

Processus causal et intrication quantique

Laurent Jodoin*

Résumé

*La notion de causalité repose sur une grande prétention : rendre intelligibles l'origine, la constitution et le devenir du monde. On lui attribue donc une portée universelle : tout événement a une cause. La majeure partie des débats philosophiques sur la causalité a concerné nos jugements intuitifs selon deux types de conceptions causales, soit la conception probabiliste et la conception processuelle. Chacune d'elles fait face à d'importants obstacles conceptuels dont les principaux sont la préemption, l'inaboutissement (*fizzling*), la déconnexion et la méconnexion. Or, afin de rendre compte de certains phénomènes physiques et d'éviter le problème classique des régularités fallacieuses – comme quoi, par exemple, la chute du baromètre ne saurait être la cause de la tempête – l'approche processuelle est généralement privilégiée. Max Kistler (1998 ; 2006), entre autres, offre ainsi une théorie causale processuelle basée sur la notion de transfert d'énergie. Cependant, les cas paradigmatiques d'intrication quantique imposent de sérieuses contraintes aux approches processuelles, dont celle de Kistler.*

1. Introduction

La notion de causalité est ancienne et repose sur de grandes prétentions : rendre intelligibles l'origine, la constitution et le devenir du monde. Traditionnellement, elle concernait la philosophie de la nature, qui traitait autant de l'investigation empirique que de la clarification spéculative. Aristote, pour qui nous ne croyons connaître les choses que lorsque les causes nous sont connues, a étayé la notion de cause en la divisant en quatre catégories : matérielle, formelle,

* Doctorant en philosophie, Université de Montréal/Université de Paris-I-Sorbonne.

efficente et finale. La notion de cause efficace s'est graduellement imposée, au détriment des autres catégories, par sa clarté et la possibilité – importante, voire essentielle en sciences – d'être exprimée en termes mathématiques. Elle reste aujourd'hui objet de débats intenses entre philosophes et les consensus sont rares, pour ne pas dire inexistantes. Caractérisant ces débats, Jonathan Schaffer a affirmé, avec des accents de paradoxe, que la causalité était ce « je-ne-sais-quoi » liant tout ce que nous connaissons¹.

Les prétentions à l'universalité de la causalité imposent des contraintes majeures : elle doit concilier nos intuitions fondamentales avec les concepts, principes et lois des sciences modernes. C'est pourquoi certains modèles épistémologiques, dont celui de Wesley Salmon, la place au centre de toute explication rationnelle concernant le monde. Il y aurait ainsi une similitude conceptuelle, par exemple, entre le fait que mon retard est dû au trafic et celui de la désintégration du boson en raison de sa collision dans l'accélérateur de particules. Or, plusieurs physiciens et philosophes ont récusé son universalité, ou même son existence. Par exemple, Werner Heisenberg (1930) a soutenu que la causalité n'était qu'une approximation ; pour Erwin Schrödinger (1951), elle s'apparenterait à une interpolation ; Bertrand Russell (1912) a affirmé qu'elle faisait partie d'un âge révolu ; et Mario Bunge (1959) qu'elle ne constituait qu'un type de détermination parmi d'autres.

Ces jugements sévères envers la causalité reposent souvent sur la « nouveauté » des phénomènes quantiques et de la théorie qui en rend compte, la mécanique quantique. En effet, l'indéterminisme endémique qu'elle présente laisse d'aucuns pantois : deux expériences qui semblent identiques n'évoluent pas de même. De plus, les particules quantiques semblent posséder une nature duale, en ce sens qu'elles manifestent des traits corpusculaires ou ondulatoires plus ou moins accentués selon les dispositifs expérimentaux, ou encore semblent communiquer à distance puisque les valeurs des mesures effectuées sont parfois corrélées statistiquement malgré le fait qu'elles soient séparées d'une grande distance. Certains scientifiques ont ainsi affirmé les fondements de la liberté de la nature (Paul Dirac), de la

¹ Jonathan SCHAFFER, « Le trou noir de la causalité », *Philosophie*, no. 89, 2006, p. 52.

liberté humaine (Pascual Jordan), ou encore une logique à trois valeurs (Hans Reichenbach). On le conçoit, la mécanique quantique dérange.

Toutefois, bien que le statut de la causalité paraisse ambigu, elle demeure néanmoins au centre de la plupart de nos inférences. C'est d'ailleurs ce que croyait Hume (1739). Celui-ci proposait une thèse associationniste de la croyance, à savoir que toutes nos idées seraient des copies de nos impressions. Selon lui, pour qu'une relation entre événements soit causale, en d'autres mots pour qu'une inférence causale soit possible, il doit y avoir aussi une *conjonction nécessaire*. Toutefois, il n'y aurait pas de conjonction nécessaire *objective*, seulement des conjonctions nécessaires *subjectives*. Donc, conjonction constante n'implique pas conjonction nécessaire et l'induction n'est pas épistémologiquement fondée.

Une recherche électronique du mot « cause » dans la célèbre revue *Science* entre octobre 1995 et juin 2003 renvoie un résultat de 8288 documents (près de 90 documents par mois)². En outre, la causalité est un élément fondamental de la responsabilité civile et, par conséquent, ses conséquences sociales sont importantes³. Malgré cela, une définition consensuelle de la causalité se fait attendre en raison de difficultés conceptuelles majeures : chaque stratégie adoptée semble porter son lot de problèmes « congénitaux ». Au surplus, les solutions proposées, qui restent nombreuses, se heurtent à l'« étrangeté » des phénomènes quantiques.

2. Théories causales

La causalité concerne les changements – ce qui apparaît et ce qui disparaît dans le monde. Elle est parfois considérée comme une catégorie *ontologique* (schème objectif de connexion entre les événements) ou bien *épistémologique* (principe de détermination ou d'inférence). Plusieurs théories causales se sont succédées et aucune n'a fait vraiment consensus. Néanmoins, les jugements causaux

² Don ROSS, David SPURETT, « Notions of cause: Russell's thesis revisited », *British Journal for the Philosophy of Science*, 2007, p. 1-32.

