

Physique quantique et cognition

Michel Bitbol

Revue Internationale de Philosophie, 2/2000, n°212, 299-328

I-Prologue: objets et situations, propriétés et observables

La révolution quantique tend à être globale, et cela rend aujourd'hui encore difficile d'en prendre la pleine mesure. Car elle ne consiste pas seulement à modifier les lois qui régissent le comportement d'objets d'échelle microscopique; elle ne fait pas qu'accroître le nombre des propriétés de ces objets en y ajoutant des caractéristiques inédites comme le spin, le charme ou la couleur; elle ne se borne pas à affaiblir la conception traditionnelle des objets de la physique comme entités localisées (corpuscules matériels ou valeurs locales d'un champ). Elle conduit à s'interroger sur l'opportunité même de continuer à mettre en oeuvre les «concepts formels»¹ de propriété et d'objet dans sa circonscription spécifique de validité; des concepts qui ne font pourtant pas partie de ce qu'une théorie peut compter parmi ses moyens descriptifs pour la simple raison qu'ils pré-conditionnent ce qu'il est convenu d'appeler une *description*.

Ainsi, en physique quantique, le concept formel de propriété a-t-il été soit remplacé par le concept relationnel d'*observable*, soit transfiguré jusqu'à en devenir méconnaissable. Ses transfigurations ont pu impliquer une altération des règles logiques de composition (conjonction ou disjonction) des prédicats, l'assimilation des propriétés à des *projecteurs* sur les directions propres des observables² (c'est-à-dire à des virtualités d'expérimentations qui ne sont pourtant pas toujours conjointement réalisables), ou bien l'affirmation que les propriétés des objets microscopiques sont instantanément influencées par la totalité des constituants de l'univers³ (vidant de l'essentiel de son contenu le mot «propriété» qui connote une détermination appartenant en *propre* à l'objet).

Le concept formel d'objet, qui suppose une (problématique) aptitude à individualiser et à réidentifier une entité séparable des moyens de sa détection, a également subi divers affaiblissements et métamorphoses. Il a parfois été mis à l'écart au profit de celui de situation expérimentale (dans une lecture radicalement pragmatiste ou opérationnaliste de la mécanique quantique). Plus souvent, dans les

¹ Voir L. Wittgenstein, *Tractatus logico-philosophicus*, Trad. G.G. Granger, Gallimard, 1993, §4.126

² R. Omnès, *The interpretation of quantum mechanics*, Princeton University Press, 1994

³ D. Bohm & B. Hiley, *The undivided universe*, Routledge, 1993

conventions discursives tacites des physiciens, il a été fragmenté au gré des configurations instrumentales dans lesquelles les conditions d'individualisation et de réidentification sont, *en pratique*, suffisamment remplies. Dans la plus courante des théories à variables cachées non-locales, il a été instancié par de simples coordonnées spatiales, ce qui a abouti à réduire les objets de la physique à des «bare particulars» ponctuels se déplaçant sur une trajectoire principiellement hors d'atteinte de l'expérimentation⁴. Enfin, plusieurs auteurs ont proposé de transporter le site d'application du concept formel d'objet dans un espace abstrait (l'espace de Hilbert, l'espace de Fock, ou l'espace de l'«ordre implicite» du dernier Bohm)⁵, au risque de dissocier objectivité et effectivité: une objectivité définie comme invariance par changement de repère dans l'espace abstrait considéré, et une effectivité qui continue à se manifester dans l'espace-temps de l'expérience et de l'action.

II-Les deux cercles épistémologiques

La remise en cause ou la mobilisation du cadre de concepts formels de propriétés et d'objets ne peut rester sans conséquences, non seulement sur l'idée élémentaire que la théorie *décrit* quelque chose, mais aussi, par extension, sur la description du second ordre que nous pouvons offrir du rapport cognitif entre le descripteur et ce qui est à décrire. Elle nous conduit à réexaminer en profondeur les deux «cercles épistémologiques»⁶ dans lesquels s'inscrivait élégamment la physique (et plus généralement la science) classique.

Par «cercle épistémologique», j'entends la relation réciproque auto-consistante entre une théorie scientifique et la manière dont cette théorie conduit à se figurer en retour le processus par lequel il a été possible de la formuler et de l'attester. Le premier cercle épistémologique dans lequel s'inscrit la physique classique est donc constitué, comme tout cercle épistémologique, de deux éléments. L'un est la famille

⁴ H.R. Brown, C. Dewdney, & G. Horton, «Bohm particles and their detection in the light of neutron interferometry», *Foundations of physics*, 25, 329-347, 1995; voir aussi Y. Ben-Dov, «Hidden variables as configuration points», *Nuovo cimento*, 108B, 931-939, 1993. Une discussion sur ce point peut être trouvée au chapitre 5 de M. Bitbol, *L'aveuglante proximité du réel*, Champs-Flammarion, 1998

⁵ Voir M. Bitbol, *Mécanique quantique, une introduction philosophique*, Champs-Flammarion, 1997

⁶ Voir A. Shimony, *Search for a naturalistic world view*, Volume I, *Scientific method and epistemology*, Cambridge University Press, 1993. Le rapport entre les concepts de «cercle épistémologique» et de «cercle herméneutique» est incontestablement étroit. Il faut cependant résister à une pure et simple identification, car elle empêcherait de distinguer entre:

- (a) les préconceptions de l'interprète d'un texte (qui forment l'un des éléments du cercle herméneutique en son sens premier),
- (b) les anticipations de la vie courante inscrites dans une «précompréhension» ou un *habitus* holistique (qui forment l'un des éléments du cercle herméneutique en son sens élargi, heideggerien),
- (c) le système thématique de *prédictions*, souvent explicité en structures mathématiques, en quoi consistent les théories scientifiques. C'est ce dernier système que met en oeuvre préférentiellement le cercle *épistémologique*.

Je remercie Natalie Depraz pour ses remarques stimulantes à ce sujet.

de descriptions que le système des théories classiques offre de ses deux entités principales: les corps matériels et les champs; l'autre est une description concrète du fonctionnement des appareillages permettant de mesurer ses variables pertinentes, *sous l'hypothèse que les appareillages sont composés de corps matériels et de champs obéissant à ses lois*. La mise à l'épreuve des théories de la physique classique dépend ainsi d'une *interprétation* des valeurs mesurées, obtenue en appliquant ces théories à la dynamique du processus de mesure; et réciproquement la validité de la description de l'opération de mesure est suspendue à celle des théories qu'on y met en oeuvre. Je nommerai ce premier cercle «le petit cercle épistémologique». Le second cercle, que j'appellerai par contraste «le grand cercle épistémologique», comporte également deux éléments. L'un est le type de représentations que les théories de la science classique fournissent de leurs objets; l'autre est une méta-représentation concrète du rapport qui s'établit entre objets et sujets connaissants. Le cercle se clôt lorsque la validité de la représentation se trouve confortée par la méta-représentation du processus cognitif qui y a conduit, et que réciproquement la méta-représentation est mise en conformité avec les normes de cette représentation. La conception selon laquelle une théorie physique décrit le devenir d'une multitude d'objets autonomes en interaction, est par exemple rendue crédible par la méta-représentation d'objets confrontés à un sujet connaissant passif, ou doté d'une activité extrinsèque et non constitutive (c'est-à-dire d'une activité dont la contribution aux contenus épistémiques puisse toujours être retranchée de la contribution propre de l'objet). Réciproquement, la méta-représentation classique d'un face-à-face entre sujet et objet s'effectue sur le modèle de l'interaction de deux objets étendus, placés en vis-à-vis dans l'espace, et définissant par leurs surfaces limitantes des régions intérieures et extérieures.

Le *paradigme de la commande* des sciences cognitives, qui consiste à se représenter le processus de la cognition comme la succession d'un flux d'«entrées» en provenance d'un monde «extérieur» pré-constitué, d'un traitement «interne» de l'information (computationnel, symbolique ou sub-symbolique), et de «sorties» performatives, n'est certes pas le seul à être compatible avec la science classique. Mais il présente le double avantage de s'accorder immédiatement avec les structures ontologiques qui lui sont couramment associées, et d'atteindre un remarquable degré d'isomorphisme avec ces dernières. Le paradigme de la commande s'accorde avec la conception d'un univers de corps matériels pré-existants, puisque tout ce qu'il conduit à demander à un système cognitif est de recueillir fidèlement l'information rendue disponible par ces corps et de la traiter de manière à atteindre en «sortie» un haut degré d'efficacité performative. Il est également *isomorphe* à cette conception, en ceci que l'extériorité des objets vis-à-vis du système cognitif peut y être tenu pour un cas particulier de l'extériorité spatiale mutuelle des objets corporels de la science classique. Il favorise à partir de là le projet d'une complète naturalisation de

l'épistémologie dans les termes descriptifs des théories classiques, c'est-à-dire de telle sorte que le système cognitif puisse être traité comme un *objet corporel* de ces théories parmi d'autres. Et il conduit inversement la théorie dualiste de la connaissance, dont il s'inspire, à tirer argument d'une science classique qui ouvre la perspective de sa naturalisation. Ainsi le «grand cercle épistémologique» qui assure l'appui réciproque des contenus de connaissance de la science classique et de l'idéal régulateur d'une théorie de la connaissance naturalisée conformément aux présupposés constitutifs de cette science, semble-t-il pouvoir être refermé. Cela suffit à entretenir l'espoir d'une représentation du monde suffisamment exhaustive pour rendre raison de la façon dont nous y sommes parvenus.

