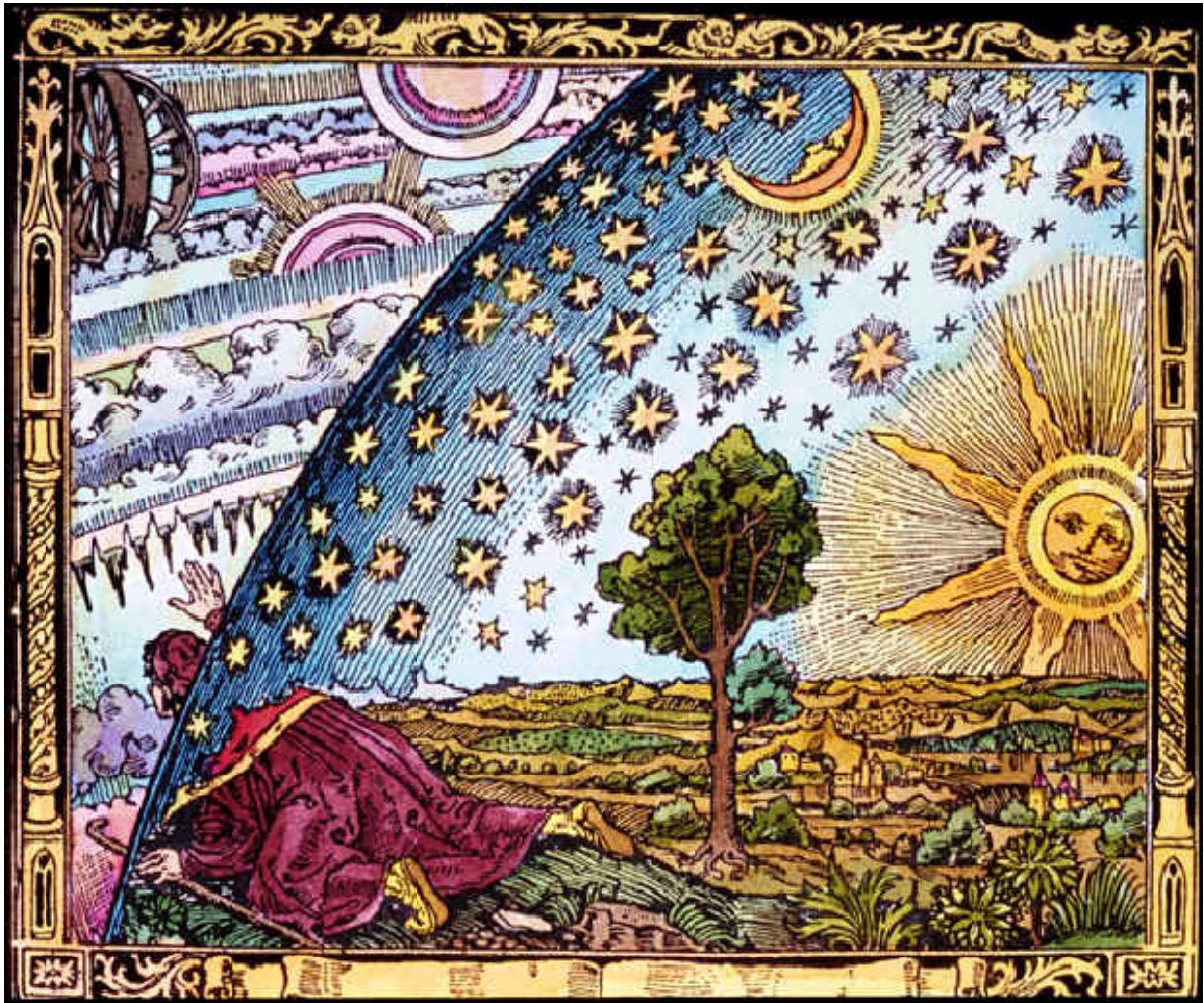


Aurélien Barrau

Laboratoire de Physique Subatomique et de Cosmologie CNRS-IN2P3

Université Joseph Fourier

Quelques éléments de physique et de philosophie des multivers



Architecture du méta-monde

Introduction	4
1. Un bref aperçu des mondes multiples	6
Mythes et mondes en Grèce antique	6
Mondes multiples du Moyen-Âge à l'âge classique	12
Plurivers en philosophie contemporaine	17
2. Le modèle standard de la cosmologie physique	29
Relativité générale	30
Particules élémentaires	36
Cosmologie physique	39
L'inflation « standard »	44
3. Architecture du méta-monde	51
Quelques considérations sur le principe anthropique	51
Indéterminés en physique des particules et cosmologie	58
Un bref aperçu de la théorie des cordes	61
Le paysage des cordes : première approche du multivers	67
4. Manières de faire des mondes – un multivers gigogne	72
Niveau aI	74
Niveau aII	77
Niveau aII'	81
Niveau b	84
Niveau c	92
Niveau III	95
5. Multivers : du falsifiable au mythifié	99
Spécificité de la situation	99
Popper et le multivers	102
Des prédictions dans le multivers	111
Vers une porosité mythique de la phusika	116
Conclusion	127
Bibliographie	129

je-de-mots ou jeu-de-mondes ?

« Qu'est-ce qu'il y avait quand il n'y avait pas encore quelque chose ?
Qu'y avait-il quand il n'y avait rien ?
La réponse à ces questions ne peut être qu'un mythe. »

J.-P. Vernant,
L'Univers, les dieux, les Hommes

Introduction

Invention de la contingence.

Ici, les mondes possibles de Leibniz sont réels et effectifs. La Science de la Nature propose aujourd'hui un réel pluriel où les lois elles-mêmes deviennent des phénomènes. *Nomos* déconstruit. Union nouvelle – et désacralisée – de *muthos* et de *logos*. Le monde aurait pu être autre. Troquer l'inéluctable pour l'improbable. Monde-miracle réinventé. Enchanté ? Merveilleux !

Pourquoi les constantes fondamentales de nos théories physiques, celles du modèle standard des particules élémentaires et celles du modèle cosmologique usuel, adoptent-elles des valeurs si étranges ? Pourquoi une telle hiérarchie de masses entre les quanta fondamentaux ? Pourquoi une valeur si extraordinairement incroyable – au sens strict des termes – de l'énergie du vide ? Pourquoi une gravité si faible ? Pourquoi des couplages si divers ? Le visage de *Cosmos* a décidément largement emprunté à *Chaos*... Du désordre dans l'harmonie ? Peut-être plutôt un îlot très particulier au sein du multivers, c'est-à-dire du méta-monde immense, multiplement infini, où tout a lieu. Notre univers comme une bulle parmi tant d'autres. Un micro-cosme dérisoire et imperceptible dans l'étendue vertigineuse du multivers.

L'inflation éternelle produit de l'espace. Sans faille, sans interruption, sans difficulté. Création exponentielle d'espace. Dans cette trame perpétuellement naissante, des bulles germent. Dans les bulles, les champs physiques de la théorie des cordes s'immobilisent en un lieu métastable qui fixe des lois effectives. Un monde diapré. Au sein du quasi-continuum quasi-infini d'états possibles, certains, rares et fragiles, permettent l'émergence de la complexité, de la chimie, de la vie. Nous nous trouvons dans une telle zone du multivers. Une infime parcelle où la physique a pris la forme étrange et gracieuse que nous lui connaissons. Autre part, autres règles. Ailleurs, autres lois. Plus loin, autres dimensions. L'effet de sélection anthropique assure que les observateurs se trouvent inévitablement dans les régions

moins fréquentes (mais infiniment nombreuses néanmoins) où les constantes fondamentales conduisent à l'existence d'une bio-logie.

Structure gigogne du plurivers. Infinis imbriqués. Extraordinaire « paysage » de la théorie avec ses plaines supersymétriques et ses vallées hospitalières. Multitude de diversités. Et, quelque part, marginal et insignifiant, un minimum local où les scalaires se sont figés pour créer notre monde.

L'idée d'univers parallèles n'est pas nouvelle. D'Anaximandre à David Lewis, les philosophes l'ont explorée en détails tout au long de l'histoire. Elle resurgit aujourd'hui comme une conséquence pratiquement inéluctable de nos théories physiques les plus élaborées et les plus ambitieuses. Les plus spéculatives, aussi. Le multivers est-il une proposition scientifique ? Quelle architecture dessine-t-il ? Autorise-t-il l'émergence d'une porosité mythique de la physique ? Nous proposons, dans les chapitres de ce mémoire, d'explorer quelques méandres du Mégamonde et de tisser des embryons de liens entre la sphère-science et l'espace-mythe.

1. Un bref aperçu des mondes multiples

Mythes et mondes en Grèce antique

Sans doute Anaximandre peut-il (au moins suivant la doxographie lacunaire dont nous disposons) être considéré comme l'un des pères de la notion de mondes multiples. Selon Simplicius, Anaximandre invente la pluralité des mondes en supposant qu'ils apparaissent et disparaissent pendant un temps, que certains naissent quand périssent d'autres. Il affirme que ce mouvement est éternel, « car sans mouvement, il ne peut y avoir ni génération ni destruction¹ ». Indépendamment de Simplicius, Hippolyte rapporte qu'Anaximandre clamait que le principe des êtres émane de l'infini², duquel proviennent les cieux et les mondes. Cicéron spécifie en outre que le philosophe associe des dieux différents aux mondes innombrables qui se succèdent³.

La cosmologie d'Anaximandre est très subtile et marque une transition par rapport à ses prédécesseurs en cela qu'elle ne se fonde pas sur une mythologie. Ada Neschke montre qu'il est dépourvu de sens de tenter de classer la pensée d'Anaximandre en tant que physique ou philosophique⁴. Les topiques de l'exégète ne sont simplement pas ceux de l'auteur et le débat usuel entre la lecture hégélienne (c'est-à-dire évolutionniste) et la lecture nietzschéenne (c'est-à-dire suivant le schème d'une révolution par la rupture socratique) perd ici son sens. Les catégories du mode discursif actuel sont hors champ pour appréhender le monde d'Anaximandre. L'objection péripatéticienne suivant laquelle il n'y aurait « aucune raison » à l'existence de mondes multiples tombe quand la logique interne de la cosmogonie d'Anaximandre est considérée. Elle apparaît dans trois domaines de sa pensée : dans la thèse du principe de l'illimité (*a-peiron*), dans le caractère des objets constituant le monde et le formant et dans le caractère du monde lui-même en tant que système terrestre et astral. La tension entre ces deux dernières approches définitoires du monde est à la fois pierre

¹ Simplicius, *Commentaire sur la physique d'Aristote* (1121, 5-9) in G. COLLI, P. GABELLONE, *La Sagesse Grecque*, Paris, l'Eclat, 1991.

² Pseudo-Plutarque (III, 2) ; Aetius, *Opinions* (I, 3, 3; I, 7, 12; II, 1, 3; II, 1, 8).

³ Cicéron, *De la nature des Dieux* (I, 10, 25) :

« Anaximandri autem opinio est nativos esse deos longis intervallis orientis occidentisque, eosque innumerabiles esse mundos. »

« Pour Anaximandre, les dieux ont eu une naissance, mais le temps est long entre leur naissance et leur mort; et les mondes sont innombrables. »

⁴ A. Neschke, « Philosophie ou Science : La question des mondes multiples chez Anaximandre », *Rech. philos. lang.*, 1996, n° 18, pp. 189-200

d'achoppement (quand on tend à l'enfermer dans une catégorie moderne) et la cohérence (quand on la sonde en contexte) de la proposition d'Anaximandre. Anaximandre a été le premier à utiliser un principe (*Arché*) en tant que détermination fondatrice, ce qui dépasse déjà nettement la structure conventionnelle empiriste. Plus nuancé que Thalès, il voit que ce principe est nécessairement transcendant aux objets du monde. Le socle du principe est ici conçu par la *via negationis* : il doit être disjoint des choses (*ta onta*) auxquelles appartiennent le temps (cycle du devenir, de l'être et du périr), l'espace et la détermination qualitative. Or, puisque l'*Arché* est construit par négation, il s'ensuit que tout ce qui n'est pas lui échappe à ses caractères. En particulier, le monde – à dissocier donc de son fondement – n'a aucun droit à l'immortalité et à l'unicité. Ainsi naquit le concept de mondes multiples, au croisement de l'empirie et de la pensée transcendantale.

Le monde d'Anaximandre est soumis à un ordre, à une architecture géométrique exacte⁵. Il est limité dans l'espace, les choses y sont qualitativement déterminées. Cette conception du monde comme limité sous trois aspects (la qualité, l'espace et le temps) exige par elle-même de penser la corruption du monde. La multitude des mondes successifs n'est donc certainement pas l'absurdité principielle que nombre d'interprètes ont souhaité déceler dans le modèle d'Anaximandre.

Ada Neschke montre⁶ que la pensée d'Anaximandre fait sens si on lui restitue son lien fort avec l'observation des phénomènes sans l'enfermer dans la pure empirie. Elle cherche l'intelligible (et suppose donc un cadre modélisateur) mais renonce à l'autonomie du mythe. Ne s'agit-il pas d'une anticipation prémonitoire de la voie actuellement suivie par la cosmologie des multivers ? Cette thèse sera développée dans les derniers chapitres du mémoire.

Les grandes figures de l'atomisme ancien ont tout autant fondé leurs doctrines sur une idée commune que sur le besoin d'une rupture radicale par rapport aux développements de leurs prédécesseurs. Cette évolution constante peut se lire en contrepoint d'une double discontinuité : éthique, d'abord, dans l'opposition d'Epicure à Démocrite, mais physique, surtout, avec l'apparition du *parenklisis* qui propose d'ancrer la physique des anciens sur une notion étonnamment moderne : la déviation.

⁵ DK 12 A 10 et 11

⁶ A. Neschke, « Philosophie ou Science : La question des mondes multiples chez Anaximandre », op. cit., p. 199

Michel Serres⁷ a montré que l'idée convenue selon laquelle la physique classique serait née avec la rupture galiléenne, à l'instar des mathématiques apparaissant brutalement avec Pythagore et Thalès, est sans doute erronée. En proposant de revisiter le texte de Lucrèce afin d'y substituer la mécanique des fluides à la statique des solides, il invite à comprendre le *clinamen* comme une première formulation de la notion de différentielle et à voir dans cette invisible déviation une ébauche du calcul infinitésimal. Si les corpuscules solides n'ont aucune raison de se détourner de leur orbite de chute, il en va tout autrement si la cataracte première est un flux pour lequel le *clinamen* est angle minimum dans l'inchoatif de la turbulence. Cette hypothèse, étayée par l'étude de l'Arénaire, invite à appliquer finement Epicure sur Archimède et Lucrèce sur le corpus syracusain afin de fonder une authentique physique mathématique. On pourrait aller au-delà de cette démarche, rompre avec la temporalité et envisager une lecture anachronique pour mettre en lumière l'étonnante contemporanéité de l'atomisme ancien.

Au niveau de la méthode, déjà, quelque chose de singulier se dessine. On peut y lire une fascinante gigantomachie où la confrontation des philosophes l'emporte sur celle des concepts mais on peut aussi y déceler l'émergence d'une histoire et d'un protocole. La grande polémique sur le fondement de l'appréhension du réel, sur le principe d'explication des événements, du mouvement, de la formation du (ou des) monde(s), de l'acte libre, de l'exercice des facultés cognitives est intrinsèquement semblable au principe même d'une controverse scientifique. Aristote voyait en Démocrite un *physicien* qui « oublie de parler de la cause finale et réduit à la nécessité tous les moyens dont use la nature ». Cette omission de la téléonomie n'est-elle pas justement fondatrice ? Diogène Laërce montre lui aussi que l'Univers démocritéen s'affranchit de toute dimension providentielle lorsqu'il écrit que « toutes les choses se produisent selon la nécessité⁸ ». La substitution de l'étiologie à l'eschatologie pourrait précisément signer la véritable naissance de la science de la Nature. La situation n'est plus celle d'Anaximandre, le choix a été opéré. En érigeant une hypothèse cosmologique en socle fondateur dénué de finalité externe, en parvenant à s'abstraire des principes dont l'horizon présocratique était si friand (l'eau pour Thalès, l'air pour Anaximène, le feu pour Héraclite, le nombre pour Pythagore, l'esprit pour Anaxagore, etc.), en opérant une simplification formelle autour de l'idée de nécessité, Démocrite initie une démarche

⁷ M. SERRES, *La Naissance de la Physique dans le Texte de Lucrèce, Fleuves et turbulences*, Paris, Editions de Minuit, 1977

⁸ Diogène Laërce, *Vie et doctrine des philosophes illustres*, Paris, Livre de Poche, 1999

gnoséologique improbable. Mais au-delà de celle-ci, il invente des concepts dont la justesse théorique frappe par son étonnante validité contemporaine.

Chez Démocrite, le matérialisme est finalement, et contrairement à ce que lui reprocheront ses détracteurs, assez nuancé. Précisément parce que, comme en physique contemporaine, la matière n'a d'existence qu'en contrepoint avec le vide qui, de fait, gagne lui-même un statut ontologiquement respectable, l'atomisme abdéritain ouvre une voie subtile. Il ne nie plus le rien, l'absence, la possibilité de n'être pas. En opposition avec le démiurge organisateur platonicien, Démocrite semble se fonder sur un strict minimalisme. A la différence du *Timée*, on peut lire en filigrane dans son oeuvre un souhait omniprésent de réduire les hypothèses et de minimiser les recours aux principes potentiellement évitables.

Il est tout à fait spectaculaire de constater que, dans ce contexte, chez Epicure comme chez Démocrite, les atomes ne sont pas seuls en nombre illimité : les mondes (*kosmoi*) le sont aussi, ils naissent et se forment. L'Univers a perdu une large part de son absoluité. Il est devenu relatif. Comme s'il se définissait avant tout par l'horizon causal de l'observateur. Il est multiple. Il peut mourir. Les « Opinions Physiques » de Théophraste vont en ce sens : « c'est pourquoi ils disent que c'est seulement pour ceux qui posent les éléments comme illimités que tout se produit conformément à la raison ». L'infinité des effets – celle des mondes et des associations atomiques possibles – n'est intelligible que si l'on pose une infinité des principes. Ce point aura une résonance particulière quand sera évoquée ultérieurement la contingence des lois physiques contemporaines au regard de la structure hiérarchique du méta-monde.

Comme le fait remarquer Pierre-Marie Morel⁹, il convient néanmoins de considérer avec nuance cette notion d'infini. Lorsque Démocrite considère que le nombre des formes atomiques est illimité, cela ne revient pas à dire qu'il est rigoureusement infini au sens du dénombrement ou de la numération. Le terme *apeiron* est ici moins contraint que chez Anaximandre et peut se traduire par « illimité » mais aussi par « indéfini ». Ce qui est non seulement moins abstrait mais aussi plus cohérent : la Nature demeure souveraine en certains domaines. Nous dirions aujourd'hui que la physique dicte les lois mais pas leurs conditions de réalisation.

Le point fondamental de cette description est sans doute le problème du mouvement initial, du choc originel. C'est clairement un point délicat de l'approche démocritéenne. Et

⁹ P.-M. MOREL, *Atome et nécessité*, Paris, PUF, 2000

c'est précisément ce qui valide sa modernité ! L'instant primordial, est un état asymptotique, il est intrinsèquement hors d'atteinte. Aristote critique cette vision, considérant qu'elle est non seulement incapable de rendre compte de la causalité efficiente mais aussi de la causalité effective. L'histoire semble lui avoir donné tort, la « modestie » démocritéenne était finalement salutaire. Le *peripalaxis*, cet éclaboussement en tous sens sans direction privilégiée dont fait état Démocrite, ne trouve-t-il pas un troublant écho dans le modèle cosmologique standard contemporain ?

La critique aristotélicienne repose essentiellement sur un refus du hasard et de l'ignorance de la finalité. Pierre-Marie Morel considère que l'opposition « hasard-nécessité » introduite par Aristote est une anticipation de la modernité. On peut aujourd'hui légitimement considérer qu'au contraire, c'est la fusion de ces deux concepts et leur indistinction qui est exceptionnellement moderne chez Démocrite. Le point le plus intéressant réside sans doute dans l'intuition de la complexité. L'atome n'a pas les propriétés dont il est le principe et cette défaillance apparente a été largement soulignée par les détracteurs du système démocritéen. C'est sans doute parce que les démocritéens avaient l'exceptionnelle intuition que dans l'agencement des grands nombres, dans la sommation des séries, quelque chose de singulier se passe que l'argument n'a jamais véritablement entamé la détermination de la pensée atomiste.

L'approche épicurienne, tout en s'inspirant de la physique démocritéenne, entreprend de la réformer radicalement. Epicure, dans un premier temps, limite l'infini atomique : les formes atomiques ne sont plus en nombre tout à fait illimité. Lucrèce écrit explicitement (II, 513-514) que « les formes de la matière ne doivent pas non plus varier à l'infini ». Parallèlement, la notion de limite acquiert également une importance fondatrice. Celle-ci affecte profondément la structure du réel parce qu'à l'instar du tout qui est plus que la juxtaposition de ses constituants, la limite n'est pas nécessairement de même nature que ce qu'elle prolonge. Une idée, ne serait-ce qu'intuitive et diffuse de la notion de limite faisait justement défaut à Aristote. Les réflexions qu'il livre, au sein de la *Physique*, sur les intervalles temporels et sur les intervalles spatiaux sont particulièrement confuses. Outre leur obsolescence au regard des définitions contemporaines, on peine à saisir la cohérence interne. La solution moderne à ces paradoxes apparents, liés à l'infiniment petit et à l'infiniment bref, a été précisément donnée par l'avènement du calcul différentiel. Il n'est donc pas étonnant que cette problématique revête une toute autre dimension chez les épicuriens que chez Aristote.

L'apport le plus troublant et le plus prophétique d'Epicure est sans doute le *parenklisis*. Fondamentalement, ce saut imprévisible, cet écart *nec plus quam minimum* des particules aux trajectoires classiques, cette entorse à l'enchaînement causal, ce principe d'indétermination (comme le nommait Lucrèce au *de Natura Rerum*) est évidemment saisissant lorsque pensé en contrepoint des percées quantiques du vingtième siècle. Le *clinamen* est, strictement, une limitation radicale du pouvoir de la nécessité, une rupture de la série causale. Il faut d'ailleurs sans doute amoindrir l'opposition généralement évoquée sur ce point avec Démocrite : l'abdéritain admettait déjà le caractère aléatoire des mouvements pré-cosmiques. En contrepoint de cette structure stochastique des événements, Lucrèce insiste sur l'inéluctabilité des lois, ce que la physique contemporaine considérera de façon quasi-définivoire. Les coïncidences avec la vision moderne sont troublantes parce que très nombreuses : dans la contingence résiduelle objective des variations dans la contrainte, dans l'étude systématique des conditions de possibilité, dans le *necesset* qui ponctue la prosopopée du troisième chant de Lucrèce, dans les fondements du libre arbitre. Mais, par delà ces propositions dont la résonance avec la science d'aujourd'hui ne peut évidemment qu'être fortuite, c'est l'extraordinaire acuité de la démarche qui frappe. Michel Serres montre que dans le cadre de la mécanique des fluides (celle qui faisait véritablement sens pour les civilisations de la Méditerranée) ces considérations entrent strictement dans le corpus d'une authentique démarche scientifique. Lucrèce actualise le mythe. Tityos, Tantale, Sisyphe et les Danaïdes sont ici, dans la concrétude du vécu : le refoulé des ténèbres s'étale au Soleil du savoir. Là où Orphée avait échoué, la sagesse du jardin propose un « espaceensemencé de *circonstances* ».

L'idée de mondes multiples est donc née dans des *circonstances* remarquables. D'Anaximandre à Lucrèce, les représentations du monde ont drastiquement évolué. Elles ont parcouru les méandres d'une profusion de voies entrelacées et pourtant autonomes. Le génie de l'atomisme grec consiste sans doute à avoir osé les conséquences de ses principes. C'est là la grande leçon de courage et de cohérence. Qu'une première approche scientifique (chez Démocrite) ou pré-scientifique (chez Anaximandre) ait pu conduire à la notion de multivers est tout à fait étonnant. Mais l'est plus encore l'audace avec laquelle les schèmes mythologiques – déjà nettement plus anciens à cette époque que ne l'est pour nous la physique de Galilée – ont pu être déconstruits. Sans renier un héritage pluri-séculaire,

l'invention d'une coexistence entre l'étonnement contemplatif (bien avant le Théétète) et l'empirie active posait les premiers jalons d'une structure complexe organisant les mondes.

Mondes multiples du Moyen-Âge à l'âge classique

La liberté de pensée des atomistes grecs s'inscrivait sans doute en faux par rapport aux nécessités apologétiques de beaucoup des grands systèmes du moyen-âge. La pluralité des mondes grecs traduisait un refus de l'idée de finalité. C'est ce que souligne Thomas d'Aquin dans une question de la *Somme théologique* traitant de l'unité du Monde¹⁰ :

« C'est pourquoi ceux-là seuls ont pu admettre une pluralité des mondes, qui n'assignaient pas pour cause à ce monde-ci une sagesse ordonnatrice, mais le hasard. Ainsi Démocrite disait que la rencontre des atomes produit non seulement ce monde, mais une infinité d'autres ».

La pensée de Saint Thomas est très claire : le monde a été créé et toutes les créations sont ordonnées au Créateur. Il existe donc un principe d'unité qui rassemble toutes les créatures en les orientant vers une fin commune ordonnatrice. Il s'ensuit qu'un monde ne saurait être autonome puisque la finalité est commune et absolue :

« La raison pour laquelle le monde est unique, c'est que toutes choses doivent être ordonnées à un but unique, selon un ordre unique. Aussi, Aristote déduit-il l'unité du gouvernement divin de l'ordre existant dans les choses. Et Platon prouve l'unité du monde par l'unité de l'Exemplaire dont il est l'image. » Autrement dit, « l'unicité du monde découle de sa finalité ».

Pourtant, la renaissance voit fleurir à nouveau les mondes multiples. Au début du XVème siècle, le théologien Nicolas de Cues posa les fondements de la cosmogonie post-médiévale dans son ouvrage « De la docte ignorance ». Utilisant toutes les potentialités d'un être omnipotent, il introduisit la notion d'un univers infini non borné et dépourvu de centre, ce qu'il résuma, en empruntant à Empédocle l'image d'un « Univers qui a son centre partout et sa circonférence nulle part ». Il fut, de plus, contemporain de la redécouverte de l'ouvrage de Lucrèce, sombré dans l'oubli pendant plus d'un millénaire, auquel il put avoir accès. Sa philosophie ouvrit la voie aux univers infinis décrits par les auteurs des siècles suivants. De

¹⁰ T. d'AQUIN, *Somme théologique*, I, q 47, a. 3, traduit par A ;M. Roguet), Paris, Cerf, 1984, p. 492

façon remarquable, il imagine une pluralité de mondes dont les habitants se distingueraient par leur caractère propre¹¹ :

« Nous soupçonnons que les habitants du Soleil sont plus solaires, éclairés, plus illuminés et intellectuels ; nous les supposons plus spirituels que ceux qui se rencontrent sur la Lune et qui sont plus lunatiques ; sur la Terre enfin, ils sont plus matériels et plus grossiers ; en sorte que les êtres de nature intellectuelle qui se trouvent dans le Soleil sont beaucoup en acte et peu en puissance, tandis que les habitants de la Terre sont plus en puissance et moins en acte ; quant aux habitants de la Lune ils flottent entre ces deux extrêmes.[...] Il en est semblablement des régions des autres étoiles, car aucune d'elles, croyons-nous, n'est privée d'habitants ».

Dans une représentation épistémique contemporaine, il semble d'avantage s'agir ici de spéculer sur des civilisations lointaines que sur d'authentiques mondes parallèles. Cette réserve relève pourtant d'un certain anachronisme : les mondes stellaires ou lunaires étaient sans doute, dans un esprit renaissant, aussi indépendants et décorellés du notre que ne peuvent l'être aujourd'hui les bulles inflationnaires qui seront ultérieurement décrites. Nicolas de Cues ouvre donc bien une nouvelle brèche dans la cohérence cosmogonique de son époque et pense une dangereuse pluralité que Giordano Bruno portera jusque sur des sentes apocryphes.

Bruno, celui que l'on considère aujourd'hui comme le frère italien de Rabelais, écrit dans sa grande cosmologie¹² :

« Persévère, cher Filoteo, persévère ; ne te décourage pas et ne recule pas parce qu'avec le secours de multiples machinations et artifices le grand et solennel sénat de la sottise ignorance menace et tente de détruire ta divine entreprise et ton grandiose travail. [...] Et parce que dans la pensée de tout un chacun se trouve une certaine sainteté naturelle, sise dans le haut tribunal de l'intellect qui exerce le jugement du bien et du mal, de la lumière et des ténèbres, il adviendra que des réflexions particulières de chacun naîtront pour ton procès des témoins et des défenseurs très fidèles et intègres. [...] Fais-nous encore connaître ce qu'est vraiment le ciel, ce que sont vraiment les planètes et tous les astres ; comment les mondes infinis sont distincts les

¹¹ P. DUHEM, *Le Système du Monde. Histoire des doctrines cosmologiques de Platon à Copernic*, 10 volumes ; t. X, Paris, Hermann, 1958, p. 324

¹² G. BRUNO, *De l'Univers infini et des Mondes*, cité par A. KOYRE, *Du monde clos à l'Univers infini*, traduit de l'anglais par R. Tarr, Paris, Gallimard, 1973 (1^e éd. ang. 1957)

uns des autres ; comment un tel effet infini n'est pas impossible mais nécessaire ; comment un tel effet infini convient à la cause infinie ; quelle est la vraie substance, matière, acte et efficence du tout ; comment toutes les choses sensibles et composées sont formées des mêmes principes et éléments. Apporte nous la connaissance de l'univers infini. Déchire les surfaces concaves et convexes qui terminent au dedans et au dehors tant d'éléments et de cieux. Jette le ridicule sur les orbes déférents et les étoiles fixes. Brise et jette à terre, dans le grondement et le tourbillon de tes arguments vigoureux, ce que le peuple aveugle considère comme les murailles adamantines du premier mobile et du dernier convexe. Que soit détruite la position centrale accordée en propre et uniquement à cette Terre. Supprime la vulgaire croyance en la quintessence. Donne-nous la science de l'équivalence de la composition de notre astre et monde avec celle de tous les astres et mondes que nous pouvons voir. Qu'avec ses phases successives et ordonnées, chacun des grands et spacieux mondes infinis nourrisse équitablement d'autres mondes infinis de moindre importance. Annule les moteurs extrinsèques, en même temps que les limites de ces cieux. Ouvre nous la porte par laquelle nous voyons que cet astre ne diffère pas des autres. Montre que la consistance des autres mondes dans l'éther est pareille à celle de celui-ci. Fais clairement entendre que le mouvement de tous provient de l'âme intérieure, afin qu'à la lumière d'une telle contemplation, nous progressions à pas plus sûrs dans la connaissance de la nature. »

Rétrospectivement, il n'est pas très étonnant que Giordano Bruno ait été condamné pour hérésie sur ordre du Pape Clément VIII et brûlé vif¹³ en la place Campo dei Fiori, à Rome, après avoir été emprisonné par les inquisiteurs pendant huit ans¹⁴. Cet « hérétique, impénitent, tenace et obstiné », ainsi que le décrit la sentence des juges, partisan de la pluralité des mondes, eut le courage de maintenir sa vision d'un cosmos infini en expansion permanente malgré les interrogatoires et la torture, ce qui participa à faire de lui le symbole de la pensée laïque contre le dogmatisme de l'Inquisition.

¹³ Mais il eut droit au traitement de faveur des condamnés de haut rang : un petit sac de poudre placé près du visage qui, en explosant, rendait l'agonie moins interminable.

¹⁴ A l'occasion du 400ème anniversaire de la mort de Bruno Giordano, le cardinal Poupard, président du conseil pontifical pour la culture, a exprimé les regrets de l'Eglise devant les bûchers de l'Inquisition, affirmant leur « incompatibilité avec la vérité évangélique ». Un geste particulièrement rare, en particulier quand on considère que Jean-Paul II n'a pu conclure, dans l' « affaire Galilée », qu'à des « torts partagés » !

Contre les médiévaux et à travers la reprise critique de la cosmo-théologie de Nicolas de Cuse, mais aussi via ses contemporains néoplatoniciens Palingène et Patrizi, Bruno s'emploie à prouver l'infinité de l'Univers. Ses preuves, longuement développées dans *De l'infini*, puis dans le *De Immenso*, reposent sur l'ontologie de *la cause*. Il parvient ainsi à affirmer « l'identité de la liberté et de la nécessité », qui repose sur l'unité en Dieu de la puissance, de la volonté et de la bonté. Dès lors, « si Dieu crée tout ce qu'il peut faire, l'Univers ne saurait être fini ». L'Univers de Bruno est homogène et uniforme : sa matière est partout la même, il n'est pas divisé en sphères et lieux différenciés, « les mêmes lois expliquent les changements des corps terrestres ainsi que le mouvement des corps célestes ». Tout en maintenant la distinction entre Dieu et l'Univers, Bruno élimine la transcendance, en faisant de ces deux instances les faces d'une même réalité, qui ne sauraient exister indépendamment l'une de l'autre. Ce monisme est radicalement incompatible avec le christianisme : Bruno trouve Dieu à travers son omniprésence dans sa véritable image, l'Univers, lequel occupe de fait une place christique. Christ que le Nolain sera injustement accusé d'avoir traité de “triste personnage” lors du procès, et dont il se présente lui-même comme la figure antithétique. Si la modernité scientifique prodigieuse de Bruno ne fait pas doute son intuition d'un large pan du système spinoziste frappe donc sans doute tout autant.

Bien qu'il ne renonce pas à la direction copernicienne¹⁵, Rabelais propose des univers multiples en un sens différent de Bruno. Il mentionne explicitement l'existence de « plusieurs mondes »¹⁶ en référence explicite aux cent quatre vingt trois mondes de Pétron¹⁷. Suivant le cycle du temps, il tombe des vérités dans les mondes disposés suivant une structure triangulaire autour du cercle des idées platoniciennes. Le sens est injecté dans les univers comme une sorte de rosée céleste. Les mondes de Rabelais ne sont pas « autre part » comme chez Bruno, ils sont consubstantiels. Ils sont « sous » ou « dans » le nôtre, à l'image des oiseaux qui volent dans la bouche de Pantagruel. Les mondes sont ici « magiques et mystiques »¹⁸, dans la lignée d'une pensée qui prend le parti résolu de l'*invisible*. Bruno est dans le langage vernaculaire de la philosophie, il cherche la cohérence logique et la vision holiste. Rabelais est dans la narration de la Nature et l'auto-exégèse de sa propre narration. Bruno propose une ontologie des mondes pluriels intrinsèques, Rabelais s'intéresse à l'anthropologie des mondes multiples inventés.

¹⁵ F. RABELAIS, *Le Cinquième Livre*, Paris, Le Livre de Poche, 1994 (1^e éd. 1564), p 1425

¹⁶ F. RABELAIS, *Le Quart Livre*, Paris, Le Livre de Poche, 1994 (1^e éd. 1552), p 1165

¹⁷ Philosophes présocratique cité par Plutarque

¹⁸ Selon l'expression de B. Pinchard

A l'âge classique, Leibniz est sans doute le grand inventeur des mondes multiples au sens radical du terme. Comme le montre Gilles Deleuze dans ses « cours de Vincennes »¹⁹, Leibniz est un théoricien de l'ordre. Mais, paradoxalement, pour que cet ordre implacable fonctionne, il lui faut inventer des concepts radicaux, « échevelés », dans une création continue et presque frénétique. Cinq ou six concepts suffirent à Descartes. On ne les compte plus chez Leibniz, ils fleurissent comme des univers ! Quand il considère que notre monde est le « meilleur » parmi une très grande quantité (voire une infinité) de mondes parallèles, tous présentent une cohérence interne. Un exemple significatif est proposé par Leibniz lui-même : un monde où Judas trahit le Christ en l'embrassant alors que, dans un autre monde, ce baiser n'a pas lieu. En fait ces Univers n'ont pas d'existence réelle : ce sont des univers logiquement possibles que Dieu (lui-même subordonné à la raison puisque c'est une conditions nécessaire à l'absoluité de la liberté) aurait pu créer mais qu'il a librement choisi de ne *pas* créer. Il définit ainsi le monde²⁰ :

« J'appelle monde toute la suite et toute la collection de toutes les choses existantes, afin qu'on ne dise point que plusieurs mondes pouvaient exister en différents temps et en différents lieux car il faudrait les compter tous ensemble pour un monde ou si vous voulez pour un univers. Et quand on remplirait tous les temps et tous les lieux, il demeure toujours vrai qu'on les aurait pu remplir d'une infinité de mondes possibles dont il faut que Dieu ait choisi le meilleur ; puisqu'il ne fait rien sans agir suivant la suprême raison [...]. Il faut savoir que tout est lié dans chacun des mondes possibles : l'Univers, quel qu'il puisse être est tout d'une pièce, comme un océan ; le moindre mouvement y étend son effet à quelque distance que ce soit quoique cet effet devienne moins sensible à proportion de la distance : de sorte que Dieu y a tout réglé par avance [...] de sorte que rien ne peut être changé dans l'Univers (non plus que dans un nombre) sauf son essence, ou, si vous voulez, sauf son individualité numérique »

Ce qui est ici fondamental chez Leibniz, c'est la pensée de la *contingence* du monde réel et effectif. Les autres mondes sont « prétendants à l'existence ». Le principe de détermination

¹⁹ G. DELEUZE, *Cours sur Leibniz*, Vincennes, 1980, disponible sur <http://www.webdeleuze.com/>

²⁰ LEIBNIZ, *Essais de théodicée*, Paris, Garnier-Flammarion, 1969 (1^e ed. all. 1710)

est externe. Le tension fondamentale de la pyramide leibnizienne vient de ce que s'il loisible, parmi les compossibles, de considérer qu'un *choix* est opéré par le créateur, il est en revanche exclu de s'extraire des vérités nécessaires. Cette distinction est tout à fait centrale pour comprendre les enjeux scientifiques des mondes multiples de la cosmologie du 21^{ème} siècle. La révolution actuelle est en quelque sorte une transgression du système de Leibniz : une porosité épistémique s'établit entre le nécessaire (le cadre logique) et le contingent (les phénomènes au sein du cadre).

Plurivers en philosophie contemporaine

En un sens bien éloigné de celui de Leibniz, la philosophie contemporaine fait également face au concept de mondes multiples. Deux penseurs me semblent jouer dans cette voie un rôle fondamental (bien que très différents dans ses fondements et ses ambitions) : Nelson Goodman et David Lewis.

Simultanément au courant européen (essentiellement mené par l'école de Frankfort, l'école de Constance et quelques philosophes français), une esthétique d'origine analytique s'est développée dans les pays anglo-saxons au cours des dernières décennies. Plutôt que de se focaliser sur une opposition systématique entre l'institution et la création, en partie effective et en partie fantasmagique, le courant analytique ne porte plus la dimension sociale, humaine ou épistémique au cœur de l'enjeu et déplace la question de la *signification* vers celle de la *syntaxe*. Certains²¹ considèrent que ce recentrage sur la méthode au dépend de l'objet est un retour aux sources d'inspiration socratique. Sans caricaturer dans cette direction, on peut considérer que la démarche analytique, de par sa nature, est effectivement en mesure de faire face à la plupart des interrogations philosophiques (non pas nécessairement dans leur dimension ontologique mais au moins dans leur dimension logique). Le noyau méthodologique de la pensée analytique réside certainement dans la thèse que l'objet premier de la philosophie n'est pas le monde mais « la manière dont le monde est pensé et dit »²². Au lieu de voir, comme c'est souvent le cas dans la démarche substantialiste, le langage comme

²¹ En particulier J.-M. Schaeffer, dans ses analyses de Danto.

²² A. DANTO, *Analytical philosophy of Action*, Cambridge University press, 1973, p. VII.

une distorsion de l'Être qu'il faut tenter de dépasser, la philosophie analytique le considère comme une réalité irréductible : le monde pensé et dit *est* le monde, il *est* une activité sémantique humaine. La proposition analytique a ses limites et montre, dans ses propres énoncés, l'horizon qu'elle fixe d'elle-même. Nombre de métaphysiciens contemporains attendent un *ontologic turn* qui prendrait le relais attendu du *linguistic turn* de Rorty, mais les propositions fondamentales de la pensée analytique conservent une portée qui demeure tout à fait d'actualité. La spécificité analytique est particulièrement propice à une mise en perspective « hors champ » parce qu'elle est précisément centrée sur les moyens plutôt que sur les « choses ».

