

## La mathématisation du temps épuise-t-elle la question du temps ?

Étienne Klein

Beaucoup de physiciens et d'ingénieurs, habitués à manier la variable  $t$  dans telle ou telle équation, finissent par croire que le temps n'est rien d'autre que sa représentation algébrique : « Le temps, c'est petit  $t$ , un point c'est tout ». Se doutent-ils qu'ils laissent ainsi de côté de multiples questions relatives au temps ? Par exemple celle de son moteur : Qu'est-ce qui est à l'origine de son écoulement apparent ? Le temps lui-même ? L'univers ? Nous ?

Sans doute préfèrent-ils considérer que le temps avance tout seul. Cela les conduit à admettre que la variable  $t$ , à la différence des coordonnées spatiales qui ne varient que pour qui se déplace dans l'espace, est mue par une certaine dynamique qui l'oblige à constamment changer sa valeur : elle ne tient littéralement pas en place. Mais de quoi ce déplacement inéluctable résulte-t-il ? Du temps lui-même ? De notre subjectivité ? De notre mode d'insertion dans l'univers ? Il s'agit de savoir si le passage du temps est lié au temps lui-même, à la perception que nous en avons – elle-même liée à notre place dans l'univers – ou s'il provient de l'univers lui-même.

Notre représentation du cours du temps par un axe orienté dans une direction déterminée semble posséder l'évidence du naturel. N'est-elle pas une sorte de sublimation de l'image du fleuve ? En réalité, elle concentre et aiguise presque tous les problèmes philosophiques posés par le passage du temps. En particulier, elle ne précise pas de quelle façon l'axe du temps est *temporellement* parcouru : le paramètre petit  $t$  se déplace-t-il pas à pas le long d'un axe existant « de toute éternité », ou ne survient-il que « sur fond d'abîme » ? Cette représentation ne dit rien non plus du statut du passé et de l'avenir, ni de leur concaténation au présent : si le cours du temps est une juxtaposition d'instants isolés et figés, qui se succèdent à la façon des clichés sur une bande cinématographique, doit-on supposer que ces points sont déjà donnés, qu'ils sont comme alignés sur une droite déjà existante, de même que les clichés du cinématographe préexistent au déroulement du film ?

Ces remarques rappellent le problème 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 : « 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<sup>(1)</sup>. » Pour ce faire, il faudrait

(\*) Physicien au CEA et Professeur à l'École Centrale de Paris. klein@dsmidir.cea.fr

(1) Lee Smolin, *Rien ne va plus en physique. L'échec de la théorie des cordes*, Paris, Dunod, 2007, p. 336-337.

pouvoir identifier et caractériser le véritable moteur du temps : est-il physique, objectif, ou intrinsèquement lié à notre rapport au monde ? La mathématisation du temps ne répond pas d'elle-même à cette question.

Et elle n'épuise pas non plus la question du statut du temps vis-à-vis des autres concepts. Est-il un concept « primitif », ou bien dérive-t-il d'autre chose que de lui-même ?

Dans les formalismes ordinaires de la physique (mécanique classique, relativité restreinte, physique quantique), le concept de temps conserve incontestablement quelque chose de primitif : on y postule qu'il existe, indépendamment des phénomènes, on prend acte qu'il s'écoule, sans préciser ni sa nature, ni ce qui fait qu'il s'écoule.

Mais l'affaire n'est peut-être pas définitivement close. Les théories les plus spéculatives aujourd'hui travaillent au dépassement de la relativité générale et de la physique quantique dans le but d'unifier les quatre forces fondamentales. Ceux qui les élaborent sont amenés à remettre en cause que le temps soit un concept aussi primitif que dans les théories conventionnelles, ce qui les conduit à questionner la nature même du temps. L'enjeu est de savoir si le temps pourrait émerger d'un substrat d'où il est absent. Le temps dériverait-il d'un ou de plusieurs concepts plus profonds que lui-même ? De celui de causalité, par exemple ?

