

**MÉTAPHYSIQUE DE LA CAUSALITÉ  
ET  
PHYSIQUE DE LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE**

Vincent Lam

**1. Introduction**

La question de la nature de la causalité est, avec celle au sujet de l'espace et du temps, l'une des plus fondamentales en philosophie de la nature. Dans une approche analytique, cet article se propose de considérer certains aspects de cette question à la lumière de l'une de nos meilleures théories physiques fondamentales actuelles, la théorie de la relativité générale. Si le possible lien entre causalité, espace et temps n'est évidemment pas nouveau (il suffit de penser à la conception humienne de la causalité par exemple), la théorie de la relativité générale le renforce de manière fondamentale. En particulier, cette théorie – actuellement la plus fondamentale au sujet de l'espace et du temps - soumet les conceptions réalistes de la causalité, selon lesquelles la causalité est une caractéristique objective de la nature, à des contraintes entièrement nouvelles (dans la mesure évidemment où l'on considère, comme c'est le cas dans la démarche ici adoptée, que les sciences sont pertinentes pour de tels sujets). Plus spécifiquement, je vais considérer deux conceptions réalistes de la causalité abondamment discutées dans la littérature récente.

En premier lieu, je vais considérer la conception de la causalité en termes de quantités conservées, telle que récemment élaborée et développée par Wesley Salmon (1998, 2002) et Phil Dowe (2000a) (section 2). Cette conception de la causalité considère les relations causales fondamentales comme des relations physiques dont la nature repose sur le principe physique de la conservation de l'énergie(-matière). Il est clair qu'une telle conception mécaniste et physicaliste de la causalité se doit d'être en accord avec nos meilleures descriptions physiques actuelles du monde – plus que toute autre, elle en tire par ailleurs sa légitimité. Ainsi, le fait que la théorie de la relativité générale ne possède pas en toute généralité de principe de conservation (dans un sens précis discuté plus bas) peut avoir des conséquences importantes pour la conception de la causalité en termes de quantités conservées (section 3).

Cette conception de la causalité est réaliste et non-humienne dans le sens où elle considère les relations causales fondamentales comme des relations objectives (indépendantes de l'esprit) et 'singulières', locales (indépendantes des régularités) dans le monde physique. Cependant une telle conception empirique ne se prononce pas sur la

question métaphysique de la nécessité (ou du caractère irréductiblement causal) de la relation entre cause et effet (pour beaucoup élément essentiel à la thèse du réalisme au sujet de la causalité, voir par exemple Chakravartty 2005). Cette nécessité est (en général) prise en compte dans le cadre de la conception causale des propriétés (ou en termes de dispositions ou de pouvoirs), selon laquelle les propriétés physiques fondamentales, en tant que certaines qualités, sont le pouvoir de produire certains effets ; ainsi ces effets peuvent être compris comme la conséquence nécessaire de la nature même des propriétés considérées (section 4). Dans le cadre d'une telle conception réaliste envers la causalité, notamment développée et défendue par Rom Harré et Edward Madden (1975), Sydney Shoemaker (1980), Stephen Mumford (1998) et Alexander Bird (2007), les propriétés physiques fondamentales ont donc une nature causale irréductible, ancrant ainsi la causalité dans la nature même des propriétés, reflétant son caractère objectif et fondamental. Il est clair que l'existence d'un tel caractère causal irréductible des propriétés ne constitue pas une question empirique que les sciences et en particulier la physique fondamentale peuvent trancher : en effet, un monde où les propriétés physiques fondamentales sont catégoriques (non-causales) n'est pas qualitativement distinct d'un monde où les propriétés physiques fondamentales sont irréductiblement dispositionnelles (causales). Cette distinction est une question métaphysique. Néanmoins, dans la mesure où l'on requiert d'une conception de la causalité qu'elle soit compatible avec ce que nous dit la physique fondamentale, cette dernière peut fournir des arguments pertinents dans ce débat. En particulier, je vais m'intéresser aux arguments tirés de la théorie de la relativité générale (section 5). Il est important de préciser que cet article a moins pour but d'évaluer ces deux conceptions de la causalité que de mettre en lumière un cas d'interaction fructueux entre physique et métaphysique.

## 2. Théorie des quantités conservées

Dans cette section, je présente brièvement les éléments centraux de la théorie des quantités conservées dans la version de Dowe (les différences avec la version de Salmon ne sont pas importantes ici). Dans le cadre de cette théorie, la causalité est comprise en termes d'*interactions causales* et de *processus causaux*, eux-mêmes définis à l'aide de concepts physiques.<sup>1</sup> Ainsi une *interaction causale* est une intersection de lignes univers impliquant l'échange d'une quantité conservée. Une ligne univers est une courbe (de type 'temps' ou de type 'lumière')<sup>2</sup> dans l'espace-temps représentant l'histoire d'un objet. La notion d'échange est comprise comme un changement dans la valeur de la quantité conservée pour au moins une ligne univers entrante et une ligne

<sup>1</sup> Je suis Dowe (2000a) pour la plupart des définitions de la théorie des quantités conservées.

<sup>2</sup> Une courbe dans l'espace-temps  $(M, g_{ab})$  est du type 'temps' ou du type 'lumière' si pour tous les points  $p$  de la courbe le vecteur tangent  $t^a(p)$  à la courbe est du type 'temps', c'est-à-dire si  $g_{ab}t^a(p)t^b(p) < 0$ , ou du type 'lumière', c'est-à-dire si  $g_{ab}t^a(p)t^b(p) = 0$ , avec  $(-1, +1, +1, +1)$  pour signature de  $g_{ab}$ .

