

Le tic-tac des physiciens

Etienne Klein

Quand le temps perd ses propriétés les plus évidentes

Comment les physiciens se représentent-ils le temps qui passe ?

Ce temps est-il linéaire, cyclique, en boucle ? Est-il continu ? A-t-il une ou plusieurs dimensions ? L'émergence de nouvelles théories comme celle des supercordes amène les spécialistes du temps à revoir leur copie. Voyage au cœur des théories physico-mathématiques.

Pour dire le monde, il semble que nous ne puissions nous passer de l'idée de temps, elle-même inséparable de celle d'écoulement. D'ailleurs, si l'on compare souvent le temps à un fleuve, c'est bien parce que l'un comme l'autre ne cessent jamais de s'écouler : ils ont un cours. Un fleuve n'est pas une mare, et nous ne pouvons pas imaginer un temps qui ne s'écoulerait plus. Certes, il y a bien eu des romanciers pour imaginer l'arrêt du temps, mais c'est toujours au prix d'une confusion entre le temps et le mouvement. Ils expliquent que les aiguilles des montres se bloquent, que le temps ne passe plus, sans que cela empêche le monde de continuer à exister. Mais si le monde se maintient, c'est qu'il perdure, et s'il perdure, c'est qu'il y a du temps qui passe... Imaginer qu'à la fois le temps s'arrête et que le monde continue d'exister conduit donc à une contradiction. Puisqu'on ne peut exister que dans le temps, l'arrêt de celui-ci signifierait l'arrêt du présent, c'est-à-dire la disparition de tout ce qui existe. Certes, il est présomptueux de prétendre savoir ce qu'est le temps, mais ne peut-on pas dire qu'il est au minimum ce par quoi les choses persistent à être présentes ? Ou, plus plaisamment, qu'il est le moyen le plus commode qu'a trouvé la nature pour que tout ne se passe pas d'un seul coup...

Limiter ses ambitions. Force est de reconnaître que nos réflexions sur le temps sont souvent confuses. Sans doute est-ce parce que nous ne savons pas trop de quel type d'objet il s'agit. Le temps est-il une chose ? Est-ce une idée ? Est-ce un concept ? Est-ce plutôt un a priori de notre sensibilité, pour parler comme Kant ? N'est-ce qu'un mot ? N'existe-t-il que dans l'âme, comme le pensait saint Augustin ? Est-il un pur produit de la conscience, comme le croyait Husserl ? Bien qu'il soit très difficile de répondre à ces

1. Magazine La Recherche Hors-Série n° 5, Avril 2001.

2. Etienne Klein est physicien au Commissariat à l'Energie Atomique (CEA). Il a notamment publié *Le Temps*, Flammarion, coll. "Dominos", 1995.

questions, on croit très souvent que les scientifiques, et notamment les physiciens seront un jour capables de dévoiler la véritable nature du temps, ou du moins d'en proposer une définition exacte. Il s'agit certainement d'un malentendu, que Blaise Pascal dénonçait déjà au motif qu'il est pratiquement impossible de définir les mots importants (les mots "primitifs", comme les appelait l'auteur des *Pensées*). En effet, si ces mots sont vraiment fondamentaux, comment les rapporter à autre chose qu'eux-mêmes? Or définir, c'est avant tout ramener une conception donnée à une autre plus fondamentale. Mais qu'y a-t-il de plus fondamental que ce qui est déjà fondamental? Rien, et c'est sans doute pourquoi les scientifiques posent finalement très peu de questions comme "Qu'est-ce que le temps?", "Qu'est-ce que l'espace?" ou "Qu'est-ce que la matière?". Attendre d'eux qu'ils répondent à ces questions, c'est oublier que la puissance de la physique vient de ce qu'elle a su limiter ses ambitions. En effet, la physique ne s'intéresse pas à toutes les questions que nous nous posons, prenant soin de ne sélectionner que celles qui relèvent de ses compétences et de sa méthode. Par exemple, les physiciens n'essaient pas de résoudre directement la délicate question de la nature du temps, ou du moins, s'ils le font c'est seulement à la marge de leurs théories. Ils cherchent plutôt la meilleure façon de représenter le temps, ce qui est une toute autre affaire.