« Des mondes innombrables faits à partir de rien par l'usage de symboles », c'est en ces termes que s'ouvre le fameux ouvrage de Goodman *Ways of Worldmaking*²³. La multiplicité des mondes, l'apparence trompeuse du donné, le pouvoir créateur de la compréhension, la variété et la fonction des symboles sont ainsi d'emblée proposés au lecteur et placés au cœur de la discussion. Puisque c'est bien d'une discussion qu'il s'agit en fait, entre les thèmes développés par Ernst Cassirer et les questions que Goodman entend leur poser pour les compléter et les affiner. En quel sens au juste y a-t-il plusieurs mondes ? Qu'est-ce qui distingue les mondes authentiques des contrefaçons ? De quoi les mondes sont-ils faits ? Comment sont-ils faits ? Et surtout, quel rôle les symboles jouent-ils dans ce faire ? Il n'est plus question de réception ou de perception mais bien d'action : comment ces symboles dénotent-ils, quelle « voie de référence » utilisent-ils ? La thèse de Goodman, si elle devait être synthétisée en deux mots, avec sa richesse et ses contradictions pourrait sans doute se résumer au titre de l'ouvrage de William James *A pluralistic Universe* où le choix entre monisme et dualisme tend à s'évanouir sous l'analyse. La force et l'originalité de la proposition de Goodman viennent sans doute de ce qu'elle ne s'intéresse pas à la diversité des mondes possibles, mais à celle des mondes réels et effectifs. Le premier exemple auquel recourt le philosophe est celui du système solaire : les énoncés « le Soleil se meut toujours » et « le Soleil ne se meut jamais » sont à l'évidence tous les deux justes et pourtant mutuellement exclusifs. La physique a coutume de considérer qu'il n'y a là aucune aporie, bien au contraire, et que c'est de ce relativisme du référentiel que naît la cohérence de la théorie. Mais Goodman pousse l'interrogation plus loin et cherche à sonder la possibilité d'appréhender le monde indépendamment du système d'ancrage particulier considéré pour le

²³ N. GOODMAN, *Manières de Faire des Mondes*, traduit de l'anglais par M.-D. Popelard, Nîmes, Catherine Chambon, 1992 (1^e éd. ang. 1977), p. 9.

dépeindre. C'est en ce sens qu'il écrit que « quoiqu'on ait à décrire, on est limité par les manières de décrire. A proprement parler, notre Univers consiste en ces manières plutôt qu'en un ou des mondes ». Ces descriptions rivales du mouvement sont sans doute un exemple de peu de poids dans la mesure où elles se transforment canoniquement les unes en les autres (c'est le groupe de Galilée en mécanique newtonienne et le groupe de Lorentz-Poincaré en mécanique relativiste). En revanche, la grande variété des versions et des visions qui permettent, selon Goodman, la co-existence des sciences en général, des arts et des lettres est beaucoup plus significative du point de vue des perceptions qui en sont nourries, des circonstances qui entrent en jeu, des intuitions et des expériences de pensée qui en découlent. Ici, les cadres de référence ne forment pas un ensemble aux contours définis, il n'existe plus de règles systématiques ou d'algorithme pour transformer « physique, biologie ou psychologie » l'une en l'autre, ni pour transposer « le monde de Van Gogh en celui de Canaletto ». De telles versions, qui n'ont aucune valeur de vérité, ne sont pas des descriptions mais des dépicions, c'est-à-dire qu'elles dénotent sans dépeindre²⁴. La consolation d'une intertraductibilité s'évanouit. Malgré tout, une version correcte ne diffère-t-elle pas d'une version incorrecte uniquement dans sa manière de s'appliquer *au* monde ? Goodman inverse radicalement la perspective et considère que c'est le monde qui dépend de la correction. C'est une façon de prendre au sérieux la boutade d'Einstein selon laquelle la nature aurait été dans l'erreur si elle n'avait pas corroboré sa théorie. Se plaçant dans la perspective d'une prise de conscience de la complexité des rapports entre le monde et ses images, Goodman considère qu'il est impossible de tester une version en la comparant avec un monde qui n'est pas décrit ou perçu. C'est en quelque sorte le paradoxe de la primauté et de l'antériorité qui est ici posé simultanément à la science et à l'art : si la description ne saurait, par essence, précéder le monde, il semble que le monde ne saurait non plus la précéder puisqu'il ne se donnerait alors aucun critère de rectitude. Deuxième indice fort en faveur d'une disparition de la dichotomie exclusive entre le réel et ses représentations.

Il est donc clair que pour Goodman il existe plusieurs versions différentes du monde et que la question de savoir combien il existe de mondes *en soi* est vide de sens. Les nombreuses versions ne requièrent ni ne présupposent d'être réduites à un unique fondement. Le pluralisme ici considéré n'est pas antagoniste de la vision scientifique, Goodman considère

²⁴ N. GOODMAN, *Langages de l'Art*, traduit de l'anglais par J. Morizot, Nîmes, Catherine Chambon, 1990 (1^e éd. ang. 1968), p. 65.

qu'il s'opposerait seulement, mais totalement, à un physicalisme radical et monopolistique qui considérerait la description mathématico-logique du réel, supposé extérieur, comme prééminente et singulière en ceci que toutes les autres versions devraient, *in fine*, s'y réduire. Il propose en fait que la science de la Nature accepte ce que l'art a compris et intégré depuis longtemps. Goodman a alors beau jeu de rappeler qu'il est peu probable que la vision du monde de James Joyce puisse un jour être réduite à la physique, même si Joyce a beaucoup inspiré les physiciens ! Il développe en parallèle l'idée que la physique est en elle-même fragmentaire. Si l'on accepte la cosmologie physique comme une version du monde, il faut alors la considérer comme une version protéiforme : elle n'est, au sein même de son corpus, pas unitaire. Goodman ne dénigre pas les opérations intellectuelles de construction et de réduction au sein du système scientifique. Il en fait même un clair éloge et considère que réduire un système à un autre peut constituer une contribution authentique et majeure à la compréhension des interrelations entre les mondes. Mais il considère qu'une réduction est presque toujours partielle et rarement unique : exiger une pleine et exclusive réductibilité à une version unique (qui pourrait être la physique), obligerait à renoncer à toutes les autres versions et à ne plus accepter, dans une optique pluraliste (que Goodman tente, tout au long de son œuvre, de concilier avec une version nominaliste), que des versions autres que la physique puissent être acceptables sans conduire à une conception atténuée de la rigueur. Cette proposition nécessite de reconnaître que différents standards, non moins exigeants que la science, sont appropriés pour estimer ce qu'apportent les versions perceptuelles, picturales ou littéraires. Autrement dit, toute gnoséologie n'est pas nécessairement une épistémologie. Il faut donc rechercher l'unité, non pas dans quelque chose d'ambivalent ou de neutre gisant au dessus ou en dessous des différentes versions, mais dans une organisation générale qui les embrasse. Cassirer entreprend cette démarche par le recours au mythe, à la religion et au langage pour mettre en perspective les croisements des différentes cultures. Goodman s'adonne plutôt à une étude analytique sur les types et les fonctions des symboles et des systèmes symboliques. Cette direction est extrêmement féconde pour la réflexion sur l'art et fut exhaustivement utilisé en ce sens par beaucoup d'analystes, y compris l'auteur lui-même. Elle ouvre également des portes intéressantes pour sortir d'un certain nombre de contradictions du modèle cosmologique. Elle pousse à l'extrême la proposition d'inflation éternelle de Linde²⁵ : il ne s'agit plus seulement de considérer qu'il existe d'autres univers (essentiellement décorés) pour résoudre les difficultés liées aux brisures de symétrie et aux

²⁵ Voir les chapitres suivants de ce mémoire

conditions initiales mais de voir ces différents univers au sein même de ce que l'on nomme le *monde*. On reproche souvent à Goodman l'arbitraire de son point de vue. Certaines cosmologies des multivers ci-après développées le sont certainement tout autant dans la mesure où elles sont pratiquement invérifiables et infalsifiables par essence, à la différence de la proposition de Goodman. La philosophie de Goodman intériorise ce qui était pressenti comme nécessaire, mais demeurait extérieur au monde. La diversité des possibles à laquelle la cosmologie ne peut pas ne pas faire face devient une diversité des réels. En rendant omniprésente la difficulté centrale et en multipliant à l'infini ses occurrences, elle offre une solution élégante qui déplace le problème dans un autre ordre. Il n'est plus relatif à une description particulière mais à la possibilité même de décrire.

Face à cette audacieuse proposition, deux questions doivent être posées : quelles possibilités existe-il pour fonder une telle vision et comment peut-on effectivement faire des mondes ? A la première question, Goodman répond de façon assez laconique. Il rappelle brièvement les critiques opérées, en particulier chez Berkeley et Kant, sur la perception sans concept, sur le donné pur, sur l'immédiateté absolue, sur toutes ces tentatives de fondement par des archétypes de ce qu'on pourrait assimiler à des *archai*. Evoquer un contenu non structuré, un donné non conceptualisé, un substrat sans propriété, échoue de soi car le langage impose de telles structures. Les prédicats, les images, les manières d'étiqueter, les schémas, résistent à l'absence d'application mais le contenu s'évanouit alors dans la forme. On peut bien, écrit-il, avoir « des mots sans monde, mais pas de mondes sans mot » ! Bien qu'en un sens très différent on pourrait presque lire Beckett déclarant que « nous sommes faits des mots, des mots des autres ». Plus exactement, ce que Goodman tente ici de montrer, c'est que les entités dont les mondes sont faits sont faites en même temps que les mondes. Faire, c'est dans cette perspective refaire et défaire, il faut toujours « partir des mondes à disposition ». La substance s'est dissoute dans la fonction. A la seconde question, Goodman donne une réponse beaucoup plus détaillée. Il n'entend pas supplanter Dieu (il est d'ailleurs à noter qu'avec un certain cynisme Goodman parle des « dieux et autres faiseurs de mondes ») mais tente d'élucider le problème de l'élaboration d'un monde à partir des autres. La taxonomie des critères est simple et évoquée avec précision.

Le premier critère est la « composition et la décomposition ». Faire le monde, dit Goodman, c'est « séparer et réunir, diviser les totalités en parties, positionner les genres en espèces, analyser les complexes en traits qui les composent, établir des distinctions ». Mais

ensuite, il faut recomposer les totalités à partir de leurs membres et les parties avec les sous-classes, combiner les composantes pour faire émerger des complexes et, surtout, faire des connections. Dans cette démarche, les étiquettes, c'est-à-dire les noms, les prédicats, les gestes et les images jouent un rôle absolument central : on ne construit pas *ex nihilo*. L'identification est relative et contextuelle. C'est une remarque de grande portée en physique parce qu'elle invite à considérer que ce qui est dit (et se traduira nécessairement par une égalité à un moment ou un autre) ne concerne pas les *choses du monde* mais un système sémantique particulier qui doit être défini. Et ce qui vaut pour l'identité vaut, chez Goodman, pour la répétitivité. C'est là encore un point très important pour la physique, au moins du point de vue heuristique. Il montre que quand une expérience est supposée être reproduite dans les mêmes conditions, c'est toujours relativement à un protocole particulier. Chez Goodman, l'uniformité de la nature dont nous nous émerveillons ou l'irrégularité contre laquelle nous protestons font partie d'un monde que nous faisons nous-même. Cela ne signifie pas que la science n'a pas d'objet, mais qu'elle constitue son objet. Ce qui revêt bien sûr un sens particulier quand l'objet est l'Univers, qu'il devient donc indispensable de *construire* au vu de la visée recherchée. Goodman considère que tout dépend des genres qui sont décrétés pertinents : c'est une activité décisionnelle de l'agent qui pense et qui, dans cette circonstance, fait le monde.

Le second critère a trait à la pondération. Certains genres pertinents dans un monde manquent dans un autre. Ils n'en sont vraisemblablement pas strictement absents mais ils y sont présents au titre de genres non pertinents. Les différences et les nuances entre les mondes ne proviennent pas tant des entités retenues que de la force ou du relief qu'elles y acquièrent. Donnons un exemple simple : la couleur bleue n'est jamais *stricto sensu* absente de la physique. Rien n'invite à ne pas considérer l'existence de rayonnements électromagnétiques de quatre cent nanomètres de longueur d'onde environ dans le cadre d'une réflexion sur la production de partenaires supersymétriques des gravitons à l'issue de l'inflation²⁶. Mais c'est clairement une catégorie non pertinente, sans pour autant être dénuée de sens. Ce même bleu profond, dont les caractéristiques générales ont été décrites par Kandinsky²⁷, utilisé dans la diagonale lyrique de *Composition IX* ou baptisé IKB²⁸ dans un monochrome de Klein acquiert bien sûr un tout autre statut : il devient *relevant*. Goodman considère que plus que de nommer

²⁶ Il s'agit de l'un des problèmes cruciaux du paradigme inflationnaire: ces particules métastables doivent se former en quantités trop abondantes par rapport à ce que permet l'existence des noyaux tels qu'observés.

²⁷ V. KANDISNSKY, *Du Spirituel dans l'Art et dans la Peinture en Particulier*, traduit de l'allemand par N. Debrand, Paris, Folio, 1989

²⁸ *International Klein Blue*

ou de décrire, la tâche spécifique des œuvres d'art consiste à illustrer les genres pertinents. La différence majeure entre art et science est donc beaucoup plus subtile : l'art se situe dans un méta-monde qui permet de sonder le sens des autres univers. Même lorsque coïncident les champs d'application – les objets décrits ou dépeints – il arrive que les types ou les genres exemplifiés et exprimés soient très différents. Un poème, explique Goodman, qui ne contient aucun prédicat explicitement triste ni ne réfère à des personnages effectivement moroses peut être mélancolique par sa structure même. Il considère que l'exemplification et l'expression, bien qu'allant dans la direction opposée à celle de la dénotation (c'est-à-dire du symbole à l'un de ses aspects littéraux ou métaphoriques au lieu d'aller vers ce à quoi il s'applique) n'en sont pas moins des fonctions référentielles symboliques et des instruments pour faire un monde.

La troisième approche de Goodman s'intéresse à l'agencement. Des mondes dont les différences ne concernent pas les entités ni l'accentuation peuvent néanmoins différer sur ce critère. De même que rien n'est au repos ou en mouvement qu'en fonction d'un cadre de référence, rien n'est primitif ou premier dans la dérivation indépendamment d'un système de construction. Ce point décisif, aux conséquences immédiates du point de vue esthétique, est très important pour la cosmologie et même pour la physique en général. Depuis les années cinquante, depuis le développement de la théorie quantique des champs et du théorème de Noether²⁹, la tendance est à fonder les théories sur les symétries. La transformation de Lorentz qui permet de décrire les transformations spatio-temporelles en relativité restreinte peut, comme cela sera montré ultérieurement, être vue comme résultant des propriétés d'homogénéité et d'isotropie de l'espace et du temps. L'électrodynamique quantique, qui rend compte du comportement des interactions nucléaires faibles, peut être vue comme résultant d'une invariance par rotation dans l'espace électron-neutrino. La chromodynamique quantique, qui rend compte des interactions nucléaires fortes, peut être vue comme résultant d'une invariance par rotation dans l'espace proton-neutron (pour certains aspects de ses fondations). Plus généralement, les théories dites de jauge sont fondées sur ces symétries souvent globales et rendues locales pour expliquer la présence des bosons vecteurs. Pourtant, d'un point de vue mathématique, on peut aisément montrer l'exacte équivalence entre l'équation et la symétrie. Autrement dit, donner la primauté à cette dernière relève bien d'un *choix* de nature plutôt esthétique qui fait émerger un paradigme sur une structure pyramidale dont la géométrie a été arbitrairement décrétée le socle. C'est un parti pris qui pourrait

²⁹ Lien entre les symétries et les lois de conservation (*cf* premier chapitre)

parfaitement être renversé. On considère aujourd'hui que la conservation de l'énergie est une conséquence de l'invariance temporelle des lois de la physique. On pourrait parfaitement considérer que l'invariance temporelle est une conséquence de la conservation de l'énergie sans rien sacrifier au pouvoir prédictif de la théorie ni à sa cohérence logique. Goodman généralise ce problème. Il ne dit pas que toutes les descriptions sont équivalentes – ce qui conduirait évidemment à une aporie, ne serait-ce que d'un point de vue heuristique – mais il déplace le problème à un autre niveau : il ne s'agit plus de savoir ce qui est premier *en soi* mais ce qui doit être ainsi choisi pour améliorer le monde créé. L'agencement participe aux manières de faire le monde. C'est grâce à celui-ci, considère Goodman, que des arrangements et des regroupements convenables émergent et permettent de manipuler les objets à des fins de perception ou de connaissance. Il est clair que des êtres physiques effectivement considérés comme dissemblables dans un corpus peuvent être vus comme identiques dans un autre : la question de l'ontologie devient sans objet.

Goodman cherche également à comprendre le sens de la suppression et de la supplémentation. Pour faire un monde à partir d'un autre, il faut souvent procéder à des coupes sévères et à des opérations de comblement. Il considère que nous passons inmanquablement sur quelque chose qui est là, pour voir quelque chose qui n'est pas là, que nous allons jusqu'à écarter comme illusoire et négligeable ce qui ne saurait correspondre avec l'architecture du monde que nous construisons. Dans cette voie, Goodman s'appuie sur un protocole de nature scientifique en se référant aux courbes expérimentales qui sont des extrapolations (là où les mesures manquent) et des réfutations (là où l'expérience sera considérée comme fautive parce que ses résultats sont en inadéquation avec le monde). La démonstration n'est sans doute pas très heureuse.

Le cinquième et dernier élément fondamental est la déformation. Il faut procéder à des remises en forme, à des modifications et à des distorsions pour créer un monde à partir d'un autre. Les exemples ont trait essentiellement à l'art, à la façon dont Picasso revisite Vélasquez ou dont Brahms emprunte à Haydn. Ils s'extrapolent directement au monde scientifique pour lequel chaque modèle se fonde, au moins partiellement (et même lors des révolutions), sur les avancées précédentes. C'est sans doute la proposition la moins audacieuse et la plus implicitement admise des idées de Goodman pour construire des mondes. Cette taxonomie n'a pas vocation à l'exhaustivité : la non-unicité du monde va de pair avec la multiplicité des moyens de création des mondes.

En un sens très différent de Goodman, David Kellogg Lewis propose une architecture novatrice des mondes pluriels³⁰. Les premières analyses de Lewis ont porté de façon préférentielle sur les propositions contrefactuelles³¹. A la question ontologique de l'existence effective de ces mondes possibles, Lewis répond positivement de façon non ambiguë : c'est la thèse centrale du réalisme modal. Le monde que nous habitons, le *Cosmos* tout entier dont nous sommes une partie, n'est qu'un monde parmi une pluralité d'autres, les *Cosmoi*, qui sont spatialement et causalement décorellés les uns des autres. Tout ce qui aurait pu se produire dans notre monde se produit réellement dans un ou plusieurs des autres mondes. Dans certains mondes Nietzsche ne renie pas Wagner et s'enthousiasme pour Socrate, dans d'autres Platon chante les louanges des harmonies complexes de la flûte ou de la cithare et invite les artistes à prendre le pouvoir dans la cité. Tout ce que nous aurions pu faire dans ce monde (mais n'avons pas fait) est effectué par l'une de nos contreparties dans un autre monde. La vie de cette contrepartie coïncidait jusqu'alors avec la notre et diverge dès lors que l'une de ses réactions ne suit plus la notre. Suivant le réalisme modal, l'actuel et le possible ne présentent pas de différence ontologique. Ils ne diffèrent que dans leur relation à nous : les mondes possibles nous sont inaccessibles. Ces propositions ont été considérées avec défiance par la plupart des philosophes. Les réponses de Lewis, contre la tendance qui tendait à considérer les mondes multiples comme des entités abstraites et irréelles, tiennent pour l'essentiel dans son œuvre majeure : *On the Plurality of Worlds*³². Il s'agit moins pour lui de convaincre (dans une certaine tradition pragmatique, il se soucie plus des effets que des fondements) que de proposer une véritable métaphysique modale.

Pourquoi, selon Lewis, faudrait-il croire à la pluralité des mondes ? Dans ses travaux précoces, Lewis fondait son argumentaire sur le critère, issu de Quine, de l'engagement ontologique appliqué au langage ordinaire. Autrement dit, il s'attachait à rechercher ce à quoi pouvait référer des expressions comme « les façons dont les choses auraient pu se passer » pour montrer qu'il ne pouvait s'agir que de mondes possibles. Face aux objections sérieuses de Stalnaker³³ montrant qu'en fait ces structures linguistiques renvoyaient beaucoup plus probablement à des concepts abstraits, Lewis a abandonné cette tentative de justification pour se concentrer sur une approche systématique du problème. La cohérence d'une telle approche est liée à construction d'une *théorie totale*, c'est-à-dire de l'ensemble de ce que l'on considère

³⁰ Voir par exemple P. BRICKER, "David Lewis: On the Plurality of Worlds" *Central Works of Philosophy, Vol. 5: The Twentieth Century: Quine and After*, Acumen Publishing, 2006

³¹ D. LEWIS, *Countrefactuals*, Cambridge, MA : Harvard University Press, 1973

³² D. LEWIS, « On the plurality of worlds », Oxford, Blackwell, 1986

³³ R. STALNAKET, « Possible Worlds », *Nous*, Vol. 10, pp 65-75, 1976

comme vrai. Les mondes possibles, si on les accepte, sont un moyen de réduire la diversité des notions qui doivent être considérées comme primitives, autorisant ainsi une substantielle économie conceptuelle et renforçant l'unité globale de la théorie. Lewis considère que sa proposition des mondes pluriels est un paradis pour les philosophes au même titre que les classes sont un paradis pour les mathématiciens. Quand il lui était demandé « pourquoi croire en la diversité des mondes », Lewis répondait « parce que cette hypothèse est utile et qu'il s'agit là d'une bonne raison de croire qu'elle est juste ». Evidemment, Lewis est conscient que l'utilité n'est pas nécessairement un critère de véracité. Mais c'est néanmoins par une analyse des coûts et bénéfices de l'idée des mondes pluriels qu'il entend fonder l'essentiel de sa « démonstration ».

A titre d'exemple, considérons une assertion modale du type « nécessairement, toutes les chouettes sont des oiseaux ». En termes de mondes possibles, cela signifie : dans *chaque* monde, les chouettes sont des oiseaux. L'opérateur de « nécessité » devient un quantificateur universel sur tous les mondes. Les quantificateurs sont restreints au domaine d'évaluation : « toutes les chouettes sont des oiseaux » est vrai dans un monde si et seulement si toutes les chouettes habitant ce monde sont des oiseaux. Etant donné que les mondes possibles sont, pour le réaliste modal, comme des lieux, la vérité dans un monde est analogue à la vérité restreinte à une portion d'espace (au sens large) : « les chouettes sont des animaux philosophiques » est vrai dans le lexique archétypal des philosophes ayant reçu une formation universitaire mais pas nécessairement au-delà de ce cercle. Considérons l'assertion modale « il est possible qu'il existe des chouettes sachant chanter le concerto à la mémoire d'un ange ». Cela peut être compris comme : « dans un (ou des) monde(s) possible(s), il existe des chouettes sachant chanter le concerto à la mémoire d'un ange ». L'opérateur de possibilité devient un quantificateur existentiel sur tous les mondes possibles. Ces analyses de la nécessité et de la possibilité permettent d'élucider les relations logiques entre notions modales. Par exemple, si une proposition n'est pas possible, elle ne l'est nécessairement pas ; si une proposition n'est pas nécessaire, elle ne l'est possiblement pas. L'analyse « quantificationnelle » permet aux inférences modales d'être expliquées en termes d'inférences logiques usuelles (utilisant « tous », « quelques uns », « aucun »). Au-delà de cet exemple simpliste d'analyse modale *de dicto* (où les opérateurs modaux sont appliqués aux propositions entières), Lewis s'intéresse aux modalités *de re* (l'application des propriétés modales aux choses). La situation est alors beaucoup plus riche et complexe et impose de considérer des contreparties définies de façon plus subtile. Par-delà les détails techniques de construction, le point fondamental tient à ce que Lewis peut éviter toutes les apories sous-

jaçentes. Il récuse l'idée suivant laquelle le réalisme modal serait lui aussi lié à une forme de modalité primitive en recourant à la notion de mondes *possibles* considérée comme fondamentale. Pour Lewis, le *possible* est redondant : il n'y a pas de monde impossible. Il n'a donc pas besoin de modalité primitive pour diviser les mondes en possibles et impossibles. Pourquoi faut-il tant se méfier de la modalité primitive ? D'abord parce que le principe d'économie, qui serait alors violé, est, pour Lewis, central dans l'évaluation d'une proposition métaphysique. Ensuite, parce que les notions primitives doivent être comprises même si elles ne sont pas analysées. Or, la modalité est mystérieuse, elle ne s'ajuste pas à l'empirie, elle n'est pas un « produit du monde ». Les théories qui considèrent la modalité comme primitive perdront donc, paradoxalement, l'essentiel du pouvoir explicatif du réalisme modal

Qu'est-ce qu'un monde ? Lewis considère que deux individus font partie d'un même monde si et seulement s'ils sont spatiotemporellement reliés. Un monde est donc unifié par les relations spatiotemporelles possibles entre ses parties. Si la suffisance de cette condition ne fait pas question, sa nécessité est évidemment plus sujette à caution, en particulier dans le champ scientifique. Si l'on considère, comme Lewis, qu'être spatiotemporellement relié est une relation d'équivalence, cela permet à chaque individu appartenant à un monde de considérer qu'il appartient à exactement un monde qui est l'ensemble des individus spatiotemporellement liés à lui. Il est évidemment essentiel à la cohérence de l'édifice que le concept de monde soit ici défini sans recourir à une forme de modalité primitive.

S'il est légitime, pour souligner leur équivalence ontologique, de considérer que le réalisme modal est l'acceptation d'une pluralité de mondes *concrets*, il faut également reconnaître que Lewis prend quelques distances par rapport à cette assertion dans la mesure où la distinction abstrait/concret est ambiguë. En un sens, pour Lewis, tout est concret. Dans la continuité d'une certaine tradition analytique, il montre qu'aucune tentative de définition de l'abstraction pure n'est réellement viable.

Les mondes de Lewis sont *abondants*. C'est une caractéristique fondamentale. Il ne doit pas y avoir de « vides » dans l'espace logique. Lewis développe un rigoureux principe de recombinaison pour définir les « coupes et les tranches » permettant de créer des mondes³⁴. Ajouté au « principe de plénitude », dont l'expression formelle n'est pas explicitement donnée, il s'agit essentiellement par là de s'assurer d'une profusion de mondes suffisante pour combler les *requisits* du système.

³⁴ En dépit de la proximité des termes, la proposition est très différente de celle de Goodman.

De nombreuses objections au réalisme modal ont été proposées. Elles sont de nature linguistique, épistémique, éthique et intuitive. Pour chacune d'elles, Lewis offre des solutions détaillées et plausibles mais force est de constater que la thèse centrale du réalisme modal n'a pas été acceptée par la plupart des philosophes. En proposant que la réalité soit une notion indexicale, Lewis ouvre pourtant une voie singulière, extrêmement féconde pour constituer un paradigme logique et philosophique à la description des multivers physiques.

2. Le modèle standard de la cosmologie physique

Le modèle standard de la cosmologie physique d'aujourd'hui est une conjonction de faits d'expérience, d'hypothèses méthodologiques et de modèles théoriques. L'émergence du paradigme contemporain, auquel on se réfère généralement en tant que *Big-Bang* chaud³⁵, est le fruit de diverses découvertes inattendues et d'un cheminement de pensée original qui contribuent au statut singulier de la cosmologie au sein des autres sciences. Avant de discuter la création de nouveaux mondes et ses conséquences philosophiques, ce qui constituera le cœur de ce mémoire, cette partie entend dresser, dans une perspective essentiellement technique, les fondements de la description physique de l'Univers. Les conséquences de cette approche seront discutées dans les chapitres suivants. Il est important de noter dès à présent que, de façon quasi-exhaustive, les observations autant que les théories sur lesquelles repose le modèle standard ici présenté ont été établies au cours du vingtième siècle. Dans un premier temps, seront présentés les deux piliers de la physique contemporaine : relativité générale et mécanique quantique. La seconde sera abordée essentiellement du point de vue de la physique des particules élémentaires qui joue un rôle socle en cosmologie. Ensuite, les résultats expérimentaux qui permettent de conclure à l'existence d'un *Big-Bang* seront passés en revue de façon à mettre en lumière la part d'arbitraire et les contraintes externes. A l'issue de la présentation du modèle sous-jacent, l'hypothèse de l'inflation³⁶ sera discutée en détails parce qu'elle est un point important et archétypal des succès et des difficultés de la description de l'Univers primordial. Elle sert également de base (dans une version particulière) à l'un des mécanismes les plus étudiés pour générer un multivers.

³⁵ Une description moderne et complète de l'état de l'art est donnée dans E. W. Kolb, M. S. Turner, *The Early Universe*, New York, Addison-Wesley, 1990. On peut aussi consulter P. J. E. PEEBLES, *Principles of Physical Cosmology*, Princeton, Princeton University Press, 1993 et J. A. PEACOCK, *Cosmological Physics*, Cambridge, Cambridge University Press, 1999.

³⁶ La première référence à l'inflation peut être trouvée dans A. A. STAROBINSKI, « Spectrum of Relict Gravitational Radiation and the Early State of the Universe », *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 30, 1979, p: 682, c'est néanmoins Alan Guth qui comprit l'intérêt cosmologique de cette situation. La publication historique est : A. GUTH, « The Inflationary Universe : a Possible Solution to the Horizon and Flatness Problems », *Physical Review D*, 23, 1981, pp. 347-356.

Relativité générale

La théorie de la relativité restreinte se fonde³⁷, dans la description initiale d'Einstein, sur très peu d'hypothèses : le postulat définitoire de l'existence de référentiels d'inertie (c'est-à-dire dans lesquels le mouvement libre des corps s'effectue à vitesse constante) et le principe de relativité de Galilée, résultant de l'expérience et qui stipule que les lois de la nature sont les mêmes dans tous les référentiels inertiels. A partir des symétries fondamentales de l'espace-temps – homogénéité et isotropie de l'espace, homogénéité du temps – on montre aisément que la structure de groupe de la théorie conduit à l'existence inévitable d'une vitesse limite pour la propagation des interactions. Elle intervient en fait comme une véritable constante de structure de l'espace temps. Il s'ensuit la conservation d'une quantité essentielle nommée intervalle et définie comme la différence entre l'écoulement temporel et la distance spatiale séparant deux événements. De l'invariance de cet intervalle – qui se traduit par une rotation dans l'espace-temps – découle la transformation de Lorentz qui régit les changements de référentiels. L'espace et le temps ne sont plus absolus. Ils se dilatent, se contractent et s'échangent l'un en l'autre. Les voyages dans le futur deviennent possibles. L'âge des jumeaux n'est plus voué à demeurer identique. A partir d'un très petit nombre d'hypothèses, la cohérence mathématique impose une redéfinition de la structure même des concepts centraux de la physique. L'espace et le temps demeurent finalement – et contrairement à ce qui est souvent assené – des formes pures de la sensibilité kantienne, *a priori* et donc transcendantales (puisqu'ils sont *antérieurs* et *extérieurs* au corpus³⁸) mais perdent leur absoluté. Il s'ensuit de plus une équivalence entre masse et énergie dont les conséquences très profondes seront présentées au sein du paragraphe dédié à la physique des particules élémentaires. Les vérifications expérimentales de la théorie de la relativité restreinte sont innombrables et son bien-fondé n'est plus guère discuté même si la prudence scientifique impose de douter – par défaut – de tout modèle lorsqu'il est utilisé au-delà du domaine empiriquement accessible. C'est un outil indispensable à la description des phénomènes lorsque des vitesses conséquentes entrent en jeu. Bien que les corrélats conceptuels de la

³⁷ Une bonne description concise est donnée dans L. LANDAU, E. LIFCHITZ, *Physique Théorique*, traduit du russe par S. Medvédev, Moscou, Mir Moscou, 1989 (1^e éd. russe 1964), t. II, pp :7-36

³⁸ C'est aussi le cas dans la plupart des théories physiques. Quelques rares tentatives permettent néanmoins de faire *émerger* l'espace et le temps.

relativité restreinte soient d'une importance considérable, c'est avant tout la relativité générale³⁹ qui permet une nouvelle approche du Cosmos.

La gravité est sans aucun doute la force qui nous semble la plus familière. Elle est aussi celle qui, historiquement, a permis la naissance de la physique. Au vu du paradigme contemporain, elle semble pourtant bien singulière. Elle est la seule force à longue portée s'exerçant entre corps neutres. Elle présente une constante de couplage incroyablement petite. Et, surtout, elle donne lieu à des trajectoires qui ne dépendent pas de la masse des corps. Il est fondamental de noter que la gravitation est le seul champ de force dans lequel – paradoxalement ? – les équations de la dynamique ne font pas intervenir le terme de masse. Cette remarque permet d'établir une analogie essentielle entre le mouvement des corps dans un champ gravitationnel et leur mouvement libre dans un référentiel non-inertiel. Parce que, précisément, tous les habitants du monde sont identiquement soumis à la gravité, on peut penser leurs déplacements comme résultant d'un mouvement d'ensemble du cadre référent qui, par essence, ne dépend pas non plus des caractéristiques propres des entités qu'il contient. Pour néanmoins équivaloir à l'effet de la gravité, le mouvement doit être accéléré et donc conduire à un référentiel qui n'est plus galiléen. Cette similitude de description entre la gravité dans un référentiel inertiel et le mouvement libre dans un référentiel non-inertiel constitue le principe d'équivalence sur lequel se fonde la théorie d'Einstein. L'élimination du champ n'est néanmoins possible que dans une zone limitée de l'espace – c'est le caractère local de la théorie – et les propriétés à l'infini ne peuvent être identiques à celles effectivement rencontrées dans un champ réel. Ces remarques reposent sur une description purement classique du champ gravitationnel. Pour tenir compte des avancées de la relativité restreinte, il faut étudier les conséquences de cette approche sur la forme de l'intervalle.

Lorsqu'un changement de référentiel est opéré en relativité restreinte, celui-ci doit être décrit par une transformation de Lorentz. En l'absence de gravité, lorsqu'il est légitime de cantonner la description aux référentiels d'inertie, l'intervalle est conservé dans sa forme. Mais le principe d'équivalence impose de considérer un repère accéléré et les principes généraux n'assurent plus l'invariance structurelle de l'intervalle. Il doit être écrit comme une

³⁹ A. EINSTEIN, « The Foundation of the General Theory of Relativity », *Annalen der Physik*, 49, 1916, pp. 769-822

forme quadratique générale des variations des coordonnées et requiert donc l'introduction d'un être mathématique spécifique – le tenseur métrique – qui décrit la géométrie de l'espace temps. Avant même d'écrire les équations de champ, l'une des propriétés les plus importantes de la relativité générale peut ainsi être appréhendée intuitivement : la trame géométrique de la nature est déterminée par le contenu effectif et n'est plus une propriété immuable de l'espace et du temps. La gravité impose un référentiel non-inertiel qui, lui même, impose une nouvelle géométrie⁴⁰.

Dans un référentiel en chute libre, la gravitation a disparu. La physique est alors extrêmement simple. Mais cela n'est vrai que localement : des masses initialement immobiles dans un repère vont, à l'intérieur de celui-ci, nécessairement se mettre en mouvement. Dans le langage de Newton c'est une conséquence des forces de marée ; dans le langage d'Einstein c'est une conséquence de la courbure. Le tenseur de Riemann, généralisation de la courbure gaussienne d'une sphère, permet de rendre compte de cet effet (il se construit d'ailleurs à partir des coefficients de connections qui intègrent le fait que la dérivée d'un vecteur ne se transforme pas de façon adéquate, c'est-à-dire conformément au groupe considéré) : il donne accès à l'accélération de la séparation géodésique. Cette idée de courbure qui impose une redéfinition des fondements de la physique classique n'est pas sans difficultés interprétatives. Riemann a tenté de formuler une théorie gravitationnelle fondée sur le concept de courbure mais n'a pas réussi à concilier le fait que des corps de vitesses initiales différentes suivent des trajectoires différentes avec la description du mouvement en termes de structure géométrique – auquel cas chacun devrait y être identiquement soumis. C'est précisément parce qu'il ne faut plus raisonner dans l'espace mais dans l'espace-temps : la relativité restreinte est donc plus liée au développement de la relativité générale qu'il n'y paraît au premier abord.

La construction des équations de champ d'Einstein est assez simple dans sa démarche⁴¹. En chaque point de l'espace-temps, on définit un tenseur – c'est-à-dire un être mathématique qui se transforme selon le groupe considéré – rendant compte de la pression et de la densité locales : le tenseur énergie impulsion. Reste à élaborer un objet qui décrit exhaustivement les propriétés géométriques : le tenseur d'Einstein. Celui-ci peut être construit

⁴⁰ L. LANDAU, E. LIFCHITZ, *Physique Théorique, op. cit.*, t. II, pp :293-335

⁴¹ La monographie de référence sur le sujet est C. MISNER, K. S. THORNE, J. WHEELER, *Gravitation*, New York, W. H. Freeman and company, 1970

de façon non ambiguë en demandant qu'il soit symétrique (parce que la métrique doit l'être), linéaire en tenseur de Riemann (pour être une mesure naturelle de la courbure), nul en espace-temps plat (pour coïncider avec l'image habituelle en absence de gravité) et soumis à une loi d'auto-conservation (pour des raisons plus techniques liées aux degrés de liberté internes de la théorie). La théorie de la relativité générale suppose le lien le plus simple possible entre ces deux objets : la proportionnalité. Les équations de champ stipulent donc que le tenseur d'Einstein est proportionnel au tenseur énergie-impulsion (avec un facteur multiplicatif de 8π pour permettre de retrouver la loi de Newton en champ faible). Cela suffit à établir le modèle le plus révolutionnaire de la physique du vingtième siècle. Il est important de noter qu'une grande partie des contraintes imposées aux objets mathématiques sur lesquelles repose ce formalisme est arbitraire. Les notions de naturalité et de simplicité sont non seulement, dans une large mesure, d'ordre esthétique⁴², mais également relatives à un cadre de pensée. Ce point n'est d'ailleurs pas strictement singulier à la relativité générale : la démonstration contemporaine des équations de Maxwell de l'électromagnétisme se fonde sur des arguments très similaires (proportionnalité du champ-tenseur par rapport au quadri-potentiel). Il sera l'objet d'une étude particulière dans les prochains chapitres.

La relativité générale ouvre un nouveau cadre de référence au sein duquel la structure ultime de la trame géométrique qui nous entoure devient donc une conséquence du contenu et perd l'apparent arbitraire de son caractère supposé immuable. Ses conséquences pour le modèle cosmologique sont immenses puisque la métrique qui décrit l'Univers dans son ensemble résulte de ce modèle, moyennant quelques hypothèses supplémentaires sur les symétries du monde.

Outre sa position sociologiquement très singulière et la quasi canonisation de son auteur, la théorie de la relativité générale jouit d'un statut particulièrement enviable au sein du corpus de la physique contemporaine. Rares sont en effet les modèles qui répondent conjointement et de façon si éloquente aux critères de réfutation (la relativité générale est soumise avec succès à de très nombreux tests expérimentaux particulièrement discriminants) sans rien renier des

⁴² S. CHANDRASEKHAR, *Truth and Beauty: Aesthetics and Motivations in Science*, Chicago, University of Chicago Press, 1987

désirs de complétude (tous les aspects du secteur gravitationnel y sont exhaustivement décrits).

D'un point de vue conceptuel, la relativité générale est vraisemblablement plus simple que la gravité Newtonienne. La proposition est évidemment paradoxale si on la considère au niveau formel (les équations relativistes sont bien sûr très complexes) mais prend tout son sens du point de vue de l'économie des notions. La simplicité, clairement, n'est pas définie de façon absolue et demeure relative aux circonstances, aux visées et au contexte. Comment nier pourtant que penser la Lune se mouvant en ligne droite, librement, dans un espace façonné par la présence de la Terre, est beaucoup plus immédiatement accessible à une lecture rationnelle des événements physiques que l'étrange supposition d'une mystérieuse force, transmise sans médiateur identifié à travers le vide ou l'éther, qui dévirait celle-ci sans cesse de son orbite naturelle de chute ? La relativité, en géométrisant, renoue avec les origines de la pensée scientifique. Elle s'affranchit du recours à d'hypothétiques inobservables dont le statut fut dès l'origine considéré comme essentiellement heuristique.

Le principe d'équivalence montre donc qu'il est possible de rendre compte des phénomènes par un simple effet d'accélération locale du référentiel. Ce faisant, il impose de penser la transformation vers un système-cadre non inertiel. Dans cette opération, la forme de l'intervalle établie par la relativité restreinte⁴³ n'a plus aucune raison de demeurer invariante. Il faut l'écrire comme une forme quadratique générale des différentielles des coordonnées⁴⁴, la métrique, qui généralise le théorème de Pythagore dans un espace Riemannien rendant compte de la courbure de l'espace-temps.

