



*Sous la direction*  
d'Aurélien Barrau  
et de Daniel Parrochia

[https://t.me/livres\\_2020](https://t.me/livres_2020)

# Forme et origine de l'Univers

Regards philosophiques  
sur la cosmologie

UniverSciences



DUNOD

**LA** Recherche

*Sous la direction*

d'Aurélien Barrau et de Daniel Parrochia



# FORME ET ORIGINE DE L'UNIVERS

## Regards philosophiques sur la cosmologie

Destiné à tous les esprits curieux, cet ouvrage présente une réflexion plurielle sur la cosmologie.

L'enquête est philosophique et scientifique : de Platon à la théorie des cordes, en passant par la relativité générale et le Big-bang, elle chemine à travers les grandes interrogations qui jalonnent notre description de l'Univers. Le modèle standard de la cosmologie physique y est présenté en profondeur, jusque dans ses incomplétudes et ses contradictions.

La porte est ouverte sur les théories les plus spéculatives, au cœur de l'activité de recherche. Les conséquences et ouvertures proprement philosophiques sont abordées suivant un double prisme historique et épistémologique.

### Les auteurs

Julien Lesgourgues, Jean-Pierre Luminet, Sylvie Vauclair, François Vannucci, Philippe Brax, Michel Cassé, Marc Lachièze-Rey, Pierre Vanhove, Julien Grain, Guillaume Duprat, Luc Brisson, Jean Seidengart, Nicolas Prantzos, Daniel Parrochia, Christian Godin, Étienne Klein, Jean-Jacques Szczéciniaż, Gérard Chazal, Michel Paty et Aurélien Barrau.

AURÉLIEN BARRAU est astrophysicien, maître de conférences à l'Université Grenoble-1 et membre de l'Institut Universitaire de France.

DANIEL PARROCHIA est philosophe et professeur à l'Université Lyon-3.


 MATHÉMATIQUES


 PHYSIQUE


 CHIMIE


 SCIENCES DE L'INGÉNIEUR


 INFORMATIQUE


 SCIENCES DE LA VIE


 SCIENCES DE LA TERRE


9 782100 547838

6687412

ISBN 978-2-10-054783-8

**LA Recherche**


DUNOD

www.dunod.com

# FORME ET ORIGINE DE L'UNIVERS

## Regards philosophiques sur la cosmologie

*Sous la direction d'Aurélien Barrau et de Daniel Parrochia*

*Julien Lescourges, Jean-Pierre Luminet, Sylvie Vauclair,  
François Vannucci, Philippe Brax, Michel Cassé,  
Marc Lachièze-Rey, Pierre Vanhove, Julien Grain,  
Guillaume Duprat, Luc Brisson, Jean Seidengart,  
Nicolas Prantzos, Daniel Parrochia, Christian Godin,  
Étienne Klein, Jean-Jacques Szczéciniaż, Gérard Chazal,  
Michel Paty, Aurélien Barrau*

DUNOD

Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.

Le Code de la propriété intellectuelle du 1<sup>er</sup> juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements

d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour

les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée. Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du

Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).



© Dunod, Paris, 2010  
ISBN 978-2-10-056044-8

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

# Table des matières

<b>Introduction</b>	<b>I</b>
<b>Partie I : Le modèle standard de la cosmologie physique</b>	
<b>Chapitre 1</b> : État de l'art en cosmologie physique	<b>9</b>
<b>Chapitre 2</b> : Les inventeurs du Big-bang	<b>25</b>
<b>Chapitre 3</b> : L'Homme à la recherche de nouveaux mondes	<b>45</b>
<b>Chapitre 4</b> : L'infiniment petit et les limites de la connaissance	<b>55</b>
<b>Partie 2 : Cosmologie et recherche de « nouvelle physique »</b>	
<b>Chapitre 5</b> : La cosmologie : un laboratoire de l'infiniment petit	<b>69</b>
<b>Chapitre 6</b> : Métacosmologie	<b>87</b>
<b>Chapitre 7</b> : Vers la cosmologie quantique	<b>105</b>
<b>Chapitre 8</b> : La cosmologie : un laboratoire pour la théorie des cordes	<b>125</b>
<b>Chapitre 9</b> : Des univers multiples ?	<b>141</b>
<b>Partie 3 : Éléments d'histoire de la cosmologie et des épistémologies</b>	
<b>Chapitre 10</b> : Forme et structure de l'univers dans les civilisations anciennes et les traditions orales	<b>163</b>
<b>Chapitre 11</b> : Platon et la cosmologie	<b>179</b>

<b>Chapitre 12</b> : L'« influence » de T. Wright of Durham sur la cosmologie précritique de Kant	<b>197</b>
<b>Chapitre 13</b> : Cosmologie et matérialisme dialectique	<b>219</b>
<b>Chapitre 14</b> : Gaston Bachelard et la cosmologie	<b>235</b>
<b>Partie 4 : Philosophie de la cosmologie contemporaine</b>	
<b>Chapitre 15</b> : Criticisme et positivisme : la déraisonnable prudence des philosophes en matière de cosmologie	<b>249</b>
<b>Chapitre 16</b> : Un discours sur l'origine est-il possible ?	<b>267</b>
<b>Chapitre 17</b> : La cosmologie comme science spéculative ou comme théorie philosophique scientifique	<b>283</b>
<b>Chapitre 18</b> : Cosmologie et scientificité	<b>309</b>
<b>Chapitre 19</b> : Sur le caractère physique du concept de temps de la cosmologie	<b>327</b>
<b>Chapitre 20</b> : La cosmologie comme « manière de faire un monde » – Physique, relativisme et irréalisme –	<b>353</b>
<b>Notes</b>	<b>381</b>

# Les auteurs

## **Partie 1 : Le modèle standard de la cosmologie physique**

### **Chapitre 1 : État de l'art en cosmologie physique**

*Julien Lesgourgues.* Cosmologiste, chercheur au CERN et au CNRS, professeur à l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne.

### **Chapitre 2 : Les inventeurs du Big-bang**

*Jean-Pierre Luminet.* Astrophysicien, directeur de recherches CNRS au Laboratoire Univers et Théories, Observatoire de Paris.

### **Chapitre 3 : L'Homme à la recherche de nouveaux mondes**

*Sylvie Vauclair.* Astrophysicienne, professeur à l'Université de Toulouse, chercheur au Laboratoire d'Astrophysique de l'Observatoire Midi-Pyrénées, membre de l'Institut universitaire de France.

### **Chapitre 4 : L'infiniment petit et les limites de la connaissance**

*François Vannucci.* Physicien des particules, professeur à l'Université Denis Diderot, chercheur au laboratoire de physique nucléaire et des hautes énergies de Paris et au laboratoire Astroparticule et Cosmologie.

## **Partie 2 : Cosmologie et recherche de « nouvelle physique »**

### **Chapitre 5 : La cosmologie : un laboratoire de l'infiniment petit**

*Philippe Brax.* Physicien théoricien, directeur de recherche à l'institut de physique théorique du CEA à Saclay.

### **Chapitre 6 : Métacosmologie**

*Michel Cassé.* Astrophysicien, directeur de recherches au CEA et chercheur invité à l'Institut d'Astrophysique de Paris.

### **Chapitre 7 : Vers la cosmologie quantique**

*Marc Lachièze-Rey.* Cosmologiste, directeur de recherches CNRS au laboratoire Astroparticule et Cosmologie.

### **Chapitre 8 : La cosmologie : un laboratoire pour la théorie des cordes**

*Pierre Vanhove.* Physicien théoricien, ingénieur CEA, chercheur à l'Institut de Physique Théorique du CEA-Saclay et à l'Institut des Hautes Études Scientifiques (IHÉS).

### **Chapitre 9 : Des univers multiples ?**

*Julien Grain.* Cosmologiste, chercheur CNRS à l'Institut d'Astrophysique Spatiale d'Orsay.

### **Partie 3 : Éléments d'histoire de la cosmologie et de ses épistémologies**

#### **Chapitre 10 : Forme et structure de l'univers dans les civilisations anciennes et les traditions orales**

*Guillaume Duprat.* Cosmographe, chercheur indépendant.

#### **Chapitre 11 : Platon et la cosmologie**

*Luc Brisson.* Philosophe, directeur de recherche au CNRS.

#### **Chapitre 12 : L'« influence » de T. Wright of Durham sur la cosmologie précritique de Kant**

*Jean Seidengart.* Philosophe, professeur à l'Université Paris-Ouest Nanterre-La Défense.

#### **Chapitre 13 : Cosmologie et matérialisme dialectique**

*Nicolas Prantzos.* Astrophysicien, directeur de recherches CNRS à l'Institut d'Astrophysique de Paris.

#### **Chapitre 14 : Gaston Bachelard et la cosmologie**

*Daniel Parrochia.* Philosophe, professeur de logique et philosophie des sciences à l'Université Jean Moulin-Lyon III.

### **Partie 4 : Philosophie de la cosmologie contemporaine**

#### **Chapitre 15 : Criticisme et positivisme : la déraisonnable prudence des philosophes en matière de cosmologie**

*Christian Godin.* Philosophe, maître de conférences à l'Université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand.

#### **Chapitre 16 : Un discours sur l'origine est-il possible ?**

*Étienne Klein.* Physicien, philosophe, directeur de recherches au CEA.

#### **Chapitre 17 : La cosmologie comme science spéculative ou comme théorie philosophique scientifique**

*Jean-Jacques Szczéciniaarz.* Philosophe, mathématicien, professeur à l'Université Paris-Diderot.

#### **Chapitre 18 : Cosmologie et scientificité**

*Gérard Chazal.* Philosophe, professeur émérite à l'Université de Bourgogne.

#### **Chapitre 19 : Sur le caractère physique du concept de temps de la cosmologie**

*Michel Paty.* Physicien, philosophe, directeur de recherche émérite au CNRS

#### **Chapitre 20 : La cosmologie physique comme « manière de faire un monde » - Physique, relativisme et irréalisme**

*Aurélien Barrau.* Astrophysicien, maître de conférences IUF à l'Université Joseph Fourier, chercheur au Laboratoire de Physique Subatomique et de Cosmologie de Grenoble.

# Introduction

Daniel Parrochia et Aurélien Barrau

La cosmologie physique, sous la forme mathématique qu'elle a prise à partir du début du XX<sup>e</sup> siècle, est, quelle que soit la manière dont on l'aborde, une science très formalisée, et traversée, au surplus, de nombreux débats théoriques – incluant souvent des disciplines connexes d'abord difficile (par exemple, la physique quantique) – où le non-spécialiste peut ne pas parvenir aisément à se frayer un chemin. D'où, très souvent également, un certain scepticisme perceptible à l'égard de cette discipline, par ailleurs fascinante à tous égards puisqu'elle pose des questions aussi essentielles que celle de l'origine de l'univers observable, de ses dimensions (finies ou infinies<sup>1</sup>), de son évolution et, le cas échéant, de sa fin. Il nous a semblé que ces questions, qu'on retrouve dans toutes les cultures et qui, après avoir nourri la spéculation des penseurs présocratiques dans la nôtre, ont pu émerger à nouveau au début du siècle dernier, méritaient d'être débattues conjointement entre scientifiques et philosophes, dans la mesure où elles n'engageaient pas seulement des réponses physiques, mais se trouvaient aussi, parfois, devoir être déjà préalablement analysées et étudiées en tant que questions, c'est-à-dire d'abord bien précisées dans leurs termes au sein de la langue naturelle, avant de donner éventuellement lieu à des réponses scientifiques. De ce point de vue, les exposés d'E. Klein (sur la notion d'origine) et de M. Paty (sur le concept de temps physique) sont ici des modèles du genre.

Il faut de plus reconnaître que la philosophie, tout comme la science elle-même, a évolué, au fil de l'histoire, dans sa façon d'aborder ces questions cruciales.

La philosophie classique, qu'on peut définir de façon rapide comme une pensée dans la perspective d'une totalité, incluait autrefois nécessairement dans ses développements une réflexion sur le monde, plus encore que sur l'univers<sup>2</sup>. Elle était ou, du moins, se voulait être, en ce sens, une véritable cosmologie. Il y avait là sans doute un héritage des premières spéculations mythologiques, telle que G. Duprat nous les présente dans leur diversité, et qui sont elles-mêmes des façons plus ou moins significatives de s'emparer du réel et de tenter de le maîtriser.

Saisir des « mondes entiers » est cependant toujours apparu aux penseurs les plus rationnels comme parfaitement présomptueux. Platon se méfiait déjà de la cosmologie présocratique, et même s'il a cédé, dans le *Timée*, à la tentation d'expliquer la totalité du réel, du moins l'a-t-il fait – comme le montre bien L. Brisson, grand connaisseur de ce dialogue – en tentant surtout de dégager des principes rationnels. Kant, on le sait, malgré ses premières amours pour les théories du ciel du XVIII<sup>e</sup> siècle (voir l'exposé savant de J. Seidengart) – a cru, dans la période critique, pouvoir démontrer (Ch. Godin le rappelle avec compétence) le caractère aporétique de certaines interrogations sur l'origine. Un peu plus tard, Comte refusait aux spéculations astronomiques tout intérêt et toute utilité, et loin encore dans le XX<sup>e</sup> siècle, Bachelard, « philosophe sans monde » selon ses propres dires, doutait lui-même que la pensée à moitié artificielle et à moitié rêveuse de l'univers que développaient les physiciens de son temps, ait la moindre pertinence réelle (voir l'exposé de D. Parrochia). Il faudra, comme le montre G. Chazal dans la dernière partie de son exposé, le retour d'une saine dialectique de la théorie et de l'expérience (« dialectique » à vrai dire présente dans le développement même de la pensée physique tout

entière selon N. Prantzos) pour que la cosmologie intègre ou réintègre le champ des connaissances positives et soit enfin admise, par les philosophes eux-mêmes, comme une science à part entière.

On comprendra mieux les raisons de ces réticences si l'on se réfère à la façon dont la physique, historiquement parlant, s'est développée. L'avènement d'une science mathématisée en effet, devait, peu à peu, supplanter – au moins vis-à-vis de certaines attentes – les premières spéculations cosmogoniques. À partir du début du XVII<sup>e</sup> siècle et pendant près de deux siècles, disons de Galilée à Newton, la physique « moderne » s'est pratiquement passée de cosmologie. Comme l'a bien montré Jacques Merleau-Ponty, c'est seulement dans le dernier quart du XVIII<sup>e</sup> siècle, avec le développement presque simultané des recherches de Laplace et Herschel, que s'ouvre l'ère moderne de la cosmologie<sup>3</sup>. À nouveau l'univers redevient alors une question pour les philosophes, et bientôt, des hommes comme Whewell et Cournot, bien que souvent prisonniers de considérations épistémologiques, éthiques ou théologiques, ne manqueront pas, cependant, de faire renaître la question cosmologique, quitte à lui donner des réponses diverses, allant de l'exclusion pure et simple à l'inclusion dans d'autres formes de savoir, y compris ontologiques.

Mais la grande renaissance de la cosmologie, tout le monde le sait, ne vint qu'au XX<sup>e</sup> siècle, sous la double poussée de la science et de la technique. Là, à quelques années d'intervalle, selon le raccourci lumineux de Jacques Merleau-Ponty, « un physicien de génie et un télescope gigantesque, manié par un astronome à sa mesure, apportèrent à la Philosophie de la Nature, l'un une idée, l'autre une vision de l'Univers dont on ne sait laquelle était plus surprenante et plus exaltante »<sup>4</sup>. Plus d'un siècle a passé depuis cette découverte qui scella la Théorie de la Relativité Générale d'Einstein et la loi de récession des galaxies issue de l'astronomie

d'observation de Hubble, ouvrant la voie à la cosmologie moderne et à ses multiples univers « brevetés d'ingénieur » dont se moquait – un peu trop facilement sans doute – la philosophie bachelardienne.

Plus d'un siècle a passé, en effet, depuis cette époque des pères fondateurs (Einstein, De Sitter, Schwarzschild, Lemaître, Eddington, Gamow...) et de leurs découvertes majeures (identification de la gravitation et de la courbure de l'espace, univers à quatre dimensions, trous noirs, univers en expansion, rayonnement cosmologique...), et la question se pose aujourd'hui de savoir si la cosmologie contemporaine – au-delà de ces résultats incontestables – apporte bien la contribution à cette arlésienne nommée « Philosophie de la Nature » qu'attendait encore Jacques Merleau-Ponty et que certains semblent toujours appeler de leurs vœux. Certes, la théorie de la relativité générale, alliée à l'astronomie d'observation a permis l'émergence d'un nouveau paradigme – la célèbre théorie dite du « Big Bang » au sein duquel l'Univers a pu commencer d'être pensé et décrit de façon à peu près cohérente depuis ses premiers instants jusqu'à la dynamique contemporaine. Associée à la mécanique quantique, et conjointement liée à des observations de plus en plus précises et diversifiées, cette théorie a même permis, après les travaux de Andrei Linde<sup>5</sup>, notamment, l'avènement d'un modèle cosmologique standard plus évolué, dit du « Big-bang inflationnaire ». Dans ce cadre, l'âge de l'Univers, sa densité et plusieurs paramètres fondamentaux pour sa description sont aujourd'hui connus avec une excellente précision dont témoigne l'existence même de manuels massifs<sup>6</sup> : la science du cosmos est entrée dans son ère quantitative.

Corrélativement, et suite aux premiers travaux d'Hubert Reeves<sup>7</sup>, nombre d'ouvrages de vulgarisation ont peu à peu familiarisé l'homme contemporain avec la cosmologie scientifique du XX<sup>e</sup> siècle, au point de lui faire croire qu'on savait tout (ou

presque) sur l'univers : ses premières minutes d'existence<sup>8</sup>, voire sa première seconde<sup>9</sup>, sa naissance<sup>10</sup>, son histoire<sup>11</sup>, ses couleurs<sup>12</sup>, ses clairs-obscurs<sup>13</sup>, ses trous noirs<sup>14</sup>, la nature de l'espace et du temps qui le constituent<sup>15</sup>, etc. À peine hésite-t-on parfois encore : l'univers est-il fini ou infini ? Est-il unique ou fait d'une répllication de mondes sans fin<sup>16</sup> ? A-t-il seulement, en réalité, une forme<sup>17</sup> ? Et si oui, celle-ci est-elle lisse ou chiffonnée<sup>18</sup> ? Toutes ces interrogations témoignent évidemment des progrès incontestables des études cosmologiques dans les trente dernières années et de l'intérêt qu'ils suscitent, en général, dans le public.

En contrepoint de ces succès, non seulement différents problèmes continuent cependant de se poser au sein même de la science existante, mais le sens même de certaines questions mérite en fait d'être discuté philosophiquement avant toute autre investigation plus approfondie (voir les exposés d'E. Klein et de J.-J. Szczécinarz). Bien sûr des incomplétudes et des incohérences subsistent dans la démarche de cette discipline. L'essentiel du contenu de l'Univers – énergie noire et matière « sombre », comme on dit aujourd'hui<sup>19</sup> – est de nature strictement inconnue et résiste à toute tentative de détection ou de caractérisation directe. De même, la description des temps les plus reculés nécessite le recours à une théorie quantique de la gravitation qui fait actuellement défaut dans une forme consensuelle. Enfin, l'unicité de l'Univers est elle-même remise en question par l'hypothèse controversée d'une structure de « multivers » qui imposerait, comme le suggère A. Barrau, une déconstruction profonde de notre conception de la physique. On observera également que le Cosmos est simultanément objet d'étude et laboratoire privilégié : il requiert un modèle de physique des hautes énergies et de gravitation pour être décrit mais permet également de sonder et de tester ces théories fondamentales. Cette richesse est aussi une tension qui rend l'étude particulièrement sensible

aux hypothèses sous-jacentes et aux présupposés souvent passés sous silence.

Plus que jamais, par conséquent, un questionnement philosophique sur les cent années écoulées depuis la naissance de la cosmologie moderne mérite d'être dressé. Il s'agirait d'une enquête philosophique portant notamment sur la question de savoir si les interrogations cosmologiques demeurent ou non (comme Kant, mais aussi Bachelard le pensaient) aporétiques, d'une enquête épistémologique sur les méthodes qui ont permis le développement de cette discipline et en marquant la spécificité, ainsi que sur les connaissances dont nous disposons aujourd'hui et sur ce qu'elles permettent ou non d'inférer philosophiquement concernant le « destin » de l'univers<sup>20</sup>, enfin d'une enquête scientifique sur l'état de l'art observationnel et théorique. Existe-t-il, pour finir, une continuité entre le geste cosmogonique ou théogonique ancien et les modèles contemporains ? La porosité mythique de cette science si singulière qu'est la cosmologie s'est-elle définitivement évanouie ? Notre représentation du monde – si tant est que la physique *représente* une réalité qui lui soit extérieure – se trouve-t-elle à un point tournant, ouvrant vers un nouveau paradigme ?

Les exposés proprement scientifiques de ce colloque tentent de répondre, tant bien que mal, à ces questions. Ils présentent non seulement des aperçus historiques sur la théorie du « Big bang » et ses principaux « inventeurs » (J.-P. Luminet), mais un véritable panorama sur l'état actuel de la cosmologie physique (J. Lesgourgues) ainsi que des considérations plus philosophiques sur l'extension des connaissances, telles qu'elles ont été amenées par la cosmologie, aussi bien dans le domaine des mondes lointains et des nouvelles planètes (S. Vauclair<sup>21</sup>) que du côté de l'infiniment petit et des limites de notre savoir (F. Vanucci).

De manière encore plus détaillée, certains exposés nous feront entrer dans les secteurs les plus en pointe de la cosmologie

contemporaine, tels que l'univers primordial (Ph. Brax), la cosmologie quantique (M. Lachièze-Rey), la théorie des cordes (P. Vanhove), ou encore, le « paysage cosmique »<sup>22</sup> des univers multiples (J. Grain), révélant, au fil de cette réflexion, combien la cosmologie ne cesse de se penser et de se réfléchir elle-même au cours de son développement, devenant au fond, comme le montre très bien M. Cassé, une « métacosmologie ».

Ce colloque, qui s'est tenu à l'Université Jean Moulin – Lyon III, devant un public de formation principalement non-scientifique a tenté de poser, sinon de résoudre, certaines des questions les plus brûlantes que l'humanité s'est jamais posée depuis qu'elle existe. Il s'est efforcé de le faire dans une langue claire, ce qui a sans doute obligé les participants scientifiques, tout en faisant appel à l'ensemble des ressources théoriques de leurs disciplines, à cependant limiter, voire éviter, les développements par trop techniques, ce dont nous les remercions grandement. Voilà qui devrait, en principe, rendre le présent ouvrage abordable pour un large public. C'est du moins le but que nous avons très sincèrement poursuivi.



# **Partie I : Le modèle standard de la cosmologie physique**

## **Chapitre I État de l'art en cosmologie physique**

Julien Lesgourgues

En guise d'introduction à cet ouvrage, les grands traits du modèle standard de la cosmologie physique contemporaine sont esquissés.

Il est difficile de présenter le modèle cosmologique communément adopté par les physiciens contemporains en quelques pages. On est en effet contraint de simplifier ce modèle à outrance et de survoler la liste des arguments étayant de façon plus ou moins robuste ses éléments constitutifs, au point de sembler défendre une description simpliste, irréaliste et parfois arbitraire de l'univers. C'est pourquoi on reproche souvent aux physiciens qui s'efforcent de résumer l'état actuel des connaissances en cosmologie de présenter de façon dogmatique une

vision de l'univers influencée par des partis pris théoriques. Reproche largement injustifié, car la cosmologie, comme les autres domaines de la science, procède d'un foisonnement d'hypothèses, de remises en questions et de confrontations entre théorie et observations. Pour bien apprécier la substance et la portée du modèle présenté ici, il faudrait consacrer des livres entiers à l'énumération des centaines d'alternatives qui ont été explorées, et aux innombrables rebondissements qui ont suivi chaque nouvelle observation importante. Ceci ne pouvant faire l'objet d'un chapitre, nous prions le lecteur d'accepter cette prémisse : le modèle qui sera résumé dans ces quelques pages, et que nous appellerons « modèle cosmologique standard », représente la somme des théories et des modèles *les plus simples* permettant de rendre compte de la plupart des observations actuelles. Cela ne signifie pas que ce modèle soit l'unique scénario envisageable : il en existe de plus compliqués permettant de rendre compte des observations avec autant de succès. Cela ne veut pas non plus dire que les cosmologistes s'arrêtent à ce modèle minimal et baignent dans une naïve certitude : au contraire, l'activité de la plupart d'entre nous consiste à remettre en question les conclusions qui vont suivre, à explorer des alternatives plus complexes et à vérifier dans quelle mesure ces dernières sont rendues nécessaires par de nouvelles observations. À ce jour, les quelques données expérimentales présentant un léger désaccord avec le modèle standard ne paraissent pas assez solides pour que l'on doive nécessairement recourir à de telles alternatives. Mais demain, avec des observations plus précises, une telle nécessité apparaîtra peut-être, comme c'est le cas en général dans tous les domaines scientifiques.

## I. Fondements

Le modèle cosmologique standard repose en grande partie sur la théorie de la gravitation formulée par Einstein, c'est-à-dire la

relativité générale. Cette théorie, soumise à des tests expérimentaux de toutes sortes depuis presque un siècle, n'a encore jamais été prise en défaut. Pour rendre compte des interactions gravitationnelles, elle indique que la présence de matière déforme l'espace-temps, qui reçoit alors une courbure. Vu dans son ensemble, l'espace-temps décrivant notre univers est donc courbé par son propre contenu en matière.

En plus de la relativité générale, le modèle cosmologique standard repose sur un ingrédient essentiel, qui était initialement une hypothèse de travail parmi d'autres, et qui est devenu aujourd'hui un fait expérimental : à grande échelle, l'univers semble *homogène*. Des inhomogénéités telles que les galaxies et les amas de galaxies apparaissent certes aux petites échelles, mais, à des distances beaucoup plus grandes que la taille des amas de galaxies, toutes les régions de l'univers observable semblent partager les mêmes propriétés et la même densité moyenne. Ceci est attesté, d'une part, par l'observation systématique des galaxies effectuée aujourd'hui avec précision dans certaines portions du ciel jusqu'à des distances de l'ordre de quelques milliards d'années-lumière, et d'autre part, grâce à l'observation du « rayonnement de fond cosmologique » sur lequel nous reviendrons.

Dans les années 1920, Alexander Friedmann et Georges Lemaître ont construit, indépendamment l'un de l'autre, un modèle mathématique qui porte leurs noms et qui représente la seule possibilité pour décrire l'univers aux grandes échelles, à condition qu'il soit homogène et que la relativité générale soit exacte. Ce modèle prédit : premièrement, que l'espace tridimensionnel dans lequel nous vivons doit se contracter ou se dilater au fil du temps (univers en contraction ou en expansion) de façon identique en tout point ; et deuxièmement, qu'il possède une géométrie soit euclidienne, soit elliptique, soit hyperbolique. Ces trois propriétés ont des définitions mathématiques précises mais sont délicates à représenter. Pour résumer, un

espace euclidien est un espace infini de courbure nulle, conforme à notre intuition commune, dans lequel l'axiome d'Euclide est valide et la somme des angles d'un triangle est égale à 180 degrés. En revanche, lorsque la géométrie est elliptique, l'espace est courbe et de volume fini, une droite finit toujours par se recouper et la somme des angles d'un triangle quelconque excède 180 degrés (un tel espace est parfois appelé « fermé »). Lorsque la géométrie est hyperbolique, l'espace est infini mais toujours courbe et la somme des angles est cette fois inférieure à 180 degrés (cet espace est appelé aussi « ouvert »).

De plus, dans le modèle de Friedmann-Lemaître, les deux questions de l'évolution de l'univers (contraction ou expansion) et de sa géométrie (euclidienne, elliptique ou hyperbolique) sont intimement liées à celle de son contenu : de l'abondance de telle ou telle « espèce » dépend l'appartenance à l'un des cas de figure décrits ci-dessus. Ces « espèces » pourraient être, *a priori* : de la matière ordinaire (les atomes constituant les planètes, les étoiles, la partie visible des galaxies) ; du rayonnement (par exemple, un rayonnement électromagnétique diffus, décrit par la mécanique quantique comme un bain de particules de masses nulles appelées photons) ; éventuellement, des particules plus exotiques non découvertes jusqu'à ce jour en laboratoire ; ou bien un fluide ou une entité plus mystérieuse encore, comme la fameuse « constante cosmologique » proposée par Einstein, et qui équivaut mathématiquement à un fluide de pression négative...

Les premiers physiciens ayant tenté d'appliquer concrètement le modèle de Friedmann-Lemaître à la description de notre univers n'avaient à leur disposition que deux indices : premièrement, la mise en évidence par Edwin Hubble de l'expansion de l'univers grâce à l'effet Doppler, toujours dans les années 1920 ; deuxièmement, le fait que l'on observe tout autour de nous de la matière ordinaire formant des étoiles et des galaxies. Pour une description moyenne de l'univers aux grandes échelles, ces deux

indices sont compatibles avec un modèle de Friedmann-Lemaître contenant uniquement – ou du moins majoritairement – de la matière ordinaire : c'est l'hypothèse la plus simple qui pouvait être formulée au milieu du XX<sup>e</sup> siècle. Ce modèle est appelé « univers dominé par la matière ». Dans ce cas de figure, l'expansion de l'univers doit être nécessairement décélérée : la matière s'y dilue, mais de plus en plus lentement. Ce modèle prédit également que notre univers devait être initialement presque homogène, avec néanmoins d'infimes irrégularités. Aux lieux contenant initialement de légères surdensités, la matière s'est accumulée sous l'effet des forces de gravitation, de manière à former, au bout de quelques milliards d'années, les galaxies et amas de galaxies que nous observons aujourd'hui (Isaac Newton avait déjà eu l'intuition d'un tel processus). L'univers primordial n'était donc pas constitué de galaxies séparées par du vide, mais plutôt d'une soupe de particules élémentaires quasiment homogène. Sous l'effet de l'expansion, cette soupe primordiale s'est diluée et refroidie au fil du temps, et s'est ensuite fragmentée pour former des galaxies distinctes.

Ce modèle d'« univers dominé par la matière » est un cas particulier de « modèle de Big-bang » dans la mesure où, si l'on extrapole vers le passé, on aboutit à un instant critique correspondant à une densité de matière infinie. Ceci ne veut pas dire que cet instant ait été effectivement atteint. En effet, les lois physiques sur lesquelles ce modèle repose pourraient perdre leur validité à très haute énergie avant d'atteindre une telle singularité – et même, elles doivent perdre leur validité à un certain point, selon des arguments bien connus exposés dans les chapitres suivants de cet ouvrage. On ne peut actuellement rien dire sur ce qui aurait pu se passer avant ce point, et il est totalement artificiel d'extrapoler un modèle cosmologique jusqu'à un instant initial où la densité de matière serait infinie. Il faut donc souligner qu'un physicien travaillant dans le cadre d'un « modèle

de Big-bang » n'effectue pas l'hypothèse que l'univers trouve son « origine » dans une quelconque singularité ou « explosion initiale », contrairement à une idée fort répandue. Le terme « Big-bang » décrit une propriété asymptotique de certains modèles cosmologiques, qui ne sont pris au sérieux qu'à partir d'un instant initial correspondant à une densité de matière certes très élevée, mais finie.

L'observation de la dynamique des corps célestes (vitesse des galaxies dans les amas de galaxies, vitesse des étoiles dans les galaxies) a conduit les astrophysiciens – à commencer par Fritz Zwicky en 1933 – à effectuer une distinction entre deux types de matière : d'une part, la matière lumineuse et d'autre part, la « matière sombre » ou « matière noire », que l'on ne peut localiser qu'indirectement, et ce grâce à l'attraction gravitationnelle qu'elle exerce. Cette hypothèse, largement confirmée depuis lors, intrigue fort les physiciens des particules qui déploient d'intenses efforts pour comprendre la nature de cette matière sombre – probablement une particule exotique aux propriétés radicalement différente des particules usuelles et qui pourrait même, avec de la chance, être créée et étudiée dans les années à venir au sein de l'accélérateur de particules du CERN à Genève. Le modèle d'« univers dominé par la matière » doit être compris comme un modèle de Friedmann-Lemaître contenant à la fois de la matière lumineuse et de la matière sombre.

## 2. Une brève histoire cosmique

À des instants très reculés, et donc à des températures très élevées, la soupe de particules primordiale était parcourue de réactions nucléaires empêchant la formation des noyaux des atomes. En dessous d'une certaine température critique, ces réactions devinrent impossibles faute d'énergie, et les noyaux des atomes se formèrent. La proportion entre différents types de noyaux

atomiques (c'est-à-dire entre différents éléments : hydrogène, hélium, lithium, etc.) a dû rester figée depuis cette époque, la température étant insuffisante pour enclencher de nouvelles réactions nucléaires, excepté au cœur des étoiles. Dès les années 1940, Georges Gamow a su appliquer les lois de la physique nucléaire à ce modèle et prédire dans quelles proportions les différents éléments auraient dû se former. Fait remarquable, ces prédictions se sont révélées en contradiction flagrante avec les observations : Gamow a donc dû abandonner l'hypothèse d'un « univers dominé par la matière » et passer au degré de complexité suivant, à savoir un « univers dominé d'abord par le rayonnement, puis ensuite par la matière ». En effet, si l'univers primordial contenait majoritairement du rayonnement, c'est-à-dire un bain de particules de masse nulle ou infime (comme les photons, messagers du rayonnement électromagnétique, ou comme les fameux neutrinos) alors d'après un principe élémentaire, l'énergie associée à ce rayonnement a dû se diluer plus rapidement que l'énergie associée à la matière ordinaire et à la matière sombre. Il est donc tout à fait plausible que l'énergie totale de l'univers ait été dominée d'abord par le rayonnement, puis par la matière. Si l'on effectue l'hypothèse que la synthèse des noyaux atomiques s'est produite pendant la domination du rayonnement, les calculs prédisent des proportions entre les différents éléments qui coïncident de façon très remarquable avec les observations. L'étape ultérieure de domination de la matière a, quant à elle, permis aux galaxies de se former. Mais ce modèle conduit à une autre prédiction remarquable, formulée pour la première fois par Gamow : le rayonnement électromagnétique dans lequel baignait l'univers primordial doit être présent encore aujourd'hui, bien que très dilué. Ceci fut confirmé en 1964 par Arno Penzias et Robert Wilson, premiers observateurs du « fond cosmologique micro-onde », parfois surnommé poétiquement « rayonnement fossile du Big-bang ». Cette prodigieu-

se découverte établit le modèle d'« univers dominé d'abord par la radiation puis par la matière » comme modèle cosmologique le plus simple compatible avec les observations de l'époque.

Mais, dans les décennies qui suivirent, la nécessité d'adjoindre à ce scénario une troisième étape préalable apparut clairement. Le modèle décrit ci-dessus n'est pas entièrement cohérent. Il faut invoquer trop de coïncidences pour expliquer sa densité ou son homogénéité aux plus grandes échelles de distance observables. Aux alentours de 1980, pour résoudre ces problèmes, Alexei Starobinsky et Alan Guth suggérèrent, indépendamment l'un de l'autre, l'existence d'une époque baptisée « inflation », précédant la domination du rayonnement et de la matière, et pendant laquelle l'univers aurait été rempli d'un champ quelque peu inhabituel, entraînant une expansion accélérée. Ce champ ne serait pas comparable au champ électromagnétique, mais plutôt au supposé « boson de Higgs », actuellement si recherché au CERN. Cette hypothèse s'est révélée concluante : comme nous le verrons plus tard, ce modèle d'inflation est à l'origine de plusieurs prédictions théoriques, dont quelques-unes ont été validées par certaines observations au cours des dix dernières années.

La saga du modèle cosmologique standard se poursuit dans les années 1990, grâce à plusieurs observations contredisant le modèle ci-dessus : l'âge de certains corps célestes (comme les quasars) semblait alors supérieur à l'âge théorique de notre univers ; tandis que pour d'autres objets lointains (comme certaines supernovae), la loi de décroissance de la luminosité avec la distance n'obéissait pas aux expectatives. Ces problèmes ne remettaient pas en question l'existence des trois périodes décrites ci-dessus, mais suggéraient l'existence d'une quatrième période dans laquelle nous vivrions actuellement, et caractérisée par une expansion accélérée comme pendant la période d'inflation. Ceci est envisageable si l'énergie totale de l'univers est actuellement dominée par la contribution, soit d'une constante cosmologique

(cette entité abstraite introduite par Einstein comme complément possible à sa théorie de la relativité générale), soit d'un champ analogue à celui responsable de l'inflation, soit d'un autre fluide de pression négative. À l'heure actuelle, nous pouvons énoncer les propriétés nécessaires d'un tel fluide, baptisé de façon générique « énergie noire », mais pas comprendre sa nature.

Ainsi le modèle cosmologique standard actuel distingue-t-il quatre grandes périodes dans l'évolution de l'univers : inflation, domination du rayonnement, domination de la matière et domination de l'énergie noire. La période d'inflation possède une propriété étonnante : pendant cette phase, l'univers perdit toute sensibilité aux époques antérieures, qui ne purent laisser aucune trace observable. Le modèle cosmologique standard actuel n'est donc plus à proprement parler un « modèle de Big-bang » : en raison de cette période d'inflation, une extrapolation vers le passé serait largement arbitraire et n'aboutirait pas nécessairement à une densité infinie. Toutefois, pendant l'inflation, la densité d'énergie dans l'univers devait être considérable : ce modèle ne remet donc pas en question l'idée générale selon laquelle notre univers observable est issu d'une région initialement très petite, et très concentrée en matière.

### **3. Paradigme**

L'aspect le plus fascinant et le plus complexe du modèle cosmologique standard concerne les *inhomogénéités*, c'est-à-dire les fluctuations locales de densité dans l'univers. En théorie, la période d'inflation doit engendrer de petites inhomogénéités initiales – c'est une conséquence nécessaire de la mécanique quantique. Pendant la domination du rayonnement, ces inhomogénéités doivent se propager dans l'univers, exactement comme le son se propage dans l'air. Pendant la domination de la matière, elles doivent être amplifiées par effondrement gravita-

tionnel, de manière à former les galaxies et les amas de galaxies. Pendant la domination de l'énergie noire, cette amplification doit ralentir. Sur le papier, ces étapes sont minutieusement décrites par un ensemble d'équations découlant de la relativité générale et du modèle de Friedmann. Or, il est possible de tester les prédictions les plus fines de cet édifice théorique complexe : il suffit de cartographier les inhomogénéités de notre univers à diverses époques...

L'observation par les télescopes modernes de la répartition des galaxies dans l'espace permet de cartographier les inhomogénéités dans une portion de l'univers actuel, ainsi que dans un passé proche (puisqu'en observant des galaxies lointaines, on obtient une image du passé, la lumière se propageant à vitesse finie). Le « rayonnement de fond cosmologique » offre quant à lui une image de l'univers au moment où il est devenu transparent à la lumière, c'est-à-dire 320 000 ans environ après le début de la domination de la matière, et treize milliards d'années avant nos jours. L'observation précise de ce rayonnement permet donc de cartographier les inhomogénéités dans une certaine région de l'univers à cette époque. Ces observations sont menées depuis quelques années, avec une précision sans cesse croissante (depuis le satellite COBE en 1992 jusqu'au satellite WMAP opérant actuellement). Le satellite européen Planck s'apprête à livrer une image encore plus détaillée de l'univers à cet instant incroyablement reculé. Ces observations représentent l'apothéose d'un siècle de recherches en cosmologie, et s'accordent de façon étonnante avec de nombreuses prédictions très fines du modèle cosmologique standard, datant essentiellement des années 1980. Pour ne citer que quelques conséquences de cet accord presque parfait, la cartographie des inhomogénéités du « rayonnement de fond cosmologique » valide le modèle de formation des atomes suggéré initialement par Gamow, confirme l'existence de la matière noire dans les proportions attendues par les astrophysici-

ciens, vérifie certaines propriétés des fluctuations primordiales prédites par l'inflation, et apporte de nouvelles preuves de l'accélération actuelle de l'univers. De plus, la question de la géométrie de l'univers – que nous avons laissée de côté pendant plusieurs pages – est, sinon résolue, du moins éclairée : les données expérimentales sont compatibles avec un espace euclidien, ce qui signifie que si l'univers observable possède une géométrie elliptique ou hyperbolique, alors la courbure qui caractérise cette géométrie est infime – nous reviendrons plus précisément sur cette affirmation à la fin de ce chapitre. Finalement, la cartographie des inhomogénéités du « rayonnement de fond cosmologique » permet de mesurer la composition actuelle de notre univers (en termes de densité d'énergie, environ 75 % d'énergie noire, 20 % de matière sombre, 4 % de matière ordinaire, 0,1 % à 1 % de neutrinos, et 0,01 % de photons), et fournit une estimation de la durée des trois dernières périodes : domination de la radiation, de la matière et de l'énergie noire, qui totalisent environ 13,7 milliards d'années entre la fin de l'inflation et nos jours.

Pour le propos général de ce livre, il paraît fondamental d'insister sur les limites du modèle cosmologique standard – je ne parle pas ici de ses limites épistémologiques, qui seront abordées dans d'autres chapitres, mais de ses limites physiques.

#### **4. Limites et extensions**

Insistons sur le fait qu'il s'agit d'un modèle minimal, c'est-à-dire du modèle le plus simple en accord avec les observations, mais que de nombreuses alternatives plus complexes sont envisageables et constamment étudiées. Pour ne citer que très peu d'entre elles, l'accélération actuelle de l'expansion de l'univers pourrait être expliquée par une théorie de la gravitation plus générale que la théorie d'Einstein, plutôt que par un fluide mystérieux (mais

ceci reste à établir) ; les preuves en faveur de la période d'inflation étant relativement indirectes, quelques alternatives à l'inflation sont à l'étude (mais se révèlent toutes peu convaincantes jusqu'à ce jour) ; d'autres particules ou d'autres fluides pourraient être présents dans l'univers, des étapes intermédiaires pourraient s'ajouter aux quatre grandes époques connues, etc. Soulignons néanmoins que s'il est possible d'affiner les grandes lignes du scénario cosmologique standard, il paraît très difficile de proposer une alternative radicale sans entrer en conflit avec les observations.

Ce modèle inspire d'emblée une forme de modestie, puisqu'il permet de caractériser précisément le contenu de l'univers, sans toutefois apporter de lumière sur la nature de ses deux principaux constituants actuels. En effet, la cosmologie permet de définir certaines propriétés générales de la matière sombre et de l'énergie noire, ainsi que leur abondance ; mais elle paraît impuissante à expliquer leur origine qui, bien que les hypothèses théoriques fourmillent, reste totalement inconnue à ce jour. Ces deux énigmes ne pourront être élucidées que par confrontation avec d'autres domaines de la physique : physique des particules et des accélérateurs, tests de la gravitation, etc.

Une poignée d'observations est en léger désaccord avec le modèle cosmologique standard actuel. Il est du devoir des chercheurs de se demander si ces anomalies suggèrent, par exemple, que l'univers a une géométrie légèrement elliptique ou une topologie non triviale, que la matière sombre a un comportement inattendu aux petites échelles de distance, etc. Mais les données expérimentales sont toujours affectées par des incertitudes qui ne sont bien appréciées qu'au bout de plusieurs années. La prudence recommande donc d'attendre que ces quelques anomalies soient corroborées par plusieurs instruments et plusieurs méthodes. Si tel devait être le cas, il faudrait adopter un scénario minimal plus complexe, comme cela survint déjà tant de fois en un

siècle de cosmologie physique. Pour le moment, le modèle cosmologique minimal résumé dans ces quelques pages semble suffisant.

Finalement, tout modèle physique de l'univers contient des limitations intrinsèques : il n'aborde que la description d'échelles de distance et de temps finies. En effet, le physicien ne peut modéliser que la partie observable de l'univers (limite spatiale), et seulement depuis un certain temps initial (limite temporelle). Cette limite temporelle paraît très difficile à définir exactement. Elle est donnée en principe par l'instant le plus reculé au sujet duquel les observations nous apportent une information. Par observation directe et avec les technologies actuelles, nous n'avons accès qu'à des images datant tout au plus de l'instant où l'univers est devenu transparent (au début de la domination de la matière). Toutefois, nous avons à notre disposition de nombreuses preuves, indirectes mais très convaincantes, de l'évolution antérieure à cette époque (par exemple, grâce à l'analyse des inhomogénéités du « rayonnement de fond cosmologique », ou de la proportion des différents types d'atomes dans l'univers). La véritable limite temporelle est peut-être fixée par la période d'inflation, qui tend à effacer toute information relative aux époques antérieures. Mais les choses ne sont pas si simples car des observations associées à d'autres domaines de la physique pourraient fournir des contraintes indirectes sur l'univers pré-inflationnaire...

La question de la limite spatiale est plus simple et mérite une brève discussion. En principe, les questions de limites spatiales et temporelles d'un modèle cosmologique devraient être liées mais, dans le cadre théorique du modèle cosmologique standard, ce n'est pas le cas. En effet, on démontre très facilement que, quelle que soit la méthode utilisée, on ne peut observer qu'une portion bien définie de notre univers, dont le rayon, appelé « horizon cosmologique », est de l'ordre de dix milliards d'an-

nées-lumière. Cette région est appelée « univers observable ». Bien entendu, ses limites n'ont pas de réalité matérielle mais, d'après les connaissances actuelles, aucune information ne peut nous parvenir d'un point situé au-delà de l'horizon. L'interprétation stricte des observations à notre disposition montre que, dans cette portion de l'univers, tout semble conforme au modèle cosmologique standard. Mais, à moins d'invoquer des préjugés de diverses natures, il est impossible de tirer des conclusions concernant des échelles plus grandes. Ainsi avons-nous déjà mentionné que l'observation des inhomogénéités du rayonnement de fond diffus suggère que l'espace est euclidien. Il serait plus juste de dire que, si l'espace dans lequel nous vivons possède un rayon de courbure (associé à une géométrie elliptique ou hyperbolique), alors ce rayon doit être nettement plus grand que l'horizon. Mais cette description ne vaut qu'à l'intérieur de notre univers observable. Rien ne prouve qu'à plus grande échelle, notre univers soit homogène. Le modèle de Friedmann-Lemaître pourrait n'être qu'une approximation « locale » d'un univers beaucoup plus grand et plus complexe que la portion à laquelle nous avons accès. Pour illustrer cette limitation, supposons que dans les prochaines années on s'aperçoive, grâce à des observations plus précises du « rayonnement de fond cosmologique », que notre univers possède une géométrie elliptique avec un rayon de courbure mille fois plus grand que l'horizon. Une telle découverte est du domaine du possible. Dans le cadre strict du modèle de Friedmann-Lemaître, on en déduirait que l'univers est « fermé », c'est-à-dire qu'il possède un volume fini (mais beaucoup plus grand que le volume de l'univers observable). Mais cette affirmation relèverait d'une extrapolation hasardeuse du modèle, à des échelles inaccessibles aux observations : notre univers pourrait posséder localement une géométrie elliptique dans sa portion observable, tout en étant infini, inhomogène et avec des géométries bien différentes dans d'autres régions.

Certains cosmologistes cèdent parfois à une « tentation de l'au-delà », c'est-à-dire à une volonté de construire des modèles supposés décrire une portion de l'univers beaucoup plus grande que notre univers observable. Ces modèles sont souvent captivants mais, sur un plan purement scientifique, leur intérêt est difficile à déterminer. D'un côté, ils reposent généralement sur des arguments théoriques parfaitement rigoureux et peuvent contenir une véritable information : par exemple, ils permettent d'aborder l'intrigante question du calcul de la probabilité pour qu'une portion de l'univers ait des propriétés analogues à notre univers observable, probabilité qui ne devrait pas être trop faible pour satisfaire le rationalisme scientifique... D'un autre côté, ces modèles sont, par construction, invérifiables. Les physiciens sont donc actuellement très partagés sur l'intérêt de développer ce type de réflexion.

Le modèle cosmologique en vigueur ne repose donc pas sur des préjugés simplistes, et n'est pas considéré comme infaillible par les physiciens eux-mêmes. Il s'appuie néanmoins sur un faisceau de preuves expérimentales concordant d'une façon tout à fait admirable, parmi lesquelles l'observation des inhomogénéités du « rayonnement de fond cosmologie » joue le rôle d'un véritable livre ouvert, parlant des détails de notre univers il y a treize milliards d'années. Cet édifice complexe constitue sans aucun doute l'un des plus beaux succès de la science moderne.



# Chapitre 2

## Les inventeurs du Big-bang

Jean-Pierre Luminet

Pour prendre la mesure de la signification du modèle cosmologique contemporain, dont les linéaments ont été esquissés dans le chapitre précédent, il est indispensable de le situer dans une perspective historique. Nous en retraçons ici les étapes majeures.

### **I. Les débuts de la cosmologie relativiste : solutions statiques**

Dans les quelque quatre-vingt-dix années d'histoire de la cosmologie relativiste, il est possible de distinguer six périodes<sup>1</sup> :

- la *période initiale* (1917-1927) voit le développement de modèles cosmologiques relativistes quantitatifs, mais dont la signification physique, en particulier la relation avec les observations astronomiques, n'est pas comprise ;
- la *période de développement* (1927-1945) est celle durant laquelle les aspects géométriques et dynamiques des modèles d'univers sont explorés intensivement, et l'interprétation des décalages spectraux en termes d'univers en expansion s'affirme ;
- la *période de consolidation* (1945-1965) correspond aux développements mathématiques et à l'amélioration des données observationnelles ; elle s'achève par la découverte et l'interprétation du rayonnement de fond cosmologique ;

- commence alors la *période d'acceptation* (au sens de consensus, et non d'unanimité) des modèles de « Big-bang » ;
- qui laisse la place, à partir des années 1980, à la *période d'élargissement* (1980-1998), où des modifications, pour la plupart issues de la physique des hautes énergies, sont apportées aux modèles standards de Big-bang, allant jusqu'à l'introduction de géométries plus générales que celles des variétés pseudo-riemanniennes quadridimensionnelles ;
- nous nous trouvons dans la *période de renouveau expérimental*, où des observations de haute précision permettent désormais de mesurer les valeurs des paramètres de l'univers à quelques pourcents près, et où les problématiques de la constante cosmologique, de l'énergie du vide et de la topologie ont été renouvelées.

Suivons chronologiquement l'évolution plutôt hectique des idées dans la discipline.

En 1915, Einstein (et Hilbert) fournissent les équations de champ correctes pour une théorie de la gravitation relativiste. Baptisée relativité générale, cette théorie propose un nouveau cadre conceptuel pour interpréter l'univers. Selon Einstein, la gravité n'est pas une force, mais une manifestation de la courbure de l'espace-temps engendrée par la distribution de la masse et de l'énergie. La relativité générale permet d'aborder de façon pertinente le problème cosmologique ; le concept d'univers, jusqu'alors défini de façon plutôt vague, acquiert en effet une nouvelle cohérence et devient une entité physique définie par sa structure spatio-temporelle et sa composition en matière, rayonnement et toute autre forme d'énergie. L'espace-temps est muni d'une riche structure qui s'exprime géométriquement en termes de courbure et de topologie, et physiquement en termes de contenu énergétique.

## 2. L'avènement des solutions dynamiques

Dans un article paru en 1922 en langue allemande<sup>2</sup>, intitulé « Sur la Courbure de l'Espace », le physicien russe Alexandre Friedmann franchit un pas que n'a pas osé Einstein : il abandonne l'hypothèse d'un univers statique et lui substitue une alternative « dynamique », dans laquelle l'espace varie au cours du temps. Comme indiqué dans son introduction, « Le but de cette note est, en premier lieu, de dériver les solutions [d'Einstein et de Sitter] comme cas particuliers à partir de certaines hypothèses générales et, en second lieu, de démontrer l'existence possible d'univers dont la courbure spatiale est constante par rapport aux trois coordonnées spatiales, lesquelles dépendent cependant du temps, c'est-à-dire de la quatrième coordonnée (temporelle). »

Friedmann suppose donc l'espace à courbure positive (une hypersphère), une densité de matière variable  $\rho(t)$  et une constante cosmologique nulle. Il obtient son fameux modèle d'« univers fermé » en expansion-contraction, où le temps cosmique commence et se termine dans des singularités. Pour la première fois dans l'histoire de la cosmologie, les problèmes du début et de la fin de l'univers sont ainsi posés en termes purement scientifiques. Friedmann dérive aussi des solutions à constante cosmologique  $\lambda$  non nulle, mais remarque que le terme est superflu. Contrairement à une opinion couramment répandue chez les cosmologistes, le travail de Friedmann n'est pas purement mathématique ; mais le physicien russe est assez honnête pour reconnaître que les observations astronomiques disponibles ne peuvent étayer son modèle : « Nos informations présentes sont tout à fait insuffisantes pour nous permettre d'effectuer des calculs numériques et de distinguer dans quel type d'univers nous sommes. [...] Si nous supposons  $\lambda = 0$  et  $M = 5 \times 10^{21}$  masses solaires, la période d'univers devient de l'ordre de 10 milliards

d'années. » Il s'agit là d'une prédiction remarquable, puisque l'estimation la plus récente de l'âge de l'univers donne 13,7 milliards d'années.

Friedmann n'est pas seulement un brillant physicien, il est aussi un fervent catholique orthodoxe : pour lui, la relativité générale suggère une création du monde par Dieu (bien qu'il n'ait pas formulé explicitement son opinion dans une publication scientifique).

Einstein réagit rapidement à l'article de Friedmann. Dans une courte *Remarque sur le travail de A. Friedmann « Sur la courbure de l'espace »*, il argue que « dans le travail cité, les résultats concernant un univers non statique me semblent sujets à caution. En réalité il s'avère que la solution qui y est donnée ne satisfait pas les équations du champ. »

Bien entendu, Friedmann est désappointé. Comme il n'a pas l'autorisation de quitter l'Union Soviétique pour rencontrer Einstein à Berlin et le convaincre, il lui écrit une lettre explicative et charge son ami Yuri Krutkoff, qui a lui la permission de voyager à l'étranger, de convaincre le célèbre physicien allemand. La mission est apparemment remplie avec succès, puisqu'en 1923 Einstein publie une encore plus courte *Remarque sur le travail de A. Friedmann « Sur la courbure de l'espace »*, où il reconnaît : « Dans une note antérieure j'ai critiqué le travail susmentionné. Mais – comme je m'en suis convaincu à l'instigation de M. Krutkoff et grâce à une lettre de M. Friedmann – mon objection était fondée sur une erreur de calcul. Je tiens les résultats de M. Friedmann pour justes et éclairants. Ils montrent que les équations du champ admettent pour la structure de l'espace à symétrie centrale, en plus des solutions statiques, des solutions dynamiques. »

Peut-on en déduire qu'Einstein admet enfin la découverte de Friedmann comme étant de nature à dessiner une nouvelle image de l'univers ? C'est peu probable, comme le montreront

également ses réticences ultérieures envers le travail de Lemaître. D'ailleurs, dans une première version non publiée de sa seconde note, la dernière phrase du manuscrit « [...] les équations du champ admettent [...] des solutions dynamiques [...] » se prolonge par « auxquelles il est à peine possible d'attribuer une signification physique ». Cette phrase a été – au dernier moment – biffée par Einstein ! Elle est semblable à la sentence qu'il édictera plus tard, en 1927, à l'encontre du travail de Lemaître. L'attitude d'Einstein vis-à-vis du problème cosmologique traduit donc une sorte de malaise qui ne se résoudra jamais réellement.

En 1924, Friedmann publie *Sur la possibilité d'un univers à courbure négative constante*. Il suppose cette fois un espace à courbure négative et une densité de matière variable au cours du temps, et dérive le modèle d'« univers ouvert », en expansion perpétuelle.

À la fin de cet article, il livre la première discussion d'envergure sur une possible topologie non triviale de l'espace : « Ce que nous savons actuellement de la courbure spatiale ne fournit aucune indication directe sur la finitude ou l'infinitude de l'univers. Des considérations supplémentaires sont nécessaires pour résoudre définitivement la question. [...] Comme critère permettant de distinguer les points entre eux, nous pouvons adopter le principe selon lequel deux points par lesquels passent plus d'une géodésique ne sont pas distincts. Il est clair que ce critère permet l'existence possible de « fantômes », en ce sens qu'en un même point coexistent un objet et ses propres images. Cette façon de formuler l'identité ou la différence entre les points implique qu'un espace à courbure positive est toujours fini. Elle ne permet cependant pas de résoudre la question de la finitude pour un espace à courbure négative. »

Malheureusement, cette part la plus importante de l'article passe inaperçue, et Friedmann n'aura jamais la satisfaction de voir ses modèles théoriques confrontés aux observations cosmo-

logiques : il meurt prématurément en 1925 après une ascension en ballon (il était aussi météorologue). C'est précisément le moment où des données expérimentales commencent à remettre en question la validité des solutions cosmologiques statiques. Par exemple, en 1924 le théoricien britannique Arthur Eddington remarque que, sur les 41 décalages spectraux de nébuleuses spirales mesurés par Vesto Slipher, 36 sont vers le rouge ; il favorise alors la solution de Sitter tandis qu'en 1925, son étudiant en thèse de doctorat, le jeune prêtre belge Georges Lemaître, démontre une relation linéaire entre la distance et le décalage vers le rouge dans cette solution. La même année, Edwin Hubble prouve la nature extragalactique des nébuleuses spirales. Il confirme ainsi qu'il existe d'autres galaxies semblables à la nôtre, et que l'univers observable est beaucoup plus grand que ce que l'on pensait jusqu'alors. Plus important encore, les observations qui s'accumulent montrent que la lumière des galaxies lointaines est systématiquement décalée vers le rouge, ce qui, interprété comme un effet Doppler, suggère qu'elles s'éloignent toutes de nous à grande vitesse. Comment cela est-il possible ?

C'est Lemaître qui résout l'énigme. Dans son article fondateur de 1927, « Un univers homogène de masse constante et de rayon croissant, rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extragalactiques », publié en français dans les *Annales de la Société Scientifique de Bruxelles*, le jeune physicien belge calcule les solutions exactes des équations d'Einstein en supposant un espace à courbure positive (mais avec la topologie de l'espace projectif), une densité et une pression de matière variables au cours du temps, et une constante cosmologique non nulle. Il obtient un modèle en expansion perpétuellement accélérée, dans lequel il ajuste la valeur de la constante cosmologique de façon à ce que le rayon de l'espace hypersphérique  $R(t)$  croisse continûment depuis  $t = -\infty$ , à partir du rayon de l'hypersphère statique

d'Einstein  $R_E$ . Il n'y a donc pas de singularité dans le passé, ni de problème d'âge de l'univers. La grande nouveauté est que Lemaître fournit la première interprétation des décalages vers le rouge cosmologiques en termes d'expansion de l'espace, et non pas de mouvement réel des galaxies : l'espace se dilate continuellement, et par conséquent accroît les séparations apparentes entre les galaxies. Cette idée s'avérera l'une des découvertes scientifiques les plus significatives du XX<sup>e</sup> siècle. De plus, utilisant les données astronomiques alors disponibles, Lemaître trouve la relation explicite de proportionnalité entre la vitesse de récession apparente des galaxies et leur distance : « Utilisant les 42 nébuleuses extragalactiques figurant dans les listes de Hubble et de Strömberg, et tenant compte de la vitesse propre du Soleil, on trouve une distance moyenne de 0,95 million de parsecs et une vitesse radiale de 600 km/s, soit 625 km/s à  $10^6$  parsecs. Nous adopterons donc  $R'/R = v/rc = 0,68 \times 10^{-27} \text{ cm}^{-1}$  (Éq. 24) ». Cette équation 24 n'est autre que la première formulation de ce qui sera plus tard appelé loi de Hubble...

La signification fondamentale du travail de Lemaître passe inaperçue. Lorsque ce dernier rencontre pour la première fois Einstein à la Conférence Solvay de 1927, le célèbre physicien lui dit : « Vos calculs sont corrects, mais du point de vue physique ils me paraissent tout à fait abominables ! ».

En 1929, l'Américain H. P. Robertson dérive l'expression mathématique générale des métriques spatialement homogènes, mais ne comprend pas leur sens physique (son compatriote A. Walker fera le même travail en 1936, de sorte qu'aux États-Unis, les solutions de Friedmann-Lemaître seront ni plus ni moins appelées modèles de Robertson-Walker !)

En 1929, Hubble publie les données expérimentales montrant la relation linéaire vitesse-distance  $v = Hr$ , avec  $H = 600 \text{ km/s/Mpc}$ . Cette loi est strictement identique à l'équation 24 de Lemaître, avec le même facteur numérique de propor-

tionnalité... Mais Hubble ne fait pas le lien avec les modèles d'univers en expansion. En fait, l'astronome américain n'a pas lu (et ne lira jamais) les travaux de Lemaître ; pour lui, les décalages vers le rouge des galaxies résultent d'un pur effet Doppler (dû aux vitesses propres des galaxies), et non de l'expansion de l'espace (augmentation du rayon d'échelle de l'espace au cours du temps). Pourtant, durant les années 1920 sont découvertes des galaxies spirales à décalages vers le rouge supérieurs à 0,1, ce qui implique des vitesses de récession supérieures à 30 000 km/s ! En 1931, dans une lettre à de Sitter, Hubble exprime son incapacité à trouver une explication théorique, laissant cette tâche à de « rares théoriciens compétents ». Il ne comprend pas non plus que, comme il apparaît clairement dans les équations de Friedmann-Lemaître, le facteur de proportionnalité entre le décalage vers le rouge et la distance, improprement nommé « constante de Hubble », n'est pas constant puisqu'il varie au cours du temps. Il est donc quelque peu paradoxal d'attribuer à Hubble la paternité de la théorie du Big-bang, comme on le lit un peu partout dans la littérature scientifique. Dans l'introduction de son ouvrage *The realm of nebulae*, qui paraîtra en 1936, le grand astronome américain mentionne l'interface entre observation et théorie et déclare honnêtement : « l'auteur du présent ouvrage est au premier chef un observateur ». De fait, sur les 202 pages que comporte son livre, il ne discute l'interprétation théorique de ses observations qu'à l'unique page 198, dans un ultime paragraphe intitulé « Théories de la cosmologie ». Il ne mentionne aucunement le travail de Lemaître, mais cite Friedmann, Robertson et Milne (ce dernier ayant tenté de construire une cosmologie newtonienne non-relativiste).

En 1930, Eddington réexamine le modèle de l'hypersphère statique d'Einstein et découvre qu'il est instable : à la moindre perturbation, l'espace entre, soit en expansion, soit en contraction. Il appelle alors à de nouvelles recherches en cosmologie

pour expliquer les vitesses de récession en termes de modèles dynamiques. Lemaître lui rappelle, par lettre, qu'il a déjà résolu le problème dans son article de 1927. Eddington, qui ne l'a pas lu lors de sa parution, fait amende honorable et va désormais se mettre à promouvoir le modèle d'univers en expansion de son ancien étudiant. Pour ce faire, il traduit lui-même en anglais l'article de Lemaître pour le publier dans les renommées *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* (1931). C'est alors que se déroule un curieux épisode : pour une raison inexpiquée, Eddington remplace le paragraphe cité plus haut (dans lequel Lemaître donne la relation de proportionnalité entre la vitesse de récession et la distance des galaxies) par : « From a discussion of available data, we adopt  $R'/R = 0,68 \times 10^{-27} \text{ cm}^{-1}$  (Éq. 24) ». Ainsi, en raison de l'omission (délibérée ?) d'Eddington, Lemaître ne sera jamais reconnu comme le premier découvreur de l'expansion de l'univers, et tous les lauriers iront à Edwin Hubble.

### 3. L'atome primitif

L'année même où son travail antérieur commence à être accepté par la communauté scientifique, Lemaître ose avancer une hypothèse encore plus audacieuse : si l'univers est actuellement en expansion, ne doit-il pas avoir été plus petit et plus dense dans le passé ? Dans *The Expanding universe* (*M.N.R.A.S.*, mars 1931), il suppose ainsi : un espace à courbure positive (muni de la topologie elliptique) ; une densité de matière et une pression variables au cours du temps ; et une constante cosmologique telle que, partant d'une singularité initiale, l'univers entre d'abord en expansion décélérée, puis traverse une phase de « stagnation » durant laquelle son rayon reste de l'ordre de celui de l'hypersphère statique d'Einstein, et entre de nouveau en expansion, cette fois accélérée. Ce modèle dit « univers hésitant »

résout le problème de l'âge de l'univers et laisse suffisamment de temps aux galaxies pour se former. Lemaître y introduit le concept révolutionnaire d'« atome primitif » : dans un passé lointain, l'univers doit avoir été si condensé qu'il pouvait être alors considéré comme un « quantum de pure énergie ». Lemaître esquisse ainsi pour la première fois un lien entre cosmologie et physique quantique, discipline alors naissante. Et il décrit poétiquement la naissance de l'univers : « L'atome-univers s'est brisé en fragments, chaque fragment en morceaux plus petits. [...] L'évolution du monde peut être comparée à un feu d'artifice qui vient de se terminer. Quelques mèches rouges, cendres et fumées. Debout sur une escarille mieux refroidie, nous voyons s'éteindre doucement les soleils et cherchons à reconstituer l'éclat disparu de la formation des mondes. »

Au cours de cette *annus mirabilis* 1931, Georges Lemaître publie également une courte note dans la revue *Nature*, intitulée « The beginning of the world from the point of view of quantum theory », qui peut être considérée comme la charte de la théorie moderne du Big-bang. Tentant de trouver un lien entre les nébuleuses et les atomes, il applique à la cosmologie les dernières connaissances acquises sur les particules élémentaires et la radioactivité : « Si nous remontons le cours du temps, nous devons trouver toujours moins de quanta, jusqu'à ce que nous trouvions toute l'énergie de l'univers concentrée en un petit nombre, ou même, en un seul quantum. Mais, dans les phénomènes atomiques, les notions d'espace et de temps ne sont que des notions statistiques : elles s'estompent lorsqu'on les applique à des phénomènes qui ne mettent en jeu que quelques quanta. Si le monde a commencé par un quantum unique, les notions d'espace et de temps n'auront absolument plus de signification au commencement même ; mais elles acquerront progressivement quelque sens, quand le quantum originel se sera divisé en un nombre suffisant de quanta partiels. Si cette suggestion est

correcte, le début du monde a eu lieu un peu avant celui de l'espace et du temps. »

Cette idée est très mal reçue par les autres scientifiques. Le fait que Lemaître soit mathématicien et prêtre (il avait été ordonné en 1923) cristallise la résistance naturelle envers l'instauration d'une nouvelle vision du monde. Selon Eddington, « la notion d'un commencement du monde est répugnante », tandis que Einstein considère l'hypothèse de l'atome primitif comme « inspirée par le dogme chrétien de la création, et totalement injustifiée du point de vue physique ». Le procès est injuste, car pour Lemaître, ainsi qu'il l'exprimera à maintes reprises, le *commencement* physique du monde est tout à fait différent de la notion métaphysique de *création* ; et pour le prêtre physicien, science et religion correspondent à des niveaux distincts d'entendement du monde...

Einstein est aussi très réticent envers la constante cosmologique, qu'il avait introduite en 1917 dans ses équations du champ pour de mauvaises raisons, et qu'il considère désormais comme « la plus grande bêtise de [sa] vie ». C'est probablement la raison pour laquelle, dans le nouveau modèle relativiste qu'il propose en 1932 avec de Sitter – un modèle sans courbure spatiale ni pression, à densité uniforme et en expansion perpétuelle – le terme disparaît. Les deux auteurs ne font même aucune référence aux travaux de Friedmann et Lemaître, après quoi Einstein abandonne toute recherche en cosmologie...

En raison de l'autorité d'Einstein, c'est malheureusement cette solution ultrasimplifiée, passant à côté de l'énorme variété potentielle des solutions de type Big-bang, qui va devenir le modèle standard de la cosmologie pour les 60 années suivantes. Lemaître n'en conserve pas moins ses vues originales. Dans « Evolution of the expanding universe », publié en 1934 dans les *Proceedings of the National Academy of Science*, USA, il a la première intuition d'un rayonnement de fond cosmologique qui

serait le vestige fossile de l'atome primitif : « si tous les atomes des étoiles étaient distribués de façon égale dans l'espace, alors il y aurait environ un atome par mètre cube, ou l'énergie totale serait celle d'un rayonnement d'équilibre à la température de l'hydrogène liquide. »

Il interprète aussi pour la première fois la constante cosmologique comme une énergie du vide quantique : « La théorie de la relativité fournit la possibilité d'une modification de la loi de gravitation sous des conditions aussi extrêmes. Elle suggère que, quand on identifie la masse gravitationnelle et l'énergie, on doit introduire une constante. Tout se passe comme si l'énergie *in vacuo* était différente de zéro. De façon à ce que le mouvement absolu, i.e. le mouvement par rapport au vide, ne puisse être détecté, nous devons associer une pression  $p = -\rho c^2$  à la densité d'énergie  $\rho c^2$  du vide. Ceci est essentiellement la signification de la constante cosmique  $\lambda$  qui correspond à une densité d'énergie négative du vide... ».

Un tel résultat ne sera redécouvert qu'en 1967 par Y.B Zeldovich sur la base de la théorie quantique des champs, et il est aujourd'hui considéré comme l'une des solutions possibles au problème dit de « l'énergie noire ».

#### 4. Le modèle du Big-bang chaud

Au tournant des années 1950, lorsque Lemaître publie une synthèse en langue anglaise de sa théorie, intitulée *The Primeval Atom: An Essay on Cosmogony*, celle-ci n'est plus à la mode. Deux ans plus tôt en effet, la théorie rivale de « l'état stationnaire », promue principalement par Thomas Gold aux États-Unis et par Hermann Bondi et Fred Hoyle en Grande-Bretagne, a été largement plébiscitée. Selon eux, l'univers doit toujours avoir été identique à lui-même, éternel et invariable. De façon à obtenir une solution conforme à cette hypothèse métaphysique, ils sup-

posent un espace euclidien infini, rempli d'une densité de matière constante dans l'espace et dans le temps, ainsi qu'un nouveau « champ de création » à énergie négative, qui permet à des particules de jaillir spontanément du vide et de compenser ainsi la dilution due à l'expansion de l'espace. Peu tendre envers ses adversaires scientifiques, Fred Hoyle raille Lemaître en le qualifiant de « Big-bang man ». Il utilise d'ailleurs pour la première fois l'expression « Big-bang » en 1948, lors d'une interview radiophonique.

Débarassé de son contexte péjoratif, le terme va entrer dans le langage scientifique courant grâce au physicien américain d'origine russe George Gamow, ancien étudiant de Friedmann. Hoyle a donc contribué bien malgré lui à la popularité d'une théorie en laquelle il ne croyait pas ; il a même apporté de l'eau au moulin à la théorie du Big-bang en aidant à résoudre la question de l'origine des éléments chimiques. Arguant que *tous* les éléments chimiques ont été formés dans les chaudrons stellaires, il est contredit par Gamow et ses collaborateurs Ralph Alpher et Robert Hermann. Ces derniers prennent avantage du fait que l'univers primitif doit avoir été extrêmement chaud. En supposant un mélange initial de particules nucléaires appelé *Ylem* – terme hébreu faisant référence à une substance primitive à partir de laquelle tous les éléments sont supposés s'être formés –, ils peuvent alors rendre compte de la formation des noyaux les plus légers (deutérium, hélium, et lithium) au cours des trois premières minutes de l'univers, à une époque où la température cosmique atteignait 10 milliards de degrés. Ils prédisent également, qu'à une époque ultérieure, lorsque l'univers s'est refroidi à quelques milliers de degrés, il est devenu subitement transparent et a laissé pour la première fois la lumière se propager. Alpher et Hermann calculent ainsi que l'on devrait recevoir aujourd'hui un écho du Big-bang sous la forme d'un rayonnement de « corps noir » à une température fossile d'environ 5 K.

Leur prédiction n'émeut personne. Ils affinent leurs calculs à plusieurs reprises jusqu'en 1956, sans susciter davantage d'intérêt ; aucune tentative de détection n'est entreprise. Au milieu des années 1960, à l'université de Princeton, les théoriciens Robert Dicke et James Peebles étudient des modèles d'univers oscillatoires dans lesquels un univers en expansion-contraction, au lieu d'être infiniment comprimé dans un Big Crunch, passe par un rayon minimum avant de rebondir en un nouveau cycle (une solution précédemment étudiée et rejetée par Georges Lemaître). Ils calculent qu'un tel rebond chaud engendrerait un rayonnement de corps noir détectable aujourd'hui à la température de 10 K. C'est alors qu'ils apprennent qu'un rayonnement de ce type vient juste d'être détecté aux laboratoires de la Bell Company, dans le New Jersey. Là, les ingénieurs Arno Penzias et Robert Wilson ont mis la dernière main à un radiomètre dédié à l'astronomie, et ont trouvé un bruit de fond plus haut qu'attendu. Après avoir soustrait le bruit d'antenne et l'absorption par l'atmosphère, il reste un excès de 3,5 K. Ce bruit de fond doit donc être d'origine cosmique : c'est le rayonnement fossile !

Les équipes de la Bell Company et de l'université de Princeton publient leurs articles séparément dans le même numéro d'*Astrophysical Journal* (juillet 1965). Penzias et Wilson n'y livrent que les résultats de leurs mesures, tandis que Dicke, Peebles, Peter Roll et David Wilkinson donnent leur interprétation cosmologique. Aucun d'eux ne mentionne les prédictions d'Alpher et Hermann, encore moins celles de Lemaître. Ce dernier meurt en 1966, quelques semaines après que son assistant l'ait informé de la découverte du rayonnement fossile (le commentaire de Lemaître aurait été : « Je suis content maintenant, nous avons la preuve. »). Gamow meurt également, en 1968, sans que ses calculs aient été reconnus. Alpher et Hermann sont pratiquement oubliés. Penzias et Wilson obtiennent le prix

Nobel de physique en 1978. Pourtant, au moment de leur découverte, ils croyaient en la théorie de l'état stationnaire, rivale de celle du Big-bang, alors que leur détection du rayonnement fossile signalait l'arrêt de mort du modèle stationnaire.

Toujours est-il, qu'après un demi-siècle de rejet, l'atome primitif de Lemaître, rebaptisé plus spectaculairement « théorie du Big-bang », devient enfin accepté par les physiciens théoriciens, sans que justice soit davantage rendue à son principal inventeur...

## 5. La nouvelle cosmologie

En 1980, François Englert et Alan Guth proposent indépendamment la théorie de l'inflation, phase hypothétique d'expansion exponentielle qui aurait eu lieu dans l'univers très primordial, due peut-être au découplage des interactions fondamentales. Bien que ne reposant sur aucun support observationnel et fondée sur un cadre théorique quelque peu incertain, la théorie de l'inflation devient un nouveau paradigme de la cosmologie. Elle ne peut guère être réfutée car, en raison du grand nombre de paramètres libres qu'elle contient, elle engendre autant de modèles que nécessaire pour rendre compte de tel ou tel détail cosmologique.

En 1992, le satellite COBE vérifie la nature de corps noir du rayonnement de fond cosmologique, son homogénéité et son isotropie à un niveau de  $10^{-5}$ , et détecte les premières fluctuations de densité (G. Smoot et J. Mather, les deux principaux responsables de la mission, obtiendront le Prix Nobel de Physique 2006). Certains commentaires triomphalistes de l'époque oublient malheureusement les leçons de Georges Lemaître, qui était mieux placé que quiconque pour mettre en garde contre toute tentative de concordisme entre science et religion. On a pu lire en effet les déclarations médiatiques de tel ou

tel cosmologiste du type « Si vous êtes croyant, c'est comme si vous voyiez le visage de Dieu », « On a trouvé le Saint-Graal de la cosmologie », « La plus grande découverte du siècle, sinon de tous les temps ».

La première évidence expérimentale d'une accélération de l'expansion cosmique est obtenue en 1998. Elle ne fait que signaler le retour sur scène de la constante cosmologique (rebaptisée pour l'occasion « énergie noire », afin de laisser la porte ouverte à une possible variation temporelle de ce champ d'énergie répulsif).

Finalement, entre 2003 et 2006, le satellite WMAP peut cartographier le rayonnement cosmologique micro-ondes avec une précision sans précédent et permet de fixer les paramètres de l'univers à quelques pourcents près. Le modèle dit de « concordance » (où les observations du rayonnement de fond sont combinées avec d'autres données astronomiques) stipule que l'âge de l'univers est 13,7 milliards d'années, que la courbure spatiale est proche de zéro mais, peut-être positive, et que la densité d'énergie totale est aujourd'hui composée de 28 % de matière gravitante (baryonique, non baryonique, neutrinos et radiation) et de 72 % d'énergie noire répulsive. Il en découle que le destin ultime de notre univers serait une expansion perpétuelle accélérée.

Au-delà du modèle de concordance, certaines particularités dans les données du rayonnement de fond s'accordent mal avec l'hypothèse habituelle d'un espace euclidien infini initialement gouverné par une phase d'inflation. Entre autres, des anomalies dans le spectre de puissance peuvent s'interpréter en termes d'un espace fini, à courbure positive, muni de la topologie du dodécaèdre de Poincaré<sup>3</sup>.

## 6. Demain

Les modèles de Big-bang sont fondés sur des observations astronomiques et des expériences de physique des hautes énergies,

dont les résultats ont été extrapolés aussi loin que possible dans le passé (il n'est pas possible de remonter à la singularité du Big-bang proprement dite), et sont construits par un processus d'hypothèse et de calcul – comme il est de règle en physique. Aucun autre type de théorie ne corrobore autant de faits observés que la théorie du Big-bang. Cette dernière, qui est maintenant presque universellement acceptée par les astrophysiciens, explique de façon globalement satisfaisante la masse énorme d'observations faites par les grands télescopes et les résultats expérimentaux issus des accélérateurs de particules. Elle retrace de façon spectaculairement efficace les principales étapes de la formation de l'univers – processus qui ne s'est pas fait en six jours, mais en quatorze milliards d'années !

Il est utile d'insister sur le fait que la théorie du Big-bang permet une large variété de solutions possibles (dépendant de paramètres cosmologiques tels que la courbure spatiale, la densité de matière, la constante cosmologique ou le champ d'énergie noire, la topologie spatiale, etc.). Certaines solutions sont désormais exclues par les données expérimentales (par exemple le modèle d'univers strictement euclidien en expansion décélérée, empli seulement de matière ordinaire, c'est-à-dire le modèle d'Einstein-de Sitter, tellement en vogue entre 1930 et 1980) ; mais le schéma général, à savoir un univers ayant connu dans le passé une phase chaude et dense, se trouve considérablement renforcé.

Une confusion parfois présente dans l'esprit de certains cosmologistes est que la théorie du Big-bang serait synonyme de théorie inflatoire. Cependant cette dernière – tout au moins ses variantes les plus usuelles – est à mon sens remise en cause par les anomalies du rayonnement fossile observées par WMAP. Bien entendu, les « conservateurs » préfèrent considérer ces anomalies comme des artefacts, provenant d'une analyse incorrecte des données. Parmi ceux qui prennent au sérieux ces anomalies,

les adeptes de l'inflation invoquent une propriété particulière du champ inflatoire, usant et abusant du théorème bien connu : « l'inflation peut tout faire ». Mais ajouter des propriétés particulières et ajuster des paramètres libres dans une théorie aussi spéculative que l'inflation afin de « sauver les apparences », ressemble furieusement à l'introduction d'épicycles dans les théories planétaires de l'Antiquité. Cela « marche » mathématiquement, mais il n'y a aucune justification physique derrière !

Enfin, un petit groupe de cosmologistes estime que les anomalies dans les données WMAP marquent bel et bien les limites de validité du modèle de concordance, certaines d'entre elles (la très faible valeur du quadrupole) pouvant avoir une explication purement géométrique en termes d'un espace à topologie non triviale, ou encore d'un espace légèrement anisotrope, tandis que d'autres anomalies (les violations de l'isotropie statistique dans les moments multipolaires à grande échelle) seraient dues à des effets locaux. Je me situe clairement dans ce groupe<sup>4</sup>.

Ce ne serait pas un bouleversement fondamental de la cosmologie relativiste que de modifier sérieusement, voire abandonner, le scénario inflatoire. Il serait plus intéressant (à mon avis) d'obtenir une preuve définitive de la finitude de l'espace et de sa topologie. Toutefois, comme expliqué précédemment, toutes ces possibilités sont déjà potentiellement incluses dans la vaste famille des solutions « Big-bang ». Un vrai bouleversement viendrait plutôt de vues radicalement nouvelles qui, dans le contexte de théories de la gravitation quantique, comme les supercordes, la théorie M ou la gravité quantique à boucles<sup>5</sup>, induiraient des phénomènes réellement nouveaux, comme des dimensions supplémentaires de l'espace, la suppression des singularités, des phases de pré-Big-bang ou de rebond, un multivers, etc. Le paradigme cosmologique actuel serait alors réellement changé. Les télescopes ultraprécis que sont WMAP ou Planck ne sont guère à même d'apporter du grain à moudre pour cette révolution

espérée et attendue. En revanche, les expériences de haute énergie faites dans les accélérateurs de particules pourraient fournir les premiers indices concrets d'une vision vraiment novatrice de notre univers, peut-être même de quelques autres univers dans lesquels nous ne vivons pas...



# Chapitre 3

## L'Homme à la recherche de nouveaux mondes

Sylvie Vauclair

Un exercice de dialogue profond, entre les scientifiques qui s'intéressent à la répercussion de leurs découvertes dans la pensée humaine et les philosophes qui souhaitent mieux comprendre les données de base de l'évolution des connaissances, est sans aucun doute fondamental. En astrophysicienne, et « philosophe amateur », je propose quelques pistes de réflexions inspirées par la découverte récente de nouveaux systèmes planétaires.

### **I. Les étapes d'une découverte**

Il me semble qu'il existe une différence importante entre une conférence donnée par un philosophe et une conférence donnée par un physicien. Les philosophes contemporains s'appuient profondément sur la pensée individuelle de certains philosophes du passé et continuent à la discuter, car c'est par la pensée individuelle de personnalités marquantes que se construit l'évolution générale de la pensée humaine. En revanche, lorsqu'un physicien fait un exposé scientifique, son but est en général de donner une description de la situation atteinte par la collectivité dans le domaine considéré, à l'époque contemporaine. Cela ne l'empêche pas évidemment de citer certains de ses collègues ni de parler de modèles proposés par des chercheurs individuels, mais seulement comme une étape vers un consensus collectif.

La démarche scientifique créative, dans le cadre de l'évolution générale des connaissances humaines, comporte trois étapes que l'on peut considérer comme successives même si elles s'imbriquent aussi les unes dans les autres. Dans un premier temps, il faut avoir des idées nouvelles, qui sortent des paradigmes existants. Cet aspect relève de la pensée individuelle, c'est-à-dire qu'il est relié à la culture des individus. Il peut être influencé par la philosophie, par les religions, par l'environnement culturel des chercheurs concernés.

Puis vient la période de validation, période scientifique à proprement parler. Au cours de cette période, les idées sont testées, confrontées à l'expérience et à l'observation. De nouvelles expériences et de nouvelles observations peuvent être programmées dans ce but. Les résultats sont vérifiés par les pairs, c'est-à-dire la communauté scientifique internationale. Ils sont publiés sous forme d'articles dans des revues scientifiques, après avoir été relus par des « rapporteurs ». Contrairement aux livres individuels, dans lesquels les auteurs peuvent présenter leur vision personnelle de la science, les articles scientifiques publiés dans des revues internationales ont un caractère universel. Lorsque des scientifiques de pays très divers et de cultures très différentes se rencontrent dans des colloques internationaux, ils s'expriment avec le même langage, indépendamment des cultures individuelles. Ils se comprennent et raisonnent de la même manière, et tendent vers le même but.

Mais ensuite, lorsque les résultats sont obtenus et validés comme des avancées significatives de la connaissance, il devient nécessaire de replacer ces découvertes dans la pensée humaine, sociale, politique, philosophique, ou religieuse, dans le cadre des cultures locales aussi bien que mondiales. L'humanité a besoin de digérer ces connaissances nouvelles, de se resituer par rapport à elles, d'étudier leurs conséquences dans le cadre de la société et de prendre des décisions pour l'avenir. Tout cela s'imbrique, cha-

cun a besoin de l'autre. Mais, dans les discussions il est important de ne pas oublier l'existence de cette période particulière de rigueur scientifique, de preuves et de validation internationale.

## 2. Au-delà de Copernic

Nous vivons une époque étonnante, au cours de laquelle se sont produites un grand nombre de découvertes qui ont profondément modifié la perception que l'Homme a de lui-même face au cosmos. Pour la première fois de l'histoire de l'humanité, l'Homme a quitté sa planète et peut l'observer depuis les espaces lointains. Ce qui relevait de déductions logiques est à présent directement tangible. La pluralité des mondes (évoquée ici au sens des systèmes planétaires multiples et non pas des « multivers » dont il sera question dans les prochains chapitres) est devenue réalité : l'existence de planètes en orbite autour des étoiles est un phénomène courant. La recherche de la vie ailleurs relève à présent de la démarche scientifique, et non plus seulement de la fiction.

Il y a longtemps, la Terre était le centre du monde et l'univers était limité aux sphères concentriques qui l'entouraient. Pour Aristote, il était divisé en monde sublunaire, où régnaient le bien et le mal, et monde supralunaire où tout était parfait. Puis les observations célestes de plus en plus détaillées ont imposé aux astronomes de donner à la Terre la place qui lui revient, celle d'une planète tournant autour du Soleil. C'est ce que le public appelle encore, d'une manière générale, la « révolution copernicienne ».

Nous sommes à présent bien au-delà de l'image copernicienne du monde. Il a fallu attendre le début du XX<sup>e</sup> siècle pour comprendre que, si le Soleil est bien le centre du système solaire, il n'est pas le centre de l'univers. Le Soleil est une étoile semblable aux autres, sans caractéristique particulière sinon celle d'héber-

ger la planète Terre dans son sillage, planète qui nous concerne tout particulièrement. Le Soleil fait partie des 200 milliards d'étoiles qui constituent notre galaxie, et beaucoup de ces étoiles sont, elles aussi, entourées de cortèges de planètes. Au sein de la galaxie, la trajectoire de la Terre ressemble plus à un gigantesque tire-bouchon très étiré vers l'avant qu'à une ellipse. En effet, avec les autres étoiles qui lui sont proches, le Soleil tourne autour du centre galactique, avec une vitesse d'environ 250 km/s presque dix fois plus vite que la Terre autour du Soleil. La Terre ne repasse jamais au même endroit dans l'espace. Tout bouge, tout évolue dans l'univers, et nous sommes partie prenante de cette évolution.

### **3. Univers observable et univers observé**

Depuis les époques les plus anciennes, l'évolution de notre connaissance du monde, et donc de notre relation au cosmos, s'accompagne d'une augmentation des échelles d'espace et de temps correspondantes. Le concept d'univers a pris des significations très diverses, depuis l'environnement immédiat de la Terre jusqu'à des proportions gigantesques et même infinies. À présent, les Hommes sont arrivés par leurs observations aux limites possibles de l'univers observable ce qui représente une étape importante de la connaissance.

En effet, la science du XX<sup>e</sup> siècle nous a appris que la lumière se propage dans le vide avec une vitesse finie, de 300 000 km/s, et que cette valeur représente une constante fondamentale de la physique. Nous ne voyons jamais les choses qui sont autour de nous comme elles se présentent à l'instant où nous les regardons, car il faut du temps pour que l'information nous en parvienne, et pendant ce temps elles ont pu évoluer. C'est vrai pour tout et c'est le lot de tous. Que se passe-t-il à l'époque actuelle ? Impossible de le savoir par l'observation. La seule possibilité est

de deviner, d'extrapoler les événements selon les connaissances, les statistiques et les théories établies. En d'autres termes, les événements « présents » correspondent toujours au futur de ce que nous observons...

Plus nous regardons loin, plus nous remontons le temps. Puisque l'univers n'a pas toujours existé, en observant suffisamment loin nous « tombons » logiquement sur le début. C'est ainsi que l'univers observable est fini. Il est limité par le Big-bang. En revanche l'univers actuel, ainsi qu'à toute époque définie sur l'axe des temps, pourrait très bien être infini.

L'un des événements les plus importants de l'époque contemporaine est la détection de la première lumière du Big-bang. Alors que, depuis toujours, l'évolution de la compréhension logique du monde s'accompagne d'une augmentation des échelles accessibles, à notre époque, dans le cadre de la physique contemporaine, les limites sont atteintes. Mais il s'agit uniquement de limites dimensionnelles : l'univers offre continuellement aux scientifiques de nouvelles informations qui ouvrent des milliers de questionnements. Les limites de la connaissance ne seront jamais atteintes !

Toutes ces avancées ont été rendues possibles grâce à une symbiose entre la recherche fondamentale, c'est-à-dire la recherche d'une meilleure compréhension du monde qui nous entoure et dont nous sommes issus, et la recherche appliquée, technologique, qui consiste en applications pour construire des objets utiles à l'Homme. Sans recherche fondamentale, pas de recherche appliquée. Sans les scientifiques qui ont cherché à mieux comprendre ce qu'est la lumière, nous n'aurions pas de télévision, pas de communication instantanée par téléphone ou ordinateur, etc. Mais sans la recherche appliquée et technologique, les chercheurs qui étudient les fondements du monde n'auraient pas les moyens d'avancer. Les deux fonctionnent en symbiose.

#### 4. La pluralité des mondes

À présent, nous en sommes certains : une grande partie des étoiles visibles dans le ciel sont des soleils entourés de planètes. Ce qui, depuis plusieurs siècles, relevait de l'intuition géniale de quelques philosophes est devenu une réalité scientifique. Épicure, dans sa célèbre « Lettre à Hérodoté », exprimait déjà l'idée d'une infinité des mondes possibles, en liaison avec la pérennité des atomes. Plus récemment, Giordano Bruno, brûlé vif à Rome en 1600, déclarait que tous les astres sont composés de la même matière, que toutes les étoiles sont des soleils, entourés d'autres planètes invisibles à cause de leur éloignement.

Penser à cette construction du savoir de l'humanité, depuis de nombreux siècles, en dépit de tous les blocages sociaux et religieux des époques successives, est particulièrement exaltant. En ce sens, la découverte scientifique de la première exoplanète en 1995 représente un aboutissement extraordinaire de la connaissance, tout en ouvrant des perspectives immenses vers une nouvelle dimension de la recherche et de la pensée humaine.

Le système solaire n'est donc pas unique : il existe de nombreux systèmes multiplanétaires dans l'espace. On estime actuellement qu'environ dix pourcent des étoiles devraient posséder des planètes. Parmi toutes ces planètes, existe-t-il des planètes comme la nôtre ? Y a-t-il de la vie ailleurs ? Encore récemment, cette question relevait plutôt de la science-fiction. À présent, c'est devenu une véritable démarche scientifique. Depuis que l'on peut voir la Terre de l'espace, il est possible de reconnaître, dans son rayonnement, les signatures de la vie. Le rayonnement de la Terre n'est rien d'autre que le rayonnement solaire, réfléchi par ses surfaces solides après avoir traversé l'atmosphère. Ainsi, on y découvre des absorptions caractéristiques dues au gaz carbonique, à la vapeur d'eau et à l'ozone, alors que dans le rayonnement de Mars et Venus, on remarque le gaz carbonique, mais

ni eau ni ozone. On peut donc espérer détecter éventuellement ces signatures de la vie sur d'autres planètes.

Sommes-nous seuls dans l'univers ? Existe-t-il des gens comme nous, quelque part, qui regardent de très loin l'étoile Soleil en se demandant s'il existe des planètes autour de cette étoile, et peut-être de la vie sur l'une de ces planètes ? Nous n'avons pas encore la réponse, mais la nouveauté est que cette recherche, considérée encore récemment comme de la fiction, est devenue une démarche scientifique. Nous ne connaissons qu'une seule sorte de vie, celle qui s'est développée sur Terre. Peut-être y en a-t-il d'autres sortes, mais il est difficile de chercher ce que nous ne connaissons absolument pas. Donc nous commençons par chercher s'il existe d'autres vies semblables à la nôtre, sur d'autres planètes ressemblant à la Terre, ailleurs dans l'espace.

La première étape, obtenir la preuve de l'existence de planètes en orbite autour d'autres étoiles, est accomplie. L'étape suivante consiste à découvrir des planètes semblables à la Terre, dans la zone dite « habitable », c'est-à-dire ni trop près ni trop loin de l'étoile pour que les conditions soient propices à la vie, en particulier que l'eau puisse être liquide.

Cette notion est cependant très schématique, car elle ne tient pas compte des circonstances particulières dues aux atmosphères planétaires. Sur Terre, nous le savons, tout serait gelé en permanence sans l'effet de serre dû à la vapeur d'eau et au gaz carbonique de l'atmosphère. Mais si la teneur en gaz carbonique augmentait trop, la température pourrait devenir invivable. Le climat terrestre représente un délicat équilibre entre l'énergie en provenance du Soleil et la manière dont l'atmosphère la restitue.

Ensuite, il faudra étudier l'atmosphère de ces planètes pour détecter éventuellement les signes de la vie. Les scientifiques en sont capables, même sans voir la planète directement. Il est en effet possible d'étudier l'absorption du rayonnement de l'étoile par l'atmosphère de la planète au moment précis où son ombre

commence à effleurer le bord de l'étoile. On peut aussi étudier la lumière réfléchiée par la planète lorsqu'elle s'apprête à passer derrière l'étoile.

Allons-nous, un jour, rencontrer réellement des êtres vivants autres que les terriens ? Il est clair que, si l'on peut un jour découvrir la signature du vivant quelque part dans l'univers, on aura beaucoup plus de chances de découvrir des bactéries que des êtres à notre image. Les bactéries sont beaucoup plus nombreuses que les êtres complexes comme les plantes ou les animaux et leur existence s'inscrit sur une durée immensément plus longue. Mais si vraiment on découvre scientifiquement des signatures de vie extraterrestre, la révolution sera immensément plus importante que la découverte de l'Amérique par Christophe Colomb !

## **5. Une révolution en marche**

La révolution copernicienne est à présent complètement dépassée. Non seulement la Terre tourne autour d'une petite étoile banale. Non seulement la galaxie contient deux cent milliards d'étoiles comme la nôtre, non seulement des milliards de galaxies semblables existent dans l'univers, mais en plus il y a des planètes autour d'un grand nombre de ces étoiles. Nous vivons un nouveau vertige qui exige une nouvelle élaboration de la pensée humaine.

Au cours du XX<sup>e</sup> siècle, l'Homme a pour la première fois quitté sa planète. Il est allé jusqu'à la Lune. Il a envoyé des instruments très loin dans l'espace, pour étudier de près les planètes du système solaire, ou encore pour observer la Terre ou le ciel depuis une région située au-delà de l'atmosphère. Certains de ces instruments spatiaux nous envoient des images de la Terre vue depuis l'espace lointain. Imaginez Copernic ou Galilée qui, grâce à leur esprit logique et leurs observations, avaient déduit

que la Terre était une planète, revenant dans notre monde actuel et observant cette planète comme un petit point bleu dans l'immensité des cieux !

