

PENSER
AVEC LES
SCIENCES

L'espace physique
entre
mathématiques et philosophie

Coordonné par Marc **LACHIÈZE-REY**



L'espace physique entre mathématiques et philosophie

Coordonné par Marc Lachièze-Rey



17, avenue du Hoggar
Parc d'activités de Courtabœuf, BP 112
91944 Les Ulis Cedex A, France

« Penser avec les sciences »

Collection dirigée par
Michel Paty et Jean-Jacques Szczeciniarz

Ouvrage paru :

Sur la science cosmologique, Jacques Merleau-Ponty
Philosophie, langage, science, Gilles-Gaston Granger

Illustration de couverture : © Droits réservés.

ISBN 2-86883-821-9

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés réservés pour tous pays. Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, des pages publiées dans le présent ouvrage, faite sans l'autorisation de l'éditeur est illicite et constitue une contrefaçon. Seules sont autorisées, d'une part, les reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective, et d'autre part, les courtes citations justifiées par le caractère scientifique ou d'information de l'œuvre dans laquelle elles sont incorporées (art. L. 122-4, L. 122-5 et L. 335-2 du Code de la propriété intellectuelle). Des photocopies payantes peuvent être réalisées avec l'accord de l'éditeur. S'adresser au : Centre français d'exploitation du droit de copie, 3, rue Hautefeuille, 75006 Paris. Tél. : 01 43 26 95 35.

T A B L E D E S M A T I È R E S

Introduction	5
À propos de André Heslot	13
Liste des participants	13
01 Orientations de l'épistémologie contemporaine : vers une épistémologie des affects	17
02 Le statut de l'espace dans la <i>Critique de la raison pure</i> de Kant	31
03 L'espace physique vu du monde quantique : une approche épistémologique	41
04 Espaces et référentiels	81
05 Nouvelles dimensions mathématiques et épistémologiques du concept d'espace en physique, de Riemann à Weyl et à Witten	101
06 Variations N -dimensionnelles sur des thèmes de Pythagore, Euclide et Archimède	135
07 Espaces physiques : pluralité, filiation, statut	161
08 Les théories spatiales de Poincaré à l'épreuve de l'Histoire classique	195
09 Espaces mathématiques, espaces philosophiques	205
10 Fluctuations du vide quantique	225
11 Causalité et localisation en Mécanique Quantique Relativiste	243
12 Il y a différentes manières de prendre position	257
13 Quantification canonique et énergie du vide	285
14 Courbes elliptiques, homotopie et extensions de l'espace	301
15 Espace et observateurs en cosmologie	325
16 La machine électromagnétique à remonter le temps	345
17 Équations (F.R.W.) de la cosmologie et cosmologie quantique	357

Introduction

Marc Lachièze-Rey

Cet ouvrage présente les comptes-rendus du colloque qui s'est tenu au Centre d'Études scientifiques de Cargèse du 29 janvier au 9 février 2001. Il est consacré aux réflexions sur l'espace physique, tel qu'il apparaît au sein des diverses théories physiques passées ou présentes : en particulier la physique quantique et la relativité, mais aussi les approches plus modernes et plus spéculatives.

Une longue liste de philosophes, épistémologues et physiciens (Leibniz, Kant, Mach, Poincaré, Einstein. . .) n'ont cessé de discuter la notion d'espace, et d'en critiquer le statut, sinon la pertinence : réalité ou illusion, objet physique ou entité métaphysique ? Le statut philosophique de l'espace physique reste indéterminé.

Le but de cet ouvrage est de reprendre certaines de ces réflexions, en les actualisant à la lumière des théories physiques modernes, y compris celles encore en gestation. L'intention est ici de poursuivre aussi loin que possible des réflexions de fond sur la notion d'espace, et celles qui lui sont liées. C'est pourquoi les contributions des différents auteurs oscillent constamment entre physique et mathématiques, épistémologie et philosophie.

Le texte de Pascal Nouvel peut ici être vu comme une introduction à l'épistémologie. S'il se présente comme fondateur d'un nouveau type d'épistémologie, on y trouvera une approche de cette discipline elle-même, et une classification des diverses tendances qui sont exprimées lors de ses applications à la physique. Partant de la question : « l'affect est-il le continent oublié de l'épistémologie », Nouvel suggère d'envisager la science du point de vue de celui qui la fait. Il reste à appliquer ce point de vue fructueux à l'épistémologie de

l'espace. Les contributions suivantes apportent de substantielles contributions dans cette voie.