La relativité générale doit alors répondre à deux questions fondamentales. D'une part, décrire le comportement des champs physiques dans un espace quadridimensionnel devenu courbe. C'est ce que permet le principe de covariance généralisé qui stipule que les lois tensorielles compatibles avec la relativité restreinte dans le référentiel en chute libre demeurent valides en relativité générale. Il suffit donc, essentiellement, de supplanter des

⁴³ On peut ici rappeler que, contrairement à ce que stipulent encore beaucoup d'ouvrages introductifs, la construction de la relativité restreinte ne nécessite *pas* de supposer l'existence d'une vitesse limite pour les interactions. Celle-ci apparaît nécessairement comme une « constante de structure » eu égard au groupe de transformations de la théorie. La forme générale de l'intervalle $ds^2 = \eta_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$ (où $\eta_{\mu\nu}$ est le tenseur de Minkowski) et, au-delà, la matrice de Lorentz, résultent simplement des symétries fondamentales : la relativité restreinte fut sans doute la première théorie de jauge (*i.e.* fondée sur des invariants, en l'occurrence l'homogénéité de l'espace et du temps et l'isotropie de l'espace) de l'histoire et, plus que les effets spectaculaires de dilatation du temps ou de contraction de l'espace, c'est là son caractère radicalement révolutionnaire. Ces concepts de symétries (éventuellement dans des espaces abstraits où les « vecteurs » de base peuvent devenir des entités élémentaires) ont été très féconds en physique des particules et fondent le modèle standard des hautes énergies.

⁴⁴ $ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$ où $g_{\mu\nu}$ est le tenseur métrique.

dérivées covariantes⁴⁵ aux dérivées usuelles intervenant dans les équations dynamiques pour obtenir les lois d'évolution des champs en présence de gravité. D'autre part, la relativité générale doit décrire la manière dont la masse et l'énergie génèrent la courbure. C'est l'objet des équations d'Einstein⁴⁶. Celles-ci reposent sur un principe de construction nettement moins naturellement déductif. Il faut, en effet, dans un premier temps, introduire un tenseur (dit d'Einstein) qui rende compte de la géométrie et dont on détermine la forme par plusieurs contraintes : ne dépendre que de la métrique et du tenseur de Riemann⁴⁷, être de second rang, s'écrire linéairement par rapport au tenseur de Riemann et présenter une divergence nulle. Presque chacune de ces hypothèses fait question et c'est, en partie, l'objet des théories de gravitation étendue que de les remettre en cause. Enfin, il faut, dans un second temps, supposer une simple proportionnalité entre le tenseur d'Einstein et le tenseur énergie-impulsion qui décrit le contenu de l'espace-temps. Ce deuxième postulat n'est, lui non plus, pas anodin et peut être contredit sans renier l'esprit global de la relativité générale.

Les conséquences épistémologiques de la relativité générale sont considérables. A un premier niveau, elle déconstruit la rupture ontologique qui séparait le contenant du contenu, l'espace de la matière, ou, métaphoriquement, l'œuvre du parergon⁴⁸. Plus profondément, elle renoue sans doute avec un cheminement monadologique que, comme Merleau-Ponty le souligne, les « plus illustres successeurs de Leibniz n'avaient pas repris ». Certains n'hésitent pas à considérer que la relativité générale révèle en fait une véritable « loi transcendantale de l'intersubjectivité » qui pourrait ouvrir vers une pensée nouvelle de la réalité physique dépassant sa définition *stricto sensu* pour ouvrir un champ cosmologique mathématiquement fondé⁴⁹. Il n'est, en d'autres termes, pas exclu que les concepts fondateurs de la relativité générale puissent servir de prémices à l'établissement d'une véritable *Mathesis Universalis*.

⁴⁵ Le point clé tient à ce que la dérivée d'un vecteur $\partial_\mu V^\nu$ ne forme pas un tenseur (*i.e.*, dans ce contexte, un objet se transformant correctement par changement de coordonnées) à cause du terme de dérivée seconde par rapport aux coordonnées qu'il est impossible d'annuler en espace courbe (on ne dispose que de 80 degrés de liberté pour 100 contraintes). Au contraire, la dérivée covariante définie par $D_\mu V^\nu = \partial_\mu V^\nu + \Gamma_{\mu\lambda}^\nu V^\lambda$, où $\Gamma_{\mu\lambda}^\nu$ est le symbole de Christoffel faisant intervenir les dérivées de la métrique, forme explicitement un tenseur.

⁴⁶ $G_{\mu\nu} = 8\pi T_{\mu\nu}$ (en unités naturelles) où $G_{\mu\nu}$ est le tenseur d'Einstein représentant la géométrie et $T_{\mu\nu}$ est le tenseur énergie-impulsion représentant le contenu de l'espace-temps.

⁴⁷ Il n'est pas utile d'exprimer explicitement le tenseur de Riemann en fonction de la métrique et de ses dérivées. On peut le définir implicitement par la variation d'un vecteur sur un contour fermé : $dV^\mu = R_{\nu\rho\lambda}^\mu V^\nu dx^\rho dx^\lambda$.

⁴⁸ Voir à ce propos J. DERRIDA, *La vérité en Peinture*, Flammarion, Paris, 1978.

⁴⁹ D. PARROCHIA, *Les grandes révolutions scientifiques du XXème siècle*, Paris, PUF, 1997, pp. 120-122.

Particules élémentaires

Le second pilier théorique de la cosmologie physique est la mécanique quantique. Les bases de cette approche sont décrites en détails dans de nombreux ouvrages⁵⁰ et nous ne présentons ici que ses conséquences pour la physique des particules élémentaires. Son rôle est déterminant pour la description des premiers instants de l'Univers et pour la compréhension des processus violents qui y sont encore à l'œuvre.

La théorie quantique, qui décrit le monde en termes de probabilités irréductibles, doit, comme tous les modèles physiques, obéir au principe de la relativité restreinte. Ceci est rendu nécessaire par les vitesses élevées des particules élémentaires mais aussi par les nombreux phénomènes nouveaux et effectivement vérifiés qui en découlent. En même temps que Schrödinger et Heisenberg, Dirac réfléchissait à l'élaboration d'une théorie quantique mais, à la différence de ses illustres confrères, il voulait que, dès sa construction, celle-ci soit invariante de Lorentz – c'est-à-dire qu'elle vérifie la relativité restreinte. Ce qui n'est pas le cas de la célèbre équation quantique de Schrödinger : en disymétrisant fondamentalement le temps et l'espace (les dérivées sont du premier ordre en temps et du second ordre en espace) elle s'inscrit en faux par rapport à l'équivalence des dimensions requises par la théorie d'Einstein. Pour établir une approche quantique relativiste, il fallait tenir compte de deux points essentiels : accepter la relation entre la masse et l'énergie et intégrer le moment angulaire intrinsèque (spin) de l'électron. Dirac a prouvé que pour traiter l'espace et le temps de façon symétrique, la fonction d'onde – c'est-à-dire l'objet mathématique qui contient toute l'information sur le système – ne pouvait pas être un simple nombre. Elle devait comporter deux composantes et devenir un être plus complexe appelé spinneur. Il est d'ailleurs très spectaculaire de constater que le spin aurait ainsi pu être découvert comme une sorte de « charge de Lorentz », indépendamment de toute observation. Du point de vue des particules élémentaires la première conséquence spectaculaire de cette approche vient de ce que, dans un acte d'étonnante bravoure intellectuelle, Dirac a considéré que les solutions d'énergie négatives à la formule d'Einstein n'étaient pas de simples artéfacts mathématiques mais les prémices réelles d'un monde caché. Ces entités physiques d'énergie négative ne s'accordent

⁵⁰ Le meilleur traité en langue française est sans aucun doute C. COHEN-TANNOUJDI, B. DIU, F. LALOE, *Mécanique Quantique*, Paris, Hermann, 1998 (1^e éd. 1973)

avec aucune idée intuitive et, pour les interpréter, il fallut oser penser l'existence d'une mer de particules d'énergie négative qui « stabilise » cet univers obscur et empêchent les corpuscules réels de sombrer vers les états d'énergie négative. Lorsqu'un apport d'énergie extérieur permet à une particule d'énergie négative de quitter sa place, cela se traduit dans notre monde par l'apparition d'un nouveau quantum : une antiparticule. Ces constituants d'antimatière imposent de repenser les fondements du monde microscopique. Les particules élémentaires ne sont plus immuables, elles peuvent être créées et détruites, comme la lumière. Matière et antimatière s'annihilent lors d'une co-présence simultanée : les quanta deviennent rayonnement.

Dans la forme la plus aboutie de la théorie quantique relativiste, toutes les entités sont décrites par des champs⁵¹. De même que le photon est une manifestation du champ électromagnétique, l'électron peut être considéré comme une manifestation du champ électronique. Une fois acceptée l'idée fondamentale de la mécanique quantique d'une fonction d'onde étendue dans tout l'espace et associée à une densité de probabilité de présence, il n'est pas déraisonnable d'accepter le concept d'un champ, lui aussi emplissant tout l'espace. Chaque fonction d'onde peut alors être vue comme une excitation plus ou moins localisée du champ à une fréquence donnée. La première quantification est la prise en compte de la dualité onde-corpuscule et la seconde quantification est la prise en compte de la possibilité de créer ou de détruire des quanta lors des réactions. A partir de ces notions, se sont développées les idées des théories de perturbation qui permettent de calculer les occurrences des différents phénomènes en termes de processus fondamentaux et de corrections par rapport à ceux-ci. Le concept sous-jacent de renormalisation permet – et demande – de redéfinir les particules élémentaires en tant qu'objets nus entourés d'inéluctables interactions avec le vide via des phénomènes virtuels. Ces derniers étant d'ailleurs bien réels mais de courte durée puisqu'ils violent la conservation de l'énergie en accord avec les inégalités de Heisenberg. Le vide quantique est bien loin d'être vide (la définition ou plus exactement la recherche du vide dans une théorie donnée est d'ailleurs l'un des points les plus importants et les plus délicats de la physique théorique), il est peuplé d'une énergie irréductible, ce qui n'est pas sans conséquence en cosmologie...

⁵¹ M. E. PESKIN, D. V. SCHROEDER, *Quantum Field Theory*, New York, Addison-Wesley, 1995

La physique des particules élémentaires se fonde à la fois sur ces développements de la théorie quantique des champs et sur un certain nombre de symétries⁵². Dans les années soixante, des centaines de corpuscules apparemment élémentaires étaient révélés par les accélérateurs et c'est le recours aux groupes de symétries qui permit de résoudre la plupart des apories. En se fondant sur l'indépendance de charge de l'interaction nucléaire forte, Murray Gell-Mann et Yuval Ne'eman ont proposé de voir le proton et le neutron comme deux états d'une même particule. Ce pas conceptuel considérable permet de considérer une invariance dans un espace abstrait dont le proton et le neutron constitueraient les vecteurs de base. A ce groupe de rotation sont associées différentes représentations qui figurent les particules observées. De plus, parmi l'infinité des représentations mathématiquement possibles, on put montrer que celles qui étaient effectivement occupées pouvaient être générées en combinant seulement deux états de la représentation fondamentale. Zweig les appela *quarks* en référence au roman de James Joyce *Finnegans Wake*⁵³. Il est frappant de noter que ces entités réellement élémentaires – dans l'état actuel des connaissances – sont en fait des objets très abstraits bien plus que des petites billes à l'intérieur des nucléons.

Les symétries jouent un rôle bien plus large encore via le concept de jauge. Le théorème de Noether montre qu'à chaque symétrie continue est associée une loi de conservation. D'un point de vue heuristique, ces invariances sont primordiales puisqu'elles président à la dynamique des systèmes. En électrodynamique quantique, la conservation de la charge électrique est associée à l'invariance de phase de la fonction d'onde. Mais cette symétrie est globale et l'arbitraire qui en découle n'a de légitimité que si la convention est respectée dans tout l'espace. Lorsqu'on souhaite néanmoins appliquer de façon locale cette symétrie globale, il faut introduire un médiateur qui compensera la liberté incidemment prise par le physicien. Ce médiateur est en l'occurrence le photon, le grain de lumière. Dans le cadre des théories de jauge, il peut donc être compris comme la résultante d'une localité illégitimement requise. Dans le cadre des interactions nucléaires faibles, la similitude de comportement entre l'électron et le neutrino – deux particules disjointes au regard de l'électromagnétisme mais identiques au regard de cette force faible – permet d'introduire une

⁵² Une description simple et intuitive avec un recours minimum aux mathématiques peut être trouvé dans : G. D. Coughlan, J. E. Dodd, *The Ideas of Particle Physics*, Cambridge, Cambridge University Press, 1991 (1e éd. 1984)

⁵³ Une introduction historique peut être trouvée dans L. Z. FANG, R. RUFFINI (éd.), *Quantum Cosmology*, Singapore, World Scientific, 1987

nouvelle rotation dans un espace abstrait. Lorsque cette rotation globale est, suivant le précepte de jauge, appliquée de façon locale, de nouveaux médiateurs doivent apparaître : les bosons W et Z, vecteur de l'interaction nucléaire faible.

Un dernier ingrédient manque encore pour donner sa cohérence au modèle : comprendre l'origine des masses. Fort heureusement, un certain nombre de symétries sont spontanément brisées dans la nature. Ce qui signifie que les solutions n'ont plus la symétrie des équations ou que les conséquences n'ont plus les symétries des causes. Des exceptions au principe de Curie en quelque sorte. Dans ces situations, l'état d'énergie minimale ne correspond plus à l'état vide de particules. Il s'ensuit une nécessité pratique de développer les quantités physiques autour d'un nouveau point de stabilité dont l'une des conséquences majeures se traduit par l'apparition d'un terme de masse dans la fonction de Lagrange qui décrit le système. Dans le cadre du modèle électrofaible succinctement présenté au paragraphe précédent, cela permet de résoudre la plupart des difficultés : les particules de jauge W et Z deviennent massives, comme c'est effectivement observé, et les indésirables bosons de Goldstone disparaissent. Mais il reste un prix à payer : l'émergence d'une nouvelle particule, effectivement responsable de cette brisure de symétrie : le boson de Higgs qui est aujourd'hui l'objet d'une traque sans relâche auprès des grands collisionneurs.

Cosmologie physique

L'objet de la cosmologie est si vaste – l'Univers dans toute son étendue spatiale et temporelle – que celle-ci ne peut faire l'économie d'une interrogation sur la légitimité de son approche et même sur l'existence de l'objet de son étude. Ce qu'un physicien entend usuellement par Cosmos est certainement très éloigné de ce qu'un poète pourrait signifier par ce même mot⁵⁴. Le concept même d'Univers prend ici un sens très particulier : il suppose un contenu physique et intelligible, régi par un certain nombre de relations qu'il s'agit de mettre en évidence. Il suppose aussi une échelle : un modèle cosmologique considéré comme exhaustif n'aurait pas vocation à expliquer la structure des planètes, ni des étoiles, ni même des galaxies. Les galaxies sont les *atomos* de la cosmologie, elles sont les entités élémentaires

⁵⁴ Nous verrons que la proposition des multivers pourrait rapprocher le scientifique de l'aède et rendre à *Cosmos* le sens qu'Hésiode lui donnait.

et – presque – insécables, les composantes du fluide cosmique qui peuple le tout. Le terme cosmologie s'est généralisé et englobe maintenant ce qui autrefois apparaissait sous les dénominations distinctes de cosmographie et de cosmogonie⁵⁵. La première – sans doute la branche la plus dépouillée de toute l'astrophysique – étudie la structure géométrique globale de l'espace-temps, indépendamment de son contenu. La seconde s'intéresse à l'évolution de la matière, de l'énergie, du rayonnement et des différents objets qui peuplent l'Univers⁵⁶.

Comme évoqué en introduction, la possibilité même d'une cosmologie scientifique n'est pas assurée. Les spécificités épistémologiques de cette discipline sont nombreuses et posent la question de sa légitimité scientifique.

D'abord, l'observateur est partie intégrante du système qu'il entend décrire. Il en est le fruit et influe (en principe si ce n'est en fait) sur son devenir. Il n'y a pas d'extériorité possible quand l'objet est l'Univers. Quel est le sens du point de vue de l'observateur dans ces conditions ? Les difficultés conceptuelles bien connues des neuropsychologues concernant la possibilité pour un cerveau de se penser « objectivement » lui-même se posent – à une autre échelle – en cosmologie.

Ensuite, l'expérience est irréproductible. Sauf à supposer un monde cyclique ou pluriel (ce qui sera l'enjeu des cosmologies hétérodoxes développées par la suite), l'événement « naissance de l'Univers » n'eut lieu qu'une fois et ne saurait être reproduit en laboratoire. Le protocole de la science de la Nature veut que les lois soient inférées à partir de régularités observées en reproduisant l'expérience dans des conditions similaires, ce qui est impossible en cosmologie.

De plus, à la différence de toutes les autres branches de la physique, les conditions initiales ne sont pas ici contingentes. Il n'y a, usuellement, aucune contradiction entre le déterminisme des lois (par exemple la gravitation universelle) et la diversité des phénomènes (par exemple les trajectoires possibles de flèches décochées par des archers différents). Dans le cas cosmologique, l'arbitraire des conditions initiales entacherait la structure même de l'objet décrit. Il est donc nécessaire de considérer une description singulière qui intègre ses propres conditions initiales.

⁵⁵ M. LACHIEZE-REY, *Initiation à la Cosmologie*, Paris, Masson, 1992

⁵⁶ Il s'agit bien sûr d'un appauvrissement du sens primitif et étymologique du mot. Mais cette dérive n'est pas nouvelle : la *Théogonie* s'intéressait d'avantage aux mœurs et aux vies d'Ouranos et de Gaïa qu'à leur naissance *stricto sensu*.

Il faut également noter que les énergies en jeu lors de l'étude de l'Univers primordial sont sans commune mesure avec celles qui ont été – et seront sans doute jamais – testées en laboratoire. Cette extrapolation hasardeuse est un élément à haut risque pour la fiabilité de l'édifice. L'étude des étoiles, par exemple, peut se reposer sur une physique nucléaire bien connue et exhaustivement étudiée auprès des accélérateurs. Au contraire, l'échelle d'énergie de l'inflation cosmologique – par exemple – est sans doute supérieure de plus de dix ordres de grandeurs à celle du grand collisionneur LHC.

Enfin, l'étude des premiers instants du Cosmos demande – au moins conceptuellement – de violer la deuxième loi de la thermodynamique. Il faut, ne serait-ce qu'en pensée, remonter le cours du temps. Or, précisément, le film à l'envers est très différent de celui se déroulant à temps croissant. Les bifurcations ont lieu à sens unique.

Comme toutes les sciences, mais sans doute plus encore que les autres, la cosmologie repose sur ses mythes, ses chimères et ses évidences réfutées. Le premier principe explicitement posé de la cosmologie consiste donc sans doute à supposer qu'une cosmologie scientifique a un sens, que l'Univers est plus que la somme de ses parties, que la description de l'ensemble échappe à l'accumulation des faits et des régularités isolés. Il faut ensuite postuler (encore que quelques études s'intéressent maintenant à ce point précis) que les lois de la physique sont les mêmes partout, que ce que l'on sait de la Nature sur Terre reste valable aux confins de l'espace inter-galactique. Bien sûr, cette hypothèse est une condition de possibilité et sa portée dépasse largement ce seul champ d'étude puisqu'elle est consubstantielle à l'idée même de loi. Elle est aussi largement liée aux symétries fondamentales sur lesquelles reposent les principes de conservation. Elle présente néanmoins l'avantage certain d'être testable : de nombreuses lois physiques peuvent être observationnellement vérifiées sans que le physicien soit effectivement présent *in situ* et rien n'indique, à l'heure actuelle, une quelconque déviation par rapport à cette hypothèse⁵⁷. Le second postulat généralement émis – mais il n'a ni la même portée ni la même nécessité que le précédent – consiste à supposer que l'Univers présente un aspect identique (à grande échelle) en tout point : l'espace est homogène. Ce principe, quelque peu dogmatique, est l'un des fondements de tous les modèles cosmologiques contemporains. Les propriétés du Cosmos influencent celles de la matière : les galaxies, plongées dans la géométrie de l'Univers

⁵⁷ La mesure de la valeur de la constante de structure fine dans les quasars lointains est compatible avec une très légère évolution mais ces données sont de faible valeur statistique.

subissent son évolution. Réciproquement, les propriétés du Cosmos sont influencées – et même déterminées – par son contenu matériel et énergétique. Il n’y a pas de cosmologie possible sans astronomie, sans astrophysique et sans physique des hautes énergies. C’est en fait la base de son statut de discipline observationnelle.

Au-delà de la physique, la cosmologie s’adresse aux questions les plus fondamentales qu’il soit possible de poser sur certains aspects du (des ?) monde(s). L’origine, le devenir. Une nouvelle face de l’éternelle question de Leibniz « pourquoi quelque chose plutôt que rien » que l’on trouve dans tant d’essais philosophiques, jusqu’à la première phrase de l’*Introduction à la Métaphysique* de Heidegger. Il existe aujourd’hui de nombreuses indications en faveur d’une expansion de l’Univers : la distance entre les galaxies ne cesse de croître et cela renvoie en fait à l’existence d’un *Big-Bang* chaud. L’observation contemporaine conduit naturellement à formuler des hypothèses sur le passé le plus reculé. L’extrapolation au futur est délicate mais elle est possible : le destin est partiellement accessible et le devenir de l’Univers peut être aujourd’hui appréhendé avec une confiance sans précédent. Il est assez remarquable que la science physique, dans son cadre mathématique rigide, s’applique finalement aussi bien à la description de l’Univers. Celle-ci requiert le recours à de très nombreuses structures extrêmement hiérarchisées sur des échelles de temps et de distance qui sont habituellement totalement inaccessibles. Pourquoi le tout est-il en fait si facilement accessible ? Pourquoi la physique est-elle strictement incapable de prédire la trajectoire d’une boule de billard quelques secondes après qu’elle a été lancée mais pense-t-elle – sans doute à raison – pouvoir connaître la dynamique du Cosmos dans dix milliards d’années ? Une des voies de réponse vient précisément de l’homogénéité et de l’isotropie : à grande échelle l’Univers est extrêmement simple et cela constitue le socle des modèles contemporains. Les éléments fondamentaux du monde tel qu’il nous apparaît aujourd’hui sont peu nombreux. En premier lieu, l’homogénéité est telle que les fluctuations de masse ne deviennent importantes que lorsque les volumes considérés sont inférieurs au pourcent du rayon de Hubble – c’est-à-dire au rayon de l’Univers causal⁵⁸. Ensuite, l’Univers est en expansion, avec une vitesse proportionnelle à la distance qui sépare les objets considérés. Cet état, décrit par la relativité générale, est le fruit d’une phase dense et chaude appelée *Big-Bang*. Enfin, il existe des indications en faveur d’une phase d’expansion très

⁵⁸ On nomme univers causal l’ensemble des points ayant été capables d’échanger de l’information, donc séparés par une distance inférieure à l’âge de l’Univers multipliée par la vitesse de la lumière.

rapide de l'Univers dans ses premiers instants, l'inflation. Son étude sera présentée plus en détails, comme exemple paradigmatique d'une théorie acceptée et pourtant sujette à caution.

Du point de vue observationnel les indications en faveur de ce modèle se fondent essentiellement sur trois points fondamentaux⁵⁹. D'abord la loi de Hubble, c'est-à-dire la proportionnalité entre la distance des objets et leur vitesse d'éloignement par rapport à la Terre (ou à n'importe quel autre point puisqu'il n'existe aucun lieu intrinsèquement privilégié dans le Cosmos). Celle-ci ne s'est jamais démentie dès lors que l'on considère des échelles suffisantes pour que les effets locaux soient négligeables. Ensuite, les abondances des éléments légers dans l'Univers. Ces dernières sont prédites par la théorie de la nucléosynthèse primordiale – c'est-à-dire par la description de la formation des noyaux lorsque la température devint suffisamment basse, quelques secondes après le *Big-Bang* – et sont en remarquable adéquation avec les mesures. Enfin, la clé de voûte de l'édifice est sans aucun doute aujourd'hui le fond diffus cosmologique⁶⁰ : ces rayonnements témoignent directement de l'état de l'Univers jeune. Ils se sont découplés de la matière lorsque, trois cent quatre-vingt mille ans environ après l'instant initial, leur énergie devint trop faible pour ioniser les atomes. Depuis lors, ils se propagent librement et constituent une sorte de photographie instantanée du Cosmos des temps reculés. L'existence même de ce bain thermique est une indication très forte en faveur du *Big-Bang* mais, au-delà, ses caractéristiques sont d'une extrême richesse pour la détermination des paramètres cosmologiques. Son isotropie témoigne de l'extraordinaire homogénéité de l'Univers primordial. Les très légères variations de température observées sur la voûte céleste permettent de mesurer les ondes acoustiques – puisqu'il s'agit effectivement d'ondes de densité – présentes dans le fluide primordial et, par là, d'accéder de façon relativement directe à l'âge de l'Univers, à sa masse (volumique) totale, à la proportion de matière baryonique (c'est-à-dire constituée de particules usuelles) et non-baryonique, à la vitesse d'expansion et à la répartition de la puissance entre les différentes échelles. Ces dernières années ont vu des développements considérables en ce sens et les mesures aujourd'hui disponibles permettent d'accéder à la plupart de ces paramètres avec une

⁵⁹ La référence sur le sujet demeure : P. J. E. PEEBLES, *Principles of Physical Cosmology*, Princeton, Princeton University Press, 1993

⁶⁰ La première mesure des anisotropies du fond diffus, qui permit l'entrée de la cosmologie dans l'ère de la physique de précision et changea considérablement le visage du monde, est présentée dans : G. F. SMOOT *et alii*, « Structure in the COBE DMR first Year Map », *Astrophysical Journal*, 396, 1992, pp: 1-5

précision de l'ordre de quelques pourcents. La cosmologie observationnelle est entrée dans une ère de précision.

Il est néanmoins important de noter qu'en contrepoint de cette belle concordance, un grand nombre de questions nouvelles voient également le jour. D'abord l'essentiel de la matière de l'Univers est invisible. Pour solutionner ce problème pour le moins sérieux, il faut supposer l'existence d'une composante étrange de matière « noire » dont on ne peut que spéculer sur l'origine et la nature. Ensuite, une expérience fondée sur l'étude des supernovae lointaines⁶¹ a montré il y a quelques années, à la surprise générale, que l'Univers était actuellement dans une phase d'expansion accélérée. Même s'il est techniquement possible de rendre compte de cet effet via la présence d'une constante cosmologique dans les équations d'Einstein (dont l'histoire est cocasse puisqu'elle fut initialement introduite, à tort, pour faire artificiellement apparaître un état stationnaire) la nature physique de cette nouvelle « force » demeure strictement mystérieuse. Enfin, pour comprendre le fait étonnant que des zones causalement décorréelées – n'ayant jamais pu échanger d'information – se trouvent presque exactement à la même température, il faut supposer l'existence d'une phase d'accélération très importante nommée inflation. Face à une telle situation, il est possible de considérer que le modèle standard du *Big-Bang* est en grande difficulté ou, au contraire, qu'il est d'une singulière cohérence⁶². L'arbitraire de ces points de vue, qui peuvent tous deux être scientifiquement soutenus, sera l'un des points clé de l'analogie avec une forme de pensée esthétique.

L'inflation « standard »

Pour clore cette introduction au modèle cosmologique, il est intéressant d'étudier plus en détails le scénario inflationnaire parce qu'il constitue l'exemple le plus éloquent de cette imbrication complexe de faits d'expérience, de nécessités mathématiques et de spéculations

⁶¹ S. PERLMUTTER *et alii*, « Measurements of Omega and Lambda from 42 High Redshift Supernovae », *Astrophysical Journal*, 517, 1999 pp: 565-586

⁶² La cohérence du modèle requiert le recours à une théorie quantique des premiers instants. L'état de l'art est résumé dans : L. Z. FANG, R. RUFFINI (éd.), *Quantum Cosmology*, Singapore, World Scientific, 1987

heuristiquement fondées⁶³. Le modèle du *Big-Bang* dans sa version pré-inflationnaire est un cadre très riche mais il ne permet pas de rendre compte de la platitude et de l'homogénéité de l'Univers, de l'absence de monopoles magnétiques, ni d'ailleurs de l'origine de la matière et des structures. L'avènement du paradigme inflationnaire, dans les années 1980⁶⁴, donne un cadre dynamique pour expliquer la génération de ces entités fondamentales. Néanmoins, à la différence de la théorie du *Big-Bang* qui est bien établie, il n'y a pas encore *stricto sensu* de théorie de l'inflation⁶⁵. La plupart des physiciens considèrent l'inflation comme une idée séduisante et efficace, un paradigme, qui peut se réaliser dans différents modèles. Juan García-Bellido propose une analogie osée entre le statut actuel de l'inflation et la mécanique Newtonienne lors de son développement (les cosmologistes préfèrent d'ordinaire une comparaison plus technique avec les théories de jauge en physique des particules élémentaires). D'un point de vue contemporain, on peut considérer que Newton a été chanceux : il a proposé une loi gravitationnelle fondée sur la notion de force (avec d'ailleurs beaucoup de réserves sur le sens à donner à ce mot) sans disposer d'un cadre théorique convenable pour décrire l'espace et le temps. Ce à quoi ses contemporains Leibniz et Berkeley étaient sans doute particulièrement sensibles. Néanmoins, Newton a été sage au point d'utiliser souvent la formulation « tout se passe comme si... », prenant ainsi une certaine distance par rapport aux éventuelles prétentions ontologiques imputables à son modèle. En fait, ce qui permit sans aucun doute le succès de cette approche fut son extraordinaire capacité à prévoir les mouvements des planètes. Elle demeura en quelque sorte heuristiquement fondée durant des siècles. Ce n'est en fait qu'avec la relativité générale que cette sorte de coïncidence miraculeuse fut dissipée et que l'approche Newtonienne put apparaître de façon satisfaisante comme la limite d'une description qui rend compte de la nature profonde (ou au moins d'une proposition sur celle-ci) de l'espace-temps. On peut supposer que l'inflation est dans une situation similaire par rapport à une théorie plus fondamentale et encore inconnue. Les observations coïncident à merveille avec le modèle inflationnaire mais personne ne sait exactement pourquoi. Au niveau élémentaire, l'idée de l'inflation est d'une simplicité presque insultante pour les cosmologistes : comment est-il

⁶³ Une introduction qualitative et philosophique au modèle de l'inflation peut être trouvée dans (à paraître) : J. GARCIA-BELILDO, « The Paradigm of Inflation », *preprint hep-ph/0406191*

⁶⁴ A. GUTH, « The Inflationary Universe : a Possible Solution to the Horizon and Flatness Problems », *op. cit.*, pp. 347-356

⁶⁵ C'est un point controversé. A. Linde, l'un des inventeurs de l'inflation, considère au contraire que le Big-Bang n'est qu'un ingrédient de la théorie générale de l'inflation.

possible, comme le fait remarquer par exemple Andrei Linde⁶⁶ qui est un des principaux acteurs de la théorie inflationnaire, qu'elle soit apparue si tard dans l'histoire de la science de l'Univers ? De plus, la plupart des prédictions de l'inflation ont été faites avant les observations correspondantes, ce qui est relativement rare et crédibilise considérablement l'approche. A l'heure actuelle, les mesures permettent de confirmer le paradigme général mais pas encore de discerner les différents modèles.

L'inflation suppose l'existence d'une période d'expansion accélérée dans les premiers instants de l'Univers pour rendre compte de l'homogénéité et de la platitude aujourd'hui observées. Dans le contexte de la relativité générale, cela signifie qu'une pression négative était alors la source de la gravité et la plus simple réalisation de ce scénario est une densité d'énergie constante conduisant à un Univers de type de-Sitter (pour lequel le facteur d'échelle – la taille caractéristique de l'Univers – croît exponentiellement). Tous les champs fondamentaux – y compris éventuellement l'inflaton responsable de cette situation – sont supposés être régis par un comportement quantique dans un espace-temps courbe. L'expansion inflationnaire porte ces fluctuations de la métrique et des champs hors de l'horizon causal, induisant une transition du quantique au classique. Ultérieurement, lorsque l'Univers deviendra dominé par le rayonnement, l'horizon causal croissant à nouveau plus vite que le facteur d'échelle, les fluctuations ré-entreront dans l'horizon donnant naissance à des perturbations de densité de matière et de rayonnement. Ces perturbations ayant une amplitude proportionnelle à la densité d'énergie constante qui permet l'inflation, elles conduisent à un spectre de puissance invariant d'échelle : quel que soit l'angle considéré sur le ciel, la valeur moyenne du carré des fluctuations est identique. Cette prédiction très forte, récemment confirmée expérimentalement par différents détecteurs⁶⁷, est un argument clé en faveur d'une phase inflationnaire. Il est remarquable qu'un tel spectre, complexe en soi, et postulé par Harrison et Zeldovitch en 1970 pour expliquer la distribution contemporaine de matière, puisse être naturellement généré par une idée aussi simple que l'inflation. Il n'en demeure pas moins que le caractère euclidien de l'espace est sans aucun doute la prédiction la plus forte de l'inflation. Autrement dit, la courbure doit être quasiment nulle au sein d'une sphère dont la taille est de l'ordre de celle de l'horizon de Hubble. Michael Turner, l'un des

⁶⁶ A. LINDE, « Prospects for Inflation », talk at the Nobel Symposium "Cosmology and String Theory", 2004, preprint hep-th/0402051

⁶⁷ D. N. SPERGEL *et alii*, « First Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Determination of Cosmological Parameters », *Astrophysical Journal Supplement*, 148, 2003, p. 175

cosmologistes les plus reconnus aujourd'hui, n'a de cesse de rappeler⁶⁸ que contrairement à l'espoir illusoire placé dans la recherche des ondes gravitationnelles primordiales, c'est bel et bien cette géométrie improbable – puisqu'une infinité de valeurs de densité auraient conduit à des géométries sphériques ou hyperboliques et qu'une unique valeur s'accordait avec le caractère euclidien de l'espace – qui est la meilleure « preuve » du paradigme inflationnaire.

L'inflation est un cadre extraordinaire en ceci qu'il produit une phénoménologie extrêmement riche à partir d'une hypothèse extrêmement simple⁶⁹. En particulier, l'apparition de la matière est comprise comme la désexcitation du champ d'inflaton lors de la période de réchauffement. Quand ce champ atteint le fond de son potentiel, il commence à osciller autour de son minimum et ces oscillations sont très exactement les particules en théorie quantique des champs. L'énergie potentielle se transforme en énergie cinétique et l'Univers commence à s'échauffer après le considérable refroidissement qu'il a subi lors de la détente due à l'inflation. Il existe donc de forts liens entre ces idées cosmologiques et la physique des particules même si, justement, un cadre microphysique défini fait toujours défaut dans ce contexte. On peut, en particulier, remarquer que le champ supposé responsable de l'inflation est presque systématiquement considéré comme scalaire – de moment angulaire intrinsèque nul – alors qu'aucun champ scalaire fondamental n'a encore été découvert dans la nature...

Bien que l'on s'intéresse généralement aux conséquences de l'inflation sur « notre » part d'Univers, c'est-à-dire sur une région dont la taille est, par définition, égale à celle du rayon de Hubble, on peut aller plus loin et faire parler le modèle au-delà de l'horizon. S'agit-il encore de science ? Au sens de Popper, probablement pas. Au sens d'une épistémologie contemporaine plus heuristique et plus pragmatique, vraisemblablement oui. C'est d'ailleurs une question que l'on pourrait – devrait – se poser lorsque l'on utilise la relativité générale pour décrire le mouvement des corps à l'intérieur d'un trou noir, prédiction que l'on ne pourra, par essence, jamais vérifier et qui se trouve pourtant dans tous les ouvrages de gravitation... Toujours est-il que d'un point de vue « interne », la théorie inflationnaire n'a strictement aucune raison de cesser d'être valide au-delà du rayon de Hubble (elle est d'ailleurs utilisée à ces échelles pour prédire les propriétés précédemment exposées), de

⁶⁸ communication privée

⁶⁹ On peut consulter, par exemple: G. BOTHUN, *Modern Cosmological Observations and Problems*, Londres, Taylor & Francis, 1998

même que la relativité générale n'a aucune raison de n'être plus valide en deçà de l'horizon d'un trou noir. Il est alors fascinant de constater que la prise en compte de la rétroaction de la métrique et du champ d'inflaton sur l'espace-temps non perturbé induit un mouvement Brownien – c'est-à-dire une marche au hasard – du champ. Il s'ensuit que contrairement à l'image classique il ne descend pas systématiquement la pente du potentiel (à l'instar d'une boule qui roule le long d'une montagne) mais remonte parfois. Dans les domaines où se produit effectivement un tel phénomène, le taux d'expansion augmente. Etant donné que l'amplitude des fluctuations quantiques est proportionnelle au taux d'expansion local, le champ peut continuer à gravir la pente, conduisant à une augmentation plus importante encore de l'expansion ! Ces domaines sont en état d'« inflation éternelle ». Le « méta-Univers » devient alors cloisonné en domaines au sein desquels le champ d'inflaton a descendu le potentiel, conduisant au réchauffement et à la production de particules, et en domaines où le champ s'est élevé le long du potentiel, conduisant à une expansion toujours plus rapide. Dans cette image stochastique, le monde est en auto-reproduction infinie et en éternelle inflation. Il se peut alors que nous vivions dans une île de chaleur appropriée au développement de la biologie au sein d'un Univers – au sens global – généralement froid et en expansion rapide. Cette île est simplement suffisamment vaste pour que les écarts par rapport à l'homogénéité et à la platitude soient dérisoires. On peut alors penser notre environnement comme un agrégat de zones causalement décorréélées dont certaines ont thermalisé et d'autres subissent encore l'expansion inflationnaire. De ce point de vue, il n'existe plus un *Big-Bang*, mais une infinité de *Big-Bangs*. Cela permet de s'affranchir du problème des conditions initiales de l'inflation : lorsqu'un domaine a subi un minuscule élan à l'inflation, celui-ci permettra à l'inflation de se produire éternellement dans l'Univers. Les régions séparées de l'Univers peuvent s'effondrer lors de la domination de la matière ou bien subir une expansion sans fin. Notre monde – jusqu'au rayon de Hubble, soit quatorze milliards d'années-lumière - ne serait en fait qu'un insignifiant domaine du véritable méta-Univers qui emplit tout l'espace-temps. Ce n'est qu'une manière de créer un monde, parmi d'autres, qui est ici esquissée et qui sera présentée ultérieurement plus en détails.

L'inflation, dans sa généralité, est une théorie clairement « falsifiable ». On pourrait exclure l'inflation. Mais le jeu n'est pas simple parce que ce paradigme a été imaginé pour fonctionner redoutablement bien. La première possibilité consisterait bien sûr à observer une courbure non nulle de l'Univers. La dilution extrême due à l'inflation s'accommode mal d'un

reliquat de courbure dans notre domaine d'Univers et les mesures actuelles indiquent une absence de courbure à 1 % près⁷⁰. Une autre voie consisterait à montrer que l'Univers est topologiquement non trivial. L'expansion ne change pas la topologie. Or l'étude du fond diffus cosmologique ne présente pas de structures laissant penser à l'existence de cellules topologiques complexes. Il ne devrait donc pas être aujourd'hui possible, dans le cadre du paradigme inflationnaire, de mettre en évidence des répétitions d'images de galaxies consécutives à une éventuelle topologie « multi-connectée » de notre monde (ce que Jean-Pierre Luminet appelle l'Univers Chiffonné). Une troisième possibilité viendrait de l'existence d'une rotation globale de l'Univers. S'il existait, en quelque sorte, un axe privilégié dans les cieux, celui-ci s'inscrirait en faux par rapport à l'isotropie selon laquelle l'inflation étend toutes les échelles. Ensuite, pour des raisons plus techniques liées à la parité, certaines corrélations entre des modes de polarisation du fond diffus sont interdites. Bien que des contaminations – liées en particulier aux avant-plans astrophysiques et au champ magnétique primordial – soient toujours possibles, ce test est particulièrement important parce qu'il est envisageable dans un avenir proche et constitue une prédiction claire et simple de l'inflation. Enfin, l'écart éventuel par rapport à l'invariance d'échelle parfaite ne saurait être trop important. Bien qu'une déviation de quelques centièmes de pourcent soit possible – et permette même de discriminer entre plusieurs modèles particuliers au sein du paradigme inflationnaire – une inclinaison substantielle du spectre de puissance de l'Univers serait en désaccord patent avec les concepts fondateurs de l'inflation. Cette possibilité est d'ores et déjà pratiquement exclue.

