

DE LA PHYSIQUE A L'EPISTEMOLOGIE

B. D'ESPAGNAT ET I. PRIGOGINE

Yvon GAUTHIER

0. L'épistémologie française de la physique a été une épistémologie historique jusqu'à Bachelard. Récemment elle a pris un tournant qui l'écarte de l'histoire régressive pour la rapprocher davantage des débats actuels de la physique: j'en veux pour exemples les discussions que suscitent l'inégalité (ou les inégalités) de Bell ou la théorie des variables cachées et les débats qui gravitent autour de la notion de désordre, surtout dans la perspective de la nouvelle thermodynamique proposée par I. Prigogine. Ces débats montrent une vigueur nouvelle et s'ils ne sont pas toujours éclairants, il faut se réjouir de leur pertinence et de leur «actualité». Dans cet article, je voudrais faire l'état de la question et essayer d'être le plus près possible de la rigueur sans pour autant faire un étalage impudique de formalisme; je ferai aussi référence, sans fausse humilité, à quelques travaux parus ailleurs et susceptibles de mieux situer la problématique. Je ferai porter ma critique sur le réalisme en science.

1. Le réalisme se porte mal: des philosophes comme Putnam ou van Fraassen qui naguère encore défendaient des points de vue à tout le moins apparentés au réalisme proposent des thèses anti-réalistes⁽¹⁾ ou qui sont aux antipodes du réalisme métaphysique. Et ceux qui

(¹) Nous renvoyons à l'article de Putnam «Models and Reality», (*Journal of Symbolic Logic*, vol. 45, (1980) no. 3, pp. 464-482) pour montrer qu'une théorie scientifique, à la manière des théories mathématique, ne peut avoir pour seul modèle le modèle visé (intended interpretation); en d'autres mots, une théorie physique (du premier ordre), par exemple, ne peut déterminer catégoriquement ses objets, de sorte que toute interprétation réaliste qui supposerait une description littérale du monde physique où le réel serait isomorphe à une structure théorique est vouée à l'absurdité. Bas van Fraassen expose ses vues anti-réalistes dans *The Scientific Image*, The Clarendon Press, Oxford, 1980. Notre constat diffère de celui de Pierre Jacob *L'empirisme logique*, Editions de Minuit, Paris, 1980, dont l'«Epilogue» décrit une histoire déjà ancienne.

tiennent encore au réalisme le voilent prudemment⁽²⁾. Quant au réalisme critique de Popper et des poppériens, il est relégué aujourd'hui au rôle d'une thèse historique sur le développement rationnel de la science que contredit la doctrine kuhnienne. Reste le réalisme naïf.

On connaît la fortune du réalisme naïf en mathématiques, platonisme inconscient qui croit ou feint de croire à l'existence idéale des objets mathématiques. «Naïf» a un autre sens aussi, il est opposé à «axiomatique» comme dans «théorie naïve des ensembles» par contraste avec «théorie axiomatique des ensembles». Le réalisme naïf en science peut aussi vouloir dire «pré-critique» ou «acritique». C'est cette acception que semble autoriser l'ouvrage de I. Prigogine et I. Stengers, *La Nouvelle Alliance*. L'ouvrage se veut, en réalité, un procès de la science classique et l'annonce d'une science nouvelle, la promesse d'un savoir rafraîchi qui marie science et métaphysique dans l'aventure spirituelle d'une renaissance culturelle. Cette innocence retrouvée par-delà le triomphe «déshumanisant» de la science classique annonce-t-elle un nouvel âge de la science ou promet-elle un nouvel Eden qui ne serait que la face cachée de la science classique, le renversement espéré de la perspective euclidienne du savoir?

Disons-le tout de suite: le procès que Prigogine et Stengers veulent intenter à la science classique n'aura pas lieu. Il ne suffit pas de reprendre à de nouveaux frais l'accusation de mécanicisme contre la science moderne pour réinventer la science: il y a une longue tradition de protestation poético-humaniste ou romantique qui est toujours vivante⁽³⁾. Mais l'image que nous en présentent les auteurs est-elle bien fidèle? On nous dit «Bien sûr, un certain mécanicisme est mort – comme il était mort déjà avec le remplacement des concepts géométriques par les concepts infinitésimaux...» (p. 78). Il n'en est rien, puisque Newton donne presque toujours une interprétation géométrique à son calcul des fluxions et recourt constamment à des preuves géométriques dans ses *Principia*. Et si l'on suit S. Drake, le modèle de

(2) Cf. B. d'Espagnat dans *A la recherche du réel*, ouvr. cit. où l'auteur parle d'un réel voilé, inaccessible à nos manipulations et à nos théories.

(3) Voir H. J. Muller *Science & Criticism. The Humanistic Tradition in Contemporary Thought*, Yale University Press, New Haven and London, 1964, pour une mise à jour de l'humanisme scientifique.