Ces deux cercles épistémologiques ne sont pas forcément «vicieux» ou «tautologiques», en ce sens que rien n'oblige à leur reconnaître un pouvoir *illimité* d'auto-corroboration. Les conditions de leur éventuelle révision sont cependant très particulières, et expliquent la résistance qu'ils opposent, encore de nos jours, aux essais de refonte radicale.

Tout d'abord, ni l'un ni l'autre des deux cercles épistémologiques ne peut, par construction, être remis en cause par une circonstance qui lui soit complètement étrangère. Si une circonstance nouvelle doit conduire à en réévaluer la pertinence, il ne peut s'agir que de l'apparition d'un défaut d'auto-consistance. Mais face à ce genre de défaut, bien d'autres attitudes que la révision complète peuvent être adoptées: la compensation du défaut par des hypothèses *ad hoc* en est une, le renvoi de sa résorption à un futur indéfini de la recherche en est une autre, l'acceptation de l'inconsistance et la fragmentation corrélatrice des domaines de validité en est une troisième.

Par ailleurs, il ne faut pas perdre de vue que le *grand* cercle épistémologique standard plonge une partie de ses racines dans des présupposés ontologiques que la science classique a hérité du langage courant et de l'activité manipulatrice quotidienne. Le fait que le face-à-face qu'il instaure entre un sujet plus ou moins réceptif et un objet autonome reproduise la relation familière d'extériorité entre le corps propre et les corps environnants, en est l'un des indices les plus clairs. A cause de cela, réviser de fond en comble le grand cercle épistémologique reviendrait vraisemblablement à ne s'affranchir de ses tensions internes qu'au prix de l'apparition de *contradictions performatives* entre le contenu théorique du nouveau cercle et certaines manières de parler et d'agir dans l'*Umwelt* du genre humain. Si un nouveau grand cercle épistémologique devait opérer, ce ne serait donc qu'à condition que l'ancien continue à le sous-tendre à la fois comme son présupposé, dans les discours et les comportements, et comme son cas-limite au moins quantitatif. Cette remarque généralise une réflexion analogue que Bohr a esquissée à propos du renouveau du petit cercle épistémologique, lorsqu'il a affirmé que le symbolisme prédictif de la théorie quantique ne peut opérer que si les théories classiques demeurent en tant que

présupposition indispensable pour la description de certains moments du fonctionnement de l'appareillage, et en tant que forme-limite de la théorie quantique quand la valeur de la constante de Planck devient négligeable.

Dans les deux cas, pour le grand comme pour le petit cercle épistémologique, la contrainte à laquelle il s'agit de faire droit ressemble à une version renforcée de la parabole du «bateau de Neurath». Imaginons en effet que non seulement le «bateau» figurant notre système de connaissances doit être reconstruit en pleine mer, mais qu'en plus l'ensemble des gestes à accomplir pour le reconstruire et le maintenir soit partie intégrante de sa structure. S'il en allait ainsi, il faudrait d'une part que la structure en cours de renouvellement autorise à tout instant, en l'incluant, le déploiement du savoir-faire gestuel qui permet sa transformation, et d'autre part que ce savoir-faire trouve une place dans la structure achevée dont il assure le maintien. Dans les sciences, le «savoir-faire» à préserver n'est autre que le langage et l'activité opératoire de l'expérimentateur, qui opèrent sur fond d'une hypothèse tacite d'extériorité mutuelle et d'autonomie des corps.

Une conséquence importante de ces contraintes est que la formulation d'un cercle épistémologique nouveau, concurrent du cercle traditionnel associé au paradigme de la commande, s'effectue *de facto* sous le régime des présupposés de ce dernier. Lorsqu'on y regarde de près, on s'aperçoit par exemple que les paradigmes cognitifs alternatifs mettant en oeuvre les concepts d'émergence et d'auto-organisation font usage, dans leur exposé des processus impliqués, de conventions propres à une épistémologie de la pré-structuration et de l'hétéro-organisation. Tout se passe *au cours de cet exposé* comme si les éléments qui sont censés participer au cycle auto-organisateur étaient, pour leur part, des entités à l'individualité et aux propriétés pré-déterminées placées face au sujet spécialiste de sciences cognitives. Ces éléments apparaissent tantôt sous la forme d'un ensemble d'objets pré-donnés entre lesquels vont prendre place les relations organisatrices, tantôt sous la forme d'un espace des états internes spécifié d'avance et dans le cadre rigide duquel va évoluer le processus auto-poïétique. La méta-théorie de la connaissance ne se conforme pas ici intégralement à la théorie de la connaissance développée⁷. Cette situation est assez facile à assumer dans une science comme la biologie où l'on peut faire reposer la divergence entre théorie et méta-théorie de la connaissance sur la différence entre organisation anatomo-physiologique émergente et constituants *physico-chimiques* pré-

⁷ F. Varela le reconnaît avec une parfaite lucidité, lorsqu'il signale que «(...) la conception de la cognition comme énaction, cependant qu'elle insiste sur l'interdépendance de l'esprit et du monde, tend à traiter leur relation (...) comme si elle possédait une existence concrète indépendante» (F. Varela, E. Thomson, & E. Rosch, *L'inscription corporelle de l'esprit*, Seuil, 1993, p. 307). Sa façon d'échapper à la critique est de rappeler que le concept d'énaction peut opérer comme élément d'une dialectique visant à nous libérer des schémas de pensée fondationnalistes, plutôt que comme représentation prétendant à une vérité absolue. C'est aussi ce genre de statut instrumental plutôt que thétique que nous attribuerons en fin de parcours aux conceptions auto-organisationnelles de la cognition.

donnés, mais elle suscite bien des questions délicates en physique où le concept même de constituant élémentaire est en jeu. Nous verrons aux paragraphes IV et V comment arbitrer, en tenant compte des exigences propres à la physique, ce conflit apparent entre une théorie de la connaissance traduite par un grand cercle épistémologique auto-organisationnel, et la méta-théorie de la connaissance hétéro-organisationnelle implicitement utilisée pour sa description. Nous montrerons par la même occasion que l'une des conséquences de cet arbitrage est de conduire à réviser à la baisse l'ambition des projets de naturalisation de l'épistémologie. Mais avant cela, il nous faut aborder les tentatives actuelles de mettre en place un *petit* cercle épistémologique propre à la physique quantique.

III-Le cercle épistémologique du mesurant et du mesuré

L'une des raisons que David Bohm invoque en faveur de sa tentative de reformulation «ontologique» de la théorie quantique, est que seule une telle reformulation permettrait de reconstituer un petit cercle épistémologique aussi remarquablement clos que l'était celui de la physique classique. En physique classique, écrivent D. Bohm et B. Hiley, «L'épistémologie était presque auto-évidente parce que l'appareil d'observation était censé obéir aux mêmes lois objectives que le système observé, de telle sorte que le processus de mesure pouvait être compris comme un cas particulier des lois générales qui s'appliquent à l'univers entier»⁸. Par contraste, dans la formulation standard de la mécanique quantique, d'importants obstacles s'opposent à la constitution d'un petit cercle épistémologique crédible. Une *théorie quantique de la mesure* a bien été élaborée par Von Neumann au début des années 1930, mais elle présente de ce point de vue un inconvénient majeur, bien répertorié depuis sous le nom de «problème de la mesure». Supposons en effet que le vecteur d'état associé à l'appareil de mesure évolue selon la même loi (l'équation de Schrödinger) que le vecteur d'état associé au système mesuré; et supposons encore que le vecteur d'état initialement associé au système ne s'identifie pas à un *vecteur propre* de l'observable que l'appareil a pour fonction de mesurer, mais plutôt à une *superposition linéaire* de ces vecteurs propres. Pendant le processus de mesure, le vecteur d'état de l'ensemble formé par le système et l'appareil évolue conformément à une équation de Schrödinger dont l'Hamiltonien prend en compte l'énergie d'*interaction* entre le système et l'appareil. A l'issue de cette évolution, il est en général impossible de factoriser le vecteur d'état de l'appareil dans le vecteur d'état global résultant associé à l'ensemble formé par le système et l'appareil; on dit que les états du système et de l'appareil se sont «entremêlés» ou «enchevêtrés» («entangled», en anglais). Il apparaît alors que le vecteur d'état *global* du système comprenant le

⁸ D. Bohm & B. Hiley, *The undivided universe*, Routledge, 1993, p. 13

système et l'appareil consiste en une superposition linéaire de vecteurs propres reproduisant la structure de la superposition linéaire initiale associée au système seul.

