

L'EVANSCENCE DE LA NOTION DE CAUSE EN PHYSIQUE

Etienne Klein
DSM/LARSIM

D'où vient que vous savez les effets et les causes ?
Ruy Blas, Victor Hugo

Comme indiqué dans l'argumentaire qu'Aaron Schurger et moi-même avons rédigé, le but de ce colloque consacré à la causalité est de croiser deux disciplines, la physique et les neurosciences, grâce à des exposés faits d'une part par des chercheurs de ces deux champs scientifiques, d'autre part par des philosophes qui ont travaillé sur cette question. Il s'agira de comparer les usages que l'on fait, dans ces deux champs d'expérience, des mots « cause » et « causalité », et des concepts auxquels ces mots renvoient.

Le point de départ de notre initiative réside consiste en une conviction qui relève elle-même d'une démarche qu'on peut sans doute qualifier de bachelardienne, et qu'on peut résumer par la concaténation des deux arguments suivants :

1) S'il y a des questions fondamentales à poser sur l'existence et la nature de l'espace et du temps ou sur le rôle effectif de la causalité dans l'élaboration des théories physiques, c'est à la théorie de la relativité générale ou à la physique quantique ou à l'éventuelle synthèse des deux d'y répondre plutôt qu'à la métaphysique spéculative en fauteuil ou à l'analyse purement conceptuelle.

2) Mais - et ce second point nous rapproche de Gaston Bachelard -, nous pensons qu'il ne peut y avoir d'analyse *épistémologique* de la science sans une analyse *métaphysique* des questions abordées en son sein.

S'agissant de la causalité, le mieux, pour prendre de l'élan, 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. » Ce serait cela, en somme, la causalité au sens usuel du terme, la tentation en notre esprit, justifiée ou non, 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 l'un des trois principes d'association fondamentaux (avec la ressemblance et la contiguïté), principe qui serait « pour nous le ciment de l'univers », dit-il. La causalité serait donc une sorte de « ciment », terme dont vous relevez comme moi qu'il est commun à Hume et Meyerson et qu'on retrouve également dans le titre du dernier ouvrage de Claudine Tiercelin, qui est justement « Le Ciment des choses » (Editions Ithaque, 2011).

Dans sa formulation classique, le principe de causalité se confondait avec l'idée d'un déterminisme strict, comme sous la plume de Leibniz : « Rien ne se fait sans raison suffisante, c'est-à-dire que rien n'arrive sans qu'il soit possible à celui qui connaîtrait assez les choses de rendre une raison qui suffise pour déterminer pourquoi il en est ainsi, et non pas autrement² ».

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

² Leibniz, *Principes de la nature et de la grâce fondés en raison* (texte original en

Mais en général, on se contente de résumer ce principe en disant simplement que tout événement a une cause, qui lui est nécessairement antérieure.

Reste que sous ses airs badins, la notion de causalité pose d'épineux problèmes philosophiques lorsqu'il s'agit de préciser son statut épistémologique. Des problèmes qui sont peut-être comme le contrepoint des problèmes posés par la notion de hasard et par celle 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 toujours lié à une difficulté de l'explication causale. Le hasard, c'est en quelque sorte le *purgatoire de la causalité*.

Il existe de multiples théories de la causalité et pas de consensus à leur sujet. 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, qui est sans doute à réinterroger, 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 Price³, selon laquelle la causalité est affaire de stratégie de l'agent : 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 en quelque sorte un « transfert », un transfert de quelque chose entre la cause

français), Paris, PUF, coll. Épiméthée, 2001, p. 83.

et l'effet, de quelque chose qui unit ou colle la cause à l'effet. Max Kistler, qui acceptera je pense que je le range dans cette catégorie, 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*. » (Max Kistler, *Causalité et lois de la nature*, op. cit., p. 282). La causalité devient là une sorte de ciment dynamique qui scelle deux événements successifs.

