

Le corps matériel et l'objet de la physique quantique

Michel Bitbol

In: F. Monnoyeur (ed.), Qu'est-ce que la matière? Le livre de poche, 2000

Introduction

Un corps matériel est un *objet* occupant à chaque instant un certain secteur de *l'espace tridimensionnel*. Cette définition simple, qui peut se prévaloir d'une longue tradition philosophique, place le concept de corps matériel au confluent d'une exigence et d'une situation. L'*exigence*, d'abord portée par la vie individuelle et sociale puis systématisée par la recherche scientifique, est celle d'*objectivation*, c'est-à-dire d'extraction de configurations stables, invariantes vis-à-vis d'une large classe de transformations, à partir du flux de ce qui arrive. La *situation*, pour sa part, n'est autre que l'espace commun des diverses modalités perceptives et de l'activité gestuelle de l'homme. Un corps matériel, pourrait-on dire en retournant la définition initiale, est un secteur d'espace tridimensionnel objectivé par la détermination d'effets locaux invariants sous un ensemble de changements réglés. Parmi ces effets locaux, l'inertie et l'impénétrabilité (ou au moins la résistance) tiennent traditionnellement une place centrale.

Une telle association organique entre objectivité et spatialité ordinaire a été amplifiée et confortée par la physique classique. En revanche, la physique quantique a conduit soit à la briser, soit à payer un prix épistémologique très (peut-être trop) élevé pour son maintien. C'est cette mise en cause du corps matériel comme objet archétypal de la physique contemporaine que nous allons analyser ici. Mais il faut pour cela commencer par mettre brièvement au clair la constitution historique et cognitive du concept de corps matériel.

Matière et espace

L'histoire du concept de corps matériel tourne tout entière autour du statut de l'espace. L'espace est tantôt une partie intégrante, tantôt une simple détermination, de la matière; il est parfois identifié à l'objet même, et parfois considéré comme une condition subjective de l'appréhension d'objets sensibles.

Chez Aristote, la matière est radicalement distinguée de la forme et de ses corrélats spatiaux; c'est la surimposition à la matière première d'une forme

pensée comme extrinsèque qui lui confère extension tri-dimensionnelle et “quantité” (ou volume), et qui en fait un *corps*. La *quantité* est donc considérée comme une simple détermination de la matière; seul son second rang dans la liste des catégories (juste après la substance), vient signaler la priorité qui lui est accordée. Chez la plupart des commentateurs tardifs d’Aristote, la tendance a été d’accentuer ce privilège de l’extension spatiale en l’élevant au premier rang (substantiel) de l’échelle catégoriale. Simplicius doit être tenu pour l’un des principaux promoteurs de ce changement par rapport à la tradition aristotélicienne¹. C’est cependant chez Jean Philopon, comme le remarque R. Sorabji², que l’itinéraire de pensée conduisant d’une étendue-détermination à une étendue-sujet est le plus facilement lisible. Dans ses premiers travaux (vers 517), Jean Philopon suivait Aristote à la lettre en qualifiant la matière de premier sujet (*hupokeimenon prôton*) et en admettant que les dimensions spatiales ne constituent qu’une “couche fondamentale de propriétés”³ quantitatives sur laquelle se greffe la couche ultérieure des propriétés qualitatives. Une douzaine d’années plus tard (en 529), le même auteur recommande pourtant de ne pas considérer l’extension tri-dimensionnelle comme propriété de la matière mais comme *premier sujet*; désormais, c’est cette extension même qui sera appelée *matière première*, et non pas le substrat complètement indéterminé d’Aristote. L’extension tri-dimensionnelle se trouve corrélativement promue au rang d’*ousia* (que l’on traduit par substance ou essence)⁴. Le passage du sens ancien, aristotélicien, à quelque chose de proche du sens actuel du mot matière, est ainsi accompli: la matière n’est plus ce qui peut être doté d’extension mais ce qui est d’emblée étendu; elle n’est plus sous-jacente aux corps mais tend à s’identifier aux corps. L’ultime projet einsteinien d’identification des corpuscules matériels à des régions de grande intensité du champ, et d’identification du champ à une courbure de l’espace, peut se lire comme une limite contemporaine de la tendance qui vient d’être décrite.

L’époque de la naissance de la science moderne de la nature, au dix-septième siècle, est un moment-clé de ce passage; un moment où l’argumentation glisse d’un plan purement ontologique à un plan épistémologique. L’affirmation par Descartes que “(...) l’étendue en longueur, largeur et profondeur, constitue la nature de la substance corporelle”⁵, s’appuie par exemple sur la remarque que la substance corporelle ne peut pas être *conçue* de façon claire et distincte indépendamment de son extension, alors qu’elle peut l’être indépendamment de telle ou telle qualité qui lui est associée. Chez Locke, la dichotomie entre les qualités primaires et les qualités secondaires, autrement dit entre les caractéristiques des corps matériels qui se montrent telles qu’elles sont en elles-

¹ Voir par exemple S. Sambursky, *The concept of place in late neo-platonism*, The Israel academy of science publications, 1982, p. 131 suiv.

² R. Sorabji, *Matter, space and motion*, Duckworth, 1988. Jean Philopon est un philosophe chrétien du sixième siècle, à peu près contemporain de Simplicius.

³ *ibid.* p. 25

⁴ *ibid.* p. 28

⁵ R. Descartes, *Les principes de la philosophie*, §53, in: R. Descartes, *Oeuvres philosophiques III*, (ed. F. Alquié), p. 123

mêmes, et les propriétés attribuées à ces corps sur la foi de phénomènes résultant de leur interaction avec les organes des sens, est aussi fondée implicitement sur des considérations d'ordre épistémique. Les qualités secondaires (saveur, couleur, chaleur, etc.) sont en effet mises à part parce qu'elles relèvent d'une seule modalité sensorielle, tandis que les qualités primaires spatiales coordonnent toutes les modalités sensorielles entre elles et avec l'activité gestuelle.

