

Le réalisme scientifique et la métaphysique des sciences

Michael Esfeld

Université de Lausanne, Section de philosophie, Michael-Andreas.Esfeld@unil.ch

(pour Anouk Barberousse, Denis Bonnay et Mikaël Cozic (dir.) :
Précis de philosophie des sciences, Paris : Vuibert 2008)

Résumé

Cet article prend pour point de départ les réponses réalistes majeures aux défis de la sous-détermination et de l'incommensurabilité. Ces réponses servent de base épistémologique au projet visant à construire une métaphysique des sciences qui réunit les connaissances scientifiques dans une conception cohérente et complète de la nature. Ce projet accorde une position privilégiée aux théories physiques fondamentales. Dans ce contexte, l'article se focalise sur les distinctions entre, d'une part, propriétés intrinsèques et relations et, d'autre part, propriétés catégoriques et propriétés causales, montrant comment les théories physiques fondamentales contemporaines soutiennent la position métaphysique du réalisme structural.

1. *Le réalisme scientifique*

La métaphysique des sciences est le projet de développer une vision cohérente et complète de la nature sur la base des théories scientifiques. On peut également parler de philosophie de la nature. Toutefois, on préfère aujourd'hui le terme de « métaphysique des sciences » pour distinguer ce projet d'une philosophie de la nature purement spéculative, sans ancrage dans les sciences et sans contrôle méthodologique. La métaphysique des sciences appartient à la philosophie analytique qui, depuis son tournant métaphysique, ne consiste plus uniquement en l'analyse du langage mais, plus largement, en un discours systématique et argumentatif visant la compréhension du monde et la position que nous y occupons – en bref, ce en quoi consiste la philosophie depuis Platon et Aristote. Par « métaphysique », on n'entend pas une théorie spéculative portant sur un domaine d'être présumé existant au-delà du monde empirique, mais, au sens aristotélicien, le développement de catégories générales qui cherchent à saisir l'être du monde empirique (cf. Aristote, *Métaphysique*, livre 4). La particularité qui distingue la métaphysique des sciences du courant dominant de la philosophie analytique, c'est son ancrage dans les sciences : on expose une position métaphysique sur la base des connaissances que les théories scientifiques actuelles apportent (voir Ladyman & Ross, 2007, chap. 1, pour marquer cette distinction).

Ce projet présuppose évidemment une forme de *réalisme scientifique*. On peut caractériser le réalisme scientifique par les trois propositions suivantes (voir Psillos, 1999, introduction, Sankey, 2002, et Esfeld, 2006, chap. 1) :

(1) *Proposition métaphysique* : l'existence et la constitution de la nature sont indépendantes des théories scientifiques. L'indépendance est à la fois ontologique et causale : l'existence de la nature ou sa constitution ne dépendent pas du fait qu'il y ait ou non des personnes qui construisent des théories scientifiques. S'il y a des personnes qui développent des théories scientifiques, l'existence de ces théories ne cause pas l'existence ou la constitution de la nature.

- (2) *Proposition sémantique* : la constitution de la nature détermine lesquelles de nos théories scientifiques sont vraies (et lesquelles ne sont pas vraies). Par conséquent, si une théorie scientifique est vraie, les objets que pose cette théorie existent et leur constitution rend vraie la théorie en question. Autrement dit, leur constitution est le vérifacteur (*truth-maker* en anglais) de la théorie en question.
- (3) *Proposition épistémique* : les sciences sont, en principe, capables de nous donner un accès cognitif à la constitution de la nature. En particulier, nous avons à notre disposition des méthodes d'évaluation rationnelle applicables à des théories scientifiques concurrentes – ou des interprétations concurrentes de la même théorie scientifique – qui sont capables d'établir, au moins de manière hypothétique, laquelle de ces théories ou interprétations concurrentes est la meilleure au niveau de la connaissance.

Parmi ces propositions, c'est la troisième qui est objet de dispute. En effet, si l'on soutient que nous avons un accès cognitif à la constitution de la nature par le biais des sciences, on se heurte alors à deux objections principales.

La première objection est celle dite de la *sous-détermination de la théorie par l'expérience* : depuis les travaux de Pierre Duhem (1906, 2^e édition 1914, voir 2^e partie, chap. 6) et de Willard Van Orman Quine (1951 / traduction française, 2003), on sait que pour chaque ensemble de propositions exprimant l'expérience, y compris l'expérience scientifique, il est logiquement possible de construire plusieurs théories qui se contredisent entre elles mais dont chacune permet de déduire d'elle l'ensemble des propositions empiriques en question. Par conséquent, l'expérience ne possède pas la force logique de déterminer la théorie scientifique. Il peut y avoir toujours plusieurs théories logiquement possibles qui sont toutes en accord avec les mêmes données de l'expérience.

Néanmoins, la thèse de la sous-détermination n'exclut pas qu'il puisse n'y avoir qu'une seule théorie qui soit correcte et qu'en cas de nouvelles données de l'expérience qui sont en conflit avec une théorie établie, il puisse n'y avoir qu'une seule manière correcte d'adapter la théorie à l'expérience. Cette thèse montre uniquement que les données de l'expérience ne sont pas suffisantes pour déterminer quelle est cette théorie ou la manière de l'adapter. Cette thèse établit dès lors que l'épistémologie empiriste qui accepte uniquement les données expérimentales comme critère de sélection des théories scientifiques ne peut pas être un réalisme scientifique. Autrement dit, le réaliste scientifique a la tâche de mettre en avant d'autres critères que le simple accord avec les données expérimentales pour déterminer laquelle des théories concurrentes est la meilleure au niveau de la connaissance. Il peut notamment utiliser le critère de l'évaluation des engagements ontologiques d'une théorie ou interprétation d'une théorie en vue de développer une vision cohérente de la nature. On verra plus bas comment on peut tirer profit de ce critère dans des cas concrets.

Le deuxième défi pour le réalisme scientifique provient de l'histoire des sciences : si l'on regarde notamment l'histoire de la physique qui est une science mature depuis le début de l'époque moderne, on constate que s'y sont produits des changements considérables. Pour prendre l'exemple le plus célèbre, la mécanique de Newton a été considérée à son époque – et en fait jusqu'à la fin du 19^e siècle – comme le point culminant de la physique. Toutefois, au début du 20^e siècle, elle a été remplacée par les théories de la relativité restreinte et générale d'Einstein et par la mécanique quantique. Bien que ces théories permettent de reproduire les prédictions de la mécanique newtonienne dans les domaines où celle-ci reste applicable, elles contredisent ses principes. Selon la relativité restreinte, par exemple, il existe une vitesse

absolue (celle de la lumière), tandis que selon la mécanique de Newton, il n'existe pas de vitesse absolue. Selon la relativité générale, la gravitation est identique à la courbure de l'espace-temps, tandis que selon la mécanique de Newton, elle consiste en une interaction à distance. D'après la mécanique quantique, les états des objets physiques sont en superposition, alors que selon la mécanique de Newton, toutes les propriétés des objets physiques possèdent toujours une valeur numérique définie.

Selon les épistémologies de Thomas Kuhn et de Paul Feyerabend, nous sommes là en présence d'exemples d'*incommensurabilité* de concepts (voir Kuhn, 1962, chap. 13 / chap. 12 dans la traduction française, 1972, et Feyerabend, 1962) : les concepts de la nouvelle théorie sont tellement éloignés des concepts de l'ancienne théorie qu'il n'y a pas de mesure commune permettant une comparaison entre eux. Par exemple, il n'est pas possible d'exprimer dans le vocabulaire de la mécanique de Newton le concept d'un espace-temps courbé, et il n'est pas possible d'exprimer le concept d'une action à distance en utilisant le vocabulaire de la théorie de la relativité générale. Or, s'il n'est pas possible de comparer les concepts respectifs de deux théories distinctes, on ne peut alors pas déterminer laquelle est la meilleure sur le plan de la connaissance. S'il s'agit de deux théories qui se succèdent dans l'histoire des sciences, on ne peut dès lors pas soutenir qu'il y a un progrès cognitif dans l'histoire des sciences.

Hilary Putnam (1973 / traduction française, 1980) objecte à Kuhn et à Feyerabend que la thèse de l'incommensurabilité présuppose, pour être significative, un domaine commun de phénomènes auquel s'appliquent les deux théories dont les concepts respectifs sont présumés incommensurables. Or, d'après Putnam, ce domaine commun de phénomènes rend possible une comparaison des deux théories en question. Cette comparaison est en principe capable d'établir laquelle des deux est la meilleure au plan de la connaissance, tenant compte, le cas échéant, de critères supplémentaires d'évaluation de théories comme le critère de cohérence mentionné plus haut. De plus, le courant connu sous le nom de « reconstruction rationnelle » s'efforce de démontrer que l'on peut comprendre l'ancienne théorie comme cas limite de la nouvelle théorie, même si les concepts respectifs des deux théories sont éloignés (voir par exemple Schaffner, 1967 ; cf. Esfeld, 2006, chap. 8). Pour ces deux raisons, la thèse de l'incommensurabilité, dans la mesure où elle touche un point bien fondé, n'est plus aujourd'hui considérée comme menaçant le réalisme scientifique (voir, en ce sens, le livre de Sankey, 1994, surtout chap. 6 et 7, le livre de Bartels, 1994, surtout chap. 1, et l'article de Carrier, 2001).

En résumé, donc, le projet de métaphysique des sciences peut se baser sur un réalisme scientifique selon lequel les théories scientifiques matures que nous jugeons valides sont les meilleures hypothèses que nous pouvons avancer aujourd'hui quant à la constitution de la nature. Ceci n'exclut évidemment pas qu'en cas de changement des théories scientifiques il faille adapter la métaphysique des sciences en conséquence.

2. *La position privilégiée de la physique*

Le projet de métaphysique des sciences accorde une position privilégiée à la physique. Depuis la mécanique de Newton, nous avons à disposition des théories physiques qui sont *universelles* et *fondamentales* : elles affirment être valides pour tous ce qui existe dans le monde et elles ne dépendent pas d'autres théories scientifiques. Ceci revient à dire que leurs lois sont strictes, à savoir n'admettent pas d'exceptions (et si elles reconnaissent des exceptions, on peut les décrire dans le vocabulaire de la théorie en question). Si leurs lois sont

déterministes, elles indiquent les conditions complètes pour l'existence des phénomènes étudiés – et si ces phénomènes ne sont pas produits alors que leurs conditions d'existence sont réunies, les lois postulées s'en trouvent falsifiées. Néanmoins, il n'est pas nécessaire que des lois strictes soient déterministes ; elles peuvent tout aussi bien être probabilistes. Si elles sont probabilistes, elles sont également valides sans exception : elles indiquent en ce cas les probabilités complètes pour l'occurrence des phénomènes étudiés.

Les théories physiques fondamentales et universelles se distinguent des théories des sciences spéciales. Ces dernières sont dites spéciales et non pas universelles, parce que chacune d'elles concerne un domaine d'être limité, et parce qu'elles dépendent des théories de la physique fondamentale. Elles ne peuvent pas, en effet, décrire et expliquer les objets de leur domaine complètement, par leurs concepts propres, car elles sont obligées d'avoir en fin de compte recours à des concepts et lois de la physique fondamentale. Leurs lois ne sont pas strictes mais admettent des exceptions qui ne peuvent pas être décrites dans les concepts propres à ces théories, sans que ces lois soient ainsi falsifiées. Leurs lois présupposent des conditions normales, et l'on ne peut pas délimiter dans le vocabulaire de ces théories quelles sont les conditions normales et quelles sont des conditions exceptionnelles.

Par exemple, la biologie est une science spéciale, portant notamment sur des cellules et des organismes. Un important sujet de recherche en biologie est le lien entre causes génétiques et effets phénotypiques qui sont obtenus par le biais de la production de certaines protéines. Toutefois, le lien entre causes génétiques et effets phénotypiques ne peut avoir lieu que si certaines conditions physiques normales sont satisfaites. Si dans une situation donnée l'effet phénotypique ne se produit pas, bien que la cause génétique soit présente, ce n'est pas la loi qui est falsifiée : il est possible que des conditions physiques normales ne soient pas réunies. Il y a toujours des facteurs physiques dans l'organisme ou dans son environnement qui peuvent couper le lien entre causes génétiques et effets phénotypiques, facteurs physiques qui ne peuvent finalement être saisis que par le vocabulaire d'une théorie physique fondamentale – par exemple, en fin de compte, on ne peut jamais exclure que des effets quantiques macroscopiques rares interviennent.