univers sortante<sup>3</sup> et de telle manière que la loi de conservation correspondante soit satisfaite. Une quantité conservée est une quantité physique qui satisfait une loi de conservation pour toute région de l'espace-temps donnée.<sup>4</sup> Ce sont les théories physiques fondamentales qui définissent les lois de conservation ainsi que les quantités conservées ; cette conception de la causalité dépend ainsi fortement de ce que nous disent ces théories physiques fondamentales. En particulier, on considère volontiers l'énergie(-matière) comme la quantité conservée pertinente dans l'analyse de la causalité et ceci pour deux raisons principales. Premièrement, la conservation de l'énergie(-matière) est un des piliers de toute la physique contemporaine<sup>5</sup> et donc semble être expérimentalement bien vérifiée dans notre monde. Deuxièmement, il semble y avoir un lien spécifique entre causalité et énergie(-matière), lien déjà mis en valeur par de nombreux philosophes, tels Bertrand Russell et Hans Reichenbach, et selon lequel une cause produit un effet en vertu de l'énergie(-matière) qu'elle possède. Le second élément fondamental de la théorie des quantités conservées est le *processus causal*, qui est une ligne univers d'un objet qui possède une quantité conservée. La notion d'objet est ici conçue dans un sens très large. Dans la mesure où l'on considère la causalité au niveau fondamental, les objets sont les éléments fondamentaux constituant l'ontologie pertinente, comme des particules ou des champs par exemple. Un objet possède une quantité conservée dans le sens que cette quantité conservée, considérée comme une propriété, est 'instanciée'. La théorie des quantités conservées ne prend pas position dans les débats traditionnels en métaphysique des objets et des propriétés.<sup>6</sup> La thèse centrale de la conception de la causalité en termes de quantités conservées peut à présent être énoncé comme suit : il y a une *relation causale* entre deux événements<sup>7</sup> si et seulement si ces deux événements sont reliés par un ensemble de processus causaux et d'interactions causales de telle manière que tout changement se produit lors d'une interaction causale et que les changements dans les quantités conservées (l'énergie(-matière)) sont régis par les lois de conservation physiques.

### 3. Théorie des quantités conservées et physique de la relativité générale

---

<sup>3</sup> 'Entrante' et 'sortante' sont définis par le cône de lumière local et sont interchangeables.

<sup>4</sup> Le caractère de 'loi' n'est pas nécessaire ici. Il suffit que la quantité conservée considérée satisfasse un énoncé particulier de conservation pertinent dans le cas considéré (Dowe 2000a, 96 ; Salmon 1998, 259, Psillos 2002, 121). Nous discuterons plus bas une représentation mathématique précise d'un tel énoncé de conservation.

<sup>5</sup> Hormis la théorie de la relativité générale – c'est tout le problème.

<sup>6</sup> A noter cependant que cette définition d'un processus causal nécessite que l'objet dont la ligne univers est un processus causal possède une identité dans le temps ou 'générité', en particulier pour distinguer un processus causal de ce qui est appelé pseudo-processus, comme par exemple une tache de lumière se déplaçant sur un mur (Salmon 2002, 113-116).

<sup>7</sup> Un événement est simplement compris comme 'instanciation' de propriétés dans une région de l'espace-temps donnée ; en particulier, une interaction causale est un événement. Plus spécifiquement, un événement peut aussi être compris comme la partie temporelle d'un objet.

Les notions d'énergie d'un système physique et de conservation de cette énergie constituent un sujet délicat et ardu en théorie de la relativité générale. La source des difficultés se trouve dans la nature unique du champ gravitationnel et de l'espace-temps, décrits comme une seule et même structure physique dans le cadre de la relativité générale.<sup>8</sup> L'espace-temps a ainsi une nature fondamentalement dynamique et il n'y a pas d'entité physique non dynamique par rapport à laquelle les systèmes physiques étudiés peuvent être considérés (selon de nombreux chercheurs, cette propriété, 'background independence' en anglais, est une caractéristique fondamentale de la théorie de la relativité générale et constitue une des difficultés majeures pour la quantification du champ gravitationnel). En particulier, de cette nature dynamique (et de la courbure de l'espace-temps) découle l'impossibilité en général de définir une famille globale de courbes (géodésiques) de type temps représentant des observateurs inertiels au repos les uns par rapport aux autres. Ainsi, un observateur donné ne peut définir l'énergie d'une particule distante (Wald 1984, 69). Du point de vue technique, ceci provient du fait que l'espace-temps, dans le cas général, ne possède pas le haut degré de symétrie nécessaire à l'existence de ce genre de famille de courbes (plus spécifiquement, une solution générale des équations d'Einstein ne contient pas de champ de Killing). Sans ce genre de famille de courbes, il n'est pas possible de définir un énoncé ou loi assurant la conservation de l'énergie(-matière) dans un volume donné de l'espace-temps : il n'y a pas de loi de conservation de l'énergie(-matière) sous forme intégrale dans le cadre de la relativité générale.<sup>9</sup> Il doit être clair que ce fait n'est pas une question épistémologique mais est une conséquence de la nature de l'espace-temps et du champ gravitationnel.

En effet, l'absence de loi de conservation de l'énergie(-matière) peut être considérée du point de vue du champ gravitationnel. En considérant la physique newtonienne, on peut s'attendre à ce que le champ gravitationnel possède également une certaine énergie (qui nous est par ailleurs familière). En théorie de la relativité

---

<sup>8</sup> L'espace-temps est décrit par une classe d'équivalence de paires  $(M, g_{ab})$  où le champ métrique de Lorentz  $g_{ab}$  décrit à la fois les effets inertiels et gravitationnels ainsi que toutes les relations spatio-temporelles fondamentales. On peut interpréter l'espace-temps et le champ gravitationnel, tels que décrits par la théorie de la relativité générale, comme une seule et même structure physique dans le sens précis d'un réseau de relations physiques (spatio-temporelles et gravitationnelles) entre des relata ne possédant pas d'identité intrinsèque (en raison de l'invariance sous les difféomorphismes actifs), voir Esfeld et Lam (2008) et Lam (à paraître).

<sup>9</sup> Dans la théorie de la relativité générale, la distribution d'énergie-matière est représentée par un champ tensoriel de type  $(0, 2)$ , le champ tensoriel d'énergie-impulsion  $T_{ab}$ , satisfaisant la loi de conservation sous forme différentielle  $\nabla^a T_{ab} = 0$ , où  $\nabla^a$  est la dérivée covariante associée avec la métrique. Une telle expression ne représente pas un énoncé de conservation valable sur tout volume fini de l'espace-temps. La présence d'un champ de Killing  $v_a$  satisfaisant par définition l'équation de Killing  $\nabla_a v_b + \nabla_b v_a = 0$ , implique que  $\nabla^a (T_{ab} v^b) = 0$  ( $T_{ab}$  est symétrique) et permet de considérer l'intégral sur un volume 4-dimensionnel  $V$ ,  $\int_V \nabla^a (T_{ab} v^b) dV = 0$ , ce qui par le théorème de Stokes peut s'écrire  $\int_S T_{ab} v^b dS^a = 0$ , où  $S$  est le bord 3-dimensionnel de  $V$ . Cette dernière expression représente bien un énoncé de conservation de l'énergie(-matière) pour tout volume fini  $V$  de l'espace-temps ( $T_{ab} v^b$  représente le 4-vecteur de densité de courant d'énergie-matière par rapport à  $v^b$ ). Dans le cas général d'un espace-temps sans champ de Killing, un tel énoncé de conservation de l'énergie(-matière) n'est donc pas disponible (Wald 1984, 69-70).

