Physique et Réalité, (M. Bitbol, S. Laugier, eds.), Paris, Diderot Editeur, 1997, 201-236.

Journée d'étude sur la philosophie de Bernard d'Espagnat
IHPST, 19-20 janvier 1996

OBJECTIVITÉ FAIBLE ET PHILOSOPHIE TRANSCENDANTALE

Jean Petitot
EHESS, 54 bd Raspail, 75 006 Paris
petitot@poly.polytechnique.fr

I. INTRODUCTION

1. Je remercie beaucoup Michel Bitbol de son invitation et j'aimerais dire avant toute chose à quel point je suis honoré et ému de participer à cet hommage à Bernard d'Espagnat. A ma sortie de Polytechnique, avant que je n'intègre le Centre de Mathématiques de l'École, Bernard d'Espagnat a été mon premier guide dans la recherche et j'ai toujours gardé un souvenir extrêmement vif de ses conseils.

2. Je me propose ici d'expliquer brièvement pourquoi je me trouve en plein accord avec les principales thèses philosophiques du *Réel voilé*, avec l'affirmation que la physique moderne offre une remarquable leçon de philosophie (cf. par exemple p. 429) [1] et avec le fait que les thèses philosophiques n'ont plus à être débattues spéculativement mais argumentées à partir de résultats scientifiques. Effectivement, la physique (et aussi les sciences cognitives et les neurosciences) commencent à rendre l'épistémologie *décidable*.

J'expliquerai toutefois cet accord à partir de mon orientation philosophique propre qui est de nature transcendantaliste. Cela pourra paraître étrange puisque Bernard d'Espagnat a expliqué en détail pourquoi le kantisme lui paraissait erroné ou, à tout le moins, radicalement insuffisant. Je dois donc lever d'emblée cette ambiguïté.

J'adopte une lecture "charitable" des grands philosophes. Ce qui m'intéresse en eux n'est pas tant la lettre de leur texte que l'opérativité de leur pensée relativement à des problèmes fondamentaux. Je les lis comme des savants et j'estime que les enfermer dans la prison exégétique de leur œuvre pour en faire ce que Husserl appelait "des poètes du concept", c'est les condamner à mort. C'est dire que pour moi Kant est un fondateur et

---

[1] Les références au *Réel voilé* seront faites dans le texte.

un initiateur, celui de l'orientation transcendantale en philosophie, comme l'étaient pour d'autres orientations Euclide, Descartes, Hume ou Leibniz, etc. On admet bien que les formalistes puissent se réclamer du point de vue axiomatique d'Euclide ou les phénoménologues de celui de Descartes, ou les empiristes contemporains de celui de Hume sans être pour autant victimes d'une nostalgie archaïsante. Pourquoi n'en irait-il pas de même pour Kant et le transcendantalisme qui sont incommensurablement plus proches des sciences modernes? Bref, il n'y a pour moi aucune obstruction de principe à une actualité du transcendantalisme et cela malgré la guerre incessante que lui ont fait les logicistes et positivistes soucieux de rétablir le dogmatisme logique dans ses droits scolastiques pré-critiques.

3. Ceci dit, il est évident que la possibilité d'une approche transcendantaliste de la physique moderne exige un remaniement profond de Kant et passe en particulier par la disjonction de deux dimensions qui se trouvent chez lui mal distinguées: d'une part la dimension *constitutive* (doctrine de la constitution des objectivités) et d'autre part la dimension *cognitive* (le fait que c'est une conscience qui est constituante).

Kant a découvert la problématique de la constitution, à savoir qu'il existe des principes *prescriptifs* (et non pas descriptifs) de la réalité physique. Comme l'affirmait Hans Reichenbach, il s'agit là d'un "résultat philosophique éminent". Mais, chez Kant, le constitutif reste fondé sur une base cognitive (théorie représentationaliste, doctrine des facultés, etc.). Comme le soulignait Schlick, chez Kant les principes constitutifs sont caractéristiques de notre conscience représentationnelle. D'où le *subjectivisme* transcendantal.

Bernard d'Espagnat rabat clairement Kant sur son versant cognitif-mentaliste (innéisme psychologique des a priori). Ses affirmations sont précises sur ce point. Il explique par exemple (p. 17) que Kant est un idéaliste (modéré il est vrai, car il y a la chose en soi) pour qui le fait que l'espace, le temps, la causalité soient des formes a priori de la sensibilité et de l'entendement et n'ayant pas à être induits de l'expérience, implique (p. 23) que les phénomènes soient mentaux (p. 27). L'idéalisme transcendantal s'identifierait ainsi à un idéalisme non critique, à un idéalisme subjectif (un solipsisme) malgré le fait qu'il existe dans la *Critique de la Raison pure* (CRP) une réfutation explicite de ce type d'idéalisme.[2]

---

[2] Cf. dans la CRP la section "Réfutation de l'idéalisme" du Chapitre II de l'*Analytique des Principes*. Kant y réfute les deux formes principales d'idéalisme "matériel" que sont l'idéalisme problématique rationnel de Descartes et l'idéalisme dogmatique de Berkeley. Quant au second, pour qui l'espace est à la fois une propriété de la chose en soi et une propriété impossible, il est réfuté par l'Esthétique transcendantale. Quant au premier, pour qui l'existence d'un monde extérieur est indémontrable, il est

Pour ma part, je lis Kant de façon différente en mettant au premier plan la problématique de la constitution et au second plan celui des structures (innées ou non) de la conscience constituante. Certes l'espace et le temps comme formes des phénomènes sont "mentaux" au sens où notre appareil perceptif est un appareil de mesure du signal optique (et même un extraordinaire appareil de mesure). Mais leur fonction est très particulière. Elle est de formatter les informations (ce que Kant appelait le divers pur de la sensation). A ce titre, ce sont des formes complètement "désubjectivisées".[3] Il en va de même en Mécanique quantique où ce n'est pas parce que les phénomènes n'existent que mesurés par des appareils que la réalité physique se réduit pour autant à un "solipsisme" d'appareil.

L'approche constitutive me paraît donc être exemplairement juste pour la mécanique classique et parfaitement prolongeable à la physique moderne, à condition bien sûr de la recentrer sur le problème *des conditions de possibilité* de l'expérience et de la connaissance scientifique, c'est-à-dire sur celui de *l'auto-limitation* de la connaissance objective relativement à toute ontologie et, par conséquent, sur son incompatibilité avec une logique naturelle de choses en soi substantielles, individuées et indépendantes possédant des propriétés. Comment ne pas se convaincre à la lecture du *Réel voilé* et d'autres ouvrages sur les fondements de la physique moderne comme ceux de Baas Van Fraassen, Roland Omnès ou Michel Bitbol que c'est exactement cette problématique qui y est centrale.

Je vais donc essayer de montrer que dans son débat serré avec Kant Bernard d'Espagnat se révèle être au fond assez transcendantaliste (dans le sens élargi que je viens d'expliciter) même s'il remet à juste titre en cause un certain nombre de limites du texte kantien à partir de leur réinterprétation psychologique.

4. L'interprétation psychologique du transcendantal va d'ailleurs de pair chez Bernard d'Espagnat avec une évaluation philosophique particulière de la physique classique.

Bernard d'Espagnat affirme souvent (par exemple p. 330) que les théories à objectivité forte comme la mécanique classique ou la relativité einsteinienne sont interprétables de façon *réaliste*, c.a.d. en termes ontologiques, comme décrivant une réalité indépendante.

---

réfuté par la preuve que, dans l'évidence cartésienne, "l'expérience *interne* elle-même n'est possible que sous la supposition de l'expérience *externe*" (B 275).

[3] D'ailleurs les travaux de neurosciences montrent à quel point la représentation neuronale de l'espace est compliquée et n'a rien à voir avec la géométrie. Elle repose sans doute sur des phénomènes de synchronisation d'oscillateurs neuraux. Cf. Petitot [1994a].

Je ne suis pas tout à fait d'accord avec ce point de vue. En effet, il ne fait pas justice à la révolution scientifique qu'a été la mécanique rationnelle classique entre Galilée et Newton. Il n'y a pas à revenir ici sur la coupure épistémologique des sciences galiléennes. Mais il faut rappeler que l'objectivité physique de la mécanique rationnelle, loin d'être ontologiquement interprétable, représente au contraire *la rupture fondatrice* avec l'ontologie traditionnelle d'une réalité substantielle indépendante. Le fait que la mécanique décrive une réalité spatio-temporelle

(i) subordonnée de façon déterminante à un principe de relativité et

(ii) réductible à des mouvements d'entités dont les propriétés matérielles se réduisent à la masse

disjoint irrémédiablement son objectivité de toute ontologie. De même, et pour des raisons analogues, le réalisme physicaliste d'Einstein ne peut pas être l'ontologie d'une réalité indépendante. Certes cette réalité est indépendante au sens où les mesures n'interfèrent pas avec les phénomènes. Mais elle n'est pas indépendante de leur formatage spatio-temporel.[4] Or une réalité ontologiquement indépendante ne peut pas être spatio-temporelle.

Il me semble donc qu'il faut introduire trois termes au lieu de deux: l'ontologie d'une réalité indépendante (métaphysique), l'objectivité forte de la physique spatio-temporelle (de Newton à Einstein), l'objectivité faible de la Mécanique quantique. L'objectivité faible quantique est actuellement à l'objectivité forte ce que celle-ci était autrefois à l'ontologie. Autrement dit, l'objectivité dite "forte" relativement à la Mécanique quantique est *faible* relativement à l'ontologie. La philosophie transcendantale étant par excellence la philosophie de l'objectivité non ontologique il est naturel d'essayer de la prolonger à la Mécanique quantique et d'en répéter le geste critique bien au-delà de la lettre du texte kantien pour clarifier les problèmes gnoséologiques que pose celle-ci quant au statut de la vérité et de la réalité .[5]

---

[4] D'ailleurs les neurosciences cognitives et les modèles physico-mathématiques de la perception montrent à quel point le système visuel est un remarquable appareil de mesure (cf. plus haut): les photorécepteurs sont des capteurs de photons qui transforment le flux du signal optique en clics neuronaux (spikes) dont l'organisation rétinotopique et la cohérence temporelle permettent de reconstruire l'espace et les objets tridimensionnels dans l'espace. Depuis une dizaine d'années il y a une explosion de travaux concernant la physique et la géométrie différentielle de la vision (ondelettes, équations de diffusion anisotropes non linéaires dans un espace-échelle). Ils permettent de géométriser et de physicaliser la phénoménologie de la perception (pour une introduction cf. Petitot [1994a]).

[5] Bien entendu, la physique n'a pas besoin de philosophie. Mais *si* l'on pose à son propos des problèmes ayant trait au conflit entre objectivité et ontologie, alors la philosophie transcendantale est par excellence, presque par définition, un bon outil.

II. QUELQUES PROBLÈMES TRANSCENDANTAUX DU RÉEL VOILÉ

Voici quelques points philosophiques du *Réel voilé* qui me paraîssent être de nature typiquement transcendantale.

1. La disjonction être/phénomène (différence ontologique)

Bernard d'Espagnat insiste depuis longtemps, par exemple dans *Une incertaine réalité*, sur la différence être/phénomène:

> "c'est la science elle-même qui (...) fournit aujourd'hui au penseur de pressantes raisons d'accepter la dualité (philosophique) de l'être et du phénomène".[6]

Le concept ontologique de réalité substantielle indépendante n'est pas un concept *physiquement* admissible.