Les notions d'*invariance* et de *symétrie* sont intimement liées à celle de géométrie. Les invariances d'un espace géométrique, et/ou d'une théorie sont représentées par un groupe, auquel est associée une algèbre, et ces structures caractérisent de manière essentielle la théorie. Physiquement, la notion d'invariance est liée à celle de reproductibilité des phénomènes (Claude Comte). Et certains aspects se représentent comme des échanges entre référentiels. Bien entendu, la notion d'invariance est également liée à celle de relativité, galiléenne ou relativiste.

La plupart des contributions évoquent les différents outils qui permettent d'aborder la géométrie. En particulier, la théorie des groupes joue un très grand rôle, notamment les groupes de Lorentz, Poincaré et de Sitter. Ils sont longuement évoqués par Jean-Pierre Gazeau, Jacques Renaud et Luciano Boi.

Ces outils sont indispensables à l'expression de la physique actuelle, mais aussi à l'élaboration de nouvelles théories. Parmi elles, les espaces, ou variétés, munis d'un grand nombre de dimensions, jouent des rôles essentiels, malgré les difficultés de représentation et d'approche intuitive. C'est à ce propos que l'article de Jean-Marc Lévy-Leblond se révèle précieux : en présentant des généralisations multi-dimensionnelles de résultats simples (théorème de Pythagore, calculs de surfaces et de volumes...) il permet une appréhension intuitive de quelques propriétés caractéristiques de ces variétés à grand nombre de dimensions. Cette généralisation de résultats classiques d'une géométrie « à la physicienne » fait ressortir le côté très particulier de nos géométries à « petit » nombre de dimensions.

L'espace

La notion d'espace sous-tend toute la physique, et lui est apparemment indispensable. Elle fut introduite formellement par Newton, dans ses *Principia*, après les travaux de nombreux prédécesseurs, dont notamment Descartes. Newton énonce l'existence de l'espace physique, assimilé au seul espace mathématique connu à l'époque, *l'espace euclidien*, ainsi baptisé parce que sa géométrie correspond aux postulats énoncés par le géomètre grec.

Mais la notion fut bouleversée au XIX^e, avec la découverte des « espaces non euclidiens », ou *variétés* (non euclidiennes). Dès lors, la question se posait de savoir laquelle de toutes les variétés possibles convenait le mieux pour décrire le Monde physique. Au début du XX^e siècle, la géométrie non

euclidienne fut incorporée dans la physique par les théories de la relativité : la relativité restreinte énonce qu'il faut remplacer l'espace et le temps séparés par une variété lorentzienne à quatre dimensions, l'espace-temps de Minkowski. Ensuite, la relativité générale énonce que, pour tenir compte de la gravitation, il faut considérer une variété plus générale, toujours à quatre dimensions et lorentzienne, mais avec une *courbure* qui, précisément, représente la gravitation.

Très peu de temps après, apparaît la physique quantique, qui implique de nouveaux types d'espaces, les *espaces de Hilbert*. Évoluant afin de s'accorder avec la relativité restreinte, elle devient la *théorie quantique des champs*. Cette dernière (sous la forme des *théories de jauge*) implique de nouveaux types d'espaces géométriques, les *espaces fibrés*. Une nouvelle géométrie est en jeu, qui concerne ce que l'on qualifiera d'*espace interne* (fibre en terme mathématique) pour le distinguer de l'espace-temps (base du fibré).

Le présent ouvrage a pour ambition de répondre à plusieurs questions :

- Quel sont les espaces géométriques (dans un sens très large, variétés ou autres) les mieux adaptés pour décrire les différentes branches de la physique, y compris dans les nouvelles théories physiques explorées actuellement ?
- Quels sont les accords et les antagonismes entre eux ?
- Est-il possible de les harmoniser, ou de les raccorder, en particulier en ce qui concerne l'antagonisme quantique/relativiste ?
- Quels sont les statuts – ontologique, métaphysique, épistémologique – de ces différentes notions d'espace ?

Les questions de l'ontologie et de la réalité de l'espace, du temps et/ou de l'espace-temps se reposent dans le cadre de chaque nouvelle théorie physique. Déjà, dès le XVII^e siècle, les positions de Leibniz s'opposaient à celles de Newton. Un siècle plus tard, l'approche philosophique de Kant s'attaque en profondeur au statut de l'espace. Sa conception constitue le sujet de l'article de Jean-Michel Besnier. Il montre en détail l'argumentation de Kant qui conduit à considérer l'espace et le temps comme des *catégories de la pensée*. Il expose didactiquement les liens entre ces dernières et la sensibilité, les positions de Kant vis-à-vis du réalisme et de l'idéalisme, par rapport à celles de Berkeley, Descartes, Hume, Leibniz, Newton. Restant toujours dans une approche très pédagogique, il termine en évoquant la réception de l'analyse kantienne par Cassirer et Heidegger.