Galilée n'aurait pas été la machine, mais bien plutôt la musique et les instruments de musique. Les auteurs décrivent ensuite l'hamiltonien (pp. 79-84) ou les équations de la dynamique classique et insistent avec justesse sur le rôle des variables canoniques ou des coordonnées généralisées p, q du système $H(p, q)$, mais on dramatise le problème des trois corps (p. 58 et pp. 242-249) comme s'il s'agissait d'un moment critique insurpassable de la science moderne, alors qu'on sait comment obtenir de bonnes approximations en l'absence de solutions exactes (le cas de la terre, de la lune et du soleil est un exemple du problème des trois corps, le proton, l'électron et le neutron en est un autre). Arnold en 1962 a démontré, par exemple, qu'il existe des solutions quasi-périodiques pour le problème des n corps⁽⁴⁾. C'est ici cependant que se trouve le point d'ancrage du livre (et des travaux de Prigogine): le problème de la stabilité. Nous savons comment se pose le problème en thermodynamique des systèmes instables⁽⁵⁾; en fait, il ne se pose pas différemment aujourd'hui qu'au temps de Poincaré et c'est toujours un système d'équations différentielles partielles (pour l'évolution temporelle du système) et non linéaires (à cause de l'interaction non additive) qui sert de point de départ (avec le théorème de Liapounov) à l'analyse des structures dissipatives, i.e. structures de diffusion ou de dispersion qui créent de l'ordre à partir du désordre apparent. La thermodynamique du non-équilibre est l'axe recteur du livre et il faut maintenant en évaluer la pertinence.

2. La thermodynamique classique est la thermodynamique de l'équilibre: la conservation de l'énergie et l'acroissement de l'entropie jusqu'à l'état d'équilibre thermique sont ses deux lois.⁽⁶⁾ Le modèle

(4) Voir là-dessus J. Moser *Stable and Random Motions in Dynamical Systems*, Annals of Mathematics Studies, no. 77, Princeton University Press, Princeton, N. J., 1973.

(5) Voir en particulier G. Nicolis and I. Prigogine *Self-Organization in Nonequilibrium Systems*, John Wiley and Sons, New York, 1977. Je me permets de renvoyer au chapitre «Systèmes» de mon dernier ouvrage *Théorétiques. Pour une philosophie constructiviste des sciences*, Le Préambule, Montréal, 1982, pour plus de précisions là-dessus.

(6) Une troisième loi de la thermodynamique peut être ajoutée ici: le principe de Nernst stipule que l'entropie s'approche asymptotiquement de zéro à la température du zéro absolu.

mécanique règne toujours, mais vient s'y ajouter l'irréversibilité, phénomène nouveau, inconnu de la dynamique newtonienne. Le temps anisotropique fait son entrée en physique; cette histoire de la thermodynamique est admirablement évoquée dans l'ouvrage de Prigogine et Stengers: on y décrit la théorie boltzmannienne de la probabilité des complexions – une complexion est la donnée d'une énergie, d'une direction et d'une localisation spatiale pour toutes les molécules d'un gaz, par exemple – pour laquelle l'entropie s'écrit

$$S = k \ln W$$

pour W la probabilité thermodynamique, k la constante de Boltzmann (en termes d'ergs) et $\ln$ le logarithme naturel; les trois stades de la thermodynamique vont de l'équilibre au domaine proche de l'équilibre et au domaine non linéaire. On passe ainsi de la vitesse de changement des concentrations, à l'autocatalyse ou rétroaction chimique par laquelle une réaction chimique devient son propre catalyseur, jusqu'à l'instabilité de Bénard. La présentation est encore «dramatisée» ici est nous allons nous arrêter un peu sur cette instabilité de Bénard qui joue un rôle archétypal dans la thermodynamique du non-équilibre.

3. L'instabilité de Bénard est un phénomène de convection, i.e. mouvement d'un fluide (gaz ou liquide) sous l'action de la chaleur. Par exemple, chauffée par en bas, la couche inférieure du fluide va prendre de l'expansion et tendre à monter alors que les couches supérieures vont s'affaisser. Plusieurs forces sont en jeu: la force ascensionnelle, la viscosité, la densité, la tension superficielle ou de surface, etc... Lord Rayleigh, Landau, Ginsburg, Hopf ont contribué à la théorie de la convection et si l'on n'a pas ici non plus de solutions exactes (en particulier, la théorie de Rayleigh comportait une sorte de catastrophe de l'ultra-violet)⁽⁷⁾, on a de très bonnes approximations qui utilisent des méthodes de la dynamique classique (surface de potentiel, énergie potentielle, etc...). Du point de vue physico-

(7) Dans le sens où la vitesse d'un flux convectionnel devait croître exponentiellement sous certaines conditions. On trouvera des détails sur la théorie de la convection dans l'article de C. Normand, Y. Pomeau et M. G. Velarde «Convective Instability», in *Reviews of Modern Physics*, vol. 49, no. 3, pp. 581-624 (July 1977).

