

appréhende la réalité comme une collection de nœuds et de liens entre ces nœuds qui ne sont pas dans l'espace, mais constituent l'espace. Un point surprenant de cette approche est le phénomène baptisé « localité désordonnée » (2). Il s'agit d'une déviation entre les éléments tels qu'ils sont décrits par la gravité quantique à boucles et la description de ces éléments dans la relativité générale. Prenons par exemple les villes de Paris et de Marseille. Il est évident que ces deux villes ne se touchent pas. Et pourtant, il arrive dans certains modèles de la gravité quantique à boucles qu'on ait des relations d'adjacence entre des éléments qui sont pourtant éloignés à notre échelle. Ainsi, il se pourrait très bien que certains éléments qui composent Paris et Marseille soient directement connectés (c'est-à-dire qu'ils soient adjacents) dans la description fondamentale du système physique que nous appelons « France ».

### L'ESPACE-TEMPS SERAIT-IL UNE FICTION PRODUITE PAR NOS ESPRITS ?

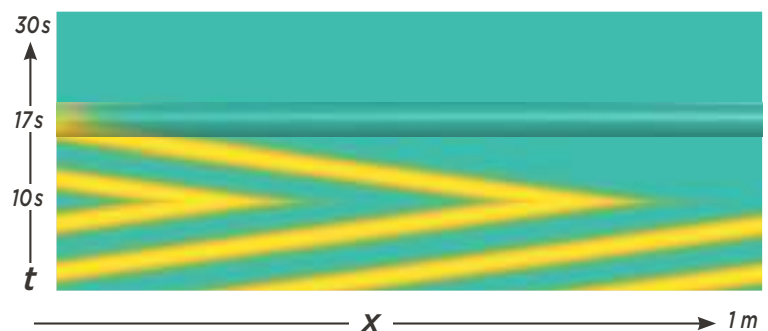
Comment réconcilier alors notre expérience ordinaire avec ces descriptions du monde si étranges ? Comment lier une journée ordinaire constituée d'épisodes s'enchaînant dans le temps, et se produisant dans l'espace, avec l'ontologie potentiellement sans durées ni distances de la théorie des cordes, ou avec l'ontologie qui remet en cause l'ordre même des choses dans l'espace avec la gravité quantique à boucles ? À l'heure actuelle, il n'existe pas une seule réponse universellement admise à cette question. On peut distinguer deux grands types d'approches. Ou bien l'espace-temps est une sorte d'illusion, une fiction produite par nos esprits qui se substitue à la réelle arène de la réalité, ou il existe bel et bien, mais pas à toutes les échelles de description. Si bien que, lorsqu'on commence à sonder des domaines d'énergie particulièrement élevés, ou à examiner certains phénomènes comme le centre des trous noirs, l'idée même d'un espace-temps cesse d'être pertinente. Quelle que soit la réponse à cette question, la physique du futur s'annonce passionnante pour notre compréhension de l'espace et du temps. ■

## Le retournement temporel, une question d'échelle

Dans les phénomènes macroscopiques, le temps semble s'écouler toujours dans le même sens : il nous paraît irréversible. Pourtant, dans un certain nombre d'expériences, il est possible de « retourner » la flèche du temps et d'induire une dynamique qui revient à faire revisiter à une onde des états de son passé immédiat, en ordre antichronologique. Mais il faut bien distinguer deux notions : d'un côté, les propriétés intrinsèques du temps – le temps qui passe, quoi qu'il advienne ; de l'autre, les propriétés des phénomènes qui peuvent sembler irréversibles, suivant les échelles auxquelles on les observe et les équations qui les modélisent.

### ÉCOULEMENT DANS UN TUYAU

*Diagramme d'espace-temps d'un écoulement unidirectionnel dans un tuyau ouvert (le tuyau à  $t = 17$  s a été superposé). Après 10 s, le sens de l'écoulement est inversé. L'écoulement est en partie réversible : si on lit le temps dans l'autre sens (du haut vers le bas), on retrouve des écoulements identiques. Toutefois, une partie de l'information est perdue à la sortie du tuyau.*





