

VRAI OU FAUX

Les hommes ont-ils de la cellulite ?

Non, c'est rare. Car le tissu graisseux des hommes ne se situe pas sous la peau, mais dans la cavité abdominale.

Bénédicte SALTHUN-LASSALLE

Le terme de cellulite est impropre : il signifie « inflammation de la cellule ». Or on désigne par cellulite un aspect particulier de la peau qui ressemble à de la « peau d'orange ». Ce sont les femmes qui en ont le plus et qui en parlent le plus. Mais les hommes sont-ils aussi concernés ? Nous allons voir que peu d'hommes en ont, à cause d'une répartition différente de leurs graisses.

La cellulite résulte d'une désorganisation du tissu de soutien et de cohésion du tissu adipeux. Ce dernier contient les cellules graisseuses, ou adipocytes, qui mettent en réserve les lipides ; il est présent partout dans l'organisme, dans l'abdomen, autour de chaque organe et sous la peau. Le tissu graisseux sous-cutané est peu actif d'un point de vue métabolique : il stocke les graisses, mais les libère rarement dans le sang, car c'est un tissu de réserve peu utilisé (ses graisses sont consommées en cas de jeûne prolongé ou d'allaitement par exemple). En revanche, le tissu adipeux abdominal est très actif : ses graisses sont facilement libérées dans le sang. Pour cette raison, on considère que l'obésité abdominale est dangereuse pour la santé.

Les cellules graisseuses sont organisées et soudées entre elles par un réseau extracellulaire de protéines, qui contient notamment du collagène et de la fibronectine. Ce réseau assure une répartition homogène des cellules, de sorte que le tissu graisseux est lisse. Or la cellulite apparaît quand cette trame de soutien des cellules graisseuses se désorganise.

Les graisses abdominales existent davantage chez les hommes alors que le tissu graisseux sous-cutané est surtout

féminin. En effet, les hormones sexuelles déterminent la localisation des cellules graisseuses : les estrogènes (ou hormones féminines) favorisent une mise en réserve des graisses sous la peau à des endroits jugés peu esthétiques selon les critères de beauté du XXI^e siècle (dans les fesses, le haut des cuisses et des bras) ; les hormones masculines stimulent un stockage des graisses dans l'abdomen. Mais la cellulite ne se voit que lorsque le tissu graisseux est sous-cutané, c'est-à-dire chez les femmes.

Inéluctable cellulite...

Pourquoi le réseau de soutien des adipocytes se désorganise-t-il ? Il y a trois causes. La première est constitutive, c'est-à-dire que le réseau extracellulaire est génétiquement déstructuré ; dans ce cas (où des facteurs de prédisposition à la cellulite existent), rien ne peut empêcher la formation de cellulite, même chez une femme mince (elle a peu de tissu graisseux et ses adipocytes sont petits). La présence de cellulite ne dépend pas uniquement du nombre et de la taille des adipocytes. La deuxième cause est une fibrose, un vieillissement du tissu adipeux. Tous les tissus de l'organisme vieillissent et produisent trop de certaines protéines du réseau de soutien, tel le collagène. Un tel excès de protéines déstructure le réseau. La dernière raison est la rétention d'eau. S'il y a trop d'eau dans le tissu graisseux, la trame se déstructure encore davantage.

Selon Philippe Valet, directeur de l'Équipe INSERM Sécrétions adipocytaires, obésités et pathologies associées de l'Université Paul Sabatier à Toulouse, ces causes exis-

Cellulite ou « peau d'orange »



© Shutterstock / Stéphane Bidouze

tent aussi bien chez les hommes que chez les femmes ; mais les hommes ont peu, voire pas du tout, de tissu graisseux sous-cutané. Le tissu graisseux de l'homme dans la cavité abdominale reste invisible de l'extérieur, même s'il est désorganisé par une fibrose. Seul un homme en surpoids ou obèse peut développer de la cellulite au niveau de la ceinture abdominale. À la ménopause, la femme produit moins d'estrogènes : elle accumule alors de la graisse dans l'abdomen, mais peut perdre la graisse sous-cutanée.

Peut-on éliminer la cellulite ? On ne peut pas combattre la fibrose ni la cellulite constitutive. En revanche, on peut drainer l'eau par des massages, ce qui lisse la peau momentanément... Mais l'eau ne tarde pas à s'installer à nouveau. Il est aussi possible de limiter la consommation de sel pour éviter la rétention d'eau.

Si les hommes ont rarement de la cellulite, les femmes aussi peuvent y échapper, si elles n'ont pas de facteurs génétiques de prédisposition à la cellulite et si elles ne sont pas en surpoids. En effet, quand on grossit, non seulement la taille, mais aussi le nombre des cellules graisseuses augmentent (dans un espace limité), ce qui accroît le risque de désorganiser les fibres de soutien.

Bénédicte SALTHUN-LASSALLE est journaliste à Pour la Science.

POUR LA SCIENCE

vous fait découvrir toujours
plus d'actualités
scientifiques



Abonnez-vous !

Pour la Science + Les Dossiers
12 numéros 4 numéros

Soit
les Dossiers
offerts !

1 an • 76 €

Recevez chaque mois votre magazine en version papier et consultez sa version numérique
en format PDF sur www.pourlascience.fr

BULLETIN D'ABONNEMENT

À retourner accompagné de votre règlement à :
Service Abonnements • Pour la Science
8, rue Férou • 75278 Paris cedex 06

☐ Oui, je m'abonne à **Pour la Science** (12 n°s et leur version numérique) + **les Dossiers** (4 n°s et leur version numérique)
1 an • 76 € au lieu de 102,50 €* Participation aux frais de port : Europe (hors France) 16 € par an, autres pays 35 € par an.

☐ Oui, je m'abonne à **Pour la Science** seul (12 n°s et leur version numérique)
1 an • 56 € au lieu de 74,70 €* Participation aux frais de port : Europe (hors France) 12 € par an, autres pays 25 € par an.

☐ Oui, je m'abonne à **Pour la Science** version web (12 n°s)
1 an • 48 €

☐ J'accepte de recevoir par e-mail des informations de **Pour la Science**

☐ J'accepte de recevoir par e-mail des informations des partenaires commerciaux de **Pour la Science**

Mes coordonnées (à remplir) :

Nom, prénom : _____

Adresse : _____

Code postal : _____ Ville : _____

Pays : _____ Tél. **: _____

E-mail **: _____

Je règle par :

☐ Chèque à l'ordre de **Pour la Science**

☐ Carte bancaire

Numéro de la carte _____

Date d'expiration _____

Code de sécurité *** _____

Signature obligatoire



En application de l'article 27 de la loi du 6 janvier 1978, les informations ci-contre sont indispensables au traitement de votre commande. Elles peuvent donner lieu à l'exercice du droit d'accès et de rectification auprès de Pour la Science. Par notre intermédiaire, vous pouvez être amené à recevoir des propositions d'autres organismes. En cas de refus de votre part, il vous suffit de nous prévenir par simple courrier.

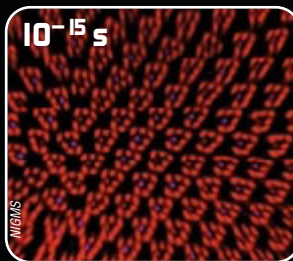
* prix en kiosque ** facultatif *** Merci d'inscrire les 3 chiffres figurant au dos de votre carte

Les jalons du temps

Les échelles de temps accessibles à la science actuelle s'étendent sur plus de 40 ordres de grandeur, du monde subatomique à celui de la cosmologie. Un défi à notre imagination.

Temps de Planck : 10^{-43} s

C'est l'échelle de temps obtenue en combinant les trois constantes fondamentales de la physique (la vitesse de la lumière, la constante de gravitation et la constante de Planck). Seule une théorie unifiant la relativité générale à la physique quantique permettrait de comprendre ce qui se passe à cette échelle, ainsi qu'à l'échelle de longueur correspondante (la longueur de Planck, 10^{-35} mètre).



1 femtoseconde (fs) : 10^{-15} s

Les changements de conformation des molécules en interaction avec d'autres ou sous l'effet d'une excitation durent 100 à 200 femtosecondes. Par exemple, dans la rétine (ici de *Drosophila*), le rétinol contenu dans le pigment des photorécepteurs change de conformation sous l'effet de la lumière en moins de 200 femtosecondes, déclenchant une suite de réactions biochimiques qui crée un message nerveux.



1 attoseconde (as) : 10^{-18} s

En une attoseconde, la lumière parcourt 0,3 milliardième de millimètre, soit la taille d'une petite molécule. En 2008, des chercheurs allemands et américains ont produit dans le domaine des rayons X des impulsions laser d'environ 80 attosecondes, soit les plus brèves à ce jour (ci-contre). De telles impulsions permettent d'observer ou de contrôler le mouvement des électrons dans les atomes et les molécules.

1 yoctoseconde (ys) : 10^{-24} s

C'est le temps qu'il faut à la lumière pour traverser le noyau d'un atome. La durée de vie moyenne des bosons W ou Z est de 0,3 yoctoseconde. Des collisions d'ions lourds produisent durant quelques yoctosecondes un plasma de quarks et de gluons (ci-dessous) ainsi que des photons très énergétiques.



1 seconde (s)

Équivalent de 1/86 400 du jour solaire moyen. En une seconde, la lumière parcourt 299 792 458 mètres. Par définition, la seconde est « la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133, au repos, à une température de 0 kelvin ». Les horloges atomiques au césium ne dévient que d'une seconde au bout de 100 millions d'années. Un homme de 64 ans a vécu environ deux milliards de secondes. La rotation de la Terre ralentit progressivement de cinq secondes tous les 1 000 ans.

1 microseconde (μ s) : 10^{-6} s

Dans ce laps de temps, un message nerveux parcourt trois micromètres. La variation électrique, ou potentiel d'action, qui en est à l'origine se produit en 1 000 microsecondes environ (une milliseconde). En 100 microsecondes, le son parcourt 3,4 centimètres, la lumière un peu moins de 30 kilomètres.

1 nanoseconde (ns) : 10^{-9} s

En une nanoseconde, la lumière parcourt près de 30 centimètres. Dans un ordinateur doté d'une mémoire vive dynamique (DRAM), le temps d'accès à un bit d'information (un 0 ou 1) est de 60 à 70 nanosecondes. La fusion nucléaire dans une bombe à hydrogène dure 20 à 40 nanosecondes.



10^{-43} s

10^{-24} s

10^{-18} s

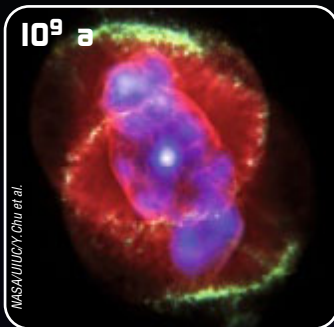
10^{-15} s

10^{-9} s

10^{-6} s

1 s

1 h



10⁹ a

MASA/UDU/Chu et al.

1 milliard d'années

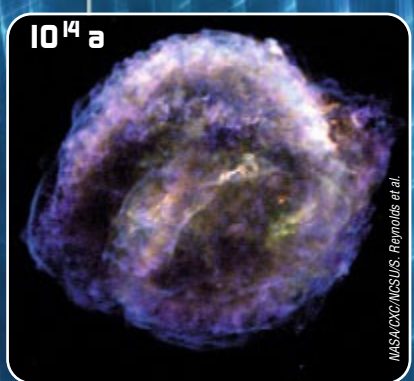
C'est ce qu'il a fallu à la vie pour apparaître sur Terre après la formation de la planète, 3,5 milliards d'années plus tôt. Dans un milliard d'années, le Soleil sera devenu trop chaud pour que la vie sur Terre soit encore possible. Quatre milliards d'années de plus, et notre étoile deviendra une géante rouge, éjectant de la matière comme c'est le cas dans la Nébuleuse de l'œil de chat (*ci-contre*), puis finira en naine blanche.

1 000 milliards d'années

Durée de vie possible des naines rouges, étoiles peu massives, les plus nombreuses de l'Univers. D'ici 10¹² ans, tous les éléments créés lors du Big Bang auront disparu ou seront noyés dans ceux produits par les étoiles.

1 million d'années : 31,6 × 10¹² s

C'est l'unité de l'échelle des temps géologiques. La période du Quaternaire a ainsi débuté il y a 2,588 millions d'années et l'ère du Cénozoïque il y a 65,5 millions d'années. Les premiers hominidés sont apparus il y a 7 millions d'années ; c'est un peu moins de trois fois le temps mis par la lumière pour nous parvenir depuis la galaxie d'Andromède.



10¹⁴ a

MASA/CXC/MSUS, Reynolds et al.

100 000 milliards d'années

Ce futur lointain verra la mort des dernières étoiles de l'Univers, parfois sous forme de supernovae (*ci-contre*, à droite, la supernova de Kepler). De nombreux noyaux atomiques mettent plus de temps à disparaître ; la demi-vie du tellure 128 est ainsi de 2,2 × 10²⁴ années. Et les derniers protons finiront de se désintégrer dans 10²⁰⁰ ans !



1 année : 31 556 926 s

L'année sidérale est le temps de révolution complète de la Terre autour du Soleil, c'est-à-dire ce que met le Soleil pour retrouver la même position sur la sphère céleste ; soit 365 jours 6 heures 9 minutes et 9,8 secondes (365,25636 jours). L'année solaire ou tropique, durée séparant deux équinoxes, représente 365 jours 5 heures 48 minutes 45 secondes en moyenne (365,24219 jours). Notre calendrier grégorien prend un jour de retard sur l'année tropique tous les 3 300 ans.

100 000 ans : 3 160 × 10⁹ s

C'est le temps que met la lumière pour traverser notre galaxie, ou encore la galaxie de la Vierge (*ci-dessous*), distante de la nôtre de 56 millions d'années-lumière. C'est aussi approximativement le temps écoulé depuis l'expansion de l'homme moderne hors d'Afrique.



1 h

Niels Gailisen, MGH/NSF

1 heure : 3 600 s

En une heure, la lumière parcourt 1,08 milliard de kilomètres. Depuis Pluton, elle nous parvient en 5 heures et 20 minutes. Une cellule vivante se divise en une à quelques heures, selon l'organisme. Un embryon de mammifère (*ci-dessus*) met quelques dizaines d'heures pour avoir huit cellules.



10⁵ a

MASA/ESA/Immer et al.

L'instant présent unique, mais banal

Étienne Klein

L'instant présent, l'instant passé et l'instant futur sont indissociables dans la perception que nous avons du temps. La conscience rend le temps continu. Pourtant, l'instant présent, celui qui existe maintenant, est singulier. Peut-on définir le temps indépendamment de notre subjectivité ?

J'ai cessé de croire aux « grands événements » qui s'accompagnent de hurlements et de fumée. Et crois-moi, je te prie, cher vacarme d'enfer, les plus grands événements, ce ne sont pas nos heures les plus bruyantes, mais les heures du plus grand silence.
Nietzsche, Ainsi parlait Zarathoustra

La métaphore du fleuve a accompagné presque toute l'histoire de la pensée du temps – du moins en Occident – et continue d'irriguer notre façon de l'évoquer et de le représenter : verbalement, le temps demeure solidement arrimé à l'image d'un fluide qui s'écoule ; graphiquement, il est figuré par une ligne droite, sorte d'abstraction du fleuve, dont le sens d'écoulement est indiqué par une petite flèche.

Mais en réalité, il se pourrait que cette figuration soit en partie trompeuse, car elle nous conduit à attribuer au temps les propriétés de la ligne par laquelle on

le représente. En d'autres termes, le fait de décrire le temps par une ligne lui confère *ipso facto* des « problèmes de ligne ». Kant l'avait déjà relevé : « Nous représentons la suite du temps par une ligne qui se prolonge à l'infini et dont les diverses parties constituent une série qui n'a qu'une dimension, et nous concluons des propriétés de cette ligne à toutes les propriétés du temps, avec cette seule exception que les parties de la première sont simultanées, tandis que celles du second sont toujours successives. »

En effet, cette représentation aiguise et concentre certains problèmes d'ordre philosophique. Par exemple, elle n'explique pas comment la ligne du temps se construit : est-ce l'instant présent qui la parcourt progressivement ou n'advient-elle que point par point, un instant présent après l'autre ? Et à quoi tient ce que nous nommons l'écoulement du temps ? Quel est son moteur ? Est-ce le temps même ? L'Univers ? Nous-mêmes ?

1. LE TEMPS S'ÉCOULE. Cette métaphore associant le temps et un fluide a conduit à représenter le temps sous forme d'une ligne orientée. Or, contrairement au temps, une ligne est continue. Cette image est trompeuse.



Le simple fait de poser ces questions renvoie à une question que soulevait Henri Bergson dans *Durée et simultanéité* : comment du successif peut-il être engendré par du juxtaposé ? Comment des points placés sur une ligne droite, d'apparence spatiale, parviennent-ils à se temporaliser ? Comment peut-il n'en apparaître qu'un seul à la fois ?

Tout récemment, le physicien américain Lee Smolin a attiré l'attention de ses confrères sur cette énigme, qu'il appréhende comme une difficulté conceptuelle majeure entravant l'avancement de la physique, notamment lorsqu'il s'agit d'unifier la relativité générale et la physique quantique, ou, de façon très simplifiée, le monde de l'infiniment grand et celui de l'infiniment petit : « Quand on représente graphiquement un mouvement dans l'espace, le temps est représenté comme s'il n'était qu'une autre dimension spatiale. Le temps est comme gelé. [...] Il faudrait trouver une manière de dégeler le temps, de le représenter sans le transformer en espace. » Pour ce faire, il faudrait pouvoir identifier et caractériser le véritable moteur du temps : est-il physique, objectif, ou intrinsèquement lié à notre rapport au monde ? Si c'est cette dernière hypothèse qui est la bonne, est-ce la conscience qui joue le rôle de médiatrice entre le monde et nous ? Est-ce elle qui formate et temporalise notre rapport au monde ?

