

AUTONOMIE ET ONTOLOGIE

L'interprétation du formalisme de la mécanique quantique dans les années 1930

MICHEL BITBOL
CNRS, Paris

in: F. Nef et D. Vernant (eds.), *Le formalisme en question*, Vrin, 1998

Résumé : La physique quantique a-t-elle réussi à conquérir son autonomie par rapport à la physique classique ? Si la réponse est négative, la physique quantique n'est, comme le propose Bohr, qu'un symbolisme destiné à prédire des phénomènes survenant relativement à des appareillages décrits en termes classiques. Si la réponse à la question initiale est au contraire positive, comme le pense Schrödinger, la physique quantique peut éventuellement prétendre fonder une nouvelle ontologie de l'univers objectif. Le présent article analyse ce débat fondateur entre Bohr et Schrödinger, moins célèbre, mais tout aussi important, que celui entre Bohr et Einstein.

L'insistance sur des mots comme « formalisme » ou « symbolisme » à propos de la mécanique quantique signale déjà l'appartenance à une école de pensée née entre Göttingen et Copenhague au début des années 1920. Si, suivant cette école, on admet que la théorie quantique manque d'autonomie vis-à-vis des théories classiques, que ses symboles n'ont pas de fonction référentielle, que son ambition se limite à établir un lien légal entre les fragments épars d'une ontologie du sens commun que la physique classique pouvait encore prétendre tenir ensemble, alors il est en effet tentant de la qualifier par défaut de pur calcul symbolique ou de pur formalisme. Par contraste, on conçoit que la démarche de Schrödinger en 1926, qui visait simultanément à assurer l'autonomie de la mécanique quantique (sous le nom de mécanique ondulatoire) et à affirmer un engagement ontologique à propos de ses entités, ait pu conduire à élever cette théorie au rang de *représentation* et à faire passer les aspects purement opératoires de son formalisme au deuxième plan. Le thème du caractère essentiellement formel de la mécanique quantique n'a donc resurgi avec toute sa force qu'à la suite de l'échec de la tentative de Schrödinger, autour de 1927. Il était favorisé par l'algébrisation croissante associée à la théorie des transformations de Dirac, à la seconde quantification de Jordan,

et à l'introduction par von Neumann des concepts de vecteur et d'opérateur dans un espace de Hilbert. Le projet d'une véritable *interprétation* du formalisme quantique, une interprétation qui ne se limiterait pas à un ensemble de règles de correspondance des symboles avec des manipulations expérimentales mais qui aurait aussi en un certain sens une visée ontologique, n'était pas abandonné pour autant. Simplement, avant d'être repris au début des années 1950, il allait devoir passer par la longue phase de clarification et de mutations conceptuelles accomplie durant les années 1930. La clarification portait sur les critères de l'engagement ontologique, tandis que la mutation majeure consistait à remplacer progressivement les considérations initiales sur l'autonomie de la mécanique quantique par une analyse de sa complétude. C'est ce moment de la réflexion sur la mécanique quantique que je vais développer, mais je dois auparavant revenir sur ses antécédents historiques.

Dénégation de l'autonomie théorique de la mécanique quantique et désengagement ontologique. La première tendance se dessina dès l'époque de l'ancienne théorie des quanta, durant les années 1918-1920, lors de la formulation du principe de correspondance. L'objectif de Bohr, quand il énonça ce principe, consistait avant tout à compenser l'incapacité de la théorie des quanta à prédire l'intensité des raies spectrales, en extrapolant les valeurs d'intensité données par l'électrodynamique classique. A la k -ième harmonique de la fréquence de révolution orbitale de l'électron, qui selon l'électrodynamique classique est aussi une fréquence d'émission du rayonnement par l'atome, Bohr faisait correspondre la transition quantique entre l'orbite n et l'orbite $n-k$. L'intensité de la raie $(n, n-k)$ était dès lors identifiée à l'intensité de la k -ième harmonique calculée au moyen de la théorie classique. Le succès de ce procédé alla bien au delà de l'accord asymptotique entre l'ancienne et la nouvelle théorie pour de grands nombres quantiques n , et Bohr lui réserva bientôt un statut de loi fondamentale de la théorie des quanta¹. Ce qui n'était à l'origine qu'un simple algorithme de raccord entre un paradigme théorique et son successeur était devenu partie intégrante de ce dernier. L'échafaudage classique se trouvait pris dans l'édifice quantique, au lieu de se voir rejeter en cours de construction.

Bien entendu, de nombreux chercheurs, parmi lesquels Sommerfeld, ne s'accordaient pas avec Bohr sur ce point. Selon eux, le principe de correspondance n'était qu'un outil auxiliaire et provisoire. Une théorie quantique achevée devrait s'en passer et assurer ainsi une pleine autonomie à ses fondations. Mais en 1925, lorsque Heisenberg formula une véritable « Mécanique quantique »ⁱⁱ apte à se substituer aux lois classiques du mouvement dont la théorie de Bohr maintenait encore la validité sur les orbites stationnaires de l'électron, cet espoir sembla définitivement compromis. Car la cinématique et la dynamique de Heisenberg, loin de faire l'économie du principe de correspondance, en systématisait l'emploi. A chacune des amplitudes harmoniques de la série de Fourier représentant la position et la quantité de mouvement d'une trajectoire périodique classique, Heisenberg faisait correspondre un terme de transition quantique; et aux équations aux dérivées partielles régissant les variables continues de la mécanique classique, Heisenberg substituait des équations aux différences finies entre termes discontinus. Comme l'indiquait Bohr avec satisfaction dans sa conférence de Côme de 1927, « c'est seulement grâce aux méthodes introduites dans la théorie quantique au cours de ces dernières années que l'on a pu réaliser d'une manière générale la tendance exprimée par le principe de correspondance »ⁱⁱⁱ. A moins de supposer que la mécanique quantique de Heisenberg était encore un expédient provisoire pour sauver quelques phénomènes atomiques, ce qui devenait de moins en moins vraisemblable au vu de l'étendue croissante de ses succès, il fallait désormais tenter de comprendre pourquoi elle ne pouvait s'édifier sans soubassement classique. Pourquoi en somme elle souffrait d'une carence congénitale d'autonomie théorique. Heisenberg parvint assez vite à répondre à ces questions en remplaçant certaines remarques critiques d'Einstein dans le contexte du dialogue constructif qu'il entretenait avec Bohr.

En 1926, Einstein dénonçait vigoureusement la motivation méthodologique initiale de la substitution des variables continues par des matrices de termes de transition discontinus. La réduction aux observables, invoquée par Heisenberg dans son article de 1925^{iv}, paraissait épistémologiquement naïve à Einstein parce qu'en n'analysant pas ou peu le terme « observable », elle

suggérait son identification à un donné pur, indépendant de toute théorie. Or ce « donné » était informé par la description du fonctionnement des appareillages en termes classiques: « Bien que nous ayons l'intention de formuler de nouvelles lois naturelles qui ne concordent pas avec les anciennes, nous présumons tout de même que les lois antérieures fonctionnent le long du chemin qui va du phénomène à observer à notre conscience »^v. Le problème de la cohérence entre la théorie quantique et sa base d'attestation empirique, ainsi soulevé par Einstein, fut résolu, ou si l'on veut esquivé, par un compromis. Bohr et Heisenberg affirmèrent d'un côté que l'état de l'appareillage peut en principe être décrit au moyen du nouveau formalisme quantique, et de l'autre côté qu'un fragment au moins de cet appareillage doit être décrit, pour des raisons pratico-pragmatiques, en termes classiques. Les concepts classiques étaient en effet considérés comme autant de prolongements raffinés des catégories de la vie quotidienne, seules utilisables en fin de parcours pour communiquer les résultats effectifs des expériences^{vi}, voire pour exprimer la notion même d'effectivité d'un résultat obtenu à l'exclusion de tout autre. Le défaut d'autonomie de la mécanique quantique se voyait par là reconduit à une exigence épistémologique incontournable: celle de raccorder le formalisme de n'importe quelle théorie physique aux gestes et aux paroles de l'expérimentateur dans son laboratoire; c'est-à-dire, pour être plus précis, à la rationalité procédurale de l'action et aux normes de la communication.