Il suffit à Kant de pousser à son terme ultime la remarque lockéenne selon laquelle "(...) certains prédicats n'appartiennent pas (aux) choses en elles-mêmes mais à leurs phénomènes seulement (...)")⁶ pour amorcer sa *révolution copernicienne* en philosophie. En mettant "(...) aussi au nombre des simples phénomènes les autres qualités des corps appelées primaires: l'étendue, le lieu et en général l'espace avec tout ce qui lui est inhérent (impénétrabilité ou matérialité, forme, etc.)"⁷, Kant peut parachever son projet de dissoudre la question traditionnelle de la conformité de la connaissance à ses objets, au profit d'une investigation de la manière dont les objets se règlent sur notre connaissance. Car désormais les choses telles qu'elles sont en elles-mêmes sont dépouillées de leurs dernières caractéristiques intrinsèques, d'ordre spatial, et toutes les déterminations, y compris spatiales, qui peuvent leur être attribuées, résultent d'un rapport avec la faculté humaine de connaître. Cela n'implique pas, bien entendu, que les déterminations spatiales des corps sont relatives à une modalité sensorielle particulière, à l'instar des qualités secondaires de Locke, mais qu'elles sont relatives à une forme *a priori* de l'intuition sensible en général.

L'argument le plus spécifique de Kant en faveur de l'absence d'inhérence des déterminations spatiales aux corps, est que l'espace est une condition élémentaire de possibilité de la représentation de choses extérieures les unes aux autres et à soi-même; en aucune manière l'espace ne peut être abstrait de la perception sensible des corps, puisque cette perception le *présuppose*. L'espace, comme le temps, pré-conditionne la perception des corps. En tant que forme pure de l'intuition sensible, l'espace rend possible une connaissance de quelque chose comme des corps matériels parce qu'il permet la représentation des relations d'extériorité qui les définissent; de même, le temps rend possible une connaissance de quelque chose comme des déterminations de corps matériels, parce qu'il permet la représentation de relations de *succession* entre phénomènes, et qu'il évite ainsi la coexistence de traits contradictoires *en un même lieu*. Mais pour passer de ce premier arrière-plan de possibilité de la connaissance à une connaissance pleinement constituée, il est indispensable que le contenu de l'intuition sensible reçoive de l'entendement la *détermination légale* qui définit l'objectivité. Lier le divers des perceptions en une expérience, ordonner la succession des phénomènes locaux au moyen de règles prescrites par l'entendement (comme le principe de permanence de la substance et le principe de causalité), c'est cela qui objective certaines séquences sélectionnées de régions spatiales en *corps matériels en mouvement*. C'est cela qui autorise par exemple à

⁶ E. Kant, *Prolégomènes à toute métaphysique future qui pourra se présenter comme science*, §12, remarque II, Vrin, 1968, p. 53

⁷ *ibid.*

définir la matière sur le plan dynamique comme “(...) le *mobile* en tant qu’il remplit un espace”⁸. Au total, les concepts purs de l’entendement ne s’appliquant légitimement, chez Kant, qu’au contenu d’une intuition sensible informé *a priori* par son cadre spatio-temporel, les objets qu’ils conduisent à définir ne peuvent être que matériels. L’objet de connaissance s’identifie ici *constitutivement* à la matière et à son mouvement.

Jean Piaget, l’un des principaux précurseurs des sciences cognitives contemporaines (en particulier de leur branche dynamique et auto-organisationnelle), a mis en place ce qu’on pourrait appeler une réorientation pragmatiste et génétique de la conception kantienne de la connaissance.

Au couple kantien *sensibilité - entendement* est substitué par Piaget un *couple réceptivité sensible - activité motrice structurée*. L’architecture générale de la faculté de connaître kantienne est ainsi préservée, à ceci près que:

1) la part d’activité constitutive qui était attribuée par Kant à l’intuition sensible, par le biais de ses formes *a priori* que sont l’espace et le temps, est tout entière transférée par Piaget à l’activité motrice. C’est l’aspect pragmatiste de l’épistémologie piagétienne.

2) l’a priorité originaire des formes kantienne de la sensibilité et de l’entendement est remplacée chez Piaget par un processus de développement par paliers, alternant durant l’enfance: (a) l’*assimilation* des phénomènes aux schèmes d’activité, et (b) une *accommodation* des schèmes d’activité qui permet d’élargir et d’améliorer leur capacité d’assimilation. C’est l’aspect génétique de l’épistémologie piagétienne.

La constitution de l’espace, de l’objectivité, et du concept de corps matériel, est à partir de là décrite par Piaget comme une histoire à la fois unique et multidimensionnelle. Unique parce que dérivant en bloc de la mise en oeuvre réglée des aptitudes sensori-motrices de l’homme, et multidimensionnelle parce que se différenciant au terme de son itinéraire en plusieurs composantes. L’espace et les corps sont en particulier, selon Piaget, génétiquement co-constitués, même s’ils sont nettement distingués en fin de parcours: “l’espace n’est (...) nullement la perception d’un contenant, mais bien celle des contenus, c’est-à-dire des corps eux-mêmes; et si l’espace devient en un sens un contenant, c’est dans la mesure où les relations constituant l’objectivation de ces corps parviennent à se coordonner entre elles jusqu’à former un tout cohérent”⁹. Antérieurement à l’objectivation des corps, on ne peut même pas parler d’espace mais seulement d’un recouvrement de champs sensoriels et moteurs disjoints; la dissociation entre contenant et contenu n’intervient qu’à l’issue de la définition d’un contenu corporel objectivé. Que suppose alors l’objectivation des corps? Avant tout, selon Piaget, des schèmes d’activité motrice *réversibles*, organisés en systèmes d’actes *réciroques*, et dotés de ce fait d’une structure de *groupe*. C’est seulement par exemple lorsqu’une région caractérisée du champ visuel est insérée dans un schème de suivi oculo-moteur et de retour du foyer oculaire au point initial, que

⁸ E. Kant, *Premiers principes métaphysiques de la science de la nature*, Vrin, 1990, p. 51

