

DE QUOI LA FLECHE DU TEMPS EST-ELLE LE NOM ?

*Etienne KLEIN
DSM/LARSIM
Centre d'Etudes de Saclay
91191 Gif sur Yvette cédex
France*

Il y a au moins un paradoxe autour du mot temps : alors qu'il ne donne lieu à aucune difficulté quand il est engagé dans le train rapide d'une phrase ordinaire, il devient très embarrassant dès qu'on le retire de la circulation pour l'examiner à part. Aussitôt qu'il est isolé des mots qui l'entourent, dès qu'il est extrait du flux verbal où on l'a mis, il se venge, se change en énigme, et devient vite un tourment terrible de la pensée. Qu'est-ce au juste que le temps ? se demande-t-elle ? S'agit-il d'une substance particulière ? Existe-t-il par lui-même ? N'est-il au contraire qu'une entité secondaire émanant des relations entre événements ? Dépend-il de nous ? Est-il un produit de la conscience ? Nous ne comprenons pas comment un mot aussi familier peut engendrer des questions aussi difficiles.

On pense là à Ludwig Wittgenstein qui, après beaucoup d'autres, posa la question :

Qu'est-ce que le temps ?

Et répondit :

– L'erreur réside déjà dans la question : comme si la question était : de quoi, de quel matériau est fait le temps, comme on dit, par exemple, de quoi est fait cet habit fin ?

Mais – miracle -, dès qu'on insère le mot temps dans une phrase sans s'appesantir sur lui, ces questionnements semblent s'évanouir et tout redevient limpide. En somme, serait-ce grâce à la grande vitesse de notre passage sur les mots, et seulement grâce à elle, que nous parvenons à nous comprendre lorsque nous parlons du temps ?

Saint Augustin est le premier à avoir, sinon éprouver, du moins exprimer le sentiment d'hébétude que nous éprouvons en constatant que, malgré notre conscience du temps, celui-ci demeure abstrait et insaisissable. Il est aussi celui qui, par un travail critique inaugural, est parvenu à élaborer les « bonnes questions », dont certaines continuent de se

poser alors même que les Galilée, Newton, Einstein et autres Boltzmann ont profondément remanié la façon dont nous comprenons les liens du temps à l'espace, au mouvement, au changement, aux phénomènes, aux événements.

Le temps victime du langage

Saint Augustin avait d'abord remarqué que notre pensée du temps est victime d'abus de langage : « nous avons bien peu de locutions justes, beaucoup d'inexactes ». On ne peut que lui donner raison, d'autant qu'en la matière la situation a empiré. La polysémie du mot « temps » s'est tellement déployée qu'il sert à désigner tout aussi bien la succession, la simultanéité, la durée, le changement, le devenir, l'urgence, l'attente, l'usure, la vitesse, le vieillissement, les révolutions géologiques qui finissent par affecter nos visages, et même l'argent ou la mort... Cela fait à l'évidence trop pour un seul mot. Un décrassage sémantique s'impose donc, qu'en termes élégants Paul Valéry appelait à un « nettoyage de la situation verbale ».

Mais même si l'on procédait à un tel nettoyage, il serait illusoire d'espérer saisir la vérité du temps seulement à partir de notre façon de le dire ou de l'expérience que nous en avons.

Est-ce qu'on peut mieux réussir à partir de la physique ? Sans doute, mais en gardant à l'esprit une réserve en forme de question : par quel cheminement intellectuel, et en vertu de quelle conception préalable du temps Newton a-t-il choisi d'appeler la variable t « le temps » ? Il aurait pu la nommer autrement, dès lors que ce temps physique n'a pas les propriétés que nous attribuons d'ordinaire au temps : par exemple, il n'a pas de vitesse d'écoulement, il n'a pas les propriétés des phénomènes qui se déroulent en son sein alors que nous parlons du temps comme s'il se confondait avec les phénomènes temporels, il ne change pas au cours du temps, c'est-à-dire ne dépend pas de lui-même, etc...

Mais si l'on admet que le temps physique est un temps plus authentique que les autres, alors les formalismes de la physique peuvent devenir une base théorique depuis laquelle on peut procéder à une critique du langage, et peut-être même faire des « découvertes philosophiques négatives », c'est-à-dire éclairer, voire critiquer nos façons de penser.

Cours du temps *versus* flèche du temps

Les formalismes de la physique sont essentiellement constitués d'équations. Celles-ci condensent des relations fondamentales, traduisent des propriétés essentielles, révèlent des choses plus profondes sans doute que ce que nos discours humains, aussi subtils soient-ils, sont capables d'exprimer ; sans doute sont-elles même plus intelligentes que nous. Mais, bien sûr, les équations ne parlent pas d'elles-mêmes, en tout cas pas au sens usuel du terme.

Alors que pourrions-nous dire du temps et du devenir qu'elles diraient si elles pouvaient parler ?