La question de l'actualité du kantisme, notamment vis-à-vis de la nouvelle physique relativiste (sans parler des propositions les plus récentes) reste

ouverte. C'est le sujet traité par Jean-Jacques Szczeciniarz : peut-on encore accorder une pertinence aux conceptions kantienne de l'intuition de l'espace ?

Sous un titre étrange et provocateur, Mario Novello présente une vision originale de l'espace et de la géométrie en relativité générale. Il montre comment, du point de vue de la propagation de la lumière, les propriétés géométriques de l'espace (sa courbure) peuvent être décrites par un *indice de réfraction*, dans une géométrie sans caractéristiques particulières (sans courbure). Cette vision permet de considérer (au moins localement) la relativité générale comme une théorie non particulièrement géométrique. Réciproquement, la propagation de la lumière dans un espace-temps plat, mais dans un environnement particulier, peut être décrite comme suivant les géodésiques d'une certaine métrique, caractérisant un espace-temps courbe (fictif). Novello s'intéresse au statut de ce dernier. Outre un éclairage épistémologique original sur la notion de géométrie, cela suggère certains procédés expérimentaux qui pourraient permettre de tester des aspects de la relativité générale.

Christiane Vilain s'intéresse à la manière dont est construite la notion d'espace : comment pouvons-nous l'acquérir ? Quel est le rôle de nos *sensations* ? Un des enjeux sera alors de savoir si ces notions correspondent nécessairement à la notion euclidienne, ou si elles s'accordent avec les visions relativiste et quantique (voir aussi la question du rôle des perceptions pour nos conceptions de l'espace, chez Michel Paty). Après avoir rappelé ce qui s'est passé au moment de l'introduction de l'espace en physique (aux XVI^e et XVII^e siècles), Christiane Vilain s'intéresse aux conceptions de Poincaré : celui-ci montre que notre notion de l'espace se construit à partir de la notion de *déplacement* plutôt que de celle de sensation. Du point de vue psychologique, on pourrait sans doute insister sur le caractère « volontaire » de cette acquisition. Mais c'est surtout le point de vue mathématique qui trouve ainsi sa justification, et en particulier la notion de groupe (de Lie) fondée sur celle de déplacement.

Michel Paty s'intéresse, en épistémologue, au statut de l'espace et des notions géométriques qui l'accompagnent, dans la physique quantique. Il situe d'emblée le problème au sein du « monde quantique ». Cela suppose que ce monde quantique possède bien une existence *réelle*. Cette vision, qui devient la vision moderne de la physique quantique, contredit l'ancienne *interprétation de Copenhague*. Paty nous rappelle que rien ne nous assure que le concept d'espace physique conserve sa validité à l'échelle microscopique. Il y a là un prélude aux idées aujourd'hui développées en gravité quantique.

Paty prend comme point de départ la critique de l'espace physique qui résulte de la physique quantique. Elle est liée au problème de la localisation, également abordée, d'un point de vue plus technique, par Jean-Pierre Gazeau, André Heslot et Serge Reynaud. Paty rappelle et souligne certaines caractéristiques fondamentales de l'approche quantique : impossibilité de localisation, non-séparabilité, et non-localité. Il suggère que, bien que la physique quantique soit effectivement décrite dans le cadre géométrique de l'espace euclidien (ou de l'espace-temps de Minkowski pour la théorie quantique des champs), une autre conception de l'espace la sous-tend de fait. Un paradoxe se cache en effet dans l'approche quantique : bien qu'elle soit formulée dans le cadre géométrique de la physique newtonienne, ou minkowskienne, l'impossibilité de localisation interdit d'exploiter la structure sous-jacente de variété continue, supposée présente. Ce paradoxe fait dire à Paty que les propriétés quantiques empêchent de considérer véritablement l'espace (ou l'espace-temps) comme une *variété* avec ses propriétés habituelles.