⁹ J. Piaget, *La construction du réel chez l’enfant*, 1977, p. 87. Voir aussi F. Varela, E. Roch, & E. Thomson, *L’inscription corporelle de l’esprit*, Seuil, 1993

son mouvement se trouve défini par référence aux déplacements effectués pour la suivre. Et c'est seulement à partir du moment où le schème du suivi opère en l'*absence* momentanée de la région concernée (disons lorsqu'elle disparaît derrière un écran), qu'il constitue cette région caractérisée en objet *permanent*. D'autres schèmes contribuant à constituer une région d'un champ sensoriel en objet permanent sont ceux de déplacement et de remplacement par manipulation, ou d'assemblage et de désassemblage en sous-régions. A ces schèmes s'ajoute celui de substitution réglée et reproductible de régions spatiales caractérisées, qui conduit, grâce à la maîtrise des antécédents qu'il autorise, à mettre en place des relations de *causalité*. Ensemble, ces schèmes (aussi bien ceux qui constituent l'objet permanent que les relations de causalité entre objets) permettent de détacher les objets corporels des circonstances, en *anticipant* leur devenir même lorsqu'ils sont hors de portée de l'appréhension sensorielle directe. Les schèmes décrits sont en somme porteurs de ce que nous nommerons une objectivation *incarnée*, ou encore présumposée, par l'activité motrice. Cette notion d'incarnation ou de présupposition de l'objectivité est à vrai dire suffisamment large pour s'appliquer à d'autres niveaux que celui de l'activité motrice, privilégié par Piaget. Elle s'applique aussi aux usages (ouvertement ou tacitement) performatifs du langage courant. Demander à quelqu'un: "vas me chercher une chaise dans l'autre pièce", cela présuppose autant la disponibilité permanente du corps matériel "chaise", et son détachement à l'égard des circonstances perceptives présentes, que sortir pour aller le chercher soi-même. Il faut simplement reconnaître que, comme le laisse entendre le fréquent usage conjoint de verbes d'action, la présupposition discursive reste conditionnée par le jeu des présuppositions sensori-motrices.

Dans cette perspective, ce que réussissent à accomplir les sciences physiques, c'est d'une part une transposition symbolique des schèmes réversibles d'activité constitutifs d'objectivité (essentiellement sous forme de structures de groupes mathématisées), et d'autre part une transformation des anticipations performatives spécifiques en anticipations symboliques systématiques ou *pré-dictions*. Le problème (d'ordre philosophique), c'est que le succès réitéré de cette stratégie incite à détacher les corps matériels objectivés non seulement de chaque circonstance perceptive mais aussi de la procédure même qui permet de les extraire en tant qu'invariants perceptifs. Il incite à projeter la *forme* des schèmes gestuels et discursifs qui incarnent le procédé d'objectivation sur l'objet résultant, et à traiter par conséquent cette *forme* comme si elle était un *fait* de la nature. De là dérivent les termes et l'inextricabilité du débat entre idéalisme et réalisme, remarquablement caractérisé par Wittgenstein: "Les (idéalistes) s'en prennent à la *forme* d'expression normale comme ils s'en prendraient à une affirmation, les (réalistes) la défendent comme ils constateraient des *faits* que reconnaît tout homme raisonnable"¹⁰. De là vient aussi, sur le versant réaliste de l'antinomie, le sentiment d'une pérennité de la forme "corps matériel" de l'objet des sciences

¹⁰ L. Wittgenstein, *Investigations philosophiques* §402, in: *Tractatus logico-philosophicus* suivi de *Investigations philosophiques*, Gallimard, 1961, p. 250. Les italiques ont été ajoutés.

physiques. Car si cette forme appartient à la chose même et non pas à la classe des procédures sensori-motrices d'objectivation, alors on n'a aucune raison de douter à la fois de sa résistance aux avancées scientifiques et de son universalité à toute échelle et dans tous les domaines d'exploration. C'est cette dernière certitude que la révolution quantique est venue mettre à mal; et c'est corrélativement vers les procédures d'objectivation plutôt que vers le seul et problématique objet qu'elle a ré-orienté le regard philosophique.

Physique quantique et “retour au primitif”

D'un point de vue constitutif, la question n'est ni de savoir comment caractériser des corps matériels pré-existants, ni à l'inverse de trouver un moyen de démontrer l'“inexistence” de tels corps matériels dans un domaine d'investigation donné (disons celui de la physique quantique). Elle est de déterminer jusqu'à quel point les *conditions* qui autorisent à présupposer la disponibilité de corps matériels dans l'action et le discours familiers, sont encore remplies dans ce domaine d'investigation. Cette façon de voir a été remarquablement illustrée par Piaget, dans une discussion à propos de la transformation des relations spatiales en microphysique. “Le microphysicien contemporain, écrit-il, s'impose (...) de lui-même à titre d'idéal scientifique une sorte de *retour au primitif*, mais de retour voulu et très lucide (...). Il s'efforce de se refaire une mentalité vierge de toute notion préconçue dans la mesure où ses actions individuelles se trouvent à la limite de leur échelle opérative: il s'applique, comme le tout jeune enfant, à ne croire aux objets que dans la mesure où il peut les retrouver, et ne veut connaître de l'espace et du temps que ce qu'il en peut construire, en reconstituant un à un les rapports élémentaires de position, de déplacement, de forme, etc.”¹¹. Le “retour au primitif” dont parle Piaget revient à re-mobiliser point par point le cadre d'objectivité qu'incarnent nos formes de vie au lieu de se contenter de l'appliquer de façon irréfléchie. Ce retour n'est perçu comme une régression que dans la mesure où il oblige à mettre entre parenthèses la projection réifiante de la forme des procédures d'objectivation en corps matériels existant indépendamment d'elles. Mais il peut aussi, dans une perspective non-réifiante, être reconnu comme une importante avancée, parce qu'il permet d'une part de généraliser et donc de rendre plus largement efficaces les schèmes de réciprocité initiaux, et d'autre part d'acquérir une conscience réflexive plus aiguë de la manière dont ces schèmes interviennent dans la constitution d'objet. Il a les vertus et la fraîcheur d'un recommencement, tout en bénéficiant des enseignements acquis lors du premier commencement. Comme le jeune enfant, explique Piaget, le microphysicien “(...) ne croit pas à la permanence de l'objet individuel tant qu'il ne peut pas le retrouver par des actions coordonnées (...). (Il) en construit au contraire la notion sitôt que les actions de retrouver peuvent être effectuées systématiquement (...)”¹². Mais à la différence