En supposant, comme le font couramment les physiciens (et comme son nom le suggère), que le vecteur d'état exprime l'«état» de l'objet auquel il est associé, on est conduit à admettre que la théorie quantique de la mesure ne représente ni le système ni l'appareil comme se trouvant dans un *état* final bien déterminé (l'un de ceux qui sont traduits par un vecteur propre de l'observable considérée), mais dans un *état* «flou» ou «brouillé» ainsi que l'écrivait Schrödinger⁹ en 1935. L'aboutissement de la théorie quantique de la mesure semble dès lors démentir le constat effectif de l'expérimentateur, selon lequel l'appareil se trouve dans un *état* bien défini à l'issue de son fonctionnement; plus largement, il semble s'inscrire en faux contre une condition élémentaire de possibilité de l'attestation expérimentale de la théorie dont il provient, à savoir la confrontation de cette théorie à des résultats *bien déterminés*. Du coup, le cercle formé par la théorie quantique et la théorie quantique de la mesure apparaît incapable de remplir la mission d'un (petit) cercle épistémologique. Pour qu'un ensemble comprenant une théorie de l'objet et une théorie partielle instrumentale dérivée de la théorie de l'objet puisse à bon droit passer pour un cercle *épistémologique* (plutôt que pour un simple cercle formel), il est en effet indispensable que son produit soit compatible avec les conditions *épistémiques* de la mise à l'épreuve de la théorie. Sans correspondant structural avec une condition aussi élémentaire que l'unicité et la stricte détermination des résultats expérimentaux, les symboles de la théorie quantique de la mesure, complétés par l'interprétation des vecteurs d'état comme «états» des objets, tournent à vide.

La première parade, la parade d'urgence, à cette difficulté, a consisté à introduire le «postulat de réduction» selon lequel le vecteur d'état de l'objet (ou le vecteur d'état du système constitué par l'appareil et l'objet) est «réduit» instantanément, au décours de la mesure, à l'*un* des termes de la superposition linéaire initiale. L'ennui est que cette parade équivaut à renoncer à *clôre* le petit cercle épistémologique; car elle revient à admettre que la mesure est un processus exceptionnel, durant lequel les vecteurs d'état subissent une brusque transition instantanée, et échappent ainsi momentanément à la loi d'évolution des vecteurs d'état qui caractérise la théorie quantique de l'objet entre deux mesures. Bien des réactions ont été suscitées par cet état de choses, parmi lesquelles l'interprétation «ontologique» de Bohm, évoquée plus haut, ou bien l'introduction par Ghirardi, Rimini, et Weber, de termes de «réduction spontanée» dans l'équation de Schrödinger¹⁰. Cette dernière tentative a un certain intérêt de principe parce qu'elle consiste à fermer le cercle épistémologique en

⁹ E. Schrödinger, «La situation actuelle en mécanique quantique», in: E. Schrödinger, *Physique quantique et représentation du monde*, Seuil, 1992

¹⁰ Ghirardi G.C., Rimini A., & Weber T., «Unified dynamics for microscopic and macroscopic systems», *Phys. Rev. D*34, 470-491

modifiant la théorie quantique de l'objet de manière à l'adapter à une théorie partielle instrumentale comprenant des processus de réduction, plutôt que l'inverse. Mais elle présente aussi de très sérieux inconvénients¹¹, et je préfère donc passer tout de suite à l'examen de ce que devient le *problème de la mesure* dans le cadre de conceptions «déflationnistes» de la mécanique quantique mettant l'accent sur la teneur *prédictive* du vecteur d'état plutôt que sur sa capacité supposée à *décrire* l'«état» de divers objets.

Isoler une interprétation prédictive des vecteurs d'état n'est à vrai dire pas toujours facile, car le lexique standard des physiciens combine de façon déroutante des éléments descriptifs et prédictifs. Le vecteur d'état fonctionne bien, admettent-ils, comme un instrument de calcul des probabilités des résultats d'une mesure (à travers la règle de Born, ou la règle de Lüders qui s'applique aux opérateurs densité), mais c'est selon eux parce qu'il exprime de quelque manière l'*état* des objets sur lesquels s'effectue la mesure¹². La lecture *exclusivement* prédictive, qui impliquerait de substituer à la mention de l'objet celle de l'ensemble de la situation expérimentale, et au concept d'état d'un objet subissant la mesure celui d'un type de *préparation* précédant la mesure, a rarement été exposée pour elle-même¹³. Une inclination initiale (encore incomplètement déployée) vers ce genre de conception se manifeste chez Bohr, lorsqu'il considère le formalisme de la théorie quantique comme un pur symbolisme permettant de calculer les probabilités de résultats expérimentaux spécifiés par des concepts classiques¹⁴. Plus récemment, des développements allant dans ce sens ont été proposés par B. Van Fraassen¹⁵. Dans le cadre de sa variété empiriste de l'interprétation modale de la mécanique quantique, Van Fraassen insiste pour distinguer:

(a) l'«état dynamique», qui est gouverné *en permanence* par l'équation de Schrödinger et qui permet le calcul des *probabilités* d'une valeur donnée de la variable mesurée,

(b) l'«état de valeur» qui correspond au résultat effectivement obtenu.

Ainsi Van Fraassen évite-t-il de briser le cercle de la théorie quantique de la mesure par des événements discontinus de «réduction», puisque selon lui la théorie quantique de la mesure concerne exclusivement le devenir continu des *états dynamiques*, et que la réduction équivaldrait à y projeter indûment la série discontinue *des états de*

¹¹ P. Mittelstaedt, *The interpretation of quantum mechanics and the measurement process*, Cambridge University Press, 1998, p. 113

¹² B. d'Espagnat exprime très bien, dans l'avant-propos au *Réel voilé* (Fayard, 1994) le sentiment d'étrangeté qu'on peut éprouver face à une telle juxtaposition d'orientations instrumentalistes et réalistes.

¹³ L'une des premières tentatives d'effectuer ce type de lecture est celle de J.L. Destouches et P. Destouches-Février. Voir Par exemple. P. Destouches-Février, *La structure des théories physiques*, P.U.F. 1951; voir aussi M. Bitbol, *Mécanique quantique, une introduction philosophique*, Champs-Flammarion, 1997

¹⁴ N. Bohr, *Essays 1958-62 on atomic physics and human knowledge*, Ox Bow Press, 1987, p. 60

¹⁵ B. Van Fraassen, *Quantum mechanics, an empiricist view*, Oxford University Press, 1991

valeurs. Van Fraassen n'obtient cependant ce résultat qu'au prix d'un désinvestissement partiel du vecteur d'état vis-à-vis de son contenu descriptif: ce contenu revient habituellement à spécifier l'état d'un système au sens le plus large (et le plus vague) du mot «état», alors qu'ici le vecteur d'état ne spécifie qu'un état *dynamique* à teneur prédictive qu'il faut compléter par un état de valeur pour être descriptivement exhaustif. La signification même du cercle de la théorie quantique de la mesure s'en trouve altérée. Si ce cercle concerne seulement l'état *dynamique*, il ne tend plus à la description intégrale du processus d'interaction entre un objet et un appareillage expérimental, mais porte seulement sur le système de prédictions qui s'applique aux divers moments du processus de mesure.

En allant jusqu'au bout de la lecture prédictive du formalisme de la mécanique quantique, on peut considérer que la théorie quantique de la mesure n'instaure rien d'autre qu'un cercle *d'évaluations probabilistes* concernant deux sortes de mesures: la mesure proprement dite et une méta-mesure portant sur le dispositif qui l'a permise. Toutes les difficultés liées au problème de la mesure de la mécanique quantique ne disparaissent pas pour autant. Ce cercle d'évaluations probabilistes doit, comme l'autre, pouvoir être refermé. La fermeture de l'autre cercle supposait que la description du fonctionnement de l'appareillage soit un cas particulier de la description du devenir des objets; la fermeture de celui-ci suppose que le mode de calcul des probabilités portant sur le résultat de la méta-mesure soit un cas particulier du mode de calcul des probabilités portant sur le résultat de la mesure. Or, on sait qu'au niveau macroscopique où se déroule la mesure du second ordre, le calcul des probabilités à utiliser est régi par la théorie classique de Kolmogorov, qui a entre autres particularités celle de permettre d'interpréter l'évaluation probabiliste comme une expression de l'*ignorance* dans laquelle on se trouve au sujet du phénomène devant se manifester. Au contraire, la mesure du premier ordre requiert la mise en oeuvre d'un calcul quantique des probabilités dont le principal trait distinctif est de comporter des termes isomorphes à ceux qui représentent des *interférences* dans un processus ondulatoire, et de ne pas permettre à cause de cela (au moins au premier degré¹⁶) une interprétation laplacienne en termes de «hasard d'ignorance». La question est alors la suivante: est-il possible de fermer le cercle constitué par la prédiction probabiliste des résultats d'une mesure de premier ordre et par la prédiction probabiliste des résultats d'une mesure de second ordre portant sur l'appareil de mesure qui intervient dans la mesure du premier ordre? Peut-on tenir le calcul

¹⁶ Il est certes impossible de considérer les probabilités quantiques comme expression de l'ignorance dans laquelle on se trouve du *phénomène expérimental* qui doit survenir; mais il est parfaitement possible de les considérer comme expression de notre ignorance de *processus sous-jacents* holistiquement co-dépendants et principiellement inaccessibles à l'expérience. En témoignent les théories à variables cachées non-locales et contextualistes du type de celle de Bohm. Une discussion sur ce point peut être trouvée dans M. Bitbol, *L'aveuglante proximité du réel*, op. cit. chapitre 8

classique des probabilités, utilisable en pratique à l'échelle des appareils de mesure, pour un *cas particulier* du calcul quantique des probabilités, valable en principe à toute échelle? Ce sont les *théories de la décohérence* qui ont eu pour première mission de prouver la possibilité de fermer ce cercle, même si leurs auteurs les ont rarement limitées à ce programme minimal lié à une interprétation prédictive du vecteur d'état¹⁷. Les théories de la décohérence tendent en effet à montrer qu'appliqué à des processus complexes faisant intervenir un objet, un appareil de mesure, et un vaste environnement, le calcul quantique des probabilités se ramène à *une très faible approximation près* au calcul classique des probabilités. Ceci se traduit par un amenuisement asymptotique des termes d'*interférence* typiques du calcul quantique des probabilités, au profit d'une quasi-validité de la règle kolmogorovienne d'additivité des probabilités d'une disjonction; ou, plus précisément¹⁸, par une quasi-disparition des termes non-diagonaux de la matrice densité, au terme de laquelle la superposition initiale se ramène à peu de choses près à un *mélange statistique*.