Les théories des sciences spéciales ne sont ainsi pas complètes, tandis qu'un principe de *complétude causale, nomologique et explicative* s'applique aux théories physiques fondamentales et universelles. Pour tout phénomène décrit par une théorie physique fondamentale et universelle, dans la mesure où ce phénomène a des causes, il a des causes physiques ; dans la mesure où ce phénomène tombe sous des lois, c'est sous des lois physiques qu'il est subsumable ; dans la mesure où ce phénomène admet des explications, ce sont des explications physiques qui s'appliquent à lui. Ce principe n'exclut pas qu'il puisse y avoir encore d'autres causes, lois et explications que celles de la physique fondamentale ; mais celles-ci ne peuvent rien déterminer qui n'est pas en même temps aussi déterminé par des causes, des lois ou des explications physiques. Il est vrai que les théories physiques fondamentales changent – on a déjà mentionné le passage de la physique newtonienne à la théorie de la relativité générale et à la physique quantique. Toutefois, les théories physiques fondamentales ne changent jamais à cause de considérations provenant des sciences spéciales mais toujours parce qu'on constate que des phénomènes supposés être fondamentaux ne le sont en fait pas. Ainsi, les théories physiques fondamentales jugées valides à une époque sont complètes, au moins par rapport aux théories des sciences spéciales en vigueur à la même époque. Dans la suite de cet article, je me concentrerai sur les positions métaphysiques que

l'on peut baser sur les théories physiques fondamentales actuelles (sections 3 à 6). En fin d'article, je reviendrai brièvement sur le rapport entre physique fondamentale et sciences spéciales (section 7) avant de terminer avec un résumé des positions principales (section 8).

3. *Quatre positions métaphysiques possibles*

David Lewis est le philosophe le plus influent du courant de la métaphysique analytique de la deuxième moitié du 20^e siècle. Il exprime sa vision du monde dans une thèse qu'il appelle « survenance humienne » parce qu'elle soutient, à l'instar de David Hume, qu'il n'existe pas de connexions nécessaires dans le monde. Il résume cette thèse dans les termes suivants :

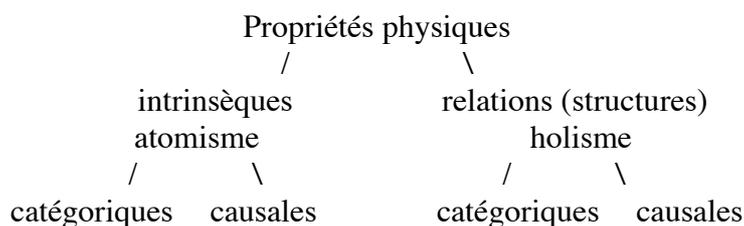
« Il s'agit de la doctrine suivant laquelle tout ce qui existe dans le monde est une vaste mosaïque d'occurrences locales de faits particuliers, rien qu'une petite chose et puis une autre, et ainsi de suite. (...) Nous avons la géométrie : un système de points avec des relations externes de distance spatio-temporelle entre eux. Peut-être des points de l'espace-temps lui-même, peut-être des points de matière (ou d'un éther ou de champs) ; peut-être les deux à la fois. En ces points se trouvent des qualités locales : des propriétés intrinsèques parfaitement naturelles qui n'ont besoin de rien de plus grand qu'un point où être instanciées. En bref : nous avons un arrangement de qualités. Et c'est tout. Il n'y a pas de différence sans différence dans l'arrangement des qualités. Tout le reste survient sur cet arrangement. » (Lewis, 1986, introduction, pp. IX-X)

Cette thèse est l'exemple paradigmatique d'un *atomisme* contemporain en philosophie de la nature. Il existe des objets fondamentaux qui sont situés en des points de l'espace-temps, voire même identiques à ceux-ci. Ces objets sont fondamentaux parce qu'il n'existe rien de plus petit qu'un point physique. Les propriétés caractéristiques de ces objets – c'est-à-dire, les propriétés qui définissent leur être, qui constituent leurs critères d'identité – sont des *propriétés intrinsèques* : des propriétés qu'un objet possède indépendamment de l'existence de quoi que ce soit d'autre dans le monde (cf. Langton & Lewis, 1998). De plus, selon Lewis, ces *propriétés* sont *catégoriques* : elles sont des qualités pures. Autrement dit, en tant que telles, elles ne possèdent pas la disposition de causer quoi que ce soit. Ces deux propositions caractérisent l'atomisme en philosophie de la nature : les propriétés fondamentales sont intrinsèques et non-causales. Le monde est ainsi vu comme une vaste mosaïque d'occurrences de propriétés intrinsèques. Comme celles-ci sont catégoriques, il n'y a pas de connexions nécessaires entre elles : aucune de ces occurrences de propriétés ne possède le pouvoir (disposition causale) d'engendrer d'autres de ces occurrences.

Selon l'atomisme, les relations surviennent sur les propriétés intrinsèques des objets. Un exemple paradigmatique de relations survenantes sont les relations de masse : la relation qui lie un objet à un autre objet en étant plus léger, plus lourd ou de la même masse que celui-ci est fixée par la valeur de la masse au repos que chacun de ces deux objets possède indépendamment de l'autre. Il y a cependant une exception : les relations spatio-temporelles ne surviennent pas sur des propriétés intrinsèques. Les propriétés intrinsèques ne sont pas en mesure de fixer la distance spatio-temporelle qu'il y a entre deux objets. Les relations spatio-temporelles unissent ainsi le monde : deux objets coexistent dans le même monde si et seulement s'il y a une relation spatio-temporelle entre eux. Un filet de relations spatio-temporelles constitue alors une sorte d'arrière-plan dans lequel les objets matériels (avec leurs propriétés intrinsèques) sont insérés. Le fait que les relations spatio-temporelles sont catégoriques semble évident : le simple fait que, par exemple, un objet se trouve à une

distance spatiale d'un centimètre d'un autre objet n'inclut apparemment aucune disposition à engendrer certains effets. Les propriétés géométriques sont ainsi un exemple paradigmatique de propriétés catégoriques, dépourvues de pouvoirs causaux.

Il faut donc tenir compte de deux distinctions : celle entre propriétés intrinsèques et relations, d'une part, et celle entre propriétés catégoriques et propriétés causales (dispositions, pouvoirs), d'autre part. On peut subsumer les relations physiques également sous la catégorie des propriétés, étant des propriétés qui requièrent la présence d'au moins deux objets dans le monde pour exister, tandis qu'une propriété intrinsèque n'a besoin que d'un seul objet pour exister dans le monde. L'atomisme classique, humien, en philosophie de la nature est la position qui soutient que les propriétés physiques sont intrinsèques et catégoriques. Etant donné les deux distinctions évoquées ci-dessus, l'espace logique des positions possibles est constitué des quatre positions suivantes :



La première distinction est celle entre propriétés intrinsèques et relations. Elle marque le contraste entre l'atomisme et le holisme. Si les propriétés des objets physiques sont des relations au lieu d'être des propriétés intrinsèques, alors l'être des objets dépend des relations qui les unissent. Pour cette raison, cette position est un holisme en philosophie de la nature. La seconde distinction est celle entre propriétés catégoriques (c'est-à-dire, purement qualitatives) et propriétés causales – c'est-à-dire, engendrant par leur nature même certains effets. Cette dernière distinction se retrouve tant dans le holisme que dans l'atomisme.

Comme expliqué plus haut, on peut associer Hume à la position qui considère les propriétés comme intrinsèques et catégoriques. Leibniz est également atomiste, concevant les monades comme les véritables atomes, mais il considère les propriétés physiques comme des forces et soutient ainsi une vision causale des propriétés. Leibniz a réhabilité la notion de disposition causale (pouvoir) en philosophie moderne. On peut dès lors lier la position qui conçoit les propriétés comme intrinsèques et causales à lui. Du côté du holisme, on peut attribuer la position qui considère les propriétés physiques comme des relations catégoriques à Descartes, car celui-ci (tout comme Spinoza) identifie la matière à l'extension spatio-temporelle. On peut dès lors regarder Descartes et Spinoza comme réduisant toutes les propriétés physiques et matérielles à des propriétés géométriques qui consistent en des relations spatio-temporelles. La position logiquement possible consistant à concevoir les propriétés physiques comme des relations ou des structures causales, par contre, n'est pas accessible au début de l'époque moderne. La raison en est que les relations spatio-temporelles sont, comme déjà mentionné plus haut, l'exemple paradigmatique de relations irréductibles en physique classique, et celles-ci semblent évidemment être des relations catégoriques.

Ces quatre positions définissent l'espace logique des positions possibles par rapport aux propriétés physiques. Il y a bien sûr des combinaisons possibles, voire même, en certain cas, inévitables. Même dans l'atomisme humien, il faut reconnaître des relations irréductibles et ainsi une sorte de holisme, à savoir accepter les relations spatio-temporelles comme des

relations irréductibles qui unissent le monde. De même, le holisme peut intégrer des propriétés intrinsèques pour autant que celles-ci ne constituent pas de critères d'identité pour les objets, indépendamment des relations qui les unissent. En ce qui concerne la question de savoir si les propriétés, y compris les relations, sont catégoriques ou causales, une combinaison des deux positions est plus difficile à soutenir : si l'on maintient qu'il existe des propriétés catégoriques ainsi que des propriétés causales, il faut donner une réponse à la question de savoir pourquoi certaines propriétés sont causales tandis que d'autres ne le sont pas.

Essayons maintenant d'évaluer ces positions et commençons de nouveau par la métaphysique humienne : l'atomisme des propriétés catégoriques. Si l'on adopte cette position, il faut accepter comme fait primitif la distribution des propriétés physiques fondamentales dans l'univers entier. Etant donné que les propriétés ne sont pas causales en tant que telles, aucune occurrence d'une propriété quelconque ne nécessite l'occurrence d'une autre propriété. Lewis soutient un principe de combinaison libre : pour chaque occurrence d'une propriété physique fondamentale, on peut tenir comme fixe l'occurrence en question et changer toutes les autres occurrences de propriétés physiques fondamentales, le résultat étant toujours un monde possible. Les lois de la nature ne déterminent pas la distribution des propriétés physiques fondamentales. Bien au contraire, elles surviennent sur cette distribution en entier. Les lois sont donc fixées uniquement à la fin du monde. Notons que la nécessité pour l'atomisme des propriétés catégoriques de devoir accepter comme fait primitif la distribution dans l'univers entier des propriétés physiques fondamentales ne constitue pas une objection contre cette position : chaque position doit nécessairement accepter quelque chose comme primitif.

L'objection centrale contre l'atomisme des propriétés catégoriques s'appuie sur la question suivante : si les propriétés qui existent dans le monde sont intrinsèques et catégoriques, comment pouvons-nous les connaître ? Voici ce que dit Frank Jackson, qui est en principe favorable à la métaphysique humienne, sur cette question :

« Quand les physiciens nous parlent des propriétés qu'ils tiennent pour fondamentales, ils nous disent ce que *font* ces propriétés. Ce n'est pas là un accident. Nous savons ce que sont les choses essentiellement par le biais de la manière dont elles nous affectent, nous et nos instruments de mesure. (...) Cela suggère (...) l'idée inconfortable qu'il se peut bien que nous ne sachions presque rien de la nature intrinsèque du monde. Nous connaissons seulement sa nature causale relationnelle. » (Jackson, 1998, pp. 23-24)

La distribution des propriétés intrinsèques et catégoriques dans le monde détermine certaines relations, entre autres les relations entre les objets qui possèdent ces propriétés et les cerveaux des observateurs étudiant les objets en question. Toutefois, ces relations ne révèlent pas l'être des propriétés intrinsèques : on peut, sans autre, concevoir deux situations ou deux mondes possibles dans lesquels ces relations sont les mêmes, tandis que les propriétés intrinsèques sous-jacentes sont différentes, car celles-ci ne sont pas causales en tant que telles. Par conséquent, ce que sont ces propriétés intrinsèques ne se manifeste pas dans les relations causales. Lewis (2001) concède cette conséquence en plaidant en faveur de l'humilité, c'est-à-dire en reconnaissant comme fait que nous n'avons aucun accès cognitif à l'essence intrinsèque et catégorique des propriétés. Cette conséquence est inconfortable, comme le dit Jackson, parce qu'elle aboutit à un décalage entre la métaphysique et l'épistémologie : la métaphysique postule que les propriétés sont intrinsèques et catégoriques, alors que la

réflexion épistémologique montre que nous ne pouvons pas connaître la nature des propriétés qui existent dans le monde puisqu'elles sont intrinsèques et catégoriques. Si l'on stipule qu'il existe quelque chose qui échappe, par principe, à notre connaissance, il faut apporter des arguments convaincants pour motiver l'affirmation de l'existence de l'entité en question. La métaphysique humienne n'a pas de tels arguments à sa disposition car on peut simplement éviter le décalage entre métaphysique et épistémologie auquel elle conduit en soutenant que les propriétés sont causales au lieu d'être catégoriques.

