

Kant et la mécanique quantique

Michel Bitbol
CNRS, Paris, France

in : J-B. Joinet & S. Tronçon (eds.), *Ouvrir la logique au monde*, Hermann, 2009

Résumé : Au début du XXe siècle, beaucoup ont considéré que l'épistémologie de Kant était dépassée face aux révolutions relativiste et quantique. La relativité semblait mettre en défaut l'esthétique transcendantale (la doctrine de l'espace comme forme *a priori* de l'intuition sensible), et la mécanique quantique l'analytique transcendantale (la doctrine de la causalité comme forme *a priori* de l'entendement). Mais certains philosophes néo-kantiens (surtout E. Cassirer, le jeune H. Reichenbach, G. Hermann, P. Mittelstaedt, etc.) ont montré que ces problèmes pourraient être surmontés. Dans le sillage de ces auteurs, trois stratégies d'adaptation de l'épistémologie transcendantale au défi de la physique moderne sont discutées: 1) la restriction des principes *a priori* de Kant au domaine de la connaissance du monde quotidien; 2) la recherche de principes *a priori* plus généraux que ceux de Kant capables de couvrir le domaine de validité de la physique moderne; 3) la relativisation et l'historicisation de l'*a priori*. On montrera alors que la stratégie fondamentale de l'épistémologie transcendantale, à savoir l'adoption d'une attitude réflexive, n'a jamais été aussi indispensable à l'intelligibilité de la physique. Cette stratégie sera appliquée à la justification de la structure de la mécanique quantique, à la compréhension de la non-séparabilité, et à la réinterprétation de la décohérence.

Durant le premier quart du vingtième siècle, l'épistémologie de Kant a été accusée d'être devenue caduque face aux révolutions scientifiques qui venaient de transfigurer la physique. Sa réactualisation, moyennant bien des adaptations, apparaît donc comme un défi. Mais un défi qui *doit* à mon sens être relevé si l'on veut donner lisibilité et cohérence aux théories physiques contemporaines.

Commençons par l'accusation traditionnelle.

La théorie de la relativité générale semble invalider l'*Esthétique transcendantale* de Kant, avec sa doctrine de l'espace comme forme *a priori* de l'intuition sensible. Einstein souligne lui-même que l'intervention d'une géométrie riemannienne dans la théorie relativiste de la gravitation implique la fausseté de la thèse kantienne d'un statut *a priori* de l'espace tri-dimensionnel soumis aux règles de la géométrie euclidienne. Ses textes l'indiquent très clairement, et le répètent tout au long de sa carrière :

« La confiance en la certitude apodictique des jugements synthétiques *a priori* est gravement ébranlée par la connaissance de l'invalidité, ne fût-ce que d'un seul de tels jugements » (1915).

« Il y a peu de temps encore, on croyait que le système kantien de concepts et de normes *a priori* pourrait résister éternellement. Cette position fut tenable aussi longtemps que la science de la nature postérieure à Kant (...) n'enfreignit pas les normes en question. Ce qui ne se présenta de manière incontestable qu'avec la théorie de la relativité. A moins de vouloir prétendre que la théorie de la relativité est contradictoire avec la raison, on ne peut donc pas conserver le système kantien des concepts et normes *a priori* » (1924).

« Naturellement, chacun sait aujourd'hui que lesdites connaissances (particulièrement la géométrie euclidienne) ne sont pas aussi sûres et n'ont pas de nécessité interne aussi établie que Kant le croyait » (1944).

« Kant a été induit en erreur par l'opinion fautive, mais difficilement évitable à cette époque, selon laquelle la géométrie est une nécessité de la pensée qui fournit sur les objets de la perception 'extérieure' des connaissances certaines (c'est-à-dire ne dépendant pas de l'expérience sensible). Sur la base de cette erreur facilement compréhensible, il a conclu à l'existence de jugements synthétiques *a priori*, produits par la seule raison et qui de ce fait doivent pouvoir prétendre à une validité inconditionnelle » (1949)¹

De façon analogue, la mécanique quantique semble invalider *l'Analytique Transcendantale* de la *Critique de la raison pure*, avec sa doctrine de la substance et de la causalité en tant que catégories, c'est-à-dire en tant que concepts purs *a priori* de l'entendement. Heisenberg a été particulièrement ferme dans sa dénonciation de l'inapplicabilité des deux concepts dans le domaine quantique. Il a d'abord affirmé, dans son article de 1927 sur les « relations d'incertitude » que « la mécanique quantique établit l'échec final de la causalité ». Plus tard, en 1929, Heisenberg est devenu nuancé et précis. Il ne s'est plus aventuré à exclure toute intervention de la causalité en physique quantique. Au lieu de cela, il a montré, sous l'influence de Bohr, qu'appliquer la loi de causalité et localiser les phénomènes dans l'espace et dans le temps sont des approches « complémentaires », c'est-à-dire des approches mutuellement exclusives. Mais si les lois causales ne valent pas pour les phénomènes spatio-temporels, cela suffit à enlever toute pertinence à la théorie kantienne de la connaissance, puisque sa catégorie cruciale de causalité n'a d'autre champ d'application que les apparitions dans l'espace et dans le temps. Dans son livre *Physique et Philosophie* de 1958, Heisenberg conclut donc de manière négative :

« Il semble que (le concept kantien) de "jugements synthétiques *a priori*" ait été complètement annihilé par les découvertes de notre siècle. La théorie de la relativité a changé nos vues sur l'espace et le temps, elle a en fait révélé des

¹ A. Einstein, *Oeuvres choisies*, 5, Seuil, 1991. Dans l'ordre des citations : pp. 37, 221, 109, 91

caractéristiques entièrement nouvelles de l'espace et du temps dont on ne voit rien dans les formes a priori de l'intuition pure de Kant. La loi de causalité n'est plus appliquée en mécanique quantique, et la loi de conservation de la matière n'est plus vraie pour les particules élémentaires (...) Les arguments de Kant en faveur du caractère *a priori* de la loi de causalité ne sont plus valides »²

Dans le même temps que la conception kantienne de la connaissance était ainsi fortement contestée, plusieurs philosophes néo-kantiens ont pourtant trouvé dans la physique moderne au moins trois raisons, non seulement de continuer à adhérer aux idées de l'épistémologie transcendantale, mais encore de les amplifier. Ces raisons tiennent aux gestes les plus fondamentaux qui définissent l'épistémologie transcendantale, en deçà du détail de la doctrine kantienne des facultés (la sensibilité, l'entendement, la raison) :

A-La « révolution copernicienne »

« Que l'on fasse l'essai de voir si nous ne réussirions pas mieux (...) en admettant que les objets doivent se régler sur notre connaissance »³. Ce genre d'attitude réflexive, prenant la forme d'une attention portée aux procédures d'acquisition de connaissances, et non pas aux seules représentations d'objets, s'est avérée cruciale dans la phase de formation des théories de la relativité et des théories quantiques. Il suffit de penser à la définition opératoire des durées et des distances par Einstein en 1905, et à la « réduction aux observables » accomplie par Heisenberg pour sa mécanique matricielle de 1925.