La principale pierre d'achoppement de cette méthode de clôture du cercle prédictif est que, pour parvenir à dériver à partir d'un calcul purement quantique les structures probabilistes qui prévalent à l'échelle humaine, les spécialistes des théories de la décohérence n'ont pu éviter d'introduire des hypothèses à connotations anthropologiques. Le clivage ternaire de la chaîne de mesure en un objet, un appareil, et un environnement, imposé par W.H. Zurek¹⁹, est (de son propre aveu) l'une de ces hypothèses, puisque ce genre de clivage ne va vraiment de soi qu'à l'échelle de l'*Umwelt* du genre humain. Une autre de ces hypothèses est le recours de M. Gell-Mann à un *coarse graining* des *histoires consistantes* par des «IGUS» (Information Gathering and Utilizing Systems) anthropomorphiques. Mais ce degré de pétition de principe n'est une véritable difficulté que si l'on exige des théories de la décohérence qu'elles démontrent qu'une théorie classique des probabilités, valant pour des occurrences mutuellement exclusives, est l'aboutissement *unique* de la théorie probabiliste quantique de la mesure à grande échelle. Si au contraire on en attend seulement la preuve que le calcul quantique des probabilités appliqué au processus de mesure est *compatible* avec une évaluation probabiliste classique dans le domaine macroscopique, si on leur demande uniquement d'attester que le calcul classique des probabilités est l'*une* des conséquences envisageables du calcul quantique des probabilités, sous certaines conditions traduisant les présupposés constitutifs de la connaissance humaine, alors les théories de la décohérence remplissent bien leur

¹⁷ M. Gell-Mann, *Le quark et le jaguar*, Champs Flammarion, 1997. Discussion dans M. Bitbol, *Mécanique quantique, une introduction philosophique*, op. cit. pp. 410-418. Pour une critique serrée des prétentions descriptives (voire «ontologiques») des théories de la décohérence, voir B. d'Espagnat, «Towards a separable empirical reality», *Foundations of physics*, 20, 1147-1172, 1990. La réponse de R. Omnès se trouve dans: R. Omnès, *The interpretation of quantum mechanics*, Princeton University Press, 1994

¹⁸ B. d'Espagnat, *Le réel voilé*, Fayard, 1994, p. 195

¹⁹ W.H. Zurek, «Environment-induced superselection rules», *Physical Review*, D26, 1862-1880, 1982

mission. La clôture du petit cercle épistémologique n'est certes pas assurée comme le fruit *unique* et inévitable du fonctionnement de la théorie quantique, mais elle est inscrite en tant que *possibilité* dans son formalisme²⁰.

La quête d'*univocité* ne pourrait éventuellement aboutir qu'en sortant du cadre strict de la théorie quantique. C'est justement ce genre de stratégie d'élargissement théorique qu'ont adopté W.H. Zurek et M. Gell-Mann, lorsqu'ils ont fait appel à un concept darwinien de sélection naturelle. Selon Gell-Mann, par exemple, le but n'est pas de montrer que des structures prédictives typiques de la physique classique dérivent *obligatoirement* de la théorie quantique, mais simplement de prouver dans le cadre de cette dernière que des systèmes connaissants (les IGUS) ne peuvent être stables (c'est-à-dire *survivre*) qu'à condition de focaliser leur intérêt épistémique et leur activité sur un domaine obéissant à des lois d'ensemble quasi-classiques²¹. Poursuivant sur cette ligne de pensée, S. Saunders a pu démontrer que le processus de décohérence est dérivable d'un ensemble de conditions nécessaires à la *vie* d'un système métabolique autonome²². Sans pouvoir établir la stricte nécessité de l'émergence d'un monde classique à partir d'un monde quantique, les théories de la décohérence ont par conséquent instauré la scène où peut se jouer le drame auto-organisationnel et darwinien de la *co*-émergence d'un système connaissant et de l'environnement classique qui lui est donné immédiatement à connaître. On est tenté d'en inférer qu'à moins d'être modifiée ou complétée, la théorie quantique ne parvient à clore son petit cercle épistémologique du mesurant et du mesuré qu'en ayant recours

²⁰ On est tenté de penser que cette discussion a été récemment close par le beau travail de l'équipe de S. Haroche, qui a permis de mettre les théories de la décohérence «à l'épreuve de l'expérience» (voir par exemple S. Haroche, J.M. Raimond & M. Brune, «Le chat de Schrödinger se prête à l'expérience», *La Recherche*, n°301, Septembre 1997). En vérité, les choses ne sont pas si simples. N'oublions pas que pour mettre en évidence la décroissance rapide des effets d'interférence dans les probabilités quantiques, l'expérience citée a besoin de présupposer (au niveau des appareils qu'elle utilise si ce n'est au niveau du processus analysé), des notions de propriétés et d'événements mutuellement exclusifs qui ne s'accrochent que d'une structure probabiliste classique et d'une interprétation épistémique des probabilités. Ce que l'on parvient à faire par cette expérience n'est donc pas de vérifier à partir d'un point de vue complètement extérieur la validité des présupposés mis en oeuvre pour l'interprétation des phénomènes expérimentaux, mais seulement de montrer la remarquable consistance interne du système formé par ces présupposés et certaines séquences de phénomènes expérimentaux qui non seulement sont interprétés par leur biais mais de surcroît leur sont isomorphes. De même, ce que l'on parvenait à faire par les théories de la décohérence n'était pas de «dérivée mathématiquement» les présupposés de l'expérimentation comme conséquence unique et obligatoire de l'axiomatique adoptée, mais de prouver la consistance interne du système formé par: (a) les présupposés de l'expérimentation et (b) certaines prédictions isomorphes à ces présupposés que conduit à formuler une théorie (la théorie quantique) fonctionnant sous leur régime. Au total, ce que l'on a réussi à attester, c'est la consistance interne du système à trois termes constitué par les présupposés de l'expérimentation, les prédictions qui leur sont associées, et les phénomènes qu'ils permettent d'interpréter. Plutôt qu'à des rapports linéaires de «dérivation» (théorique) ou de «vérification» (expérimentale), on a une nouvelle fois affaire à un réseau circulaire auto-consistant de relations.

²¹ M. Gell-Mann & J.B. Hartle, in: W.H. Zurek (ed.), *Complexity, entropy, and the physics of information*, Addison-Wesley, 1990

²² S. Saunders, «Decoherence, relative states and evolutionary adaptation», *Foundations of physics*, 23, 1553-1585, 1993

à une perspective de clôture du grand cercle épistémologique du connaissant et du connu. C'est vers ce grand cercle que va à présent se tourner notre attention.

IV-Le cercle épistémologique du connaissant et du connu

L'opportunité d'une révision profonde du grand cercle épistémologique de la science classique, c'est-à-dire de la représentation d'un face-à-face extrinsèque entre le sujet et la nature qu'il cherche à se représenter, a été perçue comme urgente dès le début de l'histoire de la physique quantique. Bohr, Heisenberg, puis Pauli, en ont été les principaux avocats. Dans ses expressions les plus directes, Heisenberg nous demande par exemple de comprendre que la théorie quantique ne fournit plus une description des particules élémentaires mais, au moins en partie, de la connaissance que nous en prenons; ou que la physique contemporaine ne forge plus une image de la nature, mais (s'il est permis de réemployer ici le mot «image») «(...) l'image de nos rapports avec la nature»²³. La recherche scientifique est corrélativement figurée comme un processus qui, faute de pouvoir se dérouler comme s'il lui était possible de prendre une nature autonome pour objet à décrire, vise à explorer un système de relations qualifié par contraste de *nature-livrée-à-l'interrogation-humaine*²⁴. Des symboles comme les vecteurs d'état, les observables, ou les amplitudes de probabilité, doivent être pris dans cette perspective comme moyens d'exprimer (sans la décrire exhaustivement et même sans la thématiser) une *relation* de mesure et ses implications anticipatives. Cela suffit à dissoudre le «problème de la mesure», en excluant que l'on puisse demander à des vecteurs d'état s'écrivant sous forme d'une superposition linéaire de vecteurs propres d'observable de représenter l'«état» intrinsèque des constituants de la chaîne de mesure.

