

2. TOUT N'EST-IL QUE RELATION ?

A. LA NATURE ?

La mécanique quantique comme théorie essentiellement relationnelle¹

Michel Bitbol

« L'objectivité de la science a nécessairement pour prix sa relativité (et qui veut l'absolu doit le chercher dans le subjectif). »

Karl POPPER (d'après H. WEYL)

Introduction

L'idée que notre science peut seulement accéder à des relations, et non pas aux hypothétiques déterminations absolues de ce qui *est*, remonte à un passé très ancien. Elle a été avancée, de Protagoras à Pyrrhon, comme argument sceptique apte à saper les fondements de la connaissance. Mais elle a aussi été prise, de Kant à Einstein, comme point de départ d'une entreprise de refondation épistémologique. En dehors des cercles sceptiques, ou à distance des moments de lucidité favorisés par les révolutions scientifiques, le système des relations constituant chaque domaine de connaissance a cependant eu tendance à retomber dans l'oubli au profit de ses invariants réifiés.

1. Cet article est une version revue de celui paru initialement sous le titre : « Relations et corrélations en physique quantique », in Michel Crozon et Yves Sacquin (dir.), *Un siècle de quanta*, EDP sciences, 2003. Il faisait partie du chantier d'élaboration de Michel Bitbol, *De l'intérieur du monde*, Flammarion, Paris, 2010.

L'avènement de la mécanique quantique a enrayé ce mouvement de flux et de reflux, d'affirmation puis de négligence, du caractère relationnel de la connaissance. L'oubli, pour ne pas dire l'escamotage volontaire, des relations constitutives est à coup sûr resté une tentation en physique microscopique. Cette tentation a pris, entre autres, la forme d'une quête de théories à variables cachées supposées accéder à des propriétés intrinsèques (c'est-à-dire absolues). Mais, face à cela, la thèse suivant laquelle la mécanique quantique renvoie plus exclusivement et plus radicalement à des relations que toutes les théories physiques antérieures n'a cessé de ressurgir et de se renforcer. Bohr et Heisenberg en ont été les premiers promoteurs à l'époque de l'élaboration de la théorie quantique². Elle a ensuite trouvé des relais chez des physiciens aussi éloignés de l'interprétation de Copenhague que l'était Hugh Everett, avec sa « *relative state interpretation of quantum mechanics* » de 1957 (injustement confondue avec la « *many-worlds interpretation of quantum mechanics* » formulée par Graham et de Witt à la fin des années 1960). Et elle a été réintroduite plus récemment sous des formes profondément retravaillées par Karl Popper, Arthur Fine, Simon Kochen, Martin Davis [1977], Mioara Mugur-Schächter [1992], Paul Teller [1986], David Mermin [1998], Carlo Rovelli [1997], Reginald Cahill³, etc. Le plus troublant est sans doute que l'approche relationnelle est aussi présente en filigrane dans toutes les interprétations de la mécanique quantique dont la motivation était d'en faire l'économie, par le biais des inévitables traits contextualistes ou holistiques [Esfeld, 2012] qui leur sont associés.

Mon but est ici de classer les interprétations relationnelles de la mécanique quantique et d'en discuter la portée philosophique. Pour mener ce projet à bien, deux préliminaires sont requis. Le premier est de se donner un critère de classification des genres

2. Voir, par exemple, Heisenberg [2000], p. 137 : « Le sujet de la recherche n'est donc plus la nature en soi mais la nature livrée à l'interrogation humaine », ou p. 142 : « S'il est permis de parler de l'image de la nature selon les sciences exactes de notre temps, il faut entendre par là, plutôt que l'image de la nature, *l'image de nos rapports avec la nature* ».

3. Voir l'article « Random reality » *New Scientist magazine*, 26 février 2000, sur le récent travail de Reginald T. Cahill et Christopher M. Klinger. Selon ces auteurs, il est possible de déduire les lois de la physique à partir de l'hypothèse selon laquelle le monde est fait de « pseudo-objets » aléatoires et purement relationnels, « seulement définis par la force de leurs connexions mutuelles ».

de relations mis en œuvre. Le second est d'expliquer pourquoi le caractère de part en part relationnel de la connaissance scientifique a été plus facile à ignorer en physique classique qu'en physique quantique.

1. Relations cognitives et relations objectales

Les relations qui interviennent dans l'interprétation de la mécanique quantique sont de deux types. Les unes connectent le sujet connaissant et ce qu'il vise à connaître par l'intermédiaire d'appareillages expérimentaux. Nous les appellerons relations *cognitives* ou *transversales*. Les autres relient entre eux des phénomènes actuels ou virtuels, pris pour objets de connaissance. Nous les appellerons des relations *objectales* ou *latérales*.

Deux façons d'établir un lien entre ces types de relations sont par ailleurs concevables. L'une consiste à donner aux relations cognitives la priorité sur les relations latérales, en notant que si la connaissance n'est concernée que par de pures relations entre phénomènes, c'est parce que les phénomènes eux-mêmes résultent d'une relation cognitive et ne donnent en rien accès à ce que les choses sont supposées être dans l'absolu. L'autre consiste au contraire à donner aux relations objectales la priorité sur les relations cognitives en réduisant les relations cognitives à un cas particulier de relation objectale : la relation entre le corps humain ou ses instruments d'une part, et le monde qui l'environne d'autre part.

La première approche est caractéristique de la philosophie transcendantale, dont la méthode revient à défléchir toute question portant sur l'objet de la connaissance vers le mode même de fonctionnement de cette connaissance. C'est elle que choisit Kant, lorsqu'il signale : (a) que les relations entre objets spatio-temporels sont secondaires à la relation cognitive mise en place à travers les formes *a priori* de notre sensibilité⁴, et (b) que, réciproquement, si la connaissance scientifique ne fait que représenter des relations

4. *Critique de la raison pure*, B59, in *Œuvres philosophiques*, Kant [1980], p. 801 : « [...] Si nous faisons abstraction [...] de la constitution subjective des sens en général, la manière d'être tout entière et tous les rapports des objets dans l'espace et dans le temps, l'espace et le temps eux-mêmes, disparaîtraient [...]. »

objectales ou latérales, cela implique qu'elle n'accède pas à la constitution intime de la chose en soi mais seulement au résultat de la relation cognitive établie entre nous et cette dernière [Albert, 1985⁵].