C'est à ce point que s'introduit le thème de l'ontologie. Car si l'ontologie « naturelle » de corpuscules matériels localisés, permanents, et dotés de propriétés univoquement déterminées, s'était révélée immédiatement conciliable avec le formalisme quantique, le raccord entre ce dernier et l'activité motrice ou linguistique de l'expérimentateur aurait pu se passer de l'intermédiaire d'une rupture descriptive forçant à rendre compte de l'appareillage en termes classiques. Les appareils n'auraient eu à être conçus que comme autant de démultiplicateurs de gestes capables de saisir les figures et mouvements des objets microscopiques; et la structure de la langue, avec ses foyers de stabilité substantivés et ses règles de prédication, serait restée opérante d'un bout à l'autre de l'échelle des grandeurs spatiales.

Or il n'en allait justement pas ainsi. La mécanique quantique de Heisenberg constituait l'aboutissement d'une critique vigoureuse de l'ontologie « naturelle », *via* le rejet des images continues dans l'espace-temps. Remplacer les variables cinématiques continues par des matrices de composantes harmoniques, cela revenait en effet à faire éclater la représentation des trajectoires corpusculaires; et l'on savait bien, comme l'attestent les *Principes de la mécanique* de Boltzmann^{vii} que le concept même de corpuscule matériel repose sur la possibilité de l'identifier par la trajectoire qu'il a suivi. « Qu'est-ce qu'une particule qui n'a pas de trajectoire ? »^{viii} demandera Schrödinger beaucoup plus tard, avec une grosse pointe de scepticisme et par référence à Boltzmann.

Dès lors, Heisenberg et Bohr auraient pu s'en tenir à une sorte de partage des rôles entre la table rase ontologique associée à l'instrument prédictif adéquat que constitue la mécanique quantique, et la persistance, à l'échelle du laboratoire, de conduites et de discours supposant la validité locale de l'ontologie « naturelle ». Telle n'a cependant pas été leur stratégie. Leur effort a consisté de préférence à rétablir une certaine continuité d'échelle et de structure entre le mode descriptif de la mécanique quantique et celui du langage courant « raffiné par la terminologie classique »^{ix}. Ainsi, plutôt que de s'en tenir à l'absence d'un équivalent de trajectoire corpusculaire dans sa mécanique matricielle, Heisenberg a cherché à préciser à quel intervalle d'approximation près on pouvait encore parler de telles trajectoires. C'est cette démarche qui a abouti aux relations dites d'« incertitude ». Mais c'est aussi elle qui a engendré quantité d'ambiguïtés dont les physiciens sont encore tributaires de nos jours.

Premier exemple d'ambiguïté: Heisenberg affirme que la tâche de la physique consiste à découvrir les « lois naturelles qui déterminent toutes les particules élémentaires ». Les particules élémentaires sont donc considérées comme les objets de la physique; des objets qui sont régis par les lois de la nature, et qui possèdent des propriétés pouvant en être prédiquées. Quelques lignes plus loin, pourtant, il doit avouer que les « particules ne peuvent plus être assurées »^x dans leur existence, et que le fait

même de leur attribuer des propriétés, y compris de nature géométrique^{xi}, ne va pas de soi.

Second exemple d'ambiguïté: les « démonstrations » des relations de Heisenberg qui font appel à la notion de perturbation de la trajectoire de l'objet par l'agent de mesure^{xii} invitent irrésistiblement à penser qu'il y a « là-dessous » des propriétés déterminées, mais que nos moyens de mesure trop grossiers nous empêchent de les atteindre. Cette façon de dissimuler un problème ontologique (celui des propriétés) derrière une formulation épistémologique (celle de l'interaction mesurant-mesuré) a beau avoir été compensée par un interdit de style positiviste à l'encontre de tout discours sur ce qui se trouve au-delà de la portée de nos moyens expérimentaux, elle n'en a pas moins nourri à son corps défendant le programme de recherches sur les variables cachées^{xiii}.

Le cas de Bohr est un peu plus subtil, mais il illustre aussi la difficulté de ne pas couper tous les ponts avec l'ontologie « naturelle ». Plutôt que de se contenter de la remarque qu'en physique quantique tout phénomène étant relatif à l'état d'un appareillage on ne peut pas l'en détacher pour l'attribuer en propre à un objet, le physicien danois a préféré continuer à parler comme si ces phénomènes constituaient une information *sur* des « objets atomiques », ou encore des « renseignements obtenus sur le comportement des particules atomiques »^{xiv}. Le prix en était l'introduction de la notion un peu baroque de *complémentarité* qui a pour mission d'articuler le caractère mutuellement exclusif de certaines caractérisations expérimentales avec l'idée de leur association dans un seul et même objet.

Si les physiciens du groupe auto-dénommé « école de Copenhague » s'en étaient tenus au temps initial de leur stratégie théorique; s'ils avaient simplement tenté d'établir une généralisation rationnelle de la mécanique classique qui en retiendrait les concepts opératoires mais pas les lois, et qui décrirait l'évolution de ses observables sans leur assigner le statut de propriétés d'un substrat permanent; si en somme ils avaient renoncé à la fois à l'autonomie de la nouvelle théorie et à son association à un engagement ontologique spécifique, alors on aurait compris qu'ils qualifient la mécanique quantique de *pur*

formalisme, ou encore, dans une acception très voisine, *de pur symbolisme*. Ce n'est pas tout-à-fait cette voie radicale que Bohr et Heisenberg ont empruntée, mais certains passages des textes qu'ils ont publiés tout au long de leur carrière vont dans ce sens. La mécanique quantique y est décrite comme une pure combinatoire des éléments conceptuels de la physique classique, désormais désarticulés.

Comme le dit Heisenberg, la théorie quantique ne fait qu'établir des « connexions abstraites » entre concepts classiques, et elle repose sur une relation réciproque entre ces connexions et ces concepts. D'un côté le résultat des expériences « peut être exprimé en termes classiques sans prêter attention au caractère abstrait des connexions 'quantiques' » ; et d'un autre côté, il faut se souvenir à point nommé que « les lois de la physique classique, conçues du point de vue de la physique moderne, apparaissent seulement comme des cas-limites de connexions plus abstraites, plus générales »^{xv}.