Ces caractérisations de la situation épistémologique qu'affronte la physique quantique ont généralement été accueillies avec un respect mêlé de scepticisme ou d'indifférence par la communauté des physiciens, qui a oscillé ces cinquante dernières années entre un quasi-instrumentalisme résigné et le désir sans cesse résurgent de montrer qu'une lecture «réaliste» de la théorie quantique n'est pas inconcevable. Une explication externaliste de cette résistance est sans doute, ainsi que l'écrit I. Stengers, que les physiciens pouvaient difficilement renoncer à leur projet historique d'organiser l'expérimentation de telle sorte que rien n'empêche après coup de la tenir pour une simple méthode de révélation des propriétés d'une nature indépendante²⁵.

²³ W. Heisenberg, *La nature dans la physique contemporaine*, Gallimard, 1962, p. 34. Voir aussi W. Heisenberg, *Physique et philosophie*, Albin Michel, 1971, p. 38; W. Heisenberg, *Philosophie, le manuscrit de 1942*, Traduction et présentation par C. Chevalley, Seuil, 1998. Ce dernier livre contient le développement le plus complet et le plus cohérent de la philosophie de Heisenberg, avec un commentaire approfondi de C. Chevalley.

²⁴ W. Heisenberg, *La nature dans la physique contemporaine*, op. cit. p. 29. Les traits d'union ont été rajoutés.

²⁵ I. Stengers, *Cosmopolitique 5, Au nom de la flèche du temps: le défi de Prigogine*, La découverte, 1997, p. 146

Mais une raison interne a pu également dissuader bien des physiciens d'inscrire leur travail dans le prolongement de la thèse de Heisenberg. Cette raison est la teneur fortement aporétique du concept d'une science des seuls rapports ou relations que nous entretenons avec la nature. Comment concilier la suggestion que les *termes* mis en relation ne sont pas définis indépendamment l'un de l'autre, et leur traitement individualisé dans le discours? Ne semble-t-il pas étrange de défendre une épistémologie de l'immersion, de la participation, de l'inséparabilité, en l'appuyant sur la description du rapport de deux entités séparées par la pensée ou par la dénomination? Ni la quête obstinée d'une objectivation omni-englobante, ni la perception des aspects aporétiques de l'issue alternative d'une science des rapports-de-l'homme-avec-la-nature, ne justifient cependant qu'on se cramponne à une attitude naïve dans les sciences. Il est après tout probable que le simple processus consistant à développer la thèse épistémologique de Heisenberg jusqu'à ses ultimes conséquences suffise à nous faire gagner une perception aiguë des limites du projet scientifique le plus répandu. Même si cette thèse devait être désamorcée en fin de parcours à cause de son aporie d'une relation exprimée en termes de *relata* distincts alors même qu'elle les précède en droit, il serait dans ces conditions peu avisé de l'ignorer. On aurait tort de renoncer à utiliser une échelle (intellectuelle) sous prétexte qu'il faudra «(...)jeter l'échelle après y être monté»²⁶.

C'est donc à l'esquisse d'un développement systématique du schéma épistémologique de Heisenberg que nous allons procéder ici. Nous serons assistés en cela par un parallèle avec les importants travaux de l'école auto-organisationnelle dans les sciences cognitives, et en particulier de sa récente variété connexioniste. Le trait distinctif d'une procédure d'apprentissage menée à bien par des systèmes auto-organiseurs comme les réseaux neuronaux est après tout d'aboutir à une structure qui, à l'égal de la théorie physique selon Heisenberg, «(...) ne représente pas le monde extérieur mais représente - si l'on veut s'en tenir à ce mot - le processus d'*interaction* entre l'input et l'organisme, ou entre l'environnement et l'organisme»²⁷.

(1) Le premier point de convergence entre les deux courants de rénovation épistémologique tient à leur motivation commune, qui est de s'affranchir des schémas ontologiques pré-constitués. La résurgence du paradigme auto-organisationnel, après une longue parenthèse constituée par les tendances représentationnalistes, symboliques, et computationnalistes du cognitivisme, est le contre-coup d'une réflexion sur le demi-échec des programmes initiaux d'Intelligence Artificielle. La difficulté qu'ont éprouvée les spécialistes d'IA pour assurer dans tous les cas la réidentification des objets corporels de l'environnement traités comme "formes", a en

²⁶ L. Wittgenstein, *Tractatus logico-philosophicus*, op. cit. §6.54

²⁷ J. Schopman & A. Shawky, «The impact of connectionism on our thinking about concepts», in: A. Clark & P.J.R. Millican, *Connectionism, concepts and folk psychology (The legacy of A. Turing, volume 2)*, Oxford University Press, 1996

effet conduit certains chercheurs à penser que «(...) le monde est un lieu indiscipliné - beaucoup plus désordonné que les mythes ontologiques et scientifiques régnants ne le laissent soupçonner»²⁸. Dès lors, ce qu'il fallait par-dessus tout éviter c'était d'imposer d'avance à la machine une structuration de ses modes d'exploration par le système de concepts formels auquel a abouti l'histoire cognitive de l'espèce humaine. Les concepteurs de systèmes perceptifs avaient à ménager des espaces de liberté, des capacités d'adaptation, ils devaient implémenter des notions «fluides, dynamiques, négociées, ambiguës, sensibles au contexte»²⁹, et non pas projeter sur leurs artéfacts le corpus (solidifié après-coup) des présuppositions ontologiques auxquelles la vie humaine engage. Si une machine pouvait un jour s'orienter dans le monde, ce serait dans *son* monde, un monde qu'elle aurait structuré à mesure qu'elle se structurait elle-même, et non pas le monde pré-digéré de la logique et de la théorie des modèles. Le tort du cognitivisme classique est en bref, dans cette perspective, d'avoir préjugé de la relation entre la machine et ses objets, en imposant à ses termes d'être isomorphes au produit final d'une dynamique relationnelle antérieure (celle de l'homme et de son *Umwelt*). De façon analogue, l'intérêt réflexif des créateurs de la mécanique quantique pour la *relation* entre moyens d'exploration et domaine exploré avait pour premier but d'éviter que la physique ne reste intégralement tributaire de la structure ontologique préalable que partagent la physique classique et l'«attitude naturelle». Les procédures formalisées d'orientation et d'anticipation utilisées par le physicien quantique devaient traduire l'ordre émergent de la nouvelle dynamique relationnelle rendue possible par les progrès de l'instrumentation, et non pas être dérivées d'une description utilisant un cadre de concepts formels dont les conditions d'emploi sont vraisemblablement restreintes au type de relations sensori-motrices qu'est capable d'établir l'homme dans son environnement immédiat.

Une différence majeure persiste cependant entre la situation des sciences cognitives et celle de la physique quantique. Dans les sciences cognitives, on peut d'un côté conférer une pleine autonomie au processus relationnel d'émergence d'organisation, et d'un autre côté continuer à se représenter les deux termes de la relation conformément aux normes d'autres relations que nous, êtres humains adultes, établissons directement avec eux. Mais en physique quantique, nous sommes en principe dépendants, pour les relations que nous entretenons avec le domaine d'investigation, d'appareillages expérimentaux; nous n'avons pas la ressource d'invoquer des relations latérales «directes» qui nous donneraient un accès indépendant aux termes de la relation transversale domaine-appareillage. L'applicabilité au domaine d'investigation du cadre standard de concepts formels valant pour les relations que nous entretenons avec notre environnement immédiat est

²⁸ B.C. Smith, *On the origin of objects*, MIT Press, 1996

²⁹ *ibid.*

de ce fait suspendue à l'aboutissement de la dynamique du rapport qui s'établit entre l'appareillage et ce domaine. Et avec elle est également suspendue toute représentation de la relation domaine-appareillage qui ferait usage de ces concepts formels (par exemple en décrivant cette relation comme celle de deux systèmes-objets distincts dotés de déterminations propres).

(2) Dans le paradigme auto-organisationnel des sciences cognitives, il n'est plus question de systèmes de mise en forme de l'information conçus comme lieux où s'articulent: (a) des entrées en provenance d'un monde extérieur pré-structuré, (b) un traitement de ces entrées par le biais d'une représentation des traits invariants du monde, et (c) des sorties performatives. Les entités de base sont ici des unités dotées de «clôture opérationnelle»³⁰, dont le seul invariant est leur propre organisation, et dont le «domaine cognitif» est défini comme la fraction d'environnement au sein de laquelle leur organisation peut persister en dépit des perturbations qui leur sont infligées. Le procédé par lequel une unité se préserve en intégrant à son fonctionnement les perturbations les plus courantes, est appelé *l'assimilation*. Et le processus par lequel sa clôture opérationnelle se transforme afin de parvenir à assimiler de nouvelles sortes de perturbations est qualifié *d'accommodation*³¹. Les comportements adaptés dont fait preuve une unité auto-organisationnelle ne révèlent pas dans ces conditions qu'elle est en possession d'une représentation fidèle de son environnement, mais seulement que le fonctionnement de sa clôture opérationnelle sous l'effet de perturbations environnementales, est durablement *viable*. En particulier, les distinctions ou catégories que présupposent ses comportements ne sont pas le reflet intériorisé du pré-découpage d'un monde ordonné; elles sont le résultat stabilisé, au sein du cycle d'opérations qui constitue l'unité auto-organisationnelle, de l'histoire du couplage entre elle et un environnement pouvant être chaotique³². Au total, le réseau de prédicats qui exprime ces distinctions n'est pas à interpréter comme le calque statique du réseau d'articulations d'un monde pré-donné, mais comme le système des possibilités de fonctionnement stationnaire d'une unité auto-organisationnelle dans son environnement perturbateur. *Chaque* prédicat correspond à un «comportement propre» bien défini de l'unité considérée, à l'un de ses cycles-limites, ou encore (en utilisant le vocabulaire des systèmes dynamiques), à l'un des *attracteurs* du fonctionnement de sa clôture opérationnelle.