La seconde approche est quant à elle typique de l'entreprise de naturalisation de l'épistémologie puisqu'elle demande de concevoir la relation constitutive de la connaissance sur le modèle des relations entre objets naturels connus. Prise isolément, cette approche ne va pas sans de graves difficultés, dont la raison est le caractère circulaire, dogmatique ou à jamais inachevé de toute tentative d'autofonder une démarche épistémique sur ses propres résultats⁶. Rien n'empêche cependant de faire jouer à l'approche naturalisante un rôle plus modeste mais non négligeable. Le rôle d'une représentation du processus cognitif qui ne prétende pas être *fondatrice* du savoir qui en résulte, mais seulement être contrainte par une condition de *compatibilité* avec lui.

La réflexion sur la mécanique quantique porte de nombreuses traces de cette analyse bidirectionnelle des relations qui interviennent dans les sciences physiques. Le plus simple, pour s'en apercevoir, est de se souvenir de la dualité non réductible des théorèmes qui circonscrivent les limites d'acceptabilité des théories à variables cachées. Les uns, comme le théorème de Kochen et Specker, imposent aux théories à variables cachées aptes à reproduire les prédictions de la mécanique quantique d'être *contextualistes*, c'est-à-dire de ne porter que sur des déterminations immédiatement modifiées par la procédure même de leur mise en évidence expérimentale. Les autres, comme le théorème de Bell, imposent aux théories à variables cachées compatibles avec les prédictions quantiques d'être *non locales*, c'est-à-dire de porter sur des déterminations qui s'influencent mutuellement et immédiatement à distance. Le contextualisme exprime la nécessité dans laquelle se trouve la microphysique de ne pas ignorer la relation *transversale ou cognitive* qui la permet ; et la non-localité traduit un genre inédit

5. *Ibid.*, B67, p. 807 : « [...] comme le sens externe ne nous donne rien d'autre que la représentation de rapports, il ne peut contenir dans sa représentation que le rapport d'un objet au sujet, et non l'intérieur de l'objet, ce qu'il est en soi. »

6. L'écartèlement entre circularité, dogmatisme et régression à l'infini est appelé « trilemme de Munchhausen » par Hans Albert.

(mais mal caractérisé par le concept de « non-localité ») de relation *latérale ou objectale*.

La même dualité se retrouve par ailleurs, en dehors de toute référence aux théories à variables cachées, dans la coexistence de deux courants d'interprétation de la mécanique quantique standard.

L'un de ces courants souligne par-dessus tout, avec Bohr, l'impossibilité de séparer dans le phénomène ce qui revient à un objet et ce qui revient au dispositif expérimental. L'idée est ici que le phénomène porte la trace ineffaçable de la relation *cognitive* d'où il émerge ; qu'on ne peut pas faire suffisamment abstraction de la relation cognitive pour détacher de son produit phénoménal une détermination traitable comme si elle appartenait en propre à un objet.

L'autre courant se focalise sur les corrélations latérales entre phénomènes, telles que les prédit le formalisme de la mécanique quantique à travers ses traits d'intrication (*entanglement*), et ravale la relation cognitive au rang de simple cas particulier macroscopique de ce genre de corrélations.

L'insistance du premier courant sur le caractère constitutif des relations cognitives lui confère beaucoup d'affinités, comme l'a montré Jean Petitot, avec la démarche transcendantale. La primauté qu'accorde le second courant aux relations latérales ou objectales par rapport à la relation transversale ou cognitive le rapproche en revanche du projet de naturalisation de l'épistémologie.

Mais avant d'approfondir la double structure relationnelle de la mécanique quantique, nous devons à présent rappeler celle de la physique préquantique. C'est seulement au prix de ce détour que nous pourrions établir en quoi consiste l'*excès* de la constitution relationnelle de la physique quantique par rapport à celle des théories physiques antérieures.

2. Les relations constitutives de la physique classique

L'acte de naissance de la mécanique classique a été la remise en cause de l'ontologie de *lieux naturels*, qui prévalait dans la physique aristotélicienne, au profit d'une explicitation des *relations spatiales* entre corps matériels. Le « lieu », antérieurement détermination absolue de chaque étant, est désormais relatif au repère considéré.

La *position* d'un corps, remplaçant son « lieu » propre, est ce qui le relie à un réseau d'autres corps. Il est vrai que la charge d'« être », auparavant attribuée aux lieux, semble dans une certaine mesure (partielle) avoir été transférée au mouvement. Le principe de relativité des vitesses de Galilée ne vaut en effet que sur un plan cinématique, pour les déplacements rectilignes uniformes. Dès que la dynamique entre en jeu, c'est-à-dire dès qu'il est question des *forces* aptes à faire varier la vitesse d'un corps, le mouvement apparaît en mécanique classique avoir une « réalité physique et métaphysique » [Leibniz, 1971]. Newton insiste ainsi sur le caractère absolu des mouvements de *rotation* (en donnant le célèbre exemple du seau tournant rempli d'eau, dont la surface adopte la forme d'un parabololoïde). Mais cette ontologisation du mouvement au sens dynamique, a elle-même été l'objet de vigoureuses critiques durant les deux siècles qui ont suivi l'élaboration théorique de Galilée et Newton. Elle l'a été sur un mode néoleibnizien par Ernst Mach, qui a attribué les forces d'inertie à des relations entre chaque corps et l'ensemble des masses de l'univers [Mach, 1925]. Elle l'a également été sur un mode transcendantal par Kant et ses successeurs. Ces derniers ont souligné la vertigineuse réciprocity des déterminations de temps égaux mesurés par le biais de corps en mouvement périodique ou inertiel, et de la définition des mouvements inertiels comme parcours d'espaces égaux en des temps égaux [Cassirer, 2000, p. 43 ; Friedman, 1992, p. 143]. Ils en ont inféré que le principe d'inertie ne devait être considéré que comme un *étalon* pour la formulation de lois d'évolution plutôt que comme l'énoncé d'une propriété intrinsèque des corps massifs. Dès lors, la physique de Galilée et de Newton désontologise selon eux le mouvement tout autant qu'elle a désontologisé le lieu.