Nous existons sur la seule de toutes les planètes connues actuellement à posséder les conditions du vivant. Il a fallu beaucoup de conditions particulières, peut-être de coïncidences, pour que la vie ait pu s'y développer. À présent, vue depuis l'espace, la finitude de la Terre nous apparaît brutalement. Notre planète est petite, et ses ressources sont limitées. Il est fondamental de la préserver.

Nous conjugons à la fois la vision de la Terre depuis l'espace, l'évidence de sa finitude, la connaissance de l'existence d'autres planètes, peut-être bientôt d'autres vies ailleurs. La communication est devenue instantanée, l'humanité toute entière fonctionne en réseau. Cette accélération des connaissances demande une nouvelle réflexion de l'humanité sur elle-même. Nous sommes à présent ancrés dans la pluralité des mondes réels. Mais le vertige continue bien au-delà : dans la mesure où les représentations du monde ont évolué au cours des millénaires, depuis la Terre entourée de planètes jusqu'à l'univers lointain en passant par le système solaire et la galaxie, l'idée de pluralité des mondes a pris une autre dimension. Elle représente maintenant le symbole des recherches actuelles sur les univers parallèles, évoquées ultérieurement dans ce livre. Existe-t-il d'autres univers que le nôtre ?



# Chapitre 4

## L'infiniment petit et les limites de la connaissance

François Vannucci

La compréhension des premiers instants de l'univers se fonde sur la physique des particules élémentaires. Tout autant innervée de physique subatomique que d'astrophysique, la cosmologie ne peut faire l'économie d'un détour par l'infiniment petit. Quelque chose, pourtant, semble aujourd'hui freiner les découvertes dans ce domaine : les limites sont-elles atteintes ?

### I. La quête de l'infiniment petit

Le XX<sup>e</sup> siècle a été le siècle d'or de la physique des particules. Nous voyons aujourd'hui des détails cent millions de fois plus fins qu'au début du siècle, et le progrès est parallèle dans le domaine de l'infiniment grand, puisque l'univers exploré est aujourd'hui cent millions de fois plus étendu.

En effet, à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, l'Homme concevait la matière comme constituée d'atomes. Cette hypothèse vint de considérations sur les associations chimiques des éléments. L'atome, mot venant du grec signifiant indivisible, est caractérisé par une taille de  $10^{-10}$  mètres. Mais déjà, les premiers signes d'une structure beaucoup plus fine émergeaient avec la découverte de la radioactivité et celle de l'électron.

L'exploration de l'infiniment petit se fit en plusieurs étapes. D'abord Rutherford démontra expérimentalement que l'atome,

malgré son nom, est formé : d'un point dur central, le noyau, portant des charges électriques positives ainsi que presque toute la masse ; et d'électrons, de charge négative, orbitant autour. Tous les éléments connus répertoriés dans la table de Mendeleiev, sont ainsi interprétés comme un assemblage de protons et neutrons plus ou moins nombreux formant le noyau. Les électrons équilibrent la charge des protons présents, sauf en cas d'ionisation.

La recette de construction de la matière semblait alors très simple, puisqu'elle se contentait de seulement trois particules élémentaires. Les choses devaient se compliquer rapidement et le monde des particules enfla jusqu'à atteindre 300 représentants aux propriétés très disparates. De surcroît, la théorie demanda de faire une place aux antiparticules, ce que l'expérience confirma rapidement.

Les découvertes successives furent réalisées, d'abord à l'aide des rayons cosmiques, dont l'origine n'est pas encore complètement élucidée, mais qui se présentent sous la forme de protons primaires, de grande énergie, permettant des collisions avec les atomes rencontrés lors de la traversée de l'atmosphère. Ainsi furent découverts le positron, le muon et les particules étranges. Les rayons cosmiques offrent donc des sondes énergiques pour explorer la matière, mais leur flux est aléatoire. Les grands progrès sont alors venus de mesures systématiques effectuées auprès d'accélérateurs de plus en plus puissants. En effet, pour sonder des dimensions de plus en plus petites, il faut bombarder la matière avec des faisceaux de plus en plus énergiques. Ceci est justifié par la mécanique quantique qui associe à chaque particule une onde de longueur d'autant plus faible que l'énergie est plus élevée. De fait, en augmentant l'énergie des sondes, une structure à l'intérieur des protons et neutrons fut trouvée. Des points durs se révélèrent, on les appela quarks.

La connaissance du monde est tributaire du pouvoir d'observation des instruments disponibles. En 1609, Galilée pointa une lunette vers le ciel. D'un seul coup, il augmentait l'étendue de l'univers observable par un facteur 30. De même, dans le domaine de l'infiniment petit, les fantastiques progrès accomplis ont été permis grâce à la mise en œuvre d'appareillages de plus en plus imposants. Aujourd'hui nous savons que protons et neutrons ne sont pas élémentaires, mais formés de quarks, et toute la matière ordinaire connue se comprend comme un assemblage de quelques constituants élémentaires dont la taille est inférieure à  $10^{-18}$  mètres. La connaissance humaine a donc repoussé les frontières de l'inconnu de huit ordres de grandeur.

Mais pour réussir ce programme, il a fallu développer des instruments à la pointe de la plus audacieuse technologie. D'énormes moyens ont été mis en œuvre pour la construction et l'utilisation d'accélérateurs de plus en plus performants ainsi que des détecteurs associés. De vastes collaborations de physiciens se sont formées pour mener à bien cet énorme effort. Travailler à la limite de la connaissance demande de relever de multiples défis, à la fois technique, informatique mais aussi sociologique et financier. D'où la morose constatation : un mur de gigantisme semble graduellement s'ériger devant la poursuite d'un tel programme.

## **2. Où en sommes-nous ?**

Les constituants élémentaires se partagent en deux classes aux propriétés bien différenciées : les particules dites de matière, qui sont des fermions de spin  $1/2$ , et les particules d'interaction ou de champ qui sont des bosons portant un spin entier. Le spin est un nombre quantique lié au nombre de tours qu'il faut faire faire à une particule pour la retrouver identique à elle-même.

Les particules de matière regroupent d'une part les leptons (insensibles à l'interaction forte), parmi lesquels on trouve les électrons mais aussi les neutrinos, et d'autre part les quarks (au cœur de la matière usuelle) qui s'associent pour former toutes les autres particules, protons et neutrons mais aussi pions, kaons...

Ainsi, toute la matière ordinaire repose sur l'assemblage de 6 quarks et 6 leptons. Ces objets élémentaires sont flanqués de 6 antiquarks et 6 antileptons. Ces derniers, qui ont des propriétés analogues mais des charges (électriques ainsi que généralisées) contraires, ont été mis au jour expérimentalement.

Il faut ensuite ajouter les particules de champ. On connaît quatre interactions fondamentales agissant entre constituants : forte, électromagnétique, faible et gravitationnelle. Ces interactions se comprennent comme échange de 12 particules de champ parmi lesquelles le photon, qui est le messager de l'interaction électromagnétique.

Aujourd'hui, les constituants élémentaires forment un ensemble cohérent d'une poignée d'objets primordiaux qui ont tous été étudiés en détail. Cela ne signifie pas qu'on peut tous les individualiser. Les quarks ont la curieuse propriété de ne jamais apparaître librement. Mais leur existence est assurée et leurs paramètres caractéristiques sont bien mesurés.

On sait que la liste des constituants élémentaires est complète, il n'y a plus de nouveaux représentants à découvrir. La « réalité » qui transparaît au niveau des dimensions de  $10^{-18}$  m est comprise. Ces objets primordiaux se différencient par les interactions qu'ils subissent et aussi, dans une même famille, par leurs masses. Une théorie extrêmement bien vérifiée jusqu'à présent, appelée le modèle standard, rend compte avec une grande précision de tous les phénomènes naissant entre constituants.

Pourtant, tout n'est pas résolu. Tout d'abord, la théorie s'appuie sur des objets sans masse. Or on sait que ces objets ont une masse. Un processus appelé « brisure spontanée de la symétrie du

vide » résout ce paradoxe, mais il nécessite l'introduction d'une nouvelle particule encore à découvrir appelée boson de Higgs. Par ailleurs, la théorie actuelle n'est pas entièrement satisfaisante car elle repose sur trop de paramètres libres et la gravitation (complètement négligeable au niveau des constituants) reste jusqu'à présent en dehors du champ de compréhension du modèle standard.

Pour sursoir à ces limitations, une théorie très spéculative imagine que les constituants ne sont plus des objets ponctuels mais de minuscules cordes dont les états de vibration reproduisent les divers objets connus. Ces considérations très spéculatives fixent une prochaine étape dans les dimensions de l'infiniment petit. Malheureusement, ce nouveau niveau d'élémentarité est prédit à  $10^{-35}$  m. C'est dire s'il sera difficile de le vérifier expérimentalement.

### **3. La prochaine étape : le LHC**

L'organisation européenne pour la physique des particules, le CERN, a construit l'accélérateur le plus ambitieux de l'histoire humaine. Appelé LHC (Large Hadron Collider), ce nouveau dispositif permet d'étudier le bombardement de protons d'énergie 7 TeV contre des protons de même énergie. Une telle énergie dans la collision peut être comparée à celle du choc entre deux moustiques en vol, c'est énorme pour des particules élémentaires.

À vrai dire, le but de cette recherche n'est pas directement lié à un nouveau niveau d'élémentarité. Il s'agit ici de conclure l'épopée des constituants élémentaires et de leurs interactions par la découverte du boson de Higgs déjà introduit. Cette nouvelle particule est nécessaire pour rendre cohérente la théorie, par ailleurs expérimentalement très bien vérifiée. Mais l'espoir réside dans la possibilité de découvrir une physique nouvelle allant au-

delà du modèle standard, même si le domaine exploré restera encore très éloigné de celui suggéré par les cordes.

Pour cette recherche, le LHC a multiplié les défis. Le collisionneur, qui associe deux accélérateurs lovés l'un dans l'autre, est construit dans un tunnel souterrain de 27 km de circonférence. Les protons tournent dans une chambre à ultravide sous l'effet d'un champ magnétique de 9 T, grâce à la technique supraconductrice, et à une température de 1,9 K, inférieure à celle du cosmos.

Le collisionneur nécessite des « microscopes » proportionnés pour analyser toutes les particules produites lors des interactions de protons. Ces instruments sont à la fois gigantesques, ils concurrencent en poids la Tour Eiffel, et d'une infinie précision. Il faut reconstruire le passage des particules à quelques 10 micromètres près, dans un volume égal à celui d'un bâtiment de huit étages.

Le défi d'une telle recherche est aussi informatique, puisque l'information sortant des collisions battra tous les records : elle atteindra un flux équivalent à celui de 20 communications téléphoniques simultanées de tous les habitants de la terre. Il faudra une batterie de 50 000 ordinateurs pour le digérer. Le défi est également financier et sociologique, les deux grosses expériences qui s'appêtent à fonctionner regroupent chacune 2 500 physiciens, certains engagés dans cet effort depuis plus de 20 ans.

#### **4. Les deux frontières**

Victor Hugo fait en quelque sorte office de prophète quand il écrit dans les Misérables : « Qui donc connaît les flux et les reflux réciproques de l'infiniment grand et de l'infiniment petit. »

En effet, et c'est l'une des surprises de cette recherche, il existe un lien fort entre le monde de l'infiniment petit et celui de l'infiniment grand. Cela est apparu dans les années 1970, quand on réalisa clairement que pour comprendre l'évolution de l'univers,

il fallait utiliser les recettes de la physique nucléaire et des particules apprises dans les laboratoires. La matière céleste n'est pas différente de celle terrestre, comme le pensaient à tort les Anciens. Les mêmes constituants trouvés sur Terre sont à la base de la formation des astres. Ainsi, la connaissance de la structure profonde de la matière éclaire aussi les tribulations du début de l'univers.

Le Big-bang se comprend comme une soupe très chaude de particules en interactions très violentes. Le modèle standard y est à l'œuvre dans des conditions extrêmes. Avec l'expansion de l'espace au cours du temps, les énergies se sont modérées et les interactions se sont faites moins violentes. Ainsi, augmenter l'énergie des particules, revient à se rapprocher des conditions qui existaient au moment de l'explosion initiale, accélérer les particules c'est donc remonter le temps ! Le LHC devient en quelque sorte une « métaphore » du Big-bang. Il permettra d'étudier, comme en éprouvette, les conditions réalisées proches du temps 0. De fait, l'énergie qui sera atteinte dans la nouvelle machine clonera ce qui existait quand l'univers avait  $10^{-10}$  s.

Or, l'astrophysique et la cosmologie actuelles nous ont récemment livré une énorme surprise : la matière ordinaire si finement étudiée pendant un siècle ne représente que 4 % du contenu de l'univers. Les 96 % manquants demeurent inconnus. En fait deux nouvelles composantes contribuent au contenu invisible de l'univers. L'une d'elle, la matière cachée ou sombre, représenterait 25 % du total. Elle se révèle par la dynamique des galaxies et serait constituée d'une nouvelle forme de matière neutre électriquement et ne subissant que des interactions faibles. Elle est donc très difficile à mettre en évidence. Les 72 % restant, appelés énergie noire, sont encore plus mystérieux, et personne n'a encore proposé une solution crédible pour les expliquer.

Le LHC qui reproduit sur une taille minuscule l'état de l'univers peu après le Big-bang pourrait donc apporter des éléments

de réponse pour comprendre un peu mieux ces composantes mystérieuses.

## 5. L'approche asymptotique de la connaissance

L'évolution des progrès dans l'exploration de l'infiniment petit semble marquer le pas. La dernière grande surprise venue d'un accélérateur date de 1974, et depuis quelques années, les découvertes arrivent au compte-gouttes, au prix d'un effort sans cesse grandissant. Pendant les années d'or, jusqu'en 1990, l'énergie des dispositifs accélérateurs gagnait un ordre de grandeur tous les 10 ans. Aujourd'hui, cet accroissement est freiné par la taille des instruments projetés. En suivant l'évolution passée, le LHC aurait dû donner ses premiers résultats en l'an 2000. On est loin du compte. Tout se passe comme si l'expérience approchait de la connaissance qui lui échappe encore de manière asymptotique.

En parallèle, les théoriciens ne connaissent pas les mêmes freins. Quand Pauli proposait une nouvelle particule, le neutrino, pour résoudre la violation apparente du principe de conservation d'énergie, il s'excusait presque de cette hypothèse désespérée, selon ses propres termes. Aujourd'hui, on ne craint pas de surcharger le monde des particules d'une myriade de nouveaux objets, et les théories les plus ambitieuses explorent des domaines hors d'atteinte de toute expérimentation.

En étant optimiste, on peut toujours espérer l'avènement de nouvelles techniques d'accélération permettant d'explorer des champs plus larges. Il n'en reste pas moins que certains objectifs semblent trop éloignés des possibilités envisageables concrètement pour être testés expérimentalement. L'étape de mise en évidence du niveau  $10^{-35}$  m suggéré par la théorie des cordes demanderait un accélérateur à la taille de la galaxie. Cela montre tout de suite l'impossibilité de réaliser un tel objectif. Or, comme Pascal le remarquait dans le cas du vide, ce qui est in-

observable est non scientifique. On peut dès lors se poser la question de la poursuite de telles recherches.

Ce point de vue peut évidemment être mis en cause et les chapitres les plus « philosophiques » de cet ouvrage présentent des alternatives à cette vision très poppérienne de la démarche scientifique.

## 6. Qu'est-ce que connaître?

On cherche à connaître toujours plus précisément l'infiniment petit, encore faut-il définir ce que signifie *connaître*. Dans la vie quotidienne, connaître, c'est voir. Or, on ne voit jamais directement les acteurs de l'infiniment petit. On élabore une théorie à partir des faits déjà recensés, puis on valide ou on rejette la théorie en vérifiant ses prédictions. Comment comprend-on l'infiniment petit ?

Le cas de l'expérience de Rutherford est exemplaire. Quand le physicien voulut mettre en évidence le noyau de l'atome, il bombarde une mince feuille d'or avec la sonde la plus énergétique dont il disposait, en l'occurrence un faisceau de particules  $\alpha$  provenant de la radioactivité naturelle. La présence du noyau portant une charge électrique positive, la même que celle des particules  $\alpha$ , se révélait par la distribution caractéristique de ces particules après leur diffusion. Des charges électriques de même signe se repoussant, ceci devait se refléter dans la distribution des  $\alpha$  à la sortie de la feuille. En particulier, on observait une certaine probabilité que les particules soient rétrodiffusées, c'est-à-dire rebondissent sur la matière. Ce résultat était attendu dans le cas où la particule  $\alpha$  arrivait directement dans la ligne de visée du noyau. Tout est cohérent avec l'hypothèse proposée et le modèle imaginé est justifié.

Le noyau découvert par Rutherford atteignait les dimensions  $10^{-15}$  m, comme on put le déduire de la distribution expéri-

mentale. L'atome répondait donc au modèle planétaire avec des électrons de charge négative orbitant autour d'un noyau de charge positive portant presque toute la masse. Peu après, on comprit que le noyau était formé de protons et neutrons, généralement appelés nucléons, dont la taille approche  $10^{-15}$  m.

L'énergie nécessaire pour valider la théorie de Rutherford atteignait 1 MeV, pour utiliser les unités communément employées. LeV est l'énergie acquise par un électron accéléré dans une différence de potentiel de 1 volt. C'est typiquement l'énergie des photons de la lumière visible. Ainsi le rayonnement  $\alpha$  avait une énergie un million de fois supérieure.

La technique de Rutherford fut répétée de nombreuses fois au cours de l'histoire, avec des sondes de plus en plus énergiques. Les accélérateurs des années 1950 atteignirent le GeV, ce qui constitue un nouveau gain d'un facteur mille. Ils permirent de démontrer que les nucléons possèdent eux-mêmes une structure interne. Ce ne sont pas des objets ponctuels. Il fallut attendre les années 1970 et des énergies encore dix fois supérieures pour mettre directement au jour les quarks, qui sont les points durs à l'intérieur des nucléons. Comme on vient de l'esquisser, on ne voit jamais directement les objets qui peuplent l'infiniment petit. On ne fait que constater leur effet sur une sonde extérieure. Cela n'est pas sans rappeler les ombres projetées sur l'écran de la caverne de Platon. Dans notre cas, les particules se reflètent sur l'écran d'immenses détecteurs très sophistiqués.

Comprendre, c'est donc imaginer une représentation mathématique qu'on validera en vérifiant la justesse de ses prédictions. L'expérimentation réduit ensuite le réel au calculable. Si donc, pour comprendre il faut voir, selon l'avis du naïf, on peut aussi dire que pour comprendre il faut croire, comme l'enseigne Saint Augustin.

## 7. La science aux limites

Einstein a dit : « Le plus incompréhensible est que le monde soit compréhensible ». Cette réflexion résume en fait plusieurs énigmes de la connaissance qui se réalisent à l'unisson. Tout d'abord, l'univers se laisse ausculter, au moins dans une certaine mesure ; il se laisse palper et examiner par l'intelligence humaine. Ceci n'a rien d'évident. Ensuite, l'Homme s'intéresse aux phénomènes qui s'y déroulent, bien au-delà des simples besoins immédiats qui assurent son bien-être. Ceci est *a priori* étonnant. Et cet intérêt de l'Homme pour les mystères de l'univers est rendu opérant grâce à l'invention d'un langage abstrait, celui des mathématiques. Pourquoi cet artifice intellectuel se trouve-t-il précisément adapté à comprendre la nature ? C'est une chose surprenante qu'une invention toute spéculative de notre cerveau soit la clef pour déchiffrer le monde. La structure intellectuelle de l'esprit humain et la structure objective de la nature sont en rapport et communiquent dans le mode mathématique. D'autres auteurs de ce livre ne partagent pas ce point de vue mais tout ceci relève selon moi d'une coïncidence *a priori* très improbable.

Mais le monde est-il entièrement compréhensible ? L'esprit humain parviendra-t-il un jour à comprendre tous les mystères offerts à sa curiosité ? On vient de montrer que la recherche qui explore les domaines extrêmes de la physique, infiniment petit ou infiniment grand, bute ouvertement contre le mur du gigantisme expérimental pour aller de l'avant. On peut encore espérer des avancées, mais les nouvelles découvertes demanderont de plus en plus d'efforts pour se concrétiser.

La théorie quant à elle n'a pas ces limitations, l'esprit humain continue à inventer, et les théoriciens n'ayant jamais été aussi nombreux, les idées nouvelles foisonnent à la frontière du connu actuel. Beaucoup d'officiants se réfugient dans l'irréalisable des

cordes, à l'horizon des  $10^{-35}$  m. Les théoriciens devancent toujours l'expérience, c'est la règle du jeu, mais les validations deviennent plus difficiles. La fuite en avant amène à des projets de taille rédhibitoire censés départager les théories concurrentes.

Ceci amène à une situation inédite. On taxait les physiciens d'arrogance, eux qui s'appuyaient sur une science qui n'admet pas de réfutation. La physique prenait les aspects d'une connaissance dogmatique qu'on ne pouvait critiquer. Avec les développements récents, on se retrouve devant une science beaucoup plus humble qui laisse le choix entre diverses interprétations. Et comme ces interprétations n'ont de toute façon aucune incidence sur la vie de tous les jours, personne ne s'en offusque.

Ces réflexions trouvent un écho dans l'état des idées religieuses au XVII<sup>e</sup> siècle. Pascal fustige les compromis que toléraient les Jésuites. Dans *Les Provinciales*, il met à nu la technique des opinions probables qui permettent tous les laisser-aller : une opinion est appelée probable lorsqu'elle est fondée sur des raisons de quelque considération. D'où il arrive parfois qu'un seul docteur grave puisse rendre une opinion probable... Et le bon Père des Provinciales de préciser : L'affirmative et la négative de la plupart des opinions ont chacune quelque probabilité au jugement et assez pour être suivies avec sûreté de conscience. Ce n'est pas que le pour et le contre soient ensemble véritables dans le même sens ; cela est impossible ; mais c'est seulement qu'ils sont ensemble probables et sûrs par conséquent.

Il suffit de remplacer « bon Père » par « théoricien » pour donner une image approximative de la physique à venir.

## 8. Le problème de recouvrement

Il semble donc inéluctable que notre connaissance soit limitée par la disproportion de l'effort nécessaire pour faire progresser le connu. Une partie du réel restera insoupçonnée ou du moins

invérifiable. Il se cachera peut-être parmi les théories disponibles, mais on ne saura le prouver. Il faudra croire pour comprendre, mais chacun pourra choisir à sa guise entre diverses interprétations expérimentalement impossibles à départager.

Une autre réflexion, celle-ci du type « *top-down* », amène à une conclusion analogue quant à la limitation de la connaissance accessible. La démonstration utilise les concepts de théorie des ensembles. Appelons  $A$  le domaine des mystères de l'univers, et  $B$  la capacité du cerveau humain à les révéler. Il n'y a *a priori* pas de raison pour que les deux ensembles concordent.  $A$  doit être plus grand que  $B$  puisque l'Homme est partie intégrante de  $A$ . Donc  $B$  peut être plus petit ou égal à  $A$ .

S'il est plus petit, nous avons démontré la proposition que l'ensemble des mystères à l'œuvre dans l'univers n'est pas accessible à l'Homme. Seule une partie des phénomènes peut se projeter dans le cerveau humain.

Considérons maintenant l'hypothèse  $B$  égal à  $A$ . L'esprit humain serait à la dimension de l'univers, tous les mystères lui seraient accessibles. Cette situation rappelle les arguments qui ont amené certains cosmologistes à invoquer le principe anthropique. Ce principe est avancé pour expliquer l'adaptation troublante de l'univers actuel à notre existence. Les paramètres physiques sont effectivement finement ajustés. Il suffirait d'une variation infinitésimale de certains d'entre eux pour que l'évolution de l'univers ait été tout autre, et nous ne serions pas ici pour en juger. La réponse à ce dilemme est de supposer l'existence d'une très grande quantité d'univers, chacun ayant un jeu de paramètres différents, et nous nous trouvons précisément dans celui qui a permis notre apparition. Il semble que ces multi-univers soient en dehors du champ de l'expérimentation, et donc, nous nous retrouvons dans l'hypothèse  $B$  inférieur à  $A$ .

Si, au contraire, on suppose un univers unique, ce qui demeurera probablement une hypothèse invérifiable, on pourrait invo-

quer l'évolution du cerveau, mais il ne s'agit plus d'adaptation à des conditions extérieures. La coïncidence demanderait un accord, une connivence étroite entre l'Homme et l'univers. Un tel scénario ne laisse plus de place au hasard, il pointe vers une intentionnalité dans la création.

Alors, y a-t-il une limite absolue à notre connaissance ? Probablement, puisque prouver le contraire semble impossible. De cette démonstration, on en tire que l'esprit humain peut concevoir des idées au-delà du réel, celle des multi-univers par exemple, mais alors qu'est-ce que le réel ? D'ailleurs, même si on parvenait à démontrer qu'il y a antinomie entre la science et les approches subjectives de la pensée, cela signifierait que l'intelligence humaine n'est pas capable d'unifier ses connaissances et qu'elle avance en chancelant.

## **9. Au-delà des limites ?**

La quête continue de connaissances traduit la perplexité de l'Homme vis-à-vis de l'univers dans lequel il vit. À un certain niveau, la question fondamentale revient toujours au-devant de la scène : pourquoi existons-nous ? Le désir de connaissance révèle peut-être une tentative pragmatique de répondre à cette question. Comme si, le jour où tout serait connu, on obtiendrait la réponse au problème existentiel. Mais alors, si la connaissance permise est finie, le pourquoi de notre présence sur terre ne pourra jamais trouver sa solution !

L'Homme réalise depuis peu que les ressources de la planète sont limitées. De même, il faudra probablement se faire à l'idée que le domaine de la connaissance accessible à l'intelligence est fini. Ceci amène à une phrase désabusée de L. Carroll dans *Sylvie et Bruno* : « Et alors ? Quand on n'a plus rien à apprendre, est-il possible de se reposer, satisfait de son savoir, avec l'éternité devant soi ? ».

# **Partie 2 :** **Cosmologie et recherche** **de « nouvelle physique »**

## **Chapitre 5**

### **La cosmologie : un laboratoire** **de l'infiniment petit**

Philippe Brax

Longtemps l'univers ne fut le sujet que de diverses cosmogonies. Dans la tradition occidentale, le poète Hésiode puis Apollodore nous donnèrent accès à un aperçu mythologique de l'histoire de l'univers depuis le chaos originel. Ce ne fut qu'avec Thalès et ses successeurs à Milet que le questionnement scientifique sur l'univers prit son essor. Cependant, il a fallu attendre Einstein et sa théorie de la relativité générale pour que l'étude du cosmos devienne une discipline centrale en physique, au même titre que la physique des phénomènes subatomiques. De nos jours, les questions sur l'infiniment grand à des échelles bien plus importantes que la distance qui nous relie aux galaxies les plus proches

et sur l'infiniment petit comme il est mis en évidence par les expériences menées au CERN, se rejoignent. C'est cette convergence qui est l'objet du présent chapitre, introduit par quelques rappels des notions fondamentales esquissées dans les chapitres précédents.

## **I. Une description effective de l'univers**

La relativité générale, écrite par Einstein pendant la première guerre mondiale et brièvement présentée dans les premiers chapitres de cet ouvrage, permet de réconcilier la relativité restreinte de 1905 et la gravité telle qu'elle était connue depuis Newton. En particulier, elle repose sur un principe fondamental d'équivalence entre inertie et gravité. Dans sa version dite faible, ce principe stipule que tout corps soumis à la gravité a un mouvement indépendant de sa composition. Sa forme forte ajoute que le résultat de toute expérience non-gravitationnelle ne dépend, ni de la vitesse du laboratoire, ni de sa position. Évidemment cette deuxième partie du principe d'équivalence est un postulat sur la nature de la physique en tout point de l'univers. En particulier, il nécessite que les lois de la physique doivent être les mêmes partout, même hors de portée de nos dispositifs expérimentaux.

L'étude physique des propriétés de l'univers repose sur la relativité générale qui donne le cadre pour décrire l'évolution de l'univers. La relativité générale nous apprend également que la forme géométrique de l'univers dépend de son contenu en énergie. Il y a une correspondance entre la courbure de l'espace-temps (comprenant à la fois les degrés de liberté spatiaux mais aussi la variable temps) et la densité d'énergie de la matière en chaque point de l'univers. Ainsi, de façon presque naïve, nous voyons apparaître un premier lien intrinsèque entre matière et géométrie, c'est-à-dire entre la physique de l'infiniment petit et

celle de l'infiniment grand. D'autres liens plus subtils apparaîtront ultérieurement.

Nous venons de décrire deux des trois piliers sur lesquels repose la cosmologie<sup>1</sup> : la relativité générale pour la géométrie et la physique des particules pour le contenu en matière. En principe, ceci pourrait être suffisant pour avoir une compréhension globale de l'histoire de l'univers<sup>2</sup>. En pratique, un autre postulat est utilisé afin de simplifier l'analyse : il s'agit du principe cosmologique. Celui-ci généralise au cosmos le principe de Copernic qui stipule que la Terre n'a pas de position privilégiée dans le système solaire. Le principe cosmologique énonce que l'univers est isotrope et homogène sur de grandes échelles de distance. L'isotropie concerne l'absence de direction privilégiée quand l'homogénéité impose l'absence de position privilégiée.

Ces trois piliers de la cosmologie théorique sont et doivent être confrontés aux observations. C'est effectivement le cas pour la relativité générale et le principe d'équivalence, depuis les expériences du baron Eötvös, jusqu'à la physique des pulsars binaires. Le principe cosmologique est plus difficile à confronter aux expériences. Néanmoins, sous la pression des données qui ont mené à la découverte de l'accélération récente de l'univers, celui-ci fait l'objet d'un débat très actif.

Armé de ces trois hypothèses, une des premières applications de la théorie de la relativité générale fut la découverte par Einstein de solutions qui décrivent un univers statique et sphérique. En effet, à la fin des années 1910, rien ne semblait indiquer que l'on doive remettre en cause la staticité de la sphère céleste, vision qui remontait aux fondements aristotéliens de l'univers<sup>3</sup>. Ces solutions mettent en jeu un fluide de matière non-relativiste qui modélise la répartition de la matière observable de l'univers et un terme dont l'origine physique est plus mystérieuse et qu'Einstein baptisa constante cosmologique. Cette constante, dans les équations de la relativité, a pour effet de

contrebalancer l'attraction gravitationnelle et donc de rendre possible l'existence d'un univers statique. Ce qu'Einstein n'avait pas entrevu, mais qui fut remarqué peu de temps après par de Sitter, c'est qu'un univers soumis à cette constante cosmologique se trouve être en expansion accélérée sans présence de matière. Cette violation du principe de Mach<sup>4</sup>, si cher à Einstein, continue de poser de grands problèmes de nos jours, et ce depuis la mise en évidence de l'accélération récente de l'expansion de l'univers.

En fait, nous savons depuis Friedmann et Lemaître, que la plupart des solutions cosmologiques des équations de la relativité générale décrivent des univers non-statiques. Leur évolution temporelle dépend intrinsèquement du contenu matériel de l'univers. Avant de plonger dans la description des différentes ères de l'histoire de l'univers, il faut revenir sur la description physique de la matière telle qu'elle est comprise depuis une vingtaine d'années.

Il est particulièrement important d'insister sur une propriété fondamentale de la matière : la notion de découplage d'échelle. Celle-ci paraît si naturelle qu'elle apparaît très peu dans l'enseignement de la physique. Il semble en effet évident que la physique puisse se décrire en termes de couches successives. Vient en premier lieu la physique macroscopique (du mouvement des corps dans l'atmosphère par exemple) puis, à des échelles de l'ordre de quelques nanomètres, se révèlent les molécules, elles-mêmes composées d'atomes. Puis, en allant encore explorer des échelles beaucoup plus petites, il apparaît que les atomes eux-mêmes ont un cœur composé d'un noyau à l'échelle du Fermi<sup>5</sup>. Chaque noyau contient des protons et des neutrons qui sont faits de quarks et de gluons qui, jusqu'à présent, apparaissent comme des objets ponctuels. Chaque couche de cette description peut être séparée de celles intervenant sur des échelles plus petites : la chimie des molécules ne dépend que très peu de la

physique nucléaire. En fait, le lien entre les différentes théories qui décrivent la nature à différentes distances est plus subtil et plus intéressant.

Pour bien s'en rendre compte, utilisons un exemple de physique très classique, aux multiples applications et à la portée universelle : la mécanique des fluides. En un sens, la mécanique des fluides est un triomphe de la physique du XIX<sup>e</sup> siècle et de la description newtonienne de la nature. En effet, l'étude de l'écoulement des fluides, depuis les cours d'eau jusqu'aux tornades, peut se comprendre grâce à une seule équation de la dynamique, dite de Navier-Stokes<sup>6</sup>, qui décrit l'évolution temporelle du champ de vitesse d'un fluide en chaque point de l'espace et en chaque instant, en fonction du champ de pression et de la densité. Cette équation, d'une concision remarquable, contient un seul paramètre : la viscosité. Ce paramètre phénoménologique doit être mesuré et il caractérise chaque fluide. Une fois ce nombre mesuré, il est possible de prédire l'écoulement d'un fluide dans n'importe quelle circonstance. Cette démarche est à la base de l'approche effective de la nature, utilisée en particulier en physique des hautes énergies. La description effective des phénomènes naturels à une échelle donnée s'effectue grâce à des champs<sup>7</sup> dépendant de l'espace et du temps. Le modèle mathématique décrivant le comportement de ces champs dépend d'un petit nombre de paramètres, dits pertinents, qui doivent être mesurés expérimentalement. Une fois cette mesure effectuée, il est possible de prédire les résultats de toutes les expériences analysant la physique à cette échelle caractéristique.

Cette approche phénoménologique, utilisant des théories effectives, est appliquée à toutes les échelles de la physique connue, jusqu'à l'infiniment petit (comme il est décrit par le modèle standard de la physique des particules). Une autre propriété fondamentale des théories effectives est la possibilité de calculer<sup>8</sup> les paramètres pertinents à une échelle donnée en fonction de ceux

apparaissant à une échelle plus petite<sup>9</sup>. Revenons sur l'exemple de la viscosité afin d'illustrer notre propos. Une meilleure compréhension de l'origine physique de la viscosité fut donnée par la théorie cinétique qui nous apprend que les gaz et les fluides sont composés de molécules qui ont un mouvement désordonné caractérisé par une vitesse moyenne et un libre parcours moyen<sup>10</sup>. La viscosité peut alors s'exprimer simplement en fonction de ces grandeurs. C'est un premier pas vers une compréhension microscopique de la viscosité. Le pas suivant vient du fait qu'il est possible de calculer le libre parcours moyen à partir de la physique atomique. En effet, celui-ci dépend de la densité des molécules et de la section efficace d'interaction entre molécules.

Ainsi, la mécanique quantique non-relativiste qui régit la physique atomique permet de calculer une propriété de la matière (comme la viscosité), qui avait été introduite de manière purement phénoménologique.

Cette démarche, utilisant des théories effectives, jouit de grands succès puisqu'elle rend compte de la physique atomique, puis nucléaire et enfin des particules. Le modèle standard de la physique des particules est une théorie effective décrivant le comportement des quarks, des leptons et des bosons de jauge. Il dépend de vingt paramètres, ce qui est beaucoup, même pour une théorie effective. Ces paramètres caractérisent l'énergie du vide, les masses des particules et leurs constantes de couplage. Bien évidemment, une activité théorique intense a conduit à de nombreuses extensions du modèle standard. Nous verrons leur importance pour la cosmologie.

## **2. Les succès de la physique des particules en cosmologie**

Le succès de la physique des particules dans la description des phénomènes cosmologiques vient d'une observation cruciale.

Dans un univers en expansion, la température des espèces en équilibre thermodynamique, tels que le bain de photons fossiles, est inversement proportionnelle au facteur d'échelle de l'univers. Ce facteur mesure l'accroissement des distances dû à l'expansion de l'univers. Ainsi, lorsque l'univers était plus petit<sup>11</sup>, sa température était plus élevée. Or la température d'un plasma caractérise la densité d'énergie de ses constituants. Il est donc raisonnable de considérer que l'univers a exploré de façon dynamique toutes les phases de la matière. En extrapolant cette régression temporelle vers des températures de plus en plus élevées, on rencontre une singularité initiale de densité infinie appelée Big-bang (suivant la chronologie présentée dans le premier chapitre de cet ouvrage). Bien évidemment, les lois de la physique qui régissent les premiers instants ne sont pas encore connues. La physique du modèle standard des particules nous donne une image de l'univers tel qu'il se présentait un dixième de milliardième de seconde après le Big-bang. Pour décrire ce qui avait lieu avant cet instant, il existe de nombreuses théories spéculatives au-delà du modèle standard mais aucune certitude.

Quelles sont les observations de ces premiers instants de l'univers dont on peut espérer disposer ? Il se trouve qu'il existe une limitation fondamentale à cette quête. En effet, ce n'est qu'au bout de 380 000 ans après le Big-bang que l'univers cesse d'être opaque et libère les photons. Il est impossible d'obtenir une image optique de l'univers plus jeune que 380 000 ans<sup>12</sup>. Il existe aussi une autre difficulté observationnelle qui est liée à l'unicité de l'univers et à l'impossibilité apparente de réaliser une étude statistique des propriétés de l'univers. En fait, il se trouve que des points qui sont éloignés de plus d'un degré sur une carte du ciel au moment où l'univers devient transparent n'ont jamais été en contact causal<sup>13</sup>. Il est donc possible de sectionner une carte du ciel primordial en blocs et de considérer ces blocs comme des univers indépendants. Alors, les outils statistiques

d'analyse des données expérimentales peuvent être utilisés en cosmologie.

Le meilleur accord entre la physique des particules et la cosmologie est obtenu dans le cadre de l'étude de l'abondance des éléments légers comme l'hélium ou le deutérium. Ces éléments furent créés pendant la nucléosynthèse primordiale, moins de 3 minutes après le Big-bang. Cet événement ayant eu lieu bien avant l'instant où les photons deviennent observables, notre connaissance ne peut en être qu'indirecte : elle provient de l'évolution temporelle (jusqu'à nos jours) de la densité des éléments légers. Il se trouve que la nucléosynthèse met en jeu à la fois la physique nucléaire et l'interaction faible entre particules, car elle dépend de façon cruciale de la désintégration du neutron en proton. Dans ce cadre, on peut calculer l'abondance attendue de l'hélium et l'estimer à environ 24 %. Ceci est en très bon accord avec les observations. La nucléosynthèse donne aussi accès à un paramètre fondamental appelé  $\eta$ . En effet, l'abondance du deutérium et de l'hélium-3 dépend du rapport du nombre de particules de matière (appelées baryons) sur le nombre de particules de lumière (appelées photons). Ce rapport est constant pendant l'histoire de l'univers et permet de déterminer la densité de la matière visible actuellement. Il se trouve que seulement 5 % de la densité d'énergie totale de l'univers est sous forme baryonique. Ceci est un petit nombre sur lequel nous reviendrons plus tard. Concentrons-nous d'abord sur le nombre de baryons par rapport au nombre de photons. Ce rapport, le paramètre  $\eta$ , est de dix ordres de grandeur plus petit que l'unité (un dixième de milliardième).

Au moment de la nucléosynthèse, ce rapport est fixé. Il trouve son origine dans la phase précédente de l'histoire de l'univers, que l'on appelle baryogenèse. Pendant cette période, les protons et les neutrons se forment à partir des briques fondamentales que sont les quarks. Or, en physique des particules, chaque particule

est associée à une antiparticule de même masse mais de charge électrique opposée. Ainsi chaque quark possède son antiquark. Il peut donc se former à la fois des baryons et des antibaryons. Or nul n'a jamais observé de quantité importante d'antimatière dans l'univers. Il est possible d'en créer avec des accélérateurs comme au CERN. Les rayons cosmiques qui nous bombardent de particules continûment en provenance du cosmos peuvent aussi être porteurs d'antiparticules. Mais, de l'antimatière stable en contact avec la matière, ceci est impossible. En effet, il se produit une désintégration explosive de la matière quand elle entre en contact avec l'antimatière. Notre univers est ainsi fait de matière. Ceci pose un problème ardu : pourquoi l'univers a-t-il évolué vers un état où la matière domine sur l'antimatière ? Et comment expliquer la petitesse du nombre de baryons par rapport au nombre de photons ? Pour résoudre ce problème de la baryogenèse, la physique des particules énonce trois conditions dites d'Andreï Sakharov<sup>14</sup> :

- il doit exister des interactions entre particules qui ne conservent pas le nombre de baryons<sup>15</sup>,
- la baryogenèse doit avoir lieu en dehors de l'équilibre thermodynamique,
- Il doit exister une flèche du temps microscopique.

La première de ces conditions paraît tautologique. La seconde tient au fait que, comme pour une réaction chimique, une réaction de physique des particules qui tendrait à créer des baryons à l'équilibre thermodynamique serait aussi favorable à leur disparition. Enfin, s'il existe une flèche du temps, alors un déséquilibre entre matière et antimatière créé par des réactions hors de l'équilibre thermodynamique ne peut être effacé par le processus inverse. Le modèle standard de la physique des particules réunit ces trois conditions. Malheureusement, si la baryogenèse est qualitativement possible dans le modèle standard, il est

impossible d'en rendre compte quantitativement. C'est là un échec de notre compréhension de l'infiniment petit qui est mis en évidence par des considérations cosmologiques. La cosmologie joue ici son rôle de laboratoire de l'infiniment petit.

### 3. Au-delà du modèle standard

La baryogenèse nous offre le premier exemple de phénomène physique dont l'explication ne peut être donnée par le modèle standard. Le domaine spéculatif des théories qui étendent le modèle standard à des échelles plus petites, c'est-à-dire à des temps plus proches du Big-bang dans l'histoire de l'univers, s'appelle « la physique au-delà du modèle standard ». Ce domaine est mu à la fois par des considérations phénoménologiques, esthétiques et de cohérence interne. La première classe de tels modèles est apparue dans les années soixante-dix et porte le nom de grande unification. En effet, le modèle standard est une petite unification de la force faible responsable de la radioactivité avec l'électromagnétisme. Il est envisageable que l'interaction forte à laquelle on doit la cohésion des noyaux, soit aussi unifiée avec les forces faibles et électromagnétiques. Ceci pourrait avoir eu lieu à très haute énergie<sup>16</sup>. Les modèles de grande unification peuvent expliquer la baryogenèse<sup>17</sup>.

La cosmologie suggère aussi une autre extension du modèle standard. En effet, les mesures des courbes de rotation des galaxies<sup>18</sup> ne peuvent être expliquées par la seule présence de matière lumineuse<sup>19</sup>. Leur attraction gravitationnelle ne suffit pas. Les astrophysiciens postulent l'existence d'une nouvelle forme de matière appelée « matière noire » qui donnerait lieu à l'existence d'un halo entourant chaque galaxie. Une composante uniforme de matière noire serait aussi présente partout dans l'univers. La matière noire est devenue un élément essentiel de la cosmologie moderne. Elle représenterait vingt-cinq pourcent de

la densité de matière de l'univers. Évidemment, il est du ressort de la physique des particules d'identifier ce qui compose cette forme de matière. Or, aucune particule du modèle standard ne peut être un candidat valable pour incarner la matière noire. Là encore, il faut aller au-delà du modèle standard pour trouver une explication plausible à la matière noire : elle pourrait être le fait de particules un peu plus lourdes que les médiateurs de l'interaction faible. Ces particules sont recherchées très activement. Elles pourraient être détectées directement grâce à leur interaction avec les noyaux sur terre, ou indirectement en observant le rayonnement provenant du centre de galaxies et qui serait engendré par leur annihilation.

Nous avons mentionné les reliquats de particules qui furent créés dans les premiers instants de l'univers, avant que celui-ci ne devienne transparent. Ces particules nous donnent des indications sur la phase suivant immédiatement le Big-bang, qui ne peut être connue qu'indirectement. En revanche, le rayonnement électromagnétique résiduel issu de l'instant où l'univers devint transparent<sup>20</sup>, est observable<sup>21</sup> et nous donne de très nombreux renseignements sur la physique de l'univers primordial. Les photons qui nous parviennent de la surface de dernière diffusion sont en correspondance directe avec les fluctuations quantiques d'une autre particule dont l'existence est postulée au-delà du modèle standard : l'inflaton.

Le rayonnement de fond cosmologique est presque uniforme dans toutes les directions d'observation. Seules de petites fluctuations de température de rayonnement existent, elles sont de l'ordre d'une part pour cent mille. Il est possible de décomposer la répartition angulaire de ces fluctuations en harmoniques comme on le ferait pour des notes de musique. Ce spectre nous apprend que l'univers a dû connaître une période d'expansion accélérée très rapide avant que la matière ne soit créée. Cette ère d'inflation met en jeu une échelle d'énergie caractéristique qui

est très élevée, quatorze ordres de grandeur plus haute que les échelles de la physique du modèle standard<sup>22</sup>. C'est l'échelle la plus grande à laquelle on a accès expérimentalement<sup>23</sup>.

L'inflation est un phénomène extrêmement simple à modéliser. En ce sens, il révèle l'extrême économie dont la physique fait preuve pour expliquer des phénomènes aussi complexes. En fait, il suffit qu'il ait existé, dans l'univers primordial, un champ d'inflaton roulant lentement le long d'une pente douce correspondant à son énergie potentielle. Lors de son roulement lent, l'énergie potentielle de l'inflaton est la source de l'accélération de l'expansion de l'univers. Les fluctuations quantiques de l'inflaton dans son mouvement engendrent les fluctuations du rayonnement de fond cosmologique. Elles sont aussi celles qui, bien plus tard dans l'histoire de l'univers, donnent lieu à l'existence des galaxies. À la fin de l'inflation, le champ d'inflaton se met à osciller autour d'une position d'équilibre. En oscillant, il cède de l'énergie à des particules de matière qui sont ainsi créées et sont à l'origine des constituants décrits dans le modèle standard.

Pendant l'inflation, la taille de l'univers croît d'un facteur dont le logarithme vaut soixante. Cet énorme accroissement se passe en un temps très court et de façon superluminale<sup>24</sup>. Il joue un rôle d'uniformisation de l'univers observable puisqu'il est issu d'une région de taille initialement minuscule. Ceci explique la grande isotropie du rayonnement de fond cosmologique.

L'inflation représente une étape quasi ultime dans la description des phénomènes physiques par des théories effectives. Il suffit de trois paramètres pertinents pour comprendre le spectre du rayonnement de fond cosmologique. Ce sont la valeur du potentiel, sa pente et sa courbure, évaluées pendant l'inflation. À la fin de l'inflation, apparaît la matière, elle aussi représentée par des théories effectives, par exemple de grande unification, qui ne dépendent que de peu de paramètres pertinents comme les masses et les couplages des particules. Comme nous l'avons indiqué,

il est très improbable que l'expérience nous donne accès à des époques antérieures à l'inflation. Néanmoins, les modèles d'inflation n'étant que des théories effectives, il est louable de se demander s'il existe une description des instants précédents l'inflation dans l'histoire de l'univers ou, de façon équivalente, de la physique à des énergies encore plus élevées. Rien ne semble empêcher que la physique soit une régression infinie de modèles, chacun donnant une description de la matière à des échelles toujours plus petites.

Il existe une échelle très importante qui est cent fois plus petite que l'échelle de l'inflation (ou cent fois plus grand en termes d'énergie). C'est l'échelle de Planck, en dessous de laquelle les propriétés quantiques de l'interaction gravitationnelle ne peuvent plus être négligées. En dessous de cette échelle, il est nécessaire de définir une théorie quantique de la gravitation<sup>25</sup>.

#### **4. Les théories effectives mises en défaut**

La gravité quantique pourrait être aussi une théorie effective. Dans ce cas, il est peu probable que la physique expérimentale puisse indiquer s'il existe une théorie plus fondamentale dont elle est une approximation. Les paramètres pertinents de cette théorie effective auraient un statut très particulier. Ils ne seraient pas calculables et devraient être déduits de l'expérience<sup>26</sup> ; mais une fois mesurés, ils deviendraient les paramètres fondamentaux de notre compréhension de l'univers.

Il existe une autre possibilité qui a la faveur de nombreux théoriciens : la gravité quantique pourrait être un sous-produit d'une théorie plus fondamentale qui ne met pas en jeu des particules mais des cordes. Dans ce cadre, la théorie dépendrait uniquement d'une échelle et d'une constante de couplage. Toutes les théories effectives dont nous avons parlé, du modèle standard à l'inflation, devraient se déduire de cette théorie sans l'ambiguïté

due à des processus de plus haute énergie que ceux mis en jeu en théorie des cordes<sup>27</sup>. La théorie des cordes réaliserait ainsi la complétion ultra-violette (c'est-à-dire « haute énergie ») de toutes les théories effectives de l'infiniment petit.

Malheureusement, il semblerait que la théorie des cordes admette de nombreux états fondamentaux. Chacun pourrait représenter un univers possible. Notre univers ne serait alors qu'un parmi tant d'autres... Cette conception anthropique de la physique pourrait avoir un impact sur le principal problème dont souffrent les théories effectives : les problèmes de hiérarchie.

Revenons à une théorie effective à basse énergie dont on connaît les quelques paramètres pertinents grâce à des mesures expérimentales. Imaginons que cette théorie ne soit qu'une approximation d'une autre théorie effective à plus haute énergie. Dans ce cas, on peut calculer les paramètres pertinents à basse énergie en fonction de ceux à haute énergie. On trouve alors que les paramètres dimensionnés de la théorie à basse énergie (comme l'énergie du vide et les masses) ont une dépendance directe vis-à-vis des processus physiques se passant à haute énergie<sup>28</sup>. C'est l'origine des problèmes de hiérarchie : comment garantir que l'énergie du vide et les masses des particules soient de l'ordre de grandeur de l'échelle de la théorie de basse énergie, quand ces paramètres dépendent de phénomènes à haute énergie et devraient donc avoir une valeur de l'ordre de grandeur de l'échelle de la théorie à haute énergie ? Pour être plus explicite, prenons l'exemple du boson de Higgs, pierre angulaire du modèle standard et dont la masse ne doit pas excéder l'échelle d'énergie du modèle standard. Or, la masse du boson de Higgs est sensible à la physique à très haute énergie, comme la grande unification, et devrait donc avoir une valeur de l'ordre de cette échelle. Ceci serait une catastrophe pour le modèle standard. Pour résoudre ce problème, il est souvent supposé qu'existe une « supersymétrie » qui associerait à chaque particule un super-par-

tenaire. Par contre pour l'énergie du vide, aucune symétrie ne semble pouvoir garantir qu'elle ne soit pas de l'ordre de l'échelle de grande unification ou de Planck. Or, en 1998, l'énergie du vide a été mesurée : sa valeur remet en cause toute la démarche des théories effectives.

Rappelons qu'Einstein avait introduit une constante cosmologique dans le cadre de la relativité générale afin d'obtenir des solutions statiques et sphériques des équations de la relativité générale. La constante cosmologique peut être comprise comme l'effet qu'aurait un fluide de pression négative sur la géométrie de l'univers. Dans le modèle d'Einstein, la constante cosmologique vient compenser l'attraction gravitationnelle. Sous son action et si la constante cosmologique est assez grande par rapport à la densité de matière de l'univers, le mouvement des galaxies est en expansion accélérée. C'est exactement ce qui a été observé pour certaines supernovae lointaines dont le comportement permet de suivre la trace de l'expansion de l'univers. En fait, même en l'absence de toute mesure de la constante cosmologique, sa valeur est contrainte par la borne de Weinberg. Celle-ci est obtenue en remarquant que, si la constante cosmologique excédait cinq cents fois la densité de la matière, les grandes structures de l'univers ne se seraient pas formées<sup>29</sup>. La mesure de 1998, plusieurs fois confirmée depuis, nous apprend que l'univers est composé à soixante-dix pour cent d'une énergie associée à la constante cosmologique. Cette énergie porte le nom d'« énergie noire ».

La mise en évidence de l'énergie noire vient heurter la description de l'univers en termes de théorie effective. En effet, nous savons, depuis les premiers balbutiements de la mécanique quantique, qu'énergie du vide et constante cosmologique ne sont que la manifestation de la même physique : le vide quantique se compose de nombreuses paires particule-antiparticule apparaissant et disparaissant au gré des fluctuations quantiques.

Ceci confère une densité d'énergie au vide. Une manifestation expérimentale de l'existence de l'énergie du vide a été obtenue par la mise en évidence de l'effet Casimir. Lorsque deux plaques métalliques sont en vis-à-vis et séparées par du vide, les fluctuations quantiques du champ électromagnétique induisent une force attractive entre les plaques. C'est une preuve tangible de la nature non-triviale du vide quantique.

Dès les années vingt, Pauli s'est interrogé sur la possibilité d'observer de possibles effets gravitationnels de l'énergie du vide. Il avait également remarqué que la valeur de l'énergie du vide était très sensible à la physique à haute énergie. À cette époque, la masse de l'électron apparaissait comme l'échelle à partir de laquelle la description de la nature en terme de particules telles que l'électron devrait être modifiée. La valeur de l'énergie du vide qu'il en déduisit était tellement élevée qu'il en conclut que l'énergie du vide ne pouvait être soumise à la gravité<sup>30</sup>. De nos jours, le même calcul nous apprend qu'en fait l'énergie du vide devrait être de l'ordre de la masse de Planck. C'est-à-dire cent vingt ordres de grandeur plus grande que celle qui est observée depuis 1998 ! Cette énorme différence, entre ce que l'approche de la physique de l'infiniment petit par des théories effectives nous apprend et les observations cosmologiques, est un des problèmes les plus difficiles de la physique actuelle. Sa solution viendra sans doute modifier notre compréhension de l'infiniment petit et de l'infiniment grand.

La détection d'une si petite énergie du vide pourrait n'être qu'un artefact de notre interprétation des données cosmologiques. D'autres pistes sont ainsi suivies comme la modification de la gravité à grande distance. En effet, rien ne nous indique que la relativité générale soit la théorie de la gravitation aux échelles cosmologiques. Néanmoins, la relativité générale est une structure si rigide mathématiquement qu'il est difficile de la déformer sans introduire des aberrations physiques comme des

particules violant le principe de causalité<sup>31</sup>. Une autre possibilité serait que nous vivions dans un vide de notre univers. L'accélération apparente de l'univers ne serait alors qu'un biais dans l'interprétation erronée que nous ferions des données. En un sens, nous assisterions à une violation du principe de Copernic puisque notre position comme planète appartenant à un vide de l'univers serait très particulière. Dans les deux cas, modification de gravité à longue distance et rôle d'une inhomogénéité locale, aucune conclusion quant à leur statut théorique ou expérimentale n'est encore concluante.

Enfin, il me semble important de mentionner que, même au sein du système solaire, il existe de petites anomalies par rapport à la relativité générale<sup>32</sup>. Peut-être que, comme ce fut le cas de l'avance de périhélie de mercure vis-à-vis de la théorie newtonienne, ces anomalies nous indiquent-elles que la relativité générale doit être modifiée. Et, dans ce cas, peut-être l'accélération de l'univers pourra-t-elle être enfin expliquée.

En conclusion, les lois qui gouvernent la géométrie et la dynamique de l'univers font apparaître un lien profond entre, la structure de la matière et du vide quantique d'une part, et la structure de l'univers à grande échelle d'autre part. Cette dualité entre l'infiniment petit et l'infiniment grand est un des aspects fondamentaux de la compréhension de l'univers telle qu'elle a émergé depuis l'avènement de la cosmologie de précision au cours des quinze dernières années. Notre connaissance de la matière et de l'univers sera à la fois améliorée par des expériences de physique des particules, comme le LHC au CERN, et des expériences à but cosmologique, comme la mesure des fluctuations du rayonnement de fond cosmologique par le satellite Planck. L'étude de l'univers nous promet encore de nombreuses surprises.



# Chapitre 6

## Métacosmologie

Michel Cassé

Ce texte est dédié à Aurélien Barrau, sous l'aile de la citation de Nietzsche : « Il faut encore avoir le chaos en soi pour donner naissance à une étoile dansante ».

Les propos qui suivent concernent moins l'essence de la cosmologie qu'une large zone périphérique qui en constitue le revêtement expressif. Qu'on me pardonne si je cède à la tendance universelle consistant à immiscer la poésie dans le donné cosmologique, car la physique considérée comme métaphore de la vérité cosmique n'est pas faite de mille vies de physiciens, mais de milliards de rêves humains.

### I. Petit lever

Du texte du ciel, nous ne voyons que la ponctuation étoilée et, en liant les points, nous faisons des constellations de questions. La haute suite des hommes est comme un seul homme qui subsiste et interroge perpétuellement l'éternel poseur d'énigme, le cosmos. Chasseur diurne sous atmosphère transparente, c'est l'insistance de la lumière du Soleil qui a forgé ses yeux<sup>1</sup>. Les atomes du soleil parlent aux atomes de l'œil le langage visible de la lumière. Révolution sensorielle, sensible, sensuelle : *omnivoyants*, nous percevons désormais tous les rayonnements et tels des poètes nous décalquons l'infrarouge, l'ultraviolet, et les imperceptibles nuances X et gamma de la violence créatrice par le truche-

ment de nos prothèses électroniques satellisées<sup>2</sup>. Du ciel, nous avons appris plus en 50 ans qu'en 13,7 milliards d'années. Nous sommes devenus des astronomes de l'invisible. Nous nous sommes infiltrés dans la jeunesse turbulente de l'univers jusqu'aux jours orageux de son enfance et réécrivons la genèse en termes scientifiques. Mais qu'avons-nous compris des origines, des neiges d'antan ?

## 2. Libération d'univers

De l'univers, chacun a sa définition, je serais tenté de me conformer à celle d'Herman Bondi (1961) : « c'est l'ensemble des objets (événements) auxquels les lois physiques peuvent être appliquées de façon cohérente et pertinente. » L'univers est donc uni par ses lois... Ce serait le plus grand des systèmes législatifs<sup>3</sup>. Mais, adoptant cette caractérisation, je craindrais d'être encore trop limitatif et de porter atteinte à l'ampleur, la généralité et la libre majesté du concept, et amoureux du cercle, de raisonner en cercle. Car que seraient les lois si elles n'étaient universelles<sup>4</sup> ? La cosmologie ne sera pas interprétée comme un discours clos réduisant à lui-même toute altérité. Nous verrons à trois pas d'ici qu'à partir du moment où on épouse l'idée qu'elle est la description de l'univers observable, bulle causale que nous occupons, dont la lumière émise il y a 13,7 milliards d'années marque la frontière, mais également de son au-delà, le mystère n'est pas tant dans « univers » que dans « lois »<sup>5</sup>. Pour nous libérer l'esprit et ne point nous enfermer dans une vision trop provinciale ou paroissiale, car l'expérience nous a montré que l'univers est toujours plus grand (ou fourbe/courbe) qu'on le croit, laissons le libre de toute définition et de toute limite : aussi bien spatiale : infini, peut-être ; législative : indéfini, selon le droit rationnel et mathématique ; et, finalement, numérique : pluriel. Partons avec ce bagage léger : l'univers est un système physique donc quan-

tique. Ouvrons la cage aux oiseaux, nous ne nous sentirons plus incarcérés dans la notion d'univers et étendrons l'altérité jusque dans ses confins. Au centre du discours résidera la cosmologie et non plus l'univers, car lorsque le physicien parle de lui, il ne sait pas vraiment de quoi il parle. Comme nous le verrons, la science voit et lit de nos jours dans la cosmologie des énergies du vide et elle étend le droit d'exister (avec ou sans conscience de soi ou de l'univers) à d'autres cosmos inaccessibles. Est-ce dégradation et fin de science, science, ou suprascience ?

Comment le donner à vivre et à penser ? Notre univers n'est pas un objet physique, il ne peut être conçu sur le modèle de la chose, c'est un ordre à retrouver et cet ordre est temporel, littéraire, oserai-je dire, comme celui d'une page écrite, ou d'un livre. Une histoire parmi les autres, un roman dans une bibliothèque, plein de cris et de fureur. Un roman, que dis-je, un mythe fédérateur à la fine pointe de la science : une parole qui convoque les technologies et les techniques de calcul galopantes et les mentalités cheminantes. Il y a du temps dans les mots et de l'espace entre eux. L'univers est tout autant une histoire qu'une cosmographie. Infini peut-être, il s'étend encore, le poème ? L'amour ? L'univers ! Le verbe<sup>6</sup>... Certains (mathématiciens) s'expriment avec des rasoirs, des éclairs, d'autres (cosmologues) avec des cieux bleus ou sombres. Ils rendent manifeste la connexion naturelle du microcosme quantique et du macrocosme cosmologique. Cette citation de Levi-Strauss explose à ma mémoire :

« Entre le savant qui accède par le calcul à une réalité imaginable et le public avide de saisir quelque chose de cette réalité dont l'évidence mathématique dément toutes les données de l'intuition sensible, la pensée mythique redevient un intercesseur, seul moyen pour les physiciens de communiquer avec les non-physiciens [...]. Ainsi les événements que les savants imaginent pour nous aider à combler le gouffre qui s'est creusé entre l'expérience macroscopique et les vérités accessibles au vulgaire :

Big-bang, univers en expansion, etc., ont tous des caractères du mythe... Il existe donc à nouveau pour l'Homme un monde surnaturel. Sans doute les calculs, les expériences des physiciens démontrent sa réalité... » (Histoire de Lynx)

À l'époque<sup>7</sup> je m'étais récréé en lui opposant cette parole de Jacques Lacarrière : « aux savants les photons, aux autres les amours ». Aujourd'hui les photons de masse nulle m'apparaissent suspects, plus très naturels, et la fable de Higgs<sup>8</sup>, qui préserve leur virginité, me semble controuvée... Mon doute est tel qu'il ne peut s'accroître, même si l'univers est, dit-on, en expansion...

De par ses particularités épistémiques et méthodologiques, la cosmologie, *science historique mathématisée*, occupe une place très spéciale. On ne peut s'étonner du fait que le monde *comme un tout* ne soit pas accessible empiriquement. « Zéro », « Infini », « Tout » sont poétiques et mathématiques mais non point physiques. La connaissance fournie par la modélisation cosmologique, vu l'ampleur de son programme (retracer l'évolution de l'univers observable, mais non seulement cela, statuer sur l'extérieur de l'horizon cosmique et les *alter-univers* éventuels), ne peut être aussi explicative et sûre que la connaissance obtenue de haute lutte dans le laboratoire, il faut se faire une raison. Mais il faut aussi ajouter que si l'espace est une fonction du corps naturel l'esprit humain est capable d'omniprésence non spatiale.

### 3. Le guide du perplexe

Les découvertes pleuvent car nous voyons de plus en plus loin, de plus en plus fin, dans le visible aussi bien que dans l'invisible. Nous faisons, en chaque lumière, le spectre et la carte de l'univers observable. Car Uranie, la vieille muse, fait flèche de tous bois sur les montagnes ou dans l'espace, dans les plaines, sous la terre la glace ou la mer. Les télescopes sont asservis et relayés par

des ordinateurs : ce sont des yeux-cerveaux-parlants. Et dans ce concert, radio, IR, V, UV, X, gamma, neutrinos et ondes gravitationnelles, c'est la planète Terre tout entière qui se tourne vers l'ancienne jeunesse des cieux.

Nous avons appris du ciel plus de choses en une génération que tous nos ancêtres depuis l'aube de l'humanité. Et ceci est vrai, mais nous avons également pris la mesure de notre nuage d'inconnaissance, de notre nuit obscure. Peut-on au moins dire que la cosmologie est en progrès ? Que le modèle cosmologique a conduit à une meilleure compréhension que celui qui prévalait il y a 20 ans ? D'un côté la cosmologie physique a piqué une pointe sous l'aiguillon de l'observation et de la théorie. Les paramètres du modèle cosmologique sont maintenant mesurés avec une précision d'horloger. Mais de l'autre, il apparaît que 95 % du contenu matériel/énergétique de l'univers observable est de nature inconnue. Mise en abîme : toute clarté se paie d'un mystère. *Victoire à la Pyrrhus*. Cette situation suscite un malaise dans la civilisation astrophysique et motive une double réflexion : sur la place de la cosmologie dans la science, ce que nous avons ébauché ; sur la place de l'Homme dans l'univers, que nous allons maintenant aborder, après la grande rupture, le saut quantique, que constitue l'inflation cosmologique induite par un remarquable écarteur d'espace nommé  $\Lambda$ , sigle de la constante cosmologique d'Einstein.

#### **4. Les bonnes œuvres de l'inflation**

L'inflation cosmologique est, par définition, la phase d'expansion accélérée (exponentielle ou presque), hyperexplosive et supraluminique, induite par une gravitation répulsive<sup>9</sup> dans l'univers primordial qui lui donne espace, matière et structure. Brève ( $10^{-35}$  s), mais efficace<sup>10</sup>, elle se termine par extinction de son champ moteur, l'inflaton, sa conversion en lumière, matière

et antimatière<sup>11</sup>. Le moyen le plus simple de modéliser l'inflation est de supposer l'existence d'un champ scalaire, l'inflaton, et de forger son potentiel sur mesure. En l'absence de théorie fondamentale le physicien jouit de la liberté de jouer avec les potentiels et d'inventer de nouveaux scénarios à l'envi. Ainsi l'inflation n'est qu'un paradigme, un scénario, ce n'est pas une théorie, à proprement parler, et, à plus forte raison, une théorie de la genèse. *L'inflation n'est pas la création*, car ce n'est pas l'origine absolue du monde, il lui faut une source. C'est cependant le cadre théorique essentiel pour décrire l'univers primordial et ce paradigme a survécu à la confrontation avec les données observationnelles de plus en plus précises. Ce n'est pas son moindre mérite que d'avoir résolu des problèmes d'envergure cosmologique comme le caractère euclidien de la géométrie de l'espace, l'homogénéité presque parfaite du rayonnement cosmologique fossile sur des échelles supérieures à l'horizon causal au temps où la lumière s'est détachée de la matière ( $t = 380\,000$  ans après Big-bang). Enfin, l'inflation a donné une explication naturelle à l'origine des galaxies et de leur réseau arachnéen : les germes des structures sont des fluctuations quantiques de densité du substrat originel qui s'amplifient lorsque leur longueur d'onde, proportionnelle au facteur d'échelle, est étirée au-delà du rayon de Hubble ( $\lambda > 1/H$ ).

## 5. Why quantum ? (Wheeler)

Grand mère, pourquoi l'univers est-il... si grand si vieux si droit si uniforme... si quantique... c'est pour mieux t'accoucher mon enfant... L'inflation est le cheval de la physique quantique dans la Troie cosmologique. Ses résultats sont si dignes d'éloges qu'elle peut servir de motivation à l'intrusion de la mécanique quantique dans la cosmologie, et au-delà même, elle peut donner une réponse à la fameuse question de Wheeler, pourquoi la

mécanique quantique ? L'inflation est probablement la seule manière d'expliquer pourquoi l'univers est si grand, plat, homogène et isotrope, comme dit plus haut, et de surcroît fourré de matière et ciselé en galaxies. Juste avant la fin de l'inflation l'univers est pur  $\Lambda$ , vide de matière. La substance fertile de l'univers (atomes et lumière), ainsi que la matière noire, sont produits en totalité par un processus quantique de transmutation en fin d'inflation. De surcroît, les fluctuations quantiques de l'inflaton au terme de son existence sont germes de galaxies. Il n'y aurait ni matière ni galaxies dans l'univers sans effets quantiques. Sans inflation, notre univers serait affreux. Sans physique quantique l'univers serait vide (A. Linde). C'est une réponse possible à la question de Wheeler, mais qui ne satisfera sans doute que les adeptes du raisonnement anthropique, que nous aborderons au terme de cet exposé.

## 6. Création hasardeuse de multiples cosmos

Avec l'invention de la cosmologie inflationnaire, la notion d'univers uniforme a été graduellement remplacée par celle de plurivers constitué d'univers localement uniformes<sup>12</sup>. La collection de ces univers représente une structure fractale en croissance et développement éternels, constituée d'univers de différentes propriétés<sup>13</sup>. Ce scénario a été récemment adopté par les cordeliers, car ils ont découvert un mécanisme de stabilisation des vides<sup>14</sup> et ont réalisé que le nombre total d'états de vide différents peut être extrêmement élevé. En raison de la transition aléatoire du faux vide en vide plus vrai<sup>15</sup> (de plus basse énergie), en certains points du *landscape* ou « paysage de vides »<sup>16</sup>, le plurivers se divise en zones thermalisées (pleines de lumière/matière à  $\Lambda$  atténué voire exténué) et zones (majoritaires en volume) vides de Matière/Lumière mais pleines de  $\Lambda$  intact et vivace. L'univers est un champagne généralisé dont nous n'occupons

qu'une bulle. Champagne pour tout le monde ! Cette vision spumescence, tout aussi joyeuse qu'elle puisse paraître ne rend pas suffisamment justice, encore, à l'extraordinaire dynamisme de  $\Lambda$ . Vigoureux entre les bulles, il fouette l'expansion, et celle-ci, exponentielle, crée toujours plus d'espace et donc de bulles, lesquelles s'écartent les unes des autres à des vitesses supraluminiques, ce qui interdit la communication usuelle<sup>17</sup> entre elles et confère à l'inflation l'éternité future, car  $\Lambda$  se régénère plus vite qu'il ne se mite. Le cosmologue assiste ébahi dans ce pépiement à la démultiplication effervescente des univers de papier et d'équations *ad infinitum*. Les univers-bulles prolifèrent au point qu'il ne sait situer l'origine du notre *arche* originare bulle. Le Big-bang lui glisse entre les doigts.

## 7. Création/Apocalypse

La physique ravit-elle la création des mains de la religion et de la métaphysique pour la mettre dans son escarcelle ou pour en annihiler le sens ? Le commencement absolu et auroral est une notion du sens commun, un préjugé, une croyance. Je ne crois pas au commencement ni à la fin. Big-bang est une onomatopée tapageuse. Il n'y a ni big ni bang, ni trou ni noir. Si l'univers est tout ce qui existe, l'émergence ne peut faire détoner un milieu préexistant. *Silence sur l'origine*. Le trou noir n'est ni trou, ni noir, il est gris sur les bords depuis qu'Hawking lui a ôté toute obscurité. *Silence sur la mort*. Le noir parle<sup>18</sup>.

Deux cosmologies se font face, l'une, physique, pudique, très recueillie, l'autre, inventive, chaleureuse et violente, menacée d'hystérie<sup>19</sup>. À la couture du monde et de l'oubli est l'inflation cosmologique, période d'expansion fabuleuse de l'espace, dont le moteur est  $\Lambda$ . Mais l'inflation n'est pas la création. Avant elle est la cosmologie quantique. En cosmologie quantique aussi bien que dans les approches cordelières, l'univers ressemble plus à une

particule<sup>20</sup> parmi tant d'autres qu'à un système gravitationnel lié à l'échelle la plus vaste. La cosmologie se fait brumeuse comme le fond de l'inconscient<sup>21</sup>, son équation fondamentale (celle de Wheeler-DeWitt) n'arbore plus le temps... L'univers (qui va se fragmenter en plurivers) naît de la transgression de l'impossibilité d'existence<sup>22</sup>, du passage d'un état d'énergie et d'extension nulle, à une perle d'énergie (totale) nulle, d'extension non nulle, et remplie de  $\Lambda$ . On parle de création à partir de rien, ou presque, tout le sel est dans ce presque... Mais ceci est une autre histoire...

## 8. École maternelle de la cosmologie

La théorie de l'univers est désormais subjuguée par l'ondulante et insinuante pensée quantique, inflationnaire et cordelière. Certains s'en inquiètent ou s'en affligent<sup>23</sup>, moi je m'en réjouis, sans toutefois y attacher croyance. La physique quantique a envahi le territoire de la cosmologie, montée sur l'inflation et la cosmologie quantique celui de la théologie, son oriflamme est  $\Lambda$ . Multiplicateur d'univers, écarteur d'espace, père de la lumière. Qu'est-il advenu à l'Homme pour qu'il invente  $\Lambda$ <sup>24</sup> ? Refaisons le chemin en arrière pour en défaire la genèse. Il y a une chaîne physique de la création : Cosmologie Quantique ; Inflation ; Big-bang et ce que l'on prenait pour le commencement n'était que la troisième étape.

Au bon vieux temps de la cosmologie enfantine on parlait du Big-bang comme de la dynamite, avec une admiration toute craintive : une fois pour toutes et tout en une fois l'univers explosait à l'existence. Et on admirait sa rage de s'étendre toujours d'avantage. *En ce temps-là...* Le vide quantique<sup>25</sup> était réservé à la physique des particules (régenté par la théorie quantique des champs). Personne n'imaginait une quelconque influence cosmologique du vide.

La conjonction du classicisme européen (Einstein), de la métaphysique chrétienne du commencement (Lemaître), de l'esprit révolutionnaire russe (Friedmann) et du pragmatisme anglo-saxon (Hubble) avait fait voler en éclat les sphères cristallines d'Aristote. Le concept dynamique de succession s'était substitué à la simultanéité divine. Il mettait l'accent sur la dimension temporelle, là où le terme d'univers pouvait paraître insister sur la dimension spatiale, volumique de la perception. Au temps heureux de la cosmologie et de l'atome roi :

En ce temps-là... la matière était exclusivement atomique.

La constante cosmologique était nulle.

Le vide, inoffensif, se tenait tranquille.

L'univers était uni par lois d'airain, uniques et invariables.

La relativité générale régnait en maître sur la cosmologie.

Les constantes étaient constantes<sup>26</sup>.

Physique des particules et cosmologie étaient des branches séparées (on faisait un usage modéré de la mécanique quantique, elle était réservée aux physiques atomique et nucléaire).

La physique avait des principes.

Rien n'était plus digne de respect en science que la prédiction vérifiée d'un phénomène insoupçonné.

## **9. Malaise dans la civilisation astrophysique**

Mais déjà le milieu était injuste pour les extrêmes. Née (?) obscurément d'un Big-bang, la matière trouvait une fin (misérable) dans les trous noirs. C'est à peine si on se préoccupait du chancre de Planck (nauséux tant l'espace-temps fluctue et grimace) et du cœur noué du trou noir. On entourait le temps dément d'un cordon sanitaire. On jetait les premières  $10^{-43}$  s et on gardait les 10 milliards d'années suivantes. Relativité générale et mécanique quantique étaient inconciliables.

Côté cour, la relativité générale, assure la connexion entre espace-temps-matière-énergie. Son alphabet est la géométrie,

son vocabulaire est émaillé de lignes, angles, surfaces et courbes. La *gravité est une propriété de la géométrie de l'espace-temps*, lequel n'est plus scène de tous les événements, mais acteur à part entière qui participe à la dramaturgie cosmologique. À l'échelle de Planck, la relativité générale affiche des valeurs déraisonnables, des infinis absurdes (dits pudiquement singularités). Elle porte en elle les germes de sa propre destruction. Côté jardin, la théorie quantique développe un alphabet constitué de symboles mathématiques et de nombres quantiques. Elle remplace les vocables déterministes simples et définitifs « jamais » et « toujours » par les termes statistiques « habituellement » et « rarement », plus prudents et nuancés. *Zéro est trop précis pour être quantique*. Mais cette théorie subtile et audacieuse quant à la matière, conserve pieusement un espace-temps classiquement fixe sur lequel elle fait jouer particules et forces. L'arène de la physique quantique n'est ni plus ni moins que celle des ébats des êtres cosmologiques petits mais atomiquement grands que nous sommes. La gravité est incarnée par l'hypothétique graviton, céleste page qui porte beau avec son spin 2. Las, les interactions des gravitons entre eux suscitent des infinis absurdes et des probabilités supérieures à 100 %, etc. Comment voulez-vous qu'elles s'entendent ? *Ces théories ne sont pas compatibles au niveau fondamental*. Elles n'ont en commun que la déraison qu'elles expriment avant brisure : une faille.

## 10. Métaphysique unitariste

Nous avons donc vécu sur des théories incomplètes<sup>27</sup> mais vigoureusement enseignées. *In illo tempore*, au vingtième siècle, physiciens et astronomes, nous avons tous été creusés dans le monolithe scientifique, dans le respect des mesures et des lois d'airain. L'intuition métaphysique qui courrait sous le dogme était l'inévitabilité de l'unicité : l'univers, dans sa solitude absolue, ne saurait être différent de ce qu'il est. Il est né un et unique,

une fois pour toutes et tout en une fois. Il n'y a pas de liberté pour l'univers, pas de choix, pas de double. Pas de contingence. Après la deuxième guerre, on récitait le mythe cosmogonique d'un univers né explosivement. Mais au moins existait-il la possibilité d'encadrer le cosmos dans un système cohérent et unitaire, la cosmologie relativiste, qui décrivait son évolution mais non point son origine.

Il y avait, d'un côté, les matérialistes (quantiques, atomiques et nucléaires), qui se pressaient en foule, et de l'autre des géomètres distingués, un peu guindés. Pétris de relativité générale et amoureux du charme sinueux de la courbure, on les trouvait dans les rangs clairsemés des cosmologues, que l'on considérait dans les cénacles d'acier de la physique dure comme d'aimables poètes. Le credo des physiciens était que les lois de la nature sont décrites de manière univoque par un principe d'action qui détermine complètement le vide, le spectre des particules élémentaires, les forces et les symétries. La physique s'était forgée dans la tradition prédictive et la recherche de corrélations fondées sur des principes de symétrie et de dynamique était son objectif. Cette méthodologie impeccable avait abouti à d'indéniables succès. Par exemple la masse nulle du photon était imputée à  $U(1)$ , la symétrie de phase de l'électrodynamique. La supersymétrie laissait accroire à l'unification des interactions forte et électrofaible à très haute énergie ( $10^{16}$  GeV).

Le paradigme de l'unification opérait donc au service du plus grand réductionnisme. L'argument philosophique dominant était que son règne impérial devait culminer dans la construction d'une théorie fondamentale, un temple commun, ou une maison du peuple, laquelle répondrait à toutes les questions possibles et donc ne pouvait se permettre le moindre paramètre libre, la moindre liberté. Les esprits aspiraient à un totalitarisme théorique, en quelque sorte. Mais des problèmes virulents, des apories cruelles, s'y opposaient aux dernières extrémités du temps et

de l'espace : trous noirs et singularité originelle, résistances suprêmes.

Aujourd'hui encore, dans la même veine (ou illusion ?), la gravité quantique vise l'unification royale, mais à quel prix ! Les forces sont unifiées, égalisées à haute énergie, certes, mais les types de particules et les dimensions de l'espace se démultiplient, ce qui va à l'encontre du principe d'économie de l'esprit. L'amour d'une chimère n'est-il pas le plus fidèle des amours ? Halte s'insurge la philosophie ! Le problème fondamental de l'idée d'unicité est qu'elle peut être fausse. Il peut, très logiquement, y avoir multiplicité et contingence fondamentale<sup>28</sup>. Prouvez-le ! dit le moniste.

## **II. Une vision unitaire sans principe (ni vérification expérimentale)**

Las ! Ladite théorie des supercordes ne repose sur aucun principe de base (tel le principe d'équivalence ou le principe de superposition, socles respectifs de la relativité générale et de la mécanique quantique). Les principes physiques et géométriques fondamentaux qui constituent la fondation de la théorie des supercordes sont encore inconnus. Ce n'est donc pas une théorie mais un labyrinthe de procédures mathématiques et d'intuitions : une proposition théorique.

« It is as if we had a long list of solutions of the Einstein equations, without knowing the actual equation that defines the theory / or, to take a simpler example, string theory in its present form most likely has the same relationship to its ultimate form as Kepler's astronomy had to Newton's physics » (Smolin 2000).

La cohérence logique et conceptuelle est-elle suffisante pour établir l'adéquation d'une théorie postulée de la nature ? La « théorie » des cordes travaille à rebours : elle cherche à remon-

ter à son principe (sans jamais l'atteindre tout comme la cosmologie). La testabilité empirique reste son point faible. Mais on peut toutefois faire un certain nombre de calculs (statistiques) qui mesurent l'improbabilité de la condition humaine dans le plurivers<sup>29</sup>, ou plus exactement concernent le *landscape* ou paysage de vide, qui est une sorte de portrait de famille des vides, de tous les vides. Vides de tous les univers, unissez-vous !

Les divers univers résident au fond des vallées. L'altitude de chacune est mise en correspondance avec la constante cosmologique locale,  $\Lambda$ . L'effet tunnel tient le rôle de passeur d'un univers à un autre.

L'érosion sémantique du mot univers a fait de lui un concept émacié. Il se regonfle avec la notion de plurivers. Les mythes cosmologiques de nos ancêtres ont été remplacés par une *cosmologie inventive* quantique et inflationnaire ( $\delta t < 10^{-12}$  s) qui prolonge vers le temps zéro la *cosmologie physique*, reposant sur des bases empiriques solides.

## 12. Levée d'astres dans le ciel de la connaissance ?

La cosmologie est la science du plus grand, mais que se passe-t-il de plus grand en cosmologie ? Les cosmologues étaient jusqu'ici les prophètes du passé, de l'infiniment petit et de l'infiniment grand, les voilà en passe de devenir ceux de l'infiniment complexe (on estime à exponentielle d'exponentielle de 180 soit 10 puissance  $10^{77}$  le nombre d'univers dans le plurivers<sup>30</sup>), ce qui dépasse très largement le nombre total d'états de vide estimé grossièrement à  $10^{500}$  par les cordeliers-paysagistes<sup>31</sup>. Parmi ceux-ci figurent des états hospitaliers et vivables dont il convient d'évaluer la proportion. Le concept de *landscape* contient tout à fois la solution des problèmes anthropologique et métaphysique de la cosmologie. Toutefois Le « paysage » des cordeliers ne décrit pas complètement toutes les options qu'offre, dans son

immense générosité, le plurivers inflationnaire, car il ne concerne que les états de vide, il laisse indéterminées la matière, sa nature et sa dentelure. Voilà « l'espace » aussi riche et proliférant que la vie ! La cosmologie new-look s'annexe d'ailleurs la biosphère (la crochetant avec le « principe anthropique »<sup>32</sup>, auquel nous allons ouvrir la porte du royaume).

### 13. La condition humaine

« Bon pour la vie » : pourquoi l'univers a-t-il des propriétés qui permettent la vie heureuse ? À titre sélectif, pour expliquer l'humaine condition, sinon pour l'excuser, on allègue un principe qui n'en est probablement pas un, le « principe anthropique »<sup>33</sup> qui dit benoîtement une chose très simple : dans la mesure où nous existons nous devons observer un univers compatible avec notre existence (certes !). Cette constatation anodine, ce truisme, va toutefois servir de *principe de sélection des univers*.

Certains, dans les bureaux d'études, font des modèles de bateaux ou des prototypes de voiture, d'autres dans les maisons de haute couture, dessinent des robes de mariées ou de bal, nous, physiciens astraux, faisons des costumes d'univers, à partir des tissus écrus ou soyeux de la théorie des particules élémentaires et de la gravité einsteinienne. Au vrai, nous bâtissons des univers de papier et d'équations. Des vaisseaux qui nous amènent toujours plus loin, souvent dans l'absurde et dans le beau. Et tels des demiurges, dans la salle des machines, nous en faisons varier les paramètres en tournant les boutons.

À la moindre altération, le Soleil brûle comme un feu de pailles, l'univers s'effondre sur lui-même, les galaxies refusent de se former... Une vivante énigme souffre de ne point être résolue, *fine tuning* : lois et paramètres physiques sont « juste ce qu'il faut » pour que la vie existe et se développe (exemples : la masse des quarks u et d, l'intensité des forces fondamentales, constante

cosmologique, etc.). Les plus petits changements ont des effets catastrophiques car ils rendent l'existence des pierres, des plantes, des animaux et des hommes impossible. La probabilité que l'univers ait les propriétés précises qui sont les siennes (taille, composition, découpage en galaxies) est extrêmement faible (le meilleur exemple est la valeur particulière de la constante cosmologique).

Deux solutions s'offrent, et seulement deux, pour résoudre cette énigme existentielle, celle du *grand dessein* et celle du *plurivers*.

1. L'univers a été intelligemment conçu et réalisé.

2. Nous vivons dans un plurivers contenant un nombre immense d'univers, si grand qu'au moins 1 univers est devenu vivable<sup>34</sup>.

Les modèles cosmologiques de mathématiques appliquées n'ont pas besoin, pour exister, de relation avec le monde extérieur au cerveau. Le plurivers n'est pas une théorie, mais la conséquence de deux paradigmes et d'un « principe » de sélection (anthropique). Bancal mais courageuse est l'idée du plurivers, tout comme à ses débuts la mécanique quantique... *Supposons que des univers sont émis au temps zéro comme des photons par une antenne...* cette image due à Susskind (1991) nous aide à penser le plurivers dans un langage de mitrailleuse.

- Un *ur-welt* (*arrière monde* ?) (sans principe) qui liste les univers possibles et en établit le catalogue (*landscape* des supercordes).
- Un *générateur d'univers* variés : l'inflation éternelle (sans moteur identifié).
- Un *principe de sélection* (anthropique), auquel certains refusent le nom de principe.

## 14. Plurivers : fiction théorique ou réalité ?

Pour le positiviste logique, les phénomènes physiques inobservables ne présentent aucune réalité physique : ils ne peuvent affecter aucun évènement que nous percevons, et de ce fait, ils n'existent pas causalement. Pour le réaliste (Einstein), si une théorie fondée sur l'expérience fait valoir que des entités inobservables existent, alors on doit les considérer comme réellement existantes. Entre les deux le cœur balance.

Solution : Créer un mini-univers en concentrant de l'énergie ou encore observer des balafres sur le visage duveteux de l'univers juvénile, dues à une collision ancienne avec un autre univers. Mais c'est peut-être trop demander. Pour l'instant, il faut se contenter de confirmer ou infirmer l'existence de dimensions supplémentaires d'espace et de la supersymétrie. Suite de l'enquête sur la fragilité du réel et son extravagance à Genève, dans les années à venir au CERN et dans le ciel<sup>35</sup>.

Les dernières avancées de la physique et de la cosmologie spéculatives, visant à raccrocher les deux cosmologies, physique et inventive, concernent outre les collisions de bulles d'univers et les traces qu'elles auraient pu imprimer sur le rayonnement cosmologique fossile<sup>36</sup>, la mesure de la probabilité d'occurrence d'une bulle d'univers parée de telle ou telle propriété physique dans le plurivers<sup>37</sup>. Des méthodes statistiques ont été appliquées audacieusement à un ensemble d'univers (résidant dans le cerveau) pour tenter d'expliquer la valeur des constantes fondamentales de la « nature » et mesurer l'improbabilité des univers propres à l'existence d'un sujet « conscient » (contenant les bonnes constantes cosmologiques, intensités des forces, catégories et masses des particules<sup>38</sup>), ceci, on l'imagine, avec un succès relatif, car la tâche paraît incommensurable...

## 15. La révolution c'est changer de ciel

Hier : avant tous les siècles, une fois pour toutes et tout en une fois il jaillit du non-où... Aujourd'hui : infini, inachevé, insupportable de beauté extensible, sa ressemblance avec une bulle de savon m'émeut. Et j'abuse de cela :

« S'il s'en frotte les mains, le savon écume, jubile ; plus il rage, plus sa bave devient volumineuse et nacrée, plus il rend les mains complaisantes, souples, liantes, ductiles. Pierre magique... Plus il forme avec l'air et l'eau des grappes explosives de raisins parfumés... » (Francis Ponge, le savon).

Mais d'où l'univers tient-il sa rage savonneuse de s'étendre toujours ? Et quel souffle le sous-tend et enfle sa bulle ? : la réponse est  $\Lambda$ ... Telle est la vision moderne de la pluri-genèse qui a remplacé les mythes de la Grèce antique, de la Chine et de l'Inde. Peut-être dans mille ans notre théorie sera-t-elle considérée comme mythologie ou astrologie ? Mais, pour l'instant, les têtes s'étoilent et la joie règne dans les instituts de physique. Les astrophysiciens ont l'or à la bouche et il flotte autour d'eux comme un parfum d'été antique... mais peut-être rêvai-je ?

Qu'on me pardonne cette liturgie de fantaisie, j'ai mis dans la cosmologie un peu d'ironie joyeuse car elle est pour moi la science de l'enfance universelle, comme la poésie en est l'expression. Oui j'ai exagéré sachant qu'il me suffirait d'un paragraphe de physique pure pour dissoudre à grande eau ces fleurs de sucre jetées sur le marbre de la cosmologie... L'ironie n'est-elle pas le début de la philosophie ?

# Chapitre 7

## Vers la cosmologie quantique

Marc Lachièze-Rey

Dans ce chapitre, sont présentées quelques motivations en faveur de la recherche d'une théorie de la gravité quantique et d'une cosmologie quantique. Je présente quelques-unes des approches suivies aujourd'hui, alternatives à la théorie des cordes abordée au chapitre suivant. L'intérêt fondamental du recours aux catégories est souligné.

### I. Motivations

Notre physique contemporaine se divise en deux corpus : la relativité générale s'applique essentiellement à l'astrophysique et à la cosmologie ; la physique quantique s'applique essentiellement au monde microscopique des particules. Entre les deux, le monde à nos échelles relève d'une physique dite classique (ni relativiste ni quantique), qui constitue une approximation commune de chacune ces deux approches.

Que nous exprimions ces deux corpus avec des outils et des formalismes mathématiques distincts, là n'est pas le problème. Mais ils impliquent des visions du monde très différentes, et même parfois antagonistes (à propos de l'espace, du temps, de la matière, du vide...) : elles ne peuvent être « vraies » toutes les deux<sup>1</sup>. Plutôt que de penser que l'une d'elles est meilleure que l'autre, de nombreux physiciens croient en l'existence d'une

théorie plus globale encore inconnue, qui harmoniserait les deux points de vue.

La gravité restant aujourd'hui la seule des quatre interactions de la physique à être abordée d'une manière non quantique, il semble raisonnable de penser que la nouvelle théorie doit combler cette lacune : ce serait une théorie de gravité quantique. Nos théories actuelles en seraient des versions approximatives, valables dans des contextes différents.

On peut alors espérer voir disparaître les difficultés inhérentes à chacun des deux corpus : questions d'infinis (divergences quantiques et singularités relativistes), interprétation de la physique quantique, problèmes de l'astrophysique et de la cosmologie (qui découlent de la relativité générale), tels que masse cachée, constante cosmologique, problèmes gravitationnels dans le système solaire...

Enfin, il deviendra peut-être possible d'aborder certaines situations où les prédictions quantiques et relativistes semblent aujourd'hui irréconciliables : trous noirs, univers primordial, structure microscopique de la matière, du temps et de l'espace<sup>2</sup>...

Par ailleurs, la physique quantique implique déjà elle-même une cosmologie quantique : l'une de ses propriétés les plus fondamentales – sa non-séparabilité – interdit de considérer séparément deux systèmes physiques interagissant, ou ayant interagi. Elle implique de les voir comme un système unique, décrit par une fonction d'onde commune<sup>3</sup>. Or, tout ce que contient l'univers interagit, ou a interagi, ne serait-ce que via la gravitation : strictement, seul l'univers entier dans sa globalité constitue un système physique vraiment isolé. En conséquence, non seulement la physique quantique autorise à rendre compte de l'univers entier ; mais c'est une obligation : elle ne prend son sens que comme cosmologie quantique. Et le fait que la gravitation gouverne la cosmologie fait apparaître la cosmologie quantique comme [un aspect d'une] théorie de gravité quantique dont la

principale originalité – le caractère quantique de la gravité – nous reste inconnu.

Notre cosmologie constitue une branche de la relativité générale, théorie non quantique de la gravitation. La cosmologie quantique doit constituer une branche de la gravité quantique. Une solution cosmologique – un modèle d'univers – est une solution de la relativité générale particulièrement simple, car les symétries supposées de l'espace-temps diminuent le nombre de degrés de liberté. La cosmologie quantique doit être plus simple que la gravité quantique, dont elle constitue un cas particulier.

## 2. L'approche géométrique de la relativité générale

### 2.1 L'équation d'Einstein et l'espace-temps

En relativité générale, la gravité (non quantique) est décrite par la métrique de l'espace-temps. Une métrique se définit dans le cadre de ce que l'on appelle *variété différentielle* (que j'appellerai aussi *variété nue*)<sup>4</sup>. Le cadre de la relativité générale se constitue ainsi d'une variété nue  $M$  donnée une fois pour toutes<sup>5</sup>.

Une *métrique*  $g$  est objet géométrique [un tenseur] défini sur  $M$ . Elle constitue l'outil qui permet d'y mesurer les intervalles (de types longueurs et durées) et les angles. Munie d'une métrique,  $M$  devient une variété riemannienne ou pseudo-riemannienne<sup>6</sup>.

Chercher les solutions de la relativité générale, c'est chercher les « bonnes » métriques  $g$ , c'est-à-dire celles qui sont solution de l'équation d'Einstein. Cette dernière exprime que  $g$  doit être compatible avec (imposée par) le contenu « matériel » de l'univers, et/ou avec certaines conditions limites fixées. La variété pseudo-riemannienne alors obtenue est appelée *espace-temps*.

## 2.2 Le super-espace

L'équation d'Einstein (avec les conditions limites) sélectionne une métrique  $g$  dans l'ensemble de toutes les métriques pseudo-riemanniennes qu'il est possible de définir sur  $M$ , noté  $\text{Métr}(M)$  : chaque point de  $\text{Métr}(M)$  représente une métrique  $g$ . Certains de ces points représentent les solutions des équations d'Einstein.

À vrai dire, la gravitation jouit d'une propriété fondamentale appelée *covariance* : deux métriques différentes reliées entre elles par une certaine relation (un difféomorphisme) représentent la même solution physique. Une solution de la relativité générale n'est donc pas une métrique, mais une classe de métriques reliées entre elles par les difféomorphismes. L'espace de ces solutions possède une structure bien déterminée, mais compliquée. Il est appelé le *super-espace*<sup>7</sup>  $S$ . Une solution de la relativité générale, c'est un point de  $S$ .

## 2.3 Une analogie pour la gravité quantique

Cette vision « géométrique » suggère une piste pour « quantifier » la relativité générale un peu comme on quantifie la mécanique ordinaire pour obtenir la mécanique quantique.

La mécanique s'intéresse à l'état d'une particule, qu'elle décrit par les valeurs de sa position  $q$  et de son impulsion  $p$  (*grosso modo*, sa vitesse) : elles constituent les variables canoniques et vérifient une certaine relation qui traduit la structure symplectique de la mécanique. On appelle *espace des phases*  $\Gamma$  l'ensemble des valeurs possibles de  $q$  et  $p$  : tout état [classique] de la particule, c'est-à-dire toute solution de la mécanique classique, est représenté comme un point de  $\Gamma$ . En revanche, une solution de la mécanique quantique – un état quantique – peut être représentée par une fonction sur  $\Gamma$  : la fonction d'onde. La quantification remplace ainsi les points de  $\Gamma$  (états classiques) par des fonctions sur  $\Gamma$  (états quantiques).