L'inflation – considérée en son sens large comme un ensemble de théories microscopiques possibles qui induisent génériquement une expansion considérable de notre Univers – est donc un cadre scientifique testable qui propose des prédictions précises pouvant être mises à l'épreuve des observations. Il n'est pas sans lacune. En fait aucun modèle microphysique cohérent ne permet de rendre compte de cette théorie effective. Les tentatives de construction de modèles inflationnaires dans le cadre de la supersymétrie et de la supergravité⁷¹ – qui constituent les extensions naturelles du modèle standard de la physique des particules – sont aujourd'hui au mieux artificielles, au pire pratiquement impossibles. On ne connaît pas

⁷⁰ D.N. SPERGEL *et alii*, « First Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Determination of Cosmological Parameters », op. cit.

⁷¹ M. KAKU, *Introduction to Superstrings and M-theory*, Berlin, Springer, 1999 ; G. KANE, M. SHIFMAN, éd. , *The Supersymmetric World*, Singapore, World Scientific, 2000

l'échelle d'énergie de l'inflation. Elle a souvent été associée à l'échelle de grande unification à laquelle les intensités des forces nucléaire faible, nucléaire forte et électromagnétique se rejoignent, mais cela n'est pas sans poser quelques difficultés du point de vue de la physique des hautes énergies⁷². De plus, il est aujourd'hui impossible de savoir si le champ d'inflaton, responsable du phénomène, est une réelle entité fondamentale ou une manifestation effective d'une théorie plus globale et plus profonde. Sans compter que l'inflation ne peut, ni de droit, ni de fait, résoudre tous les problèmes cosmologiques centraux. Elle reste essentiellement muette sur la présence contemporaine d'une constante cosmologique (l'accélération observée aujourd'hui correspond à une densité d'énergie approximativement constante), sur les fractions de matière baryonique et non-baryonique, sur le taux d'expansion actuel, sur l'âge de l'Univers et sur son destin. Pire encore : fondamentalement, ce modèle n'est pas *nécessaire*. L'inflation n'est favorisée pour des questions de naturalité : elle rend plus « probable » l'aspect de notre monde. Mais les conditions initiales nécessaires à l'existence de l'inflation elle-même ne sont elles-mêmes pas assurées...

Malgré ces faiblesses, ou plutôt ces incomplétudes, le paradigme inflationnaire est, me semble-t-il, l'image archétypale d'une certaine pratique contemporaine de la physique fondamentale.

⁷² A. BARRAU, « Could the Next Generation of Cosmology Exclude Supergravity ? », *Physical Review D*, 69, 2004, p 105021

3. Architecture du méta-monde

Quelques considérations sur le principe anthropique

« Le principe anthropique est un principe hypothétique selon lequel le monde s'est très précisément ajusté à la présence de ceux qui sont en mesure de l'observer » écrit Léonard Susskind⁷³, le père de la théorie des cordes. C'est très exactement cette idée que ce chapitre entend déconstruire puis réfuter.

Comme cela sera montré par la suite, la pertinence scientifique du concept d'univers multiples est intimement liée à certaines considérations anthropiques. Les très nombreuses controverses quant au statut du *principe anthropique* et l'essentiel des débats autour de sa légitimité épistémique semblent, pour partie, dus à une incompréhension mutuelle des principaux acteurs quant au sens qu'ils donnent aux mots employés. La science s'étant, dans une large mesure, développée contre une cosmogonie anthropocentrée, il n'est pas surprenant que les réflexions autour d'un argument relatif à l'existence de l'homme, au cœur même des propositions physiques les plus fondamentales, soient chargées d'affect et parfois empreintes d'une certaine précipitation de jugement. Afin de clarifier, autant que faire se peut, la situation et de donner un sens clair aux références anthropiques proposées dans la suite de ce mémoire, nous proposons de nous en tenir rigoureusement à la sémantique proposée par Brandon Carter, l'inventeur du principe anthropique (dans le cadre de la physique contemporaine) et l'un des plus grands physiciens théoriciens de notre temps⁷⁴.

Bien que particulièrement fécond dans ce domaine, le principe anthropique, tel qu'introduit par Carter⁷⁵ en 1974, n'est pas exclusivement adapté à l'étude globale de l'Univers et prétend s'appliquer aussi bien au microcosme qu'au macrocosme. Aujourd'hui,

⁷³ L. SUSSKIND, *Le paysage cosmique*, traduit de l'anglais par B. Arman, Paris, Robert Laffont, 2007 (1^e ed. anglaise 2004)

⁷⁴ Brandon Carter a joué un rôle pionnier en relativité générale et en physique des trous noirs. Il est l'auteur d'un grand nombre de découvertes fondamentales et continue aujourd'hui ses recherches à l'observatoire de Meudon.

⁷⁵ B. CARTER, "Large number coincidences and the anthropic principle in cosmology", in *Confrontations of Cosmological Theories with Observational Data* (I.A.U. Symposium 63) ed. M. Longair, Reidel, Dordrecht, 1974 pp. 291-298

Carter regrette d'avoir employé le terme *anthropique* dont l'histoire des trois dernières décennies prouve qu'il a largement porté à confusion. En particulier, la même expression *principe anthropique* a été utilisée pour désigner des idées différentes et même opposées à celles de Carter, notamment le fait que l'Univers aurait été programmé pour l'apparition de notre vie (ce qu'il faudrait sans doute appeler un *principe anthropotéléologique* du type *Intelligent Design*).

La démarche de Carter était assez simple et assez modeste dans ses ambitions. Lorsqu'un observateur n'a accès qu'à un échantillon du système sur lequel il souhaite proposer un modèle, il doit se poser la question de la « représentativité » de l'échantillon dont il dispose. Le principe anthropique n'a d'autre vocation que de proposer une ligne de pensée pour tenir compte du biais relatif à la position particulière de l'observateur dans le monde qu'il décrit. Dans cette acception, sa légitimité est incontestable et, sans le formuler nécessairement explicitement, il est évident que toutes les démarches scientifiques y recourent d'une façon ou d'une autre.

Dans le cadre cosmologique, le principe anthropique apparaît comme une position médiane entre deux positions extrêmes⁷⁶. La première, le *principe autocentrique*, qui présidait à la vision pré-copernicienne, stipule que les observateurs terrestres occupent une position absolument privilégiée, au centre de l'Univers. La seconde, usuelle en physique contemporaine, le *principe cosmologique*, stipule que l'Univers est homogène, que nous n'y occupons pas une position particulière et que notre environnement est représentatif de l'ensemble en tant qu'échantillon statistique aléatoire. En termes plus techniques, dans une terminologie bayésienne conventionnelle, la distribution de probabilités *a priori* est supposée, pour le principe autocentrique, avoir été restreinte à la région où nous nous trouvons, alors que, pour le principe cosmologique, elle a été uniformément étendue à tout l'espace-temps. Autrement dit, selon le principe autocentrique, strictement rien ne peut être inféré sur l'Univers en général à partir d'observations locales, tandis que selon le principe cosmologique (que Carter nomme principe d'ubiquité) tout le reste de l'Univers peut-être décrit par ce qui est mesuré ici et maintenant.

Comme un intermédiaire entre ces positions extrêmes et outrageusement simplificatrices, le principe anthropique stipule – et cela quel que soit le modèle considéré – que la distribution de probabilité *a priori* doit être pondérée par un poids anthropique. Cela

⁷⁶ B. CARTER, « Anthropic principle in cosmology », preprint gr-qc/0606117, 2006

signifie que la distribution n'est plus supposée uniforme sur l'espace-temps, comme pour le principe cosmologique, mais uniforme sur les observateurs suffisamment proches de nous pour être qualifiés d'anthropiques. Évidemment, si la qualification d'anthropique est interprétée si étroitement que seuls les membres de l'espèce humaine y répondent, les conséquences cosmologiques du principe anthropique sont exactement les mêmes que celles du principe autocentrique. Explicitement, le terme anthropique réfère également à d'hypothétiques extra-terrestres doués de capacités cognitives leur permettant de s'interroger sur l'Univers d'une façon relativement analogue à la nôtre⁷⁷. Ainsi, comme le principe cosmologique, et à la différence du principe autocentrique, le principe anthropique conduit à des prédictions non triviales susceptibles de vérifications expérimentales. Le débat entre Dirac et Dicke à propos de l'éventuelle décroissance de la force gravitationnelle en proportion de la croissance de la taille de l'Univers produit un exemple archétypal d'une telle disjonction. Les travaux ultérieurs à la controverse ont montré que la prédiction de Dirac (une décroissance), qui était implicitement fondée sur le principe cosmologique, doit être rejetée à la faveur de celle du Dicke (une constance) qui était implicitement fondée sur le principe anthropique.

Une distinction importante doit être faite entre deux versions : le principe anthropique faible et le principe anthropique fort. Dans la version faible, presque unanimement admise, la distribution de probabilité *a priori* pondérée anthropiquement est supposée concerner seulement un modèle donné particulier d'Univers (ou d'une de ses parties) avec lequel l'observateur est confronté. Dans la version forte, plus controversée, la distribution de probabilités doit être étendue sur un ensemble de modèles cosmologiques comportant des valeurs différentes des constantes supposées dans chaque modèle être fondamentales⁷⁸. Les valeurs observées des constantes pourraient ainsi être explicables s'il pouvait être montré que d'autres valeurs seraient défavorables à l'existence d'observateurs anthropiques. Si les valeurs de ces constantes pouvaient être déduites de principes fondamentaux (ce qui n'est aujourd'hui pas le cas mais qui demeure espéré par la plupart des physiciens), le principe anthropique fort n'aurait pas de véritable intérêt scientifique.

⁷⁷ C'est bien sûr une pierre d'achoppement du raisonnement anthropique. Quand il est tenu compte que les chimpanzés, partageant 98% de notre patrimoine génétique, ne sondent évidemment pas le monde suivant les schèmes humains, l'hypothèse d'extra-terrestres se posant les mêmes questions dans les mêmes termes semble plus que désuète. De façon sous-jacente, cette proposition est clairement attachée à une position réaliste forte sur la physique : celle-ci est ici supposée (ce qui est hautement critiquable) décrire le monde *en soi* et ne pas constituer une projection humaine sur le monde.

⁷⁸ Contrairement à ce qui peut être lu dans une assez imposante littérature approximative, le principe anthropique fort ne postule en *aucun cas* que l'Univers a été créé pour l'homme. Cette interprétation est même strictement orthogonale à la démarche.

Les exemples les plus fameux d'utilisation du principe anthropique fort concernent les constantes de couplage nucléaires et la constante cosmologique. La « coïncidence » fut remarquée pour la première fois par Fred Hoyle⁷⁹ qui montra que le processus « triple alpha » qui est nécessaire à la formation des éléments intermédiaires et lourds qui nous composent est extrêmement sensible aux valeurs des couplages qui gouvernent les réactions thermonucléaires dans les étoiles de la séquence principale⁸⁰. Par ailleurs, la valeur surprenante de la constante cosmologique (120 ordres de grandeur environ plus faible que ce qu'un calcul élémentaire laisse présager) peut se comprendre anthropiquement quand il est remarqué que si elle était effectivement notablement supérieure à la valeur mesurée, l'Univers aurait atteint rapidement des densités si basses que des observateurs n'auraient pu y exister⁸¹. Ce point, fondamental pour Weinberg, sera abordé ultérieurement plus en détails.

Carter considère que ces arguments sont hautement non tautologiques et permettent d'expliquer une large facette de notre environnement. Plusieurs réserves s'imposent à ce stade. D'abord, l'utilisation du principe *fort*, qui est ici le seul scientifiquement pertinent, requiert des Univers multiples dont l'existence n'est pas assurée. Les compossibles « latents » de Leibniz ne suffisent plus, sauf, justement, à postuler l'intervention externe de Dieu (ce que fait évidemment Leibniz). De plus, le concept même d'observateur anthropique est dangereusement mal défini. Si l'on se limite à l'espèce humaine le principe devient tout à fait dépourvu d'intérêt. Dans ce cas, le principe anthropique porte particulièrement mal son nom puisque, *stricto sensu*, la vie n'intervient pas en tant que telle dans le raisonnement. Elle n'est pertinente qu'en tant que processus très complexe et donc très sensible aux paramètres physiques. Mais, dans cette forme, le principe devient tautologique et énonce fondamentalement que si les lois avaient été autres, le monde aurait effectivement été ... effectivement autre ! Dans cette version dénuée de sens (mais fréquemment rencontrée), l'observateur ne joue aucun rôle spécifique : l'orbite de Jupiter ou la forme de n'importe quel astéroïde intervient tout aussi légitimement. Il s'agit simplement de constater qu'avec des lois

⁷⁹ F. HOYLE, D.N.F. DUNBAR, W.A. WENZEL & W. WHALING, « A state in carbon prediction from astrophysical evidence », *Phys. Rev.* 92, p 1095 (1953)

⁸⁰ Il est intéressant de noter que ces considérations ne s'appliquent pas aux processus biochimiques (dépendant étroitement des propriétés de l'eau) qui sont pourtant indispensables au développement d'une vie comparable à la notre. Ces processus sont indépendants de tout paramètre de couplage physique et sont déterminés par les conséquences quantiques des propriétés mathématiques du groupe des rotations à 3 dimensions.

⁸¹ Il faut insister sur ce qu'il s'agit ici d'une utilisation du principe anthropique *fort*. Autrement dit, il n'est évidemment pas proposé que la valeur de la constante cosmologique ait été « déterminée » pour que l'homme existe mais simplement de supposer que parmi toutes les réalisations cosmologiques donnant lieu à différentes valeurs de cette constante, nous nous trouvons dans la région correspondant à une valeur anthropiquement acceptable.

différentes, l'homme comme tous les autres « êtres physiques » du monde, ne seraient pas tels qu'ils se présentent aujourd'hui. Cet usage est évidemment strictement non prédictif et revient à stipuler qu'une théorie correcte doit rendre compte du monde tel qu'il est. Ce qui est juste mais ne nécessite pas un nouveau principe pour être admis ! Du point de vue de l'approche des « multivers⁸² », cela revient à considérer que le poids anthropique de notre monde est égal à 1 et que celui de tous les autres est égal à 0. Cette vision n'est pas absurde mais elle est strictement infalsifiable puisque, dans la distribution des possibles, seule celle que nous observons était *a priori* observable. A l'extrême inverse, on peut supposer que la vie – qui est fondamentalement un processus d'adaptation – trouverait un chemin dans chaque type d'Univers, éventuellement très différent du nôtre du point de vue des lois physiques. Dans ce cas, la distribution de probabilités est uniforme et l'argument anthropique s'effondre : seule la probabilité d'occurrence d'un type donné d'Univers intervient dans la prédiction. Les assertions sont donc hautement dépendantes d'une compréhension des conditions de possibilité d'une vie intelligente, conditions qui sont évidemment inconnues. L'idée même de vie intelligente est sujette à caution puisque rien n'assure que toute intelligence (concept, lui aussi, anthropiquement défini !) conduise à interroger le monde suivant le mode qui nous est familier. Rien, d'ailleurs, ne prouve que les propriétés physiques soient des propriétés monadiques intrinsèques.

Pourtant, hors donc de ces écueils et moyennant les réserves émises, un certain nombre de prédictions falsifiables peuvent être faites à l'aide du principe anthropique.

La première d'entre elles, due à Carter⁸³, stipule que l'occurrence d'observateurs anthropiques doit être rare, même sur des planètes similaires à la nôtre. Cette proposition se fonde sur le fait que notre développement sur la Terre a requis une fraction substantielle du temps disponible avant que le Soleil atteigne la fin de sa vie sur la séquence principale. Cela serait inexplicable sur la base du principe cosmologique, qui postule que ce qui advient sur notre planète est typique et que la vie doit être banale. Sur la base du principe anthropique, cela serait aussi inexplicable si l'on suppose que l'évolution biologique peut se faire aisément sur des échelles de temps petites comparées à celle de l'évolution stellaire. En revanche, cette observation devient naturelle si l'évolution d'une vie comme la nôtre dépend d'événements aléatoires avec des échelles de temps caractéristiques grandes par rapport à celle de

⁸² On ne réfère pas ici à des multivers de niveau 1. Cette classification sera introduite dans les chapitres suivants.

⁸³ B. CARTER, « The anthropic principle and its implication for biological evolution », Phil. Trans. Roy. Soc. A310, pp. 474-363, 1983

l'évolution stellaire. La conséquence (non réfutée) qu'en tira Carter il y a plus de vingt ans était que la recherche de vie extraterrestre avait peu de chances de déboucher.

Suivant la même ligne de pensée, et de manière sans doute moins réjouissante, Carter a prédit que la fin du monde était proche⁸⁴. Cette proposition, connue sous le nom de *Doomsday argument*, a été poussée plus avant par le philosophe John A. Leslie. L'argument est extrêmement simple. Soit n notre position sur une liste ordonnée de tous les hommes nés depuis l'origine de l'humanité. Soit N le nombre total d'hommes qui existeront dans l'histoire de l'humanité. Le principe anthropique conduit à légitimement supposer que nous n'occupons pas une position particulière privilégiée sur la liste de tous les humains. Notre distribution de probabilité de présence sur la liste est donc *a priori* uniforme. Il y a donc 95% de chances qu'on se trouve dans les 95% finaux de l'intervalle $[0, N]$. Or, on peut estimer que 60 milliards d'hommes ont jusqu'à maintenant habité la Terre, ce qui correspond à notre position n . On peut donc considérer, qu'à 95% de niveau de confiance, N (le nombre total d'humains) ne dépassera pas $20*n$ (sans quoi nous serions des observateurs très « exceptionnels » se situant dans les premiers 5%, ce qui est exclu à 95% de niveau de confiance). On en déduit qu'il y aura moins de 1200 milliards d'hommes. Compte tenu de la croissance démographique et en supposant une stabilisation de la population terrestre à 10 milliards d'humains, ce nombre sera atteint en l'an 9120. La fin de l'humanité aura donc lieu, à 95% de niveau de confiance, avant l'an 9120. En dépit de son étrangeté, cette proposition est très difficile à mettre en défaut. Il existe des tentatives de réfutations, fondées essentiellement sur la légitimité de l'approche bayésienne, en particulier dans ce contexte, mais aucune n'est absolument conclusive et l'argument de Carter est à prendre au sérieux.

Une large part des objections au principe anthropique fort vient d'une mauvaise compréhension des enjeux et des termes. La dérive téléologique du terme anthropique est strictement orthogonale à l'esprit même de la démarche et aux définitions de Carter.

Lee Smolin⁸⁵ présente une objection simple à l'argument Hoyle résumé comme suit :

- (1) X est nécessaire pour que la vie existe
- (2) X est vrai pour notre Univers

⁸⁴ B. CARTER, « The anthropic principle and its implication for biological evolution », *Phil. Trans. Roy. Soc.* A310, pp. 474-363, 1983

⁸⁵ L. SMOLIN, « Scientific alternative to the anthropic principle » pp.323-366, in B. CARR (éd.) *Universe or Multiverse*, Cambridge, Cambridge University Press, 2007

(3) En utilisant les lois de la physique ainsi que des faits observés Y, on déduit que si X est vrai pour notre Univers, alors Z l'est aussi

(4) On prédit donc que Z est vrai

De façon évidente, la proposition (1) est inutile au raisonnement. Cette remarque illustre le problème sémantique évoqué par Carter : le principe *anthropique* porte mal son nom. De plus, quand il s'agit de s'intéresser, comme dans le cas de l'argument de Hoyle, à une propriété physique indépendante de la position spatio-temporelle, le principe faible perd effectivement tout intérêt puisqu'il n'y a pas d'effet de sélection. La situation est évidemment différente dans le cas du principe fort. Les réfutations portent alors sur la difficulté – incontestable – de l'établissement de la distribution de probabilité et la faible significativité des conclusions qui en résultent. C'est une objection recevable mais que la méthode soit délicate à exploiter *en fait* ne prouve pas qu'elle soit erronée *en principe*.

Il est important de noter que la croyance répandue selon laquelle on cache derrière le principe anthropique notre incompréhension du moment, celle-ci ayant vocation à être ultérieurement supplantée par une description plus profonde, plus globale et plus prédictive, n'est pas toujours exacte. À l'époque de Kepler, la dérivation de la taille exacte des orbites à partir des principes fondamentaux de la science était considérée comme une impérieuse nécessité. Une théorie physique qui se respecte *devait* pouvoir prédire la position des planètes. Aujourd'hui, notre meilleure compréhension des lois et de la structure de l'Univers nous conduit naturellement à considérer qu'il n'y a pas de sens à chercher à « calculer » les positions des planètes : ce sont des phénomènes contingents. Il existe vraisemblablement des milliards de milliards de planètes dans le Cosmos avec une distribution essentiellement aléatoire des positions orbitales et nous nous trouvons – par notre simple statut d'être vivant et donc très sensible aux conditions environnementales – au voisinage d'une étoile stable, suivant une trajectoire peu elliptique, à une distance permettant l'existence de températures variant peu et compatible avec la présence d'eau liquide. Le progrès des modèles peut donc s'accompagner d'un renoncement évident aux tentatives de détermination des paramètres à partir de principes fondamentaux, au profit d'une simple sélection anthropique. De tels exemples ne sont pas rares dans l'histoire.

Indéterminés en physique des particules et cosmologie

L'enjeu d'une théorie physique fondamentale est double. Il s'agit d'une part de tenter d'unifier des forces dans un cadre global permettant de les comprendre au sein du même paradigme. Mais, par ailleurs, l'immense difficulté consiste à faire en sorte que cette unification conceptuelle ne s'inscrive pas en faux par rapport à la diversité effective des phénomènes observés. C'est sur cette tension entre l'unification des interactions et la diversité des manifestations que se construisent les modèles contemporains de physique des particules élémentaires.

L'unification est obtenue par le concept de symétries rendues locales en induisant des champs de jauge tandis que la diversité est préservée grâce à la brisure spontanée de ces symétries. Ce sont des idées similaires qui président au modèle standard de la cosmologie physique. Néanmoins, cette très féconde procédure présente une pierre d'achoppement. L'interaction des champs de jauge entre eux et avec la gravité est complètement déterminée par les symétries fondamentales qui dépendent de très peu de paramètres. Mais la dynamique des champs de matière nécessaire pour permettre une brisure spontanée dynamique de symétrie est essentiellement arbitraire et requiert de nombreux paramètres libres. En conséquence, le modèle standard de la physique des particules comporte aujourd'hui plus de vingt paramètres indéterminés. Parmi ceux-ci on compte les masses de toutes les particules élémentaires, les constantes de couplage et les angles de mélange. Ces grandeurs ne sont pas déterminées par le modèle et doivent être ajustées de façon « externe » pour permettre une adéquation avec les mesures. De façon analogue, le modèle standard de la cosmologie présente environ quinze paramètres libres.

L'une des questions centrales de la science contemporaine consiste donc à comprendre l'origine de la valeur de ces paramètres. Il y a deux aspects particulièrement troublants dans cette démarche⁸⁶. Le premier est celui de la *naturalité*. Beaucoup des paramètres, quand ils sont exprimés sous forme de rapports sans dimension, sont extrêmement grands ou extrêmement petits. En unités de Planck, les masses du proton et du neutron sont de l'ordre de 10^{-19} , la constante cosmologique vaut 10^{120} , la constante d'auto-couplage du champ d'inflaton est inférieure à 10^{-11} , etc.

⁸⁶ L. SMOLIN, « Scientific alternative to the anthropic principle » pp.323-366, in B. CARR (éd.) *Universe or Multivers, op. cit.*

Le second problème est celui de la *complexité* (ou de la coïncidence anthropique). Notre Univers est un agrégat de structures complexes, souvent hors équilibre, réparties sur des échelles extrêmement différentes, de la cellule animale à l'amas de galaxies. Il est aisé de voir que cette circonstance remarquable dépend de paramètres apparemment très finement ajustés pour qu'il en soit ainsi. Si le neutron était plus massif d'1% seulement, si le proton était plus léger dans les mêmes proportions, si l'électron était deux fois plus massif, si sa charge électrique était 10% plus grande ou si les neutrinos étaient aussi massifs que les électrons, il n'y aurait pas de noyaux stables, pas d'étoiles, pas de chimie. L'Univers ne serait que du gaz d'hydrogène. Un monde pauvre.

Pendant longtemps, il y eut consensus sur la manière de résoudre le problème des paramètres indéterminés : il suffit d'unifier les différentes forces et particules en augmentant la symétrie de la théorie et le nombre de paramètres décroîtra. L'idée que l'unification réduit le nombre des paramètres d'une théorie est historiquement vérifiée. Dans de nombreux cas, l'unification s'est effectuée par la découverte d'une symétrie qui permet de relier des grandeurs jusqu'alors considérées comme strictement indépendantes. Ce fut le cas, par exemple, quand Newton unifia la théorie des orbites planétaires et quand Maxwell montra que la lumière était une conséquence de l'unification de l'électricité et du magnétisme. À ces succès du passé, s'ajoute le présupposé philosophique que la découverte de la théorie ultime s'accompagne nécessairement d'un élan réductionniste. Je pense que cette idée, liée en partie au dogme des religions monothéiques et en partie à un fantasme unitaire d'origine platonicienne ne va pas du tout de soi. Or, en effet, les avancées contemporaines ne corroborent plus cette évolution. La tendance s'inverse.

En unifiant toute la physique des particules au sein d'une théorie grande-unifiée (GUT), le nombre des paramètres décroît légèrement. Mais l'essentiel de l'indétermination demeure car l'arbitraire quant à la valeur des paramètres fondamentaux est échangé contre des libertés spécifiques liées au champ de Higgs qui ne sont pas déterminées et ne se laissent contraindre par aucune symétrie. Les théories grande-unifiées souffrent de plus d'un problème majeur. La version la plus simple, fondée sur le groupe de symétrie SU(5) a en effet été expérimentalement réfutée (par la stabilité du proton, beaucoup plus grande que ce qui est prévu par ces modèles). Il est possible de construire des théories GUT plus complexes qui échappent à cette falsification. Mais elles font alors face à la seconde difficulté : elles manquent de naturalité. Elles requièrent en effet deux échelles de Higgs, l'une voisine de 1 TeV et l'autre de 10^{15} TeV. À cause des corrections quantiques, maintenir ces deux échelles

aussi éloignées demande un ajustement extrêmement fin des constantes de couplage. Pour faire face à ce problème, des versions supersymétriques, liant les bosons et les fermions, ont été introduites. Il pouvait, dans le schème historique classique, être supposé que cette nouvelle symétrie allait réduire le nombre de paramètres libres. Il n'en est rien. La version la plus simple des extensions supersymétriques du modèle standard possède 125 paramètres, cinq fois plus que le modèle qu'elle « symétrise » !

La supersymétrie est une très élégante proposition. Elle a suscité tous les enthousiasmes et toutes les espérances depuis plus de vingt ans. Hélas, force est de reconnaître qu'elle ne produit pas de prédictions expérimentales réellement testables. Aucun super-partenaire n'a jusqu'alors été observé. Il nous manquerait la moitié du monde (non pas en fait, mais en puissance)... Bien qu'elle ne soit pas strictement infalsifiable, la supersymétrie peut rendre compte de pratiquement toutes les observations imaginables en variant ses paramètres internes. L'espace d'arbitraire, lié aux 124 paramètres libres, est si immense que quasiment tous les résultats de mesures envisageables au grand collisionneur de hadrons (LHC) du Centre Européen de Recherche Nucléaire (CERN) pourront être interprétés en termes supersymétriques.

Pour aller plus loin, il faut inclure la gravité. Les approches peuvent tenter d'utiliser dès le fondement une indépendance de fond – c'est le cas de la gravité quantique à boucle⁸⁷ – ou bien se fonder sur une approche perturbative – c'est le cas de la théorie des cordes. Il était initialement espéré que cette dernière approche (exposée plus en détails dans les deux paragraphes suivants) soit unique. Espoirs rapidement déçus puisque le « nombre » de théories de cordes différentes s'est avéré exponentiellement croissant avec le temps. Initialement, il y avait cinq théories de cordes supersymétriques à dix dimensions. Hélas, le nombre de façons de « compactifier » les six dimensions supplémentaires (puisque notre monde a le mauvais goût de n'en présenter que quatre) est de l'ordre de 10^5 . Dans les années récentes, des indications en faveur de nouvelles théories de cordes sont apparues, incorporant en particulier des structures non-perturbatives appelées « branes ». Le problème technique essentiel vient de ce que la supersymétrie qui est essentielle pour s'affranchir des instabilités liées à l'existence de tachyons dans le spectre des cordes n'est pas compatible avec une valeur positive de la constante cosmologique, telle qu'aujourd'hui observée. Dans les dernières années, des progrès considérables ont été effectués sur ce point par Kachru et ses collaborateurs. Ils ont pu contourner la difficulté en proposant des flux courbés autour des

⁸⁷ Bien qu'extrêmement élégante du point de vue de la gravité quantique, cette théorie n'est pas *stricto sensu* une théorie de grande unification.

cycles du « 6-manifold », rendant compatible la supersymétrie avec un espace de-Sitter. Le point clef de cette approche est que le nombre de théories distinctes générées par une telle démarche est de l'ordre de 10^{500} (ce qu'on nomme le « paysage » ou *landscape*) ! Chacune de ces propositions sur le monde est compatible avec l'existence d'un Univers à quatre dimensions présentant une énergie du vide légèrement positive. Mais elles sont en désaccord sur tout le reste : elles prévoient différentes physiques des particules, différents groupes de jauge, différents spectres des fermions et des scalaires, différents paramètres fondamentaux. La crainte associée à cet état de fait est qu'il y a peu de chances que la théorie des cordes permette des prédictions testables en physique. Bien sûr, seule une très petite proportion de ces théories est compatible avec les mesures. Mais quand bien même cette proportion serait aussi improbablement dérisoire que 1 sur 10^{400} , resteraient 10^{100} théories compatibles avec l'expérience... Dans un ensemble aussi vaste, Lee Smolin conclut que quelles que soient les futures découvertes, elles pourront être expliquées par la (les) théorie(s) des cordes.

Un bref aperçu de la théorie des cordes

En contrepoint de ces remarques techniques et critiques sur la théorie des cordes, une lecture plus orthodoxe et enthousiaste, ancrée dans la grande tradition de la physique du XXème siècle est également possible⁸⁸. Il est juste de la proposer (ainsi que quelques objections) compte tenu du rôle central que joue la théorie des cordes dans la pertinence scientifique du concept de multivers.

Le modèle standard de la physique des particules est un magnifique succès des théories de jauge. Néanmoins, lorsqu'il est tenté d'y inclure la gravité, des problèmes fondamentaux apparaissent. Le modèle standard est quantique par essence tandis que la relativité générale est intrinsèquement classique. Au-delà des problèmes calculatoires liés à la renormalisation⁸⁹, l'incompatibilité structurale entre relativité générale et théorie quantique des champs est profonde : l'élément dynamique de la première (l'espace-temps Riemannien,

⁸⁸ B. ZWIEBACH, « A first course in string theory », Cambridge, Cambridge university press, 2004

⁸⁹ A la différence de l'électrodynamique quantique – par exemple – où les divergences qui apparaissent dans certaines interactions peuvent être régularisées par un processus de soustraction d'infinis nommé renormalisation, la gravitation décrite comme un simple champ d'interaction ne conduit pas à des amplitudes finies pour les observables. Ceci peut s'appréhender intuitivement en gardant à l'esprit l'équivalence masse-énergie de la relativité restreinte : les gravitons échangés emportent une énergie qui doit influencer sur la géométrie via l'échange de nouveaux gravitons, et ainsi de suite dans un processus récursif divergeant.

déterminé par la présence de matière) est au contraire le cadre figé de référence de la seconde (l'espace-temps Minkowskien, invariant suivant ce qu'il contient). D'un point de vue pratique, en cosmologie ou en physique des trous noirs par exemple, il est souvent possible de travailler avec des champs quantiques dans un fond métrique traité classiquement. C'est l'approche semi-classique usuelle qui est relativement bien contrôlée⁹⁰. Mais la construction d'une théorie-cadre fondamentale requiert un traitement quantique intrinsèque de la gravitation.

La théorie des cordes est l'un des seuls candidats en tant que théorie unifiée des forces de la nature. En fait, toutes les interactions et toutes les particules sont unifiées dans cette démarche. C'est une approche quantique et, parce qu'elle incorpore la gravitation, c'est une authentique proposition sur la gravitation quantique. Considéré sous cet angle, et compte-tenu de l'échec d'Einstein pour unifier la relativité générale et la mécanique quantique, on peut conclure qu'en théorie des cordes toutes les autres forces sont en fait nécessaires à la quantification de la seule gravité !

En quoi la théorie des cordes est-elle réellement une théorie d'unification ? La réponse se trouve au cœur de la démarche : chaque particule est comprise comme un mode de vibration d'une corde élémentaire. De la même façon qu'une même corde de violon peut engendrer les douze notes de la gamme chromatique, une même (classe de) corde(s) peut engendrer toutes les particules connues. De plus, l'un des modes de vibration particulier se trouve être celui du graviton, médiateur du champ gravitationnel. Étant donné que toutes les particules apparaissent comme des *manifestations* d'une unique entité, il s'agit fondamentalement d'une procédure unificatrice. Quand on évoque, dans le cadre de la théorie des cordes, un processus de désintégration du type $\alpha \rightarrow \beta + \gamma$ où une particule α se transforme en une particule β et une particule γ , il faut imaginer une corde vibrant selon le mode α qui se rompt en deux cordes, l'une vibrant sur le mode β et l'autre sur le mode γ .

Rien n'assure que la théorie des cordes soit le bon modèle de gravité quantique. Les cordes sont si petites que leur mise en évidence est délicate. Pourtant, force est de constater que les incalculables qui apparaissaient dans la quantification canonique de la gravitation ont disparu. En opposition apparente avec l'image du « paysage » déjà mentionnée (qui sera développée au paragraphe suivant) on peut, sous un certain aspect, considérer que la théorie des cordes est essentiellement unique. La première indication en faveur de cette thèse tient à

⁹⁰ Encore que, là aussi, des difficultés conceptuelles notables demeurent.

ce qu'elle ne présente pas de paramètre sans unité ajustable⁹¹. La théorie des cordes présente un unique paramètre fondamental, homogène à une distance : la longueur des cordes l_s . Un autre signe dans cette direction a trait à ce que la dimensionnalité de l'espace-temps est ici fixée. Dans toutes les autres théories physiques le nombre de dimension est un *a priori*. Au contraire, dans le cadre de la théorie des cordes, celui-ci est déterminé par le corpus : l'espace-temps doit posséder dix dimensions dont six sont repliées sur elles-mêmes afin d'échapper à la détection.

Il existe des cordes ouvertes et des cordes fermées. Les premières ont deux points terminaux tandis que les secondes n'en ont aucun. On peut envisager des théories comportant des cordes fermées exclusivement et des théories comportant des cordes ouvertes et des cordes fermées (les cordes ouvertes pouvant spontanément se fermer, le cas des cordes ouvertes seules n'est pas considéré). La seconde division à considérer est entre les théories de cordes bosoniques et les théories de supercordes. Les cordes bosoniques vivent dans des espaces à vingt-six dimensions et leurs vibrations ne peuvent représenter que des bosons. Bien qu'ayant permis une approche simplifiée et féconde d'un grand nombre de problèmes, cette version incapable de rendre compte de l'existence – avérée – de fermions est d'ores et déjà exclue. Les supercordes vivent dans des espaces à 10 dimensions et présentent un spectre de bosons *et* de fermions. La supersymétrie est donc un élément important des théories de cordes réalistes. Dans toutes les théories de cordes, le graviton apparaît comme un mode de vibration des cordes fermées. En théorie(s) des cordes, la gravité est *inévitabile*.

Au milieu des années 1980, on connaissait cinq théories de supercordes décadiimensionnelles. De plus, une nouvelle variante fut découverte en prenant la limite à fort couplage de l'une des théories des cordes : la théorie-M⁹². Il est probable que ce modèle « englobe », dans une certaine mesure, les cinq théories de supercordes à cause de leurs relations de dualité.

Bien qu'unifiant toutes les forces et interactions, éventuellement unique dans ses concepts, la théorie des cordes n'est, techniquement, qu'une mécanique quantique des cordes relativistes.

Il faut rappeler qu'à l'heure actuelle il n'existe *pas* d'indication expérimentale convaincante en faveur de la théorie des cordes. Une prédiction forte et générique des théories

⁹¹ L'absence de paramètre ajustable sans dimension signifie que la théorie ne peut pas être déformée continûment par variation de ce paramètre. Mais cela ne s'oppose pas à l'existence d'un grand nombre de théorie de cordes.

⁹² Plus personne ne connaît l'origine de ce terme : théorie-Mère, Méta-théorie, théorie-Magique, théorie-Mystère, théorie-Maitresse, théorie-Matrice, théorie-Membranes, théorie-Mystique ?

de cordes réaliste est évidemment liée à l'existence de dimensions supplémentaires. Est-ce testable ? Si la taille des dimensions supplémentaires est effectivement voisine de l'échelle de Planck (10^{-33} cm), il est probable que ces dimensions demeurent éternellement cachées (la matière a été aujourd'hui sondée, dans les accélérateurs de particules, à des distances minimales de l'ordre de 10^{-16} cm). Heureusement, dans certains scénarios, la taille des dimensions supplémentaires peut être beaucoup plus importante. Dans ce cas, l'échelle de Planck fondamentale est nettement plus basse et pourrait se signer dans les futures expériences auprès des accélérateurs de particules⁹³.

De plus, si l'on commence avec une théorie de cordes à dix dimensions et que l'on compactifie les six dimensions supplémentaires, la théorie résultante à quatre dimensions doit être supersymétrique. La supersymétrie est donc une prédiction générique des théories de cordes et sa découverte plaiderait en leur faveur.

En théorie des cordes, les conditions aux limites sont fondamentales. Si les plus évidentes sont celles de Neumann (cordes entièrement libres), il est parfois nécessaire de recourir à des conditions de Dirichlet (cordes « attachées » aux extrémités). On peut aussi imposer des conditions mixtes avec D conditions de Dirichlet et $9-D$ conditions de Neumann⁹⁴. Une telle configuration se nomme une D-brane. Le point clé vient de ce que ces D-branes ne sont pas invariantes de Lorentz. Si on les considère comme une part du formalisme lui-même, c'est évidemment un problème majeur. Mais si on les considère plutôt comme des « particules » (qui sont des phénomènes contingents et donc non astreints aux symétries fondamentales de la théorie), l'incohérence disparaît d'elle-même. Les D-branes sont donc, en théorie des cordes, des objets bien physiques et réels. Or, précisément, le modèle standard semble pouvoir émerger comme lié aux modes de vibration les plus bas des cordes ouvertes achevées en D-branes.

Certains théoriciens des cordes considèrent que ce modèle a déjà fait une prédiction majeure et vérifiée : il prédit la gravité ! C'est évidemment un brin provocateur puisque la force gravitationnelle est la plus anciennement connue. Mais il faut reconnaître que la gravité n'est pas ajoutée « à la main » en théorie des cordes. Aucune des vibrations des cordes relativistes classiques ne correspond au graviton. Il est donc assez remarquable de le voir apparaître naturellement dans le spectre quantique des cordes relativistes.

⁹³ A. BARRAU *et alii*, « Gauss-Bonnet black holes at the LHC : beyond the dimensionality of space », Phys. Lett. B 584 p114, 2004

⁹⁴ Il ne s'agit ici que des dimensions spatiales (sans le temps), c'est pourquoi on écrit 9-D et non 10-D.

La théorie des cordes permet également une percée spectaculaire dans le domaine de la thermodynamique des trous noirs. L'entropie de Bekestein-Hawking associée aux trous noirs est en effet l'un des concepts les plus importants et les plus délicats de la physique théorique contemporaine. Bien que nécessaire à une description thermodynamique globale cohérente de l'Univers, cette entropie – paradoxale puisque associée aux objets les plus simples de la physique⁹⁵ – résistait à toute description microscopique. En considérant la variation adiabatique de certaines constantes, il est possible de calculer l'entropie des trous noirs extrémaux. À partir de l'assemblage de D-branes et de cordes, il devient possible de *compter* les états d'un trou noir et de retrouver la prédiction macroscopique. Ce résultat est l'un des grands succès de la théorie des cordes.

La théorie des cordes s'est fondamentalement construite autour de trois révolutions. La première est celle de la supersymétrie. Cette symétrie qui lie fermions et bosons est indispensable dans le cadre des cordes et donne une crédibilité et une élégance certaine au corpus. La seconde est celle de la dualité, ou plutôt des dualités. Elle est sans doute plus importante encore. La dualité est – en l'occurrence – une transformation qui lie une théorie de cordes à une autre de façon qu'en déformant la première, la seconde puisse émerger. Ce qui revient à dire que deux théories duales sont simplement deux mathématiques du même réel. La dualité T relie les grandes distances aux petites distances tandis que la dualité S relie les forts couplages aux faibles couplages. Les cinq théories de cordes semblent liées par ces relations de dualité, ce qui confirme l'idée d'une unique théorie sous-jacente. Dans la lignée de ces travaux, Maldacena a supposé une relation fondamentale entre la théorie des cordes et une théorie de jauge (nommée supersymétrique Yang-Mills N=4). Cette conjecture – dite AdS/CFT⁹⁶ – est d'une portée immense mais reste à prouver rigoureusement. La troisième révolution a trait au « paysage » des cordes, objet du prochain chapitre et intimement liée aux multivers.

