

Introduction : Qu'est-ce que la philosophie de la physique?

Soazig Le Bihan

« La philosophie est une réflexion pour qui toute matière étrangère est bonne et nous dirions volontiers pour qui toute bonne matière doit être étrangère. » (George Canguilhem, Essai sur le normal et le pathologique.)

« La question de la relation entre la philosophie de la physique et la physique proprement dite est délicate. Souvent, elles se fondent imperceptiblement l'une dans l'autre. Mais tandis que le physicien s'entraîne comme un pianiste de concert pour s'attaquer, armé de théorie, aux problèmes physiques les plus complexes, le philosophe se contente simplement d'apprendre quelles touches correspondent aux notes écrites. Ensuite, il se met à démonter le piano pour voir comment il est possible qu'il en sorte un son quelconque" (Tim Maudlin, Philosophy of physics, 5+1 questions)

C'est peut-être l'un des exercices les plus intéressants et difficiles pour un professionnel de devoir expliquer son travail au novice curieux. Un tel exercice est sans doute d'autant plus difficile que le domaine d'expertise est éloigné des nécessités matérielles de la vie de tous les jours. On comprend aisément comment quelqu'un peut se prendre de passion pour la pâtisserie, la finance, la construction de ponts ou la gestion de réseaux informatiques. Mais comment expliquer pourquoi l'on a décidé de passer le plus clair de son temps à son bureau à s'occuper non seulement de philosophie, mais encore de philosophie de la physique ? La réaction à laquelle on peut s'attendre est au mieux un sourire amusé, accompagné d'une remarque du genre: "Je ne savais même pas qu'une chose pareille existait !".

Voici donc la tâche qui nous incombe: expliquer ce qu'est la philosophie de la physique, et pourquoi on peut penser que c'est un domaine parmi les plus intéressants et les plus importants de la sphère philosophique. Nous commencerons par revenir rapidement sur l'intrication de la philosophie et de la physique dans l'histoire (Section 1). Nous nous tournerons ensuite vers les raisons logiques qui

font que philosophie et physique se rencontrent nécessairement, que ce soit quand des physiciens s'ouvrent à la philosophie (Section 2), ou quand les philosophes s'informent de nos meilleures théories physiques (Section 3). Nous montrerons au passage comment les différents articles de ce livre illustrent chacun certains des aspects de la philosophie de la physique.¹ Avant de conclure, nous nous arrêterons en section 4 sur la question du style, essentiellement « analytique », de ce livre. Nous tenterons d'expliquer notre conviction que philosophie des sciences analytique et l'épistémologie historique à la française n'ont nullement besoin d'entrer en conflit, mais doivent au contraire être vues comme des approches complémentaires.

1. La chanson des vieux amants

Un retour rapide sur l'histoire nous rappelle que philosophie et physique ont longtemps été intriquées l'une à l'autre et qu'elles n'ont été séparées que relativement récemment. On sait aussi que les plus grands physiciens furent tous de grands philosophes. Ajoutons enfin que les épisodes les plus épiques de l'histoire des sciences ont vu des considérations philosophiques jouer un rôle de premier plan. Tentons, avant que de donner les raisons logiques de l'intrication nécessaire de la physique et de la philosophie, de faire un tableau rapide des relations qu'elles ont entretenues dans l'histoire : ceci devrait donner une légitimité de fait à notre discipline.²

Il est communément admis que philosophie et physique, telles que notre tradition occidentale les conçoit, sont nées ensemble aux environs du sixième et cinquième siècles avant notre ère, sur les bords de la mer Méditerranée, avec les travaux de ceux qu'il est convenu d'appeler les Présocratiques : Thales, Anaximandre, Xénophane, Héraclite, Parménide, Pythagore, Zénon, Anaxagore, Empédocle, ou

¹ Notons que on aurait pu choisir de classer chacun des articles d'une façon différente. Nous n'avons fait qu'un choix parmi d'autres.

² Ce qui suit n'a pas pour prétention de constituer un vrai travail d'histoire des sciences. Pour des travaux plus précis, on pourra consulter ???

encore Leucippe et Démocrite. Ces philosophes-physiciens (ou physiciens philosophes ?) se distinguent des auteurs qui les précèdent, tels que Homère ou Hésiode par exemple, tant sur le plan de leur objet d'étude que sur celui des méthodes qu'ils considèrent comme légitimes. Ils voient en effet dans le monde un ordre naturel (le cosmos) dont il s'agit de rendre compte de façon rationnelle en ne faisant appel qu'à ses propriétés intrinsèques. Une telle approche doit être contrastée avec les récits décrivant les événements du monde comme étant le résultat des désirs, caprices et facéties d'êtres supra-naturels. Les questions posées concernant le monde ne sont plus celles de l'origine et du pourquoi mais celles du quoi et du comment, tandis que les réponses offertes ne sont plus en termes de volonté divine mais bien en termes des propriétés naturelles des éléments constitutifs de la fabrique du monde. Si après Socrate, la philosophie prend une nouvelle dimension qui est celle de l'éthique³, il n'en reste pas moins que la physique fait longtemps partie intégrante de la philosophie.

A l'époque moderne, alors que la science se définit peu à peu comme une discipline indépendante de la philosophie, donnant un poids tout particulier à l'expérience empirique aux côtés du raisonnement strictement rationnel, le dialogue entre philosophie et physique ne cesse pas pour autant. On peut ici citer plusieurs exemples de discussions philosophiques qui ont joué un rôle central dans l'histoire des sciences. C'est concernant la question du statut épistémologique de l'astronomie -- en considérant celle-ci comme une description de la réalité plutôt que comme un simple instrument de prédiction sans prétention réaliste -- que Copernic puis Galilée se distinguent radicalement des nombreux astronomes qui faisaient usage du système héliocentrique au Moyen-Âge⁴. Rappelons aussi les débats entre Newton

³ On se souvient de la fameuse critique d'Anaxagore par le Socrate de Platon dans le *Phédon* (97b sq.), rejetant l'explication mécaniste du monde comme insuffisante, et exigeant une véritable téléologie.

⁴ On pourra se référer à Duhem (1908) pour un compte-rendu (philosophiquement non-neutre mais historiquement sérieux) de cet épisode.

(ou plutôt son porte-parole Clarke) et Leibniz concernant le statut ontologique de l'espace et du temps: pour le dire vite, tandis que Newton considère ces derniers comme des entités à part entière, Leibniz ne veut les concevoir que de façon relationnelle. La question n'est pas dénuée d'implications : dans un univers fait d'un unique système physique, est-il possible de dire que ce système est en mouvement? Si l'on choisit la voie Leibnizienne, la réponse est non: il n'y a rien par rapport à quoi nous pourrions définir un tel mouvement. En revanche, si l'on accepte avec Newton, l'existence d'un espace absolu, alors cet espace peut précisément servir de référent pour le mouvement du système considéré. Au travers de ce débat sont donc posées non seulement la question du statut ontologique de l'espace et du temps, mais aussi celle de la définition même de la notion de mouvement.

Ces mêmes questions du statut épistémologique de la science (réalisme vs instrumentalisme), du statut ontologique des objets inobservables postulés par les formalismes, et de la définition précise des concepts fondamentaux des théories, ont parcourus l'histoire de la physique moderne et contemporaine. Mentionnons d'abord le débat concernant l'existence des atomes. Avant les travaux de Jean Perrin, de nombreux philosophes et scientifiques restaient sceptiques concernant l'existence réelle des atomes. Duhem par exemple resta attaché à l'idée que les symboles chimiques, ne sont autres qu'un mode d'écriture efficace pour les calculs et les prédictions. L'idée qu'à chaque symbole chimique corresponde une entité "atome" lui semblait en revanche particulièrement naïve et injustifiée.⁵ Durant cette même période, on peut affirmer que ce sont des réflexions d'ordre philosophique, concernant l'existence de l'éther et le statut de l'espace-temps au sein de l'électromagnétisme classique, qui menèrent Albert Einstein à la formulation de sa théorie de la Relativité : insatisfait des notions classiques d'espace et de temps, Einstein entreprit de refonder philosophiquement ces notions. On peut même

⁵ Voir Duhem (1892, 1902). On pourra consulter les travaux de Bernadette Bensaude-Vincent pour plus de détails à ce sujet. Voir par exemple Bensaude-Vincent et Stengers (1993).

avancer qu'il n'y a de différence entre la théorie de Lorentz et celle d'Einstein que philosophique.⁶ Einstein fut également fortement préoccupé de philosophie concernant l'autre grande théorie qui vit le jour au début du vingtième siècle, savoir la mécanique quantique. Les débats firent rage entre Louis de Broglie, Werner Heisenberg, Erwin Schrödinger, Niels Bohr et Einstein à ce propos. Au centre de ces discussions on trouve les notions d'objectivité, de compréhensibilité, de continu et de discret, de déterminisme, pour n'en citer que quelques unes.⁷ La question de l'interprétation du formalisme de la mécanique quantique est restée, jusqu'à ce jour, l'un des problèmes des plus importants en philosophie de la physique. Elle prit en particulier le devant de la scène avec les travaux de John Bell et les expériences associées qui furent conduites dans les années 1980 en particulier par l'équipe de Alain Aspect. A cette occasion furent discutées les questions de la non-localité, de la séparabilité des systèmes physiques, de la définition des individus, du déterminisme parmi d'autres encore⁸. On pourrait avancer que ce fut l'occasion à laquelle la philosophie de la physique se développa comme une discipline à part entière.