**Emmanuel Dormy**  
MATHÉMATICIEN,  
ÉCOLE NORMALE  
SUPÉRIEURE, PARIS



**Isabelle Gallagher**  
MATHÉMATICIENNE,  
ÉCOLE NORMALE  
SUPÉRIEURE, PARIS



**Emmanuel Trizac**  
PHYSICIEN,  
UNIVERSITÉ  
PARIS-SACLAY

SIMULATIONS EMMANUEL DORMY - DR - CYRIL FRÉLILLON / CNRS PHOTOTHÈQUE - DR

**L**es équations qui régissent le mouvement des atomes et des molécules sont réversibles. Cela signifie que si on filme un processus physique à l'échelle microscopique, la projection du film à l'envers respecte parfaitement les équations du mouvement. Rien ne permet alors de distinguer le film originel du film passé à l'envers. Voilà bien une différence fondamentale avec un film de cinéma. Comment la comprendre? L'opération de retournement temporel dont il est ici question est une des symétries importantes de la physique. Elle a permis de mettre au point de véritables miroirs temporels pour le contrôle d'ondes variées, par exemple en hydrodynamique ou en acoustique. Qu'entendent les mathématiciens et physiciens par ce terme de « retournement temporel »? Peut-on remonter le temps, comme avec les tourniquets tempo-

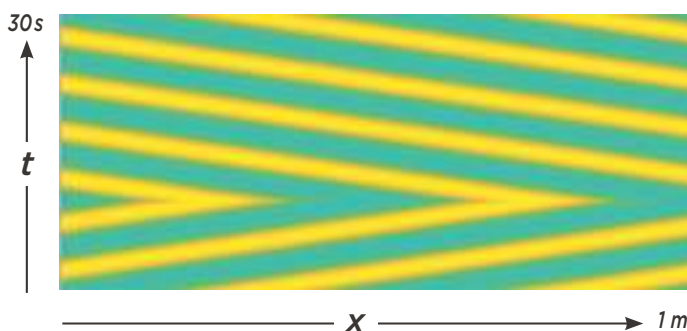
rels mis en scène dans le film de Christopher Nolan, *Tenet*? Pour répondre, il est nécessaire d'introduire la notion de flèche du temps, associée à l'irréversibilité des phénomènes.

Si on peut passer à l'envers le film des processus élémentaires sans qu'une incongruité apparaisse, comment comprendre l'origine de l'irréversibilité, qu'il est coutumier de constater à notre échelle, macroscopique? En effet, un glaçon en train de fondre nous fournit un exemple où il est aisé de distinguer la scène d'origine du film passé à l'envers. On parle ainsi de la flèche du temps, terme introduit par l'astrophysicien britannique Arthur Eddington (1882-1944) il y a environ un siècle pour signifier que la scène projetée à l'envers semble contraire aux lois de la physique macroscopique.

Pour autant, la dynamique du film « renversé » est parfaitement conforme aux lois du mouvement. Cette énigme a constitué un thème central de la recherche dans la seconde moitié du XIX<sup>e</sup> siècle. C'est le physicien autrichien Ludwig

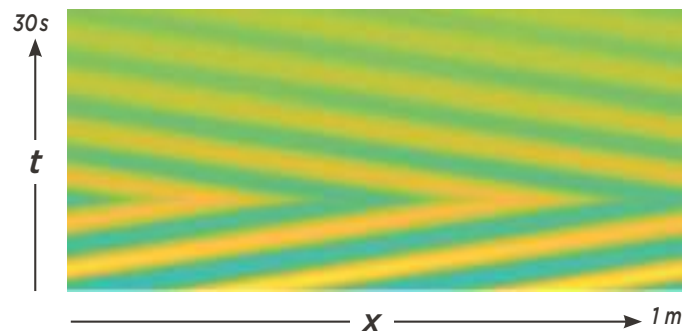
## ÉCOULEMENT DANS UN TORE

*Dans ce deuxième diagramme d'espace-temps, le tuyau est refermé sur lui-même, de sorte que l'écoulement devient parfaitement réversible. Cela s'observe par la symétrie totale de la figure: si on inverse le temps (de haut en bas), le déroulé des événements est identique (le diagramme espace-temps correspond au tuyau déplié).*



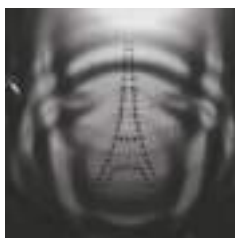
## ÉCOULEMENT AVEC DIFFUSION

*Ce troisième diagramme d'espace-temps illustre l'irréversibilité. Bien qu'on soit dans un tore (comme dans le diagramme du milieu), le colorant est non seulement transporté par l'écoulement, mais diffuse. L'écoulement redevient irréversible, ce qu'on observe par le fait que les lignes colorées s'estompent.*