S'il fallait répondre à cette question en quelques mots, voici ce que je proposerai : La physique moderne s'est construite en opérant dans ses formalismes une distinction entre le temps et le devenir, ou plus exactement entre le *cours du temps* et la *flèche du temps*. Dès sa naissance, c'est-à-dire dès la mise sur pied de la mécanique newtonienne, elle a élaboré un temps épuré, un temps « maigre », débarrassé de la surcharge pondérale en provenance des phénomènes, un temps qui n'a pas besoin que quelque chose se passe pour passer. L'efficacité opératoire de la physique et ses succès expérimentaux sont devenus si impressionnants qu'on est en droit de considérer que la distinction qu'elle établit entre temps et devenir constitue une découverte philosophique négative de première importance, dont il faudrait prendre acte.

En termes simples, le cours du temps est ce qui permet d'établir un écart (mais pas une différence de nature) entre les instants du passé et ceux du futur : dans le temps, *demain* n'est pas situé à la même place qu'*hier*, ils sont séparés l'un de l'autre par une certaine durée. La flèche du temps, quant à elle, est la manifestation du devenir. Elle exprime le fait que certains systèmes physiques évoluent de façon irréversible : ils ne retrouveront jamais dans le futur les états qu'ils ont connus dans le passé : *leur* demain – l'état qu'ils auront demain - ne ressemblera pas à *leur* hier – à l'état qu'ils avaient hier.

Le cours du temps et le devenir sont non seulement distingués l'un de l'autre dans le cadre de la physique conventionnelle, mais aussi presque opposés l'un à l'autre. Car le cours du temps peut être considéré, dans une certaine mesure, comme ce qui se soustrait à toute forme d'évolution, au sens où il ne change jamais sa façon d'*être* le temps. Il est homogène. Tous ses instants ont le même statut. En définitive, le temps semble pouvoir exister sans le changement. À supposer, par exemple, une espèce de mort thermique de l'univers, où plus rien ne bougerait ni ne changerait, le temps serait-il pour autant aboli ? Cela n'aurait-il aucun sens de se demander *depuis combien de temps* rien ne change ?

Lorsqu'elle est présente, la flèche du temps advient *de surcroît*, en « habillant » le cours du temps (irréversible) de phénomènes irréversibles. Les physiciens sont parvenus à identifier, non sans difficultés, de possibles explications à l'irréversibilité des phénomènes. Comme nous le verrons, toutes présupposent l'existence préalable d'un cours du temps établi, au sein duquel des phénomènes temporellement orientés, c'est-à-dire ne pouvant se produire dans les deux sens, viennent prendre place.

En avançant, le cours du temps n'évolue pas lui-même, de sorte qu'il permet de penser l'idée de permanence : la variable temps ne dépend pas du temps. La flèche du temps, elle,

est la véritable expression du devenir, sa marque déposée. Elle se manifeste dans le cours du temps, qu'elle n'affecte en rien mais qu'elle colonise de phénomènes, irréversibles le plus souvent. L'idée de cours du temps précède donc, en un certain sens, celle de devenir. C'est d'ailleurs ce que suggère le deuxième principe de la thermodynamique : pour pouvoir dire que l'entropie d'un système isolé subissant une transformation spontanée ne peut que croître au cours du temps, il faut supposer implicitement que la transformation considérée se produit le long de la direction du temps qui nous transporte depuis notre « passé » jusqu'à notre « futur », et non dans la direction inverse. Il faut avoir préalablement défini un cours du temps.

Le cours du temps et la contrainte causale

Pour penser la causalité, le mieux est sans doute de partir du « vertige » qui nous saisit dès que nous voulons comprendre le rôle de la causalité dans la nature, vertige fort bien résumé par Emile Meyerson dans les termes suivants : « Les phénomènes naturels se suivent et semblent se commander : la cause entraîne l'effet. Mais comment cela se fait-il ? Quel est le lien qui relie l'effet à la cause, et y a-t-il même un lien, un ciment qui les rattache l'un à l'autre ou s'agit-il, comme Hume a cru pouvoir le démontrer, d'une pure illusion de l'esprit, née de ce que nous avons l'habitude de les voir se poursuivre dans le temps et que nous transposons cette constatation en nécessité, en transformant la *séquence* en *conséquence*¹. » La causalité serait en somme la tentation en notre esprit qui nous pousse à considérer toute séquence d'événements comme le déroulement temporel d'une suite concaténée dont le dernier événement serait la conséquence directe ou indirecte du premier. Quelque chose dans notre entendement réclamerait de voir le monde comme une vaste chaîne causale. C'est du moins ce que pensait David Hume qui parlait du concept de causalité comme de l'un des trois principes d'association fondamentaux (avec la ressemblance et la contiguïté), principe qui serait « pour nous le ciment de l'univers ».

Mais sous ses airs badins, la notion de causalité pose d'épineux problèmes qui sont peut-être comme le contrepoint des problèmes posés par les notions de hasard et de contingence. Car les notions de hasard et de causalité sont connectées au sens où chacune d'elles se déploie dans l'ombre de l'autre : l'usage de la notion de hasard est presque

¹ Emile Meyerson, « Philosophie de la nature et philosophie de l'intellect », 1934, Revue de Métaphysique 41, p. 115.

toujours lié à une difficulté de l'explication causale. On pourrait presque dire que le hasard est en quelque sorte le *purgatoire de la causalité*.