Au niveau plus profondément conceptuel, une grande élégance de la théorie des cordes vient de ce que la loi du mouvement y dicte sa volonté aux lois des forces. Généralement, en physique, le mouvement des particules et les forces fondamentales sont des notions sans lien,

⁹⁵ Les trous noirs sont entièrement décrits par deux paramètres (trois dans certains cas particuliers) : il sont à ce titre les astres – et même les objets physiques – les plus simples de l'Univers. Il est donc étonnant qu'ils possèdent l'entropie la plus grande possible pour une aire donnée d'espace.

⁹⁶ Il s'agit d'une réalisation « concrète » du principe holographique dont les conséquences sont déterminantes en physique des trous noirs et théorie de l'information.

le mouvement correspondant justement à la dynamique en l'absence de force. En théorie des cordes, la situation est très différente parce que les forces ont la même origine que les particules : elles proviennent de la cassure et de l'union des cordes. Une fois le mouvement libre des cordes décrit, il ne reste qu'à ajouter la possibilité pour une corde de se casser en deux pour rendre compte des forces. La loi qui régit la cassure et l'union des cordes subit des contraintes fortes afin d'être compatible avec la relativité restreinte et la théorie quantique. Les forces et le mouvement sont unifiés d'une manière qui serait totalement inimaginable dans une théorie des particules ponctuelles.

Face à cette situation exceptionnellement riche, les critiques ne manquent pas. Lee Smolin propose, dans un ouvrage provocateur et érudit⁹⁷, une double remise en cause de la théorie des cordes. D'abord sur le plan épistémique. La théorie des cordes n'entre pas dans la définition poppérienne de la science : elle est incapable de produire une prédiction falsifiable à échelle de temps raisonnable⁹⁸. Elle n'a en rien enrichi notre capacité à prévoir les phénomènes, elle rompt le lien pluriséculaire qui unit les modèles au Monde. De plus, elle omet la leçon fondamentale d'Einstein : l'indépendance par rapport au fond. La relativité générale impose, c'est le point clé de tout l'édifice, d'écrire les lois physiques d'une manière qui ne dépende pas explicitement de la métrique de fond. Or, justement, la théorie des cordes ne respecte pas cette prescription. Elle permet en effet de retrouver la relativité générale (à un champ scalaire additionnel près) à basse énergie mais ceci s'obtient au prix d'une inélégance fondamentale qui laisse perplexe sur la possibilité qu'il s'agisse d'une théorie réellement ultime.

Ensuite, sur le plan sociologique. La quasi-totalité des postes de professeur en physique théorique fondamentale dans les plus grandes universités du monde est accordée à des « cordistes ». Cette mainmise de la théorie des cordes sur la pensée scientifique, en particulier dans le monde anglo-saxon, n'est pas sans rappeler la situation de la philosophie analytique (telle que légitimée, par exemple, par Arthur Danto et beaucoup d'autres) il y a quelques années ou quelques décennies. Bien que la théorie elle-même ne soit pas à incriminer de cet état de fait, il est probable que la situation actuelle ne favorise pas l'émergence d'idées nouvelles. Les cordes sont devenues un « passage obligé » pour les physiciens ambitionnant

⁹⁷ L. SMOLIN, *Rien ne va plus en physique ! L'échec de la théorie des cordes.*, traduit de l'anglais par A. Grinbaum, Paris, Dunod, 2007 (1^{er} édition anglaise 2006)

⁹⁸ Quelques versions de théories de cordes peuvent mener à des prédictions testables. Elles sont toutes en désaccord avec le monde observé. Il est d'ailleurs frappant que le plus forte conséquence des cordes, un espace à 10 dimensions, n'ait pas conduit les physiciens à abandonner cette voie !

une certaine respectabilité dans leur communauté, au prix de contorsions parfois très artéfactuelles.

Reste que la théorie des cordes – avec ses défauts et lacunes – demeure le meilleur candidat actuel à une description globale de la physique, y compris la gravitation quantique. Elle fournit une unification « automatique » et « gratuite » de toutes les particules élémentaires et de toutes les forces. Elle fournit « automatiquement » les champs de jauge, émergeant naturellement des vibrations des cordes ouvertes. Elle fournit « automatiquement » les gravitons qui proviennent des vibrations des cordes fermées. Elle unifie bosons et fermions, permettant de lier les forces et les particules. Enfin, elle permet de penser dans un même corpus les lois du mouvement et celles des interactions.

Le paysage des cordes : première approche du multivers

La vision du monde que partage la plupart des physiciens est fondée sur l'idée que les lois de la Nature, décrites par un certain lagrangien, peuvent complètement déterminer le vide⁹⁹, les spectres des particules élémentaires, les forces et les symétries. Les très féconds modèles de l'électrodynamique quantique et de la chromodynamique quantique suggèrent un monde avec peu de paramètres et un unique état fondamental. Beaucoup de théoriciens des cordes adoptèrent initialement cette vision. Il fut ainsi espéré qu'émerge une unique théorie des cordes permettant de déterminer les paramètres libres du modèle standard. Quand il apparut que cela n'était pas le cas, on crut qu'il y avait exactement cinq théories des cordes, répondant aux noms peu avenants de Type-I, Type-IIA, Type-IIB, Hétérotique-E8 et Hétérotique-SO32. Ce qui se révéla également inexact. C'est aujourd'hui un véritable *continuum* de théories interpolant entre les cinq versions et la Théorie-M qui se révèle. Le langage des cordistes s'est transformé avec l'objet étudié. On ne parle plus de différentes théories mais plutôt de différentes solutions d'une méta-théorie. La théorie des cordes, le Graal annoncé de la physique fondamentale, le modèle ultime, la Nature révélée dans ses

⁹⁹ En théorie quantique des champs le vide n'est pas une structure triviale. Il représente l'état fondamental de l'espace de Hilbert.

secrets les plus intimes, devient, elle aussi, un simple *phénomène* émergent d'un cadre plus large.

L'ensemble de ces théories forme l'« espace-module des vides supersymétriques »¹⁰⁰, généralement nommé l'« espace des supermodules ». Un déplacement dans cet espace équivaut à une variation de certains modules dynamiques comme, par exemple, les paramètres de taille et de forme de l'espace interne compacte dont la théorie des cordes a nécessairement besoin. Les modules ne sont pas des paramètres de la théorie mais plutôt des champs pouvant être régis par leurs propres équations du mouvement. À la limite des basses énergies, les modules apparaissent comme des champs scalaires. L'élégance de l'approche en termes d'espace des supermodules tient à ce qu'il n'y a plus qu'une seule théorie avec beaucoup de solutions caractérisées par des valeurs des champs de modules scalaires. La cohérence mathématique est frappante bien que la structure fine de cet espace demeure inconnue : le « paysage » reste à explorer¹⁰¹.

Le *continuum* des solutions dans l'espace des supermodules conduit inévitablement à des mondes supersymétriques avec une dégénérescence exacte des super-particules et une constante cosmologique strictement nulle¹⁰². De plus, y existent nécessairement des scalaires sans masse (les modules eux-mêmes). Toutes ces prédictions sont en opposition flagrante avec ce qui est aujourd'hui expérimentalement observé. Aucun de ces vides ne peut être le nôtre. Il doit exister des îles de théories différentes, au-delà des côtes de l'espace des supermodules¹⁰³. L'espoir de certains théoriciens des cordes consiste à supposer qu'il n'existe qu'un petit nombre d'îlots non supersymétriques afin que la physique associée soit approximativement unique. Ce n'est pas impossible. Mais il est extrêmement plus probable et plus honnête de penser que ces îles sont incroyablement nombreuses, se comptant non pas en millions ou milliards mais en 10^{100} ou 10^{1000} . Ce point de vue est motivé par deux faits importants.

Le premier est observationnel : notre Univers est en expansion accélérée. Cela s'explique simplement par une valeur faible mais non nulle de la constante cosmologique. Il

¹⁰⁰ L. SUSSKIND, « The anthropic landscape of string theory » pp 247-266 in B. CARR (éd.) *Universe or Multiverse*, *op. cit.*

¹⁰¹ On peut lire à ce propos L. SUSSKIND, *Le Paysage Cosmique*, traduit de l'anglais par B. Arman, Paris, Robert Laffont, 2007, (1^{er} édition en anglais 2006)

¹⁰² Une théorie supersymétrique non brisée compense exactement l'énergie du vide associée aux champs usuels par celle associée à leurs super-partenaires. L'énergie de point zéro globale (associée à la constante cosmologique) est alors naturellement nulle.

¹⁰³ Cette image est due à L. Susskind.

est donc nécessaire de considérer des vides avec une énergie fondamentale non nulle. L'extrême petitesse de la constante cosmologique (ce qu'on nomme l'ajustement fin) rend hautement improbable l'existence d'un vide présentant les propriétés requises sauf s'il existe justement une quantité « astronomique » de vides non-supersymétriques munis de pratiquement toutes les valeurs imaginables. Le *paysage* de la théorie des cordes est précisément l'ensemble – vraisemblablement immense – de tous ces vides.

Le second fait est théorique et tient aux progrès récents réalisés dans l'étude du paysage. À la différence des bosons des Goldstone, les points dans l'espace des modules ne sont pas liés par une symétrie de la théorie. Génériquement, en théorie quantique des champs, changer la valeur d'un scalaire qui n'est pas un boson de Goldstone implique de changer l'énergie potentielle. Autrement dit, il existe un potentiel $V(\phi)$ non nul. Les minima locaux de V sont les vides. Si le minimum est absolu il s'agit d'un vide strictement stable, sinon il s'agit d'un vide métastable. Tout en gardant à l'esprit que cette approximation de basse énergie n'est pas *stricto sensu* valable dans tous les cas, on décrit donc la situation par une collection de champs scalaires (représentant les modules) et un potentiel. Rigoureusement, on appelle *paysage* l'espace de ces champs.

L'espace des supermodules est une zone particulière du paysage où le vide est supersymétrique et le potentiel strictement nul. Ces vides sont marginalement stables et peuvent être excités. La constante cosmologique y est égale à zéro. L'espace des supermodules est une plaine d'altitude nulle. Quand on s'éloigne de cette plaine, la supersymétrie est brisée et un potentiel non nul se développe, généralement via des processus perturbatifs. Autrement dit, par-delà la plaine, existent des collines et des vallées. Ces vallées (les minima locaux) sont les lieux particulièrement intéressants. Chacun des minima présente sa propre énergie du vide. On peut estimer que la différence de potentiel type entre deux minima voisins (et la hauteur de la barrière de potentiel) est de l'ordre de M_p^4 où M_p est la masse de Planck. Si donc un vide avec une constante cosmologique de $10^{-120} M_p^4$ (ce qui est aujourd'hui observé) est découvert, il sera statistiquement entouré de collines très hautes par rapport à lui.

Comme le rappelle Steven Weinberg¹⁰⁴, l'un des pères de la physique des particules dans sa version moderne, il y a essentiellement deux types de révolutions dans l'histoire des sciences. Les premières changent notre conception du monde. Les secondes, plus profondes

¹⁰⁴ S. WEINBERG, « Living in the multiverse », pp 29-42 in B. CARR (éd.) *Universe or Multiverse*, *op. cit.*

encore, changent notre conception de la science elle-même. Peut-être se trouve-t-on au seuil d'un de ces changements fondamentaux de paradigme. La dernière révolution « incontestée » du second type eut sans doute lieu en 1905 avec l'avènement de la relativité restreinte. Avec un brin de provocation, on peut considérer que les effets et la structure de la relativité restreinte ne sont pas radicalement novateurs : il ne s'agit que de passer d'un groupe d'espace-temps à dix paramètres (celui de Galilée) à un autre groupe d'espace-temps à dix paramètres (celui de Lorentz). Mais, jamais dans l'histoire, une théorie n'avait été *fondée* sur une symétrie. C'est là que la démarche d'Einstein fut singulièrement innovante : en imposant que toutes les lois physiques (et non pas la seule vitesse de la lumière) soient invariantes par changement de référentiel d'inertie, il posait un *principe* de symétrie. C'est cette idée, plus que toute autre, qui a conduit au fabuleux essor de la physique des particules au XXème siècle. Le modèle standard des hautes énergies peut aujourd'hui être considéré comme résultant de quelques symétries de jauge associées aux conditions de cohérence de la mécanique quantique. Le développement du modèle standard, aussi spectaculaire fut-il, n'a demandé aucun changement profond de paradigme : en un sens assez « large » il n'est qu'une généralisation de l'électrodynamique quantique. De la même façon, la théorie des cordes se présente dans la continuité de cette démarche : il s'agit essentiellement d'inclure la gravité et de fonctionner par symétrie de jauge et conditions de cohérence.

Pourtant, il se pourrait que l'on se trouve à un point tournant de deuxième type : un changement radical de ce que l'on considère comme légitime pour une proposition scientifique pourrait voir le jour. Cette effervescence, sans doute sans précédent depuis des décennies, remonte à l'an 2000 lorsque Bousso et Polchinski¹⁰⁵ ont découvert l'étendue des solutions de la théorie des cordes. En travaillant sur les structures topologiques et les flux associés, ils ont montré la diversité des minima locaux des théories de cordes de type-II correspondant à des vides possibles pour des Univers métastables. Les travaux suivants de Giddings, Kachru, Kallosh, Linde, Maloney, Silverstein, Strominger et Treivedi ont établi l'existence de vides avec des énergies positives. Finalement, on doit à Ashok et Douglas¹⁰⁶ le dénombrement de ces vides à environ 10^{500} . Le terme de paysage employé pour décrire ces régions est emprunté à la biochimie et tant qu'aucune raison n'existe de considérer qu'un des vides est ontologiquement supérieur aux autres, il faut se résoudre à réinterpréter la physique comme la science du calcul des paramètres environnementaux. Il est bien clair que cette

¹⁰⁵ R. BOUSSO & J. POLCHINSKI, JHEP, 0006, p 6, 2000

¹⁰⁶ S.K. ASHOK & M. DOUGLAS, JHEP, 0401 p 60, 2004

structure en paysage renforce considérablement le raisonnement anthropique. Il lui confère même une dimension prédictive (en termes probabilistes).

4. Manières de faire des mondes – un multivers gigogne

Ce chapitre, à l'intitulé en forme de paraphrase du célèbre ouvrage de N. Goodman¹⁰⁷, constitue le cœur du mémoire en présentant une proposition structurée quant à l'architecture du multivers. Il se fonde sur une étude de Max Tegmark¹⁰⁸ qu'il généralise et infléchit suivant la mise en perspective ici adoptée.

Dans le modèle du Big-Bang, le plus loin qu'il soit possible d'observer correspond à la distance parcourue par la lumière pendant les 13.7 milliards d'années qui nous séparent du début de l'expansion cosmique. En tenant compte de ce que les objets se sont éloignés de nous depuis le moment où ils ont émis la lumière qui nous parvient aujourd'hui, on peut estimer que les sources les plus lointaines visibles, en principe, se situent à environ $4 \cdot 10^{26}$ m. Une sphère dont le rayon aurait cette longueur définit notre *horizon*¹⁰⁹. Le mot « Univers » a jusqu'alors été utilisé dans ce document dans un sens très large et parfois dépendant du contexte. À partir de maintenant, il convient d'être plus rigoureux et il réfèrera exclusivement à cette sphère, à l'Univers visible défini par notre horizon de particule, sauf mention explicite contraire.

On peut distinguer plusieurs niveaux d'univers parallèles (ou multivers, mégavers, métavers) présentant progressivement une plus grande diversité. Néanmoins, l'imbrication est complexe et la progression linéaire parfois évoquée dans les rares tentatives taxonomiques n'est pas exacte. Le niveau le plus élémentaire correspond à l'espace infini contenant une infinité de volumes de Hubble réalisant toutes les conditions initiales, en particulier une copie à l'identique de chacun des êtres de la Terre à une distance moyenne de $10^{10^{29}}$ mètres. Les lois de la physique sont les mêmes en tout point d'un tel multivers. À des niveaux supérieurs, le multivers est constitué de différentes régions de l'espace qui présentent des lois *effectives* différentes (constantes fondamentales, contenu en particules, etc.) tandis qu'une unique méta-

¹⁰⁷ N. GOODMAN, *Manières de Faire des Mondes*, traduit de l'anglais par M.-D. Popelard, Nîmes, Catherine Chambon, 1992 (1^{er} éd. ang. 1977)

¹⁰⁸ M. TEGMARK, « The multiverse hierarchy », pp 99-125 in B. CARR (éd.) *Universe or Multiverse*, *op. cit.*

¹⁰⁹ Ce concept est complexe en relativité générale et il existe plusieurs types d'horizons radicalement différents. La distinction n'est pas pertinente pour cette discussion.

théorie demeure. Ces zones sont les minima d'un « paysage » de possibilités. D'autres structures correspondent à différentes branches de la fonction d'onde quantique, telles que prédites par l'unitarité de la théorie, peuvent être considérées en parallèles. Au sommet de la pyramide, un certain « platonisme » physique autorise d'autres investigations vers un tissu de mondes plus diapré encore.

Il est utile de noter dès à présent que la question est moins de savoir s'il existe un multivers (puisque le modèle de concordance presque unanimement accepté en cosmologie le prévoit au niveau fondamental sans ambiguïté) que d'en comprendre la structure. Ce chapitre entend présenter en détails les différents niveaux, les raisons qui permettent d'en supposer l'existence, les éventuelles indications observationnelles et, surtout, quelques conséquences physiques et philosophiques. Les Univers parallèles ne sont *pas* une théorie mais une prédiction de certaines théories. Or, pour qu'une théorie soit falsifiable, il n'est pas nécessaire de pouvoir en observer *toutes* les prédictions. Quand bien même les Univers multiples seraient une prédiction non vérifiable (ce qui ne va pas de soi, comme nous le montrerons au prochain chapitre) ils pourraient présenter une véritable légitimité scientifique, au même titre que l'application des lois physiques à des situations qui sont en *droit* accessibles au corpus. Par exemple, les théories quantiques unitaires et la théorie de l'inflation ont induit beaucoup de prédictions vérifiées. Le fait qu'elles conduisent génériquement à l'existence d'univers parallèles mène donc inévitablement – fut-ce sans preuve explicite de cette prédiction particulière – à considérer l'hypothèse avec sérieux. L'histoire montre non seulement que le manque d'imagination a été plus préjudiciable aux sciences que l'excès d'idées audacieuses mais aussi que nos estimations de la taille de l'Univers (entendu ici comme le « tout ») n'a fait que croître avec le temps. La réflexion sur le multivers est un acte d'humilité intellectuelle : le monde est sans doute plus vaste et plus complexe, plus imprévisible et plus bigarré, que ce que notre compréhension *hic et nunc* veut bien laisser entendre. Sans doute y a-t-il un risque à spéculer sur des lois qui nous échappent (ce que, pourtant, nous nous permettrons dans certains des paragraphes qui suivent) mais il y aurait, de façon plus choquante encore, un évident obscurantisme à dénier aux univers parallèles un statut de dignité gnoséologique quand il sont prédits par les théories même que nous utilisons dans le quotidien de nos pratiques !

Suivant la démarche de Tegmark (mais en considérant d'autres instanciations), pour chaque type de multivers seront posées les questions de :

- sa légitimité épistémique
- sa structure et sa morphologie
- l'éventuelle falsifiabilité de l'hypothèse.

Niveau aI

Si l'espace est infini et que la matière y est distribuée de façon suffisamment homogène à grande échelle, alors tous les événements possibles (compatibles avec les lois de la physique telles que nous les connaissons) doivent avoir lieu quelque part. En particulier, il doit y avoir une infinité d'autres planètes habitées, hébergeant une infinité de copies à l'identique de chacun d'entre nous. Toutes les histoires cosmiques envisageables dans le corpus ont effectivement lieu quelque part.

Bien que certaines conséquences de ces univers multiples, que nous qualifions de type aI (« a » parce que *classiques* dans leur origine et « I » parce que de moindre diversité), paraissent étranges, ce modèle est clairement aujourd'hui le plus simple, le plus évident et le plus couramment accepté chez les physiciens. Pourtant, ce multivers de niveau aI a toujours suscité une évidente controverse. Fondamentalement, il constitue l'idée hérétique pour laquelle Giordano Bruno a péri par les flammes en l'an 1600.

L'idée d'un espace infini est robuste. Elle remonte à Lucrèce avec l'argument du « trait » jeté qui ne saurait se briser contre le bord de l'Univers. Et quand bien même ce bord existerait, cela signifierait qu'il existe un au-delà de la frontière. L'argument peut se reproduire à l'infini et l'espace ne saurait donc être borné. Dans un langage contemporain, il suffit de remarquer que les objets au-delà de l'horizon cosmologique ont le même statut que les navires au-delà de l'horizon terrestre : ils sont aussi réels et ne souffrent d'aucune « carence » ontologique. Comment l'espace pourrait-il ne pas être infini ? S'il s'achevait, qu'y aurait-il derrière ? Bien sûr, l'avènement des géométries riemanniennes oblige à prendre une certaine distance par rapport à cet argument simpliste : une sphère par exemple, en tant qu'objet à deux dimensions, présente une surface finie sans pour autant qu'il soit possible de définir un bord. Au-delà, des topologies non-triviales (la relativité générale ne fixe que la géométrie locale) peuvent également permettre d'outrepasser cette remarque. Toujours est-il que l'espace infini constitue l'hypothèse la plus « évidente » sur la structure globale du

monde. D'un point de vue plus observationnel, l'ajustement des données obtenues récemment sur le fond diffus cosmologique favorise les modèles d'espace infini. De plus, un tel espace est une prédiction générique du modèle inflationnaire qui est aujourd'hui au cœur des cosmologies physiques.

Pour que ce multivers et toutes les réalisations effectives des événements envisageables fonctionnent, encore faut-il que la matière emplisse de façon relativement homogène l'espace infini. Il se pourrait que notre volume de Hubble constitue un îlot singulier au sein d'un désert de vide. Des agencements fractals plus complexes peuvent conduire à cette même conclusion. Pourtant, les observations de la répartition des galaxies dans le ciel profond ne montrent aucune structure cohérente au-delà de 10^{24} m. Les grandes échelles sont extraordinairement homogènes. Il n'est pas *stricto sensu* possible d'exclure un espace vide au-delà de l'horizon de Hubble. Mais étant donné que celui-ci n'a aucun statut intrinsèque privilégié (il dépend de *notre* position en tant que limite de ce qui *nous* est accessible), tout porte à croire que le contenu suit l'homogénéité du contenant.

Notre description physique du monde se fonde en grande partie (ce que les multivers de niveaux plus élevés remettent d'ailleurs partiellement en cause) sur une disjonction des conditions initiales – supposées contingentes – et des lois – supposées nécessaires¹¹⁰. Les habitants des autres Univers (c'est-à-dire des autres volumes de Hubble) du niveau αI voient les mêmes lois que nous mais elles conduisent à une évolution éventuellement autre liée à des conditions initiales différentes. La théorie aujourd'hui favorisée consiste à supposer que ces conditions initiales ont été générées par des fluctuations quantiques durant l'inflation. Cela produit des fluctuations essentiellement aléatoires conduisant à des densités décrites par un champ stochastique ergodique. Ce qui signifie que si l'on considère un ensemble d'univers, chacun avec ses propres conditions initiales, la distribution de probabilités des réalisations d'un événement dans un certain volume est identique à la distribution obtenue en échantillonnant les différents univers. Autrement dit, tout ce qui aurait pu, en principe, se produire ici s'est effectivement produit quelque part. Bien que très proche dans sa formulation de l'Univers pluraliste de David Lewis, sur lequel nous reviendrons, la proposition est ici bien différente : il s'agit, à ce niveau, d'univers *spatialement* séparés du nôtre.

¹¹⁰ L'habitude que nous avons de ce fonctionnement nous en fait parfois oublier le caractère très troublant de cette évidence : la science de Nature admet ici dans sa construction même qu'elle ne peut *rien* prévoir sans recours à des conditions qui lui sont *extérieures*.

L'inflation génère toutes les conditions initiales possibles avec une probabilité non nulle, la configuration la plus probable étant un très faible contraste de densité, de l'ordre de 10^{-5} . Ces fluctuations sont ensuite amplifiées par la gravitation et forment des amas, des galaxies, des étoiles et des planètes. Cela signifie que toutes les configurations possibles de matière doivent avoir lieu dans certains volumes de Hubble et que l'on peut supposer notre propre volume comme étant relativement typique (au moins sous condition anthropique). Des calculs simples d'ordres de grandeur laissent penser que l'on peut trouver une copie à l'identique de soi-même à une distance moyenne d'environ $10^{10^{29}}$ m, une copie à l'identique d'une sphère de cent années lumières de diamètre centrées sur la Terre à environ $10^{10^{91}}$ m (nos copies dans cette sphère auront donc exactement les mêmes histoires que nous pendant au moins cent années) et une copie de notre volume de Hubble – ce que l'on nomme ici notre Univers – à environ $10^{10^{115}}$ m. Ces nombres sont colossaux mais ils sont finis, ils correspondent donc à des distances effectivement réalisées dans un multivers infini.

Un point très curieux s'ensuit au niveau épistémologique quant à la possibilité même d'une description strictement causale. Il existe, dans ce cadre, une infinité d'autres « moi-même » vivant dans des volumes de Hubble strictement identiques (c'est-à-dire ayant eu des histoires scrupuleusement similaires). Il est clair que ces instanciations étant par essence indiscernables, il est impossible de déterminer laquelle « je » suis effectivement, même en accédant à une (impossible) vision globale. Or, ces entités présentant exactement le même passé n'auront pas le même futur : les volumes de Hubble sont en constante expansion et des modes physiques différents entrent dans les différents horizons, induisant des évolutions différentes pour ces copies, même sans tenir compte des aléas quantiques. La situation est étonnamment paradoxale : même une connaissance globale parfaite du multivers et une acceptation scrupuleuse de la causalité mécaniste classique ne permettent plus de prévoir l'évolution future d'un système pour la simple raison qu'il est impossible, à partir de son passé, de le distinguer des autres copies identiques.

Au-delà de cette étonnante remarque, les prédictions « multiverselles » sont-elles testables ? Il faut insister sur ce que, même au sens restreint de Popper, il n'est pas nécessaire que toutes les prédictions d'une théorie soient vérifiables pour que celle-ci soit falsifiable et prétende donc à la légitimité scientifique. Un modèle qui proposerait, par exemple, l'existence de 26 dimensions, dont 24 inobservables, toutes compactes à l'échelle de Planck, est exclu.

En fait, l'hypothèse du multivers de niveau aI est déjà implicitement communément utilisée pour exclure des théories en cosmologie contemporaine. Par exemple, on utilise la taille des points chauds et des points froids dans le fond diffus cosmologique pour réfuter des modèles d'Univers. Mais ces tailles fluctuent évidemment d'un volume de Hubble à l'autre. Quand il est conclu qu'un Univers d'un certain type est exclu à un niveau de confiance de 99.9%, cela signifie que moins d'un volume de Hubble sur mille présente des tailles de fluctuations telles qu'observées dans le cadre de ce type d'Univers. On en conclut, avec cette significativité statistique, que ce type d'Univers est exclu même si l'on observe uniquement notre propre volume de Hubble. Fondamentalement, les modèles induisant des univers parallèles sont testables au sens usuel si l'on peut définir une *mesure* sur le multivers. C'est un aspect essentiel qui sera développé ultérieurement plus en détails.

Niveau aII

Supposons que tous les univers de niveau I se trouvent dans une bulle¹¹¹. Supposons qu'il existe de nombreuses bulles – contenant chacune un multivers infini de niveau I – présentant des lois physiques effectives différentes. Les variations entre les bulles¹¹² peuvent être très importantes et concerner par exemple les constantes fondamentales ou la dimensionnalité de l'espace-temps. Ce schème correspond au multivers de niveau II, prédit par la plupart des scénarii inflationnaires. Les bulles sont si éloignées les unes des autres qu'un observateur voyageant à la vitesse de la lumière pendant un temps infini ne pourrait en atteindre aucune autre. La raison pour cela tient à ce que l'espace entre les multivers de type I continue d'inflater, ce qui crée de l'espace plus vite qu'il n'est possible de se déplacer sur celui-ci. Au contraire, il est en principe possible d'accéder à temps fini à n'importe quel autre univers du multivers de niveau I si l'expansion cosmique n'accélère pas.

L'inflation est entrée dans la théorie standard du Big-Bang. Cette expansion rapide du facteur d'échelle de l'Univers, prédite par une large classe de modèles de physique des

¹¹¹ Curieusement, un multivers *infini* de niveau I peut se trouver dans une bulle de volume *fini*. Bucher et Spergel ont montré que cela est dû à ce que les directions spatiales de l'espace-temps se courbent vers la direction temporelle (infinie).

¹¹² Chaque bulle enferme donc elle-même une infinité d'univers multiples de niveau I présentant tous les mêmes lois physiques mais des réalisations différentes.

particules, permet d'apporter des réponses (non nécessairement ultimes) aux questions fondamentales suivantes :

- pourquoi n'observe-t-on pas de monopoles magnétiques qui devraient induire une masse de l'Univers environ quinze ordres de grandeur supérieure à celle observée ?
- pourquoi l'espace est-il si plat (euclidien) alors que l'échelle naturelle de courbure est plus élevée d'environ soixante ordres de grandeurs¹¹³ à celle observée ?
- pourquoi l'Univers est-il si grand ? Dans le modèle de Big-Bang le plus simple, avec un Univers dont la densité initiale est à l'échelle de Planck, on attendrait environ une dizaine de particules aujourd'hui dans le rayon de Hubble et non pas 10^{88} comme on l'observe.
- pourquoi toutes les zones d'Univers décorrelées ont-elles commencé leur expansion en même temps ? Comment la synchronisation s'est-elle opérée ?
- pourquoi l'Univers est-il si homogène à grande échelle ?

Dans le paradigme inflationnaire, l'essentiel de l'espace¹¹⁴ continuera à s'étendre éternellement, mais des régions sortent de ce processus et forment des bulles distinctes. Les bulles peuvent émerger en nombre infini, chacune contenant un multivers infini de niveau I.

Il est aujourd'hui essentiellement admis que la physique que l'on observe est vraisemblablement la limite à basse énergie d'une théorie fondamentale qui se manifeste à très haute énergie. Cette théorie pourrait, par exemple, être décadiimensionnelle, supersymétrique et permettre la grande unification des quatre forces connues. Une propriété générique de ces théories est que l'énergie potentielle du champ permettant l'inflation a beaucoup de minima différents (les vides métastables) correspondant aux différentes lois effectives de notre monde de basse énergie. Le nombre de dimensions compactifiées pourrait être de six, conduisant à l'espace-temps quadridimensionnel usuel, ou, par exemple, de cinq, conduisant à un espace-temps pentadimensionnel. Les fluctuations quantiques durant l'inflation peuvent ainsi engendrer différentes bulles post-inflationnaires dans le multivers de

¹¹³ Ce chiffre est simplement obtenu en faisant le rapport du rayon de Hubble à la longueur de Planck.

¹¹⁴ Il est clair qu'une notion telle que « l'essentiel de l'espace » n'est *pas* rigoureusement mathématiquement définie. Elle est ici à considérer au sens intuitif des termes. Cette difficulté, liée au problème de la mesure et à la définition des probabilités anthropiques et cosmologiques dans le multivers, sera abordée ultérieurement dans ce document.

niveau II conduisant à des lois différentes, des dimensionnalités différentes et des spectres de particules différents.

En plus de ces propriétés discrètes, notre Univers est caractérisé par un ensemble de constantes physiques sans dimension, par exemple le rapport de masse proton/électron ou la constante cosmologique (qui n'est pas strictement parlant dénuée d'unité mais s'exprime naturellement comme un rapport à la densité de Planck et vaut alors 10^{-123}). Dans un certain nombre de modèles inflationnaires ces paramètres peuvent également varier d'une bulle à l'autre. Bien que la loi ultime de la physique soit supposée identique partout dans le multivers de niveau II, les équations effectives peuvent varier considérablement d'une bulle à l'autre. Par exemple, passer de trois à quatre dimensions d'espace non compactes change la dépendance fonctionnelle des lois gravitationnelles et électromagnétiques suivant la distance. De même, différentes effectuations d'une brisure spontanée de symétrie conduiront à différentes équations pour la dynamique des particules élémentaires. Le multivers de niveau II est donc, selon toute vraisemblance, plus riche et diversifié que celui de premier niveau.

Cette voie de recherche est actuellement extrêmement active. En théorie des cordes, le « paysage » a sans doute environ 10^{500} minima différents, ce qui peut constituer (mais ce n'est qu'une possibilité parmi d'autres) une réalisation effective du multivers de niveau II. On peut distinguer plusieurs sous-niveaux de diversité décroissante au sein du niveau II :

- différentes façons de compactifier l'espace, conduisant à la fois à des dimensionnalités et à des symétries différentes.
- différents flux (la généralisation des champs magnétiques) qui stabilisent les dimensions supplémentaires. C'est ici que le plus grand nombre de choix est possible.
- lorsque les deux choix précédents auront été faits, demeureront beaucoup de possibilités relatives aux minima des potentiels effectifs de supergravité.
- enfin, les mêmes minima et lois effectives de la physique peuvent se réaliser dans différentes bulles, chacune contenant un multivers de niveau I.

Il est également intéressant de noter que le modèle cyclique de Steinhardt et Turok¹¹⁵, dans lequel le multivers de niveau I subit une série infinie de Big-Bangs conduit également à un monde multiple dont la diversité avoisine celle du niveau II. Enfin, si le multivers de niveau II peut exister en éternelle reproduction dans une structure fractale, il peut en exister une infinité d'autres, absolument déconnectés. Bien que

¹¹⁵ P. STEINHARDT & N. TUROK, « A cyclic model of the Universe », Science, 296, p1436, 2002

cette variante soit tout à fait viable, elle ne change pas la forme « minimale » du niveau II et ne change qualitativement rien à l'image globale.

Il est clair que ce multivers de niveau 2 est la structure qui crédibilise le raisonnement anthropique. Pour ce qui est des *phénomènes*, on peut expliquer les coïncidences au niveau de notre Univers ou du multivers de niveau I. Par exemple, la vie telle qu'on la connaît ne peut exister qu'au voisinage d'une étoile dont la masse est comprise entre 1.6×10^{30} kg et 2.4×10^{30} kg. Celle du Soleil est justement de 2.0×10^{30} kg. Ici, la diversité de notre propre Univers est suffisante : il s'agit d'un simple effet de sélection qui rappelle cette évidence que notre étoile est plus hospitalière qu'une super-géante rouge ! Pour comprendre l'homogénéité du fond diffus cosmologique, il faut recourir à la diversité du multivers de niveau I : toutes les conditions initiales se réalisant, certaines sont compatibles avec nos observations.

En revanche, pour rendre compte de l'ajustement des *lois* effectives, le multivers de niveau II est requis. Si le proton était plus lourd de 0.2%, il serait instable et déstabiliserait les atomes. Si l'interaction faible était plus faible l'hydrogène n'existerait pas ; si elle était plus forte les supernovae ne pourraient pas enrichir le milieu interstellaire avec des éléments lourds. Si la constante cosmologique était plus élevée, l'Univers aurait « explosé » avant de former les galaxies. Les valeurs « ajustées » de ces constantes s'expliquent naturellement par un effet de sélection au sein du multivers de niveau II.

Ce multivers conduit génériquement à une structure arborescente d'inflation éternelle. Ceci apparaît clairement quand on considère un champ scalaire d'inflaton supposé quasi-constant sur plusieurs régions d'une surface de type espace (cette situation se réalise nécessairement dans un Univers infini). Ce champ exhibe des fluctuations quantiques. Dans la moitié des régions, les fluctuations augmentent la valeur du champ tandis que dans l'autre moitié elles la diminuent. Dans la première moitié, l'énergie supplémentaire engendre une expansion de l'Univers plus rapide que dans celle où le champ a fluctué vers le bas. Au bout d'un certain temps, il y aura donc d'avantage de régions présentant une fluctuation vers le haut (puisque celles-ci croissent plus vite que les autres). La valeur moyenne du champ croit ainsi avec le temps et il y aura toujours des régions où le champ est haut, même si l'évolution spontanée de celui-ci le conduit à rouler vers le fond du potentiel. D'où l'image d'une inflation globalement éternelle au sein de laquelle les régions qui subissent une fluctuation basse sortent du mécanisme d'expansion exponentielle et se « stabilisent ». Il existe ainsi un

nombre infini de régions extraites de l'inflation au sein d'un méta-univers en inflation globale éternelle¹¹⁶. Au-delà de son infinitude spatiale et de la diversité des lois engendrées, ce multivers est aussi particulièrement intéressant pour son atemporalité. Il n'y a plus d'origine absolue du temps : chaque Big-Bang dans une des bulles n'est qu'un épiphénomène au sein de l'Univers-arbre.

Niveau aII'

Il existe une alternative au multivers inflationnaire de niveau II. Celle-ci se fonde sur les rebonds quantiques au cœur des trous noirs¹¹⁷. Il est aujourd'hui admis que les étoiles à neutrons ne sont pas stables au-delà d'environ 2 masses solaires. Cette limite dépassée, des trous noirs se forment. Selon le théorème de Penrose, une singularité doit nécessairement apparaître, au niveau de laquelle la courbure devient infinie et l'espace-temps s'achève. Aucune trajectoire ne peut « dépasser » la singularité.

Néanmoins cette conclusion peut être modifiée lorsqu'il est tenu compte des effets quantiques. Avant que la singularité soit atteinte, les densités et courbures atteignent les valeurs de Planck et la dynamique correcte ne peut être décrite que par une théorie quantique de la gravitation. Dès les années 1960, les pionniers du domaine tels John Wheeler et Bryce deWitt ont émis la conjecture que les effets de gravité quantique devraient renverser l'effondrement et engendrer une expansion. Le temps, alors, ne s'achèverait pas et il existerait une région dans le futur de ce qui aurait été une singularité. Il en résulte une nouvelle région d'espace-temps en expansion qui peut être assimilée à un Univers. L'horizon du trou noir est toujours présent, ce qui signifie qu'aucun signal provenant de la nouvelle région en expansion ne peut atteindre la région « mère » où l'effondrement a eu lieu.

La transition entre l'effondrement et l'expansion se nomme un rebond. On peut, dans ce modèle, supposer que notre propre Big-Bang est un rebond dans un Univers hôte qui et que chaque trou noir dans notre Univers génère un processus identique.

¹¹⁶ Ce modèle, bien que populaire chez les physiciens, ne fait pas l'unanimité. En particulier, S. Hawking, considère qu'il n'est pas viable parce que non invariant de jauge, parce qu'il n'est pas covariant et parce qu'il est inconsistant. Ce point de vue est assez marginal mais ne saurait être ignoré.

¹¹⁷ L. SMOLIN, « Scientific alternative to the anthropic principle » pp.323-366, in B. CARR (éd.) *Universe or Multiverse*, Cambridge, Cambridge University Press, 2007

La conjecture selon laquelle les singularités de la relativité générale sont remplacées par des rebonds en gravité quantique a été confirmée par beaucoup d'investigations semi-classiques. Elle est aussi suggérée par certaines études en théorie des cordes. Tous les calculs qu'il est possible de mener de manière exacte (et non plus seulement de manière perturbative) confirment l'existence de rebonds. Fondamentalement, cela signifie que notre Big-Bang ne saurait être l'origine des temps et que « quelque chose » doit avoir existé au préalable¹¹⁸.

Il est pertinent de comparer ce multivers II' au multivers inflationnaire II quant à la fiabilité scientifique des arguments.

Le premier point concerne la vraisemblance du mécanisme de formation d'univers. On sait de façon quasi-certaine que notre Univers contient des trous noirs. Nous avons la « preuve » que beaucoup de galaxies comptent un trou noir supermassif en leur centre. Par ailleurs, les étoiles massives en fin de vie doivent également former des trous noirs. Des observations récentes viennent corroborer cette prédiction. Des trous noirs primordiaux ont également pu se former directement à partir des fluctuations de densité dans les premiers instants de l'Univers¹¹⁹. On peut en déduire une limite inférieure raisonnable d'au moins 10^{18} trous noirs dans notre Univers. C'est un argument fort en faveur de cette hypothèse II' dans la mesure où l'on peut considérer que l'existence de trous noirs est nettement plus avérée que celle d'une phase inflationnaire à l'issue du Big-Bang. De plus, on possède de sérieuses indications théoriques – à défaut d'éléments observationnels – en faveur de rebonds au cœur des trous noirs.