C'est au cours du XX<sup>e</sup> siècle qu'ont été accomplies les percées les plus spectaculaires dans le monde de l'infiniment petit. Les physiciens sont parvenus à identifier puis à classer de nombreuses particules, presque toutes éphémères. Surtout, ils ont découvert, en marge de la gravitation et de l'électromagnétisme, deux nouvelles forces fondamentales qui n'agissent qu'à toute petite distance, donc à des échelles très courtes : l'interaction nucléaire faible, qui est à l'origine de certains phénomènes radioactifs, et l'interaction nucléaire forte, qui assure la cohésion des noyaux d'atomes en liant protons et neutrons entre eux. Enfin, dans les années 1970, en s'appuyant sur les principes de la physique quantique, ils ont pu démontrer que la force électromagnétique et la force nucléaire faible, qui se manifestent pourtant très différemment, n'étaient pas indépendantes l'une de l'autre : dans un passé très lointain de l'univers, elles ne formaient qu'une seule et même force, qualifiée d'« électrofaible », qui s'est très vite dissociée en deux forces distinctes, quelques fractions de seconde après le big bang.

Ensuite, ils ont pu étendre la démarche unificatrice en intégrant l'interaction nucléaire forte dans le cadre théorique qu'ils avaient élaboré pour décrire l'interaction électrofaible. Le résultat obtenu, qui permet de décrire à l'aide des mêmes principes mathématiques trois des quatre forces fondamentales, est d'une puissance prédictive considérable jusqu'à des énergies très élevées. Il constitue ce qu'on appelle le « modèle standard » de la physique des particules, qui a pu être testé très en détail (jusqu'à des énergies de l'ordre de la centaine de GeV<sup>(2)</sup>), grâce à de gigantesques collisionneurs de particules, capables de reproduire fugitivement les conditions physiques extrêmes (densité d'énergie très grande et température très élevée) qui prévalaient dans un passé lointain de l'univers.

La messe est-elle dite pour autant ? Les physiciens sont les premiers à reconnaître que non. Car ce modèle standard bute sur plusieurs problèmes d'ordre conceptuel.

(2) 1 GeV, soit 1 giga-électronvolt, vaut 10<sup>9</sup> électronvolts.

D'abord, à des énergies plus élevées que celles accessibles avec les collisionneurs de particules, les principes sur lesquels il s'appuie entrent eux-mêmes en collision violente les uns avec les autres, de sorte que les équations ne fonctionnent plus. C'est l'indice que le cadre conceptuel en usage ne permet pas de décrire les phénomènes qui se sont déroulés à plus haute énergie, dans l'univers primordial. Ensuite, le modèle standard de la physique des particules laisse de côté la quatrième force, la gravitation, seulement prise en compte par la relativité générale (qui ne décrit qu'elle). Comment l'intégrer ? Ou, à défaut, comment construire une théorie permettant de décrire à la fois la gravitation et les trois autres forces ?

L'affaire s'annonce plus que délicate car nous avons vu que ces deux théories ne représentent pas l'espace-temps de la même façon. Pour la physique des particules, il est plat, rigide et statique ; pour la relativité générale, il est courbe, souple et dynamique. Or l'espace-temps est indispensable à toute démarche physique, pour rendre compte de la présence des objets et du déroulement des phénomènes. Concevoir un espace-temps dont la structure soit compatible avec les lois quantiques aussi bien qu'avec celles de la relativité générale amène à remettre à plat les deux formalismes en vigueur et leur façon de représenter l'espace et le temps.

La nature profonde du temps pourrait-elle être autre chose que le temps lui-même ? Les théoriciens, ces gens qui calculent comme les rossignols chantent, n'hésitent plus à formuler d'étranges hypothèses. Par exemple : à toute petite échelle, l'espace-temps serait discontinu plutôt que lisse, ou n'existerait pas vraiment, ou posséderait plus de quatre dimensions, ou encore serait théoriquement dérivable ou déductible de quelque chose qui n'est pas ... un espace-temps. Pourrait-on le construire à partir d'autres éléments que lui-même ?