L'alliance du passé immédiat et du futur imminent

Tel qu'il est figuré sur la ligne du temps physique, l'instant présent a une durée nulle. Il se concentre en un point. Point qui symbolise notre connexion actuelle à la ligne du temps. Mais la perception que nous en avons n'est jamais aussi concentrée. Car notre conscience épaissit l'instant présent, émousse sa brillance, le dilate en durée. Elle l'habille de son voisinage, l'enveloppe d'une rémanence de ce qu'il a contenu à l'instant précédent et d'une anticipation de ce qu'il contiendra à l'instant suivant.

Ainsi, lorsque nous écoutons un air de musique, nous percevons bien que la note précédente est comme retenue avec la note présente qui se projette elle-même dans la note suivante. Le présent, lorsqu'il disparaît, laisse toujours une trace

L'ESSENTIEL

- ✓ Sur la ligne du temps, l'instant présent est un point.
- ✓ Le présent exclut le passé et le futur, mais en est indissociable.
- ✓ Notre conscience unifie les instants discontinus du temps de la physique, les « atomes de temps », de sorte que cette dimension devient continue et homogène.
- ✓ Le passé et le futur se pensent par rapport au présent. Ce temps perçu diffère du temps physique qui ne fait qu'établir l'ordre chronologique de ce qui a eu lieu avant, après ou en même temps qu'un événement de référence.

Les propriétés antagonistes du temps

Dès le début du XVII^e siècle, Pierre Gassendi (1592-1655), mathématicien, philosophe et astronome, avait noté que le présent est contaminé par des propriétés antagonistes : à ceux qui objectaient « que le temps n'est rien parce que, consistant par hypothèse en une partie passée, une partie présente et une partie future, la partie passée n'est plus, la partie future n'est pas encore, la partie présente s'évanouit complètement », il rétorquait que c'est « un paralogisme [un

non-sens], puisqu'on traite alors des choses de différentes natures comme si elles étaient de même nature [...] ». Ceux qui appliquent une catégorie valable pour une espèce de choses à une autre espèce de choses font comme s'ils mesureraient une ligne droite avec quelque chose de courbe, un poids de quelque chose avec une mesure de longueur, une longueur avec une mesure de poids ». À la question : « Est-il vrai que rien, en dehors de ce qui est permanent, ne peut exis-

ter ? », Gassendi répondait que notre embarras venait d'une limitation de notre vocabulaire : « Évidemment, rien ne peut exister d'une manière permanente, excepté ce qui est permanent ; mais ce qui est successif peut exister à sa manière, c'est-à-dire successivement. Sans aucun doute, nous manquons d'un simple mot pour exprimer l'existence totale qui, n'étant pas simultanée, n'est pas contenue seulement dans le présent, mais aussi dans le passé et dans le futur. »

dans la conscience, en même temps qu'il y préfigure son prolongement : une sorte d'alliance continue du passé immédiat et du futur imminent s'établit au sein du présent perçu. Sans cette alliance, il n'y aurait pas de mélodie à proprement parler. Ainsi, notre conscience du présent unifie-t-elle – ou rassemble-t-elle – des instants successifs qui ne coexistent pas dans le temps physique. Car pour la physique, deux instants qui se succèdent n'existent pas ensemble.

Vue sous cet angle, la représentation du passage du temps par une ligne, qui nous semble si naturelle, apparaît plutôt comme le résultat d'une opération compliquée. Elle revient en effet à considérer que deux événements distincts et successifs s'excluent l'un l'autre d'une existence simultanée, mais qu'ils appartiennent à une même série.

Saisir le passage du temps, c'est en somme procéder à une lecture à la fois analytique et intégrative de la suite des instants : un ensemble de points, au départ sans corrélation, s'organise en une ligne continue, devenant un continuum temporel. C'est cette capacité intégrative de la conscience qui nous permet d'imaginer qu'existe un « cours du temps ». D'ailleurs, lorsqu'elle vient à faire défaut, on se retrouve dans la situation du malheureux père Bourdin évoquée par Descartes : « J'ai connu quelqu'un qui en s'endormant avait entendu, un jour, sonner quatre heures, et avait fait ainsi le compte : une, une, une ; et devant l'absurdité de sa conception, il s'était mis à crier : "Voilà l'horloge qui est folle : elle a compté quatre fois une heure !" » Ce monsieur croyait

que, ayant sonné quatre heures, l'horloge avait sonné quatre fois une heure : chaque nouvelle sonnerie de l'horloge lui paraissait la répétition de la sonnerie précédente et n'apportait à ses oreilles aucune information supplémentaire.

La perception du temps comme un passage, imbriquant le futur, le présent et le passé, nécessite donc bel et bien une double opération de la pensée : il faut non seulement distinguer le présent, seul existant, et exclure le passé et le futur, mais aussi – en même temps – appréhender à la fois l'instant présent, l'instant passé et l'instant futur, les penser dans leur appartenance à une même série ; il n'y a pas un instant, puis un autre ; il y en a un, puis un deuxième, puis un troisième. Ce qui suppose que le premier et le deuxième n'existent plus lorsqu'est présent le troisième, mais que quelque chose d'eux demeure qui permet de penser les trois instants comme appartenant à un même tout.

L'intervention d'une conscience « intégrante » semble donc nécessaire à la conceptualisation d'un cours du temps qui soit continu et homogène, qui ne soit pas une agglomération chaotique d'atomes de temps. Est-ce à dire que le cours du temps dépend lui-même de la conscience ? Ou existe-t-il de façon autonome par rapport au sujet conscient ?

Au sein de la ligne du temps, le présent occupe, pour nous, une place singulière. Il nous apparaît même unique, radicalement différent de tous les autres instants, puisqu'il est celui où nous sommes... présents. Un instant n'est d'ailleurs qualifié de présent qu'en référence à nous : la seule chose qui le dis-

tingue *a priori* de ses congénères est que cet instant-là accueille notre présence. Pourtant, sur la ligne qui représente le temps physique, c'est un instant singulièrement... banal : rien ne semble le distinguer des instants qui le précèdent ni de ceux qui le suivent, si ce n'est que nous le déclarons présent.

De prime abord, la mathématisation du temps semble banaliser le présent en lui ôtant toute spécificité par rapport aux autres instants : par définition, tout instant du temps est, a été ou sera présent. Dès lors, une question se pose : par quoi l'instant présent, physiquement si quelconque, devient-il, pour nous, si singulier ? Sa particularité vient-elle de nous ou lui est-elle intrinsèque ? En d'autres termes, existe-t-il un présent du monde (qui peut n'être que local), ou ce que nous appelons le présent ne fait-il que marquer notre présence au monde ? Ou encore, la notion de présent a-t-elle besoin de la présence d'un observateur pour prendre corps ?

L'observateur crée-t-il le temps ?

Avant de voir si la physique est en mesure – ou pas – de nous aider à répondre à ces questions, notons que nos discours philosophiques sur le présent sont souvent contradictoires. Par exemple, nous disons que le temps passe, puisque l'instant présent n'est jamais strictement le même, et aussi qu'il ne passe pas, puisque nous ne quittons un instant présent que pour en retrouver un autre. Ainsi le présent apparaît-il toujours contaminé par des qualités antagonistes : il conjugue la présence et l'absence, la singularité et la continuité, le surgissement et l'effacement, la mobilité et l'immobilité, la variation et la persistance.

Pareil statut ne semble pouvoir conduire qu'à des non-sens, qui ont des effets d'ordre intellectuel dans la mesure où ils nous rendent incapables de bien penser la ligne du temps « tout entière ». Nous ne parvenons jamais à l'apprécier vraiment : tantôt principe du changement, tantôt enveloppe de toute chronologie ; tantôt assimilée à la furtivité, tantôt à une arène statique, en attente de ce qui viendra s'y produire ; tantôt conçue comme un être purement physique, ou au contraire, comme un produit de la conscience.

Quel est, en somme, le statut de l'instant présent ? Est-il ce par quoi le temps se donne à nous ou ce par quoi nous

nous situons dans le temps ? Cette question est d'autant plus délicate que nous disposons, sinon de deux concepts, du moins de deux expériences distinctes du temps. Que trouvons-nous, en effet, dans notre langage courant pour dire le temps ? D'une part, des expressions telles que « avant », « après », « pendant » et, d'autre part, des expressions comme « présent », « passé », « futur ». Les premières n'expriment que des relations (d'antériorité, de postériorité, de simultanéité) entre des événements quelconques ; les secondes sont des attributs temporels qui font intervenir un instant privilégié, l'instant présent, celui qui existe maintenant.

Relations et attributs temporels constituent ainsi le squelette intelligible de tous nos discours sur le temps. Les relations strictement chronologiques, celles d'antériorité, de postériorité et de simultanéité entre événements, sont objectives et indépendantes de nous. Elles ne changent pas à mesure que le temps passe : il demeurera toujours vrai que Newton est né avant Einstein. Tandis que les attributs temporels changent avec le présent qui change, le même événement étant tour à tour futur, présent, passé : de ce qui se passe aujourd'hui, nous dirons demain que cela s'est passé hier, alors que ce qui se passe avant ne pourra jamais s'être passé après.

Peut-on réduire les attributs temporels aux seules relations chronologiques ? Cette question a divisé les philosophes, surtout depuis que le métaphysicien américain John McTaggart a publié en 1908 un

article dont l'enjeu peut être résumé de la façon suivante : l'expérience que nous faisons du temps est marquée par le fait que ce qui arrive advient toujours au présent, et que la seule réalité, ou du moins la première réalité, nous semble être celle du présent. Au présent nous sentons, au présent aussi nous nous remémorons ce qui n'est plus, et au présent encore nous forgeons le projet, dans la crainte ou le désir, de ce qui n'est pas encore.

Le temps, tel qu'il nous apparaît, est défini par ces trois déterminations, le présent, temps premier, par rapport auquel se disent ou se pensent le passé et l'avenir. En revanche, si nous tentons de penser ce qu'est le monde en imaginant que nous n'y sommes pas présents, si nous essayons de dire ce qu'il serait sans nous, nous avons alors le sentiment que ces trois déterminations perdent leur sens et qu'elles n'ont aucune réalité en elles-mêmes.

Il semble bien que le concept « physique » du temps, objectif et naturel, indépendant de notre situation temporelle, ne comporte pas en lui-même ces trois déterminations, mais seulement trois relations fixes entre les événements : « antérieurement à », « postérieurement à », « en même temps que » (ou « avant », « après », « pendant »). La question se pose donc de savoir si le temps lui-même est ou non pensable à l'aide de ces seules relations (nommées relations B par McTaggart) – ou bien si cela nécessite, en outre, les déterminations présent/passé/futur (nommées relations A par McTaggart).

L'AUTEUR



Étienne KLEIN est physicien, directeur de recherche au CEA, où il dirige le Laboratoire de recherche sur les sciences de la matière (LARSIM).

2. UN JOUR, UNE HEURE, une minute, une seconde... La conscience rend continue notre perception du temps qui, pourtant, n'est constitué que de « particules de temps » discontinues.



© Shutterstock/DHitch - PLS

Telle semble être l'opposition, héritière de toute l'histoire de la pensée, qui divise la plupart des doctrines philosophiques du temps. Pour les unes – représentées au XX^e siècle par le philosophe américain d'origine allemande, Rudolf Carnap, et le philosophe et logicien britannique Bertrand Russell (mais déjà par Leibniz et en premier lieu par Aristote) –, le temps peut être pensé comme un simple ordre d'antériorité/postériorité. Selon eux, les

LA THÉORIE DE LA RELATIVITÉ peine à rendre compte de la présence du présent, ni n'explique ce que l'instant présent peut avoir de si spécial par rapport aux autres moments de la vie.

déterminations temporelles peuvent être réduites, logiquement et physiquement, aux relations B: le présent, le futur ou le passé ne sont que des déterminations subjectives – psychologiques –, et ce qui existe en réalité, ce sont seulement des relations temporelles entre événements.

Selon les autres doctrines, généralement celles des « philosophes de la conscience » (Henri Bergson, Edmund Husserl, Maurice Merleau-Ponty et, en tout premier lieu, saint Augustin), le temps ne peut être pensé sans les idées de présent, de passé et de futur, parce que ces déterminations temporelles, notamment celle de présent, sont irréductibles.

Dans le premier cas, le temps est conçu comme un ordre de succession, qui déploie des chronologies définitives. Dans le second, il est conçu comme le passage d'un instant particulier, comme le transit du présent vers le passé et de l'avenir vers le présent.

Le statut particulier du *Maintenant*

La physique, notamment celle du XX^e siècle qui a si profondément modifié ses représentations du temps, est-elle devenue capable d'affronter ces questions ? Est-elle partisane d'une « philosophie du concept », ne voyant dans la ligne du temps que le déploiement d'une chronologie sans référence particulière au présent ? Ou pourrait-elle sous-tendre une « philosophie de la conscience » qui accorderait toute sa place à la perception que nous avons de l'instant qui passe ?

En fait, elle ne s'engage guère sur ces terrains. Pour le moment du moins. Notamment parce que la notion de « maintenant » demeure pour elle un problème aigu : en effet, la théorie de la relativité peine à rendre compte de la « présence du présent », ni n'explique ce que l'instant présent peut avoir de si spécial par rapport aux autres moments du temps.

À la fin de sa vie, Albert Einstein se disait lui-même troublé par ce problème du « statut du maintenant » dans la théorie qu'il avait élaborée. Dans son « autobiographie intellectuelle », Carnap rapporte à ce propos une anecdote intéressante : « Un jour, Einstein me dit que le problème du *Maintenant* le tracassait sérieusement. Il m'expliqua que l'expérience du *Maintenant* a pour l'homme une signification spéciale qui la différencie radicalement de celle du passé et du futur, mais que cette différence ne peut être mise en évidence au sein de la physique. Que cette expérience ne puisse être prise en charge par la science lui semblait aussi navrant qu'inévitable. Je lui fis remarquer que tout ce qui a objectivement lieu devrait pouvoir être décrit par la science : d'un côté, la succession temporelle des événements par la physique ; de l'autre, l'expérience particulière que l'homme a du temps, y compris ses appréhensions différentes du passé, du présent et du futur, peut être décrite et (en principe) expliquée par la psychologie. Mais Einstein pensait que les descriptions scientifiques ne sont pas faites pour combler nos attentes d'êtres humains ; qu'il y a quelque chose d'essentiel à propos du *Maintenant* qui demeure hors du domaine de la science. »

La structuration mathématique du temps physique rendant équivalent chacun de ses instants, il reste à comprendre la singularité qu'a chaque instant présent pour chacun d'entre nous. La physique pourra-t-elle, à elle seule, résoudre ce problème ? Cela supposerait qu'elle devienne capable de décrire, en termes exclusivement physiques, l'intégralité de notre expérience du temps. Mais si le cours du temps est au contraire dépendant de notre subjectivité, en quelque façon, si la conscience que nous en avons joue un rôle dans sa dynamique, à quelles autres sciences devrait-elle faire appel ? Aux sciences cognitives ? Aux neurosciences ? Les réponses à ces questions sont âprement discutées et nul consensus n'est en vue. Nous n'en avons pas tout à fait fini avec le temps. ■

✓ BIBLIOGRAPHIE

É. Klein, *Discours sur l'origine de l'Univers*, Flammarion, 2010.

É. Klein, *Le facteur temps ne sonne jamais deux fois*, Flammarion, 2007.

L. Smolin, *Rien ne va plus en physique !*, Dunod, coll. Quai des sciences, 2007.

É. Klein, *Les tactiques de Chronos*, Flammarion, coll. Champs, 2004.