Qu'en est-il aujourd'hui ? Une chose est certaine : à regarder la liste des auteurs de ce livre, on remarque que presque tous ont fait des études à la fois en physique et en philosophie. Certains sont des philosophes s'étant tournés vers l'étude des théories physiques, d'autres des physiciens qui se sont convertis à la philosophie. La longue tradition de dialogue entre philosophie et physique est donc loin d'être morte. Elle a même fini par se transformer en une discipline propre. Les philosophes de la

⁶ Voir à ce propos l'excellent petit livre de Françoise Balibar (1997).

⁷ Le récent ouvrage de Guido Bacciagaluppi et Antony Valentini (2009) contient les traductions en anglais des textes originaux de la fameuse Conférence Solvay de 1927, durant laquelle nombre des discussions philosophiques entre les pères fondateurs de la mécanique quantique eurent lieu, le tout accompagné d'analyses éclairées.

⁸ Voir mon article à ce sujet dans ce volume et les références bibliographiques qui y sont incluses.

physique aujourd'hui s'intéressent à presque toutes les théories physiques en usage : relativité et mécanique quantique bien sûr, mais aussi thermodynamique et physique statistique, physique quantique des champs, ou gravité quantique. C'est qu'il existe des raisons structurelles qui font que les deux disciplines tendent à se rencontrer, comme nous allons tenter de l'expliquer maintenant.

2. Pourquoi la physique appelle à la réflexion philosophique

La plupart des philosophes de la physique ont d'abord étudié la physique avant de se tourner vers la philosophie. Tout commence par une fascination pour les réussites technologiques de la science physique: gratte-ciels, ordinateurs, navettes spatiales, et autres collisionneurs de particules, mais aussi pour sa capacité à expliquer les phénomènes naturels : ricochets, marées, et autres éclipses de soleil. La question que l'esprit curieux se pose est: comment ça marche? Mais bientôt la simple donnée des lois et règles de calculs ne satisfait plus un tel appétit intellectuel, car une autre forme de questionnement surgit: comment expliquer que la physique, elle-même, en tant que science, ça marche? sur quoi se fondent les théories scientifiques? peut-on déduire de leur succès qu'elles décrivent le monde tel qu'il est? et si oui, quelle est l'image exacte que ces théories nous donnent du monde? Un tel questionnement est proprement philosophique. Il se divise en gros en deux catégories : la question des méthodes et la question de l'interprétation.

2.1. Comment ça marche – la question des méthodes.

Comment rendre raison du statut épistémique privilégié que nous donnons aux énoncés de la physique? C'est là une vieille question de philosophie des sciences générale, et on peut espérer que tout physicien se l'est posée au moins une fois. La philosophe des sciences répondra quelque chose comme suit. Si la rigueur de la logique et des mathématiques sont importantes, il ne saurait y avoir de sciences de la nature (physique, biologie, etc.) sans un engagement sans faille à "se coltiner" avec le réel, sans la volonté de faire des prédictions qui pourraient bien être réfutées par l'expérience et l'intention sinon d'abandonner, au moins de modifier, nos théories quand bien le monde ne se comporterait pas comme ces dernières le

prédisent (ou au moins d'expliquer de façon convaincante pourquoi les données empiriques apparemment problématiques ne le sont pas en réalité). On nuancera ensuite cette vision d'inspiration poppérienne en rappelant que de nombreux aspects, sociologiques et psychologiques, de la pratique scientifique font que la science a une profonde tendance conservatrice qu'il ne faut pas sous-estimer. Les théories ont la vie dure et ne sont pas abandonnées facilement. Seront aussi mentionnées les difficultés rencontrées par quiconque tente de déterminer les conditions de légitimité de la méthode inductive. On rappellera alors le grand problème de l'induction qui hante la philosophie depuis Hume, ainsi que les problèmes plus récemment formulés de la sous-détermination des théories, selon lesquels plusieurs théories (incompatibles entre elles) peuvent être compatibles avec les mêmes données de l'expérience (y compris des théories qui n'ont pas été conçues et qui pourraient l'être dans le futur). Pour ajouter encore au scepticisme, on notera qu'un simple regard sur le passé nous donne toutes les raisons de croire que les théories acceptées aujourd'hui seront demain considérées comme au moins partiellement fausses. Certains ne manqueront pas cependant de souligner que les arguments ci-dessus ne sauraient pour autant justifier aucune forme de relativisme scientifique radical, qui renoncerait tout à fait à donner aux énoncés scientifiques un statut épistémique privilégié. Ceux-ci souligneront que, même si nos théories, passées, présentes, et futures, ne sauraient être conçues comme donnant une image complète et tout à fait véridique de la réalité, il n'est resté pas moins que ces théories peuvent et doivent être conçues comme partiellement vraies, peut-être comme décrivant, sinon quelles entités peuplent le monde, au moins certaines éléments structurels réels. D'autres s'attacheront aussi à nuancer le tableau fait ci-dessus de la psycho-sociologie des sciences, soulignant le rôle positif de la communauté scientifique, où chacun cite ses sources, expose ses méthodes ouvertement, et se soumet au regard critique de ses pairs.

Une fois donnée cette réponse générale, on peut se demander quelles sont les particularités des méthodes propres aux différentes sciences (physique, chimie, biologie par exemple) et même aux différentes théories au sein d'une science

donnée (astronomie, thermodynamique ou physique des particules au sein de la physique). C'est ici que les disciplines telles que la philosophie de la physique, de la chimie, de la biologie, de l'écologie ou des autres sciences font leur entrée. Les questions méthodologiques se multiplient alors, et se font plus spécifiques, qu'il s'agisse de la structure particulière d'une théorie donnée, ou de l'usage de méthodes expérimentales singulières dans un domaine donné des sciences. Les réponses ont bien entendu un domaine de validité plus restreint, mais sont aussi plus précises. Sous ce premier aspect, la philosophie de la physique se présente donc comme une réflexion sur les méthodes au fondement des sciences physiques particulières. Quatre des articles de ce livre peuvent illustrer cette façon de faire de la philosophie de la physique.

Premièrement, Roman Frigg, dans "Qu'est-ce que la mécanique statistique?", nous invite à repenser les relations entre thermodynamique et mécanique statistique. On se souvient tous de quelque cours de physique où l'on a appris que la température (notion thermodynamique) d'un objet tel que l'air contenu dans mon bureau, n'est que le reflet macroscopique de la vitesse moyenne des molécules microscopiques composant cet objet. De même, pression et température peuvent être, nous dit-on, facilement expliquées en termes de (sinon réduites à) certaines des caractéristiques du mouvement des molécules composant ce gaz. La relation de la thermodynamique à la mécanique statistique est-elle si simple? Frigg nous explique très clairement que non: certains des comportements des objets macroscopiques, tels que la dilution du nuage de lait dans mon café, ou bien son refroidissement inéluctable, sont des processus qui présentent un caractère irréversible (le phénomène inverse ne se produit pas spontanément) dont on ne saurait rendre compte au moyen des mouvements mécaniques sous-jacents, puis que les lois de la mécanique sont, elles, parfaitement symétrique par rapport au temps. Si on ajoute à cela, nous explique Frigg, que la mécanique statistique est en réalité constituée de deux formalismes (dus respectivement à Gibbs et Boltzmann) qui n'ont à peu près rien à voir l'un avec l'autre, et font tous deux face à des difficultés sérieuses, on commence à comprendre que le tableau est moins idyllique que ce qu'on croyait. Or, comme Frigg le montre

très bien, ce sont bien des questions d'ordre philosophique qui se trouvent au centre des discussions concernant les fondements de la mécanique statistique dans l'approche de Gibbs comme dans celle de Boltzmann: celles du caractère universel ou local des lois scientifiques, de la réduction d'une théorie à une autre, du lien entre théorie et observation, et de l'interprétation des probabilités, etc. Au bout du compte, le lecteur tire comme leçon qu'il reste beaucoup à faire pour comprendre le statut épistémique de la (des?) mécanique(s) statistique(s).