La physique quantique rend particulièrement crucial le lien entre espace et *vide*. La difficulté des deux notions remonte déjà au très ancien problème de l'éther, déjà évoqué à l'époque de Newton. Serge Reynaud souligne l'impossibilité d'identifier le vide quantique à un pur néant. Autrement dit, l'espace ne peut être dissocié de l'état des champs quantiques qui, nécessairement, l'occupent. C'est toute la question du *vide quantique*, à laquelle Reynaud consacre sa contribution, en particulier à la question controversée de l'énergie du vide. Il montre que, dès que l'on atteint la précision des mesures quantiques, on ne peut traiter le mouvement et la gravitation d'un point de vue purement géométrique. On doit tenir compte du vide quantique et de tous ses effets. Autrement dit, cela implique que tout ce que l'on attribue à l'espace (ou à l'espace-temps) doit en fait être attribué à la combinaison espace + vide(s) quantique(s). La question reste ouverte de bien connaître tous les effets en question ; et aussi de savoir ce qu'il convient, dans ces conditions, d'appeler exactement « espace » et « vide ».

Bien entendu, la plupart des problèmes intéressants (et difficiles) proviennent des différences de traitement de l'espace, du temps et de l'espace-temps en relativité et en physique quantique. Ceci est lié à la difficile question de la définition des *opérateurs de localisation* en physique quantique, qui constitue le thème principal des contributions de André Heslot et Jean-Pierre Gazeau. Les approches des deux auteurs sont similaires : tenter de définir une possibilité de localisation en physique quantique, qui reste compatible avec la notion de causalité. Cette dernière est naturellement implantée en

relativité restreinte, mais qu'en est-il en mécanique quantique ? Les deux auteurs explorent en détails les manières de résoudre les paradoxes liés à cette difficulté.

André Heslot nous présente la construction, formelle, d'une théorie de mécanique quantique, où l'espace-temps n'existe pas au départ : ce dernier apparaît comme le résultat d'une *construction* de la théorie, résultant précisément de l'application d'opérateurs de localisation. Ceux-ci sont élaborés de manière à assurer la covariance (ici, l'invariance de Lorentz). Heslot peut montrer comment les contraintes que la causalité impose à cette construction nécessitent l'existence d'états d'énergie négative (voir aussi à ce propos la contribution de Jacques Renaud). Ceci apporte *a posteriori* une justification à la théorie quantique relativiste de l'électron (de Dirac).

Jean-Pierre Gazeau pose des questions similaires, mais répond dans un autre formalisme, qui rapproche l'approche quantique, exprimée en termes d'*états cohérents*, de la théorie du signal. Il consacre son étude à l'examen de la possibilité de définir des opérateurs de localisation présentant de « bonnes propriétés », notamment, ici encore, la causalité dans l'espace-temps. Au passage, cela fournit une interprétation nouvelle et originale de l'espace, ou de l'espace-temps géométrique, comme « plongé » à l'intérieur d'un espace (de Hilbert) formel d'opérateurs. Gazeau montre les difficultés issues des tentatives pour rendre les opérateurs de localisation compatibles avec la causalité. Il en déduit que la bonne localisation se déroule plutôt dans l'espace des phases.

Jacques Renaud étudie la compatibilité entre quantification et covariance. Si celle-ci ne pose guère de problème pour l'espace-temps de Minkowski, il n'en est pas de même dans un espace-temps courbe. Renaud s'intéresse ici à celui de de Sitter. Il montre d'abord comment la quantification canonique usuelle est incompatible avec la covariance. Il introduit alors une nouvelle méthode de quantification (basée sur celle de Gupta et Bleuler) qui résout ce problème. Il peut paraître surprenant aux spécialistes de la physique quantique que cette nouvelle procédure ne soit pas fondée sur un espace de Hilbert, mais sur une généralisation de ce dernier. Plus surprenant encore, elle implique des états d'énergie négative. Prenant en compte son avantage essentiel, à savoir de résoudre les problèmes d'énergie infinie rencontrés en théorie des champs usuelle, Jacques Renaud montre que l'on peut tout à fait s'accommoder de ces caractères paradoxaux.

Malgré leur cohérence et leur « élégance », les théories de la relativité ne sont pas indemnes de problèmes quant aux conceptions de l'espace. Luciano

Boi s'intéresse aux conceptions de l'espace et de l'espace-temps, telles qu'elles ressortent des deux théories de la relativité, restreinte et générale, mises en perspective avec celles de la physique newtonienne. Dans la foulée, il souligne également les aspects nouveaux qui semblent jouer un rôle important dans les nouvelles théories de la physique en cours d'élaboration. La question du lien entre espace et matière est examinée avec une attention particulière, dans les cadres de la physique newtonienne, de la relativité restreinte et de la relativité générale.