³ Jean-Louis BEAUDOIN, *La responsabilité civile*, 4e édition, Cowansville, Les éditions Yvon Blais inc., 1994.

reposent généralement sur l'intuition ou le sens commun et font appel à des énoncés du genre « la balle a causé le bris de la vitre » ou encore « fumer cause le cancer ». À cet égard, Max Kistler (2006) offre une distinction intéressante à la caractérisation de nos jugements causaux, au sens où nous avons des « attentes » devant les relations causales : la conception *explicative* et la conception *mécaniste*.

Selon la conception *explicative*, une relation causale est essentiellement une explication reliant l'*explanandum* (ce qu'il s'agit d'expliquer, comme un phénomène) à l'*explanans* (ce qui explique, comme une loi). On y retrouve principalement la doctrine de l'empirisme logique (la causalité est une explication déductive), la doctrine contrefactuelle (si *c* n'avait pas eu lieu, *e* n'aurait pas eu lieu) et la doctrine probabiliste (l'occurrence des causes augmente la probabilité d'occurrence des effets).

Selon la conception *mécaniste* une relation causale est essentiellement fondée sur un processus de transmission matérielle. On y retrouve principalement la doctrine de l'agentivité ou de la manipulabilité (une cause *c* est un moyen d'obtenir *e*), la doctrine processuelle en termes de « caractères » (une cause transmet un « caractère » ou une « marque »), la doctrine mécaniste (les causes sont reliées à leurs effets par un mécanisme), la doctrine de la continuité qualitative (une relation causale est caractérisée par un changement continu de propriétés) et la doctrine du transfert (les causes transfèrent des quantités individuelles, comme l'énergie).

Il semble alors évident que la caractérisation de la causalité dépend largement de nos conceptions ontologique et épistémologique. Ainsi, en grande partie, la distinction précédente recoupe les éléments du débat entre empirisme et réalisme. En effet, la première conception esquissée précédemment est plus réceptive à la critique humienne et tente davantage de la ménager en référant aux relations causales comme de simples régularités événementielles, tandis que la seconde implique, d'une certaine façon, une description de la manière dont les événements s'enchaînent (hormis, peut-être, la doctrine de l'agentivité). En ce sens, la question de la causalité présente des ramifications philosophiques importantes et celles-ci peuvent parfois prendre une envergure insoupçonnée si la caractérisation de la causalité se fait détaillée ; par exemple, à quelles conditions un monde doit-il répondre pour accueillir la causalité ?

Jonathan Schaffer (2006 ; 2007) présente une vue d'ensemble des débats philosophiques entourant ce genre de questions, autrement dit de la métaphysique de la causalité. Il y a d'abord les questions concernant la nature des relata causaux : sont-ils localisables dans l'espace-temps (immanents ou non), à quel type de description répondent-ils (fine ou grossière), combien sont-ils (« adicité ») ? Viennent ensuite les questions concernant la nature des relations causales : quelle est la différence entre une relation causale et une relation non causale (connexion), quelle est la différence entre une séquence reliant une cause à un effet et une séquence reliant un effet à une cause (direction), quelle est la différence entre une séquence impliquant une cause et une séquence impliquant de simples conditions ? Les deux approches dominantes dans ces débats sont la conception *probabiliste* et la conception *processuelle*. Elles représentent ainsi, respectivement, un cas de la conception explicative et de la conception mécaniste, présentées précédemment. Plusieurs versions tournant autour de ces idées de base respectives ont été offertes.

La conception *probabiliste* est basée sur l'idée que les causes augmentent la probabilité d'occurrence de leurs effets. Elle tire ses origines des statistiques et de l'analyse logique en termes de conditions nécessaires et/ou suffisantes. La majorité des théories causales probabilistes utilisent le théorème de Bayes décrivant la probabilité conditionnelle P d'un événement A étant donné B , telle que $P(A | B) = P(A \& B) / P(B)$, de sorte que A cause B si et seulement si $P(B | A) > P(B | \text{non-}A)$. Par exemple, il est généralement admis que fumer la cigarette est une cause du cancer du poumon. Pourtant, tous les fumeurs ne développent pas le cancer du poumon et tous les non-fumeurs ne sont pas épargnés par cette maladie. Ainsi, de ces *régularités imparfaites*, il semble raisonnable d'affirmer (seulement) que les fumeurs ont *plus de chance* de développer le cancer du poumon. Mais, alors qu'une conjonction constante faisait partie des desiderata causaux de Hume, dans le cas des fumeurs et du cancer du poumon, par contre, il est plus difficile de déterminer, de manière univoque, la cause et l'effet.

La conception *processuelle* est basée sur l'idée que les causes influencent leurs effets par l'intermédiaire d'un lien ou connexion physique. Elle prend racine dans la physique et dans l'analyse matérielle en termes de flux ou de flots d'entités quantitatives. C'est

pourquoi elle s'appuie généralement sur des lois, telle que, par exemple, la loi (axiome) relativiste affirmant que la vitesse de la lumière est une vitesse limite, discriminant par le fait même certaines relations entre événements. Elle adopte ainsi une attitude naturaliste, à savoir que la philosophie devrait s'« inspirer » (ou encore « être compatible » ou même « découler ») du discours scientifique. Par conséquent, la théorie causale ne devrait pas contredire une loi physique fondamentale et même la prendra souvent comme prémisse. L'une des premières questions à laquelle elle doit répondre consiste à définir ce qui constitue la différence entre un processus (causal) et un pseudo-processus (non-causal).

Chacune de ces deux conceptions rencontre des problèmes typiques. Des conceptions hybrides ont aussi été élaborées, sans succès. (Schaffer (2001) a d'ailleurs présenté une théorie causale en termes d'augmentation de la probabilité d'un processus.)