Craig Callender, dans "Les histoires passées des molécules", approche cette même situation d'un point de vue exemplairement philosophique. Il se lance dans un exercice de synthèse d'abord: par delà la multiplicité des approches de la mécanique statistique et des problèmes qui sont associés à chacune d'entre elles, Callender identifie une question à la fois fondamentale et transversale -- le paradoxe de la réversibilité. Il s'attelle ensuite à un exercice de clarification: il offre une formulation simple et précise de cette question en termes des relations entre les probabilités données par la mécanique statistique et celles données par la mécanique supposée sous-jacente, formulation qu'il décline selon le cas où l'on considère le formalisme de Boltzmann ou bien celui de Gibbs. Vient alors un exercice de cartographie conceptuelle, quand il procède à l'analyse critique des différentes tentatives de résolution de ce problème, et évalue l'importance des difficultés que chacune rencontrent. Callender conclue par un exercice de créativité intellectuelle enfin, quand il propose de résoudre ce qui semblait un problème insoluble en repensant la façon même dont on conçoit la mécanique statistique. Selon lui, le problème se dissout dès que l'on se résout à considérer la mécanique statistique comme une science spéciale, et non fondamentale: de la même façon qu'il n'est pas requis de la biologie de rendre compte de l'existence des êtres vivants dont elle décrit la nature et le comportement, il ne serait pas requis de la mécanique statistique de rendre raison de l'existence des systèmes thermodynamiques, c'est-à-dire des systèmes "qui sont locaux, ont une entropie initiale faible, et auxquels la mécanique statistique s'applique". Penser la mécanique statistique comme une science spéciale et non fondamentale permettrait donc d'éviter nombres des problèmes auxquels se

confronte la thèse globaliste selon laquelle la mécanique statistique s'applique toujours et partout, sans pour autant tomber dans l'instrumentalisme ou le subjectivisme.

Dans le cas ci-dessus, la réflexion philosophique éclaire d'un jour nouveau certains problèmes minant les fondements des sciences physiques ; dans d'autres cas, l'apparition de nouvelles méthodes en physique requiert que l'on pense à nouveaux frais les notions classiques de philosophie des sciences. Ceci est illustré dans ce livre d'un côté par l'article de Elena Castellani, d'un autre par celui de Anouk Barberousse et Cyrille Imbert. Castellani se penche sur le rôle grandissant que jouent les considérations de symétrie dans les sciences physiques contemporaines. Elle propose une analyse de ce rôle à la lumière du fameux principe de Curie : la symétrie des causes se retrouve dans la symétrie des effets. La signification originelle de ce principe, selon Castellani, est que les symétries d'un milieu imposent des contraintes structurelles sur le type de phénomène qui peut s'y produire. Ce sont les dissymétries -- les brisures de symétrie -- qui rendent possibles l'apparition de certaines structures (cristallines par exemple). Le principe est donc éminemment méthodologique et heuristique : il a fonction de guide servant à délimiter le domaine des phénomènes possibles dans un milieu donné. Castellani avance enfin que ce retour sur la signification historique du principe de Curie peut servir à comprendre le rôle joué par les considérations de symétrie au sein des lois physiques dans la physique contemporaine. Ici comme dans le cas de Curie, nous dit-elle, la brisure de symétrie joue un rôle essentiel en permettant l'apparition d'une structure. On peut de plus, selon Castellani, reformuler le principe de Curie comme liant les symétries des lois physiques avec celles des états physiques possibles de la façon suivante : "les symétries des équations dynamiques doivent se retrouver dans l'ensemble de leurs solutions". Un tel principe, de façon analogue au principe originel, permet donc, sur la seule base de propriétés purement formelle des lois physiques, de délimiter le domaine des solutions possibles, et peut donc jouer un rôle heuristique important.

Barberousse et Imbert s'attache à l'étude d'une autre évolution récente des pratiques en physique contemporaine : l'usage massif des ordinateurs, au travers du calcul et des simulations numériques. Les philosophes des sciences se divisent à ce propos en deux camps: d'un côté, ceux qui maintiennent que le tournant computationnel n'implique qu'une différence quantitative pour la pratique de la science (on peut, grâce aux ordinateurs, calculer plus, et plus vite), et, de l'autre, ceux qui défendent l'idée selon laquelle l'usage extensif des ordinateurs modifie profondément la nature de la pratique scientifique. Barberousse et Imbert entrent dans le débat en offrant une analyse de l'impact des méthodes numériques sur l'activité de théorisation des physiciens. Ils avancent que, contrairement à ce que de nombreux philosophes ont maintenus, le conservatisme caractéristique de la "science normale" est au moins partiellement dû aux limitations imposées par les outils mathématiques disponibles. Calculer prend du temps et de l'énergie, et pour cette raison les physiciens tendent à investir dans les calculs dont ils ont de bonnes raisons de penser qu'ils aboutiront. Le tournant computationnel change cette situation de façon profonde, nous disent Barberousse et Imbert, menant, au moins dans certains cas à une modification de nature de la pratique scientifique: "l'activité de théorisation, moins contrainte, peut-être plus audacieuse". Ils illustrent cette thèse au moyen d'un étude de cas : la fascinante utilisation des automates cellulaires dans la physique contemporaine.

Ainsi donc la physique pose et continuera toujours de poser de nouveaux problèmes méthodologiques pour l'esprit curieux. La réflexion philosophique offre alors des outils à la fois rigoureux et efficaces pour analyser et clarifier ces problèmes, ainsi que pour dessiner la carte des solutions envisageables, et des difficultés associées à ces dernières.

2.2. Qu'est-ce que cela veut dire – la question de l'interprétation

Même le physicien qui ne s'intéresse que peu aux questions de méthode, qui les rejette d'un simple « mais puisque ça marche, où est le problème ?! », devra, s'il veut maintenir un réalisme même modéré concernant les théories physiques, se

demander ce que ces théories nous disent exactement de la constitution fondamentale du monde. Toute théorie physique comporte un formalisme, au sein duquel apparaissent un grand nombre d'entités formelles définies mathématiquement : forces, particules ponctuelles, champs, référentiels, ou autre fonction d'onde etc. Toute théorie physique comprend aussi un ensemble de « règles » qui permettent de lier ce formalisme avec l'expérience. Mais aucune ne vient avec une explicitation précise de ce qui nous y est dit de la fabrique du monde : parmi ces entités formelles, y en a-t-il qui correspondent à des entités concrètes ? et si oui, lesquelles, et quel est leur mode d'existence ? En réalité, les théories physiques peuvent en général se voir donner plusieurs interprétations, ou, pour le dire autrement, peuvent être conçues comme compatibles avec plusieurs descriptions du monde, ou plusieurs « mondes possibles », au niveau fondamental. La question de savoir laquelle des interprétations possibles est la meilleure n'est bien entendu pas d'ordre empirique : c'est alors que les outils de la philosophie s'avèrent utiles. Sous ce second aspect, la philosophie de la physique consiste donc à sonder les théories physiques et leurs formalismes afin de déterminer ce qu'elles peuvent bien nous dire de la fabrique du monde.⁹ Presque tous les articles concernant la mécanique quantique peuvent servir à illustrer ceci.

Bien que le développement de la mécanique quantique fût l'occasion d'un intense débat philosophique entre ses pères fondateurs, la communauté des physiciens a longtemps détourné son attention des problèmes liés à ses fondements. Mais les philosophes n'ont jamais lâché le morceau, et il est maintenant reconnu par

⁹ Notons qu'il n'est nul besoin d'être réaliste concernant les théories physiques pour s'intéresser aux questions d'interprétation. Preuve en est l'intérêt porté par Bas van Fraassen à l'interprétation de la mécanique quantique. La raison en est, selon nous, qu'en déterminant les types de mondes compatibles avec une théorie, on approfondit la compréhension que l'on a de cette théorie elle-même.

beaucoup que la question de l'interprétation¹⁰ de la mécanique quantique est une question non seulement légitime mais même cruciale. Très peu nombreux sont en effet désormais les physiciens qui ne reconnaissent pas l'importance du problème de la mesure. Le problème est le suivant : du fait que certains systèmes sont décrits comme en état de superposition entre des états déterminés, et du fait de la linéarité de l'équation décrivant l'évolution des systèmes (qui fait qu'un état de superposition, loin de se réduire de lui-même, est au contraire « contagieux » au sens où tout système entrant en interaction avec un système en état de superposition évolue lui-même vers un état superposé), la mécanique quantique semble décrire un monde où les systèmes physiques n'ont pas de propriétés déterminées : ils sont ici *et* là, vont plus *et* moins vite, ont plus *et* moins d'énergie etc. L'interprétation standard consiste alors à introduire une seconde règle d'évolution, le postulat de réduction de paquet d'onde, qui nous dit qu'à chaque mesure, le système quantique évolue de façon discontinue et indéterministe vers l'un des états composant la superposition : ils sautent ici *ou* là, prennent telle *ou* telle vitesse etc. On pourrait exiger que l'on nous dise ce que cela veut dire exactement, que les systèmes physiques soient en états superposés en dehors de la mesure, et on pourrait vouloir plus de détails quant à la fameuse notion de saut quantique. Mais quand bien même on se verrait donner des réponses satisfaisantes à ces deux questions, il n'en reste pas moins que le problème fondamental est que personne n'a su donner des critères nécessaires et suffisants permettant de définir ce qui constitue une « mesure », notion qui pourtant est le pilier central de cette interprétation. Le résultat est qu'on ne possède pas de critères clairs pour

¹⁰ Le terme d'interprétation n'est pas toujours adéquat quant il s'agit de discuter les différentes approches de la mécanique quantique non-relativistes. On peut en effet maintenir que les approches de type Bohm ou GRW sont des théories à part entière, dans la mesure où le formalisme est modifié, et où les prédictions empiriques diffèrent, même si ces différences ne saurait être observées avec nos moyens expérimentaux actuels. Nous utilisons ici ce terme malgré tout, pour des raisons de simplicité.

l'application de l'une ou l'autre des règles d'évolution des systèmes quantiques. Enfin, quand bien même on parviendrait à trouver de tels critères, il reste à savoir s'il est vraiment souhaitable de faire de la notion de mesure une notion aussi centrale. Cela implique en effet qu'on abandonne l'idée de décrire l'univers dans son entier, puisqu'il nous faudra toujours conserver deux systèmes séparés : un mesurant et un mesuré. Une grande part de la philosophie de la physique des trente dernières années fut consacrée à la recherche d'une façon de rendre compte des phénomènes quantiques qui permettent d'éviter le problème de la mesure. De ces discussions sont nées les trois variantes théoriques et interprétatives concernant les phénomènes quantiques non-relativistes : l'interprétation multi-mondes, et les théories de Bohm et GRW.