mathématique, cette nouveauté n'est pas incompressible ou irréductible. C'est sur cette hypothèse de l'irréductibilité de l'instable, du fluctuant, du bifurquant (la bifurcation est le point critique ou singulier où commence l'instable), du dissipatif, que se fonde la thermodynamique du non-équilibre. Il ne faut pas le cacher: l'hypothèse est un défi (ou un pari) autant qu'un programme de recherche. On a beau insister sur le caractère qualitatif de l'entreprise (la chimie serait-elle une physique qualitative?)(⁸), on ne peut masquer la minceur des résultats mathématiques. La mécanique statistique des Boltzmann, Maxwell, Gibbs, la théorie cinétique des gaz, bien qu'elle ne s'occupe que de cas idéaux, ont fourni des modèles probabilitaires qu'on ne peut écarter au profit d'une théorie riche de promesses, mais avare de résultats.

La théorie de l'ordre par fluctuation, c'est-à-dire l'ordre macroscopique créé par des écarts infinitésimaux à l'équilibre qui s'amplifient, peut cependant jouer un rôle extrêmement important en biologie (biologie moléculaire, génétique des populations), en sciences sociales et humaines où la dialectique de l'équilibre et de l'instabilité peut fournir une méthode et des concepts analogiques *transdisciplinaires* (les abus de langage métaphorique sont toutefois à craindre ici). Ce n'est pas le moindre mérite de l'ouvrage de vouloir montrer contre Monod la continuité du monde vivant avec l'univers physique, de vouloir paradoxalement «désingulariser» la vie en généralisant les singularités, les points critiques, des phénomènes physico-chimiques aux phénomènes biochimiques.

4. Ce point de vue particulier, celui de la thermodynamique du non-équilibre entraîne les auteurs, surtout Prigogine, dans des spéculations originales sur l'opérateur temps et une complémentarité «élargie».

Partant de l'équation de Liouville qui est une généralisation de l'équation de continuité (due à Euler) en hydrodynamique, les auteurs imaginent un opérateur T (temps) qui aurait des fonctions propres et des valeurs propres tout comme les opérateurs de la mécanique

(⁸) On pourrait résumer le contenu quantitatif de la chimie dans les deux lois de la périodicité et de stœchiométrie (lois des proportions multiples, réciproques, relations de poids, etc.).

quantique et qui donnerait l'âge «interne» d'un système thermodynamique (ou son entropie microscopique); cette entropie microscopique a aussi un opérateur représentatif M qui ne commute pas avec l'opérateur L qui représente l'équation de continuité de Liouville

$$ML-LM \neq 0;$$

on obtient ainsi une fonction de Boltzmann modifiée

$$\mathcal{H} = \int p M dq dp^{(*)}$$

qui n'est pas canonique, mais multiple. Ce temps «foisonnant», statistique n'a pas encore de statut scientifique, mais il représente un exemple intéressant de spéculation scientifique (les trous noirs ne sont eux aussi que des objets de spéculation, après tout). Les auteurs voudraient qu'un gain important soit obtenu sur la dynamique classique des trajectoires, puisque le système mélangé ou «mixé» exhibe en plus des trajectoires une marche aléatoire, un processus stochastique. Il n'est pas facile ici de trier l'acquis du nouveau, les résultats annoncés n'ayant pas de caractère définitif. Mais la thermodynamique nouvelle est une science ouverte...

Ce que l'ouvrage de Prigogine et Stengers ne dit pas, c'est tout ce qui est passé de la science classique, dans notre cas de la mécanique classique, dans la science contemporaine; malgré les révolutions

(*) La fonction de Boltzmann

$$\mathcal{H} = \int dv f \log f$$

exprime le fait que l'entropie tend vers un maximum, c'est-à-dire un état asymptotiquement stable ou un état «attracteur». Elle devient

$$\mathcal{H} = \int (\dot{q})^2 dp dq$$

si l'on opère le transformation $\Lambda q = \dot{q}$ pour $\Lambda = 1/2M$; les auteurs font ici état de travaux de Misra qui utilisent la «transformation du boulanger», sorte de pétrissage (automorphisme) d'une surface qui la fragmente de telle sorte que sa description ne peut être que statistique; il s'agit alors de systèmes ergodiques où l'on remplace la moyenne des états dans le temps d'un système par la moyenne des états du système à un instant donnée. C'est une situation qui a donné naissance à plusieurs théorèmes dans la théorie des probabilités (e.g. théorème ergodique). Aujourd'hui, théorie ergodique signifie simplement étude probabiliste des systèmes dynamique complexes (cf. V. I. Arnold et A. Avez *Problèmes ergodiques de la mécanique classique*, Gauthier-Villars, Paris, 1967). Remarquons qu'on a aussi une transformation «multiplication des pains», *ibid.*, pp. 121-122 ou encore du «mixing» ou du mixeur, *ibid.*, p. 19. On consultera encore l'ouvrage récent de Prigogine *Physique, temps et devenir*, Masson, Paris, 1982.