- 200 ms



0 ms



200 ms

▲ *Expérience de miroir à retournement temporel: on crée des vagues à la surface du liquide avec une forme reconnaissable (ici, la tour Eiffel). Elles se propagent et la forme initiale semble perdue. Après 200 ms, on fait chuter brusquement la cuve contenant le liquide, ce qui induit un miroir temporel instantané. Une partie de l'énergie est alors réémise vers la source et s'y refocalise exactement 200 ms après la chute.*

Boltzmann (1844-1906) qui a compris parmi les premiers que la clé de ce paradoxe – passage du microscopique au macroscopique – se trouvait du côté des probabilités. Dès lors qu'un trop grand nombre de molécules est impliqué, c'est-à-dire dès qu'il n'est plus possible de suivre des trajectoires individuelles, nous sommes condamnés à nous contenter de mesures dégradées – des observables – de la réalité microscopique. L'évolution de ces observables, quantités nécessairement moyennées sur toutes les molécules présentes – par exemple la densité d'un gaz – se fait alors vers les configurations les plus probables. L'origine de l'irréversibilité perçue se trouve là, dans cette fuite vers les probabilités les plus fortes.

Pour fixer les idées, penchons-nous sur un dispositif qui figure en bonne place dans les livres de thermodynamique et qui a laissé perplexes des générations d'étudiants. Il y est question de mélanges de boules rouges et de boules vertes ou, pour prendre un exemple plus physique, de la détente d'un gaz. Prenons un récipient constitué de deux compartiments séparés par une paroi, l'un initialement vide, tandis que l'autre contient un gaz. Si la paroi entre les deux compartiments est ôtée, les densités dans les deux compartiments vont s'équilibrer. Et ce irrémédiablement, nous dit notre intuition, conformément aux formulations initiales du second principe de la thermodynamique (lire l'encadré p. 31). Et pourtant, la dynamique inversée (à temps retourné) ne viole aucune des équations ou principes physiques. Mieux même: il n'est pas impossible qu'au bout d'un certain temps toutes les molécules retournent dans leur compartiment d'origine. Un tel autoconfinement, s'il n'est pas impossible, est toutefois très improbable. Ainsi, le second principe, véritable législation de l'irréversibilité, ne signe pas une impossibilité, mais une improbabilité.

Comment rendre la détente du gaz réversible? Une expérience de pensée simple offre une solution: il suffit de reprendre le dispositif, avec quelques molécules seulement (deux, par exemple), et les particules se retrouveront tantôt dans l'un ou l'autre des compartiments. Les évolutions directes, ou à temps renversé, sont indiscernables. C'est dans ce sens que l'irréversibilité et, partant, la flèche du temps,

est un phénomène émergent. Il se manifeste d'autant plus nettement qu'on considère un nombre élevé de molécules. Or, un seul centimètre cube de gaz à température et pression ambiantes contient plusieurs milliards de milliards de molécules. C'est en définitive la loi des grands nombres qui se trouve à l'origine de l'irréversibilité apparente des phénomènes et qui explique qu'une fois qu'on a mis de l'eau dans son vin (au sens propre), les deux liquides nous semblent inséparables. L'irréversibilité est une question d'échelle; le mouvement sous-jacent est réversible mais ce qu'on en perçoit ne l'est pas. Le physicien écossais James Clerk Maxwell (1831-1879) résumait la situation d'une formule: « *La vraie logique du monde est celle du calcul des probabilités.* » Pour autant, tous les phénomènes macroscopiques sont-ils irréversibles?

#### DES ÉQUATIONS AUX DÉRIVÉES PARTIELLES LIANT L'ESPACE ET LE TEMPS

Une fois décrits de manière macroscopique, certains phénomènes sont réversibles, alors que d'autres ne le sont pas. Cette propriété se traduit dans les équations mathématiques qui les gouvernent. Lorsque les phénomènes sont réversibles, on peut retourner la flèche du temps, c'est-à-dire faire en sorte que le système étudié revienne à son état initial. Il ne s'agit évidemment pas là d'inverser le cours du temps, la personne réalisant l'expérience ne rajeunissant pas, hélas! Ces équations qui lient l'espace et le temps sont des équations aux dérivées partielles. Elles se classent en trois catégories. Les équations décrivant un transport d'information entrent dans la catégorie des équations dites « hyperboliques ». L'information s'y propage le long de courbes caractéristiques dans l'espace-temps. Considérons l'écoulement d'un fluide – de l'eau colorée – à travers un tube horizontal. Le fluide s'écoule de la gauche vers la droite; le tuyau est ouvert à droite et se vide dans un récipient. Si l'écoulement se fait purement dans la direction du tuyau, on peut retourner le temps en décidant d'aspirer le fluide par l'extrémité gauche, là où il était jusqu'ici injecté, pour créer un écoulement cette fois orienté de la droite vers la gauche. Comme le tuyau est ouvert à droite et que le liquide sort du tuyau,

il y aura tout de même une perte d'information à droite du domaine lors de cette expérience. Une manière de construire un problème similaire mais parfaitement réversible serait alors de boucler le tuyau sur lui-même, de manière circulaire. Cette configuration, dite « périodique », est, elle, parfaitement réversible (voir la figure de gauche p. 29).