Avant de nous tourner vers les raisons de défendre telle ou telle théorie, il nous faut considérer deux objections que ne manqueront pas de lever certains physiciens. Premièrement, n'est-il pas vrai, nous diront-ils, que toutes ces discussions deviennent inutiles et non avenues, dès lors que l'on prend en considération la théorie de la décohérence ? En d'autres termes, la théorie de la décohérence ne permet-elle pas de résoudre – et ce sans faire appel à la philosophie – le problème de la mesure ? L'article de Guido Bacciagaluppi devrait permettre d'écarter définitivement cette objection. La théorie de la décohérence est l'étude des interactions, entre les systèmes quantiques et leur environnement, qui résultent en la suppression du terme d'interférence. En gros, c'est la théorie de la façon dont les différents états d'une superposition se couplent avec les états de l'environnement. Bacciagaluppi nous explique que si faire appel à la théorie de la décohérence peut être tout à fait pertinent pour expliquer l'émergence de la classicalité au niveau des phénomènes, mais ne saurait en aucun cas permettre de résoudre le problème de la mesure, bien au contraire. Prendre en considération le couplage d'un système avec son environnement ne fait que reculer la question d'un pas : on ne sait toujours pas ce que cela signifie que l'ensemble constitué du système et de son environnement soit représenté au sein de la théorie par une superposition d'états. A vrai dire, nous explique Bacciagaluppi, le problème, bien loin d'être résolu, est de fait amplifié :

« Pour le dire crument : si tout est en interaction avec tout, alors tout est intriqué avec tout, et c'est un problème bien plus grave que celui que présentait la seule intrication des nos appareils de mesure avec les sondes mesurées ». Le résultat est que la théorie de la décohérence peut et doit jouer un rôle important dans l'explication de l'émergence de la classicalité au niveau des phénomènes, mais ce uniquement dans le cadre des différentes approches de la mécanique quantique.

La deuxième objection viendra de la part des défenseurs des interprétations en termes d'information. Ces derniers nous feront remarquer que, si l'on abandonne l'idée que le vecteur d'état représente des caractères ontologiques des systèmes physiques, alors le problème de la mesure, comme d'autres problèmes tels que le problème de la non-localité, ne se posent tout simplement plus. Que représente le vecteur d'état dans ce cas? Selon l'interprétation bayésienne, il représente l'état de l'information qu'un agent possède à propos d'un système. Plus précisément, du fait que les probabilités sont interprétées de façon subjective, le vecteur d'état devient une fonction de croyance. Armond Duwell nous explique cependant clairement pourquoi la stratégie bayésienne, bien qu'apparemment prometteuse, mène à l'impasse. Toute interprétation quelle qu'elle soit présente des avantages (certains problèmes sont résolus, certaines de nos intuitions sont préservées, certains critères d'économie ou de simplicité sont satisfaits etc.) mais aussi des inconvénients (certains problèmes ne sont pas résolus, certaines de nos intuitions sont bousculées, certaines entités ont du être postulées, ou le formalisme modifié). Et toute interprétation voit ses défenseurs travailler à réduire le nombre et l'importance de ces inconvénients. Le bayésianisme quantique ne fait pas exception. Ce qui différencie le bayésianisme quantique des autres interprétations cependant, nous explique Duwell, c'est que les difficultés qu'il rencontre semblent ne pouvoir trouver de solution qu'au travers de l'abandon de son principe fondamental, selon lequel le vecteur d'état ne représente pas les propriétés ontologiques des systèmes physiques. On l'aura compris, faire appel à la notion d'information est loin d'être une solution miracle.

Il nous faut donc en revenir aux différentes approches de la mécanique quantique qui ont été développées au cours des cinquante dernières années en réponse au problème de la mesure. Le problème de la mesure revient en effet à dire que les trois propositions suivantes sont incompatibles :

- (1) Les systèmes physiques ont des propriétés déterminées ;
- (2) La fonction d'onde donne une description complète des systèmes physiques ;
- (3) L'équation de Schrödinger (la loi d'évolution des systèmes quantiques) est de caractère linéaire.

On peut voir les trois grandes interprétations de la mécanique quantique comme abandonnant chacune l'une de ces trois propositions. L'interprétation multi-mondes renonce à (1), acceptant l'existence de superpositions au niveau fondamental et expliquant l'émergence de mondes « classiques » au niveau des observateurs. La théorie de Bohm rejette (2) et ajoute au formalisme de la fonction d'onde une équation donnant la position de particules, et enfin les théories GRW abandonnent (3) et modifient l'équation de Schrödinger de sorte que la fonction d'onde se voit « réduite » de façon stochastique. Les articles de Adrien Barton et de Valia Allori offrent une évaluation de ces différents choix possibles : tandis que Barton défend l'interprétation multi-monde, Allori donne sa préférence à Bohm, et plus généralement à ces interprétations seulement qui posent comme constituants fondamentaux du monde des entités vivant dans l'espace à trois dimensions ou dans l'espace-temps.

L'interprétation multi-mondes prend la fonction d'onde, l'objet formel central de la mécanique quantique, au sérieux, et lui donne une valeur ontologique : elle représente l'état du monde au niveau fondamental. Il nous faut donc admettre que le monde est fondamentalement en état de superposition, et non pas constitué de systèmes individuels aux propriétés bien déterminées. Comment se fait-il alors que le monde nous apparaisse, à nous, observateurs, comme « classique » ? C'est que, tout comme les autres systèmes physiques, nous sommes au fond en état de superposition, diffus dans la somme d'un nombre possiblement infini d'états

différents, mais que chacun de nos « états » vit dans un « monde » différent, représenté par un terme de cette somme, et dans lequel par conséquent les systèmes physiques, nous y compris, ont des propriétés bien déterminées. Sans aucun doute est-ce là une vision nouvelle, et aussi étrange de notre univers et existence. Cependant, si elle permet de résoudre les problèmes fondamentaux de la mécanique quantique, alors il nous faut prendre cette proposition au sérieux. Or, si pendant longtemps, nous explique Barton, les interprétations multi-mondes semblaient se trouver dans l'impasse concernant deux problèmes majeurs, savoir ceux de la base préférée et de l'interprétation des probabilités, elles ont connu une renaissance au cours des dix dernières années, ont vu ces deux problèmes largement résolus (les solutions faisant appel pour l'un à la décohérence, pour l'autre à la théorie de la décision), et sont par là devenues parmi les plus prometteuses.

Certains cependant considèrent que c'est un sacrifice trop grand que de devoir renoncer à notre intuition que le monde est constitué de systèmes physiques possédant des propriétés bien déterminées, en particulier bien localisés dans l'espace-temps. Valia Allori maintient que les trois grandes approches de la mécanique quantique (Interprétation multi-mondes, théorie de Bohm ou théorie GRW) gagnent à être formulées de sorte à comprendre une « ontologie primitive », c'est-à-dire que doivent être identifiés certains éléments de formalisme définis dans l'espace à trois dimensions ou bien dans l'espace-temps à quatre dimensions, éléments que l'on peut interpréter aisément comme représentant les constituants fondamentaux du monde, l'« ontologie primitive ». L'idée est la suivante : puisque le monde nous apparaît comme constitué de systèmes bien localisés dans l'espace-temps, il nous faut, autant que possible, donner notre préférence aux théories qui s'interprètent facilement comme décrivant un monde constitué de systèmes bien localisés dans l'espace-temps. Pourquoi choisirait-on d'abandonner l'une de nos intuitions les plus fondamentales si nul n'en est besoin ? Si le cas de la théorie de Bohm est évident, il est moins clair que la théorie GRW ou l'interprétation multi-mondes se prêtent facilement à une interprétation en termes d'« ontologie

primitive ». Vallori maintient que c'est non seulement possible mais encore préférable : toutes ces théories gagnent en pouvoir explicatif dès lors qu'on choisit une ontologie primitive et que l'on conçoit la fonction d'onde comme régissant l'évolution des constituants fondamentaux de l'univers plutôt que comme représentant elle-même une entité fondamentale.

