

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.

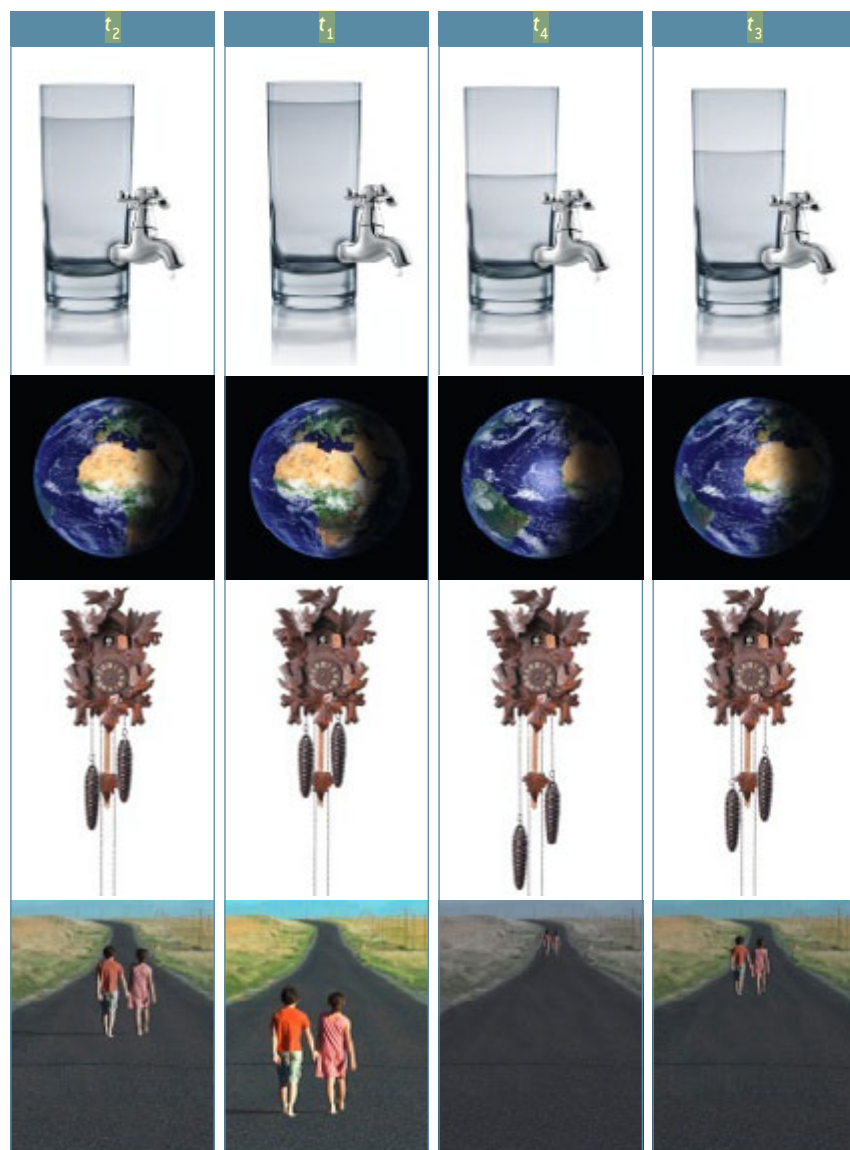
Petit à petit, nous avons fini par comprendre la signification physique de cette absence de la variable  $t$  : le postulat newtonien de l'existence d'une variable inobservable nommée « temps » n'est ni nécessaire ni possible quand on tient compte à la fois de la mécanique quantique et de la relativité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

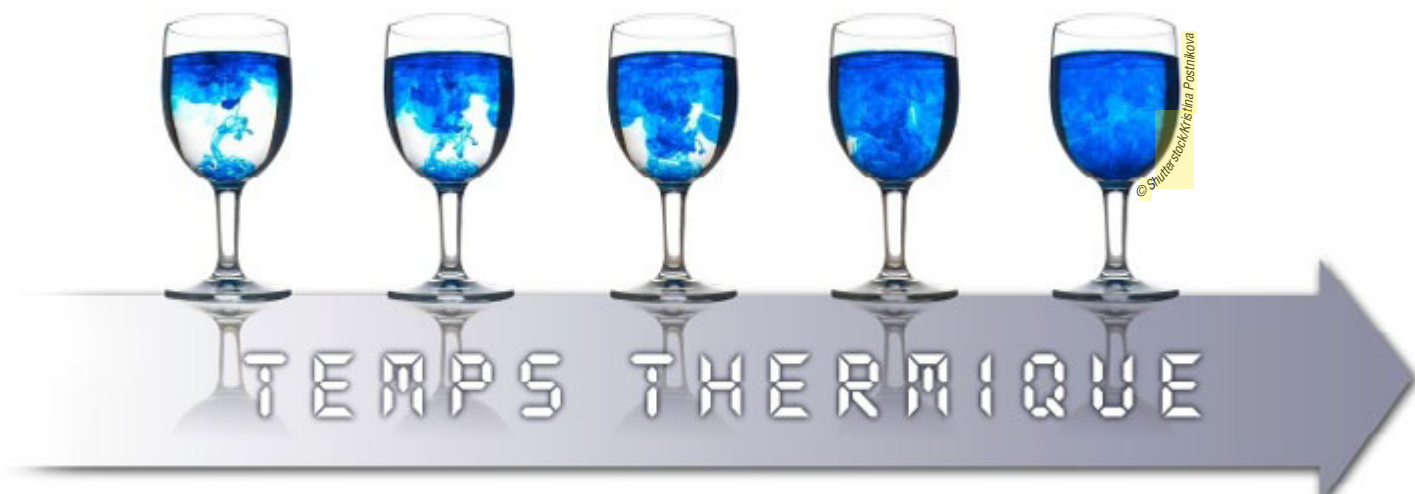
les couleurs, le temps n'existe que dans certains contextes, et il émerge de notre propre perspective, particulière et limitée, sur la réalité. Pour comprendre le monde dans un contexte plus vaste que celui de notre petit jardin, il faut oublier le temps.

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, Sator, 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<sup>e</sup> 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