B-La relativité des connaissances aux moyens de connaître

« Les lois n'existent pas dans les phénomènes, mais n'existent que relativement au sujet auquel les phénomènes sont inhérents, pour autant qu'il est doué d'entendement ; pas plus que les phénomènes n'existent en soi, mais seulement relativement au même être, pour autant qu'il a des sens »⁴. En physique moderne, l'idée de relativité des lois au sujet rationnel est simplement remplacée par celle de leur relativité à l'ensemble réglé des *procédés* utilisables pour accéder expérimentalement aux variables qu'elles régissent.

C-L'absence d'innéisme des formes a priori

² W. Heisenberg, *Physique et Philosophie*, Albin Michel, 1971, p. 100 suiv.

³ I. Kant, *Critique de la raison pure*, GF-Flammarion, 2001, B XVI

⁴ *ibid.*, B 164

« Le concept de la cause, qui exprime la nécessité d'un effet sous une condition supposée, serait faux s'il ne reposait que sur une nécessité subjective arbitraire et innée en nous de lier certaines représentations empiriques selon une telle règle de relation. Je ne pourrais pas dire que l'effet est lié à la cause dans l'objet (...) mais seulement que je suis constitué de telle sorte que je ne peux pas penser cette représentation autrement que liée de cette manière »⁵. Même d'un point de vue kantien, par conséquent, il est faux de dire que les formes *a priori* qui conditionnent la légalisation des phénomènes sont immuablement issues de notre constitution biologique. Cela suffit à entr'ouvrir la perspective de leur adaptation à de profonds bouleversements historiques de la connaissance.

Rien d'étonnant dans ces conditions qu'un mouvement de « retour à Kant », ou plus exactement de retour à l'esprit du kantisme, se soit fait jour durant les années 1930. En voici deux exemples.

A propos des théories de la relativité, Ernst Cassirer a noté qu'elles reposent sur trois procédures conformes à l'idée de la révolution copernicienne : (i) le questionnement systématique sur la manière dont les mesures d'espace et de temps sont obtenues, (ii) la mise en évidence de la structure de groupe qui permet d'articuler ces mesures entre elles lorsqu'elles sont effectuées dans des référentiels distincts, et (iii) l'extraction des invariants des groupes de transformation. Ici, conformément aux grandes lignes de l'épistémologie transcendantale, il n'est pas question de pré-donation des déterminations et des objets, mais de leur constitution par la mise en ordre légale ou structurale des phénomènes et par identification d'invariants légaux. Ni les lois ni les invariants ne sont cependant fixés une fois pour toutes.

Il est par ailleurs devenu clair à partir des réflexions de Bohr qu'en mécanique quantique des considérations sur la contextualité, sur la manière dont chaque micro-phénomène est à la fois relatif à l'intervention singulière d'un contexte expérimental et indissociable d'elle, sont cruciales. Grete Hermann, une philosophe allemande qui a discuté à fond ces questions avec Heisenberg en 1934, en a conclu que la philosophie de Kant n'a pas du tout été réfutée par la mécanique quantique, mais au contraire rendue plus indispensable que jamais par cette théorie, à condition qu'on la pousse jusqu'à ses conséquences les plus radicales⁶.

⁵ *ibid.*, B168

⁶ G. Hermann, *Les fondements philosophiques de la mécanique quantique*, Présentation par L. Soler, Traduction par A. Schnell et L. Soler, Vrin, 1996

La question que nous devons donc clarifier à présent est celle des stratégies permettant de promouvoir les idées essentielles de la théorie kantienne de la connaissance, sans rester tributaire des traits particuliers de cette doctrine qui ont été clairement rendues obsolètes par les théories quantiques et relativistes. A l'examen, il existe en tout et pour tout trois grandes orientations stratégiques qu'on désignera respectivement par : (1) anthropocentration, (2) universalisation, et (3) relativisation.

La première stratégie, dite d'« anthropocentration », consiste à restreindre la validité du synthétique *a priori*, tel que Kant l'a défini, à l'environnement immédiat du genre humain, autrement dit à un environnement dans lequel la physique classique reste une approximation satisfaisante. La seconde stratégie, celle d'« universalisation », revient à formuler de nouvelles pré-conditions de la connaissance qui soient assez générales pour englober non seulement la physique classique, mais *aussi* le champ étendu de phénomènes pris en compte par les théories de la physique moderne. Enfin, la troisième stratégie consiste à relativiser les formes *a priori*, c'est-à-dire à la rendre relatives à une certaine situation des sciences qui peut changer d'une étape à l'autre de leur histoire.

Restreindre le domaine de validité des formes kantienne de l'intuition sensible et des catégories de l'entendement pur, est ce qu'Einstein, Bohr, et Heisenberg ont fait presque spontanément après qu'ils aient formulé leurs théories révolutionnaires. Tous ont déclaré, d'une manière ou d'une autre, que les formes *a priori* kantienne, bien qu'invalidées dans le domaine élargi dont rendent raison les nouvelles théories physiques, demeurent des pré-requis loco-régionaux de la connaissance physique. Einstein a ainsi remarqué en 1921 que la géométrie riemannienne est fondée sur la présupposition qu'il existe des corps rigides qui se comportent comme si la géométrie euclidienne était *localement*, ou *tangentielle*ment valide⁷. Mais il a également mis en garde contre toute généralisation réifiante de cette validité locale : « Les concepts qui se sont avérés utiles pour établir un certain ordre acquièrent facilement pour nous un statut d'autorité si

⁷ A. Einstein, *Oeuvres choisies*, 5, op. cit., p. 75

grande que nous oublions leur origine terrestre et que nous en arrivons à les considérer comme des données immuables »⁸. Dès lors, selon Einstein, les formes kantienne de l'intuition sensible ne sont rien d'autre que des principes d'ordre de voisinage tenant lieu de présuppositions minimales pour toute tentative ultérieure d'étendre la physique au-delà de l'environnement étroit du genre humain.