Il existe de multiples théories de la causalité. Pour certains philosophes, à commencer par David Hume, la causalité n'est qu'une simple conjonction constante : P cause Q si Q survient toujours si P précède. Selon cette conception, le lever du soleil serait la cause de son coucher qui serait lui-même la cause de son lever, de sorte que cause et effet seraient solidairement imbriqués dans la même répétition.

Pour d'autres, la causalité peut être ramenée à une dépendance contrefactuelle entre deux événements : si la cause n'avait pas existé, l'effet n'aurait pas existé non plus.

Pour d'autres encore, la causalité se réduit à une augmentation de probabilité : l'effet est plus probable lorsque la cause est présente que lorsqu'elle est absente. C'est la thèse notamment défendue par Huw Price², selon laquelle la causalité est affaire de stratégie de l'agent (politique ou économique) : les causes sont des moyens que les agents utilisent pour produire des effets. Dans un contexte d'indéterminisme, cette conception survit dans une forme affaiblie : les causes sont des moyens que les agents utilisent pour rendre les effets plus probables.

Pour d'autres encore, la causalité ne peut se penser qu'en termes d'un mécanisme par lequel la cause transmet quelque chose à l'effet. Elle est une sorte de « transfert », un transfert de quelque chose entre la cause et l'effet, de quelque chose qui unit ou colle la cause à l'effet. Max Kistler définit ainsi la causalité : « Deux événements *c* et *e* sont liés comme cause et effet si et seulement s'il existe au moins une grandeur physique P, soumise à une loi de conservation, exemplifiée dans *c* et *e*, et dont une quantité déterminée est transférée entre *c* et *e*. »³ La causalité devient là une sorte de ciment dynamique qui scelle deux événements successifs.

Bien sûr, on ne peut pas ne pas parler de Kant qui, dans la *Critique de la raison pure*, a tenté une formalisation rigoureuse du principe de causalité. Dans la « deuxième analogie de l'expérience », il pose la question suivante : Qu'est-ce qui distingue une succession objective d'une succession subjective ? C'est que, répond Kant, dans une succession subjective, la synthèse de mes représentations se fait selon un ordre arbitraire et qui peut être modifié à ma fantaisie, tandis que dans une succession objective, au contraire, l'ordre est déterminé. Pour étayer son argumentation, Kant compare deux perceptions, celle d'un bateau descendant un fleuve et celle d'une maison : « Quand je vois un bateau descendre le

² Huw Price, « Agency and Probabilistic Causality », *British Journal for the Philosophy of Science* 42 (1991), P. 157-176.

³ Max Kistler, *Causalité et lois de la nature*, p. 282.

cours d'un fleuve, ma perception de la position qu'il occupe en aval du courant du fleuve est postérieure à la perception de la position qu'il occupait en amont, et il est impossible que, dans l'appréhension de ce phénomène, le bateau puisse être perçu d'abord en aval et ensuite en amont du courant. L'ordre dans la série des perceptions qui se succèdent dans l'appréhension est donc ici déterminé et cette appréhension est liée à cet ordre⁴. »

Mais, poursuit Kant, si c'est une maison que je regarde, et non plus un bateau descendant un fleuve, « mes perceptions dans l'appréhension peuvent commencer au sommet et finir par le sol ; je peux aussi les faire partir du bas et m'arrêter en haut, et également appréhender par la droite et par la gauche le divers de l'intuition empirique. Dans la série de ces perceptions il n'y a pas d'ordre déterminé qui m'obligerait à commencer par un côté ou par un autre pour lier empiriquement le divers⁵. » En d'autres termes, il y a de l'arbitraire dans l'ordre de mes perceptions des différentes parties d'une maison, arbitraire qui n'existe pas dans le cas d'un bateau descendant un fleuve.

Kant appuie la succession objective sur la nécessité causale. La cause et l'effet ne sont pas dans le temps. C'est bien plutôt le temps qui est sous-tendu par le rapport de causalité et qui en devient un facteur complémentaire. La causalité agit en amont de la succession temporelle qui l'incarne et la rend manifeste : c'est elle qui organise un ordre objectif dans le temps en tissant le fil des séquences où s'enchaînent les événements. Elle se pose ainsi en règle absolue de la détermination dans le temps : l'effet ne survient pas seulement *à la suite* de la cause, il est posé par cette dernière et il en *résulte*.

Kant distingue subtilement cet « ordre du temps » du « cours du temps ». L'ordre du temps fixe l'antériorité logique de la cause sur l'effet, tandis que le cours du temps « temporalise », ou « étale dans le temps », le lien de cause à effet. « La plus grande partie des causes efficientes dans la nature existent en même temps que leurs effets, écrit-il, et la succession dans le temps de ceux-ci tient uniquement à ce que la cause ne peut pas produire tout son effet en un moment. Mais dans le moment où l'effet commence à se produire, il est toujours simultané avec la causalité de sa cause, puisque, si cette cause avait cessé d'être un instant auparavant, l'effet n'aurait pas pu se produire. Il faut bien remarquer ici qu'il s'agit de l'*ordre* du temps et non de son *cours* : le rapport demeure, même s'il ne s'est pas écoulé de temps. ».