Quant à Bohr, seules des nuances de vocabulaire semblent à première vue le séparer de Heisenberg. Pour lui, « le formalisme de la mécanique quantique est (...) un schéma purement symbolique qui ne permet de prédire, selon le principe de correspondance, que des résultats pouvant être obtenus dans des conditions précisées au moyen de concepts classiques »^{xvi}. A l'usage, cependant, la différence entre l'expression « connexion abstraite » et l'expression « schéma symbolique » se révèle connotativement non négligeable. Elle marque la distance qui s'est fait jour entre la tendance à l'agnosticisme ontologique qu'impliquait la *tabula rasa* de 1925 et la tentative ultérieure visant à rétablir, non sans de sévères limitations, quelque chose de l'ontologie « naturelle » d'objets corpusculaires. Ainsi, lorsque Heisenberg fait référence à une particule ou à un atome plutôt qu'à de simples événements expérimentaux, il laisse de côté la notion de connexion et passe à celle de symbolisation: « L'atome de la physique moderne peut seulement être symbolisé par une équation aux dérivées partielles dans un espace multidimensionnel abstrait »^{xvii}. Dans cette phrase, la polysémie du mot se trouve subrepticement mobilisée. Simple signe utilisé dans un langage formel, le symbole est aussi et d'abord le porteur d'une signification indirecte, d'une transgression de la fonction

référentielle immédiate en direction d'un domaine qui resterait autrement inexprimable^{xviii}. Les symboles du formalisme quantique ne sont donc pas les simples instruments d'une opération algébrique abstraite; ils ne font pas davantage référence à un « quelque chose » qui leur serait isomorphe; ils pointent médiatement, *symboliquement*, vers un système d'objets qui, en dépit de sa dénomination commune, excède les catégories de l'action, de la perception et du langage quotidiens.

Par son emploi des observables cinématiques de position et de quantité de mouvement, ainsi que des variables de masse et de charge, le formalisme quantique évoque le concept classique de corpuscule^{xix}; et par son équation de propagation, par les effets d'interférence qu'il prévoit, ce même formalisme suscite une représentation ondulatoire. Mais selon Bohr, ni l'un ni l'autre ne doivent être considérés comme autre chose que des éléments *symboliques* complémentaires, en ce sens que, malgré leur caractère mutuellement exclusif, tous deux sont nécessaires pour illustrer la variété de comportements que les objets microscopiques putatifs peuvent adopter dans divers contextes expérimentaux.

En définitive, Bohr et Heisenberg n'ont pas vraiment tranché entre les deux termes de l'alternative qui se présentait à eux. Ils nous ont légué leur dilemme: soit un formalisme ininterprété au sens de la théorie des modèles, un pur réseau d'opérations algébriques valant comme traduction abstraite d'une classe d'opérations expérimentales; soit une tentative qui se sait partielle, imparfaite, purement *symbolique*, d'interprétation du formalisme par l'un ou l'autre des modèles classiques, corpusculaire ou ondulatoire, de la mécanique et de l'électromagnétisme.

Schrödinger a inauguré une toute autre approche, dont on aurait pu reconnaître très vite le caractère ontologiquement révolutionnaire si elle ne s'était présentée au départ comme une généralisation du modèle classique ondulatoire. La mécanique ondulatoire du début de 1926 se voulait une théorie *autonome*, qui serait à la mécanique classique ce que l'optique ondulatoire est à l'optique géométrique. Schrödinger lui assignait également une ambition *ontologique*, puisque dès le premier article de sa série « Quantification et valeurs propres », il suggérait « de

rattacher la fonction ψ à un phénomène de vibration intra-atomique ayant un caractère de réalité beaucoup plus prononcé que celui (...) des trajectoires électroniques »^{xx}. Aux yeux de Schrödinger, l'ontologie d'ondes ψ devait *remplacer* purement et simplement l'ontologie corpusculaire, même s'il se croyait à l'époque obligé de montrer qu'elle permettait d'engendrer, sous le nom de « paquet d'ondes », un *équivalent* d'objet localisé et permanent^{xxi}. Les deux tendances, autonomie conceptuelle et visée ontologique, s'accompagnaient bien évidemment d'une critique de la *tendance formaliste* des physiciens de Göttingen. Schrödinger rappelle qu'il a formé le projet de sa propre théorie des processus atomiques en dépit de sa familiarité avec la mécanique matricielle de Heisenberg, parce qu'il refusait de s'en tenir à de pures connections formelles entre observables: «Je connaissais naturellement sa théorie, dit-il au milieu de 1926, mais j'étais effrayé (...) devant ses méthodes d'algèbre transcendante qui me semblaient trop difficiles, et devant l'impossibilité d'y trouver une image intuitive des phénomènes naturels»^{xxii}.

A partir de la deuxième moitié de 1926, cependant, ce projet de refondation radicale apparaît de plus en plus intenable. La tendance à l'autonomie conceptuelle, la visée ontologique et le refus de l'exclusivisme formaliste se voient tour à tour ou simultanément contestés.

L'autonomie, d'abord. Le calcul des modes propres des vibrations ψ , qui avait fourni des valeurs correctes de la fréquence des raies spectrales, se révèle incapable de prédire l'intensité et la polarisation de ces raies. Pour y parvenir, Schrödinger doit considérer le produit de la charge électronique par le carré du module de ψ , à savoir $-e|\psi|^2$, comme une densité de charge *régie par l'électrodynamique classique*. Le raccord de la mécanique ondulatoire à l'expérience exige donc une fois de plus de recourir à une théorie classique. Et, remarquons-le, les éléments expérimentaux qui forcent à ce recours sont ceux-là mêmes qui avaient conduit Bohr à adopter le principe de correspondance.

L'ontologie, ensuite. Très vite, plusieurs physiciens font remarquer à Schrödinger que les paquets d'onde ne sauraient fournir l'équivalent des corpuscules localisés et individualisés,

puisqu'en raison de phénomènes de dispersion en fréquence ces paquets d'onde s'évalent très rapidement et finissent par se fondre^{xxiii}. L'ontologie exclusivement ondulatoire, dont Schrödinger pensait qu'elle ne valait qu'à condition d'être capable d'engendrer un substitut d'ontologie corpusculaire, s'en trouve gravement mise en cause.

Le formalisme, enfin. L'interprétation de Born, qui tient $|\psi|^2$ pour la densité de probabilité de présence d'un ou de plusieurs corpuscules, conduit à ne plus voir dans ψ qu'un intermédiaire de calcul commode privé de fonction référentielle. Le statut purement « symbolique » de ψ , sa prise de distance vis-à-vis de tout processus représenté dans l'espace-temps, est encore renforcé par la nécessité de donner comme correspondant des problèmes classiques à n corpuscules, non pas n ondes dans un espace à 3 dimensions mais une seule fonction ψ dans un espace abstrait $3n$ -dimensionnel. Comme le disait Bohr, « l'aspect symbolique des fonctions d'onde de Schrödinger ressort immédiatement de l'utilisation d'un espace de coordonnées multidimensionnel »^{xxiv}.