Quant à Bohr et Heisenberg, ils ont promu la même idée, mais en l'appliquant aux catégories kantienne de l'entendement pur, particulièrement celles de substance et de causalité, plutôt qu'aux formes de l'intuition. Selon ces deux co-fondateurs de la mécanique quantique, l'organisation *classique* de l'expérience proximale (celle de notre environnement immédiat) est une pré-condition de tout développement possible concernant l'expérience distale, y compris dans le domaine *quantique*. En effet, souligne Bohr, les prévisions du « symbolisme » quantique portent en fin de parcours sur des événements bien définis (par exemple les positions des aiguilles des appareils de mesure) concernant des corps matériels macro- ou mésoscopiques dont le mouvement relève du champ de validité de la physique classique. Or, cette organisation classique est elle-même préconditionnée par les catégories kantienne (conformément à la démonstration, certes limitée mais toujours correcte dans sa limitation, de la *Critique de la raison pure* et des *Premiers principes métaphysiques de la science de la nature*). Par conséquent, ces catégories fonctionnent *de facto* comme autant de présuppositions anthropocentriques de second ordre pour la mécanique quantique, même si elles ne peuvent pas opérer comme des présuppositions générales de premier ordre s'appliquant directement aux phénomènes microscopiques. Heisenberg a récapitulé ces considérations par une remarque un peu ironique : « Ce que Kant n'a pas prévu est que ses concepts *a priori* peuvent être des pré-conditions pour la science, et avoir en même temps un domaine limité d'applicabilité »⁹.

Accepter que le rôle constitutif des catégories de la *Critique de la raison pure* vaille seulement pour le domaine mésoscopique semble être une clause purement restrictive, n'ouvrant aucune voie pour aller plus loin. Mais en vérité, la philosophie de Kant a les ressources nécessaires pour avancer également des propositions constructives sur

⁸ A. Einstein, *Oeuvres choisies*, 5, op. cit., p. 226

⁹ W. Heisenberg, *Physique et philosophie*, op. cit. p. 103

ce qui a été reconnu comme ne tombant pas directement sous la juridiction conjointe des formes de l'intuition sensible et des catégories de l'entendement pur. Ces ressources doivent être recherchées non plus seulement dans la *Critique de la raison pure*, mais aussi dans la *Critique de la faculté de juger*.

Un signe que ce type d'extension est envisageable se manifeste déjà à travers les rares allusions que fait Kant aux géométries non-euclidiennes ; des géométries à l'époque seulement hypothétiques, et définies par le postulat que plus d'une droite est traçable entre deux points¹⁰. Bien que ces géométries non-euclidiennes ne soient pas *transcendamment* possibles, indique Kant, elles demeurent *logiquement* possibles. Et c'est cette possibilité logique qui permet d'assigner un statut *synthétique a priori* à la géométrie euclidienne puisque, si d'autres géométries étaient logiquement impossibles, il faudrait admettre que la géométrie euclidienne est *analytique a priori*. On s'aperçoit ainsi que Kant n'exclut pas l'utilisation de géométries alternatives. Il n'exclut pas, en particulier, que cette utilisation puisse s'imposer afin de satisfaire le besoin d'une unification systématique des lois de la physique, conforme à ce qu'exige la faculté de juger¹¹.

Le même genre de possibilité a été exploré récemment pour la mécanique quantique¹². L'approche consiste à comprendre les nouvelles structures des théories quantiques non pas comme des expressions directes de la fonction constitutive des catégories, mais, ici aussi, comme la traduction du projet d'unité du système de la nature porté par la faculté de juger. Pour le comprendre, il faut se rappeler que l'unité du domaine de validité des lois de la physique a semblé être sérieusement mise en question durant l'époque intermédiaire de l'ancienne théorie des quanta, entre 1900 et 1924 environ. Elle a semblé rompue par la nécessité de faire droit à des représentations aussi antinomiques que celle des corpuscules et celles des ondes, sans critère clair pour passer de l'une à l'autre ou pour les associer. L'unité du champ légal s'est avérée de surcroît irréalisable au premier degré, en raison de la contrainte imposée par le caractère fini du quantum d'action. Cette contrainte se manifestait en effet par

¹⁰ I. Kant, *Critique de la raison pure*, op. cit. A220/B268, "(...) dans le concept d'une figure renfermée entre deux lignes droites, il n'y a point de contradiction"

¹¹ S. Palmquist « Kant on Euclid : geometry in perspective », *Philosophia Mathematica II* 5:1/2, 88-113, 1990

¹² H. Pringe, *Critique of the Quantum Power of Judgment : A Transcendental Foundation of Quantum Objectivity*, Thèse de doctorat de l'université de Dortmund (Allemagne), Juillet 2006. Voir C. Chevalley, article « Symbole », in : N. Bohr, *Physique atomique et connaissance humaine*, Gallimard, 1991

la relativité des valeurs d'observables à une multiplicité de contextes expérimentaux mutuellement incompatibles, et inscrivant la multiplicité en question dans le formalisme par le biais des relations de commutation entre observables. L'unité, qui avait ainsi été brisée en un grand nombre de représentations ou évaluations contextuelles, pouvait (devait) cependant être rétablie à un niveau méta-contextuel en faisant usage d'un horizon fédérateur.

Telle a été la stratégie suivie par Bohr lorsqu'il a formulé le concept un peu baroque de « complémentarité », selon lequel les diverses images et valeurs d'observables, bien que mutuellement incompatibles (parce que relevant de contextes expérimentaux disjoints), *portent* néanmoins *sur* un seul objet et en offrent, prises toutes ensemble, une caractérisation exhaustive. Le problème est que cet objet à fonction artificiellement fédératrice ne peut pas être dit posséder simultanément les propriétés correspondant aux caractérisations contextuelles qu'on fait converger sur lui ; il n'en est pas le support permanent. Le nom de cet objet ne saurait donc avoir qu'un statut de graphisme unifiant, et même l'hypothétique capacité causale à déclencher des phénomènes dont on investit un objet hypothétique de ce genre, ne doit être figurée que sur le mode d'un « comme si ». Car, en raison de l'obstacle que le caractère fini du quantum d'action impose à la synthèse des phénomènes, aucun objet *constitué* (au sens de l'*Analytique transcendantale*) ne peut être dit se tenir « derrière » les phénomènes contextuels. La référence persistante à l'objet ne saurait dès lors être qu'un dispositif purement *régulateur*, utilisé comme *symbole* à fonction mentalement unificatrice. Le statut restreint des objets-horizons fédérateurs chez Bohr peut dans ces conditions être rapproché de la conception kantienne de l'« analogie symbolique », qui remplace dans la *Critique de la faculté de juger* l'« analogie de l'expérience » à usage proprement constitutif lorsque l'objet ne peut pas entrer dans le cadre offert par l'intuition pure et que son concept ne peut donc pas être schématisé par l'imagination :

« Toute (présentation) comme acte de rendre sensible est double : ou bien elle est schématique, puisqu'à un concept que l'entendement saisit, l'intuition correspondante est donnée *a priori* ; ou bien elle est symbolique, puisqu'à un concept que seule la raison peut penser, et auquel aucune intuition sensible ne peut être adéquate, une telle intuition est soumise ».