E. Kant, *Critique de la raison pure*, PUF, 1781, édition 1971.



Gabriel Gohau
0-00122, 22 €, juin 2010
Collection « Inflexions »
Coédition ADAPT-SNES



Jean Jandaly
7-24932, 20 €, juin 2009



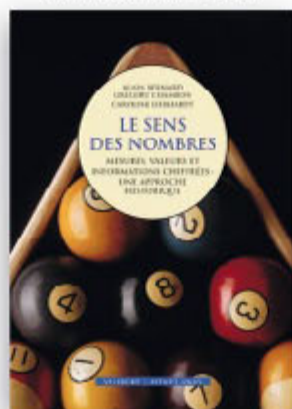
Laurence Maurines & al.
0-01184, 42 €, août 2010



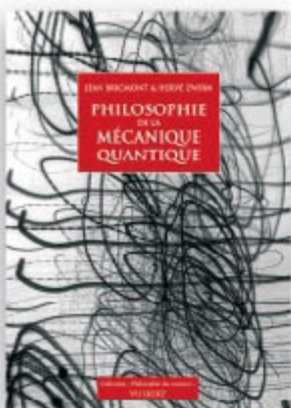
Jens Høyrup
0-00014, 20 €, août 2010
Collection « Inflexions »
Coédition ADAPT-SNES



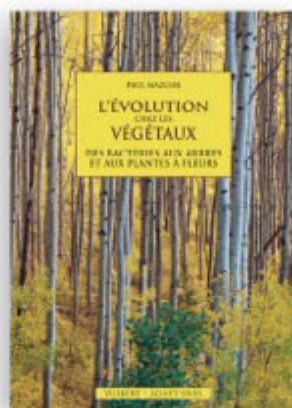
Michel Blay
0-01464, 17 €, mai 2010
Collection « Inflexions »
Coédition ADAPT-SNES



Alain Bernard & al.
0-00160, 19 €, juillet 2010
Coédition ADAPT-SNES



Jean Bricmont & Hervé Zwirn
7-20743, 15 €, août 2009
Collection « Philosophie des sciences »
Coédition SPS



Paul Mazliak
7-20767, 42 €, novembre 2009
Collection « Inflexions »
Coédition ADAPT-SNES

SCIENCES 2010 VUIBERT

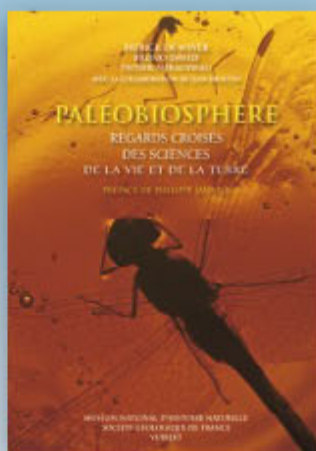


À PARAÎTRE
OCTOBRE 2010

Brian Hayes
Traduit de l'anglais (USA) par Jean-Louis Basdevant
0-01129

« Seuls – pour le moment – dans un univers sans écho, nous sommes réduits à évaluer le temps qui passe et celui qui est passé tandis que, par son développement, sa croissance et son tribut à la sélection naturelle, chaque être vivant contribue à une épopée dont on entrevoit à peine le début et dont nous n'osons guère imaginer l'issue »

Philippe Janvier (préface à *Paléobiosphère*)



Patrick De Wever & al.
7-25038, 79 €, juillet 2010
Collection « Interactions »
Coédition SGF/MNHN

www.Vuibert.fr



Le temps est-il ? une illusion

Craig Callender

1. DANS CERTAINES DE SES ŒUVRES,
l'artiste américain Keith Peters explore l'idée
qu'un monde intrinsèquement statique puisse
néanmoins donner une impression de dynamisme.

Pendant que vous lisez cette phrase, vous pensez probablement que le moment présent, là maintenant, correspond à ce qui est en train de se passer. Vous sentez que l'instant présent a quelque chose de particulier. Il est réel. Vous pouvez vous rappeler le passé ou anticiper l'avenir, mais vous vivez dans le présent. Bien sûr, le moment où vous avez lu cette première phrase n'a plus cours. Le moment où vous lisez celle-ci l'a remplacé. En d'autres termes, nous avons la sensation d'un écoulement du temps. Notre intuition profonde est que le futur est ouvert jusqu'à ce qu'il devienne le présent, et que le passé est fixé. À mesure que le temps s'écoule, cette structure de passé fixé, présent immédiat et avenir ouvert se décale dans un sens, toujours le même. Cette structure est inscrite dans notre langage, nos pensées et notre comportement.

Pourtant, aussi naturelle que soit cette conception, la science ne la reflète pas. Les équations de la physique ne nous disent pas quels événements sont en train de se passer juste maintenant; on peut en effet

N'importe qui peut constater que mes cheveux grisonnent, que les objets bougent, etc. Nous observons du changement, qui correspond à des variations de propriétés par rapport au temps. Sans le temps, le monde serait immobile. Mais comment une théorie dépourvue de temps pourrait-elle expliquer que nous observons des changements?

Le temps vu comme un concept émergent

Même si le temps n'existe pas au niveau fondamental, il peut apparaître à des niveaux supérieurs, de la même façon qu'une table est solide alors qu'elle n'est qu'un assemblage de particules constituées, pour l'essentiel, d'espace vide. La solidité est une propriété collective, ou émergente, des particules. Le temps aussi pourrait être une propriété émergente des ingrédients élémentaires du monde.

Ce concept de temps émergent est potentiellement révolutionnaire. Einstein affirmait que l'étape clef du développe-

Le temps n'est peut-être pas une entité fondamentale. D'après certains physiciens, il pourrait émerger à notre perception dans le cadre d'un monde parfaitement statique.

comparer ces équations à une carte où le symbole « Vous êtes ici » est absent. De plus, les théories de la relativité d'Albert Einstein suggèrent non seulement qu'il n'existe pas un unique présent particulier, mais que tous les instants sont également réels.

La divergence entre la compréhension scientifique du temps et l'intuition que nous en avons préoccupe les penseurs depuis longtemps. Elle n'a fait qu'augmenter à mesure que les physiciens dépouillaient le temps de la plupart des attributs dont nous le revêtons d'ordinaire. Aujourd'hui, le fossé entre le temps de la physique et le temps de l'expérience humaine atteint sa conclusion logique: beaucoup de théoriciens sont arrivés à croire que, fondamentalement, le temps n'existe même pas.

L'idée de l'inexistence du temps est si étonnante qu'il est difficile de voir comment elle pourrait être cohérente. Tout ce que nous faisons est ancré dans le temps. Le monde est une série d'événements reliés les uns aux autres par les fils du temps.

ment de la théorie de la relativité avait été de repenser le temps. À l'heure où les théoriciens poursuivent son ambition d'unir la relativité générale avec la physique quantique, beaucoup jugent que sans une réflexion approfondie sur le temps, il sera impossible de progresser.

L'idée intuitive que nous avons du temps a connu une succession de revers au fil des progrès de la physique. Commentons par le temps de la physique classique, dite newtonienne. Les lois du mouvement de Newton sous-entendent que le temps est doté d'un certain nombre de caractéristiques.

Tous les observateurs s'accordent en général sur l'ordre dans lequel les événements se déroulent. Quels que soient l'instant et le lieu où un événement se produit, la physique classique suppose que l'on peut objectivement dire s'il a eu lieu avant, après ou en même temps que n'importe quel autre événement. Le temps permet donc d'ordonner complètement tous les événements de l'Univers. La simultanéité

L'ESSENTIEL

✓ La recherche d'une théorie unifiée force les physiciens à réexaminer les concepts les plus fondamentaux. Le temps est l'un d'eux.

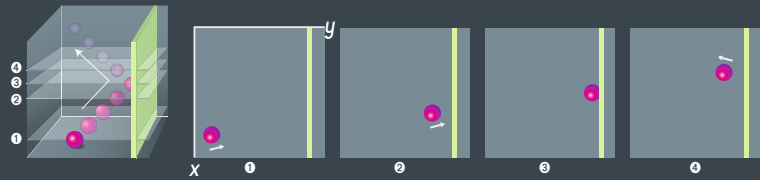
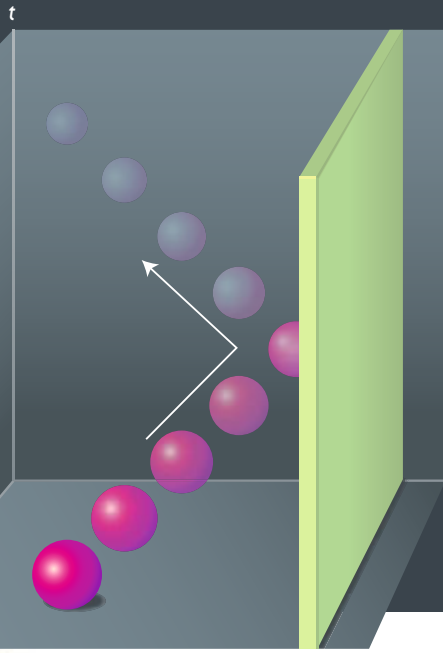
✓ Certains prétendent que le temps n'existe pas. D'autres pensent que si. Une position intermédiaire est que le temps existe, mais qu'il n'est pas fondamental. Un monde statique le ferait apparaître à notre perception.

✓ Ce que nous percevons comme étant le temps pourrait ne refléter que les relations entre les différents sous-systèmes de l'Univers.

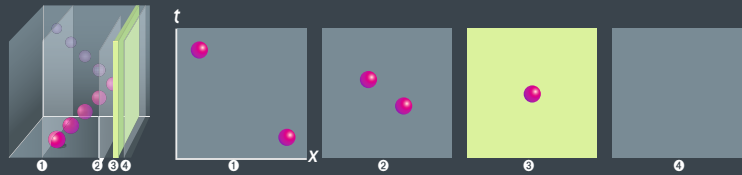
Keith Peters

EN QUOI LE TEMPS EST DIFFÉRENT DE L'ESPACE

Physiciens, artistes et graphistes représentent d'ordinaire le temps comme une dimension supplémentaire de l'espace. L'espace-temps ainsi construit est représenté ici, avec une dimension spatiale de moins, comme un bloc tridimensionnel dans lequel une balle rebondit sur un mur. Selon la théorie de la relativité, où l'espace et le temps ne sont pas indépendants, l'espace-temps peut être découpé de différentes façons. Mais toutes ne sont pas aussi judicieuses.

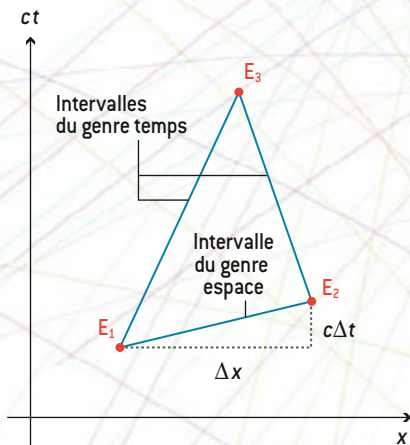


L'approche classique consiste à prendre des tranches d'espace à des instants successifs, ce qui crée un film du mouvement de la balle. Chaque image conduit à la suivante, conformément aux lois usuelles de la physique.



Dans une approche alternative, on considère des tranches non pas du passé vers le futur, mais de gauche à droite. Chaque tranche mélange espace et temps. À gauche du mur, la balle apparaît en deux positions ; à droite, elle n'apparaît pas du tout. Il est normal que ce découpage semble étrange : il rend les lois de la physique très difficiles à manier.

Melissa Thomas



2. DANS L'ESPACE-TEMPS, deux événements séparés par un intervalle du « genre espace », c'est-à-dire tel que $c \Delta t < \Delta x$ (où c est la vitesse de la lumière), ne peuvent influencer l'un sur l'autre (cas des événements E_1 et E_2). Pour qu'il puisse y avoir un lien de causalité, l'intervalle doit être du « genre temps » ($c \Delta t > \Delta x$) : un signal lumineux a alors le temps d'aller d'un événement à l'autre (cas de E_1 et E_3 , ainsi que de E_2 et E_3).

est une propriété absolue, indépendante de l'observateur. De plus, le temps doit être continu afin que l'on puisse définir la vitesse et l'accélération.

Le temps classique doit également être doté d'une notion de durée permettant de quantifier ce qui sépare les événements dans le temps. Pour dire qu'un guépard peut courir à 110 kilomètres par heure, nous devons avoir une mesure de ce qu'est une heure. Et tout comme l'ordre des événements, la durée est indépendante de l'observateur en physique newtonienne.

Pour l'essentiel, Newton supposait donc que le monde est muni d'une horloge maîtresse. La physique newtonienne écoute le tic-tac de cette horloge et d'aucune autre. Newton pensait en outre que le temps s'écoule et que cet écoulement définit une flèche indiquant le futur ; mais ces caractéristiques supplémentaires ne sont pas strictement exigées par les lois newtoniennes.

Le temps de Newton peut nous sembler suranné, mais en y réfléchissant un peu, on peut remarquer à quel point cette conception est étonnante. Ses nombreuses caractéristiques (ordre, continuité, durée, caractère absolu de la simultanéité, écoulement et flèche d'écoulement) sont, en toute logique, indépendantes ; mais l'horloge maîtresse que Newton nommait « temps » les regroupe toutes. Et ce cocktail de caracté-

ristiques était si performant qu'il est resté intact durant près de deux siècles.

Puis vinrent les assauts de la fin du XIX^e siècle et du début du XX^e. Le premier fut donné par Ludwig Boltzmann. Ce physicien autrichien fit remarquer que comme les lois de Newton sont tout aussi valides lorsqu'on renverse le temps (autrement dit, ces lois restent inchangées si l'on y change la variable temporelle t en son opposée, $-t$), le temps n'est pas doté d'une flèche intrinsèque. Pour Boltzmann, la distinction entre passé et futur n'est pas inhérente au temps, mais émerge des asymétries dans l'organisation de la matière dans l'Univers. Bien que les détails de cette proposition soient encore débattus, Boltzmann avait de manière convaincante dépossédé le temps newtonien de l'une de ses caractéristiques.

Einstein lança l'assaut suivant en éliminant la simultanéité absolue. D'après sa théorie de la relativité restreinte, la détermination des événements qui se produisent au même instant dépend du mouvement de l'observateur. La véritable arène des événements n'est ni le temps ni l'espace, mais leur réunion : l'espace-temps. Deux observateurs se déplaçant à des vitesses différentes ne seront pas d'accord sur l'instant ni sur le lieu où se produit un événement, mais ils seront d'accord sur sa localisation

dans l'espace-temps. L'espace et le temps sont ainsi des concepts plus secondaires.

Einstein n'a fait qu'empirer les choses en 1915 avec sa théorie de la relativité générale, qui étend la relativité restreinte à des situations où la gravitation est présente. La gravitation déforme le temps, de telle sorte que l'écoulement d'une seconde ici peut ne pas signifier la même chose que l'écoulement d'une seconde ailleurs. Sauf dans de rares cas, il est alors impossible de synchroniser des horloges et d'obtenir qu'elles restent synchronisées. Il n'est plus possible de considérer que le monde évolue seconde après seconde en étant régi par un unique paramètre temporel. Il devient alors impossible de dire qu'un événement s'est produit avant ou après un autre (voir l'article de Marc Lachièze-Rey).

Le temps était déjà déchu en 1915

La relativité générale met en jeu de nombreuses notions où apparaît le mot « temps » : coordonnée temporelle, temps propre, temps global... Elles remplissent collectivement de nombreuses tâches qui incombaient au temps unique de Newton, mais, isolément, aucune d'elles ne s'impose. Soit la physique n'écoute pas ces horloges, soit, si elle le fait, ces horloges ne s'appliquent qu'à de petites portions de l'Univers ou à des observateurs particuliers. Les physiciens d'aujourd'hui s'émeuvent de ce qu'une théorie unifiée devra éliminer le temps, mais on peut raisonnablement dire que le temps était déjà passé à la trappe en 1915 et que nous ne l'avons pas encore tout à fait intégré.

On serait tenté de penser que la différence entre l'espace et le temps a presque disparu, et que la véritable arène des événements est quadridimensionnelle. La relativité semble transformer le temps en une simple dimension (ou direction) supplémentaire dans cette arène. L'espace-temps est comme une miches de pain que l'on peut découper en tranches de différentes façons, arbitrairement nommées « espace » ou « temps ».

Pourtant, même en relativité générale, le temps conserve une fonction distincte et importante : celle de distinguer localement entre les directions « du genre temps » et celles « du genre espace ». Les événements séparés par un intervalle du genre temps sont ceux qui peuvent être causalement reliés (voir la figure 2) – des évé-

nements tels qu'un objet ou un signal peut passer de l'un à l'autre, et ainsi l'influencer. Deux événements séparés par un intervalle du genre espace sont sans relation causale. Aucun objet ou signal ne peut passer de l'un à l'autre.

Les différents observateurs ne sont pas d'accord sur la succession des événements séparés par des intervalles du genre espace, mais ils sont tous d'accord sur l'ordre des événements séparés par des intervalles du genre temps. Et si, pour un observateur, un événement peut en provoquer un autre (par causalité), il en est de même pour tous les autres observateurs.

Il y a deux ans, dans un essai, j'explorais ce que signifie cette caractéristique du temps. Imaginons que l'on découpe en tranches l'espace-temps du passé vers le futur ; chaque tranche est la totalité tridimensionnelle de l'espace à un instant donné (voir l'encadré page précédente). La somme de toutes ces tranches d'événements (dans chaque tranche, les événements sont séparés par des intervalles du genre espace) est l'espace-temps quadridimensionnel. Alternativement, imaginons que l'on regarde le monde de travers et qu'on le découpe dans ce sens. Dans cette perspective, chaque tranche tridimensionnelle est un étrange amalgame d'événements séparés par des intervalles du genre espace et d'autres séparés par des intervalles du genre temps.

La première méthode est familière aux physiciens ou aux cinéphiles. Les images d'un film représentent des tranches d'espace-temps : elles montrent l'espace à des instants successifs. Un peu comme les passionnés de cinéma qui deviennent l'intrigue et prédisent la suite de l'histoire racontée par le film, les physiciens peuvent prendre une seule tranche spatiale complète et reconstruire ce qui se passe dans les autres tranches spatiales, simplement en appliquant les lois de la physique.

Un découpage étrange

La seconde méthode de découpage n'a pas d'analogie simple. Elle correspond au découpage de l'espace-temps non pas du passé vers le futur, mais d'Est en Ouest. Un exemple d'une telle tranche pourrait être le mur Nord d'une maison et tout ce qui arrivera à ce mur dans le futur. À partir de cette tranche, les lois de la physique permettraient de reconstituer le reste de la maison (et même le reste de l'Univers).

L'AUTEUR



Craig CALLENDER est professeur de philosophie à l'Université de Californie à San Diego, aux États-Unis.

✓ BIBLIOGRAPHIE

S. M. Carroll, *From Eternity to Here: The Quest for the Ultimate Theory of Time*, Dutton, 2010.

C. Callender, *Introducing Time*, Totem Books, 2005.

B. Greene, *La magie du cosmos*, Robert Laffont, 2005.

L. Smolin, *Des atomes d'espace et de temps*, *Pour la Science*, n° 316, février 2004.

R. Healey, « Can physics coherently deny the reality of time ? », dans C. Callender, *Time, Reality & Experience*, University of Cambridge, 2002.