Une analogie mathématique rend à ce stade presque évidentes les affinités entre cette conception des sciences cognitives avec une approche de la physique quantique inspirée de Bohr et Heisenberg. L'expression «comportement propre», explique F. Varela, est en accord avec l'usage des termes «(...) 'valeur propre' et 'fonction propre'»

³⁰ F. Varela, *Autonomie et connaissance*, Seuil, 1989

³¹ J. Piaget, *Biologie et connaissance*, Gallimard, 1967

³² F. Varela, *Autonomie et connaissance*, op. cit. p. 219

en mathématiques, pour désigner les *points fixes* d'opérateurs linéaires»³³ (un point fixe de la fonction f étant la valeur x_n de la variable x pour laquelle le processus récursif $x_{n+1}=f(x_n)$ aboutit à l'égalité $x_{n+1}=x_n$). A l'inverse, dire qu'une «valeur propre» et un «vecteur propre» d'observable correspondent à l'un des «comportements propres» (ou attracteurs) du processus dynamique de couplage d'un appareil avec le domaine exploré, plutôt qu'à une détermination intrinsèque de tel objet microscopique, est assez bien dans l'esprit de la conception interactionnelle du formalisme de la mécanique quantique que soutenaient Bohr et Heisenberg. Cela n'est pas sans rappeler également l'idée, défendue par Schrödinger à la fin de sa carrière, selon laquelle les discontinuités quantiques ne révèlent pas une propriété des objets microscopiques mais plutôt la circonstance que «(...) certains dispositifs ne peuvent, de par leur nature même, fournir que des réponses discrètes et discontinues (aux perturbations)»³⁴. Plus largement, estimer que la liste complète des valeurs propres d'une observable exprime l'ensemble des possibilités de stabilisation du fonctionnement d'une classe d'appareillages au cours de leur couplage avec le domaine exploré, et non pas la gamme des valeurs de variable pouvant être possédées par un objet microscopique, s'accorde avec la thèse de Bohr selon laquelle l'appareillage expérimental participe indissolublement à la *définition* de la variable qu'il sert à mesurer. L'inconvénient de cette façon de concevoir l'expérimentation en physique est, une nouvelle fois, qu'elle risque d'inciter à décrire le processus dynamique de couplage entre l'appareillage et son domaine d'exploration au moyen des concepts formels mêmes dont elle a conduit à contester la pertinence au-delà de notre *Umwelt* macroscopique.

(3) Comment passe-t-on, dans le paradigme auto-organisationnel des sciences cognitives, d'un simple «comportement propre» à quelque chose qu'on peut qualifier à bon droit de *connaissance*? Quel peut d'ailleurs être le sens du mot «connaissance» dans un cadre de pensée qui se dispense du concept de *représentation*? Et, corrélativement, par quel fil conducteur va-t-on d'une conception relationnelle de l'expérimentation au formalisme intégré de la théorie quantique?

Selon J. Piaget³⁵, l'étape obligée sur le chemin qui conduit des activités concrètes à la connaissance, est l'affranchissement, appuyé sur des schèmes gestuels de *réciprocité*, à l'égard des aspects *irréversibles* des opérations³⁶. La conséquence majeure de cet affranchissement est l'apparition de conduites *d'anticipation*. Au cours

³³ *ibid.* p. 227

³⁴ E. Schrödinger, «The meaning of wave mechanics», in: A. George (ed.), *Louis de Broglie physicien et penseur*, Albin Michel, 1953, p. 28

³⁵ J. Piaget, *Biologie et connaissance*, op. cit. p. 47

³⁶ Ces schèmes gestuels de réciprocité se manifestent par exemple dans: l'activité de déplacement puis de remplacement d'un corps matériel, ou l'activité de rotation d'un corps jusqu'à ré-obtention de l'aspect initial, ou encore l'activité consistant à vider le contenu liquide d'un récipient dans un autre de forme différente, puis à verser ce contenu dans le récipient initial, etc.

de l'étape suivante, les schèmes gestuels de réciprocité sont repris et coordonnés à un niveau supérieur, par exemple par transposition du niveau sensori-moteur au niveau logico-linguistique. Par le biais de l'accession au langage, l'insertion de l'individu dans un réseau de relations sociales joue donc un rôle crucial (quelque peu négligé par Piaget) dans la définition des conditions d'utilisation et d'amélioration collective des procédures d'activité coordonnée. Car ces procédures performatives sont désormais organisées autour de foyers référentiels et prédicatifs communs. Au terme du processus ontogénétique, sont élaborées (sous la pression collective d'un idéal régulateur de partage et d'une critique mutuelle) des structures symboliques traduisant en opérations abstraites et en nécessité démonstrative les régulations pratiques par lesquelles les effets des perturbations environnementales sont *pré-corrigés*. Ces nouvelles structures symboliques, plus générales que les structures logico-linguistiques parce qu'elles ne restent pas nécessairement subordonnées à l'ordre prédicatif du jugement, sont les mathématiques. Des mathématiques conçues par Piaget comme «coordination générale des actions (...)»³⁷ réversibles et à visée anticipatrice.

Il est dans ces conditions inévitable que la physique, dont un moment essentiel est le contrôle des séquences perceptives par des actions expérimentales ordonnées et réversibles, se trouve organiquement associée aux mathématiques. «(En physique), la mathématique, loin de se réduire à un langage, est l'instrument même de structuration qui coordonne déjà ces actions et les prolonge ensuite en théories (...)»³⁸. L'histoire de la physique n'est de ce fait plus comprise comme recherche de «copies» représentatives de plus en plus ressemblantes d'un monde donné d'avance, mais comme oeuvre *d'assimilation*, par paliers accommodatifs de généralité croissante, de la suite irréversible des phénomènes expérimentaux aux schèmes performatifs réversibles et à fonction prédictive que formalisent les mathématiques.

Tirant les ultimes conséquences de cette réflexion³⁹, on est conduit à tenir le face-à-face sujet-objet pour une figure très particulière de la cognition. La tendance commune des procédures cognitives d'assimilation-accomodation est en effet d'évoluer vers la «décentration», l'affranchissement à l'égard des circonstances, l'intégration de processus irréversibles et non reproductibles dans des schèmes réversibles, le dépassement des moments singuliers par des règles de prédiction. L'adoption de schèmes d'activité présupposant l'*identité* de l'objet à travers le temps, et l'attribution de *propriétés* stables aux objets afin de prévoir des résultats

³⁷ Voir J. Piaget, *Introduction à l'épistémologie génétique, I La pensée mathématique*, P.U.F., 1973

³⁸ *ibid.* p. 386

³⁹ Conséquences que Piaget lui-même, encore partiellement tributaire du schéma dualiste sujet-objet, n'a pas souhaité tirer.

d'expériences effectuées «sur eux»⁴⁰, apparaît dans ce contexte comme une façon parmi d'autres, peut-être plus contraignante que bien d'autres, d'obtenir ce résultat.

Cette remarque va à présent être développée en systématisant une distinction à peine marquée entre *cognition* et *connaissance*. A vrai dire, la distinction n'a rien d'évident tant qu'on s'en tient aux caractérisations explicites que proposent de leur discipline les spécialistes des sciences cognitives. Ainsi que le remarque D. Andler, il est pratiquement impossible de trouver une définition de la *cognition* dans les dictionnaires de sciences cognitives. Les sciences cognitives elles-mêmes sont définies par le *Blackwell dictionary of cognitive psychology* comme «(...) étude interdisciplinaire de l'acquisition et de l'utilisation des connaissances»⁴¹, ce qui peut donner le sentiment (si l'on n'y regarde pas de près) d'une coextensivité sémantique, ou au moins d'une sorte d'interdéfinition circulaire, des mots *cognition* et *connaissance*. Ce que laisse pourtant soupçonner le clivage entre la connaissance et ses procédés d'*acquisition* et d'*utilisation* dans la définition précédente, c'est que les deux mots n'ont pas le même *usage* dans les idiomes spécialisés contemporains⁴². Le mot "cognition" renvoie préférentiellement aux processus concrets, tantôt neuro-biologiques, tantôt artéfactuels, tantôt informationnels et fonctionnels, par lesquels sont maîtrisées des capacités à percevoir, à coordonner les mouvements, à parler, à raisonner, etc. Le mot "connaissance" tend pour sa part à désigner un contenu abstrait, socialement partagé, et exprimé au moyen du langage; un contenu qui peut d'autant plus naturellement être dit *porter sur un objet* que son expression fait usage de substantifs et d'adjectifs, c'est-à-dire de termes à fonction référentielle et de termes à fonction prédicative. Il suffit à partir de là de travailler légèrement cet écart, de remplacer le rapport de *contiguïté* sémantique qui s'y manifeste par un rapport d'*inclusion* sémantique, pour obtenir une nouvelle distinction utile à notre discussion du parallèle entre épistémologies non-représentationnalistes et problèmes d'interprétation de la mécanique quantique.