Une solution de la relativité générale (un état) correspond à un point du super-espace  $S$ . Une solution quantique devra se présenter comme une fonction  $\Psi$  sur  $S$ . On l'appellera la *fonction d'onde de l'univers*. La tâche de la gravité quantique consiste à définir et à découvrir ces fonctions<sup>8</sup>. La complexité du super-espace<sup>9</sup> la rend très ardue.

### 3. Vers la cosmologie quantique

#### 3.1 La cosmologie et le mini-super-espace

La cosmologie (classique) constitue un cas particulier plutôt simple de la relativité générale. Elle néglige en effet (dans une première approche) les irrégularités de l'espace-temps engendrées par les étoiles, galaxies... si bien qu'un modèle cosmologique est une solution très régulière, obéissant à certaines symétries. Celles-ci diminuent énormément le nombre de degrés de liberté du problème : les solutions cosmologiques occupent un sous-ensemble de celles de la relativité générale, c'est-à-dire du super-espace. On le *baptise mini-super-espace*.

La cosmologie quantique étant plus simple que la gravité quantique, certains considèrent que l'on peut l'aborder comme une première approche de la gravité quantique. C'est l'approche mini-super-espace, dont nous dirons quelques mots ; mais une véritable cosmologie quantique doit s'envisager comme un cas particulier d'une théorie de gravité quantique.

#### 3.2 Cosmologie quantique : l'approche mini-super-espace

Les démarches les plus simples admettent le principe cosmologique. L'homogénéité et l'isotropie spatiales<sup>10</sup> qui en découlent permettent de décrire la métrique  $g$  par une unique fonction du temps  $a(t)$ <sup>11</sup>. Celle-ci n'est rien d'autre que le facteur d'échelle qui intervient dans les modèles cosmologiques habituels. Le contenu matériel de l'univers est également décrit d'une manière

re simplifiée : comme un unique champ<sup>12</sup>, représenté comme une fonction du temps  $\varphi(t)$ . Le mini-super-espace se constitue alors de l'ensemble des couples de fonctions  $(a, \varphi)$ . Les couples qui vérifient l'équation d'Einstein (devenue dans ce cas simple l'équation de Friedmann-Lemaître) sont les solutions.

Remarquons qu'une solution – un couple de fonctions  $(a(t), \varphi(t))$  – peut être exprimée de manière un peu différente : en éliminant la variable commune  $t$  entre deux fonctions, on décrit la même solution par une relation du type  $R(a, \varphi) = 0$ , appelée *corrélacion* : la référence au temps disparaît. Une telle expression de la solution correspond beaucoup mieux à l'esprit de la relativité générale<sup>13</sup>, en relation avec le « problème du temps ».

Un point du mini-super-espace  $S$  – une solution de la cosmologie classique – se constitue d'un couple  $(a, \varphi)$  obéissant à l'équation (classique) de Friedmann-Lemaître. Une solution quantique s'envisage alors comme une fonction  $\Psi(a, \varphi)$  sur  $S$ . Cette fonction d'onde de l'univers doit obéir à une contrepartie quantique de l'équation Friedmann-Lemaître appelée l'équation de Wheeler-de Witt.

Cette dernière permet de calculer une « probabilité de transition » entre deux états quantiques « instantanés » de l'univers. Concrètement, on peut par exemple estimer la probabilité de tel ou tel état de l'univers (que l'on imaginera dans un passé très lointain : une condition initiale proche du Big-bang) sous la condition qu'il soit aujourd'hui dans un état spécifié (conditions « finales »).

J'utilise ici des termes à connotation temporelle mais le temps n'apparaît pas dans l'équation de Wheeler-de Witt : caractériser un état quantique comme passé, présent ou futur n'a pas de sens car ces notions n'existent pas dans la théorie. Certains évoquent un « problème du temps », d'autres se réjouissent de la disparition de cette notion jugée superflue. Une manière de les réconcilier consiste à évoquer des « horloges »<sup>14</sup>.

Nous pouvons demander à la cosmologie quantique de quel état quantique passé peut être issu l'état actuel de notre univers, celui que nous observons. Plusieurs remarques s'imposent alors.

Tout d'abord, l'état actuel de l'univers n'est pas défini comme « actuel », mais comme vérifiant certaines propriétés intrinsèques. La première est qu'il présente l'apparence d'un état classique : ceci résulte du fait que nous n'avons rien décelé qui ressemble à un effet quantique à l'échelle cosmologique (sans quoi nous n'aurions pas fait de la cosmologie classique jusqu'à aujourd'hui). La seconde est qu'une certaine relation entre  $a$  et  $\varphi$  est vérifiée : celle que nos observations nous ont permis d'établir. Notons que la notion même d'une telle relation est de nature classique, et n'est permise que grâce à la première propriété<sup>15</sup>. Toujours est-il que ces deux spécifications permettent de préciser l'état quantique de l'univers que nous considérons comme actuel.

Un état passé n'est pas non plus défini comme « passé », puisque le terme n'a pas de sens ici ; mais selon un critère intrinsèque. On pourrait vouloir par exemple que la valeur de  $a$  soit petite. Mais rien ne garantit que l'on puisse associer à un état quantique une valeur spécifiée de  $a$  (sauf si, précisément, il ressemble à un état classique). Rappelons-nous que, en mécanique quantique, on ne peut assigner une position à une particule qu'à la condition que son état quantique ressemble à un état classique.

Une première approche, dite de *Hartle-Hawking*, découle d'une spécification particulière souvent exprimée sous la forme : « la condition initiale est qu'il n'y a pas de condition initiale »<sup>16</sup>. Cela correspond mathématiquement à un état qualifié d'*instanton*. Résultat (délicat à interpréter) : pas de Big-bang mais un « début » de l'univers où temps et espace s'échangent<sup>17</sup>. Parmi d'autres approches, celles de Linde, ou de Vilenkin, supposent une évolution par effet tunnel depuis un état initial jusqu'à l'état actuel.

Rien de tout ceci n'est considéré comme définitif, et de très nombreux problèmes<sup>18</sup> restent non résolus dans cette approche d'utilisation difficile ; sans parler des difficultés d'interprétation liées à l'absence de temps et à la signification des probabilités dans ce contexte... Tout ceci suggère qu'il est plus sain d'adopter une autre voie : se situer dans le cadre d'une véritable théorie de gravité quantique ; et particulariser ensuite le problème à la cosmologie. Les tentatives dans ce sens (par exemple la cosmologie à boucles, issue de la gravité quantique à boucles) suggèrent en effet des conclusions différentes.

### **3.3 Le « problème du temps » en cosmologie**

Les évocations de type temporel n'ont pas cours dans ces approches. Le temps n'apparaît pas dans l'équation de Wheeler-de Witt. Est-ce un problème ?

Il convient d'abord de remarquer qu'une solution (classique) de la relativité générale s'exprime tout à fait convenablement sans impliquer le temps ; par exemple sous forme de corrélation, comme décrit plus haut. Dans de nombreux cas, il ne peut même en être autrement. On ne s'attend donc guère à ce qu'un temps intervienne dans une solution quantique. Même en physique « ordinaire », celle de Newton, où nous avons pris l'habitude d'exprimer les solutions en fonction du temps, un renoncement à une vision intuitive rend tout à fait possible également une formulation qui ne fait pas intervenir le temps. Celui-ci apparaît donc comme une notion superflue, ou du moins non indispensable. Notons en particulier que, contrairement à certaines craintes, l'absence de temps n'implique pas du tout l'absence d'évolution ou de dynamique.

Ensuite, nous avons vu qu'une grande partie des solutions quantiques ne « ressemblent » pas à des solutions classiques. Pour elles, on s'attend encore moins à retrouver quelque chose qui ressemble au temps. Nous avons vu comment interpréter

une solution classique (un modèle cosmologique = un point de  $S$ ) comme une corrélation, c'est-à-dire une relation entre  $a$  et  $\varphi$  : le facteur d'échelle  $a$  (*grosso modo*, la « dimension » de l'espace) varie en fonction du champ  $\varphi$ , promu au rôle d'une « horloge matérielle »<sup>19</sup>. Les seules solutions quantiques qui « ressemblent » à une solution classique sont celles où la fonction  $\Psi(a, \varphi)$  ressemble à une corrélation<sup>20</sup>, c'est-à-dire une relation du type  $F(a, \varphi) = 0$ . C'est pourquoi, vu l'arbitraire d'un tel choix, il vaut mieux qualifier cette fonction d'horloge. Ceci rappelle au moins que ce « temps » d'horloge n'est pas qualifié pour mesurer les durées ou définir des relations chronologiques ou causales. En cosmologie, il est habituel de choisir comme horloge l'ensemble idéalisé des galaxies peuplant l'univers, supposées en chute libre. Ce choix correspond à ce que l'on appelle le *temps cosmique*.

Notons que l'adoption d'une horloge pose des difficultés du point de vue quantique. Le contenu de l'univers, qui doit apparaître comme résultat de la quantification, ne peut fournir une horloge *a priori*. La quantification ne peut donc être menée en utilisant un temps d'horloge (et encore moins un autre type de temps). Finalement, il est rassurant que l'aspect quantique de la gravité exige de revenir à cette absence de temps en relativité générale, qui en constitue un de ses fondements.

## 4. Vers la gravité quantique

Le programme de la gravité quantique n'est accompli aujourd'hui qu'en partie. Je distingue deux approches : canonique et discrète :

### 4.1 Gravité quantique : problèmes généraux

La « quantité dynamique » à quantifier est la gravité, c'est-à-dire la métrique de l'espace-temps. Une difficulté provient de la cova-

riance. Rappelons qu'une solution de la relativité générale n'est pas une métrique sur  $M$ , mais une classe [d'équivalence] de métriques reliées les unes aux autres par des difféomorphismes : c'est donc une telle classe dans son ensemble qu'il faudrait quantifier. On ne sait pas le faire car le formalisme implique plus de variables que nécessaire, sans que l'on réussisse à se débarrasser de ces variables superflues. La seule méthode connue pour restaurer la covariance consiste à imposer des relations entre ces variables, des contraintes. Celles-ci ne posent aucun problème en relativité générale (classique), mais on n'a pas encore réussi à les satisfaire au niveau quantique, ce qui constitue aujourd'hui le véritable frein à une théorie de gravité quantique.

La covariance joue un rôle similaire à l'invariance de jauge dans les théories de champs de type Yang-Mills (ou théories de jauge) que l'on sait quantifier, telles par exemple l'électromagnétisme. Le mérite revient à Abhay Ashtekar et à ses successeurs d'avoir formulé la relativité générale sur le modèle de ces théories de jauge, ce qui a permis une des approches de la gravité quantique les plus prometteuses aujourd'hui, la gravité en boucles.

## **4.2 Temps et causalité en gravité quantique**

En gravité classique (relativité générale), le temps est absent. Espace-temps et causalité y demeurent cependant. Mais en gravité quantique, il n'y a ni temps ni causalité *a priori*. Ces derniers ne peuvent en effet être définis à partir d'une géométrie de l'espace-temps, puisque celle-ci doit apparaître (au mieux) comme une solution de la théorie. C'est cette difficulté qui empêche d'utiliser le procédé de quantification appliqué aux autres théories, car celui-ci met en jeu temporalité et causalité ici absentes. Ce problème est en fait étroitement lié à celui de la covariance, car l'absence du temps en relativité générale peut se voir comme un aspect de la covariance.

Face à ce problème, deux approches sont étudiées : les unes tentent de procéder à la quantification sans le temps. La plupart – que je qualifierai d'« approches discrètes » – procèdent en remplaçant la variété de départ  $M$  par une structure géométrique discrète.

Les approches « canoniques », telles la gravité en boucles, introduisent de manière provisoire un « temps » artificiel et arbitraire. Ce dernier, dépourvu de signification physique, disparaîtra par la suite mais permet d'appliquer la quantification canonique. Il « brise » la covariance, qui doit être « restaurée » à la fin en exigeant que les solutions satisfassent certaines contraintes. Mais il n'a pas été possible, jusqu'ici de résoudre ces dernières. Signe positif néanmoins, les deux approches – discrète et canonique – montrent des signes de convergence, notamment vers ce que l'on appelle les *écumes de spin*.

### 4.3 Les approches discrètes

Elles consistent à remplacer tout d'abord la variété [nue]  $M$  de départ, continue, par un objet « discret »  $D$ , que je qualifierai de *discontinuum*. On sait par exemple que la triangulation d'une surface en représente une approximation discrète. L'analogie pour une variété de dimension supérieure (espace ou espace-temps) est une discrétisation, même si l'on parle encore de triangulation par abus de langage. Mais ici, le *discontinuum* serait la véritable structure fondamentale : un support fondamental, plutôt qu'une approximation d'une géométrie continue.

Mathématiquement, une triangulation s'exprime par des objets mathématiques appelés *complexes simpliciaux*, qui se retrouvent dans la plupart des approches discrètes : réseaux de spin (*spin networks*), écumes de spin (*spin foams*), triangulations, etc. D'autres types de structures discrètes (par exemple les *causets*, pour *ensembles causaux*) sont aussi utilisées, mais toutes sont des structures combinatoires.

En géométrie continue, une métrique est un objet défini sur la variété nue. La version discrète doit définir des objets mathématiques jouant un rôle similaire sur le *discontinuum*  $D$ . Le *calcul de Regge* permet d'accomplir cette tâche, en munissant  $D$  d'une « métrique » et d'une « courbure » discrètes. Il résulte une « relativité générale discrète », qui tend vers la relativité générale à la limite continue. Le fait que cette dernière ressemble à certaines théories de champ déjà connues – les *théories BF*<sup>21</sup> – indique la piste pour les quantifier. Les tentatives de quantification de ces versions discrètes font l'objet de très nombreux travaux. Je me bornerai à trois remarques.

Elles semblent plus abordables que la version continue ; elles convergent (au moins partiellement) avec la quantification canonique évoquée ci-dessous ; elles s'expriment naturellement dans un formalisme de catégories (voir plus bas).

#### 4.4 L'approche canonique

L'approche canonique utilise la méthode du même nom, qui a fait ses preuves dans les théories quantiques aujourd'hui disponibles. Son programme se dessine ainsi<sup>22</sup> :

- définir et caractériser le super-espace  $S$  ; y définir des bonnes « variables dynamiques » exprimant les degrés de liberté<sup>23</sup> ; exprimer les fonctions d'onde – comme fonctions<sup>24</sup> de ces variables – pour représenter les états quantiques ; énoncer les contraintes mathématiques auxquelles doivent obéir ces fonctions, dont la covariance ; définir un produit scalaire entre les états, de manière à obtenir un *espace de Hilbert* ;
- trouver les équations quantiques d'évolution ;
- les résoudre.

La première étape de l'approche canonique consiste à reformuler la relativité générale comme une théorie dynamique, que l'on peut baptiser *géomérodynamique classique*. Elle débute par un

choix arbitraire : celui d'une fonction temporelle que l'on appellera « temps » malgré les risques qu'entraîne l'usage de ce terme. Techniquement, ceci revient à une foliation de la variété de départ, considérée comme un produit  $M = E \times T$  de l'« espace »  $E$  par le « temps »  $T$ . La théorie sera ensuite construite sur l'espace  $E$ . Ce choix brise la covariance, qui devra être restaurée sous forme de *contraintes*. Il permet de considérer la métrique de l'espace-temps comme une métrique de l'espace  $E$  évoluant dans le temps.

Le super-espace est bien défini, mais sa quantification nécessite d'y définir des « coordonnées » particulières, qualifiées de canoniques. C'est sur cet aspect assez technique qu'ont été faits des progrès essentiels ces dernières années : la découverte d'un système de variables canoniques aux « bonnes » propriétés utilisant les variables d'Ashtekar, ensuite généralisées.

La première de ces variables est une *connexion*<sup>25</sup> ; la seconde une *densité de tétrade*, aussi baptisée *champ électrique* (par analogie avec l'électromagnétisme). Toutes deux sont définies sur la variété « spatiale »  $E$ . La relativité générale, exprimée dans ces variables, se formule comme un système dynamique avec temps et contraintes. Sa quantification suit alors une procédure originellement mise au point par Dirac.

Les fonctions d'ondes sont définies comme des fonctions de la variable de connexion  $A$ . Or, toute connexion jouit d'une propriété fondamentale : son intégration le long d'une *boucle* (dessinée dans  $E$ ) permet d'obtenir un nombre. Une boucle associe ce nombre à  $A$ , et constitue donc une fonction de  $A$ , appelée *holonomie*.<sup>26</sup>

Les fonctions d'ondes les plus générales apparaissent alors comme des [combinaisons de] boucles. Seconde découverte importante, certaines combinaisons particulières, appelées *réseaux de spin*, possèdent des propriétés remarquables<sup>27</sup> : elles fournissent un espace de Hilbert  $H$  et permettent de retrouver le formalisme habituel des théories quantiques connues.

### 4.5 Apparition du discret

Ces résultats rigoureux étaient inattendus car un réseau de spin est un objet à caractère discret<sup>28</sup>, ce qui établit la convergence annoncée avec les approches discrètes.

Dans toute théorie quantique, les quantités deviennent des opérateurs. Ici, les quantités géométriques (surfaces, volumes...) deviennent des opérateurs géométriques. Il a été possible de calculer leurs *spectres*, qui se révèlent discrets ! Le spectre<sup>29</sup> constitue l'ensemble des valeurs que peut donner une mesure de la quantité associée. Il apparaît donc ici qu'une mesure de surface ou de volume ne peut pas donner n'importe quel nombre (comme en géométrie ordinaire), mais aboutit à une valeur prise dans un certain ensemble discret, le spectre précisément. Ceci est considéré comme une propriété fondamentale de la gravité quantique, souvent postulée, mais ici démontrée dans le cadre de la théorie.

Tout ceci ne constitue que le volet cinématique de la théorie, car les états de  $H$  n'obéissent pas à toutes les contraintes. Obtenir la dynamique, c'est-à-dire une véritable théorie de gravité quantique, exigerait de résoudre la *contrainte Hamiltonienne*,<sup>30</sup> problème toujours non résolu. Néanmoins, sans que l'on sache résoudre, on peut prédire qu'une solution doit apparaître comme un certain type de structure combinatoire qui généralise à 4 dimensions ce qu'est un réseau de spin à 3 dimensions : une *écume de spins*<sup>31</sup> (*Spin foam*) ; ici encore un objet discret, qui représente l'évolution (*l'histoire*, selon une appellation quantique ; la *feuille d'univers* selon une appellation relativiste) d'un réseau de spin. En particulier, les états « initial » et « final » d'une écume de spins sont des réseaux de spin.

Pas encore vraiment de théorie, mais pourtant déjà quelques résultats « concrets » : une estimation de l'entropie d'un trou noir, ce qui est considéré comme le premier succès de cette

approche, car cette entropie est longtemps restée mystérieuse. Par ailleurs, cette approche permet d'établir une cosmologie quantique aux propriétés originales et nouvelles.

#### **4.6 La cosmologie à boucles (Loop Quantum cosmology)**

La restriction de la gravité en boucles à des états symétriques fournit une cosmologie quantique, baptisée *cosmologie à boucles*. La réduction des degrés de liberté permet de résoudre complètement le problème, d'une manière qui diffère de l'approche mini-super-espace.

Premier résultat, inattendu au départ : l'évolution semble suivre un régime « semi-classique ». Cela signifie que la géométrie quantique peut être approximativement décrite par un espace-temps dans le sens habituel. Néanmoins, le caractère quantique modifie l'évolution (la dynamique) : la singularité du Big-bang disparaît – résultat espéré – et un nouveau scénario cosmologique se dessine, incluant une évolution « pré-Big-bang » de l'univers.

#### **4.7 Dualités**

Une triangulation représente une surface par une juxtaposition de triangles qui épousent sa forme. Ces derniers constituent les simplexes (ici, 2-simplexes), dont la réunion forme le *complexe simplicial* que constitue la triangulation elle-même. Chaque triangle possède trois côtés qui le relient aux triangles voisins. Et chaque extrémité d'un côté peut être vue comme reliant le côté à un côté voisin.

La vision duale considère chaque triangle (simplex) comme un objet ponctuel dans un graphe : un vertex. Chaque côté de ce triangle est vu comme une flèche (1-flèche) qui le relie aux triangles (vertex) voisins. Chaque extrémité devient une « 2-flèche » reliant le côté (1-flèche) à un de ses voisins. Ce graphe (2-graphe) dual contient la même information que le complexe. Les

triangulations aux dimensions plus élevées impliquent des 3-simplexes (tétraèdres) ou des 4-simplexes (généralisation à la dimension supérieure). Les graphes obtenus par dualité sont respectivement les réseaux de spin et les écumes de spin. Certaines approches travaillent avec les complexes simpliciaux ; d'autres avec leurs structures duales. Tout ceci se décrit de manière naturelle dans le langage des catégories.

## 5. Catégories

### 5.1 L'approche catégorielle

La physique telle qu'elle est formulée aujourd'hui fait un très grand usage des ensembles. Un ensemble se compose d'éléments. Une catégorie comprend des objets et des flèches (ou morphismes). Le passage des ensembles aux catégories peut être vu comme une augmentation de dimension, qualifiée de catégorification. On peut continuer le processus en passant d'une catégorie à une 2-catégorie, dans laquelle existent des 2-flèches, c'est-à-dire des relations entre les flèches, etc.

La plupart des structures mathématiques existantes – dont celles qu'utilise la physique – se reformulent dans le point de vue catégoriel ; d'une manière souvent plus simple, plus élégante et plus naturelle ; et qui autorise des généralisations fructueuses. Notamment, les catégories apportent des points de vue nouveaux sur la géométrie, l'algèbre et la logique, établissent des liens entre elles, et permettent de les généraliser.

Une originalité des catégories est de proposer une vision totalement relationnelle des objets ou des structures mathématiques : leurs propriétés apparaissent uniquement comme résultat de leurs relations avec les autres objets. Cette propriété les rend particulièrement adaptées à une utilisation en physique.

Par exemple, on définit un groupe comme une catégorie à un objet ; tous les morphismes sont inversibles et constituent les élé-

ments du groupe. Un groupoïde est une catégorie dont toutes les flèches sont inversibles. Un monoïde est une catégorie à un élément. Un ensemble causal est une catégorie telle qu'il existe un morphisme au plus entre deux objets...

## 5.2 Catégories tensorielles

Au sein des catégories, la classe des catégories tensorielles (celles dans lesquelles on peut définir un produit tensoriel) joue un rôle spécifique. Il peut exister dans certains cas la possibilité de « rendre une catégorie tensorielle ». En physique, ce processus apparaît relié à ce que l'on appelle *quantification*, c'est-à-dire la transformation d'une théorie classique en une théorie quantique<sup>32</sup>. Il se trouve qu'une catégorie tensorielle peut être vue comme une 2-catégorie particulière<sup>33</sup>, si bien que ce processus peut être vu comme un aspect de la catégorification.

Plusieurs mathématiciens et physiciens – notamment John Baez, Louis Crane, Christopher Isham – ont souligné la pertinence des catégories tensorielles pour la physique : la relativité générale s'exprime naturellement à l'aide de la catégorie tensorielle des *cobordismes*<sup>34</sup> : Cob. La physique quantique est le plus souvent formulée en termes d'espaces de Hilbert<sup>35</sup>. Ceux-ci forment la catégorie tensorielle Hilb (les flèches sont les applications linéaires entre espaces de Hilbert) ; d'où la parenté mentionnée plus haut entre quantification et catégorification<sup>36</sup>.

## 5.3 Géométrie

Un grand nombre de catégories ont un caractère géométrique. En premier lieu, les objets géométriques déjà connus s'expriment dans le cadre catégoriel (qui apporte des possibilités intéressantes de mettre en relation le continu et le discret). Mais les mathématiciens savent aussi depuis longtemps que les catégories permettent de construire, de manière originale, des objets géométriques nouveaux. Or, la gravité quantique (et peut-être déjà

l'interprétation de la physique quantique elle-même) a besoin de notions géométriques généralisées, et il est naturel de se tourner vers les catégories dans cette optique. Par dessus le marché, les catégories fournissent des liens avec la logique et d'autres branches des mathématiques.

Pour citer quelques exemples, les notions topologiques s'expriment très naturellement et se généralisent dans le formalisme des catégories. La nature profonde des connexions et des holonomies, qui jouent un rôle très important en relativité générale, en physique quantique (et dans toutes les tentatives de gravité quantique) relève des catégories. Les structures discrètes mentionnées pour le discontinuum – complexes simpliciaux, réseaux, graphes... ; ainsi que leurs objets duaux, réseaux de spin et écumes de spin – sont toutes de manière naturelle des  $n$ -catégories.

#### **5.4 Catégories et gravité quantique**

De nombreux travaux des auteurs cités formulent notre physique établie (notamment la physique quantique) dans le cadre des catégories. Mais le plus original concerne la gravité quantique puisque les objets qu'elle implique révèlent leur nature catégorielle. Déjà certains modèles – tel celui de Barret et Crane<sup>37</sup> – les utilisent de manière fondamentale et explicite.

En poussant un peu les choses, on pourrait dire que la première étape, au moins, du programme de gravité quantique se ramène à une quantification à partir d'une catégorie géométrique (d'un type discret ou non) ; et que cette quantification se ramène à une catégorification.

Pour de nombreuses approches en cours, les catégories géométriques envisagées sont les structures combinatoires que nous avons mentionnées (y compris pour la gravité en boucles puisqu'elle se ramène aux réseaux et écumes de spin). Mais il est aussi reconnu depuis longtemps que les catégories offrent des notions

géométriques nouvelles, qui généralisent celles que nous connaissons : en particulier, les *catégories simpliciales*, les *topos*..., avec en prime des liens originaux avec l'algèbre et la logique. Des travaux plus spéculatifs impliquent ces notions nouvelles et purement catégorielles.

L'approche catégorielle de gravité quantique consiste à exprimer d'abord la structure géométrique de départ (qui joue le rôle de la variété nue en relativité générale) par une catégorie (par exemple un complexe simplicial). Sur cette structure, on peut définir certains objets qui jouent le rôle de la métrique, de la courbure... (par exemple selon le calcul de Regge). Quantifier consiste à rendre la catégorie tensorielle : en attachant à chaque flèche une représentation d'un groupe (le groupe des rotations spatiales, ou le groupe de Lorentz) ; à chaque objet un *intertwiner*.

Ensuite, reste à définir une « fonction » sur la catégorie, permettant de définir l'analogue d'une intégrale de chemin pour exprimer la dynamique, en tenant compte des contraintes. Cette étape difficile n'est pas achevée.

## 6. Convergence

On ne peut qu'être impressionné, et encouragé, par les points de convergence soulignés entre les différentes approches de la gravité quantique. Il est raisonnable de penser que, si l'on ne dispose pas encore d'une véritable théorie, ni de résultats concrets, le cadre adapté est en train de se mettre en place.

Les catégories semblent jouer ici un rôle essentiel. Qu'elles permettent seulement de reformuler des approches existantes d'une manière naturelle et élégante ; où, mieux, qu'elles fournissent de nouveaux outils permettant de développer des approches originales. Les travaux sont en cours sur les deux fronts.



## Chapitre 8

# La cosmologie : un laboratoire pour la théorie des cordes

Pierre Vanhove

Le chapitre précédent de cet ouvrage étant essentiellement consacré à la gravitation quantique à boucles, cette partie est dévolue à la présentation de l'autre piste « dominante » d'élaboration d'une théorie quantique de la gravitation (qui serait ici également une théorie d'unification) : la théorie des cordes.

### Introduction

2009 fut l'année internationale de l'astronomie, célébrant le 400<sup>e</sup> anniversaire des observations astronomiques par Galileo Galilei au moyen d'un télescope optique.

L'astronomie est l'une des plus anciennes sciences fondamentales. L'observation du ciel permet de déduire des informations importantes sur le monde *visible* dans lequel nous vivons. Nous donnerons une définition précise de ce que nous entendons par monde visible ultérieurement dans ce texte. Aristote, entre 384 et 382 avant Jésus-Christ, sachant que les éclipses lunaires sont dues au passage de la Lune dans l'ombre portée de la Terre et remarquant que celles-ci ont toujours la forme d'arcs de cercle, en déduisit que la Terre était ronde. Constatant que certains astres sont visibles en Égypte ou à Chypre mais ne le sont pas dans les régions septentrionales, Aristote conclut que la Terre était une sphère de modeste dimension. Ératosthène (276-194 avant

Jésus-Christ) savait qu'à midi le jour du solstice d'été, le 21 juin, le Soleil se trouvait exactement à la verticale d'un puits de Syène (Assouan de nos jours) en Égypte, à cause de la proximité de Syène avec le tropique du Cancer. En observant la réflexion du Soleil dans un puits à Alexandrie, il mesura que la position du Soleil faisait avec la verticale un angle de 7 degrés. Sachant que Syène est distante de 740 kilomètres (5 000 stades) d'Alexandrie il en déduisit que le rayon de la Terre était de 6 800 kilomètres (40 000 stades). Ce qui est correct à 8 % près. Aristarque de Samos (310-230 avant Jésus-Christ) ayant compris que le Soleil est beaucoup plus gros que la Terre conclut logiquement que la Terre tournait autour du Soleil. Ce fait ne sera accepté que 1 700 ans plus tard avec les travaux de Copernic. C'est en analysant les mesures très précises et détaillées de la position de Mars et des autres planètes par Tycho Brahé (1545-1601), que Johannes Kepler (1571-1630) put énoncer les trois règles du mouvement des planètes qui ont amené Isaac Newton (1643-1727) à formuler sa loi d'attraction universelle. De nos jours, même si les méthodes se sont sophistiquées grâce à l'élaboration d'appareils d'observations astronomiques qui, depuis la Terre et l'espace, explorent les signaux du domaine des ondes radio aux rayons gamma, la démarche suivie pour comprendre notre univers visible est la même que celle initiée par les Grecs.

Au XX<sup>e</sup> siècle, une profonde révolution scientifique a eu lieu avec l'élaboration de la théorie de la relativité générale d'Einstein qui a modifié notre vision de l'espace et du temps ainsi que notre conception de l'histoire de notre univers. Dès la formulation de cette théorie, Einstein a lui-même proposé des tests expérimentaux. Le 18 novembre 1915 dans un manuscrit adressé à l'académie de Prusse, il montre que sa théorie permet de résoudre le problème de l'avancée du périhélie de Mercure, et il explique que sa théorie prédit la courbure de la trajectoire des rayons lumineux. À la sortie de la première guerre mondiale, en 1919,

Sir Arthur Eddington (1882-1944) et Sir Frank Dyson (1868-1939) ont entrepris d'obtenir une mesure de la déviation des rayons lumineux en observant les éclipses solaires totales depuis les îles de Sao Tomé-et-Principe au large du Gabon et depuis Sobral (Ceara) au Brésil. Les résultats obtenus confirment assez bien la prédiction de la relativité générale. En fait, si la précision et la netteté des photographies n'étaient pas de qualité suffisante pour conclure de façon certaine à la mise en évidence de l'effet de courbure des rayons lumineux, ce test a été d'une importance capitale dans l'acceptation de la théorie. De nos jours, il est capital de tenir compte des effets de relativité restreinte et générale pour le bon fonctionnement des GPS<sup>1</sup>.

Les années 2000-2001 marquent le début d'une ère de cosmologie de précision grâce à l'accumulation de mesures de grandes précisions des caractéristiques physiques de notre univers. Ce qui a amené à l'élaboration d'un modèle cosmologique standard<sup>2</sup> dont les points principaux sont les suivants :

- vitesse d'expansion de l'univers déterminée par la constante de Hubble  $H \sim 74,2 \text{ km/s/Mpc}$  ;
- matière ordinaire (proton, neutron, électrons...) : 5 % ;
- matière noire froide non relativiste invisible (baignant les galaxies et les groupements de galaxies, aidant à la formation des structures) : 25 % ;
- énergie noire : 70 % ;
- univers spatialement plat et très homogène ;
- perturbations initiales gaussiennes, adiabatiques et presque invariantes d'échelle.

Le 3 juillet 2009, le satellite Planck<sup>3</sup> a atteint son orbite autour du point de Lagrange L2 et a livré, le 29 août 2009, ses premières images du fond diffus cosmologique relique à 2.7 degrés Kelvin, qui fournissent une photographie de notre univers au moment où la matière et la lumière se sont séparées. Comme

expliqué dans les précédents chapitres, ce satellite, par une mesure très précise des anisotropies du fond cosmologique relique, permettra de déterminer avec une précision accrue les valeurs des paramètres du modèle standard cosmologique ainsi que les écarts au spectre gaussien.

Toutes ces caractéristiques sont celles de la partie *visible* accessible aux mesures et aux observations de notre univers. Avec l'amélioration des méthodes d'observation nous avons pu pousser plus loin l'exploration du cosmos, mais quelles que soient les évolutions technologiques il est impossible d'accéder à des informations en dehors du volume fini de notre univers observable déterminé par le rayon de Hubble  $1/H \sim H_0^{-1} \sim 10^{25}$  m. Ce volume résulte de l'évolution de notre univers depuis le Big-bang survenu il y a environ 13.7 milliards d'années<sup>4</sup>.

Comme la découverte que la Terre orbite autour du Soleil, puis l'analyse des trajectoires des planètes du système solaire ont amené Newton à formuler la loi universelle de l'attraction des corps, il est naturel de se demander ce que la cosmologie actuelle indique sur l'existence d'un modèle unificateur de la physique fondamentale. Un problème important de la physique fondamentale moderne est la compréhension de la compatibilité entre les deux piliers de la physique du XX<sup>e</sup> siècle, que sont la mécanique quantique et la théorie de la relativité générale.

Dans ce texte nous donnerons des raisons en faveur de la nécessité de considérer un cadre théorique unique réunissant ces deux concepts amenant à la quantification de la gravitation. Nous présenterons les caractéristiques fondamentales que doivent satisfaire toutes théories de gravité quantique et nous argumenterons que la théorie des cordes<sup>5</sup>, satisfaisant à ces critères, fournit un cadre naturel et cohérent. Nous détaillerons les effets physiques attendus, ce que nous illustrerons en présentant un modèle pour l'accélération de l'expansion de l'univers. Nous expliquerons qu'un tel modèle ne peut pas être compris dans le

cadre d'une théorie des champs effective de la gravitation, mais nécessite une théorie fondamentale comme la théorie des cordes pour être correctement défini.

## I. Pourquoi quantifier la gravitation ?

Les aspects classiques de la théorie de la relativité générale sont vérifiés avec une grande précision de nos jours. Nous en avons mentionné quelques manifestations dans l'introduction de ce texte.

La première raison en faveur d'une quantification de la gravitation est un argument de naturalité. Les équations d'Einstein indiquent que toute distribution de matière ou d'énergie, caractérisée par un tenseur énergie-impulsion  $T$  déforme la géométrie de l'espace-temps caractérisée par le tenseur d'Einstein  $G$  selon l'équation  $G = 8\pi T$ . Cette équation s'applique aux phénomènes physiques à toutes les échelles du microscopique au macroscopique. Comme le tenseur énergie-impulsion est fonction des interactions fondamentales qui sont quantifiées selon les règles de la mécanique quantique et de la théorie quantique des champs, il est naturel de supposer que le membre de gauche de l'équation d'Einstein est aussi régi par les lois de la mécanique quantique et qu'il faut ainsi quantifier la gravitation.

Un autre argument est la correspondance AdS/CFT entre théories quantiques des champs et gravité quantique, découverte<sup>6</sup> par Juan Maldacena et précisée par Igor Klebanov, Steven Gubser et Alexander Polyakov en 1997. Cette correspondance se formule en termes d'un principe holographique qui indique que les degrés de liberté fondamentaux d'une théorie de gravité quantique dans un volume d'espace fini sont distribués sur une surface bordant ce volume. Ces degrés de liberté sur la surface s'organisent en une théorie des champs sans gravité, comme la Chromodynamique Quantique<sup>7</sup> (QCD) ou son cousin avec le nombre maximal de supersymétries dont les particules élémen-

taires portent beaucoup de nombres quantiques. En 1974, G. 't Hooft a montré que ces théories sur le bord se décrivent par des graphes ressemblant fortement à ceux d'une théorie des cordes, mais la relation précise avec la théorie des cordes restait à comprendre. Ce fut Alexander Polyakov qui remarqua que cette théorie des cordes évolue dans un espace courbe de type anti-de Sitter (muni d'une constante cosmologique négative), sur le bord duquel sont définies les théories de jauge<sup>8</sup>. Selon cette correspondance, la physique des trous noirs classiques dans un espace courbe et la limite classique des théories de jauge sur le bord de cet espace fournissent deux limites classiques différentes de la même théorie quantique. La taille de cet espace est déterminée par la quantité de nombres quantiques portés par les particules élémentaires. Pour que cet espace ait la taille de notre univers visible, il faudrait que les particules élémentaires soient caractérisées par une quantité irréaliste de  $10^{60}$  nombres quantiques. Selon cette correspondance, il serait équivalent de décrire la dynamique et les interactions des particules fondamentales par une théorie de jauge ou par la gravité quantique donnée par une théorie des cordes dans l'espace de type anti-de Sitter. Cette correspondance a initialement été formulée dans le cadre théorique idéalisé d'une physique sur le bord, décrite par une théorie de jauge conforme (CFT) maximale supersymétrique. On ne connaît pas le cadre théorique décrivant notre univers actuel régi par les quatre forces fondamentales. Il semble néanmoins possible de construire des configurations gravitationnelles décrivant certaines propriétés des systèmes physiques plus réalistes comme les plasmas de quarks et de gluons créés au *Relativistic Heavy Ion Collider* à Brookhaven aux États-Unis ou des systèmes de fermions fortement couplés modélisant des phases supraconductrices de la matière.

Nous avons ici une manifestation des nombreuses dualités présentes dans la description des effets de physique fondamentale, à

commencer par la dualité onde corpuscule des états quantiques, et les multiples dualités assurant l'unité de la théorie des cordes.

## 2. À quelles échelles espérons-nous devoir faire appel aux effets de gravité quantique ?

Pour répondre à cette question, il est utile de faire référence au cube des théories<sup>9</sup> de Bronshtein, Zelmanov et Okun qui représente les différents régimes de la physique. Les dimensions de ce cube sont données par la vitesse de la lumière  $c$  qui régit les effets de relativité restreinte, la constante de Newton  $G$  qui régit les effets gravitationnels de la relativité générale, et la constante de Planck  $\hbar$  qui régit les effets de la mécanique quantique. La physique quantique se situe sur l'axe vertical, la physique relativiste sur l'axe horizontal et les effets gravitationnels de courbure de l'espace sur l'axe oblique de profondeur du cube.

Une théorie fondamentale d'unification doit décrire tous les phénomènes physiques dans tous les régimes situés importe où à l'intérieur de ce cube. À cause des valeurs numériques mesurées<sup>10</sup> de la vitesse de la lumière, de la constante de Planck et de la constante de Newton, quotidiennement nous ne faisons l'expérience que du coin inférieur gauche de ce cube.

En 1900, Max Planck<sup>11</sup> a montré que l'on attend des effets de gravité quantique importants à des distances de l'ordre de la longueur de Planck  $L \sim 1.6 \cdot 10^{-33}$  cm. Ce qui correspond à une énergie caractéristique de l'ordre de  $E \sim 1.22 \cdot 10^{19}$  GeV. Avec une distance caractéristique si faible, ou une énergie caractéristique aussi élevée, les effets de gravité quantique semblent désespérément inaccessibles à l'expérience.

En fait, cet argument, souvent invoqué, n'est pas correct à cause de l'universalité de la gravitation qui implique qu'elle couple à toutes les formes de la matière, à toutes les densités d'énergie, à toutes les échelles. Ainsi, on ne doit pas penser les grandes échel-

les cosmologiques et les courtes échelles microscopiques comme deux extrémités infiniment éloignées de la physique, mais comme deux points d'un cercle connectés par la gravitation. Ce rôle particulier joué par la gravitation est parfaitement représenté par l'*Ouroboros de la physique fondamentale* (serpent mythique se mordant la queue) conçu par Sheldon Glashow. Nous allons expliquer que la cosmologie est un domaine où des effets de gravité quantiques doivent jouer un rôle important.

### **3. Quels problèmes peuvent être résolus par la gravité quantique ?**

Le cadre formel d'une théorie cohérente et fondamentale de la gravitation quantique permet d'analyser les cinq questions suivantes. Il y a bien sûr d'autres questions que l'on peut analyser en relation avec la physique des particules, mais nous ne discutons dans ce texte que les modèles cosmologiques.

1) L'observation dans le fond cosmologique relique d'une extrême homogénéité des fluctuations de température entre des zones causalement indépendantes, la platitude de l'univers visible, et le problème de l'horizon sont naturellement expliqués par un mécanisme d'inflation<sup>12</sup> qui suppose qu'une petite région causalement connectée de l'univers primordial a gonflé exponentiellement pour engendrer tout l'univers observable. Les théories d'inflation sont naturellement définies dans le cadre des théories d'unification dont l'échelle d'énergie caractéristique n'est que de l'ordre d'un millième de l'énergie de Planck où les effets de gravité quantique sont importants. Ainsi les écarts à l'homogénéité du spectre du fond diffus relique cosmologique générés quelques instants après le Big-bang contiennent des informations sur la physique à l'échelle de Planck. Ces inhomogénéités ont engendré les structures macroscopiques de notre univers.

2) La théorie des cordes ne permet toujours pas de déterminer uniquement les caractéristiques de notre univers et il est estimé<sup>13</sup> que la théorie a un très grand nombre de solutions possibles. L'existence d'un grand nombre de solutions, qui est due au couplage à la gravité, n'est pas un problème en soi, mais la difficulté actuelle d'exhiber une solution réaliste s'approchant des caractéristiques de notre univers microscopique et macroscopique est plus dérangeante. En fait, le recours aux arguments anthropiques, par certains membres de la communauté scientifique, est plus un aveu d'échec qu'un cadre scientifique bien défini.

3) Non seulement notre univers est en expansion, mais en 1998 les équipes du *Supernova Cosmology Project* et du *High-Z supernovae search* ont mis en évidence que l'expansion de notre univers est en phase d'accélération. Cette accélération de l'expansion trouve son origine dans la densité d'énergie noire (ou une constante cosmologique) qui baigne notre univers et qui agit comme une sorte de « force d'antigravité » qui pousse l'univers à s'étendre. Nous donnerons plus bas un modèle tiré de la théorie des cordes qui explique ce phénomène par un effet de dilution de la force gravitationnelle dans des dimensions supplémentaires infinies.

4) Une description semi-classique des trous noirs prédit que ceux-ci émettent un rayonnement quantique amenant à une perte d'information et à une violation de l'unitarité de la théorie<sup>14</sup>. Seule une théorie quantique fondamentale de la gravité quantique permet d'analyser cette question et de statuer sur l'évolution des trous noirs.

5) Quelle est la réalité des dimensions supplémentaires prédites par la théorie des cordes et la description holographique, puisque nous faisons quotidiennement l'expérience de trois dimensions d'espace ? Le principe holographique, présenté plus haut, indique que ces dimensions supplémentaires sont en cor-

respondance avec les échelles d'énergie auxquelles nous examinons les phénomènes physiques. Elles fournissent une représentation géométrique des degrés de liberté fondamentaux de la physique dans un régime de couplage fort. Nous commenterons l'aspect ontologique de ces dimensions supplémentaires dans la conclusion de ce texte.

#### 4. Quelle théorie de la gravité quantique ?

Afin de bâtir une théorie quantique de la gravitation quantique, nous recherchons une théorie satisfaisant trois critères fondamentaux et incontournables. Pour que cette théorie quantique soit prédictive il est nécessaire qu'elle soit *renormalisable* (en fait sans divergences à courtes distances pour une théorie fondamentale). Ainsi elle ne contiendra qu'un nombre fini de paramètres corrigés par des corrections quantiques. Elle doit aussi être *unitaire*, afin qu'aucune information ne soit perdue lors de la transformation des états quantiques. Et, finalement, elle doit respecter l'*invariance de Lorentz*.

Si l'on impose seulement deux de ces trois conditions, il est possible de construire de nombreuses « théories » de la gravité quantique qui ne sont pas toutes cohérentes. Par exemple, certaines approches sacrifient l'invariance de Lorentz sous le prétexte de la quantification de la géométrie en cubes élémentaires de la taille de la longueur de Planck. Mais même une perte d'invariance de Lorentz aux très courtes échelles a des effets macroscopiques désastreux avec la propagation de différentes particules fondamentales à des vitesses différentes de la vitesse de la lumière. La collaboration FERMI a récemment publié dans *Nature* les résultats de ses observations confirmant l'absence de violation d'invariance de Lorentz jusqu'à des énergies de l'ordre de la masse de Planck<sup>15</sup>.

En théorie quantique des champs, tout objet classique est habillé par un nuage de fluctuations du vide quantique. La

somme de ces effets amène souvent des infinités mathématiques qu'il faut soustraire selon le procédé de renormalisation. Ainsi les grandeurs physiques, comme la charge ou la masse des particules, dépendent de l'échelle d'observation. Le principe de renormalisation implique une description effective des phénomènes de la physique valable dans un régime donné d'énergie, avec la séparation entre les effets physiques infrarouges à très grande distance et les effets ultraviolets à très courte distance. Les caractéristiques d'un même système physique examiné à différentes échelles évoluent selon les équations du groupe de renormalisation.

La théorie des cordes satisfait tous ces critères fondamentaux. À la différence des théories ponctuelles des champs, il n'est pas possible en théorie des cordes d'accéder à des dimensions spatiales arbitrairement faibles. Si l'on essaie de comprimer une corde dans un petit volume d'espace-temps au-delà d'une taille minimale fixée par l'extension de la corde, cette dernière augmentera les dimensions spatiales de la géométrie ambiante afin d'y relâcher l'énergie accumulée. Ce processus appelé dualité<sup>16</sup> relie des géométries de petite taille caractéristique avec des géométries de grandes tailles, mais ouvre aussi des dimensions spatiales supplémentaires. Une première conséquence est un lissage de la géométrie à très courte distance ce qui assure que la théorie est finie sans divergences. Une deuxième conséquence est que la géométrie de l'espace-temps ambiant n'est qu'une notion effective approximative, et la distinction entre grandes et courtes échelles est essentiellement perdue dans la géométrie quantique vue par la théorie des cordes. Les vibrations des cordes sont autant d'excitations que l'on peut associer aux particules fondamentales. Lorsque les extrémités des cordes ouvertes sont contraintes à évoluer sur un hyperplan quadridimensionnel elles donnent naissance aux interactions entre la matière, selon la description holographique de notre univers présentée précédemment.

Il est intéressant de remarquer que la théorie des cordes est formulée au moyen d'une théorie de gravité quantique en deux dimensions, pour définir la gravité quantique dans l'espace ambiant en dix dimensions<sup>17</sup>.

Est-il possible de concevoir une formulation fondamentale de la gravité quantique basée sur un formalisme de théorie des champs sans faire appel à la théorie des cordes ? On peut se demander si la théorie de supergravité maximale construite<sup>18</sup> en 1978 peut fournir une théorie fondamentale ponctuelle des champs de la gravité quantique. Sous l'hypothèse (peu probable<sup>19</sup>) que cette théorie est finie en perturbation, elle satisferait aux trois critères énoncés ci-dessus. Mais comme théorie de la gravitation, elle doit décrire les régimes à très hautes énergies où sont produits des trous noirs. Malheureusement, cette théorie ponctuelle des champs ne peut pas décrire ces trous noirs, car ils impliquent des états quantiques qui nécessitent la théorie des cordes<sup>20</sup>.

## **5. Application : l'accélération de l'expansion de l'univers**

Dans cette partie nous présentons un modèle réalisé en théorie des cordes pour l'accélération de l'expansion de l'univers. Cette accélération de l'expansion de l'univers peut s'expliquer si la force de gravitation devient plus faible aux échelles de l'ordre de la taille de Hubble ( $1/H \sim 10^{25}$  m) de notre univers visible.

En 2000 Dvali, Gabadadze, et Porrati (DGP) ont proposé<sup>21</sup> un mécanisme qui modifie la gravitation aux grandes distances en la diluant dans une dimension supplémentaire d'extension infinie. Puisque la gravitation peut se propager aussi bien dans les dimensions supplémentaires que dans celles de notre espace, les équations d'Einstein, données au début de ce texte, sont modifiées ; car elles font cette fois intervenir le tenseur d'Einstein de la gravitation ordinaire à quatre dimensions et

celui dans l'espace multidimensionnel ambiant, suivant une équation modifiée. Pour des distances faibles devant la valeur du rayon critique, nous avons la loi de la gravitation ordinaire en quatre dimensions. Aux distances de l'ordre de ce rayon critique et au-delà, c'est la loi de la gravitation dans l'espace multidimensionnel qui domine. Il est mesuré que, pour les échelles entre le millimètre et la taille de notre univers visible, la loi usuelle de la gravitation d'Einstein s'applique<sup>22</sup>. Mais cette loi peut être modifiée aux très courtes distances et aux échelles de l'ordre de la taille de notre univers observable.

Le mécanisme DGP considère que la gravitation agissant sur la géométrie de notre espace-temps quadridimensionnel n'est pas une théorie fondamentale, mais qu'elle est induite par les fluctuations quantiques des champs élémentaires couplant à la géométrie classique, selon une idée émise par Sakharov<sup>23</sup> en 1967. Nous sommes encore dans une description holographique avec, cette fois, des dimensions supplémentaires transverses d'extension infinie. Dans ce modèle, les effets à très grandes distances dépendent crucialement du comportement ultraviolet à très courte distance des interactions en quatre dimensions. Mais il est très difficile de définir une théorie des champs où il n'y a pas de séparation entre les grandes et les courtes échelles. Différentes approches pour traiter ce problème donnent lieu à des incohérences et à des instabilités dues au fait que, dans ce modèle, l'interaction gravitationnelle fait intervenir un nombre de degrés de liberté physiques différents aux échelles du système solaire et aux très grandes échelles cosmologiques. Comme nous l'avons vu précédemment avec le problème de l'invariance de Lorentz, il est difficile de modifier la gravitation à grande distance sans changer l'effet de la gravité aux distances terrestres par exemple, et vice-versa.

En 2002 nous avons donné une construction en théorie des cordes<sup>24</sup> d'un modèle de la classe DGP. Cette construction

réalise une généralisation de ce modèle avec plusieurs dimensions supplémentaires d'extension infinies, ce qui diffère de la construction initialement proposée qui n'a qu'une seule dimension supplémentaire d'extension infinie. Notre construction permet de mettre à jour les problèmes fondamentaux posés par ce genre de mécanisme de modification de la gravitation.

Pour cela, imaginons que nous vivons sur un plan quadridimensionnel plongé dans un univers décadimensionnel  $M_{1,9}$  où est définie la théorie des cordes supersymétrique. Dans ce modèle, il y a six dimensions transverses d'extension infinies. Les fluctuations quantiques des cordes autour de l'hyperplan  $M_{1,3}$  génèrent une gravité induite. On montre que cette gravité induite résulte de la *première correction quantique* de la théorie des cordes. Il est remarquable que cette première correction quantique, donnée par la contraction de quatre puissances du tenseur de Riemann, ait exactement les caractéristiques mathématiques nécessaires pour induire une théorie effective de la gravitation préférentiellement dans un espace quadridimensionnel. La théorie des cordes supersymétrique favorise, par ce mécanisme, un espace-temps effectif à quatre dimensions ! La dépendance fonctionnelle de la constante de Newton induite vis-à-vis des paramètres de la théorie des cordes permet d'ajuster la valeur du rayon critique, afin d'obtenir une modification de la gravité de l'ordre la taille de Hubble de notre univers visible, au prix de l'introduction d'un grand nombre de particules auxiliaires supplémentaires, ce qui peut impliquer une violation du principe d'équivalence. La construction en théorie des cordes suggère, en fait, une description duale incorporant les effets de contre-réaction gravitationnelle où l'interprétation géométrique initiale disparaît.

## Pour conclure

Nous venons de présenter divers arguments motivant la recherche d'une théorie de la gravitation quantique. La construction de cette théorie est la dernière frontière pour achever le programme d'unification des théories fondamentales entrepris au XX<sup>e</sup> siècle et avoir une description unique de tous les régimes de la physique à l'intérieur du cube des théories de Bronshtein, Zelmanov et Okun.

Nous avons présenté divers arguments indiquant, qu'en vertu du principe holographique, la gravitation quantique n'est qu'une autre face des interactions entre particules chargées composant la matière, et est donc fondamentale. Nous avons aussi expliqué que les effets de gravité quantique se manifestent aux échelles microscopiques et macroscopiques. On peut être surpris de la faiblesse de l'intensité de la force gravitationnelle comparée à celles des autres interactions mises en jeu dans la matière. C'est grâce au caractère universel de cette force, couplant à toutes formes de matière ou d'énergie à toutes les échelles, que la gravitation peut compenser la faiblesse de l'intensité de son interaction. C'est aussi cette même universalité qui permet d'expliquer cette extrême faiblesse. Dans le cadre d'un modèle avec des dimensions supplémentaires, si les forces entre la matière chargée sont localisées sur un espace-temps quadridimensionnel, la force gravitationnelle explorant tout l'espace multidimensionnel se trouve diluée dans les dimensions supplémentaires, réduisant ainsi l'effet des interactions gravitationnelles induites.

Les problèmes posés par la gravité quantique nécessitent un point de vue nouveau et un cadre théorique nouveau. La théorie des cordes fournit un tel cadre, qui permet d'aborder des problèmes insolubles dans le cadre d'une théorie des champs ponctuelle de la gravitation n'ayant pas les degrés de libertés fondamentaux requis<sup>25</sup>. Nous avons donné l'exemple d'un mécanisme

de modification de la gravité à grande distance pouvant expliquer l'accélération mesurée de l'expansion de l'univers. Finalement, seule la théorie des cordes permet d'aborder correctement la question de la nature et de l'évolution des trous noirs, même si de nombreux aspects n'ont pas encore complètement été clarifiés, comme la description de l'état final d'évaporation du trou noir et le sens de leur entropie.

Les dimensions supplémentaires de la géométrie courbe de la correspondance AdS/CFT et celles d'extension infinie du modèle cosmologique pour l'accélération de l'expansion de l'univers, modélisent géométriquement les propriétés des phénomènes physiques à différentes échelles. Il en est de même des dimensions supplémentaires enroulées de très petite taille, qui se manifestent par un spectre de particules massives qui pourrait être observé dans les accélérateurs de particules, si la taille de ces dimensions supplémentaires est suffisamment large. Il est très tentant de réifier ces dimensions supplémentaires, mais il faut conserver à l'esprit que ces constructions géométriques ne sont que des descriptions effectives, modélisant l'organisation des degrés de liberté des interactions fondamentales à différentes échelles d'énergie. Ces dimensions supplémentaires peuvent ne pas correspondre à des dimensions tangibles de l'univers.

Nous concluons avec une citation du texte « La Métaphore » de Jorge Luis Borges :

« Goethe a déclaré que ce qui nous abuse, ce ne sont pas nos sens mais notre entendement, sentence que nous pouvons comparer à ce vers de Marcedonio Fernández : *La réalité travaille en un mystère a découvert.* »

# Chapitre 9

## Des univers multiples ?

Julien Grain

Des mondes multiples disséminés à travers l'espace. Un gigantesque *multivers* dont notre univers ne serait qu'un « détail ». Nouvelle fable ou révolution épistémologique ?

### I. Étranges coïncidences

Un faisceau d'éléments laisse aujourd'hui penser que notre univers ne serait qu'un parmi de nombreux autres, un îlot dérisoire au sein d'un gigantesque méta-monde infiniment vaste et infiniment diversifié, rempli d'univers-bulle possédant chacun leurs propres lois effectives de la physique. Bien que cette idée ait traversé toute l'histoire de la philosophie, son entrée dans le champ de la physique contemporaine n'est que très récente et son avènement constituerait une véritable révolution épistémologique. Bien qu'inscrite dans la tradition copernicienne – notre univers et ses lois de la nature apparemment les plus fondamentales ne seraient plus qu'une réalisation marginale parmi tant d'autres – l'idée des multivers redéfinirait les contours de la science moderne. La cosmologie physique qui en résulte se voit enrichie d'une multitude d'univers éventuellement *merveilleux*, dont l'observation directe est impossible. Mais il s'agit là d'un merveilleux issu d'une démarche strictement scientifique, d'univers *pensés* qui émergent de théorie physique. Le point nodal de cette image tient à ce que les univers multiples ne constituent pas, par eux-

mêmes, un modèle. Ils sont une conséquence de modèles développés par ailleurs pour répondre à des questions claires de physique des particules ou de gravitation. Enfin, l'existence d'un multivers permettrait de résoudre un certain nombre de difficultés majeures en physique théorique et pourrait, en principe, être mise à l'épreuve. Elle ne constitue donc pas une pure invention métaphysique et possède un véritable pouvoir explicatif, qui fait toutefois appel à des univers invisibles pour rendre compte de l'aspect du nôtre. Tout comme les *expériences de pensée* servent à comprendre une théorie physique, ces univers *pensés* seraient nécessaires pour expliquer notre propre univers.

Elle demeure néanmoins une approche extrêmement spéculative qui pourrait n'être, *in fine*, qu'un supplétif provisoire, palliant les incomplétudes de la physique théorique contemporaine. Elle soulève en particulier de nombreuses questions quant à sa réfutabilité – une théorie qui prédit des mondes invisibles peut-elle être mise à l'épreuve ? – et, dans certaines versions des multivers, quant à son utilisation de la sélection anthropique.

Cependant, étant donné que leur existence est relativement « naturelle » et qu'elle permet de résoudre quelques paradoxes lancinants (à commencer par la valeur improbable de certaines constantes fondamentales de la physique), il est raisonnable de considérer *a priori* ces autres mondes avec intérêt. D'autant que, contrairement à certaines idées reçues, les théories prédisant des multivers sont testables, réfutables et donc poppériennes. Dans sa version la plus vertigineuse, on peut imaginer le multivers comme une structure gigogne au sein de laquelle chaque niveau comporterait lui-même une infinité d'univers...

Dans ce cadre, on entend par « univers » une sphère contenant tous les points de l'espace en contact causal, c'est-à-dire tous les points de l'espace qui peuvent communiquer, interagir, par un processus physique. Il s'agit de l'univers *théoriquement* observable, c'est-à-dire sans limitation technologique, correspondant

*actuellement* à une sphère centrée sur la Terre et dont le rayon est de l'ordre de quelques dizaines de milliards d'années-lumière. Un multivers est alors simplement défini comme un *ensemble* d'univers.

Si les constantes fondamentales de la physique étaient, pour la plupart, ne serait-ce que très légèrement différentes de ce qu'elles sont aujourd'hui, la vie telle qu'on l'observe, et plus généralement la complexité, n'auraient pas pu émerger.

Toute forme de vie observée actuellement se base sur la formation de structures physico-chimiques complexes ; ces macromolécules complexes se forment par l'assemblage, *stable*, d'atomes (*e.g.* carbone, oxygène) ; ces atomes, eux-mêmes *stables*, se forment au cœur des étoiles, si ces dernières vivent assez longtemps, etc. Chacune de ces étapes dépend des lois physiques et des constantes fondamentales impliquées, des grandeurs fixes ne variant ni dans le temps ni dans l'espace, intervenant dans les équations physiques et dont les valeurs ne peuvent être déterminées par la théorie. Or, l'architecture actuelle de notre univers, dont l'évolution passée est déterminée sur 13,7 milliards d'années grâce à de nombreuses observations et à une base théorique solide, est extrêmement sensible aux constantes fondamentales présentes dans ces théories : tout au long de son histoire, notre univers semble avoir été sujet à un grand nombre de troublantes coïncidences. Il suffirait par exemple que l'interaction forte, qui lie les nucléons entre eux, soit légèrement plus intense (d'environ un pourcent) pour que les étoiles ne vivent pas plus d'une seconde, au lieu des quelques milliards d'années observées dans le cosmos. C'est une conséquence dramatique pour l'émergence de structures moléculaires complexes qui nécessitent des échelles de temps bien plus grandes que la seconde pour se former. L'intensité de l'interaction forte apparaît donc finement ajustée et ce type d'ajustement fin jalonne l'histoire de l'univers<sup>1</sup>. Ces ajustements fins des valeurs des constantes fondamentales

connues de la physique sont, non seulement nombreux, mais sont parfois extrêmes. Si l'on ne veut pas aboutir à une *catastrophe anthropique*, l'intervalle de valeurs autorisées pour la fameuse constante cosmologique, ou énergie du vide, est très réduit. Légèrement plus grande que zéro, elle entraîne une accélération de l'expansion de l'univers si rapide que les galaxies ne peuvent se former. Légèrement plus faible que zéro, l'univers se refermerait rapidement sur lui-même en un immense effondrement gravitationnel. Il apparaît alors que la valeur de la constante cosmologique ne peut être guère différente de celle observée :  $10^{-120}$  en unité de Planck, nécessitant un modèle annulant les 119 premières décimales de l'énergie du vide, mais pas la 120<sup>e</sup>.

Ces coïncidences se résument par ce que Lee Smolin appelle *l'observation anthropique*<sup>2</sup> :

« Notre univers est bien plus complexe que la plupart des univers possédant les mêmes lois physiques mais des valeurs différentes des constantes fondamentales. [...] Ces conditions nécessaires pour la vie sont réalisées dans notre univers comme la conséquence de la complexité, rendue possible par les valeurs finement ajustées des paramètres de la physique. »

Face à cette troublante et incontestable évidence, les réponses ne sont pas nombreuses si l'on ne souhaite recourir, ni à une intervention divine finaliste ayant orienté le monde vers l'émergence de la vie, ni à un inconcevable hasard qui aurait mené à une réalisation tout à fait singulière. Demeurent essentiellement deux possibilités. La première consiste à supposer que la vie étant un processus adaptatif, elle trouverait sa voie dans tous les univers possibles, revêtant éventuellement des formes très inattendues. Si l'hypothèse est attrayante, elle semble défavorisée par la biologie de notre propre univers : en dépit d'une fascinante diversité de formes, la vie ne se déploie que dans des conditions physico-chimiques très spécifiques, autorisant la formation de

structures complexes. Il ne semble exister d'êtres vivants, ni dans le vide interstellaire, ni dans le cœur du Soleil. Il paraît donc extrêmement déraisonnable d'envisager une forme de vie se développant dans un monde éventuellement sans atome, sans états liés ou sans dimensions étendues.

La seconde possibilité consiste à rendre les constantes fondamentales de la physique *contingentes*. Cela peut être effectué de deux façons, radicalement opposées l'une de l'autre. La première repose sur l'idée d'*unification*, c'est-à-dire que le nombre de paramètres libres diminuera en unifiant des théories différentes en une même théorie de symétrie plus élevée. Dans cette vision *réductionniste*, les théories physiques actuelles, ainsi que la valeur des constantes fondamentales qu'elles impliquent, découleraient « naturellement » de cette *théorie unificatrice*, qui, elle, ne ferait intervenir aucun paramètre libre. Le monde aujourd'hui nous apparaît alors si complexe suite à la brisure de ces symétries. C'est par exemple ce qui était attendu de la théorie des cordes jusqu'à la fin des années quatre-vingt-dix. Cependant, cette connexion entre unification et réduction du nombre de paramètres libres, bien que très opérante jusqu'aux années soixante-dix, ne l'a plus été depuis.

La seconde, quant à elle, repose sur l'idée que l'univers n'est précisément pas unique. Qu'il n'est qu'un parmi une multitude d'univers possibles, chacun possédant ses propres lois de la physique avec ses propres valeurs des constantes fondamentales. S'il existe un multivers dont notre univers n'est qu'une infime partie, de nombreuses énigmes peuvent trouver une élégante solution. En particulier, les valeurs de ces fameuses constantes n'ont plus de caractère spécifique : toutes les valeurs sont possibles au sein du multivers et une valeur particulière correspond simplement à un tirage particulier. Mais si chaque univers présente ses lois différentes, si presque tout ce qui est possible est réel et effectif, il est évident que nous nous trouvons dans une zone du mul-

tivers compatible avec les lois que nous observons, nécessitant un effet de sélection au sein du multivers. Par exemple, si l'existence de la vie est fortement conditionnée par l'émergence de structures complexes, elle-même très sensible aux lois physiques au sein d'un univers donné, il est alors évident que nous nous trouvons dans une zone du multivers compatible avec l'apparition de la vie. Ce simple effet de sélection, par exemple anthropique, est strictement dénué de toute dimension théologique ou téléologique. Il n'a aucun lien avec une forme quelconque d'*Intelligent design* et requiert simplement de prendre en compte la spécificité de l'échantillon auquel nous avons accès au sein du monde ou du méta-monde. De la même façon que nous nous trouvons dans une zone hospitalière de notre planète (et non pas au sommet du mont Everest par exemple), dans une zone hospitalière de notre univers (et non pas au cœur d'une étoile à neutrons par exemple), nous nous trouverions naturellement dans une zone hospitalière du multivers (et non pas dans un univers où les électrons sont, par exemple, très massifs). Les constantes de couplage et les paramètres fondamentaux de la physique, ne semblent si incroyablement « ajustés » pour l'existence de la complexité, que pour la simple raison qu'il existe une multitude de réalisations différentes des lois de la Nature au sein du multivers, et que nous nous trouvons nécessairement dans une des bulles autorisant l'émergence de structures conscientes s'interrogeant sur leur environnement.

Cette approche du multivers repose donc sur la conjonction de deux hypothèses :

- nous avons un multivers à disposition, c'est-à-dire un ensemble d'univers possédant des lois physiques différentes ainsi qu'un mécanisme capable de générer ces univers ;
- et un critère de sélection à l'intérieur du multivers, rendant l'observation d'une réalisation particulière des lois physiques plus probable.

Ces deux conditions sont nécessaires pour expliquer l'observation anthropique. Il est évident qu'un critère de sélection ne saurait à lui seul en être une explication : un mécanisme physique de création d'univers multiple est nécessaire pour que toutes les valeurs, même les plus improbables, des constantes fondamentales puissent se réaliser. Inversement, le multivers constitue une explication de l'observation anthropique à la condition de sélectionner les zones, à l'intérieur du multivers, compatibles avec l'apparition de la complexité, afin de rendre l'improbable probable. Sans critère de sélection, nous ferions en effet toujours face à la question de savoir pourquoi nous vivons dans un endroit si particulier du multivers. Avec ces deux conditions, les valeurs des constantes fondamentales de la physique moderne n'ont aucun caractère particulier, mais les valeurs observées dans notre univers sont rendues probables par un critère de sélection.

Si l'ajustement incroyablement fin de la constante cosmologique, non seulement plaide en faveur de l'approche des multivers, mais exclut aussi pratiquement l'approche d'une théorie unifiée, cela n'est vrai que dans l'hypothèse où l'accélération récente de l'expansion de l'univers est interprétée comme l'effet de l'énergie du vide. Si ces deux effets (expansion accélérée et énergie du vide) ne sont pas connectés (et il existe des moyens d'expliquer l'expansion accélérée récente indépendamment de l'énergie du vide<sup>3</sup>), alors l'ajustement le plus fin jamais constaté, et principal moteur de l'approche des multivers, n'existe plus. Bien que cela ne détruise pas en soi cette idée, elle perdrait beaucoup de son crédit.

## 2. Modèles de multivers

Aussi séduisante qu'elle soit, la proposition des multivers serait peu crédible si elle avait été conçue spécifiquement et artificiellement dans le dessein de répondre aux énigmes de la complexité et de la naturalité. Mais tel n'est précisément pas le cas. Le

multivers n'est pas une élucubration conceptuelle *ad hoc* fondée sur un présupposé métaphysique ou un credo mystique. Il est la conséquence presque inévitable de nombreuses théories physiques contemporaines, presque unanimement admises pour certaines, plus spéculatives pour d'autres. La construction des univers multiples consiste à comprendre qu'ils ne sont pas un ajout aux modèles, inventé pour résoudre quelques énigmes lancinantes mais, au contraire, une conséquence de modèles dont l'ambition explicative est liée à des problèmes clairs de physique des particules ou de gravitation relativiste, indépendants du problème d'ajustement fin. Le « rasoir d'Ockham », qui est l'un des fils conducteurs fondamentaux de la démarche scientifique, n'est pas violé par le multivers, mais il le serait, au contraire, par les hypothèses supplémentaires auxquelles il faudrait recourir pour se dispenser des mondes multiples<sup>4</sup>. Une démarche qui serait d'ailleurs aussi lourde que contre-productive (puisque le multivers résout beaucoup d'énigmes bien qu'il n'ait pas été introduit pour cela), au point que certains considèrent que la question est moins aujourd'hui celle de l'existence du multivers que celle de la compréhension détaillée de sa structure. Quels sont donc les mécanismes de génération d'univers multiples ?

Indépendamment de tout cadre cosmologique, les deux grandes théories physiques du XX<sup>e</sup> siècle, la mécanique quantique d'une part et la relativité générale d'autre part, fournissent toutes deux des mécanismes de production d'univers multiples.

C'est tout d'abord dans le cadre de la mécanique quantique que la première proposition scientifique concernant la pluralité des mondes fit surface, du moins dans l'interprétation de Everett, ou interprétation des multimondes (*many-worlds interpretation*)<sup>5</sup>. Cette approche de la mécanique quantique cherche à résoudre le *problème de la mesure* qui apparaît dans la vision plus orthodoxe de l'École de Copenhague. Selon cette dernière, la mécanique quantique se développe suivant six postulats qui

aboutissent à un statut particulier de la mesure. Tout d'abord, bien que l'évolution de la fonction d'onde, qui représente toute l'information connaissable d'un système (postulat 1), soit *causale* et *déterministe* (grâce l'équation de Schrödinger, postulat 6), le résultat d'une mesure quantique est quant à lui fondamentalement *indéterministe* (postulats 4 et 5). Par exemple, selon le quatrième postulat, cette fameuse fonction d'onde ne renseigne ni plus ni moins que sur la probabilité d'observer un système quantique dans un état donné. Par ailleurs, avant d'effectuer une mesure, le système est décrit par une superposition d'états. Une fois la mesure effectuée, l'état du système devient connu et toute mesure suivante conduira au même état, comme cela s'observe expérimentalement : la fonction d'onde, initialement une superposition d'états, a été réduite à un seul état lors de la mesure (postulat 5). Ainsi, bien que l'évolution de la fonction d'onde soit linéaire et unitaire (postulat 6), ce qui préserve la superposition des états, cette superposition disparaît lors de la mesure (postulat 5). Suivant les préceptes de l'École de Copenhague, la mesure possède bel et bien un statut particulier (postulat 5) puisqu'il se comporte différemment de l'évolution du système (postulat 6). À l'inverse de la vision de Copenhague, dont l'amusante résonance wittgensteinienne (la physique n'est que ce qui peut être dit du monde<sup>6</sup>) viole la correspondance isomorphe entre le modèle et le réel sur le plan philosophique, et l'unitarité de la théorie sur le plan mathématique, la proposition d'Everett, en s'affranchissant du postulat de *réduction du paquet d'onde*, est la plus économique conceptuellement, et la plus proche de la position réaliste forte adoptée implicitement par la plupart des physiciens : la fonction d'onde est totalement équivalente au système lui-même et la mesure quantique peut être décrite à partir des mêmes postulats décrivant le *système à observer* (postulats 1 et 6). Dans cette approche, l'apparente réduction du paquet d'onde lors de la mesure est la conséquence d'un processus d'en-

chevêtement des états du *système à mesurer* avec les états de *l'appareil de mesure*, suivi d'un processus de décohérence ; deux phénomènes dont l'évolution est linéaire et unitaire. Plutôt que de supposer un effondrement de la fonction d'onde, Everett propose donc que deux univers parallèles soient créés à chaque mesure. La réalité n'est plus une simple ligne, mais un arbre à plusieurs branches, où chaque embranchement correspond à une mesure et chaque branche à un univers parallèle emportant son propre résultat de la mesure. Dans cette interprétation, il est loisible de considérer que le « chat de Schrödinger » est vivant dans un monde et mort dans un autre. De récentes études cosmologiques donnent un crédit particulier à cette interprétation des univers parallèles quantiques<sup>7</sup> pour expliquer certaines invariances observées. Enfin, il serait possible de tester l'hypothèse audacieuse d'Everett à l'aide de la cosmologie quantique, comme le suggère Don Page.

La relativité générale conduit, elle aussi, à s'interroger sur les mondes multiples dans une circonstance très différente : l'intérieur des trous noirs. Pour comprendre la structure causale de l'espace-temps, y compris au-delà de l'horizon, il faut recourir au jeu mathématique des transformations conformes et utiliser les diagrammes de Penrose-Carter. Or ces derniers, en particulier pour les trous noirs en rotation, présentent dans leur prolongement analytique maximal une structure tout à fait remarquable. À l'inverse des trous noirs sans rotation, un deuxième horizon apparaît à l'intérieur du trou noir. La singularité est alors dite de type temps et subit une rotation de 90 degrés dans ces diagrammes. Elle n'est plus un passage inévitable et de nouveaux univers de gravités attractives et répulsives deviennent accessibles. Le pont d'Einstein-Rosen qui connecte les différentes zones d'espace-temps est très instable et rend l'utilisation effective du trou de ver, pour d'éventuels voyages vers les « arrières-mondes », pratiquement impossibles. Mais, que ces univers ne soient pas

accessibles à des corps macroscopiques pénétrant le trou noir, ne révoque pas la possibilité de leur existence. Ce scénario demeure néanmoins extrêmement spéculatif dans la mesure où rien ne permet d'exclure que ces nouveaux univers (ou nouvelles zones de notre propre univers, selon la topologie globale), exhibés par les représentations de Penrose-Carter, ne soient que des artefacts mathématiques. De plus, un scénario crédible de création dynamique de ces mondes et anti-mondes fait aujourd'hui défaut. Avec les mondes parallèles de la mécanique quantique, ce fut pourtant, historiquement, l'une des premières portes conceptuelles ouvertes sur la possibilité d'univers parallèles dans le strict champ de la physique « orthodoxe ».

Plus intéressante et plus contemporaine est sans doute l'hypothèse de la sélection naturelle cosmologique<sup>8</sup>, elle aussi associée aux trous noirs mais en un tout autre sens. La construction d'une théorie quantique de la gravitation demeure aujourd'hui inachevée. Au-delà des difficultés techniques, en particulier liées à la renormalisation c'est-à-dire au fait que les gravitons emportent eux-mêmes une énergie source de gravité, l'incompatibilité entre la théorie quantique des champs et la relativité générale est profondément structurelle : l'invariant fondamental de la première (l'espace-temps) est la variable dynamique de la seconde. Bien que la tâche soit particulièrement ardue et qu'aucun consensus théorique n'ait encore émergé, il existe néanmoins différentes voies d'approche de la gravité quantique qui conduisent génériquement à une prédiction de la plus haute importance : la singularité centrale des trous noirs n'existe plus. Cette régularisation de la théorie peut en particulier permettre l'existence d'un intérieur de type de Sitter au sein des trous noirs. Ainsi, la singularité centrale se trouverait remplacée par un « rebond » quantique, auquel viendrait se connecter un nouvel univers en expansion<sup>9</sup>. Ce modèle permet de penser une sorte de multivers gigo-gne, où chaque trou noir formé engendrerait lui-même un uni-

vers. Notre monde aurait au moins  $10^{18}$  univers fils créés par ses trous noirs stellaires et supermassifs. Dans cette théorie, très inspirée de l'évolution darwinienne biologique, chaque univers transmet à sa descendance ses propres lois de la physique, légèrement modifiées par les fluctuations quantiques au moment du « rebond » dans le trou noir. Ces fluctuations induisent en effet la part d'aléa indispensable pour permettre une évolution, et non pas une simple réplique à l'identique. Il s'ensuit donc un mécanisme évolutif qui tend à stabiliser les lois autour de la structure permettant de maximiser la production de trous noirs, c'est-à-dire favorisant la procréation. Dans cette approche dynamique du multivers, il est alors attendu, et marginalement justifié, que les lois physiques favorisant la procréation soient aussi celles nécessaires à l'émergence de la complexité. Si tel est le cas, le critère de sélection naturelle suffit à expliquer l'apparition de structures complexes sans faire appel à un effet de sélection anthropique.

Ce modèle de sélection naturelle cosmologique est séduisant, mais il demeure embryonnaire et beaucoup de travail est encore nécessaire avant de lui conférer un véritable statut de cadre de pensée pour la cosmologie physique. En particulier, un mécanisme détaillé permettant de décrire la transmission des caractères (ici des lois de la physique) avec de légères fluctuations reste à élaborer. Par ailleurs, il est important de souligner que ce modèle n'échappe pas nécessairement à un effet de sélection anthropique. Il permet uniquement de s'en passer si les lois physiques maximisant la procréation sont aussi celles permettant l'émergence de structures complexes. Si cette condition n'est pas satisfaite lors de l'évolution dynamique des générations d'univers, le critère de sélection naturelle n'est alors plus opérant, mais il est toujours possible de réhabiliter ce modèle de multivers en y incluant le critère de sélection anthropique.

### 3. Des mondes gigognes

Dans un cadre cosmologique, au niveau le plus élémentaire de la hiérarchie<sup>10</sup> des multivers, se trouve le simple espace infini. Notre théorie de la gravitation, la relativité générale, permet non seulement de décrire le comportement des champs physique en espace courbe, mais aussi de comprendre comment la masse génère la courbure et donc façonne l'espace. Quand on applique cette théorie élégante et éprouvée à l'univers dans son ensemble, seules trois types de géométries peuvent émerger : hyperbolique, euclidienne ou sphérique. Or, dans les deux premiers cas, l'espace est – strictement – infini, du moins dans les topologies simplement connexes. Plus surprenant encore : cette théorie limite notre capacité d'observation. Le volume d'univers accessible est lui *fini*. Ainsi, les zones du cosmos au-delà de ce volume, appelé *sphère de Hubble*, constituent de nouveaux univers.

Or, il se trouve que les observations du fond diffus cosmologique, lumière relique du Big-bang, favorisent une géométrie euclidienne. Si le cosmos est spatialement infini, tout ce qui est possible, c'est-à-dire compatible avec les lois de la physique telles que nous les connaissons, doit alors avoir lieu quelque part. Tout événement dont la probabilité d'occurrence n'est pas strictement nulle *doit* se produire en un lieu de ce mégamonde illimité comportant une infinité de volumes de Hubble (ou univers), dont certains – eux aussi en nombre infini – sont nécessairement identiques au nôtre. À ce niveau, tous les univers partagent les mêmes lois de la physique, mais chacun possède ses propres conditions initiales. Les origines de ces conditions initiales sont les fluctuations quantiques lors de l'inflation. De par la nature stochastique de ces fluctuations, chaque volume de Hubble au sein du multivers correspond à un tirage aléatoire des conditions initiales.

Ce premier niveau de multivers n'explique pas la forme et la nature des lois, mais elle rend naturellement compte de l'étran-

geté de certains phénomènes. Si toutes les conditions initiales ont pu se réaliser quelque part dans cet ensemble infini de sphères de Hubble, la sélection anthropique explique, par exemple, pourquoi nous nous trouvons dans une des sphères où l'amplitude des fluctuations primordiales a permis la formation des différentes structures cosmiques, tandis que d'autres zones du multivers ne présentent, par exemple, ni étoiles ni galaxies. La spécificité de notre monde n'est pas intrinsèque ou ontique, mais simplement relative à ce qu'elle permet notre existence.

Le multivers le plus riche et le plus fascinant émane sans doute de la rencontre de la cosmologie inflationnaire et de la théorie des cordes. L'inflation, croissance exponentielle du facteur d'échelle de l'univers dans les premiers instants, est entrée dans le paradigme du Big-bang. Elle peut se décrire assez simplement, en recourant aux outils usuels de théorie des champs, et permet de résoudre l'essentiel des incohérences usuelles de la cosmologie : pourquoi n'observe-t-on pas les monopoles magnétiques prévus par les théories d'unification et qui devraient induire un univers  $10^{15}$  fois plus massif ; pourquoi l'univers est-il euclidien alors que l'échelle naturelle de courbure est environ  $10^{60}$  fois plus élevée ; pourquoi l'univers est-il si grand, c'est-à-dire composé d'environ  $10^{88}$  particules alors qu'un modèle simple de Big-bang conduirait plus volontiers à une dizaine de quanta dans le rayon de Hubble ; pourquoi l'univers est-il si homogène à grande échelle y compris entre des zones qui semblent causalement déconnectées ? Autant de paradoxes que l'inflation permet d'outrepasser par une simple accélération démesurée du taux de croissance de l'univers primordial durant un bref instant. De plus, le modèle permet aussi de rendre compte de l'apparition des structures cosmologiques telles qu'observées aujourd'hui. Lorsqu'on considère les fluctuations quantiques du champ à l'origine de l'inflation, il est aisé de comprendre que l'univers restera – globalement – éternellement en inflation, puisque les

zones ayant subies une fluctuation favorable (vers le « haut ») s'étendent plus vite que celles s'extrayant du mécanisme inflationnaire. Ce mécanisme peut d'ailleurs donner lieu à une autoreproduction d'univers inflationnaires<sup>11</sup>. Dans une bulle d'univers donnée, une fluctuation favorable à une nouvelle phase d'inflation peut se produire localement. Bien que la probabilité quantique d'une telle fluctuation soit très faible, la zone où cette dernière a lieu se met à croître exponentiellement plus rapidement que le reste de l'univers, pour finalement former une nouvelle bulle d'univers en inflation.

Par ailleurs, la théorie des cordes est aujourd'hui le seul cadre permettant de décrire toutes les interactions (bien que la gravité quantique à boucle<sup>12</sup> soit une autre voie prometteuse pour quantifier la gravité de façon non perturbative, comme montré dans un chapitre précédent de cet ouvrage). Cette théorie ne jouit d'aucun réel succès prédictif. Elle n'est pas même mathématiquement clairement définie. Elle décrit pourtant un cadre de pensée très fécond et très vraisemblable pour de multiples raisons. Ce cadre est unificateur, puisque toutes les particules apparaissent comme des modes de vibration d'une unique classe de cordes élémentaires, à l'instar d'une corde de violon qui peut générer toutes les notes de la gamme chromatique. Il est quantique par construction. Il est gravitationnel parce que des bosons sans masse de spin 2 – ce qu'on nomme des gravitons – apparaissent inéluctablement dans le spectre des cordes (en un sens la théorie des cordes *prévoit* la gravité par le simple nécessité de décrire de façon cohérente les autres interactions !). Il permet, ce qui est tout à fait remarquable, de donner un sens microphysique à la très mystérieuse entropie des trous noirs, qui demeure l'une des grandes énigmes de la physique théorique. La théorie des cordes, après celle de la supersymétrie (liant les bosons et les fermions) et celle de la dualité (liant les petites et les grandes distances pour la dualité T, puis les faibles et les fortes interactions

pour la dualité S), vient de subir une troisième révolution d'importance : la découverte du « paysage »<sup>13</sup>. Ce terme, emprunté aux sciences du vivant, réfère au nombre immense (peut-être  $10^{500}$  ou  $10^{1000}$ ) de vides de la théorie. Techniquement, ce chiffre gigantesque vient des différents choix de *variétés* de Calabi-Yau (associés aux repliements des dimensions supplémentaires) et aux différentes valeurs des flux magnétiques généralisés. De ce point de vue, nous faisons appel à une unique théorie qui, cependant, possède un nombre gigantesque de solutions – chacune d'entre elles correspondant à une réalisation particulière de la physique effective aux énergies actuellement sondées, avec ses valeurs particulières des constantes fondamentales. En un certain sens, chacun de ces vides correspond à des lois de la physique et nous nous trouvons dans un îlot de cet insondable paysage...

Lorsque l'inflation éternelle est pensée dans le cadre du paysage de la théorie des cordes, c'est naturellement un multivers d'une fascinante diversité qui se dessine. Chaque univers-bulle présente alors ses propres lois, qui réapparaissent comme de simples phénomènes, et l'inflation fournit un mécanisme dynamique pour que ces bulles d'univers puissent croître. Ce deuxième niveau de multivers englobe le premier niveau, puisque chaque univers-bulle présentant ses propres lois physiques peut alors contenir une infinité de sous-univers-bulles, chacun correspondant à une sphère de Hubble. Mais à la différence du premier niveau, il permet aussi de rendre compte de l'ajustement fin de certaines constantes fondamentales. Pourquoi, par exemple, la constante cosmologique présente-t-elle une valeur si incompréhensible dans notre univers ? Par quel « miracle » les 119 premières décimales de la valeur attendue sont-elles exactement compensées par un mécanisme mathématique mystérieux, mais pas la 120<sup>e</sup>, conduisant par là même à un monde particulièrement favorable à la complexité ? Simplement parce que presque toutes les valeurs possibles se réalisent quelque

part dans le multivers (à un vide de la théorie des cordes correspond une valeur de la constante cosmologique). Là encore, nous nous trouvons dans une île, ne présentant aucun primat ontologique, mais simplement une structure mieux adaptée à la vie que les mondes où, par exemple, l'énergie du vide ne permet pas la formation des structures. Autre lieu, autres lois. Ailleurs, autres dimensionalités. Plus loin, autres forces.

Les multivers sont donc nombreux et apparaissent aussi bien dans le champ de la physique « usuelle » que dans des approches plus spéculatives. Mais si le multivers est prédit par les théories usuelles de la physique fondamentale et s'il donne des clés nouvelles de compréhension à certaines contradictions centrales de nos modèles, d'où vient la réticence au multivers ?

#### 4. Un modèle testable

Tout d'abord, de ce que certains modèles de multivers se basent sur le fameux *principe anthropique* comme critère de sélection, premièrement formulé en 1974 par B. Carter. Il est important de souligner que le principe anthropique n'est pas en soi un principe, mais bien un acte de rigueur scientifique consistant à prendre en compte la spécificité de l'échantillon dans lequel nous nous trouvons<sup>14</sup>. Pour que le multivers constitue une explication de l'observation anthropique (la complexité est rare), il est nécessaire de sélectionner les zones à l'intérieur du multivers, compatibles avec l'apparition de la complexité. Si la complexité est alors une condition nécessaire à l'émergence de la vie, il paraît raisonnable de considérer le biais anthropique comme critère de sélection approprié. Le principe est alors utilisé dans une version faible : les lois de la physique ne sont pas contraintes par l'émergence de structures conscientes *observantes*, mais ces structures conscientes ne pouvant apparaître que sous certaines conditions physiques, leur existence impose un effet de sélection sur les régions du multivers qui peuvent être observées.

Utiliser le principe anthropique comme critère de sélection impose cependant deux hypothèses : la complexité est rare et est une condition nécessaire à l'émergence de la vie d'une part et, d'autre part, nous sommes des observateurs typiques au sein du multivers. Cette seconde hypothèse, appelée *principe de médiosité* par A. Vilenkin<sup>15</sup>, est nécessaire pour faire le lien entre les prédictions usant du principe anthropique et les observations. Elle s'inscrit de plus dans la lignée copernicienne : il est important qu'en tant qu'observateur nous n'ayons aucun statut spécifique. Ainsi, une théorie du multivers prédisant que la valeur observée des constantes fondamentales est peu probable sera exclue, car elle conduirait à la conclusion que nous avons un statut particulier en tant qu'observateur.

Ensuite, que le multivers pousse la science à prédiquer sur des espaces *invisibles* met à mal une certaine conception poppérienne de la physique. Autrement dit, une théorie qui prévoit l'existence de mondes invisibles (puisque déconnectés du nôtre) satisfait-elle au critère de réfutabilité de Popper ? D'abord, il faut rappeler que l'existence d'univers multiples n'est pas un modèle mais une conséquence – qui se trouve être, de plus, fructueuse du point de vue explicatif – de certains modèles. Or, il n'a jamais été nécessaire que toutes les conséquences d'une théorie soient vérifiées, ni même vérifiables, pour que celle-ci puisse constituer une proposition légitime. Par exemple, les conséquences de la relativité générale sur la structure interne des trous noirs sont irréfutables sans que l'édifice n'en soit ébranlé. Ensuite, le rationalisme critique de Popper n'est certainement pas le dernier mot en philosophie des sciences. Enfin, l'exercice définitoire est intéressant *a posteriori* mais il est bien clair que, comme l'art, la science est définie de façon interne par la *praxis* et que, si elle prenait aujourd'hui un nouveau tournant, une prescription épistémologique l'en dissuadant *a priori* serait délicate à justifier.

Cependant, en dépit des réserves que l'on peut émettre sur l'étroitesse de la définition poppérienne de la science, il reste important de savoir si les multivers entrent de plein droit dans le champ tracé par cette ligne de démarcation. Considérons une théorie conduisant à un million d'univers différents dans laquelle la gravité est soit répulsive, soit attractive. Quand elle est attractive l'espace présente deux dimensions, quand elle est répulsive, il en présente trois. Par la simple observation de notre univers (c'est-à-dire d'un unique échantillon) présentant trois dimensions de type espace et une gravité attractive, le modèle et tous ses univers sont réfutés.

Dans des cas plus réalistes, comment mène-t-on une prédiction au sein du multivers et comment cette prédiction se compare-t-elle aux observations ? Une prédiction dans le multivers nécessite deux étapes et revêt un caractère probabiliste :

- une théorie  $T$  qui aboutisse à un multivers muni d'une distribution de probabilité  $P^T(\Lambda_i)$ , définissant la probabilité que la valeur  $\Lambda_i$  soit réalisée dans un univers tiré au hasard ;
- un critère de sélection qui pondère la probabilité  $P^T(\Lambda_i)$  (par exemple que la vie émerge étant donnée la valeur de  $\Lambda_i$  ou alors le nombre de trous noirs dans l'univers père).

Étant donnée, par exemple, la conjonction de l'inflation éternelle et de la théorie des cordes, munie du principe anthropique comme critère de sélection, la probabilité d'observer la valeur  $\Lambda_i$  est donnée par le produit  $P(\Lambda_i) = P^T(\Lambda_i) \times f(\Lambda_i)$ . La probabilité  $P^T(\Lambda_i)$  est fixée par la dynamique de l'inflation éternelle menée dans la géographie du paysage et le facteur de sélection par la probabilité de l'émergence de la vie conditionnée par la valeur  $\Lambda_i$ . Les prédictions au sein du multivers correspondent à la probabilité qu'un observateur aléatoire se trouve dans la zone «  $\Lambda_i$  » du multivers. De plus, cette probabilité s'interprète aisément dans un cadre Bayésien. Il est évident que les prédictions

et réfutations ne peuvent être menées que de façon probabiliste sur une base de vraisemblance de la théorie. Mais cela est déjà le cas en physique « usuelle » quand il est tenu compte des aléas quantiques fondamentaux et des incertitudes de mesure. La méthodologie dans le multivers n'est pas qualitativement différente de ce qui nous est habituel et une théorie du multivers ne sera acceptée ou rejetée qu'à un certain niveau de confiance.

D'un point de vue pratique, notre méconnaissance quasi-totale de la morphologie du paysage, c'est-à-dire des méandres de la théorie des cordes, et notre incompréhension des mécanismes d'émergence de la conscience, nécessaires à l'évaluation de la pondération anthropique, rendent les calculs prédictifs essentiellement impossibles. De plus, un problème sérieux (dit de « mesure ») est associé au choix d'une hypersurface de genre espace sur laquelle évaluer la distribution. De ce choix, essentiellement arbitraire, peuvent résulter des probabilités substantiellement différentes. Si les approches de type multivers sont prédictives et réfutables en principe, tel n'est pas le cas en pratique.

Contourner ces problèmes mathématiques n'est pas aisé. Par exemple, S. Weinberg suggère de n'appliquer un raisonnement anthropique qu'aux constantes fondamentales dont la variation au sein du paysage est pratiquement nulle sur la gamme *anthropiquement* autorisée<sup>16</sup>. Une connaissance précise du paysage n'est alors plus nécessaire. De cette utilisation *triviale* du principe anthropique s'ensuit que toute théorie prédisant un paysage entrant dans le cadre de la prescription de Weinberg est confirmée par l'observation : un sous-ensemble des théories du multivers est irréfutable, même au sens probabiliste. Essentiellement seules les théories prédisant une probabilité *a priori* strictement nulle dans la gamme anthropique sont alors réfutées. La crainte est donc la suivante : plutôt que de tester la théorie fondamentale à l'origine du multivers, nous nous contenterions de placer

des limites anthropiques. Un accès direct à la probabilité *a priori*  $P^T(\Lambda_j)$ , c'est à dire sans biais anthropique, pour au moins une des constantes fondamentales, est suffisant pour éviter ce risque – une condition qui apparaît comme indispensable à certains physiciens<sup>17</sup>.

Si les théories de multivers sont donc en principe prédictives et réfutables, de nombreux problèmes pratiques et méthodologiques n'ont pas encore été résolus. Cependant, cette impossibilité de fait n'est certes pas une impossibilité de droit et rien n'empêche d'espérer l'avènement d'outils physico-mathématiques fiables permettant *in fine* de mettre le multivers à l'épreuve des observations, fussent-elles réalisées dans un seul univers.

Le multivers apparaît spontanément dans beaucoup de modèles physiques édifiés pour comprendre la structure fondamentale de la matière et des interactions. Non comme une supposition mais comme une conséquence. Il résout naturellement les problèmes fondamentaux de la complexité et de la naturalité : l'« ajustement fin » apparent des paramètres ne serait qu'un effet de sélection causé par notre position dans ce méta-monde. Il ne remet pas en cause la démarche scientifique éprouvée en demeurant clairement réfutable, au moins en principe, sur une base probabiliste. Loin d'un retour à l'anthropocentrisme, il s'inscrit au contraire dans la lignée des révolutions copernicienne, darwinienne et freudienne comme une nouvelle blessure narcissique qui relativise la valeur métaphysique de notre univers.

Pourquoi suscite-t-il donc autant de suspicion, de défiance et parfois même de colère ? Sans doute parce que c'est une pensée spéculative, plus que d'ordinaire. Une pensée où les frontières de la science se brouillent. Une pensée qui pourrait très bien n'être qu'une illusion, invalidée par de futurs progrès en physique théorique. Une pensée qui manque encore singulièrement d'outils mathématiques clairement définis pour mener à bien une

prédiction et qui fait face à deux problèmes d'envergure : celui dit de la « mesure » et celui dit du « conditionnement », chacun relié aux deux hypothèses à l'origine du pouvoir explicatif des multivers. Une pensée qui jette des ponts vers d'autres gnoséologies et d'autres récits. Une pensée dangereuse, aux délinéaments du raisonnable. Mais l'exploration des nouveaux mondes ne saurait être tout à fait exempte de dangers.

# **Partie 3 : Éléments d'histoire de la cosmologie et de ses épistémologies**

## **Chapitre 10**

### **Forme et structure de l'univers dans les civilisations anciennes et les traditions orales**

Guillaume Duprat

Depuis quelques milliers d'années, sur tous les continents, dans toutes les cultures, ceux qui observent le ciel se posent les mêmes questions : l'univers a-t-il un début ? une fin ? une limite ? Avant et à côté<sup>1</sup> de la cosmologie moderne, ces réflexions ont donné lieu à de multiples visions de l'univers, mêlant observations concrètes du ciel et sciences religieuses, descriptions du territoire et géographies symboliques. Comprendre les logiques spatiales de ces cosmologies méconnues est possible en sondant les différentes traditions des anciennes civilisations et des micro-sociétés : cosmogonies, épopées, textes funéraires et récits chamaniques<sup>2</sup>. Ces traditions cosmologiques sont diverses et polymorphes, mais elles présentent des analogies. Leur conception de l'espace procède très largement de l'existence de différentes catégories d'êtres, les lieux sont hiérarchisés en fonction de leur nature. Ce sont des récits dont la structure est hétérogène, *bri-*

*colant*<sup>3</sup> différents types de discours, religieux, mythologique, politique ou scientifique, amalgamant par conséquent plusieurs représentations de l'espace.