Dès l'Antiquité grecque, les philosophes ont compris que le temps était à la source de nombreux paradoxes. Par exemple, Parménide et les Eléates, qui proposaient de confondre la matière et l'espace excluant par là même le vide, se trouvaient contraints de penser le mouvement comme une simple translation, c'est-à-dire comme une succession de positions fixes. Le temps leur demeura inexplicable. Ils s'attachaient d'ailleurs à le démontrer impossible et à tout décrire à partir de l'immobilité. En face d'eux, Héraclite et les atomistes prenaient un autre parti en proposant de confondre la matière avec le mouvement et en affirmant la réalité du vide. Selon eux, tout était mobile, tellement mobile même qu'on ne pouvait imaginer de point fixe pour évaluer les changements d'état, ni expliquer quoi que ce soit. C'est certainement Parménide qui aura eu l'influence la plus forte en physique. En effet, celle-ci prétend être à la recherche de rapports qui soient soustraits au changement. Lors même qu'elle s'applique à des processus qui ont une histoire ou une évolution, c'est pour y discerner soit des substances et des formes, soit des lois et des règles indépendantes du temps. En somme, la physique a l'ambition de construire une législation des métamorphoses à partir des

notions immuables. Les historiens des sciences s'accordent à dire que la physique moderne a véritablement commencé au XVII^{ème} siècle avec Galilée, qui le premier s'intéressa au statut qu'il convenait de donner au temps dans le champ de la physique. Cela l'amena à considérer le temps comme une grandeur quantifiable susceptible d'ordonner des expériences et de les relier mathématiquement. C'est dans cet esprit qu'il étudia la chute des corps. Il réalisa que si le temps, plutôt que l'espace parcouru, était choisi comme le paramètre fondamental, alors la chute des corps obéissait à une loi simple : la vitesse acquise est simplement proportionnelle à la durée de la chute. Cette découverte signa la naissance de la dynamique moderne, qui allait donner au temps un statut inédit et mathématisable. Jusqu'alors, l'idée du temps était restée centrée sur des préoccupations humaines. Le temps servait essentiellement aux hommes de moyen d'orientation dans l'univers social et de mode de régulation de leur coexistence, mais il n'intervenait pas de façon explicite et quantitative dans l'étude des phénomènes naturels.

Courbe du temps. La première mathématisation du temps physique a consisté à dire que celui-ci n'a qu'une dimension - un seul nombre suffit à déterminer un instant - et qu'il est continu. Cette figuration du temps par une ligne incite à assimiler le temps à un flux composé d'instantanés infiniment proches parcourus les uns après les autres. Elle implique qu'il n'y a qu'un temps à la fois, conformément à ce que nous apprend notre expérience intérieure la plus sûre, qui nous présente des événements se chevauchant dans le temps, mais jamais de lacunes : il ne cesse jamais d'y avoir du temps qui passe. Remarquons qu'avec sa seule et unique dimension. Le temps se voit doté d'une topologie beaucoup plus pauvre que celle de l'espace, qui, lui, a trois dimensions. Elle n'offre en fait que deux variantes, la ligne ou le cercle, selon que la courbe du temps est ouverte ou fermée.

Il n'y a donc *a priori* que deux types de temps possibles, le temps linéaire et le temps cyclique. Le cours du temps se manifeste sur ces courbes par le fait qu'elles sont orientées, c'est-à-dire parcourues dans un sens bien défini, du passé vers le futur.