Admettant que la situation est désespérée, reconnaissant que sa première tentative de conférer autonomie conceptuelle et portée ontologique à sa théorie a échoué, Schrödinger ne peut faire plus à la fin des années 1920 que réaffirmer *in abstracto* les lignes directrices de son programme. La mécanique quantique doit se dégager entièrement de son moule classique, y compris dans la désignation de ce sur quoi porte la mesure, car, demandait-il en 1928, « n'est-il pas plutôt hardi d'interpréter les mesures d'après une représentation que nous savons fausse? »^{xxv}. Dans ces conditions, Schrödinger refuse de se limiter à un discours « symbolique » sur les éléments disjoints d'une ontologie classique, et d'en étayer la nécessité par un argumentaire tournant autour de la grossièreté ou l'imperfection de nos moyens d'investigation expérimentale. Il s'explique plus longuement sur ce point dans une lettre à Bohr du 5 mai 1928 qui est apparue à certains comme la dernière formulation d'un espoir vain, mais qui doit plutôt à mon sens être comprise comme le premier pas d'une démarche de re-fondation qui va s'accomplir entre la fin des années 1930 et 1955: «Puisque ce qui est en principe inobservable ne devrait pas du tout être contenu dans notre

schéma conceptuel, il ne devrait pas être possible de le représenter dans ce dernier. Dans le schéma conceptuel adéquat, les choses ne devraient pas apparaître comme si nos possibilités d'expérience étaient limitées par des circonstances défavorables»^{xxvi}. Pour Schrödinger, le recours à des raisonnements épistémologiques, comme par exemple l'invocation de la « circonstance défavorable » qu'est la perturbation du mesuré par le mesurant, signale simplement une incapacité provisoire à rebâtir une nouvelle ontologie sur les ruines de l'ancienne. La marque distinctive d'une ontologie accomplie est en effet sa capacité à retourner les obstacles de principe auxquels se heurte la connaissance en autant de limites constitutives de ses objets, de même qu'elle tend à retourner une fraction des éléments épistémiquement accessibles en prédicats de ses objets.

Au début des années 1930, le paysage de la réflexion sur la mécanique quantique commence à changer insensiblement. Le système interprétatif proposé par Bohr et Heisenberg en 1927 semble il est vrai avoir gagné l'assentiment général des physiciens. Et des philosophes comme E. Cassirer, A. Kojève, G. Bachelard, H. Margenau, G. Hermann, E. Meyerson etc. ne sont entrés dans ce qui était jusque là un chantier de pensée réservé aux spécialistes qu'encouragés par cet unanimité de façade. Mais les premiers signes d'un renouveau du débat sont déjà patents. Ainsi, la nécessité de décrire une partie au moins de la chaîne de mesure au moyen de la physique classique se voit contestée en filigrane par l'introduction des théories purement quantiques de la mesure, en 1932 par von Neumann^{xxvii}, puis en 1935 par Schrödinger^{xxviii}. La contrainte qui avait poussé Bohr à maintenir la juridiction classique sur une fraction de l'appareillage, c'est-à-dire la nécessité de donner un correspondant théorique à la notion commune de résultat effectivement obtenu, n'en a pas disparu pour autant. Elle est simplement assumée de façon différente par von Neumann. Au lieu d'exclure l'appareil de mesure^{xxix} du champ descriptif de la mécanique quantique, von Neumann préfère admettre que l'évolution du système dont fait partie l'appareillage n'obéit pas toujours à l'axiomatique standard de cette théorie mais aussi, dans certaines circonstances, à un postulat surajouté appelé

« postulat de projection ». Tant qu'aucune n'intervient, l'évolution du vecteur d'état du système obéit à l'équation de Schrödinger; mais quand une « mesure » est effectuée, le vecteur d'état subit une transition brutale qui le transforme en l'un des vecteurs propres de l'observable mesurée. Plusieurs commentateurs récents ont noté que cette façon de procéder revenait à passer d'une description purement physique des processus à une stratégie relevant de la logique^{xxx}. Chez von Neumann, la classe d'objets qui doit être considérée comme méta-théorique vis-à-vis de la mécanique quantique n'est pas prise en charge par une *autre* théorie physique; elle est exclue de la description régie par l'axiomatique standard de la mécanique quantique et elle justifie à elle seule l'introduction d'un axiome additionnel. La mécanique quantique dotée de son axiomatique standard ne pouvant par construction compter parmi ses objets le *contexte* expérimental des événements qu'elle prédit de façon probabiliste, von Neumann propose d'entériner cette inaptitude par un axiome dont la mise en jeu se fait au nom de critères extra-théoriques, d'ordre pratico-pragmatiques, qui sont seuls aptes à établir la ligne de partage requise entre les interactions physiques ordinaires et celles qui s'interprètent comme une « mesure ». De cette manière, l'autonomie de la théorie quantique à l'égard de théories physiques antérieures est sans doute assurée, mais cela se fait au prix du constat implicite de son *incomplétude*.

Rien d'étonnant dans ces conditions que les accusations d'incomplétude à l'encontre de la mécanique quantique se soient multipliées au milieu des années 1930. Celle d'Einstein Podolsky et Rosen en 1935 ne nous retiendra guère, car elle s'éloigne assez considérablement du problème logique posé par von Neumann. En revanche, celle portée par Schrödinger en est la traduction exacte. Dans l'article de la fin de 1935 où il expose pour la première fois son célèbre paradoxe du chat, Schrödinger remarque: « le catalogue ('vecteur d'état') est très incomplet, puisqu'il ne nous indique même pas où le crayon a laissé une trace (on se souvient du chat empoisonné!) »^{xxx1}. Conformément à la théorie quantique de la mesure, en effet, le vecteur d'état du système (objet+appareil+chat) s'écrit sous la forme d'une superposition linéaire de produits tensoriels de vecteurs propres

de certaines observables. Chacun de ces termes correspond à l'un des résultats possibles d'une mesure, à l'un des endroits où le crayon du dispositif enregistreur a pu laisser une trace, ou à l'état biologique (mort ou vif) du chat de Schrödinger. Mais la théorie ne désigne aucun d'entre ces résultats comme celui qui a été effectivement obtenu; et elle ne se laisse même pas interpréter de façon subjectiviste, comme expression de l'ignorance dans laquelle nous nous trouverions au sujet d'un résultat qui aurait été obtenu à notre insu. L'interprétation subjectiviste impliquerait en effet la disparition des effets d'interférence qui jouent un rôle crucial dans la capacité prédictive de la mécanique quantique.

L'expression la plus limpide d'une parenté entre ce paradoxe du chat et la problématique plus générale de l'incomplétude ou de la non-clôture sémantique des théories a été donnée par Hans Primas: « La proposition 'le chat est dans un état de vie défini' (...) est endophysiquement indécidable (...) quand bien même elle serait vraie »^{xxxii}. Cet énoncé est de toute évidence construit sur le modèle du théorème d'incomplétude de Gödel, que l'on pourrait énoncer comme ceci: « La proposition G est endoarithmétiquement indécidable bien qu'elle soit vraie »^{xxxiii}. La seule différence, mais elle est de taille, concerne le rapport à la vérité de la proposition dont il est question. La phrase du théorème de Gödel affirme directement la vérité de la proposition G: « bien que G soit vraie », tandis que la phrase de Primas utilise une forme conditionnelle: « quand bien même la proposition 'C' serait vraie ». Contrairement au mathématicien qui a affaire à des propositions analytiques, le physicien doit recourir à l'*expérience* pour tester ses propositions; plus d'ailleurs, on le concèdera à Popper, pour les soumettre à une réfutation possible que pour les vérifier à strictement parler.