Peut-on alors toujours maintenir que nos théories décrivent le monde comme constitué de particules aux propriétés bien déterminées évoluant dans l'espace-temps ? Pas si sûr si on en croit l'article de Doreen Fraser concernant la physique quantique des champs, c'est-à-dire la théorie qui combine mécanique quantique et relativité restreinte. Cette théorie semble résister fortement à une interprétation de la sorte : non seulement les « quantas » ne peuvent pas être considérés comme des individus, non seulement ne sont-ils pas bien localisés, mais encore ils peuvent être compté de différentes façons selon que l'observateur est en mouvement accéléré ou non. Ajoutons à cela qu'une interprétation en termes de quantas ne vaut que dans le cas où les systèmes n'interagissent pas entre eux. Il faut donc nous résoudre à abandonner l'idée que la théorie quantique des champs décrit un monde constitué de quantas au niveau fondamental. Comment l'interpréter alors ? Quel type de monde nous décrit-elle ? Et comment expliquer le fait que nous pouvons, au niveau des phénomènes, « détecter des particules » ? Ces questions restent ouvertes et demandent, nous dit Fraser, l'attention des philosophes, et cela de façon d'autant plus pressante qu'une interprétation en termes de champs semble tout aussi problématique. Au bout du compte, il reste beaucoup à faire pour comprendre ce que la physique quantique des champs signifie vraiment.

Ces débats concernant l'interprétation des théories quantiques resteront ouverts sans doute encore longtemps. Quel qu'en soit le résultat, il devrait être clair maintenant que notre compréhension des théories physiques gagne considérablement en profondeur au travers de l'analyse précise, formelle et conceptuelle, de leurs méthodes et fondements.

3. Pourquoi la philosophie peut vouloir se mêler de physique

Que peut la physique pour la philosophie? Tentons de donner une caractérisation générale de l'activité philosophique comme la réflexion raisonnée sur quatre grands types de questions : que pouvons-nous savoir? de quoi le monde est-il fondamentalement constitué? que devons nous faire? pouvons-nous, et si oui comment pouvons-nous, être heureux?¹¹ Il nous semble que, pour chacune de ces questions, ce que nous disent les sciences est pertinent, même si à des degrés plus ou moins. Certains maintiendront que cette pertinence est relativement limitée concernant les deux dernières questions, c'est-à-dire celle de l'éthique et celle de la vie heureuse. Même si nous sommes à vrai dire convaincus du contraire¹², nous ne nous étendrons pas ici sur ce point. Je me concentrerai sur les deux premières questions, à savoir celle de la théorie de la connaissance et celle de la métaphysique.

On pourrait s'attendre à ce qu'on défende ici l'idée selon laquelle les sciences physiques sont un terrain privilégié d'investigation pour quiconque s'intéresse à la théorie de la connaissance. En réalité, beaucoup ont abandonné aujourd'hui la thèse selon laquelle la science est l'unique modèle de la connaissance humaine, et que la physique est l'unique modèle de science. Il n'est pas question de nier que les sciences en général, et la science physique en particulier, sont parmi les plus grandes réussites de l'aventure de la connaissance humaine. Ceci dit, chacun reconnaît aussi que, premièrement, il existe d'autres formes de connaissance que

¹¹ On reconnaîtra ici la définition kantienne classique, avec ceci de différent que la question métaphysique par excellence (de quoi le monde est-il fondamentalement constitué?) a été réintroduite.

¹² C'est ce que les philosophes hellénistiques avaient très bien compris : chaque théorie de la nature, ou théorie physique, impose un certain nombre de contraintes sur les théories éthiques possibles. Ce qui compte comme la « vie bonne » diffère selon que l'on pense l'univers comme un cosmos déterministe, organisé rationnellement, et dirigé par la volonté des dieux, ou comme le résultat des chocs aléatoires d'une infinité de particules matérielles.

scientifique, et que, deuxièmement, la connaissance scientifique elle-même est loin d'être monolithique. La théorie de la connaissance peut et doit se développer de façon (au moins partiellement) autonome, tandis qu'il revient à la philosophie des sciences à proprement dit de s'occuper de la question spécifique de la connaissance scientifique, ou plutôt des différents types de connaissance scientifique.¹³ Mais nous avons déjà traité de la question de comment la philosophie de la physique contribue à avancer le travail de la philosophie des sciences dans la section 2.1. Il nous reste donc la seule question de savoir en quel sens et dans quelle mesure il est pertinent de se mêler de science physique et de l'analyse philosophique de cette dernière quand on tente de traiter de la grande question métaphysique : de quoi le monde est-il fondamentalement constitué ?

Par quelles méthodes la philosophie peut-elle espérer traiter de cette question métaphysique par excellence ? Faire l'histoire des réponses données à ce problème reviendrait sans doute à faire l'histoire de la philosophie elle-même. Il en est d'abord qui pensent qu'il est possible et même souhaitable de traiter de métaphysique de façon a priori. Ce fut en gros le cas de Platon, des rationalistes à l'époque moderne, et c'est peut-être encore le cas de certains des défenseurs de la métaphysique analytique aujourd'hui. Il est cependant bien connu qu'un tel usage de la raison pure fut souvent et est toujours souvent la cible de nombreuses critiques. Ces critiques viennent de l'empirisme d'un côté, et de la phénoménologie de l'autre. La métaphysique rationaliste est critiquée dans les deux cas pour n'avoir aucune prise avec le réel, pour ne résulter qu'en la construction de magnifiques systèmes parfaitement cohérents mais aussi parfaitement éloignés de toute expérience.

¹³ S'il est des sciences qu'il semble plus pertinent de consulter dans le cadre de la théorie de la connaissance générale, ce sont sans doute les sciences cognitives, avec la collaboration desquelles on peut développer une théorie de la connaissance « naturalisée », mais cela est un autre débat.

L'empiriste radical¹⁴ pourrait exiger que la signification de tout énoncé soit donnée par un lien clair et précis avec certains faits empiriques, ceci en partie dans le but d'éliminer la métaphysique. Le langage est conçu ici comme un outil dont il faut se méfier, mais dont il est possible, si on travaille assez à son analyse, de rendre claire et transparente la signification. Les énoncés philosophiques qui ne se plient pas bien à ce genre de traitement ne sont pas obscurs et profonds, mais au contraire tout simplement vides de sens. Comment répondre alors à la question de la constitution fondamentale du monde ? S'il est possible de le faire, ce sera uniquement, selon les empiristes radicaux, de façon limitée et au moyen de sciences empiriques – et la physique fondamentale est sans doute la meilleure candidate. A l'extrême, un tel empirisme radical se doit d'admettre que la philosophie est vouée à voir son domaine diminuer, puis disparaître totalement, à mesure que les sciences empiriques progressent.

Le point de départ de critique faite par la phénoménologie à la métaphysique classique est similaire¹⁵ : elle ne prend pas assez en compte les phénomènes. Mais si le diagnostic est le même, le traitement prescrit est différent. La tentative d'établir une relation de transparence entre langage et données empiriques est, selon les phénoménologues, vouée à l'échec. L'observation scientifique, formulée dans le langage de la science, loin d'offrir un accès direct au réel, en fournit déjà une interprétation, partielle, partiale, et réductrice. Le langage ne saurait être rendu transparent : pour retourner au donné, il nous faut plus travailler contre le langage qu'avec lui, tenter d'éviter les constructions conceptuelles, et essayer de toucher à

¹⁴ La position philosophique dépeinte ici est clairement inspirée du positivisme logique, mais en présente une version simplifiée et sans prétention à l'exactitude historique. Pour une présentation historique du positivisme logique, on se référera à Parrini et al. (2003).

¹⁵ Encore une fois, ce qui suit n'a pas la prétention d'être une analyse précise d'histoire de la philosophie. On pourra consulter à ce sujet les travaux de Jocelyn Benoist, par exemple (2001, 2004).

l'immanence du sensible. On pourrait peut-être décrire l'histoire de la phénoménologie comme celle la quête d'un donné toujours fuyant notre saisie. A l'extrême, la phénoménologie radicale est menée à admettre que la philosophie est vouée à voir son domaine diminuer, puis disparaître tout à fait, à mesure que les strates interprétatives sont découvertes, tandis que la voix du poète se dévoile comme la seule parvenant à accéder à quelque chose de l'immanence du sensible.

Y a-t-il encore aujourd'hui une place pour une forme de métaphysique ? Si notre analyse ci-dessus est correcte, la physique et les arts, bien qu'en des sens et au travers de méthodes bien différents, sont sans doute les deux façons les plus accomplies d'accéder à quelque chose de la réalité fondamentale. Or le philosophe n'est ni physicien, ni poète. Si philosophie métaphysique il y a, celle-ci ne saurait donc être ni fondée sur la seule méthode scientifique, ni sur la seule expression artistique. Pour autant, au vu de l'échec de la métaphysique rationaliste, elle ne saurait non plus opérer dans le vide. Pour toutes ces raisons, il nous semble donc que, si philosophie métaphysique il y a, celle-ci doit prendre pour point d'ancrage soit les sciences empiriques, soit les arts, et tenter de comprendre, avec ses moyens propres que sont l'analyse conceptuelle et l'argumentation logique, ce que les scientifiques ou les poètes nous disent de la constitution fondamentale du monde. Pour des raisons évidentes, je laisserai à d'autres le soin d'élucider la façon dont le philosophe et le poète peuvent collaborer en vue d'une métaphysique de l'immanence, et me concentrerai ici sur la possible collaboration de la physique fondamentale et de la philosophie au sein d'une forme de métaphysique que l'on pourrait dire « naturalisée ».