C. Rovelli, *Relational quantum mechanics*, *International Journal of Theoretical Physics*, vol. 35(8), pp. 1637-1678, 1996.
arxiv.org/abs/quant-ph/9609002

✓ SUR LE WEB

FQXi FORUM : The Nature of Time Essay Contest, sur : <http://www.fqxi.org/community/forum/category/10> (voir en particulier les essais de Claus Kiefer, Carlo Rovelli, Julian Barbour et Craig Callender).

Cela vous semble étrange ? C'est normal. Il n'est pas évident que les lois de la physique vous permettent de le faire. Mais comme le mathématicien Walter Craig, de l'Université McMaster au Canada, et le philosophe Steven Weinstein, de l'Université de Waterloo (Canada), l'ont récemment montré, c'est possible, du moins dans certaines situations simples.

Bien qu'en principe, les deux méthodes de découpage de l'espace-temps soient possibles, elles diffèrent profondément. Dans le découpage usuel, du passé vers le futur, les données qu'il est nécessaire de recueillir sur une tranche sont, en théorie, assez faciles à obtenir. Par exemple, si l'on mesure les vitesses de toutes les particules, la vitesse d'une particule en un endroit est indépendante de la vitesse d'une autre particule ailleurs. Mais dans la seconde méthode de découpage, les propriétés des particules ne sont pas indépendantes ; elles sont entremêlées de façon très particulière. Il faudrait combiner des mesures extrêmement compliquées sur ces particules pour obtenir les informations nécessaires. Et encore, ces mesures ne permettraient de reconstituer l'espace-temps entier que dans des cas particuliers, comme ceux découverts par W. Craig et S. Weinstein.

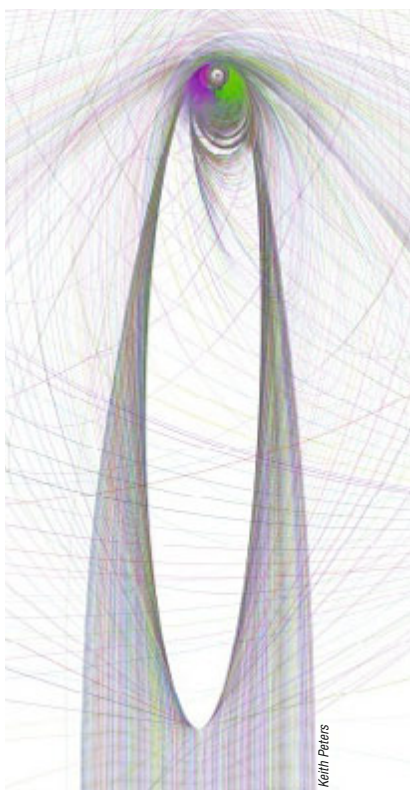
Le temps, une direction qui simplifie les choses

Dans un sens bien précis, le temps est la direction de l'espace-temps dans laquelle de bonnes prédictions sont possibles, la direction dans laquelle nous pouvons raconter les histoires les plus informatives. Le récit de l'Univers ne se déroule pas dans l'espace ; il se déroule dans le temps.

L'un des objectifs les plus ambitieux de la physique moderne est de réunir la relativité générale et la physique quantique en une théorie unique qui prenne en compte les aspects tant gravitationnels que quantiques de la matière : une théorie quantique de la gravitation. Cette ambition se heurte à plusieurs écueils ; en particulier, la mécanique quantique impose au temps certaines propriétés qui contredisent ce que j'ai dit jusqu'ici.

La mécanique quantique affirme que les objets ont un répertoire de comportements bien plus riche que ce que nous pouvons saisir avec des grandeurs classiques telles que position et vitesse. La description complète d'un objet est donnée par une entité mathématique nom-

mée état quantique. Cet état évolue de façon continue dans le temps, et les physiciens sont capables de calculer la probabilité que tel ou tel résultat expérimental soit obtenu à tel ou tel instant. Si l'on envoie un électron à travers un dispositif qui le défléchit soit vers le haut, soit vers le bas, la mécanique quantique peut ne pas être en mesure de nous dire avec certitude à quel résultat s'attendre. Au lieu de cela, l'état quantique ne donne que la probabilité des différents résultats possibles ; par exemple, 25 pour cent de chances que l'électron parte vers le haut, et 75 pour cent de chances qu'il soit dévié vers le bas. Deux systèmes décrits par des



états quantiques identiques peuvent ainsi donner des résultats différents.

Les prédictions probabilistes de la théorie exigent du temps certaines caractéristiques. Tout d'abord, le temps est ce qui rend les contradictions possibles. Quand on lance un dé, il ne peut pas tomber sur 3 et sur 5 en même temps. Il ne peut le faire qu'à des instants différents. Cette caractéristique est liée au fait que la probabilité de tomber sur chacune des six faces doit être égale à 100 pour cent, sinon le concept de probabilité perdrait tout son sens. Les probabilités s'additionnent à un instant donné, pas à un endroit donné. Il en va de même des probabilités que les particules

quantiques aient une position ou une quantité de mouvement données.

Ensuite, l'ordre temporel des mesures quantiques importe. Supposons que l'on fasse passer un électron à travers un dispositif qui le défléchit d'abord verticalement, puis horizontalement, et que l'on mesure son moment cinétique lorsqu'il sort du dispositif. On répète l'expérience, cette fois en déviant l'électron horizontalement, puis verticalement, et l'on mesure à nouveau le moment cinétique. Les valeurs obtenues seront très différentes.

Un écueil quantique

Enfin, un état quantique fournit les probabilités pour tout l'espace à un instant donné. Si l'état englobe une paire de particules, alors le fait de mesurer l'une des particules affecte instantanément l'autre, indépendamment de l'endroit où elle se trouve ; c'est la célèbre « fantomatique action à distance » qui troublait tant Einstein à propos de la mécanique quantique. Cette corrélation instantanée le chagrina pour la bonne raison que si les particules réagissent en même temps, alors cela signifie que l'Univers est muni d'une horloge maîtresse, ce que la relativité interdit expressément.

Bien que certaines de ces questions restent controversées, le temps en mécanique quantique est essentiellement une régression au temps de la mécanique newtonienne. Les physiciens se préoccupent de l'absence de temps en relativité, mais le rôle central du temps en mécanique quantique pose peut-être un problème plus grave. C'est pour cette raison profonde que l'unification de la relativité générale et de la physique quantique est si difficile.

De nombreux programmes de recherche ont visé à unir la relativité générale et la physique quantique. Ils se répartissent schématiquement en deux groupes. Les physiciens qui pensent que la mécanique quantique offre le fondement le plus solide, comme les théoriciens des supercordes, ont pour point de départ un temps pur et dur. Ceux qui croient que la relativité générale fournit le meilleur point de départ démarrent avec une théorie où le temps est déjà déchu et sont donc plus ouverts à l'idée d'une réalité atemporelle.

Certes, la distinction entre ces deux approches est floue. Les théoriciens des supercordes ont récemment envisagé des théories dépourvues de temps. Mais pour

A-T-ON VRAIMENT BESOIN DU TEMPS ?

Pour certains physiciens, le temps est comme une monnaie, qui rend le monde plus facile à décrire, mais qui n'a pas d'existence propre. Mesurer les processus en termes de temps pourrait être équivalent à utiliser de l'argent plutôt que de faire du troc.



© Shutterstock/Terre - ianmis Pantarinas/Cour - Créations/Café - Svetlana Lukienko/Volture - Slobodan Djelic/Chaussures - Aaron Amal/Lumière - Rloghin

bien faire comprendre les problèmes fondamentaux que pose le temps, je vais me concentrer sur la seconde approche, dont le principal exemple est la théorie de la gravitation quantique à boucles, elle-même issue de la première théorie de la gravitation quantique, dite canonique.

La théorie canonique a émergé dans les années 1950 et 1960, quand les physiciens ont exprimé les équations de la gravitation d'Einstein sous la même forme que les équations de l'électromagnétisme. L'idée était que les techniques ayant été utilisées pour construire la théorie quantique de l'électromagnétisme s'appliqueraient aussi à la gravité. Ainsi, à la fin des années 1960, les physiciens John Wheeler et Bryce DeWitt sont parvenus à un étrange résultat. L'équation (dite de Wheeler-DeWitt) était totalement dépourvue de variable temporelle. Le symbole t désignant le temps avait tout bonnement disparu.

Des équations où le temps a disparu

Les physiciens sont restés perplexes des décennies durant. Si l'on prend le résultat à la lettre, le temps n'existe pas vraiment. Carlo Rovelli, de l'Université de la Méditerranée Aix-Marseille II, l'un des créateurs de la gravitation quantique à boucles, et le physicien anglais Julian Barbour sont les

deux partisans les plus en vue de cette idée. Ils ont tenté de réécrire la mécanique quantique d'une façon qui ne fasse pas intervenir le temps, comme semble l'exiger la relativité (voir l'article de Carlo Rovelli).

Ils pensent que cette manœuvre est possible parce que la relativité générale, bien que dépourvue de temps global, parvient encore à décrire le changement. Pour l'essentiel, cette théorie le fait en reliant les systèmes physiques directement les uns aux autres plutôt qu'à travers une notion abstraite de temps global.

Dans les expériences de pensée d'Einstein, les observateurs établissent la chronologie des événements en comparant des horloges utilisant des signaux lumineux. On pourrait décrire la variation de la position d'un satellite en orbite autour de la Terre en termes des battements de l'horloge de votre cuisine, ou *vice-versa*. Ce que l'on fait, c'est décrire les corrélations entre deux objets physiques sans faire intervenir de temps global comme intermédiaire. Au lieu de décrire la couleur de mes cheveux comme changeante dans le temps, on peut la corréler avec l'orbite du satellite. Au lieu de dire qu'une balle de baseball accélère à dix mètres par seconde carrée, on peut la corréler aux changements d'un glacier. Et ainsi de suite. Le temps devient redondant. Le changement peut être décrit sans lui.

Ce vaste réseau de corrélations est si bien organisé que l'on peut y définir une entité nommée « temps » et tout y relier ; on se débarrasse ainsi du fardeau consistant à suivre toutes les relations directes entre les phénomènes. Les physiciens sont ainsi en mesure de résumer de manière compacte les rouages de l'Univers, en termes de lois physiques qui se jouent dans le temps.

Virtuel comme l'argent

Mais cette commodité ne doit pas nous faire croire que le temps est une entité fondamentale. L'argent aussi nous facilite beaucoup la vie, en nous évitant de faire du troc à chaque fois que nous voulons boire un café ou manger un morceau de pain. Mais c'est une grandeur fictive inventée pour les choses auxquelles nous accordons de la valeur, pas une entité qui a de la valeur en soi. De façon analogue, le temps nous permet de relier des systèmes physiques les uns aux autres sans qu'il soit nécessaire de comprendre exactement comment un glacier est relié à une balle de base-ball. Mais le temps est lui aussi une invention commode qui n'existe pas plus fondamentalement dans la nature que l'argent.

Se débarrasser du temps a un certain attrait, mais cela entraîne certaines difficultés. Entre autres, il faut repenser la

LES DÉFENSEURS DE L'ÉCOULEMENT DU TEMPS

Tous les physiciens ne pensent pas que le monde est, par essence, intemporel. L'une des idées alternatives les plus intéressantes est la « théorie des ensembles causaux », développée par Rafael Sorkin et David Rideout de l'Institut Perimeter (PI) pour la physique théorique du Canada. Elle suppose que le monde est un ensemble d'événements qui croît à mesure que de nouveaux événements voient le jour selon des règles probabilistes. Ils espèrent que le processus reproduit les caractéristiques de l'espace-temps que nous percevons, y compris l'écoulement du temps. Reste cependant à déterminer si ce processus produit des univers compatibles avec la théorie de la relativité.

mécanique quantique. Prenons le célèbre exemple du chat de Schrödinger. Ce chat, dont le sort dépend de l'état d'une particule quantique, est suspendu entre la vie et la mort. Dans la représentation classique, le chat devient l'un ou l'autre après une mesure ou un processus équivalent. Mais C. Rovelli prétendrait que le sort du chat n'est jamais déterminé. La pauvre bête peut être morte vis-à-vis d'elle-même, vivante par rapport à un humain présent dans la pièce, morte par rapport à un autre humain dans la pièce d'à côté, et ainsi de suite.

Une chose est de faire dépendre de l'observateur le moment de la mort du chat, comme dans la relativité restreinte; une autre, encore plus surprenante, est que la mort du chat elle-même soit relative, comme le suggère C. Rovelli, en poussant l'esprit de la relativité à son extrême. Le temps fait tellement partie de notre intuition que son éviction transformerait la vision que les physiciens ont du monde.

Une question pressante pour quiconque épouse la gravitation quantique atemporelle est d'expliquer pourquoi le monde a une temporalité apparente. La relativité générale elle non plus n'intègre pas le temps au sens newtonien, mais au moins elle possède divers substituts partiels qui, ensemble, se comportent comme le temps newtonien quand la gravité est faible et les vitesses relatives petites. L'équation de Wheeler-DeWitt ne laisse même pas la place à ces substituts. J. Barbour et C. Rovelli ont chacun proposé des suggestions sur la manière dont le temps, ou du moins son illusion, pourrait surgir de rien. Mais la gravitation quantique canonique offre déjà une idée plus développée.

Connue sous le nom de temps semi-classique, elle remonte à un article de 1931 du physicien anglais Nevill Mott qui décrivait la collision entre un noyau d'hélium et un atome plus gros. Pour modéliser le système total, Mott utilisait une équation où le temps ne figure pas, et qu'on n'applique généralement qu'aux systèmes statiques. Il décomposait alors le système en deux sous-systèmes et utilisait le noyau d'hélium comme « horloge » pour l'atome. Remarquablement, l'atome obéit, par rapport au noyau, à l'équation usuelle de la mécanique quantique, mais où une fonction spatiale remplace le paramètre temps.

Ainsi, même quand le système dans son ensemble est atemporel, les éléments individuels ne le sont pas. Un temps pour

le sous-système se cache dans l'équation atemporelle du système total.

Quelque chose d'assez similaire a lieu avec la gravitation quantique, comme l'a argumenté Claus Kiefer, de l'Université de Cologne, suivant en cela les pas de Thomas Banks, de l'Université de Californie à Santa Cruz, et d'autres. L'Univers est peut-être dépourvu de temps, mais si on le décompose, certaines de ses parties peuvent servir d'horloges aux autres. Le temps émerge ainsi de l'atemporalité. Nous percevons le temps parce que nous sommes, par nature, un de ces éléments de l'Univers.

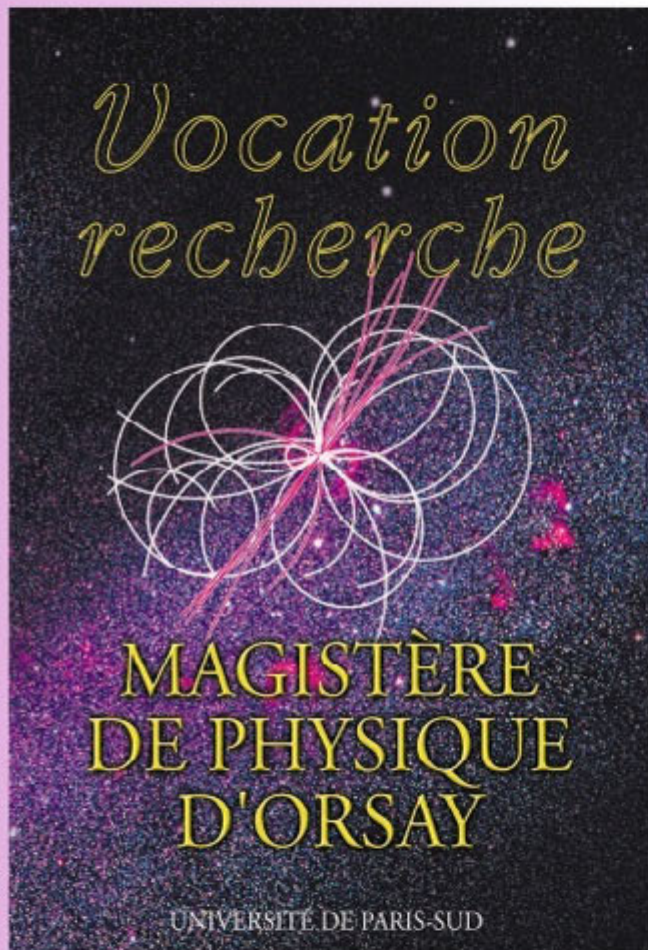
Reconstituer le temps de l'expérience

Pour intéressante et étrange que soit cette idée, elle nous laisse un peu sur notre faim. L'Univers ne peut pas toujours être décomposé en éléments qui servent d'horloges et, dans ce cas, la théorie ne fait pas de prédictions probabilistes. Le traitement de ces situations nécessitera une théorie complète de la gravitation quantique, et il faudra repenser le temps encore plus en profondeur.

Les physiciens sont partis du temps structuré de l'expérience, le temps d'un passé fixé, du présent et d'un futur ouvert. Ils l'ont petit à petit démantelé, et il n'en reste plus grand-chose. Les chercheurs doivent désormais inverser ce raisonnement et reconstruire le temps de l'expérience, peut-être à partir d'un réseau de corrélations entre éléments d'un monde fondamentalement statique.