¹¹ J. Piaget, *Introduction à l'épistémologie génétique, 2-La pensée physique*, P.U.F., 1974, p. 226

¹² *ibid.* p. 222

du jeune enfant, “(...) le microphysicien ne se contente pas de refuser d’admettre des notions qui dépassent l’action effective (...)”; il élabore “tout un système d’opérations intellectuelles et mathématiques” afin de traduire l’éclatement et la disparition partielle des conditions performatives autorisant à présupposer des corps matériels, et de continuer en dépit de cela à maîtriser sur un mode pré-dictif les conséquences de ses manipulations expérimentales.

A vrai dire, dans le compte-rendu précédent, Piaget idéalise quelque peu la netteté des vues épistémologiques des physiciens, et il préjuge de l’univocité des attitudes acceptables face à l’indisponibilité en microphysique de quelques-uns des principaux critères opératoires de définition des corps matériels. Cela est certainement dû à la sélectivité des textes de physiciens sur lesquels il s’appuie (essentiellement ceux de Heisenberg, et ceux de de Broglie *avant* sa reconversion aux théories à variables cachées). Ici, Piaget n’opère que comme porte-parole averti, et interprète original, des thèses les plus couramment acceptées à l’époque de relatif consensus (vers la fin des années 1940) durant laquelle il écrit. Depuis, se sont faites jour au moins trois grandes possibilités de contourner l’obstacle constitué par la perte de certains invariants expérimentaux traditionnels, et de continuer à s’exprimer en dépit de cette perte *comme si* les expériences portaient sur des objets partiellement ou totalement assimilables à des corps matériels individualisés et porteurs de propriétés.

La première de ces possibilités se manifeste à travers l’attitude d’engagement ontologique flexible de la plupart des physiciens contemporains. Ceux-ci ont beau accorder une priorité de fait à leurs *activités* spécifiques de chercheurs (qu’elles soient expérimentales ou mathématico-symboliques), ils continuent à manipuler, à des fins heuristiques, des représentations fragmentaires d’objets dont certains aspects les apparentent aux corps matériels. Il utilisent parallèlement des termes à sémantique variable comme ceux de “particule élémentaire” ou d’“état”, et mettent en oeuvre à travers eux ce que H. Putnam¹³ appelle des “notions à large spectre”. Des notions qui sont encore empreintes de leur origine familière à l’échelle humaine, mais qui sont suffisamment assouplies, éclatées, et contextualisées en fonction des approches instrumentales utilisées, pour ne pas s’inscrire en faux contre la variété élargie des phénomènes microphysiques.

Une seconde possibilité de ne pas renoncer aux aspects les plus pertinents du concept de corps matériel, est de formaliser les lignes de force de l’attitude pragmatique des physiciens dans un cadre ensembliste et une logique modifiées: la théorie des quasi-ensembles et la (ou les) logique(s) quantique(s)¹⁴. Une théorie des quasi-ensemble qui permet de manipuler des classes qui *ne* sont *pas* instanciées par des *individus*, et des logiques quantiques qui prennent en charge, le plus souvent par des règles altérées de conjonction et de disjonction, l’incompatibilité des contextes expérimentaux relativement auxquels sont définis les prédicats.

¹³ H. Putnam, *Définitions*, Editions de l’Eclat, 1992, p. 61; voir aussi M. Bitbol, *L’aveuglante proximité du réel*, Champs-Flammarion, 1998, chapitre 5

¹⁴ Voir M. Bitbol, *Mécanique quantique, une introduction philosophique*, Champs-Flammarion, 1997, §4-4

Une troisième possibilité, enfin, réside dans les théories à variables cachées, dont seules les variétés *non-locales* sont acceptables au regard du théorème de Bell, mais qui ont l'avantage d'éviter la fragmentation et les assouplissements consentis par l'attitude pragmatique des physiciens. Elles n'y parviennent toutefois qu'au prix d'une radicale dissociation entre les objets décrits et les schèmes d'activité expérimentale. Les objets de ces théories à variables cachées sont des points focaux idéaux, des lieux de convergence hypothétiques pour les invariants locaux des schèmes opératoires partiels. Ils ne représentent par contre l'invariant effectif d'*aucun* schème opératoire global. Ils résultent d'une sorte de fonctionnement à vide, parce que transposé dans un domaine trans-empirique, de l'entreprise cognitive de recherche des invariants.

L'existence de stratégies de contournement, comme celles qui viennent d'être exposées, ne doit cependant pas nous dissuader d'identifier clairement la nature de l'obstacle contourné. Elle ne doit pas non plus nous empêcher de tirer tous les enseignements de la démarche de ceux (à savoir les principaux créateurs de la théorie quantique) qui ont préféré pratiquer un "retour au primitif", vers les schèmes opératoires et les groupes de transformation de la microphysique, plutôt que de maintenir dans un état de survie artificielle le genre d'invariant qui était associé à des schèmes opératoires antérieurs. Car, il ne faut pas l'oublier, la part de pertinence du discours de ceux qui continuent à affirmer que la physique quantique a pour objets une multitude de petites entités assimilables par certains côtés à des corpuscules matériels, est elle-même suspendue au résultat de cet examen réflexif.