Lorsque la causalité est en jeu, les phénomènes concernés se déroulent selon un ordonnancement précis, qui se manifeste par le biais d'une chronologie objective, c'est-à-dire la même pour tous les observateurs. La physique a explicité cet ordre du temps et l'a

4. Emmanuel Kant, *Critique de la raison pure*, Paris, PUF, 1971, p. 184.

intégré dans ses divers formalismes, où il joue comme nous allons le voir un rôle à la fois structurant, spectaculaire et crucial.

Les implications de la causalité en physique

Qu'en est-il de la causalité en physique ? La notion de cause y a également posé des problèmes aux physiciens, qui ont d'ailleurs fini par quasiment l'abandonner. Ils ne l'invoquent en tout cas presque plus de façon explicite, même si le concept de cause demeure présent dans certains discours. La cause en est, si j'ose dire, que comme l'a remarqué Bertrand Russel en usant d'une jolie formule, il en va du concept de cause « comme de la monarchie anglaise, à savoir qu'on ne l'a laissé survivre que parce qu'on suppose à tort qu'elle ne fait pas de dégâts »⁶... Russel prend l'exemple de la loi de gravitation pour montrer comment celle-ci aplatit la notion de causalité. « Dans les mouvements des corps gravitant ensemble, il n'y a rien qui puisse être appelé une cause, et il n'y a rien qui puisse être appelé un effet : il y a là simplement une formule qui permet de calculer la configuration du système à n'importe quel instant ».

Après avoir joué un rôle essentiel dans la physique des XVII^e et XVIII^e siècles, l'idée de cause a vu son importance décliner au XIX^e siècle, avec son effacement au profit de la notion de « loi », et aussi avec l'assouplissement du déterminisme du fait de l'apparition des probabilités en physique statistique. Au XX^e siècle, la physique quantique lui a porté le coup de grâce. En effet, l'usage que cette physique fait des probabilités interdit qu'on puisse parler, à propos des processus quantiques, de cause au sens strict du terme. Et c'est ainsi que, de fil en aiguille, l'idée de cause semble avoir été évacuée des théories scientifiques et s'est résorbée dans la dynamique même des systèmes. Pourtant le principe de causalité, lui, reste vivace. Désormais épuré de l'idée de cause, il a permis l'élaboration des théories de la physique moderne (physique quantique et relativité) en imposant un ordre obligatoire et absolu entre divers phénomènes, sans que l'un puisse être présenté comme la cause de l'autre.

En pratique, le principe de causalité se décline dans les différents formalismes de la physique : il s'adapte à chacun d'eux, y prend une forme qui dépend de la façon dont les événements et les phénomènes sont représentés. Ses conséquences sont toujours contraignantes. Elles s'expriment sous la forme d'interdictions ou de prédictions, qui peuvent et doivent être confrontées à l'expérience. Celles-ci dépendent de façon cruciale de la théorie qu'on considère. En physique newtonienne, la causalité implique que le temps est

5. *Ibid.*, p. 185.

linéaire et non cyclique (ce qui suffit à assurer qu'un effet ne peut pas rétroagir sur sa propre cause). En relativité restreinte, elle interdit qu'une particule puisse se propager plus vite que la lumière dans le vide (ce qui suffit à exclure les voyages dans le passé). En physique quantique non relativiste, elle est garantie par la structure même de l'équation de Schrödinger⁷. En physique des particules, elle a permis de prédire l'existence de l'antimatière. Plus précisément, et pour ceux qui connaissent le jargon de la théorie des champs, la causalité s'exprime au moyen de règles de commutation des opérateurs de champs. Un opérateur de création $\Psi^*(x)$ d'une particule au point d'espace-temps x et l'opérateur d'annihilation de cette même particule $\Psi(y)$ au point d'espace-temps y doivent commuter pour une séparation de x et de y du genre espace et ne pas commuter pour une séparation du genre temps : ces règles empêchent une particule de se propager sur une ligne du genre espace (ce qui voudrait dire que la particule se propagerait plus vite que la lumière) et, pour la propagation sur une ligne du genre temps, garantissent que la création de la particule a précédé son annihilation. Ces règles ne peuvent être satisfaites que si la décomposition en ondes planes des opérateurs de champ comporte des modes de fréquence négative. Que faire de ces modes qui, en physique quantique, correspondent à des énergies négatives, c'est-à-dire à des particules qui remontent le cours du temps ? On les réinterprète tout simplement comme étant des *antiparticules* qui suivent le cours normal du temps. Particule et antiparticule doivent avoir la même masse et des charges électriques opposées. Le concept d'antiparticule, et celui d'antimatière en général, est donc le prix à payer pour que la théorie quantique des champs soit compatible avec la relativité et la causalité.

De façon plus large, la causalité s'explique formellement aujourd'hui par le biais de « l'invariance CPT » à laquelle doit obéir la dynamique des phénomènes physiques. Qu'exprime cette invariance CPT ? Le fait que les lois physiques qui gouvernent notre monde sont rigoureusement identiques à celles d'un monde d'antimatière observé dans un miroir et où le temps s'écoulerait à l'envers. Elle a notamment comme conséquence que la masse et la durée de vie des particules doivent être strictement égales à celles de leurs antiparticules. Dans sa formulation même, cette invariance rend explicite le lien qui existe entre causalité et antimatière.

⁶ B. Russel, *The Concept of Cause*, dans *Mysticism and logic*, London, 1986, p. 173.