Les contradictions de l'élémentarité renvoient à la difficulté fondamentale qu'il y a à atteindre l'objectivité scientifique malgré le caractère insécable de l'interaction entre l'objet et l'appareil de mesure. Pour le résoudre, les physiciens ont dû repenser les concepts basiques de phénomène, d'observation, de système, d'état, d'objet, de causalité, etc. et *restreindre* leur application aux phénomènes.

On reconnaîtra là l'amorce du point de vue transcendantal. C'est presque mot à mot du Kant. On admet l'hypothèse qu'il peut y avoir une réalité ontologique "en-soi" sous-jacente aux phénomènes. Celle-ci reste toutefois inobservable. Elle ne saurait par conséquent être *objet* d'une connaissance physique. Les théories physiques portent et ne peuvent porter que sur les manifestations de cette réalité, c'est-à-dire sur des *observables* micro-physiques. Le concept de phénomène reste donc ici défini, comme il se doit, par l'équivalent d'une *réceptivité*. Mais la réceptivité n'est plus notre réceptivité sensorielle adaptée aux phénomènes macro-physiques. Elle s'identifie à l'ensemble des appareils d'observation. Pour paraphraser Bachelard qui parlait de "cogito d'appareil" à propos de la physique moderne, on pourrait dire que c'est une "réceptivité d'appareil". Son effet est inéliminable. De même que l'espace et le temps, il produit un "voilement" de l'être par le phénomène. Et l'impératif de la réduction aux observables est la traduction de l'impératif transcendantal de réduction au phénomène. Il faut insister ici sur le fait que, même découplé de toute ontologie sous-jacente, un phénomène n'est pourtant pas une apparence. Il est *donné* et il existe une différence fondamentale entre le donné (*gegeben*) et le pensé (*gedacht*). Il y a des *formes* de la donation phénoménale qui jouent un rôle constitutif dans l'objectivité (problématique kantienne de l'Esthétique transcendantale).

---

[6] d'Espagnat [1985], p.VII.

La question se pose alors immédiatement : comment rejoindre l'objectivité? Pour y répondre, les physiciens ont retrouvé spontanément la thèse transcendantale: *il existe une légalité propre des phénomènes observables en tant que tels*. Il n'y a pas à chercher une explication objective aux phénomènes à partir d'une inaccessible réalité ontologique sous-jacente. On doit définir l'objectivité comme un ordre de légalité. Ainsi prescriptivement définie comme légalité, l'objectivité se distingue de toute ontologie.

Les phénomènes ne sont insérables dans des dispositifs expérimentaux et théoriques que s'ils sont au préalable *qualifiés comme objets*. En plus de l'ordre *descriptif*, toute connaissance présuppose donc dans son principe un ordre *prescriptif* normatif (juridique) de légalité objective. Il existe par conséquent non seulement une différence "ontologique" entre être et phénomène, mais également une différence "objective" entre phénomène et objet d'expérience. Contrairement aux phénomènes, l'objet n'existe que qualifié conformément à des *normes*, à des *règles* éidético-constitutives définissant ce que Husserl appelait une essence objective régionale. Le concept normatif d'objet est présupposé à titre de condition de possibilité par toute activité scientifique. Il *anticipe* et *pré*détermine prescriptivement ce qui appartient en général et typiquement aux phénomènes de la région considérée. Corrélat de l'expérience, il possède une nature, disons, procédurale.

L'erreur récurrente des réalismes ontologiques est de confondre la dimension prescriptive de l'objet avec une dimension ontologique sous-jacente, dimension descriptive supplémentaire qui existerait en soi "derrière" les phénomènes et serait tout à la fois expérimentalement inaccessible, théoriquement inconnaissable et malgré tout causalement efficace.[7]

Comment peut s'opèrer la légalisation? L'idée directrice est au fond assez simple. Elle consiste essentiellement *à interpréter les catégories de l'objectivité à partir des instances de donation des phénomènes*, c.a.d. à partir des formes de la manifestation. Comme l'interprétation n'est opératoire que si elle est *mathématique*, il faut que ces formes soient elles-mêmes mathématisées. Dans toute objectivité au sens transcendantal (ce que Kant appelait les sciences "proprement dites") opère donc *une herméneutique mathématique des catégories objectivantes* qui élimine leur *sens* (leur usage métaphysique) et repose sur la mathématisation des instances de la donation phénoménale: elle est la forme *mathématique* de l'impératif de restriction des catégories aux observables (ce que Kant appelait la "Déduction transcendantale" c.a.d. la justification de la restriction de l'application des catégories aux phénomènes). On retrouve ainsi l'idée, chère au Cercle de Vienne, d'un a priorisme grammatical conformément

---

[7] Dans le domaine des mathématiques pures on rencontre le même type d'erreur récurrente avec les platonismes naïfs qui oublient que les mathématiques sont aussi prescriptives et postulent qu'elles ne sont que purement descriptives.

auquel les mathématiques constituent une syntaxe pour la légalisation des objets. Mais ici ce sont les mathématiques permettant de mathématiser les formes de la manifestation qui déterminent le type de syntaxe approprié.

Chez Kant, la problématique des formes de donation et de leur mathématisation correspond à l'Esthétique transcendantale.[8] Quant à l'interprétation des catégories elle s'effectue à un double niveau: d'abord leur "schématisation" puis, à un niveau beaucoup plus profond, leur "construction" mathématique. En général la construction mathématique transforme de façon radicale *le sens* des catégories (cf. plus bas section III). D'où une disjonction caractéristique entre connaissance scientifique et sens commun.

Pour légaliser les phénomènes, il faut donc disposer d'une instance objectivante très précise mais de nature apparemment paradoxale. Elle doit en effet permettre de tenir compte du voilement de l'être par le phénomène, mais aussi, dans le même temps, de "désubjectiviser" le concept de phénomène. Elle doit rompre à la fois avec l'ontologie et avec la psychologie. Ce problème fondamental a été résolu en mécanique classique au moyen du concept d'espace/temps.[9] Il l'a été en micro-physique quantique au moyen du concept *d'amplitude de probabilité*. Ce dernier permet en effet de tenir compte de l'insécabilité objet/instrument de mesure, sans pour autant faire intervenir telle ou telle théorie particulière de tel ou tel instrument de mesure particulier. C'est à partir de cette instance déterminante qu'il a fallu réinterpréter les catégories de l'objectivité et, en particulier, les catégories "dynamiques" de substance, de causalité et d'interaction.

Le rôle *transcendantal* des amplitudes de probabilité en Mécanique quantique est donc selon moi analogue à celui que joue l'espace-temps en Mécanique classique. Quitte à choquer certains d'entre vous, j'affirmerai donc que la fonction déterminante de cette instance est l'équivalent, pour l'objectivité quantique, de ce qui, pour l'objectivité classique, est représenté par l'Esthétique transcendantale.

Rappelons que les quatre propriétés caractéristiques des amplitudes de probabilité (*AP*) sont les suivantes ($|i\rangle$ = état initial, $|f\rangle$ = état final) :

1) S'il existe k voies de transition indiscernables, il y a additivité des *AP* de chacune des voies: $\langle f|i\rangle = \sum_k \langle f|i\rangle_k$.

2) S'il existe plusieurs états finaux $|f_k\rangle$ discernables, il y a addditivité des probabilités: $|\langle f|i\rangle|^2 = \sum_k |\langle f_k|i\rangle|^2$.

---

[8] C'est là qu'intervient l'a priori de la structure euclidienne de l'espace. Il peut parfaitement être remis en cause à l'intérieur même de la perspective transcendantale si l'on ne fait pas du transcendantalisme un innéisme cognitif.

[9] Je note ici espace/temps (pour le distinguer de l'espace-temps relativiste) le couple espace et temps de la mécanique classique.

3) Si la transition se fait à travers un état intermédiaire e, il y a factorisation des AP: $\langle f|i\rangle = \langle f|e\rangle\langle e|i\rangle$.

4) S'il y a plusieurs systèmes indépendants, alors il y a aussi factorisation des AP: $\langle f_1 f_2|i_1 i_2\rangle = \langle f_1|i_1\rangle\langle f_2|i_2\rangle$.

Ces axiomes sont à la mécanique quantique ce que sont ceux de la géométrie à la mécanique classique. Si l'on interprète les voies comme des trajectoires classiques, ils conduisent immédiatement aux intégrales de chemin de Feynman. La mécanique quantique s'élabore sur cette base comme la mécanique classique s'élabore sur la base de la géométrie de l'espace/temps.

De façon générale, la fonction d'une Esthétique transcendantale dans une stratégie de constitution est caractérisée par quatre exigences :

(i) déterminer des formes de la manifestation qui permettent de mettre entre parenthèses le contenu "subjectif" du concept, par définition *relationnel* (au sens d'une relation sujet-monde), de phénomène;

(ii) manifester une relativité violant les principes de toute ontologie substantialiste;

(iii) fournir une base mathématique pour la construction des catégories dynamiques (physiques) de substance, de causalité et d'interaction;

(iv) conduire à une interprétation non plus absolue (métaphysique) mais seulement relative (physique) des catégories *modales* de possibilité (potentialité, virtualité), de réalité (actualité) et de nécessité.

Ce dernier point est épistémologiquement crucial. Ce sont en effet les catégories modales qui font en général le plus question et la plupart des problèmes philosophiques posés par le réalisme proviennent d'une méconnaissance du caractère modal de la catégorie de réalité. Celui-ci se manifeste entre autres (cf. section III) par le fait que certaines "propriétés" objectives ne résistent pas à la contrafactualité et peuvent, sans contradiction logique, être à la fois affirmées et niées (i.e. ne peuvent pas être possédées par des objets substantiels individués au sens "ontologique" des verbes "posséder" ou "avoir").

En mécanique quantique, les amplitudes de probabilité expriment des potentialités qui sont actualisées par des opérations de mesure. Ce statut relationnel (souvent souligné par Bohr) du concept d'état quantique ainsi que son interprétation en termes d'une extension du concept de relativité, ont été fort bien formulés par Vladimir Fock.

> "The probabilities expressed by the wave function are the probabilities of some result of the interaction of the micro-object and the instrument (of some reading on the instrument). The wave function itself can be interpreted as the reflection of the potential possibilities of such an interaction of the micro-object (prepared in a definite way) with various types of instruments. A quantum mechanical description of an object by means of a wave function corresponds to the relativity requirement

> with respect to the means of observation. This extend the concept of relativity with respect to the reference system familiar in classical physics." [10]

En micro-physique quantique, l'Esthétique transcendantale a donc muté de nature. Elle n'est plus esthésique mais instrumentale (et d'ailleurs, répétons-le, la perception aussi est une mesure). Sa place reste toutefois tenue et de nombreuses difficultés épistémologiques de la première mécanique quantique venaient précisément de la difficulté qu'il y avait à reconnaître le caractère *strictement objectif*, c.a.d. ni ontologique, ni subjectif, ni classiquement statistique, de l'indéterminisme lié au concept d'amplitude de probabilité. On peut relire ces débats et se convaincre que *le problème est l'exact analogue pour la micro-physique de celui de l'ambivalence du réalisme empirique et de l'idéalité transcendantale de l'espace en mécanique classique*.