Espace, identité, et causalité

L'identité d'un corps matériel à travers le temps est présupposée par l'acte de langage consistant à y faire *référence*. Ce point est rendu particulièrement évident par les théories de la référence de J. Searle et S. Kripke. Selon Searle¹⁵, se référer à quelque chose, c'est implicitement se déclarer capable d'identifier cette chose à l'heure actuelle, ou de la réidentifier si elle se présente à nouveau dans le futur. Kripke, pour sa part, considère qu'utiliser le procédé de la dénomination revient à admettre soit qu'il sera possible de reconnaître dans le futur la chose qui vient d'être "baptisée", soit à l'inverse qu'il est possible de rattacher la chose dont on utilise actuellement le nom à un acte de baptême passé¹⁶. On pourrait remarquer dans le même ordre d'idées que l'identité trans-temporelle d'un corps matériel est présupposée par les procédures de poursuite à la trace d'une région caractérisée de l'espace, impliquant tantôt directement le système oculo-moteur tantôt des appareillages qui opèrent sur le même mode à d'autres échelles. Mais en vérité, cette dernière proposition est aussi susceptible de s'inverser: en cas de manque de tout autre critère d'identité, c'est le rattachement par continuité d'une région de l'espace à une autre, assuré par une procédure de suivi (voire de manipulation),

¹⁵J. Searle, *Speech acts*, Cambridge University Press, 1969

¹⁶S. Kripke, *Naming and necessity*, Basil Blackwell, 1980

qui est pris comme seule garantie de son identité trans-temporelle. Dans ce cas, on parle de l'identité généalogique, ou de la "généidentité", d'un corps matériel, pour la distinguer d'une identité assurée par la permanence de caractéristiques individuelles discriminantes.

Le problème est que dans le domaine d'investigation expérimentale de la physique quantique, aucun critère d'identité, qu'il s'appuie sur des déterminations individuelles discriminantes ou sur la possibilité d'un suivi permanent, n'est généralement opérant. Pour commencer, celles des déterminations des "particules" qui sont soumises à des "règles de supersélection"¹⁷, à savoir diverses charges, la masse, le module du spin, etc. ne sont pas suffisantes pour caractériser une particule individuelle; leur ensemble définit tout au plus une *espèce* de particules (l'électron, le proton, le quark-u, etc.). D'autres variables non soumises à des règles de supersélection, comme la position dans l'espace tridimensionnel ordinaire, sont il est vrai susceptibles de fournir la détermination individuante recherchée. Mais elles sont régies par une relation d'indétermination de Heisenberg qui limite leur prédictibilité en fonction de la marge de prédictibilité d'une seconde variable, dite conjuguée; elles laissent de ce fait généralement subsister une zone de superposition entre la distribution de probabilité de trouver une certaine particule en un point au moyen d'un détecteur, et la distribution de probabilité d'en trouver une autre au même point. Sauf dans des cas bien particuliers (cavités contenant une seule particule, réseaux cristallins dont chaque site joue le rôle de cavité, etc.), ni la discrimination entre particules, ni l'identité de chacune d'entre elles, ne peut donc être assurée à chaque instant au moyen de ce genre de variable. Par ailleurs, en mettant encore une fois à part quelques cas spectaculaires conditionnés par un environnement restrictif (comme la micro-manipulation sur sites cristallins), on doit admettre qu'il n'y a pas moyen de mettre en place une procédure *universelle* de suivi ou de déplacement maîtrisé de chaque particule dans l'espace tridimensionnel. La relation d'indétermination entre coordonnées spatiales et coordonnées de quantité de mouvement a en effet pour conséquence que ce que l'on peut détecter du déplacement supposé d'une particule n'est pas tant une véritable trajectoire continue qu'une suite discontinue de régions spatiales assez étendues et plus ou moins alignées. On pourrait certes supposer, par analogie avec le cas des corps en mouvements provisoirement cachés derrière un écran, qu'une trajectoire continue se poursuit à l'insu de l'expérimentateur entre les régions de détection. Mais les deux situations ne sont en fait pas comparables. Car, dans le cas du corps matériels caché derrière un écran, quantité de descriptions conditionnelles de son mouvement sont autorisées: on *pourrait* passer derrière l'écran pour observer ce qui s'y passe, on *pourrait* aussi utiliser un procédé de rayons X, ou un système de miroirs, pour appréhender simultanément ce qui arrive devant et derrière l'écran. Au contraire, dans le cas des "trajectoires de particules", l'interpolation expérimentale (qui joue le rôle de "coup d'oeil jeté derrière l'écran") n'aboutit, une fois de plus en vertu des relations d'indétermination, qu'à une dispersion

¹⁷ B. d'Espagnat, *Le réel voilé*, Fayard, 1994, p. 111, 187

accrue des régions spatiales où les événements de détection sont susceptibles de se produire.

E. Schrödinger a sans doute été celui des créateurs de la théorie quantique qui a le plus insisté sur cette carence des critères d'identité dans l'espace ordinaire, et qui en a tiré les conclusions les plus radicales. Selon lui, en l'absence de critères d'identité ou de géidentité stricte, on doit aller jusqu'à refuser de faire référence à la moindre particule. "Selon moi, écrivait-il, abandonner la trajectoire équivaut à abandonner la particule"¹⁸. L'indisponibilité principielle de toute trajectoire (principielle parce qu'ayant valeur légale en théorie quantique à travers les relations d'indétermination) conduit même à admettre que "(...) les particules, dans le sens naïf d'antan, *n'existent pas*"¹⁹. Le discours du physicien s'en trouve complètement inversé. Au lieu d'admettre qu'à faible distance, des particules individuelles ont une "probabilité d'échange" non nulle, qu'on risque alors de les prendre l'une pour l'autre et de perdre les conséquences statistiques de leur individualité, Schrödinger n'hésite pas à affirmer qu'"(...) *il n'y a pas* d'individus qui pourraient être confondus ou pris l'un pour l'autre. De tels énoncés sont dénués de sens"²⁰. Plutôt que d'utiliser un formalisme impliquant des opérateurs de symétrie et d'anti-symétrie, avec ses états étiquetés par des noms de particules et ses permutations d'étiquettes, il préconise par conséquent de mettre en oeuvre le formalisme de la théorie quantique des champs, dans lequel il n'est plus du tout question de *n* particules dans un état, mais d'un état dans son *n*-ième niveau quantique. De plus, au lieu de considérer que des particules ont une trajectoire approximative, Schrödinger signale que tout ce dont on dispose, et tout ce que régit la mécanique quantique, ce sont "(...) de longs chapelets d'états successivement occupés (...)". La seule chose qui conduit bien des physiciens à parler de trajectoires *de particules* dans ce cas est que "(...) de tels chapelets donnent l'*impression* d'un individu identifiable (...) "²¹. Il ne s'agit là que d'une impression, ou pire d'une *illusion*, surenchérit Schrödinger: "Quelques fois ces événements forment des chaînes qui donnent l'illusion d'entités permanentes"²². Schrödinger suit ici à la lettre la prescription piagétienne de "retour au primitif". Au lieu d'extrapoler automatiquement, dans son discours, un système classique d'assertions sur les corps matériels, il en analyse les conditions performatives d'assertabilité. Ayant trouvé que l'une des plus cruciales de ces conditions, à savoir l'opérativité universelle des schèmes de suivi et de déplacement continu, n'est pas remplie, il suspend toute référence à des équivalents complets ou partiels des corps matériels en physique microscopique.