⁷ En physique quantique, le Hamiltonien est l'opérateur mathématique qui permet de décrire l'évolution d'un système physique au cours du temps. L'équation de Schrödinger fait jouer à cet opérateur le rôle de générateur infinitésimal des translations dans le temps, ce qui garantit le respect de la causalité.

Ainsi, le principe de causalité qui, comme on vient de le voir, a été très largement apuré de l'idée même de cause, pourrait être avantageusement rebaptisé « principe d'antécédence » ou « principe de protection chronologique ».

Ces diverses déclinaisons et implications du principe de causalité, si on laisse de côté leurs aspects les plus techniques, sont claires. Si claires même, qu'elles tendent à masquer une difficulté conceptuelle redoutable. En effet, la notion de causalité ne semble pouvoir être pensée, ni même définie, indépendamment des événements qui viennent l'incarner. De là une certaine ambiguïté de son lien avec le cours du temps, considéré comme indépendant des phénomènes : si celui-ci est contraint par le principe de causalité, cela signifie qu'il est indirectement « contaminé » par les phénomènes causalement reliés qui se déroulent en son sein. En d'autres termes, et malgré la distinction établie entre cours du temps et phénomènes temporels, on s'aperçoit que le principe de causalité vient (partiellement) les ré-amalgamer.

De plus, il se pourrait que cette relation temps-causalité soit un jour inversée ou renversée, du moins si l'on en croit certaines théories à l'ébauche aujourd'hui, qui tentent de construire une théorie quantique de la gravitation.

D'où provient la flèche du temps ?

Nous avons pu constater que la physique a donné au cours du temps un statut limpide. Il traduit une première sorte d'irréversibilité, celle du temps même. Mais d'où vient que certains phénomènes temporels soient irréversibles et d'autres réversibles ? Lorsqu'un phénomène est irréversible, en d'autres termes lorsqu'une flèche du temps se manifeste, quelle en est l'origine ?

Car la flèche du temps n'est pas d'emblée présente dans les formalismes fondamentaux de la physique ! Ni en mécanique classique, ni en physique quantique, ni en théorie de la relativité ! Dès lors, comment l'appréhender ? D'où pourrait-elle bien provenir ?

L'interrogation a débuté voilà seulement un petit siècle et demi. C'est alors que des physiciens ont commencé à se demander si les phénomènes physiques pouvaient ou non « se dérouler dans les deux sens » : un processus dynamique capable de faire passer un système de l'état A à l'état B peut-il le faire passer de l'état B à l'état A ? Cette question est bien plus qu'une question, c'est une énigme, née de la conjonction de deux constats en apparence contradictoires :

1. Nous observons quotidiennement, autour de nous, de très nombreux processus physiques, dont les processus inverses correspondants n'ont soit jamais été observés, soit sont exceptionnels. Il s'agit donc, par définition, de phénomènes irréversibles.

2. Toutes les lois dynamiques qui gouvernent ces processus ne contiennent pourtant aucune asymétrie temporelle, c'est-à-dire qu'elles s'exprimeraient de la même façon si le cours du temps s'écoulait en sens inverse. Si elles permettent à un processus de se réaliser dans une direction du temps, elles permettent aussi qu'il se réalise dans l'autre : les états initial et final peuvent échanger leur rôle. On dit de telles équations qu'elles sont « invariantes par renversement du temps ». Tout se passe comme si le devenir ne « mordait » pas sur les processus qu'elles décrivent. Si un système peut passer de l'état A à l'état B, il doit aussi pouvoir passer de l'état B à l'état A : la flèche du temps ne le concerne pas. Pour reprendre un exemple célèbre, évoqué par Einstein, « imaginons que l'on ait filmé le mouvement brownien d'une particule et que l'on ait conservé les images dans leur suite chronologique correcte ; seulement, on a oublié de noter si la suite temporelle correcte va de A à Z, ou bien de Z à A. L'homme le plus malin sera incapable de trouver la direction du temps à partir de ce matériel. Résultat : ce qui se passe dans le mouvement de cette particule à l'équilibre thermodynamique ne renferme aucune flèche du temps⁸. »

Dès lors, comment se fait-il qu'il y ait des phénomènes irréversibles ? D'où vient qu'il y ait une flèche du temps, c'est-à-dire une asymétrie dans la dynamique de certains systèmes que nous observons, alors que les équations de la physique n'en prévoient aucune ?

Mettons les points sur les i : répondre à cette question ne consiste pas à expliquer la « direction du temps », à dire les raisons pour lesquels il s'écoule dans tel sens plutôt que dans tel autre, encore moins à expliquer pourquoi nous ne nous souvenons pas du futur. Le problème posé concerne uniquement l'*asymétrie des processus physiques* au cours du temps, non l'asymétrie du cours du temps lui-même. Une analogie spatiale nous aidera à illustrer cette distinction cruciale. Imaginons une salle, très longue, dont la géométrie est parfaitement symétrique (songeons à un parallélépipède) : tous les murs en vis-à-vis sont identiques. Supposons maintenant que les chaises disposées dans cette salle soient toutes orientées dans le même sens. Le problème consistera alors à tenter d'expliquer l'asymétrie de la disposition des chaises, et non l'asymétrie de la salle elle-même. De la même façon, la flèche du temps correspond à une asymétrie des « contenus » du temps, c'est-à-dire des phénomènes temporels, non à une asymétrie du « contenant » lui-même, c'est-à-dire du cours du temps.