De façon plus générale, la mécanique classique, prolongée par la théorie de la relativité, repose sur un renversement complet de la conception naïve de l'objectivité. Sans toujours en être conscient, le physicien galiléo-newtonien, puis einsteinien, n'identifie plus une détermination objective à une détermination absolue. Il cherche simplement à quelles règles il faut soumettre les relations (latérales) entre phénomènes pour que la nature (transversalement) relationnelle de ces phénomènes puisse être *mise entre parenthèses* [Petitot, 1997 ; Bitbol, 1997]. Dans ce processus, le scepticisme est d'une certaine manière vaincu. Mais il n'est pas vaincu par

la démonstration que les sciences parviennent à la connaissance d'un en-soi. Il l'est par la mise en évidence de l'aptitude qu'a la physique à atteindre l'objectivité en établissant directement un réseau approprié de relations légales *latérales* entre phénomènes sans jamais avoir besoin de faire référence à un absolu (si ce n'est peut-être à titre de *focus imaginarius* mobilisateur).

Se retournant vers les relations cognitives génératrices des phénomènes après avoir ordonné leurs relations mutuelles, la science classique a aussi produit une théorie de la connaissance *naturalisée* isomorphe à la théorie *transcendantale* de la connaissance avancée par Kant. C'est Hermann von Helmholtz qui l'a développée dans son *Traité d'optique physiologique*, en essayant de traiter des relations transversales-cognitives par les mêmes méthodes que celles qui valent pour les relations latérales. Tirant ainsi l'enseignement conjoint des sciences biologiques, physiques et chimiques, Helmholtz se trouve forcé de conclure que « [...] les *propriétés* des objets naturels, en dépit de ce terme, n'indiquent nullement une quelconque propriété en soi et pour soi de l'objet particulier, mais toujours une relation à un second objet (y compris nos organes des sens)⁷ ». Certaines propriétés traduisent des relations transversales entre objets et structures cognitives ; tel est par exemple le cas des propriétés chromatiques, qui expriment une relation aux organes visuels, ou bien de la température, qui exprime une relation avec une classe d'instruments thermométriques. D'autres propriétés traduisent des relations mutuelles (latérales) entre les corps ; tel est le cas des propriétés chimiques, manifestées dans des « réactions » de corps mis en présence les uns des autres.

Il y a cependant quelque chose de troublant, parce qu'au fond incomplet, dans cette affirmation du caractère universellement relationnel du champ d'investigation des sciences de la nature sous leur forme classique. On déclare, au nom d'une démarche réflexive portant sur la connaissance, que les déterminations d'un objet expriment en vérité une *relation* à un second objet ; mais on continue dans la pratique irréfléchie de l'élaboration de la science classique à les qualifier de *propriétés* sans que cela soulève la moindre difficulté. On généralise l'idée de relativité des déterminations des

7. H. Helmholtz, *Handbuch der physiologischer optik* (2e éd.), 1896, cité et traduit dans Ernst Cassirer [. p. 68].

corps dans le cadre d'une théorie de la connaissance naturalisée, en affirmant que « [...] *toutes* les propriétés que nous pouvons leur attribuer ne font qu'indiquer les *effets* qu'elles produisent soit sur nos sens, soit sur d'autres objets naturels » [*ibid.*]. Mais, ce faisant, on vide de toute signification la représentation des deux pôles, ou *relata*, de la relation invoquée, alors même que cette représentation est indispensable à la théorie de la connaissance naturalisée dont on se sert. Remarquons en effet qu'affirmer la relativité de *toutes* les déterminations, c'est s'affranchir de la distinction galiléenne et lockienne entre qualités primaires, absolues, et qualités secondaires, relatives, en universalisant cette dernière classe de qualités. Or c'est seulement à condition de faire cette distinction que la représentation des pôles d'une relation constitutive des qualités secondaires est légitime. C'est seulement si l'on dispose d'une catégorie de déterminations absolues, comme les propriétés spatio-cinématiques de Galilée et de Locke, qu'il est possible de traiter comme autonomes les *termes* de la relation dont résulte une autre classe de déterminations, celle des qualités secondaires.

On est ainsi porté à soupçonner que, dans la science classique, l'assimilation de déterminations relationnelles à des propriétés inhérentes a beau avoir été reconnue incorrecte en droit, chacun la considère avec quelque raison comme inoffensive en fait et, de surcroît, indispensable à titre d'armature intellectuelle préalable. Tant et si bien que la proclamation du caractère universellement relationnel des processus faisant l'objet d'une description scientifique reste confinée au cercle étroit des théoriciens de la connaissance.

Comment expliquer ce curieux auto-affaiblissement de la thèse relationnelle en théorie classique de la connaissance ? Sans doute par le succès trop complet de l'entreprise d'objectivation, c'est-à-dire de mise entre parenthèses de la nature relationnelle des phénomènes. La science classique, complétée par les théories de la relativité, a si bien réussi dans son entreprise de détachement de structures invariantes à l'égard de la variété des rapports cognitifs qu'elle a pu se croire libérée d'un devoir de mémoire intransigeant et permanent à propos du rôle constitutif que jouent ces rapports. Il est vrai qu'il n'était plus question d'atteindre d'hypothétiques propriétés intrinsèques dans leur essence. Mais le désir de la science classique, largement exaucé dans son domaine de validité, consistait

à extraire des faisceaux convergents de relations suffisamment stables pour pouvoir les traiter *comme s'ils* correspondaient à des propriétés, et de rendre le *comme si* assez parfait pour ne même plus avoir à l'explicitier.

Dans le vocabulaire emprunté par Paul Teller [1986] à Donald Davidson [1993], les réflexions précédentes se traduisent ainsi : ce que les physiciens classiques sont parvenus à faire, c'est à dé-convoluer si bien les relations « non survenantes » constituant les phénomènes que rien ne leur interdisait de les assimiler à des relations « survenantes » entre propriétés.

