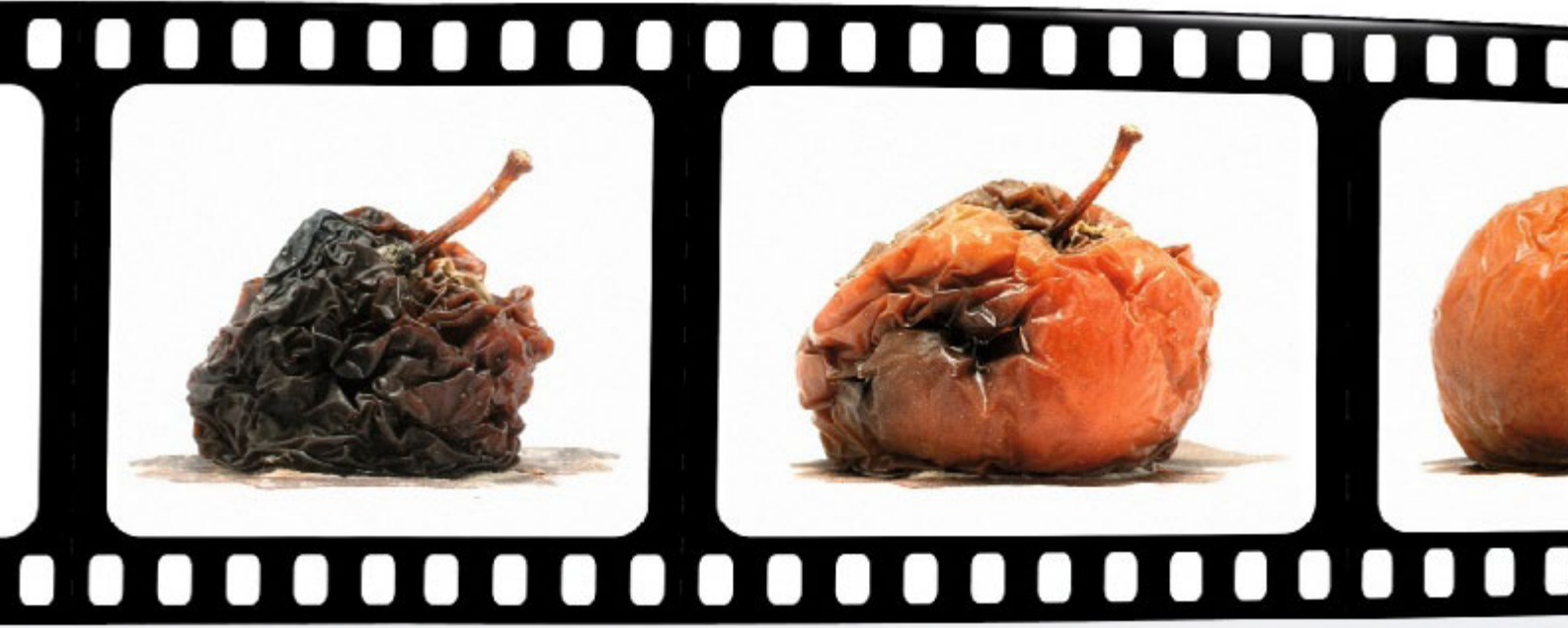




Le paradoxe de l'ir

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,

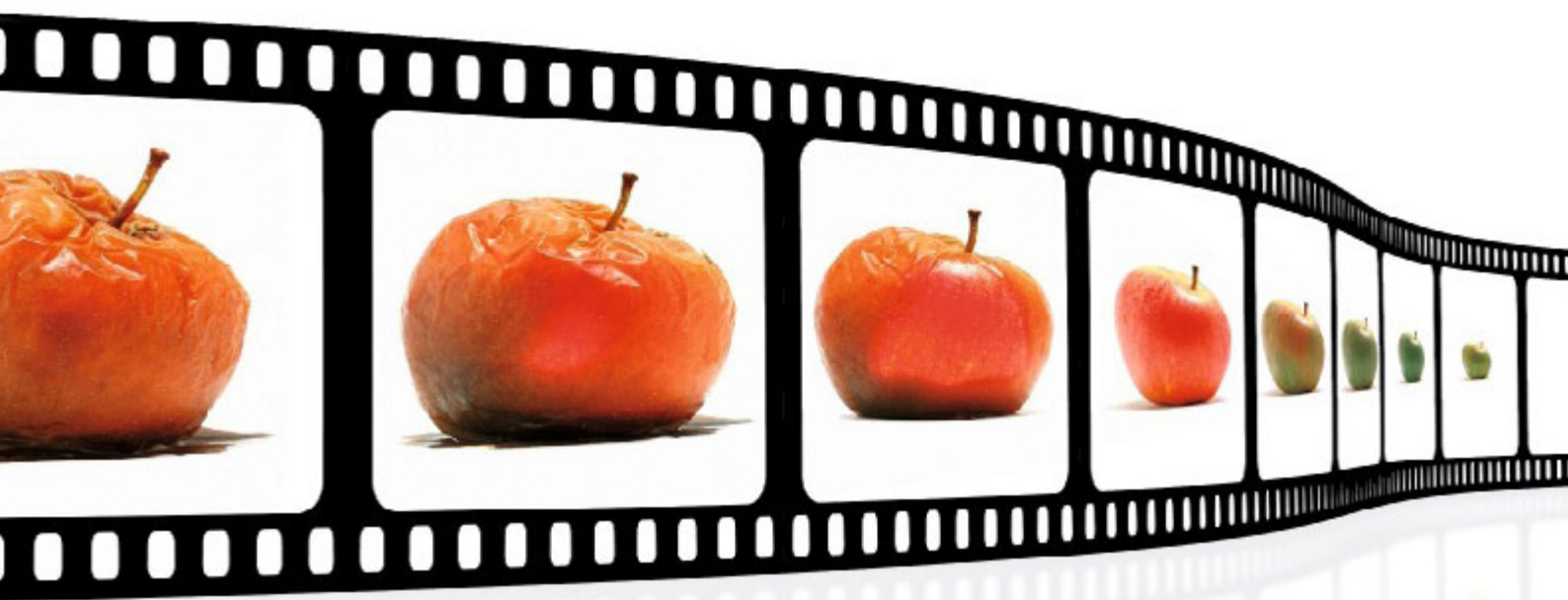
comme les trois coordonnées d'espace, l'une des variables qui figurent dans les lois décrivant un phénomène tel que le mouvement d'une particule ou la propagation de la chaleur dans un matériau.

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)