Le philosophe français Maurice Merleau-Ponty avançait que le temps lui-même ne s'écoule pas vraiment, et que cet écoulement apparent est un produit du fait « que nous mettons subrepticement dans le ruisseau un témoin de sa course ». En d'autres termes, la tendance à croire que le temps s'écoule vient du fait que nous oublions de nous mettre nous-mêmes et nos relations avec le monde dans le tableau. Merleau-Ponty parlait de notre expérience subjective du temps, et jusque récemment personne n'avait deviné que le temps objectif pourrait lui-même s'expliquer comme résultant de ces relations. Le temps pourrait n'exister qu'en éclatant le monde en sous-systèmes et en regardant ce qui les relie. Dans ce tableau, le temps physique émerge parce que nous nous considérons comme distincts de tout le reste. ■

MAGISTÈRE de PHYSIQUE FONDAMENTALE d'ORSAY



RECHERCHE
ENSEIGNEMENT
INDUSTRIE

<http://www.magistere.u-psud.fr/>
magistere-physique.sciences@u-psud.fr
Tél : 01 69 15 58 52

- Une formation complète et approfondie à la recherche et par la recherche en physique incluant les diplômes nationaux de Licence et Master
- Un large choix d'options permettant un parcours personnalisé : tous les secteurs de la physique fondamentale et appliquée, mais aussi la physique médicale, le génie nucléaire, la biophysique, la géophysique, l'électronique, l'informatique, ...
- Une préparation spécifique à l'AGREGATION de physique
- Une possibilité d'intégrer sur titre les meilleures Ecoles d'Ingénieurs
- Une très large ouverture internationale

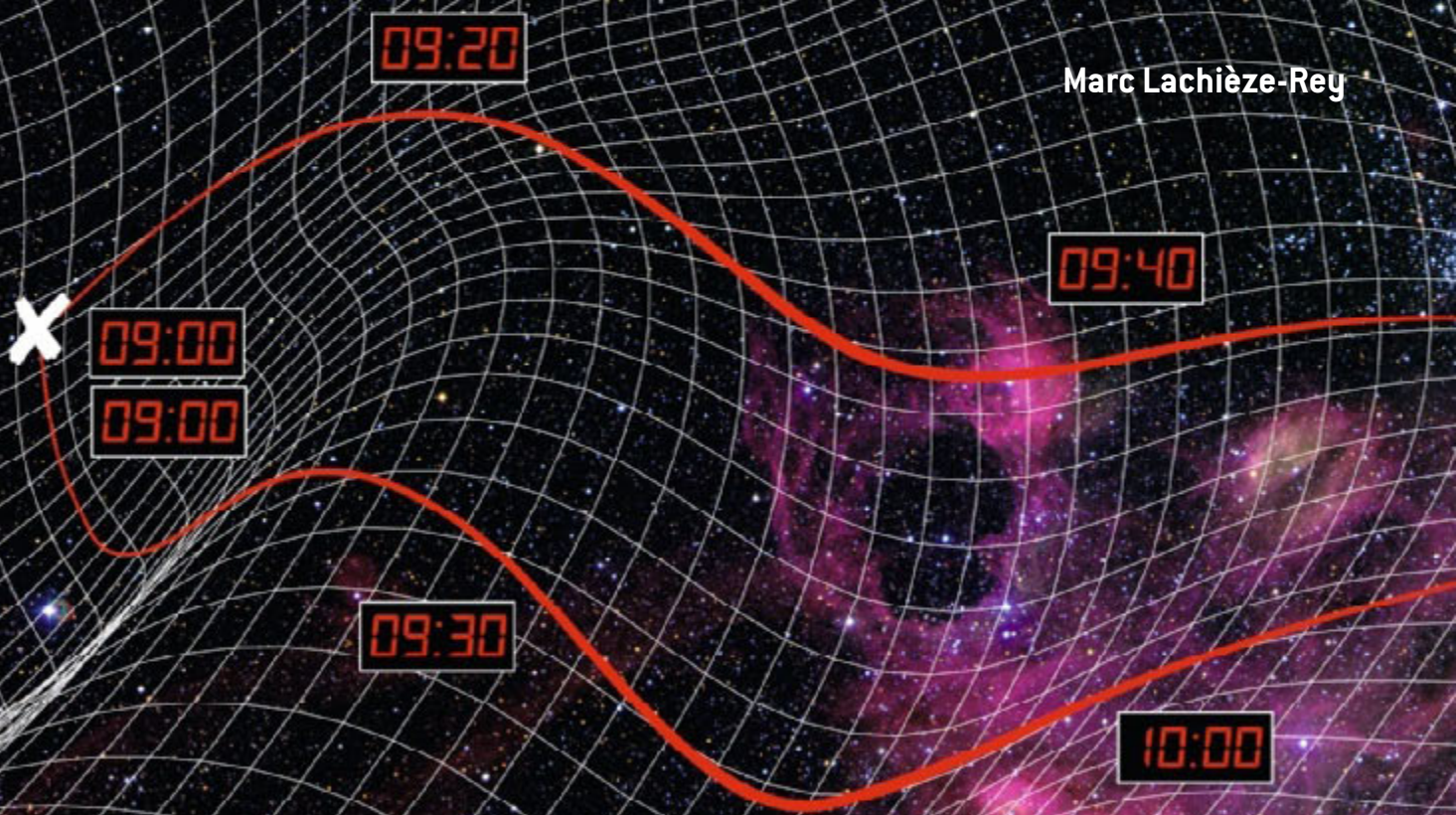
Physique théorique

La disparition du

TEMPS

en relativité

Marc Lachière-Rey



LES DURÉES MESURÉES par des observateurs qui ne suivent pas la même trajectoire de l'espace-temps sont différentes : les durées absolues n'existent pas.



Chacun de nous a une perception personnelle du temps, mais nous considérons qu'elle reflète, certes imparfaitement, un temps « universel », qui serait le même pour tous et en tout lieu, et s'écoulerait indépendamment de tout événement. Cette façon de voir fonctionne bien au quotidien : nous réussissons à honorer nos rendez-vous à une date convenue et, même si le temps nous paraît parfois « long » ou « trop court », nous sommes convaincus qu'il est possible d'accorder une durée objective à chaque phénomène.

Cela n'a pourtant rien d'une évidence. Le concept de temps universel est en accord avec la physique newtonienne, dont il constitue l'un des fondements. En introduisant le temps dans la physique – introduction qui n'avait rien de naturel ! –, Newton a permis le développement d'une science qui a volé de succès en succès pen-

loges, le balancement des pendules et, *in fine*, tous les mouvements sont des manifestations du temps universel. Cette conception a longtemps parfaitement fonctionné et reste toujours valable pour la plupart des phénomènes familiers que l'on étudie au laboratoire.

Mais au cours du XIX^e siècle, diverses expériences, et notamment celle de Michelson et Morley, ont convaincu les physiciens que la vitesse de la lumière dans le vide est invariante. En particulier, la vitesse de la lumière ne s'ajoute ni ne se retranche à celle de sa source si celle-ci est en mouvement. Autrement dit, la lumière n'obéit pas à la loi d'additivité des vitesses de la cinématique newtonienne (héritée de Galilée). Or la cinématique est l'étude des mouvements de la matière libre de toute interaction, et qui ne dépendent donc que des propriétés de l'espace et du temps. L'invariance de la vitesse de la

La théorie de la relativité d'Einstein remet en cause les propriétés usuelles du temps. Il n'est plus possible de considérer le temps comme une entité universelle et indépendante.

dant trois siècles. Mais le cadre de la physique newtonienne est désormais dépassé. Il a été remplacé par deux corpus distincts, la théorie de la relativité générale d'Einstein et la physique quantique, qui expliquent à elles deux une immense gamme de phénomènes physiques. Ces développements ont remis en question la conception classique du temps. En particulier, la relativité condamne l'idée newtonienne du temps universel et absolu. Et pour aller plus loin encore, il faudra sans doute se passer de la notion même de temps. Nous allons voir pourquoi.

On peut considérer que la physique moderne est née avec la publication des *Principia Mathematica* par Newton en 1687. Parmi ses innovations fondamentales, Newton postule l'existence objective d'un temps universel. Ce temps serait indépendant de nous et de tout système physique particulier. À notre échelle, il se manifeste par des propriétés en apparence évidentes : la possibilité d'attribuer une date à un événement, de mesurer une durée entre deux événements, ou de dire si un événement s'est déroulé avant un autre, etc. De façon moins intuitive, le tic-tac des hor-

lumière entraînait donc une remise en cause des notions newtoniennes de temps et d'espace absolus, ce qu'Einstein fut le premier à reconnaître pleinement.

Einstein montra tout d'abord qu'en raison de la vitesse finie de l'information (au maximum égale à celle de la lumière), la simultanéité absolue est impossible. Ce furent les prémisses de la théorie de la relativité restreinte, publiée en 1905. Cette théorie énonce que le cadre correct pour décrire les phénomènes physiques est l'espace-temps, et non plus l'espace seul. On peut découper comme on le souhaite dans ce continuum d'espace-temps des coordonnées de natures spatiales et temporelles, formant un référentiel. Mais chaque observateur possède son propre référentiel, différent de celui des autres.

La théorie stipule que les lois de la physique prennent des formes identiques dans tous les référentiels en mouvement uniforme les uns par rapport aux autres, et indique comment, d'un point de vue mathématique, passer d'un référentiel à un autre.

La relativité restreinte fut reformulée quelques années plus tard par Henri Poincaré et Hermann Minkowski, lequel

L'ESSENTIEL

✓ Le temps universel, qui s'écoule indépendamment des événements et de la même façon pour tous, est une invention de Newton.

✓ Ses propriétés, et donc son existence même, sont remises en cause par les théories de la relativité restreinte et générale.

✓ Cette disparition du temps, confirmée par l'expérience, se révèle incontournable dans les tentatives pour établir une théorie physique plus fondamentale.

déclara lors de son introduction à la 80^e assemblée des physiciens allemands en 1908 : « L'espace en lui-même, le temps en lui-même, sont condamnés à s'évanouir telles de simples ombres, et seule une sorte d'union des deux préserve une réalité indépendante. »

La théorie de la relativité générale, développée par Einstein dans les années qui suivirent, étend les principes de la relativité restreinte à des changements de référentiels plus généraux (en accélération les uns par rapport aux autres). L'espace-temps y devient une structure plus complexe, dotée d'une courbure. Cette courbure, qui s'identifie avec la gravitation, est créée par le contenu en matière et énergie de l'Univers.

La théorie de la disparition du temps

La relativité restreinte exprime la disparition du temps, disparition encore plus radicale en relativité générale. Cette idée suscite parfois des réticences, parce qu'au quotidien, nous continuons à utiliser sans problème nos montres et autres manifestations du temps universel. Et un examen superficiel des principes des équations de la relativité restreinte laisse croire qu'elles sont compatibles avec l'existence d'un temps. On parle ainsi fréquemment de « dilata-

tion des durées » ou du temps qui « s'écoule plus ou moins vite ». Mais en réalité, c'est bien la disparition du temps qui est à l'œuvre. Voyons en quoi.

Tous les auteurs ont déclaré leur impuissance à définir ce qu'est le temps. Mais faute de le définir, on peut au moins énoncer les propriétés qui le caractérisent : durée et chronologie, déjà évoquées, mais aussi simultanéité et causalité, pour les principales. En montrant que ces propriétés ne sont pas vérifiées dans la nature, on pourra en conclure que le temps, tel qu'on le qualifie, n'existe pas.

Tout d'abord, l'existence du temps universel permet d'attribuer sans ambiguïté une date à chaque événement. On peut voir chaque événement comme un point de l'espace-temps, auquel on peut assigner sans ambiguïté une date, identique pour tous les observateurs. Ensuite, il est possible d'assigner une durée bien définie à tout phénomène physique. C'est simplement la différence entre la date de la fin et la date du début du phénomène. Une troisième propriété du temps universel est la simultanéité. Il est toujours possible de décider si deux événements se sont déroulés en même temps ou non ; il suffit pour cela de vérifier si leurs dates coïncident. De même, en comparant leur date, on peut dresser une chronologie, c'est-à-dire déterminer si un événement s'est déroulé avant ou après un autre. La dernière propriété qui nous intéresse ici

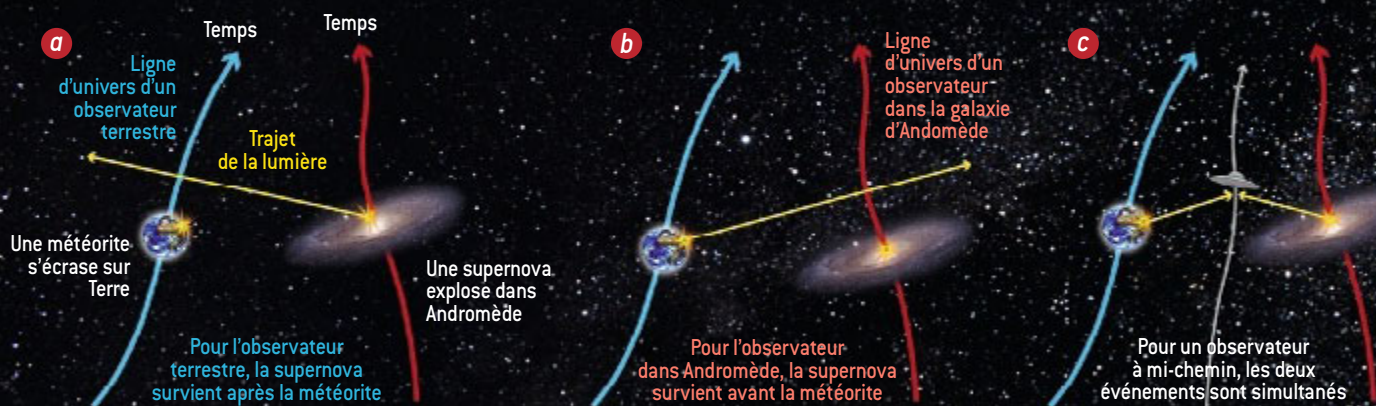
LA SIMULTANÉITÉ N'EXISTE PAS

En relativité, la notion de simultanéité n'existe pas. Imaginons qu'une supernova explose dans la galaxie d'Andromède et qu'une

météorite s'écrase sur Terre. Les phénomènes sont-ils simultanés ? Cela dépend de chaque observateur, chacun suivant sa propre ligne d'es-

pace-temps. Pour un observateur terrestre (a), la supernova a explosé après la chute de la météorite ; pour un observateur dans Andromède, la

supernova a explosé avant la chute (b) ; et l'on peut trouver un troisième observateur pour qui les deux événements sont simultanés (c).



est la causalité : on peut influencer sur certains événements – ceux du futur causal – mais pas sur d'autres – ceux du passé causal. En physique newtonienne, la causalité se confond avec la chronologie.

À chacun sa durée

Or la relativité restreinte – et *a fortiori* la relativité générale – remet en cause toutes ces propriétés. Il est par exemple impossible d'assigner une durée bien définie à un processus physique. Imaginons le trajet d'un photon, de son émission par une étoile à sa réception par un télescope au sol. Bien que l'universalité de la méthode de mesure elle-même pose problème, supposons qu'il existe un tel protocole. Un premier observateur, sur Terre, l'applique et mesure une « durée » t_1 . Un autre, situé sur le trajet, effectue une observation identique, et trouve une durée t_2 , tandis qu'un troisième, se déplaçant le long du trajet, mesure une durée t_3 . La physique newtonienne considère que t_1 , t_2 et t_3 sont trois mesures d'une même grandeur, la durée : elles doivent donc être égales.

Mais de nombreuses observations (cascades de particules engendrées par les rayons cosmiques, désintégration dans les accélérateurs de particules, phénomènes astrophysiques à haute énergie, ainsi que des expériences en laboratoire ou en orbite, etc.) prouvent que ce n'est pas le cas : en général, les valeurs mesurées par différents observateurs ne sont pas les mêmes, écarts que prédisent avec exactitude les théories relativistes.

La seule explication cohérente est que ces mesures concernent en fait des grandeurs différentes ; autrement dit, il n'existe pas de grandeur que l'on pourrait appeler sans ambiguïté « durée » d'un phénomène. Toute autre interprétation cherchant à relier les différentes « durées » mesurées à une durée intrinsèque conduit à des paradoxes.

Il existe pourtant une durée en un sens « plus valable » que les autres. Les équations de la relativité indiquent que dans notre exemple, plus le trajet d'un observateur est proche de celui du photon émis par l'étoile, plus la « durée » qu'il va mesurer est petite. De façon générale, l'observateur qui est lié à un processus et l'accompagne du début à la fin mesurera la durée la plus petite possible. Nommée « durée propre », on peut considérer que c'est la « vraie » durée du processus.

Dans notre exemple, la durée propre du phénomène est celle que mesurerait le photon. Or la relativité indique que la durée propre d'un photon est... nulle. Cela n'est qu'une manifestation du fait qu'il voyage à la vitesse limite, celle de la lumière ; de façon générale, c'est vrai pour toute particule de masse nulle. Ainsi, la durée propre du trajet d'un photon, de son émission dans une galaxie lointaine à sa réception, est nulle. On aurait pourtant envie de dire que le trajet dure des milliards d'années !

Dès lors, comment différents observateurs peuvent-ils comparer les durées entre deux événements donnés ? Chaque observateur ne peut mesurer que sa durée propre, le long de sa trajectoire dans

Les durées dépendent de l'observateur

La notion de durée d'un phénomène est différente d'un observateur à l'autre. Imaginons par exemple un train en mouvement uniforme, qui passe devant une gare. Une impulsion lumineuse est envoyée du sol vers le plafond du train, où elle est réfléchie par un miroir vers son point de départ.

Pour un observateur assis dans le train, la durée du trajet de la lumière est $d = 2h/c$, où h est la hauteur du plafond et c la vitesse de la lumière. Mais pour un observateur sur le quai de la gare, puisque le train a avancé pendant le trajet de la lumière, le point de réflexion

de la lumière au plafond, et encore plus le point d'impact au retour sur le plancher, sont décalés par rapport à la verticale du point d'émission.