Mais qu'est-ce exactement que la « survenance », et comment intervient-elle dans cette situation ? Selon Davidson, une classe d'entités B est survenante (« *supervenient* » en anglais) sur une classe d'entités A, si (a) toute modification d'une entité B est conditionnée par certains changements dans l'entité A correspondante, mais que (b) il existe des changements de l'entité A, même profonds, qui laissent l'entité B invariante.

Imaginons maintenant que les entités A et B sont respectivement des propriétés et des relations. Un exemple simple est celui de la relation « être à la distance D de ». Cette relation dépend des coordonnées spatiales des deux objets comparés (traitées à tort ou à raison comme propriétés de ces objets). Elle ne peut changer que si au moins une des coordonnées change (clause (a)). Mais elle persiste si les coordonnées varient *conjointement* sous l'effet du même opérateur de translation, de rotation ou de symétrie (clause (b)).

En généralisant, dire que des relations « surviennent » sur des propriétés d'objets, c'est énoncer leur caractère dérivé et secondaire par rapport à ces propriétés. C'est aussi indiquer que le contenu d'information de chaque relation spécifiée est plus pauvre que celui des propriétés reliées (parce que de nombreux couples de propriétés donnent lieu à la même relation).

Mais s'en tenir là, comme le font les théoriciens de la connaissance qui participent du paradigme de la science classique, cela revient à refuser de s'interroger sur l'origine du supplément de richesse des propriétés par rapport à chaque relation particulière. Or cette origine n'est vraisemblablement autre que la capacité qu'a le concept formel de propriété d'exprimer une infinité de relations (cognitives ou objectales) *possibles*, par-delà la relation *actuelle* dans laquelle l'objet est engagé. Dire qu'une chose a une propriété,

c'est anticiper le résultat des rapports dans lesquels il est *possible* à cette chose d'entrer. Attribuer une propriété à une chose, cela signifie lui reconnaître une *disposition* à produire des effets dans toutes sortes de relations possibles avec d'autres choses⁸. C'est ce que suggère par exemple le premier Wittgenstein, selon lequel nous ne pouvons « [...] nous figurer aucun objet en dehors de la possibilité de sa connexion avec d'autres » [Wittgenstein, 1993, p. 34]. L'autonomie des choses et des propriétés n'est donc à ses yeux qu'un faux-semblant dû au nombre illimité de *possibilités de connexions* qui les définit⁹ : « La chose est indépendante en tant qu'elle peut se présenter dans toutes les situations possibles, mais cette forme d'in-dépendance est une forme d'inter-dépendance avec l'état de choses, une forme de *non-indépendance* » [*ibid.*]. Autrement dit, l'indépendance des choses et propriétés est le nom que nous donnons à l'*ouverture indéfinie* des réseaux d'interdépendance où ils peuvent entrer.

Nous venons de nous apercevoir que la strate de propriétés (couche n° 1) par-dessus laquelle « surviennent » les relations invoquées par la théorie classique de la connaissance (couche n° 2) est implicitement conçue comme reposant sur une strate inférieure (couche n° 0) de relations *non survenantes* (c'est-à-dire primitives, dénuées de propriétés sous-jacentes opérant comme *relata*). Si cette couche de relations préalables de type non-survenant a pu rester quasiment ignorée (ou mise entre parenthèses) par la science classique, c'est en raison de son extrême plasticité, de la facilité avec laquelle on pouvait en extraire des effets invariants sous de larges plages de variation des rapports cognitifs. Un phénomène par définition relationnel, mais qui reste invariant quelle que soit sa position dans une séquence de rapports expérimentaux, et quelle que soit la manière dont il est associé avec d'autres rapports expérimentaux, peut être détaché sans inconvénient de ses conditions cognitives de manifestation et tenu pour le simple reflet d'une *propriété*. Cette opportunité de détachement persiste même quand le phénomène considéré est sensible à des variations de

8. Cette façon de concevoir les propriétés est défendue par Simon Blackburn [1993]. À propos du point de vue opposé de Quine, et de l'antinomie qui en résulte, voir Michel Bitbol [1998, p. 263].

9. Ces possibilités de connexion définissent au moins ce que Wittgenstein appelle la « forme » de l'objet (*Tractatus*, 2.0141).

configuration expérimentale, pour peu que ses modifications puissent être attribuées à des propriétés *perturbantes* qui prennent en charge la clause d'invariance par délégation. Ce ne serait que si chaque phénomène était étroitement associé à un rapport expérimental particulier, s'il était hautement dépendant de sa position dans une séquence de tels rapports, et si toutes les explications de cette dépendance en termes de perturbations s'avéraient inacceptables ou artificielles, que son caractère relationnel ne pourrait plus être escamoté. Ces dernières conditions, qui rendent quasi inévitable le retournement réflexif des chercheurs sur les relations constitutives des phénomènes, sont précisément remplies par la physique quantique.

3. Les relations transversales-cognitives en physique quantique

La « réduction aux observables » pratiquée par Heisenberg en 1925 était une façon de demander aux chercheurs d'éviter de faire tourner à vide des schémas de propriétés hérités des procédures de constitution passées. Ce qu'a rappelé à juste titre ce moment révolutionnaire (et que les physiciens avaient fini par oublier tant ils étaient anesthésiés par le succès des procédures constitutives antérieures), c'est que l'établissement de relations latérales entre propriétés présuppose des relations transversales-cognitives ; car des propriétés n'ont aucun titre à être invoquées si ce n'est en tant qu'invariants de faisceaux de relations cognitives possibles. Recommandant de ne pas tenir coûte que coûte à des « relations (latérales) entre quantités qui sont apparemment inobservables en principe (c'est-à-dire qui ne semblent être gagées sur aucune relation cognitive possible) » [Heisenberg, 1925], l'article fondateur de la mécanique matricielle ne faisait que prescrire un retour réflexif sur les relations cognitives constituantes. Face à une communauté de physiciens habituée à compter sur des entités et propriétés pré-objectivées (grâce à des procédures de constitution immémoriales et stéréotypées), Heisenberg a affirmé la nécessité de renouveler la procédure d'objectivation, quitte à faire éclater le cadre ontologique de la physique classique. Dans la mécanique matricielle de Heisenberg, comme l'ont souligné Alain Connes

[1990] et Jean Petitot¹⁰, le domaine d'objectivité n'était plus spatial mais *spectral*. Les phénomènes objectivés, c'est-à-dire ceux qui sont les invariants des relations cognitives disponibles, n'étaient plus isomorphes à des corps matériels localisés, mais aux intensités et aux fréquences du spectre d'un rayonnement étendu.