Enfin, certains considèrent que le principe de causalité demeure injustifiable sur un plan strictement philosophique, car, arguent-ils, si la causalité est le principe dont tout formalisme procède, elle ne procède elle-même de rien (au sens où la raison est incapable de rendre compte de ce principe). Ce constat avait d'ailleurs poussé Schopenhauer à faire l'expérience inverse de celle attribuée à Newton. Newton, selon la légende, s'était étonné que la pomme tombât et en avait découvert la cause. Schopenhauer, lui, s'étonne que la causalité découverte par Newton suffise à faire tomber la pomme, et se demande comment la causalité a pu devenir une évidence première pour tant de philosophes. Le problème qu'il pose est simple : les questions cessent-elles de se poser quand on a dit que " la pomme tombe en direction de la terre à cause de la force de gravitation " ? Non, répond-il, car il faut chercher en plus la cause de la force de gravitation elle-même.

Je ne peux 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 cours d'un fleuve, ma perception de la position qu'il occupe en aval du courant du fleuve est postérieure à la

³ Huw Price, « Agency and Probabilistic Causality », *British Journal for the Philosophy of Science* 42 (1991), P. 157-176.

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. » Il faut alors passer d'une succession qui est d'abord donnée comme subjective à une succession objective. Car dire que la succession de mes représentations est déterminée, « celle-ci avant, celle-là après », c'est dire qu'une représentation étant donnée, une autre l'a précédée. Il faut donc que l'une suive l'autre selon une règle ou, si l'on préfère, en vertu d'une loi. Autrement dit, la succession reste objectivement indéterminée tant qu'elle est simplement perçue, tant que ne lui est pas appliquée ce que Kant appelait la « loi de causalité ».

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 divers. Cette règle se trouve toujours dans la perception de ce qui arrive et elle rend *nécessaire* l'ordre des perceptions qui se succèdent (dans l'appréhension de ce phénomène)⁵. » 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 lorsque le phénomène observé est un bateau descendant un fleuve.

Tel est l'argument à l'issue duquel Kant établit que « ce n'est que parce que nous soumettons la succession des phénomènes et, par suite, tout changement, à la loi de causalité, qu'est possible l'expérience même, c'est-à-dire la connaissance empirique de ces phénomènes ; par conséquent, ils ne sont eux-mêmes possibles, comme objets de l'expérience, que suivant cette loi⁶. » En clair, 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

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

5. *Ibid.*, p. 185.

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*.

La métaphore du fleuve a ainsi inspiré l'idée qu'il existe un « ordre du temps⁷ ». 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 simultanément 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, où qu'ils se trouvent. La physique a explicité cet ordre du temps et l'a intégré dans ses divers formalismes, où il joue comme nous allons le voir un rôle à la fois structurant, spectaculaire et crucial.

J'en viens donc maintenant à la physique, puisque la notion de cause 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

6. *Ibid.*, p. 184.

7. *Ibid.*, p. 190-191.

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 »⁸... 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) et structure en profondeur celles qui sont à l'ébauche, car il continue d'imposer 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 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

⁸ B. Russel, *The Concept of Cause*, dans *Mysticism and logic*, London, 1986, p. 173.

physique quantique non relativiste, elle est garantie par la structure même de l'équation de Schrödinger⁹. 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 physique théorique, la causalité s'exprime au moyen de règles de commutation des opérateurs de champs. Un opérateur de création $\Phi^*(x)$ d'une particule au point d'espace-temps x et l'opérateur d'annihilation de cette même particule $\Phi(y)$ 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.

9. 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, 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 ? S'agit-il d'appliquer les procédures de la physique quantique à la relativité générale ? Ou bien de procéder à un mariage qui impliquerait une modification de la physique quantique standard ? Ou encore de mettre sur pied une nouvelle théorie qui dépasse, en les incluant, la physique quantique et la relativité générale ?