Cette réflexion sur l'accès cognitif que nous avons aux propriétés qui existent dans le monde constitue ainsi la motivation principale pour adopter la position selon laquelle les propriétés sont bel et bien intrinsèques mais causales. Si les propriétés sont en elles-mêmes causales, ce que sont les propriétés se manifeste dans les relations causales. Depuis la publication de l'article « Causalité et propriétés » de Sydney Shoemaker en 1980, la théorie causale des propriétés est devenue une position majeure en métaphysique des propriétés. On distingue deux versions de cette théorie :

- (1) La première version soutient que chaque propriété est à la fois causale-dispositionnelle et catégorique. La distinction entre « causal-dispositionnel » et « catégorique » n'est pas une opposition entre deux types de propriétés : il s'agit de deux types de prédicats que nous utilisons pour décrire les mêmes propriétés (voir notamment Martin, 1997, surtout sections 3 et 12 ; Mumford, 1998, chap. 9 ; Heil, 2003, chap. 11 ; Kistler, 2005).
- (2) L'autre version considère toutes les propriétés comme étant des pouvoirs. Chaque propriété est le pouvoir (disposition causale) de produire certains effets (voir notamment Shoemaker, 1980, et Bird, 2007).

Il n'y a pas de conflit réel entre ces deux versions. On peut dire qu'il s'agit plutôt d'accentuations différentes d'une et même position. La première version ne tient pas la distinction entre « causal-dispositionnel » et « catégorique » pour une opposition ontologique. On ne peut même pas parler de deux aspects différents des propriétés (car de tels aspects seraient à leur tour des propriétés). L'autre version ne conçoit pas les propriétés comme des potentialités pures. Les pouvoirs sont des propriétés réelles et actuelles. Ils sont certaines qualités, à savoir des pouvoirs de produire certains effets spécifiques. On peut dès lors résumer ces deux nuances de la même métaphysique des propriétés de la façon suivante : *dans la mesure où les propriétés sont certaines qualités, elles sont causales – c'est-à-dire qu'elles consistent en des pouvoirs de produire certains effets.*

Voici donc une distinction centrale en métaphysique analytique des propriétés : présumant que les propriétés physiques sont des propriétés intrinsèques, la question est de savoir si elles sont catégoriques (métaphysique humienne) ou si elles sont des pouvoirs (théorie causale des propriétés). La discussion purement métaphysique se focalise dès lors sur les deux positions à gauche dans le tableau ci-dessus. Tournons-nous maintenant vers la métaphysique des sciences et tenons compte de l'impact qu'exerce la physique contemporaine sur cette discussion.

4. *La portée philosophique de la physique quantique*

La théorie quantique (mécanique quantique ainsi que théorie des champs quantiques) est la théorie physique fondamentale des propriétés physiques et matérielles. Elle représente les objets physiques d'une telle façon que ceux-ci ne sont normalement pas dans un état dans lequel leurs propriétés possèdent des valeurs numériques définies. Une valeur numérique

définie consiste en un seul chiffre comme, par exemple, 1, 1/3 ou 0,576. Par contre, l'état d'un objet physique tel que décrit par la théorie quantique consiste normalement en une *superposition* de toutes les valeurs numériques définies possibles qu'admet la propriété en question.

Un exemple qui met cette situation en évidence est la fameuse relation d'indétermination ou d'incertitude d'Heisenberg qui stipule que le produit de l'indétermination (à savoir, déviation d'une seule valeur numérique définie) de la valeur de position et de l'impulsion d'un objet quantique ne peut jamais atteindre zéro mais reste toujours au-delà d'une certaine quantité. Autrement dit, il n'est pas possible que la position et l'impulsion d'un objet quantique possèdent toutes les deux une valeur numérique définie. La relation d'Heisenberg n'a rien à voir avec une incertitude ou ignorance des observateurs par rapport aux valeurs réelles de ces quantités. Elle saisit la situation objective des objets quantiques.

Si l'on observe deux ou plusieurs objets quantiques, il y a des corrélations précises entre les valeurs numériques définies possibles de leurs propriétés. L'état du système total consiste en une superposition de toutes ces corrélations possibles. Autrement dit, aucun des objets quantiques en question, s'il est considéré isolément, ne présente un état défini ; seul le système total est dans un état défini (un état pur) qui est une superposition de toutes les corrélations possibles des valeurs numériques définies des propriétés de ces objets quantiques. On parle alors d'*intrication* ou d'enchevêtrement.

L'exemple le plus simple d'intrication est le suivant : le spin est une sorte de moment cinétique propre. C'est une propriété physique qui n'est considérée qu'en physique quantique. Il existe des objets quantiques de spin demi-entier comme des électrons, par exemple. Il n'existe pour un tel objet que deux valeurs numériques définies de spin dans chacune des trois directions spatiales orthogonales : spin plus (+1/2) et spin moins (-1/2). Par contraste, en ce qui concerne des propriétés comme la position et l'impulsion, il y a toujours une infinité de valeurs numériques définies dont il faut tenir compte. Considérons à présent deux objets de spin demi-entier de la même espèce – comme par exemple deux électrons – qui sont émis simultanément à partir d'une seule source et qui s'éloignent l'un de l'autre dans des directions spatiales opposées. Il n'y a alors plus d'interaction entre les deux objets. Néanmoins, aucun des deux objets ne possède un état de spin indépendamment de l'autre : l'état total des deux objets est une superposition qui inclut toutes les corrélations entre les valeurs possibles de spin, dans n'importe quelle direction spatiale, des deux objets. Dans le cas de deux objets de spin demi-entier de la même espèce (comme deux électrons) et d'état total de spin nul, nous avons affaire à une superposition antisymétrisée et normée du type « premier objet spin plus et deuxième objet spin moins » moins « premier objet spin moins et deuxième objet spin plus ». On peut exprimer mathématiquement cet état de la façon suivante :

$$(1) \quad \psi_{12} = \frac{1}{\sqrt{2}} (\psi_1^+ \otimes \psi_2^- - \psi_1^- \otimes \psi_2^+)$$

Dans cette expression, ψ_{12} représente l'état total de spin, à savoir l'état de spin des deux objets ensemble, respectivement représentés par ψ_1 et ψ_2 , le signe « + » représente la valeur spin plus et le signe « - » représente la valeur spin moins. Le signe « \otimes » désigne le produit tensoriel des états de spin possibles des deux objets. Cet état total de spin est connu sous le nom d'état singulet. Dans cet état total, la propriété de spin total possède la valeur numérique définie de zéro. L'état total est un état pur, tandis qu'aucun de deux objets n'est dans un état pur (ils ne possèdent pas de valeur numérique définie de spin, dans aucune direction).

Le fameux problème de la mesure en physique quantique consiste en la question de savoir si les intrications persistent lors de la transition à des objets macroscopiques qui sont composés de beaucoup d'objets quantiques élémentaires ou si se produisent des événements qui dissolvent les intrications, de sorte que chaque objet – tant macroscopique que microscopique – possède pour chacune de ses propriétés une valeur numérique définie en corrélation avec les valeurs des propriétés de même type possédées par les autres objets. Revenons à l'exemple de l'état singulet et supposons que l'on fasse une mesure du spin des deux objets dans la même direction. Désignons l'objet que mesure l'appareil à gauche dans l'arrangement expérimental comme le premier objet et l'objet à droite comme le deuxième objet. Le résultat que l'on observe est alors soit, premier objet spin plus corrélé avec deuxième objet spin moins soit, premier objet spin moins corrélé avec deuxième objet spin plus. La question est donc de savoir si la superposition des corrélations qu'exprime la formule (1) se trouve réduite à l'une ou l'autre des deux corrélations (à savoir, soit $\psi^+_1 \otimes \psi^-_2$, soit $\psi^-_1 \otimes \psi^+_2$) ou si elle persiste mais est inaccessible à nous autres observateurs locaux.

Pour être plus précis, le problème de la mesure provient du fait que la dynamique qui saisit le développement des états (des propriétés) des objets quantiques dans le temps, à savoir l'équation de Schrödinger, est linéaire et déterministe : d'après cette dynamique, les intrications se perpétuent ; elle ne peut pas inclure la description d'événements qui dissolvent les superpositions, y compris les intrications, en faveur de valeurs numériques définies des propriétés en question. N'importe quel objet – microscopique ou macroscopique – qui interagit avec un objet quantique élémentaire ou qui est composé d'objets quantiques élémentaires est impliqué dans des intrications.

Schrödinger lui-même met cette situation en évidence en concevant le fameux exemple d'un chat dont le destin est lié à celui d'un atome radioactif. L'exemple est du même type que celui des deux objets quantiques élémentaires de spin demi-entier dans l'état singulet, sauf que l'on remplace l'un des deux objets quantiques élémentaires par un objet macroscopique, en l'occurrence un chat. Dans son expérience de pensée, Schrödinger place le chat dans une boîte fermée, aux parois opaques, avec un atome d'une substance radioactive ainsi qu'un récipient contenant un poison qui, une fois inhalé, provoque la mort immédiate du chat. Si l'atome se désintègre, un mécanisme s'enclenche alors, brisant le récipient contenant le poison et entraînant, de fait, la mort du chat. La probabilité que l'atome se désintègre en une heure est de 0,5. Selon la dynamique de Schrödinger, après une heure, les états de tous les objets sont intriqués. Par conséquent, l'atome radioactif se trouve dans un état qui consiste en une superposition de l'état désintégré et de l'état non désintégré, de sorte que le chat se trouve dans un état de superposition de l'état « être vivant » et de l'état « être mort ». Nous sommes donc en présence d'une superposition de la corrélation « atome non désintégré et chat vivant » et de la corrélation « atome désintégré et chat mort » (voir Schrödinger, 1935, p. 812 / traduction française Schrödinger, 1992, p. 106).

Il n'existe que deux types de solutions possibles à l'intérieur de la théorie quantique pour résoudre ce problème : soit on considère la dynamique qu'exprime l'équation de Schrödinger comme la dynamique complète des objets quantiques de sorte que les intrications quantiques sont perpétuelles et universelles, touchant tout ce qui se trouve dans l'univers, mais étant inaccessibles aux expériences d'un observateur à l'intérieur de l'univers ; soit on ajoute quelque chose à la dynamique de Schrödinger de sorte que la dynamique complète des objets quantiques inclut des événements qui dissolvent les superpositions, y compris les intrications.

La version de la théorie quantique qui accepte l'équation de Schrödinger comme la dynamique complète des objets quantiques a été pour la première fois exprimée explicitement dans un article de Hugh Everett (1957). Selon cette position, les intrications quantiques se perpétuent : elles sont universelles, touchant tous les objets, quantiques ainsi que macroscopiques. Toutes les corrélations possibles entre les différentes valeurs des propriétés des objets existent dans les faits. Toutefois, en raison d'un phénomène physique connu sous le nom de décohérence, il n'y a pas d'interférence entre ces différentes corrélations (voir au sujet de la décohérence les articles dans Giulini *et al.*, 1996, surtout Zeh, 1996). La décohérence permet à cette position de tenir compte du fait que nous observons toujours des valeurs numériques définies : ce que nous voyons quand nous observons le monde, ce n'est qu'une des corrélations qui font partie de la superposition des corrélations (intrication) en question. Les autres corrélations existent également mais elles ne sont pas accessibles à l'expérience de l'observateur. Plus précisément, les intrications touchent en fin de compte également la conscience de l'observateur de sorte qu'il y a une superposition de différentes valeurs de conscience de l'observateur, mais ces différentes valeurs ne sont pas accessibles les unes aux autres : elles existent dans différentes branches de l'univers (voir surtout Albert & Loewer, 1988, et Lockwood, 1989, chap. 12 et 13).