Sur quels éléments de l'environnement se baser pour imaginer l'univers ? À l'horizon de l'espace visible, des repères existent au ciel, sur Terre, et nous postulons qu'ils constituent les points nodaux à partir desquels les représentations se construisent. Autour de leur habitat, les hommes appréhendent un espace plus ou moins maîtrisé : un territoire de chasse ou de pêche, un réseau de routes, un empire, etc. Pour s'y déplacer et se le représenter il apparaît nécessaire d'utiliser des repères. Sur Terre, la mer, les fleuves, les montagnes, les arbres, les rochers ou les grottes constituent de véritables bornes qui balisent l'espace. Au ciel, le soleil, la lune, les étoiles, sont des corps célestes dont les intensités lumineuses et les mouvements attirent l'attention. Un certain agencement de ces repères détermine les premiers axes, ces lignes fondamentales qui structurent la pensée cosmologique des systèmes traditionnels. Sur le plan horizontal, la course solaire dessine un premier axe de référence. Symbole de lumière et de fertilité, l'astre est un modèle à suivre dans l'ordre cosmique, sa course est régulière, il se lève chaque matin dans une direction et se couche dans la direction opposée, traçant au sol un axe est/ouest à partir duquel un système d'orientation se met en place. L'autre axe de référence se lit sur un plan vertical, en fonction d'une bipolarité haut/bas. Ces pôles renvoient respectivement au ciel et à la Terre et sont pensés comme un couple qui peut parfois désigner l'idée de « Tout ». Entre ces deux pôles, la Terre est souvent décrite comme une surface plane<sup>4</sup>. Extraits symboliquement de leur environnement géographique, les repères terrestres et célestes sont utilisés en tant que métaphores dans une sorte de grammaire cosmologique élémentaire : ils sont extrapolés. À la frontière entre le réel et le symbolique, le processus d'extrapolation permet de désigner l'inaccessible, de

représenter des lieux invisibles et des points de communication entre les niveaux cosmiques. Selon cette modalité, plusieurs types d'espaces se déploient.

## I. L'espace matriciel et illimité

Alors que la logique d'ensemble des cosmogonies semble entièrement subordonnée à la démonstration de la puissance des dieux et des esprits<sup>5</sup>, ces récits dévoilent parfois quelques indices d'ordre spatial. Si l'on remonte à la source de la chaîne causale mise en place dans l'ordre du discours cosmogonique, on remarque parfois la mention d'un élément fondateur, souvent une mer illimitée ou un espace obscur.

### I.1 La mer illimitée

Associée au sexe féminin, la mer primordiale est la matrice du monde, l'espace fécond où la génération des divinités et la création des êtres sont possibles. Sur un plan spatial, elle est le contenant du monde et une étendue sans fins.

- En Égypte, dans la tradition d'Héliopolis<sup>6</sup> de l'Ancien Empire, le dieu solaire Rê-Atoum-Khépri est mis au monde dans *Noun*, traduit par « mer primordiale » ou « abysses ». Le thème persiste jusqu'au Nouvel Empire, comme dans la tradition de Memphis<sup>7</sup> où Ptah émerge de *Noun*.
- D'après l'*Enuma Elish* des Babyloniens, l'espace fondateur est aquatique, une matière indifférenciée, magique et féconde. Puis l'océan cosmique se sépare en deux types d'eau : *Tiamat*, l'eau salée, et *Apsou*, l'eau douce<sup>8</sup>.
- En Amérique du Nord, de nombreux mythes évoquent une mer illimitée. Pour les Indiens Cheyenne, le grand esprit Maheo existe au-dessus d'une mer sans limites. Après avoir donné vie aux poissons et aux oiseaux, il crée le ciel et demande à un oiseau d'aller chercher de la vase au fond de

l'eau pour façonner une Terre<sup>9</sup>. Le thème de la plongée dans une mer illimitée connaît des variations chez les indiens Alabama<sup>10</sup>, les Sioux Outbreak<sup>11</sup>.

- En Eurasie également, le mythe d'une mer illimitée associé au thème de la plongée est très répandu. Pour les Tatars Lebed, le dieu créateur envoie un cygne blanc chercher de la vase au fond de la mer pour créer la Terre<sup>12</sup>. Pour les Bouriates de Mongolie, c'est un rouge-gorge<sup>13</sup> et pour les Yakoutes, c'est un canard sauvage<sup>14</sup>.
- En Indonésie, chez les Iban, deux esprits oiseaux, Ara et Irik, planent au-dessus d'une mer illimitée, ils plongent et trouvent deux œufs. Grâce à leur découverte, les oiseaux créent le ciel et la terre<sup>15</sup>. Pour les Dusun de Bornéo, un rocher émerge dans « les eaux de l'univers »<sup>16</sup>.

## 1.2 L'espace obscur et magique

Le germe du monde se développe d'autres fois dans un espace obscur, plutôt lié à l'élément air. Associé au domaine céleste ou à un abîme, c'est un lieu illimité dont la nature est magique et fertile. L'absence de lumière caractérise l'état initial du monde, il justifie la création prochaine des astres et du soleil.

- En Amérique du sud, pour les Indiens Guarani, le dieu Namandu surgit dans un « néant ténébreux » où règnent les vents<sup>17</sup>. Chez les Kogi de Colombie, la déesse mère se tient au-dessus des eaux primordiales dans un espace où règne une obscurité totale<sup>18</sup>.
- Aux États-Unis, chez les indiens Hopi, le dieu Taiowa pense sa création dans *Tokpela*, « espace infini »<sup>19</sup>.
- En Océanie, pour les habitants de Tahiti, au début du monde un œuf-monde se tient « dans les cieux ténébreux »<sup>20</sup>. En Nouvelle-Zélande, pour les Maori, la cosmogonie commence « dans un espace vaste et plongé dans la nuit »<sup>21</sup>.

- En Afrique centrale, les Kuba croient que le dieu Mbumba régnait sur une terre couverte d'eau, « plongée dans les ténèbres »<sup>22</sup>.

Autour du thème de l'espace magique, d'autres variations correspondent à une idée d'abîme :

- Dans la Grèce archaïque, l'espace fondateur est le chaos. Par opposition au *cosmos* dont l'organisation est harmonieuse, le *chaos* est un espace désorganisé, fécond pour les générations successives de dieux. Sur un plan topologique, plusieurs interprétations existent, c'est une « béance féconde », un « gouffre infini », un « abîme infracosmique »<sup>23</sup>.
- Chez les anciens Scandinaves, au commencement du monde il n'y a que *Ginnungagap* traduit par « vide » ou « abîme », un espace propice aux forces magiques, localisé entre Niflheimr, le monde humide du nord, et Muspellsheimr le monde chaud du sud<sup>24</sup>.

Quel que soit le thème initial, souvent une mer ou un espace obscur<sup>25</sup>, parfois une sorte d'abîme, deux points communs se dégagent : la fécondité et l'absence de limites spatiales. En tant qu'espace matriciel, de nombreux mythes développent par la suite le thème de la formation d'un œuf-monde. En tant que lieu, l'espace fondateur des cosmogonies se distingue des espaces créés ultérieurement par son absence de limites spatiales.

## 2. L'espace contenu

Après l'inaccessible espace matriciel, les traditions cosmologiques – dont certaines cosmogonies – décrivent l'organisation du couple terre/ciel. Un autre type d'espace se déploie alors notamment sur un plan horizontal, le long de la course solaire. La représentation de l'étendue du lieu se heurte à la question du bord du monde où surgissent des limites sous diverses formes : bornes géographiques, ciel, monstres ou êtres mythiques.

## 2.1 Les bornes du monde

Les bornes terrestres peuvent être décrites à partir du processus d'extrapolation des éléments saillants de la géographie ; des arbres ou des montagnes sont situés au coucher et au lever du soleil, parfois aux quatre points cardinaux. Ce système d'orientation se décline avec l'attribution à chaque direction d'une qualité, d'un élément ou d'une couleur. Dans ce type de système cosmologique, le destin des âmes des défunts s'inspire du parcours du soleil : l'est est un pôle de vie alors que l'ouest est associé à la mort.

- Dans la cosmologie égyptienne du Nouvel Empire, les limites est et ouest de la terre sont marquées par les montagnes *Manou* et *Bakhou*<sup>26</sup>, ou par des sycomores<sup>27</sup>. Le lever du soleil est un lieu où règne la vie, contrairement à l'ouest qui accueille les âmes des morts.
- Dans la cosmographie aztèque, la terre a une forme de croix<sup>28</sup> et les quatre branches correspondent aux quatre points cardinaux. Des vents et des arbres mythiques sont situés dans chacune de ces directions, au nord l'arbre est noir, à l'est il est rouge, au sud il est bleu et à l'ouest il est blanc<sup>29</sup>.
- D'après une tradition balinaise<sup>30</sup>, la terre est bornée aux quatre points cardinaux par quatre montagnes.
- Pour les Indiens Navajo, quatre montagnes sont situées aux quatre points cardinaux : le Mont Hesperus, au nord, est noir ; à l'est est située une montagne blanche ; le mont Taylor, au sud, est bleu ; et le Pic San Francisco, à l'ouest, est jaune<sup>31</sup>.
- D'après le *Huainan zi*, précieuse encyclopédie d'inspiration taoïste de l'époque Han, la terre est carrée et balisée par huit montagnes et huit portes situées aux quatre points cardinaux et dans les quatre points intermédiaires. Les portes sont associées à des couleurs : le nord est noir, l'est est bleu, le sud est rouge et l'ouest est blanc<sup>32</sup>.

- Chez les Yakoutes de Sibérie, la terre peut avoir une forme carrée ou octogonale et le soleil commence sa course où est située une gigantesque montagne d'argent<sup>33</sup>.

Dans les traditions cosmographiques d'Orient, le bord du monde est fréquemment désigné par une variation du thème de la montagne cosmique, une chaîne montagneuse circulaire contient la terre et la mer :

- Selon la tradition mésopotamienne, des montagnes sont situées au-delà de la mer qui entoure la terre des hommes. Ce sont « les montagnes du bout du monde »<sup>34</sup>.
- Le monde perse est entouré par une mer circulaire et une chaîne montagneuse percée par 360 trous, à l'est et à l'ouest<sup>35</sup>.
- La cosmographie la plus diffusée dans le bouddhisme Mahayana décrit une chaîne montagneuse en argent tout autour de notre monde<sup>36</sup>.
- Dans la tradition cosmologique de l'Échelle de Mahomet, la terre est encerclée par *Kaf*, une barrière montagneuse infranchissable<sup>37</sup>.
- Le thème de la barrière montagneuse se retrouve dans des cosmologies d'Eurasie, comme chez les Tatars où le cercle montagneux est en fer<sup>38</sup>.

## **2.2 Les mondes clos**

La question des limites du monde se traduit aussi dans des conceptions du ciel où ce dernier peut être perçu comme un dôme dont la voûte clôt l'espace. Pour désigner la forme convexe ou sphérique et la rendre intelligible, des métaphores sphéroïdales ou couvrantes sont utilisées.

- Dans la tradition du Bundahishn des anciens Perses, le monde est contenu dans une sphère solide en métal<sup>39</sup>.

- Dans les traditions hindoues, le monde est souvent contenu dans un œuf. Dans les Samhitâ, l'œuf a un diamètre de 500 millions de yojana. La tradition Çaiवासिद्धान्ता multiplie les œufs cosmiques, pour arriver à un nombre de 224<sup>40</sup>.
- Chez les indiens Kogi de Colombie, la terre est située entre quatre plans célestes et quatre plans souterrains et le tout est contenu dans un œuf<sup>41</sup>.
- Pour les Dogons du Mali, les quatorze plans de l'univers sont contenus dans l'œuf d'Amma<sup>42</sup>.
- En Polynésie, pour les habitants de l'île Rarontonga, le monde est dans une noix de coco<sup>43</sup>.
- Chez les Scandinaves, le ciel est fait avec le crâne du géant Ymir sacrifié lors de la création du monde<sup>44</sup>.
- Dans la cosmologie du Huainan Zi des Chinois, le ciel est un dôme hémisphérique<sup>45</sup>, comme un bol renversé.
- En Afrique de l'Ouest, chez les Guen Mina<sup>46</sup> et les Yoruba<sup>47</sup>, on dit que le ciel est comme une demi-calebasse renversée.
- Au Vietnam, le ciel est une demi-sphère au-dessus de la Terre, comme une calabasse coupée en deux<sup>48</sup>.

L'architecture, notamment la forme des toits, fournit d'autres métaphores couvrantes au ciel :

- Chez les indiens Navajo, le ciel a la forme d'un hogan, l'enceinte circulaire et voûtée où se tiennent les cérémonies<sup>49</sup>.
- Pour les Yakoutes, le ciel a la forme de la yourte traditionnelle, circulaire et centrée sur une cheminée, comme le ciel est centré sur la polaire. Comme la yourte, le ciel est sou-ple<sup>50</sup>.
- Les Inuits comparent le ciel à leur igloo hémisphérique<sup>51</sup>.

### **2.3 Les mondes contenus par des êtres mythiques**

Dans certains mythes ce sont des serpents géants qui contiennent le monde. En se mordant la queue, le serpent forme une

roue, l'Ouroboros et dessine une figure géométrique élémentaire, le cercle. Ce symbole se comprend sur un plan spatial et temporel : le serpent marque la limite ultime du monde humain dans la géographie symbolique et renvoie aussi à une conception cyclique du temps.

- Dans la mythologie des anciens Scandinaves, le dieu Odin a lancé loin de la terre un bébé serpent qui grandissait à vue d'œil. Le serpent *Jormungandr* a continué de grandir dans l'océan circulaire au point que ses deux extrémités en ont fait le tour et qu'il se mord la queue<sup>52</sup>.
- Pour les indiens Shipibo la terre est entourée par un anaconda géant<sup>53</sup>.
- Chez les Dogon du Mali, le serpent qui entoure notre monde s'appelle *Yuguru Na*. S'il vient à lâcher prise, notre monde se disloque. Il en est de même pour chacune des treize autres terres situées au-dessus et au-dessous de la terre des hommes<sup>54</sup>.

### 3. Les espaces étagés

Dans les épopées, les textes funéraires ou les visions des chamanes, les hommes et les esprits se déplacent dans différents plans qui communiquent entre eux. À partir du processus d'extrapolation des repères terrestres et célestes, les cosmologies traditionnelles désignent des points de contact entre les mondes, les différentes catégories d'êtres peuvent alors circuler, communiquer dans ces espaces hiérarchisés selon leur nature. Ce type de vision de l'univers se déploie alors principalement sur un plan vertical, selon la polarité bas/haut, dévoilant de multiples niveaux comparés à des étages. Cette représentation de l'espace peut être autonome ou corrélative à l'espace matriciel et à l'espace contenu.

### **3.1 La structure terre/ciel**

De très nombreuses cosmologies sont fondées sur le couple ciel/terre, ou ciel/mer. Dans ces traditions, le couple fondateur désigne le « Monde » ou le « Tout »<sup>55</sup> :

- Au Tchad, les Hadjeray se perçoivent en bas d'un monde sous lequel il n'y a rien. Leur univers est divisé en deux plans parallèles, aux contours et aux formes non précisés<sup>56</sup>.
- Pour les Pygmées Aka, la mer et le ciel constituent les deux parties du monde. Entre les deux, la terre n'est qu'une fine pellicule flottant sur la mer<sup>57</sup>.
- En Afrique de l'Ouest, pour les populations Guen-Mina<sup>58</sup> et Yoruba<sup>59</sup>, le modèle cosmologique est le couple ciel/mer.
- En Amérique du Nord, le modèle cosmologique est très souvent le couple ciel/terre avec un ciel voûté. Pour les indiens Cherokee<sup>60</sup>, Creek<sup>61</sup> (Yuchi, Muskogee et Alabama), la terre est surmontée d'une coupole céleste solide qui tombe et remonte sans cesse. Les Osage ont un monde bipolaire, divisé entre un ciel lumineux, associé au masculin, et une terre obscure, associée au féminin<sup>62</sup>.
- Les Indiens Huni Kuin de Guyane française ont un monde divisé en deux pôles, le haut et le bas, le ciel et la terre<sup>63</sup>.
- Au sud-est de l'Australie, les Yuli Ulu, les Mura Mura, Pirna, Worgal ont partagé une conception de l'univers avec une terre plate surmontée d'un ciel voûté et solide<sup>64</sup>.

### **3.2 La structure enfer/terre/ciel**

La plupart des mythologies indo-aryennes proposent une vision du monde structurée en trois niveaux, enfer/terre/ciel ou enfer/terre/paradis. Dans les mythes et textes funéraires de ces cultures, la représentation verticale de l'univers est marquée par la bipolarité haut/bas. Le ciel, monde archétypique et chargé de valeurs positives, abrite les divers dieux et accueille les esprits des

élus dans un paradis. À l'inverse, le monde souterrain est un pôle obscur connoté négativement, où se trouve un enfer. Cette structure cosmologique correspond à une conception de la destinée humaine où les morts sont jugés en fonction de leurs conduites, les bons montent au paradis et les mauvais descendent en enfer.

- Dans les Brâhmana, les plus anciennes cosmologies des hindous décrivent un monde divisé en trois plans, l'enfer, la terre, et le paradis situé au ciel<sup>65</sup>.
- Chez les anciens Perses, la terre est située entre un paradis et un enfer. Les âmes sont jugées sur le pont Cinvat, sur le Mont Albourz<sup>66</sup>.
- Pour les Babyloniens, l'univers est un sphéroïde creux divisé en trois plans : le ciel *An*, la terre *Ki* et l'enfer *Kur*<sup>67</sup>.
- Dans l'Edda de Snorri des anciens Scandinaves, le monde est divisé en trois niveaux, le monde des morts en bas, le monde des hommes au milieu et le monde des dieux au ciel<sup>68</sup>.

### **3.3 Variations le long de l'axe terre/ciel**

À partir de la structure terre/ciel, sur un plan vertical, de nombreuses variations existent où les niveaux sont comparés à des couches empilées :

- Chez les Babyloniens, la structure à trois plans est aussi subdivisée en cinq plans : le ciel supérieur, le ciel intermédiaire, le ciel inférieur, la terre, une réserve d'eaux souterraines appelée *Apsou*, et le monde des morts<sup>69</sup>.
- Dans les Samhitâ hindoues, la tradition cosmologique tripartite des *Brahmana* est déclinée, le ciel s'échelonne alors en sept couches<sup>70</sup>.
- Chez les Bouddhistes tibétains, le *Bardo Thödol* décrit la structure de l'univers en relatant les voyages des âmes dans l'Au-delà. Sous terre, l'enfer est divisé en huit enfers, subdivi-

visés en cent vingt-huit sous-enfers. Au centre de l'océan, le Mont Meru permet aux Boddhistava d'accéder à une myriade de paradis situés au-delà du ciel visible<sup>71</sup>.

- Chez les Égyptiens, le modèle cosmologique change au fil des siècles. Pendant l'Ancien Empire, l'autre monde est céleste et ne concerne que les pharaons qui ont la possibilité de monter dans la *Douat*. À partir du Moyen Empire, la cosmographie du *Livre des Morts* décrit le voyage et les épreuves des âmes des défunts dans la terre<sup>72</sup>.

Les microsociétés ont aussi leurs propres modèles cosmologiques. Ils empruntent parfois certains aspects symboliques à des modèles cosmologiques hégémoniques, en l'occurrence souvent aux grandes religions, Christianisme, Islam, Hindouisme et Bouddhisme, dévoilant alors de profonds phénomènes d'acculturation<sup>73</sup>. Mais on trouve aussi des modèles cosmologiques indigènes, souvent liés à des systèmes de croyance animiste ou totémique<sup>74</sup>. Vis-à-vis des cosmologies des « grandes » religions, les visions du monde des microsociétés se différencient principalement sur plusieurs points. Tout d'abord, le prototype du monde n'est pas systématiquement situé en haut, au ciel. Ensuite, la conception d'un paradis n'est pas universelle, on trouve ainsi de nombreux mondes des morts souterrains qui ne sont pas connotés positivement ou négativement. Enfin, le thème du monde souterrain où tout est inversé par rapport au monde humain est récurrent. Ces descriptions proviennent de récits de chamanes, de voyants, de medecine-men, des individus dont le statut social jouit d'un rôle de médiation entre les mondes des hommes et des esprits. Elles accordent donc une place importante aux déplacements des âmes.

- En Amérique du Sud, pour les Yanomami du Venezuela, la terre est une galette convexe située entre deux strates célestes et un monde souterrain. Chaque couche correspond à une destinée humaine, les mauvaises âmes montent au premier ciel, les

esprits généreux descendent dans la terre du dessous<sup>75</sup>. Au Pérou, les chamanes Nomatsiguenga décrivent sept ciels étagés au-dessus de la terre, et deux mondes souterrains<sup>76</sup>.

- Pour les Inuits d'Igloodik, les âmes des morts vont à *Udlormiut*, au ciel, ou à *Qimiujârmiut*, sous la mer. Ce ne sont pas les actes des hommes qui déterminent ces destinées mais leur type de mort. Les morts « naturelles » ou causées par la maladie conduisent les âmes sous la mer tandis que les morts décédés de manière violente ou accidentelle vont au ciel<sup>77</sup>.
- Chez les Ehvés du Togo, la terre est comme un plateau sous lequel il y a d'abord *Amedzophe*, le lieu d'origine d'une des trois âmes qui composent chaque personne. Un autre monde existe à un niveau inférieur, *Tsiephe*, un enfer rempli d'esprits, un monde inversé par rapport à la terre<sup>78</sup>.
- Chez les Arandas d'Australie, un autre monde existe sous la terre, une sorte de prototype cosmique : le monde du Rêve, un monde qui réactualise et façonne sans cesse la terre<sup>79</sup>.
- En Nouvelle-Zélande, les Maori ont développé une cosmologie étagée à partir du couple ciel (*Rangi*) / terre (*Papa*), le ciel peut y être subdivisé en douze couches<sup>80</sup>.

### 3.4 Le centre, axe de communication entre les mondes

Dans bien des cosmologies, un arbre ou une montagne mythique désignent le centre du monde et permettent d'aller d'un plan cosmique à un autre. Ces deux objets saillants de la géographie partagent une même symbolique de liaison entre la terre et le ciel, entre le bas et le haut, entre les hommes et les esprits ou les dieux.

- Chez les anciens Perses, le centre de l'univers est occupé par le Mont *Albourz*, une gigantesque montagne cosmique qui grandit et touche le ciel.<sup>81</sup>
- Chez les Hindous, d'après les Purana, l'axe du monde est le Mont *Meru*, entouré par quatre continents, sept îles et sept

océans concentriques. Le sommet du mont *Meru* abrite le paradis<sup>82</sup>.

- Chez les Bouddhistes du Mahayana, le centre de l'univers est aussi le Mont *Meru*, entouré par sept océans, sept îles concentriques, puis quatre minuscules continents, dont celui des hommes. Son sommet est un paradis, le premier d'une longue série<sup>83</sup>.
- Certains Mongols ont un système du monde centré sur la montagne géante *Soumer* surmontée de l'arbre *Zambu*<sup>84</sup>. Les Indiens Huni Kuin du Pérou croient que le monde est une colline géante dont le centre abrite la source de tous les fleuves et des villages habités par des entités bénéfiques<sup>85</sup>.
- Dans la mythologie scandinave, d'après l'Edda de Snorri, l'arbre *Yggdrasil* est au milieu du monde des Hommes. C'est le domaine privilégié des dieux et son arborescence relie différents mondes : monde des hommes, monde des Ases, monde des morts<sup>86</sup>.
- Pour les anciens Mayas, le centre de la terre est également symbolisé par un arbre cosmique dont les racines plongent dans l'Inframonde et les branches traversent treize strates célestes<sup>87</sup>.
- Pour les Indiens Shipibo du Pérou, la terre est circulaire et un arbre est situé en son milieu. Dans cette conception chamanique de l'univers, l'arbre relie la terre au ciel, le domaine des hommes à la « maison » des dieux<sup>88</sup>.
- Pour les chamanes Yakoutes de Sibérie, le centre de la terre est occupé par un mélèze géant qui permet aux chamanes d'accéder à l'un des neuf ciels<sup>89</sup>.

### **3.5 Les mondes portés par des êtres mythiques**

Certaines cosmologies ressemblent parfois à de curieux échafaudages où la terre est maintenue en équilibre par des monstres ou des animaux. Tous ces édifices symboliques montrent la précarité du monde et la fragilité du genre humain.

- Chez les Hindous, dans les Upanishad, quatre éléphants sont sous le Mont Meru, aux quatre orient. Les pachidermes sont les montures des *Lokapâla*, les quatre régents du monde<sup>90</sup>.
- En Indonésie, à Bali, une tortue porte sur son dos deux serpents lovés qui contiennent le monde souterrain<sup>91</sup>. Pour les Minangkabaus de l'île de Sumatra, la terre est posée sur un buffle mythique qui est debout sur un œuf lui-même posé sur un poisson géant baigné dans la mer primordiale<sup>92</sup>. Les Kedang croient que l'univers est composé de sept ciels et cinq terres plates superposées. Notre terre est soutenue par un géant. Les séismes surviennent lorsqu'un oiseau le frôle et lui dit que sur la terre tous les hommes sont morts, il secoue la terre alors pour vérifier<sup>93</sup>.
- Selon la tradition musulmane de l'échelle de Mahomet, sept ciels sont superposés au-dessus de sept terres empilées et posées sur les épaules de l'ange Arzaniel qui s'appuie sur le dos du bœuf Behamut, lui-même posé sur une pierre verte en équilibre sur le dos d'un très grand poisson<sup>94</sup>.
- Les Tatars ont plusieurs traditions similaires : La terre peut être supportée par un taureau, quatre taureaux bleus ou trois poissons. Dans cette dernière variation, un gardien tire le poisson du milieu par les branchies au grès des actions des hommes. Il peut ainsi provoquer des inondations et un déluge<sup>95</sup>.
- En Amérique Centrale, les Aztèques imaginaient un monstre chthonien appelé *Tlaltecutili* dans la terre. Chaque matin, le monstre crache le soleil à l'est et le ravale chaque soir à l'ouest. *Tlaltecutili* est lui-même posé sur le dos de Cipactli, un crocodile nageant dans une mer primordiale<sup>96</sup>.
- En Amérique du Nord, un mythe Huron raconte que c'est une tortue qui tient la terre sur son dos. Les tremblements de terre sont dûs à ses déplacements brusques<sup>97</sup>. Les Cheyennes

placent aussi une tortue sous la terre<sup>98</sup>. Pour les Indiens Creek, c'est un crocodile qui tient la terre sur son dos<sup>99</sup>.

L'analyse comparée d'un modeste échantillon de cosmologies issues du monde entier fait ressortir une grande variété de visions qui se construisent suivant des processus imaginatifs proches<sup>100</sup>. Plusieurs visions de l'espace se dessinent. Par-delà les théogonies et anthropogonies, une représentation fondamentale se met en place dans certaines cosmogonies, une mer primordiale et/ou un espace obscur, fécond, sans limites spatiales. Le monde, composé principalement du ciel et de la terre, est ensuite généré dans cet espace matriciel. La représentation d'un espace illimité dans les cosmogonies constitue une sorte de référent ultime, un horizon indépassable. Dans d'autres traditions cosmologiques, d'autres représentations de l'espace se déploient, sans forcément exclure l'espace fondateur. Ces espaces sont souvent limités, bornés, contenus sur un plan horizontal et vertical. La représentation d'un espace fermé est souvent liée au monde créé, la frontière physique et la forme du ciel donnent lieu à des métaphores couvrantes et sphéroïdales dont le modèle géométrique est souvent un cercle<sup>101</sup>. Dans les textes funéraires et chamaniques, une sorte de pensée en couche se déploie verticalement, désignant les états de l'être associés à différents lieux du monde, dévoilant de l'ontologie au sein de la cosmologie.

En collectant ces cosmologies traditionnelles issues de cultures et d'époques si diverses, on peut les survoler comme on consulte des miscellanées, se laisser porter par la beauté des mythes, mais on peut aussi les déconstruire pour y trouver des fragments d'un patrimoine immatériel et universel. L'empreinte des pièces reconstruites révèle une figure double, en plein, le champ des possibles représentations du monde, et, en creux, le mouvement de l'Être au monde.

# Chapitre II

## Platon et la cosmologie

Luc Brisson

### I. Le *Timée*, véritable cosmologie mathématique

Si l'on estime qu'une cosmologie doit proposer une explication simple, mais cohérente et rigoureuse de l'univers, dont les propriétés apparaissent comme les conséquences déduites logiquement d'un ensemble limité de présupposés, alors le *Timée* de Platon peut être tenu pour une véritable cosmologie. Bien plus, il s'agit de la première cosmologie menée à l'aide, non pas du langage ordinaire comme c'est le cas chez Aristote, mais en utilisant les mathématiques. Aristote, d'ailleurs, ne cesse de critiquer, dans le *De Caelo* et la *Physique*, la mathématisation de l'univers entreprise par Platon. Mais, et c'est par là que le *Timée*, à l'instar de la *Théogonie* d'Hésiode<sup>1</sup>, s'ancre dans la tradition et donc dans le mythe, la description platonicienne de l'origine de l'univers reste indissociable d'une description de l'origine de l'homme, et même de la société, comme l'illustre le mythe de l'Atlantide résumé au début du dialogue et raconté dans le *Critias*<sup>2</sup>.

### 2. Questions initiales et hypothèses

Pour Platon, une cosmologie doit être en mesure de répondre aux deux questions suivantes : À quelles conditions le monde sensible peut-il devenir connaissable ? Comment arrive-t-on à le décrire<sup>3</sup> ? Questions que suscite cette conviction universellement

partagée dans le monde grec antique : ce qui est soumis à un changement incessant ne peut être considéré comme la réalité véritable. Pour devenir objet de connaissance et objet de discours, le monde sensible doit présenter, dans son changement même, quelque chose qui ne change pas, quelque chose qui présente une permanence véritable et qui donc se retrouve identique dans tous les cas. Platon rend compte de cette exigence en faisant cette hypothèse déconcertante pour un contemporain : il existe un monde de formes intelligibles, réalités immuables et universelles faisant l'objet d'une connaissance et d'un discours vrais, et auxquelles participent les choses sensibles qui n'en sont que les copies.

L'hypothèse de l'existence de formes intelligibles entraîne automatiquement deux problèmes redoutables : celui de la participation des formes intelligibles entre elles et celui de la participation des choses sensibles aux formes intelligibles. Ces problèmes sont formulés dans le *Parménide*. Pour résoudre le premier, une solution est proposée dans le *Sophiste*. Et pour répondre au second, Platon fait dans le *Timée* deux hypothèses nouvelles qui donnent naissance à deux fictions : celle d'un démiurge, qui fabrique ou qui plutôt met en ordre l'univers, et celle de la *khora*, le matériau sur lequel intervient le démiurge, et qu'on appellera matière (en grec, *hulè*) à partir d'Aristote.

Dès lors, si les choses sensibles ne sont que des images des formes intelligibles, elles doivent présenter par rapport à leurs modèles une certaine ressemblance, sous peine de n'avoir aucun rapport avec elles, et en être en même temps dissemblables, sous peine de se confondre avec elles. Le démiurge garantit la ressemblance, alors que la *khora* explique la différence.

Cela dit, la *khora* n'est jamais décrite en tant que telle, à l'état pur, dans le *Timée*. Lorsque le démiurge entreprend d'y introduire mesure et proportion, elle présente déjà les traces des quatre éléments (*Timée* 52d-53c), qui sont agités par un mouve-

ment mécanique dépourvu d'ordre et de mesure. Ce principe de résistance, Platon l'appelle *anagkè*, terme traduit habituellement par « nécessité », mais qui doit être compris comme l'ensemble des conséquences inéluctables qui, dans le monde sensible, imposent des limites sévères à toute intention rationnelle. En admettant la présence persistante de la « nécessité » dans l'univers, avec laquelle le démiurge d'abord, puis l'âme du monde, doivent compter, Platon reconnaît que l'ordre supposé par son modèle cosmologique ne peut que rester partiel et provisoire. On est loin de l'optimisme leibnizien.

### 3. Permanence et invariants

C'est leur permanence relative qui apparente les choses sensibles aux formes intelligibles qui, elles, ne changent pas. Or, dans le monde sensible, la permanence se manifeste sous les traits suivants : causalité, stabilité et symétrie. Il y a causalité si tout effet dépend d'une cause ; stabilité, si la même cause produit toujours le même effet ; et symétrie, si ce rapport de causalité reste invariant en dépit de transformations incessantes. Cette invariance peut s'exprimer en termes de rapports mathématiques instaurés par le démiurge, et elle constitue en fait l'essentiel de ce que l'Homme arrive à connaître et à décrire du monde sensible. La connaissance et le discours qui ont pour objet les choses sensibles entretiennent avec la connaissance et le discours qui ont pour objet les formes intelligibles un rapport de copie à modèle, similaire à celui qu'entretiennent les choses sensibles avec les formes intelligibles ; cette connaissance et le discours qui l'exprime ne sont jamais vrais, ils restent vraisemblables, car ils ne portent que sur des images, et non sur la réalité véritable.

Et c'est en gardant les yeux fixés sur les formes intelligibles que le démiurge, dont par ailleurs l'action est limitée par la *khora*, fabrique le mieux possible l'univers, ce vivant doté d'une âme et

d'un corps. La description de l'âme du monde ressortit à l'astronomie, et celle de son corps à la physique et à la chimie.

Pourquoi Platon considère-t-il l'univers comme un être vivant ? En Grèce ancienne, le problème majeur en cosmologie, c'est, on l'a vu, de rendre compte de ce qu'il y a d'ordonné dans l'incessant changement du monde sensible, et surtout des mouvements les plus réguliers que l'on y observe, ceux des corps célestes. Mais alors, quelle origine donner au mouvement, et comment rendre compte de l'ordre que ce mouvement manifeste ?

Ce n'est qu'en 1687 que Newton formula la loi de la gravitation : deux corps exercent l'un sur l'autre une force d'attraction proportionnelle à leur masse et inversement proportionnelle au carré de leur distance. Quant à la loi d'inertie selon laquelle un corps qui n'est soumis à aucune force ne peut qu'être au repos ou présenter un mouvement rectiligne et uniforme, elle a dû attendre Galilée pour être formulée, et Newton pour être étendue aux corps célestes. Or, si l'on ne dispose d'aucune de ces lois, il faut bien faire l'hypothèse d'une réalité que ne perçoivent pas les sens, mais qui rende compte de l'origine et de la persistance de l'ensemble des mouvements dans l'univers – et surtout des plus permanents et des plus réguliers, ceux qui animent les corps célestes. Selon Platon, cette réalité est de même nature que le principe du mouvement spontané dans les vivants : il s'agit d'une âme.

#### **4. Astronomie<sup>4</sup>**

Une telle hypothèse n'est pas plus extravagante que celle de l'existence d'un « mouvement à distance ». Chez les êtres vivants, pourvus de ce principe de mouvement spontané que Platon appelle « âme », se manifeste une certaine régularité dans le changement : telle espèce engendre telle espèce, vit en moyenne

tel nombre d'années, présente telles caractéristiques, etc. De plus, l'âme de l'Homme est douée d'un intellect, qui lui assure une conduite cohérente et conforme à des intentions plus ou moins bien définies. Un raisonnement analogique permet de mettre en rapport ces deux ordres de faits, ce qui amène à supposer que le monde sensible se trouve pourvu d'une âme douée de raison (*Timée* 30a-c), tout comme l'Homme.

Partout où elle arrive à établir et à maintenir l'ordre mathématique instauré par le démiurge (*Timée* 34c), l'âme du monde comporte les caractéristiques suivantes : c'est une réalité intermédiaire (*Timée* 35a-b), qui présente l'aspect d'un enchevêtrement de cercles – le cercle est la plus « symétrique » des figures planes – entretenant les uns avec les autres des rapports mathématiques ; et dans l'univers elle est le principe de tous les mouvements, aussi bien psychiques que physiques. On comprend dès lors que l'âme du monde soit associée à l'astronomie.

Cette réalité intermédiaire entre le sensible et l'intelligible est, dans le sensible, l'origine de tous les mouvements ordonnés : les mouvements circulaires des corps célestes, et les mouvements rectilignes des réalités sublunaires. De là vient que le *Timée* décrit la constitution de l'âme du monde comme s'il s'agissait de la fabrication d'une sphère armillaire, c'est-à-dire d'un globe formé d'anneaux ou de cercles représentant le mouvement du ciel et des astres (évoquée en *Timée* 40d). Pour comprendre la suite, il faut garder cette image en tête.

Après avoir composé le mélange fondamental qui sert à fabriquer l'âme du monde, le démiurge lamine cette masse à la manière d'un forgeron pour la transformer en une plaque qu'il découpe en deux pour former d'abord le cercle du *Même*, qui entraîne les astres fixes, puis le cercle de l'*Autre*, lui-même redécoupé en sept cercles auxquels sont attachés les sept corps célestes connus à l'époque : Lune, Soleil, Mercure, Vénus, Mars, Jupiter et Saturne. (*Timée* 36d-39e). Mais il ne suffit pas d'ex-

plier la permanence des mouvements des corps célestes, il faut aussi rendre compte de leur régularité.

La permanence du mouvement des corps célestes s'explique par le fait que leur déplacement s'effectue en cercle. Et leur régularité est associée à l'établissement de trois rapports mathématiques (*Timée* 36b-d), qui expliquent ce que l'on a appelé l'harmonie des sphères. Le premier de ces rapports équivaut à la progression géométrique de raison 2 et 3 qui indiquent la distance de chaque planète par rapport à la terre qui se trouve au centre : cela donne pour la Lune ( $1 = 2^0$  ou  $3^0$ ), pour le Soleil ( $2 = 2^1$ ), pour Mercure ( $3 = 3^1$ ), pour Vénus ( $4 = 2^2$ ), pour Mars ( $8 = 2^3$ ), pour Jupiter ( $9 = 3^2$ ), et pour Saturne ( $27 = 3^3$ ). Et entre ces sept nombres on introduit des rapports, arithmétiques ( $x - a = b - x$ ) et harmoniques ( $x = 2ab/a + x$ )<sup>5</sup>. Comme ces rapports mathématiques valent aussi en musique, on comprend qu'on ait parlé d'harmonie des sphères dans ce contexte astronomique.

Dans le *Timée*, Platon parvient donc à proposer un système astronomique qui présente une simplicité étonnante, car il se fonde exclusivement sur le mouvement circulaire, une hypothèse qui fut admise jusqu'à Képler (loi des orbites, en 1609), et qui ne fait intervenir que trois types de rapports ou de médiétés : géométrique, arithmétique et harmonique. L'extraordinaire complexité des mouvements qui apparemment affectent les corps célestes se trouve réduite à deux éléments d'ordre mathématique : le cercle et la médiété<sup>6</sup>.

## 5. Physique et chimie<sup>7</sup>

Cette âme, le démiurge l'adapte au corps du monde (*Timée* 34b, 36d-e), qui présente l'aspect d'une gigantesque sphère, puisque, comme copie d'un original parfait, ce corps doit avoir lui aussi la forme la plus parfaite, la plus symétrique ; or, dans la géométrie de l'espace à trois dimensions, aucune forme n'est plus symétrique que la sphère.

### 5.1 Les éléments

Se conformant à une opinion traditionnelle qui remonte probablement à Empédocle et qui allait se perpétuer jusqu'à Lavoisier, Platon prend pour acquis que le corps de l'univers a été fabriqué exclusivement à partir de quatre éléments : le feu, l'air, l'eau et la terre (*Timée* 56b-c). Mais il va beaucoup plus loin. D'une part, il avance un argument mathématique pour justifier le nombre de ces éléments. Et surtout, il est conscient de faire preuve d'une très grande originalité (*Timée* 53e) en établissant une correspondance entre ces éléments et les quatre polyèdres réguliers, c'est-à-dire en transposant en termes mathématiques l'ensemble de la réalité physique et les changements qui l'affectent<sup>8</sup>. On notera par ailleurs que la construction des premiers polyèdres réguliers est rapportée au nom du mathématicien *Théétète* (415-369 av. J.-C.), que Platon met en scène dans le prologue d'un dialogue qui porte son nom (*Théétète*), signe de la grande attention que Platon portait au développement des mathématiques à son époque.

Les quatre éléments dont est fait notre univers sont la terre, l'eau, l'air et le feu. Ce postulat, qui remonte au moins à Empédocle, Platon l'admet, mais il fait preuve de la plus grande originalité, originalité dont il est conscient, en l'interprétant mathématiquement. En effet, il associe le feu au tétraèdre, l'air à l'octaèdre, l'eau à l'icosaèdre et la terre au cube.

#### *La constitution des éléments*

Ces quatre polyèdres sont construits à partir de deux types de surfaces, qui résultent elles-mêmes de deux types de triangles rectangles.

Les deux types de triangles rectangles qui interviennent à l'origine sont le triangle rectangle isocèle, qui est la moitié d'un carré de côté, et le triangle rectangle scalène, qui est la moitié d'un triangle équilatéral de côté  $x$ .

Ces deux triangles rectangles élémentaires entrent dans la construction de deux autres types de surface : le carré et le triangle équilatéral. Un carré résulte de la réunion de quatre triangles rectangles isocèles (*Timée* 55b), et un triangle équilatéral résulte de la réunion de six triangles rectangles scalènes (*Timée* 54d-e). Pour constituer un carré, deux triangles rectangles isocèles eussent suffi, tout de même que, pour constituer un triangle équilatéral, deux triangles rectangles scalènes. On peut cependant penser que, dans le cas du carré et dans celui du triangle équilatéral, Platon veut trouver un centre de symétrie axiale (cf. Euclide, *Éléments* XIII 18 Scholie) qui fasse qu'aucun des triangles constitutifs du carré ou du triangle équilatéral ne puisse avoir une prééminence sur les autres. Il s'agit peut-être là d'une critique implicite du pythagorisme où la gauche et la droite étaient dotées de valeurs opposées.

Les triangles équilatéraux servent à construire ces trois polyèdres réguliers que sont le tétraèdre (*Timée* 54e-55a, quatre triangles équilatéraux), l'octaèdre (*Timée* 55a, huit triangles équilatéraux) et l'icosaèdre (*Timée* 55a-b, vingt triangles équilatéraux), associés respectivement au feu, à l'air et à l'eau. Par ailleurs, les carrés servent à constituer le cube (*Timée* 55b-c, six carrés) associé à la terre. Enfin, se trouve fugitivement évoqué le dodécaèdre, le polyèdre régulier qui s'apparente le plus à la sphère (*Timée* 55c), figure géométrique à laquelle est associé le corps du monde (cf. *Lettre* XIII [apocryphe] 363d).

Toutes les propriétés des polyèdres auxquels sont associés les quatre éléments peuvent être réunies en un tableau facile à lire. Deux observations résultent de son examen attentif. 1) Les polyèdres réguliers qui correspondent aux différents éléments sont décrits exclusivement en fonction du nombre des faces qui composent leur enveloppe. 2) Les arêtes de ces faces sont définies à partir d'une valeur originelle qui correspond à la longueur de l'hypoténuse des triangles rectangles élémentaires qui les

composent. Or, cette valeur reste indéterminée (*Timée* 57c-d). Une telle indétermination présente une importance considérable, et cela pour deux raisons : d'un côté elle réduit le pouvoir explicatif du modèle géométrique proposé par Platon en s'opposant à sa simplicité ; mais de l'autre elle permet de mieux rendre compte des variétés d'un même élément.

Platon veut en effet montrer comment le modèle cosmologique qu'il propose permet de décrire non seulement les objets du monde sensible dans son ensemble, qui ne sont que des variétés des quatre éléments ou qui résultent de leur combinaison, mais aussi leurs propriétés. En *Timée* 58c-61c, on trouve quelques exemples qui illustreront ce point. Les substances les plus complexes dans l'univers ne sont en définitive que des variétés de cette architecture de base, à laquelle en dernière instance se ramène toute la structure matérielle de l'univers. Dans le monde sensible, toutes les réalités peuvent être décrites en termes mathématiques, et elles peuvent même être considérées comme des variétés de deux triangles rectangles.

### *La transmutation mutuelle de trois de ces éléments*

Pour rendre compte de la transmutation mutuelle de ces polyèdres que sont le tétraèdre (associé au feu), l'octaèdre (associé à l'air) et l'icosaèdre (associé à l'eau), Platon ne tient compte que du nombre des surfaces qui en constituent l'enveloppe. Ce sont en effet les correspondances établies entre le nombre des triangles équilatéraux qui composent la surface de ces polyèdres qui permettent de formuler les équivalences mathématiques ; ces dernières expliquant comment les éléments se transforment les uns dans les autres, et comment se produisent les phénomènes de génération et de corruption qui se manifestent dans le monde sensible.

Une telle explication se fonde sur le présupposé suivant : les deux types de triangles rectangles élémentaires ne peuvent être ni

créés ni détruits. Par conséquent, dans toute transformation, le nombre de triangles se trouve conservé. De plus, ne peuvent se transformer les uns dans les autres que les éléments qui correspondent à des polyèdres dont les faces sont formées de triangles équilatéraux. Il s'ensuit que l'eau, l'air et le feu peuvent se transformer les uns dans les autres, mais non pas la terre qui correspond au cube dont les faces sont des carrés, que seuls affectent des processus de décomposition et de recombinaison. Bref, la transformation des éléments est considérée en fonction des surfaces qui composent les polyèdres réguliers et non, comme il serait naturel, en fonction de leurs volumes. Les règles de transformation mutuelle du feu, de l'air et de l'eau peuvent être réunies dans un tableau relativement simple. Ce genre de solution ne manque pas de surprendre, car elle ne prend en compte que des surfaces qui entourent les polyèdres, alors même que ces polyèdres sont des volumes. Comment expliquer la chose ? On peut faire valoir trois explications.

- Comme on le constate encore chez Euclide, ce qui définit un polyèdre, c'est sa forme, c'est-à-dire sa limite extérieure qui correspond à l'ensemble de ses faces.
- La longueur de l'hypoténuse des triangles rectangles élémentaires qui composent les triangles équilatéraux restant indéterminée, une explication de la transformation mutuelle de polyèdres dont les faces ne sont pas des triangles équilatéraux de même surface en est rendue d'autant plus difficile. En d'autres termes, seuls des éléments de variétés correspondantes (dont les faces sont des triangles équilatéraux de même dimension) peuvent se transformer les uns dans les autres.
- Les mathématiques connues à l'époque de Platon rencontraient de nombreuses difficultés lorsqu'il s'agissait d'extraire les racines carrées et se trouvaient dans l'impossibilité d'extraire des racines cubiques.

### *Les mathématiques et leurs limites*

Tout compte fait, les limites de la cosmologie de Platon correspondent aux limites des mathématiques de son époque ; ce qui reste vrai pour notre époque, *mutatis mutandis*. Cet aveu d'impuissance relative apparaît plus clairement encore si l'on cherche à établir, entre les polyèdres réguliers, des rapports en fonction de leur volume et de leur surface. Une telle comparaison est très utile à un contemporain, mais il convient de se rappeler ici encore que ni Platon ni aucun de ses contemporains n'auraient pu en comprendre une seule ligne, car on ne savait pas extraire la racine cubique, et l'extraction de la racine carrée, très laborieuse, ne pouvait être effectuée que sur des nombres peu importants.

Les limites qui viennent d'être énumérées sont réelles et réduisent l'intérêt du modèle cosmologique platonicien. Il n'en reste pas moins que le démiurge a fabriqué l'univers à partir des corps géométriques les plus parfaits, la sphère et les quatre polyèdres réguliers ; que les mouvements et les interactions de ces polyèdres réguliers sont gouvernés par des lois mathématiques, là seulement, bien entendu, où l'*anagkè* a été persuadée de se soumettre à cet ordre ; et donc que le corps de l'univers est, en l'état actuel des choses, le plus parfait possible.

### **5.2 Le problème du changement**

L'hypothèse de l'âme du monde permet à Platon d'expliquer, non seulement pourquoi et comment s'ordonne le mouvement des corps célestes, mais encore pourquoi et comment celui des corps sublunaires est, lui aussi, soumis à des « lois » mathématiques, qui rendent compte de sa régularité et de sa permanence relatives.

Malgré tout, les explications proposées jusqu'ici ne suffisent pas à rendre compte des changements qui affectent l'ensemble du monde sensible. Manquent les axiomes suivants.

- L'univers n'est pas uniforme, et le mouvement que l'on y observe tire son origine de sa non-uniformité (*Timée* 57e). Elle peut s'expliquer de deux façons. Une interprétation faible la justifie par le fait que quatre polyèdres réguliers ne peuvent s'emboîter parfaitement les uns dans les autres. Une autre, plus forte, veut que cette non-uniformité résulte du fait que la longueur de l'hypoténuse des triangles rectangles élémentaires reste indéterminée, d'où il suit que les dimensions des polyèdres élémentaires qui composent toutes les choses sensibles peuvent être différentes. Cette absence d'uniformité constitue donc la cause du changement incessant auquel est soumis le monde sensible, un changement que va tenter d'ordonner l'âme du monde, mais seulement là où elle y arrive !
- Dans le monde sensible, il n'y a pas de vide (*Timée* 58a, cf. 79b-c) ou, ce qui revient au même, tout ce qui est doit être quelque part (*Timée* 52b).
- La sphère du monde enveloppe tout ce qui est corporel. Les quatre éléments se distribuent, à l'intérieur de cette sphère, en quatre couches concentriques (*Timée* 33b, 53a, 58a-b) entre lesquelles se produisent des échanges qui s'expliquent ainsi. Ces quatre couches concentriques sont entraînées par le mouvement circulaire qui anime l'ensemble de la sphère. Comme il n'y a pas de vide, les particules ne peuvent s'épancher à l'infini vers l'extérieur ; et, à l'intérieur, elles ne peuvent circuler que dans les interstices, toujours remplis, qui tirent leur origine de l'absence d'homogénéité entre les éléments. D'où une réaction en chaîne que provoque la « compression impliquée par le processus de refoulement » (*Timée* 58b, cf. 76c et *Lois* X 849c). Cela entraîne un processus présentant les deux types de mouvements qui régissent toute transformation d'un corps dans un autre, et que nous avons évoqués plus haut : division et condensation, décomposition et recomposition.

En définitive, il faut se représenter l'univers platonicien comme une vaste sphère remplie d'un fluide homogène et dépourvue de toute caractéristique – la *khora* –, mais dont la plus grande partie est enfermée dans des enveloppes qui délimitent la surface extérieure de chacun des quatre polyèdres réguliers auxquels sont associés les éléments. Ces composants élémentaires ont tendance à se répartir en quatre couches concentriques, tendance que vient contrarier le mouvement de rotation qui entraîne la sphère dans son ensemble. De ce mouvement, résulte le déplacement de ces polyèdres réguliers et une modification de leur nature, le feu devenant air, l'air devenant eau et vice-versa. Une telle représentation fait apparaître une contradiction : dans l'univers platonicien, il faut tenir compte à la fois du continu qui doit caractériser la *khora*, et du discontinu qu'instaurent inéluctablement les polyèdres réguliers. La physique platonicienne n'est donc ni un atomisme, comme celui proposé par Leucippe et par Démocrite, ni une physique du continu, comme celle proposée par Parménide, Zénon et Mélissos ; elle se situe entre les deux.

Même si l'on se heurte à cette contradiction, il faut admettre que, puisque d'une part le monde sensible est dominé par une âme à la structure mathématique particulièrement rigoureuse, et que d'autre part le démiurge a façonné mathématiquement la *khora* en y introduisant les polyèdres réguliers, toute transformation d'un corps dans un autre peut être expliquée en termes d'interactions et de corrélations mathématiques. Les mathématiques permettent d'appliquer au monde sensible certains des prédicats du monde intelligible dont il participe. Au bout de ce long processus d'intégration, le monde sensible se voit revêtu d'une certaine permanence et d'une certaine régularité. En dernière instance, ce sont les mathématiques qui rendent compte de la participation du monde sensible au monde intelligible. Dès lors, si le monde sensible est bien une image de l'intelligible, il

doit donc être construit mathématiquement ; dans cette perspective, ce sont les mathématiques qui fixent les limites de cette cosmologie. « Limites » est à prendre dans un sens qui n'est pas seulement péjoratif, car Platon a su utiliser ce que les mathématiques de son époque présentaient de plus élaboré.

## **6. Observation rigoureuse et vérification expérimentale**

Comme chez la plupart de ses contemporains, la recherche de la certitude à l'intérieur d'un système axiomatique utilisant notamment un langage mathématique, entraîne chez Platon une absence de contenu empirique. Témoignages et expériences sont le plus souvent utilisés pour corroborer une théorie plutôt que pour la mettre à l'épreuve : il s'agit d'illustrer un modèle explicatif et non de démontrer, sinon qu'il est le seul valable, à tout le moins qu'il est le meilleur. On peut penser que c'est le débat compétitif, l'*agon* rhétorique s'exprimant à l'assemblée et au tribunal, qui a finalement fourni le cadre dans lequel se développèrent les sciences de la nature en Grèce ancienne. Il s'agissait avant tout de faire prévaloir, sur le plan de la parole, un modèle d'explication, en présentant une argumentation plus convaincante, plutôt que de l'imposer sur le plan de la réalité en le mettant à l'épreuve afin de déterminer son degré de résistance et d'efficacité par rapport à d'autres théories.

Deux types d'explications, d'ordre technique et d'ordre théorique, pourraient être avancées pour expliquer les réticences dont Platon fait montre à l'égard de la vérification expérimentale.

### **6.1 Les limites techniques**

L'acte fondamental de la science réside sans doute dans l'opération de mesure. Pour progresser, la science doit au préalable définir des concepts particulièrement abstraits, au premier rang des-

quels se trouvent les unités de mesure que sont la température exprimée en degrés, l'accélération, l'énergie, la charge électrique, l'entropie, la quantité d'information mesurée en bits, etc. ; et la mise au point d'instruments permettant de les noter. Or, à l'époque de Platon, les étalons de mesure connus ne concernent que la longueur, le poids, le volume et le temps. Ils ne présentent aucune universalité, puisqu'ils varient en fonction des cités, et restent très peu fiables, en raison du caractère primitif des instruments de mesure. De surcroît, interviennent deux autres facteurs non moins décisifs : la notation des nombres par des lettres, et le balbutiement des mathématiques, dont plusieurs développements, maintenant considérés comme essentiels, manquaient encore. Toutefois, plusieurs exemples ressortissant à l'époque hellénistique montrent l'ingéniosité que l'on déploya pour surmonter ou pour contourner ces difficultés.

Étant donné ce qui vient d'être dit, il faut bien reconnaître que, même s'ils ont atteint un niveau assez avancé en géométrie, même s'ils ont réussi à accomplir des prouesses techniques – voir leur architecture, leur sculpture et leur céramique et même si leurs méthodes de navigation impliquaient l'usage de procédés techniques, fussent-ils primitifs, les Grecs de l'époque de Platon ne disposaient pas des outils qui leur auraient permis de concevoir, de définir et de mettre en œuvre des expériences destinées à vérifier leurs hypothèses dans le domaine des savoirs scientifiques.

## **6.2 Préjugé théorique**

Mais il y a plus. Ce procédé absolument décisif de questionnement de la nature qu'est la vérification expérimentale fut explicitement refusé par Platon dans le *Timée*, à l'occasion de l'exposé de sa fameuse théorie sur la couleur. Elle s'insère dans l'explication du mécanisme de la vision, qui elle-même n'est qu'une section de l'explication du mécanisme de la sensation. Après

avoir proposé cette explication particulièrement audacieuse, Platon déclare en *Timée* 68d-e :

« Pour les autres couleurs, on voit presque à l'évidence à partir de ces exemples, à quels mélanges il faudrait les assimiler, pour sauver notre mythe vraisemblable (*eikos muthos*). Pourtant, si l'on voulait faire une recherche expérimentale en soumettant cela à la vérification, ce serait méconnaître la différence entre un homme et un dieu ; car seul un dieu possède à la fois le savoir et le pouvoir nécessaires qui permettent de mêler les multiples choses en une seule, et inversement de résoudre ce qui est un dans le multiple ; tandis que parmi les hommes nul n'est à l'heure actuelle en mesure de réaliser l'une et l'autre de ces tâches, et ne le sera jamais à l'avenir. »

Pour Platon, la vérification expérimentale est d'abord assimilée à une torture. C'est là une image qui ressortit au vocabulaire juridique. À Athènes, en effet, le témoignage des esclaves était toujours présenté comme obtenu sous la torture. Il est possible que cela ait été le cas à un moment ou à un autre, mais au V<sup>e</sup> et IV<sup>e</sup> siècles, c'est-à-dire à l'époque des grands orateurs et de Platon, c'était une fiction juridique permettant de prendre en considération le témoignage d'un homme qui théoriquement n'avait aucun droit. De surcroît, la vérification expérimentale implique une reproduction exacte de la Nature, tâche aussi impossible pour nous aujourd'hui que pour lui alors.

Aussi bien, nous contentons-nous maintenant de soumettre à vérification un aspect particulier d'une théorie, et cela dans le cadre d'une expérience purement locale, contrôlée et répétable. Cette expérimentation ne fait varier qu'un nombre très réduit de paramètres, en supposant que tout le reste de l'univers, malgré son énorme complexité et le nombre élevé des degrés de liberté qui y règnent ne va exercer aucune influence sur l'expérience en cours. Comme on le dit : *ceteris paribus*, « tout le reste ne compte pas ». Pour arriver à ce *ceteris paribus*, il faut qu'intervienne toute

l'ingéniosité de l'expérimentateur, ce qui parfois le mène à construire ces instruments gigantesques que sont par exemple les accélérateurs de particules. Platon qui, de toute évidence n'avait ni les instruments, ni les unités de mesure ni le langage mathématique qui lui eussent permis de le faire, n'a pas cherché à réaliser ce type d'expérience. Cette déficience explique pourquoi les modèles d'explication qu'il propose dans le *Timée* restent dépourvus de toute valeur opératoire.

En négligeant l'observation et surtout en refusant la vérification expérimentale, Platon condamnait ses explications à l'impuissance. Pourquoi en effet préférer les explications qu'il proposait à d'autres intuitivement plus plausibles et utilisant le langage ordinaire, moins abstruses que les mathématiques à l'usage restreint aux seuls spécialistes ? Sur le plan de l'histoire des sciences, Platon reste donc une figure ambiguë ; très moderne, lorsqu'il recourt aux mathématiques et lorsqu'il se plie aux rigueurs de l'argumentation déductive, mais très traditionnel, lorsqu'il tient l'observation pour peu de chose et la vérification expérimentale pour impossible.

**Des annexes à ce chapitre sont disponibles sur le site Internet de Dunod : [www.dunod.com](http://www.dunod.com)**

*Je remercie Monsieur Frédéric Plin qui m'a aidé à mettre au point le manuscrit de cet article et à corriger les épreuves.*



# Chapitre 12

## L'« influence » de T. Wright of Durham sur la cosmologie précritique de Kant

Jean Seidengart

Kant apparaît comme le premier théoricien qui ait conçu, au moins sur le plan *spéculatif*, la structure correcte de la voie lactée. Certes, Galilée avait déjà découvert en 1609, à l'aide de sa lunette, la nature stellaire de la voie lactée<sup>1</sup>, mais sans concevoir la forme de son organisation systématique. Kant reconnaît expressément, dès le début de sa *Théorie du Ciel*, que ses idées sur la structure de la voie lactée lui ont été inspirées par les considérations de Thomas Wright of Durham :

« Je ne puis déterminer exactement les limites qui séparent mon système de celui de M. Wright, ni en quelles parties j'ai simplement reproduit son propos, ni encore en lesquelles j'en ai mené plus avant le développement »<sup>2</sup>.

Pourtant, il avoue n'avoir jamais eu en main ni lu l'ouvrage de Wright publié en 1750 : *An Original Theory or new Hypothesis of the Universe*<sup>3</sup>, mais seulement un bref compte rendu en langue allemande<sup>4</sup> publié dans un journal de Hambourg, les *Freye Urtheile und Nachrichten* de 1751<sup>5</sup>. Dans son ouvrage de 1750 consacré à l'astronomie stellaire, (dont l'ébauche manuscrite remonte à l'année 1734), Thomas Wright s'efforçait de reconfigurer l'image de l'univers à la lumière de la science newtonienne et des découvertes astronomiques de son temps, pour tenter de

les accorder avec ses convictions morales et religieuses, comme l'a montré clairement Michael Hoskin. Alors que Newton n'avait pas développé de recherche particulière sur le monde sidéral, du moins dans ses œuvres publiées, Wright s'est attaché à définir tout particulièrement la structure possible de la voie lactée, mais on oublie trop souvent qu'il a renoncé à son hypothèse de 1750 après le tremblement de terre de Lisbonne survenu cinq ans plus tard, et qu'il lui a substituée une conception volcanique entièrement différente de celle que l'histoire a retenue.

Dans notre investigation, nous nous proposons de déterminer précisément la conception de la voie lactée établie par Wright en 1750, pour la distinguer aussi clairement que possible de celle qui relève proprement de la cosmologie précritique de Kant. Les travaux de Michael Hoskin sur Thomas Wright nous ont déjà largement facilité la tâche, mais sans avoir opéré pour autant de confrontation systématique entre ces deux conceptions. Or, une telle confrontation est indispensable pour affiner le jugement des historiens de l'astronomie<sup>6</sup>, auxquels Michael Hoskin reproche d'avoir attribué à la légère un mérite excessif, à savoir de fournir le premier modèle de la voie lactée avant Kant, Lambert et Herschel. Après avoir examiné la théorie de Wright, nous examinerons ce que Kant a pu en connaître à partir du magazine de Hambourg de 1751, puis nous verrons sur quels points il s'en est écarté et l'a rectifiée en la remaniant au sein de sa propre cosmologie précritique qu'il n'a du reste jamais désavouée, puisqu'il la fit rééditer six fois de son vivant.

## **I. La genèse de la pensée cosmologie de Wright of Durham**

Thomas Wright of Durham (1711-1786), originaire d'une famille très modeste, est né à Byers Green près de la ville de Durham au nord-est de l'Angleterre. Sa passion pour l'astrono-

mie remonte à son enfance au cours de laquelle, dit-on, son père brûla tous ses livres en pensant que le jeune Thomas était devenu fou, et le plaça comme apprenti chez un horloger. À 18 ans, il quitta son maître horloger à la suite d'un scandale et il se lança dans l'étude de la navigation qu'il finira par enseigner aux marins dans le port de Sunderland jusqu'en 1731. Il poursuivit ses études de mathématiques et d'astronomie tout en commençant à rédiger et illustrer des planches sur ces trois domaines à des fins de publication. Il existe une première ébauche manuscrite datée de 1734, fort différente du texte publié en 1750, qui s'intitulait simplement : *A Theory of the Universe*, mais elle ne vit jamais le jour du vivant de son auteur. Michael Hoskin a retrouvé ce manuscrit de 1734 et l'a publié en 1971 avec la version de 1750. C'est en 1742 que Wright publia son premier ouvrage d'astronomie intitulé *Clavis Coelestis*. Dès cette même année, Wright connut une certaine notoriété car on lui proposa d'enseigner la navigation à l'Académie de Saint Pétersbourg, avec une solide rémunération, mais il déclina cette offre pour demeurer en Angleterre où il entra au service de riches mécènes. Ensuite, il publia un ouvrage sur les antiquités d'Irlande qui eut un grand succès : son célèbre *Louthiana* (Londres, 1748). Peu après, il fit paraître en 1750 l'ouvrage où il aborde directement le problème cosmologique, mais dont le titre laisse filtrer qu'il ne s'agit pas que de science, puisqu'il y est question des « phénomènes généraux de la création visible » : *An Original Theory or new Hypothesis of the Universe founded upon the Laws of Nature and Solving by Mathematical principles the General Phenomena of the Visible Creation and particularly the Via Lactea*. Comme pour un grand nombre de scientifiques anglais qui gravitaient dans l'orbite de Newton, la science était inséparable de la religion. À noter également que Wright publia un ouvrage d'architecture en 1755, *Universal Architecture*. Il faut enfin signaler que l'ouvrage de 1750 ne représente pas l'état définitif des considérations cos-

mologiques de Wright, car celui-ci préparait à partir de 1770 une nouvelle publication à ce sujet dont le titre provisoire était : *Second or Singular Thoughts upon the Theory of the Universe*. Ce texte manuscrit, encore à l'état de brouillon, ne fut pas publié de son vivant. Il ne fut découvert qu'en 1966 par Michael Hoskin qui classait les papiers de Wright. C'est sûrement à la suite du terrible tremblement de terre de Lisbonne de 1755 que Wright a été amené à élaborer une conception volcanique du monde sidéral, y compris de la voie lactée. La position de Wright en cosmologie est donc plus complexe qu'il n'y paraît.

Quels que soient les revirements de la pensée cosmologique de Wright, il existe une constante qui traverse et ordonne l'ensemble de ses démarches intellectuelles : c'est que l'astronomie peut seulement fournir une connaissance observationnelle et théorique de l'environnement local du système solaire, tandis que la cosmologie doit s'appuyer sur les enseignements de la *révélation* et de la religion pour pouvoir passer du local à une conception globale de l'univers. Si cette dernière englobe la première, encore faut-il s'assurer que les découvertes astronomiques s'accordent aux enseignements de la foi.

Force est de reconnaître que les œuvres physiques de Newton laissaient pour compte les questions d'ordre proprement cosmologique : qu'il s'agisse de la structure de l'univers, de sa stabilité, de sa formation ou de son évolution. Lorsque Newton eut à traiter de ces questions (surtout dans sa correspondance), il fit appel à la théologie et aux causes finales, comme aboutissement nécessaire et soutien ultime de ses *Principia*. Le problème cosmologique soulevé latéralement par Newton revint au centre des débats philosophiques européens durant la première moitié du XVIII<sup>e</sup> siècle. Les essais de cosmologie propres à cette époque considéraient presque tous unanimement qu'en ce domaine science et théologie sont intimement liées. En effet, de par sa structure propre, la science newtonienne était incapable de ren-

dre compte de l'*origine* et de la *fin* de l'univers, puisqu'elle postulait d'emblée l'infinité du temps *a parte ante* et *a parte post*. Il était encore plus regrettable que Newton n'ait fourni aucune explication *mécanique* au sujet de l'*organisation particulière* du système solaire, ni aucune garantie en faveur de la *stabilité* du système du monde. Car, la seule loi de l'attraction universelle peut aussi bien produire l'effondrement gravitationnel de l'édifice cosmique, que sa dispersion dans les vastes profondeurs de l'espace universel. Newton lui-même avait affirmé, notamment dans le *Scolie Général des Principia*, que l'intervention divine est absolument indispensable pour stabiliser la Création :

« On voit que celui qui a arrangé cet univers, a mis les étoiles fixes à une distance immense les unes des autres, de peur que ces globes ne tombassent les uns sur les autres par la force de leur gravité »<sup>7</sup>.

La théologie se faisait ainsi, en quelque sorte, la « servante » de la physique, de la philosophie naturelle et de la cosmologie. Bien que Newton procédât à l'inverse de Descartes en ne faisant intervenir l'existence de Dieu qu'à la fin de sa physique (et non pas comme le philosophe français *avant* celle-ci), le système du monde newtonien ne pouvait en aucune façon se passer de l'intervention divine, comme le rappelle cette lettre de Newton à Bentley de février 1693 :

« 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>8</sup>.

D'ailleurs, les manuscrits de Newton prouvent qu'il a tenté à plusieurs reprises de surmonter ce problème, comme le signale Michael Hoskin<sup>9</sup>. On trouve, également un élément de réponse, bien qu'un peu allusif, dans les *Principia*.

« Peut-être les étoiles fixes, qui sont également dispersées dans toutes les parties du ciel, détruisent-elles leurs forces mutuelles par leurs attractions contraires »<sup>10</sup>.

Or, cette ébauche de solution nécessite à son tour que, dès le début de la création, Dieu ait placé les étoiles fixes à une distance suffisante pour que leurs attractions mutuelles puissent en quelque sorte venir s'équilibrer. C'est donc là qu'intervient la *providence* divine. Comme le souligne très justement Michael Hoskin, la divine providence intervient non seulement pour mettre en place cet équilibre, mais aussi et surtout pour le préserver<sup>11</sup>. Ce qui reviendrait, de l'aveu même de Newton, à « faire tenir non pas seulement une unique aiguille, mais un nombre infini d'entre elles sur leurs pointes »<sup>12</sup>. Cette déclaration de Newton laisse penser qu'il ne s'opposait nullement à l'idée qu'il existe une infinité de systèmes stellaires dans l'univers.

Le seul passage en notre possession, où Newton admet positivement l'existence possible, sinon réelle, d'une quantité infinie d'étoiles dans l'univers, se trouve dans un manuscrit où il se proposait de reformuler le *Théorème XV* de la *Proposition XV* du Livre III des *Principia*, que reproduit l'article de Michael Hoskin précédemment cité. À la suite de réflexions sur l'attraction que les étoiles exercent les unes sur les autres et sur la relation entre leurs distances et leur magnitude, Newton s'interroge sur le cas des étoiles télescopiques, c'est-à-dire visibles seulement à l'aide d'un instrument d'optique approprié, comme le fit déjà Galilée un siècle plus tôt avec son modeste *perspicillum* : où s'arrêtent ces systèmes d'étoiles invisibles à l'œil nu ? Newton écrit :

« En effet, si l'on utilise des télescopes on découvre un nombre tellement énorme et presque infini d'étoiles plus petites et plus éloignées : et ce nombre ira toujours croissant avec de meilleurs télescopes à tel point que la Nature semble ignorer toute espèce de limite dans cette progression »<sup>13</sup>.

Or, qu'il existe ou non une quantité infinie d'étoiles et de systèmes solaires identiques au nôtre, voilà qui ne change rien à la nécessité de faire appel à la toute-puissance de Dieu. Sur ce point, Newton et Bentley restaient totalement d'accord<sup>14</sup>.

Simplement, dans le cas d'un univers infini, peuplé d'une infinité d'étoiles, on se débarrasse de la question insurmontable de la limite du monde matériel dans un espace illimité. Encore une fois, la théologie demeurerait indispensable à Newton pour soutenir l'édifice de son système du monde.

Cette nécessité où se trouvait la physique newtonienne de recourir à la théologie et aux causes finales pour soutenir l'édifice cosmique, exalta nombre d'esprits pénétrants qui étaient enclins à un amour spéculatif de l'ordre naturel. D'ailleurs, on ne tarda pas à voir fleurir toutes sortes de « physico-théologies » comme celles de William Derham<sup>15</sup> et de William Whiston<sup>16</sup>, dont Wright s'est aussi largement inspiré. Comme ses contemporains, Newton avait suivi un ordre hiérarchique croissant parmi les corps célestes : comètes, satellites, planètes, soleil, système solaire et étoiles ; mais cet ordre restait ouvert, car il ne s'était pas élevé jusqu'au niveau supérieur des *systèmes d'étoiles*. Ce fut l'une des tâches de ses successeurs d'aventurer des considérations plus systématiques sur l'organisation des systèmes stellaires, tant sur le plan observationnel que sur celui de la théorie. Or, ce n'est pas sous la seule pression de la curiosité que les newtoniens se penchèrent sur cette question, mais afin de pouvoir expliquer comment les étoiles parviennent à contrebalancer la force d'attraction qui devrait les conduire à s'effondrer les unes sur les autres au sein de l'espace cosmique. Cette question elle-même en contient deux autres, à savoir : si les étoiles sont animées de mouvements propres ; et si elles sont organisées ou non en systèmes eux-mêmes hiérarchiquement ordonnés au sein d'un ordre total.

C'est dans ce cadre intellectuel que prirent naissance les recherches sur la structure de la voie lactée. Depuis que Galilée observa la voie lactée à l'aide de sa lunette en 1609, il était devenu évident que l'ensemble des étoiles accessibles aux instruments d'observation ne représentait qu'une portion limitée de

l'univers – dont les dimensions restent un abyme insondable. En revanche, il était clair que, pour les astronomes anglais du temps de Wright, le *désordre apparent* qui caractérise la distribution des étoiles visibles à l'œil nu ou au télescope n'est qu'un simple effet *local* dû à notre situation particulière dans l'univers : il ne faisait aucun doute qu'il doit exister un *ordre caché* au sein des étoiles fixes. C'est ainsi que William Derham pensait déjà pouvoir reconduire cette apparence de désordre à un ordre caché inhérent à la distribution des étoiles :

« Comment les étoiles fixes sont-elles situées les unes par rapport aux autres, il nous est impossible de le déterminer à des distances si prodigieuses qui les séparent de nous ; mais nous qui ne disposons pas d'une perspective régulière par rapport à leurs positions, elles nous apparaissent comme distribuées sans aucun ordre : c'est comme si nous devions juger d'une armée constituée de soldats mis en ordre et bien disciplinés, mais en restant à une distance telle qu'ils nous apparaîtraient de façon confuse, jusqu'à ce que nous nous en approchions pour obtenir une perspective appropriée à leur égard, qui nous permette de découvrir qu'ils se trouvent bien disposés en rangs et bien alignés. De même, sans aucun doute, si nous pouvions disposer d'une perspective favorable par rapport aux étoiles fixes, nous trouverions qu'elles sont très éloignées les unes des autres et bien situées dans le firmament »<sup>17</sup>.

C'est donc la *perspective* sous laquelle on perçoit un groupe quelconque d'objets, mais bien ordonnés, qui joue un rôle prépondérant dans ce que l'on pourrait appeler la réduction des apparences observationnelles. L'idée n'est certes pas nouvelle, car elle avait été déjà déterminante pour l'avènement de l'héliocentrisme copernicien, où il était apparu que la situation de l'observateur joue un rôle essentiel dans l'apparition des phénomènes observés. À cet égard, il serait pertinent de considérer que les considérations sur la structure de la voie lactée ne sont qu'un pro-

longement, une extension ou une application particulière du renversement copernicien. D'ailleurs, Wright lui-même avait opéré ce rapprochement dans *An Original Theory of the Universe* :

« Lorsque nous réfléchissons sur les aspects variés et les changements perpétuels des planètes, en prenant en compte à la fois leur mouvement héliocentrique et géocentrique, nous pouvons aisément imaginer que rien qu'une position excentrique des étoiles pourrait de toute façon produire une différence telle qu'elles apparaîtraient en désordre alors qu'autrement ce sont des corps disposés suivant un ordre régulier. Et il en va de même que pour les planètes vues depuis le Soleil, il doit exister un lieu dans l'univers depuis lequel leur ordre et leurs mouvements primaires doit apparaître tout à fait beau et régulier. Je présume qu'il n'est point contre nature de faire une telle supposition quoique jusqu'à présent nous ayons été incapables d'en produire une preuve absolue »<sup>18</sup>.

En ce sens, la question de savoir si les étoiles sont distribuées au hasard, sans ordre, dans l'espace cosmique ou bien si elles sont nécessairement ordonnées au sein de systèmes plus vastes, reste inséparablement liée à celle de notre propre situation locale d'observateurs terriens dans l'univers<sup>19</sup>. Bien évidemment, Wright opte pour une structure ordonnée du monde stellaire sous la forme de la voie lactée, mais avant tout pour des raisons théologiques. Contrairement à Newton qui procédait selon l'ordre analytique, partant des phénomènes pour remonter à Dieu, Wright est parti de conceptions morales et théologiques globales pour tenter de trouver un accord avec les découvertes astronomiques de son temps. Or, cette démarche propre à Wright traverse la totalité de son œuvre, jusqu'aux *Second or singular Thoughts upon the Theory of the Universe* (après 1770). C'est la raison pour laquelle la démarche de Wright ne peut être confondue ni avec celle de Newton ni avec celle de Kant.

## 2. L'hypothèse de Wright of Durham sur la voie lactée, « partie visible de la création »

Thomas Wright reprend ici la distinction biblique entre les parties visible et invisible de la création<sup>20</sup>, distinction que l'on retrouve chez William Whiston<sup>21</sup> et qu'il cite à maintes reprises en 1742 dans sa *Clavis Coelestis*<sup>22</sup>. Tout comme William Whiston, ce chapelain de l'évêque de Norwich qui avait publié dès 1696 *A new Theory of the Earth*<sup>23</sup>, Wright entend concilier la science et la *révélation*, comme la plupart de ses compatriotes de l'époque. Il faut prendre en compte le fait que le cadre cosmologique au sein duquel Wright tente d'intégrer les connaissances et les découvertes astronomiques est un cadre religieux. C'est pourquoi Wright avait ouvert son premier écrit de 1734 intitulé : *A Theory of the Universe* – qui reste à l'état de manuscrit – par les considérations suivantes, qui devaient être illustrées par un vaste tableau, aujourd'hui perdu :

« An hypothesis to solve, nearest to the level of y<sup>e</sup> human understanding, the Being of a God and y<sup>e</sup> origin of Nature grounded upon visible effects and final causes. [...] All which is represented in a section of y<sup>e</sup> universe twelve feet radius, extending from the Imperial Seat or *Sedes Beatorum* to the verge of chaos bordering y<sup>e</sup> infinite abiss. Comprehending first y<sup>e</sup> Paradise of immortal spirits in there several degrees of glory surrounding the sacred Throne of Omnipotence. Secondly, the Gulfe of Time or Region of Mortality, in which all sensible beings such as y<sup>e</sup> planetary bodies are imagined to circumvolve in all maner of direction round the Divine Presence, or y<sup>e</sup> Eternal Eye of Providence. Thirdly the shades of Darkness & Dispaer supposed to be the Desolate Regions of ye Damned. < Wrote in y<sup>e</sup> year 1734: the author being then 22 years old > »<sup>24</sup>.

En revanche, lorsqu'on lit la *Préface* de la version publiée en 1750 sous le titre de : *An Original Theory of the Universe*, on a

affaire à un ouvrage nettement plus scientifique, puisqu'il déclare que :

« son dessein principal est de tenter de résoudre [le problème posé par] les apparences de la voie lactée, et comme conséquence de cette solution, de formuler une théorie rationnelle et fidèle à propos de l'univers connu, mais qui n'a jamais été tentée par personne »<sup>25</sup>.

Wright ajoute à la fin de sa *Préface* que le problème de la structure de la voie lactée « a été jusqu'à présent considéré comme une difficulté insurmontable »<sup>26</sup>. Le propos est très modéré, car Wright ne prétend pas avoir réussi pleinement dans ce domaine, mais il encourage les chercheurs futurs à prolonger ses efforts pour dépasser ou compléter son hypothèse<sup>27</sup>. Le problème de la voie lactée est donc prépondérant ici, comme le sous-titre de son ouvrage de 1750 pouvait le laisser présumer, mais force est de reconnaître que le livre de Wright n'est pas toujours clair, ne serait-ce que dans ses prolongements cosmologiques, alors que le traitement du problème de la voie lactée est lui-même beaucoup plus explicite. L'hypothèse sur la structure de la voie lactée est soutenue par la prise en compte de la seule perspective aidée de l'optique géométrique, tandis que les aperçus cosmologiques relèvent plutôt d'une extrapolation religieuse qui s'étend à l'ensemble de la création :

« J'ai non seulement enfin découvert la cause réelle de ce cercle lumineux, mais aussi, par la même hypothèse que celle qui résout cette apparence, je serai capable d'exposer une théorie beaucoup plus rationnelle de la Création que celles qui ont été jusqu'ici avancées, et, en même temps, vous donner une idée de l'univers, ou système infini des choses »<sup>28</sup>.

La Lettre V estime que la voie lactée mesure environ 9° de large et, par une sorte de calcul statistique, Wright conclut que cette bande laiteuse doit compter globalement 3 888 000 étoiles<sup>29</sup>. Dans sa Lettre VI, Wright veut démontrer que les étoiles

dites fixes sont en fait en mouvement, y compris notre Soleil<sup>30</sup>. À cette fin, il se fonde d'une part sur les variations des mesures effectuées depuis l'Antiquité, concernant les pôles terrestres ainsi que l'inclinaison de l'équateur terrestre sur l'écliptique, et d'autre part celles des positions de certaines étoiles, dont, en particulier, *Arcturus* observée par Tycho Brahe, Hevelius et Flamsteed. C'est enfin dans la Lettre VII que Wright présente son hypothèse qui sauve les apparences de la voie lactée tout en les reconduisant à un système d'étoiles bien ordonné.

Wright part du principe que notre Soleil ne doit pas différer des autres étoiles, car nous n'avons aucune raison de le considérer comme le centre de l'univers, puisqu'il n'offre aucune symétrie dans les apparences stellaires qui l'entourent, dans la partie « visible de la création ». De même que la Terre n'était pas le centre de notre système planétaire, de même le Soleil ne peut prétendre être le centre du monde sidéral. La nature véritable de notre voie lactée est due à ce que les myriades de soleils qu'elle contient dans une zone étroite et qui se trouvent tellement éloignées de notre œil qu'elles semblent se toucher et former une bande laiteuse. Wright précise que :

« l'irrégularité que nous observons [dans notre voie lactée] depuis la Terre, je juge qu'elle est entièrement due à la position de notre Soleil dans ce grand firmament, et qu'elle peut être aisément réduite à son excentricité »<sup>31</sup>.

Vient ensuite la question du mouvement propre des étoiles qui peut décrire soit une trajectoire rectiligne, soit courbe. Or, le déplacement de toutes les étoiles en ligne droite serait entièrement contraire aux lois de la mécanique newtonienne et en désaccord avec les observations. Il ne reste plus qu'à combiner les mouvements orbitaux des étoiles au sein de modèles géométriques pour rejoindre l'apparence de voie lactée.

Wright évoque alors deux dispositions possibles des étoiles permettant de réduire géométriquement l'apparence de voie lactée,

tout en sauvegardant l'organisation systématique et régulière de celle-ci. Après avoir démontré que le système stellaire auquel appartient notre Soleil ne peut se mouvoir qu'en décrivant un mouvement orbital autour d'un centre donné, Wright envisage *les deux seules solutions possibles*, sans dissimuler sa nette préférence pour la seconde dans les termes suivants :

« Il n'y a que deux voies possibles à proposer pour parvenir [à résoudre les phénomènes] et je pense que l'une d'entre elles est hautement probable ; mais je ne me risquerai pas à déterminer laquelle des deux recevra votre approbation, mais j'ai seulement l'intention de vous envoyer les deux en les incluant ici. La première est telle que je l'ai décrite ci-dessus, c'est-à-dire que toutes [les étoiles] se meuvent dans le même sens en ne déviant guère du même plan, comme le font les planètes autour du corps solaire avec leur mouvement héliocentrique. [...] La seconde méthode pour résoudre ce phénomène, c'est que les étoiles soient ordonnées au sein d'une sphère, et qu'elles se déplacent toutes suivant diverses directions autour d'un centre commun, comme le font ensemble les planètes et les comètes autour du Soleil, mais à l'intérieur d'une coque sphérique ou d'un orbe concave »<sup>32</sup>.

C'est bien sûr le second modèle, qui emportait la préférence de Wright, parce qu'il est un modèle sphérique où les étoiles seraient assez régulièrement réparties et enserrées à l'intérieur d'une mince couche stellifère concave, animée d'un mouvement de rotation axiale. Dans ce cas, l'*effet de voie lactée* ne se produit que lorsqu'un observateur tourne son regard en direction du plan tangent à l'enveloppe sphérique, par rapport à la position particulière du système solaire. Cet effet de voie lactée disparaît lorsque l'observateur regarde vers l'intérieur ou vers l'extérieur de la sphère, en raison de la minceur de la couche stellaire. Dans ce dernier cas, l'apparence relative de *désordre* parmi les étoiles les plus proches et perpendiculaires au plan tangent à l'enveloppe sphérique, n'est

imputable qu'à notre situation *locale* et non pas à la structure *globale* de la voie lactée. En outre, ce modèle offre l'avantage de placer toutes les étoiles à égale distance du centre de la voie lactée qui était, pour Wright, d'ordre surnaturel et divin.

Il faut ajouter que Wright admettait même l'existence possible d'une pluralité de voies lactées possédant chacune son propre centre divin, sans que celles-ci soient soumises à un système d'ordre supérieur, car cela reviendrait à subordonner les différents centres divins à un système qui leur serait supérieur, ce qui est absurde. Ce qui reste assez obscur dans l'ouvrage de Wright, c'est la question de savoir s'il existe à l'intérieur de la voie lactée des nébuleuses (considérées comme des amas d'étoiles) ou bien si toutes les nébuleuses sont des voies lactées. En revanche, Wright reconnaît que le premier modèle ressemble plutôt au système de Saturne, car toutes les étoiles seraient enfermées dans une bande étroite « proprement à la manière des anneaux de Saturne »<sup>33</sup>, selon son expression. C'est d'ailleurs dans ce passage que l'on trouve cette remarque un peu vague sur les points ou les taches nébuleuses :

« Ainsi [s.e. à l'aide du modèle de type saturnien] peut-on rendre compte non seulement du phénomène de la *voie lactée*, mais aussi de toutes les taches nébuleuses < *cloudy spots* > et de leur distribution irrégulière »<sup>34</sup>.

Ces considérations géométriques sur la perspective étaient accompagnées de nombreuses planches qui en illustraient les différents aspects<sup>35</sup>. Les deux dernières lettres qui suivent immédiatement la Lettre VII glissent peu à peu dans la métaphysique et la théologie, puisqu'elles traitent du temps, de l'espace, de l'immortalité de l'âme, puis de l'infinité et de l'éternité. Toutefois, il ne s'agit nullement d'une excroissance spiritualiste qui viendrait parasiter une recherche astronomique, mais d'une véritable physico-théologie, car l'on apprend pour finir que Dieu est à la fois centre de gravité et centre moral :

« Tous les êtres peuvent tendre vers ce centre commun de gravitation, dont on peut supposer qu'il attire toutes les vertus et repousse tous les vices, comme ils tendent vers la perfection ; et c'est de là que tous les corps tirent en premier lieu l'origine de leur action et que leurs divers mouvements sont dirigés »<sup>36</sup>.

Cette image semble confuse non seulement parce qu'elle superpose le plan physique et le plan moral, mais aussi et surtout parce qu'elle évoque un centre de la création, alors qu'il semblait établi que celle-ci possédait une multiplicité de centres gravifiques et divins. Wright va même jusqu'à parler du « Center of infinity » :

« Sil devait être considéré comme acquis que la création puisse être circulaire ou orbiculaire, je supposerais ensuite qu'il existe, au centre général de ce tout, un principe intelligent d'où procède ce pouvoir mystique et paternel, producteur de toute vie, de toute lumière et de l'infinité des choses. Ici, l'œil de la Providence qui-s'étend-à-tout, au sein de sa sphère d'activité, et qui préside à tout par son omniprésence, siège au centre de l'infinité, j'imagine qu'il voit immédiatement tous les objets qui sont en son pouvoir »<sup>37</sup>.

Il faut garder à l'esprit ces images partielles et peu compatibles entre elles pour comprendre qu'elles trouvent finalement leur aboutissement dans cette très ancienne formule qui vient du *Corpus hermeticum* et qu'emploie Wright comme allant de soi :

« Bien que l'on admette que la divinité suprême et la plus sacrée soit essentiellement présente en tous lieux aussi bien qu'en celui-ci, en tant qu'elle est un Être dont le centre est partout et la circonférence nulle part, c'est cependant ici seulement ou dans un tel *Sensorium* de son unité qu'il manifeste sa qualité d'agent corporel »<sup>38</sup>.

Même s'il est vrai que Kant avoue n'avoir jamais eu en mains l'ouvrage de Wright, mais seulement son compte rendu dans un magazine de Hambourg, il a très bien pu se rendre compte que

ce texte contenait des considérations aussi bien astronomiques que théologiques. Vraisemblablement, nombre d'assertions théologiques qui figuraient dans le compte rendu des *Freye Urteile* de Hambourg n'étaient pas pour déplaire à Kant, puisqu'il en a repris certains éléments. D'ailleurs, la physico-théologie de la *Théorie du Ciel* de Kant avait des objectifs très proches de ceux de Wright, et notamment en ce qui concerne la question de la voie lactée et des nébuleuses, comme nous allons le voir<sup>39</sup>.

### **3. La conception kantienne de la voie lactée et sa dette envers celle de Wright**

Ce fameux compte rendu du livre de Wright que Kant a lu dans les *Freye Urtheile und Nachrichten* de Hambourg pour l'année 1751, n'est pas tant une recension d'ouvrage qu'une succession d'extraits assez bien choisis et traduits en allemand<sup>40</sup>. L'auteur du compte-rendu présente en des termes enthousiastes cet ouvrage dont il dit qu'il « mérite à juste titre l'attention de tous les lecteurs »<sup>41</sup>, tout en déplorant de n'avoir pu reproduire « les diverses gravures magnifiques »<sup>42</sup> ce qui a nécessité de sauter les passages qui les commentaient, mais « ce qui suit sera cependant suffisant pour donner à nos lecteurs une idée favorable de l'ouvrage »<sup>43</sup>.

Sans reprendre l'ensemble de ces propos, nous ne retiendrons que quelques points de grande importance pour Kant. Ce dernier, après avoir reconnu sa dette envers Wright, présente en ces termes l'idée générale ou le principe fondamental de l'astronome anglais :

« M. Wright of Durham dont j'ai pris connaissance de la thèse dans les *Hamburgische Freye Urtheile* de l'année 1751, m'a tout d'abord amené à considérer les étoiles fixes non pas comme un fourmillement dispersé, sans ordre apparent, mais comme un système qui a la plus grande ressemblance avec un système pla-

nétaire de sorte que, comme dans celui-ci les planètes sont très proches d'un plan commun ; de même, les étoiles fixes se rapportent par leur position, d'aussi près que possible, à un certain plan qui doit être conçu comme s'étendant à travers le ciel tout entier ; et par l'amoncellement le plus dense sur ce plan, elles forment une bande lumineuse appelée voie lactée »<sup>44</sup>.

Le troisième et dernier compte rendu de Hambourg (assurément lu par Kant) commençait par présenter la Lettre V de Wright en précisant que l'apparence de « rivière laiteuse, mais de nature plutôt transparente »<sup>45</sup> propre à la voie lactée est due à une accumulation prodigieuse d'étoiles. Ce propos, totalement conforme au principe général de Wright, convenait aussi à Kant. Mais ce sont surtout les extraits de la Lettre VII (déjà cités en partie ci-dessus) qui ont le plus retenu l'attention de Kant, notamment la description des deux modèles géométriques possibles de la voie lactée. Pourtant, Kant ne semble guère avoir fait attention à l'*alternative* proposée par Wright ni à sa préférence nettement affirmée pour le modèle sphérique. Kant se contente d'écarter purement et simplement l'antique « sphère des étoiles fixes » lorsqu'il écrit : « les étoiles ne sont pas placées dans la concavité apparente de la sphère céleste »<sup>46</sup>. En outre, comme il se réfère aux observations des nébuleuses effectuées par Maupertuis et William Derham, il sait que certaines d'entre elles ont un aspect elliptique qui permet d'écarter le modèle sphérique. Kant a donc retenu uniquement le modèle de type « saturnien » dans l'alternative proposée par Wright, mais son mérite n'est pas tant d'avoir développé un modèle qui va très approximativement dans le sens que retiendra l'astrophysique du XX<sup>e</sup> siècle, mais plutôt d'avoir choisi ce modèle *par analogie* avec la structure du système solaire, parce que ce dernier est soumis aux mêmes lois que la voie lactée :

« Selon cette conception, on peut décrire le système d'étoiles fixes dans une certaine mesure, comme le système planétaire

infiniment agrandi. [...] La configuration du ciel des étoiles fixes n'a donc pas d'autre cause que cette même constitution systématique reproduite en grand. [...] »<sup>47</sup>.

La préférence de Kant pour le modèle saturnien permet de conclure avec M. Hoskin qu'il y a ici un malentendu, car il n'a pas vraiment compris l'option personnelle de Wright<sup>48</sup>. Cependant, ce malentendu produisit des conséquences fécondes pour les recherches futures concernant le « royaume des nébuleuses », tout en brouillant les idées de certains historiens des sciences concernant la cosmologie de Wright<sup>49</sup>. Tout comme Wright, Kant pense que la voie lactée est animée de rotation axiale, de manière à contrebalancer la force d'attraction qui produirait à elle seule l'effondrement gravitationnel de ce système d'étoiles. Toutefois, Kant a voulu chiffrer la période de rotation axiale de la voie lactée en combinant les mesures effectuées par Huygens pour estimer la distance des étoiles les plus proches avec la troisième loi de Kepler, tout en considérant Sirius comme le centre de notre voie lactée, ce qui donne comme résultat : environ « un million et demi d'années »<sup>50</sup>.

Par ailleurs, l'auteur du compte rendu a fait une incise qui est de son propre chef à propos des nébuleuses, mais qui reste un peu vague, car Wright lui-même est resté assez flou sur la question :

« En guise de confirmation, il [s.e. Wright] montre que les diverses étoiles nébuleuses ou les apparences célestes lumineuses ne peuvent être rien d'autre qu'une accumulation dense de petites étoiles »<sup>51</sup>.

Est-ce à dire que ces nébuleuses, qui sont aussi des amas stellaires, se trouvent à l'intérieur de la voie lactée ou bien qu'elles sont aussi d'autres voies lactées en tous points semblables à la nôtre ? Les écrits de Wright ne le précisent guère, mais certaines de ses planches (inconnues de Kant) permettent de lever l'équivoque et de penser que l'astronome anglais avait admis de son

côté l'existence de plusieurs voies lactées extérieures les unes aux autres<sup>52</sup>. L'équivocité de cette incise a dû encourager Kant à étendre ses considérations sur la nature des nébuleuses que nous appelons aujourd'hui extragalactiques.

Le second pas que fit Kant au-delà de Wright, c'est de considérer non seulement qu'il doit exister une quantité innombrable de voies lactées dont les quelques nébuleuses recensées à l'époque par E. Halley, W. Derham et Maupertuis ne sont que quelques échantillons « visibles », mais aussi que les observations à venir sont appelées à confirmer et à étendre considérablement. Malheureusement, Kant a écarté trop rapidement l'idée que ces « étoiles nébuleuses » pourraient être aussi des nuages de gaz éclairés par des étoiles voisines, mais situées à l'intérieur de notre propre voie lactée : pour lui, toutes les nébuleuses sont, sans exception, des voies lactées. C'est d'ailleurs cette théorie que la postérité a retenu sous le nom de « théorie des univers-Iles »<sup>53</sup>, car elle constituait aux yeux de Kant lui-même : « la partie la plus séduisante du système »<sup>54</sup>. Ainsi, puisque la voie lactée est un système constitué de systèmes solaires analogues au nôtre, dans la série des mondes et des systèmes de mondes, on ne saurait trouver de fin. En se référant à la notion mathématique de *série*, Kant écrit en ce sens :

« Nous voyons les premiers termes d'une progression continue de mondes et de systèmes, et la première partie de cette progression infinie laisse déjà reconnaître ce qu'on doit supposer de l'ensemble. Ici, il n'y a point de fin, mais un abîme véritablement insondable »<sup>55</sup>.