« Toutes les intuitions que l'on soumet *a priori* à des concepts sont soit des schèmes soit des symboles, dont les premières contiennent des présentations directes du concept, et les seconde des présentations indirectes. Les schèmes procèdent démonstrativement, les symboles au moyen d'une analogie (...) dans laquelle la faculté de juger mène une double entreprise qui est d'abord

d'appliquer le concept à une intuition sensible, et ensuite d'appliquer la simple règle de la réflexion sur cette intuition à un objet tout à fait autre, dont le premier n'est que le symbole »¹³.

Le symbole n'opère ici que comme béquille (analogique) et point focal virtuel pour une intuition sensible qui manque d'un contenu à la fois directement accessible et effectivement inscriptible dans le cadre légal de la constitution d'objectivité. Elle est en quelque sorte son objet de substitution. Mais un objet de substitution qui a aussi une certaine aptitude à guider les développements formels à usage prédictif. Un bon exemple de guidage par un symbole d'objet est fourni par la théorie de l'effet Compton, qui concerne la diffusion de rayonnement X par des électrons. Les angles de diffusion et les énergies cinétiques résultantes peuvent aisément être calculés en employant un modèle de mécanique classique relativiste dans lequel le rayonnement X, comme les électrons, est représenté par des corpuscules. Ce modèle n'est pas unique, puisqu'il est également possible (comme l'a montré Schrödinger) de calculer le même effet en employant un modèle ondulatoire classique de diffraction d'une onde électromagnétique par le réseau d'une onde de de Broglie. Mais l'un comme l'autre des deux modèles se contente de faire appel à une « analogie symbolique » avec des pseudo-objets corpuscules ou des pseudo-objets ondes, dans une situation où la seule méthode générale de prédiction (par le formalisme de Dirac-Von Neumann dans un espace de Hilbert) échappe complètement à l'intuition sensible. Les symboles « corpuscules » ou « ondes » sont au total purement analogiques, car (a) ils jouent le même rôle dans les modèles de la diffusion Compton que les objets constitués « corpuscules » ou « ondes » en physique classique, mais (b) ce rôle ne vient qu'en substitution d'un formalisme prédictif général qui fait éclater les représentations, aussi bien celle d'onde se propageant dans l'espace ordinaire que celle de trajectoire corpusculaire.

Le dispositif unificateur ultime, dans la *Critique de la faculté de juger*, n'est toutefois pas tant le symbole que la *finalité* : la visée d'une fin désignée par la raison, et dont le symbole n'est qu'une préfiguration possible. On sait que le « principe propre de la faculté de juger » doit être que « la nature spécifie ses lois universelles en lois empiriques conformément à la forme d'un *système* logique »¹⁴. C'est à travers l'idée d'une tension des processus naturels vers une *fin* visant à

¹³ I. Kant, *Critique de la faculté de juger*, §59, Gallimard, 1985, p. 314

¹⁴ I. Kant, *Critique de la faculté de juger*, 1^{ère} introduction, V, op. cit. p. 43

les conformer aux besoins de synthèse explicative de la faculté de réfléchir du sujet jugeant et connaissant, que cette dernière s'oriente dans la recherche d'un tel système. On peut comprendre cette intervention de la finalité comme transposition laïcisée d'un héritage de théologie spéculative qui a accompagné la naissance de la science moderne de la nature : la thèse suivant laquelle Dieu a créé le monde selon des formes conformes au pouvoir de compréhension synthétique de l'intelligence humaine. Le pouvoir de législation divine en vue d'une fin est simplement remplacé ici par une projection téléologique de la demande d'intelligibilité que formule le sujet connaissant. Ainsi que le résume Kant :

« Le concept d'une légalité objectivement contingente mais subjectivement nécessaire, (est) le concept d'une finalité de la nature ».

Et encore : « Le concept des fins naturelles est donc simplement un concept de la faculté de juger réfléchissante, et qui lui sert pour son usage propre »¹⁵.

Il reste à transposer à la mécanique quantique l'application que Kant fait de la finalité au concept biologique d'*organisme*, c'est-à-dire à un ensemble de parties et d'organes qu'ordonnent un plan et une fonction globale. H. Pringe propose de lui faire correspondre la mise en ordre des ensembles d'événements expérimentaux isolés par leur subordination à une fonction de probabilité (celle que fournit le *vecteur d'état* associé à une préparation instrumentale). Le schéma analogique suggéré est en bref le suivant :

Parties et organes : plan de l'organisme = événements expérimentaux : vecteur d'état.

On s'aperçoit qu'on a affaire à un procédé d'unification quasiment symétrique de celui de l'objet symbolique bohrien. Tandis que l'objet symbolique de Bohr visait à fédérer les phénomènes expérimentaux contextuels sous la représentation analogique d'une entité opérant comme si elle était la *cause* des activations instrumentale, le vecteur d'état est censé les fédérer sous la perspective de la convergence à long terme (ou *finale*) de leur fréquence observée vers une probabilité.

¹⁵ I. Kant, *Critique de la faculté de juger*, 1^{ère} introduction, IX, op. cit. p. 67

A côté de cette stratégie consistant à accepter la limitation du pouvoir constitutif de l'entendement pur, et à se contenter d'en étendre le projet législateur à des régions échappant aux formes de l'intuition pure par le biais de régulations symboliques ou téléologiques, il en existe deux autres qui visent au contraire à reprendre le travail de constitution d'objectivité là où il avait été laissé par la physique classique.