relativiste et quantique, les méthodes mathématiques du domaine classique sont demeurées valides, même lorsqu'il a fallu les généraliser considérablement. Le lagrangien et l'hamiltonien des équations du mouvement fondés sur le principe de moindre action sont demeurés un axe principal dans la théorie quantique des champs et aussi bien dans la théorie ergodique des systèmes dynamiques, puisqu'on y trouve la notion de «flot hamiltonien», de flot géodésique, etc...; les équations différentielles non linéaires sont au cœur de la relativité générale et la théorie des variétés différentielles avec le fibré principal n'a pas invalidé la géométrie différentielle classique. Si c'est le paradigme mécaniciste de la science classique qu'on veut dépasser, il y a longtemps que son contenu intellectuel est épuisé: on n'imagine plus l'horloger de Voltaire ni le démon de Laplace dans son observatoire sur Sirius. Mais lorsqu'on s'en prend à la réversibilité comme reste mécaniciste, on oublie de dire que la réversibilité signifie symétrie, invariance, interaction et que la physique contemporaine ne serait pas possible sans l'opération de renversement du temps (à l'intérieur du théorème CPT, conjugaison de la charge, conservation de la parité et renversement du temps) et qu'en particulier l'électrodynamique quantique de Schwinger et Feynman, la théorie scientifique la plus «précise» que l'on ait aujourd'hui, n'est pas concevable sans elle; les brisures spontanées de symétrie elles-mêmes ne sont qu'une autre manifestation du principe de symétrie.

5. L'homogénéisation de l'espace qu'a opérée la géométrie euclidienne dans la mécanique contemporaine, après que les philosophes (Nicolas de Cuse, Giordano Bruno) l'eurent «infinisé»⁽¹⁰⁾, à rendu possible le désenchantement du monde. Mais pour réenchanter le monde, faudra-t-il réveiller la nature? La nouvelle alliance va-t-elle ressusciter les vieilles idoles? Le modèle philosophique ici est Bergson ou Whitehead. L'élan vital ou l'organicisme de *Process and Reality* seront-ils remis à l'ordre du jour? La science des philosophes et la philosophie des savants, c'est connu, n'ont pas fait bon ménage dans le passé et on ne peut supposer qu'il en sera autrement dans l'avenir immédiat. C'est pourtant ce type d'alliance que proposent

(10) Voir là-dessus A. Koyré *Du monde clos à l'univers infini*, Gallimard, Paris, 1973 et M. Jammer *Concepts of Space*, Dover, New York, 1960.

Prigogine et Stengers, alliance où science et métaphysique auraient de nouveau un destin conjoint. Mais la métaphysique est morte et la science n'est plus une. Le rêve est cependant toujours vivace d'une théorie physique unificatrice et d'une sagesse qui rendrait de nouveau le monde habitable. Faut-il pour cela reprendre la philosophie de la nature, de ce concept inassignable de la métaphysique qui appartient à une époque révolue de l'histoire du savoir? D'Aristote à Thomas d'Aquin, avant que la physique ne naisse, n'en déplaise à Lucrèce⁽¹¹⁾, la «*philosophia naturalis*» (ou «*cosmologia*») n'était qu'un domaine d'application de la métaphysique; elle devint physique en devenant science. La philosophie de la nature n'a pu ensuite subsister que comme rappel romantique, nostalgie de l'ancienne alliance des dieux et des hommes, du ciel et de la terre – Hölderlin, Novalis, Schelling, ont tous voulu recouvrer ce «*Geviert*» ce «*Quadrant*» ou «*Quadruple*» qu'a décrit Heidegger⁽¹²⁾. La philosophie romantique était essentiellement anti-mécaniste et organiciste, ce qui nous rapproche d'un Whitehead (et d'un autre romantique naturaliste, S. Moscovici). On n'évaluera pas ici l'entreprise de Whitehead qui était essentiellement une cosmologie philosophique au sens scolastique et qui n'avait pas plus de contact avec la science contemporaine qu'une méta-physique.⁽¹³⁾

(11) Nous référons évidemment au Lucrèce de Michel Serres *La naissance de la physique dans le texte de Lucrèce*, Minuit, Paris, 1977. L'histoire des sciences «*dévoquée*» ou «*déviationniste*», «*clinaminale*», si l'on veut, que même Michel Serres en admirable métaphoricien a une vigueur, une originalité, une ondulation qui change de l'histoire «*plate*» des penseurs linéaires; ses «*transports*» dérangent de vieilles habitudes et même si l'on ne se rend pas à ses destinations ou à ses raisons on ne peut rester insensible aux «*voyages*» conceptuels de ce philosophe marin.