Une grande part de la philosophie de la physique consiste précisément en cela : tenter de comprendre ce que les meilleures théories physiques nous disent de la constitution fondamentale du monde, et cela, non seulement pour comprendre plus en profondeur les théories elles-mêmes, comme c'était le cas en section 2.2, mais bien dans l'intention de faire de la métaphysique, bien que de la métaphysique sous contrainte, c'est-à-dire guidée par les théories physiques fondamentales. Ces contraintes peuvent d'un côté jouer un rôle de garde-fou, barrant la route à

certaines thèses métaphysiques fondées sur des notions dont les sciences nous disent qu'elles ne s'appliquent pas aux constituants fondamentaux de l'univers. Sous cette forme de métaphysique « négative », les sciences ne nous apprennent pas ce qu'est le monde, mais ce qu'il n'est pas. D'un autre côté, certains avancent des thèses positives concernant la constitution fondamentale de l'univers, et ce en se fondant sur l'interprétation de certains principes fondamentaux de nos théories physiques.

Les sciences nous ont forcé tout au long de l'histoire moderne et contemporaine à remettre en question nombre de nos conceptions familières, entre autres : que la terre soit au centre de l'univers, que les espèces animales soient d'origine distincte, que les distances dans l'espace ou les intervalles de temps soient fixes quelque soit le mouvement de l'observateur, que le monde physique soit régi par des lois déterministes etc. Les révolutions scientifiques semblent avoir mis en branle la plupart des fondements de notre cadre conceptuel communs. Certains pourraient penser qu'il est bien trop naïf de tirer la conclusion que ces conceptions sont « démenties » par la science. Même dans ce cas, les révolutions scientifiques peuvent être conçues comme donnant l'occasion unique de sonder les cadres conceptuels au travers desquels nous pensons le réel. Elles en dévoilent en effet les présupposés non-fondés sur l'expérience et qui restent impensés. Elles permettent aussi d'en révéler la structure en offrant la possibilité d'étudier les conséquences de l'ébranlement de certains de leurs fondements. En résumé, elles permettent une analyse critique de nos conceptions métaphysiques ordinaires.

Prenons trois exemples ici: la question de l'existence des espèces naturelles traitée par Stéphanie Ruphy, les difficultés rencontrées par la notion lewisienne de mosaïque humienne quand on considère les théories de jauge telles que décrites par Alexandre Guay, et le problème du temps en gravité quantique expliqué par Christian Wüthrich.

La question de savoir s'il existe une classification unique en espèces naturelles, c'est-à-dire si la nature possède un ensemble unique d'articulations objectives, nous explique Ruphy, divise les philosophes en deux camps chacun faisant appel à

différents type de science : ceux qui répondent par l'affirmative fondent leur position sur le caractère moniste des classifications physico-chimiques, tandis que ceux défendant la thèse contraire prennent pour preuve la pluralité des classifications biologiques. Les monistes objectent aux pluralistes que la biologie est encore immature, et toujours à la recherche des propriétés structurales permettant une classification unique. Les biologistes doutent que les classifications physico-chimiques soient aussi solides que les pluralistes le prétendent. Ruphy montre que le cas des espèces stellaires bouleverse cette répartition traditionnelle : la classification des étoiles, bien que fondés sur certaines de leurs propriétés structurales, est de caractère pluraliste. Cela apporte du grain au moulin des pluralistes, et ce de façon importante : l'astronomie, contrairement à la biologie, ne saurait en effet être accusée d'être une science immature, et l'étude des espèces stellaires montre que la considération de propriétés structurales n'implique pas nécessairement le monisme. En fin de compte, maintient Ruphy, aucune position réaliste n'est tenable en ce qui concerne les espèces stellaires, dont le mode de classification reflète bien plus les intérêts épistémiques des scientifiques que de prétendues divisions objectives et éternelles.

L'étude des théories de jauge est un autre domaine un peu négligé par les philosophes. Elle permet pourtant, nous explique Guay, d'éclairer de multiples questions philosophiques. Une théorie de jauge présente une liberté dans le choix de jauge, ce qui veut dire que, du fait de certaines symétries dans le formalisme, plusieurs descriptions théoriques d'une même situation empirique sont possibles. On a donc le choix : on peut considérer que l'on a affaire soit à un cas d'indétermination, soit à un cas de surplus descriptif. Du fait que le choix de jauge n'implique aucune conséquence empirique observable, les philosophes et physiciens optent le plus souvent pour la seconde option. Ceci a une conséquence immédiate pour les tenants du réalisme scientifique : seuls les éléments du formalisme qui sont indépendants de jauge peuvent être considérés comme correspondant à des entités réelles. Mais l'existence de théories de jauge a aussi des conséquences plus problématiques pour certaines théories métaphysiques actuelles, en particulier la

théorie de la survenance humienne de type de celle de David Lewis, et celle de la causalité spatio-temporelle de Wesley Salmon. Selon la théorie de Lewis, l'ensemble des phénomènes surviennent sur des faits locaux. Ceci implique, au niveau de la physique fondamentale, que nous ne devrions assigner de propriétés que localement, par exemple à des points de l'espace-temps. Selon la théorie de Salmon, un processus causal est nécessairement un processus dont on peut tracer la trajectoire dans l'espace-temps. Au cœur de ces deux théories se trouve une conception réaliste locale de l'espace-temps. Guay nous montre que les théories de jauge exhibent des effets de non-localité (en physique classique) qui discréditent largement une telle conception, ébranlant ainsi deux des grandes théories métaphysiques actuelles.

De telles théories métaphysiques posant l'espace-temps au fondement de la constitution de l'univers semblent encore discréditées par les recherches en gravité quantique, si l'on en croit l'analyse de Wüthrich. Chacun sait que ces recherches n'ont pas encore abouti à un consensus concernant la façon d'aboutir à une théorie qui combinerait relativité et physique quantique. Cependant, la théorie quantique à boucles, procédant d'une modification de la relativité générale est l'une des candidates les plus prometteuses. Or, nous explique Wüthrich, il se trouve que le temps, dont la notion classique – comme externe et indépendant de l'espace – avait déjà été mise à mal par la théorie de la relativité elle-même, disparaît tout simplement des équations régissant la dynamique fondamentale de l'univers en théorie quantique à boucle. Pire, il semble qu'on n'y puisse plus rendre compte du changement des propriétés des systèmes. Est-ce à dire que temps et changement n'émergent qu'au niveau des phénomènes mais n'existent pas au niveau fondamental ? Faut-il conclure, comme le suggère Wüthrich, que Parménide avait raison ? Si c'est bien là la route métaphysique que l'on suit, il faut alors travailler à concevoir comment l'espace et le temps tels que nous les percevons émergent de la structure fondamentale non spatio-temporelle de l'univers. Et c'est là un domaine où la collaboration entre physique et philosophie pourrait être des plus fructueuses

dans les décennies à venir. C'est ainsi Wüthrich nous enjoint de le rejoindre dans sa « quête de l'espace-temps perdu ».

On voit avec l'article de Wüthrich que la forme négative de métaphysique en philosophie de la physique, faisant appel aux théories physiques fondamentales pour discréditer certaines positions métaphysiques communes, appelle naturellement à une contribution plus positive, exigeant que l'on trouve de nouveaux concepts, compatibles avec les théories physiques fondamentales, et qui puissent remplacer ceux qui se sont trouvés discrédités. La recherche d'une notion d'espace-temps émergeant de la structure fondamentale non spatio-temporelle de Wüthrich en est un exemple. C'est aussi en réaction à la physique contemporaine que s'est développé le réalisme structural ontologique au cours des deux dernières décennies (voir Ladyman 1998, 2007 et Ladyman et Ross 2007). Prenant acte du fait que la physique quantique semble interdire la caractérisation individuelle et intrinsèque des systèmes quantiques, les structuralistes ontologiques maintiennent que le monde doit être considéré comme fondamentalement constitué de structures, dans un sens précis qu'ils tâchent de définir, et que, si relata il y a, ceux-ci ne sont définis que par les relations qu'ils entretiennent les uns avec les autres. Vincent Lam et Michael Esfeld font tout deux partie de cette mouvance importante de la philosophie de la physique contemporaine. Lam nous propose d'étendre le domaine de validité du réalisme structural ontologique, dont il maintient qu'il peut offrir une interprétation satisfaisante de l'espace-temps et du champ gravitationnel tel que conçus par la relativité générale. Ces derniers peuvent être interprétés, affirme Lam, comme une « une structure physique dans le sens d'un réseau de relations physiques entre des relata physiques ». Il nous montre en effet que certaines propriétés du formalisme impliquent que s'il existe des points de l'espace-temps, ceux-ci n'ont pas d'identité intrinsèque. Lam défend donc une version modérée du réalisme structural dans le cadre de l'interprétation de l'espace-temps en relativité générale, selon laquelle les points de l'espace temps ne sont pas totalement éliminés, mais n'ont pas non plus de priorité ontologique par rapport aux relations qu'il entretiennent entre eux, et qui en réalité les définissent pour ce qu'ils sont. Lam

maintient aussi que le problème du temps et du changement (évoqués dans le paragraphe précédant) peuvent trouver des réponses au sein d'une interprétation en termes de réalisme structural ontologique. Il reste à voir, nous dit-il enfin, si le domaine de validité de cette position métaphysique peut être étendu aux théories de la gravité quantique.