Bref, la relation entre phénomène et réalité n'est pas binaire. Elle est ternaire: en plus du phénomène observable, et de la réalité indépendante inconnaissable qui en est le fondement, elle implique le concept d'objet en tant que concept légal et normatif. L'objet n'est pas donné dans la donation du phénomène. Il est la position objectale des actes de légalisation des phénomènes. Il est prescriptif. Il est le corrélat des conditions de possibilité de l'expérience. Cette thèse transcendantaliste typique a également été retrouvée par les physiciens. On pourra lire de fort belles pages de Gilles Cohen-Tanoudji sur le fait que "la physique ne produit pas des choses" (pas de valeur représentative), que "l'objet réel de la physique est le concept même de physique" (objet normatif régional corrélatif des actes objectivants) ou que "l'essence du physique" est la "rationalité expérimentale" (le concept d'expérience comme méta-référent).[11]

2. La nécessité de dépasser l'antinomie dialectique entre le réalisme ontologique (physicalisme) et le phénoménisme mentaliste

Bernard d'Espagnat a souvent insisté sur cet impératif. Il faut dépasser le conflit dialectique opposant un réalisme ontologique physicaliste (la science parle de la réalité indépendante) à un idéalisme phénoméniste mentaliste (la science n'est qu'une construction sémiotique sans contenu objectif). De nombreux passages du *Réel voilé* y reviennent.

Le réalisme n'est pas tenable parce qu'il est invalidé scientifiquement (p.9). Par exemple (p. 31, à propos de Schrödinger), le réaliste doit postuler l'action causale d'un réel inobservable sur le mental. Or, on ne peut pas appliquer la catégorie de cause à un tel réel.

---

10 Cité par Max Jammer (1974], p. 202.

11 Cohen-Tannoudji, Spiro [1986].

L'idéalisme subjectif (très différent de l'idéalisme transcendantal qui est un réalisme empirique) n'est pas non plus tenable car il fait de la réalité une réalité mentale. Or, il existe un quelque chose qui "résiste", qui "dit non" et permet de réfuter les théories (p. 376). (Mais on pourrait dire que ce qui résiste ce sont les données empiriques qui, en tant que telles, ne possèdent pas le statut d'objet).

Le concept d'objectivité *faible* en épistémologie quantique "démontre" en quelque sorte le bien fondé du concept transcendantal d'objectivité: des composantes épistémiques (les conditions théoriques et expérimentales d'observabilité) sont, comme le disait Bohr, un "élément intrinsèque" — i.e. *constitutif* — "de tout phénomène auquel l'expression "réalité physique" peut s'appliquer".[12]

Bref, on peut dire que, dans la microphysique quantique, *l'épistémologie transcendantale devient en quelque sorte physiquement démontrable*. Ce point a été fort bien vu par certains philosophes des sciences et, en particulier, par C.F. von Weizsäcker.[13]

3. La différence irréductible entre objectivité forte/faible

Nous venons de voir que de nombreuses thèses du *Réel voilé* confirment le bien fondé d'une interprétation transcendantaliste post-kantienne de la Mécanique quantique. En résumé, on peut dire qu'elles concernent essentiellement:

(i) la réduction aux observables et aux résultats de mesure (pp. 34, 348);

(ii) les difficultés d'un réalisme conventionnel;

(iii) la nécessité de distinguer entre réalité indépendante sous-jacente et réalité empirique observable et effective (p. 418) et de se restreindre à cette réalité empirique (i.e. à l'expérience) qui peut être considérée comme locale et séparable;

(iv) le fait que dans l'interprétation de Copenhague, la Mécanique quantique est de type phénoméniste (réalité = ensemble des phénomènes) et qu'il existe chez Bohr une incompatibilité entre complémentarité et réalisme (p. 26).

4. Le problème dialectique de la non séparabilité et la seconde antinomie

La non séparabilité s'oppose au principe de "divisibilité par la pensée" et à l'image "atomiste" (p. 337). Transcendantalement parlant, il s'agit là d'un problème "dialectique" donnant une actualité remarquable à la seconde antinomie de l'Antithétique de la raison pure: quel est le lien entre la divisibilité de l'espace et la compositionalité atomiste de ce qui est matériellement situé dans l'espace (i.e. la compositionalité de "substances"

---

[12] Bohr [1935], p. 696.

[13] Cf. par exemple Weizsäcker [1979], Folse [1978] et Honner [1982] (sur le transcendantalisme de Bohr).

décomposables en parties "simples")? L'inséparabilité est la "démonstration" quantique de la pertinence irréductible de ce problème du lien entre la spatialité de la réalité et sa compositionalité.

Je me permets de renvoyer à ce propos à l'excellente analyse de l'Antithétique proposée par Alexis Philonenko.[14] Philonenko insiste sur le fait que les antinomies — qui sont des conflits thèses/antithèses indécidables — ont pour origine "l'illusion transcendantale"

(i) que, dans le cadre même de l'objectivation des phénomènes (via leur légalisation, en particulier causale), tout phénomène "conditionné" et déterminé implique la totalité inconditionnée de ses conditions, et

(ii) que l'on peut traiter cette totalité elle-même comme un objet (lui même conditionné comme phénomène et comme objet catégorial).

Cette illusion est une conséquence normale de l'application de la "logique générale" à la réalité. Elle méconnaît les contraintes schématiques. Philonenko explique très bien que derrière ce conflit se trouve mis en question le rôle des mathématiques: le conflit est entre un atomisme logique et un holisme géométrique.

Dans la thèse (atomiste : tout est composé de parties simples), on refuse la primauté de l'espace comme méthode de détermination objective des phénomènes : les mathématiques doivent se plier à l'ontologie et à la logique compositionnelle d'entités singulières, individuées, séparées, indépendantes.

Dans l'antithèse (holiste : rien n'est composé, seul l'univers global a une réalité objective), on applique au contraire la géométrisation de l'objectivité à la totalité de l'être: l'ontologie et la logique naturelle doivent se plier à la géométrie de l'objectivité.

Dans les deux cas on utilise, de façon opposée, l'atomisme logique ou la géométrie comme méthodes *dogmatiques* de détermination pour le monde en général. Mais le choix entre ces deux dogmatismes complémentaires est indécidable. La bonne position est de comprendre comment, dans la restriction aux observables, logique et détermination géométrique s'harmonisent.

5. Le conflit dialectique entre la description physique objective de la réalité empirique et la logique naturelle

La logique naturelle du sens commun est associée à la langue naturelle et décrit spontanément une réalité supposée être indépendante en termes de substances, d'accidents, de propriétés et de relations. Lui accorder un contenu ontologique conduit à des antinomies dialectiques.

En particulier, indépendamment d'une mesure, on ne peut pas dire qu'une grandeur observable *A* possède ("*a*") telle valeur bien définie et que celle ci serait une

---

[14] Philonenko [1972].

propriété du système *S* considéré (pp. 76, 234). La discussion de la théorie d'Omnès et de la subordination des critères de vérité à la mesure est particulièrement éclairante à cet égard (pp. 257-260). Je me permets d'insister encore une fois sur le fait qu'une des principales caractéristiques de la coupure galiléenne a précisément été d'effectuer une opération du même ordre à propos de la localisation des corps matériels. Chez Aristote (théorie des lieux naturels), la localisation est une propriété des corps: un corps *a* une position bien définie en tant que propriété. Chez Galilée, le principe de relativité disjoint localisation et propriétés.

Selon Bernard d'Espagnat, et je partage pleinement ce point de vue, la logique naturelle est donc *mentale et non objective*. Je pense que le problème sous-jacent est que la *réalité* attribuée aux propriétés est en fait une *modalité*. A ce titre elle est entièrement dépendante d'une procédure de constitution d'objectivité. En traiter de façon absolue (i.e. métaphysique, non dépendante d'une telle procédure) conduit à des antinomies dialectiques. Un tel conflit entre objectivité physique et dogmatisme logique est caractéristique de l'approche transcendantale. Je vais y revenir.

6. La nécessité d'une "causalité élargie" expliquant les lois

En plus de la causalité conçue comme catégorie constitutive de l'objectivité restreinte à l'expérience (à la réalité empirique), il y a aussi une "causalité élargie" concernant "l'action de la réalité indépendante sur les phénomènes" (p. 434). En tant que principe de raison suffisante, elle explique *les lois* en tant que celles-ci reflètent les régularités du réel. Bernard d'Espagnat insiste beaucoup sur ce point délicat (p. 356). On peut accepter une conception "réaliste" des lois à condition d'adopter un "réalisme structurel" à la Poincaré et ne pas *ontologiser les valeurs* des éléments mathématiques intervenant dans ces lois comme si celles-ci référaient à des éléments réels.

Cette différence entre causalité stricte et causalité élargie correspond dans le lexique transcendantal à celle entre la causalité comme catégorie et la "chose en soi" comme fondement de réalité (*Grund*) pour les phénomènes. La "chose en soi" est la réalité indépendante de l'expérience. Elle est *posée* comme *fondement* intelligible "supra-sensible" des phénomènes et de leur détermination. La détermination sensible-catégoriale de la réalité empirique *n'épuise donc pas* l'être du réel. Mais le *Grund* "non sensible" des phénomènes, bien qu'intelligible, se situe hors connaissance puisque la connaissance, pour être effective, exige la restriction de l'application de la causalité aux phénomènes. La connaissance scientifique est procédurale et, en tant que telle, s'oppose au sens. Comme aime à le dire Thom, elle "géométrise le sens". Toutefois, la prise en compte du *Grund* reste heuristiquement nécessaire à la compréhension de l'ordre de la nature comme une hypothèse, une Idée régulatrice, une "causalité" finale.

Dans l'*Introduction* à la *Critique de la Faculté de Juger*, Kant explique fort bien que l'intelligible intervient en tant que "principe de finalité" pour *comprendre* la

possibilité d'un *système organisé* de lois empiriques. Ce principe d'organisation systématique des lois relève de la faculté de juger réfléchissante. La loi de la réflexion qu'il met en jeu est

> "*la loi de spécification de la nature* par rapport à ses lois empiriques" (p. 33).

L'ordre de la nature n'est compréhensible que si l'on spécifie les lois universelles prescrites par l'entendement et ses catégories schématisées de façon à pouvoir leur subordonner les lois empiriques particulières. Le principe de la réflexion pour l'organisation de la nature suivant la diversité de ses lois empiriques contingentes

> "est *la finalité de la nature* en sa diversité" (p.29).

7. Jugement réfléchissant et jugement déterminant

Il existe en fait dans le *Réel voilé* plusieurs réflexions qui élargissent le problème de l'objectivité physique vers le jugement réfléchissant au delà du jugement déterminant et redonnent une étonnante actualité à cette profonde opposition kantienne. Elles concernent entre autres:

(i) L'affinité c.a.d. l'existence d'une régularité et d'une uniformité des phénomènes naturels permettant de les organiser cognitivement (de les catégoriser, de les regrouper en fonction de leurs ressemblances/différences, etc.).

(ii) La réalité indépendante (en soi) comme fondement de réalité (*Grund* et non pas cause des phénomènes).

(iii) L'idée d'un système possible des lois empiriques ("la finalité de la nature dans sa diversité").

Tout se passe *"comme si"* (*als ob* disait Kant) ces dimensions de la réalité étaient objectives mais elles ne le sont pas au sens strict. Elles sont pourtant nécessaires à la compréhension (mais non pas à l'explication) de la nature. Ce sont des heuristiques, des "maximes" du jugement physique sans lesquelles aucune science ne serait possible. Si l'on transforme ces maximes heuristiques en jugements objectifs (déterminants), alors on arrive à des contradictions (à des conflits "dialectiques").