Pour revenir à l'exemple de l'état singulet, il y a une branche de l'univers dans laquelle existe la corrélation « observateur *O* observe premier objet spin plus et deuxième objet spin moins » et il y a une autre branche de l'univers dans laquelle existe la corrélation « observateur *O* observe premier objet spin moins et deuxième objet spin plus ». De même, dans l'exemple du chat de Schrödinger, il y a une branche de l'univers dans laquelle existe la corrélation « observateur *O* observe atome non désintégré et chat vivant » et il y a une autre branche de l'univers dans laquelle existe la corrélation « observateur *O* observe atome désintégré et chat mort ». En bref, cette stratégie consistant à postuler l'existence de branches parallèles de l'univers invisibles les unes aux autres permet de rendre compte de notre expérience quotidienne tout en affirmant que les intrications quantiques sont universelles et perpétuelles. Toutefois, pour obtenir ce résultat, cette position est obligée de s'engager à reconnaître une infinité de branches de l'univers qui existent en parallèle de sorte que tous les objets de l'univers se trouvent ainsi infiniment multipliés : les différentes corrélations qui entrent dans une superposition (intrication) constituent chacune une branche de l'univers qui existe réellement.

Si l'on recule devant cet engagement ontologique et si l'on soutient que les objets macroscopiques ne sont pas soumis aux intrications, bien qu'ils interagissent avec des objets quantiques élémentaires et soient composés de ceux-ci, on est obligé de développer une version du formalisme de la théorie quantique qui ajoute un facteur à l'équation de Schrödinger. Le but est d'obtenir un résultat suivant lequel la dynamique des objets quantiques inclut des événements qui réduisent les intrications, à savoir les superpositions de corrélations, à une seule des corrélations en question. On appelle ces événements « réductions d'état ». Par conséquent, ce qui existe en fait, c'est soit la corrélation « atome non désintégré et chat vivant », soit la corrélation « atome désintégré et chat mort », mais pas les deux dans différentes branches de l'univers.

La seule proposition physique concrète pour une dynamique cohérente qui inclut des réductions d'état a été développée par les physiciens italiens Giancarlo Ghirardi, Alberto Rimini et Tullio Weber (1986) (pour un aperçu, voir Ghirardi, 2002). Ils ajoutent un facteur

non linéaire et stochastique à l'équation de Schrödinger de sorte que pour un seul objet quantique élémentaire isolé il existe une probabilité très faible pour qu'il se localise spontanément, c'est-à-dire qu'il adopte spontanément une valeur numérique définie de sa position. Si l'on considère un grand nombre d'objets quantiques élémentaires – comme, par exemple, un objet macroscopique qui est composé d'un grand nombre d'objets quantiques élémentaires –, il y a au moins un de ces objets quantiques élémentaires qui se localise spontanément en extrêmement peu de temps. Si un seul objet se localise spontanément, tous les autres objets avec lesquels l'état de cet objet est intriqué sont également localisés et l'intrication – à savoir la superposition des corrélations – se trouve réduit à une seule corrélation. Sur cette base, John Bell (1987, notamment p. 45) propose de considérer ces localisations spontanées comme des événements locaux et de concevoir les objets macroscopiques comme des galaxies de tels événements locaux.

Ce que la théorie quantique nous donne, ce sont alors des relations entre des objets, en premier lieu des relations d'intrication (superpositions des corrélations). Soit ces relations d'intrication sont perpétuelles et universelles, soit il y a des événements qui les réduisent à une des corrélations en question. Même en ce cas, nous avons affaire à des corrélations et non à des propriétés intrinsèques – corrélations, par exemple, du type : un objet quantique possède la valeur spin plus dans une direction donnée relativement à un autre objet quantique possédant la valeur spin moins dans la même direction. Il n'y a pas de propriétés intrinsèques qui peuvent servir de base de survenance pour ces corrélations. C'est que montre un théorème que John Bell a prouvé en 1964 : si les objets quantiques avaient des propriétés intrinsèques qui fixent les relations d'intrication (à l'instar de la masse comme propriété intrinsèque fixant les relations de masse entre les objets), il ne pourrait pas y avoir les corrélations que prédit la théorie quantique et qui sont confirmées par des expériences (notamment les expériences d'Aspect, Dalibard & Roger, 1982). Le théorème de Bell exclut la possibilité même de propriétés intrinsèques comme fondement des relations d'intrication, indépendamment de la question de savoir si oui ou non nous pouvons connaître ces propriétés (il pourrait s'agir de variables cachées).

Néanmoins, il n'y a jamais un chemin royal qui, d'une théorie physique, d'un théorème mathématique ou de résultats d'expérience, mène directement à des conséquences métaphysiques déterminées et nécessaires. Même suite à la théorie quantique et aux expériences qui s'inspirent du théorème de Bell, il est possible de soutenir la position selon laquelle les propriétés des objets quantiques sont des propriétés intrinsèques qui fixent les corrélations et que nous ne connaissons pas (des variables cachées). Toutefois, il faut en ce cas accepter des relations causales qui se propagent à une vitesse quelconque (actions à distance) (voir par exemple Chang & Cartwright, 1993) ou reconnaître des relations causales qui sont orientées vers le passé (causalité rétroactive) (voir surtout Price, 1996, chap. 8 et 9, et Dowe, 2000, chap. 8 ; la théorie des variables cachées de Bohm & Hiley, 1993, postule également une action à distance sous forme d'un potentiel quantique).

Une hypothèse philosophique *a priori* – propriétés intrinsèques – se trouve ainsi mise en cause par des résultats scientifiques. On peut sauver l'hypothèse philosophique en question, mais uniquement en souscrivant à des engagements ontologiques fort douteux – comme l'action à distance ou la causalité rétroactive – qui sont, de plus, en contradiction avec une autre théorie physique fondamentale, à savoir celle de la relativité générale. Cette situation confirme la position proposée ci-dessus dans la section 1 au sujet de la thèse de la sous-

détermination de la théorie par l'expérience : l'expérience à elle seule ne possède pas la force logique de déterminer la théorie scientifique, voire l'interprétation d'une théorie scientifique donnée. Toutefois, l'évaluation des conséquences ontologiques des positions logiquement disponibles nous permet de proposer certaines conséquences métaphysiques étant donné la situation empirique, à savoir en ce cas, la reconnaissance des relations d'intrication quantique comme relations physiques fondamentales. Le philosophe Abner Shimony (1989, p. 27) va jusqu'à employer l'expression de métaphysique expérimentale dans ce contexte.

5. *Le réalisme structural*

La situation empirique présentée dans la section précédente est la raison pour laquelle le *réalisme structural* a été mis en avant comme position en métaphysique des sciences. Dans un premier temps, le réalisme structural a été conçu dans la discussion contemporaine comme un point de vue en épistémologie des sciences qui s'accorde avec la métaphysique des propriétés intrinsèques et la conclusion mentionnée dans la section 3, à savoir que nous n'avons aucun accès cognitif aux propriétés physiques si elles sont intrinsèques. D'après le réalisme structural épistémique que propose John Worrall (1989), ce que nous pouvons connaître, ce sont les relations entre les objets, mais pas leur nature intrinsèque. Toutefois, ce que la physique quantique montre – si l'on écarte des hypothèses comme l'action à distance ou la causalité rétroactive – c'est que les objets physiques n'ont pas de nature intrinsèque qui sert de base pour les relations d'intrication. Pour cette raison, Steven French et James Ladyman ont transformé le réalisme structural épistémique en une métaphysique des sciences, soutenant que tout ce qui existe au niveau quantique, ce sont les relations d'intrication (voir surtout Ladyman, 1998, French & Ladyman, 2003, ainsi que Esfeld, 2004).

On peut caractériser une *structure physique* comme *un filet de relations physiques concrètes entre des objets qui n'ont besoin d'être rien de plus que ce qui est relié par ces relations*. Autrement dit, *les relations qui les relient sont la manière dont les objets existent, rien n'empêche que l'existence des objets s'achève dans les relations qui les unissent*. C'est une trivialité logique que de dire que pour qu'il puisse y avoir des relations, il faut des relata, c'est-à-dire des objets reliés par les relations en question. C'est pourtant un préjugé métaphysique que de tirer de cette trivialité logique la conséquence qu'il est nécessaire que les objets possèdent des propriétés intrinsèques qui servent de base aux relations et qui constituent leur identité – ou qu'ils possèdent au moins une propriété primitive, non qualitative, d'être cet objet-ci (propriété d'haeccité, *primitive thisness* en anglais), qui constitue leur identité.

La théorie quantique montre que ce préjugé métaphysique est sans fondement même pour des objets physiques, matériels : il existe bel et bien des objets quantiques élémentaires comme, par exemple, les deux objets de spin demi-entier dans l'état singulet. Cependant, en ce qui concerne les relations quantiques d'intrication, ces objets ne sont rien de plus que ce qui existe dans ces relations. Il n'y a pas de propriétés intrinsèques qui constituent la base de ces relations, et présumer que les objets quantiques possèdent chacun une propriété primitive, non qualitative, d'être cet objet-ci va également à l'encontre de la description des objets physiques que propose la théorie quantique (voir Cao, 2003, notamment p. 62). Ce que la mécanique quantique considère comme des objets physiques élémentaires (par exemple, les deux objets de spin demi-entier dans l'état singulet) se trouve ramené à des propriétés de champs en théorie des champs quantiques (par exemple, opérateur de nombre de particules).

Néanmoins, la trivialité logique qui veut que des relations demandent des relata demeure évidemment valide en théorie des champs quantiques : il y a des parties des champs, voire à la rigueur même, les points de l'espace-temps, que l'on peut considérer comme étant les relata des relations d'intrication en théorie des champs quantiques.

Toutefois, il existe des propriétés concrètes des objets physiques qui ne sont pas touchées par les intrications, comme par exemple la charge et la masse au repos. Celles-ci sont des propriétés qui possèdent toujours une valeur numérique définie qui ne varie pas dans le temps. Par exemple, un électron possède toujours une charge élémentaire négative et une masse au repos de 0,51 Mev ($1 \text{ Mev} = 1,782 \times 10^{-27} \text{ g}$). Néanmoins, il est possible d'appliquer à ces propriétés une description en termes structuraux, c'est-à-dire une description qui les représente comme étant invariantes sous certaines transformations de symétrie (voir Psillos, 2006, pp. 151-154). Il ne découle pourtant pas de cette possibilité de description structurale que les propriétés elles-mêmes consistent en des structures. Il est trivial d'affirmer que l'on peut donner une description relationnelle de n'importe quelle propriété ; ce fait ne tranche en rien la question de savoir si les propriétés auxquelles ces descriptions font référence sont des relations ou des propriétés intrinsèques. Même David Lewis (2001) concède que toutes nos descriptions sont relationnelles ou structurales, mais il maintient que les propriétés elles-mêmes sont intrinsèques. Dans le cas des propriétés comme la charge et la masse, il manque un argument comparable à celui qui dérive du théorème de Bell et qui montre que les relations que nous saisissons ne pourraient pas exister si elles étaient basées sur des propriétés intrinsèques.

On peut dès lors maintenir que des propriétés comme la charge et la masse sont des propriétés intrinsèques et causales. La charge, par exemple, consiste en le fait d'exercer le pouvoir d'engendrer un champ électromagnétique, ceci ayant pour conséquence d'attirer les objets de charge opposée et de repousser les objets ayant la même charge. La masse consiste en le pouvoir de résister à l'accélération, etc. Cependant, même si l'on considère la charge et la masse comme des propriétés intrinsèques, celles-ci ne sont pas des propriétés qui peuvent constituer l'identité des objets. Tous les électrons, par exemple, ont la même charge et la même masse au repos. Les propriétés qui ont toujours une valeur numérique définie qui reste invariante ne sont pas en mesure de distinguer les objets de la même espèce les uns des autres.

Il est compatible avec le réalisme structural que de reconnaître aux objets, en plus des relations, des propriétés intrinsèques, pour autant que celles-ci ne constituent pas l'identité de ces objets. D'après le réalisme structural, il est possible que la manière d'exister des objets s'achève dans leurs relations. Toutefois, cette position métaphysique n'exclut pas que les objets puissent posséder encore d'autres propriétés. Seule la reconnaissance de propriétés intrinsèques (ou d'une propriété primitive, non qualitative, d'être cet objet-ci) qui constituent l'identité des objets indépendamment des relations contredit le réalisme structural.