générale, une telle énergie gravitationnelle est bien présente, mais, comme le champ gravitationnel est assimilé au champ métrique de Lorentz (et vice versa), elle n'est pas représentée de la même manière que les autres formes d'énergie, comme l'énergie du champ électromagnétique par exemple (le tenseur énergie-impulsion représente l'énergie(-matière) non gravitationnelle). Ainsi on pourrait légitimement se demander s'il ne suffirait pas de prendre en compte cette énergie du champ gravitationnel pour obtenir une loi de conservation de l'énergie(-matière) 'totale'. Les choses sont cependant un peu plus compliquées. En effet, non seulement l'énergie gravitationnelle n'est pas représentée de la même manière que les autres formes d'énergie, mais elle ne peut l'être, dans le sens où l'énergie gravitationnelle ne peut être représentée par un objet géométrique indépendamment de tout système de coordonnées (c'est-à-dire par un tenseur). Ainsi est-il toujours possible de trouver un système de coordonnées dans lequel (infinitésimalement) l'énergie gravitationnelle est nulle.<sup>10</sup> En conséquence, l'énergie gravitationnelle est comprise comme étant non locale, dans le sens direct où la quantité d'énergie gravitationnelle présente dans une région donnée de l'espace-temps ne peut être définie de manière univoque.<sup>11</sup> En tout généralité, il ne peut donc y avoir de loi de conservation de l'énergie(-matière) dans la mesure où aucune loi de conservation ne peut prendre en compte cette nature non locale de l'énergie gravitationnelle (il est clair que l'énergie gravitationnelle peut être transformée en énergie non gravitationnelle et ainsi peut augmenter ou diminuer la quantité d'énergie présente dans une région donnée de l'espace-temps).

Bien qu'encore peu débattue en philosophie de la nature, cette conclusion ainsi que ses conséquences pour la conception de la causalité en termes de quantités conservées ont été discutées de manière pertinente par Alexander Rueger (1998) et Erik Curiel (2000). En l'absence de quantités conservées (en particulier l'énergie-matière), les notions fondamentales d'interaction causale et de processus causal sont mal définies. Ainsi, il n'y a pas de loi de conservation permettant de réguler l'échange d'énergie-matière lors d'une interaction causale et permettant d'identifier une ligne univers comme processus causal. Si l'on tient compte de la nature de l'espace-temps et du champ gravitationnel tels que décrits par la théorie de la relativité générale, cette conception de la causalité ne donne pas de conditions bien définies permettant de conclure si deux événements sont reliés causalement ou pas.

Dans la mesure où le principe de conservation de l'énergie(-matière) constitue un des piliers de la physique contemporaine (hormis la théorie de la relativité générale), il pourrait sembler que la conception en termes de quantité conservées, en liant la notion

---

<sup>10</sup> Ce fait est souvent compris comme découlant du principe d'équivalence formulé par Einstein, voir par exemple Misner, Thorne et Wheeler (1973, 386) ; or la signification de ce principe d'équivalence au sens d'Einstein est plus subtile, voir Norton (1993, §4.1).

<sup>11</sup> Hoefler (2000) argumente que ce caractère non local de l'énergie gravitationnelle montre qu'elle ne constitue pas en réalité une véritable forme d'énergie. Cette interprétation ne modifie en rien l'absence de loi de conservation de l'énergie(-matière).

de causalité à ce principe, capture bien un aspect fondamental du monde. Une telle attitude reviendrait cependant à négliger la leçon d'une des deux théories contemporaines les plus fondamentales : espace-temps et champ gravitationnel forment une seule et même entité physique, possédant énergie et impulsion, et reliée dynamiquement (et de manière universelle) à toute l'énergie-matière non gravitationnelle. Du point de vue de la théorie de la relativité générale, la pertinence du principe de conservation de l'énergie(-matière) dans les autres domaines de la physique et en particulier en théorie quantique (l'autre théorie contemporaine fondamentale), provient du fait que ces théories postulent une structure spatio-temporelle non dynamique, fixe, possédant le degré de symétrie nécessaire pour définir une loi de conservation de l'énergie(-matière). En fait, dans le cadre de la relativité générale, il existe une notion d'énergie(-matière) totale bien définie pour un système physique isolé, c'est-à-dire pour un système physique dans un espace-temps asymptotiquement plat (c'est-à-dire que très loin du système physique considéré, l'espace-temps est celui, non dynamique, de Minkowski). Si de telles approximations sont extrêmement utiles et justifiées pour la physique de nombreux cas concrets, notamment les systèmes quantiques où la gravitation peut être négligée, elles ne peuvent constituer la base empirique d'une théorie de la causalité qui se propose d'être fondamentale (à moins d'écarter d'emblée ces aspects fondamentaux de la relativité générale comme non pertinents – pari risqué).

Une autre attitude possible du partisan de la théorie des quantités conservées est d'accepter ouvertement dans un premier temps cette conception de la causalité comme contingente, notamment par rapport à l'existence dans notre monde actuel de lois de conservation ou de quantités conservées, et de maintenir dans un deuxième temps que notre monde actuel possède bien les propriétés requises, en l'occurrence le haut degré de symétrie de l'espace-temps nécessaire à l'existence de lois de conservation (dans le cas de la conservation de l'énergie-matière, l'espace-temps doit être invariant par rapport à certaines translations temporelles<sup>12</sup> – il est dit 'stationnaire'). Cette attitude est adoptée par Dowe (2000a, 2000b) face au problème des quantités conservées dans la théorie de la relativité générale. Ainsi Dowe (2000a, 2000b) conçoit la théorie des quantités conservées comme une analyse empirique de la causalité dans notre monde actuel par opposition à une métaphysique de la causalité s'appliquant dans tous les mondes possibles ; une telle analyse empirique doit, selon lui, reposer sur les résultats des sciences – comme déjà mentionné, c'est précisément la démarche adoptée ici. Or, ce sont les résultats de la théorie de la relativité générale appliquée à notre monde actuel qui tendent à montrer que, contrairement à ce que Dowe (2000a, 97 ; 2000b, 24) avance, notre univers ne possède pas, à strictement parler, le haut degré de symétrie requis (les solutions de Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker, qui constituent le 'modèle standard' de la cosmologie contemporaine, sont fortement symétriques - en particulier