Même s'il est impossible de franchir l'horizon d'un trou noir et de revenir dans l'Univers parent, l'existence de trous noirs pourrait, en principe, être observée avec certitude. En revanche, la formation d'autres univers lors d'un processus d'inflation éternelle ne peut être observé, quelle que soit l'ingéniosité mise en œuvre, puisque l'événement se déroule hors de notre horizon passé. Ce processus dépend donc entièrement de la confiance que l'on peut

¹¹⁸ Il est intéressant de remarquer que les théories quantiques de la gravitation permettent d'outrepasser la réponse décevante que la relativité générale impose à la question « qu'y avait-il avant le Big-Bang ? ». La théorie d'Einstein considère qu'avant l'espace il ne saurait y avoir de temps et que l'interrogation est donc dépourvue de sens. Comme s'il s'agissait de rechercher le Nord ou pôle Nord. Pourtant, les investigations quantiques permettent d'aller au-delà de cette pauvre réponse et de considérer un « pré Big-Bang » selon l'expression de G. Veneziano. La propriété fondamentale utilisée pour cela est la dualité de la théorie des cordes. Un Univers $1/R$ fois plus petit que l'échelle de Planck est énergétiquement équivalent à un Univers R fois plus grand. En remontant le temps par-delà le Big-Bang, c'est donc un Univers plus froid et plus proche de son état actuel qui apparaîtrait. Le Big-Bang n'est plus considéré que comme un goulet d'étranglement.

¹¹⁹ Ces derniers sont nettement plus spéculatifs.

estimer raisonnable d'accorder à un modèle particulier d'inflation. Des progrès ont été récemment obtenus mais un certain nombre de calculs dans le paradigme inflationnaire se fondent sur des approches semi-classiques rudimentaires (en particulier pour ce qui concerne la fonction d'onde de l'Univers) sujettes à caution. Spécifiquement, les hypothèses nécessaires au développement d'une inflation éternelle n'ont pas encore été rigoureusement vérifiées. En ce sens, on peut considérer que le multivers de niveau II est plus spéculatif que celui de niveau II'. Ce dernier, moyennant l'hypothèse d'une valeur finie pour l'invariant de Riemann¹²⁰, peut être étudié en détails et il a été montré qu'un intérieur de type de Sitter (Univers en expansion) est effectivement possible au sein d'un trou noir¹²¹. La couche de transition autorise en effet un raccordement satisfaisant entre les deux métriques.

Le second point a trait à la physique impliquée dans le mécanisme de production d'univers et dans le nombre d'univers produits. L'échelle d'énergie à laquelle les univers de niveau II naissent en inflation éternelle est celle du potentiel du champ d'inflaton dans le régime où la nucléation des nouvelles zones inflationnaires prend naissance. Celle-ci se situe vraisemblablement au moins au niveau de l'échelle de grande unification ($\approx 10^{16}$ GeV) et peut-être à l'échelle de Planck. Il existe des théories (dont celle des cordes) qui permettent d'accéder conceptuellement à ces énergies mais peu d'indications expérimentales viennent les étayer. Au contraire, l'échelle d'énergie qui gouverne la formation des trous noirs est celle de la physique ordinaire et maîtrisée. Les processus qui président à l'évolution des étoiles et à l'explosion des supernovae sont relativement bien compris et, en tout état de cause, fondés sur de solides observations. La physique associée à la création de trous noirs-univers est donc, en un sens, mieux ancrée dans le corpus que celle du multivers inflationnaire. Demeure évidemment le mécanisme du rebond lui-même qui requiert également le recours à un certain nombre de spéculations.

Le troisième point est lié à la structure du multivers engendré. Un multivers formé par des rebonds de trous noirs s'apparente à un arbre généalogique. Chaque univers a un ancêtre et une descendance. Notre propre Univers aurait au moins 10^{18} enfants. Au contraire, le multivers de niveau II associé à l'inflation est plus simple : chaque univers n'a qu'un ancêtre : le vide primordial. Les univers en tant que tels n'enfantent pas. Dans le modèle de type II' les

¹²⁰ En relativité générale, cette grandeur diverge au centre du trou noir. Néanmoins, il est raisonnable de supposer que les corrections quantiques la stabilisent.

¹²¹ V.P. FROLOV, M.A. MARKOV, V.F. MUKHANOV, Phys. Lett. B, 216, 272, 1989

lois (qui ne sont plus nécessairement effectives mais peuvent être fondamentales) varient légèrement d'un univers parent à un univers enfant. Les caractères sont essentiellement transmis mais des fluctuations quantiques autorisent de légères variations des constantes physiques. Ce sont ces dernières qui permettent l'hypothétique émergence d'un processus de type darwinien.

À l'évidence, cette proposition entend s'inspirer des succès du modèle de sélection naturelle dans les sciences du vivant. Il présente l'attrait d'être (au moins en principe) testable de façon relativement rigoureuse. Suivant l'hypothèse que notre monde est « typique » au sein de l'ensemble des mondes générés par le modèle, il doit être proche de l'état le plus « probable ». Or, les caractères étant transmis, il est évident que les univers générant beaucoup de trous noirs (ayant donc une abondante progéniture) sont favorisés. Nous devrions donc nous trouver dans un univers pour lequel les lois physiques sont telles que la production de trous noirs est quasi « maximale ». C'est une propriété délicate à établir mais qui pourrait permettre, au moins en droit, de falsifier le modèle.

Niveau b

Au sein de la physique contemporaine, la mécanique quantique est certainement la première théorie à avoir sérieusement envisagé l'existence de mondes multiples. L'origine de cette mystérieuse hypothèse se trouve dans les difficultés interprétatives associées à la transition entre le niveau microscopique et le niveau macroscopique.

La réduction de la fonction d'onde est usuellement considérée comme ayant lieu à un certain « instant » de l'interaction d'un système quantique avec un instrument de mesure. La taille de l'objet n'est pas un critère pertinent pour choisir de façon fiable entre une description fondée sur l'équation de Schrödinger et une simple description classique. Ce qui signifie que les équations classiques doivent être obtenues à partir des équations quantiques à la limite où la constante de Planck \hbar tend vers zéro. Fondamentalement, la théorie quantique est construite en remplaçant des nombres dans les équations classiques par des opérateurs qui satisfont à certaines relations de commutation. À la limite, tous les opérateurs devraient commuter et les valeurs attendues des opérateurs devraient vérifier les équations classiques à un niveau de précision proportionnel à \hbar . Pourtant, tel n'est pas le cas pour tous les systèmes, même si les

objets associés sont macroscopiques. Si l'on suppose qu'un système classique peut être adéquatement décrit par la mécanique quantique, alors son état quantique générique est une superposition de différents états macroscopiques. L'exemple le plus fameux de tels paradoxes est bien sûr celui du chat de Schrödinger se trouvant dans une superposition d'états « mort » et « vivant » si le marteau brisant la fiole de poison qui conditionne sa vie est asservi à la désintégration quantique d'un noyau. D'une façon très générique, la superposition macroscopique a lieu dès lors que l'équation de Schrödinger est utilisée de façon universelle. Après amplification, la superposition microscopique évolue vers des états quantiques qui, s'ils sont interprétés comme étant en relation isomorphe avec le réel, conduisent à un monde « schizophrène » de dualité classique. Il est important de noter que la superposition des états classiques ne disparaît pas dans la limite $\hbar \rightarrow 0$.

L'interprétation usuelle de la mécanique quantique – qui permet, entre autres, de faire face à ce paradoxe – se fonde sur la position de l'école de Copenhague¹²². Celle-ci est très lourde de conséquences et il est probable que la majorité des physiciens qui s'en réclament (l'orthodoxie épistémologique actuelle) n'ait pas explicitement conscience de ses implications. Bohr proférait ouvertement : « Il n'y a pas de monde quantique. Il n'y a qu'une description physique abstraite. Il est faux de penser que la tâche de la physique consiste à découvrir la nature telle qu'elle est. La physique concerne ce que l'on peut dire à propos de la nature¹²³. » L'interprétation de Copenhague nie la réalité forte de la fonction d'onde. Très influencé par le positivisme, Bohr considère que la science s'intéresse exclusivement à prédire le résultat des expériences. La réduction du paquet d'ondes est ici un élément incontournable du schème interprétatif qui est lui aussi considéré comme une règle formelle sans signification dynamique propre. Au paradoxe du chat de Schrödinger, l'interprétation de Copenhague objecte que la fonction d'onde $(|mort\rangle + |vivant\rangle)/\sqrt{2}$ signifie simplement qu'il y a une probabilité identique que le chat soit vivant ou mort. Au paradoxe de la dualité onde-corpuscule mise en évidence par les expériences de diffraction, elle objecte qu'on ne saurait prédiquer sur l'« être » des particules. Une expérience peut exhiber le caractère ondulatoire ou le caractère corpusculaire mais pas l'un et l'autre simultanément. Au paradoxe EPR (concernant les états intriqués), elle objecte que les fonctions d'ondes n'étant pas réelles leurs réductions s'interprètent subjectivement. Lorsqu'un observateur mesure le spin d'une

¹²² Bien qu'usuellement associé à Bohr et Heisenberg, il faut noter que le terme « Ecole de Copenhague » ne réfère pas un groupe clairement identifié de physiciens. Il réfère à un vaste ensemble de courants de pensées dont l'exposé détaillé est inutile pour le propos ici développé.

¹²³ Il est amusant de noter la résonance très wittgensteinienne de cette remarque. Une physique qui serait à la nature ce que la philosophie (du Tractatus) serait à la langue.

particule, il connaît effectivement celui de l'autre particule mais ne peut pas en faire profiter un autre observateur plus vite que la lumière.

Cette approche impose (c'est l'argument d'Einstein évoquant dans son célèbre « Dieu ne joue pas aux dés » l'existence de la Lune indépendamment du fait qu'elle soit contemplée) une véritable déconstruction de la notion usuelle de réalité, au moins dans son rapport à la description scientifique. « Être ? être ? Je ne sais pas ce qu'*être* signifie » répondit Niels Bohr quand on l'interrogeait sur le lieu où était l'électron entre deux mesures. L'interprétation de Copenhague mène à une position philosophique extrême et finalement diamétralement opposée à celle qu'adoptent la plupart des physiciens s'en réclamant pourtant sans renier un réalisme fort. Autrement dit, les conséquences inévitables de la proposition de Bohr sont rarement assumées jusque dans leurs déploiements les plus profonds. L'équation de Schrödinger est strictement déterministe. Mais l'interprétation de Copenhague oblige à y renoncer lors de la mesure. Il se passe à cet instant quelque chose de particulier : le monde scruté ne peut plus être le monde *en soi*.

De plus, cet « effondrement » de la fonction d'onde, et les immenses difficultés philosophiques qui en résultent dans la version de Copenhague, deviennent plus délicates encore quand le système quantique considéré est l'Univers lui-même. Comment concevoir la réduction de la fonction d'onde de l'Univers ? Le concept même de mesure perd ici son sens. Quelle serait la signification d'une mesure *sur* l'Univers alors que l'observateur en est – de façon définitoire – une sous-partie ? Pour appliquer la très fructueuse théorie quantique à l'Univers dans son ensemble, il faut donc renoncer à la réduction du paquet d'ondes qui n'est, d'ailleurs, qu'un postulat annexe du corpus.

C'est dans ce contexte, et pour éviter une forme de disjonction entre la physique et le monde considérée par V. Mukhanov comme inhérente à l'interprétation de Copenhague¹²⁴, que Hugh Everett proposa en 1957, avec Graham, de Witt et Wheeler une nouvelle voie de compréhension de la mécanique quantique. Fondamentalement, il s'agit avant tout de prendre à la lettre les prédictions de la théorie quantique. Les superpositions macroscopiques sont prédites, supposons donc qu'elles existent effectivement. Mais elles ne sont pas observées. Il est donc naturel de supposer que la mécanique quantique décrit fondamentalement un

¹²⁴ V. MUKHANOV, « Cosmology and the many world interpretation of quantum mechanics », pp 267-274 in B. CARR (éd.) *Universe or Multiverse*, *op. cit.*

ensemble d'Univers réels¹²⁵ mais déconnectés. Lors de la mesure, il n'y a plus réduction du paquet d'ondes mais apparition d'un nouvel Univers. Tous les états possibles du système continuent à exister dans des univers disjoints. Il s'agit sans doute de la première théorie physique des multivers proposée au sein du paradigme physique contemporain (c'est-à-dire depuis le début du vingtième siècle). Le point nodal de cette proposition tient essentiellement à ce que la physique peut dans cette interprétation ambitionner de décrire à nouveau le monde en tant que tel, intrinsèque, indépendamment de l'observateur. Mais le monde s'est complexifié : il est devenu pluriel. En un sens, le choix entre l'interprétation de Bohr et celle d'Everett reflète vraisemblablement un *a priori* individuel qui veut que la simplicité porte soit sur le système soit sur la manière de le décrire. Il faut néanmoins noter que le simple fait que ce choix existe penche en défaveur du réalisme physique fort.

Dans l'interprétation d'Everett, la mécanique classique peut toujours apparaître à la limite de la mécanique quantique quand $\hbar \rightarrow 0$. Il est simplement nécessaire de développer la fonction d'onde dans une base et d'identifier les différentes composantes dans cette base avec différents Univers quasi-classiques. La base préférentielle est déterminée en demandant que les « opérateurs macroscopiques » pour les vecteurs de base satisfassent les équations classiques du mouvement. Les corrections quasi-classiques aux équations sont proportionnelles à la constante de Planck. Ces corrections caractérisent l'« intensité des interactions quantiques », c'est-à-dire les interférences, entre les différents Univers. Bien sûr, à cause de la décohérence, deux Univers différents interagissent très peu et il est *pratiquement* impossible de vérifier leur existence mutuelle. Mais, à la différence de ce que Demaret et Lambert prétendent¹²⁶, cette difficulté technique n'est en aucun cas un postulat supplémentaire de la version d'Everett. Au contraire, que ce soit *pratiquement* impossible ne signifie pas que ce soit impossible *en principe* (en particulier quand on considère des évolutions à l'échelle de Poincaré). Si quelque chose peut *en principe* influencer notre réalité, cela signifie que ce « quelque chose » est tout aussi réel que notre réalité.

Les conséquences cosmologiques de ce point de vue sont fondamentales et permettent de répondre à certaines remarques « de bon sens » que le modèle standard tend à délaissier. Comme le souligne V. Mukhanov, dans le modèle inflationnaire, les inhomogénéités

¹²⁵ Cette manière de présenter l'hypothèse fait débat. Au contraire, J. Demaret et D. Lambert considèrent que l'interprétation d'Everett est une tentative désespérée de sauver le point de vue classique qui veut qu'un système soumis à une mesure et un système libre obéissent aux mêmes lois. En portant la réduction du paquet d'ondes au rang de principe fondateur de la théorie quantique, ce point de vue inverse la perspective et décèle quelque chose de quasi réactionnaire dans la position d'Everett. Cette manière de voir la situation est contestable parce qu'elle viole la prescription du rasoir d'Ockham.

¹²⁶ J. DEMARET, D. LAMBERT, *Le Principe Anthropique*, pp 180-185, Paris, Armand Collin, 1994

primordiales responsables des grandes structures trouvent leur origine dans les fluctuations du vide, amplifiées durant l'expansion accélérée. L'état initial du vide est invariant par translation (il n'y a pas de point privilégié) et cela perdure lorsque les fluctuations sont excitées. Comment comprendre que l'invariance translationnelle soit aujourd'hui brisée ? Pourquoi la Terre est-elle ici plutôt que là ? Si l'on considère la fonctionnelle d'onde décrivant les perturbations, celle-ci demeure spatialement invariante même après que les nombres d'occupation de chaque mode ont considérablement augmenté. Après l'inflation, cette fonctionnelle d'onde est la superposition de différentes composantes, chacune correspondant à des Univers macroscopiquement différents. L'un de ces Univers est celui que nous observons aujourd'hui. Dans un autre, la Terre se trouve à quelques centaines de Méga Parsecs d'ici... Chaque composante de la fonctionnelle d'onde décrit un état ayant brisé l'invariance par translation mais la somme des états demeure globalement invariante.

La situation est relativement similaire avec la fonction d'onde de l'Univers. Les conditions aux limites naturelles pour la fonction d'onde de l'Univers prédisent des états qui sont des superpositions d'univers macroscopiquement différents (plus dissemblables encore que dans le cas des perturbations cosmologiques). Selon l'interprétation d'Everett, tous les Univers sont réels. On peut alors supposer qu'une théorie crédible de la gravité quantique (qui demeure pour l'essentiel à construire) permettra d'introduire une mesure dans cet ensemble autorisant à montrer que le nombre de « grands » univers est beaucoup plus important que celui des « petits » univers dès lors qu'un stade inflationnaire est supposé. C'est une étape importante pour réellement fonder mathématiquement l'intuition selon laquelle l'inflation résout le problème de la naturalité des conditions initiales.

Il est curieux de constater que l'interprétation d'Everett ne soit pas généralement considérée comme la plus spontanée et demeure relativement marginale dans la communauté scientifique. Bien que l'idée de mondes multiples réels et effectifs frappe évidemment l'imagination et semble s'inscrire en faux par rapport à l'intuition première, c'est pourtant la version interprétative de la mécanique quantique qui prolonge le plus naturellement le réalisme fort qui demeure implicitement supposé par un large pan de l'épistémologie contemporaine. Les conséquences vertigineuses de la proposition de l'école de Copenhague quant à la contingence du rapport entre la science et le monde sont souvent oubliées au bénéfice de la relative simplicité de l'ontologie associée. Paradoxalement, la proposition d'Everett, pour aussi déroutante qu'elle puisse sembler, est la plus conservatrice quant au statut de la *Phusika*.

De plus, cette approche me semble présenter un intérêt particulier du point de vue de son rapport au temps. L'asymétrie de la coordonnée temporelle est un problème central en physique que les approches thermodynamiques, cosmologiques et électromagnétiques ne résolvent que de façon très partielle. À la différence de celle de Bohr, l'interprétation d'Everett permet justement de faire émerger une flèche du temps au niveau le plus fondamental sans qu'aucun nouveau postulat soit nécessaire. La prolifération des Univers s'effectue à sens unique.

En théorie quantique, l'état d'un système évolue dans le temps de façon *unitaire*. Cela signifie que le vecteur d'état subit des rotations dans un espace de Hilbert de dimension infinie. Bien qu'on associe souvent mécanique quantique et aléas, l'évolution de la fonction d'onde est strictement déterministe. Pour que les fonctions d'onde « étranges » (comme celle décrivant un chat simultanément mort et vivant) demeurent en accord avec le monde observé, les physiciens ont donc imaginé dès les années 1920 que la fonction d'onde s'effondrait dans un certain état classique quand la mesure était effectuée. Au-delà des difficultés conceptuelles précédemment mentionnées, cela entraîne une brisure d'unitarité. Le caractère stochastique de la théorie est essentiellement lié à ce postulat supplémentaire qui transforme une élégante théorie en modèle beaucoup moins naturel. Au cours du temps, de plus en plus de physiciens ont adopté l'interprétation d'Everett qui ne nécessite pas d'altérer la simplicité originelle de la mécanique quantique. Cette séparation en nouveaux mondes à chaque fois que la fonction d'onde « bifurque » (qui se traduit donc pour un observateur donné exactement comme une projection probabiliste) constitue le multivers de niveau b.

La proposition d'Everett a été au cœur d'un grand nombre de débats physiques et philosophiques depuis plus de quarante ans. Pour comprendre l'origine d'un certain nombre de controverses, il est utile de distinguer entre deux niveaux : le niveau extérieur (celui du physicien qui lit les équations globales) et le niveau intérieur (celui de l'observateur vivant dans le(s) monde(s) décrit(s) par ces équations).

Du point de vue extérieur, ce multivers est simple : il n'y a qu'une seule fonction d'onde qui évolue de façon déterministe et continue, sans aucune bifurcation. Ce monde quantique abstrait contient un grand nombre de trajectoires classiques parallèles ainsi que quelques phénomènes purement quantiques sans analogie classique.

Du point de vue intérieur, les observateurs ne perçoivent qu'une infime portion de la réalité¹²⁷. Ils peuvent percevoir leur multivers de niveau aI, aII ou c mais, à cause de la décohérence, ne perçoivent pas directement le multivers de niveau b. Dans cette interprétation, chaque fois qu'un observateur prend une décision (par exemple continuer à lire ce mémoire ou s'interrompre), les effets quantiques dans son cerveau engendrent une superposition des possibles. Considéré de l'extérieur, l'acte décisionnel donne naissance à un dédoublement (en l'occurrence, le philosophe continuant à lire ce mémoire et celui achevant ici cet exercice sans doute fort ennuyeux !) où les deux réalisations s'effectuent dans leurs mondes respectifs créés par là même. De l'intérieur, néanmoins, aucun des *alter ego* ne perçoit l'autre ni ne ressent la bifurcation (sauf, peut-être, comme une légère hésitation¹²⁸). Il est à noter que la situation est assez proche de celle du niveau aI. Là aussi, il existe quelque part, une copie du lecteur qui poursuit son labeur et une autre qui ne le poursuit pas. Tout ce qui peut¹²⁹ arriver a effectivement lieu dans le multivers de niveau aI. La seule différence est le lieu de cet « autre » : loin dans le même espace tridimensionnel au niveau aI, dans une autre branche quantique d'un espace de Hilbert de dimension infinie au niveau b.

La légitimité de l'interprétation d'Everett tient en grande partie à l'hypothèse d'unitarité. Jusqu'à maintenant aucune expérience physique n'a suggéré de violation d'unitarité. Dans les dernières années, elle fut même vérifiée pour des systèmes très lourds comme des molécules de carbone-60 ou des fibres optiques de plusieurs kilomètres de long. Du point de vue théorique, l'évaporation des trous noirs¹³⁰ a été longtemps considérée comme le seul phénomène violant l'unitarité de la mécanique quantique. Ce point crucial, soulevé par Hawking, tient à ce que même si un trou noir est formé à partir d'un état quantique pur (par exemple l'effondrement d'une coquille de fluide superfluide), l'état final résultant de

¹²⁷ Tout au long de ce mémoire (à l'exception de quelques propositions dans le dernier chapitre), les concepts très philosophiquement chargés, comme « la réalité », « le monde concret », « les propriétés tangibles », etc. sont utilisés au sens commun. Il est évident qu'une étude plus poussée nécessiterait de tenir compte de la plurivocité de ces notions. Afin de ne pas brouiller le propos en mêlant les propriétés spécifiquement associées au multivers avec les réflexions sur « le réel physique » qui sont tout aussi légitimes dans le cadre d'un Univers unique, ces voies d'étude ne seront pas ici abordées.

¹²⁸ Il y a évidemment ici un gouffre pour tenter de définir la conscience. Certains n'ont pas hésité à franchir le pas.

¹²⁹ C'est-à-dire tout ce qui respecte les lois physiques (au niveau I, il n'y a pas lieu de distinguer entre lois fondamentales et lois effectives).

¹³⁰ Phénomène que l'on peut intuitivement comprendre comme un effet de marée du trou noir sur les fluctuations quantiques du vide : une des particules de la paire est éjectée à l'infini tandis que l'autre tombe dans le trou noir. Pour conserver l'énergie, la masse du trou noir doit obligatoirement décroître. Si donc, classiquement, la masse d'un trou noir ne peut que croître, il n'en va pas de même quand il est tenu compte des effets quantiques. Ce processus, d'une importance immense en physique théorique, n'a jamais été vérifié expérimentalement car les trous noirs pour lesquels il devient important doivent avoir des masses beaucoup plus petites que celles effectivement observées en astronomie.

l'évaporation est purement thermique et donc (maximalement) mixte. Néanmoins, les avancées les plus récentes, tant en théorie des cordes¹³¹ que dans des approches plus génériques¹³², laissent aujourd'hui entendre que l'évaporation quantique des trous noirs peut bien être décrite de façon unitaire. C'est un point crucial de la physique fondamentale contemporaine car il est intimement lié à la conservation globale de l'information tombant dans un trou noir.

Tout laisse donc aujourd'hui penser que la physique est unitaire. De ce point de vue, les fluctuations quantiques dans l'Univers primordial n'ont pas généré des conditions initiales aléatoires mais une superposition de tous les états possibles. La décohérence a ensuite conduit chaque branche à se comporter classiquement. Il est important de noter que la distribution des réalisations dans différentes branches d'un volume de Hubble (le niveau b) est analogue à la distribution de différents volumes de Hubble dans la même branche quantique (le niveau aI). C'est en fait une simple propriété d'ergodicité.

Le même raisonnement s'applique au niveau aII. Si les brisures spontanées de symétrie qui déterminent la forme des lois physiques effectives sont des effets quantiques, le multivers de type b génère des mondes correspondant aux réalisations du type aII qui, elles aussi, génèrent des univers séparés évoluant chacun de façon autonome.

Explicitement, le niveau b est donc relativement analogue à l'union des niveaux aI et aII. La proposition d'Everett, très débattue dans la courte histoire de l'exégèse de la mécanique quantique, se trouve aujourd'hui doublement légitimée : dans ses fondements, de par sa cohérence interne et l'attrait évident d'une théorie unitaire, et dans l'effectivité de ses prédictions puisque d'autres approches, moins sujettes à caution semble-t-il, conduisent *in fine* à la même structure du méta-monde.

Il faut enfin noter qu'en dépit de son caractère apparemment surprenant, la proposition d'Everett suit bien mieux le précepte du rasoir d'Ockham que l'interprétation conventionnelle : elle suit à la lettre les enseignements d'une théorie qui fonctionne sans faille (la mécanique quantique) sans nécessiter de postulat supplémentaire et artificiel.

Contrairement à ce qui fut longtemps pensé, le nombre des mondes ne croit pas exponentiellement. Dans la perspective extérieure, il n'existe évidemment qu'un seul Univers quantique. Dans la perspective intérieure, la quantité signifiante est le nombre de volumes de

¹³¹ En particulier par la correspondance AdS/CFT entre les espaces anti-de-Sitter et les théories de champ conformes.

¹³² S. HAWKING, *Information Loss in Black Holes*, Phys. Rev. D 72, 084013, 2005

Hubble différents à un instant donné. Il n'existe qu'un nombre fini (certes gigantesque) de tels volumes présentant une température inférieure à une valeur fixée. L'évolution du multivers s'interprète alors comme un cheminement entre les différentes « feuilles » quantiques. En un sens, tous les univers existent déjà et le passage du temps pourrait n'être qu'une perception psychique des bifurcations d'un observateur¹³³.

Niveau c

Il existe une autre porte sur d'éventuels univers parallèles, connue depuis longtemps et associée aux trous noirs. Moins que d'une manière de *faire* un monde, il s'agit plutôt d'une manière de *voir* un monde (dans le cas de Schwarzschild¹³⁴) ou de *visiter* un monde (dans le cas de Kerr¹³⁵).

L'une des problématiques fondamentales et récurrente de la physique des trous noirs consiste à se demander si le puits creusé par le trou noir dans le tissu élastique de l'espace-temps est pincé par un nœud de courbure infinie – auquel cas toute la matière qui tombe dans le trou noir se tasse indéfiniment dans une singularité – ou si le fond du trou noir est ouvert vers d'autres régions de l'espace-temps par des sortes de tunnels. Pour pouvoir répondre à cette question, il faut savoir ce qu'il advient à l'intérieur de la « gorge » de Schwarzschild¹³⁶. Or, le jeu usuel du prolongement, permettant, par exemple, de rendre compte de la courbure par une trame d'espace-temps bidimensionnelle immergée dans un espace *fictif* à trois dimensions, ne permet pas de décrire la singularité. Pour aller plus loin, il faut suivre la voie ouverte par Martin Kruskal. Cette représentation de l'espace-temps, dite « extension analytique maximale », permet de représenter non seulement l'extérieur mais aussi l'intérieur d'un trou noir. La carte de Kruskal projette sur un plan l'espace-temps de Schwarzschild – amputé de deux dimensions spatiales pour des raisons de symétrie – en forçant le réseau des cônes de lumière à rester rigide. C'est ce qu'on nomme une transformation conforme. Le point tout à fait fondamental tient à ce que la représentation de Kruskal montre qu'une fois

¹³³ J.B. BARBOUR. *The end of time*. Oxford, Oxford university press, 2001

¹³⁴ Trou noir sans charge et sans moment angulaire

¹³⁵ Trou noir sans charge mais avec une rotation non nulle

¹³⁶ Voir, par exemple, J.-P. LUMINET, *Le destin de l'univers*, Paris, Fayard, 2006, pour une belle introduction didactique

l'horizon franchi, s'il est bien impossible d'échapper à la singularité (qui marque en quelque sorte la fin du temps puisque l'espace et le temps se sont échangés l'un en l'autre à l'intérieur du trou noir), il est en revanche possible d'apercevoir un nouvel univers. Cet autre univers n'est pas *stricto sensu* créé par le trou noir. Celui-ci, en revanche, permet au voyageur interne d'en visualiser l'existence.

Pourtant, quand il est tenu compte de la dynamique du processus de formation d'un trou noir, c'est-à-dire de l'effondrement, cette étonnante perspective ne perdure pas : la gorge de Schwarzschild se ferme et l'univers parallèle disparaît.

Fort heureusement, la situation est drastiquement différente lorsqu'il est tenu compte de la rotation des trous noirs, effectivement exhibé par la totalité de ceux présents dans notre Univers (le cas sans rotation est intéressant pour sa simplicité mais il ne représente, mathématiquement, qu'un sous-ensemble de conditions initiales de mesure nulle et donc – strictement – improbable). La représentation la mieux adaptée n'est plus cette fois celle de Kruskal mais la carte de Penrose-Carter¹³⁷ qui ramène l'infini spatial à distance finie. Or, le diagramme de Penrose-Carter des trous noirs de Kerr est beaucoup plus riche et plus fascinant que celui des trous noirs de Schwarzschild. Il est constitué de blocs se répétant indéfiniment du passé au futur, mettant en évidence une infinité d'univers extérieurs au trou noir et une infinité d'univers intérieurs au trou noir. Les univers extérieurs sont bordés par l'infini spatial et l'horizon des événements. Les univers intérieurs, contenant chacun une singularité, se subdivisent en plusieurs régions. Le trou noir en rotation possède en effet un horizon des événements internes qui enveloppe la singularité centrale. Chaque fois qu'un horizon est franchi, la direction d'espace et la direction de temps s'échangent l'une en l'autre. Par conséquent, une fois les deux horizons franchis, proche de la singularité centrale, les directions d'espace et de temps sont à nouveau les mêmes qu'à l'extérieur du trou noir !

C'est la raison pour laquelle, dans la représentation de Penrose-Carter, la singularité n'est plus horizontale mais verticale. À ce titre, elle ne marque plus la fin du temps. Elle n'est plus un « bord » de l'espace-temps. Il existe un « au-delà » de la singularité. Géométriquement, il est associé à ce que celle-ci n'est plus ponctuelle, comme dans le cas de Schwarzschild, mais annulaire. Cet anneau n'obstrue plus l'espace-temps puisqu'il est possible de passer à travers via un pont d'Einstein-Rosen. C'est alors un morceau d'espace-

¹³⁷ Il s'agit bien du même Brandon Carter que celui qui inventa le principe anthropique.

temps spatialement infini (un univers) qui devient accessible. Celui-ci présente des distances « négatives » qui s'interprètent dans ce cadre comme une gravité répulsive.

Il est également possible, compte tenu de la structure causale du trou noir de Kerr, de « survoler » l'anneau singulier et de ressortir vers un univers extérieur de gravité usuelle, c'est-à-dire attractive. Bien qu'une infinité d'univers de gravité négative et une infinité d'univers de gravité attractive soient en principe accessibles à l'observateur, il est néanmoins intéressant de constater que la structure de diagramme de Penrose-Carter ne permet pas d'accéder à *tous* les univers. Il existe également une double infinité d'univers intrinsèquement inaccessibles. Ces trous de vers entre les univers, rendus possibles par l'extraordinaire richesse de la géométrie engendrée par un trou noir en rotation (ou un trou noir chargé), perdurent même lorsqu'il est tenu compte de la dynamique. L'énigme de ces univers multiples demeure. Bien qu'également liés aux trous noirs, ils sont très différents du multivers II'. Ce dernier était dû à des effets de gravité quantique engendrant un rebond au voisinage de ce que la relativité générale décrivait comme une singularité. Dans le cas ici étudié, il s'agit d'un effet purement classique, prédit par la relativité générale. Le mot « prédit » est sans doute un peu fort. Ces ponts d'Einstein-Rosen sont *possibles*. Ils sont naturels dans la description de Penrose-Carter. Ils ne sont pas *stricto sensu* indispensables à la relativité générale.

Trois réserves doivent être émises quant à ce modèle¹³⁸. La première a trait à la stabilité du trou de ver. Il a été montré que la présence de matière dans le trou noir altère la géométrie au point d'obstruer le trou de ver. Autrement dit, sauf à supposer une équation d'état très spécifique (par exemple avec un rapport pression sur densité très négatif) du corps en chute dans le trou noir, l'exploration effective des nouveaux univers semble compromise. C'est un point sans réelle importance pour sonder la structure du multivers associé. La deuxième réserve est liée à la nature des univers liés par les ponts d'Einstein-Rosen. Rien, en relativité générale, ne permet de dire s'il s'agit d'une connexion entre deux univers différents ou entre deux parties d'un même univers. Étant donné que la seconde hypothèse génère d'insurmontables paradoxes temporels (en particulier une perte de causalité), il me semble raisonnable de supposer qu'il s'agit en effet d'univers disjoints. La troisième – la plus sérieuse – réserve vient du mécanisme de génération du multivers. Tout ici se passe comme si les trous

138 Kip Thorne, l'un des grands spécialistes mondiaux des trous noirs, co-auteur de la monographie de référence (C. Misner, K. S. Thorne, J. Wheeler, Gravitation, New York, W. H. Freeman and company, 1970) est l'un des premiers à avoir étudié ces questions en détails.

de vers liaient des univers pré-existants mais rien ne renseigne sur la dynamique de création d'univers. Existaient-ils avant la formation du trou noir ou sont-ils engendrés par celui-ci ? Une question fondamentale qui n'a pas aujourd'hui de réponse.

Niveau III

Max Tegmark¹³⁹ propose un élégant multivers mathématique de niveau III. Il donne de celui-ci une interprétation platonicienne considérant qu'on peut schématiquement répartir les rapports possibles au monde suivant deux catégories : le paradigme aristotélicien et le paradigme platonicien. Suivant le premier, la perspective interne, « vécue et sentie », est réelle et seulement approximée par le langage mathématique dans la perspective externe. Suivant le second, c'est, au contraire, la perspective externe des structures mathématiques qui est fondamentalement réelle, et les langages humains ne sont que des approximations d'ordre inférieur pour décrire nos perceptions subjectives. D'après Max Tegmark, la légitimité que l'on peut accorder au multivers dépend de cette option. Pour un penseur aristotélicien, l'objection de la « régression infinie »¹⁴⁰ impose de renoncer à la possibilité d'une *théorie du tout* : étant donné que notre pratique physique n'est qu'une explication linguistique de certaines assertions linguistiques, il existera nécessairement un méta-niveau auquel la question du pourquoi de la structure décrite pourra être posée. Au contraire, Tegmark considère que le multivers est une évidence pour le physicien platonicien. La physique est fondamentalement un problème mathématique et un mathématicien infiniment intelligent pourrait *en principe* calculer¹⁴¹ la perspective interne, c'est-à-dire l'éventuelle présence d'observateurs conscients, le monde qu'ils découvrent et les lois qui s'y déploient. Autrement dit, il existe dans cette option une *théorie du tout* au sommet de l'arbre des savoirs dont les axiomes sont purement mathématiques.

Si l'on adopte la perspective platonicienne et qu'il existe effectivement une *théorie du tout* au sommet de l'édifice de la connaissance (dont la forme demeure bien sûr aujourd'hui inconnue), il est légitime de se demander pourquoi cette théorie ultime est décrite par cette équation (ou cet ensemble d'équations) plutôt qu'une autre. Le multivers de niveau III répond

¹³⁹ M. TEGMARK, « Is the theory of everything merely the ultimate ensemble theory », Ann. Phys. 270, 1, 1988

¹⁴⁰ R. NOZICK, « Philosophical explanations », Cambridge, Harvard University Press, 1981

¹⁴¹ Il est assez intéressant de voir ici resurgir le fantasme de la Mathesis Universalis de Leibniz.

à cette interrogation par l'hypothèse de la « démocratie » mathématique selon laquelle les univers gouvernés par d'autres lois physiques sont également réels. Cela suppose que les structures mathématiques (qui doivent dans cette proposition être explicitement considérées comme *découvertes* et non comme *inventées*) et le monde physique coïncident suivant un mode qui reste à définir précisément.

Tegmark considère que par « structure mathématique », il faut entendre « système formel ». Un système formel est constitué de symboles et de règles pour les manipuler permettant de faire apparaître de nouvelles séquences nommées *théorèmes* à partir de séquences primitives nommées *axiomes*¹⁴². Toute dimension interprétative est à bannir dans cette approche exclusivement fondée sur un système de relations abstraites. Le type de multivers considéré dans cette approche requiert de penser le monde comme fondamentalement et intrinsèquement mathématique. Non pas seulement les aspects évidemment « mécaniques » aujourd'hui correctement décrits pas la physique mais absolument *tout* ce qui peut composer l'Univers ou s'y produire. Il existe une structure mathématique isomorphe au réel qui, *in fine*, le constitue.

Étant donné une structure mathématique, on considère qu'elle présente une *existence physique* s'il existe une sous-structure consciente¹⁴³ de celle-ci qui se perçoit comme vivant dans un monde physique réel. Si l'on suppose donc que le monde est une structure mathématique dans laquelle nous nous trouvons, se pose inévitablement la question des autres structures mathématiques possibles. Se pourrait-il qu'il existe une faille ontologique majeure entre les structures mathématiques ayant existence physique et celles demeurant en puissance dans le champ des possibles ? Tegmark suppose que règne une complète démocratie mathématique dans laquelle *toutes* les structures ont effectivement une existence physique. Cela constitue le multivers de niveau III. Il s'agit d'une forme de platonisme radical où toutes les structures mathématiques existent effectivement et physiquement. L'hypothèse n'est pas sans écho avec les œuvres de Rucker¹⁴⁴, Davies¹⁴⁵ et Lewis¹⁴⁶. Si cette théorie est correcte, alors – puisqu'elle ne possède *aucun* paramètre libre – toutes les propriétés de tous les univers

¹⁴² Cette définition est sujette à caution. On peut ici la considérer comme signifiante dans le cas particulier du propos de Tegmark mais de généralité limitée.

¹⁴³ Le concept de structure consciente est évidemment délicat à élaborer. Il a été montré qu'il était néanmoins possible d'en donner une définition satisfaisante au sein de ce paradigme exclusivement mathématique dans l'article : M. TEGMARK, « The importance of quantum decoherence in brain processes », Phys. Rev. E, 61, 4194, 2000

¹⁴⁴ R. RUCKER, « Infinity and the mind », Boston, Birkhauser, 1982

¹⁴⁵ P.C.W. DAVIES, « The mind of God », New-York, Simon and Schuster, 1992

¹⁴⁶ D. LEWIS, « On the plurality of worlds », *op. cit.*

parallèles (y compris les perceptions subjectives des sous-structures conscientes) pourraient, en principe, être dérivées par une pensée mathématique infiniment intelligente.

La proposition repose donc sur deux hypothèses. D'une part, le monde physique (c'est-à-dire tous les multivers de niveau inférieur) est une structure mathématique et, d'autre part, toutes les structures mathématiques existent réellement. Dans son fameux essai, Wigner¹⁴⁷ écrit que « l'énorme puissance des mathématiques dans les sciences naturelles est quelque chose à la frontière du mystérieux pour laquelle il n'y a pas d'explication rationnelle ». Tegmark argumente que l'efficacité des mathématiques devient ici une simple conséquence de ce que le monde physique *est* une structure mathématique. Les approximations que constituent nos théories physiques actuelles sont fructueuses parce que les structures mathématiques constituent une bonne approximation de la façon dont une sous-structure consciente perçoit une structure mathématique plus complexe. En un sens, ce multivers de niveau III est une théorie ultime des ensembles¹⁴⁸ qui subsume toutes les autres classes et entend fermer la porte à tout multivers de niveau supérieur. Considérer, par exemple, un méta-ensemble de structures mathématiques n'ajoute strictement rien à la proposition puisqu'il est, lui-même, une structure mathématique. Il est intéressant de noter que le modèle inclut aussi la possibilité étrange, mais abondamment discutée, que l'Univers soit une simulation informatique¹⁴⁹. Plus sérieusement, un argument simple en faveur de la seconde hypothèse consiste à remarquer que si l'on désirait remettre en question l'équivalence de l'existence physique et de l'existence mathématique, il faudrait se résoudre à supposer que notre Univers est partiellement parfaitement descriptible en termes d'une structure mathématique et partiellement constitué d'éléments qui échappent à cette approche. Néanmoins, cela violerait la première supposition et impliquerait que l'Univers soit isomorphe à une structure mathématique plus complexe ou fondamentalement non-mathématique.