Comme ce point de retour ne se trouve pas là où se situe l'observateur de la gare, celui-ci ne peut mesurer directement la durée du phénomène (on dit que cet événement n'appartient pas à sa « ligne d'univers », qu'il décrit dans l'espace-temps.) Il peut cependant reconstituer ce qu'il qualifiera – de façon impropre, au sens strict – de durée du phénomène.

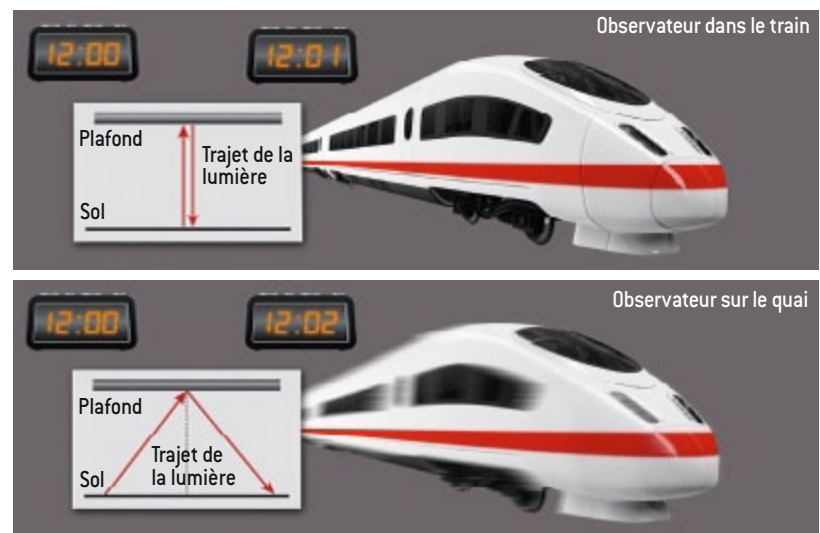
La vitesse de la lumière étant invariante, l'aller-retour

de la lumière dure ainsi plus longtemps observé depuis la gare. Un calcul géométrique simple montre que la « durée » observée depuis le quai est :

$$d' = d / \sqrt{1 - v^2/c^2},$$

où v est la vitesse du train. Le « temps » du train et le temps de la gare ne sont donc pas identiques.

Cependant, pour avoir une compréhension correcte de la situation, il faudrait comparer les durées de phénomènes se situant sur la trajectoire des différents observateurs dans l'espace-temps. C'est tout l'objet du « paradoxe des jumeaux » (voir l'encadré page suivante).



l'espace-temps (sa ligne d'univers). Or, entre les deux phénomènes, ces trajectoires diffèrent en général. Le « paradoxe des jumeaux », proposé par le physicien Paul Langevin, en est une illustration (voir l'encadré ci-dessous).

En résumé, il n'existe pas de moyen objectif de définir une durée entre deux événements. On peut définir une durée propre, mais celle-ci n'a rien à voir avec ce

que peut mesurer un observateur ; ni avec ce que nous appelons intuitivement durée.

Pour évoquer cette situation, on parle fréquemment de « dilatation des durées » selon les observateurs. C'est un abus de langage. En réalité, il existe seulement différentes mesures, qui concernent des grandeurs distinctes, et il n'y a pas grand sens à les comparer. De même, l'idée que la « vitesse d'écoulement du temps » varierait selon les observateurs n'a pas de sens. Cela suggérerait qu'il y a un temps universel et absolu qui s'écoulerait plus ou moins vite en fonction du contexte. En réalité, il existe simplement différents temps, propres à chaque observateur.

L'absence de durée implique celle de temps absolu. En effet, dans le cas contraire, il suffirait de soustraire la date de fin et de début du phénomène pour mesurer sa durée, comme nous l'avons vu.

Chacun son ordre

Les notions de simultanéité et de chronologie ne résistent pas plus à l'analyse dans le cadre relativiste. Imaginons qu'une supernova explose dans la galaxie d'Andromède et qu'une météorite s'écrase sur Terre. Les phénomènes sont-ils simultanés ? L'un s'est-il déroulé avant l'autre ? Réponse possible : un observateur terrestre voit la météorite tomber avant l'explosion ; un observateur dans Andromède voit la supernova exploser avant la chute ; et l'on peut trouver un troisième observateur pour qui les deux événements sont simultanés (voir l'encadré page 46). Du fait de la vitesse finie de l'information, chaque observateur voit les événements survenir à différents moments en fonction de sa position et de sa vitesse par rapport à eux. L'ordre dans lequel l'un voit des événements contredira l'ordre de l'autre. La chronologie et *a fortiori* la simultanéité sont relatives. Cela est manifestement incompatible avec l'existence du temps universel, car dans ce cas, il suffirait de comparer les dates des événements pour savoir lequel précède l'autre ou s'ils sont simultanés.

La causalité, en revanche, reste un concept parfaitement défini en relativité, même si elle n'est plus équivalente à la chronologie. En physique classique, deux situations sont possibles : soit l'événement A influence l'événement B, qui est alors dans le futur causal de A ; soit au contraire A peut avoir été influencé par B, auquel cas B est dans le passé causal

Durées et trajectoires dans l'espace-temps

Le « paradoxe » des jumeaux, inventé par le physicien Paul Langevin, est l'une des illustrations les plus connues des implications de la relativité sur les notions temporelles.

Deux jumeaux fêtent leur 20^e anniversaire commun. Peu après, l'un part pour un long voyage dans l'espace. Après son retour, ils fêtent un nouvel anniversaire, mais le jumeau resté sur Terre a alors 40 ans, tandis que voyageur n'en a que 30 ! Comment est-ce possible ?

En fait, la situation des deux jumeaux n'est pas symétrique. Entre le point de départ et le point d'arrivée, les deux jumeaux suivent des trajectoires (ou lignes d'univers) différentes dans l'espace-temps (voir le diagramme ci-dessous). La géométrie de l'espace-temps permet de calculer leur « longueur », qui correspond à la durée propre du phénomène pour celui qui suit cette ligne.

Sur la figure, la trajectoire suivie par le voyageur semble plus longue. Mais dans l'es-

pace-temps relativiste, les longueurs ne se comportent pas comme dans l'espace euclidien ordinaire : la géométrie de Minkowski introduit un signe moins entre les coordonnées spatiales et temporelles, ce qui rend le trajet du voyageur plus court, dans cette métrique, que le trajet du jumeau resté sur Terre.



On peut aussi raisonner en termes de géodésiques. Les géodésiques sont les trajectoires que suit un corps en l'absence de toute accélération. Dans le plan euclidien, les géodésiques sont les droites, de longueur minimale. Mais dans la géométrie relativiste, les géodésiques sont

les trajectoires qui maximisent le temps propre.

Or le jumeau resté sur Terre, au repos, suit une géodésique, tandis que le voyageur suit une trajectoire en partie accélérée, qui n'est plus une géodésique. La durée propre mesurée par ce dernier est donc plus petite. Dans le cas limite où le voyageur se déplacerait à la vitesse de la lumière, la durée propre de son voyage serait égale à zéro.

Remarquons que le temps du voyageur ne s'écoule pas plus vite que sur Terre, ou inversement. Les années sont les mêmes pour les deux jumeaux, et les processus biologiques se déroulent au même rythme. C'est comme si vous alliez de Paris à Marseille en passant par Toulouse : vous aurez parcouru plus de kilomètres que par le trajet direct, mais ces kilomètres sont les mêmes. Ici, les deux jumeaux suivent simplement des trajectoires de l'espace-temps qui ont des « longueurs » ou, de façon équivalente, des durées propres, différentes.

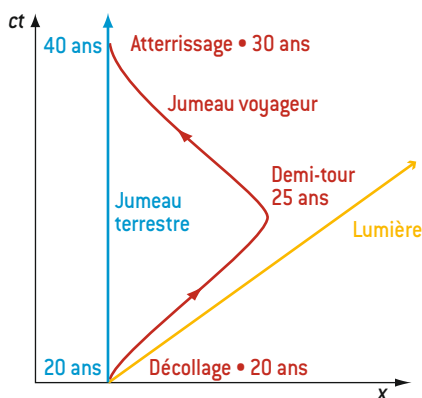


DIAGRAMME D'ESPACE-TEMPS. Dans le référentiel inertiel de la Terre (où, par commodité, ne figure qu'une seule coordonnée spatiale), on a représenté le trajet des jumeaux dans l'espace-temps. La ligne d'univers du frère resté sur Terre (en bleu) est une géodésique. Son jumeau décolle de la Terre et s'éloigne à grande vitesse, fait demi-tour et revient (courbe rouge). De façon contre-intuitive, dans la géométrie de l'espace-temps relativiste, la courbe rouge est plus « courte », en terme de durée propre, que la bleue. La ligne jaune représente la ligne d'univers d'un signal lumineux émis au départ ; elle est de « longueur » nulle.

de A. La causalité distingue le passé et le futur. Dans le cadre de la théorie de la relativité, il existe un troisième cas : l'événement A ne peut influencer l'événement B ni inversement.

Une fois encore, c'est dû à la vitesse finie de l'information. Par exemple, une explosion survenue à la surface du Soleil « il y a trois minutes » dans un référentiel qui m'est associé ne peut avoir d'impact sur un événement se déroulant au moment présent sur Terre, car la lumière met au minimum huit minutes pour nous parvenir. Inversement, ce qui se passe sur Terre au moment présent ne peut influencer sur l'explosion à la surface du Soleil. Les deux événements sont « non causalement liés ». En termes mathématiques, la relation de causalité relativiste est une relation d'ordre partielle, et non plus totale comme en physique newtonienne.

Le temps universel n'existe donc pas. Au quotidien, cela reste cependant une approximation utile. Deux horloges marquent chacune l'écoulement de leur temps propre. Mais si elles sont voisines

et au repos l'une par rapport à l'autre, ces deux grandeurs sont très proches, et l'on peut les confondre (la proximité et le repos dépendant de la précision considérée). Deux observateurs assez proches peuvent considérer qu'un même temps s'écoule pour eux. De fait, nous et nos horloges occupons un minuscule coin de l'Univers, et nous sommes tous au repos les uns par rapport aux autres en comparaison des distances cosmiques et de la vitesse de la lumière. En pratique, il est légitime de considérer que nous partageons un temps propre commun ; ce qui revient à dire que, dans notre environnement et pour des vitesses assez petites par rapport à celle de la lumière, on peut appliquer la physique newtonienne. C'est ce temps propre commun que Newton a qualifié d'universel. Mais c'est un choix arbitraire et valable localement.

Tant qu'elle n'a pas eu affaire à des vitesses très élevées et que la précision des mesures temporelles est restée limitée, la physique a pu s'accommoder du temps universel. À l'époque de Newton, aucune

L'AUTEUR



Marc LACHÎÈZE-REY est directeur de recherche au Laboratoire Astroparticule et cosmologie (CNRS-Université Paris 7-Denis Diderot)



Research

- Salon européen des carrières de la recherche
- Europäische Messe für Forschung und Karriere
- European research career fair



Paris

19 novembre 2010
November 19, 2010

- **60 exposants**
Entreprises, centres et laboratoires de recherches, campus européens
- **60 exhibitors**
Companies, Research centres and laboratories, European campuses
- **5 conférences**
5 conferences

L'événement européen de votre carrière

The European event dedicated to your career

- **Recrutement/Recruitment**
- **Conseils/Advice**

Pré-inscription et informations sur:
Registration and information online:

www.ResearchCareerFair.com



observation ne pouvait indiquer que ce temps n'en était pas vraiment un. Mais les progrès des mesures physiques et le changement d'échelle des systèmes étudiés rendent cette approximation intenable.

Les durées de vie propres des particules voyageant à des vitesses proches de celle de la lumière dans les accélérateurs ou dans le rayonnement cosmique sont par exemple beaucoup plus courtes que les durées que nous observons. Dans l'environnement terrestre proche, les horloges atomiques les plus précises, séparées

ment « mon réveil indique sept heures ». On peut ensuite corréler les indications du réveil à celles d'une horloge atomique, à la rotation de la Terre ou à tout autre système physique. Aucune référence au temps n'est nécessaire dans ces corrélations. Cette reformulation « relationnelle », qui rejette l'usage du temps, évite toute ambiguïté. Elle s'accorde avec les notions de durées propres, personnelles à chaque observateur et valables uniquement dans son environnement. Mais déjà, elle suggère que la notion de temps n'est pas aussi fondamentale qu'il pourrait sembler.

À un niveau plus fondamental, selon la théorie de la relativité, la durée propre d'un processus physique découle de certaines propriétés de l'espace-temps ; et plus précisément de ce qu'on appelle sa métrique, c'est-à-dire la façon dont les distances sont définies dans l'espace-temps. Autrement dit, la durée propre qu'un système physique perçoit, et peut mesurer, peut être vue comme le résultat d'une interaction avec la métrique de l'espace-temps dans lequel il évolue.

IL Y A TOUTES LES RAISONS DE PENSER

que la disparition du temps est fondamentale et doit être prise en compte dans une approche plus large de la physique.

de quelques mètres seulement, n'indiquent pas le même temps ! Le temps propre d'un cosmonaute ou d'un satellite en orbite autour de la Terre est différent du nôtre (le cosmonaute « vieillit moins vite »).

Mais tant que l'on ne s'éloigne pas trop de la Terre, on peut encore considérer le temps des objets en orbite comme une petite déviation de notre temps propre. Des « corrections relativistes » sont ainsi indispensables au système GPS de géolocalisation, qui ne fonctionnerait pas dans un cadre purement newtonien.

La relativité impose donc la disparition de la notion de temps. Cela étant, de nombreuses raisons nous laissent penser que la physique actuelle n'est pas aboutie et qu'il doit exister une théorie plus fondamentale intégrant la relativité et la physique quantique. Les physiciens se heurtent cependant à une difficulté de taille pour construire cette théorie de la « gravitation quantique » : la physique quantique est construite sur la notion de temps universel, dont la relativité générale nie l'existence.

Il existe néanmoins une reformulation de la physique quantique qui élimine la notion de temps ; c'est une voie prometteuse (voir l'article de Carlo Rovelli). L'idée est de considérer les mesures temporelles d'un événement non pas comme une référence à un temps, mais comme la comparaison avec un autre processus, considéré comme une horloge. Par exemple, se lever à sept heures en regardant son réveil revient à constater une corrélation entre l'événement « se lever » et l'évène-

Vers la disparition de la métrique

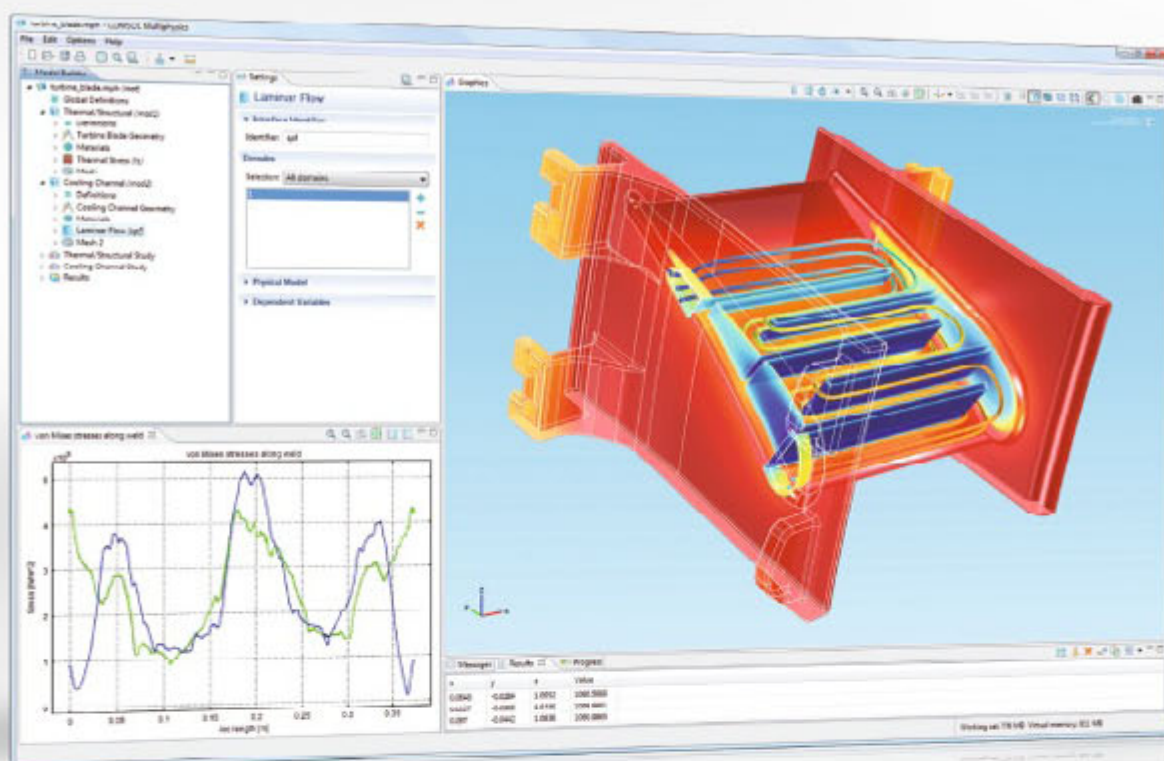
Ce dernier bastion à caractère temporel pourrait lui aussi être remis en question. En effet, les approches de gravité quantique évoquées – « gravité quantique à boucles », « écumes de spin » et autres théories apparentées – impliquent non seulement l'absence de temps, mais aussi de toute structure d'espace-temps préalable, ou au moins d'une métrique. La métrique n'est pas considérée comme existant *a priori*, mais comme une conséquence attendue de la théorie. On parle de *background independence*, qu'on pourrait traduire par « indépendance par rapport au cadre ». L'absence de métrique entraîne celles des durées propres qui en découlent, ainsi que de la causalité. La disparition du temps est une chose, bien établie aujourd'hui, mais celle de ces notions plus fondamentales en est une autre...