L'une d'entre elles consiste, nous l'avons dit, à généraliser les formes *a priori* kantienne, à en formuler de plus universelles. L'espoir est ici de réussir là où Kant a espéré et échoué, c'est-à-dire d'identifier des conditions *réellement nécessaires* de *n'importe quelle* connaissance empirique, à *n'importe quelle* époque de l'histoire. Dans cette perspective, le but consiste à démontrer que les structures de base des lois physiques expriment essentiellement les structures de ces présuppositions très générales. Une telle démonstration, si elle était menée à bien, constituerait une justification transcendantale de la théorie physique. Il me semble cependant que la recherche envisagée et son objectif déclaré sont contradictoires. En effet, des préconditions suffisamment générales pour être universelles et pérennes, seraient vraisemblablement d'autant plus faibles en pouvoir justificateur qu'elles seraient pauvres en contenu. Tandis qu'une fraction notable de la structure légale de la mécanique classique newtonienne pouvait être justifiée transcendantalement à partir de l'ensemble étroit de préconditions considéré par Kant, comme on peut s'en convaincre à la lecture des *Premiers principes métaphysiques des sciences de la nature*, une fraction beaucoup plus faible des théories physiques pourrait sans doute être justifiée par des préconditions beaucoup plus générales.

Cette impression est confortée lorsqu'on examine le devenir de la tentative la plus avancée dans cette direction : celle de C.F.von Weizsäcker¹⁶, célèbre disciple de Heisenberg. Ce physicien-philosophe a formulé deux préconditions centrales de la connaissance scientifiques, dont on voit immédiatement à quel point elles sont plus englobantes que celles de Kant. La première précondition est qu'il doit être possible de *discriminer* entre au moins deux phénomènes ; et la seconde qu'on doit pouvoir distinguer entre phénomènes actuels et potentiels, entre le passé et le futur, entre la possession d'information et la prédiction. De fait, on peut difficilement concevoir un seul fragment de connaissance scientifique qui ne repose pas sur la

¹⁶ C.F. Von Weizsäcker, *The structure of physics*, Springer, 2006

possibilité d'effectuer des discriminations au sein du continuum de ce qui arrive, et sur la perspective de gagner de l'information au cours du temps. Mais, en raison du caractère élémentaire de ces présuppositions, il n'est pas étonnant que l'espoir caressé par Von Weizsäcker d'en dériver régressivement la totalité des théories de la physique moderne ait jusque là échoué, si l'on excepte une intéressante remontée vers quelques-uns de leurs traits les plus génériques.

Dès lors, si nous voulons faire progresser le programme de justification transcendantale des théories physiques, nous n'avons d'autre choix que d'avoir recours à la troisième stratégie, c'est-à-dire celle des *a priori* relativisés et historicisés.

Il faut d'abord donner quelques arguments en faveur de cette approche qui, lorsqu'on l'entend pour la première fois, sonne un peu comme une contradiction dans les termes.

Pour commencer, il est clair que les *a priori* relativisés sont pleinement compatibles avec les deux précédentes options. Mettre en évidence des structures spécialisées relativement *a priori* n'empêche en rien d'extraire des préconditions plus générales. Les préconditions les plus universelles de la connaissance empirique (comme celles de Von Weizsäcker) peuvent vraisemblablement être retrouvées comme noyau stable des préconditions plus spécialisées et plus riches de chaque région particulière d'expérience. De surcroît, dire, à la manière d'Einstein, Bohr et Heisenberg, que la validité des formes kantienne de la sensibilité et de la pensée vaut seulement pour notre environnement mésoscopique, est une manière d'affirmer que ces formes kantienne sont *relatives* à la gamme de procédures qui peuvent intervenir dans cet environnement ; qu'elles sont des préconditions de la région la plus familière de l'expérience. Si l'on admet cela, la clause restrictive énoncée par Einstein, Bohr et Heisenberg au sujet des formes kantienne peut être tenue, par contraste, pour une incitation à identifier d'autres formes pertinentes pour la gamme de phénomènes et de procédures explorées par la microphysique.

Une bonne défense des *a priori* relativisés doit par ailleurs affronter les accusations de recouvrir un certain arbitraire ou un empirisme à peine déguisé. Ce genre d'accusation a été formulé à l'origine par Einstein contre la lecture cassirerienne de la théorie de la relativité.

Selon Einstein, « On pourra toujours dire que les philosophes criticistes se sont trompés jusqu'à présent en établissant la liste des éléments *a priori*, et on pourra toujours établir un système d'éléments *a priori* qui ne soit pas contradictoire avec un système physique donné »¹⁷. Si la tendance à la relativisation des formes *a priori* est poussée jusqu'à ses dernières conséquences, conclut Einstein, ce qu'on obtient n'est pas différent du fruit de la méthode hypothético-déductive ; il y a indifférenciation des préconditions et des hypothèses. La seule composante du Kantisme qu'on semble devoir retenir est la reconnaissance du pouvoir de la spontanéité de la raison, à savoir le fait que notre raison tend toujours à anticiper les phénomènes avec un ensemble de postulats constructifs. La méthode transcendantale se réduit ici à l'abduction de Peirce ou au faillibilisme de Popper.

A contrario, si l'épistémologie transcendantale doit maintenir sa spécificité, elle ne doit pas pousser la relativisation des formes *a priori* jusqu'à un degré où l'on ne puisse plus la distinguer d'une dialectique en mouvement de conjectures et réfutations. Mais est-ce possible ? Je pense que oui. On peut bien instaurer une différence nette entre un arrière-plan *a priori*, fût-il relativisé, et une simple conjecture ; une différence qui porte sur la part de nécessité du premier, et l'entière contingence de la seconde. Mais bien sûr, le concept de nécessité doit être nuancé si l'on ne veut pas retomber dans les formes *a priori* absolues et intemporelles de Kant.

L'idée d'une espèce nuancée de nécessité peut être illustrée par la première réaction philosophique d'esprit néo-kantien que Hans Reichenbach a eue face aux théories d'Einstein vers 1920.

C'est Reichenbach qui, l'un des premiers, avec Cassirer, a élaboré la thèse d'un *a priori* relativisé en réponse au défi de la physique moderne. Selon Reichenbach, le sens d'*a priori* est double : (1) « nécessairement vrai, ou vrai pour tous temps » et (2) « constituant le concept d'objet »¹⁸. Seule la seconde composante, celle de présupposition constitutive, est indispensable à l'élaboration de la connaissance scientifique, tandis que la première, celle de nécessité et de pérennité ne l'est pas. S'il en va ainsi, insiste Reichenbach, c'est qu'*a priori* veut dire « avant la connaissance » (sur le mode d'une antériorité seulement *logique*), et non pas « indépendant de

¹⁷ A. Einstein, *Oeuvres choisies*, 5, op. cit. p. 222

¹⁸ H. Reichenbach, *The theory of relativity and a priori knowledge*, University of California Press, 1965, p. 48

l'expérience » (sur un mode spéculatif)¹⁹. Des principes de « coordination », qui fixent la procédure selon lequel une connaissance est acquise, sélectionnée et organisée, doivent être imposés *préalablement* aux axiomes théoriques, dits de « connexion », qui concernent l'ordre légal des contenus de connaissance ainsi obtenus et structurés.