Boi porte un intérêt particulier à l'antagonisme entre les conceptions de l'espace en relativité et en physique quantique. En historien des sciences, il rappelle que des incompatibilités du même genre se sont déjà présentées dans l'histoire de la physique : leurs résolutions ont mené à de nouvelles théories physiques avec de nouvelles géométries, impliquant de nouvelles formes d'espace. L'intention première de Boi est de souligner l'importance du rôle de la géométrie (de l'espace-temps) dans la physique, et en particulier sa relation avec les lois physiques. Il discute de la position limite qui consiste à déclarer que *tout* dans la physique – interactions et particules – se réduit à de la géométrie (comme, déjà, la gravitation en relativité générale).

Plusieurs articles sont consacrés à la notion de *référentiel* (ou de repère, ou de système de coordonnées), très liée à la conception de l'espace. Les quantités géométriques véritablement intrinsèques sont indépendantes de tout référentiel. C'est ce qu'exprime la notion de *covariance* en relativité. Ainsi, la physique doit rester invariante par rapport au choix d'un référentiel. Pourtant, que ce soit dans les variétés (espace ou espace-temps), ou dans les espaces de Hilbert en physique quantique, et dans toutes les branches de la physique, il est presque toujours indispensable de définir et d'utiliser un référentiel. Outre la commodité des calculs ainsi obtenue, cela permet d'accéder à certaines quantités observables liées à la présence d'un observateur.

La question des référentiels en physique quantique constitue le fondement de l'article de Jean-Pierre Gazeau. Celle de covariance, c'est-à-dire, l'indépendance vis-à-vis du choix d'un référentiel, constitue le point de départ de la nouvelle méthode de quantification proposée par Jacques Renaud. La notion de référentiel est aussi le fondement de l'approche épistémologique de Claude Comte.

Du point de vue relativiste, la question est déjà abordée dans l'article de Luciano Boi. Elle l'est de manière plus détaillée et plus technique dans celui de Marc Lachièze-Rey. Les théories de la relativité ont énoncé que le cadre convenable pour la physique était *l'espace-temps*, plutôt qu'un espace et un temps

séparés. Cette exigence s'accorde avec le principe de covariance, fondement de la théorie. Pourtant, on a souvent besoin d'évoquer la notion d'*espace* : soit pour retrouver un langage familier afin d'interpréter tel ou tel résultat relativiste ou cosmologique ; soit lorsque l'on veut incorporer des notions quantiques non locales, ce qui exige que l'on dispose de notions d'espace et de temps séparés. Ceci équivaut au choix d'un référentiel, indispensable donc aux *interprétations* de la physique quantique et de la cosmologie.

Du point de vue mathématique et géométrique, la notion est parfaitement définie. Il existe cependant, dans une variété donnée (espace-temps), des référentiels en nombre illimité. Lachièze-Rey montre comment le choix au sein de cette disparité, équivalent à la définition de l'espace (et du temps) au sein de l'espace-temps, doit nécessairement dépendre de l'observateur : un découpage de l'espace-temps en espace + temps ne saurait être fait de manière covariante et absolue. Mais Lachièze-Rey propose une manière canonique (unique) d'effectuer un tel découpage, *du point de vue d'un observateur*. Ce découpage est accompli grâce à la notion de *synchronisation* ici étendue, de manière parfaitement opérationnelle (et en accord avec les notions déjà énoncées par Einstein), à la relativité générale. Il en résulte une manière unique de définir espace et temps dans l'espace-temps, pour un observateur donné.

Ce découpage peut être utilisé pour définir des variables canoniques à la base d'une quantification de la relativité générale. Sans aller jusqu'à une quantification complète de la gravitation, la *cosmologie quantique* se donne un programme plus restreint, qui consiste à quantifier une évolution de l'Univers, en demeurant dans le cadre d'une classe de modèles cosmologiques classiques (non quantiques) donnés. Ainsi, il est inutile de définir des variables canoniques pour le champ de gravitation (tenseur de courbure) complet, mais seulement pour les paramètres, en nombre réduit, qui sont pertinents pour la cosmologie. C'est à ce propos qu'Edgard Elbaz propose une méthode originale, concurrente de l'équation de Wheeler-de Witt usuellement invoquée. Son choix différent de variables canoniques conduit à une quantification qui permet de suivre la fonction d'onde du fluide cosmique dans ses différents états (vide quantique, puis radiation, puis matière), avec un raccordement harmonieux.

Qu'il me soit permis de remercier le Centre d'Études Scientifiques de Cargèse, le Commissariat à l'Énergie Atomique, et la Fondation Louis de Broglie, grâce à qui ce colloque a pu se tenir.