Poursuivons le parallèle. Gödel a établi que l'arithmétique était incomplète, en ce sens que, même si on ajoute un axiome d'où la proposition G se déduit, il existe une autre proposition G' non déductible dans le nouveau système d'axiomes. L'arithmétique est donc non seulement incomplète mais *essentiellement incomplète*. En est-il de même pour la mécanique quantique? Un théorème dû à Paulette Destouches-Février l'établit. « Une mécanique ondulatoire », énonce-t-elle, « est une théorie essentiellement incomplète »^{xxxiv}. Mais bien entendu, de

même que la proposition de Gödel et celle de Primas divergeaient quant à leur rapport à la vérité, on peut s'attendre à ce que le théorème de Gödel et celui de Destouches-Février divergent quant au contenu du concept de complétabilité qu'ils mettent en oeuvre. Alors que, pour Gödel, compléter l'arithmétique voudrait dire lui ajouter suffisamment d'axiomes pour faire coïncider l'ensemble des propositions démontrables et l'ensemble des propositions vraies, pour Paulette Destouches-Février compléter la mécanique quantique signifierait lui adjoindre des variables caractérisant complètement le contexte expérimental relativement auquel le vecteur d'état des systèmes physiques est défini. Cette opération permettrait de découpler ce qui revient au système et ce qui revient au contexte; d'assigner aux objets des propriétés au sens fort (c'est-à-dire des déterminations qui leur appartiennent en *propre*); et de surmonter ainsi l'obstacle de l'incompatibilité des observables conjuguées. Or, souligne Paulette Destouches-Février, deux grandeurs A, B, sont non-simultanément mesurables *en droit* dans (la mécanique ondulatoire), elles le sont encore dans toute théorie plus complète^{xxxv}. Si deux observables de la mécanique quantique sont incompatibles, aucun procédé de complétion respectant les prédictions de cette théorie ne peut les rendre compatibles. Impossible dans ces conditions de tenir les valeurs particulières prises par ces observables pour des propriétés au sens fort; impossible également de faire de ces observables le reflet de propriétés sous-jacentes, à moins d'admettre l'inaccessibilité *de principe* de ces propriétés à une évaluation expérimentale directe, « reflet ». Comme le démontreront d'une autre façon en 1967 Kochen et Specker^{xxxvi}, une théorie à variables cachées visant à compléter la mécanique quantique tout en préservant ses prédictions est nécessairement *contextuelle*. Les théories à variables cachées ne parviennent en définitive qu'à traduire l'incomplétude de la mécanique quantique en termes de contextualité et non pas à l'éliminer. Tout au plus peuvent-elles transfigurer cette contextualité en signe avant-coureur d'un projet de clôture holistique de la théorie^{xxxvii}.

Deuxième transformation amenée par les années 1930 dans l'interprétation du formalisme la mécanique quantique: le retour en force du mode de pensée ontologique. Comme l'aperçoit déjà

Cassirer en 1932 dans un livre pourtant consacré à la causalité, « Les problèmes essentiels posés par la mécanique quantique (...) portent d'abord non pas sur la catégorie de cause et d'effet mais sur la catégorie de chose et d'attribut »^{xxxviii}. Les considérations épistémologiques des commencements s'estompent progressivement au profit de la tentative de refonder une ontologie sur les ruines de l'ancienne. Bien entendu, la leçon des déboires subis en 1926 par ceux qui avaient voulu conduire cette entreprise sans précautions devait être retenue. Les raisons de leur échec devaient être analysées, et cela ne pouvait se faire que si le concept même d'objet physique était mis à plat. Tel fut l'un des axes majeurs de la réflexion que Schrödinger mena depuis le début des années 1930 jusqu'à sa mort^{xxxix}.

En me limitant volontairement à ce qui s'est passé durant les années 1930, je distinguerai deux étapes marquantes dans le processus de pensée qui conduisit par la suite Schrödinger à proposer une version renouvelée de son ontologie ondulatoire. La première étape lui permit de couper les ultimes ponts qui subsistaient entre la nouvelle ontologie et l'ancienne, tandis que la deuxième le conduisit à interpréter le formalisme de la seconde quantification en termes d'un modèle cosmologique et à conférer ainsi à l'atomisme une signification inédite.

On se rappelle qu'en 1926, la critique adressée à l'interprétation exclusivement ondulatoire de la mécanique quantique était son incapacité à fournir un équivalent acceptable des représentations corpusculaires. La notion de « paquet d'ondes » avait été proposée par Schrödinger dans ce but, mais la dispersion des paquets d'ondes impliquait à la fois la disparition de la trajectoire et la dissolution rapide, au sein d'un phénomène vibratoire collectif, des entités initialement individuées par leur localisation. En 1933 encore, lors de sa conférence Nobel, Schrödinger reconnaissait non sans amertume que « la théorie ondulatoire ne peut pas rendre compte de ce cas (c'est-à-dire la trajectoire apparente des particules présomptives dans une chambre de Wilson), si ce n'est d'une façon très insatisfaisante »^{xl}. A partir de la fin des années 1930, cependant, les défauts allégués du concept de paquet d'ondes sont brutalement retournés par Schrödinger en autant de qualités. La dispersion du paquet d'onde met en danger la notion de

trajectoire? Mais au fait, qui a jamais vu une trajectoire corpusculaire? Cette soit-disante trajectoire n'est-elle pas en vérité un pointillé de gouttelettes d'eau condensée que l'on photographie dans la chambre de Wilson? La remarque est pratiquement identique à celle qui, en 1927, conduisit Heisenberg à ses relations d'« incertitude », mais Schrödinger en infère des conclusions bien plus radicales. Si, pour Heisenberg, les relations d'incertitude spécifient les limites entre lesquelles la représentation corpusculaire reste applicable^{xli}, pour Schrödinger elles tendent à montrer que *même* entre ces limites la représentation corpusculaire est complètement inadéquate.

Rappelons en effet l'une des remarques-clés de Heisenberg à propos de ses relations d'« incertitude »: elles valent prédictivement mais pas rétrodictivement. On ne peut prédire la valeur de la vitesse d'une particule à mieux de Δv près si l'on a mesuré la position d'une particule auparavant à Δx près ($\Delta x \Delta v \geq h/m$), mais en revanche on peut rétrodire avec une précision arbitraire quelle *était* la vitesse de la particule pour peu que l'on dispose de deux valeurs de sa position. Malheureusement, cette manière de présenter la situation suscite inévitablement la remarque de bon sens selon laquelle, si on peut connaître *a posteriori* la trajectoire d'une particule, c'est qu'elle existait avant, même si nous l'ignorions lors de notre tentative de prédiction. On retombe ainsi sur une interprétation subjectiviste de l'outil probabiliste qui est incompatible avec certaines prédictions de la mécanique quantique. Pour échapper à cette difficulté, deux solutions sont envisageables. La solution épistémologique de Heisenberg, qui consiste à jeter un discrédit positiviste sur la rétrodition, c'est-à-dire à affirmer que les trajectoires passées n'étant pas vérifiables, leur spécification est privée de sens. Et la solution ontologique de Schrödinger selon laquelle on n'a aucune raison de croire que les deux mesures consécutives de la position portaient sur la *même* particule^{xlii}. Si l'on ne fait pas cette hypothèse d'identité, en effet, les deux valeurs de la position ne peuvent pas être utilisées pour calculer la vitesse passée d'une particule, et du coup aucun énoncé rétrodictif n'entre plus en conflit avec les prédictions quantiques. La cohérence interprétative de la mécanique quantique est

assurée, quitte à sacrifier le concept de corpuscule réidentifiable à travers le temps.