Qu'entend exactement Reichenbach par « coordination », et que s'agit-il de coordonner ? Reichenbach l'indique en deux étapes. La première étape revient à proposer des exemples simples, où ce qu'on cherche à coordonner est donné sous forme de deux ensembles préalablement connus. Ainsi : (a) les nombres rationnels sont coordonnés aux points d'un segment continu ; (b) des entités physiques sont coordonnées à des équations. Une telle opération de coordination implique des normes, forçant à opérer des choix entre ceux des termes des deux ensembles qui vont être mis en correspondance les uns avec les autres ; on peut par exemple spécifier comme norme que « de deux fractions, la plus grande doit toujours être coordonnée au point le plus éloigné sur la droite »²⁰ ; ou bien encore que le résultat de la mesure de telle détermination spatiale d'un point matériel doit être coordonné à la variable x de l'équation du mouvement. La seconde étape de l'explication de ce qu'est « coordonner » est bien plus délicate, car cette fois seul l'*un* des deux termes de l'acte de coordination est connu, tandis que l'autre ne sera pas seulement sélectionné mais *délimité et défini* par la manière dont il se trouve coordonné. Dans les coordinations cognitives, écrit Reichenbach en retrouvant la *fonction* de la chose en soi chez Kant, « (...) l'un des côtés est complètement indéfini »²¹. Un exemple simple est celui de la mesure de la longueur d'un corps matériel. Selon Reichenbach, préalablement à cette mesure, aucune détermination métrique ne peut être dite appartenir au corps. C'est seulement l'opération complète de mesure, avec sa sélection d'une règle initialement étalonnée par comparaison à un standard, sa gravure de graduations, puis son examen de coïncidences entre les extrémités du corps et les graduations de la règle, qui conduit à définir une longueur. En somme, l'objet (ou la détermination) est indéfini(e) préalablement à la coordination, mais atteint à sa définition par la coordination : « (...) nous sommes confrontés au fait étrange que, dans le domaine de la cognition, deux ensembles sont coordonnés, l'un d'entre eux

¹⁹ *ibid.* p. 105

²⁰ *ibid.* p. 39

²¹ *ibid.* p. 40

n'atteignant pas seulement son ordre à travers la coordination, mais ayant ses éléments définis par le biais de cette coordination »²². Les éléments ne sont pas simplement sélectionnés, mais fixés et spécifiés par la coordination. Cela revient à déployer une procédure de constitution d'objectivité : « En déterminant la coordination, (les principes) définissent les éléments individuels de réalité et en ce sens *constituent* les objets réels »²³.

Rien n'empêche cependant que le corpus des principes de coordination n'ait à être profondément transformé lorsque seule sa mutation s'avère capable de rétablir la cohérence de l'édifice entier des connaissances, menacée par des anomalies croissantes. Dans ces circonstances, les principes constitutifs de la connaissance objective s'avèrent bien relatifs à l'une de ses étapes. Leur capacité constitutive n'a pas pour corrélat une validité transhistorique, mais une présence universelle à l'arrière-plan des contenus scientifiques de la phase historique qui leur correspond. Il faut simplement être disposé à admettre, pour combiner le statut constitutif et l'historicité des principes de coordination, que lors d'une révolution suffisamment radicale pour remettre en question d'anciens principes de ce type, les objets de la physique peuvent changer du tout au tout (et non pas seulement se trouver mieux caractérisés). Il faut en particulier admettre la fragilité, la contingence, et le caractère constitué des objets les plus traditionnels de la physique, de ceux qui sont tellement inscrits dans sa tradition qu'y renoncer semble équivaloir à reconcer à la physique elle-même : les choses-substances, les corps et points matériels subsistants. Ces derniers sont en effet définis par un principe de coordination (le principe de « génidentité »²⁴, ou de recherche de continuité spatio-temporelle en « trajectoire » de séquences choisies de phénomènes) ; un principe de coordination parmi d'autres qui n'a pas plus de raison d'être pérenne que n'importe quel autre. Reichenbach assène alors cette conclusion très forte : « Tout changement des principes de coordination produit un changement du concept d'objet ou d'événement, c'est-à-dire de l'objet de la connaissance »²⁵.

On voit en résumé que, pour avoir été historicisés et relativisés, les principes de coordination n'en conservent pas moins un rôle capital.

²² *ibid.* p. 40

²³ *ibid.* p. 53

²⁴ *ibid.* p. 55

²⁵ *ibid.* p. 88

Ils *définissent* les objets de connaissance²⁶. Ils en sont constitutifs, dans la mesure où ils prescrivent la manière dont on doit articuler les phénomènes pour qu'ils puissent compter comme manifestations de déterminations objectives ; mais ils ne sont pas nécessaires, contrairement aux formes *a priori* kantienne, insiste Reichenbach en accord avec sa distinction initiale de la constitutivité et de la nécessité. Leurs changements au cours de l'histoire est donc possible. Ces changements ont pour corrélat des altérations du mode d'articulation des phénomènes, et donc de la nature des déterminations objectives qu'ils définissent.

L'un des cas traités en détails par Reichenbach est celui de la théorie de la relativité restreinte. Selon lui, l'acte révolutionnaire d'Einstein en 1905 est d'avoir fait passer la transformation de Lorentz du statut de loi empirique à celui de principe de coordination²⁷. À partir de là, et contrairement à ce que proposait Lorentz lui-même dans ses travaux pionniers, la mesure des distances et des temps n'a plus été considérée comme simple opération de *révélation* de propriétés quantitatives qui varient intrinsèquement (se contractant ou se dilatant) selon le mouvement des objets par rapport à l'Ether. Au lieu de cela, on s'est mis à coordonner systématiquement les résultats de la mesure des distances et des temps sous le présupposé de la constance de la vitesse de la lumière, d'une définition de la simultanéité, d'un élargissement du principe de relativité, et du groupe de Lorentz qui en découle. Cette coordination a alors conduit à *définir* de nouvelles déterminations objectives (c'est-à-dire invariantes par changement de référentiel), comme l'*intervalle d'espace-temps*. Un cadre de coordination refondu a ainsi délimité un champ d'objectivité inédit. On peut bien parler dans ces conditions, martèle Reichenbach, d'un « (...) changement de *concept d'objet* que le changement de principes de coordination a imposé à travers la théorie de la relativité (restreinte) »²⁸.

