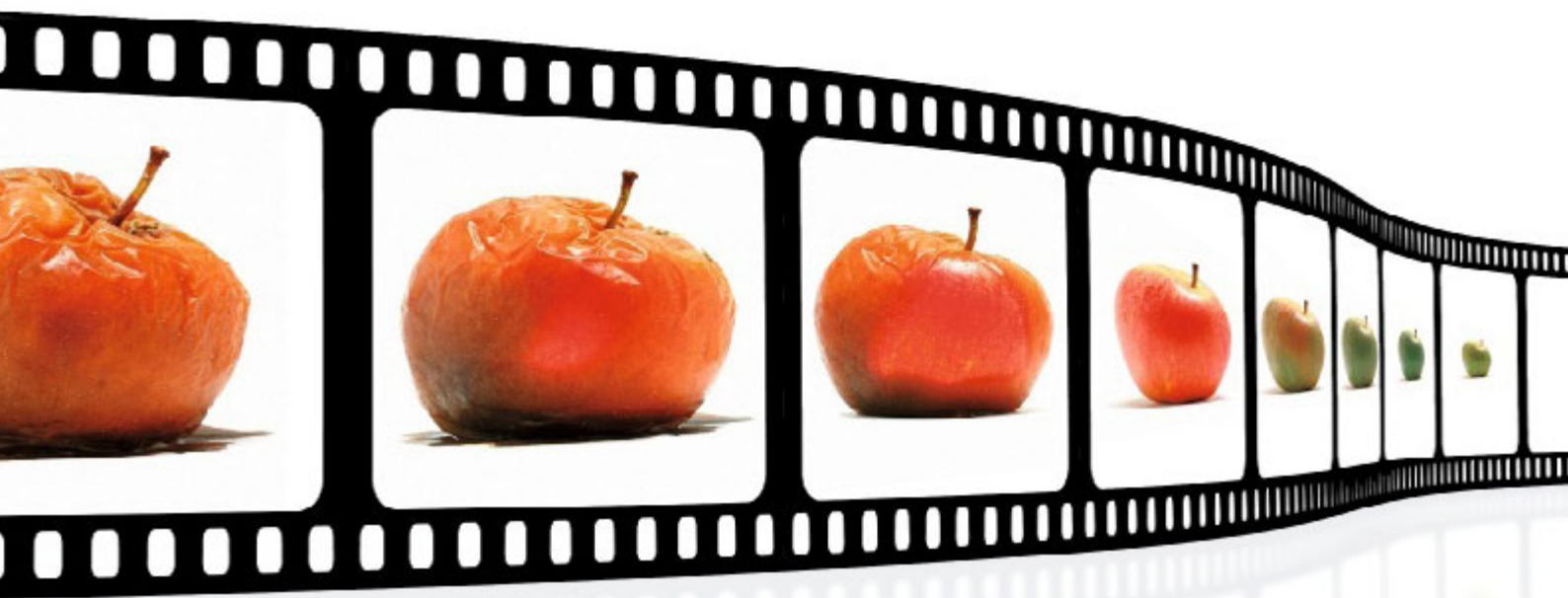




réversibilité

*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 $t' = -t$.

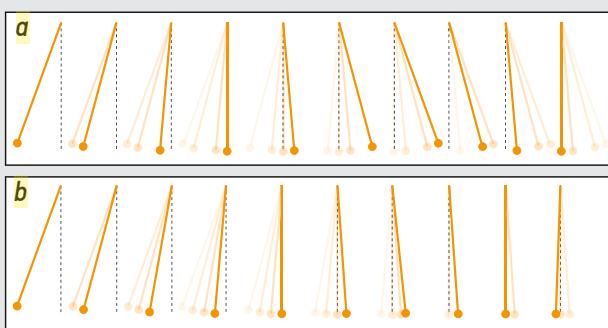
Pour le montrer, exprimons l'équation (1) en termes de : $\beta(t') = \beta(-t) = \alpha(t)$.

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.

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