Autre transfiguration en qualité d'un défaut du concept de paquet d'ondes. La dispersion du paquet d'ondes, pour ne rien dire de son étalement initial, minent les critères de son individualité. Mais la physique statistique quantique offre-t-elle le moindre argument en faveur de l'individualité des particules? N'a-t-elle pas été confrontée dès sa naissance, au temps de la statistique de Bose-Einstein en 1924, à la nécessité de traiter les particules comme rigoureusement indiscernables? Pourquoi reprocherait-on au paquet d'onde une perte d'individualité entérinée par les descriptions corpusculaires elles-mêmes? Schrödinger se lance donc, dès ses carnets de notes de 1938-1939, dans une critique systématique et destructrice du concept de corpuscule individuel^{xliii}, une critique si totale que la tâche même d'en fournir un correspondant dans le formalisme en est rendue parfaitement inutile.

A partir de là, il devient clair que le concept de paquet d'ondes, loin de constituer un équivalent défectueux de catégories corpusculaires toujours opérantes, a servi de révélateur imagé de leur effondrement complet. Plus de corpuscules par conséquent; mais si l'on ne se satisfait pas d'un pur et simple agnosticisme interprétatif, par quoi les remplacer, et comment rendre compte de l'élément de discontinuité expérimentale qui leur a conféré une certaine crédibilité? C'est le schème de la seconde quantification qui va fournir des réponses à ces questions, en se constituant en point de départ d'un nouveau ontologique. La méthode revient pour l'essentiel à inverser le rapport entre sujets et attributs. Dans la formulation standard de la mécanique quantique, on considère que des systèmes physiques de nature plus ou moins corpusculaires sont affectés d'un « état », représenté symboliquement par un vecteur de l'espace de Hilbert. En seconde quantification, au contraire, on admet que les modes propres d'oscillation décrits par un vecteur d'état sont affectés de la valeur d'une observable « nombre ». Ce nombre correspond, dans la représentation habituelle, à un nombre de corpuscules. Alors qu'en « première quantification », c'est-à-dire en mécanique quantique standard, les corpuscules jouent le rôle du sujet pendant que le vecteur d'état joue le rôle

d'un attribut, en seconde quantification, un vecteur d'état joue le rôle du sujet et c'est le nombre quantique d'excitation du mode propre correspondant, ou encore le nombre de « corpuscules », qui joue le rôle de l'attribut. Cette inversion ontologique est fortement suggérée par le fait que, si les particules ont en principe perdu leur individualité, il n'en va pas de même des modes propres d'oscillation.

Tout cela était d'autant mieux connu de Schrödinger, dès 1927, que la théorie de la seconde quantification ne se présentait, dans son principe, que comme une reviviscence de sa théorie ondulatoire des gaz de 1925. En dépit de cela, se méfiant de son caractère excessivement formel, il ne pensa pas tout de suite à en faire un usage ontologique. La seconde quantification telle que l'avait présentée Jordan^{xliiv}, apparaissait seulement résulter d'un calcul algébrique des valeurs propres de certains opérateurs; elle ne comportait pas de composante imagée, comme c'était le cas dans la théorie des gaz de 1925 où la quantification résultait du confinement des ondes dans une boîte et de la sélection de la seule suite discrète d'ondes stationnaires compatibles avec la condition aux limites imposée par les parois de cette boîte. En somme, pour fournir un modèle ondulatoire au formalisme de la seconde quantification, on avait besoin d'une boîte appropriée; malheureusement l'idée même d'une boîte semblait incompatible avec le fait que la seconde quantification s'applique à des processus non-confinés spatialement. Mais en 1936, la parution d'un ouvrage d'Arthur Eddington^{xlv}, révéla à Schrödinger l'issue qu'il cherchait. La boîte souhaitée n'était autre que l'univers dans son ensemble: « L'univers fini d'Einstein est en lui-même la boîte naturelle, sans parois, qui engendre l'atomicité par le caractère nécessairement discret de ses modes propres de vibration »^{xlvi}. Plus d'atomes, en définitive, au sens de petits corpuscules localisés, mais une atomicité (ou discontinuité) garantie par le confinement cosmologique d'un milieu vibratoire. Tout cela suggérait irrésistiblement de conférer une fonction référentielle au(x) vecteur(s) d'état de l'espace de Fock dont fait usage la théorie de la seconde quantification, et Schrödinger ne s'est pas fait faute de le faire durant les deux décennies qui suivirent. Mais il resta longtemps isolé dans sa tentative, et ce n'est que tout dernièrement, après que l'on ait épuisé tous les artifices

permettant de sauver l'ontologie corpusculaire, après que l'on ait dû accepter de recourir à des logiques non-classiques pour maintenir le concept de propriété et à des théories quasi-ensemblistes pour pallier l'indistinction des corpuscules, qu'un consensus a enfin commencé à se dégager en faveur d'un changement complet d'ontologie représenté par le(s) vecteur(s) de l'espace de Fock^{xlvii}.

Les questions que je soulèverai en conclusion concernent la raison de cette résistance à la révolution ontologique. Pourquoi ne pas avoir d'emblée remodelé une ontologie sur la structure du formalisme expérimentalement adéquat; pourquoi ne pas avoir choisi pour cela un modèle permettant une interprétation immédiate, isomorphe, du formalisme, tel qu'il ressortait de façon déjà très claire à la fin des années 1930; pourquoi s'en être tenu si longtemps soit à un agnosticisme ontologique complet soit à une tentative de plus en plus visiblement vaine de réconcilier la mécanique quantique avec l'ontologie des corps matériels; pourquoi avoir préféré ménager un statut symbolique à des corpuscules privés de trajectoire plutôt que de s'en passer complètement; pourquoi ne pas avoir cherché un autre mode d'articulation que la représentation corpusculaire entre l'outil prédictif continu et les événements expérimentaux discontinus? La première motivation que je vois à cette résistance vient d'une certaine conception réaliste du progrès des sciences. Les théories scientifiques successives sont censées converger vers une caractérisation asymptotiquement raffinées des *mêmes* objets. La « stabilité de la référence à travers les paradigmes »^{xlviii} est dès lors considérée comme extrêmement souhaitable, voire parfois indispensable. En l'absence d'une telle stabilité, le réaliste manquerait d'arguments contre un relativisme épistémologique dans lequel les anti-réalistes se reconnaissent volontiers. Mieux vaut encore pour lui admettre que la réalité est inassignable, indicible si ce n'est par le biais d'une multiplicité de caractérisations symboliques, que de concéder une quelconque dérive historique de la structure ontologique de cette réalité^{xlix}. La stratégie métaphysiquement insouciante qui consiste à chercher à chaque étape paradigmatique un nouveau système d'entités théoriques stables, invariantes par diverses transformations de coordonnées, régies par des lois, et

connectées à l'expérience par une règle de correspondance, *puis* à exprimer un engagement ontologique à leur égard, ne relève d'aucun réalisme implicite ou explicite, mais plutôt de ce que Simon Blackburn¹ a appelé une attitude *quasi-réaliste*.

Il y a bien entendu une deuxième raison majeure à la réticence exprimée par des générations de physiciens à l'égard du changement d'ontologie proposé par Schrödinger. C'est qu'en général, par extension de ce que nous avons appelé à la suite de P. Destouches-Février l'incomplétabilité essentielle de la mécanique quantique, les modes propres de vibration, candidats au statut d'entités de la nouvelle ontologie, ne sont définis que *contextuellement*. Comme le remarquait Schrödinger lui-même, les états et modes propres « ne sont pas définis dans l'absolu; ils dépendent de l'arrangement de l'expérience effective, ou imaginée »^{li}. Cela rend-il pour autant inadmissible l'attribution d'une fonction référentielle aux vecteurs d'état particuliers, voire une forme lucide d'engagement ontologique à l'égard des entités qu'ils apparaissent dénoter? Non, mais cela oblige à ne plus jamais oublier qu'une ontologie n'est rien d'autre qu'un procédé permettant d'anticiper les réponses aux actions ou aux sollicitations expérimentales en s'appuyant sur une analyse segmentée de ce qui arrive; une analyse en une multiplicité d'entités stables porteuses de déterminations dont la seule obligation est de s'accorder avec la théorie la plus adéquate et la plus générale du moment. Le terme *Quasi-ontologie* pourrait dans ces conditions remplacer avantageusement , trop surdéterminé par ses consonances transcendantes.