La portée métaphysique de la physique quantique s'exprime alors en premier lieu dans le fait suivant : tout le monde, même l'atomiste humien David Lewis, concède que l'espace-temps consiste en des structures géométriques, à savoir des relations métriques entre des points spatio-temporels, sans que ces points n'aient de propriétés intrinsèques. La physique quantique montre qu'il y a encore un autre type de relations irréductibles, à savoir les relations d'intrication. Celles-ci sont des relations matérielles par contraste à des relations spatio-temporelles, et elles sont indépendantes des relations spatio-temporelles – la distance spatio-temporelle n'a aucune influence sur ces relations. Partant, la physique quantique établit

que la matière ne consiste pas en des propriétés intrinsèques et réfute l'atomisme en philosophie de la nature. Elle suggère un holisme au sens où les objets dans la nature sont au fond liés les uns aux autres par des relations d'intrication – au lieu de posséder chacun pour soi des propriétés intrinsèques (voir Teller, 1986, Healey, 1991, et Esfeld, 2001, chap. 8, au sujet du holisme en physique quantique). Ainsi, en plus de l'être par les relations spatio-temporelles, le monde est uni par les relations d'intrication quantique.

On peut même aller encore plus loin en tenant compte de l'autre théorie physique fondamentale : la théorie de la relativité générale. Comme déjà mentionné, tout le monde, même l'atomisme humien, reconnaît les relations spatio-temporelles comme des relations fondamentales et irréductibles. L'atomisme peut faire cette concession envers le réalisme structural, voire le holisme, parce qu'il considère les relations spatio-temporelles comme une sorte d'arrière-plan dans le lequel la matière est insérée, celle-ci consistant en des propriétés intrinsèques. Or, la théorie contemporaine de l'espace-temps, la théorie de la relativité générale, ne permet pas d'établir une distinction nette entre l'espace-temps d'un côté et la matière de l'autre. D'après cette théorie, l'espace-temps est courbé au lieu d'être plat, et la gravitation est identique à la courbure de l'espace-temps : l'énergie gravitationnelle est incluse dans le champ métrique. Celui-ci acquiert ainsi un caractère matériel, interagissant avec les champs d'énergie-matière non gravitationnelle (les champs quantiques) ainsi qu'avec lui-même.

Il y a un argument fort qui a pour conséquence que l'on ne peut pas regarder le champ métrique comme étant séparé de l'espace-temps physique. Cet argument, appelé « argument du trou », établit en même temps que les points de l'espace-temps ne possèdent pas de propriété primitive, non qualitative, d'être cet objet-ci, constituant leur identité indépendamment des relations métriques. Cet argument montre que s'il y avait une telle propriété primitive, non qualitative et si l'on pouvait ainsi considérer les points de l'espace-temps comme possédant une identité primitive indépendamment du champ métrique, il s'ensuivrait un certain indéterminisme, tandis que la théorie de la relativité générale est déterministe (cet argument remonte à Einstein & Grossmann, 1913, pp. 260-261 ; pour la discussion actuelle, voir surtout Earman & Norton, 1987, et Stachel, 1993). A l'instar de l'argument qui se base sur le théorème de Bell, il s'agit à nouveau d'un argument qui met en évidence les conséquences empiriques inacceptables d'une certaine position métaphysique (identité primitive des points de l'espace-temps) et qui confirme le réalisme structural, cette fois par rapport à l'espace-temps (voir Esfeld & Lam, 2008).

Toutefois, qu'est-ce qui constitue alors l'identité des objets physiques fondamentaux, à savoir des points de l'espace-temps ainsi que des objets quantiques élémentaires ? En métaphysique générale, il existe deux types de réponse principaux à la question de savoir ce qui constitue l'identité d'un objet : postuler soit une propriété primitive, non qualitative, d'être cet objet-ci (*primitive thisness* en anglais), soit des propriétés qualitatives. Le premier type de réponse ne tient ni pour les points de l'espace-temps, ni pour les objets quantiques élémentaires pour les raisons déjà mentionnées. En ce qui concerne le deuxième type de réponse, il n'existe pas de propriétés intrinsèques qui peuvent constituer l'identité des objets physiques fondamentaux, ni des objets quantiques élémentaires, ni des points de l'espace-temps.

Cependant, des relations peuvent également mettre à disposition de critères d'identité car elles sont aussi spécifiques et déterminées que les propriétés intrinsèques. Par exemple, si un

objet *A* est plus grand qu'un objet *B*, plus lourd qu'un objet *C*, etc., des telles relations ont pour conséquence qu'*A* est un individu distinct de *B* et de *C*. Considérons une analogie : depuis l'article fameux de Willard Van Orman Quine sur « Deux dogmes de l'empirisme » (Quine, 1951 / traduction française Quine, 2003), la notion de filet de croyances nous est familière. Le contenu conceptuel (la signification) d'une croyance n'est pas une propriété intrinsèque, mais consiste en des relations inférentielles à d'autres croyances (il en va de même pour d'autres propriétés des croyances comme la confirmation ou encore la justification). Le holisme sémantique n'a pas de problème à proposer des critères d'identité des croyances sur cette base : chaque croyance est caractérisée par sa position dans le filet. Elle se distingue ainsi de toutes les autres croyances dans le filet, parce qu'il n'y a pas deux croyances qui entrent dans exactement les mêmes relations avec toutes les autres croyances dans le filet. Le problème pour le holisme sémantique est d'éviter la conséquence que n'importe quel changement de relations à l'intérieur du filet aboutit à un changement du contenu conceptuel de *toutes* les croyances. Il faut dès lors distinguer certaines relations inférentielles comme étant plus importantes que d'autres. Ce problème n'a pourtant rien à voir avec le sujet central dans notre contexte, à savoir le fait que ce sont les relations à d'autres croyances qui constituent les critères d'identité pour les croyances. Dans une première approche, on peut concevoir le réalisme structural comme transférant cette idée de la sémantique à la métaphysique. Si cette idée est intelligible en sémantique, elle l'est également en métaphysique.

La situation est cependant plus compliquée en métaphysique des sciences physiques fondamentales qu'en sémantique. En physique fondamentale, nous faisons face à des situations dans lesquelles ni des propriétés intrinsèques ni des relations ne sont capables de mettre à disposition des critères d'identité pour les objets fondamentaux (et l'idée d'une propriété primitive, non qualitative, d'être cet objet-ci ne tient pas non plus pour les raisons expliquées). Tous les objets quantiques élémentaires de la même espèce dont les états sont intriqués sont indiscernables les uns des autres : il n'y a aucun prédicat, même pas de prédicat qui décrit une probabilité conditionnelle, qui s'applique à l'un de ces objets sans s'appliquer également aux autres. Pour revenir à l'exemple de deux objets de spin demi-entier, comme deux électrons dans l'état singulet, il n'y a rien qui distingue l'un de ces deux objets de l'autre. Par conséquent, il n'est pas possible de caractériser l'un des deux objets par une marque et de le reconnaître par la suite. Tout ce que nous dit la relation d'intrication en ce cas c'est qu'il y a deux objets qui sont anti-corrélés en ce qui concerne leurs valeurs numériques définies possibles de spin dans chaque direction spatiale. Simon Saunders (2006, pp. 57-60) parle néanmoins de discernabilité faible car il s'agit d'une relation irréflexive : aucun objet ne peut être anti-corrélé avec lui-même. En général, on peut dire qu'aucun objet ne peut être intriqué avec lui-même. Toutefois, tout ce que montre le caractère irréflexive de la relation d'intrication, c'est qu'il y a un nombre d'objets qui est plus grand qu'un. Il n'y a rien qui permet de distinguer l'un de ces objets des autres et de le reconnaître à travers le temps. Les objets quantiques ne possèdent pas d'identité dans le temps.

En ce qui concerne les relations métriques, il y a des bons arguments physiques pour soutenir que le monde réel est décrit par des solutions symétriques des équations de champ d'Einstein, à savoir les solutions Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker (FLRW). D'après ces solutions, il y a des points de l'espace-temps qui sont numériquement distincts (c'est-à-dire qu'il ne s'agit pas d'un seul point), mais il n'y a pas de relations métriques qui les

distinguent les uns des autres. En d'autres termes, ces points entrent dans exactement les mêmes relations métriques avec tous les autres points de l'espace-temps.

Steven French et James Ladyman utilisent ces exemples pour mettre la notion même d'objet en question : selon eux, il n'existe au fond pas d'objets. Tout ce qui existe, ce sont des relations. French et Ladyman soutiennent ainsi un réalisme structural radical. Dans la mesure où il y a des objets, ils sont ontologiquement secondaires, étant constitués par des nœuds de relations (voir French & Ladyman, 2003, et Ladyman & Ross, 2007, chap. 3). On peut interpréter cette conception comme appliquant aux relations une position qui est répandue en métaphysique analytique, à savoir la position qui considère les objets comme des faisceaux (*bundles* en anglais) de propriétés intrinsèques : les objets sont des faisceaux de relations. Toutefois, on peut objecter contre la vision des objets comme nœuds ou faisceaux de relations qu'elle n'est pas intelligible : les relations nécessitent évidemment des objets qu'elles relient (même s'il n'est pas nécessaire que ces objets possèdent une identité, voire des propriétés intrinsèques, en sus des relations). Il n'est pas logiquement possible qu'il y ait des relations sans relata. Autrement dit, il ne peut pas y avoir des structures sans objets (voir par exemple Cao, 2003, et Psillos, 2006, section 2, pour cette objection).

De plus, on peut soulever des objections physiques à l'idée selon laquelle les objets sont des nœuds ou des faisceaux de relations : en ce qui concerne les structures d'intrication quantique, chaque objet appartient à une seule structure de ce type. Il n'y a pas de pluralité de structures d'intrication quantique avec des objets comme nœuds de plusieurs de telles structures, mais au fond une seule structure quantique d'intrication globale. Eu égard aux relations métriques, j'ai déjà mentionné les solutions symétriques des équations de champ d'Einstein qui présupposent une pluralité numérique de points de l'espace-temps sans que des relations soit capables de les distinguer les uns des autres. La situation physique qui est caractérisée par ces solutions symétriques ainsi que les relations d'intrication quantique constitue un argument fort en faveur de la position métaphysique qui accepte simplement comme primitive une diversité numérique d'objets indiscernables. Autrement dit, il y a une pluralité d'objets que les relations relient, sans que rien ne soit capable de distinguer ces objets les uns des autres (voir Pooley, 2006, Rickles, 2006, et Esfeld & Lam, 2008).

Les conceptions métaphysiques classiques échouent face à cette situation physique : les objets physiques fondamentaux ne possèdent pas de propriété primitive, non qualitative, d'être cet objet-ci (*primitive thisness* en anglais), ils ne sont pas non plus des faisceaux de propriétés intrinsèques, et ils ne pourraient pas être des faisceaux de relations. Néanmoins, il existe des objets physiques fondamentaux, car les relations requièrent des relata qu'elles relient. Partant, c'est une position cohérente et bien fondée empiriquement que de soutenir qu'il existe une diversité numérique d'objets physiques fondamentaux constituant les relata des relations sans qu'il n'existe de propriétés par lesquelles ces objets se distinguent les uns des autres. C'est un réalisme structural modéré que de reconnaître des objets en ce sens, par contraste au réalisme structural radical que proposent French et Ladyman, niant au fond l'existence même d'objets.

Les relations dont il est question dans le réalisme structural en philosophie de la nature sont des relations concrètes qui relient des objets physiques fondamentaux. On peut caractériser le réalisme structural modéré en disant que les relations sont la manière (mode) dont les objets physiques fondamentaux existent. En ce qui concerne le réalisme structural, rien n'empêche que la manière dont ces objets existent s'achève dans les relations (c'est le cas pour les points

de l'espace-temps ; eu égard aux objets quantiques élémentaires, on peut maintenir que ceux-ci possèdent encore des propriétés intrinsèques et causales comme la charge et la masse, qui sont cependant incapables de distinguer ces objets les uns des autres). En parlant de modes pour désigner les propriétés, y compris les relations, on suggère de considérer les propriétés comme étant des entités particulières (tropes) et non pas comme étant des universaux. Selon cette dernière position, les objets sont conçus comme instanciant des propriétés, y compris des relations, propriétés qui sont des universaux. Soit les universaux existent en dehors du monde empirique (position platonicienne), soit ils sont présents dans les objets empiriques (position aristotélicienne) (voir Garcia & Nef, 2007, pour un recueil de textes contemporains en français sur ce débat).