3. Problèmes rencontrés par les théories causales

Il y a principalement quatre types de problèmes auxquels sont confrontées les approches probabiliste et processuelle. Selon Kistler (2006), les problèmes rencontrés par les conceptions explicatives se nourrissent d'intuitions mécanistes, et vice-versa. En ce qui concerne la conception probabiliste, il s'agit des problèmes de la *préemption* et de l'*inaboutissement* (*fizzling*), et en ce qui concerne la conception processuelle, les problèmes de la *déconnexion* et de la *méconnexion* dominant.

Les cas de *préemption* se présentent lorsqu'un effet a plusieurs causes potentielles : de deux causes potentielles, A et B , pour un effet E , si A cause la non-actualisation de B mais cause E , alors A ne rend pas plus probable E si A est un plus faible potentiel que B . Par exemple, Alice actionne l'interrupteur à l'instant t et la lumière s'allume, mais Benoît (*cause substitut*) aurait actionné l'interrupteur à l'instant t si Alice ne l'avait pas fait. Il s'agit aussi d'un contre-exemple de la doctrine contrefactuelle et des théories régularistes. En effet, une conjonction constante n'implique pas une conjonction nécessaire (où la probabilité est égale à l'unité) et n'implique pas non plus un lien causal. Cet état de fait est particulièrement probant dans le cas des *régularités fallacienses* ; par exemple, la chute d'un baromètre peut être

suivie régulièrement par une tempête, mais il est généralement admis que cette chute *ne* cause *pas* la tempête. Il s'agit en quelque sorte de cas de préemption inversée au sens où une cause a plusieurs effets potentiels (on parle alors d'« effets joints » ou de « cause commune »). Il semble donc que l'augmentation de probabilité ne soit pas une condition *nécessaire* à la causalité.

Il y a *inaboutissement* lorsqu'une cause potentielle ne réussit pas à produire son effet : de deux causes potentielles, A et B , pour un effet E , si A cause E alors que B n'est pas actualisé, B a sans doute rendu plus probable E sans le causer. À partir de l'exemple précédent, supposons que Benoît soit vraiment déterminé à actionner l'interrupteur (et qu'il représente ainsi un plus fort potentiel), mais qu'il soit freiné dans ses intentions (quelqu'un l'appelle, il s'aperçoit qu'il est en retard, etc.) ; de sorte qu'il a augmenté la probabilité de l'effet sans le causer. Il semble donc que l'augmentation de probabilité ne soit pas une condition *suffisante* à la causalité.

Les cas de *déconnexion* se présentent lorsqu'une cause opère en bloquant un processus qui aurait empêché son effet : A est une cause de *non-E* et B cause *non-A*, de sorte que E se produit. Par exemple, un avion s'écrase parce qu'un terroriste sabote l'antenne radio qui aurait permis à la tour de contrôle d'avertir le pilote du danger. Ainsi, si l'acte terroriste est bien la cause de l'écrasement, il semble alors qu'un processus ne soit pas une condition *nécessaire* à la causalité. Un autre type de déconnexion concerne les *relations fonctionnelles* ; par exemple, il ne semble pas y avoir de processus entre la pression et le volume dans la formule de Boyle-Mariotte, ou encore entre deux masses dans la loi newtonienne de la gravitation universelle.

Il y a *méconnexion* lorsqu'un effet est modifié dans certains aspects sans importance : il peut y avoir un processus reliant A à E sans que A cause E . À partir de l'exemple précédent, supposons qu'un oiseau frappe l'avion qui est en train de s'écraser ; de sorte que l'oiseau soit relié à l'écrasement de l'avion sans le causer. Il semble alors qu'un processus ne soit pas une condition *suffisante* à la causalité.

D'autres objections ont bien sûr été soulevées contre ces deux conceptions, mais celles présentées ici sont les plus discutées dans la littérature (voir, entre autres, Schaffer 2007). Plusieurs solutions ou révisions ont aussi été apportées dans le but de contrer ces problèmes, en vain. Or, les différentes théories causales répondent à

plusieurs questions mais elles ne focalisent pas toutes sur les mêmes ; certaines évitent carrément de répondre à certaines questions. Cette situation découle, dans une large mesure, des différentes positions épistémologiques de leurs auteurs qui imposent un certain critère de signification et donc écartent d'emblée certaines questions jugées impertinentes. En effet, dans un cadre humien, par exemple, la question de l'immanence ou de la transcendance ne se pose pas, puisque la connaissance de l'inobservable ou des contrefactuels est impossible (ou plutôt épistémologiquement non fondée).

Dans les deux contre-exemples des conceptions explicatives, une stratégie révisionniste consiste à imposer un critère de *continuité spatio-temporelle*. Ainsi, dans le cas de la préemption, la probabilité doit croître de manière continue et c'est pourquoi, dans l'exemple de l'interrupteur, Benoît ne peut être la cause de l'actionnement de l'interrupteur. En ce qui concerne les régularités fallacieuses, il est nécessaire qu'il y ait un processus continu reliant la cause et l'effet, et ce n'est pas le cas entre le baromètre et la tempête (hormis de façon impertinente, comme la propagation de photons par exemple). Il en va de même dans le cas de l'inaboutissement où la probabilité doit croître de manière continue, et ce n'est pas le cas avec Benoît car la chaîne d'accroissement (de probabilité) s'égaré ou s'évanouit. On constate ainsi que cette stratégie s'éloigne des scrupules empiristes, car elle impose la connaissance d'inobservables ou de contrefactuels. En effet, l'accroissement de probabilité n'est pas observée (même indirectement elle ne pourrait l'être de manière continue), de même que le processus, qui est en grande partie inféré. La critique humienne prend alors de l'ampleur.