Pour sa part, Wright ne pouvait subordonner les voies lactées à des systèmes d'ordre supérieur, pour les raisons théologiques que nous avons vues, aussi dut-il limiter son système à n'embrasser qu'un amas de voies lactées coexistantes, mais innombrables. En revanche, la théologie précritique de Kant ne pouvait venir limiter ses considérations cosmologiques, puisque pour lui

Dieu est à la fois absolument transcendant et omnisuffisant < *allgenugsam* > : il ne règne donc que par le truchement des lois physiques qu'il a implantées dans sa création. De ce fait, la cosmologie précritique de Kant débouche sur une hiérarchie de systèmes et de systèmes de systèmes, qui reste donc totalement ouverte.

Enfin, pour clore ce rapide examen, il faut signaler que Wright, à la suite du tremblement de Terre de Lisbonne a complètement abandonné sa cosmologie de 1750 et rédigea un nouveau manuscrit cosmologique au cours des quinze dernières années de sa vie. Ce texte, dont Kant n'a jamais entendu parler, puisqu'il ne fut découvert qu'au XX<sup>e</sup> siècle par Michael Hoskin, revient sur la nature de la voie lactée qui apparaît désormais comme un ensemble de chaînes de montagnes volcaniques en feu, déversant un déluge de lave céleste. Ce que nous prenons pour des étoiles, ce ne sont que des « volcans célestes » en pleine activité et qui tournent vers nous leurs cratères. Les nombreuses fardes de ce manuscrit que l'on a retrouvées dans les papiers de Wright contiennent des considérations assez obscures qui n'auraient sûrement pas retenu l'attention de Kant.

En revanche, après avoir publié sa trilogie critique, Kant est resté toujours attaché à sa propre conception de la voie lactée et des « univers-îles », comme il le rappelle en 1790 dans une lettre à Bode<sup>56</sup>, l'astronome de Berlin, et aussi en 1791 dans une lettre au mathématicien Gensichen, tout en rappelant que ses idées ne doivent rien à celles de Lambert. Cette dernière lettre était destinée à préfacier une réédition de sa *Théorie du Ciel* en 1791, soit 36 ans après la première édition :

« 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 pour expliquer combien mes modestes conjectures personnelles diffèrent de celles des théoriciens ultérieurs. 1<sup>o</sup> - 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*. 2°- L'idée que les nébuleuses sont comparables à des voies lactées lointaines n'a pas été hasardée par Lambert [...] puisqu'il les prenait pour des corps obscurs (au moins l'une d'entre elles), éclairés par des soleils voisins »<sup>57</sup>.

Au terme de ce rapide aperçu, on peut conclure que Kant a reconnu sa dette envers Wright, mais qu'il ne s'agit là que d'une simple *inspiration*, mais nullement d'une influence au sens où l'entendent trop souvent les historiens des idées. La conception kantienne de la voie lactée, tout comme le reste de sa cosmologie, ont su montrer leur fécondité, mais sans la lecture partielle et, en partie, erronée que fit Kant de la cosmologie de Wright, il est peu sûr que les idées de ce dernier auraient joué un rôle quelconque dans l'histoire de l'astronomie.



# Chapitre 13

## Cosmologie et matérialisme dialectique

Nicolas Prantzos

### I. Du matérialisme des penseurs présocratiques...

Les penseurs de l'antiquité grecque ont, les premiers, posé la question ontologique fondamentale : *est-ce que l'Être s'identifie au monde (la nature) ?* Ou bien, *le monde est-il le produit d'un Être qui lui est extérieur ?* Les réponses qu'ils ont apportées à ces questions ont largement déterminé le débat sur le sujet jusqu'à nos jours et elles ont affecté leur conception du cosmos (monde ordonné, en grec).

Les premiers philosophes de l'école ionienne ont cherché la substance qui serait à l'origine de toutes les choses : l'eau pour Thalès, l'air pour Anaximène. Héraclite a identifié cette substance avec le feu, mais il a surtout insisté sur l'importance du *devenir* : « tout coule, rien ne reste identique en soi-même ; l'identité n'est qu'illusion ». Ou encore : « Ce monde a toujours été et il est et il sera un feu toujours vivant, s'alimentant avec mesure et s'éteignant avec mesure ».

En revanche, pour Parménide c'est le changement qui n'est qu'un épiphénomène, une illusion : « derrière les changements, seul l'Être, un, immobile, incréé, plein et fini, existe ». En accord avec ce dernier, Platon conçoit cet Être comme étant situé en dehors du monde sensible et il pense qu'il est mathématisable,

puisqu'il s'agit des formes géométriques (les *Idées*). Aristote coupe la poire en deux : seul le monde sublunaire est sensible (pas parfaitement invariant, pas mathématisable), tandis qu'au-delà de l'orbite lunaire règne l'*éther*, parfait et inaltérable. Pour les atomistes, comme Épicure, le monde est composé du vide et d'atomes (éternels, insécables, inaltérables) et *rien ne peut naître du néant*. Le célèbre passage de Démocrite révèle une des premières visions correspondant au multivers de la cosmologie moderne :

« ... Les mondes existent dans le vide et sont en nombre infini, de différentes grandeurs et disposés de différentes manières dans l'espace : ils sont plus ou moins rapprochés, et, dans certains endroits, il y a plus ou moins de mondes. Certains de ces univers sont entièrement identiques. Ces univers sont engendrés et périssables : certains sont dans des phases d'accroissement, d'autres disparaissent, ou bien encore ils entrent en collision les uns avec les autres et se détruisent. Les mondes sont ainsi gouvernés par des forces créatrices aveugles, et il n'y a pas de providence. Dans certains mondes, on retrouve des êtres vivants (animaux, plantes), d'autres en sont privés et sont privés d'eau (d'humidité)... Dans certains de ces univers, il n'y a ni soleil ni lune, et dans ceux qui en possèdent, ils sont de tailles différentes... ».

Malgré les différences dans leur conception du monde, on pourrait classer les penseurs de l'antiquité grecque en deux grandes catégories. Dans la première, on trouve ceux qui considèrent que l'essence du monde est matérielle : c'est le cas de Thalès (l'eau), Héraclite (le feu), Anaximène (l'air) et des atomistes (Leucippe, Démocrite, Épicure : les atomes). Pour ces philosophes *matérialistes*, la propriété la plus importante de ce monde matériel est qu'il se trouve en mouvement, en *changement* perpétuel. Dans la deuxième catégorie on trouve ceux qui attribuent au monde une essence spirituelle, comme Parménide (l'Être), Platon (les Idées), Anaxagore (le Nous), Pythagore (les nomb-

res), etc. Ces philosophes *idéalistes* considèrent, en revanche, que le principal caractéristique du monde est l'immutabilité éternelle (ou l'invariabilité absolue), les changements observés n'étant que secondaires.

Il est intéressant de noter les différences entre ces deux grands courants de pensée en ce qui concerne l'extension spatio-temporelle du cosmos. Pour les matérialistes, le cosmos est, en général, infini aussi bien dans l'espace (il peut même contenir un nombre infini de mondes), que dans le temps (en d'autres termes, il est incréé). En revanche, les idéalistes conçoivent, en général, un monde fini dans l'espace et dans le temps, qui est donc apparu à un moment donné, par l'action d'un Créateur (le *Démiurge* de Platon). Cette « ligne de démarcation » entre les deux courants n'est pas absolue : Aristote, par exemple, considérait un cosmos fini dans l'espace, mais incréé.

## **2. ... au matérialisme d'Engels**

Au XVIII<sup>e</sup> siècle, un vaste corpus de connaissances sur la nature (l'astronomie, la géologie, la zoologie) existait déjà. Sur la base de ces connaissances, une vision matérialiste du monde a commencé à se développer à nouveau (vingt siècles après les penseurs de l'antiquité), avec des philosophes comme Henri d'Holbach, Helvetius, Julien de La Mettrie, Ludwig Feuerbach, etc. Et pourtant, l'interprétation philosophique du matériel scientifique, la « vision globale » du cosmos de cette époque, était, à bien des égards, inférieure à celle des penseurs pré-socratiques.

« Pour les philosophes grecs, le cosmos avait jailli du chaos, et il s'est par la suite développé, structuré, il a été le résultat d'un devenir. En revanche, pour les scientifiques de cette période-là, le monde était invariable, résultat d'une création ponctuelle. La science était encore intimement liée à la théologie, on cherchait partout une impulsion externe, extérieure à la nature... La pre-

mière brèche à cet édifice fossilisé a été ouverte par un philosophe : Immanuel Kant, qui publia en 1755 *L'histoire générale de la nature et la théorie du ciel*. La Terre et l'ensemble du système solaire sont maintenant présentés comme résultant d'un processus physique, d'un devenir dans le temps... » (F. Engels, *La dialectique de la Nature*).

En effet, suite à l'hypothèse de la nébuleuse proto-solaire de Kant, reprise par Laplace en 1796, la notion de *devenir* a progressivement envahi les disciplines scientifiques à partir de la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle. Dans le registre de la philosophie, le devenir se trouve à l'origine du développement de la *dialectique* par G.W.F. Hegel (1770-1831) : dans son œuvre majeure, *La phénoménologie de l'esprit*, Hegel présente la dialectique comme l'histoire des contradictions et du devenir de la pensée (qu'il identifie avec l'Être), évoluant vers l'Idée Absolue. Il s'agit manifestement d'une dialectique idéaliste. Selon Karl Marx, un des disciples de Hegel, cette dialectique « marchait la tête en bas » et il fallait donc la remettre « tête en haut », c'est-à-dire l'adapter à la vision matérialiste du monde. Marx s'est attelé à cette tâche avec son ami et collaborateur Friedrich Engels, profitant de l'explosion des découvertes scientifiques du XIX<sup>e</sup> siècle : le fonctionnement de la cellule, les transformations entre les différentes formes de l'énergie et la théorie de l'évolution des espèces.

Ces découvertes scientifiques majeures ont beaucoup influencé Marx et Engels dans leur conception d'une nouvelle « version » du matérialisme, qui combine le matérialisme de Feuerbach à la dialectique de Hegel. Marx avait fait sa thèse sur les atomistes Épicure et Démocrite, qui (avec les stoïciens) étaient à l'origine de la philosophie matérialiste. Selon le matérialisme, le monde – tout ce qui existe – est entièrement et uniquement matériel et tous les phénomènes dans l'univers sont des manifestations de la « matière en mouvement ». Bien entendu, le matérialisme adopte le postulat du *réalisme* : *le monde existe en dehors de nous*,

*et indépendamment de notre perception de lui.* Quant à la pensée, elle est le reflet du monde matériel dans notre cerveau (ce qui expliquerait pourquoi l'on parvient à comprendre ce monde) et constitue le stade suprême – jusqu'ici – de l'évolution de la matière.

L'apport de la dialectique à l'édifice est extrêmement important. La dialectique est conçue comme la discipline des lois générales du développement dans la nature et la société ; ses principales caractéristiques sont :

- Le monde ne peut être conçu autrement que dans sa totalité, comme un ensemble d'objets interdépendants et en interaction, et non pas comme un ensemble d'objets isolés.
- La caractéristique principale du monde physique est d'être en mouvement « L'ensemble de la nature, des objets les plus petits aux plus grands, du grain de sable au Soleil et des protistes à l'homme, est dans un flux constant d'émergence et de disparition, de mouvement et de changement » (F. Engels *La dialectique de la Nature*).
- L'évolution de tout système est un processus caractérisé par de changements quantitatifs imperceptibles et insignifiants, menant brusquement à des changements qualitatifs majeurs. Les transitions de phase de l'eau en fonction de la température en est l'exemple le plus commun.
- La raison de ces changements, de cette évolution, est l'existence des « contradictions internes » (dialectiques), qui caractérisent tous les objets et tous les phénomènes.

Selon la conception matérialiste – dialectique d'Engels, la matière est *tout ce qui existe*, elle est *infinie* (dans l'espace et dans le temps, mais aussi dans la richesse de ses manifestations et de ses formes d'existence), elle est sa propre cause (*incrée*) et ne peut donc disparaître. Il faut noter que ces définitions répondent à la question « qu'est ce que la matière ? », qui est de nature phi-

losophique ; en revanche, la réponse à la question « comment est la matière ? » appartient à la science et non pas à la philosophie : c'est à la science de déterminer les propriétés des atomes, des particules élémentaires, des champs, ou encore de la matière sombre et de l'énergie sombre, et de toute autre forme d'existence de la matière. Par ailleurs, la philosophie matérialiste postule que la propriété fondamentale de la matière est d'être *en mouvement* (conçu non pas comme mouvement mécanique, mais comme changement permanent) : « *Le mouvement est le mode d'existence de la matière... la matière sans mouvement est aussi inconcevable que le mouvement sans matière* » (Engels : *Anti-Dühring*). Quant à l'espace et le temps, ils sont des propriétés consubstantielles de la matière, et pas des « catégories » *a priori* de notre esprit (à la Kant) : « Les formes fondamentales de tout être sont l'espace et le temps » (Engels : *Anti-Dühring*). Enfin, la matière étant infinie, son « reflet » dans notre esprit (qui est fini, aussi bien sur le plan individuel que collectif) ne peut qu'être imparfait, ce qui implique que nous ne pourrons jamais avoir une connaissance parfaite de la nature.

Engels a bien souligné les implications du matérialisme dialectique pour la cosmologie (ou plutôt la cosmogonie) de son époque : l'univers n'a pas été créé, et par conséquent, il ne peut « mourir ». Il a clairement exprimé sa conception d'un univers incréé dans son œuvre *Anti-Dühring* : « ... Si le monde a jamais été dans un état où aucun changement n'avait lieu, comment a-t-il pu se mettre en mouvement ? Un être aussi inchangeable – surtout depuis l'éternité – ne peut sortir de cet état par lui-même (par ses propres moyens). Il aurait besoin d'une impulsion initiale de l'extérieur, une impulsion qui l'aurait mis en mouvement. Mais, comme tout le monde sait, cette » impulsion initiale « n'est qu'une autre expression pour désigner Dieu... que M. Dühring introduit à nouveau dans la philosophie naturelle. ».

Mais Engels a surtout combattu les implications cosmologiques de la fameuse 2<sup>e</sup> loi de la thermodynamique, qui stipule que « *l'entropie d'un système isolé ne peut qu'augmenter au cours du temps* ». S'appuyant sur la portée universelle de la deuxième loi, le physicien allemand Hermann Ludwig von Helmholtz a envisagé, en 1854, l'univers futur dans un état d'uniformité absolue, où toute différence de température serait réduite à zéro et un équilibre thermodynamique global serait atteint. Dix ans plus tard, Rudolph Clausius explicita les idées de Helmholtz : « Plus l'univers s'approche de l'état d'entropie maximale, plus les occasions de changements ultérieurs diminuent ; et, supposant que cet état soit finalement atteint, aucun changement ne pourra plus avoir lieu et l'univers se trouvera dans un état de mort permanente ». Dans *La Dialectique de la Nature*, Engels a voulu exorciser le spectre de la « mort thermique », utilisant des arguments inspirés par le physicien allemand Ludwig Boltzmann et le mathématicien français Henri Poincaré :

« Une succession éternelle de mondes dans un temps infini est le complément logique de la coexistence de mondes innombrables dans un espace infini [...] la matière évolue dans un cercle éternel [...], des millions des soleils et des terres peuvent apparaître et disparaître, mais nous avons la certitude que la matière reste identique à elle-même, qu'elle ne perd aucun de ses attributs durant toutes ses transformations. »

Évidemment, les deux refus, celui d'un « début » de l'univers et celui de sa fin, sont intimement liés, et Engels en était parfaitement conscient :

« ... La deuxième loi de Clausius montre que l'énergie est perdue, du moins du point de vue qualitatif... Ainsi, une impulsion de l'extérieur était nécessaire au début, qui créa de l'énergie ; l'énergie peut donc être créée et, par conséquent, elle peut aussi être détruite. Ad absurdum ! ».

### 3. Cosmologie et matérialisme dialectique en URSS dans les années 1920 – 1970

Les apories cosmologiques d'Engels ont eu peu d'écho auprès des physiciens de son époque. Au début du XX<sup>e</sup> siècle, l'univers était conçu comme statique et éternel. D'où la surprise d'Einstein, quand Alexandre Friedmann montra que les équations cosmologiques de la relativité générale impliquent un univers dynamique, en mouvement de contraction ou d'expansion globale. Friedmann s'est aussi intéressé aux implications de ces équations pour le devenir ultime de l'univers.

« ... Il y a des cas (des modèles de l'univers) où le rayon de courbure change de manière périodique. L'univers se contracte en un point (en rien), puis son rayon de courbure augmente jusqu'à une certaine valeur, puis en se contractant de nouveau se transforme en un point, etc. Ceci rappelle la mythologie Hindoue et ses « cycles de l'existence » et il devient possible de parler de la « création du monde à partir du néant », mais tout ça ne constitue à présent qu'une simple curiosité, qui n'est pas étayée par des preuves astronomiques... ».

L'autre père fondateur de la théorie de l'univers en expansion, Georges Lemaître, s'est aussi exprimé sur l'inévitable question du « début ». Selon lui, le temps pourrait n'être qu'une grandeur secondaire, émergente, à l'instar de la notion de la température, qui n'a de sens que dans un système à plusieurs corps :

« Si le monde avait commencé avec un simple quantum, les notions de l'espace et du temps n'auraient aucun sens au tout début ; elles commenceraient à avoir un sens quand le quantum originel se serait séparé en un nombre suffisant de quanta. Si cette suggestion est correcte, le début du monde a eu lieu un peu avant le début de l'espace et du temps... ».

Il semble difficile de trouver un sens à ce passage de Lemaître. Comment concevoir le « début » du temps *précédé* par quoi que

ce soit ? Sans surprise, ces conjectures n'ont pas ému les physiciens de l'époque, mais elles ont passablement irrité les « gardiens du temple » de la philosophie matérialiste dans l'ex-URSS. Les rapports entre science et philosophie ont été tumultueux dans la jeune URSS des années 1920, où le matérialisme dialectique – enrichi par les travaux de Lénine – s'était entre-temps imposé comme philosophie officielle de la classe ouvrière et, par conséquent, de l'État. Selon l'historien de la science Ernest McMullin, le débat dans les milieux scientifiques concernait le choix entre trois options : avoir une science totalement indépendante de la philosophie, une philosophie prédominante (et normative par rapport à la science) et, enfin, une interaction constante entre deux disciplines indépendantes. Le débat était clos par Staline, qui a imposé la position prédominante et normative de la philosophie en 1931. Jadis un « outil » de synthèse interdisciplinaire et global, le matérialisme dialectique – *DiaMat*, dans le jargon soviétique de l'époque – s'est ainsi transformé en outil de censure, voire de persécution, pour toute une génération des scientifiques. Même en l'absence d'interdiction explicite, les scientifiques soviétiques se sont spontanément détournés – par instinct de survie – de toute activité concernant les sujets qui pourraient « fâcher ». La cosmologie de l'univers en expansion, basée sur la relativité générale d'Einstein et les modèles de Friedman et Lemaître – des théories « bourgeoises » selon l'orthodoxie du DiaMat – était un sujet à éviter à tout prix. Ainsi, entre 1928 et 1957, aucun article sur les modèles de Friedman-Lemaître ne fut publié en URSS. Cette auto-censure a littéralement « étranglé » pendant longtemps la cosmologie soviétique, qui n'a commencé à récupérer qu'à partir de la fin des années 1950 (grâce notamment aux travaux de Y. Zel'dovich et de ses étudiants) pour devenir rapidement la meilleure école de cosmologie au niveau mondial.

Ainsi, la philosophie du matérialisme dialectique a rapidement cessé d'exercer son emprise sur la science soviétique. Il faut souligner, cependant, que certains aspects de la critique de la cosmologie moderne, adressés au nom du matérialisme dialectique, semblent tout à fait pertinents même aujourd'hui. Cette critique est très bien résumée dans l'article « Drame d'idées en cosmogonie contemporaine » de V. Kazutinski (de l'Institut de philosophie de l'Académie des Sciences de l'URSS), publié dans l'ouvrage collectif *Problèmes de cosmogonie contemporaine* (édité par l'académicien V. Ambartsumian en 1968). Les modèles de Friedman-Lemaître s'étaient imposés depuis longtemps comme description appropriée de l'expansion de l'univers, mais pour Kazutinski il est clair que « *le contenu objectif d'une théorie et son interprétation philosophique ne sont pas la même chose* ». Selon l'interprétation matérialiste, ces modèles ne peuvent avoir qu'un domaine d'application limité à une portion seulement de l'univers, ils ne peuvent en aucun cas prétendre décrire l'univers (avec U) dans le sens de « tout ce qui existe ». C'est pour distinguer clairement l'univers « local » de l'univers « global » que les soviétiques ont inventé pour le premier le terme *métagalaxie*. Ainsi, selon Kazutinski,

« la tentative d'identifier l'univers de Friedmann (la métagalaxie) avec tout le monde matériel, est inspirée par une tendance injustifiée à ériger en absolu le niveau déjà atteint de nos connaissances qui, comme tout autre niveau accessible, est relatif, la variabilité du monde matériel étant infinie et son reflet dans la connaissance n'étant pas parfaitement adéquat ».

Même si les régions plus lointaines (au-delà de l'horizon cosmologique) semblent inaccessibles, ce qui rend les questions de l'infinité et de la variété présumées du monde invérifiables, le postulat philosophique reste valable, car :

« ce qui aujourd'hui est considéré comme *inexistant*, physiquement impossible, peut demain faire partie de la pratique

humaine et devenir possible... On ne peut donc pas considérer la métagalaxie comme un système unique et englobant tout ce qui existe... L'expansion de la métagalaxie ne doit pas être interprétée comme l'expansion de toute la matière ».

Mais Kazutinski va bien au-delà de ces simples précautions méthodologiques et tire clairement toutes les conséquences du postulat du matérialisme dialectique sur l'infinité de la matière. D'où son avertissement aux chercheurs de la « théorie du Tout », à ceux qui voudraient décrire tout ce qui existe par une simple équation :

« L'idée que l'infinie variété des phénomènes étudiés actuellement (et dans l'avenir) par la physique peut être décrite à l'aide d'un nombre limité de lois n'est pas exacte ; la nature est également infinie au niveau de ses lois ».

Selon lui, il est illusoire de vouloir décrire la totalité de l'univers à l'aide des théories qui, par définition, ne pourront jamais être testées qu'à l'intérieur de la métagalaxie :

« L'affirmation qu'à une certaine étape de développement de la science on pourra s'attaquer à la description de *tout ce qui existe* dans un sens absolu, définitif, semble une illusion optimiste, mais naïve ».

#### **4. Le matérialisme dialectique à la lumière de la cosmologie moderne**

Quels sont aujourd'hui les rapports entre le matérialisme dialectique et la cosmologie, surtout après l'incroyable développement de cette dernière lors de la décennie écoulée ? Pour bon nombre des scientifiques, le débat est clos depuis longtemps : non seulement la philosophie ne peut avoir aucune prétention normative vis-à-vis de la science, mais elle est carrément inutile, voire nuisible à l'exercice de l'activité scientifique. Ainsi, le physicien et prix Nobel Steven Weinberg écrivait :

« ... J'ai du mal à comprendre comment certains trouvent des correspondances entre la philosophie et les découvertes scientifiques. Il est vrai que bon nombre des sujets de la physique – l'espace et le temps, la causalité, les particules élémentaires – ont préoccupé les philosophes depuis longtemps. Mais je pense que, quand les physiciens progressent dans la compréhension de ces sujets, ils ne confirment ni n'infirmement les assertions des philosophes ; ils montrent simplement que les philosophes étaient hors de leur juridiction en spéculant sur ces sujets ». Richard Feynman (un autre prix Nobel de la physique) est encore plus incisif : « La philosophie de la science est aussi utile aux scientifiques que l'ornithologie aux oiseaux ».

Sans être aussi radical, Ernest McMullin questionne les prétentions du matérialisme dialectique : « ... [Si on admet qu'il est indépendant de la science], quelle est son autorité pour proclamer des lois suffisamment générales et précises, servant des normes à la science de l'univers ? Et si [on admet qu'] il dépend de la science, alors il se réduirait facilement à celle-ci... ou, pire, encore, il serait vulnérable aux défis de la science ».

Les questions de McMullin sont tout à fait légitimes, mais je pense qu'elles n'admettent pas des réponses *a priori*. Seule la pratique, i.e. la confrontation continue des principes philosophiques aux résultats des découvertes scientifiques, peut étayer la validité de ces principes et nous permettre de continuer de les utiliser. Dans le domaine de la cosmologie, les positions les plus importantes du matérialisme dialectique sont deux :

La première est de nature *épistémologique*, i.e. elle concerne notre *méthode* d'étudier l'univers : nous n'avons pas le droit d'extrapoler notre connaissance de l'univers local (la métagalaxie, même si elle est homogène à grande échelle) à l'ensemble d'un univers infini, qui peut être très hétérogène.

La deuxième position est *ontologique*, i.e. elle concerne la nature profonde (les propriétés fondamentales) de l'univers : la

matière étant incréée, il est inconcevable que l'univers, l'espace et le temps soient créés ; on peut, certes, concevoir un début pour l'univers local (la métagalaxie), mais pas pour l'univers au sens de « tout ce qui existe ».

Il est clair que la position épistémologique ci-dessus n'est pas l'apanage du matérialisme dialectique. Le mathématicien Emil Borel écrivait à propos de l'application des équations d'Einstein à l'univers :

« ... il me semble prématuré de tirer des conclusions sur l'ensemble de l'univers à partir de ce qu'on voit de notre petit coin... L'univers visible pourrait être [à l'univers] ce que la goutte d'eau est à la Terre ; les habitants de la goutte d'eau – aussi petits par rapport à elle que nous le sommes par rapport à la galaxie – ne pourraient pas imaginer qu'au-delà de leur goutte d'eau les propriétés de la matière sont très différentes... ».

Il est vrai que les équations cosmologiques d'Einstein permettent la description d'un univers fini (arbitrairement grand) et homogène à grande échelle. Et pourtant, la tendance actuelle en cosmologie est de concevoir un univers caractérisé par la plus grande hétérogénéité. Une des versions les plus « en vogue » de la théorie de l'inflation d'Allan Guth, qui permet de résoudre certains problèmes du modèle « standard » du Big-bang (voir le texte de Julien Lesgourgues dans ce volume), est celle de *l'inflation chaotique*, proposée par Andrei Linde en 1985. Selon cette hypothèse, des myriades d'univers, ayant des propriétés très différentes, surgissent par les fluctuations du vide quantique et évoluent de manière indépendante, le vide quantique lui-même étant très hétérogène. Le *paysage* (*landscape*, en anglais) de la théorie des cordes, hypothèse avancée dans les années 2000 par Leonard Susskind, prédit un nombre tout aussi faramineux des « régions » de ce paysage : plus de  $10^{500}$ , au sein desquelles les brisures de la supersymétrie seraient déroulées de différentes manières, pour y produire une étonnante variété de particules

élémentaires, d'interactions fondamentales et de structures résultantes. Face à cette prolifération des mondes possibles, on pense au texte de Démocrite (situé en début de ce texte), ou encore à l'une des phrases dont Arthur C. Clarke avait le secret : « Nombreux et étranges sont les univers qui, tels des bulles d'écume, dérivent sur la rivière du temps ». Mais, avant tout, ces différentes conceptions du multivers montrent clairement la pertinence de la critique épistémologique adressée par les partisans du matérialisme dialectique à ceux qui veulent « enfermer » tout ce qui existe dans l'un des modèles de Friedmann-Lemaître.

On rencontre une situation analogue en ce qui concerne la notion du « début » du temps : les spéculations cosmologiques les plus récentes semblent partager l'hostilité du matérialisme dialectique à cette notion. Il est vrai que dans les années 1980, l'idée de *création de l'univers à partir de « rien »* a été largement promue par certains auteurs, comme le physicien P. C. W. Davies. Cependant, il s'agit d'un abus manifeste de langage, car ce « rien » (en l'occurrence le *vide quantique*) a des propriétés bien concrètes : « La question sur l'origine de l'univers est : pourquoi y a-t-il quelque chose, au lieu de rien du tout ? Et la réponse est que « quelque chose » existe car « rien » (le vide quantique) est instable », selon Franck Wilczek. Ce « rien » ne peut donc être considéré comme l'*absence de tout*, mais plutôt comme une autre forme d'existence de la matière, dont une partie s'est transformée en notre univers, en accord avec les postulats du matérialisme dialectique sur les cycles de transformation de la matière à toutes les échelles. La seule autre tentative de « limiter » le passé de l'univers (sans pour autant lui attribuer un début) est celle de Hartle et Hawking, à la fin des années 1980 : leur proposition de « no-boundary » fait état de deux dimensions temporelles, dont la deuxième serait imaginaire (!) et courbée sur elle-même (tout comme les dimensions spatiales), pour former un espace-temps fini mais sans limites, i.e. sans début dans le temps.

Cependant, jongler avec les mathématiques est une condition nécessaire mais pas suffisante pour arriver à une bonne description de la réalité ; ainsi, la proposition de Hartle et Hawking est largement oubliée aujourd'hui. Les recherches les plus récentes tentent d'aller bien au-delà de la « singularité initiale » et envisagent un univers (au sens de « tout ce qui existe ») bien plus vieux que les 13,7 milliards d'années de la métagalaxie. C'est le cas des divers scénarios du multivers (voire ci-dessus), qui n'envisagent aucune limite d'âge pour le « paysage » ou pour la « matrice originelle » du vide quantique. C'est également le cas des scénarios de pré-Big-bang, avancés par Gabriele Veneziano et d'autres, selon lesquels notre univers aurait surgi après l'effondrement et le « rebond » d'un univers précédent (sans préciser combien de ces rebonds, de ces cycles, auraient pu avoir lieu). C'est, finalement, le cas du scénario *ékpyrotique*, avancé par Neil Turock and Paul Steinhardt, selon lequel notre univers se trouverait sur une *brane* évoluant dans un espace de dimension supérieure (le *bulk*) : la collision de cette brane avec une autre produirait, à intervalles réguliers, un « bang » (assimilé à notre Big-bang) et l'apparition d'un nouvel univers ; la durée de chaque cycle se mesurerait à plusieurs milliers de milliards d'années...

Il va sans dire que ces scénarios sont extrêmement spéculatifs et il est fort possible qu'aucun d'eux ne survive. Ce qu'il faut retenir, cependant, c'est que les postulats du matérialisme dialectique semblent être (plus que jamais) en accord avec l'esprit qui anime les recherches actuelles en cosmologie : aucune limite, spatiale ou temporelle, ne se profile à l'horizon des cosmologistes. L'univers, au sens de « tout ce qui existe », semble conforme à la conception d'Engels : *matière infinie en mouvement éternel*.



# Chapitre 14

## Gaston Bachelard et la cosmologie

Daniel Parrochia

### I. Un paradoxe du bachelardisme

Il y a une sorte de paradoxe dans le bachelardisme : j'entends par « bachelardisme » non seulement la philosophie de Gaston Bachelard, dont je vais parler avant tout, évidemment, mais plus encore peut-être la tradition qui se réclame de lui et qu'il a largement contribué à inspirer. Voici un épistémologue (Gaston Bachelard), et une tradition d'épistémologie ou de philosophie des sciences (Canguilhem, Dagognet, Merleau-Ponty, Granger...) qui n'a cessé de défendre la rationalité – même s'il s'agit d'une rationalité ouverte et évolutive – et qui n'a, par conséquent cessé de s'intéresser au devenir effectif des sciences, y compris des sciences les plus en pointe. Cette tradition, qui ne s'est donc pas contentée de décrire ces sciences de façon extérieure ou d'en présenter une vague *sociologie*, comme le font aujourd'hui les « Science Studies » (qui sont si en vogue en France), s'est au contraire occupée à préciser leurs concepts, leurs méthodes, le caractère souvent si révolutionnaire de leurs résultats, si en rupture, en particulier, avec l'expérience commune. Or, très curieusement, chez Bachelard, quand on s'en tient à l'apparence en tout cas, on assiste à un rejet sans appel de la cosmologie (qui est pourtant l'un des grands fleurons de la physique au XX<sup>e</sup> siècle). Chez ses disciples, ce n'est pas beaucoup mieux :

chez Granger, on assiste à une acceptation du bout des lèvres<sup>1</sup>, chez Merleau-Ponty, on voit une difficile conversion à l'une des principales thèses de cette discipline qui est la théorie du Big-bang<sup>2</sup>, et chez les autres auteurs de la tradition, on rencontre généralement un pudique silence sur la question. Je voudrais, dans cet exposé, en le centrant sur Bachelard uniquement, mais en montrant comment ses choix se sont faits, essayer de comprendre cette réticence ou cette prudence à l'égard de la cosmologie.

## 2. La conférence d'avril 1939 : univers et réalité

Je commencerai par le commencement, à savoir une conférence de Bachelard à la Société lyonnaise de Philosophie, datant des 13-15 avril 1939. Il convient de voir que 1939 est une date déjà tardive dans la réflexion de Bachelard, qui a commencé à publier en 1928 et qui, en 1939, a derrière lui trois ou quatre de ses principaux ouvrages, notamment *La valeur inductive de la relativité* (1929), *Le Nouvel Esprit scientifique* (1934), *L'expérience de l'espace dans la physique contemporaine* (1937) et enfin *La Formation de l'Esprit Scientifique* (1938). Il faut bien voir qu'à l'époque, Bachelard est l'un des rares philosophes français à pouvoir étudier et comprendre le développement des sciences exactes de ce premier tiers du XX<sup>e</sup> siècle. Il est, en particulier, avec Meyerson, le seul à avoir compris la théorie de la relativité, sur laquelle Bergson a écrit au contraire des sottises, et il est le seul, à ma connaissance, à avoir compris la cohérence de la science du premier tiers du XX<sup>e</sup> siècle, c'est-à-dire en particulier les liens qui unissent d'un côté les mathématiques (avec la théorie des espaces de Riemann et le calcul tensoriel) et la théorie de la relativité, ou, d'un autre côté, les liens qui unissent le calcul des probabilités, la théorie des espaces de Hilbert, et la mécanique quantique. Bachelard, a, à l'époque, une représentation assez fidèle de

ce qu'est la science de son temps, sur laquelle il continue d'ailleurs à cette date de travailler. Or, nous allons trouver dans la conférence de 1939 une sorte de fin de non-recevoir à l'égard de la cosmologie connue. La question qu'on devra se poser est évidemment celle du « pourquoi ». Mais commençons d'abord par étudier cet article et voir ce qu'il nous dit.

Au début de cet article, Bachelard commence par s'étonner lui-même de l'impasse qu'il a faite sur l'idée d'univers : au cours de sa carrière déjà longue et multiple, il avoue n'avoir jamais médité jusque là sur l'idée d'univers. « J'avais lu, dit-il, comme un consciencieux agrégé de philosophie, des volumes sur les cosmologies antiques ; à l'autre pôle des connaissances humaines, j'avais suivi avec docilité les discussions des algébristes de la relativité généralisée qui, en travaillant du paramètre, ouvrent ou ferment l'univers en quelques lignes de leurs cahiers. Mais en admirant l'ingénuité des premières cosmologies et l'ingéniosité des constructions mathématiques les plus récentes, je dois reconnaître que je ne m'étais jamais intéressé à l'idée même d'univers »<sup>3</sup>. Tout est déjà dit ou presque dès ces premières lignes : Bachelard renvoie dos à dos les premières cosmologies (trop ingénues) et les cosmologies récentes du début du XX<sup>e</sup> siècle (trop ingénieuses). Je note au passage l'expression « travailler du paramètre », qui connote de façon particulièrement négative le travail effectif des cosmologistes, et qui fait penser à l'expression idiomatique française « travailler du chapeau », suggérant en quelque sorte déjà que tout ce monde-là, je ne dirai pas « délire » mais « s'amuse » à figoler des mondes, et cela, d'une manière plus ou moins artificielle. Bachelard enchaîne d'ailleurs en disant que la demande, qui lui a été faite par la Société lyonnaise de philosophie, de parler de la notion d'univers, l'a mis dans l'embarras et que sa conférence consistera à confesser cet embarras, qui se traduit par le fait que, pour lui, former une idée de l'univers rencontre d'énormes difficultés. De sorte qu'il s'avoue lui-même comme un philoso-

phe *sans monde*, un philosophe *qui a perdu son monde*, un monstre ou une curiosité, par conséquent, parmi les philosophes, une sorte de philosophe tératologique car acosmique. Quels sont les arguments par lesquels il va, malgré tout, tenter de justifier sa position,

**Premier argument : l'hypertrophie naïve des premières cosmologies**

Penser, pour Bachelard, c'est accommoder, c'est-à-dire essayer de regarder à distance finie, et de fixer, par conséquent, des points proches. Cesser d'opérer cette accommodation, c'est, pour l'esprit, selon lui, parcourir l'axe des évasions, partir en vacances, glisser doucement vers la rêverie. L'univers apparaît ainsi pour Bachelard – qui présente modestement son cas comme anormal – non pas comme un objet mais bien comme l'antithèse de l'idée d'objet. L'univers, dira Bachelard d'une formule choc « est l'infini de mon inattention ». À partir de là, la notion d'univers ne peut être conçue que négativement : en cherchant à expliquer sa genèse, Bachelard la présente comme une désorganisation, une déformation, une dilution ou encore une dissolution de l'idée d'objet. L'univers s'identifie pour lui à une sorte de perte de structure.

Mais le regard qui n'accomode plus ne va pas rester dans le vague. En réalité, en regardant dans le vague, on regarde en fait toujours un point. Simplement, on va en quelque sorte s'hypnotiser sur ce point particulier, et à partir de là, le grossir et lui faire atteindre la dimension d'un monde. Cette perte de structure et ce phénomène corrélatif d'hypnose sont pour lui sensibles dans toutes les cosmologies, aussi bien anciennes que modernes.

Par exemple, écrit Bachelard en évoquant les premières cosmologies grecques, « dire que l'univers s'enferme dans une forme sphérique, c'est, de mon point de vue, quitter la géométrie qui mesure pour une géométrie qui rêve ; c'est se mettre au centre de la sphère, ce qui en simplifie du coup l'intuition. On dit que la

sphère est la plus belle des formes ; c'est aussi la plus pauvre. La valorisation du centre demanderait à elle seule toute une psychanalyse »<sup>4</sup>. Si on va jusqu'à parler d'une sphère infinie, comme, plus tard, à partir de Nicolas de Cuse, de Giordano Bruno ou de Galilée, alors il y a, selon Bachelard, une évasion encore plus lointaine par rapport à la réalité.

***Deuxième argument : la simplification des cosmologies savantes et leur excessive ambition***

Maintenant, dans le cas de la cosmologie relativiste, les réticences de Bachelard sont plus raffinées et il ne s'agit plus simplement d'évoquer le complexe du centre, le narcissisme ou le nombrilisme des anciennes pensées du monde. « Dans les thèses relativistes, écrit-il, l'induction mathématique qui consiste à passer d'une déformation locale de l'espace à une fermeture totale de l'espace me paraît de même une simplification savante. En se fermant, l'espace se simplifie puisqu'il se résume dans une formule. Au lieu d'être une somme de structures locales, il devient une structure totale. Il est d'ailleurs assez frappant que cette structure totale porte le nom de son inventeur. On parle de l'univers d'Einstein, de de Sitter, d'Eddington. L'univers est alors un brevet d'ingénieur »<sup>5</sup>. Et, Bachelard va encore plus loin, en ajoutant ceci : « À cet égard, la relativité généralisée me semble une sorte de plan quinquennal de l'astronomie. Elle me paraît affectée de ce besoin de » voir grand « qui est la marque de notre époque »<sup>6</sup>.

Alors ce qui est très troublant ici, c'est que le même Bachelard, quelques années auparavant, avait précisément défendu une telle organisation de la science. Au Congrès International de Philosophie de Prague, en 1934, par exemple, dans sa communication intitulée « Critique préliminaire du concept de frontière épistémologique », il avait explicitement souhaité que « chaque science put proposer une sorte de plan quinquennal »<sup>7</sup> de développement. Et *le Nouvel Esprit Scientifique*, le NES, qui fait écho

à la NEP (nouvelle politique économique) de Lénine défendait le même projet et allait évidemment dans le même sens.

Alors on peut s'interroger : pourquoi Bachelard reproche-t-il ici à la théorie de la relativité de faire exactement ce qu'il préconisait trois ans plus tôt, c'est-à-dire de voir grand ? Faut-il incriminer l'échec de la planification soviétique ? Doit-on penser que c'est le sentiment de la venue inéluctable de la guerre (n'oublions pas que nous sommes en avril 1939) qui provoque chez Bachelard ce désenchantement à l'égard des programmes et des perspectives grandioses ? C'est possible, mais ce n'est pas la seule explication. La suite de la conférence fait apparaître en fait un troisième argument qui ne plaide pas en faveur de la cosmologie. Ce sont les difficultés conceptuelles de la notion d'unité.

*Troisième argument : les difficultés conceptuelles de la notion d'unité*

Bachelard, qui comprend la démarche scientifique comme une démarche historique et étudie les sciences dans leur histoire ne voit dans la notion d'unité qu'une unité de point de vue et une unification toujours partielle. Il y a, écrit-il, « une dialectique de la découverte » qui « paraît sans cesse aller du pluralisme à la cohérence et de la cohérence à un pluralisme multiplié ». L'un de ses ouvrages, qui porte sur la chimie, s'appelle d'ailleurs *Le pluralisme cohérent de la Chimie moderne* et il y montre que non seulement on a besoin de faire des expériences sur la pluralité des autres éléments chimiques pour comprendre ce qu'est l'un d'entre eux mais, d'une façon générale, que toute expérience doit suggérer un changement de point de vue et préparer une sorte de multiplication de la pensée. Or tel n'est pas le cas, dit-il, d'une expérience de l'univers. Non seulement l'expérience de l'univers, à supposer que ce concept ait un sens, ne prépare aucune multiplication de pensée mais l'idée d'univers brise même, de fait, toute espèce de pensée. C'est un anti-cogito : *je pense le monde*,

*donc, je ne suis pas.* « Je ne suis pas », c'est-à-dire je n'existe pas en tant que pensant objectivement, je ne fais que rêver. En d'autres termes, le « Je pense le monde » – cogito du cosmologiste – me met en fait « hors du monde ». C'est ce qui arrive à tous les philosophes de la nature, qui ouvrent tout grand les bras pour embrasser le monde, mais comme celui-ci perd ainsi toutes ses qualités spécifiques, ces philosophes ne serrent finalement dans leur bras qu'un grand vide ou le substitut qui en prend la place, par exemple la valorisation d'un élément (feu, eau, air, etc.), comme chez les présocratiques. Autrement dit, une rêverie.

Alors on peut admettre que l'argument porte contre les cosmologies anciennes, mais il est plus difficile à soutenir contre la cosmologie scientifique, qui n'est pas précisément une rêverie, et Bachelard le sait bien. C'est pourquoi il avance encore un quatrième argument, qui porte sur l'idée de *solidarité universelle des événements*, autrement dit, sur l'idée de *système*.

#### **Quatrième argument : la faillite de l'idée de système**

Pour Bachelard, la formule qu'il oppose aux cosmologistes et surtout à ceux qu'il appelle « les heureux philosophes qui savent se servir de l'idée d'univers » (et dont un exemple pourrait être un grand métaphysicien comme Leibniz), est celle-ci : il n'y a pas de systèmes *ouverts*, il n'y a que des systèmes *fermés*. Ses arguments sont les suivants : d'abord, toute expérience de laboratoire est une expérience sur un système fermé. Relativement à une propriété donnée, en tout cas, tout système scientifique est absolument fermé. Ici, il faut se souvenir que Bachelard avait été aussi l'un des premiers philosophes à étudier la mécanique quantique. Dans un livre intitulé *l'Expérience de l'espace dans la physique contemporaine* (qui est un livre qui date de 1937, c'est-à-dire deux ans avant cette conférence sur « univers et réalité »), Bachelard avait montré comment la physique quantique faisait découvrir un espace discret, entièrement dérivé des instruments techniques qui don-

ment accès au monde microphysique. Pour lui, la physique quantique, et notamment la discontinuité fondamentale des quanta, devait conforter l'épistémologue dans cette pensée qu'« il y a un seuil pour la solidarité universelle. Autrement dit [que], du seul fait de la réalité quantifiée, l'univers se désolidarise », c'est-à-dire éclate. Et l'on peut alors conclure, selon lui, « d'une manière réaliste, et non plus seulement d'une manière criticiste : il n'y a que des systèmes fermés »<sup>8</sup>. Vouloir échapper à cette discrétisation de l'expérience en la globalisant apparaît donc, à partir de là, illégitime. Pour Bachelard, dès qu'il y a totalisation, il y a risque de totalisation négligente, risque d'unification trop rapide, et donc risque d'une définition non systématique de la notion de système. Dès que la notion d'univers est là, s'introduit pour lui une sorte de « transcendance » dans la pensée qui met en dehors de la pensée objective, qui contredit, comme il le dit, la *fonction active* de la pensée.

Et le philosophe conclura finalement d'ailleurs sa conférence de façon assez négative : « L'univers est mon repos. L'univers est ma paresse. Ce n'est jamais ma pensée »<sup>9</sup>.

On se dit donc que Bachelard a rejeté la cosmologie de son temps et qu'il a, ce faisant, méconnu évidemment ce qui allait devenir l'un des fers de lance de la physique contemporaine. Pis : en faisant cela, il a dégoûté les philosophes de la cosmologie.

### **3. En quête d'une autre interprétation**

Je voudrais essayer de suggérer une autre interprétation. Si je résume le point où je suis parvenu, je dirais qu'il y a quand même quelque chose d'assez étonnant chez Bachelard. Au fond, pour des raisons philosophiques qui tiennent à la fois à sa méfiance vis-à-vis des pensées du Tout, des cosmologies anciennes comme des cosmologies encore incertaines et un peu caricaturales du début du siècle, Bachelard a rejeté deux affirmations :

- le fait qu'on puisse penser l'univers actuellement observable comme un Tout ;
- l'idée qu'on puisse penser cet immense univers comme une unité.

Mais alors, regardons quelle a été ensuite l'évolution de Bachelard.

La croix des commentateurs de Bachelard, c'est qu'il y a, comme on sait, deux versants dans son œuvre, de sorte qu'ils ne comprennent pas vraiment pourquoi cet homme si averti de la science de son temps a ensuite dérivé vers la poétique et l'esthétique (bien entendu, on en trouve aussi qui regrettent que le rêveur ait perdu tant de temps avec la science). Je voudrais donc suggérer l'hypothèse suivante : comme tout philosophe, Bachelard souhaitait en fait penser le monde et donc faire, au sens propre, une *cosmo-logie*. Mais face à la cosmologie physique globalisante et, pour ainsi dire un peu « stalinienne » que lui proposait comme modèle la science de l'époque, il a préféré développer une cosmologie humaine et multiple, que faute de bases physiques vraiment sérieuses (on ne parlait pas de cosmologie quantique à l'époque, la fonction d'onde de Wheeler-de Witt n'était pas connue), il a développé sous une forme philosophico-poétique. Cela dit, sur le fond, cette perspective ne me paraît pas si éloignée que cela de ce qu'on peut penser aujourd'hui en cosmologie. Je voudrais en dire quelques mots pour finir, même si cela excède l'idée scientifique de cosmologie *stricto sensu*.

Parmi les références que Bachelard aime à citer dans ses travaux non-épistémologiques en particulier, il y a le célèbre psychiatre Eugène Minkowski (à ne pas confondre avec Hermann Minkowski, le professeur de mathématiques d'Einstein au Polytechnicum de Zürich). Eugène Minkowski avait publié en 1936 un livre précisément intitulé *Vers une cosmologie*, où il s'efforçait de restituer la dimension poétique et humaine du monde à travers l'analyse phénoménologique de différents comporte-

ments ou attitudes (lutter, être attentif, allumer la lampe, toucher, goûter, avancer, etc.). Quand on lit ces pages, on découvre le même type d'argumentation que celui que Bachelard défend dans la conférence de 1939 : par exemple, Minkowski, dans l'Avant-propos, dit son désir de faire, avec ce livre, une sorte de voyage autour de l'univers. « Mais, s'interroge-t-il aussitôt en se mettant à la place de son lecteur, la physique, l'astronomie, la cosmographie ne nous donnent-elles pas un tableau du monde ? » En réalité, répond-il en substance, « ce tableau pourtant ne nous présente qu'un seul aspect des choses ; il est loin de pouvoir nous fournir le tracé du voyage que nous voulons entreprendre. Celui-ci suit un tout autre itinéraire ; il vise l'univers tout entier »<sup>10</sup>. L'univers tout entier, c'est-à-dire, non pas simplement l'univers physiquement observable et que décrit la cosmologie scientifique, mais le *monde* comme ensemble d'informations, en tant qu'il est aussi pénétré de tout ce qu'y met l'être humain. Et ce monde-là n'est pas *matériel* ou pas *simplement matériel*. En réalité, sa matérialité, comme le dit Minkowski, « semble plonger dans une atmosphère particulière, faite de mille lueurs, de mille parfums, de mille mélodies, de mille échos profonds et pénétrants. Comme un nuage léger, écrit encore Minkowski, aux rayons adoucis du soleil couchant, s'élève au-dessus de la terre labourée toute la spiritualité de la vie. C'est la poésie de la vie. Bien plus, c'est la vie même. C'est aussi la paix »<sup>11</sup>.

Or, cela, évidemment, la cosmologie physique *stricto sensu* n'en a rien à faire. Le but de la cosmologie, comme de toute science, c'est d'arriver à construire un *objet*, en l'occurrence à construire l'*univers* comme objet, et, pour aboutir à cela, il faut, en principe, commencer par le dépoétiser, afin de pouvoir atteindre ainsi, justement, à ce qu'il y a de plus prosaïque en lui.

Mais Minkowski fait l'observation suivante : « Pourtant l'atmosphère spirituelle et poétique fait partie de l'univers au même

titre que les faits scientifiques, et nous ne saurions la négliger toujours »<sup>12</sup>. Dans son texte, son but est alors, non pas de chanter cette atmosphère comme font les poètes, mais d'essayer de la transcrire en prose, et c'est en ce sens qu'il entend le mot « cosmologie ».

#### 4. La cosmologie bachelardienne

Il me semble que, de même, Bachelard n'a rejeté la cosmologie scientifique de son temps que pour mieux développer des considérations cosmologiques en un sens étendu. Mais, ce faisant, ce qu'il va développer, sur un mode non scientifique, mais en suivant l'inspiration de la physique quantique c'est :

- la cosmologie d'un univers minuscule ;
- et une multicosmologie ou, si l'on préfère cette expression, la cosmologie d'un multimonde.

Je voudrais en donner deux exemples. Bachelard a écrit dans la *Revue Philosophique* de 1933-1934 un article intitulé « Le monde comme caprice et miniature » où il montre que ce qu'on appelle le monde ne peut être saisi comme un tout qu'à la condition de réduire ses dimensions, c'est-à-dire de le voir comme une chose petite et lointaine, à la limite de la rêverie et de la pensée : si je veux, dit Bachelard garder le monde comme tel, alors il faut en faire une miniature : « C'est comme miniature que le Monde peut rester *composé* sans tomber en morceau »<sup>13</sup>. Et c'est par la miniature qu'on peut ensuite aller vers les choses, comme d'un premier caprice de la vision on peut aller ensuite vers des *forces*.

Mais il faut dire que ce micromonde, à la limite, n'est pas *un*, il est *multiple*. Dans la *Poétique de l'espace*, Bachelard va mettre en scène ce qu'il appelle une topo-analyse des sites de la vie intime qui, mis bout à bout, forment des mondes. Celui de la maison et de ses niches (cave, grenier, armoire, tiroirs, etc.) mais aussi celui de l'univers global et de ses métaphores locales (la

coquille, la miniature, l'immensité intime, l'espace du dehors et du dedans, le rond, etc.).

Ainsi, aux univers pensés et soigneusement calculés des cosmologistes du début du siècle, ces univers qu'il disait brevetés d'ingénieurs et qui présentaient l'univers de façon globale et univoque, Bachelard oppose un monde qui est à la fois une miniature et aussi une multiplicité d'univers remplis de nuances et d'ondulations.

Ce faisant, il combat évidemment aussi tous les philosophes qui prétendent « avoir un monde » ou être en mesure de « penser le monde », car ils n'ont alors dans l'esprit qu'une sorte de totalité vague et indifférenciée :

« Trop souvent, écrit Bachelard dans la *Poétique de l'espace*, le Monde désigné par le philosophe n'est qu'un non-moi. Son énormité est un amas de négativités. Le philosophe passe au positif trop vite et se donne le monde, un monde unique. Les formules : être-au-monde, l'être du Monde sont trop majestueuses pour moi ; je n'arrive pas à les vivre. Je suis plus à mon aise dans les mondes de la miniature. Ce sont pour moi des mondes dominés. En les vivant je sens partir de mon être rêvant des ondes mondificatrices. L'énormité du monde n'est plus pour moi que le brouillage des ondes mondificatrices<sup>14</sup>. En exagérant un peu, je dirai qu'on croirait presque entendre un théoricien de la décohérence.

De la même façon, dans *la Poétique de la rêverie*, il s'opposera aux métaphysiciens classiques en des termes similaires.

« Les métaphysiciens, écrit-il, parlent souvent d'une « ouverture au monde ». Mais à les entendre, il semble qu'ils n'aient qu'un rideau à tirer pour se trouver d'un coup, en une seule illumination, en face du Monde. Que d'expériences de métaphysique concrète nous aurions si nous donnions plus d'attention à la rêverie poétique. S'ouvrir au monde objectif, entrer dans le monde objectif, constituer un Monde que nous tenons

pour objectif, [voici de] longues démarches qui ne peuvent être décrites que par la psychologie positive. Mais ces démarches, pour constituer à travers mille rectifications, un monde stable, nous font oublier l'éclat des ouvertures premières. La rêverie poétique nous donne le monde des mondes »<sup>15</sup>.

Je crois qu'ici Bachelard nous donne l'ultime clé de sa pensée sur l'univers : alors que la métaphysique classique, comme les cosmologies anciennes et modernes (en tout cas celles de l'époque) ne donnent accès qu'à un seul monde – et encore, vu sous un certain aspect – la poétique permettrait, selon lui, non seulement de retrouver une multiplicité de micromondes, mais de trouver cette multiplicité unifiée dans une sorte de multivers, un « monde des mondes ». Cette intuition, qui ne pouvait pas être à l'époque, fondée physiquement, et qui était en totale rupture par rapport au paradigme cosmologique alors en vigueur, ne nous semble pas, curieusement, aujourd'hui, si éloignée de ce à quoi la physique, par son évolution propre, a pu parvenir. C'est pourquoi il me semble qu'il est assez injuste que Bachelard soit un peu tombé en désuétude sur le plan épistémologique, car sa pensée, si on le lit d'assez près, est pleine de surprises.



# **Partie 4 : Philosophie de la cosmologie contemporaine**

## **Chapitre 15**

### **Criticisme et positivisme : la déraisonnable prudence des philosophes en matière de cosmologie**

Christian Godin

« Tant que je serai dans ce labo, je ne veux pas entendre le mot « univers », prévenait Rutherford. Le sens de l'interpellation du grand physicien atomiste est à chercher au confluent de deux philosophies modernes.

Le criticisme d'Emmanuel Kant et le positivisme d'Auguste Comte ont sans doute été, sous leur forme propre et sous leur forme réactualisée respectivement en néocriticisme et néopositivisme, les deux philosophies les plus influentes en épistémologie durant la seconde moitié du XIX<sup>e</sup> siècle et la première du XX<sup>e</sup>.

Leurs théories de la connaissance, bien que fondées sur des principes différents – la psychologie des facultés chez Kant, les progrès historiques de l'esprit chez Comte – présentent ce point commun qui en fait deux philosophies comparables : le rejet des antiques prétentions de la métaphysique à être une science, et même la science suprême, au nom de la connaissance des phénomènes appuyée sur l'expérience.

Les conceptions kantienne et comtienne de l'univers présentent en particulier une notable convergence liée à leur rejet de la scientificité de la métaphysique : l'univers en tant que *tout* englobant la réalité physique est conçu comme hors de toute saisie scientifique possible, il ne peut être qu'un objet de pensée métaphysique. Christian Wolff, disciple de Leibniz, avait, au début du XVIII<sup>e</sup> siècle, défini la « cosmologie rationnelle » comme l'une des trois branches de la métaphysique spéciale<sup>1</sup>, avec la psychologie qui traite de l'âme et la théologie qui traite de Dieu. C'est cette tripartition qui structure la Dialectique transcendantale de la *Critique de la raison pure*<sup>2</sup>. Seulement, là où Wolff croyait à une *science* de l'âme, du monde et de Dieu, Kant y substitue la pensée spéculative. Quant à Auguste Comte, il considérera l'univers comme une abstraction métaphysique dont l'esprit positif saura se débarrasser au profit du seul *monde*. En somme, pour ces deux philosophes, l'univers ne peut jamais réellement sortir de la mythologie où il a été inscrit dès les débuts de la civilisation humaine. Ni Kant ni Comte – alors même qu'ils étaient les contemporains de mutations décisives dans ce domaine – ne croyaient à la possibilité d'une rupture épistémologique en cosmologie.

## I. La question du monde chez Kant

La question du monde est sans doute celle sur laquelle la pensée de Kant a connu le plus de variations. Dès sa jeunesse, le futur auteur de la *Critique de la raison pure* s'est intéressé à la nature

physique du monde. En 1755 il écrit une *Histoire générale de la nature et théorie du ciel* qui marquera l'histoire de la pensée cosmologique grâce à l'hypothèse d'une nébuleuse primitive tournant sur elle-même et d'où serait issu le système solaire – une hypothèse plus tard confirmée et que l'histoire a désignée sous le nom d'hypothèse de Kant-Laplace. Kant défendait alors une position que l'on peut dire « réaliste ». Dans la préface de son ouvrage, il pose que le caractère systématique du monde visible doit pouvoir s'étendre à l'univers entier<sup>3</sup>. Chaque étoile visible est un soleil : l'analogie, l'extrapolation sont dès lors possibles<sup>4</sup>. Kant croit donc, en cette période précritique encore marquée par l'influence leibnizienne, à une certaine connaissance cosmologique : le système solaire est un échantillon d'univers, les structures à petite échelle se répètent à grande échelle. Le philosophe a l'intuition de ce que nous appelons aujourd'hui principe cosmologique. Il définit l'univers comme un système de systèmes : « L'armée des étoiles forme, par sa position en relation avec un plan commun, un système tout comme les planètes de notre univers solaire autour du Soleil »<sup>5</sup>. La « liaison de l'attraction et de la force centrifuge » rassemble « la totalité de l'univers, le tout de la nature, dans un unique système »<sup>6</sup>. Bien que dans un univers infini aucun point ne puisse proprement être appelé centre, sous l'effet de la gravitation une masse centrale devrait tout de même exister, et donc si loin que dans la sphère infinie de la création le développement de la nature puisse s'étendre, ce point fait de ce grand tout un seul système. Un système nécessairement unique appelle nécessairement un centre<sup>7</sup> : « On est (...) obligé d'accepter un centre général de l'entière totalité du monde, qui rassemble toutes ses parties en une relation qui les lie, et fait de tout l'ensemble de la nature un unique système »<sup>8</sup>.

La *Dissertation de 1770* entreprendra de montrer contre l'empirisme sceptique de Hume qu'il existe une idée de l'univers comme totalité objective et non seulement comme totalité

idéale. La même année (1770) Kant forme le projet d'une cosmologie qui remplacerait la relation de causalité par celle de coordination. Dès lors, le glissement du point de vue était possible : pour que l'univers existe, il doit avoir une unité, or celle-ci ne peut réellement provenir que du sujet. Même chose avec la nature, impensable sans la *loi*, laquelle vient de l'activité législatrice du sujet.

Bien que le contenu spéculatif de l'*Histoire générale de la nature et théorie du ciel* n'ait jamais été renié par son auteur, qui au contraire en assurera la réédition jusqu'à la fin de son existence, la *Dissertation de 1770* marque dans la pensée cosmologique de Kant une certaine mutation en même temps qu'elle met un terme à sa période dite précritique. Le monde et sa cause ne forment pas un tout car elle lui est extérieure. Kant n'écarte pas l'hypothèse de la pluralité des mondes « mais sous cette seule condition qu'il existe seulement une unique cause nécessaire de toutes choses »<sup>9</sup>. La cause du monde est donc à la fois un facteur de détotalisation (puisqu'elle ne constitue pas un tout avec le monde) et de totalisation (puisqu'elle rassemble sous une unité une pluralité possible de mondes). Seulement, le principe d'unité de l'univers n'est plus d'ordre cosmologique comme dans un système newtonien régi par la seule loi de gravitation. Par ailleurs, si le monde y est défini comme le tout absolu, symétrique de l'élément qui est la partie absolue, la *Dissertation de 1770* dont le sous-titre est *De la forme et des principes du monde sensible et du monde intelligible*, non seulement casse le monde en deux mais réserve l'objectivité au seul monde intelligible : « La forme du monde intelligible reconnaît un principe objectif, c'est-à-dire une cause, par lequel sont liées toutes les choses qui existent en soi. Mais le monde, en tant qu'il est considéré comme phénomène, c'est-à-dire relativement à la sensibilité propre de l'esprit humain, ne reconnaît de principe formel que subjectif »<sup>10</sup>. Autrement dit, que la nature soit définie comme « la

somme de tous les objets de l'expérience »<sup>11</sup> ou bien comme l'interdépendance du « tenir-ensemble » (*Zusammenhang*) des phénomènes<sup>12</sup>, le principe même de son ordre total n'est pas contenu en elle<sup>13</sup>. L'homme, comme être sensible, vit dans le monde qu'il habite mais comme *cosmothéôros* il « crée lui-même *a priori* les éléments de la connaissance du monde, à partir desquels il construit dans l'idée la vue du monde »<sup>14</sup>. « La totalité des choses, *Universum*, dit une note de l'*Opus postumum*, écrit à l'extrême fin de la vie du philosophe, contient Dieu et le monde. Le monde signifie le *tout* des êtres sensibles »<sup>15</sup>. Mais cette totalité est subjective. C'est le moi en effet qui fait le lien entre Dieu et le monde. Puisque la nature n'est pas un ensemble de phénomènes mais un ensemble de lois, son unité ne repose pas sur la liaison objective des phénomènes mais sur le pouvoir unificateur de la faculté de juger réfléchissante. Celle-ci, qui, à la différence de la déterminante, remonte du particulier à l'universel (au lieu de descendre vers le particulier à partir d'un universel donné) a besoin d'un principe transcendantal d'unification systématique des lois empiriques – l'idée d'un entendement organisateur qui aurait pris notre entendement pour fin<sup>16</sup>.

Heidegger discerne deux significations du monde chez Kant, l'une proprement cosmologique qui se rattache à la métaphysique traditionnelle, l'autre existentielle, et qui ne se trouve pas seulement dans l'*Anthropologie du point de vue pragmatique*, mais déjà dans la *Critique de la raison pure*. Car le monde, comme totalité des phénomènes, est un inconditionné encore relatif à une connaissance finie, et Kant le distingue de l'idéal transcendantal qui est la totalité de toutes choses. Comme l'écrit Heidegger « le concept de monde, ce n'est pas l'enchaînement ontique des choses existantes, mais une totalité transcendantale (ou ontologique) des phénomènes »<sup>17</sup>.

À partir de la *Critique de la raison pure*, Kant rejette résolument hors du champ de la connaissance le tout du monde. Déjà

l'univers est défini de façon restrictive non plus comme une totalité des états mais comme une totalité des substances<sup>18</sup>. La distinction a un sens *critique* capital : « Nous ne pouvons pas même nous représenter complètement la série des états, parce qu'ils sont constamment en devenir. Mais nous pouvons nous représenter ensemble les substances, et cela déjà est un tout »<sup>19</sup>. Mais se représenter ne signifie pas connaître. À partir de la *Dissertation de 1770*, Kant avait distingué la matière du monde, la forme du monde et la totalité (*universitas*) du monde, laquelle constitue l'unité de la forme et de la matière. C'est cette totalité absolue qui, aux yeux de Kant, représente la croix de la philosophie. La connaissance, parce que vraie, renvoie à la totalité de l'expérience possible : l'universel est le nom de cette totalité. Or il n'y a pas, concernant le monde, de totalité de l'expérience possible : l'expérience du monde est à la fois partielle, indéfinie et infinie. Il ne saurait par conséquent y avoir de connaissance du monde comme totalité.

Dans la *Critique de la raison pure*, Kant oppose les idées de la raison, objets de la pensée de la totalité, aux concepts de l'entendement, qui sont les seuls moyens de la connaissance. La raison ne se satisfait pas du caractère partiel, limité de la connaissance que l'entendement lui offre. D'où le balayage qu'elle effectue dans la série des conditions pour parvenir à un inconditionné. L'idée cosmologique est celle qui donne la totalité des phénomènes comme réunis dans un univers<sup>20</sup>. La totalité du monde, comme celle du moi, est vue non comme l'organisation structurale de ses phénomènes mais comme la synthèse régressive de ses conditions. L'idée transcendantale de la totalité absolue de la série des conditions pour un conditionné donné ne porte donc que sur tout le temps passé. Mais pour ce qui est de l'espace, il n'y a pas à distinguer en lui de progression et de régression, puisqu'il constitue un *agrégat* et non une *série*, toutes ses parties existant simultanément<sup>21</sup>. Dès la *Dissertation de*

1770, Kant avait établi que, parce que les choses ne peuvent être pensées que dans la simultanéité ou la succession, le temps est le *tout formel* du monde phénoménal<sup>22</sup>. Seulement, si nous trouvons tout dans l'univers, nous n'y trouvons pas l'univers lui-même. Grâce à la synthèse régressive des phénomènes, la raison espère comprendre l'ensemble qui englobe tous les phénomènes mais elle bute sur cette aporie : le tout absolu de tout ce qui peut jamais être donné n'est nullement lui-même une perception. Point essentiel : la cosmologie rationnelle prend l'univers comme un tout achevé – ce qu'il n'est pas. L'*Idée* cosmologique est la seule des trois *Idées* de la raison pure où l'inconditionné se présente comme une série et c'est pourquoi elle est la seule à admettre la forme de l'antinomie ; car une série n'a que deux prédicats possibles *a priori*, elle est finie ou elle est infinie. Toute la cosmologie rationnelle se résume donc à cette question de savoir si le monde est une totalité finie ou infinie. Le monde est un ensemble de choses dans l'espace et il est une succession d'événements dans le temps ; on demandera d'abord s'il est limité dans l'espace et s'il a un commencement dans le temps, ou si, au contraire, il est sans limite et n'a pas eu de commencement. La confrontation des arguments (appelés à tort des « preuves ») finitistes et des arguments infinitistes est elle-même infinie et aporétique. L'antithétique de la raison pure (c'est le nom que Kant donne à cette confrontation) est indécidable.

Le concept de monde ne peut lui être adéquat car que le monde n'ait pas de commencement, alors il est trop grand pour notre concept, mais que le monde ait un commencement, alors il est trop petit pour notre concept<sup>23</sup>. Il n'y a pas de principe cosmologique *constitutif* – qui serait le principe de la totalité absolue de la série des conditions, considérée comme donnée en soi dans les phénomènes – mais seulement un principe *régulateur* de la raison<sup>24</sup>. La raison ne peut ni éviter de penser le monde ni de s'imaginer que cette pensée est une connaissance, en quoi elle

tombe dans une illusion spécifique. La Dialectique transcendante de la *Critique de la raison pure* fait de l'univers une idée située sur le même plan (métaphysique) que celles de l'âme et de Dieu, et de la cosmologie une discipline située sur le même plan (métaphysique) que la psychologie et la théologie. Avec la cosmologie rationnelle, argumente Kant, la raison prétend illusoirement atteindre une connaissance intégrale de ce qui est donné dans un phénomène. À cet effet, elle exige que l'on remonte intégralement la série des conditions qui ont rendu possible celui-ci. C'est ce que Kant appelle la synthèse régressive des phénomènes. Tel est l'objet de la cosmologie : « l'ensemble qui comprend tous les phénomènes »<sup>25</sup>. L'idée d'univers est celle d'un absolu, or la connaissance de l'absolu est contradictoire puisque la connaissance est relation et que l'absolu est sans relation. En tant qu'*Idée*, l'*Idée* de l'univers a une fonction régulatrice pour la raison, ce n'est pas un concept constitutif de l'entendement<sup>26</sup>.

La *Critique de la raison pure* a accordé à la nature l'unité réelle qu'elle retirait au monde : Kant y distingue le concept mathématique de monde et le concept dynamique de nature<sup>27</sup> : le monde est une agrégation, la nature, une unité. Le domaine pratique achèvera de libérer l'idée de monde de la physique. La conclusion de la *Critique de la raison pratique* dit implicitement que le vrai monde est le règne des fins. La démarche de Kant a donc consisté à déphysicaliser le monde.

## 2. L'Univers selon Auguste Comte

Là se situe le point de jonction entre le criticisme et le positivisme : du Tout de l'univers on ne peut avoir que la notion. Puisque l'univers est unique, il échappe à la comparaison et à l'analogie : à quoi pourrait-on le mesurer ? Auguste Comte établit une distinction radicale entre les astres visibles intérieurs et les astres visibles extérieurs<sup>28</sup>, une distinction qui correspond à la division

conceptuelle entre l'idée de *monde* et celle d'*univers*. L'*Opus postumum* avait repris à son compte la distinction antique de l'univers et des mondes : « *Pluralitas mundorum, unitas Universi* »<sup>29</sup>. « Nos saines connaissances astronomiques sont essentiellement bornées au monde dont nous faisons partie »<sup>30</sup>. « Toutes nos études réelles », est-il écrit dans le *Discours sur l'esprit positif*, « sont nécessairement bornées à notre monde qui pourtant ne constitue qu'un minime élément de l'univers, dont l'exploration nous est essentiellement interdite »<sup>31</sup>. « L'idée d'univers ne saurait par sa nature jamais devenir vraiment positive »<sup>32</sup>. Lorsque Laplace parlait du « système du monde » (1796), c'est du système solaire qu'il était question et la gravitation dite « universelle » de Newton n'a d'abord concerné que le Soleil et ses planètes.

Si la notion d'univers est récusée avec autant de rigueur étourdie (mais après tout, on ne peut guère reprocher à Auguste Comte de n'avoir pas prévu les progrès ultérieurs de la physique) c'est parce qu'elle entraîne, selon lui, des problèmes insolubles ou métaphysiques (c'est tout un) sur l'infini. Comte ne croyait pas légitime l'extension de la gravitation à l'ensemble de l'univers ; pour lui, cette force ne peut donc pas être dite véritablement *universelle*. L'astronomie de Comte ne va guère au-delà de ce qu'Aristote appelait le monde sublunaire. « C'est donc en vain que, depuis un demi-siècle, on s'est efforcé de distinguer deux astronomies, l'une *solaire*, l'autre *sidérale*. Aux yeux de ceux qui font consister la science en lois réelles et non en simples faits incohérents, la seconde n'existe certainement que de nom, et la première seule constitue une véritable astronomie »<sup>33</sup>. « Or, je ne crains pas d'assurer qu'il en sera toujours essentiellement ainsi », ajoute imprudemment le fondateur du positivisme<sup>34</sup>. « Nous ne saurions jamais nous élever à la véritable conception de l'ensemble des astres », écrit Comte<sup>35</sup>.

L'incommunicabilité des genres épistémiques, qui est l'un des principes sur lesquels repose la théorie comtienne de la connais-

sance, rend impossibles une physique et une chimie des astres. Pour Auguste Comte, l'astronomie doit se contenter de la géométrie et de la mécanique. Tout mariage entre elle et la physique ou la chimie serait une chimère. L'astronomie est mécanique et optique, jamais elle ne deviendra une physique. Ainsi est frappée d'impossibilité la connaissance de la température, de la distance et de la dimension des « diverses planètes »<sup>36</sup>. Plus tard, Émile Littré, en fidèle positiviste, dira du mot *univers* qu'il est ambitieux et qu'il devrait subir une *réduction* (sic), « il ne peut pas signifier l'universalité des choses qui nous est et nous sera à jamais inaccessible, il signifie seulement la portion qu'embrassent nos télescopes »<sup>37</sup>. Reprenant la distinction d'Auguste Comte, Littré définit le *monde* comme le « système dont nous faisons partie » et l'univers comme « l'espace illimité au-delà de ce monde »<sup>38</sup>. « Le monde est la partie, écrit plus loin Littré, l'univers est le tout »<sup>39</sup>. Pour Auguste Comte, les cosmogonies ne peuvent pas ne pas être conjecturales et il donnait comme exemple de connaissance impossible la composition chimique des étoiles : le fait que l'homme ne pourra jamais y aller lui paraissait suffisant, et de la même façon qu'il n'envisageait pas l'immensité du champ spectrographique ouvert à l'étude par le développement des sciences physico-chimiques, de même Littré se résignera au caractère borné de la portion d'univers pénétrée par les télescopes, car il ne pouvait imaginer à l'époque où il écrivait, que ceux-ci pussent être autre chose que des grosses loupes.

« *Univers*, donc, n'est qu'une expression mythologique », dira Paul Valéry dans un esprit tout à fait positiviste aussi. « Comment, ajoutait-il, acquérir le concept de ce qui ne s'oppose à rien, qui ne rejette rien, qui ne ressemble à rien ? S'il ressemblait à quelque chose, il ne serait pas tout. S'il ne ressemble à rien... Et si cette totalité a même puissance que notre esprit, notre esprit n'a aucune prise sur elle. Toutes les objections qui s'élèvent contre l'infini en acte, toutes les difficultés que l'on

trouve quand on veut ordonner une multiplicité se déclarent. Aucune proposition n'est capable de ce *sujet* d'une richesse si désordonnée que tous les *attributs* lui conviennent. Comme l'univers échappe à l'intuition, tout de même il est transcendant à la logique »<sup>40</sup>.

Karl Popper fait remarquer dans sa préface à l'édition anglaise de sa *Logique de la découverte scientifique* que « des idées métaphysiques et donc des idées philosophiques ont été d'une extrême importance pour la cosmologie »<sup>41</sup>. Mais ce sont aussi ces « idées » qui ont interdit ou retardé la reconnaissance de la cosmologie comme une science positive possible de la totalité physique. Née d'une rupture d'avec les songeries ancestrales, la science classique a péché elle aussi par excès de prudence : ainsi l'idée d'un univers était-elle généralement écartée au profit d'un espace indéterminé.

L'encyclopédisme et le systématisme d'Auguste Comte sont amputés d'immenses champs de réalité – que les sciences futures, passant outre aux interdits fixés, ne manqueront pas de parcourir. L'épistémologie comtienne apparaît même en retrait par rapport aux connaissances de son temps. La distinction établie entre une physique terrestre, seule positive, et une physique céleste, métaphysique, efface les acquis de la révolution galiléo-cartésienne et des travaux de Newton, et revient *in fine* à la métaphysique dualiste d'Aristote. Le fondateur du positivisme était si rétif à l'idée d'un au-delà (associé spontanément au stade religieux, donc fictif), qu'il finit par brider les efforts de la science elle-même, dont une bonne partie du dynamisme consiste justement à franchir les bornes anciennes. Ainsi se montra-t-il exagérément sceptique à l'égard des travaux d'Herschel, le découvreur des univers-îles, et de Félix Savary, auteur d'un mémoire sur les étoiles doubles. En fait son rejet d'une cosmologie scientifique tient moins à une question de principe – comme chez Kant qui reconnaissait dans la totalité une idée métaphysique – qu'à son

humanocentrisme. Comte pense en fait qu'une connaissance qui n'a pas l'Humanité pour but est inutile.

Autre refus, lourd de conséquences épistémologiques, lui également – le rejet de ce que l'on appellerait aujourd'hui l'interdisciplinarité. Si pour Auguste Comte, il ne saurait y avoir de physique ou de chimie stellaires, ce n'est pas seulement parce qu'il est matériellement impossible d'aller jusque dans les étoiles, mais aussi, mais d'abord parce qu'il croit absolument certain le principe aristotélien du non-mélange des genres. Comme les essences ne se mêlent pas, les sciences fondamentales ne peuvent se marier. L'astrophysique lui donnera tort, et bien d'autres découvertes ultérieures. Pour Auguste Comte, les sciences sont subordonnées les unes aux autres, des moins générales aux plus générales, des plus complexes aux moins complexes mais aucune réduction n'est possible<sup>42</sup>. La *subordination* est à l'opposé de la *réduction* : c'est justement parce que la sociologie, la dernière-née des sciences, est subordonnée à la biologie qu'elle lui est irréductible. Paradoxalement, c'est une position holiste qui fait manquer au fondateur du positivisme la totalité.

Auguste Comte lance en outre un interdit au nom de ce que l'on pourrait appeler un actualisme épistémologique, contre toute recherche prétendant porter sur des objets situés au-delà de notre expérience présente. Dans la première leçon de son *Cours de philosophie positive*, bornant la connaissance positive aux « lois effectives » des phénomènes, « c'est-à-dire leurs relations invariables de succession et de similitude », Auguste Comte demande que l'esprit humain renonce à la recherche de l'origine et de la destination de l'univers et à la connaissance des causes intimes des phénomènes. La recherche des causes, qu'elles soient premières ou finales, est déclarée « absolument inaccessible et vide de sens ». La recherche des causes est sans fin, elle est donc déclarée vaine par la théorie positiviste de la connaissance, qui est finitiste.

C'est précisément dans le champ astronomique que la censure de l'*au-delà* (compris comme nécessairement fictif) aura les conséquences les plus dommageables. L'univers est repoussé dans son infini au profit du monde, et le monde n'a plus finalement que les dimensions de la Terre et de sa proche banlieue. L'astronomie comtienne est résolument géocentrée. Ce qu'à la fin de sa vie, l'auteur du *Système de politique positive* appelait le Grand Fétiche, et qu'il mettait en regard du Grand-Être (l'Humanité) et du Grand-Milieu (l'espace) désigne la Terre<sup>43</sup>, et aussi, disait-il, « les astres vraiment liés à la planète humaine, comme annexes objectives ou subjectives, surtout le Soleil et la Lune ». Voilà l'objet exclusif de l'astronomie, le reste n'étant que divagation. La limitation comtienne est beaucoup plus restrictive, on le voit, que le rejet kantien d'une cosmologie rationnelle.

Comte discrédite la méthode inductive, il considère comme *chimériques* « ces entreprises d'explication universelle de tous les phénomènes par une loi unique »<sup>44</sup> – la phrase vise Laplace, les néopositivistes reprendront l'idée à leur compte. L'esprit positif est synthétique – mais la volonté de connaître la totalité des phénomènes, et, qui plus est, grâce à des énoncés unifiés, est rejetée comme irrationnelle. Pour Comte comme pour Kant, l'univers est inconnaissable car son idée est indéfinie<sup>45</sup>. Première en date des sciences « naturelles », l'astronomie n'a de leçons à recevoir que des mathématiques. Prisonnier de son schéma logico-historique, Comte n'a pas vu qu'une astrophysique, qu'une astrochimie seraient possibles. Au-delà du système solaire, raisonne-t-il, les distances sont tellement énormes, qu'il n'est même plus possible de parler de *système* : l'idée d'univers est « devenue essentiellement incertaine et même à peu près inintelligible »<sup>46</sup>. Car nous ignorons complètement aujourd'hui et nous ne saurons probablement jamais, avec une véritable certitude si les innombrables soleils que nous apercevons composent finalement, en effet, un système unique et général ou, au

contraire, un nombre, peut être fort grand, de systèmes partiels, entièrement indépendants les uns des autres. Dans l'esprit d'Auguste Comte, ce renoncement est moins une perte qu'une victoire – car les « phénomènes intérieurs de notre monde » sont indépendants de la totalité de l'univers. Ainsi la question de savoir si la loi de la gravitation est valide au-delà des limites du système solaire est considérée comme positivement indécidable. Rien ne prouve que la gravitation, connue par l'observation des planètes, s'étend au-delà du système solaire ; on ne peut donc la dire universelle. Plus globalement encore, il n'y a pas, aux yeux d'Auguste Comte, de lois réellement universelles parce que l'extrapolation n'est pas permise au-delà des limites de l'observation. La boucle se ferme : la *loi* limitait le champ de l'astronomie, laquelle, en retour, limite le champ de la loi.

### **3. La cosmologie moderne au-delà des préventions des philosophes**

L'ironie de l'histoire aura voulu que c'est au moment même où le criticisme et le positivisme jetèrent leurs interdits les plus décidés sur une science de l'univers que l'astronomie commença à se muer en cosmologie. La cosmologie, qui abandonna le qualificatif de rationnelle au profit de celui de scientifique, a peut-être commencé du temps même de Kant, avec Herschel, parce que c'est le découvreur d'Uranus qui a véritablement fait entrer l'astronomie dans la troisième dimension. À la différence de l'astronomie, la cosmologie n'est pas exclusivement ni même prioritairement une science d'observation. Par définition, il n'y avait pas d'astronomie de l'invisible<sup>47</sup> et ce qui s'étend au-delà du regard n'était plus calculable. Mais la cosmologie a ignoré les préventions des philosophes. Rétrospectivement, Kant et Auguste Comte apparaissent timorés avec leurs préjugés qu'il faut bien qualifier d'anthropocentriques. À partir de 1838, grâce

à Friedrich Wilhelm Bessel, on commence à calculer l'éloignement des étoiles les plus proches.

L'inventeur du positivisme parlait des « saines études astronomiques »<sup>48</sup>. Autant dire, si l'on suit ce critère et ce jugement, que la cosmologie contemporaine est entrée dans la franche pathologie ! Alors que l'astronomie, science déductive, travaillait d'emblée sur des universaux mathématiques, la cosmologie procède inductivement à partir de singularités car la totalité des totalités (l'univers) est d'abord une singularité de singularités. Comme le note Jacques Merleau-Ponty : « La cosmologie, par sa nature même de science de la Totalité, ne peut être directement intéressée que par un petit nombre de faits d'observation, ceux justement auxquels il est possible d'attribuer à coup sûr une signification universelle ; or, on ne peut espérer que de tels faits soient très nombreux ni très facilement discernables ; pour s'assurer qu'ils ne sont pas seulement l'effet de configurations partielles ou passagères, il faut les observer sur des échelles énormes et les chercher extrêmement loin, aux limites du visible, ce qui fait que la cosmologie est toujours plus ou moins obligée de vivre au-dessus des moyens de l'astronomie »<sup>49</sup>. De fait, observe Jacques Merleau-Ponty un peu plus loin, « l'apport de l'astronomie à la cosmologie reste limité »<sup>50</sup>.

Dans l'espace de l'esprit, comme en géographie, les frontières finissent par être franchies et disparaître. Kant et Auguste Comte avaient à peine fixé les bornes de la connaissance que la science s'empressait de les détruire. Ce que Jacques Merleau-Ponty a nommé « l'un des commandements les plus rigoureux du catéchisme scientifique : « Tu ne parleras pas du Tout » »<sup>51</sup> n'a été respecté que par ceux qui, tels les eunuques devant l'interdit de l'adultère, n'avaient qu'une idée molle de la question.

Auguste Comte avait prédit que jamais l'homme ne connaîtrait la composition chimique du Soleil puisqu'il ne pourrait jamais s'en approcher. Peu de temps après (le temps n'est pas

seulement cruel pour la beauté), la spectroscopie était inventée. En identifiant (en 1859) certaines raies spectrales observées dans le Soleil avec des raies d'émission obtenues en laboratoire, Kirchhoff et Bunsen ouvrirent à l'astronomie une ère nouvelle. Kirchhoff découvrit non seulement que chaque élément chimique est signalé par les raies spectrales qu'il peut émettre – chaque raie pouvant être caractérisée comme une émission d'une couleur très pure, quasi monochromatique –, mais que tout élément peut absorber les raies qu'il est susceptible d'émettre. Un peu plus tard, en observant avec un spectroscopie quelques étoiles brillantes, le père Secchi identifia certains éléments chimiques fondamentaux, tels que l'hydrogène, le sodium et le calcium. Point n'est besoin d'aller jusqu'aux étoiles pour connaître leur composition chimique, puisque ce sont elles, par leur lumière, qui viennent jusqu'à nous. L'analyse spectrale déchiffre leurs messages. On comprend ainsi rétrospectivement la profondeur de l'analogie cartésienne : comme la raison, la lumière n'est pas seulement un phénomène à étudier, c'est elle qui nous permet d'étudier les phénomènes.

L'imprudence de Kant et de Comte aura été de considérer comme définitivement déterminés les domaines de l'observation et de l'expérience possible. Il est caractéristique qu'en dehors du plan incliné de Galilée, qui n'est pas vraiment un instrument, il n'y a pas une seule allusion aux instruments scientifiques dans la *Critique de la raison pure* : en somme, Kant rabat l'expérience sur l'expérience sensible, donc sur une faculté définitivement limitée. Quant à Auguste Comte, il croyait, nous l'avons vu, que la science du ciel ne pourrait jamais être autre chose qu'une affaire de regard et de calcul.

Pour ce qui concerne le caractère fini ou infini de l'univers, il n'est plus vrai que la question soit réservée à la méditation métaphysique – seulement nous avons de l'infini une conception autrement plus complexe que ne pouvaient en avoir Kant et

Comte. Le concept de limite des connaissances est un concept prudentiel, destiné à tenir la bride aux erreurs et illusions de l'esprit. Les développements des sciences depuis deux siècles ont montré combien peuvent être imprudentes certaines règles de prudence. La question même, jadis mythique par excellence, de la cosmogonie a fini par être englobée dans la cosmologie. Ce que nous comprenons sous le concept de modèle n'aurait été envisagé par Kant et par Comte que sous l'angle de la mythologie. Certes, bien des problèmes essentiels restent à résoudre – au premier rang desquels celui de la composition de l'univers<sup>52</sup>. Nous avons en outre encore affaire à une pluralité de modèles entre lesquels l'avenir de la science aura à choisir. Mais la cosmologie aujourd'hui pourrait faire sienne la devise de David Hilbert : « En mathématiques, il n'y a pas d'*ignorabimus*<sup>53</sup> ». Même l'horizon qui nous interdit de porter nos regards au-delà des 13,7 milliards d'années du Big-bang<sup>54</sup> n'est pas en dehors du champ de la connaissance. En cosmologie, en effet, il n'y a ni limites ni bornes comme l'avaient cru Emmanuel Kant et Auguste Comte, mais horizons. À la différence des limites et des bornes, les horizons ne dépendent pas de nos capacités de connaissance, mais de la structure objective de l'univers et de la position particulière que nous y occupons.



# Chapitre 16

## Un discours sur l'origine est-il possible ?

Etienne Klein

« Nous nous sommes détachés d'une origine qui ne nous lâche pas.  
Il faut rater, s'y remettre, et rater mieux. » Samuel Beckett.

L'idée de ce colloque est d'accompagner par un effort de réflexion philosophique la présentation des résultats et des enjeux les plus récents de la cosmologie actuelle. Cet effort me semble aujourd'hui s'imposer à nous du fait de l'actualité même de la cosmologie : ayant eu la chance de participer récemment à un colloque international sur l'énergie noire et la matière noire, j'ai ressenti l'impression d'une assez grande confusion épistémologique au sein de ce champ très actif de la science contemporaine. Même si une partie de cette impression de confusion n'est sans doute que la mesure de mes incompétences ou de mes incompréhensions, j'ai observé au sein de la communauté des chercheurs une vive tension dialectique qui embrouillent les discours : certains se livrent à une sorte de débauche ontologique, multipliant les prédictions d'entités *ad hoc* qui permettraient de résoudre tel ou tel problème, tandis que d'autres s'adonnent tout aussi intensément à une ivresse réformatrice, proposant de changer les lois de la physique afin de ne pas avoir à accorder de place à des êtres fantomatiques au sein du mobilier ontologique de la physique.

Mais que veut dire réflexion « philosophique » en l'occurrence ? Sans entrer dans la discussion toujours compliquée des rapports entre science et philosophie, on peut répondre simplement en suivant la proposition de Jacques Merleau-Ponty selon laquelle il y a deux manières différentes d'aborder philosophiquement l'étude de la cosmologie. La première consiste à s'interroger sur les caractères propres de cette science, ses méthodes, ses relations avec son objet, l'univers ou les multivers, sa place parmi les autres sciences : on se demandera alors quelle science est la cosmologie, si elle ne rencontre pas des problèmes spécifiques qu'il lui est difficile de traiter complètement selon les méthodes des autres sciences, autres sciences dont l'application lui est cependant indispensable. La seconde approche philosophique de la cosmologie consiste à s'intéresser non plus au statut épistémologique de la cosmologie, mais directement aux résultats acquis par elle, et à les replacer dans un cadre plus général.

Je voudrais dire deux mots de ces approches, surtout de la première. Qu'est-ce que la cosmologie ? Le mot « cosmologie » a pris aujourd'hui un sens plus précis et plus restreint que dans le vocabulaire traditionnel de la philosophie : on peut désormais caractériser la cosmologie, sans équivoque ni excessive restriction, comme la science des phénomènes naturels pris dans leur totalité (ou plutôt dans leur « globalité », comme l'a fait remarquer hier Marc Lachièze-Rey). Mais science de la totalité ou de la globalité ne veut pas dire science de tout ce qui existe (ce qui serait une entreprise à la fois chimérique et insignifiante), mais science de ce qui, dans les phénomènes naturels, les rassemble et les ordonne en une totalité. Cette idée de totalité est essentielle à la définition de la cosmologie car c'est elle qui permet de la distinguer des disciplines auxquelles elle est le plus étroitement associée, à savoir l'astronomie, l'astrophysique et la physique des particules (qui est aussi une physique des « hautes énergies »).

L'autre idée essentielle pour la définition de la cosmologie est celle d'existence physique ou naturelle. Pour le philosophe ou pour le logicien, le mot « univers » peut désigner quelque chose de plus large, comprenant tout ce qui peut faire l'objet d'un discours conforme aux lois de la logique, comme les nombres, les êtres imaginaires, les lois civiles, les phénomènes de conscience, toutes choses qui ont certes des supports physiques, mais qui n'« existent » pas au même sens que ces supports. La cosmologie ne s'occupe donc que des choses qui ont une existence physique ou matérielle (ou de celles dont on pense qu'elles pourraient en avoir une, telles l'énergie noire et la matière noire), ce qui lui impose tout naturellement de s'appuyer sur les sciences physiques. Mais la notion de totalité, qui lui est essentielle, est beaucoup moins familière à ces sciences, non seulement parce que la spécialisation y est de règle, mais aussi parce que la logique même de leurs recherches tend à les éloigner d'une perspective totalisante.

On pourrait donc dire, d'une façon qui n'est paradoxale qu'en apparence, que la cosmologie est une discipline à la fois *globalisante* et *incomplète* : la « théorie du Tout » qu'elle vise ne saurait être considérée comme une théorie de tout.

Parmi toutes les questions qu'on peut lui adresser, il en est une qui, pour le coup, est proprement philosophique : c'est celle de l'invariance des lois physique, question qui échappe en grande partie aux méthodes de la recherche physico-mathématique. En effet, les inférences qui conduisent les cosmologues à leur description de l'univers primordial reposent évidemment sur l'universalité et la permanence des lois, supposées identiques en tout lieu et en tout temps, sinon la cosmologie serait un simple jeu. Mais puisque l'univers est en évolution, comment faut-il comprendre cette invariance ? Cette situation ne s'accorde guère avec la notion d'un univers qui serait fermé sur lui-même au sens où il « produirait » de lui-même les lois mêmes qui le régissent. Elle

encourage au contraire, par l'opposition entre la temporalité essentielle de l'univers et la permanence non moins essentielle de ses lois, l'idée que les lois ont un mode d'existence tout à fait différent de celui des êtres du monde naturel dont elles permettent de comprendre l'histoire. Est-ce parce qu'elles sont inséparables de la « pensée » ? Mais quelle pensée ? Celle de l'homme, petite partie de l'univers ? Mais alors, comment pourrait-elle s'égaliser à la structure du tout ? Ou bien l'univers est-il comme le voulait Spinoza, la Substance ou Dieu, conçu sous l'attribut de l'étendue (*extensio*) et, en tant qu'il obéit à l'ordre intelligible des lois éternelles, la Substance ou Dieu conçu sous l'attribut de l'intellect (*cogitatio*) ? Ou bien faut-il comprendre l'existence des formes mathématiques qui expriment les lois physiques comme tout à fait indépendante de l'univers naturel qui n'en serait, comme le pensait Platon, qu'une image mobile et imparfaite, irrémédiablement privée de l'Être et vouée au Devenir ? Ou bien faut-il concevoir, comme Leibniz, que le système des lois définit un ensemble d'univers possibles, logiquement cohérents, parmi lesquels le nôtre est un cas particulier, choisi en raison de ses qualités exceptionnelles ou pas choisi du tout (c'est toute l'affaire du « principe anthropique ») ?

Ce que je trouve intéressant dans ce renvoi aux systèmes métaphysiques du passé – et en apparence dépassés –, c'est qu'il ne cesse de faire écho aux discussions actuelles autour du lien entre univers et lois physiques, autour du temps et du devenir (la « flèche du temps »), de l'unicité ou de la pluralité de l'univers... Les progrès de la cosmologie sont aujourd'hui si spectaculaires qu'ils pourraient donner l'impression de dissiper, une bonne fois pour toutes, les horizons philosophiques qui les cernent, mais force est de constater qu'en réalité, ces horizons se reforment ailleurs : ils ne sont que déplacés ou reconfigurés, sans jamais s'annuler.

Parmi les autres questions philosophiques qu'on peut adresser à la cosmologie contemporaine, il y a également (et bien sûr !) la

question de l'origine. C'est à elle que je voudrais adresser la suite de ma réflexion.

On rapporte que le pape Jean-Paul II, recevant Stephen Hawking, lui aurait déclaré : « Nous sommes bien d'accord : ce qu'il y a après le Big-bang c'est pour vous, et ce qu'il y a avant, c'est pour nous ». Je ne sais pas si cette anecdote est vraie ou fausse, mais elle a le mérite d'illustrer le fait que la question de l'origine est souvent pensée et présentée comme une zone de concurrence, et même de conflit ouvert, entre la science et la religion, qui seraient là en lutte pour la préséance, ou bien une zone de brouillard entre la physique et la métaphysique qui viendraient là entremêler leurs compétences et leurs principes. Mon propos consistera à essayer de montrer que ce conflit n'a pas de raison d'être, non pas parce que la science et la religion seraient d'accord entre elles, ni parce que la religion aurait raison contre la science ou la science contre la religion, mais tout simplement parce que la question de l'origine, lorsqu'on prend ce mot au sérieux, c'est-à-dire dans son sens radical, est une question sans doute mal posée, peut-être un « faux problème » au sens que Wittgenstein donne à cette expression, et qu'en conséquence, personne n'y répond jamais vraiment.