L'absence d'une autre de ces conditions, c'est-à-dire de la possibilité de faire usage du schème de substitution réglée et reproductible d'antécédents spatio-

¹⁸ Lettre de E. Schrödinger à H. Margenau, 12 Avril 1955, AHQP, microfilm 37, section 9

¹⁹ E. Schrödinger, "L'image actuelle de la matière", in: *Gesammelte abhandlungen*, Volume 4, F. Wieweg & Sohn, 1984, p. 506

²⁰ E. Schrödinger, "What is an elementary particle?", *Endeavour*, 9, 109-116, 1950

²¹ *ibid.*

²² E. Schrödinger, *Science et humanisme*, in: *Physique quantique et représentation du monde*, Seuil, 1992, p. 47

cinématiques²³ afin de dégager des rapports de cause à effet entre événements, a été plus particulièrement analysée et discutée par Heisenberg et par Bohr. Dans l'article de 1927 dans lequel il exposait pour la première fois les relations d'indétermination qui portent son nom, Heisenberg remarquait que ce que ces relations interdisaient, c'était de fixer les conditions initiales du mouvement d'un (éventuel) corpuscule matériel avec une précision et une reproductibilité arbitrairement bonne. Il en inférait que "ce qui a été réfuté dans la loi exacte de causalité, selon laquelle 'quand nous connaissons le présent avec précision, nous pouvons prédire le futur', ce n'est pas la conclusion mais l'hypothèse"²⁴. Sans doute fasciné par la teneur révolutionnaire de l'idée d'une pure et simple réfutation de la loi de causalité, sans restriction d'aucune sorte, il se laissait aller à ajouter en fin de parcours que "(...) la mécanique quantique établit l'échec final de la causalité". Peu de temps après la publication de cet article, plusieurs chercheurs, parmi lesquels quelques philosophes²⁵, objectèrent cependant à Heisenberg que sa conclusion très forte ne découlait pas des prémisses dont il était parti. D'une part, l'impossibilité de fixer des antécédents ne réfute pas la loi de causalité dans l'absolu mais la rend opératoirement inapplicable; elle ne fait que lui retirer, comme le dit A. Kojève, tout "sens physique". C'est dans cette brèche que se sont engouffrés les partisans des théories à variables cachées. D'autre part, ainsi que le faisaient remarquer M. Schlick et E. Cassirer, la loi de causalité a une valeur essentiellement régulatrice pour la recherche; elle est un *principe d'orientation* plutôt qu'une loi au sens étroit du terme. Son inapplicabilité ou son incapacité à fournir des prédictions certaines lorsqu'on la fait porter sur les seules séquences singulières d'événements spatio-temporels, n'empêche pas de chercher un domaine plus vaste où pourrait être mise en pratique la demande vague d'ordre et de "promesses de connaissances futures"²⁶ en quoi elle consiste en tant que principe. Sensible à ce genre d'argument, Heisenberg se ralliait dès 1929-1930 à une analyse plus nuancée, empruntée à Bohr, du statut de la "loi de causalité" en physique quantique. Selon cette nouvelle perspective, il n'est pas question d'affirmer, sans plus, que la loi de causalité a été réfutée par la physique quantique, mais seulement que "(...) La description des faits dans l'espace et dans le temps d'une part et la loi de causalité d'autre part, représentent des aspects des faits complémentaires et qui s'excluent l'un l'autre"²⁷. Autrement dit, la causalité en tant que principe peut rester à l'ordre du jour; seule son application dans le champ constitutif du concept de corps matériel, à savoir l'espace et le temps ordinaires, a été exclue ou du moins privée

²³ Dans des séquences d'"états" au sens de la mécanique classique (c'est-à-dire de couples de valeurs des coordonnées de position et de quantité de mouvement).

²⁴ W. Heisenberg, "The physical content of quantum kinematics and mechanics", in: J.A. Wheeler & W.H. Zurek, *Quantum theory and measurement*, Princeton University Press, 1983

²⁵ H. Bergmann en 1929 (voir M. Jammer, *The philosophy of quantum mechanics*, J. Wiley, 1974); A. Kojève, *L'idée du déterminisme*, Livre de poche, 1991; E. Cassirer, *Determinism and indeterminism in modern physics*, Yale University Press, 1956.

²⁶ E. Cassirer, *Determinism and indeterminism in modern physics*, op. cit. p. 65

²⁷ W. Heisenberg, *Les principes physiques de la théorie des quanta*, Gauthier-Villars, 1972, p. 52

de “sens physique” et de fécondité prédictive, par l’avènement de la physique quantique.

Un autre lieu d’objectivité?

