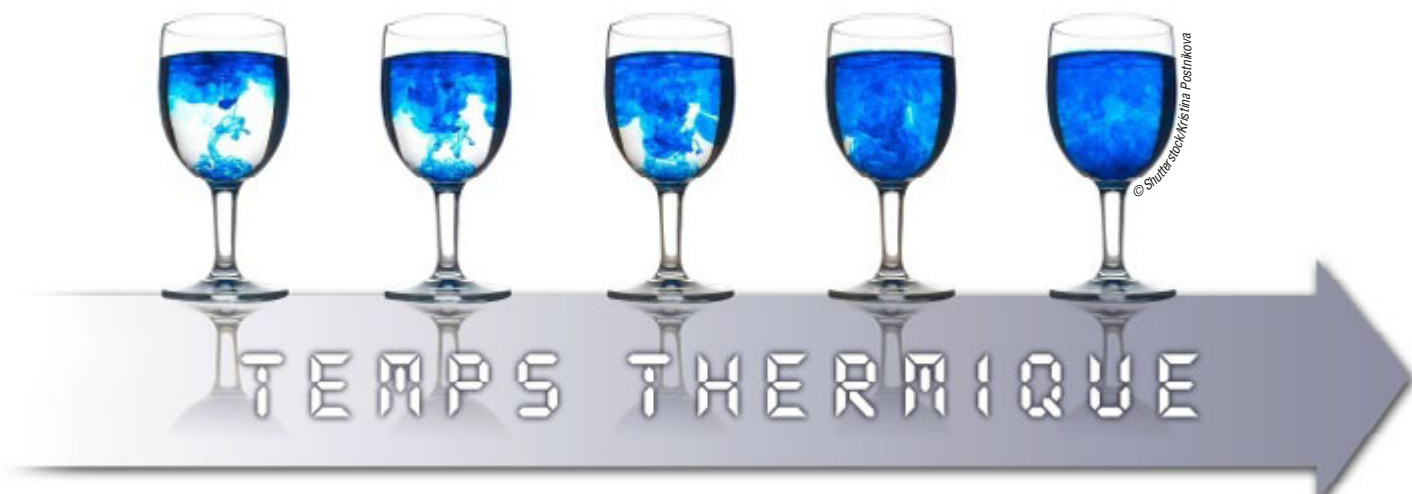




3. LES SYSTÈMES THERMODYNAMIQUES évoluent de façon irréversible, comme l'illustre ici la diffusion d'un colorant dans un verre d'eau. La notion intuitive que l'on a du temps serait issue du comportement de tels systèmes : c'est l'hypothèse du temps thermique. Les systèmes thermodynamiques sont des systèmes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

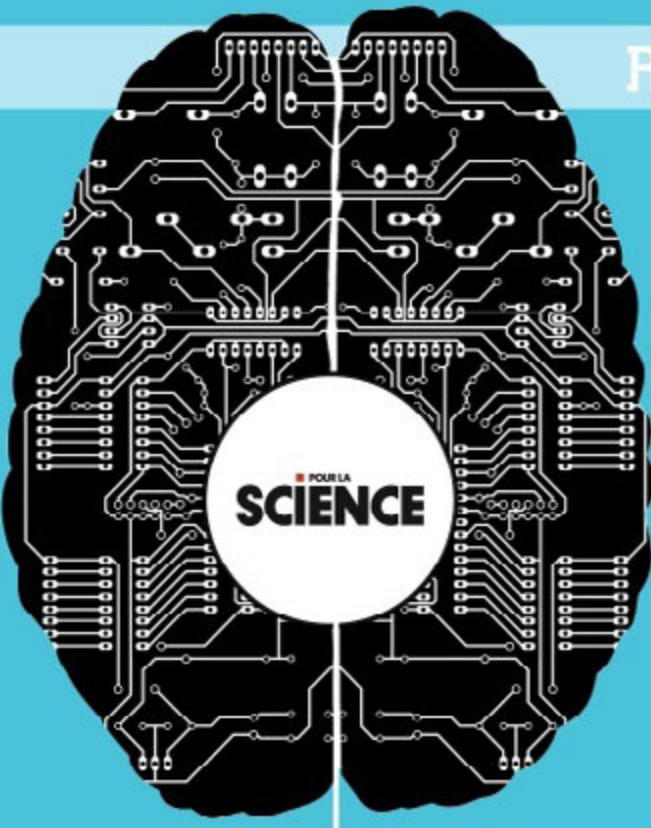
Le temps, effet de notre ignorance ?

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>

© Pour la Science - n° 397 - Novembre 2010

Physique théorique [55



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-