Les partisans des universaux n'ont cependant pas réussi à expliquer en quoi consiste exactement la relation d'instantiation qui est censée relier les propriétés comme universaux aux objets concrets. Si l'on maintient que les universaux existent en dehors du monde empirique, il n'est pas clair comment il faut comprendre la proposition selon laquelle les propriétés, y compris les relations, physiques concrètes qui existent dans le monde empirique participent aux universaux (voir déjà Platon, *Parménide* 130e-133a). Concevoir des structures mathématiques abstraites placées en dehors du monde empirique et considérer les objets physiques comme participant à ces structures ne contribue en rien à une résolution de ce problème. Si les universaux sont censés exister dans les objets physiques concrets, il n'est pas clair comment un universel qui est numériquement une seule entité peut néanmoins exister comme tout dans un nombre indéfini d'objets numériquement différents.

Les tenants des universaux rétorquent que l'on ne peut pas expliquer la similarité entre les propriétés concrètes des objets sans reconnaître d'universaux. Ce problème ne se pose pourtant pas pour les propriétés, y compris les relations, physiques fondamentales : celles-ci ne sont pas simplement similaires, mais qualitativement identiques (pour autant qu'elles rendent vraie la même description scientifique). Par exemple, toutes les charges élémentaires négatives qui existent dans le monde sont qualitativement identiques, bien que numériquement différentes, toutes les relations d'intrication d'état singulet entre, disons, deux électrons sont qualitativement identiques, etc. Sur cette base, on peut maintenir que les similarités pertinentes qui existent entre des propriétés concrètes plus complexes dérivent de l'identité qualitative entre des propriétés, y compris des relations, physiques fondamentales.

Les deux théories physiques fondamentales contemporaines, à savoir la théorie quantique et la théorie de la relativité générale, soutiennent dès lors toutes les deux le réalisme structural. Il existe deux types de structures physiques fondamentales : les structures d'intrication quantique et les structures métriques. Ces deux types de structures sont différents : les structures d'intrication quantique sont indépendantes de la distance spatio-temporelle, et il n'y a rien de comparable à des superpositions de corrélations dans les structures métriques. Quel est le rapport entre ces deux types de structures ? Cette question soulève celle du rapport entre la théorie des champs quantiques et la théorie de la relativité générale. Il n'y a aucune contradiction explicite et expérimentale entre ces deux théories, mais elles ne sont pas mutuellement cohérentes : la théorie des champs quantiques, dans la version aujourd'hui opérationnelle, présuppose l'espace-temps comme arrière-plan passif dans lequel les champs quantiques sont insérés et se développent (le temps est traité comme paramètre externe en théorie quantique). D'après la théorie de la relativité générale, par contre, l'espace-temps n'est pas du tout un arrière-plan passif : il est lui-même dynamique, interagissant, grâce à

l'énergie gravitationnelle que le champs métrique contient, avec l'énergie-matière non gravitationnelle ainsi qu'avec lui-même.

La recherche d'une unification de ces deux théories se focalise sur le développement d'une théorie de la gravitation quantique. La tendance dominante consiste à considérer les structures d'intrication quantique comme plus fondamentales que les structures métriques, spatio-temporelles. Autrement dit, on cherche à développer une théorie fondamentale des structures quantiques qui ne présuppose pas, comme la théorie des champs quantiques aujourd'hui opérationnelle, un espace-temps passif comme arrière-plan dans lequel ces structures sont insérées. Bien au contraire, on cherche à dériver la description des structures métriques, spatio-temporelles, de la description des structures quantiques fondamentales.

Selon le physicien Claus Kiefer, il existe une structure quantique fondamentale qui n'appartient pas à l'espace-temps et qui est décrite par une équation non-temporelle. Cette structure mène, par le biais de la décohérence, à l'émergence de l'espace-temps et des processus qui se déroulent dans le temps. Kiefer soutient que le principe quantique de superposition reste universellement valide (voir Kiefer, 2004, chap. 8 et 10, notamment pp. 272-273). Il n'y a donc pas d'événements de réduction des intrications quantiques. Au moyen de la décohérence se développent dès lors différentes branches de l'univers qui donnent chacune l'apparence d'un monde classique aux observateurs locaux (voir les explications au sujet du problème de la mesure dans la section 4 ci-dessus).

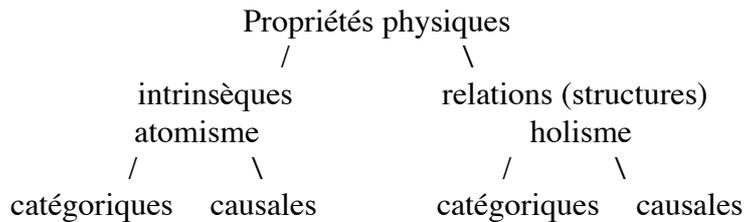
Si, par contre, on accepte une version de la théorie quantique qui inclut des événements de réduction des intrications quantiques, il est en principe également possible de développer une telle position en une théorie physique fondamentale qui aboutit à une unification de la théorie quantique avec la théorie de la relativité générale. Le philosophe Mauro Dorato (2006) met en avant l'idée suivante : il existe des structures quantiques fondamentales d'intrication qui ne sont pas situées dans l'espace-temps. Au contraire, l'espace-temps se développe à partir de ces structures au moyen d'événements de localisation spontanée d'objets quantiques. Cette idée se situe dans le cadre de la version de la théorie quantique que Ghirardi, Rimini et Weber (1986) ont élaboré et selon laquelle, d'après les dires de Bell (1987, p. 45), les objets macroscopiques sont des galaxies d'événements locaux de localisation spontanée d'objets quantiques. Dorato fait encore un pas de plus en proposant que ces événements quantiques de réduction des intrications sous forme de localisations spontanées sont non seulement à la base des objets macroscopiques mais encore de l'espace-temps lui-même.

Il va sans dire qu'explorer le domaine de l'unification de la théorie quantique avec celle de la relativité générale est à l'heure actuelle un projet pour lequel il n'y a pas encore à disposition de résultats empiriquement bien fondés. Néanmoins, on peut retenir les deux points suivants : (1) Quelle que soit la forme que prendra la théorie de l'unification des structures quantiques et des structures spatio-temporelles, cette théorie ne résoudra pas automatiquement le problème de la mesure. Autrement dit, elle sera compatible avec une version de la théorie quantique qui considère le principe de superposition universellement valide tout comme avec une version qui reconnaît des événements de réduction des intrications quantiques à des structures classiques et locales. Rien n'empêche dès lors qu'une théorie vraiment fondamentale contienne une théorie de la transition des structures quantiques à un domaine du monde qui est réellement classique (au lieu d'apparaître uniquement comme classique à des observateurs locaux). (2) Quelle que soit la forme que prendra la théorie de l'unification des structures quantiques et des structures spatio-temporelles, le réalisme

structural restera valide : tout ce débat se situe dans le cadre de l'ontologie du réalisme structural ; ce qui existe au fond dans le monde, ce sont des structures.

6. Structures catégoriques ou structures causales ?

Revenons sur la présentation de l'espace logique des positions possibles que j'ai introduit en section 3. Cet espace se définit par la distinction entre propriétés intrinsèques et relations ainsi que par la distinction entre propriétés catégoriques et propriétés causales. Il comporte donc quatre positions possibles :



La discussion en métaphysique analytique tient généralement comme admis que les propriétés fondamentales sont intrinsèques et se concentre ainsi sur la question de savoir si elles sont catégoriques ou causales. Si l'on tient compte des théories physiques fondamentales, les trois observations suivantes s'imposent cependant :

- (1) Les propriétés physiques fondamentales sont des relations (structures) et non pas des propriétés intrinsèques. (S'il y a des propriétés intrinsèques en sus des structures, celles-ci ne sont en rien en mesure de constituer des critères d'identité pour les objets physiques fondamentaux). Il faut dès lors abandonner la métaphysique atomiste des propriétés intrinsèques en faveur de la métaphysique holiste du réalisme structural.
- (2) La physique fondamentale contemporaine accorde le statut d'une option métaphysique réelle qui mérite d'être prise au sérieux à la position qui considère les propriétés physiques comme des structures causales. Eu égard à la métaphysique avant l'arrivée de la théorie physique de la relativité générale, cette position n'était pas disponible comme une option réelle, bien qu'elle ait été logiquement possible : il a semblé évident que l'exemple paradigmatique des structures en physique classique, à savoir les relations spatio-temporelles, ne peuvent pas être des structures causales, l'espace-temps étant considéré comme un arrière-plan passif, catégorique dans laquelle la matière est insérée. Or, d'après la théorie de la relativité générale, les structures spatio-temporelles contiennent elles-mêmes de l'énergie, à savoir l'énergie gravitationnelle, et interagissent ainsi avec l'énergie-matière non gravitationnelle aussi bien qu'avec elles-mêmes. Par conséquent, pour autant que l'on puisse considérer les propriétés matérielles comme causales, on peut regarder les structures métriques, spatio-temporelles également comme causales.
- (3) Néanmoins, il semble qu'en parlant en faveur du réalisme structural, la physique fondamentale contemporaine ouvre non seulement la voie à une métaphysique de structures causales, mais réfute également l'argument standard contre la conception des propriétés comme intrinsèques et catégoriques. Il semble que cet argument ne s'applique plus si l'on fait le pas conduisant des propriétés intrinsèques à des structures. L'argument traditionnel dit que si les propriétés étaient intrinsèques et catégoriques, nous ne pourrions pas les connaître (voir la fin de la section 3 ci-dessus). Or, si les propriétés sont des relations au lieu d'être des propriétés intrinsèques, il semble que cet argument ne

s'applique plus car on peut maintenir que les relations sont telles qu'elles sont décrites par les théories physiques fondamentales. Autrement dit, l'argument en question tire sa force du fait que toutes nos connaissances passent par des relations et que des propriétés qui sont censées être intrinsèques et catégoriques n'engendrent pas en tant que telles de relations qui permettent de les identifier ; partant, il n'y a pas de relations qui révèlent l'être intrinsèque et catégorique de ces propriétés. Cet argument ne tient apparemment plus si ce qui existe dans la nature sont des relations au lieu d'être des propriétés intrinsèques (voir Sparber, 2008).

La question est donc de savoir si les structures physiques fondamentales sont catégoriques ou si elles sont causales. On peut appeler la première position « réalisme structural cartésien » et la seconde « réalisme structural leibnizien ». Descartes cherche à réduire la matière à des relations spatio-temporelles, car celles-ci sont, pour la physique de son époque, l'exemple paradigmatique de propriétés catégoriques. Il se dissocie ainsi de la métaphysique des propriétés dispositionnelles de l'aristotélisme et de la scholastique. Leibniz, lui, réintroduit la conception causale des propriétés en philosophie moderne, s'opposant ainsi à Descartes (et cherchant par conséquent, sur la base de la physique de son époque, à diminuer le statut ontologique du filet des relations spatio-temporelles). Tandis que l'on peut trancher l'opposition entre l'atomisme (propriétés intrinsèques) et le holisme (structures) en se référant aux théories physiques fondamentales contemporaines, on ne peut pas trouver de réponse à la question de savoir si les structures sont catégoriques ou causales en examinant simplement les engagements ontologiques de ces théories. L'argument standard contre les propriétés intrinsèques et catégoriques est un argument de connaissance, disant au fond que nous n'avons aucune raison de reconnaître comme existant des propriétés auxquelles nous n'avons pas d'accès cognitif. C'est sous cet angle là qu'il faut attaquer la question de savoir si oui ou non cet argument tient si l'on fait le pas menant des propriétés intrinsèques aux structures.