Telle aurait pu être la position d'Einstein selon Arthur Fine, à travers cet « entheorizing » consistant à accorder la priorité aux questions d'adéquation empirique globale des théories plutôt qu'à la référence des termes singuliers^{lii}. Telle était en filigrane la position de Schrödinger, lorsqu'il indiquait que la « description de quelque chose », fournie par le système des entités théoriques de la mécanique ondulatoire, n'était en rien assimilable à une description de « ce que la nature est réellement »^{liii}.

Le rêve (ou l'illusion) d'un certain réalisme consistait à faire coïncider le fonds dispositionnel irréductible qui se manifeste par ses effets perceptifs ou expérimentaux avec le réseau des objets de la connaissance. Un tel rêve, poursuivi en dépit des

avertissements kantien, se nourrissait de la possibilité qu'offrait la physique classique de pérenniser la structure ontologique présupposée par le langage courant et par l'action quotidienne. La stabilité de cette structure, sa remarquable compatibilité^{liv} avec un corpus théorique considéré comme à la fois adéquat et non révisable dans ses grandes lignes, avait de quoi faire perdre leur prudence à la plupart des physiciens et les inciter à croire que la forme du système de leurs objets se confondait avec la forme du monde. Seule l'advenue de la mécanique quantique, en introduisant des discordances manifestes entre l'architecture de la théorie et l'ontologie du sens commun, est parvenue à briser une harmonie aussi fascinante que trompeuse. A partir de ce moment, il est devenu indispensable de thématiser la différence entre cette « réalité-source » qui admet « comme seule qualification d'être qualifiable »^{lv}, et l'ontologie qui structure en réseau d'objets l'anticipation d'un certain mode d'actualisation perceptive ou expérimentale du qualifiable; entre une pure *capacité* à déterminer les réponses à toutes les sollicitations expérimentales concevables, et une série de tentatives (variant légèrement d'un langage à l'autre et plus radicalement d'un paradigme théorique à l'autre) de prévoir ces réponses en les faisant découler de l'ensemble de relations qui unit une pluralité d'entités permanentes. Le système des entités théoriques, désinvesti de la prétention à mimer la « réalité-source », perd du même mouvement le droit de porter les connotations traditionnelles du terme « ontologie ». L'utilisation du mot « quasi-ontologie » entérine ce divorce entre la forme sémantique et la charge métaphysique.

ⁱVoir: O. Darrigol, *From c-numbers to q-numbers*, The University of California Press, 1993, p. 138

ⁱⁱSelon le nom que lui donna Max Born pour la première fois dans son article , *Z. Phys.* 26, 379, 1924; trad. anglaise dans B.L. Van der Waerden, *Sources of quantum mechanics*, Dover, 1967

ⁱⁱⁱN. Bohr, , in: N. Bohr, *La théorie atomique et la description des phénomènes*, J. Gabay, 1993; cet article est la traduction française d'une version de la conférence de Côme de l'automne 1927 modifiée et publiée dans *Nature* en 1928 .

^{iv}W. Heisenberg, , *Z. Phys.*, 33, 879, 1925; trad. anglaise dans B.L. Van der Waerden, *Sources of quantum mechanics*, op. cit.

^vA. Einstein, cité de mémoire par W. Heisenberg, *La partie et le tout*, Albin Michel, 1972, p. 95

^{vi}Voir par exemple N. Bohr, *Physique atomique et connaissance humaine*, introduction et annotations par C. Chevalley, Gallimard, 1971, pp. 185, 207.

^{vii}L. Boltzmann, , trad. anglaise dans B. Mac Guinness (ed.), L. Boltzmann, *Theoretical physics and philosophical problems*, Reidel, 1974.

^{viii}E. Schrödinger, , (1952), in: E. Schrödinger, *Gesammelte abhandlungen*, vol. 4, Wiewweg & Sohn, 1984, p. 503 s.

^{ix}N. Bohr, *Physique atomique et connaissance humaine*, op. cit. p. 185

^xW. Heisenberg, (1948) in: *Philosophical problems of quantum physics*, Ox Bow, 1979, p. 104

^{xi}Heisenberg critique en particulier la distinction, classique depuis Démocrite, entre les propriétés géométriques directes (primaires, dirait Locke) et les propriétés indirectes (secondaires). W. Heisenberg, (1932) in: *Philosophical problems of quantum physics*, op. cit. p. 38

^{xii}Bien qu'elles n'aient eu à l'origine qu'un statut subalterne d'instrument de vérification de la consistance de la physique quantique avec son mode d'attestation expérimentale, les démonstrations des relations d'incertitude faisant appel à la représentation corpusculaire de l'objet et de l'agent de mesure tiennent une large place dans l'ouvrage publié par Heisenberg en 1930: *Les principes physiques de la théorie des quanta* (Gauthier-Villars, 1972, p. 15).

^{xiii}Cette situation à première vue paradoxale où un corps d'interdits positivistes suscite un programme de recherche réaliste n'est que la version quantique d'une situation bien connue en théorie de la connaissance. L'affirmation que *tel* phénomène s'assimile à une illusion ne vaut que par opposition à une levée possible de l'illusion; c'est-à-dire par opposition à d'autres phénomènes qui, *eux*, ne seraient pas considérés comme illusoire. L'affirmation que *tout* phénomène relève de l'illusion (le voile de maya), mais qu'il nous est impossible d'aller au-delà en raison de la finitude de nos sens et de nos moyens expérimentaux, engendre à la fois l'image d'un au-delà non-illusoire et le verdict d'inaccessibilité. L'image engendre une telle fascination qu'il ne faut pas s'étonner de la tentation permanente de contourner le verdict.

^{xiv}*ibid.* p. 186

^{xv}W. Heisenberg, (1935), in: *Philosophical problems of quantum physics*, op. cit. p. 45

^{xvi}N. Bohr, *Physique atomique et connaissance humaine*, op. cit. p. 209

^{xvii}W. Heisenberg, (1932) in: *Philosophical problems of quantum physics*, op. cit. p. 38

^{xviii}J. Ladrière, , in: J. Ladrière, *L'articulation du sens I*, Editions du Cerf, 1984, p. 51

^{xix}Ajoutons à cela que les équations auxquelles obéissent les matrices de Heisenberg sont isomorphes aux équations de Hamilton de la mécanique classique.

^{xx}E. Schrödinger, , in: E. Schrödinger, *Mémoires sur la mécanique ondulatoire*, J. Gabay, 1988, p. 13

^{xxi}E. Schrödinger, , in: E. Schrödinger, *Mémoires sur la mécanique ondulatoire*, op. cit. p. 69-70

^{xxii}E. Schrödinger, , in: E. Schrödinger, *Mémoires sur la mécanique ondulatoire*, op. cit. p.72 (note). Cette préférence pour une théorie *anschaulich* s'accompagne toutefois d'un grand sens des nuances. Ce n'est que lorsqu'il a démontré la parfaite réciprocité de l'équivalence entre mécanique matricielle et mécanique ondulatoire que Schrödinger affirme la supériorité de la seconde. Seule cette réciprocité permet de montrer que . Si les fonctions d'ondes n'étaient *que* des suppléments intuitifs greffés artificiellement sur l'algèbre de la mécanique matricielle, cela , *ibid.* p. 92.