8. Le réalisme lointain et le réel voilé

Quelle est la nature de la réalité indépendante et quel est son statut d'accessibilité?

Comme Bernard d'Espagnat unifie réalité indépendante au sens ontologique et au sens de la physique classique, il doit d'une part analyser les réalismes physicalistes et d'autre part montrer que la réalité indépendante ne s'identifie pas avec cette réalité physicaliste (au sens des théories à variables cachées).

La non-séparabilité et l'objectivité faible quantiques montrent que la réalité indépendante ne peut pas être spatio-temporelle (au sens de localisée) (pp. 341, 344, 376):

> "L'espace est l'arène dans laquelle les *phénomènes* se déroulent, il n'est pas une arène *dans* laquelle la *réalité indépendante* évoluerait" (p. 376).

L'espace est un a priori d'appréhension des phénomènes, c.a.d. une forme de la donation phénoménale, une intuition pure.

Mais le "réalisme lointain" (p. 324) ne concerne pas seulement les interprétations "ontologiques" (au sens de l'objectivité classique) de la Mécanique quantique et le caractère holistique du réel quantique. Il ne concerne pas seulement la scission imposée par la Mécanique quantique entre les phénomènes (multiples et localisés) et la réalité indépendante non-séparable sous-jacente (p. 353). Il concerne aussi la cause "élargie" et "voilée" des phénomènes.

9. Le problème du mathématique

Un dernier point que j'aimerais évoquer et qui, lui, fait relativement défaut à la réflexion du *Réel voilé* concerne le fait, souvent souligné par R. Omnès,[15] que la physique théorique est *dans son essence même* une physique *mathématique*. Cela est très important pour évaluer le type de philosophie dont on a besoin. La philosophie transcendantale est par excellence la philosophie de la physique mathématique. Comme l'a affirmé Jules Vuillemin (cf. section III) elle peut se définir comme la prise en compte philosophique du fait que l'essence de l'objectivité physique est mathématique.

III. LES MOMENTS TRANSCENDANTAUX DE LA PHYSIQUE THÉORIQUE CLASSIQUE

Pour voir qu'une approche transcendantale de ces divers problèmes reste fidèle à l'esprit du texte kantien (sinon à sa lettre), revenons un instant sur le grand texte physique de Kant, à savoir les *Premiers Principes Métaphysiques de la Science de la Nature (PPM)* si profondément analysés par Jules Vuillemin dans *Physique et Métaphysique kantiennes*.[16] Essayons d'en formuler brièvement le sens en un langage un peu plus moderne.

1. Phoronomie (Cinématique)

---

[15] Cf. par exemple Omnès [1994].

[16] Vuillemin [1955].

Dans la cinématique, qui spécifie les catégories de la *quantité* et les "Axiomes de l'intuition" réglant la fonction des grandeurs *extensives*, deux problèmes sont traités.

(a) La façon dont la *mesure* advient, sous forme d'arithmétisation, de coordonnées, et surtout de *métrique*, à l'espace et au temps purement phénoménologiques. L'espace comme forme de présentation et medium de manifestation (intuition pure) devient géométrie (intuition formelle) en vue de la physique et sa structure euclidienne est inséparable des principes de la mécanique (principe d'inertie et géodésiques rectilignes).

(b) Les mouvements rectilignes uniformes et le groupe d'invariance de la relativité galiléenne. Cela recouvre d'une part les symétries de l'espace/temps: translations temporelles, translations et rotations spatiales, etc.. (Il faut encore insister sur le fait que Kant est le premier philosophe à avoir affirmé, contre les dogmatismes logiques métaphysiques (leibniziens par exemple) que l'existence de symétries spatiales était constitutive de l'objectivité physique). Cela recouvre d'autre part le groupe proprement cinématique des transformations galiléennes (mouvements rectilignes uniformes). D'où l'affirmation du rôle constitutif du principe de relativité. Ainsi que le note J. Vuillemin,

> "c'est le principe de la phoronomie qui fournit la véritable démonstration de l'Esthétique transcendantale"

et

> "c'est la relativité du mouvement qui rend transcendantalement nécessaire la subjectivité de l'espace [son idéalité transcendantale]." [17]

On voit à quel point on est loin de tout idéalisme subjectif et solipsiste.

Notons d'ailleurs que pour Kant, la loi d'addition des vitesses dans la relativité galiléenne n'avait rien d'évident et constituait même un problème central. En effet les vitesses sont des grandeurs intensives et non pas extensives. Leur additivité (leur vectorialité) doit donc être démontrée en accord avec leur intensivité et cela ne va pas de soi.[18] Le mouvement n'est pas un mode de l'espace et l'additivité n'est pas que géométrique. Elle est cinématique.

2. **Dynamique**

2.1. Le débat avec Leibniz

Comme *qualité* (et non plus comme quantité), la matière est *remplissement* de l'espace. Ce remplissement est très différent d'une simple "occupation" (anti-cartésianisme). C'est un processus dynamique et énergétique propre à "l'intériorité" substantielle de la matière. C'est ici l'un des points où le débat de Kant avec Leibniz est le

---

[17] Vuillemin [1955], pp. 59-60.

[18] On dirait maintenant que les vitesses appartiennent, non pas à R^3, mais à ses espaces vectoriels tangents T_xR^3 (qui ne sont isomorphes à R^3 que parce que ce dernier est lui-même un espace vectoriel).

plus serré. Pour Leibniz l'espace est imaginaire. L'intériorité substantielle, la substance-force réelle, est hors espace, bien qu'elle s'exprime spatialement. Kant maintient cette intériorité substantielle, mais seulement à titre de fondement. Toutefois, comme elle est d'ordre nouménal, elle ne peut pas être introduite dans le domaine de l'objectivité. Elle doit être déterminée à travers sa seule extériorisation (sa spatio-temporalisation à travers le mouvement). Il s'agit par conséquent de conquérir un concept purement spatio-temporel de Dynamique qui ne relève plus de la chose en soi. Mais cela implique la fondation de la Dynamique dans la Phoronomie. Or, comme y insiste J. Vuillemin :

> "que la Dynamique présuppose la Phoronomie, cela signifie la possibilité d'une révolution copernicienne concernant la catégorie de substance, révolution qui est sans doute le coeur de l'idéalisme kantien" (p. 87).

C'est effectivement là que les catégories de la qualité se disjoignent irréversiblement du concept traditionnel (ontologique et métaphysique) de substance. Le remplissement de l'espace/temps par la matière est une tension dynamique pour l'occupation. Il est le résultat du conflit *de forces fondamentales* attractives et répulsives engendrant la cohésion des corps, leurs phases matérielles et leurs interactions. Ces forces fondamentales "primitives internes" — qui doivent être bien distinguées des forces "dérivatives externes" que sont les forces mécaniques — ont un être opaque qui s'exprime phénoménologiquement par des qualités, en l'occurrence par des *grandeurs intensives*.

Kant va donc élaborer dans la *Dynamique* le traitement mathématique des grandeurs intensives. Mais l'on voit que cela laisse entièrement ouvert le problème du concept dynamique de matière. L'intériorité substantielle génératrice des qualités dynamiques demeure en fait hors construction. C'est un problème central abordé dans l'*Opus Postumum* [19] et légué par Kant à l'avenir.

2.2. L'Opus Postumum et la physique des formations phénoménales

Dans ces réflexions ultimes, Kant envisage entre autres une *genèse physique de la phénoménalité* elle-même, phénoménalité conçue comme la manifestation d'une intériorité substantielle de la matière pour un dispositif de perception. L'OP est hanté par un retour de l'en soi dynamique leibnizien éliminé dans la CRP et les PPM, mais par un retour prenant l'allure d'une conquête en quelque sorte physique de cet en soi.

Dans la théorie du *phénomène du phénomène*, il s'agit non plus tant de légalisation objective des phénomènes que de leur origine, de leur genèse à partir d'un fondement. Ce fondement considéré jusque là comme d'ordre nouménal doit se convertir

---

[19] J'ai analysé ailleurs cette "Critique de la Raison Physique" qu'est l'*Opus Postumum*. Cf. Petitot [1990b] et [1991c].

en *fondement physique*. Avec lui, les conditions de possibilité de l'expérience traitées dans la CRP doivent devenir les conditions de possibilité de la phénoménalité même manifestant les objets physiques de la mécanique. Comme l'affirme le père François Marty dans sa Préface à sa traduction de l'OP, elles doivent permettre de "comprendre ce qu'est un *réel manifesté*" (p. 378).

Pour ce faire, Kant a envisagé d'appliquer l'Analytique transcendantale non plus, comme dans les PPM, à l'objet régional qu'est le mouvement mais au nouvel objet régional qu'est le système des forces fondamentales conçues comme forces primitives motrices internes à la matière.

Ces forces primitives intérieurement motrices sont beaucoup plus fondamentales que les forces extérieurement motrices et mécaniques traitées dans les PPM. Elles sont dynamiques:

> "toutes les forces primitives de la matière sont dynamiques : les forces mécaniques sont seulement dérivées" (p. 37).

Elles ne sont pas motrices à travers des déplacements. Elles sont

> "motrices en leurs parties, les unes par rapport aux autres dans l'espace occupé par la matière" (p. 75).

Elles sont génératrices de perception et expliquent les Anticipations de la perception (p. 38). Par extériorisation, elles engendrent des forces mécaniquement motrices tombant, elles, sous la législation des Analogies de l'expérience et des Postulats de la pensée empirique (p. 38).

Grâce à elles on peut comprendre la *présence* (i.e. la stabilité), la *formation* et la *composition* des corps car

> "elles forment des corps qui déterminent eux-mêmes leur espace, selon la quantité et la qualité" (p. 39).

On peut comprendre

> "une matière déterminant elle-même par ses propres forces sa figure et sa structure, et résistant à leur changement, originellement et de manière uniforme" (p. 47)

(résolution du problème initial de la *Dynamique* dans les PPM).

Le fondement physique engendre les formes de l'intuition elles-mêmes puisqu'il rend l'espace perceptible (p. 61). L'Esthétique transcendantale se trouve convertie en objet physique issu d'une causalité physique plus profonde. La matière n'est plus seulement, comme dans les PPM, le substrat du mouvement,

> "Elle est ce qui fait de l'espace un objet des sens empiriquement intuitionnable",
>
> "le substrat de toute intuition empirique externe avec conscience" (p.110).

2.3. Dynamique et géométrie différentielle

Revenons aux PPM. Dans la *Mécanique*, la matière se trouve réduite à la masse. Cela permet la construction mathématique du mouvement tout en faisant l'économie de celle, dynamique, de la substantialité[20].

Les catégories de la qualité et les principes associés que sont les "Anticipations de la Perception" se spécifient ici par le principe que l'être physique s'externalise à travers des grandeurs intensives comme la vitesse ou l'accélération. Le lien organique, systématique, avec la cinématique s'exprime alors comme *un principe de covariance* relativement au groupe d'invariance de l'espace-temps. Ainsi apparaît, après celle du principe de relativité, l'interprétation transcendantale d'un autre principe fondamental, à savoir que l'être physique doit être décrit *par des données différentielles variant de façon covariante*. Bref, la *Dynamique* nous explique que, *pour des raisons transcendantales, la Mécanique doit être une géométrie différentielle* (et non pas une logique des propriétés).