Évidemment, la plupart des conceptions mécanistes font aussi appel au critère de continuité spatio-temporelle, puisqu'elles impliquent généralement un processus continu. Entre autres, Bertrand Russell⁴ caractérise les relations causales en termes de « persistance » et « constance » (de qualité ou de structure) ; Mario Bunge⁵ parle de « continuité d'action » ; John L. Mackie⁶ soutient une

⁴ Bertrand RUSSELL, *Human knowledge: Its scope and limits*, Oxon, Routledge, [1948] 2005, p. 477.

⁵ Mario BUNGE, *Causality, - The Place of the causal principle in modern science*, Cleveland, Meridian Books, [1959], 1963, p. 137s.

forme de « persistance dans les objets et les processus ». Dans les théories de ces auteurs, et chez bien d'autres, on retrouve la notion de « ressemblance » entre la cause et l'effet, où le changement est graduel. Il va de soi que ce critère de continuité restreint davantage la classe des séquences pouvant se qualifier de « causales » : du vaste ensemble de séquences d'événements, seules certaines (un sous-ensemble) font preuve de continuité. Ce qui ne signifie toutefois pas que toute relation de continuité soit une relation causale. Comme le souligne Russell⁷, la causalité implique une certaine « concomitance invariable » et non l'inverse ; deux horloges peuvent bien sonner midi régulièrement (selon une relation donnée, successive, simultanée ou autre) sans pour autant être liée par une relation causale.

Cependant, tel que vu précédemment, le critère de processus continu peut échouer à contrer les problèmes de déconnexion et de méconnexion. Dans ce premier cas problématique, illustré par le sabotage du terroriste, la cause ne semble pas reliée à son effet par un processus et ce, même si, sur le plan conceptuel, tout porte à croire qu'il s'agit bien d'une cause : la cause et l'effet sont reliés statistiquement, contrefactuellement, et même moralement (le terroriste sera tenu responsable). Comme l'illustre Schaffer de manière colorée, « ce cas se dandine, barbotte et fait coin-coin comme une cause⁸ », de sorte qu'on ne puisse simplement nier le lien causal. Une façon plus ou moins satisfaisante de s'en sortir consiste à prôner un certain contextualisme : les causes n'agissent pas dans l'absolu, mais seulement sur un « fond » exprimé par une clause « dans les circonstances ». Rien de vraiment surprenant, car il est évident qu'une cause n'est pas suivie de son effet en toute circonstance ; le craquement d'une allumette ne produit pas de feu de forêt en toute circonstance. Le contexte joue alors un rôle important en ce sens qu'il représente un élément conjonctif dans une implication causale. Ainsi, dans l'exemple du terroriste, les circonstances, qui veulent qu'un avion se dirige vers un danger, constituent un ensemble suffisant pour l'effet qu'est l'écrasement,

⁶ John L. MACKIE, *The Cement of the universe*, Oxford, Oxford University Press, [1980] 2002, p. 221.

⁷ *Op. cit.*, p. 477.

⁸ *Op. cit.*, p. 48.

alors que l'avion obéit à un processus. Il est tout de même nécessaire que le sabotage ait lieu. Dans le second cas problématique, il semble que la cause ne soit pas suffisamment « significative », qu'elle soit « sans importance ». Une solution consiste à accepter ce genre de processus comme causal, mais en le qualifiant d'« impertinent », en ce sens qu'il participe à une autre relation causale. L'intensité de cette cause semblera moins insignifiante par rapport à un effet moins perceptible (par exemple, la pression de radiation exercée par des photons). Autrement dit, un événement ou un objet peuvent être « au centre » de plusieurs relations causales, formant ce qu'on appelle une « toile causale » (« causal web »).

Les diverses solutions apportées aux différents problèmes exposés précédemment sont compatibles et parfois même découlent de l'hypothèse de nomicité (« lawfulness »), comme quoi le monde serait gouverné par des lois de la nature. D'ailleurs, l'analyse de la causalité chez Hume et Russell recoupe celle des lois. Le statut de ces lois est toutefois contesté ; la question est de savoir à quel compromis métaphysique l'on est prêt à consentir. Pour certains, les lois sont des structures objectives, pour d'autres, elles ne sont que des régularités cosmiques. Pour autant, ces « lois » paraissent nécessaires à l'introduction des critères de continuité et de persistance dans la caractérisation des relations causales. En effet, le simple critère de régularité – pourtant très « stable » épistémologiquement – n'est pas suffisant aux relations causales, de même du critère de processus (tel que vu précédemment). Une loi permet aussi d'apporter un lien de *nécessité* (plus faible, certes, dans le cas des lois probabilistes) aux relations causales, ce qui légitime en retour des inférences. Celles-ci sont à la base de la plupart des prédictions et des explications (rétrodictions). Le cas paradigmatique des lois mathématiques (ou mathématisées) est à cet égard probant, puisque celles-ci déterminent généralement des valeurs à partir de conditions initiales. Cette aptitude à inférer est essentielle (entre autres pour Russell) à la causalité. Ainsi, la caractérisation de la causalité, afin de répondre aux objections précédentes (comme les régularités fallacieuses), impose le critère de processus continu selon une loi⁹.

⁹ Le terme « impose » est sans doute un peu fort ici. Toutefois, il est clair que les critères mentionnés constituent pour plusieurs auteurs (entre autres