Toutes ces réflexions sont loin d'être achevées et font l'objet de recherches actives. Mais il est incontestable que la relativité a définitivement condamné la plupart des propriétés du temps et des notions qui s'y rapportent. Il y a toutes les raisons de penser que cette disparition est fondamentale, et doit être prise en compte dans une approche plus large de la physique. ■

✓ BIBLIOGRAPHIE

M. Lachièze-Rey,
Au-delà de l'espace et du temps :
La nouvelle physique,
Le Pommier, 2003.

S. Bergia, Einstein, le père
du temps moderne, Les Génies
de la Science, n° 11, 2002.



Refroidissement d'une pale d'un stator de turbine, avec la distribution des contraintes de von Mises le long des soudures.

80% des concepts produits n'arrivent jamais sur le marché. Donnez vie à vos idées avec COMSOL Multiphysics®!

Les simulations multiphysiques reproduisent avec précision les caractéristiques essentielles de vos designs. Comment ? En prenant en compte tous les effets physiques du monde réel. L'approche COMSOL Multiphysics® donne des résultats - des résultats concrets qui économisent du temps de développement et stimulent l'innovation.

Capture the Concept.®

Exemples d'applications sur:
www.comsol.com/multiphysics

S'affranchir du temps

Carlo Rovelli

La notion de temps pose certaines difficultés à la physique moderne. Une issue à ce problème consiste à se passer de structure temporelle dans les théories fondamentales. Des physiciens ont montré que c'est possible.

La notion intuitive de temps nous paraît simple. En réalité, elle a de nombreuses caractéristiques qui la rendent complexe et structurée. Premièrement, le temps a une structure linéaire : il est comme une droite dont chaque point représente un instant. Deuxièmement, cette droite est orientée, le passé étant différent du futur. Troisièmement, cette droite contient un instant très particulier, le « présent », qui sépare le passé du futur et qui, en un sens, est le seul qui soit réel. Quatrièmement, le temps est mesurable, par exemple en jours et heures. Cinquièmement, le temps est universel, le même pour tous. Enfin, le temps passe même quand rien ne bouge : il a sa propre réalité, indépendante de la complexité des événements qui se succèdent. On peut donner de toutes ces propriétés une image un peu naïve en considérant le temps de l'Univers comme le battement imposé par une Grande horloge cosmique.

Mais les progrès de la science montrent que le monde est souvent bien différent de ce qu'il nous paraît. Des notions « évidentes » comme le caractère plat et l'immobi-

L'ESSENTIEL

✓ Il est possible de formuler la mécanique newtonienne, la mécanique quantique et la relativité générale sans utiliser de paramètre temporel.

✓ Cela résout certains problèmes conceptuels posés par le temps. Mais il faut alors expliquer d'où provient notre intuition du temps.

✓ Une réponse possible est donnée par le « temps thermique », un sens d'évolution associé aux systèmes macroscopiques dont l'état microscopique est décrit de façon probabiliste.

© Shutterstock/FreestudioProduction, Pour la Science



lité de la Terre n'ont été valides et utiles qu'un temps dans l'histoire. Or la même chose se produit avec la notion de temps. Par exemple, nous savons aujourd'hui que le temps n'est pas universel. La durée d'un événement semble en général la même pour différentes personnes, mais l'unique raison de cette belle concordance est que nos montres sont très peu précises. Les horloges atomiques ont permis de vérifier, conformément à la théorie de la relativité d'Einstein, que le temps qu'elles indiquent dépend de leurs vitesses, de leurs altitudes et d'autres facteurs. Et avec les progrès de la physique, d'autres caractéristiques du temps intuitif ont perdu leur pertinence (voir les articles de Craig Callender et de Marc Lachièze-Rey).

La révision des notions fondamentales de la physique, et en particulier celle de temps, ne s'est pas interrompue avec la théorie de la relativité d'Einstein. Elle se poursuit aujourd'hui, et c'est ce que nous allons détailler.

Le statut du temps est à revoir

Commençons par une petite leçon que nous a donnée l'histoire. Il y a plus d'un siècle, Einstein a pu prédire que le temps ne s'écoule pas au même rythme pour tous les observateurs. Comment y est-il parvenu ? Il disposait à son époque de la mécanique de Newton et Galilée, de l'électromagnétisme de Faraday et Maxwell, et de la théorie newtonienne de la gravitation. D'un côté, ces théories étaient très efficaces, et donc crédibles ; mais de l'autre, elles étaient fondées sur des notions en contradiction apparente (par exemple : invariance de la vitesse de la lumière en électromagnétisme *versus* addition des vitesses relatives en mécanique newtonienne). Einstein a compris qu'il fallait trouver de nouveaux schémas conceptuels où les résultats de ces théories pouvaient être réunis de façon non contradictoire, et que pour ce faire, il fallait revoir certaines notions fondamentales, notamment celle de temps.

Nous nous retrouvons aujourd'hui dans une situation similaire. Nous disposons de deux théories qui se sont montrées très efficaces, et donc crédibles, tout au long du dernier siècle : la mécanique quantique et la relativité générale d'Einstein. Mais, une fois encore, ces théories sont fondées sur des notions qui apparaissent en conflit, et il semble nécessaire de

1. LA DIFFICULTÉ À ÉDIFIER UNE THÉORIE quantique de la gravitation, qui unirait la physique quantique et la relativité générale d'Einstein, conduit une partie des physiciens à mettre en doute la réalité du temps. De fait, il est possible de formuler les théories fondamentales sans utiliser de paramètre temporel. Mais il reste à expliquer comment se construit le temps, c'est-à-dire comment il vient s'imposer à notre intuition.

L'AUTEUR



Carlo ROVELLI est professeur à l'Université de la Méditerranée et travaille au Centre de physique théorique de Luminy (CNRS), près de Marseille.

revoir notre notion de temps pour construire un schéma conceptuel cohérent.

La physique quantique et la relativité générale, prises ensemble, indiquent que pratiquement tous les aspects de la notion naïve de temps ne sont que des propriétés locales et partielles de la temporalité, qui dépendent des limites de nos sens et des particularités de notre expérience.

Comment est-on parvenu à cette conclusion ? Oublions un instant la mécanique quantique. Le succès de la théorie de la relativité nous a appris que le temps est indissociable d'un continuum nommé espace-temps, et que cet espace-temps est une entité dynamique, qui bouge : c'est comme un immense mollusque mobile au sein duquel nous sommes immergés, pour

nous mesurons en réalité n'est jamais le temps, mais toujours quelque variable physique qui change « avec le temps ». Par exemple, nous mesurons le « temps » en observant la position des aiguilles de notre montre ; mais pourquoi ces aiguilles nous donnent-elles le « vrai temps » ? Parce que leur lecture est la même que celle de l'horloge de la mairie ou de l'horloge diffusée sur le Web. Mais ces horloges nous indiquent-elles le « vrai temps » ?

La réponse à ces questions apparemment sans fin a été donnée par Newton dans une très belle page de sa grande œuvre, les *Principia*. En effet, notait Newton, nous ne mesurons jamais le temps t . Nous ne faisons qu'observer des grandeurs physiques A, B, C , etc. et constater qu'elles prennent à chaque fois des valeurs différentes. Les quantités observables nous apparaissent changer continuellement. Il est fort utile, remarquait Newton, de postuler l'existence d'une variable physique t qui n'est pas observable, mais qui serait comme l'occulte chef d'orchestre qui mène le ballet des grandeurs observables. Quand le paramètre t change, les variables physiques changent et leur modification est décrite par des fonctions $A(t), B(t), C(t)$, etc.

Toute la physique, proposait Newton, peut être exprimée en termes d'équations qui régissent ces fonctions de t . Nous n'observons jamais ces fonctions, parce que ce n'est pas la variable t que nous observons, mais seulement les quantités A, B, C , etc. et leur ballet. Autrement dit, nous observons comment A change avec B, C , etc., B avec A, C etc., C avec A, B , etc., et ainsi de suite. En d'autres termes, expérimentalement, nous n'avons accès qu'aux fonctions $A(B, C, \dots), B(A, C, \dots), C(A, B, \dots)$, etc. Mais d'un point de vue théorique, il se révèle plus facile d'accéder aux relations entre les grandeurs observables en déterminant les fonctions $A(t), B(t), C(t)$, etc. : il suffira alors d'exprimer t en fonction de l'une de ces grandeurs et ainsi de retrouver les relations entre A, B, C , etc.

Cette démarche un peu saugrenue, qui consiste à faire appel à un paramètre temporel t sous-jacent et inobservable, est à la base de la physique newtonienne et de ses avatars. Elle fonctionne très bien... jusqu'à ce qu'on essaie de construire une théorie quantique de la gravité. Le schéma newtonien du temps montre déjà ses limites en relativité générale, puisque par exemple les temps de systèmes différents ne sont généralement pas les mêmes (voir l'article

« LA MEILLEURE OPTION EST D'ABANDONNER

la notion de temps tout entière, un peu comme nous avons abandonné la notion de couleur pour décrire la matière au niveau atomique. »

utiliser une métaphore chère à Einstein. Cette étape réduit déjà le temps à quelque chose de très différent de la notion intuitive que l'on en a. Maintenant, si nous prenons en compte la mécanique quantique, cette dernière révèle que toute entité dynamique, par exemple le champ électromagnétique, est en réalité bien plus complexe qu'un continuum mobile : ses manifestations peuvent seulement être décrites en termes de lois de probabilités. Il s'ensuit que le temps, qui n'était déjà plus universel comme l'a montré la relativité, n'est plus orienté et perd même sa structure linéaire...

Je suis ainsi convaincu que, pour conceptualiser la temporalité, le devenir et l'évolution d'une façon qui soit compatible tant avec la mécanique quantique qu'avec la relativité générale, c'est-à-dire qui puisse fonder une théorie quantique de la gravitation, la meilleure option est d'abandonner la notion de temps tout entière, un peu comme nous avons abandonné la notion de couleur pour décrire la matière au niveau atomique, ou comme nous avons abandonné le caractère absolu de la simultanéité dans la théorie de la relativité restreinte.

S'affranchir entièrement de la notion de temps est une option moins radicale qu'il n'y paraît. Tout bien réfléchi, le temps n'est pas si essentiel en physique. Ce que

✓ BIBLIOGRAPHIE

C. Rovelli, *Qu'est-ce que le temps ? Qu'est-ce que l'espace ?*, Bernard Gilson Éditeur, 2006.

C. Rovelli, *Quantum Gravity*, Cambridge University Press, 2004.

✓ SUR LE WEB

C. Rovelli et M. Smerlak, *Thermal time and the Tolman-Ehrenfest effect : temperature as the « speed of time »*, 2010, disponible sur : <http://fr.arxiv.org/abs/1005.2985>

C. Rovelli, *Forget time*, 2008, essai disponible sur : http://www.fqxi.org/data/essay-contest-files/Rovelli_Time.pdf

C. Rovelli, *Gravité quantique : quand le temps et l'espace n'existent plus*, conférence donnée le 19 mars 2005, disponible sur : http://www.cite-sciences.fr/francais/ala_cite/college/04-05/conferences/01-05-einstein/03-rovelli/index.htm

de Marc Lachièze-Rey). Et quand, en plus, on tient compte de la mécanique quantique, où un même système physique peut être dans une superposition d'états différents, donc où plusieurs temps peuvent se superposer, c'est toute la conception newtonienne du temps qui s'effondre. Les variables physiques ne dansent plus au rythme unique d'une seule variable t , elles dansent de façon beaucoup plus sauvage.

Comment résoudre la difficulté ? La solution est simple dans son principe : en écrivant des équations pour les fonctions $A(B, C, \dots)$, $B(A, C, \dots)$, $C(A, B, \dots)$, etc. qui décrivent directement l'évolution des variables physiques les unes par rapport aux autres, au lieu de passer par l'hypothèse newtonienne de l'existence d'une unique variable t menant la danse. Au niveau de la gravité quantique, c'est-à-dire dans l'infiniment petit, au cœur des trous noirs ou dans un état de l'Univers proche du Big Bang, la nature ne ressemble pas à un défilé bien ordonné mené à la baguette par une variable t .

Une variable t absente

En fait, la possibilité de ne pas introduire une variable privilégiée t et de ne décrire que l'évolution relative des variables a toujours été présente. Comme je l'ai montré à partir des années 1970, on peut reformuler toute la mécanique newtonienne sans jamais utiliser de variable t ! C'est une possibilité dans le cadre limité de la physique newtonienne. Mais cela devient une nécessité dans le cadre bien plus large de la théorie quantique de la gravité : dans les équations de cette dernière, la variable t ne figure pas.

Historiquement, les choses se sont passées un peu dans le sens inverse. D'abord, une équation pour la gravité quantique a été obtenue à la fin des années 1960 par les Américains Bryce DeWitt et John Wheeler, qui ont appliqué les règles formelles de la mécanique quantique à la relativité générale. Le résultat était surprenant, car le temps t était absent de cette équation.

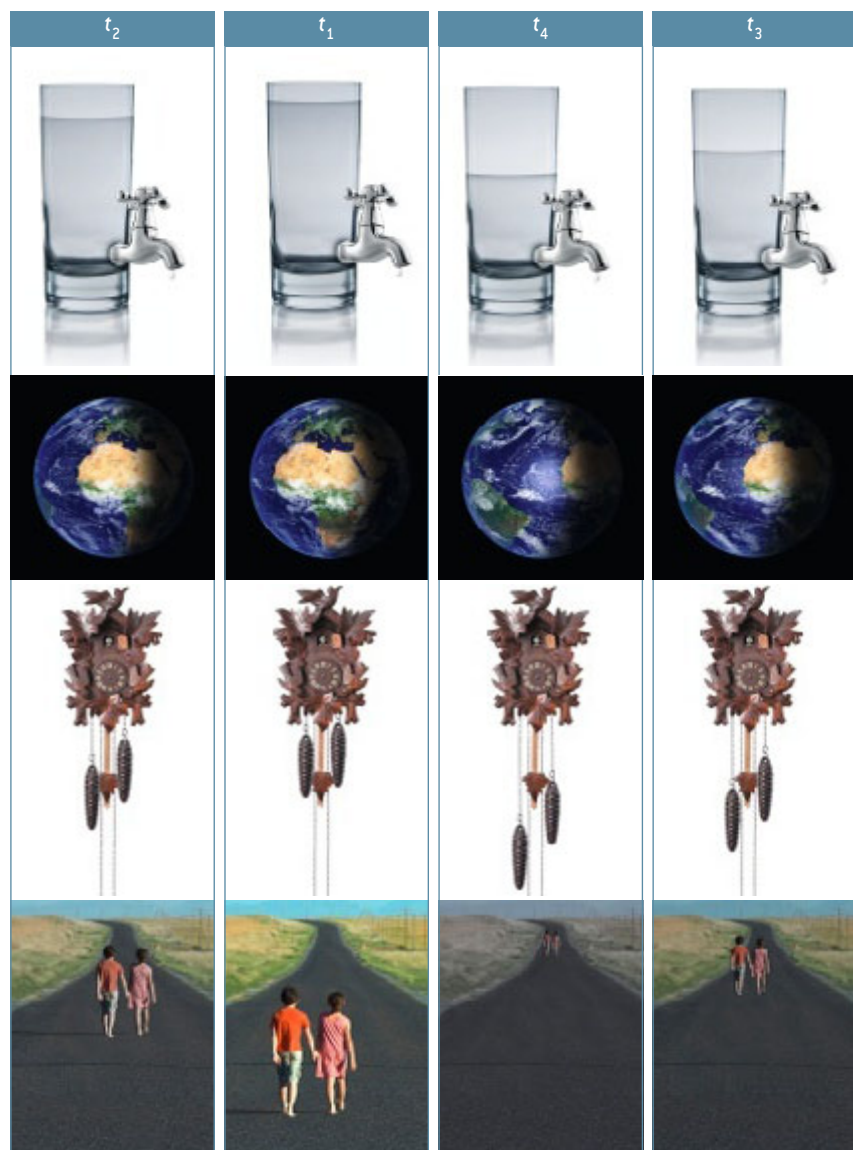
Petit à petit, nous avons fini par comprendre la signification physique de cette absence de la variable t : le postulat newtonien de l'existence d'une variable inobservable nommée « temps » n'est ni nécessaire ni possible quand on tient compte à la fois de la mécanique quantique et de la relativité générale. Et de fait, des formulations atemporelles de la méca-

nique quantique et de la relativité générale ont pu être élaborées au cours des deux dernières décennies. Aideront-elles les théoriciens à trouver une façon satisfaisante de marier ces deux édifices, c'est-à-dire à trouver une théorie quantique satisfaisante de la gravité ? Je l'espère.