3. **Mécanique**

La *Mécanique*, qui spécifie les catégories *de la relation* et les principes associés que sont les "Analogies de l'expérience", explique la genèse des objets physiques proprement dits. Elle repose, nous venons de le voir, sur la réduction de la matière à la masse. La masse devient "sujet ultime dans l'espace", le mouvement devient son "prédicat déterminant", et , dans la mesure où ce prédicat est *spatio-temporel*, la matière

---

[20] Dans sa remarquable étude *Inertia, the communication of Motion, and Kant's third law of mechanics*, Howard Duncan a analysé en détail la façon dont opère dans les PPM le fait que le concept de matière, comme tension dynamique pour l'occupation de l'espace, ne soit pas dynamiquement constructible. Une véritable ontologie de la matière exigerait que l'on puisse ramener ultimement les corps matériels à un effet de forces dynamiques fondamentales opérant sur une sorte de "fluide" énergétique primordial (d'où l'anti-atomisme de Kant). Cela étant selon Kant mathématiquement impossible, la Dynamique évince le problème et change de niveau pour se restreindre au niveau purement mécanique du mouvement (des trajectoires). Ce faisant, la genèse physique de la matière est remplacée par sa description scalaire comme masse inertiale. Cela permet de construire mathématiquement le mouvement et la communication du mouvement *sans construire pour autant le concept de matière*. C'est cette dernière construction qui fait l'objet des réflexions visionnaires de l'OP.

se trouve bien traitée scientifiquement à partir de sa seule phénoménalité. La matière n'est plus une matière physique "seconde" animée par en-dessous par une materia prima extrinsèquement spatiale. Inertiale, elle devient en quelque sorte une unité matière-espace-temps.

Cela permet *de construire mathématiquement les catégories "dynamiques"* (i.e. *non* "mathématiques"), catégories qui ne pouvaient être que schématisées au niveau de la CRP.

Ce point est essentiel. Les catégories mathématiques concernent les intuitions pures et donc *l'essence* comme

> "premier principe interne de tout ce qui appartient à la *possibilité* d'une chose".

Les catégories dynamiques concernent au contraire *la nature* comme

> "premier principe interne de tout ce qui appartient à *l'existence* d'une chose".

Dans la CRP, à la différence des catégories mathématiques qui concernent l'essence, les catégories dynamiques posent l'existence, la conditionnent tout en la laissant indéterminée. Cela implique qu'elles ne soient pas constructibles. Elles ne s'appliquent qu'à l'objet en général et ne sont que schématisables. Mais elles deviennent constructibles lorsqu'elles s'appliquent "à une détermination supplémentaire", en l'occurrence le mouvement, "contenant une intuition pure".

La construction commence par une réinterprétation complète de la catégorie de substance.[21] A travers son schématisme temporel qui en fait un principe de permanence, celle-ci s'identifie désormais aux principes *de conservation des grandeurs physiques*, c'est-à-dire aux principes physiques d'invariance.

On ne saurait trop insister sur l'importance épistémologique de cette réinterprétation. Elle rompt avec toutes les approches logico-ontologiques qui considèrent que la science est une prédication sur les états de choses d'une réalité indépendante. Ici, le concept de substance devient la source des lois de conservation, lois qui, une fois traduites en équations, épuisent l'essentiel du contenu théorique des théories physiques.

Quant au principe de causalité, il se trouve retraduit par le principe d'inertie et la loi de Newton.

Enfin, quant au principe de communauté, il se trouve retraduit d'abord par le principe de l'égalité de l'action et de la réaction puis par le principe de l'interaction universelle qui spécifie le schème de la *simultanéité*.

---

[21] Il ne faut pas oublier que, pour Kant, le concept métaphysique traditionnel (aristotélico-scholastique) de substance comme support d'accidents n'était qu'une simple *hypotypose symbolique* (cf. *Critique de la Faculté de Juger* §59.

La simultanéité pose d'ailleurs pour Kant un problème difficile. En effet, on doit en garantir l'objectivité. Or, pour cela, il faut coordonner les temps locaux en un temps cosmologique global. L'espace et le temps sont donnés comme infinis au niveau de l'Esthétique transcendantale. Mais en tant qu'espace et temps de l'objectivité physique, ils sont, si on les considère globalement, de nature cosmologique. Or l'univers ("le monde") *n'est pas* un concept objectif pour Kant (cf. les antinomies cosmologiques de la Dialectique transcendantale). Ce n'est qu'une Idée. (Cela a même conduit Kant à renier ses considérations cosmologiques pré-critiques que tous les spécialistes s'accordent pourtant à juger visionnaires).

4. Phénoménologie

Ce que les *PPM* développent sous le titre de *Phénoménologie* concerne les catégories de la *modalité* (possible, réel, nécessaire) et les principes associés que sont les "Postulats de la pensée empirique en général".

1. Ce qui s'accorde avec les conditions formelles de l'expérience (intuitions et catégories) est *possible*.
2. Ce qui est en cohésion avec les conditions matérielles de l'expérience (la sensation) est *réel*.
3. Ce dont la cohésion avec le réel est déterminé suivant les conditions générales de l'expérience est *nécessaire* (existe *nécessairement*). (On notera le retour de l'existence tout à la fin du systèmes des principes).

Insistons encore une fois sur le fait que le concept de réalité est une catégorie *modale* qui ne possède de sens objectif que relativisé à une stratégie constitutive.

Cinématiquement parlant, à cause de la relativité, le mouvement *n'est pas un prédicat réel* mais seulement possible. Il ne peut pas être interprété comme une transformation réelle de l'état interne réel du système et de certaines de ses propriétés qui seraient des propriétés mécaniques intrinsèques. En réduisant la matière à la masse, en mettant entre parenthèses les "forces primitives internes" et en ne traitant que des "forces dérivatives externes", la Mécanique s'interdit de pouvoir ramener les mesures sur le mouvement à une détermination de l'état interne du système. C'est pourquoi on peut *à la fois* affirmer le mouvement et le nier sans aucune contradiction logique. Autrement dit, la relativité du mouvement rend inacceptable l'interprétation spontanée (ontologisante) d'énoncés comme "le corps S *a* telle position ou telle vitesse", où "avoir" est pris au sens de "posséder une propriété". De tels énoncés *ne supportent pas la contrafactualité* puisque leur valeur de vérité présuppose que l'on ait choisi un repère inertial, c.a.d. que l'on ait précisé les conditions des mesures. Il existe par conséquent pour Kant un conflit irréductible entre l'objectivité physique et la logique naturelle (prédicative) du sens commun. Position (spatiale ou temporelle) absolue ainsi que vitesse absolue (d'un mouvement rectiligne uniforme) ne sont pas des observables. On peut certes considérer

qu'il reste correct, d'un point de vue pratique, de parler “comme si” la localisation et le mouvement étaient des propriétés. Mais ce “réalisme empirique” de l'espace ne peut en aucun cas se doubler d'un “réalisme transcendantal”. La fameuse thèse de “l'idéalité transcendantale” de l'espace ne fait qu'exprimer philosophiquement cette conséquence (à l'époque traumatisante) du principe de relativité.

La dynamique fournit en revanche des critères *de réalité* du mouvement, car les forces sont réelles. Cette réalité est gouvernée par des lois mécaniques qui sont nécessaires, la nécessité n'étant pas ici une modalité logique mais une modalité transcendantale, une nécessité conditionnelle, relative à la contingence radicale de l'expérience.

On voit à quel point la proscription du transcendantal par l’empirisme logique a pu être dommageable pour la philosophie de la physique. Alors que Kant avait fait un effort vertigineux pour clarifier les problèmes fondamentaux posés par le statut très particulier de l’objectivité physique (disjonction objectivité/ontologie, caractère prescriptif de la légalisation catégoriale, rôle constitutif des symétries, des contraintes de covariance et des lois de conservation, caractère modal des mesures et de la réalité physiques, inadaptation de la logique eu égard à sa nature “dogmatique”, etc.), au lieu de poursuivre son effort parallèlement aux progrès des sciences on a (et cela malgré l’importance de travaux comme ceux de Cassirer sur la Relativité) remis le compteur à zéro et réimposé un logicisme reflétant une ontologie incompatible avec l’objectivité physique. Tout l’effort du criticisme a donc dû être recommencé. Etant donné l’irrationalisme engagé des philosophies “continentales” il n’a pu l’être que par les physiciens eux-mêmes qui ont entièrement réinventé le sens authentique des moments transcendantaux de l’expérience et des éléments critiques de la connaissance. Ceux-ci ont effectivement “donné une leçon” à la philosophie, dans tous les sens du terme.

Le “tabou” anti-transcendantal rend parfois la situation épistémologique un peu confuse. Par exemple Baas Van Fraassen a redécouvert le caractère fondamentalement modal des concepts physiques d’observable et de réalité. Il faut faire la différence entre les énoncés d’attribution d’état et ceux d’attribution de valeur d’observable:

> “states can be identified in terms of observables, but cannot be identified with them.”[22]

Les transitions du possible à l’actuel lors des mesures sont décrites par les états mais ne sont pas des transitions d’état. De même qu’en mécanique classique les résultats des mesures sur le mouvement ne peuvent pas être interprétés ontologiquement comme des prédicats réels des corps, de même en Mécanique quantique les résultats de mesure ne

---

[22] Van Fraassen [1991], p. 278.

sont pas interprétables ontologiquement comme des prédicats réels des états. Normalement de telles thèses devraient être considérées comme d'esprit transcendantaliste. Mais étant donné le "tabou", on doit les présenter comme une nouvelle forme d'empirisme.

On remarque ainsi l'affinité qui existe entre l'approche transcendantaliste de la Mécanique classique et les problèmes philosophiques de la Mécanique quantique traités dans *Le Réel voilé*. Certes la Mécanique quantique soulève des questions originales concernant entre autres les effets de la non commutativité des observables et le fait que les mesures exigent non seulement un protocole cinématique mais une véritable interaction physique avec le système. Mais la nature philosophique des problèmes est clairement du même ordre.

IV. LES PRINCIPES DE SYMÉTRIE ET LA CONSTRUCTION DES CATÉGORIES "DYNAMIQUES" DE SUBSTANCE, DE CAUSALITÉ ET D'INTERACTION

1. La téléologie transcendantale des théories physiques

Mon hypothèse de travail est qu'il existe également une structure transcendantale des théories physiques postérieures à la Mécanique rationnelle et même, plus précisément, qu'il existe une *histoire transcendantale* de ces théories. Celle-ci possède, me semble-t-il, trois aspects:

(i) L'approfondissement des moments transcendantaux.

(ii) La remise en cause de l'exclusion d'un dynamisme interne et la théorisation du système des forces fondamentales primitives internes à la matière (et non pas dérivatives externes comme les forces mécaniques).

(iii) La construction *au sens fort* des catégories dynamiques de substance, de causalité et d'interaction, c.a.d. leur engendrement à partir d'un *élargissement* de l'interprétation mathématique des catégories mathématiques, c'est-à-dire en définitive d'un enrichissement des principes de relativité.

La conséquence en est une involution de la structure transcendantale des théories dans leurs constructions mathématiques. Cette structure transcendantale n'est plus lisible *que* mathématiquement. Si l'on met entre parenthèses le contenu mathématique spécifique des théories physiques, on n'a donc plus aucune possibilité d'accéder à leur signification transcendantale.