Des décennies durant, des physiciens se sont cassé les os du cerveau pour apporter des éléments de réponse à cette énigme. Au bout du compte, ils mettent en avant quatre

⁸ Albert Einstein, *Correspondance avec Michele Besso*, « Lettre du 29 juillet 1953 », Paris, Hermann, 1979, p. 291.

registres d'arguments, subtils et délicats, permettant de cerner les origines de la flèche du temps. Nous les rappellerons brièvement⁹ :

– *Le second principe de la thermodynamique*, c'est-à-dire la croissance de l'entropie pour les systèmes isolés. Dans l'interprétation de Boltzmann, qui lui est sous-jacente, il n'existe pas de flèche du temps au niveau microscopique, mais le niveau macroscopique crée l'illusion qu'il y en a une (c'est le sens profond du théorème H de Boltzmann).

– *L'opération de mesure en physique quantique*, qui fait l'objet de débats passionnés depuis bientôt quatre-vingts ans. Elle est en général interprétée comme un processus temporellement asymétrique. Lorsqu'une particule est représentée par un vecteur d'état qui s'écrit sous la forme d'une somme de plusieurs termes, ses propriétés physiques sont indéterminées au sens où l'on ne peut pas leur attribuer une valeur définie qui soit certaine. Le vecteur d'état contient seulement toutes les possibilités du système, et il ne permet pas de calculer davantage que la probabilité que telle ou telle valeur soit sélectionnée au hasard à l'issue d'une mesure. Si une mesure est effectuée, une seule des possibilités contenues dans le vecteur d'état s'actualise, de sorte que le vecteur d'état n'est plus le même après la mesure : il y a eu « réduction du paquet d'ondes », et ce processus est irréversible¹⁰.

– *La « violation de la symétrie CP » lors de certains phénomènes régis par l'interaction nucléaire faible* : certaines particules instables, par exemple celles qu'on appelle les « kaons neutres », ne se comportent pas exactement comme leurs antiparticules, contrairement à ce qu'impose la symétrie dite « CP » (qui exige que notre univers ne soit pas modifié si toutes les particules étaient soudainement transformées en leurs antiparticules, et réciproquement). Plus précisément, elles ne se désintègrent pas en d'autres particules au même rythme que leurs antiparticules. Cela signifie qu'elles se désintègrent selon une loi temporellement asymétrique. La raison profonde de cette asymétrie temporelle, qui demeure délicate à interpréter, n'est pas bien comprise. Si elle n'a pas obligé les physiciens à modifier, dans la théorie, le statut même du temps, elle pose la question de l'existence d'une « flèche du temps » à l'échelle microscopique, qui est elle aussi ardemment débattue ;

– *L'expansion de l'univers*, qui rendrait impossible tout retour d'un système à son état initial du fait que l'univers lui-même a évolué ; cela peut sembler contradictoire, car les équations de la relativité générale sont temporellement symétriques, mais en réalité leurs solutions cosmologiques, celles qui sont censées régir l'évolution de l'univers, ne le sont pas.

⁹ Pour le lecteur qui voudrait en savoir plus, ces arguments sont explicités dans *Les Tactiques de Chronos*, *op. cit.*, p. 125-145.

¹⁰ Pour approfondir la question, voir Étienne Klein, *Petit voyage dans le monde des quanta*, Paris, Flammarion, 2004.

L'univers qu'elles décrivent est soit en expansion, soit en contraction, ce qui se manifeste par l'existence d'une flèche du temps cosmique, liée aux conditions aux limites de l'univers. Certains théoriciens, notamment Stephen Hawking et Roger Penrose, pensent que cette flèche pourrait être la flèche « maîtresse » de toutes les autres, mais tous les physiciens ne partagent pas ce point de vue.

Nous en avons assez dit pour nous permettre deux remarques.

La première est de loin la plus importante dans le cadre de notre propos : ces tentatives d'explication de la flèche du temps mobilisent des arguments qui diffèrent tous des contraintes que le principe de causalité impose au cours du temps (temps linéaire, impossibilité de dépasser la vitesse de la lumière dans le vide, existence de l'antimatière, invariance CPT). ***En définitive, les façons de rendre compte du cours du temps ne recouvrent jamais les façons de justifier la flèche du temps***, du moins au sein des théories utilisées couramment par les physiciens. C'est l'indice – mieux, la démonstration, si l'on veut bien tenir compte de l'extraordinaire efficacité des théories physiques dont il est ici question – que cours du temps et flèche du temps sont deux choses distinctes pour la physique contemporaine : l'irréversibilité des phénomènes ne provient pas de l'irréversibilité du temps, et *vice versa*.