Dans cette version de *l'a priori* relativisé, il y a clairement davantage que dans la méthode hypothético-déductive, puisque les principes de coordination sont soigneusement séparés des principes de connexion, au lieu d'être mêlés avec eux dans l'ensemble indistinct des « hypothèses ». En dépit de cette différence, cependant, l'idée que les principes de coordination sont privés de toute nécessité a été considérée par Reichenbach à partir de la fin des années 1920 comme

²⁶ *ibid.* p. 53, 56

²⁷ M. Friedman, *Reconsidering logical positivism*, Cambridge University Press, 1999, p. 62

²⁸ *ibid.* p. 95

une bonne raison d'abandonner toute référence à l'épistémologie transcendantale et d'en revenir à l'empirisme.

Examinons donc de près pour quelle raison Reichenbach a décidé d'abandonner toute clause de nécessité dans sa conception de *l'a priori* relativisé, et demandons-nous si cela était vraiment inévitable. Sa motivation principale était bien sûr que si *l'a priori* doit être historicisé, on ne peut pas le considérer comme un ensemble de principes « valide pour tous temps ». Reichenbach ayant identifié « nécessaire » et « valide pour tous temps », il était évident pour lui que des principes constitutifs qui connaissent une dérive historique ne sauraient être nécessaires. Mais, sauf dans l'ancien paradigme grec de Diodore Kronos, il n'y a aucune obligation à identifier ainsi « nécessaire » et « valide pour tous temps ». Des définitions différentes, moins contraignante, de la nécessité sont disponibles, et elles peuvent être utilisées dans le contexte d'une épistémologie transcendantale actualisée. La principale d'entre elles est celle de nécessité *conditionnelle* : certains principes constitutifs sont ici considérés comme nécessaires *sous la condition* qu'une certaine pratique de recherche soit effectivement pratiquée. Ils sont nécessaires *pour* donner un cadre directif à cette pratique de recherche. Mais les pratiques peuvent évoluer, et un nouveau réseau de présuppositions peut dès lors devenir conditionnellement nécessaire. Aussi surprenant que cela puisse paraître, un ensemble de principes constitutifs peut de cette manière être à la fois nécessaire et provisoire.

Si nous acceptons cela, la procédure de justification transcendantale est à nouveau activable, même si ce n'est plus exactement dans le même sens que Kant. Une justification transcendantale ne serait plus désormais une régression à partir du fait de la connaissance objective vers certains concepts et principes tenus pour des « conditions *a priori* de la possibilité de *n'importe quelle* expérience » ; elle serait seulement une régression à partir d'un projet historique donné de connaissance intersubjective, vers un ensemble de préconditions nécessaires *sous condition* que ce projet particulier soit mené à bien.

Il n'est pas très difficile de justifier transcendantalement dans ce sens une partie importante du formalisme des théories quantiques. On peut par exemple dériver une partie notable de la structure de ces théories à partir de principes de limitation de l'information expérimentale disponible²⁹ ; ou bien à partir de clauses de

²⁹ A Grinbaum, *The Significance of Information in Quantum Theory*, Thèse de l'école Polytechnique, 2004

contextualité des phénomènes³⁰. Cette possibilité est hautement signifiante pour l'interprétation des théories quantiques. Elle veut dire qu'on n'est plus obligé de comprendre ces théories comme représentations du monde, avec toutes les étrangetés et les paradoxes associées à de telles représentations. Au lieu de cela, les théories quantiques peuvent être naturellement comprises comme expressions des contraintes et des limites de la connaissance expérimentale. L'esprit, si ce n'est la lettre, de Kant, est ainsi pleinement respecté.

Interrogeons-nous à présent sur l'intérêt de faire référence à la procédure typiquement kantienne de « constitution d'objectivité ». Dans la vie de tous les jours, ainsi qu'en physique classique, se souvenir que les objets sont « constitués » peut paraître superflu. Car si une telle constitution a lieu, les bases en ont été posées dans les débuts ontogéniques de l'individu voire dans le lointain passé phylogénique du genre humain. Les conditions de la constitution d'objectivité ont été disponibles en permanence depuis lors, et elles n'ont pas eu à être remises en question. Par suite, dans la situation actuelle de la connaissance, tout se passe comme si les corps matériels de la vie courante et de la physique classique étaient *donnés* dans le monde extérieur.

Mais en microphysique, il n'en va pas du tout ainsi. Les conditions élémentaires de la constitution d'objets dans l'espace-temps ne sont plus disponibles en général³¹, et cela nous force à repenser de fond en comble la constitution de types d'objets nouveaux.

Pour avancer dans cette direction, il est utile de commencer par rappeler ce qui a motivé la conception kantienne selon laquelle les objets de perception et les objets de science sont constitués. Kant désirait trouver une voie moyenne entre le dogmatisme et l'empirisme sceptique, entre la croyance que les objets sont des entités réelles indépendantes de nous et la conviction qu'ils sont de simples projections imaginatives d'un esprit humain en mal de stabilité parce que privé de la connaissance détaillée d'un apparaître indéfiniment mouvant. Un objet constitué ne s'identifie ni à un objet intrinsèquement existant ni à une fantasmagorie de l'imagination.

³⁰ M. Bitbol, *Mécanique quantique, une introduction philosophique*, Flammarion, 1996 ; M. Bitbol, «Jean-Louis Destouches: individualité et théories de la prévision», *Philosophia scientiae*, 5, 1-30, 2001

³¹ M. Bitbol, «Le corps matériel et l'objet de la physique quantique», in: F. Monnoyeur (ed.), *Qu'est-ce que la matière?* Le livre de Poche, 2000

Mais qu'est-il donc exactement ? Lisons l'un des énoncés les plus clairs de Kant à ce sujet : « (Des représentations) se trouvent désignées comme des *objets* en tant qu'elles sont (...) reliées et déterminables d'après des lois réglant l'unité de l'expérience »³². Ici, rien d'autre n'est demandé que des (re)présentations, c'est-à-dire des éléments de l'apparaître. Mais des apparitions incluses dans un cadre structural avancé par notre entendement : celui des lois de l'unité de l'expérience. Ce cadre structural *doit* être présupposé afin d'organiser les présentations en complexes rendus indépendants de n'importe quelle situation particulière ou de n'importe quel état subjectif. En d'autres termes, le cadre structural de notre entendement nous fournit les invariants dont nous avons besoin pour élaborer une connaissance à vocation universelle. Une telle définition des objets constitués ne requiert aucune référence à l'extériorité, sauf dans le sens faible d'une extériorité spatiale ; aucune référence à la réalité non plus, sauf dans le sens faible de « réalité empirique » (un sens qui a été réactualisé par Putnam sous le nom de « réalisme interne »). Les objets ne sont aucunement conçus comme parties d'une réalité « extérieure » dans le sens fort, plus que spatial, de l'expression ; et pourtant ces objets sont aussi indépendants des sujets particuliers qu'on peut le désirer.