Esfeld contribue à préciser les propriétés de cette notion de structure, qui, selon le réalisme structural ontologique, forme la fabrique de l'univers. Selon lui, il nous faut reconnaître que les structures physiques fondamentales sont essentiellement causales. A l'appui de sa thèse, il invoque l'argument formulé en métaphysique analytique en faveur des propriétés causales et contre les propriétés intrinsèques. Cet argument est que postuler l'existence de propriétés intrinsèques implique une indétermination irréductible entre plusieurs mondes possibles se manifestant causalement à nous de la même façon. Il est par conséquent préférable, nous dit-on, de considérer que le monde est fondamentalement constitué de propriétés causales ou dispositions à produire certains effets. Esfeld maintient qu'un argument similaire peut être fait dans le cadre de la discussion du réalisme structural ontologique. Il montre en effet que, dans l'argument ci-dessus, c'est le caractère catégorique et non intrinsèque des propriétés qui implique les problèmes de multiple réalisabilité et d'indétermination. Du coup, ces mêmes problèmes se posent si on considère, au sein du structuralisme ontologique, les structures fondamentales comme catégoriques : deux mondes constitués de structures fondamentales différentes pourraient se montrer indiscernables. Une telle sous-détermination de principe est, selon Esfeld, incompatible avec la thèse réaliste au principe du structuralisme ontologique. Ce dernier se doit donc de reconnaître les structures fondamentales comme essentiellement causales. En s'engageant sur cette voie, montre enfin Esfeld, le réalisme structural reste aussi fidèle à sa motivation profonde : la métaphysique des structures causales est compatible avec la physique contemporaine.

Il existe donc une forme de métaphysique « naturalisée » qui prend en considération les contraintes imposées par la théories physiques fondamentales contemporaines. La contribution faite par la physique est ici évidente. Soulignons cependant que c'est

bien de philosophie de la physique, et non de physique tout court, que le métaphysicien doit se mêler. Au bout du compte, nous serions tenter d'affirmer que, si métaphysique « naturalisée » il peut y avoir, elle se doit de prendre pour base l'analyse des fondements des théories physiques, et une telle analyse est du domaine de la philosophie. Le sujet de notre article fournit une bonne illustration de ce dernier point. Il a été en effet souvent déclaré que le théorème de Bell et les expériences associées permettaient une forme de « métaphysique expérimentale », c'est-à-dire de répondre à certaines grandes questions de métaphysique au moyen de la seule expérience. Pour le dire vite, le théorème de Bell montre que certaines corrélations prédites par la mécanique quantique – entre des systèmes dit en état d'intrication – ne peuvent être expliquées selon le schéma classique d'explication des corrélations, c'est-à-dire comme résultant de processus continus dans l'espace et le temps se déployant depuis une cause commune dans le passé. Certains ont voulu voir dans ces expériences la preuve empirique de l'existence, au niveau fondamental, d'une forme de holisme, compris comme une relation non-causale mais permettant que des systèmes apparemment séparés dans l'espace aient pourtant un comportement corrélé. Une analyse rigoureuse montre qu'on ne saurait tirer aucune conclusion métaphysique de la sorte. En effet, si on considère les théories philosophiques de la causalité, on remarque d'abord que si certaines sont très clairement à prétention métaphysique, d'autres se contentent de donner des critères empiriques pour déterminer les structures causales au niveau phénoménal. Or seules les théories de ce dernier type permettent d'interpréter les situations d'intrication quantique comme le signe de l'existence d'une relation non-causale entre les systèmes. En revanche, les théories à visée métaphysique sont tout à fait compatibles avec plusieurs interprétations des corrélations, certaines impliquant des interactions non-locales, d'autres une causalité vers le passé ou d'autres encore. On ne saurait tirer de conclusion métaphysique concernant les situations de type Bell sans spécifier plus avant le type d'entité ainsi que le type d'interaction qui constituent le monde au niveau fondamental. En d'autres termes, on ne saurait tirer de conclusion métaphysique concernant les situations de type Bell qu'au sein d'une interprétation du formalisme de la mécanique quantique. Or la formulation et

l'analyse de telles interprétations est précisément le travail de la philosophie de la physique. Si métaphysique naturalisée il peut y avoir, donc, elle doit être le fruit d'une réelle collaboration entre philosophie et physique : elle se doit de prendre en considération l'analyse conceptuelle des fondements des théories physiques contemporaines.

4. Philosophie de la physique et épistémologie à la française : appel à la paix et au dialogue

Pour conclure cette introduction, arrêtons-nous un instant sur les différents styles de philosophie des sciences. Anne Fagot Largeault (2008) a récemment distingué entre trois types de philosophie des sciences : la philosophie naturelle, la philosophie formelle, et l'épistémologie historique. La philosophie naturelle des sciences, souvent pratiquée par d'anciens physiciens, consiste en une spéculation parfois plus libre que ne l'autorise la philosophie académique, mais aussi parfois plus profonde, sur la base des sciences contemporaines. Nous ne nous y intéresserons pas ici, du fait que, premièrement, elle n'est pas représentée dans cet ouvrage, et que, deuxièmement, elle n'entre généralement en conflit avec aucune des autres formes de philosophie des sciences. Pour tout dire, les frontières sont même parfois largement poreuses, et le philosophe des sciences formel comme l'épistémologue historique, peut se prendre à faire parfois de la philosophie naturelle des sciences. C'est de la philosophie formelle des sciences, et de sa relation avec l'épistémologie historique, dont nous voulons écrire un mot. Cet ouvrage est en effet un livre de philosophie formelle des sciences, consistant en l'analyse conceptuelle et logique des théories scientifiques (physiques) contemporaines. Il n'y est pas, ou peu, fait mention de l'histoire. Or il se trouve que la France est une des bastions de l'épistémologie historique, et que la philosophie formelle des sciences y est parfois vue d'un mauvais œil. Nous voudrions donc tenter ici d'expliquer ce qui, selon nous, différencie fondamentalement ces deux formes de philosophie des sciences, et

pourquoi elles représentent des approches non pas rivales, mais bien complémentaires dans la recherche d'une meilleure compréhension des sciences.¹⁶

L'épistémologie historique se différencie de la philosophie formelle des sciences essentiellement sur la question de la méthode, donnant sa préférence à une approche historique en lieu et place de l'analyse formelle des théories. Un retour sur l'origine de cette opposition devrait permettre de distinguer, parmi les différents points de discorde, lesquels sont dus à des contingences de l'histoire, et lesquels sont intrinsèques. Les premiers, du fait de l'évolution récente de la philosophie formelle des sciences, n'ont en réalité plus lieu d'être. Quant aux seconds, nous tenterons d'expliquer en quel sens ils sont le signe que les deux approches peuvent être complémentaires.

L'épistémologie historique se développa en même temps que, et en opposition à, la philosophie formelle des sciences, au début du vingtième siècle. Cette dernière était alors représentée, en gros, par la mouvance de l'empirisme logique. Cette mouvance est historiquement complexe, mais la conception que l'on en a communément est la suivante : elle consistait en la prescription d'une l'analyse logique du langage des sciences, en vue de leur axiomatisation, impliquant une distinction, au sein des théories, entre d'un côté une partie strictement théorique et d'un autre des éléments permettant de faire le lien entre la théorie et les phénomènes observables. La méthode prescrite pour l'analyse des sciences possède donc essentiellement trois caractéristiques : elle est (1) formelle, (2) d'inspiration globaliste, et (3) normative, au sens où (1) la logique formelle est l'outil essentiel de l'analyse, (2) toutes les sciences sont soumises à la même forme d'analyse – la physique étant prise pour le paradigme de « bonne » science, et (3) toute théorie n'entrant pas bien dans le cadre formel prescrit est rejetée en dehors du domaine de la légitimité scientifique. La philosophie française des sciences, incarnée entre autres par Auguste Comte, Henri

¹⁶ Sur cette question de la spécificité de l'épistémologie à la française, on pourra consulter deux ouvrages récents: Bitbol et Gayon (2006) et Gayon et Brenner (2008).

Poincaré, Pierre Duhem, Emile Meyerson, Gaston Bachelard et George Canguilhem, s'opposa à l'empirisme logique sur chacun de ces trois points. Cela tient sans doute en partie aux types de science sur lesquelles se portait l'intérêt des philosophes français, à savoir la chimie, la médecine (Bensaude-Vincent 2005), ou même les sciences sociales telles que l'économie (Gayon et Brenner 2008), et non pas seulement la physique. Traitant d'objets différents, l'épistémologie à la française aurait donc été naturellement portée vers des méthodes différentes.