J'ai étudié ailleurs trois exemples particulièrement spectaculaires.

2. Le théorème de Nœther et la construction de la catégorie de substance

Le premier exemple d'approfondissement de moment transcendantal est fourni par le théorème de Nœther. Ce théorème fondamental possède selon moi un sens non seulement physique, mais également transcendantal éminent. Il montre en effet que, sous la double condition :

(i) de pouvoir décrire mathématiquement la relation entre Cinématique et Dynamique par l'action d'un groupe de relativité sur l'espace de phases du système physique considéré;

(ii) de disposer d'une formulation variationnelle (lagrangienne ou hamiltonienne) de la Mécanique (i.e. des lois du mouvement),

alors il existe *une corrélation explicite entre les symétries et les grandeurs conservées*. Cela correspond à la *construction* (au sens fort) de la catégorie de substance, déjà réduite par Kant aux lois de conservation.

De façon plus précise, le formalisme lagrangien-hamiltonien qui domine la physique permet d'engendrer les grandeurs physiques d'un système à partir de ses grandeurs cinématiques extensives (positions) et intensives (vitesses). Il permet en quelque sorte de *convertir* du “mathématique” (de l'essence) en “dynamique” (en existence). Le théorème de Noether dit que si un lagrangien est invariant sous un groupe de relativité à un paramètre (i.e. de dimension 1), alors il existe une grandeur physique conservée au cours du mouvement (une intégrale première). Il relie donc:

(i) principes de relativité (inobservabilité de grandeurs cinématiques absolues),

(ii) symétries (invariance du lagrangien) et

(iii) lois de conservation (observabilité) de grandeurs physiques corrélatives.

C'est en quelque sorte *le* théorème transcendantal qui donne raison à Kant au-delà de tout ce qu'il pouvait imaginer et espérer.

Les exemples les plus classiques corrèlent :

(i) la conservation de l'énergie au groupe d'invariance des translations temporelles;

(ii) la conservation de l'impulsion au groupe d'invariance des translations spatiales;

(iii) la conservation du moment angulaire au groupe d'invariance des rotations spatiales.

J'ai exposé ailleurs [23] les aspects modernes de ce théorème en géométrie symplectique et en particulier le formalisme de l’application moment, c.a.d. la façon dont on peut associer à un groupe de Lie qui opère symplectiquement sur un espace de phases des intégrales premières a priori et cela de façon indépendante de tout hamiltonien (mais si un hamiltonien est invariant sous l’action du groupe alors il possède ces intégrales premières). Ces résultats renforcent considérablement le contenu *synthétique a priori* du théorème de Noether.

---

[23] Petitot [1992a].

3. La relativité générale et la construction de la catégorie de cause (du concept de force)

Mon deuxième exemple est celui de la Relativité Générale (RG). On a souvent dit que la RG avait rendu impossible une lecture transcendantale de la physique moderne. Je pense toutefois que c'est exactement le contraire qui est vrai. La structure transcendantale de la RG est manifeste et remarquable. Mais elle change profondément le contenu kantien des moments transcendantaux. Comme l'a bien vu Cassirer dans son ouvrage de 1921 *Zur Einsteinschen Relativitätstheorie*, elle les approfondit. Ce n'est que si l'on interprète ces contenus de façon fixiste dans le cadre d'une interprétation cognitive innéiste que l'on peut conclure à l'obligation d'abandonner une lecture transcendantale. En fait, transcendantalement parlant, la RG correspond *à la construction de la catégorie de cause (de force).*

Dans l'interprétation transcendantale, cette construction consiste à ramener la force à un principe de relativité, c'est-à-dire à une généralisation de l'Esthétique transcendantale. C'est bien ce que fait la RG. En RG, les moments transcendantaux que sont les Axiomes de l'intuition (avec la Cinématique correspondante) et les Anticipations de la Perception (avec la Dynamique correspondante) sont passés du niveau *global et métrique*, qui était le leur en mécanique newtonienne, au niveau *local et différentiable* sous-jacent. Cela n'était évidemment possible qu'après la conquête mathématique de ce niveau par Riemann. Le groupe de relativité de la théorie devient alors le groupe des *difféomorphismes* de l'espace-temps. Les contraintes de covariance deviennent par conséquent beaucoup plus importantes et cela permet de ramener la force, donc la catégorie de cause, à un principe d'inertie généralisé. Les a priori géométriques ne sont plus dès lors de nature métrique mais de nature différentielle et concernent, par exemple, la cohomologie des formes différentielles. [24]

De façon un peu plus précise, soit E l'espace-temps muni de sa métrique localement Minkowskienne $g_{\mu\nu}$. Si e_α est une base de l'espace vectoriel tangent à E en x T_xE et si ω^α est la base duale de l'espace cotangent T^*_xE , le tenseur de courbure de Riemann est défini en termes de composantes par $R^\alpha{}_{\beta\gamma\delta} = \langle \omega^\alpha, [\nabla_\gamma, \nabla_\delta]\, e_\beta \rangle$ (où ∇ est la dérivation covariante, où [•,•] est à la fois le crochet de Lie de l'algèbre de Lie des champs de vecteurs et le commutateur des opérateurs différentiels et où, pour $\omega \in T^*_x$E et $v \in T_x$E , $\langle \omega, v \rangle = \omega(v)$). Pour $\omega \in T^*_x$E et $u, v, w \in T_x$E , on a $R(\omega,u,v,w) = \langle \omega, \mathrm{R}(v, w)u \rangle$ avec $R(v, w) = [\nabla_v , \nabla_w] - \nabla_{[v, w]}$.

---

[24] Dans Petitot [1992a] j'ai analysé en détail dans cette perspective la géométro-dynamique de Wheeler et son débat avec Grünbaum (pour ce dernier, cf. aussi plus bas section V).

Par contraction du tenseur de courbure de Riemann, on construit le tenseur de courbure de Ricci $R_{\mu\nu} = R_{\mu}{}^{\alpha}{}_{\alpha\nu}$. Par une seconde contraction, on construit la courbure scalaire $R = R_{\mu}{}^{\mu}$. Le tenseur de courbure d'Einstein est donné par G = Ricci – $1/2gR$ (g=|det($g_{\mu\nu}$)|). Il satisfait *pour des raisons a prioriques* — purement géométriques, en fait cohomologiques —, les identités de Bianchi $\nabla G \equiv 0$.

Dans les équations d'Einstein $G = 8\pi T$ (où T est le tenseur d'impulsion énergie), l'identité $\nabla T \equiv 0$ formule le principe de la conservation de l'énergie (l'expression de la catégorie de substance). Elle devient une *conséquence* de la géométrie de l'espace-temps car elle dérive de *l'a priori synthétique* $\nabla G \equiv 0$.

Comme Hilbert l'a montré dès 1921 et comme cela a été développé dans les années 60 par Wheeler, Arnowitt, Deser et Misner,[25] il est possible de dériver la métrique $g_{\mu\nu}$ de l'espace temps E d'un principe variationnel en prenant la courbure scalaire R comme densité lagrangienne. L'action est alors :

$$S = \frac{1}{16\pi} \int_{\mathrm{E}} R\sqrt{|g|}\, d^4x.$$

On déduit de cette formule un système hamiltonien (de dimension infinie) sur l'espace fonctionnel des métriques.

Cela montre qu'en *RG* la métrique ne relève plus, comme cela était le cas en mécanique rationnelle, des catégories mathématiques, mais bien des catégories dynamiques. Elle devient une entité physique qui doit elle-même être déterminée. Mais cela ne signifie pas pour autant l'invalidation de la logique transcendantale. Bien au contraire. Cela signifie seulement que l'Esthétique Transcendantale est passée du niveau métrique global au niveau différentiable local. Comme nous l'avons dit plus haut, le groupe de relativité n'est plus désormais le groupe de Galilée ou le groupe de Lorentz mais le groupe *Diff*(E) des difféomorphismes de E . C'est donc à ce niveau que se situe désormais le synthétique a priori. Ce déplacement de niveau permet d'absorber la catégorie de force dans un principe de relativité élargi et, par là-même, de la construire.

4. Les théories de jauge et la construction de la catégorie d'interaction

L'exemple est encore plus spectaculaire avec les théories de jauge où c'est non seulement la catégorie de force (comme dans la relativité générale) mais aussi *la catégorie d'interaction* qui se trouve ramenée à des principes de symétries élargis. Comme l'explique Yuri Manin [26]:

---

[25] Cf. Misner, Thorne, Wheeler [1973].

[26] Manin [1988].

> "From a philosophical point of view, one can speak of a new wave of geometrization of physical thought which for the first time is sweeping far beyond the boundaries of general relativity".

Depuis les travaux pionniers de Chen Ning Yang et Robert Mills (1954) sur l'invariance de jauge concernant l'isospin, il existe dans les théories de jauge *deux classes* de champs.

1) *Les champs fermioniques de matière* qui sont interprétés comme des *sections* de fibrés sur l'espace-temps. Les coordonnées des fibres sont les degrés *internes* de liberté. Le groupe structural (i.e. le groupe de symétrie des fibres) exprime les *symétries internes* des particules.

2) *Les champs bosoniques de jauge* qui sont des champs d'interactions véhiculées par des particules virtuelles d'échange (des bosons) et sont interprétés comme des connexions sur ces fibrés. Les particules véhiculant les interactions sont par conséquent les quanta des champs de connexions sur les fibrés de matière.

Le Lagrangien de Yang-Mills est *la norme* de la *courbure* des connexions. Il est invariant sous l'action du groupe de jauge et l'espace-temps y contribue comme champ de jauge à travers la courbure scalaire de sa connexion. Les *dérivations covariantes* permettent d'exprimer géométriquement les interactions.

Plus précisément, rappelons qu'en théorie quantique des champs, on dispose d'une chaîne de procédures de déterminations objectives conduisant de principes constitutifs à des modèles explicites.

Les principes de relativité et de symétrie fournissent des Lagrangiens L, ou mieux, des densités de lagrangien $\mathrm{L}\,(\varphi,\partial_\mu\varphi)$ dépendant des champs $\varphi(x,t)$ considérés et de leurs dérivées premières $\partial_\mu\varphi$. Cela permet de définir des actions $S(\Gamma)$ sur des chemins Γ conduisant d'un état initial $\varphi_i = \varphi\,(x, t_1)$ à un état final $\varphi_f = \varphi(x, t_2)$:

$$S(\Gamma) = \int \mathrm{L}\;\; d^4x = \int_{t_1}^{t_2}\int_{\mathbb{R}^3} \mathrm{L}\;\; (\varphi, \partial_\mu \varphi)\, d^3x\, dt \quad .$$

Les axiomes de la mécanique quantique conduisent alors de l'action $S(\Gamma)$ à la formule de Feynman (intégrale de chemin) pour l'amplitude de probabilité de transition (h est la constante de Planck):

$$\langle \varphi_f | \varphi_i \rangle = \int_\Gamma \exp\left(\frac{2i\pi}{h} S(\Gamma)\right) d\Gamma \,.$$

Il s'agit d'une intégrale fonctionnelle dans l'espace fonctionnel des chemins. Elle n'est pas bien définie comme objet mathématique (c'est l'un des principaux problèmes de la théorie quantique des champs), mais elle fournit néanmoins un algorithme de calcul extraordinairement puissant.