La pleine mesure de la révolution non seulement scientifique, mais aussi gnoséologique, de 1925, tarda à être prise par ses auteurs eux-mêmes. Ainsi, en 1927, Heisenberg ne se contenta pas de dériver son « principe d'indétermination » à partir des relations de commutation de la mécanique matricielle, qui sont l'expression formelle de l'indissoluble *relativité* des déterminations microscopiques à l'égard de conditions expérimentales partiellement *incompatibles*. Il voulut en fournir également une autre démonstration, faisant appel à une représentation antérieure, semi-classique, de l'interaction entre l'agent de mesure et l'objet microscopique sur lequel s'exerce la mesure. Ce qui empêche de connaître complètement les deux groupes de variables composant l'état initial (classique) d'une particule, selon le Heisenberg de 1927, n'est autre qu'une *perturbation* incompressible de l'objet par l'agent de mesure. Le problème est qu'en adoptant cette approche Heisenberg reculait en deçà de sa grande idée novatrice de 1925. Car faire intervenir une « perturbation » est une manière de réactiver la stratégie utilisée dans la vie courante et en physique classique afin d'escamoter le caractère (transversalement) relationnel des phénomènes et de pérenniser le concept formel de *propriété*. L'image de la perturbation évite d'avoir à reconnaître le caractère non survenant des relations cognitives en imputant la relativité même des déterminations à des relations survenantes entre *propriétés* perturbées (celles de l'objet) et *propriétés* perturbantes (celles de l'agent de mesure).

Mais Bohr a progressivement surmonté cette inertie épistémologique en délaissant l'image de la perturbation. De plus en plus, en dépit de quelques maladroites d'expression, une relativité primitive (c'est-à-dire non survenante) des phénomènes vis-à-vis de leurs conditions de manifestation a pris le pas chez lui sur toute velléité de se figurer une relation survenante entre un objet perturbé

10. Jean Petitot, « L'intelligibilité spectrale de la mécanique quantique », 2000, texte inédit d'un exposé au séminaire *Arguments transcendants en philosophie de la physique*, organisé par Michel Bitbol, Sandra Laugier et Pierre Kerszberg.

et un agent de mesure perturbant. L'indivisibilité principielle du phénomène prenait l'ascendant, dans les conceptions de Bohr, sur la perturbation des propriétés dans le processus expérimental de génération des phénomènes.

La tâche du physicien et du théoricien de la connaissance s'en trouve complètement inversée. Il n'est plus question de compter sur une ontologie patrimoniale (héritée de la vie courante et de la physique classique) pour éclairer les nouvelles relations cognitives mises en jeu par la physique microscopique. Il n'est plus question de considérer que ces relations cognitives *surviennent* sur des propriétés préexistantes. Il s'agit plutôt de partir du produit de ces relations, traitées comme primaires, ou comme *non survenantes*, pour explorer les opportunités d'une constitution d'objectivité renouvelée.

À la réflexion, cependant, le concept de relation cognitive non survenante demeure très délicat à manipuler. L'histoire de son élaboration par Bohr et par ses successeurs, qui est celle d'une alternance de rejets explicites et de réadmissions implicites des connotations du mot « relation », en témoigne. La difficulté propre à ce concept est double. D'une part, l'un des *relata* de la relation cognitive (si cela a même un sens de l'individualiser) n'est autre que *nous-mêmes* ; soit directement par le biais de notre équipement neurosensoriel, soit indirectement à travers une instrumentation expérimentale construite selon des règles qui sont en totalité ou en partie appropriées à l'environnement mésoscopique immédiat de l'homme. D'autre part, pour cette espèce de relation non survenante comme pour n'importe quelle autre, l'acte consistant à décrire, ou à se représenter, les *relata* préalablement à la relation, est proscrit. À la distension et à la dualité habituelles qu'on associe naturellement à une relation, devraient dès lors être substituées une unicité de plan structural : le plan d'immanence de l'expérimenté.

Ce qui fait illusion, laissant croire qu'une dualité de type sujet-objet est toujours à l'œuvre, est qu'on traite un corps matériel d'échelle mésoscopique (l'appareillage expérimental), comme s'il était l'un des pôles de la relation cognitive sur laquelle repose la physique microscopique. On peut d'autant plus facilement le faire que rien n'empêche de décrire le comportement de l'appareil dans le cadre du paradigme classique, qui implique de lui attribuer des *propriétés*. Mais si l'on admet que l'appareil est l'un des pôles

préexistants de la relation cognitive, comment empêcher que s'esquisse la figure d'un second pôle préexistant, celui de l'objet ? Et comment éviter que, par simple mimétisme à l'égard du premier pôle supposé, cette figure ne s'approche (fût-ce par fragments) du modèle archétypal du corpuscule matériel doté de propriétés ? Bohr lui-même a parfois cédé à la tentation, en affirmant (1) que la variété des moyens instrumentaux d'investigation permet de recueillir des renseignements « complémentaires » à *propos* d'un certain objet, et (2) que cet objet est *la cause* des phénomènes de type impact sur un écran [Bohr, 1987, p. 3-4].