À propos de André Heslot

André Heslot, Maître de Conférences à l'Université Paris 7-Denis Diderot (*Laboratoire de Physique Théorique de la Matière Condensée*, Université Paris 7-Denis Diderot), nous a quitté en juin 2000. Esprit libre, il avait engagé son intelligence, incisive, rigoureuse, sur les fondements des théories quantiques. Ce sont là des questions que peu de théoriciens contemporains considèrent comme prioritaires, peut-être parce qu'elles sont simplement hors de leur temps. Ce texte est repris de notes qu'André avait préparées pour un séminaire. Elles datent de 1989 et n'avaient jamais été publiées.

Liste des participants

- **Jean-Michel BESNIER**
Université de Paris IV-Sorbonne, France
- **Luciano BOI**
École des Hautes Études en Sciences Sociales,
Centre de Mathématiques, 54, boulevard Raspail, 75006 Paris, France
- **Claude COMTE**
Équipe REHSEIS (UMR 7596), CNRS et Université Paris 7-Denis Diderot,
Centre Javelot, 75251 Paris Cedex 05, France
- **Edgar ELBAZ**
Université Claude Bernard, Lyon-1, France
- **Sylvain FAUTRAT**
Université de Marne-la-Vallée, France
- **Antoine FOLACCI**
Université de Corse, Corte, France
- **Tarik GARIDI**
Laboratoire de Physique Théorique de la Matière Condensée
Boite 7020, Université Paris 7-Denis Diderot,
75251 Paris Cedex 05, France
- **Jean-Pierre GAZEAU**
Laboratoire de Physique Théorique de la Matière Condensée
Boite 7020, Université Paris 7-Denis Diderot,
75251 Paris Cedex 05, France

-
- **Éric HUGUET**
Laboratoire APC, Université Paris 7-Denis Diderot, France
 - **Étienne KLEIN**
DSM/DIR, CE Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette Cedex, France
 - **Joseph KOUNEIHHER**
CNRS UMR 8102,
Observatoire de Paris-Meudon, France
 - **Marc LACHIÈZE-REY**
Service d'Astrophysique, CE Saclay,
91191 Gif-sur-Yvette Cedex, France
et laboratoire APC
 - **Jean-Marc LÉVY-LEBLOND**
Université de Nice, France
 - **Jean-Paul LONGAVESNE**
Professeur à l'ENSAD
 - **Pascal NOUVEL**
Université Paris 7, France
 - **Mario NOVELLO**
Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas,
Rua Dr. Xavier Sigaud, 150, Urca
22290-180, Rio de Janeiro, RJ, Brazil
 - **Michel PATY**
Équipe REHSEIS (UMR 7596), CNRS et Université Paris 7-Denis Diderot,
Centre Javelot, 75251 Paris Cedex 05, France
 - **Jacques RENAUD**
LPTMC, Université Paris 7, 75251 Paris Cedex 05, France
 - **Serge REYNAUD**
Laboratoire Kastler Brossel
UPMC case 74, Jussieu, 75252 Paris Cedex 05,
Laboratoire de Physique Théorique de l'ENS,
Laboratoire du CNRS de l'École Normale Supérieure et de l'Université
Paris-Sud, 24 rue Lhomond, 75231 Paris Cedex 05, France

- **Christophe SALINI**
Équipe REHSEIS (UMR 7596), CNRS et Université Paris 7-Denis Diderot,
Centre Javelot, 75251 Paris Cedex 05, France
- **Jean-Jacques SZCZECINIARZ**
Professeur de l'Université Paris 7, France
- **Roland TRIAY**
Centre de Physique Théorique, Marseille-Luminy, France
- **Christiane VILAIN**
DARC, Observatoire de Paris-Meudon, France

01

Orientations de l'épistémologie contemporaine : vers une épistémologie des affects

Pascal Nouvel

À côté de la très vaste littérature scientifique qui s'est accumulée au cours du xx^e siècle, s'en est constituée une autre qui prend la science dans son ensemble ou dans l'une de ses parties comme objet d'études et de réflexions. Moins abondante que la première, elle n'en est pas moins diverse et contrastée. On peut y distinguer deux grands groupes, deux grands styles d'études.

1. Examen général de la littérature sur la science

Le premier groupe est critique. Comme exemple de ce type de discours, on peut citer, bien sûr, les textes de Martin Heidegger sur la science¹ ou encore *L'homme unidimensionnel*² d'Herbert Marcuse. La tonalité critique y est perceptible d'emblée et il y est souvent allégué que, pour juger la science sans parti pris, il faut se situer en dehors de la science³. Ces contributions, souvent riches de perspectives profondes et d'aperçus métaphysiques ne font pas l'objet de la présente analyse.

