

# épistémologiques

*philosophie, sciences, histoire*  
*philosophy, science, history*

Revue internationale  
An international Journal  
Paris / São Paulo

*Cosmologie et philosophie*  
*Cosmology and philosophy*

hommage à Jacques Merleau-Ponty

Vol. I (1-2)  
janvier-juin 2000

ISSN 1517-7823

UNIVERSITÉ  
PARIS 7 - DENIS DIDEROT



discurso editorial

Departamento de Filosofia  
FFLCH - USP

# épistémologiques

*philosophie, sciences, histoire*  
*philosophy, science, history*

Vol. I (1-2)  
janvier-juin 2000  
ISSN 1517-7823

Trimestriel  
Published quarterly

## **Redacteurs en chef / Editors**

Pablo Mariconda (São Paulo), Michel Paty (Paris), Jean-Jacques Szczeciniarz (Bordeaux/Paris)

## **Secrétariat de rédaction / Editorial secretary**

Guilherme Rodrigues Neto (São Paulo)

## **Comité de rédaction / Editorial board**

Christiane Chauviré (Paris), Karine Chemla (Paris), Catherine Chevalley (Tours), Claude Comte (Paris), Olivier Darrigol (Paris), Jacques Dubucs (Paris), Dominique Flament (Paris), Olival Freire (Salvador - Bahia), Steven French (Leeds), Jean Gayon (Paris), Michel Ghins (Louvain La Neuve), Carlos Lopes Beltran (Mexico), Alain Michel (Aix-en-Provence), Régis Morelon (Paris), André Pessel (Paris), Caetano Plastino (São Paulo), Roshdi Rashed (Paris), Terry Shinn (Paris), Luiz Henrique L. dos Santos (São Paulo), Jean Seidengart (Reims), Elia Zahar (London), Hervé Zwirn (Paris)

## **Comité scientifique international /**

### **International advisory board**

Daniel Andler (Paris), Luis Carlos Arboleda (Cali), Françoise Balibar (Paris), Enrico Bellone (Padova), Alain Berthoz (Paris), Michel Blay (Paris), Jacques Bouveresse (Paris), Harvey Brown (Oxford), Christophe Charles (Paris), Gilles Chatelet (Paris), Marcos Cueto (Lima), Claude Debru (Paris), Craig Dilworth (Uppsala), Manuel Doncel (Barcelona), Anne Fagot-Largeault (Paris), Michel Fichant (Paris), Bruno Giorgini (Bologna), Christian Houzel (Paris), Gerhard Heinzmann (Nancy), Claude Imbert (Paris), Dominique Lambert (Namur), Catherine Larrère (Bordeaux), Baudouin Jurdant (Paris), Hugh Lacey (Pennsylvania), Marc Lachize-Rey (Paris), Dominique Lecourt (Paris), Ildeu Moreira (Rio de Janeiro), Gregorz Malinowski (Łódź), Anne-Marie Moulin (Paris), Carlos Ulises Moulines (München), Jean Petitot (Paris), Joëlle Proust (Paris), Georges Saliba (Harvard), Claire Salomon-Bayet (Paris), Hourya Sinaceur (Paris), Richard Zuber (Paris), Francis Wolf (Paris)

## **Comité de parrainage / Patronage committee**

Victor Albis (Bogotá), Pierre Bourdieu (Paris), Mario Bunge (Montreal), Pierre Cartier (Paris), Marcello Cini (Roma), Robert S. Cohen (Boston), Newton da Costa (São Paulo), Maria Luisa Dalla Chiara (Firenze), Serguei Demidov (Moscou), Bernard d'Espagnat (Paris), Gilles Gaston Granger (Aix-en-Provence), Mirko Grmek (Paris), Jean-Pierre Kahane (Paris), José Leite Lopes (Rio de Janeiro), Jacques Merleau-Ponty (Paris), Jean-Claude Pecker (Paris), Osvaldo Porchat (São Paulo), Evry Schatzman (Paris), John Stachel (Boston), Jules Vuillemin (Paris)

*Copyright © by Discurso Editorial, 2000*

Tirage: 1200 exemplaires  
Imprimé au Brésil / Printed in Brazil

**épistémologiques**



# épistémologiques

*philosophie, sciences, histoire*  
*philosophy, science, history*

Revue internationale  
An international Journal  
Paris / São Paulo

Vol. I (1-2)  
janvier-juin 2000

ISSN 1517-7823

UNIVERSITÉ  
PARIS 7 - DENIS DIDEROT



discurso editorial

Departamento de Filosofia  
FFLCH - USP

# épistémologiques

*philosophie, sciences, histoire*  
*philosophy, science, history*

Vol. I (1-2) janvier-juin 2000

ISSN 1517-7823

## **Redacteurs en chef / Editors**

Pablo Mariconda (São Paulo), Michel Paty (Paris), Jean-Jacques Szczeciniarz (Bordeaux/Paris)

## **Secrétariat de rédaction / Editorial secretary**

Guilherme Rodrigues Neto (São Paulo)

## **Comité de rédaction / Editorial board**

Christiane Chauviré (Paris), Karine Chemla (Paris), Catherine Chevalley (Tours), Claude Comte (Paris), Olivier Darrigol (Paris), Jacques Dubucs (Paris), Dominique Flament (Paris), Olival Freire (Salvador - Bahia), Steven French (Leeds), Jean Gayon (Paris), Michel Ghins (Louvain La Neuve), Carlos Lopes Beltran (Mexico), Alain Michel (Aix-en-Provence), Régis Morelon (Paris), André Pessel (Paris), Caetano Plastino (São Paulo), Roshdi Rashed (Paris), Terry Shinn (Paris), Luiz Henrique L. dos Santos (São Paulo), Jean Seidengart (Reims), Elia Zahar (London), Hervé Zwirn (Paris)

## **Comité scientifique international /**

### **International advisory board**

Daniel Andler (Paris), Luis Carlos Arboleda (Cali), Françoise Balibar (Paris), Enrico Bellone (Padova), Alain Berthoz (Paris), Michel Blay (Paris), Jacques Bouveresse (Paris), Harvey Brown (Oxford), Christophe Charles (Paris), Gilles Chatelet (Paris), Marcos Cueto (Lima), Claude Debru (Paris), Craig Dilworth (Uppsala), Manuel Doncel (Barcelona), Anne Fagot-Largeault (Paris), Michel Fichant (Paris), Bruno Giorgini (Bologna), Christian Houzel (Paris), Gerhard Heinzmann (Nancy), Claude Imbert (Paris), Dominique Lambert (Namur), Catherine Larrère (Bordeaux), Baudouin Jurdant (Paris), Hugh Lacey (Pennsylvania), Marc Lachize-Rey (Paris), Dominique Lecourt (Paris), Ildeu Moreira (Rio de Janeiro), Gregorz Malinowski (Łódz), Anne-Marie Moulin (Paris), Carlos Ulises Moulines (München), Jean Petitot (Paris), Joëlle Proust (Paris), Georges Saliba (Harvard), Claire Salomon-Bayet (Paris), Hourya Sinaceur (Paris), Richard Zuber (Paris), Francis Wolf (Paris)

## **Comité de parrainage / Patronage committee**

Victor Albis (Bogotá), Pierre Bourdieu (Paris), Mario Bunge (Montreal), Pierre Cartier (Paris), Marcello Cini (Roma), Robert S. Cohen (Boston), Newton da Costa (São Paulo), Maria Luisa Dalla Chiara (Firenze), Serguei Demidov (Moscou), Bernard d'Espagnat (Paris), Gilles Gaston Granger (Aix-en-Provence), Mirko Grmek (Paris), Jean-Pierre Kahane (Paris), José Leite Lopes (Rio de Janeiro), Jacques Merleau-Ponty (Paris), Jean-Claude Pecker (Paris), Osvaldo Porchat (São Paulo), Evry Schatzman (Paris), John Stachel (Boston), Jules Vuillemin (Paris)

*La revue veut être un lieu de réflexion sur les relations qu'entretiennent les sciences et la philosophie. Leur prise en compte est devenue une exigence particulière de notre temps, qui s'impose comme un fait culturel et un élément de la conjoncture théorique.*

*Toute l'histoire des sciences et de la philosophie témoigne, certes, d'un tel lien étroit. Mais le développement exceptionnel de la pensée scientifique et sa pénétration dans tous les secteurs de la société demandent de formuler et d'analyser les nouvelles questions qui font sens. Si des scientifiques – et parmi les plus grands – se sont parfois déjà lancés dans l'entreprise, il s'en faut que tous aient reçu avec leur formation, ou acquis à travers leur pratique, les éléments d'une véritable culture philosophique et historique indispensables pour un tel projet. Les philosophes, quant à eux, manquent souvent d'une culture scientifique ou, du moins, des concepts qui leur permettraient de contribuer à des analyses pertinentes ou de discerner les virtualités philosophiques des sciences contemporaines.*

*Le manque de recul critique et de véritable dialogue entre ces différents domaines de la pensée entraîne le développement de réductionnismes, soit dans le sens d'une valorisation excessive des seuls résultats positifs d'une discipline des sciences "dures" soit dans celui d'un relativisme extrême (psychologisme, sociologisme), niant la spécificité du fait scientifique.*

*Il importe donc de développer les nouvelles formes philosophiques que réclament les connaissances scientifiques de notre temps; la philosophie renouerait ainsi avec sa grande tradition d'ouverture sur la science, retrouvant les liens anciens sous des figures nouvelles, adaptées, et reprendrait toute la place qui lui revient dans le mouvement de la pensée scientifique.*

*Considéré de cette manière, le rapport de la philosophie et des sciences implique un appel particulier à l'histoire des sciences, qui prémunit chacune d'elles contre une vue purement formaliste ou pragmatique. En retour, la dimension philosophique et la préoccupation pour les contenus conceptuels préserve l'histoire des sciences des tentations historiciste ou positiviste. Une telle approche est d'ailleurs propre à mettre les sciences, dans leur signification essentielle, à la portée de non-spécialistes, redonnant sens aux exigences philosophiques et politiques de la vulgarisation et de la pédagogie.*

*La revue fonde, dans cette perspective, sa réflexion sur les problématiques philosophiques à l'œuvre dans les sciences mêmes. Ces problématiques concernent aussi bien les processus d'invention et de développement des connaissances scientifiques que leur assimilation et leur interprétation. Elles concernent également l'activité scientifique en tant que pratique sociale, les applications de ces connaissances et leurs incidences éthiques et politiques.*

*La revue publie des analyses philosophiques, logiques, historiques, sociologiques, politiques, sur les sciences, accessibles aux non-spécialistes. Elle accueille également des contributions originales proposées par des scientifiques à partir de leur expérience.*

Les rédacteurs en chef:

Pablo Mariconda (São Paulo),  
Michel Paty (Paris),  
Jean-Jacques Szczeciniarz (Paris).

*This journal aims to promote the discussion of the relationship that exists between science and philosophy. This focus has become a specific demand of our times imposed as a cultural fact and as an element of the present theoretical circumstances.*

*The entire history of science and of philosophy has witnessed, without doubt, the close relationship that exists between them. But the exceptional development of scientific thought and its dissemination across all sectors of society demand that one formulate and analyse the new issues that make sense. If scientists – and great ones among them – have already plunged into this quest, not all have received along with their education, or through their practice, the elements of a true philosophical and historical culture indispensable for such a project. Philosophers not rarely feel the lack of a scientific culture, or at least, of concepts which would allow them to contribute towards more pertinent analyses, which would be instrumental in telling the philosophical virtualities from the contemporary sciences.*

*The want of a critical distance and of a true dialogue between these different domains of thought entails the development of reductionisms, be it in the sense of an excessive overvaluing of only the positive results of the hard science subjects, or in the sense of an extreme relativism (psychologism, sociologism), denying the specificity of the scientific fact.*

*What is needed is the development of new philosophical forms through the association with the scientific knowledge of our times. This will allow philosophy to recover its great tradition of openness to science, rendering the ancient links under new adapted roles, and regaining the space that it deserves within the development of scientific thought.*

*To consider the relationship between philosophy and science in such a way implies a specific claim on the history of science that protects each of them against a purely formalist or pragmatic point of view. On the other hand, the philosophical dimension and the concern for the conceptual contents preserve the history of science from historicist or positivist temptations. Such an approach allows science, within its essential meaning, to be understood by the layman, giving a new sense to the philosophical and political needs of popularization and of pedagogy.*

*This journal bases its reflexion on the philosophical issues that are operating in the sciences. These issues have to do with the processes of invention and of the development of scientific knowledge, as well as with their assimilation and their interpretation. They are also concerned with scientific activity as a social practice, the applications of these knowledges and their ethical and political reach.*

*The journal publishes philosophical, logical, historical, sociological and political analyses on science, accessible to the layman. It also accepts original contributions from scientists based on their experiences.*

The editors:

Pablo Mariconda (São Paulo),  
Michel Paty (Paris),  
Jean-Jacques Szczeciniarz (Paris).



# épistémologiques

*philosophie, sciences, histoire*  
*philosophy, science, history*

Vol. I, numéro 1-2, janvier-juin 2000

## *Cosmologie et philosophie* *Cosmology and philosophy*

hommage à Jacques Merleau-Ponty

sous la direction de / edited by  
J. Seidengart & J.-J. Szczeciniarz

A partir du Colloque réalisé avec le concours du Centre de Philosophie et d'histoire des sciences de l'Université de Paris 10-Nanterre, l'Equipe REHSEIS (UMR, CNRS et Université Paris 7 Denis Diderot), et le Centre d'Histoire des sciences cosmologiques de l'Université de Reims, Champagne-Ardennes, Paris-Nanterre, 6-8 octobre 1997



# TABLE DES MATIÈRES / CONTENTS :

JEAN SEIDENGART ET JEAN-JACQUES SZCZECINIARZ

*Introduction*

11

JACQUES MERLEAU-PONTY

*Questions philosophiques de la cosmologie*

13

MAURICE CAVEING

*Le chaos du fond du ciel selon Anaxagore*

25

BERNARD BESNIER

*La droite et la gauche de l'univers selon Aristote*

47

ROSHDI RASHED

*Astronomie et mathématiques anciennes et classiques*

89

RÉGIS MORELON

*Ibn Al Hyatam (XI<sup>e</sup> siècle) et ses arguments cosmologiques*

101

PIERRE SOUFFRIN

*La théorie des marées de Galilée n'est pas une théorie fausse*

113

CHRISTIANE VILAIN

*Espaces et mondes au XVII<sup>e</sup> siècle*

141

MICHEL BLAY

*Infini, géométrie et mouvement au XVII<sup>e</sup> siècle*

163

JEAN SEIDENGART

*Kant et la cosmogonie du Beweisgrund 1763:  
une nouvelle version de la Théorie du ciel?*

177

JEAN EISTENSTAEDT

*La cosmologie: un espace pour penser la relativité générale*

197

MICHEL PATY

*Cosmologie et matière quantique: convergences conceptuelles*

219

JEAN-JACQUES SZCZECINIARZ

*Sur la signification conceptuelle de l'intervention  
des nombres complexes dans la cosmologie*

251

MARC LACHIÈZE-REY

*Cosmologies de la fin du XX<sup>e</sup> siècle*

269

JEAN SALLANTIN ET GERMANA MENEZES DA NÓBREGA

*Les temps, la pensée et le calcul:  
une stratification des calculs pour fonder une cosmologie*

281

CATHERINE CHEVALLEY

*Objectivité et intersubjectivité chez Bohr*

307

JEAN-CLAUDE PONT

*Science et philosophie sont-elles des sœurs ennemies?*

325

# Introduction

## à la publication du colloque organisé en hommage à Jacques Merleau-Ponty

J. Seidengart, J.-J. Szczeciniarz

LES TEXTES RASSEMBLÉS ici font suite aux journées organisées à l'Université de Paris-10 Nanterre du 6 au 8 octobre 1997, en hommage à la personnalité et aux travaux de Jacques Merleau-Ponty<sup>1</sup>. Philosophe et historien des sciences, Jacques Merleau-Ponty a consacré la plus grande partie de son oeuvre et en premier lieu sa thèse de doctorat à l'analyse des théories cosmologiques du XX<sup>e</sup> siècle, dont il a étudié les développements et les significations, notamment dans ses rapports aux transformations de la philosophie contemporaine. La confrontation entre les théories cosmologiques est aussi une confrontation de thèses philosophiques.

Une philosophie s'esquisse, qui prend en compte l'idée que l'Univers, mais aussi la géométrie, est en devenir, changeant notre conception de l'histoire. Du point de vue de la philosophie naturelle, Jacques Merleau-Ponty défend l'idée que l'espace-temps est une structure mathématique qui convient, dans certaines conditions très étroitement définies, à la description de certains systèmes physiques considérés à la fois dans leur forme et dans leur évolution. De même admet-il les présomptions très fortes d'une orientation physique fondamentale de la variable temps (la flèche du temps, et il en analyse certaines du point de vue philosophiques). Et il nous enseigne que "l'homme a [pourtant] quelque

---

1 Ce colloque était organisé par le Centre de Philosophie et d'Histoire des Sciences de l'Université de Paris 10 Nanterre, l'Equipe REHSEIS (UMR 7596 ; Centre National de la Recherche scientifique et Université Paris 7-Denis Diderot), et le Centre d'Histoire des Sciences cosmologiques de l'Université de Reims, Champagne-Ardennes. Nous n'avons pas pu inclure les contributions présentées au Colloque par Bernadette Bensaude-Vincent («Atomisme et positivisme au XIX<sup>e</sup> siècle»), Nathalie Deruelle («Les modèles cosmologiques de l'inflation»), Anne Fagot-Largeault («La philosophie de la nature aujourd'hui») et Bernard Ruyer («Apparence et réalité : l'exemple de l'astronomie») dont les textes écrits ne nous sont pas parvenus.

proportion à l'Univers par la durée des préliminaires à son apparition" La cosmologie donne encore à l'homme des "raisons de se considérer comme un avatar cosmique peu banal, de faire valoir une certaine prétention à l'exceptionnel"

Ces travaux se situent dans une perspective philosophique qui allie à la fois la tradition de la philosophie de savants-philosophes (Russell, Whitehead, Duhem, Poincaré, etc.), les grands fondateurs de la cosmologie contemporaine (Einstein, De Sitter, Friedmann, Lemaître, Milne, etc.) et Eddington, auquel Jacques Merleau-Ponty consacra sa thèse complémentaire, sans oublier la philosophie des sciences des écoles française et allemande.

C'est du reste cette féconde conciliation sur l'essentiel qui a permis à ses élèves de travailler sans préjugés dans son sillage. Outre de nombreux articles il a publié les ouvrages suivants: *Cosmologie du XXe siècle*, Gallimard, Paris, 1965; *Philosophie et théorie physique chez Eddington*, Les Belles Lettres, Paris, 1965; *Les trois étapes de la cosmologie* (avec Bruno Morando), Laffont, Paris, 1971; *Leçons sur la genèse des théories physiques: Galilée, Ampère, Einstein*, Vrin, Paris, 1974; *La science de l'Univers à l'âge du positivisme*, Paris, Vrin, 1983; *Einstein*, Flammarion, Paris, 1993. Ses enseignements et son oeuvre nous invitent à poursuivre ses investigations sur la connaissance de l'Univers et sur les principes, concepts, lois hypothèses, théories et méthodes élaborés par elle, afin de dégager les présupposés et les options philosophiques qui lui servent de fondement.

L'ensemble des articles de ce numéro spécial d'*Epistémologiques* est regroupé suivant deux orientations principales. L'une est plutôt historique (histoire de l'astronomie, de la physique et des mathématiques), l'autre est plutôt thématique, scientifique et épistémologique (cosmologie contemporaine, physique quantique). Au delà de cette distinction, le lecteur pourra découvrir les diverses trajectoires philosophiques possibles que dessinent ces contributions.

# Questions philosophiques de la cosmologie\*

Jacques Merleau-Ponty\*\*

**Résumé:** La cosmologie contemporaine entretient avec la philosophie des rapports d'autant plus particuliers que sa naissance fut, en fait, une re-naissance. La physique classique avait abandonné le projet d'une cosmologie. La cosmologie contemporaine, née de la théorie de la relativité et de l'observation astronomique, tout en préservant les principes méthodologiques de la physique classique, repose sur deux caractères essentiels, l'*homogénéité* de l'univers et son *évolution*. On examine la signification épistémologique et les implications philosophiques de ces deux thèses à contrainte objective. La première indique, du point de vue géométrique, une structure cosmique d'espace-temps et, du point de vue épistémologique, l'existence d'une classe d'observateurs équivalents. Une analyse réflexive conduit, au contraire de la cosmologie ancienne, à replacer l'homme dans sa finitude même comme mesure du monde, et à énoncer l'accord possible de la raison et du réel. La seconde thèse, au contraire, celle d'une histoire de l'Univers, nous place devant l'irrationalité d'un point aveugle, l'origine singulière, donc non existante, non-événement d'où résulterait causalement la totalité.

**Abstract:** Contemporary cosmology maintains with philosophy relations whose peculiarity is connected with the fact that its birth was, actually, a rebirth. Classical physics had let aside the cosmological project. Contemporary cosmology, issued from the general theory of relativity and astronomical observations, while keeping the methodological principles of classical physics, stands on two essential features, the *homogeneity* of the universe and its *evolution*. We examine the epistemological significance and the philosophical implications of these two thesis which correspond to objective constraints. The first thesis indicates, from a geometrical point of view, a cosmic space-time structure and, from the epistemological point of view, the existence of a class of equivalent observers. A reflexive analysis leads, contrarily to the ancient cosmology, to replace man in its very finiteness as the measure of the world, and to enunciate the possibility of an agreement between reason and reality. The second thesis, on the contrary, about a history of the Universe, makes us face the irrationality of a blind centre, the origin, singular and therefore non-existent, a no-event from which the totality would causally result.

IL Y A MAINTENANT à peu près deux siècles que, par suite de l'essor de la science dite désormais classique, la question du rapport de la Science et de la Philosophie fut posée en ses termes modernes; on ne peut pas dire pourtant qu'elle ait encore trouvé une réponse généralement admise; pour une rai-

---

\* Ce texte est repris de l'essentiel d'une communication faite à l'occasion de la remise à l'auteur de la médaille Marc-Auguste Pictet, décernée par la Société de Physique et d'Histoire Naturelle de Genève, le 20 novembre 1998.

\*\* Professeur émérite, Université de Paris 10 – Nanterre.

son simple: toutes les réponses proposées sont encouragées par certains exemples et démenties par d'autres. Et mon propos est de prendre un exemple si original qu'il paraît démentir toute réponse possible.

Je veux parler de la Cosmologie, entendue dans le sens strict que le mot a pris, ou repris, dans le vocabulaire contemporain, à savoir la science – je dis bien la science – dont le but est de décrire et de faire comprendre, en accord avec les lois de la Physique, les propriétés caractéristiques de l'Univers naturel, considéré comme un tout.

Cette science existe, en ce sens qu'elle dispose d'un corpus très riche d'observations précises qui définissent concrètement son objet, corpus par ailleurs bien structuré par un système théorique construit sur les lois de la Physique et principalement sur la théorie relativiste de la gravitation. Elle interprète en effet les données des observations pertinentes à l'aide d'un schéma théorique qui peut être soumis à des épreuves expérimentales capables de le corroborer ou de le contredire: il est "falsifiable" au sens de Popper; il permet en outre de faire le partage entre le quasi certain, le probable, le douteux, l'indifférent; il permet de poser clairement des questions significatives qui ne sont pas susceptibles de solution dans l'état des connaissances mais qui pourraient le devenir grâce à des données plus précises ou plus étendues; par exemple, l'infinité de l'espace; il permet enfin de préciser telle ou telle hypothèse dans le cas où certains paramètres seraient mieux connus; il correspond donc assez bien à ce que Thomas Kuhn appelle un "paradigme", ce qui fait de la Cosmologie, dans ce vocabulaire, une science "normale" Mais elle ne l'est pas tout-à-fait du point de vue philosophique, en raison de quelques caractères très originaux.

Et d'abord du point de vue historique; c'est, en effet, une science très ancienne et très moderne, car c'est une science renaissante. Sous sa forme actuelle, elle est très récente; on peut dater sa naissance il y a quatre vingts ans, à peu près, par une convergence tout-à fait inattendue entre les recherches théoriques d'Einstein et de ses disciples et émules d'une côté, et, de l'autre, les observations de Hubble et divers astronomes; naissance suivie d'une rapide croissance qui se poursuit aujourd'hui, marquée par des avatars, des surprises et des controverses assez semblables à ce qu'on a pu constater dans toutes les autres sciences dans ce siècle.

Mais l'originalité de la Cosmologie tient d'abord à ce que, comme je l'ai dit, cette naissance était une renaissance. A la fin du siècle dernier, en effet, la Cosmologie apparaissait comme une science très ancienne et très vénérable (associée à la plus ancienne des véritables sciences), mais abandonnée par les modernes. Son passé était associé à la mémoire des deux grands fondateurs du rationalisme, Platon et Aristote qui, l'un et l'autre, lui avait consacré un chef



d'oeuvre fameux. Mais tout le monde savait que l'effondrement de la Cosmologie antique sous les coups de Copernic avait prélué à, et dans une certaine mesure conditionné, la fondation de la science, alors "moderne" et maintenant «classique» Or, et nul ne songeait alors à s'en réjouir ni même à le constater franchement, les tentatives pour reconstituer une cosmologie conforme à la nouvelle physique n'avaient pas abouti.

Si bien qu'à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, la Cosmologie était pratiquement abandonnée; à l'époque, on s'en consolait implicitement et verbalement en appelant "Système du monde" la théorie du système solaire alors qu' on savait depuis longtemps que le Soleil et ses planètes forment un ensemble minuscule, même à l'échelle de la seule partie de l'Univers quelque peu explorée à l'époque, la Galaxie.

Or il est intéressant d'examiner les raisons de cet abandon inavoué de la Cosmologie; il y a bien sûr des raisons circonstanciées de cet abandon, dont la principale est, paradoxalement, l'invention de la lunette puis du télescope à réflexion; elle avait en effet produit un contraste étonnant entre la richesse du spectacle cosmique qu'elle ouvrait et la faiblesse des sondages possibles de sa profondeur; il fallut attendre plus d'un siècle après la mort de Newton pour que fût mesurée pour la première fois la parallaxe d'une étoile – exploit accompli par Bessel en 1833 – mesure indispensable pour rapporter à l'échelle du système solaire au moins l'ordre de grandeur des distances stellaires.

Mais la réserve de la science classique à l'égard de la Cosmologie avait aussi d'autres raisons; elle tenait en effet, pour une part, à la forme nouvelle de la pensée rationnelle, à la conception même des buts et des méthodes de la science de la nature. Notons d'abord que l'idée d'un espace naturel infini, qui commençait à fleurir à l'époque de la Renaissance, s'était imposée comme une conséquence de l'introduction des méthodes géométriques en Physique, qui elle-même supposait l'attribution à l'espace naturel des propriétés euclidiennes. Mais cela ne faisait que rendre plus manifestes les difficultés logiques associées à la notion d'un tout réel infini; même pour les mathématiciens, l'idée d'un infini actuel restait inaccessible et l'infinitisme métaphysique de Descartes et de Spinoza, associant matière et étendue, ne fut jamais vraiment, et pour cause, accepté par les physiciens.

Il se trouvait aussi, et c'est sans doute là l'essentiel, que la méthode même qui s'instaurait en Physique et les hypothèses naturellement associées à cette méthode (l'hypothèse atomique notamment) allaient à contre-sens de la Cosmologie; c'était, en effet, essentiellement une méthode d'analyse: comprendre la nature, si on l'applique, c'est d'abord comprendre les lois des phénomènes élémentaires, affectant des objets élémentaires localisés dans l'espace et le

temps; ce sont ces lois qu'il faut d'abord formuler, et vérifier par l'expérience (qui permet dans une certaine mesure, d'isoler l'élémentaire par rapport au complexe). C'est à l'aide de ces lois que s'établira la prévision et la description des processus et objets complexes et étendus dans l'espace et le temps.

L'invention du calcul différentiel et intégral à la fin du XVII<sup>e</sup> siècle a fourni l'instrument mathématique de cette méthode; les lois universelles s'expriment par des équations de type différentiel, mettant en relation les variables caractéristiques d'un événement local et instantané; pour en faire un instrument de connaissance applicable à un système complexe, à un processus, il faut et il suffit, comme chacun sait, d'en connaître les conditions initiales, et aux limites, et d'intégrer les équations selon ces conditions. Or cela renversait complètement l'ordre cosmologique aristotélicien, dans lequel c'est à partir de la structure du Tout, posée d'abord, que se comprend le phénomène élémentaire (la chute des corps fournissant le parfait exemple de ce renversement de points de vue). Mais comment, dans le nouveau schéma heuristique, remonter de l'élément au Tout? Comment introduire le Cosmos comme objet de connaissance scientifique? Comment, dans ce cas, déterminer – et même parler de – conditions initiales ou aux limites, alors que ces notions impliquent évidemment que les choses qu'il s'agit de décrire, de comprendre ou de prédire doivent d'abord être situées dans un environnement spatio-temporel donné, ou posé par hypothèse? Quelle est, d'ailleurs, la position logique de l'Univers par rapport aux lois de la nature? Il est plus universel qu'elles puisqu'elles ne sont rien hors de lui; mais il est plus particulier que tous les particuliers puisqu'il n'y en a pas d'autre exemple. Par rapport aux normes de la science qui s'est formée à l'âge classique, et qui est d'ailleurs encore, dans une large mesure, celle de notre temps, l'Univers est une sorte de monstre épistémologique.

Il était donc difficile aux fondateurs et aux constructeurs de la science classique, et pas seulement à cause des limites trop étroites de l'observation, de former, avec ses méthodes, le projet d'une cosmologie. Il y eut cependant de tels projets; mais, il se trouve que pratiquement les seuls qui annoncent de quelque façon la renaissance du XX<sup>e</sup> siècle sont celui d'un philosophe, Kant, dans la période "pré-critique" de sa pensée, et celui d'un poète, Edgar Poe. Les "vrais" savants, à l'exception toutefois de Lambert, s'en abstinrent, n'allant pas plus loin, (c'était déjà un saut énorme), qu'une théorie de la Galaxie, comme William Herschel et son fils John. Inversement, certains astronomes, particulièrement perspicaces, mirent en évidence les contradictions menaçant toute cosmologie fondée sur la physique newtonienne.

D'un autre côté, compte tenu des ambitions du rationalisme scientifique conquérant, l'abandon pur et simple de la Cosmologie, l'idée que la science

devait abandonner l'Univers au scepticisme ou à-la Théologie était difficile à admettre; en fait, la solution plus ou moins implicitement admise fut, non pas de renoncer à toute idée cosmologique, mais de s'en tenir à un concept formel de l'Univers, en posant l'existence (mais quelle sorte d'existence?... ) d'un espace infini partout métriquement structuré par les axiomes d'Euclide, et l'universelle validité des lois de la Physique. Cosmologie formelle renonçant à toute hypothèse sur le contenu réel de l'espace cosmique au delà de ce que pouvait révéler l'observation des étoiles et de leurs mouvements; en fait, si prudente que fût apparemment cette position, elle dépassait largement, on le sait maintenant, ce qu'autorisait le savoir "positif " du XIX<sup>e</sup> siècle.

L'intérêt de ces remarques historiques, du point de vue de la cosmologie contemporaine, tient à ce que ses fondateurs et ceux qui la pratiquent maintenant sont loin d'avoir totalement renoncé aux principes méthodologiques de la science classique et à ses hypothèses fondamentales: les lois de la Physique, notamment, s'expriment encore pour une bonne part par des équations locales, de type différentiel. Comment alors, et jusqu'à quel point, leur entreprise échappe-t-elle à l'interdit positiviste qui l'excluait de la science classique? C'est justement là que que réside l'intérêt philosophique de cette grande et surprenante oeuvre rationnelle.

Pour en discuter dans les étroites limites du présent exposé, je me bornerai à évoquer les deux caractères essentiels de l'Univers, tel que le présente la cosmologie contemporaine (caractères de l'Univers ou thèses de la Cosmologie, suivant qu'on préfère le point de vue de l'objet, ou celui de la connaissance); il suffit en effet de les énoncer pour voir qu'ils prêtent à commentaire et discussion philosophiques.

1. L'Univers est assimilable à une distribution homogène de matière et d'énergie, la part de la matière étant largement prépondérante, si l'on applique le coefficient d'équivalence de la fameuse équation d'Einstein. Cette distribution est-elle finie ou infinie? La question se pose de façon assez précise pour être susceptible d'une réponse à partir de nouvelles observations, mais n'en a pas dans l'état présent du savoir. Cette homogénéité se superpose à des irrégularités observables à toute échelle accessible, mais qui finissent par s'intégrer dans une configuration régulière, au-delà d'une limite d'ailleurs mal définie. D'autre part, des observations très convaincantes indiquent qu'à une certaine date très lointaine dans le passé, la distribution cosmique de matière-énergie fut plus homogène que ce que l'on peut voir aujourd'hui et cette remarque par sa simple expression nous conduit au second des caractères fondamentaux attribués à l'Univers:

2. L'Univers subit une évolution globale se superposant à la variété, indéfinie, à toute échelle, des évolutions locales, réversibles ou non. On peut la caractériser comme une dilatation isotrope de l'espace une fois éliminés les effets des mouvements locaux, tous les objets s'éloignant les uns des autres, suivant une loi très simple en première et très bonne approximation: la vitesse relative d'éloignement de deux objets quelconques est proportionnelle à leur distance, le coefficient, étant le même pour toutes les paires.

Que ces deux thèses de la cosmologie contemporaine soient d'un grand intérêt pour une réflexion sur les rapports de la Philosophie et de la Science, cela apparaît déjà dans les circonstances de son développement. Je n'ai pas le loisir de m'y étendre mais je soulignerai certains aspects remarquables de ce développement.

Ces deux caractères ont été découverts (ou ces deux thèses formulées) *grosso modo* simultanément, entre 1917 et 1927, indépendamment l'un de l'autre, et, pour l'un et l'autre, indépendamment par la voie de l'observation et par celle de la théorie. Cette double indépendance suggère fortement l'idée d'une contrainte objective, indépendante des circonstances et des préjugés ou préférences des chercheurs, apparemment imposée par la nature des choses ou par la forme de la visée cosmologique de la pensée rationnelle, ou les deux.

Et cela d'autant plus que l'association des deux thèses dans une définition précise de la structure cosmique a été remarquablement corroborée, il y a maintenant plus de trente ans, par un résultat d'observation, à l'époque totalement imprévu et qui, depuis, a été confirmé dans les meilleures conditions possibles (un satellite artificiel de la Terre a même été créé à cet effet); je veux parler de la découverte et de l'étude du rayonnement du fond du ciel sur ondes centimétriques et millimétriques; je rappelle brièvement de quoi il s'agit.

En dehors des innombrables rayonnements provenant des objets célestes pratiquement sur toutes les fréquences du spectre électromagnétique, il en est un qui diffère de tous les autres par des caractères exceptionnels; il est présent dans toutes les aires vides de la sphère céleste; il est presque parfaitement isotrope (le léger écart à l'isotropie s'interprète bien dans le cadre des deux thèses fondamentales); son analyse en chaque point montre une relation fréquence – intensité très bien accordée à la loi de Planck pour le rayonnement du corps noir ce qui indique, compte tenu du décalage spectral dû à l'expansion de l'espace, une température de la matière cosmique à une date définie de l'histoire de l'Univers; la seule interprétation du phénomène jugée acceptable par les cosmologues à l'heure actuelle est qu'il s'agit d'un rayonnement "fossile" émis au moment de la déconnexion, par l'effet de l'expansion, de la matière, désormais condensée en noyaux atomiques, et du rayonnement électromagnétique qui, ces-

sant d'interagir avec elle, s'est propagé librement. Cet ensemble d'observations, tout-à-fait exceptionnel, corrobore à la fois les deux caractères de l'Univers (homogénéité et évolution) et leur étroite association.

Deux raisons principales motivent un examen réflexif et critique de ces thèses; d'abord, parce qu'elles se rapportent au Tout, échappent-t-elles, et comment, aux difficultés que rencontrait ce concept confronté aux hypothèses épistémologiques de la science classique? est-ce en lui donnant un sens nouveau, et si oui, lequel? En outre, à l'examen, elles se présentent très différemment l'une de l'autre, l'une étant aisément recevable, l'autre à peine acceptable, dans le contexte d'un rationalisme cohérent.

A) Examinons la première, l'hypothèse de l'homogénéité; elle ne suscite aucune défiance particulière sinon que c'est une extrapolation, en toute rigueur invérifiable: ce n'est ni un axiome ni un fait; mais c'est aussi le cas des lois les plus générales de la nature; d'autre part, elle se propose assez-naturellement à la pensée rationnelle, astreinte aux lois de la Logique, toujours à la recherche d'équivalences et de symétries, et qui redoute la diversité. Il était donc naturel qu'une science dont l'objet est si difficile à saisir s'encourage elle-même en accueillant volontiers les signes indiquant une propriété si favorable à son dessein; mais c'est encore là une interprétation trop superficielle du rôle capital que joue l'hypothèse d'homogénéité dans la cosmologie moderne et il y a plus à dire sur sa signification rationnelle.

Car il faut remarquer que ce type d'hypothèse s'oppose à une autre demande tout aussi familière et naturelle à la pensée rationnelle, portée à supposer que la diversité organisée est caractéristique du tout dans son opposition à ses parties ou éléments – organisation éventuellement hiérarchique ou esthétique; cette idée a d'ailleurs une origine très intuitive dans la contemplation naïve du ciel et dans la perception la plus familière des êtres vivants. Et c'est bien cet ordre organique, hiérarchique, esthétique, et non l'uniformité, qui caractérisait l'Univers selon les fondateurs du rationalisme, ordre implicite dans le sens du mot grec *cosmos*, dont il n'y a d'ailleurs pas d'équivalent parfait à cet égard dans les langues modernes.

C'est pourquoi il faut, à mon avis, attribuer au principe d'homogénéité, dans la mesure où il est posé à partir d'observations très favorables mais non décisives absolument, une signification plus essentielle, et d'ailleurs plus étroitement associée à la structure physico-mathématique qui ordonne la théorie et la recherche dans la cosmologie contemporaine, c'est-à-dire la théorie relativiste de la gravitation. Or, dans cette théorie, les propriétés essentielles du monde naturel et de chacune de ses parties, s'expriment à la fois, et inséparablement:

- 1) en termes de propriétés réelles, expérimentalement constatables, du contenu matériel et énergétique de l'espace-temps.
- 2) comme caractéristiques métriques de cet espace-temps (l'association des points 1 et 2 est analytiquement exprimée par les équations d'Einstein).
- 3) en relation avec les caractères logiques, épistémologiques (je dirais volontiers "transcendants", au sens de Kant) de la description que donne des objets et phénomènes naturels l'observateur, situé dans l'espace-temps, et qui prend connaissance de ces phénomènes à l'aide d'instruments de mesure et de visée en un lieu et à un moment défini (cette relation est notamment attestée par l'usage des systèmes de coordonnées, inévitable pour exprimer les résultats d'observation ou d'expérience, et le principe de covariance des équations, conditions de cet usage).

Or si l'on applique cette conception relativiste de la connaissance à celle de l'Univers, l'hypothèse de l'homogénéité, traduite en termes géométriques, implique une structure cosmique d'espace-temps spécifiée parmi l'ensemble des structures possibles pour l'application locale des équations; si on traduit cette structure géométrique en termes épistémologiques, elle signifie l'existence possible d'une classe d'observateurs (associés à un ensemble de lignes d'espace-temps) tels que le temps propre de chacun d'eux est identique à celui de tout autre et que la description que chacun donne du Tout est identique à celle de tout autre, pourvu que sa visée ne soit pas totalement obscurcie par la variété indéfinie des irrégularités "locales"

Or il me semble qu'à partir de là, on peut dire que l'analyse réflexive de la cosmologie contemporaine conduit plus loin que la considération des avantages, pour une science dont l'objet est si exceptionnel, de l'hypothèse d'homogénéité; et qu'en fait cette hypothèse et le schéma cosmologique qu'elle contribue à définir peuvent être dits humanistes et qu'ils s'opposent radicalement, sous ce rapport, à celui de la cosmologie précopernicienne dans laquelle la structure supposée organique et hiérarchique du Cosmos s'interprétait naturellement en termes biologiques, esthétiques (l'Univers pour Aristote était un "être vivant éternel et parfait"), démiurgiques (chez Platon), théologiques, (chez Aristote). Or, dans un tel schéma, la pensée vraie de l'Univers ne peut s'effectuer pleinement qu'au niveau du Tout dont les caractères sont essentiellement distincts de ceux des parties et n'appartient donc absolument qu'au démiurge platonicien, au dieu penseur et moteur aristotélicien ou à l'âme du monde des Stoïciens; à charge pour le philosophe de s'"égaler au dieu" par la pensée.

On peut dire qu'au contraire la cosmologie contemporaine justifie contre Socrate – qui la cite pour la condamner – la maxime de Protagoras que

“l’homme est la mesure de toutes choses”; pour Socrate, sinon, peut-être, pour Protagoras lui-même, c’était une maxime sceptique voulant dire que les choses sont comme elles apparaissent aux hommes réels, qui n’en ont que des vues illusives et incohérentes, les ombres de la caverne; mais si “homme” c’est la communauté des observateurs virtuels de la cosmologie relativiste, la maxime prend un autre sens; ces observateurs ne sont que des êtres virtuels (l’homme réel n’appartient pas à la classe fondamentale de la cosmologie relativiste; c’est ce que montre la légère anisotropie du rayonnement cosmologique, qui lui permet cependant, de se situer exactement au voisinage de cette classe, et d’en définir la perspective fondamentale); mais, bien que virtuels, ils possèdent tous les caractères qui définissent, de façon minimale mais conformément à l’expérience, la nature de l’être humain connaissant, individu situé dans l’espace-temps, qui connaît les choses par le contact expérimental, les définit par la mesure, qui se connaît lui-même et les autres comme êtres connaissants, et peut s’accorder avec les autres sur leur connaissance commune de l’Univers.

Dans cette interprétation, la maxime de Protagoras s’accorde avec la cosmologie contemporaine et cela incite à l’optimisme quant à l’accord possible de la raison et du réel pour la communauté des *homines sapientes*.

B) Mais il n’en est vraiment pas de même pour le second des caractères fondamentaux attribués à l’Univers par la cosmologie contemporaine: son histoire à partir d’une origine temporelle singulière.

On peut certes remarquer, – c’est le thème des réflexions proposées par d’éminents cosmologues sur le “principe anthropique”, – que l’histoire de l’Univers et celle de l’espèce humaine sont significativement associées l’une à l’autre, car l’espèce humaine n’a pu se former que sous des conditions très strictes réalisées dans l’état antérieur de la matière-énergie cosmique. Ces remarques mériteraient un examen et une discussion que je n’ai pas le temps d’entreprendre; mais elles ne modifient pas ce qui est à mon avis essentiel, à savoir l’irrationalité profonde que présente l’idée d’une origine du Tout, conçue en tout cas comme singulière, au sens de la cosmologie relativiste.

Remarquons d’abord que ce n’était pas sans des raisons très fortes que pendant des millénaires, tant d’astronomes et de physiciens étaient en fait restés fidèles, sur le plan au moins du savoir naturel et malgré la très dure pression de la théologie chrétienne et de ses institutions, à la notion aristotélicienne d’un Univers éternel, dans lequel ne se produisent à l’échelle cosmique que des mouvements et phénomènes périodiques. Or, sur ce point, la Cosmologie, encouragée d’ailleurs par la Thermodynamique et l’Astrophysique, est maintenant en rupture complète avec la tradition rationaliste. Et elle l’est de

façon d'autant plus frappante qu'elle assigne à l'origine cosmique une date à distance finie dans le passé et lui confère un caractère singulier au sens mathématique du mot. J'y reviens car c'est essentiel: l'instant origine est une limite mathématiquement bien définie, mais à laquelle on ne peut assigner aucune existence au sens physique du mot, aucune des propriétés physiques ou géométriques caractérisant un être naturel ne pouvant être assignée, à cet instant, à la matière cosmique, ni longueur, ni volume, ni énergie, ni densité, ni température... C'est un non-être et un non-sens physiques, sans être un non-être ou un non-sens mathématique; car, l'existence mathématique ne se définit pas comme l'existence physique; une entité mathématique peut très bien exister dans un contexte qui exclut justement son existence dans un autre. Que l'on songe aux définitions classiques du nombre irrationnel ou de la fonction transcendante. Mais ces variations contextuelles n'ont pas cours dans la nature où s'impose l'alternative parménidienne. On dira que la physique mathématique connaît beaucoup de singularités dont la physique expérimentale s'accommode fort bien; mais, dans la Physique, ces singularités concernent des phénomènes ou objets situés dans un environnement régulier auquel les méthodes d'approximation ou le traitement statistique permettent de les ajuster en quelque sorte. Mais s'agissant de l'Univers, l'absurdité est inévitable; car c'est alors la totalité du réel qui est supposée dépendre causalement de ce non-événement, qui est, dans sa figuration mathématique, approché, mais non atteint, par régression vers le passé, alors qu'il devient, dans la Cosmologie par un renversement absurde, le point de départ et la source du Tout; absurde, car dans la nature, la direction du temps ne dépend pas, comme dans son expression mathématique, d'un choix arbitraire. Les mots dont on se sert couramment pour parler de cette origine singulière sont d'ailleurs totalement dénués de sens, à la différence des mots habituels de la vulgarisation qui approchent plus ou moins exactement le sens des mots techniques, ou des expressions formelles du discours scientifique. On parle habituellement d'un *big-bang* (mot d'ailleurs choisi ironiquement à l'origine); mais, sauf erreur, un bang est un grand bruit qui survient dans le silence, à cause de l'explosion d'un objet jusque là stable; mais il n'y a jamais eu de silence ni d'explosif stable à l'origine de l'Univers vu par la Cosmologie; on parle aussi de création *ex nihilo*; mais une "création" suppose un temps pendant lequel la chose créée n'existait pas; puisqu'il s'agit du tout, cela suppose l'existence d'un temps vide, mais il n'y a jamais eu de temps vide dans l'Univers relativiste.

Devant une telle situation, une attitude philosophique, même très modeste, conduit à s'interroger sur la signification de cette étrange situation et de son issue possible; la prudence s'impose évidemment; la cosmologie d'Aristote, astronomiquement perfectionnée par Ptolémée et les Arabes, a vécu vingt siè-



cles avant de s'effondrer, en laissant il est vrai, outre beaucoup de regrets, l'indispensable "sphère céleste" des astronomes; il n'est nullement déraisonnable de penser qu'un jour les progrès de la recherche dissiperont comme un mirage l'énigme du *big-bang*; pour ma part je n'en suis pas certain ou plutôt je doute que, si cette élimination se produit, elle signifie une rationalisation complète de la pensée cosmologique; car bien des signes indiquent que la fameuse formule de Hegel: "Tout ce qui est réel est rationnel, tout ce qui est rationnel est réel" est simplement fausse, s'agissant au moins de la rationalité du réel; et qu'il y a apparemment dans le réel un élément irréductible d'irrationalité; on m'objectera facilement que pour s'assurer de cela, il faudrait savoir quel est cet élément ou comment le trouver: est-ce justement ce *big-bang*? Mais je viens de dire qu'il peut fort bien disparaître. Il n'est raisonnablement pas possible de parler de ce prétendu élément sans rien pouvoir en dire de certain; si, justement; car le situer et le nommer ce serait déjà le rationaliser partiellement, l'appivoiser, c'est-à-dire le manquer; en un sens c'est bien ce qui se passe avec la Cosmologie et il y en a d'autres exemples dans les sciences contemporaines. Telle prétendue énigme disparaît, une autre se montre ailleurs; j'ai déjà cité le cas de l'infinité de l'Univers (la "croix du philosophe" disait Kant); c'est maintenant seulement un problème; inversement, la localisation spatio-temporelle d'un élément matériel était, pour la physique classique un concept non seulement clair, mais fondamental; c'est devenu, dans la physique quantique, une énigme, comme l'ont montré des expériences bien connues.

L'intérêt de la Cosmologie, du point de vue philosophique, est donc, entre autres, de montrer de façon particulièrement frappante le contraste entre la puissance de la connaissance rationnelle, armée des moyens de la science, et fondée sur le *consensus* des penseurs qui les mettent en oeuvre, et ce point aveugle qui ressurgit où on ne l'attend pas dans les contextes scientifiques les mieux constitués.



# Le Chaos du fond du ciel selon Anaxagore

Maurice Caveing\*

**Résumé:** Ce texte est un examen des *Fragments* du livre *Sur la Nature* d'Anaxagore de Clazomènes. On a écarté de l'enquête, par principe, l'étude des *Témoignages* et la discussion des très nombreux commentaires, anciens et modernes, qui constituent - et surchargent - la tradition. Le retour aux textes mêmes - retraduits par nous - se fait dans la perspective d'une recherche du meilleur ordre que l'on peut assigner, avec vraisemblance, à ces *Fragments*. L'ordre proposé paraît cohérent, faisant se succéder quatre thèmes : le mélange primordial, la nature des choses séparées du mélange, l'état de composition des choses naturelles, le tourbillon cosmogonique. Chaque fragment prend ainsi sa place logique répondant à l'analyse de son contenu et l'ensemble situe la pensée anaxagoréenne dans l'histoire des cosmologies grecques des origines à Platon, après l'intervention de Parménide.

**Abstract:** This article examines the *Fragments* of the book *On nature* of Anaxagore of Clazomen. We let aside of the inquiry, as a matter of principle, the study of the *Testimonies* and the discussion of the many commentaries, ancient and modern, that constitute - and overload, the tradition. We come back to the texts - and translate them by our own - with the perspective of looking for the best likely order to be attributed to these *Fragments*. The propose order seems to be consistent, showing up a sequence of four themes : the primeval mixture, the nature of things separated from the mixture, the compound note of natural things, the cosmogonic whirl. Each fragment thus gets its logical place according to its content's analysis and the whole situates Anagore's thought inside the history of greek cosmologies from the origins to Parmenide and then to Plato.

QUE DANS CERTAINES conjonctures théoriques une cosmologie ne puisse s'édifier sans se coordonner d'étroite façon à une théorie de la matière, voilà ce qu'atteste fort bien l'histoire de la doctrine de la Nature dans la pensée grecque, du moins si l'on choisit une période pertinente. Les premiers "physiologues" présocratiques, il est vrai, n'ont pu élaborer suffisamment ni leur conception de la matière ni leurs idées cosmologiques pour que le problème d'une coordination entre elles puisse même se poser. Mais tout autre se trouve être la conjoncture après l'intervention de Parménide. La consistance logique de son ontologie moniste oblige ses successeurs, sauf à s'évader dans la sophistique, à rendre compte à la fois des phénomènes naturels temporalisés et de l'organisation cosmique. C'est pourquoi le moment spéculatif qui se déploie entre l'injonction de l'Eléate et les systèmes du monde de l'Académie et du Lycée est

---

\* Directeur de recherche, Centre National de la Recherche Scientifique.

particulièrement privilégié, encore que méconnu sous ce rapport. Il est marqué par trois noms aux fortunes diverses, puisque seuls Démocrite et l'atomisme auront une postérité, tandis qu'Empédocle se verra emprunter sa classification des éléments et qu'Anaxagore connaîtra une destinée ambiguë: victime d'une page sévère du *Phédon*, travesti peut-être par Aristote, mais attentivement discuté par Simplicius, après l'avoir été par Théophraste et Porphyre. Sous son nom la Section A du recueil des *Vorsokratiker* de Diels et Kranz ne répertorie pas moins de cent-dix-sept témoignages. Il est sans doute celui dont la pensée a suscité dès l'Antiquité le plus d'interprétations divergentes et de controverses.

Toutefois, ainsi que Kirk et Raven l'ont fait remarquer, il est judicieux dans son cas d'observer les deux principes suivants: d'une part le seul guide entièrement fiable pour pénétrer sa pensée, ce sont ses propres termes, d'autre part il est beaucoup plus vraisemblable qu'il ait voulu dire ce qu'il a dit que ce que, quoiqu'il eût pu aisément l'avoir dit, il n'a pas dit en fait.<sup>1</sup> Ce sont donc, plutôt que les témoignages, les Fragments de son livre *Sur la Nature* qu'il faut directement interroger. Une vingtaine seulement nous ont été conservés, la plupart par Simplicius, dans un ordre commandé par la logique des questions que celui-ci se pose, qui n'est pas nécessairement celui du livre d'Anaxagore, ni par tout celui de la numérotation de Diels et Kranz.<sup>2</sup> Comme pour d'autres auteurs, l'historien, devant ces Fragments, est confronté à un problème de mise en ordre et de reconstitution.

Sans entrer dans les discussions érudites, nous proposons ici un ordre qui nous paraît devoir être le suivant. Est posé d'abord un état initial universel de la matière. Puis se développe une doctrine de la nature des êtres spécifiés et individualisés, ainsi que du mode de leur composition matérielle. Enfin est décrit, à partir de ces bases théoriques, le processus effectif de constitution d'un cosmos analogue au nôtre et son organisation actuelle.

## I. L'état initial

Selon Simplicius le livre d'Anaxagore commençait par ce qui est aujourd'hui notre Fragment 1.

---

1 Cf. G.S.KIRK & J.E.RAVEN: *The Presocratic Philosophers*, Cambridge University Press, 1957; repr. Cambridge, 1969, p. 367.

2 Par laquelle néanmoins nous les désignerons.

Fragment 1: [“Ensemble étaient toutes choses, infinies aussi bien en multitude qu’en petitesse: car le “petit” lui aussi était infini. Et, toutes étant ensemble, aucune n’était discernable, du fait de la petitesse; car toutes étaient maintenues en leur état par l’air et l’éther, qui sont tous les deux ensemble infinis; car ils sont ce qu’il y a de plus grand dans l’ensemble total, aussi bien en multitude qu’en grandeur.”]

La célèbre formule par laquelle s’ouvre le texte est la réplique d’Anaxagore au “Il est, maintenant, tout ensemble, un” de Parménide (Frg. 8, v. 5-6), mais face au monisme éléatique, l’“un” d’Anaxagore est une multiplicité infinie. Multiplicité de quoi? Le texte reste pour le moment dans la plus grande généralité: “toutes choses” Il faut pourtant éliminer toute acception “chosiste” du mot. De même, des termes comme “éléments”, “substances”, ne conviennent pas, ainsi qu’il sera clair par la suite. Le mot grec cependant n’est pas indifférent: *chrēmata*, employé au sens vague: les choses, se distingue de *pragmata*, qui désignerait “les choses” au sens de “les affaires” On ne peut entièrement faire abstraction du sens propre: les biens, les richesses, les choses qui constituent les ressources auxquelles on peut avoir recours, ici: les ressources dont dispose la Nature pour faire un monde.

Leur multiplicité est infinie, mais leur petitesse aussi. Par cette double référence au dénombrement et au volume, Anaxagore atteste que sa notion de l’infini, par rapport à l’emploi archaïque du terme, est déjà différenciée. Cette infinité en petitesse des choses primordiales – dont il est hors de propos, parce qu’anachronique, de demander s’il s’agit d’un infini potentiel à la manière d’Aristote – entraîne leur indiscernabilité dans leur “être-ensemble” La multiplicité initiale est donc une manière de continuum indistinct quant à l’apparence, mais non homogène quant à ses ingrédients.

Deux d’entre eux toutefois, même s’ils sont initialement indiscernables, jouent un rôle particulier. L’important à eux deux sur chacun des autres tant comme multiplicité que par l’immensité de l’étendue qu’ils occupent, ils maintiennent tous les autres dans leur état d’extrême division et donc de confusion. Ce sont l’Air et l’Ether. Ces deux principes sont bien connus de la physique ionienne. “Air” désigne l’atmosphère humide, lourde, chargée d’eau, formant brouillards et nuages. “Ether” désigne l’atmosphère sèche, légère, lumineuse, chargée de feu. L’un fait le ciel gris et l’autre bleu. Anaxagore les réunit tous deux pour les faire dominer sur “toutes choses” à l’état initial du mélange primordial. Celui-ci se présente donc, apparemment, comme une masse infinie et

impalpable dans laquelle dominant l'air et l'éther, et baignent, à l'état de division illimitée, et indiscernables, toutes les autres "choses"

Fragment 3: [... car, pour le "petit", il n'existe certes pas de minimum de petitesse, mais il y a sans cesse à nouveau quelque chose de "moindre"(il n'est pas possible en effet pour l'étant de ne plus être) – mais, pour le "grand", il y a aussi sans cesse à nouveau quelque chose de "plus grand" Et le [grand] est égal au petit en multitude, et chaque [segment] est par rapport à soi aussi bien grand que petit."]

Voilà dans ce Fragment quelques-unes des précisions souhaitables. L'infinité de petitesse est justifiée. L'absence d'un minimum découle de la relativité de la petitesse. Mais la descente infinie n'aboutit pas au néant, car l'être ne saurait se résoudre en non-être. La raison ainsi donnée est parménidienne. Rien de ce qui est ne saurait cesser d'être. Il y a donc un au-delà de la perception.<sup>3</sup> L'infinité de grandeur paraît demander moins d'explication, en sorte que le réel anaxagoréen se déploie entre les deux infinis.

C'est alors que survient l'étonnant théorème: "le grand est égal au petit en multitude." L'accusatif de point de vue *pléthos*, "en multitude", est essentiel. Certes le "grand" n'est nullement égal au "petit" du point de vue de la grandeur, de la taille: ce serait une absurdité. Mais du point de vue de la multiplicité, il en va autrement. Il faut concevoir la multiplicité des constituants et redonner au mot grec *isos* (égal) son sens attesté d'"équivalent" Comment donc deux multiplicités, prises l'une dans le "grand", l'autre dans le "petit", seraient-elles équivalentes? Ce ne peut être qu'en raison de leur infinité. Ainsi Anaxagore professe-t-il qu'un tout infini est équivalent, quant à la multitude de ses constituants, à l'une de ses parties propres. Une structure granulaire de la matière qui impliquerait un minimum dans la petitesse ne saurait autoriser une telle conclusion, puisque tout volume serait un multiple entier du volume d'un granule. La matière anaxagoréenne est bien un continuum. Une partie quelconque, si infime soit-elle, contient une multiplicité infinie de constituants, en équivalence avec toute autre partie, si grande soit-elle. Tout segment découpé dans ce continu (nous avons traduit en appuyant le neutre *ékaston* sur un substantif ajouté), envisagé sous le rapport de la multiplicité qui est en lui, est substituable à tout autre plus

<sup>3</sup> Selon le Fragment 21 recopié par Sextus Empiricus, "nous ne sommes pas capables de distinguer la vérité à cause de la faiblesse de nos sens"

grand ou plus petit; il est alors grand aussi bien que petit par rapport à soi. Reste à savoir toutefois comment concevoir les constituants de ces multiplicités.

La seconde partie du Fragment 4 peut être examinée ici comme fournissant un début de réponse. La première partie appartient à un thème qui sera abordé ci-après. On y apprend que les êtres de la Nature, comme les astres, les vivants ou les hommes doivent être considérés comme résultant d'un processus qui commence par une "séparation" effectuée à partir du mélange primordial. Le texte continue comme suit.

Fragment 4, 2è. partie: ["Avant que se soit faite la séparation de ces êtres, lorsque toutes [choses] étaient ensemble, pas même une seule couleur n'était discernable: car ce qui l'empêchait, c'était le mélange de toutes choses, de l'humide, du sec, du chaud, du froid, du lumineux, du sombre, et de la terre s'y trouvant en abondance, et de semences infinies en multitude en rien semblables les unes aux autres. Car pour le reste non plus rien ne se ressemble d'une chose à l'autre. S'il en est bien ainsi, il faut penser que dans la totalité se trouvent contenues toutes choses."]

Ce texte reprend certaines idées ou expressions du Fragment 1, notamment l'indiscernabilité comme effet du mélange dans le cas des couleurs. C'est l'occasion d'une énumération de ces "choses" qui sont "toutes ensemble" dans le mélange, énumération qui n'est sans doute qu'un échantillonnage. C'est ainsi qu'y figurent les Opposés, entités qualitatives groupées par couples que la physique ionienne regarde comme des principes. La terre aussi est mentionnée, alors que le Fragment 1 faisait état de l'air et de l'éther. Il s'agit là encore de principes, mis en avant par tel ou tel des "physiologues" antérieurs et destinés à être systématisés dans les quatre "racines" d'Empédocle. La présence sur le même plan de ce que nous aurions tendance à considérer comme deux sortes de principes bien distincts ne doit pas plus nous étonner que celle du calorique dans une physique vieille d'à peine quelques siècles. Y avait-il, pour Anaxagore comme dans d'autres doctrines, des corrélations définies entre ce qu'un esprit aristotélien eût appelé les qualités et les éléments? Nous n'en savons rien. Ce qui est clair, c'est qu'Anaxagore donne droit de cité dans son système aux acquis, bien connus de son lecteur, de la tradition ionienne à laquelle il appartient. Mais sous quelle forme?

C'est ici que les choses deviennent intéressantes. Le dernier terme de l'énumération n'est pas, quant à lui, sur le même plan que les autres: il résume

en généralisant et en fixant la pensée propre d'Anaxagore. Des "semences" (*spermata*) de toutes choses, différentes de nature, et pour chaque nature en infinie multitude, voilà de quoi est fait le mélange. Il y a semence de la terre et de l'air..., du sec et de l'humide..., mais aussi de bien d'autres choses encore. Que les Opposés traditionnels des Ioniens soient représentés en eux-mêmes, mais sous cette forme, dans le mélange, n'empêche pas que les semences des autres choses, toutes différentes les unes des autres, soient qualifiées selon leur nature. La même remarque vaut pour la terre ou l'air: il n'y a pas, parmi les semences, d'espèces privilégiées jouant le rôle d'"éléments" pour tout le reste. Enfin il ne semble pas que la terre soit pensée comme réductible à un mixte de froid et de sec: il n'y a pas synthèse de qualités opposées ou corrélatives dans des "éléments". Il semble exclu que les Opposés seuls – comme on l'a soutenu – soient semences des choses.

Compte tenu de ce que nous savons déjà sur la texture du mélange comme continuum partout indéfiniment divisible, les "semences" qui ne sont constituées que de leurs différences qualitatives, des unes par rapport aux autres, ne peuvent, semble-t-il, être conçues que comme des micro-régions, aussi petites que l'on veut, de ce continuum, mais néanmoins différenciées d'espèce, parce qu'affectées de gradients qualitatifs qui déterminent leur spécification.

Nous savons maintenant ce que sont toutes ces "choses" qui sont "ensemble" dans la totalité du mélange primordial en son état initial, ces *chrēmata* qui sont les ressources de la Nature. Ce sont des "semences" de tout ce que la Nature, dans son état actuel, comporte comme "choses" (en un second sens) différenciées, dans son inépuisable richesse de déterminations qualitatives. Mais ces choses naturelles, dont nous pouvons alors constater directement l'existence, ont été séparées (*apokrinesthai*) du mélange, et c'est notre second point.

## II. La vraie nature des êtres séparés

Fragment 17: ["Les Hellènes ne conçoivent pas correctement la génération et la disparition: aucune chose en effet ne s'engendre ni ne disparaît, mais à partir des choses préexistantes, elle se présente comme un mélange, puis elle se dissocie. Ainsi donc, ils parleraient correctement en appelant la génération "mélange" et la disparition "dissociation".]

Ce texte comporte un double usage du mot *chrēma*, "chose", au singulier et au pluriel. Au singulier il s'agit clairement de choses naturelles, données



dans l'expérience, que d'autres Fragments désignent comme "choses séparées". Au pluriel il s'agit des choses dont il est question au Fragment 1, c'est-à-dire des semences invisibles formant le mélange primordial, qui constituent les ressources préexistantes de la Nature.

Nous devons aussi distinguer deux sortes de "mélange": le mélange primordial qui nous est désormais connu, et le mélange constitutif de chaque chose naturelle, dont il nous reste à apprendre de quoi et comment il est composé. Un point toutefois apparaît déjà clairement: c'est qu'une chose donnée ne provient pas d'une seule semence. Quant à la disparition, ce n'est que la dissociation (*diakrinesthai*) des composants du mélange en quoi la chose consiste.

Ainsi les "semences" sont-elles indestructibles et nul être ne peut provenir du non-être ni y retourner, conformément à l'injonction parméniennne. Le processus "mélange/dissociation" peut s'inverser en "dissociation/mélange" et, l'un succédant à l'autre, rendre compte des transformations observables dans la Nature. Le changement n'est en un sens qu'apparence et ne fait pas obstacle à la pérennité des semences, mais il n'en est pas moins réel: c'est une apparence fondée, puisque les composants indestructibles sont caractérisés par des déterminations et des qualités nullement illusoire.

Fragment 5: ["Ces dissociations s'étant ainsi produites, il faut savoir que le total [des choses] n'est de ce fait ni inférieur ni supérieur (car, qu'il y ait plus que le total, c'est impraticable), mais le total est toujours égal."]

Le verbe correspondant à "dissociation" est encore ici *diakrinesthai*. Il est probable qu'il s'agit des dissociations qui affectent le mélange primordial lors de la formation des choses séparées. Le "total" n'est pas exactement le "tout" parméniennne: celui-là est un singulier; ici nous avons un pluriel correspondant à la totalité des "choses" primitivement données, les "semences" originaires. Il ne saurait être question que leur totalité infinie s'accroisse. Mais l'on pourrait se demander si le processus de dissociation s'accompagne de perte de matière. Le présent texte nous avertit qu'il n'en est rien. Il y a toujours autant d'être, et le tout anaxagoréen, pour être divisible, est tout aussi égal à lui-même que le tout parméniennne. Le principe éléatique est sauf.

Le thème qui se présente ensuite est celui de la nature du mélange constitutif des "choses séparées", c'est-à-dire de sa composition. La doctrine des "composés" se trouve être disséminée entre de nombreux Fragments.

### III. Les composés

Fragment 6: [“Alors, du moment que les parts du grand et du petit sont égales en multitude, il peut bien se faire que, de cette façon, en toute chose il y ait toutes choses; il n’est pas possible non plus qu’elles existent isolément, mais toutes ont une part de n’importe laquelle. Du moment qu’il n’est pas possible qu’il y ait un minimum, elles ne peuvent être isolées ni subsister en soi, mais juste comme elles étaient au commencement, ainsi [sont-elles] encore maintenant, toutes ensemble. Elles sont présentes nombreuses et égales en multitude dans toutes les choses séparées, qu’on prenne celles-ci plus grandes ou plus petites.”]

Dans ce texte nous rencontrons pour la première fois le terme *moira*, que nous traduisons de la façon la plus simple par le mot “part”. Il est plus archaïque que *meros*: “partie” pour désigner la fraction  $1/n$ , c’est-à-dire “la n. part”. Ce type de fraction est suffisant pour identifier les parts successives et de plus en plus petites obtenues par division illimitée sur un continuum. Il y a autant de telles fractions inférieures à  $1/3$  qu’inférieures à  $1/30$ , à savoir une infinité, et pourtant, sur un segment donné de continuum, le trentième est plus petit que le tiers. Ainsi les parts du segment  $1/3$  et celles du segment  $1/30$  sont égales en multitude, c’est-à-dire quant à la multiplicité infinie qu’elles constituent. Ce sens fractionnaire de *moira* nous semble devoir guider l’interprétation et il est tout-à-fait en harmonie avec l’arithmétique qui se pratiquait au temps d’Anaxagore. Il s’agit donc bien de cette équivalence en multitude du grand et du petit que nous avons analysée dans le Fragment 3 et qui ne peut s’entendre que d’un continuum. Faire dire au Fragment 6 que l’on peut diviser des choses inégales en un même nombre de portions, c’est le banaliser de façon stérilisante.

De cette équivalence des infinis, Anaxagore tire aussitôt la conclusion qu’il est possible qu’en tout segment du continuum se trouve représentée toute la variété séminale qui caractérise le mélange primordial. Or les “choses séparées” (et le verbe employé dans ce cas est *apokrinesthai*) ne sont rien d’autre que de tels segments qui se sont détachés du mélange. D’où l’assertion qu’il y a chance qu’en toute chose (au singulier) il y ait toutes choses (au pluriel), c’est-à-dire toutes les ressources de la Nature sous forme de “semences”. Bien entendu, s’il en est ainsi, il reste à expliquer ce qui distingue entre elles les “choses séparées” dont la Nature nous offre le spectacle. Mais n’anticipons pas!

*A contrario*, le texte argumente la thèse que ces semences ne peuvent exister isolément (*chôris*) ou être isolées (*chôristhênai*). Si en effet l'une quelconque de ces semence subsistait isolément en soi, cela signifierait qu'elle ne peut être divisée en deux ou plusieurs autres, c'est-à-dire qu'aurait été atteint un minimum de petitesse. Or cela est exclu, comme nous l'avons vu aux Fragments 1 et 3. Par conséquent une semence ne peut exister qu'en association avec d'autres dans le continuum qu'elles forment par leur "être-ensemble", ou alors immergée dans un de ses segments quel qu'il soit. Nulle part d'ailleurs dans les textes dont nous disposons le mot n'intervient autrement qu'au pluriel (*spermata*).

La seconde phrase du texte: "il n'est pas possible non plus qu'elles existent isolément, mais toutes ont une part de n'importe laquelle" est suspecte. D'une part elle forme doublon avec la phrase suivante qui est tout-à-fait claire et que nous venons d'expliquer; d'autre part elle est grammaticalement inconsistante, car l'impossibilité de l'existence isolée doit être dite de toutes ces choses que sont les *chrêmata* du mélange originaire, c'est-à-dire les semences, tandis que les choses dont on dit que "toutes ont une part de n'importe laquelle" sont les "choses séparées" qu'on trouve dans la Nature. Pareille inadvertance trahit la glose marginale qui se serait glissée dans le texte.

La dernière phrase confirme que les choses séparées, quelle que soit leur taille, contiennent toutes et chacune la multitude infinie des choses présentes "toutes ensemble" dans le mélange primordial, c'est-à-dire une représentation de toutes les sortes de semences.

Fragment 7: ["... de sorte qu'on ne peut connaître la multitude des choses séparées ni par raisonnement, ni par expérience."]

A propos des choses séparées (*apokrinesthai*), ce Fragment note que leur multiplicité dans la Nature n'est déterminable ni par raisonnement ni par expérience. Il semble qu'il s'agisse des individus, non de leurs genres, distinction qui d'ailleurs n'apparaît pas dans les Fragments dont nous disposons. Mais l'infinité de la réserve séminale naturelle, le mélange originaire indestructible, garantit la reproduction de la Nature par une succession numériquement inassignable d'êtres séparés.

Fragment 4, Iè. partie: ["S'il en est bien ainsi, il faut penser que dans tous les composés il y a multiplicité et diversité, c'est-à-dire des semences de toutes choses, ayant des aspects, des couleurs et des qualités sensibles variés...[ suit un passage concer-

nant la formation des hommes et des vivants en général, du Soleil, de la Lune, et des autres astres, la production des fruits de la Terre.] Voilà ce que j'ai professé au sujet du processus de séparation, à savoir qu'il n'y aurait pas eu séparation seulement chez nous, mais aussi ailleurs." [suit la 2<sup>e</sup>. partie du Fragment 4, *q.v-supra.*]

Les "composés" sont désignés par le participe passé de *synkrinesthai*; "séparation" est *apokrisis*, correspondant à *apokrinesthai*, déjà rencontré dans la 2<sup>e</sup>. partie du Fragment, ainsi qu'aux Fragments 6 et 7. Nous avons donc ici le texte qui établit la corrélation entre la séparation et la composition: les choses séparées du mélange initial sont des choses composées, c'est-à-dire formées à partir des semences qui sont dans le mélange. Le second point à souligner, c'est que ce texte met particulièrement en relief le caractère qualitatif des déterminations séminales: les semences sont extrêmement variées dans leur aspect, leur couleur et leurs autres qualités sensibles; "qualité" est exprimé par le terme *hédonè* qui évoque les plaisirs des sens. Rien de ce qui fait la richesse de la Nature n'est donc perdu dans la conception d'Anaxagore. Il faut bien garder à l'esprit toutefois qu'avant la séparation, ces qualités sont imperceptibles et les semences indiscernables en raison de leur petitesse et de leur mélange.

D'autre part l'emploi de deux verbes distincts: *apokrinesthai* et *diakrinesthai*, apparu aux Fragments 17 et 5, ne permet pas de confondre la séparation et la dissociation. Le Fragment 17 avertit que la dissociation est le processus inverse d'un mélange, c'est-à-dire de ce que le présent texte permet de nommer: "composition" On peut donc supposer que le processus de séparation, par lequel un fragment du mélange initial s'en distingue, est précédé d'un processus par lequel certaines semences de ce mélange en sont dissociées, et accompagné du processus de leur (re)composition dans la chose naturelle en voie de séparation.

La dernière phrase du présent texte ouvre un débat parmi les érudits sur la question de savoir si Anaxagore professait la pluralité des mondes à partir du mélange primordial.

Fragment 12, dernière phrase: ["Aucune autre chose n'est jamais semblable à aucune [autre], mais ce dont il y a le plus en elle, c'est cela – le plus discernable en elle – qu'elle est et a été, chacune en son individualité."]

Nous isolons cette phrase afin de compléter dès maintenant la conception des choses composées et séparées, sans cela inintelligible. Il s'agit ici en effet de toutes les choses de la Nature, à l'exception de l'Esprit, ou Intelligence, dont nous verrons l'intervention ci-après.

Le texte lève la difficulté de concevoir comment se distinguent les unes des autres des choses toutes formées pourtant d'une infinie multitude de semences. La solution est dans la proportion majoritaire de certaines semences sur toutes les autres, présentes, mais très faiblement représentées. Il y a dans chaque chose de la Nature certaines qualités (ou faut-il dire "sortes"?) de semences dominantes et d'autres récessives. Ce qu'une chose est par essence (car tel est le sens de la redondance gnomique: "est et a été") c'est simplement "ce dont il y a le plus en elle"

Or c'est aussi ce qui, en elle, est "le plus discernable" L'indiscernabilité des semences dans le mélange originaire était l'effet de leur dispersion et de leur petitesse. Dans une "chose séparée" de la Nature, des semences semblables, voire identiques, sont regroupées massivement: elles sont alors dominantes et leurs propriétés qualitatives deviennent perceptibles. De même, des points colorés dispersés demeurent invisibles, tandis que, regroupés de façon adéquate, ils forment des plages colorées qui composent une image parfaitement visible, et pourtant formée uniquement de points. Les caractères dominants confèrent à la chose son individualité, en sorte qu'aucune n'est jamais semblable à aucune autre; de légères variations dans la dominance permettent donc de prendre en compte les particularités individuelles. Quant aux caractères "récessifs" en quelque sorte, ils correspondent à des semences si dispersées dans la masse que leurs qualités, et donc leur présence, demeurent inaperçues. Néanmoins chaque chose contient, à sa façon propre, l'infinie multiplicité des semences universelles.

On voit donc en quoi consiste le processus dissociation/composition qui s'opère au sein du mélange initial juste avant la séparation d'un être naturel. Il s'agit d'un réarrangement des semences qui vont le composer: elles se dissocient de leurs voisines dans le mélange et se regroupent pour former *un mélange spécifié et séparable, désormais à dominante.*

Fragment 11: ["En toute chose il y a une part de toute chose, excepté de l'Esprit, mais il y en a dans lesquelles l'Esprit aussi est présent."]

Mis à part le cas spécial de la présence de l'intelligence dans certains êtres naturels, le Fragment affirme une loi universelle de la Nature: "en toute chose il y a une part de toute chose", dont nous pouvons saisir maintenant en

quel sens il faut la comprendre. En effet, il y a en toute chose une multiplicité infinie de semences qui n'y sont pas dominantes, mais qui sont dominantes les unes dans telle autre chose, les autres dans telle autre, et ainsi de suite pour toutes les autres choses de la Nature, en sorte que, dans la chose considérée, il y a une part (*moira*) de chacune des autres choses, puisque le continuum se divise en fragments aussi petits que l'on veut, sans qu'il existe jamais de semence isolée. Ainsi toute chose contient une part infime et indiscernable de ce qui fait l'essence de chacune des autres choses, mais qui ne constitue pas son essence à elle. Une autre interprétation du texte, qui ferait de toute chose, par essence, un magma de tout ce qui fait l'essence des autres choses, serait absurde.

D'une chose à une autre – de nature différente, faut-il ajouter – il n'y a donc aucune similitude dans la répartition interne des semences constitutives: chaque chose dans la Nature, en quelque sorte, a sa formule, mais il est bien entendu que les semences qui y sont dominantes le sont partout, c'est-à-dire en toutes ses parties, en vertu du principe de la divisibilité à l'infini et de l'équivalence du "grand" et du "petit". De manière analogue, l'or impur n'en est pas moins de l'or en toutes ses parties.

Fragment 10: ["Car comment du poil proviendrait-il de ce qui n'est pas poil, et de la chair de ce qui n'est pas chair?"]

Il n'est pas absolument certain qu'on ait ici les propres termes d'Anaxagore, car ce Fragment est tiré d'un scolie à Grégoire de Nazianze: sa transmission est donc anonyme; cependant il est présenté comme résumant en une formule imagée le commentaire assez abondant qui l'entoure.

Le texte exprime le principe parménidien que l'être ne peut provenir du non-être, mais il le fait de façon concrète, sur le cas de choses spécifiées qualitativement. Si le poil ou la chair se forment et apparaissent chez les animaux, ce ne peut être qu'à partir de choses dans lesquelles les semences du poil ou de la chair étaient bien présentes, encore que peut-être récessives et inapparentes. Il y a ainsi en toute chose de quoi en former d'autres par dissociation et recombinaison, lesquelles seront des "mélanges à dominante" différente, d'essence différente. Il semble donc qu'au cours des cycles naturels des semences puissent transiter, à l'état récessif, à travers des choses très diverses, avant de parvenir à devenir dominantes dans la chose dont elles déterminent l'essence.<sup>4</sup>

---

<sup>4</sup> Le terme "homéomère" répandu par Aristote à propos de la doctrine de la Nature d'Anaxagore ne se trouve nulle part dans les Fragments; il ne figure pas non plus dans les textes de Platon ni de

Fragment 21a: [“Ce qui apparaît est en effet un aperçu sur l’invisible.”]

Ce texte fait état explicitement des “phénomènes” (*phainomena*), au sens de “ce qui se montre”, “ce qui apparaît”, et indique le rapport entre ce qui apparaît et ce qui est. Ce qui est en dernière instance, c’est-à-dire le domaine des semences, demeure invisible du fait de leur petitesse et de la faiblesse de nos sens. Nous ne percevons à l’état d’association, et non en elles-mêmes, que celles qui sont dominantes dans une chose donnée, et nous ignorons l’existence des autres. En un sens, le phénomène n’est donc pas illusion; il est bien un aperçu de ce qu’est la chose en elle-même, une manifestation de son essence. Mais, s’il nous permet d’identifier la chose, ce n’est pas lui qui nous apprend la raison pour laquelle c’est bien son essence qui se manifeste ainsi, à savoir que celle-ci consiste dans la dominance de certaines semences et que leur association de ce fait est devenue visible. Ainsi la coupure parménidienne entre l’être et l’apparence est résorbée: la distinction du phénomène et de l’essence est maintenue, car l’essence n’est connue que par raisonnement, mais le phénomène est fondé dans l’essence: étant donné ce qu’est la chose, elle ne peut apparaître autrement qu’elle apparaît. La richesse et la variété des apparences est fondée dans la nature des choses.

Ce Fragment clôt la série qui est consacrée aux “composés” séparés du mélange initial. Toutefois, si ont été identifiés et caractérisés les processus qui doivent permettre de passer de celui-ci à ceux-là, en revanche nous ne savons encore rien de la nature et de l’origine du mouvement par lequel s’effectuent ces processus. C’est l’objet du quatrième thème.

---

Xénophon se rapportant à Anaxagore. “Homéomère” se dit d’un tout qui est semblable à ses parties, ainsi en Géométrie la ligne droite, la circonférence de cercle, l’hélice cylindrique; et dans la biologie d’Aristote, les divers tissus animaux ou végétaux: chair, os, sang, nerf, bois. Comme à son habitude Aristote désigne des choses mentionnées par Anaxagore au moyen de son propre vocabulaire. Ces “choses” peuvent être considérées comme “homéomères” pour deux raisons, semble-t-il, la première étant l’équivalence du “grand” et du “petit” en tant qu’infinies multiplicités, donc du tout et de la partie, la seconde étant qu’Anaxagore paraît individualiser les “choses séparées” surtout qualitativement, en sorte que les organismes complexes, par exemple les animaux, sont formés de ces choses par assemblage (*sympegnusthai*: Fragments 4 et 16) et que, dans ce cas, elles s’identifient aux “homéomères” d’Aristote.

#### IV. La révolution cosmogonique

La réponse à la question du mouvement se trouve dans le Fragment 12, célèbre en raison du rôle qu'il donne à l'Esprit, sur lequel principalement a insisté la tradition métaphysique. Mais ce rôle est inséparable de la mise en ordre cosmique, en sorte qu'il faut citer le Fragment tout entier.

Fragment 12: ["Les autres[choses] ont en elles une part de toute chose, tandis que l'Esprit est sans limites et son propre maître: il ne se mélange à aucune chose, mais demeure seul lui-même en lui-même. Car s'il n'était pas en soi, mais se mélangeait avec quelque chose d'autre, il participerait de toutes les choses en se mélangeant à l'une d'elles: car en toute chose se trouve une part de toute chose, comme je l'ai dit précédemment. Mais les choses auxquelles il serait mélangé l'empêcheraient d'être le maître d'aucune d'entre elles, comme il l'est en étant seul en soi. Car il est entre toutes les choses la plus subtile et la plus pure, et il détient véritablement sur toute chose la connaissance complète et la puissance la plus grande; et tout ce qui possède vie, qu'ils soient plus grands ou plus petits, tous l'Esprit en a la maîtrise. Et la rotation dans sa totalité, l'Esprit en a eu la maîtrise, de telle sorte qu'il a donné l'impulsion au [mouvement de] rotation. Et d'abord il fit débiter la rotation à partir d'une petite [région], puis la rotation s'étend, et s'étendra encore davantage. Et les choses à l'état de mélange et celles qui se séparent et celles qui sont dissociées, toutes l'Esprit en a eu la connaissance. Et les choses qui devaient venir à l'être, quelles qu'elles fussent, et qui furent, mais ne sont plus maintenant, et celles qui sont maintenant, quelles qu'elles soient, et celles qui seront, toutes l'Esprit les a soumises à l'ordre cosmique, y compris cette rotation dans laquelle tournent actuellement les astres, le Soleil, la Lune, l'air et l'éther, qui sont séparés.

C'est la rotation elle-même qui produisit la séparation. Alors du rare se sépare le dense, du froid le chaud, du sombre le lumineux, de l'humide le sec. Et d'une multitude de choses il y a une multitude de parts. Mais de façon absolue, rien ne se sépare ni n'est dissocié l'un de l'autre, excepté l'Esprit. L'Esprit est tout entier semblable [à soi-même], qu'il soit plus grand ou plus petit... [suit la dernière phrase, *q.v. supra*"]



Ce Fragment contient la plus ample énumération des attributs de l'Esprit, ce principe qu'Anaxagore est le premier à introduire dans l'histoire des cosmologies grecques, du moins sous cette forme explicite. Une première série d'attributs le différencie de façon décisive de tous ceux qu'avaient pu invoquer les penseurs antérieurs, notamment ioniens. Ce sont ceux qui creusent l'écart entre lui et toutes les autres "choses" de la Nature. Il est pur de tout mélange, ni mélange en lui-même, ni se mélangeant à quoi que ce soit d'autre; il est donc absolument séparé et, partant, il est libre au sens de sans entraves. A la différence des "choses séparées" du mélange primordial, il est sans limites et, sans que ce soit dit, unique. Par conséquent il est en soi et cause de soi. Son éternité est affirmée dans le Fragment 14 (ci-après). Deux attributs fondamentaux le caractérisent en lui-même: il est tout-connaissant et tout-puissant. A ce titre il est premier moteur et principe de l'ordre cosmique. Enfin il est coextensif au mélange primordial et au Cosmos qui s'en distingue progressivement, et dans toute cette étendue il demeure partout semblable à soi, simple et homogène.

Ainsi bien qu'il y ait chez Anaxagore séparation totale entre d'une part le mélange primordial dans son infinie multiplicité indistincte, et de l'autre l'Esprit illimité, unique et simple, il est difficile de dire qu'il y a opposition entre le "matériel" et "l'immatériel". Ces catégories ici ne sont pas encore opératoires. L'Esprit qui est "la plus subtile" des choses (*chrémata*) est en quelque sorte joint à toutes les parties de l'étendue, et c'est sans doute ce qui lui permet de les "connaître" et en même temps de leur communiquer le mouvement qui ne vient que de lui seul. En outre il n'a aucun attribut moral: la Nature d'Anaxagore n'est ni bonne ni mauvaise. Nulle part à son sujet le mot "dieu" n'est prononcé, sans doute pour le distinguer absolument des personnages mythologiques. Enfin, en ce qui concerne les êtres de la Nature chez qui, selon le Fragment 11, l'Esprit aussi est présent, il est probable qu'il y est joint en même façon, en sorte qu'à la fois il leur procure la connaissance et les anime. Le fait qu'il soit semblable, aussi bien petit que grand, garantit, semble-t-il, la possibilité d'une connaissance rationnelle du Cosmos par l'homme, puisque partout c'est la même Intelligence qui connaît.

Le texte confirme les états ou processus dans lesquelles les ressources initiales de la Nature (*chrémata*) peuvent se trouver ou être engagées: à l'état de mélange, en voie de dissociation (*diakrīnesthai*) ou de séparation (*apokrīnesthai*). Tous sont sous le contrôle de la connaissance qu'en a l'Intelligence cosmique. Il en résulte le devenir dans le temps des "choses séparées", dans leur diversité qualitative et leur multiplicité quantitative, toutes soumises cependant dans la simultanéité et dans la durée à l'ordre déterminé par cette Intelligence.

Sur ces questions, la nouveauté du Fragment est d'introduire le tourbillon cosmogonique, c'est-à-dire comme mode de formation du Cosmos. Cette rotation a reçu le branle de l'impulsion initiale que lui a donnée l'Esprit. Même si l'on sait qu'alors "toutes choses étaient ensemble", on ne sait rien sur l'éventuelle durée antérieure de ce mélange indistinct. Avec l'impulsion de l'Esprit, c'est l'Univers lui-même qui commence d'exister et avec lui s'instaure un temps universel à partir d'un instant initial (ce que marque dans le texte l'apparition du passé, du présent et du futur du verbe "être"). Cependant la durée écoulée depuis cet instant reste indéterminée et inconnue.

La rotation dans le mélange primordial débute en un point, puis elle accroît son rayon et élargit de proche en proche son domaine, en sorte que le Cosmos s'accroît et s'accroîtra encore indéfiniment aux dépens du mélange primordial, dans une sorte de bulle sphérique en expansion à l'intérieur de l'infinité du mélange qui se trouve toujours à sa périphérie. Géométriquement cela n'est possible que par la rotation autour d'un diamètre (axe des pôles) d'un cercle (méridien) dont le rayon croît de zéro à l'infini, mais Anaxagore n'en dit rien.<sup>5</sup> La question de savoir si le mouvement se poursuit de lui-même ou est toujours entretenu par l'Esprit n'est ni précisée ni tranchée. C'est cette même rotation qui emporte actuellement dans le mouvement diurne les astres, le Soleil, la Lune, l'air et l'éther, qui sont ici donnés comme séparés (*apokrinesthai*) alors que, dans le Fragment 1, ils étaient encore dans le mélange primordial comme ce qui y était le plus répandu et dominant.

C'est la rotation qui est responsable de la séparation, sans doute parce que le tourbillon arrache de proche en proche des semences d'une certaine sorte qui se regroupent en lui pour former une "chose séparée" un "mélange à dominante" Il semble que la séparation affecte d'abord les Opposés ioniens, qui reparaissent ici: le dense, le froid, le sombre et l'humide, qui caractérisent l'air, par opposition au rare, au chaud, au lumineux, au sec, qui caractérisent l'éther. Il se forme ainsi une multitude de parts (*moira*) d'une multitude de choses, c'est-à-dire des groupements formés de semences agglutinées entre elles et dissociés les uns des autres, promis à d'ultérieures recompositions. Cependant, prise parmi les choses issues du mélange, aucune séparation ni dissociation ne doit être entendue de façon absolue, c'est-à-dire sans doute ni complète ni défini-

---

<sup>5</sup> Deux témoignages laissent entendre cependant qu'il connaissait l'inclinaison de l'axe des pôles, qu'il attribuait, croyant la Terre plate, à un basculement ultérieur de l'Univers: Diogène Laërce, II,9 = DK<sup>6</sup>, 59 A 1, p. 5-6, et Aétius, 11,8,1 = DK, 59 A 67, p. 22 (DK<sup>6</sup> II abrégé: DIELS & KRANZ: *Die Fragmente der Vorsokratiker* (6è. éd., vol. II).

tive. Le continuum qui se différencie en lui-même et dont certaines choses deviennent bien distinctes, n'est pourtant jamais rompu. Seul l'Esprit est absolument à l'écart de tous ces processus. Les Fragments suivants vont d'ailleurs fournir d'autres précisions.

Fragment 13: ["Et quand l'Esprit commença le mouvement, il était séparé de tout ce qui était en mouvement, et ce que l'Esprit mit en mouvement, tout cela, en même quantité, fut soumis à dissociation; et la rotation des choses en mouvement et en voie de dissociation accrut beaucoup plus encore le processus de dissociation."]

Deux précisions en effet ressortent de ce texte: d'une part la rotation n'est pas responsable seulement de la séparation, mais aussi bien de la dissociation (*diakrīnesthai*): par la turbulence qu'il introduit dans le mélange originaire, le mouvement dissocie les semences les unes des autres, sans que cela se solde par une perte de matière; d'autre part il semble que cet effet dissociatif de la rotation s'amplifie encore de façon cumulative, d'une manière purement mécanique, en ce sens que les choses en mouvement et en train de se dissocier entraînent sans cesse davantage d'autres dans leur tourbillon: l'Esprit n'aurait donc même plus à intervenir.

Fragment 9: [... [ces choses] étant ainsi soumises à la rotation et à la séparation, par l'effet de la force et de la vitesse. C'est la vitesse qui produit la force. Mais leur vitesse ne ressemble en rien à la vitesse des choses actuellement existantes parmi les hommes: au total, elle est de multiples fois plus rapide."]

Nous avons la confirmation de l'effet mécanique du mouvement, qui produit la séparation (*apokrīnesthai*) par l'intermédiaire de la force. De plus les vitesses cosmiques ne sont pas de l'ordre de ce qui peut être constaté sur Terre; il faut les concevoir comme des multiples qui font sortir du registre auquel l'homme est habitué.

Fragment 8: ["Les [choses] qui sont dans le Cosmos [qui est] un ne sont pas isolées les unes des autres, ni coupées à la hache, ni le chaud du froid, ni le froid du chaud."]

Ce texte rappelle, dans l'intérêt de l'unité du Cosmos, la non-séparation absolue des choses de la Nature, déjà affirmée au Fragment 12. D'une part il n'y a pas de vide entre les choses; d'autre part les qualités s'interpénètrent, l'exemple donné étant celui de la présence relative des Opposés l'un dans l'autre, le chaud dans le froid, le froid dans le chaud, assurant la gradation insensible de l'échelle des températures, ou plus généralement des "grandeurs intensives."

Les Fragments suivants vont permettre d'identifier quelques étapes de la formation du Cosmos.

Fragment 2: ["... Car air et éther se séparent de la multitude qui les enveloppe, et cette enveloppe est certes une multiplicité infinie."]

L'air et l'éther dominants dans le mélange original selon le Fragment 1 et donnés comme séparés au Fragment 12, apparaissent ici comme les premiers à se séparer (*apokrinesthai*) du mélange, formant à l'intérieur de celui-ci la bulle cosmique promise à s'étendre indéfiniment. Le mélange subsiste alors à la périphérie de la bulle et devient son enveloppe (*périéchon*). Il est d'ailleurs réaffirmé aussitôt que, comme il a été dit au Fragment 1, ce mélange désormais enveloppant est infini quant à la multitude dont il est composé. Comme il est infini, l'expansion de la bulle cosmique, qui s'effectue, ne l'oublions pas, à ses dépens, ne l'affecte en rien quant à son étendue, à son inépuisabilité, ni à sa capacité enveloppante. On peut donc considérer que cette "enveloppe" forme depuis l'origine des temps le "fond du Ciel" d'Anaxagore.

Fragment 15: ["Le dense, l'humide, le froid et le sombre se rassemblèrent là-même où maintenant [se trouve la Terre], tandis que le rare, le chaud, le sec, [le lumineux] émigrèrent aux confins de l'éther."]

Cette seconde étape est constituée par la dissociation (relative) du complexe air/éther et sa recombinaison en éther d'une part, air de l'autre, par la séparation (relative) des Opposés dans chacun des couples, déjà évoquée au Fragment 12, suivie de leur regroupement: la première série qualitative se rassemble là où ils se trouvent maintenant, au voisinage de la Terre, tandis que la seconde émigre aux confins du Cosmos, là où commence l'éther. A cette étape, le Cosmos est donc, à partir de l'enveloppe, étagé en deux couches: l'une d'éther entourant un noyau central d'air, le tout bien sûr sous l'effet de la rotation cosmi-

que. Il apparaît ainsi que dans le tourbillon les parties denses ont un mouvement centripète.

Fragment 16: “[Formée] à partir de ces [choses] en cours de séparation la Terre se solidifie; en effet des nuages se sépare l’eau, de l’eau la terre, et à partir de la terre les roches se solidifient sous l’effet du froid, mais ces dernières s’en échappent mieux que [ne le fait] l’eau.”]

Dans cette troisième étape, le mouvement centripète de différenciation se continue. L’air, qui est dense, humide, froid et sombre, compose les nuages, dont se sépare (*apokrinesthai*) l’eau. Dans une quatrième étape, la terre se sépare de l’eau, toujours en se portant vers le centre. Les roches sont des parties solidifiées de la terre, elle-même formée par compactification de choses antérieurement séparées: des poussières terreuses seraient en suspension dans l’eau comme l’eau est en suspension dans l’air. Mais les roches ont une destinée surprenante, car elles s’échappent de la Terre mieux que l’eau, et s’il faut en croire le témoignage d’Hippolyte, le Soleil, la Lune et tous les astres sont des roches enflammées qui sont emportées circulairement par la révolution de l’éther, le Soleil étant sous les étoiles, la Lune sous le Soleil, et d’autres corps encore en-dessous, invisibles pour nous, entraînés dans la même révolution<sup>6</sup> Il y a là, semble-t-il, un mouvement centrifuge par lequel les roches s’échappent de la Terre, à l’encontre du mouvement centripète qui produisait condensation et concentration. Peut-être est-ce un exemple de la non-séparation radicale de deux processus opposés, à quoi d’ailleurs s’ajoute que des fragments rocheux peuvent se détacher de ces corps et retomber sur Terre, comme dans le cas du fameux aérolithe de l’Ægos Potamos, qu’Anaxagore aurait déclaré provenir du Soleil<sup>7</sup>

Fragment 14: “[L’Esprit, qui toujours existe, subsiste en vérité maintenant comme toujours là où se trouve aussi tout le

6 Hippol., *Refut.*, I, 8, 1sq. = DK<sup>6</sup>II, 59 A 42: 6, p. 16, l. 16-19, et 7, p. 16, l. 21-22. En fait Hippolyte déclare ensuite que la Lune n’a pas de lumière propre, mais la reçoit du Soleil (*ibid.*, 8, p. 16, l. 18), qu’elle est faite de terre et comporte des plaines et des ravins (*ibid.*, 10, p. 16, l. 29) et qu’Anaxagore a expliqué les éclipses (*ibid.*, 9-10): la Lune ne semble donc pas enflammée. Quant à la Voie Lactée, elle est due à la réflexion de la lumière des étoiles non éclairées par le Soleil parce que se trouvant dans l’ombre du disque terrestre (*ibid.*, 10, p. 16, l. 30-1).

7 Diogène Laërce II, 10 = DK<sup>6</sup>II, 59 A 1, p. 6, l. 9-10, et Pline, *N.H.*, II, 149 = DK<sup>6</sup>II, 59 A 11, p. 9, l. 16-20.

reste, aussi bien dans la multitude enveloppante que dans les choses qui sont réunies et dans celles qui sont séparées”.]

“Réunir” ici correspond à *proskrinesthai*, qui rappelle le *synkrinesthai* du Fragment 4 (1<sup>è</sup>. partie), dans lequel figure aussi *apokrinesthai* que l’on retrouve également ici. A cette caractérisation fondamentale des choses diverses qui constituent le Cosmos s’ajoute la multitude enveloppante (*périéchon*), le “fond du Ciel” infini, subsistant du mélange primordial. Cet inventaire de la totalité du réel permet de situer l’omniprésence de l’Intelligence cosmique dans son éternité.

### Conclusion: le chaos du fond du ciel

L’enveloppe du Cosmos est donc le témoin de l’état initial à partir duquel il s’est formé. Elle en conserve toutes les caractéristiques, bien que l’air et l’éther s’en soient différenciés: continuum illimité en étendue, infinité en multitude de composants indiscernables, diversité qualitative elle-même infinie, mélange primordial des semences qui sont les ressources et les richesses de la Nature. C’est à partir de ce réservoir qu’a été peuplée la Terre. Au témoignage de Théophraste, les semences des plantes étaient en suspension dans l’air et furent entraînées sur la Terre par les eaux de pluie<sup>8</sup> et selon Irénée les animaux proviennent, d’après Anaxagore, de semences tombées du Ciel sur la Terre<sup>9</sup>, plus précisément selon Hippolyte dans ses parties humides.<sup>10</sup> Comme la bulle cosmique ne cesse de s’étendre aux dépens de l’enveloppe, on doit supposer que la séparation de l’air et de l’éther est continue. De la sorte il semble qu’on puisse concevoir l’enveloppe comme un continuum dans l’état que nous appellerions gazeux, où parmi les semences mélangées d’air et d’éther sont aussi mêlées, à l’état d’extrême dispersion, les semences de toutes choses, y compris des “qualités”

Or, un tel mélange où le chaud, le froid, le sombre, le lumineux, le sec, l’humide, le dense, le rare sont mêlés et indiscernables, de même que l’air, l’éther, et les semences de tout le reste, est un Chaos. Le terme d’“infini” (*apeiron*) qui lui est appliqué de plusieurs points de vue, même s’il a dans les Fragments un

8 Theophr., *H. Plant.*, III, 1, 4 = DK<sup>6</sup>II, 59 A 117, p. 31, l. 30-1,

9 Irenaeus II, 14, 2 = DK<sup>6</sup>II, 59 A 113, p. 31, l. 18-9 (“semences” sans doute de chair, os, sang, etc.).

10 Hippol., *Refut.*, I, 8, 12 = DK<sup>6</sup>II, 59 A 42, p. 17, l. 6.

sens précis que l'on peut dire de type mathématique, ne peut pas ne pas avoir gardé, à l'époque d'Anaxagore, à titre de connotation, quelque chose de son sens ancien qui évoque l'absence de détermination, de limites et de repères, donc une région que l'on ne saurait franchir.

Par là se retrouve chez Anaxagore, sous une forme qui lui est propre, un prolongement d'une tradition de la pensée cosmogonique grecque, dans laquelle *Chaos* et *apeiron* ont partie liée. Alors que le Chaos hésiodique est ouverture béante (*chainein*), gouffre qui s'entr'ouvre, espace qui engloutit, une cosmogonie poétique du VII<sup>e</sup> siècle (BC) évoque dans le même sens l'image de la haute mer par nuit de tempête et de brouillard, sans lune, où le marin, privé de tout repère terrestre et stellaire, ne peut qu'errer interminablement, prisonnier de l'insondable Nuit au milieu des éléments déchainés: l'océan apparaît ici comme l'étendue abyssale et chaotique, espace infranchissable où s'efface aussitôt toute trace du chemin suivi. Dans cette image, sont présentes bon nombre des entités mythologiques qui seront, au gré des diverses cosmogonies, des avatars du Chaos: Okeanos, l'Erèbe, l'Air brumeux, la Nuit, de laquelle dans certains textes procède l'Ether. Or ces entités sont en même temps des figures de ce qui est infranchissable parce que privé de chemins, de limites, de repères, d'orientation, bref des figures de *l'apeiron*.<sup>11</sup>

L'association des deux thèmes se poursuit chez les "physiologues" Aristote suggère que l'Eau primordiale de Thalès a pour ancêtre mythique Okeanos et que l'Air d'Anaximène doit être dit *apeiron*.<sup>12</sup> C'est Anaximandre qui, le premier, choisit le terme abstrait lui-même (*apeiron*) pour désigner l'état-de-choses primordial, l'Indéterminé, puissance originaire antérieure à toute détermination, donc Chaos, antérieur à la différenciation des opposés, enveloppant entièrement la Terre et les Cieux, immense, éternelle et infranchissable nuit extérieure, abîme insondable où nul ne peut jamais s'aventurer.

Chez les Pythagoriciens, *apeiron* comme principe rencontre un principe opposé: *peras*, la limite, le repère. Le couple Indéterminé/Détermination évolue vers le couple Illimité/Limite. Le Cosmos naît de l'articulation des deux principes, mais baigne dans *l'apeiron* extérieur, indéterminé et illimité. Le Cosmos com-

11 Sur tous ces points, cf. M. CAVEING, *La Figure et le Nombre*. Lille, Presses Universitaires du Septentrion, 1997, Cap. VI, 3, 1, p. 278-86. La racine de *apeiron*, *peras*, a en effet archaïquement une double signification: "chemin" et "lien". Notons qu'appliqué à l'Esprit, le terme signifie que l'Esprit est au-delà de toute entrave, de toute limitation, qui pourrait réduire sa connaissance et sa puissance.

12 Aristote: *Met.*, I, 983b6-984a2; *Du Ciel*, II, 13, 294a28-b1; *Met.*, XI, 1066b21; *Phys.*, III, 4, 203a16; III, 5, 204b25.

mence avec l'Un, autre nom de la Limite, qui s'implante dans l'*apeiron* et s'y développe en déterminant l'indéterminé.

Toutes ces cosmogonies, qu'elles soient mythiques ou spéculatives, sont autant de raisons de penser que, lorsqu'Anaxagore décrit le mélange primordial comme infini, il faut l'entendre aussi bien comme illimité dans le grand et le petit, comme infiniment multiple quant à ses composants, que comme indéterminé en ce que "toutes choses" y sont confondues et indiscernables, et que le continuum ne comporte aucune démarcation. Rien n'y est distingué: c'est donc bien une nouvelle figure du Chaos des origines, et ce n'est pas la présence en lui de l'air et de l'éther qui peut y faire obstacle, puisqu'ils sont eux-mêmes présents sous la même catégorie dans plusieurs cosmogonies. La particularité du Chaos anaxagoréen, c'est qu'il est explicitement riche: il est le réservoir inépuisable de toutes les ressources de la Nature, la source surabondante de l'infinie diversité du monde.

Le renversement qu'opérera Platon se manifeste clairement dans le contraste avec la manière dont l'indéterminé intervient dans le *Timée*. Espèce difficile et obscure à concevoir puisqu'il est la négation de toute détermination, il est ce dans quoi peut prendre naissance, dans le devenir, toute copie des archétypes intelligibles, une sorte de support nu, invisible et sans forme, apte seulement à recevoir l'empreinte des Idées, ainsi qu'à fournir espace et matière à la croissance de ce qui devient; il ne participe à l'intelligible que d'une façon très aporétique et très difficile à entendre, il n'est pas perceptible par les sens, mais par une sorte de raisonnement bâtard à peine croyable. Et pourtant ce "troisième genre" est indestructible et sans son concours le monde sensible ne saurait exister par la seule puissance des Idées: il faut qu'existe quelque chose qui reçoive leur empreinte. Mais ce quelque chose est réduit à la plus extrême pauvreté. L'indétermination pure antérieure au Cosmos n'est même plus un chaos. C'est une sorte de matière première exténuée, toutefois étendue, en attente des Formes.

Anaxagore est un présocratique et un héritier des Ioniens, mais il est post-parménédien. Le Chaos du fond du Ciel, d'où procède toute chose, assure l'unité et l'éternité de l'être de la Nature en même temps que la possibilité du devenir du Cosmos et dans le Cosmos. Mais il faut que l'Intelligence cosmique, qui lui coexiste dans son unité, son infinité et son éternité, lui communique le mouvement qui révélera sa richesse.



# La droite et la gauche de l'univers selon Aristote

Bernard Besnier\*

**Résumé:** Au chapitre 2 du second livre du *de Caelo*, Aristote examine une doctrine pythagoricienne selon laquelle l'univers est doté d'une droite et d'une gauche. Après lui avoir reproché de ne mentionner que cette opposition selon la dimension de la largeur, alors que les oppositions directionnelles selon la longueur (haut/bas) et selon la profondeur (avant/arrière) lui sont ou préalables ou associées, il répond pour son compte qu'il y a lieu de doter le monde d'une telle opposition directionnelle, et qu'elle lui appartient par soi, mais à condition de le considérer en tant que vivant. Dans l'étude de ce chapitre, on s'attache à élucider deux difficultés du texte 1) s'il est vrai que la distinction de la droite et de la gauche n'est pertinente pour un animal qu'en raison de la détermination du commencement de son mouvement, et si le mouvement du monde est sans commencement ni fin, comment peut-on maintenir qu'elle s'applique encore à lui? 2) en quel sens peut-on dire du mouvement du ciel (de la sphère des fixes) à la fois qu'il part de la droite et qu'il s'oriente vers la droite?

**Abstract:** In chapter 2 of the second book of his *de Caelo*, Aristotle discusses a pythagorean thesis according to which the *kosmos* has a right and a left sides. He criticises this saying for having neglected the two other directional oppositions, above/below and front/back, of which the first at least is prior to the left/right opposition. His own answer is that the world has by himself such a directional opposition, in so far as we consider it as a living being. In this study of this chapter, we try to elucidate two obscure points: 1) if the right/left distinction pertains to an animal in relation to the beginning of its locomotion, but the motion of the universe has no beginning nor end, how is this distinction pertinent for it? 2) in what sense can we say both that the world's motion begins by its right flank and goes to the right?

AU CHAPITRE 2 DU LIVRE B du *de cælo* Aristote fait état de la doctrine pythagoricienne<sup>1</sup> qui attribue à l'univers une droite et une gauche; il la critique pour une lacune<sup>2</sup> et pour une détermination erronée de ce qui est à droite et de ce qui est à gauche; et lui-même paraît en conséquence (du fait qu'il avance

---

\* Bernard Besnier est maître de conférences à l'École Normale Supérieure de Fontenay Saint Cloud, Section de Philosophie, 31 avenue Lombart, 92266 Fontenay-aux-Roses-Cedex. Courrier-él : bbesnier@ens.fsc.fr.

1 Ou sans doute d'une de ses versions, d'où l'occurrence ici de cette fameuse expression οἱ χαλούμενοι Πυθαγόρειοι (284b7). Cf. pour ceci W. Burkert *Lore and science in ancient Pythagoreism* (engl. transl., Minar), Harvard, 1972, p. 29-30 (et n. 8).

2 Les pythagoriciens ont attribué de but en blanc une droite et une gauche à l'univers, sans lui attribuer auparavant les dimensions qui sont préalables (haut/bas, avant /arrière), – ce qui peut sans

des propositions alternatives à celles des pythagoriciens, et qui, dans les cas où elles s'accordent avec les lignes générales de leur orientation, semblent avoir de meilleures justifications que les leurs) partager au moins le point de vue selon lequel il est pertinent de doter l'univers des trois dimensions, – ou, comme il préfère dire, de six directions: haut/bas, avant/arrière, et gauche/droite. Tant les défauts qu'il reproche aux pythagoriciens que le point de vue à partir duquel il avance ses propres solutions ont quelque chose de déconcertant. À vue de pays, les doctrines qu'il passe en examen, aussi bien que la position qu'il adopte pour sa part, envisagent ces directions en fonction de notre propre position dans l'univers<sup>3</sup>; mais on s'aperçoit vite que, s'il est tout à fait clair que l'assignation des directions doit être relative à quelque chose, ce qui est en jeu c'est de savoir quel est le "sujet" par rapport auquel elle doit être faite. On constate en tout cas que ce qui dirige sa discussion, ce n'est pas la pure et simple considération des dimensions de l'univers, et qu'il n'y a problème qu'eu égard au fait que ces dimensions doivent être prises comme orientées.