Le point crucial est que l'objectivité ne signifie plus un détachement complet des entités et propriétés à l'égard de l'appareil cognitif, mais la coordination des phénomènes en plusieurs niveaux de structures demeurant invariantes à travers les changements de circonstances subjectives et/ou instrumentales. Le fait que les types habituels d'invariants spatio-temporels (ou corpuscules matériels) ne soient plus disponibles en physique microscopique ne doit pas nous empêcher de tenter une autre sorte de coordination. Cette quête de constitution d'objectivité peut être menée à bien en deux étapes. D'abord en revoyant la mécanique classique dans cet esprit, et en analysant la manière dont les objets ont effectivement été définis dans cette théorie, au-delà de l'affirmation superficielle qu'ils nous ont été simplement *donnés*. Puis étendre ce mode de définition à la microphysique, avec les altérations appropriées.

Lorsqu'on analyse de cette manière le statut des objets en mécanique classique, on trouve qu'ils ne sont rien d'autre que le treillis booléen des propositions expérimentales incluses dans le diagramme de covariance du groupe de Galilée³³. Ils ne jouent aucun autre rôle que celui d'invariants de ce groupe qui opère dans un

³² I. Kant, *Critique de la raison pure*, GF-Flammarion, 2001, B 522

³³ E. Castellani, *Interpreting bodies*, Princeton University Press, 1998, pp. 170, 184

ensemble de phénomènes. Tout énoncé additionnel qualifiant un objet classique de « substrat » se tenant « sous » des propriétés serait seulement un ornement métaphysique sans aucune pertinence pour le mode de fonctionnement de la mécanique classique.

Comment peut-on alors transposer cette procédure à la physique quantique ? P. Mittelstaedt, inspiré par une approche due à Schrödinger, a fait une intéressante suggestion à ce propos dans son livre *Philosophical problems of modern physics*³⁴. Il a d'abord remarqué que, étant donné un certain « état » Ψ , seules des observables qui *commutent* peuvent être tenues pour objectives, en ce sens que leurs valeurs sont invariantes par changement de la séquence de mesures qui donne accès à la totalité de leurs valeurs. Il a ensuite souligné que, si quelque chose doit jouer le rôle que Kant attribue à une « substance », ce quelque chose ne peut être que l'« état » Ψ lui-même, parce que (a) l'« état » Ψ synthétise en lui une capacité à prédire les valeurs d'un ensemble complet d'observables qui commutent (ce qui en fait l'analogue opérationnel d'un « support »), et (b) l'« état » Ψ peut être considéré comme *permanent*, puisque réidentifiable continûment par sa trajectoire dans l'espace de Hilbert, conformément à l'exigence de la première analogie de l'expérience de Kant. Mittelstaedt a ajouté à juste titre que, par contraste, les entités putatives qui pourraient être conçues comme porteuses des mêmes déterminations spatiales et cinématiques non-commutatives que les corps matériels classiques, à savoir les « particules », ne peuvent être considérées que comme des objets *fictifs*³⁵. Ceci est une invitation très claire à se dispenser complètement des anciens objets qualifiés de corps matériels, et d'adopter un genre complètement différent d'objet en leur lieu et place. Nous n'avons aucun besoin d'objets fictifs qui sont tout au plus aptes à engendrer des paradoxes ; nous devrions préférer faire signe vers des objets répondant en tous points aux critères de l'objectivation.

Malgré cela, pourtant, presque personne ne franchit l'étape consistant à remplacer le domaine traditionnel d'objectivité de forme corporelle et de localisation dans l'espace ordinaire par un nouveau domaine d'objectivité localisé dans l'espace de Hilbert. Au maximum, comme nous l'avons vu plus haut, on restreint l'« état » Ψ au rôle de *finalité* régulatrice pour des séquence aléatoires d'événements expérimentaux, tout en continuant à assigner aux corpuscules

³⁴ P. Mittelstaedt, *Philosophical problems of modern physics*, Reidel, 1976

³⁵ *ibid.* p. 129-130

microscopiques un certain statut de fédérateurs *symboliques* des déterminations antérieurement portées par des objets classiques.

Pourquoi en va-t-il ainsi ? Cela pourrait bien être dû à un surmoi réaliste toujours dominant en épistémologie, mais parfois irrationnel dans son conservatisme. Les philosophes réalistes des sciences, même lorsqu'ils sont influencés par certaines composantes de la philosophie de Kant, ne se contentent pas de structures invariantes ; ils cherchent à désigner des « éléments de réalité (extérieure) ». Or, le problème avec les « états » Ψ est que, tout en fonctionnant comme autant d'invariants abstraits (par des transformations de Dirac) à travers l'ensemble des observables, ils sont des candidats peu convaincants au titre d'« éléments de réalité ». En effet, ils apparaissent comme rien d'autre que des générateurs de probabilités. N'étant que des générateurs de probabilités, ils ne se connectent qu'indirectement, à travers l'algorithme de Born, aux valeurs d'observables, alors que les corps matériels de la tradition sont supposés *porter* directement ces valeurs en tant que *propriétés*. Mais bien entendu, à rebours des réalistes, des kantien de tendance constructiviste se soucient fort peu que les invariants représentent fidèlement ou non la réalité « indépendante » (ce qui est de toutes manières indécidable). Tout ce qu'ils demandent est que ces invariants soient complètement affranchis de traits paradoxaux, qu'ils soient aussi généraux que nécessaire, qu'ils soient aptes à unifier le plus grand domaine de la connaissance, et qu'ils soient propres à orienter sur ce mode unifié les meilleures anticipations disponibles. Cela leur permet de rester en permanence ouverts aux mutations des formalismes de la physique, en acceptant de leur associer des représentations aussi audacieuses qu'on peut le rêver parce que aussi peu prises au pied de la lettre ontologique que possible.