Pour récapituler, ni le schème d’identité de l’objet, ni celui de substituabilité d’antécédents reproductibles, ne sont généralement applicables à des régions délimitées de l’espace ordinaire, à l’échelle microscopique. En traduisant ce constat en termes kantien, on pourrait aussi dire qu’au moins deux des règles qui contribuent à transformer la simple suite des apparences en une connaissance d’objets, à savoir le principe de permanence de la substance et le principe de causalité, sont inapplicables aux rapports de succession des phénomènes singuliers situés dans l’espace ordinaire à l’échelle microscopique. La conséquence de cela est qu’à moins de trancher définitivement le fil conducteur qui conduit des procédures d’objectivation à l’objectivité (comme acceptent de le faire les partisans des théories à variables cachées), on doit admettre que l’*objet* de la microphysique n’est ni de près ni de loin assimilable au type des corps matériels. Les conditions performatives d’assertabilité d’énoncés portant sur des *corpuscules* matériels ne sont pas remplies.

On aurait pu arriver à la même conclusion beaucoup plus directement en remontant à la racine définitionnelle du concept d’objectivation, et en montrant que le critère central permettant de satisfaire à une telle définition n’est pas rempli en microphysique. Objectiver cela veut dire avant tout *stabiliser* un aspect des phénomènes, le désolidariser non seulement du contexte perceptif ou instrumental de sa manifestation, mais aussi des circonstances particulières de la mise en place de ce contexte, et pouvoir ainsi le prendre comme thème d’une description valant pour tous ceux qui se placeraient dans des conditions perceptives ou instrumentales suffisamment voisines. Or, justement, l’une des premières conclusions importantes que les créateurs de la mécanique quantique ont tirées de leurs réflexions sur cette théorie et sur la situation épistémologique qu’elle exprime, consiste à dire qu’il est généralement impossible de défaire le lien entre le phénomène et les circonstances expérimentales particulières de sa manifestation. Bohr a été le premier à l’affirmer, entre 1927 et 1929: “(...) la grandeur finie du quantum d’action, écrit-il, ne permet pas de faire entre phénomène et instrument d’observation la distinction nette qu’exige le concept d’observation (...)”²⁸. Il a insisté plus tard sur les processus *irréversibles*, à la fois indispensables et incontrôlables, qui accompagnent chaque événement de détection, et qui interdisent en général²⁹ de reproduire précisément les conditions initiales qui y ont conduit. La procédure de saisie opératoire du stable ou du répétable dans le mouvant, en quoi consiste fondamentalement l’objectivation, est donc entravée à la source lorsqu’on cherche à l’appliquer aux rapports et aux successions de phénomènes singuliers spatio-cinématiques relevant de la

²⁸N. Bohr, *La théorie atomique et la description des phénomènes*, op. cit. p. 10

²⁹ Si l’on ne s’interdit pas de faire alterner des mesures de variables conjuguées.

microphysique. Le projet scientifique de maîtriser le flux héraclitéen des phénomènes en un ordre réglé de succession des états d'objets, semble gravement compromis. Mais il n'est après tout compromis de façon avérée qu'au niveau des séries de phénomènes isolés comprenant des indications sur une stricte localisation dans l'espace-temps. Il ne rencontre d'obstacles clairement identifiés que lorsqu'on cherche à conférer à l'objet de la physique microscopique une forme plus ou moins inspirée du corps matériel. Pourquoi ne pas reprendre *ab initio* la procédure d'objectivation en changeant radicalement son niveau d'application, et en n'exigeant pas d'avance qu'elle aboutisse aux figures familières à l'échelle de l'homme?

Une méthode pour cela consiste à repousser d'un cran le projet général d'identification d'un invariant. Ne disposant pas d'une structure stable génératrice de phénomènes singuliers spatio-temporellement localisés reproductibles, rien n'empêche de chercher une structure stable génératrice de *distributions statistiques* reproductibles³⁰. Or, l'une de celles-ci est bien connue en mécanique quantique: il s'agit du vecteur d'état. D'une part, un vecteur d'état unique est associé de façon permanente à une classe définie de préparations expérimentales: à partir du moment où la préparation est fixée, le vecteur d'état l'est aussi, et il évolue par la suite conformément à une équation aux dérivées partielles strictement continue et déterministe (l'équation de Schrödinger). D'autre part, chaque vecteur d'état est le générateur d'autant de distributions fixes de probabilités que de mesures pouvant être accomplies à la suite de la préparation qui lui correspond. En somme, si le corps matériel peut être appelé (en s'inspirant de Leibniz et Merleau-Ponty) le "géométral" d'une classe d'aspects phénoménaux spatio-temporels, le vecteur d'état est, lui, le géométral des distributions statistiques de phénomènes obtenus à la suite d'une préparation expérimentale spécifiée. Une différence notable entre les deux est que, contrairement à l'invariant "corps matériel", qui est une entité située dans le cadre spatio-temporel ordinaire, l'invariant "vecteur d'état" se déploie dans un espace abstrait (l'espace de Hilbert). L'espace-temps où se manifestent les phénomènes est rigoureusement coextensif à la scène géométrique du devenir des entités "corps matériel", alors qu'il est complètement distinct du cadre géométrique où évoluent les vecteurs d'état. C'est ce dernier point qui explique que Heisenberg ait qualifié, dans *Physique et philosophie*, le vecteur d'état (ou la fonction d'onde) d'entité *objective mais pas réelle*. Le qualificatif "réel" est en effet réservé par Heisenberg, conformément à l'étymologie latine du mot allemand *realität* qu'il emploie ici, à des objets isomorphes à la "chose" familière (ou au corps matériel), c'est-à-dire à des objets situés dans l'espace-temps ordinaires. C'est aussi ce point qui justifie que G. Cohen-Tannoudji ait

³⁰Souhaitant approfondir ce projet de changement du lieu d'objectivation en microphysique, quelques chercheurs se sont mis en quête d'une classe inédite de méthodes expérimentales vis-à-vis desquelles le vecteur d'état ne représente plus un invariant *seulement statistique*, mais l'invariant de certaines séquences singulières de phénomènes. De telles méthodes ont été identifiées sous le nom de procédures de mesure "adiabatiques". Voir Aharonov Y., Anandan, J., and Vaidman L., "Meaning of the wave function", *Physical Review*, A47, 4616-4626, 1993

considéré que l'espace de Hilbert était le nouveau lieu de l'objectivité en physique, en remplacement de l'espace-temps ordinaire³¹.