Kistler (1998 ; 2006), afin de répondre à ces problèmes, a proposé une théorie causale de conception mécaniste, qui prend toutefois ses distances des théories processuelles. Sa théorie est une théorie du transfert, conçue « sur mesure pour rendre compte des situations qui constituent des contre-exemples aux théories nomologiques, contrefactuelles et probabilistes¹⁰ ». Il défend une thèse où la causalité est basée sur la *transmission d'une quantité conservative entre événements*. Kistler considère ainsi l'expression suivante comme « fondamentale, non-circulaire, et généralement applicable : deux événements sont reliés comme cause et effet si et seulement s'il existe une quantité d'énergie, de charge électrique ou de toute autre grandeur conservée en vertu d'une loi fondamentale de la nature [...] »¹¹. Une transmission est comprise comme une relation symétrique de coprésence entre événements distincts. Ainsi, deux événements *a* et *b* sont causalement reliés, au sens où l'un est la cause de l'autre, si et seulement s'il existe une quantité conservée *Q* de laquelle une certaine valeur *P* est transmise de *a* à *b*¹². Les événements sont les relata qui sont conçus comme immanents, c'est-à-dire spatio-temporellement localisés. La notion de *quantité conservée* est donc naturaliste, en ce sens qu'elle est empruntée à la physique et la quantité de valeur *P* est présente dans les deux événements *a* et *b*. Cette dernière notion requiert une ontologie impliquant des propriétés appelées « tropes » : un événement concret est constitué « de la totalité des tropes intrinsèques présentes dans la zone spatio-temporelle qu'il occupe » et un trope est dit « intrinsèque à la zone où il se produit s'il ne dépend pas de quoi que ce soit en dehors de cette zone¹³ ».

RUSSELL 1948, MACKIE 1980, STREVENs 2007) une solution aux problèmes soulevés dans la discussion précédente.

¹⁰ Max KISTLER, « La causalité comme transfert et dépendance nomique », *Philosophie*, no. 89, 2006, p. 68.

¹¹ *Ibid.*, p. 67.

¹² Max KISTLER, « Reducing causality to transmission », *Erkenntnis* 48, 1998, p. 1. Ceci n'est pas sans rappeler le théorème de symétrie de Noether : soit un système dont le lagrangien *L* est invariant par rapport à une certaine variable *s*, soit $\partial L / \partial s = 0$, alors il y a une propriété *C* du système qui est conservée, tel que dC/dt .

¹³ *Ibid.*, p. 2.

Bien qu'elles puissent rendre compte de plusieurs problèmes, les théories du transfert, dont celle de Kistler, ont maille à partir avec l'intuition des absences, omissions ou autres faits de forme négative pouvant agir comme causes, comme les déconnexions, mais aussi (comme nous le verrons plus tard) avec certains phénomènes quantiques. Néanmoins, l'hypothèse voulant que l'énergie soit au centre de la causalité, soit le mode de détermination des phénomènes, peut être fertile puisque l'énergie peut être considérée comme non spécifique, c'est-à-dire comme appartenant à tout système physique¹⁴.

En somme, la question de la causalité se heurte à des problèmes qui sont caractéristiques au type de réponses apportées (processuelle ou probabiliste). Bien que le débat ne soit pas tranché, l'approche processuelle doublée du critère d'une loi permet de répondre de façon satisfaisante à plusieurs objections, d'autant plus qu'elle semble faite sur mesure aux théories physiques (qui, pour plusieurs, appuient tout réductionnisme). Entre autres, les processus d'évolution temporelle « de proche en proche » sont tout à fait caractéristiques des théories de l'électrodynamique de Maxwell et de la relativité d'Einstein.

4. Théorie de la mécanique quantique

Les discussions philosophiques sur la mécanique quantique sont pratiquement incalculables. Les interprétations de son formalisme sont aussi nombreuses. Plusieurs philosophes et physiciens ont prétendu qu'elle nécessitait une révision radicale de notre façon de voir le monde : nouvelles sciences, fin de la causalité, modification des ontologies, etc. Elle est, à première vue et dans une large mesure, un appareil mathématique utile à la prédiction des comportements microscopiques. L'interprétation orthodoxe est celle de Copenhague, élaborée à la fin des années vingt principalement par Nils Bohr, Werner Heisenberg et Max Born. Même s'ils ne se sont jamais vraiment accordés sur une interprétation univoque, elle constitue surtout une approche sémantique et épistémologique. Il est convenu de considérer l'interprétation de Copenhague comme impliquant le

¹⁴ Voir, entre autres, Mario BUNGE, *Chasing reality - strife over realism*, Toronto, Toronto University Press, 2006.

principe de correspondance de Bohr, la règle probabiliste de Born, l'interprétation de la complémentarité de Bohr et les relations d'indétermination de Heisenberg¹⁵.

Il est évidemment impossible de présenter ici l'ensemble de la théorie (dont le formalisme peut faire peur à qui ne possède pas une certaine base en mathématiques). Toutefois, une description sommaire mais ciblée peut suffire aux besoins de la présente discussion¹⁶.

(T1) Un événement (contextuel) élémentaire particulier e_{ai} correspond à une valeur particulière d'une certaine grandeur physique, soit une variable A . Ainsi, si l'événement e_{ai} s'est produit, cela signifie que la valeur a_i a été obtenue d'une mesure de la variable A . Un tel événement fait partie d'une gamme d'événements possibles représentée par un ensemble de N vecteurs orthogonaux ayant tous la même origine ; il s'agit de l'*espace des états* qui est un sous-espace d'un espace de Hilbert.

(T2) L'événement e_{ai} est représenté dans l'espace des états par un axe de coordonnées orthogonal aux autres axes de coordonnées et on lui associe un *vecteur de base* $|a_i\rangle$. L'état d'un système est représenté par un vecteur normé, le *vecteur d'état*, dans cet espace. Le *vecteur d'état* $|\psi\rangle$ est un instrument mathématique permettant de calculer les probabilités d'événements particuliers, c'est-à-dire les probabilités d'obtenir une valeur particulière pour une grandeur physique particulière dans la gamme des possibles de l'espace des états.

(T3) Chaque variable dynamique comme grandeur physique est représenté par une *observable*. Par exemple, considérant un électron, le nombre de vecteurs de base doit représenter toutes les positions possibles de l'électron dans un certain contexte. Le principe de

¹⁵ Voir Jennan ISMAEL, « Quantum Mechanics », dans *Stanford Encyclopedia of Philosophy*. Internet, 2000 ; Jan FAYE, « Copenhagen Interpretation of Quantum Mechanics », dans *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, Internet, 2008 ; Louis MARCHILDON, *Mécanique Quantique*, De Boeck & Larcier s.a., Bruxelles, 2000.