Le remède le plus radical à ces glissements consisterait à s'abstenir complètement de singulariser des *relata*, et même à éviter de traiter l'appareil comme terme autonome d'une relation cognitive. Ce remède n'est cependant pas dénué de défauts. Car il semble réduire à néant la problématique relationnelle elle-même. Y a-t-il encore un sens à parler de *relations* si l'on s'interdit jusqu'à l'évocation de leurs pôles ? Que peut-il rester de l'opérativité du concept de relation cognitive, dans un discours scientifique volontairement restreint à un plan immanent de pratiques, de configurations instrumentales et de phénomènes résultants (ou au moins dans lequel la visée transcendante n'est admise qu'avec le statut subalterne de procédé heuristique) ? La réponse à ces questions de fond est qu'il y a bien encore un sens à mobiliser le concept de relation si la structure *interne* du plan d'immanence s'identifie à celle qui résulterait (au conditionnel irréel) de relations *externes* entre ses procédures et un hypothétique domaine transcendant ; si, en d'autres termes, certains traits propres à ce plan d'immanence sont interprétables comme la *trace* qu'y aurait laissée un ensemble de relations cognitives. Mais qu'est-ce à dire exactement ? Quels sont les traits du plan d'immanence qui autoriseraient qu'on les lise comme la marque cryptée du caractère relationnel de la connaissance ? Ces traits sont au nombre de deux : (1) la fragmentation du champ des phénomènes en classes d'équivalence associées aux classes particulières de pratiques, d'instrumentations ou de situations dans lesquelles ils se manifestent, et (2) la possibilité d'établir des règles de transformations, dotées d'une structure de groupe, entre les éléments descriptifs ou prédictifs de ces classes d'équivalence. La partition des phénomènes se laisse en effet interpréter comme révélant leur *relativité* vis-à-vis de sous-ensembles de configurations

instrumentales ou de situations. Et l'établissement d'un groupe de transformations ouvre la possibilité de traiter les éléments transformés comme autant d'*aspects* d'une seule entité (l'invariant du groupe), appréhendée sous une pluralité de rapports distincts.

Aller au bout de cette approche, qui consiste à tenir partitions et groupes de transformation pour les marques seulement *internes* d'une structure relationnelle de la connaissance, suppose de transfigurer patiemment la signification de celles des expressions qui connotent le rapport *externe* entre deux choses autonomes. Comme nous l'avons vu, lorsqu'un physicien affirme mesurer une variable *sur* un système physique *au moyen* d'un appareil de mesure, il a si bien planté le décor d'une relation externe bipolaire que rien ne semble pouvoir entraver la tendance qu'ont ceux qui l'écoutent à hypostasier ces pôles. Le travail de transfiguration sémantique doit alors porter en priorité, et alternativement, sur les deux prétendus *relata*. D'abord l'appareil, puis le système physique qui est son corrélat.

En premier lieu, il doit être clair que, lorsqu'on décrit un appareillage expérimental, ce qui se trouve détaillé n'est pas nécessairement la configuration de l'un des pôles d'une relation cognitive externe. Cela peut être, et c'est toujours au minimum, le cadre de présuppositions structurales sur fond duquel une occurrence *interne au plan d'immanence des pratiques de laboratoire* devient interprétable comme résultat de mesure. La constitution de l'appareillage est, dans cette dernière perspective, ce qui définit un système d'oppositions entre résultats expérimentaux. Elle délimite une classe d'équivalence de phénomènes et fixe l'échelle de graduation sur laquelle ils se répartissent. Mais en aucun cas elle n'a à être conçue comme structure *réceptrice* d'autre chose, ni même comme élément en *interaction* avec un quelque chose d'autre ayant une autonomie et des caractéristiques propres. L'appareillage peut parfaitement jouer le rôle de *ce relativement à quoi* la partition *interne* de l'ensemble des phénomènes est établie, sans pour autant devoir être pris pour un pôle individualisé *externe* de la relation correspondante.

En second lieu, il faut réaliser que si l'on continue à parler, en physique quantique, d'un système physique *sur lequel* porte la mesure, ou *en interaction avec lequel* est l'appareil de mesure, c'est avant tout en raison d'une extrapolation discutable de la catégorie

de causalité. La question que l'on se pose ici, et à laquelle on croit répondre par l'invocation du système physique, est la suivante : qu'est-ce qui *cause* le phénomène révélé à l'échelle macroscopique par l'appareillage ; quelle est la *cause* des impacts sur les écrans, des décharges dans les compteurs Geiger ou des traces dans les chambres à bulles ? Tenir les relations cognitives pour causales était déjà problématique dans la philosophie de Kant, marquée par la physique classique. En tant que concept pur de l'entendement, la catégorie de causalité était normalement réservée par Kant aux relations latérales entre phénomènes, et ce n'est qu'avec d'infinies précautions qu'il qualifiait parfois la chose en soi de *cause* « intellectuelle » plutôt qu'empirique, ou bien encore de *fondement*, des phénomènes¹¹. Dans le cadre de la physique quantique, les raisons d'éviter l'application de la catégorie de causalité à la *production* des phénomènes sont encore plus fortes. La causalité suppose une succession ou, du moins, une dissymétrie. Mais, pour le phénomène quantique, aucune dissymétrie entre ce qui agit et ce sur quoi s'exerce l'action, entre la cause et l'effet, n'est identifiable. L'image suggestive, bien qu'inexacte, de la « perturbation », le laisse déjà deviner. Dans cette image, l'action de l'objet sur l'agent de mesure a pour exacte réciproque une influence « perturbante » de l'agent de mesure sur l'objet. La perturbation étant par ailleurs incontrôlable, elle ne peut être soustraite de l'effet final (le phénomène) afin d'isoler, de « purifier » en quelque sorte, l'action de l'objet. Aucune dissymétrie causale ne peut donc être reconstituée à partir de là, même si un préjugé dissymétrique continue à opérer en sous-main. Quant au concept bohrien de phénomène holistique, qui a progressivement pris le pas sur l'image auxiliaire de la perturbation, il ne laisse même pas subsister l'espace d'une différenciation et, à plus forte raison, d'une dissymétrie entre la cause productrice supposée et son effet manifeste dans les dispositifs expérimentaux. Grete Hermann [1996, p. 90], tirant les ultimes conséquences de ce holisme, en a inféré que les causes d'un phénomène ne le déterminent que de façon relative aux circonstances expérimentales mêmes de son occurrence ; qu'elles ne lui sont donc ni logiquement ni chronologiquement

11. Kant, *Critique de la raison pure*, A538/B566, *Œuvres philosophiques. I*, [1980] p. 1172. Voir également la discussion par Bernard d'Espagnat de sa notion de « causalité élargie » [Bitbol et Laugier, 1997].

antérieures. C'est cette absence d'antériorité qui explique selon elle qu'en physique microscopique on ne puisse généralement *prédire* de façon certaine un phénomène en s'appuyant sur ses causes. Mais on peut tout aussi bien en conclure que le concept dissymétrique et transcendant de « cause productrice du phénomène » est ici totalement inapproprié et devrait se voir *remplacé* par celui, symétrique et interprétable sur un plan immanent, de relation cognitive non survenante.