L'argument traditionnel contre les propriétés intrinsèques et catégoriques soutient que nous avons un accès cognitif à quelque chose uniquement par le biais des relations causales qui relient l'entité en question à notre appareil cognitif. Les structures dont les théories physiques fondamentales traitent ne sont pas directement liées à notre appareil cognitif. Il s'agit d'entités théoriques, parce qu'elles ne sont pas directement observables. Les structures d'intrication quantique ne sont pas observables en tant que telles. Ce que l'on observe, ce sont certaines corrélations entre des résultats de mesure, mais pas de superpositions de ces corrélations (intrications). On postule l'existence des superpositions afin d'expliquer les corrélations entre les résultats de mesure. De même, les relations métriques que la théorie de la relativité générale postule, concevant l'espace-temps comme courbé, ne sont pas observables en tant que telles. Un observateur local peut toujours décrire l'espace-temps autour de lui comme plat. C'est uniquement lorsqu'on cherche à construire une description globale de l'espace-temps que l'on constate que l'espace-temps ne peut pas être regardé comme étant plat si l'on se propose d'expliquer l'ensemble des expériences des observateurs locaux. En bref, on accepte ces entités théoriques (structures d'intrication quantique, structures métriques qui incluent l'énergie gravitationnelle) parce qu'elles expliquent les phénomènes observés. Il s'agit là d'explications causales.

Il est coutumier d'utiliser des concepts causales pour des propriétés dispositionnelles dans la description des structures quantiques d'intrication. Ces structures incluent la disposition de se perpétuer (développement des états des objets quantiques selon la dynamique de

Schrödinger) ainsi que la disposition d'engendrer des réductions d'état qui dissolvent les intrications. Pour être plus précis, même si l'on défend une version de la théorie quantique selon laquelle il n'y a pas de réductions d'états, on peut interpréter les processus de décohérence qui mènent à partir des structures quantiques fondamentales au développement de différentes branches de l'univers, existant en parallèle et apparaissant chacune de façon classique aux observateurs locaux, comme des processus causaux. Autrement dit, les structures quantiques fondamentales sont en elles-mêmes causales, et c'est pour cette raison qu'elles engendrent, par le biais de la décohérence, la manière dont le monde nous apparaît. Si, par contre, on accepte l'existence d'événements de réduction d'état qui dissolvent les intrications, on peut considérer les structures d'intrication quantique comme étant en elles-mêmes causales dans le sens où elles incluent la disposition d'engendrer des événements de localisation spontanée. La dynamique de Ghirardi, Rimini et Weber (1986) décrit ainsi le caractère causal de ces structures (voir Dorato, 2006, et Suárez, 2007).

En ce qui concerne les structures métriques, spatio-temporelles, la théorie de la relativité générale donne le coup de grâce à un dualisme insatisfaisant postulant, d'une part, des propriétés matérielles causales et, d'autre part, des relations spatio-temporelles qui ne peuvent pas être causales (dans la littérature contemporaine, Ellis, 2001, chap. 1 et 3, par exemple, défend toujours un tel dualisme). Comme les structures métriques contiennent de l'énergie, à savoir l'énergie gravitationnelle, on peut les considérer comme causales au même titre que les structures quantiques d'énergie-matière non gravitationnelle : la manière dont le champ métrique interagit avec lui-même ainsi qu'avec l'énergie-matière non gravitationnelle, y compris la production des phénomènes [de gravitation](#) observés, est la manifestation de son caractère causal (cf. [Bartels, 1996, pp. 37-38](#), et [Bird, 2008, section 2.3](#)).

Rien en l'état actuel des connaissances physiques ne nous empêche dès lors de concevoir les structures physiques fondamentales comme des structures causales (voir [French, 2006, pp. 178-182](#), au sujet des structures causales, et [Ladyman & Ross, 2007, chap. 2 à 5](#), au sujet des structures modales). L'argument principal pour cette conception est le suivant : [si les structures physiques fondamentales n'étaient pas causales elles-mêmes, c'est-à-dire n'étaient pas de pouvoirs dans le sens expliqué, nous ne pourrions pas les connaître : nous ne pourrions pas savoir quelles sont les structures physiques sous-jacentes. Si les structures physiques fondamentales étaient catégoriques, différentes structures pourraient être corrélées avec les mêmes phénomènes observables. En d'autres termes, sur la base des phénomènes observables, on ne pourrait en principe pas savoir quelles sont les structures physiques fondamentales. Il y aurait en ce cas deux mondes possibles qui sont distincts par rapport aux structures physiques fondamentales mais indiscernables en ce qui concerne le domaine entier des phénomènes observables dans les deux mondes. Si, par contre, les structures physiques fondamentales sont causales, chaque différence dans les structures physiques fondamentales est une différence causale ; puisque les pouvoirs que sont les structures physiques fondamentales s'exercent en engendrant les phénomènes observables, cette différence causale mène forcément à une différence quelque part dans le domaine des phénomènes observables. Nous pouvons donc en principe découvrir les structures physiques fondamentales à partir des phénomènes observables.](#)

On peut concevoir l'argument en faveur du caractère causal des structures physiques fondamentales également de la façon suivante : Quelle est la distinction entre structures physiques réelles et structures mathématiques ? Nous employons des structures

mathématiques pour représenter le monde physique et pour dériver des prédictions de phénomènes. Il n'est pourtant pas le cas que toutes les structures mathématiques que nous utilisons dans des théories physiques font référence à des structures physiques et représentent leur constitution. Une réponse claire à cette question est la suivante : les structures mathématiques ne sont pas causalement efficaces en tant que telles. L'emploi que nous faisons des structures mathématiques en construisant des théories physiques a certainement des effets, mais non ces structures en elles-mêmes. Les structures physiques réelles se distinguent des structures mathématiques en produisant des effets. Par conséquent, on a une raison suffisante à disposition pour maintenir qu'une description en termes de structures mathématiques se réfère à une structure physique réelle et révèle la constitution de celle-ci dans la mesure où l'on peut considérer celle-ci comme étant causalement efficace en tant que telle.

L'idée de propriétés causales et d'explications causales tire bien sûr son origine du sens commun, à savoir de l'expérience quotidienne de notre environnement ainsi que de nous-mêmes en tant qu'agents dans cet environnement (voir Esfeld, 2007). C'est la raison pour laquelle la biologie et les sciences humaines et sociales, notamment, conçoivent leurs domaines en termes de propriétés fonctionnelles et proposent des explications causales-fonctionnelles. Pourquoi retenir cette idée dans toutes les sciences, y compris la physique fondamentale ? Parce qu'elle explique quelque chose, nous rendant ainsi le monde intelligible : en se basant sur cette idée, on obtient une position cohérente qui s'étend de la physique fondamentale via les sciences spéciales jusqu'aux sciences humaines et sociales. Il vaut mieux avoir une explication à disposition, pour autant qu'elle soit bien fondée, que de se borner à une attitude sceptique d'agnosticisme envers la constitution réelle du monde. On a montré ci-dessus comment l'idée de propriétés causales en guise de structures causales et d'explications causales tient également pour les théories physiques fondamentales, bien qu'il ne soit pas possible de tirer le caractère causal directement des engagements ontologiques de ces théories : ces engagements concernent des structures, et l'engagement envers le caractère causal de ces structures dérive de la motivation de comprendre le monde – qui, quant à elle, est bel et bien la motivation scientifique.

7. *Structures globales et structures locales*

Les théories physiques fondamentales contemporaines nous engagent à accepter que ce qui existe au fond dans le monde, ce sont des structures globales : des structures d'intrication quantique ainsi que des structures métriques, à savoir le champ métrique qui inclut l'énergie gravitationnelle. Quel est le rapport entre les théories physiques fondamentales et universelles d'un côté et les théories des sciences spéciales de l'autre ?

Si l'on adopte une version de la théorie quantique qui reconnaît des événements de réduction d'état, on peut répondre de la façon suivante à cette question : à partir des structures globales d'intrication quantique se développent, par le biais des événements de réduction d'état, des objets et des propriétés physiques classiques, ayant des valeurs numériques définies. Néanmoins, il ne s'agit pas là de propriétés intrinsèques : ce qui se passe lors d'un événement de réduction d'état, c'est qu'une superposition de corrélations est réduite à une seule des corrélations en question. Les propriétés de chaque objet quantique élémentaire possèdent alors une valeur numérique définie, mais cette valeur n'existe que relativement aux valeurs numériques définies des propriétés de même type que possèdent les autres objets

quantiques élémentaires impliqués dans l'intrication. Nous faisons donc toujours face à des relations, à savoir des structures. Toutefois, ce qui se produit par le biais des réductions d'états, c'est que des structures locales se développent en structures stables, car le nombre d'objets quantiques élémentaires impliqués est tellement grand que des intrications persistantes ne se produisent plus.

Certaines de ces structures locales se développent en des structures complexes qui constituent le domaine de l'une ou l'autre des sciences spéciales – par exemple de la chimie (molécules), de la biologie (cellules, organismes) ou encore des neurosciences (configurations de neurones). Ces sciences spéciales se focalisent sur certains des effets que produisent ces structures prises dans leur totalité ; elles en proposent des descriptions fonctionnelles sous la forme de rôles causaux. Autrement dit, les sciences spéciales – de même que le sens commun – considèrent les propriétés (les structures) dont elles traitent comme consistant en des rôles causaux.

Si l'on souscrit à la version leibnizienne du réalisme structural qui considère les structures physiques fondamentales, globales comme causales, les structures locales que celles-ci engendrent sont bien sûr également causales. Sur cette base, on arrive dès lors à une métaphysique des sciences cohérente qui s'étend du domaine de la physique fondamentale via celui des sciences spéciales jusqu'à notre expérience du monde et de nous-mêmes dans le monde. Dans ce cadre, on trouve une solution facile au problème qui résulte du fait que (a) les théories physiques fondamentales et universelles sont complètes causalement, nomologiquement et explicativement (voir section 2 ci-dessus) et que (b) les propriétés dont les sciences spéciales traitent sont également causalement efficaces, produisant des effets qui incluent des effets physiques : ces propriétés-ci (au sens d'occurrences de propriétés, modes ou tropes) sont identiques à des structures locales. Certaines de ces structures locales, prises dans leur totalité, ont des effets qui sont décrits par des théories des sciences spéciales. Il est possible de coordonner les descriptions de ces structures locales, proposées d'une part par la physique et d'autre part par les sciences spéciales, dans le cadre d'un réductionnisme conservatif (voir Esfeld & Sachse, 2007).

8. *Conclusion*

Pour conclure, résumons brièvement les différentes distinctions traitées dans cet article et le caractère des arguments s'appliquant à elles. La première distinction abordée était celle entre propriétés intrinsèques et relations (structures). J'ai soutenu que la question de savoir si ce qui existe primordialement dans le monde ce sont des propriétés intrinsèques ou des structures est une question physique. Par conséquent, c'est un argument physique, dérivant de la théorie quantique et de la théorie de la relativité générale, qui est avancé pour pouvoir affirmer que les structures l'emportent sur les propriétés intrinsèques dans le domaine physique fondamental. La deuxième distinction dont il a été question dans cet article était celle entre propriétés catégoriques et propriétés causales. L'argument standard contre la théorie des propriétés comme étant intrinsèques et catégoriques est un argument purement métaphysique. J'ai montré comment cet argument s'applique également aux structures. Il devient en ce cas un argument physico-philosophique, car il concerne l'interprétation des structures décrites en termes physiques.

En plus de ces deux distinctions qui constituent le centre de l'article, j'ai abordé deux autres distinctions. La troisième distinction mentionnée était celle entre propriétés comme

universaux et propriétés comme modes. L'argumentation est en ce cas purement métaphysique, et j'ai soulevé la question de savoir ce que la reconnaissance des universaux nous apporte étant donné que la relation d'instantiation qui relie les universaux aux objets particuliers est obscure. La dernière distinction abordée était celle qui, à l'intérieur de la théorie quantique, oppose une version qui traite les intrications comme universelles et perpétuelles (dynamique de Schrödinger) à une autre version qui inclut des réductions d'états et ainsi des événements de dissolution des intrications (dynamique de Ghirardi, Rimini et Weber). L'argument est de prime abord physique, concernant la question de savoir laquelle de ces deux versions tient du point de vue du formalisme mathématique ainsi que du point de vue expérimental. Toutefois, comme à l'état actuel de la recherche toutes les versions disponibles rencontrent des problèmes sur ce plan, l'argumentation est pour le moment plutôt philosophique, se focalisant sur l'évaluation des engagements ontologiques qu'impliquent respectivement les deux versions. J'ai expliqué comment une dynamique qui inclut des réductions d'états évite des engagements ontologiques fort douteux (comme celui postulant l'existence d'une infinité de branches parallèles de l'univers) et est, de plus, en mesure d'aboutir à une vision cohérente de la physique fondamentale et des sciences spéciales.