### **L'espace-temps serait-il un déploiement de la causalité ?**

Traditionnellement, on considère qu'un événement, représenté par un point dans l'espace-temps, est une donnée primaire, et que les relations qui lient deux événements entre eux ne sont, elles, que des données secondaires : l'événement est seul jugé réel, tandis que les relations causales ne sont jamais qu'accessoires. Mais ne pourrait-on inverser la donne, considérer que les relations causales sont les véritables éléments fondamentaux, et que les événements dans l'espace-temps peuvent ensuite être définis à partir d'elles ?

Dans les années 1980, Roger Penrose, le plus célèbre des théoriciens de l'université d'Oxford, a ouvert une voie en proposant justement une conception de l'espace-temps fondée sur ce qu'il dénomme la « structure causale de l'univers » : au lieu que l'espace-temps soit l'arène au sein de laquelle la causalité vient s'exprimer, il se construit à partir d'elle. Mais qu'entend-il par « structure causale de l'univers » ? Selon la relativité générale, la géométrie de l'espace-temps dicte à la lumière sa voie de propagation : les trajets qu'elle peut suivre sont les géodésiques de lumière<sup>(3)</sup>. Pour que deux événements soient causalement reliés, il faut qu'une particule ait pu se propager de l'un à l'autre. Or aucune particule ne peut se déplacer plus vite que la

(3) On appelle « géodésique » le plus court chemin permettant de passer d'un point à un autre. Dans un espace courbe, les géodésiques ne sont généralement pas des droites. Les géodésiques de lumière, celles qui sont empruntées par les photons, sont des géodésiques particulières, de longueur nulle.

lumière. Dès lors, connaître les géodésiques de lumière permet de déterminer quel(s) événement(s) a (ont) pu être causé(s) par un événement donné : ce sont tous ceux qui sont reliés à cet événement par un signal dont la vitesse est inférieure ou égale à celle de la lumière. Ainsi la géométrie de l'espace-temps contient-elle de l'information à propos des liens de causalité entre événements. Une information qui constitue la « structure causale de l'univers ».

La connaissance de cette structure permet de déterminer si telle région de l'univers peut ou non transmettre de l'information à telle autre, donc de savoir quelle région peut causalement en influencer une autre. Elle constitue une sorte de tissage de l'espace-temps qui indique tous les chemins par lesquels des liens de causalité peuvent se propager<sup>(4)</sup>.

Roger Penrose postule que cette structure causale de l'univers est sa propriété la plus déterminante. Ce n'est plus l'ensemble des événements susceptibles de se produire au sein de l'espace-temps qui est essentiel, mais plutôt l'ensemble des trajets possibles des rayons lumineux capables de connecter les événements entre eux. Les rayons de lumière, parce qu'ils sont les bras armés de la causalité, constituent des objets plus fondamentaux que les points de l'espace-temps. Cette prééminence du rôle de la lumière le conduit à un renversement complet de point de vue : au lieu d'envisager que la géométrie spatio-temporelle détermine les relations causales, il suggère que ce sont les relations causales qui déterminent la géométrie de l'espace-temps. Son argument est simple : la plupart des informations dont nous avons besoin pour définir la géométrie de l'espace-temps sont intégralement fixées dès qu'on sait comment la lumière y voyage.

Roger Penrose appelle l'ensemble des rayons lumineux l'« espace des *twisteurs* » : chaque rayon lumineux, qui correspond à une géodésique de lumière dans l'espace-temps, est représenté par un simple point dans l'espace des *twisteurs* ; et réciproquement, chaque point de l'espace-temps peut être reconsidéré comme l'ensemble des rayons lumineux passant par lui, c'est-à-dire comme un ensemble de points dans l'espace des *twisteurs*<sup>(5)</sup>. S'établit ainsi une relation de correspondance entre l'espace des *twisteurs* et l'espace-temps, relation qui invite à considérer que le second est ... secondaire, c'est-à-dire qu'il dérive du premier. De là à penser que l'espace des *twisteurs* est une entité plus fondamentale que l'espace-temps, et que c'est à partir de lui qu'il faudrait reformuler les lois de la physique, il n'y a qu'un pas, que Roger Penrose n'a pas hésité à franchir.