(12) Le cas de Hegel est, comme toujours, exceptionnel. S'il a été prudent dans son approche des mathématiques, – voir notre article «*L'épistémologie française des mathématiques*» in *Critique*, no 368, janvier 1978 p. 21 et ss. – il a voulu intégrer la science de son temps dans une dialectique qui l'a étouffée. (cf. G.W.F. Hegel *Enzyklopädie der philosophischen Wissenschaften im Grundrisse* de 1830, 2e partie «*Naturphilosophie*» en particulier la «*physique organique*», «*Organische Physik*», F. Meiner, Hamburg, 1959).

(13) Nous renvoyons ici à *Process and Reality. An Essay in Cosmology* (1929) The Free Press, New York, 1969. *Science and the Modern World* (1925), the Free Press, New York, 1967 contient des considérations générales sur la relativité et la théorie des quanta; on sait que Whitehead a été influencé par l'évolutionnisme holiste et «*processif*» de Morgan et Alexander.

La philosophie des sciences ou ce qu'on appelle encore l'épistémologie et que nous appellerions plutôt l'épistémologique est la grande oubliée dans l'ouvrage de Prigogine et Stengers. Il est vrai qu'en France, en particulier, comme nous l'avons déjà dit, l'histoire des sciences tient lieu de philosophie des sciences et c'est là une confusion qui n'est due qu'à l'ignorance, comme le reconnaissent J. Largeault ou J. Bouveresse. L'examen critique et l'analyse fondationnelle du discours scientifique interviennent dans la construction du savoir lui-même par la mise en œuvre de méthodes logiques et de jauges épistémologiques qui sont «internes» à la science. La logique mathématique et l'épistémologie scientifique ne sont pas plus «positivistes» ou autre chose que les mathématiques et la physique d'aujourd'hui et c'est encore de courte vue que de condamner ces disciplines en les renvoyant à je ne sais quelle paternité anti-philosophique. Si l'œuvre littéraire peut servir d'antidote aux excès de la science dans l'harmonie des deux cultures, ce n'est pas elle qui nous dira les limites d'un savoir dont elle est trop souvent le simple envers. Une science ouverte est une science qui est capable de dépasser ses propres limites, d'inventer de nouveaux concepts, de produire des questions originales et d'ouvrir de larges avenues à la recherche. La thermodynamique nouvelle est à ce compte une science ouverte, mais il lui manque encore une logique et une épistémologique. En dépit de son ouverture généreuse au dialogue entre science et philosophie et de son audace conceptuelle, la thermodynamique nouvelle ne peut prétendre embasser tout l'horizon du savoir et éclipser, par exemple, la théorie des particules élémentaires, la cosmologie qui ont des motivations et des ambitions tout différentes. La réconciliation des domaines respectifs du réversible et de l'irréversible, du symétrique et de l'asymétrique, de la conservation et de la dissipation, de l'invariant et de l'écart à l'équilibre reste à accomplir. Ce n'est pas le réalisme ou la naïveté métaphysique qui pourra s'acquitter de cette tâche, s'il est vrai que nous ne sommes pas seulement spectateurs ou auditeurs dans le procès créateur du devenir, mais aussi acteurs, agents ou constructeurs.

L'illusion première est celle d'un monde, d'un univers (ou d'un dieu), d'une nature qui se serait faite sans nous pour nous faire ensuite dans une reduplication spontanée ; le mythe ancien du microcosme ou de la créature à la vie dure et il renaît à intervalles réguliers. Nous

supposons plutôt que l'histoire cosmique est une histoire que nous construisons dans et par la science (née elle aussi du mythe et qui parfois s'en souvient). La science est langage et cet univers linguistique est celui de nos théories qui, à leur tour, rendent possibles nos pratiques. Le constructivisme n'a pas besoin du support métaphysique d'un monde objectif, d'une réalité indépendante pour comprendre le savoir et expliquer son objet. Là où la philosophie ouverte du constructivisme rejoint les ambitions de la thermodynamique nouvelle, c'est dans sa prédilection des constructions locales.

6. C'est d'ailleurs sur cette question de l'observateur «actif» que les idées de Prigogine sont peut-être les plus originales. Inspirée par une épistémologie de la science qui veut que le travail scientifique soit une exploration élective plutôt que la découverte d'une réalité donnée (*Physique, temps et devenir*, ouvr. cit., p. 65), Prigogine nous dit que l'irréversibilité est en nous (ibid., pp. 82 et 215) et que l'entropie rendrait impossible la distinction entre mélanges et états purs de la mécanique quantique (p. 257). On le voit, une telle théorie macroscopique de la mesure est certainement possible, mais elle n'a pas encore de statut formel ou d'assises rigoureuses. Cette possibilité n'est pas évoquée par B. d'Espagnat dans l'ouvrage qui nous occupe,⁽¹⁴⁾ mais la théorie macroscopique de la mesure qu'esquisse Prigogine⁽¹⁵⁾ est peut-être un exemple de l'idée de non-séparabilité si chère à d'Espagnat. Quoi qu'il en soit, ce sont des questions épistémologiques qui sont ici en jeu et B. d'Espagnat n'hésite pas à réclamer pour les physiciens ces questions fondamentales qu'il voudrait retirer aux épistémologues professionnels.⁽¹⁶⁾ S'il est facile de montrer la légèreté de la plupart des philosophes en matières scientifiques il n'est pas plus difficile de démontrer la naïveté philosophique de la plupart des praticiens de la science. Mais il n'est pas interdit que le physicien et

(14) Voir aussi la version anglaise amplifiée B. d'Espagnat *Conceptual Foundations of Quantum Mechanics*, 2nd ed., W. A. Benjamin, Reading, Mass., 1976.