Le début du chapitre introduit la discussion en en restreignant l'objet, à savoir l'assignation d'une droite et d'une gauche au monde (et la manière dont on doit les distinguer), bien que la suite élargisse cette discussion aux deux autres paires de directions (haut/bas, avant/arrière). À ce qu'il semble, cela indique que pour Aristote, c'est peut-être seulement l'assignation d'une droite et d'une gauche qui fait difficulté, et c'est ainsi qu'il semble n'en attribuer la responsabi-

---

doute se comprendre dans ce sens qu'ils ne se sont pas prononcés clairement sur la façon dont l'ordre de fixation des dimensions devait être suivi. En dépit du fait qu'il s'exprime initialement comme si les Pythagoriciens avaient complètement omis de donner à l'univers un haut et un bas, un avant et un arrière, Aristote, à la fin du chapitre, présente sa propre détermination de la gauche et de la droite, comme en contradiction avec ce que les Pythagoriciens ont décidé concernant le haut et le bas de l'univers (285b22-27); ce qui laisse donc penser que, contrairement à l'impression qu'il a pu donner d'abord, ils ont tout de même parlé d'un haut et d'un bas. Il se peut que la présentation d'une seule opposition (entre la droite et la gauche) tienne au schéma des dix oppositions de *Metaph.* 986a22, où elle figure en effet, tandis qu'en sont absentes les oppositions du haut et du bas, de l'avant et de l'arrière. Simplicius (*in de cael.*, p. 386, ll. 21-23) qui prétend tirer ce renseignement de la collection des *placita* pythagoriciens rédigée par Aristote, considère tout simplement que les colonnes d'oppositions étaient susceptibles de ramifications et que les oppositions bas/haut, avant/arrière s'emboîtaient dans celle droite/gauche. Cela laisserait penser que cette opposition était, du point de vue de la langue commune, plus directement susceptible d'une valorisation/dévalorisation polaire, et qu'Aristote a simplement voulu ici souligner que c'est à partir de cette polarisation que les Pythagoriciens dont il parle auraient introduit pour l'univers ces oppositions de directions.

<sup>3</sup> et, bien entendu, pas en le situant à l'intérieur d'un espace vide illimité, puisque eu égard à celui-ci, il n'y aurait plus du tout moyen de donner des repères pour l'orientation.

lité qu'à une seule école, qui est le pythagorisme. On peut comprendre en effet que, selon ce qu'il a établi auparavant pour le ciel, qui est (du point de vue géométrique) une sphère en rotation sur elle-même, il soit pertinent de distinguer au moins une paire de directions qui coïncide avec l'axe de rotation, puisque cet axe est fixe (285b8-14) – étant entendu que pour discerner, ensuite, lequel des deux pôles est en haut et lequel en bas, on est amené, du moins ordinairement, à se référer à une position de l'observateur qui le place au centre et qui le suppose lui-même orienté sur cet axe. Cependant il n'est pas trop clair qu'on puisse également fixer – ou du moins qu'on le puisse de cette manière – les deux autres paires de directions; en effet, si l'on s'en tient au point de vue stéréométrique (visé en 284b23-25, j'y reviens un peu plus bas), on peut toujours dire qu'un corps "complet" a, par définition, trois dimensions, et donc, dans le cas d'une sphère, qu'elle doit avoir, outre la longueur ( $\mu\eta\chi\omicron\varsigma$ ), dont il est loisible de dire (mais cela semble ne pouvoir être qu'une convention) que le haut soit le principe, une largeur ( $\pi\lambda\acute{\alpha}\tau\omicron\varsigma$ ), dont on pourra dire que la droite est principe, et une profondeur ( $\beta\acute{\alpha}\theta\omicron\varsigma$ ), dont on dira que l'avant est le principe; mais tant qu'on la considère simplement comme solide, on peut prendre indifféremment n'importe quels triplets de ses diamètres pour représenter ces trois dimensions (pourvu simplement que ces diamètres soient dans des plans orthogonaux). Si l'on veut fixer l'un des diamètres comme représentant l'une de ces dimensions, une bonne ressource est, en effet, comme le suggère Aristote ici même, de doter le solide d'un mouvement: c'est ce qui nous permet, comme on vient de le dire, d'isoler l'axe de rotation. À dire le vrai, cela ne permet pas ensuite de fixer *le* diamètre qui sera celui de la largeur et *le* diamètre qui sera celui de la profondeur, mais du moins fixe-t-on ainsi les plans dans lesquels ces diamètres se trouveront. Cependant, lorsqu' Aristote déclare qu'il ne considère pas seulement haut, avant et droite comme principes des trois dimensions, mais comme principes eu égard au mouvement (284b25-26), il ne se borne pas à ajouter à la considération stéréométrique celle, phoronomique, de la sphère en rotation, – ce qui ne permettrait pas de choisir les diamètres dont on pourrait dire qu'ils sont la largeur et la profondeur du corps (et en conséquence, les points dont on pourrait dire qu'ils sont l'avant et la droite) –, il indique immédiatement que le recours pour cela, c'est de considérer le corps sphérique comme un vivant et de prendre ses trois orientations, non pas comme trois déterminants d'un seul et même mouvement (celui de la rotation), mais comme les trois déterminants spécifiques de trois mouvements – ou changements – qui sont catégoriellement différents: la longueur est comprise comme la dimension selon laquelle s'oriente un mouvement  $\chi\alpha\tau\acute{\alpha}$   $\pi\acute{o}\sigma\omicron\nu$ , l'accroissement du vivant (donc son mouvement de nutrition), la largeur est comprise comme celle selon laquelle s'oriente le mou-

vement  $\chi\alpha\tau\acute{\alpha}$   $\tau\acute{o}\pi\omicron\nu$  de ce même vivant (qui alors doit être un animal, puisque les plantes ne se déplacent pas) et la profondeur la dimension selon laquelle s’oriente son mouvement  $\chi\alpha\tau\acute{\alpha}$   $\pi\omicron\iota\acute{o}\nu$ , qui est, en l’occurrence, la sensation (284b27-30). Cette indication est un rappel d’une doctrine qui a été exposée aux chapitres 3-6 du *de Incessu animalium*<sup>4</sup>. Et Aristote, lorsqu’il souligne, en conclusion de ces remarques initiales, que ce n’est pas pour n’importe quelle sorte de corps, mais seulement pour les corps animés, que l’on peut distinguer haut, avant et droite, s’appuie sur ces analyses et sur le fait qu’elles seules (ou en tout cas la considération qui en fait leur thème) permettent de fixer de façon déterminée ces trois dimensions.

Simplicius estime que dans l’affirmation de 284b24: “il est rationnel (*eulogós*) que ces dimensions (*diastaseis*) appartiennent toutes ensemble aux corps complets”, l’expression “corps complets” (*teleia sómata*) ne vise pas, comme on l’entend d’ordinaire, des corps possédant les trois dimensions (des solides), mais ne s’applique qu’aux corps doués en outre d’un principe de mobilité interne, c’est-à-dire les animaux. Il est suivi au moins par Leo Elders<sup>5</sup>. Mais cela l’oblige à penser que cette proposition, en dépit du vocabulaire utilisé (où il s’agit bien de trois *diastaseis*), ne porte pas sur les dimensions d’un corps solide, mais déjà sur les oppositions de directions<sup>6</sup>, et il comprend l’expression “corps complet” comme visant le fait qu’il s’agisse d’un *vivant* complet, c’est-à-dire un corps qui n’a pas seulement la vie végétative, mais également les deux autres sortes de changement qui sont caractéristiques des animaux (la sensation et le déplacement). Et il insiste sur le fait que, si certaines des directions peuvent être dites “principes” il faut entendre qu’elles le sont comme point de départ d’un mouvement auto-moteur, ce qui, conformément aux énoncés de *Physique* VIII, 4, 255b30-31, exclut que l’on puisse envisager un corps simplement naturel, car celui-ci est bien doté d’une puissance en direction d’un lieu (ainsi le mouvement naturel du feu est-il vers le haut), mais cette puissance est passive et le moteur agent agit au contact du mû, mais néanmoins extérieurement. De cette exégèse il faut assurément retenir que la question se pose de savoir en quel sens Aristote peut distinguer l’une des directions locales comme “principe” si c’est comme prin-

4 C’est sans doute à cela qu’est fait le renvoi de 284b14, quoique la chronologie habituellement retenue pour les traités – à laquelle, cependant, je ne suis pas convaincu qu’on doive se soumettre – puisse laisser ouverte l’éventualité que ce soit à une autre version de ce traité que celle qui nous est parvenue.

5 *Aristotle’s Cosmology*. Assen, Van Gorcum, 1965, p. 185.

6 Ce qu’il appelle “oppositions locales” (*topikai antitheseis*).

cipe actif de la mobilité de l'animal (ou du ciel), ou comme principe passif (simplement "physique") et qu'on peut se demander – contre Alexandre qui cherchait à faire coïncider les deux – si Aristote envisage le principe moteur comme du type de l'âme, ou comme pouvant encore être du type de la nature. Mais il faut bien dire qu'en tant qu'exégèse littérale du passage, celle qu'offre Simplicius (et qui lui a certainement déjà été préparée par Alexandre) est malheureuse; elle oblige à prendre les corps complets comme s'il s'agissait des "animaux complets"<sup>7</sup>, alors qu'il y a un sens obvie par lequel ce passage se rattache au chapitre 1 du livre I du *de celo*, où l'on dit (268a7-13 et 21-22) qu'un corps est complet s'il a les trois dimensions (sans orientation); et elle efface le fait qu'il y ait trace d'un mouvement de pensée qui, après avoir affirmé qu'il est rationnel que le ciel, étant un corps complet, possède les trois dimensions, ajoute (ἔτι δ' ἄλλως 284b25) que le terme *arché* peut aussi se prendre dans le sens de "principe (ou point de départ) du mouvement", et que c'est sous ce point de vue que l'opposition de la droite et de la gauche est pertinente. On peut donc penser qu'il y a, aux yeux d'Aristote, un ordre d'établissement de l'appartenance des trois dimensions, ordre qu'il a voulu rappeler contre les Pythagoriciens (en ce sens qu'ils n'en auraient pas tenu compte), et qui place la dimension "longueur" en premier, avant celles de "largeur" et de "profondeur", mais il est difficile de se convaincre que cet ordre ne concerne que la nature du corps solide envisagée sous la pure et simple considération géométrique (ou stéréométrique); et on ne voit guère de raison pour penser que cet ordre d'engendrement des dimensions (*grasso modo*: ligne, surface et "volume") doive commander celui des oppositions de changement(s).

Il convient en effet, avant d'aller plus loin, de souligner qu'il serait incohérent de la part du Stagirite de donner, quand il s'agit du ciel, à la dimension orientée haut/bas le sens qu'on lui donne pour l'anatomie des plantes (à savoir qu'elle est l'axe selon lequel se fait le mouvement d'absorption de la nourriture, puis de formation des feuilles et des fleurs, autrement dit, l'axe selon lequel agit la chaleur vitale); en effet l'univers ne se nourrit pas; de même, il serait incohérent de sa part de comprendre l'application de la polarité avant/arrière pour l'uni-

<sup>7</sup> Et par là, on voit bien que Simplicius a en vue une distinction suggérée dans *de anima* III, 11, 433b31-434a5, où le Stagirite qualifie d'incomplets les animaux qui n'ont qu'un seul sens (le toucher) et qui, probablement, ne sont pas auto-moteurs: ce sont les zoophytes qu'il mentionne ici comme intermédiaires entre les plantes et les animaux complets, et qui permettraient d'illustrer le cas de vivants ayant en eux le principe actif du changement selon la quantité et selon la qualité, mais pas selon le lieu.

vers à la façon dont il l'envisage pour les vivants animaux (pour eux, les organes de la sensation et principalement ceux de la sensation à distance, sont devant); en effet, le monde n'a rien à percevoir et n'a donc pas d'organes de sensation<sup>8</sup>. En revanche, il est vrai qu'on peut lui donner un mouvement selon le lieu, quoiqu'évidemment il ne s'agisse pas de déplacement, mais d'une rotation sur place. Cela laisserait penser que les Pythagoriciens n'ont pas été trop mal inspirés en ne discutant expressément que de la droite et de la gauche de l'univers: ce sont en effet les seules oppositions directionnelles qu'il soit pertinent d'appliquer au monde. En ce qui concerne le Stagirite, il demeure qu'il est conduit par ses propres exigences concernant l'ordre des dimensions pour tout vivant à construire un analogue pour le ciel de la fonction que joue l'opposition du haut et du bas, quoiqu'il ne puisse pas s'agir de nourriture. On va voir que la construction de cet analogue est assez délicate.

### L'ordre des trois oppositions directionnelles

Sans aborder directement la question de savoir à laquelle des versions du Pythagorisme il s'en prend<sup>9</sup>, je voudrais essayer de préciser quel est le reproche qu'il leur adresse; je veux dire, du moins, le premier reproche, car il y en aura un second qui consistera à montrer que, à supposer qu'il y ait, comme ils l'ont voulu, une droite et une gauche du monde, ils n'ont pas fixé correctement quelle était la droite, et quelle la gauche. Cette première critique, je le rappelle, comporte deux aspects: les pythagoriciens (ou du moins ceux dont il est question ici) ont attribué à l'univers une droite et une gauche, en négligeant de le doter également des deux autres axes de direction; et ils ne se sont pas rendu

---

8 Simplicius (p. 388, l. 6sq.) qui se rend bien compte qu'il serait peu conforme à la façon dont le Stagirite envisage la vie du ciel que de la supposer dépendante de la nourriture, estime qu'Aristote n'a pas borné la possession de l'opposition haut/bas aux seuls corps (ou vivants) qui sont susceptibles d'augmentation et de diminution: c'est directement (*enthus*) que l'on peut leur attribuer cette polarisation. Il semble bien que l'interprétation abusive que nous l'avons vu faire de la phrase de 284b24 lui serve ici à introduire cette assertion que les trois oppositions polaires soient *directement* pertinentes pour tous les vivants "complets", même si certains d'entre eux n'exercent pas les fonctions psychiques plus basiques (comme la nutrition et la sensation). Il vaudrait mieux envisager une démarche dans laquelle Aristote attribue d'abord l'appartenance des trois dimensions à tous les corps solides, pour ensuite distinguer les polarités pertinentes d'après les mouvements dont ils sont capables (et ici principalement en tant que vivants, et selon le type de vivants qu'ils sont).

9 J'y reviendrai à la fin de cet exposé.

compte que la distinction des six directions n'est pertinente que pour certains corps et pas pour tous (cf. 285a10-13). Le premier aspect est rendu plausible si l'on pense spécialement aux auteurs de la table des opposés, car on y trouve bien cette opposition droite/gauche, mais pas les deux autres oppositions de direction; cependant, nous ne sommes pas sûrs que la liste établie par Aristote soit complète, et de surcroît il est difficile de concilier cette accusation avec celle, faite plus loin (285b), d'après laquelle ils auraient placé à tort le haut de l'univers dans la région qui est au dessus de notre tête: ce qui laisse penser qu'il ont bien eux aussi défini un haut et un bas, ou alors il faut supposer qu'il ne s'agit pas de la même version du pythagorisme. Cela étant, si nous supposons que la critique initiale que leur adresse Aristote part de cette lacune, comment pouvons nous apprécier qu'il s'agit d'une lacune, je veux dire d'un défaut? Aristote établit qu'on ne peut pas envisager l'opposition directionnelle droite/gauche sans envisager également les deux autres oppositions directionnelles, qui sont pré-supposées (parce qu'antérieures) (284b11-12). On peut détacher un premier ensemble de considérations (284b 11-30), qui est entièrement emprunté au *de incessu animalium* (selon la version transmise ou un état antérieur, peu importe), et dont la conclusion (284b30-33) est que ce n'est pas à n'importe quel corps que l'on peut attribuer – avec pertinence – la distinction droite/gauche, mais seulement aux corps animés (ἔμψυχα). Sans doute avons-nous vu que, contrairement à l'interprétation anticipative de Simplicius, il faut faire une place dans ces considérations au fait qu'il s'agisse de *corps* (avant de dire qu'ils sont animés), mais ceci ne joue de rôle que comme étape intermédiaire, pour pouvoir affirmer que, du fait qu'ils sont stéréométriquement “complets”, on est en droit de penser qu'ils possèdent toutes les dimensions selon lesquelles vont se distribuer les oppositions polaires. Mais, une fois cette condition remplie, on souligne qu'elle n'est pas suffisante à ce que toutes ces oppositions pôlaires soient pertinentes: pour les plantes, il n'y a que celle du bas et du haut, ce qui ne veut pas dire que leur corps soit simplement comme une ligne, plutôt que comme un solide, mais qu'il n'y a que selon cette dimension que leur capacité de mouvement est polarisée. Puisque l'on réserve la pertinence de cette polarisation aux *empsycha*, il faut penser qu'elle ne l'est pas pour les corps qui sont “simplement naturels” (à commencer par les éléments). Il faut certainement relier cela au fait que les corps simplement naturels ne sont pas auto-moteurs, que leur mouvement leur vient d'un moteur extérieur. Mais ce qui peut surprendre, c'est cette formule de 284b33-34 que “dans les êtres inanimés, nous ne discernons rien où soit le point de départ du mouvement” Il faut sans doute comprendre que dans de l'air, par exemple (ou plus exactement dans un liquide qui, une fois chauffé, devient de l'air et par conséquent s'élève, si rien n'y fait obstacle), nous discernons un agent

moteur extérieur, qui est le même que celui qui a provoqué la transformation du liquide en air (ou en vapeur) – ce sera généralement du feu, comme celui qui est sous la marmite – et nous voyons bien que l’air s’élève d’un mouvement qui lui est naturel, mais il n’y a pas dans la masse d’air elle-même (pas davantage que dans la masse d’eau qui la précédait) quelque chose qui constituerait une partie distinguable comme celle par laquelle le mouvement d’élévation va commencer. En revanche pour la nutrition, il y a une partie distinguée par laquelle le mouvement d’assimilation commence, qui est la bouche et l’estomac (ou leurs analogues). Il faut donc penser que l’opposition polaire est pertinente en tant que visant une partie *interne* de l’organisme, qui est celle dans laquelle le mouvement commence. Ceci, il faut le signaler dès maintenant, est une distinction à l’intérieur des parties de l’organisme envisagé comme *corps*, et ne suppose pas que là où commence le mouvement, là aussi soit le moteur (auto-moteur) de ce mouvement, ou le siège de ce moteur: le moteur de la nutrition des plantes est à proprement parler l’âme végétative<sup>10</sup>, mais c’est la racine qui constitue la partie de l’organisme à partir de laquelle commence le mouvement de nutrition. Il est donc conforme à l’usage le plus courant du Stagirite que, pour désigner le sujet à propos duquel on pose que ces polarisations sont pertinentes, on emploie le terme *empsychos*, puisqu’elles s’appliquent en effet au corps organique, plutôt qu’au vivant tout entier (ou au vivant considéré selon son *logos*). Cela ayant été précisé, il demeure que, même si la partie organique dans laquelle on discerne le point de départ de la motricité n’est pas pour autant le moteur auto-moteur de ce vivant, on doit tout de même souligner qu’Aristote ne considère ici comme pertinentes que les seules différenciations eu égard à la mobilité qui tiennent aux orientations intrinsèques au corps considéré. Il indique ainsi (284b33-285a10) que dans les corps inanimés, on ne discerne pas d’orientations qui soient celles de leur propre motricité puisqu’il n’en n’ont pas: à l’égard de sa propre configuration, une pierre peut être mue selon n’importe laquelle de ses parties; et en conséquence nous sommes amenés à donner à ces corps des attributs d’orientation soit simplement en nous prenant nous mêmes comme référence: nous disons que telle chose est “devant” en voulant dire, non pas qu’elle a en elle-même un avant et un arrière, mais qu’il y a une partie d’elle qui est devant nous et une autre qui est derrière, – et il est clair que ceci n’est défini que par rapport à l’ef-

10 Et elle a comme instrument la chaleur qui, dans le cas des plantes, est dans la terre, et dans celui des animaux, est un *pneuma* situé dans le péricarde, cf. B. Besnier “L’âme végétative selon Aristote.” *Kairos*, n° 9 (Toulouse, 1997), p. 33-56 (ici, p. 50-53).



fort que nous devrions faire pour l'atteindre; soit en la leur attribuant par ressemblance avec nous: par exemple pour une statue d'homme, qui a une droite et une gauche par ressemblance à ce que nous avons, mais c'est par homonymie, puisque cela ne correspond à aucune qualification intrinsèque de sa mobilité.<sup>11</sup>

\* \* \*

On peut considérer comme une application critique de ces remarques tirées du *de incessu animalium* le reproche de méthode qu'Aristote adresse finalement aux Pythagoriciens pour avoir tout au moins donné l'illusion que la polarité droite/gauche serait plus fondamentale que les deux autres. Ce reproche est formulé et à nouveau justifié en 285a11-27; et, comme nous avons déjà signalé qu'il n'est pas plausible de supposer qu'Aristote ait voulu accuser les Pythagoriciens de n'avoir pas du tout reconnu au moins la distinction haut/bas dans le monde (puisque, par la suite, il va donner une détermination du haut et du bas dont il dit qu'elle s'oppose à celle des Pythagoriciens: ce qui suppose qu'ils en ont donné une), sans doute faut-il comprendre cette première série de critiques comme s'articulant sous deux chefs: 1/ les Pythagoriciens n'ont pas reconnu (ou ne l'ont pas fait explicitement) que ces polarités ne sont pertinentes que pour des vivants, 2/ ils n'ont pas saisi que la polarité droite/gauche est "postérieure" au moins à la polarité haut/bas. Disons rapidement quelques mots au sujet de la façon dont ce deuxième chef de critique est présenté dans les quelques quinze lignes que nous venons de mentionner. Il y a trois arguments. Le premier est expressément relatif aux animaux: la polarité haut/bas précède la polarité gauche/droite, parce qu'elle est plus générale (elle est commune aux plantes et aux animaux) et que, là où elle se trouve, la polarité droite/gauche n'offre qu'une différence d'aptitude (ou de puissance), tandis que les autres po-

11 Que les trois oppositions polaires doivent être discernées seulement par la fonction qu'elles remplissent eu égard à la motricité (ce qui entraîne que dans les choses qui ne se meuvent pas par leurs propres moyens, il n'y ait, à strictement parler, pas de place pour de pareilles distinctions, et qu'elles ne soient posées qu'extrinsèquement et par convention), cela s'accorde également avec le fait que la fixation d'une détermination doit se faire par la fonction (*ergon*) et non pas par la position (*thesis*, entendue ici par relation à un cadre de référence extérieur). Ainsi confirme-t-on (*de incessu animalium*, IV, 705b2-8) que ce sont les racines qui constituent pour la plante le haut, puisque c'est là qu'est l'origine de la nutrition et de la croissance; et ceci, bien que "par rapport au tout", les racines soient plutôt en bas.

larités sont exprimées par des différences morphologiques (215a13-19)<sup>12</sup>. Le deuxième argument (285a19-22) vient apparemment d'une simple considération stéréométrique: un corps ne peut pas avoir seulement la dimension de la largeur sans avoir aussi celle de la longueur et de la profondeur (et comme le ciel est une sphère, il doit être traité comme un corps "complet" et non pas seulement comme un plan ou une droite). Considérée isolément cette remarque ne devrait pas avoir d'autre conséquence que le constat qu'on ne puisse pas poser la polarité droite/gauche sans devoir aussi poser les deux autres, si du moins l'on suppose qu'on a affaire à un corps "complet"; mais Aristote ajoute encore que la longueur est première par rapport à la largeur et à la profondeur "selon la génération", ce qui est une affirmation plus forte, mais qu'explique justement cette précision "selon la génération": elle montre simplement qu'il considère le plan comme engendré à partir de la rotation de la droite et le solide comme engendré à partir de la rotation du plan, ce qui n'est pas forcément une conception à laquelle il se tienne lui-même fermement, mais une conception qui a de bonnes chances d'avoir été acceptée au moins par un courant de Pythagoriciens; dans ce cas, il leur reprocherait leur inconséquence. Pour sa part, il distingue ordinairement longueur, largeur et profondeur, comme autant de capacités pour une grandeur (a) d'être divisible (*Metaph.* Δ, vi, 1016b25-27) ou (b) d'être continue (*eod. loc.*, xiii, 1020a11-14). Sans qu'il y ait lieu de le soupçonner d'avoir confondu la continuité avec l'indéfinie divisibilité (*i.e.* la densité), on constate qu'il se sert de l'implication de l'indéfinie divisibilité par la continuité pour réunir volontiers les deux propriétés comme caractéristiques de la grandeur (μέγεθος)<sup>13</sup>; et cela lui permet le classement des grandeurs selon les trois "di-

12 Suivant ce critère de la plus ou moins grande extension de ces polarités chez le vivant, non seulement l'opposition haut/bas doit-elle être la première puisqu'elle appartient aussi aux plantes, mais l'opposition avant/arrière devrait être antérieure à celle de la droite et de la gauche, car elle est caractéristique de la sensation, laquelle est partagée par tous les animaux, tandis que l'autre n'est caractéristique que de la capacité à se déplacer par ses propres moyens, capacité qui n'est pas présente chez tous les animaux, cf. l'ordre dans lequel sont introduites ces oppositions dans le chapitre 4 du *de incessu animalium*.

13 Un bon exemple est fourni par le chap. 1 du livre I du *de celo*, 268a 6-10, où il énonce que ce qui est continu est indéfiniment divisible, que ceci est la caractéristique minimum de la grandeur: la grandeur qui ne vérifie cette divisibilité que selon une seule "dimension" (? on a seulement ἐφ'ἓν; on peut conjecturer que le substantif manquant est de la famille de *diastasis* d'après 268b6, où l'on rappelle que ce qui possède les trois "dimensions" est un corps), est une ligne, celle qui vérifie cette divisibilité selon deux "dimensions" est une surface, et celle qui la vérifie selon trois, est un corps (solide).

mensions”<sup>14</sup> On peut penser qu’à ses yeux, ce sont ces capacités de divisibilité et de continuité qui devraient former la définition de la longueur, de la largeur et de la profondeur, et qu’il n’accepterait pas en toute rigueur de donner comme définition du plan son engendrement à partir du glissement de la ligne et celle du solide à partir de la rotation du plan; *a fortiori* cette façon de procéder serait-elle blâmable si l’on prétendait par là définir, non les figures (linéaires, planaires et solides), mais les dimensions elles-mêmes. Par conséquent, je suis enclin à penser que lorsqu’il présente cette antériorité de la longueur sur la largeur (non de la ligne sur la surface fermée), comme “selon la génération” il ne faut justement pas l’entendre comme une antériorité selon l’essence ou la définition<sup>15</sup>: ce doit précisément être une antériorité selon la génération, type d’antériorité qui (selon une indication obscure de *Metaph. Δ*, xi, 1019a12-14<sup>16</sup>) peut être compris comme l’antériorité de l’antécédent sur le subséquent (lequel peut lui être supérieur quant à la perfection: les fondations sont antérieures à la maison selon la génération, quoiqu’elles ne le soient évidemment pas selon l’essence ni selon la définition); un des propres de l’antériorité selon la génération c’est que lorsque l’antérieur est réalisé, il ne s’ensuit pas nécessairement que le postérieur se réalisera aussi, alors que si le postérieur est réalisé, nécessairement l’antérieur l’a également été. De ce point de vue, outre la confirmation qu’il est nécessaire de conserver cette précision<sup>17</sup> on comprend mieux comment cet argument, qui est purement inspiré de considérations géométriques, peut être utilisé dans ce contexte où ce sont des caractères phoronomiques, et même des caractères de mouvement vital, qui sont mis en avant. Nous avons dit en effet qu’Aristote ne peut pas tirer parti du fait que, chez les vivants de la région sublunaire, la fonction

14 Pour être exact, il faut ajouter que ce que, tout au moins en *Metaph. Δ*, vi, 1016b25-27, Aristote classe comme divisibles selon une, deux, ou trois possibilités ce que nous appelons les “dimensions”: longueur, largeur et profondeur, et comme délimitées ou définies selon les trois dimensions ce que nous appellerions les figures: ligne, surface, corps.

15 Ou alors, comme je le suggérais plus haut, seulement dans le cas où cette façon de “définir” serait celle des Pythagoriciens qu’il critique. La remarque d’Oddone Longo (éd. Florence, Sansoni, 1961, p. 318), selon qui la longueur est antérieure à la largeur selon la définition, car on peut définir la longueur comme une grandeur sans largeur, offre un exemple de définition qu’Aristote critique (comme donnant la définition d’un terme par négation du caractère d’un autre) en *Topiques* VI, vi, 143b11-144a4. Il est donc malheureux de s’en servir comme moyen de rapprochement entre la priorité *kat’ousian* et la priorité *kata genesin*.

16 que l’on peut cependant éclairer par *GC*, II, xi, 337b14-25 (avec les explications de Joachim).

17 Ceci contre la tentation d’y voir une glose, comme le croyait Leo Elders (*loc. cit.*, p. 188).

nutritive soit première par rapport aux fonctions sensitive et locomotrice<sup>18</sup>: sans doute souligne-t-il ici qu'elle est commune à tous les vivants sublunaires (alors que la sensation et l'*orexis* n'appartiennent qu'aux animaux), mais il ne peut pas en tirer l'affirmation que, pour le ciel également, la fonction de nutrition doit être préalable à la capacité locomotrice. Il contourne cette difficulté en se rabattant sur une antériorité de la détermination du "haut" par rapport à celle de la "droite", antériorité que l'on peut affirmer du ciel, non en tant que vivant, mais simplement en tant que corps "complet", c'est-à-dire solide. On remarquera que le parti qu'il en tire ne consiste pas à dire que le ciel doit avoir trois dimensions, mais qu'il doit avoir un haut prioritairement au fait d'avoir une droite.

Peut-être dans ces conditions, la connexion avec le troisième argument (285a22-25) pourra-t-elle jeter quelque lumière sur celui-ci. C'est à nouveau un argument pour affirmer la priorité du haut sur la droite et sur l'avant. Cela tiendrait à ce que le haut soit "ce dont vient (le mouvement) [ὄθεν]" la droite, "ce à partir de quoi (ἀφ'οὔ)" et l'avant "ce vers quoi (ἐφ'ὅ)" se produit le mouvement. On a généralement, et non sans raison, trouvé sophistiquée la nuance mise ici entre le *hothen* et le *aph'hou*. En effet, Aristote ne respecte déjà pas cet usage lorsqu'il présente cette distinction en 284b26-30: la notion générale de commencement est introduite sous le terme *hothen*, puis pour chacun des trois changements, le point de départ est désigné par ἀπό<sup>19</sup>. Aussi la pertinence de cette distinction entre les trois façons d'être principe dans le changement organique n'impose-t-elle cette terminologie quelque peu artificielle qu'en raison du fait que

18 Priorité qui, comme on sait, amène le Stagirite à donner une "définition" de l'âme qui est minimale, plutôt que commune à toutes les sortes d'âme, *de anima* II, III, 414b19sq.

19 Y compris pour le cas de l'*aisthêsis*, où l'on dit d'abord que c'est "à partir de l'avant" que ce changement a lieu, pour préciser aussitôt que c'est "du côté (ἐφ'ὅ) de l'avant" qu'ont lieu les sensations. Sans doute Aristote veut-il insister sur le fait que la détermination "à partir de (*apo*)", que l'on pourrait fort bien envisager de prendre littéralement comme indiquant que la sensation se fait d'abord dans l'organe périphérique avant d'être transmise à la région du cœur, est à entendre selon l'application de la règle que c'est la fonction qui définit l'avant et l'arrière: ici, cela se borne à fixer l'endroit du corps où la sensation se produit.

La terminologie du *de incessu* n'est pas plus stable. ὄθεν est utilisé pour introduire – de façon équivalente – l'idée qu'il y a un point de départ pour chacun des trois types de changement catégoriellement distingués (705a32, b12 – avec la même correction à l'aide de ἐφ'ὅ, s'agissant de la sensation –, b18) ; il est présent dans les arguments qui établissent que la locomotion animale "part de la droite" (705b18, 706a10 et 12) en concurrence avec ἀπό (706a5 et 16) lequel à son tour, gouvernant plutôt une locution au pluriel (*apo tôn dexiôn*), se trouve en rivalité avec des expressions en ἐχ (suivies également du pluriel, 705b30 et 706b17).

l'on envisage ici une distribution des déterminations non plus d'après la distinction des trois types de changement (catégoriellement distincts), mais en les appliquant à la description d'un seul et même type de mouvement, à savoir le déplacement<sup>20</sup>

C'est au demeurant une situation que l'on rencontre également dans le *de incessu animalium*. Après avoir fixé (et ceci d'après la distinction catégorielle des types de changement) ce que sont pour l'animal le haut et le bas, l'avant et l'arrière, la droite et la gauche, Aristote considère la locomotion, en examinant si, pour tous les animaux, elle se fait d'arrière en avant, et si elle se fait en déplaçant "en diagonale" les pattes de devant et celles de derrière<sup>21</sup>. On aurait donc la configuration suivante: les trois polarités (et surtout les trois pôles dominants) seraient défini(e)s d'après leur rôle dans les trois types de changement dont le vivant peut être cause par ses propres moyens<sup>22</sup>, mais, une fois ces déterminations fixées par ce biais, on les envisagerait du point de vue de leur rôle dans la description d'un seul type de changement, la locomotion<sup>23</sup>. Il est à vrai dire difficile de comprendre précisément comment, selon cette interprétation, le haut peut être un principe supérieur à la droite, eu égard au déplacement local. Oddone Longo, qui a au moins eu le mérite de se rendre compte de la difficulté, suggère (à l'aide d'un rapprochement avec *de anima* II, IV, 415b21) qu'Aristote pourrait viser ici la position de l'âme laquelle peut en effet être envisagée comme "ce dont vient (*hothen*) le mouvement". Mais en toute rigueur on ne peut localiser l'âme dans le corps, et si l'on veut, par souci de simplification, la "localiser" d'après l'endroit où elle trouve son premier instrument organique, c'est la ré-

20 Contrairement à ce que fait Simplicius, qui comprend qu'Aristote continue d'envisager le *hothen* comme principe du mouvement de croissance, le *epb'bo* comme principe de l'orientation de la sensation et que seul le *apb'hou* serait une détermination du déplacement.

21 La réponse générale est que c'est le cas. L'exception apparente est celle du crabe. Sans doute lui aussi marche-t-il en déplaçant selon un rythme "en diagonale" les pattes arrière et les pattes avant (parce qu'il est soumis aux mêmes contraintes de point d'appui que les autres animaux pourvus de pattes); mais au lieu d'aller vers l'avant, il va vers le côté (*epi to plagion*); cependant il a des yeux qui, au lieu de diriger le regard devant eux, le dirigent aussi sur le côté; si bien que, si au lieu de définir l'avant du crabe par l'endroit où sont placés ses yeux, on le définit par la direction dans laquelle ils sont orientés, on peut dire que, là aussi, la loi générale (selon laquelle les animaux se déplacent vers ce qui est *pour eux* l'avant) est vérifiée. Cf. *de incessu an.* XIV, 712b14-21.

22 Ce qui est en tout cas réglé de cette façon, c'est le sens de la polarisation: supériorité du haut sur le bas, de l'avant sur l'arrière et de la droite sur la gauche; par conséquent supériorité (dans le cadre de cette polarité) des organes qui s'y trouvent, cf. *de incessu*, V, 706b11-16.

23 C'est l'interprétation d'Oddone Longo (*loc. cit.*, p. 318-319).

gion du cœur, donc, si l'on prend les choses directement, le milieu, plutôt que le haut. Peut-être faut-il recourir à un autre passage curieux du *de incessu* (ch. v, 706b3-10), où le Stagirite, ayant, comme on l'a dit, fixé ce que sont le haut, l'avant et la droite dans les animaux d'après les trois fonctions vitales (nutrition, sensation, locomotion), note encore que les plantes sont orientées vers le bas, que les quadrupèdes sont orientés vers le milieu, et les bipèdes vers le haut. Il est manifeste que cette manière de les classer est purement relative à leur position eu égard au cadre de référence de l'univers (706b4: les bipèdes sont dirigés *pros tou holou anô*). Plutôt qu'un renversement de point de vue – comme si l'on revenait à une caractérisation purement extrinsèque de la “situation” des parties de l'organisme –, on est en présence d'une comparaison<sup>24</sup>: ce n'est que pour les bipèdes, et surtout pour l'homme, que le haut intrinsèque est également situé dans la direction de ce qu'est le haut pour le tout; et il est clair qu'on ne peut qualifier les plantes d'“orientées vers le bas” qu'en supposant déjà que, du point de vue organique, ce sont leurs racines qui sont pour elles le haut. Or ces remarques, qui visent évidemment à hiérarchiser les vivants (en l'occurrence en trois classes seulement), et à souligner l'excellence de l'homme, en les comparant à l'orientation du tout (i.e. du monde), suggèrent en même temps une justification pour les cas où la qualification intrinsèque des parties ne coïncide pas avec la situation de ces parties par rapport au cadre de référence du monde: pour les plantes, on a expliqué pourquoi leur haut est dans leurs racines, mais on ajoute qu'elles sont immobiles (*akinêta*), ce qui s'entend bien sûr en ce sens qu'elles n'ont pas de mobilité locale qui dépende de leurs propres moyens. Ce qui pourrait entraîner, en passant à l'extrémité opposée de l'échelle, que dans le cas de l'homme, la coïncidence de sa partie intrinsèquement “haute” et de la place de cette partie eu égard au tout (et dont on fait une illustration de sa qualité *malista kata phusin*) tient à une plus forte aptitude à la mobilité par ses propres moyens<sup>25</sup>. Cependant, si l'on réintroduit, comme il se doit, ces remarques dans le contexte du chapitre auquel elles appartiennent, on s'aperçoit que la différence entre les bipèdes et les autres animaux locomoteurs (quadrupèdes et polypodes), c'est que, bien que tous aient – comme on dit – quatre points d'ap-

24 Entendue ici au sens d'un examen portant sur la coïncidence ou non coïncidence de la qualification intrinsèque du haut et du bas pour l'organisme et de la position de ce qui est ainsi qualifié par rapport au cadre d'orientation offert par le tout.

25 La justification expressément invoquée est simplement que les bipèdes sont “droits”; il faut reconstruire l'explication véritable, mais, une fois cela fait, il faudrait réexaminer en quel sens on dit ici “droit”

pui<sup>26</sup>, ils ne les ont pas tous en contact avec le sol: les quadrupèdes<sup>27</sup> ont leurs quatre “points d’appui” au contact avec le sol, les bipèdes n’en ont que deux<sup>28</sup>; or ce sont les points d’appui qui ne sont pas des “pieds” au sens étroit qui, dans le cas des bipèdes, se trouvent vers le haut (y compris en référence au cadre du tout) et qui, dans le cas des quadrupèdes, se trouvent “au même niveau” que les pieds<sup>29</sup> Ceci permet de passer d’une qualification de la détermination “en haut” pour l’animal, qui, en tant qu’il participe à la nature générique du vivant, se trouve d’abord fixée pour lui par l’orientation de la nutrition (donc du côté de la bouche), à une qualification secondaire et comparative, dans laquelle cette position de “en haut” serait mise en rapport avec sa locomotion: laissant de côté la prétendue “situation” de l’âme (car elle n’est déterminable que de manière extérieure et inexacte), on peut dire que le bipède offre une distinction entre des points d’appui “supérieurs” et des point d’appui “inférieurs”, mais, cette fois-ci, en ne fixant pas directement cette polarité d’après les fonctions organiques:

26 La traduction classique rend fidèlement au moins un aspect: c’est que ces “points d’appui” sont en effet désignés comme des “points” (σημεία); la notion d’appui est rarement soulignée, si ce n’est (VIII, 708b2 ὑπόστυμα) pour mentionner le besoin d’un support pour le poids de l’animal.

27 Du moins quand ils marchent (*poréia*), non quand ils sautent (*balsis*).

28 Ceux qui n’ont pas besoin d’être au contact du sol, mais qui n’en sont pas moins des “points d’appui” sont les ailes pour les oiseaux et les bras pour les hommes. Aristote, dans ce contexte, réserve le terme “pied” aux points d’appui qui sont en contact avec le sol; d’où le sens littéral de la distinction entre bipèdes et quadrupèdes. Un “pont d’appui” est donc d’abord caractérisé par les possibilités qu’il offre à la flexion. Cf. v, 706a26-33. Cela n’empêche pas que le point d’appui dans la flexion soit précisément immobile, ou plus exactement, comme on l’explique au chapitre 1 du *de motu animalium*, que le “point” qui est à l’intérieur de la flexion se dédouble en tant qu’extrémité à la fois de la partie de la flexion qui est au repos et de celle qui est mue: ainsi lorsque c’est l’ensemble du bras qui est mù, la flexion se fait avec le tronc (qui joue alors le rôle de partie antérieure au repos) et elle se fait dans l’épaule où l’on peut idéalement discerner un aspect de la jointure au repos et un autre en mouvement.

29 En extrapolant, on pourrait dire que c’est par rapport à une locomotion fictive que les plantes peuvent être dites avoir “la tête (i.e. la racine) en bas”: en effet, si elles se mouvaient, leurs “pieds” seraient (sans doute) leurs racines; or les pieds des animaux locomoteurs sont sans doute “en bas” du fait qu’il y a (effectivement ou virtuellement) pour eux des parties du même ordre fonctionnel (des points d’appui) qui sont “en haut” (en tout cas au-dessus d’eux). – En extrapolant de la même manière (mais tout de même avec l’appui de 706a29-31), on peut dire que les quadrupèdes (et autres animaux à pattes, mais non bipèdes) doivent l’indistinction de leurs points d’appui (le fait qu’ils soient tous des “pieds”) à l’indistinction de l’orientation “en haut” et de l’orientation “en avant”; ainsi tous leurs points d’appui sont réduits au rôle de pieds, du fait que, pour eux, les points d’appui qui sont qualifiés comme ceux de devant, le sont indistinctement en raison de la position des organes de la sensation à distance (les pattes avant du cheval sont celles du côté où se trouvent ses yeux) et des organes antérieurs de la nutrition (c’est du même côté que ses yeux que se trouve la bouche du tigre).

il faut faire un détour qui compare les déterminations intrinsèques relatives aux fonctions organiques et ce qu'elles donnent quand on les reproduit sur la carte du monde<sup>30</sup> Ainsi, on pourrait considérer qu'il y a, pour le "haut", d'abord défini de manière organique comme point de départ de la nutrition, également une qualification envisageable eu égard au mouvement local, en mettant en valeur le fait qu'il y a des parties organiques (en l'occurrence: des membres) qui se trouvent en position supérieure par rapport à d'autres, qui sont censées jouer un rôle coordonné avec elles dans la même locomotion, mais un rôle qui les met en position "en bas"

Il se peut en outre qu'Aristote éprouve beaucoup de difficultés à envisager de manière cohérente une qualification de la locomotion qui puisse faire fond sur la triple polarisation des *diastaseis*. Le *de incessu* (VI, 706b28-32) élimine l'opposition de l'avant et de l'arrière, du fait qu'il n'y a aucun animal qui se meuve en arrière: c'est peut-être un constat<sup>31</sup>, mais c'est beaucoup plus vraisemblablement le résultat d'une induction, à partir du fait que la mobilité en arrière ne pourrait pas être dirigée par la sensation (au moins la sensation visuelle) et à partir de l'indistinction souvent effective entre les parties antérieures et les parties supérieures de l'animal. Cela permet aussi une réduction aisée des divisions possibles, quel que soit le nombre de pattes, entre animaux dont les mouvements sont d'abord déterminés par la distinction de la droite et de la gauche (auxquels il suffit d'avoir deux membres impliqués dans la locomotion) et animaux dont les mouvements sont aussi déterminés par la distinction du haut et du bas (ce qui demande que quatre membres au moins jouent un rôle dans le déplacement).

En admettant toutefois que l'opposition du haut et du bas puisse, par le détour que nous avons envisagé, être tenue pour pertinente dans la définition des "points de départ" de la locomotion, il resterait à justifier qu'elle puisse être tenue pour première par rapport à celle de la droite et de la gauche. Manifestement les chapitres du *de incessu animalium* que nous venons d'exploiter offriraient plutôt des motifs de penser le contraire, puisque la distinction de la droite et de la gauche paraît plus fondamentale, en ceci qu'elle définit les membres moteurs

---

30 Je veux simplement dire par là que, en ce qui regarde la locomotion considérée en elle-même, il n'y a rien qui puisse justifier que l'on qualifie les bras ou les ailes comme "en haut" et les pieds comme "en bas"; on ne le peut qu'en comparant les qualifications des parties du corps aux orientations du tout.

31 Encore que certains aient voulu y mettre une sourdine en faisant état d l'exception que représenterait la langouste qui (d'après *Hist. anim.* I, v, 490a3) nage plus vite "en direction de sa queue", ce qui suppose au moins qu'elle puisse aller en arrière.



(ou répartit leurs rôles) y compris pour des animaux bipèdes. Cependant le *de motu animalium*, chapitres VIII (depuis 702a21) et IX, utilise la conceptualisation du point d'articulation de la flexion comme double (et eu égard à la partie mue, comme origine), en vue d'une généralisation qui permet de donner au cœur (ou, disons, à la région du cœur) le rôle de point d'articulation pour l'ensemble de l'organisme. Cela tient à ce que, lorsque l'animal tout entier se déplace, sa droite et sa gauche sont également en mouvement<sup>32</sup>: eu égard à cette possibilité, on ne peut donc pas se borner à n'envisager comme centre d'articulation pour l'animal une jointure qui se trouve située à droite ou à gauche; il reste qu'elle soit au centre, ce qu'est la région du cœur, et ainsi le cœur, outre le fait qu'il soit le premier instrument de la motricité inspirée par le désir, se trouve être aussi le point d'appui ultime du mouvement de l'ensemble de l'organisme. Or dans cette argumentation, la position du point fixe, dans la mesure où il est en même temps envisagé comme origine du mouvement, est qualifiée de plus élevée que celle de la partie mue de la flexion (702b10), si bien que la formulation de la conclusion qui présente la région du cœur comme le point d'appui interne d'un mouvement impliquant à la fois le flanc gauche et le flanc droit s'exprime assez curieusement en disant que leur point d'appui doit être dans un point supérieur à l'un et l'autre et que, par conséquent, le milieu (du fait qu'il est l'extrémité des deux) est le principe où agit l'âme motrice (702b15-17). Cette façon de voir permettrait donc de comprendre que l'âme, bien qu'ayant son premier instrument dans ce qui est, à strictement parler, le milieu du corps, puisse y être présentée comme y agissant – en étant origine du déclenchement de l'aspect mécanique du mouvement – d'"en haut" Il est vrai que, pour qu'elle soit utile à l'éclaircissement de notre passage du *de caelo*, il faut prendre l'expression ἀνωτέρω dans un sens littéral (ce qui est situé plus haut que), et non pas seulement dans le sens abstrait de "supérieur" (ce qui est plus puissant). En renvoyant à un passage du *de generatione animalium* (V, VII, 788a15-16), où l'on dit simplement qu'un principe est, ce qui étant cause de quelque chose, n'a pas en outre d'autres cau-

32 On peut penser au déplacement "en diagonale" des pattes du quadrupède (ou du balancement du bras gauche en même temps que la projection de la jambe droite). Ce qui suffit, pour l'essentiel, à répondre aux difficultés que Martha Nussbaum soulève à propos de l'argumentation du début du chapitre IX (édition du *de motu animalium*, Princeton, 1978, pp. 369-371). Le déplacement "en diagonale" illustre bien le cas où l'on a un déplacement simultané à la fois d'une partie droite et d'une partie gauche et d'une partie antérieure et d'une partie postérieure, ce qui – comme M. Nussbaum le constate elle-même – permet de conclure que le point fixe doit alors être localisé comme le centre eu égard à ces quatre directions, donc au milieu du tronc.

ses au dessus (ἄνωθεν) de lui, c'est pourtant vers ce sens "métaphorique" que Farquharson et Torraca à sa suite<sup>33</sup> orientent la compréhension de ces déclarations et c'est une attitude qui s'explique fort bien, dans la mesure où il est assez difficile d'accepter que l'on dise en un sens littéral que ce qui doit être "en haut" se trouve par conséquent au milieu. Il y a de bonnes raisons pour accepter qu'en tout cas le cœur soit "plus élevé" que les autres principes (envisageables) de la locomotion dans ce sens qu'il n'y aurait pas au delà de lui – dans la séquence des points fixes de flexions – quelque chose qui mériterait davantage d'être considéré comme le point de départ à partir duquel s'exercerait l'action motrice de l'âme. En effet, ce qui donne à la région du cœur une position exceptionnelle par rapport aux autres points fixes, c'est qu'à proprement parler, c'est un point fixe qui est "point de départ" dans deux directions opposées, mais "point d'arrivée" dans aucune<sup>34</sup>: il faut donc accueillir favorablement la suggestion indiquée par Farquharson. Mais il n'en résulte pas pour autant que ce point fixe par excellence ne puisse pas également être considéré comme "en haut" en un sens littéral: il suffit de considérer que, à cet égard (c'est-à-dire celui de la locomotion) comme dans le reste, le "haut" doit être qualifié par la fonction et non pas par une appréciation de position extrinsèque. Simplement, il faut reconnaître que ce "haut" relativement à la locomotion ne coïncide pas – en tout cas pas forcément – avec le haut relativement à la nutrition.

Quoi que l'on puisse penser de cette formulation, toujours est-il que, s'agissant de la locomotion, c'est bien la région du centre qu'Aristote considère comme au principe. On se demandera sans doute comment, dans ces conditions, il est encore possible de présenter la droite comme "principe" au moins dans ce sens que ce serait ce "à partir de quoi (*apo*)" s'effectue le déplacement. D'après

33 A.S.L. Farquharson, traduction du *de motu animalium* dans la traduction d'Oxford (vol. V, 1912, *ad loc.*) et Luigi Torraca (éd. Naples, 1958, note *ad loc.*).

34 Alors que la discussion de la fin du chapitre IX mettait en évidence que des articulations comme les doigts (par rapport au bâton qu'ils manient), le poignet (par rapport à la main), le coude (par rapport à l'avant bras), l'épaule (par rapport à l'ensemble du bras) sont bien des "points de départ" (ce qui permettrait de dire que c'est "en eux" que l'âme se situe pour mouvoir ce qui suit), mais que ce sont des "points d'arrivée" eu égard à la partie fixe qui les précède (l'avant bras par rapport au poignet, ou le tronc par rapport à l'épaule); en ce sens, on ne peut pas y situer la capacité motrice de l'âme, si du moins celle-ci est censée être un principe pour lequel il n'y a rien de "supérieur". Différence sur ce point entre une conception du μέσον qui en fait exclusivement une limite et un point de départ et une conception qui en fait un point d'aboutissement, ou le point d'aboutissement, i.e. de rencontre de deux directions (et dont l'expression exacte serait celle de μεταξύ), *de calo* II, XIII, 293a27-b15.

le chapitre IV du *de incessu*, où, ainsi que nous l'avons signalé, la droite est présentée comme "commencement", que ce soit avec une construction en *apo*, ou même (705b30) avec une construction en *ek* – et dans les deux cas avec un régime au pluriel τῶν δεξιῶν –, sans doute faut-il penser que le flanc droit n'a pas à proprement parler de force motrice, ni qu'il soit véritablement le premier organe où s'exerce la causalité de l'âme: ce premier organe reste le cœur. Simplement on veut dire que c'est le côté de l'organisme dont les parties (avec leurs point fixes articulatoires propres) sont projetées en avant les premières. Peut-être la portée du passage 285a22-25 est-elle tout simplement de rappeler cette hiérarchie. Il faudra en tout cas la conserver présente à l'esprit pour éviter de spéculer sur l'état de la doctrine du moteur immobile représentée dans ce chapitre du *de caelo*, où l'on pourrait éprouver le sentiment qu'il y a tout simplement un moteur "physiologique" le flanc droit. Justement, la droite n'est pas le moteur, elle est simplement ce qui est mû en premier.

### Les motifs de la priorité de la droite sur la gauche

Parmi les animaux sublunaires, c'est chez l'homme que la différenciation de la droite et de la gauche est la plus perceptible (*de incessu*, IV, 706a18; pour les degrés de différenciation chez les autres animaux, cf. 705b21-29). Pourtant nous avons dit qu'elle est moins sensible par une différence anatomique que comme une capacité<sup>35</sup>. Contrairement à ce qui a été maintes fois mis en avant depuis Kant, Aristote ne porte pas beaucoup d'attention à ce que nous appelons la non-congruence de répliques (ou énantiomorphisme), laquelle fait par exemple que nous ne pouvons pas enfiler sur la main gauche un gant – du moins un gant dont tous les doigts sont différenciés – confectionné pour la main droite. En dépit d'une allusion rapide au jeu de mots sur les deux sens de *dexion* ("droite" et "adroit", 706a21-22), il n'insiste pas non plus sur le fait que la majorité des humains sont "droitiers" plutôt que "gauchers". En fait la détermination de droite est entièrement rendue indépendante de la structure visible et des repères extérieurs et entièrement rapportée à la modalité de déplacement, si bien qu'il la suppose universelle chez tous les animaux locomoteurs (706a9-10) et qu'il la suppose présente chez des animaux où elle n'est pas extérieurement visible,

35 Quoiqu'il y ait des animaux pour lesquels ce soit le cas, tout au moins en ceci que le flanc droit est plus fort, comme le crabe.

comme les serpents et les chenilles. Cela lui permet de contourner une difficulté apparente (285a31-b8) qui est qu'on ne voit pas comment discerner la droite et la gauche dans ce qui est sphérique, et donc comment on pourrait appliquer cette distinction à l'univers. Il n'est pas nécessaire qu'on les puisse distinguer morphologiquement, il suffit que l'aptitude quant au mouvement le soit; même si la différence ne se voit pas du fait que l'intérieur de l'organisme est recouvert par une enveloppe qui donne l'apparence extérieure d'une symétrisation complète des deux flancs, il y a tout de même une différenciation, pourvu qu'il y ait une différence entre deux modes possibles de locomotion. On pourrait penser – c'est en tout cas ce qui est suggéré pour les serpents et les chenilles – qu'il demeure une différenciation dans les organes internes, et l'image étonnante de notre passage pourrait le suggérer; mais il me semble qu'il n'est pas du tout nécessaire de supposer pour le ciel – pas davantage que ce ne l'est pour les autres animaux – une différence anatomique; il suffit qu'il y ait une différence de fonction quant aux points fixes. Bien entendu, il reste à savoir comment on peut distinguer deux orientations possibles du mouvement pour le ciel. La difficulté est aggravée du fait que la conceptualisation de la différence droite/gauche qu'il a proposée pour les animaux sublunaires et qu'il cherche manifestement à appliquer telle quelle au ciel, s'applique à un mouvement qui est de cheminement et qui comporte arrêt et départ: c'est par le fait que le bipède mette d'abord l'un de ses deux pieds (et pas les deux ensemble) en avant, et que ce soit toujours le même, à toutes les fois qu'il se met en route, que nous discernons ce qui est chez lui la droite et la gauche: comment pourra-t-on opérer un tel discernement pour le mouvement de l'univers qui n'a pas du tout de commencement, ni arrêt, ni nouveau départ? La réponse qu'il offre (285b5-8): qu'on ne doit point tenir cette objection comme dirimante, et que, encore que le mouvement du ciel n'ait jamais eu de commencement, on doit pouvoir discerner de quel côté eût été son départ s'il en avait eu un – a paru platonicienne à Simplicius (p. 389, ll. 31-33, qui renvoie à *Lois*, X, 895A) et elle a choqué les exégètes modernes<sup>36</sup> Il me semble cependant que, si l'on met à part le problème délicat de savoir quel type d'attitude modale est compatible avec ce genre de supposition, en ce qui concerne la question directe, on peut retenir qu'elle est pertinente tout simplement en ce qu'elle part du constat (ou de la présupposition) qu'il y a bien possibilité de discerner deux orientations possibles du mouvement du ciel – et selon Aris-

---

36 Qui trouvent eux aussi que cette façon de voir s'accorderait mieux avec la cosmologie du *Timée* ou avec celle du *Politique* qu'avec le reste du *de celo*. cf. Paul Moraux, éd. (Belles Lettres, 1965, p. xciii, n. 3) et Leo Elders, p. 189.

tote, elles se discernent en effet – et que, comme aucune d’elles n’est contraire à la nature de l’éther, celle qui vaut *de facto* pour le ciel tout entier (pour la sphère des fixes) aurait pu ne pas être préférée à celle qui vaut *de facto* pour le mouvement du soleil selon l’écliptique.

\* \* \*

Pour déterminer ce que sont la droite et la gauche du ciel, Aristote fixe d’abord ce qu’est sa longueur: c’est l’axe des pôles, qu’il distingue par le fait que c’est le seul axe dont les extrémités sont immobiles, mais dont il ne décide pas d’emblée lequel est en haut et lequel en bas<sup>37</sup>. C’est donc à partir de qualifications intrinsèques qu’il envisage la distinction des orientations pour le ciel: s’il n’y a qu’un seul axe immobile (et, avec Simplicius, universel), c’est lui qui représente la “longueur” du ciel, conformément à l’analogie avec les animaux sublunaires, pour lesquels la longueur est la “dimension” qui (a) ou bien peut être qualifiée comme immobile eu égard à la locomotion (parce que c’est un axe pour les vivants qui n’ont pas de locomotion, les plantes), (b) ou bien peut être considérée comme l’axe dans lequel se trouve, pour les vivants locomoteurs, le centre qui constitue leur point articuloire fixe<sup>38</sup>. La droite et la gauche sont alors

37 La terminologie est évidemment allusive et il faut sans doute comprendre que discerner le *diastéma* entre les pôles, c’est déjà choisir sur la sphère, parmi l’infinité des demi cercles qu’on y peut dessiner, celui qui offre une marque de différenciation. Simplicius (p. 390, l. 16-20) évoque d’autres possibilités qui ont évidemment une pertinence pour les géographes et les astronomes: les cercles méridiens et l’horizon (= les demi -sphères délimitées par les méridiens et celles délimitées par l’horizon) et, en rappelant qu’ils sont purement relatifs aux lieux d’observation (c’est-à-dire que ce ne sont que des cercles de la sphère locale, et non de la sphère universelle), il laisse entendre que la *diaphora* par laquelle Aristote discerne les pôles serait aussi son universalité. C’est sans doute un point de vue orienté par l’enseignement d’astronomie élémentaire ultérieur. Il semble plutôt qu’Aristote ait voulu distinguer les hémisphères divisées par le cercle équateur du ciel (et qui contiennent, il est vrai, les cercles parallèles universels qui intéressent l’astronomie d’observation: arctique et antarctique, tropiques et équateur) de celles qui sont divisées par les cercles qui, ou bien passent par les pôles (comme les méridiens) ou bien leur sont obliques (comme les horizons).

38 Simplicius rapporte (p. 392, l. 33- 393, l. 20) une tentative d’Alexandre pour déduire que ce doit bien être l’axe des pôles qui détermine la dimension du haut et du bas pour l’univers; elle repose sur le fait que dans le vivant sublunaire, seule la dimension du haut et du bas se trouve chez des vivants immobiles (au sens qu’ils n’ont pas de déplacement, i.e. les plantes); par conséquent il est raisonnable que ce qui est également immobile dans le *kosmos* représente pour le ciel la dimension du haut et du bas.– Il est possible que, comme semble le suggérer Simplicius (qui place cette citation

présentées comme n'étant pas assimilables aux pôles, mais comme étant disposées autour d'eux (παρά, 285b13 et 14)<sup>39</sup> et cette distinction est en outre justifiée par référence à l'usage courant du terme πλάγια (côtés): il s'agit certainement d'une remarque où Aristote se dissocie de la terminologie pythagoricienne, et nous y reviendrons. Mais il n'en procède pas moins comme précédemment, c'est-à-dire en déterminant ce qui forme la "droite" et la "gauche" de l'univers, en prenant, pour ainsi dire, le point de vue que le ciel (ou, ce qui revient au même<sup>40</sup>, les étoiles de la sphère des fixes qui y sont justement considérées comme fixées et dont le mouvement – la révolution diurne – suit toujours le même cercle selon la même direction) prend sur son propre mouvement. L'assignation des déterminations "droite" et "gauche" se fait en appliquant au mouvement du ciel ce principe – supposé vérifié dans le cas des animaux terrestres – que la droite est le flanc à partir duquel l'animal commence son mouvement: la droite sera donc pour le ciel ce côté où toutes les étoiles se lèvent, c'est-à-dire (pour un observateur placé dans l'hémisphère nord) l'orient. Il faut ici noter d'abord qu'Aristote effectue un choix entre deux solutions possibles et ensuite qu'il est amené à une bizarrerie quand il passe de cette détermination de l'orientation gauche/droite du point de vue du ciel lui-même à ce qui en résulte pour notre propre situation eu égard à lui. Aristote, pour déterminer la droite du ciel choisit d'en faire la qualification du mouvement des étoiles (celui de la rotation diurne), et non celui du soleil selon l'écliptique (i.e. du soleil comme planète, selon la révolution annuelle). Ce choix n'a rien de surprenant, puisqu'il est clair que le mouvement de la sphère des fixes mérite davantage que celui des planètes le titre de "mouvement du ciel"; mais il faut souligner que le choix est entre deux mouvements seulement (comme on le voit en 285b28-33, où il n'est fait mention que d'un seul second mouvement), alors que le ch. 12 (à tout le moins) du même deuxième livre laisse penser qu'Aristote connaît une théorie des mou-

---

d'Alexandre dans la rubrique des "réponses aux objections" que l'on pourrait faire aux affirmations d'Aristote, Alexandre ait surtout voulu montrer qu'Aristote avait raison de procéder en définissant le haut et le bas de manière indépendante de (et préalable à) la définition de la droite et de la gauche, et justifier par là sa critique de la démarche pythagoricienne. Si c'est le cas, son raisonnement (qui, considéré en lui-même, n'est pas des mieux inspirés et vise inutilement à donner une allure syllogistique, qui, à ses yeux, manque aux affirmations de 285b9-14) pourrait comporter un élément intéressant pour le contraste de la démarche du Stagirite et de celle des Pythagoriciens. On y reviendra un peu plus loin.

39 La leçon περί du Laurentianus, adoptée par Bekker et conservée par Guthrie (éd. Loeb, p. 245, note) quoiqu'avec hésitation, est certainement moins justifiée si elle vise à accentuer dans "autour" la tendance vers.

40 Pas tout à fait cependant, comme on va s'en apercevoir.

vements planétaires comme celle des sphères homocentriques d'Eudoxe, c'est-à-dire que les planètes n'auraient pas qu'une seule sphère motrice et qu'en conséquence leurs mouvements ne seraient pas univoquement réductibles à un mouvement de direction opposée à celui de la sphère des fixes. Cependant, on peut aussi deviner (par une incidente du ch. 10, 291a2) que dans le système de sphères entraînant qu'il a en vue, Aristote maintient que la dernière, celle qui porte réellement la planète, est toujours animée d'un mouvement opposé à celui de la sphère des fixes; et c'est, pour ainsi parler, ce mouvement-là qui est, là aussi, le mouvement propre de la planète, celui, en tout cas, par référence auquel il est possible de parler de *sa* droite et de *sa* gauche. Il y a en revanche une bizarrerie qui tient à ce que, tout en définissant la droite du ciel par la région dans laquelle ont lieu les levers des étoiles, Aristote applique à la direction de leur mouvement une expression ἐπὶ (τὰ) δεξιᾶ, dont on a souvent souligné qu'elle appartient autant à un vocabulaire de la valorisation sociale des déterminations hodologiques qu'à une conceptualisation spécifiquement appliquée au mouvement des astres ou même des animaux. Dans une phrase assez déconcertante (285b19-20), Aristote caractérise à la fois le mouvement des étoiles comme s'effectuant ἀπὸ τῶν δεξιῶν et ἐπὶ τὰ δεξιᾶ<sup>41</sup> – ce qui, à moins d'absurdité patente, ne peut pas s'appliquer à la caractérisation de la marche de l'étoile selon le même point de vue. On a dit que que l'assignation de la détermination ἀπὸ τῶν δεξιῶν à l'univers s'est faite en prenant comme sa droite la région dans laquelle ont lieu tous les levers d'étoiles, c'est-à-dire l'est; or il est de fait que pour l'observateur situé sur l'axe des pôles<sup>42</sup> et qui a la tête tournée vers

41 Il est ἀπὸ τῶν δεξιῶν du fait que, comme on l'a dit, c'est le flanc droit de l'univers (et de chaque étoile) qui doit contenir le point de départ de sa motricité; il est ἐπὶ τὰ δεξιᾶ du fait que l'étoile doit prendre la direction la plus noble pour aller de son lever à son coucher, en passant par sa culmination (d'après le ch. 5, 278b22-25, on s'aperçoit que la marche que doit suivre l'étoile – qui, à partir de son lever, pourrait rejoindre son coucher soit par un chemin qui lui ferait avoir son point de culmination “à l'avant” selon un certain repère, soit “à l'arrière” – doit passer par l'avant. Reste à savoir d'après quel observateur. L'explication donnée par Oddone Longo, pp. 319-321 est peu compréhensible et paraît affirmer le contraire de ce que dit le texte. Paul Moraux, qui a bien cerné la difficulté (pp. xciii-xcv, note), mais est resté persuadé que le seul point de vue possible est celui de l'observateur terrestre.

42 Il faut se souvenir que l'axe des pôles (boréal/austral) du ciel est, pour l'observateur, incliné par rapport à l'axe terrestre (nord/sud); ce qui fait que qu'il y a pour lui des étoiles qui sont toujours visibles (pour nous, les étoiles circumpolaires au nord), d'autres qui sont toujours invisibles (comme la croix du sud) et d'autres qui ont un lever et un coucher; cette inclinaison est relative à la latitude du lieu, mais le fait qu'il y ait une division entre les latitudes nord et les latitudes sud (c'est-à-dire qu'il y a une opposition entre deux systèmes d'étoiles circumpolaires) est considéré comme une propriété qui affecte le ciel lui-même.

l'étoile polaire, le mouvement que décrit l'étoile part *également* de sa droite (c'est un mouvement qui va dans le sens contraire des aiguilles d'une montre); par conséquent, si l'expression ἐπὶ τὰ δεξιὰ désigne bien la direction dans laquelle s'effectue le mouvement, pour cet observateur, le parcours de l'étoile se fait de droite à gauche, c'est-à-dire qu'il ne s'accomplit pas ἐπὶ τὰ δεξιὰ et c'est sans doute pour cette raison qu'Aristote tire la conclusion que – contrairement à l'avis des pythagoriciens – ce n'est pas la direction du pôle boréal, mais celle du pôle austral qui indique le haut de l'univers (en ayant la tête tournée vers le pôle austral, mais en restant dans la région des latitudes nord, par exemple si nous avons les pieds près du cercle d'une étoile de la grande ourse, mais la tête pas plus loin que le lieu où nous sommes situés, nous verrions ces mêmes étoiles se lever sur notre gauche et se coucher vers notre droite). Ce qui demeure bizarre, c'est ce renversement du point de vue pour désigner l'ἀπὸ τῶν δεξιῶν et l'ἐπὶ τὰ δεξιὰ. Il est vrai que, s'agissant de la première caractérisation, on serait tenté de penser qu'elle s'applique de la même manière au point de vue du ciel (par justification intra-systématique, on détermine que l'orient est la droite pour l'animal céleste) et au point de vue de l'observateur (pour nous les étoiles, en se levant "à l'est", se lèvent bien sur notre droite), mais justement la décision de rétablir un parcours qui vérifie également la deuxième caractéristique (l'orientation *epi ta dexia*) oblige à abandonner cette coïncidence, puisque si l'observateur se tourne vers le pôle austral, il n'est plus vrai que le parcours de l'étoile qui est visible pour lui prenne son départ à sa droite. On aurait donc bien une double caractérisation du mouvement de l'étoile, l'une intrinsèque au ciel et à l'astre lui-même (et qui devient *uniquement* intrinsèque à l'astre et à la voûte céleste, si comme on l'a dit, l'observateur terrestre a son véritable haut vers la région australe, et non pas boréale) et l'autre relative à l'observateur (à condition qu'il soit tourné comme on l'a dit). À supposer que l'on doive s'en tenir là, on remarquera que si le Stagirite paraît se laisser guider par des préjugés (ici la valorisation du mouvement vers la droite), du moins la réinsertion de ceux-ci dans l'organisation du système aboutit-elle à des conclusions qui heurtent peut-être davantage encore les préjugés du sens commun, puisque l'affirmation que le haut est dans la région opposée à celle où nous sommes s'écarte de ce qui doit être le sentiment spontané de l'observateur terrestre situé dans l'hémisphère nord<sup>43</sup>.

Ceci étant admis, on peut soupçonner que cette dissociation des deux caractères – rapportés l'un au ciel et l'autre à l'observateur terrestre – ne doit

43 Ce que souligne Simplicius, p. 390-1.



pas être complète (qu'elle n'est même vraisemblablement qu'apparente); car si l'on rapporte les appréciations de l'observateur terrestre à sa propre situation pour en faire quelque chose qui le qualifie de manière intrinsèque, ce qui est le bas *pour lui*, c'est la terre, puisqu'elle l'est relativement au mouvement du lourd et du léger, et toute la périphérie est indifféremment "le haut". Il semblerait ainsi que si l'on attribue au pôle austral le statut du haut, non seulement ce n'est pas une manière d'assigner cette détermination qui corresponde au préjugé spontané que peut avoir l'observateur situé dans l'hémisphère nord, mais en outre on ne voit pas comment ce pourrait être pour lui une qualification intrinsèque eu égard à ses propres capacités de mouvement. Aristote du reste présente bien cette qualification comme propre au *kosmos*, et dès lors, il s'agit de savoir si elle ne lui convient que relativement à l'observateur terrestre et en raison d'un préjugé sur ce qui constitue l'orientation noble d'un parcours, ou s'il est possible de trouver un motif pour en faire un attribut intrinsèque du monde. Comment faire pour que la caractérisation *epi ta dexia* puisse être pertinente pour le monde, c'est-à-dire pour le point de vue qu'il (lui ou les étoiles) peut prendre sur son propre mouvement? À mon sens le point de vue qu'il faut adopter doit concerner l'étoile, envisagée comme se déplaçant sur son cercle (dans un plan orthogonal à l'axe des pôles): c'est la giration du passage inférieur (visible pour nous seulement pour les étoiles circumpolaires au pôle boréal) => lever=> culmination=> coucher (=> passage inférieur) qui doit, pour l'astre, se présenter de telle manière qu'elle puisse recevoir la qualification "vers la droite". Or si nous supposons l'astre placé sur la circonférence du cercle qu'il parcourt et regardant le centre de ce cercle, nous pouvons sans difficulté dire que son mouvement se fait *apo tón dexiôn* dans le sens que nous avons expliqué, à savoir que son lever a lieu dans la région qui forme le flanc droit du ciel, mais alors son déplacement sera par rapport à lui-même vers la gauche (il se déplace dans le sens des aiguilles d'une montre, comme un individu placé sur le cercle et qui regarde le centre); si l'on veut que son déplacement soit pour lui "vers la droite", on peut penser à le faire pivoter (sur lui-même) et regarder, au lieu du centre de la montre, l'extérieur, et vu la disposition des cercles des étoiles (les parallèles empilés au long de l'axe des pôles) on peut comprendre que cela équivaille à lui lui faire tourner la tête vers le pôle austral; il est vrai que dans ces conditions, il ne tourne plus son flanc droit du côté oriental (celui d'où part son mouvement) mais au fond cela n'est pas si gênant, dans la mesure où, comme cela sera établi au ch. 8, ce n'est pas l'astre lui-même qui est son propre moteur, mais le cercle qui le porte, c'est à dire une partie de la sphère des fixes (du ciel au sens strict), et pour le ciel, on peut toujours dire (quelle que soit la position dans laquelle l'astre se trouve sur son cercle porteur) que son mouvement part de la droite.

Ainsi donc, on conserve bien une dualité pour pouvoir affirmer à la fois que le mouvement des étoiles soit “en commençant par la droite” et qu’il soit “vers la droite”, et cette dualité est inévitable si l’on veut éviter l’absurdité (puisqu’on ne peut pas partir de la droite pour aller vers la droite), mais cette dualité est entre le point de vue du moteur (le ciel ou le cercle porteur) et le mû (l’étoile), ce qui, à ce qu’il semble correspond assez à l’usage courant où la qualification *epi ta dexia* s’applique le plus souvent à celui qui est porté ou à celui qui est spectateur d’un mouvement, plutôt qu’à sa motricité. De cette façon, on a une illustration supplémentaire de cette classique attitude d’Aristote: il ne tourne pas aussi radicalement le dos au sens commun (aux préjugés communs) que ne le fait Platon (lequel rejette toute pertinence des distinctions entre haut et bas, droite et gauche, pour l’univers), mais ce qu’il récupère des indications de celui-ci, il le transforme (et le rend opposé, éventuellement, aux affirmations du sens commun) par l’intégration au tissu intra-systématique.

### En quel sens le monde est-il “animé”?

L’application d’une différence droite/gauche à l’univers passe par le fait qu’il soit “animé” (*empsychos*), ou plus exactement, qu’il soit animé et possède un principe de déplacement (puisque cette distinction n’est pertinente que pour les animaux et non pour les plantes). En rappelant cela (285a27-31), Aristote indique qu’il trouve autant de justifications (et dans un meilleur ordre) que les Pythagoriciens à accepter cette qualification pour le ciel. Cependant cela a paru contraster avec la polémique menée au chapitre précédent contre la construction du *Timée*, et en tout cas la reconnaissance d’une “âme du monde” est apparue comme peu compatible avec celle d’un moteur immobile<sup>44</sup>. Aucune de ces appréciations n’est justifiée. La faiblesse de la première a déjà été soulignée par Ross, puis par Guthrie<sup>45</sup>: la critique adressée au *Timée* ne porte pas sur le fait que le ciel y soit doué d’une âme, elle porte sur le fait que cette âme imprime au corps qu’elle anime un mouvement qui lui est contre-nature. En effet Platon ne compose pas la région supra-lunaire autrement qu’avec les éléments de la région sublunaire<sup>46</sup>, lesquels, aux yeux d’Aristote, se ramènent purement et sim-

44 Ainsi Leo Elders, p. 189.

45 introduction à son édition du *de calo*, p. xxxi-xxxii.

46 En ne tenant pas compte de l’allusion mystérieuse (*Timée* 55C) au rôle possible du dodécaèdre.

plement aux quatre éléments classiques, et par conséquent ont des mouvements naturels linéaires, vers le haut et vers le bas, et non pas circulairement. Les quatre premiers chapitres du livre I ont établi que pour qu'il y ait une réalité pour laquelle la translation circulaire soit naturelle, il faut poser un cinquième élément, l'éther (qui, de surcroît, n'a aucune possibilité d'entrer dans des transformations réciproques avec les autres). La façon dont l'âme du monde est composée dans le *Timée* (par un mélange du même et de l'autre, du divisible et de l'indivisible) ne paraît pas à Aristote en faire un cinquième corps, et de ce fait elle apparaît comme imposant à un élément corporel, qui est au mieux composé de tétraèdres (si l'on pense que c'est le feu qui prédomine dans la région supralunaire) ou plus vraisemblablement des quatre éléments classiques, un mouvement qui ne leur est pas naturel. C'est ce rôle de l'âme du monde, en tant que, pour ainsi dire, elle n'a pas pour contrepartie un corps dont les aptitudes lui soient ajustées, qu'Aristote critique chez Platon. – Ceux qui ont reconnu cela n'en ont pas moins pensé que le *de cælo* représenterait un stade de l'évolution de la cosmologie du Stagirite qui combinerait (ou juxtaposerait) deux explications de la mobilité du ciel: par l'aptitude spontanée du corps éthéré, et par une âme, qui doit être normalement conforme à la conception de l'âme du *de anima* et donc unie à ce corps comme son entéléchie; les allusions à la causalité d'un moteur immobile que l'on trouve en II, VI, 288a27 et b22, ou bien n'imposent aucune conclusion claire ou bien sont des additions tardives; et en effet si tant l'aptitude naturelle de l'éther que la présence d'une âme suffisent à expliquer le mouvement circulaire et éternel du ciel, on ne voit pas qu'il soit nécessaire d'ajouter un moteur immobile; pour en venir à cette notion, il fallait à Aristote rejeter radicalement l'idée (héritée de Platon, et transférée soit alternativement, soit simultanément à l'âme et à l'éther) de l'auto-motricité, ou plus exactement l'idée que l'auto-motricité puisse ne se réaliser qu'avec des moteurs eux-mêmes en mouvement, sans rien d'immobile (et qu'elle puisse le faire de manière éternelle et continue); c'est ce qu'Aristote n'aurait pas encore saisi à l'époque de la composition primitive du *de cælo*<sup>47</sup>

Il faut bien dire que si l'éther est doué d'une aptitude naturelle au mouvement circulaire et s'il n'y a pas eu de commencement à son mouvement, on ne voit en effet pas très bien quel rôle pourrait jouer le moteur immobile: mais cette difficulté doit encore demeurer dans la présentation du livre Λ de la *Méta-*

47 Cette façon d'envisager la place du *de cælo* dans l' "évolution" d'Aristote est bien illustrée dans l'introduction de Guthrie. Pour une présentation qui insiste sur le caractère indécis des positions dessinées, cf. P. Moraux, introduction, p. xlii et sqq.

*physique*, où, cette fois-ci, ce qui est obscur, c'est si le ciel est "animé" (il est difficile qu'il ne le soit pas si le premier moteur doit faire l'objet d'une aspiration) et si son corps est composé d'un élément différent des éléments sublunaires (il n'y est plus question d' "éther"). On pourrait se demander également quel rôle est censée jouer son âme, puisqu'il n'y a apparemment – et contrairement au sentiment de Guthrie – nul besoin d'une "force supplémentaire" pour mouvoir un corps qui en a l'aptitude et qui la réalise éternellement. Le fait que le ciel et son mouvement soient éternels impose une contrainte à la manière de leur appliquer le rôle causal que l'on donne ordinairement aux moteurs (immobiles aussi bien qu'auto-moteurs): on considère que ce rôle est de faire passer à l'acte ce qui n'est dans le mobile qu'une puissance (et passive); mais précisément pour le ciel, il n'y a aucune place pour l'actualisation de ce qui pourrait n'avoir été qu'en puissance, et supposer cela irait absolument à contre-sens des efforts déployés aux chapitres X-XII du livre I, pour montrer qu'un changement donnant origine au ciel ou à son mouvement est inconcevable (ou du moins qu'il ne soit pas concevable de manière compatible avec le fait que, ensuite, ce mouvement n'aura pas de fin). C'est une exigence avec laquelle l'exégèse (à moins qu'elle ne prenne plaisir à insinuer dans les arguments du Stagirite lui-même les prémisses de ceux par lesquels Xénarque, puis Philopon, ont prétendu les renverser) devrait vérifier, préalablement à toute proposition d'interprétation, qu'elle s'est bien mise en règle. Quand on admet que l'aptitude spontanée de l'éther à sa mobilité circulaire suffit à rendre compte du fait qu'elle soit éternellement réalisée ainsi et qu'il n'y a pas besoin d'un agent qui la fasse passer de la puissance à l'acte, il ne reste plus alors qu'à faire de l'âme une entéléchie du mouvement circulaire, dont la seule nuance, eu égard à la notion stricte et simple de ce mouvement, consiste à le nommer en "vie": c'est, à mon avis, ce qui, par des canaux qu'il ne peut être question d'essayer de reconstituer ici, est arrivé, ainsi filtré, jusqu'à la résurgence de cette visualisation au I<sup>er</sup> siècle avant notre ère (chez les témoins de Posidonius), résurgence qui a été à l'origine de cette image singulièrement artificielle de la première étape de la cosmologie aristotélicienne qu'aurait été le *de philosophia*.

Dans le cas du mouvement des éléments sublunaires, la nature qui est inhérente à leur constitution est une cause formelle de l'orientation de leur mobilité: elle fait que, si rien ne l'en empêche, le feu *se trouve* en haut, et que, si quelque chose l'a initialement empêché de s'y trouver et que cet obstacle est enlevé, il *s'élève* vers le haut. Mais elle n'est pas cause motrice: d'une part, il n'y a pas besoin de cause motrice pour que quelque chose se trouve être dans son lieu naturel (je veux dire pour l'y faire demeurer au repos); lorsqu'Aristote envisage la notion hypothétique d'une cause motrice qui ferait être le feu là où il est,

il ne trouve pas d'autre formule que de déplacer la causalité sur une autre forme de changement, celui qui a engendré le feu (i.e. par transformation en feu de quelque chose qui était auparavant bois ou air, par exemple); la cause productive que telle partie de la matière soit désormais du feu est *ipso facto* déterminante du fait qu'elle trouvera son lieu naturel en haut; maintenant, il se vérifie pour la génération du feu ce qui se vérifie pour toute génération, à savoir que la cause productive du résultat est elle-même en acte au début du processus ce que le patient sera au terme de ce processus, si bien que, dans le cas canonique, le feu qui transformera une partie d'air à son contact en l'incendant, étant déjà feu en acte, agit sur lui en étant à son contact (ou en se faisant relayer par quelque chose qui a le même mouvement) et dans un lieu immédiatement supérieur. D'autre part, on peut envisager une cause motrice qui soit celle du transport du feu vers son lieu, mais simplement ce sera celle qui ôte l'obstacle qui l'empêchait de s'y trouver déjà. Eu égard à l'une comme à l'autre, la nature interne du feu est bien puissance (de son mouvement et de son repos), mais puissance passive<sup>48</sup> Dans le cas des vivants, l'âme, il est vrai, joue à la fois le rôle de la nature et celui d'un agent, en ce sens du moins qu'elle est directement cause formelle de la substance vivante et de la détermination des mouvements par lesquels l'animal ou la plante accomplit ses actes vitaux. Mais on peut bien dire qu'il y a encore en face d'elle une puissance passive, qui est le corps, non seulement dans ce sens obvie qu'elle en est la forme, mais également dans ce sens qu'elle est à l'origine des mouvements qu'il exécute (et de ce point de vue, il est bien *organikon* pour elle, i.e. ce dans quoi elle réalise les mouvements qui lui permettent d'atteindre ses buts). Et l'on voit que cette unité "internalisée" de la causalité agente et de la causalité patiente dans le vivant ne le fait pas échapper à cette loi générale qui veut que la causalité motrice (ou productive) ne soit requise que lorsqu'il y a effectivement besoin d'un passage de la puissance à l'acte: l'âme végétative n'agit comme principe de l'assimilation et de la croissance, que lorsqu'il y a des choses ingérées et ayant subi la coction, et en ce sens il y a passage de la puissance à l'acte des puissances de *trophê* et d'*auxêsis*; quant à l'âme sensitive et motrice, lorsqu'elle détermine le déplacement de l'animal, c'est en faisant passer, par une suite assez délicate de relais, l'actualisation de sa *phantasia* et de son *orexis* par la perception d'un "bien" extérieur jusqu'à celle de la puissance de dédoublement des points fixes de flexion dans les articulations des membres. Or ce sont autant de conditions qui sont exclues pour la mobilité du ciel. Il sem-

48 *Physique*, VIII, iv, 255a30-b31.

blerait donc que nous nous trouvions en présence d'une situation rendue difficile sous deux rapports (i) en ceci que la nature de l'élément du ciel, non seulement lui conférerait la puissance passive du mouvement cyclophorique, mais encore, ne rencontrant aucun obstacle et n'ayant eu aucune génération, deviendrait puissance active de ce mouvement (ou en deviendrait l'équivalent, c'est-à-dire que chaque état de mouvement serait en acte cause motrice de celui qui le suit, mais ceci dans un mouvement "continu") et (ii) en ce que l'âme de ce vivant, n'ayant d'information à recevoir d'aucun environnement extérieur, et ne pouvant donc pas trouver d'occasion de faire passer à l'acte des potentialités dormantes, ne pourrait guère avoir d'autre rôle que d'assurer à ce qui est déjà l'auto-motricité du corps éthéré une sorte d'image intérieure de cette spontanéité. Il est manifestement difficile de donner un rôle moteur à une âme ayant affaire à un corps simple et qui a toujours le mouvement qui lui est naturel. Et c'est pourquoi il n'a pas manqué de bons interprètes pour penser que la critique adressée au chapitre I du livre II, si elle trouve une très bonne cible dans le *Timée*, vaut également pour toute sorte d'âme cosmique<sup>49</sup> Pourtant, il ne fait pas de doute que, considéré comme corps, le ciel soit un corps "animé" (ou ayant part à la vie) et il apparaît même<sup>50</sup> que l'éternité immuable de son mouvement circulaire est, pour lui, sa manière de réaliser une tâche, qui est l'immortalité. Il n'en résulte pas (comme Guthrie et Elders ont cru devoir le soutenir) que l'attribution de ce caractère divin et de cette œuvre divine à l'éther implique l'absence d'une doctrine du moteur immobile incorporel, doctrine affirmée un peu plus loin (II, VI, 288b1-6, que les mêmes interprètes sont amenés à considérer comme une addition ultérieure). Il suffit de comprendre que c'est dans le corps du ciel que réside la vie, du moins comme mouvement, de même que d'un corps animal sublunaire, nous pouvons dire que la vie réside comme mouvement dans ses organes sensoriels, dans le cœur, le foie et le sang, et dans le *pneuma*: plus exactement ce sont les mouvements dont ces organes sont soit le lieu de réalisation soit les instruments qui sont dans le corps vivant la vie *comme mouvement*; et l'on peut dire que la réalisation de ces mouvements est l'œuvre de ces organes corporels. À le bien prendre, il conviendrait sans doute d'entendre la "vie"

---

49 Ainsi Fr. Solmsen *Aristotle's System of the World*, Cornell, 1960, p. 243-245, qui fait très justement remarquer que la spontanéité de la cyclophorie de l'éther et l'éventuelle position d'un moteur immobile (mais qui soit réduit à un intellect et ne soit donc pas auto-moteur) permet de récupérer ce qui devait l'être de la conception platonicienne de l'âme auto-motrice, tout en éliminant les inconvénients.

50 Chapitre III, 286a8-12.

non pas comme une sorte de propriété que posséderait l'âme et qu'elle conférerait au corps qu'elle "anime", mais comme un certain type de mouvements et de *praxeis* dont on peut dire que, une fois réalisée, ils conservent l'être du vivant; et de ce point de vue, l'immortalité consiste simplement dans la perpétuation sans limite et sans obstacle de ces mouvements (et *praxeis*) qui sont la vie<sup>51</sup>. Lorsque, dans la célèbre définition de l'âme, on dit qu'elle est l'entéléchie d'un corps qui a la vie en puissance, cette puissance est liée à une certaine organisation qui permet au corps d'exécuter les mouvements en quoi consiste la vie (comme se nourrir, croître, dépérir, 412a14-15) et lorsqu'on ajoute (412b25-26) que le corps qui est dit "avoir la vie en puissance", ce n'est pas celui qui est privé d'âme (le cadavre n'est corps que par homonymie), mais celui qui l'a comme son entéléchie, il apparaît que, dans ce qui est appelé *empsychos*, c'est-à-dire corps animé, la vie consiste bien en un ensemble de mouvements et *praxeis* très spécifiés, et dont la spécification est le fait de l'âme (qui en est la cause formelle). Il me semble donc qu'il n'y a pas véritablement de quoi s'étonner lorsqu'on lit que le ciel, étant un corps divin (288a11: *σῶμα γὰρ τι θεῖον*), a une fonction qui est l'immortalité et que celle-ci consiste à réaliser, pour le vivant qu'il est (ou dont il est une partie) et sous le rapport où il est une partie de ce vivant immortel, un mouvement cyclophorique absolument constant et continu: on ne suggère pas que son œuvre soit de participer à l'activité théorique, non qu'on veuille exclure que tel soit l'aspect essentiel de la vie des dieux, mais simplement, parce que ce n'est pas le rôle d'un corps, fût-il l'éther, que de réaliser une telle activité. Il est donc très possible que, si le ciel est un vivant complet, il a

51 Richard Bodeüs *Aristote et la théologie des vivants immortels*. Québec, 1992, p. 184-5, a opportunément rappelé le passage de *Topiques* IV, v, 126b34-127a2, qui insiste sur le fait que le terme "vie" ne représente pas le genre dont "immortalité" (*athanasia*) serait l'espèce, mais que l'immortalité est une affection (ou une qualification accidentelle) de la vie (si bien que à supposer qu'un homme se trouve immortalisé, nous ne dirions pas qu'il est passé d'une espèce de vie à une autre, mais que sa vie, qui est censée rester la même quant à la définition, a reçu une propriété nouvelle). Il est possible que la définition qui convienne aux dieux ne soit plus, aux yeux du Stagirite, celle de "vivants immortels", car c'est là un accident qui pourrait convenir à la vie d'une plante ou à celle d'un homme, qui, par quelque tour de magie, seraient préservés du vieillissement et de la mort, mais n'en continueraient pas moins à vivre la vie d'une plante, ou d'un homme, c'est-à-dire une vie qui, quelle que soit sa durée, n'est pas une vie de dieu(x). Suivant ces observations de Bodéüs, il ne faudrait donc pas prendre comme une sorte de développement par implication définitionnelle la déclaration de 286a9 "l'acte du dieu, c'est l'immortalité; c'est-à-dire la vie éternelle." Il vaudrait mieux penser que la vie éternelle, qui sans doute définit la vie divine (ou en tout cas en est une meilleure qualification), a pour propre perpétuel l'*athanasia*, et c'est ce propre qu'Aristote retient ici pour dire que dans ces conditions les mouvements de cette vie (en l'occurrence il n'y en a qu'un, la cyclophorie) ne peuvent pas s'arrêter (ils sont "immortels").

aussi un principe qui n'est pas corporel; ce principe est sans doute de l'ordre du "psychique", mais comme le ciel n'a ni besoin de croître, ni de se nourrir, ni de percevoir, il serait assez raisonnable de penser que, déjà dans ce traité, ce principe soit un intellect.

\* \* \*

### Jusqu'où s'étend le genre du vivant?

Ce chapitre (il en va de même du chapitre XII du même livre) fait partie des passages du *de cælo* qui déconcertent le lecteur habitué, par le début du livre I, à penser que si Aristote peut être pris en flagrant délit de construction(s) aventureuse(s), c'est surtout par la hardiesse avec laquelle il donne des interprétations physiques des procédés de la discipline de "la sphère en mouvement" (comme elle est illustrée, de façon presque contemporaine, chez Autolycus de Pitane). Ici, il nous paraît faire fond avec un peu trop de confiance en des analogies tirées de la pratique courante, ou surtout dans la possibilité d'étendre à ce vivant tout de même un peu exceptionnel que doit être le ciel, des propositions qu'il a établies à propos de la locomotion des animaux sublunaires. Ces possibilités inductives<sup>52</sup> sont ici franchement revendiquées: et dans l'allusion aux cours "sur la marche des animaux" et parce qu'on reproche aux Pythagoriciens de n'en avoir justement pas tenu compte. La relation des résultats du *de incessu animalium* à ce chapitre du *de cælo* rappelle beaucoup celle des chapitres 1-2 aux chapitres 3-4 du *de motu animalium*, dans laquelle Martha Nussbaum<sup>53</sup> pensait pouvoir trouver une illustration de la manière dont Aristote était capable (au moins dans la recherche) de s'écarter de la règle des *Seconds Analytiques* sur l'interdiction d'utiliser les principes propres à un genre (a fortiori leurs résultats) comme prémisses pour l'étude d'un autre genre, ce qui l'amenait à considérer le traité qu'elle commentait comme offrant une révision des règles trop strictes des *Analytiques* (*op. cit.*, p. 141). Si, comme on a l'habitude de la croire, le *de cælo* est un traité assez précoce, il faudrait dire que cette révision a déjà connu quel-

52 Au sens, ici, de la possibilité d'exporter "au ciel" (bien entendu, sous certains rapports) des principes qui paraîtraient devoir caractériser le genre animal (ou le genre vivant), en ayant eux-mêmes été posés à partir de l'observation faite sur les animaux sublunaires.

53 Dans le second essai introductif de son édition du *de motu animalium*.



ques illustrations avant la rédaction des *Seconds Analytiques*. Je laisserai de côté les spéculations sur la chronologie du *de celo*, qui ne me paraissent reposer que sur des préjugés. On pourrait penser que l'argumentation du Stagirite est délibérément "dialectique" du fait qu'il s'en prend aux Pythagoriciens qu'il accuse assez souvent (et au demeurant un peu plus tard dans ce livre, ch. XIII, 293a25-27) de mettre en avant des propositions qui conviennent à leur conception générale, plutôt que de s'assurer qu'elles correspondent bien à ce que l'on constate. Mais ce serait faire peu de cas du fait qu'il propose lui-même une décision et la légitime à partir de principes qui, à ses yeux du moins, correspondent à des faits établis. En ce qui concerne la nécessité (réaffirmée contre eux) de reconnaître la priorité de l'opposition haut/bas sur l'opposition droite/gauche, on s'aperçoit aisément qu'Aristote ne pouvait pas l'assurer purement et simplement en rappelant qu'un corps "complet" comporte trois dimensions (et donc que s'il comporte le *diastéma* qui disjoint la droite de la gauche, il doit aussi comporter les deux autres). En effet, les Pythagoriciens l'admettaient eux-mêmes (c'est un point qu'il rappelle au chapitre 1 du livre I) et il est même possible qu'ils aient envisagé pour cela une justification (par l'engendrement de la ligne par "fluxion" du point, de la surface par glissement de la ligne, et du "volume" par rotation du plan), qui aurait peut-être pu paraître plus directe que celle qu'il propose. Or il évite de s'y référer. S'il en est ainsi, c'est, à mon sens, que ce qu'il veut mettre en discussion, ce n'est pas une pure et simple détermination du nombre des "dimensions" du ciel: sur ce point, en effet, dès le moment qu'on le considère comme sphérique (et c'est aussi le cas des Pythagoriciens), il n'y a aucun litige possible. Ce qui est en question, c'est le fait de retenir une opposition gauche/droite, laquelle n'est pas une pure est simple "dimension", mais une opposition polaire qualitative (avec un côté meilleur et un côté moins bon). Or cette opposition, précisément, il la reprend à son compte, et avec elle, une polarisation semblable du haut et du bas, de l'avant et de l'arrière. S'il insiste sur le fait que l'opposition polaire droite/gauche n'est pertinente que pour une classe de vivants (les animaux locomoteurs), il faut dire qu'à ses yeux l'opposition haut/bas n'est aussi pertinente que pour les vivants (à partir des plantes). Ceci surprend, car nous sommes habitués à penser qu'il y a un haut et un bas déjà pour les quatre éléments "inanimés" de la région sublunaire; mais à vrai dire la différence est que l'opposition haut/bas est, assurément pertinente pour le feu et la terre, mais en ceci que l'un étant le lieu naturel du feu, l'autre celui de la terre, leur mouvement naturel les fait aller dans une direction et une seule, ou plus exactement il faut dire que le haut n'est pas pour le feu qualification interne d'un début de mouvement (naturel) comme il l'est chez la plante; il n'est que lieu d'arrivée et de repos (du moins selon le mouvement naturel). Il faut donc

insister sur cette nuance qui distingue les polarisations “hodologiques” pour le vivant de ce qu’elles sont pour les éléments inanimés: le haut et le bas restent, au moins à un certain degré, définis extrinsèquement pour le feu ou pour la terre<sup>54</sup>, tandis que pour la plante le haut est l’endroit où commence un certain mouvement *à l’intérieur d’elle*. Pour autant qu’il tienne encore à cette distinction<sup>55</sup>, on peut dire qu’Aristote fait des êtres auto-moteurs (et qui sont tous des vivants), non plus, comme Platon, des êtres dont le principe interne de motricité (l’âme) serait lui-même éternellement en mouvement, mais des êtres dont le mouvement<sup>56</sup>, même dans le cas où il affecte l’organisme dans son ensemble et se traduit “extérieurement” (ainsi la croissance, qui fait qu’extérieurement la plante prend davantage de place, et bien sûr le déplacement de l’animal) est d’abord un mouvement qui s’effectue à l’intérieur du vivant. Il en va ainsi même du déplacement, car il comporte d’abord une suite assez compliquée de change-

---

54 Au fond, ils demeurent définis par le cadre de référence de l’univers, alors qu’on a vu que le haut et le bas sont, pour la plante, définis d’une façon opposée à ce que donnerait le repérage sur le monde. En 284b35, la remarque sur le fait que les êtres inanimés, quand ils ont un mouvement local (il faut entendre: par nature), ne l’ont qu’en une seule direction (par exemple le feu ne se dirige que vers le haut), vise semble-t-il, essentiellement à les mettre à l’écart de l’éventail des réalités pour lesquelles il est pertinent de considérer la droite et la gauche comme qualifiant une mobilité possible.

55 Ce que l’on a de bonnes raisons de croire; les discussions récentes sur la critique à laquelle le Stagirite aurait soumis la notion d’auto-motricité (critiques qui apparaissent clairement au chapitre IV du livre VIII de la *Physique*) tendent à montrer que ce qu’il a rejeté, c’est simplement l’idée d’une auto-motricité “absolue”, c’est à dire auto-entretenu et ne dépendant d’aucune cause capable de la faire passer à l’acte. En général, les partisans de cette interprétation estiment que cette critique ne s’est clairement affirmée qu’à l’époque de la rédaction de la *Physique*, ce qui laisserait ouverte la possibilité qu’elle n’ait pas encore été pleinement assumée à l’époque de la rédaction du *de calo*, et que, par conséquent, on puisse considérer que l’éther y joue le rôle d’un auto-moteur “au sens absolu”. Cf. les articles de David Furley, Mary-Louise Gill, Susan Sauvé-Meyer et Lindsay Judson dans le volume *Self-movers*, éd. par M. L. Gill et Jim Lennox, Princeton, 1994. Mon désaccord avec ces auteurs ne porte que sur le résultat de la prétendue évolution du Stagirite après *Physique* VIII, je veux dire l’idée que dans *Métaphysique* Λ, le premier moteur (ainsi que ses répliques du chapitre 8) aurait pour fonction d’ “activer” soit la puissance dormante (expression reprise à Guthrie) de l’éther au mouvement circulaire, soit le désir qui se réalise dans un tel mouvement circulaire. Comme je l’ai dit plus haut, il n’y a, à mon avis, aucun besoin d’ “activer” dans l’éther une puissance qui est éternellement en acte. Le rôle de l’âme comme principe d’actualisation de capacités de mouvement pour les animaux sublunaires (et pour nous-mêmes) tient à ce que justement tous nos mouvements ont un commencement et une fin.

56 Outre le fait que (dans le cas du moins des vivants sublunaires) il s’impose à un composé corporel dont, de ce fait les éléments ne sont pas dans leur lieu naturel (la terre dans nos os n’est pas “au sol” le feu et l’air qui composent notre *pneuma* restent près de la terre etc...); c’est l’origine (dans *de calo*, II, VI, 288b15-18) du fait que les animaux sublunaires finissent par connaître vieillissement et mort.

ments qui affectent la *phantasia*, puis le *pneuma* (c'est à cet endroit que le mouvement prend l'aspect de poussée et de traction), puis les organes et les jointures: et c'est parce qu'il y a un mouvement interne que l'animal a besoin, non seulement d'un point d'appui (ou de résistance) externe (comme le sol, ou la rive pour celui qui pousse le bateau), mais également d'un point fixe interne<sup>57</sup> De ce fait, il y a dans le vivant des parties distinguées qui correspondent à l'ordre dans lequel le mouvement se déroule de manière interne<sup>58</sup> L'une des raisons pour lesquelles le *de motu animalium* et le *de incessu animalium* occupent une place à part dans le "corpus biologique" du Stagirite<sup>59</sup>, c'est qu'il y affronte cette difficulté assez considérable qui consiste à combiner une phronomie interne et une phronomie externe: seule la seconde est aisément attingible par l'observation, mais elle est pauvre en données qui puissent passer pour explicatives, la seconde est évidemment "construite", mais elle l'est à partir d'un inventaire riche des parties des animaux *et* du principe général que la nature ne fait rien en vain (par conséquent on doit pouvoir fixer le rôle exact des variations dans l'anatomie des différentes espèces animales, comme autant de manières d'accomplir la même fonction sous différentes contraintes). Et il ressort assez clairement d'un examen même rapide de ces deux opuscules que la règle qu'a suivie Aristote, c'est de réserver à la phronomie interne l'essentiel des capacités explicatives de la phronomie "externalisée"<sup>60</sup>. Il n'est pas déraisonnable de dire que c'est par ce primat de l'explication interne sur son expression (ou son résultat) extérieur qu'Aristote est vraiment un biologiste. Du moins dirais-je que c'est ainsi que pour sa part il distingue, à l'intérieur de la nature, le secteur du vivant. Dans la mesure où les quatre variétés canoniques de changement (génération/corruption, augmentation/diminution, altération, déplacement) sont communes à l'ensemble de la nature, il n'est en effet guère pertinent de prétendre distinguer le domaine du vivant par exemple par la génération: le feu ou l'eau également sont capables de génération (et du même par le même); si bien que, pour

57 Ou plus exactement, comme nous l'avons vu, un point fixe "absolu" (dans la région du cœur) et plusieurs relatifs ou dérivés (dans chacune des flexions mobilisées).

58 Alors que, comme l'indique 284b33sqq., il n'y a pas de parties du feu ou de la terre qui se distinguent comme celles par lesquelles ces éléments commenceraient d'être lourd et léger (i.e. d'aller vers le bas ou vers le haut).

59 Bien que je ne veuille pas insister sur ce point, je dirai que les remarques qui suivent valent également dans une très large mesure pour le *de generatione animalium*.

60 En laissant à celle-ci le rôle de rendre compte des particularités accidentelles qui qualifient la locomotion de certaines espèces, en raison de leur milieu.

autant qu'il s'agit de dresser l'éventail des processus et d'en assigner les règles générales de discernement, le vivant est bel et bien un secteur du naturel. Ce sont les modalités d'accomplissement de ces processus qui le distinguent et, pour parler superficiellement, on peut dire qu'elles le distinguent en ceci qu'elles leur donnent un cadre de description qui n'est plus simplement celui d'êtres spécifiés par des propriétés intrinsèques "basiques" (le chaud et le froid, le sec et l'humide, le lourd et le léger) dans un "milieu" indifférencié, mais par la structure d'un système de parties (l'anatomie) qui fonctionne à la fois comme ensemble des instruments et ensemble des contraintes de l'accomplissement de ces processus. C'est par cette configuration théorique, et non pas par le pur et simple découpage des phénomènes ordinairement observés (ce qui ne serait que le découpage des préjugés communs), qu'une discipline théorique est définie. Et de ce point de vue, pourvu qu'on ait des motifs pour penser que le ciel est à ranger parmi les vivants plutôt que parmi les êtres inanimés, il n'y a pas de raison pour penser qu'en appliquant à son mouvement des principes d'analyse qu'on a établis pour n'importe quel vivant locomoteur, on commette une *metabasis eis allo genos*.

C'est donc du point de vue de la méthode qu'Aristote fait reproche aux Pythagoriciens d'avoir attribué une droite et une gauche à *l'univers* (ce en quoi cependant ils tombaient juste, à son avis), sans avoir tenu compte de ses autres oppositions polaires, et comme s'ils ne s'étaient pas rendu compte que cela n'est pertinent que pour un vivant (et un vivant locomoteur). Si l'on prend cette critique directement en ses conclusions, on ne laissera pas que d'être embarrassé. Il est d'abord difficile de croire que les Pythagoriciens que vise Aristote aient attribué à l'univers une gauche et une droite sans lui reconnaître, à tout le moins, de haut et de bas. Évoquant un extrait de la collection des *placita* pythagoriciens, qu'il connaît par Alexandre, Simplicius (p. 386) explique très clairement que, dans l'organisation des "catégories" pythagoriciennes en deux colonnes antithétiques, la ligne de l'opposition droite/gauche était chargée de représenter à elle seule toutes les "relations locales"<sup>61</sup>: par conséquent tous les pôles positifs (à savoir le haut et l'avant) se trouvaient regroupés sous la rubrique de la droite, et tous les pôles péjorés (le bas et l'arrière) sous celle de la gauche, différentes expressions populaires pouvant servir de justification. On peut donc penser que la critique du Stagirite ne consiste pas à leur reprocher d'avoir "omis" l'opposition

---

61 τοπιχαὶ σχέσεις (ligne 14) ou ἀντιθέσεις (ligne 20). Ce passage de Simplicius a été retenu comme fragment 200 des *Fragmenta* de Valentin Rose, celui de la page 392, que j'aurais l'occasion d'évoquer un peu plus loin, comme fragment 205.

haut/bas, mais de n'en avoir pas fait le chef de rubrique. Maintenant, il reste possible qu'il attribue l'origine de cette faute (i) soit au fait qu'ils n'ont pas reconnu que les trois oppositions polaires ne sont pertinentes que pour des vivants, (ii) soit au fait qu'ils n'ont pas saisi, pour les vivants, quelle était la polarité "basique" et commune (celle du haut et du bas) et quelle était la polarité à pertinence restreinte (celle de la droite et de la gauche). Carl Huffman, qui a confronté des extraits de ce chapitre d'Aristote (ainsi que les deux extraits de la "collection pythagorique" préservés par Simplicius [= fr. 200 et 205 de Rose]) au fragment 17 de Philolaos<sup>62</sup>, qu'il interprète, à juste titre, non comme l'indication que haut et bas ne sont que des orientations relatives (selon que l'observateur est dans notre hémisphère ou aux antipodes), mais comme visant le fait que, lors de sa génération (qui est comme on sait une sorte de déploiement, grâce à l'inspiration du souffle infini, d'un fœtus en une sphère dont le centre est Hestia), le gonflement du ballon cosmique s'est fait, de manière isonomique selon toutes les directions – en ne commençant pas par privilégier l'orientation du haut, plutôt que celle du bas –, estime malgré tout que ledit fragment 17 (conservé par Stobée) permet d'affirmer que Philolaos a maintenu la "relativité" de toutes les orientations polarisées, eu égard à l'univers, et qu'en conséquence il est peu plausible que les Pythagoriciens visés par Aristote, dans la mesure où ils paraissent au moins poser une polarisation "absolue" de la droite et de la gauche pour l'univers, puissent inclure Philolaos. Il estime que ces Pythagoriciens seraient plus vraisemblablement ceux de la table des opposés, mentionnés en *Metaph. A*, v, 986a23, et qu'Aristote tient sans doute pour différents de Philolaos (censé être représenté parmi le courant pythagoricien discuté au début du même chapitre). La volonté de pousser aussi loin que possible la dissociation de Philolaos d'avec le courant dit de la "table des opposés" a, en l'occurrence, créé davantage d'embarras à Carl Huffman qu'elle ne lui a procuré d'aide pour justifier le jugement qu'il porte sur l'authenticité du fragment 17 de Philolaos<sup>63</sup>. Ce que Simplicius rapporte de la manière dont, selon Aristote (ou Alexandre d'Aphrodise), les Pythagoriciens auraient rangé sous la rubrique de l'opposition

62 Carl A. Huffman *Philolaos of Croton, Pythagorean and presocratic*. Cambridge, 1993, p. 215-226.

63 Huffman est évidemment dans l'embarras pour réconcilier l'affirmation de la fin du chapitre (que les Pythagoriciens dont il est question ont posé que nous étions "à droite" et "en haut" de l'univers) avec l'idée qu'il s'agisse de Pythagoriciens qui n'auraient pas eu précisément de cosmologie. Il est difficile également de croire qu'Aristote ait ici visé des Pythagoriciens fort différents de ceux qu'il accuse, au chap. 13, d'avoir ajouté l'anti-terre (et auparavant le foyer central) pour satisfaire aux exigences globales de leur *Weltanschauung*, or parmi ces derniers, il faut évidemment reconnaître, de l'aveu même de Carl Huffman, Philolaos. – Je ne suis pas certain non plus que les arguments

droite/gauche les autres oppositions “locales” s’accorde assez bien avec le jugement que le Stagirite porte<sup>64</sup> sur la faiblesse dans la manière dont les Pythagoriciens ont tenté de rechercher la définition et l’essence: organisant les termes en les rangeant par séries, il faisaient du premier terme d’une série l’essence de tous les termes de la même série: ainsi le premier nombre triangulaire donnerait l’essence de six, de dix etc..., qui appartiennent à la même série, et, s’il est possible de prendre les choses ainsi, la première opposition “locale” donnerait l’essence de toutes les autres<sup>65</sup>. Cette façon d’envisager les trois polarités locales, en les regroupant (avec certainement des nuances dues à la dérivation, mais dont nous ignorons le détail) sous un seul chef correspond assez bien au reproche qu’Aristote fait ici aux Pythagoriciens. Il n’est peut-être pas même nécessaire de supposer que les Pythagoriciens aient ignoré que, pour que cette opposition soit pertinente (et qu’elle ne soit pas une simple manière de s’exprimer de l’observateur “extérieur”), il faille la rapporter comme une qualification intrinsèque à un vivant. Mais ce qui leur paraissait essentiel, c’est le côté évaluatif de l’opposition et, d’une manière qui nous échappe (parce que nous n’en connaissons que les justifications populaires, qui, évidemment sont pour le gros public), ils ont pensé que, *comme polarisation*, et non pas seulement comme “dimension orientée”, c’est le couple droite/gauche qui est primitif. Il se peut qu’on ait pensé que, une fois formé comme une sphère, le *kosmos* n’ait eu qu’un seul choix d’orientation à faire, qui était de s’orienter “selon son flanc droit” ou “selon son flanc gauche” Et comme c’était le *kosmos* à qui incombait ce choix en

---

qu’Huffman avance pour défendre l’authenticité du fragment 17, contre les doutes de Burkert, renforcés par Mansfield (dans son travail sur le *de hebdomadibus*), et qui consistent à restreindre la portée des affirmations de ce fragment 17 au processus de la génération du *kosmos* (par expansion isonomique de la sphère) soient bien compatibles avec le contraste qu’il continue de maintenir entre l’attribution aux Pythagoriciens que vise Aristote d’une droite et d’une gauche “absolues” du *kosmos* et l’idée que le fragment 17 ne donnerait à ces orientations qu’une valeur “relative”: une fois le *kosmos* formé, qu’est-ce qui empêche que certaines régions soient valorisées par rapport à d’autres? Il est difficile de se défendre du sentiment que, dans sa confrontation du fragment 17 au passage d’Aristote, Huffman est resté prisonnier de l’interprétation ordinaire (encore représentée chez Burkert) de ce fragment 17.