Quoi qu'il en soit, il est évident que le projet de construire une métaphysique des sciences (permettant de proposer une vision cohérente et complète de la nature) implique d'argumenter en faveur de certaines interprétations des théories physiques ainsi que d'amener des arguments purement métaphysiques, sans qu'il soit toujours possibles d'établir une distinction claire entre les deux types d'arguments.

Bibliographie

- Albert D. Z. & Loewer B. (1988) : « Interpreting the many worlds interpretation ». *Synthese* 77, 195-213.
- Aspect A., Dalibard J. & Roger G. (1982) : « Experimental test of Bell's inequalities using time-varying analyzers ». *Physical Review Letters* 49, 1804-1807.
- Bartels A. (1994) : *Bedeutung und Begriffsgeschichte. Die Erzeugung wissenschaftlichen Verstehens*. Paderborn : Schöningh.
- Bartels, A. (1996) : « Modern essentialism and the problem of individuation of spacetime points ». *Erkenntnis* 45, 25-43.
- Bell J. S. (1964) : « On the Einstein-Podolsky-Rosen-paradox ». *Physics* 1, 195-200.
- Bell J. S. (1987) : « Are there quantum jumps ? » In : Kilmister C. W. (dir.) : *Schrödinger. Centenary celebration of a plymath*. Cambridge : Cambridge University Press, 41-52. Réimprimé dans Bell J. S. (1987) : *Speakable and unspeakable in quantum mechanics*. Cambridge : Cambridge University Press, 201-212.
- Bird A. (2007) : *Nature's metaphysics. Laws and properties*. Oxford : Oxford University Press.
- Bird A. (2008) : « Structural properties revisited ». A paraître in : Handfield T. (dir.) : *Dispositions and causes*. Oxford : Oxford University Press.
- Bohm D. & Hiley B. (1993) : *The undivided universe. An ontological interpretation of quantum theory*. London : Routledge.
- Cao T. Y. (2003) : « Can we dissolve physical entities into mathematical structure? », *Synthese* 136, 51-71.
- Carrier M. (2001) : « Changing laws and shifting concepts : on the nature and impact of incommensurability ». In : Hoyningen-Huene P. & Sankey H. (dir.) : *Incommensurability and related matters*. Dordrecht : Kluwer, 65-90.
- Chang H. & Cartwright N. (1993) : « Causality and realism in the EPR experiment ». *Erkenntnis* 38, 169-190.
- Dorato M. (2006) : « Properties and dispositions : some metaphysical remarks on quantum ontology ». In : Bassi A., Dürr D., Weber T. & Zanghi N. (dir.) : *Quantum mechanics. American Institute of Physics. Conference Proceedings*. New York : Melville, 139-157.

- Dowe P. (2000) : *Physical causation*. Cambridge : Cambridge University Press.
- Duhem P. (1914) : *La théorie physique. Son objet – sa structure*. Paris : Vrin. 2^e édition. Réimpression 1981.
- Earman J. & Norton J. (1987) : « What price spacetime substantivalism ? The hole story ». *British Journal for the Philosophy of Science* 38, 515-525.
- Einstein A. & Grossmann M. (1913) : « Entwurf einer verallgemeinerten Relativitätstheorie und einer Theorie der Gravitation ». *Zeitschrift für Mathematik und Physik* 63, 225-264.
- Ellis B. (2001) : *Scientific essentialism*. Cambridge : Cambridge University Press.
- Esfeld M. (2001) : *Holism in philosophy of mind and philosophy of physics*. Dordrecht : Kluwer.
- Esfeld M. (2004) : « Quantum entanglement and a metaphysics of relations ». *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 35B, 601-617.
- Esfeld M. (2006) : *Philosophie des sciences. Une introduction*. Lausanne : Presses polytechniques et universitaires romandes.
- Esfeld M. (2007) : « Mental causation and the metaphysics of causation ». *Erkenntnis* 67, 207-220.
- Esfeld M. & Lam V. (2008) : « Moderate structural realism about space-time ». *Synthese* 160, 27-46.
- Esfeld M. & Sachse C. (2007) : « Theory reduction by means of functional sub-types ». *International Studies in the Philosophy of Science* 21, 1-17.
- Everett H. (1957) : « 'Relative state' formulation of quantum mechanics ». *Reviews of Modern Physics* 29, 454-462. Réimprimé dans DeWitt B. S. & Graham N. (dir.) (1973) : *The many-worlds interpretation of quantum mechanics*. Princeton : Princeton University Press, 141-149.
- Feyerabend P. K. (1962) : « Explanation, reduction, and empiricism ». In : Feigl H. & Maxwell G. (dir.) : *Scientific explanation, space, and time. Minnesota Studies in the philosophy of science*. Volume 3, Minneapolis : University of Minnesota Press, 28-97.
- French S. (2006) : « Structure as a weapon of the realist ». *Proceedings of the Aristotelian Society* 106, 167-185.
- French S. & Ladyman J. (2003) : « Remodelling structural realism : quantum physics and the metaphysics of structure ». *Synthese* 136, 31-56.
- Garcia E. & Nef F. (dir.) (2007) : *Métaphysique contemporaine. Propriétés, mondes possibles et personnes*. Paris : Vrin.
- Ghirardi G. (2002) : « Collapse theories ». In : Zalta E. N. (dir.) : *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. <http://plato.stanford.edu/archives/spr2002/entries/qm-collapse/>
- Ghirardi G., Rimini A. & Weber T. (1986) : « Unified dynamics for microscopic and macroscopic systems ». *Physical Review D* 34, 470-491.
- Giulini D., Joos E., Kiefer C., Kupsch J., Stamatescu I.-O. & Zeh H. D. (1996) : *Decoherence and the appearance of a classical world in quantum theory*. Berlin : Springer.
- Healey R. A. (1991) : « Holism and nonseparability ». *Journal of Philosophy* 88, 393-421.
- Heil J. (2003) : *From an ontological point of view*. Oxford : Oxford University Press.
- Jackson F. (1998) : *From metaphysics to ethics. A defence of conceptual analysis*. Oxford : Oxford University Press.
- Kiefer C. (2004) : *Quantum gravity*. Oxford : Oxford University Press.
- Kistler M. (2005) : « L'efficacité causale des propriétés dispositionnelles macroscopiques ». In : Gnassounou B. & Kistler M. (dir.) : *Causes, pouvoir, dispositions en philosophie. Le retour des vertus dormitives*. Paris : PUF, 115-154.
- Kuhn T. S. (1962) : *The structure of scientific revolutions*. Chicago : University of Chicago Press.
- Kuhn T. S. (1972) : *La structure des révolutions scientifiques*. Paris : Flammarion.
- Ladyman J. (1998) : « What is structural realism? ». *Studies in History and Philosophy of Modern Science* 29, 409-424.
- Ladyman J. & Ross D. avec Spurrett D. & Collier J. (2007) : *Every thing must go. Metaphysics naturalized*. Oxford : Oxford University Press.

- Langton R. & Lewis D. (1998) : « Defining 'intrinsic' ». *Philosophy and Phenomenological Research* 58, 333-345. Réimprimé dans Lewis D. (1999) : *Papers in metaphysics and epistemology*. Cambridge : Cambridge University Press, 116-132.
- Lewis D. (1986) : *Philosophical papers*. Volume 2. Oxford : Oxford University Press.
- Lewis D. (2001) : « Ramseyan humility ». Manuscrit daté du 7 juin 2001. University of Melbourne Philosophy Department Preprint 1/01.
- Lockwood M. (1989) : *Mind, brain and the quantum. The compound 'I'*. Oxford : Blackwell.
- Martin C. B. (1997) : « On the need for properties : the road to Pythagoreanism and back ». *Synthese* 112, 193-231.
- Mumford S. (1998) : *Dispositions*. Oxford : Oxford University Press.
- Pooley O. (2006) : « Points, particles, and structural realism ». In : Rickles D., French S. & Saatsi J. (dir.) : *The structural foundations of quantum gravity*. Oxford : Oxford University Press, 83-120.
- Price H. (1996) : *Time's arrow and Archimedes' point. New directions for the physics of time*. Oxford : Oxford University Press.
- Psillos S. (1999) : *Scientific realism. How science tracks truth*. London : Routledge.
- Psillos S. (2006) : « The structure, the whole structure and nothing but the structure ». *Philosophy of Science* 73, 560-570.
- Putnam H. (1973) : « Explanation and reference ». In : Pearce G. & Maynard P. (dir.) : *Conceptual change*. Dordrecht : Reidel, 199-221. Réimprimé dans Putnam H. (1975) : *Mind, language and reality. Philosophical papers volume 2*. Cambridge : Cambridge University Press, 196-214.
- Putnam H. (1980) : « Explication et référence. Traduction par Pierre Jacob ». In : Jacob P. (dir.) : *De Vienne à Cambridge. L'héritage du positivisme logique*. Paris : Gallimard, 339-363.
- Quine W. V. O. (1951) : « Two dogmas of empiricism ». *Philosophical Review* 60, 20-43.
- Quine W. V. O. (2003) : « Deux dogmes de l'empirisme. Traduction par P. Jacob, S. Laugier et D. Bonnay ». In : Laugier S. (dir.) : *Du point de vue logique. Neuf essais logico-philosophiques*. Traduction sous la direction de Laugier S. Paris : Vrin, 49-81.
- Rickles D. (2006) : « Time and structure in canonical gravity ». In : Rickles D., French S. & Saatsi J. (dir.) : *The structural foundations of quantum gravity*. Oxford : Oxford University Press, 152-195.
- Sankey H. (1994) : *The incommensurability thesis*. Aldershot : Avebury.
- Sankey H. (2002) : « Qu'est-ce que le réalisme scientifique? » *Réseaux* 94-95-96, 69-82. Disponible sur http://www.hps.unimelb.edu.au/staff/staff_papers/howard.
- Saunders S. (2006) : « Are quantum particles objects? » *Analysis* 66, 52-63.
- Schaffner K. (1967) : « Approaches to reduction ». *Philosophy of Science* 34, 137-147.
- Schrödinger E. (1935) : « Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik ». *Naturwissenschaften* 23, 807-812, 823-828, 844-849.
- Schrödinger E. (1992) : « La situation actuelle en mécanique quantique. Traduction par F. de Jouvenel, A. Bitbol-Hespériès et M. Bitbol ». In : Schrödinger E. : *Physique quantique et représentation du monde*. Paris : Seuil, 89-185.
- Shimony A. (1989) : « Search for a world view which can accomodate our knowledge of microphysics ». In : Cushing J. T. & McMullin E. (dir.) : *Philosophical consequences of quantum theory. Reflections on Bell's theorem*. Notre Dame : University of Notre Dame Press, 25-37.
- Shoemaker S. (1980) : « Causality and properties ». In : Inwagen P. V. (dir.) : *Time and cause*. Dordrecht : Reidel, 109-135. Réimprimé dans Shoemaker S. (1984) : *Identity, cause, and mind. Philosophical essays*. Cambridge : Cambridge University Press, 206-233.
- Sparber G. (2008) : « L'argument de la non-fondation des dispositions ». A paraître dans les actes du deuxième congrès de la Société de philosophie des sciences, publication sur internet.
- Stachel J. (1993) : « The meaning of general covariance. The hole story ». In : Earman J., Janis I., Massey G. J. & Rescher N. (dir.) : *Philosophical problems of the internal and external worlds. Essays on the philosophy of Adolf Gruenbaum*. Pittsburgh : University of Pittsburgh Press, 129-160.

- Suárez M. (2007) : « Quantum propensities ». *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 38B, 418-438.
- Teller P. (1986) : « Relational holism and quantum mechanics ». *British Journal for the Philosophy of Science* 37, 71-81.
- Worrall J. (1989): « Structural realism : the best of two worlds? » *Dialectica* 43, 99-124. Réimprimé dans Papineau D. (dir.) (1996) : *The philosophy of science*. Oxford : Oxford University Press, 139-165.
- Zeh H. D. (1996) : « The program of decoherence : ideas and concepts ». In : Giulini D., Joos E., Kiefer C., Kupsch J., Stamatescu I.-O. & Zeh H. D. (dir.) : *Decoherence and the appearance of a classical world in quantum theory*. Berlin : Springer, 5-34.