L'insistance de Schrödinger sur la *réalité* des fonctions d'onde (ou les vecteurs d'état) se comprend quant à elle si l'on se souvient de la tendance de cet auteur à faire converger les notions d'objectivité et de réalité³². Quoi que l'on puisse penser de cette assimilation, il faut reconnaître qu'elle a donné à Schrödinger l'audace intellectuelle nécessaire pour contester l'ordonnancement convenu d'un atomisme encore mal affranchi de ses connotations "corpusculaires". Selon Schrödinger³³, la matière telle que nous la manipulons dans notre environnement immédiat *ne* consiste *pas* en un assemblage géométrique d'atomes plus ou moins assimilés à de petits corps matériels. Elle doit être considérée comme une *observable* spatiale macroscopique dont la stabilité relative est d'ordre statistique, et dont le rapport avec les observables spatiales microscopiques (comme celles qui sont appréhendées par le microscope à effet tunnel) est de l'ordre de la "coalescence"³⁴ plutôt que de la juxtaposition. Ainsi, la matière se trouve-t-elle complètement dépossédée du privilège d'être auto-explicable parce qu'auto-composée (les grands corps matériels étant supposés résulter d'une sorte d'empilement de corps matériels plus petits). Elle ne peut plus prétendre qu'au statut de résultante d'une procédure *limitée* d'objectivation des phénomènes, approximativement

³¹ On peut s'interroger dans ces conditions sur la persistance dans le langage standard des traités de mécanique quantique d'expressions comme "le vecteur d'état de telle particule est ...", ou bien "on a préparé telle particule dans tel état". Ces expressions ne laissent-elles pas entendre que l'objet d'investigation reste une (des) "particule(s)" reliée(s) de façon plus ou moins lâche, avec plus ou moins d'aspects ondulatoires et plus ou moins de sens de l'abstraction, au type antérieur des corps matériels situés dans l'espace-temps ordinaire? Et cette façon de s'exprimer est-elle vraiment compatible avec un changement *complet* de lieu d'objectivité tel que celui qui est suggéré par G. Cohen-Tannoudji? La réponse à cette dernière question est pour l'essentiel négative. Le signe de cette incompatibilité est la multiplication de paradoxes bien connus qui ne sont pas tant ceux de la physique quantique que ceux de la juxtaposition persistante à cette physique de représentations qui lui sont antérieures. Mais s'il en est ainsi, pourquoi les physiciens continuent-ils à faire usage de ces modes d'expression et de leurs représentations associées? On peut l'expliquer par leur souhait de concilier autant que possible deux besoins distincts. Le premier besoin est de disposer des invariants à fonction prédictive les plus généraux et les plus féconds possibles. Les vecteurs d'état, et les symétries qui opèrent sur eux, jouent ce rôle. Le second besoin est d'assurer la continuité historique des types ontologiques, et en particulier de tirer un fil conducteur entre la "chose" de la vie courante et l'objet de la physique. Pour atteindre ce second but (souvent tacite), les physiciens s'appuient sur un agrégat d'invariants spatio-temporels *partiels*, de séquences de phénomènes *approximant* des trajectoires, de critères d'identité *temporairement* opérants, de classes limitées de déterminations "super-sélectives" (non soumises à des relations d'indétermination), ou de schèmes d'activité de manipulation aux domaines de validité *restreints*. La "particule" est le fédérateur composite vers lequel sont censés converger: le pointillé d'une quasi-trajectoire, une masse et un ensemble de charges, des possibilités ponctuelles d'insertion dans un schème de manipulation, etc. Les lacunes dans les quasi-trajectoires, l'impossibilité d'attribuer aux "particules" d'autres *propriétés* au sens strict que celles qui relèvent d'observables super-sélectives, les carences des schèmes de manipulation en dehors de certaines situations spécifiées, sont tenus pour des circonstances dont il faut certes tenir compte dans l'utilisation des vecteurs d'état (ou des intégrales de chemin de Feynman), mais qui restent marginales au regard de la décision implicite de conserver coûte que coûte des formes d'expression issues de l'ontologie somatologique de la vie courante. Cette stratégie réussit plutôt bien en pratique, mais au prix d'une tension permanente entre le petit nombre de degrés de liberté du discours et la généralité du formalisme. De là vient l'impression, justifiée, des physiciens, que "les mathématiques en savent plus qu'eux"; plus qu'eux, c'est-à-dire plus que le cadre discursif pré-compris qu'ils continuent à utiliser par fragments adroitement articulés les uns aux autres.

³² M. Bitbol, *Schrödinger's philosophy of quantum mechanics*, Kluwer, 1996, chapitre 4

³³ E. Schrödinger, *The interpretation of quantum mechanics*, (Ed. M. Bitbol), Ox Bow Press, 1995, chapitre 3.

³⁴ *ibid.* p. 98-99

acceptable à l'échelle spatiale macroscopique parce qu'appuyée sur un faible niveau de fluctuations statistiques relatives. Elle représente si l'on veut un type d'objet émergent à grande échelle. Les conséquences de cette réorganisation du champ conceptuel pour la définition même des sciences physiques ne sont pas minces. Si on l'accepte (et on *doit* l'accepter lorsqu'on assume toutes les conséquences du "retour au primitif" piagétien), on est en effet conduit à admettre du même coup que *la matière n'est pas l'objet universel des investigations du physicien*. Elle ne représente rien de plus que la présupposition de base et la motivation initiale de ces investigations. En termes plus directs, le physicien ne peut plus être dit "chercher à percer les secrets *de* la matière". Son travail consiste plutôt à articuler des invariants performatifs de plus en plus étendus lui permettant de maîtriser anticipativement ceux des phénomènes qui, *à son échelle* et dans un cadre de pré-compréhension qui est celui *de l'activité et du langage humains*, se manifestent comme des indications au sujet des propriétés de corps matériels.