(4) La structure causale de l'espace-temps conduira, par exemple, à refuser que puissent exister dans l'univers des géodésiques de lumière ou de matière qui seraient comme des boucles refermées sur elles-mêmes, car cela impliquerait qu'une particule pourrait revenir dans son propre passé. Bien que de telles situations soient, en toute rigueur, possibles en relativité générale, on les écarte au nom du principe de causalité.

(5) Les mathématiciens savent que les nombres complexes peuvent être représentés dans un plan (le plan complexe) ou bien, si l'on ajoute un point à l'infini, sur une sphère, la sphère de Riemann. Cette sphère peut tourner sur elle-même, et ainsi devenir un *twisteur* (un torseur en français). Dans l'espace-temps, les rayons de lumière sont des géodésiques. Dans l'espace des *twisteurs*, chaque point de l'espace-temps, c'est-à-dire chaque événement, est représenté par une sphère de Riemann, qui correspond à l'ensemble des rayons lumineux passant par lui.

Pendant les vingt années qui ont suivi la proposition initiale de Penrose, la « théorie des *twisteurs*<sup>(6)</sup> » s'est rapidement développée. À la surprise quasi-générale des physiciens, on s'est aperçu que de nombreuses équations pouvaient être reformulées dans l'espace des *twisteurs*. Cette possibilité de réécriture militait à elle seule pour qu'on admît de considérer effectivement les rayons de lumière, c'est-à-dire les propagateurs de la causalité, comme des entités vraiment fondamentales, voire fondatrices, l'espace-temps n'étant plus qu'un aspect secondaire exprimant les relations mutuelles de ces rayons. En vertu d'un argument esthétique, elle semblait également marquer une étape vers l'unification des quatre interactions fondamentales car, reformulées au sein de l'espace des *twisteurs*, les équations décrivant les divers types de particules prennent une même forme, qui plus est, simple<sup>(7)</sup>.

Cette nouvelle théorie paraissait surtout donner corps à l'idée que l'espace-temps de la relativité générale pourrait émerger d'une autre structure plus profonde : il deviendrait en quelque sorte le « fils » de la lumière. Mais cette représentation de l'univers n'est pas sans poser quelques problèmes. Et le principal d'entre eux pourrait être rédhibitoire : l'espace des *twisteurs* ne serait encore concevable qu'en dehors du cadre de la physique quantique. Bien qu'il soit structurellement très différent de l'espace-temps, il correspond, comme lui, à une structure géométrique lisse. Personne ne sait encore à quoi pourrait ressembler un espace des *twisteurs* qui serait de nature quantique. Cette théorie n'a peut-être pas dit son dernier mot, mais, à ce jour, elle n'unifie pas la physique quantique et la relativité générale.

Reste que ses succès, même partiels, ont convaincu de nombreux physiciens théoriciens que le concept de causalité est opératoire à des niveaux plus profonds que l'espace-temps lui-même. Depuis lors, les travaux qui visent à comprendre la nature de l'espace et du temps utilisent tous la combinaison de trois idées fondamentales : l'espace-temps est émergent ; sa description la plus fondamentale est discrète ; cette description fait intervenir la causalité de façon cruciale.