Ces différentes démarches se répartissent en trois groupes :

- Les procédures qui appliquent les règles de quantification à la relativité générale ordinaire. Deux pistes : les *approches* « *covariantes* », qui renoncent à définir le temps *a priori* ; les *approches* « *canoniques* » (telle la gravité quantique à boucles) qui partent d'une définition *a priori* du temps au sein de l'espace-temps de la relativité générale.
- La *théorie des supercordes*, qui envisagent un cadre radicalement neuf (les objets physiques sont des cordes, mais l'espace-temps fait partie du background) à partir duquel on espère retrouver la RG

comme limite à basse énergie (et les autres interactions fondamentales).

L'ensemble des approches qui ne relèvent d'aucune des deux premières, par exemple la théorie des *twisteurs* de Penrose ou les *géométries non commutatives* d'Alain Connes.

Je m'attarderai seulement sur la théorie des twisters, car elle est la plus démonstrative d'un éventuel renversement du lien entre cours du temps et 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'accessoire. 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 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 lumière¹⁰. 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 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 ».

10. 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.

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 propager¹¹.

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*¹². S'établit ainsi une relation de correspondance entre l'espace des *twisteurs* et l'espace-temps, relation qui invite à considérer que le

11. 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.

12. 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

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.

Pendant les vingt années qui ont suivi la proposition initiale de Penrose, la « théorie des *twisteurs*¹³ » 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, simple¹⁴.

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.

une sphère de Riemann, qui correspond à l'ensemble des rayons lumineux passant par lui.

13. Une présentation relativement accessible de cette théorie est donnée par Roger Penrose lui-même dans un livre écrit en collaboration avec Stephen Hawking : *La Nature de l'espace...*, *op. cit.*

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

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 en non pas primitif ; sa description la plus fondamentale est discrète ; cette description fait intervenir la causalité de façon cruciale.

Ma conclusion sera très simple : si la physique a renoncé aux causes, cela ne signifie pas qu'elle ait forcément clarifié la nature du concept de loi : quel lien peut-il exister entre le monde et sa représentation, entre l'univers physique et les lois universelles qui découlent des théories physiques ?

Une première piste consiste à considérer que les lois physiques sont des produits de la « pensée », du moins qu'elles en sont inséparables. Mais de quelle pensée ? Celle de l'homme, infime partie de l'univers ? Mais alors, comment celle-ci pourrait-elle saisir la structure du tout qui la contient ? Comment les lois physiques parviendraient-elles à participer à la fois du *monde* qu'elles structurent et de la *pensée* qui permet de comprendre ce monde ?

On peut préférer distinguer, derrière Spinoza, deux sortes d'univers, ou plutôt un même univers qui se donnerait sous deux modes différents : l'univers en tant qu'il est d'une part conçu sous l'attribut de l'étendue, d'autre part sous l'attribut de l'intellect, c'est-à-dire en tant qu'il obéit à l'ordre intelligible de lois éternelles. En d'autres termes, considérer qu'il y a d'un côté un univers *matériel* et *spatial*, doté d'un certain mobilier ontologique constitué de particules et de champs quantiques, de l'autre, un univers *législatif* contenant des lois, des principes et des règles accessibles par la pensée. Mais comment ces deux modes d'être de l'univers communiquent-ils ?

On peut également envisager avec Platon l'existence d'équations mathématiques exprimant les lois physiques, lesquelles seraient tout à fait indépendantes de l'univers naturel qui n'en serait qu'une image mobile et imparfaite, irrémédiablement privée des qualités de l'être et seulement vouée au devenir. L'univers serait en quelque sorte un écho physique

dégradé de la pureté mathématique qui le tiendrait sous sa coupe. Si tel est le cas, comment le monde des Idées parvient-il à structurer « à distance » le monde des phénomènes?

On peut enfin suivre Leibniz et concevoir que le système des lois définit un ensemble d'univers possibles, logiquement cohérents, parmi lesquels le nôtre serait un cas particulier, choisi par Dieu en raison de ses qualités exceptionnelles (« le meilleur des mondes possibles ») ou pas choisi du tout.

Mais parmi toutes ces options, ou d'autres imaginables, comment faire un choix ?