^{xxiii}Voir en particulier les remarques de Heisenberg dans l'article de 1927 où il présentait pour la première fois ses relations , in: J.A. Wheeler & W.H. Zurek, *Quantum theory and measurement*, Princeton University Press, 1983.

^{xxiv}N. Bohr, , J. chem. soc., 349-384, 1932, in: N. Bohr, *Collected works*, vol. 6, J. Kalckar (ed.), North-Holland, 1985, p. 370

^{xxv}E. Schrödinger, *Four lectures on wave mechanics*, Blackie & son, 1928, p. 52

^{xxvi}E. Schrödinger, lettre du 5 mai 1928 à Bohr, in: N. Bohr, *Collected works*, vol. 6, J. Kalckar (ed.), North-Holland, 1985, p. 47

^{xxvii}J. Von Neumann, *Les fondements mathématiques de la mécanique quantique*, J. Gabay, 1988

^{xxviii}E. Schrödinger, , Proc. Cambridge Phil. soc., 31, 555-563, 1935

^{xxix}Ou toute partie de la chaîne de mesure apte à *signifier* un résultat aux expérimentateurs.

^{xxx}M.L. Dalla Chiara, , J. Phil. Logic, 6, 1977, 331-377

^{xxxi}E. Schrödinger, , in: E. Schrödinger, *Physique quantique et représentation du monde*, Seuil, 1992

^{xxxii}H. Primas, , in: M. Bitbol & O. Darrigol, *Erwin Schrödinger, Philosophy and the birth of quantum mechanics*, Editions Frontières, 1992, p. 401. Dans ce qui suit, l'abréviation 'C' sera utilisée pour la proposition 'Le chat est dans un état de vie bien défini'.

^{xxxiii}Dire que G est est une manière abrégée de dire: la formule arithmétique qui représente G *via* les règles de projection de Gödel est indémontrable dans le cadre axiomatique de l'arithmétique. G est la proposition suivante: .

^{xxxiv}P. Destouches-Février, *L'interprétation physique de la mécanique ondulatoire et des théories quantiques*, Gauthier-Villars, 1956, p. 47 s.

^{xxxv}*ibid.*

^{xxxvi}S. Kochen, & E.P. Specker, , *Journal of mathematics and mechanics*, 17, 59-87, 1967. Voir aussi: R. Clifton, , *Am. J. Phys.*, 61, 443-447, 1993

^{xxxvii}D. Bohm, *Wholeness and implicate order*, Ark Paperbacks, 1983; D. Bohm & B. Hiley, *The Undivided Universe*, Routledge, 1993

^{xxxviii}E. Cassirer, *Determinism and indeterminism*, Yale University Press, 1956

^{xxxix}Voir M. Bitbol, in: M. Bitbol & O. Darrigol, *Erwin Schrödinger, Philosophy and the birth of quantum mechanics*, op. cit.; M. Bitbol, *L'élision*, in: E. Schrödinger, *L'esprit et la matière*, Seuil, 1990.

^{xl}E. Schrödinger, , in: *Science and the human temperament*, Norton & Co, 1935

^{xli}W. Heisenberg, *Les principes physiques de la théorie des quanta*, op. cit.

^{xlii}E. Schrödinger, *Notes for Dublin seminar 1949*, Archives Schrödinger, Alpbach, Autriche.

^{xliii}E. Schrödinger, *Principium individuationis*, 1939, Archive for the History of Quantum Physics, microfilm 42, section 9

^{xliv}Voir O. Darrigol, , *H.S.P.S.*, 16, 197-239, 1986

^{xlv}A. Eddington, *Relativity theory of protons and electrons*, Cambridge University Press, 1936

^{xlvi}E. Schrödinger, , *Nature*, 140, 742-744, 1937; , *Physica*, 6, 899-912, 1939

^{xlvii}Voir la conclusion de M. Redhead & P. Teller, , *Brit. J. Phil. Sci.*, 43, 1992, 201-218; également: M.L. Dalla Chiara & G. Toraldo di Francia, , in: G. Corsi et al. (eds.), *Bridging the gap: Philosophy, mathematics and physics*, 261-283, 1993; H.D. Zeh, , *Phys. Lett. A* 172, 189-192, 1993; B. d'Espagnat, , in: F. Bonsack (ed.), *The status of existence of hidden physical entities*, Editions Frontières (à paraître): «La seule notion à laquelle on puisse tenter d'attribuer une réalité en soi, c'est (...) cette chose qui change d'état. Et c'est quelque chose qui est de l'ordre du général. Si vous me demandez ce qu'est cette chose qui change d'état, je vous renverrai à la théorie de l'espace de Fock, et ces changements, ce sont les changements de ce qu'on appelle le 'vecteur représentatif' de l'espace de Fock (...)»

^{xlviii}A. Fine, *The shaky game*, The University of Chicago Press, 1986, p. 131

^{xlix}Il peut paraître assez curieux de chercher des motivations *réalistes* à l'attitude de Bohr. Les accusations de portées contre lui, ainsi que sa définition clairement anti-réaliste de la physique comme effort pour ordonner l'expérience humaine communicable, paraissent aller à l'encontre d'une telle interprétation de ses textes. Certains aspects de sa pensée laissent cependant transparaître des éléments réalistes persistants et importants. Quelques commentateurs, comme Henry Folse (*The philosophy of Niels Bohr. The framework of complementarity*, North Holland, 1985) s'en sont même prévalus pour donner une lecture complètement réaliste de Bohr. Leur argument principal réside dans une analyse raffinée du concept de

complémentarité. Ce concept, associant l'exclusion mutuelle des variables et leur conjonction, n'est indispensable que si l'on considère qu'il y a un *quelque chose* de particulier à caractériser de façon conjointe par les valeurs des observables. Un *quelque chose* qui correspond terme à terme avec un corpuscule, même s'il ne s'y réduit pas. Sans cela, on pourrait se contenter de décrire la suite des résultats expérimentaux sans les faire à tout prix (c'est-à-dire au prix de leur exclusivité mutuelle) converger deux à deux. Telle est la trace la plus patente du réalisme résiduel de Bohr.

ⁱS. Blackburn, *Essays in quasi-realism*, Oxford University Press, 1993; voir aussi P. Engel, , *Droits*, 18, 99-107, 1993; M. Bitbol, , *Critique*, 564, 340-361, 1994.

ⁱⁱE. Schrödinger, , *Endeavour*, XI, 110-116, 1950

ⁱⁱⁱA. Fine, *The shaky game*, op. cit. p. 92, 106

ⁱⁱⁱⁱE. Schrödinger, *Science et Humanisme*, in: E. Schrödinger, *Physique quantique et représentation du monde*, Seuil, 1992, p. 60

^{lv}Il s'agit bien, insistons sur ce point, d'une simple *compatibilité*. Il était clair, dès le dix-neuvième siècle, que la physique classique n'*imposait* en aucune manière une structure ontologique de corps matériels localisés et dotés de propriétés.

^{lv}M. Mugur-Schächter, , *Found. Phys.* 22, 235-312, 1992.