Nous appellerons «*cognition*» la procédure générale de mise en place de schèmes d'activité indépendants vis-à-vis de classes entières de situations, et d'extrapolation anticipative de ces schèmes. Une telle procédure peut être implémentée indifféremment par des structures neurologiques ou technologiques, elle peut ou non être socialement partagée, elle peut ou non s'organiser autour de foyers référentiels et prédicatifs. Par contraste, nous appellerons «*connaissance*» un cas d'espèce de ces stratégies cognitives qui consistent à prolonger en prescriptions anticipatrices des

⁴⁰ Cette expression «sur eux» doit être considérée comme une manière abrégée d'exprimer la mise en oeuvre expérimentale du schème d'activité présupposant l'identité de l'objet.

⁴¹ D. Andler, *Introduction aux sciences cognitives*, Folio-Gallimard, 1992

⁴² Je remercie Catherine Sayada pour les utiles précisions qu'elle m'a données sur ce point, à l'issue d'un exposé du présent travail dans le cadre du séminaire du Centre de Synthèse pour une Epistémologie Formelle animé par M. Mugur-Schächter.

schèmes opératoires rendus indépendants de larges classes de situations d'expérience. Le cas d'espèce en question est celui où le mode d'affranchissement des schèmes à l'égard des situations est entièrement traductible en termes de déterminations propres d'entités séparées dotés d'une identité permanente; c'est-à-dire celui dans lequel on a escamoté les conduites et les règles de covariance par changement de situation, au profit d'un discours sur les objets d'où toute mention des situations a disparu. Les connaissances sont en résumé, dans l'acception choisie, celles des cognitions qui sont conditionnées de bout en bout par les fonctions référentielles et prédicatives de la langue.

Dans le même esprit, on distinguera un aspect négatif et un aspect positif du concept d'objectivité. L'aspect négatif est l'absence d'asujettissement des schèmes d'activité et des corrections anticipatrices associées à l'égard d'une configuration indexicale singulière (moi, ici, maintenant, ceci). L'aspect positif, connoté par l'étymologie, consiste à affirmer qu'il est possible de projeter cette absence d'asujettissement dans une description du devenir d'*objets* autonomes.

La raison du malaise éprouvé par trois générations de chercheurs et de philosophes à l'égard de la mécanique quantique peut à présent se dire en deux courtes phrases: la théorie quantique standard procure une *cognition* au sens le plus général plutôt qu'une *connaissance*; elle restreint son ambition à l'aspect *négatif* de l'objectivité.

Au premier degré, la mécanique quantique n'est en effet autre qu'une *forme méta-contextuelle de théorie des probabilités*. Elle recueille dans son symbolisme les conditions de possibilité d'un système de prédictions probabilistes rendu indépendant des contextes expérimentaux, même si ces prédictions portent sur des phénomènes qui, eux, sont inséparables de contextes parfois incompatibles⁴³. La mécanique quantique s'acquitte bien, dans ces conditions, des deux tâches d'une *cognition*: (a) intégrer les sollicitations expérimentales et les phénomènes résultants dans un schème généralisé d'activité affranchi de la particularité et de l'irréversibilité des situations et (b) retourner cette intégration en un corpus complet d'anticipations. En cela, elle réalise aussi l'intégralité du contenu négatif du concept d'objectivité. Par contre, comme je l'ai souligné dans le prologue de cet article, la restriction de cette cognition à une *connaissance* d'*objets* individuels dotés de propriétés, c'est-à-dire la mise en oeuvre du contenu positif du concept d'objectivité, se heurte à des difficultés considérables. Non que je sous-estime l'apport des multiples tentatives engagées afin de surmonter ces difficultés; mais simplement que leur intérêt me semble se limiter à cerner, en explorant ses conséquences de tous côtés, la configuration cognitionnelle élargie dans laquelle évolue désormais la physique. Considérons d'abord l'attitude pragmatique des physiciens, qui revient à accorder la priorité aux *activités* (qu'elles

⁴³ Voir M. Bitbol, *Mécanique quantique, une introduction philosophique*, op. cit. Chapitre 2; M. Bitbol, «La mécanique quantique comme théorie des probabilités généralisée», in: G. Cohen-Tannoudji & E. Klein (eds.), *Prévision et probabilités dans les sciences*, Editions Frontières-Diderot, 1998

soient expérimentales ou mathématico-symboliques), tout en se servant, à des fins heuristiques, de modèles fragmentaires d'objets, et de termes à sémantique variable comme ceux de «particule» ou d'«état». Quelles que soient les tentations ontologiques suscitées par ces modèles et par ces termes empreints de leur origine familière, la façon flexible et contextualisée dont ils sont utilisés au jour le jour dans les laboratoires ne fait que manifester à quel point, en physique quantique comme en théorie de l'auto-organisation, «le monde unique, fondé (...), est remplacé par la pluralité des environnements relatifs (...)»⁴⁴ à des systèmes de sollicitations opératoires. Certains modèles à vocation universelle, comme ceux des théories à variables cachées (*non-locales*), paraissent il est vrai permettre de surmonter la fragmentation précédente. Mais ils ne le font qu'au prix d'une irrémédiable dissociation entre les objets qu'ils décrivent et les schèmes d'activité expérimentale. Les objets de ces modèles sont des points focaux putatifs, des lieux de convergence hypothétiques pour les invariants des schèmes opératoires partiels, sans représenter l'invariant effectif d'aucun schème opératoire global. Ils résultent d'une sorte de fonctionnement à vide de la stratégie scientifique de recherche des invariants, et affrontent de ce fait une version extrême de la sous-détermination des théories par l'expérience: celle où, par construction, aucun élément empirique présent ou futur ne peut contribuer à trancher entre les théories avancées.

V-Epilogue: auto-résorption des cercles épistémologiques et méthode transcendantale

Le propos classique de l'épistémologie est de répondre au défi sceptique en appuyant la science sur des critères et des normes qui lui soient extérieurs. Mais, comme le remarque Quine, la formulation même du défi sceptique ('peut-on connaître le monde à partir des informations rares et indirectes que nous procurent les sens?') emprunte ses catégories à la science⁴⁵; le relever peut et doit dans ces conditions se faire dans le cadre du système des sciences. Selon cette approche, «(l'épistémologue) combat pour défendre la science de l'intérieur, contre son auto-dubitation»⁴⁶. Le cercle qui en découle est ouvertement assumé: «(le) problème (de l'épistémologue), écrit Quine, consiste à trouver les moyens, en s'en tenant à la science de la nature, par lesquels l'animal humain peut avoir projeté cette même science à partir des informations sensorielles qui peuvent l'atteindre selon cette science»⁴⁷. Ce qu'omet toutefois de signaler Quine c'est que le cercle des sciences n'engendre ce genre de

⁴⁴ J. Habermas, *Le discours philosophique de la modernité*, Gallimard, 1988, p. 436; à propos de la sociologie systémique de N. Luhmann.

⁴⁵ Par exemple les catégories d'information et de données des sens

⁴⁶ W.V. Quine, *The roots of reference*, Open court, 1974, p. 3

⁴⁷ *ibid.* p. 2

doute sceptique qu'en raison de son assujettissement implicite au paradigme de la commande. Dans le cadre du paradigme auto-organisationnel, un doute à propos de la correspondance des descriptions scientifiques à la nature ne pourrait même pas être formulé. La raison de cette dissolution *de facto* de la version commune du problème sceptique est qu'à la limite, dans le paradigme auto-organisationnel, on est conduit à admettre qu'il n'y a *rien* (aucune structure pré-déterminée) à connaître, que les «perturbations» exercées sur la clôture opérationnelle par son environnement sont essentiellement chaotiques, et qu'on n'a par conséquent aucun motif de s'inquiéter de la fidélité de la connaissance à quoi que ce soit. La connaissance (ou plutôt la «cognition», au sens large qui a été défini plus haut) est ici rapportée au processus de son élaboration plutôt qu'à son *focus imaginarius*. «(...) Elle ne repose sur rien, si ce n'est sur une tradition, et (...) elle ne conduit nulle part si ce n'est à une nouvelle interprétation de cette tradition»⁴⁸. N'ayant de fondement ni extérieur ni intérieur, elle ne fait qu'exprimer la co-émergence⁴⁹ d'une clôture opérationnelle et de l'*Umwelt* structuré que projette le système de ses *comportements propres*. Parmi ces comportements propres structurants on retiendra: l'établissement du fonctionnement de la clôture opérationnelle à une échelle (qualifiée de macroscopique) où peuvent se manifester des récurrences statistiques, les conduites de poursuite qui instaurent le schème de l'identité à travers le temps, et les conduites de substitution des antécédents qui participent au schème de la succession selon une règle.