4. Les relations latérales-objectales en physique quantique

Ce pur et simple *remplacement* du concept de causalité dissymétrique par celui de relation cognitive non survenante est également suggéré de façon insistante lorsqu'on adopte une stratégie de naturalisation de l'épistémologie. Car, dans cette approche, la relation cognitive est conçue sur le modèle des relations latérales entre entités connues. Or, en mécanique quantique, ces relations latérales sont aussi, manifestement, de type *non survenant*. Il n'y est pas question (sauf à recourir aux variables cachées) de supposer que des propriétés préexistent aux relations, ou que des *relata* sont ontologiquement antérieurs à ce qui les relie.

Depuis quelques années déjà, plusieurs philosophes de la physique ont remarqué à quel point il est facile de comprendre le symbolisme des théories quantiques si l'on admet que celui-ci dénote de *pures relations* sans jamais fixer ou identifier des *termes* entre lesquels s'établiraient ces relations. Pour Paul Teller [1986], les paradoxes que recèle la mécanique quantique lorsqu'elle est censée traiter des « états de systèmes physiques » se dissolvent presque immédiatement si on la comprend comme compte rendu d'un réseau de relations non survenantes. Des relations, par conséquent, qui ne sont pas secondaires aux propriétés de leurs termes mais qui ont une complète autonomie par rapport au concept formel de propriété. Cela apparaît peu conforme aux habitudes d'expression et de pensée adaptées à l'environnement macroscopique, mais cela devient hautement vraisemblable dans le champ d'investigation microscopique.

David Mermin [1998] et Carlo Rovelli [1997] ont ainsi réinterprété avec succès la mécanique quantique (et en particulier

son trait remarquable de *non-séparabilité*) en admettant que : « *Les corrélations ont une réalité physique ; ce qu'elles corrélerent n'en a pas* » [Mermin, *ibid.*].

Un exemple est celui des célèbres corrélations d'Einstein, Podolsky et Rosen. La position relative d'une paire d'électrons et la somme de leurs quantités de mouvement peuvent être parfaitement définies sans accorder le moindre sens opératoire à l'idée que chaque électron possède séparément une position et une quantité de mouvement précises. Les conditions d'assertion de propositions conditionnelles comme « *si A est trouvé en x, B sera certainement trouvé en x** » peuvent être remplies sans que les conditions d'assertion des propositions catégoriques « *A est en x* » et « *B est en x** » le soient. La *relation* entre les positions et les quantités de mouvement des électrons est autonome par rapport à toute attribution de *propriétés* correspondantes à chacun d'entre eux.

Dans les corrélations d'Einstein, Podolsky et Rosen, il n'y a en somme qu'*une seule* façon de considérer les relatifs (par exemple les coordonnées x et x^*) : comme réciproquement codépendants. En aucun cas ils ne peuvent se voir attribuer la part d'indépendance qu'on assigne traditionnellement aux termes d'une relation. L'« être » de la coordonnée x ne consiste *en rien d'autre* que d'être rigidement liée à x^* par la *relation* :

$x-x^*=X$ (où X désigne la position *relative* selon l'axe des x).

La coordonnée microscopique « x » n'a donc pas d'« être » propre. Ce n'est pas en tant que *propriété* qu'on peut la faire intervenir dans diverses relations ; c'est au contraire en tant qu'elle est impliquée dans une relation qu'on veut, à tort, la couler dans le moule du concept formel de propriété.

Conclusion

Tandis que l'édifice de la physique classique s'appuie sur un cercle de propriétés, l'édifice de la physique quantique dépend d'un cercle de pures relations, c'est-à-dire de relations non survenantes.

Le cercle de propriétés sur lequel repose la physique classique inclut : (a) les propriétés des corps matériels et des champs décrits par les théories de la mécanique et de l'électromagnétisme classique ; (b) les propriétés des appareils de mesure qui permettent

de tester ces théories. Entre les deux ordres de propriétés citées, il y a bien un *cercle* épistémologique [Bitbol, 2000 ; 2001]. Car les théories classiques sont mises à l'épreuve de l'expérience par des appareils que l'on suppose faits de corps matériels et de champs dont les propriétés obéissent elles-mêmes à ces théories. Ce cercle est par ailleurs conforme à ce qu'exige une théorie naturalisée de la connaissance : les relations cognitives y sont homogènes aux relations objectales puisque ce sont dans les deux cas des *relations survenantes entre propriétés*. Les relations objectales établissent un rapport entre les propriétés de tous les corps matériels et de tous les champs. Et les relations cognitives établissent un rapport du même ordre entre les propriétés de deux classes particulières de corps matériels et de champs : ceux qui composent l'objet et ceux qui composent l'appareil.

Une bonne part des « paradoxes » de la physique quantique vient de ce qu'on n'a pas su, ou pas pu, rétablir une pleine homogénéité dans son cercle épistémologique. À travers le concept de « non-séparabilité », la spécificité des relations *latérales-objectales* de la physique quantique sautait aux yeux. Leur caractère non survenant a tardé à être explicité mais il était à peu près perçu. En revanche, le statut de la relation *cognitive* est resté ambigu. Tantôt, il était conçu sur le modèle classique (dans l'image de la « perturbation » des propriétés de l'objet par les propriétés de l'agent de mesure). Tantôt on tentait de le mettre aux normes du nouveau type de relation objectale (dans la théorie quantique de la mesure de von Neumann).