¹⁶ Pour plus de détails, voir Claude COHEN-TANNOUJJI, Bernard DIU et Franck LALOË, *Mécanique Quantique. Tome 1 et 2*, Hermann, Paris, [1973] 1998 ; Michel BITBOL, *Mécanique quantique - Une introduction philosophique*, Champs-Flammarion, Paris, [1996] 2003.

superposition s'applique dans cet espace de sorte que la combinaison linéaire de deux états est aussi un état du système.

(I4) L'équation de Schrödinger permet de déterminer l'évolution du vecteur d'état (ou de la fonction d'onde) dans le temps (entre deux mesures) dans l'espace des états, tel que

$$i \hbar \frac{d}{dt} |\psi\rangle = H |\psi\rangle,$$

où H est l'opérateur de l'Hamiltonien (en quelque sorte l'énergie du système).

(I5) La probabilité que l'événement e_{ai} se produise, c'est-à-dire que la mesure de la variable \mathcal{A} donne a_i , est égale au module de la projection c_i du vecteur d'état $|\psi\rangle$ sur l'axe de coordonnées du vecteur de base $|a_i\rangle$ au carré, si la préparation expérimentale est bien caractérisée par ce vecteur d'état $|\psi\rangle$, tel que

$$P(\mathcal{A} \rightarrow a_i, \psi) = |c_i|^2 = |\langle a_i | \psi \rangle|^2,$$

puisque la projection c_i équivaut au produit scalaire. Ceci est la *règle de Born*, formulée en 1926.

Plusieurs caractéristiques de cette théorie ont surpris et surprennent encore. Même Einstein, considéré comme l'un des pères de la théorie, n'a jamais accepté l'interprétation dominante. Au premier chef se trouve sans doute l'indéterminisme : seule la probabilité de (mesure de) présence est déterminée (I5). Le repli épistémologique classique consiste à dire que de l'incomplétude de nos connaissances sur un système quantique découle cet indéterminisme (ou incertitude). Mais le théorème de Bell « prouve » que la théorie est complète¹⁷. De plus, le principe de superposition implique qu'un système quantique est (avant la mesure) dans plusieurs états possibles (I3), ce qui suggéra le fameux « paradoxe du chat de Schrödinger » où un chat semble à la fois mort *et* vivant. Or, le phénomène d'intrication quantique, où des particules corrélées interagissent à distance, reste sans doute le plus déroutant.

¹⁷ Voir, entre autres, l'article de Abner SHIMONY dans *Stanford Encyclopedia of Philosophy* (2009) ; et Claude COHEN-TANNOUJDI, Bernard DIU et Franck LALOË, *Mécanique Quantique. Tome 1 et 2*, Hermann, Paris, [1973] 1998.

5. Intrication quantique

L'intrication quantique est encore considérée comme l'un des phénomènes physiques les plus étranges. Elle a été et est toujours au centre de nombreux débats, tant parmi les scientifiques que parmi les philosophes, et celui entre Bohr et Einstein est sans doute le plus fameux¹⁸.

Lorsque deux systèmes quantiques ont interagi dans le passé, il n'est plus possible de factoriser le vecteur d'état de la paire qu'ils forment en deux vecteurs d'état correspondant à chacun d'entre eux (factorisabilité). Ce vecteur d'état s'écrit comme une superposition linéaire de produits tensoriels de vecteurs d'états. On dit alors que les états des deux systèmes sont devenus « entremêlés » ou « intriqués » (« entangled »). Pour Schrödinger, cela constitue le trait caractéristique de la mécanique quantique¹⁹.

En résumé, dans une version récente de l'expérience, ce phénomène se présente de la façon suivante²⁰.

(E1) Un faisceau laser pénètre dans un cristal, engendrant ainsi l'émission simultanée de deux photons corrélés par rapport aux variables énergie et temps. Deux fibres optiques récupèrent chacun des deux photons et les envoient dans deux directions opposées.

(E2) Les deux photons parcourent la même longueur de fibres optiques avant d'atteindre deux dispositifs situés à une distance approximative de 55 mètres.

(E3) Chaque dispositif contient un élément piézoélectrique excitant un verre spécial et produisant des ondes acousto-optiques. Ces ondes agissent comme des séparateurs : le photon peut être soit

¹⁸ Voir, entre autres, les textes respectifs de Bohr et d'Einstein dans Paul Arthur SCHLIPP (éd.), *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*, MJF Books, New York, 1951.

¹⁹ Voir Michel BITBOL, *Op. cit.*, p. 188-189.

²⁰ A. STEFANOV, H. ZBINDEN, N. GISIN and A. SUAREZ, « Quantum correlations with spacelike separated beam splitters in motion : experimental test of multisimultaneity », *Physical Review Letters* 88, no. 12, 2002, p. 1-4. L'expérience décrite ici est simplifiée : elle ne prend pas en compte le déplacement des miroirs qui montre que les coïncidences varient de façon régulière entre une parfaite corrélation et une parfaite anti-corrélation, en accord avec les prédictions quantiques.

réfléchi, soit transmis. Si le photon est réfléchi, il va rebondir sur un miroir placé à faible distance ; s'il est transmis, il va rebondir sur un miroir placé à une distance variable.

(E4) Dans les deux cas, les photons repartent par une autre fibre optique. Ces ondes acousto-optiques, se déplaçant à 2500 m/s, agissent tels des dispositifs mécaniques se déplaçant à la même vitesse ; de sorte que chaque système subit sa mesure *avant* l'autre système dans son propre référentiel inertiel.

(E5) Les détecteurs captent les photons et l'information (transmise ou réfléchie) est envoyée à un ordinateur : les photons se comportent de la même façon.