64 *Metaph. A*, v, 987a20sq., cf. B.Besnier “Le rôle des nombres figurés dans la cosmologie pythagoricienne d’après Aristote” *Revue philosophique*, 1993, n°2 (ici, pp. 351sq.).

65 Pour bien faire, il faudrait pouvoir montrer que c’est plutôt à l’opposition droite/gauche qu’à une des autres oppositions “locales” que s’applique en premier lieu une certaine structure de nombres figurés. Malheureusement Simplicius ne nous est ici d’aucun secours, d’autant moins que, manifestement, il avait (comme déjà Jamblique) cessé de comprendre la fonction exacte de la “figuration des nombres” dans la formation des définitions, pour lui substituer l’idée vulgaire d’une représentation “symbolique”

premier lieu, cette polarité se trouvait du même coup en position de matrice pour toutes les autres polarisations locales. Autrement dit, au lieu de procéder comme Aristote, par intégration des aspects “animaux” du ciel dans le régime général de la motricité animale, les Pythagoriciens auraient au contraire procédé à partir du *kosmos* pour déterminer ce qui est bon et ce qui est mauvais pour le reste des vivants. Mais il faut dire que, chez eux, il y a peut-être une justification à cette façon de faire: c’est que le *kosmos* est effectivement engendré, et que l’on peut penser que l’ordre dans lequel ses caractéristiques et propriétés le sont doit être décisif pour le classement général de ces propriétés.

Le fait qu’ils aient ordonné sous une même rubrique les oppositions du haut et du bas, de l’avant et de l’arrière, n’explique pas directement que les Pythagoriciens aient placé le haut dans la direction de ce qui est pour nous le pôle boréal. Ce point comporte une curiosité concernant la tradition relative à la “collection pythagorique” dont Alexandre était encore en mesure, semble-t-il, de faire usage pour éclaircir le corpus aristotélicien. Simplicius (p. 392= fr. 205 Rose) rapporte qu’Alexandre lisait dans son manuscrit de la “collection pythagorique” que (selon Aristote) les Pythagoriciens auraient réuni sous la rubrique de “la droite”, non pas les déterminations dérivées du haut et de l’avant, mais celles du *bas* et de l’avant, si bien que selon cette leçon, les Pythagoriciens s’accorderaient bel et bien avec le Stagirite, plaçant sans doute comme lui la droite du côté du lever des étoiles, l’avant du côté de leur culmination, et le haut vers le pôle austral, celui qui nous demeure (à nous gens de l’hémisphère nord) perpétuellement caché. Alexandre pensait qu’il y avait tout simplement une faute dans son exemplaire de la *Pythagorikôn sunagogê* et qu’il fallait lire sous la colonne de la droite “en haut” et non pas “en bas” et que les Pythagoriciens pensaient en réalité (comme le dit le texte du *de cælo*) que ce que nous voyons (de nos latitudes septentrionales) comme “en haut” est en effet, pour le ciel lui-même également, le haut. Acceptée par Simplicius, cette émendation d’Alexandre n’a guère été mise en question depuis, et on ne voit guère en effet à partir de quoi on en pourrait juger autrement. Il peut se faire que le passage de la “collection pythagorique” n’ait comporté qu’un exposé sans prise de position et que, comme le soupçonne Alexandre, quelqu’un ait cru bon de corriger le texte de façon à l’accorder avec ce qu’Aristote affirme dans le *de cælo*, quoiqu’à vrai dire en son propre nom et non pas pour le compte des Pythagoriciens.

Toutefois la véritable difficulté est de savoir en fonction de quoi les Pythagoriciens fixaient la droite et la gauche de l’univers. Dans leur astronomie, telle que la connaît Aristote, la terre n’est pas au centre et se meut autour du feu central d’une révolution rapide (la plus rapide des révolutions des dix cyclophories). Il n’est pas du tout clair qu’il y ait deux directions opposées de mou-

vements célestes, celle de la révolution diurne et celle des planètes; du fait que le mouvement de la terre est censé rendre compte de la différence des jours et des nuits<sup>66</sup>, il serait évidemment plus simple que la sphère des fixes soit en effet immobile<sup>67</sup>; mais c'est un point qu'il est difficile de réconcilier avec la plupart des expressions dans lesquelles Aristote formule le décompte du nombre de cyclophories (pour que ce soit dix, il faut bien que la sphère des fixes soit en mouvement). Ainsi il se peut que l'astronomie des Pythagoriciens d'Aristote se

---

66 Ceci cependant seulement d'après un témoignage de Simplicius, *in de calo*, p.511, lignes 31-33, au demeurant d'interprétation difficile. Simplicius (qui se réclame d'un texte "sur les Pythagoriciens" qu'il ne connaît manifestement pas de première main) indique que la terre est mue circulairement "parce que c'est un astre (comme les autres)" et qu'elle produit le jour et la nuit "selon la relation du soleil". À s'en tenir aux Pythagoriciens pour lesquels il y a un témoignage d'Aristote (qu'ils soient ou non équivalents à Philolaos), nous ne savons rien de la façon dont le soleil "éclaire" (la théorie selon laquelle il est ou bien miroir du feu central, ou bien lentille de l'*angeia* de la sphère des fixes, repose exclusivement sur la doxographie d'Aëtius, laquelle peut assurément refléter quelque chose d'ancien, mais n'est pas un témoignage de ce qu'Aristote retient du pythagorisme); il n'est donc pas impossible qu'Aristote considère "ses" Pythagoriciens comme ayant reconnu au soleil une luminosité propre (et non pas d'emprunt, comme celle de la lune), quitte au demeurant à ce qu'elle consiste à concentrer celle du feu répandu aux deux "limites" du monde. Si Simplicius donne une indication correcte, lorsqu'il dit que la capacité de la terre à produire le jour et la nuit est "en fonction de la relation du (/au) soleil", on peut évidemment penser que "relation (*schésis*)" soit, en l'occurrence, à comprendre comme "position" (ou relation de position), autrement dit, que la différenciation et le rythme d'alternance du jour et de la nuit soit fonction des changements des positions respectives des deux astres, en raison de la différence de leurs vitesses de révolution autour du foyer central; si l'on suppose que la révolution de la terre autour du foyer central s'effectue en 24 heures, il suffit que pendant cette même période le soleil n'ait presque pas bougé de place pour que se produise la division des jours et des nuits; leur inégalité saisonnière pourrait s'expliquer, tant bien que mal, par l'inégalité des vitesses angulaires des deux astres, même sans supposer une différence d'inclinaison des axes de rotation (contrairement à ce qui a sans doute été introduit postérieurement dans la doxographie d'Aëtius); enfin, il faut encore supposer une rotation de la terre sur son propre axe (accordée au rythme de sa révolution diurne) pour rendre compte du fait que nous ne voyons jamais l'anti-terre (ce n'est pas nécessaire pour expliquer que nous ne voyons pas le feu central: il suffit que notre terre soit toujours tournée de manière que nos latitudes septentrionales soient orientées vers le soleil et que l'anti-terre tourne exactement à la même vitesse que nous et dans le même sens). Cf. pour cette présentation T. Heath *Aristarchus of Samos* (1913, réimpr. Dover, p. 100-1), lequel pense cependant que l'inégalité des culminations du soleil selon les saisons demande que l'axe de révolution de la terre ne soit pas le même que celui du soleil (ce qui irait donc dans le sens contraire à l'interprétation littérale d'un témoignage d'Aëtius).

67 Discussion de cette difficulté d'abord dans Heath, *op. cit.*, p. 101-4, puis dans Huffman, *op. cit.*, p. 255 sqq., lequel est amené à rejeter, sans doute avec raison, un prétendu témoignage d'Alexandre qui rendrait les vitesses des cyclophories proportionnelles aux distances du centre (dans ces conditions le mouvement de la sphère des fixes serait de beaucoup le plus rapide): on constate, une fois de plus, qu'Alexandre est incapable de visualiser une doctrine astronomique disparate avec le cadre de l'enseignement élémentaire de son époque. Huffman pense que l'excessive lenteur du



range du côté de cette interprétation de la trajectoire des planètes sur le zodiaque qui consiste, selon Platon (*Lois* VII, 822A sq.), à présenter la marche des planètes comme allant dans le même sens que celle des étoiles, mais plus lentement<sup>68</sup> Ce qui complique la situation, c'est que la terre soit en mouvement. À ce qu'il semble, l'explication des jours et des nuits par la différence de vitesse entre la révolution de la terre et celle du soleil laisse penser que le sens de leurs révolutions est le même (bien que nous ne sachions rien – si l'on s'en tient aux Pythagoriciens "d'Aristote" – sur l'inclinaison des axes). Si tel est le cas, il est plus vraisemblable que le sens retenu pour l'ensemble du mouvement du ciel ait été celui d'ouest en est, qui caractérise le mouvement des planètes et, dans l'hypothèse d'une terre excentrée et mobile, celui de la terre, plutôt que celui de la révolution diurne d'est en ouest, telle que la tradition en attribue, sinon la "découverte" (car, après tout, il ne s'agit pas d'un "fait"), du moins l'hypothèse, à Cénopide<sup>69</sup> L'innovation d'Cénopide dissocie (pour les opposer) l'orientation du mouvement des planètes et celle du mouvement de la révolution diurne (qui

---

mouvement de la sphère des fixes devait permettre de le tenir pour négligeable. Si l'on voulait trouver dans Aristote (et en s'en tenant à lui) un argument pour rendre immobile la sphère des fixes, il me semble que ce devrait être en exploitant l'indication de *de celo*, 293a30-34, où présentant l'un des motifs que l'on pourrait avoir de sa rallier à l'opinion que ce doit être le feu, parce qu'il est plus noble, plutôt que la terre qui doit se trouver en position centrale, le Stagirite présente la position centrale et la position périphérique comme remplissant également les réquisits de la notion de *peras*: si le rôle de la *peras* est d'assurer la stabilité (ce que n'indique pas la simple notion d'intermédiaire), on pourrait penser que, de même que le foyer central doit être immobile, de même la périphérie. Mais il est vrai que la périphérie joue aussi bien son rôle stabilisateur si elle se contente de délimiter le domaine de ce qui est *kosmos* au milieu du vide infini (ou de l'absorber pour l'enclorre).

68 Cette façon d'envisager la relation du mouvement des planètes aux levers et couchers des étoiles "fixes" n'est évidemment pas aussi naïve que celle qui consiste à les considérer purement et simplement comme des astres "errants". La doxographie donne plusieurs exemples de cette façon de considérer le "retardement" des planètes (eu égard aux signes du zodiaque) au cours de leur révolution sidérale: Anaxagore et Démocrite principalement. Je ne suis pas certain que l'on puisse considérer ce qu' Aristote rapporte de l'explication des comètes par Hippocrate de Chios (*Météorol.*, I, vi, 342b35-343a20) – qu'elles font partie des planètes, mais avec un retardement encore plus grand – comme impliquant qu'Hippocrate soit, aux yeux du Stagirite, un partisan de la doctrine que les planètes retardent réellement sur les étoiles du zodiaque. En effet, il reprend la même expression (*hypoleisthai*, 343a24 et 29), pour formuler une objection: ce qui semble indiquer qu'elle n'est pas forcément à entendre comme une thèse sur le sens du mouvement des planètes, mais comme une simple manière de décrire les apparences. – Cette conception est surtout connue par des exposés plus tardifs, cf. p. ex. Géminus *Eisagogé*, XII, 14-23.

69 Nous ne savons pas exactement ce que la tradition attribue à Cénopide; comme il n'est pas possible que ce soit la pure et simple découverte de l'effet de retardement des planètes et du soleil dans

est attribué à la sphère des fixes). Mais lorsque les Pythagoriciens attribuent la révolution diurne à la différence de vitesse de la révolution de la terre et de celle du soleil, il paraît plus naturel de penser que ces deux révolutions ont lieu dans la même direction (en admettant l'inclinaison du plan de l'orbite de la terre par rapport à celui de l'écliptique) que de supposer qu'elles se font en des sens opposés (ce qui laisserait dans la plus complète indétermination les moyens d'évaluer le "retard" quotidien du soleil dans les signes du zodiaque). On pourrait alors comprendre l'attitude de ces Pythagoriciens comme tendant à réunir la terre avec les sept planètes, plutôt qu'à la connecter (dans le cas où elle serait immobile) avec la sphère des fixes<sup>70</sup>. Dans ces conditions, il serait plausible que la remarque finale (285b27-33) du Stagirite dans ce chapitre, selon laquelle, si au lieu de considérer le mouvement "propre" de l'univers comme celui de la rotation diurne, nous envisageons celui des planètes (selon l'écliptique), il ne serait pas faux de dire que "nous sommes en haut", – "nous", c'est-à-dire les habitants des latitudes septentrionales – vise, au fond, le point de vue adopté par les Pythagoriciens qu'il critique. Ou plus exactement cela viserait ce qu'Aristote considère comme susceptible de justifier leur décision concernant la détermination du haut et du bas, mais en exprimant cette décision dans une visualisation qui n'est plus la leur, mais la sienne. S'ils n'ont considéré comme mouvement de l'univers que celui-là seul qu'Aristote considère comme de sens opposé à celui de l'univers, leur décision concernant notre situation se comprend. Cette façon d'interpréter ses devanciers sur le mode du "cela revient au même que (s'ils avaient évalué la situation d'après les critères que j'avance), ils avaient dit que ..." est bien souvent la sienne.

---

les signes du zodiaque, (qui est une "donnée" plus ancienne), il est probable que ce qu'Ænopide a introduit c'est la visualisation selon laquelle ces effets pouvaient se décrire en supposant que les planètes se meuvent toutes dans un même plan (l'écliptique), et en avançant le chiffre de 24° comme mesure de son inclinaison. À partir du moment où l'on met en avant cette visualisation, qui permet d'unifier (dans un premier schéma approximatif) les mouvements du soleil et de la lune avec ceux des cinq autres planètes, il est assez naturel de considérer ces mouvements comme se produisant dans le sens opposé à celui de la sphère des fixes; et en ce sens il serait cohérent d'attribuer aussi cette proposition à Ænopide.

70 Cependant cela laisse ouverte la question relative au mouvement de la sphère des fixes.

# Astronomie et mathématiques anciennes et classiques

Roshdi Rashed\*

**Résumé:** On examine les disciplines mathématiques qui doivent leur existence à l'astronomie ancienne et classique. Les exemples de la géométrie des coniques et des recherches sur le gnomon, des méthodes d'approximation numérique et de l'établissement de tables astronomiques, de la trigonométrie et l'étude des mouvements célestes, sont rapidement évoqués. On s'attache plus particulièrement à deux autres chapitres des mathématiques : les recherches isopérimétriques, tout d'abord, qui doivent leur origine aux conceptions cosmologiques sur le cercle et la sphère, et ont suscité les études sur l'extrémalité (Ibn al-Haytam), et donné lieu à la géométrie métrique. Les problèmes de projection de la sphère qui sont à l'origine de la géométrie des positions, d'autre part, qui doivent leur développement initial à la construction des astrolabes étendus ensuite au point de vue projectif d'une manière plus générale (en particulier, Ibn Sahl, al-Quhi). Ces domaines des mathématiques se sont développés ultérieurement en s'affranchissant de ces conditions d'origine.

**Abstract:** We examine the mathematical disciplines that owe their existence to ancient and classical astronomy. The examples of the geometry of conics with the researches on the gnomon, of the methods of numerical approximations with the setting of astronomical tables, of trigonometry with the study of celestial motions, are briefly evoked. We emphasize two other chapters of mathematics. Firstly, the studies on isoperimetrics, originated in cosmological conceptions on the circle and the sphere, have generated the studies on extremality (Ibn al-Haytham) and given rise to metrical geometry. Secondly, the problems of projection of the sphere, which generated geometry of positions, have been initially impelled by the construction of astrolabs; the projective problem has been considered afterwards in a more general way (in particular, Ibn Sahl, al-Quhi). These domains of mathematics have developed further independently of the conditions of their origins.

L'HISTOIRE DES MATHÉMATIQUES est intimement liée à l'histoire de la cosmologie et de l'astronomie. Cette affirmation va de soi lorsqu'il s'agit de l'histoire récente: le renouvellement des notions astronomiques a, chaque fois, des répercussions sur les mathématiques, et il n'est pas moins vrai que les nouvelles méthodes mathématiques ont permis l'élaboration des conceptions astronomiques. On sait combien ces rapports entre astronomie et mathématiques sont essentiels à l'histoire du calcul différentiel, de la géométrie différentielle, du calcul des probabilités, des statistiques, entre autres disciplines mathématiques. Par

---

\* Directeur de recherche, Centre d'histoire des sciences et des philosophies arabes et médiévales, CNRS et Université Paris 7 - Denis Diderot - 7, rue Guy Môquet B.P. No. 8 - 94801 Villejuif.

conséquent, l'historien des mathématiques récentes ne peut ni ne doit faire l'économie de l'examen de ces rapports.

En est-il de même pour l'historien des mathématiques anciennes et classiques? Autrement dit, ces liens étroits entre mathématiques et astronomie étaient-ils également, pour les mathématiciens de l'antiquité et du moyen-âge, l'horizon privilégié de leur recherche? S'il s'agit de l'antiquité, la question risque de s'étendre et de se compliquer davantage, puisqu'elle peut porter sur l'origine historique, mais aussi phénoménologique, de certaines branches des mathématiques. On songera alors à ce qu'aurait pu être la géométrie dans l'espace, par exemple, si l'astronomie positive n'avait jamais vu le jour. On se demandera aussi ce qu'il serait advenu d'une telle discipline si l'homme avait négligé d'observer le ciel pour décrire, et, éventuellement, mesurer, les apparences. Ces questions d'"origine" ne peuvent à l'évidence être résolues à l'aide de la seule description, fût-elle eidétique: leur solution appelle une restitution historique, qui n'est pas faite, tant s'en faut. La seule stratégie qui se dessine pour approcher ce but lointain est d'examiner les disciplines mathématiques qui doivent peu ou prou leur existence à l'astronomie ancienne et classique. Parmi ces disciplines, on rencontre aussi bien la géométrie des positions que la géométrie métrique, l'analyse numérique et la trigonométrie.

Venons-en d'abord, et très brièvement, à l'une des théories mathématiques parmi les plus importantes des mathématiques grecques: la théorie des coniques telle qu'elle se présente dans le livre d'Apollonius. L'origine de cette théorie semble se fondre dans deux traditions de recherche relatives à deux espèces d'"organon" au sens premier du terme, toutes deux en quelconque relation à l'astronomie. La première tradition, ainsi que j'ai pu l'établir, porte sur les miroirs ardents. Il s'agissait, dans le milieu de Conon d'Alexandrie, de Dosithee, de Dioclès, etc., de construire des miroirs ardents paraboliques. On exigeait par exemple qu'ils embrasent selon un cercle, ou qu'ils embrasent sans être dirigés vers le soleil, fixes et indiquant l'heure sans gnomon; problème optico-astronomique d'une difficulté redoutable. Dans la seconde tradition s'inscrivent les recherches menées sur le gnomon. Il s'agit d'un gnomon d'une longueur donnée, et de position fixe. Le plan sur lequel tombe l'ombre de l'extrémité de ce gnomon est perpendiculaire à celui-ci, et on cherche à déterminer la grandeur de l'ombre en fonction du temps. On peut alors montrer que l'on retrouvera dans ces conditions les sections coniques, selon la conception de Menechme. C'est ce qu'a fait O. Neugebauer, lorsqu'il a proposé, en des termes certes spéculatifs, mais non point invraisemblables, de fixer là l'origine des coniques. Il apparaît donc que les instruments et les problèmes astronomiques sont l'une

des origines de la théorie des coniques, laquelle semble prendre son autonomie vers le III<sup>e</sup> siècle avant notre ère.

Mais le rôle de l'astronomie n'est pas moins important si l'on considère la formation et le développement de l'analyse numérique. Les astronomes ont très tôt cherché des méthodes pour établir et utiliser des tables astronomiques et trigonométriques, et ils ont à cette occasion développé des concepts et des méthodes d'interpolation. L'interpolation linéaire, aussi ancienne que l'astronomie babylonienne, était le point de départ de toutes les tentatives ultérieures: la voie naturelle consista en effet à améliorer cette interpolation. C'est en tous cas celle qu'a suivie Brahmagupta pour l'élaboration d'une méthode d'interpolation parabolique. C'est la même voie qu'a empruntée un anonyme indien pour donner une autre méthode d'interpolation quadratique, dite *Sankalī*. Les astronomes vont, à partir du IX<sup>e</sup> siècle, multiplier le nombre des méthodes d'interpolation quadratique, les comparer pour choisir celle qui approche le mieux la fonction considérée. Cette comparaison a donné sa première dimension théorique à une recherche essentiellement "expérimentale", pour ainsi dire. C'est avec ces astronomes-mathématiciens, comme al-Biruni, que l'on assiste à l'émergence du calcul aux différences finies<sup>1</sup>

Il en est de même, comme chacun sait, pour la trigonométrie. À l'origine, elle n'a pas de nom, elle se présente comme un auxiliaire de l'étude des mouvements célestes. On attribue à Hipparque la première table des cordes; mais ce sont les astronomes de l'Inde qui, vers le VI<sup>e</sup> siècle de notre ère, ont remplacé la corde de l'arc double par sa moitié. Il fallut cependant attendre le X<sup>e</sup> siècle avant que les astronomes obtiennent les premières relations du triangle sphérique: c'est vers cette époque que la trigonométrie émerge comme science autonome, sous forme de compositions propres et indépendantes. On rencontre entre autres contributions la découverte de méthodes pour le calcul de  $\sin 1^\circ$ <sup>2</sup>

À peine rappelés, ces exemples suffisent à désigner l'astronomie ancienne comme étant à l'origine, partiellement tout au moins, des disciplines mathématiques, lesquelles toutefois ne se constituent comme telles qu'une fois rompues les attaches qui les unissaient à l'astronomie. Pour illustrer cette idée, j'examinerai, sans m'étendre davantage, deux autres chapitres des mathématiques anciennes et classiques: les recherches isopérimétriques et les études projectives.

1 R. Rashed, "Al-Samaw'al, al-Biruni et Brahmagupta: sur les méthodes d'interpolation", *Arabic Sciences and Philosophy: a Historical Journal*, 1 (1991), p. 100-50.

2 M.-Th. Debarnot, "Trigonométrie", dans R. Rashed (éd.), *Histoire des sciences arabes*, Paris, 1997, Vol. II, p. 163-98.

Venons-en d'abord au problème isopérimétrique qui a surgi tout naturellement pour ainsi dire dans le cadre de la cosmologie babylonienne et grecque.

Montrer que, parmi les domaines du plan ayant un périmètre donné, le disque a la plus grande aire; et que, de tous les solides de l'espace ayant la même aire latérale, la sphère a le plus grand volume: d'après les témoignages tardifs, ce résultat semble être un acquis ancien. C'est en tout cas l'opinion de Simplicius. Mais de l'avis de tous, c'est à Zénodore que revient d'avoir traité le problème et d'avoir établi la démonstration, dans son traité perdu *Sur les figures isopérimétriques*. Le problème n'a d'ailleurs pas cessé d'intéresser les astronomes et les mathématiciens: Héron d'Alexandrie, Ptolémée, Pappus, Théon d'Alexandrie. En fait, c'est Ptolémée et son *Almageste* qui ont été la source de ce problème pendant plus d'un millénaire.

Dans l'*Almageste* en effet, à l'appui de sa thèse de la sphéricité, si importante pour sa cosmologie et son astronomie, Ptolémée rappelle le précédent résultat comme un acquis, et écrit:

“Puisque, parmi les figures différentes mais isopérimétriques, celles qui ont le plus de côtés sont plus grandes, parmi les figures planes, c'est le cercle qui est la plus grande, et parmi les solides, c'est la sphère qui a le plus grand volume et le ciel est le plus grand corps.”<sup>3</sup>

À partir de Théon d'Alexandrie et de Pappus, les commentateurs de l'*Almageste* ne pouvaient désormais faire silence sur cette affirmation, et se devaient d'en apporter la preuve. Tout un courant de recherche s'enclenche donc, afin d'établir cette conception cosmologique. Citons simplement Théon d'Alexandrie:

“Nous allons le prouver d'une manière abrégée, tirée de la démonstration de Zénodore dans son traité des figures isopérimètres.”<sup>4</sup>

3 J.L. Heiberg, *Claudii Ptolemaei opera quae extant omnia. I. Syntaxis mathematica* (Leipzig, 1898), p. 13, l. 16-9.

4 A. Rome, *Commentaires de Pappus et de Théon d'Alexandrie sur l'Almageste*, texte établi et annoté, T. II: *Théon d'Alexandrie, Commentaire sur les livres 1 et 2 de l'Almageste* (Vatican, 1936), p. 33.

Dans les premières décades du IX<sup>e</sup> siècle, l'*Almageste* aussi bien que le *Commentaire* de Théon d'Alexandrie étaient rendus en arabe. Tous les commentateurs arabes de l'*Almageste* s'intéressent à ce problème, et deux courants de recherche mathématique s'engagent alors pour établir l'affirmation de Ptolémée. Le premier courant est représenté par un mathématicien-astronome du milieu du X<sup>e</sup> siècle: al-Khazin. Son idée directrice est de placer ce problème dans un contexte plus général, celui de toutes les figures convexes, et de montrer que, parmi les figures convexes d'un type donné (triangle, losange, parallélogramme, etc.), celle dont la symétrie est la plus parfaite réalise un *extremum* pour un certain paramètre (aire, rapport d'aire, périmètres, etc.)<sup>5</sup>. On procède alors de la manière suivante: on fixe un paramètre et on fait varier la figure en la symétrisant par rapport à une certaine droite. Par exemple, on fixe le périmètre d'un parallélogramme, et on transforme ce parallélogramme en un losange en symétrisant par rapport à une diagonale: l'aire augmente au cours du processus. La démarche concrète d'al-Khazin s'ordonne de la manière suivante: 1) il commence par comparer les polygones réguliers de même périmètre et montre que celui qui a le plus grand nombre de côtés a la plus grande aire. 2) il compare ensuite un polygone régulier circonscrit à un cercle et un cercle de même périmètre. Démarche "statique", en ce sens que l'on a d'une part le polygone donné, et, de l'autre, le cercle. Sans vouloir entrer dans les détails, disons simplement qu'al-Khazin termine son traité une fois établies la propriété isopérimétrique et la propriété isépiphannique, c'est-à-dire ce qui est requis par la cosmologie.

La seconde tendance est représentée par un autre mathématicien, mort après 1040, le célèbre Ibn al-Haytham<sup>6</sup>. Il entendait à l'évidence donner une démonstration "dynamique" de ces deux propriétés. C'est alors qu'il a rédigé un traité qui fut à l'avant-garde de la recherche mathématique de l'époque, mais qui conserva ce poste durant bien des siècles. Ibn al-Haytham commence par régler rapidement le cas des figures planes. Tout comme son prédécesseur al-Khazin, il compare des polygones réguliers de même périmètre, et d'un nombre de côtés différents, et démontre

1) Soient deux polygones réguliers de même périmètre, celui qui a le plus grand nombre de côtés a la plus grande aire.

2) Si un cercle et un polygone régulier ont le même périmètre, alors l'aire du cercle est plus grande que celle du polygone.

5 R. Rashed, *Les Mathématiques infinitésimales du IX<sup>e</sup> au XI<sup>e</sup> siècle*, Vol. I: *Fondateurs et commentateurs: Bann Musa, Thabit ibn Qurra, Ibn Sinan, al-Khazin, al-Qubi, Ibn al-Samb, Ibn Hud*, Londres, 1996.

6 R. Rashed, *Les Mathématiques infinitésimales du IX<sup>e</sup> au XI<sup>e</sup> siècle*, Vol. II: *Ibn al-Haytham*, Londres, 1993.

Contrairement à tous ses prédécesseurs, Ibn al-Haytham utilise la première propriété pour établir la seconde, en considérant le cercle comme limite d'une suite de polygones réguliers ; c'est en cela que sa démarche est "dynamique" Notons qu'au cours de sa démonstration, il suppose l'existence de la limite – l'aire du disque, – ce qui était assuré à partir de *La Mesure du cercle* d'Archimède.

La seconde partie de son traité est consacrée aux isépiphanes. Elle s'ouvre sur dix lemmes qui constituent à eux seuls le premier traité véritable sur l'angle solide, que je passe sous silence ici. Ces lemmes lui permettent en tout cas d'établir les deux propositions suivantes:

- 1) De deux polyèdres réguliers ayant des faces semblables et des surfaces égales, celui qui a le plus grand nombre de faces a le plus grand volume.
- 2) Si deux polyèdres réguliers ont pour faces des polygones réguliers semblables, et sont inscrits dans une même sphère, alors celui qui a le plus grand nombre de faces a la plus grande surface et le plus grand volume.

On observe donc qu'Ibn al-Haytham part des polyèdres réguliers. Les deux propositions que je viens de citer ne s'appliquent alors qu'au cas du tétraèdre, de l'octaèdre et de l'icosaèdre, puisque le nombre des faces d'un polyèdre régulier à faces carrées ou pentagonales est fixé (6 ou 12). L'intention d'Ibn al-Haytham ressort cependant clairement de ce qui précède: à partir de la comparaison entre polyèdres de même aire et d'un nombre différent de faces, établir la propriété extrémale de la sphère; c'est-à-dire approcher la sphère comme limite des polyèdres inscrits. Mais cette démarche dynamique se heurte manifestement à la finitude du nombre des polyèdres réguliers, et j'avoue que ce fait demeure incompréhensible. Cela dit, cet échec se double d'une grande réussite: la théorie de l'angle solide.

Ce traité d'Ibn al-Haytham prend déjà des distances à l'égard du cadre cosmologique, qui était initialement celui du problème isopérimétrique. Bien plus, porté par le courant de ce nouvel esprit, Ibn al-Haytham engage une autre étude sur l'extrémalité. Il compare entre les différentes courbes convexes dans un segment de cercle, en considérant que la longueur de chaque courbe est la borne supérieure des polygones inscrits, pour ainsi ramener la comparaison entre les courbes à celle des polygones.

Pour aller plus loin qu'Ibn al-Haytham, il a fallu attendre le début du XVIII<sup>e</sup> siècle et l'essor du calcul infinitésimal. Le problème resurgit avec celui du Brachistochrone, que J. Bernoulli formule en ces termes:



“étant donné deux points  $A$  et  $B$  dans un plan vertical, trouver le chemin  $AMB$  qu’un point mobile  $M$  parcourt de  $A$  à  $B$  par vertu de son poids dans le plus court temps possible.”<sup>7</sup>

Nous sommes déjà là sur un autre terrain, celui du calcul des variations naissant, différent de celui qu’avait investi la recherche issue du problème cosmologique. Cette dernière recherche s’était déjà épuisée, non pas après Ibn al-Haytham, mais, si j’ose dire, dès le milieu de son livre.

Le second exemple sur lequel je voudrais rapidement m’arrêter ne relève plus de la géométrie métrique, mais de la géométrie des positions. Cette fois encore, c’est de Ptolémée qu’il faut partir, de son *Planisphère* conservé dans une version arabe, ainsi que dans une traduction latine de cette dernière. Voici le début du livre de Ptolémée:

“Puisqu’il est possible, oh Syros, et utile dans plusieurs chapitres, de tracer sur une surface plane les cercles qui se trouvent sur la sphère solide comme s’ils étaient plans, j’ai pensé qu’il est de mon devoir vis-à-vis de la science d’écrire un livre pour celui qui veut connaître cela, dans lequel je montre brièvement de quelle manière il est possible de tracer le cercle de l’orbe incliné (l’écliptique), les cercles parallèles au cercle de l’équateur, les cercles connus par les cercles méridiens, de sorte que ce qui se produit soit conforme à ce qui apparaît sur la sphère solide.”<sup>8</sup>

Le but de Ptolémée est clair: trouver un procédé pour représenter certaines lignes de la sphère céleste sur un plan, sans qu’il soit question de l’étude géométrique de ce procédé. Et de fait, Ptolémée conçoit la projection stéréographique d’une sphère sur un plan, mais les problèmes soulevés par le tracé de ces lignes exigent une étude géométrique de la dite projection, étude que Ptolémée semble avoir ignorée. Pappus l’avait-il faite dans son commentaire du *Planisphère*? On n’en sait rien: le texte de Pappus ne nous est jamais parvenu, non plus que sa traduction arabe. Telle est la situation jusqu’au IX<sup>e</sup> siècle.

Au IX<sup>e</sup> siècle on parvient en effet à une découverte considérable, celle du point de vue des transformations en géométrie. Cette découverte, pour le

<sup>7</sup> *Acta Eruditorum*, 1696, p. 269.

<sup>8</sup> *Fi tastih basit al-kura*, ms. Istanbul, Aya Sofia 2671, fol. 1.

dire vite, s'est faite presque naturellement, et, en tout cas, indépendamment, lors de l'étude de deux groupes de questions. Il s'agit d'abord de ces questions qui surgirent au cours de la recherche sur les coniques, sur les aires de certains segments elliptiques et paraboliques, et sur la génération de certaines courbes. Le second groupe comporte en revanche des questions rencontrées par les astronomes, et que nous avons déjà évoquées à propos de Ptolémée: celles qui touchent à la représentation exacte de la sphère céleste. Ces questions s'imposent avec d'autant plus de force que l'on s'intéresse activement à la construction des astrolabes. L'astrolabe, on le sait, est un instrument destiné à étudier la sphère céleste, animée d'un mouvement de rotation autour d'un axe, par projection sur une surface mobile superposée à une surface fixe. Il permet donc la représentation exacte de la sphère céleste, et de la position des étoiles en fonction de leur hauteur sur l'horizon. Il servait à déterminer les heures, la longitude et la latitude célestes des astres, la direction de La Mecque, l'ascension des étoiles ... ; autrement dit, il répondait aux besoins de l'astronomie, de la géographie, de l'astrologie, de la religion, de la médecine, etc. On n'insistera jamais assez sur un phénomène bien nouveau, au IX<sup>e</sup> siècle: un progrès sans précédent de la construction des astrolabes et de leur usage. À son tour, la demande sociale d'astrolabes a suscité la multiplication des recherches sur les projections, utiles à leur construction. Ainsi, pour ne prendre qu'un exemple au milieu du IX<sup>e</sup> siècle, le philosophe et savant al-Kindi, les mathématiciens et astronomes, les frères Banu Musa, l'astronome al-Farghani, étudiaient les projections et engageaient la première controverse sur la valeur respective de chacune. Quant à l'astronome al-Farghani<sup>9</sup>, il invente une projection zénithale équidistante, rapportée à l'un des pôles de l'écliptique. Cette projection est très proche de celle inventée par Lambert plus tard, et, ensuite, par Cagnoli. C'est encore al-Farghani qui donne le premier exposé théorique de la projection stéréographique. Il démontre en outre sa propriété fondamentale: cette projection transforme les cercles passant par le pôle en droites, et les cercles ne passant par le pôle en cercles.

Il n'est pas question de faire ici l'histoire de ces travaux aux IX<sup>e</sup> et X<sup>e</sup> siècles. Je rappelle simplement que la recherche était intense, multiple et continue ; on ne s'y arrêta plus à la projection stéréographique, mais on inventa d'autres projections. Cette recherche a abouti vers la fin du X<sup>e</sup> siècle à la constitution d'un nouveau chapitre de géométrie: à ce chapitre, on associe les noms

---

<sup>9</sup> *Al-Kamil*, mssLondres, British Library, Or 5479, fol. 38<sup>v</sup>-40<sup>v</sup>. L'édition et la traduction, ainsi que son commentaire sont à paraître dans R. Rashed, "Al-Farghani: On Geometry".

des deux mathématiciens, al-Quhi et Ibn Sahl<sup>10</sup>. Je voudrais un peu insister sur ce point.

Al-Quhi a rédigé un livre intitulé *L'art de l'astrolabe par la démonstration*<sup>11</sup>. Comme le suggère le titre, l'auteur ne s'intéresse pas aux problèmes pratiques qui pouvaient se poser aux artisans constructeurs d'astrolabes, ou aux utilisateurs de l'astrolabe: il ne considère que la théorie géométrique sous-jacente à cette construction. Al-Quhi se livre donc, dès le début de son traité, à l'étude générale de la projection d'une sphère d'axe connu sur une surface, qui peut être, ou non, de révolution. Cette étude, à son tour, l'amène à distinguer deux cas pour la surface de révolution, selon que son axe est, ou non, parallèle à l'axe de la sphère. Aussi al-Quhi a-t-il été amené à définir les projections cylindriques – de direction parallèle ou non à l'axe de la sphère – et les projections coniques à partir d'un sommet appartenant ou n'appartenant pas à cet axe. On ne s'arrête donc plus à la seule projection stéréographique, celle qui est nécessaire à la construction de l'astrolabe, mais on invente et on étudie d'autres projections indépendantes de l'astrolabe: projections coniques, dont le pôle n'est plus situé sur la sphère, projections cylindriques, orthographiques ou non.

Aussi importante que ces nouveaux concepts est leur présentation: ils interviennent comme les éléments d'un exposé sur la méthode des projections. Sans doute suscité par les problèmes posés par la construction de l'astrolabe, ce discours général est aussi élaboré indépendamment d'eux. C'est ainsi qu'al-Quhi prend délibérément le parti – qu'il justifie – de négliger les cas qu'il a pris soin de définir: la projection cylindrique de direction non parallèle à l'axe de la sphère; et la projection conique de sommet non situé sur la sphère. Autrement dit, al-Quhi a introduit les différents types de projection, dont un seul sera utilisé pour l'astrolabe. Pour dégager ce trait de la recherche géométrique, considérons les différentes étapes parcourues, à partir d'al-Quhi, par son contemporain Ibn Sahl.

Ibn Sahl n'étudie pas seulement ces projections; il examine aussi comment, selon les différents cas, la surface mobile de l'astrolabe peut tourner tout en restant superposée à la surface fixe. Il commence par considérer le cas où la surface de l'astrolabe est un plan: toute perpendiculaire à ce plan est alors un axe pour ce plan. Il envisage deux situations, selon que l'axe de la sphère et l'axe de la surface sont ou non confondus. Considérons à titre d'exemple le cas où les deux axes sont confondus. À la suite d'al-Quhi, mais de manière plus élaborée, Ibn Sahl introduit les concepts suivants:

10 R. Rashed, *Géométrie et Dioptrique au x<sup>e</sup> siècle: Ibn Sahl, al-Quhi et Ibn al-Haytham*, Paris, 1993.

11 *Ibid.*, Appendice III.

- 1) Projection cylindrique de direction donnée, parallèle à l'axe ;
- 2) projection cylindrique de direction donnée, non parallèle à l'axe ;
- 3) projection conique à partir d'un point donné sur l'axe ;
- 4) projection conique à partir d'un point donné qui n'est pas sur l'axe.

Notons que, dans un autre traité intitulé *Sur les propriétés de trois sections coniques*, le même Ibn Sahl étudie la division harmonique. Il s'écarte alors d'Apollonius, et, au lieu de caractériser, comme ce dernier, les divisions harmoniques par l'égalité de deux rapports, il donne la relation rapportée au milieu de l'un des couples conjugués, pris comme origine. Or la division harmonique se conserve par projection cylindrique ou conique, qui sont les deux projections étudiées par Ibn Sahl.

On voit, sans qu'il faille entrer davantage dans les détails, comment au <sup>x</sup>e siècle, à partir des préoccupations astronomiques, on est parvenu à la découverte du point de vue projectif: l'étude des projections cylindriques et coniques de la sphère, de ses points, de ses diamètres, de ses cercles et des figures qui sont tracées sur elle. Tout comme le commentaire d'Ibn Sahl, le traité d'al-Quhi commence, je l'ai rappelé, par un exposé de ces projections et de leurs propriétés, indépendamment de l'astrolabe, pour ensuite passer aux problèmes résolus par les projections stéréographiques, et qui pouvaient se poser, théoriquement au moins, lors de la construction et de l'utilisation de l'instrument. Ce clivage qui partage l'exposé entre une partie entièrement consacrée aux projections, mais de la sphère seulement, et une seconde partie relative aux problèmes qui pouvaient se poser pour l'astrolabe, marque bien les limites de l'autonomie de ce chapitre par rapport à son terrain d'origine. Autre survivance de ce lieu d'origine, le privilège accordé au problème inverse: au lieu de partir de la sphère projetée, on part au contraire de sa représentation.

Ce nouveau chapitre de la géométrie se distingue également par son langage et par les procédés de démonstration mis en œuvre. Le langage est mixte: au vocabulaire de la théorie des proportions, celui de la géométrie traditionnelle, se mêlent des termes qui désormais désignent les concepts projectifs. Les démonstrations sont elles aussi composées de comparaisons de rapports, tout comme dans la géométrie traditionnelle, mais aussi de rabattements. Lorsque par exemple al-Quhi établit la propriété suivante: à tout cercle tracé sur la sphère, et dont le plan ne contient pas le pôle, la projection stéréographique associe un cercle dans le plan de projection, et inversement ; le mathématicien utilise à cet effet la proposition 1. 5 des *Coniques* d'Apollonius, proposition qui étudie la section d'un cône à base circulaire par un plan, dans le cas où le plan de base et le plan sécant sont des plans antiparallèles. L'idée de l'inversion n'effleure pas en-

core cet auteur, ni du reste ce fait que la projection stéréographique est la restriction d'une inversion dans l'espace. Mais il reste qu'al-Quhi a fréquemment recours à la technique de rabattement. Il résout le plus souvent le problème à l'aide de la propriété suivante: un point quelconque, son homologue et le pôle de projection sont alignés. Il fait alors appel à plusieurs reprises à des rabattements, qui permettent des constructions en géométrie plane.

Ainsi, qu'il s'agisse de son domaine, de son langage ou des méthodes de démonstration qui s'y déploient, ce chapitre de géométrie conçu par les mathématiciens du x<sup>e</sup> siècle est issu des problèmes de l'astrolabe, auxquels on avait commencé à répondre plus d'un siècle auparavant. Il s'agit d'un chapitre de géométrie projective, dont les mathématiciens du siècle suivant – comme par exemple al-Biruni – ne cesseront de s'occuper. Mais à la différence des recherches sur les isopérimètres, ce chapitre n'avait jamais rompu les liens qui l'unissent à son terrain d'origine. Cette rupture ne sera consommée qu'au prix d'une accumulation d'autres méthodes projectives, obtenues à l'occasion d'autres recherches: l'étude de la perspective, des coniques, etc.; c'est-à-dire dans les travaux de Kepler, Desargues, Pascal, La Hire, Newton, et bien d'autres encore avant Poncelet.

Il ressort des exemples précédents que les chapitres les plus avancés des mathématiques anciennes et classiques semblent bien être originairement liés à l'activité théorique ou pratique de l'astronomie. Rappelons, pour ne retenir que les deux derniers exemples, que l'extrémalité de la sphère et du cercle était une notion cosmologique avant d'être investie d'un vrai statut mathématique, et que la projection stéréographique était un procédé pour tracer une carte du ciel avant d'être conçue comme transformation géométrique. L'extrémalité de la sphère et du cercle devient un objet véritablement mathématique lorsque l'on commence à l'insérer dans un réseau déjà complexe de définitions, d'axiomes et d'opérations divers, qui lui ôtent tout caractère d'unicité: telle est la première étape. Dans un deuxième temps, le cercle lui-même devient une limite des polygones, et la sphère une limite des polyèdres. Ainsi s'établit une double distance avec les objets d'origine. Il en est de même pour la projection stéréographique: pour qu'elle devienne une vraie transformation géométrique, il faut attendre qu'elle soit conçue comme une projection conique de pôle l'un des points de la sphère, soit sur un plan tangent à la sphère au point diamétralement opposé, soit sur un plan parallèle à celui-ci. Cette transformation n'a plus rien de propre à l'astronomie, même si celle-ci demeure l'un de ses domaines privilégiés d'application. Dans les deux cas évoqués, comme dans les autres, la distance qui sépare doublement de l'origine s'établit à deux niveaux différents: l'objet est reformulé pour transcender l'objet astronomique de départ ; la discipline – isopérimétrie, projections,

coniques ... – est, en quelque sorte, le fossoyeur de ses origines, pour commencer, ou recommencer.

Notons en conclusion que, au moins pour ces chapitres, l'idéalité mathématique semble bien se fonder sur une autre idéalité, qui permet déjà de parler mathématiquement des organons ou des contours des phénomènes ; de sorte que la notion d'origine est déjà trop abstraite et trop dense pour se prêter à une description eidétique, et encore moins à une investigation archéologique, quel que soit le sens que l'on donne à cette formule.

# Ibn al-Haytham et ses arguments cosmologiques

Régis Morelon\*

**Résumé:** Après Ptolémée, le grand astronome de langue grecque au IIe siècle de notre ère, il y a eu discontinuité dans la pratique de l’astronomie comme science exacte autour de la Méditerranée, et le travail a recommencé en langue arabe à Bagdad au IXe siècle, sur la base des textes de Ptolémée. Pendant deux siècles les travaux des astronomes arabes restent dans le cadre des schémas hérités de Ptolémée, mais, au XIe siècle, Ibn al-Haytham fait le bilan de la recherche en astronomie dans son petit ouvrage “Doutes sur Ptolémée”. Il constate que les modèles ptoléméens ne peuvent plus convenir et qu’il faut tout reprendre à la base. Il s’agit d’un ouvrage purement critique, qui s’appuie surtout sur des arguments cosmologiques, en montrant qu’il y a là incompatibilité entre une astronomie de type “mathématique” – qui vise à rendre compte le plus exactement possible du mouvement des astres – et une astronomie de type “physique” – qui cherche à intégrer les divers mouvements célestes dans des corps concrets.

**Abstract:** After Ptolemy, the great 2nd century astronomer of the Greek world, astronomy as an exact science practically disappeared from the Mediterranean world. Not until the 9th century were his writings once again given serious attention, this time in the Arab world of Baghdad. For two centuries Arab astronomers worked within the framework bequeathed to them by Ptolemy. In the 11th century, however, Ibn al-Haytham made an assessment of astronomy this far in his little work “Doubts about Ptolemy”. He observed that the Ptolemaic models did not work, and astronomy would have to begin afresh. In this critical work, based mainly on cosmological arguments, he demonstrated the incompatibility of two approaches to astronomy: the one “mathematical” – which tries to give the most exact possible account of the movement of the stars – and the other “physical” – which tries to accord the various heavenly movements with real concrete bodies.

IBN AL-HAYTHAM (Le Caire, première moitié du XI<sup>e</sup> siècle) est surtout connu pour ses travaux brillants en mathématique et en optique<sup>1</sup>; il a composé également quelques études dans le domaine de l’astronomie, dont celle dont il va être question ici et qui s’intitule “Les doutes sur Ptolémée” (*al-Shukuk ‘ala*

---

\* Directeur de recherche, Centre d’histoire des sciences et des philosophies arabes et médiévales, CNRS et Université Paris 7 Denis Diderot 7, rue Guy Môquet B. P. No. 8 94801 Villejuif, ideo@link.com.eg.

<sup>1</sup> Cet auteur est présenté, avec son œuvre scientifique, dans: R. Rashed, *Les mathématiques infinitésimales du IX<sup>e</sup> au XI<sup>e</sup> siècle*, Vol. II: Ibn al-Haytham, London, Al-Furqan, 1993, p. 1-28.

*Batlamiyus*)<sup>2</sup>. Cet ouvrage a eu une très grande importance dans le développement de l'histoire de l'astronomie arabe car il a marqué la fin de sa première étape, ce qui sera souligné en conclusion; mais il nous faut d'abord voir rapidement dans quel contexte son auteur se situe après deux siècles de travail en langue arabe dans cette discipline.

### **Le travail des astronomes arabes entre le IX<sup>e</sup> et le XI<sup>e</sup> siècle sur la base des ouvrages de Ptolémée (II<sup>e</sup> siècle)<sup>3</sup>**

Il serait superflu de s'étendre longuement ici sur la place de Ptolémée dans l'histoire de l'astronomie précopernicienne. Ses deux ouvrages principaux en astronomie, l'*Almageste* et le *Livre des hypothèses*, furent traduits très tôt en arabe au cours du IX<sup>e</sup> siècle. Ces deux ouvrages ont une tonalité très différente.

L'*Almageste* est presque toujours présenté exclusivement comme un ouvrage d'astronomie "mathématique". En effet, nous y voyons exposé tout ce qui permet de rendre compte quantitativement du mouvement des astres: à partir d'observations chiffrées précises, est donné pour chacun d'entre eux un modèle géométrique paramétrable qui aboutit à la composition de tables donnant la possibilité de calculer leur position dans le ciel à un instant donné. Tous les éléments de ses calculs et de ses raisonnements ont été soigneusement décrits par les historiens de l'astronomie, avec le système complexe des compositions d'excentriques et d'épicycles, qui peuvent paraître, dans un premier temps, être purement abstraits de toute réalité – donc seulement valables pour les calculs – et impossibles à penser dans un modèle concret d'univers. Mais nous y trouvons aussi un certain nombre d'éléments d'astronomie "physique", c'est-à-dire qui relèvent de la recherche de l'organisation matérielle de la structure de l'univers, en particulier dans le programme général qu'il donne dans son premier livre, et, vers la fin de son ouvrage, au livre XIII, Ptolémée constate l'échec partiel de ce qu'il avait essayé de faire, car, pour rendre compte du mouvement apparent des astres, il n'était pas arrivé à garder partout le mouvement circulaire uniforme, nécessaire pour pouvoir comprendre les mouvements décrits pour

2 Texte édité par A.I. Sabra et N. Shehabi, Le Caire, Dar al-Kutub, 1971. C'est un ouvrage assez bref, il couvre 70 pages de l'édition indiquée. Les critiques sur l'*Almageste* se placent p. 5-42, et celles sur le *Livre des hypothèses*, p. 42-64.

3 Pour le développement de cette question voir R. Morelon, "L'astronomie orientale entre le VIII<sup>e</sup> et le XI<sup>e</sup> siècle", dans: R. Rashed (éd.), *Histoire des sciences arabes*, Paris, Le Seuil, 1997, Vol. 1, p. 35-69.



chacun des astres dans le cadre d'un univers concret constitué de corps matériels, dans la tradition d'une cosmologie dépendant en partie de celle d'Aristote.

Le *Livre des hypothèses* est rédigé, quant à lui, pour compléter un travail que Ptolémée considérait ainsi comme inachevé; son premier quart seulement est conservé en grec, le reste est transmis en version arabe. Dans le premier traité il rappelle les résultats de l'*Almageste* en les simplifiant légèrement, et, dans le deuxième, il propose une organisation de l'univers en sphères concentriques ou en "tores". Le déroulement du raisonnement de ce livre est tout à fait cohérent. Il s'agit d'arriver à une représentation "physique" de l'univers en sphères matérielles à partir des modèles mathématiques purement théoriques définis dans l'*Almageste*. Dans le premier traité ces modèles sont réinterprétés sous forme de cercles matériels avec la distinction des plans dans lesquels ils se trouvent. Cette réinterprétation est un passage nécessaire pour introduire à la composition des sphères proposée dans le deuxième traité, car le système de l'*Almageste* pour les différents astres s'y trouve légèrement modifié, et on ne peut pas passer directement des modèles géométriques qui y sont décrits à la proposition des corps matériels du *Livre des hypothèses*. La continuité entre les deux ouvrages est affirmée dès le prologue du second:

"Nous avons déjà décrit les principes sur lesquels sont construits les mouvements célestes, ô Syrus, dans les développements que nous avons exposés dans l'*Almageste*; nous y avons appliqué un critère démonstratif, et nous avons montré ce en quoi il doit y avoir accord avec les apparences pour chacun d'eux, et ce qui est en désaccord, en montrant ainsi que c'est le mouvement circulaire qui est nécessairement attaché aux objets qu'englobe la nature permanente, selon un état unique, mouvement de structure uniforme, et qu'il n'est pas possible qu'y soit acceptée augmentation, ou diminution, d'une façon ou d'une autre, de manière absolue. Quant à ce livre-ci, notre but est d'y placer seulement de façon globale ces éléments mentionnés, pour que leur représentation soit facile dans nos imaginations et dans celles de qui veut réaliser des appareils pour tout cela de façon simple."<sup>4</sup>

4 Voir l'édition du texte arabe du premier traité avec traduction française: R. Morelon, "La version arabe du *Livre des hypothèses* de Ptolémée, trait 1", *MIDEO*, 21 (1993), p. 14.

Cette continuité, soulignée par l'auteur lui-même entre ses deux ouvrages, montre que, pour lui, ils formaient un tout. Les astronomes arabes, dès la traduction de l'un et l'autre, les ont également pris comme un ensemble indissociable, ce qui explique l'orientation prise dès le départ par les astronomes arabes dans leur recherche.

C'est à partir du IX<sup>e</sup> siècle, à Bagdad, que s'est développée, à partir de la traduction des travaux de Ptolémée, une tradition de recherche scientifique en langue arabe dans le domaine de l'astronomie. Cette discipline n'était plus vivante dans le bassin méditerranéen depuis plusieurs siècles: il n'y a que quelques observations isolées qui aient été enregistrées entre le III<sup>e</sup> et le VIII<sup>e</sup> siècle, et les successeurs de Ptolémée en langue grecque ne furent globalement que des commentateurs. Il y avait donc discontinuité dans une tradition. Lorsqu'il s'est agi de la revivifier à Bagdad sous al-Ma'mûn (813-833), les sources écrites du travail étaient évidemment hellénistiques, mais il a fallu retrouver quelles bases et quelles méthodes convenaient pour cette discipline, donc les recréer. Le résultat représente une amélioration très sensible de leur modèle hellénistique, et tout le développement ultérieur de l'astronomie arabe dépend de ce point de départ, dont nous pouvons relever principalement trois caractéristiques:

1) Importance des observations et explicitation du rapport entre théorie et observation. Dès que les deux ouvrages principaux de Ptolémée ont été traduits en arabe, l'*Almageste* et le *Livre des hypothèses*, deux observatoires ont été construits pour vérifier les résultats donnés par ce grand ancien, l'un à Bagdad et l'autre à Damas, et, dans ce dernier lieu, il y eut une année d'observations continues du soleil et de la lune en 829-830. Ce principe des observations continues n'existait pas auparavant, et il sera repris dans toute la suite.

2) Mathématisation de l'astronomie. Celle-ci sera fortement accentuée, en particulier avec le développement de la trigonométrie sphérique et celui de l'analyse géométrique des modèles proposés pour le mouvement des astres. Ce sera l'une des bases du développement scientifique de toute l'école orientale de l'astronomie arabe, qui visera à réduire de plus en plus la part non négligeable d'empirisme qui se trouvait au départ chez Ptolémée.

3) Rapport conflictuel entre astronomie "physique" (recherche d'une représentation physique de l'univers observable) et astronomie "mathématique" (se préoccupant seulement du calcul des positions d'astres)<sup>5</sup> Ce sera l'un des

---

5 Voir R. Morelon, "Astronomie "physique" et astronomie "mathématique" dans l'astronomie précopernicienne, dans: R. Rashed et J. Biard (éd.), *Les doctrines de la science*, Paris-Louvain, Peeters, 1999; p. 105-29.

moteurs de l'évolution de cette science, et le but des astronomes arabes, dès le départ, fut clairement de reprendre à la base l'astronomie "mathématique" pour que sa cohérence avec l'astronomie "physique" soit meilleure que celle qui avait été proposée à partir des travaux de Ptolémée. C'est surtout sur ce dernier point que portera l'analyse critique faite par Ibn al-Haytham.

Pendant les deux premiers siècles de leur travail, les astronomes arabes sont restés globalement dans le cadre du système hérité de Ptolémée, avec les modèles géométriques d'épicycles et d'excentriques, affinés et critiqués, mais sans que soit dépassée cette géométrie de l'univers. L'un des modèles, en particulier, fut très vite l'objet de critiques, celui qui avait été proposé pour la lune dans l'*Almageste*: il était impossible de l'intégrer dans un ensemble de corps solides animés de mouvements circulaires uniformes. Mais personne n'était arrivé à le remplacer: il rendait compte de façon suffisamment exacte de la position de la lune en longitude, et aucune autre proposition n'avait été capable de cette précision.

C'est sur l'ensemble des résultats ainsi accumulés que travaille Ibn al-Haytham, et qu'il rédige l'ouvrage dont il va être ici question.

### Les doutes sur Ptolémée<sup>6</sup>

Ibn al-Haytham, dans cet ouvrage, veut simplement faire le bilan de toutes les critiques qui se sont accumulées contre Ptolémée, et le programme qu'il se donne est très clairement exprimé dans son introduction:

"Lorsque nous considérons les écrits de cet homme célèbre par son mérite, très versé dans les différentes disciplines mathématiques, toujours mis en avant lorsqu'il s'agit de sciences exactes, je veux dire Claude Ptolémée, nous y trouvons beaucoup de science, des notions riches, très utiles et amplement profitables. Lorsque nous nous érigeons en critiques, que nous pratiquons le discernement et que nous cherchons à opérer en conscience un choix juste entre lui et le vrai par rapport à lui,

<sup>6</sup> Les textes cités ci-dessous se trouvent successivement aux pages 4, 41-2, 46, 63-4 de l'édition indiquée. Une analyse du contenu de cet ouvrage a été faite par G. Saliba dans: *Histoire des sciences arabes*, *op. cit.*, Vol. 1, p. 88-96.

nous y trouvons des ambiguïtés à certains endroits, des expressions impropres, des notions contradictoires; tout cela cependant en petit nombre par rapport à tout ce dans quoi il a atteint la notion vraie. A notre avis, refuser de voir tout cela c'est léser le vrai et en transgresser la loi, et c'est agir injustement vis-à-vis de ceux qui considéreront ses écrits après nous que de masquer tout cela chez lui. Nous avons trouvé que la meilleure des choses était de mentionner ces différents endroits, et de les faire apparaître pour celui qui, par la suite, appliquera son effort à combler ces lacunes et à rectifier ces notions, par toute méthode permettant de conduire à la vérité."

Il traite de trois livres de Ptolémée: l'*Almageste*, le *Livre des hypothèses* et l'*Optique*, en les référant les uns aux autres. Ce sont les deux premiers seulement qui nous concernent ici; Ibn al-Haytham les traite l'un après l'autre, mais il les lit comme un ensemble indissociable et les critique l'un par rapport à l'autre.

Les critiques sur l'*Almageste* portent ou bien sur des questions de calcul (par exemple pour la question de la valeur de la corde d'un degré); ou bien sur les raisonnements mis en œuvre par Ptolémée (pour l'inclinaison de l'écliptique, avec mention des calculs récents qui donnent, d'une part, une autre valeur de l'obliquité, et qui prouvent, d'autre part, que l'apogée du soleil est en mouvement); ou bien sur l'incohérence entre les modèles géométriques et les principes "physiques" admis par Ptolémée (surtout l'équant qui contredit le principe de mouvement circulaire uniforme et le "mouvement de prosneuse" dans le cas de la lune); ou encore sur la difficulté de la théorie du mouvement en latitude des différentes planètes. Il rappelle en particulier le contenu des deux premiers chapitres du livre IX de l'*Almageste* – dans lesquels est rappelé de façon très claire le principe absolu de la nécessité du mouvement circulaire uniforme – pour montrer quelle contradiction apparaît entre les modèles géométriques que Ptolémée propose et la possibilité de les incarner dans des corps réels. Il compte enfin le nombre de mouvements auquel parvient Ptolémée dans l'*Almageste* et arrive au nombre de trente-six. Il en conclut alors:

"Il nous reste à montrer quelle est la méthode qu'a mise au point Ptolémée à propos des structures qu'il a déterminées pour les astres: il s'agissait pour lui de rassembler tout ce qui était vrai pour les anciens et pour lui comme mouvement de chacun des astres, puis de chercher nécessairement une structure qui existe vraiment dans des corps réels qui se meuvent de ces mou-

vements. Il n'en a pas été capable, et il a alors posé une structure imaginaire dans des cercles et des droites imaginaires qui se meuvent de ces mouvements; il est possible, pour certains de ces mouvements, de se trouver dans des corps qui se meuvent ainsi. Il a été obligé de mettre au point cette méthode, parce qu'il était incapable de faire autrement. Il n'est pas possible, lorsqu'on pose une droite imaginaire et qu'on la fait se mouvoir de façon imaginaire, qu'une droite correspondante à elle se meuve dans les cieux du même mouvement; et lorsqu'on imagine un cercle dans les cieux et que l'on imagine que l'astre se meut sur ce cercle, l'astre ne se meut pas sur ce cercle imaginaire. S'il en est ainsi, les structures qu'a posées Ptolémée pour les cinq astres <errants> correspondent à une structure fautive, et il les a déterminées en sachant qu'elles étaient fautes, parce qu'il était incapable de faire autrement. Les mouvements des astres correspondent à une véritable structure dans des corps existants que Ptolémée n'a pas comprise, et à laquelle il n'est pas arrivé. En effet, il n'est pas vrai qu'il puisse exister un mouvement sensible permanent et rigoureusement uniforme sans qu'il corresponde à une structure dans des corps existants. Voilà tout ce que nous disons sur ce qui est lié au livre de *l'Almageste*."

Cette conclusion d'Ibn al-Haytham accentue fortement ce que Ptolémée lui-même constatait en *Almageste* XIII. Pour Ibn al-Haytham il y a échec dans la mesure où à chaque mouvement proposé dans ce livre pour rendre compte du mouvement des astres ne peut pas être associé un corps réel existant dans les cieux, qui devrait être animé d'un mouvement circulaire strictement uniforme. Pour lui, ce sont les principes mêmes que Ptolémée avait posés sans pouvoir les suivre.

Les critiques portant sur le *Livre des hypothèses* relèvent de la même méthode, et Ibn al-Haytham prend ces deux ouvrages de Ptolémée comme un tout, en les critiquant l'un par rapport à l'autre.

Il commence par relever le nombre de mouvements décrits dans le premier traité de ce second livre et en compte vingt-six, donc un déficit de dix par rapport au premier, alors que Ptolémée disait y reprendre ce qu'il avait déterminé dans *l'Almageste*, or, ces vingt-six mouvements ne suffisent pas pour rendre compte de ce qui est observé. Il constate ensuite que le mouvement des épicycles est décrit différemment dans l'un et l'autre livre et que la théorie de la latitude des planètes n'y est pas identique, et il termine ainsi: "Il est clair, à la

suite de ce que nous avons montré, par ce qui est perceptible par les sens, que la structure qu'il a déterminée dans le premier traité du *Livre des hypothèses* est une structure fautive, et, en même temps, qu'elle contredit ce qu'il avait déterminé dans l'*Almageste*" Il poursuit le même raisonnement en citant longuement ce que dit là Ptolémée sur le principe du lien entre les mouvements et les corps et en conclut:

"Il reconnaît ainsi que pour tout mouvement mentionné il faut un corps qui se meut de ce mouvement. Il avait garanti, dans ce qui précède, avoir décrit les formes des corps que se meuvent de ces mouvements. Il lui aurait fallu, dans ces deux passages, décrire pour chacun des mouvements un corps qui se mouvrait de ce mouvement, dont il serait vrai qu'il existe dans le ciel, et dont la nature serait celle des corps célestes. Les mouvements qu'il a déterminés pour les astres sont ceux qu'il a déterminés dans l'*Almageste*, parce qu'il les a prouvés par l'observation et le raisonnement. Il lui aurait fallu, dans les deux passages mentionnés, qu'il pose pour chaque mouvement mentionné dans l'*Almageste* un corps qui se meut de ce mouvement."

Il relève ainsi que ce qui a été prouvé dans l'*Almageste* correspond aux mouvements véritables à reprendre nécessairement dans une structure concrète complète pour l'univers et que le *Livre des hypothèses*, sur cette question, conduit à un échec. Il explicite ensuite toutes les incohérences qui lui apparaissent, et auxquelles nous avons déjà fait allusion ci-dessus: la question des latitudes des planètes, le mouvement de prosneuse pour la lune, etc.; il conteste également qu'il puisse y avoir dans les cieux à la fois un mouvement volontaire pour les astres et un mouvement contraint, et il conclut son analyse ainsi:

"Il est donc prouvé, à la suite de tout ce que nous avons montré, que les corps posés par Ptolémée dans le second traité du *Livre des hypothèses* contredisent les principes qu'il avait déterminés dans l'*Almageste* et dans le <premier traité du> *Livre des hypothèses*, que ces corps sont incapables de rendre compte des mouvements qu'il avait déterminés dans le livre de l'*Almageste*, et qu'ils conduisent à des impossibilités absurdes qui ne sont permises à personne, ni chez les anciens, ni chez les modernes.

S'il en est ainsi, Ptolémée ne peut se trouver que dans l'une des deux situations suivantes: il a proposé cette organisation des

corps et la détermination de tout cela ou bien en connaissant les impossibilités qui y étaient attachées, ou bien sans les connaître. S'il l'avait déterminé sans rien connaître des impossibilités qui y sont liées, il aurait été incapable de pratiquer son art: sa représentation et celle des structures déterminées auraient été fausses, et on ne pourrait pas faire de reproches à Ptolémée. S'il a déterminé tout cela en connaissant ce qui y était attaché – cette alternative est préférable à son propos – que la cause en était qu'il y était obligé car il n'était pas capable de trouver une solution meilleure, et qu'il avait posé ces impossibilités en connaissant ce qu'il en était, alors il a commis deux fautes: la première à propos des notions qu'il a développées et auxquelles sont attachées ces impossibilités, la seconde en commettant une erreur en sachant que c'était une erreur. Quoi qu'il en soit, et pour être plus juste, disons que si Ptolémée avait été capable de déterminer pour les astres une structure dépourvue de toute impossibilité, il l'aurait mentionnée et déterminée, et il ne s'en serait pas écarté pour déterminer ce à quoi sont attachées des impossibilités absurdes; en fait, il ne s'est contenté de ce qu'il a déterminé que parce qu'il a été incapable de faire mieux que cela. Ce qui est vrai, et sans ambiguïté, c'est que les structures des mouvements des astres sont vraies, existantes et invariantes, et que ne doit y être attachée aucune impossibilité ni contradiction. Il s'agit de structures autres que celles qui ont été déterminées par Ptolémée et auxquelles il a prêté attention, et son intelligence n'est pas arrivée à imaginer leur vérité. (...)

Puisque tout cela a été montré, il est prouvé que Ptolémée a été incapable de déterminer les structures des mouvements des astres qu'il avait analysés dans *l'Almageste*. C'est la fin de ce que nous avons à dire sur le *Livre des hypothèses*."

Ce livre d'Ibn al-Haytham est donc un bilan critique radical, mais, comme il le disait dans son introduction, ce n'est qu'une pure critique, sans suggestion de solutions autres. Au cours de son raisonnement, il fait allusion à des travaux de ses prédécesseurs immédiats qui ne nous ont pas été conservés, en particulier à propos de la "prosneuse", mais il ne dit jamais qu'une autre proposition, globale et meilleure, d'une "structure de l'univers" ait pu être faite.

C'est la constatation d'une impasse dans la recherche en astronomie à cette époque: si l'on prend l'astronomie comme un tout, le système de Ptolé-

mée ne convient plus, et il n’y a encore aucune autre proposition qui puisse le remplacer. Il y a donc ici, par Ibn al-Haytham, le lancement – déjà plus ou moins explicite dans son introduction – d’un programme de recherche pour ses successeurs: trouver d’autres modèles mathématiques que ceux de Ptolémée puisque ceux-ci – qui permettent pourtant de dresser correctement les tables des positions des astres – ne peuvent pas être intégrés dans un modèle concret d’univers, où tous les mouvements célestes observés pourraient être compris à l’intérieur de corps sphériques qui seraient tous animés de mouvements circulaires uniformes.

### Conclusion

Cet ouvrage d’Ibn al-Haytham a été largement connu et cité par les savants de langue arabe, d’Est en Ouest, et l’évolution de l’astronomie, à partir de cette époque, a eu deux tonalités très différentes en Orient et en Occident<sup>7</sup>

En Occident musulman, Andalousie et Maghreb, une école d’astronomie a tenté d’apporter une réponse avec retour aux principes aristotéliens: abandonner les épicycles et les excentriques, pour en revenir aux sphères homocentriques, beaucoup plus cohérentes du point de vue de l’astronomie “physique” de tradition aristotélienne; c’est al-Bitruji<sup>8</sup> (fin XII<sup>e</sup> siècle) qui est le représentant le plus caractéristique de cette école, mais ses bases étaient presque exclusivement philosophiques, et il était impossible de faire un calcul à partir de ses conclusions ou de vérifier celles-ci par des observations chiffrables. Cette voie aboutit ainsi à une autre impasse, même si la démarche philosophique sous-jacente reste intéressante.

En Orient la réponse a été d’ordre plus “scientifique”, mais il faudra attendre environ deux siècles pour que l’impasse constatée par Ibn al-Haytham puisse être débloquée, et c’est au milieu du XIII<sup>e</sup> siècle, à Maragha<sup>9</sup> – non loin de la frontière actuelle entre l’Iran et la Turquie – que sera construit un obser-

7 La connaissance de ce texte en Andalousie, longtemps restée douteuse, a été prouvée par J. Lay dans sa thèse, non encore publiée, sur *L’abrégé de l’Almageste* par Ibn Rushd.

8 Voir al-Bitruji, *On the Principles of Astronomy*, éd. des versions arabe et hébraïque, avec trad. angl. et analyse de B.R. Goldstein, 2 vol., New Haven – London, Yale University Press, 1971.

9 Sur les travaux de l’école d’astronomie arabe autour de cet observatoire, voir: G. Saliba, *A History of Arabic Astronomy, Planetary theories during the Golden Age of Islam*, New York and London, New York University Press, 1994.



vatoire explicitement destiné à fournir des observations précises en vue de mettre au point de nouveaux modèles planétaires compatibles avec une astronomie “physique”, dans le cadre d’un programme d’observations continues devant couvrir idéalement trente ans, dans la mesure où la planète connue la plus éloignée, Saturne, a une rotation de 29 ans 1/2. C’est Nasir al-Din al-Tusi qui fut le maître d’œuvre de cet ouvrage, et al-‘Urdu se chargea de concevoir les instruments de grande taille capables de répondre au programme. Cette école de Maragha durera jusque vers la fin du XIV<sup>e</sup> siècle, et c’est Ibn al-Shatir (mort en 1372) qui en sera l’aboutissement<sup>10</sup>

Les nouveaux modèles planétaires mis soigneusement au point par ce dernier auteur ne sont plus ptoléméens; les compositions de cercles destinés à représenter les mouvements des astres sont très différentes de celles de l’*Almageste* et donnent des résultats beaucoup plus cohérents et précis: il s’agit d’une nouvelle “géométrie” de l’univers. Cette “nouvelle astronomie” reste géocentrique, car la physique de l’époque ne permettait pas de faire tourner la terre sur elle-même, ni de lui donner un mouvement de translation; mais Ibn al-Shatir arrive à un système géocentrique presque parfait, avec une explication de tous les mouvements célestes à l’aide de mouvements circulaires rigoureusement uniformes – donc concevables à l’intérieur de corps sphériques qui communiquent ces mouvements – et la possibilité de construire des tables de positions d’astres avec une bonne exactitude. C’est la réalisation du programme que s’était fixé Ptolémée treize siècles auparavant pour trouver une unité entre astronomie “physique” et astronomie “mathématique”

10 Voir: E.S. Kennedy et I. Ghanem (ed.): *The Life and Works of Ibn al-Shâtir, an arab astronomer of the 14th century*, Alep, I.H.A.S., 1976.



# La théorie des marées de Galilée n'est pas une théorie fausse

## Essai sur le thème de l'erreur dans l'histoire et l'historiographie des sciences

Pierre Souffrin\*

**Résumé:** Galilée n'a laissé aucun doute sur la place centrale qu'il conférait à sa théorie des marées dans sa défense du système de Copernic. La critique moderne la récuse quasi-unaniment comme fausse ou sans rapport à son objet, généralement sans discussion sinon sans embarras, et la réduit à une anecdote sans grande signification. Pour dépasser un jugement aussi superficiel, j'ai procédé à un examen théorique de la *causa primaria* des marées selon Galilée: la succession quotidienne d'une accélération et d'un ralentissement du mouvement "absolu" des lieux géographiques du fait de la composition des deux mouvements, diurne et annuel, de la terre. Il en ressort 1) qu'une accélération et un ralentissement horizontales quotidiens résultent bien des deux mouvements supposés, et qu'il en résulterait un phénomène de marée dans les conditions du modèle de Galilée, 2) que ce phénomène est précisément l'une des deux composantes constitutives de la théorie élémentaire newtonienne des marées. Je montre que l'on peut en déduire une présentation non standard de cette dernière théorie comme simple superposition du mécanisme galiléen stricto sensu et de l'action du soleil (disons) sur le mouvement des eaux superficielles, action ignorée : ou plutôt qui n'a aucun droit de cité, dans la physique de Galilée. La théorie galiléenne apparaît ainsi, à l'aune de la théorie newtonienne, comme une théorie juste mais partielle des marées.

**Abstract:** Galileo consistently stated in his correspondence that he considered his theory of the tides the central argument in his defense of Copernicus. It is however refuted by most modern critics as allegedly false or irrelevant, without specific discussion if not without embarrassment, and reduced to an anecdote of little significance. Little satisfied with such an attitude I undertook a theoretical analysis of the *causa primaria* of the tides according to Galileo: the daily succession of an acceleration and of a slowing down for the "absolute" motion of any point at the surface of the Earth resulting from the combined two motions, diurnal and annual. The outcome is 1) the two supposed motions do actually result in successive accelerations and decelerations, inducing a diurnal tide for Galileo's physical model, 2) such a tide is actually one of the two constitutive components of the elementary Newtonian theory of the tides. From this a nonstandard derivation of this Newtonian theory can be exhibited, by the mere superposition of Galileo's mechanical process stricto sensu and the action on the seawater of, say, the sun - an action for which there is no room in Galileo's physics. Galileo's theory is then seen, by the light of Newtonian physics, as a correct but partial of the tides.

---

\* Astronome, Observatoire de Nice – [souffrin@abs-nice.fr](mailto:souffrin@abs-nice.fr).

## Introduction

QUELQUES RECHERCHES sur les travaux scientifiques de Galilée et sur l'histoire que l'on en fait m'ont conduit, sans que je l'aie en rien cherché, à rencontrer le thème de l'erreur si fréquemment et sous une telle variété d'aspects que j'en suis arrivé à tenter d'ébaucher une typologie raisonnée de l'erreur en histoire des sciences centrée, pour baliser le champ, sur les études galiléennes (en comprenant cette expression dans son extension la plus large: les travaux de Galilée, les travaux sur Galilée, les travaux sur les œuvres de Galilée).

Plusieurs caractéristiques concourent à faire des études galiléennes un champ particulièrement propre à une telle exploration.

Les sources primaires dont nous disposons, en ce qui concerne la personnalité et l'œuvre de l'homme lui-même, sont d'une extension singulière. À côté des œuvres qu'il a publiées, Galilée conservait une masse de brouillons, de premières ébauches, de traités rédigés puis abandonnés, auxquels s'ajoute une correspondance abondante. La disponibilité de ce corpus est elle-même exceptionnelle grâce au monumental travail d'édition critique de Favaro dont l'Edizione Nazionale<sup>1</sup>, toujours disponible, n'a négligé que quelques folios autographes sur lesquels ne se trouvent que des opérations arithmétiques sans texte.

S'agissant d'une œuvre qui à joué un rôle décisif dans la formation de la culture européenne moderne, la littérature secondaire est évidemment extrêmement copieuse: elle s'accroît en moyenne de plusieurs dizaines d'articles de recherche et de plusieurs livres chaque année. Entre les sources primaires et la littérature secondaire, c'est donc un matériel riche et doté d'une certaine unité par constitution qui s'offre à l'exploration d'un thème, et celui de l'erreur, comme je l'ai dit, s'est présenté avec insistance dans les recherches que j'ai menées sur le travail de Galilée sur la théorie du mouvement.

Si la littérature secondaire concernant Galilée est abondante, elle n'en est pas pour autant très variée: la répétition semble sans limite d'un nombre très restreint de passages supposés représentatifs et canoniques, toujours les mêmes avec toujours les mêmes commentaires.

La réduction de l'œuvre à une très petite partie, canonique donc par force, que l'on peut présenter comme relativement cohérente ou ne contenant d'incohérences que ce que l'on peut justifier ou exploiter clairement dans le cadre d'une conception théorique préétablie de l'histoire des sciences ne saurait

---

<sup>1</sup> Galileo Galilei, *Le opere* (Firenze: Barbèra, 1899-1909 réimpression 1964-1968). Dans la suite, EN X, nn est mis pour la page nn du volume X de cette édition.

trop surprendre: c'est une caractéristique de la vulgate de l'histoire des sciences, et le genre a ses justifications. On relèvera cependant que dans le cas des études galiléennes cette pratique est également fréquente dans les ouvrages suivants, livres ou articles, des historiens des sciences et des épistémologues. C'est en fait un large consensus sur la notion d'incohérence concevable ou inconcevable dans le cadre d'une théorie de l'histoire des sciences qui me semble à la fois définir le corpus canonique retenu pour représenter l'œuvre, et rendre compte de la quasi unanimité de la littérature sur la qualification même des incohérences ou erreurs alléguées.

### Première partie: "come è noto, la teoria galileiana è erronea"

#### La renaissance et le problème des marées

Pour rester dans un format compatible avec ce volume collectif, et en hommage à l'intérêt que Jacque Merleau-Ponty a porté, en plusieurs occasions, à la cosmologie et à Galilée, je vais tenter d'illustrer ces problèmes sur le cas de la théorie galiléenne des marées (TGM dans la suite). Cette épisode de l'histoire des sciences est exemplaire à bien des points de vue pour mon propos.

En premier lieu il est clair que l'enjeu théorique est ici d'une importance historique exceptionnelle. Cet enjeu n'est pas en premier lieu, *rétrospectivement*, la production d'une théorie des marées; l'enjeu principal, du point de vue de l'épistémologie moderne, est la recherche d'une preuve physique irréfutable du double mouvement – journalier et annuel – de la terre demandé par le système de Copernic (pour serrer l'argument, je négligerai ici le rôle historique du problème du troisième mouvement de la terre dans ce système). Il s'agit, avec ces mouvements de la terre, du véritable talon d'Achille de la physique et du cosmos aristotéliens: E. Grant a montré d'une façon convaincante<sup>2</sup>, par une argumentation historique (et ici les arguments usuels non étayés par des source textuelles ne sont que des exercices de dialectique sinon de sophistique) qu'au XVI<sup>e</sup> siècle les partisans du cosmos et de la physique d'Aristote parvenaient à absorber bien des nouveautés sans se trouver vraiment ébranlés, comme la corruptibilité des cieux (les taches solaires, la nova de 1604, ...), même les phases de Vénus, mais que l'héliocentrisme, s'il venait à être démontré par une preuve physique irréfu-

2 E., Grant, "A New look at Medieval Cosmology, 1200 – 1687", *Proceedings of the American Philosophical Society*, 129(1985), 417-32.

table, ruinait l'édifice sans possibilité de récupération. Il est attesté que Galilée lui-même considéra très tôt le phénomène des marées comme un argument décisif, ou plutôt comme la seule preuve de la réalité objective des deux mouvements la terre et qu'il tint cette position jusqu'à ses dernières années<sup>3</sup> Je ne veux certainement pas suggérer que l'adhésion de Galilée au système de Copernic ait pu dépendre d'une telle preuve physique: elle reposait évidemment en premier lieu sur son rejet de la philosophie naturelle aristotélicienne et scolastique, et en second lieu, comme celle des coperniciens contemporains et pour tout dire de Copernic lui-même, sur la cohérence d'un faisceau d'arguments dont on avait reconnu dès le XIV<sup>e</sup> siècle aussi bien la force persuasive que le caractère non probant<sup>4</sup>

Pour apprécier la force que pouvait revêtir, dans une polémique, un argument construit sur une théorie des marées, il est bon d'avoir à l'esprit que le phénomène des marées était perçu par les aristotéliens de la Renaissance comme le seul phénomène cosmologique dont le Philosophe n'avait pas réussi à donner l'ombre d'une explication. La popularité dont jouissait alors la légende d'un Aristote se suicidant (cf. EN VII, 459), en se précipitant dans la mer du haut des rochers du Négroponte par désespoir de ne savoir en dire quelque chose de plausible, atteste l'importance accordée au problème. Mario Helbing fait remarquer<sup>5</sup> qu'à la charnière du XVI<sup>e</sup> et du XVII<sup>e</sup> siècles l'explication théorique des marées représentait un tel défi pour la philosophie naturelle que le philosophe qui y parviendrait était sûr d'acquérir immédiatement une notoriété et une autorité considérable, et en conclut que cela fut probablement la motivation première de l'intérêt de Galilée pour une théorie du phénomène. Faire de la recherche d'une preuve du double mouvement de la terre l'origine des recherches galiléennes sur les marées, pour être plus conforme avec notre hiérarchie des problèmes épistémologiques, impliquerait, si l'on y regarde bien, une intuition préalable que le phénomène des marées pourrait constituer une telle preuve; on voit

---

3 Le *Discorso del Flusso e reflusso del mare*, EN V, 378 ff date de 1616, et est repris très largement en 1632 dans le *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo*, EN VII, 27-546. Dans la suite on désignera par *Dialogo* (1998) la grande édition critique: Galileo Galilei, *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo Tolemaico e Copernico, Edizione critica e commento a cura di O. Besomi e M. Helbing*, vol. I Testo, vol. II Commento (Padova: Antenore, 1998).

4 Voir P. Souffrin, "Oresme, Buridan, et le mouvement de rotation diurne de la terre ou des cieux" *Terres médiévales*, ed. B. Ribémont; (Orléans: Kincksieck, 1992). "ce sont là arguments qui ne concluent pas" (Oresme).

5 M. Helbing, communication privée. On trouvera des indications précises sur cette tradition dans *Dialogo* (1998), Vol. II, p. 831 ff.

mal comment une telle intuition aurait pu précéder toute idée de solution théorique du problème des marées<sup>6</sup>. Il n'a pas été historiquement démontré, à ma connaissance, que le problème de la supériorité objective du système de Copernic sur celui de Tycho-Brahé aurait été perçu, avant la diffusion publique des propositions de Galilée, comme un problème crucial de la philosophie naturelle; bien que cela soit fréquemment soutenu, il ne s'agit que de l'une de ces thèses qui conviennent si bien à l'idéologie dominante de l'histoire des idées scientifiques qu'elles semblent ne nécessiter aucune justification et ne souffrir aucun questionnement. La force accordée très largement, encore au début du XV<sup>e</sup> siècle, aux arguments bien connus, depuis alors plus de deux siècles, qui en suggéraient l'équivalence vis-à-vis de l'observation, de l'expérience et de la raison<sup>7</sup>, éclipseait l'intérêt pour une improbable possibilité de discrimination objective entre les grands systèmes du monde.

### Des marées aux mouvements de la terre selon Galilée

La solution de Galilée au problème des marées repose sur l'analogie qu'il établit entre le phénomène communément observé des oscillations de l'eau contenue dans un récipient soumis à des phases d'accélération et de décélération et les oscillations des mers à la surface du globe terrestre; en présentant comme indissociables le phénomène – évident – des marées et le double mouvement de la terre autour du soleil, cette solution modifiait radicalement la hiérarchie des enjeux. La possibilité de trancher, par la seule existence d'un phénomène évident, de la vieille question du mouvement de la terre ou des cieux se présentait exposée ainsi pour la première fois<sup>8</sup> sur des bases nouvelles depuis les argumentations du XIV<sup>e</sup> siècle qui avaient laissé les partisans des deux thèses égale-

6 Cette proposition s'oppose au point de vue exprimé par Popper dans *Objective knowledge* (Oxford: University Press, 1979), (pp. 170-180): "It was another problem which led [Galileo] to the problem of the tides: the problem of the truth or falsity of the Copernician theory" (p. 172). Cette opinion de Popper est séduisante épistémologiquement, mais ne tient pas compte de la situation historique du problème des marées soulignée par Besomi et Helbing.

7 Oresme, *Du ciel et du monde*, cité in Souffrin, *op. cit.*: "... Mais, sous toute réserve, il me semble que l'on pourrait bien soutenir et illustrer la dernière opinion, à savoir que la terre est mue d'un mouvement journalier et le ciel non. Et je veux établir que l'on ne pourrait montrer le contraire par aucune expérience, ni par le raisonnement, et j'apporterai à ceci des raisons."

8 Sur l'existence de propositions assez proches de celles de Galilée, mais beaucoup moins développées et non publiées, aux XVI<sup>e</sup> et au XVII<sup>e</sup> siècles, voir W. R. Shea, *Galileo's Intellectual Revolution. Middle Period, 1610-1632*. (New York: Neale Watson Academic Publications, 1977). Traduction française par F. De Gandt: Le Seuil, Paris, 1992.

ment satisfaits par l'indécidabilité dans le champ de la philosophie naturelle. La nécessité du double mouvement de la terre dans l'explication galiléenne des marées transformait radicalement le problème de la comparaison des grands systèmes du monde et lui conférait un statut révolutionnaire. Ce statut révolutionnaire du problème des grands systèmes est un lieu commun de l'histoire de la pensée scientifique; ce qui est moins généralement perçu est que cette révolution était ancrée, pour Galilée lui-même, plus radicalement dans sa théorie des marées que dans toute autre argumentation, phases de Vénus et satellites de Jupiter compris. Cette théorie des marées a particulièrement préoccupé ses adversaires et en particulier la cour pontificale, probablement dès son premier procès de 1616, certainement lors du procès de 1633 puisque parmi les huit présomptions de culpabilité retenues contre Galilée le seul argument de philosophie naturelle mentionné est la preuve du copernicisme par la théorie des marées<sup>9</sup> Enfin c'est cette théorie des marées – reprise quasiment inchangée du discours de 1616 – qui couronne le grand œuvre de la fin de sa vie, le *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo*. Si l'on rappelle qu'il entendait titrer le *Dialogo De fluxu et refluxu maris*<sup>10</sup> – il en fut dissuadé par ses amis et par les pressions de ses puissants adversaires – on reconnaîtra que non seulement il a soutenu cette théorie de façon constante sans l'amender en rien, mais encore qu'il la considérait comme une pièce maîtresse de sa philosophie de la nature.

### La théorie galiléenne des marées (tgm) devant l'histoire

L'appréciation des historiens devant une théorie aussi importante pour son auteur, alors que cet auteur est considéré comme l'un des plus importants de l'histoire de la pensée scientifique, est assez paradoxale. Elle est dominée par un jugement quasi unanime: la théorie des marées de Galilée est une théorie fautive<sup>11</sup> Embarrassés par cette malheureuse errance, les historiens ont le plus

9 Voir par exemple F. Lo Chiato, S. Marconi, *Galilée entre le pouvoir et le savoir*. (ALINEA: Aix en Provence, 1988).

10 Voir *Dialogo* (1998), Vol. II, p. 39.

11 Par exemple: E.J. Aiton, "Galileo's Theory of the Tides", *Annals of science*, 1965, 10: 44-57: *Though fundamentally false, Galileo's theory of the tides merits attention...*; M. Clavelin, *La philosophie naturelle de Galilée* (Paris: Armand Colin, 1976, rééd. Albin Michel, 1996): "*Qu'il s'agisse des marées ou des vents alizés, l'argumentation de Galilée est donc profondément défectueuse*", p. 482; P. Costabel, *Encyclopaedia Universalis*, article "Galilée": "*la seule preuve formelle qu'il proposait du mouvement de la terre, à savoir le flux et le reflux de la mer, ne valait absolument rien*".



souvent négligé la quatrième Journée du *Dialogo*, passant la théorie des marées et ses conséquences cosmologiques aux profits et pertes de l'histoire<sup>12</sup>.

Dans une importante introduction à son édition du *Dialogo*, Sosio analyse très justement la situation: “*La quatrième Journée du Dialogo est généralement considérée comme la moins importante, la moins réussie, la plus faible du point de vue scientifique – une sorte d’appendice non essentiel du Dialogo, et comme telle rapidement expédiée dans les présentations, et traitée de façon tout à fait insatisfaisante par les rares commentateurs. Il me semble nécessaire de réfuter ce procédé: celui qui s’occupe d’histoire des sciences sait bien qu’il n’est pas de saine méthodologie de garder ce qui survivra et de jeter à l’eau les parties mortes, et que parfois justement une erreur se révèle être plus productive qu’une vérité trouvée par hasard. Si l’on considère le Dialogo dans son ensemble, les trois premières Journées se présentent comme une préparation lente et patiente [...] Les trois premières Journées n’apportent aucun argument concluant. [...] Galilée a vu dans la théorie des marées l’unique preuve physique irréfutable du mouvement de la terre et lui a réservé la place d’honneur, celle de l’argument décisif*”<sup>13</sup>. A la suite de cette analyse, à laquelle j’adhère complètement, Sosio ajoute: “*comme on sait, la théorie galiléenne est fautive, au moins dans la mesure où elle prétend expliquer un phénomène essentiellement dû à d’autres causes*”.

J’ai dit plus haut que la TGM était considérée unanimement comme une théorie fautive. Sans doute Sosio partage-t-il cette opinion, mais il modère cette conclusion – qui prise à la lettre est tout de même ravageuse pour l’ouvrage dont Sosio a correctement rétabli l’économie contre la lecture habituelle – en précisant qu’elle est fautive “au moins en tant que théorie de marées” Cette précision est potentiellement très importante du point de vue épistémologique, dans la mesure où elle laisse ouverte une possibilité que cette théorie ne soit fautive “que comme théorie des marées” Si cette voie entrevue n’est pas explorée par Sosio, il faut reconnaître qu’il est l’un des rares commentateurs à avoir émis une réserve<sup>14</sup> à la qualification de théorie fautive partout affirmée; cependant, en l’absence de développement son argument reste imprécis et empreint d’ambiguïtés. Cette réserve pertinente trahit essentiellement une perplexité que de rares auteurs se sont risqués à exprimer. Ainsi Finocchiaro, qui ose ce courageux commen-

12 Par exemple, Clavelin ne réserve à la TGM que quelques pages en appendice de *La philosophie naturelle de Galilée*, qu’il conclut ainsi: “*La quatrième journée [...] n’est pas tout à fait sur le même plan que les autres journées. Son apport pouvait donc être dissocié (comme cela se produisit effectivement) sans que l’influence de l’œuvre en soit d’aucune façon amoindrie*”, p. 482.

13 Sosio, L., dans son introduction à: *Galileo Galilei, Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo, a cura di Libero Sosio* (Torino: Einaudi editore, 1970, 1982), p. LXXII.

14 Voir cependant *supra* note 21.

taire: “*this causal explanation is erroneous, although his supporting argument is not worthless, and it is not clear where his reasoning goes wrong*”<sup>15</sup>, ou De Gandt<sup>16</sup> qui donne un sous-titre interrogatif: “*La théorie des marées, une erreur mémorable?*” mais se contente d’ajouter: “*la théorie galiléenne des marées a été unanimement rejetée comme fausse et mal accordée aux observations. Et pourtant il faut encore la lire [...] Galilée fait preuve d’une étonnante ingéniosité [...]*”

Si prudentes et peu concluantes qu’elles soient, les citations qui précèdent sont loin d’être représentatives des commentaires modernes sur cette question; la théorie galiléenne est très généralement considérée péremptoirement<sup>17</sup> comme une erreur malheureuse, que l’on peut comprendre dans le contexte historique mais dont le traitement le plus honorable pour son auteur serait l’oubli pur et simple.

L’analyse de la TGM par Mach<sup>18</sup> est d’une tout autre teneur, aussi bien sur le plan de l’épistémologie que de la compétence scientifique. Son objection porte – du moins en apparence – sur le modèle développé par Galilée et non sur ce qui le distingue de la théorie newtonienne. Mach conclut de sa discussion que le modèle de Galilée serait stationnaire, c’est à dire qu’il ne comprendrait aucune accélération superficielle *dépendant du temps*; dans ces conditions la discussion galiléenne serait effectivement radicalement invalidée.

Popper, dans *Objective Knowledge*<sup>19</sup>, hésite curieusement entre cet argument de Mach et une variante consistant à considérer qu’au modèle de Galilée correspondrait bien un effet dépendant du temps, mais d’une amplitude négligeable et par là étranger au phénomène des marées. Cette dernière variante de

15 Finnochiaro, M. A., *Galileo on the World Systems, A New Abridged Translation and Guide, Translated and edited by* – (Berkeley/Los Angeles/London: University of California Press, 1997), p. 397.

16 De Gandt, dans sa présentation du *Dialogo* ..., traduction française par R. Fréreux avec le concours de F. De Gandt, (Paris: Le Seuil, 1992), p. 27.

17 Les affirmations sont parfois d’autant plus péremptoires que l’argumentation est – pour le moins – discutable. Ainsi Clavelin estime que “*Si l’explication de Galilée était exacte, ce sont tous les corps non rigidement liés à la terre qui devraient, chaque vingt-quatre heures, être alternativement projetés vers l’avant et vers l’arrière ...*” (*op. cit.* p. 480). Si cette objection était pertinente, Clavelin devrait soutenir que cela se produit effectivement toutes les douze heures, selon la théorie de Newton. Il poursuit dans la même veine: “*Galilée ne voit donc pas que la quatrième Journée du Dialogue est incompatible avec la seconde*”; Clavelin semble “donc” ne pas distinguer pas entre une rotation uniforme et la composition de deux rotations uniformes, distinction qui est la base de la TGM.

18 Mach, E. *La mécanique/ exposé historique et critique de son développement* (Paris: Hermann, 1904, Gabay, 1987), Ch. II, IV, 11, p. 208 ff.

19 *Op. cit.*, note 6. Je remercie J.-J. Szczeciniarz de m’avoir signalé l’intervention de Popper sur ce problème historique.

la théorie de Mach avait déjà été soutenue par Strauss<sup>20</sup> dans le commentaire à son édition du *Dialogo*.

Pour tous les commentateurs, en fin de compte, la TMG est une théorie fautive, au mieux ingénieuse; aucun<sup>21</sup> ne semble avoir entrevu au moins une possible pertinence de cette théorie au but que Galilée vise dans le *Dialogo*: une preuve physique du double mouvement de la terre.

### Un réexamen nécessaire

Les hésitations qui ont pu être exprimées quant à la simple qualification comme théorie fautive de la TGM, si exceptionnelles qu'elles aient été, pourraient suffire à rendre nécessaire un réexamen critique de cette qualification. De deux choses l'une en effet: ou bien ces hésitations sont mal fondées, et il faut alors le montrer, ou bien elles ont quelques fondements solides dont on doit alors en explorer les conséquences. Il faut reconnaître que dans la dernière hypothèse on pourrait s'étonner que ceux qui ont eu assez de lucidité pour émettre ces réserves aient pu en rester là.

Quant à l'objection soulevée par Mach, le peu de cas qui en est fait par les historiens des sciences peut surprendre; car si elle est irréfutable, elle dit tout sur la TMG et rend vaine les tergiversations dont il vient d'être question. Elle a été peu citée et mal comprise lorsqu'elle a été citée<sup>22</sup>: ceci éclaire peut-être cela. Un examen critique en est cependant nécessaire, et je montrerai plus loin qu'elle est réfutable en tant que critique du modèle de Galilée.

Avant d'aborder ce programme il est convenu de décrire plus précisément le contenu de la proposition galiléenne.

20 E. Strauss *in*: Galileo Galilei, *Dialog über die beiden hauptsächlichsten Weltsysteme* (Leipzig: 1891) p. 566.

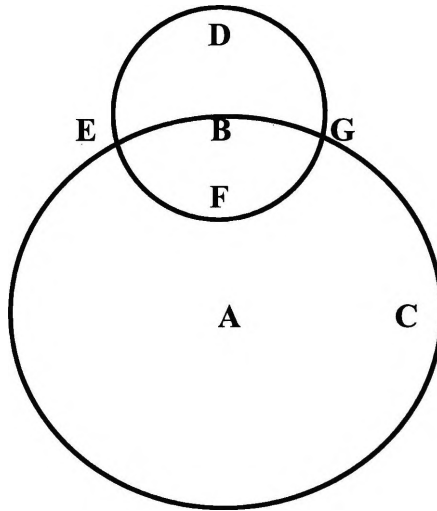
J'ai souvent entendu ce même argument (i.e.: si il y a un effet, il est négligeable) dans les discussions que j'ai pu avoir à propos de la TGM.

21 Note ajoutée aux épreuves: J'ai eu connaissance, après cette conférence, de deux exceptions notables curieusement ignorées par la littérature historique. Nobile (1954) et Burstyn (1962) ont en effet contesté sans ambiguïté la thèse d'un caractère *essentiellement erroné* de la TGM, c'est-à-dire ont soutenu *quant au fond* la thèse que je soutiens ici. Voir ma discussion dans *Cahier du SEHS*, 25 (1999) sur <http://wwwrtc-obs-azur.fr/cerga/hdsn/Psouffrin/souffrin.html>.

22 Par exemple par W. Shea *op. cit.*, p. 174 (trad. fr., p. 228). L'ouvrage de Shea, bien qu'embarrassé d'erreurs de géométrie et de mécanique, n'en est pas moins, à mon avis, l'une des meilleures présentations de la philosophie naturelle de Galilée. Cf ma revue dans *AIHS*, 45 (1995), 171-3.

### La théorie galiléenne des marées: simplicité et sophistication

La TGM repose d'abord, comme je l'ai indiqué plus haut, sur la référence aux mouvements d'un liquide par rapport au récipient qui le contient lorsque celui-ci est soumis à des accélérations et décélérations successives. Galilée affirme que dans l'hypothèse d'un double mouvement de la terre – un mouvement de rotation uniforme autour de son centre, et un mouvement de circulation uniforme de ce centre sur une orbite circulaire autour du soleil – les grandes masses d'eau à la surface de la terre se trouvent dans leurs bassins naturels comme l'eau dans un tel récipient. Alors, remarque-t-il, la composition des deux mouvements de rotation uniforme – la rotation diurne et le mouvement orbital annuel – a pour effet que le bassin de tout lac, mer ou océan a un mouvement non uniforme, la rotation diurne s'ajoutant au mouvement orbital au milieu de la nuit et s'en retranchant au milieu du jour<sup>23</sup> Pour faire plus facilement comprendre ce résultat, Galilée l'explique sur la figure ci-dessous où, pour simplifier, il fait coïncider le plan de l'équateur avec celui de l'écliptique.



<sup>23</sup> *"Dalla composizione di questi due movimenti, ciascheduno per sè stesso uniforme, dico risultare un moto difforme nelle parti della Terra"* (EN VII, p.452).

Le cercle EGFD représente la terre, B son centre, le cercle C de centre A l'orbite annuelle. Un point fixe sur la terre parcourt le petit cercle en un jour et le centre B parcourt le cercle C en un an, les deux rotations étant de même sens, disons de D vers E. Galilée fait voir par la figure que "lorsque [la surface terrestre] tourne autour de son propre centre, il résultera forcément pour les parties de cette surface, par le couplage entre ce mouvement diurne et le mouvement annuel, un mouvement absolu <un moto assoluto> tantôt très accéléré, tantôt tout autant retardé pour les parties de cette surface [...] Donc, si il est vrai (et l'expérience prouve que c'est bien vrai) que l'accélération et le ralentissement du mouvement d'un vase fait aller et venir, et monter puis descendre à ses extrémités, l'eau qu'il contient, qui saurait ne pas concéder qu'un tel effet puisse, ou plutôt doive également se produire de toute nécessité dans le cas des mers, dont les contenants sont soumis à de semblables variations [...]?"<sup>24</sup>

Cette description préliminaire n'est qu'une version très simplifiée de la discussion que Galilée développe, dans les pages qui suivent, pour tenir compte de façon de plus en plus réaliste des caractéristiques géométriques et cinématiques des mouvements de la terre selon Copernic et des conséquences de la diversité topographique des côtes et des fonds sur les eaux en mouvement. Dans son ensemble, l'argumentation de Galilée est finalement très sophistiquée, complexe, impliquant l'inclinaison de l'écliptique et le mouvement orbital de la lune autour de la terre pour ce qui est de la cosmographie, les mouvements que nous appelons des oscillations propres d'une masse fluide et sa conception d'un *impetus* spontanément dissipatif<sup>25</sup> pour ce qui est de la physique, pour ne citer que quelques-uns des ingrédients qui font partie de l'arsenal explicitement mis en œuvre dans la comparaison de son modèle théorique aux observations. Mais il est parfaitement clair que Galilée considère que le modèle simple suffit à lui seul pour démontrer l'essentiel, à savoir que les deux mouvements de la terre ont pour conséquence nécessaire des flux et reflux des eaux superficielles de la même nature que ceux que l'on observe dans le phénomène des marées, et qu'en l'ab-

24 E.N. VII, p. 453.

25 Galilée explique l'absence de marées de l'air atmosphérique et les alizés par les propriétés de l'*impetus* dissipatif dont il a développé le concept dans le chapitre 17 de son *De motu antiquiora*. Je ne vois pas d'autre interprétation possible pertinente du passage crucial de cette démonstration: "imperocché, come altra volta s'è detto, i corpi leggeri sono ben più facili ad esser mossi che i più gravi, ma son tanto meno atti a conservare il moto impressoli, cessante la causa movente" (*Dialogo*, EN VII, p.463). Ignorant – ou négligeant – cette proposition, Clavelin considère que toute cette discussion est, elle aussi, incompatible avec la deuxième journée du *Dialogo* (*op. cit.* p.481). Cette accumulation d'incompatibilités alléguées (par Clavelin mais aussi par d'autres) suggère plutôt qu'on affaiblit la cohérence de la philosophie naturelle de Galilée en évacuant arbitrairement certains concepts pre-modernes qui peuvent s'y lire.

sence de toute explication alternative (recevable) les marées constituent une preuve du double mouvement de la terre.

Dans la mesure où le jugement porté par la critique moderne sur la TGM, c'est-à-dire sa qualification comme fausse, et non pas simplement comme incomplète ou imprécise, s'articule essentiellement sur le modèle simplifié, et que ce qui est ici d'abord en examen est justement cette qualification, c'est sur la discussions des propriétés de ce modèle que je développerai ma réfutation de ce jugement.

## **Deuxième partie: la théorie des marées de Galilée comme théorie fausse**

### **Sur la réfutation d'une théorie par une théorie**

L'objection "théorique" la plus fréquemment opposée à la TMG est l'affirmation que la théorie newtonienne de l'attraction gravitationnelle est le fondement de la théorie correcte (de l'essence) du phénomène de marée, et que la TGM en ignore, bien évidemment, les concepts fondamentaux. Cette objection épistémologiquement très naïve ne mériterait guère l'attention si elle n'était émise de façon si constante, par des scientifiques presque toujours, par des historiens des sciences souvent, et parfois même par des philosophes – sous une forme plus ambiguë bien sûr. Il n'est donc peut-être pas hors propos de souligner que juger de la pertinence d'une théorie physique par une référence à une autre théorie physique relève d'une confusion sur le rapport des théories aux phénomènes. La justification apparente d'une démarche de ce genre réside dans le fait que certaines théories peuvent légitimement être comparées, et qu'une théorie peut être dite, d'une certaine façon, supérieure à une autre; la question est justement de savoir de quelle façon. Dans le cas par exemple où l'une des théories conduirait, pour tous les *phénomènes* dont l'autre théorie peut donner une description, à un meilleur accord entre les déductions de la théorie et les phénomènes, on devra certainement dire qu'elle est meilleure en tout point *comme théorie*, mais en conclure à une supériorité ontologique de ses *concepts* constitutifs sur ceux de la théorie qu'elle surpasse reviendrait à une réification de ces concepts, ce qui n'est philosophiquement pas défendable.

Si une théorie peut-être normative par rapport à une autre, ici par exemple la théorie de Newton par rapport à la TGM, ce ne peut être par référence aux concepts qui les constituent, mais seulement par la comparaison des conséquences des deux théories. Seule la confrontation des implications d'une théo-

rie à des phénomènes peut en légitimer et en délimiter une qualification comme “juste” ou “fausse”. C’est bien ainsi que l’entend Galilée lui-même, lorsqu’il exprime sa propre conception, mille fois citée, de la *justification* de sa théorie de la chute des graves: elle réside dans la conformité aux observations des conséquences démontrées de la théorie<sup>26</sup>. Lorsque le champ d’application d’une théorie est assez bien délimité pour que l’on puisse considérer comme suffisamment réaliste la description qu’elle donne d’un phénomène; elle peut dispenser d’une connaissance empirique ou expérimentale du phénomène, et permettre sans autre médiation de confronter les prévisions d’une autre théorie à ce phénomène. C’est de cette façon que la théorie newtonienne des marées peut effectivement nous permettre de dire un certain nombre des choses sur la TGM: dans la mesure où elle implique des conséquences que l’on sait – d’une façon ou d’une autre – être corroborées par l’observation. Mais cela est tout autre chose que la qualification de la TGM par référence aux concepts newtoniens.

### Les marées comme phénomène

Les phénomènes de marées sont, dans leur diversité observable, d’une complexité qui défie le calcul<sup>27</sup>. C’est justement en invoquant cette complexité – connue de son temps – que Galilée a pu soutenir, contre ses critiques contemporains qui accumulaient sans peine les observations dont il ne rendait pas le moindre compte<sup>28</sup> que sa théorie décrivait bien l’essence du phénomène; il lui suffisait de remarquer, ce que personne ne pouvait contester, que de nombreux *accidents* difficiles à discerner ne peuvent manquer d’influencer le phénomène et lui donner ses caractéristiques observées. Sa thèse est que seul le double mouvement de la terre peut être la *cause première*<sup>29</sup> de cette agitation ordonnée des eaux superficielles que l’on appelle marée.

26 Au début du Livre *Sur le mouvement accéléré*, dans la Troisième Journée des *Discorsi*: “*Quod tandem, post diurnas mentis agitationes, reperisse confidimus; ea potissimum ducti ratione, quia symptomatis, deinceps a nobis demonstratis, apprimè responderre atque congruere videntur ea, quae naturalia experimenta sensui repraesentant*” (EN VIII, p. 197).

27 Sur les phénomènes observés comme sur la théorie moderne des marées, on pourra consulter l’ouvrage de vulgarisation: J. Bouteloup, *Vagues, marées, courants marins* (Paris: PUF Que sais-je n° 438, 1968). Sur l’approche mathématique moderne du problème, la référence essentielle est: H. Poincaré, *Leçons de mécanique céleste*, Vol. III. *Théorie des marées* (Paris: Gauthier-Villars, 1910).

28 J’emploie en général l’expression “rendre compte” d’un phénomène dans le sens où les anciens disaient que les théories des astronomes avaient pour objectif de “sauver” les phénomènes.

29 *Ma già si è concluso, la disegualità e difformità del moto de i vasi contenenti l’acqua esser causa primaria de i flussi e reflussi* (EN VII, p.471). Autre occurrence de *causa primaria*, p. 460.

Il n'est pas possible, et il ne sera pas nécessaire, de décrire ici en quelques détails cette complexité *phénoménale* des marées. Il suffira à notre propos de rappeler que l'aspect le plus caractéristique *qualitativement*, bien connu et observé de longue date est que, de façon dominante à l'échelle du globe, la marée en un lieu géographique se produit *deux fois par jour*, et plus précisément deux fois par *jour lunaire* si l'on entend par jour lunaire le temps qui sépare deux passages successifs de la lune au méridien du lieu (soit un peu moins de 25 heures).