---

<sup>12</sup> Un tel espace-temps doit posséder un champ de Killing du type temps (voir Wald 1984, 119-120).

homogènes et isotropes, mais il est clair que ces solutions, physiquement justifiées, ne constituent cependant que des approximations de notre univers actuel).<sup>13</sup>

Que la théorie des quantités conservées nécessite des conditions tellement spécifiques (du point de vue de la relativité générale) pour être viable semble refléter le fait que cette théorie considère la causalité entre objets matériels évoluant sur un espace-temps fixe (par exemple Curiel (2000, 47) souligne le fait qu'un champ de Killing de type temps constitue une sorte de structure temporelle fixe et privilégiée par rapport à laquelle on peut considérer les quantités conservées). Or, comme nous l'avons vu, la théorie de la relativité générale décrit l'espace-temps comme une entité physique fondamentalement dynamique possédant énergie et impulsion (gravitationnelle), de sorte que, d'un point de vue strict, il n'est pas possible d'isoler un processus 'causal' des interactions 'causales' avec la structure spatio-temporelle ou avec le champ gravitationnel.

La conception de la causalité en termes de quantités conservées fournit un excellent exemple des relations fructueuses entre métaphysique de la nature et physique : fondée sur des considérations provenant de la physique, cette conception réaliste de la causalité se trouve en dernier ressort remise en question pour des raisons physiques plus fondamentales que celles sur lesquelles elle se trouve basée. De manière analogue, toute position métaphysique au sujet de la nature doit pouvoir être discutée à la lumière de ce que nous dit la physique fondamentale sur le monde. Il est clair qu'il n'y a aucune implication directe entre physique et métaphysique de la nature. Cependant la physique peut apporter un éclairage pertinent sur certaines positions métaphysiques, comme dans le cas des conceptions réalistes de la causalité, dans une approche physique en termes de quantités conservées ou, dans une approche plus métaphysique, en termes de dispositions et de pouvoir causaux, que j'aborde à présent.

#### **4. Théorie causale des propriétés**

Dans le cadre de la théorie des quantités conservées, la causalité est considérée comme une caractéristique objective du monde, mais la question plus métaphysique de la nécessité (ou du caractère irréductiblement causal) de la relation causale est laissée ouverte. Ainsi, malgré leur caractère objectif et singulier, est-il possible de comprendre les processus causaux et les interactions causales de la conception de Salmon et Dowe comme survenant sur une base humienne non-causale (voir par exemple Psillos 2002, §4.5.4). A l'inverse, rien ne semble empêcher de considérer les propriétés en jeu dans la théorie des quantités conservées comme étant irréductiblement causales, c'est-à-dire des propriétés dont la nature même est de produire certains effets (Chakravartty 2005, §5, discute brièvement cette possibilité). Dans une démarche empiriste, il est légitime de se

---

<sup>13</sup> Curiel (2000, 47-48) souligne le fait que la moindre 'inhomogénéité' brise la symétrie requise et qu'il semble que rien de tel ne puisse correspondre à notre univers actuel.

demander quel est l'intérêt de considérer les propriétés physiques fondamentales comme des pouvoirs causaux dont la nature causale irréductible semble hors de portée des sciences empiriques (ce constat constitue par ailleurs le cœur de la critique humienne). Dans le débat contemporain, une motivation plus ou moins explicite parmi les partisans d'une telle conception provient de la 'pratique' en physique fondamentale : en effet, dans la mesure où nous connaissons une propriété physique fondamentale, nous la connaissons via la manière dont elle interagit, via les relations causales dans lesquelles elle entre. Si cette particularité épistémologique suggère une nature purement dispositionnelle des propriétés physiques fondamentales, elle ne constitue toutefois pas à elle seule un argument suffisant contre une nature catégorique sous-jacente de ces propriétés. En revanche, cette particularité épistémologique s'accorde avec l'un des arguments principaux, purement métaphysique, en faveur d'une théorie causale des propriétés : dans la mesure où l'on a accès aux propriétés physiques fondamentales uniquement via les relations causales dans lesquelles elles rentrent, leur nature catégorique est indépendante de leur rôle nomologique et causal. Cette nature catégorique constitue une caractéristique qualitative primitive et inaccessible (une 'quiddité') des propriétés et nous contraint donc à une forme d'humilité, dans le sens qu'on ne peut connaître ce que sont les propriétés. Dans une approche empiriste, il n'est pas très satisfaisant de devoir accepter une telle nature qualitative inaccessible des propriétés. Deux propriétés physiques fondamentales, qualitativement distinctes en vertu de leur nature catégorique distincte, peuvent ainsi entrer dans exactement les mêmes relations causales et nomologiques (correspondant à ce que l'on conceptualise comme étant la charge par exemple). Une telle sous-détermination métaphysique disparaît si l'on considère une théorie causale des propriétés selon laquelle leur nature même est (le pouvoir, la disposition) de produire certains effets. Ainsi, deux propriétés distinctes, par leur nature, leur essence, ne peuvent produire exactement les mêmes effets, produire exactement les mêmes relations causales. Ces dernières, découlant de la nature même des propriétés, possèdent alors un caractère objectif et nécessaire : dans la mesure où la nature d'une propriété physique fondamentale est de produire certains effets, ces derniers constituent la conséquence nécessaire de la nature de la propriété considérée. Les propriétés physiques fondamentales sont alors conçues comme ayant une essence dispositionnelle irréductible ou comme étant des pouvoirs causaux irréductibles, ne nécessitant en particulier aucune condition de manifestation extérieure (en quelque sorte, il est dans la nature même des propriétés de produire certains effets). Les détails et subtilités des différentes versions de la théorie causale des propriétés en termes de pouvoirs causaux ou de dispositions irréductibles ne sont pas pertinents pour la discussion ici (voir Shoemaker 1980, Mumford 1998, Bird 2007, Chakravartty 2007). Le point essentiel est qu'il y a un argument purement métaphysique important en faveur d'une théorie causale des propriétés (bien que motivé par une démarche empiriste, cet argument est indépendant des considérations épistémologiques mentionnés ci-dessus au



sujet de la ‘pratique’ en physique fondamentale), c’est-à-dire en faveur d’un réalisme causal fort, ancrant la causalité dans la nature même des propriétés physiques fondamentales.<sup>14</sup>