Les astrophysiciens, aidés par les physiciens, sont parvenus à reconstituer une partie du grand récit de l'univers, les 13,7 derniers milliards d'années de son évolution. Ce récit est original, inédit, en rupture avec toutes les cosmogonies traditionnelles. Personne, avant les scientifiques, n'avait pu le raconter, ce qui prouve qu'en l'occurrence la démarche scientifique a quelque chose de vraiment spécifique, d'authentiquement révolutionnaire.

Mais dans le prolongement de cette narration à « rebrousse-temps », on se persuade parfois que les sciences seront bientôt capables de saisir l'origine même de l'univers, c'est-à-dire la source dynamique de la totalité de ce qui existe empiriquement.

Et l'on ne concède plus que du bout des lèvres que cette question puisse conserver quelque chose de métaphysique.

Pourtant, la prudence devrait ici s'imposer, pour au moins une raison qui tient au fait que, lorsqu'on écoute les physiciens dissertant sur l'origine de telle ou telle chose, on découvre qu'il n'est jamais question dans leur bouche de genèse proprement dite. Ils parlent surtout – et en fait seulement – de généalogies, de métamorphoses, de structurations de constituants élémentaires en systèmes plus complexes. Par exemple, ils expliquent que les atomes sont fils des étoiles, qui sont elles-mêmes filles de nuages de poussières, dont la matière provient quant à elle des phases les plus chaudes et les plus anciennes de l'univers... En d'autres termes, ils n'évoquent jamais que des transitions d'un état à un autre, des processus permettant de comprendre l'apparition d'un nouvel objet, le commencement de son histoire. Dès lors, toute origine entraperçue n'est jamais qu'une étape, qu'une origine secondaire, qu'un commencement précédé d'un autre commencement, de sorte que le statut des origines que nous sommes capables d'envisager doit être systématiquement relativisé : nous n'identifions des sources qu'à la condition d'y associer, en amont d'elles-mêmes, les rochers d'où elles jaillissent.

Ainsi, à rebours du sens des mots, les origines dont nous parlons sont plutôt des *prolongements*, voire des *achèvements*.

Cette apparente contradiction m'incite à proposer quelques commentaires que je qualifierai de « philosophiques » (même s'ils sembleront naïfs ou évidents aux philosophes professionnels). Ces commentaires s'imposent à mon avis par le fait que, ainsi que l'avait remarqué Werner Heisenberg, la physique contemporaine devient de plus en plus une épistémologie, au sens où il devient essentiel pour elle, si elle veut demeurer intelligible, de préciser les notions et les concepts dont elle se sert. Cela vaut bien sûr pour la cosmologie, mais pas seulement : la physique des particules me semble concernée tout autant. Alors,

avant de prétendre s'attaquer au problème de l'origine, il faut donc d'abord questionner la question elle-même et c'est ce que je voudrais tenter de faire devant vous.

## **1. La question de l'origine est « irritante »**

Elle est irritante parce que le langage est trop pauvre pour la saisir vraiment et le silence trop difficile pour que nous nous abstenions d'en parler quand même (on pourrait même dire que le bavardage est la maladie de nos discours sur l'origine...). Le langage est non seulement trop pauvre, mais aussi impuissant, car vient toujours un moment où il rencontre sa propre butée. Par exemple, la formule des contes de fées, le fameux « il était une fois », masque toujours un abus de langage, car elle nomme ce qu'elle n'explique jamais : subsiste toujours un flottement mystérieux autour de ce « il » dont on ne sait rien mais dont on postule qu'il devait être là au départ pour que l'histoire puisse commencer. L'origine, le premier « il y a », semble donc être ce qu'aucune proposition vraie ne peut dire, elle est comme le point aveugle de nos discours et de nos représentations.

## **2. La question de l'origine est à la fois inévitable et, sinon insoluble, du moins très éloignée de sa solution**

La question de l'origine est inévitable, pour deux raisons. D'abord, parce que c'est sur elle que débouche tout constat d'historicité : dès lors que nous constatons que l'univers n'est ni une affaire instantanée ni une entité stationnaire, qu'il a eu une histoire et continue d'en avoir une, nous nous posons inmanquablement la question du commencement de cette histoire, à partir d'un réflexe qui est soit du type « les meilleures choses ont un début » (de la même façon qu'on dit que les meilleures choses ont une fin), soit du type « il faut bien que genèse se passe ».

Car la pensée, y compris la pensée scientifique et peut-être même *surtout* elle, cherche toujours en arrière d'elle-même les conditions explicatives de son présent, en vertu de ce que Bergson appelait le « mouvement rétrograde du vrai ». La pensée intellectuelle est régressive par prédilection, elle se retourne derrière elle-même pour se justifier tout en puisant dans le présent les justifications qu'elle projette ensuite dans le passé (voyez par exemple les climatologues, qui appuient la fiabilité de leurs prédictions climatiques sur la capacité de leurs codes numériques à « rétro-dire » les climats du passé qui, eux, sont expérimentalement connaissables grâce notamment à l'analyse isotopique de l'air contenu dans les carottes de glace collectées aux Pôles). D'une certaine manière, l'univers innove et hérite en même temps, nous le savons, mais nous ne parvenons à penser sa capacité à innover et à se structurer qu'en termes d'héritage : la prédiction du futur s'appuie exclusivement sur la connaissance du passé, du passé le plus lointain possible. Et nous pensons tous, je crois, que si nous connaissions le vrai début de l'univers, nous connaîtrions aussi sa vraie fin. Pour qui s'intéresse à l'avenir, la question de l'origine est donc bien une question inévitable, dès lors que par une intrication de déterminisme et de causalité, la connaissance de la fin apparaît fixée par celle du début, et même déjà contenue en elle.

Mais la question de l'origine est également une question presque *impossible*, car quand on la prend vraiment au sérieux, quand on l'explore de façon radicale, quand on se pose vraiment la question du passage du néant à l'être, on bute systématiquement sur des apories qui sont peut-être indépassables : il arrive toujours un moment où l'on doit envisager une entité, une chose, dont on puisse dire : « cette chose n'est rien et doit devenir quelque chose », et le moteur de cette transition qui transforme un rien en quelque chose qui n'est pas rien est toujours

insaisissable, du moins tant que l'on ne s'appuie sur un principe métaphysique qui est, par nature, discutable.

Il n'est donc pas exclu qu'il y ait une authentique inanité du problème de l'origine, de l'origine radicale, de l'origine « originaire ». L'origine est une thématique qui nous rend très bavards, mais elle est peut-être une notion téréatologique, un vrai « faux problème » qui apparaît tel que dès qu'on se met à « secouer le langage » ou à « secouer la science ». Car toute origine entraperçue, décrite, comprise, n'est jamais qu'une étape, qu'une origine secondaire, qu'un commencement qui n'est jamais un véritable commencement puisqu'il est toujours précédé d'un autre commencement. *Par une sorte d'ironie, la question du début semble être une question sans fin* : on attend de découvrir l'origine comme une perle trouvée dans la mer, mais l'ayant trouvée, on continuera la recherche plus loin, dans des eaux plus profondes.

### **3. Le lien entre une chose et son origine**

En général, on parle de l'origine d'une chose comme si elle faisait partie de cette chose : par exemple, l'origine de l'univers est décrite comme appartenant à l'univers, du moins à son histoire, elle fait partie de son début, elle se confond peut-être même avec son début. Mais, chose troublante, s'interroger sur le fondement des choses, s'enquérir de leur origine ontologique, c'est considérer que ces choses n'ont pas en elles-mêmes leur propre fondement, que le principe de leur existence ne se trouve pas en elle, et qu'il y a lieu, par conséquent, de chercher leur origine en dehors d'elles. « La cause du monde est à l'extérieur du monde », nous disait Christian Godin citant Kant. Mais si l'origine des choses est hors des choses, cela revient *ipso facto* à considérer ces choses comme contingentes, à poser qu'elles auraient pu ne pas être, ce qui oblique à poser ensuite la question du lien dynamique entre l'origine d'une chose et la chose elle-même : par quel processus l'origine d'une chose devient-elle cette chose ?

Prenons l'exemple, largement débattu aujourd'hui, des liens entre la physique et la biologie : les lois physiques contiennent-elles les lois biologiques, mais de façon implicite et invisible quand on en reste au seul champ de la physique, ou bien les lois biologiques sont-elles advenues de surcroît, en marge des lois physiques et indépendamment d'elles ? En d'autres termes, quel est le lien de nécessité entre le monde physique et le monde biologique ? Procèdent-ils d'une législation commune mais empiriquement distincte ou relèvent-ils de juridictions séparées ? Cette question exprime à sa façon le problème de l'*émergence*, dont j'observe au passage que son évocation conserve l'ambiguïté que je viens de décrire : dans certains discours, l'émergence correspond à l'apparition d'entités ou de propriétés radicalement neuves, absolument inexistantes au niveau ontologique sous-jacent ; dans d'autres, elle n'est que l'actualisation de propriétés déjà existantes au niveau sous-jacent, mais qui y étaient en quelque sorte « inactives » ou dynamiquement discrètes.

#### **4. L'ambiguïté de la notion d'origine**

Le mot « origine », pris dans son sens radical, peut revêtir deux significations (que les philosophes distinguent mais que les scientifiques, en général, confondent). Il peut désigner d'abord la réalité « première » (la réalité qui n'a pas elle-même d'origine ?) qui est la source dynamique de la totalité de ce qui existe empiriquement : l'origine est alors la cause première au-delà de laquelle il ne serait pas possible de remonter, c'est une origine chronologiquement première, pratiquement prééminente, et absolument créatrice. Sous tous ces aspects, cette origine-là est distincte de tout ce qu'elle a produit et précédé, elle est une réalité autonome, une réalité absolue que seules les métaphysiques prétendent pouvoir cerner.

Mais il y a une seconde signification de l'expression « origine radicale » : l'origine peut être conçue non pas comme cause effi-

cause et chronologiquement première, mais comme fondement logiquement premier de tout ce qui existe cette ; ce fondement peut être un être particulier, le vide quantique par exemple, ou bien un « concentré de rien », un concentré de rien qui aurait la potentialité de s'excéder, de se lancer hors de soi pour devenir quelque chose, c'est-à-dire autre chose qu'un concentré de rien...

Ces deux termes, « cause première » et « fondement logiquement premier », permettent de préciser la relation qu'entretient l'origine de l'univers avec l'univers dont elle est l'origine : comme cause première, l'origine est une transcendance effectivement distincte de l'univers, et, comme fondement logiquement premier, comme fondement ontologique, elle est un être immanent et non pas transcendant, un être immanent qui rend compte des autres existences empiriques. Il existe donc bien deux points de vue : un point de vue chronologique et transcendant, et un point de vue logique et immanent. Souvent, on ne retient qu'un seul terme, ce qui conduit à confondre la notion de cause première efficace avec celle de fondement absolu.

Par exemple, la question « qu'est-ce que l'origine du temps ? » peut s'entendre de deux façons. Ou bien on se pose la question de « l'instant zéro », de la dynamique qui a fait que cet instant a été le premier terme d'une chronologie ultérieure : on s'intéressera alors au premier terme du cours du temps, en postulant qu'antérieurement à ce premier terme le néant seul était donné, ou bien, comme dans certaines métaphysiques d'inspiration judéo-chrétienne, on évoquera un être transcendant qui serait tout à la fois la cause du temps et sa propre cause, ou bien on cherchera une origine du temps qui ne soit pas déjà un temps mais qui ne soit pas non plus le néant *stricto sensu*. Ou bien, et c'est là la seconde façon d'entendre la question de l'origine du temps, on se posera la question de l'origine ontologique de l'espace-temps : s'il n'est plus un concept primitif, de quoi émerge-t-il ? Pourrait-on construire une « thermodynamique » de

l'espace-temps qui le ferait apparaître comme la manifestation, à une certaine échelle, d'événements qu'on pourrait décrire sans faire référence ni à l'espace ni au temps ? C'est notamment la piste qu'a suivie Roger Penrose avec sa théorie des *twisters*, ou bien, d'une autre façon, par Abhay Ashtekar, Carlo Rovelli et Lee Smolin, les trois fondateurs de la théorie de la gravité quantique à boucles<sup>1</sup>, qui pensent qu'une théorie physique digne de ce nom doit pouvoir être formulée sans référence aucune à un arrière-fond préexistant, à un cadre spatio-temporel donné *a priori*.

Il n'est pas question ici d'entrer davantage dans les détails, mais il me semble important de garder en tête ces deux façons distinctes d'entendre la question de l'origine. La question « d'où vient que le temps passe ? » et la question « d'où vient le temps ? » sont deux questions vraiment différentes (aussi différentes que « d'où viennent les étincelles ? » et « comment une étincelle se continue-t-elle en feu ? ») même s'il est possible – et même probable – que si nous connaissions la bonne réponse à l'une d'entre elle nous serions mieux armés pour répondre à l'autre.

Mais, point capital, que le commencement soit conçu comme premier terme immanent d'une série ou comme entité transcendante qui serait cause de cette série, on est dans tous les cas entraînés dans la recherche d'un commencement du commencement, puisqu'on doit justifier soit le premier terme de la série, soit le privilège et la fécondité de l'entité transcendante qui l'engendre.

## **5. Difficulté à saisir le changement en général, et le passage du néant à l'être en particulier**

La notion de changement a beau sembler relever de l'évidence, elle constitue pourtant un authentique paradoxe. Car de deux choses l'une : ou bien l'être ou l'objet dont on dit qu'il change demeure un et le même, et alors il n'a pas changé ; ou bien il a vraiment changé, et alors on ne peut plus dire qu'il est un et le

même. Il semble qu'il y ait une incompatibilité entre l'identité et le changement.

Commençons par la première possibilité : admettons le principe de l'identité « de soi à soi » : si un être ou un objet particulier, disons  $x$ , est nécessairement identique à lui-même, il ne peut en toute rigueur changer, puisqu'alors il cesserait d'être  $x$ . Cette manière de penser conduit à admettre qu'il n'y a pas de sens à parler de changement : celui-ci est au mieux une illusion, une apparence qui se jouerait de nous, au pire une absurdité.

Voyons maintenant la seconde possibilité (l'objet ou l'être a vraiment changé, et alors il n'est plus un et le même), elle semble naturelle dès lors qu'on prend au sérieux l'idée même de changement : changer c'est, par définition, devenir différent et, par conséquent, ne plus être identique à soi-même ; si  $x$  change, c'est qu'il cesse d'être  $x$ . Il n'y aurait pas de sens à parler d'êtres ou d'objets particuliers qui seraient *persistants* dès lors qu'ils sont soumis au changement.

Dilemme : soit nous acceptons le principe d'identité de soi à soi, et nous devons alors refuser l'idée de changement ; soit nous acceptons le changement, et nous devons alors refuser le principe d'identité de soi à soi.

Mais, on a fini par comprendre que changer, ce n'est pas être remplacé, ce n'est pas cesser d'être soi, c'est être soi *autrement*. Cette conviction foncière d'une identité qui perdure dans et malgré le changement se nourrit de notre expérience quotidienne, et constitue la trame de notre rapport ordinaire au devenir : cette bicyclette rouge, c'est celle qui, autrefois, était bleue ; c'est la même, qui a été repeinte en rouge. Nous parvenons donc à comprendre le changement, mais à la condition de considérer que le sujet du verbe changer, cela qui change, c'est ce qui ne change pas au cours du changement.

Fascinante conclusion, au demeurant : une chose  $x$  ne peut changer que si, en elle, « quelque chose » ne change pas, et c'est

parce que ce « quelque chose » ne change pas qu'on peut dire de  $x$  qu'il change...

## **6. La question de l'origine serait-elle une affaire de langage, et seulement de langage ?**

J'ai été très impressionné, il y a quelques semaines, par la lecture d'un livre récent de François Jullien, intitulé *Les Transformations silencieuses* (Grasset, 2009). Il se pose la question de savoir pourquoi, en Chine, la question de l'origine s'efface : « Comment s'étonner, se demande-t-il, que les Chinois ne se soient pas préoccupés du Début et de la Fin des choses ? Ni du début premier ni de la fin dernière ? Pourquoi ne se sont-ils pas passionnés pour l'énigme de la Création et pourquoi n'ont-ils jamais dramatisé l'Apocalypse ? » (p. 91).

Sa réponse est que cette différence tient toute entière dans la différence de langage. Le nôtre est un langage ontologique, il ne désigne que des « étants » et se trouve par construction incapable de décrire comment ces étants sont advenus à l'existence, de sorte que la question de l'origine devient à la fois inévitable et impossible, tandis que la langue chinoise est une langue qui ne décrit que des procès, et non pas de choses, de sorte que pour elle la question de l'origine est pratiquement intraduisible. François Jullien précise : « Nous avons du mal à parler des transitions continues. La neige qui fond en tombant sur le sol est-elle encore de la neige ou déjà de l'eau ? Cette série d'impuissances ou de difficultés de notre pensée est sans doute une conséquence de choix premiers qu'elle a opérés : à savoir qu'elle est avant tout une pensée de l'Être, une ontologie, une pensée de l'identité et de la substance. On peut lui opposer la pensée chinoise, fondée, elle, sur la transition, la polarité entre les contraires qui coexistent sans cesse, c'est-à-dire sur le procès perpétuel des choses. »

Autrement dit, notre parti pris de l'Être nous empêcherait de penser la transition : « La *transition* fait littéralement trou dans

la pensée européenne, la réduisant au silence ». La question de l'origine, qui est une affaire de transition entre l'absence d'une chose et la présence de cette chose, serait donc une question que nous ne pouvons pas ne pas poser en même temps que nous n'avons pas les armes conceptuelles pour la saisir. Car nous ne parvenons pas à sortir de l'articulation des étants. Notre philosophie est comme « pliée dans son idiome » et ne peut que le réfléchir. Du coup, la notion d'origine absolue nous est réfractaire bien qu'elle ne cesse pas de nous provoquer.

Ces remarques nous incitent à regarder avec le plus grand intérêt les modèles dits « de pré-Big-bang » qui tentent aujourd'hui de décrire la phase (hypothétique) qui aurait précédé l'expansion de l'univers, c'est-à-dire celle antérieure à ce que nous appelons le Big-bang. Différentes versions de ces modèles ont été proposées à partir des principes de la théorie des cordes, notamment par Gabriele Veneziano. L'idée sur laquelle ils s'appuient est qu'*avant* le Big-bang l'univers aurait connu une évolution symétrique de celle qu'il a eue *après* le Big-bang : au cours de cette phase de pré-Big-bang, la densité de matière, au lieu de décroître comme dans l'univers actuel, devient de plus en plus élevée, la température augmente, tandis que les dimensions de l'univers diminuent, jusqu'à ce que la densité d'énergie et la température atteignent les valeurs maximales permises par la théorie des cordes. À ce moment-là, l'univers rebondit en quelque sorte sur lui-même : au lieu de se contracter, il se dilate ; toutes les grandeurs qui augmentaient se mettent à décroître, et *vice versa*. Ce phénomène de renversement, ou de rebond, c'est ce que nous appelons le Big-bang. L'univers antérieur au Big-bang peut être vu comme une sorte d'image « miroir » de l'univers postérieur au Big-bang, qui lui-même n'est plus qu'une transition entre deux phases distinctes de l'univers.

La cosmologie serait-elle, comme les réacteurs nucléaires, en voie de « sinisation » ?



# Chapitre 17

## La cosmologie comme science spéculative ou comme théorie philosophique scientifique

Jean-Jacques Szczéciniaż

Problème : en quoi la cosmologie est-elle une science ?

La seule question que nous poserons et qui regroupe bien sûr un grand nombre d'autres dans une unité synthétique est la suivante : dès lors que l'on assume le fait que la cosmologie est une science ou une réflexion théorique qui porte sur le tout ou l'Univers à vocation scientifique et qui par ailleurs rencontre les réflexions et tous les paradoxes de la pensée philosophique liés à sa position théorique, dès lors que l'on assume cette situation, peut-on considérer qu'en travaillant dans ce cadre (réflexion scientifique sur le tout, paradoxes philosophiques), nous pouvons non pas résoudre ou dissoudre les paradoxes, mais au contraire les transformer en principes de pensée et de connaissance ?

La philosophie dans tous ses développements systématiques rencontre la question cosmologique qu'elle appelle comme telle, comme question du rapport au tout. Ce qui implique que la cosmologie soit indissociablement spéculative, dialectique, théorique et expérimentale, physique et pratique. À des titres divers, de façon plus formelle, n'est-ce pas de cette façon qu'une science

de l'Univers digne de ce nom peut exister ? Telle est la ligne de pensée que nous voudrions tenir devant vous, jusqu'à la fin de cet article.

La réflexion se développera suivant deux mouvements d'analyse : l'une, épistémologique, interrogera les difficultés liées à la science cosmologique comme science, l'autre, plus directement ontologique, le problème de l'objet Univers et de son apparition.

Nous avons trouvé un travail de synthèse très important que nous utilisons à plein : la monographie de G. F. Ellis\* .

La cosmologie est l'étude des structures de l'Univers à grande échelle, où univers signifie tout ce qui existe au sens physique du terme. Il faut le distinguer de l'univers observable, à savoir cette partie de l'univers contenant la matière accessible à nos observations astronomiques. La cosmologie considère le vaste domaine des galaxies, des amas de galaxies, les objets quasi-stellaires observables dans le ciel grâce au télescope, leur nature, distribution, origines et relations à leur grand environnement. La cosmologie observationnelle vise à déterminer la géométrie à grande échelle de l'univers observable, la cosmologie physique est l'étude des interactions durant l'expansion de l'univers dans la phase de Big-bang primordial et la cosmologie astrophysique est l'étude des développements plus tardifs des structures à grande échelle comme les galaxies et les amas de galaxies.

## I. le point de vue épistémologique

### I.1 Première considération

Peut-il y avoir une science qui soit science d'un seul objet ?

L'univers ne peut être soumis à une expérimentation physique. Nous ne pouvons pas reparcourir l'univers. Les lois physiques

---

\* G.F.R. Ellis, «Issues in Philosophy of Cosmology», *Handbook in Philosophy of Physics*, vol. 2, J. Butterfield and J. Earman, Elsevier, 2007, pp. 1183-1285 cf. site internet: <http://arxiv.org/abs/astro-ph/0602280>

s'appliquent à une classe de tels objets car nous ne pouvons tester de telles lois sinon en vérifiant leur consistance avec cet objet (l'univers observé). Le concept de loi devient douteux s'il y a seulement un objet auquel il s'applique.

L'idée de loi s'applique à une classe d'objets qui ont tous un comportement invariant sous-jacent malgré la variation des propriétés dans des conditions spécifiques, la variation résultant de conditions initiales qui varient elles-mêmes pour les systèmes dans lesquels ces lois agissent (Ellis).

La connaissance est testée par des expériences physiques pour lesquelles les conditions initiales pour un ensemble d'objets du même genre sont examinées.

Les lois de la physique s'appliquent localement à des objets dans le cosmos comme un tout quand elles sont appliquées partout, avec des conditions au bord adaptées imposées, comme dans le cas des modèles Robertson-Walker via l'équation de Friedmann par exemple.

Nous ne pouvons pas établir des lois effectives de haut niveau qui s'appliquent à tous les univers et déterminent leur structure comme nous le faisons pour les autres niveaux de la hiérarchie de complexité. Tout ce que nous pouvons faire à ce niveau est d'observer et d'analyser l'unique objet qui existe. Comme l'écrit Mac Crea : « Quand nous parlons des autres solutions des équations de la structure stellaire à côté de celles qui sont l'objet actuel de notre intérêt comme représentant des systèmes qui pourraient exister, nous voulons dire qu'ils existeraient dans l'univers tel que nous le connaissons. Clairement, aucune certitude n'est possible vis-à-vis de l'univers lui-même. »

Puisque la restriction d'une solution globale à un voisinage local est aussi une solution, nous avons des millions de petits univers sur lesquels tester les lois qui contrôlent la nature locale de l'univers. En voyant que ces mini-univers sont essentiellement les mêmes partout, nous voyons que les lois de la physique

sont les mêmes partout dans l'univers, et nous testons l'homogénéité de celui-ci.

Mais cette caractéristique, c'est ce qu'il faut expliquer par une loi de l'univers. Vérifier l'homogénéité n'explique pas pourquoi il en est ainsi.

Cela provient plutôt des conditions initiales spécifiques qui seraient dues à d'hypothétiques lois de l'univers applicables au tout plutôt qu'aux parties. Si l'on suit cette première considération de G. Ellis, on peut voir que l'homogénéité joue un rôle à la fois heuristique, et de principe de fonctionnement et de condition d'exercice de la théorie, mais que, par ailleurs, c'est une notion qui s'est imposée ontologiquement.

## **1.2 Seconde considération épistémologique**

Le concept de probabilité est problématique dans le contexte de l'existence d'un seul objet.

Un concept de probabilité est invoqué dans l'argumentation moderne en cosmologie. Par exemple un réglage fin (*fine tuning*) est fondé sur l'usage du concept de probabilité. On rencontre des problèmes dans l'application de l'idée de probabilité à la cosmologie comme un tout, il n'est pas clair de l'appliquer à un seul objet qui ne peut être comparé à un autre objet existant.

Cela suppose à la fois que les choses auraient pu être différentes et que nous pouvons assigner des probabilités à l'ensemble des possibilités non réalisées de manière invariante : il faut expliquer en quel sens elles auraient pu être différentes avec des probabilités assignées aux différentes possibilités théoriques.

Si l'on use de probabilités bayésiennes, qui pourraient être appliquées à un seul objet, le résultat dépend de notre connaissance antérieure qui, dans ce cas, peut varier en changeant nos suppositions initiales préphysiques.

Cette problématique est issue d'une thématique ancienne : on retrouve son équivalent dans le trilemme du Dominateur qui a

partagé les Écoles grecques. L'un des énoncés porte sur le caractère nécessaire du passé. Pour Aristote on ne délibère pas sur le passé (Vuillemin 1984).

La fonction d'onde ne donne pas une unique prédiction pour un seul univers.

En cosmologie quantique (Elbaz 1992) le problème est de déterminer la fonction d'onde d'univers  $\psi(h_{ij}(x), \varphi(x), \Sigma)$  décrivant un univers clos dans lequel une métrique à trois dimensions  $h_{ij}(x)$  et un champ de matière  $\varphi(x)$  sont définies sur une surface  $\Sigma$ . À partir d'une théorie dynamique de la gravitation, issue par exemple de la théorie de la Relativité Générale, on dérive une formulation hamiltonienne de la théorie d'Einstein et on quantifie les opérateurs associés. On dispose alors d'une équation d'onde analogue à l'équation de Schrödinger : l'équation de Wheeler De Witt (WDW). cette équation possède de nombreuses solutions possibles et, pour qu'elle ait un pouvoir prédictif, il faut lui adjoindre des conditions initiales ou des conditions aux limites conduisant à une solution unique.

À cause de la situation de l'objet de la cosmologie, science qui porte sur un seul objet, et du fait que cet objet soit le tout, (et par ailleurs pour un sens commun, croit-on, relativement élaboré), les hypothèses de la cosmologie quantique rencontrent elles aussi une situation qui est celle des antinomies kantienne (la première qui porte sur le commencement dans le temps et d'une limitation dans l'espace) mais de façon très élaborée.

Reprenons la citation de Linde que Novello utilise dans sa propre présentation. « L'univers comme un Tout ne dépend pas du temps parce que le concept d'un tel changement suppose l'existence de quelque référence immobile qui ne fait pas partie de l'univers et par rapport à laquelle ce dernier évolue. Si par « univers » on entend tout, alors il ne reste pas d'observateur extérieur pour lequel l'univers pourrait se développer par rapport à ses

horloges propres ». Il n'y a pas de référence externe à l'univers ce qui contredirait la notion même d'univers conçu comme le tout.

Kant explique, nous y revenons plus bas, qu'un commencement dans le temps suppose un temps vide dans lequel, avant que ça commence, il n'y aurait rien et que, en conséquence, il n'y a donc aucune raison pour que cela commence. Ce qui signifie qu'un temps vide en dehors de l'univers est dénué de signification.

Linde poursuit son argument.

« En fait nous ne demandons pas pourquoi l'univers se développe, nous demandons plutôt pourquoi nous percevons qu'il se développe. On a donc séparé l'univers en deux parties : un observateur macroscopique muni d'horloge et le reste. Ce reste peut parfaitement évoluer par rapport au temps (en référence aux horloges de l'observateur) en dépit du fait que la fonction d'onde de l'univers dans son ensemble est indépendante du temps.

En d'autres termes, on arrive à notre image coutumière d'un monde qui évolue avec le temps seulement après que l'univers a été divisé en deux parties macroscopiques, chacune d'elles évoluant de manière semi-classique. La situation qui en découle rappelle l'effet tunnel à travers une barrière : la fonction d'onde est définie à l'intérieur de la barrière mais elle produit une amplitude de probabilité non nulle de trouver une particule se propageant en temps réel seulement à l'extérieur de la barrière, où un mouvement classique est permis.

Ainsi, du fait même de son existence, un observateur réduit en quelque sorte la fonction d'onde de l'univers à la partie qui décrit le monde observable par lui. C'est exactement le point de vue de l'École de Copenhague pour l'interprétation de la mécanique quantique : l'observateur n'est pas seulement un spectateur passif mais quelque chose de plus : un participant à la création de l'univers » (Linde, *Particles Physics and Inflationary Cosmology*, Harwood Academic Press, 1990).

Le fait que la fonction d'onde ne dépende pas du temps est l'un des problèmes difficiles de la cosmologie quantique (Marc Lachièze-Rey a proposé, dans un sens un peu différent, des pistes de réflexion dans son livre *Au-delà de l'espace et du temps*). C'est sans doute la réponse à la question de l'unicité de l'objet.

Le caractère paradoxal de la cosmologie d'être en un sens science d'un seul objet, corrélaté au fait que cet unique objet soit unique à cause de sa définition, est ici un moteur de réflexion.

### **1.3 Troisième considération épistémologique**

Il est courant de distinguer entre les sciences expérimentales : physique, chimie, microbiologie, et les sciences historiques et géographiques, astronomie, géologie, théorie évolutionniste par exemple ; ce sont les premières que nous avons en tête. Dans ce cas, nous observons et expérimentons sur une classe d'objets identiques ou presque et établissons leur comportement commun. Le problème est de déterminer comment ces objets sont identiques. Comme le remarque Ellis, quarks protons, électrons sont exactement identiques les uns aux autres et ont alors le même comportement car cette caractéristique est sous-jacente aux statistiques quantiques. Toutes les molécules d'ADN, grenouilles, êtres humains et écosystèmes sont quelque peu différents les uns des autres, mais sont suffisamment similaires pour que les mêmes descriptions larges et les mêmes lois s'y appliquent. Et c'est pourquoi elles appartiennent à la même classe d'objets.

Molécules d'eau, gaz, solides, liquides sont dans la catégorie intermédiaire : presque identiques, certainement descriptibles par des lois physiques et chimiques spécifiques.

Les sciences géographiques et historiques étudient des objets uniques (le Rio Grande, le continent Antarctique, le Système Solaire, la galaxie d'Andromède etc.) ou des événements qui se sont produits une seule fois : l'origine du système solaire, l'évolution de la vie sur Terre, l'explosion de SN1987a.

En raison de cette unicité, le commentaire ci-dessus s'y applique aussi. Nous ne pouvons qu'observer, et non expérimenter, les conditions initiales qui conduisent à ces objets uniques ou événements ne peuvent pas être altérés ou expérimentés.

Pourtant le second commentaire ne s'y applique pas. Au moins en principe, il y a une classe d'objets similaires ailleurs (autres rivières, continents, systèmes planétaires, galaxies etc.) que l'on peut observer et comparer avec notre spécifique exemplaire ; et l'on peut aussi réaliser des analyses statistiques sur nombre de cas tels pour déterminer des modèles sous-jacents de régularité ; et sous cet aspect ces thèmes diffèrent de la cosmologie. D'où l'idée de Ellis : on peut spécifier ce qu'est une propriété cosmologique.

On peut dire que la ligne de partage est que, si certains phénomènes physiques à grande échelle se produisent essentiellement une seule fois, alors ils doivent être regardés comme une partie de la cosmologie propre ; tandis que, si nous sommes convaincus qu'il se produit à plusieurs endroits ou plusieurs moments, alors cette classe d'objets doit être distincte de la cosmologie, précisément parce que l'on en étudie une classe. On fait jouer la notion de « grande échelle » pour caractériser le phénomène.

Certains théoriciens ont essayé de se débarrasser du problème de l'unicité en refusant l'unicité de l'univers. D'où le concept d'univers multiples, auxquels le concept de probabilité est appliqué, soit à des régions largement séparées d'un univers plus grand avec des propriétés différentes dans chaque région (inflation chaotique par exemple) – multiples réalisations de résultats quantiques –, soit à un ensemble d'univers complètement disconnecté (xe)s, dans lesquels toutes les possibilités sont réalisées. Nous nous sommes contentés de noter quelques-uns des caractères épistémologiques de la discipline « cosmologie » et l'on pourrait conclure sur le fait qu'il s'agit essentiellement de propriétés qui raffinent la notion du tout.

## **2. De l'épistémologie à la philosophie : passage nécessaire**

L'examen des conditions d'exercice de la connaissance cosmologique dépend lui aussi de la nature de son objet et donc de l'ontologie qu'elle suppose. On l'a vu dans l'évolution des questions épistémologiques, allons maintenant plus loin.

Problème ontologique ou philosophique : de quoi la cosmologie est science ?

### **2.1 La grande échelle de l'univers**

La spécificité de la cosmologie est de traiter de l'univers à grande échelle.

$10^{24}$  cm,  $10^{28}$  cm,  $10^2$  cm : Le premier nombre est la distance qui nous sépare de la galaxie la plus proche, le second est la taille de l'univers visible. Le dernier nombre correspond à notre échelle physique. la cosmologie traite de ces échelles les plus grandes avec lesquelles nous avons un contact causal.

L'immensité de ces distances, que nous avons constituées comme des outils mais aussi comme un contour des objets, spécifie les êtres cosmologiques. Surtout nous y avons accès par le biais de rapports causaux. Les observations astronomiques sont limitées au cône nul du passé qui s'évanouit avec la distance.

La grande échelle fait de l'objet un objet qui nous échappe et impose dans son élaboration une transformation de l'inaccessible. Et il est clair que la cosmologie est une science qui nous ramène de façon très prégnante à nos limites : nous serons toujours physiquement réduits à l'ici et au maintenant.

L'existence de son objet immense fait que la cosmologie peut procéder autant en « approche inverse » qu'en approche théoriquement fondée. La première repose, si l'on veut, sur le théorème suivant, cité par Ellis : « les données accessibles en principe dans notre cône du passé à partir des observations astrono-

miques sont nécessaires et suffisantes pour déterminer la géométrie de l'espace-temps sur ce cône nul ». L'approche ordinaire est plutôt *a priori* : supposer un modèle géométrique d'espace-temps à haute symétrie et déterminer ses paramètres libres essentiels à partir de comparaison entre les relations théoriques et les observations astronomiques.

Nous ajouterons, pour nous diriger vers la question clé, que la cosmologie est bien une science qui combine l'histoire et la géographie : nous avons accès aux galaxies distantes et aux autres objets à des périodes plus anciennes de leur histoire, où leur ligne d'univers intersecte le cône du passé et où leurs propriétés peuvent avoir été différentes. Les sources distantes apparaissent très petites et très faibles à cause de leur distance physique et à cause de l'expansion de l'univers. Et en un certain sens, notre connaissance de l'univers décroît rapidement avec la distance. Mais Ellis ajoute que cette situation est contrebalancée par notre accès à des données de type géologiques et que les observations physiques et astrophysiques nous donnent des indications sur les conditions proches des lignes d'univers de matière dans le passé lointain. Donc nous remontons dans le passé, et nous avons des concepts théoriques au moyen desquels effectuer cette remontée.

À l'inverse nous descendons à partir de conditions initiales. Le principe cosmologique prescrit *a priori* que les conditions initiales sont préservées (un univers avec une géométrie Robertson-Walker au début conservera cette géométrie par la suite) par les équations d'Einstein. Et l'argument le plus couramment accepté repose sur un principe Copernicien. Il n'y a pas d'observateurs privilégiés. Combiné avec l'isotropie que nous sommes censés constater autour de nous, cela implique que tous les observateurs voient un univers isotropique et on établit de la sorte une géométrie Robertson-Walker. Les références sur ce point sont Ellis 1971, Hawking et Ellis 1973.

## 2.2 La question de l'origine

Il est clair que la question se pose puisque la cosmologie est science du tout, son seul objet. Si l'on reste sur cette affirmation, qui est une affirmation clé, la question se pose de savoir si ce tout a commencé ; mais alors, en quel sens est-il le tout, s'il a commencé ? D'un autre côté, s'il n'a pas commencé, il devient impossible de le saisir comme tout. C'est sur ces arguments qu'est fondée l'argumentation de Kant qui sous-tend sa conception de la cosmologie. La dialectique kantienne que l'on trouve à la troisième partie de la *Critique de la Raison pure* pose que l'on peut poser avec autant de force argumentative et convaincante les deux affirmations suivantes ; le monde (l'univers) a un premier commencement dans le temps, et le monde n'a pas de premier commencement dans le temps.

C'est bien l'affaire principale (Ellis) de la cosmologie physique : expliquer pourquoi l'univers est venu à l'existence, pourquoi il a évolué jusqu'à la géométrie Friedman-Lemaître sur les grandes échelles actuelles et comment de petites structures viennent à l'existence sur de plus petites échelles.

## 3. Le commencement de l'univers

Y a-t-il eu un commencement de l'univers ? Si oui, quelle en est la nature ?

La théorie a prédit au début qu'il doit y avoir eu un commencement de l'univers. Mais il n'a pas été clair, pendant longtemps, de savoir si ce dernier provient simplement de cette géométrie très spéciale – exactement isotrope et spatialement homogène – des modèles standards Friedmann-Lemaître. Il est possible que les modèles plus réalistes, avec rotation et accélération, puissent montrer que la prédiction est un artefact mathématique résultant des modèles idéalisés utilisés. Grâce aux théorèmes de singularités développés par Penrose et Hawking (Earman 1999), on

pense que ce n'est pas le cas ; même pour les géométries réalistes, la théorie gravitationnelle classique prédit un commencement de l'univers avec une singularité espace-temps, pourvu que les conditions d'énergie usuelles soient satisfaites. Cette étude a conduit, *inter alia*, à une compréhension qui s'est bien développée de la causalité et de la topologie des modèles génériques d'univers, en tenant compte du fait que les singularités peuvent avoir été de nature tout à fait différente de celles des modèles Robertson et Walker, e.g. être anisotropes ou de nature non-scalaire (Ellis et King 1974).

On connaît des classes de solutions cosmologiques exactes (Kantowski-Sachs et Bianchi) spatialement homogènes mais anisotropes ; Tolman-Bondi, modèles sphériquement symétriques inhomogènes ; modèles non analytiques de « gruyère » permettant de comprendre le comportement dynamique et observationnel de classes de modèles plus généraux que les modèles FL (Ellis et van Elst).

Les études de systèmes dynamiques (Uggla 2003) relient le comportement de toutes les classes de modèles anisotropes dans un espace d'états adapté permettant l'identification de modèles génériques de comportement (points fixes, points-selles, attracteurs, etc.), et donc, la relation entre la dynamique des univers à haute symétrie et à basse symétrie.

Ces études nous aident à comprendre à quel degré les modèles FL sont génériques dans la famille des modèles cosmologiques possibles et quels modèles peuvent donner des observations similaires à celles des modèles FL.

### **3.1 Est-ce que la dialectique de la question subsiste dans le cas des modèles à singularité ?**

Il s'agit toujours de considérer la géométrie possible de l'univers à des périodes très primitives.

Cette réflexion impliquant la question de l'origine ouvre un vaste champ de connaissances. Et, à ce niveau, il engendre des connaissances positives. Nous ne sommes pas entraînés de la sorte dans le flot qui va de thèses en antithèses, selon l'antithétique de la Raison pure telle que reconstruite par Kant.

Avant de reprendre des éléments de sa restitution, constatons que les modèles avec singularité initiale possèdent une grande richesse et une grande puissance explicative. On peut, par exemple, examiner la dynamique des modèles FL perturbés.

C'est le cas de la théorie de l'inflation. Une période très courte d'accélération de l'expansion précède l'ère du Big-bang chaud. Ceci produit un état dominé par le vide, très chaud et lisse, et se termine dans un réchauffement nouveau. Ce processus inflationnaire est censé expliquer pourquoi l'univers est si spécial (avec une géométrie isotrope et homogène et une distribution de matière très uniforme). Même avec un univers très irrégulier au départ, l'énorme expansion qu'il subit durant la phase inflationnaire permettrait d'estomper toutes ces irrégularités, et de donner lieu à un univers très FLRW, expliquant aussi pourquoi les sections d'espace sont si proches d'être plates à présent. L'expansion inflationnaire essaie d'expliquer ces caractéristiques de l'univers actuel (Penrose 2008). Considérée comme la meilleure proposition accessible pour l'ère précédant l'époque du Big-bang chaud conduisant à la présence de perturbations, elle est plus une théorie générique de ce qui s'est produit qu'une théorie physique spécifique. A ce titre elle n'est, par définition, pas confirmable (Penrose 2008).

Une question importante, liée à celle de l'origine, est de savoir si le processus d'expansion arrive seulement une fois dans la vie de l'univers, ou se produit à répétition. Cette distinction prend place à l'intérieur de la question générale de l'existence d'un commencement, car la répétition implique une première fois.

### **3.2 Première option : le modèle standard**

Dans le modèle standard, l'évolution entière de l'univers est l'affaire d'une fois, s'est produite une seule fois, avec tous les objets que nous voyons ; et en effet l'univers lui-même est fait d'objets transitoires qui brûlent comme des feux d'artifices qui meurent l'un après l'autre.

Dans ce cas, ce qui arrive se produit durant une phase d'expansion de l'univers (suivie d'une phase de contraction, qui arrive seulement si la courbure  $k = +1$ , et si le champ actuel d'énergie noire s'éteint dans le futur).

L'évolution peut avoir un commencement singulier à une singularité de l'espace-temps, c'est-à-dire un commencement où la nature du temps change de caractère. Il peut s'agir d'un rebond non singulier à partir d'une seule phase précédente d'effondrement, ou bien d'un commencement à partir d'un état initial statique non singulier (Mulryne 2005).

Une alternative est un univers Phenix, de nouvelles phases d'expansion naissant alors des cendres des anciennes.

Si l'idée d'un ou de plusieurs rebonds est une vieille idée de Tolman, les mécanismes réels qui rendent possible ce comportement de rebond n'ont pas été élucidés de façon satisfaisante. Une variante : l'idée d'inflation chaotique de régions entières de l'univers en expansion, naissant de fluctuations du vide dans d'anciennes régions en expansion, et conduisant à un univers qui a une structure quasi-fractale aux plus grandes échelles, avec de nombreuses régions et différentes propriétés émergeant de chacune d'elles dans un univers qui se maintient pour toujours.

Une singularité initiale, contingente par définition, peut ou peut ne pas s'être produite. Un commencement de l'univers peut s'être produit un temps fini auparavant, mais on peut concevoir une variété d'alternatives : des univers éternels ou des univers dans lesquels le temps, tel que nous le connaissons, est venu à l'existence.

Prenons l'exemple de la proposition de Wheeler : dans le modèle de Friedmann, dans le cas  $K > 0$  et  $L = 0$ , l'univers s'accroît depuis sa singularité initiale (Big-bang) puis se contracte ensuite jusqu'à une singularité finale (big crunch). Ce modèle fut qualifié d'oscillant (ou cyclique), la graphe de la fonction de  $t$  étant une cycloïde avec un nombre infini de cycles d'expansion et de contraction. On sait aujourd'hui qu'il n'y a aucun moyen de lisser la singularité qui relie chaque « crunch » au « bang » suivant, dans le cadre de la relativité générale classique (Hawking et Penrose 1970). Si nous supposons qu'une certaine forme de « gravitation quantique » pourrait autoriser ce rebond, alors nous pouvons imaginer que ce modèle cyclique est une approximation de ce qui pourrait avoir lieu (Penrose 2008).

Lee Smolin, dans son livre *The life of the Cosmos*, propose ceci : plutôt qu'imaginer un univers fermé dont le big crunch généralisé se transforme en Big-bang pour l'univers du cycle suivant, on pourrait voir les singularités centrales des trous noirs comme les sources de nouveaux cycles d'univers, chaque singularité de trou noir produisant à elle seule un cycle d'univers différent, avec un réajustement des constantes fondamentales. Il y aurait, selon Smolin, des cycles d'univers de mieux en mieux « ajustés ». Il est clair qu'une telle théorie remarquablement brillante n'évite pas la question de la singularité.

### **3.3 Questions posées par la dialectique kantienne**

Une singularité d'espace-temps est une question problématique car l'univers (temps-espace-matière) a alors un commencement. En ce point, toute la physique, selon l'expression de Ellis, « s'effondre », et notre capacité à comprendre ce qui se produit, sur une base scientifique, s'évanouit.

Une existence éternelle est également problématique, conduisant à l'idée de Poincaré d'un éternel retour : toute chose qui est

arrivée va recommencer une infinité de fois dans le futur et s'est déjà produite une infinité de fois dans le passé. (Barrow and Tipler 1984). Une telle situation est typique des problèmes associés à l'idée d'infini.

Et nous ne savons pas si l'on doit choisir « singularité » ou « existence éternelle » si l'une ou l'autre hypothèse est philosophiquement préférable. C'est là que nous tournons dans le problème dialectique au sens de Kant.

Si l'on reprend la thèse, on n'est pas à même de fournir les raisons qui sous-tendent les choix entre différentes possibilités contingentes de la formation de l'univers. Même une création au sens strict n'est pas satisfaisante, pas plus que l'évolution à partir d'un état éternel préalable : pourquoi l'expansion de l'univers comme une bulle à partir d'un vide commence-t-il comme il l'a fait et pas plus tôt ? Toutes les variétés de départ que nous avons déjà citées (Ellis) – par exemple les séries d'expansion de Tolman et de cycles d'effondrement – toutes ces hypothèses, donc, n'évitent pas la question ultime dont parle Ellis et qui est, selon moi, liée à sa forme kantienne. On parvient toujours à la même question : pourquoi est-ce un état spécifique qui s'est produit, plutôt que l'une des autres possibilités ? « Dans un temps vide, dit Kant, nulle naissance d'une quelconque chose n'est possible, parce qu'aucune partie de ce temps, plutôt qu'une autre, ne possède en soi une condition distinctive de l'existence, plutôt que la non-existence » (*Critique de la Raison Pure, L'antinomie de la Raison Pure*, p. 431). Ce raisonnement vaut même si l'on ne suppose aucun temps. Avant le commencement (s'il y en a un) aucune physique n'est applicable et notre langage est défaillant, le temps n'existe pas.

Le fond des arguments qui nous déportent sur l'autre côté de l'antinomie pour nous faire affirmer l'éternité comme résultat de l'impossibilité d'un commencement est tout autant intenable au sens rigoureux du terme. Il faut, dans ce cas, quelle que soit la

nature de l'hypothèse choisie, expliquer qu'il se produit quelque chose au sein de cette éternité.

Est-ce que cette dialectique provient du caractère spécifiquement philosophique de la question ?

Nous avons rencontré des formes variées de l'antinomie : « commencement initial » ou « recommencement indéfini » – ce qui est, selon nous, dans notre argumentation, un raffinement de la même position –, ou bien « véritable éternité statique », singularité initiale ou non singularité.

Tandis que l'occurrence d'une singularité initiale est choquante en ce que c'est le point de départ de la physique et de l'espace-temps aussi bien que de la matière, le fait de savoir si elle s'est produite ou non est en un sens irrelevant pour le problème clé de ce qui a déterminé la nature de l'univers.

La physique testable ne peut pas expliquer l'état initial et donc la nature spécifique de l'univers.

Un choix entre différentes possibilités contingentes s'étant produit d'une manière ou d'une autre, le problème essentiel est de savoir ce qui sous-tend ce choix. Pourquoi l'univers a-t-il cette forme plutôt qu'une autre, alors que d'autres formes semblent parfaitement compatibles avec les lois physiques ? Les raisons qui sous-tendent le choix entre différentes possibilités contingentes pour l'univers (pourquoi c'est l'une qui arrive plutôt qu'une autre), ne peut pas être exploré scientifiquement. C'est un problème qu'il faut examiner à travers la philosophie ou la métaphysique.

Même s'il n'y a pas de création stricte, comme c'est le cas dans la diversité des propositions présentes, cela ne résout pas le problème sous-jacent de ce qui détermine les raisons pourquoi l'univers a suivi cette voie, étant donné qu'il aurait pu être autrement. (Toute la correspondance de Leibniz avec Clarke tourne autour de cette question.)

Si on propose une évolution à partir d'un état éternel qui a précédé (Minkowski p.e.) pourquoi est-ce cela qui est venu à l'exis-

tence et pourquoi l'expansion de l'univers à partir d'une bulle venue de ce commencement vide s'est-elle produite comme elle s'est produite, plutôt qu'à des états antérieurs dans l'éternité pré-existante ?

À quelque moment que l'univers ait commencé, il aurait pu commencer plus tôt.

Il y a quelques essais pour éviter un vrai commencement en retournant à une forme d'état initial éternel ou cyclique. Par exemple la série d'expansions-contractions de Tolman rappelée plus haut, ou la proposition d'un univers formé à partir d'une bulle dans un espace-temps plat (Tryon 1973). Nous avons déjà cité ci-dessus, également, les tentatives de Wheeler améliorées par Smolin, l'inflation chaotique éternelle de Linde (Linde 1990), la réexpansion de Veneziano à partir d'une phase d'effondrement précédente (Gosh et al. 1998), la proposition d'un univers ekpyrotique de Khoury et al. 2001) et les théories liées à des limites fondationnelles portant sur l'information à partir d'un principe holographique (Susskind et Linsey 2004). Ces essais remettent sur le tapis la question abordée de face, car on doit poser les mêmes questions d'origine et d'unicité au sujet de cet état supposé précéder la phase d'expansion du Big-bang chaud.

L'explication des conditions initiales a été l'objectif d'une famille de théories que l'on nomme collectivement « cosmologie quantique ». (Voir, par exemple, Hawking en 1993, Gott et Gibbons en 2003.)

Nous atteignons ici les limites de ce qu'une étude scientifique du cosmos peut dire.

Si l'on suppose que de telles études doivent nécessairement impliquer une capacité à être testées expérimentalement ou observationnellement, aucune expérience physique ne peut être d'une aide quelconque ici, à cause de l'unicité de l'univers, et les tentatives pour définir une physique de la création effacent la signification de la physique. Avant le commencement – si tant

est qu'il y en ait un – la physique comme nous la connaissons n'est pas applicable, et notre langage ordinaire nous fait défaut, car le temps n'existe pas, et notre tendance naturelle à contempler ce qui est arrivé avant le commencement est trompeur. Il n'y avait pas d'avant, et donc, il n'y avait pas d' « ensuite » ensuite. Parler comme s'il y en avait est un lieu commun mais il est tout à fait trompeur d'essayer de concevoir un concept scientifique de création (Grunbaum 2004). Il est absolument impossible de tester les mécanismes causaux enveloppés dès lors que la physique n'existe pas. Aucun test expérimental ne peut déterminer la nature d'un mécanisme quand les concepts de cause et d'effet sont suspects.

#### **4. La question de l'origine de l'univers comme objet et principe de développement scientifique : dernier retour sur l'antinomie.**

Les plus gros efforts qui ont réussi à poser la question de l'origine de manière à ouvrir un champ de recherches sont liés à la théorie quantique.

Il y a bien une théorie (un observateur rationnel, une conscience théorique) qui remonte à des conditions initiales.

Il est vrai que la théorie quantique de l'origine de l'univers, qui remonte à 1931 (Lemaître 1931), a construit une argumentation qui s'est structurée à partir d'une théorie, ou du moins certains aspects de cette théorie, qui sont établis ou suffisamment argumentés pour entraîner une grande partie des cosmologues et des physiciens. En un certain sens cet argument reprend la position kantienne : toute forme de réfutation de la nécessité d'un premier commencement est irrecevable (démonstration de la thèse par impossibilité de l'antithèse). Il s'efforce, sur la base des connaissances acquises de la gravité quantique (nous y revenons tout de suite), de donner un contenu à la thèse de l'origine de

l'univers. Il est vrai que la cosmologie quantique est grevée par les difficultés propres à la gravité quantique et les problèmes liés au fondement de la théorie quantique (problème de la mesure, de l'effondrement de la fonction d'onde) – difficultés qui ont un effet direct sur la cosmologie (Perez et al. 1995). Les diverses tentatives de cosmologie quantique développent chacune un aspect spécifique de la théorie quantique qu'il faudrait faire émerger d'une cosmologie globale pour le moment hors de portée. Une telle théorie serait fondée :

- Sur l'équation Wheeler-De Witt et l'idée de la fonction d'onde de l'univers.
- Sur une version d'un plongement dans un espace-temps de plus grande dimension (inspiré de la théorie des cordes).
- Sur une application appropriée de la gravité en boucle.

Il est très remarquable qu'elle s'efforce de donner une théorie vraie de la création *ex nihilo* (Vilenkin, 1982). De telles tentatives sont vaines car elles reposent sur des structures (e.g. le cadre élaboré de la théorie quantique des champs et nombre de modèles standards de physique des particules) qui préexistent à l'origine de l'univers, et donc requièrent elles-mêmes une explication.

Il est évident que, si je veux expliquer la création *ex nihilo* – expression difficile, aussi bien à cause du mot « création » qu'à cause du mot *nihil* –, je requiers une théorie de la création, et éventuellement des propriétés de l'être divin qui s'est livré à une telle création, ou bien – et je n'en suis certes pas loin – je m'abandonne aux développements de la non connaissance. Je suis alors contraint de construire les conditions préexistantes d'une création à partir de rien. En ce cas, ce qui rend cohérent partiellement cette création est son niveau d'hétérogénéité par rapport à ses conditions préexistantes. Mais alors, jusqu'à quel point peut-on admettre que la cause de cette création *ex nihilo*

est suffisamment hétérogène à ses effets pour penser cette création comme *ex nihilo* (une sorte d'anéantissement du cadre préexistant qui cesse de jouer un rôle causal) ? Pourquoi cette insistance sur la création me direz-vous ? Parce que c'est ce qui doit rendre cohérent l'idée même du Big-bang. Même si l'on admet raisonnablement un cadre préexistant (Marc Lachèze-Rey 2007), il n'en reste pas moins que ce qui fait l'attraction scientifique du Big-bang (et non pas nécessairement religieuse : c'est ainsi que Gamow interprète spirituellement le terme de « création » comme prenant sens dans la mode), c'est l'idée de donner une signification physique à la notion de « commencement de l'univers ».

Pour résumer les autres solutions envisagées du point de vue de leur intention première, on dira qu'il s'agit de décrire un univers qui se tient de lui-même (self-sustaining) ou univers autoréférentiel, ce qui contourne le problème de la création (c'est une thèse anti-crétionniste à la Spinoza). On le fera :

- En plaçant l'origine dans un état éternellement préexistant, à travers l'idée récurrente d'un univers-phénix, comme Dicke and Peebles (1979),
- ou en procédant comme dans la théorie du pré-Big-bang de Veneziano (1968) fondée sur des analogues de dualité de la théorie de cordes ;
- ou en envisageant des univers qui s'auto-répètent comme dans la théorie des modèles d'inflation chaotique de Linde ;
- ou encore en imaginant une création à partir de fluctuations dans une structure tout à fait différente préexistante (e.g. émergence à partir de l'espace-temps de De Sitter) ;
- ou bien en inventant un univers ekpyrotique initié par une collision entre des « branes » préexistantes dans un espace-temps de plus haute dimension ;
- ou bien en envisageant un état initial statique éternel.

La question qui se pose alors est de savoir si le fait de modifier le concept de temps et d'espace (espace-temps), modifie la formulation du paradoxe dialectique kantien (*pax rationis*) dans ces cas d'univers *sustained*. Spinoza démontre longuement dans l'*Éthique* que Dieu produit nécessairement l'univers, qu'il y a égalité entre Dieu et l'univers, qu'il y a identité de sa puissance et de son essence.

Kant explique à ceux qui refusent le premier commencement qu'il faudrait alors pouvoir synthétiser une éternité écoulée jusqu'à maintenant pour expliquer le « maintenant » – ce qui, dit-il, n'est pas pensable. Mais c'est bien le cas si je place l'origine dans un état éternellement préexistant. Il est certain que la nécessité de ne plus penser le temps comme une sorte de temporalité perceptive et, à partir de notre perception, indéfiniment prolongeable, comme une ligne droite dans les deux sens, s'impose. On veut une théorie qui vient germer sur un fond éternel, et on peut alors continuer à travailler sur ce fond non clarifié, lequel n'est certainement pas une éternité écoulée sur le modèle d'une dimension temporelle finie que l'on a infinitisée et dont on affirme l'existence.

## **5. Une autre direction d'analyse dont originalité vient de son traitement de la singularité**

Il faut mentionner ici plus précisément la théorie de Hartle-Hawking présentée en 1983. L'un des ingrédients est ce qu'on appelle « l'euclidinisation ». Cette idée est intimement liée à la « rotation de Wick » de l'espace de Minkowski, par laquelle la coordonnée  $t$  se transforme en coordonnée  $\tau = it$ . La métrique devient alors :  $dl^2 = d\tau^2 + dx^2 + dy^2 + dz^2$ . L'idée originale était la possibilité de construire une théorie quantique relativiste (restreinte) en la formulant à l'intérieur d'une théorie de cet espace quadridimensionnel  $E^4$  qui remplace l'espace-temps

minkowskien, la théorie étant choisie invariante sous le groupe des symétries de  $E^4$ . Si on admet que les grandeurs obtenues dans la version euclidienne sont analytiques dans les coordonnées, la rotation de Wick permettrait, en repassant continûment de  $t$  à  $\tau$  d'obtenir une théorie invariante sous le groupe de Poincaré du 4-espace de Minkowski.

Cette procédure offre deux avantages importants : les grandeurs qui risquent d'être divergentes dans l'espace de Minkowski se révèlent convergentes dans la version euclidienne de la théorie (le groupe  $O(4)$  des rotations euclidiennes est un groupe compact, donc de volume fini, tandis que le groupe de Lorentz relativiste  $O(3,1)$  est non compact, donc de volume infini).

L'idée de l'intégrale de Feynman est d'appliquer le principe de la superposition linéaire complexe, non seulement à des états quantiques particuliers, mais à toutes les histoires spatio-temporelles, c'est-à-dire à toutes les trajectoires possibles dans l'espace des configurations. Dans le monde quantique, nous avons une gigantesque superposition complexe de toutes ces « réalités possibles ». Et le formalisme du lagrangien nous indique quelle amplitude associer à chaque histoire. Et Feynman demande que nous intégrions sur l'espace des chemins. Cette intégrale pose de nombreux problèmes et tout le travail de Feynman est d'en donner une explication.

Les intégrales de chemin ont beaucoup plus de chances d'être bien définies dans la version euclidienne que dans la version minkowskienne. Le second avantage est que les exigences de positivité de la fréquence peuvent être garanties en opérant la rotation de Wick (Penrose 2008).

Dans le modèle de Hartle-Hawking, la rotation de Wick n'est pas appliquée à un espace dans lequel sont plongés les chemins de l'intégrale des chemins de Feynman, mais aux espaces-temps individuels constituant chaque chemin de l'intégrale des chemins. La philosophie de l'intégrale des chemins, qui a elle-même toute une histoire, est retravaillée de façon extraordinaire par

Hawking. Ces « espace-temps » sont alors munis de métriques riemanniennes. Cette « euclidinisation » à la Hawking fait preuve de beaucoup d'imagination. (Elle reste en course, dit Penrose, pour l'union RG et MQ). La proposition étonnante de Hartle-Hawking (Penrose) était que cette variante de l'intégrale de chemins imaginée par Hawking donnerait la théorie quantique adaptée pour décrire le Big-bang, et qu'au lieu d'une singularité spatio-temporelle il y ait une superposition quantique (une intégrale de chemins) d'espace-temps munis de métriques riemanniennes plutôt que lorentziennes. Ils l'appelèrent « l'univers sans bord », car la frontière singulière de l'espace-temps classique que représente le Big-bang est remplacée par une famille d'espaces non singuliers superposés dominés par les espaces riemanniens qui colmatent simplement la région initiale, si bien que la frontière singulière disparaît aussitôt. Quelques instants après le Big-bang dut avoir eu lieu une transition, la domination de la géométrie riemannienne laissant place à la géométrie lorentzienne, par exemple, grâce à une métrique complexe bien choisie. Dans la région lorentzienne, nous avons encore une superposition d'espaces-temps (dont certains sont riemanniens). Mais loin du Big-bang, c'est l'espace lorentzien classique qui domine tandis qu'au voisinage du Big-bang, ce sont les métriques riemanniennes sans bords qui sont prédominantes (Penrose 2008). Ce modèle est non seulement d'une grande élégance mais possède toutes les apparences de l'univers primordial lisse compatible avec l'hypothèse de la courbure de Weyl.

La théorie générale de l'euclidinisation pose des problèmes, et elle n'a pas vraiment, selon le constat de Penrose (2008), fait son chemin.

Elle est un exemple très remarquable de traitement de la singularité.

Elle est pour nous, dans le cadre théorique que je présente, un véritable travail sur le concept de « commencement ». Elle

témoigne d'un mouvement théorique différent de celui que propose Kant.

La question posée est la suivante : le fait de désingulariser de la sorte possède-t-il une signification scientifique et, bien plus, mathématique ? Mais puis-je donner une signification philosophique et physique à deux opérations corrélatives : la complexification du temps, et l'eulclidinisation ? La réponse à la question de la complexification demande des développements importants, mais il est possible, en revanche, de donner une signification philosophique pour cette sorte de réintroduction de l'espace euclidien.

Kant nous explique que la solution de l'antinomie consiste à décider si « dans la régression vers la grandeur inconditionnée de l'univers (quant au temps et quant à l'espace) cette ascension qui ne trouve jamais sa limite peut être appelée une régression à l'infini, ou seulement une régression dont il est impossible de déterminer jusqu'où elle peut être poursuivie ». Le concept de grandeur du monde n'est donné qu'à travers la régression, et non pas antérieurement à cette régression dans une intuition collective, mais la régression « ne consiste jamais que dans l'acte de déterminer la grandeur et elle ne donne pas un concept déterminé, ni non plus d'une grandeur qui serait infinie par rapport à une certaine mesure... » (CRP p. 489)

On doit, en dénaturant à peine la réflexion kantienne, considérer qu'un commencement fait difficulté dès lors qu'il est conçu comme une singularité. Et que l'absence de commencement appelle une cause productrice d'un événement impossible à penser. L'essai pour concevoir une singularité en la ... désingularisant est remarquable. Un des instruments de cette procédure est la complexification du temps. Le problème reste ouvert de la réalisation physique de cette solution dont nous n'avons souligné qu'un aspect.

Nous n'avons pas de la sorte neutralisé ou apporté une solution à l'antithétique, mais nous en avons déplacé l'application et nous

pouvons alors l'exploiter autrement. On pourra développer ainsi une physique structurée à travers les nombres imaginaires.

## **Pour conclure**

Nous reprendrons la question que pose Ellis : y a-t-il des lois de la cosmologie ?

L'idée de lois, de conditions initiales de l'univers n'est pas, on l'a vu, testable. De fait, dit Ellis, une description de conditions initiales au bord pour l'univers semble être une description, par opposition à une prescription testable de leur comportement nécessaire. Il en est ainsi du principe cosmologique, dont une justification se trouve dans un principe copernicien lui-même renforcé par le principe cosmologique. Cet argument passé de mode a eu son heure de gloire (Weinberg 1972). Ellis propose un principe d'incertitude en cosmologie, dual du principe de la mécanique quantique. Il resterait selon lui, une incertitude, peut-être constitutive de la cosmologie, qui porte sur la nature ultime du cosmos. Nous avons essayé de montrer que cette incertitude est plus à concevoir comme le moteur de la cosmologie, sur la base d'une antinomie. Et cette antinomie, qui porte sur le commencement, est à développer, jusqu'à en déplacer les effets dans une transposition dans les concepts des nombres complexes.

## **Références**

La bibliographie concernant ce chapitre est disponible sur le site Internet de Dunod : [www.dunod.com](http://www.dunod.com)

# Chapitre 18

## Cosmologie et scientificité

Gérard Chazal

### **I. Les débuts de la cosmologie relativiste**

Aux yeux du philosophe des sciences attentif au développement des connaissances et au fonctionnement de la démarche scientifique, la cosmologie contemporaine soulève des interrogations épistémologiques.   voir se multiplier les hypothèses avancées – matière noire, énergie sombre, multivers –, par les cosmologues il semble que certains principes comme celui d'économie ontologique (rasoir d'Occam), de vérification (ou falsification) expérimentale, principes auxquels la science semblait très fermement attachée, ne soient plus de mise. L'ancienne cosmologie, celle des Grecs par exemple ou du Moyen-âge chrétien, était tant enchevêtrée avec la théologie et la métaphysique, le terme était si proche de celui de cosmogonie, qu'il a pu sembler, aux yeux de l'historien des sciences qu'il fallait ranger cette discipline au côté de l'alchimie ou de l'astrologie sur l'étagère des rêveries pr scientifiques et des univers imaginaires. Pourtant, lorsque le philosophe se penche sur la cosmologie d'aujourd'hui il reconnaît les atours les plus significatifs de la science la plus « dure », ceux de la physique mathématisée, de l'astronomie techniquement équipée. Ses discours se croisent avec ceux de la physique des particules, ses outils sont ceux de l'observation astronomique, des techniques de l'espace, des accélérateurs géants de particules. On peut soupçonner une histoire de la cosmologie confrontée aux

règles de la démarche scientifique telles qu'elles se sont peu à peu mises en place, ont évolué et évoluent encore. La cosmologie joue peut-être encore un rôle dans cette redéfinition toujours reprise de ce qui est scientifique.

Mais revenons à l'histoire. À la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, la philosophie des sciences avait banni – c'est Auguste Comte qui en prend acte – la cosmologie du champ scientifique<sup>1</sup>. L'histoire de ce bannissement est étroitement liée à celle de la mise en place au cours des siècles précédents de ce qui deviendra la démarche scientifique. Peu à peu, et bien avant que cela soit explicité et formalisé par certains philosophes des sciences au XX<sup>e</sup> siècle tels que Rudolf Carnap ou Karl Popper sous des formes diverses (vérificationnisme, falsificationnisme) des critères de distinction entre science et non-science s'étaient mis en place. Depuis Galilée peut-être et sa fameuse *Lettre à Christine de Lorraine*, par son développement même et à travers des débats philosophiques constants, la science s'était dégagée de la théologie et de la métaphysique. Les critères ainsi établis conduisirent à rejeter en dehors du champ scientifique la cosmologie qui ne pouvait alors s'y conformer. Aujourd'hui, depuis les travaux d'Einstein, de Gamow et de Lemaître entre autres, la cosmologie semble être revenue dans le cadre de la science, étroitement liée d'une part aux développements de l'astronomie, de l'observation astronomique et à ceux de la physique. Les nombreux articles proposés sur ce thème par les revues de vulgarisation scientifique, voire leurs couvertures, témoignent de cette naissance au cours des années du siècle passé et du siècle actuel d'une cosmologie scientifique. Cela signifierait soit que les critères de la scientificité ont changé, soit qu'un certain nombre de découvertes, le renouvellement des cadres théoriques et des procédures d'observation permettent aujourd'hui d'accorder ce qualificatif de scientifique à la cosmologie. *A priori*, il ne semble pas que ce soit du côté d'un éventuel assouplissement des critères de la démarche scientifique

qu'il faille chercher la justification d'une cosmologie scientifique, encore que l'on puisse voir une évolution dans les conditions de leur application, mais bien plutôt dans la manière dont les questions cosmologiques peuvent être posées aujourd'hui. Cette question est d'ailleurs très présente dans les débats dont la littérature de vulgarisation mais aussi les articles proprement techniques rendent compte. Ce sont donc ces critères de scientificité, au moins certains, autour desquels s'est joué et se joue encore l'appartenance de la cosmologie à la science que je voudrais rapidement examiner. J'en retiendrai, assez arbitrairement, trois : la question des origines, les rapports entre théorie et expérience, le problème d'une science du tout et l'exigence d'universalité. Mais commençons par l'éviction passée de la cosmologie.

## **2. L'éviction du champ scientifique**

### **2.1 La question des origines**

Si la science apparaît dès le départ comme un ensemble de questions que les hommes se posent à propos du monde qui les entoure, sa longue confrontation avec d'autres types d'explications, mythologiques ou théologiques, l'a conduit à considérer que certaines questions se situaient en dehors de son champ de compétence. Non pas qu'elles fussent dépourvues de sens comme le voulut le positivisme logique mais parce qu'aucun élément de réponse ne pouvait être apporté à ces questions dans le cadre de la démarche scientifique qui devait s'en tenir à ce que l'on observe et à l'exercice de la raison sur les résultats de l'observation. La question de l'origine du monde ou de l'univers est une de ces questions. Déjà les philosophes matérialistes de l'Antiquité, de Démocrite à Épicure, l'avaient écartée au moins implicitement. Or elle est au cœur d'abord des cosmogonies puis de la cosmologie. La question de l'origine de l'univers, ce que l'on traduira sur le plan métaphysique par celle de savoir pour-

quoi il y a quelque chose plutôt que rien, va peu à peu, de Galilée à Auguste Comte, se trouver écartée de l'interrogation scientifique, même si elle conserve encore pendant toute une période une pertinence dans le cadre de l'astronomie. Si cette question demeure en effet quelque temps dans le champ scientifique c'est parce que trois règles, outre celle de s'en tenir à l'observation et au raisonnement, plus ou moins implicites président à la mise en place de la démarche scientifique :

- l'objet de la science est le monde tel que nous le percevons, directement ou indirectement, la formulation qui le décrit et l'explique pouvant être parfois probabiliste ;
- tous les éléments du monde et tous les événements qui s'y déroulent sont reliés par des relations causales qui peuvent s'exprimer dans des lois que l'on ne tardera pas à formuler mathématiquement ;
- enfin, expliquer un fait c'est en donner les causes – Aristote le disait déjà.

Répondre à la question des origines apparaît alors comme un moyen d'éviter une régression à l'infini. C'est pour éviter une telle régression qu'Aristote justement postula l'existence d'un moteur premier immobile et Leibniz développera cet argument par exemple dans le texte intitulé *De rerum originatione radicali*<sup>2</sup>. En effet si un événement A a pour cause un événement B qui lui est antérieur, qui lui-même doit avoir pour cause un événement C et ainsi de suite, on ne peut arrêter cette forme d'explication régressive qu'en supposant un début absolu où se situe une cause première de nature cosmologique mais en même temps théologique.

En fait, ces trois règles entrent en contradiction avec une des conditions élémentaires de la scientificité qui est que l'objet de la science est le monde observable, car la régression causale, qu'on la laisse se perdre dans l'infini ou que l'on y mette fin par

la supposition d'une origine absolue, nous fait sortir de l'univers observable. Même si l'hypothèse plus théologique que scientifique de Giordano Bruno d'un univers infini allait trouver une part de justification dans la révolution astronomique et dans le fait que la lunette puis le télescope allait ouvrir considérablement notre champ de vision sur l'univers, il n'en demeure pas moins que l'hypothèse de l'origine restait alors inaccessible à toute observation<sup>3</sup>. En retour, la science ne pouvait considérer la causalité que comme locale. La recherche d'une cause première comme celle d'un recours à des causes finales ne trouvait plus place dans la démarche scientifique. En limitant son ambition à l'observable, la science constituait un horizon à son discours et traçait les frontières de ses recherches. Même si l'on pouvait toujours espérer repousser cet horizon, peut-être indéfiniment, par le biais d'une instrumentalisation technique de l'observation, on ne pouvait l'abolir qu'en passant du domaine de la connaissance à celui de la croyance, du scientifique au mythique ou au théologique. Jusqu'au début du XX<sup>e</sup> siècle, poser la question de l'origine et surtout tenter d'y répondre c'était se placer au-dessus du monde, du cosmos pris comme objet donc du point de vue d'une transcendance. Par suite c'était sortir de la démarche proprement scientifique. C'est pourquoi la science encore hésitante dans la Grèce antique cherchera à éviter cette question en postulant soit un univers éternel, soit un éternel recommencement des mondes par agrégat et décomposition de la matière réduite au flux éternel des atomes. C'est pourquoi aussi, la science moderne depuis le XVII<sup>e</sup> siècle, jusqu'à Auguste Comte a peu à peu écarté cette question de son champ d'investigation.

Cependant, c'est par cette question de l'origine que la cosmologie est revenue dans le champ scientifique et si, dans l'affaire, les questions de physique théorique ont joué un rôle majeur avec la théorie de la relativité générale, c'est essentiellement par des observations qu'elle a pu être refondée scientifiquement. Les

nouvelles observations se trouvaient elles-mêmes fondées sur des acquis de la physique dans la mesure où c'est, par exemple, l'électromagnétisme qui induit des observations en dehors du domaine de la lumière visible (infrarouge, ultraviolet, rayons X, rayons gamma). Des hypothèses nouvelles pouvaient être avancées, suscitées par des observations, hypothèses qui à leur tour pouvaient fonctionner comme fondement pour la mise en place de nouvelles observations. En un mot, la découverte de l'existence d'un espace extragalactique et d'autres galaxies que la nôtre, de la fuite de ces galaxies les unes par rapport aux autres (observation du décalage vers le rouge de leur luminosité) conduit à l'hypothèse d'un univers en expansion. Je fais évidemment allusion aux travaux de Slipher (1916), Willem de Sitter (1917) ou encore Hubble (1929). Sous cette hypothèse, et en remontant vers le passé on est conduit à celle d'un point initial dont on peut dès lors chercher la trace par l'observation autant que par le calcul. Ce sera la découverte du fond diffus cosmologique. Je caricature ce qui va devenir la théorie du Big-bang mais c'est bien à travers cette théorie que la cosmologie revient avec Gamov et Lemaître dans le champ de la science. Non sans mal. On sait bien d'une part que le terme de Big-bang fut à l'origine un terme péjoratif, le fait d'une critique virulente de cette théorie, en partie pour des raisons de méthodologie scientifique que j'ai évoquées et d'autre part parce que la théologie tenta, contre l'avis de Lemaître d'ailleurs, pourtant prêtre catholique, de s'en emparer comme une preuve de la création de l'univers par une divinité transcendante. Mais je reviendrai sur cette manière dont une cosmologie scientifique a réintroduit la question des origines.

## **2.2 Les rapports entre théorie et expérience**

Après Galilée, les sciences de la nature devinrent expérimentales et cherchèrent une expression mathématique. La physique appa-

rut rapidement comme la première discipline à satisfaire cette double exigence, même si l'astronomie avait développé tout un appareillage mathématique bien avant que la physique y recourt, alors même que cette dernière demeurait encore plus qualitative que quantitative. Peu à peu, la physique étant devenue une sorte de modèle pour les autres disciplines, chacune chercha peu à peu à formuler mathématiquement ses lois et y réussit plus ou moins partiellement et plus ou moins rapidement. Cependant le critère de l'expérimentation (ou de sa forme première l'observation) prit dans tout le domaine scientifique une place déterminante très rapidement. Dès le XVIII<sup>e</sup> siècle les rapports que la théorie devait entretenir avec l'expérience sont au cœur des réflexions épistémologiques. En témoigne par exemple tout le chapitre IV que Madame du Châtelet consacre à cette question dans ses *Institutions de physique*. Dans ce texte un peu oublié, voire méprisé aujourd'hui, l'essentiel des débats de la philosophie des sciences du XX<sup>e</sup> siècle, entre le positivisme logique et Karl Popper par exemple, s'y trouve. Contre un empirisme radical qui voyait dans l'exercice de nos sens la seule source de nos connaissances, il apparut assez vite – et déjà chez Galilée – que nos perceptions immédiates, non seulement n'étaient pas la source de tout savoir, mais encore pouvaient s'avérer illusoire et mensongères. L'histoire des sciences montre rétrospectivement que les progrès des connaissances supposent une subtile dialectique entre les hypothèses théoriques et l'expérience à laquelle elles doivent être confrontées. Ainsi le chapitre de Mme du Châtelet auquel je faisais allusion s'intitule-t-il non pas « de l'expérience » mais « des hypothèses ». Tout ce qui dans le discours scientifique échapperait à cette dialectique de l'expérience et de la théorie et mériterait le titre légèrement péjoratif de « purement spéculatif » se trouve *de facto* écarté du domaine scientifique. Il est d'ailleurs significatif que dans les articles et ouvrages consacrés à la cosmologie et qui rendent compte des débats dont elle est le terrain,

ce terme d'hypothèse purement spéculative revient souvent sous la plume des auteurs, soit pour critiquer les hypothèses des autres, soit à titre de réserve quant à leurs propres théories.

La question est dès lors de savoir pourquoi, au regard des penseurs des XVIII<sup>e</sup> et XIX<sup>e</sup> siècles, la cosmologie échappe à l'expérience, alors que l'astronomie, où il est pourtant difficile d'envisager une manipulation de ses objets, demeure profondément scientifique. L'expérience ou l'expérimentation va-t-elle radicalement au-delà de la simple observation ? Ainsi Claude Bernard fait une distinction entre science d'observation et science expérimentale : « les sciences d'observation et les sciences expérimentales n'ont donc pas le même caractère ni la même puissance. Les sciences d'observation s'absorbent dans la contemplation des phénomènes de la nature ; elles sont passives, en ce sens qu'elles observent sans chercher à modifier les lois de la nature. Les sciences expérimentales au contraire sont plus audacieuses ; l'expérimentateur veut surprendre le secret des lois du créateur pour devenir, comme on l'a dit, le contremaître de la création, il veut créer des phénomènes nouveaux et soumettre les éléments à sa volonté.<sup>4</sup> » Pourtant l'expérimentation ne se réduit pas à – ou ne se définit pas par – la manipulation de la réalité ; et l'observation, dans la mesure où elle est active, peut-être tout autre chose qu'une simple contemplation des phénomènes. Les alchimistes du Moyen âge ont beaucoup manipulé, cela n'a pas fait pour autant de l'alchimie une discipline scientifique. Les astronomes ont beaucoup contemplé le ciel et cela n'invalide pas leurs résultats.

Ce n'est pas dans une différence entre observation passive et expérimentation active qu'il faut chercher le critère de scientificité. Le fait scientifique, implicitement d'abord, de plus en plus explicitement par la suite, apparut non pas comme un fait brut donné à notre perception mais comme une construction qui en assure l'objectivité qu'il s'agisse d'un fait obtenu par « création

artificielle des phénomènes » selon l'expression de Claude Bernard ou par une observation rationnellement guidée par des hypothèses ou des conjectures et accompagnée de mesures. Car, dès l'origine, l'observation astronomique s'est accompagnée de mesures et de calculs. Or, pour un penseur du XIX<sup>e</sup> siècle, par exemple, cela supposait deux choses. Premièrement le fait doit pouvoir s'inscrire dans un espace et un temps qui le situe précisément quelle que soit par ailleurs la conception du temps et de l'espace que l'on ait. Cela veut dire que cette construction du fait scientifique suppose la possibilité d'une prédiction quant à son évolution, l'objectivité s'établissant dans l'adéquation plus ou moins bonne de la prédiction avec l'observation ultérieure. On comprend que l'astronomie – souvent réduite à celle du système solaire (l'existence des galaxies extérieures à la nôtre n'est bien reconnue que depuis 1916) – bien que ne créant pas artificiellement de phénomène, répondait à ce critère. Elle place ses objets dans une durée et dans un espace et la théorie sous-jacente à l'observation permet de faire des prévisions dont on pourra mesurer la précision. D'une manière un peu caricaturale, on pourrait dire que la scientificité de l'astronomie s'exprime dans les calculs de Leverrier et d'Adams découlant de la mécanique de Newton et Laplace. L'observation liée au calcul prédictif constituant alors une forme d'expérimentation. Le deuxième point capital qui assure le caractère scientifique aussi bien de l'observation que de l'expérimentation c'est la possibilité d'effectuer des mesures sur les phénomènes étudiés. Ces deux points, prédictibilité et mesure, entraînent que l'expérience ou l'observation se placent sous le contrôle d'hypothèses théoriques qui en retour peuvent se trouver confirmées ou invalidées dans et par les processus de mesure. Un trop grand écart entre ce que prévoyait l'hypothèse et ce qui est effectivement mesuré remet en cause l'hypothèse sur laquelle s'appuyait la procédure expérimentale. Ce n'est pas le lieu ici d'approfondir toutes les modalités<sup>5</sup> qui

ont été longuement discutées par les philosophes des sciences de ces rapports entre théorie et expérience, mais si nous ne retenons que ces deux éléments, prédiction et mesure, on comprend qu'aux yeux de notre penseur du XIX<sup>e</sup>, la cosmologie, incapable de situer ses objets dans un espace et un temps qui assurerait des prédictions vérifiables à travers des mesures, ne pouvait par répondre au critère de scientificité.

Nous devons avoir cela en tête lorsque nous verrons pourquoi la cosmologie a pu devenir scientifique au XX<sup>e</sup> siècle et répondre enfin à ces critères.

### **2.3 Le problème d'une science du tout et l'exigence d'universalité**

Enfin, le dernier argument qui fut avancé au cours du XIX<sup>e</sup> siècle contre l'idée même d'une cosmologie, fut celui de l'impossibilité d'une science du tout. Certes, les lois que tente de formuler la science à partir au moins de Newton doivent avoir une portée universelle (loi de la gravitation *universelle*) mais cela signifie que ces lois doivent s'appliquer partout et non pas qu'elles doivent rendre compte de l'univers dans sa totalité. Le scientifique – et c'est la garantie de l'objectivité – se trouve placé en dehors de son objet ou construit son objet en dehors de lui. Même les sciences humaines devront faire comme si l'homme était un objet auquel n'appartient pas celui qui tente de le connaître. Or, prétendre élaborer une science du Tout, dont nécessairement le scientifique fera partie, c'est en quelque sorte et contradictoirement se placer en dehors de ce Tout, ce qui est par définition impossible ; c'est, en cherchant une explication globale, prendre le point de vue de la divinité. On sait bien que les conflits qui sont nés, au cours de l'histoire, entre science et religion tiennent en partie à cette différence de points de vue. La religion propose une explication globale dont peuvent se déduire des explications plus partielles de certains phénomènes. La

science développe des explications locales, je veux dire qui ne concernent que certaines catégories de phénomènes. D'où d'ailleurs le morcellement des sciences en diverses disciplines même si les frontières disciplinaires changent au fur et à mesure du développement des savoirs. Or il arrive que les explications partielles déduites dans le cadre théologique entrent en contradiction avec les explications locales de la science. Dès lors, à partir du moment où la science adoptait *de facto* une forme – au moins dans l'idéal – de matérialisme méthodologique (la science ne doit pas faire appel dans ses explications à des entités autres que matérielles, même si ce que recouvre l'idée de matière a pu évoluer), elle ne pouvait accepter une approche du monde qui se fasse à partir d'une position surplombante, d'une transcendance. Alors que l'universel tel qu'il peut fonctionner en science est un universel construit à travers le jeu interactif des hypothèses et des expériences, celui de la cosmologie apparaissait comme un universel donné, si ce n'est révélé. De ce fait, la cosmologie pouvait apparaître à un penseur tel qu'Auguste Comte comme relevant au pire de la théologie, au mieux de la métaphysique, en tout cas de stades de la connaissance antérieurs aux sciences positives.

D'une certaine manière, telle que la science s'était définie dans sa démarche autant que dans ses objets, elle rejetait hors de son horizon toute approche de l'univers pris comme une totalité. Par une sorte de principe qui s'était mis en place peu à peu tout discours sur le monde, la nature, l'univers dans leur totalité, en tant qu'objet d'un savoir, se trouvait invalidé scientifiquement.

### **3. Les conditions d'une cosmologie scientifique**

Reste à voir comment la cosmologie a réintégré l'espace de la science au point d'en constituer aujourd'hui une part déterminante entre astronomie et physique fondamentale.

Si le XIX<sup>e</sup> siècle condamnait la cosmologie, celle-ci est désormais, depuis la première moitié du XX<sup>e</sup> siècle, parfaitement inscrite dans le champ scientifique. Cela ne signifie pas comme je l'ai dit que les sciences ou la philosophie des sciences ont libéralisé les critères de scientificité. Il semble bien plutôt que les développements des connaissances en astronomie et en physique théorique ont permis que se déploie une approche autorisant une dialectique de la théorie et de l'expérience dont l'univers dans sa totalité puisse être l'objet, et que la question de l'origine puisse être posée à nouveau frais en faisant l'économie de considérations mythiques.

J'ai rappelé comment de l'observation de la fuite des galaxies on était passé à l'hypothèse du Big-bang et, de là, à l'observation du fond diffus cosmologique. À partir de là une masse considérable de connaissances et de programmes de recherche s'est développée. On assiste bien à un retour à ce que j'ai appelé « la dialectique de la théorie et de l'expérience ». Car, les observations en cause sont en fait de véritables expériences, non pas tant parce qu'il y aurait une manipulation directe des objets comme cela peut se faire en physique ou en biologie mais parce que ces observations sont extrêmement instrumentalisées, en lien étroit avec des hypothèses théoriques dont elles peuvent permettre la validation ou l'invalidation à travers des prédictions d'observations et des mesures. Un exemple particulièrement remarquable de cette interaction entre conjectures théoriques et recherche expérimentale est celui de la détection des neutrinos d'origine cosmologique, la découverte de leur oscillation ou encore celui de l'étude des bouffées d'émission de rayonnement gamma extrêmement énergétique. Ainsi, de la prédiction de l'existence du neutrino dans le cadre de la physique théorique par Wolfgang Pauli en 1930, à la construction d'immenses détecteurs profondément enterrés, toute cette dialectique de la théorie et de l'ex-

périmentation se déploie alimentant de ses résultats la recherche cosmologique.

Les hypothèses que l'on rencontre aujourd'hui en cosmologie, énergie sombre, matière noire, voire multivers, s'enracinent sur des phénomènes observés qu'elles visent à expliquer et en retour elles appellent des procédures d'observations renouvelées hautement instrumentalisées. Elles se placent d'emblée dans un cadre théorique avec des exigences fortes de cohérence et définissent des programmes de recherche observationnels et expérimentaux dans lesquels interviennent aussi bien des projets d'observations satellitaires que des expériences de physique des particules dans des accélérateurs géants. La cosmologie devenait expérimentale dans la mesure où elle développait ses problématiques dans le croisement de l'astronomie et de la physique. Il est tout à fait remarquable, tout du moins aux yeux du philosophe, que le problème de l'unification de la relativité générale et de la mécanique quantique soit autant un problème cosmologique que strictement physique. En effet, ces deux grandes théories cohabitent finalement assez bien à notre échelle, surtout si l'on fait en sorte qu'elles s'ignorent, mais à l'échelle cosmologique où la question de l'unification de la gravitation avec les autres forces fondamentales devient critique, le problème prend un caractère aigu. En ce sens, l'univers, pris dans un devenir dont on peut reconstituer les étapes, devient une sorte de laboratoire dont, évidemment, on ne maîtrise pas les comportements, mais qui constitue pourtant un véritable champ expérimental auquel les théories physiques doivent s'affronter. On pourrait être tenté, à ce propos de la prise en compte cosmologique d'une histoire de l'univers, par une comparaison entre la cosmologie et la théorie de l'évolution en biologie où l'on a vu, là aussi, comment une forme d'expérimentation *a priori* difficile, s'introduire à partir des traces laissées par l'histoire. Je pense d'ailleurs qu'une telle comparaison ne serait pas sans intérêt d'un point de vue épistémolo-

gique et mériterait d'être approfondie. Cependant, cela dépasserait le cadre de ce bref exposé. D'une certaine manière, la théorie de l'évolution et la cosmologie ont introduit en science une véritable philosophie de l'empreinte et de la trace qu'il faut rationnellement interpréter.

Pour en revenir plus précisément au sujet, et en ce sens que je viens d'indiquer, la cosmologie est une discipline scientifique dans la mesure où elle a acquis ce caractère expérimental. Ses hypothèses ne tiennent pas d'une révélation ou d'*a priori* philosophiques mais sont commandées par des questions posées par des acquis observationnels en attente de réponses explicatives. Elles sont multiples et concurrentes donc elles s'inscrivent dans le cadre du débat normal de la recherche scientifique, contrairement à la cosmologie préscientifique de nature dogmatique. Et si, elles ont souvent un caractère spéculatif, toute la recherche tend à les replacer dans le cadre de la démarche scientifique, c'est-à-dire, pour reprendre une définition popperienne, de les rendre réfutables. Le philosophe curieux est particulièrement frappé par cette constante tentative de rendre réfutables les hypothèses que l'on trouve dans les exposés qu'il peut lire dans les ouvrages des cosmologues. Cela signifie que toute hypothèse doit répondre à une quadruple exigence :

- elle doit être cohérente avec ce que l'on sait déjà en particulier en physique ;
- elle doit rendre compte des phénomènes qui se présentent comme des questions ;
- elle doit proposer des procédures observationnelles ou expérimentales susceptibles de l'invalider ;
- si elle remet en cause les modèles, il faut qu'elle propose un modèle de substitution.

Ainsi, on sait que l'une des critiques faites à certaines théories des cordes tient à leur caractère quasi irréfutable (critique de

Peter Woit par exemple), puisque l'on peut toujours manipuler certains paramètres de manière à les rendre compatibles avec n'importe quelle observation. Et il semble bien que ce soit ce caractère là que les théoriciens tentent d'éliminer. Il n'en demeure pas moins que le cosmos peut devenir le lieu d'une théorie unificatrice de la physique. Certes, le philosophe se sent parfois troublé par la pluralité des hypothèses qui alimentent un débat dont de nombreux ouvrages et articles dans les revues de vulgarisation rendent compte. Il n'est pas toujours facile d'appliquer le rasoir d'Occam aux théories cosmologiques. Parler de matière noire ou d'énergie sombre, de dimensions supplémentaires de l'espace au-delà des trois que nous connaissons, d'univers multiples, etc. n'est-ce pas faire une orgie ontologique d'entités qui peuvent jouer un rôle explicatif considérable alors que les scientifiques ont du mal à dégager des procédures d'observation ou d'expérimentation qui en assureraient l'existence ? Il est cependant, encore une fois, tout à fait remarquable que cette préoccupation apparaisse incessamment dans la littérature disponible et d'une certaine façon soit sous-jacente aux débats qui se développent entre physiciens et entre cosmologistes. L'existence explicite de cette préoccupation, d'une certaine manière, rassure le philosophe sur la scientificité de la démarche cosmologique et suffit à écarter – du moins peut-on l'espérer – une dérive métaphysique ou théologique.

L'inconfort de la pensée soumise à la critique, au doute, voire à la polémique, la confrontation de théories en recherche de validations expérimentales (théorie des cordes, énergie sombre, matière noire ou multivers...) si elles peuvent déranger le philosophe ou quiconque aime le repos des certitudes, font le caractère scientifique de ce type de recherche.

## Pour conclure

Je me permettrai de revenir très rapidement sur la question des origines car, la prise en compte d'un univers en devenir, possédant une histoire ne signifie ni un retour aux mythes de la création ou au discours eschatologiques.

L'ancienne cosmologie mythique ou théologique que la démarche scientifique avait écartée de son champ d'investigation répondait toutefois, à sa façon bien souvent dogmatique, à une question fondamentale des rapports de l'homme avec le cosmos auquel il appartient et qu'en même temps il tente de projeter devant lui comme un objet de connaissance. Cependant cette ancienne cosmologie résolvait le paradoxe de cette extériorité dans laquelle l'individu se trouve malgré tout inclu en prenant le point de vue d'une transcendance, d'une divinité, quitte dans certains cadres religieux à attendre toute connaissance sur l'univers d'une révélation qui en dirait la naissance et le destin, l'origine et la fin. En devenant scientifique, la cosmologie ne change pas la question mais la manière d'y répondre.

Qu'elle ne change pas la question, cela est évident à lire avec quelles précautions, quelle vigilance les cosmologistes d'aujourd'hui présentent leurs hypothèses. Quant à la manière d'y répondre, même s'il demeure quelques penseurs qui tentent d'enrichir leur vision théologique du cosmos par les apports de la science et qui veulent maintenir au-dessus des hypothèses strictement scientifiques le postulat d'une transcendance ou le dogme d'une création, elle se fait dans le cadre de l'approche et de la démarche scientifique. La question même des origines devient une question mathématiquement exprimable et physiquement descriptible. Elle devient la question de trouver un sens physique compatible avec les modèles de la physique, tels qu'ils sont ou tels que l'on pourrait éventuellement les modifier, à ce point initial mathématique que nous livrent théorie et calculs. Elle

peut être dorénavant abordée dans le cadre d'une conception immanentiste en faisant l'économie de toute transcendance. Elle ouvre à une conception scientifique de la place de l'homme dans le cosmos. Ainsi le principe copernicien peut être discuté aujourd'hui d'un point de vue strictement scientifique sans nécessairement faire appel à une finalité engendrée par un acte créateur. La cosmologie nous permet donc de penser après coup, notre situation comme, pour évoquer encore une fois une comparaison que j'ai déjà faite, la théorie de l'évolution darwinienne nous permet de replacer l'homme dans l'histoire de la vie. Je dis penser après coup puisque si c'est là la tâche du philosophe, cette réflexion devra prendre en compte les acquis de la science : il est temps que la philosophie redevienne comme l'oiseau de Minerve.



# Chapitre 19

## Sur le caractère physique du concept de temps de la cosmologie

Michel Paty

### **I. Le problème du temps cosmologique**

Je voudrais examiner un problème particulier de la cosmologie physique contemporaine, soulevé voici un demi-siècle et toujours actuel malgré les développements considérables que cette science a connu depuis lors. Ce problème est celui de la nature du temps cosmologique, tel que la théorie cosmologique le propose, pris entre une forme mathématique (celle de l'espace-temps de la théorie de la relativité générale) et une signification physique quant aux phénomènes décrits (effective localement, mais problématique à plusieurs égards, notamment dans les dimensions extrêmes), et qui suscite toujours une diversité d'interprétations. Le concept de temps cosmologique est en continuité avec le concept de temps physique en général, tel que la science physique l'a élaboré progressivement, et qui constitue la base de la pensée scientifique du temps en usage dans les diverses sciences<sup>1</sup>. Il est donc utile de rappeler tout d'abord quelques aspects du temps physique, qui pourront servir d'indicateurs pour la signification physique du temps cosmologique. Emprunté à l'expérience commune du monde, puis défini dans une perspective scientifique comme variable ou concept du

changement, et d'abord du mouvement, mis en jeu en premier lieu dans les lois de l'astronomie, le temps fit son entrée dans la physique moderne avec l'énoncé de la première loi dynamique, celle de la chute des corps, formulée par Galilée : les distances parcourues par un corps dans sa chute sont proportionnelles aux carrés des durées temporelles correspondantes. Cette loi fut précédée de la constatation, par le même Galilée, de l'isochronisme des petites oscillations du pendule pesant, qui met aussi en jeu le temps dans un phénomène naturel élémentaire.