Remarquons que, si c'étaient là les seuls points de discorde, alors on pourrait dire que toute source de conflit a tout simplement disparu. En effet, la philosophie formelle des sciences d'aujourd'hui (1) ne consiste plus en la seule analyse logique du langage des sciences mais bien en une analyse conceptuelle et philosophique de leur fondements ; (2) elle a connu un tournant régionaliste – chacune des sciences particulières possédant désormais son propre « domaine » : philosophie de la physique, de la biologie etc. – et s'est ouverte à l'occasion aux sciences éloignées du modèle de la physique mathématique telles que l'écologie ou l'économie ; enfin, (3) elle a largement abandonné ses prétentions normatives au profit d'une visée uniquement descriptive de la pratique de la science. La différence fondamentale se situe donc ailleurs.

Cette différence consiste en ce que les défenseurs de l'épistémologie à la française considèrent comme crucial que les sciences soient étudiées d'un point de vue historique. Les théories scientifiques ne sauraient être proprement comprises qu'au travers de l'étude de la genèse de leurs concepts fondamentaux. La philosophie formelle des sciences, d'inspiration analytique, est, elle, au contraire, non pas anti-mais a-historique. Selon son point de vue, les théories scientifiques peuvent être comprises au travers de l'analyse de leur structure conceptuelle.¹⁷

¹⁷ C'est, me semble-t-il, la même différence de point de vue qui existe entre les défenseurs de la philosophie comme réflexion toujours ancrée dans l'histoire de la philosophie et les partisans de la philosophie analytique, qui étudient les concepts

On pourrait, pour illustrer ce point, considérer deux façons d'étudier la « Ferris Wheel », ou la première Grande Roue, la Grande Roue de Chicago. Selon un premier point de vue, on peut s'intéresser aux conditions historiques qui ont mené George Washington Gale Ferris, Jr. à proposer pour l'exposition universelle de Chicago de 1893 un projet d'architecture aussi grandiose. On pourrait rappeler que l'un des buts avoués du projet était de dépasser la prouesse technique que représentait la construction à Paris de la Tour Eiffel pour l'exposition universelle de 1889. On pourrait de plus évoquer l'importance de la réussite de l'exposition universelle de 1883 pour la ville de Chicago, qui cherchait encore alors à s'établir comme l'une des métropoles les plus importantes sur le nouveau continent. On pourrait ensuite se demander quelles différences il existe entre la Grande Roue de Chicago, et toutes celles qui ont par la suite vu le jour sur le Globe, et noter enfin que désormais, les grandes roues ont moins pour but de prouver les capacités technologiques d'un pays que de divertir les badauds. Une telle analyse historique de la genèse de la Grande Roue de Chicago est sans aucun doute intéressante et instructive. On peut concevoir cependant d'étudier le même objet d'un point de vue a-historique. Selon ce point de vue, la Grande Roue de Ferris est considérée indépendamment des conditions historiques ou sociales qui ont permis sa construction. On se pose en revanche la question de sa structure architecturale : comment cela peut-il tenir debout ? comment cela peut-il tourner ? On s'interroge également quant à son usage : comment peut-on opérer une telle machinerie ? On s'intéresse ensuite à la question de son utilité : à quoi ca sert exactement ? Enfin, armés des réponses aux questions précédentes, on s'attaque à un nouveau projet : comment peut-on faire mieux ? si c'est de prestige et de prouesse technologique dont il s'agit, faut-il qu'elle soit plus haute ? qu'elle aille plus vite ? ou bien, si le divertissement est désormais le but véritable, ne faut-il pas varier les trajectoires, et opter pour des montagnes russes ?

de la philosophie d'un point de vue a-historique. Il n'y a pas lieu cependant ici de développer ce point.

L'exemple de la Grande Roue est volontairement neutre : il est clair me semble-t-il que les deux types d'analyse, historique ou non, sont éclairantes quant à la nature de la Grande Roue de Chicago. Il existe sans aucun doute des objets qui se portent plus ou moins vers l'une ou l'autre des perspectives. Chacune des méthodes, si malmenée, peut également mener à nous perdre dans la considération de détails, ici historiques, là techniques, qui nous éloignent de l'esprit de synthèse conceptuelle propre à la philosophie. C'est notre conviction cependant que, concernant les théories scientifiques, les deux points de vue sont, s'ils sont bien menés, toujours instructifs, et qu'il n'est aucune raison de rejeter l'un ou l'autre comme illégitime. On apprend sans aucun doute beaucoup de la mécanique quantique en étudiant sa genèse historique. Les travaux, par exemple, de Catherine Chevalley (1991) sur la pensée de Bohr, de Michel Bitbol (1996) sur Schrödinger, ou encore de Bacciagaluppi et Valentini (2009) sur la Conférence Solvay de 1927 en sont la preuve. Mais on approfondit aussi la compréhension que l'on a de cette théorie en procédant en l'analyse de ses fondements. L'analyse a-historique et formelle du problème de la mesure et de la question de la non-localité ont par exemple permis des avancées aussi importantes qu'indéniables concernant notre conception des phénomènes quantiques. Le développement des théories GRW, de Broglie-Bohm, et de l'interprétation multi-mondes sont sans aucun doute parmi les plus grandes avancées intellectuelles dues à la philosophie formelle des sciences au vingtième siècle. Les discussions concernant le théorème de Bell et les expériences associées fournissent un autre exemple. Que ces discussions concernant l'interprétation de la physique quantique n'aient pas abouti à un consensus est moins un problème que le signe que nous avons bien affaire ici à de la philosophie, si du moins on souscrit à la thèse selon laquelle la philosophie n'a pas tant pour but de donner des réponses définitives aux questions qu'elle se pose que (1) de transformer des questions importantes mais vagues en problèmes bien articulés et, (2) d'en « cartographier » les solutions possibles ainsi que les difficultés auxquelles ces solutions font face. En publiant ce livre dans un pays de tradition historique, notre espoir est d'éveiller quelques vocations à poursuivre la voie de la philosophie de la physique formelle, qui peut être tout simplement intellectuellement passionnante.

Références

- Bacciagaluppi, Guido, et Valentini, Antony (2009). *Quantum Theory at the Crossroads: Reconsidering the 1927 Solvay Conference*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Balibar, Françoise (1997). *Galilée, Newton lus par Einstein : Espace et relativité*. Paris : PUF.
- Benoist, Jocelyn (2001). *Représentations sans objet : aux origines de la phénoménologie et de la philosophie analytique*. Paris, P.U.F., Epiméthée.
- Benoist, Jocelyn (2004). *Dépassements de la métaphysique*. *Revue philosophique de la France et de l'étranger* 2/2004 (Tome 129), p. 167-180.
- Bensaude-Vincent, Bernadette (2005). *Chemistry in the French tradition of philosophy of science: Duhem, Meyerson, Metzger and Bachelard*. *Studies in History and Philosophy of Science*, 36: 627-648.
- Bensaude-Vincent, Bernadette, et Stengers, Isabelle (1993). *Histoire de la chimie*. Paris: La Découverte.
- Bitbol, Michel (1996). *Schrödinger's philosophy of quantum mechanics*, Boston Studies in the philosophy of science : Kluwer.
- Bitbol, Michel et Jean Gayon (eds.) (2006), *L'épistémologie Française (1830-1970)*, Paris : Presses Universitaires de France.
- Chevalley, Catherine (1991). *Physique atomique et connaissance humaine, textes de Niels Bohr, traduction et introduction*. Paris : Gallimart.
- Duhem, Pierre (1892). "Notation atomique et hypothèses atomistiques". *Revue des questions scientifiques*, 31, 391-457.
- Duhem, Pierre (1902). *Le mixte et la combinaison chimique: Essai sur l'évolution d'une idée*. Paris: C. Naud, réimprimé Paris: Fayard, 1985.

Duhem (1908) [1990] Sauver les phénomènes, Essai sur la notion de théorie physique de Platon à Galilée. Paris: Vrin.

Gayon, Jean, et Anastasio Brenner (eds) (2008). French Studies in the Philosophy of Science. Boston Studies in the Philosophy of Science, 276, New-York : Springer-Verlag.

Fagot-Largeault, Anne (2008). The Legend of Philosophy's Striptease : Trends in Philosophy of Science. In Gayon et Brenner : 25-50.

Ladyman, James (1998). What is structural realism? Studies in History and Philosophy of Science Part A, 29(3):409-424.

Ladyman, James (2007). On the Identity and Diversity of Objects in a Structure. Proceedings of the Aristotelian Society Supplementary Volume, 81(1):45-61.

Ladyman, James et David Ross (2007) (avec D. Spurrett et J. Collier). Every Thing Must Go: Metaphysics Naturalized. Oxford University Press, Oxford.

Parrini, P., Salmon, M., et Salmon, W. C. (dir.) (2003). Logical empiricism: Historical and contemporary perspectives. Pittsburgh: University of Pittsburgh Press.