Il est bien connu que cette formule (qui est analogue aux fonctions de partition Z de la mécanique statistique) encode une quantité énorme d'information. Il est possible

d'en dériver un nombre considérable de modèles explicites, quantitatifs et prédictifs des phénomènes en utilisant des outils mathématiques appropriés comme par exemple:

(i) les développements perturbatifs;

(ii) le théorème de Wick disant que tous les moments d'une loi de probabilité gaussienne peuvent s'exprimer en fonction de ses moments d'ordre 2;

(iii) le théorème de la phase stationnaire disant qu'une intégrale oscillante $e^{i\tau\varphi(x)}$ se concentre pour $\tau\rightarrow\infty$ sur les points critiques de la phase $\varphi(x)$;

(iv) le groupe de renormalisation.

On rencontre ici un splendide exemple d'une détermination objective conduisant de principes constitutifs à des modèles spécifiques et diversifiés: les principes constitutifs (groupes de relativité, symétries) fournissent des Lagrangiens, qui fournissent à leur tour des intégrales de Feynman, qui fournissent elles-mêmes les modèles:

A priori constitutifs → Groupes de relativité et symétries → Lagrangiens → Action → Intégrales de chemins → Modèles spécifiques de phénomènes.[27]

Dans ce contexte, les théories de jauge ont réussi à construire *a priori* les interactions en faisant dépendre les symétries *internes* des systèmes (qui sont des symétries globales apparemment non spatio-temporelles associées aux nombres quantiques des particules) de la *position* spatio-temporelle. Si on localise ainsi ces symétries internes et si l'on exige que les théories demeurent invariantes, on doit introduire des termes correctifs. On constate alors que ceux-ci redonnent exactement les termes d'interaction. Les forces et les interactions apparaissent ainsi de façon générale comme dérivables de principes de conservation *locaux*.[28]

Le cas le plus simple (découvert par Hermann Weyl) est celui du "couplage minimal" entre un électron et un champ électromagnétique F. Soit ψ la fonction d'onde de l'électron. Son évolution est régie par l'équation de Dirac. Le Lagrangien de Dirac L_D est invariant sous la symétrie interne globale $\psi \rightarrow e^{-ie\vartheta}\psi$ (où le e en exposant est la charge de l'électron et ϑ une phase). Le groupe des symétries internes est le groupe des phases, i.e. le groupe *commutatif* U(1) des rotations du cercle. D'autre part, le Lagrangien de Maxwell (champ électro-magnétique) L_M est invariant sous une transformation de jauge $A \rightarrow A + d\Lambda$, où A est le potentiel vecteur du champ électro-magnétique F, Λ une fonction sur E et $d\Lambda$ la différentielle de Λ. Si l'on admet que le facteur de phase ϑ peut dépendre de la position spatio-temporelle $x\in E$, alors le Lagrangien de Dirac L_D *n'est plus* invariant. Mais le terme de correction qui apparaît peut être *exactement compensé*

---

[27] Cf. par exemple Itzykson, Zuber [1985] et Le Bellac [1988].

[28] Cf. par exemple Quigg [1983].

par la transformation de jauge $A \rightarrow A + d\vartheta$. Il s'agit là d'une sorte de "miracle" dont la signification tant physico-mathématique que transcendantale est remarquable.

Géométriquement, le potentiel vecteur A s'interprète comme une *connexion* définie sur un fibré vectoriel F au-dessus de l'espace temps E et le champ F s'identifie *à la courbure* de cette connexion. Le groupe de relativité est maintenant *encore plus large* que le groupe *Diff*(E). C'est le groupe — dit groupe de jauge — des automorphismes du fibré F de base E . Cet élargissement permet de ramener la catégorie dynamique d'interaction à un principe de relativité, et donc de la construire. Dans le cas non abélien, le groupe des symétries internes G (G = SU(2), SU(3), etc.), n'est plus commutatif. Cela introduit des difficultés profondes dans la théorie, mais les idées principales subsistent.

Le cas est encore plus spectaculaire avec la théorie des supercordes.[29] En fait, toute symétrie supplémentaire enrichit de façon considérable le contenu mathématique des théories physiques. Par exemple, en théorie des supercordes, la simple reparamétrisation des cordes conduit à introduire la théorie des surfaces de Riemann et, plus particulièrement, la théorie de Teichmüller des espaces de modules qui classifient les différentes structures complexes compatibles à une même structure différentiable. Il en va de même avec l'interprétation donnée récemment (1994) par Edward Witten de la symétrie électrique↔magnétique de Montonen-Olive (1977). Elle conduit à l'introduction de formes modulaires et a déjà eu des conséquences considérables pour la compréhension de la structure des variétés différentiables de dimension 4.[30]

Ce sont ces stratégies remarquables de détermination objective des phénomènes qui font dire aux physiciens, par exemple à Michio Kaku: [31]

> "the secret of this mystery [celui des théories unifiées] most likely lies in the power of *gauge symmetry*".
>
> "Nature *demands* symmetry".
>
> "Symmetry, instead of being a purely aesthetic feature of a particular model, now becomes its most important feature" (p. 8).

Bref, au moyen des formalismes variationnels, du théorème de Noether, des intégrales de Feynman et des théories de jauge, il a été possible de construire une véritable *ontogenèse formelle* de la réalité physique. Une telle construction convertit le synthétique a priori en règles d'engendrement de modèles explicites diversifiés. Les

---

[29] Cf. par exemple, Kaku [1988] et Bailin, Love [1994], ainsi que Petitot [1992b].

[30] Cf. Witten [1994] et Donaldson [1996].

[31] Kaku [1988].

contraintes mathématiques sont si fortes (renormalisabilité, élimination des anomalies, mécanisme de Higgs et ruptures spontanées de symétries conférant une masse aux bosons de jauge, etc.), qu'il est souvent possible d'inférer le bon choix du groupe de symétrie de la théorie à partir d'un tout petit nombre de données empiriques significatives.

V. INTERPRÉTATION TRANSCENDANTALE DU CONVENTIONALISME GÉOMÉTRIQUE DE POINCARÉ

Cette possibilité de construction (au sens fort) des catégories dynamiques en physique théorique a de nombreuses conséquences épistémologiques. Je n'en évoquerai ici qu'une seule, concernant l'interprétation transcendantale du conventionalisme. Je rappelle les deux thèses d'Henri Poincaré sur la physique mathématique exposées, entre autres, dans les chapitres IV et V de *La Science et l'Hypothèse* : "L'espace et la géométrie", "L'expérience et la géométrie":

1. La thèse selon laquelle la géométrie appliquée à la physique est conventionnelle (ni vraie ni fausse), que l'on peut décrire les mêmes contenus factuels physiques dans des cadres géométriques alternatifs. En tant que convention, une géométrie fixe un langage de description et ne possède pas de vérité empirique expérimentale.
2. La thèse que le concept de groupe est une forme a priori de l'entendement.

C'est surtout dans la conclusion de "L'espace et la géométrie" qu'est exposée la thèse du conventionalisme géométrique:

> "Ce qui est l'objet de la géométrie, c'est l'étude d'un "groupe" particulier; mais le concept général de groupe préexiste dans notre esprit au moins en puissance. Il s'impose à nous, non comme forme de notre sensibilité, mais comme forme de notre entendement.
>
> Seulement, parmi tous les groupes possibles, il faut choisir celui qui sera pour ainsi dire l'étalon auquel nous rapporterons les phénomènes naturels.
>
> L'expérience nous guide dans ce choix qu'elle ne nous impose pas; elle nous fait reconnaître non quelle est la géométrie la plus vraie, mais quelle est la plus *commode*".

Cette thèse est approfondie dans "L'expérience et la géométrie" où Poincaré explique que les principes de la géométrie ne sont pas des faits expérimentaux. On peut toujours exprimer un même fait physique en changeant la convention du cadre

géométrique et en changeant les lois physiques (par exemple on peut garder la géométrie euclidienne et ne pas garder le principe que les rayons lumineux sont des géodésiques).

Ce point de vue avait déjà été admirablement anticipé par Clifford à la fin du siècle dernier: il existe une équivalence entre

(i) des causes physiques de changements dans un espace posé a priori comme plat;

(ii) une géométrie non triviale (courbe) de l'espace.

Les expériences physiques portent toujours sur des corps et jamais sur l'espace. Elles ne peuvent donc pas *décider* de la géométrie.[32]

Bref, les thèses sont:

1. La géométrie est une convention i.e. un *a priori* (grammatical si on veut) de l'expérience. Elle fixe un langage de description et ne possède pas de vérité expérimentale. L'a priori n'a ici rien à voir avec un a priori logique ou un a priori innéiste cognitif. C'est un a priori au sens de conditions de possibilité déterminantes.
2. L'a priori de la géométrie se ramène essentiellement à l'a priori des groupes : groupes d'invariance, groupes de relativité, groupes de symétrie des théories physiques.
3. L'a priori n'étant pas inné et ne pouvant pas être décidé par l'expérience, il doit être choisi.
4. Le critère du choix est pragmatique : c'est celui de la commodité.

Mais nous avons vu que, en ce qui concerne l'évolution de la physique mathématique, on peut observer, à travers le mouvement toujours plus accentué et profond de *géométrisation* de la physique, une évolution qui *motive* le choix des conventions géométriques et possède le statut philosophique d'une réduction à l'a priori mathématique des contenus physiques empiriques.

Par exemple, dans le cas de la relativité générale, la conventionalité de la géométrie pour la physique signifie que l'on choisit une métrique de façon à ce que les rayons lumineux soient des courbes de longueur nulle et les mouvements en chute libre des géodésiques. Comme l'a expliqué Adolph Grünbaum dans sa critique de la *Géométrodynamique* de John Archibald Wheeler, Charles Misner et Kip Thorne,[33] ces deux classes de trajectoires sont empiriquement données et ce n'est que le choix conventionnel de la métrique qui les *qualifie géométriquement*. Certes. Mais la qualification einsteinienne est pourtant plus motivée que d'autres car elle ramène les mouvements gravitationnels à des mouvements inertiaux. En fait la RG est la théorie de jauge du groupe de Poincaré.

La dépendance de l'objectivité physique par rapport à des conventions fixant la qualification géométrique des données empiriques, en particulier le fait que les symétries des théories sont mathématiquement déterminantes pour le contenu physique de ces

---

[32] Pour une introduction aux idées de Clifford, cf. Boi [1995].

[33] Grünbaum [1973], chapitre 22: *General Relativity, Geometrodynamics and Ontology*.

théories, est, répétons-le, la forme moderne de l'idéalité transcendantale de l'espace. Cette idéalité transcendantale s'oppose aussi bien à un réalisme ontologique qu'à un idéalisme subjectif (psychologique). Elle est prescriptive, i.e. à la fois conventionnelle et normative (déterminante).

On peut donc aller plus loin dans l'interprétation du conventionalisme géométrique que ne l'a fait Poincaré en adoptant un point de vue pragmatique de "commodité". Nous avons vu en effet qu'il existe un télos de la géométrisation en physique : transformer des principes de symétrie en principes dynamiques.

CONCLUSION

Paraphrasant des affirmations de Jean-Marie Souriau à propos de la quantification géométrique, on peut dire que

> "philosophiquement [la géométrisation] c'est ramener la physique à des symétries géométriques pour faire de la physique a priori" (c'est-à-dire "rationnelle").