D'autres phénomènes, comme la propagation des ondes, sont également décrits par des équations hyperboliques, généralement réversibles. Cela peut mener à des expériences de « retournement temporel » bien plus spectaculaires que notre tuyau. Ainsi, en déformant la surface de l'eau dans un bassin, par exemple en y laissant tomber un objet, on observe des ondes qui se propagent et se réfléchissent sur les bords du bassin en prenant des formes de plus en plus complexes. Si on perturbe l'expérience en faisant tomber le bassin expérimental de quelques centimètres de façon abrupte au cours de l'expérience, un phénomène surprenant se produit. La perturbation de la gravité apparente dans le référentiel du bassin, qui résulte de la chute, interrompt la propagation des ondes. À la fin de la chute, dès lors que la gravité apparente est rétablie, leur propagation reprend, mais la direction de propagation des ondes a été perdue. Une partie de l'énergie est réémise en sens inverse et semble remonter le temps. Les ondes retournent à leur source et se superposent à l'endroit précis où l'objet a été lâché (voir les illustrations p. 30). D'autres approches permettent d'aboutir à un tel retournement. Il est par exemple possible d'enregistrer la pression exercée par l'eau sur les bords du bassin et de réémettre, à l'aide de petits batteurs, ce signal à l'envers (dernier arrivé, premier réémis).

#### DES APPLICATIONS DANS LA MÉDECINE ET LES TÉLÉCOMMUNICATIONS

Ce type de retournement temporel existe pour une étonnante variété d'ondes et de milieux, éventuellement beaucoup plus complexes qu'un simple bassin. Au cours de ces dernières décennies, les physiciens de l'Institut Langevin, à Paris, ont mis à profit ces idées pour des applications médicales (thérapeutiques ou liées à l'imagerie) afin d'améliorer les méthodes de télécommu-

## L'entropie et le second principe

**L'étymologie annonçait au terme « entropie » un devenir et une réception difficiles: en grec, ἔντροπια signifie non seulement « action de se retourner », mais aussi « coup tordu », « mauvais tour ». L'entropie est de fait une notion délicate à appréhender, fuyante. Le terme a été introduit il y a un peu plus de cent cinquante ans pour quantifier le degré d'imprédictibilité d'un système: il est proportionnel au logarithme du nombre d'états microscopiques compatibles avec la donnée d'un jeu d'observables.**

**Ce jeu est défini par les appareils de mesure dont on dispose. Ainsi, on peut présenter le second principe de la thermodynamique en disant que pour un système isolé, une différence d'entropie mesure la longueur de la flèche du temps. Cette différence, nécessairement positive, quantifie le degré d'irréversibilité. Elle s'annule pour un phénomène réversible, ce qui correspond à une flèche de longueur nulle, c'est-à-dire à l'absence de flèche pour le phénomène en question. ■**

E. D., I. G. et E. T.

nication en milieu urbain, ou encore pour du contrôle non destructif en aéronautique.

Revenons à l'expérience du transport de l'eau à travers notre tuyau imaginaire et considérons à présent que le colorant utilisé s'étale avec le temps, comme le ferait une goutte d'encre lâchée dans un seau d'eau: on parle de diffusion (voir la figure de droite p. 29). Le phénomène macroscopique est alors décrit par un second type d'équations d'évolution, appelées « paraboliques ». Tout changement abrupt de couleur devient de plus en plus flou avec le temps. Si on attend suffisamment, tout le liquide devient de couleur uniforme. Plusieurs configurations initiales différentes mènent à ce même état stationnaire. Dans l'exemple de la goutte colorée lâchée dans un seau d'eau, une fois que le colorant a diffusé, il est impossible de savoir où la goutte de colorant est tombée et, quel que soit le point d'impact, le résultat final sera le même! Le retournement temporel est donc impossible en pratique, et le phénomène observé est irréversible. C'est cet effet de diffusion qui caractérise le plus souvent l'irréversibilité macroscopique.