## **2. Mise en perspective du concept de temps**

Le concept de temps, élaboré et mis en œuvre par la physique pour l'étude des phénomènes de la matière, correspond à une grandeur ou variable de repère dans le changement de l'état d'un système physique, cet état étant rapporté à un instant donné et la transition entre deux états étant elle-même rapportée à la durée du temps qui les sépare. Initialement conçu selon une suite d'instants dénombrables, la pensée du temps entretint un lien privilégié, longtemps maintenu, avec l'arithmétique (analogue à celui de l'espace avec la géométrie). Le temps et la durée, représentés par des nombres<sup>2</sup>, ressemblent par leur forme, respectivement, à la représentation du point courant d'une ligne et à la distance prise sur celle-ci (qui sont des grandeurs spatiales), avec cette différence qu'il n'est possible de concevoir une ligne de temps (c'est-à-dire de la parcourir) que dans une seule direction, du passé vers le futur. Le cours du temps est unidirectionnel, orienté dans un seul sens, par définition.

Les phénomènes physiques (sous-tendus par une relation dynamique, telle la loi de la chute des corps), en mettant en relation le temps et l'espace (grandeur représentative de l'extension), octroient d'une manière ou d'une autre à ces concepts un caractère physique, direct ou indirect. Cette relation implique en

outre que le temps soit considéré comme une grandeur continue, à l'égal de la ligne, et en particulier de la droite infinie. Comme toute partie d'une droite, le temps, par la durée, était conçu dès lors comme indéfiniment divisible. Descartes remarquait qu'il s'agissait là d'une convention, puisqu'on ne disposait pas d'unités naturelles de durées plus petites que le jour et l'heure (indiquées par les mouvements des astres). C'était déjà reconnaître la dépendance du temps par rapport aux phénomènes de la nature, constatée aujourd'hui pour des fractions de durées bien plus petites (horloges atomiques, désintégrations des particules élémentaires, phases des régimes du temps de la cosmologie primordiale).

L'homéomorphisme de la suite (ou ligne) temporelle et de la droite infinie orientée se trouvait pleinement justifié par l'énoncé du principe d'inertie (Galilée, Gassendi, Descartes, repris par Newton). Cette propriété (physique) du mouvement donnait au temps un contenu physique comparable à celui de l'espace : ou, dans le vocabulaire de l'époque, le mouvement uniforme fournissait une « mesure naturelle du temps », selon l'expression de d'Alembert au XVIII<sup>e</sup> siècle<sup>3</sup>.

Nous voyons déjà que le temps porte, dès son introduction, un contenu physique qui tient à son lien aux événements du monde et à leur dynamique : ce contenu devait être explicité et précisé progressivement, à la faveur de l'évolution des connaissances dans les différents domaines de la physique, au-delà de l'étude du mouvement par la mécanique.

Si Descartes liait le temps dans sa nature (comme d'ailleurs l'espace de la géométrie) aux corps et aux phénomènes physiques qu'il accompagne, tel n'était pas le cas de Newton, qui voulait voir l'espace et le temps comme indépendants absolument des corps et des phénomènes, comme des grandeurs « vraies, absolues et mathématiques » (ce qui justifiait pour lui le traitement mathématique du mouvement des corps, contenus dans l'espace

et dans le temps, mais sans interaction avec ceux-ci). Cependant, malgré ce caractère absolu, la définition des notions d'espace et de temps telle que Newton la précisait dans les *Principia* les mettrait du moins en concordance avec l'exigence de les faire servir à la description du monde physique<sup>4</sup>. En quelque sorte, par son insertion étroite dans la constitution de la théorie du mouvement des corps, même sous une forme encore incomplète (il est, dans les *Principia*, la variable implicite ou muette du mouvement décrit par une géométrie infinitésimale ou des limites), le temps acquerrait déjà la signification d'un concept physique.

Ce contenu physique encore partiel du concept de temps (partiel, puisqu'il resterait considéré comme « absolu », depuis la mécanique de Newton jusqu'à la transformation opérée par la théorie de la relativité d'Einstein) serait plus tangible avec la reformulation différentielle de la loi de causalité « newtonienne » par d'Alembert, Euler puis Lagrange, avec l'expression différentielle de la loi de l'accélération  $F = m \frac{d^2x}{dt^2}$ , qui exprime en fait, comme cela serait remarqué ultérieurement<sup>5</sup>, le lien relationnel et de définition mutuelle des quantités en jeu, force, masse, accélération, cette dernière faisant intervenir la grandeur temps. Le temps joue un rôle fondamental dans cette loi de la causalité physique, qui lui fait réciproquement acquérir une signification physique plus explicite : c'est ainsi qu'il fut désormais conçu dans la physique tout entière qui suivrait. Cette signification physique serait encore précisée et épurée, notamment avec l'introduction du concept de champ à propagation progressive (dans le temps et dans l'espace), élaboré de Faraday à Maxwell, et dont les implications sur la redéfinition nécessaire des grandeurs espace et temps seraient explicitées et exprimées par la théorie de la relativité d'Einstein : celle-ci les rend plus physiques par la perte de leur caractère d'« absolus » obtenue en les soumettant au respect du principe physique de relativité (invariance des lois physiques sous les transformations dues au

mouvement, uniforme et rectiligne – ou d’inertie – dans le cas du principe de relativité restreinte).

En fin de compte, au terme des élaborations et réélaborations du concept de temps, et surtout avec la théorie de la relativité restreinte puis générale, il apparaît que le temps dépend des phénomènes de la même façon que les phénomènes dépendent du temps. Cette réciprocité est encore seulement partielle avec la théorie de la relativité restreinte, l’espace-temps – de structure quasi-euclidienne – y restant encore un cadre ou contenant dont la forme est indépendante de ce qu’il contient et des actions qui s’y produisent. Elle est complète avec la théorie de la relativité générale, ou théorie relativiste de la gravitation : le déroulement du temps (emboîté dans l’espace-temps) et les durées y sont affectés par les champs de gravitation qui entrent dans la structure de l’espace-temps<sup>6</sup>. Dès lors le temps possède un contenu pleinement physique qui le définit totalement (de même que l’espace).

### **2.1 Le cours orienté du temps et la causalité temporelle**

Avec la mécanique et la physique classiques, certains phénomènes physiques étaient encore conçus comme échappant à la considération du cours du temps : ceux liés à l’idée de simultanéité (absolue, liée au temps absolu newtonien) et au concept d’action instantanée à distance de l’attraction gravitationnelle de Newton, des forces laplaciennes ou de l’électrodynamique d’Ampère. Cette indépendance apparaîtrait en fait comme une limitation de la connaissance physique. Elle serait levée, pour la première, par la théorie de la relativité restreinte d’Einstein, qui débute par une critique de la simultanéité absolue et montre la dépendance des jugements de simultanéité par rapport à l’état de mouvement des référentiels considérés. Cette indépendance temporelle serait levée, pour la seconde, par le remplacement du concept d’action (instantanée) à distance par celui de champ à propagation de pro-

che en proche, dont la pleine expression requerrait la même théorie de la relativité (restreinte pour les champs électromagnétiques, générale pour les champs de gravitation). Toutes les actions physiques seraient désormais conçues comme s'opérant, par la causalité, selon le cours orienté du temps.

La directionnalité ou orientation univoque du temps<sup>7</sup>, posée par définition en conformité avec l'expérience et l'observation, était récupérée dans la théorie newtonienne du mouvement des planètes, comme ultérieurement dans les lois de la physique classique, par le recours à la donnée des « conditions initiales ». D'une manière générale, la causalité physique, exprimée par la mise en équations différentielles, ne porte que sur des actions locales, instantanées (dans le sens que donne la conception différentielle des grandeurs continues<sup>8</sup>), d'ailleurs conçues comme réversibles : l'orientation du cours du temps (local et global) doit toujours être imposé « du dehors » (par rapport à la causalité différentielle seule), par la considération des conditions initiales.

Avec la connaissance de la valeur finie de la vitesse de la lumière, puis de la nature ondulatoire de cette dernière (des ondes se propageant dans l'espace) et enfin des champs à propagation progressive à vitesse finie, le cours du temps, avec son orientation du passé vers le futur, se manifestait comme une caractéristique physique universelle qui devait être naturellement adjointe aux causalités locales. Pour l'incorporer, l'électrodynamique de Maxwell devait éliminer des solutions mathématiquement possibles, celles des potentiels avancés<sup>9</sup>. En ne gardant que les potentiels retardés (qui tiennent compte de la précédence de la source du potentiel sur ses effets), Maxwell imposait aux solutions la condition physique de l'orientation du temps. La théorie de la relativité restreinte fournit ensuite les propriétés relationnelles de l'espace-temps, contraintes par le caractère de limite de la vitesse de la lumière dans le vide,  $c$ , devenue, sous la forme  $c\sqrt{-1}$ , la « constante de structure de

l'espace-temps »<sup>10</sup>. Ce faisant, elle maintient évidemment l'orientation du cours du temps.

Le formalisme de l'espace-temps quadridimensionnel de Minkowski permet d'exprimer de manière quasiment géométrique ces propriétés, à l'aide du « cône de lumière » ayant pour base l'espace (avec ses trois axes de coordonnées), et pour axe le temps, ou plus exactement la quatrième coordonnée, proportionnelle au temps ( $c\sqrt{-1} \cdot t$  (ou  $ict$ ). La distinction du temps par rapport aux coordonnées d'espace est exprimée par la « signature » différente du terme de la dimension temporelle dans l'invariant métrique  $ds^2$ . Celui-ci a la forme, en coordonnées quadridimensionnelles homogènes ( $x_i$ , avec  $i = 1, 2, 3, 4$ ) :  $ds^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 + dx_4^2$ . Cette forme correspond, en coordonnées spatio-temporelles usuelles, à :  $ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 - c^2dt^2$  <sup>11</sup> avec, pour les trois coordonnées d'espace :  $x_1 = x$ ,  $x_2 = y$ ,  $x_3 = z$ , et, pour la quatrième coordonnée (après Poincaré et Minkowski),  $x_4 = ict$ .

Le « cône de lumière » détermine trois régions dans l'espace-temps quadridimensionnel de la théorie de la relativité restreinte. La nappe ou surface du cône, d'équation  $s^2 = 0$  (avec  $s^2 = r^2 - c^2t^2$ ,  $r$  étant la variable d'espace) ; la nappe intérieure, ou région du « type temps », définie par  $s^2 < 0$  ; et la nappe extérieure, ou région du « type espace », définie par  $s^2 > 0$ . Seules les deux premières ( $s^2 \leq 0$ , donc  $r \leq ct$ ) correspondent à des actions physiques possibles et sont ainsi dites *régions physiques* : leurs points (correspondant à des événements d'espace-temps) sont mutuellement séparés par des distances spatiales qui peuvent être franchies à une vitesse inférieure ou égale à la vitesse de la lumière et peuvent donc être mis en relation par des actions causales. La région extérieure, du « type espace », est *non physique* au contraire, puisque ses points sont mutuellement séparés par des distances spatiales trop grandes pour être franchies même

avec la vitesse de la lumière ( $r > ct$ ), et ne peuvent donc pas être mis en relations de causalité<sup>12</sup>.

La métrique de l'espace-temps de Minkowski définit la région (physique) des actions causales en explicitant la distinction de nature (de nature physique) entre les dimensions spatiales et la dimension temporelle, malgré leur formulation homogène comme coordonnées d'espace à quatre dimensions. Cette homogénéisation permet de traiter formellement l'espace-temps par une géométrie à quatre dimensions, ce qui présente des avantages importants (notamment pour la possibilité d'utiliser des tenseurs en relativité générale). Mais ici la forme (mathématique) n'épuise pas le contenu physique (qui concerne la matière et ses phénomènes), et le temps préserve sa différence par rapport aux coordonnées spatiales. La symétrie de la forme spatio-temporelle, qui est effective dans les équations et dans leurs transformations sous les changements de référentiels en mouvement relatif, et se trouve exprimée par la covariance, est d'une certaine manière « brisée » si l'on considère la signification propre de la quatrième variable, proportionnelle au temps, dès lors qu'il est question de caractériser l'aspect temporel en tant que tel des phénomènes physiques.

Le temps a en effet un rapport spécifique à la quatrième coordonnée d'espace-temps considérée formellement (cette spécificité étant indiquée par sa signature négative dans la métrique), qui fait différer celle-ci d'une coordonnée proprement géométrique, et exprime une hétérogénéité quant à son contenu physique. Jamais le concept d'espace-temps n'a éliminé la différence de nature (c'est-à-dire le type de contenu physique) entre les coordonnées d'espace et le temps. S'il a permis de dépasser cette différence dans l'expression des lois fondamentales de la cinématique et de la dynamique, par la covariance, il ne l'a pas pour autant éliminée.

L'autre différence foncière du temps par rapport aux coordonnées spatiales est évidemment l'orientation de son cours, qui reste toujours imposée, par définition, pour les raisons indiquées plus haut : dans le cône d'espace-temps, l'axe du temps est orienté dans le sens du passé vers le futur, et détermine la direction des relations causales à l'intérieur et sur le cône de lumière. La relation de causalité *implique que la cause est avant l'effet*, et la direction ainsi fixée dans un seul sens de la quatrième dimension d'espace-temps la fait encore différer physiquement des trois autres, les dimensions d'espace, qui sont sans orientation. Cette direction imposée par une définition première est indépendante de la forme de la *loi différentielle de causalité*, qui peut être (et se trouve être, généralement, dans la plupart des phénomènes élémentaires) formellement symétrique « entre le passé et le futur », suivant l'expression courante, c'est-à-dire, en réalité, entre les états immédiatement successifs du système physique que la relation de causalité lie entre eux. L'intégration de l'équation différentielle fournit les grandeurs finies du système ou du phénomène physique en fonction du temps (et d'autres variables éventuelles) en y insérant les constantes d'intégration ou conditions initiales, c'est-à-dire les valeurs de ces grandeurs à un temps donné, qui correspondent à la fixation effective du cours du temps.

## **2.2 Orientation temporelle et réversibilité causale**

La théorie de la relativité générale modifie les caractéristiques acquises avec la relativité restreinte seulement en ceci que le temps (avec l'espace auquel il est lié dans l'espace-temps, variable en tout point  $x$  de ce dernier, par le tenseur métrique)<sup>13</sup>, est lié à la matérialité des champs de gravitation, qui ont pour source les masses (en fait, les masses-énergies). Les durées des phénomènes sont affectées par les champs de gravitation dans lesquels ceux-ci se produisent (ralentissement des horloges, avance séculaire du périhélie de la planète Mercure...)<sup>14</sup>.

Il est utile ici de préciser que l'orientation du temps du passé vers le futur, choisie par définition de la signification physique du concept de temps, n'est pas restreinte aux événements ou phénomènes macroscopiques relevant de la physique classique ou relativiste, mais s'est trouvée étendue aux événements élémentaires qui échappent à la perception et dont les phénomènes macroscopiques résultent. Nous dirons plus loin quelques mots sur le rapport de l'orientation du temps à l'irréversibilité de la thermodynamique. Mais les événements considérés dans l'espace-temps de Minkowski sont le plus souvent « réversibles », au contraire de l'« irréversibilité » constatée pour les systèmes fermés de la thermodynamique, et l'on continue évidemment à les considérer selon l'orientation de l'axe du temps du passé vers le futur. Bien que les expressions « réversibilité » et « irréversibilité » semblent à première vue désigner le temps dans les transformations entre des états, elles se rapportent en réalité à ces états eux-mêmes. Dire que la loi différentielle de causalité est « réversible » ou « invariante par renversement du temps »<sup>15</sup> ne signifie pas que l'on parle d'une orientation inverse du cours physique du temps, qui serait contraire à la définition habituelle. Par « renversement » ou « inversion » du temps, on désigne l'ordre de la transition des états d'un système physique : soit de l'état A à l'état B, soit, pour l'ordre inverse, de l'état B à l'état A. La réversibilité exprime simplement que les équations causales des deux transitions  $A \rightarrow B$  et  $B \rightarrow A$ , considérées selon la même orientation du temps (d'ailleurs indiquée par le sens de la flèche), sont identiques.

Admise universellement comme inhérente aux phénomènes physiques élémentaires aussi bien que complexes, du moins ceux constatés à l'échelle de l'expérience humaine (macroscopiques et jusqu'à un certain point microscopiques), l'orientation directionnelle du temps est maintenue (toujours par définition) dans les domaines qui échappent à l'observation ou à l'expérience

directes. Sans une même orientation du temps pour tous les événements élémentaires, accessibles ou non à l'expérience, l'orientation du temps (sa « flèche ») serait impossible à retrouver au niveau où elle est constatée.

Tout en étant toujours posée par définition, et non déductible théoriquement, l'orientation du temps acquiert, par ces convergences et par son intégration dans les théories physiques qui confèrent leurs contenus aux concepts, un statut de nécessité puisqu'elle s'intègre de plus en plus à la théorie dans sa forme, lui devenant en quelque sorte inhérente, par la cohérence et l'économie de la formulation ainsi obtenue, depuis son origine dans l'expérience commune, puis en passant de la mécanique newtonienne à la théorie électromagnétique et à la théorie de la relativité restreinte – sans compter encore la thermodynamique et la cosmologie dont nous allons parler. En fin de compte, malgré son origine empirique et de définition, elle n'est plus tant extra-théorique qu'avant et elle apparaît ainsi tout autant rationnelle, parce qu'unificatrice de phénomènes, que l'énoncé d'autres propriétés ou principes physiques universels, comme le principe de relativité, ou la conservation de l'énergie, qui gouvernent l'ensemble des phénomènes physiques. On conçoit difficilement (c'est un euphémisme) la physique sans l'orientation unidirectionnelle du temps, de telle sorte que toute proposition qui dénierait celle-ci serait généralement considérée comme étant non physique, ou de pure fantaisie.

### ***2.3 L'orientation du temps et l'irréversibilité***

En ce qui concerne la thermodynamique, son second principe est celui de l'augmentation de l'entropie avec le temps pour les systèmes fermés, au niveau macroscopique, qui correspond à l'irréversibilité des phénomènes en suivant le cours du temps : elle incorpore l'orientation de ce cours jusqu'à s'identifier à elle, en ce sens que l'ordre causal des phénomènes selon la thermodyna-

mique se confond avec l'orientation du cours du temps. L'orientation directionnelle du temps, qui n'affecte pas la réversibilité pour les transitions entre les états des systèmes élémentaires (au niveau moléculaire), la fait perdre au niveau global d'un ensemble fermé de tels systèmes, par l'effet de modifications des espaces de phases dans les transformations successives de ces états : une dissymétrie s'instaure ainsi entre les états initial et final du système thermodynamique, de telle sorte que le retour aux configurations moléculaires initiales est de plus en plus improbable : l'évolution thermodynamique selon la direction temporelle aura pour ainsi dire « gelé » les réversibilités des processus causaux élémentaires des systèmes individuels en rétrécissant leurs espaces de phases, et produit au bout du compte l'irréversibilité de la transition de leur système global d'un état vers un autre.

L'irréversibilité des transformations des systèmes matériels, que la thermodynamique érige en principe physique fondamental de l'évolution des systèmes fermés, fut évidemment constatée et éprouvée bien avant sa formulation théorique, et exprimée en termes du cours orienté du temps, ce temps lui-même exprimant la succession des heures, des jours et des années. Les deux pouvaient bien alors être confondus, comme dans la phrase d'Héraclite selon laquelle « on ne se baigne pas deux fois dans le même fleuve » avec sa double interprétation possible, selon qu'on y voie l'orientation ou la dégradation. L'idée du temps et de son cours orienté eut partie liée dès le début avec l'irréversibilité des choses. L'irréversibilité indiquait la flèche du temps du monde, le caractère par nature orienté de son cours. Si la science en se constituant fit ensuite appel au temps et à son orientation définie, indépendamment de l'irréversibilité et bien avant d'être en mesure de reconstituer celle-ci, ce fut probablement malgré tout cette dernière, telle qu'éprouvée dans l'expérience commune, qui dicta l'orientation univoque du temps comme étant de définition nécessaire.

Même en abstrayant le temps des phénomènes complexes de l'expérience du monde (en en faisant une variable mathématique, celle de la succession, conçue comme une sorte d'équivalent immatériel de la ligne), la pensée humaine lui garda comme propriété spécifique d'avoir un cours orienté. La reconstruction du temps, des processus élémentaires à ceux, complexes, de la thermodynamique, y trouverait une cohérence : l'orientation univoque du temps dans son cours permet de concevoir comment de l'irréversibilité est produite à partir de réversibilités élémentaires<sup>16</sup>. On peut d'ailleurs considérer que si la directionnalité du temps n'est pas arbitrairement choisie, mais nécessaire, c'est essentiellement parce qu'elle permet de rendre compte de l'irréversibilité thermodynamique, bien qu'elle en soit conceptuellement distincte (et que celle-ci soit d'abord l'irréversibilité des phénomènes<sup>17</sup>). Il est même possible de proposer de fonder scientifiquement le cours unidirectionnel du temps sur la thermodynamique, qui garantit finalement son caractère pleinement physique : c'était la manière de voir d'Einstein. En somme, selon cette conception, la lourde « flèche du temps » des évolutions irréversibles justifie le choix de l'orientation de la « flèche » plus légère des successions élémentaires.

Plus récemment, la cosmologie contemporaine a introduit une autre flèche du temps, celle du temps cosmique. Il s'agit d'un temps universel, relié à l'évolution physique de l'univers, y compris jusqu'aux tout premiers stades de celui-ci (dont traite la cosmologie quantique primordiale) : nous devons l'examiner par rapport à l'orientation directionnelle du cours du temps aussi bien que par rapport à la flèche du temps de la thermodynamique.

### **3. Aspects du temps cosmologique**

La cosmologie gravitationnelle, relativiste, fondée sur la théorie de la relativité générale (qui l'a rendue possible)<sup>18</sup>, est une appli-

cation de la théorie de la relativité générale à l'univers entier, dont la structure métrique et l'évolution temporelle sont déterminées par les masses-énergies qu'il contient. La cosmologie évolutionniste s'est assez vite imposée, étayée par l'éloignement mutuel des galaxies constaté en astronomie lointaine, par l'observation du déplacement de leur spectre optique vers le rouge. Ce mouvement d'expansion de l'univers est rendu par la loi de variation du rayon de l'univers matériel en fonction du temps, ce temps étant le temps cosmique ou temps cosmologique universel. On peut considérer, prolongeant nos réflexions précédentes, qu'il existe une situation de relation réciproque entre le rayon d'univers  $R(t)$ , caractérisé par champ de gravitation de l'ensemble de la matière-énergie répartie dans le volume correspondant, et le temps  $t$  sur l'échelle du temps, et que cette relation assure le caractère pleinement physique du temps cosmique.

On peut regarder le temps cosmique suivant lequel s'effectue son évolution comme le temps propre de l'univers. On pourrait à première vue, pour maintenir la conception relativiste stricte de l'équivalence des référentiels en mouvement relatif, définir autant de temps cosmologiques partiels qu'il y a de régions (en mouvement d'éloignement par rapport aux autres) d'où il est possible d'avoir un point de vue sur les autres. On voit bien cependant tout l'intérêt qu'il y a à prendre un point de vue intégré ou moyen, reconstruit intellectuellement à partir des points de vue possibles, qui octroierait une vue d'ensemble sur l'univers. C'est en fait ce à quoi reviennent les « modèles cosmologiques » (nécessairement globaux et simplificateurs, mais susceptibles d'indiquer quelques grands traits de la structure de l'univers), que l'on substitue dans la pratique à une théorie cosmologique plus exacte (qui n'aurait pas besoin d'hypothèses complémentaires ou de paramètres à fixer). Dans de tels modèles, le temps et l'espace de l'univers sont en quelque sorte découplés l'un et l'autre dans l'espace-temps. La cosmologie comme

science d'un univers unique considéré dans sa totalité est une particularité au sein de la connaissance scientifique qui oblige à des modifications par rapport aux conceptions usuelles, notamment de la physique, à laquelle elle emprunte ses éléments théoriques.

La définition d'un rayon d'univers et d'un temps cosmique correspondant font parties de ces spécificités, avec la nécessité de préciser certaines conditions physiques et certains paramètres qui font perdre la symétrie entre les systèmes de référence, inhérente à la théorie de la relativité générale avant son application à l'univers. Le temps cosmique est le temps unique de l'univers que l'on tente de représenter à l'aide des modèles d'univers. La théorie de la relativité générale permet d'écrire l'équation de tels modèles cosmologiques, dont les solutions sont les lignes spatio-temporelles d'univers, qui peuvent être parcourues spatialement suivant le temps cosmologique correspondant.

Sur l'échelle du temps cosmique, passée la période très brève de l'univers primordial, qui est l'objet de la théorie ou modèle « standard », dits du « Big-bang », l'évolution du rayon de l'univers avec le temps est déterminée par l'effet du champ de gravitation de la matière-énergie totale de l'univers.

D'un côté, la loi d'évolution de l'univers soumis à son expansion constatée par la fuite des galaxies et à l'attraction gravitationnelle des masses et des énergies qu'il contient (galaxies et diverses formes de matière et de rayonnement) est fournie par la théorie de la relativité générale, par l'équation donnant la variation du rayon de l'univers en fonction du temps,  $R(t)$ . La forme de  $R(t)$  indique l'augmentation du volume d'espace occupé par l'univers dans son mouvement d'expansion et la loi de cette augmentation (loi de Hubble sur la vitesse d'éloignement des galaxies) : celle-ci indique que l'univers a évolué jusqu'à son état présent à partir d'états de matière très denses ou très chauds et de volume ramassé, correspondant, dans les premiers intervalles

de temps (extrêmement petits), aux conditions de la matière subatomique des particules et des champs quantiques. L'espace de l'univers matériel est auto-engendré dans son propre mouvement d'expansion<sup>19</sup>.

D'un autre côté, on peut considérer l'univers primordial comme un système thermodynamique, en l'occurrence un corps noir (ou four à l'équilibre thermique) dans les conditions d'énergie et de densité d'énergie données à chaque instant, qui correspondent aux états de la matière de la physique quantique des particules et des champs. Le rythme de l'expansion de l'univers est beaucoup plus intense dans cette région (qui va de  $t = 10^{-43}$  s, ou temps de Planck, à quelques 100 000 années) que dans celle qui la suit jusqu'au temps présent, où le champ gravitationnel de la théorie de la relativité générale est dominant.

La combinaison des deux modèles permet de retracer l'évolution des états de l'univers au cours du déroulement du temps cosmique, du « Big-bang » à la fuite des galaxies à la faveur de l'expansion de l'univers.

### **3.1 Le caractère physique du temps cosmologique dans l'univers primordial**

Avec la « cosmologie primordiale », si nous revenons aux conditions des « premiers instants » de l'univers, la gravitation n'est plus seule pour déterminer les propriétés de l'univers dans son ensemble, puisqu'interviennent désormais les autres champs d'interaction de la matière. La théorie de cet état de l'univers indique qu'il y a un lien physique entre le temps et la nature du champ d'interaction dont le régime est dominant dans le domaine temporel ou énergétique considéré. Le temps cosmique est, dans les conditions physiques de cet univers, fourni à la fois par la relativité générale (par l'équation donnant  $R(t)$ ), et par la thermodynamique de l'univers considéré comme un « corps noir » à très haute température (due à son extrême densité, étant donné

la relation entre l'énergie totale et le rayon (ou le volume) de l'univers en fonction du temps)<sup>20</sup>.

Si l'on se reporte aux conditions de l'univers primordial, le modèle cosmologique indique qu'il existe un lien physique entre le temps et la nature du champ d'interaction dont le régime est dominant dans le domaine temporel ou énergétique considéré<sup>21</sup>.

Selon la théorie ou « modèle » standard généralisé, qui joint la théorie du Big-bang pour l'univers et celle des champs de jauge pour la matière subatomique<sup>22</sup>, toutes deux requises dans cette région de leur jonction, qui est celle des très hautes densités (asymptotiques) d'énergie, les symétries fondamentales liées aux formes de champs se brisent en descendant le cours du temps, en découplant les champs (totalement unifié, gravitation comprise ; de grande unification ; électrofaible ; puis les quatre champs séparés ; et, après le découplage de la matière et du rayonnement, la dominance du champ gravitationnel devenu classique (non quantique) engendrant ensuite la structure de l'espace-temps continu de l'univers. Ainsi, dans ce modèle théorique de l'évolution de l'univers, est-ce la forme du champ dominant dans chacune de ces phases temporelles primordiales qui y détermine la structuration de l'univers au cours de cette phase : il est donc approprié de considérer que le temps et le champ s'y déterminent mutuellement. Le temps cosmologique porte le contenu du champ de matière dominant correspondant.

Ce caractère physique du temps est assuré dans le domaine où l'on sait déterminer le régime des lois physiques de la matière. La forme du rapport de l'espace au temps est affectée par les phénomènes matériels qui s'y produisent. Contrairement à la définition newtonienne tautologique qui donne au temps absolu un cours uniforme, le rapport qui lie réciproquement le temps et les phénomènes permet de parler de variation du régime temporel. Dans la théorie de la relativité générale, les durées sont dilatées dans les champs de gravitation (les horloges retardent). En cos-

mologie, le cours du temps se trouve très éloigné de l'uniformité, si l'on mesure son flux à l'aune de la succession des phénomènes cosmologiques correspondants (globalement représentés par le rayon d'univers). Dans l'univers primordial, la variation du rythme du temps, c'est-à-dire de la succession des états physiques de l'univers est incomparablement plus rapide que dans les champs (classiques) de gravitation de la relativité générale ; le rythme de cette succession est lié aux propriétés des champs quantiques de la matière dans les états de densité d'énergie aux temps considérés, du moins pour les temps supérieurs au « temps de Planck »<sup>23</sup>. Pour les valeurs inférieures au « temps de Planck », l'on se trouve dans l'ignorance de la loi physique dominante (gravitation quantique ou autre type de champ d'interaction).

Mais du moins le caractère physique de la matière dans cet univers hyperconcentré et dense nous assure-t-il que le problème de la « singularité initiale », initialement posé par l'extrapolation des échelles de temps et d'espace dans la perspective de la cosmologie relativiste (au sens de la relativité générale), n'est plus de mise. Le concept d'espace aura dû subir une modification imposée par la nature quantique de la matière, et celui de temps, maintenu jusqu'ici comme paramètre, perd peut-être dans ces régions une signification définie. D'autres concepts plus adéquats à la physique régnant sous ces conditions s'imposeront peut-être, si nous en savons un jour un peu plus dans ce domaine.

### **3.2 Le temps cosmologique de la cosmologie relativiste est-il physique ?**

Ce cadre théorique d'ensemble de la cosmologie comprenant la période quantique primordiale suscite actuellement un consensus majoritaire (mais non unanime, les réserves portant essentiellement sur la théorie du Big-bang). Avant son établissement

(dans les années 1970-1980), la cosmologie ne prenait en considération que le champ de gravitation. Les modèles cosmologiques d'univers reposaient sur la théorie de la relativité générale et sur les distributions possibles de la matière de l'univers. Une théorie de l'univers était une solution des équations de la relativité générale appliquée à l'univers dans son ensemble. Ces solutions devaient fournir les propriétés de l'espace et – surtout peut-être – du temps dans les très grandes dimensions, aux confins de l'univers physique.

C'est dans ce contexte du temps cosmique et cosmologique (du moins avant les considérations sur la cosmologie primordiale, et donc dans le cadre de la cosmologie de la seule relativité générale, statique aussi bien que non statique), que des considérations comme celles proposées par le grand mathématicien et logicien Kurt Gödel, à partir de certains problèmes ouverts posés par des théories physiques contemporaines (en l'occurrence, la cosmologie gravitationnelle), sont venues jeter le doute sur le caractère physique (c'est-à-dire objectif) du temps, et notamment sur l'idée d'un cours unique et universel du temps. Elles nous donnent l'occasion de nous interroger sur la signification physique du temps comme grandeur dans les situations limites invoquées dans ces spéculations.

Je m'en tiendrai, dans ce qui suit, à évoquer l'aspect physico-mathématique du problème soulevé par Gödel, bien que, dans l'esprit de ce dernier, il se fut agi fondamentalement aussi d'un problème philosophique, comme il le développe dans le premier de ses travaux sur le sujet, paru dans un hommage collectif à Einstein, sous un titre explicite à cet égard : « Remarque sur le rapport de la théorie de la relativité à la philosophie idéaliste »<sup>24</sup>. C'est d'ailleurs à cet aspect physico-mathématique qu'Einstein s'intéressa dans sa réponse, l'aspect philosophique lui paraissant (à juste titre), « totalement étranger » à la question évoquée<sup>25</sup>. Gödel plaçait son paradoxe du temps cosmologique dans une

argumentation visant à montrer que le temps de la théorie de la relativité, restreinte aussi bien que générale, ne pouvait être objectif, et rejoignait ainsi la conception « idéaliste » qu'il attribuait – à tort – à Kant, celle de la négation de l'objectivité du changement, en raison de la mise en avant par celui-ci de la perception. Le temps relatif de la théorie de la relativité restreinte faisait perdre, à ses yeux, l'objectivité des relations causales. Mais c'était confondre (ce qui est étonnant de sa part), la relativité de la simultanéité et la causalité qui reste, dans l'espace-temps d'Einstein-Minkowski, absolue<sup>26</sup>.

L'existence de certaines solutions, pour le temps cosmologique, qui viendraient ruiner l'objectivité du temps, couronnait ainsi à ses yeux, le tableau. L'idée de mettre en contradiction philosophique la théorie de la relativité, irrémédiablement idéaliste (d'après lui), et son auteur (Einstein), qui s'affirmait farouchement réaliste (notamment dans le vif débat de l'époque autour de la mécanique quantique), aura peut-être séduit le brillant logicien... Le côté amusant de la chose (dont il se délecta peut-être) étant le parallèle (que n'aurait pas nié Niels Bohr) entre la mise en avant (que fait Gödel) de l'*observation* avec les « observateurs » pour définir la réalité relativiste (quoiqu'il eût suffi de parler de référentiels), et celle de la *perception sensible* pour qualifier l'« idéalisme » kantien (supposé), alors que la théorie de la relativité était censée avoir renversé la conception kantienne de l'espace et du temps... Les deux, la philosophie de la relativité et la kantienne, étaient renvoyées dos à dos, ou mises dans le même sac... Mais les spéculations philosophiques très particulières (quelque peu machiavéliques et plutôt mal fondées) de Gödel n'enlèvent rien à l'intérêt du problème considéré au plan physico-mathématique par ses solutions de cosmologies relativistes<sup>27</sup>.

Gödel souleva, dans des articles parus en 1949 et 1950, la question de la signification (dans la perspective de sa réalité

objective) du temps cosmologique tel qu'il est donné par certaines solutions curieuses de modèles cosmologiques, ces modèles eux-mêmes paraissant pourtant vraisemblables du point de vue physique<sup>28</sup>. Le premier de ces articles donnait l'essence de l'argumentation, davantage développée et plus technique dans les suivants, qui considéraient des modèles cosmologiques plus raffinés, non statiques et prenant en compte l'expansion de l'univers telle que la révélait le décalage vers le rouge des galaxies, et donc plus proches des propriétés d'un univers physique tel que le nôtre.

Gödel considère un univers en rotation par rapport à toutes ses masses, ou galaxies, spatialement homogène, statique dans un premier temps, et à constante cosmologique négative. Il étendra dans un second temps ce modèle à un univers en expansion<sup>29</sup>. Appliquant la théorie de la relativité générale à ces modèles, il obtient les équations d'univers, dont il calcule les solutions. Parmi ces solutions, certaines ont l'allure attendue normalement, c'est-à-dire de lignes d'univers ouvertes, allant du passé vers le futur, mais d'autres, sont fermées sur elles-mêmes. Sur de telles lignes d'univers en boucle, un mobile pourrait, sans changer sa direction du passé vers le futur, se retrouver au voisinage du lieu (du point) d'espace-temps dans lequel il s'est déjà trouvé dans le passé, après avoir traversé l'espace de l'univers tout entier. L'orientation temporelle se trouve en fait brouillée par une telle éventualité qui revient à voyager dans le passé, et n'est plus effective. (Gödel décrit la situation, bien connue de la littérature de science-fiction, de quelqu'un qui se rencontre lui-même à un moment antérieur de sa vie, avec les paradoxes inhérents à une telle occurrence).

Les conditions pratiques de réalisation d'un voyage de ce genre échappent évidemment aux possibilités habituelles, ce qui exclut, à vue d'homme, qu'il puisse être effectivement réalisé (immenses distances cosmologiques à parcourir, vitesses excep-

tionnellement élevées, quantité « astronomique » de carburant requise, etc.). Mais une impossibilité pratique ne vaut pas impossibilité de droit. Pour Gödel, on ne peut exclure que notre univers, ou un univers réel possible, soit configuré ainsi, faute d'avoir pu mettre jusqu'ici à l'épreuve des éventualités de ce genre. Bien que nous ne puissions en faire l'expérience, il se pourrait bien qu'il en soit ainsi dans la réalité. Pour de tels mondes, la notion d'« écoulement objectif du temps » perd, selon Gödel, toute signification. La possibilité de telles solutions cosmologiques ne permet pas, selon lui, de formuler un temps physique ayant un écoulement objectif. La direction du cours du temps dans de tels cas n'est pas définie, d'où s'ensuit le caractère non physique du temps.

Cependant, la rhétorique que Gödel emploie dans son argumentation n'est pas sans défaut. Même si, estime-t-il, le temps cosmologique peut être considéré comme s'écoulant objectivement dans l'univers où nous nous trouvons nous-mêmes, la simple possibilité de l'existence d'autres univers « réalistes » (ou vraisemblables) dans lesquels il n'y ait pas d'écoulement objectif du temps nous permet de douter de l'objectivité du nôtre. Tous les modèles d'univers envisagés par Gödel étant compatibles avec les conditions d'univers physiques réels (courbure d'espace-temps, décalage vers le rouge c'est-à-dire expansion, dans ses modèles ultérieurs, etc.), il s'ensuit que les différences entre eux résident simplement dans celles des arrangements de la matière. On devrait donc admettre, pour Gödel, que « l'existence ou non d'un écoulement objectif du temps (c'est-à-dire qu'un temps au sens ordinaire du mot existe ou non), dépend de la manière particulière dont la matière et son mouvement sont agencés dans le monde »<sup>30</sup>. Tout en reconnaissant qu'il n'y a pas là de contradiction, Gödel estime en conclusion qu'une « perspective philosophique qui aboutit à de telles conséquences peut difficilement être considérée comme satisfaisante »<sup>31</sup>.

En somme, pour Gödel, tout univers compatible dans ses grandes structures avec un univers physique existant réellement, même si le temps cosmologique qui lui est attaché présente des caractères non-réels, reste un univers physique possible. Le simple fait qu'il soit mathématiquement possible, pour des modèles cosmologiques compatibles dans leurs grandes lignes avec un univers réel, d'obtenir pour le temps des solutions « tératologiques » des équations, entraîne, à ses yeux, le temps en général dans cette « monstruosité », dans la non-réalité de ces solutions, et cela que d'autres solutions plus physiques soient ou non également possibles<sup>32</sup>. Autrement dit, ce qui aurait pu apparaître comme une curiosité physico-mathématique, règle, pour Gödel, le statut d'existence en général, de toute solution possible : cette conclusion est de nature philosophique (quant à la non-réalité du temps de la théorie de la relativité générale) et vient parachever son argumentation de départ sur le lien de la relativité à la philosophie idéaliste.

Mais si nous nous en tenons, comme Einstein le réclame dans sa réponse à Gödel, à l'aspect physico-mathématique du problème<sup>33</sup>, l'existence effective de solutions « tératologiques » (non réelles, c'est-à-dire non physiquement possibles) de l'équation cosmologique conduit plutôt à s'interroger sur le statut de telles solutions eu égard au problème considéré, à savoir la description (simplifiée) par un modèle cosmologique de l'univers physique. Il se pourrait fort bien (et c'est même très vraisemblable) que la simplification qui fait remplacer l'univers effectif par un modèle cosmologique ne prenne pas en compte des aspects physiques décisifs mais que l'on ignore encore (tels que le type de distribution de matière, etc.). Si l'on pense physiquement l'univers, on doit admettre que tous les arrangements de la matière qui sont mathématiquement possibles, considérant une structuration d'ensemble (celle rendue par un modèle), ne sont pas nécessairement possibles physiquement. Il se pourrait que les temps

obtenus comme solutions de tels modèles soient sensibles à ces structurations matérielles, comme d'ailleurs Gödel en laisse entrevoir la possibilité, tout en en refermant aussitôt la porte.

Ce que nous avons vu dans la première partie de ce travail, sur le caractère physique du temps, l'orientation de son cours et son rapport de réciprocité aux phénomènes, nous incite à considérer, au contraire de Gödel, que les solutions non physiques doivent être éliminées. Si elles correspondent à des arrangements particuliers de la matière de l'univers, ces arrangements devront être rejetés avec elles, restreignant le domaine des possibilités ouvertes *a priori* dans la formulation des modèles. Toutes les solutions mathématiquement possibles des équations d'univers ne sont pas physiquement possibles pour autant : n'est-ce pas pour une telle raison que Maxwell avait rejeté les potentiels avancés, qui étaient pourtant des solutions mathématiquement possibles de ses équations ?

La physique place des contraintes sur les représentations et les solutions obtenues mathématiquement, ces contraintes étant rapportées à des principes ou à des conditions physiques caractérisés. De telles contraintes, par rapport aux possibilités physiques, peuvent fort bien n'être pas déjà données, et requérir d'être formulées. Les modèles cosmologiques de Gödel sont des modèles mathématiques, pour lesquels tous les principes ou exigences physiques d'un univers réel n'ont sans doute pas été inventoriés. Toute solution des équations mathématiques de tels modèles n'est pas *ipso facto* une solution physique. Certaines solutions mathématiques devront être éliminées par l'imposition d'exigences physiques supplémentaires, quand ces dernières pourront être explicitées. Il semble donc raisonnable d'admettre que, par la réciprocité du temps et des phénomènes, un temps non physique indique un type de phénomène non physique. Au lieu de voir dans les solutions « tératologiques » du temps cosmologique comme celles de Gödel l'indice de la non-réalité du

temps, du temps cosmologique au temps ordinaire, on devrait plutôt y voir au contraire une indication heuristique pour restreindre les choix possibles entre des modèles cosmologiques visant à décrire l'univers physique.

## **Références**

La bibliographie concernant ce chapitre est disponible sur le site Internet de Dunod : [www.dunod.com](http://www.dunod.com)



# Chapitre 20

## La cosmologie comme « manière de faire un monde » – Physique, relativisme et irréalisme –

Aurélien Barrau

Pour conclure cet ouvrage, peut-être est-il permis d'explorer une interprétation hétérodoxe de la cosmologie physique. Moins pour en renouveler le sens ou en saper les fondements que pour en interroger les résonances « hors champ ». La penser comme subversion et comme construction. Autrement dit : faire le pari de l'itérabilité – c'est-à-dire, au sens derridien, de la citation<sup>1</sup> – pour greffer le matériau sur un autre substrat et envisager de nouvelles hétérogénéités ou hybridations. Comme toute greffe, elle court le risque du rejet.

De l'avis général, il semblerait que se profile enfin l'ère *aléthique*, le temps de la vérité. Plus brève, sans doute, que l'âge axial<sup>2</sup>, mais non moins radicale et émancipatrice. La philosophie analytique, pour l'essentiel, fait sienne l'idée que la science révèle le monde en tant que tel<sup>3</sup>, tandis que le courant continental s'empresse de tourner la page de ce qu'il est, depuis Sokal, presque convenu de nommer les « impostures » postmodernes<sup>4</sup>. Retour aux choses sérieuses. Gloire à la connaissance authentique, à l'exact savoir, à la rationalité pure. Plus d'amphigouris, plus d'am-

bivalences. Sobriété. Sur les pas de Bouveresse, prudence avec les images, renoncement aux métaphores, réserves sur les analogies<sup>5</sup>. Condamnation du « relativisme », disqualifié de droit et discrédité de fait par sa simple distanciation de la visée normative<sup>6</sup>. Le vrai n'est, semble-t-il, pas négociable : il ne se choisit pas, il s'impose. La cosmologie physique présenterait donc le visage authentique et intrinsèque de l'univers, tendrait vers la connaissance de la chose en-soi globale et universelle, esquisserait l'ébauche incontestable des linéaments du monde objectif.

Les développements complexes et imprévus de la cosmologie contemporaine s'inscrivent pourtant en faux par rapport à cette image caricaturale mais dominante. Parce qu'elle se situe simultanément à la convergence des savoirs et à la frontière de l'ineffable, cette science étrange constitue sans doute l'une des constructions les plus à même de révéler certains fondamentaux obscurs et certaines ambiguïtés de notre rapport au monde. Pensée-limite aux ramifications improbables, elle condense et exacerbe l'ensemble des tensions qui parcourent et sous-tendent les différentes branches de la physique théorique. À mon sens, le défi métaphysique auquel invitent les avancées récentes consiste à concilier rapport à l'altérité et dimension démiurgique : le réel n'est évidemment pas purement contractuel – il ne cesse de surprendre, de contredire, de réfuter – mais le mode d'interrogation – et donc le type de réponses possibles – demeure largement arbitraire. Y a-t-il matière à fonder une nouvelle ontologie ? Non plus celle d'un monde de faits, de choses ou d'états de choses, que ce soit au sens de Wittgenstein ou d'Armstrong<sup>7</sup>, mais de fonctions, de relations, de réactions.

## I. Étrangetés

*Kósmos*, manifestement, dut composer avec *Khaos*. Non pas seulement parce que du désordre s'imisce dans l'harmonie mais

surtout parce qu'une faille, une béance, comme un hiatus originel semble infecter les velléités totalisatrices. La cosmologie comme exemple archétypal d'une pluralité fractale. Des mondes multiples à chaque échelle, jusqu'au niveau – provisoirement – le plus élevé. Leurs origines, leurs conséquences et leurs ramifications sont aussi diversifiées que leurs visages. Un plurivers diapré tout à la fois créé, inventé, façonné mais aussi imprévu, implacable, imposant. La cosmologie convoque, à l'évidence, l'essentiel des développements de la physique du vingtième siècle. Mais elle n'opère cette synthèse qu'au prix de difficultés – au moins de spécificités – conceptuelles majeures : l'expérience « création de l'univers » est irreproductible, l'observateur est contenu dans le système qu'il entend décrire, les conditions initiales ne sauraient être « extérieures »<sup>8</sup>, le cours du temps doit être remonté à partir de l'état observé et les énergies en jeu sont au-delà de ce qui sera sans doute jamais testé sur Terre.

Le modèle cosmologique standard du Big-Bang se fonde sur trois observations majeures et deux théories cadres : l'éloignement des galaxies, la nucléosynthèse primordiale, le fond diffus à trois degrés Kelvin pour les premières ; la mécanique quantique et la relativité générale pour les secondes. Ces observables historiques, qu'on ne saurait, c'est un lieu commun, considérer comme des données pures mais plutôt comme des éléments de signification au sein du paradigme interprétatif qui les soutend<sup>9</sup>, sont aujourd'hui complétées par de nombreuses autres approches : oscillations acoustiques de baryons, mesure de la distance de luminosité de certaines supernovae, lentilles gravitationnelles faibles, etc. L'image-du-monde résultante est précise et prédictive. Elle est cohérente au sens de la convergence des mesures. Les paramètres cosmologiques sont connus avec des précisions qui avoisinent le pourcent et le scénario s'affine pratiquement de jour en jour. En contrepoint, les incomplétudes, les tensions, les arbitraires se dessinent et s'ancrent dans la démar-

che. Faut-il n'y déceler que des erreurs ou des errements, des accidents, des impasses ? Faut-il les exclure de la définition et les bannir des fondements ? Faut-il, d'ailleurs, nécessairement définir et fonder ? Faut-il interdire ou plutôt inter-dire ? Mieux vaut, peut-être, demeurer parfois dans ou sur le *parergon*<sup>10</sup>, au sein du cadre, de la limite, de l'entre-deux, littéralement hors-d'œuvre. Mieux vaut, peut-être, se départir du rêve – ou du cauchemar – d'une « conception absolue du monde » comme la désirait Williams<sup>11</sup>. Mieux vaut, peut-être, défigurer quelques visages du cosmos, c'est-à-dire, suivant Evelyne Grossman, en « bouleverser les formes stratifiées du sens »<sup>12</sup>, et réhabiliter une certaine latitude polysémique : moins qu'un effet de style ou un substitut à une compréhension claire et profonde, la plurivocité peut devenir un outil nécessaire à la rigueur ou à la précision du discours et contribuer de façon décisive à ce que Castoriadis nomme, à propos de la polysémie irréductible du grec, une *intensité*<sup>13</sup>.

Cosmo-logie. Bien sûr, il faut déconstruire le logocentrisme<sup>14</sup> et ses racines phallogocentriques, voire carno-pallogocentriques<sup>15</sup>. Bien sûr, il faut fustiger ce primat de la parole – et singulièrement de la parole masculine et carnassière – pensée comme « vie et présence ». Mais c'eût pu être pire. La science de l'univers, du système-univers considéré dans son ensemble depuis l'éventuel instant initial jusqu'à l'éventuel instant final sans aucune limite spatiale, aurait pu se proclamer cosmonomie. Déconstruire le nomocentrisme eut été une toute autre affaire, bien plus complexe et bien plus dangereuse... Le discours, la parole, le défaut de récit et de métarécit<sup>16</sup>, qui structure donc notre cosmologie fait face à certaines difficultés structurelles. Matière noire et énergie noire posent la question du contenu. L'essentiel de la masse de l'univers est de nature inconnue (pas même composée des particules élémentaires répertoriées) et une mystérieuse force répulsive semble contre-carrer la gravitation classique à grande échelle. Rien de très

inquiétant. Ajustement du modèle (particules supersymétriques et champs scalaires, par exemple) ou changement radical de paradigme (remise en cause de la relativité générale ou des symétries cosmiques) permettront sans doute de s'accommoder de ces désagréments. Mais il y a pire. La dimension cosmo-gonique semble avoir été omise durant ces dernières décennies. Non pas parce qu'il faudrait à tout prix répondre à la question de ce qui fut *avant* l'origine : dans une vision toute Augustinienne, il est fort légitime – et même indispensable pour certaines approches physiques spéculatives mais très cohérentes<sup>17</sup> – de penser la naissance du temps comme concomitante de celle de l'univers. Mais plutôt parce que le Big-Bang est une prédiction inévitable de la relativité générale dans une région où, précisément, elle n'est plus valide ! Il est une catastrophe originelle, le signe donc d'un retournement ou, plus littéralement, d'un « regarder sous »<sup>18</sup>. Les succès heuristiques du modèle sont tels que cette incohérence fondatrice fut quelque peu oubliée... Elle pose, impose et dépose une question, une réponse et un cadre : il *faut* en passer par une théorie quantique de la gravitation. Ce qui n'a rien à voir avec le mythe de l'unification. À l'évidence, la quête d'unification a joué un rôle majeur en physique, que ce soit avec les orbites de Kepler, les lois électromagnétiques de Maxwell ou le modèle de Glashow-Salam-Weinberg qui décrit les interactions électrofaibles. Le principe de jauge<sup>19</sup> est, avec la brisure spontanée de symétrie qui permet de le contrebalancer et de rendre compte de la diversité du monde observé en dépit de l'unification conceptuelle censée le régir, la clef de voûte de la physique des particules élémentaires. Mais les temps sont troubles. L'augmentation de la symétrie (vers la supersymétrie ou la théorie des cordes par exemple) ne s'accompagne plus d'une diminution des paramètres libres et donc de l'arbitraire du modèle. Quelque chose change. L'unification a porté ses fruits, elle est à la fois consacrée par ses succès et fantasmée par une double tra-

dition : judéo-islamo-chrétienne – l'unicité de Dieu – d'une part et platonicienne – l'unité des essences au terme de la dialectique ascendante<sup>20</sup> – d'autre part. Elle n'est pourtant pas requise. L'émergence d'une « théorie du tout » à échéance raisonnable est non seulement très improbable au vu de la situation largement aporétique de la physique théorique mais elle ne constituerait, à l'évidence, qu'une étape : quelle métathéorie pour la dériver, la situer, la contextualiser ? La nécessité d'une approche quantique de la gravitation ne s'inscrit pas nécessairement dans cette visée : elle est, avant tout, une condition de cohérence et d'intelligibilité. La science, rappelaient Deleuze et Guattari<sup>21</sup> « n'est pas hantée par sa propre unité » mais par le plan de référence sous lequel elle affronte le chaos. Rapport au chaos – une fois de plus – tout empreint d'ambiguïté : conflictuel et passionnel. Le mythe de l'ordre, colonne vertébrale et centre névralgique de toute l'histoire de la métaphysique, a la vie dure.

La relativité restreinte, la gravitation einsteinienne et la mécanique quantique ne sont pas des propositions anodines. La première lie l'espace et le temps, la masse et l'énergie. Elle sape l'absoluité et l'immutabilité en inventant l'antimatière et en posant donc les prémisses de la théorie quantique des champs. Elle oblige ( $E = mc^2$ ) à égaler intrinsèque et extrinsèque, inné et acquis, essentiel et accidentel. Les « formes a priori » de la sensibilité kantienne<sup>22</sup> se trouvent finalement conditionnées aux mouvements relatifs des observateurs. La seconde dynamise jusqu'au système-cadre en subordonnant la géométrie elle-même à son contenu. Plus profondément encore, elle préconise, suivant l'expression de Rovelli, de penser le champ gravitationnel en lieu et place de l'espace<sup>23</sup> : le monde comme une collection de champs, éventuellement quantiques, évoluant sur le champ gravitationnel. La dernière, de façon inattendue, semble également plaider en faveur d'un certain « relationnisme ». C'était un fait presque acquis : la mécanique quantique esquisse un réel non-

local. Des inégalités de Bell<sup>24</sup> aux expériences d'Aspect<sup>25</sup>, tout le montre : il faut considérer que la fonction d'onde du système s'effondre « partout » en même temps et penser un monde délocalisé<sup>26</sup>. C'était oublier un peu vite la très – trop – lourde hypothèse de « réalité objective » qui sous-tend l'argument d'Einstein, Podolsky et Rosen<sup>27</sup>. Non pas pour la réfuter à la manière de Bohr surdéterminant le rôle de la mesure, mais plutôt pour la détourner et la retourner vers celui qui la pose ou la suppose. L'interprétation relationnelle de la mécanique quantique<sup>28</sup> aujourd'hui développée (parmi beaucoup d'autres) montre qu'une image cohérente peut être aisément restaurée si l'on considère que la théorie ne décrit pas ce que *sont* les systèmes mais la manière dont ils s'affectent les uns les autres. Sans ajout d'aucune hypothèse supplémentaire *ad hoc*, cette démarche établit qu'en relativisant les propriétés quantiques au « système » qui les observe ou les dérive – l'état physique ne valant plus absolument ou en tant que tel –, il devient possible de dissoudre l'essentiel des paradoxes jusqu'alors rencontrés dans ce cadre.

Mais il faut poursuivre. L'univers primordial requiert la délicate conciliation du quantique et du gravitationnel. La difficulté est moins technique – les approches les plus simples ne sont pas renormalisables<sup>29</sup> – que conceptuelle : la variable dynamique de l'une – la géométrie ou la gravité – est, au contraire, l'immuable, le fixe, le fond, de l'autre. Se passer de fond, renouveler sans refonder. C'est l'enjeu central de la gravitation quantique, le défi relevé par l'approche des boucles<sup>30</sup> : prendre Newton à contrepied, s'abstraire de l'espace-monde en tant que tel, pur contenant, structure autonome, cadre intrinsèque et rejoindre Aristote et Descartes mais aussi, en l'occurrence, Leibniz, Berkeley et Mach. En géométrie quantique, l'espace est une relation de contiguïté, les boucles sont les quanta de champ gravitationnel et leur *relations* constituent ce qu'on nomme espace. Il n'est plus une entité fondamentalement signifiante. La perte de l'espace

s'accompagne nécessairement, relativité restreinte oblige, d'un renoncement au temps. Aussi paradoxale paraît-elle, la proposition est singulièrement cohérente. Le temps n'a plus lieu d'être : la dynamique des systèmes – classiques ou quantiques – peut se penser en termes de relations entre les variables et non plus en termes d'évolution par rapport à une variable privilégiée<sup>31</sup>. Du point de vue cosmologique, ce monde sans espace et sans temps, notre monde donc, revisité par les concepts de la gravitation quantique, est essentiellement dépourvu des apories constitutives du Big-Bang<sup>32</sup>. En particulier, la singularité initiale – qui est moins une divergence prédite par la relativité générale qu'un effondrement de la théorie elle-même – est lissée et remplacée par un rebond dû aux effets quantiques répulsifs qui outrepassent rapidement la gravitation classique dans la région de Planck<sup>33</sup>. Le modèle est – en principe – testable : des empreintes dans le fond diffus de photons<sup>34</sup> ou des relations de dispersion modifiées par la structure granulaire de ce qui fut nommé espace<sup>35</sup> pourraient révéler la présence de ces boucles quantiques. Il satisfait donc, dans une certaine mesure (qui, précisément, ne se mesure pas), aux règles du « jeu de langage »<sup>36</sup> scientifique. Mais il constitue aussi, et c'est ce qui le rend attrayant « par anticipation sur les indices »<sup>37</sup>, ce que Lyotard nomme un « coup »<sup>38</sup> dans le jeu de langage. Une déstructuration de l'habitus, un déchirement local du tissu de croyances. Il entend pourtant faire sens, c'est-à-dire s'inscrire dans cette *logique* deleuzienne<sup>39</sup> dont André Hirt rappelle qu'elle procède toujours de l'exaltation de la généralité par surcharge de l'événement singulier<sup>40</sup>. Autrement dit, déjà, quelque chose s'écrit au-delà ou plutôt en deçà de la vérité. Surtout pas une assise ou un socle. Moins encore une fondation ou un enracinement. Une sorte d'*excription*, suivant le mot de Bataille réinventé par Nancy<sup>41</sup>, un sortir du texte, un prolongement possible du langage.

Univers : l'ensemble de ce qui nous est causalement lié. Peut-être donc un îlot dérisoire et contingent au sein du méta monde infiniment vaste et infiniment diversifié que propose la physique contemporaine. Chacune à leur manière, mécanique quantique (dans l'interprétation de Everett<sup>42</sup>) et relativité générale (via la stricte infinité de l'espace dans deux des trois géométries pertinentes en cosmologie<sup>43</sup> ou de par la structure interne des trous noirs<sup>44</sup>) conduisent déjà à l'existence vraisemblable d'autres mondes. En particulier, des copies à l'identique de chacun de nous – et de notre univers tout entier – doivent exister à distance considérable mais finie. Alter ego ?

De façon plus étrange et plus profonde encore, la rencontre de l'inflation et de la théorie de cordes dessine un *holocosme* insoupçonné. Augmentation considérable du facteur d'échelle dans les premiers instants, la phase d'inflation cosmique est aujourd'hui partie intégrante du paradigme du Big-Bang : elle remédie élégamment à la plupart des paradoxes et génère simplement les fluctuations qui engendreront les structures. Dans sa version « éternelle »<sup>45</sup>, elle génère une multitude d'univers-bulles et le méta-univers demeure en perpétuelle inflation. La théorie des (super)cordes ne jouit évidemment pas du même statut. Spéculative et difficilement testable, elle ne permet l'unification – de toutes les forces et particules connues – qu'au prix de lourdes hypothèses dont l'existence de dimensions supplémentaires. La dernière grande rupture de son évolution – succédant à la supersymétrie et à la dualité – est liée à la découverte du « paysage ». La compactification des dimensions supplémentaires de la théorie des cordes, associée aux flux magnétiques généralisés, génère un quasi-continuum quasi infini de lois physiques effectives. Délicieuse ironie : la recherche de la théorie unique et nécessaire, celle qui embrasserait et subsumerait nos lois apparentes, celle qui dissoudrait les choix et corrigerait les errements, conduit *in fine* à une diversité sans précédent et à une réinter-

prétation strictement contingente des règles naturelles ! La conjonction de l'inflation éternelle et de la théorie des cordes dessine un multivers d'une exceptionnelle richesse. Chacun des univers créés par la première est « peuplé » de lois sélectionnées par la seconde. Ailleurs, autres dimensionalités, autres particules, autres couplages. Immense méta-monde diapré et bigarré, infaisable dans le langage de notre science locale. Le très sérieux problème de naturalité que rencontre la physique théorique contemporaine se trouve immédiatement résolu : les lois de la science ne semblent si finement ajustées pour l'existence de la complexité que parce que nous nous trouvons évidemment dans une région hospitalière du multivers. Nouvelle blessure narcissique, répudiation radicale de l'hypothèse anthropo-téléocentrique. Notre univers, lui-même, perd son absoluté.

Le multivers est une proposition scientifique au sens le plus orthodoxe et traditionnel du terme. Curieusement, et bien que ces univers multiples ne nous soient pas accessibles, on peut montrer<sup>46</sup> que la démarche est bel et bien falsifiable ou réfutable. Ceci parce que le plurivers n'est pas un modèle mais une conséquence – parmi d'autres – de modèles et qu'un unique échantillon (notre propre univers) permet déjà de corroborer ou d'exclure la proposition à un certain niveau de confiance<sup>47</sup>. Mais il ouvre aussi vers d'autres *horizons*. Plus exactement, il déchire l'horizon. Non plus seulement le firmament, comme le suggérait Deleuze<sup>48</sup>, mais la limite elle-même. Il joue avec les délinéaments, les frontières, les bords ; il s'imisce dans l'entre-deux et s'installe dans l'équilibre instable de la marge. Faire des mondes avec les limites du monde. Porosité au récit. Retour vers la mythologie mais union radicalisée et désacralisée de *logos* et de *muthos* où, pour la première fois sans doute, c'est la pensée rationnelle (et non pas ici la seule parole) qui entraîne, qui engraine – presque mécaniquement – vers l'existence de dicibles invisibles. La cosmologie comme alternative à ce que Nancy

nomme l'« interruption du mythe »<sup>49</sup>, comme sortir de la « tau-tégorie » du mythe.

## 2. Inquiétudes

Quels rapports cette cosmo-mytho-logie, qui n'est qu'un condensa – ou un précipité – des ramifications multiples de la physique contemporaine, entretient-elle encore avec la vérité ? Non pas avec les vérités détournées et retournées, la fidélité à l'événement de Badiou<sup>50</sup> ou le rapport à l'infini de Hirt<sup>51</sup> par exemple, mais avec *la* vérité en tant que telle. Se pourrait-il qu'elle invite, avec une acuité sans précédent, à renoncer au concept même de vérité globalisante et totalisante ? Contribuerait-elle à porter un coup de grâce à la vision « correspondantiste » qui, depuis Socrate et malgré les objections insistantes de ces derniers siècles (de Vico à Dewey en passant par Hegel, Marx, James ou Tarski), constitue toujours l'acception orthodoxe et rassurante du « vrai » ? L'époque ne se prête guère à ces positions supposées dangereuses et presque unanimement décriées. À en juger par la violence avec laquelle toute velléité au *relativisme* (au sens le plus large, qui couvre le constructivisme, le perspectivisme, etc.) est balayée – non seulement dans le champ épistémique mais aussi dans les champs éthique et esthétique –, il faut à l'évidence conclure que quelque chose de grave se passe ici. Moins une colère qu'une angoisse : le relativisme fait peur à la manière de ce à quoi on ne souhaite pas faire face. Pas d'affrontement, juste un mépris. Un revers de la main, un haussement d'épaule, une sage distance à instaurer entre ceux qui savent et le magma confus et subversif des « relativistes ».

De Protagoras à Nietzsche, de Wittgenstein à Rorty, de Derrida à Goodman, le relativisme n'est évidemment pas une doctrine constituée ou un jeu de propositions établi. Il ne peut, structurellement, pas même y aspirer. En revanche, la charge

dont il est la cible est assez claire et étonnamment invariante au cours du temps. Presque toutes les tentatives de dénigrement du relativisme se fondent sur deux arguments principaux : l'auto-réfutation supposée de la doctrine et l'idée que la posture suivant laquelle « tout se vaut » mène inexorablement au nihilisme. Les réponses possibles à la première objection sont bien connues : celle de Margolis qui outrepassa la logique binaire<sup>52</sup>, celle de Hales qui utilise explicitement la logique modale<sup>53</sup> ou celle de Taylor qui introduit le concept de « relativiste intolérant »<sup>54</sup>, pour ne citer que les plus récentes. Bien connues mais ignorées. Comme s'il fallait impérativement s'en tenir à une objection de surface – évidemment inopérante et effectivement inefficace – pour ne surtout pas avoir à pénétrer la proposition. La seconde objection est plus étonnante encore en ceci qu'elle énonce une évidence sans lien avec les positions relativistes qu'elle entend critiquer. Quel philosophe a jamais prétendu que tout se vaut ? Que les critères de justice et de justesse soient *relatifs* à une situation, à une culture, à un positionnement ontologique signifie, justement, qu'au sein de cette situation, de cette culture – dont il est impossible de s'extraire ou de s'abstraire entièrement – et sous ce positionnement, ces critères sont tout à fait pertinents et signifiants. Précisément, et contrairement aux caricatures, la tendance générale du relativisme (qui, bien évidemment, connaît aussi ses excès et ses réductions à l'absurde) ne consiste pas à « tout autoriser et tout légitimer » mais, bien au contraire, à imposer une vigilance scrupuleuse qui porte non plus seulement sur les propositions mais aussi sur les cadres qui les rendent possibles. Ouvrir la pensée à l'axiomatique, aux hypothèses, aux postulats, aux modes d'interrogations, aux types de fonctions. Tout à l'inverse d'un cynisme esthétisant, « la déconstruction est la justice » écrivait Derrida<sup>55</sup>. Étendre le champ du construit, délimiter les variables, variétés et variations deleuziennes, in-finir les fondements et les raisons.

Désabsolutiser les critères de rectitude et hisser au rang de *choix*, digne d'être énoncé ou dénoncé, la trame dans laquelle ils s'ancrent – ou sur laquelle ils glissent – contribue bien d'avantage à légitimer une démarche évaluative qu'à la décrédibiliser. Assumer la construction de nos vérités, c'est prendre conscience de leurs fragilités et donc s'engager à les défendre (s'il n'y a plus de transcendance assurant *in fine* une inéluctable victoire, l'action n'en est que plus nécessaire).

Les objections les plus grossières se rencontrent assez naturellement dans le domaine éthique (où se développe d'ailleurs l'étonnant mouvement du « réalisme moral »<sup>56</sup> poussant l'anti-relativisme jusqu'à supposer que nos jugements moraux sont dotés de valeurs de vérité identiques à celles des jugements scientifiques<sup>57</sup>). Jouant dangereusement sur la « corde sensible », l'argument se résume essentiellement à ceci : la torture et l'esclavage – par exemple – étant inacceptables, le relativisme n'est pas tenable. Peut-être est-ce oublier un peu vite que la négation n'est pas performative. De fait, torture et esclavage se pratiquent bel et bien et sont, manifestement, tout à fait tenables ; de fait, les bourreaux s'accommodent fort aisément (l'actualité récente le montre) de leurs actes ; de fait l'ennemi, sa conviction et sa puissance, existent, et parfois s'imposent. Le relativisme n'a aucune vocation à légitimer la barbarie. Il n'invite bien évidemment pas à accepter les faits avec un fatalisme narquois et détaché. Au contraire. Il impose de renoncer à la transcendance du ressenti (à la *transdanciation* du ressenti) pour combattre les pratiques jugées abjectes avec la vigueur potentiellement décuplée de celui qui *assume* sa position après avoir parcouru l'ensemble du territoire, avec la conviction renforcée de celui qui *accepte* d'envisager le point de vue de l'autre avant de le récuser, avec la détermination libérée de celui qui *accuse* après avoir douté. Parce qu'il demande de *relativiser* les valeurs et les jugements corrélatifs à un choix reconnu comme tel, il s'accompagne d'un investissement

égologique ou égoïque très particulier. Il permet aussi, espérons-le, d'outrepasser l'impérialisme axiologique qui peut se révéler – l'histoire le suggère – aussi dangereux que le nihilisme éthique. Le relativisme n'interdit pas de convaincre ou de combattre mais il exige de faire face, sans échappatoire, à ses postures prescriptives et normatives. Le relativisme axiologique est exactement l'inverse d'un nihilisme éthique ou d'un laxisme praxéologique. Il faut, un instant, avoir passé sa tête dans la guillotine de Hume...

« Cela mènerait au relativisme » est, en philosophie contemporaine, une proposition à peu près équivalente à « cela est donc manifestement inepte ». Il semble que le relativisme soit devenu une sorte d'*antéchrist* philosophique, un archétype, un condensé, un concentré de l'imposture : comment ne pas « sombrer dans le relativisme », comment « éviter le piège relativiste » sont autant d'articulations banales du discours philosophique qui, semble-t-il, ne nécessitent aucune justification. Au point d'ailleurs que les rares défenseurs d'une posture relativiste doivent néanmoins s'en défendre<sup>58</sup>. Demeurer à distance. Récuser la position sans la discuter. Inconfort. Il faudrait, lit-on communément, s'extraire du « relativisme ambiant »<sup>59</sup>. Quel relativisme ambiant ? Qui le revendique ou s'en réclame, non comme d'un laxisme diffus aux accents vaguement libertaires et sulfureux mais comme d'une pratique exigeante et rigoureuse ? La dimension relativiste des pratiques humaines, y compris scientifiques, que les sociologues (notamment Callon et Latour) sont parvenus à établir, ne serait-ce que parce que leur méthode d'approche impose presque structurellement une telle mise en perspective, demeure confiné à un microcosme essentiellement décrié. Certains philosophes contemporains s'aventurent à argumenter : Putnam, par exemple, pourtant suspecté de sympathie pour le relativisme (en particulier conceptuel<sup>60</sup>) fait preuve d'une étonnante mauvaise foi. Ne cachant pas son admiration pour Wittgenstein il se voit contraint à d'in vraisemblables contorsions

pour tenter de le « laver » de ses inclinations évidemment relativistes. Lorsque Wittgenstein compare l'homme consultant un oracle à celui interrogeant un physicien et conclut que notre propension à favoriser le second n'est fondée que sur nos jeux de langage dans la mesure où « lorsque deux principes qui ne peuvent être réconciliés se rencontrent chaque homme nomme l'autre un fou et un hérétique »<sup>61</sup>, Putnam doit – en dépit de son adhésion réclamée à la méthode analytique – procéder à un véritable détournement de sens<sup>62</sup> pour nier la dimension clairement relativiste de la position wittgensteinienne. Quelque chose de trouble dans cet épidermique rejet.

### 3. Des mondes créés

Nelson Goodman, pourtant philosophe analytique américain du vingtième siècle, revendique un « relativisme radical sous contrainte de rigueur »<sup>63</sup>. Échanger la structure du monde pour celle de l'esprit, celle de l'esprit pour celle des concepts, celle des concepts pour celle des symboles. Cheminer d'une « unique vérité et d'un monde établi et trouvé, aux diverses versions correctes, parfois en conflit, ou à la diversité des mondes en construction ». La physique comme une manière, parmi d'autres, de *faire un monde*. Les univers multiples, spatialement disjoints et causalement décorrelés, proposés par les théories contemporaines ne constituaient qu'un avant-goût, un ensemble de prolégomènes à la méta-strate de pluralité. La diversité est aussi *hic et nunc*, immiscée jusque sur la peau des concepts<sup>64</sup>, jusque dans la chair<sup>65</sup> des symboles. La cosmologie révèle sans doute plus que d'autres sciences sa dimension *contractuelle* et *conventionnelle* de par l'autonomie de son objet et l'hétéronomie de sa méthode. Elle cristallise les tensions internes et les racines externes. Elle constitue l'exemple indépassé d'un monde créé, d'une version correcte, d'une construction adéquate. Elle touche à ce que

Deleuze et Guattari nomment une « interférence intrinsèque »<sup>66</sup>, c'est-à-dire un glissement subtil entre les plans d'immanence, de composition et de référence ; elle se déploie dans une « interférence illocalisable », dans un rapport *essentiel* avec le Non, avec l'hors-science, avec l'altérité radicale. Elle dessine le « chaosmos intérieur à la science moderne » suivant le néologisme de *Finnegeans Wake*<sup>67</sup>.

Il est un point fondamental sur lequel Rorty (mais aussi Dewey, Davidson et Putnam) retrouve Goodman : le refus catégorique du réductionnisme. L'antireprésentationnalisme de Rorty ne cherche pas – bien au contraire – à combattre la physique, il la réinterprète comme une « habitude d'action permettant d'affronter la réalité »<sup>68</sup> plutôt que comme la recherche d'une « vision exacte du réel ». La cosmologie est un « contact avec la réalité » qui n'élève pas au-dessus des croyances et rejoint, avec la critique littéraire et la biologie, les domaines de la culture qui *touchent* le réel mais ne le « représente pas de façon exacte »<sup>69</sup>. Renoncer à la représentation, c'est évidemment faire violence à ce que Nancy nomme « une époque aussi longue que l'Occident », à un mode apparemment coextensif à l'humanité, à ce qui semble ne pas pouvoir finir<sup>70</sup>. Étudiant Artaud et son *Théâtre de la cruauté*, Derrida avait anticipé : « [...] la représentation n'a donc pas de fin. Mais on peut penser la clôture de ce qui n'a pas de fin. »<sup>71</sup> Un danger dans ce geste de circonscription. Il appartient sans doute aux sociologues de déterminer pourquoi la plupart des praticiens de la recherche scientifique ne se satisfont pas de considérer leur démarche comme la création d'une « version correcte » culturellement et historiquement déterminée mais désirent y contempler une esquisse ou une ébauche de La Vérité. Le réalisme, sous toutes ses formes, rassure apparemment : puisque notre humanité occidentale moderne a perdu Dieu, la science lui offrirait l'occasion inespérée d'une nouvelle fenêtre entrebâillée sur l'éternel, l'immortel et l'inhu-

main<sup>72</sup>. Un accès matériel et immanent (la physique comme infra-méta-physique) à l'essence substantivée. Tout, pourtant, dans la pratique comme dans les re-fondements, semble plaider (contre cette image orgueilleuse et totalisatrice) pour une science considérée comme « version correcte », c'est-à-dire comme un monde adéquatement *créé* par l'usage de symboles. Goodman défend à juste titre l'idée d'une visée-vision plurielle en rappelant qu'il est peu probable qu'on puisse jamais réduire la version de Van Gogh à celle de Canaletto, ou celle de James Joyce à la physique théorique<sup>73</sup>. Il est d'ailleurs saisissant de noter avec quelle exactitude la cosmologie contemporaine répond en détails aux critères de ce qu'il nomme une « manière de faire un monde ».

« Maintenant que s'est enfui le faux espoir d'une fondation ferme, écrit Nelson Goodman, qu'au monde se sont substitués des mondes qui ne sont que des versions, que la substance s'est dissoute dans la fonction, que le donné se reconnaît comme conquis, nous faisons face aux questions de savoir comment les mondes sont faits, testés et connus. » Chacune des « manières » proposée par Goodman trouve un écho en cosmologie contemporaine. Plus exactement, notre cosmo-logo-gonie se construit exactement suivant ces schèmes de création de mondes<sup>74</sup> : composition et décomposition, pondération, agencement, suppression et supplémentation, déformation. Il faut choisir les genres pertinents. Le plan de référence de Deleuze est plutôt un hyperplan de l'espace chaotique de dimension infinie. Il faut encore, dans celui-ci, sélectionner les sous-espaces où s'exhiberont les régularités, les uniformités, les invariances jugées adaptées à la création d'un monde. Il faut choisir les critères suivant lesquels les différences peuvent faire sens en tant que *différence*<sup>75</sup>, c'est-à-dire faire office de traces, de mouvements, de productions qui ouvrent à des différenciations ou à des séries originaires. Les observables significantes, le degré d'inadéquation toléré entre le modèle et l'observation, le cadre (parergon-paradigme) qui per-

met à cette observation, elle-même, d'émerger sous l'apparence d'un donné neutre, la hiérarchisation des grandeurs premières et secondes, la ligne de démarcation entre le dérivable et le non-dérivable<sup>76</sup> sont autant de choix à opérer pour échafauder un monde. Le scientifique, écrit Goodman, « recherche le système, la simplicité et la portée [...]. Il décrète autant qu'il découvre les lois qu'il établit, il dessine autant qu'il discerne les modèles qu'il définit. »<sup>77</sup> La théorie cosmologique dominante, façonnée au scalpel dans la glaise des possibles, répond exactement au constructivisme nominaliste de Goodman. Chacun de ses piliers repose sur un sol meuble provisoirement et conventionnellement considéré comme fondement légitime. Il appartient à une époque et à son épistémè<sup>78</sup> de choisir ce qui fait signe. L'unimulti-vers ne parle pas, il est parlé par ceux qui le forment et lui donnent sens. Il s'incarne. *Corpus*. Le corps, écrit Nancy, est « le produit le plus tardif, le plus longuement décanté, raffiné, démonté et remonté de notre vieille culture »<sup>79</sup>. La physique est une manière de donner un corps au monde. Il peut être de matière ou de rayonnement, de champs scalaires ou tensoriels, discret ou continu, couvert d'un pudique habit de boucles ou dénudé comme une particule non encore renormalisée, quantique ou classique, réel ou virtuel. Il est multiple au sein du discours scientifique, qui n'est, lui-même, qu'un mode correct parmi tant d'autres. Toujours hétéronome, comme rhizomatissant<sup>80</sup>. L'objection fut faite à Goodman : sont-ce réellement les hommes qui créent les étoiles ? Oui, ils les instituent *en tant* qu'étoiles. Ils les lient aux constellations et les singularisent dans le firmament, ils les incluent ou les excluent des régimes de signes, ils les choisissent ou les réfutent comme éléments pertinents du monde considéré. Bergson voyait notre corps se prolonger jusqu'aux étoiles<sup>81</sup> ; l'astrophysique étend le Soleil jusqu'à la Terre. Son bord est arbitraire, rien n'impose de le limiter au mince disque lumineux perçu aux longueurs d'ondes visibles.

Du point de vue du bain de particules énergétiques qu'il émet ou des lignes de champ magnétiques qui se déploient depuis ses pôles, notre planète est, strictement parlant, à l'intérieur de son étoile.

Ne faudrait-il pas mieux renoncer à la prolifération des mondes et à l'évocation de versions correctes constituant chacune un monde pour revenir à l'image plus orthodoxe de différentes descriptions d'un seul et même monde neutre et sous-jacent ? Mais le monde ainsi reconquis, écrit Goodman, « n'a plus ni genre ni ordre, ni mouvement, ni repos, ni structure – c'est un monde qui ne mérite pas qu'on lutte pour ou contre lui ». C'est l'hypothèse de trop. Cette « passion de l'un », comme la nomme Goodman, du sous-jacent, du fondamental, de l'Être ou de l'*arche* atrophie les possibles. Elle ne subsume pas nécessairement sous un maître-concept, elle ferme aussi des voies d'accès et des canaux d'irrigation. Elle élague les ramures et endommage les racines.

La très hypothétique et fantasmatique théorie complète et unifiée – Graal supposé de la physique théorique, décrivant toutes les particules et toutes les interactions – n'a pas été trouvée et semble demeurer largement hors d'atteinte. Rien n'indique aujourd'hui que cet objectif soit proche ni même qu'il soit, en principe, concevable. Quand bien même une telle théorie serait trouvée-crée (la théorie-M<sup>82</sup>, par exemple, est un candidat sérieux à ce titre), au sein de quelle nouvelle méta-diversité, faudrait-il la plonger et la réinterpréter afin d'expliquer son émergence ? Quand bien même le modèle gigogne de dérivations imbriquées serait cohérent et convaincant, pourquoi faudrait-il espérer y réduire ou y enfouir toutes les gnoséologies ? Pourquoi, commente Isabelle Stengers, « l'humanité entière devrait-elle s'incliner »<sup>83</sup> devant les faits édictés par les scientifiques ? La science moderne comme « invention du pouvoir de conférer aux choses le pouvoir de conférer à l'expérimentateur le pouvoir de

parler en leur nom »<sup>84</sup>. Neutralisation, normalisation et normalisation des faits. Tirant les leçons de Nietzsche et Foucault, Paul Veyne écrit<sup>85</sup> qu'« un monde ne saurait être fictif par lui-même, mais seulement selon qu'on y croit ou pas ; entre une réalité et une fiction, la différence n'est pas objective, n'est pas dans la chose même, mais elle est en nous, selon que subjectivement nous y voyons ou non une fiction.[...] Einstein est vrai à nos yeux, en un certain programme de vérité, celui de la physique déductive et quantifiée ; mais si nous croyons à l'*Iliade* elle sera non moins vraie, en son programme de vérité mythique. Et *Alice au pays des merveilles* également. » Ces programmes de vérités sont aussi nombreux et polymorphes que les modes de l'esprit humain. (Puisqu'il n'est ici question que des mondes humains : Von Uexküll a magnifiquement montré<sup>86</sup>, par l'exemple saisissant de la tique, que les animaux – et certainement pas *l'animal*<sup>87</sup> – habitent, et dans une certaine mesure façonnent, eux aussi, des mondes qui leur sont propres). Aucune autorité transcendante ne semble définir le cheminement unique qui conduirait au réel. Mieux vaut, sans doute, arpenter avec étonnement les sentes qui ouvrent aux réels. La perception, rappelle Goodman, est, pour le physicien, imparfaite et souvent trompeuse, sujette à complétion et correction<sup>88</sup>. Elle est au contraire essentielle, fondamentale et correcte de façon définitoire pour le phénoménaliste. Qui, et au nom de quoi, tranchera ? Selon le prisme choisi, selon la nature des conséquences escomptées, selon le plan d'affrontement du chaos parcouru, selon les interférences attendues, les incohérences tolérées, les décohérences recherchées, une version s'imposera ; un monde, donc, se créera.

La vérité de Goodman, « serviteur docile et obéissant »<sup>89</sup> au sein d'une « relative réalité » est un écho amplifié de ce que Foucault esquissait comme un « partage historiquement constitué »<sup>90</sup>. Si l'on se place à l'*extérieur* du discours, le critère de vérité est contingent, malléable et volubile. D'Hésiode à Platon, par exemple, un

partage s'est établi : la nature du vrai a changé, évoluant de l'acte d'énonciation ritualisé et juste de droit à un énoncé tourné ou retourné vers son sens et sa référence. Premier adieu aux sophistes et au relativisme protagoréen. Première mutation d'une longue série dont rien ne laisse présager l'achèvement prochain.

David Lewis pense la pluralité des mondes<sup>91</sup> avec un objectif clair : apporter une solution technique au problème des conditionnels contrefactuels. Solution d'ailleurs très contestable compte tenu de ce qu'il n'existe pas de « mesure » de proximité dans l'espace des mondes possibles et que cette possibilité n'est elle-même que récursivement définie. Ses mondes sont « autre part ». Chez Goodman, au contraire, les divers sont co-présents. La multiplicité goodmanienne est une ontologie. Ou plutôt une dislocation-dissolution de l'ontologie dans sa propre prolifération. Chaque version correcte porte une ontologie, la suppose ou l'impose. En ce sens, la reconnaissance de la multiplicité des mondes conduit à une désontologisation radicale du réel : une métaphysique lavée des *transcendentia*. En substituant la question « *When is art ?* » à l'interrogation habituelle « *What is art ?* », Goodman, contrairement à ce qui fut souvent écrit, ne confère pas à l'art la dignité de la science. Ce serait encore supposer une hiérarchie possible, ne serait-ce que pour la récuser ou la lisser. Il s'agit plutôt de renoncer, là encore, et avec la plus extrême détermination, à toute forme de re-présentation. L'art, ironisait déjà Duchamp, « ne représente pas, il présente ». L'expérience esthétique, comme l'expérience épistémique, consiste à faire fonctionner un système de symboles. Elle se caractérise par des symptômes, se déploie suivant des agencements et se parcourt par des *voies de référence*. La vérité ne suffit pas. Elle présuppose un monde déjà bâti, elle manque les catégories, questions, instructions, les versions non verbales, ce que Pouivet nomme les *gestes*<sup>92</sup>.

#### 4. Relativisme, altérité et extériorité

Pourtant. *Le monde ne s'impose-t-il pas ? Avec sa violence, son indifférence ou sa cruauté, avec son lot d'arbitraire et d'aléas, avec cette impénétrable altérité. Peut-on concilier la liberté démiurgique du créateur de mondes avec la déréliction toujours latente de l'habitant du monde ? Ou, ce qui revient au même : peut-on construire des univers et se laisser pourtant surprendre par le cosmos physico-mathématique ? Que la science soit considérée comme une construction parmi d'autres et que le primat conféré par Fodor à méthode scientifique (au sens large, incluant ce qu'il nomme les « sciences spéciales » comme la géologie ou la biologie) en tant qu'elle donnerait accès à la réalité intrinsèque et non-intentionnelle<sup>93</sup> soit réfutée ne s'oppose d'aucune manière à l'étonnement ou à l'émerveillement qui peuvent être suscités par une observation astronomique ou à une élaboration théorique. Ce à quoi il s'agit de renoncer est l'idée de Williams, et ses multiples ramifications, suivant laquelle il doit nécessairement exister une conception du monde « à laquelle devrait arriver n'importe quel investigateur, éventuellement très différent de nous »<sup>94</sup>. Étonnante supposition qui ne semble suggérée ni par la diversité des systèmes symboliques développés au sein des multiples cultures humaines, ni par l'observation des autres vivants avec lesquels nous partageons un espace commun, un large pan de notre histoire et – faut-il le rappeler ? – parfois l'essentiel de notre patrimoine génétique. Rassurante en surface, parce qu'elle inscrirait notre démarche dans l'histoire d'un progrès dépassant la pragmatique humainement déterminée, mais déresponsabilisante parce qu'elle manque le choix – ce que Sartre nommerait ici l'angoisse – irréductiblement associé à l'immanence, parce qu'elle interrompt la possibilité de créer les cadres et les modes de relations suivant lesquels les traces peuvent se transformer en *signes*. Les signes « ne sont pas dans le monde »<sup>95</sup>,*

nous les y inventons à partir de ce que le réel rend possible, accessible, intelligible en suivant l'axe d'organisation selon lequel il est scruté et sculpté.

Que la cosmologie soit une « manière de faire un monde », une parmi tant d'autres, sans lien particulier avec *la* vérité ou *le* réel, sans ambition hégémonique et sans prétention totalisatrice, n'affaiblit aucune contrainte ni ne relâche aucune exigence quant à la rigueur de la démarche. L'insistance sur la correction, la convenance, l'adéquation ou l'ajustement (*fitting*) est le fil conducteur de l'œuvre de Goodman. Que différents mondes irréductibles (ou différentes versions puisque la distinction n'a plus aucun sens) coexistent ne signifient bien évidemment pas que toutes les versions sont justes et moins encore que toutes se valent. C'est même, en partie, l'enjeu de la philosophie que de chercher, inventer, répertorier, cartographier, lier et délier les critères de rectitude. Dans une visée physico-mathématique – au sein donc d'un monde particulier, contractuellement choisi mais dont l'élégance et l'efficace sont avérées – la cosmologie est extrêmement contrainte. Elle obéit à des méthodes d'élaboration, des procédures de vérification, des tests de falsifications qui n'ont, bien évidemment, plus rien de contractuel au sein de ce monde. Lorsque le langage mathématique a été choisi, lorsque la corroboration expérimentale ou observationnelle a été érigée en ligne de démarcation entre le juste et le faux, lorsque la succession des paradigmes a été acceptée comme ligne de déploiement historique de la discipline, un mode du réel s'impose effectivement. Des choix demeurent possibles, mais ils s'assujettissent à une indexation systémique de la liberté. Un monde peut abriter un autre monde, comme un cadre peint – ou imaginé par le spectateur-créateur qui fait *fonctionner* la peinture en tant qu'art et, littéralement, la transfigure<sup>96</sup> – dans l'œuvre encadrée. La cosmologie physique fourmille d'îlots de sens, plus ou moins identifiés, plus ou moins délocalisés, plus ou moins imbriqués.

Ils sont les investigations en cours, les zones d'explorations, les reformulations naissantes. Ce monde possible, celui des sciences dures à intersubjectivité forte, convoque naturellement l'étonnement et l'imprévu. Il met en prise avec l'altérité. La Nature, *Naturus*, au féminin *Natura*, du verbe latin *nascor*, sa racine, ce qui va naître, ce qui est en train – ou sur le point – de naître, « le processus même de naissance, d'émergence, d'invention, l'éternelle nouvelle née », écrivait Serres<sup>97</sup>, ne cesse, presque par définition, de surprendre. Comme par une sorte de *délice* de Tantale, la théorie ultime se dérobe dès qu'on croit pouvoir la toucher. Une observation déroutante ou une expérience insoupçonnée viennent toujours ébranler le *corpus* qui allait figer la connaissance, l'ancrer ou la suspendre. Faire un monde avec des télescopes, des équations différentielles, des accélérateurs de particules et des tenseurs est un mode radical d'accès à l'hors-soi. En ce sens, se révèle effectivement – avec une inépuisable capacité d'auto-dépassement – un cosmos diapré et foisonnant, ensemené d'étrangeté et d'invisible.

Le relativisme n'est pas un solipsisme. Il n'entrave aucune voie d'accès à la *découverte* d'un réel qui dicterait les lois, infligerait les revers et exigerait les compromis. Que l'on puisse – que l'on doive – faire des mondes, qu'ils soient contingents et construits, multiples et co-présents, ne signifie pas, bien au contraire, que ce qui est vu et dit, au sein d'une version, est une invention libre et arbitraire, sans contrainte et sans contrôle, jailli *ex nihilo* de l'esprit humain. Reconnaître à la physique son droit à n'être pas la seule version correcte n'entache ni sa légitimité, ni sa beauté, ni l'organicité de son lien – presque aveuglant<sup>98</sup> – avec le réel : « comment ne pas enregistrer de façon positive le caractère construit de l'activité scientifique » écrivait Latour dans l'ouvrage même où il évoque... la pluralité des mondes<sup>99</sup> ! Les valeurs de la température du fond diffus cosmologique dans le référentiel en chute libre, de la constante de Hubble mesurée aujourd'hui

ou de l'indice spectral des fluctuations primordiales scalaires ne sont évidemment pas contractuelles. Mais le choix d'accorder crédit ou préférence au monde dans lequel ces paramètres sont *signifiants* l'est, strictement. Il serait injuste ou incomplet de considérer que le choix relève exclusivement d'une esthétique. Il convoque nécessairement une éthique et une logique, si tant est qu'il faille s'en tenir à cette taxonomie usée. Tous les mondes ne sont pas adéquats : il y a, relativement aux mondes choisis, des mondes ineptes et des mondes ignobles. Proposer ou imposer un monde (ou un ensemble de mondes éventuellement enchevêtrés) contre un autre demande un engagement ou une prise de risque. Certains mondes effectivement créés – ils pullulent à travers l'histoire – sont à détruire. Non car ils seraient méta-logiquement faux (suivant quelle métalogue ?), mais parce qu'ils sont inacceptables suivant les schèmes adoptés. Dans le domaine aléthique, et pour le cas des discours qu'il nomme « herméneutiques » (c'est-à-dire n'entraînant pas l'adhésion de l'ensemble d'une communauté), Rorty a plaidé tout au long de son œuvre en faveur d'une argumentation pragmatique pour concilier les positions incompatibles suite à l'incommensurabilité des paradigmes choisis : la vérité n'est pas un critère adapté. Le monde – protéiforme – de l'astronomie n'est pas plus intrinsèquement vrai que celui de l'astrologie (en considérant l'acception contemporaine de ces termes), ne serait-ce que dans la mesure où les critères qui permettraient d'en établir la prétendue véracité objective sont, eux aussi, des éléments d'un monde construit, mortel et réfutable en doute<sup>100</sup>. Mais elle lui est infiniment préférable suivant une immense variété de choix et de positions, assumés comme tels. Peut-être parce qu'elle autorise des prédictions concluantes ; peut-être parce qu'elle se fonde sur des principes assez clairement établis ; peut-être parce qu'elle s'accorde avec un protocole essentiellement accepté par la communauté des praticiens ; surtout parce qu'elle oblige à faire face à une authentique

*altérité*. Au sein de cette construction, quelque chose hors du discours s'impose et c'est de cette contrainte que s'enrichit le monde créé. Une porosité au non-dit.

Il est sans doute aisé de montrer que les lignes de démarcation qui furent dessinées entre science et non-science sont toujours inexactes et souvent caricaturales, à commencer par le critère de réfutabilité poppérien<sup>101</sup> qui ne correspond ni à la pratique ni à l'idéal de la démarche scientifique<sup>102</sup>. Feyerabend rappelle, non sans raison, que « la vérité est ce qu'un style de pensée présente comme étant la réalité » et que « l'acceptation d'un tel style n'a rien d'un critère objectif »<sup>103</sup>. La science se développe en effet comme l'un des beaux-arts, suivant ce qu'il nomme « une homologie de structure beaucoup plus que formelle ». Mais quelque chose qui n'est ni essentiellement une méthode, ni principalement un langage, distingue l'approche scientifique. Sa singularité réside, précisément, dans l'invention d'un monde un peu plus hétéronome que les autres. La science, et en particulier la cosmologie, met en position d'être surpris. Non pas par l'ingéniosité ou le raffinement de la construction elle-même, ce qui est banal, mais par ce qui s'impose, de façon non contractuelle, lorsque le système fonctionne. La physique construit un monde qui, en grande partie, lui échappe. Elle fige les lois et fixe des cadres pour y développer les modes de calculs et d'observations qui permettront *in fine* d'en établir l'inadéquation.

## 5. Onto-relationnisme

Considérée comme une manière de faire un monde, la physique contribue, comme toutes les autres élaborations correctes, à effriter ou étirer le concept d'ontologie. Il ne perd pas strictement sa pertinence mais se voit déplacé vers un autre mode d'affrontement du chaos. Un mode où il n'est plus question de l'ordonner, de l'organiser ou de l'agencer mais de le composer et

de le parler. La cosmologie se fait chaologie. Le réel, semble-t-il, *répond*. Il ne fonctionne pas, il est la fonction. Faire un monde, c'est inventer l'argument. L'image par le réel de cet antécédent n'est pas arbitraire. Dans le monde de l'astronome contemporain, les mouvements planétaires ne sont pas, ne peuvent pas être, l'origine du temps que Platon décrivait au *Timée*<sup>104</sup>. Ce n'est plus un choix possible : il est exclu par la manière d'interroger. Il va sans dire que suivant l'axiomatique platonicienne, nombre des conclusions de l'astrophysique contemporaine sont insensées et même, strictement, fausses. Les multiples façons de s'immiscer dans la fonction-réel, de grouper ou de disloquer les variables, de les contraindre ou de les négliger, de les fixer ou de les surdéterminer, sont autant de mondes possibles. Une ontologie fonctionnelle ou relationnelle<sup>105</sup> dont notre hétérocosmologie (en un sens très foucaldien<sup>106</sup>) ne serait qu'un révélateur, parmi tant d'autres. Un au-delà radical du corrélationnisme que Meillassoux lit dans la modernité post-kantienne.