Comme déjà souligné, le but ici n’est certainement pas d’évaluer une telle conception. Plutôt, il s’agit de considérer les interactions entre cette conception métaphysique de la causalité et la physique de la théorie de la relativité générale. Je vais en particulier considérer les conséquences pour la théorie causale des propriétés de la nature fondamentalement dynamique de l’espace-temps. Ainsi certaines contraintes globales (non triviales) doivent être imposées à la structure de l’espace-temps pour assurer la cohérence de la conception causale des propriétés. Il semble alors que ces contraintes affectent en particulier un aspect important de cette conception : le caractère ‘singulier’ (‘singulariste’) de la relation causale. Si l’on considère deux événements *A* et *B* (instanciations de propriétés physiques fondamentales par exemple) comme étant reliés par une relation causale dans le sens où la nature de *A* est de produire l’effet *B*, alors la nature causale de la relation ainsi que l’existence même de l’événement *B* sont entièrement basées de manière locale (‘singulière’) sur l’événement *A*. Ceci par opposition à la conception humienne, non-singulière, de la causalité selon laquelle le lien causal entre *A* et *B* dépend des régularités entre tous les événements de type *A* et tous les événements de type *B* dans le monde, et en définitive survient sur l’entière distribution des propriétés physiques fondamentales (comme dans le cadre de la thèse de David Lewis de la survenance humienne, voir par exemple Lewis 1986, ix-x).<sup>15</sup> Parmi les partisans de la théorie causale des propriétés, cet aspect ‘singulier’ de la causalité n’est pas controversé et est considéré comme un avantage dans la mesure où, pour rendre compte d’une relation causale, seul la nature des propriétés en jeu est invoquée. Les contraintes globales qui doivent être satisfaites par la structure spatio-temporelle semblent en un certain sens affecter cet aspect ‘singulier’ de la relation causale : il semble que la nature causale de la relation ne dépend plus uniquement de la nature de la propriété considérée comme cause mais également de propriétés globales de la structure spatio-temporelle. Mais avant de discuter cette possibilité plus en avant, il

---

<sup>14</sup> Selon les partisans de la théorie causale des propriétés, l’argument métaphysique majeur au sujet de la ‘quiddité’ n’est pas le seul en faveur de cette conception de la causalité et des propriétés ; ils proposent des arguments provenant de la physique quantique (systèmes quantiques intriqués comme ayant des dispositions irréductibles de dissoudre leur intrication par exemple) et de la physique de la relativité générale (propriétés spatio-temporelles comme causales – voir section 6) ; voir la contribution de Michael Esfeld dans ce numéro ainsi que les références mentionnées.

<sup>15</sup> Il est possible que les relata de la relation causale ne soient pas des entités ponctuelles et ‘locales’ ; par exemple, dans le cadre du réalisme structural ontologique, il a récemment été suggéré que les structures physiques (dans le sens précis d’un réseau de relations concrets, physiques entre des relata concrets, physiques) soient elles-mêmes causales (French 2006, Esfeld 2009) ; cependant, comment des structures et des relations peuvent posséder des pouvoirs causaux reste peu clair (French 2006, § VI). Dans tous les cas, l’élément essentiel de l’aspect singulier de cette conception de la causalité est que la cause (par exemple l’état du monde à un temps donné) produit nécessairement l’effet (l’état du monde à un temps ‘ultérieur’ – cet exemple particulier est discuté en section 5) et ceci de par sa nature même, en particulier sans tenir compte du reste des propriétés physiques fondamentales.

est utile de considérer un peu plus en détail ce que sont ces contraintes que le partisan de la théorie causale des propriétés doit accepter.

## 5. Théorie causale des propriétés et physique de la relativité générale

L'une des principales leçons de la théorie de la relativité générale est que l'espace-temps et le champ gravitationnel forment une unique structure physique dynamique, possédant de l'énergie (gravitationnelle) et interagissant avec l'énergie(-matière) gravitationnelle ('self-interaction') et non-gravitationnelle – interaction décrite par les équations d'Einstein. Comme conséquence de cette nature dynamique, la topologie de l'espace-temps peut ainsi être non-triviale. En théorie de la relativité restreinte, la métrique fixe de Minkowski définit en chaque point de l'espace-temps un cône de lumière future et passé ('future' et 'passé' sont en premier lieu ici des labels interchangeables, modulo une certaine consistance avec le reste de l'espace-temps nécessitant la satisfaction d'une condition globale dite d'orientabilité temporelle'). Le cône de lumière futur en tout point  $p$  de l'espace-temps détermine l'ensemble des événements pouvant être causalement influencé par un événement en  $p$ , c'est-à-dire l'ensemble des points de l'espace-temps pouvant être atteints par une particule physique (se propageant avec une vitesse inférieure ou égale à celle de la lumière) passant par  $p$  (et similairement pour le cône de lumière passé). Cette structure se retrouve uniquement localement en théorie de la relativité générale, c'est-à-dire n'est valable que pour un voisinage (dit 'normal') de tout point  $p$  de l'espace-temps ; elle peut différer considérablement au niveau global. Ainsi, dans un espace-temps dynamique (non plat), l'ensemble  $I^+(p)$  des événements qui peuvent être atteints par une particule physique suivant une courbe de type temps (orientée vers le future) et passant par l'événement  $p$  ne coïncide pas avec l'intérieur du cône de lumière future en  $p$  (qui est par ailleurs uniquement défini localement pour un voisinage de  $p$  – d'un point de vue strict, le cône de lumière se trouve dans l'espace tangent). En particulier, il est tout à fait possible que  $p \in I^+(p)$ , ce qui signifie qu'il existe une courbe fermée de type temps orientée vers le futur passant par  $p$ . Dans un tel espace-temps et dans le cadre d'une conception réaliste de la causalité, un événement peut alors causalement influencer des événements dans son passé et entrer en relation causale avec soi-même, ce dernier aspect étant le plus problématique, en particulier dans le cadre de la théorie causale des propriétés. Il semble en effet difficile de maintenir que la nature d'une occurrence d'une propriété est de se produire elle-même. A partir de ce constat, deux attitudes sont possibles. Premièrement, accepter les comportements causalement pathologiques comme physiquement possibles (dans notre monde actuel). Une telle attitude est motivée par le fait que de nombreuses solutions des équations d'Einstein (dont certaines pouvant possiblement s'appliquer à notre monde actuel) contiennent des courbes fermées du type temps orientées vers le futur (par exemple, la solution de Kerr-Newman décrivant