Les effets de sélection anthropiques se présentent au niveau III comme aux autres niveaux du multivers. Il est probable que la plupart des structures mathématiques soient incompatibles avec l'émergence d'une structure auto-consciente (parce que ne permettant pas le niveau de complexité, de stabilité et de prédictibilité nécessaire). La « coïncidence » des lois physiques se trouverait ainsi expliquée jusque dans les équations les plus fondamentales

¹⁴⁷ E.P. WIGNER, « Symmetries and reflections », Cambridge, MIT Press, 1967

¹⁴⁸ M. TEGMARK, « On the dimensionality of spacetime », *Class. Quantum. Grav.*, 14, L69, 1997

¹⁴⁹ S. WOLFRAM, « A New Kind of Science », New York, Wolfram Media, 2002

gouvernant notre sous-ensemble de ce multivers. À cause de cet effet de sélection, Tegmark, considère qu'il est légitime de considérer que la réponse à la question de Hawking « qu'est-ce qui insuffle le feu dans les équations et crée un Univers qu'elles peuvent décrire ? » est simplement : « nous, les structures auto-conscientes ».

En dépit de son élégance, cette approche n'est pas exempte de faiblesse. D'une part, elle pense les mathématiques comme une construction figée, au moins dans son axiomatique. D'autre part, elle suppose l'évidence d'un isomorphisme entre le réel et la mathématique (éventuellement absolument définie). D. Parrochia a montré que la situation est beaucoup plus complexe¹⁵⁰. D'abord, une étude des structures ordonnées, de leurs réalisations empiriques et des modèles associés souligne que les grands problèmes de taxonomie et de correspondances, ainsi que les questions délicates touchant aux liaisons et aux relations (constructions arborescentes, formes réticulaires, panoplie des structures de l'organisation en général, arbres, treillis, graphes, réseaux, agencements, etc.) sont beaucoup plus complexes et, en un sens, plus contingents qu'on pouvait le supposer. D'autre part, il semble que la mathématique, qui, dans le sillage du leibnizianisme, devient une mathématique qualitative et une science générale des situations, tend à s'emparer du monde qu'elle exprime et résume dans les structures fondamentales. La réalité, cependant, se défend : non seulement l'existence, dans sa fluidité et ses débordements, ne se laisse pas du tout réduire à la logique des classes et à la figure de l'appartenance, mais l'opération même de classer, appliquée aux êtres les plus banals, rencontre en fait d'emblée de multiples difficultés.

¹⁵⁰ D. PARROCHIA, *Mathématiques et existence*, Seyssel, Champ Vallon, 1991

5. Multivers : du falsifiable au mythifié

Spécificité de la situation

Il est un fait incontestable que si les constantes fondamentales de la physique différaient – ne serait-ce que très peu pour la plupart d’entre elles – de la valeur que nous leur connaissons, la vie telle que nous la concevons ne pourrait exister. Face à cette remarque de bon sens, presque tautologique, il existe essentiellement quatre positions possibles¹⁵¹ :

- Nous avons été chanceux. Tout aurait pu être différent, menant à un univers pauvre, dépourvu de complexité, de chimie, de vie. L’espace des paramètres, de taille absolument infime, permettant l’apparition de la vie était incroyablement improbable mais, dans le « coup de dé » initial, nous avons eu l’incroyable chance que l’Univers se réalise dans cette situation. La probabilité que la vie existe était dérisoire, quasi nulle, mais l’aléa a voulu qu’il en soit ainsi.
- Nous n’avons pas été particulièrement chanceux. La vie est un processus d’adaptation. Finalement, presque n’importe quel jeu de constantes physiques aurait mené à l’existence d’un univers peuplé d’êtres vivants, même s’il n’existait ni molécules, ni atomes, ni états liés.
- L’Univers a été spécifiquement « dessiné » (sans doute faudrait-il écrire « dessiné ») pour l’apparition de la vie. Les valeurs des constantes fondamentales ont été « choisies » pour notre existence. Une forme divine ou supérieure a agi sur la création du Cosmos pour que la vie soit possible, bien qu’elle nécessite des conditions physiques extrêmement particulières.
- Il n’est pas nécessaire d’être chanceux car il existe un grand nombre d’univers avec des valeurs différentes des constantes fondamentales. En fait, les dés ont été jetés un grand nombre de fois. On se trouve naturellement dans un des univers permettant la vie (bien que la plupart ne le permettent pas).

Aucune de ces quatre réponses – chance, élan vital, dessein intelligent et multivers – n’est *a priori* à écarter. Chacune d’elle peut avoir sa place dans un certain type de cosmogonie. Si

¹⁵¹ Cette présentation est inspirée de A. AGUIRRE, « Making predictions in a multiverse : conundrums, dangers, coincidences », pp 367-368 in B. CARR (éd.) *Universe or Multiverse*, Cambridge, Cambridge University Press, 2007

l'on exclut la troisième, non parce qu'elle est inepte mais parce qu'elle est orthogonale à la démarche scientifique qui est ici le cadre dans lequel nous raisonnons, il est intéressant de constater que l'hypothèse des multivers apparaît certainement comme la plus « simple » et la plus naturelle, même en l'absence d'un mécanisme détaillé de production d'univers multiples. De plus, l'existence de tels mécanismes étant maintenant avérée (telle que nous l'avons montré au précédent chapitre), cela renforce le crédit de cette éventualité. La seconde proposition est attrayante, mais les faits au sein de notre propre univers tendent à la défavoriser : nous n'observons que des formes de vie relativement proches les unes des autres. Il n'y a de vie – semble-t-il – ni dans le Soleil, ni dans le vide interstellaire, ni dans le magma terrestre. Il apparaît donc hautement improbable que des mondes sans molécules, sans atomes, à gravité répulsive, et, éventuellement, présentant une dimensionnalité différente de la nôtre, puissent conduire à l'émergence de vie. Enfin, la première hypothèse est ... possible. Un peu à la manière d'un solipsisme de la création elle est, dans sa formulation, pratiquement irréfutable. Mais une proposition scientifique ne s'évalue pas seulement à son éventuelle véracité. Elle doit aussi être confrontée la richesse et à l'élégance des possibles qu'elle entend décrire. Et, de ce point de vue, il ne s'agit que d'une quasi vacuité.

Faut-il donc croire aux univers parallèles ? La question n'est pas vraiment de comprendre s'il est loisible de croire mais plutôt de mesurer les conséquences et de comprendre la gnoséologie associée. L'objection usuelle contre le multivers consiste à arguer qu'il s'agit d'une construction gratuite et inutile puisqu'elle ne peut être vérifiée et qu'elle viole le rasoir d'Ockham. Pourtant, ce point de vue peut être contourné. De quoi la Nature manquerait-elle (de quoi ferait-on donc un usage immodéré dans cette profusion de mondes) ? Certainement pas d'espace, de masse et d'atomes ! Le multivers (non controversé) de niveau I contient déjà une quantité infinie de chacun de ces trois « éléments »¹⁵². Le véritable problème est celui de la simplicité¹⁵³. Celui, justement, qui conduit Lewis à proposer la logique modale et ses mondes pluriels. On pourrait craindre que la quantité d'informations nécessaires à la description du méta-monde soit gigantesque, démesurée. Mais un ensemble complet est souvent moins complexe que l'un de ses éléments... Cette notion peut être précisée en ayant recours à la notion de « contenu algorithmique informatif ». Schématiquement, le contenu algorithmique d'un nombre est le plus petit programme qu'il faudrait écrire pour obtenir ce nombre en sortie. On pourrait naïvement penser qu'un nombre

¹⁵² Cette présentation est due à M. Tegmark

¹⁵³ D'où le jeu de mots intraduisible en français : *many worlds versus many words*

donné est plus simple que l'ensemble de tous les nombres. Il n'en est rien : un nombre peut être composé de milliers de chiffres qu'il faut spécifier un à un (requérant donc beaucoup d'espace mémoire) tandis qu'un programme extrêmement simple permet de générer l'ensemble des nombres entiers. En ce sens, l'ensemble complet est plus « simple » que la plupart de ses éléments. Du point de vue qui nous intéresse, on peut remarquer de même qu'en remplaçant un unique univers par un multivers de niveau I, on s'affranchit de la nécessité de spécifier les conditions initiales. En choisissant le niveau II, il n'est plus nécessaire de fixer les constantes fondamentales. Au niveau III, rien n'est plus nécessaire (dans le cadre d'une pensée mathématique). Les univers multiples peuvent constituer une véritable économie conceptuelle et non pas conduire à une profusion d'entités fantômes comme une analyse un peu superficielle pouvait le laisser craindre.

Il est fondamental de ne pas omettre que les théories physiques les plus simples et les plus élégantes aujourd'hui considérées conduisent génériquement – en quelque sorte par défaut – à l'existence d'un multivers. Le multivers n'est *pas* en lui-même une théorie. Il est la conséquence de théories élaborées pour répondre à des problèmes concrets de physique des particules élémentaires. Pour dénier l'existence des univers parallèles, il faudrait être prêt à accepter des modèles plus complexes et plus artificiels, ajouter des postulats *ad hoc*, réfuter les prédictions des théories fonctionnant ou inventer des asymétries ontologiques. La valeur incroyablement faible (120 ordres de grandeur en dessous de sa grandeur « naturelle ») mais non nulle de la constante cosmologique est qualifiée par Léonard Susskind¹⁵⁴ de « problème-père » de toute la physique. Cette incroyable situation où l'énergie du vide ne présente ni la valeur gigantesque prévue par le calcul quantique, ni une valeur égale à zéro comme un petit miracle mathématique de compensation de tous les termes pouvait le laisser espérer, est très troublante. Il semble qu'un processus annule exactement les 119 premières décimales de ce terme mais pas la 120^{ème} ! Exactement comme nécessaire pour l'apparition d'un univers favorable à la vie... Un paradoxe sans précédent qui trouve évidemment une solution simple si le paysage des cordes permet de générer un très grand nombre de valeurs d'énergie du vide au sein du multivers. Nous nous trouvons alors naturellement dans une de ces vallées – peu nombreuses mais propices à la chimie et à la complexité – où la constante cosmologique est très petite. Contingence-émergence des grandeurs dites « fondamentales ».

¹⁵⁴ L. Susskind est le père de la théorie des cordes.

Renoncer aujourd'hui aux multivers semble s'apparenter à l'attitude des partisans inconditionnels de la matrice S lors de la découverte des quarks. Ces derniers étant, par essence, inobservables directement, certains physiciens prônaient le recours à une « boîte noire » (nommé *Scattering Matrix*) afin de ne faire intervenir dans la description du processus que les états initiaux et finaux (c'est-à-dire les observables) et en aucun cas les constituants microscopiques à l'origine du mécanisme. Même si la théorie de la matrice S a été utile et continue à être bienvenue dans l'étude de certaines situations, il est aujourd'hui incontestable qu'il eut été fort dommageable à notre compréhension du réel de s'en tenir à cette vision macroscopique et de se priver de l'hypothèse des quarks...

Popper et le multivers

Karl Popper a joué un rôle considérable dans l'établissement du paradigme épistémologique actuel. À tort ou à raison, le fait est que la plupart des physiciens se réfèrent à ses propositions pour décider de ce qui est ou n'est pas de nature « scientifique ».

Pour Popper, le problème fondamental est justement celui de cette ligne de démarcation¹⁵⁵. Pour comprendre cette question, il faut d'abord s'interroger sur la place de l'induction dans la découverte scientifique. Les sciences (sauf la mathématique et ses dérivées) prétendent être fondées sur l'observation du monde. Comme cette observation est par nature partielle, la seule approche possible consiste à en tirer des lois générales (c'est aussi l'approche générale et fondamentale de tout organisme vivant qui apprend de son milieu). Si cette démarche permet d'avancer, elle ne garantit en aucun cas la justesse des conclusions. Pour Popper, il faut donc prendre au sérieux l'analyse de Hume qui montre l'invalidité fréquente de l'induction.

Une collection d'observations ne permet jamais d'induire logiquement une proposition générale car la seule observation ne dit rien des observations à venir ; il reste possible qu'une seule observation contraire l'invalide. Cette critique de l'induction conduit donc Popper à remettre en cause l'idée (chère aux positivistes) de vérification. Plutôt que de parler de « vérification » d'une hypothèse, Popper parlera de « corroboration », c'est-à-dire d'observation qui va dans le sens prévu par la théorie. Or, même par un grand nombre

¹⁵⁵ K. POPPER, *La logique de la découverte scientifique*, traduit de l'anglais par N. Thyssen-Rutten et P. Devaux, Paris, Payot, 1995 (1^{er} ed. ang. 1959)

d'expériences, la corroboration ne permet pas de conclure à la « vérité » d'une hypothèse générale (supposée valide jusqu'à la fin des temps) : toutes les observations possibles ne sont jamais effectuées.

Une proposition scientifique n'est donc pas une proposition vérifiée - ni même vérifiable par l'expérience, mais une proposition réfutable (ou falsifiable) dont on ne peut affirmer qu'elle ne sera jamais réfutée. La proposition « Dieu existe » est pour Popper dotée de sens, mais elle n'est pas scientifique, car elle n'est pas réfutable. La proposition « tous les cygnes sont blancs » est une conjecture scientifique. Si j'observe un cygne noir, cette proposition sera réfutée. C'est donc la démarche de conjectures et de réfutations qui permet de faire croître les connaissances scientifiques.

Il affirme donc s'inscrire en faux contre l'induction (ignorant à l'époque le théorème de Cox-Jaynes), et lui substituer la réfutabilité (*falsifiability*). C'est ce principe qui devient le critère de démarcation.

Il peut être ainsi formulé : si on entend par énoncé simple un rapport d'observation, on peut considérer qu'une théorie est scientifique si elle se divise en deux sous-classes d'énoncés de base :

- la classe des énoncés qui la contredisent, appelés falsificateurs potentiels (si ces énoncés sont vrais la théorie est fausse);
- la classe des énoncés avec lesquels elle s'accorde (si ces énoncés sont vrais, ils la corroborent).

Le critère de falsifiabilité de Popper ne se distingue pas dans son principe d'un test de falsifiabilité bayésien, hormis le fait qu'il travaille uniquement en logique discrète (vrai/faux). Le principe de Popper a été critiqué notamment par Imre Lakatos et Paul Feyerabend¹⁵⁶. Le succès de l'épistémologie poppérienne, coincée entre celle de Bachelard (expérimentation) et Carnap (logique) d'une part et celle de Merton (académisme), Kuhn et Bourdieu (contextualité) d'autre part, demeure assez curieux. Des thèses plus radicales ont tenté de déconstruire plus fondamentalement encore la position de Popper en proposant qu'il n'existe finalement aucune réelle démarcation entre science et non-science. On les doit, en particulier,

¹⁵⁶ P. FEYERABEND, *La Science en tant qu'Art*, traduit de l'allemand par F. Péricaut, Paris, Albin Michel, 2003 (1^e éd. all. 1983)

aux sociologues Bloor¹⁵⁷ et Collins¹⁵⁸. Autour d'eux, et de ce que l'on va peu à peu appeler le groupe d'Edimbourg, les sciences vont être considérées comme un empilement de croyances et de conventions sociales, de « boîtes noires » qu'il convient d'ouvrir pour sortir des mystifications qui entourent toujours la science et ses acteurs. Ce courant s'est aussi développé en France, à l'Ecole des Mines, notamment par Michel Calon¹⁵⁹. Bruno Latour¹⁶⁰ a réussi à imposer l'idée d'une distinction entre la « science en train de se faire », autrement dit la recherche, et « la science accomplie » que l'on trouve expliquée dans les manuels pour étudiants et qui n'est que la naturalisation d'une activité fondamentalement sociale et culturelle (thèse de Steeve Woolgar). Cette nouvelle pensée des sciences a l'immense mérite d'historiciser les contenus scientifiques en renonçant aux tentations naturalistes. Elle a permis de rompre avec la vision téléologique si brillante soit-elle de Gaston Bachelard ramenant l'histoire des sciences à celle du progrès de la vérité contre les obscurantismes et obscurantistes. Les principes axiologiques de cette nouvelle histoire des sciences ont souvent été assimilés à un relativisme dangereux. Les débats se sont ainsi cristallisés, de manière caricaturale, entre les partisans d'une démarcation (« néo-positivistes ») et ceux la contestant (« relativistes »). Pour les premiers, la lutte contre le « tout se vaut » est un combat des Lumières contre l'obscurantisme (et particulièrement contre ceux qui ont intérêt à l'entretenir). Dans un héritage rationaliste de la 3ème République, ils se font un devoir d'arracher les êtres à leur condition, la science libérant des *habitus* aliénants (particulièrement ceux de l'Eglise). Pour les seconds, l'historicisation des contenus scientifiques permet finalement d'atteindre le même but en ébranlant des dominations obscures construites au nom de la science (la grande messe des experts) et ils revendiquent l'appartenance au camp progressiste et éclairé contre une science « sûre d'elle-même (qui) devient sourde à ses propres préceptes et se transforme en un discours d'autorité tranquille »¹⁶¹.

L'épistémologie poppérienne est donc vraisemblablement aujourd'hui largement obsolète, au moins pour les philosophes des sciences. Mais elle demeure une référence quasi dogmatique pour la grande majorité des physiciens et c'est donc à son aune que l'essentiel de la communauté scientifique évalue la pertinence des univers multiples. C'est, en particulier,

¹⁵⁷ D. BLOOR, *Knowledge and social imagery*, Chicago, Chicago University Press, 1991

¹⁵⁸ H.M. COLLINS., *Changing order. Replication and induction in Scientific Practice*, Chicago, The University of Chicago Press, 1992

¹⁵⁹ M. CALLON (dir), *La science et ses réseaux, genèse de la circulation des faits scientifiques*, Paris, Edition la découverte, 1988

¹⁶⁰ B. LATOUR, *Nous n'avons jamais été modernes. Essai d'anthropologie symétrique*, Paris, La Découverte, 1997

¹⁶¹ D. PESTRE, « Les sciences et l'histoire aujourd'hui. » *Le Débat*, n° 102, novembre-décembre 1998, p. 64.

parce que le principe anthropique serait non falsifiable que Lee Smolin considère qu'il faut lui rechercher des alternatives « scientifiques », parmi lesquelles on trouve, bien sûr, son propre modèle de sélection naturelle cosmologique.

Il est possible que soient un jour découvertes les lois ultimes de la physique¹⁶². Il est possible que, comme beaucoup de physiciens l'espèrent, elles soient simples, élégantes. Il est possible que leur rédaction ne prenne pas plus de quelques lignes. Peut être ressembleront-elles à cela¹⁶³ :

$$L = -\frac{1}{4}F^2 + \bar{\psi}iD\psi + \frac{1}{2}D_\mu\phi D^\mu\phi + \bar{\psi}\Gamma\psi\phi + \mu^2\phi^2 - \lambda\phi^4 - \frac{1}{16\pi G}R - \Lambda.$$

Demeurerait néanmoins un fait troublant à expliquer : pourquoi ces lois-là et pas d'autres ? En particulier, l'immense majorité des lois simples ne permettent *pas* l'apparition de la complexité et donc, entre autres choses, celle de la vie. Seules des classes de lois très particulières permettent à des phénomènes élaborés de prendre naissance en dépit de la simplicité des règles. Pourquoi les lois du monde seraient-elle de ce type très improbable ? Clairement, les multivers au-delà du niveau I, c'est-à-dire ceux engendrant différentes lois effectives (éventuellement considérées comme ultimes dans chaque univers), apportent un éclairage novateur sur cette question. Toute la difficulté du point de vue épistémologique – pour les tenants d'une version poppérienne pure et dure – consiste à s'accommoder à la possibilité de prédire sur des mondes décorés du nôtre. Beaucoup de cosmologistes considèrent qu'il s'agit de métaphysique ou de mythologie mais certainement pas de science (au sens donc de la falsifiabilité où nous l'entendons ici). C'est une position que nous nous proposons de contredire dans ce chapitre. Bien que le multivers soit intéressant au-delà du strict paradigme physico-mathématique, nous souhaitons ici montrer que même dans le cadre restreint de la science « dure », les univers parallèles sont une prédiction pertinente et légitime.

La science est une entreprise expérimentale ou observationnelle et il est compréhensible que l'évocation de mondes « inobservables » puisse déranger la bienséance

¹⁶² S. Hawking promet depuis trente ans que cela adviendra dans les dix prochaines années.

¹⁶³ Ce magnifique lagrangien (unique équation de ce mémoire) résume l'essentiel de notre connaissance actuelle de la physique. On y reconnaît les termes associés aux photons, gluons, bosons-W, quarks, leptons, Higgs et gravité, ainsi que les interactions contraintes par les symétries de jauge.

orthodoxie. Il existe pourtant une transition douce – presque continue – entre le difficilement observable et l'absolument inobservable. Suivant l'image de Martin Rees¹⁶⁴, on peut distinguer plusieurs horizons pour comprendre en quoi il n'y a rien de particulièrement spécifique à l'étude des « arrière mondes »¹⁶⁵ :

- la limite des télescopes actuels. Les instruments d'observation ont une sensibilité limitée qui ne révèle les galaxies que jusqu'à une certaine distance de la Terre. À l'évidence, cette limite n'a rien d'intrinsèque et évolue rapidement avec le temps en simple conséquence de nos progrès techniques. Personne ne doute qu'il est scientifiquement fondé de supposer qu'il existe des objets au-delà de cet « horizon » et qu'il est tout à fait naturel de s'intéresser au comportement de ces galaxies, bien qu'elles ne soient pas observées.
- la limite causale actuelle. Même si nos télescopes étaient infiniment puissants, il ne serait pas possible de voir infiniment loin, simplement parce que la vitesse de la lumière est finie. L'horizon causal est défini par la distance qu'aurait pu parcourir un signal se propageant à la vitesse de la lumière depuis le Big-Bang. Là encore, les galaxies se trouvant sur cette sphère n'ont intrinsèquement rien de particulier puisque cet horizon est défini par rapport à l'observateur. Il est strictement impossible de voir *aujourd'hui* au-delà de cette limite mais, si l'Univers n'accélère pas son expansion, il sera *ultérieurement* envisageable d'observer les objets au-delà de l'horizon actuel. L'horizon grandit avec le temps et les mondes cachés se révèlent au fur et à mesure de l'expansion. Ces galaxies lointaines ont-elles un statut épistémique différent des précédentes ? Leur existence est-elle appauvrie ?
- la limite causale absolue. S'il existe, comme c'est presque certainement avéré aujourd'hui, une constante cosmologique positive, le facteur d'échelle de l'Univers finira par croître plus vite que l'horizon. Auquel cas, il existera des zones du même univers qui resteront à jamais décorrelées. Les galaxies les plus lointaines demeureront inobservables pour nous, même au bout d'un temps infini. Il n'y a ni moyen technique, ni espoir physique de voir ces lieux reculés de notre univers. Pourtant, ils ne sont en rien intrinsèquement spécifiques ou différents de la zone

¹⁶⁴ M. REES, « Cosmology and the multiverse », pp.61-62, in B. CARR (éd.) *Universe or Multiverse*, Cambridge, Cambridge University Press, 2007

¹⁶⁵ Le multivers n'a évidemment pas grand rapport avec la pensée nietzschéenne, si ce n'est, peut-être, l'éternel retour dans le cas des collisions branaires *ekpyrotiques*.

(vraisemblablement de taille dérisoire à l'échelle de l'Univers) qui nous est accessible. Faut-il leur réserver une ontologie atrophiée ?

- la limite universelle. Les galaxies inobservables décrites au point précédent ont émergé du même Big-Bang que le nôtre. Mais, au-delà des régions causalement isolées d'un même univers, il peut (et *doit* dans beaucoup de modèles) aussi exister d'autres univers. Ces espaces-temps totalement disjoints du nôtre (par exemple associés à d'autres Big-Bangs) sont-ils moins réels que le nôtre ? Du point de vue du formalisme physico-mathématique, la réponse est clairement négative : ils prennent part au Cosmos (au multivers) ni plus ni moins que notre monde.

La question de l'existence d'autres univers émerge donc dans le strict cadre de la physique « poppérienne » usuelle. Elle n'est pas un désir métaphysique ou une résurgence théologique mais une prédiction explicite et inévitable de théories nécessaires à la compréhension de notre univers. Aucun scientifique ne prétendrait que prédiquer sur des galaxies dont le décalage vers le rouge vaut 10 environ n'est pas autorisé par la physique au prétexte qu'elles sont aujourd'hui inobservables. L'idée des mondes multiples n'est vraisemblablement qu'un pas supplémentaire dans cette direction. Résiste-t-elle néanmoins au critère de falsifiabilité (que satisfont en droit si ce n'est en fait les propositions sur les objets lointains de notre Univers) ?

Comme précédemment mentionné, il existe différents mécanismes de création de multivers. Inflation éternelle, rebonds dans les trous noirs, dimensions supplémentaires branaires, structures mathématiques différentes, etc. Chaque scénario est attrayant et cohérent. Mais tous sont évidemment spéculatifs. Clairement, c'est une théorie quantique de la gravitation, autorisant une description détaillée de l'Univers primordial, qui permettra d'aller plus avant dans cette voie. Mais le point clé tient à ce que *si* cette théorie, qui devra être testée dans notre univers où elle sera évidemment falsifiable, prédit l'existence d'univers multiples, il n'y aura aucune raison de ne pas prendre leur existence au sérieux et de ne pas les considérer comme entrant de plein droit dans le champ de la science. Une théorie est « validée » parce qu'un certain nombre de ses conséquences sont observées et, lorsque tel est le cas, elle peut être mise à contribution pour investiguer des situations qui ne peuvent (ni ne doivent) être toutes vérifiées. C'est même, en un sens, la raison d'être du modèle. C'est déjà ainsi que procède la physique contemporaine, sans choquer qui que ce soit : les théories

connues et avérées¹⁶⁶ (par exemple mécanique quantique et relativité générale) sont aussi utilisées pour prédire sur des situations non observées – voire non observables – comme les quarks ou l’intérieur des trous noirs. Il n’a jamais été nécessaire que *toutes* les prédictions d’une théorie soient vérifiées. Un certain nombre d’entre elles sont soumises à l’épreuve de l’expérience et, lorsque le modèle a ainsi acquis suffisamment de crédibilité, il peut être utilisé « hors champ ». C’est exactement de cette démarche que procèdent les multivers. La théorie des cordes n’a évidemment pas encore le degré de véracité de la théorie d’Einstein ou de celle de Schrödinger. Mais s’il en était ainsi dans le futur, les univers multiples qu’elle prévoit ne serait pas moins scientifique que ce qui est aujourd’hui décrit des particules élémentaires par le modèle standard, fussent-elles non observables à l’état libre.

Bien qu’un grand nombre de difficultés techniques se présentent (la méthodologie précise sera décrite au prochain chapitre), il est *a priori* possible de faire des prédictions sur le multivers et de réfuter l’hypothèse. Les modèles conduisant à des univers parallèles *sont* scientifiques au sens de Popper. Bien évidemment, les tests ne peuvent être que de nature statistique. Mais tel est déjà le cas dans notre univers où les prédictions physiques ne peuvent être validées ou réfutées qu’à un certain niveau statistique de confiance (résultant soit de l’aléa quantique fondamental soit des imprécisions inhérentes à la mesure). L’existence d’une constante cosmologique non nulle n’est, par exemple, aujourd’hui avérée qu’à 95% de niveau de confiance environ. Le fait que la nébuleuse du Crabe émette des photons gamma dans le domaine du TeV est bien mieux établi, à un niveau de confiance de l’ordre de 99.9999%. Mais la possibilité d’une simple fluctuation n’est jamais strictement exclue. C’est exactement ce type de raisonnement qui permet de faire des prédictions dans le multivers. Très grossièrement : si $P(i)$ est la proportion des univers présentant un vide de type i dans le multivers et si $f(i)$ représente la probabilité de trouver un observateur dans le vide i , la probabilité que nous nous trouvions effectivement dans un univers de type i est proportionnelle à $P(i)*f(i)$. Autrement dit, plus les univers de type i sont nombreux et plus ils sont favorables à l’existence d’êtres vivants effectuant des mesures sur leur univers, plus la probabilité que nous nous trouvions dans un tel univers est élevée. L’argument est dans son principe extrêmement simple. Si la théorie utilisée pour décrire le multivers permet de calculer les probabilités d’occurrence des différents types d’univers (et elle doit permettre de

¹⁶⁶ C'est-à-dire, dans le cadre de l'épistémologie choisie pour ce chapitre, les théories ayant passé avec succès un grand nombre de tests de falsification.

le faire, sans quoi elle n'est plus une théorie digne de ce nom), il est donc possible de comparer les caractéristiques de notre univers avec la distribution de probabilités prédite et de réfuter ou de confirmer le modèle à un certain niveau de confiance. Autrement dit, le modèle est bien réfutable. Les multivers font partie de la science au sens usuel du terme. Un exemple simple de raisonnement anthropique de ce type, au sein même de notre univers, peut être donné : même si l'on ne connaissait rien à la façon dont les étoiles et les planètes se forment, nous ne devrions pas être surpris de constater que l'orbite de la Terre est proche d'un cercle. Si elle était hautement excentrique, l'eau serait vaporisée au périhélie et gelée à l'aphélie, un environnement incompatible avec la vie. En revanche, une faible excentricité, jusqu'à environ 0.1, ne pose pas de problème particulier. Si l'on observait que l'excentricité de la Terre était de 0.00000001 (autrement dit une ellipse extrêmement proche du cercle parfait), la proposition anthropique serait en difficulté : rien ne justifierait que l'on se trouve dans cet intervalle très mince de la distribution bayésienne *a priori* plate entre 0 et 1. Statistiquement parlant, une excentricité de l'ordre de 0.1 est donc très raisonnable compte tenu d'un modèle aléatoire et d'une sélection anthropique. Une excentricité minuscule entrerait en contradiction (probabiliste) avec la proposition. L'argument anthropique *est* falsifiable.

À ce niveau, une importante précision s'impose. L'argument anthropique n'est *pas* une explication physique. Il ne constitue *pas* un modèle explicatif de l'état du monde. La phrase de Stephen Hawking « l'Univers est isotrope parce que nous sommes là » me semble absolument dénuée de sens. Ou plus exactement, elle constitue un strict contresens. Il n'y a *aucune* dimension explicative dans l'argument anthropique. Il s'agit là d'une erreur de raisonnement commune qui a généré beaucoup de confusion en physique contemporaine. L'argument anthropique est uniquement pertinent en cela qu'il permet de valider ou d'invalidier un modèle prédictif dont il ne constitue qu'un rouage dans le calcul de la distribution de probabilités associée. Le poids anthropique est nécessaire à l'effectuation de prédictions dans le multivers. Il n'est pas, en tant que tel, explicatif. C'est la théorie génératrice du multivers (elle-même mise à l'épreuve dans notre propre univers puisque l'existence d'univers parallèles ne saurait être sa seule conséquence) qui est explicative. (Évidemment, le concept même d'explication est sujet à caution. Sans doute s'agit-il plus d'une démarche métaphorique que réellement explicative. La science peut être une construction entretenant un rapport particulier avec « l'altérité » dans une vision relationnelle sans permettre une véritable *explication* au sens ontique du terme. Mais là n'est pas le point ici discuté.) Quand il est couramment prétendu que l'argument anthropique de Weinberg

permet d'expliquer la valeur de la constante cosmologique (si elle était notablement plus grande ou plus petite que ce qui est aujourd'hui observé la vie ne serait pas possible), il me semble qu'il s'agit d'une mésinterprétation logique fondamentale. L'argument de Weinberg permet de *prévoir* la valeur de la constante cosmologique, certainement pas de l'*expliquer*. On peut aisément prévoir la position de la trotteuse d'une montre au bout de quelques secondes sans avoir rien compris au délicat mécanisme de rouages qui se trouve dans le boîtier ! Weinberg constate simplement (et la vie ne joue d'ailleurs aucun rôle dans l'argument) que l'Univers serait autre si la constante cosmologique était autre. Cela permet de calculer sa valeur. C'est une démarche incontestablement pertinente du point de vue scientifique. Mais elle n'a, en elle-même, *aucune* valeur explicative. Elle n'acquiert ce statut que s'il existe un mécanisme de génération d'univers multiples générant différentes valeurs de la constante cosmologique. Fort heureusement, la théorie des cordes permet justement cette possibilité. Dans l'espace des paramètres des cordes, il existe un très grand nombre de vallées dont certaines présentent des constantes cosmologiques compatibles avec notre existence. C'est à ce niveau que l'argument anthropique intervient, pour augmenter la pondération de ces vides par ailleurs défavorisés dans le multivers considéré *ex abstracto*.

Ces réserves faites, il est donc bel et bien possible de proposer des prédictions dans le multivers et de le soumettre à l'épreuve de la falsification poppérienne.

Deux pierres d'achoppements se présentent néanmoins et doivent être mentionnées. Elles induisent une immense complexité technique dans la construction de prédictions fiables au sein du multivers mais elles n'invalident *pas* la possibilité de la démarche. La première difficulté a trait à l'évaluation de la probabilité d'émergence d'une conscience intelligente dans un univers de type donné. Il n'est pas aujourd'hui possible d'évaluer cette grandeur, même de façon approximative. Le schème de développement de la vie ne nous est pas suffisamment connu. La définition même de la vie ne nous est pas suffisamment connue. Par défaut, on suppose généralement que le nombre de « civilisations » s'interrogeant sur les lois de l'Univers est proportionnel au nombre de galaxies. C'est évidemment une approximation très naïve. Il a récemment été montré¹⁶⁷ que le choix d'autres estimateurs, tout aussi (dé)raisonnables pouvait conduire à des prédictions très différentes sur certains paramètres cosmologiques. La seconde difficulté est liée au problème de la mesure. Il n'est pas évident de quantifier la « proportion d'univers de type i » dans un ensemble infini. Par exemple, quelle

¹⁶⁷ Voir, par exemple, G.D. STARKMAN & R. TROTTA, « Why Anthropic Reasoning Cannot Predict Lambda », Phys. Rev. Lett., 97, 201301, 2006

est la proportion de nombres pairs dans l'ensemble des entiers naturels ? L'idée la plus évidente consiste à considérer un sous-ensemble et à effectuer un passage à la limite. Si l'on écrit les nombres dans l'ordre « usuel » 1,2,3,4,5,6... la réponse est évidemment 1/2. Mais si l'on écrit les nombres suivants une séquence 1,3,2,5,7,4,9,11,6,... autrement dit deux nombres impairs consécutifs alternés avec un nombre pair, on obtient cette fois une proportion de 1/3 . Clairement, cette façon d'écrire est aussi légitime que la précédente et aucun nombre n'est perdu dans cette séquence. Autrement dit, la « proportion » de nombres pairs dans \mathbb{N} n'est *pas* définie de façon non ambiguë, contrairement à une certaine idée intuitive. C'est le problème de la mesure dans le multivers¹⁶⁸. Il n'est pas évident de quantifier la proportion d'univers de type i dans un ensemble infini. Sans compter la difficulté quasi insurmontable de définition d'un temps unique qui autoriserait une « coupe » dans l'hyper-espace global. Il semble qu'il soit extrêmement délicat de tester les théories de multivers et qu'un formalisme adapté soit à inventer. Mais rien n'interdit *a priori* de penser qu'une mathématique, une physique et une biologie suffisamment avancées puissent permettre de considérer les univers parallèles dans une optique strictement poppérienne.

Des prédictions dans le multivers

Considérons que nous disposons d'un candidat-théorie T et de conditions aux limites cosmologiques qui prédisent un ensemble de réalisations physiques, chacune étant approximativement homogène et pouvant être caractérisée par des paramètres (c'est-à-dire des constantes « fondamentales » apparaissant dans les modèles standards de la physique des particules et de la cosmologie). Supposons, pour la simplicité de l'exposé, que les lois elles-mêmes restent identiques (il serait possible de généraliser cette hypothèse et d'étudier des lois différentes via une paramétrisation moins restrictive). Le système est un multivers, chaque réalisation est un univers. Quelles conclusions peut-on tirer sur la justesse de T à partir de l'observation d'un unique univers, le nôtre ?

Un cas particulier favorable serait par exemple celui pour lequel aucun univers ne pourrait présenter la valeur effectivement ici observée d'un paramètre de la théorie. Dans ce

¹⁶⁸ Voir, par exemple, A. VILENKIN, *A measure of the multiverse*, J. Phys. A : Math. Theor. 40, pp 6777-6785, 2007

cas, T serait simplement exclu. On peut noter que toute théorie T pour laquelle il existe au moins un paramètre qui présente une gamme de valeurs exclues dans tous les univers est rigoureusement falsifiable. Mais ce n'est pas une condition nécessaire. Réciproquement, si T prédit une unique valeur non triviale pour un paramètre dans tous les multivers et que celle-ci est effectivement observée dans notre monde, cela corroborerait indéniablement la théorie (sans toutefois tomber explicitement sous le critère poppérien par cette unique propriété). Les cas intéressants et réalistes sont évidemment ceux pour lesquelles la valeur observée d'un paramètre se réalise dans certains univers (mais pas dans tout le multivers). T est-il encore falsifiable ? Fondamentalement, il n'y a aucune raison qu'il en soit autrement. Supposons que T prédise une situation A avec une probabilité de 0.9999999 et une situation B avec une probabilité de 0.00000001 (et que l'une et l'autre soient anthropiquement neutres). Si nous observons B dans notre univers, il est tout à fait raisonnable de réfuter T (au niveau de confiance correspondant). Le fait que l'expérience ne soit pas reproductible (puisque nous ne voyons qu'un seul univers) n'invalide pas la démarche. Cela signifie simplement qu'il n'est pas possible d'améliorer la significativité statistique du résultat avec des mesures plus nombreuses. En revanche, l'utilisation d'autres paramètres peut contribuer à réfuter T. Finalement, toute la question est celle de la capacité de T à prédire des distributions de probabilités pour ses paramètres.

Pour calculer une distribution de probabilités dans le multivers, il faut que plusieurs conditions soient réunies¹⁶⁹.

- D'abord, il faut un ensemble d'univers clairement défini, chacun présentant des lois homogènes, mais tous ne présentant pas nécessairement les mêmes lois.
- Ensuite, il faut identifier les paramètres pertinents pour caractériser les différents univers. Il pourrait s'agir de la vingtaine de paramètres libres du modèle standard de la physique des particules et de la dizaine de paramètres du modèle cosmologique. Notons A_i (avec $i=1 \dots N$) l'ensemble des paramètres.
- Étant donné les paramètres, il faut une *mesure* avec laquelle calculer leur densité de probabilité multidimensionnelle $P(A_i)$. On peut, par exemple, compter chaque univers sur un pied d'égalité de façon que $P(A_i)$ soit la probabilité qu'un univers pris au hasard présente les paramètres A_i . Ce n'est pas un choix trivial car si l'on entend ici par univers les « univers-bulles » de l'inflation éternelle, rien n'empêche

¹⁶⁹ A. AGUIRRE, « Making predictions in a multiverse : conundrums, dangers, coincidences », op. cit.

de subdiviser un univers en un grand nombre de sous-univers tout aussi légitimes et de changer ainsi radicalement la fonction de distribution. Cela inciterait à plutôt choisir une mesure fondée sur le volume : $PV(A_i)$ dénoterait la probabilité qu'un point aléatoire dans l'espace se trouve dans un univers présentant les paramètres A_i . Mais dans un univers en expansion, le volume augmente et cette mesure dépend donc du temps auquel elle est considérée. Mais le temps n'est pas défini de façon univoque dans le multivers... On peut alors considérer des objets stables, par exemple des baryons, et définir $PB(A_i)$ pour évaluer la probabilité qu'un baryon se trouve dans un univers avec les paramètres A_i . Mais on exclut alors les univers sans baryons. Comme mentionné à la section précédente, le choix de la mesure est aujourd'hui encore un problème ouvert dans la compréhension du multivers. Il est cependant très vraisemblable qu'il s'agisse plus d'une difficulté conceptuelle surmontable que d'un véritable écueil de la démarche.