Le second type apparaît, par contraste, comme bienveillant à l'égard de la science (quoiqu'il lui arrive de développer des critiques non moins aiguës).

- 1- Par exemple : [6] « Ce que nous voudrions savoir, c'est ce que ceux-là [les scientifiques] non seulement ne veulent pas savoir, mais peut-être même sont à jamais incapables de savoir, en dépit de toute leur science et de toute leur habileté artisanale. » (p. 21.)
- 2- « Ce que j'essaie de montrer c'est que la science, en vertu de sa propre méthode et de ses propres concepts, a projeté un univers au sein duquel la domination sur la nature est restée liée à la domination sur l'homme et qu'elle l'a aidé à se développer – et ce lien menace d'être fatal à l'univers dans son ensemble. » [15].
- 3- Voir par exemple M. Heidegger pour qui science et technique sont généralement confondues : « L'essence de la technique n'est absolument rien de technique. Aussi ne percevons-nous jamais notre rapport à l'essence de la technique, aussi longtemps que nous nous bornerons à nous représenter la technique et à la pratiquer, à nous en accommoder ou à la fuir. » ([7], p. 9.)

Il se développe à partir d'un intérêt de compréhension et d'élucidation : compréhension des objectifs, élucidation des méthodes de la science. À ce second type appartiennent, par exemple, les textes de Pierre Duhem sur la théorie physique⁴, ceux de Bachelard sur le rationalisme⁵, et beaucoup d'autres. À s'intéresser de plus près à ces textes, on s'aperçoit qu'ils ne forment pourtant pas un ensemble homogène. On s'aperçoit même que l'on peut de nouveau les diviser en deux grandes catégories.

Dans la première catégorie, les progrès des sciences sont expliqués par des motifs internes à ces sciences, c'est-à-dire essentiellement par des motifs conceptuels, intellectuels, théoriques. *La logique de la découverte scientifique* [19] de Karl Popper, livre publié en 1934 en allemand puis, en traduction anglaise en 1959, représente un bon exemple de ce type d'études. Popper cherche à préciser la nature de la connaissance scientifique en l'opposant à la connaissance non scientifique ; il cherche à établir un critère de « démarcation » (selon son expression) entre ces deux formes de connaissances. C'est à travers ce type d'études que le mot « épistémologie » a acquis les traits distinctifs qui sont aujourd'hui les siens. Ces traits peuvent être résumés de la manière suivante : l'épistémologie est l'examen conceptuel des résultats de la science, elle vise à préciser la nature de la connaissance scientifique. Ce genre d'approche débouche sur une histoire des sciences elle-même théorique et conceptuelle. Si, par exemple, on veut faire l'histoire de la découverte de la structure de l'ADN, on cherchera à préciser les diverses conceptions du support matériel de l'hérédité qui ont pu précéder cette découverte. On fera une histoire des sciences centrée sur les concepts et leurs transformations progressives.

Dans la seconde catégorie, les progrès des sciences sont expliqués par des motifs externes à la science, c'est-à-dire essentiellement par des motifs sociaux, politiques, économiques, culturels. Dans ce contexte, l'histoire de la découverte de l'ADN deviendra une histoire sociale et politique : on cherchera à savoir d'où venaient les crédits qui ont permis aux scientifiques de faire leurs travaux, comment était constitué le laboratoire où ils opéraient, sur la base de quels critères se sont faits leurs recrutements et en vue de quels objectifs, etc. Tout ceci formera une explication « externe » des progrès scientifiques, en ce sens qu'elle fera essentiellement intervenir des facteurs non spécifiques à la science. L'explication peut aller jusqu'à s'affranchir entièrement du contenu

4 – On peut citer, en particulier le grand livre de Pierre Duhem sur l'épistémologie de la physique [2].

5 – Entre 1949 et 1955, Bachelard fait paraître une série d'études sur le rationalisme [1] qui manifeste un intérêt renouvelé pour les questions épistémologiques dans les travaux du philosophe.