## L'espace-temps a-t-il des dimensions cachées ?

Depuis quelques dizaines d'années, la piste qui mobilise de loin le plus de chercheurs pour unifier les interactions fondamentales demeure celle de la théorie des supercordes. Parmi ses plus importants contributeurs, citons notamment Gabriele Veneziano, Joël Scherk, Bernard Julia, John Schwarz, Michael Green et Edward Witten. D'une complexité mathématique extraordinaire, elle tente non seulement de compléter notre représentation de l'espace-temps, mais surtout de modifier celle des particules élémentaires : celles-ci ne sont plus représentées par des objets de dimension nulle, mais par des objets longilignes – des supercordes – qui vibrent dans un espace-temps dont le nombre de dimensions est strictement supérieur à quatre, en l'occurrence égal à dix. Plus précisément, la théorie considère que toutes les particules que nous connaissons ne sont que des manifestations d'un seul et unique objet, la

(6) Une présentation relativement accessible de cette théorie est donnée par Roger Penrose lui-même dans un livre écrit en collaboration avec Stephen Hawking : *The Nature of Space and Time*, Princeton University Press, 1996.

(7) Les équations différentielles par lesquelles on décrit d'ordinaire les différents types de particules deviennent en effet de simples équations algébriques.

supercorde, qui vibre dans un espace-temps doté de six dimensions de plus que l'espace-temps ordinaire. Cette supercorde peut être refermée sur elle-même, comme une boucle, et correspond alors au graviton, la particule censée propager la force gravitationnelle<sup>(8)</sup> et capable, elle, de se mouvoir dans toutes les dimensions de l'espace-temps. Elle peut être ouverte (c'est-à-dire se terminer par deux extrémités), et ses différents modes de vibration correspondent alors aux différentes particules de matière possibles, condamnées, elles, à ne pouvoir circuler que dans l'espace-temps ordinaire à quatre dimensions. Les particules habituelles (que nous détectons dans l'univers ou que nous créons en laboratoire), correspondent aux modes de vibration dont les fréquences sont les plus basses : l'électron est associé à un mode particulier, le neutrino à un autre, les quarks à d'autres encore, ... Mais les modes dont les fréquences sont plus élevées doivent correspondre à d'autres particules, beaucoup plus lourdes, qui n'ont jamais été observées. Les « cordistes », comme on les appelle dans le jargon des physiciens, postulent qu'elles existent, mais elles restent à découvrir.

Comment l'idée, qui peut paraître folle, d'augmenter le nombre de dimensions de l'espace-temps a-t-elle pu naître ? Il nous faut revenir aux glorieuses années 1920, à l'époque où Einstein se demandait si les effets électromagnétiques pouvaient être appréhendés comme une propriété géométrique de l'espace-temps (l'idée avait été fructueuse pour la gravitation, qu'Einstein lui-même avait géométrisée par le biais de la relativité générale). Or, la force électromagnétisme et la force gravitationnelle, qui étaient alors les seules connues, ont une propriété commune : elles varient l'une et l'autre comme l'inverse du carré de la distance, ce qui laisse espérer qu'elles pourraient être mises en correspondance.

Dans le dessein de les unifier, deux physiciens de l'époque, Théodore Kaluza et Oscar Klein proposèrent une théorie révolutionnaire. Ils avaient remarqué, chacun de son côté, que l'écriture des équations de la relativité générale dans un espace-temps à cinq dimensions (au lieu de quatre) permettait d'obtenir, après projection sur des espaces plus restreints (de une et quatre dimensions), d'une part les équations habituelles de la relativité générale, d'autre part les équations de Maxwell pour l'électromagnétisme. La description d'une force unique dans un espace-temps à cinq dimensions était donc équivalente à celle de deux interactions dans un espace-temps à quatre dimensions. D'où l'idée qu'un nombre plus élevé de dimensions d'espace-temps pourrait permettre l'unification des interactions fondamentales : chacune serait déductible d'une force unique agissant dans une sorte de super-espace.

Mais comment expliquer que la cinquième dimension nous soit imperceptible ? Kaluza et Klein suggéraient qu'elle pouvait être enroulée sur elle-même à une échelle infime, et qu'elle était donc inaccessible à nos sens et à nos moyens d'observation, de la même manière qu'un tissu, objet à trois dimensions, nous apparaît tel un objet à deux dimensions, du fait de la 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.