l'espace-temps autour d'une masse chargée en rotation peut contenir de telles courbes). Dans ce cas, il semble alors que la théorie causale des propriétés telle que présentée dans la section précédente n'est pas compatible avec la théorie de la relativité générale. Ce qui constitue un désavantage important pour la théorie causale des propriétés dans la mesure où la relativité générale fournit une description empiriquement pertinente de la nature. Une seconde attitude est de rejeter les courbes fermées du type temps comme physiquement non pertinentes. Une telle attitude est justifiée en considérant que beaucoup de solutions des équations d'Einstein contenant des courbes fermées du type temps orientées vers le futur sont artificielles et ne correspondent pas en fait à des situations physiques dans notre monde actuel (la fameuse solution de Gödel est communément admise comme ne correspondant à aucune région de notre univers ; dans l'exemple ci-dessus, la métrique de Kerr-Newman représentant plus spécifiquement l'espace-temps à l'extérieur d'un trou noir chargé en rotation ne contient pas de courbes fermées de type temps ; en outre, des considérations globales sur certaines lois de la physique, comme les équations de Maxwell, peuvent être mises en avant pour exclure l'existence de telles courbes fermées). Cette prise de position est cependant controversée autant parmi les philosophes des sciences que parmi les physiciens (voir par exemple la discussion dans Earman 1995, § 6.4 – dans le cas de la solution de Kerr-Newman contenant des courbes fermées du type temps, elle peut être comprise comme représentant l'espace-temps engendré par l'effondrement gravitationnel d'une étoile en rotation ne donnant pas naissance à un trou noir – possibilité physique ne pouvant être exclue a priori). Néanmoins, nous allons adopter cette attitude ici, dans le but d'offrir la possibilité d'un cadre physique à la théorie causale des propriétés. Ainsi est-il possible d'imposer une condition globale excluant les solutions contenant des courbes fermées de type temps (condition de 'chronologie'). Il est immédiatement évident qu'une telle condition n'est pas suffisante et qu'il est nécessaire d'exclure également les courbes fermées du type lumière (condition de 'causalité (simple)'). Il semble qu'avec cette dernière condition globale, une conception réaliste forte de la causalité comme la théorie causale des propriétés peut être considérée en toute sécurité. Cependant, une fois pris dans l'engrenage des conditions de causalité, il est difficile d'en sortir. Par exemple, la condition de causalité simple n'exclut pas les courbes de types temps 'presque fermées' dans le sens où, pour un voisinage  $U$  (même infinitésimal) d'un point  $p$ , une courbe de type temps peut passer par  $U$  plus d'une fois. Ce genre de courbes 'presque fermées' sont exclues en imposant la condition de 'causalité forte'. En outre, il est probable (mais pas nécessaire) qu'un partisan d'un réalisme causal fort désire dériver un ordre temporel à partir de l'ordre causal qu'il considère comme plus fondamental (et de lier par là même la notion de changement à celle de production causale). Une telle dérivation semble nécessiter l'existence d'une fonction temporelle globale, rendant ainsi possible les notions mêmes de changement et d'évolution temporels (ainsi que peut-être

la notion de production).<sup>16</sup> La possibilité d'une telle fonction est garantie par une condition plus forte encore, la condition de 'causalité stable'. Il existe ainsi toute une hiérarchie de conditions de causalité de plus en plus forte (une condition donnée impliquant celles moins fortes) que l'on peut imposer aux solutions des équations d'Einstein. La plus forte étant la condition d'hyperbolicité globale, impliquant que l'espace-temps possède la topologie d'un produit  $R \times \Sigma$ , où  $R$  représente la droite des réels et  $\Sigma$  une hypersurface de dimension 3, appelée surface de Cauchy, telle que toute courbe (inextensible) de type temps coupe  $\Sigma$  une fois et une seule ( $\Sigma$  représente en quelque sorte l'univers 'à un instant donné').<sup>17</sup> Sans discuter les questions touchant au déterminisme, une telle condition offre la possibilité, séduisante pour le partisan de la théorie causale des propriétés, d'une formulation à valeurs initiales de la théorie : sans entrer dans les détails, la donnée des conditions initiales appropriées sur une surface de Cauchy détermine (dans un sens précis) les structures spatio-temporelle (gravitationnelle) et matérielle dans leur totalité. Le réaliste causal peut alors être tenté de considérer les propriétés pertinentes sur la surface de Cauchy initiale comme engendrant (produisant) causalement (l'état physique de) l'univers dans sa totalité (Maudlin 2007, ch.6, défend par exemple une telle position, où les lois de la nature, primitives, plutôt que la causalité, sous-tendent la notion de production).

Le but ici n'est pas de discuter dans quelle mesure la théorie des propriétés causales nécessite toute cette hiérarchie de conditions globales imposées sur la structure spatio-temporelle. Pour la présente discussion, il est suffisant de souligner qu'une telle conception métaphysique de la causalité nécessite l'imposition de certaines de ces conditions ; ainsi la condition de 'causalité simple' semble au minimum être requise pour que la conception de causalité comme production soit cohérente (Maudlin 2007, ch.6, souligne très clairement le fait que, selon lui, l'existence de courbes fermées du type temps est incompatible avec la notion de production ontologique au niveau fondamental). Comme discuté ci-dessus, il est probable que d'autres conditions de la hiérarchie soient requises par une telle conception de la causalité. Le point important à relever est que ces conditions, dont certaines sont nécessaires pour la notion de causalité défendue par la théorie causale des propriétés, sont des conditions globales sur la structure de l'espace-temps. Sans entrer dans les détails techniques, il est assez facile de voir, par exemple, que la condition d'hyperbolicité globale constitue une condition globale dans le sens où elle impose à la structure spatio-temporelle d'avoir la topologie  $R \times \Sigma$ .

---

<sup>16</sup> Une fonction temporelle globale est une fonction  $t$  de la variété  $M$  vers les réels tels que  $t(p) < t(q)$  pour tout  $p, q \in M$  reliés par une courbe de type temps de  $p$  vers  $q$ . En général, une telle fonction n'est pas unique. Il doit être clair que l'existence de telles fonctions n'implique en rien une notion de distance temporelle (de 'temps écoulé') entre deux événements objective.

<sup>17</sup> La foliation de l'espace-temps en surfaces de Cauchy n'est pas unique et aucune n'est privilégiée. Ce fait constitue l'une des formulations les plus simples de ce qui est connu sous le nom de 'problème du temps' dans la théorie de la relativité générale ainsi que dans les diverses tentatives de quantification de cette théorie.