La seconde remarque est plutôt un constat : aucune des explications données à la flèche du temps n'est à même de constituer une véritable théorie, c'est-à-dire une construction qui reposerait sur un système hypothético-déductif. Il s'agit plutôt d'une *interprétation* de telle ou telle théorie physique, et non d'une *incorporation* au sein de tel ou tel formalisme. Il n'existe d'ailleurs pas de théories physiques opératoires au sein desquelles le devenir soit d'emblée intégré (par l'entremise d'équations fondamentales irréversibles). Dès lors, la façon dont on peut rendre compte du devenir en physique ne peut être qu'une affaire de lecture – ou d'exégèse – de théories qui ne l'incluent pas dans leurs principes. Ainsi, par construction, les interprétations de l'origine de la flèche du temps en viennent-elles à mêler physique et philosophie. Elles sont de ce fait discutables, et d'ailleurs ardemment discutées. Discussions qui ne sont pas sans rappeler le débat entre les tenants de Parménide et ceux d'Héraclite. Certains physiciens pensent qu'il ne s'agit que d'un faux problème : au motif que nulle flèche du temps n'apparaît dans les équations fondamentales de la physique, ils considèrent, comme Parménide, que le devenir n'est que pure apparence, intimement lié à la façon dont nos sens limités nous permettent de percevoir le monde. D'autres, dans la lignée héraclitienne, considèrent que la physique actuelle, ne pouvant rendre compte explicitement du devenir, est soit fautive, soit incomplète – une sorte d'idéalité.

Les deux points de vue se défendent, à condition de bien s'entendre sur le sens des mots. Et de ne pas prétendre, comme le fait Ilya Prigogine, que la physique a nié le temps au seul motif que ses formalismes n'incorporent pas de flèche du temps. Car, à défaut d'intégrer le devenir directement dans ces principes, elle incorpore toujours le cours du temps, même si elle n'explicite pas son moteur ! On peut donc tout à fait déplorer que la physique n'intègre pas d'emblée le devenir – mieux, suggérer comment elle pourrait lui donner une place dans ses formalismes –, mais certainement pas lui reprocher d'avoir oublié le cours du temps.

Plusieurs personnes avaient d'ailleurs tenté d'alerter Ilya Prigogine sur ce point, notamment le mathématicien René Thom. Dans un film récent de Joan Ubeda, *Dimension Dali*, on découvre plusieurs scènes d'un colloque international que Salvador Dali organisa chez lui en 1985, peu de temps avant sa mort. Intitulé « Culture et sciences : déterminisme et liberté », ce symposium rassembla durant plusieurs jours philosophes, artistes et scientifiques venus du monde entier, parmi lesquels René Thom et Ilya Prigogine. Ils s'étaient déjà affrontés par articles interposés, mais se rencontraient pour la première fois. Prigogine donna une communication sur le temps, à la suite de laquelle les deux hommes eurent un échange extrêmement vif. Principal argument de René Thom : la possibilité d'inverser « sur le papier » le signe du temps dans une équation de la physique n'implique nullement celle de renverser « physiquement » le sens du temps. Seule la direction des phénomènes peut être physiquement inversée, non celle du cours du temps¹¹. Wittgenstein l'avait dit à sa façon, éclairante, dès les années 1930 : « Ce qu'on dit ordinairement sur le "sens du temps" et la loi de l'entropie revient à ceci que le temps changerait son sens si les gens commençaient un jour à marcher à reculons. Si l'on veut, on peut appeler cela ainsi ; mais il faut seulement, à ce moment-là, avoir les idées claires sur le fait qu'on ne dit par là rien de plus que : les hommes ont changé le sens de leur marche¹² ». Le renversement des mouvements n'équivaut jamais, en effet, à un renversement du temps.

Quelle leçon tirer de cet épisode ? Qu'un vocabulaire mieux choisi, une rigueur conceptuelle plus grande permettraient sans doute de traduire comment les différentes

¹¹ Prigogine ne semble pas avoir été pris acte de cette remarque, pourtant fondamentale, de René Thom. À une lettre de remerciement que Dali lui adressa après le symposium, il répondit par ces mots, qui montrent qu'il persistait à penser que la physique nie vraiment le temps : « Votre conception de l'espace-temps est, d'un certain point de vue, plus actuelle que celle d'Einstein. Dans l'œuvre d'Einstein, on spatialise le temps. Vous, au contraire, vous temporalisez l'espace et je crois comprendre que le temps, dans votre œuvre, est intrinsèque aux objets et non pas ajouté, comme de l'extérieur, à des objets éternels » (Cette lettre est citée dans Louis Pauwels, *Dali m'a dit*, Paris, Carrère, 1987, p. 122).

¹² Ludwig Wittgenstein, *Remarques mêlées (1931)*, Garnier-Flammarion, 1994, p. 73.

théories formalisent le cours du temps, interprètent la flèche du temps, articulent temps et devenir. En somme de mieux penser la question du temps. « Penser, c'est être en lutte avec la langue »¹³, pour reprendre encore un propos de Wittgenstein.

Dans le cadre de la physique conventionnelle, les notions de cours du temps et de flèche du temps se fondent en somme sur deux idées différentes du changement, deux idées hétérogènes : *le changement irréversible de l'instant présent, que traduit le cours du temps ; et le changement parfois irréversible de ce qui est présent dans le présent, que traduit la flèche du temps*¹⁴.