Les auteurs de la version de l'expérience précédente (E1–E5) ont proposé que l'intrication quantique soit considérée comme un principe premier, à l'instar de la conservation de l'énergie. Einstein, décrivant ce genre de relations, parlait d'« action à distance qui donne la chair de poule » (« spooky action at a distance »). En général, l'explication de corrélations entre systèmes physiques répond à l'une ou l'autre des stratégies suivantes : soit il y a cause(s) commune(s) (ou encore « entente préalable »), soit il y a interaction (ou communication) très rapide. Or, ces deux stratégies sont écartées. Le théorème de Bell exclut la première stratégie, tandis que la relativité restreinte exclut la seconde – du moins dans l'état actuelle de nos connaissances. C'est pourquoi il est généralement admis que les phénomènes quantiques ne sont pas compatibles avec une réalité dite « locale » car des systèmes spatialement séparés (« genre-espace ») peuvent interagir. En d'autres mots, la mesure sur l'une des particules corrélées influence immédiatement ou simultanément la valeur de la mesure sur l'autre particule, même si elles sont séparées de plusieurs kilomètres. Il peut être tentant d'y voir la possibilité d'une téléportation, mais il n'en est rien²¹.

6. Causalité et intrication quantique

Les solutions présentées précédemment pour répondre aux problèmes issus de conceptions explicatives (comme les régularités

²¹ Certains auteurs, comme Pegg (2006), proposent plutôt une « rétrocausalité ».

fallacieuses ou l'inaboutissement) impliquaient, ou du moins suggéraient, un processus continu selon une loi. Or, la mécanique quantique, et l'intrication quantique en particulier, posent des difficultés importantes aux conceptions mécanistes.

D'abord, les relata causaux dans ces théories sont immanents, c'est-à-dire spatio-temporellement localisables. C'est le cas notamment de la théorie de Kistler (1998 ; 2006). Or, ce qui reçoit une description d'évolution temporelle, soit un processus continu, selon l'équation de Schrödinger (T4) dans la mécanique quantique est le vecteur d'état (T2), autrement dit l'outil mathématique de prédiction probabiliste – en bref, la probabilité. Mais il appert qu'une probabilité n'est pas spatio-temporellement localisable, à moins d'embrasser une espèce d'idéalisme platonicien. Et comment attribuer une trajectoire à ce qui n'est pas localisé ?

Ensuite, l'interaction décrite dans l'intrication quantique ne suit pas un processus continu, bien qu'elle satisfasse à une loi probabiliste (T5). Or, éviter le problème en affirmant qu'il s'agit d'une relation, certes, mais d'une relation non causale mène à d'autres difficultés. En effet, si corrélation n'implique pas causalité, il reste que la possibilité d'une cause commune (qui expliquerait les corrélations) est exclue. Dans un premier temps, il y a la difficulté de la factorisabilité : la probabilité d'obtenir une certaine valeur lors d'une mesure sur une particule corrélée n'est pas indépendante de la probabilité d'obtenir une valeur donnée sur l'autre particule. Dans un deuxième temps, il y a celle de la manipulabilité : l'intervention (par une mesure) d'un agent sur l'une des particules est un moyen d'obtenir (à une probabilité près) une certaine valeur lors de la mesure sur l'autre particule. Donc, l'influence (E5) est telle, que nier la relation causale est hasardeux.

Enfin, l'ontologie des tropes utilisée par Kistler est mise à mal par l'intrication. En effet, les relata causaux sont des événements constitués de tropes intrinsèques, c'est-à-dire qu'elles ne dépendent pas de quoi que ce soit en dehors de cette zone. Or, c'est justement le propre de l'intrication, du moins selon l'interprétation orthodoxe, de rejeter les théories locales. De plus, si action à distance il y a, la relativité restreinte est violée²². Évidemment, Einstein pouvait

²² En toute rigueur il faudrait dire que la relativité restreinte n'est pas violée

difficilement accepter une telle conclusion, mais il y avait pire selon lui : il semble que la particule quantique n'ait pas de « réalité », autrement dit son état est indéterminé, tant que la mesure sur l'autre particule n'est pas effectuée. En effet, le vecteur d'état, qui « décrit » de façon « complète » la particule quantique, représente une superposition d'états possibles avant la mesure (T2 et T3).

Ainsi, l'incompatibilité des théories de type mécaniste avec l'intrication quantique semble, à première vue, suggérer que la causalité n'est pas universelle. Peut-être, comme certains l'ont proposé (Bunge 1967), que les phénomènes quantiques sont des phénomènes *sui generis* qui ont très peu à voir avec les phénomènes communs sur lesquels nous basons nos jugements causaux. Il faut tout de même rendre compte de ces corrélations. Deux voies semblent alors ouvertes : ou bien opter pour une autre interprétation de la mécanique quantique, ou bien réduire les attentes (comme celle d'universalité) d'un concept de causalité (à défaut d'un concept satisfaisant).

Dans le premier cas, plusieurs choix sont disponibles, mais les différentes interprétations offrent des solutions différentes sans pour autant répondre de façon satisfaisante à certains problèmes soulevés par les théories causales de type mécaniste. En effet, très peu d'interprétations de la mécanique quantique rendent compte d'une réalité locale et les plus excentriques (comme celle des « multivers ») posent évidemment d'autres problèmes philosophiques. Par ailleurs, il n'est pas *a priori* exclu que des développements ultérieurs (ou peu connus à l'heure actuelle) en physique surmontent ces problèmes (comme, par exemple, la possibilité de signaux superluminaux).