Si les physiciens ont préféré le modèle linéaire plutôt que cyclique, c'est en vertu du principe de causalité qui, dans sa formulation classique, stipule que la cause d'un phénomène est nécessairement antérieure au phénomène lui-même. Ce principe de causalité semble interdire les voyages dans le temps,

car ceux-ci permettraient en principe de rétroagir dans le passé pour modifier une séquence d'événements ayant déjà eu lieu. Dans un temps cyclique, aller vers le futur revient à retourner dans le passé, de sorte que ce qu'on appelle la cause pourrait tout aussi bien être l'effet, et vice versa. Au contraire, dans un temps linéaire, les événements sont ordonnés selon un enchaînement chronologique irrémédiable, du passé vers l'avenir. De même qu'un fleuve non tourbillonnaire coule toujours dans le même sens, de l'amont vers l'aval, le temps linéaire s'écoule du passé vers l'avenir sans jamais rebrousser chemin ni faire de boucle, de sorte qu'un instant donné ne peut jamais se reproduire. Aujourd'hui, ce principe de causalité, essentiel à la physique, se décline de différentes façons selon les théories. Mentionnons rapidement, à titre d'illustrations, la façon dont il est pris en compte en physique classique, en relativité restreinte* et en physique des particules. En physique classique, il s'exprime simplement par le fait que le temps est supposé linéaire avec un cours bien défini : on ne peut donc pas rejoindre le passé en allant vers l'avenir. En relativité restreinte, le principe de causalité est garanti par l'impossibilité de transmettre de l'énergie ou de l'information à une vitesse supérieure à celle de la lumière. Cette impossibilité interdit les voyages dans le temps et les renversements de chronologie. En théorie quantique des champs*, qui est le formalisme de base de la physique des particules, les contraintes de la causalité s'expriment au moyen des "règles de commutation des opérateurs de champ". Ces règles empêchent d'une part toute particule de se propager plus vite que la lumière dans le vide, et imposent d'autre part que la création d'une particule précède nécessairement son annihilation. De telles contraintes rendent nécessaire l'existence de particules mathématiquement décrites comme des particules qui remontent le cours du temps. Mais si l'on admet que le temps a un cours identique pour toutes les particules, alors ces particules qui semblent remonter le cours du temps sont réinterprétées comme étant des *antiparticules* qui suivent le cours du temps. Autrement dit, l'antimatière est comme la trace "matérielle" du fait que le temps est supposé passer en sens unique.

Antagonismes. Nous l'avons dit, la physique, limitée dans ses ambitions, ne prétend pas répondre à toutes les questions qui concernent le temps. Par exemple, elle échoue à rendre compte de la relation entre le temps physique et le temps psychologique, entre le temps des horloges et celui de la conscience. Ces deux temps ont certainement des liens, mais certaines de leurs propriétés sont distinctes, voire antagonistes. Déjà, leurs structures diffèrent. Le temps

physique est toujours représenté comme un mince filament qui s'écoule identiquement à lui-même. Mais le temps subjectif, lui, se déploie en ligne brisée, entremêle des rythmes différents, des discontinuités, de sorte qu'il ressemble plutôt à une corde tressée.

Temps physique et temps psychologique se distinguent aussi par le fait que le premier, toujours ponctuellement concentré dans le présent, sépare l'infini du passé de l'infini du futur, tandis que le second mélange, au sein du présent, un peu du passé récent et un peu de l'avenir proche. Dans le temps physique, des instants successifs n'existent jamais ensemble, par définition. Le temps psychologique, lui, élabore une sorte de coexistence au sein du présent du passé immédiat et du futur imminent. Il unit donc ce que le temps physique ne cesse de séparer, il retient ce que ce dernier emporte, inclut ce qu'il exclut, maintient ce qu'il supprime. Ainsi, lorsqu'on entend une mélodie, la note précédente est "retenue" avec la note présente et la projection de la note future pour former un ensemble harmonieux. Passé immédiat et futur imminent coexistent donc dans le présent. Sans cette alliance au sein de la conscience, il n'y aurait pas de mélodie à proprement parler.