### La théorie newtonienne comme théorie des marées

On sait que Newton, dans ses *Principes Mathématiques de la Philosophie Naturelle*, rend précisément compte de cet aspect caractéristique: "*Par les corollaires 19 et 20 de la Proposition 66 du premier Livre, on voit que la mer doit s'abaisser et s'élever deux fois chaque jour tant solaire que lunaire*"<sup>30</sup>

Ces deux marées quotidiennes correspondent au fait que le niveau moyen des eaux superficielles présente en permanence deux renflements antipodiques le long du diamètre terrestre dirigé vers le disque lunaire (pour ne parler que du phénomène quantitativement dominant). Cette figure caractéristique du géoïde est obtenue comme une conséquence nécessaire de la théorie newtonienne, et même plus précisément de la forme la plus simple de la théorie, dite *théorie statique* des marées, qui ne considère que la figure d'équilibre du géoïde. Il n'est peut-être pas déplacé de souligner que la théorie newtonienne des marées implique, pour rendre compte de deux marées quotidiennes en un lieu géographique, un double mouvement de la terre par rapport à l'astre responsable de la marée. En effet, si la terre montrait toujours la même face à son satellite (pour ne parler que de l'effet dû à la lune), le niveau des eaux ne serait pas variable dans le temps en un lieu géographique donné, comme on peut le déduire de façon certaine justement de ce que nous savons de la théorie de Newton; il n'y aurait alors à proprement parler pas de marées mais seulement une déformation symétrique géographiquement stationnaire de la surface du géoïde aqueux. La complexité dont il a été question a pour conséquence que la théorie statique est gravement déficiente lorsqu'il s'agit de donner quelque estimation quantitative d'intérêt pratique en un lieu donné, comme l'amplitude, la phase ou même la période précise du phénomène réel. Mais la forme général du géoïde est le phénomène le plus caractéristique à grande échelle. Pour cette raison, seule une

---

<sup>30</sup> Je cite d'après I. Newton, *Principes Mathématiques de la Philosophie Naturelle*, Trad. Marquise du Châtelet, (Paris: Blanchard, 1966), Livre III, Proposition XXIV, Théorème XIX.



théorie qui rend compte de la double marée quotidienne peut être considérée comme une théorie *satisfaisante* des marées, et pour cette raison encore il est raisonnable de dire que la *théorie statique* de Newton, si imprécise qu'elle soit, est essentiellement une théorie juste des marées.

La théorie newtonienne et ses développements au XVIII<sup>e</sup> siècle ont été popularisés dans un grand article de d'Alembert dans l'*Encyclopédie Méthodique Mathématiques*<sup>31</sup>, dont on ne peut que souligner l'intérêt historique.

### Troisième partie: la théorie de Galilée revisitée

#### Les fondements conceptuels de la tgm

Les deux fondements de la description newtonienne sont le concept de force à distance et celui de force d'inertie, c'est-à-dire les effets dus au fait que la terre ne soit ni au repos ni en mouvement uniforme de translation, pour rester dans le langage de Newton.

La force à distance a deux fonctions dans la théorie de Newton. Avec le globe terrestre comme centre, elle rend compte de la *gravitas* – c'est-à-dire du poids – des eaux, donc de leur stabilité dans leurs bassins. Avec l'astre perturbateur, disons la lune, comme centre elle rend compte ensuite, *par composition avec des forces d'inertie centrifuges*, de la symétrie du géoïde aqueux qui est, nous l'avons vu, le phénomène justement dont *doit* rendre compte une théorie pour qu'on puisse la considérer comme *satisfaisante*.

Qu'en est-il des fonctions de la force à distance de Newton dans le modèle galiléen?

La première de ces fonctions trouve chez Galilée un parfait équivalent fonctionnel, précisément en la *gravitas* que Galilée attribue *par nature* à tout les corps terrestres. La *propria gravitas* est pour Galilée la tendance ou propension des corps au mouvement vers le centre de la terre. Pour ce qui est de la stabilité des eaux dans leurs bassins, où la variation du poids avec le lieu n'est pas essentielle, cette conception de la *gravitas* est aussi valable et efficace que la conception newtonienne.

Dans sa seconde fonction, la force d'attraction gravitationnelle de Newton n'a pas de substitut dans la physique galiléenne. Dans le cadre des concepts

31 D'Alembert, *Encyclopédie Méthodique. Mathématique*. (Paris: Panckoucke; Liège: Plomteux, 1785) Vol. II, Article: Flux et reflux. Le caractère dominant des composantes *horizontales* des forces dans les effets de marées, généralement ignoré par les non-spécialistes, y est expliqué clairement, p. 62).

galiléens, la force gravitationnelle de Newton due à la lune – ou au soleil – serait une *gravitas* des corps terrestres correspondant à une tendance ou propension au mouvement vers le centre du mouvement orbital, qui se composerait avec la *gravitas propria*, et qui dépendrait de la distance à cet astre. De telles conceptions sont absolument étrangères à la philosophie de la nature de Galilée. Dans le modèle mécanique de la TGM rien ne joue un rôle comparable à l'attraction gravitationnelle de l'astre autour duquel a lieu le mouvement orbital, si ce n'est que *par nature* la terre a un tel mouvement orbital.

Quant aux forces d'inertie, le schéma théorique de Galilée les prend fondamentalement en considération, comme effets conjugués d'un mouvement non uniforme du contenant et de la propension (*propensione*) du contenu à la suite d'un mouvement uniforme.

On voudra peut-être objecter que Galilée ne pouvait pas maîtriser le concept de force d'inertie. Soit, si on l'entend dans un sens très général, mais les forces d'inertie dont il est question ici sont celles que l'on appelle aujourd'hui forces centrifuges; or, Galilée explique longuement la nature inertielle de la force centrifuge dans la deuxième Journée du *Dialogo*<sup>32</sup>, et le fait qu'il ne parvienne pas à en comparer correctement *quantitativement* les effets à la chute libre ne fait rien à l'affaire. Qualitativement les effets centrifuges des rotations sont aussi bien compris par Galilée que quelques années plus tard ils le seront par Huygens qui ira lui, jusqu'à la maîtrise quantitative. Contrairement à ce que peut laisser penser le discours habituel des historiens sur le concept d'inertie chez Galilée, celui-ci admet – et cela n'est pas une innovation – que la force centrifuge affecte les corps célestes en mouvement circulaire aussi bien que les corps élémentaires du monde sublunaire<sup>33</sup>; c'est donc de façon parfaitement cohérente

32 Par exemple, EN VII, p. 216: “i corpi gravi, girati con velocità intorno a un centro stabile, acquistano impeto di muoversi allontanandosi da quel centro, quando anco e' sieno in stato di aver propensione di andarvi naturalmente. Leghisi in capo di una corda un secchiello, dentrovi dell'acqua, e tenendo forte in mano l'altro capo, e fatto semidiametro la corda e 'l braccio, e centro la snodatura della spalla, facciasi andare intorno velocemente il vaso, sì che egli descriva la circonferenza di un cerchio [...] seguirà che l'acqua non cascherà fuori del vaso, anzi colui che lo gira sentirà sempre tirar la corda e far forza per allontanarsi più dalla spalla [...] e se in cambio d'acqua si metteranno pietruzze, girando nell'istesso modo, si sentirà far loro l'istessa forza contro alla corda.”

33 EN VII p. 146, note marginale: *Accresce l'inverisimile (e sia il sesto inconveniente), a chi più saldamente discorre, l'essere inescogitabile qual deva esser la solidità di quella vastissima sfera[...]: o se pure il cielo è fluido, come assai più ragionevolmente convien credere, sì che ogni stella per sè stessa per quello vadia vagando, qual legge regolerà i moti loro ed a che fine, per far che, rimirati dalla Terra, appariscano come fatti da una sola sfera?* [paraphrase: Si la terre est immobile, on comprend difficilement la solidité de l'immense sphère céleste à laquelle les étoiles seraient fixées, et si cette sphère est fluide (ce qui semble beaucoup plus raisonnable) on ne comprend pas ce qui peut ainsi régler le mouvement d'ensemble des étoiles comme celui d'une seule sphère].

que Galilée considère un effet centrifuge de la rotation orbitale sans avoir de conception *dynamique* de la cause de ce mouvement orbital.

Il convient de rappeler à ce point que s'il est bien avéré que Galilée prétendait avoir effectivement expliqué les marées, et que cela fut son projet initial, nous avons vu que l'enjeu s'est trouvé profondément modifié par le contenu même de la théorie: dès sa première version de 1616 il devient avant tout de proposer une preuve observable du double mouvement de la terre.

Le problème historique ne peut donc être réduit à la question du rapport du modèle de Galilée au phénomène des marées; la question se pose également de savoir si la TMG, qu'elle soit ou non une théorie satisfaisante des marées (ce que l'on accordera, pour faire court, à celle de Newton), serait de nature à justifier la prétention de Galilée de présenter une preuve du double mouvement de la terre. On peut même soutenir que cette dernière question est la plus significative du point de vue épistémologique<sup>34</sup>

Je poserai donc dans la suite de cet essai le problème sous la forme suivante:

1) le mécanisme invoqué par Galilée a-t-il pour effet, en principe, une accélération horizontale périodique des eaux en un point donné à la surface du globe terrestre?

2) si c'est le cas, la réalité du double mouvement de la terre est-il une cause suffisante pour l'existence de cet effet?

Je dis que si la réponse à la première question est positive, il conviendra d'examiner dans quelle mesure cette accélération est effectivement une composante du phénomène réel, et que si la réponse à la deuxième de ces deux questions s'avérait être positive il faudra reconnaître que la TGM est bien une théorie juste *en tant que preuve de la réalité du double mouvement de la terre*, exactement dans le sens et dans les limites où l'on dit que le pendule de Foucault constitue une preuve de la rotation diurne de la terre.

### Réfutation de la critique de Mach

L'objection la plus sérieuse à la TGM – celle de Mach – s'est bien placée dans la perspective du modèle proposé par Galilée: Mach a récusé la TGM en niant la réalité des propriétés physiques que Galilée attribue à son modèle mécanique. Nous allons voir que la pertinence de cette critique de Mach à la TGM peut être elle-même récusée.

34 C'est, bien sûr, le point de vue de Popper (*op. cit.*).

Mach a cru légitime de penser que l'explication de Galilée concernait une composition de mouvements où le mouvement *circulaire uniforme orbital* serait remplacé par un mouvement *rectiligne uniforme*. Or, si le mouvement orbital est remplacé par un mouvement rectiligne uniforme, la trajectoire d'un lieu géographique dans le modèle galiléen devient une cycloïde à base rectiligne, et la critique de Mach est alors parfaitement fondée: il y aura bien une force d'inertie, mais elle ne sera pas variable dans le temps en un lieu géographique et il n'y aura donc pas de marée<sup>35</sup>. Cette absence d'effet de marée lorsque le deuxième mouvement uniforme est rectiligne ressort justement de l'absence d'effet dynamique d'un entraînement rectiligne uniforme<sup>36</sup>; il n'y aura comme effet d'inertie que la force centrifuge de la rotation terrestre, qui est purement indépendante du temps en un lieu géographique.

Je ne vois pas ce qui autorise à préférer cette interprétation à la lecture stricte du texte qui ne fait mention que de mouvements *circulaires uniformes*, sauf lorsque dans l'introduction didactique Galilée utilise l'image du mouvement rectiligne d'une barque freinée qui aurait pris l'eau, mais alors l'essentiel est justement que ce mouvement *rectiligne* est *non uniforme*, décéléré. Tout dans le texte, dans les figures, ainsi que le contexte astronomique, implique clairement que *les deux mouvements* uniformes dont l'existence simultanée est requise essentiellement par Galilée sont des *rotations uniformes*.

La critique de Mach est donc juste dans la mesure où elle s'applique au modèle qu'il soumet à sa critique, mais ce modèle n'est pas celui de Galilée, et la critique n'est pas pertinente en tant que réfutation de la TGM.

Quant à la variante de la critique de Mach proposée par Strauss et par Popper, elle ne peut être elle-même réfutée, du fait de son caractère *essentiellement quantitatif*, qu'après une analyse quantitative des phénomènes participant aux marées; j'y reviendrai donc à la suite de la brève annexe "mathématique"

### La tgm et les marées

La question de l'existence ou non existence des effets physiques que Galilée attribue à son modèle doit être considérée sur le modèle proposé par Galilée lui-même et non sur celui qu'un lecteur moderne peut lui substituer. Il faut donc en revenir au texte. Le modèle de Galilée est sans aucune ambiguïté,

---

35 Comme le signalait déjà Newton dans les *Principia* au Livre I, Proposition 66, Théorème 26, Corollaire 19.

36 *Principia*: Corollaire 5 des Lois.

dans la forme simplifiée qu'il lui donne d'abord avant de rentrer dans le détail de nombreux accidents qui peuvent moduler le fonctionnement d'un modèle plus réaliste, celui d'un disque en rotation uniforme autour d'un centre lui-même en rotation uniforme autour de son centre réputé fixe. Du point de vue cinématique ce modèle n'est autre qu'un cas simplifié (sans équant) des épicycles de Ptolémée, c'est-à-dire d'une certaine façon un paradigme de l'astronomie ancienne. La théorie de Galilée est fondée sur l'affirmation qu'un point fixé à la périphérie du disque extérieur est soumis à une accélération tangentielle dont le sens change périodiquement, et la première question est de savoir si cette affirmation est juste ou fautive. Pour y répondre on peut bien sûr penser à un dispositif expérimental, et on sait que Galilée a prétendu en avoir effectivement construit un – dont il dit finalement qu'il est impossible d'en rien tirer de convaincant<sup>37</sup> Une autre méthode consiste à substituer à cette expérimentation le recours au calcul. Le problème de cinématique est fort simple. La solution<sup>38</sup> fait apparaître effectivement l'existence d'une composante "horizontale" de l'accélération, qui change de sens à l'aphélie et au périhélie; cette composante est due au mouvement orbital, et du fait du mouvement diurne elle donne lieu en un point fixe de l'équateur à une oscillation périodique quotidienne.

Le calcul confirme donc littéralement les propositions de Galilée quant à l'existence, dans son modèle, de variations périodiques de l'accélération en un point de son "équateur" Cependant, comme de simples considérations de symétrie du modèle permettaient de le prévoir, la seule composition des forces centrifuges en présence et de la *gravitas propria* est incapable de produire aux points de "l'équateur" situés au milieu du jour et au milieu de la nuit (soit en D et F sur la figure) des effets opposés; c'est dire que le modèle est incapable de rendre compte de la symétrie du géoïde et la double marée quotidienne. C'est en ce sens restreint que la TGM n'est pas une théorie satisfaisante des marées.

L'accélération dont le modèle rend compte valide cependant, dans la logique de la physique galiléenne du mouvement et de la *gravitas*, l'analogie qualitative entre les marées et le mouvement de l'eau dans une barque brusquement freinée. La *gravitas* empêche l'eau d'être expulsée verticalement par la force cen-

37 Curieusement Frereux et De Gandt dans leur traduction française, rendent "ed io, ho la costruzjone d'una machina ..." (EN VII, p. 456) par "je pense à la construction d'une machine ..." Le texte signifie précisément "j'ai construit une machine ...".

38 En notation complexe, si on représente par  $\mathbf{M} = e^{iWt}\{\mathbf{R} + re^{iwt}\}$  un point du cercle extérieur du modèle de Galilée, son accélération absolue est  $\mathbf{M}'' = -W^2\mathbf{M} - [w^2 + 2wW]re^{i(W+w)t}$ , dont la composante tangentielle, qui est *stricto sensu* ce dont parle Galilée, est  $RW^2 \sin(wt)$ .

trifuge, et le fond de la mer retient l'eau dans la direction verticale. Si aucune liaison autre que la côte ne fait obstacle au mouvement horizontal de l'eau, si cette côte est accélérée ou décélérée horizontalement l'eau s'y précipitera. Or nous avons vu que les effets cinématiques impliqués par le modèle de Galilée sont de cette nature, et qu'ils résultent de la composition de deux mouvements circulaires.

Que Galilée puisse dire réels, absolument et non seulement relativement, les deux mouvements dont il est question ressort suffisamment du fait que dans le cas d'un modèle à la Tycho-Brahe, la logique de sa discussion conduit évidemment à l'absence de cet "effet de marée"

### La tgm comme partie de la théorie newtonienne des marées

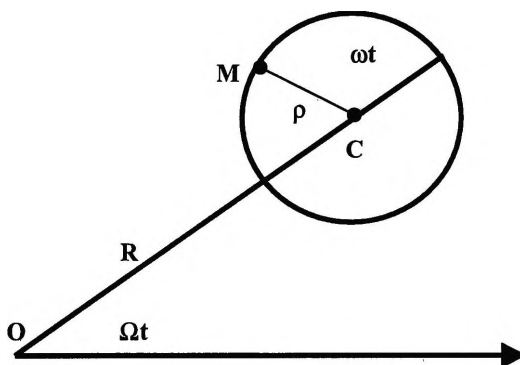
Nous avons dit en quoi la théorie de Galilée n'est pas une théorie *satisfaisante* en tant que théorie des marées. On doit ajouter que les conclusions obtenues avec le modèle de Galilée ne sont *pertinentes* à la description de la situation physique réelle que si les phénomènes physiques propres à ce modèle sont présents dans le phénomène réel. Il s'agit de s'assurer que les phénomènes que Galilée ignorait n'ont pas pour effet d'annuler précisément ceux qu'il décrit, à la façon dont la lourdeur d'un corps est annulé dans un ascenseur qui tombe en chute libre, pour prendre un exemple qui a un rapport étroit avec notre problème. Pour en décider, nous pouvons avoir recours aux ressources de la meilleure théorie disponible aujourd'hui. Nous pouvons plus précisément nous contenter de nous référer à la théorie la plus élémentaire propre à nous éclairer, c'est-à-dire à la théorie newtonienne *statique* des marées. Aux forces d'inerties prises en considération par le modèle de Galilée, la théorie statique de Newton ajoute les effets dont son concept de force de gravitation rend bien compte. La seule composante du modèle newtonien à considérer ici est l'attraction du corps central (il est clair qu'il suffit de se limiter au problème à deux corps, le deuxième corps étant soit le soleil soit la lune) dont l'attraction centripète s'oppose à la force d'inertie centrifuge du mouvement orbital de la terre; on sait que cette force centripète ne compense exactement – c'est-à-dire n'annule – l'effet de cette force d'inertie qu'au centre d'inertie de la terre et que de cette composition résulte justement la symétrie du géoïde et le doublement de la fréquence des marées. Au niveau de la surface terrestre, *l'effet des forces d'inertie* qui constituent l'essence du phénomène dans la TGM est ontologiquement exactement le même dans la description newtonienne, où il se compose quantitativement avec un autre effet que Galilée ne soupçonnait absolument pas pour provoquer, ensemble, la "marée newtonienne".

En ce sens, la théorie newtonienne des marées confirme l'existence d'effets d'accélération horizontales périodiques décrits par la TGM. L'existence même de ces effets physique est bien une conséquence nécessaire du double mouvement de la terre, et cette conséquence justifie la prétention de Galilée d'avoir découvert une preuve physique de la réalité de ce double mouvement.

### La même chose, en "langue mathématique"<sup>39</sup>

L'objectif de ceci est d'exprimer ce qui a été dit précédemment sous une autre forme, pour les lecteurs informés de *la langue du Livre de la Nature*, de façon aussi simple que possible et en s'inspirant du raisonnement même de Galilée. La seule chose nouvelle qui ressortira de cette discussion sera une comparaison quantitative de la marée selon la TGM et de la marée "newtonienne"<sup>40</sup>, et cela nous permettra de réfuter un argument de Popper que j'ai désigné plus haut comme variante de la critique de Mach.

1) On calcule d'abord l'accélération d'un point M représentant un lieu fixe sur l'équateur de la terre, dans l'hypothèse du double mouvement uniforme circulaire, dans le repère (réputé *assoluto* par Galilée) dans lequel le centre – le soleil pour Galilée – et la sphère étoilée sont fixes. Dans l'esprit de la discussion où les causes premières sont recherchées avec le minimum de sophistication, l'équateur est supposé dans le plan de l'écliptique. Si O représente le centre du déférent (le soleil), C le centre de la terre, r le rayon terrestre et R la distance terre soleil, on peut avantageusement utiliser la représentation complexe (cf. figure):



39 "Le livre de la nature est écrit en caractères mathématiques". Galilée dans *Il Saggiatore* (E.N. VI, p. 232).

40 Comme nous l'avons dit plus haut, la quantification de la TGM n'a été rendue possible que postérieurement, par Huygens.

$$\mathbf{OM} = e^{i\Omega t} \{ \mathbf{R} + \rho e^{i\omega t} \}$$

de ce mouvement d'un point de "l'équateur"

On en déduit immédiatement l'accélération absolue de M, que l'on note

$\mathbf{OM}''$ :

$$\mathbf{OM}'' = -\Omega^2 \mathbf{OC} - (\Omega + \omega)^2 \mathbf{CM}, \text{ soit encore:}$$

$$\mathbf{OM}'' = -\Omega^2 \mathbf{OM} - [\omega^2 + 2\omega\Omega] \mathbf{CM}$$

La composante "horizontale" de cette accélération est, comme nous l'avons vu (note 38)

$$\text{accélération horizontale} = R\Omega^2 \sin(\omega t)$$

et est donc périodique de période diurne.

Cette composante "horizontale" (c'est-à-dire tangentielle en M) est l'expression quantitative que nous savons donner à l'accélération du bassin des mers dont parle Galilée de façon qualitative, accélération analogue à celle du bateau freiné ou accéléré. Il est explicitement attesté que Galilée conçoit que l'eau situé en ce point M tend naturellement à poursuivre son mouvement horizontal uniformément; cette composante "horizontale" de  $\mathbf{OM}''$  est donc (au signe près) l'accélération horizontale de cette eau par rapport à la surface terrestre selon la conception de la TGM.

Il est possible de mettre mécaniquement en évidence cette accélération, mais cela est assez délicat si on utilise un liquide (cf. le modèle assez laborieux de S. Drake, "Galileo's Theory of Tides" *Galileo's Studies* (Ann Arbor: The University of Michigan Press, 1970), p. 200-13, part. p. 206 ff.)<sup>41</sup>.

2) Le mouvement de la terre ainsi donné, dans un cas d'école (mouvements orbital et diurne tous deux circulaires et uniformes) que l'on sait être une solution du problème du mouvement d'un corps sphérique sous l'effet d'une force centrale d'attraction en  $1/R^2$  selon la théorie newtonienne de la gravitation, on peut calculer selon cette même théorie newtonienne l'intensité la force, c'est-à-dire l'accélération dans le système "absolu" qu'exercerait la force centrale en question sur un *point matériel libre* P coïncidant avec M à l'instant considéré (les effets de la gravitation *terrestre* sont bien connus et peuvent ne pas être considérés explicitement dans cette discussion) la gravitation terrestre est l. Cette accélération due à l'attraction est bien sûr absolument absente des conceptions

41 Un modèle purement mécanique (sans composant liquide) très convaincant a été construit par A. Hairer (LERMAT-ISMRA, Caen, France) en 1998, dont la description ne peut être faite ici.



galiléennes, et c'est justement pour cela que pour Galilée ce point P aurait un mouvement horizontal uniforme si les côtes ne s'y opposaient finalement.

Ce que j'ai affirmé sur le caractère correct mais partiel du modèle de théorie des marées de Galilée traduit le fait que dans le cadre de la théorie newtonienne, *l'intensité* de la force qui s'exerce sur le corps matériel libre P (disons une masse d'eau) *dans le repère lié à la terre* est précisément *l'accélération par rapport au point M de la surface terrestre de la masse d'eau coïncidant avec ce point*, c'est-à-dire la différence entre l'accélération du point M lié à la terre – que nous avons obtenue ci-dessus, et l'accélération du point matériel P due à la force d'attraction centrée en O. L'accélération ainsi obtenue est ce qu'il est d'usage d'appeler la *force perturbatrice* des marées. Cette façon d'obtenir le résultat de la théorie newtonienne statique des marées est à la fois particulièrement simple et propre à faire apparaître la marée comme la superposition de deux effets, dont l'un est celui imaginé qualitativement par Galilée, et dont l'autre est l'accélération de la particule "libre" d'eau, décrite par Newton comme l'attraction gravitationnelle par le centre de force (le soleil) mais complètement ignorée par Galilée.

Montrons comment cela se présente quantitativement.

Il est d'usage d'exprimer la *force perturbatrice* dans un repère lié au mouvement orbital de la terre mais dépourvu de mouvement diurne, c'est-à-dire d'axes de directions absolues fixes; son intensité  $G$  exprimée à l'ordre le plus bas en  $r/R$  (supposé très petit par hypothèse) a alors la forme suivante, que l'on trouve dans tous les bons manuels<sup>42</sup>:

$$\Gamma = \rho \Omega^2 \cdot \{ 3/2 \sin(2\varphi) \mathbf{t} + [3\cos^2\varphi - 1] \mathbf{n} \}$$

où les notations ont le sens suivant:

$\varphi$ : distance zénithale du centre de force, soit  $\varphi = \omega t$  avec les notations de la figure

$\mathbf{t}$ : vecteur "horizontal" en M

$\mathbf{n}$ : vecteur unitaire "vertical" en M.

Cette marée a bien lieu *deux fois* par "jour" en chaque point géographique.

Pour passer dans un repère lié à la terre, donc aux *deux mouvements* de la terre, il suffit d'ajouter à cette expression la force d'entraînement en  $\mathbf{M}$  due à la rotation diurne, c'est-à-dire la force centrifuge  $\rho (\omega + \Omega)^2 \mathbf{n}$ .

42 D'Alembert, *Encyclopédie Méthodique, op. cit.*, p. 61; Bouteloup, *op. cit.*, p. 61.

Avec la notation

$$\Sigma = \omega + \Omega.$$

on obtient alors pour l'expression "newtonienne" de l'accélération  $\Gamma_r$  de l'eau par rapport au point **M** *lié à la terre* la forme suivante

$$(N) \Gamma_r = \rho \Omega^2 \cdot \{ 3/2 \sin(2\omega t) \mathbf{t} + [3\cos^2(\omega t) - 1 + \Sigma^2/\Omega^2] \mathbf{n} \}$$

Montrons que cette relation s'obtient bien précisément comme superposition des deux effets dont il est question.

a) L'accélération absolue de "la côte" résultant du double mouvement de la terre a été obtenue plus haut comme:

$$\mathbf{OM}'' = -\Omega^2 \mathbf{OM} - [\Sigma^2 - \Omega^2] \mathbf{CM}$$

b) L'accélération absolue d'une masse libre située au point P coïncidant avec M au temps t est, selon la théorie de Newton:

$\mathbf{OP}'' = GM/r^3 \mathbf{OM}$  où r est le module de  $\mathbf{OM}$  et où  $GM/r^2$  est l'attraction gravitationnelle centrée en O.

Puisque le mouvement circulaire uniforme orbital de la terre est dû à l'attraction gravitationnelle centrée en O, l'accélération due à cette force est identique à l'accélération centripète de la rotation orbitale, et on a

$$GM/R^3 = \Omega^2$$

ce qui permet d'écrire

$$\mathbf{OP}'' = -\Omega^2 (R/r)^3 \mathbf{OM}$$

c) L'accélération de cette masse libre *par rapport au point M lié au mouvement de la terre* (le bassin de la mer, ou le bateau dans l'exemple de Galilée) s'obtient par différence:

$$\mathbf{MP}'' = \mathbf{OP}'' - \mathbf{OM}'' = \{ 1 - (R/r)^3 \} \Omega^2 \mathbf{OM} + (\Sigma^2 - \Omega^2) \mathbf{CM}$$

Pour  $\rho / R \ll 1$ , en écrivant  $r = R + \delta$  on obtient par développement, à l'ordre le plus bas en  $\delta$ :

$$\mathbf{MP}'' = 3\Omega^2 (\delta / R) \mathbf{OM} + (\Sigma^2 - \Omega^2) \mathbf{CM} + O(\delta^2)$$

et, par projection sur la normale et sur la tangente en M à la "terre" on obtient exactement par un calcul qu'il n'est pas utile de développer

$$\mathbf{MP}'' = \Gamma_r$$

c'est-à-dire l'équation (N) de la théorie classique.

On voit bien ainsi que les marées, comme il est bien connu, résultent de la très petite différence (de l'ordre de  $\rho\Omega^2$ ) entre les effets (de l'ordre de  $R\Omega^2$ ) de deux phénomènes qui se manifestent de façon soustractive, chacun étant dans des conditions du système terre-soleil par quatre ordres de grandeurs supérieurs à cette différence essentielle. On peut séparer ces deux effets par une expérience de pensée comme celle que Mach propose dans sa discussion des marées<sup>43</sup>, et on peut les décrire comme statique et gravitationnel pour l'un (suivant l'expérience de pensée proposée par Mach), et comme essentiellement inertiel (c'est-à-dire décrit en termes de forces d'inertie) pour l'autre. J'ai soutenu dans cet article que le phénomène auquel Galilée attribue qualitativement la marée est précisément localisable dans cette description: il s'agit de la composante horizontale de la partie inertielle du phénomène.

La théorie des marées de Galilée est ainsi doublement partielle. Le phénomène pris en compte par Galilée est partiel qualitativement et quantitativement, et de façon telle qu'on peut dire qu'il n'y a aucune façon de compléter la théorie galiléenne sans une révolution conceptuelle. Je dis seulement, contre l'opinion généralement admise, que Galilée a justement conçu la nature de l'une des composantes du phénomène des marées; il ne s'agit pas d'une théorie fautive, mais d'une partie d'une théorie satisfaisante – celle de Newton.

**Une erreur *intéressante*:  
la réfutation quantitative de la tgm par Popper**

Les quelques pages que Popper consacre à la théorie galiléenne des marées dans *Objective knowledge* pour illustrer son concept de "*objective historical understanding*" me semblent singulièrement instructives du point de vue épistémologique. J'y lirais, en employant une formule de Koyré, une sorte de *comédie des erreurs*.

Après une paraphrase tout-à-fait fidèle du modèle épicyclique décrit par Galilée, Popper conclut: "*Galileo's theory is plausible but incorrect in this form: apart from the constant acceleration due to the rotation of the earth – that is the centripetal acceleration – which also arises if a [the orbital velocity] is zero, there does not arise any further acceleration and therefore especially no periodical acceleration*".

On reconnaît très précisément la critique de Mach, et ce que j'en ai dit plus haut vaut également pour cet argument de Popper. Ce qui mérite une attention particulière est la façon singulière dont Popper prolonge cet argument

43 Mach, *op. cit.*, p. 206.

par une note en bas de page évidemment ajoutée ultérieurement pour compléter la discussion:

*“One might say that Galileo’s kinematic theory of the tides contradicts the so-called Galilean relativity principle. But this criticism would be false, historically as well as theoretically since this principle does not refer to rotational movements [...]. Moreover we get (small) periodical accelerations as soon as we take into account the curvature of the earth’s movement round the sun”<sup>44</sup>.*

Ce qui fait problème, et de plusieurs façon, est évidemment la dernière phrase de cette note.

À supposer qu’il soit exact que l’accélération périodique dont il s’agit soit effectivement petite, il me semble que la TGM devrait être considérée comme correcte en principe, et cela si petite que soit cette accélération périodique, du simple fait de son existence. Car c’est bien de l’existence d’un effet de marée qu’il est question, et Galilée n’a aucune préoccupation, quant à la *causa primaria*, pour l’ampleur de cet effet. Il est difficile de comprendre que Popper n’ait pas tiré cette conséquence radicale de sa remarque; il semble clair que la *petitesse* supposée de l’effet lui a semblé autoriser le maintien de la qualification de *théorie plausible mais incorrecte*. C’est explicitement sur cette base que Strauss se refuse à considérer comme *causa primaria* des marées l’effet physique qu’il concède effectivement au mécanisme de la TGM: *“Ich halte für sehr wohl möglich, dass aber die von Galilei aufgestellte Theorie in der Hauptsache nicht unrichtig ist, dass aber die Erscheinungen, die ihr zufolge eintreten, zu geringfügig sind, um neben der Mondflut bemerkt zu werden [...] so ist die Möglichkeit nicht ausgeschlossen, dass die galileische Ansicht zur Aufklärung sekundärer Fluterscheinungen mit herangezogen werden kann”<sup>45</sup>.*

En fait cette discussion est rendue fort académique, et pour tout dire inutile, du fait que l’idée que l’effet dû la courbure de l’orbite terrestre serait *négligeable* pour les marées est profondément fautive. Il ressort en effet de la discussion quantitative précédente que l’accélération due au mécanisme de Galilée est non pas *petite* devant la *force perturbatrice* globale, mais plutôt supérieure par plusieurs ordres de grandeur. Comme on l’a vu, l’accélération d’un bassin maritime correspondant à la courbure de l’orbite est *égale à très peu près* – au dix millièmes près dans le modèle de la discussion – à l’accélération de l’eau résultant de l’attraction gravitationnelle exercée par le soleil, et la marée newtonienne résulte justement de la *très petite différence* entre ces deux effets.

44 Popper, *op. cit.*, p. 171, n. 19 (édition de 1979). Les caractères romains sont italiques dans la texte.

45 Strauss, *op. cit.*, p. 566.

On se trouve donc devant cette situation quelque peu paradoxale que Popper (et d'une certaine façon Strauss) ne tire pas, d'une remarque qualitative-ment juste qu'il formule explicitement, les conséquences épistémologiques qui semblent devoir en résulter, et qu'il s'en justifie par une estimation quantitativement fautive de la situation.

Cet épisode me semble fort instructif, et assez révélateur de racines profondes de la critique traditionnelle de la TGM.

### En guise de conclusion

Je dirais en conclusion que la TGM n'est une théorie irrémédiablement fautive que dans la mesure où l'on remplace le modèle physique de Galilée par un autre modèle dont il ne parle jamais. Du modèle dont parle Galilée, je dirais que dans l'optique de la recherche de *la cause première* du phénomène des marées, la TGM est une théorie *partielle* puisqu'elle ignore des effets comparables à ceux qu'elle connaît; enfin qu'elle est une théorie *juste*, dont seulement la dénomination est impropre, en tant qu'elle propose une preuve de la réalité du double mouvement de la terre, exactement dans le sens et dans les limites, il convient de le redire, où l'on dit que le pendule de Foucault constitue une preuve de la rotation diurne de la terre.

Et comme il n'est peut-être pas hors propos de souligner que le phénomène des marées est, à notre connaissance, ontologiquement indissociable du double mouvement – orbital et diurne – de la terre, je dirais que cette simple affirmation de Galilée, qui constituait probablement à ses yeux l'un de ses plus grands titres de gloire devant la postérité, est en définitive validée par la physique classique.



# Espaces et mondes au XVII<sup>e</sup> siècle

Christiane Vilain\*

**Résumé:** On décrit les nouvelles représentations du monde, ou plutôt des mondes, proposées au cours du XVII<sup>e</sup> siècle en relation aux conceptions de l'espace. Les espaces sont considérés ici tant selon leurs implications pratiques, que sous leur aspect métaphysique, mieux connu. Ce faisant, avec l'aide de Descartes, Huygens et Leibniz, et en adoptant une perspective plus générale sur le contexte culturel, nous esquissons le portrait d'un acteur possible de la science nouvelle en tant qu'observateur actif et mobile, faisant partie d'une multitude d'habitants terrestres et extra-terrestres.

**Abstract:** We present the new visions of the world, or rather the worlds, given during the 17<sup>th</sup> century in connection with conceptions of space. Spaces are considered here in both their practical implications and their metaphysical aspect. In doing so, with the help of Descartes, Huygens and Leibniz, and a more general insight on the cultural context, we draw a portrait of a possible actor for the new science as an active and mobile observer, which is a part of a multiplicity of terrestrial or extra-terrestrial inhabitants.

## Introduction

LE XVII<sup>e</sup> SIÈCLE peut être considéré comme celui au cours duquel le système solaire lui-même perd définitivement, en même temps que la Terre, sa position centrale et son unicité. C'est le siècle de l'"*Iter ecstaticum*" d'Athanas Kircher<sup>1</sup>, des "Entretiens sur la pluralité des mondes" de Fontenelle<sup>2</sup> et du "*Cosmotheoros*" moins connu de Huygens<sup>3</sup>. L'ouverture du Cosmos vers l'infini n'est pas seulement l'acceptation de cet infini "en acte", mais aussi celle d'autres mondes semblables au nôtre, d'autres soleils, et donc en conséquence d'autres planètes comme la Terre autour de ces soleils, et d'autres être vivants. Toutes ces suppositions s'enchaînent logiquement, et Kircher suppose bien des habitants dans tous les systèmes solaires, bien qu'il fasse tourner tout cela autour d'une

---

\* Maître de conférence, Université Paris 7 – Denis Diderot – Equipe REHSEIS – 2, Place Jussieu – 75006 – Paris.

1 KIRCHER Athanasie, *Iter ecstaticum* ou voyage fantastique, publié à Rome en 1656.

2 FONTENELLE, *Entretiens sur la pluralité des mondes*, par M. de Fontenelle de l'Académie française, 1686, nouvelle édition, à Lyon, de l'imprimerie d'Amable Leroy, (1804).

3 HUYGENS Christiaan, *Le cosmotheoros ou conjectures sur les terres célestes et leur équipement*, édition posthume de 1698, Oeuvres Complètes publiées par la Société Hollandaise des Sciences, (ultérieurement notées O.C.), La Haye, (1888-1950), Volume XXI, p. 681.

Terre immobile. Mais il ne s'agit pas tant chez Fontenelle et Huygens de supposer d'autres planètes autour des soleils que sont les étoiles, que de supposer que la Lune et nos planètes sont des terres habitées comme la nôtre. En ce sens c'est plutôt une conséquence tardive du copernicanisme imposé par Galilée que de l'ouverture du Monde à l'infini. Le mouvement de la Terre suffit à en faire un corps céleste comme les autres et à modifier les représentations.

Cette explosion d'idées diverses ne suppose pas forcément une représentation de la totalité, mais y concourt, avec des fortunes diverses. Le destin de cette visée cosmologique nouvelle se poursuivra au XVIII<sup>e</sup> siècle dans un cadre plus scientifique, à travers des difficultés qui en provoqueront la relative extinction au XIX<sup>e</sup> siècle, jusqu'à la cosmologie relativiste d'Einstein et De Sitter en 1916. Jacques Merleau-Ponty<sup>4</sup> a bien montré dans quelle situation se trouvaient les savants du XVIII<sup>e</sup> siècle aux prises avec une physique newtonienne qui leur était indispensable dans toute pratique (de calculs en mécanique terrestre ou céleste), mais ne les satisfaisait pas sur le plan des concepts et ne permettait pas de traiter d'un Univers infini. D'Alembert puis Laplace sont les meilleurs représentants de ces conflits. On peut ajouter que les développements d'une mécanique, la plus exacte possible, du système solaire par ces deux savants, auxquels on peut adjoindre Clairaut et Euler, requièrent toute leur habileté technique et leurs énergies, car il faut déjà mettre au point des méthodes de perturbation des équations de Newton si l'on veut seulement obtenir de bonnes éphémérides de la Lune.

Mais nous n'en sommes pas encore là en cette fin du XVII<sup>e</sup> siècle, même après la parution des *Principia* de Newton, car ceux-ci ne seront utilisables pratiquement qu'après leur réécriture par Clairaut et Euler. De quoi s'agit-il alors?

Il s'agit d'abord de changer de mentalité, de quitter un statut ethnocentrique qui n'a plus sa raison d'être. Il s'agit en tout état de cause de concevoir ce que l'on ne peut voir, et de le concevoir de la façon la plus rationnelle possible, la plus logique, la plus "objective" pour l'époque. Fontenelle imagine que nous puissions être, par rapport aux habitants de la Lune, comme les indiens américains en face de Christophe Colomb et de ses compagnons. Notre incapacité à aller sur la Lune ne signifie donc pas que les habitants de celle-ci ne soient pas sur le point de débarquer chez nous. Loin de l'inquiéter, cette éventualité le rassure, car il ne serait pas nécessaire d'attendre les progrès technologiques pour

---

4 Voir à ce sujet le livre de Jacques MERLEAU-PONTY: *La science de l'Univers à l'âge du positivisme. Etude sur les origines de la Cosmologie contemporaine*, Paris, Vrin, (1983). Cette étude, centrée sur les travaux de Laplace et de Herschel, montre bien les difficultés d'une cosmologie scientifique chez l'un et la persistance d'un besoin de représentation du Monde dans son ensemble chez l'autre.



savoir enfin à quoi ils ressemblent. Outre l'intérêt ethnologique de cette réflexion, comme de beaucoup d'autres de l'écrit de Fontenelle, on ne peut qu'être sensible à cette relativisation du point de vue.

Fontenelle a passé déjà un temps considérable à faire sentir à sa marquis le mouvement de la Terre sur elle-même et autour du Soleil, et elle entre si bien dans le propos de l'académicien qu'elle en vient à imaginer des vaisseaux lunaires posés à la surface de notre atmosphère et lançant des filets pour pêcher des animaux qui pourraient bien être des hommes. La fantaisie des images n'est pas seulement distrayante. Elle illustre concrètement la nécessité pour l'humanité de se resituer dans un nouvel ensemble spatio-temporel, ensemble qui a considérablement reculé ses limites. Cela se fait avec un enthousiasme étonnant, la perte d'un privilège étant compensée par l'ouverture d'un nouveau champ à l'imagination et à la curiosité. Le désir de savoir, la perspective de découvertes futures encore plus extraordinaires que celle de l'Amérique, domine le récit.

Nous voulons décrire ici cette nouvelle sorte de cosmologie dans son lien avec des notions d'espace utilisées en physique plus courante, ou dans toute autre pratique terrestre ayant pu influencer celle-ci, c'est-à-dire dans un domaine plus "terre-à-terre" au premier regard tout au moins. Car ce n'est pas le problème de l'infinitude du Monde qui nous intéresse ici, mais celui de la diversification des points de vue, de leur réciprocity éventuelle, à la place du point de vue central et unique du géocentrisme. De même que Platon avait relativisé le haut et le bas en imaginant un homme situé aux antipodes, les classiques relativisent leurs perceptions, leurs connaissances et leur civilisation en imaginant des personnages situés sur la Lune, Mars et les autres planètes. Mais il faut bien que certaines choses soient supposées invariantes pour permettre de concrétiser le point de vue du "planéticole", mercurien, vénusien, ou autre. Voyons donc comment raisonne à ce sujet le seul de nos auteurs qui soit aussi un grand savant: Christiaan Huygens.

## I. Le "Cosmotheoros" de Huygens

Christiaan Huygens écrit cet ouvrage vers la fin de sa vie, vers 60 ans, et le dédie à son frère Constantyn alors secrétaire de Guillaume III, roi de la Grande-Bretagne. Il se réfère d'abord à Nicolas de Cuse qui avaient attribué des habitants au Soleil et aux étoiles, puis à l'*"ingénieux dialogue sur la pluralité des Mondes"* de Fontenelle. Comptant parmi les plaisanteries le "Rêve astronomique" de Kepler, Huygens s'est avisé, sans doute à la suite de Fontenelle, qu'il était possible d'écrire des choses raisonnables sur le sujet, et annonce de *"vraisemblables*

*conjectures*” Il déclare s’adresser préférentiellement à ceux qui “*ne sont étrangers ni à la science Astronomique ni à la philosophie raisonnable*”, tout en prévoyant que son écrit puisse tomber dans les mains de lecteurs moins instruits. Il ne vise donc pas tout à fait le même public que Fontenelle et adopte un ton bien différent.

Si le *Cosmotheoros* occupe une place particulière dans l’oeuvre de Huygens, il ne faut pas oublier que ses traités à propos de la nature de la Lumière et de la cause de la Pesanteur, publiés peu avant la rédaction de ce dernier ouvrage, étaient déjà rédigés plus librement que ses écrits antérieurs et considérés par lui-même comme beaucoup plus hypothétiques. C’est donc dans une certaine continuité que Huygens se permet maintenant de simples conjectures. La différence entre ce dernier écrit et les autres réside peut-être en ce qu’il ne fait plus appel à sa physique, tout au moins dans la première partie. La seconde pourrait en revanche être considérée comme un petit traité de présentation des données du système solaire.

Dans sa première partie, Huygens disserte sur les habitants probables des planètes. Mais en s’astreignant à ne privilégier la Terre à aucun prix, il tombe dans un anthropomorphisme auquel Fontenelle avait échappé: les habitants des planètes doivent être aussi savants que nous, ils doivent donc pouvoir utiliser des télescopes et il leur faut pour cela des mains comme les nôtres! Huygens a justifié à l’avance son raisonnement. Si nous n’avions jamais ouvert le corps d’un animal, nous lui supposerions un coeur, un estomac, des poumons, etc..., et nous aurions raison.

“De même, si nous avons appris à connaître la nature d’un seul des Satellites de Saturne ou de Jupiter, ne serions-nous pas d’avis que les mêmes choses à peu près doivent se trouver chez tous les autres? Pareillement, si nous réussissions à comprendre la nature d’une Comète quelconque, nous jugerions que telle est la nature universelle de ces corps.”<sup>5</sup>

On ne peut imaginer un autre mécanisme pour la vue, ni pour l’ouïe, annonce Huygens. De même ne peut-il y avoir qu’une seule façon d’évaluer ce qui est juste, et donc une seule raison. Huygens essaie tout de même d’imaginer que les “planéticoles” puissent avoir leurs os à l’extérieur, comme les langoustes. Mais il y renonce. Peut-on reprocher à Huygens de manquer d’audace ou de jugement? Son discours procède plutôt selon une évaluation de la nécessité de

---

5 HUYGENS, *ibid.*, p. 698.

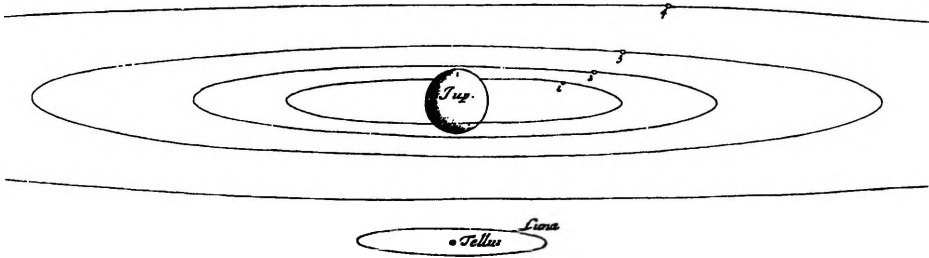
chacune des caractéristiques des espèces vivantes, surtout de l'espèce humaine qu'il connaît. Il est clair que cette nécessité lui paraît beaucoup plus forte qu'à nous aujourd'hui, sans qu'il soit vraiment possible de dire pourquoi.

Dans la deuxième partie, Huygens réponds explicitement à l'invraisemblance de certaines affirmations de Kircher. Tout d'abord celle de l'immobilité de la Terre, qui semble d'autant plus absurde à Huygens qu'il faut maintenant faire tourner d'innombrables systèmes semblables à celui du Soleil, et non plus seulement les planètes et la sphère des fixes, autour de notre petite Terre. Les vieilles considérations issues de la logique occamienne sont toujours valables: il est vain de mettre en mouvement un grand ensemble si on peut rendre compte des mêmes choses à moindre frais. Des considérations d'origine astrologique avaient en outre conduit Kircher à décrire Vénus et Jupiter comme des univers agréables, limpides, et Mars comme un monde hostile plein de fumées, de "*choses tristes, horribles, sales, ténébreuses*". La réponse de Huygens à ces arguments constitue alors une partie nettement plus scientifique que la première, car il va maintenant s'efforcer de se restreindre à ce qu'il peut dire d'une planète en fonction de ce que l'on connaît de sa distance au Soleil, de sa période de révolution, de sa rotation sur elle-même, de ses satellites. On en déduit la taille apparente du Soleil pour cette planète, celles des autres planètes si elles sont visibles, la durée de son année, de son jour si c'est possible, et le nombre de ses lunes. Huygens avait sans doute été séduit par les entretiens de Fontenelle, mais les fables de Kircher l'irritent. Il redevient alors un scientifique à part entière, qui s'en tient aux données d'observation.

Il est ainsi facile à Huygens de décrire l'astronomie des mercuriens, des vénusiens qui peuvent aisément nous observer ainsi que notre Lune. Il signale qu'après avoir observé Vénus à la lunette, il n'y a rien remarqué qui puisse indiquer des mers et suppose alors que l'atmosphère de Vénus, peut-être plus dense que la nôtre, réfléchit les rayons solaires et empêche de voir ce qu'il y a en dessous. Le Soleil vu de Vénus a un rayon une fois et demi plus grand que depuis la Terre. La Terre vue de Mars doit avoir la même apparence que Vénus pour nous, mais Vénus doit leur être rarement visible, comme Mercure pour nous, etc...

On peut évaluer également la température de chaque planète en fonction de sa distance au Soleil. Considérant la forte température qui doit régner sur Mercure en raison de sa proximité au Soleil, Huygens déclare que l'on pourrait penser alors ses habitants plus intelligents que nous, car c'est la chaleur qui donne au corps "*sa vigueur et son alacrité*". Mais il y renonce pour deux raisons: d'une part parce qu'il faudrait alors attribuer aux habitants de Jupiter et Saturne une intelligence inférieure, et d'autre part parce que les habitants des régions plus chaudes de la Terre n'égalent pas ceux des zones tempérées...

Huygens accompagne ses considérations de figures dont nous donnons un seul exemple: celui du système de Jupiter<sup>6</sup>:



Huygens est donc sans doute celui qui illustre avec le plus de rigueur, on pourrait dire avec le plus de conscience professionnelle, la relativité des points de vue dans le système solaire tel qu'il le connaît. Son écrit refuse toute imagination trop arbitraire. C'est ce qui le conduit d'abord à supposer des formes de vie trop proches des nôtres, puis à se représenter précisément ce qu'il peut savoir avec certitude de la vie des éventuels habitants des autres planètes, à savoir leur ciel. Sa motivation est incontestablement liée aux publications antérieures de Kircher et Fontenelle. On peut avancer que Huygens ne se serait pas tellement avancé au sujet des habitants des autres planètes si ce n'était pour répondre à des discours en vogue. S'y serait-il intéressé? Il est difficile de le dire et cela n'a guère d'importance. Mais on peut lui attribuer en propre la partie purement astronomique de la seconde partie de son traité si on la met en rapport avec les changements de repère dont il est spécialiste dans sa physique terrestre.

Mais notre propos était plus ambitieux puisque nous voulions considérer l'espace de l'époque classique dans sa diversité et non seulement chez Huygens, avec l'espoir d'en extraire quelques caractéristiques générales. Huygens nous sert seulement ici d'exemple type pour poser les termes d'une réflexion que nous souhaitons la plus large possible.

## II. Quel espace?

Malgré les bouleversements profonds qui ont traversé le XVI<sup>e</sup> et le XVII<sup>e</sup> siècle, bouleversements dont ce qui vient d'être exposé donne la mesure,

<sup>6</sup> HUYGENS, *ibid.*, p. 774.

les concepts et le vocabulaire utilisés sont fortement tributaires d'un ensemble de traditions. Les espaces classiques rassemblent un ensemble de théories et de pratiques diverses par leur origine autant que par leur but.

L'espace de la géométrie est un espace "physique" si on le considère selon son étymologie, comme une "géo-métrie" ou "mesure de la Terre", c'est-à-dire un instrument de mesure du terrain. C'est néanmoins un espace vide et homogène bien différent de l'espace perçu, car il est le cadre d'une action spécifique qui consiste à déplacer des figures sans les déformer et à établir des théorèmes valables en tout temps et en tout lieu. Un lieu y est équivalent à tout autre lieu, une direction à une autre (exceptée peut-être la verticale) comme pour la plupart des actions humaines de type logique ou pour l'utilisation d'une machine quelconque.

Aristote avait refusé cependant ce cadre vide et indifférencié, considérant à juste titre que les figures géométriques, comme les machines, appartiennent à un autre domaine que celui de la nature. Pour rendre compte du mouvement des corps, pour en parler même avant de l'expliquer, il lui a fallu poser des "lieux" différenciés et hétérogènes. On peut dire qu'Aristote revient à un espace plus proche de celui de la perception, espace polymorphe sans aucune symétrie ni équivalence, à ceci près que le sien est hiérarchisé, fortement ordonné. Un certain ordre lui a été en effet nécessaire pour expliquer le mouvement naturel des corps vers le haut ou vers le bas comme rejoignant le centre de la Terre et du Monde, ou bien l'extérieur de ce Monde fini, la dernière sphère. Cet espace ne saurait par ailleurs être vide car dans le vide indifférencié il n'y aurait pas de lieux, et le mouvement ne pourrait ni commencer ni cesser. Les lieux y sont déterminés par les limites entre les corps. Mais ces lieux aristotéliens sont immobiles par essence, c'est-à-dire non-mouvants. Ce sont donc des êtres d'une autre sorte que les corps et leurs limites. L'univers des catégories aristotéliennes appartient sans conteste pour les physiciens d'aujourd'hui à la métaphysique; mais il faut en considérer le souci de coller aux observations et la défiance envers l'imagination, en réaction contre un ensemble de systèmes préalables. En ce sens c'est bien une philosophie de la Nature, donc une "physique" La physique aristotélienne constitue de ce fait, pour les médiévaux, une école de rationalité qui ne se restreint pas à la logique seule.

L'espace vide des atomistes est bien différent de celui de la géométrie, même s'il est aussi vide, homogène et infini. C'est un espace destiné à se représenter mentalement les atomes et leurs mouvements, leur chute incessante dans le vide. Cette vision du Monde sera remise au goût du jour au XVII<sup>e</sup> siècle par Gassendi, sans s'imposer à l'ensemble de la communauté savante.

Mais tout ceci incite à se demander à quoi sert un espace. On doit considérer en effet un espace physique pour “mesurer”, ou tout au moins évaluer, non plus le terrain, mais le mouvement des corps. Il faut encore un espace métaphysique pour “expliquer” ce mouvement, en donner une cause, à la suite d’Aristote. Il faudra également, de façon plus implicite, un espace de représentation pour “voir” le mouvement des corps, non seulement les atomes mais aussi les corps tels que nous les percevons, et aussi, pourquoi pas, le Monde dans son ensemble, puis aussi les autres mondes.

Mais il vaut mieux que ces espaces coïncident. Il ne sera pas question de se donner un espace au gré de ses besoins comme on peut le faire en physique contemporaine. L’espace du savant médiéval ou classique doit être le contenant réel, unique, des corps que l’on voit.

### III. L’espace médiéval et classique

Au Moyen-Age, en 1277, l’église impose, entre autres thèses anti-aristotéliennes (anti-averroïstes), la possibilité du vide, du mouvement de l’Univers dans son ensemble et de la pluralité des mondes. Cette possibilité relève de la toute puissance divine, que l’on ne saurait limiter. Ces thèses posent en même temps les questions du vide, de l’espace et de l’infini. En effet lorsque Dieu décide de supprimer tout-à-coup une partie de l’intérieur du Monde, les bords ne se rejoignent pas instantanément. Il doit donc y avoir du vide. Si le Monde est par ailleurs en mouvement dans son ensemble, il doit bien être en mouvement quelque part. Il faut bien que ce mouvement ait lieu dans quelque chose ou par rapport à quelque chose. Comme l’a bien remarqué Alexandre Koyré<sup>7</sup>, l’idée d’un tel mouvement présuppose de se représenter le Monde comme une boule dans un espace infini, alors que cela n’avait aucun sens chez Aristote pour qui, hors du Monde il n’y avait rien, ni temps ni lieux. Quand aux mondes multiples, ils sont plus ou moins ronds. Il doit donc y avoir du vide entre eux. Si l’on imagine qu’ils remplissent tout l’espace, il faut qu’ils aient des “coins”, ce qui les éloigne de la forme parfaite imaginée pour un monde, même si ce n’est pas le nôtre!

La totalité est toujours conçue comme finie. Dieu lui-même ne saurait avoir créé un Univers infini, car il doit toujours pouvoir ajouter quelque chose au Monde. L’infini est conçu comme le résultat d’un processus temporel qui

---

<sup>7</sup> KOYRE, Alexandre, “L’espace infini au XIV<sup>e</sup> siècle, dans: *Etudes d’Histoire de la pensée philosophique*, Gallimard, 1971, p. 37-92.

n'aboutit jamais. C'est pourquoi l'infini actuel est impossible chez Aristote. C'est pourquoi également les bords du domaine vidé par Dieu de sa matière ne peuvent se rejoindre instantanément. Dieu est aussi soumis au temps, implicitement, qu'il l'est explicitement au principe de non contradiction. Lorsque Nicolas de Cuse au XV<sup>e</sup> siècle puis Giordano Bruno au XVI<sup>e</sup>, affirment que Dieu a pu dans sa toute-puissance créer un univers infini, ce n'est pas tellement la puissance de Dieu qui se trouve accrue que l'idée de l'infini qui est modifiée, car il est conçu comme déjà là. L'espace vide infini doit également être conçu comme tout entier déjà là, et non comme le résultat d'une accumulation, au cours d'un processus qui prend du temps. Il est donc, en lui-même, une suppression du temps.

Les paradoxes de l'infini, résumés par le fait qu'il soit égal à certaines de ses parties, étaient déjà posés à propos de l'infinitude dans le temps du Monde d'Aristote. La création du Monde par Dieu à un instant donné ne calme pas l'inquiétude des scolastiques. Car cette création à un moment donné pose un problème qui n'existait pas pour les anciens: où était Dieu avant la création du Monde?

D'après Koyré<sup>8</sup>, les scolastiques ne se passionnent pas pour les décrets de l'église et n'ont que peu de choses à faire du vide imposé. Seuls quelques anglais moins marqués par l'aristotélisme s'y intéressent. Thomas Bradwardine est en fait le seul à affirmer clairement que tout ceci, action divine, mouvement des corps ou du Monde, doit avoir lieu quelque part: dans un espace vide illimité. Il est vrai que Bradwardine est géomètre et théologien, combinaison inconnue à Paris.

Mais Walter Burleigh qui est philosophe demeure aristotélien. Deux tendances coexisteront donc pendant longtemps en un conflit qui ne peut être réduit à une opposition entre des anciens et des modernes. Car le discours rationnel directement appliqué aux phénomènes tels qu'ils sont perçus n'implique certainement pas la donnée d'un espace vide, homogène et isotrope, sous-jacent aux choses. Nous le constaterons encore mieux avec Descartes.

La position de Descartes au sujet de l'espace se trouve explicitée dans ses échanges avec le théologien atomiste Henri More<sup>9</sup>. On y retrouve assez précisément le ton des débats médiévaux pour avoir l'impression d'une continuité, continuité que nous allons admettre ici. A peine s'agit-il d'une correspondance

8 KOYRE, *ibidem*.

9 KOYRE, *Du Monde clos à l'Univers infini*, première édition en anglais en 1957, Paris, Gallimard, 1973, Ch. V: "Etendue indéfinie ou espace infini."

puisque Descartes, qui a répondu courtoisement à la première lettre de son admirateur et détracteur, réponds plus brièvement aux deux suivantes et pas du tout à la quatrième. More n'accepte pas l'assimilation cartésienne de la matière à l'étendue, ni la séparation entre cette étendue et Dieu. Descartes réponds en accusant l'imagination sous laquelle tombent facilement la substance autant que Dieu<sup>10</sup>:

“... car s'il n'y avait aucun corps, je ne comprendrais aussi aucun espace à qui Dieu ou l'ange correspondisse par l'étendue.”

Le terme “indéfini” utilisé par Descartes à propos de cette étendue est jugé “affecté” par More. Descartes réponds qu'il s'agit au contraire d'une position ingénue car il ne sait pas si les parties de la matière sont en nombre fini ou infini mais qu'il ne leur connaît aucune limite.

Nous retrouvons donc chez Descartes la problématique médiévale de l'infini potentiel, et la position de celui-ci vis-à-vis de l'infini peut même sembler aristotélicienne. Mais le Monde cartésien est très différent de celui d'Aristote, car il n'est pas du tout hiérarchisé ni ordonné. Même s'il est fini, il possède une certaine homogénéité globale. Il obéit par ailleurs à des lois permanentes et non à une finalité conduisant à un ordre parfait jamais atteint. Les lois cartésiennes de la Nature représentent une fin déjà réalisée, à travers un mouvement qui doit être perpétuel, immuable dans son ensemble.

L'étendue réelle de Descartes, confondue avec la matière, est très différente de l'étendue pensée pour la géométrie, qu'il connaît bien par ailleurs. L'étendue matérielle est le cadre du “mécanisme” cartésien selon lequel toute action a lieu par contact. Il ne peut donc y avoir de vide. La soi-disant “géométrisation du mouvement” par Descartes n'a rien à voir avec celle d'un Galilée qui traite du mouvement dans le vide en attendant de pouvoir mieux faire. Les principes cartésiens sont en revanche définitifs pour le Monde tel qu'il est, et d'autant plus justes, et même exacts, qu'ils sont éloignés de toute vérification possible par une expérience locale.

Henri More s'exprimera plus tard plus radicalement à propos de l'intuition de l'espace, résumant une attitude devenue spontanée et donc assez répandue<sup>11</sup>:

10 KOYRE, *ibid.*, p. 152.

11 KOYRE, *ibid.*, p. 171, 179-80.



“en effet, nous ne pouvons pas concevoir une matière finie si ce n’est comme entourée d’une certaine étendue infinie.”

“... nous ne pouvons pas concevoir qu’une certaine extension immobile, qui pénètre tout à l’infini, a toujours existé et existera éternellement et qu’elle est réellement distincte de la matière mobile.”

Mais une autre correspondance, plus célèbre encore, nous renseigne sur les conflits à propos de la nature de l’espace, à la fin du siècle cette fois. Il s’agit de la correspondance de Leibniz avec Clarke en 1715, la plume de ce dernier ayant peut-être été guidée par Newton, mais ce n’est pas certain.

Leibniz avait déjà exprimé longuement son point de vue en 1704 sur l’espace, les figures et le lieu dans ses “Nouveaux Essais sur l’Entendement humain”, en réponse à Locke plutôt qu’à Newton. Le lieu sera déterminé comme chez Aristote et Descartes par emboitements successifs, mais on ne sait si on parvient ou non à un terme. L’étendue est définie comme “l’abstraction de l’étendu” ce qui la distingue de l’étendue cartésienne confondue avec son contenu. L’espace n’est pas plus une substance que le temps. Comme il a des parties, il ne saurait être Dieu<sup>12</sup>:

“C’est un rapport, un ordre, non seulement entre les existants, mais encore entre les possibles comme s’ils existaient.

Mais Leibniz est particulièrement clair dans ses réponses à Clarke, une dizaine d’années plus tard<sup>13</sup>:

“Ces messieurs soutiennent donc que l’espace est un être réel absolu; mais cela les mène à de grandes difficultés. Car il paraît que cet être doit être éternel et infini. C’est pourquoi il y en a qui ont cru que c’était Dieu lui-même, ou bien son attribut, son immensité. Mais comme il a des parties, ce n’est pas une chose qui puisse convenir à Dieu.”

12 LEIBNIZ, Gottfried Wilhelm, *Nouveaux Essais sur l’Entendement Humain*, 1704, dans *Œuvres Philosophiques*, 2ème édition, Paris, Félix Alcan, 1900, p. 112.

13 LEIBNIZ, Gottfried Wilhelm, *Philosophischen Schriften*, VII, Georg Olms Hildesheim, 1961, p. 370.

Jusque là ce pourrait être une réponse de Descartes à Henri More, ou même l'extrait d'un débat médiéval, mais la suite est différente:

“Pour moi j’ai marqué plus d’une fois que je tenais l’espace pour quelque chose de purement relatif, comme le temps; pour un ordre des coexistences comme le temps est un ordre des successions. Car l’espace marque en termes de possibilité un ordre des choses qui existent en même temps, en tant qu’elles existent ensembles, sans entrer dans leur manière d’exister.”

La justification de Leibniz est aussi intéressante, à partir du principe de raison suffisante. Si l’espace était quelque chose en soi, indépendamment de son contenu, il faudrait pouvoir expliquer pourquoi les choses dans leur totalité se trouvent là et non un peu plus loin, ou dans l’ordre inverse. De même, pour le temps, faudrait-il expliquer pourquoi Dieu n’a pas créé le Monde un an plus tôt. Or s’il n’y a pas de raison à cela c’est que ce sont des états identiques, indistinguables. L’argumentation vise en tout cas l’espace et le temps absolus de Newton, sinon tout espace.

Remarquons le côté accessoire du discours sur le temps, qui suit celui sur l’espace, en parallèle, comme dans le célèbre Scholie de Newton, quoique le temps précède alors l’espace. Lorsque l’on affirme, à juste titre, que l’espace précède le temps, il s’agit plutôt d’un point de vue psychologique ou anthropologique qu’historique, tout au moins en ce qui concerne l’histoire classique qui nous intéresse ici. On constate en effet une abondance des discours sur le temps, à la suite d’Aristote, chez Plotin, Saint Augustin, pour ne citer que les plus connus, jusqu’à ce que l’espace vienne en prendre la place au XIV<sup>e</sup> siècle. Alors, curieusement, le temps disparaît, comme si l’espace consistait déjà, en lui-même, en une annulation du temps. Les propos de Newton ne sont en effet, pas plus que ceux de Leibniz, de véritables propos sur le temps. On a dit que le temps était spatialisé en physique, et cela est vrai dans le discours, avant même que l’on ne représente le temps par une ligne. On peut voir la disparition du temps également dans l’acceptation de l’infini en acte. L’infini n’est plus considéré comme le résultat d’un processus, mais comme quelque chose de déjà réalisé. L’infini est toujours déjà là. Le mouvement et aussi toujours déjà là et sera toujours là. La permanence des lois, puis de l’espace, remplace celle des lieux aristotéliens.

#### IV. L'espace comme repère du mouvement

Galilée ne parle pas de l'espace. Le mouvement est repéré par rapport au laboratoire, à la Terre, au Soleil. On ne peut en dire plus. Le mouvement est déterminé par ses effets. Mais le mouvement "égal à lui-même" (uniforme) est sans effet pour ce qui se passe à l'intérieur du système (du navire ou de la Terre). Il n'est donc déterminé que relativement à d'autres corps. C'est l'"invariance" galiléenne, trop connue pour qu'il soit nécessaire d'insister ici<sup>14</sup> Mais la théorie des marées développée dans le même ouvrage par Galilée, implique, comme toute dynamique, la donnée implicite d'un mouvement unique, qui est alors dans ce cas le mouvement relatif au Soleil, c'est-à-dire celui qui correspond au point de vue le plus extérieur. Dans la discussion aristotélicienne qui s'ensuit entre Sagredo et Simplicio au sujet du mouvement "propre" qui est au contraire le mouvement repéré par rapport au corps environnant le plus proche, Salviati n'intervient pas.

Galilée ne s'exprime donc pas vraiment à propos de la nature du mouvement. Cela ne lui est pas nécessaire et on ne peut l'accuser de contradiction que si on extrapole ses propos sur l'invariance ou le principe d'inertie, qui sont des énoncés locaux et circonstanciés, pour en faire des principes généraux.

On trouve en revanche de tels principes chez Descartes, nous l'avons déjà vu. Il proclame que l'on ne peut trouver dans l'Univers un corps dont on puisse dire qu'il est au repos<sup>15</sup> En conséquence on ne peut attribuer un mouvement unique à aucun corps, pas même à la Terre. Descartes, qui refuse le vide, reprend la notion aristotélicienne de lieu dans un but de retour au langage courant et à ses évidences. S'il y a un mouvement plus proprement attribué à un corps, il est le résultat de la composition des divers éléments: le mouvement par rapport au corps le plus proche, puis de ce dernier par rapport à un ensemble plus grand etc... Ainsi en est-il des mouvements des rouages de la montre du marinier qui marche sur son bateau en mouvement sur le fleuve. Mais, au contraire de ce qui se passait chez Aristote, on ne parvient jamais à un stade ultime, et le mouvement demeure, chez Descartes, totalement relatif. A la finitude du

14 GALILÉE, *Dialogue sur les deux systèmes du Monde*, trad. de l'italien par René Fréreau avec le concours de François de Gandt, Paris, Seuil, 1992. La question du mouvement de la Terre et la comparaison avec le navire en mouvement est longuement traitée dans la seconde Journée. Ce que nous disons ensuite du mouvement et des marées chez Galilée provient de la quatrième Journée, p. 414.

15 DESCARTES, René, *Principes de la Philosophie* (1644), dans *Œuvres de Descartes*, publiées par Adam et Tannery, Vol. IX (2), Paris, Vrin, 1978, seconde partie, p. 76-81.

Monde aritotélien réponds la finitude de la pensée chez Descartes. Le processus qui nous conduit de proche en proche ne saurait parvenir à une fin. Cela ne provient pas forcément d'un Monde infini, mais du fait qu'il n'est plus hiérarchisé comme chez Aristote. On y tourne en rond au lieu d'aller simplement du centre vers l'extérieur.

Cette indétermination du mouvement rend ambigus les propos tenus sur la force centrifuge autant que le principe d'inertie, lorsque Descartes entend les préciser. La tendance du corps à fuir en ligne droite est difficilement compatible avec une définition relative du mouvement.

Huygens se battra toute sa vie pour une conception relative du mouvement, conséquence pour lui de la physique galiléenne autant que de la philosophie cartésienne.

Il démontre en 1656 l'ensemble des lois des chocs élastiques à partir de cas symétriques et de l'invariance galiléenne<sup>16</sup>, prise comme condition restrictive sur l'ensemble des lois possibles, et donc comme instrument positif pour trouver des lois et non plus seulement pour démontrer la possibilité du mouvement de la Terre. Son traitement, parfaitement efficace, consiste à considérer l'ensemble des chocs possibles (frontaux) de deux boules données (ensemble des conditions initiales), comme un seul choc vu de différents points de vue. Le choc, caractérisé par ses vitesses n'est pas invariant par changement de repère, mais il est "covariant" car il appartient à l'ensemble obtenu par changements de repère à partir d'un cas quelconque.

La nature relative du mouvement dont Huygens est profondément persuadé implique intuitivement pour lui un espace indifférencié. Il en est question à plusieurs reprises dans ses brouillons et correspondances, mais malheureusement jamais dans les oeuvres publiées. Il affirme dès 1654<sup>17</sup>:

"Personne ne peut comprendre le repos et le mouvement dans les corps si ce n'est par rapport à d'autres corps. Car rien ne peut être imaginé du mouvement dans les corps que ce qui échange les distances et les positions mutuelles des corps."

Et encore en 1668<sup>18</sup>:

---

16 HUYGENS, Christian, O.C. XVI, p. 30-91, pour l'édition posthume de 1703 intitulée: *De Motu Corporum ex Percussione*.

17 *Ibid.*, p. 111.

18 *Id.*, O.C. VI, p. 183.

“Il n’y a rien qui distingue le mouvement droit d’avec le repos, et l’un et l’autre n’est que relatif, l’estendue du monde étant infinie.”

Il n’est encore question que du mouvement rectiligne, la force centrifuge constituant alors pour Huygens un “critère” de mouvement. L’étude qu’il a consacré en 1659 à la force centrifuge est d’ailleurs l’occasion pour lui de montrer que son espace vide et indifférencié est vraiment un espace physique et non seulement celui de la géométrie euclidienne. Il considère un pendule dans le plan d’une roue en rotation et veut rendre compte de la tension radiale du fil par trajectoire que suivrait le mobile accroché au fil s’il était soudain libéré. Ce n’est pas la trajectoire tangentielle, telle qu’elle est vue de l’extérieur, qui peut lui donner la réponse. Il effectue donc un changement de repère, pour trouver que la trajectoire vue depuis la roue en rotation est bien au départ dans le prolongement du rayon.

La position de Newton survient, dans le premier Scholie des “Principes mathématiques de philosophie naturelle” de 1687, comme un coup de théâtre assez scandaleux. Il est clair que l’avantage de l’espace absolu comme repère est de rendre compte sans douleur des forces d’inertie. L’expérience de pensée du seau tournant est suffisamment claire pour se passer de commentaires.

Huygens aura alors bien du mal, après 1687, parce qu’il refuse obstinément l’espace absolu newtonien, à rendre compte de la force centrifuge comme conséquence d’un mouvement relatif des parties de la roues les unes par rapport aux autres. Ces parties conservent en effet les mêmes positions et distances mutuelles. Elles sont donc au repos mutuel selon les propres définitions de Huygens. Il explique alors que deux parties symétriques par rapport au centre seraient en mouvement rectiligne uniforme sur des droites parallèles si les contraintes du solide ne les contraignaient à tourner et à garder ainsi une distance mutuelle constante.

Huygens a-t-il expliqué la force centrifuge par la force centrifuge? Peut-être. Son unique interlocuteur possible à ce sujet est Leibniz, pour qui l’espace ne peut être non plus absolu. Leibniz écrit à Huygens en 1694<sup>19</sup>:

“Quand à la différence entre le mouvement absolu et le mouvement relatif, je croy que si le mouvement, ou plutost la

19 LEIBNIZ, Gottfried Wilhelm, *Matematishe Sbriften*, 1, N.Y., Georg Olms Verlag, Hildesheim, 1971, 184-5, et O.C. X, p. 639, Lettre de Leibniz à Huygens du 12/22 juin 1694.

force du mouvante des corps, est quelque chose de réel, comme il semble qu'on doit le reconnaître, il faudra bien qu'elle est un subjectum. [...]; je demeure d'accord que les phénomènes ne nous sauroient fournir (ny mesme aux anges) une raison infaillible pour déterminer le sujet du mouvement ou de son degré; et que chacun pourrait estre conçu à part comme estant en repos, et c'est aussi tout ce que je crois que vous demandes. Mais vous ne nieres pas que veritablement chacun a un certain degré de mouvement, ou, si vous voulés, de la force; non-obstant l'équivalence des hypotheses."

Huygens n'est plus d'accord. Il avait déjà refusé la loi de conservation de la "force vive" imposée par Leibniz pour le traitement des chocs, et pour toute la mécanique. Il est probable que le refus de Huygens provient de ce que cette quantité n'est pas, lorsqu'elle est considérée seule, invariante par changement de repère, et que sa propre méthode est justement fondée sur l'invariance.

Huygens revient alors à l'idée de l'espace pour lequel il reprend, sans le savoir, un scénario médiéval. Il imagine un corps unique dans l'Univers vide et infini. Son mouvement ne peut alors être repéré ni défini. L'espace lui-même ne peut alors être dit au repos ni immobile<sup>20</sup>:

"A cet espace infini et vide, ni l'idée ou l'appellation de mouvement ni celles de repos ne conviennent. Si l'on estime qu'il est au repos, c'est semble-t-il uniquement pour avoir remarqué que ce serait absurde de le dire en mouvement [...] Car il n'y a aucune définition ou désignation du lieu si ce n'est par d'autres corps. [...]"

"Mais d'où vient l'idée de l'immobilité si ce n'est du repos relatif des corps? Par conséquent à cette idée on a ajouté qu'ils se reposent entre eux. Mais ton espace vraiment immobile, par rapport à quoi est-il en repos? Donc l'idée du repos ne lui convient pas. Et ainsi est fausse la notion de l'espace immobile en tant qu'immobile."

Ce qui est clair chez Huygens, et c'est pourquoi nous avons insisté sur sa position dans ce paragraphe, c'est que repérage et définition du mouvement

---

20 HUYGENS, Christian, O.C. XXI, p. 507.

sont volontairement et explicitement confondus. Huygens s'étonne de ceux qui, ne pouvant repérer le vrai mouvement, veulent qu'il existe tout de même dans la nature. Pas de différence chez lui entre évaluation et ontologie.

## V. Un espace de représentation

Nous voulons mettre en évidence, à la suite des remarques précédentes concernant l'ontologie, une prééminence nouvelle du visible ou du visualisable sur le discursif. Or cette prééminence ne provient pas seulement de la géométrie en tant qu'elle est utilisée directement pour décrire le mouvement, mais également en tant qu'elle a permis d'établir les lois de la perspective et celles de l'optique.

La vision directe du Monde est faussée, la perception nous trompe. Ce n'est pas seulement une affirmation platonicienne, mais la conséquence des nombreuses déformations de la vision directe: perspective qui fait paraître plus petit ce qui est plus grand, ovale ce qui est rond, plus rapide ce qui est plus lent, au repos ce qui ne l'est pas. Tout ceci se trouve déjà dans les premiers traités d'optique, d'Euclide à Witelo en passant par Ptolémée et Ibn al-Haytham, traités qui sont d'ailleurs souvent intitulés "Perspective"

Les lois de la perspective mises au point par Filippo Brunelleschi et Leon Battista Alberti au quattrocento ne sont pas uniquement destinées aux architectes et aux peintres. Elles ont été incontestablement utilisées par Piero della Francesca, Masacio, Ucello, par Léonard de Vinci. Mais les peintres les considèrent plutôt comme une possibilité supplémentaire que comme une règle stricte. Ils s'en amusent et les pervertissent. Les traités de perspective ne sont donc pas des traités pratiques au sens actuel de ce mot. Ils ne le sont qu'au même titre que les traités de mécanique, parce qu'ils sont produits hors du monde universitaire, donc hors du domaine de la philosophie. Mais ce sont des traités théoriques en ce sens qu'ils rendent universel le résultat d'un point de vue particulier en l'incluant dans un ensemble régi par des lois. La vision particulière se trouve justifiée, objectivée. Peu importe que les règles en soient appliquées ou non. Elles existent. L'invariance des lois de la perspective d'un observateur à l'autre fait de la vision particulière un phénomène "covariant", en ce sens que sa particularité est prévue, incluse dans un système.

Or au XVII<sup>e</sup> siècle justement, la perspective entre dans le domaine des mathématiques pures avec la géométrie projective inaugurée par Desargues et Pascal. Une nouvelle tradition géométrique émerge, qui se développera au XVIII<sup>e</sup> siècle avec Monge et Poncelet. Il ne s'agit plus alors de "points de vue", mais

d'une approche plus mobile, plus vaste que celle de la géométrie euclidienne. C'est l'approche d'un espace homogène et isotrope à trois dimensions.

Mais les erreurs de la vision, les "illusions", proviennent également de la réflexion et de la réfraction des rayons lumineux qui produisent des brisures et des colorations n'appartenant pas aux objets. Ces phénomènes sont utilisés depuis longtemps dans l'usage des lentilles et depuis peu dans l'usage des lunettes galiléennes. Si on est toujours, jusqu'à Newton, incapable de connaître le trajet des rayons lumineux dans une lunette, on en connaît le comportement sur ou à travers des surfaces coniques.

En même temps que son "Discours de la méthode" et que sa "Géométrie", Descartes publie sa "Dioptrique" comme s'il accordait la même importance à cette science jusque-là considérée comme subalterne. Sa justification est la suivante<sup>21</sup>:

"Toute la conduite de notre vie dépend de nos sens, entre lesquels celui de la vue étant le plus universel et le plus noble, il n'y a point de doute que les inventions qui servent à augmenter sa puissance ne soient les plus utiles qui puissent être."

Dans le "Discours de la méthode" Descartes justifie du choix de la dioptrique comme d'un exemple d'application de la méthode, car il faut bien faire un choix. Mais ce qui est amusant est qu'il se compare alors à un peintre qui doit choisir un point de vue pour représenter une réalité qu'il ne peut saisir dans son ensemble<sup>22</sup>.

Nous ne voulons certes pas faire de Descartes un empiriste pour lequel l'observation serait primordiale. Ce serait contradictoire avec le contenu de ses "Principes de la Philosophie" dans lesquels il s'agit justement de poser les principes *a priori* d'une étude de la Nature, comme nous l'avons déjà évoqué. Mais sans entrer véritablement dans la métaphysique cartésienne, nous mettons simplement en avant ici le fait que le mécanisme cartésien fait reposer l'explication sur une visualisation des phénomènes à la place de l'explication en termes de catégories. La causalité elle-même n'y est pas mieux traitée que chez Galilée puis-

---

21 DESCARTES, René, *Discours de la méthode, suivi d'extraits de la Dioptrique, des Météores, de la Vie de Descartes par Ballet, du Monde, de l'Homme et de Lettres*, édition établie par Geneviève Rodis-Lewis, Paris, GF-Flammarion, 1992, p. 97.

22 *Ibid.*, p. 62.



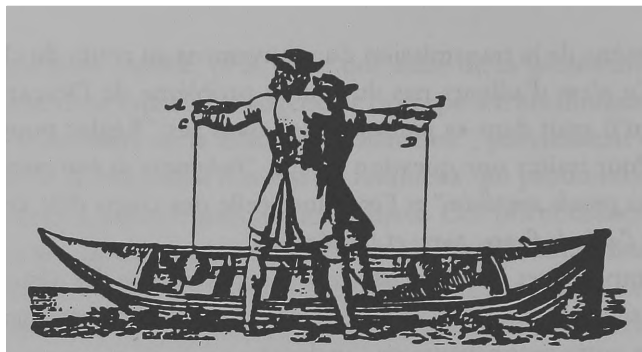
que le phénomène de la transmission du mouvement au cours du choc demeure mystérieux. Ce n'est d'ailleurs pas du tout le problème de Descartes qui obéit encore à ce qu'il avait dans sa jeunesse écrit dans ses "Règles pour la direction de l'esprit" Pour traiter une question il faut: "*l'abstraire de tout concept superflu, la réduire à sa plus grande simplicité*" et l'étendue réelle des corps doit être "*proposée à l'imagination à l'aide de figures pures et simples.*"

La simplicité et l'ordre cartésiens s'appuient sur des visions mentales, sur une représentation qui n'est pas celle que nous livre directement la perception, mais une autre reconstruite par analogie.

La représentation visuelle joue un rôle évident chez Galilée également. On sait dans quelle mesure il s'est intéressé à la peinture et au dessin. Sa physique est géométrique, cela est bien connu également. La figuration du mouvement dans les "Discours" de 1638 va bien au delà d'une représentation qui serait celle du mouvement tel qu'il est vu, puisque le temps y est figuré par une ligne<sup>23</sup>, pour la première fois depuis les diagrammes oxfordiens et oresmiens. Le fait de figurer également les intensités des mouvements concrétise les rapports entre temps, vitesses et espaces, car tout est ramené à du spatial. Mais ce qu'apporte la visualisation chez Galilée dans ce cas, c'est surtout de ramener des quantités inhomogènes à des grandeurs homogènes, et donc de braver un interdit traditionnel. C'est aussi de faire figurer l'infiniment petit, l'instant et la vitesse instantanée étant représentés respectivement par un point et une droite. La représentation du mouvement, lorsqu'elle est autre chose qu'une simple trajectoire, ne s'effectue donc pas sans modifier radicalement l'appréhension des grandeurs qui y sont impliquées.

Huygens est un visuel, plus radicalement que ses deux maîtres Galilée et Descartes. Il dessine constamment. Lorsqu'il établit les règles des chocs à partir de l'argument du navire galiléen, il ressent le besoin d'établir une véritable réciprocité entre le navire et la berge, réciprocité dont Galilée n'avait pas eu besoin. Il est indispensable pour Huygens que le choc, tel qu'il est vu sur la berge, soit aussi réel que celui qui est vu du bateau, sans hiérarchie aucune entre les deux. Il imagine alors un procédé difficilement réalisable pratiquement mais parfaitement illustré par ses éditeurs posthumes en 1703: celui des deux compagnons qui, l'un sur le bateau et l'autre sur la berge, participent de la même façon à l'action d'un choc.

23 GALILEE, *Discours concernant deux sciences nouvelles*, Paris, Armand Colin, 1970, p. 140-1.



Cette illustration n'était pas indispensable à l'utilisation par Huygens de l'invariance galiléenne. Elle ajoute donc quelque chose de plus. Elle ajoute la réciprocité totale des deux repères, leur équivalence.

Ces compagnons sont, d'une certaine façon, les premiers "observateurs" situés dans un espace physique vide, constituant ainsi la scène sur laquelle vont se dérouler les phénomènes idéalisés. Il est vrai que ces observateurs ne sont pas passifs. Ils agissent en même temps qu'ils regardent. Mais cela ne fait que souligner la nature de l'espace de Huygens. Ce n'est pas l'espace de la perception visuelle mais celui d'une vision abstraite de phénomènes reconstitués par la pensée. Il en est de même des mercuriens, vénusiens et marsiens que l'on imagine à peu de chose près équivalents aux terriens, permettant ainsi de reconstituer un autre point de vue, point de vue qui a le même statut que le nôtre.

## Conclusion

Dans ses "Nouveaux Essais sur l'Entendement humain" de 1704, auxquels nous avons déjà fait allusion, Leibniz tentait de trouver une définition générale de la figure géométrique. Au delà de ce qui est dit de la figure, la tentative est intéressante en ce qu'elle confronte le spatial avec le discours logique, comme le fera plus tard Kant à propos de la symétrie plane dans l'espace. Le résultat en est que quelque chose du spatial échappe au langage, au moins jusqu'à ce que le langage ne se soit donné, bien plus tard, des outils adaptés.

Cela nous permet de remarquer que si l'on n'admet plus au XVII<sup>e</sup> siècle que le discours définisse quelque chose d'irreprésentable comme l'Univers fini et sans extérieur d'Aristote, on admet que la représentation contienne des éléments qui échappent au discours. Le langage mathématique devra s'y conformer, petit à petit. Ce parcours aura illustré également le fait que l'espace vide

est une scène, indispensable à la représentation mais non au discours naturel, logique ou mathématique.

Maurice Merleau Ponty disait: "Poser la question de la nature en soi de l'espace n'a pas de sens", puis, un peu plus loin: "Poser la question de la nature en soi de l'espace, c'est admettre un "Kosmos Theoros", c'est-à-dire un contemplateur du Monde."<sup>24</sup>

Il est vrai que ce propos lui est inspiré par les théories de la relativité restreinte et générale, mais il concerne aussi bien nos auteurs classiques. Il est donc évident que ceux-ci sont des "Contemplateurs du Monde", des "Kosmos Theoros". Ils ont échappé à l'attraction terrestre pour se déplacer dans le système solaire, et même au delà. Ils peuvent alors s'interroger sur la nature de l'espace, à défaut de celle de Dieu.

Les cosmo-théories de la fin du XVII<sup>e</sup> siècle n'en appartiennent pas moins à une aventure de la raison avant de devenir, beaucoup plus tard, une aventure scientifique à part entière. Celle-ci naîtra d'une nouvelle rencontre entre observation astronomique et théorie telle que la commente Jacques Merleau-Ponty dans son livre sur la Cosmologie du XX<sup>e</sup> siècle<sup>25</sup> Mais si l'image que l'on peut avoir du Monde dans son ensemble et de son évolution n'a plus rien à voir avec celle du XVII<sup>e</sup> siècle, le problème des autres terres habitées n'a pas profondément changé, sauf en ceci qu'il a plus d'arguments pour se considérer comme unique, ou tout au moins très rare, dans l'Univers. Or comme le dit justement Jacques Merleau-Ponty: "La rareté est une relation, l'unicité n'en est pas une."<sup>26</sup>. Nos classiques seraient bien déçus de constater l'état actuel de nos recherches de la vie dans l'Univers et se sentiraient peut-être plus perdus qu'ils ne l'étaient lors de l'ouverture de la sphère des fixes. La diversification des points de vue n'est plus au goût du jour, même si les sondes interplanétaires ont concrétisé les images de Huygens et préciseront toujours davantage ses idées de la surface de Vénus ou du système de Saturne. Les galaxies lointaines demeurent lointaines et l'accumulation de données à leur sujet ne les a pas rendu accessibles à une quelconque réciprocité. L'homme est redevenu au XX<sup>e</sup> siècle un *Kosmos Theoros* qui statue sur la nature de l'espace et de la totalité du Monde, qui se déplace par la pensée dans l'espace et dans le temps. Mais cela peut-il encore lui

24 MERLEAU-PONTY, Maurice, "Les notions d'espace et de temps", dans *La Nature*, Notes du Collège de France, Paris, Seuil, 1995, Ch. 2, p. 141.

25 MERLEAU-PONTY, Jacques, *Cosmologie du 20ème siècle*, Paris, Gallimard, 1965.

26 *Ibid.*, p. 456.

servir à relativiser son point de vue et à réfléchir sur sa position et sa condition? Si c'est le cas c'est d'une toute autre façon, en termes de probabilités par exemple, car le scientifique moderne s'est lassé de l'ethnologie autant que de la fiction. C'est pourquoi la fraîcheur et l'enthousiasme des savants ou auteurs moins savants de l'époque classique nous séduisent toujours.

# Infini, géométrie et mouvement au XVII<sup>e</sup> siècle

Michel Blay\*

**Résumé:** La géométrisation du mouvement au XVII<sup>e</sup> siècle selon l'intelligibilité géométrique de l'époque se heurte à des difficultés liées à la considération de l'infini, au problème de la continuité du commencement de la fin du mouvement, et à la diversité des mouvements accélérés. Cet article examine les solutions proposées par Galilée, Descartes, Mariotte, et finalement Newton (pour la continuité) et Leibniz (pour le commencement).

**Abstract:** The geometrization of motion in XVII<sup>e</sup> century according to geometrical intelligibility of the time (with difficulties related with considering infinity, the problem of continuity, the rising and the ending of motion, the variety of accelerated motions. This papers examines the solutions proposed by Galileo, Descartes, Mariotte and finally Newton (concerning continuity) and Leibniz (concerning the rising).

L'UN DES ASPECTS les plus novateur du développement de la science au début du XVII<sup>e</sup> siècle consiste dans la géométrisation du mouvement. Par géométrisation il faut comprendre une démarche dont l'objet consiste à reconstruire les phénomènes du mouvement à l'intérieur du domaine de l'intelligibilité géométrique, de telle sorte que ces phénomènes se trouvent soumis à l'emprise de la raison géométrique et puissent être l'objet d'une mise en forme déductive sur le modèle des *Eléments* d'Euclide.

Cependant, cette entreprise ne va pas sans difficultés. Elle se heurte rapidement à des questions impliquant la considération de l'infini et, bien sûr, le retour des célèbres paradoxes de Zénon d'Elée (la dichotomie, l'Achille et la flèche). Comment peut-on penser la continuité d'un mouvement, le début et la fin d'un mouvement? Comment expliquer la variété des mouvements accélérés; doit-on avoir, comme le suggèrent certains atomistes, recours à un mélange de mouvement et de repos?

Autant de questions qui occuperont les savants du XVII<sup>e</sup> siècle, Galilée, Bonaventura Cavalieri (1598-1647), Blaise Pascal, et qui ne trouveront fina-

---

\* Directeur de recherche, CNRS, Ecole Normale Supérieure Fontenay-St.-Cloud - 31, avenue bombard  
92266 - Fontenay aux Roses.

lement une réponse mathématique explicite qu'au début du XVIII<sup>e</sup> siècle avec l'algorithme de la cinématique<sup>1</sup>

Dans une lettre adressée à Galilée en date du 21 mars 1626, Bonaventura Cavalieri souligne parfaitement l'importance et la difficulté des problèmes posés, dans le cadre de la géométrisation, par la compréhension du commencement et de l'évolution continue du mouvement: "[...] je suis arrivé à composer quelque petite chose sur le mouvement [...]: lorsqu'on en arrive à devoir prouver que le mobile, qui du repos doit passer à un degré quelconque de vitesse, doit passer par les (degrés) intermédiaires, je ne trouve aucune raison qui me tranquillise, bien qu'il me semble que généralement il en soit ainsi [...]"<sup>2</sup>

La quête d'une raison qui tranquillise, c'est ici à la fois un programme de travail et une attitude d'esprit ; c'est la volonté de comprendre le commencement et l'évolution continue du mouvement, mais surtout de les penser mathématiquement, ou plutôt d'en construire les raisons mathématiques.

Cependant le traitement de ces questions est d'une extrême difficulté, car s'y attaquer c'est immédiatement se trouver confronté à l'infini. Blaise Pascal en témoigne explicitement, par exemple, dans son petit traité intitulé *De l'esprit géométrique*:

"[...] quelque prompt que soit un mouvement, on peut en concevoir un qui le soit davantage, et hâter encore ce dernier; et ainsi toujours à l'infini, sans jamais arriver à un qui le soit de telle sorte qu'on ne puisse plus y ajouter. Et au contraire, quelque lent que soit un mouvement, on peut le retarder davantage, et encore le dernier ; et ainsi à l'infini, sans jamais arriver à un tel degré de lenteur qu'on ne puisse encore en descendre à une infinité d'autres sans tomber dans le repos?"<sup>3</sup>

Dans une perspective très voisine Galilée écrit dans les *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*, en plaçant les mots dans la bouche de son ami et porte-parole, Salviati:

1 Sur ce point voir en particulier Michel Blay, *la naissance de la mécanique analytique. La science du mouvement au tournant des XVII<sup>ème</sup> et XVIII<sup>ème</sup> siècles*, Paris, PUF, 1992 et *Les raisons de l'infini, Du monde clos à l'univers mathématique*, Paris, Gallimard-Essais, 1993.

2 Galilée, *Opere*, édition nationale italienne par Favaro et Longo, 20 vols., Florence, 1890-1909, XIII, p. 312.

3 Pascal, B., *Œuvres complètes*, Collection l'Intégrale, Paris, Le Seuil, 1963, p. 351-2.

“Ecoutez-moi bien. Vous ne refuserez pas, je crois, de m’accorder qu’une pierre tombant de l’état de repos acquiert ses degrés successifs de vitesse selon l’ordre dans lequel ces mêmes degrés diminueraient et se perdraient, si une force motrice la reconduisait à la même hauteur ; et le refuseriez-vous que je ne vois pas comment la pierre, dont la vitesse diminue et se consume en totalité au cours de son ascension, pourrait atteindre l’état de repos sans être passée par tous degrés successifs de lenteur”<sup>4</sup>

Dans ce texte, Galilée souligne, comme Pascal, mais d’une façon plus précise, la continuité caractérisant selon lui la croissance ou la décroissance de la vitesse dans un mouvement naturellement accéléré. Ainsi dans un tel mouvement, comme le précise également Galilée dans les *Discorsi*, “un grave [...] ne demeure en aucun de ces degrés de vitesse pendant un temps fini” Ce qui revient encore à dire que, suivant Galilée, dans un mouvement accéléré ou retardé, un grave qui sort du repos ou qui y retourne passe par une infinité de degrés de vitesse dans un intervalle de temps qui, si petit qu’il soit, contient une infinité d’instant. En ce sens, le repos peut être considéré, non comme opposé au mouvement, mais comme une limite ou un cas particulier du mouvement.

Les problèmes soulevés par cette analyse de la continuité du mouvement, tout en rendant possible la géométrisation du mouvement, comme en témoigne le traitement galiléen de cette question dans les *Discorsi* ou dans le *Dialogo* (Florence, 1632), sont d’une extrême difficulté. En effet, s’il y a une infinité de degrés de lenteur pour atteindre le repos, ne faut-il pas un temps infini pour que ce mouvement puisse s’accomplir ou, plus exactement, pour que le mobile animé d’un tel mouvement s’arrête en passant successivement par tous les degrés de lenteur? Et, à l’inverse, pour qu’un mouvement commence en passant successivement par tous les degrés croissants de vitesse ne faut-il pas, là aussi, un temps infini pour atteindre la moindre vitesse? Dans un cas le repos est impossible à atteindre, dans l’autre c’est le mouvement qui ne peut, à strictement parler commencer. Or, bien évidemment, les mouvements commencent et finissent!

Que le mouvement commence et voilà les paradoxes de l’infini qui s’insinuent et semblent venir ruiner toute possibilité de penser la continuité du dé-

<sup>4</sup> Galilée, *Opere*, VIII, p. 200. Traduction par Maurice Clavelin (*Discours concernant deux sciences nouvelles*, Paris, Colin, 1970, p. 133).

but et de la fin du mouvement. Une réponse consiste à rejeter l'idée d'un commencement non fini du mouvement ou plutôt de considérer que, par exemple, le mouvement de chute des graves commence, non pas à partir d'une vitesse nulle par accroissements successifs continus, mais à partir d'une vitesse petite mais finie. C'est ainsi qu'Edme Mariotte (1620?-1684) envisage la question. Dans son *Traité de la percussion ou chocq des corps* publié à Paris en 1673, il refuse l'idée qu'un mouvement accéléré puisse l'être dès le premier instant. Son argumentation repose, bien évidemment, sur un rappel des difficultés engendrées par les paradoxes de Zénon sur l'infini, mais aussi, bien que le contexte infinitésimal y semble peu propice, sur diverses expériences en rapport principalement avec l'écoulement et la force des fluides:

“Galilée fait quelques raisonnements assez vraisemblables pour prouver qu'au premier moment qu'un poids commence à tomber, sa vitesse est plus petite qu'aucune qu'on puisse déterminer: mais ces raisonnements sont fondés sur les divisions à l'infini, tant des vitesses que des espaces passés, et des temps de chutes, qui sont des raisonnements très suspects, comme celui que les anciens faisaient pour prouver qu'Achille ne pourrait jamais attraper une tortue, auquel raisonnement il est difficile de répondre et d'en donner la solution ; mais on en démontre la fausseté par l'expérience, et par d'autres raisonnements plus faciles à concevoir. Ainsi l'on objectera à Galilée les raisonnements ci-dessus qui sont faciles à concevoir, particulièrement celui de la balance, et qui sont beaucoup plus clairs que les siens, qu'il a fondé sur les divisions à l'infini, qui sont inconcevables, et sur certaines règles de l'accélération de la vitesse des corps, qui sont douteuses: car on ne peut savoir si le corps tombant ne passe pas un petit espace, sans accélérer son premier mouvement, à cause qu'il faut du temps pour produire la plupart des effets naturels, comme il paraît lorsqu'on fait passer du papier au travers d'une grande flamme, avec une grande vitesse, sans qu'il s'allume; et par conséquent on doit préférer les raisonnements ci-dessus à ceux de Galilée”<sup>5</sup>

---

5 Mariotte, E., *Traité de la percussion ou chocq des corps*, Paris, 1673, avertissement placé à la fin de la proposition X, p. 247-9.



Il devient donc possible d'éliminer l'infini au début du mouvement en considérant qu'il n'y a pas, aux sens strict, de début au mouvement. Dès le premier instant le corps est animé d'une vitesse très petite mais finie. De même le repos peut être atteint sans que le mobile passe par tous les degrés de lenteur ainsi que le propose, par exemple Hartsocker dans une lettre adressée à G.W Leibniz en date du 6 janvier 1712:

“Il y a une loi dans la Nature, dites-vous, Monsieur, qui porte qu'il n'y a aucun passage *per saltum*. Je vous l'accorde dans un certain sens ; mais quand vous dites, que cette loi ne permet pas qu'il n'y ait point de milieu entre le dur et le fluide, je n'y vois aucune nécessité. Si vous ne saviez pas par l'expérience, Monsieur, qu'un corps qui se meut avec tout autant de vitesse qu'il vous plaira peut demeurer en repos dès l'instant du choc, sans perdre peu à peu et par degrés son mouvement, ne diriez-vous pas par votre loy que cela est impossible?”<sup>6</sup>

Descartes est également très prudent concernant l'accroissement continu de la vitesse lorsque les corps descendent et suggère, qu'“ordinairement”, ils ne passent pas par tous les degrés de vitesse. D'ailleurs en énonçant, dans la deuxième partie de ses *Principes de la philosophie*, ses lois du choc, dont la réforme va reposer entre autres, pour Leibniz, sur l'application de sa loi de continuité. Descartes se met précisément en contradiction avec les exigences de la continuité. Par l'expression de la première loi du choc, Descartes indique que “deux corps [...] exactement égaux et se (mouvant) d'égal vitesse en ligne droite l'un vers l'autre, lorsqu'ils viendraient à se rencontrer [...] rejailliraient tous deux également, et retourneraient chacun vers le côté d'où il serait venu, sans perdre rien de leur vitesse”, mais, si l'on suppose maintenant avec Descartes, respectivement dans les deuxième et troisième lois, que l'un des corps est “tant soit peu plus grand” ou qu'il a “tant soit peu plus de vitesse”, alors il n'y aura par la deuxième loi que le plus petit ou, par la troisième loi, que le plus lent qui rejaillira seul, de sorte que les corps iront après, dans un cas comme dans l'autre, tous les deux du même côté. Une telle analyse est en parfaite contradiction avec l'idée même de continuité, comme le souligne par exemple Leibniz en 1691-1692 dans ses *Animadversiones in partem generalem principiorum cartesianorum*<sup>7</sup>

6 *Die philosophischen Schriften von Leibniz*, Hrsg. Von CI gerhardt, Bd. 1-7, Berlin, 1875-1890, réed. Hildesheim, 1960-1961, III, p. 531.

7 *Ibid.*, IV, p. 377.

Le traitement “à la façon” galiléenne de l’évolution “sans sauts”, “pau-  
ses” ou discontinuités du mouvement apparaît au XVII<sup>e</sup> siècle comme le résul-  
tat d’un choix théorique risqué mais décisif car, comme Galilée l’a parfaitement  
perçu, c’est la possibilité même de la géométrisation du mouvement qui est ici  
en jeu. Le traitement géométrique du mouvement requiert de dépasser par la  
construction rationnelle, mais avec les risques de l’infini, ce qui, chez Mariotte  
relève d’une pseudo-évidence expérimentale qui n’apprend rien.

Deux exemples, l’un tiré des *Philosophiae naturalis principia mathematica*  
(Londres, 1687) de Newton et l’autre de la *Théoria motus abstracti* (1678) de Leib-  
niz, montreront, plus qu’une longue digression, en quel sens l’effort de géomé-  
trisation passe par l’acceptation du rôle central de l’infini; la géométrisation est  
d’abord une pensée marquée par le risque conceptuel.

## I. Continuités et discontinuités newtoniennes

### I.1. La Proposition II de la Section I du Livre II

Dans les trois premières Sections du Livre II Newton examine en par-  
ticulier le mouvement des projectiles dans les milieux dont la loi de résistance  
est proportionnelle à la vitesse, puis au carré de la vitesse, puis enfin à une com-  
binaison des deux.

Nous limiterons notre propos, celui-ci n’étant pas de présenter la théo-  
rie newtonienne dans toute son extension mais seulement de faire sentir les en-  
jeux de la construction d’une physique mathématique, à la seule Proposition 2  
relative au mouvement uniforme des projectiles dans l’hypothèse d’une résis-  
tance proportionnelle à la vitesse<sup>8</sup>

“Si un corps éprouve une résistance en raison de sa vitesse,  
et qu’il se meuve dans un milieu homogène par la seule force  
qui lui a été imprimée<sup>9</sup>, je dis, qu’en prenant des temps égaux,  
les vitesses au commencement de chacun de ces temps seront

8 Pour une analyse plus détaillée de cette question voir Michel Blay, *op. cit.*, note 1, p. 251 et ss.

9 Newton, I., *Principes mathématiques de la philosophie naturelle*, Paris, 1756-1759, traduction française de  
la Marquise de Chastelet, rééd. Paris, Blanchard, 1966, Gabay, 1989, p. 246. Cette traduction n’est  
pas tout à fait exacte car le latin donne “... et idem sola *vi insita* per medium simile moveatur...”,  
le corps se meut donc bien ici du fait de sa seule force d’inertie au sens newtonien.

en progression géométrique, et que les espaces parcourus pendant chacun de ces temps seront comme les vitesses.”<sup>10</sup>

Dans la première phase qui ouvre la démonstration, Newton s’attache principalement à conceptualiser, en s’appuyant sur le modèle de la percussion, le mode d’action des forces de résistance:

“Soit divisé le temps en particules égales (*particulas aequales*), et soit supposé au commencement de chacune de ces particules (*ipsis particularum initiis*) une force de résistance qui soit comme la vitesse et qui agisse par un seul coup (*impulsu unico*), le décrétement de la vitesse à chacune de ces particules de temps sera comme cette vitesse.”<sup>11</sup>

Newton suppose donc tout d’abord que le temps est divisé en particules égales<sup>12</sup> et qu’“au commencement”<sup>13</sup> de chaque particule le temps la force de résistance agit “par un seul coup” A ce mode d’action discontinue de la force de résistance, Newton va substituer quelques lignes plus bas, comme nous le verrons, à l’aide d’un passage à la limite – sur le nombre et la grandeur des parties de temps d’un intervalle donné de temps – une action continue.

Par ailleurs, la force de résistance est, d’une part, conformément à l’hypothèse, “comme la vitesse”, et, d’autre part, étant la seule force en jeu et en raison des lois du mouvement, comme “le décrétement de la vitesse à chacune des ces particules de temps”<sup>14</sup> Par conséquent, puisque le mouvement perdu à chaque particule de temps l’est dès le commencement de cette particule de temps, la vitesse pendant chaque particule de temps devra être considérée comme constante et le mouvement uniforme; et donc, au début de chaque particule de temps, le décrétement de la vitesse devra être, conformément à l’hypothèse, proportion-

10 *Ibid.*, p. 246.

11 *Ibidem.*

12 L’expression “particules de temps” désigne, comme cela est confirmé par la suite du texte, non pas un temps de petite durée, mais des parties de temps destinées à tendre vers zéro.

13 Cette expression a pour objet de préciser que l’action de la force a lieu de façon instantanée au commencement même de la particule du temps. On retrouvera un mode d’action identique de la force dans la proposition I de la section II des Livre I relative à la loi des aires.

14 Nous évitons ici, de faire explicitement référence à la loi II dans laquelle l’indication du temps est absente. Sur ce point on peut consulter Michel Blay, les *Principia de Newton*, Paris, PUF, 1995.

nel à la vitesse du projectile au cours de la particule de temps précédente, ou bien encore, la différence des vitesses (leur décrement) entre deux particules de temps devra être proportionnelle à la vitesse du projectile<sup>15</sup>. Newton ayant préalablement démontré dans le Lemme I, placé entre les Propositions 1 et 2 du Livre II, que “les quantités proportionnelles à leurs différences sont en proportion continue”<sup>16</sup>, parvient alors facilement à établir une relation caractérisant l'évolution de la vitesse, à savoir que “les vitesses au commencement de chacun de ces temps seront en progression géométrique”<sup>17</sup>. Cela étant, il précise que les particules de temps, constituant un certain intervalle de temps, peuvent être prises aussi petites que l'on veut et leur nombre être augmenté à l'infini, de telle sorte que de discontinue l'action de la force de résistance devient continue sans pour autant que soit modifiée la relation caractéristique d'évolution de la vitesse:

“Maintenant soient diminuées ces particules égales de temps, et soit leur nombre augmenté à l'infini, en sorte que l'impulsion de la résistance devienne continue (*eo ut resistentia impulsus reddatur continuus*); et les vitesses qui sont toujours en proportion continue dans les commencements des temps égaux le seront encore dans ce cas.”<sup>18</sup>

Dans ce texte l'usage du terme d'*impulsus* est révélatrice, à travers le passage du discontinu au continu, des difficultés conceptuelles qui sont attachées à la construction newtonienne du concept de force dans son acception d'action continue.

Cette continuité de l'action, obtenue par un passage à la limite se retrouve également dans le traitement newtonien de la loi des aires.

15 Si l'on appelle  $v_1, v_2, v_3, v_4 \dots$  les vitesses du projectile “à chacune des particules de temps” égales, et  $kv_1, kv_2, kv_3, kv_4 \dots$  la résistance exercée par le milieu au début de chaque particule de temps ; il s'ensuit que:  $v_2 = v_1 - kv_1, v_3 = v_2 - kv_2, v_4 = v_3 - kv_3 \dots$

16 Le Lemme a pour objet d'établir que si.

17 d'après le résultat de la note précédente, nous avons.

18 *Ibid.*, p. 246-7.

**I.2. La loi des aires**

La Proposition 1 –Théorème 1 du Livre I stipule:

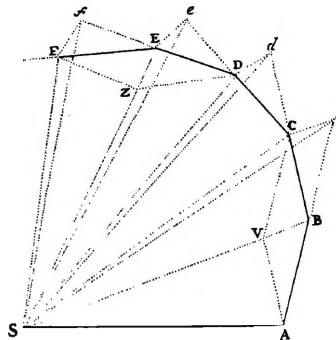
“Les aires, que les corps animés de mouvements curvilignes décrivent par des rayons menés au centre immobile des forces, sont incluses dans des plans immobiles, et sont proportionnelles aux temps.”<sup>19</sup>

Aucune précision n’est donnée par Newton sur le type de courbe plane décrit par le corps ; il n’est pas spécifié, en particulier, si cette courbe doit être fermée (Newton envisagera dans la Proposition 12 de la Section III le cas de l’hyperbole).

Puisque le corps décrit une courbe, une force, d’après la loi I, doit lui être continuellement imprimée. Newton suppose donc qu’une force centripète agit et que son centre est un point immobile et mathématique. Dans le cas où l’on aurait affaire à un point non plus mathématique mais matériel, Newton serait conduit à résoudre un autre problème, celui des deux corps, problème qui fait nécessairement intervenir la troisième loi du mouvement.

Dans cette Proposition 1, il faut donc démontrer tout d’abord que la trajectoire curviligne est plane, et ensuite que les “rayons – vecteurs” balaient des aires proportionnelles aux temps.

La difficulté de la démonstration réside principalement dans le traitement mathématique de l’action supposée continue de la force centripète. Comment rendre raison d’une action continue alors que la force imprimée est conceptualisée en s’appuyant sur le modèle fondamentalement discontinu de la percussion ou du choc?



<sup>19</sup> *Ibidem*, traduction légèrement modifiée.