(15) Voir I. Prigogine «Measurement Process and Macroscopic Level of Quantum Mechanics» dans *The Physicist's Conception of Nature*, ed. by J. Mehra, Reidel, Dordrecht/Holland, 1973, pp. 697-701.

(16) Voir B. d'Espagnat «The Concepts of Influences and Attributes as seen in connection with Bell's Theorem» *Foundations of Physics*, vol. 11, nos 3/4, April 1981, pp. 205-234.

l'épistémologue se rencontrent dans le même homme, pourvu que l'un soit bien informé de l'autre et que le même homme soit instruit, dirait Bachelard.

J'aborde maintenant deux problèmes centraux qui sont au cœur de la discussion de d'Espagnat: l'inégalité de Bell et l'interprétation d'Everett de la MQ.

Je veux commencer par deux exemples que je tire de Karl Popper: ces deux exemples se trouvent dans *Quantum Theory and the Schism in Physics* ⁽¹⁷⁾. Le premier exemple touche à l'interprétation d'Everett et constitue une addition récente (pp. 89-95, daté de 1981). L'interprétation d'Everett qui remonte à la fin des années cinquante a connu un certain succès à cette époque: elle consistait à supposer que la fonction d'onde ψ dans l'équation de Schrödinger se ramifiait universellement, c'est-à-dire qu'elle prenait toutes ses valeurs et qu'elle engendrait ainsi une multitude d'univers, de «multivers» dont nous n'étions pas conscients (pas plus que nous ne sommes conscients de la rotation de la terre, dit Everett, et pourtant elle tourne, disait l'autre). Popper écrit que l'interprétation ne tient pas puisqu'elle contredit les lois dynamiques de la physique, la solution d'Everett ne respectant pas la symétrie du renversement de la direction du temps, par exemple. Popper ajoute que l'interprétation, par là, n'est pas isomorphe au formalisme de la théorie, ce que prétendait Everett.

Je voudrais montrer sur cet exemple qu'on peut aller beaucoup plus loin et refaire ici ma courte démonstration de l'inconsistance de la thèse d'Everett que l'on trouvera dans plusieurs de mes travaux, en particulier dans l'ouvrage cité en note 5. La ramification universelle de la fonction d'onde donne un ensemble de cardinalité $2^{\lambda'}$ (ou infinité non dénombrable, ce que semble remarquer Popper dans une note p. 93 du texte précité), puisque la fonction d'onde prend ses valeurs dans $\mathbb{R}$ (ensemble des nombres réels) ou dans $\mathbb{C}$ (ensemble des nombres complexes) et que l'on quantifie universellement; mais il n'y a certainement pas plus de λ'_0 résultats (ou une infinité dénombrable) de mesure et même s'il y avait λ'_0 observateurs, $\lambda'_0 + \lambda'_0 = \lambda'_0$ ou encore $\lambda'_0 \cdot \lambda'_0 = \lambda'_0$ et il n'y a pas de bijection entre λ'_0 et $2^{\lambda'}$; ce qui

⁽¹⁷⁾ K. R. POPPER *Quantum Theory and the Schism in Physics. Postscript to the Logic of Scientific Discovery*, ed. by W. W. Bartley III, Roman and Littlefield, Totowa, N. J., 1982.

montre l'inconsistance de l'interprétation d'Everett et du même coup invalide sa thèse de l'isomorphisme entre le formalisme mathématique et son interprétation physique C.Q.F.D.

La contradiction apparaît dans la théorie des ensembles dont Everett ne conteste jamais la validité. Une contradiction mathématique n'est-elle pas plus sérieuse qu'une contradiction au sein de la théorie physique ? Je suppose que l'ordre de la consistance va dans le sens suivant : logique $\rightarrow$ mathématique $\rightarrow$ physique $\rightarrow$ philosophie. Ainsi une contradiction au niveau logique a des répercussions sur tous les autres niveaux, alors qu'une contradiction philosophique n'est qu'une auto-affection. Le choc en retour d'une impossibilité philosophique peut cependant entraîner une révision de la logique et c'est ce que nous allons voir avec notre deuxième exemple qui semble affecter la validité de la logique classique : c'est l'inégalité de Bell⁽¹⁸⁾.