Autrement dit, comme le dit encore Souriau,

> "il n'y a *rien de plus* dans les théories physiques que les groupes de symétrie *si ce n'est la construction mathématique* qui permet précisément de montrer qu'il n'y a rien de plus".[34]

Cela est une parfaite définition de la réduction à l'a priori : il n'y a rien de plus si ce n'est les mathématiques permettant de montrer qu'il n'y a rien de plus.

Ce principe est devenu le *principe de découverte* majeur des théories physiques contemporaines. S'il y a des structures physiques empiriques supplémentaires c'est qu'il y a des symétries supplémentaires et que l'on n'a pas pris un groupe de symétrie approprié.

Le rôle déterminant des symétries en physique confère à l'objectivité physique un statut très particulier, qui oppose cette objectivité à toute ontologie substantialiste d'étants singuliers et individués, existant de façon transcendante comme entités séparées. Cette vieille tradition métaphysique aristotélicienne est incompatible avec la physique moderne. L'objectivité physique est transcendantale au sens où c'est une objectivité "faible" qui inclut dans son concept d'objet les conditions d'accès et les conditions de possibilité de détermination de ses objets. Plus précisément: ce qui est *accessible* à la théorie, son contenu positif, y est défini *négativement*, c'est-à-dire par ce qui lui est *inaccessible* (à cause des symétries). Les symétries imposent une auto-limitation à ce que la théorie peut connaître et dire qu'elles sont constitutives c'est dire que *ce que la théorie peut connaître est déterminé par ce que la théorie ne peut pas connaître*. Il s'agit là du

---

[34] Pour la quantification géométrique, cf. Souriau [1975] et Weinstein [1977].

principe de base qui disjoint l'objectivité physique de toute ontologie. On peut le qualifier de *principe galoisien* dans la mesure où un principe analogue a été formulé pour la première fois de façon claire par Galois dans la façon dont celui-ci a complètement repensé le problème de la résolution des équations algébriques.

Cette nature galoisienne a été excellemment soulignée par l'éminent spécialiste de géométrie symplectique et des travaux de Witten qu'est Daniel Bennequin, en particulier dans son long article en hommage à Thom: "Questions de physique galoisienne" [35]. Dire philosophiquement que l'objectivité physique est transcendantale c'est dire techniquement qu'elle est galoisienne.

Pour moi le sens moderne du *synthétique a priori* concerne cette caractéristique des théories physiques modernes, à savoir que le maximum d'économie et de puissance théorique s'obtient en ramenant les contenus physiques d'abord à des principes dynamiques (conservations, forces, interactions) et ensuite ces principes eux-mêmes à des conséquences physiques de symétries qui expriment que l'on doit pouvoir éliminer dans les théories physiques les éléments mathématiques conventionnels (coordonnées, repères, jauges, etc.) nécessaires à la description. Le fait que, par exemple dans une théorie de jauge à la Yang-Mills, une propriété physique comme une self-interaction de bosons de jauge soit reliée au fait que le groupe des symétries globales internes est non commutatif, est, pour moi, un exemple typique de synthétique a priori. Cela n'a rien à voir avec une nécessité logique. D'ailleurs déjà chez Kant, le synthétique a priori est toujours corrélatif de la contingence radicale de l'expérience.

BIBLIOGRAPHIE

ABRAHAM, R., MARSDEN, J. 1978, *Foundations of Mechanics*, Benjamin Cummings, New-York, Reading.

ALLISON, H.E., 1983. *Kant's Transcendental Idealism. An Interpretation and Defense*, New-Haven, Yale University Press.

ARNOLD, V., 1976. *Méthodes mathématiques de la mécanique classique*, Moscou, Mir.

BAILIN, D., LOVE, A., 1994. *Supersymmetric Gauge Field Theory and String Theory*, Institute of Physics Publishing, London.

BENNEQUIN, D., 1994. "Questions de physique galoisienne", *Passion des Formes, à René Thom* (M. Porte ed.), 311-410, E.N.S. Editions Fontenay-Saint Cloud.

BITBOL, M., 1996. *Mécanique quantique. Une introduction philosophique*, Paris, Flammarion.

BOHR, N., 1935. *Physical Review*, 48, 696.

---

[35] Bennequin [1994].

BOI, L., 1995. *Le problème mathématique de l'espace*, Berlin, Springer.

BRITTAN, G., 1978. *Kant's Theory of Science*, Princeton University Press.

CASSIRER, E., 1918. *Kants Leben und Lehre, Kant's Life and Thought* (trad.J. Haden), Yale University Press, 1981.

COHEN-TANNOUDJI, G., SPIRO, M., 1986. *La Matière - Espace - Temps*, Paris, Fayard.

DONALDSON, S. K., 1996. "The Seiberg-Witten equations and 4-manifold topology", *Bulletin of the American Mathematical Society*, 33, 1, 45-70.

DUNCAN, H., 1984. "Inertia, the communication of Motion, and Kant's third law of mechanics", *Philosophy of Science*, 51, 93-119.

d'ESPAGNAT, B., 1985. *Une incertaine réalité*, Paris, Gauthier-Villars.

d'ESPAGNAT, B., 1994. *Le réel voilé*, Paris, Fayard.

FOLSE, H.J., 1978. "Kantian Aspects of Complementarity", *Kant-Studien*, 69, 58-66.

GOMEZ, R.J., 1986. "Beltrami's Kantian View of Non-Euclidean Geometry", *Kant-Studien*, 77, 1, 102-107.

GRÜNBAUM, A., 1973. *Philosophical Problems of Space and Time*, Dordrecht - Boston, Reidel.

HONNER, J. 1982. "The Transcendental Philosophy of Niels Bohr", *Studies in History and Philosophy of Science*, 13, 1, 1-29.

ICMP, 1995. *XIth International Congress of Mathematical Physics* (D. Iagolnitzer, ed.), International Press.

ITZYKSON, C., ZUBER, J.B., 1985. *Quantum Field Theory*, Singapour, Mc Graw-Hill.

JAMMER, M., 1974. *The Philosophy of Quantum Mechanics*, John Wiley and Sons.

KAKU, M., 1988. *Introduction to Superstrings*, New-York, Springer.

KANT, E, 1980-1986. *Oeuvres philosophiques* (F. Alquié ed.), Paris, Bibliothèque de la Pléïade, Gallimard.

KANT, I., 1781-1787. *Kritik der reinen Vernunft*, Kants gesammelte Schriften, Band III, Preussische Akademie der Wissenschaften, Berlin, Georg Reimer, 1911.

KANT, I., 1786. *Metaphysische Anfangsgründe der Naturwissenschaft*, Kants gesammelte Schriften, Band IV, Preussische Akademie der Wissenschaften, Berlin, Georg Reimer, 1911. *Premiers Pincipes métaphysiques de la Science de la Nature*, Trad. J. Gibelin, Paris, Vrin, 1971.

KANT, I., 1790. *Kritik der Urtheilskraft*, Kants gesammelte Schriften, Band V, Preussische Akademie der Wissenschaften, Berlin, Georg Reimer, 1913. *Critique de la Faculté de Juger*, trad. A. Philonenko, Paris, Vrin, 1979.

KANT, I., 1796-1803. *Opus Postumum*, trad. F. Marty, Paris, Presses Universitaires de France, 1986.

LE BELLAC, M., 1988. *Des phénomènes critiques aux champs de jauge*, Paris, InterEditions - C.N.R.S.

LOCHAK, G., 1994. *La géométrisation de la physique*, Paris, Flammarion.

MANIN, Y., 1988. *Gauge Field Theory and Complex Geometry*, Springer.

MARSDEN, J., 1974. *Applications of Global Analysis in Mathematical Physics*, Berkeley, Publish or Perish.

MISNER, C.W., THORNE, K.S., WHEELER, J.A., 1973. *Gravitation*, San Francisco, Freeman.

OMNES, R., 1994. *Philosophie de la science contemporaine*, Paris, Gallimard.

PETITOT, J., 1990a. "Le Physique, le Morphologique, le Symbolique. Remarques sur la vision", *SC [1990]*, 139-183.

PETITOT, J., 1990b. "Logique transcendantale, Synthétique a priori et Herméneutique mathématique des Objectivités", *Fundamenta Scientiæ*, (numéro en l'honneur de L. Geymonat), 10, 1, 57-84.

PETITOT, J., 1991a. "Idéalités mathématiques et Réalité objective. Approche transcendantale", *Hommage à Jean-Toussaint Desanti*, (G. Granel ed.), 213-282, Editions TER, Mauvezin.

PETITOT, J., 1991b. La Philosophie transcendantale et le problème de l'Objectivité, Entretiens du Centre Sèvres, (F. Marty ed.), Paris, Editions Osiris.

PETITOT, J., 1992a. *Physique du Sens*, Editions du CNRS, Paris.

PETITOT, J., 1992b. "Actuality of Transcendental Aesthetics for Modern Physics", *1830-1930 : A Century of Geometry*, (L. Boi, D. Flament, J.-M. Salanskis eds), Berlin, New-York, Springer.

PETITOT, J., 1992c. "Continu et Objectivité. La bimodalité objective du continu et le platonisme transcendantal", *Le Labyrinthe du Continu*, (J.-M. Salanskis, H. Sinaceur eds.), 239-263, Springer, Paris.

PETITOT, J., 1994a. “La sémiophysique : de la physique qualitative aux sciences cognitives”, *Passion des Formes, à René Thom* (M. Porte éd.), 499-545, E.N.S. Editions Fontenay-Saint Cloud.

PETITOT, J., 1994b. “Esthétique transcendantale et physique mathématique”, *Neukantianismus. Perspektiven und Probleme* (E.W. Orth, H. Holzhey Hrsg.), 187-213, Königshausen & Neumann, Würzburg.

PETITOT, J., 1995. “Pour un platonisme transcendantal”, *L’objectivité mathématique. Platonisme et structures formelles,* (M. Panza, J-M. Salanskis eds.), 147-178, Paris, Masson.

PHILONENKO, A., 1972. *L'œuvre de Kant*, Paris, Vrin.

POINCARE, H., 1902. *La Science et l’Hypothèse*, Paris, Flammarion.

QUIGG, C., 1983. *Gauge Theories of the Strong, Weak, and Electromagnetic Interactions*, Reading, Benjamin-Cummings.

SOURIAU, J.M., 1975. *Géométrie symplectique et physique mathématique*, Coll. Internat. du C.N.R.S., 237, Paris.

VAN FRAASSEN, B. C., 1991. *Quantum Mechanics. An Empirist View*, Clarendon Press, Oxford.

VUILLEMIN, J., 1955. *Physique et Métaphysique kantiennes*, Paris, Presses Universitaires de France.

WEINSTEIN, A., 1977. *Lectures on Symplectic Manifolds*, C.B.M.S., Conf. Series, Am. Math. Soc., 29, Providence.

WEIZSÄCKER, C.F. von, 1979. *Die Einheit der Natur*, Munich, Hauser.

WEYL, H., 1922. *Space - Time - Matter*, New-York, Dover.

WIREDU, J.E., 1970. "Kant's Synthetic a priori in geometry and the rise of non-euclidean geometries", *Kant-Studien*, 61, 1, 5-27.

WITTEN, E., 1994, “Electric-Magnetic Duality in Four Dimensional Gauge Theories”, *ICMP 1994*, 155-162.