“Supposé que le temps soit divisé en parties égales, et que dans la première partie de ce temps, le corps, par sa force d’inertie, décrive la droite AB. De même, dans la seconde partie, si rien ne l’empêchait, il irait en ligne droite jusqu’à c (par la loi I) décrivant la ligne Bc égale à AB ; de sorte qu’en tirant au centre S les rayons AS, BS, cS, il se ferait des aires égales ASB, BSc.”<sup>20</sup>

L’égalité des aires des triangles ASB et BSc découle de ce que ces triangles ont une base égale ( $AB = Bc$ ) et une même hauteur (la perpendiculaire issue de S et tombant sur Abc). Cependant, loin de poursuivre son trajet rectiligne de B en c, suivant la loi I, le corps se dirige vers C.

“En vérité quand le corps parvient en B, la force centripète agit sur lui par un coup unique mais grand ([...] *impulsu unico sed magno* [...]) de sorte que le corps dévie de la droite Bc et continue suivant la droite BC.”<sup>21</sup>

Le temps étant divisé en parties égales, c’est au commencement de chacune de ces parties et de façon instantanée que la force agit comme dans la Proposition II du Livre II.

“Que l’on mène cC parallèle à BS et qui rencontre BC en C, et à la fin de la seconde partie du temps, le corps (par le Corollaire I des lois) se retrouvera en C, dans le même plan que le triangle ASB.”<sup>22</sup>

La coplanarité du mouvement résulte de ce que cC est parallèle à BS et de ce que c est dans le plan défini par ASB. Le mouvement à force centrale est un mouvement plan.

“Joignez SC; et le triangle SBC, à cause des parallèles SB, Cc sera égal au triangle SBC, et aussi, de ce fait, au triangle SAB.

---

20 *Ibidem*, traduction légèrement modifiée.

21 *Ibidem*.

22 *Ibidem*, traduction légèrement modifiée.

Par le même raisonnement, si la force centripète agit successivement en C, D, E, etc. faisant que le corps décrive en chacune des particules de temps, chacune des droite CD, DE, EF, etc. celles-ci se situeront dans un même plan [...].”<sup>23</sup>

Ce premier point acquis, Newton en vient au second concernant l’expression de la loi des aires.

“[...] et le triangle SCD sera égal au triangle SBC, et SDE à ce même SCD, et SEF à ce même SDE. Donc, des aires égales seront décrites en des temps égaux, dans un plan immobile: et en composant ([...] *componendo* [...]) les sommes quelconques d’aires comme SADS, SAFS sont entre elles, comme sont les temps employés à les décrire.”<sup>24</sup>

L’égalité des aires des différents triangles découle, comme précédemment, de ce qu’ils ont même base et même hauteur. A cette étape de la construction rationnelle, la continuité de l’action de la force et corrélativement l’engendrement de la courbe sont loin d’être acquis. En effet, ce qui est engendré par cette succession d’actions s’exerçant au début de chaque particule de temps, c’est un polygone de sommets A,B,C,D... Comment passer de cette figure polygonale à une figure curviligne engendrée par une action, supposée continue, de la force centripète?

“Que maintenant le nombre des triangles augmente à l’infini (*in infinitum*) et que leur ampleur diminue à l’infini, et leur périmètre ultime ADF (*ultima perimeter*), (par le Corollaire quatrième du troisième Lemme) sera une ligne courbe: et pour cette raison la force centripète, qui retire perpétuellement le corps de la tangente de cette courbe, agit sans interruption (*indefinitè*); quant aux aires quelconques décrites SADS, SAFS, toujours proportionnelles aux temps employés à les décrire, elles seront, dans ce dernier cas, proportionnelles aux mêmes temps.”<sup>25</sup>

23 *Ibidem*.

24 *Ibidem*.

25 *Ibid.*, traduction légèrement modifiée.

La proportionnalité des aires aux temps étant “toujours” réalisée, cette proportionnalité est conservée à la limite et, par conséquent, un mouvement à force centrale décrit nécessairement des aires égales, dans un même plan, et dans des temps égaux. C’est par un appel au Corollaire IV du Lemme III de la première Section, relatif à la convergence des suites de figures inscrites<sup>26</sup>, que Newton introduit la courbure continue de la trajectoire et de cela conclut à une action “sans interruption” de la force centripète. On ne perçoit cependant pas très bien comment doit être comprise rigoureusement la relation entre “les coups uniques mais grands” et la force centripète agissant “sans interruption”. La tâche de la physique mathématique est loin d’être accomplie, il manque, à strictement parler, une analyse du continu dégagée des intuitions géométriques.

## II. Le “commencement” leibnizien

Alors qu’il ne développera son calcul différentiel et intégral qu’en 1676, Leibniz rédige en 1670 une *Théorie du mouvement abstrait* (*theoria motu abstracti*) qui a essentiellement pour objet d’édifier une théorie a priori ou purement rationnelle du mouvement. Ce travail s’inspire de certains résultats mathématiques de Bonaventura Cavalieri exposé dans son célèbre écrit intitulé *Geometria indivisibilibus* publié à Bologne en 1635.

Dans sa *Théorie du mouvement abstrait* Leibniz considère que le mouvement est un continu, c’est-à-dire qu’il est “nullement entrecoupé de petits repos”, comme cela était parfois envisagé par les atomistes. Donc, en tant qu’il est continu, le mouvement, comme c’est d’ailleurs le propre du tout continu suivant Leibniz est, non seulement divisible à l’infini mais effectivement divisé, en ce sens qu’“il y a des parties données en acte dans le continu” et que “celles-ci sont infinies en acte”. Cependant “il n’y a pas de minimum dans l’espace ou le temps”, car un tel minimum “implique contradiction”. En effet, dans ce cas, il y aurait autant de minima dans le tout que dans la partie puisque toute partie de même espèce que le tout est encore infiniment divisible. Leibniz échappe à cette contradiction en s’appuyant sur son interprétation de la méthode cavalierienne, méthode qu’il est conduit à envisager, plus préoccupé qu’il est ici sans doute par l’analyse du mouvement et des trajectoires que par les pures questions de

---

26 “Et par conséquent ces dernières figures (quant à leurs périmètres acE) ne sont pas rectilignes, mais les limites curvilignes des figures rectilignes” (*Ibidem*).



géométrie, sous l'angle de la composition du continu. Il introduit donc son concept d'indivisible: "Des indivisibles ou inétendus sont donnés, sans quoi ni le commencement, ni la fin du mouvement et du corps ne sont concevables" Que dire, en effet, comme on l'a vu précédemment, du "commencement" que ce soit celui d'un corps, d'un espace, d'une durée ou d'un mouvement sans retomber dans les paradoxes de Zénon?<sup>27</sup>

Pour Leibniz un tel commencement appartient à l'espace, au temps, au mouvement sans pour autant être lui-même divisible. Comme on l'a vu la notion d'un commencement divisible est contradictoire. Il y a donc des indivisibles, constitutifs de l'espace, du temps et du mouvement, et cependant hétérogènes à ce qu'ils constituent. Ce faisant, Leibniz introduit alors des êtres mathématiques pour le moins surprenant que sont "le commencement du corps, de l'espace, du mouvement, du temps (à savoir le point, l'effort, l'instant)" C'est à Thomas Hobbes (1588-1679) que Leibniz emprunte en le transformant le concept d'effort pour en faire son indivisible de mouvement: "L'effort est au mouvement ce que le point est à l'espace, soit comme l'unité à l'infini, il est en effet le commencement et la fin du mouvement" Il existe donc un indivisible de mouvement, "l'effort", qui, d'un certain point de vue, bloque la régression à l'infini qui interdisait de penser le commencement ou la fin du mouvement.<sup>28</sup>

Les tentatives pour penser mathématiquement l'engendrement du mouvement font immédiatement surgir l'infini ; penser la continuité du mouvement, son commencement ou sa fin c'est faire entrer l'infini dans le monde, en affirmant la présence. Dans cette perspective le projet de géométrisation retrouve, comme une conséquence inévitable et, non plus, sur le mode de la décision péremptoire, les thèses de Giordano Bruno présentées en particulier dans *De l'Infinito, universo e mondi* publié à Londres en 1584: "S'il est une raison pour qu'existe un monde bon et fini, un monde parfait et terminé, il est incomparablement plus raisonnable d'admettre l'existence d'un monde bon et infini. Par ce que là où le fini est un bien par convenance et raison, l'infini l'est par absolu nécessité."

<sup>27</sup> Leibniz, G.W., *Sämtliche Schriften und Briefe*, Berlin, Akademer Verlag, 1966, VI, II . p. 262 et ss.; voir également *Leibnizens mathematische Schriften*, Hrg; von CI Gerhardt, Bd 1-7, Berlin, Halle, 1849-1863, rééd. Hildesheim, 1960-1961 VI, p. 17-80.

<sup>28</sup> *Ibidem*, p. 68.



# Kant et la “cosmogonie” du *Beweisgrund* de 1763: une nouvelle version de la *Théorie du ciel*?

Jean Seidengart\*

**Résumé:** L’objectif de cet article est d’analyser et de comparer les différences significatives qui séparent la version abrégée de l’hypothèse cosmogonique de Kant qui figure dans le *Beweisgrund* de 1763 par rapport à celle que donnait l’édition complète de la *Théorie du ciel* de 1755. Une des principales différences entre ces deux exposés consiste dans le fait que Kant supprima dans la version de 1763 toute trace de son infinitisme cosmologique qui occupait pourtant une place éminente dans le texte de 1755. C’est le sens et les raisons de ce profond remaniement que cet article s’efforce de déterminer.

**Abstract:** Here, the point is to analyse and to compare the main differences between the abbreviated version of Kant’s cosmological hypothesis presented in *The Only Possible Basis of Proof* (1763) and the original one published in his *Universal Natural History and Theory of the Heavens* (1755). One of the most important differences between them is the fact that Kant withdrew, in 1763, all the statements concerning his cosmological infinitism, whereas in 1755 it was the chief feature of his cosmogony. This article wants to clear up the philosophical meaning and the reasons of this notable recasting.

KANT EST RESTÉ très attaché toute sa vie durant à l’hypothèse cosmologique qu’il publia en 1755 dans sa *Théorie du ciel*, ouvrage qui parut cependant sans nom d’auteur. Le faible impact que connut ce texte à l’époque, pour des raisons tout à fait externes, décida Kant, huit ans plus tard, à en revendiquer la paternité, et à annoncer au début du *Beweisgrund* de 1763, non sans quelques réserves, qu’il allait reprendre de façon abrégée sa cosmologie de jeunesse. L’objet de la présente communication est précisément d’analyser et de comparer ces différences significatives qui séparent la version abrégée de l’édition complète de la *Théorie du ciel*.

Dans un premier temps, nous éluciderons le sens de ce retour de l’hypothèse cosmologique et son nouveau statut au sein du *Beweisgrund*. Ensuite, nous procéderons à une confrontation des deux versions de sa cosmologie afin d’en relever les principaux remaniements dans le texte de 1763. Enfin, dans un der-

---

\* Professeur, Université de Reims, jean.seidengart@univ-reims.fr.

nier temps, nous dégagerons les raisons qui poussèrent le Kant du *Beweisgrund* à supprimer toute trace de *son infinitisme* cosmologique qu'il avait pourtant mis au tout premier plan dans le texte de 1755.

## I. Le retour de l'hypothèse cosmologique dans le *Beweisgrund* et son nouveau statut

### I.1. Kant revendique la paternité et la priorité de sa *Théorie du ciel*

Comme on le sait, la *Théorie du ciel* de Kant avait été publiée sans nom d'auteur et sa parution était passée presque inaperçue en 1755 en raison de sa très faible diffusion, car son éditeur Johann Friedrich Petersen fit faillite et tout son stock d'exemplaires fut mis sous scellées. Dans son livre de 1763 sur *L'unique fondement possible d'une démonstration de l'existence de Dieu*, Kant dut revenir sur le statut de la physico-théologie et profita de cette occasion pour présenter au public une nouvelle fois, mais sous une autre forme très abrégée, son hypothèse cosmogonique. C'est d'ailleurs dès *L'Avant-propos* du *Beweisgrund* que Kant précise en note et avoue expressément qu'il est l'auteur d'un livre dont "Le titre est *Histoire générale de la nature et théorie du ciel*"<sup>1</sup> L'on sent une certaine amertume dans le ton de Kant qui déplore que la *Théorie du ciel* soit un écrit "peu connu"<sup>2</sup> contrairement aux *Lettres cosmologiques de Lambert*<sup>3</sup> dont il admire tant l'auteur manifestement. Kant fait remarquer au passage que sa *Théorie du ciel* avait vu le jour 6 ans avant l'hypothèse de Lambert, mais que, malgré sa priorité chronologique, il existe une profonde conformité entre ces deux cosmologies<sup>4</sup>

Or, il se trouve que le wolffien Sulzer, secrétaire de la classe de philosophie de l'Académie de Berlin, montra l'*Unique fondement* de Kant en 1764 à Lambert. Un an plus tard, Lambert, qui avait été touché par la note de Kant qui mentionne ses *Lettres cosmologiques* dans son *Avant-propos*, lui écrit:

1 Kant, *L'Unique fondement possible...*, 1763, AK II, p. 68; tr. fr. Zac, Paris, Pléiade, T. I, p. 321, note de l'auteur.

2 *Ibidem*.

3 J. H. Lambert, *Cosmologische Briefe über die Einrichtung des Weltbaues*, Augsburg, 1761, bey Eberhart Kletts Wittib.

4 Cf. Kant, *L'Unique fondement possible...*, 1763, AK II, p. 69; tr. fr. Zac, Paris, Pléiade, T. I, p. 322, note de l'auteur: "la conformité entre les pensées de cet homme ingénieux avec celles que j'ai exposées alors, s'accordant presque jusqu'aux moindres traits, renforce mon opinion que dans l'avenir cette hypothèse recevra des confirmations plus nombreuses"

“Je puis vous assurer, cher Monsieur, que je n’~~est~~ suis pas encore revenu de la mention que vous faites de ma cosmologie dans la préface à votre *Unique fondement...* Ce qui est dit dans les *Lettres cosmologiques* [...] est à dater de 1749. [...] Je couchai sur une feuille l’idée que j’eus alors de considérer la Voie lactée comme un écliptique des étoiles fixes, et c’est tout ce que, j’avais produit en 1760 lorsque j’écrivis les *Lettres...*”<sup>5</sup>

Sans tomber dans une querelle de priorité, finalement assez stérile, Lambert tient seulement à rétablir ses droits en cette matière et à préciser que ses vues concordent avec celles de Kant sans avoir été pour autant inspirées par la lecture de la *Théorie du ciel*. De son côté, Kant semble se réjouir à cette époque de cette profonde convergence de ses propres hypothèses cosmologiques avec celles de Lambert, qu’il n’hésite pas à désigner comme “le premier génie de l’Allemagne”<sup>6</sup> Toutefois, il faut signaler que lorsque Kant aura connu la gloire ainsi qu’une très grande célébrité après la publication de sa trilogie critique, il continuera toujours de revendiquer la priorité de ses vues cosmologiques sur celles de Lambert, mais il affirmera toutefois qu’une profonde divergence les sépare totalement. C’est ce que montre clairement la lettre de Kant à son ami mathématicien Johann Friedrich Gensichen du 19 Avril 1791:

“Afin d’accorder le crédit qui revient en propre à chacun de ceux qui ont contribué à l’histoire de l’astronomie, je souhaite que vous ajoutiez un appendice à votre ouvrage<sup>7</sup> pour expliquer combien mes modestes conjectures personnelles diffèrent de celles des théoriciens ultérieurs.

1) La conception de la Voie lactée comme système de soleils en mouvement analogue à notre système planétaire, je l’ai exposée six ans avant que Lambert ne publie une théorie similaire dans ses *Lettres cosmologiques*;

5 Lettre de Lambert à Kant du 15 novembre 1765, AK X, 50-51; Trad. fr. in Correspondance par I. Kant, Paris, Gallimard, 1991, p. 42-3.

6 Cf. lettre de Kant à Lambert du 31 décembre 1765, AK X, p. 54, Trad. in Pléiade, T. I, p. 595: “Je vous tiens pour le premier génie de l’Allemagne”.

7 Cet ouvrage rassemblait des écrits de Herschel et de Kant, à savoir: W. Herschel, *Sur la Constitution du ciel*, trois mémoires traduits par G. M. Sommer, avec un précis authentique de l’*Histoire générale de la nature et Théorie du Ciel* de Kant, Königsberg, chez F. R. Nicolovius, 1791. Le texte de Kant figure de la p. 163 à 200.

2) L'idée que les nébuleuses sont comparables à des Voies lactées lointaines n'a pas été hasardée par Lambert (quoique Erxleben le soutienne dans ses *Anfangsgründe der Naturlehre* page 540, même dans sa nouvelle édition), puisqu'il les prenait pour des corps obscurs (au moins l'une d'entre elles), éclairés par des soleils voisins."<sup>8</sup>

Au lendemain de la publication de sa troisième *Critique*, Kant n'avait plus besoin de rechercher la caution scientifique de Lambert. Il convient donc de rester prudent au sujet des rapports entre Kant et Lambert en matière de cosmologie.

### I.2. La place de l'hypothèse cosmogonique dans 1' *Unique fondement*

Certes, il est vrai que Kant accorde à la preuve *a priori*, c'est-à-dire ici sa preuve ontologique inversée, une prééminence indiscutable sur la preuve *a posteriori*, c'est-à-dire sur la preuve physico-théologique. Toutefois, Kant reconnaît expressément que la preuve ontothéologique inversée présente un caractère abstrait qui est rebutant pour la raison commune, tandis que la preuve *a posteriori* de la physico-théologie traditionnelle offre trois avantages particulièrement remarquables que n'a pas la première:

“la conviction qu'elle fait naître est extrêmement vive et attrayante et, par conséquent, facilement saisissable pour l'entendement commun, [...] elle est plus spontanée qu'aucune autre, attendu que c'est indubitablement par elle que tout le monde

---

8 Lettre de Kant à Johann Friedrich Gensichen du 19 Avril 1791, in AK, XI, p. 252-253; et les *Kant-Studien*, II, 1897, p. 104 et ss. C'est nous qui traduisons. On trouve des précisions similaires dans la lettre de Kant à l'astronome J. E. Bode du 2 septembre 1790, AK XI, 203-4; trad. fr. in *Correspondance*, Paris, Gallimard, 1991, p. 431: “M. Herschel a découvert pour l'anneau de une rotation axiale de 10 h. 22' 15" et ce à partir de la particule la plus proche du bord interne de cet anneau, cela pourrait venir confirmer ce que je supposais, il y a 35 ans, dans mon *Histoire générale de la nature et Théorie du ciel*. [...] La façon dont Monsieur Herschel représente les nébuleuses, c'est-à-dire comme un système en soi lui-même compris dans un système s'accorde à souhait avec ma façon de les exposer jadis in *op. cit.*, p. 14-5; ce doit être un trou de mémoire de M. Erxleben que d'attribuer, dans sa physique, cette pensée à M. Lambert qui serait le premier à l'avoir eue, alors que ses *Lettres cosmologiques* sont parues 6 ans après mes écrits, et que je ne parviens même pas, malgré toutes mes recherches, à y trouver ce type de représentation”

commence; [...] elle procure une conception très intuitive de la sagesse suprême [...] qui, en remplissant l'âme, est éminemment propre à inspirer l'admiration, l'humilité et le respect."<sup>9</sup>

Malheureusement, malgré tous ses avantages, la preuve physico-théologique *a posteriori* ne peut atteindre à une *certitude mathématique*, mais seulement à une *certitude morale*, c'est-à-dire une certitude qui suffit pour la conduite de la vie. Cependant, il est des cas où la certitude morale ne suffit pas, c'est lorsqu'il s'agit de "vaincre le scepticisme, [...] le plus éhonté"<sup>10</sup>. Maintenant, la question se pose de savoir pourquoi Kant éprouve le besoin de consacrer de très longs développements à la preuve physico-théologique si elle est *philosophiquement* inférieure à la preuve *a priori* et finalement insuffisante en elle-même?

La réponse est double: à savoir, d'une part, que les défauts de preuve physico-théologique traditionnelle peuvent être *rectifiés, corrigés* à partir d'une nouvelle "physicothéologie perfectionnée" et, d'autre part, que cette dernière peut servir de "complément" à la preuve *a priori*. Nous allons donc voir que la totalité de la deuxième des trois parties que comporte *l'Unique fondement*, est destinée à justifier et à établir la légitimité de l'hypothèse cosmogonique tirée de la *Théorie du ciel* dans la mesure où elle seule peut fournir une nouvelle forme, renouvelée et perfectionnée, de la physico-théologie qui est conforme désormais à <l'esprit de la vraie philosophie"<sup>11</sup>.

Tout d'abord, Kant définit la physico-théologie en général comme un procédé <Art>, comme une méthode <Méthode> qui "remonte de la considération de la nature à la connaissance de Dieu"<sup>12</sup>. Plus précisément, cette considération de la nature recherche avant tout dans *l'expérience* des marques distinctives de régularité, de perfection, d'harmonie et de convenance dans l'ordre de la nature. Or, il existe trois manières d'envisager le statut de cet ordre naturel: la première fait sans cesse appel au *miracle*, mais elle a l'inconvénient d'"interrompre

9 Kant, *L'Unique fondement possible...*, 1763, AK II, p. 117; trad. fr. Pléiade, T. I, p. 381. Kant précise à la fin de son livre, IIIe. Partie, IV, AK II 161; trad. fr., p. 434: "Eu égard à l'utilité, cette preuve [physico-théologique] est préférable à toute autre preuve visant à plus de rigueur, et même à la mienne. [...] Des preuves de ce genre ont une réelle efficacité, et laissent une place plus grande à la faculté intuitive".

10 *Op. cit.*, IIIe. Partie, IV, AK II 160; trad. fr., p. 433.

11 Kant, *L'Unique fondement possible...*, 1763, Iie. Partie, Vie. Considération, AK II, p. 136; trad. fr., Pléiade, T. I, p. 404.

12 *Op. cit.*, Iie. Partie, Ve. Considération, AK II, p. 117; trad. fr., Pléiade, T. I, p. 380.

à tout moment l'ordre de la nature"<sup>13</sup>; la seconde manière (d'allure wolffienne) fait ressortir le caractère *contingent* de l'ordre naturel pour conduire à Dieu, l'Être nécessaire. Enfin, la troisième manière indique 1<sup>re</sup> "unité nécessaire perceptible dans la nature et l'ordre des choses [...] qui nous conduit à un principe suprême non seulement de cette existence, mais même de toute possibilité"<sup>14</sup> Kant considère que la première manière est le propre des hommes à l'état sauvage, tandis que la seconde, qui est propre à toute âme bien née et civilisée, est conforme au bon sens et suffit à la vie vertueuse<sup>15</sup> Seule la troisième manière relève de la philosophie proprement dite, c'est celle qu'il désigne comme la "méthode perfectionnée de la physico-théologie"<sup>16</sup> tandis que la seconde était plutôt celle de "la physico-théologie ordinaire"<sup>17</sup> Par conséquent, Kant ne veut pas rejeter la physico-théologie, mais seulement écarter ses deux premières formes qui stérilisent la réflexion ainsi que toute recherche, car elles rattachent toute perfection naturelle à un dessein contingent et particulier de la volonté divine. Bien au contraire conclut Kant:

"Il est louable d'appliquer ses efforts à améliorer cette méthode plutôt qu'à la combattre, à corriger ses défauts plutôt qu'à la mépriser à cause d'eux."<sup>18</sup>

Kant doit encore fixer les nouvelles règles de la méthode de cette physico-théologie perfectionnée, avant d'exposer les vues de son hypothèse cosmogonique.

### I.3. La Physico-théologie perfectionnée du *Beweisgrund*:

Le newtonianisme de Kant a été profondément marqué par la signification toute particulière que Pierre Louis Moreau de Maupertuis lui a conférée, comme nous le verrons plus loin. En effet, Newton lui-même reconnaît à maintes reprises qu'il est nécessaire de faire appel aux causes finales et à l'intervention directe de Dieu en matière de cosmologie. Ainsi, Newton rappelle avec fer-

---

13 *Ibidem*, p. 116.

14 *Ibidem*.

15 *Ibidem*.

16 *Op. cit.*, IIe. Partie, VIe. Considération, AK II, p. 123; trad. fr., Pléiade, T. I, p. 388.

17 *Op. cit.*, IIe. Partie, Ve. Considération, AK II, p. 117; trad. fr., Pléiade, T. I, p. 381.

18 *Op. cit.*, IIe. Partie, Ve. Considération, AK II, p. 123; trad. fr., Pléiade, T. I, p. 388.



meté dans une lettre à Bentley que le système du Monde ne peut en aucune façon se passer de l'intervention divine:

“L’hypothèse qui dérive l’ordre du monde de l’action de principes mécaniques sur une matière répandue de façon égale à travers les cieux est incompatible avec mon système.”<sup>19</sup>

Pourtant, c’est précisément contre ce point de vue que s’élève Kant, car il risque de donner libre cours à l’imagination la plus fantaisiste des causes finales:

“La célèbre théorie de Newton ne doit pas servir de prétexte à une confiance paresseuse, ni amener à prendre pour une explication conçue dans un esprit philosophique un recours précipité à une disposition directe de Dieu. [...] On s’expose encore au préjudice consistant à laisser de côté les causes efficientes, et à passer directement à une cause finale purement imaginaire.”<sup>20</sup>

Bref, Kant reproche à Newton d’avoir suivi la voie de la physico-théologie *ordinaire* qui considère que tout ordre, toute perfection ou toute harmonie sont purement *contingents* dans la nature. Ce qui reviendrait à dire que c’est seulement en *violentant* la nature que Dieu la conduit à produire les effets particuliers qu’il veut y réaliser, comme prétendaient le montrer aussi Burnet<sup>21</sup>, W. Derham<sup>22</sup> et W. Whiston<sup>23</sup>. Outre la stérilité intellectuelle de cette “physico-théologie ordinaire” qui rend vaine toute recherche scientifique pour tenter d’expliquer les phénomènes naturels, elle finit par conduire à ce que Kant appelle un “athéisme raffiné”, puisqu’elle conduit non pas à un *Dieu créateur* tirant la matière du néant, mais à un “artisan qui l’ordonne et la façonne”<sup>24</sup>. D’ailleurs, la

19 Newton, Lettre à Bentley du 11 février 1693, in Newton’s *Correspondance*, III, p. 244.

20 *Op. cit.*, IIe. Partie, Ve. Considération, AK II, p. 121-2; trad. fr., Pléiade, T. I, p. 386-7.

21 Burnet, *Telluris theoria sacra*, 1681; Kant le critique in *L’Unique fondement possible...*, 1763, IIe. Partie, Vie. Considération, AK II, p. 127; trad. fr., Pléiade, T. I, p. 393.

22 William Derham, *Physico-Theology*, London, 1713, Rotterdam 1726, tr. fr. J. Lufnen, Paris, 1730; *Astrotheology*, London, 1714, trad. fr., Bellanger, Paris, 1729; trad. allemande Fabricius, Hambourg, 1728.

23 William Whiston, *Astronomical Principles of Religion*, London, 1726. Kant critique Whiston dans une note, cf. *op. cit.*, IIe. Partie, Ve. Considération, AK II, p. 120-121; trad. fr., Pléiade, T. I, p. 385.

24 *Op. cit.*, IIe. Partie, Ve. Considération, AK II, p. 122-3; trad. fr., Pléiade, T. I, p. 388.

physico-théologie ordinaire mérite, à juste titre selon Kant, les railleries de Voltaire dont il cite l'échantillon suivant: "Voyez bien, si nous avons un nez, c'est assurément pour y pouvoir poser des besicles"<sup>25</sup>

Certes, toute forme de physico-théologie, quelle qu'elle soit, admet qu'il existe une *dépendance* <Abhängigkeit> des choses de la nature envers Dieu. Or, cette *dépendance* peut être soit une connexion *contingente*, soit une connexion *nécessaire*. Certains philosophes anciens comme Aristote avaient déjà admis qu'il existe une dépendance entre le Monde et Dieu, mais Kant insiste sur le fait que c'est à la suite des enseignements de la Révélation que cette dépendance a été spécifiée par l'idée biblique de *création*<sup>26</sup>. Celle-ci implique la position absolue de la chose à la fois dans son *essence* et dans son *existence*, dans sa forme et dans sa matière, tandis que la physico-théologie ordinaire considère Dieu comme l'artisan qui façonne l'ordre du Monde par un décret libre et *contingent* de sa volonté toute-puissante. Il faudra donc que la physico-théologie perfectionnée <verbesserte> puisse conduire à l'existence d'un Dieu *créateur*.

Toute l'originalité de la physico-théologie perfectionnée <verbesserte> du *Beweisgrund* consiste précisément à montrer que l'ordre de la nature possède une *unité nécessaire* qui seule permet de remonter à l'existence d'un Dieu Créateur. Or, c'est la cosmologie, et mieux encore la *cosmogonie*, qui permet à Kant de faire ressortir cette *unité nécessaire*. Est-ce à dire que tout soit absolument nécessaire dans l'ordre du monde?

Tout d'abord, Kant admet que *l'existence* même des choses naturelles demeure toujours *contingente*. Il admet aussi que de très nombreuses connexions soumises à des lois différentes à l'intérieur d'un même être relèvent d'une *unité contingente* et particulière, bien que nous ignorions ce qui assure l'unité interne des êtres vivants. En revanche, lorsque c'est un même principe qui commande la conformité de différentes choses à des lois qui impliquent à leur tour l'intervention d'autres lois, il règne une *unité nécessaire*. Kant allègue à titre d'exemple, pour illustrer son propos, le cas du "règne végétal" et du "règne animal" qui comportent une *unité contingente* remarquablement sage, mais tout de même *con-*

25 *Op. cit.*, IIe. Partie, VIe. Considération, AK II, p. 131; trad. fr., Pléiade, T. I, p. 398. Cette citation de Voltaire est tirée de son *Dictionnaire philosophique*, à l'article: "Fin, causes finales"

26 *Op. cit.*, IIe. Partie, VIe. Considération, AK II, p. 124; trad. fr., Pléiade, T. I, p. 390. "C'est peut-être seulement depuis que la Révélation a enseigné le principe de la dépendance complète du monde à l'égard de Dieu que la philosophie a commencé à faire l'effort nécessaire pour poser le problème de l'origine des choses elles-mêmes, c'est-à-dire de l'existence de la matière brute de la nature, et pour montrer qu'elle est impossible sans un Créateur"

*tingente*, car elle est arbitraire. C'est plutôt entre les lois universelles de la "nature inorganique" que l'on découvre une *unité nécessaire*:

"[...] Ce ne sont pas des causes différentes qui font que la Terre est ronde, que les corps terrestres résistent à la force centrifuge, que la Lune est maintenue sur son orbite. La seule pesanteur est la cause suffisante de la production de ces effets. [...] La nature inorganique apporte [...] des preuves innombrables en faveur d'une unité nécessaire, résultant de la convenance de nombreux effets à un principe simple."<sup>27</sup>

Sur ce point, il faut remarquer que Kant suit de très près les vues que Maupertuis avait développées dans son *Essai de Cosmologie* de 1750 et dont une traduction allemande vit le jour un an plus tard<sup>28</sup>. Tout comme lui, Kant critique et rejette les physicothéologies ordinaires qui voient dans chaque effet naturel le résultat d'un miracle indispensable pour réaliser les desseins de la Providence divine. Tout comme lui aussi, Kant propose de promouvoir une physicothéologie rénovée qui intègre les résultats les plus récents des sciences de la nature<sup>29</sup>. Enfin et surtout, Kant pense pouvoir s'appuyer sur un principe général qui *unifie* les diverses lois du mouvement<sup>30</sup>: le principe de la *moindre action* de Maupertuis, qui ser d'*unité nécessaire aux* lois du mouvement:

"M. de Maupertuis a démontré que même les lois les plus générales [...] obéissent toutes à une règle dominante d'après laquelle est observée, dans l'action, la plus grande économie. Par cette découverte, les effets de la matière, en dépit des grandes diversités qu'ils peuvent présenter entre eux, sont ramenés à une

27 *Op. cit.*, IIe. Partie, IIIe. Considération, AK II, p. 106-7; trad. fr., Pléiade, T. I, p. 368-9.

28 Maupertuis, *Essai de Cosmologie*, 1ère. éd. française, Berlin, 1750; trad. allemande, *Versuch einer Cosmologie*, Berlin, 1751.

29 De même, Maupertuis remarquait dans son *Essai de Cosmologie*, éd. fr. de 1751, *Avant-Propos*, p. 55: "Ce n'est donc point dans les petits détails, dans ces parties de l'Univers dont nous connoissons trop peu les rapports, qu'il faut chercher l'Être suprême: c'est dans les phénomènes dont l'universalité ne souffre aucune exception, & que leur simplicité expose entièrement à notre vûe"

30 Maupertuis écrivait dans l'*Essai de Cosmologie*, éd. fr. de 1751, *Avertissement*, p. xix: "J'ai découvert un principe métaphysique sur lequel toutes les lois du mouvement et du repos sont fondées. J'ai fait voir la conformité de ce principe avec la puissance & la sagesse du créateur & de l'ordonnateur des choses"

formule générale qui exprime une aptitude à la convenance <Anständigkeit>, à la beauté et à l'harmonie <Wohlgereimtheit> [...] C'est avec raison qu'il a cru que [...] un accord si universel dans les natures les plus simples des choses met à notre disposition une raison suffisante pour trouver avec certitude, dans quelque Être originaire et parfait la dernière cause de tout dans l'univers.<sup>31</sup>

L'avantage énorme que présente le principe maupertuisien de la moindre action, c'est non seulement qu'il ramène la diversité des lois du mouvement à l'unité d'un principe, mais aussi qu'il permet de réconcilier le *mécanisme* avec la *finalité*: tel est bien le sens de ce que Kant entend sous le terme de *convenance*<sup>32</sup> <Anständigkeit> selon lequel les effets ne sont pas seulement des résultats, mais aussi des fins. Ainsi, Kant pense pouvoir tirer la physico-théologie de l'impasse dans laquelle Newton l'avait entraînée lorsqu'il s'était penché sur le problème cosmologique. Au lieu de recourir, comme Newton, à la théologie et aux causes finales pour rendre raison de la stabilité et de l'ordre cosmique, Kant prend appui sur l'*unité* et la *convenance* des lois universelles pour montrer qu'entre le *fiat* créateur de Dieu et l'ordre cosmique que découvre l'astronomie, "les lois mécaniques ont une prédisposition à l'ordre"<sup>33</sup> qui a dû permettre d'organiser l'état originellement chaotique de la matière. Kant pense avoir ainsi épuré la physico-théologie des scories d'un finalisme incontrôlé et avoir donc permis au newtonianisme de réintégrer le problème cosmologique dans le cadre de la mécanique rationnelle:

"Si [Newton] avait pu former une hypothèse bien fondée sur la constitution primitive de la matière, on peut même être certain qu'il eût cherché, selon le procédé requis par la philosophie, les principes de la constitution de l'univers <die Gründe von der Beschaffenheit des Weltbaues> dans les lois générales de la mécanique, sans craindre pour cela que cette explication de l'ori-

31 *Op. cit.*, IIe. Partie, Ie. Considération, AK II, p. 98-99; trad. fr., Pléiade, T. I, p. 357-8.

32 On lit également dans l'*Essai de Cosmologie* de Maupertuis, éd. fr. de 1751, *Avertissement*, p. xvii: "C'est ainsi que malgré quelques parties de l'univers dans lesquelles on n'aperçoit pas bien l'ordre et la convenance, le tout en présente assez pour qu'on ne puisse douter de l'existence d'un Créateur tout-puissant & tout sage"

33 *Op. cit.*, IIe. Partie, VIe. Considération, AK II, p. 130; trad. fr., Pléiade, T. I, p. 396.

gine du monde fasse passer la création des mains de Dieu à la puissance du hasard.”<sup>34</sup>

Bref, le jeune Kant du *Beweisgrund* pense avoir engagé la cosmologie dans la voie sûre de la science newtonienne. Examinons quels sont les traits saillants de son hypothèse cosmogonique qui ne se présente plus sous le titre arrogant de *Théorie du ciel*.

## II. Les remaniements de l'hypothèse cosmologique de 1755 dans le *Beweisgrund*

Le titre de la VIIe. *Considération* est: *Cosmogonie*. Il ne fait que reprendre le titre que le jeune Kant avait voulu donner originellement à sa *Théorie du ciel* lors de l'annonce de sa parution dès 1754 dans un petit Mémoire destiné à l'Académie des Sciences de Berlin. Le parallèle est frappant:

1754  
Kosmogonie, oder Versuch, den  
Ursprung des Weltgebäudes, die Bil-  
der Himmelskörper und die Ur-  
sachen ihrer Bewegung aus den all-  
gemeinen Bewegungsgesetzen der  
*Materie der Theorie des Newtons*  
*gemäß her zu leiten*<sup>36</sup>.

1763  
Kosmogonie  
Eine Hypothese mecanischer Er-  
dungsklärungsart des Ursprungs der Wel-  
tkörper und der Ursachen ihrer Be-  
wegungen, gemäß denen vorher er-  
wiesenen Regeln<sup>35</sup>.

On notera au passage à quel point Kant tient à ses recherches cosmologiques antérieures, puisque près de dix années n'ont rien changé à sa détermination intellectuelle.

La petite introduction qui précède l'hypothèse et qui lui sert d'avertissement, expose les données du problème. Celui-ci consiste à expliquer la formation des corps célestes ainsi que leurs mouvements à l'aide de la force fonda-

34 *Op. cit.*, IIe. Partie, Ve. Considération, AK II, p. 121; trad. fr., Pléiade, T. I, p. 386.

35 *Op. cit.*, IIe. Partie, VIIe. Considération, AK II, p. 137; trad. fr., Pléiade, T. I, p. 405.

36 Le titre de ce petit Mémoire de 1754 était: *Recherches sur la question: la Terre a-t-elle subi quelques modifications dans son mouvement de rotation axiale depuis son origine?*, cf. AK I, p. 190-1.

mentale <eine Grundkraft der Materie> d'attraction dont on ne peut ni ne doit expliquer l'existence puisqu'elle est originellement constitutive de la matière. Sur ce point, Kant se montre infidèle à la pensée de Newton qui avait toujours refusé, pour sa part, de considérer l'attraction comme une force essentielle aux corps<sup>37</sup> Il reste donc à rendre compte d'une part du "mouvement d'impulsion" <Wurfsbewegung, Schwung> et d'autre part de sa "direction" <Richtung> qui s'ajoutent aux effets de l'attraction dans la constitution du système du monde. Face au préjugé qui objecterait qu'il est téméraire d'essayer d'expliquer l'origine du système du monde alors que l'on est incapable d'expliquer "un vulgaire brin d'herbe", Kant répond par le fait du succès incontestable de la mécanique dans le monde inorganique explicable en raison de sa grande simplicité, tandis que l'incroyable et admirable complexité du monde organique le rend pour l'époque inaccessible.

Le plan de la *Cosmogonie* de 1763 est identique à celui de la *Théorie du ciel*, à cette seule différence près que les considérations sur les habitants des planètes (qui figuraient à la IIIe. Partie du livre de 1755) ont été purement et simplement supprimées. En fait, dans une première section, Kant examine l'actuelle structure d'ensemble de l'univers, en développant sa théorie de la Voie lactée et des "Univers-îles"; puis, dans les trois autres sections, il esquisse la formation mécanique de tout système planétaire, avant de proposer une nouvelle estimation de la durée de la rotation axiale de Saturne.

## II.1. L'actuelle structure d'ensemble de l'Univers

Kant n'a rien changé dans son hypothèse, si ce n'est la forme de son exposé qui est plus pure et totalement dépourvue de digression sur les autres hypothèses en vigueur. Kant suit le fil de l'analogie en partant du système solaire et en s'élevant successivement à la Voie lactée (qui est un système de systèmes solaires), puis aux autres voies lactées que doivent être les nébuleuses récemment observées depuis un siècle (mais dont il affirme sans preuve la situation extragalactique), et il arrive enfin aux éventuels amas galactiques qui sont des systèmes d'ordre 3, tout en laissant ouverte la question de savoir s'il existe

---

37 Isaac Newton, *Principia mathematica Philosophiae Naturalis*, Livre III, *Regulae philosophandi*, trad. fr. de la Marquise du Chatêlet, 1759, réed. Blanchard, 1966, T. 2, p. 4: "Cependant, je n'affirme point que la gravité soit essentielle aux corps. Et je n'entends par la force qui réside dans le corps, que la seule force d'inertie, laquelle est immuable; au lieu que la gravité diminue lorsqu'on s'éloigne de la Terre".

encore des systèmes supérieurs. Tous ces ordres, tous ces systèmes sont régis par les mêmes lois et c'est la raison pour laquelle ils doivent présenter la même structure à des échelles différentes:

“Cette analogie fournit ici une raison sérieuse de supposer: [...] que les soleils, au nombre desquels figure le nôtre, constituent un système du monde réglé selon des lois semblables à celles de notre système planétaire, en petit.”<sup>38</sup>

Kant sait pertinemment que sa conception n'est pas communément reçue dans le monde savant, mais, en nous renvoyant au catalogue d'opinions que Maupertuis dresse à ce sujet dans son *Discours sur les différentes figures des astres*<sup>39</sup> il montre bien qu'il n'en a cure. Ce qui est nouveau, dans la version de 1763, c'est que Kant n'affirme plus que cet emboîtement de systèmes de plus en plus vastes s'étend à l'infini. Il ne soulève même plus la question<sup>40</sup> Nous aurons l'occasion d'y revenir. Toutefois, étant donné que cette théorie des “univers-îles” est purement conjecturale, Kant encourage les recherches observationnelles sur les “nébuleuses” pour mettre à l'épreuve son hypothèse dans un avenir assez proche.

## II.2. La formation mécanique du système planétaire

Avant d'exposer directement son hypothèse cosmogonique, Kant éprouve le besoin de plaider en faveur d'une explication d'ordre mécanique, sans

38 *Op. cit.*, IIe. Partie, VIIe. Considération, AK II, p. 140; trad. fr., Pléiade, T. I, p. 409.

39 *Op. cit.*, IIe. Partie, VIIe. Considération, AK II, p. 141; trad. fr., Pléiade, T. I, p. 410: “L'astronomie nous a découvert depuis longtemps de telles petites taches, malgré la diversité des opinions qu'on a à leur sujet, comme on peut le voir d'après les oeuvres de Maupertuis sur les figures des astres” Kant ne connaît qu'un résumé, paru dans les *Acta Eruditorum* en 1745, de l'ouvrage de Maupertuis intitulé *Discours sur les différents figures des astres* et qui avait été publié pour la première fois à Paris en 1732, la seconde édition date d 1742. Dans l'édition de 1768, Maupertuis mentionne seulement les observations et les interprétations de Huygens, Halley, W. Derham, mais il pense que sa propre interprétation est la seule qui soit juste, cf. in *Oeuvres de Maupertuis*, Lyon, 1768, réed. Olms, 1974, T. I, p. 145: “Tous ces phénomènes, dit-il, se trouvent par notre système si naturellement & si facilement expliqués, qu'il n'est presque pas besoin d'en faire l'application”

40 Comparer avec la *Théorie du ciel*, Ière partie, AK I, p. 256: Nous voyons les premiers termes d'une progression continue de mondes et de systèmes, et cette première partie d'une progression infinie <unendliche Progression> nous donne déjà à reconnaître ce qu'il faut conjecturer de l'ensemble. Cette série n'a pas de fin, elle s'enfonce dans un abîme véritablement insondable.

invoquer le recours aux causes finales comme le fit Newton. Contre la physico-théologie ordinaire qui se réfugie dans l'intervention directe de Dieu, Kant montre que si l'ordre du système solaire est mathématisable et conforme aux lois physiques générales, il n'est pas pour autant absolument parfait: il connaît des écarts <Abweichungen>, des dérèglements <Regellosigkeit> et des aberrations. Or, ces écarts vis-à-vis de la perfection <Vollkommenheit> (à savoir que les corps célestes ne sont pas des sphères parfaites, que les orbites planétaires ne sont pas parfaitement circulaires, que les plans des orbites s'écartent légèrement de celui de l'équateur solaire, pour ne rien dire des comètes), tous ces écarts prouvent donc que l'ordre cosmique n'est pas causé *directement* par Dieu, mais par l'intermédiaire des lois générales de la mécanique:

“Dans une oeuvre immédiatement divine, il ne peut jamais, au contraire, y avoir, de place pour des fins incomplètement atteintes.”<sup>41</sup>

La voie est donc libre pour exposer tout d'abord les grandes lignes de la formation du Soleil à partir de la matière primitive <aus dem Grundstoffe> qui était répandue à travers l'espace cosmique dans un état de diffusion extrême. Le jeu de la force d'attraction condense autour du point de plus forte attraction toutes les particules qui chutent sur ce qui deviendra peu à peu le Soleil, tout en vidant progressivement l'espace.

Kant pense pouvoir expliquer la rotation de ce proto-soleil par la chute des particules animées d'un mouvement tangentiel dû aux chocs entre les particules lors de leur chute convergente vers le centre de gravité du Soleil. Dans un second moment, le reste des particules, qui étaient assez éloignées du Soleil et dotées d'un mouvement circulaire suffisamment rapide pour contrebalancer les effets de son attraction, continuent d'orbiter autour du Soleil en se regroupant dans le plan de l'équateur solaire<sup>42</sup>. Peu à peu les points de plus forte attraction permettent aux proto-planètes de se former par un mouvement de condensation qui les conglobe progressivement, tout en éloignant d'autant plus du Soleil ces proto-planètes qu'elles sont moins denses.

On est frappé de voir que dans le *Beweisgrund*, tout comme dans la *Théorie du ciel*, Kant ne se donne pas la peine de chiffrer les vitesses, les distances, les masses, les densités spécifiques des corps célestes en formation, alors qu'il pré-

---

<sup>41</sup> *Op. cit.*, IIe. Partie, VIIe. Considération, AK II, p. 144; trad. fr., Pléiade, T. I, p. 413.

<sup>42</sup> *Op. cit.*, IIe. Partie, VIIe. Considération, AK II, p. 146-147; trad. fr., Pléiade, T. I, p. 417.



tend être “en mesure d’indiquer la condition qui, seule, rend possible une explication mécanique des mouvements célestes”<sup>43</sup> Kant est conscient du caractère très grossier et approximatif de son esquisse et il invite “des hommes d’esprit large à un examen plus approfondi”<sup>44</sup> Il n’exclut pas que l’on puisse même découvrir d’autres hypothèses mécaniques, mieux conçues que la sienne, car ce qui le préoccupe avant tout, c’est d’avoir établi définitivement qu’une explication mécanique de la formation de l’univers est “compatible avec la foi en un Dieu sage”<sup>45</sup>

Malgré ce dédain pour le calcul et la mesure, Kant consacre environ un quart de son exposé pour expliquer sa *méthode* de calcul de la durée de la rotation de Saturne, sans montrer pour autant ses propres calculs dont il nous confie seulement le résultat final. Malheureusement, il aboutit à un résultat différent de celui qu’il obtint en 1755: 5h. 40' en 1763 et 6h. 23' 53" en 1755.<sup>46</sup> Cette

43 *Op. cit.*, IIe. Partie, VIIe. Considération, AK II, p. 145; trad. fr., Pléiade, T. I, p. 415.

44 *Op. cit.*, IIe. Partie, VIIe. Considération, AK II, p. 148; trad. fr., Pléiade, T. I, p. 419.

45 *Ibidem.*

46 La loi sur laquelle repose ce calcul est un genre de réplique de la 3e. loi de Kepler faisant entrer en jeu l’accélération centrale du mouvement circulaire qui est en raison directe du carré de la vitesse, mais inverse de la distance au centre =  $v^2/r$ . Kant réduit cette formule à  $\frac{v}{\sqrt{r}}$ , puisqu’il écrit in

AK I, p. 294: “on peut trouver la vitesse de la rotation axiale de Saturne en la déduisant de la vitesse d’un des satellites de Saturne, [ici, le 4e. c’est-à-dire Titan découvert par Huygens en 1655] du fait qu’on trouve cette vitesse dans le rapport des racines carrées des distances au centre de la planète”. Kant établit les relations suivantes au niveau de la force centrifuge:  $\gamma = \omega^2 R$  et comme  $\omega = \frac{2\pi}{T}$  on a  $\gamma = 4\pi^2 \left(\frac{R}{T^2}\right)$  Si on néglige  $4\pi^2$ , il reste  $\left(\frac{R}{T^2}\right)$  ou  $\frac{\sqrt{R}}{T}$  Si l’on met en relation ces deux formules on obtient:  $\frac{v}{\sqrt{R}} = \frac{\sqrt{R}}{T}$  d’où l’on tire  $R = T \cdot v$  ou même

$T = \frac{R}{v}$  Il ne reste plus qu’à mettre en forme la comparaison des temps, des rayons et des vitesses respectivement du satellite Titan (paramètres connus grâce à l’observation), avec les rayons de Saturne (rayon équatorial) et du bord interne de l’anneau (connus et mesurés par Cassini et repris par Newton in *Principia*, III, p. 7 et 8 du vol. II de la traduction de la Marquise du Chatelet). Une dernière précaution d’écriture consistera à se débarrasser de la vitesse encore inconnue du bord interne de l’anneau par la relation suivante où  $v_1$  et  $\sqrt{R_1}$  désignent respectivement la vitesse et la racine du rayon du satellite, et  $v_2$  et  $\sqrt{R_2}$  celles du bord intérieur de l’anneau:  $\frac{\sqrt{R_2}}{\sqrt{R_1}} = \frac{v_1}{v_2}$ ; d’où

l’on tire  $v_2 = \frac{v_1 \cdot \sqrt{R_1}}{\sqrt{R_2}}$ . Si l’on reprend les indications de Gensichen données dans l’édition de

1791, et si l’on garde notre type de notation en ajoutant  $r$  pour désigner le rayon de Saturne et  $(T, t)$  respectivement pour le temps de révolution du satellite et pour le temps de rotation axiale de Sa-

différence est certainement due à l'adoption d'autres données astronomiques que celles qu'il trouva dans un Mémoire de Cassini daté de 1705.

Bref, quelles que soient les imperfections de l'hypothèse cosmogonique de Kant, il s'agissait pour lui de montrer que la physico-théologie ordinaire n'est pas le meilleur moyen de combattre le système d'Epicure qui prétendait (à tort) tirer l'ordre à partir de l'entrechoc fortuit des atomes, c'est-à-dire du hasard. Au contraire, c'est seulement la physico-théologie perfectionnée qui permet de comprendre que "la nature elle-même passe, par le jeu des lois générales, du chaos à la régularité <Regelmäßigkeit>"<sup>47</sup>

A la fin de cette brève étude comparée, on doit remarquer que ce qui a totalement disparu dans l'édition de 1763, c'est l'étonnante perspective infinitiste vue dès la Ie. Partie de la *Théorie du ciel*<sup>48</sup> et développée longuement dans la IIe. Partie sous le titre révélateur: "De la création dans toute l'étendue de son infinité aussi bien selon l'espace que selon le temps"<sup>49</sup> C'est le sens de cette disparition totale de l'infinitisme cosmologique, le sens de ce silence qu'il nous faut examiner à présent.

turne, on obtient:  $\frac{T}{t} = \frac{R_1}{\frac{r}{v_1}}$  d'où l'on tire:  $\frac{T}{t} = \frac{R_1 v_2}{r v_1}$  Débarrassons-nous de  $v_2$

en le remplaçant par la formule citée plus haut:  $\frac{T}{t} = \frac{R_1 \sqrt{R_1}}{r \sqrt{R_2}}$   $t = \frac{T \cdot r \sqrt{R_2}}{R_1 \sqrt{R_1}}$

Faisons entrer les données observationnelles de Cassini dans l'équation finale:  $T = 15 \text{ J} \cdot 22 \text{ h } 40' = 1.377.600''$ . Les rayons  $R_1, R_2, r$ , sont comme 72; 6,5; 4.

$$\text{Donc } t = \frac{1.3377.600 \times 4 \times \sqrt{6,5}}{72 \sqrt{72}} = \frac{14.051.520}{610} = 23.035'' \text{ soit } 6 \text{ h } 23' 55''$$

La différence de 2'' avec le résultat de Kant est due à sa façon propre d'arrondir les décimales des racines. Malgré ces considérations, il ne m'a pas été possible de découvrir les raisons de l'écart que l'on constate dans l'estimation du *Beweisgrund*. Toutefois, il semble qu'entre-temps, d'autres données observationnelles aient été prises en compte par Kant.

47 *Op. cit.*, IIe. Partie, VIIe. Considération, AK II, p. 151; trad. fr., Pléiade, T. I, p. 422.

48 Cf. par exemple, *Théorie du ciel*, Ière partie, AK I, p. 256: "Nous voyons les premiers termes d'une progression continue de mondes et de systèmes, et cette première partie d'une progression infinie <unendliche Progression> nous donne déjà à reconnaître ce qu'il faut conjecturer de l'ensemble. Cette série n'a pas de fin, elle s'enfonce dans un abîme véritablement insondable"

49 *Traité du ciel*, Iie. Partie, Chap. VII, AK I, 306: "Von der Schöpfung im ganzen Umfange ihrer Unendlichkeit sowohl dem Raume, als der Zeit nach".

### III. Le retrait de l'infinisme en cosmologie et son statut théologique

Bien que Kant reprenne, sous une forme abrégée, l'essentiel de sa *Théorie du ciel*, il est tout à fait manifeste que la différence fondamentale avec cette dernière c'est que le *Beweisgrund* ne dit plus un seul mot sur l'*infinité* de l'univers. Ce n'est qu'à la *Considération* qui fait suite à l'exposé de sa *Cosmogonie* (Huitième Considération) que Kant revient sur l'idée d'infini, et notamment sur l'infinité divine, mais c'est pour prendre ses distances avec ce terme dont il nous dit qu'en plus de ses déterminations conceptuelles propres, il possède une charge émotionnelle.

“Certes le terme infini est beau et proprement esthétique. Ce qui dépasse tous les concepts du nombre émeut et met l'âme dans un état d'étonnement, en la troublant en quelque sorte.”<sup>50</sup>

Kant se laisse pourtant aller à quelques débordements enthousiastes dans ce livre, comme dans l'extrait suivant, mais en note seulement:

“Quand j'élève mes yeux vers le haut pour regarder l'espace immense <unermelichen Raum> où pullulent des mondes comme s'ils étaient des poussières, aucune langue humaine n'est capable d'exprimer le sentiment que suscite en moi une telle pensée, et la plus subtile des analyses métaphysiques ne résiste pas à la sublimité et à la noblesse d'une pareille contemplation <Anschauung>.”<sup>51</sup>

Tout en démontrant ainsi son profond attachement à l'idée d'infini, Kant la chasse du domaine de la cosmologie et lui donne même momentanément congé dans la mesure où il considère que le terme d'“omnisuffisance <Allgenugsamkeit> de Dieu “fournit pour désigner la plus grande perfection de cet Etre un terme beaucoup plus juste que celui de l'Infini dont on se sert ordinairement”<sup>52</sup>. Kant précise que l'emploi du terme infini, qui s'applique aussi bien aux mathématiques qu'à Dieu et aux choses créées, risque d'introduire toutes sortes d'équivo-

50 Kant, *L'Unique fondement possible...*, 1763, AK II, p. 154; trad. fr. Zac, Pléiade, T. I, p. 426.

51 *Op. cit.*, IIe. Partie, Ve. Considération, AK II, p. 117; trad. fr., Pléiade, T. I, p. 381. Traduction rectifiée par nos soins.

52 *Op. cit.*, IIe. Partie, VIIIe. Considération, AK II, p. 154; trad. fr., Pléiade, T. I, p. 426.

ques et de confusions dont la pire est sans doute de constituer, "entre de telles déterminations de Dieu et celles des choses créées, une analogie bien difficile à établir"<sup>53</sup>. Selon Kant, le plus grand danger qui menace l'infinisme cosmologique, c'est une éventuelle collusion entre l'infinité divine et l'infinité cosmique dans une sorte de monisme réducteur. On sent ici, chez le Kant de *l'Unique fondement*, le souci d'éviter toute déviance possible vers ce qui pourrait être taxé de panthéisme, voire de matérialisme ou d'athéisme, et surtout de *spinozisme*. Il lui faut montrer au contraire que l'unique fondement possible d'une preuve de l'existence de Dieu débouche sur un Dieu transcendant, immatériel et "*allgenugsam*" C'est pourquoi il écrit dans le *Beweisgrund* afin de laver son traité de toute accusation possible de spinozisme:

"Le monde n'est pas un accident de la divinité, puisqu'on y trouve des conflits, des manques et des changements, déterminations contraires à celles de la divinité. Dieu n'est pas la substance unique que existe; et toutes les autres choses sont aussi des substances, mais des substances dépendantes."<sup>54</sup>

Il faut rappeler que le *Beweisgrund* est le seul texte précritique avant 1770 où Kant se livre à une critique du spinozisme en citant même le nom de Spinoza<sup>55</sup> Bien avant que n'éclate le *Pantheismusstreit*, le spinozisme faisait déjà horreur à la plupart des penseurs du XVIIIe. siècle au point de servir d'invective officielle dans la plupart des querelles intellectuelles, même si le spinozisme demeurerait totalement incompris et seulement perçu à travers l'article célèbre de Bayle dans son *Dictionnaire historique et critique*<sup>56</sup> Kant ne pouvait ignorer cette grave accusation même pendant ses années d'étude à l'Université de Königsberg, puisqu'elle avait opposé les Piétistes anti-wolffiens à l'École de Wolff<sup>57</sup> durant toute sa jeunesse. A l'époque de la rédaction de sa *Théorie du ciel*, le style

---

53 *Ibidem*.

54 *Op. cit.*, Ie. Partie, IVe. Considération, AK II, p. 90-1; trad. fr., Pléiade, T. I, p. 349.

55 *Op. cit.*, Ie. Partie, Ie. Considération, AK II, p. 74; trad. fr., Pléiade, T. I, p. 328: "Le Dieu de Spinoza est soumis à de perpétuelles changements"

56 Bayle, *Dictionnaire historique et critique*, Rotterdam, 1697 et 1702, T. III, article "Spinoza": trad. allemande par Gottsched (1741-1744).

57 Dans la *Luculenta commentatio*, Wolff s'efforce de montrer que si son système admet l'idée d'un *progressus in infinitum*, il ne conduit nullement au spinozisme ni à l'athéisme pour autant, contrairement à ce que prétendaient les Piétistes violemment anti-wolffiens. C'est pourquoi Wolff n'admettait qu'un infini *potentiel* pour la série des êtres créés finis et il réservait à Dieu seul l'infinité actuelle

du jeune Kant était celui d'un métaphysicien intempérant qui ne reculait pas devant le danger d'accusation de "spinozisme", c'est certainement ce qui avait dû le conduire à publier sa cosmologie sans nom d'auteur. Aussi, il n'avait pas hésité à recourir à l'argument de type théo-cosmologique pour déduire l'infinité cosmique à partir de l'infinité divine en écrivant:

"La conception que nous avons exposée nous ouvre une perspective dans le champ infini de la Création <eine Aussicht in das unendliche Feld der Schöpfung> et offre une représentation <Vorstellung> de l'oeuvre de Dieu <dem Werke Gottes> conforme à l'infinité du grand Maître d'œuvre <der Unendlichkeit des großen Werkmeisters> [...] Il n'y a pas ici de fin, mais un abîme d'une véritable immensité <UnerneBlichkeit> dans lequel sombre tout le pouvoir des concepts humains. celui-ci fut-il rendu supérieur grâce à la science des nombres. La Sagesse, la Bonté, la Puissance qui sont manifestées <offenbart> sont infinies <unendlich> et dans la même mesure fécondés et actives, le plan de leur manifestation doit donc être comme elles infini <unendlich> et sans limites."<sup>58</sup>

Cet argument théo-cosmologique qui remonte pour l'essentiel à Bruno<sup>59</sup>, (et dont Kant a dû avoir connaissance au moins en parcourant *l'Histoire critique de la Philosophie* de Brucker<sup>60</sup>), ne réapparaîtra plus jamais, du moins sous cette forme, dans l'oeuvre de Kant. A l'époque du *Beweisgrund* Kant ne peut donc

---

qu'il refuse d'attribuer à l'univers. Cf. Wolff, *De differentia nexus rerum sapientis et fatalis necessitatis, nec non systematis harmoniae praestabilitae et hypothesium Spinosae luculenta commentatio*, Halle, 1723 et 1737, sect. I, § 16, p. 52-3.

58 Cf. Kant, *Théorie du ciel*, 1ère partie, AK I, p. 255-6; trad. f. Roviello, Paris, Vrin, 1984, p. 96-7.

59 Par exemple, cf. Bruno, *Cena de le Ceneri*, 1584, trad. fr. Y. Hersant, Premier Dialogue, éd. De l'Éclat, 1988, p. 26: "Ainsi sommes-nous conduits à découvrir l'effet infini de la cause infinie, la trace vivante et véritable de la vigueur infini" Cf. aussi: Bruno, *De l'Infini*, 1584, trad. fr. Levergeois, Berg. 1987, Dialogue Premier, p. 69: "Qui nie l'effet infini, nie la puissance infinie", Bruno, Documenti veneti, XI, Interrogatoire du 2 juin 1592, in *Vita di Giordano Bruno con documenti editi e inediti*, V. Spampinato, Messina, 1921, rééd. par Nuccio Ordine, Gela Editrici, Roma, 1988, p. 709: "[...] perché io stimavo cosa indegna della divina bontà e potenza che, possendo produr oltra questo mondo un altro ed altri infiniti, producesse un mondo finito"

60 Cf. Jacob Brucker, *Historia critica philosophiae a mundi incunabilis ad nostram usque aetatem deducta*, Leipzig, 1742-1744 (1ère éd.), 5 vols., spécialement le tome IV. Brucker avait finement montré que la philosophie de Bruno qu'il connaissait bien (pour avoir étudié de très près le *De la Causa* et le *De Immenso et innumerabilibus*) différait profondément de celle de Spinoza, contrairement à ce qu'en

plus se permettre de recourir à l'argument de type théo-cosmologique qui repose sur l'infinité divine, car il se méfie du concept d'infini en général, même en théologie où il préfère employer le terme d'*Allgenugsamkeit* à propos de Dieu. C'est d'ailleurs la raison pour laquelle il n'hésitait pas à qualifier certaines de ces hypothèses de la *Théorie du ciel* d'"assez risquées"<sup>61</sup> dans l'Avant-propos du *Beweisgrund*. Désormais, Kant s'exprime officiellement et ne peut plus prendre autant de risques qu'auparavant. Pourtant, il sera aussitôt attaqué, dès la publication de son *Beweisgrund*, pour son spinozisme larvé. C'est ce que prétend l'attaque qui a été dirigée directement contre le *Beweisgrund* par un jeune philosophe allemand, Daniel Weymann, auteur d'une plaquette intitulée *Bedenklichkeiten über den einzig möglichen Beweisgrund des Herrn I. Kants zu einer Demonstration des Daseyns Gottes*<sup>62</sup> Weymann reproche à la démonstration alléguée par Kant d'aboutir à un Dieu tout à fait semblable à celui de la substance unique de Spinoza. Comme on le sait, Kant ne répondra aux accusations de spinozisme pas avant la mort de son ami M. Mendelssohn en 1786 à l'occasion du déchaînement du *Pantheismusstreit*. Certes cette querelle du panthéisme sort du cadre de notre communication sur la cosmogonie de 1763, puisqu'elle a lieu au cours de la période critique. Mais il n'est pas inutile de rappeler que ce qui a permis à Jacobi d'accuser le grand Kant de spinozisme, c'est sa conception de l'espace infini dans la première *Critique*. Kant avait donc bien fait de laisser de côté la question de l'infinité cosmique dès 1763, car elle risquait de l'entraîner dans des polémiques stériles, dans la mesure où elles l'écartent de son but essentiel: sortir la métaphysique de l'impasse où elle était arrivée au XVIIIe. siècle. Les difficultés de l'infini seront le pivot central des deux premières *Antinomies de la raison pure*, mais cette fois au profit de l'entreprise critique de Kant.

---

avait écrit Bayle dans son *Dictionnaire historique et critique*. Peut-être le jeune Kant avait-il entendu parler de Bruno par le canal de l'École wolffienne à propos de la querelle qui opposa entre 1720 et 1730 Joachim Lange à Wolff à propos des rapports entre foi et raison et de l'accusation de spinozisme. Toutefois, il ne s'agit là que de suppositions extrêmement ténues qui ne reposent sur aucun document précis, ni sur aucun témoignage direct. On peut consulter utilement sur cette question délicate les indications générales qui figurent dans les articles suivants: Jean-Louis Vieillard-Baron, *Bruno et l'idéalisme allemand*, RMM, 1971, 76, p. 406-423; Saverio Ricci, *La ricezione del pensiero di Giordano Bruno in Francia e in Germania da Diderot a Schelling*, *Giornale Critico della Filosofia Italiana*, Firenze, Fasc. III, Settembre-Dicembre 1991, p. 431-465.

61 Kant, *L'Unique fondement possible...*, 1763, AK II, p. 69; trad. fr. Zac, Paris, T. I, Avant-propos, p. 322, "mit verschiedenen etwas gewagten Hypothesen".

62 Daniel Weymann, *Bedenklichkeiten über den einzig möglichen Beweisgrund des Herrn I. Kants zu einer Demonstration des Daseyns Gottes*, Königsberg, 1763, chez J.J. Kanter, le même éditeur que Kant.

# La cosmologie: un espace pour penser la relativité générale

Jean Eisenstaedt\*

**Résumé:** Sans doute, la cosmologie est-elle une application particulièrement spéculative de la relativité générale et sans doute elle a-t-elle longtemps manqué de matériau observationnel. Je voudrais simplement montrer ici que la cosmologie relativiste ne fut pas spéculative pour rien; mais que les spéculations cosmologiques de l'entre-deux guerres ont favorisé sinon même permis une vue manifestement relativiste d'une théorie – la relativité générale – alors largement dominée par une vision étriquée, “néo-newtonienne”. Avant de devenir le laboratoire de la physique des hautes-énergies qu'elle aimerait être aujourd'hui, la cosmologie a été un laboratoire intellectuel, un espace de liberté en relativité générale.

**Abstract:** Without a doubt cosmology, is quite a speculative application of general relativity, and without a doubt it grievously lacked for long “observational verification”. I just like to suggest here that relativistic cosmology is not “speculative for nothing”, and that the cosmological speculations of the inter-wars years favoured a manifestly relativistic view in a theory then dominated by a “neo-Newtonian” vision. Before becoming the laboratory of high-energy physics that it would like to be today, cosmology was an intellectual laboratory, a space of freedom within general relativity.

## Introduction

ON A SOUVENT SOULIGNÉ, le plus souvent pour le condamner, le caractère spéculatif de la cosmologie dont les rapports à l'observation sont restés jusqu'à ces dernières années très limités et de toute manière difficiles à développer. Je voudrais ici, d'un point de vue historique, insister sur l'importance de la cosmologie quant au développement de la théorie de la relativité générale.

La relativité générale, c'est l'outil qui a permis de penser – et non plus simplement de poser – l'univers en tant que géométrie, de le mettre en question, de le mettre en équation. Mais, à l'inverse, la pratique cosmologique a per-

---

\* Laboratoire de Gravitation et Cosmologie relativistes, CNRS, Université Pierre et Marie Curie-Paris 6 – 4, Place Jussieu – 75006 – Paris – jee@ccr.jussieu.fr.

mis de penser la relativité générale, de construire une interprétation un peu plus relativiste de la théorie de la gravitation d'Einstein.

Ainsi, je voudrais laisser entendre que la cosmologie relativiste ne fut pas “spéculative” pour rien; que les spéculations cosmologiques de l'entre-deux-guerres ont favorisé et apporté une vision manifestement relativiste dans une théorie alors et encore dominée par une interprétation “néo-newtonienne”<sup>1</sup> Avant d'être le laboratoire de la physique des hautes énergies qu'elle devient aujourd'hui, la cosmologie fut un laboratoire intellectuel, un espace de liberté en relativité générale.

Dans un premier temps je rappellerai l'importance de la cosmologie dans la voie qu'emprunte Einstein vers sa relativité générale; à travers le principe de Mach, essentiel dans la dynamique qui conduit Einstein.

Dans un second temps et en contrepoint il me faudra revenir sur l'histoire de la relativité générale pour montrer à quel point une interprétation *néo-newtonienne* domine la théorie avant son renouveau.

Enfin, je montrerai comment alors, la cosmologie a permis, pour des raisons qui ne sont pas seulement techniques, de mieux penser la théorie de la gravitation d'Einstein.

### De la relativité générale à la cosmologie

Loin d'être, comme on le dit trop souvent, une géométrisation de la physique, la relativité générale impose une “physicalisation” – si je puis me permettre ce néologisme<sup>2</sup> – de la géométrie; la relativité générale, c'est en quelque sorte une nouvelle discipline qui émerge, “la géométrie physique” Désormais, la structure géométrique de l'espace dépendra de son contenu matériel. C'est ce que les équations de champ:

$$S_{\mu\nu} = \chi T_{\mu\nu}$$

qu'Einstein met au point fin 1915 expriment avec clarté: tandis que S décrit la géométrie, T représente le contenu matériel du modèle projeté et c'est de droite à gauche qu'il faut avant tout lire et entendre cette équation:  $T \rightarrow S$ , le contenu

1 Pour une analyse de la place de la relativité générale entre le début des années vingt et la fin des années cinquante, on se reportera à Eisenstaedt, 1986.

2 À ce propos, voir la préface au livre de Michael Friedman. Friedman, 1983.



matériel détermine la structure géométrique, physico-géométrique, de l'espace-temps.

Il faut insister sur le saut, sur la coupure épistémologique que sous-tend cette vision véritablement radicale. Jusqu'alors, dans le cadre de la théorie newtonienne de la gravitation, l'espace, absolu, est donné à l'avance, une fois pour toute, d'une manière définitive. Attribut de Dieu, il n'est sûrement pas contingent et ne peut donc être objet de la physique. Et la cosmologie newtonienne implique une conception ambiguë de l'univers qui est contenu et contient à la fois un espace préconçu, l'espace absolu. Et la question se pose du statut de cet espace dans l'espace mais hors de l'univers... En fait, la cosmologie newtonienne se résume à une description du contenu de l'univers, indépendamment de l'espace lui-même qui n'est rien d'autre qu'un cadre prêté, présupposé, une enveloppe d'abord vide...

Que l'espace ne soit plus donné à l'avance, présupposé et en particulier à l'infini, n'est-ce pas là la question essentielle de la cosmologie contemporaine? Ainsi, la relativité générale pose-t-elle non pas tant la question de la distribution matérielle du contenu de l'univers, qui était déjà celle de la cosmologie newtonienne, mais bien celle de la structure géométrique, sinon même de l'existence, de l'espace. En substance, on peut dire que le système newtonien imposait son cadre à sa cosmologie tandis que la relativité générale va tenter de le définir. La question s'ouvre donc alors du choix d'un univers parmi une infinité d'autres possibles; solution parmi d'autres d'une série d'équations différentielles: l'univers y est bel et bien en devenir, un objet de la physique parmi d'autres, bien que très particulier... Ainsi la relativité générale implique-t-elle, impose-t-elle non seulement une renaissance mais une redéfinition de la cosmologie: Einstein réinvente la cosmologie.

Et plus on va approfondir la relativité générale, plus on s'apercevra que les questions qu'amène la cosmologie sont essentielles. Car, poser une question de relativité, construire un modèle d'étoile, c'est nécessairement construire (ce que l'on appelle même parfois) un univers; c'est nécessairement poser, résoudre un problème de cosmologie, car c'est se poser la question de la structure de l'infini, c'est résoudre un problème "global" Et bien des travaux, bien des études, ont pour cadre l'infini ou pour objet l'étude des comportements physiques à l'infini. Car il est indispensable de poser, de savoir, d'imaginer ce qui se passe "à l'infini"... ce qui n'est pas si simple ni même encore très clairement compris. C'est bien d'ailleurs pourquoi l'on a longtemps préféré nier cette question en acceptant *a priori* la détermination cosmologique standard: le comportement minkowskien – c'est-à-dire pseudo-euclidien – à l'infini, une manière de revenir à l'espace absolu de Newton.

## Le principe de Mach: de la cosmologie à la relativité générale

C'est bien avant 1917, date de la publication des "Kosmologische Betrachtungen", le premier mémoire qu'Einstein consacre explicitement à la cosmologie, qu'il faut dater le début de la cosmologie relativiste. Dès l'été 1912, alors qu'Einstein conçoit la structure même du projet qui le conduira à la relativité générale: courber l'espace sous le poids de la matière. Car c'est alors qu'il abandonne la géométrie euclidienne pour la riemannienne et c'est bien sûr l'idée la plus radicale de son programme. Einstein prépare là une révolution incroyable puisque désormais l'espace de la physique (et pas seulement de la gravitation) devient fonction du contenu de l'espace, devient objet de la physique. Une révolution qui ne peut qu'atteindre la cosmologie puisqu'aussi bien cette vision est cosmologique dans son principe même. L'univers n'est plus désormais la scène newtonienne, l'espace absolu sur laquelle se joue notre destin matériel, il devient lui même partie du destin... universel.

En 1912, Einstein s'est en effet remis au travail et s'est attelé à construire une théorie de la gravitation qui soit compatible aussi bien avec la relativité restreinte qu'avec le principe d'équivalence. Il en vient à considérer la dynamique du champ gravitationnel. Et c'est alors qu'il publie dans une revue confidentielle, un petit article intitulé "Y-a-t-il un effet gravitationnel qui soit analogue à l'induction électrodynamique?" C'est là la première expression de l'influence – essentielle – qu'auront sur Einstein les critiques de Mach sur les concepts newtoniens. Sur la base d'un article qu'il vient de consacrer à "la vitesse de la lumière et la statique du champ de gravitation", Einstein montre que "l'inertie totale d'un point massique est une conséquence de la présence de toutes les autres masses, un effet qui se base sur une sorte d'interaction avec ces dernières."<sup>3</sup>

En note Einstein cite le chapitre II de "La Mécanique" de Mach sur le "développement des principes de la dynamique", précisant qu'il s'agit du passage où Mach vise "les vues newtoniennes sur le temps, l'espace et le mouvement" en fait, l'expérience des seaux... Arrêtons-nous un instant sur la critique machienne de l'analyse que fait Newton dans ses *Définitions des Principia* des seaux en rotation, une critique que l'on retrouvera bien entendu dans l'article qu'Einstein écrit en 1916,<sup>4</sup> revue et présentation de sa théorie nouvellement née. Il s'agit de deux seaux dont l'un tourne et l'autre non; la surface de l'eau du premier s'incurve mais non pas du second. Ainsi de deux sphères en rotation relative,

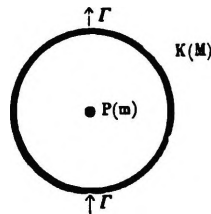
---

<sup>3</sup> Einstein, 1912, p. 39.

<sup>4</sup> *Idem*, 1916.

l'une et non l'autre se déforme: pourquoi?<sup>5</sup> ce qui nécessite une cause. Cause qui, pour le réaliste qu'est Mach – et bientôt Einstein – doit être “un *fait expérimental observable*”.<sup>6</sup> Car la réponse newtonienne, l'espace absolu, n'est pas satisfaisante; c'est une “cause purement fictive; ce n'est pas une chose observable” dira Einstein après Mach.<sup>7</sup>

Mais sans nous attarder ici aux travaux de Mach, revenons-en à ce premier article de 1912 où Einstein cherche à exprimer d'une manière heuristique ce qu'il appellera bientôt le principe de Mach. On a donc là l'ébauche de l'intérêt premier d'Einstein pour la cosmologie; le schéma publié à la première page de cet article<sup>8</sup> montre un tout premier modèle d'univers cosmologique, un modèle ultra-primitif, il faut le dire, qui schématise une sorte de toupie sphérique creuse, au centre de laquelle est placée une masse test.



Einstein 1912

C'est en 1913, dans “l'Entwurf”, “l'Esquisse d'une théorie générale de la relativité et de la gravitation” qu'il franchira – avec l'aide de Grossmann – le pas décisif; celui du recours à un espace riemannien. Et, à nouveau, il est question de principe d'équivalence (et, pour la première fois dans un de ses articles, de l'expérience d'Eötvös). Dans un tout premier chapitre, il s'intéresse aux équations de mouvement dont il déduit que  $c$ , la vitesse de la lumière, “joue le rôle d'un potentiel gravitationnel”, ce qui le conduit à reprendre ses idées machiennes de l'année passée; un calcul qu'il conduit très rapidement montrant que “la masse inerte [...] c'est  $m/c$ , [...]” “Ce qui est en accord, écrit-il, avec les idées audacieu-

5 L'une est en rotation (par rapport à l'espace absolu de Newton) tandis que l'autre non. Cette expérience (de pensée) a le même contenu physique-épistémologique – que l'expérience de Foucault: le plan d'un pendule oscillant reste fixe par rapport aux étoiles fixes: pourquoi? Cela traduit-il l'influence – qui serait d'une certaine manière métaphysique – de l'espace absolu de Newton, ou celui – infiniment plus physique – des étoiles fixes elles-mêmes?

6 Einstein, 1916, p. 181.

7 *Ibidem*.

8 Einstein, 1912, p. 37.

ses de Mach selon lesquelles l'inertie a son origine dans une interaction entre le point massif en considération et tous les autres points massifs; car si nous accumulons des masses dans le voisinage du point massif en considération, par là-même nous faisons décroître le potentiel gravitationnel  $c$ , et donc la quantité qui détermine l'inertie  $m/c$  croît."<sup>9</sup>

Aussitôt il envoie son "Entwurf" à Mach avec une lettre dans laquelle il présente rapidement ce qu'il considère alors comme l'essentiel de ses espoirs:

"Vous avez sans doute reçu ces jours-ci mon nouveau travail sur la relativité et la gravitation qui est maintenant terminé grâce à un dur et long labeur, dans les affres du doute. [...] Il s'ensuit nécessairement que *l'inertie* a son origine dans une sorte *d'interaction* entre les corps exactement dans le sens de votre argument sur l'expérience des seaux de Newton."

Einstein en déduit alors quelques conséquences, et entre autre, l'entraînement du plan d'oscillation d'un pendule de Foucault dans le champ d'une coque en rotation, un résultat qui sera développé dix ans plus tard dans le cadre de la relativité générale par Hans Thirring; le même schéma que celui de l'article de 1912 accompagne cette digression. Pour Einstein le principe de Mach est alors comme une obsession; il y revient dans chacun de ses articles et dans chacune de ses conférences.<sup>10</sup>

## Einstein et De Sitter

La question de la structure à l'infini des solutions des équations de champ d'une théorie relativiste de la gravitation est posée par Einstein dès l'*Entwurf*.<sup>11</sup> Avant de se résoudre – et l'on sait à quel point il le regrettera –, fin 1916, début 1917, à modifier ses équations de champ en leur adjoignant la constante cosmologique  $\lambda$ , Einstein cherche une solution à son problème de la structure à l'infini.

Pour Einstein, alors, un espace (physiquement) vide ne pouvait, ne devait pas, impliquer un espace (mathématiquement) structuré en particulier à l'in-

<sup>9</sup> *Idem*, 1913, p. 6.

<sup>10</sup> On consultera à ce propos, Hoefler, 1994.

<sup>11</sup> *Ibidem*, p. 304.

fini. Aussi bien, une masse isolée dans un espace totalement vide ne devait-elle pas posséder d'inertie. Ainsi, la solution de Schwarzschild<sup>12</sup> lui pose-t-elle problème dans la mesure où elle définit la structure de l'espace à l'infini, en imposant un comportement asymptotique minkowskien. Et comment se fait-il donc qu'une simple masse compacte (et donc aussi bien un seul et unique atome) puisse d'un seul trait structurer l'espace jusqu'à l'infini? Un point de vue qu'il exprime en de multiples occasions et en particulier, précisément, dans une lettre à Schwarzschild qui vient de publier sa solution:

“L'inertie, dans ma théorie, c'est juste en fin de compte une interaction entre les masses, non pas une action à laquelle, en plus des masses en question, “l'espace” en tant que tel participe. Le trait essentiel de ma théorie, c'est précisément de n'attribuer aucune propriété indépendante à l'espace en tant que tel.

“On peut exprimer ça par une boutade. Si je faisais disparaître toutes les choses de l'univers, pour Newton il resterait alors l'espace inertiel Galiléen, mais d'après ma conception il n'y aurait *rien* de reste.”<sup>13</sup>

Et, en mai 1916, ce n'est pas sans raison que, le jour même de la mort de Schwarzschild, cette question, qui le travaille encore, lui revient à l'esprit, ainsi qu'il l'écrit à Besso:

“Actuellement, je travaille sans trop me presser; je m'en trouve très bien et ma vie coule doucement, sans troubles. En matière de gravitation, j'essaie à présent de déterminer les conditions limites à l'infini; il est intéressant de se demander dans quelle mesure il existe un univers *fini* dont l'étendue a été fixée par la nature et dans lequel l'inertie est vraiment relative. Aujourd'hui ont lieu les obsèques de Schwarzschild, directeur de l'observatoire de Potsdam. Je t'ai certainement parlé de lui; sa mort représente une perte.”<sup>14</sup>

12 Qui représente le champ de gravitation produit par une masse sphérique isolée dans un espace vide et qui permet de représenter le champ de gravitation du Soleil; on pourra en déduire, entre autres résultats, la généralisation (relativiste) des trajectoires kepleriennes.

13 A. Einstein à K. Schwarzschild le 9 Janvier 1916. Cité in Eisenstaedt, 1989, p. 219.

14 Einstein à Besso, 14 Mai 1916; cité in Eisenstaedt, 1982, p. 167.

Mais il y a plus grave que les problèmes de la solution de Schwarzschild; comment expliquer que l'espace de base de la relativité générale, l'espace vide, possède une structure (pseudo-euclidienne), celle de l'espace de Minkowski, fort bien – trop bien! – définie à l'infini... N'est-ce pas là en somme l'équivalent des questions que pose à Mach l'espace absolu de Newton?

C'est dans cet axe que l'on trouve les racines de la controverse qui oppose bientôt Einstein à De Sitter; De Sitter qui voit dans l'hypothèse des *masses distantes* une résurgence de l'espace absolu de Newton. Pour De Sitter, il n'y a pas de place en relativité générale pour quoi que ce soit d'indépendant des systèmes de référence. Il refuse toute hypothèse concernant l'infini: aussi bien l'hypothèse d'un comportement minkowskien – qui, selon lui, n'obéit pas aux règles de la covariance générale – que tout type de conditions aux limites à l'infini et, en particulier, l'idée, sur laquelle travaille alors Einstein, d'un système de valeurs dégénérées prises par les potentiels de gravitation à l'infini. C'est en effet dans cette hypothèse – un espace mathématiquement dégénéré, déstructuré à l'infini – qu'Einstein cherche à ce moment la réponse à ses questions. On a une idée de ces recherches étonnantes dans un article écrit à l'automne 1916 par De Sitter, qui reprend là, pour mieux les combattre, les idées qu'Einstein défend alors:

“On pourrait imaginer qu'il y ait un système de valeurs dégénérées vers lequel  $g_{ij}$  pourrait converger à l'infini, et qui serait invariant pour toutes les transformations [...] Le professeur Einstein a déjà trouvé un tel ensemble de valeurs. Il s'agit de

$$\left\{ \begin{array}{cccc} 0 & 0 & 0 & \infty \\ 0 & 0 & 0 & \infty \\ 0 & 0 & 0 & \infty \\ \infty & \infty & \infty & \infty^2 \end{array} \right\} \quad (\text{au lieu de} \quad \left\{ \begin{array}{cccc} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right\})^{15}$$

et l'on doit se limiter à des transformations telles qu'à l'infini  $x'_4$  soit seulement une fonction de  $x_4$ . En conséquence l'hypothèse selon laquelle les  $g_{ij}$  ont vraiment ces valeurs à l'infini, et qu'à des distances finies, bien que très grandes, de toutes les autres masses, il y ait d'autres masses qui seraient la cause de ces valeurs, n'est pas contraire au principe formel de relativité.

15 La matrice de droite  $\eta_{ij}$  de Minkowski a été ajoutée afin de bien éclairer la question.

Mais aussi bien, en refuser l'hypothèse n'est pas contraire à ce principe."

Mais, dans une très belle lettre du 4 novembre 1916 à De Sitter, Einstein reconnaîtra qu'il est "désolé de [l'] avoir harcelé avec trop d'énergie quant à la question des conditions aux limites." Ajoutant qu'il s'agissait en somme d'une "véritable question de goût qui ne parviendra jamais à avoir une signification physique." Il convient alors de ce qu'il ne sera jamais possible de répondre à la question: d'où vient l'inertie? Est-elle en partie ou totalement déterminée par les masses présentes dans l'univers ou/et par les conditions aux limites. C'est que l'espace relatif d'Einstein est tout autant un fantôme que l'espace absolu de Newton. Tout simplement parce qu'il est impossible de proposer une expérience qui réponde à la question... Mais après avoir posé les limites physiques/philosophiques de sa question, Einstein ne peut se retenir d'ajouter:

"En pratique je *dois* m'en contenter et je *peux* m'en contenter d'un point de vue théorique, et je ne serais pas mécontent si vous rejetiez toutes les autres questions. D'un autre côté, néanmoins, vous ne pouvez pas me réprimander si je suis assez curieux pour demander: Peut-on imaginer qu'un (ou que le) monde soit tel que l'inertie ne vienne que des masses, et pas du tout des conditions aux limites? Pour autant que je sois conscient que ce caprice n'affecte pas le cœur de la théorie, il est innocent; en aucun cas, je ne vous demande de partager cette curiosité."<sup>16</sup>

C'est dans ce contexte qu'Einstein publie au début de 1917 ses "Considérations cosmologiques"<sup>17</sup>, dans lesquelles il pose le problème des conditions aux limites à l'infini et, en particulier, la question de l'évanouissement des étoiles. Sa formulation du principe de Mach est toujours aussi contraignante, puisqu'il exige que "dans une théorie conséquente de la relativité il ne [puisse] pas y avoir d'inertie relativement à "l'espace", mais seulement une inertie des masses les unes par rapport aux autres."<sup>18</sup>

16 Einstein à De Sitter, 4 novembre 1916; cité par Hoefler, 1994, p. 306.

17 *Idem*, 1917.

18 *Op. cit.*, p. 91.

Ainsi, ne supportant ni l'hypothèse de telles conditions aux limites "contraires au principe de relativité", ni "de se résigner" comme De Sitter va-t-il proposer de considérer l'espace comme un continuum spatialement fini. Et, c'est afin d'exhiber sa solution cosmologique (qui possède précisément ces qualités) – et donc pour tenter de résoudre le problème de Mach – qu'il en vient à modifier ses équations de champ de décembre 1915 en introduisant sa constante cosmologique.

Désormais, la présence de masses à l'infini permet de donner à la question des conditions aux limites à l'infini un contenu physique: la structure de l'espace est – semble être – une réponse univoque à la présence de matière. Dans ce sens, on peut dire qu'Einstein a tenté de rendre compte des exigences machiennes; mais le problème de la relativité de l'inertie n'est pas résolu pour autant et Einstein y reviendra encore... sans beaucoup de succès.

Peu de temps après la publication des "Considérations Cosmologiques", De Sitter exhibait sa solution cosmologique dans laquelle l'espace, bien que vide, manifestait une courbure globale ... au grand agacement d'Einstein qui lui écrivait alors:

"De mon point de vue, il serait tout à fait insatisfaisant qu'il soit possible de penser l'Univers sans matière. Le champ  $g_{\mu\nu}$  doit être déterminé par la matière, sans elle il ne peut pas exister. Tel est le coeur de ce que je comprends comme le postulat de la relativité de l'inertie."<sup>19</sup>

Car, s'il peut exister un univers à la fois vide et courbé, non seulement la théorie n'obéit pas au principe de Mach mais, aussi bien, elle perd une partie de sa force; pire, sa logique interne – telle qu'Einstein la projetait – est alors mise en cause, puisqu'il n'y a plus une claire correspondance entre la présence de matière et la courbure. Bref, quelle pouvait être la source de la courbure de l'espace de De Sitter? Einstein n'eut de cesse qu'il "prouvât" que cette solution bizarre n'était pas vide: la matière se cachait sur la singularité de l'espace de De Sitter, sur l'horizon. Ainsi la relativité générale pouvait-elle conserver toute la cohérence interne qu'il lui avait voulu donner.

Comme on l'a vu plus haut, l'espace-temps de Minkowski, solution première des équations de champ d'Einstein du vide, viole le principe de Mach tel

---

<sup>19</sup> Einstein à de Sitter, reproduit dans de Sitter, 1917, p. 1225.



qu'Einstein le comprend, puisque, bien que vide de matière, il possède une structure géométrique bien définie à l'infini. Mais la question est, dans le cas de l'espace de de Sitter, plus grave encore, vu qu'il s'agit d'une solution "courbée" des équations de champ en l'absence de matière. Qui plus est, l'existence de solutions "courbées" en l'absence de matière *et* de constante cosmologique sera démontrée par Taub en 1951. Ainsi, entre le projet d'une physique idéale et les possibilités de réalisation théorique demeure – même en relativité générale! – une distance qu'Einstein n'a pas pu abolir...

Bien entendu, parmi les trois seuls modèles cosmologiques alors connus – la solution statique d'Einstein, la solution de De Sitter, celle de Minkowski – la question du "bon modèle" d'Univers fut soulevée. Einstein tenait pour son modèle qui seul contenait la matière créant le champ de gravitation; quant à De Sitter, il ne voyait là que métaphysique, en l'absence de données observationnelles suffisantes.

Mais, au delà de ces questions "métaphysiques", les recherches dans le champ cosmologique vont permettre de poser des problèmes d'interprétation, de mettre en lumière certaines limites de la théorie, de travailler plusieurs points délicats; mais surtout de disposer de solutions exactes, de solutions simples, de modèles grâce auxquels on va pouvoir manipuler la théorie en vraie grandeur. La cosmologie est un des rares lieux où la relativité générale ne sera pas réduite à son interprétation néo-newtonienne; un lieu où la théorie d'Einstein a pu, sinon se penser dans toute son ampleur, du moins se "déplier" quelque peu, où l'interprétation de la théorie était vraiment en question, en chantier. À mon sens pour plusieurs raisons et, tout d'abord, parce que les solutions cosmologiques homogènes (dites de Robertson-Friedmann) sont physiquement et mathématiquement relativement simples: l'hypothèse de la constance de la densité de matière implique l'homogénéité et l'isotropie de l'espace. Et ces caractéristiques très particulières impliquent l'existence d'un temps cosmique, ce qui permet de limiter l'interprétation à l'espace tri-dimensionnel auquel le temps reste orthogonal (comme dans l'espace de Minkowski). Ainsi, dans le cadre de ces modèles d'univers, la question de la définition relative du temps et de l'espace n'est-elle pas posée, ce qui permet une réflexion plus sereine. C'est sans doute une des raisons qui fait que des questions parallèles vont se résoudre d'une manière beaucoup plus simple dans le cadre d'un modèle cosmologique homogène que dans celui d'un modèle d'étoile. En ce sens, l'étude des cosmologies homogènes fut en quelque sorte une étape sur le chemin de modèles plus complexes.

Mais aussi, il est bien possible que l'image que l'on a *a priori*, que l'on se fait inconsciemment d'un *univers* cosmologique, ne soit pas si lointaine des questions que la relativité générale pose. C'est qu'il est moins difficile d'imaginer que

L'espace de l'univers puisse être étrange que celui de sa chambre... Dans l'univers, n'a-t-on pas tout simplement la place de penser la courbure, de penser que l'espace puisse être différent? *A contrario*, dans le cadre d'études plus classiques, liées à la structure des étoiles, n'est-il pas particulièrement perturbant d'imaginer que l'espace puisse être réellement courbé? Du point de vue de l'imaginaire, l'univers "infini" laisse place à un jeu, à une liberté d'esprit dont on ne dispose pas tant dans le cas des étoiles. On est prêt à accepter que l'univers puisse exhiber une structure géométrique excentrique mais on n'est pas prêt à faire ce même pas quant à la géométrie des étoiles...

Dés 1917, Einstein propose dans ses *Considérations Cosmologiques* un univers fermé qui implique une topologie cylindrique... une nouveauté! Un assez grand intérêt pour l'étude des modèles cosmologiques se manifesta alors et en particulier dans le cadre de la controverse Einstein-De Sitter. Einstein, Willem De Sitter, Hermann Weyl et Felix Klein s'inquiéteront ainsi de l'interprétation de l'équateur singulier de la forme statique de la solution cosmologique de De Sitter. Qu'Einstein voulait à tout prix voir singulier afin d'écarter l'espace de De Sitter incompatible avec ses vues machiennes. Felix Klein montrera explicitement à Einstein qu'il n'en est rien et que l'équateur en question est tout à fait régulier mais qu'il s'agit d'une question d'extension de l'espace...

À la lumière de cette problématique, on aborda ainsi une question centrale en relativité générale, celle de la définition d'une singularité, d'un horizon. S'agissait-il d'une vraie singularité? Porteuse ou non de matière? Ou plutôt d'une singularité apparente? D'un horizon... Comment l'interpréter? Pour Einstein et Weyl, il s'agissait d'une singularité cachant de la matière, tandis que pour Klein il s'agissait bel et bien d'une singularité apparente au-delà de laquelle la solution était prolongeable. Dans ce même cadre, Einstein lui-même donnera en 1918 une définition très moderne de la régularité des potentiels de gravitation, une définition qu'il ne pourra d'ailleurs pas tenir longtemps, en particulier dans le cadre de la solution de Schwarzschild... Ainsi, dès l'avènement, de la cosmologie, des questions théoriques fondamentales – et, en particulier, celles de la définition de la régularité, ou d'une singularité apparente, de l'extension – sont vues et même (quasiment) résolues d'un point de vue mathématique, mais elles sont loin d'être acceptées d'une manière générale. Nous n'entrerons évidemment pas ici dans les détails de ces travaux complexes car, ce qui nous importe, c'est simplement de montrer que l'on a ainsi pu étudier de nouveaux problèmes quant à la structure à l'infini ou à la topologie; ce qui n'était pas encore possible dans le cadre de ce qu'on appellera ensuite l'astrophysique relativiste. Bref, les experts ont pu pour la première fois penser la relativité dans un cadre qui n'est plus tout à fait celui de Newton.

Un épisode particulièrement intéressant de ce point de vue, c'est la publication par Friedman en 1922 de sa solution cosmologique non-statique qu'Einstein n'accepta – sans doute parce qu'elle n'était pas statique – qu'avec difficulté, une solution que Lemaître redécouvrit en 1927 mais qui, comme celle de Friedman, passa alors inaperçue. C'est qu'il n'était pas évident – même pour Einstein – d'accepter toutes les possibilités que la relativité générale ouvrait.

Après les travaux de Friedman de nombreux auteurs comme Stanley Eddington, Georges Lemaître, Richard Tolman, George McVittie, travailleront sur les modèles cosmologiques, homogènes puis inhomogènes. En 1932, Richard Tolman et M. Ward montreront que la singularité initiale est, dans certains cas, inévitable ouvrant la porte au big bang de Lemaître. Déjà, au milieu des années vingt, Edward Kasner avait travaillé d'un point de vue mathématique sur la géométrie d'espaces cosmologiques particuliers. Luther Pfahler Eisenhart, Howard P. Robertson, A.G. Walker reprendront ces études dans les années trente.

Ainsi, tout au long de la décennie, voit-on l'espace de la relativité générale s'ouvrir dans le cadre des travaux cosmologiques tandis que, dans les autres domaines, il sera le plus souvent limité à une vision néo-newtonienne.

## L'étiage

Laissons passer quelques années, durant lesquelles Einstein a bien d'autres soucis en tête que la cosmologie, et intéressons-nous un instant aux travaux qui sont alors publiés et à la manière dont la relativité générale est... bien mal comprise.

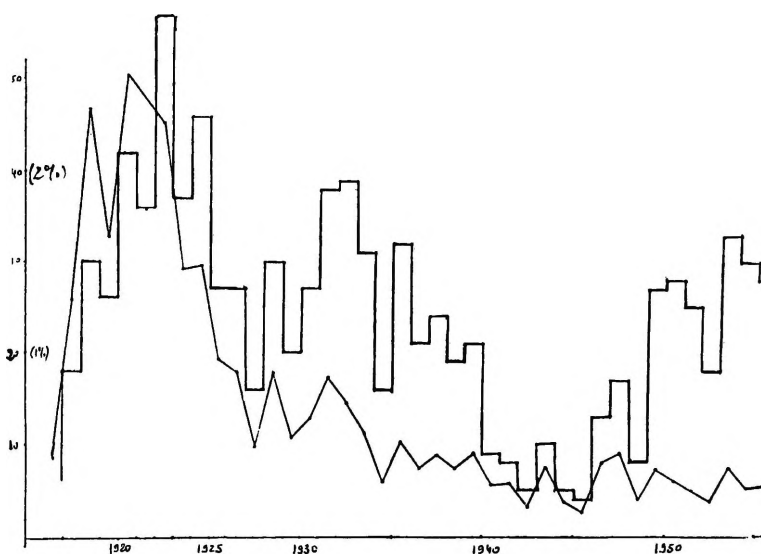
C'est une période difficile que traverse alors la relativité générale après ses premiers succès, matérialisés par la vérification plus ou moins claire de ses trois tests que l'on dira bientôt classiques (périhélie de Mercure, déviation des rayons lumineux, décalage des raies). Des test plus ou moins convaincants, quant à leur précision, quant à leur signification, quant à leur champ, mais qui laissent malgré tout entendre que la relativité générale est, au plan observationnel, la moins mauvaise des théories de la gravitation connues.

Quant à la théorie elle-même, elle patine et piétine; ses modèles s'appliquent le plus souvent à des champs faibles auxquels il sera possible d'appliquer diverses approximations "post-newtoniennes" dont le premier ordre est représenté par la solution newtonienne.

Évidemment – mais *a posteriori* –, il est certain que la relativité générale n'a alors que rarement pu exprimer les points les plus caractéristiques, les plus intéressants, les plus marquants de ses équations. C'est une théorie que l'on can-

tonne dans une interprétation limitée, aussi bien au niveau calculatoire que conceptuel ou qu'observationnel, et qui est donc bien loin de donner tout ce qu'elle a à exprimer; elle perd même alors sa réputation, pourtant méritée, de théorie révolutionnaire.

Afin d'objectiver le déclin subit – et surprenant – de la théorie de la gravitation d'Einstein, j'ai tracé l'histogramme du nombre de publications annuelles dans la discipline entre 1916 et la fin des années soixante, en valeur absolue et relative par rapport aux publications référées par "Science Abstract" ou par le "Jahrbuch über die Fortschritte der Mathematik"



Histogramme des publications référées par *Science Abstract*

On y remarque quatre périodes essentielles, et tout d'abord, cette période quelque peu euphorique, dans les quelques années (1916-1922) qui suivent la naissance de la théorie et durant laquelle beaucoup d'idées et la plupart des résultats classiques vont sortir, bien souvent de la main d'Einstein... Un grand intérêt qui se meurt dès le début des années vingt où débute l'étiage durant laquelle la relativité générale n'est plus guère à la mode, et qui durera en somme jusqu'aux années soixante, date du renouveau.

Notons, entre la fin des années vingt et le milieu des années trente, une étrange petite colline dont l'analyse détaillée montre qu'elle est due, après les premiers articles de Edwin Hubble, à la naissance de la cosmologie observationnelle qui entraîne avec elle une littérature théorique spécifique.

Mais au-delà de la sociologie quantitative, c'est vers l'interprétation de la théorie qu'il faut se tourner si l'on veut comprendre tout l'intérêt que représentait alors la cosmologie dans le cadre de la relativité générale. C'est que le moindre développement de la théorie de la relativité générale qui caractérise l'étiage ne s'exprime pas tant dans le volume de la production – ce ne serait là, et c'est un euphémisme que, moindre mal –, mais cette période se marque aussi d'un point de vue théorique quant aux moyens mis en œuvre (ou plutôt que l'on ne mettra pas en œuvre!) dans l'interprétation de la théorie. C'est le temps où se développe ce que j'ai donc appelé l'interprétation *néo-newtonienne* de la théorie. Il s'agit d'une interprétation de la relativité générale qui s'appuie en premier lieu, et qui se focalise, sur des développements approchés dont le premier ordre est évidemment et nécessairement newtonien; et qui est incapable de s'intéresser, loin de la théorie de Newton et du système solaire, aux frontières de la théorie.

Cette interprétation néo-newtonienne a non seulement un impact sur la construction des modèles de la théorie, mais aussi sur l'établissement et la compréhension de ses concepts, bref sur l'interprétation globale de la théorie. D'une part parce que, n'ayant guère besoin pour rendre compte des trois tests que de l'approximation post-newtonienne, on se limitera essentiellement à des analyses de ce type: soit qu'on suppose que  $GM/Rc^2$  – qui paramètre l'intensité du champ gravitationnel – est petit par rapport à 1 (ce qui est vrai dans tous les cas que l'on connaît et que l'on envisage), soit que les vitesses sont faibles par rapport à celle de la lumière. De la même manière le comportement asymptotique minkowskien reste le cadre (cosmologique) de référence.

En fait, cela signifie que le cadre fondamental de la relativité générale, c'est, tout au moins *de facto*, encore et toujours le cadre newtonien: espace et temps absolus à un très large degré. Et le caractère courbe de l'espace reçoit essentiellement une interprétation "faible"; la courbure reste en somme une caractéristique secondaire de l'espace et encore plus, bien entendu, la topologie. C'est certainement le cas de la plupart des travaux qui seront réalisés avant 1960. Ainsi, dans le premier modèle que publie Einstein et qui concerne l'explication de l'avance du périhélie de Mercure, il n'y a trace ni de courbure ni de topologie; et il n'est pas fait allusion, sinon d'une manière implicite (sous forme strictement mathématique, élément linéaire, géodésiques, etc...) à un espace qui différerait de l'espace minkowskien de la relativité restreinte. Bref, toute caractéristique (riemannienne) de l'espace est éludée, passée sous silence. C'est bel et bien d'une interprétation néo-newtonienne qu'il est question.

On pourrait penser qu'il en va tout autrement des interprétations de la théorie liées aux solutions exactes qui, précisément dans la mesure où elles sont exactes, portent encore en elles toute la spécificité de la théorie. Mais il y aura

un long chemin, une grande distance, entre l'interprétation que l'on donnera de ces solutions exactes lors de leur découverte dans les années dix ou vingt et celle que l'on en donne aujourd'hui. Ainsi de l'histoire de l'interprétation de la solution de Schwarzschild qui s'appuiera en fait très longtemps sur un espace et un temps quasiment (pour ne pas dire totalement) absolus. En fait, parce l'idéologie néo-newtonienne imprègne tellement les esprits qu'il est impossible de voir autre chose que ce que l'on cherche: une *petite* modification aux lois de Newton...

En fait, et précisément pour les mêmes raisons, les coordonnées "classiques", les coordonnées de Droste-Schwarzschild, sont alors massivement utilisées et sont loin d'être comprises comme de simples coordonnées repérant des événements mais sans signification physique; elles sont *de facto* et pour très longtemps utilisées – et pensées – comme absolues, temps absolu et distance banale possédant une signification physique.

Renvoyant à l'analyse détaillée que j'ai faite autrefois, je me bornerai ici au témoignage de Levi-Civita qui, en 1937, écrivait:

"Les lois de la mécanique, selon la théorie d'Einstein, sont beaucoup plus complexes quant à leur conception que selon l'hypothèse de Newton. Pourtant le mouvement des corps célestes dans des circonstances ordinaires diffère si peu de sa représentation newtonienne que, pour les besoins astronomiques, les effets relativistes peuvent être traités sans inconvénient comme des perturbations de premier ordre."<sup>20</sup>

Sans inconvénient... Tel n'est pas toutefois le point de vue de tous et par exemple de Kornel Lanczos qui écrivait à ce propos, en 1932, que "la valeur de cette théorie réside manifestement dans les nouveaux aperçus qu'elle apporte et non pas dans chaque correction qu'elle ajoute aux équations de Newton."<sup>21</sup>

Mais l'interprétation néo-newtonienne, ce n'est pas seulement une question de perturbation, d'analyse post-newtonienne, c'est aussi (et en fait surtout), une question de concepts. Or, jusqu'aux années soixante et même bien souvent encore ensuite, on se servit sans guère d'arrière-pensée des concepts classiques de la théorie newtonienne. Ainsi de la distance, par exemple, dont des flots de définitions variées encombrèrent les articles et manuels d'alors et cela bien qu'il n'y ait pas, que je sache, de concept de tri-distance possible intrinsèque en rela-

---

<sup>20</sup> Eisenstaedt, 1986, p. 150.

<sup>21</sup> *Ibidem*.

tivité générale; ou encore de l'énergie, dont on sait les problèmes que pose encore aujourd'hui sa définition générale et intrinsèque dans le cadre de la théorie.

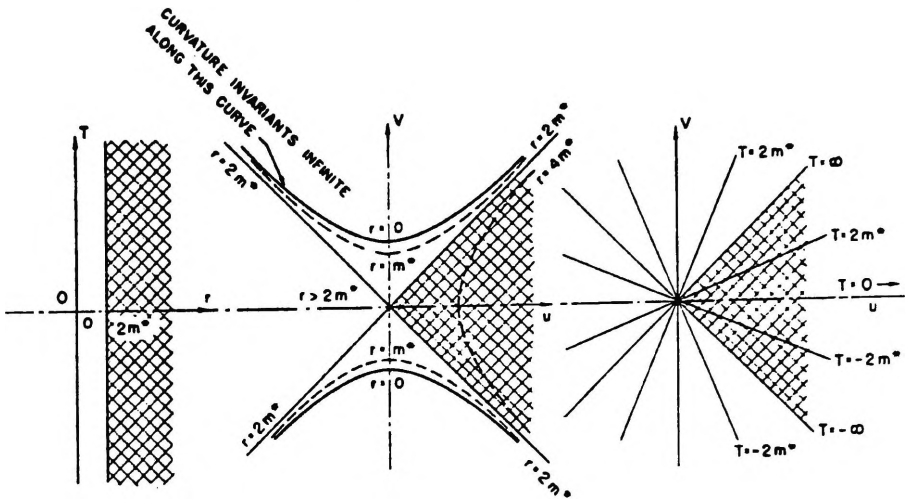
Ainsi l'interprétation néo-newtonienne, l'analyse qui durant l'étiage est très généralement proposée de la théorie de la gravitation d'Einstein, c'est une interprétation qui laisse obstinément de côté ce qu'il y a de nouveau, de révolutionnaire, en fait ce qu'il a de plus intéressant, dans la nouvelle théorie. Ce qu'on laisse de côté, c'est, par exemple, la nouvelle analyse du champ de gravitation d'une masse sphérique, de la solution de Schwarzschild qui va donner naissance à ce que l'on appelle aujourd'hui les "trous noirs" Ainsi dans l'interprétation globale de la solution adoptée depuis Kruskal<sup>22</sup>, l'espace est doublement brisé; globalement puisqu'il contient deux régions, deux feuilletts, trou noir et trou blanc – reliés par un trou de ver (ou une gorge "de Schwarzschild" suivant la topologie choisie); et localement puisqu'il implique des horizons qui partagent chaque région en un secteur intérieur et un secteur extérieur connectés par une membrane unidirectionnelle.

Il est ici nécessaire de préciser l'emploi et le sens des termes "local" et "global" en topologie; un sens qu'il convient de distinguer de leur sens familier. En effet, dans le langage courant, local concerne "un lieu bien particulier" tandis que "global" s'applique à "un ensemble" Dans le cadre de la topologie et plus particulièrement dans le cadre de la topologie appliquée à des espaces de Riemann, de la relativité générale, on est amené à décrire l'espace par des systèmes de coordonnées divers. Et la question, c'est de les "raccorder" afin de pouvoir cheminer continûment dans l'espace. Ces régions diverses, limitées ou non, on les appelle parfois des "cartes"; l'ensemble de ces cartes étant réputé former un "atlas" qui décrit ainsi l'espace en question, parfois nommé "univers" Dans ce cadre, "local" se réfère non pas simplement au voisinage d'un point donné mais à une seule et même carte qui peut (par exemple dans le cas d'un espace minkowskien) représenter tout l'espace. Quant au terme "global" il a à voir avec l'atlas des cartes, avec l'univers lui-même. Ainsi peut-on distinguer les questions "locales" – singularités, horizons – des questions globales liées à la structure à l'infini.

En fait, afin de mieux comprendre cette distinction ainsi que ces concepts, il suffit de penser à la représentation en deux dimensions de la Terre. Afin de représenter la Terre, il est indispensable de recourir à deux cartes, par exemple celle de l'hémisphère sud et celle de l'hémisphère nord projetées sur un plan équateur, l'atlas étant constitué de ces deux cartes et des moyens de passer de

<sup>22</sup> Kruskal, 1960.

l'une à l'autre par recouvrement partiel sur l'équateur. L'image n'est d'ailleurs pas absurde pour comprendre les limites de l'interprétation néo-newtonienne; dans le cadre de la cartographie de la Terre, une telle interprétation se limiterait à une seule projection sur une carte tangente au point qui nous intéresserait (une carte banale) au mépris de la vraie figure de la Terre... que figurerait un atlas.