7. Reprenant le paradoxe d'Einstein-Podolsky-Rosen sur l'incomplétude de la MQ de 1935, Bell montre que les théories réalistes à paramètres cachés comme la théorie de David Bohm entraînent une inégalité qui n'est pas compatible avec les prédictions de la MQ. Cette inégalité est liée aux mesures de probabilité des composantes de spin A^+ , B^+ , C^+ d'un nombre n de particules

$$n[A^+B^+] \leq n[A^+C^+] + n[B^+C^+]$$

Des expériences ont été conçues récemment pour tenter de confirmer cette inégalité et ainsi démontrer l'invalidité de la MQ. Rappelons les expériences spectaculaires d'Aspect qui ont eu un résultat négatif : les expériences sont en accord avec les prédictions de la MQ, c'est-à-dire que l'inégalité devient une égalité.

Popper écrit dans sa préface de 1982 au *Postscript* «On a Realistic and Common Sense Interpretation of Quantum Theory»

I must admit that these test results have surprised me. When I first heard that John F. Clauser and Abner Shimony were intending to test Bell's theorem, I expected that their results would refute quantum theory. But my expectation appears to have been mistaken, since the majority of the tests have gone the other way.

⁽¹⁸⁾ Cf. J. S. Bell «On the Einstein-Podolsky-Rosen Paradox», *Physics* I (1964), pp. 195-200.

Et Popper suggère de ressusciter l'action à distance (et son médium, l'éther) dans l'interprétation de Lorentz pour aller à l'encontre du principe de localité ou séparation spatiale exigé par la Relativité Restreinte et que les théories réalistes de variables cachées ne peuvent admettre en vertu de l'inégalité de Bell - Bohm parlera alors de «wholeness» et d'Espagnat de non-séparabilité du réel physique. Il s'agit ici de savoir si une thèse philosophique, le réalisme «commun» de Popper, est assez forte pour répudier un principe physique dont la validité semble assurée, la causalité relativiste ou l'invariance de Lorentz. Le résultat physique ici semble en contradiction avec la philosophie réaliste. Mais est-ce que l'exigence philosophique est plus grande que la validité des lois physiques ? Je dirai qu'il est plus simple (et plus sage) d'abandonner le réalisme ici que la Relativité Restreinte ; si j'adopte une logique plus forte, i.e. plus exigeante, la logique constructiviste de la négation locale et du complément local qui n'est plus booléenne, c'est-à-dire qui n'obéit plus à la loi $\neg\neg a = a$, alors je peux dire que la mesure, c'est-à-dire la relation ou l'interrelation (ou l'interaction) du système observé et du système observateur (ou de l'appareil de mesure) ne conserve pas les mesures de probabilité (booléennes) sur les sous-espaces orthogonaux de l'espace de Hilbert⁽¹⁹⁾ ou encore «ouvre» l'ensemble des sous-espaces, ce qui entraîne la non-orthocomplémentation et une logique non booléenne. Si le réalisme est répudié ici, on ne tombe pas pour autant dans l'idéalisme : le constructivisme est aussi empirique que le plus béat des réalistes ; en particulier, la solution proposée ici s'accorde aussi bien avec une théorie macroscopique qu'avec une théorie microscopique de l'observateur. On sait que certaines notions et certaines théories mathématiques, la notion d'espace topologique et la théorie des topoi en géométrie algébrique où un topos est une généralisation de la notion d'espace topologique, obéissent à une logique intuitionniste. Pourquoi la théorie «constructivisée» des espaces de Hilbert n'obéirait-elle pas à une logique apparentée, si, par ailleurs, la situation physique où l'on suppose un observateur local l'exige ? Popper pensait que la physique pouvait se passer de la notion

(19) Cf. Y. Gauthier «Quantum Mechanics and the Local Observer» *International Journal of Theoretical Physics*, vol. 22 (1983), n° 12, pp. 1141-1152.

Voir aussi «Pseudo-Boolean probability measures and Bell's inequality», à paraître.

d'observateur. Mais est-il préférable de se passer de la Relativité Restreinte plutôt que de l'observateur local ? Remarquez que j'obtiens une théorie consistante de la MQ et de la RR avec le formalisme de l'observateur local que je propose.

J'ai voulu reprendre ces deux problèmes, parce qu'ils alimentent les discussions épistémologiques contemporaines aussi bien en France qu'ailleurs. Lévy-Leblond⁽²⁰⁾, par exemple, a semblé vouloir défendre l'interprétation d'Everett qui est apparue à plusieurs comme une interprétation objective de la MQ opposée à l'interprétation (subjectiviste) de Copenhague, celle de Bohr et de Heisenberg. La tradition réaliste a prévalu en France depuis Louis de Broglie et la théorie des paramètres cachés a marqué des physiciens comme Vigier et d'Espagnat entre autres, mais n'autorise certainement pas les abus d'interprétation illustrés abondamment par des colloques ou revues populaires. C'est là peut-être la conséquence d'une philosophie réaliste qui, à force de peupler le réel de variables cachées, en vient à une sorte de *surréalisme* physique. Ces excès sont étrangers à B. d'Espagnat qui a toujours conservé une grande rigueur et une admirable prudence épistémologique dans ses travaux. La constance de ses préoccupations, les inégalités de Bell, en fait un penseur de la théorie plutôt qu'un physicien de la pratique. Mais si on ne peut lui reprocher d'écarts, on peut se demander si une telle fidélité à une problématique ne risque pas de confiner à un point de vue dogmatique. Je termine par quelques réflexions sur le réalisme.