Mais, même dans ce dernier cas, on ne saisissait pas toutes les implications de la nature *non survenante* des relations cognitives. L'un des signes de cette incompréhension est qu'on attendait d'une description de cette relation dans le cadre de la théorie quantique qu'elle permette la définition de certaines *propriétés* et l'affirmation d'énoncés uniques. On espérait au moins qu'elle fixe une propriété univoque de l'*appareil* à l'issue de la mesure, exprimée par un énoncé catégorique : la propriété qui consiste à afficher une position d'aiguille sur un cadran, ou une inscription bien définie sur un écran, traduite par l'énoncé catégorique d'un *résultat* de mesure déterminé (tel est un énoncé possible du « problème de la mesure » de la mécanique quantique, illustré par le paradoxe du chat de Schrödinger).

Or, sauf à faire intervenir un *deus ex machina*, comme le « terme de réduction spontanée » de Ghirardi, Rimini et Weber, ou bien la « conscience » de Wigner, cet espoir a été déçu. Du haut en bas de l'échelle des grandeurs spatiales, dans son traitement des relations cognitives comme dans sa description des relations objectales, le formalisme quantique n'indique que de pures *corrélations*. Des corrélations que le langage courant peut tout au plus traduire par une *liste d'énoncés conditionnels*, comme, par exemple : « Si la trace se situe au niveau de la première graduation, alors cela signifie telle ou telle chose pour l'objet mesuré ; mais si elle est sur la deuxième graduation, alors cela entraîne telle ou telle autre chose, si elle est sur la troisième, alors [...] » [Schrödinger, 1992, p. 121].

Les théories de la décohérence elles-mêmes n'ont pas fondamentalement changé cette situation. Tout ce qu'elles ont montré est que la structure particulière des corrélations quantiques (impliquant des termes de forme interférentielle) se rapproche asymptotiquement, à l'échelle macroscopique, de la structure des corrélations de la théorie *classique* des probabilités. Cela permet bien de traiter approximativement ces corrélations *comme si* elles reflétaient des relations survenantes entre propriétés macroscopiques. Mais, d'une part, le « comme si » reste inéliminable, ce qui interdit d'ignorer le caractère essentiellement non survenant des relations quantiques. Et, d'autre part, aucune propriété singulière n'émerge des calculs de décohérence, montrant une nouvelle fois que le formalisme de la théorie quantique ne saurait sortir par lui-même du *cercle des relations*. Les théories de la décohérence (corroborées par l'expérience) montrent simplement la compatibilité approximative, à l'échelle macroscopique, du cercle de propriétés de la physique classique et du cercle de relations non survenantes de la physique quantique.

Références bibliographiques

- ALBERT Hans, 1985, *Treatise on critical reason*, Princeton University Press, Princeton.
- BITBOL Michel, 2001, « Non-representationalist theories of knowledge and quantum mechanics », *SATS* (Nordic journal of philosophy), 2, p. 37-61.

- 2000, « Physique quantique et cognition », *Revue internationale de philosophie*, n° 212 (2), p. 299-328.
- 1998, *L'Aveuglante proximité du réel*, Champs-Flammarion, Paris.
- 1997, *Mécanique quantique, une introduction philosophique*, Champs-Flammarion, Paris.
- BITBOL Michel, Laugier Sandra (dir.), 1997, *Physique et réalité, un débat avec Bernard d'Espagnat*, Diderot éd., « Frontières », Paris.
- BLACKBURN Simon, 1993, *Essays in Quasi-realism*, Oxford University Press.
- BOHR Niels, 1987, *Essays 1958-1962 on atomic physics and human knowledge*, Ox Bow Press.
- CAHILL Reginald T., 2000, « Random reality » *New Scientist magazine*, 26 février.
- CASSIRER Ernst, 2000, *La Théorie de la relativité d'Einstein*, trad. J. Seidengart, Le Cerf, Paris.
- CONNES Alain, 1990, *Géométrie non commutative*, Interéditions.
- DAVIDSON Donald, *Actions et événements*, trad. P. Engel, PUF, Paris.
- DAVIS Martin, 1977, « A relativity principle in quantum mechanics », *International journal of theoretical physics*, 16, p. 867-874.
- ESFELD Michael (dir.), 2012, *Philosophie der Physik*, Suhrkamp, Verlag, Berlin.
- FRIEDMAN Michael, 1992, *Kant and the exact sciences*, Harvard University Press.
- HEISENBERG Werner, 2000, *La Nature dans la physique contemporaine*, Gallimard, « Folio », Paris.
- 1925, « Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen », *Z. Phys.* 33, p. 879-893 (trad. anglaise : « Quantum-theoretical re-interpretation of kinematic and mechanical relations », in Van der Waerden B. L., *Sources of Quantum Mechanics*, Dover, 1968).
- HERMANN Gretev, 1996, *Les Fondements philosophiques de la mécanique quantique*, présentation par L. Soler, traduction par A. Schnell et L. Soler, Vrin, Paris.
- KANT Emmanuel, 1980, *Œuvres philosophiques. I*, Gallimard, « La Pléiade », Paris.
- LEIBNIZ Gottfried Wilhelm, 1971, *Mathematische Schriften*, éd. C. J. Gerhardt, Hildesheim.
- MACH Ernst, 1925, *La Mécanique*, Hermann, Paris.
- MERMIN N. David, 1998, « What is quantum mechanics trying to tell us ? », *Am. J. Phys.*, 66, p. 753-767.
- MUGUR-SCHÄCHTER Miorana, 1992, « Space-time quantum probabilities, relativized descriptions, and Popperian propensities », *Foundations of physics*, 21, p. 1387-1449.

- PETITOT Jean, 1997, « Objectivité faible et philosophie transcendantale », in BITBOL Michel, LAUGIER Sandra (dir.), *Physique et réalité, un débat avec Bernard d'Espagnat*, Diderot éd., « Frontières », Paris.
- ROVELLI Carlo, 1997, « Relational quantum mechanics », arXiv : quant-ph/9609002 v2.
- SCHRÖDINGER Erwin, 1992, « La situation actuelle en mécanique quantique », in *Physique quantique et représentation du monde*, Seuil, « Points », Paris.
- TELLER Paul, 1986, « Relational holism and quantum mechanics », *British Journal for the Philosophy of Science*, 37, p. 71-81.
- WITTGENSTEIN Ludwig, 1993, *Tractatus logico-philosophicus*, trad. G.-G. Granger, Gallimard, Paris.