Pour autant, comme on l'a déjà noté en passant aux sections II et IV, la thèse auto-organisationnelle n'échappe pas à une variété nouvelle d'injonction sceptique (ou de configuration aporétique), formulée dans ses propres termes. Le défi qu'affronte cette thèse ne concerne certes pas la conformité de la connaissance à ce qui est à connaître, mais il la met en question dans son apparente prétention à *décrire* quelque chose (le processus d'assimilation-accomodation des perturbations environnantes à une unité auto-organisée). Essayons de formuler ce défi de façon plus précise, en partant de deux remarques de F. Varela: (a) «(...) pour le système auto-poïétique lui-même (les perturbations venant de l'extérieur et celles venant de l'intérieur) sont intrinsèquement indistinguables»⁵⁰, et (b) «(...) l'organisme n'extrait pas la distance des caractéristiques de l'environnement; au contraire, par un processus de compensation des perturbations, il *engendre* les distances perçues, comme un mode de comportement compatible avec l'environnement»⁵¹. S'il en va comme l'indique la remarque (b), ce n'est qu'une fois constitué un réseau de distances exprimant des comportements propres résultant du couplage organique unité-environnement, que les distinctions intérieur-extérieur, ou bien objet A - objet B, peuvent acquérir un sens.

⁴⁸ F. Varela, *Autonomie et connaissance*, op. cit. p. 14

⁴⁹ *ibid.* p. 224

⁵⁰ *ibid.* p. 64

⁵¹ *ibid.* p. 166

Mais, bien entendu, ce sens étant supposé relatif à la procédure de constitution, il n'affaiblit en rien l'énoncé (a) d'indistinguabilité intrinsèque. Ici, tout se passe comme si l'unité auto-poïétique avait à constituer les *relata* des relations qu'elle entretient, sans jamais disposer de rien d'autre pour y parvenir que de ceux de ses états propres qui sont censées résulter des relations en question. De son point de vue, l'hypothèse même qu'*il y a* de telles relations, et que leur constitution n'est qu'une *re-constitution*, ne doit dès lors être tenue que pour une projection après coup du résultat de la procédure de constitution.

Appliquées au point de vue du concepteur humain de la méta-théorie auto-organisationnelle de la cognition, ces réflexions devraient conduire à reconnaître que la description d'une interaction entre unité auto-poïétique et environnement perturbateur, n'est, elle aussi, que la projection après coup du résultat d'un travail antérieur de constitution. Quelle(s) attitude(s) adopter face à cette menace d'auto-résorption de la version auto-organisationnelle du cercle épistémologique? Deux attitudes sont en principe disponibles. La première, celle de la philosophie transcendante, revient à se contenter de *montrer* le résidu stabilisé de présuppositions formelles auquel a abouti un processus constitutif originaire qu'on se garde bien de *décrire*, et même d'évoquer ouvertement. La deuxième attitude (qui est une version auto-organisationnelle de la stratégie de naturalisation de l'épistémologie) consiste au contraire à ne pas se laisser impressionner par le constat selon lequel la description des relations constitutives de la cognition est elle-même dépendante d'une procédure préalable de constitution. Ceux qui adoptent cette deuxième attitude peuvent se contenter pour cela d'accorder un privilège universel à la procédure préalable de constitution qui est celle de l'attitude naturelle et de la science classique. Mais dans ce cas ils s'exposent à l'accusation, justifiée, de naïveté épistémologique; ils réduisent l'avantage qu'ils avaient par rapport aux partisans d'une théorie dualiste de la connaissance *constitutivement* naïve; et ils se privent de la possibilité de déployer pleinement leur thèse dans le champ de la physique quantique. Les partisans de la version auto-organisationnelle de la stratégie de naturalisation de l'épistémologie peuvent aussi, de manière plus intéressante, souligner que ce qui apparaît comme un cercle vicieux dans une perspective statique devient un cercle vertueux dans une perspective dynamique. Rien ne les empêche après tout d'insérer la relation cognitionnelle décrite et la procédure qui fournit les formes de la description, la relation constitutive et la pré-constitution requise pour la thématiser, dans un cercle ouvert et en devenir où est corrigé à chaque étape le défaut de conception qui se manifeste à l'étape précédente.

A vrai dire, les deux attitudes précédentes ne font pas que s'opposer; elles se complètent, en permettant de clarifier le statut de l'une par sa mise en perspective dans les termes de l'autre. L'approche transcendante offre à la théorie auto-organisationnelle de la cognition l'opportunité de rendre raison des catégories qu'elle

est forcée d'emprunter en première instance au sens commun ou à la science classique, sans recourir à l'idée (qui lui est étrangère) d'une pré-structuration du monde extérieur. Inversement, la théorie auto-organisationnelle de la cognition incite à voir dans l'approche transcendantale un cas particulier des processus qu'elle décrit: celui où est inventorié après-coup le cadre formel qui organise un mode unique et stable de relation cognitive, du point de vue de quelqu'un qui participe à cette relation. Pour peu qu'elle admette la notion d'*équilibres ponctuels*⁵², une théorie évolutionniste et auto-organisationnelle de la cognition peut même aider la philosophie transcendantale à se mobiliser, à se pluraliser, à s'affranchir du projet fondationnaliste et fixiste original de Kant. Car on peut admettre, dans la perspective d'une telle théorie, qu'il y a autant de démarches transcendantales possibles que de modes d'équilibre durable entre des classes de clôtures opérationnelles et leur *Umwelt* co-émergent; une démarche transcendantale étant ici définie comme auto-explicitation rétrospective des cadres catégoriaux propres à chaque phase d'équilibre.

Cet éclairage réciproque des approches transcendantales et des théories auto-organisationnelles de la cognition suggère à son tour d'envisager leurs rapports non plus sous l'angle d'un conflit des prétentions à la validité, mais sous celui d'une répartition équitable des rôles.

(1) Les approches transcendantales s'imposent lorsqu'il faut tenir compte de la relativité des déterminations à l'égard d'un (ou plusieurs) contexte(s) *à partir de l'intérieur de la relation*; autrement dit, dans une configuration épistémologique où on ne dispose d'aucun autre moyen de détection des déterminations que les contextes eux-mêmes, et où on ne peut même pas *définir* ces déterminations indépendamment des contextes qui y donnent accès⁵³. C'est le cas pour les déterminations des corps matériels de l'environnement familier, relatives selon Kant à des formes *a priori* de la sensibilité et de la pensée qui les co-constituent. C'est le cas également pour les déterminations attribuées aux objets de la physique quantique, inséparables, comme le souligne Bohr, de contextes instrumentaux qui tout à la fois y donnent accès et les co-définissent.

(2) Les théories relationnelles et auto-organisationnelles de la cognition, pour leur part, s'avèrent très utiles dans les situations mouvantes où l'on cherche à spécifier les caractéristiques d'une nouvelle relation cognitive en présupposant, fût-ce provisoirement, le cadre formel résultant d'une relation cognitive antérieure. L'image de la «perturbation» de l'objet par l'appareil de mesure, que Bohr et Heisenberg popularisèrent durant la phase de création de la mécanique quantique, illustre bien ce

⁵² S.J. Gould & N. Eldredge, «Punctuated equilibrium comes of age», *Nature*, 366, 223-227, 1993. Selon la théorie des équilibres ponctuels, l'évolution biologique ne s'effectue pas par changements graduels, mais par quasi-sauts: de longues périodes d'équilibre sont interrompues par de brèves périodes de changement rapide.

⁵³ Voir J. Petitot, «Objectivité faible et philosophie transcendantale», in: M. Bitbol & S. Laugier (eds.), *Physique et réalité, un débat avec Bernard d'Espagnat*, Frontières-Diderot, 1997

rôle de moyen de passage hybride, de pont trans-paradigmatique, joué par les théories relationnelles de la cognition. Car employer cette image c'est commencer par représenter le rapport entre les éléments du processus cognitif d'une façon qui implique la validité universelle des concepts formels de propriété et d'objet, puis se prévaloir de l'inanalysabilité d'un tel rapport pour mettre en question le concept formel de propriété, voire celui d'objet, hors du domaine macroscopique où ils continuent à devoir être présumés et à opérer comme cas-limite. C'est en somme prendre une dernière fois appui sur le cadre formel classique afin de décrire un mode de relation qui lui échappe. Mais ensuite, une fois consommé le bénéfice heuristique de cet appui, seule une application renouvelée de la méthode transcendantale permet d'identifier le cadre formel du mode de relation inédit sans risque de confusion avec des catégories antérieures.

En accord avec leur propre façon de définir la cognition, les théories auto-organisationnelles n'ont en définitive aucune valeur descriptive ou explicative, mais seulement une *fonctionnalité*. Leur principale fonctionnalité consiste à servir de matrice de *transition* entre un paradigme relationnel et un autre; par exemple entre le monde propre de l'homme et les mondes propres de ses artefacts robotiques, ou entre le mode classique et le mode quantique d'orientation anticipative. Leur éventuelle prédominance (particulièrement face aux approches transcendantales) n'est dès lors assurée qu'en période de redéfinition dynamique du processus cognitif. Telle est l'une des principales limites que devrait s'assigner à lui-même un projet de naturalisation de l'épistémologie conforme au paradigme auto-poïétique.