Le diagramme de Kruskhal, 1960

Évidemment, la question se complique singulièrement dans le cas de la structure de la solution de Schwarzschild où la question de la topologie est vraiment posée. Topologie, en ce que l'espace n'a plus du tout sa forme classique; elle n'est plus tri-dimensionnelle (mais c'est de peu d'importance); elle ne fait plus un sort particulier au temps (depuis la relativité restreinte); elle oublie la signification physique des coordonnées espace/temps...; elle implique des objets curieux comme les horizons, les singularités – où le champ gravitationnel est infini et les lois de la physique ne sont plus valables – et développe une structure étrange à l'infini où se dédouble l'espace ordinaire... Bref, la physique doit désormais vraiment compter avec la structure de l'espace: la géométrie est bel et bien physique!

Encore un mot qui permet de comprendre un peu mieux comment on en est arrivé là, comment on a dû en arriver là, et en particulier à cette idée étrangement absurde de dédoublement de l'espace dont ne sait encore aujourd'hui trop quoi faire. Une idée essentielle, et nécessaire, c'est que toute particule a une histoire qu'il faut bien décrire de A à Z – simplement pour des raisons de



conservation de la matière – sinon quoi? Et ce, depuis le commencement du Monde et jusqu'à la fin des temps; ce qui n'est pas sans conséquence puisqu'il va falloir suivre cette trajectoire-ci (et par exemple la vôtre, lecteur, celle de chacune des particules qui vous constitue) depuis le commencement du Monde jusqu'à la fin des temps et aussi bien toutes les autres trajectoires possibles qu'il faudra étendre dans un espace qui est donc parfois à inventer. Avant et après, à droite et à gauche, bref il faudra leur trouver à tous et à toutes l'espace pour naître et pour mourir; quoi de plus philosophique comme idée... À toutes particules, réelles, virtuelles, imaginables, il faut trouver – inventer – l'espace d'où elles viennent et où elles seront; un espace pour exister; un espace qui doit donc être étendu de l'infini du passé à celui du futur, à moins qu'elles ne trouvent leur fin – ou leur début – en un instant singulier de leur histoire: une "singularité" C'est là sans doute la raison la plus forte, incontournable, de l'extension de la solution de Schwarzschild, cet espace absolument étrange mais nécessaire qui fut mis en place par Kruskal en 1960 et qui se construira peu à peu dans la tête des relativistes; c'est, bien sûr, aussi celle qui préside à l'étude des modèles cosmologiques.

Ainsi, et si l'on en revient un instant à la théorie telle qu'elle était généralement comprise avant (et souvent encore après!) Kruskal, on voit quel chemin il a fallu parcourir. Passer d'un espace très proche de l'espace banal à cet espace dédoublé en deux feuillets orientés, dont l'interprétation n'est pas simple et dont le sens l'est encore moins. En fait c'est seulement à une toute petite partie de l'espace de Kruskal que l'on a pu donner un sens physique; pour le reste, il faut bien reconnaître que l'on est... dans la science-fiction. De toute manière, on voit là à quel point la relativité générale implique une cosmologie et combien Einstein avait raison de se poser la question de la structure de l'espace à l'infini.

Et l'on comprend que la cosmologie ait pu être, en particulier dans les années trente, un lieu privilégié pour penser ces questions, et aussi pourquoi il s'est trouvé plusieurs cosmologues réputés, G. Lemaître, H.P. Robertson, et R.C. Tolman, aux sources de la refonte de l'interprétation de la solution de Schwarzschild et en particulier de sa "singularité" Car s'il était un lieu où penser l'espace était un peu plus aisé qu'ailleurs, c'était bien en cosmologie. Pour des raisons techniques aussi bien que pour des raisons idéologiques.

Mais aussi à l'inverse, il faut bien voir qu'il n'est pas évident d'imaginer et même d'accepter que la structure géométrique décrivant un objet compact, disons une étoile, soit non seulement courbée mais brisée, déchirée, topologiquement éclatée; bref, bien que l'idée fut au départ de la théorie – depuis que l'espace est représenté par une variété différentielle de Riemann – il n'était pas

si simple d'accepter que l'espace était vraiment à repenser, à ré-inventer ici et maintenant. Rien d'étonnant donc à ce que la question ait d'abord pu se poser dans le cadre de la cosmologie... Même l'idée de "courbure" a été plus facilement acceptée à longue portée – dans le cadre de la courbure des rayons lumineux par exemple – qu'à courte portée. Il n'en est pas moins étonnant que l'on n'ait pas été – avant les années soixante – jusqu'au bout de cette idée. Bref, ce n'est pas sans raisons que la cosmologie fut un lieu pour penser la relativité générale...

Dans un livre technique, publié en 1965 sur un sujet alors très à la mode *Gravitation Theory and Gravitational Collapse*, coproduit par John Wheeler et ses collaborateurs, c'est sans doute Wheeler qui, s'exclamant, montre bien à quel point cette manière de voir était nouvelle en 1965...

"A part la prédiction de la théorie d'Einstein concernant l'expansion et la contraction de l'univers, toutes les autres applications de la relativité générale (précession du périhélie, déplacement vers le rouge, déflexion de la lumière, radiation gravitationnelle) envisagées normalement, ont à voir avec de petites déviations au caractère plat de l'espace. Pas ici. L'effondrement gravitationnel produit des géométries aussi peu plates que possible."<sup>23</sup>

... Wheeler qui fut un des premiers à accepter et à mettre en scène le caractère révolutionnaire de la relativité générale.

### Le statut de la cosmologie à l'heure de l'étiage

Un des reproches essentiels – et justifié – que l'on fera, durant l'étiage, à la cosmologie, c'est la précarité de son lien à l'observation. Ainsi que le souligne fortement Synge avec bien des auteurs: "de toutes les branches de la science moderne, la théorie cosmologique est la moins liée à l'observation"<sup>24</sup> On sait en effet à quel point les facteurs observationnels sur lesquels se base la loi de Hubble sont délicats à mesurer. Comment départager alors les différents modèles d'univers possibles à l'intérieur de chaque théorie, mais encore plus les différentes théories qui admettent le plus souvent des modèles heuristiquement

<sup>23</sup> Eisenstaedt, 1986, p. 155.

<sup>24</sup> Synge, 1960, p. 329.

voisins et parfois même équivalents? Alors, sur le plan empirique, la cosmologie n'apporte que fort peu de choses à la relativité générale.

Ces faits permettent d'expliquer le peu de confiance dont témoignaient la plupart des relativistes quant au champ cosmologique et les précautions dont s'entouraient ceux qui y travaillaient. De plus, à la trop grande liberté que l'observation laissait à la théorie se conjugait la proximité de la "philosophie" ce qui rendait quasiment suspecte cette spécialité déjà marginale.

Mais, d'une manière paradoxale, ce sont précisément ces caractéristiques spéculatives qui donneront à la cosmologie une importance manifeste dans le développement de la relativité générale. C'est un point que Richard C. Tolman, qui publia en 1934 un des ouvrages<sup>25</sup> les plus remarquables sur la relativité générale – le premier manuel largement consacré à la cosmologie – comprendra très tôt. Ainsi fait-il observer dans son livre que "puisque nous avons basé notre traitement sur une théorie physique acceptable, nous sommes en droit d'attendre du comportement théorique de nos modèles au moins qu'ils nous informent et qu'ils *libéralisent notre manière de penser* quant aux possibilités conceptuelles du comportement de l'univers réel"<sup>26</sup>

C'est bien là en effet qu'il faut voir tout l'intérêt de la cosmologie pour la relativité générale ou, plus précisément, pour l'image de la relativité générale que s'en font et que forgent ses propres spécialistes. Car, à l'inverse de toutes les autres applications de la théorie connues à l'époque, les effets cosmologiques ne sont pas liés à une vision néo-newtonienne; en ce sens, la cosmologie relativiste représente alors la seule branche de la relativité générale disposant d'une réelle autonomie face à la théorie de Newton.

En fait, jusqu'au début des années soixante, la cosmologie a constitué le seul domaine où la relativité générale a pu être projetée, pensée dans le cadre d'une structure de l'espace-temps (presque) dégagée des schémas newtoniens, d'un espace vraiment courbé. C'est aussi en ce sens que la cosmologie représentera un apport essentiel au développement récent de la théorie.

Sans doute, l'exiguïté du champ directement expérimentable est à l'origine des problèmes de la relativité générale. Mais, plus encore, c'est la structure même des champs envisagés et envisageables, du domaine dont peuvent s'auto-riser les spécialistes, qui bloque son évolution. Un domaine qui, pour être pris au sérieux, ne peut se situer en un lieu à jamais inaccessible observationnellement mais qui doit aussi laisser à la théorie la place de s'exprimer. C'est précisément à

<sup>25</sup> Tolman, 1934.

<sup>26</sup> *Ibid.*, p. 445. C'est moi qui souligne.

cette frontière entre le spéculatif et l'empirique que se situait alors la cosmologie, à la fois raillée par les physiciens sérieux et travaillée par les relativistes avisés. Ce n'est d'ailleurs pas par hasard si la cosmologie a pu remplir cette fonction; mais parce qu'elle se situe aux fondements mêmes de la relativité générale pour laquelle tout problème doit être pensé globalement. C'est bien le chemin qu'il a fallu faire pour comprendre la solution de Schwarzschild.

## RÉFÉRENCES

- DE SITTER, Willem (1917). "On the Relativity of Inertia. Remarks Concerning Einstein's Latest Hypothesis" *Koninklijke Akademie van Wetenschappen te Amsterdam. Section of Sciences. Proceedings*, 19: 1217-25.
- EINSTEIN, Albert (1912). "Gibt es eine Gravitationswirkung die der elektrodynamischen Induktionswirkung analog ist?" *Vierteljahrsschrift für gerichtliche Medizin und öffentliches Sanitätswesen*, 44: 37-40.
- \_\_\_\_\_. (1913). *Entwurf einer verallgemeinerten Relativitätstheorie und einer Theorie der Gravitation. I. Physikalischer Teil*. Leipzig and Berlin: B. G. Teubner.
- \_\_\_\_\_. (1916). "Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie." *Annalen der Physik* 49: 769-822. Traduction française sous le titre "Les fondements de la théorie de la relativité générale" In: Albert Einstein *Œuvres choisies*, Vol. 2. Françoise Balibar (éd.), Paris: Seuil, 1993, p. 179-227.
- \_\_\_\_\_. (1917). "Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie." *Königlich Preussische Akademie der Wissenschaften* (Berlin). *Sitzungsberichte*: 142-52. Traduction française sous le titre "Considérations cosmologiques sur la théorie de la relativité générale." In: Albert Einstein *Œuvres choisies*, Vol. 3. Françoise Balibar (éd.); Jean Eisenstaedt (trad.) pour la partie "Cosmologie" Paris: Seuil, 1993, p. 82-129.
- EISENSTAEDT, Jean (1982). "Histoire et singularités de la solution de Schwarzschild (1915-1923)". *Archive for History of Exact Sciences*, 27: p. 157-98.
- \_\_\_\_\_. (1986). "La relativité générale à l'étiage: 1925-1955". *Archive for History of Exact Sciences*, 35: 115-85.
- \_\_\_\_\_. (1989). "The Early Interpretation of the Schwarzschild Solution, 1915-1923." In *Einstein and the History of General Relativity*. Proceedings of the 1986 Osgood Hill Conference. Einstein Studies, Vol 1, John Stachel and Don Howard, eds. Boston: Birkhäuser, p. 213-33.
- FRIEDMAN, Michael (1983). *Foundations of Space-Time Theories*. Princeton: Princeton University Press.
- HOEFER, Carl (1994). "Einstein's Struggle for a Machian Gravitation Theory". *Studies in History and Philosophy of Science*, 25: p. 287-335.
- KRUSKAL, M.D. (1960). "Maximal Extension of Schwarzschild Metric" *Physical Review*, 119: p. 1743-5.
- MERLEAU-PONTY, Jacques (1965). *Cosmologie du XXeme siècle*. Paris: Gallimard.
- SYNGE, J.L. (1960). *Relativity: The General Theory*. Amsterdam: North-Holland.
- TOLMAN, Richard C. (1934). *Relativity, Thermodynamics and Cosmology*. Oxford: Clarendon Press.

# Cosmologie et matière quantique: convergences conceptuelles\*

Michel Paty\*\*

**Résumé:** Les représentations théoriques de l'*ultra-macroscopique*, régi par la force de gravitation, et de l'*ultra-microscopique*, domaine de la physique quantique infra-atomique, deux régions extrêmes de la structuration de la matière longtemps pensées comme déconnectées, sont mises désormais en rapport par la *physique* elle-même, qui établit une convergence et un recouvrement partiel de leurs objets. Les phases primordiales de l'Univers en expansion, qui déterminent les premières impulsions de la dynamique du cosmos en imposant les contraintes physiques "initiales" de la cosmologie, coïncident avec l'objet de cette partie fondamentale de la physique subatomique qui concerne les symétries des champs et leurs brisures.

Cette rencontre entre la cosmologie et la matière quantique s'effectue par deux voies: celle des *lois de la nature*, et celle de la *constitution de la matière*, que l'on peut suivre aussi bien en étudiant les *circonstances historiques* de ces convergences conceptuelles et théoriques (mais aussi factuelles) qu'en analysant leurs *conditions épistémologiques*. L'Univers primordial de la cosmologie est considéré comme laboratoire virtuel de la physique des champs à symétrie de jauge dans la région asymptotique de leurs unifications. La pensée de la matière semble portée dans cette direction par un mouvement vers l'indifférenciation, qui part de l'identité des indiscernables constitutive de la physique quantique et va vers une identification progressive des divers *genres* d'états physiques (indifférenciation croissante par les *symétries dynamiques* d'ordres plus élevés). Le sens physique acquis désormais par de tels concepts théoriques incline à y voir l'indice d'une objectivation plus grande de la théorie physique, qui ne *décrit* pas seulement le comportement de ses objets, mais les *détermine* et les *constitue* eux-mêmes de plus en plus étroitement.

La descente au fond de la matière ne s'effectue désormais pas tant dans les dimensions spatiales, que dans une plus grande indifférenciation des particules de la matière quantique: et de même pour la remontée vers "l'origine du temps" Cette dernière question s'éclaire par une analyse du rapport entre le temps et les théories physiques, notamment dans la perspective du temps cosmologique. **Abstract:** The theoretical representations of the *ultra-macroscopic*, governed by the force of gravitation, and of the *ultra-microscopic*, domain of infra-atomic quantum physics, two extreme regions of the structuration of matter that were for long thought as being disconnected, are put henceforth in relation by physics itself, establishing convergence and partial recovery of their objects. The primordial phases of the Universe in expansion, that determine the first impetuses of the dynamics of the cosmos by imposing the "initial" physical constraints of cosmology, coincide with the object of this fundamental part of subatomic physics that concerns symmetries of fields and their breakings.

---

\* Journée en hommage à Jacques Merleau-Ponty, Université de Paris 10-Nanterre, 6, 7 et 8 octobre 1997.

\*\* Equipe REHSEIS (UMR 7596), CNRS et Université Paris 7-Denis Diderot, 37 rue Jacob, 75006 Paris, France. E-mail: paty@paris7.jussieu.fr.

The encounter between cosmology and quantum matter happens by two ways, that of the *laws of nature*, and that of the *constitution of matter*, as one can trace it as well by studying the *historical circumstances* of these conceptual and theoretical (and also factual) convergences as by analyzing their *epistemological conditions*. The primordial Universe of cosmology is considered as a virtual laboratory for the physics of gauge symmetry fields in the asymptotic region of their unifications. The thought of matter seems to be oriented in this direction through a movement towards indifferentiation, that starts from the identity of the indistinguishables which is constitutive of quantum physics and goes towards a progressive identification of the various types of physical states (growing indifferentiation through *dynamic symmetries* of higher orders). The physical content acquired henceforth by such theoretical concept inclines us to see there an indication for a greater objectivation of physical theory, that does not only describe the behavior of its objects, but *determines* them and *constitutes* themselves closer and closer.

The descent down to the bottom of matter is henceforth not so much a descent down toward infinitely small spacial dimensions, than a descent towards a greater indifferentiation of quantum matter particles: and similarly for the ascent to the “origin of time” This last question is enlightened by an analysis of the relationship between time and physical theories, notably in the perspective of cosmological time.

*“Alors, je vis l’aleph.”*

*“... Le diamètre de l’Aleph devait être de deux ou trois centimètres, mais l’espace cosmique était là, sans dimension de volume.”*

*“... J’eus le vertige et je pleurai, car mes yeux avaient vu cet objet secret et conjectural, dont les hommes usurpent le nom, mais qu’aucun homme n’a regardé: l’inconcevable univers”*

Jorge Luis Borges, *L’Aleph*.

NOUS NE VOYONS NI l’Univers ni la matière élémentaire, mais nous pouvons les concevoir, comme dirait Descartes (nous n’imaginons pas l’infini, écrivait-il<sup>1</sup>). Et, au fur et à mesure que notre vision se précise, nous les voyons en partie se confondre, se pénétrer l’un l’autre. Du moins l’un nous aide-t-il à concevoir l’autre. C’est à quelques réflexions sur ces données de la science contemporaine que ce qui suit voudrait inviter, en nous questionnant sur les constances de raison qui ont rendu possible un tel éclaircissement mutuel inattendu.

L’Univers considéré dans son ensemble, comme une totalité, et la “constitution intime” de la matière, aujourd’hui qualifiée comme la matière quantique, atomique et subatomique, pouvaient assez paraître correspondre, jusqu’à une époque récente, aux deux immensités de Pascal, celle de l’infinie grandeur

<sup>1</sup> Descartes, lettre à Mersenne, 27 mai 1630, in AT, Vol. 1, p. 152.

et celle de l'infinie petitesse<sup>2</sup> En les invoquant, l'auteur des *Pensées* n'envisageait pas qu'il fût possible ni même seulement pensable d'en faire jamais le tour, lui qui les voyait s'enfuir vers plus d'infini à chaque approche. Du moins nous reste-il de la question pascalienne, indépendamment des dimensions physiques de l'univers et de l'atome, l'interrogation sur les soubassements de notre pensée du monde, qui paraissent bien devoir continuer à tenir, quels que soient nos efforts, "le milieu entre tout et rien" Un peu plus près de nous, ces deux domaines, celui de l'Univers et celui de l'atome, étaient situés tous deux naguère parmi les terres interdites du positivisme, échappant par nature à la connaissance scientifique, à la connaissance positive.

Or voici que, depuis un certain temps, la cosmologie et la physique se sont attelées avec quelque succès à la tâche, peut-être enfin lavée de la malédiction de Sisyphe, de connaître les objets physiques le plus grand et le plus petit qui soient concevables. Ceux-ci, d'ailleurs, ne seraient plus infinis, si l'Univers bien qu'illimité reste fini, selon la théorie de la relativité générale et la conception des espaces riemanniens, et si les particules élémentaires nous font toucher la limite de leur extension spatiale (les leptons et les quarks seraient des particules ponctuelles, de dimension inférieure à  $10^{-18}$  cm), selon la théorie quantique des champs (électrodynamique quantique, théorie de jauge électrofaible, chromodynamique quantique) dans son accord aux expériences<sup>3</sup> Cela, du moins, avec d'autres conditions, permettrait plus facilement de les concevoir selon l'approche scientifique. A propos de la limite possible de signification physique d'un accès aux distances de plus en plus petites, on peut avancer que la descente au fond de la matière ne s'effectue désormais pas tant dans les dimensions spatiales, que dans une plus grande indifférenciation des particules de la matière quantique (nous y reviendrons).

Ces deux domaines, celui de l'Univers dans sa totalité, et celui des particules quantiques les plus élémentaires, ont été longtemps pensés comme déconnectés, relatifs à des conditions physiques qui semblaient à l'opposé les unes des autres, et relevant d'approches sans commune mesure: l'*ultra-macroscopique*, régi par une force de gravitation entre les masses agissant dans un espace-temps continu, et l'*ultra-microscopique*, soumis aux interactions quantifiées de la physique infra-atomique. Les représentations théoriques correspondantes, dévelop-

2 Pascal, *De l'Esprit géométrique* (vers 1657) et *Pensées* (1670), in Pascal [1963], respectivement p. 351-4 et 525-7.

3 Cf., en part., Feynman [1985], Cohen-Tannoudji & Spiro [1986], Salam, Heisenberg & Dirac [1990], Lopes & Escoubès [1995], Bimbot & Paty [1996].

pées depuis les années vingt de ce siècle, sont aussi différentes que possible et, comme l'écrivait Einstein lui-même, "semblent peu se prêter à une unification"<sup>4</sup>: la théorie de la relativité générale est une théorie déterministe et causale du champ continu, alors que la théorie quantique est une théorie de la discontinuité, faisant intrinsèquement appel aux *probabilités*, qui permettent de raccorder la discontinuité des grandeurs caractérisant un état à des équations différentielles pour les fonctions d'état qui décrivent les systèmes physiques (ces fonctions ayant les propriétés d'amplitudes de probabilité).

Ces deux domaines limites de la structuration de la matière universelle étaient traditionnellement pensés du point de vue théorique, notamment depuis la connaissance de la matière atomique (quantique), comme disjoints. Ils ne sont plus conçus aujourd'hui sans connexions, celles-ci ayant été appelées tout d'abord par la *cosmologie physique*, qui impliquait au départ la dynamique d'agrégats de matière, et qui implique aussi, en raison de son caractère évolutionnaire, celle des particules de matière. Ces deux régions extrêmes de la structuration de la matière sont mises désormais en rapport par la *physique* elle-même, au point d'établir une convergence partielle de leurs objets.

Bien des problèmes de la cosmologie contemporaine font appel à la connaissance des particules élémentaires, et une partie importante de cette discipline, celle qui se préoccupe de déterminer les premières impulsions de la dynamique du cosmos en lui imposant des contraintes physiques "initiales" se confond avec une partie fondamentale de la physique subatomique, qui concerne les symétries des champs et leur brisure. *L'examen épistémologique* de chacune des deux disciplines, de leurs objets et de leurs approches théoriques, auquel nous consacrerons l'essentiel de ce qui suit pour certains aspects, laisse également déceler des convergences conceptuelles qui permettent de mieux comprendre les recouvrements d'objets physiques. Nous rappellerons, chemin faisant, quelques éléments des premières convergences ou coïncidences d'objets, qui se rapportent à l'histoire de la rencontre des deux disciplines<sup>5</sup>.

La première région extrême de la matière, la cosmologie<sup>6</sup>, a pour objet l'Univers, dans son unicité et sa singularité, autrefois pensé immobile et statique, aujourd'hui évolutif, en expansion, déroulant l'espace-temps matériel; la

---

4 Einstein [1940], trad. fr., p. 116.

5 Paty [1980a, 1986a].

6 Sur l'astronomie, l'astrophysique et la cosmologie contemporaine, voir, en particulier, Schatzman [1962], Merleau-Ponty [1965], Sciamia [1971], Weinberg [1977], Silk [1980], Hawking [1988], Andrillat *et al.* [1993], Audouze, Musset, Paty [1990], Hakim [1993], Thorne [1994].



seconde est la matière quantique, des atomes aux noyaux atomiques et aux particules élémentaires qui, ramenées à leurs constituants les plus fondamentaux, les *quarks* et les *leptons* et leurs *bosons d'échange*, sont "ponctuelles", non affectées par le temps, et indestructibles, du moins selon une certaine acception, qui leur substitue des conservations fondamentales, celles des diverses *charges quantiques* (électrique, baryonique, leptonique, de saveurs, etc.), celles du nombre de fermions, celle de la masse-énergie<sup>7</sup>

L'étude des *circonstances historiques* aussi bien que celle des *conditions épistémologiques* de la rencontre entre la cosmologie et la matière quantique révèlent que cette rencontre s'effectue par deux voies: celle des *lois de la nature*, et celle de la *constitution de la matière*.

## Cosmogonie physique et pensée cosmologique. La voie des lois de la nature

Prenons d'abord la première voie, celle des lois générales du monde physique (qui constituaient classiquement la *cosmologie* au sens propre, par exemple selon la définition donnée par Emile Littré dans son *Dictionnaire de la langue française*<sup>8</sup>). Ces lois s'appliquent au cosmos entier, en raison de l'unité de la matière: il s'agissait d'abord des lois (ou principes) du mouvement des corps et de l'attraction universelle newtonienne. D'Alembert énonçait, pour sa part, dans l'*Encyclopédie*, en s'appuyant sur la connaissance physico-mathématique développée dans le sillage de Newton (mais aussi inspirée, à des titres divers, par Descartes et par Leibniz<sup>9</sup>), une conception de la cosmologie qui en faisait "la science du Monde ou de l'Univers considéré en général, en tant qu'il est un être composé, et pourtant simple par l'union et l'harmonie de ses parties..."<sup>10</sup>.

Dans la droite ligne de la physique des équations différentielles et du déterminisme laplacien, qui dit lois de la nature et conditions initiales énonce la possibilité d'une *cosmogonie*<sup>11</sup>, c'est-à-dire d'une théorie de la constitution d'une

7 Certaines de ces conservations sont admises comme absolues (charges électrique, masse-énergie), ou quasiment (charges baryonique, leptonique), d'autres seulement partielles, suivant la nature des champs d'interaction et des symétries auxquelles ces derniers sont soumis.

8 Littré [1880], éd. 1971.

9 Paty [1998].

10 D'Alembert [1754].

11 Au sens également défini par Littré.

portion de l'Univers à partir de ses éléments localisés (la nébuleuse de gaz qui donna le système solaire, dans l'hypothèse de Kant-Laplace<sup>12</sup>). Je passerai, ici, sur la question du rapport entre *cosmologie* et *cosmogonie*, sur leurs définitions variables et sur les changements de signification de ces notions<sup>13</sup>.

La naturalisation des cosmogonies par la physique, étayée par la causalité laplacienne de la *Mécanique céleste*, étendue d'une causalité locale à un déterminisme et à une localité plus vaste, contribua (avec d'autres pensées implicitement cosmologiques concernant les concepts ou les théories de la physique<sup>14</sup>) à préparer la pensée de la cosmologie comme discipline scientifique et la théorie actuelle concernant l'état de l'Univers, fondée sur la théorie moderne de la gravitation, la Relativité générale. Les conditions initiales, ou plutôt, aux limites, étaient posées (du moins dans la pensée d'Einstein lorsqu'il écrivit son article de 1917 qui ouvrait l'ère de la cosmologie du point de vue théorique) à partir d'une réflexion sur la nature de la masse d'inertie, conçue en relation à d'autres masses mais non à l'espace (qui, sans cela, redeviendrait absolu). Cette réflexion entraînait la pensée physique vers la pensée cosmologique en posant les conditions de l'Univers au-delà des corps physiques, pour aboutir à la conclusion qu'il ne peut y avoir d'espace au-delà des masses et que l'Univers est fermé<sup>15</sup>. L'idée d'un tel Univers avait été rendue possible par l'"espace fini et illimité" de la géométrie de Riemann<sup>16</sup>.

On remarquera en passant que la théorie physique qui permit ce passage avait elle-même été tributaire, à son origine, d'une pensée cosmologique: le "principe de la relativité de l'inertie" (énoncé par Mach comme une proposition, et dénommé ainsi, puis "principe de Mach" par Einstein), qui fait intervenir l'interaction entre elles de toutes les masses de l'Univers, avait servi d'inspiration initiale à Einstein pour formuler, de manière plus maîtrisée, le principe de *covariance générale*, indépendant de tout référentiel<sup>17</sup>. Et cette généralisation elle-même, au-delà des systèmes d'inertie et à tous les mouvements, concernait l'ensemble des mouvements concevables *pour l'Univers entier*: elle était en cela

---

12 Kant [1755], Laplace [1796].

13 Paty [1993b].

14 Voir Merleau-Ponty [1983].

15 Einstein [1917].

16 Riemann [1854].

17 Voir, en part., Mach [1883], Einstein [1916b, 1921]. Cf. Paty [1993a], Chap. 5.

encore tributaire de l'idée cosmologique, mais retournée à un sens qui correspondait peut-être davantage au sens classique de la généralité des lois.

Notons encore que Henri Poincaré lui-même, en considérant le principe de relativité, étendu de la mécanique à l'électromagnétisme et à la "nouvelle mécanique", ne le restreignait aux mouvements d'inertie que pour des raisons d'approximation nécessaire<sup>18</sup>. Il le concevait en fait dans sa généralité, concernant tous les mouvements, en raison de son rapport direct à la relativité de l'espace qui, idéalement, se rapporte à l'ensemble des corps contenus dans l'espace entier de l'Univers, en déplacements quelconques les uns par rapport aux autres. Mais si elle restait idéale, cette proposition serait tautologique ou de pure définition et ne nous donnerait, estimait-il, aucune prise effective sur les propriétés des corps physiques réels. Il fallait donc se contenter, dans la pratique, de la considérer pour un ensemble plus local de corps, et pour des mouvements d'inertie. L'idée cosmologique apparaît liée, dans la pensée de Poincaré, à la rationalité des lois les plus générales de la géométrie et, dans cette mesure, de la physique.

### Conditions initiales et échelles de correspondance

Revenons à la cosmologie elle-même. La théorie de la relativité générale jointe à la question des conditions aux limites de l'espace(-temps) physique engendrait la cosmologie comme théorie et discipline scientifique. Quand la nouvelle cosmologie abandonna quelque temps plus tard l'univers statique (avec Alexander Friedmann, dès 1922<sup>19</sup>), elle se conçut comme temporelle, en ce sens qu'elle avait pour objet l'Univers considéré non seulement dans sa structure et sa dynamique interne mais dans son évolution au cours du temps. A y bien regarder d'ailleurs, c'était là une implication naturelle du lien indissoluble de la matière non pas seulement avec l'espace, mais avec l'espace-temps. Même simplifiés, les modèles cosmologiques devaient respecter l'indissociabilité de l'espace-temps (à la différence du premier modèle d'univers cylindrique d'Einstein qui séparait la coordonnée temporelle).

Inscrite dans le temps aussi bien que dans l'espace, la nouvelle cosmologie évolutionnaire d'espace-temps se donnait les conditions de correspondre à une cosmogonie, puisqu'elle pouvait désormais être conçue comme une loi

18 Poincaré [1907, 1912]. Cf. Paty [1996].

19 Friedmann [1922].

générale combinée à des “conditions initiales” Ces dernières étaient en fait celles d’un instant quelconque, par exemple celles de l’état présent de l’Univers, la loi permettant de le ramener à un autre état, passé ou futur.

La question des conditions *initiales* au sens propre, c’est-à-dire proches de *l’origine du temps*, n’avait pas vraiment de sens physique si l’on s’en tenait à la seule théorie de la relativité générale, c’est-à-dire au seul champ de gravitation, qui n’en faisait qu’un point singulier, purement mathématique, sans contenu physique. Elle reçut ultérieurement un nouveau sens (physique, du moins jusqu’à un certain point), avec l’introduction de *champs de matière* autres que le champ gravitationnel. Mais l’idée de détermination complète de la suite du déroulement de l’Univers (entendu comme le complexe *espace-temps-matière*) par les lois de la nature (c’est-à-dire les lois des champs) et les conditions “initiales” (entendues désormais comme *un peu après le zéro des temps*), cette idée-là restait entière.

Ces champs de matière, aux très petites distances qui correspondaient à l’espace de l’Univers et aux très petits “premiers instants”, en-deçà de la prédominance du champ de gravitation aux grandes distances, sont les champs d’interaction de la matière quantique, les “champs de jauge”, tels qu’on peut les considérer dans des conditions énergétiques et spatio-temporelles particulières (grande densité de matière, volume d’espace restreint, temps primordiaux), où ils sont soumis à des relations de symétries caractéristiques, qui contribuent (et peut-être devraient suffire) à les déterminer.

Le pas décisif vers la connexion étroite entre la cosmologie et la matière quantique fut effectivement franchi quand se fit jour la nécessité de prendre en compte les champs autres que celui de gravitation, par une extrapolation de l’expansion de l’Univers vers l’origine de l’axe temporel, qui correspond à une densité extrême (ou quasi infinie) de la densité de matière, c’est-à-dire de l’énergie, dans des conditions évidemment quantiques. Il devait aboutir à une identification partielle des objets de la cosmologie et de la physique subatomique.

Aux premières phases de l’évolution de l’Univers, qui sont celles de la cosmogénèse, l’échelle des énergies élevées et des très petites dimensions spatiales coïncide avec les conditions physiques dont les physiques nucléaire et des particules font l’objet de leurs recherches. Les théories récentes d’unification des champs d’interaction offrent même aujourd’hui aux physiciens des particules élémentaires la possibilité de trouver dans certains objets et événements cosmiques remarquables (objets denses, processus violents), mais aussi dans l’observation lointaine dans la distance, c’est-à-dire dans le temps, des données qui aident à résoudre leurs questions théoriques. En particulier, les symétries de la matière sont de plus en plus exactes pour les champs d’interaction et leur traitement unifié quand on remonte le temps de la cosmogénèse; on les voit se briser

au contraire, quand on descend son cours, engendrant la différenciation des champs et les masses des particules, causes lointaines, au fur et à mesure de l'expansion de l'Univers, des formes d'organisation ultérieures qui nous sont plus familières, les galaxies, la matière des étoiles, les objets cosmiques...

L'identification, par la cosmologie et par la théorie quantique de la matière, de leurs objets propres dans leurs régions asymptotiques respectives, est illustrée et justifiée par les échelles des grandeurs élémentaires qui les caractérisent, et par les correspondances, sur ces échelles, entre les conditions physiques de la matière élémentaire et celles de l'Univers aux premiers instants de son déploiement: température, densité, énergie, distance, relatives aux propriétés de la matière et du rayonnement, dans le domaine de la physique quantique. Il y correspond une échelle des temps qui représente les âges de l'Univers dans ces conditions, et qui dépend des modèles théoriques choisis, modèles d'univers d'une part, modèles théoriques de la matière "élémentaire" dans ces conditions de densité et de température, qui renvoient aux théories des champs fondamentaux, d'autre part.

Une telle échelle de correspondance des grandeurs physiques a évidemment un sens en raison de l'unicité de l'objet de la physique, de l'identité de la matière de l'Univers et de celle des particules. Largement démontrée dans le domaine observable, cette identité continue d'être postulée, pour les régions hors d'atteinte, asymptotiques, car elle est une condition de cohérence de la pensée physique de la cosmologie.

Cette unicité et cette identité constituent en fait la première condition de possibilité de la rencontre entre des disciplines aussi différentes que l'astrophysique et la physique subatomique (nucléaire et des particules), tant par les méthodes que par les thèmes de recherche. Une autre condition, servant de cadre à la rencontre, réside dans le fait que l'Univers a une "histoire" qui se déroule au long du temps.

### **La voie de la constitution de la matière**

La connaissance de la constitution de la matière du cosmos, qui constitue la seconde voie du rapprochement entre la cosmologie et la matière quantique, commença avec la spectrométrie stellaire (Fraunhoffer) qui ouvrit au siècle dernier l'astrophysique, dont l'objet était de déterminer la nature et les abondances des éléments chimiques constituant les étoiles. Elle connut un tour décisif avec les observations de Edmund Hubble et la formulation de la loi de ré-

cession des galaxies, qui inaugura la *cosmologie expérimentale* (ou faut-il dire seulement *observationnelle*)<sup>20</sup>.

Le spectre qui se déplace vers le rouge est bien celui des éléments qui constituent la matière dont sont faites les galaxies. Ces spectres, la physique avait déjà établi leur nature quantique, et la théorie quantique se trouvait alors dans une phase décisive de son élaboration. A partir du moment où la cosmologie était *physique*, et non pas seulement *mathématique* (comme on distingue astronomie physique et astronomie mathématique), elle portait en elle la question de la matière et de sa structure, et donc de la matière quantique au niveau de l'Univers lui-même. C'est précisément cette question que la suite du développement de la cosmologie allait rendre explicite jusqu'à ses ultimes conséquences.

Entretemps s'était développée l'idée d'une formation naturelle, par synthèse, des éléments chimiques. On doit à N. Lockyer, dès 1890, la première suggestion d'une genèse des éléments qui serait liée à l'évolution stellaire. Quelque temps après, la relation masse-énergie de la relativité restreinte fit imaginer à un Paul Langevin l'idée d'une constitution des différents atomes par fusion à partir d'atomes d'hydrogène<sup>21</sup>, et la nucléosynthèse des atomes dans les étoiles fut formulée à titre d'hypothèse avant de se voir confirmée<sup>22</sup>.

L'hypothèse de l'atome primitif de Georges Lemaître (1931), pensée à l'image de l'atome radioactif, extrapolé à l'Univers, constituait un modèle grossier et peu vraisemblable, correspondant plutôt à une idée générale, à une analogie difficilement justifiable en rigueur, mais qui fut inspiratrice<sup>23</sup>. Elle avait, en effet, cette vertu d'indiquer, malgré son invraisemblance et de manière encore lointaine, une direction de pensée qui s'avèrerait naturelle et féconde, quand l'analogie vague laisserait la place à une possibilité théorique précise. Cette direction était celle d'une connexion nécessaire, au point de fuite originaire de l'expansion de l'Univers, de la cosmologie avec la structure atomique et quantique de la matière. L'Univers-atome de Lemaître n'était plus inaltérable comme l'avaient été chacun de leur côté, dans les conceptions encore récentes, respectivement l'Univers et l'atome. Il était susceptible de transformations "spontanées" avec le temps, que Lemaître concevait sur le mode de la décomposition de l'atome radioactif.

---

20 Cf. Hubble [1936], Eddington [1933].

21 Langevin [1913].

22 En 1939, Hans Bethe proposait sa théorie du cycle de la fusion, dans les étoiles, de l'hydrogène en hélium, accompagnée de la production de neutrinos, aboutissant à la synthèse du carbone.

23 Voir Lemaître [1946].

Avec la théorie de George Gamow, de l'Univers considéré comme un "corps noir" (c'est-à-dire un four chauffé en équilibre thermique), le modèle devenait plus consistant et vraisemblable. Il évitait l'image originelle simplement métaphorique d'un Univers-particule en considérant l'Univers dans ces instants primordiaux comme l'état d'un *système physique* d'un genre connu, correspondant à des phénomènes que l'on savait décrire théoriquement, et dont on pouvait calculer les paramètres en fonction de données pensées comme observables. Au surplus, ce genre de système physique, un corps noir rayonnant à l'équilibre, avait constitué l'archétype même de la matière quantique dans ses premières manifestations connues (il avait suscité l'hypothèse du quantum d'action de Planck<sup>24</sup>). Il mettait en jeu des atomes ordinaires et du rayonnement électromagnétique, dont les propriétés étaient désormais bien établies par la physique quantique.

Les observations astronomiques qui le confirmèrent ou plutôt, historiquement parlant, qui permirent de le retrouver (puisque A. Penzias et R. Wilson firent leur observation fortuitement avant de connaître la prédiction que Gamow avait faite), portaient précisément sur de tels objets: le rayonnement électromagnétique fossile de longueur d'onde centimétrique (caractéristique d'un *corps noir* refroidi à la température de 2,7 K) auquel s'ajoutait l'abondance de l'hélium synthétisé dans l'univers primordial. Ces données se rapportent depuis lors à deux des problèmes les plus importants de la cosmologie observationnelle<sup>25</sup>. Le rayonnement, aujourd'hui fossile, fut produit dans un état d'équilibre avec les atomes (principalement d'hydrogène et d'hélium) qui se constituèrent alors (vers un temps cosmologique de trois minutes<sup>26</sup>), à partir des noyaux et d'électrons. Sa longueur d'onde diminua à mesure que le rayonnement se diluait et se refroidissait dans l'Univers en expansion.

Plus récemment, les constituants élémentaires de la matière (ceux qui sont connus aussi bien que d'autres encore hypothétiques) se sont vus mobilisés, soit pour servir de témoins éventuels (fossiles) des processus primordiaux (comme les neutrinos très lents du fond du ciel, qui sont la contrepartie du rayonnement radio centimétrique<sup>27</sup>, ou d'hypothétiques monopoles magnétiques lourds<sup>28</sup>), soit pour accompagner les processus ordinaires des corps qu'étudie l'astrophysique (particules de haute énergie émises dans les supernovæ, rayons

24 Formulée en 1900.

25 Tels qu'ils sont inventoriés par exemple dans *Physical Cosmology* de P.J.E. Peebles (Peebles [1971]).

26 Weinberg [1977].

27 Voir Paty [1995].

28 Dirac [1978] (en partic. la conférence sur "Magnetic monopoles"); Musset [1986].

cosmiques, etc.), soit encore pour rendre compte de la “masse manquante” de l’Univers, qui constitue actuellement l’un des principaux problèmes de la cosmologie observationnelle (neutrinos massifs, diverses formes de matière noire...) <sup>29</sup> Sans compter d’autres effets, comme la dissymétrie observée matière-antimatière, qui a une contrepartie théorique dans les processus dynamiques initiaux de l’expansion de l’Univers <sup>30</sup>. En retour, des constatations inexplicables classiquement, comme la très grande isotropie du rayonnement fossile du fond du ciel, trouvent une explication dans certains modèles hypothétiques de la théorie des interactions des particules et des champs fondamentaux, comme le modèle “inflationnaire” <sup>31</sup>

### L’Univers primordial comme laboratoire virtuel

A ce niveau où les particules et les champs quantiques rejoignent la cosmologie pour former cette nouvelle discipline mixte de la physique, intermédiaire entre les deux, qu’on appelle parfois l’“astroparticule”, les deux voies distinctes d’approche que nous avons décelées se retrouvent encore: les lois générales de la physique se confondent avec les lois de symétrie des champs dont les particules de la matière quantique sont la source, et d’ailleurs les champs et leurs sources tendent aussi, asymptotiquement, à s’indifférencier <sup>32</sup>

Dans cet état extrême de la coïncidence de leurs objets, la cosmologie et la physique subatomique se prêtent un secours mutuel, la seconde offrant à la première ses principes de symétrie qui entraînent des conséquences sur le cours ultérieur de l’expansion de l’univers et la formation de ses constituants (galaxies, etc.) à l’ère de la gravitation classique (que l’on pourrait appeler de la *cosmologie lente*), et la première s’offrant à elle comme un laboratoire naturel. Un laboratoire qui n’est pas d’accès direct, est-il besoin de préciser. Car tous les processus qui ont pu se succéder dans la phase primordiale de l’Univers ont été effacés par les suivants, jusqu’au dernier “lessivage” par le couplage de la ma-

---

29 Lachièze-Rey [1990].

30 Cf., p. ex., Bouquet [1990]. Les premières idées théoriques sur ce sujet remontent à un travail de Andréï Sakharov paru en 1967 (voir Sakharov [1984], article 7: “Violation de l’invariance CP, asymétrie C et asymétrie baryonique de l’Univers”, p. 95-8; voir aussi les articles 8 à 12 de cette collection).

31 Linde [1984], Nanopoulos [1990].

32 Dans les théories de supersymétrie.



tière atomique et du rayonnement. Mais cela n'interdit pas de tenter de les reconstituer d'une manière hypothético-déductive, ces états pouvant entraîner certaines conséquences susceptibles d'être constatées sur le long terme, comme des contraintes sur des paramètres tels que la proportion relative d'antimatière<sup>33</sup> ou l'existence de phénomènes comme... la formation de galaxies.

Toutefois, en étant ce "laboratoire" originel de la physique des particules et des champs, la cosmologie déborde la physique au sens habituel, faisant acquiescer à celle-ci des traits qui ne lui appartenaient pas traditionnellement, tels que: unicité de l'objet, non reproductibilité de son évolution temporelle, irréversibilité de la succession de transitions de phase qui caractérise cette dernière, etc.

Les théories de "Grande unification" qui imposent la considération d'énergies asymptotiques et une échelle des énergies, des distances et des temps correspondant à celle de l'univers dans les conditions de ses premiers instants, se sont imposées comme objet de recherche à la fois par leurs implications en physique des particules et par leurs conséquences en cosmologie: cette conjonction constitue un fait nouveau en physique. Ces théories sont relatives à ces deux domaines (ou ces deux sciences), et présentent corrélativement des traits différents de ceux des théories habituellement considérées en physique des particules.

En s'incorporant les théories de jauge unifiées, la cosmologie entre, à un certain stade de ses conditions, celles de l'univers primordial, dans le cadre des concepts et de la théorie quantique. En particulier, la signification d'une quantification de la gravitation, d'une unification de la mécanique quantique et de la relativité générale, prend ici toute sa force. Elle est exigée par une simple considération temporelle: celle des instants de l'univers qui précèdent la valeur du temps de Planck ( $t < 10^{-43}$  seconde), et dont les conditions physiques de densité d'énergie correspondent à la convergence des champs d'interaction de jauge subatomiques et du champ de gravitation. Du point de vue théorique, la gravitation quantique représente l'un des enjeux les plus importants de la cosmologie se constituant comme théorie fondamentale: cette perspective est peut-être ce qui légitime le mieux l'ambition de faire de la cosmologie une *théorie* fondamentale, contournant par là-même les difficultés épistémologiques (comme la place de l'observateur, etc.) considérées *a priori*.

---

33  $N_B$  et  $N_{\bar{B}}$  étant respectivement le nombre de baryons (généralisation du proton et du neutron) et d'antibaryons dans l'Univers, et  $N_\gamma$  le nombre de photons du rayonnement fossile, le rapport  $\frac{N_B - N_{\bar{B}}}{N_\gamma}$  observé est égal à  $10^{-9}$ .

Quant à la physique nucléaire et des particules, elle fournit aux astrophysiciens et aux cosmologues la description de processus fondamentaux dans un domaine, d'ailleurs inédit, qui permet de comprendre la structure de certains objets de l'Univers (considérons seulement les plasmas de quarks et de gluons des étoiles denses, ou les incidences de la physique des neutrinos sur l'astronomie) et celle de l'Univers primordial même.

La cosmologie des premiers instants de l'Univers d'une part et la physique de la matière nucléaire, des particules et des champs d'autre part, se fournissent mutuellement, avec leurs données respectives, des contraintes à respecter, permettant de mieux resserrer le filet des théories acceptables, des "modèles standards" de l'une et de l'autre (la théorie du "Big-bang" d'un côté, les théories de jauge électrofaible et chromodynamique pour les leptons et les quarks de l'autre). Elles se fournissent également des objets de recherche du point de vue expérimental, comme celle de particules ayant éventuellement joué un rôle fondamental au moment du découplage des champs d'interaction, ou de la formation de "germes" de structures qui ont ensuite donné les galaxies.

Cette convergence n'a fait que se renforcer depuis ses premières esquisses dans les années 70, et le *modèle standard* des cosmologues et des physiciens est désormais la juxtaposition de celui des champs à symétrie de jauge unifiés de la physique subatomique et celui du "big bang" de la cosmologie.

### L'indifférenciation des indiscernables

Est-il possible d'éclairer davantage les convergences factuelles et théoriques dont nous venons de parler, par une réflexion portant sur certains éléments conceptuels particulièrement adaptés à ces recouvrements de descriptions d'objets? L'on pourrait, par exemple, examiner l'idée suivante: *l'unité* et la *singularité* (ou *l'unicité*) de l'objet Univers, qui s'oppose à la multiplicité, à la diversité et à l'hétérogénéité des objets qu'il contient, dans le stade de son *évolution lente*, gouvernée par le champ d'interaction gravitationnel, retrouve, au stade de son *évolution rapide* (on entend ici *lent* et *rapide* selon l'échelle des temps de la cosmologie), une matière élémentaire mais caractérisée aussi par *l'unité* et, dans une mesure que nous allons préciser, par *l'indifférenciation*, propres à une *étouffe cosmique*.

Cette indifférenciation prend en premier lieu la forme de *l'indiscernabilité des particules quantiques identiques* (formulée dès les années 1925-1926), qui montre la matière quantique non pas sous la forme de particules individuelles toujours identifiables, mais sous celle de particules, toujours individuelles, certes<sup>34</sup> mais caractérisées seulement par un genre et *non discernables au sein de ce genre*.

On ne considère plus un électron, par exemple, comme s'il était identifiable de manière singulière, par exemple numérotable, au sein d'une collection de particules semblables, mais on doit le concevoir comme identique en tout point aux autres électrons, *indistinct d'eux*. (En corollaire, pour des raisons sur lesquelles nous allons revenir, un électron n'est pas superposable à un autre dans le même état quantique au sein d'un système physique, ce qui constitue le *principe d'exclusion de Pauli*<sup>35</sup>). Tout électron est absolument semblable à tout autre, autant dire que ces particules représentent des "clones" parfaits<sup>36</sup>. Et de même pour les autres genres de particules: chaque particule quantique est un exemplaire *individué*, mais *non identifiable* par rapport à un autre du genre auquel il appartient.

Les particules de la matière quantique sont ainsi réparties en espèces ou genres: atome d'hydrogène, électron, neutrino, proton, méson pi, etc., et ces "genres" les caractérisent complètement. Une *particule quantique* est donc décrite complètement par son *genre*, et un système de telles particules est complètement représenté par l'ensemble des états quantiques que ces particules peuvent occuper: ainsi se répartissent les électrons d'un atome selon les états possibles des divers niveaux déterminés par les nombres quantiques atomiques<sup>37</sup>.

Se référant à l'indiscernabilité, Hans Reichenbach proposa le terme de "*généntité*" des particules quantiques<sup>38</sup>. Cet état de choses réduit déjà de manière considérable le nombre des éléments individués et distincts qui constituent la matière. On rencontre déjà en physique classique une situation analogue, *jusqu'à un certain point*, puisque c'est en supposant que des particules d'une classe donnée sont identiques que l'on peut traiter une collection d'un grand nombre de ces objets par la mécanique statistique. Cette dernière, cependant, ne postule rien sur la *nature* de tels objets: c'est par une hypothèse sciemment simplifica-

34 La question du caractère individuel ou non des particules selon la mécanique quantique, encore discutée des années 30 aux années 60, est désormais clarifiée par la possibilité de construire des faisceaux de particules (électrons, neutrons, photons, etc.) très peu intenses et de structure temporelle très bien définie, de sorte que l'on soit assuré que, durant un durée contrôlable (p. ex.  $10^{-11}$  sec), une unique particule quantique traverse l'instrument d'analyse sans qu'il soit besoin de la détecter et donc de la perturber en lui faisant perdre son aspect corpusculaire.

35 Pauli [1925].

36 Bien entendu, les particules quantiques élémentaires ne gardent pas la mémoire de leur histoire individuelle, ce trait n'étant d'ailleurs pas propre aux seuls objets quantiques, mais étant commun à tout objet décrit par une physique réversible.

37 A savoir le nombre quantique principal,  $n$ , qui caractérise la couche d'énergie, les nombres quantiques  $l$ ,  $m$  et  $s$ , liés respectivement au moment cinétique, au moment magnétique et au spin.

38 Reichenbach [1956].

trice qu'elle les prend identiques et, en fait, discernables, qu'il s'agisse des particules d'un gaz ou des étoiles d'une nébuleuse. Elles sont dans une relation d'équivalence qui n'est qu'un choix de commodité, moyennant l'absence acceptée de certaines informations sur elles.

Comme elle ne se prononce pas sur leur nature, la mécanique statistique continue d'attribuer à de tels objets une individualité, dont rend compte le traitement statistique classique, avec l'interprétation *subjectiviste* correspondante: le caractère statistique signale une *ignorance*, celle, ici, de la *différence* d'identité entre les particules considérées comme identiques en pratique. Ludwig Boltzmann répartissait les particules d'un gaz dans des cellules d'occupation, en les comptant individuellement comme si chacune d'elle possédait, en plus de sa caractérisation de genre (atome de telle sorte, molécule monoatomique ou autre), *une identité propre* par laquelle elle se distingue de ses semblables.

La modification du traitement simplement statistique opérée par la physique quantique, par l'imposition de contraintes supplémentaires, revient, en fait, à se prononcer *sur la nature* des particules considérées, en n'attribuant plus leur équivalence théorique à une simplification ou à une ignorance, mais à un caractère physique. Elle a pour effet de réduire considérablement, pour un système de particules identiques, le nombre de ses états possibles. Soit un système ( $\mathcal{S}$ ) constitué d'un certain nombre ( $N$ ) de telles particules ( $P$ ) se trouvant dans un même état (décrit par une fonction d'état  $\psi$  et des grandeurs physiques  $\mathcal{A}$ ). Un échange (ou permutation) de deux particules ( $P_i$  et  $P_j$ ) identiques mais discernables (cas de la physique classique) transforme l'état  $\psi$  en un autre état, différent,  $\psi'$ . Une permutation de deux particules ( $P_i$  et  $P_j$ ) identiques mais indiscernables absolument, *par nature* (cas de la physique quantique), transforme le système en son image, qui peut correspondre soit au même système représenté par la même fonction  $\psi$  (symétrie), soit à son opposé, c'est-à-dire à la fonction  $-\psi$  (antisymétrie). La transformation correspond à une loi de symétrie particulière pour le système et sa fonction d'onde, appelée loi de "spin-statistique": l'antisymétrie vaut pour les systèmes de fermions (de spin ou moment angulaire intrinsèque demi-entier), tandis que la symétrie vaut pour les systèmes de bosons (de spin nul ou entier)<sup>39</sup>

Cette propriété des indiscernables implique une modification du traitement statistique, et donc l'abandon de la mécanique statistique proprement dite.

---

<sup>39</sup> Le spin des particules quantiques est en réalité exprimé en unités de  $\bar{h} = \frac{h}{2\pi}$

La statistique de Fermi-Dirac dans le premier cas, celle de Bose-Einstein dans le second, ne correspondent pas seulement à une modification de la *statistique*, dans le sens habituel du mot, mais à un changement de la *théorie* elle-même décrivant l'état physique du système par la fonction  $\psi$ , avec les grandeurs qui lui sont associées. Ce changement est celui opéré par la théorie quantique.

Nous ne discuterons pas ici de la modification subie, ce faisant, par la notion de probabilité, qui ne correspond plus à la définition de la mécanique statistique<sup>40</sup>. Nous voulons seulement insister sur ce qu'a de spécifique le type nouveau d'équivalence d'objets identiques exprimé par le concept d'*indiscernabilité*, ou de *génidentité*, des *particules quantiques*. C'est, en quelque sorte, une *indiscernabilité de nature*, et non plus d'ignorance; en supprimant l'identité propre à des individus même semblables qui subsistait en physique classique, elle entraîne un comportement statistique différent, première manifestation profonde de la spécificité quantique ou, si l'on veut, symptôme de l'accès au niveau quantique de la matière, qui peut être conçu comme un monde d'*objets* quantiques ayant cette propriété.

Il est possible de revoir sous cet angle tout le parcours de l'élaboration de la physique quantique depuis les travaux de Planck de 1900 jusqu'à son aboutissement avec la mécanique quantique dans les années 1926-1927. L'indiscernabilité des particules quantiques se trouve, de fait, au fondement même de la théorie quantique dès ses débuts, dans le travail de Max Planck sur le rayonnement du corps noir où, en partant de la mécanique statistique, s'inspirant de la physique des gaz de Boltzmann, il calculait la répartition des fréquences de rayonnement dans des cellules d'énergie d'un résonateur<sup>41</sup>. En éliminant de manière systématique certaines configurations pour obtenir un nombre discret d'états concordant avec la distribution observée de fréquences, Planck modifiait sans le savoir le comptage statistique à la Boltzmann pour des éléments discernables en un comptage statistique *pour des éléments indiscernables*, comme Einstein s'en aperçut en 1925 à la suite du travail de Bose sur le rayonnement et du sien propre sur les gaz monoatomiques<sup>42</sup>.

La statistique de Bose-Einstein, valable pour le rayonnement électromagnétique (gaz de photons) comme pour des gaz d'atomes de spin entier, ap-

40 Paty [1988], chap. 5; [1990c], [à paraître, a], [à paraître, b].

41 Voir Kastler [1981], Darrigol [1988].

42 Bose [1924], Einstein [1924, 1925a et b]. Einstein, lettre à Erwin Schrödinger du 28.2.1925 (Archives Einstein). Cf. Paty [à paraître, a].

parut liée à la notion d'onde de matière développée par Louis de Broglie<sup>43</sup>. Elle permettait de concevoir l'accumulation de particules de rayonnement (photons) ou d'atomes d'une certaine espèce (bosons) totalement indiscernables dans un même état: d'où résultent respectivement l'émission stimulée de rayonnement par transition entre des niveaux atomiques<sup>44</sup> (et ses conséquences à terme, le pompage optique et l'effet laser<sup>45</sup>), aussi bien que la condensation de Bose-Einstein<sup>46</sup>. Quant à la statistique de Fermi-Dirac, elle donnait immédiatement l'explication théorique du principe d'exclusion de Pauli<sup>47</sup>, rendant ainsi naturellement compte de la classification périodique des éléments chimiques.

### La "générité" ou le sens physique d'un concept théorique

La "générité" des particules (ou des états) quantiques indiscernables est caractérisée exclusivement par les valeurs des grandeurs physiques de masse, de spin, de charge, etc., qui sont les grandeurs quantiques déterminant cet état. C'est l'état qui définit l'identité, quelque soit le nombre des "individus", qui continuent par ailleurs d'être pensables individuellement, dans le sens d'être dénombrables: en effet, pour un système de particules données, le nombre de ces particules est une grandeur physique au sens de la mécanique quantique (*valeur propre d'un opérateur*)<sup>48</sup>

---

43 de Broglie [1924]. Einstein fit le rapprochement dès qu'il eut connaissance de la thèse de Louis de Broglie, que lui communiqua Paul Langevin. Cf. Einstein [1925a et b], et Albert Einstein, lettre à Paul Langevin, 16.12.1924, *in*. L. Langevin [1972].

44 Einstein [1916a].

45 Cf., p. ex., Kastler [1973].

46 Phénomène prédit dès 1925 (Einstein [1925], Griffin, Snoke & Stringari [1995]), observé en 1995 seulement à des températures extraordinairement basses: des dizaines de milliers d'atomes d'hélium liquide à l'état d'énergie "du point zéro" se condensent par transition de phase en un superatome unique qui se comporte comme un fluide parfait, homogène et occupant tout l'espace qui se présente à lui (Cornell & Wieman [1998]).

47 Paty [1988], chap 6; [1993b] et [à paraître, a]; Amaldi [1987]; Darrigol [1990]. L'antisymétrie de la fonction d'état d'un système de fermions identiques (par exemple, des électrons) qui se trouveraient dans le même état quantique entraîne que cette fonction soit nulle pour une permutation de deux de ces particules: il s'ensuit que deux particules identiques ne peuvent occuper le même état quantique dans un système donné (p. ex., au niveau atomique, où chaque état ne peut être occupé que par un seul électron).

48 En théorie quantique des champs, la définition des états comporte celle d'opérateurs de création et de destruction de particules, pour rendre compte des transformations entre particules dans les interactions, ce qui implique la possibilité de les compter.

L'absence d'identité propre pour des particules indiscernables peut être énoncée comme une propriété d'*existence* de nature à la fois formelle et empirique. Dans ce sens, Paul Langevin appelait à reconsidérer notre manière commune de concevoir la notion de particule<sup>49</sup>, en supprimant la notion d'identité individuelle au niveau quantique. On peut interpréter ainsi de manière objective la "générité" par laquelle Hans Reichenbach désignait la restriction de l'identité des particules quantiques à leurs seuls caractères génériques lorsqu'on les décrit dans l'ordre temporel. Ce n'était pas ainsi, cependant, qu'il la concevait lui-même: il la voyait non pas comme l'expression d'une propriété matérielle, mais comme fonctionnelle, c'est-à-dire formelle<sup>50</sup>. Cependant, la juxtaposition du formel et de l'empirique, caractéristique de l'empirisme logique de Reichenbach, ne fait pas de place à la théorie physique considérée en elle-même, comme une instance *sui generis*, une construction conceptuelle où s'imbriquent le *donné empirique* de l'expérience et le *formel mathématique constitutif* de la formulation des concepts comme grandeurs physiques<sup>51</sup>.

Or, l'indiscernabilité, ou la générité, apparaît comme parfaitement ajustée à la conception d'une théorie qui définit par elle-même ses propres concepts, sans supplément externe de justification ou d'interprétation. Nous pouvons y voir l'indice du passage à une objectivation plus grande de la théorie physique: les particules quantiques ne possèdent *que* la caractérisation que la théorie leur donne, et ne peuvent être pensées en dehors de cette dernière. Au contraire, des particules classiques peuvent être vues comme différentes même si elles restent parfaitement semblables dans leur traitement théorique. C'est là un trait que l'on peut retrouver d'une manière générale avec les autres contenus conceptuels de la physique quantique, comme ceux que nous évoquerons plus loin, la non-séparabilité locale et la définition des propriétés des genres de particules par les groupes de symétrie.

Cette considération revient à l'adoption d'une position minimale du point de vue théorique et méta-théorique, avant toute autre considération ou tentative d'interprétation. Les éléments conceptuels dont nous disposons théoriquement pour décrire de tels "objets" se ramènent aux seules grandeurs qui les désignent effectivement, définies dans la théorie (masse, spin, charge, autres nombres quantiques, etc.). Ces objets sont donc, selon la description quantique,

49 Langevin [1933]. Cf. Paty [1988], Chap. 6.

50 Reichenbach [1956].

51 Paty [1989], [1993a], Chap. 7.

strictement équivalents, même si l'on peut les dénombrer (par exemple, tant de photons dans tel état défini): telle est exactement l'indiscernabilité, avérée par les phénomènes et dont la théorie (la mécanique quantique) rend parfaitement compte, donnant l'explication des propriétés du rayonnement du corps noir, de celles des gaz monoatomiques avec la statistique de Bose-Einstein, du principe d'exclusion de Pauli par la statistique de Fermi-Dirac, de la condensation de Bose-Einstein en physique atomique, et de multiples traits également constatés en physique subatomique.

Cette propriété est désormais si fondamentale qu'elle est inscrite dans le cadre conceptuel général de la physique quantique. Sa puissance est remarquable par ses implications phénoménologiques et théoriques dans des domaines variés. Telle, en astronomie, l'explication théorique de l'existence d'objets célestes comme les *naines blanches* ou les *étoiles à neutrons*, qui sont respectivement un gaz d'électrons complètement dégénéré<sup>52</sup> et un gaz de neutrons également dégénéré, dans lesquels seule la pression de dégénérescence due au principe d'exclusion fait équilibre à celle due à l'attraction gravitationnelle, empêchant l'effondrement sur elles-mêmes de ces étoiles dont le carburant nucléaire est épuisé.

### Vertus heuristique et épistémologique de l'indiscernabilité

En ce qui concerne les implications de l'indiscernabilité sur la théorie fondamentale des particules, la plus caractéristique est peut-être la formulation du concept de "*couleur*" des quarks, devenu la grandeur représentant la charge spécifique du champ d'interaction forte, formulé par la suite en *chromodynamique quantique*. La représentation en termes des quarks *u* et *d* des *baryons non étranges* (famille dont font partie les nucléons, proton et neutron, constitués respectivement comme *uud* et *udd*) donnait, pour la particule-résonance  $\Delta^{++}$  une combinaison de trois quarks identiques *u* dans le même état<sup>53</sup>. Les quarks étant des

52 Sur les naines blanches, cf. déjà Eddington [1925]. Un système se trouve dans un état "dégénéré" lorsqu'il n'a plus de structure propre et que tous ses constituants élémentaires se trouvent dans des états quantiques semblables.

53 Il faut trois quarks *u* (de charge électrique  $+\frac{2}{3}e$ ) pour former un baryon de charge +2. Le spin d'un quark *u* étant  $+\frac{1}{2}\hbar$ , les spins des trois doivent être alignés (et les quarks doivent donc se trouver dans le même état) pour former le spin  $+\frac{3}{2}\hbar$  de la particule  $\Delta^{++}$ . Au sein du proton et du neutron, au contraire, les deux quarks identiques *uu* et *dd* sont dans des états de spin antiparallèle, donc différents.



fermions<sup>54</sup>, la cohérence théorique soit interdisait un tel état (par le principe d'exclusion), soit obligeait à concevoir une grandeur spécifique par laquelle trois quarks identiques dans un même état peuvent être distingués<sup>55</sup>: une grandeur pouvant donc prendre trois valeurs. Cette grandeur à trois indices, dénommée "couleur", servait à caractériser les quarks dans le champ d'interaction forte qui les lie entre eux, mais n'apparaissait pas en dehors de la portée de ce champ.

On supposa donc que les quarks physiques sont des *superpositions (linéaires) neutres de quarks de couleur*, et qu'ils échangent cette couleur dans leurs interactions fortes entre eux, par l'intermédiaire de bosons d'échange, les gluons<sup>56</sup>: ce qui permettait du même coup de formuler et *le champ d'interaction forte*, devenu désormais le "champ de couleur" de la "chromodynamique" et le "*confinement des quarks*" au sein de la matière nucléaire<sup>57</sup>. Nous disons bien: de *formuler*, mais non pas encore d'*expliquer*: le problème du confinement des quarks, par exemple, en devenant "confinement de la couleur", restait entier. Cependant, telle fut la force heuristique de l'hypothèse tirée de l'indiscernabilité, que cette formulation particulière ouvrait la voie à un développement théorique d'une fécondité considérable en termes de *théorie quantique des champs*, celui de la "chromodynamique quantique"

Les développements récents de la physique reliés à l'indiscernabilité possèdent aussi une vertu épistémologique, en nous faisant mieux comprendre le caractère objectif de cette propriété générale des systèmes quantiques, comme on l'a indiqué plus haut<sup>58</sup>. Tout comme le concept de champ (au sens classique) s'est avéré se suffire à lui-même, avec la théorie de la relativité d'Einstein, sans support du type d'un éther mécanique, de même celui de quanton (ou de système quantique, ou de champ quantifié), caractérisé notamment par l'indiscernabilité des particules identiques, est lui aussi autosuffisant, sans substance

54 Leur spin est  $\frac{1}{2} \hbar$ .

55 Les quarks  $u$  doivent avoir leurs spins  $\frac{1}{2}$  alignés (et donc se trouver dans le même état pour former le spin  $\frac{3}{2}$  de la particule  $\Delta^{++}$ . Dans le proton et le neutron, au contraire, les deux quarks identiques  $uu$  et  $dd$  sont dans des états de spin antiparallèle, donc différents.

56 Les gluons  $g_{ij}$ , porteurs de deux charges de couleur ( $i$  et  $j$ ) échangées entre deux quarks  $q_i$  et  $q_j$ .

57 Les quarks ne se manifestent pas directement à l'état libre en dehors de la matière nucléaire "naturelle" que sont les particules "hadroniques" (à interaction forte), mésons et baryons. Ils peuvent cependant être déconfinés dans certains états de densité d'énergie très élevée de la matière (plasmas de quarks et de gluons, réalisés dans des collisions d'ions lourds et probablement dans l'une des phases de l'Univers primordial).

58 Cet argument est développé par ailleurs (Paty [à paraître, c]).

discernable, ondulatoire ou corpusculaire, sous-jacente, sans projection ou réduction sur des concepts extérieurs à la théorie. Rien ne justifie physiquement de tels concepts, qui sont donc inutiles du point de vue fondamental pour la théorie considérée.

Ces remarques concernent, d'une manière générale, la description quantique en tant que cadre conceptuel pour la représentation théorique d'objets. Elles s'appliquent dans des termes presque identiques à d'autres propriétés quantiques spécifiques, en rupture avec les propriétés des objets classiques, en particulier à la *non-séparabilité quantique*<sup>59</sup> Ce n'est pas le lieu ici d'y revenir, et nous nous contenterons de la rattacher à ce qui précède sur l'indiscernabilité, sous le point de vue particulier suivant: la *non-séparabilité locale*, propriété également caractéristique des systèmes de particules quantiques, peut être aussi vue comme participant de l'indifférenciation, puisque la localisation, devenue relative, ne permet pas de penser ou décrire une particule (un quanton) séparément d'une autre quand elles appartiennent à un ensemble corrélé au sens quantique (ce qu'exprime la proposition que "les quantons sont des systèmes étendus")<sup>60</sup>.

### L'indifférenciation par les symétries

L'indifférenciation entre les objets quantiques se poursuit, en considérant cette fois les genres, avec les *symétries des particules élémentaires*, qui identifient à un seul genre (qu'on pourrait appeler "genre d'ordre supérieur"<sup>61</sup>) toute une famille d'états (un multiplet) caractérisée par des nombres quantiques communs sauf un, ne différant par exemple que par la charge électrique: tels le *nucléon* ( $p$ ,  $n$ ), ou le *méson*  $\pi$  (+, 0, -), ou d'autres encore, dont les divers états de charge sont équivalents (leurs propriétés sont identiques) selon l'invariance des transformations du groupe de l'isospin ( $SU(2)$ ); sous le groupe de symétrie unitaire  $SU(3)$ , l'équivalence a lieu pour les différents états du spin unitaire (combinant l'isospin et l'étrangeté ou l'hypercharge), et ainsi de suite pour les groupes d'invariance liés aux différentes *savours*, rapportées en dernière instance aux saveurs

59 Paty [1988], chap. 6, [1987].

60 On peut rapporter aussi la non-séparabilité locale à une perspective cosmologique au sens large en y voyant la marque d'une totalité insécable de la réalité matérielle (Bohm [1980]).

61 L'appellation n'est pas nomenclaturée, et je la propose donc sous toutes réserves. On pourrait spécifier: non plus, par exemple, "genre proton" (ou méson  $\pi^+$ ), mais "genre nucléon" (ou méson pseudoscalaire) du groupe de l'isospin, de symétrie unitaire, etc. (voir plus bas).

des quarks constituants des particules hadroniques, en considérant les membres d'un même multiplet de cette grandeur (jusqu'à  $SU(6)$ , pour six saveurs).

Les groupes de transformation des grandeurs identificatrices que sont les *saveurs* (des quarks) opèrent ainsi une réduction à chaque pas plus poussée des genres de particules distincts. Ces genres eux-mêmes, pour ce qui est des particules hadroniques, se ramènent à des combinaisons de six *quarks de saveur* (les fermions fondamentaux), distincts les uns des autres par cette grandeur appelée "saveur" qui comprend six variétés<sup>62</sup>, chacun d'eux étant soumis d'autre part à un autre groupe d'invariance, celui de la *couleur* ( $SU(3)_c$ ). L'ensemble des genres de particules fondamentales de type fermion sont alors ramenés à 6 quarks (de saveur) et 6 leptons (les leptons chargés, *électron*, *muon*, *tauon*, et leurs *neutrinos* correspondants)<sup>63</sup> et aux bosons, quanta des champs d'interaction entre ces "briques fondamentales" (briques quantiques, est-il nécessaire de le rappeler).

Dans les théories "de grande unification" (*GUT*) qui se proposent de traiter dans un seul schème et selon une invariance ou symétrie supérieure les trois champs d'interaction de la physique subatomique (*électromagnétique et faible unifiés en électrofaible*, et *chromodynamique*), les leptons et les quarks sont mêlés, les particules fondamentales ramenées à un seul genre, celui de fermion de spin  $\frac{1}{2}$ , source du champ indifférencié de grande unification. Au-delà, une symétrie d'un ordre plus élevé est proposée pour rendre indistincts les fermions et les bosons: c'est la supersymétrie<sup>64</sup>

Il n'est pas excessif de voir dans ce mouvement de constitution de dynamiques répondant à des symétries de plus en plus puissantes, par delà l'*indiscernabilité* comme *propriété structurelle de toutes les espèces d'objets quantiques*, une tendance à faire des objets de ces dynamiques que sont les particules élémentaires

62 Les grandeurs isospin  $I$ , 3<sup>è</sup> composante d'isospin ou état de charge  $I_3$ , étrangeté  $S$ , charme  $C$ , beauté (ou fond, *bottom*),  $B$ , vérité (*truth* ou sommet, *top*)  $T$ . Par-delà les dénominations fantaisistes des diverses saveurs, restent les désignations symboliques, plus neutres, des grandeurs correspondantes ( $I, I_3, S, C, B, T$ ).

63 Les "charges leptoniques" qui distinguent ces genres de leptons sont l'équivalent des "saveurs" des quarks. Les doublets de leptons peuvent être associés aux doublets de quarks correspondants en raison de la similitude de leurs interactions selon le champ électrofaible: ( $e, \nu_e$  et  $u, d$ ;  $\mu, \nu_\mu$  et  $s, c$ ;  $t, \nu_\tau$  et  $b, t$ ). Cette structure des fermions élémentaires en trois familles dont le couplage aux champs d'interaction est universel est probablement due à une propriété fondamentale sous-jacente encore inconnue. Le nombre de ces familles est limité par certaines contraintes à trois: tous les quarks et les leptons sont désormais connus.

64 Fayet [1985].

res de la matière, *des éléments de plus en plus indifférenciés*. Cette indifférenciation croissante se révèle à la faveur de la montée vers les énergies asymptotiques, qui est aussi la remontée du temps cosmologique vers les toutes premières phases de l'Univers primordial. Aboutirait-on, au terme (si parler de terme peut revêtir quelque signification), à une *éttoffe cosmique indifférenciée*? L'intérêt reste, du moins, dans la tendance constatée.

### **La loi du temps cosmologique Physique subatomique et déploiement de l'espace-temps**

Nous venons de mentionner le “terme” problématique de la remontée temporelle: il est souhaitable de revenir à cette question pour terminer. Dans l'ordre épistémologique, la nature des extrapolations effectuées, par exemple, le statut de la “singularité”, s'il en est, supposée par l'idée de “Big bang” ou le statut de la notion de temps qui est en jeu aux diverses étapes de l'évolution même de l'Univers, souvent acceptée sans critique comme s'il existait quelque chose comme une notion universelle du temps, indépendante des théories physiques à travers lesquelles il intervient.

Or c'est l'un des enseignements de la théorie de la relativité, et déjà de la relativité restreinte, que le temps comme grandeur servant à décrire l'état des phénomènes et des systèmes physiques n'est pas indépendant de ces derniers. La mécanique avait pu se contenter, avec une approximation qui parut longtemps suffisante, d'un temps défini comme universel, indépendant de l'espace et du mouvement des corps, conforme au principe de relativité galiléen. Elle l'avait pu dans la mesure où elle admettait des actions à distance instantanées, corrélatives de simultanéités absolues. La physique des champs à propagation de proche en proche exigea, pour être traitée d'une manière cohérente, que les grandeurs spatiales et le temps soient soumis au principe physique de relativité étendu au champ électromagnétique (ce qui implique la constance de la vitesse de la lumière, et le lien structurel de l'espace-temps). Le temps (avec l'espace) subit une autre modification physique avec la dynamique de la gravitation exprimée par la théorie de la relativité générale (en fait, par sa soumission à une propriété encore plus générale des phénomènes physiques, la covariance généralisée). Le temps est, comme quatrième composante de la variété espace-temps, structuré par la dynamique des champs de gravitation<sup>65</sup> On voit comment le temps phy-

---

65 Paty [1993a], chapitres 4 et 5.

sique ainsi construit est déterminé par les phénomènes qui, pour ceux liés au champ de gravitation, le dissuadent pour ainsi dire de “couler uniformément”, et comment ce “contenant” est marqué dans sa forme même par son “contenu”

Ces reconstructions du temps comme grandeur physique correspondent au développement d'une autre compréhension que celle de cadre ou de mesure externe des phénomènes. (Il faudrait ajouter que, dès la mécanique classique, tout en étant pensé comme indépendant des phénomènes, le temps était cependant conçu comme une grandeur continue à une dimension, intelligible selon la signification attachée, pour de telles grandeurs, aux opérations de différentiation et d'intégration, ce qui était déjà les préparer à servir à l'expression des phénomènes physiques).

On peut considérer sous cet angle la signification physique du temps comme grandeur de la cosmologie. Dans les phases primordiales du déroulement de l'Univers, les échelles de temps et d'espace sont structurées directement par les lois qui gouvernent les champs d'interaction en jeu<sup>66</sup>. On peut considérer que le déroulement du temps n'est pas uniforme par définition, mais donné par la loi de structure de l'Univers physique dans cette phase temporelle et spatiale, qui est en fait celle du type de champ et de particules quantiques qui la caractérise. Le temps, dans de telles phases, signifierait alors physiquement ce que les théories physiques lui font signifier, considérant que c'est la condition de correspondre à un état de l'Univers, et non pas seulement de la matière, qui lui octroie cette signification particulière. La physique des particules et des champs, considérée seule, admet l'espace-temps indépendant de la dynamique, comme dans la relativité restreinte. Mais la cosmologie des premiers instants ajoute les conditions globales de l'Univers, qui constituent une contrainte: le fait que le quadri-volume de l'Univers (en expansion) soit fermé et exactement délimité correspond à une relation réciproque entre le temps (ou l'espace) et la loi dynamique.

Cette relation se poursuit dans la phase antérieure au temps de Planck<sup>67</sup>, tout en retrouvant le lien du temps (en fait de l'espace-temps) à la dynamique alors en vigueur, qui est celle du champ de gravitation. Cependant, cette théorie n'est plus la relativité générale, mais la *gravitation quantique*, dont nous ne connaissons pas encore les lois. Nous ignorons encore tout (malgré de nombreux efforts récemment entrepris dans ce domaine) de la théorie qui correspond à

66 Cf Paty [1994].

67  $t_P = 10^{-43}$  sec La distance correspondante est  $d_P = 10^{-19}$  cm, et l'énergie, ou “masse de Planck”  
 $m_P = 10^{19}$  GeV

cette région de dimensions spatiales extrêmement petites et d'énergies immenses, où la gravitation doit être quantifiée. Et par là-même nous ne savons pas, en deçà du temps de Planck, ce que le temps pourrait signifier comme grandeur physique. A plus forte raison peut-on douter que la notion d'un "temps zéro" de l'Univers ait un sens. Le temps nous est donné par les phénomènes physiques et par les théories qui les représentent, et l'on peut après tout imaginer que, dans certaines conditions physiques comme celles des époques de l'Univers qui nous échappent, il ne soit même plus une grandeur physique pertinente.

Il est d'ailleurs vraisemblable de penser que l'Univers, tel que l'impliquent la théorie de la relativité générale, les cosmologies relativiste et quantique, ainsi que les observations astronomiques et astrophysiques, déploie lui-même son espace et son temps, qui ne sont pas définis en dehors de lui.

En résumé, dans la perspective asymptotique de la cosmologie primordiale, dans le "modèle standard du Big bang", qui rejoint le "modèle standard de la physique des particules et des champs" devenant le "modèle standard de la physique et de la cosmologie", le concept de temps garde une signification physique jusqu'à la valeur  $t_P = 10^{-43}$ , temps de Planck, pour lequel l'interaction de gravitation rejoint les autres interactions fondamentales et requiert d'être quantifiée. En-deçà de cette valeur, en l'absence d'une théorie quantique adéquate de la gravitation, le temps n'a plus, pour nous, de signification physique. On pourrait employer à son sujet à peu près le même langage que Descartes lorsqu'il évoquait la division du temps comme grandeur continue en-dessous de l'unité de jour ou d'heure (qui seules avaient, à l'époque, une signification physique, par les phénomènes astronomiques): elle est de pure convention, et tient uniquement à ce que nous considérons le temps comme une grandeur continue, c'est-à-dire indéfiniment divisible. Mais nous sommes peut-être désormais fondés à nous demander si nous n'en avons pas atteint la limite.

## Références bibliographiques

- D'ALEMBERT, Jean le Rond [1754]. Articles "Cosmogonie" et "Cosmologie" (avec Formey) de l'*Encyclopédie*, in d'Alembert & Diderot [1751-1780], vol. 4, 1754.
- D'ALEMBERT, Jean le Rond, et DIDEROT, Denis (éd.) [1751-1780]. *Encyclopédie ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers*, 17 vols + 11 vol. de planches, Briasson, David, Le Breton et Durant, Paris, 1751-1780.
- AMALDI, Edoardo [1987]. The Fermi-Dirac statistics and the statistics of nuclei, in Doncel et al. [1987], p. 251-277.
- ANDRILLAT, H., HANCK, B., MAEDER, A. & MERLEAU-PONTY, Jacques [1988]. *La cosmologie moderne*, 2<sup>e</sup> éd., Paris, Masson, 1988.
- AUDOUZE, Jean [1997]. *L'Univers*, Coll. Que sais-je?, Presses Universitaires de France, Paris, 1997.
- AUDOUZE, Jean, MUSSET, Paul & PATY, Michel (éds.) [1990]. *Les particules et l'Univers*, Presses Universitaires de France, Paris, 1990.
- BIMBOT, René et PATY, Michel [1996]. Vingt cinq années d'évolution de la physique nucléaire et des particules, in Yoccoz, Jean (éd.), *Physique subatomique: 25 ans de recherches à l'IN2P3*, Ed. Frontières, Bures-sur-Yvette, 1996, p. 12-99.
- BOHM, David [1980]. *Wholeness and the implicate order*, Routledge and Kegan Paul, London, 1980.
- BOSE, Satyendranath N. [1924]. Planck's Gesetz und Lichtquantenhypothese, *Zeitschrift für Physik* 26, 1924, 178-181 (trad. par A. Einstein); texte angl., Planck's law and the hypothesis of light quanta, in H. Theimer, and B. Ram, The beginning of quantum statistics, *American Journal of Physics* 44, 1976, 1056-1057.
- BOUQUET, Alain [1990]. L'origine de l'asymétrie entre matière et antimatière dans l'Univers, in Audouze, Musset & Paty [1990], p. 303-312.
- DE BROGLIE, Louis [1924]. *Recherches sur la théorie des quanta*, Thèse, Paris, 1924; *Annales de physique*, 10<sup>e</sup> série, 3, 1925, 22-128; ré-éd., Masson, Paris, 1963.
- BUNGE, Mario [1973]. *Philosophy of physics*, Reidel, Dordrecht, 1973. Trad. fr. par F. Balibar, *Philosophie de la physique*, Seuil, Paris, 1975.
- COHEN-TANNOUJJI, Gilles & SPIRO, Michel [1986]. *La matière-espace-temps. La logique des particules élémentaires*, Fayard, Paris, 1986.
- CORNELL, Eric & WIEMAN, Carl, La condensation de Bose-Einstein, *Pour la Science*, n°247, mai 1998, 92-97.
- DARRIGOL, Olivier [1988]. Statistics and combinatorics in early quantum theory, *Historical Studies on the Physical Sciences* 19 (1), 1988, 17-80.
- DESCARTES, René [1964-1974]. *Oeuvres de Descartes*, publiées par Charles Adam et Paul Tannery, 11 volumes (1<sup>ère</sup> éd., 1896-1913); nouvelle édition révisée, 1964-1974; ré-éd., 1996. [Édition indiquée AT en note].
- DIRAC, Paul A. M. [1978]. *Directions in physics*, New York, Wiley, 1978.
- DONCEL, Manuel, HERMANN, Armin, MICHEL, Louis & PAIS, Abraham (eds.) [1987]. *Symmetries in physics (1600-1980)*, Universitat Autònoma de Barcelona, Barcelona, 1987.
- EDDINGTON, Sir Arthur Stanley [1925]. *The internal constitution of stars*, Cambridge University Press, Cambridge, 1925.
- [1933]. *The expanding universe*, Cambridge University Press, Cambridge, 1933; 1940.

- EINSTEIN, Albert [1916a]. Zur Quantentheorie der Strahlung, *Physikalische Gesellschaft Mitteilungen* (Zürich), 1916, 47-62; également in *Physikalische Zeitschrift* XVIII, 1917, 121-128. Trad. fr., Théorie quantique du rayonnement, in Einstein [1987-1993], vol. 1, p. 134-147.
- [1916b]. Die Grundlagen der allgemeinen Relativitätstheorie, *Annalen der Physik*, ser. 4, 49, 1916-769-882; trad fr., Les fondements de la théorie de la relativité générale, in Einstein [1989-1993], vol. 2, p. 179-227.
- [1917]. Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie, *Preussische Akademie der Wissenschaften, Sitzungsberichte*, 1917, Part. 142-152; trad fr., Considérations cosmologiques sur la théorie de la relativité générale, in Einstein [1989-1993], vol. 3, p. 88-98.
- [1921]. *Vier Vorlesungen über Relativitätstheorie*, Braunschweig, Vieweg, 1922; trad. fr. par Maurice Solovine, *Quatre conférences sur la théorie de la relativité*, Paris, Gauthier-Villars, 1955.
- [1924]. Quantentheorie des einatomigen idealen Gases, *Preussische Akademie Wissenschaften, Phys. Math. Klasse, Sitzungsberichte* 22, 1924, 261-267. Trad. fr., Théorie quantique du gaz parfait monoatomique, in Einstein [1989-1993], vol. 1, p. 172-179.
- [1925a]. Quantentheorie des einatomigen idealen Gases. Zweite Abhandlung, *Preussische Akademie Wissenschaften, Phys. Math. Klasse, Sitzungsberichte*, 1925, p. 3-14. Trad. fr., Théorie quantique du gaz parfait monoatomique. Deuxième mémoire, *Annales de la Fondation Louis de Broglie* 7, 1982, 129-145.
- [1925b]. Quantentheorie des idealen Gases, *Preussische Akademie Wissenschaften, Phys. Math. Klasse, Sitzungsberichte*, 1925, p. 18-25.
- [1940]. Considerations concerning the fundaments of theoretical physics, *Science*, n.s., XCI, 1940 (may 24), 487-492; également, *Nature* 145 (june 15) 1936, 920-924. Trad. fr., Les fondements de la physique théorique, in Einstein [1952], p. 109-123.
- [1952]. *Conceptions scientifiques, morales et sociales*, trad. fr. par Maurice Solovine, Flammarion, Paris, 1952.
- [1987-1993]. *The Collected Papers of Albert Einstein*, edited by John Stachel (vols. 1 & 2), Martin Klein et al. (vols. 3-5), Princeton University Press, Princeton (N.J.), 1987-1993, vols. 1-5.
- [1989-1993]. *Oeuvres choisies*, trad. fr. par le groupe de trad. de l'ENS Fontenay-St-Cloud et al., sous la dir. de Françoise Balibar, Seuil/éd. du CNRS, Paris, 1989-1993, 6 vols.
- EINSTEIN, Albert et INFELD, Leopold [1938]. *The evolution of physics*, New York, Simon and Schuster, 1938. Trad. fr., *L'évolution des idées en physique*, Paris, Flammarion, 1938.
- FAYET, Pierre [1985]. La supersymétrie et l'unification des interactions fondamentales, *La Recherche* 19, n° 197, mars 1988, 334-345
- FEYNMAN, Richard [1985]. *QED, The strange theory of light and matter*, Princeton University Press, Princeton, 1985.
- FRIEDMAN, Alexandre [1922]. Über die Krümmung des Raumes, *Zeitschrift für Physik* 10, 1922, 377-386.
- GRIFFIN, A, SNOKE, D.W. & STRINGARI, S. (eds.), *Bose-Einstein condensation*, Cambridge University Press, 1995.
- HAKIM, Rémy [1993]. *La science de l'Univers*, Syros, Paris, 1993.
- HAWKING, Steve [1988]. *A brief history of time*, Bantam Book, New York, 1988. Trad. fr. par Isabelle Naddeo-Souriau, *Une brève histoire du temps*, Flammarion, Paris, 1989.
- HUBBLE, Edwin [1936]. *Realm of nebulae*, Yale University Press, New Haven, 1936.



- KANT, Immanuel [1755]. *Allgemeine Naturgeschichte und Theorie des Himmels oder versuch von der Verfassung dem mechanischen Ursprunge des ganzen Weltgebäudes, nach Newtonischen Grundsätzen abgehandelt*, 1755. Trad. fr. par Camille Wolf, in Wolf [1886], p. 103-255. Autre trad. fr. sous la dir. de Jean Seidengaart, *Histoire générale de la nature et théorie du ciel*, Vrin, Paris, 1984
- KASTLER, Alfred [1973]. Le concept d'atome depuis cent ans, *Journal de physique*, Colloque C10, Supplément au n° 11-12, Tome 34, nov.-déc 1973, 33-43. Repris dans A.K., *Œuvres*, éd. CNRS, Paris, vol. 2, p. 1156-1166.
- [1981]. On the historical development of the indistinguishability concept for microparticles, in Alwyn van der Merwe (ed.), *Old and new questions in physics, cosmology, philosophy and theoretical biology, Essays in honour of Wolfgang Yourgrau*, New York, Plenum Press, 1981, p. 607-623.
- KLEIN, Etienne et SPIRO, Michel (éds.) [1994]. *Le temps et sa flèche*, Editions Frontières, Gif-sur-Yvette, 1994; 2<sup>e</sup> éd., 1995; Flammarion, Paris, 1996.
- LACHÎÈZE-REY, Marc [1990]. La masse cachée dans l'Univers, in Audouze, Musset & Paty [1990], p. 207-248.
- LANGEVIN, Luce [1972]. Paul Langevin et Albert Einstein d'après une correspondance et des documents inédits, *La Pensée*, n° 161, janvier-février 1972, 3-40.
- LANGEVIN, Paul [1913]. L'inertie de l'énergie et ses conséquences, *Journal de physique*, 3, 1913, 553-592; repris dans Langevin [1950], p. 397-426.
- [1934]. *La notion de corpuscules et d'atomes*, Paris, Hermann, 1934.
- [1950]. *Oeuvres scientifiques*, Paris, Ed du CNRS, 1950.
- LAPLACE, Pierre Simon de [1796]. *Exposition du système du monde*, Paris, 1796; ré-éd. augm., 1835; Paris, Fayard, 1984.
- LEMAITRE, Georges [1946]. *L'hypothèse de l'atome primitif. Essai de cosmogonie* (recueil de textes), Neuchâtel, Griffon, 1946; nlle éd., Culture et civilisations, Bruxelles, 1972.
- LITTRÉ, Paul-Emile [1880]. *Dictionnaire de la langue française*, Paris (1880); éd. nlle, Monte-Carlo, Ed du Cap, 1971, 4 vols.
- MACH, Ernst [1883]. *Die Mechanik in ihrer Entwicklung historisch-kritisch Dargestellt*, Leipzig, 1883. Trad. fr. (sur la 4<sup>ème</sup> éd. allde) par E. Bertrand, *La mécanique. Exposé historique et critique de son développement*, Hermann, Paris, 1904; ré-éd., 1923.
- MERLEAU-PONTY, Jacques [1965]. *Cosmologie du XX<sup>e</sup> siècle. Etude épistémologique et historique des théories de la cosmologie contemporaine*, Paris, Gallimard, 1965.
- [1983]. *La science de l'univers à l'âge du positivisme. Etude sur les origines de la cosmologie contemporaine*, Paris, Vrin, 1983.
- [1988]. *Le spectacle cosmique et ses secrets*, Paris, Larousse, 1988.
- MUSSET, Paul [1986]. Magnetic monopoles, *Nuovo Cimento* 9c, 1986, 559-572.
- NANOPOULOS, Dimitri V. [1990]. Supersymétrie et inflation, in Audouze, Musset & Paty [1990], p. 279-302.
- NEWTON, Isaac [1687]. *Philosophiæ Naturalis principia mathematica*, London, 1687; trad. angl. par A. Motte, *The mathematical principles of natural philosophy*, 1729 (3<sup>e</sup> éd., 1726; trad. rév. par F. Cajori, Berkeley, Univ. California Press, 1934); *Opticks or a Treatise of the reflections, refractions, inflections, and colours of light*, 1704 (4<sup>e</sup> éd. corrigée, Londres, 1721; Londres, Bells, 1931).
- PASCAL, Blaise [1963]. *Oeuvres complètes*, Préface d'Henri Gouhier, Présentation et Notes de Louis Lafuma, Seuil, Paris, 1963.

- PATY, Michel [1986]. La non-séparabilité locale et l'objet de la théorie physique, *Fundamenta Scientiae* 7, 1986, 47-87.
- [1988]. *La matière dérobée. L'appropriation critique de l'objet de la physique contemporaine*, Paris, Archives contemporaines, 1988.
- [1990a]. *L'analyse critique des sciences, ou le tétraèdre épistémologique (sciences, philosophie, épistémologie, histoire des sciences)*, Paris, L'Harmattan, 1990.
- [1990b]. Remarques épistémologiques sur l'objet commun de la physique des particules et de la cosmologie, in Audouze, Musset & Paty [1990], p. 47-75.
- [1990c]. Reality and Probability in Mario Bunge's *Treatise*, in Dorn, Georg and Weingartner, Paul (eds.), *Studies on Mario Bunge's Treatise*, Poznan studies in the philosophy of the sciences and humanities, Rodopi, Amsterdam-Atlanta, 1990, p. 301-322.
- [1993a]. *Einstein philosophe. La physique comme pratique philosophique*, Presses Universitaires de France, Paris, 1993.
- [1993b]. A propos de la cosmologie contemporaine, *La Pensée*, n° 291, janv.- fév. 1993, 5-13.
- [1994]. Sur l'histoire du problème du temps: le temps physique et les phénomènes, in Klein & Spiro [1994], p. 21-58.
- [1995]. Les neutrinos, *Encyclopædia Universalis*, vol.12, 1995, p. 294-300.
- [1996]. Poincaré et le principe de relativité, in Greffe, Jean-Louis; Heinzmann, Gerhard et Lorenz, Kuno (éds.), *Henri Poincaré. Science et philosophie. Science and philosophy. Wissenschaft und Philosophie. Congrès international, Nancy, France, 14-18 mai 1984*, Akademie Verlag, Berlin/Albert Blanchard, Paris, 1996, p. 101-143.
- [1998]. *Albert Einstein, ou la création scientifique du monde*, Belles Lettres, Paris, 1997.
- [à paraître, a]. *Einstein, les quanta et le réel*, à paraître.
- [à paraître, b]. Physique quantique et probabilité, Exposé à la *Journée Physique et probabilité*, Marseille, 21.10.98.
- [à paraître, c]. Interprétations et significations en physique quantique, *Revue Internationale de Philosophie*, à paraître.
- PAULI, Wolfgang [1925]. Über den Zusammenhang des Abschlusses der Elektronengruppe in Atom mit der Komplexstruktur der Spektren, *Zeitschrift für Physik* 31, 1925, 765-783.
- PEEBLES, P. J. E. [1971]. *Physical cosmology*, Princeton University Press, Princeton, 1971.
- POINCARÉ, Henri [1907]. La relativité de l'espace, *L'année psychologique* 13, 1907, 1-17; repris dans Poincaré [1908], livre 2, chap. 1.
- [1908]. *Science et méthode*, Paris, Flammarion, 1908.
- [1912]. L'espace et le temps, *Scientia*, 12<sup>e</sup> année, 25, 159-170; repris dans Poincaré [1913], éd. 1963, p. 97-109.
- [1913]. *Dernières pensées*, Paris, Flammarion, 1913; 1963.
- REICHENBACH, Hans [1956]. *The direction of time*, ed. by Maria Reichenbach, Berkeley, University of California Press, 1956.
- RIEMANN, Bernhard [1854]. Über die Hypothesen, welche der Geometrie zugrunde liegen (1854), *Abhandlungender königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen*, 13, 1867; trad. fr dans B. R., *Oeuvres mathématiques*, Paris, 1898, p. 280-297.
- SAKHAROV, Andrei D. [1984]. *Collected scientific works*, transl. from Russian, *Oeuvres scientifiques*, trad. par L. A. E. Riouai, Anthropos, Paris, 1984.

- SALAM, Abdus, HEISENBERG, Werner & DIRAC Paul [1990]. *Unification of fundamental forces.*, Cambridge University Press, Cambridge, 1990. Trad. par Jean Kaplan et Alain Laverne, *La Grande unification. Vers une théorie des forces fondamentales?*, Seuil, Paris, 1991.
- SCHATZMAN, Evry (éd.), *L'astronomie*, Gallimard (coll. La Pléiade), Paris, 1962.
- SCIAMA, Dennis, W. [1971]. *Modern cosmology*, Cambridge University Press, Cambridge, 1971; 1981.
- SILK, Joseph [1980]. *The Big Bang*, New York, Freeman, 1980.
- THORNE, Kip S. [1994]. *Black holes and time warps: Einstein's outrageous legacy*, New York, Norton, 1994.
- WEINBERG, Steven [1977]. *The first three minutes. A modern view of the origin of the Universe*, Basic Books, New York, 1977; trad. fr. par Jean-Benoît Yelnik, *Les trois premières minutes de l'Univers*, Seuil, 1978.
- [1992]. *Dreams of a final theory: the search for the fundamental laws of nature*, Pantheon, New York, 1992.
- WOLF, Camille [1886]. *Les hypothèses cosmogoniques. Examen des théories scientifiques modernes sur l'origine des mondes*, suivi de la traduction de la *Théorie du ciel de Kant*, Gauthier-Villars, Paris, 1886.



# Sur la signification conceptuelle de l'intervention des nombres complexes dans la cosmologie

Jean-Jacques Szczeciniarz\*

**Résumé:** Le concept de nombre complexe correspond à une certaine forme d'exploration conceptuelle de l'espace; les aspects paradoxaux sous lesquels il s'est manifesté en témoigne. L'élaboration abstraite de cette exploration trouve son aboutissement dans deux opérations conceptuelles mathématiques: la complexification et la compactification qui construit l'espace projectif. Nous esquissons une analyse de celles-ci, et nous la prolongeons dans l'examen des concepts de Penrose (transformation de Penrose, twisteurs) comme mathématisation conceptuelle de la cosmologie.

**Abstract:** The concept of the complex number encounters a conceptual exploration of the space; the paradoxical aspects of its history bear witness to it. The abstract evolving of this exploration achieved success in two mathematical operations: complexification and compactification that gives birth to the projective space. We are outlining a analysis of it and we extend it by studying the Penrose's concepts (Penrose transformation, twistor) as a conceptual mathematization of the cosmology.

## I. Le nombre complexe

POURQUOI A-T-ON BESOIN de considérer comme négative une quantité qui se présente à nous comme on ne peut plus positive à savoir un carré? Considérez un carré, nous étendons en une dimension supérieure ce qui se donnait comme un segment de droite, son expression peuple l'espace d'une réalité. Ses éléments constituent et réalisent une portion d'espace. Rappelons-nous les difficultés qu'il y a eu à introduire une grandeur négative. En philosophie. On s'en tire après un long développement de l'algèbre en isolant l'entité positive, on peut l'appeler valeur absolue. Mais le fait d'ajouter du négatif implique une intervention de l'espace avec de nombreuses constructions. L'axe réel m'indi-

---

\* Equipe REHSEIS (UMR 7596) et Université Bordeaux, 37, rue Jacob, 75006 Paris, France, E-mail: szczeniarcz@paris7.jussieu.fr.

que qu'à partir de la représentation géométrique d'une situation repérée je dois pouvoir régresser en-deçà de l'origine de la constitution première des quantités.

Mais les actes fondateurs de ce type – c'est ce qui fait la difficulté en général, pour les historiens des mathématiques ou les logiciens – les actes fondateurs de ce type concentrent aussi une foule d'autres actes mathématiques. Ainsi le concept de nombre négatif parut-il être construit en liaison avec la constitution d'une nouvelle structure algébrique. Il s'interprète comme un inverse, un opposé, etc. Tous ces concepts – c'est le cas des concepts algébriques – ont un correspondant géométrique. On peut voir géométriquement aussi le zéro comme un point multiple. Il a concentré nombre de paradoxes sur l'identité de la fin et du commencement.

Non seulement une telle situation singularise virtuellement une grande partie de l'activité mathématique, la partie dans le tout, mais elle peut ensuite se déployer sur les autres secteurs des mathématiques par une sorte d'enveloppement en retour.

Ce que nous venons de dire vaut évidemment pour les nombres complexes. Vous connaissez partiellement l'histoire de la constitution des nombres complexes – cette histoire a été rapportée sous des aspects moins connus par D. Flament. Penrose rappelle dans son livre la vie de Cardan. Si les nombres complexes ont été promis à un brillant avenir, c'est pour une part essentielle grâce à Cardan qui en donne le concept et qui ouvre aussi sur la notion de probabilité.

Nous avons bien des difficultés à concevoir l'existence mathématique et même physique de nombres négatifs. Mais la difficulté semblait insurmontable quand il s'est agi de penser comme négative des grandeurs positives. Ecrire  $X^2 = -1$ . Quel statut donner à ce que désigne X? D'abord c'est courant en mathématique on se demande comment donner un sens à un résultat qui semble contredire ou bouleverser la définition des objets qui l'ont produit.

La question des quantités "négatives positives", a dû passer par une construction nouvelle de la situation dans l'espace et même par une nouvelle appréhension de l'espace. A chaque fois qu'une telle action est établie elle fait surgir des éléments encore plus primitifs – du fonctionnement implicite de notre activité mathématique ou même de pensée.

Elle impose alors que le nombre complexe ainsi constitué représente une quantité dans ce qu'elle peut avoir d'intrinsèquement linéaire et contradictoirement une non-linéarité qui répète l'impossibilité d'un carré négatif. Il réalise en un certain sens une synthèse de la droite et du cercle, pas en même temps mais dans la production d'une temporalité et d'un espace qui suppose la production ou l'expulsion d'une dimension supérieure. Si le nombre imaginaire s'im-

pose comme entité mathématique ce fut dans cette production de ce mixte impossible qui reprend et analyse cette impossibilité à travers un concept positif. Le nombre imaginaire est donné dans une représentation sous la forme de coordonnées trigonométriques ou dans ce que l'on a appelé le plan Argand-Cauchy qui tient compte à la fois d'un déplacement mesuré par un angle et d'un déplacement linéaire. L'espace dans lequel il a été construit a laissé l'obstacle de sa construction se déployer sans chercher à le réduire et c'est sous cette forme (module-argument) que nous le manipulons maintenant. Quel a été l'objectif d'une telle construction? Certainement au moins de régresser à une origine minimale de ce que pourrait être une genèse de l'espace. Voir en quoi l'espace est virtuellement du courbe et du droit, comment la virtualité de l'espace est circularité et linéarité.

## II. Cosmologie

La cosmologie cherche à penser le tout. Non pas tout ce qui est abstraitement, mais elle cherche de façon consubstantielle à se donner une géométrie pour penser le tout. On pourrait presque dire inversement que penser le tout c'est déjà construire une géométrie.

En même temps cette constitution tend toujours à pouvoir nous mettre en position, comme observateurs théoriques, de considérer le tout de l'extérieur. Ceci est certes contradictoire, comme le peut paraître le fait de penser une variété non plongée.

C'est cette difficulté que tente d'élaborer Copernic. Pour ce faire il construit lui aussi des obstacles qui reproduisent pour permettre une pensée les difficultés ainsi cernées. A cet effet il use d'un principe de relativité descriptive: il prend appui de façon positive sur une impossibilité perceptive. Je ne sais de la rive ou du bateau... Cette impossibilité se conjugue chez lui avec une autre qui est liée à la limite de notre perception. Je ne peux percevoir à quelque niveau que ce soit les effets de mon mouvement. Nous ne détectons pas la parallaxe stellaire. Car les distances stellaires sont incommensurables à notre perception. La possibilité du mouvement de la Terre suppose la construction d'un objet non perçu, il faut penser un rapport incommensurable.

Or on sait qu'il est possible grâce aux développements de l'algèbre du XIX<sup>e</sup> siècle de donner une forme mathématique à l'incommensurable. Ainsi construit-on une extension de corps pour adjoindre à toutes les opérations qui définissent une action sur les éléments un élément qui était inaccessible. Tel est le cas d'une racine carrée ou nième.

Une autre opération géométrique nous ménage un accès à l'imperceptible, ou à des éléments rejetés hors de notre perception. Il s'agit de l'ajout d'un point dit "à l'infini" dans la construction de l'espace de la perspective. On donne un sens positif au fait de se trouver à l'infini. Ce qui suppose d'avoir posé une maîtrise de, une forme d'accès à, ce qui du coup complète "absolument" notre perception ou qui ferme l'espace auquel nous avons accès en nous donnant les moyens de le traiter comme s'il était fini, même si nous en respectons la spécificité.

Deux opérations mathématiques ont ainsi selon nous une signification cosmologique importante, celle de complexifier, de se placer dans un espace géométrique complexe. Elle peut s'effectuer en usant de structures algébriques, on étend le corps des nombres réels. Géométriquement, une fois la conception algébrique assurée, on rend possible par une représentation spatiale une forme de rotation dans la conception et une modalité de perpendicularité aux représentations des nombres réels comme exploration de l'espace. C'est cette veine qu'exploite la Mécanique Quantique.

Deuxième opération, on ferme l'espace par projectivisation: on construit l'espace projectif comme moyen de fermer l'espace dont on accepte l'infini en établissant la forme de sa maîtrise. Ceci suppose une réélaboration du concept de la sphère, un instant conçu comme obstacle archaïque au développement de notre connaissance.

### La Cosmologie et le Complexe

Il est évident pour qui travaille dans ce domaine que l'ensemble des équations qui rendent compte de la réalité et du cadre de sa constitution est marqué par l'introduction des nombres complexes.

A la lumière des développements précédents je vais me contenter de décrire et de poser certains problèmes que l'introduction de la structure complexe permet présenter.

Il me semble que dès lors que se posent de façon nécessaire des problèmes portant sur l'élaboration – je dirais volontiers ontologique – des objets auxquels nous avons affaire s'impose la nécessité de l'introduction de la structure complexe, sous forme de fonctions d'une part en une variable, d'autre part en plusieurs variables. Et la raison de cette nécessité tient au concept même de nombre complexe dont l'histoire de la formation nous explique la constitution.

Comme cette affirmation reste extrêmement générale, je vais préciser la nature des problèmes ontologiques ainsi posés ou la nature de cette ontologie. L'un des caractères de la structure algébrique que l'on appelle le corps (le



corps comme structure étant la concentration d'opérations licites que nous sommes en droit d'effectuer sur des êtres mathématiques) des nombres complexes par opposition à celle qui caractérise le corps des réels est l'absence d'ordre au sens archimédien du terme. L'introduction de la circularité dans la linéarité qui fait l'une des substances de  $\mathbf{C}$  est nécessaire pour penser les problèmes cosmologiques.

La cosmologie est la science des phénomènes naturels pris dans leur totalité. Ce qui ne veut pas dire science de tout ce qui existe, mais science, de ce qui dans les phénomènes naturels les ordonne en une totalité. N'importe quel phénomène naturel peut intéresser la cosmologie dans la mesure où il est significatif des propriétés du tout. Les recherches des physiciens sur les particules élémentaires ont un intérêt direct pour la cosmologie.

### **La Renaissance Relativiste et la Signification de l'Introduction du Nombre Complexe**

Einstein, comme l'a rappelé Eisentaedt<sup>1</sup>, a posé au début du XX<sup>e</sup> siècle le problème cosmologique en des termes tout à fait nouveaux. Einstein a été amené à résoudre le problème de la gravitation, à le traiter en donnant une interprétation géométrique des phénomènes physiques de l'inertie et de la gravité. Il pense que la géométrie de l'espace et du temps physique est déterminée par les propriétés de la matière-énergie de la région où l'on se place. Lois physiques et axiomes géométriques sont de ce fait étroitement liés.

Prenons le problème de la gravitation.

Pourquoi une planète, image idéale d'une particule libre ne se déplace-t-elle pas en ligne droite? C'est la solution newtonienne de la force d'attraction solaire. On connaît les difficultés de l'interprétation physique d'une telle loi, car elle s'est présentée d'abord comme une action à distance. D'où le fait qu'Einstein ait décrit le phénomène de la gravitation à l'aide d'un espace-temps à courbure.

S'est déplacée en physique et en cosmologie – peut-être n'ont-elles fait que la développer – la détermination géométrique de notre physique et peut-être de notre compréhension générale des phénomènes de la nature.

Sans entrer dans le détail et la profondeur du principe de Mach, on peut rappeler que sa signification essentielle est de poser la détermination de la géo-

1 Cf. Dans ce volume.

métrie de l'espace-temps par son contenu matériel. Une propriété physique se traduit par une propriété géométrique, une masse par une propriété de courbure.

Ceci est bien connu, mais je voudrais insister brièvement sur le fait que s'il en est ainsi c'est aussi parce que la géométrie construite de cette façon est développée sur le mode de l'intrinsincité. On sait montrer – c'est un des aspects de la théorie de Gauss – que la courbure gaussienne d'une surface est intrinsèquement déterminée.

Autrement dit la géométrie dont il est question est une géométrie qui a "densifié" ses objets, et qui par certains côtés a fait entrer la physique qu'elle permet de conceptualiser dans la mise en forme de ses propres concepts. La géométrie organise depuis l'intérieur la physique qu'elle fait comprendre et appréhender. En termes kantien, je dirais volontiers qu'elle ne met pas en œuvre seulement des principes mathématiques mais aussi des principes dynamiques. Elle anticipe dans sa forme sa propre physique.

Soulignons que cette géométrie construit aussi les formes de son objectivité, qui s'exprime dans le calcul tensoriel: celui-ci montre qu'une loi physique ne doit pas dépendre du référentiel choisi pour l'écrire.