Finalement, que signifie tout cela ? L'explication la plus directe est que l'idée d'un temps indépendant des événements qui s'y déroulent est fautive. Le temps, en soi, n'existe pas, il n'est qu'une tentative que nous avons faite pour mettre de l'ordre dans le ballet complexe du réel. Comme

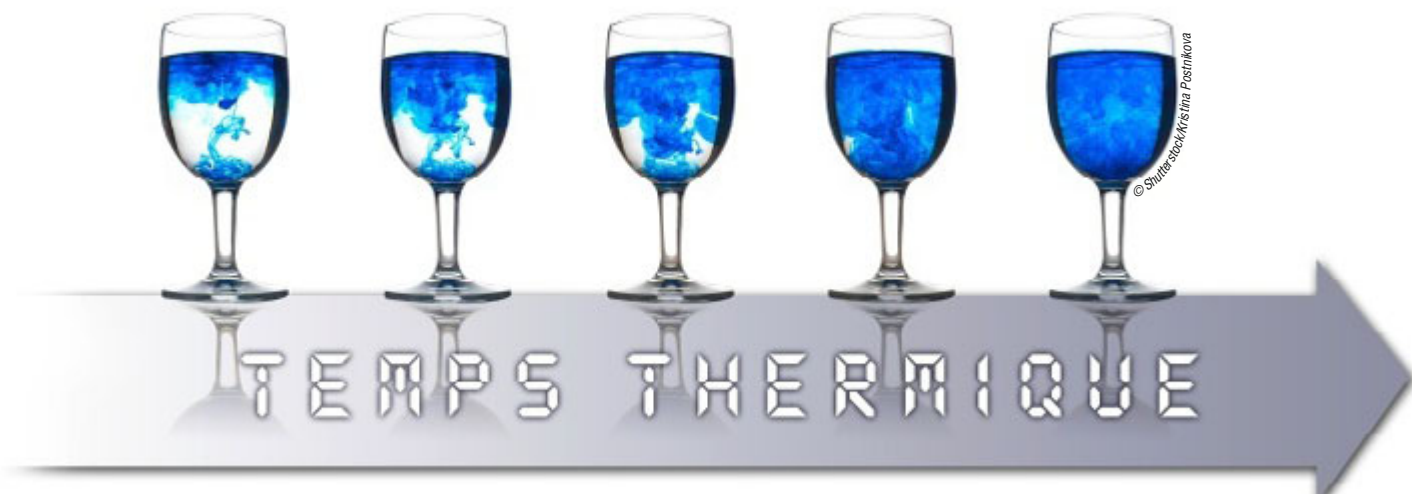
les couleurs, le temps n'existe que dans certains contextes, et il émerge de notre propre perspective, particulière et limitée, sur la réalité. Pour comprendre le monde dans un contexte plus vaste que celui de notre petit jardin, il faut oublier le temps.

Cependant, pour prendre au sérieux cette image d'un monde dépourvu de temps, un pas conceptuel reste à franchir. Si, au niveau fondamental, le monde peut être décrit sans référence à une notion de temps, en quoi consiste ce flux continu que nous percevons au quotidien, qui semble diriger nos vies et que nous appelons



© Shutterstock/SK Bakker, Kalina Brown, Satoru, Smoki, Ilong

2. COMMENT S'AFFRANCHIR DU TEMPS ? Plutôt que de décrire tout phénomène en termes de grandeurs qui varient en fonction d'une variable temporelle t , l'idée est de relier les phénomènes entre eux, c'est-à-dire d'établir des relations entre les valeurs prises par les grandeurs observables associées aux phénomènes. De telles relations sont illustrées ici pour quatre grandeurs observables : le niveau d'eau dans un récipient qui fuit, l'angle de rotation de la Terre sur elle-même, la hauteur des poids d'un coucou, la distance parcourue en marchant le long d'une route. L'ordre temporel n'a ici pas été respecté, mais il suffit d'ordonner l'une des grandeurs pour que les autres le soient aussi.



3. LES SYSTÈMES THERMODYNAMIQUES évoluent de façon irréversible, comme l'illustre ici la diffusion d'un colorant dans un verre d'eau. La notion intuitive que l'on a du temps serait issue du comportement de tels systèmes : c'est l'hypothèse du temps thermique. Les systèmes thermodynamiques sont des systèmes macroscopiques dont l'état

microscopique n'est connu que de façon probabiliste. À un tel « état statistique », il est possible d'associer, en s'appuyant sur des travaux des mathématiciens japonais Minoru Tomita et Masamichi Takesaki, un « flot » qui peut être interprété comme une évolution temporelle et qui définit ainsi un temps.

« temps » ? S'il ne régit pas le monde au niveau fondamental, comment et dans quels contextes émerge-t-il ?

Une réponse possible à cette question consiste en l'idée de « temps thermique », proposée vers 1993 par le mathématicien français Alain Connes et moi-même. Essayons d'en expliquer l'essence. Dans la physique usuelle, on décrit l'évolution « dans le temps » de nombreux systèmes différents. Ces derniers peuvent être regroupés en deux classes différentes : les systèmes mécaniques et les systèmes thermiques. À la première classe appartiennent tous les phénomènes où la chaleur et la température ne jouent aucun rôle important (par exemple l'oscillation d'un pendule ou le mouvement des planètes). La seconde classe est celle des systèmes qui présentent d'importants échanges de chaleur ou variations de température (par exemple une bougie qui brûle, ou un gaz sous pression qui se détend quand on ouvre un récipient).

Tant en mécanique qu'en thermodynamique, les physiciens utilisent des équations qui contiennent la variable « temps » : ils étudient comment le pendule oscille « au cours du temps » ou comment une bougie se consume « au cours du temps ». On dispose dans les deux cas des équations d'évolution dans le temps. Mais s'agit-il vraiment du même temps dans les deux situations ? On soupçonne que la réponse puisse être négative. Des différences existent et sont même notables.

La plus importante est que les phénomènes de la première classe sont réversibles, c'est-à-dire que si je les filme et que je regarde le film à rebours, de la fin vers le début, je vois un phénomène possible (l'oscillation renversée dans le temps d'un pendule sans frottement ne diffère pas de l'oscillation initiale). En revanche, les phénomènes de la seconde classe sont irréversibles (voir l'article de Roger Balian) : le film projeté à rebours montre un phénomène impossible, ou du moins jamais observé (un gaz ne se recomprime pas spontanément dans une partie d'un récipient après s'être dilaté).

Le temps reconstruit par la thermodynamique

Mais cette différence reflète quelque chose d'encore plus important. On a vu que l'on peut éliminer la variable temps des équations de la mécanique. Or il n'en est pas de même pour les équations de la thermodynamique ! En thermodynamique, il n'est pas possible de remplacer le temps par une mise en relation des grandeurs observables, les unes par rapport aux autres. Ainsi, la deuxième loi de la thermodynamique, qui stipule que l'entropie d'un système isolé ne décroît jamais « au cours du temps », est une équation que l'on ne peut pas traduire sous une forme relationnelle. Le « temps » qui apparaît dans les équations de la ther-

modynamique semble essentiel pour décrire le monde tel que nous l'observons.

Il convient alors d'introduire deux concepts différents, le « temps mécanique » et le « temps thermique ». Nous avons vu que nous devons renoncer au « temps mécanique » pour bien comprendre le monde. Mais le temps thermique est peut-être la véritable grandeur physique qui est à l'origine de notre conception intuitive du temps. Tout bien réfléchi, quand nous pensons au temps, nous lui associons de nombreuses caractéristiques apparentées à la thermodynamique. Par exemple, le temps de notre expérience quotidienne est irréversible. L'intuition que nous avons du temps correspond à quelque chose qui « s'écoule », à un « flot » qui a une direction déterminée. Tout cela a beaucoup plus de points communs avec les phénomènes irréversibles de la thermodynamique qu'avec le monde parfait et réversible de la mécanique.

Par conséquent, si l'on cherche à retrouver la notion intuitive de temps à partir d'une théorie fondamentale dépourvue de temps, on doit se tourner vers la thermodynamique. La physique de la fin du XIX^e siècle a montré que la thermodynamique n'est autre que la description approximative, macroscopique, de systèmes formés d'un nombre immense de composants, tels les atomes dont est constitué un gaz. Les lois de la thermodynamique sont liées au fait que nous ignorons la mécanique détaillée de chacun des composants du système. La

chaleur correspond ainsi à l'agitation chaotique des atomes et des molécules, agitation qu'il nous est impossible d'observer ou de connaître en détail. L'ignorance des détails microscopiques nous amène à décrire un gaz de façon moyenne, probabiliste, et cette description approximative conduit à la thermodynamique.

Si le seul véritable temps physique réside dans les phénomènes thermodynamiques, et si ces derniers ne sont qu'un effet des moyennes et de notre ignorance de ce qui se passe à l'échelle microscopique, il s'ensuit que l'impression du temps elle-même n'est due qu'à notre ignorance de la dynamique détaillée au niveau microscopique. Cette idée radicale est connue sous le nom de l'« hypothèse du temps thermique ».

Cette idée a pu être exprimée de façon plus précise et mathématique, et étendue au cadre de la physique quantique. La démarche s'inspire notamment de la description probabiliste de l'état d'un système en physique statistique. L'une des pierres angulaires de cette discipline est

que tout système tend vers un état d'équilibre où la probabilité de chaque microétat (c'est-à-dire chaque configuration possible des positions, vitesses, etc., des composants microscopiques du système) est proportionnelle à l'exponentielle $\exp(-E/kT)$, où E est l'énergie totale de la configuration, T la température et k une constante (la constante de Boltzmann). Comme le système tend vers cette distribution de probabilité, celle-ci définit de façon naturelle une direction d'évolution, c'est-à-dire un « temps ».

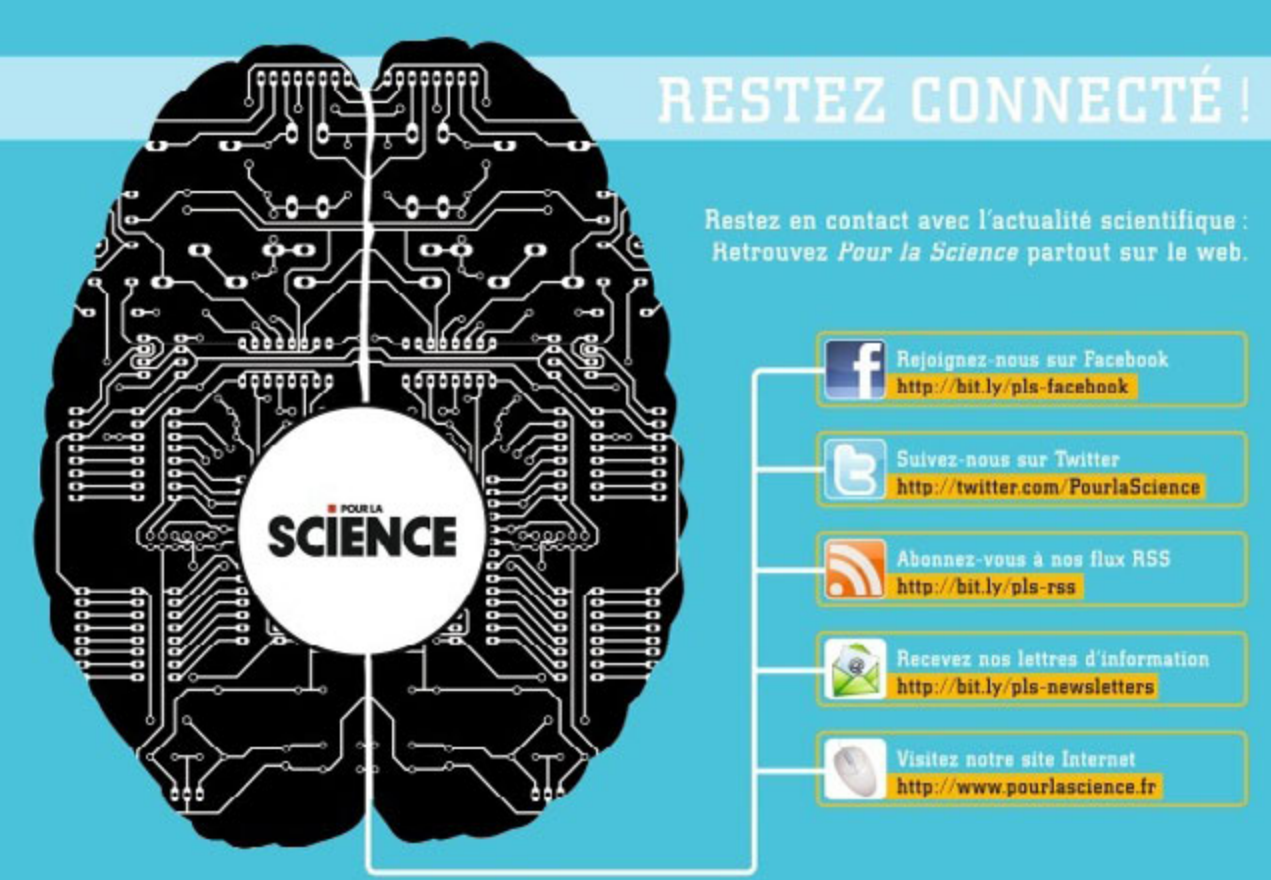
Le temps, effet de notre ignorance ?

On peut en quelque sorte inverser les choses et partir de l'« état statistique » d'un système (la donnée des probabilités de chacun des microétats), quel que soit cet état, et en déduire un « flot » associé, que l'on peut interpréter comme une évolution temporelle et qui définit ainsi un temps.

Sur le plan mathématique, ces idées se sont beaucoup appuyées sur des tra-

vaux des mathématiciens japonais Minoru Tomita et Masamichi Takesaki, réalisés vers 1970 et concernant les algèbres de von Neumann, des structures abstraites d'opérateurs utilisées notamment dans l'étude du formalisme mathématique de la physique quantique. En particulier, la théorie de Tomita-Takesaki permet de calculer une « évolution temporelle » à partir de tout état statistique. Et une analyse mathématique du « temps de Tomita » ainsi défini montre qu'il a effectivement les propriétés que nous associons habituellement au temps.

Le temps mécanique, nous l'avons vu, doit être éliminé de la mécanique classique, de la relativité et de la mécanique quantique, et il peut l'être. Restait à expliquer à quoi est due notre perception intuitive du temps, et nous avons proposé comme solution la notion de temps thermique. Si cette vision des choses est correcte, le temps n'est, en somme, rien d'autre qu'un effet de notre ignorance de l'état microscopique des systèmes macroscopiques. ■



RESTEZ CONNECTÉ !

Restez en contact avec l'actualité scientifique :
Retrouvez *Pour la Science* partout sur le web.

-  Rejoignez-nous sur Facebook
<http://bit.ly/pls-facebook>
-  Suivez-nous sur Twitter
<http://twitter.com/PourlaScience>
-  Abonnez-vous à nos flux RSS
<http://bit.ly/pls-rss>
-  Recevez nos lettres d'information
<http://bit.ly/pls-newsletters>
-  Visitez notre site Internet
<http://www.pourlascience.fr>



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,

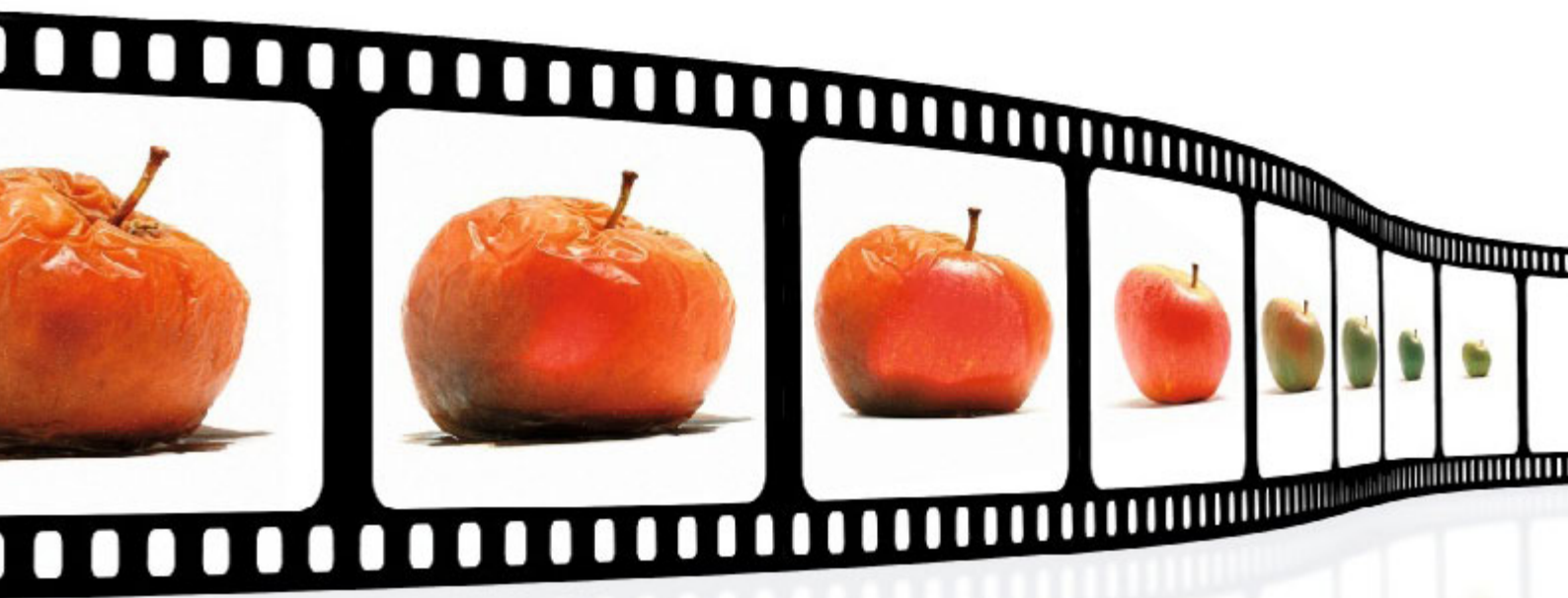
comme les trois coordonnées d'espace, l'une des variables qui figurent dans les lois décrivant un phénomène tel que le mouvement d'une particule ou la propagation de la chaleur dans un matériau.

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)