En conséquence, il semble donc dans ce cadre que les relations causales dépendent de propriétés globales de l'espace-temps (comme la topologie globale). Comme mentionné à la fin de la section précédente, ceci semble affecter l'aspect fondamentalement 'singulier' ('singulariste') de la causalité dans la conception non-humienne de la théorie causale des propriétés. Pour reprendre l'exemple de la section précédente, il semble que la relation causale entre l'événement  $A$  et l'événement  $B$  ne dépende pas que de la nature de la cause  $A$  (qui est de produire  $B$  dans la conception causale, dispositionnelle des propriétés), mais également de propriétés globales de la structure spatio-temporelle (gravitationnelle) dans son ensemble. La nature de la relation causale entre  $A$  et  $B$ , ainsi que l'existence de  $B$  lui-même, ne peuvent pas alors être ontologiquement fondés uniquement dans la nature de (la propriété instanciée)  $A$ . Si  $A$  cause  $B$ , à strictement parler, cela ne peut être uniquement en vertu de la nature de  $A$ , mais également en vertu de la structure globale de l'espace-temps (et du champ gravitationnel). Par exemple, si l'on fait l'hypothèse que  $A$  et  $B$  se trouvent dans une région  $U$  de l'espace-temps  $(M, g_{ab})$  et que l'on considère un espace-temps  $(M', g'_{ab})$  distinct, ne satisfaisant pas certaines propriétés globales de  $(M, g_{ab})$ , mais possédant une région  $U'$  exactement similaire (dans un sens précis) à  $U$  et (contenant donc des événements  $A', B'$  exactement similaires à  $A, B$ ), alors il semble que dans  $(M, g_{ab})$ ,  $A$  cause  $B$  (dans le sens de la théorie causale des propriétés) mais que dans  $(M', g'_{ab})$ ,  $A'$  ne cause pas  $B'$  (parce que, par exemple, globalement, ils sont reliés par une courbe fermée du type temps). Ainsi il semble que la nature causale de la relation entre  $A$  et  $B$  dépende non seulement de la nature de  $A$ , mais également des propriétés globales de l'espace-temps dans lequel ils se trouvent.<sup>18</sup>

La réponse du partisan de la théorie causale des propriétés ne souffre aucune ambiguïté: il ne peut que considérer  $(M', g'_{ab})$  comme métaphysiquement impossible. Il est dans la nature des propriétés de ne produire que des effets qui globalement satisfont les conditions mentionnées ci-dessus ; les contraintes globales se trouvent en quelque sorte inscrites dans la nature même des propriétés et la 'singularité' de la relation causale reste entière. Si certains trouveront une telle réponse insatisfaisante, il semble n'y avoir en revanche aucune objection définitive contre une telle attitude. Au-delà de la question de la pertinence de cette réponse apportée au défi de la possibilité des topologies non-triviales (je rappelle que mon but n'est pas d'évaluer la théorie causale des propriétés), le point important ici est que cette conception métaphysique de la causalité soumet les solutions des équations d'Einstein à des contraintes assez fortes (la hiérarchie des conditions de causalité discutée plus haut n'est pas une conséquence de la théorie de la relativité générale ; elle trouve sa justification, en générale, comme ici, dans une conception particulière de la causalité). L'absence de certaines propriétés

---

<sup>18</sup> Le fait que  $A$  et  $B$  ne sont pas forcément ponctuels et locaux, comme par exemple des états de l'univers à 'un instant donné', ne modifie pas l'argument ici.

globales de la structure spatio-temporelle, question purement empirique et encore ouverte, rendrait la théorie causale des propriétés alors difficile à soutenir.

## 6. Conclusion et perspectives

Il est clair qu'il ne s'agit pas de fournir dans cet article un argument décisif contre telle ou telle conception métaphysique de la causalité. En revanche, dans le cadre de la démarche analytique adoptée ici, une telle conception métaphysique au sujet de la nature peut s'enrichir ou être mise en difficulté par des arguments provenant de la physique contemporaine. Ainsi nous avons en premier lieu considéré la conception de la causalité en termes de quantités conservées ; en mettant au cœur de son analyse le principe de conservation (de l'énergie-matière en particulier), une telle conception s'inspire clairement de la physique. Néanmoins, nous avons vu que cette conception de la causalité se trouve mise en difficulté par certains traits fondamentaux de l'espace-temps décrit par la théorie de la relativité générale : la nature unique et dynamique de la structure spatio-temporelle et du champ gravitationnel, ainsi que l'absence de structure physique fixe, non dynamique par rapport à laquelle les entités dans le monde et leurs interactions, possiblement causales, peuvent être considérées ('background independence'). En effet, les symétries requises par la théorie des quantités conservées constituent une sorte de structure temporelle fixe et privilégiée par rapport à laquelle les quantités conservées peuvent être considérées. Contrairement à ce que Dowe (2000b) défend, notre monde actuel ne contient probablement pas de telles symétries, bien que ces dernières permettent de produire des approximations physiquement utiles et justifiées dans bien des cas (voir section 3). Un autre aspect du problème est qu'on ne peut, d'un point de vue strict, isoler un système physique des interactions avec le champ gravitationnel (bien que, une fois encore, des approximations physiquement utiles et justifiées le permettent dans certains cas). En outre, la nature non-locale de l'énergie gravitationnelle (dans le sens précis discuté en section 3) empêche le partisan de la théorie des quantités conservées de considérer une interaction gravitationnelle (comme une onde gravitationnelle détruisant un rocher) comme une interaction causale.

Le cas de la théorie causale des propriétés est, dans une certaine mesure, plus compliqué. Nous avons vu qu'elle requiert que notre monde 'instancie' certaines propriétés globales non-triviales et considère que certaines solutions des équations d'Einstein sont métaphysiquement impossibles. Cela laisse donc ouverte la possibilité d'une mise en difficulté de cette conception par l'absence de telles propriétés dans notre monde. Mais, dans la mesure où cette question purement empirique reste ouverte, cela ne constitue pas, en tant que telle, une objection à la théorie causale des propriétés (section 5).