La théorie des supercordes a repris et enrichi l'hypothèse de Kaluza et Klein, en

(8) Plus précisément, pour les supercordes fermées, il existe toujours un mode de propagation qui correspond au graviton, lequel est la version quantique du champ gravitationnel einsteinien.

mettant en scène un espace-temps à dix dimensions, dont six repliées sur elles-mêmes. Les six dimensions supplémentaires sont supposées spatiales plutôt que temporelles, de sorte que cette théorie ne devrait pas avoir d'impact sur notre représentation du temps : celui-ci conserve une seule et unique dimension<sup>(9)</sup>. En outre, à la différence de la théorie des *twisteurs* et des géométries non commutatives, l'espace-temps de la théorie des supercordes n'est pas dérivé d'une entité plus profonde que lui : il est posé *a priori*, antérieurement à toute autre chose même si, curieusement, la théorie suggère qu'il pourrait changer, voire disparaître localement dans un trou noir... Bref, on ne peut raisonnablement pas attendre de cette théorie, disons plutôt de ce programme de recherche, qu'il nous révèle tout prochainement la nature profonde de l'espace-temps. Mais peut-être pourra-t-il au moins préciser le nombre de ses dimensions.

Pour ce faire, il devra se confronter aux données de l'expérience, à la réalité physique. Or, jusqu'à présent, la théorie des supercordes n'a produit aucun effet qu'on puisse vérifier, ce qui lui a valu quelques critiques<sup>(10)</sup>. Il faut dire qu'en la matière les difficultés sont de taille, en effet : comment mettre en évidence des phénomènes physiques nouveaux liés à l'existence de dimensions supplémentaires de l'espace-temps ? Il y a quelques années, les cordistes imaginaient que la taille des dimensions supplémentaires ne pouvait être que la plus petite longueur qu'on sache décrire en physique, soit la « longueur de Planck », voisine de  $10^{-35}$  mètre. Du coup, tout phénomène physique qui se déroulerait dans l'une de ces dimensions semblait totalement hors de portée de nos moyens d'observation actuels, y compris des accélérateurs de particules les plus puissants. Le LHC, qui entrera en service dès 2008 au CERN à Genève, sondera des distances de l'ordre de  $10^{-19}$  m en provoquant des collisions de deux faisceaux de protons de 7 TeV chacun. De telles distances ont beau être minuscules, elles sont dix millions de milliards de fois plus grandes que la longueur de Planck, donc beaucoup trop importantes pour qu'on puisse détecter le moindre effet lié aux dimensions supplémentaires envisagées par la théorie des supercordes. C'est du moins ce qu'on a longtemps pensé.

En 1996, coup de tonnerre dans le ciel de la physique théorique : les cordistes comprennent que la taille des dimensions supplémentaires est en réalité un paramètre libre de la théorie et qu'il n'y a aucune raison de la fixer *a priori* égale à la longueur de Planck. Depuis lors, un petit nombre d'entre eux se passionnent pour l'idée qu'elle pourrait être de l'ordre de  $10^{-19}$  mètre. S'ils ont raison, alors certains des effets liés aux dimensions supplémentaires de l'espace-temps pourraient être détectés grâce au LHC ou à d'autres collisionneurs actuellement en projet.

---

(9) Si l'une au moins des dimensions supplémentaires était de nature temporelle, cela signifierait qu'il faudrait concevoir l'existence de plusieurs temps à la fois, ce qui paraît difficile. D'autant que ces dimensions temporelles supplémentaires, repliées sur elles-mêmes, formeraient des boucles au sein desquelles le principe de causalité ne pourrait pas être respecté.

(10) Voir notamment Lee Smolin, *Rien ne va plus en physique. L'échec de la théorie des cordes*, Paris, Dunod, 2007.