Il existe donc un être mathématique particulièrement adapté à la description de et même à la réflexion sur l'espace temps qu'on appelle un tenseur. Je ne vais en donner qu'une description conceptuelle, qualitative.

Nous cherchons d'abord des moyens d'effectuer des mesures sur une surface. Ce qui nous en rend capable est ce que l'on appelle une métrique ou manière de mesurer, donnée par le carré de la distance entre deux points- elle nous présente les moyens d'une progression dans des directions qui "couvrent" infinitésimalement la surface. Elle doit être invariante en un certain sens. On doit pouvoir mesurer de la même façon quel que soit le lieu de la mesure. Ou encore la métrique doit être invariante par changement de coordonnées. D'où la forme classique que vous connaissez tous de cette métrique avec les  $g^{\mu\nu}$

La condition nécessaire et suffisante pour qu'un espace soit sans courbure est qu'il existe au moins un système de coordonnées dans lequel les  $g_{\mu\nu}$  soient des constantes. Sans y insister on voit que c'est dans la forme des équations que se reflète la propriété géométrique. Ce qu'a recherché Einstein c'est un tenseur géométrique, le plus général qui permette de définir la métrique c'est-à-dire la géométrie de l'espace-temps, entièrement déterminé par le contenu matériel du milieu.

Un tenseur est une sorte d'opérateur conceptuel qui donne par la forme de variation de ses éléments la nature de l'objet qu'il décrit.

Il est remarquable qu'il concentre les propriétés qui le plus souvent sont construites à partir de différentiation. Parmi ces tenseurs il en est un, le tenseur

de métrique. Dans des conditions données on peut choisir les coefficients de cette métrique de façon relativement arbitraire. En particulier, le fait de choisir une symétrie sphérique de l'espace permet de résoudre toutes les équations dites d'Einstein qui doivent permettre de déterminer la métrique.

Le caractère arbitraire de la métrique autorise le signe négatif devant les termes spatiaux. On peut ainsi différencier les termes spatiaux et le terme temporel, par le signe des coefficients. Mais si on fait une coupe avec un temps nul, on a affaire à une somme de coefficients négatifs. On a ainsi une hypersurface complexe qui nous décrit une intervalle purement imaginaire.

On peut interpréter ce résultat comme l'impossibilité physique d'arrêter l'écoulement du temps, sous peine de nous retrouver dans un espace qui n'existe pas. C'est la façon dont les concepts de nombre imaginaire nous font connaître le temps qui impose cette interprétation.

### La Complexification

Considérons maintenant de façon générale la métrique de Minkowski. L'espace-temps est un espace réel à quatre dimensions de points  $x = (x_0, x_1, x_2, x_3)$  muni de la métrique "hyperbolique"

$$||x||^2 = x_0^2 - x_1^2 - x_2^2 - x_3^2$$

Avec  $x_0$  figurant le temps On sait que la vitesse des signaux est inférieure à celle de la lumière,  $c$ , prise égale à 1. L'équation  $||x||^2 = 0$  définit dans l'espace réel de Minkowski,  $M$ , un cône de lumière de sommet  $x = 0$ . L'intérieur de ce cône  $\{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 < x_0^2\}$  se décompose en deux nappes appelées *cône du futur* ( $x_0 > 0$ ) et *cône du passé* ( $x_0 < 0$ ). Ces cônes sont composés de tous les points avec lesquels, en vertu du postulat fondamental, peut communiquer le point  $x = 0$  dans le futur et dans le passé. Il est apparu nécessaire de complexifier l'espace  $M$ . On l'a donc plongé dans  $\mathbf{C}^4$  (espace complexe de dimension 4) en tant que sous-espace réel  $\mathbf{R}^4(x)$  et complété avec les points  $z = x + iy$ , pour lesquels  $y_1^2 + y_2^2 + y_3^2 < y_0^2$ . Considérons les cônes  $C_+$  et  $C_-$   $\{y \in \mathbf{R}^4, y_0^2 - y_1^2 - y_2^2 - y_3^2 > 0, y_0 > 0 \text{ et } y_0 < 0\}$ . Puis considérons les domaines tubulaires au-dessus d'eux.  $M_c = \{z = x + iy, x \in \mathbf{R}^4, y \in C_+ \text{ et } C_-\}$ . Qu'est-ce qu'un tube?

C'est une exploitation géométrique de la structure complexe, dans le multidimensionnel. Un nombre complexe est représenté suivant l'axe réel et l'axe perpendiculaire à cet axe, l'axe imaginaire pur; il s'agit de transposer sur plusieurs dimensions à la fois cette structure prise initialement sur deux dimensions. Ce qui s'écrit alors  $T = B(x) + i \mathbf{R}^n(y)$ . C'est là ce que nous appliquons à

l'espace réel de Minkowski. Nous obtenons un domaine tubulaire au-dessus de ces cônes qui est l'espace de Minkowski complexifié.  $M^c = M^+ \cup M^-$ . L'espace réel de Minkowski est la frontière distinguée des domaines tubulaires complexes  $M_c$ .

La complexification permet d'explorer le fait de mesurer en le considérant sous l'aspect de ces formes d'impossibilité mathématisées que permettent les extensions complexes. Ou bien inversement il est possible de donner une signification à la forme d'extension de notre manière d'appréhender mathématiquement, cette forme d'extension correspondant à une extension par les nombres complexes.

La théorie des tenseurs dont les origines s'expliquent pour une grande part par les paradoxes EPR, donne des descriptions des notions physiques fondamentales. Je vais simplement vous donner l'exemple des équations de Maxwell.

Elle propose une description non locale de l'espace-temps dans laquelle les rayons lumineux sont représentés par de simples points. C'est cette non-localité spatio-temporelle qui la relie à la non-localité quantique des situations EPR. Elle repose fondamentalement sur les nombres complexes et la géométrie qui leur est associée.

De façon générale, la métrique de Minkowski, métrique hyperbolique, sépare l'espace réel sur lequel elle est déployée en différents cônes. Faisons une remarque sur ces fameux cônes. Il me semble qu'ils remontent à une tradition d'utilisation de forme de généralisation (Desargues) des figures géométriques pour décrire et construire même les formes de notre subjectivité. C'est Leibniz qui a développé ce mode de construction, usant du sommet du cône pour placer le regard synthétisant de la monade. Le passage d'une monade à une autre étant en tout cas impossible depuis l'intérieur de l'une d'elle – elle est sans portes ni fenêtres.

Ajoutons pour les géomètres le fait que le cône décrit un mode de déploiement où le déplacement vertical – dans une direction – contrôle le déplacement qui lui est perpendiculaire et reste circulaire. C'est la raison de la richesse de ses sections. Le cône est à même grâce à sa géométrie de décrire des formes de clôture subjective – comme la sphère – mais aussi de situer ces subjectivités les unes par rapport aux autres. La métrique hyperbolique installe ces formes de synthèse et de séparation. Vous avez les cônes de lumière qui sont donnés par les équations du cône et les événements, quant à eux, vous sont donnés comme événements particuliers (présent, passé et futur) dans chaque cône.

Quelle est la signification de cette situation monadologique? Eddington qui fait l'objet de la thèse complémentaire de Jacques Merleau-Ponty déve-

loppe des idées similaires. (C'est aussi le point de vue de Milne). Sur le plan de la conception "cosmologique" nous sommes des suites d'événements monadologiques dont aucune ne peut interférer, mais qui contribuent de leur point de vue à la beauté du tout (Leibniz).

Passons maintenant à la complexification de cet espace de Minkowski. Il s'agit de voir  $\mathbf{R}^4$  comme une partie de  $\mathbf{C}^4$ . Cette opération est mathématiquement très puissante. On colle au-dessus de ces cônes réels des tubes qui permettent des les voir comme une partie imaginaire de ce grand espace complexe.

On remarque que toujours dans une telle construction subsiste la forme géométrique cette fois rendue bien abstraite, qui permet à travers sa propre géométrie de réorganiser l'espace. Vous avez donc un cône au-dessus duquel vous collez un voisinage tubulaire, un tube. Par exemple une bande de  $\mathbf{C}$  est un tube. Comme on est ici dans plusieurs variables complexes (à la fois) il faut trouver un moyen géométrique de travailler cette pluralité. Or il est des formes géométriques qui permettent – quand elles sont abstraites – ce déploiement, sorte de repliement éclaté des formes intuitionnables sur celles qui ne le sont point. La représentation passe ici par la forme abstraite de l'équation qui répète littéralement la construction visible du tube (cylindre).

Lorsque l'on a complexifié l'espace de Minkowski, on a gagné une nouvelle situation de celui-ci. Comme  $\mathbf{R}$  dans  $\mathbf{R}(i)$ . L'espace réel de Minkowski constitue alors la portion commune des frontières des domaines tubulaires au-dessus des cônes.

Je donne encore un exemple de complexification. Pauli a eu l'idée de représenter les points de l'espace réel  $M$  par des matrices. Ces matrices sont hermitiennes et ont leurs termes construits de telle manière que leur déterminant soit le cône sur lequel on travaille:  $||x||^2$ . Pour ce faire on a été obligé de passer par le complexe, qui sert ensuite à nous ramener dans l'espace réel.

$$X = \begin{pmatrix} x_0 + x_1 & x_2 + ix_3 \\ x_2 - ix_3 & x_0 - x_1 \end{pmatrix}; \text{ On constate facilement que } \det X = ||x||^2$$

Lorsque l'on prolonge à  $\mathbf{C}^4$  la tranformation de Pauli

$$L: (z_0, z_1, z_2, z_3) \rightarrow \begin{pmatrix} z_0 + z_1 & z_2 + iz_3 \\ z_2 - iz_3 & z_0 - z_1 \end{pmatrix}$$

on constate qu'elle agit sur les domaines tubulaires de manière à les envoyer dans un autre domaine de  $\mathbf{C}^4$  qui soit un cadre de travail, ce qu'on appelle un polyplan

supérieur généralisé (demi-plan de Poincaré). On a représenté les points de  $\mathbf{C}^4$  par des matrices 2-2. Soit  $Z^* = (z_{jk}^-)$  la transposée conjuguée de la matrice  $Z$ ; on pose

$$\text{Im } Z = 1/2i (Z - Z^*)$$

On appelle demi-plan supérieur généralisé le domaine

$$H = \{ Z \in \mathbf{C}^4 : \text{Im } Z > 0 \}. \text{ Soit}$$

$$H = \left\{ Z \in \mathbf{C}^4 : \begin{pmatrix} y_{11} & \frac{z_{12} - \bar{z}_{21}}{2i} \\ \frac{z_{21} - \bar{z}_{12}}{2i} & y_{22} \end{pmatrix} > 0 \right\}$$

On constate que cette matrice est hermitienne, les inégalités et égalité

$$y_{11} > 0, \quad y_{11}y_{22} - \frac{1}{4} |z_{12} - \bar{z}_{21}|^2 > 0$$

$$y_{11}y_{22} - \frac{1}{4} |z_{12} - \bar{z}_{21}|^2 = 0$$

$$y_{11} > 0, \quad C = \{ y_{11}^2 - y_{22}^2 - y_{12}^2 - y_{21}^2 > 0 \}$$

définissant le demi-plan supérieur et sa frontière.

Que signifie cette représentation? C'est d'abord une simple organisation des coordonnées. Mais c'est aussi une façon d'encadrer les éléments qui sont placés en position particulière accessible sur cette matrice (sur la diagonale principale les éléments sont réels et les symétriques par rapport à cette diagonale sont conjugués).

On peut remarquer encore ce que signifie cette concentration conceptuelle, la conjugaison des éléments dans le corps des complexes est une façon de conserver l'extension dans  $\mathbf{C}$ .

$$\text{Si } Z = \begin{pmatrix} z_{00} & z_{01} \\ z_{10} & z_{11} \end{pmatrix}$$

est la représentation matricielle des points de  $\mathbf{C}^4$  on a  $\text{Im } Z =$

$$\frac{1}{2i} (Z - Z^*) = \begin{pmatrix} y_{00} & \frac{z_{01} - \bar{z}_{02}}{2i} \\ \frac{z_{10} - \bar{z}_{01}}{2i} & y_{11} \end{pmatrix}, \quad y_{ik} = \text{Im } z_{jk}$$

On a comme vu ci-dessus un matrice hermitienne et les signes  $>$  et  $<$  expriment le fait que cette matrice soit positive ou négative. On remarque que l'espace  $M$  se transforme par cette application  $L$  en un ensemble de matrices hermitiennes  $Z$  pour lesquelles  $\text{Im } Z = 0$ , soit en un plan  $\{ y_{00} = y_{11} = 0, z_{01} = z_{10} \} \subset \mathbf{C}^4$ , de dimension réelle 4. On ne fait plus de distinction entre  $M^c$  et  $L(M^c)$ .

### III. La compactification

On est amené à étudier ce qui se passe très loin de l'origine des coordonnées. On cherche donc à achever  $\mathbf{C}$ . On lui adjoint ce qu'on appelle un point à l'infini. Comme on peut être amené à adjoindre des droites de l'infini à des espaces de dimension plus grande. On a alors affaire à une fermeture de l'espace, qui nous permet de ramener les problèmes à l'infini à des problèmes qui se cherchent sur des parties finies. Cette opération se nomme opération de compactification.

Cette opération de compactification est une façon de traiter de l'infini comme s'il était fini. C'est de fait en un certain sens l'exploitation de la nature conceptuelle de ce qu'est une sphère, une façon de conceptualiser la sphère. L'univers a toujours été conçu comme sphérique, la forme du tout a longtemps été introduite dans la réflexion philosophique comme celle de la sphère. On peut affirmer que l'opération de compactification ici, le passage au projectif est aussi une des formes que peut prendre la synthèse. Dans une réflexion cosmologique elle se manifeste sous deux formes

D'une part du côté du tout: il faut pouvoir se donner une représentation du tout et nous avons les modèles de type sphérique ou projectif du tout. D'autre part et c'est souvent méconnu, il y a ce que j'appellerai une réflexion locale cosmologique: le fait que l'on utilise comme outil des formes globales cosmologique comme si le tout ressurgissait – comme le montre Hegel – dans ses éléments ou dans ses parties. C'est le cas de l'opération de compactification généralisée.

Penrose a inventé ce que l'on pourrait appeler une compactification généralisée. Dans un premier temps on considère donc le compactifié d'un plan complexe, soit  $\mathbf{C}$  auquel on ajoute un point à l'infini. Les espaces projectifs sont tous construits de cette manière.

On a ainsi  $\mathbf{P}^3$  qui l'espace projectif de dimension complexe trois. Qui est obtenu à partir de la compactification de  $\mathbf{C}^3$ . On peut l'obtenir en identifiant des points antipodiques de la sphère  $\mathbf{S}^3$  réelle. Le but est de travailler sur des points de cet espace, qui sont alors des objets géométriques de dimension

appropriée. Une droite de  $\mathbf{P}^3$  c'est un espace projectif de dimension 1. Ou encore un cercle sur la sphère  $\mathbf{S}^3$  Ou encore un plan complexe compactifié.

Penrose considère toutes les droites de  $\mathbf{P}^3$  à la fois. Cet objet géométrique est muni de structures très riches. Et il est compact, il récolte la compacité de ses éléments. On peut parfaitement dire ce que sont ces structures et ce que sont les éléments. Ce que fait Penrose c'est d'inclure le complexifié de Minkowski dans un tel espace compact.

Par cette opération il colle à l'infini de l'espace réel de Minkowski le cône réel de  $\mathbf{R}^4$

Cette opération est décrite d'abord matriciellement, comme une condition sur le déterminant de la matrice qui représente un point du grand espace compact. Il faut remarquer que Minkowski hérite du résultat de l'opération de compactification de l'espace constitué de toutes les droites complexes de  $\mathbf{P}^3$ . Mais que l'opération reste structurellement la même. On réunit à un espace fini, un autre espace qui était à l'infini. Cette "réunion" consiste à rendre possible dans la figure même la considération de points à l'infini.

Il est remarquable que cette partie à l'infini nous soit donnée par des conditions portant sur les coordonnées de l'espace que l'on construit. Il existe une manière de se déplacer dans un espace ainsi donné qui laïcise le point à l'infini. Il y aura une partie d'espace où il se trouve qui nous donnera accès à lui. L'opération d'ajout de parties à l'infini est une opération dont les effets se traduisent partout dans la géométrie de l'espace projectif construit.

#### **IV. Remarques sur l'idée de transformation intégrale à la base de la théorie des twisteurs**

L'idée de Penrose est donc d'utiliser de façon systématique cette compactification généralisée. Il s'agit de replier l'espace compact sur ses éléments. A cause de l'importance des structures diverses qu'il nous livre. A chaque point de cet espace on peut faire correspondre une droite projective. On passe donc de l'espace de Minkowski projectif complexe (compactifié complexifié) à l'espace projectif de dimension trois qui lui est sous-jacent. Les points de cet espace sont appelés twisteurs. Cette méthode générale consiste à reprivilégier au sein de la structure générale, comme ensemble en tant que tel de droites de  $\mathbf{P}^3$ , une droite correspondant à un point quelconque de l'ensemble général. En particulier on peut ainsi observer les points de l'espace de Minkowski.



A un point on peut associer une droite. Remarquons bien qu'un point de l'espace dont on part est représenté par des conditions sur l'ensemble des droites de  $\mathbf{P}^3$  en tant que tel. Il faut bien noter qu'une droite de  $\mathbf{P}^3$  est une droite complexe projective notée  $\mathbf{P}^1$  que l'on appelle sphère de Riemann. Une sphère de Riemann est un espace complexe de dimension 1,  $\mathbf{C}$  que l'on a complété par un point à l'infini comme vu. Ces conditions se traduisent par des expressions matricielles.

On munit cet ensemble, appelé grassmannienne, d'une structure de variété complexe. Un point de cette variété, donc une droite projective peut s'écrire:

$$\tilde{Z} = \begin{pmatrix} \mathbf{E} \\ \mathbf{Z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ z_{00} & z_{01} \\ z_{10} & z_{11} \end{pmatrix} \text{ l'ensemble de ces matrices est la partie affine de cette variété.}$$

Les points de la variété grassmannienne se représentent par des classes de  $4 \times 2$ - matrices  $Z = \begin{pmatrix} Z_1 \\ Z_2 \end{pmatrix}$  deux matrices  $Z'$  et  $Z$  étant équivalentes s'il existe une matrice  $C$  d'ordre 2 telle que  $Z' = ZC$ . Les points de la partie affine de cette variété se représentent par des matrices  $Z$  avec  $\det Z_1 \neq 0$ . Car on retrouve ainsi facilement la forme  $\tilde{Z}$ . La condition  $\det Z_1 \neq 0$  possède une interprétation particulièrement intéressante. Nous avons inclu l'espace complexe de Minkowski,  $M^c$ , dans la variété grassmannienne qui est compacte. De la même façon que l'on compactifie  $\mathbf{C}$  en ajoutant un élément à l'infini  $\{\infty\}$ . les points de la partie affine de la grassmannienne auxquels on ajoute cette condition sont les points à l'infini de la variété. Ce sont ces points que l'on colle à l'infini de  $\mathbf{C}^4$  par cette compactification. Si l'on revient en réel, à l'espace réel  $M$  on ajoute l'ensemble des matrices pour lesquelles  $\det X = x_0^2 - x_1^2 - x_2^2 - x_3^2 = 0$ , on colle à l'infini de cette façon un cône de  $\mathbf{R}^4$  On ne s'intéresse pas à  $\mathbf{C}^4$  tout entier mais à la partie  $M^c$ . On met en évidence cette partie de la manière suivante.

Comme la transformation de Pauli envoie les domaines tubulaires  $MC+$  et  $-$  dans les demi-plans supérieurs et inférieur  $H+$  et  $-$  i.e.  $\{Z; \text{Im}Z > 0 \text{ et } < 0\}$  on construit les domaines

$$\{\tilde{Z}; \text{Im } \tilde{Z} > 0 \text{ ou } < 0\}. \text{ Il suffit de construire l'application } \Phi \text{ telle que}$$

$$\Phi(\tilde{Z}) = (E, \tilde{Z}^*) \begin{pmatrix} 0 & -iE \\ iE & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E \\ Z \end{pmatrix} = -i(\tilde{Z} - \tilde{Z}^*) = 2 \operatorname{Im} \tilde{Z} \quad Z^* \text{ est la transposée}$$

conjuguée de Z. On obtient donc  $\tilde{M}^{c+}$  et  $-$  qui sont les compactifiés de  $M^c +$  et

On a de même  $\tilde{M} = \{\tilde{Z} \in G(3, 1); \phi(\tilde{Z}) = 0\}$ ;  $(G(3, 1)$  étant la variété grassmannienne, ensemble des droites complexes de  $\mathbf{P}^3$ .

Les points de cette variété peuvent donc être interprétés comme des droites complexes ou comme des plans de  $\mathbf{C}^4$  (dimension complexe 2 dans un espace de dimension complexe 4). Pour les points de la partie affine représentables par les matrices  $\tilde{z}$ , les plans sont de la forme

$$w = \lambda \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ z_{00} \\ z_{10} \end{pmatrix} + \mu \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ z_{01} \\ z_{00} \end{pmatrix} \quad w \text{ étant un vecteur colonne } (w_i) \text{ et } \lambda \mu \text{ des paramètres com-}$$

plexes. On obtient facilement les équations développées d'une droite projective correspondant à un point  $\tilde{z}$

Penrose passe de l'espace complexe de Minkowski à un espace projectif complexe dont les points s'appellent des twisteurs. La tranformation de Penrose associe à tout point

$$\tilde{z} \in \tilde{M}^c \text{ la droite projective correspondante } l \subset \mathbf{P}^3 (\mathbf{PT}),$$

ou encore la sphère de Riemann correspondante. On munit ensuite l'espace des twisteurs d'une forme hermitienne. On voit aisément que cette forme définit dans  $\mathbf{P}^3 (= \mathbf{PT})$  une hypersurface réelle N (dimension réelle 5) qui partage  $\mathbf{P}^3$  en deux domaines D + et -.

$$\phi(w) = w^* \phi w = i(w_0 \bar{w}_2 + w_1 \bar{w}_3 - \bar{w}_0 w_2 - \bar{w}_1 w_3) = -2 \operatorname{Im}(w_0 \bar{w}_2 + w_1 \bar{w}_3),$$

cette hypersurface réelle  $N = \{w; \operatorname{Im}(w_0 \bar{w}_2 + w_1 \bar{w}_3) = 0\}$ . On montre que la transformation de Penrose associe aux points  $\tilde{z} \in \tilde{M}^{c\pm}$  des droites entièrement contenues dans les domaines  $D_{\pm}$  des twisteurs positifs et négatifs et aux points de M des droites de l'hypersurface N des twisteurs nuls.

Dans l'espace  $\mathbf{C}^4$  on peut déterminer comme précédemment des cônes, dits cônes de lumière complexes. Ceux-ci sont déterminés à partir de condition d'intersection des droites images de la transformation de Penrose. Si  $p(Z^0) = I_0$

est l' image de  $Z^0$  et les images  $p(Z) = p(Z^0 + V)$  celles des points  $Z^0 + V$ , couperont  $l_0$  si et seulement si  $\det V = 0$ . L'hypersurface complexe

$$C_{Z_0} = \{Z = Z^0 + V; \det V = 0\} \text{ s'appelle cône de lumière complexe.}$$

Et sur ce cône on peut différencier deux familles de plans différents. La transformation de Penrose agit sur ces plans. Leur associant pour les uns un point de  $\mathbf{P}^3$  (=  $\mathbf{PT}$ , twisteurs) et pour les autres un plan de l'espace des twisteurs, un point de l'espace conjugué des twisteurs ( $\mathbf{P}^3$ )\*

On restreint le cône de lumière complexe à sa partie réelle, on appelle cône de lumière réelle. Les points de ce cône sont situés à une distance nulle de son sommet, d'où son nom de cône d'isotropie.

Le cône réel est composé de droites réelles appelées rayon de lumière.

Vous voyez comment un twisteur est l'équivalent ponctuel et non local d'un plan du cône de lumière. Et l'image d'un point du rayon de lumière par la transformation de Penrose est une droite de l'ensemble des twisteurs nuls. Qu'est-ce qu'un twisteur nul? C'est un point qui est situé sur une certaine surface réelle de l'espace des twisteurs. Dans cet espace on introduit en effet des instruments qui permettent d'ordonner les éléments.

On s'est donné les moyens d'observer dans un autre espace mathématique les cônes qui concentrent les événements.

La transformation de Pauli complexe qui permet d'écrire en coordonnées sur la variété grassmannienne l'application est ce qu'on appelle aussi la relation d'incidence qui établit cette correspondance ou transformation de Penrose. On peut écrire cette relation à l'aide de la notation spinorielle.

On a commencé à bâtir une théorie quantique des twistors. On se donne une fonction d'onde des twisteurs à valeurs complexes définie sur l'espace des twisteurs. Penrose explique que n'importe quelle fonction  $f(Z)$  n'est pas *a priori* une fonction d'onde mais utilise la propriété d'holomorphicité pour caractériser une telle fonction. De la même façon il donne une description de  $f(Z)$  dans l'espace-temps. Elle s'obtient au moyen d'une intégrale de contour et là encore la contrainte d'holomorphicité des champs de twistors code pour les équations du champ.

C'est pourquoi cette méthode géométrique permet aussi de résoudre et de classer les équations de l'électromagnétisme et de l'optique géométrique. En associant à chaque droite donnée par l'application dans les twisteurs une opération sur celle-ci qui permette de donner des équations de Maxwell une représentation: on effectue une intégration le long de ces droites. Cette fois la transformation qui donne des solutions des équations différentielles une re-

présentation intégrale est une méthode absolument générale de géométrie intégrale. On peut comprendre qu'une opération d'intégration anticipe sur des solutions d'équations différentielles.

Il est simple de remarquer qu'une intégration c'est d'abord une forme d'anticipation, et qu'elle renoue avec les anticipations que Kant avait tenté de thématiser dans l'analytique de la Critique de la Raison Pure.

Pourquoi un tel cadre pour les équations de Maxwell, qui peut être développé encore pour d'autres équations différentielles importantes de la physique mathématique. Je dirais sans l'expliciter que c'est parce que cette géométrie s'est développée comme cadre de conception des formes de solutions aux limites. C'est le mode de compactification complexe qui explique la puissance de cette classification.

## V. Quelle en est la place dans la cosmologie?

Comme je l'ai souligné il s'agit d'une des formes de totalisation donnée à travers cette opération centrale de compactification.

Il en est de même pour les modèles cosmologiques qui sont à la base de la recherche de l'évolution de la métrique globale de l'univers.

Vous comprenez bien qu'il serait facile de dire que comme il faut anticiper sur l'évolution de l'univers, nous avons affaire à une sorte de système différentiel total. Que nous donnent les équations d'Einstein. C'est plus difficile. Il faut pourtant une sorte de principe anthropique. Par lequel nous remontons aux questions initiales de la métaphysique.

“Le résultat fondamental de Penrose et Hawking consiste en un théorème d'existence nécessaire de singularité. Ils démontrent qu'une singularité doit être présente pour autant que soient vérifiées trois conditions. La première porte sur la structure causale de l'univers; la seconde sur le contenu énergétique; la troisième exprime que la gravité doit être suffisamment intense.”<sup>2</sup>

---

<sup>2</sup> Lachièze Rey M., Présentation de “La nature de l'espace et du temps”. S. Hawking R. Penrose, trad. F. Balibar, NRF, 1996.

Si comme le souligne le même auteur on peut considérer l'espace-temps comme tissé par l'ensemble des géodésiques, connaître ces géodésiques et la structure qu'elles dessinent cela permet de savoir quelle région de l'univers peut influencer telle autre. C'est ainsi que l'on a affaire la structure causale de l'univers. Selon la relativité générale c'est le contenu énergétique de l'univers qui détermine (au moins partiellement) la structure de l'espace-temps.

D'après l'énoncé de Penrose l'univers en expansion entraîne la présence d'une singularité dans le passé. C'est pour examiner dans un cadre mathématique-théorique suffisamment puissant la nature de ces singularités que Penrose a développé sa théorie twistorienne. Il en parle comme d'une idéologie.

La structure de l'univers est décrite à l'aide d'un concept mathématique appelé tenseur de Riemann de l'espace-temps lié à sa courbure. Penrose le décompose en deux parties qui s'additionnent le tenseur de Ricci et le tenseur de Weyl. Selon Penrose la partie "Ricci" exprime une structure globale et relativement régulière et la partie "Weyl" rend compte des éventuelles irrégularités<sup>3</sup> Le big bang extrêmement régulier se décrit donc avec tenseur de Weyl nul. L'hypothèse de l'annulation du tenseur de Weyl est liée au nom de Penrose<sup>4</sup>

Comme la courbure de Weyl devait valoir zéro aux singularités du passé et que la variété d'espace-temps est quasi conformément plate la théorie des twistors y est très bien adaptée. On se trouve dans la situation où l'holomorphie exprime les équations du champ. Mais Penrose explique qu'il veut suivre l'idéologie twistorienne même si la description se complique avec l'envahissement de la courbure de Weyl c'est-à-dire avec l'écoulement du temps. Il ajoute même que c'est l'idéologie twistorienne qui le fait pencher pour un modèle d'univers ouvert, modèle d'univers avec  $k < 0$ .  $K$  mesure la force du champ de gravitation sur l'horizon des événements<sup>5</sup> Sa préférence pour  $k < 0$  vient de ce que le modèle twistorien holomorphe continue de fonctionner (le groupe de symétrie de la singularité initiale est holomorphe).

La question qui reste encore ouverte est de savoir en l'occurrence si la logique intrinsèque de la théorie permet de trancher sur la pertinence d'un modèle physique. A ce niveau de généralité, la réponse ne peut qu'être idéologique comme l'indique Penrose. Cependant il devient clair que la structure mathématique de la théorie joue un rôle heuristique dont nous avons déjà vu les raisons.

3 *Ibidem*, p.75 et Merleau-Ponty, J. *Cosmologie du XX<sup>e</sup> siècle pour les modèles classiques*, Friedmann Lemaître, Robertson et Walker.

4 Lachèze-Rey, *ibidem*.

5 Hawking et Penrose, *ibid.*, p. 63 et ss.

Les concepts d'holomorphie, de prolongement de diffusion propagation des effets sur les surfaces et hypersurfaces étudiées concentrent structurent et informent la nature physique essentielle de la théorie. De plus pour les mêmes raisons le cadre d'étude des singularités qui sont les concepts-clés de la cosmologie ont en quelque sorte induit les structures conceptuelles de leur étude le concept le plus puissant pour cet examen étant celui de l'espace des twisteurs comme ensemble des droites projectives de  $\mathbf{P}^3$ . Les deux actes qui président à cette construction complexification et compactification sont très loin d'avoir produit tous leurs effets.

# Cosmologies de la fin du XX<sup>e</sup> siècle

Marc Lachièze-Rey\*

**Résumé:** On retrace les tendances générales de la cosmologie scientifique à la fin de notre siècle. Son évolution a intégré l'apparition de nouvelles disciplines, physique quantique et théorie quantique des champs, physique nucléaire et physique des particules. Elle prend en compte de nombreuses découvertes observationnelles en astrophysique, permises par les progrès des instruments et des méthodes d'observation, par l'exploration de nouvelles fenêtres de rayonnement.

Prenant en compte le contenu matériel de l'univers, ses lois et son évolution, la cosmologie est devenue beaucoup plus concrète. De nouveaux concepts – masse cachée, lentilles gravitationnelles, vide quantique et son énergie, inflation, brisures de symétrie et défauts topologiques... – sont apparus. Leur étude mène vers l'ère de Planck et la cosmologie quantique. De nouveaux domaines de recherche – formation des galaxies, Univers primordial – sont très actifs.

Nous faisons le point sur le statut des modèles de big-bang, seuls candidats actuellement pour comprendre l'univers et son évolution. Ils rendent compte de l'homogénéité, de l'expansion, de l'évolution, de l'âge de l'univers, de la présence des éléments légers et du fond diffus cosmologique. Nous détaillons les progrès dans la connaissance des paramètres cosmologiques (en particulier la constante cosmologique) et du contenu de l'univers.

**Abstract:** We review the general tendencies of cosmology at the end of the century. Its evolution has integrated the appearance of new disciplines such as quantum physics and quantum field theory, nuclear and particle physics. It takes into account many observational discoveries in astrophysics, allowed by the progress of observational instruments and methods, by the exploration of new radiation window. Taking into account the material content of the Universe, with its laws and its evolution, cosmology has become more concrete. New concepts – dark matter, gravitational lenses, quantum vacuum and its energy, inflation, symmetry breaking and topological defects... – have appeared. Their study leads to the Planck era and to quantum cosmology. New domains – galaxy formation, the primordial Universe – are now very active.

We resume the status of the big-bang models, the only candidates to understand the universes and its evolution. They give an account of the homogeneity, the expansion, the evolution, the age of the universe, as well as of the presence of the light elements and of the cosmic microwave background. We detail the progress in the knowledge of the cosmological parameters (including the cosmological constant) and of the content of the universe.

LA COSMOLOGIE se constitue comme discipline scientifique au début de notre siècle. D'une part, la formulation de la théorie de la relativité générale permet de considérer un objet "univers", muni de propriétés conceptualisables et mesurables. D'autre part, l'expansion cosmique constitue la première de ces propriétés observées.

---

\* Directeur de recherche, CEA, Saclay, [marclr@discovery.saclay.cea.fr](mailto:marclr@discovery.saclay.cea.fr).

La première moitié du siècle donna lieu à une pléthore de développements formels. De nombreux modèles cosmologiques furent constitués et critiqués; des procédures observationnelles furent conçues pour les tester. Mais la mise en oeuvre de ces “tests cosmologiques” se heurta à d’énormes difficultés: limitations des instruments d’observation; présence de différents effets très complexes perturbant l’analyse des résultats de mesure: absorption et dégradation des rayonnements astrophysiques; effets d’évolution inextricablement mêlés aux effets à mesurer, et les masquant complètement.

Les premiers modèles cosmologiques étaient d’une grande abstraction: des sortes d’illustrations académiques de la théorie de la relativité générale (RG), sans prise en compte d’effets physiques. Les études se consacraient à des problèmes de nature cosmographique, où la gravitation, décrite par la RG, était seule prise en compte.

Depuis, la physique quantique s’est mise en place, et a donné lieu à d’innombrables applications qui ont confirmé son efficacité. Mise en accord avec la relativité restreinte, elle s’exprime aujourd’hui sous le formalisme de la théorie quantique des champs. Par ailleurs, de nombreuses découvertes expérimentales ont engendré et stimulé les progrès de la physique nucléaire et de la physique des particules. Si d’un point de vue conceptuel ces théories relèvent de la théorie quantique des champs, elles sont aujourd’hui formulées dans le cadre d’un modèle phénoménologique efficace, le “modèle standard des particules et des interactions” Celui-ci présente un classement des particules élémentaires (en fonction de la théorie des groupes), selon la manière dont elles interagissent (selon trois types d’interactions répertoriées: électromagnétique, nucléaire faible et nucléaire forte), en conformité avec le formalisme de la théorie des champs. Bien que conceptuellement mal compris et mal décrit, ce schéma fonctionne du point de vue empirique. La gravitation est “rajoutée”, non quantifiée et décrite d’une manière conceptuellement différente par la RG.

Depuis quelques décennies, la cosmologie incorpore cette description, et tente de tirer les conséquences du comportement de la matière que cela implique. Le contenu matériel de l’univers est décrit sous forme de l’assemblage d’un très grand nombre de ces particules, se combinant et interagissant

Néanmoins, la cosmologie déborde des domaines d’application des théories établies, et nécessite de les prolonger: vers des échelles spatiales et temporelles plus petites, vers des énergies plus grandes, en combinant de manière plus harmonieuse la gravitation aux autres interactions. Ces tentatives, aujourd’hui en cours, s’expriment sous des formes très diverses: théories “grand-unifiées”, supersymétrie et supergravité, cordes et supercordes, gravité ou cosmologie



quantiques, géométrie non commutative, ... Je n'entrerai pas dans leurs détails qui relèvent autant de la physique théorique que de la cosmologie, présentant des degrés divers de succès conceptuels. Quelques unes ont été appliquées à la cosmologie, avec plus ou moins de bonheur.

### Nouveaux concepts

De nouveaux concepts ont été introduits en cosmologie.

- Celui de “masse cachée”, ou “matière sombre” n'est pas récent. Il relève plutôt de l'astronomie que de la cosmologie, mais ses implications dans cette discipline sont importantes. Il résulte d'un désaccord: la masse de la matière “lumineuse”, telle qu'elle est estimée d'après les observations de son rayonnement, diffère de la quantité de masse mesurée au même lieu par des arguments dynamiques. La différence – très importante – pourrait être sous forme de “masse cachée”

La nature de cette masse cachée additionnelle reste inconnue. Elle pourrait être relativement ordinaire, sous la forme de matière dite baryonique car composée de protons et de neutrons essentiellement. Elle pourrait aussi se constituer d'un type encore inconnu de particules, qui n'émettent (ni n'absorbent) aucun rayonnement. Cette possibilité nouvelle est permise, sinon suggérée, par les derniers développements de la physique des particules et de la physique théorique: en quelques décennies, les physiciens des particules ont proposé, en général de manière *ad hoc*, plus d'une centaine de “candidats” possibles. La physique des particules se révèle ainsi dépourvue de pouvoir prédictif: elle autorise l'existence de presque n'importe quelle nouvelle particule aux attributs arbitraires. La multitude de candidats proposés crée une confusion actuellement peu séduisante, même si la manière dont ils pourraient intervenir en cosmologie permet de les classer en catégories telles que matière “froide” “tiède” ou “chaude”, ...

En même temps, les astronomes tentent de mettre en évidence indirectement l'éventuelle présence d'objets massifs invisibles de dimensions importantes, comparables à celles d'une planète ou d'une étoile (MACHOs). Ils utilisent pour cela le phénomène de déviation gravitationnelle de la lumière par les masses, prévue par la RG. Du point de vue cosmologique, les analyses suggèrent une contribution totale  $\Omega = 0.2 - 0.4$  à la densité de masse de l'univers (voir ci-dessous).

Il est à noter qu'il est possible que la RG (et son approximation newtonienne) ne soit pas la bonne théorie de gravitation. Dans ce cas-là, les analyses

dynamiques modifiées pourraient faire disparaître le problème. Aucune alternative convaincante n'a cependant été proposée.

- Autre concept nouveau, le “vide quantique” résulte de tentatives d'introduction de la théorie quantique des champs en cosmologie. En théorie quantique des champs, l'énergie absolue d'un état est une grandeur mal définie. Elle apparaît d'ailleurs, *a priori*, infinie, défaut “corrigé” par une procédure de renormalisation peu satisfaisante mais au moins efficace pour de nombreuses applications pratiques. Cette procédure laisse une liberté d'interprétation qui permet d'envisager un “état de vide” (ou, plus correctement, “état fondamental”), dont la densité d'énergie est à peu près arbitraire. Les avis des physiciens divergent quant à la légitimité d'une telle procédure. Toujours est-il que le concept de “vide quantique”, et d'une “énergie du vide” associée ont été introduits en cosmologie. L'idée, proposée par les soviétiques dans les années 1960-1970, reprise et médiatisée plus tard par les américains, est devenue l'objet d'une “mode” telle que de nombreux travaux la reprennent avec un flagrant manque de rigueur. Dans un cadre relativement insatisfaisant, en sont nés des concepts néanmoins intéressants – inflation, brisures de symétrie et défauts topologiques –, dont seul l'avenir nous dira la pertinence.

- A un niveau encore plus fondamental, mais aussi plus spéculatif, les cosmologues tentent de percer les mystères de l'ère de Planck et de bâtir une cosmologie quantique.

### Nouveaux moyens d'observation

L'astronomie et l'astrophysique ont énormément évolué durant le dernier demi-siècle: améliorations considérables des instruments et méthodes d'observation; meilleure compréhension des différents mécanismes conduisant à la réception du rayonnement.

Les moyens d'observation mis en service dans les dernières décennies donnent accès à un espace plus lointain, et donc à des périodes plus reculées dans le passé. Ce dernier point, fondamental en cosmologie, est à double tranchant. Certes, il dévoile certains aspects de l'évolution cosmique des objets peuplant l'univers et de l'univers lui-même. Mais ces évolutions se mêlent tant et si bien que les effets sont inextricables et l'interprétation extrêmement difficile.

Heureusement, un nombre toujours croissant d'objets deviennent observables et observés, ce qui permet de meilleures études statistiques. Les nou-

velles fenêtres d'observation (infrarouge, rayons X et gammas,...) ouvertes par la technologie (notamment spatiale), ont amené la découverte de nouvelles sources cosmiques de rayonnement, et des informations complémentaires sur les celles déjà connues: quasars, amas de galaxies, sursauts gamma ... En même temps, les observations du fond diffus cosmologique se sont affinées.

Les effets de **lentilles gravitationnelles** n'étaient au début du siècle qu'une curiosité théorique. Depuis la découverte du quasar double, de nombreux effets de "mirages" et "d'arcs gravitationnels" ont été détectés. Ces phénomènes, qui confirment la théorie de la RG, offrent bien davantage à la cosmologie: leur analyse permet de sonder directement les champs gravitationnels engendrés par les masses, offrant la possibilité tout à fait nouvelle de dresser de véritables cartes de la distribution de masse (qu'elle soit visible ou invisible), jusqu'à des échelles gigantesques (la centaine de millions d'années-lumière).

Astrophysique et cosmologie ont bien entendu bénéficié, et continuent à le faire, des progrès des moyens de calcul. Cela concerne en premier lieu le traitement massif des images et des données. La cosmologie s'appuie sur des données relatives à des astres (galaxies, quasars, ...) très lointains et donc très peu lumineux. Des traitements d'images parfaitement adaptés sont nécessaires, par exemple pour se débarrasser de la contribution indésirable du fond de ciel. En outre, la validation de certaines propriétés cosmologiques nécessite l'observation de très nombreux objets et des analyses statistiques lourdes. Tout cela ne peut être accompli sans l'aide d'un ordinateur.

Certains événements très rares peuvent être très riches en information pour la cosmologie. Je citerai par exemple l'explosion d'une supernova dans une galaxie très lointaine: permettant de mesurer la distance de cette dernière, elle fournit une information de premier choix. Plus près de nous, le passage d'un objet massif (planète, autre étoile, objet invisible de type MACHO) devant une étoile donne l'occasion d'un phénomène d'amplification gravitationnelle remarquable, dont l'analyse offre ici encore une information capitale.

Mais pour avoir la chance d'observer de tels phénomènes, il faut surveiller en permanence (toutes les nuits) des millions de candidats potentiels, ce que seuls permettent une observation et un traitement des données automatisés. C'est une des contributions essentielles des progrès de l'informatique à la cosmologie.

Ces progrès permettent également d'énormes calculs, auparavant impossibles. À côté de très réelles avancées, cela engendre un effet pervers: une véritable industrie de calculs "scientifiques", dont l'intérêt n'apparaît pas toujours clairement, remplace parfois la réflexion cosmologique. Cette overdose de simulations numériques a fait perdre son âme à certaines branches de la cosmologie.

## Le statut des modèles

Un des buts de la cosmologie est d'établir, de critiquer ou de valider les modèles décrivant l'univers et son évolution. La classe de modèles standard de Friedmann-Lemaître (FL), conçus et décrits dans le cadre de la RG, reposent sur le principe cosmologique, et sur l'adoption de la physique connue, sans modification ni rajout (ce sont les seuls vérifiant cet ensemble de prescriptions). Ils prennent en compte l'expansion cosmique décrite par la constante de Hubble  $H_0$  (introduite en fait par Lemaître). Les modèles de cette famille dépendent essentiellement de deux paramètres supplémentaires.

Les contraintes déjà existantes sur ces paramètres restreignent la classe des modèles FL à une sous-classe correspondant aux "modèles de big-bang" Successeurs de "l'hypothèse de l'atome primitif" formulée par Lemaître dans les années 1930, ils se caractérisent par une durée passée limitée de la phase d'expansion cosmique. Ils sont aujourd'hui mieux "confirmés" que jamais par un ensemble concordant de résultats observationnels, dont aucun autre modèle ne peut rendre compte:

- L'homogénéité à très grande échelle de la distribution des galaxies renforce la confiance dans le principe cosmologique. Une controverse existe quant à la taille maximale des hétérogénéités présentes. Il semble qu'elles atteignent quelques centaines de millions d'années-lumière au maximum.

- L'expansion de l'univers est devenue un fait établi. Actuellement, il s'agit de mesurer son taux, mesuré par la constante  $H_0$ ; de vérifier son isotropie, et d'établir dans quelle mesure les estimations de  $H_0$  sont perturbées par la présence des fluctuations locales, superamas, grands vides, grandes structures de tous types.

- Les observations dans tous les domaines de longueurs d'onde ont montré l'évolution globale des galaxies, quasars et autres objets cosmiques: évolution des objets eux-mêmes et évolutions des populations. Ces évolutions dévoilent celle de l'univers lui-même, un argument supplémentaire en faveur du big bang, contre les modèles d'univers stationnaire par exemple.

- Les calculs des abondances des éléments légers fabriqués lors de la nucléosynthèse primordiale, selon les modèles de big bang, ont été énormément améliorés, prenant en compte toute sorte d'effets secondaires. Les abondance de ces mêmes éléments dans l'univers sont mesurées de plus en plus précisées.

ment et surtout, récemment, dans des régions non “polluées” par des effets annexes. Globalement, ils confirment les modèles de big bang avec un excellent accord, établi sur 10 ordres de grandeur. De plus, ces calculs conduisent à une prédiction concernant la physique des particules (que le nombre de familles de neutrinos est inférieur à 4) qui, confirmée au CERN de manière spectaculaire, renforça encore la confiance dans les modèles de big bang (une controverse, qui ne remet pas cette confiance en cause, existe actuellement à propos de l’abondance du deutérium dans les régions primordiales au voisinage de quasars.)

Ces calculs permettent d’établir une limite  $\Omega_b < 0.01$  à la densité de matière baryonique présente dans l’univers (pour une valeur  $H_0 = 65$  de la constante de Hubble). Cette limite n’est pas suffisamment élevée pour clore à elle seule l’espace. En première analyse, il semble aujourd’hui qu’une partie de la masse cachée doit être sous forme baryonique, et une autre partie sous forme non-baryonique.

- Les âges des plus vieilles étoiles sont estimés aujourd’hui (réévaluation récente avec Hipparcos) autour de la dizaine de milliards d’années. Par ailleurs, les estimations (totalement indépendantes) de l’âge de l’univers à partir des paramètres cosmologiques, selon les modèles de big bang, donnent une fourchette autour des mêmes valeurs. Les modèles de big bang expliquent ainsi parfaitement ce qui apparaît autrement comme une coïncidence quasi “miraculeuse”

- Le fond diffus cosmologique fut détecté en 1965, alors que son existence avait été prédite deux décennies plus tôt dans le cadre des modèles de big bang. Son isotropie et sa nature thermique, rapidement établies, confirmèrent les prédictions des modèles de big bang. Depuis, le très grand nombre d’observations consacrées à ce rayonnement diffus (notamment par le satellite COBE) confirment, avec une précision rarement rencontrée en astrophysique, les prédictions du big bang. Par ailleurs, les astronomes se sont mis en chasse des fluctuations dans l’intensité de ce rayonnement. Après une longue période relativement décourageante, COBE puis d’autres observatoires terrestres ou spatiaux ont découvert celles aux plus grandes échelles angulaires, et ont commencé à mesurer les caractéristiques de ce rayonnement.

Ces traces, les plus<sup>1</sup> anciennes observées et même observables (du moins pour une longue période) ont une importance fondamentale pour la cosmologie. Elles nous renseignent sur les paramètres cosmologiques, les processus de formation des galaxies et des structures, le contenu de l’univers, et la physique de l’univers primordial (ondes gravitationnelles, effets quantiques, ...).

## Les paramètres cosmologiques

L'expansion de l'univers est la propriété cosmologique fondamentale. Depuis sa découverte (dans les années 1920), les astronomes s'attachent à en déterminer les caractéristiques. Son taux est exprimé par la constante de Hubble  $H_0 = R' / R$ . Sa décélération (ou accélération) est exprimée par le "paramètre de décélération"  $q_0 = -R'' R / R'^2$

Autre paramètre déterminant, la constante cosmologique  $\Lambda$  (ou, de manière équivalente, la constante cosmologique réduite  $\Omega_\lambda = \Lambda / 3 H_0^2$ ) possède un statut encore controversé. Les récentes mesures suggèrent qu'elle n'est pas nulle; la valeur  $\Omega_\lambda = 0.7$  qui semble résulter des observations correspond à peu près à un univers spatialement plat ( $\Omega_\lambda + \Omega = 1$ ).

Le paramètre de densité  $\Omega = \rho / \rho_{\text{crit}}$  mesure la densité moyenne  $\rho$  de l'univers en unités de  $\rho_{\text{crit}} = 3H_0^2 / 8 \pi G$ . La contribution baryonique est représentée par  $\Omega_b$ . ( $\Omega = \Omega_b + \Omega_{\text{nb}}$ ).

Les dernières décennies furent relativement décourageantes car notre connaissance de ces paramètres a très peu progressé, sinon pas du tout. L'accord ne s'établissait pas entre les différentes estimations de  $H_0$ . Et il semblait impossible de s'affranchir des effets d'évolution pour estimer les autres paramètres cosmologiques. Dans la dernière décennie, la mise en service de nouveaux télescopes et radiotélescopes, les observations des satellites Hipparcos et Hubble, les progrès dans les traitements et les analyses des résultats, ont fortement amélioré la situation et laissé place à l'optimisme.

## Les étalons standard et la constante de Hubble

L'estimation de  $H_0$  repose sur les possibilités de mesurer avec précision les distances des objets lointains. L'utilisation des grands télescopes au sol, des satellites Hipparcos et Hubble, ont non seulement amélioré la qualité des données, mais aussi permis l'utilisation de nouvelles méthodes. La diversité des inévitables incertitudes et erreurs permet des analyses plus objectives.

Dans un relatif voisinage (jusqu'à moins de 50 Mpc), les estimations de  $H_0$  sont considérées comme fiables, grâce à un éventail d'indicateurs de distances (étoiles Céphéides, supernovae, fluctuations de brillance de surface des galaxies, nébuleuses planétaires, loi de Tully-Fischer, de Faber-Jackson,...). Elles donnent  $H_0 = 60 \text{ -- } 70 \text{ km/sec/Mpc}$ .

En outre, de nouvelles méthodes d'estimation sont apparues: à partir d'observations de supernovae, d'effets de lentilles gravitationnelles, ou de l'ob-

servation du fond diffus cosmologique (effet Sunyaev-Zeldovich). Elles devraient, dans un avenir relativement proche, permettre de préciser ces valeurs, et de confirmer (ou non) que les estimations lointaines coïncident avec celles de notre environnement cosmique.

En ce qui concerne les autres paramètres, les incertitudes demeurent mais la situation progresse. Les astronomes ont observé de très grandes quantités d'objets (galaxies, amas de galaxies, quasars, radiogalaxies, ...) à des distances cosmologiques. Ils connaissent de mieux en mieux leurs caractéristiques, leur répartition, leur évolution. L'abondance et la qualité des données rend possible leur utilisation comme étalons cosmiques. La statistique s'améliore, et l'application des tests cosmologiques (néo-classiques) est remise au goût du jour.

L'observation de supernovae, la géométrie des mirages gravitationnels, l'estimation de l'âge des étoiles les plus vieilles, les observations des fluctuations du fond diffus constituent autant de méthodes complémentaires d'estimation des paramètres cosmologiques, dont ils permettent d'encadrer de mieux en mieux les valeurs. Conclusion: les valeurs de  $W$  semblent avoisiner 0,3. La constante cosmologique semble non nulle.

## Le contenu de l'univers

Une grande part des observations astronomiques d'intérêt cosmologique concerne aujourd'hui l'examen du contenu de l'univers: découvrir, caractériser, comprendre les différentes classes d'objets existants: galaxies de tous types et de tous âges, quasars, noyaux actifs, nuages intergalactiques, sursauts gamma, supernovae...

La mise en service d'instruments très puissants, ainsi que les possibilités informatiques de traitements d'image et de données, ont entraîné une révolution dans la cartographie céleste: les données astronomiques sont aujourd'hui présentées sous forme de gigantesques catalogues informatisés, bien souvent consultables en ligne et à distance: les catalogues à deux dimensions (position sur le ciel) rassemblent des millions d'objets; ceux à trois dimensions (décalage cosmologique en plus, qui représente une estimation de la profondeur) des dizaines de milliers d'objets. Ceux à "quatre dimensions" proposent les résultats des mesures, additionnelles, de distances (indépendamment des décalages) avec des erreurs relatives voisine de 20%. Ces mesures permettent d'estimer les vitesses de déplacement (en sus de l'expansion) des objets dans l'univers, et permettent donc l'analyse de la "cinématique cosmique", encore mal connue.

La cosmologie s'intéresse à évaluer en premier lieu les abondances moyennes de chacun de ces types de sources, leurs contributions à la masse et aux rayonnements de l'univers. Les catalogues permettent en outre l'étude de leurs répartitions: par exemple celle des galaxies qui se regroupent en amas, superamas, filaments et feuilletés autour de grands vides cosmiques. Comment, avec quelle statistique (fonctions de corrélations, autres indicateurs statistiques, fractals?) caractériser cette répartition ? Quel est son lien avec la répartition de la masse totale (y compris la masse cachée et pas seulement visible) déduite d'autres observations ? Quelles sont les vitesses de tous ces objets ?

Elle s'intéresse également à déterminer les caractéristiques d'évolution de ces populations, qui nous renseignent sur l'évolution de l'univers lui-même. Enfin, chaque catégorie d'objet peut a priori constituer un indicateur pour la mesure des propriétés de l'univers.

L'étude de la **formation des galaxies** et, plus généralement, des différentes structures cosmiques est devenu ces dernières décennies un champ de recherche très actif en cosmologie. Il s'agit tout d'abord d'imaginer, d'un point de vue théorique, quels événements ont pu être à la toute première origine des processus de formation, et quelles traces observationnelles ils ont pu laisser, par exemple dans le Fond diffus cosmologique. L'origine de ces "fluctuations primordiales", encore mal comprise, remonte très loin dans le passé cosmique, peut-être à une époque que seule pourrait décrire une cosmologie quantique encore à inventer, à une ère d'inflation ou de défauts topologiques comme les cordes cosmiques.

Ces calculs font intervenir le spectre de puissance de ces fluctuations, la nature (chaude, tiède, froide,...) de la masse cachée, les différents paramètres cosmologiques,... Malheureusement notre connaissance du processus est limitée par notre impossibilité de résoudre les équations d'évolution du fluide (de matière) cosmique sous l'effet de sa propre gravitation, sans parler des phénomènes additionnels qui compliquent encore les choses. Les quelques résultats résultant de lourdes simulations numériques sur de gros ordinateurs n'ont guère amélioré notre compréhension générale du processus.

## L'univers primordial

La caractéristique principale des modèles FL est que l'univers évolue. Les modèles de big bang décrivent une évolution qui l'a fait passer par un état dense et chaud (sans préjuger de la question des origines). Un des champs de la



cosmologie s'attache à tenter de reconstituer le passé le plus lointain possible, à la lumière d'une physique de moins en moins connue.

La possibilité d'application d'une physique connue s'arrête (vers le passé) à l'époque de la nucléosynthèse. Pour parler d'un passé plus reculé, il est nécessaire de supposer une physique nouvelle: les fortes densités et énergies exigent d'aller au-delà de la physique du modèle standard des particules (électrofaible, chromodynamique quantique), considéré aujourd'hui comme valable. Après une période d'espoir dans les théories de grande unification, règne actuellement l'incertitude. Les possibles conséquences cosmologiques des nouvelles versions de ces théories, de l'importance des champs scalaires, de la supersymétrie, des cordes ou supercordes, ... sont abondamment discutées. La formation des structures, l'influence sur la dynamique de l'univers, sur le fond diffus cosmologique, la possibilité de défauts topologiques, d'une période d'inflation, ... sont en question.

Mais tout ceci ne prend pas en compte les effets quantiques à l'échelle de l'univers. Tant que la théorie quantique ne sera pas comprise, il est difficile de dire ce que pourraient être ces derniers. A vrai dire, si la physique quantique doit être validée conceptuellement, elle ne pourra pas l'être sans que soit construite une cosmologie quantique (c'est dans ce sens que vont les idées actuelles de *décobérence*). Mais la cosmologie quantique n'est pas encore au point, même si des pistes diverses sont actuellement explorées. La prise en compte des points de vue quantiques se borne actuellement à des approximations semi-classiques dont la pertinence est très incertaine. En revanche, si une théorie de cosmologie quantique est un jour reconnue, il est permis d'espérer qu'elle nous éclairera sur des questions fondamentales qui dépassent le cadre de la cosmologie: nature de l'espace et du temps, origine des constantes fondamentales de la physique, nouvelle interprétation de la physique, ...

## Conclusion

Les modèles de big bang sont de mieux en mieux confirmés par les observations, parfois avec une étonnante précision. De nombreuses problématiques anciennes restent actuelles: mesure des paramètres cosmologiques, et en particulier nature et valeur de la constante cosmologique; courbure et topologie de l'espace, dilemme entre espace fini ou infini; nature et distribution de la masse cachée; analyse de la distribution (hiérarchique?) de la matière cosmique et des structures qu'elle dessine, et compréhension de leur formation

Le paradigme d'un univers de type Einstein-de Sitter, ( $\Lambda = 0$ ,  $\Omega = 1$ ) semble aujourd'hui démenti; celui d'un univers dominé par de la matière non baryonique "froide" également. La plupart des nouvelles idées (inflation, défauts topologiques, ...) à la mode exigent des ajustements très exacts, ne reposent pas sur une physique confirmée, ne font l'objet d'aucun modèle précis, ne sont corroborées par aucune observation. Il semble que leur seul champ de validité concerne la cosmologie et qu'elles soient à jamais invérifiables autrement que par les traces laissées il y a des milliards d'années dans l'univers.

# Le temps, la pensée et le calcul: une stratification des calculs pour fonder une cosmologie

Jean Sallantin\*  
Germana Menezes da Nobrega

**Résumé:** L'étude de la découverte scientifique permet d'observer les limites venant des facultés humaines et d'autres venant de l'usage de calculateurs. Nous présentons comment une réflexion sur le monde des calculs participe d'une réflexion sur la cosmologie, quand on ne la limite pas aux ressources actuelles de calcul.

**Abstract:** The study of scientific discovery allows to observe the limits originating from human faculties and those inerent to the use of computers. It is shown how a reflection on the world of computations is part of a reflection on cosmology, in so far as it is not limited to the present resources of calculations.

## Introduction

Autrefois les cailloux (*calculus* en latin) servaient à compter un troupeau défilant devant le berger. On se trouvait déjà en face de données, de procédures de calcul et d'interaction entre des personnes et des résultats de calculs. On imagine bien la curiosité des autres bergers devant les premiers bergers calculateurs quand on voit la nôtre devant les mathématiques pratiquées dans d'autres cultures que la nôtre (0). De nos jours, l'informatique et les télécommunications se chargent des calculs dont ils organisent les flots de données et les calculs pour réaliser les applications proposées massivement aux utilisateurs. La fusion des télécommunications et des médias met en évidence une nouvelle dimension, celle de l'interaction avec les utilisateurs qui se serviront des calculs pour communiquer, échanger ou négocier.

---

\* Directeur de Recherche, LIRMM, Montpellier – 161, rue Ada – 34392 Cedex 05 – Montpellier – [sallantin@lirmm.fr](mailto:sallantin@lirmm.fr).

L'évolution des calculs va dépendre de deux dimensions. La première est celle de l'accroissement du volume des **flots de données** disponibles pour les calculs. La seconde est celle de l'accroissement de la capacité d'évolution des processus de calculs par réorganisation des éléments matériels et logiciels qui les composent – ce qu'on désigne du terme **mobilité** – en référence aux téléphones mobiles pour lesquels les réseaux de communication se restructurent en fonction du déplacement de l'utilisateur<sup>1</sup>

Ces deux dimensions dégagent une *physique du calcul* qui a pour finalité une prise en compte de calculs exercés en très grands nombres. Cette physique du calcul ne prend pas explicitement en compte les utilisateurs, elle prend simplement en compte les conséquences matérielles de leur usage des données et des calculs sur ces données.

Les dimensions physiques du calcul ne permettent pas de saisir comment un utilisateur apporte du sens à un calcul. Une autre dimension, de ce fait métaphysique, de l'informatique sert à décrire comment des utilisateurs donne du sens à des applications informatiques. Tout d'abord, les personnes devront appréhender au travers de leurs sens l'application proposée. En informatique, les interfaces stimulent l'*attention instinctive* des utilisateurs pour leur faire percevoir une application. Cependant, on peut percevoir quelque chose que l'on ne comprend pas. Une personne donne du sens à un phénomène qu'elle perçoit en exerçant une *attention rationnelle* qui est marquée par une capacité de l'analyser. Pour nous, l'activité scientifique est l'exercice d'une attention rationnelle qui s'achève par la construction d'une théorie permettant la prédiction par le calcul et d'expliquer ce que l'on perçoit.

Bien évidemment, l'utilisateur d'un calculateur, surtout s'il n'en est pas le programmeur, n'est pas réduit à être une extension périphérique de ce calculateur. Aussi cette nouvelle dimension est une grandeur appelée **interactivité** qui explicite la nature d'un couplage entre une personne et le calcul par machine qui l'assiste. Argumentons le besoin de cette interactivité, car elle est spécifique à l'informatique, qui introduit naturellement la notion de communication entre des émetteurs et des récepteurs, là où la physique n'en ressent pas le besoin. Un système informatique a toujours une dimension d'interaction. Il est insupportable quand il demande à un utilisateur une participation excessive au processus de calcul. Un système bien conçu donne à son utilisateur un détachement lui

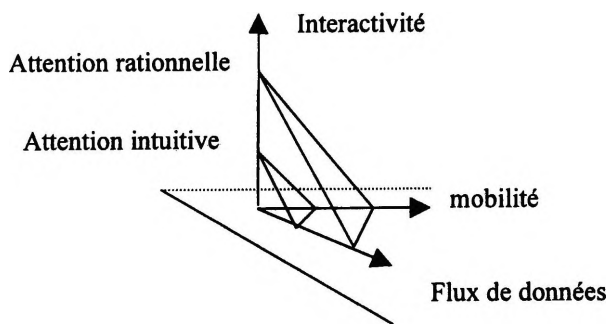
---

<sup>1</sup> Cette seconde dimension est aussi désignée comme étant celle de la programmation par composants, par agents et encore celle de la prise en compte conjointe des composants matériels et logiciels d'un calcul.

permettant de dominer les calculs qu'il ordonne et supervise. La mesure de l'interactivité est d'une nature différente de celle des flots de calculs. En effet, ce qui est appelée, distance sémantique ou articulatoire, mesure le degré d'empathie ou de participation symbiotique de la part l'utilisateur pour faire fonctionner l'application et le degré de sympathie ou de compréhension de l'application qui est requis de la part de l'utilisateur si l'on veut qu'il oriente et évalue l'application.

Nous dégageons ainsi une troisième dimension pour l'informatique qui la distingue d'une vision purement physique des calculs: cette dimension de l'interactivité est requise pour qu'un calcul prenne sens pour quelqu'un. Cette nouvelle dimension est scientifiquement moins bien dominée et elle relève de l'Intelligence Artificielle. Par un simple jeu de mise en forme, il s'agit de donner aux calculs une apparence qui sera jugée par l'utilisateur comme reflétant de manière adéquate ou conflictuelle la formulation de sa pensée. L'utilisateur attend de l'interaction avec les calculs plus de sécurité et de liberté dans la prise de décision et un meilleur accès à l'information. Pour tenir compte de l'infinie diversité des savoirs pratiques, les manières de raisonner doivent être universelles et indépendantes du contexte de leurs usages. En dernier lieu, la recherche d'une interactivité fonde l'industrie des médias: publicité, édition et télévision.

On ne peut cependant pas poser une indépendance entre ces trois dimensions car l'interactivité consomme du calcul. Nous allons illustrer dans le diagramme suivant comment cette dimension de l'interaction se reformule en quantité de calcul. Nous allons ainsi introduire une première proximité entre cette réflexion sur l'informatique et la cosmologie.



Le diagramme précédent illustre qu'il faut beaucoup plus d'interactions pour faire comprendre par l'utilisateur un phénomène que pour le lui faire percevoir; ce fait provoque l'accroissement de la quantité des calculs à faire.

La conception des calculs est soumise à des contraintes absolues qui sont: le temps de calcul d'une instruction, le nombre d'instructions requis pour réaliser une application, les exigences de l'interactivité, le savoir minimal attendu

de l'utilisateur et le temps à passer pour instruire l'utilisateur. Si le calcul est matérialisé par des électrons, la fempto-seconde ( $10^{-15}$  secondes) est une limite inférieure absolue pour l'intervalle de temps que prend une instruction. Actuellement, une instruction élémentaire se réalise en une nano-seconde ( $10^{-9}$  secondes). L'attention de l'utilisateur a également des limites. Citons: sa capacité de construire des abstractions, son temps de réaction qui dépend de son degré d'attention, son apprentissage et son expérience antérieure.

C'est l'observation de ce double jeu de contraintes venant de la physique d'une part et de la physiologie, psychologie et sociologie d'autre part qui a conduit Newell (12) à proposer une stratification des calculs en niveaux qui organisent les phénomènes perceptibles selon des échelles de temps différentes.

L'informaticien doit ainsi pratiquer un réductionisme ontologique en ramenant le monde à un calcul et un réductionisme épistémique en ramenant la définition de la cohérence d'un monde pour un utilisateur à celle des calculs. Cette *cosmologie des calculs* vient de la prise en compte dans leur globalité des calculs qui constituent une application qu'une personne reçoit comme un service personnel. Le modèle en couches de l'organisation des calculs est un second point de rapprochement avec une théorie cosmologique.

Nous allons exposer un troisième point de rapprochement en formalisant la manière dont la pensée humaine peut dominer par la raison les calculs qu'elle ordonne et évalue. Ce formalisme est indépendant du support matériel des calculs, il demeurera valable quand nous saurons déplacer l'horizon des calculs en calculant avec des photons et que nous élargirons ainsi l'ensemble des phénomènes que nous saurons calculer scientifiquement.

Par la suite, nous examinerons ces points de rapprochement entre une cosmologie des calculs et les théories cosmologiques selon trois points de vue. La nature cosmologique sera liée à un exposé des limites. La nature géométrique servira à introduire un modèle en couche. La nature catégorielle exposera des formes générales de raisonnement appuyées sur des calculs. Pour conclure cette introduction, justifions succinctement notre plan.

### Nature cosmologique du calcul

La nature cosmologique du calcul vient des limites physiques et biologiques qui sont imposées aux calculs et à son contrôle. Nous allons montrer que les différentes plages de stabilités temporelles marquent un entendement humain et les limites de ce dernier. La pensée scientifique cherche à repousser les limites du savoir et la confirmation de ses théories en les reportant sur des

calculs de plus en plus nombreux pour des machines de plus en plus rapides. Nous allons montrer les horizons des calculs.

La notion de temps est encore un point de rapprochement entre cosmologie et calcul. Nous allons considérer qu'une pensée produit du sens pour un individu lorsqu'il acquiert de l'expérience en la pratiquant et en tirant partie de ses échecs. L'individu, quand il prédit les conséquences de ses comportements passés, construit un ensemble de possibilités pour son comportement présent qui lui permet d'établir ce qu'il va faire "après". Quand il explique pourquoi il a réussi ou échoué, il fixe des modalités de ce qu'il aurait pu faire "avant". Et son "présent" est ainsi ce qui est "maintenant" situé entre l'"avant" et l'"après". La science a pour principale fonction de prédire et d'expliquer des phénomènes. Ces prédictions et ces explications se font selon les différentes échelles de temps correspondant à ceux de l'observation des phénomènes de la physique, de la chimie, de la biologie et à celle de la pensée qui matérialisent le calcul et son contrôle. Chaque science a ainsi une plage temporelle d'observation de ses phénomènes. Et nous, les observateurs de ces phénomènes, nous les simulons par des calculs pour les comprendre, les limites du calculs se corrént avec les limites de ce que nous savons appréhender concrètement.

### Nature géométrique du calcul

Dans son "credo épistémologique", Einstein s'émerveillait qu'il nous soit possible de formuler de manière géométrique des lois vérifiées par l'univers physique. Avec moins d'émerveillement, on constate qu'une organisation de l'activité interactive de conception est une méthode assez efficace pour assister un utilisateur cherchant à matérialiser sa pensée par des calculs. Ainsi sont recherchés, des principes sur la formalisation et la figuration des calculs qui font que cette dernière reflète la "réflexion" de l'utilisateur.

Précisons d'abord pourquoi la géométrie intervient. La prise en compte de l'activité interactive de conception donne au calcul une nature plus géométrique que logique car c'est une construction interactive matérialisée sur un écran qui donne sens à des calculs et qui fait réagir un utilisateur capable d'en abstraire une formalisation. La géométrie est par nature un formalisme plus large que la logique car elle permet de raisonner sur des propriétés venant de la méthodologie de construction des figures. Les raisonnements inductifs et abductifs se formalisent en géométrie alors qu'ils sont absents des formalisations logiques. Par la suite, nous ne formaliserons pas en géométrie l'activité interactive de conception, cependant nous utiliserons la théorie des catégories dans cet esprit de géomètre, cherchant à décrire une géométrie des calculs.

Il faut cependant signaler que la géométrie n'intervient pas explicitement en informatique. Nous allons cerner sa présence discrète aux différentes échelles des interactions entre les personnes et le calcul.

- **A l'échelle du jeu social:** notre thèse est que l'introduction d'une géométrie permet la prise en compte de la manifestation du jeu social dans la construction de théories. Par exemple, un créateur quelconque, doué d'une bonne imagination, propose une solution à un problème. Un encadrement expérimenté qualifie techniquement le problème et la solution que le créateur propose. Un jeu social, quand il légitime ou invalide la création, canalise l'activité du créateur en lui conférant un statut social.

- **A l'échelle de l'interaction personne/machine,** pour décrire l'espace dans lequel un calcul s'exerce et se contrôle, on préfère parler d'environnement et d'architecture de machine. La mise en lumière d'une géométrie des calculs s'accompagne de la prise en compte de notions qui surprennent, tant elles introduisent la philosophie au cœur même du dispositif de calcul. Leibniz (3), Boole, Peirce (13), philosophes et mathématiciens anticipaient sur les ordinateurs actuels quand ils attribuaient au calcul une aptitude abstraite à manipuler les mots pour associer les idées et les choses. Et, ces philosophes ont déterminé les opérations élémentaires de calcul et ils les composent en nombre infini en faisant intervenir les séries, les notions de convergence, de comparaison, de continuité et de limite. Ils distinguent les mondes des idées et des choses pour faire exister une pensée universelle, ou simplement la pensée de quelqu'un. Ils proposent des structures donnant à un sujet la faculté de concevoir en utilisant des abstractions, des formalisations et des vérifications de théories. Pour que se mette en route une machine à penser capable de s'abstraire de la matière qui la constitue, ils posent les principes de l'enchaînement, du discernement et de l'identification de raisons. Nous allons voir qu'il n'en faut pas plus pour importer des notions de géométrie dans la formalisation calculable d'une activité informatique.

- **A l'échelle du processus de calcul,** les formalismes de l'informatique font intervenir les notions de fonctions calculables ou approximables, celle de classes de fonctions de complexité comparable, de capacité de traduction d'un formalisme dans un autre. Là encore, la géométrie n'intervient pas de manière explicite. Elle est sous-jacente dès que l'on unifie des types, ou que l'on pose une hypothèse d'induction pour justifier une approximation, ou encore quand on cherche à traduire une classe de problèmes en une autre.

- **A l'échelle des composants,** de leurs placements physiques sur une carte électronique et de leur mise en relation par des circuits, la géométrie est incontestablement présente et joue un rôle important quand il s'agit d'organiser



ce placement de manière à optimiser les performances en espace et en temps de réponse des circuits de telle manière qu'un processus individuel d'attention intuitive puisse se mettre en place.

### Nature catégorielle du calcul

L'enjeu est ici de dégager les notions primitives permettant de décrire le contrôle et l'organisation des calculs indépendamment des différentes échelles que nous venons d'illustrer.

De tout temps, catégoriser exprime la capacité d'isoler, de distinguer l'universel et de le séparer du particulier, de spécifier comment décrire des phénomènes, comment distinguer ce qui prévaut dans leur description, comment transcrire une représentation dans une autre, et comment traduire et confronter des représentations.

Du temps d'Aristote, catégoriser consistait à préparer un acte d'accusation. Catégoriser est ainsi un préalable à l'énonciation et au jugement. Nous allons montrer comment les très vénérables principes de raison "*Rien n'est sans raison*", d'identité "*A' est le même que A*" et de contradiction "*Rien n'existe sans son contraire*" (8), fondant une formulation de l'activité de raisonner, se traduisent en théorie des catégories.

Nous allons maintenant développer les trois points que nous venons d'introduire en présentant progressivement comment:

- Formaliser en théorie des catégories, les principes de raison, d'identité et de contradiction afin de,
- Formaliser une géométrie du calcul soumis à une supervision de l'utilisateur de manière à,
- Esquisser enfin, une cosmologie du calcul.

### Cadre catégoriel des calculs

Gaston Bachelard disait qu'il lui était rarement arrivé de penser à ce qu'il pense quand il le pense<sup>2</sup> On peut facilement faire des expériences montrant qu'il existe une limite de l'impensable qui marque par un blanc mental l'impossibilité de déterminer une raison à l'ordre 2. Dans l'étude suivante, nous pratiquerons de petites expériences de pensées de manière à comprendre les limites que nous nous imposons pour raisonner sur les raisons d'un calcul.

2 De manière amusante cela revient à dire: "cogito<sup>2</sup> ça va, cogito<sup>3</sup> bonjour les dégâts!"

La théorie des catégories sera en arrière plan de cette étude car elle nous a permis de définir comment mener avec rationalité et adéquation des raisonnements dont les termes sont des calculs. La rationalité contraint un calcul à avoir une raison. Les enchaînements de raisons contraignent les flots de calculs. L'adéquation donne la potentialité pour un calculateur de donner du sens à un ensemble de calculs. Nous allons lier la rationalité au principe de raison et l'adéquation au principe d'identité. Le principe de contradiction concerte les deux principes.

### **Le Principe de raison ou la faculté de raisonner avec rationalité**

“Rien n'est sans raison”,

C'est l'expression la plus concise du principe de raison. Le principe de raison est celui de la rationalité d'un raisonnement – qui se présente comme un enchaînement de raisons- On pose qu'un terme “sans raison” n'est pas à sa place dans un raisonnement.

### **Les termes et relations entre termes**

Au départ, on pose l'existence de termes pour énoncer un calcul: ces énoncés seront des nœuds, des cailloux, des équations ou encore les énoncés d'une langue. Nous allons tout d'abord montrer comment un raisonnement porte sur des enchaînements de termes. Puis nous montrerons que raisonner consiste à associer aux termes leur “raison d'être” dans le raisonnement et à vérifier “qu'aucun terme n'est sans raison” et que l'agencement des raisons de la présence des termes vérifie les contraintes de correction que nous nous imposons.

Tout d'abord pour exprimer les raisonnements de la vie courante, il faut disposer de termes et les lier mutuellement.

Prenons le monde de l'hôtellerie. On pose que le terme *un hôtel sans chambre* est absurde, s'il n'y a pas un terme autre que lui-même qui le justifie. On pose aussi que *servir un petit déjeuner dans une chambre commande de disposer d'une chambre*.

On établit ainsi une relation:

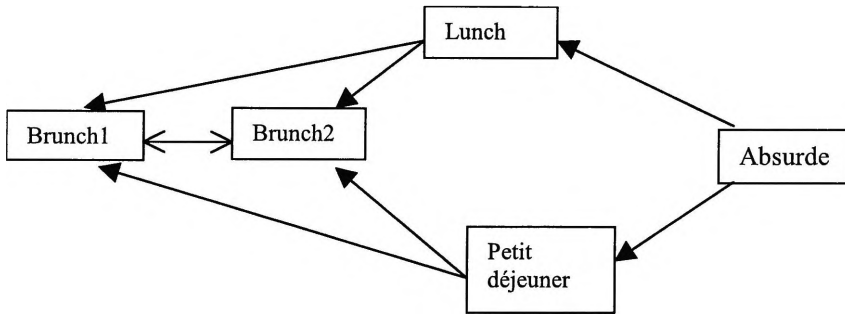
Absurde → *chambre* → *petit déjeuner*.

Cependant cette relation n'est pas un ordre causal, seul un choix supplémentaire de grande importance, imposé en logique et qui consiste à se donner une négation, conduit à formuler des implications comme *pas de chambre ou petit déjeuner*.

Reprenons notre petit exemple hôtelier, nous voulons montrer qu’il est possible de raisonner sur l’agencement des termes. Posons un terme *Brunch* pour exprimer une forme de restauration qui tient à la fois du déjeuner et du petit déjeuner. Nous aurons:

- Absurde  $\rightarrow$  petit déjeuner  $\rightarrow$  Brunch1
- Absurde  $\rightarrow$  petit déjeuner  $\rightarrow$  Brunch2
- Absurde  $\rightarrow$  lunch  $\rightarrow$  Brunch1
- Absurde  $\rightarrow$  lunch  $\rightarrow$  Brunch2
- Brunch1*  $\leftrightarrow$  *Brunch2*

Nous voici dotés de diagrammes composés de termes et de flèches entre les termes. Les flèches entre les termes expriment ici des enchaînements de termes. La théorie des catégories utilise des diagrammes transitifs de flèches et de points pour définir des objets mathématiques. Nous l’utilisons pour exprimer comment des objets se discernent ou se rassemblent à travers le calcul de leurs propriétés. Le diagramme suivant décrit les relations que nous venons d’écrire. Il indique qu’un *brunch* se formule à partir du lunch et du petit déjeuner.



Dans le petit exemple précédent interviennent des flèches et des termes qui montrent comment les termes particuliers *brunch1* et *brunch2* sont formés.

**Les raisons et enchaînements de raisons**

Ayant ainsi posés des diagrammes exprimant des agencements de termes. Nous pouvons analyser ces diagrammes et montrer comment ils sont le support de raisons et de raisonnements.

Considérons les termes *brunch1* et *brunch2*, ils sont écrits avec les signes *brunch*, 1 et 2, et ils ne se distinguent pas l’un de l’autre par les termes qui leurs sont associés par des flèches. Nous pouvons les considérer comme deux objets d’une catégorie notée ?*brunch*, qui a pour “raison d’être” de désigner n’importe quel *brunch* particulier. Ce faisant, nous introduisons une opération nouvelle.

Cette opération agit sur un terme *brunch* et elle produit un terme *?brunch*. Si on duplique l'opération, on crée le terme *??brunch*. Par une petite expérience de pensée, on peut se convaincre que l'on ne sait pas mentalement différencier "particulariser des termes particuliers" de "particulariser". Cela revient à poser une équivalence entre *??brunch* et *?brunch*.

Pour progresser dans la formalisation considérons que *?* est une opération qui, quand on l'applique à un *terme* produit un nouveau terme *?terme* qui exprime ce que ce terme a de concret. Si maintenant on a un terme, il est intéressant de savoir quelle est sa raison d'être dans un raisonnement, nous venons de définir une première raison qui est celle de concrétiser un terme. Introduisons une nouvelle raison qui est celle d'abstraire. Prenons des catégories, le repas, la liberté, la mesure ou l'ensemble. Chacun de nous peut constater qu'il est lui difficile mentalement de trouver une abstraction à l'abstraction de la catégorie liberté. On trouve que liberté est déjà abstrait. Il est ainsi raisonnable de poser que *!!liberté = !liberté*.

Nous avons ainsi introduit une nouvelle raison pour la présence d'un terme dans un raisonnement: l'abstraction. Etudions comment se composent ces raisons. Par exemple, concrétisons l'abstraction de la catégorie des libertés en créant des catégories notées *?!liberté*. On peut mentalement facilement réaliser l'opération et trouver des objets de cette catégorie comme *la liberté d'opinion* ou *la liberté de mouvement*. De la même manière, si on abstrait la catégorie concrète *? brunch*, on trouve la catégorie *!? brunch* qui exprime la catégorie des repas pris le matin. *?! liberté* exprime ce que l'on doit retrouver dans toutes les pratiques de la liberté. Ainsi augmente l'ensemble des raisons qui justifient la présence d'un terme dans un raisonnement.

Classiquement depuis Aristote, on distingue les 'universaux' qui expriment les abstractions et les 'particuliers' qui expriment ce qui est concret, qu'on appelle aussi 'accidents'. Si on considère que l'abstraction de la catégorie des *personnes humaines* est l'*humanité*, notée aussi *!humanité* par suite de la propriété de l'abstraction. *?humanité* est une personne concrète; soit Pierre ou Paul. L'abstraction des personnes concrètes que l'on note *!? humanité* correspond à *!humanité* seulement si on décide d'interdire d'utiliser dans un raisonnement des raisons qui distingueraient les hommes selon d'autres raisons comme leur race ou encore comme leur richesse. Par exemple, l'interdiction de telles raisons viendrait qu'elles ne seraient pas reconnues comme telles dans un tribunal.

Appelons 'raisons' tous les types construits par la composition des *?* et *!*. Les contraintes suivantes limitent à trois, cinq, sept le nombre de 'raisons' distinctes que l'on peut construire.

1.  $! ? = ! ; ? ! = ?$  : sans raison, universel, particulier.
2.  $! ? ! = ! ? ; ? ! ? = ? !$  : sans raison, universel, particulier, nécessité, possibilité.
3.  $(! ?)^2 = ! ? ; (? !)^2 = ? !$  : sans raison, universel, particulier, nécessité, possibilité, procédure, convention de calcul.

Expliquons les trois types de contraintes précédentes. Tout d'abord, nous avons repéré que les contraintes de type 1 donnaient seulement deux types de raisons qui ressemblent aux universaux et aux particuliers des syllogismes d'Aristote, on peut les voir comme les quantificateurs permettant de dire "tous les hommes sont mortels" et "quelques hommes sont mortels" Les contraintes de type deux limitent les raisons aux quantificateurs et aux modalités. Elle correspondent aux raisons des raisonnements en logique d'ordre 1. Les contraintes de type trois, correspondent selon nous aux contraintes du calcul, et elles ne se réduisent pas aux raisons du raisonnement logique.

Distinguons par un exemple les trois types de raisons. Considérons le terme "les brunchs ont lieu le matin" introduisons une raison à ce terme et posons "en général, les brunchs ont lieu le matin"

Si je ne distingue pas les termes suivants "tous les brunchs ont lieu le matin" "nécessairement, les brunchs ont lieu le matin" et "il est convenu que, les brunchs ont lieu le matin" alors je suis dans la situation 1 qui sera appelée par la suite **rationalité limitée**.

Si je ne distingue pas les termes suivants "il est convenu que les brunchs ont lieu le matin", "nécessairement, les brunchs ont lieu le matin", je suis dans la situation 2 qui sera appelée par la suite **rationalité délibérative**.

Si je distingue les termes suivants "tous les brunchs ont lieu le matin" "nécessairement, les brunchs ont lieu le matin" et "il est convenu que, les brunchs ont lieu le matin", alors je suis dans la situation 3 qui sera appelée par la suite **rationalité calculatoire**.

Le diagramme suivant va montrer qu'en rationalité calculatoire on peut se servir de raisons qui sont sans raison en logique. En logique, ce qui est possible correspond à ce qui a une procédure correcte. Une procédure correcte qui a un résultat impossible provoque un effet de surprise, source potentielle de nouveauté si on sait le reproduire pour l'examiner.

<i>Des raisons de la rationalité calculatoire que l'on peut discerner mentalement</i>	procédure	possibilité	particulier
La procédure est correcte et possible et avec résultat	1	1	1
La procédure est correcte et impossible et avec résultat	1	0	1
La procédure est correcte, possible et sans résultat	1	1	0
La procédure est correcte, impossible et sans résultat	1	0	0
La procédure est incorrect, possible et avec résultat	0	1	1
La procédure est incorrecte, impossible et avec résultat	0	0	1
La procédure est incorrecte, possible et sans résultat	0	1	0
La procédure est incorrecte, impossible et sans résultat	0	0	0

### Les limites de la rationalité délibérée

Le principe de raison pose que raisonner revient à transcrire des raisons en raisons. Mais en pratique, cette transcription est d'une telle complexité qu'il faudra se donner la capacité d'une traduction approximative mais suffisamment fidèle pour que l'on puisse la déclarer convenable. Nous allons, en théorie des ensembles, illustrer pourquoi la transcription entre raisons n'est pas réalisable sous la forme de calculs effectifs.

En théorie des ensembles, un ensemble est caractérisé en compréhension par une forme conjonctive normale CNF. Il est caractérisé en extension par une forme disjonctive normale DNF. Supposons que  $n$  variables booléennes formant la catégorie *?ensemble* servent à la description d'un ensemble particulier. La forme DNF en est la transcription *!ensemble* et la forme CNF la transcription *?ensemble*. Les formes CNF et DNF se transcrivent mutuellement. La complexité de la transcription d'une forme CNF en DNF est comprise entre  $(3^n)/\sqrt{n} > x > (3^n)/n$ . Cette transcription est réalisable par un algorithme, mais il ne lui correspond pas de calculs réalisables avec une machine, à l'échelle de la patience humaine, pour des tailles suffisamment importantes de données.

### Le Principe d'identité ou la faculté de juger d'une adéquation

*"A' est le même que 'A'"*.

Nous venons d'illustrer l'impossibilité de procéder au calcul effectif et exact d'une transcription entre des raisons dans une rationalité délibérée. Comme le principe de raison ne prend pas en charge le raisonnement approché, nous allons devoir introduire une possibilité de raisonner de manière approchée sous la supervision d'un utilisateur qui a comme mission de garantir que sous ses formes changeantes, on parle toujours de la même chose. Le principe d'identité pose ainsi la possibilité de raisonner de manière approximative en désignant de

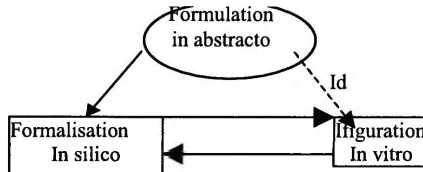
la même manière une entité qui se présente sous des apparences différentes selon les termes qui servent à sa formulation par un utilisateur, à sa formalisation pour la calculer et à la figuration des calculs pour la superviser.

L'exemple suivant montre l'action du principe dans une pratique scientifique (2) qui consiste à simuler sur un ordinateur des expérimentations envisagées de manière à choisir celles qui seront les plus profitables:

- “*in abstracto*” explicite la capacité abstraite du scientifique de se faire une représentation mentale “non symbolique” d’une expérience.
- “*In silico*” exprime son aptitude à en produire une formalisation “symbolique” calculable avec des ordinateurs.
- “*In vitro*” exprime sa capacité pratique d’expérimentation “physique” de cette théorie.

La double flèche expérimentale exprime la capacité de confronter le formalisme et l’expérience.

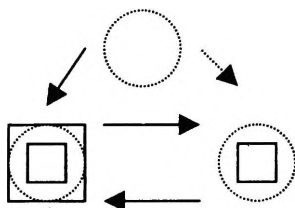
- La flèche descendante exprime la capacité d’énoncer formellement un fragment du monde.
- La flèche en pointillé exprime la capacité qu’à l’observateur d’identifier ce qu’il voit dans l’éprouvette comme adéquat avec ce qu’il constate *in vivo*.



L’observateur, figuré par un losange, formule son observation. Puis, il la formalise de manière calculable par une machine, figurée par un carré. La différence entre ces deux formes est là pour montrer que ces catégories sont hétérogènes. L’utilisateur ensuite, confronte sa formalisation à une configuration réalisable matériellement autant de fois qu’il le souhaite. Il cale alors son protocole expérimental. Il s’assure ensuite de l’adéquation entre ce qu’il formule et ce qu’il constate. Dans ce diagramme, la relation horizontale “symbiotique”, qui existe entre la modélisation et la vérification, peut se faire de manière automatique. Les deux relations verticales supposent que l’observateur trouve “sympathique” ce qui reflète sa pensée. L’observateur ne participe pas directement. Bien que concerné, l’observateur n’est pas impliqué par le calcul.

Nous allons illustrer comment le processus d’approximation correspond à une recherche de stabilité. Nous pouvons admettre qu’une formalisation ma-

thématique est utile car elle met de l'ordre dans la formulation. Cette formalisation comprime l'information à formuler créant de ce fait, un gain en information de Kolmogorov. La mesure de ce gain venant d'une mise en ordre est une négentropie. Notons par un rond dans un carré, le fait que la formulation est plongée dans la formalisation. La figuration d'une formalisation montre partiellement la formalisation. Cette information partielle fait que l'utilisateur projette sa pensée sur ce qui est montré. Il voit plus que le dessin, en particulier, il peut imaginer y retrouver sa formulation qui déborde la formalisation. Symbolisons par un *carré dans un rond* le fait que pour l'utilisateur la formulation déborde la figuration quand il l'évalue. Et notons par un *carré dans un rond dans un carré* le fait que l'utilisateur itère le processus jusqu'à un point fixe.



Les diagrammes précédents distinguent :

1. La formulation des idées de l'observateur contraint par sa culture.
2. Les langages formalisant un calcul approché.
3. Les matériaux et méthodes de l'expérience.

Ces catégories distinctes s'influencent mutuellement. Une telle démarche d'analyse se retrouve chez Platon, Bacon, Descartes, Leibniz, Peirce ou Popper (15). Descartes lie la subjectivité à la construction d'une identité. Leibniz s'intéresse à une universalité de la décomposition en trois mondes. Popper identifie les mondes celui de la physique, celui de l'expérience et celui des produits de l'esprit humain.

Illustrons succinctement ces trois mondes.

La pertinence de la notion de triangle est associée au fait que je constate mentalement la propriété qu'*un triangle est une figure géométrique qui a trois sommets*. Cette propriété est identifiée comme conséquence de sa formulation formelle.

Si maintenant je dis qu'*un nombre pair est la somme de deux nombres premiers*, je donne une propriété formelle qui est identifiable par le calcul mais que je ne peux pas m'exercer à reproduire mentalement.



La prise en compte conjointe des principes de raison et de celui d'identité sont nécessaires pour raisonner de manière rationnelle. Cependant, il manque un principe exprimant comment décrire un raisonnement rationnel et adéquat. Le principe suivant va combler cette lacune.

### **Le principe de contradiction ou la faculté de confronter**

*“Rien n'existe sans son contraire”*

Ce principe est un principe d'économie. Selon ce principe que toute raison formulée, formalisée ou figurée a son contraire. Cette confrontation est la base d'une méthode d'analyse qui oppose le concret et l'abstrait et le simple le composite. Si j'argumente au moyen d'exemples, on m'objectera la nécessité de préciser de manière conceptuelle ma pensée. Si j'argumente de manière conceptuelle, on m'objectera la nécessité d'illustrer par des exemples ou stéréotypes.

Selon ce principe, un paradoxe a la caractéristique d'être “ce qui est son propre contraire”

Chaque jeu de raisons est définie comme une catégorie. La traduction entre les jeux de raisons va leur donner une sémantique naturelle. Nous utiliserons  $3 \times 7$  raisons pour définir l'adéquation ontologique,  $3 \times 5$  raisons pour définir l'adéquation épistémique et  $3 \times 2$  raisons pour définir l'adéquation heuristique.

Donnons des exemples d'opposition entre raisons pour anticiper sur la suite:

- La formulation de convention de calcul a pour contraire la formalisation de procédures.
- La formalisation d'une situation générale et la figuration de cas particuliers sont contraires.

Nous avons ainsi montré comment raisonner sur un raisonnement qui porte sur un calcul sans pour autant devoir faire intervenir les conditions pratiques de l'intervention d'un utilisateur et de son environnement de calcul. C'est l'objet de la partie suivante.

### **Cadre géométrique des calculs**

Le cadre géométrique est celui qui prend en charge la mise en relation d'un utilisateur et des calculs. La question que nous allons traiter est de définir les instruments qui aident un utilisateur à trouver des solutions simples, valides, intéressantes et pertinentes à des problèmes.

Le problème est donc de donner à un utilisateur plus de puissance pour appréhender et résoudre un problème. Ce surplus de puissance vient d'une faculté technique permettant de surveiller la manipulation de gros volumes de données, de mieux communiquer avec les entités détentrices de savoir, de pouvoir aisément dessiner à grands traits les lignes d'une résolution de problèmes, de revoir et retoucher une conception à la vue de sa réalisation. Esquisser, adapter, réviser, expliquer, communiquer et induire sont des fonctionnalités qu'un utilisateur doit réaliser.

Nous allons ramener l'étude de ces deux questions à la définition de deux notions: l'adéquation et la rationalité.

### Rationalité

Le principe de raison fonde la rationalité. En Intelligence Artificielle selon Russell (17), l'étude de la rationalité intervient dans le cadre de la théorie de la décision. Nous allons poser trois types de rationalité.

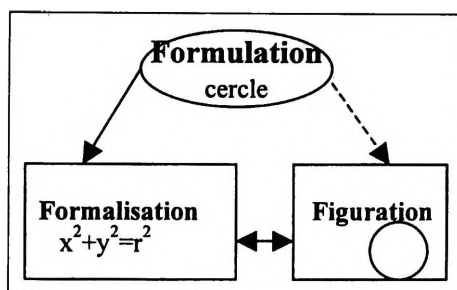
1. La **rationalité calculatoire** maîtrise un calcul de manière à ce que les calculs produisent un résultat optimal mais qui est seulement potentiellement exprimé.
2. La **rationalité délibérative** maîtrise la cohérence d'un raisonnement dans le sens où il est possible de donner les raisons logiques à la mise en œuvre de calculs.
3. La **rationalité limitée** maîtrise la normalisation d'un comportement. Elle donne des raisons pratiques, elle intègre des contraintes de temps et d'espace. C'est seulement l'absence de limites aux ressources qui fait qu'une rationalité limitée et calculatoire s'identifient.

Pour fixer un peu les idées, le mathématicien travaille en rationalité calculatoire car il ne se lance pas à faire tous les calculs qu'il décrit, le logicien en rationalité délibérée car il s'interroge sur la cohérence de calculs faits et le juriste comme l'informaticien en rationalité limitée car ils ont l'obligation de faire aboutir les calculs dans un délai imparti. Le mathématicien détermine les formes du calcul. Le logicien détermine comment manipuler de manière consistante des énoncés calculables par machine. L'informaticien comme le juriste détermine les comportements corrects pour des calculs devant aboutir dans un délai fixé.

### L'Adéquation de calculs

La notion d'adéquation vient du principe d'identité. Nous nous positionnons dans la ligne du travail de Mac Carthy pour qui l'adéquation formalise mathématiquement l'adhésion individuelle ou collective faite à un temps donné

à une théorie scientifique. Et nous posons que l'adéquation oppose une *formulation* d'une idée, une *formalisation* qui exprime mathématiquement cette formalisation et une *figuration* de la formalisation qui permet à l'utilisateur de s'assurer de la bonne formalisation de son idée. Une formulation est adéquate si l'utilisateur accepte la figuration de la formalisation de sa formulation qu'il voit sur son écran. Il a ainsi la capacité de superviser ce qu'il formule.



Les spécifications de conception sont contraintes par la nécessité de devoir être réalisées par des calculs effectifs et leur figuration sur un écran doit paraître correcte à un utilisateur compétent.

Les mathématiques sont utilisées pour exprimer une formulation de telle manière que l'on puisse faire des calculs approchés. Cette forme de réductionnisme de la formulation au calcul est souvent appelé un réductionnisme ontologique. Le contrôle de la cohérence est ramenée à l'examen de la cohérence logique des calculs en cours. Cette démarche relève d'un réductionnisme épistémique qui donne à la logique la mission de définir la cohérence des calculs en cours d'exécution.

L'organisation des calculs selon une démarche qui permet que ce qui est mathématiquement formulé puisse se transcrire en comportement logiquement cohérent relève de l'adéquation heuristique, ce troisième réductionnisme "heuristique" est une contrainte supplémentaire posée sur le réductionnisme ontologique pour que ses calculs même inachevés soient acceptables pour un raisonnement logique.

Trois adéquations correspondent à ces trois type de réductionnisme

1. L'adéquation "heuristique" contraint une rationalité limitée.
2. L'adéquation "épistémique" contraint une rationalité délibérée.
3. L'adéquation "ontologique" contraint une rationalité calculatoire.

### Illustration

L'emboîtement des rationalités et des adéquations est un peu compliqué, nous allons l'illustrer en nous inspirant d'une idée de Jean Paul Delahaye(4). Donnons-nous trois degrés de formulation.

#### 1. Formulation mathématique approchée:

Le premier degré est une formulation mathématique approchée, au sens que ce qui est formulé est mathématiquement correct mais pas nécessairement programmable car on ne peut calculer que des approximations ou alors on ne peut rien calculer du tout. Un Hamiltonien en physique se calcule de manière approchée en faisant des hypothèses simplificatrices dont on mesure l'influence sur le résultat. La conjecture "tout nombre aléatoire n'est pas la somme de deux nombres premiers" se formule mathématiquement mais ne se calcule pas de manière approchée. Elle se problématise bien au sens que l'on peut être en accord ou en désaccord avec cette conjecture et examiner si elle s'accorde avec le consensus actuel sur la notion de nombre aléatoire.

#### 2. Formulation mathématique axiomatique

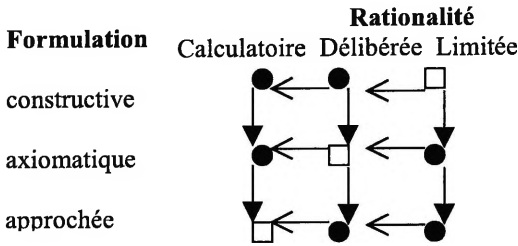
Le second degré est une formulation mathématique en théorie des ensembles par des fonctions calculables qui correspondent selon la thèse de Church à des Machines de Turing.

#### 3. Formulation mathématique constructive

Le troisième degré est celui des formulations mathématiques constructives qui correspondent à des systèmes formels constructifs au sens du système F. de Girard (5), ou encore tout ce qui se formule par des calculs finis en arithmétique.

Donnons-nous un tableau dont chaque case correspond à un calcul ayant une rationalité et une formulation.

Nous avons vu que les différentes rationalités sont ordonnées. Nous avons ainsi la justification du jeu de flèches horizontales. Le jeu de flèches verticales marque les traductions des formulations constructives en formulation axiomatiques et en formulation approchées. Le carré du bas exprime l'adéquation ontologique et le carré du haut l'adéquation heuristique. Le jeu des traductions contraint le carré du milieu qui exprime l'adéquation épistémique. Les trois carrés marquent la cohérence globale mathématique, logique et informatique d'un calcul. L'incohérence provoque des révisions de la manière de décrire par des formules mathématiques ou sur la manière de calculer effectivement.



Jean Paul Delahaye prend comme exemple la notion de nombre aléatoire. Dans une formulation approchée, un nombre aléatoire se définit comme n'ayant aucune propriété particulière apparente sur la suite de 0 et de 1 qui le décrit. La définition dans une formulation axiomatique d'un nombre aléatoire pose que toutes ses propriétés particulières ne sont vérifiées que par des ensembles de mesure nulle. Sa définition constructive pose qu'aucune de ses propriétés ne satisfait les tests statistiques connus. Dans le diagramme, le flot de flèches montre le processus de réécriture d'une solution praticable vers une solution formulable mathématiquement.

**Remarques**

De nombreux débats portent sur l'existence d'un tel processus de construction de théories. Pour Penrose (14), le processus de construction d'une théorie réalisée par un mathématicien n'est pas réductible à un processus réalisable par une machine. Revenons sur le diagramme de Delahaye, Penrose argumente ainsi en faveur de l'existence d'un carré de gauche irréductible à un calcul formel. Aleksander (1) argumente une thèse opposée en expérimentant le concept de machine consciente. Delahaye (4) montre quel est le jeu social qui a conduit à la production d'un concept stable et admis de nombre aléatoire. Le cadre conceptuel (18) que nous proposons contribue à ce débat en formalisant les notions de rationalité et d'adéquation de telle manière que l'on puisse procéder à la production de théories scientifiques.

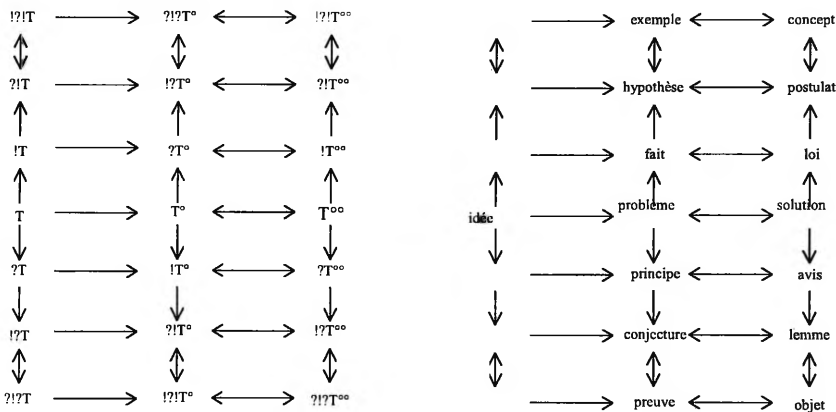
**L'adéquation des rationalités**

Nous définissons en théorie des catégories les rationalités et les adéquations pour garantir la cohérence de l'ensemble des définitions en la reportant sur la cohérence de la théorie des catégories. Dans cette formalisation, l'illustration précédente est significative, car nous avons pu démontrer que l'adéquation épistémique est bien conséquence d'une mise en cohérence des adéquations heuristiques et ontologiques. Tirons les conséquences de ce théorème.

Tout d’abord, les mathématiques donnent une ontologie convenable des raisons des calculs. Comme exemple de raisons , nous dirons que “ c’est une bonne/mauvaise hypothèse, c’est une preuve correcte/incorrecte , une conjecture judicieuse/malheureuse.

L’adéquation ontologique donne les relations entre toutes ces raisons. Donnons le diagramme des relations. Illustrons un morceau du diagramme. Au lecteur de retrouver les liens qui expriment les relations entre *preuve*, *objet*, *conjecture* et *lemme* dans le diagramme suivant, en s’assurant que cela ne heurte pas trop ses idées sur la démarche scientifique de supervision de calculs exercés en rationalité calculatoire. Dans le diagramme de l’adéquation ontologique la première colonne donne la formulation de l’idée, la seconde la formalisation de l’idée et la troisième sa figuration.

Ainsi “une preuve prouve des conjectures qui traduisent des lemmes qui se concrétisent en objets qui vérifient ou réfutent la preuve”



Ce diagramme est lui-même une formulation par des termes d’une résolution de problèmes. Nous appelons agent rationnel un système qui a une adéquation ontologique. Ce système calcule en respectant les contraintes sur les raisons de ses calculs présentés dans le diagramme précédent. Nous avons pu démontrer que si on impose à un agent rationnel de se comporter quand il raisonne selon une rationalité limitée et que ce dernier vérifie une adéquation heuristique alors son comportement vérifiera une adéquation heuristique. Ce qui veut dire qu’un groupe de travail pourra juger s’il est correct ou non.

### Modèle en couche

Dans une société de l'esprit comme celle de Marvin Minsky (11) l'individu est un pion social dont l'initiative est critiquée par ses pairs dans un groupe de travail. L'individu est modifiable, ce qui donne à la société la capacité d'évoluer en le transformant.

Les notions d'agent, de groupe de travail et de société vont construire l'espace dans lequel la pensée prend de la puissance car elle se transforme en pensée efficace. La société modèle des agents, les agents se singularisent et les groupes de travail les discernent. Ce cycle de création, d'individualisation, et de discernement donne la structuration de la pensée. Cette structuration lui permet de profiter du flot des accidents pour s'adapter, pour réagir, pour canaliser à son bénéfice toutes les énergies qui agissent sa matière. Une société de l'esprit est ainsi un espace ayant ses dimensions, ses systèmes de mesure, ses structures, sa dynamique qu'il nous faut maintenant examiner.

L'espace de pensée que nous venons de développer est celui de l'emprise d'une pensée sur les réalisations matérielles. Nous prenons en compte le besoin d'agir matériellement pour penser; que l'action se passe dans notre cerveau, dans notre laboratoire ou alors qu'elle agite des électrons dans des machines, montrons comment les modèles en couche de l'informatique organisent la supervision du calcul.

### L'organisation en couche d'une société de l'esprit

Nous examinons différentes conceptions courantes en informatique d'une architecture organisée en niveaux. Chaque niveau est autonome d'un point de vue conceptuel et chaque niveau se traduit dans le niveau du dessous.

Le tableau suivant expose les modèles en couche en reprenant la démarche de Nicola Guarino (7)

Niveaux	Identification	Interprétation
heuristique	La personne sociale	Subjective
épistémique	Le groupe de travail	Inter-subjective
ontologique	L'agent rationnel	Objective
structurelle	Le modèle	Arbitraire
logique	La formule	Arbitraire
opératoire	Le calcul	Arbitraire

Les trois niveaux primitifs explicitent comme nous venons de le voir la machinerie. Les adéquations correspondent aux niveaux supérieurs. On retrouve la construction ontologique d'un individu et la construction épistémique d'une personne au travers d'un jeu social.

Quand l'individu est une personne, la société va le contraindre à avoir un comportement prévisible et explicable s'il veut conserver les avantages de son statut social.

Le tableau suivant positionne les niveaux de base selon les idées de van Benthem (20). Les automates réalisant les calculs sont les couches qui portent les informations en œuvre dans les sociétés.

Niveaux	Identification	Réalisation
Heuristique	La personne sociale	
Epistémique	Le groupe de travail	
Ontologique	L'agent rationnel	Flux d'information
Structurelle	Le modèle	Algèbre relationnelle
Logique	La formule	Logique dynamique
Opératoire	Le calcul	Calcul booléen

Dans les modèles en couche, les opérations réalisées dans une couche se traduisent dans les opérations de la couche inférieure. Ces couches se discernent bien si le temps de réalisation des opérations élémentaires de

calcul dans les couches basses est plus rapide d'un ordre de grandeur face à celui des couches hautes. Ainsi, le calcul se réécrit de couche en couche tant qu'un temps excessif de calcul d'une couche ne pénalise l'organisation totale du calcul. Nous introduisons ainsi une nouvelle donnée, celle de la consommation de ressource en temps de calcul.

Les jeux d'offre et de demande d'informations fixent la nature des flux d'informations qui font la société de l'esprit. La notion de flux d'informations impose des émetteurs, des récepteurs et des canaux de transmissions véhiculant des messages ayant un contenant et un contenu. Ces notions ne relèvent pas de la logique. Dans le contexte d'une société de l'esprit, l'échange d'informations consomme du temps.



## Esquisse d'une cosmologie des calculs

Dans ce chapitre, nous expliquons comment le temps se construit lors de la supervision du calcul. Nous avons tout d'abord besoin de préciser davantage comment l'attention intuitive et l'attention rationnelle interviennent pour organiser la perception et la compréhension. La connaissance scientifique sera posée comme une compréhension maximale des phénomènes.

Pour faire comprendre l'attention intuitive, rappelons le principe du cinéma. Etant donné :

- Un temps de pause durant un instant  $10^{-2}$  seconde
- Une suite de clichés de trente clichés par seconde permettant une attention intuitive.
- Notre connaissance du monde et les explications des érudits nous rendent capable de discerner et d'apprécier un mouvement selon notre attention rationnelle.

Le principe du cinéma se généralise dans la démarche scientifique. En effet, en plus de la faculté de revoir à volonté un film, en sciences nous pouvons en faire varier les paramètres afin de soumettre des variantes à notre attention intuitive et rationnelle.

Pour un système observé, une théorie scientifique permet l'étude d'un phénomène que l'humanité a su discerner. Nous donnons le temps de pose, c'est-à-dire le temps minimum à attendre pour voir une variation du phénomène. L'échantillonnage à trente images par seconde est une donnée vraie pour l'homme, elle ne permet de voir que ce qui est discernable de son milieu lors une variation lente.

Dans cette table, les différentes échelles de temps sont associées selon deux principes. Le premier organise les différentes échelles de temps qui interviennent dans les systèmes vivants, le second explicite les temps des phénomènes chimiques et physiques.

Ce tableau suivant est inspiré des travaux de Newell (12). Il situe l'esquisse de cosmologie de cet article. Nous allons voir comment s'organisent les différentes couches de calcul. Nous allons principalement nous intéresser à la couche qui établit la mise en relation des calculs physiques et de leur supervision par l'activité humaine. Cette couche est marquée par la capacité d'avoir une attention intuitive, c'est à dire la capacité d'appréhender une suite de calcul comme on le fait pour une séquence d'image d'un film. Cette attention intuitive est obtenue par l'organisation en couche qui vient d'être présentée sous le nom de société de l'esprit.