Temps physique et temps psychologique se distinguent également par leur fluidité. Le premier s'écoule uniformément (du moins dans la conception classique), tandis que le deuxième a une fluidité si variable que la notion de durée éprouvée n'a qu'une consistance très relative : il n'y a pas deux personnes qui, dans un temps donné, compteraient un nombre égal d'instant. Notre estimation des durées varie avec l'âge, et surtout avec l'intensité et la signification pour nous des événements qui se produisent. Rien de tel pour le temps physique, et c'est d'ailleurs pourquoi nous portons une montre au poignet.

Au final, les temps physique et psychologique semblent irréductibles l'un à l'autre, du moins pour le moment. Leurs liens se situent sans doute à la couture de la matière et de la vie, mais les tentatives pour dériver le premier du second ou l'inverse n'ont jamais vraiment abouti. Le temps mathématisé du physicien ne semble pas épuiser le sens du temps vécu, pas plus que le temps vécu ne donne l'intuition du dépouillement du temps physique. A force de schématisation, la physique a peut-être laissé échapper quelques-unes des propriétés fondamentales du temps. Il se pourrait bien que le temps monotone des physiciens, constitué de tic-tac indéfiniment répétés à l'identique, ne soit

qu'une idéalisation très appauvrie du temps de la vie, manifestement plus pâteux qu'une variable algébrique. Tout au long de son histoire, la physique a considéré que l'espace et le temps sont des continuuums, c'est-à-dire qu'il est possible d'envisager des longueurs ou bien des durées aussi petites que l'on veut, sans jamais atteindre de limite. Le point ou l'instant, qui correspondraient à un nombre infini de divisions, restent hors d'atteinte, mais on peut en principe s'en rapprocher continûment. S'agissant de l'espace, le fait qu'il soit ainsi possible de considérer des longueurs infimes, et même nulles, fait surgir d'énormes difficultés, lorsque l'on s'intéresse par exemple au champ électrique produit par une charge électrique, disons un électron, à la distance r de celui-ci. Ce champ, variant comme $1/r^2$, devient infini lorsque la distance r s'annule. De telles divergences ou singularités conduisent à des difficultés mathématiques qu'on peut éviter en utilisant différents procédés mathématiques qui abolissent ces divergences et autorisent le calcul. Une autre piste, beaucoup plus audacieuse, consiste à imaginer que l'espace lui-même pourrait être discret, c'est-à-dire structuré selon une sorte de réseau, dont la maille, finie et non nulle, représenterait une distance minimale au-dessous de laquelle il serait impossible de descendre. Toute divergence serait ainsi évitée. Toutefois, cette conception pose d'autres problèmes. D'abord, quelle serait la taille de la maille et d'où celle-ci proviendrait-elle ? Ensuite, un tel réseau introduirait des directions privilégiées qui détruiraient l'isotropie de l'espace, c'est-à-dire son invariance par rotation. Or cette invariance joue, avec d'autres symétries du même type, un rôle fondamental dans toute la physique en imposant des lois de conservation très contraignantes. Toutefois, des travaux effectués dans les années 1980 par le mathématicien Alain Connes pourraient changer la donne. Ils concernent les géométries dites non commutatives, qui permettent de considérer des structures spatiales présentant un caractère discontinu sans que cela ne brise les symétries fondamentales. Ces nouvelles géométries sont obtenues en remplaçant les coordonnées spatiales usuelles, qui sont des nombres ordinaires, par des "opérateurs algébriques", qui ont la propriété de ne pas commuter entre eux. Cela signifie que l'ordre de leur application n'est pas indifférent. Ils vérifient toutefois certaines relations qui définissent les propriétés de l'espace à petite échelle. La beauté de ces nouvelles constructions vient de ce qu'elles restituent les propriétés habituelles de l'espace aux plus grandes échelles.