La première équation de Hamilton $\partial_t q = \partial_p H$ donne avec les formes précédentes de p et q la valeur de

$$\partial_t \rho = a/\sigma b \theta^\alpha \rho^{\beta-\sigma+1}, \quad (17.11)$$

ce qui, par comparaison avec (18.5) fixe les valeurs des coefficients

$$\alpha = 1 \quad a/\sigma b = -\gamma. \quad (17.12)$$

La seconde équation de Hamilton $\partial_t p = -\partial_q H$ donne avec la forme choisie de $V(q)$ et les coefficients précédents

$$\partial_t \theta + a/b \theta^2 + n A b^{n-1} / a \rho^{\beta(n-2)} = 0. \quad (17.13)$$

La comparaison avec (18.6) fixe donc les paramètres A et n :

$$\begin{aligned} a/b &= 1/3 = -\gamma \beta, \\ \beta(n-2) &= 1 \quad \text{et} \quad n = (2-3\gamma), \\ A &= -1/6b^{2-n}. \end{aligned} \quad (17.14)$$

On a ainsi obtenu une forme hamiltonienne [2] des équations F.R.W. de la cosmologie puisque :

$$H = -p^2 - 1/6b^{3\gamma} q^{2-3\gamma} \quad (17.15)$$

avec les variables conjuguées :

$$p = 1/3b\theta \rho^{-1/3\gamma} \quad (17.16)$$

$$q = b\rho^{-1/3\gamma}. \quad (17.17)$$

On obtient en particulier le rapport

$$p/q = 1/3\theta = \partial_t \log R. \quad (17.18)$$

Pour que q ait la dimension d'une longueur et p celle d'un moment, il faut affecter une dimension au paramètre libre b . L'intégration de l'équation (17.5) de conservation de l'énergie donne $\rho(t)$ en fonction du facteur d'échelle $R(t)$:

$$\rho(t) = \text{Const}[R(t)] - 3\gamma = M_\gamma [R(t)] - 3\gamma. \quad (17.19)$$

Dans l'ère quantique ($\gamma = 0$), la densité d'énergie constante ρ_0 est la constante M_0 elle-même, tandis que dans chacune des ères qui ont suivi,

$$M_\gamma = (\rho R^{3\gamma}), \quad (17.20)$$

constante durant la période considérée, alors même que le facteur d'échelle augmente. En portant $\rho(t)$ dans la définition (17.17) de la variable q , il vient

$$q = (bM_\gamma^{-1/3\gamma})R. \quad (17.21)$$

La constante b étant arbitraire, on peut la fixer à la valeur $M_\gamma^{1/3\gamma}$, de sorte que la variable q soit égale au facteur d'échelle, tandis que la relation (17.18) montre ensuite facilement que

$$q = R \quad \text{entraîne} \quad p = \partial_t q = \partial_t R. \quad (17.22)$$

Cette approche hamiltonienne du fluide cosmique, montre en particulier que l'on peut modéliser la force agissant sur ce fluide dans ses différents états- γ . Le potentiel effectif d'interaction $V_\gamma(q)$ s'écrit en effet

$$V_\gamma(R) = -1/6M_\gamma R^{2-3\gamma}. \quad (17.23)$$

Cela conduit à une force newtonienne effective $F_\gamma = (1/3 - 1/2\gamma)M_\gamma R^{1-3\gamma}$, **attractive** : $F_1(R) = -1/6M_1 R^{-2}$ pour un fluide cosmique sans pression ; $F_{4/3}(R) = -1/3M_{4/3} R^{-3}$ pour un fluide constitué de pur rayonnement.

Le vide quantique est modélisé classiquement par une **force répulsive** proportionnelle au facteur d'échelle $F_0(R) = 1/3M_0 R$. Est-ce la traduction de l'existence de la constante cosmologique ? Il faut alors noter que cette force répulsive n'est pas constante, car le facteur d'échelle R dépend du temps cosmologique. Cela est assez étonnant quand on pense à l'hypothèse de la **quintessence**, récemment introduite par les cosmologistes [3], pour expliquer l'accélération de l'expansion, mesurée en 1998 par deux équipes d'astrophysiciens [4].

Réécrivons maintenant le hamiltonien H , avec les variables θ et ρ , en utilisant (17.15), (17.16), (17.17), puis la dernière des équations F.R.W. :

$$H = 1/6b^2 \rho^{-2/3\gamma} [1/3\theta^2 - \rho] = -1/2(bM_\gamma^{-1/3\gamma})^2 k = -k/2. \quad (17.24)$$

La comparaison avec le cas classique, non-relativiste mentionné au début montre que la constante apparaissant au second membre de l'équation précédente, est l'énergie totale du fluide cosmique dans son état- γ , modélisé maintenant par une particule de masse unité, de moment p , dans un potentiel $V_\gamma(q)$. On peut donc noter

$$\underline{H} = E_\gamma. \quad (17.25)$$