À coup sûr, cette distinction peut sembler bien abstraite, et donc difficile à penser. Mais il est possible de l'illustrer, de la rendre visible. Observons l'œuvre de Roman Opalka qui, depuis 1965, peint chaque jour la suite des nombres entiers sur des toiles et se photographie lui-même après chaque séance de travail. La succession des nombres tracés matérialise le cours irréversible du temps, qui passe même si rien ne se passe, qui produit de l'inédit mais sans lui-même changer à mesure qu'il passe : chaque nombre écrit est certes neuf (de même que tout instant présent est radicalement neuf), mais il s'obtient toujours de la même façon, en ajoutant une unité au nombre précédent¹⁵. Quant aux photographies que l'artiste prend régulièrement de lui-même dans des conditions invariables (sur fond blanc, avec une chemise blanche, baignant dans un éclairage blanc, avec la même expression sur le visage), elles expriment la suite des changements qui affectent son corps au cours du temps, c'est-à-dire l'irréversibilité de son propre devenir. *D'une part*, le cours du temps est représenté par la succession des nombres et l'accumulation des toiles ; *d'autre part*, le devenir est représenté par la suite des photographies d'un même être changeant. Cette double représentation suffit à montrer, sinon à démontrer, que ces deux sortes d'irréversibilité, qui apparaissent toujours entremêlées au point de sembler indiscernables, sont en réalité séparables. Mais à les voir toujours se combiner et agir de conserve, nous avons tendance à les confondre, alors qu'en réalité elles ne sont jamais que superposées.

13 Ludwig Wittgenstein, *Remarques mêlées, ibid.*, p. 78.

14. Albert Lautman, un brillant mathématicien fusillé en 1944 à Bordeaux, avait déjà tenté de formaliser la différence entre ces deux notions : « Elles sont distinctes en ce sens que l'une concerne l'irréversibilité de ce que l'on pourrait appeler le temps pur, et l'autre, l'étalement dans le temps, selon cet ordre irréversible de l'avant et de l'après, des objets physiques de l'univers ». Voir Albert Lautman, *Les Mathématiques, les idées et le réel physique*, Paris, Vrin, 2006, p. 278.

15. Partant de 1 en 1965, Roman Opalka a atteint en 1972 le nombre 1 000 000. Le 22 juillet 2004, il était arrivé au nombre 5 486 028, avec – sans doute – un soupir provisoire de soulagement.

BIBLIOGRAPHIE

CALLENDER, Christopher (ed.): 2002, *Time, reality and Experience*, Cambridge, Cambridge University Press.

DAVIES, P. C. W.: 1974, *The Physics of Time Asymmetry*, Berkeley-Los Angeles: University of California Press.

DUGAS, René: 1959, *La théorie physique selon Boltzmann*, Neufchâtel, le Griffon Ed.

EDDINGTON, ARTHUR: 1928, *THE NATURE OF THE PHYSICAL WORLD*, CAMBRIDGE, CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS.

A. C. ELITZUR, S. DOLEV "BECOMING AS A BRIDGE BETWEEN QUANTUM PHYSICS AND RELATIVITY" , IN *ENDOPHYSICS, TIME, QUANTUM AND THE SUBJECTIVE*, 589-606, R. BUCCHERI ET AL (EDS), WORLD SCIENTIFIC PUBLISHING CO., 2005.

HAWKING, STEPHEN: 1994, THE NO BOUNDARY PROPOSAL AND THE ARROW OF TIME. IN HALLIWELL J. J., PÉREZ-MERCADER J., ZUREK W. (EDS.), CAMBRIDGE: *PHYSICAL ORIGINS OF TIME ASYMMETRY*, CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS.

HEIDEGGER, Martin: 1996, *Being and time*, transl. Joan Stambaugh, New York: State University of New York, 1996.

HADDAD, W. M., CHELLABOINA, V., NERSESOV, S. G.: 2005, *Thermodynamics: A Dynamical Systems Approach*. Princeton: Princeton University Press.

HAWKING, Stephen, ELLIS, G.F.R. : 1975, *The large scale structure of space-time*, Cambridge University Press, coll. "Cambridge Monographs on Mathematical Physics".

HORWICH, Paul: 1987, *Asymmetries in Time*, Cambridge, MIT Press.

KLEIN, Etienne: 2005, *Chronos, How time shapes our universe*. New York: Thunder's Mouth Press.

LINDLEY, David: 2001, *Boltzmann's Atom: the great debate that launched a Revolution in Physics*. New York: Free Press.

PENROSE, Roger: 1989, *The Emperor's New Mind*. Oxford: Oxford University Press.

PRICE, Huw: 1996, *Time's Arrow and Archimedes' Point*. New York: Oxford University Press.

PRICE, Huw: *British Journal for the Philosophy of Science*, **53**, 83 (2002).

PRIGOGINE, Ilya: 1980, *From being to becoming*. San Francisco: W. H. Freeman.

REICHENBACH, H.: 1956, *The Direction of Time*. Berkeley: University of California Press.

SACHS, R. G.: 1987, *The Physics of time reversal*. Chicago: Chicago University Press.

SAVITT, Steven (ed.): 1995, *Time's Arrows Today, Recent Physical and Philosophical Work on the Direction of Time*. Cambridge: Cambridge University Press.

ZEH, H. D.: 1989, *The Physical Basis of the Direction of Time*. Berlin: Springer Verlag.