Les atomes du temps. Ces étranges conceptions pourraient-elles s'appliquer au temps ? Celui-ci pourrait-il être discontinu ? Comme nous l'avons dit,

les physiciens l'ont toujours supposé constitué d'instantanés se succédant sans cesse. L'idée d'un temps discontinu, c'est-à-dire d'une atomicité de la durée, a parfois été évoquée, mais aucune théorie n'est jamais vraiment venue l'éclairer. Il faut dire qu'elle pose d'énormes difficultés conceptuelles : comment le temps pourrait-il être constitué d'instantanés particuliers séparés les uns des autres par des durées privées de temps ? Et combien de temps dureraient les périodes privées de temps ? On voit que l'idée d'un temps discontinu nous fait retomber sur les difficultés traditionnelles qu'il y a à penser un temps arrêté. Mais ne concluons pas trop vite : les équations finiront peut-être par mettre en scène des situations que nous ne sommes pas encore capables d'imaginer.

Grâce au modèle standard de la physique des particules, on sait aujourd'hui décrire le comportement des particules élémentaires et leurs interactions sur des échelles avoisinant les 10^{-18} mètres. Ces expériences ont lieu dans de gigantesques collisionneurs de particules. Mais, à beaucoup plus petite distance, une nouvelle physique est nécessaire. Son élaboration modifiera certainement notre représentation de l'espace et du temps.

Supercordes. Une piste actuellement très étudiée est celle de la théorie dite des supercordes, dont les fondements ont été élaborés dans les années 1970. Les particules n'y sont plus représentées par des objets de dimension nulle, mais par des objets longilignes - des supercordes -, qui vibrent dans des espaces dont le nombre de dimensions est bien supérieur à trois. Pour comprendre comment une telle idée a pu germer, il faut revenir aux années 1920, Einstein se demandait alors si les effets électromagnétiques décrits dans les équations de Maxwell pouvaient être regardés comme une propriété géométrique de l'espace-temps. Une telle idée avait bien fonctionné pour la gravitation, qu'Einstein lui-même avait géométrisée par le biais de sa relativité générale. Or l'électromagnétisme et la gravitation ont quelque ressemblance, ne serait-ce que parce que leur loi de force respective fait apparaître l'inverse du carré de la distance. Dans le dessein de les unifier, Theodor Kaluza et Oscar Klein proposèrent au début des années 1920 une théorie dans laquelle l'électromagnétisme et la gravitation semblaient pouvoir être réunis. Ils remarquèrent en effet que l'écriture des équations de la relativité générale dans un espace-temps à cinq dimensions (quatre d'espace, une de temps) permettait d'obtenir, après projections, d'une part les équations habituelles de la relativité générale, d'autre part une équation supplémentaire équivalente aux équations de Maxwell. Une force unique dans un espace-temps à cinq

dimensions apparaissait donc équivalente à deux interactions (gravitation et électromagnétisme) dans un espace-temps à quatre dimensions. D'où l'idée que l'unification des interactions pourrait nécessiter un "enrichissement" de la topologie de l'espace-temps, à charge ensuite pour ses promoteurs d'expliquer pourquoi nous ne décelons pas les dimensions spatiales supplémentaires. Kaluza et Klein suggéraient quant à eux que la cinquième dimension de leur théorie était enroulée sur elle-même à une échelle infime et qu'elle était donc imperceptible, de la même manière qu'un tissu, objet à trois dimensions, nous apparaît comme un objet à seulement deux dimensions du fait de l'extrême minceur relative des fils qui le constituent. En apparence, l'espace-temps pourrait donc perdre des dimensions pourtant tout à fait réelles à une échelle ultramicroscopique.