Echelle seconde	Temps de pose	Système observé	Ce qui bouge lentement
$10^{15}$	15 milliard d'années	Univers	Les créations du monde
	4,5 milliards d'année	Terre	Les conditions de la vie
$10^{14}$	3,5 milliards d'années	Vie	Les théories de l'évolution
$10^{13}$	Million d'année	Humanité	Mutagenèse dirigée
$10^{11}$	Millier d'années	Humanité	Les organisations sociales
$10^{10}$	Centaine d'année	modernité	Les outils
$10^9$	Dizaine d'années	Homme	L'expérience
$10^8$	Année	Homme	Education
$10^7$	Mois	Homme	Entraînement
$10^6$	Semaine	Homme	Apprentissage d'un outil
$10^4$	<b>Heure</b>	<b>Homme</b>	<b>Attention rationnelle</b>
$10^1$	<b>Seconde</b>	<b>Homme</b>	<b>Attention intuitive</b>
$10^{-1}$	100ms	Pensée intentionnelle	
$10^{-2}$	10ms	Réflexe	
$10^{-5}$		Les macromolécules	Les macromécules
$10^{-9}$	Nano-seconde	Machine	La réalisation d'un calcul
$10^{-15}$	Fempto-seconde	Les atomes	Les électrons
$10^{-17}$			Les photons
$10^{-23}$			L'antimatière/matière
$10^{-43}$	Temps de Planck		Limite de la perception

Commentons le tableau. L'humanité est capable d'influencer les événements situés entre les deux lignes en ligne pointillée et en particulier d'influencer sa capacité de raisonner. Ce processus modifie le système de traitement de l'information par une réorganisation de l'architecture matérielle réalisant le calcul. C'est ainsi que l'expérience, l'éducation nous changent, nous rendent capables de comprendre davantage de phénomènes.

Par ailleurs, les couches basses du calcul se font en domestiquant les électrons et en les canalisant dans des circuits. L'informatique, quand elle sait faire des calculs plus volumineux, agence sous l'attention intuitive d'une personne plus de données et de calculs, elle lui donne alors la capacité d'exercer son attention rationnelle et de faire des théories plus prédictives et efficaces et de les utiliser à bon escient pour intervenir sur le monde vivant et sur le monde matériel.

## Conclusion

Nous avons proposé une cosmologie du calcul. Ce système est organisé de manière systématique en couches. Chaque couche est une abstraction de la couche qui la supporte et cette couche supervise les conséquences pratiques des calculs effectués dans la couche subalterne. Des théories scientifiques rationalisent chaque couche identifiée par leur faculté de prévoir et d'expliquer les phénomènes.

Le cumul de ces couches forme une cosmologie. L'espace de la pensée ainsi systématisé est associé aux couches pour lesquelles il y a des théories prédictibles et explicables pour une société composée d'individus appartenant à des groupes techniques.

L'activité scientifique participe de l'aventure humaine en déplaçant les limites de ce qui peut se penser, en augmentant les ressources de calcul disponibles pour modéliser ce qui maintenant outrepassé nos capacités d'attention.

## Références bibliographiques

- (0) ASCHER, Marcia. *Mathématiques d'ailleurs Nombres, formes et jeux dans les sociétés traditionnelles*. Seuil, 1998.
- (1) ALEKSANDER, Igor. *Impossible minds, my neuron my consciousness*. Imperial College Press, 1996.
- (2) DANCHIN, Antoine. "By way of introduction: somme constraints of the cell physics that are usually forgotten, but should be taken in silico genome analysis". In: *Biochimie* 78, (1996): 299-301.
- (2) COUTURAT, Louis. *La logique de Leibniz*. Georg Olms Hildesheim, 1961.
- (3) DELAHAYE, Jean Paul. *Information, complexité et hasard*. Hermes, 1994.
- (4) GIRARD, Jean-Yves. *Proofs and types*. Cambridge University Press, 1989.
- (5) GOLDBLATT, Roger. *Topoi, the categorial analysis of logic*. North Holland Publishing Company, 1979.
- (6) GRINDBERG Léon, et alii. *Nouvelle introduction à la pensée de Bion*. Césura, 1996.
- (7) GUARINO, Nicolai. *The ontological level*. In: 16° Wittgenstein Symposium on Philosophy and Cognitive Science Hölder-Pichler-Tempsky, Austria, 1994.
- (8) HEIDEGGER, Martin. *Le principe de raison*. TEL Gallimard, 1962.
- (9) Mc CARTHY, John. *Artificial Intelligence, logic and formalizing common sense*. In: THOMASON, Richmond. *Philosophical logic and Artificial Intelligence*. Dordrecht; Kluwer-Academic, 1989.
- (10) MINSKY, Marvin. *La société de l'esprit*. Inter-éditions, 1988.
- (11) NEWELL, Alan. *Unified Theories of cognition*. Cambridge MA, Harvard University Press, 1990.

- (12) PEIRCE, S. Charles. *Le raisonnement et la logique des choses*. CERF, 1995.
- (13) PENROSE, Roger. *Les ombres de l'esprit*. Interéditions, 1995.
- (14) POPPER, Karl. *The logic of scientific discovery*. Routledge, 1977.
- (15) RUSSELL, Stuart Norwig Peter. *Artificial Intelligence A modern Approach*, Prentice Hall, 1995.
- (16) RUSSELL, Stuart. "Rationality and Intelligence" In: *Artificial Intelligence Journal* 94 (1997): 1/57-77.
- (17) SALLANTIN, Jean. *Les agents intelligents, essai sur la rationalité des calculs*. Hermes, 1997.
- (18) SIMON, Herbert. *Models of bounded rationality*. Cambridge, MIT Press, 1982.
- (19) VAN BENTHEM, Johan. *Exploring logical dynamics*. Studies in Logic, Language and Information, CLSI Publications Stanford/Cambridge University Press.

# Objectivité et intersubjectivité chez Bohr

Contenu et implications d'une suggestion "faite en passant"

Catherine Chevalley\*

**Résumé:** On examine l'imbrication des aspects scientifiques et philosophiques de l'objectivité telle qu'elle apparaît dans un texte tardif de Niels Bohr (des années cinquante), comme aboutissement dans sa pensée de ses essais toujours repris de redefinition de cette notion, en rapport à un renouvellement de la pensée de la separation sujet-objet.

**Abstract:** We examine the interplay, of the scientific and philosophical aspects of objectivity as it appears in a text by Niels Bohr written in the fifties, as the outcome in his thought of his long standing essays to re-define this notion, in relation to a renewal of his conception of the subject-object separation.

L'UN DES PROBLÈMES auxquels Jacques Merleau-Ponty s'est le plus intéressé est celui du sens à donner à l'émergence, dans les sciences des XIX<sup>e</sup> et XX<sup>e</sup> siècles, de l'idée d'une "communauté qui se définit par les opérations *qui permettent à chacun de s'accorder avec les autres*"<sup>1</sup> Comment comprendre que, "dans la science moderne, les observateurs (soient] de moins en moins considérés comme des *spectateurs* et de plus en plus comme *des témoins* qui contribuent directement à établir le vrai", et que l'invariant se définisse dans la physique contemporaine, non plus par "l'immuable", mais par "*l'identité pour toute une classe d'observateurs*"<sup>2</sup>? Comment comprendre, en d'autres termes, que la physique du XX<sup>e</sup> siècle, depuis les deux théories de la Relativité jusqu'au "modèle standard"

---

\* Professeur, Université de Tours.

1 Jacques Merleau-Ponty, *Cosmologie du XX<sup>e</sup> siècle*, Paris, Gallimard, 1965, 184. Il s'agit ici de Whitrow. Pour J. Merleau-Ponty, l'intersubjectivité entre dans la physique du XX<sup>e</sup> siècle avec la théorie de la Relativité restreinte, sous une forme plus ou moins implicite, puis avec le principe de covariance de la Relativité générale, c'est-à-dire avec le principe que l'expression des lois physiques doit être indépendante du choix des coordonnées permettant de repérer l'espace-temps. L'invariant n'est donc plus attribué à des propriétés intrinsèques des substances, mais devient quelque chose qui se détermine en référence à un accord entre différents observateurs.

2 *Ibidem*.

de la physique des particules actuelle, associe sa recherche de l'invariance avec la nécessité d'introduire ce qu'on appelle "le point de vue de l'observateur"<sup>3</sup>?

Je voudrais montrer ici que, si ce problème a un intérêt intrinsèque pour la philosophie des sciences, la solution qui en est donnée affecte aussi la conception générale de la science et du "sujet" de la connaissance. Pour le dire grossièrement, si la science n'est plus représentable comme cette opération par laquelle l'entendement pur d'un individu isolé se met à l'écoute de la "nature" – "inexorable et immuable", comme la qualifiait Galilée –, et si elle fait intervenir désormais de manière essentielle les notions d'identité pour une classe d'observateurs donnée et de communicabilité dans une communauté intersubjective, alors il faut réexaminer ce que signifie l'"objectivité" de la connaissance scientifique et aller jusqu'aux conséquences philosophiques de la redéfinition qui peut en être proposée. Là réside sans doute la difficulté majeure, si l'on admet avec J. Merleau-Ponty que l'épistémologie n'a pas toujours été, sous ce rapport, à la hauteur de la problématique spéculative qui était en jeu: "de cette opposition [du sujet et de l'objet], la philosophie moderne a tenté de mille façons de se dégager, mais l'épistémologie en est à bien des égards resté prisonnière"<sup>4</sup> En d'autres termes, la question de ce qu'on peut nommer, faute de mieux, *l'intersubjectivité* s'imposerait massivement dans le domaine de la physique du XX<sup>e</sup> siècle, mais son lien avec la philosophie resterait caché et indistinct.

Mon but, dans ce qui suit, sera donc avant tout d'analyser un cas où se trouve clairement mis en évidence le lien, l'imbrication, des aspects techniques et des aspects philosophiques de la question de l'objectivité. Je centrerai cette analyse sur une remarque faite par Niels Bohr dans un article de 1953 intitulé "Physical science and the study of religions" Il s'agit d'une suggestion faite "en

---

3 Ce qui ne veut pas dire que l'introduction du "point de vue de l'observateur" se fasse de la même manière en théorie de la Relativité et en mécanique quantique : la signification de cette introduction est, de fait, très différente d'un cas à l'autre. Sur la situation en physique quantique, voir Bernard d'Espagnat, *Le réel voilé. Analyse des concepts quantiques*, Paris, Fayard, 1994, notamment les remarques sur l'intersubjectivité in *ibid.*, 25-32; d'Espagnat adopte par ailleurs la même position générale selon laquelle "la physique est une science de l'expérience humaine communicable concernant un certain domaine" (*ibid.*, 16).

4 J. Merleau-Ponty, *op. cit.*, 169. *A contrario*, J. Merleau-Ponty évoque Milne, qui tentait de dépasser l'opposition traditionnelle du sujet et de l'objet dans le sens de la pluralité des mondes et d'une orientation métaphysique, en posant "l'intersubjectivité métrique" avant "l'objectivité physique"; et Whitrow qui, de son côté, définissait la méthode scientifique par les deux principes de la "communicabilité" et de l'uniformité, et songeait à une pluralité de monades en intercommunication (*ibid.*, 179). On peut penser également à Whitehead. Mais peut-être aussi à des tentatives plus radicales, qui feraient l'économie d'un retour à la métaphysique antérieure?

passant” comme c’est souvent le cas avec Bohr, dont le livre projeté de “philosophie générale” n’existe que sous forme de fragments dispersés dans des conférences de commande. Mais bien qu’elle semble anodine à première vue, cette suggestion représente en réalité l’aboutissement d’une entreprise de redéfinition de la notion d’objectivité commencée au moment de la première formulation de la théorie quantique en 1927 et poursuivie pour répondre aux objections persistantes d’Einstein. J’essaierai ainsi de montrer, en premier lieu, en quoi la remarque de 1953 se rapporte à la situation créée par les conditions de l’observation en physique quantique. Toutefois la suggestion de Bohr ne prend tout son sens que si elle est rapportée également à la tradition philosophique qui lui servait de contexte; or, si l’on adopte cette perspective, on s’aperçoit que sa redéfinition de l’objectivité conduit Bohr, puis à sa suite Wolfgang Pauli et Werner Heisenberg, à abandonner plusieurs des présuppositions essentielles de la philosophie antérieure – notamment celle de la “séparation du sujet et de l’objet” Sans proposer ici aucune interprétation d’ensemble de la portée de ces décisions, j’essaierai donc, en second lieu, de les rendre visibles et d’éclairer un peu, de cette manière, la signification si controversée de la philosophie des premiers fondateurs de la mécanique quantique.

## I. Redéfinition de l’objectivité comme communication dans un langage non ambigu

*D’un point de vue logique, nous ne pouvons comprendre une description objective que comme le fait de communiquer une expérience à d’autres au moyen d’un langage qui n’admette pas d’ambiguïté en ce qui concerne la perception de telles communications.<sup>5</sup>*

Pourquoi Bohr fait-il cette remarque, en 1953, au sujet de ce qu’est une “description objective”? L’énoncé semble d’abord trivial. Lu de plus près, il pourrait apparaître comme une profession de foi positiviste: la physique ne parlerait pas de la nature, mais seulement de nos perceptions? Il s’agit pourtant d’autre

<sup>5</sup> Niels Bohr, “Physical science and the study of religions”, in *Studia orientalia Ioanni Pedersen septuagenario A.D. VII*, Copenhague, Ginar Mimmler-Gaard, 1953, 385-90; ici : 386. Cet article sera repris dans le volume 10, non encore publié, des œuvres de Bohr: *Collected Works – Gesammelte Werke*, Amsterdam, North-Holland; New York, Elsevier, 1972.

chose. Mais pour le montrer, il faut situer l'assertion de Bohr dans l'évolution de son attitude générale à l'égard du problème de l'objectivité.

Les principes et le formalisme de la mécanique quantique sont présentés au Ve Congrès Solvay de Bruxelles en 1927 et la première prise de position explicite de Bohr sur la question de l'objectivité se trouve dans le texte connu sous le nom de "conférence de Côme", repris à l'occasion du Congrès de Bruxelles, réécrit et publié en 1928 en allemand et en anglais. A ce point, Bohr caractérise la situation de manière essentiellement *négative*, c'est-à-dire par opposition à une conception classique de l'objectivité qu'il définit comme la possibilité d'une "description *simultanément causale et spatio-temporelle* des phénomènes"<sup>6</sup>. Bohr pose ainsi qu'il est nécessaire de "*renoncer*" à une telle description dans le domaine de la physique atomique et que l'objectivité ne peut plus être conçue comme la possibilité de présenter une "image complète" des phénomènes en ce sens. Selon l'énoncé canonique initial de la "complémentarité", l'on se trouve devant

"une modification radicale du rapport entre la présentation dans l'espace et le temps (*Raum-Zeit Darstellung*) et l'exigence de causalité (*Forderung der Kausalität*) qui symbolisent respectivement les possibilités idéales d'observation et de définition, et dont l'union est caractéristique des théories classiques: d'après l'essence même de la théorie quantique, nous devons en effet nous contenter de les concevoir comme des aspects complémentaires, mais mutuellement exclusifs, de notre représentation des résultats expérimentaux."<sup>7</sup>

En d'autres termes, pour décrire la connaissance objective en physique atomique, Bohr propose en 1928 de passer d'une réunion à une disjonction. Plus précisément, il affirme qu'il est impossible de définir un système physique atomique de manière complète au moyen d'un ensemble de variables cinématiques et dynamiques supposées connues simultanément avec une précision arbitraire,

---

6 Cette référence à l'objectivité classique comme possibilité d'une description par "espace-temps-causalité" est générale dans les textes des physiciens de cette période. Outre qu'une telle caractérisation transcrit bien le formalisme de la physique classique, on peut penser, avec D. Howard, qu'elle se fixe à partir de Schopenhauer et de la réduction à la causalité qu'il fait subir aux catégories kantienne.

7 N. Bohr, "Das Quantenpostulat und die neuere Entwicklung der Atomistik", in *La théorie atomique et la description des phénomènes*, Paris, Gauthier-Villars, 1932, 50. Sur la notion de complémentarité, centrale pour l'interprétation des textes de Bohr, voir N. Bohr, *Physique atomique et connaissance humaine*, Paris, Gallimard, 1961; rééd. 1991, Introduction et Glossaire.



comme c'était le cas pour une description objective en physique classique. D'un point de vue strictement épistémologique, l'essentiel est ici que cette modification permet ensuite le passage à l'idée d'une connaissance de type intrinsèquement statistique. Mais il reste que, sur le plan de la langue philosophique, l'on n'a affaire encore qu'à une détermination "en creux" de l'objectivité. En outre, pour être explicite, cette position à l'égard de la notion d'objectivité n'en reste pas moins purement programmatique quant à sa portée philosophique. Sans doute Bohr écrit-il que l'état de choses auquel nous confronte la physique atomique

"montre une profonde analogie avec les difficultés générales de la formation des concepts humains, basées sur la séparation du sujet et de l'objet."<sup>8</sup>

Sans doute aussi, dans le prolongement direct de l'exposé de 1927, l'article "purement philosophique" de 1929 note-t-il que l'on a affaire à

"un aspect nouveau du problème de l'objectivité des phénomènes, qui a toujours suscité tant d'intérêt dans les discussions philosophiques, et que cet aspect nouveau impose une refonte complète des bases de la description des phénomènes naturels."<sup>9</sup>

Mais par quoi remplacer une telle "séparation du sujet et de l'objet"? Et comment comprendre la portée philosophique générale de cette refonte? Ces questions restent en suspens.

En les laissant provisoirement de côté, on peut toutefois comparer la suggestion de 1953, évoquée plus haut, avec la détermination négative de la "complémentarité" comme disjonction des éléments constitutifs de l'objectivité physique classique. En proposant de considérer une description objective comme "le fait de communiquer une expérience à d'autres au moyen d'un langage qui n'admette pas d'ambiguïté en ce qui concerne la perception de telles communi-

8 N. Bohr, "Das Quantenpostulat und die neuere Entwicklung der Atomistik", *Die Naturwissenschaften* 16 (1928), 245-257, ici: 257; traduction française: "Le postulat quantique et le dernier développement de la théorie atomique", in: *La théorie atomique, op. cit.*

9 N. Bohr, "Wirkungsquantum und Naturbeschreibung", *Die Naturwissenschaften* 17 (1929), 483-6; traduction française: "Le quantum d'action et la description des phénomènes", in: *La théorie atomiques, op. cit.*

cations”, Bohr fournit en effet cette fois une *caractérisation positive* de l’objectivité. Cette caractérisation positive ne vient *pas* se substituer à la caractérisation négative, qui se maintient dans les textes de Bohr jusqu’à la fin; elle la préserve et s’y juxtapose. Mais elle fait porter l’accent sur autre chose, selon un déplacement qui, à mon sens, témoigne de l’effort de Bohr pour répondre aux objections d’Einstein au sujet de la complétude de la théorie quantique. Pour Einstein en effet, la théorie quantique est irrémédiablement incomplète parce qu’elle ne permet pas d’établir une correspondance biunivoque entre les “éléments de réalité” et les éléments de la théorie physique<sup>10</sup>. Cela revient, comme le remarque W. Pauli dès 1936, à maintenir l’idée d’un “caractère univoquement objectivable (*eindeutige Objektivierbarkeit*)” des phénomènes, fondé sur “l’indépendance des régularités de l’évolution des phénomènes physiques à l’égard du mode d’observation”<sup>11</sup>. *A contrario*, pour Pauli comme pour Bohr, l’analyse de l’opération de mesure dans le domaine atomique impose de reconnaître que l’objectivité de la description y dépend de l’accord entre les observateurs au sujet des *phénomènes enregistrés* sur les appareils de mesure, *dans telle situation expérimentale bien définie*. Et non plus, pour forcer le trait, de l’accord au sujet des propriétés intrinsèques des systèmes physiques dans n’importe quelle situation expérimentale, comme c’était le cas (idéalement) en physique classique. Il s’agit, en d’autres termes, de prendre pleinement en compte l’état de choses, à la fois simple et si difficile à comprendre dans toutes ses implications, que *l’opération de mesure* introduit une modification irréversible dans l’état des systèmes physiques considérés, de sorte que ce qui se manifeste est intrinsèquement lié au dispositif expérimental. Qu’une description objective soit le fait de communiquer une expérience à d’autres au moyen d’un langage qui n’admette pas d’ambiguïté<sup>12</sup> en ce

10 A. Einstein, B. Podolsky et N. Rosen, “Can quantum-mechanical description of reality be considered complete?”, *Physical Review* 47 (1935), 777-80; traduction française in A. Einstein, *Ceuvres choisies*, F. Balibar et al. (éds.), Vol. I: *Quanta*, Paris, Le Seuil, 1989, 224 : “Dans toute théorie complète, il y a un élément correspondant à chaque élément de réalité. Pour qu’une grandeur physique soit réelle, il suffit qu’il soit possible de la prédire avec certitude, sans perturber le système”

11 Wolfgang Pauli, “Raum, Zeit und Kausalität in der modernen Physik”, *Scientia* 59 (1936), 65-76; traduction anglaise in *Writings on Physics and Philosophy*, C. P. Enz et K. von Meyenn (éds.), Berlin, Springer, 1994, ici: 98.

12 La discussion de la notion de “langage non ambigü” joue un rôle très important dans la dernière phase de la formation de la théorie quantique. L’origine du débat se trouve dans les désaccords entre Bohr, Heisenberg et Schrödinger au sujet de l’interprétation de la mécanique ondulatoire au cours de l’année 1926. Bohr acquiert à ce moment la conviction qu’il existe une ambiguïté inévitable des concepts et des images de la physique classique (ondes, corpuscules, trajectoires, énergie,

qui concerne la perception de telles communications signifie donc que l'accord d'une classe d'observateurs au sujet de ce qui est *enregistré* devient la condition *sine qua non* de tout raisonnement en physique atomique, du simple fait que les événements sont, *stricto sensu*, uniques et irréversibles (inversement, en physique classique, le désaccord éventuel d'un observateur ne tire pas à conséquence car l'on peut supposer, du moins en principe, que ce désaccord cédera devant le fait que la répétition à l'identique de l'expérience fournira toujours le même résultat).

Pourquoi est-ce si important? Parce qu'il faut alors reconnaître clairement qu'au lieu d'exhiber la nature, de la dévoiler, de la rendre visible, de la lire, de la décoder, la physique ne dit quelque chose qu'au sujet des événements qui se produisent dans nos interactions avec tels ensembles de systèmes, préparés de telle façon, etc.; bref, au sujet de ce que Bohr appelle toujours, avec une lourdeur délibérée, la "Nature-dont-nous-faisons-partie-nous-mêmes" La référence à l'exigence de non-ambiguïté dans la phrase de 1953 apparaît dès lors comme bien davantage que la simple expression d'une exigence générale de rigueur du discours. Loin d'être anodine, elle vise à dissocier la caractérisation de l'objectivité de toute présupposition d'une ontologie stable d'objets, pour la rapporter à la notion *d'accord entre un ensemble d'observateurs au sujet de ce qui apparaît dans des conditions expérimentales spécifiées*. Il s'agit en somme, pour Bohr, de changer l'usage du terme d'"objectivité", dans la poursuite d'un effort commencé dès avant 1927 pour comprendre la singularité de la situation nouvelle de la physique du point de vue de la théorie de la connaissance. Dans l'article de 1953, la phrase immédiatement précédente témoigne d'ailleurs clairement de cette volonté de redéfinition:

"L'enseignement que le développement de la science physique nous a donné en notre siècle en ce qui concerne notre

---

etc.) si on les utilise pour parler des objets de la physique atomique : il faut donc libérer les mots de la physique classique de tout poids ontologique. Ultérieurement, il proposera de distinguer entre un langage pour les objets (celui des vecteurs d'état) et un langage pour les manifestations perceptibles de l'interaction entre système physique et appareil de mesure (celui, aménagé, du langage ordinaire et de la physique classique). Pour Bohr, la situation est nouvelle dans l'exacte mesure où la physique classique pouvait s'autoriser à supposer une homogénéité entre phénomènes observés et propriétés d'objets, tandis que cette homogénéité disparaît en physique quantique pour faire place à une pratique de double langage. Sur ces questions, voir N. Bohr, *Physique atomique, op. cit.*, Introduction et Glossaire (entrée "Ambiguïté"); en ce qui concerne la position de Schrödinger, voir le commentaire de M. Bitbol in E. Schrödinger, *L'esprit et la matière*, Paris, Le Seuil, 1990, et son introduction à E. Schrödinger, *Physique quantique et représentation du monde*, Paris, Le Seuil, 1992.

position d'observateurs de la nature a créé un nouveau contexte (*background*) pour l'usage de mots tels que 'objectivité' et 'subjectivité'<sup>13</sup>

Un an plus tard, en 1954, dans une conférence donnée à New York au Congrès *The Unity of Knowledge*, Bohr écrira de manière analogue que

“tout savant se trouve constamment devant le problème de la description objective de l'expérience, *ce qui, pour nous, n'est rien d'autre qu'une communication sans ambiguïté.*”<sup>14</sup>

Résumons: à une objectivité classique définie comme possibilité d'une description simultanément spatio-temporelle et causale des phénomènes et des objets, Bohr en vient ainsi à une caractérisation, d'abord négative puis positive, d'un autre genre d'objectivité, qu'il associe à la possibilité d'une communication non ambiguë de l'expérience à une classe d'observateurs. Que ce déplacement constitue une pièce essentielle de l'interprétation philosophique de la physique quantique apparaît clairement dès qu'on en voit le lien avec le problème de la mesure. Aussi est-ce sans doute cette importance stratégique qui explique que Wolfgang Pauli ait repris pleinement à son compte la suggestion de Bohr, écrivant ainsi en 1957:

“Je m'accorde avec Bohr dans l'opinion que *l'objectivité d'une explication scientifique* de la nature devrait être *définie aussi libéralement que possible*: toute manière de voir (*Betrachtungsweise*) que l'on peut transmettre à d'autres, que d'autres, ayant les connaissances préliminaires indispensables, peuvent comprendre et appliquer à leur tour, et au sujet de laquelle nous pouvons parler avec les autres, devra être dite *objective.*”<sup>15</sup>

Pour Pauli comme pour Bohr, il s'agit ici, non pas de dissoudre toute notion de réalité physique au profit d'une vague condition de communicabilité

13 N. Bohr, “Physical science and the study of religions”, *op. cit.*, 386.

14 N. Bohr, “The unity of knowledge”, in: *The unity of knowledge* (Actes de la Conférence pour le Bicentenaire de l'Université Columbia, octobre 1954), New York, Double Day, 1955; traduction française in: N. Bohr, *Physique atomique*, *op. cit.*, 249.

15 W. Pauli, “Phänomenon und physikalische Realität” (1957), in: *Physik und Erkenntnistheorie*, Brunswick, Vieweg, 1961; rééd. 1984, 95. Traduction anglaise in *Writings*, *op. cit.*, 129.

de l'expérience, mais d'arracher la problématique de l'objectivité à son ancrage ontologique (dans une nature qui nous dicterait ses lois) ou classiquement épistémologique (dans une théorie de l'entendement), pour l'associer de manière étroite à l'accord d'un ensemble d'observateurs au sujet des phénomènes enregistrés et du langage dans lequel il est possible de les interpréter. Une telle redéfinition de l'objectivité ne conduit pas à introduire d'une manière quelconque une référence à la conscience de l'observateur individuel<sup>16</sup>. Bohr insiste sur ce point à plusieurs reprises – ainsi dans un article de 1958:

“La description des phénomènes atomiques présente un caractère parfaitement objectif au sens où aucune référence explicite n'est faite à l'observateur individuel, et où par conséquent (...) aucune ambiguïté n'est impliquée dans la communication de l'information.”<sup>17</sup>

Et Pauli précise de même que la physique quantique maintient “une réalité objective” en ce sens qu'elle

“prive l'observateur de toute possibilité d'influencer les résultats d'une mesure une fois que le dispositif expérimental a été choisi”

et que c'est en ce sens élargi que

“la description que donne la mécanique quantique est encore une description objective, bien qu'on ne fasse plus l'hypothèse que l'état d'un objet reste indépendant de la façon dont les sources possibles d'information sur cet objet sont irrévocablement altérées par les observations.”<sup>18</sup>

16 Et moins encore un quelconque subjectivisme. L'une des idées les plus répandues au sujet des positions adoptées par Bohr, Heisenberg ou Pauli est qu'ils auraient voulu introduire en physique l'observateur subjectif. Cette idée est incompatible avec le fait que l'accent est mis ici non sur la conscience de l'observateur individuel, mais sur l'appareil de mesure et la perception des phénomènes enregistrés par une communauté d'observateurs.

17 N. Bohr, “Quantum physics and philosophy”, in: *Philosophy in the Mid-Century*, R. Klibansky (éd.), Florence, La Nuova Italia Editrice, 1958, Vol. I, 308-14; rééd. in: N. Bohr, *Essays 1958-62 on atomic physics and human knowledge*, A. Bohr (éd.), New York, Interscience Publishers, 1963.

18 W. Pauli, “Die Materie” (1954), in: *Physik und Erkenntnistheorie*, op. cit., 7; *Writings*, 33.

Mais, comme le remarque aussi Pauli, le fait de ne plus pouvoir parler de réalité physique objective indépendante des conditions de son observation tout en affirmant que ce qui se manifeste, une fois ces conditions déterminées, conserve un caractère d'objectivité crée une "situation entièrement nouvelle du point de vue de la théorie de la connaissance", et qu'"aucun système philosophique n'avait anticipée."<sup>19</sup>

## II. Implications: la critique de la philosophie antérieure

L'idée que l'invariant se définit en physique contemporaine, non plus par "l'immuable", mais par "l'identité pour toute une classe d'observateurs"<sup>20</sup> se traduit donc chez Bohr et Pauli par un déplacement explicite et revendiqué du sens du terme d'"objectivité" Ici comme ailleurs, la modification de l'usage de la langue relève chez Bohr d'une stratégie consciente<sup>21</sup> Mais comment comprendre ce déplacement? Il faut pour cela en déterminer la signification pour l'histoire de la philosophie et définir les questions nouvelles auxquelles il conduit éventuellement. Dans une large mesure, Bohr, Heisenberg et Pauli ont effectué ce travail philosophique eux-mêmes.

### II.1. Sortir de Kant

La première "évidence" philosophique qui semble d'être imposée aux différents fondateurs de la mécanique quantique est que *la problématique kantienne*

---

19 W. Pauli, resp. "Raum, Zeit und Kausalität in der modernen Physik" (1936) et "Die philosophische Bedeutung der Idee der Komplementarität" (1950), in: *Physik und Erkenntnistheorie, op. cit.*

20 J. Merleau-Ponty, *op. cit.*, 184.

21 Pour d'autres exemples de telles redéfinitions, voir les entrées "Phénomène" ou "Nature" N. Bohr, *Physique atomique, op. cit.*, Glossaire. Dès 1928, Bohr exprime clairement la conviction que les difficultés de compréhension de la physique quantique sont intimement associées aux présuppositions tacites de nos concepts fondamentaux véhiculées par l'usage de la langue. L'article sur la notion de "complémentarité" – notion qui symbolise toujours aujourd'hui, quelle que soit la multiplicité des interprétations qui en sont données, la position philosophique attribuée à Bohr – se conclut ainsi par l'affirmation que l'un des obstacles essentiels à la compréhension de la mécanique quantique réside dans le caractère intuitif (c'est-à-dire associé à nos représentations spatio-temporelles) du langage classique : "nous nous trouvons ici sur la voie d'une adaptation de nos formes d'intuition, empruntées aux impressions sensorielles, à la connaissance de plus en plus approfondie de la nature; les obstacles que nous rencontrons sur cette voie proviennent avant tout du fait que pour ainsi dire *chaque terme de notre langage est lié à ces formes de représentation*". D'où la nécessité d'une réflexion sur l'usage des concepts de la physique classique dans le domaine atomique.

de la connaissance ne pouvait plus conserver le rôle de problématique de référence qu'elle avait jouée – y compris, voire avant tout, pour les mathématiciens et les physiciens – tout au long d'un XIX<sup>e</sup> siècle allemand ponctué par les "retours à Kant" A vrai dire, l'écart pris avec le kantisme se creuse déjà, pour ne citer que les physiciens, avec la doctrine des inférences inconscientes et la théorie des signes de Helmholtz, avec le concept de "symbole" développé par Hertz et avec les positions adoptées par Boltzmann. Au tournant du siècle, tout le monde ou presque commence à proposer des "aménagement" du kantisme qui sont de plus en plus dévastateurs. Il n'est donc pas étonnant de voir Heisenberg expliquer à ses premiers étudiants de Leipzig, dès 1927, qu'il faut "reprendre le problème fondamental de la théorie de la connaissance kantienne et pour ainsi dire tout recommencer"<sup>22</sup>. Cette brutalité programmatique ne fait en effet que parachèver les critiques antérieures en les ornant de la radicalité nouvelle imposée par l'énoncé de la complémentarité, qui dit en clair que l'objectivation ne peut plus opérer par appréhension des phénomènes dans les formes *a priori* de la sensibilité que sont l'espace et le temps et par application de concepts *a priori* de l'entendement tels que celui de causalité. Il faut donc "renoncer" à l'homogénéité postulée par Kant, *via* le Schématisme, entre la présentation des phénomènes dans l'espace et le temps et l'application des catégories. Dans le livre qu'il publie en 1936 après y avoir travaillé pendant dix ans, Ernst Cassirer s'appuiera tout naturellement sur Bohr et Heisenberg pour affirmer que

"le Schématisme s'est trouvé définitivement limité de par l'avènement de la mécanique quantique; nous ne pouvons plus combiner causalité et description spatio-temporelle (...) la Logique transcendantale ne peut plus être associée à, ou dépendante de, l'Esthétique transcendantale."<sup>23</sup>

En redéfinissant l'objectivité de manière négative comme impossibilité d'une description simultanément spatio-temporelle et causale, Bohr rendait ainsi effective une sortie définitive hors du Schématisme. Mais on ne comprend vraiment le sens de l'abandon du kantisme chez Bohr, Heisenberg ou Pauli que si

22 W.Heisenberg, "Erkenntnistheoretische Probleme der modernen Physik" (manuscrit), in Heisenberg, *Gesammelte Werke-Collected Works*, H. Rechenberg *et al.* (éds.), Série C, vol. I : *Physik und Erkenntnis 1927-1955*, Munich, R. Piper, 1984, 28.

23 E. Cassirer, *Determinismus und Indeterminismus in der modernen Physik*, Göteborgs Högskolas Arsskrift, Partie III, vol. 42, 1936; traduction anglaise sous le titre de *Determinism and Indeterminism in Modern Physics*, New Haven, Yale University Press, 1956, ici : 164.

l'on prend également en compte un phénomène remarquable, induit par la logique interne de la langue, et que l'on peut décrire comme un glissement de la *Critique de la raison pure* vers la *Critique de la faculté de juger*. Dès le début des années 1920 en effet – c'est-à-dire au moment de la crise ultime des modèles mécaniques de l'atome – Bohr propose de renoncer à l'exigence classique d'*Anschaulichkeit* au profit des "analogies symboliques"<sup>24</sup> Son argument est qu'il ne semble pas y avoir, en physique atomique, de "présentation sensible" possible des concepts dans l'intuition; dès lors, il faut recourir à une présentation indirecte, analogique et symbolique, qui, de fait, libère la voie pour la mécanique matricielle "abstraite" de Heisenberg<sup>25</sup>. Mais ce passage à l'analogie symbolique à l'intérieur même de la méthodologie des sciences physiques revient naturellement à récuser implicitement la définition kantienne des jugements scientifiques comme jugements "déterminants" Or cette définition s'opposait chez Kant à celle des jugements réfléchissants, propres au domaine esthétique et téléologique et régis précisément par les "analogies symboliques" Importer les jugements scientifiques dans le domaine de la troisième *Critique* consiste alors à les créditer du genre d'objectivité que Kant appelait l'universalité subjective. Il n'est donc pas étonnant, de nouveau, de constater que la caractérisation positive que Bohr propose pour l'objectivité soit précisément fondée sur l'idée de *jugements communicables à autrui*: si sa première caractérisation de l'objectivité ruine le Schématisme, la seconde conduit à introduire la "communauté des observateurs" dans la définition même du terme – et par voie de conséquence, selon la logique de la troisième *Critique*, à faire entrer la science dans un domaine qui n'est plus fondamentalement différent de celui des arts, des langages, des religions<sup>26</sup>. Le kan-

24 Sur ce point, voir O. Darrigol, *From c-numbers to q-numbers* The classical analogy in the history of quantum theory, Berkeley, University of California Press, 1992, et "Classical concepts on Bohr's atomic theory (1913-1925)", in *Phûsis*, vol. xxxiv (1997), Fasc. 3, 545-568; C. Chevalley, "Physique quantique et philosophie", in *Le Débat* (novembre 1992), 65-76; "Les concepts philosophiques dans la construction des théories physiques", in *Bulletin de la Société française de Philosophie* (avril-juin 1993); "Niels Bohr's words and the Atlantis of Kantianism", in *Niels Bohr and Contemporary Philosophy*, J. Faye et H. Folse (éds.), Dordrecht, Kluwer, 1994, 33-57.

25 Bohr se soucie peu de situer très précisément ses initiatives conceptuelles par rapport à la lettre du kantisme; mais il maîtrise tout à fait les distinctions fondamentales du criticisme, d'autant que l'opposition du Schématisme et des "hypotyposes symboliques" était l'un des soucis majeurs de Harald Höffding, ami et professeur de philosophie de Bohr. De ce point de vue, la thèse de l'absence de "concepts quantiques", qui est souvent considérée comme incompréhensible, est simplement chez Bohr la transcription de l'impossibilité de toute *Versinnlichung* dans le domaine quantique.

26 Pour une argumentation beaucoup plus détaillée de ce que j'avance ici, voir "On objectivity as intersubjective agreement", in *Physik, Philosophie und die Einheit der Wissenschaften. Für Erhard Scheibe*,



tisme ainsi hérétiquement déplacé ne ressemble plus du tout à du kantisme, mais ce glissement, en revanche, permet de rendre compte de l'insistance avec laquelle Bohr, Heisenberg ou Pauli en déduisent qu'il faut désormais critiquer la séparation traditionnelle entre les sciences et l'art, et surmonter la division de notre "intellectualité" (*Geistigkeit*) et l' "unilatéralité" de notre rationalisme.

La critique du kantisme ne doit donc pas être réduite à une critique strictement épistémologique. Il ne s'agit pas seulement d'aménager la description des processus de l'objectivation, mais bien de remettre en cause la distinction que tout le rationalisme classique avait faite entre *Wissen* et *Glauben*, connaître et "tenir pour vrai". La redéfinition de l'objectivité est envisagée ici dans ses conséquences philosophiques les plus générales, comme en témoigne plusieurs remarques de Bohr dans l'article de 1954 déjà cité:

"La nécessité (...) de porter une attention constante au problème de *l'objectivité de la description* a exercé au cours des âges une profonde influence sur l'attitude des écoles philosophiques. De nos jours, l'exploration de nouveaux champs d'expérience a mis en évidence des présuppositions insoupçonnées de toute application non-ambiguë de nos concepts les plus élémentaires. Elle a ainsi donné une leçon de critique de la connaissance, dont la portée atteint des domaines fort éloignés du domaine de la physique (...). En mettant en évidence la nécessité, dans une communication sans ambiguïté, de tenir compte du point où se situe la *séparation du sujet et de l'objet*, les développements modernes de la science ont donné un fondement nouveau à l'usage de mots tels que *connaissance et croyance*."<sup>27</sup>

## II.2. Sortir des "Temps Modernes"

Mais si, pour assurer une communication non-ambiguë, il faut ainsi chaque fois prêter attention au lieu où se situe la séparation sujet-objet, cela signifie que toute rigidité ou fixité de cette séparation devient elle-même caduque,

L. Krüger et B. Falkenburg (éds.), Mannheim BI, 332-347. Un tel déplacement a une histoire qu'il faudrait reconstituer et qui commence chez Goethe et Helmholtz.

27 N. Bohr, "The unity of knowledge" in *The unity of knowledge* (Actes de la Conférence pour le Bicentenaire de l'université Columbia, octobre 1954), New York, Double Day, 1955; traduction française in N. Bohr, *Physique atomique, op. cit.*, resp. 251 et 271.

et, avec elles, comme on vient de le voir, la partition canonique entre connaissance de l'objet et croyances du sujet (au sens de *Fürwahrhalten* ou de *Belief*). Ici se laissent donc entrevoir les raisons pour lesquelles Bohr, Heisenberg et Pauli ont éprouvé la nécessité de mettre en question, au-delà du kantisme lui-même, les fondements sur lesquels la métaphysique moderne s'était édifiée au XVIII<sup>e</sup> siècle. Ce retour critique sur l'âge classique a été largement oublié, omis, ou caricaturé dans les débats d'après-guerre qui ont porté sur l'interprétation de Bohr, dite désormais "Interprétation de Copenhague" Il n'en joue pas moins un rôle essentiel dans la clarification tant du sens de la rupture avec la philosophie antérieure que de l'origine des objections qu'Einstein et d'autres opposaient à la mécanique quantique.

De manière très générale, on peut dire que chez Bohr – comme chez Heisenberg et Pauli, qu'il serait incongru d'appeler des "disciples" mais qui partagent avec Bohr une même orientation critique fondamentale –, l'analyse porte ici sur le partage classique instauré entre, d'un côté, un "sujet" abstrait et isolé, pensé comme regard et comme spectateur, "Je" universel attributaire d'une connaissance potentiellement complète de la réalité du monde (la physique mathématique), mais simultanément tenu de cantonner son "Moi" dans un autre monde à part, et, de l'autre côté, une *nature* posée en face de ce regard, exposée à lui, comme une totalité indépendante obéissant à des lois immuables et composée de "choses" objectivables *via* leur réduction à certaines "propriétés" spatio-temporelles et causales calculables. Dans les années 1920-30, la fin de ce partage est comprise en philosophie comme le signe de l'achèvement de la métaphysique moderne et, sous ce rapport, Bohr, Pauli ou Heisenberg rejoignent et souvent anticipent les positions les plus radicales des philosophes.

Le texte le plus spectaculaire qui témoigne de cet effort pour penser la connaissance *sans reconduire la séparation sujet-objet* apparaît aujourd'hui comme étant celui du manuscrit rédigé par Heisenberg en 1942, et publié seulement en 1984<sup>28</sup> Destiné sans doute autant à léguer un exposé ordonné de l'"enseignement oral" de Bohr qu'à formuler une philosophie propre, le manuscrit de Heisenberg est centré autour du problème de la détermination d'une nouvelle "position à l'égard de la réalité" et Heisenberg y entreprend dès le début de défaire la philosophie du concept de réalité hérité des "Temps Modernes" c'est-à-dire d'une division entre *res extensa et res cogitans*, d'une conception spéculaire de la connaissance, et d'un privilège accordé à l'idée d'un point de départ unique, cer-

---

28 W. Heisenberg, in *Collected Works, op. cit.*, Série C, vol. 1, 218-306; réédité sous le titre de *Ordnung der Wirklichkeit*, H. Rechenberg (éd.), Munich, R. Piper, 1989; traduction française sous le titre de *Philosophie. Le Manuscrit de 1942*, Paris, Le Seuil, 1998.

tain et indubitable. Caractérisée à l'inverse comme la "fluctuation continue de notre expérience" en tant qu'elle inclut les processus de l'âme et tous les langages symboliques, la réalité ne se divise plus entre un "côté de l'objet" et un "côté du sujet", mais plutôt en régions de "connexions" (formalisables ou non) qui correspondent à des formes d'expérience et à des langages non hiérarchisés dont l'agencement est variable selon les époques. L'objectivation est alors un processus qui est mis en œuvre selon des modes différenciés, fonction notamment du degré d'incidence des conditions de l'observation sur ce qui est déterminé comme objet et la distinction entre art et science s'estompe, en même temps qu'est récusée l'ambition totalisante et réductionniste de ce que Heisenberg appelle "l'image scientifique du monde" du XIX<sup>e</sup> siècle.

Mais cet effort de Heisenberg pour mettre en question les présuppositions les plus fondamentales – et par là même souvent les plus tacites – de la philosophie moderne n'est pas le seul exemple que l'on pourrait donner. Entre le milieu des années 1930 et sa mort en 1958, Pauli produit également, parallèlement à ses contributions à la physique, un travail philosophique et historique considérable sur les origines de la science moderne, dans le but d'analyser, de démonter, de décomposer et d'interroger toutes les raisons pour lesquelles "le XVII<sup>e</sup> siècle est allé trop loin":

"Le fait que Newton ait placé l'espace et le temps pratiquement à la droite de Dieu, et pour tout dire à la place devenue vide dont il avait chassé le Fils de Dieu, est un épisode particulièrement piquant de l'histoire de l'esprit (...). Il est bien connu qu'il a fallu ensuite un effort intellectuel absolument extraordinaire pour les faire descendre de nouveau de ces hauteurs olympiennes. Le travail a été rendu artificiellement encore plus difficile par la tentative philosophique de Kant de refuser à la raison humaine l'accès à cet Olympe. C'est pour cela que l'époque où l'espace et le temps n'étaient pas encore là-haut, et surtout le moment qui a immédiatement précédé cette funeste opération, sont si intéressants pour moi. C'est le motif de mon étude de Kepler."<sup>29</sup>

<sup>29</sup> Lettre de W. Pauli à M. Fierz du 29 décembre 1947, citée in K. V. Laurikainen, *Beyond the atom. The philosophical thought of Wolfgang Pauli*, Berlin, Springer, 1988, 18. L'étude sur Kepler à laquelle Pauli fait son allusion est la remarquable monographie qu'il publie sous le titre "Der Einfluss archetypischer Vorstellungen auf die Bildung naturwissenschaftlicher Theorien bei Kepler" dans un livre écrit en collaboration avec Carl Jung: *Naturerklärung und Psyche*, Zurich, Rascher, 1952.

La question épistémologique de l'espace et du temps est évidemment décisive: aux yeux de Pauli, ce sont les concepts d'espace et de temps forgés par l'âge classique qui contribuent à nous "empêcher de penser" et qui rendent si difficile la compréhension de la physique contemporaine. C'est pour surmonter cet obstacle que Pauli effectue un retour, non pas naïf mais cathartique, à la philosophie de la nature de la Renaissance italienne: si cette philosophie, pour une part, anticipait sans doute sur le XVII<sup>e</sup> siècle et le rendait possible *via* le Néo-platonisme, pour une autre part elle laissait le débat ouvert, sans absolutiser les concepts, ni géométriser à l'excès l'espace physique, ni séparer "l'âme" de la "matière" Mais par ailleurs, la question de l'espace et du temps n'est pas seulement une question épistémologique. Si la Renaissance émerge aux yeux de Pauli comme un moment autonome, irréductible à un simple chaos préfigurateur de la vraie science et de la vraie philosophie, c'est aussi parce qu'elle représente un état de la pensée radicalement étranger aux partages cartésiens et newtoniens, parce que radicalement étranger à la scission entre une nature faite de "*choses objectivées*" et une humanité faite d' "*observateurs détachés*" Le XVII<sup>e</sup> siècle est "allé trop loin" dans l'exacte mesure où il a creusé un écart entre l'homme et le monde, quitte à revendiquer ensuite "orgueilleusement" l'ambition de "comprendre la totalité du monde" par le moyen des sciences de la nature. Mais parce que cette ambition trouve ses limites à l'intérieur même de la science du XX<sup>e</sup> siècle, "l'époque actuelle a atteint un point où la position rationaliste a dépassé son zénith et se trouve trop étroite"<sup>30</sup>.

Enfin, pour en revenir à Bohr lui-même, on peut remarquer que l'objet général de l'article de 1953 auquel j'ai emprunté la redéfinition de l'objectivité comme communication non-ambiguë est d'attirer l'attention sur la signification du partage entre "connaissance objective" et "croyance subjective" qui s'est insaturé à l'issue de la Renaissance, et sur la transformation de ce partage au XX<sup>e</sup> siècle. L'argument de Bohr est, pour en rester simplement à sa ligne directrice, le suivant. (a) La Renaissance européenne a donné naissance à des progrès de la physique (principes de la mécanique et unification des phénomènes terrestres et célestes) qui ont eux-mêmes conduit à formuler la "conception mécanique de la nature" et à introduire une nouvelle forme de relation entre les causes et

---

30 W. Pauli, "Die Wissenschaft und das abendländische Denken" (1956), in *Physik, op. cit.*, 111; *Writings, op. cit.*, 147. Redonner une "direction juste au rationalisme" en remettant en question les décisions prises par Galilée et Descartes était, au milieu des années 1930, l'un des buts que se donnait Husserl. Une analyse commune à beaucoup d'auteurs de cette période est que l'excès de scientisme engendré par le rationalisme classique conduit au danger irrationaliste, et qu'il faut donc tout reprendre au fondement.

les effets, qui trouve sa formulation définitive avec le “déterminisme” (au sens mathématique de la Mécanique analytique). Cette causalité nouvelle devient alors, une fois exclu tout raisonnement finaliste, l’idéal de l’explication rationnelle “dans tous les champs du savoir”. En même temps, il se produit un “schisme” entre le monde régi par les lois de la nature et le monde des valeurs humaines; et ce qui prévaut est dès lors une attitude “commune aux écoles de la philosophie empiriste et de la philosophie critique”, et consistant à opérer une distinction entre connaissance objective et connaissance subjective. (b) Si maintenant l’on s’interroge sur ce que montre le développement de la physique au XX<sup>e</sup> siècle (Relativité et physique atomique) en ce qui concerne “notre position d’observateurs de la nature”, on constate que ce développement a créé un contexte profondément différent pour l’usage de mots termes que “objectivité” et “subjectivité”, en imposant une “révision radicale” du fondement de l’application “non-ambiguë” de nos concepts physiques les plus élémentaires, tels que espace et temps, ou cause et effet. Il devient notamment impossible, du fait des conditions de la mesure et du rôle que joue le dispositif expérimental dans la définition même des phénomènes, de maintenir la condition de toute causalité classique, à savoir la possibilité de combiner sans restriction la “coordination spatio-temporelle” des phénomènes et les lois de conservation de l’impulsion et de l’énergie (c’est l’énoncé de la complémentarité). (c) C’est donc l’idéal de l’explication rationnelle adopté depuis le début des Temps Modernes qui trouve ici ses limites. Mais par ailleurs, la situation à laquelle on est confronté en physique correspond à une expérience de variation de la séparation entre sujet et objet qui est déjà notre expérience la plus ordinaire dans le langage courant, ainsi que dans tous les phénomènes de l’ordre de la volonté ou du désir. Au lieu d’un partage entre “objectif” (sciences) et “subjectif” (monde des valeurs), on se trouve donc désormais devant une expérience commune à toutes les activités humaines, qui est celle de la variation des points de vue – ou, pour le dire autrement, de l’impossibilité d’un regard neutre et totalisant sur le monde.

Ce mouvement de pensée par lequel Bohr, Heisenberg ou Pauli s’efforcent d’interpréter dans toutes ses conséquences la redéfinition de la notion d’“objectivité de la description physique” qui leur semble imposée par la physique quantique n’est évidemment intelligible que *situé* dans sa tradition philosophique propre. Cette tradition est celle de l’*Erkenntnistheorie* allemande, ou plus exactement de l’implosion de cette dernière au début du XX<sup>e</sup> siècle, sous l’effet des transformations successives des mathématiques, de la logique, de la physique et de la philosophie elle-même. Parce que cette implosion n’a été suivie d’aucune refondation – si l’on met à part la tentative de l’empirisme logique, qu’il faudrait considérer ici plus attentivement-, le problème du lien entre ob-

jectivité et communauté d'observateurs est souvent traité aujourd'hui dans la seule perspective d'une histoire des mentalités ou d'une sociologie du fait scientifique. On peut penser *a contrario* que, comme le notait J. Merleau-Ponty, l'épistémologie au sens strict a ici à apprendre de la philosophie.

# Science et philosophie sont-elles des soeurs ennemies?

Jean-Claude Pont\*

**Résumé:** Les rapports de la science et de la philosophie sont examinés à travers plusieurs exemples pris dans les sciences contemporaines aussi bien que dans l'histoire des sciences. On met en particulier en évidence l'importance de certains principes métaphysiques.

**Abstract:** The relations between science and philosophy are examined through several examples taken in contemporary sciences as well as in the history of science. We emphasize in particular the importance of some metaphysical principles.

*Ne sont-ce pas là des généralités artificielles  
dans lesquelles nous faisons marcher la nature aux  
allures de notre esprit? (Jean-Baptiste Biot<sup>1</sup>).*

## Propos liminaires

NOUS SOMMES RÉUNIS autour d'un nom et d'une personnalité, autour d'un homme et autour d'une oeuvre. Permettez-moi donc de dire en préambule et hors sujet deux mots de l'homme, permettez-moi aussi de rester en deçà de la vérité, de sorte à ne pas froisser cette modestie qui est chez lui toujours prête à sévir.

J'évoque pour cela un souvenir personnel. Lorsque en 1988 j'ai eu la charge d'organiser la chaire d'"Histoire et Philosophie des Sciences" nouvellement créée à l'Université de Genève, de mettre en place un enseignement et une recherche dans un pays qui avait peu de tradition en ce domaine, j'ai senti le

---

\* Professeur, Université de Lausanne.

1 Jean-Baptiste Biot, *Mélanges scientifiques et littéraires*, T. I, Paris, 1858, p. 379.

besoin de m'entourer de compétences extérieures, de m'entourer d'appuis dont le profil de compétences correspondrait à mes propres aspirations et à la manière que je souhaitais pour cette unité nouvelle. Jacques Merleau-Ponty a été le premier renfort que j'ai sollicité et c'est ainsi qu'il assura au titre de professeur invité d'octobre 1988 à mars 1989 un cours intitulé "Interférences entre philosophie et science: exemples historiques et contemporains" Plusieurs de ses élèves l'ont suivi dans cette activité genevoise ou le suivront (Bensaude-Vincent, Chevalley, Seidengart). Par la suite il remplaça au pied levé l'un de nos professeurs pour toute une année. Le thème retenu pour ces journées est dans la droite ligne du cours auquel je faisais allusion et si j'ai choisi de m'interroger avec vous, à bâtons rompus, sur certains aspects des relations entre science et philosophie, vous comprendrez que le choix n'est pas le fait du hasard.

### Introduction

Science et Philosophie sont des enfants de la même famille – on pourrait dire du même lit – mais leurs relations n'ont pas toujours été conviviales, et nombreuses les tensions et les brouilles. Jean Hamburger écrivait en 1986 dans l'introduction pour une colloque réunissant les membres de l'Académie des Sciences de Paris sur la philosophie des sciences<sup>2</sup>: "Il s'agissait d'encourager les retrouvailles de deux soeurs, autrefois intimement liées, aujourd'hui désunies: la science et la philosophie." Après avoir rappelé des temps plus heureux, il ajoutait: "Mais deux siècles plus tard, et plus encore durant ce siècle-ci, les chemins se sont séparés. C'est tout juste s'il n'y a pas bouderie." Avant d'évoquer des relations entre ces deux champs, il convient de circonscrire le sens du mot métaphysique et préciser celui que je retiendrai ici, parmi la multitude des acceptions.

Les définitions et les caractérisations de la métaphysique sont nombreuses et se recoupent incomplètement. Parmi elles, et c'est le sens de préférence utilisé dans cet exposé, la suivante<sup>3</sup>:

"Il y a "métaphysique" dès que l'esprit en quête d'unité totale se décide à combler les lacunes qu'offre le tableau "scientifique" de l'univers, grâce à un "liant" de son propre fonds, un "principe" (...) qu'il estime véritablement premier. La réflexion

2 Jean Hamburger, *La philosophie des sciences aujourd'hui*, Paris, Gauthier-Villars, 1986, p. 1.

3 François Grégoire, *Les grands problèmes métaphysiques*, Paris, PUF / QSJ n° 623, 1966, p. 14.



dite “métaphysique” n’est donc que la forme la plus pure de ce goût pour l’unité qu’est essentiellement la pensée philosophique, le moment décisif où l’esprit se résout, non sans appréhension, à rechercher hors du “monde” l’explication unifiante du monde.”

J’aimerais montrer plus loin sur des exemples comment certains principes utilisés en science sont métaphysiques dans ce sens précis du terme. Une telle affirmation est désécurisante pour le scientifique, assurément; la métaphysique n’a pas bonne presse, on dénonce ses stériles spéculations. Le difficile dialogue science-philosophie est compliqué par une volonté d’impérialisme qui habite – ou est supposée habiter – les protagonistes. Il s’agit de savoir qui est le meilleur, qui voit le plus loin, le plus juste. A force de faire “comme si rien n’allait de soi”<sup>4</sup>, à force de se vouloir dissolvante, il est vrai, la philosophie finit par agacer. A l’inverse, le philosophe porte volontiers un jugement sévère sur une science ne visant selon lui que les applications, la domination, et oubliant l’âme.

L’une des positions extrêmes, si l’on veut l’option zéro, consiste à tenir pour nulle la part de métaphysique dans la science. Voici un exemple emprunté à A. Abragam, un important physicien de notre temps<sup>5</sup>:

“J’ai toujours été rebelle à la philosophie, à ses méthodes et à son vocabulaire. C’est ainsi que je n’ai jamais éprouvé le besoin de définir formellement pour moi-même les concepts d’expérience et de théorie dont est faite mon existence quotidienne de scientifique.”

Dans l’hypothèse où l’on accorde une part à la métaphysique dans l’édification de la science, la contamination, ou la fécondation – selon le point de vue – s’opère vers les commencements, quand la pensée prend son envol, quand elle se dégage du sens commun. L’envol réussi, une autonomie existe en effet, les concepts nouveaux s’enchâssent dans les anciens par des définitions libérées du commerce avec le monde. Les principes seront donc notre cible.

L’enquête – dont je propose ici une sommaire esquisse – portera sur la science contemporaine, mais aussi sur son histoire. Elle seule conserve le sou-

4 Gilles Deleuze et Félix Guattari, *Qu’est-ce que la philosophie?* Paris, Ed. de Minuit, Collection “Critique” 1991, p. 12.

5 Hamburger, *op. cit.*, p. 21.

venir du moment spéculatif où la pensée file, “non sans appréhension”, le liant de son propre fond. La science d’aujourd’hui ne se distingue guère de celle de ses ancêtres pour la structure de son évolution, sauf à croire que nous avons atteint le terme du voyage. Mais qui s’aventurerait à crier Terre?

Prenons un exemple. Le mysticisme néoplatonicien de Kepler est présent tout au long de sa carrière; faut-il écarter comme non scientifique ce contexte de l’oeuvre, bannir le somnambule? Cet épisode n’est-il pas un révélateur où laisser jouer le reflet de notre propre condition? Notre temps est-il à l’abri de ces a priori où s’est nourrie la science d’avant? Dans l’examen d’une oeuvre majeure du passé on est partagé entre admiration pour une rationalité proche de la nôtre et déception devant le mythe, la spéculation ou la divagation. C’est qu’une partie de la rationalité d’alors s’est perdue, nous est devenue étrangère, elle qui gouvernait la science quand la métaphysique lui était partie intégrante. Cette manière toute mêlée de métaphysique se serait-elle exténuée, là dans la durée, pour disparaître à jamais? Quand Einstein écrivait dans une lettre à Solovine<sup>6</sup>: “If we never sin against reason we cannot achieve anything”, ce péché n’est-il pas une façon d’allégeance à la métaphysique?

### Les problèmes de la métalangue

Certains termes de la science sont nés dans la langue naturelle et y ont conservé des attaches. D’autres viennent d’une démarche philosophique et en sont toujours dépendant, mais la science ne les a pas examinés. Le soin que les scientifiques vouent à leurs définitions, à l’enchaînement des propositions, la rigueur que l’on voit à l’ensemble, sont-ils compatibles avec un laisser-aller généralisé de tout un pan du vocabulaire de base? Au reste, le système linguistique semble modifier la science et ne pas être innocent d’ontologie, l’individuation étant sûrement attachée à un système linguistique. Dans la mécanique quantique, devant la dissolution de l’objet classique, Bohr se pose en permanence la question<sup>7</sup>: comment parler d’une Nature “dont nous faisons nous-mêmes partie”, quand le langage naturel semble avoir été constitué sur une conception qui suppose l’indépendance par rapport à la réalité physique? Catherine Chevalley

6 Albert Einstein, *Lettre à Maurice Solovine*, Paris, 1956, p. 128.

7 Niels Bohr, *Physique atomique et connaissance humaine*, Paris, Gallimard, 1991, p. 81. Trad. E. Bauer et R. Omnès. Édition établie par C. Chevalley. Les citations du texte et certaines idées de ce commentaire sont empruntées à la remarquable Introduction de Catherine Chevalley.

l'a bien remarqué, la "complémentarité" permet de défaire le langage lui-même, mais à partir d'une conception "fondée sur l'idée que les mots sont autant de points de vue sur les choses et que leur simple arrangement suffit en fait à créer des fluctuations constantes de la séparation entre sujet et objet."

Face à cette situation, les scientifiques sont divisés. L'option simple, sans bourse délier, décrète la chose inintéressante, la réponse allant de soi puisque tout le monde s'accorde sur le sens de ces termes quotidiens. Ce laxisme ne laisse pas de m'étonner. Alors que la science dévoile des mondes "qui ne prolongent plus notre intuition, des mondes sans conformité avec nos habitudes de pensée quotidienne"<sup>8</sup>, la pensée se raccroche désespérément au passé, et c'est par les mots, anciens, qu'elle le fait, mais ces mots perdent pied devant le nouveau et l'indicible. Ils ont conservé les images grossières de leur autrefois, quand les mondes étranges auxquels on les applique ne sont peut-être pas faits pour eux<sup>9</sup>

En ce qui regarde l'emploi de la langue naturelle en physique, Bohr est un bon exemple: les énoncés en langue naturelle<sup>10</sup> occupent chez lui une place essentielle; la question épistémologique est centrale et elle constitue de son avis le fond même du différend qui l'oppose à Einstein. Le vocabulaire philosophique est omniprésent et il l'emprunte clairement à l'"Erkenntnistheorie" allemande du XIX<sup>e</sup> siècle<sup>11</sup>

Je résume: la science a besoin pour s'exprimer d'un métalangage dont le vocabulaire est emprunté à la langue naturelle ou à la langue philosophique. Il paraît raisonnable de soumettre ces termes à un traitement équivalent à celui des termes proprement scientifiques.

### Influence de la Weltanschauung du chercheur sur son épistémologie

La position du savant devant les grandes interrogations philosophiques exerce elle aussi une influence décisive sur son épistémologie. Le croyant admet que l'esprit est l'oeuvre de Dieu, par conséquent miroir fidèle du Monde, adapté à lui, apte à en découvrir les secrets, fusse au prix d'une longue quête. L'univers

8 Hamburger, *op. cit.*, p. 2.

9 J. Hamburger voit des séismes voisins, quoique plus discrets dans les sciences biologiques (*La raison et la passion*, Seuil, Paris, 1984).

10 Bohr (Chevalley), *op. cit.*, p. 22.

11 *Ibid.*, p. 35 et 59.

est fait pour l'homme, les dés ne sont pas pipés et Dieu ne joue pas avec eux, en un mot, l'univers est intelligible. L'épistémologie se fonde sur la religion, avec qui elle entretient des relations privilégiées, la science devient à son tour apolo-gétique. Voici des exemples de ce principe d'intelligibilité du monde.

1. Newton considère ses postulats comme certains et cette certitude a une origine métaphysique, non empirique. La dispute Newton-Leibniz porte sur la place et la nature de l'influence de Dieu dans le fonctionnement du méca-nisme qu'il a lui-même créé.

2. Descartes fonde sa fausse loi de la conservation du mouvement sur l'invariabilité de Dieu.

3. Selon Kepler, l'homme est capable de pressentiments, d'intuitions, parce qu'il a été conformé à l'image de Dieu. Dans l'*Astronomia nova* (II, chap. 14)<sup>12</sup> il écrit : "Les observations se rangèrent du côté de mes idées préconçues, comme souvent auparavant" Cette affirmation est l'expression explicite de l'intelligibilité mise en nous par Dieu; il a jeté en nos âmes des semences de vérité, selon l'aphorisme préféré du grand rationalisme métaphysique.

Notons que cette croyance en l'intelligibilité de l'univers peut prendre une tournure mystique. Ou une tournure idéalistes, à l'image de la Naturphilosophie: "Si Kepler a découvert les lois de l'univers, c'est par une sorte de connivence, de parenté, de complicité avec la nature. Il n'a pas été seulement un observateur, en lui la Nature a parlé."<sup>13</sup>

La possibilité de représenter la Nature dans notre esprit est, en dehors de l'hypothèse déiste, quasi miraculeuse, si on peut dire! La perméabilité de la Nature à l'Esprit exprime un rapport qu'Einstein et à sa suite Granger qualifiaient "d'énigmatique"<sup>14</sup>

L'homme sort-il au contraire de la sélection naturelle, sans intervention divine, et l'on ne voit pas, dans ce contexte matérialiste, de raison pourquoi l'esprit serait adapté à l'univers. Comme disait Gusdorf, le retrait de Dieu impose la recherche de formes d'intelligibilité qui se justifient elles-mêmes, sans recours à la transcendance.

12 Cité dans Arthur Koestler, *Les somnambules. Essai sur l'histoire des conceptions de l'univers*, Paris, Calmann-Lévy, 1960, p. 336.

13 G. W. F. Hegel, *Les orbites des planètes*, Paris, Vrin, 1979, p. 111.

14 Voir Michel Paty, "Interprétation et construction dans le rapport des mathématiques à la physique", *Fundamenta Scientiae*, 10, 1989, p. 35-55.

## Arrière-plan philosophiques de la science

La pratique même de la science exige du savant qu'il ait pris position, au moins dans son for intérieur, sur des questions qui relèvent de la théorie de la connaissance. Je discuterai d'abord de situations relevant de la physique et je reviendrai ensuite plus spécifiquement sur des problèmes voisins dans le domaine des mathématiques.

A. Statut ontologique des entités de la physique (leur type de présence): quel est l'être sous l'apparence, quelle est l'identité sous le changement? c'est le vieux problème présocratique. Dans les lois de conservation de la physique, y a-t-il un être qui réellement se conserve? ou est-ce une tournure linguistique répondant à une exigence avant tout grammaticale, la forme de nos langues exigeant un sujet au verbe "conserver"? Cette interrogation sur le statut ontologique des entités de la physique se présente avec une acuité particulière dans notre temps où "la matérialité des choses semble parfois se dissoudre dans des équations"<sup>15</sup>

Le débat est ancien et remonte au moins au début de notre siècle. Pour s'en convaincre il suffit de relire les mémorables pages consacrées à la force par Ernst Mach ou à la masse par Henri Poincaré. A propos de la définition des concepts fondamentaux de la mécanique, ce dernier écrivait en 1902<sup>16</sup>:

"Mais comment mesurer la force, ou la masse? Nous ne savons même pas ce que c'est. (...).

Ces difficultés sont inextricables.

(...) nous sommes acculés à la définition suivante, qui n'est qu'un aveu d'impuissance: *les masses sont des coefficients qu'il est commode d'introduire dans les calculs.*"

On pourrait dire pareil pour l'énergie<sup>17</sup>

Le statut ontologique des entités physiques nous amène à un autre thème central de l'épistémologie de la physique et de la théorie de la connaissance, à savoir la possibilité d'appliquer les mathématiques, la découverte d'Uranus par le calcul étant l'exemple canonique. On est au coeur du mystère central de la

15 Bernard d'Espagnat, *A la recherche du réel*, Paris, Gauthier-Villars, 1979, p. 11.

16 Henri Poincaré, *La science et l'hypothèse*, Paris, Flammarion/Champs, 1968. Edition originale, 1902. Les citations proviennent des pages 118 et 123.

17 Henri Poincaré, *La science et l'hypothèse*, Paris, Flammarion/Champs, 1968. Edition originale, 1902. Les citations proviennent des pages 118 et 123.

théorie de la connaissance, pourquoi l'univers est-il intelligible, quelle est la raison de cette déraisonnable adéquation de l'esprit à l'univers<sup>18</sup>? De multiples questions gravitent autour du rapport des mathématiques à la réalité; j'en évoquerai une: les mathématiques parlent-elles de l'univers? On connaît la réponse négative du positivisme logique. La thèse rivale voit dans les mathématiques le langage même de la nature. Je l'illustre par ce qui est l'un de ses arguments les plus forts et qui est associé au célèbre théorème de la célèbre Emmy Noether (1881-1935). Il fonde les principes de conservation d'une quantité physique sur l'invariance formelle des lois de la physique; il établit l'existence de réalités physiques comme l'énergie, l'impulsion, le moment cinétique. Dans le cas des transformations euclidiennes, les grandeurs conservées ont une interprétation physique immédiate. On a par ce théorème un lien inattendu entre des lois physiques et la structure de l'espace. Tout semble se passer comme si les mathématiques étaient à l'origine de l'ontologie elle-même<sup>19</sup> On retrouve ici l'une des hypothèses "communes à toutes les ontologies naturelles traditionnelles: la permanence de l'être fondamental"<sup>20</sup> Il y aurait lieu de se pencher sur un autre aspect de l'ontologie qui a trait aux processus de mathématisation avec le problème de la parenté entre la forme mathématique et la réalité<sup>21</sup>

Pour clore ce point sur le statut ontologique des entités physiques j'ajoute ceci. Le liant apporté par notre esprit dans le dessein de compléter le tableau scientifique du monde peut être un principe, une substance, parfois impondérable et/ou immatérielle telle le calorique, l'éther de fameuse mémoire, pourquoi pas la gravitation, mais aussi une fiction mathématique. Je m'attarde un instant sur l'une d'elles, le point-matériel. Le point qui intervient en mécanique est celui du mathématicien. Or ce dernier sait bien que la seule façon sérieuse d'envisager le point est celle de Hilbert, par une définition implicite: il est ce qui satisfait à des relations. Donner une masse à une relation est une rude affaire, convenons-en. Le point matériel est au sens strict une chimère. Imaginons les biologistes plaçant à la base de leur axiomatique quelque chose comme un "point vivant"!

---

18 Il faut peut-être rappeler ici le mémorable titre d'un article de Wigner: "The unreasonable effectiveness of mathematics", que je préférerais quant à moi transformer en "La déraisonnable adéquation de l'esprit à l'univers."

19 Pour des détails sur le théorème de Noether, voir l'excellent article d'Alain Boutot, Le pouvoir créateur des mathématiques, *La Recherche*, n° 215, novembre 1989, p. 1340-48.

20 Voir Jacques Merleau-Ponty, Sur la distinction de M. B. D'Espagnat entre "objectivité forte" et "objectivité faible", *Fundamenta Scientiae*, Vol. 8, p. 323-30, 1987, p. 329.

21 *Ibidem*.

B. Réalité: Statut ontologique des entités et problème de la réalité sont inextricablement mêlés. Peut-on faire de la science sans hypothèses sur la réalité et celles-ci ne sont-elles pas métaphysiques?<sup>22</sup>. Nous avons tendance à attribuer une cause à nos perceptions, une réalité extérieure. La science saisit-elle cette réalité? On sait les réponses de Kant et de Comte. Dans la tradition platonicienne où il s'agit de "sauver les phénomènes", on distingue entre l'astronomie (ou les mathématiques) et la physique; la première ne saisit pas l'essence des choses célestes, elle se contente d'une image<sup>23</sup>, les hypothèses astronomiques étant des artifices destinés à rendre compte des apparences. Pour l'épistémologie réaliste, au contraire, les hypothèses sont conformes à la nature des choses. Voici un texte de Kepler qui ne laisse pas d'être clair à ce sujet<sup>24</sup>:

"La troisième partie du bagage de l'astronome est la Physique. (...). On ne doit pas, en effet, laisser aux astronomes l'absolue licence de feindre n'importe quoi sans raison suffisante. Il faut que vous puissiez donner des raisons probables des hypothèses que vous prétendez être les causes véritables des apparences."

Sur la question du statut ontologique, je rappelle une pensée profonde qui me semble peu connue. Elle émane de Jean Nicod, qui écrivait vers 1925<sup>25</sup>:

"Souvent, pour simplifier les lois, il faut compliquer les entités qu'elles relient; le savant ne le sait que trop bien. Il est vrai que cette divergence nous froisse et que nous tendons à l'effacer de notre rêve du monde: nous posons alors que les sens complexes qui obéissent à des lois simples recouvrent des êtres simples, dont nous n'avons aucune idée. Telle est l'énergie, telle est la matière, tel est l'intervalle de la théorie de la relativité, telles sont en général toutes les entités qui jouissent de la propriété idéalement simple d'invariance."

22 "Toute méthode scientifique implique une base métaphysique ou du moins quelques axiomes sur la nature de la réalité", écrivait Alexandre Koyré dans *Études d'histoire de la pensée scientifique*, Paris, TEL Gallimard, 1973, p. 68.

23 Pour des précisions sur cette question voir Pierre Duhem, *Essai sur la notion de théorie physique. De Platon à Galilée*, Paris, Vrin, 1990, p. 25.

24 *Ibid.*, p. 124.

25 Jean Nicod, *La géométrie dans le monde sensible*, Paris, PUF, 1962, p. 22.

Et encore à la page 33: “Y a-t-il un meilleur exemple de simplification des lois par complication des concepts?”

C. Sujet-objet: La science consiste en propositions qui portent sur l'univers et en même temps sur le sujet connaissant. La relation sujet/objet – le partage cartésien – est clairement de nature métaphysique. Dans la physique de notre temps cette relation est cruciale. Avant d'apprécier la valeur respective des différents systèmes élaborés par l'esprit, il convient d'examiner le fonctionnement de cet esprit, de déterminer dans quelle mesure il atteint la vérité. Si nous voyons les choses telles que notre tête les peint, écrivait Stendhal, il y a lieu de connaître cette tête.

Il y aurait lieu de s'arrêter dans ce chapitre consacré à l'arrière plan philosophique à la question du type d'objectivité à l'oeuvre dans la science, de manière notamment à analyser les illusions épistémologiques qui fondent parfois les idéaux scientifiques<sup>26</sup>. De s'arrêter aussi aux présupposés ontologiques, à toutes les “figures ontologiques” tels l'atome ou le milieu spatial continu, la *res extensa* de Descartes. De se pencher sur un autre aspect de l'ontologie qui a trait aux processus de mathématisation avec le problème de la parenté entre la forme mathématique et réalité. Cet arrière-plan philosophique implique selon l'expression de Jacques Merleau-Ponty des engagements métaphysiques lourds.

### **De quelques principes métaphysiques à l'oeuvre dans la science**

J'examine maintenant quelques principes engagés dans la construction de la science et qui ne sont pas strictement scientifiques: Il serait utile, je crois, de procéder à une analyse typologique et à une classification de ces principes. Je me contente d'un examen sommaire.

#### **Principes liés au principe d'intelligibilité**

##### **Principe de simplicité**

La Nature agit habituellement par les voies les plus ordinaires, les plus simples: telle est la formulation de Descartes de ce principe de simplicité.

a) Il est lié au principe d'intelligibilité: supposer la simplicité des lois c'est en effet admettre une complicité entre l'esprit et l'univers.

<sup>26</sup> Voir Merleau-Ponty, *op. cit.*, p. 327-8.



b) Il est un principe métaphysique en notre sens, soit un liant fourni par l'esprit, liant qui permet à la pensée scientifique de prendre son envol, et à l'homme de garder le moral. A la différence du principe d'inertie, par exemple, il n'est pas opératoire dans l'édification de la science.

c) Ce principe de simplicité revêt parfois un caractère purement pragmatique: nous sommes à la recherche de lois, mais nous hésitons entre de nombreuses possibilités et il n'y a pas de raison de commencer par les compliquées. L'hypothèse de simplicité de la nature est alors une simple règle méthodologique.

Ptolémée considère (4<sup>e</sup> chapitre du livre III de l'*Almageste*<sup>27</sup>) qu'il est "de beaucoup plus juste de choisir l'hypothèse des (...), qui est simple, puisqu'elle atteint le même but en admettant un et non deux mouvements." On voit bien ici le lien entre une hypothèse sur la réalité et la façon d'enquêter sur le monde.

Voici, sans commentaires, des citations qui illustrent le principe de simplicité.

"Il [Dieu] opère toujours de la manière la plus facile et la plus simple (...) il se réjouit de la simplicité et de la facilité (Galilée<sup>28</sup>).

Il y a un demi-siècle, on le confessait franchement et on proclamait que la nature aime la simplicité; elle nous a donné depuis trop de démentis. Aujourd'hui on n'avoue plus cette tendance et on n'en conserve que ce qui est indispensable pour que la science ne devienne pas impossible (Poincaré<sup>29</sup>).

Jusques-là, les formules compliquées qui avoisinent une formule simple étaient censées nous être imputables, l'imperfection de nos mesures masquant la simplicité essentielle de la loi. Désormais, on doit convenir que c'est la formule simple qui est de nous, forgée pour notre commodité, les choses étant, dans la nature, bien plus compliquées (Robert Blanché)."

A propos de simplicité Bachelard écrit<sup>30</sup>:

27 Cité ici d'après *Avant, avec, après Copernic. La représentation de l'univers et ses conséquences cosmologiques*, XXXI<sup>e</sup> Semaine de synthèse 1-7 juin 1973, A. Blanchard, 1975, p. 33.

28 Lettre à Morino, cité in Paul Poupard (sous la direction de), *Galileo Galilei, 350 ans d'histoire, 1633-1983*, Tournai, Desclée International, 1983, p. 145-6.

29 Poincaré, *op. cit.*, p. 145.

30 Gaston Bachelard, *Essai sur la connaissance approchée*, Paris, Vrin, 1928, p. 93.

“Les rapports entre la simplicité et la vérité des lois naturelles ont été souvent discutés sans que souvent on ait pu définir avec précision les deux concepts qu’on prétendait réunir. La simplicité entre autres est un concept compliqué. On est moins porté que jadis à trouver dans la simplicité d’une loi une preuve de sa vérité, mais en se plaçant à un point de vue pragmatique, on préfère la moins compliquée des lois qui expliquent aussi bien un même phénomène.”

Ce que dans le même ouvrage (p. 107) Bachelard nomme la “pensée proportionaliste” relève aussi d’un quelconque principe de simplicité.

### Principe de correspondance. Signatures

La mystique néoplatonicienne se fonde sur la possibilité d’une union intime et directe de l’esprit au principe fondamental de l’être. Elle exprime en quelque sorte la croyance en une harmonie des parties. En restant chez elle – Rougier disait: sans bourse délier – la pensée peut atteindre l’intelligible, les liens logiques des propositions dans les théories reflètent les liens entre les choses. Entre le dedans et le dehors, des relations s’établissent, des signes répondent aux signes. Comme l’écrit Foucault<sup>31</sup>, il faut que les similitudes enfouies soient signalées à la surface des choses. Le monde du similaire est un monde marqué. Il poursuit en citant Paracelse: “Ce n’est pas la volonté de Dieu que ce qu’il crée pour le bénéfice de l’homme et ce qu’il lui a donné demeure caché (...). Et même s’il a caché certaines choses, il n’a rien laissé sans signes extérieurs et visibles avec des marques spéciales.” Un exemple fort et spectaculaire de ce principe de correspondance, l’exemple emblématique, se trouve chez Kepler; il est bien connu mais il a conservé sa valeur instructive. Avant d’en donner une sommaire description, un rappel de certains grands axes de l’épistémologie képlérienne s’impose. Elle est par endroit proche de la mystique néoplatonicienne. Cette vision autorise le grand rêve des *Harmonices mundi*, qui est de dévoiler le secret de l’Univers dans une vaste synthèse de géométrie, de musique, d’astrologie et d’astronomie<sup>32</sup>. On peut semblablement aller à la découverte des causes; ainsi Kepler écrit dans son *Mysterium Cosmographicum*<sup>33</sup>: “Et il y avait alors trois choses

31 Michel Foucault, *Les mots et les choses*, Paris, Gallimard, 1966, p. 41.

32 Voir Koestler, *op. cit.*, p. 411.

33 Jean-Pierre Verdet, *Astronomie et Physique*, Paris, Larousse/Textes essentiels, 1993, p. 310.

particulièrement dont je cherchais avec obstination pourquoi elles étaient ainsi et non pas autrement, à savoir: le nombre, la grandeur et le mouvement des orbites.” Selon l’ancienne tradition pythagoricienne dont il se réclame, les médiateurs sont la figure et le nombre. Partout existent les vestiges du rôle de la géométrie dans la formation du monde (forme des feuilles, écailles des poissons, poils des animaux terrestres et même la surface sexangulaire des flocons de neige). L’idée d’observer dans la matière des correspondances géométriques où se lit l’oeuvre de Dieu revient comme un leitmotiv chez Kepler. Je donne deux citations à l’appui de cette thèse, par ailleurs bien connue<sup>34</sup>

“(…) [Il faut comprendre que], puisque Dieu a tout créé selon les normes de la quantité dans l’univers entier, une intelligence a aussi été donnée à l’homme qui soit capable de percevoir de telles choses. En effet, de même que l’oeil fut créé pour [voir] les couleurs, les oreilles pour [entendre] les sons, de même l’esprit de l’homme fut créé pour comprendre les quantités (...).

Je dis quant à moi, que Dieu lui-même, qui dans son infinie bonté ne pouvait rester oisif, a joué aux signatures des choses et a imprimé son image dans le monde. En sorte que c’est une de mes pensées que toute la nature et la splendeur céleste est symbolisée dans la géométrie.

Mais ce qui est constant, c’est qu’elle [la Terre] reproduit dans les gemmes et les minéraux les cinq corps réguliers de la géométrie. L’oeuvre, en effet, témoigne de l’ouvrier.”

Les polyèdres réguliers, encore appelés figures cosmiques ou solides platoniciens, jouissent d’une particularité exceptionnelle; ils sont exactement cinq, à la différence de leurs homologues en dimension 1, qui sont une infinité. Les planètes, elles, sont au nombre de six; la correspondance du dedans et du dehors, qui marque ici l’intelligibilité, suggère que ces figures et leurs éléments métriques s’expriment dans l’univers cosmique: c’est le fameux échafaudage de Kepler, les relations métriques des polyèdres se retrouvant dans les distances planétaires. Prenons les choses dans l’autre sens: les planètes, marques de Dieu dans le Monde par excellence, sont toutes chargées de signes; elles sont autant de symboles, dont l’autre moitié, la contrepartie est dans l’esprit. L’âme humaine

<sup>34</sup> Johann Kepler, *L'étranne ou la neige sexangulaire*, Paris, CNRS/Vrin, 1975. Traduction critique par Robert Halleux. La citation est tirée de l'introduction de Halleux, p. 29-30.

par son instinct géométrique a reconnu les signatures mises à son intention. Voici un texte de Kepler lui-même<sup>35</sup>:

“– Pourquoi appelles-tu ces cinq [figures] les plus belles et les plus parfaites?”

– Parce qu’elles imitent l’image sphérique de Dieu autant qu’une figure formée avec le droit peut le faire, parce qu’elles ordonnent tous leurs angles dans le même volume sphérique et qu’elles peuvent être inscrites dans un tel volume; et, comme la surface sphérique est partout égale à elle-même, ainsi les faces de chacune de ces figures sont égales aux autres et toutes peuvent être inscrites dans un seul et même cercle, tous leurs angles étant égaux.”

La prescription platonicienne du mouvement circulaire des corps célestes est elle aussi l’expression d’une croyance en la correspondance entre l’esprit et l’univers. Loin d’être initiée par l’expérience, elle est le fruit d’une métaphysique particulière aux yeux de laquelle la perfection des corps célestes implique celle de la trajectoire, les perfections s’appellent et se répètent.

Le principe de correspondance présente de nombreux avatars, parmi lesquels il convient de citer celui qui sert de base aux pratiques de la magie imitative et sympathique, à savoir l’influence du semblable sur le semblable. D’une manière générale, comme le disait Blanché, à partir de l’ordre et de la connexion des idées, on retrouve l’ordre et la connexion des choses; il y a une similitude profonde, peut-être même une identité, entre les liens logiques des propositions à l’intérieur des théories, d’une part, et les liens entre les choses de l’autre.

### **La nature ne fait rien en vain**

Le règle voulant que “la nature ne fait rien en vain” est de caractère méthodologique, et exprime indirectement une vision déiste, parfois animiste, et anthropomorphique: l’homme projette ses aspirations dans l’univers. D’inspiration métaphysique elle est devenue – pour la plus grande joie de l’apologétique – une loi de la physique sous la forme du principe de moindre action. A propos des axiomes de ce genre Jean-Baptiste Biot (1774-1862) écrivait<sup>36</sup>: “Ne

35 Hallyn, *op. cit.*, p. 206.

36 Biot, *op. cit.*, p. 379.

sont-ce pas là des généralités artificielles dans lesquelles nous faisons marcher la nature aux allures de notre esprit?"

### **Les principes unitaires.**

Il s'agit soit de la réduction du réel à un petit nombre d'éléments, soit de la réduction de l'ensemble des forces de la nature à une force unique et primordiale, dont elles seraient les métamorphoses. Cette quête nous vient du matin de la pensée occidentale et elle est à l'origine de caractère métaphysique. La volonté en ces temps très anciens de ramener l'infinie diversité du monde à quelques éléments simples, de spéculer sur la nature profonde des choses, sur ce qui sous les apparences constitue leur principe, ne cessera pas d'étonner. Le coup de force d'Euclide parvenant à donner de la géométrie une présentation d'allure axiomatique s'inscrit dans le même projet. Dans les sciences de la vie, les premières manifestations positives de l'esprit transformiste remontent aux années 1800 et coïncident avec l'apogée du romantisme allemand et de la Naturphilosophie. Envisager le règne animal comme issu d'un ancêtre unique par transformations successives est l'expression d'un principe unitaire, proche parent de celui à l'oeuvre en chimie ou en physique.

### **Principes métaphysiques directement engagés dans la construction de la science**

#### **Principe d'inertie**

Le principe d'inertie donne le change parce qu'il s'exprime dans le langage même de la science. On peut en faire un théorème si l'on modifie convenablement la base axiomatique de la mécanique, ce qui n'est pas vrai des principes nous venant de la théorie de la connaissance. Le principe d'inertie n'est pas vérifiable par l'expérience, même s'il traduit un passage à la limite de situations quotidiennes: où trouver un point matériel? où trouver un point matériel isolé? comment vérifier dans un univers vide la rectilinéarité du mouvement de ce point? à quelle horloge rapporter ce mouvement? Sa justification tient d'abord à la pertinence de ses conséquences lointaines, ensuite peut-être au principe de raison suffisante. Il est un liant suggéré par la nature mais affirmé par notre esprit. Comme disait Poincaré des axiomes, l'expérience nous guide dans ce choix mais ne nous l'impose pas.

Dans une typologie plus fine et plus naturelle, le principe d'inertie est à ranger dans la classe de ceux qui traduisent un passage à la limite. Je cite à ce

propos un intéressant texte du mathématicien et épistémologue Jules Tannery (1848-1910)<sup>37</sup>:

“Quelques-uns d’entre eux [concepts], et notamment les concepts scientifiques, sortent d’un passage à la *limite*, dont l’étrange audace m’effraie depuis longtemps. Le mathématicien raisonne sur des points, des droites et des plans qui n’existent que dans sa pensée, sur des solides parfaits, sur des fluides parfaits; la perfection de ces solides et de ces fluides est impossible, contradictoire avec ce que nous savons de la matière. Le physicien raisonne sur des systèmes isolés; il ne peut y avoir de pareils systèmes. Le chimiste raisonne sur des corps purs; il n’y a pas de corps purs.

Tout d’abord, ces concepts nous sont assurément suggérés par des objets réels; mais nous n’y parvenons qu’en poussant jusqu’à l’infini quelque propriété que nous avons observée (...).

Dire que ces concepts limites préexistent dans notre esprit, font partie du dessein primitif qui est le résidu de la vie ancestrale, vous semblera peut-être exagéré; mais, au moins, une certaine tendance à la formation de ces concepts limites me paraît inhérente à notre pensée telle qu’elle est par elle-même (...).”

### **Indépendance par rapport à la position de l’observateur**

Les lois de la nature ne dépendent pas de la position de l’observateur, pas plus que du moment de l’observation. Il n’y a pas d’observation, ni de situation physique qui puisse nous mener à ces deux principes ou les justifier. Ils sont peut-être, eux aussi, des rejetons lointains de l’idée de raison suffisante. Voilà des principes typiquement métaphysiques au sens entendu dans cet exposé et qui ne sont même pas suggérés par l’expérience.

Les sciences de la vie offrent elles aussi un beau champ d’investigation en ce qui regarde le recours à des postulats métaphysiques. Simplement dans les exposés de ce colloque j’en ai noté deux. A propos du sida d’abord: il faut une quantité donnée d’ennemis au genre humain (Grmek, cité par Anne Fagot-Largeault). Et puis dans la communication de Bernadette Bensaude-Vincent, l’idée d’une thérapie fondée sur la possibilité de combattre le mal par le mal.

---

<sup>37</sup> Jules Tannery, *Science et philosophie*, Paris, Félix Alcan, 1912, p. 53.

## L'exemple de la Naturphilosophie

Le mouvement connu sous le nom de “Naturphilosophie”<sup>38</sup> contemporain et allié du romantisme allemand, offre un cas précis de symbiose entre un projet métaphysique et une recherche scientifique: une conviction métaphysique et spéculative est érigée en principe, qui illumine et conduit toute la démarche du savant. Nos esprits d’aujourd’hui sont décontenancés par les principes qui fondent la Naturphilosophie et ils le sont davantage en apprenant que des découvertes authentiques et notoires ont été réalisées sous sa bannière. Après une ère de mécanisme rigide et de mathématisation systématique, des poètes, des philosophes, des physiciens se rebellent et préconisent de renouer l’ancienne alliance avec la Nature, de lui rendre son âme, de la voir de nouveau comme un tout organique et une réalité vivante, pour y déchiffrer des messages et des symboles. L’homme ne fait qu’un avec la Nature, pour la mieux connaître, il lui faut l’aimer. Avant la découverte de la pile, Friedrich Schelling, l’un des grands-prêtres du mouvement, affirmait qu’une force, variée de différentes manières, se manifestait par la lumière, l’électricité, etc. Il avait des partisans chez les physiciens et leur programme de recherche consistait à reconnaître l’identité des forces naturelles par le biais de la spéculation et à la mettre en évidence par l’expérience. Cette grande idée de Schelling a pénétré dans la science active. Johann Wilhelm Ritter (1776-1810), que ses amis considèrent comme le génie de la nouvelle physique et qui est totalement inféodé au mouvement de la Naturphilosophie, réalise plusieurs découvertes de premier plan. Hans Christian Oersted (1777-1851), qui a étudié à fond et qui accepte les doctrines des métaphysiciens allemands, partage les convictions de son ami Ritter et sa découverte en 1820 de l’électromagnétisme il l’effectue dans le contexte de la Naturphilosophie, lui reconnaît pleinement sa dette.<sup>39</sup>

38 On trouvera une brève mais précieuse présentation de la Naturphilosophie dans: Pierre Thuillier, “De la philosophie à l’électromagnétisme: le cas Oersted”, *La Recherche*, 219, mars 1990, p. 344-51.

39 Pour mesurer à sa juste valeur l’influence de la Naturphilosophie sur la découverte de l’ultraviolet ainsi que sur celle de l’électromagnétisme, il faut lire les mémoires des auteurs eux-mêmes:

Johann Wilhelm Ritter, “Expériences sur la lumière, communiquées par Oersted”, *Journal de physique, de chimie et d’histoire naturelle et des arts*, T. LVII, Frimaire, an XII (1804), p. 409-11.

Hans Christian Oersted, Considérations sur l’électromagnétisme, *Journal de physique, de chimie et d’histoire naturelle et des arts*, 93, 1821, p. 161-3.

A l’instar de tous les mouvements mystiques – je prends le terme dans un sens non péjoratif – la Naturphilosophie devait dans certains de ses aspects privilégier le nombre et y voir le médiateur par excellence entre la pensée et le monde. C’est en partie dans cette perspective qu’il convient de situer la fameuse “loi” de Titius-Bode ou la machinerie polyédrale de Kepler; leur réussite

La découverte du principe de la conservation de l'énergie, vers 1840 – la découverte du siècle comment diront certains des plus grands physiciens de l'époque – s'inscrit naturellement dans ce contexte de la Naturphilosophie. La croyance en une force sous-jacente unique, impérissable – métaphysique puisque rien n'en pouvait justifier l'existence – semble bien avoir favorisé en l'esprit des pionniers de ce principe, Mayer, Joule, von Helmholtz, le développement d'une idée capable de devenir celle de la conservation de l'énergie<sup>40</sup>

### Mathématiques et théorie de la connaissance

J'aimerais terminer cette communication par l'examen d'un cas particulièrement éclairant de collaboration entre une théorie de la connaissance et une situation mathématique, une situation où le choix de la bonne théorie de la connaissance me paraît décisif<sup>41</sup>

Une épistémologie mathématique nouvelle s'insinue timidement, souvent à l'insu des protagonistes, dans le dernier quart du XIX<sup>e</sup> siècle. Si elle occupe presque immédiatement le terrain de la pratique du mathématicien, sa mise en examen philosophique tarde et est peut-être le fait de Schlick, puis du Cercle de Vienne. Rougier, qui est l'un des premiers en France à propager le positivisme logique, voit dans le surgissement de cette épistémologie mathématique une authentique révolution. J'emprunte à son *Traité de la connaissance* de 1955 une ca-

---

provisoire devait exercer en retour un effet de renforcement sur les principes qui les fondent. Les démarches de ce type sont légion; j'en citerai une; elle concerne nos deux protagonistes et a trait à une prédiction qui laisse pantois (mais, disons-le clairement, cela ne vise pas à établir une quelconque foi dans ce qui deviendra par la suite une simple superstition). Dans une lettre à Oersted du 22 mai 1803 (*Correspondance de H. C. Oersted avec divers savants*, ed. M. C. Harding, Copenhagen, 1920, p. 35-6), Ritter observe que les étapes importantes dans le domaine de l'électricité sont régies par la position de l'écliptique correspondant à une inclinaison maximale; après avoir indiqué quelques-unes de ces coïncidences, il se risque sur cette base à des pronostics. Il annonce alors de grandes découvertes en électricité pour l'année 1819 2/3 ou 1820. C'est précisément en 1820 que son correspondant Oersted découvre l'électromagnétisme. Si!

40 Pour des précisions sur les relations entre Naturphilosophie et découverte du principe de conservation de l'énergie, voir : Thomas S. Kuhn, "Energy Conservation As Simultaneous Discovery", in *Critical problems in the history of science*, edited by Marshall Clagett, Madison, The University of Wisconsin Press, 1962, p. 321-57.

41 On trouvera dans la dernière partie de cette communication des idées développées dans un exposé fait au Colloque "Histoire et Philosophie de l'Axiomatique", organisé à Zinal (Suisse) par les Universités de Genève et de Nantes du 15 au 20 septembre 1997.



ractérisation de ce qu'il nomme l'ancienne, respectivement la nouvelle théorie de la connaissance:

“Au cours du XIX<sup>e</sup> siècle et dans la première moitié du XX<sup>e</sup> s'est opérée une révolution profonde dans la théorie de la connaissance grâce aux géomètres, aux algébristes, aux physiciens, aux logisticiens, à l'insu ou à l'encontre des philosophes professionnels. Cette révolution a consisté dans une transformation totale de l'idée que les Philosophes-géomètres de la Grèce, les Scolastiques, les Rationalistes de l'âge classique, les Criticistes, les Idéalistes s'étaient fait de la distinction entre les vérités formelles et les vérités empiriques, entre les mathématiques et les sciences de la nature. Elle a abouti à la ruine totale de la croyance en l'existence de vérités synthétiques a priori, inconditionnellement nécessaires, indépendantes de toute expérience, que nous saisirions par une faculté sui generis, la raison, distincte de l'entendement empirique.<sup>42</sup>

La théorie classique de la connaissance: consistait à distinguer deux sortes de connaissances: les connaissances rationnelles, qui étaient *a priori*, universelles et nécessaires, fondées sur des principes évidents par eux-mêmes; et les vérités empiriques, *a posteriori*, singulières, révisibles et contingentes, fondées sur l'observation et l'expérience. (...)

Les Rationalistes envisagent les sciences déductives comme des systèmes de propositions apodictiquement nécessaires, qui reposent sur des notions indéfinissables et sur des propositions indémonstrables par nature, mais qui s'imposent à notre esprit en vertu de leur évidence. La démonstration propage la certitude des principes propres de la théorie à leurs conséquences les plus éloignées.<sup>43</sup>

(...) non seulement les principes sont vrais par eux-mêmes, mais on prend conscience de cette nécessité dès qu'on en appréhende les termes. Ainsi les principes des sciences déductives sont des propositions évidentes immédiatement et par eux-mêmes [sic] et naturellement connues, parce que la lumière na-

42 Louis Rougier, *Traité de la connaissance*, Paris, Gauthier-Villars, 1955, préface.

43 *Ibid.*, p. 309-10.

turelle de notre raison, sitôt qu'elle s'applique à leurs termes, en aperçoit la convenance."<sup>44</sup>

Les lignes suivantes, empruntées à un article d'Henri Cartan, illustrent bien le passage d'une épistémologie à l'autre<sup>45</sup>:

“Effectivement, on a cru longtemps qu'il y avait, en mathématiques, des êtres préexistants auxquels venaient s'appliquer les calculs de la logique, mais situés eux-mêmes en dehors de la logique à laquelle ils seraient irréductibles; et il semble bien que cela ait été l'opinion de Hilbert lui-même. Or nous allons montrer, à la suite de J. Dieudonné, que cette croyance doit être abandonnée: une théorie mathématique n'est pas autre chose qu'une théorie logique déterminée par un système d'axiomes [c'est-à-dire de relations construites à partir des relations élémentaires, et posées comme vraies]; les êtres de la théorie sont définis *ipso facto* par le système d'axiomes, qui engendre en quelque sorte le matériel auquel vont pouvoir s'appliquer les propositions vraies.”

Robert Blanché résume avec beaucoup d'à-propos les éléments du problème qui nous retient<sup>46</sup>:

“On voit alors se dissocier les deux aspects de la vérité géométrique, jusque-là intimement mêlés dans une union étonnante. Un théorème de géométrie était à la fois un renseignement sur les choses et une construction de l'esprit, une loi physique et une pièce d'un système logique, une vérité de fait et une vérité de raison.”

La révolution annoncée par ces citations est le fait de quelques événements majeurs de la pensée mathématique du XIX<sup>e</sup> siècle. La caractéristique commune à ces événements est constituée par l'impression d'étrangeté produite

---

<sup>44</sup> *Ibid.*, p. 318.

<sup>45</sup> Henri Cartan, “Sur les fondements logique des mathématiques”, *La Revue scientifique*, 81<sup>e</sup> année, janvier 1943, p. 1-11, p. 8.

<sup>46</sup> Robert Blanché, *L'axiomatique*, Paris, PUF, 1970, p. 14.

par des entités, qu'une mathématique par ailleurs classique se voyait contrainte de proposer, bien que leur statut ontologique lui en demeurât caché. A n'en pas douter, ces travaux marquent la ligne de partage entre deux théories de la connaissance et subséquemment entre deux épistémologies des mathématiques. On peut au reste se demander si l'intégration de cette épistémologie au paysage mental des mathématiciens est bien réalisée aujourd'hui. Son ignorance, sa méconnaissance plus tard est selon moi à l'origine de malentendus graves – en particulier chez les enseignants – malentendus qui empêchent une saine compréhension du statut et de la nature de la géométrie. Comme l'écrit encore Rougier<sup>47</sup>:

“Une fois posées les conventions initiales qui donnent naissance aux entités mathématiques (...) notre esprit découvre après coup que ces nombres, que ces figures, qu'il croyait connaître parfaitement du fait même de leur avoir donné l'être par convention, présentent des propriétés imprévues qu'il n'arrive pas à rattacher d'emblée aux conventions premières qui constituent leur état civil. Nous éprouvons alors le sentiment d'étrangeté de la poule qui vient de couvrir un canard.”

### Exemples du Grand Malentendu

Voici un texte de Joseph Fourier (1768-1830) exemplaire de l'ancienne épistémologie de la Géométrie; mais les exemples de ce genre sont légion et on les rencontre chez les plus grands:

“On ne peut se dispenser de fonder la démonstration sur des propositions antérieures non démontrées. C'est le propre de toute démonstration. La question consiste à n'admettre comme propositions antérieures que celles qui sont évidentes d'elles-mêmes et dérivent évidemment de notions communes. (...). La géométrie ou la science de l'espace est une science physique qui suppose la notion de l'espace et la connaissance de ses propriétés telle que la donne à tous les hommes une expérience constante.

On ne peut se dispenser d'établir la géométrie et la mécanique sur des propositions non démontrées mais que l'on con-

47 Rougier, *op. cit.*, p. 343.

sidère comme des faits évidents et dont la connaissance appartient à tous les hommes.<sup>48</sup>

On trouve dans les écrits des géomètres grecs deux propositions fondamentales qu'ils ont admises sans démonstration. L'une est le 5<sup>e</sup> postulat du premier livre d'Euclide. L'autre consiste à supposer que deux forces qui agissent dans le même sens perpendiculairement à une même droite ont pour résultante une force double parallèle et agissant au milieu de la droite.<sup>49</sup>

Le second lemme qui se rapporte à la statique peut être démontré rigoureusement. J'ai donné autrefois cette démonstration. (...). On se fonde dans la démonstration précédente sur les propriétés des lignes parallèles et par conséquent on suppose établie la vérité du lemme d'Euclide. Réciproquement si l'on admet que la résultante (...) on en conclut rigoureusement que la somme des trois angles d'un triangle équivaut à deux droits (...). Il s'ensuit que les deux lemmes non démontrés par les anciens se réduisent à un seul (...).

On peut alléguer que cette considération est étrangère aux éléments de la géométrie et que l'exposition de cette dernière science doit être indépendante de toute notion de l'équilibre. Mais cette objection purement didactique n'empêche que la démonstration ne soit très claire et incontestable ce qui est le premier caractère de toute preuve."<sup>50</sup>

Pour triompher de l'impedimenta placé en travers de la théorie des parallèles il faut se débarrasser de la glu où l'on s'est enlisé à force de négliger l'existence de deux mondes géométriques, aux relations ambiguës, insidieuses. On aurait tort de déduire de leur filiation chronologique une sorte de solidarité nécessaire, une liaison intime. Le premier est figé par nature, incapable d'évolution, tandis que le second est seulement bordé par l'exigence de non contradiction. La compréhension de ce dualisme strict s'opère tardivement dans le XIX<sup>e</sup> siècle. Les appels répétés à la liberté de Cantor, dont la coexistence avec un platonisme par ailleurs avoué n'est pas sans faire problème, serviront puissamment cette

---

48 Jean-Claude Pont, *L'aventure des parallèles. Histoire de la géométrie non euclidienne. Précurseurs et attardés*, Berne, Peter Lang, 1986, p. 537.

49 *Ibid.*, p. 555.

50 *Ibid.*, p. 562.

compréhension. Deux paradigmes différents administrent ces deux mondes. La géométrie du monde sensible, géo-métrie à proprement parler, est sous la dépendance d'une épistémologie de l'évidence, alors qu'une épistémologie de la consistance régit la géométrie abstraite. La cohabitation inanalysée de ces paradigmes depuis le temps d'Euclide est un fait très curieux de l'histoire de la pensée.

Dans l'exemples précédent nous avons rencontré un savant tout entier gouverné par la théorie classique de la connaissance, un savant que la possibilité d'une épistémologie différente pour la géométrie n'avait pas effleuré, un savant pour qui les entités de la géométrie disent fidèlement l'être du monde. Puis, vers le début du XIX<sup>e</sup> siècle et pour des raisons que nous connaissons mal, apparaît une tendance nouvelle qui exige des démonstrations de l'analyse qu'elles soient, selon le mot de l'époque, analytiques.

Pour l'épistémologie de l'évidence, les axiomes sont l'expression dans le monde des signes de propriétés dont on a une conscience immédiate. La vérité de l'axiome réside en son évidence. Puis la pensée mathématique voit fleurir des objets qui, dans leur généralité abstraite, ne sont plus à même de bénéficier d'un fondement existentiel extérieur à elle. Partout l'intuition – du moins le croit-on – est battue en brèche. Si les entités du géomètre ne sont plus le reflet d'objets du monde sensible, si leur existence ne s'impose pas à nous par un signe venant du dehors, il convient de leur trouver un statut différent. Comme le notait Gusdorf dans un autre contexte: le foyer de toute vérité à partir duquel s'opère la propagation de la certitude a été déplacé.

Impressão acabamento  
**Cromosete**  
GRÁFICA E EDITORA LTDA.  
Rua Uhland, 307 Vila Ema  
Cep: 03283-000 - São Paulo - SP  
Tel/Fax: 011 6104-1176



## Informations épistémologiques

- La revue est publiée par la maison d'édition *Discurso Editorial* (São Paulo, Brésil) sous l'égide d'un accord de collaboration entre l'Université de São Paulo (Universidade de São Paulo, USP) et l'Université Paris 7-Denis Diderot.
- La revue publie 4 numéros par an, dont certains pourront être doubles, notamment les numéros thématiques.

### Instructions aux auteurs

- Soumission des articles: les articles soumis doivent être originaux et rédigés en langue française ou anglaise, avec un résumé dans les deux langues. Les articles doivent être adressés en 4 exemplaires sur papier et sur une disquette (équivalent Word MacIntosh ou Word for Windows de PC). Ils sont lus par 2 rapporteurs. La décision de publication est prise par la rédaction au vu des rapports de lecture.
- Les auteurs recevront 20 tirés à part, ou davantage s'ils en passent commande au plus tard au moment de la correction des épreuves.

## Information épistémologiques

- Epistemologues is published by *Discurso Editorial* (São Paulo, Brazil) as part of an established agreement between the University of São Paulo and the University of Paris 7-Denis Diderot.
- The journal publishes 4 issues per year; thematic issues may be in double issue.

### Instructions for authors

- Manuscript submission: authors should send four copies of the original manuscript and a diskette (Word for Windows or Word for Macintosh) in French or English with abstracts in both languages. Two referees will read the articles. Their acceptance for publication by editors takes these reports into account.
- Authors will receive 20 offprints of the article. Further offprints must be ordered before final proofreading begins.

## ABONNEMENT / SUBSCRIPTION

	institutions	particuliers/individuals
numéro simple/single issue	US\$ 27	US\$ 18
numéro double/double issue	US\$ 54	US\$ 36
abonnement/subscription	US\$ 108	US\$ 72

Equipe REHSEIS  
Boite/Box 7064  
Université de Paris 7 – D. Diderot  
2, Place Jussieu  
F-75251 – Paris – Cedex 05  
France

DEPARTAMENTO DE FILOSOFIA  
FFLCH-USP  
Av. Prof. Luciano Gualberto, 315  
Sala 2001  
05508-900 – São Paulo  
SP – Brazil



# TABLE DES MATIÈRES/CONTENTS:

JEAN SEIDENGART ET JEAN-JACQUES SZCZECINIARZ

*Introduction*

JACQUES MERLEAU-PONTY

*Questions philosophiques de la cosmologie*

MAURICE CAVEING

*Le chaos du fond du ciel selon Anaxagore*

BERNARD BESNIER

*La droite et la gauche de l'univers selon Aristote*

ROSHDI RASHED

*Astronomie et mathématiques anciennes et classiques*

RÉGIS MORELON

*Ibn Al Hyatam (XI<sup>e</sup> siècle) et ses arguments cosmologiques*

PIERRE SOUFFRIN

*La théorie des marées de Galilée n'est pas une théorie fausse*

CHRISTIANE VILAIN

*Espaces et mondes au XVII<sup>e</sup> siècle*

MICHEL BLAY

*Infini, géométrie et mouvement au XVII<sup>e</sup> siècle*

JEAN SEIDENGART

*Kant et la cosmogonie du Beweisgrund 1763:  
une nouvelle version de la Théorie du ciel?*

JEAN EISTENSTAEDT

*La cosmologie: un espace pour penser la relativité générale*

MICHEL PATY

*Cosmologie et matière quantique: convergences conceptuelles*

JEAN-JACQUES SZCZECINIARZ

*Sur la signification conceptuelle de l'intervention  
des nombres complexes dans la cosmologie*

MARC LACHÈZE-REY

*Cosmologies de la fin du XX<sup>e</sup> siècle*

JEAN SALLANTIN ET GERMANA MENEZES DA NÓBREGA

*Les temps, la pensée et le calcul:  
une stratification des calculs pour fonder une cosmologie*

CATHERINE CHEVALLEY

*Objectivité et intersubjectivité chez Bohr*

JEAN-CLAUDE PONT

*Science et philosophie sont-elles des sœurs ennemies?*

ISSN 1517-7823

9 771517 782000