Dans le second cas, le projet de plusieurs philosophes (par exemple, Mackie, Salmon, Kistler) tombe à l'eau. Y aurait-il une pluralité de déterminations comme le suggère Bunge ? La quête d'un concept unique rendant compte de façon adéquate des changements dans le monde est millénaire, mais la justification de cette unicité n'est

puisqu'aucun message ne peut être transmis *via* les corrélations quantiques. Par ailleurs, il y aurait lieu de discuter des différences sémantiques et conceptuelles entre « non-localité », « non-séparabilité » et « action à distance », mais je ne puis le faire ici pour des raisons d'espace.

pour ainsi dire jamais abordée. Serait-ce implicitement ceci : il n'y a qu'un monde et, donc, un seul principe (causal ou autre) gouvernant son évolution ? Mais si cette universalité est exigée, les difficultés précédentes suggèrent de rompre avec le sens commun ou l'intuition et de s'appuyer sur un lourd bagage scientifique. Et d'affronter ainsi la critique humienne.

7. Conclusion

La plupart de nos jugements causaux sont basés sur l'intuition, mais la grande diversité de déterminations que présente les sciences modernes est bien souvent en rupture avec celle-ci. La recherche d'un concept unique de causalité est parsemée d'embûches qui dépendent largement des conceptions métaphysiques et épistémologiques sur lesquelles repose un tel concept. Ainsi, les théories probabilistes, plus scrupuleuses envers l'empirisme, reçoivent des objections issues de conceptions de type mécanistes, tandis que les théories processuelles, largement inspirées des théories physiques, reçoivent des objections issues de conceptions de type explicatif. Or, une théorie naturaliste, s'appuyant sur le discours scientifique et plus particulièrement sur la physique, implique (généralement) le critère de processus continu et celui de nomicité. Ces critères permettent entre autres de répondre aux problèmes des régularités fallacieuses, de la préemption et de l'inaboutissement. De façon moins convaincante, ils répondent aussi aux problèmes de la déconnexion et de la méconnexion. Cependant, les cas particuliers d'intrication quantique posent de sérieux problèmes à l'introduction de ces critères à l'intérieur d'une conception universelle de la causalité. En effet, la seule façon de représenter une évolution temporelle en mécanique quantique est de s'appuyer sur l'équation de Schrödinger. Mais alors les relata causaux (les vecteurs d'état) ne sont plus spatio-temporellement localisables et l'indéterminisme (probabiliste) règne – ce qui ne signifie toutefois pas que la nature soit chaotique. De plus, l'« action à distance » manifestée par l'intrication quantique ne reçoit pas de description selon un processus continu. Il reste, à défaut de satisfaction, ou bien à réinterpréter la théorie quantique, qui demeure exacte quant à ses prédictions, ou bien à accuser l'abandon de l'universalité de la causalité.

Remerciement

Je remercie un évaluateur anonyme pour ses remarques pertinentes sur une version préliminaire de cet article.

Bibliographie

- BEAUDOIN, Jean-Louis, *La responsabilité civile, 4e édition*, Cowansville, Les éditions Yvon Blais inc., 1994.
- BITBOL, Michel, *Mécanique quantique - Une introduction philosophique*, Paris, Champs-Flammarion, [1996] 2003.
- BUNGE, Mario, *Causality - The Place of the causal principle in modern science*, Cleveland, Meridian Books, [1959], 1963.
- BUNGE, Mario, *Foundations of Physics*, New York, Springer-Verlag, 1967.
- BUNGE, Mario, *Chasing reality - strife over realism*, Toronto, Toronto University Press, 2006.
- COHEN-TANNOUJJI, Claude, DIU, Bernad, et LALOË, Franck, *Mécanique Quantique. Tome 1 et 2*, Hermann, Paris, [1973] 1998.
- FAYE, Jan, « Copenhagen Interpretation of Quantum Mechanics », in *Stanford Encyclopedia of Philosophy*. Internet, 2008.
- HEISENBERG, Werner, *The physical principles of the quantum mechanics*, New York, Dover Publications, inc., [1930] 1949.
- HUME, David, *A Treatise of Human Nature*, Londres, Penguin Books, [1739] 1969.
- KISTLER, Max, « Reducing causality to transmission », *Erkenntnis* 48, 1998, p. 1-24.
- KISTLER, Max, « La causalité comme transfert et dépendance nomique », *Philosophie*, no. 89, 2006, p. 53-77.
- MACKIE, John L., *The Cement of the universe*, Oxford, Oxford University Press, [1980] 2002.
- MARCHILDON, Louis, *Mécanique Quantique*, De Boeck & Larcier s.a., Bruxelles, 2000.
- PEGG, David T., « Causality in Quantum Mechanics », *Physics Letters A* 349, 2006, p. 411-14.
- ROSS, Don, and SPURETT, David, "Notions of cause: Russell's thesis revisited", *British Journal for the Philosophy of Science*, 2007, 1-32.

- RUSSELL, Bertrand, « On the notion of cause », dans *Mysticism and logic and other essays*, New York, George Allen & Unwin Ltd., [1912], 1956.
- RUSSELL, Bertrand, *Human knowledge: Its scope and limits*, Oxon, Routledge, [1948] 2005, p. 477.
- SCHAFFER, Jonathan, « Causality as probability raisers of processes », dans *The Journal of Philosophy*, vol. 98, no. 2, 2001, p. 75-92.
- SCHAFFER, Jonathan, « Le trou noir de la causalité », *Philosophie*, no. 89, 2006, p. 40-52.
- SCHAFFER, Jonathan, « The Metaphysics of Causation » dans *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, Internet, 2007.
- SCHRÖDINGER, Erwin, *Physique quantique et représentation du monde*, Paris, Éditions du Seuil, [1951] 1992.
- SCHLIPP, Paul Arthur (éd.), *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*, New York, MJF Books, 1951.
- STEFANOV, A., ZBINDEN, H., GISIN, N., and SUAREZ, A., « Quantum correlations with spacelike separated beam splitters in motion : experimental test of multisimultaneity », *Physical Review Letters* 88, no. 12, 2002, p. 1-4.
- STREVENSON, Michael, "Mackie Remixed", dans *Causation and Explanation*, édité par Joseph Keim Campbell, Michael O'Rourke and Harry S. Silverstein, Cambridge, MIT Press, 2007.