Un troisième type d'équations aux dérivées partielles intervient dans la description des

#### POUR EN SAVOIR PLUS

■ Mathias Fink, *Renversement du temps, ondes et innovation*, Collège de France-Fayard, 2009.

# La physique n'interdit pas l'évolution inverse mais elle la frappe d'une improbabilité d'autant plus marquée que les systèmes étudiés sont grands

(\*) Une équation linéaire vérifie un principe de superposition et de proportionnalité (par exemple, la somme de deux solutions est une solution), ce qui n'est pas le cas d'une équation non linéaire.

phénomènes physiques qui nous entourent : les équations elliptiques. Elles correspondent à des problèmes très fortement diffusifs. On peut les interpréter en considérant une diffusion si efficace que la solution stationnaire du problème y est instantanément réalisée. Celles-ci rendent compte, par exemple, de mouvements lents dans un fluide très visqueux, tels ceux d'une cuillère dans un pot de miel. De manière surprenante, ces phénomènes sont réversibles, car ils n'impliquent que des états d'équilibre macroscopiques. Une expérience l'illustre très bien. Imaginons un fluide visqueux placé entre deux cylindres concentriques. Une manivelle actionnée par l'expérimentateur permet de faire tourner le cylindre intérieur. Un texte est écrit à la surface du fluide avec un colorant, puis on tourne lentement la manivelle dans un sens. Le colorant se déforme et s'étire, entraîné par les mouvements du fluide. Après deux ou trois tours complets, l'expérimentateur inverse la flèche du temps en tournant la manivelle dans le sens inverse, à la manière d'une membrane élastique qu'on aurait étirée puis relâchée et qui reprendrait sa forme initiale. Ce retournement temporel est frappant en vidéo (1). Ainsi, les effets diffusifs, responsables de l'irréversibilité s'ils sont modérés, peuvent finalement mener à des situations réversibles s'ils sont suffisamment importants pour dominer tous les autres effets...

La diffusion n'est cependant pas la seule cause d'irréversibilité. Nous avons vu que les équations hyperboliques, décrivant par exemple le comportement des ondes, sont en principe réversibles. Pourtant, dans des conditions particulières, elles peuvent mener à des situations irréversibles même en l'absence de diffusion, par exemple à cause de singularités. Considé-

rons une vague déferlant sur une plage. Au large, la vague est de petite amplitude. Cette configuration est réversible, exactement comme l'onde que nous avons vue dans l'expérience du bassin. À mesure qu'elle s'approche de la côte, la vague est ralentie par la remontée du fond. Elle transforme alors une partie de son énergie cinétique en énergie potentielle : elle grandit. Les équations qui décrivent la vague deviennent alors non linéaires (\*); ce type d'équations est beaucoup plus difficile à étudier mathématiquement. Lorsque la vague devient suffisamment haute, elle se cambre pour former un rouleau, le « tube » cher aux surfeurs. Étonnamment, lors de la formation de ce tube, la configuration reste réversible.

## UN JEU QUI EST PLUS QU'UNE EXPÉRIENCE DE PHYSIQUE AMUSANTE

Une expérience de pensée consistant à considérer une masse d'eau dont la vitesse serait exactement opposée en tout point à celle de la vague réelle mènerait à une vague semblant remonter le temps, comme dans un film passé à l'envers. Les équations autorisent un tel retournement temporel. En revanche, dès qu'une pointe se forme au bout de la vague, le problème cesse d'être réversible. La pointe correspond à l'apparition d'une singularité dans les équations. Le modèle mathématique cesse d'être valide, le temps ne peut plus être retourné...

Il est de coutume de relier le passage du temps (le cours du temps) à l'irréversibilité des phénomènes qui y prennent corps, quantifiée par le second principe de la thermodynamique. De façon assez contre-intuitive, la physique n'interdit pas l'évolution inverse. Elle la frappe toutefois d'une improbabilité d'autant plus marquée que les systèmes étudiés sont grands. Autrement dit, la flèche du temps est de nature statistique, et se manifeste essentiellement à grande échelle. Dans les quelques exemples présentés ici, nous voyons qu'il est possible de « retourner » la flèche du temps en jouant avec les équations et avec des dispositifs expérimentaux particuliers. Un jeu qui est plus qu'une expérience de physique amusante, puisqu'on peut l'utiliser pour détruire des calculs rénaux ou pour améliorer les systèmes de télécommunication. ■

(1) [www.tinyurl.com/video-retournement-temps](http://www.tinyurl.com/video-retournement-temps)