Bien évidemment, le réel est imbriqué et intriqué. La réponse elle-même est souvent mêlée et composée avec d'autres éléments avant de devenir un nouvel argument qui ne parle pas en lui-même mais se recompose à partir de la fonction. Le jeu est sans limite. Les règles peuvent être débattues, violées ou perverties.

Face, d'une part, à l'extraordinaire diversité – manifestement irréductible – des êtres-au-monde possibles, et, d'autre part, à l'implacable factualité – manifestement non négociable – des réponses et réactions du réel, une ontologie (ou plutôt d'une ontonomie) de l'interaction ou de la riposte semble faire sens. Les quarks et les électrons n'existent pas. Pas plus que les étoiles, les hommes ou les dieux. Mais la *réponse* quark, électron, étoile, homme ou dieu, à une sollicitation du réel soigneusement choisie et rigoureusement conçue, est, dans une large mesure, inévitable et transsubjective.

Putnam voit dans l'approche derridienne une synthèse – disjonctive ajouterait sans doute Deleuze – de l'incommensurabilité de Saussure et de l'irréalisme de Goodman<sup>107</sup>. En ce sens, elle est un matériau adapté pour penser cette ontologie déconstruite qui, loin de faire violence à la science, comme on l'a souvent supposé, réhabilite son caractère éminemment subversif. Que, comme l'a récemment rappelé Nancy<sup>108</sup>, « Plus d'un » ait été l'une des expressions favorites de Derrida n'est pas insignifiant. Il ne s'agit pas que de justesse, il s'agit aussi de désatrophie et de réenchantement. Réenchanter, c'est accepter d'entendre tous les chants. Jusqu'à celui du bouc. Ce qu'on nomme, littéralement, la « tragédie ».

# Notes

## Introduction

1. Cf. J.-P. Luminet, M. Lachièze-Rey, *De l'infini, mystères et limites de l'univers*, Paris, Dunod, 2005.
2. Il est important de distinguer le monde, comme totalité organisée (physique et non-physique) de ce qui est, et l'univers physique observable, qui est l'objet de la cosmologie depuis le début du XX<sup>e</sup> siècle.
3. J. Merleau-Ponty, *La Science de l'Univers à l'Âge du positivisme, étude sur les origines de la cosmologie contemporaine*, Paris, Vrin, 1983.
4. J. Merleau-Ponty, *Cosmologies du XX<sup>e</sup> siècle*, Paris, Gallimard, 1972, p. 7.
5. A. D. Linde, *Inflation and quantum cosmology*, Boston, Academic Press, 1990.
6. À côté du récent ouvrage de J. Heyvaerts, *Astrophysique, Étoiles, Univers et relativité*, Paris, Dunod, 2006, on a même vu apparaître récemment un manuel fort conséquent (783 p) sur la cosmologie des origines. Cf. P. Peter, J.-Ph. Uzan, *Cosmologie primordiale*, Paris, Belin, 2005.
7. H. Reeves, *Patience dans l'azur, l'évolution cosmique*, Paris, Seuil, 1981 ; *Poussières d'étoiles*, Paris, Seuil, 1984 ; *L'heure de s'enivrer, l'univers a-t-il un sens ?* Paris, Seuil, 1986.
8. Cf. S. Weinberg, *Les trois premières minutes de l'univers*, tr. fr. Paris, Seuil, 1978, rééd. coll. Point-Sciences, 1988.
9. H. Reeves, *La première seconde, dernières nouvelles du cosmos 2*, Paris, Seuil, 1995.
10. F. Lizhi, L. Shuxian, *La naissance de l'univers*, tr. fr. Paris, Interéditions, 1990.
11. J. Silk, *Une brève histoire de l'univers*, Paris, O. Jacob, 2003.
12. Y. Nazé, *Les couleurs de l'univers*, Paris, Belin, 2005.
13. Trinh Xuan Thuan, *Les voies de la lumière, physique et métaphysique du clair-obscur*, Paris, Athème Fayard, 2007, Gallimard, coll. Folio, 2008.
14. J.-P. Luminet, *Les trous noirs*, Paris, Belfond, 1987.
15. S. Hawking, R. Penrose, *La nature de l'espace et du temps*, tr. fr. Paris, Gallimard, coll. Folio, 1997.
16. La question est notamment posée par J. D. Barrow, *Une brève histoire de l'infini*, tr. fr. Paris, Robert Laffont, chap. 7-8-9, pp. 123-216.
17. R. Lehoucq, *L'univers a-t-il une forme ?* Paris, Flammarion, 2004.
18. Cf. J.-P. Luminet, *L'Univers chiffonné*, Paris, Gallimard, 2005.
19. Cf. A. Bouquet, E. Monnier, *Matériau sombre et énergie noire, mystères de l'Univers*, Paris, Dunod, 2003, 2008.
20. Cf. J.-P. Luminet, *Le destin de l'univers, trous noirs et énergie sombre*, Paris, Fayard, 2006.
21. Voir aussi, de cet auteur, sur cette question : S. Vauclair, *La Terre, l'espace et au-delà*, Paris, A. Michel, 2009.

22. L'expression est de L. Susskind, *Le paysage cosmique*, tr. fr. Paris, Robert Laffont, 2007, rééd. coll. Folio, 2008, pp. 440-441. L'auteur dénombre pas moins de 10 « vallées » correspondant aux différentes possibilités de définir l'énergie du vide, pour le « paysage » de la théorie des cordes.

## Chapitre 2 : Les inventeurs du Big-bang

1. J.-P. Luminet, *L'invention du Big-bang*, Le Seuil, Paris, 2004.
2. Dont la traduction est donnée dans J.-P. Luminet, *L'Invention du Big-bang*, Le Seuil, Paris, 2004.
3. J.-P. Luminet et al., *Nature*, 425, 593, 2003.
4. J.-P. Luminet, *L'univers chiffonné*, 2<sup>e</sup> éd., Gallimard, Paris, 2005.
5. L. Smolin, *Three Roads to Quantum Gravity*, Perseus Books, 2002.

## Chapitre 5 : La cosmologie : un laboratoire de l'infiniment petit

1. Nous considérerons uniquement la cosmologie relativiste. Il est possible d'étudier la cosmologie Newtonienne mais elle n'est pas adéquate pour décrire l'ère de radiation de l'univers.
2. Modulo la structure topologique globale de l'univers qui ne peut pas être comprise à partir des seules équations de la relativité générale. En effet, celles-ci sont des équations aux dérivées partielles qui ne tiennent compte que des propriétés locales de la géométrie et de la matière.
3. Les observations de Slipher dans les années 1912 semblaient cependant indiquer que l'univers n'était pas statique puisque ses résultats montraient que ces galaxies souffraient d'un décalage vers le rouge.
4. Le principe de Mach est une idée issue des travaux du philosophe et physicien Ernst Mach. Il argumentait que l'inertie d'un corps était dû à la distribution de toutes les masses de l'univers. Einstein généralisa ce principe et postula que la géométrie de l'espace lui-même dépend uniquement de la distribution des masses de l'univers.
5. Quinze ordres de grandeur plus petits que le mètre.
6. Il s'agit de la version simple pour des fluides dits incompressibles.
7. En physique des particules, chaque particule est décrite par un champ. Ceci est la version relativiste de la dualité onde-particule en mécanique quantique.
8. Ceci est vrai pour les théories décrites dans le régime dit « perturbatif ». Dans le cas non-perturbatif, comme le passage de l'échelle des quarks à l'échelle des nucléons, le modèle effectif peut n'être pas calculable en fonction de la théorie à l'échelle inférieure.
9. Ceci correspond à l'idée de groupe de renormalisation formulé par K. Wilson.
10. La distance moyenne entre deux chocs de molécules.
11. La taille de l'univers est une image, en effet dans un univers aux sections spatiales plates celui-ci est infini. Il s'agit en fait de la croissance des distances relatives entre points de l'espace.
12. Il est néanmoins possible d'imaginer que les neutrinos ou les ondes gravitationnelles permettraient de s'affranchir de cette borne.

13. Aucun signal lumineux n'a pu mettre en contact des observateurs des deux régions.
14. Le physicien et prix Nobel de la paix Russe.
15. Le nombre baryonique est un nombre quantique invariant. Il peut être défini comme le tiers de la différence entre le nombre de quarks et le nombre d'anti-quarks dans le système.
16. Des énergies qui pourraient être de quatorze ordres de grandeur plus hautes que l'énergie atteinte à l'accélérateur LEP au CERN ! Ces énergies ne sont pas atteignables dans des accélérateurs. La grande unification ne pourrait être accessible qu'indirectement.
17. Par l'intermédiaire de la leptogenèse.
18. Mesurant la vitesse de rotation de la galaxie en fonction de la distance à son centre.
19. Il existe une alternative à la matière noire qui consiste à modifier la loi de la gravité.
20. Les photons qui sont émis quand l'univers devient transparent sont dits issus de la surface de dernière diffusion. En effet, du fait de la vitesse finie de la lumière, les photons qui nous atteignent maintenant proviennent d'une surface à distance fixée.
21. Il est appelé le rayonnement de fond cosmologique et a une température de l'ordre de trois Kelvins.
22. Cette échelle est déterminée par ce qui s'appelle la normalisation de COBE.
23. Il n'existe pas de scénario sérieux faisant concurrence à l'inflation.
24. Plus vite que la lumière.
25. Voir l'exposé de Pierre Vanhove dans ce volume.
26. S'il est un jour possible de tester la gravité quantique expérimentalement !
27. On dit que la théorie des cordes a une propriété de finitude qui entraîne que les processus quantiques calculés dans cette théorie ont une valeur finie.
28. Ce n'est pas le cas des masses de fermions qui sont protégées par la symétrie chirale ou plus généralement lorsqu'une symétrie empêche cette grande sensibilité envers la physique de haute énergie.
29. Ce raisonnement est de type anthropique car il contraint la valeur de la constante cosmologique à partir de la donnée de l'existence de galaxies permettant la présence d'observateurs.
30. Il existe une version de la relativité générale appelée gravité unimodulaire qui fut proposée par Einstein en 1917 et qui est telle que l'énergie du vide ne gravite pas.
31. Voir l'exposé de Pierre Vanhove pour un contre exemple.
32. Par exemple l'anomalie Pioneer du nom de la sonde spatiale qui a subi une accélération non expliquée vers le soleil lors de son voyage vers les confins du système solaire.

## Chapitre 6 : Métacosmologie

1. Le maximum de sensibilité de la rétine correspond à celui du spectre solaire.
2. Quoi de plus naturel pour un œil que d'être en orbite ?

3. Le principe de moindre action vient ici à l'esprit, quintessence de la législation physique. Que les « lois de la nature » se puissent pour la plupart déduire d'un principe d'optimisation, c'est-à-dire de causes en conflit, ne peut que frapper les esprits (Cf. Jean-Louis Basdevant, *Principes variationnels et dynamique*, Vuibert).
4. Pendant que les cosmologues (successeurs des prêtres astrologues de l'antiquité ou des philosophes présocratiques) spéculent sur le fait que les « lois de la physique » pourraient expliquer non seulement la structure et l'histoire de l'univers mais également son origine, *l'origine des lois*, elle-même, est rarement discutée. L'univers est-il auto-suffisant ? A-t-il pu s'organiser lui-même ? Est-il régi par le principe darwinien de complexité adaptative ? Les conditions initiales sont tout aussi capitales que les lois. Et la cosmologie quantique malgré ses prétentions est loin d'avoir établi les lois des conditions initiales.
5. Il faudrait ici faire la part soigneuse des équations d'évolution, des conditions initiales et des constantes numériques, mais je n'en ai pas le cœur (voir les œuvres d'A. Barrau et JP. Uzan).
6. Nous assistons au retour des grands récits (écologie, cosmologie) après tentative d'éradication postmoderne. Il y a inévitablement mythologie/métaphysique dans la cosmologie, mais ceci n'a rien d'alarmant, à partir du moment où on en prend une claire conscience.
7. Le fait de l'analyse, La Fabrique de l'origine, f.a n°10 , Autrement, 2001.
8. Le boson de Higgs est censé alourdir les ailes des oiseaux W et Z, convoyeurs de l'interaction faible et ne point peser sur celle du photon, ce qui lui confère son idéale légèreté...
9. Induite par un champ scalaire d'équation d'état telle que pression = – densité d'énergie, tout le sel est dans ce moins.
10. La taille de l'univers est multipliée par un facteur de l'ordre d'exponentielle 60.
11. Le neutralino, particule hypothétique de matière noire est réputé être sa propre antiparticule.
12. FRLW ou presque (Friedmann, Robertson, Lemaître, Walker... Voir le chapitre de J.-P. Luminet).
13. Dans les conditions tempérées de notre existence, de notre bas monde, bas en énergie s'entend.
14. Et donc des dimensions supplémentaires dont l'énergie du vide dépend (voir plus bas).
15. Il y a quelque analogie, dans l'aléatoire et le quantique, avec la désintégration radioactive.
16. Du vide, les cordeliers dressent le paysage, voir figure 1.
17. Il faudra un jour réfléchir sur les enlacements quantiques, les intrications entre bulles.
18. Insufflez-leur la petite fumée quantique, les trous noirs décongelés, requinqués et dé-quintessenciés, prendront de la couleur et se mettront à reluire et à transpirer. Chassés du paradis éternel de la noirceur, ils acquerront vitalité et donc mortalité. Se prêtant au jeu de l'évolution, ils changeront de taille, de couleur et de brillance. Ils rétréciront graduellement en conséquence de quoi leur température de surface s'élèvera jusqu'à des sommets vertigineux. Et ils rayonneront intensément dans

des registres énergétiques toujours plus durs, jusqu'aux rayons gamma guettés par toute une escadre d'astronomes de l'invisible (voir les écrits de A. Barrau, et Lehoucq et al. 2009, sur ArXiv).

19. Au sens où Rimbaud est un Boileau hystérique.
20. Mise en abîme : la notion de particule élémentaire en elle-même n'est pas exempte de critique, car la théorie quantique des champs en fait une entité subsidiaire. Avant toute chose, il convient d'établir une différence distinctive entre théories des particules et théories des *champs*. Une théorie des particules peut être définie comme une théorie qui attribue à des entités individuelles soigneusement définies (les particules, précisément) un certain nombre de propriétés. En revanche une théorie des champs associe certaines propriétés à chaque point de l'espace-temps. En dépit du succès des théories des champs, reposant largement sur les épaules de Maxwell et la découverte des ondes électromagnétiques, la théorie des particules initialement édiflée par Newton ne pouvait être révoquée en doute, en vertu de diverses expériences prouvant la validité du modèle atomique de la matière. D'un point de vue historique la vision du monde en termes de particules doit beaucoup à H.A. Lorentz, qui a reformulé la théorie de Maxwell en termes de sources ponctuelles transmettant leur influence à travers l'éther immatériel. La mécanique quantique en a capté l'héritage, ainsi que la théorie quantique des champs et elles ont été façonnées depuis le début sous forme de théories propres à embrasser les particules et les quanta. Bien entendu, dans le cadre quantique, la reconnaissance de la dualité onde-particule a beaucoup aidé à associer les quanta à des oscillateurs harmoniques (et donc les particules à des paquets d'onde). Ceci a conduit à l'occultation provisoire des difficultés conceptuelles liées au fait que la structure mathématique de la mécanique quantique ne fait rien d'autre que généraliser la physique des particules ponctuelles.
21. Voir les travaux de Linde et Vilenkin.
22. Infiltration quantique à travers une barrière de potentiel.
23. Marc-Lachièze-Rey et Jean-Pierre Luminet, par exemple.
24. Pareillement, qu'est-il advenu à l'homme pour qu'il invente l'art et le plurivers, l'un et l'autre apparemment sans applications techniques ? Nous ne pouvons qu'être surpris devant la manière dont nous avons évolué car nous voilà enfin capables de résoudre, *pour la beauté du geste*, les équations différentielles et de créer de œuvres artistiques alors que ces capacités n'ont a priori aucun intérêt pour la survie de l'espèce.
25. Banque de particules virtuelles et agence de relation publique et de communication du microcosme.
26. Double inconstance : elles sont susceptibles de varier doucement dans le temps dans notre propre univers (Cf. J.P Uzan, K.Olive, E. Vangioni-Flam) et abruptement d'un univers à l'autre (Cf. A. Linde et A. Vilenkin).
27. Une fausse fleur ne respandit d'aucune grâce, mais qu'importe les fleurs et qu'importe la grâce !
28. Voir le chapitre de A. Barrau.
29. Les calculs de probabilité dans un plurivers infini parsemé d'univers paraissant infinis, vu de l'intérieur de chacun, sont particulièrement épineux, voir le chapitre de J. Grain.

30. Linde et Vanchurin: « How many universe are in the multiverse », arXiv:0910.1589.
31. Ce chiffre est obtenu en en comptant les modes de compactage (conduisant à des topologies différentes) et les lignes de flux. Le nombre maximum de trous dans la topologie (50) et le nombre de lignes de flux (de 0 à 9), conduisent au nombre de  $10^{500}$
32. Ni principe ni anthropique.
33. On pourrait dire tout aussi bien chevalin.
34. L'abondance de la mitraille compense l'imprécision du tir.
35. Scruté par les satellites PAMELA et FERMI et, bientôt l'expérience AMS (voir les travaux d'Aurélien Barrau).
36. Voir Larjo et Levy 2009 sur ArXiv .
37. Notre univers observé est bel et bon, mais à quoi le comparer ?
38. Voir les travaux de Linde 1990 et le chapitre de J. Grain dans cet ouvrage.

## Chapitre 7 : Vers la cosmologie quantique

1. Voir Marc Lachièze-Rey, *Au-delà de l'espace et du temps*, éditions Le Pommier, 2003.
2. Voir Roger Penrose, *À la découverte des lois de l'univers*. La prodigieuse histoire des mathématiques et de la physique, Odile Jacob, Paris, 2007.
3. Techniquement, appartenant à un produit tensoriel d'espaces de Hilbert.
4. Une variété différentielle est elle-même une variété topologique munie d'une structure différentielle. Une variété topologique est un ensemble muni d'une structure topologique (ou topologie) qui permet de définir des relations de voisinage entre ses éléments, appelés points.
5. En particulier, la topologie de  $M$  est considérée comme fixée. La plupart des approches considèrent une topologie très simple : celle du produit d'une variété à 3 dimensions (l'espace) par une ligne temporelle.
6. Une variété riemannienne peut être considérée comme un empilement de trois structures : topologique, différentielle, et métrique. Dès que l'on a défini une métrique, il en résulte une courbure, calculable à partir de cette métrique.
7. Les difféomorphismes de  $M$  forment un groupe noté  $\text{Diff}(M)$ . Le superspace est le quotient  $S = \text{Métr}(M)/\text{Diff}(M)$ . Ce n'est pas une variété.
8. Comme chaque point de  $S$  représente une métrique, on parle plutôt de *fonctionnelle* de la métrique.
9. Notamment la nécessité de prendre en compte la covariance.
10. Voir Marc Lachièze-Rey, *Initiation à la Cosmologie*, Dunod 2004.
11. Et aussi par le signe de la courbure de l'espace.
12. Le champ envisagé est de type « scalaire », même s'il est douteux que les champs scalaires existent réellement dans la nature : on n'est encore pas ici dans une tentative de description réelle de l'univers, mais plutôt de test de la structure possible d'une théorie de cosmologie quantique.
13. D'ailleurs, certaines solutions de la relativité générale moins simples que celles-ci ne peuvent être exprimées autrement que par de telles corrélations, sans invoquer de paramètre de type temporel ; voir par exemple l'ouvrage de Rovelli.

14. Par exemple, on peut choisir la grandeur  $a$  comme horloge, et la solution s'exprime comme  $\phi(a)$  ; pour le problème du temps en général voir Carlo Rovelli, *Quantum gravity*, Cambridge Monographs on Mathematical Physics, 2007.
15. Le fait qu'un état quantique ressemble à un état classique implique que la fonction d'onde de l'univers associée est « piquée » autour d'une solution classique, c'est-à-dire de certaines valeurs de  $a$  par exemple.
16. Voir Stephen Hawking et Roger Penrose, *La nature de l'espace et du temps*, Gallimard 1997.
17. Cette approche est rendue possible par une modification de la théorie utilisant ce que l'on appelle des *intégrales de chemin euclidiennes*.
18. Divergences (grandeurs infinies), difficultés avec les intégrales de chemin, structure de  $S$ , topologie de l'espace-temps...
19. On peut tout aussi bien décrire la variation de  $\phi$  en fonction de  $a$ .
20. Dans de tels cas, il se peut qu'un paramétrage du type  $a(t)$ ,  $\phi(t)$  devienne possible ; mais ces cas particuliers présentent un intérêt limité puisque ce sont ceux où l'aspect quantique est occulté.
21. Dans une version à dimensionnalité réduite : 2 (au lieu de 3) pour l'espace et une pour le temps, la relativité générale devient strictement équivalente à une théorie BF.
22. Voir Thomas Thiemann, *Modern Canonical Quantum General Relativity*, Cambridge Monographs on Mathematical Physics ; Abhay Ashtekar, *Gravity and the Quantum* (arXiv:gr-qc/0410054) ; Abhay Ashtekar, *Gravity, Geometry and the Quantum* (arXiv:gr-qc/0605011v2) ; Abhay Ashtekar, *An Introduction to Loop Quantum Gravity through Cosmology* (arXiv:gr-qc/0702030v1) ; Abhay Ashtekar and Jerzy Lewandowski, *Background Independent Quantum Gravity. A Status Report* (arXiv:gr-qc/0404018) ; Abhay Ashtekar, Tomasz Pawłowski and Parampreet Singh, *Quantum Nature of the Big-bang* (arXiv:gr-qc/0602086 v2) ; Jorge Pullin, *Canonical quantization of general relativity: the last 18 years in a nutshell* (arXiv:gr-qc/0209008v1).
23. Techniquement cela revient à définir un espace des phases étendu, muni d'une structure symplectique.
24. Les « variables canoniques » étant elles-mêmes des fonctions, les fonctions qui dépendent d'elles sont en fait des « fonctionnelles » ; par la suite j'utiliserai le terme « fonction » dans tous les cas.
25. Il est bien connu que l'on peut formuler la relativité générale en termes de connexions plutôt que de métriques (c'est l'approche dite de *Palatini*). Ici les connexions sont définies sur une variété nue à 3 et non pas 4 dimensions.
26. Plus exactement, ici, une *boucle de Wilson*.
27. On peut en définir un produit scalaire ; et les réseaux de spin définissent un espace de Hilbert [cinématique], dont ils constituent une base orthonormée.
28. C'est le dual d'un 3-complexe simplicial.
29. Techniquement, l'ensemble de toutes les *valeurs propres* de l'opérateur.
30. Analogue à une équation de Wheeler de Witt.
31. Une écume de spin apparaît comme le dual d'un 4-complexe simplicial (grosso modo, une triangulation à 4 dimensions).

32. Voir John C. Baez, *Quantum Quandaries: A Category-Theoretic Perspective* (arXiv:quant-ph/0404040v2) ; John C. Baez and Aaron Lauda, *A Prehistory of n-Categorical Physics* (arXiv:0908.2469v1 [hep-th]) ; John C. Baez and Mike Stay, *Physics, Topology, Logic and Computation: A Rosetta Stone* (arXiv:0903.0340v3 [quant-ph]) ; C.J. Isham, *Prima Facie Questions in Quantum Gravity* (arXiv:gr-qc/9310031).
33. Ceci est dû au caractère associatif (aux isomorphismes près) du produit tensoriel. L'associativité est en effet la propriété essentielle des flèches dans une catégorie : l'idée est de considérer les objets soumis à ce produit tensoriel comme les flèches d'une autre catégorie (qualifiée de « monoïdale », car à un seul objet). Les flèches de la catégorie initiale sont alors vues comme des 2-flèches de cette nouvelle catégorie.
34. Les objets sont des espaces ; les flèches sont des « espaces-temps » dont les espaces de départ et d'arrivée constituent les états initial et final.
35. Les catégories tensorielles typiques sont celles des représentations d'un groupe : un objet est un espace vectoriel de représentation. Une flèche est une application linéaire entre de tels espaces vectoriels, qui entremêle les représentations (un *intertwiner*). Le produit tensoriel agit entre les représentations. Or les espaces de Hilbert qu'envisage la physique quantique sont le plus souvent des espaces de représentation, et relèvent donc de cette approche. En gravité quantique, les réseaux ou écumes de spin sont textuellement des catégories de ce type.
36. Par exemple, les *diagrammes de Feynman* sont des catégories : une particule est en fait (selon Wigner) une représentation irréductible du groupe de Lorentz (classifiée par le spin). Une interaction entre particules correspond à une *intertwiner* entre leurs deux représentations : exactement le prototype des catégories tensorielles (voir note précédente) !
37. Le modèle Barret-Crane utilise comme structure de départ un 4-complexe, une catégorie particulière. On y définit une géométrie élémentaire, en assignant des valeurs aux simplexes (triangles, tétraèdres) qui le constituent. La quantification consiste à remplacer ces valeurs par des opérateurs. S'il n'y avait pas de contraintes (comme c'est le cas à 3 dimensions, avec le modèle de Regge), on aurait une pure théorie topologique que l'on saurait quantifier. Ici, achever la théorie nécessiterait de pouvoir définir une intégrale de chemin pouvant conduire à une dynamique acceptable en tenant compte des contraintes, ce qui n'a pas encore été réalisé (voir Louis Crane, *Categorical geometry and thematic foundations of Quantum Gravity* (arXiv:gr-qc/0602120v2) ; Louis Crane, *What is the mathematical structure of spt ?* (arXiv:0706.4452v1 [gr-qc])).

## Chapitre 8 : La cosmologie : un laboratoire pour la théorie des cordes

1. T. Damour, *Si Einstein m'était conté* Le Cherche Midi (2005).
2. Pour des détails relatifs à ce modèle nous référons à la page Wikipedia [http://fr.wikipedia.org/wiki/Modèle\\_standard\\_de\\_la\\_cosmologie](http://fr.wikipedia.org/wiki/Modèle_standard_de_la_cosmologie).
3. Le site internet de la collaboration Planck est accessible ici <http://public.planck.fr/>.

4. Voir le chapitre de Julien Lesgourgues dans ce volume.
5. Lorsque nous faisons référence à la théorie des cordes, il faut en fait entendre la théorie des supercordes définie dans un espace décadiimensionnel qui est la seule version quantique cohérente de cette théorie. Les fondements de cette théorie sont présentés dans le livre de M.B. Green, J.H. Schwarz et E. Witten, *Superstring Theory*, Cambridge Monographs on Mathematical Physics, 1988.
6. Juan Maldacena, *La gravité est-elle illusion ?* Pour la Science N°339, Janvier 2006.
7. Théorie des interactions nucléaires fortes, mises en jeu dans les expériences menées au LHC (l'accélérateur de particules du CERN).
8. A.M. Polyakov, *The Wall of the Cave* Int.J.Mod.Phys. A14:645-658, 1999. [hep-th/9809057]
9. L.B. Okun, *The fundamental constants of physics*, Sov. Phys. Usp. 34, 818, 1991
10. Voir le site internet du *Particle Data Group* <http://pdg.lbl.gov/>.
11. Max Planck, *Über irreversible Strahlungsvorgänge* Annalen der Physik 1, pp. 69-122, 1900.
12. Voir les textes de Philippe Brax et Julien Lesgourgues dans ce volume.
13. M.R. Douglas, *The statistics of string/M theory vacua*, JHEP 0305, 046, 2003 [arXiv:hep-th/0303194].
14. S.W. Hawking, *Particle Creation by Black Holes*, Commun Math. Phys. 43, 199, 1975 [Erratum-Ibid. 46, 206 (1976)].
15. A.A. Abdo et al., A limit on the variation of the speed of light arising from quantum gravity effects, Nature, October 2009.
16. J.H. Schwarz, *Lectures on superstring and M theory dualities*, Nucl. Phys. Proc. Suppl. 55B, 1, 1997 [arXiv:hep-th/9607201].
17. M.B. Green, *World Sheets for world*, Nucl. Phys. B 293, 593, 1987.
18. E. Cremmer, B. Julia and J. Scherk, Supergravity theory in 11 dimensions, Phys. Lett. B 76, 409, 1978.
19. M.B. Green J.G. Russo and P. Vanhove, *Ultraviolet properties of maximal supergravity*, Phys. Rev. Lett. 98, 131602, 2007 [arXiv:hep-th/0611273].
20. M.B. Green H. Ooguri and J.H. Schwarz, *Decoupling Supergravity from the Superstring*, Phys. Rev. Lett. 99, 041601, 2007 [arXiv:0704.0777 [hep-th]].
21. G.R. Dvali G. Gabadadze and M. Porrati, *4D gravity on a brane in 5D Minkowski space*, Phys. Lett. B 485, 208, 2000 [arXiv:hep-th/0005016]. C. Deffayet, *Cosmology on a brane in Minkowski bulk*, Phys. Lett. B 502, 199, 2001 [arXiv:hep-th/0010186]. C. Deffayet G.R. Dvali and G. Gabadadze, *Accelerated universe from gravity leaking to extra dimensions*, Phys. Rev. D 65, 044023, 2002 [arXiv:astro-ph/0105068].
22. T. Damour, « Experimental tests of gravitational theory » in the *Review of particle physics*, Particle Data Group, <http://pdg.lbl.gov>.
23. A.D. Sakharov, *Vacuum quantum fluctuations in curved space and the theory of gravitation*, Sov. Phys. Dokl. 12, 1040, 1968 [Dokl. Akad. Nauk Ser. Fiz. 177, 70, 1967].
24. I. Antoniadis, R. Minasian and P. Vanhove, *Non-compact Calabi-Yau manifolds and localized gravity*, Nucl. Phys. B 648, 69, 2003 [arXiv:hep-th/0209030].
25. C. Bachas et F. Daninos, « Quatre succès des cordes », in *La Recherche*, n°411, septembre 2007.

## Chapitre 9 : Des univers multiples ?

1. Il en va de même pour les autres interactions fondamentales. Par exemple, si l'intensité de l'interaction faible était différente, les éléments chimiques lourds, nécessaires à la vie et formés au cœur des étoiles, ne seraient pas dispersés dans l'espace pour être ensuite incorporés dans les planètes. Historiquement, le processus « triple  $\alpha$  » de F. Hoyle fut reconnu comme le premier ajustement fin découvert dans notre cosmos.
2. L. Smolin, « Scientific alternative to the anthropic principle » in B. Carr (éd.) *Universe or Multiverse ?*, Cambridge, Cambridge university Press, 2007.
3. L'énergie du vide peut, par exemple, être rendue strictement nulle grâce à la supersymétrie, qui correspond d'ailleurs à la vallée la plus vaste et la plus stable du paysage des cordes. Par ailleurs, de nombreuses approches cherchent à expliquer l'expansion accélérée récente de notre univers sans recourir à une quelconque constante cosmologique : il s'agit par exemple des approches de quintessence, ou dans une démarche plus « orthodoxe » des *cosmologies moyennées*.
4. Ce constat peut paraître étonnant compte tenu du nombre *a priori* gigantesque d'univers multiples. Cependant, d'un strict point de vue théorique, ces univers n'apparaissent que comme des *phénomènes* et non comme des principes ou des objets nécessaires à la théorie. De ce point de vue, leur coût conceptuel est nul puisqu'aucun principe ou nouvel objet nécessaire à la théorie n'a été ajouté.
5. Cette interprétation fut essentiellement développée par H. Everett lui-même ainsi que B. de Witt, R. Graham et J. Wheeler.
6. A. Barrau, « Quelques éléments de physique et de philosophie des multivers », [http://lpsc.in2p3.fr/ams/aurelien/aurelien/multivers\\_lpsc.pdf](http://lpsc.in2p3.fr/ams/aurelien/aurelien/multivers_lpsc.pdf), p. 85.
7. La notion même de réduction du paquet d'onde lors de la mesure est difficilement définissable en cosmologie quantique qui entend décrire l'univers dans son entier d'un point de vue quantique.
8. L. Smolin, *Class. Quant. Grav.*, vol. 9, p. 173, 1992.
9. V.P. Frolov et al., *Phys. Lett. B*, vol. 216, p. 272, 1989.
10. Cette hiérarchisation a été établie dans M. Tegmark, « The multiverse hierarchy » in B. Carr (éd.) *Universe or Multiverse ?*, Cambridge, Cambridge university Press, 2007.
11. A.D. Linde, *Non-singular regenerating inflationary universe*, Cambridge, Cambridge university Press, 1982.
12. C. Rovelli, *Quantum gravity*, Cambridge university Press, 2004.
13. R. Bouso & J. Polchinski, *JHEP*, vol. 0006, p. 6, 2000.
14. L'observateur n'ayant accès qu'à un échantillon du système qu'il étudie, il doit se poser la question de la représentativité de cet échantillon.
15. A. Vilenkin, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 74, p. 846, 1995.
16. S. Weinberg, « Living in a multiverse » in B. Carr (éd.) *Universe or Multiverse ?*, Cambridge, Cambridge university Press, 2007.
17. Il semble pourtant que tel soit toujours implicitement le cas, puisque les seuls scénarii crédibles de multivers sont ceux qui, au préalable, résolvent des problèmes de physique théorique indépendants du problème d'ajustement fin.

## Chapitre 10 : Forme et structure de l'univers dans les civilisations anciennes et les traditions orales

1. *Avant* correspond au vaste champ d'étude des civilisations anciennes ou disparues. *À côté* renvoie aux multiples histoires des micro-sociétés de tradition orale où les mythes relatifs à l'univers ne nous sont parvenus qu'à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle grâce aux anthropologues.
2. Cette contribution est un condensé d'une étude portant sur une vaste collecte de textes décrivant des cosmologies provenant de tous les horizons culturels. La collecte a commencé il y a dix ans et l'étude doit se poursuivre encore sur de nombreuses années.
3. La notion de *bricolage* décrite par Claude Lévi-Strauss (*La Pensée sauvage*, Paris, Gallimard, 2008, p. 581) est un outil conceptuel particulièrement utile pour appréhender la pensée mythologique et la structure des cosmologies.
4. La représentation d'une terre plate est omniprésente dans les cosmologies traditionnelles. Les exceptions s'appuient sur des méthodes scientifiques, ce sont soit des dérivés du modèle sphérique grec, soit des terres à surface convexe (comme dans le système chinois dit « Kai tian »).
5. Les cosmogonies sont bien souvent des théogonies, parfois des anthropogonies.
6. Yoyotte Jean et Sauneron Serge, « La Naissance du monde selon L'Égypte ancienne », *La naissance du Monde*, Paris, Seuil, 1959, p. 46.
7. *Ibid.*, p. 66.
8. Garelli Paul, Leibovici Marcel, « La Naissance du monde selon Akkad », *La naissance du Monde* – Paris : Seuil, 1959, p. 119.
9. Lee Marriott Alice, Rachlin Carol K., *American Indian Mythology*, 1960, section 2.
10. Grantham Bill, *Creation Myths and Legends of the Creek Indians*, Tampa : university Press of Florida, 2002, p. 16.
11. Mooney James, *The Ghost-dance religion and the sioux outbreak of 1890*, Chicago: The university of Chicago press, 1965.
12. Harva Uno, Représentations religieuses des peuples altaïques, Paris : Gallimard, 1960, p. 75.
13. *Ibid.*, p. 75.
14. *Ibid.*, p. 76.
15. Trankell Ing-Britt, « L'Asie du Sud-Est », *Mythologie du monde entier*, Paris : Larousse, 1999, p.302.
16. *Ibid.*, p. 302.
17. Clastres Pierre, *Le Grand Parler, Mythes et chants sacrés des Indiens Guarani*, Paris : Seuil, 1974.
18. Reichel-Rolmatoff Gerardo, *The sacred mountains of Colombia's Kogi Indians*, New-York : E.J. Brill, 1990, p. 10.
19. Walters Franck, *Le Livre du Hopi*, Paris : Le Rocher, 1992, p. 21.
20. *Mémoires de Marau Taaroa, dernière reine de Tahiti*, Paris : Société des Océanistes, n°27, 1971, p. 47.
21. Best Elsdon, *The Maori* – Wellington : The bord of ethnological research for the author and bahalf of the polynesian society, vol. I, Harry H. Tombs, 1924, p. 86.

22. Heusch Luc, *Mythes et rites bantous, Le roi ivre ou l'origine de l'état*, Paris : Gallimard, 1972.
23. Ballabriga Alain, *Le Soleil et le Tartare, L'image mythique du monde en Grèce archaïque*, Paris : ed. de l'École Pratique des Hautes Etudes en Sciences Sociales, 1986, pp. 257-261.
24. Snorri Sturluson, *L'Edda, récits de mythologie nordique*, trad. F-X. Dillmann, Paris : Gallimard, 1991, pp. 33-34.
25. Les cosmogonies qui désignent un espace fondateur associé aux thèmes de la lumière ou de la terre existent, mais elles sont peu récurrentes parmi nos sources.
26. *Le Livre des morts des anciens égyptiens*, trad. Paul Barguet, Paris : Les éditions du Cerf, 1967, p. 142.
27. *Ibid.*, p. 143.
28. Soustelle Jacques, *L'Univers des Aztèques*, Paris : Hermann, 1997, p. 156.
29. *Ibid.*, p. 155.
30. Trankell Ing-Britt, « L'Asie du sud-est », *Mythologie du monde entier*, Paris : Larousse, 1999, p. 303.
31. Gladys A. Reichard, *Navaho Religion*, Bollingen serie XVIII, Pantheon.
32. *Philosophes taoïstes*, trad. par Charles Le Blanc et Rémi Mathieu, Paris : Gallimard, 2002, pp. 169-170.
33. « Niourgoun le Yakoute, guerrier céleste », trad. Yankel Karro, in *Les Guerriers célestes du pays yakoute-saxa*, Paris : Gallimard, 1994, p. 132.
34. Bottéro Jean, Kramer Samuel Noah, *Lorsque les dieux faisaient l'homme*, Paris : Gallimard, 1989, p. 70.
35. *The Bundahishn or knowledge from The Zand*, trad. E. W. West, Kessinger Publishing, p. 18.
36. *Abhidharmakosah de Vasubandhu*, trad. et pres. Louis de la Vallée Poussin, Paris, Louvain : Paul Genthner, Société belge d'études orientales, 1926, chapitre III.
37. *Le Livre de l'échelle de Mahomet*, trad. Gisèle Besson et Michèle Brossard-Dandré, Paris, Le Livre de poche, 1991, p. 273.
38. Harva Uno, Représentations religieuses des peuples altaïques, Paris : Gallimard, 1960, p. 24.
39. Boyce Mary, *A History of zoroastrianism*, vol. 1 early period, New York : E.J. Brill, 1996, p.132.
40. Renou Louis, *L'Inde classique, manuel des études indiennes*, Paris : Jean Maisonneuve, 1985, pp. 546-547.
41. Reichel-Rolmatoff Gerardo, *The sacred mountains of Colombia's Kogi Indians*, New-York: E.J. Brill, 1990, p.10.
42. Griaule Marcel, *Masques Dogons*, Paris : Institut d'ethnologie, 1938, pp. 44-45.
43. Wyatt Gill William, *Myths and songs from The South Pacific*, London : Henri St King & Co, 1876, p. 3.
44. *L'Edda, récits de mythologie nordique par Snorri Sturluson*, trad. F-X. Dillmann, Paris : Gallimard, 1991, pp. 37-38.
45. *Philosophes taoïstes*, trad. Charles Le Blanc et Rémi Mathieu, Paris : Gallimard, 2002, p. 102.

46. De la Torre Inès, *Le Vodou en Afrique de l'ouest, rites et traditions – Le cas des sociétés Guen-Mina (Sud Togo)*, L'Harmattan, Paris 1991, p.55.
47. Hallgren Roland, *The Good things in life, a study of the traditional religious culture of the youruba people*, Löberöd : Plus Ultra, 1988, p. 86.
48. Cadière Léopold, *Croyances et pratiques religieuses des Vietnamiens*, tome III, École Française d'Extrême Orient, 1992, p.44.
49. Griffin-Pierce Trudy, *Earth is my mother, Sky is my father*, Albuquerque : university of New Mexico Press, 1992, p.154.
50. Harva Uno, *Représentations religieuses des peuples altaïques*, Paris : Gallimard, 1960, p.30.
51. Therrien Michèle, *Le corps Inuit* – Paris : Sela, 1987.
52. Snorri Sturluson, *L'Edda, récits de mythologie nordique*, trad. François-Xavier Dillmann, Paris : Gallimard, 1991.
53. Gehhart-Sayer Angelika, *Die Spitze des Bewusstseins Untersuchung gegen zu Weltbild und Kunst des Shipibo Corribo*, Hohenchäftlan : ed Klau Renner Verlag, 1987.
54. Griaule Marcel, *Masques Dogons*, Paris : Institut d'ethnologie, 1938, pp. 44-45
55. Même si plusieurs des exemples cités vont dans ce sens, cette remarque nécessite une étude approfondie sur un plan linguistique et étymologique.
56. Fuchs, *La religion des Hadjeray*, Paris : L'Harmattan, 1997, pp. 36-37.
57. Bahuchet Serge, *Les pygmées Aka et la forêt centrafricaine*, Paris : Sela, 1983, pp. 77-78.
58. De la Torre Inès, *Le Vodou en Afrique de l'ouest, rites et traditions – Le cas des sociétés Guen-Mina (Sud Togo)*, Paris : L'harmattan, 1991, p. 55.
59. Hallgren Roland, *The Good things in life, a study of the traditional religious culture of the youruba people*, Löberöd : Plus Ultra, 1988, p.86.
60. Mooney James, *The ghost dance religion and Sioux Outbreak of 1890*, Chicago : The university of Chicago press, 1965.
61. Grantham Bill, *Creation myths and Legends of the Creek Indians*, university of Florida : Gainesville, 2002, p. 21.
62. La Flesche Francis, *The Osage and the invisible world*, university of Oklahoma press, 1995, p. 33.
63. Deshay Patrick, Keifenheim Barbara, *Penser l'autre chez les Indiens Huni Kin de l'Amazonie*, Paris : L'Harmattan, pp. 183-184.
64. Howitt A. W., *The native tribes of south-east Australia*, Londres : Macmillan and co, 1904, p. 426.
65. Renou Louis, *L'Inde classique, manuel des études indiennes*, Paris : Jean Maisonneuve, 1985, p. 332.
66. *The Bundabishm or knowledge from The Zand*, trad. E. W. West, Kessinger Publishing, p. 18.
67. Kramer Samuel Noah, *L'histoire commence à Sumer*, Paris : Flammarion, 1992, p. 106.
68. Boyer Régis, *La religion des anciens Scandinaves*, Paris : Payot, 1981, pp. 214-215.
69. Horowitz Wayne, *Mesopotamian Cosmic geography*, Winona Lake : Eisenbraun, 1998.

70. Renou Louis, *L'Inde classique, manuel des études indiennes*, Paris : Jean Maisonneuve, 1985, p. 546.
71. Bardo Thödol, *Le Livre des morts tibétain*, version du lama Kazi Dawa Samdup, Paris : Maisonneuve, 1933, p. 53-56.
72. Assmann Jan, *Mort et Au-delà dans l'égypte ancienne*, Paris : édition du Rocher, 2001.
73. Ces phénomènes sont très récurrents et les cosmologies en conservent des traces. La verticalisation d'une cosmologie est souvent le fruit de l'influence d'une « grande » religion, mais ce changement peut aussi traduire un type de relation à la « surnature » comme c'est le cas chez les Bouriates, où les chasseurs vénèrent la forêt et la terre tandis que les pasteurs accordent une grande importance au ciel, qu'ils ont en l'occurrence multiplié sous l'influence des Chrétiens orthodoxes et des Lamas bouddhistes. (Hamayon Roberte, *La chasse à l'âme, esquisse d'une théorie du chamanisme sibérien*, Nanterre, Société d'ethnologie, 1990).
74. Pour appréhender les différents types de croyances appliqués aux cosmologies, l'ouvrage de Philippe Descola *Par-delà nature et culture* (Paris : Gallimard, 2005) propose une grille de lecture particulièrement utile.
75. Chagnon Napoleon. A., *The Fierce People*, Holt, Rinhart and Winston, 1977. p. 45.
76. Shaver Harold, « Los Campa-Nomatsiguenga de la Amazonia peruana y su cosmologia », *Folk. Americano*, n°20, 1975. pp. 49-53.
77. Rasmussen Knud, *Intellectual culture of the iglulik eskimos*, Copenhagen : Gyldendalske Boghandel, Nordisk Forlag, 1929. p. 94.
78. Surgy Albert, *Le système religieux des Ehvés*, Paris : L'Harmattan, 1988, p. 24.
79. Moisseef Marika, *Un long chemin semé d'objets cultuels*, Paris : éditions de l'école des hautes études en sciences sociales, 1995, pp. 40-44.
80. Best Eldson, *The Maori*, Wellington, Whitecombe and toms limited, 1924, p.88.
81. *The Bundahishn or knowledge from The Zand*, trad. E. W. West, Kessinger Publishing. p. 12.
82. Renou Louis, *L'Inde classique, manuel des études indiennes*, Paris : Jean Maisonneuve, 1985, pp. 547-549.
83. *Abhidharmakosah de Vasubandhu*, trad. et pres. Louis de la Vallée Poussin, Paris, Louvain : Paul Genthner, Société belge d'études orientales, 1926, chapitre III.
84. Harva Uno, *Représentations religieuses des peuples altaïques*, Paris : Gallimard, 1960, pp. 54-55.
85. Deshay Patrick, Keifenheim Barbara, *Penser l'autre chez les Indiens Huni Kuin de l'Amazonie*, Paris : L'Harmattan, p. 183.
86. Snorri Sturluson, *L'Edda, récits de mythologie nordique*, trad. F.-X. Dillmann, Paris : Gallimard, 1991, pp. 45-49.
87. Wagner Elisabeth, « Les mythes de la création et la cosmographie maya », *Les mayas, arts et civilisations* sous la direction de Nikolai Grube, Paris : Könneman, 2000, p. 286.
88. Geghart-Sayer Angelika, *Die Spitze des Bewusstseins Untersuchungen zu Weltbild und Kunst des Shipibo Corribo*, Hohenchäftlan : ed Klau Renner Verlag, 1987.

89. Harva Uno, *Représentations religieuses des peuples altaïques*, Paris : Gallimard, 1960, pp. 56-57.
90. Renou Louis, *L'Inde classique, manuel des études indiennes*, Paris : Jean Maisonneuve, 1985, p. 492.
91. Trankell Ing-Britt, « L'Asie du sud-est », *Mythologie du monde entier*, Paris : Larousse, 1999, p. 303
92. Loeb Edwin M., *Sumatra, its history and people*, Oxford : Oxford university press, 1974 (Première impression, 1935), p. 120.
93. Barnes R. H., *Kédang, A study of the collective thought of an eastern Indonesian people*, Oxford : Clarendon Press, 1974, pp. 104-105.
94. *Le Livre de l'échelle de Mahomet*, trad. G. Besson et M. Brossard-Dandré, Paris, Le Livre de poche, coll. Lettres gothiques 1991, p. 249.
95. Harva Uno, *Représentations religieuses des peuples altaïques*, Paris : Gallimard, 1959, p. 27.
96. Soustelle Jacques, *L'univers des Aztèques*, Paris : Hermann, 1997, p. 112.
97. Barbeau C. M. *Mythologie huronne et wyandotte*, Montréal : Presse universitaire de Montréal, 1998, pp. 265-266.
98. Mariott Alice, Rachlin Carol K., *American Indian Mythology*, 1960.
99. Grantham Bill, *Creation and legends of the Creeks Indians*, university Press of Florida, 2002.
100. Cette étude ne prétend certes pas à l'exhaustivité mais dévoile quelques constantes. L'étude des cosmologies traditionnelles est un exercice périlleux tant les sources sont diverses. Sur un plan disciplinaire, les ouvrages consultés peuvent provenir de l'histoire des sciences, des religions, de l'anthropologie. Sur un plan culturel, toutes les sociétés, toutes les langues sont concernées, écrites et orales. Sur un plan historique, les traditions sont soit anciennes ou disparues et certaines sont encore vivantes. Dans ces conditions, la présente étude ne peut prétendre à l'objectivité et ne fait qu'amorcer une réflexion qui dépasse son auteur. La question du regard sur le sujet n'est pas à exclure de nos réflexions. Cette collecte souligne l'importance du point de vue des sciences humaines occidentales sur les cosmologies. Quelle part de projection les chercheurs assument-ils ? En anthropologie par exemple, l'intérêt pour la cosmologie semble connoté historiquement et idéologiquement. Dans ces conditions, l'étude des cosmologies traditionnelles ne peut s'affranchir d'une réflexion approfondie sur les observateurs de cette étude.
101. Surtout dans l'hémisphère nord.

## Chapitre 11 : Platon et la cosmologie

1. Un recueil d'articles a été consacré à ce sujet : G.R. Boys-Stones and J.H. Haubold (ed.), *Plato and Hesiod*, Oxford, Oxford university Press, 2009.
2. Platon, *Timée, Critias*, introduction, présentation et traduction par L. Brisson (1993), Paris, Flammarion, 2001.
3. L. Brisson et F. W. Meyerstein, *Inventer l'univers. Le problème de la connaissance et les modèles cosmologiques*, Paris, Les Belles Lettres, coll. L'Ane d'or 1, 1991.

4. Pour le détail, voir l'Annexe 1, site Internet [www.dunod.com](http://www.dunod.com).
5. Pour une description, voir Platon, *Timée*, trad. par L. Brisson, Annexe 2.
6. Pour le détail des mouvements astronomiques, voir F. M. Cornford, *Plato's cosmology*, London, Kegan Paul, 1937 ; et les critiques de D. R. Dicks, *Early Greek astronomy to Aristotle*, London, Thames & Hudson, 1970; W. R. Knorr, «Plato and Eudoxus on the planetary notions», *Journal of the History of Astronomy* 21, 1990, pp. 313-329.
7. Pour le détail, voir l'Annexe 2, site Internet [www.dunod.com](http://www.dunod.com).
8. Sur cette question, voir L. Brisson, «How and why do the building blocks of the universe change constantly in Plato's *Timaeus* (51a-61c)?» dans C. Natali e S. Maso, *Plato Physicus Cosmologia e antropologia nel Timeo*, Amsterdam, Hakkert, 2003, pp. 189-204 + figure.

## Chapitre 12 : L'« influence » de T. Wright of Durham sur la cosmologie précritique de Kant

1. Galilée, *Sidereus Nuncius*, Venetiis, 1610, tr. fr. I. Pantin, Paris, Belles Lettres, 1992, p. 26.
2. Kant, *Théorie du ciel*, Préface, Ak I, 232 ; tr. fr. Roviello corrigée, Paris, Vrin, 1984, pp. 75-76 : « Ich kann die Grenzen nicht genau bestimmen, die zwischen dem System des Herrn Wright und dem meinigen anzutreffen sind, und in welchen Stücken ich seinen Entwurf bloß nachgeahmt, oder weiter ausgeführt habe ».
3. Le titre complet de cet ouvrage publié en 1750 est le suivant : *An Original Theory or new Hypothesis of the Universe founded upon the Laws of Nature and Solving by Mathematical principles the General Phenomena of the Visible Creation and particularly the Via Lactea*, London. Cf. la réédition par M. Hoskin, de l'ouvrage de Wright of Durham : *An Original Theory or new Hypothesis of the Universe*, London, éd. Macdonald, 1971.
4. *Freye Urtheile und Nachrichten zum Aufnehmen der Wissenschaften und der Historie überhaupt*, numéros des 1<sup>er</sup>, 5 et 8 janvier 1751. C'est dans le compte-rendu des V<sup>e</sup> et VII<sup>e</sup> Lettres que Kant découvrit la conception ingénieuse de la Voie lactée de Wright of Durham.
5. Le titre complet du journal était : *Freye Urtheile und Nachrichten zum Aufnehmen der Wissenschaften und der Historie überhaupt*, numéros des 1<sup>er</sup>, 5 et 8 janvier, Hamburg, Achtes Jahr (1751).
6. Cf. par exemple, Milton, K. Munitz, *Theories of the Universe*, FP Macmillan Publishing, New York, 1965, pp. 144-145: « Wright is the first to have surmised the general » disc-like « finite structure of our Galaxy of stars, of which the Milky Way is that fragmentary portion to observers situated, as we are, roughly in the plane of our Galaxy. It is to Wright that Kant is indebted for the main clues in working out his own cosmology ».
7. Newton, *Principia mathematica philosophiae naturalis*, Livre III, tr. fr. par Mme du Châtelet, Paris, 1759, rééd. Blanchard, 1964, t. II, p. 175.
8. Newton, Lettre à Bentley du 11 février 1693, *Correspondance*, III, p. 244. C'est nous qui soulignons.

9. Cf. le remarquable article de Michael Hoskin intitulé *Newton, God and the stars*, qu'il publia dans la revue qu'il dirige : *Journal for the History of Astronomy*, vol. 8, 2, juin 1977, pp. 77-101.
10. Newton, *Principia mathematica philosophiae naturalis*, Livre III, proposition XIV, Théorème XIV, corollaire 2, « Not to mention that the fixed stars, everywhere promiscuously dispersed in the heavens, by their contrary attractions destroy their mutual actions » ; tr. fr. par Mme du Châtelet, Paris, 1759, rééd. Blanchard, 1964, t. II, p. 31.
11. Hoskin, *Ibid.*, p. 94 : « By contrast with the solar system, the system of the stars is infinite and at rest and the providential pattern in its spatial ordering far from obvious – indeed it has required a major effort by Newton to uncover it. But the need for providential intervention to preserve the system in good order is to Newton very evident, since God has not in fact chosen to give it the perfect symmetry that is « as hard to make not one needle only but an infinite number of them [...] stand accurately poised upon their points » ».
12. *Ibid.*
13. Michael Hoskin, Newton, « God and the stars », in *Journal for the History of Astronomy*, vol. 8, 2, juin 1977, p. 95 : « Adhibitis enim Telescopiis tam ingens et prope infinitus numerus minorum et ulteriorum stellarum detegitur : et numerus ille melioribus Telescopiis in tantum semper augetur ut natura in hac progressionem limitem minime novisse videatur ». Il s'agit du manuscrit ULC Add. MS 3965, f° 280r. Cf. la photocopie du folio d'où a été tirée cette citation, Cf. *Ibid.*, p. 83.
14. Newton le dit expressément dans sa dernière lettre à Bentley du 25 février 1692/3, in *Ibid.*, p. 255 : « And to all ye matter were at first divided into several systems & every system by a divine power constituted like our's : yet would the outward systems descend towards ye middlemost so yt this frame of things could not always subsist without a divine power to conserve it. Which is your second Argument, & to your third I fully assent ».
15. William Derham (1657-1735), *Physico-Theology: or, a Demonstration of the Being and Attributes of God*, from *His Works of Creation*, London, 1713, 1720<sup>5</sup>; *Astrotheology : or, a Demonstration of the Being and Attributes of God, from a Survey of the Heavens*, London, 1715, tr. allemande Fabricius, Hamburg, 1728.
16. William Whiston (1667-1752), *Astronomical Principles of Religion*, London, 1717, 1725<sup>2</sup>.
17. William Derham, *Astrotheology*, 7<sup>e</sup> édition, London, 1738, pp. 57-58: « How the Fixt stars are situated in respect to one another, is impossible for us to determine at such prodigious distances as they are from us ; but they look to us who can have no regular prospect of their positions, as if placed without any order : like as we should judge of an army of orderly, well disciplined soldiers, at a distance, which would appear to us in a confused manner, until we came near, and had a regular prospect of them, which we should then find to stand well in rank and file. So doubtless, if we could have an advantageous prospect of the fixt stars, we should find them very commodiously, and well set in the firmament, in regard of one another ».
18. Thomas Wright of Durham, *An Original Theory or new Hypothesis of the Universe*, 1750, rééd. Hoskin, London, éd. Macdonald, 1971, Letter VII, p. 62 : « When

we reflect upon the various aspects, and perpetual changes of the planets, both with regard to their heliocentric and geocentric motion, we may readily imagine, that nothing but a like eccentric position of the stars could any way produce such an apparently promiscuous difference in such otherwise regular bodies. And that in like manner, as the planets would, if viewed from the Sun, there may be one place in the universe to which their order and primary motions must appear most regular and most beautiful. Such a point, I may presume, is not unnatural to be supposed, altho' hitherto we have not been able to produce any absolute proof of it ».

19. Thomas Wright of Durham, *Op. cit.*, Letter IV, p. 30 : « And hence we may conclude [...] that at least this we may be certain of, that they [the stars] are all together undoubtedly an infinity of like bodies, distributed either promiscuously, or in some regular order throughout the mundane space ».
20. Cf. par exemple, Wright cite dans son manuscrit de 1734, *A Theory of the Universe*, l'Épître au Romains, I, 20: « The visible things of God, from the creation of y<sup>e</sup> World is clearly seen being understood by y<sup>e</sup> things that are made even his eternal power & godhead »; in rééd. Hoskin, London, éd. Macdonald, 1971, manuscrit H 1, p. 14.
21. William Whiston, *Astronomical Principles of Religion*, London, 1725<sup>2</sup>, Part II, p. 25: « But of such vast and numberless systems, if such they are, we know very little: only so much we know of the planetary and cometary worlds, and of the probability of vastly more among the fixed stars (to say nothing of the noblest or invisible parts of the creation, nor of the particular phaenomena here below), etc... ». Cf. aussi, Part VII, p. 135.
22. Cf. La Préface de M. Hoskin à son édition en facsimile de Wright, *Clavis Coelestis* (1742), London, 1967, p. viii-ix, où il mentionne les échos des *Astronomical Principles of Religion* de Whiston dans cet écrit de Wright.
23. Whiston, *A new Theory of the Earth* (1696), connu 6 éditions successives. Il semble ignorer ici l'existence des *Astronomical principles of Religion*, London, 1717, et 1726.
24. Thomas Wright of Durham, manuscrit de 1734, *A Theory of the Universe*, in rééd. Hoskin, London, éd. Macdonald, 1971, p. 3.
25. Thomas Wright of Durham, *An Original Theory or new Hypothesis of the Universe*, 1750, rééd. Hoskin, London, éd. Macdonald, Préface, p. iii, (19) : « His chief design will be found an attempt towards solving the Phaenomena of the *Via Lactea*, and in consequence of that solution, the framing of a regular and rational Theory of the known universe, before unattempted by any ».
26. Wright, *Op. cit.*, p. vi, (22) : « where so great a problem is attempted as the solution of the *Via Lactea Phaenomenon*, which has hitherto been looked upon as an insurmountable Difficulty ».
27. Wright, *Ibid.*
28. Thomas Wright of Durham, *An Original Theory or new Hypothesis of the Universe*, 1750, rééd. Hoskin, London, éd. Macdonald, 1971, Letter V, pp. 37-38.
29. Wright, *Op. cit.*, Lettre V, p. 42.
30. Wright, *Op. cit.*, Lettre VI, pp. 51-55.

31. Wright, *Op. cit.*, Lettre VII, p. 63.
32. Wright, *Op. cit.*, Lettre VII, pp. 63-64.
33. Wright, *Op. cit.*, Lettre VII, p. 65.
34. Wright, *Ibid.*: « Not only the Phaenomena of the *Milky Way* may be thus accounted for, but also all the cloudy Spots, and irregular Distribution of them ».
35. Cf. les planches XXI à XXIX, pp. 62-65.
36. Wright, *Op. cit.*, Lettre IX, p. 79.
37. Wright, *Op. cit.*, Lettre IX, p. 78.
38. Wright, *Op. cit.*, Lettre IX, p. 80.
39. Sur ce point je trouve un peu trop tranché le jugement de Michael Hoskin sur le rapport de Kant à la théorie Wright lorsqu'il écrit dans son excellent article intitulé *The Cosmology of Thomas Wright of Durham*, in *Journal for History of Astronomy*, 1970, p. 48 : « Kant, thinking the Divine Centre was supposed remote from our system, considered himself entitled to examine in purely natural terms the proposals of Wright concerning the structure of our system ». En revanche, je suis entièrement d'accord avec ses propos très mesurés sur cette même question, dans son édition de Wright, *An Original Theory*, 1750, *Introduction* de Hoskin, London, éd. Macdonald, 1971, p. XXVI-XXVII.
40. Les *Freye Urtheile und Nachrichten zum Aufnehmen der Wissenschaften und der Historie überhaupt*, Hamburg, Achtes Jahr (1751), étalèrent leur compte rendu de l'ouvrage de Wright sur trois numéros. Ainsi, celui du 1<sup>er</sup> janvier 1751 contenait des extraits des Lettre I à III, celui du 5 janvier contenait un long extrait de la Lettre IV, et celui du 8 janvier présentait des passages des Lettres V à IX en s'appesantissant plus particulièrement sur les Lettres VII et IX.
41. Cf. *Freye Urtheile und Nachrichten*, du 1<sup>er</sup> janvier 1751, p. 1-2.
42. *Ibid.*
43. *Ibid.*
44. Kant, *Théorie du ciel*, *Préface*, Ak I, 231 ; tr. fr. Roviello, Paris, Vrin, 1984, p. 74. Cf. aussi, *Op. cit.*, *Première Partie*, Ak I, 248 ; tr. fr. Roviello corrigée, Paris, Vrin, 1984, p. 89 : « Il fut réservé à M. Wright de Durham, un Anglais, de faire un heureux pas vers une remarque qu'il ne semble pas avoir employée lui-même à une fin d'importance [...]. Il ne considérait pas les étoiles fixes comme un fourmillement dispersé, sans ordre ni intention, mais il trouvait une constitution systématique dans le tout et une relation générale de ces astres à un plan principal des espaces qu'ils occupent. Nous tenterons d'améliorer l'idée qu'il a proposée, et de lui donner cette tournure par laquelle elle peut être féconde en conséquences importantes dont la pleine confirmation est réservée aux temps futurs ».
45. *Freye Urtheile und Nachrichten*, du 8 janvier 1751, p. 17 sq.
46. Kant, *Théorie du ciel*, *Première Partie*, Ak I, 248 ; tr. fr. Roviello corrigée, Paris, Vrin, 1984, p. 90.
47. Kant, *Théorie du ciel*, *Première Partie*, Ak I, 250, 251 ; tr. fr. Roviello corrigée, Paris, Vrin, 1984, pp. 91-92.
48. M. Hoskin, *The Cosmology of Thomas Wright of Durham*, in *Journal for History of Astronomy*, 1970, pp. 48-49.

49. Cf. par exemple l'article de F. Paneth, « Thomas Wright of Durham and Immanuel Kant, in *The Observatory* », vol. 64, 1941, pp. 71-82, spéc. p. 74.
50. Kant, *Théorie du ciel, Première Partie*, Ak I, 252 ; tr. fr. Roviello, Paris, Vrin, 1984, p. 93. Dans ma présentation de la *Théorie du Ciel*, pp. 37-38, j'ai refait les calculs de Kant avec ses données et j'ai montré qu'il a commis une erreur en divisant le « bon résultat » par 2, erreur qu'il a répétée de nouveau dans son calcul de la durée de rotation de Saturne, *Op. cit.*, pp. 282-284, note 22.
51. *Freye Urtheile und Nachrichten*, du 8 janvier 1751, p. 17 sq.
52. Cf. notamment les planches XXXI et XXXIII in *An Original Theory or new Hypothesis of the Universe*, 1750, rééd. Hoskin, London, éd. Macdonald, 1971, entre les pp. 82-83.
53. C'est Von Humboldt qui employa pour la première fois le terme de « *Weltinseln* » dans son ouvrage *Kosmos*, 1850.
54. Kant, *Théorie du ciel*, 1<sup>e</sup> partie, Ak I, p. 253 ; tr. fr. Roviello corrigée, Paris, Vrin, 1984, p. 94.
55. Kant, *Théorie du ciel*, 1<sup>e</sup> partie, Ak I, p. 256 ; tr. fr. Roviello corrigée, Paris, Vrin, 1984, p. 97.
56. Lettre de Kant à l'astronome J. E. Bode du 2 septembre 1790, AK XI, 203-204 ; tr. fr. in *Correspondance*, Paris, Gallimard, 1991, p. 431 : « 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 *Théorie du Ciel*, pp. 14-15 ».
57. Lettre de Kant à Johann Friedrich Gensichen du 19 Avril 1791, in Ak, XI, pp. 252-253 ; et *Kant-Studien*, II, 1897, p. 104 sq. C'est nous qui traduisons.

## Chapitre 14 : Gaston Bachelard et la cosmologie

1. G.-G. Granger, *L'irrationnel*, Paris, O. Jacob, 1998.
2. J. Merleau-Ponty, *Les trois étapes de la cosmologie. Comment a évolué la conception de l'univers de l'antiquité à nos jours*, Paris, Robert Laffont, 1971, p. 231.
3. G. Bachelard, « univers et Réalité », in G. Bachelard, *L'Engagement rationaliste*, Paris, P.U.F., p. 103.
4. *Ibid.*, p. 104.
5. *Ibid.*, pp. 104-105.
6. *Ibid.*, p. 105.
7. G. Bachelard, « Critique préliminaire du concept de frontière épistémologique », in *Études*, Paris, Vrin, 1970, p. 84.
8. G. Bachelard, « univers et Réalité », *op.cit.*, pp. 107-108.
9. *Ibid.*, p. 108.
10. E. Minkowski, *Vers une cosmologie*, Paris, Aubier-Montaigne, 1936, p. 13.
11. *Ibid.*, pp. 13-14.
12. *Ibid.*, p. 14.
13. G. Bachelard, « Le monde comme caprice et miniature », in *Études*, Paris, Vrin, 1970, p. 26.
14. G. Bachelard, *La Poétique de l'Espace*, Paris, P.U.F., 1974, p. 150.
15. G. Bachelard, *La Poétique de la Rêverie*, P.U.F., 1971, p. 12.

## Chapitre 15 : Criticisme et positivisme : la déraisonnable prudence des philosophes en matière de cosmologie

1. Par opposition à la métaphysique générale (l'ontologie) qui traite de l'être en tant qu'être, la métaphysique spéciale concerne un secteur de l'être.
2. Après avoir traité des concepts de la raison pure (les Idées) en général, la Dialectique transcendantale analyse successivement les « paralogismes de la raison pure » qui traite des apories de la psychologie rationnelle, « l'antinomie de la raison pure » qui traite des apories de la cosmologie rationnelle et « l'idéal de la raison pure » qui traite des apories de la théologie rationnelle.
3. E. Kant, *Histoire générale de la nature et théorie du ciel*, AK I, 225-226, trad. F. Marty, *Cœuvres philosophiques I*, Bibliothèque de la Pléiade, Gallimard, 1980, pp. 42-43.
4. E. Kant, *Histoire générale de la nature et théorie du ciel*, AK I, 306, *Ibid.* p. 76.
5. E. Kant, *Histoire générale de la nature et théorie du ciel*, AK I, 307, *Ibid.*, p. 77.
6. E. Kant, *Histoire générale de la nature et théorie du ciel*, AK I, 310, *Ibid.*, p. 81
7. Georges Poulet fait observer que Kant fut quasi le seul penseur du XVIII<sup>e</sup> siècle qui soit parvenu à imaginer le monde à partir d'un centre (G. Poulet, *Les Métamorphoses du cercle*, « Champs », Flammarion, 1979, p. 133).
8. E. Kant, *Histoire générale de la nature et théorie du ciel*, AK I, 316, *Op. cit.*, p. 83.
9. E. Kant, « Dissertation de 1770 », § 21, AK II, 408, *Cœuvres philosophiques I*, *Op. cit.*, p. 662.
10. *Ibid.*, p. 646.
11. E. Kant, *Prolégomènes à toute métaphysique future*, § 16, trad. J. Rivelaygue, *Cœuvres philosophiques II*, Bibliothèque de la Pléiade, Gallimard, 1985, p. 67. Définition identique au début des *Premiers principes métaphysiques de la science de la nature*, AK IV, 167.
12. E. Kant, *Logique*, « Introduction », § 1.
13. Le monde s'appelle nature, dit Kant, en tant qu'il est considéré comme un *tout dynamique*, c'est-à-dire non comme un tableau étalé dans l'espace *et dans le temps* mais comme un système d'existences (*Critique de la raison pure*, Système des idées cosmologiques, AK III, 289).
14. E. Kant, *Opus postumum*, AK XXI, 31, trad. F. Marty, PUF, 1986, p. 219.
15. E. Kant, *Opus postumum*, AK XXI, 22, *Ibid.*, p. 209. Une note de l'*Opus postumum* oppose la pluralité des mondes à l'unicité de l'univers (*Opus postumum*, AK XXI, 29, *Op. cit.*, p. 217). Le monde n'est donc pas la totalité (*universum*) – laquelle « appartient aux idées et à la philosophie transcendantale » (*Ibid.*). Mais un autre fragment identifie monde et univers : « on ne peut penser qu'un monde : la pluralité des mondes (*pluralitas mundorum* c'est-à-dire *universitatis rerum*) est une contradiction en soi-même » (*Opus postumum*, AK XXI, 33, *Ibid.*, p. 221).
16. E. Kant, *Critique de la faculté de juger*, Introduction IV, trad. fr., *Cœuvres philosophiques II*, *Op. cit.*, pp. 934-935.
17. M. Heidegger, « Ce qui fait l'être-essentiel d'un fondement ou 'raison' », trad. H. Corbin, *Questions I et II*, « Tel », Gallimard, 1990, pp. 124-125.

18. E. Kant, *Leçons de métaphysique*, trad. M. Castillo, Le Livre de Poche, LGF, 1993, p. 195.
19. *Ibid.*, p. 196.
20. E. Kant, *Critique de la raison pure*, AK III, 354.
21. *Ibid.*, AK III, p. 330.
22. E. Kant, *Dissertation de 1770*, § 14, AK II, 402.
23. E. Kant, *Critique de la raison pure*, AK III, 336.
24. E. Kant, *Critique de la raison pure*, AK III, 349.
25. E. Kant, *Critique de la raison pure*, trad. A.J.-L. Delamarre et F. Marty, *Œuvres I*, *op. cit.*, p. 1041.
26. Néanmoins, à la fin de sa vie, Kant réfléchit encore sur l'éther « matière pénétrant tout, remplissant tout l'espace cosmique, comme un élément non hypothétique, mais donné *a priori* pour le système du monde » (*Opus postumum*, AK XXI, 222, *op. cit.*, p. 59), et sur le calorique qui aurait la propriété de pénétrer tous les corps de l'espace (*Opus postumum*, AK XXII, 550, *Ibid.*, p. 70).
27. E. Kant, *Critique de la raison pure*, AK III, 288-289.
28. A. Comte, *Traité philosophique d'astronomie populaire*, Fayard, 1985, p. 118.
29. E. Kant, *Opus postumum*, *op. cit.*, p. 217.
30. *Ibid.*
31. A. Comte, *Discours sur l'esprit positif*, Vrin, 2002, pp. 38-39.
32. A. Comte, *Cours de philosophie positive*, quarante-huitième leçon, tome IV, Anthropos, 1969, p. 287.
33. A. Comte, *Traité philosophique d'astronomie populaire*, *op. cit.*, p. 119.
34. *Ibid.*
35. A. Comte, *Cours de philosophie positive*, dix-neuvième leçon, tome II, Anthropos, 1968, p. 7.
36. A. Comte, *Traité philosophique d'astronomie populaire*, *op. cit.*, p. 116.
37. E. Littré, *La Science au point de vue philosophique*, Paris, 1884, p. 13.
38. *Ibid.*, p. 55.
39. *Ibid.*, p. 52.
40. P. Valéry, *Variété*, *Œuvres I*, Bibliothèque de la Pléiade, Gallimard, 1957, p. 866.
41. K. Popper, *La Logique de la découverte scientifique*, trad. fr., Payot, 1978, p. 16.
42. C'est moins par idéalisme que par refus du réductionnisme que Comte rejette le matérialisme.
43. *Ibid.*, p. 24.
44. A. Comte, *Cours de philosophie positive*, I, première leçon, *op. cit.*, p. 44.
45. A. Comte, *Cours de philosophie positive*, neuvième leçon.
46. A. Comte, *Cours de philosophie positive II*, vingt-deuxième leçon, *op. cit.*, p. 133.
47. Le spectre du visible ne correspond qu'à une petite lucarne dans le rayonnement électromagnétique global.
48. A. Comte, *Traité philosophique d'astronomie populaire*, *op. cit.*, p. 115.
49. J. Merleau-Ponty, *Cosmologie du XX<sup>e</sup> siècle*, Gallimard, 1965, p. 81.
50. *Ibid.*, p. 82.
51. *Ibid.*, p. 8.

52. La matière baryonique (la matière ordinaire, qui est composée d'atomes) n'entre que pour 5 % dans la composition de l'univers. La matière noire non baryonique et l'énergie noire constituent les 95 % « restants ».
53. « Nous ignorerons » en latin.
54. C'est parce qu'il existe un horizon cosmologique que la taille de l'univers est supérieure au trajet parcouru par la lumière depuis le Big-bang.

### Chapitre 16 : Un discours sur l'origine est-il possible ?

1. On voudra bien excuser ici le jargon nécessaire à la description des principes de cette théorie. Celle-ci est basée sur la quantification canonique de la relativité générale dans une formulation hamiltonienne, les trois autres interactions fondamentales n'étant pas considérées dans un premier temps. L'une de ses prédictions est que l'espace doit présenter une structure discrète, par opposition au *continuum* d'espace-temps de la relativité générale : les aires et les surfaces sont quantifiées. Cette théorie est en concurrence avec la théorie des supercordes, au moins pour la gravitation. Voir le livre de Carlo Rovelli, *Qu'est-ce que le temps ? Qu'est-ce que l'espace ?*, Bruxelles, Bernard Gilson, 2006.

### Chapitre 18 : Cosmologie et scientificité

1. Évidemment, ce bannissement affiché, au moins dans une perspective positiviste d'une science triomphante n'a jamais vraiment empêché des questions de nature cosmologique de traverser le champ de la recherche en physique et astronomie. Il y a bien une dimension cosmologique dans les problèmes traités à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle et au début du XX<sup>e</sup> comme celui de l'inertie, des différents principes de conservation, de l'existence ou inexistence de l'éther.
2. Leibniz, *Opuscula philosophica selecta*, texte revue par P. Schrecker, pp. 85-95.
3. On sait aujourd'hui que regarder loin c'est remonter dans le temps mais cela suppose une théorie physique de la lumière.
4. C. Bernard, *Principes de médecine expérimentale*, Alliance culturelle du livre, Les classiques de la médecine, Genève, Paris, Bruxelles, 1963, pp. 138-139.
5. Voir par exemple la thèse épistémologique de Duhem-Quine.

### Chapitre 19 : Sur le caractère physique du concept de temps de la cosmologie

1. Sur le concept de temps, on pourra consulter les textes historiques et plus récents rassemblés dans Capek [1976]. Mentionnons, parmi les nombreux ouvrages de portée philosophique : Reichenbach [1928], Hinkfuss [1975], Newton-Smith [1980], Lestienne [1990], Klein & Spiro [1994]. Le présent travail a été précédé d'autres études sur l'espace et le temps, et en particulier sur le temps : Paty [1994, 2001].
2. On désignera les grandeurs correspondantes par  $t$  et  $\Delta t (= t_f - t_i)$ , et  $dt$  la durée infinitésimale, ou différentielle de temps.

3. D'Alembert [1743].
4. Newton [1687].
5. Notamment par H. Hertz (Hertz [1894], E. Mach (Mach [1883]), H. Poincaré (Poincaré [1904]). Sur la formulation, d'une clarté et d'une originalité décisive, de la loi de causalité par d'Alembert (D'Alembert [1743], chapitre 2), voir Paty [2004a].
6. Einstein [1916].
7. Sur l'orientation du temps, on doit mentionner notamment l'étude analytique que lui a consacré Hans Reichenbach (Reichenbach [1956]), ainsi que l'ouvrage de physique théorique de H. Zeh : Zeh [1992]. Une discussion de ces ouvrages sortait du propos de ce travail, qui en est indépendant.
8. C'est un instantané non discontinu, qui implique un « voisinage », comme pour un point de l'espace. Les « actions instantanées » ne sont pas « à distance », mais locales, « de proximité » ou « de voisinage ».
9. Maxwell [1873].
10.  $\sqrt{-1}$  est le nombre imaginaire pur unité, également dénoté  $i$  ( $i^2 = -1$ ).
11. Dont la signature est : +, +, +, -.
12. Nous n'entrerons pas ici dans la considération d'éventuels « tachyons », particules hypothétiques animées d'une vitesse comprise entre  $c$  et l'infini, formellement compatibles avec les relations de la théorie de la relativité restreinte, mais dont tout semble montrer qu'elles ne sont pas présentes dans le monde physique.
13. L'élément de métrique ( $ds^2$ ) a, en tout point  $x$  de l'espace-temps (de quadri-coordonnées  $x_\mu$ ), la forme :  $ds^2 = \sum_{\mu\nu} g(x) dx_\mu dx_\nu$ , où  $g(x)$  est le tenseur métrique, donné par l'équation de la relativité générale en fonction du champ de gravitation au point considéré.
14. Einstein [1916].
15. En physique théorique, on définit un opérateur d'inversion du temps ou de symétrie temporelle,  $T$ , utilisé surtout en microphysique, sur le même mode que l'opérateur d'inversion ou symétrie spatiale, ou opérateur de parité,  $P$ , pour les coordonnées d'espace. Du point de vue formel, « inverser le temps » est équivalent à « inverser l'ordre des états », mais l'équivalence stricte ne concerne que le calcul pour une transition élémentaire ; du point de vue physique, « inverser le temps » signifie en fait *inverser l'ordre des états*. La « réversibilité » d'un processus est son invariance sous l'opération d'inversion ou renversement du temps (donc, en fait, de l'ordre des états), ce qui est généralement le cas pour les phénomènes élémentaires, quantiques ou classiques, sauf en thermodynamique (dont le second principe énonce l'irréversibilité). Cependant, certains phénomènes au niveau quantique subatomique violent l'« invariance par renversement du temps ».
16. Réversibilité et irréversibilité se rapportant tous deux, comme on l'a rappelé, aux transitions entre états, et non à une inversion imaginée du cours du temps.
17. Pour le dire en une image parlante : on ne rajeunit pas tandis que le temps suit son cours. Ce n'est pas que le temps aurait pu ne pas suivre son cours : c'est la succession des événements (imbriqués) du monde qui est irréversible avec le temps qui passe orienté dans un seul sens, toujours le même.

18. Voir notamment : Peebles [1971], Sciama [1971], Merleau-Ponty [1965, 1983, 2003, 2004], Andrillat, Hanck, Maeder & Merleau-Ponty [1988], Paty [1993, 2003].
19. Pour une réflexion sur l'engendrement de l'espace à partir de la matière quantique, cf. Paty [2000].
20. Voir : Paty [2003], chapitre 11, pp. 215-223.
21. *Ibid.*
22. Silk [1980], Salam, Heisenberg & Dirac [1990], Audouze, Musset & Paty [1990].
23. Le temps de Planck a la valeur  $t = 10^{-43}$  s.
24. Gödel [1949a].
25. Einstein [1949].
26. Comme cela a été rappelé plus haut.
27. J'ai examiné et critiqué ailleurs les remarques philosophiques de Gödel sur le caractère (par lui supposé) « idéaliste » du temps dans la conception kantienne et dans la théorie de la relativité restreinte : Paty [2006].
28. Gödel [1949a, 1949b, 1950].
29. Pour un univers statique : Gödel [1949 a et b] (le second article a pour titre : « Exemple d'un nouveau type de solutions cosmologiques des équations d'Einstein pour un champ de gravitation », et pour un univers en expansion : Gödel [1950] (sous le titre « Univers en rotation en théorie de la relativité générale »).
30. Gödel [1949a], p. 562.
31. Gödel [1949a], p. 559.
32. La terminologie en « monstrueux », « tématologique », est de moi, non de Gödel.
33. Einstein [1949]. C'est aussi la position du philosophe de la cosmologie Jacques Merleau-Ponty (Merleau-Ponty [1965]), et ma propre analyse si situe dans la même ligne.

## Chapitre 20 : La cosmologie comme « manière de faire un monde » – Physique, relativisme et irréalisme

1. J. Derrida, *Marges – de la philosophie*, Paris, Editions de Minuit, 1972.
2. K. Jaspers, *Way to Wisdom: An Introduction to Philosophy*. New Haven, Yale university Press, 1951.
3. H. Putnam, *Renewing Philosophy*, Cambridge, Harvard university Press, 1992, p. ix.
4. A. Sokal et J. Bricmont, *Impostures Intellectuelles*, Paris, Éditions Odile Jacob, 1997.
5. J. Bouveresse, *Prodiges et vertiges de l'analogie : De l'abus des belles-lettres dans la pensée*, Raisons d'Agir, 1999.
6. Voir par exemple P. Boghossian, *La peur du savoir. Sur le relativisme et le constructivisme de la connaissance*. Marseille, Agone, 2009.
7. Wittgenstein, *Tractatus logico-philosophicus*, trad. Gilles-Gaston Granger, Gallimard, Paris, 2001 (1<sup>e</sup> éd. 1921) ; Armstrong, *A World of States of Affairs*. Cambridge: Cambridge university Press, 1997.

8. Puisqu'à la différence de tous les autres systèmes physiques l'univers n'admet ni extériorité ni antériorité.
9. M. Masterman, *The Nature of Paradigm*, in I. Lakatos et A. Musgrave, *Criticism and Growth of Knowledge*, Cambridge, Cambridge university Press, pp. 59-90, 1970.
10. J. Derrida, *La Vérité en Peinture*, Paris, Flammarion, 1978.
11. B. Williams, *Ethics and the limit of philosophy*, Cambridge, Harvard university Press, 1985.
12. E. Grossman, *La défiguration, Artaud – Beckett – Michaux*, Paris, Editions de Minuit, 2004, p. 7.
13. C. Castoriadis, *Figures du pensable – les carrefours du labyrinthe VI*, Paris, Seuil, 1999, p. 35.
14. J. Derrida, *De la grammatologie*, Paris, Editions de Minuit, 1967.
15. J. Derrida, « Il faut bien manger ou le calcul du sujet » in *Points de suspensions. Entretiens*, Paris, Galilée, 1992.
16. Au sens où Lyotard (*in La condition postmoderne*, Paris, Editions de Minuit, 1979) définit la science d'aujourd'hui.
17. A. Ashtekar, « Loop Quantum Cosmology: An Overview », *Gen. Rel. Grav.* 41, 707, 2009.
18. A. Barrau, « Catastrophe : signe ou concept pour la physique contemporaine », *Le Portique*, 22, 2008.
19. Une bonne introduction aux théories de jauge et à la théorie quantique des champs est donnée, par exemple, dans M. Le Bellac, *Des phénomènes critiques aux champs de jauge*, Paris, Editions du C.N.R.S., 1988.
20. Platon, *Le banquet*, trad. L. Brisson, Paris, Flammarion, 1999.
21. D. Deleuze, F. Guattari, *Qu'est-ce que la philosophie*, Paris, Editions de Minuit, 1991, p. 113.
22. E. Kant, *Critique de la raison pure*, traduit de l'allemand par A. Trémesaygues et B. Pacaud, Paris, PUF, 1944, pp. 55-64 (1<sup>e</sup> éd. 1781).
23. C. Rovelli, *Quantum gravity*, Cambridge, Cambridge university Press, 2004.
24. J. Bell, « On the problem of hidden variables in quantum mechanics », *Rev. Mod. Phys.*, pp. 444-452, 1966.
25. A. Aspect, P. Grangier, G. Roger, « Experimental realization of Einstein-Podolsky-Rosen gedankenexperiment : a new violation of Bell's inequalities », *Phys. Rev. Lett.* 49, pp. 91-94, 1982.
26. Voir, par exemple, N. Gisin, « Can relativity be considered complete? From Newtonian non locality to quantum non locality and beyond », arXiv:quant-ph/0512168, 2005.
27. A. Einstein, B. Podolsky, N. Rosen, « Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete ? », *Phys. Rev.* 47, 777-780, 1935.
28. C. Rovelli, « Relational quantum mechanics », *Int. J. Theor. Phys.* 35, 1637, 1996.
29. Le graviton qui porte le champ gravitationnel emporte lui-même de l'énergie et génère donc de la gravité.
30. C. Rovelli, *Qu'est-ce que le temps ? Qu'est-ce que l'espace ?*, traduit de l'italien par E. Brune, Union Européenne, Bernard Gilson Editeur, 2008 (1<sup>e</sup> éd. 2004).

31. C. Rovelli, « Forget time », arXiv:0903.3832v3[gr-qc], 2009.
32. M. Bojowald, « Loop quantum cosmology », *Living Rev. Relativity*, 8, 11, 2005.
33. A. Ashtekar, « Singularity resolution in loop quantum cosmology: a brief overview », arXiv:0812.4703v1[gr-qc], 2008.
34. J. Grain, A. Barrau, « Cosmological footprint of loop quantum gravity », *Phys. Rev. Lett.*, 102, 081301, 2008.
35. G. Amelino-Camelia *et al.*, « Tests of quantum gravity from observation of gamma-ray bursts », *Nature* 393, 763, 1998.
36. L. Wittgenstein, *Cahier bleu*, in *Le Cahier bleu et le Cahier brun*, traduit par M. Goldberg et J. Sackur, Paris, Gallimard, 1996 (1933-1935, 1<sup>e</sup> éd. 1958).
37. Au sens où W. James réfère à la nécessité de croire, même en science, « in advance of evidence », in *La volonté de croire*, traduit de l'anglais par L. Moulin, Paris, Les empêcheurs de penser en rond, 2005 (1<sup>e</sup> éd. 1897). Très curieusement cette observation, banale pour qui observe la construction réelle et effective des positions scientifiques, lui a valu de nombreuses objections lors de ses cours à Harvard.
38. J.-F. Lyotard, *La condition postmoderne*, Paris, Editions de Minuit, 1979.
39. G. Deleuze, *Logique du sens*, Paris, Editions de Minuit, 1969.
40. A. Hirt, « Jean-Luc Nancy : « Le sens du monde » », *Multitude web* – 8, 1997.
41. J.-L. Nancy, « L'Excrit », *Poésie*, Paris, Belin, n°47, pp. 107-121, 1988.
42. V. Mukhanov, « Cosmology and the many world interpretation of quantum mechanics », pp. 67-274 in B. Carr (éd.), *Universe or multiverse*, Cambridge university Press, 2007.
43. Au moins pour les topologies simplement connexes.
44. Prolongement analytique maximal des trous noirs de Kerr (en rotation) ou de Reissner-Noerdström (porteur d'une charge électrique).
45. A. Linde, « Prospects for Inflation », talk at the Nobel Symposium « Cosmology and String Theory », 2004, hep-th/0402051.
46. M. Tegmark, « The multiverse hierarchy », pp 99-125 in B. Carr (éd.) *Universe or Multiverse*, Cambridge, Cambridge university Press, 2007.
47. A. Barrau, Quelques éléments de physique et de philosophie des multivers.
48. Deleuze, F. Guattari, *Qu'est-ce que la philosophie*, Paris, Editions de Minuit, 1991, p 190.
49. J.-L. Nancy, *La communauté désœuvrée*, Strasbourg, Christian Bourgeois, p 120.
50. A. Badiou, *l'éthique*, Caen, Nous, 2003.
51. A. Hirt, « Jean-Luc Nancy : Le sens du monde », *Op. cit.*
52. J. Margolis, « The truth about relativism », in M. Krausz (ed.) *Relativism: Interpretation and Configuration*, Notre Dame, university of Notre Dame press, 1989.
53. S.D. Hales, *A consistent relativism*, *Mind* (N.S.), 106, 1997, pp. 33-52.
54. K.A. Taylor, *How to be a relativist?* Preprint du departement de philosophie de Stanford.
55. J. Derrida, *Force de loi*, Paris, Galilé, 1994.
56. R. Ogien, *Le réalisme moral*, Paris, PUF, 1999.
57. Il serait intéressant de poursuivre ce parallèle pour le prendre à contre-pied : nos propositions scientifiques ne portent peut-être pas plus de vérité – au sens global et métaphysique – que nos jugements moraux !

58. On le lit chez Derrida, chez Latour, etc.
59. Voir, par exemple, R. Boudon, *Le juste et le vrai. Etude sur l'objectivité des valeurs et de la connaissance*, Paris, Fayard, 1995.
60. H. Putnam, *Realism with a Human face*, Cambridge, Harvard university Press, 1990.
61. L. Wittgenstein, *On Certainty*, Oxford, Basil Blackwell, 1969.
62. H. Putnam, *Renewing Philosophy*, Op. cit., pp 158-179.
63. N. Goodman, *Manières de Faire des Mondes*, traduit de l'anglais par M.-D. Popelard, Nîmes, Catherine Chambon, 1992 (1<sup>e</sup> éd. ang. 1977) p. 7.
64. Suivant la « profondeur » évoquée par Valéry et chère à Deleuze.
65. Au sens de son devenir « élément » dans la mutation qui s'opère de Husserl à Merleau-Ponty, d'ailleurs grand connaisseur et interprète de la cosmologie de son temps.
66. Deleuze, F. Guattari, *Qu'est-ce que la philosophie*, Op. cit., p. 205.
67. *Ibid*, p. 194 et J. Joyce in Finnegans Wake, trad.. de l'ang. par P. Lavergne, Paris, Gallimard, 1997 (1<sup>er</sup> ed. ang. 1982).
68. R. Rorty, *Objectivisme, relativisme et vérité*, Paris, PUF, 1994.
69. Ces thèses sont aussi présentes chez Davidson in « The Myth of the Subjective », in *Relativism : Interpretation and Confrontation*, Michael Krauz (ed.), Notre Dame, university of Notre Dame Press, 1989.
70. J.-L. Nancy, *Le poids d'une pensée, l'approche*, Strasbourg, La Phocide, 2008.
71. J. Derrida, *L'écriture et la différence*, Paris, Seuil, 1967, p 367.
72. Cette idée a été développée par V. Marron au détour de sa réflexion sur les interprétations de la mécanique quantique.
73. N. Goodman, *Manières de Faire des Mondes*, Op. cit., pp 11-13.
74. *Ibid*, pp 15-25.
75. J. Derrida, *L'Écriture et la Différence*, Paris, Seuil, 1979.
76. La dérivation des rayons des orbites planétaires était par exemple l'une des questions les plus fondamentales à l'époque de Kepler. Ils sont aujourd'hui considérés comme des grandeurs contingentes.
77. N. Goodman, *Problems and projects*, Indianapolis, Hackett Publishing Co, 1972.
78. M. Foucault, *Les mots et les choses*, Paris, Gallimard, 1966.
79. J.-L. Nancy, *Corpus*, Paris, Métailié, 1992.
80. « Résumons les caractères principaux d'un rhizome : à la différence des arbres ou de leurs racines, le rhizome connecte un point quelconque avec un autre point quelconque, et chacun de ses traits ne renvoie pas nécessairement à des traits de même nature, il met en jeu des régimes de signes très différents et même des états de non-signes. » in G. Deleuze et F. Guattari, *Mille Plateaux*, Paris, éditions de minuit, 1980, pp 30-31.
81. H. Bergson, *Les deux sources de la morale et de la religion*, Paris, PUF, 1932
82. M. Kaku, *Strings, Conformal Fields, and M-Theory*, New York, Springer, 1999
83. I. Stengers, *La vierge et le neutrino*, Paris, Les Empêcheurs de penser en rond, 2006, p. 50.
84. I. Stengers, *L'invention des sciences modernes*, Paris, La Découverte, 1993 p. 102.
85. P. Veyne, *Les grecs ont-ils cru à leurs mythes*, Paris, Seuil, 1992, p. 33.

86. Von Uexküll, *Mondes humains et mondes animaux*, traduit de l'allemand par Philippe Muller, Paris, Denoël, 1965 (1<sup>e</sup> éd. 1934).
87. J. Derrida, *L'animal que donc je suis*, Paris, Galilée, 2006.
88. N. Goodman, *Manière de faire des mondes*, *Op. cit.*, p. 30.
89. *Ibid*, p. 27.
90. M. Foucault, *L'ordre du discours*, Paris, Gallimard, 1971, p. 16 .
91. D. Lewis, *On the plurality of worlds*, Oxford, Blackwell, 1986.
92. R. Pouivet (dir.), *Lire Goodman, les voies de la référence*, Combas, Editions de l'Eclat, 1992, p. 10.
93. J. Fodor, « Special sciences » in *RePresentations: philosophical essays on the foundations of cognitive science*, Cambridge, MIT Press, 1986.
94. B. Williams, *Ethics and the limit of philosophy*, *Op. cit.*, pp 138-139.
95. J.-P. Sartre, *L'existentialisme est un humanisme*, Paris, Gallimard, 1996, p. 46
96. A. Danto, *La transfiguration du banal*, traduit de l'anglais par C. Hary-Schaeffer, Paris, Seuil, 1989 (1<sup>e</sup> éd. 1981).
97. M. Serres, *L'Incandescent*, Paris, Le Pommier, 2003, p. 28.
98. Voir, en particulier à propos de la mécanique quantique, M. Bitbol, *L'aveuglante proximité du réel*, Paris, Flammarion, 1998.
99. B. Latour, *Un monde pluriel mais commun*, Paris, Poche essai, 2003.
100. Descartes peut aussi jouer contre Descartes : la méthode rationnelle n'est-elle pas, elle-même, réfutable en doute ?
101. K. Popper, *La logique de la découverte scientifique*, traduit de l'anglais par N. Thyssen-Rutten et P. Devaux, Paris, Payot, 1995 (1<sup>er</sup> ed. ang. 1959).
102. Voir par exemple les critique de L. Susskind in *Le Paysage Cosmique*, traduit de l'anglais par B. Arman, Paris, Robert Laffont, 2007, (1<sup>er</sup> éd. en ang. 2004) pp. 215-218.
103. P. Feyerabend, *La Science en tant qu'Art*, traduit de l'allemand par F. Périgaut, Paris, Albin Michel, 2003 (1<sup>e</sup> éd. all. 1983), pp. 72-73.
104. Platon, *Timée*, trad. Par L. Brisson, Paris, Flammarion, 2001, pp. 127-128.
105. Et non pas une ontologie « de la relation » au sens ou Simondon l'a proposée.
106. « Je rêve d'une science – je dis bien d'une science – qui aurait pour objet ces espaces différents, ces autres lieux, ces contestations mythiques et réelles de l'espace où nous vivons. Cette science étudierait non pas les utopies, puisqu'il faut réserver ce nom à ce qui n'a vraiment aucun lieu, mais les *hétéro*-topies, les espaces absolument différents », M. Foucault, *Le corps utopique, les hétérotopies*, Paris, Lignes, 2009, p. 25.
107. H. Putnam, *Renewing Philosophy*, *Op. cit.*, p. 128.
108. J.-L. Nancy, *Plus d'un*, à paraître, 2010.