8. Le réalisme de d'Espagnat n'est pas de sens commun, comme celui de Popper. L'uniréalisme intégral qui postule qu'il n'est pas possible de connaître ou de « dévoiler » totalement le réel voilé fait intervenir un principe de non-séparabilité auquel il est difficile de donner une signification physique. Si la non-séparabilité était localisée dans le

(20) Cf. J. M. Lévy-Leblond « Towards a Proper Quantum Theory » *Dialectica*, vol. 30, nos 2/3 (1976), pp. 161-166. Il est évident que ma réfutation est valable aussi bien pour l'interprétation « quantique » de la thèse d'Everett où, au lieu de multivers « classiques », nous n'avons qu'un seul univers « quantique », la ramification universelle de la fonction d'onde ayant $2^{\aleph_0}$ valeurs. Je suis par ailleurs d'accord avec Lévy-Leblond dans son programme pédagogique et critique visant à refondre le langage de la MQ.

couple système observé/système observateur, on pourrait comprendre comment une telle notion répond aux exigences de la MQ, mais c'est le résultat négatif des expériences visant à vérifier ou falsifier les inégalités de Bell qui force d'Espagnat à renoncer à la séparation locale des systèmes quantiques et par là même à un des principes fondamentaux de la MQ. Remarquons que d'Espagnat ne se refuse pas à considérer une solution purement logique du problème, mais la logique quantique des propriétés ou attributs (voir note 16) qu'il étudie ne représente qu'une solution partielle. Celle que j'ai proposée est d'ordre logique et mathématique et offre une solution à la fois simple et rigoureuse de la contradiction interne, comme disait Bell, de la théorie des variables cachées «locales». Une autre solution envisagée par d'Espagnat, la solution contrefactuelle reposant sur des expériences hypothétiques n'est pas plus prometteuse, puisqu'on peut affirmer simplement que les expériences hypothétiques n'ont pas de résultats⁽²²⁾. Revenons, pour finir, sur le schème logique → mathématique → physique → philosophie que j'ai proposé dans le cycle de la contradiction. Si une position philosophique est incompatible avec une théorie physique largement acceptée, il faut changer la philosophie plutôt que la physique et si la théorie physique contredit le formalisme mathématique, c'est la théorie physique qu'il faut modifier. Qu'arrive-t-il à la logique dans ce procès? La logique est-elle invariable? La logique classique booléenne ne l'est pas, puisqu'elle est liée à une philosophie, une métaphysique bivalente (du vrai et du faux) héritée d'Aristote. La logique n'est que l'ensemble des structures formelles de notre langage, de nos langages. On peut seulement essayer de montrer que tous nos langages ont une logique *minimale* en commun et en tirer des mathématiques, une physique, un savoir dont la validité est *maximale*. Que cette logique minimale soit la logique

(21) Il y a d'autres physiciens qui s'occupent d'épistémologie en France. Je pense à Costa de Beauregard qui est l'auteur de réflexions approfondies sur l'irréversibilité physique. Par ailleurs, l'ouvrage de Mario Bunge *Philosophie de la physique* traduit en français (Seuil, Paris, 1975), est une introduction élémentaire (elle aussi d'inspiration réaliste) et un excellent outil pédagogique.

(22) Voir là-dessus A. Peres «Unperformed experiments have no results» *Am. J. Phys.*, 46 (7), July 1978, pp. 745-747 et A. Peres and W. H. Zurek «Is Quantum Theory universally valid?» *Am. J. Phys.*, 50 (9), Sept. 1982, pp. 807-810.

constructiviste est une hypothèse philosophique. Ce qu'il importe de comprendre ici, c'est qu'une position philosophique ne suffit pas pour invalider une théorie scientifique – il faut réviser la logique, ce qui entraîne la modification des mathématiques, de la physique et de la philosophie par choc en retour, la philosophie agissant sur la logique par rétroaction. Cette hypothèse n'est pas pour autant une solution métaphysique: elle permet seulement de fournir une image plus cohérente des relations entre la philosophie et le savoir scientifique et je suppose que la consistance ou la non-contradiction est la première vertu de toute théorie, scientifique ou autre.

Université de Montréal
Dpt. de Philosophie
Case postale 6128, Succ «A»
Montréal P.Q. H3C 357
Canada

Yvon GAUTHIER