Un temps enroulé ? La théorie des supercordes reprend l'hypothèse de Kaluza et de Klein en mettant en scène un espace-temps à beaucoup plus que quatre dimensions, dont certaines seraient "compactifiées". Ces dimensions supplémentaires permettent d'éliminer les quantités infinies que les calculs font apparaître lorsque l'on s'intéresse aux interactions ayant cours aux très petites échelles. En fait, le cadre conceptuel au sein duquel sont décrites les supercordes n'est pas imposé de façon unique. Plusieurs possibilités existent, mais le point capital est que toutes rendent nécessaire l'existence de la forme de gravitation telle qu'elle est décrite par la relativité générale d'Einstein. Autrement dit, dans la théorie des supercordes, la gravitation acquiert le statut d'une prédiction tirée des principes mêmes de la théorie ! Les choses se déroulent dans un espace-temps à dix dimensions, dans lequel six dimensions d'espace sont repliées sur elles-mêmes, et donc invisibles, de manière à donner l'apparence d'un espace-temps à quatre dimensions. On pourrait en fait imaginer que parmi les dimensions supplémentaires, l'une au moins soit temporelle. Le temps aurait ainsi plusieurs dimensions, dont seulement une, celle correspondant au temps physique habituel, ne serait pas enroulée sur elle-même. Mais cette voie de recherche est peu suivie, car elle nécessite une restructuration formidable de notre intuition. En effet, comment pourrions-nous comprendre l'existence de plusieurs temps ? Cette question devient encore plus déroutante si l'on envisage des dimensions temporelles enroulées. Formant des boucles, leur structure même violerait la causalité, obligeant les particules à remonter périodiquement dans leur passé, dans une sorte d'éternel retour.

Aujourd'hui, les théoriciens voudraient ne plus entraver la théorie en la forçant à opérer dans un espace-temps donné *a priori*. Ils essaient plutôt de lui permettre de créer sa propre arène spatio-temporelle à partir d'une configuration dénuée de temps et d'espace, comme celles que suggèrent les géométries non-commutatives. Ainsi parviendront-ils peut-être à montrer que l'espace et le temps sont seulement des notions commodes qui émergent de structures ne les contenant pas à toute petite échelle.

Si les équations continuent à être aussi audacieuses, le temps pourrait bientôt cesser d'être ce qu'il est.

Textes des encarts

Oui ! le Temps règne ; il a repris sa brutale dictature. Et il me pousse, comme si j'étais un bœuf, avec son double aiguillon ??

Charles Baudelaire.

Temps cyclique ou linéaire

Si les physiciens ont préféré le modèle linéaire, ils échouent à rendre compte de la relation entre le temps physique et le temps psychologique.

Galilée considéra, le premier, le temps comme une grandeur susceptible de relier mathématiquement des expériences.

Le principe de causalité semble interdire les voyages dans le temps qui permettent de rétroagir sur des événements ayant déjà eu lieu.

Hiroshima, 8 h15, le 6 août 1945.

Imaginer que le temps s'arrête et que le monde continue d'exister conduit pour le physicien à une contradiction.

L'idée d'un temps discontinu est difficile à concevoir : comment pourrait-il y avoir un temps constitué d'instantés séparés les uns des autres par des durées privées de temps ? Et combien de temps dureraient les périodes privées de temps ?

Le temps psychologique unit ce que le temps physique ne cesse de séparer :

passé, présent et futur.

Le mathématicien Alain Connes recevra en septembre prochain le prix Crafoord. Il est le fondateur des géométries non commutatives. Dans cette théorie, le temps pourrait ne pas exister à petite échelle.

Proposée en 1905 par Albert Einstein, la relativité restreinte permet de décrire le mouvement d'objets dont la vitesse n'est pas négligeable devant celle de la lumière dans le vide. En introduisant le concept d'espace-temps en remplacement des concepts jusqu'alors séparés d'espace et de temps, elle ébranla les visions classiques de l'espace et du temps : ni les longueurs ni les durées ne sont des quantités absolues, c'est-à-dire indépendantes du référentiel dans lequel elles sont calculées.

La théorie quantique des champs est le formalisme qui résulte du mariage de la physique quantique et de la relativité restreinte. Elle permet de décrire le monde des particules élémentaires, qui sont des objets à la fois très petits et très rapides, leur vitesse pouvant être très proche de celle de la lumière.