Qu'en est-il des aspects fondamentaux de l'espace-temps et de la gravitation mentionnés ci-dessus et qui posent tant de problèmes à la théorie des quantités

conservées ('background independence', nature non-locale de l'énergie gravitationnelle) ? Cette question se situe au cœur des débats actuels sur cette conception de la causalité (et des propriétés). Un autre aspect de la même question est de savoir dans quelle mesure la théorie causale des propriétés s'applique aux propriétés spatio-temporelles (et gravitationnelles). Au premier abord, il semble que la nature dynamique de la structure spatio-temporelle et gravitationnelle dans le cadre de la relativité générale fournit un argument explicite en faveur d'une interprétation causale des propriétés spatio-temporelles. L'argument est que les propriétés métriques dans le cadre de la théorie de la relativité générale (représentées par le champ métrique de Lorentz et ses fonctionnelles comme le champ tensoriel de Riemann) peuvent être considérées comme causales dans le sens où elles ont un rôle causal exprimé par l'action des forces de marée ('tidal forces' en anglais ; l'argument est principalement défendu par Bartels 1996, 2009 ainsi que par Bird 2009 ; pour une critique voir Livianos 2008).<sup>19</sup> Ainsi la nature des propriétés métriques (gravitationnelles) est de produire des forces de marée, via la courbure de l'espace-temps,<sup>20</sup> pouvant être expérimentées par des particules tests, bien que la présence d'énergie-matière non-gravitationnelle ne soit pas nécessaire, si bien que la conception causale des propriétés métriques reste valable dans les cas purement gravitationnels. Si une telle interprétation causale des propriétés spatio-temporelles semble séduisante à première vue, un examen plus attentif montre qu'elle n'est pas sans poser quelques problèmes. Ainsi selon cette conception, la structure spatio-temporelle (gravitationnelle) agit causalement sur l'énergie-matière non-gravitationnelle (via la courbure et les forces de marée) *et* gravitationnelle ; ceci semble impliquer que la structure spatio-temporelle (gravitationnelle) interagisse causalement avec elle-même. En outre, les équations d'Einstein ne permettent pas de privilégier une 'direction' dans l'interaction entre structure spatio-temporelle (gravitationnelle) et l'énergie-matière non-gravitationnelle (si l'une est comprise comme agissant causalement sur l'autre, alors il semble que l'inverse soit également vrai). De manière générale, la conception de la causalité comme 'production' de certains effets est loin d'être claire dans ce cadre.

Ces questions mériteraient d'être discutées en détails dans un article séparé. Elles appartiennent à un débat actuel à la croisée de la métaphysique de la nature et de la physique fondamentale. En discutant la question métaphysique de la causalité du point de vue de certains aspects de la physique de la relativité générale, j'espère avoir fourni l'exemple d'un cas de recherche à cette croisée, où le dialogue entre métaphysique de la nature et physique fondamentale peut être fructueux.

---

<sup>19</sup> Baker (2005) défend que la constante cosmologique  $\Lambda$  en relativité générale fournit également un argument en faveur d'une interprétation causale de l'espace-temps.

<sup>20</sup> Le lien entre courbure de l'espace-temps et forces de marée est que la courbure induit une accélération relative des géodésiques les unes envers les autres (ainsi des géodésiques initialement parallèles peuvent ne pas le rester) ; cette caractérisation de la courbure en termes d'accélération relative est décrite par l'équation de déviation géodésique (voir Wald 1984, §3.3 par exemple).

## RÉFÉRENCES

- D. Baker, « Spacetime Substantivalism and Einstein's Cosmological Constant », *Philosophy of Science*, 72/5, pp. 1299-1311.
- A. Bartels, « Modern essentialism and the problem of individuation of spacetime points », *Erkenntnis*, 45, 1996, pp. 25-43.
- A. Bartels, « Dispositionen in Raumzeit-Theorien », à paraître in C. F. Gethmann (éd.), *Lebenswelt und Wissenschaft. XXI. Deutscher Kongress für Philosophie, Kolloquien*, Hamburg, Meiner, 2009.
- A. Bird, *Nature's metaphysics. Laws and properties*, Oxford, Oxford University Press, 2007.
- A. Bird, « Structural properties revisited », in T. Handfield (éd.), *Dispositions and causes*, Oxford, Oxford University Press, 2009.
- A. Chakravartty, « Causal realism : events and processes », in *Erkenntnis*, 63, 2005, pp. 7-31.
- A. Chakravartty, « A metaphysics for scientific realism: knowing the unobservable », Cambridge, Cambridge University Press, 2007.
- E. Curiel, « The constraints general relativity places on physicalist accounts of causality », *Theoria*, 15/37, 2000, pp. 33-58.
- P. Dowe, *Physical Causation*, Cambridge, Cambridge University Press, 2000a.
- P. Dowe, « The conserved quantity theory defended », *Theoria*, 15/37, 2000b, pp. 11-31.
- J. Earman, *Bangs, Crunches, Whimpers, and Shrieks: Singularities and Acausalities in Relativistic Spacetimes*, Oxford, Oxford University Press, 1995.
- M. Esfeld, « The modal nature of structures in ontic structural realism », à paraître in *International Studies in the Philosophy of Science*, 23, 2009.
- M. Esfeld et V. Lam, « Moderate structural realism about space-time », *Synthese*, 160, 2008, pp. 27-46.
- S. French, « Structure as a weapon of the realist », *Proceedings of the Aristotelian Society*, 106, 2006, pp. 169-187.
- C. Hofer, « Energy Conservation in GTR », *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 31/2, 2000, pp. 187-199.
- V. Lam, « Aspects structuraux de l'espace-temps dans la théorie de la relativité générale », à paraître in S. Le Bihan (éd.), *Philosophie de la Physique*, Paris, Syllepse.
- D. Lewis, *Philosophical papers. Volume 2*, Oxford, Oxford University Press, 1986.
- V. Livanios, « Bird and the dispositional essentialist account of spatiotemporal relations », *Journal for General Philosophy of Science*, 39, 2008, pp. 383-394.



- T. Maudlin, *The Metaphysics within Physics*, Oxford, Oxford University Press, 2007.
- C. Misner, K. Thorne et J. Wheeler, *Gravitation*, San Francisco, WH Freeman, 1973.
- S. Mumford, *Dispositions*, Oxford, Oxford University Press, 1998.
- J. Norton, « General covariance and the foundations of general relativity: eight decades of dispute », *Reports on Progress in Physics*, 56/7, 1993, pp. 791-858.
- S. Psillos, *Causation & Explanation*, Chesham, Acumen, 2002.
- A. Rueger, « Local Theories of Causation and the A Posteriori Identification of the Causal Relation », *Erekenntnis*, 48, 1998, pp. 25-38.
- W. Salmon, *Causality and Explanation*, Oxford, Oxford University Press, 1998.
- W. Salmon, « A realistic account of causation », in M. Marsonet (éd.), *The problem of realism*. Aldershot, Ashgate. 2002, pp. 106–134.
- S. Shoemaker, « Causality and properties », in P. Van Inwagen (éd.), *Time and cause*, Dordrecht, Reidel, 1980, pp. 109-135.
- R. Wald, *General relativity*, Chicago, University of Chicago Press, 1984.