- Une fois la mesure M choisie, reste à calculer explicitement $PM(A_i)$ et cette tâche peut être très ardue. En particulier, avec une mesure de type « volume » (la plus utilisée), il est très délicat de comparer des univers de volumes infinis. C'est ce qu'on nomme génériquement le problème de « l'ordonnancement ». Beaucoup d'articles¹⁷⁰ récents sont dévolus à l'étude de ce point et un ensemble de prescriptions réalistes semble lentement émerger. Ces règles demeurent néanmoins plus spéculatives et heuristiques que rigoureusement établies.
- Lorsque $PM(A_i)$ est connue, dispose-t-on d'une prédiction fiable ? Précisément : une réponse à la question « Etant donné que je suis un objet- M , dans quel univers suis-je ? » peut en effet être donnée. Mais ce n'est pas exactement la même question que « Dans quel univers suis-je ? » car différents objets- M conduiront à différentes probabilités. Mais, surtout, mon association avec l'objet- M n'est pas du tout évidente. Ceci, justement, pour des raisons anthropiques. Si, par exemple, on considère une mesure par le volume, il ne faut pas oublier que *je* ne peux *pas* être un point aléatoire dans l'espace : la vie ne peut *pas* se développer n'importe où. Enfin, il est probable que la question posée ne soit pas « suffisante » : on en sait beaucoup plus sur notre univers que son volume ou son contenu baryonique... Ces questions émergent comme résultant de choix de *conditionnalisations*. Les probabilités $PM(A_i)$ sont minimalement conditionnées tandis que la question

¹⁷⁰ Voir, par exemple, J. GARRIGA *et alii*, « Probabilities in the inflationary multiverse », JCAP, 0601 p17, 2006

« étant donné que je suis un observateur aléatoire, que dois-je mesurer ? » spécifie des probabilités conditionnées par l'existence d'un observateur. L'approche « étant donné ce que je sais, que vais-je observer ? » spécifie des probabilités conditionnées sur le fait d'être dans un univers présentant toutes les propriétés scientifiques connues aujourd'hui. On peut qualifier ces trois approches d'« ascendantes », « anthropiques » et « descendantes ». Nommons O l'objet de conditionnalisation utilisé pour spécifier ces probabilités conditionnelles. Dans le raisonnement descendant, il s'agit de l'objet-M, dans le raisonnement anthropique, il s'agit d'un observateur, dans le raisonnement « ascendant », il s'agit d'un monde avec les lois telles que nous les connaissons. Cela couvre tout le spectre, de la conditionnalisation la plus faible (descendante) à la plus forte (ascendante). De même que l'objet-M, le choix de l'objet-O est fondamental et délicat. Aucune démarche n'est à l'évidence plus légitime que les autres.

- Lorsque le choix de conditionnalisation O est effectué, il faut évaluer le nombre $N(O,M,A_i)$ d'objets-O par objet-M pour chaque ensemble de paramètres A_i . Si, par exemple, on prend un observateur pour O et les brayons pour M, il faut calculer le nombre d'observateurs par baryon en fonction des paramètres cosmologiques. On peut alors calculer $PO(A_i)=PM(A_i)N(O,M,A_i)$, c'est-à-dire la probabilité qu'un objet-O (un observateur par exemple) choisi au hasard réside dans un univers avec les paramètres A_i . Cette procédure n'est pas simple. En particulier, il est fréquent que $N(O,M,A_i)$ soit infini (cela se produit dès que l'existence de l'objet-O n'entraîne pas l'existence de l'objet-M). De plus, le choix de l'objet-O n'est pas « naturellement défini » et modifie considérablement le résultat.
- Finalement, la dernière étape consiste à supposer que nous sommes des observateurs « standards » au sein de l'espace des paramètres autorisant notre existence. C'est ce qu'on nomme le « principe de médiocrité »¹⁷¹. Bien que très raisonnable, il faut bien le considérer comme un postulat supplémentaire de la démarche.

Cette procédure étant définie, il est possible de faire des prédictions dans le multivers. Si les observations (nécessairement effectuées dans notre univers) sont improbables au vu de T et

¹⁷¹ A. VILENKIN, « predictions from quantum cosmology », Phys. Rev. Lett., 74, p 846, 1995

des choix de O et de M, il est possible de réfuter T et ses conséquences sur des univers parallèles intrinsèquement inobservables.

Il n'est pas aisé de produire des prédictions dans le multivers ou de réfuter le modèle conduisant à sa genèse. Mais ce n'est pas impossible. Là encore, il faut rappeler que ni l'argument anthropique, ni le multivers ne sont en eux-mêmes des théories. Il existe des véritables théories physiques, comme la théorie des cordes, qui conduisent au multivers comme une *conséquence* de leur structure et génèrent des domaines satisfaisant la contrainte anthropique. N'en déplaisent aux partisans de la science « pure, dure et poppérienne », les univers multiples ne sont pas de vagues abstractions ou des désirs métaphysiques refoulés mais bel et bien des prédictions testables issues de modèles mathématico-physiques pertinents.

On peut achever ce chapitre visant à souligner la « scientificité » du multivers par un exemple venant de John Donoghue¹⁷². Les masses des particules élémentaires ont une distribution essentiellement aléatoire en échelle logarithmique, c'est-à-dire invariante d'échelle. Dans le multivers associé au paysage de ma théorie des cordes, les masses ne sont pas supposées exhiber une structure particulière mais simplement représenter un état possible de la théorie. Dans la solution « Intersection de Mondes Branaires » de la théorie des cordes, notre monde quadridimensionnel apparaît comme l'intersection de branes de dimensionnalité plus élevée. Dans ces approches, les masses des quarks et des leptons sont déterminées par l'aire entre trois intersections de ces surfaces. En particulier, la distribution est proportionnelle à l'exponentielle de l'aire. Dans le multivers du paysage des cordes, il n'existe pas une unique aire mais une distribution d'aires. Si ces aires sont distribuées uniformément, alors les masses sont effectivement invariantes d'échelle ! En principe, la distribution des aires peut être calculée à partir de la théorie des cordes. Il est donc bien possible de mener des prédictions dans le multivers...

Au-delà de cette dimension probabiliste, Léonard Susskind¹⁷³ pense qu'il sera possible de « voir » des traces du multivers dans le fond diffus cosmologique observé au sein de notre propre univers. Son impression se fonde sur une analogie avec la physique des trous noirs

¹⁷² J.F. DONOGHUE, K. DUTTA & A. ROSS, « Quark and lepton masses in the landscape », *Phys. Rev. D*, 73, 113002, 2006

¹⁷³ L. Susskind, in *Le Paysage Cosmique*, *op. cit.*

pour laquelle il est apparu récemment que l'information contenue dans la matière franchissant l'horizon (dans son référentiel propre) n'était pas perdu mais se trouvait coder dans une sorte d'« hologramme ». Néanmoins, et contrairement aux assertions hâtives de Susskind, l'horizon cosmologique est extrêmement différent de l'horizon d'un trou noir. La terminologie peut ici conduire à de fausses illusions... La déconnexion causale n'est pas de même nature et rien ne laisse aujourd'hui entrevoir pourquoi ni comment une information sur les mondes « au-delà » pourrait parvenir directement jusqu'à nous. L'histoire, pourtant, invite à un certain recul et à un certain optimisme. Auguste Comte ne considérait-il pas que toute proposition sur des objets hors du système solaire était intrinsèquement et définitivement non-scientifique puisqu'il ne serait jamais possible d'aller en évaluer la nature chimique ? La spectroscopie n'avait pas encore été inventée...

Vers une porosité mythique de la phusika

Les modèles de multivers entrent donc dans le champ de la science orthodoxe et poppérienne. Mais quand bien même ce ne serait pas le cas, l'histoire ne s'achèverait pas à un simple problème de ligne de démarcation. D'abord parce qu'aucune discipline ne se laisse *extérieurement* définir. La musique, si elle avait été formellement cernée par un esthéticien de la fin du dix-neuvième siècle, aurait-elle intégré dans sa définition le *quatuor à cordes n°2 en fa dièse mineur* de Schönberg ou même accepté la possibilité de l'*accord Tristan* de Wagner et de son « irrésolution » en lignes chromatiques divergentes ? Malevitch, Kandinsky et Mondrian auraient-ils été peintres au sens « classique » d'une philosophie cartésienne ? *Fountain* aurait-il été une sculpture pour Vasari ? Ou René Char un poète pour les théoriciens de la littérature du siècle des lumières ? Les révolutions viennent de l'*intérieur*. Les champs disciplinaires s'auto-transforment. Si donc la science, telle que pratiquée par les scientifiques formés à l'épistémologie classique, empruntait un chemin inusité – à l'image de l'atonalité *inouïe* choisie il y a un siècle par la musique dodécaphonique – il serait évidemment inutile, et même vraisemblablement un peu grotesque, qu'une philosophie (qui plus est très contestée dans son propre champ) vienne la rappeler à l'ordre. C'est la *praxis* scientifique qui définit la science. Ensuite, si même il pouvait être montré que les multivers ne sont *pas* scientifiques au sens consensuel de l'adjectif, ils n'en deviendraient pas pour autant une pure vacuité. Nous

proposerons qu'au délinéament du domaine strict et identifié de la physique, cette proposition peut jouer un rôle fondamental de trait d'union vers d'autres savoirs et d'autres créations.

Léonard Susskind aime à rappeler¹⁷⁴ que l'argument de la falsifiabilité est si naïf et désuet¹⁷⁵ que presque toutes les grandes avancées récentes se sont vues qualifiées de non-scientifiques parce qu'infalsifiables. En psychologie, le behaviorisme de Skinner considérait que les émotions ou « états de conscience » étaient inobservables et devaient donc être niés par une étude scientifique du psychisme. Fort heureusement, les praticiens actuels n'ont pas suivi cette voie. En physique, au début de la théorie des quarks, bon nombre de ses opposants lui reprochaient d'être infalsifiable puisque ces constituants – supposés élémentaires – ne pouvaient être examinés individuellement, demeurant, en quelque sorte, cachés derrière un voile infranchissable. Personne, aujourd'hui, remet sérieusement en cause ce modèle. Dans le même ordre d'idée, Mach s'opposait aux atomes de Boltzmann en expliquant que s'ils étaient « pratiques » dans la description, ils n'étaient pas une véritable hypothèse scientifique car ils demeuraient intrinsèquement absolument hors de toute atteinte expérimentale possible. On peine à imaginer aujourd'hui une science sans atomes. Lorsque l'idée de l'inflation a été émise, il fut considéré qu'elle n'était pas scientifique car rien ne pouvait contredire une supposition sur ce qui advint 10^{-30} s après le Big-Bang ! L'inflation était un vœu métaphysique mais pas un rouage de la cosmologie respectable. Elle fonde maintenant, et depuis plus d'une décennie, l'étude physico-mathématique de l'Univers. En biologie, si Popper avait eu un précurseur, les partisans de Lamarck auraient sans doute pu arguer que le darwinisme est infalsifiable puisqu'il n'est pas possible de remonter le cours du temps et d'observer les phénomènes qui ont mené à la sélection naturelle dont on perçoit aujourd'hui les conséquences.

Le critère de Popper n'est pas inintéressant en tant qu'exercice définitoire *a posteriori* de l'activité scientifique. Il fit sens dans la pensée de son époque. Mais l'histoire montre qu'il serait fort déraisonnable de l'ériger en critère universel de rectitude pour les pratiques futures. Aucune discipline cognitive ou poétique vivante, qu'il s'agisse de philosophie, de science ou d'art n'aime à se laisser enfermer dans un carcan étroit ou figé.

¹⁷⁴ L. SUSSKIND, *Le paysage cosmique*, pp 215-218, *op. cit.*

¹⁷⁵ R. Feynman, inspirant Susskind, écrivait « Les philosophes sont intarissables sur ce qui est absolument indispensable en science, et c'est toujours, autant que chacun peut le constater, plutôt naïf et probablement erroné ». Evidemment, il ne s'agit pas Pour Feynman de contester la pertinence – et même la nécessité – d'une épistémologie. Il s'agit d'un réfuter le caractère trop expressément *prescriptif*.

David Lewis s'est également entendu objecter que le réalisme modal souffrait de vacuité épistémique parce que les mondes invoqués étaient décorellés et donc inaccessibles à la connaissance. Sa réponse est intéressante parce qu'elle prend appui sur les concepts mathématiques : il nous est incontestablement possible d'acquérir des connaissances sur les nombres, les ensembles, les structures, etc. bien qu'aucun contact causal n'existe entre eux et nous. Clairement, cette position relève d'un présupposé platonicien qui ne va pas de soi et peut être contesté. Mais, dans ce cadre, elle suggère – pour l'existence de mondes multiples – une intéressante distinction entre vérités nécessaires et vérités contingentes. Les mathématiques et la modalité diffèrent dans leurs axiomatiques mais relèvent toutes deux de vérités nécessaires. Nul besoin, par conséquent, de bénéficier de liens causaux pour montrer la pertinence de leurs prédictions. Dans le sillage de Lewis, on pourrait arguer que si les multivers physiques apparaissaient comme une réalisation possible d'un modèle (éventuellement lui-même contingent), ils requièreraient en effet des observations pour être validés. Ce qui n'est pas possible compte tenu de l'indépendance causale des univers. Si, en revanche, ils s'imposent comme une inévitable conséquence de la théorie, ils ne nécessitent aucune mise à l'épreuve particulière. La situation n'est pas exactement la même que dans le cadre du réalisme modal car les modèles physiques n'atteignent pas, par eux-mêmes, le degré de nécessité des propositions mathématiques. Néanmoins, le fossé tend à s'amenuiser : d'une part, la mathématique a perdu de sa superbe et ses fondements eux-mêmes ne sauraient faire l'économie d'un certain degré de « conventionnalisme » ; d'autre part la physique théorique – et notamment la théorie des cordes – permet une visée et une vision totalisantes sans précédent dans l'histoire. Il existerait donc, selon ce type de pensées, une légitimité aux multivers, eussent-ils été infalsifiables par essence (ce qui n'est pas le cas comme nous l'avons précédemment montré). Les objections à la proposition de Lewis sont de fait assez similaires aux critiques dirigées contre les univers parallèles de la cosmologie physique. Il est intéressant de constater que la même réponse – celle de l'économie conceptuelle, n'en déplaise au sens commun – est également féconde dans les deux situations, précisément parce que les deux démarches procèdent d'un même désir : oser penser le(s) monde(s) tel(s) que les modèles les plus efficaces nous y invitent, sans censurer les « inobservables » au motif de leur « éloignement ».

Daniel Parrochia rappelle qu'il y a pour l'art deux manières de mourir¹⁷⁶ : celle qui consiste à se laisser dissoudre dans son négatif autodérisoire et celle qui, suivant les préceptes hégéliens, permet de se conserver en se dépassant, c'est-à-dire de se sublimer. Si cette dernière voie permet à la musique contemporaine de faire écho à la cosmologie d'aujourd'hui¹⁷⁷, et, peut-être, de « recondenser » une pensée philosophique en voie de gazéification, nous proposons, réciproquement, que la physique des multivers pourrait conduire la Science de la Nature à dissoudre ses frontières ou, pour le moins, à élargir les mailles du filet-limite. Les conditions aux limites, justement, sont toujours la pierre d'achoppement des théories du tout : c'est là qu'il faut inventer un nouveau « bord du monde ». Le multivers ne repousse pas le délinéament que dans l'espace physique – au sens métrique ou topologique –, il brise également les clôtures conceptuelles d'un champ disciplinaire bien trop isolé dans le foisonnement de la pensée humaine. Il crée une porosité symbolique avec le mythe. *L'indispensable* mythe. La science seule ne semble pas en mesure d'exprimer la totalité du monde. Même le multiver de niveau III proposé par M. Tegmark (la démocratie formelle absolue où plus aucun paramètre libre n'intervient dans le modèle), ambitionnant de clore la porte à toute proposition de niveau supérieure, ne saurait éviter les méta-questions : pourquoi la langue mathématique et pas une autre ? Pourquoi une axiomatique figée et non fluctuante ? Pourquoi Platon et pas Aristote ? Pourquoi même l'existence d'une règle du jeu et non pas une partie absolument libre, pourquoi une statuaire apollinienne et pas un chant dionysiaque ? Pourquoi la lyre et non la cithare ? La science, incontestablement, est une « manière de faire un monde ». Une manière parmi d'autres. Une manière incomplète. Une manière lacunaire. Une projection humaine, partielle et partielle, en prise avec l'altérité. (Pourquoi le créationnisme gagne-t-il aujourd'hui du terrain aux Etats-Unis et dans tous les pays occidentaux, au point d'être parfois enseigné – 64% des Américains y sont favorables¹⁷⁸ – comme une alternative plausible à la théorie de l'évolution ? Non pas parce que certains pensent qu'il est *scientifiquement* possible que l'homme ait été créé à l'image de Dieu le 23 octobre 4004 avant Jésus-Christ et que les fossiles soient des artéfacts déposés par Dieu pour égarer les hommes¹⁷⁹. Chacun sait que les faits, *scientifiquement* considérés, invalideront immédiatement cette hypothèse *scientifiquement* aberrante. Mais les prémices et les hypothèses de la *science*, le cadre même de sa pensée et de sa méthode, sont

¹⁷⁶ D. PARROCHIA, *Philosophie et Musique Contemporaine*, Paris, Champ Vallon, 2006, p 292

¹⁷⁷ Comme ce fut le cas il y a plusieurs siècles lorsque, suivant l'expression de Koyré, l'espace infini se substitua au monde clos (cf. Parrochia, *Philosophie et Musique Contemporaine*, p 289, *op. cit.*)

¹⁷⁸ Sondage de l'institut de recherches Pew publié en juillet 2005

¹⁷⁹ Argument fréquemment employé par les créationnistes pour réfuter les « preuves » scientifiques d'un âge de l'Univers supérieur à 6000 ans

contestables et, effectivement, contestés. Rien n'impose *a priori* que les constructions scientifiques soient acceptées comme nécessaires et inévitables. Il en relève du choix. Même la physique mathématique est « réfutable en droit » ! Descartes peut jouer contre Descartes. L'argument de la cohérence entre la position intellectuelle et la vie quotidienne, immergée dans une société technocratique fondée sur un usage immodéré des « objets scientifiques », n'est pas même strictement tenable : rien n'impose *a priori* la cohérence. Elle n'est ni plus ni moins nécessaire que l'« impératif catégorique » dont l'éthique normative moderne eut beau jeu de montrer la contingence. Paul Veyne écrivait¹⁸⁰ :

« 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'*Illiade* elle sera non moins vraie, en son programme de vérité mythique. Et Alice au pays des merveilles également. »

Les luttes, fussent-elles menées au nom des lumières, contre cet inévitable relativisme sont sans doute à l'origine de bien des difficultés épistémologiques. Elles me semblent perdues d'avance, sans fondement et sans profondeur.) Sans doute la science doit-elle prendre ses distances par rapport à « l'évidence » dont elle a – indûment – joui durant quelques siècles : c'est au nom d'un choix et d'un sens, d'un désir et d'un affect, d'une création et d'une position, que la science peut reconquérir sa dimension *merveilleuse*¹⁸¹ dans un monde qu'elle *enchante*¹⁸² en l'inventant. Le merveilleux, c'est sa raison d'être, n'est ni le magique, ni le miraculeux¹⁸³. Si donc la *phusika* est un créé humain qui n'est ni un solipsisme¹⁸⁴ ni un *en-*

¹⁸⁰ P. VEYNE, *Les grecs ont-ils cru à leurs mythes*, Paris, Seuil, 1992, p. 33

¹⁸¹ Du latin *mirabilia*, le « merveilleux » réfère étymologiquement à un récit « admirable et étonnant »

¹⁸² *enchante* et non pas *ré-enchante*. Je ne pense pas que le monde ait jamais été dés-enchanté. Comme le faisait remarquer Baudelaire à propos de l'art, ce *lamento d'inspiration hégélienne*, devenu un lieu commun dans la description des cosmogonies post-coperniciennes traduit plus une nostalgie intellectualiste artificielle qu'un réel ressenti populaire. La Terre était peut-être au centre des sphères d'Aristote mais elle était aussi le point le plus bas – et donc le plus vil – du monde sublunaire. Dans l'espace infini, en revanche, les repères se perdent sans doute mais, en contrepoint de cette angoisse naissante, l'humanité se trouve enfin plongée dans l'océan *céleste*, réhabilitée ontologiquement en ce sens.

¹⁸³ Une distinction développée, par exemple, par Jacques le Goff.

¹⁸⁴ Au sens, par exemple, où Bruno Pinchard évoque à propos de Dante un *solipsisme du livre*.

soi, elle a vocation à intégrer ce que Michel Serres nomme le « grand récit »¹⁸⁵. Quelque part, sans doute, entre l'*apeiron* d'Anaximandre (infini *et* indéfini, c'est-à-dire l'*un* strictement et le *multiple* strictement) et le rhizome de Deleuze¹⁸⁶ (une *multiplicité* primitive). En s'extrayant ainsi de son état d'hypostase, la physique ne perd rien de sa spécificité mais elle s'autorise à résonner et à raisonner avec le *mythe*. De façon quasi définitoire¹⁸⁷, le mythe se fonde sur l'existence d'un « autre monde ». Les multivers sont un mythe d'aujourd'hui. Un mythe physique. Un mythe mathématique. Un mythe logique et onto-logique. Pour une des premières fois dans l'histoire de la pensée occidentale, *muthos* et *logos* ne s'affrontent plus. L'enjeu est potentiellement considérable et la situation sans précédent. Quand Bruno Pinchard prend le *Cogito* à contre-pied pour réhabiliter l'infinité de la volonté en dépit de la finitude de l'entendement¹⁸⁸, il joue *muthos* contre *logos*. Il choisit de s'affranchir de la toute puissance de la pensée rationnelle pour retrouver le *don* de Dante, c'est-à-dire l'espace mythique. Les multivers de la cosmologie du XXIème siècle ouvrent au contraire la voie d'une véritable mythologie. Un *muthos* issu du *logos*. C'est en cela que les univers multiples se singularisent au sein de la pensée scientifique contemporaine. Quand bien même ils demeureraient éternellement hors d'atteinte de toute observation et s'avèreraient *in fine* infalsifiables (ce qui n'est certainement pas le cas), ils traceraient un nouveau chemin où une pensée strictement physique – au sens classique, pour ne pas dire un peu « réactionnaire », du terme – conduirait inéluctablement à un espace mythique. Que mentionner l'existence d'univers parallèles soit intrinsèquement une proposition scientifique ou ne le soit pas est une question sans grand intérêt. Ce qui compte ici, ce n'est pas de créer de la vérité mais de créer du sens. Et le point

¹⁸⁵ M. SERRES, « L'Incandescent », Paris, Le Pommier, 2003

¹⁸⁶ «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. Le rhizome ne se laisse ramener ni à l'Un ni au multiple. [...] À l'opposé d'une structure qui se définit par un ensemble de points et de positions, de rapports binaires entre ces points et de relations biunivoques entre ces positions, le rhizome n'est fait que de lignes : lignes de segmentarité, de stratification, comme dimensions, mais aussi ligne de fuite ou de déterritorialisation comme dimension maximale d'après laquelle, en la suivant, la multiplicité se métamorphose en changeant de nature. [...] Le rhizome est une antigénéalogie. C'est une mémoire courte, ou une antimémoire. Le rhizome procède par variation, expansion, conquête, capture, piqûre. À l'opposé du graphisme, du dessin ou de la photo, le rhizome se rapporte à une carte qui doit être produite, construite, toujours démontable, connectable, renversable, modifiable, à entrées et sorties multiples, avec ses lignes de fuite. Ce sont les calques qu'il faut reporter sur les cartes et non l'inverse. Contre les systèmes centrés (même polycentrés), à communication hiérarchique et liaisons préétablies, le rhizome est un système acentré, non hiérarchique et non signifiant, sans Général, sans mémoire organisatrice ou automate central, uniquement défini par une circulation d'états. Ce qui est en question dans le rhizome, c'est un rapport avec la sexualité, mais aussi avec l'animal, avec le végétal, avec le monde, avec la politique, avec le livre, avec les choses de la nature et de l'artifice, tout différent du rapport arborescent : toutes sortes de devenir. » in G. DELEUZE et F. GUATTARI, *Mille Plateaux*, Paris, éditions de minuit, 1980, pp 30-31.

¹⁸⁷ Voir, par exemple, le Dictionnaire Culturel d'Alain Rey, pp 860-862.

¹⁸⁸ B. PINCHARD, *Méditations mythologiques*, Paris, Les empêcheurs de penser en rond, Le Seuil, 2002, p 112

nodal provient de ce que ce sens n'est pas nécessairement scientifique en lui-même, bien que présentant une origine scientifique. La proposition des mondes multiples devient un pont d'Einstein-Rosen qui n'opère plus comme une connexion d'espace-temps s'établissant entre d'éventuels univers distincts mais comme un flux dans la sphère discursive liant la structure logique et la structure mythique¹⁸⁹.

Les multivers ne s'achèvent sans doute pas au niveau III. Les mondes ne sont pas nécessairement au-delà. Au-delà de l'horizon causal, au-delà de l'univers-bulle, au-delà du feuillet d'univers défini par la fonction d'onde ou au-delà d'une structure mathématique globale. Au niveau IV ou, plus généralement, au niveau (n+1) comme l'écrivait Deleuze dans une circonstance finalement assez voisine, les mondes multiples sont *hic et nunc*. Consubstantiels et coextensifs. Héraclitéens. Coprésents. Non pas seulement au sens fictionnel de Marie-Laure Ryan¹⁹⁰, non pas seulement au sens indexical de Lewis, non pas seulement au sens métaphorique de Rabelais. Plus profondément, contre le réalisme univoque de Russel¹⁹¹, contre les classes de Parménide, presque au sens nominaliste de Goodman. Autrement dit, ils s'inscrivent contre les fondations, suivant les *routes of reference* et non plus les *roots of reference*¹⁹². Au niveau (n+1), les mondes multiples sont en chaque lieu, en chaque chose, en chaque monade ou multiplicité. Ils ne sont plus un ailleurs mais des modes de relation à l'« hors-soi ». La mécanique quantique nous a habitué à considérer simultanément les mêmes objets sous un jour corpusculaire et sous un jour ondulatoire. Lentement, cette plurivocité ontologique s'est ancrée dans nos schèmes de pensée. Le monde du schizophrène est devenu monde pluriel et bien réel. La co-existence de propositions mutuellement exclusives ou, à tout le moins, essentiellement incompatibles, n'est plus une incohérence à dépasser mais une richesse à exploiter¹⁹³. Bien sûr, ces co-mondes qui redéfinissent le méta-monde vont de pair avec une forme de relativisme radical qui confine à l'irréalisme. Là encore, Goodman a montré¹⁹⁴ que contrairement à un certain credo bien établi dans la plupart des traditions philosophiques, il ne s'agit pas nécessairement d'un nihilisme. Il s'agit seulement de renoncer au concept de correspondance avec un réel supposé

¹⁸⁹ « J'appelle erreur mythologique le fait de nier les lois de l'espace mythique et de ne reconnaître que les espaces de la raison », B. Pinchard in *Méditations Mythologiques*, op. cit., p 112

¹⁹⁰ M.-L. RYAN, « Des mondes possibles aux univers parallèles », in *Fabula*, « la recherche en littérature », <http://www.fabula.org/>

¹⁹¹ B. RUSSEL, *The Problems of Philosophy*, Oxford, Oxford University Press, 1972 (1e ed. 1912)

¹⁹² « les voies de la référence et non plus les racines de la référence », expression de N. Goodman, in, *Manière de faire des mondes*, op. cit., pp 54-71

¹⁹³ Bohr y voyait ce qu'il nomma la révolution de la *complémentarité*

¹⁹⁴ Voir, par exemple, N. GOODMAN, *Of Mind an Other Matters*, New-York, Harvard University Press, 1984

intrinsèquement monovalué. L'irréalisme ne consiste pas à affirmer que rien n'est réel mais que nous ne manipulons que des représentations au sein d'une pluralité irréductible qui se substitue à l'usuelle ontologie univoque. Il n'affirme pas non plus (ce qui est souvent injustement associé au relativisme) que toutes les représentations se valent. Les critères de correction sont fondamentaux dans une démarche constructionnelle. Les diverses représentations du réel n'ont pour conditions de possibilité que l'usage référentiel de certains jeux symboliques conduisant à une définition « opératoire ». De ce point de vue, Goodman rejoint Wittgenstein : « les limites de nos langages signifient les limites de nos mondes »¹⁹⁵. Le fondement n'est ni l'*un* parméniidien ni la *multiplicité* deleuzienne, il est une *pluralité* alternativement un *et* multiplicité selon les versions. Ces versions ne sont pas que des discours, elles *sont* les mondes.

La position irréaliste de Goodman est sans doute plus intéressante pour sonder les multivers physiques au niveau IV que la proposition anti-réaliste synthétisée par Michael Dummett. Dans son célèbre article « Realism »¹⁹⁶, Dummett montre qu'une large part des débats autour du nominalisme, du réalisme conceptuel, de l'idéalisme et du phénoménalisme peut être réduite à une opposition entre l'intuitionnisme et le platonisme dans la conception des mathématiques. Or, précisément, la physique des multivers dépasse cette simple disjonction. Pour l'intuitionnisme, la vérité est associée à la possibilité de prouver. Pour le platonisme, la vérité est associée à la correspondance avec une réalité objective. Les univers parallèles, fut-ce aux niveaux III et inférieurs, ne sont signifiants dans aucune de ces deux acceptions. Ils ne sont évidemment pas « intuitionnistes » puisque non explicitement démontrables. Mais ils ne sont déjà plus strictement « platoniciens » puisque assumés en tant que construction humaine contingente sur le réel. Le réel devient relationnel. Il ne s'agit plus tant de découvrir la structure intime et intrinsèque que de comprendre comment l'extériorité-à-soi répond à une manière de faire un monde. Loin, là encore, du solipsisme. Le multivers de niveau IV ne dénie certainement pas l'existence d'une implacable altérité hors des « états de conscience »¹⁹⁷. Il n'est pas le scepticisme de Pyrrhon, il n'est pas l'idéalisme de Berkeley. Il déconstruit l'ontologie traditionnelle sans renoncer aux contraintes d'un réel-pluriel qui s'impose à soi. Il généralise en un sens le multivers de niveau III en autorisant des structures

¹⁹⁵ L. WITTGENSTEIN, *Tractatus Logico Philosophique*, traduit par G.-G. Granger, Paris, Gallimard, 2001 (1^e éd. 1921), § 5.6

¹⁹⁶ M. DUMMETT, *Realism*, in « Truth and Other Enigmas », Harvard, Harvard University Press, 1978, pp. 145-165

¹⁹⁷ En un sens, le niveau IV devrait être baptisé « niveau 0 » puisqu'il est intérieur à tous les autres multivers. Mais nous avons ici adopté une hiérarchie par complexité plus que par agencement.

propositionnelles non mathématiques mais, en revanche, ne requiert en rien la « démocratie formelle » que Tegmark érigeait en caractéristique majeure. Celle-ci reflétait sans doute encore une dernière tentative, quasi désespérée, pour sauver un méta-monde maximale-ment symétrique. Le fantasme des orbites circulaires parfaites (c'est-à-dire présentant une symétrie de rotation idéale) a la vie dure... Que la physique, en son sein même, appelle inéluctablement la plurivocité devrait sans doute nous conduire à voir la physique elle-même comme un des arguments possibles (parmi sans doute une infinité d'autres) de la « fonction-réel »¹⁹⁸. Le réel n'est plus, il *fonctionne*. Il répond aux sollicitations et forme des univers sur nos propositions.

Les multivers physiques, sans même spéculer jusqu'au niveau IV, sont une invention de la contingence. Les lois auraient pu être autres. Elles se sont muées en phénomènes. La frontière s'est brouillée. Les modèles les plus cohérents font toujours appel à une unique méta-théorie : appelons-là théorie des cordes ou théorie-M, peu importe. Il ne me semble pas déraisonnable de supposer que cette théorie-cadre émergera¹⁹⁹ elle-même, à son tour, d'un nouveau modèle. Ce qui est nécessaire ne l'est qu'en vertu d'un système devenu lui-même contingent. Le problème lancinant des conditions initiales a contaminé les lois en leur cœur. Le mythe, en l'occurrence, c'est la manière de faire un monde avec le cadre qui crée les lois. La science est un récit. Un récit d'un genre très particulier parce qu'il s'est imposé des contraintes extrêmement strictes. Des contraintes sans doute plus impératives encore que ne l'ont été le système tonal en musique et la perspective renaissante en peinture. Des contraintes qui, miraculeusement, n'ont pas atrophié leur objet mais l'ont, au contraire, libéré. Les chorégraphes le savent bien²⁰⁰ : c'est en *contraignant* les corps qu'on les fait oeuvres. Mais les contraintes ne sont pas des frontières. Aujourd'hui, les théories qui induisent des univers multiples ne renient rien des contraintes, elles se contentent d'outrepasser les limites. Elles vivent sur les frontières pour les dissoudre. L'espace de prédication de la physique n'a pas réellement changé, mais l'ensemble fermé est devenu un ouvert. Nouveaux lieux de voisinages. Paroi hémiperméable où le mythe circule. Flux et flot de sens. Tourbillon physico-fantastique. Lieu « ensemencé de circonstances » écrivait Michel Serres²⁰¹. Ni la rigueur, ni la cohérence n'ont souffert de cette nouvelle porosité : le conte

¹⁹⁸ C'est-à-dire du réel en tant que fonction (et non pas d'une fonction à valeurs réelles)

¹⁹⁹ Il ne s'agit pas ici de référer à la théorie de l'*émergence* en physique, telle que prônée par certains théoriciens du solide. Celle-ci n'est pas pertinente dans un cadre cosmologique.

²⁰⁰ J.C. Gallota, communication privée

²⁰¹ M. SERRES, *La Naissance de la Physique dans le Texte de Lucrèce, Fleuves et turbulences*, op. cit., p 237

s'est enrichi de continuités imprévues. Des liens essentiels et substantiels se sont tissés. L'espace vide de l'entre-deux s'est peuplé d'un nouveau discours. Un discours-monde, pluriel comme le pluri-vers qu'il énonce et construit.

Une nouvelle *Théogonie* ? Les aèdes de la Grèce antique n'étaient pas des prophètes. Pour religieuse qu'elle fut, cette poésie n'était pas sacrée. Les chants homériques et hésiodiques ne cherchent ni la vérité absolue ni la créance commune. Le poète possède un immense savoir (il est gardien de la tradition, il connaît toutes les Néréides), presque totalisant, mais il s'autorise des variations. Personne ne fut damné pour avoir prétendu, comme Homère, qu'Aphrodite était fille de Zeus, ou, comme Hésiode, qu'elle était fille de Pontos. L'aède est le maître de la mosaïque. Il cherche un ordre. Mais n'oublions pas qu'en grec « *kosmos* » signifie aussi « parure » et réfère également aux bijoux qui ornent la douce peau des muses. Le reflet de « *kosmos* », dans sa délicieuse polysémie²⁰², c'est la musique. Fragilité d'une construction *subtile* – « *mètiétés* », comme Zeus, parce qu'il a avalé Mètis et fondé le Monde sans Titans – où *Chaos* n'est plus seulement le désordre mais aussi la béance, le hiatus, la condition de possibilité d'une poétique²⁰³. Le poète est un artisan, mais un artisan en hexamètre. La métrique soutient le discours au-delà du bavardage. Valeur magique de la métonymie orphique. Rythme du dactyle. Celui, précisément, de l'allegretto de la septième symphonie de Beethoven et du quatuor « La jeune fille et la Mort » de Schubert.

«Il dit toutes choses selon l'ordre,

La cithare sous le bras »

Homère, *Hymne pour Hermès*, v. 431-433

C'est avec ce mythe, celui de l'*homo musicus*²⁰⁴, que renoue aujourd'hui la physique. Il ne s'agit pas de s'opposer aux faits expérimentaux ou aux règles de la logique, comme il ne s'est jamais agi pour l'aède de contredire les oracles ou les révélations. Il s'agit de s'immiscer dans l'interstice qui sépare les mondes. Il s'agit de *composer* avec les éléments. Il s'agit d'occuper une vacuité, non pas avec une nouvelle substance, mais avec une circulation possible. C'est-à-dire de construire une voie. Une voie d'échange, une voix de fugue. Ou plutôt un accord. Un accord tout à fait impromptu, arc-bouté entre les lignes du contrepoint.

²⁰² Pour une réflexion générale sur les sens multiples des mots dans la poésie grecque, voir C. CASTORIADIS, *Figures du Pensable – les carrefours du labyrinthe VI*, Paris, Seuil, 1999, pp. 35-61

²⁰³ Jean-Louis Backès montre que Chaos est un *principe* bien avant qu'Ovide n'explique cette idée, en préface à HESIODE, *Théogonie*, traduit du grec par J.-L. Bakès, Paris, Gallimard, 2001

²⁰⁴ « Pas de civilisation sans mélodie » écrit Michel Serres in *L'Incandescent*, op. cit.

Il n'est pas nécessaire de visiter l'Olympe et d'assister à la querelle d'Héra et d'Arès pour en constater les effets dévastateurs sur Troy, Priam et ses fils. Il n'est pas utile d'entendre les mots de Thétis à Achille pour observer les hauts faits du héros et comprendre son destin. Sans doute n'est-il pas non plus nécessaire de parcourir les multivers pour explorer son pouvoir explicatif et prédictif. Il n'est pas, en lui-même, un lieu de science. Mais il est – strictement – issu d'une pensée scientifique qu'il prolonge sans la trahir. Génération spontanée du mythe. Zeus n'était pas, en lui-même, un lieu de composition. Mais il permettait de donner corps au récit de « celui qui avait vu les muses ». Il était une forme inéluctable de principe organisateur de la *cité* , imposé²⁰⁵ par la nécessité vitale de s'extraire de la Titanomachie. Si les multivers physiques inventent un nouveau mythe, c'est à l'antiquité – inéluctablement – qu'ils font écho : le mythe est lié à la pluralité, des dieux et des principes, aucune place authentique pour lui dans l'atrophie imaginaire de l'ère occidentale chrétienne²⁰⁶. Vico aimait à rappeler que *muthos* , en grec, signifie justement « histoire vraie »... La science de la Nature écrit aujourd'hui une nouvelle « histoire vraie », fondée sur notre mathématique, induite par nos observations, guidée par nos expériences mais en partie invisible, c'est-à-dire, *merveilleuse* . *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. Nature : l'éternelle nouvelle née²⁰⁷. C'est bien du nouveau mythe de la perpétuelle nouvelle naissante dont la physique et ses univers parallèles nous *parlent* aujourd'hui. Avec audace et humilité. Comme il se doit.

²⁰⁵ C'est en ce sens que Durkheim, parmi d'autres, considère qu'il est inexact d'évoquer une dimension mystique de la religion grecque : elle n'entretient aucun rapport privilégié avec le *mystère* , elle cherche au contraire la « conception la plus simple ».

²⁰⁶ Voir, par exemple, J.-C. Schmidt, « Christianisme et mythologie », in *Dictionnaire des mythologies* , Y. Bonnefoy (dir.), 1981

²⁰⁷ Expression de M. Serres in *L'incandescent* , p. 28, *op. cit.*

Conclusion

Les variétés de Calabi Yau associées à la compactification des dimensions supplémentaires de la théorie des cordes conduisent, conjointement aux différents flux possibles sur les cycles d'homologie, à un nombre gigantesque de vides possibles. Ainsi se constitue de *paysage* des lois possibles. L'inflation produit de l'espace. Enormément d'espace. Dans chaque univers-bulle, avec son propre Big-Bang et sa propre dimensionnalité, une réalisation de la physique. Notre monde n'est apparemment « improbable » que parce qu'il est un parmi une infinité. Au-dessus de ce multivers générant ses lois, d'autres structures, plus complexes. En dessous, des séquences, des répétitions, des variations. Sans fin.

Wittgenstein, supplantant une dynamique des faits à une ontologie des choses, ouvrait le *Tractatus* avec le célèbre aphorisme « Le monde est tout ce qui a lieu ». C'est une définition parfaite du multivers : là où tout a lieu. Les lois elles-mêmes réapparaissent comme des faits, contingentes et multiples. Elles se *produisent*. Ce qui n'est pas ici est ailleurs. Inéluctablement. La proposition est audacieuse, vertigineuse, sans précédent dans le cadre de la Science de la Nature. Mais elle n'est pas irréfutable. Au sein même du cadre étriqué de l'épistémologie poppérienne, le modèle peut être mis à l'épreuve. Les probabilités – anthropiquement conditionnées – sont calculables dans le multivers et permettent une confrontation aux mesures *locales*. Dans la plus parfaite orthodoxie du terme, les univers parallèles constituent sans le moindre doute une proposition *scientifique*.

Mais l'histoire ne s'achève pas ici. Pour physiques qu'elles soient dans leurs origines, les théories conduisant à d'autres mondes construisent aussi un nouveau mythe. Plus exactement, une nouvelle mythologie, voir une nouvelle mythonomie, puisque, précisément et peut-être pour la première fois dans l'histoire des idées, c'est de la loi éprouvée et avérée que naît la description des espaces invisibles et *merveilleux*. La science ne cesse pas d'être ce qu'elle a toujours été ; mais elle invente un trait d'union vers d'autres lieux. Moins une passerelle ou un lien, qu'une autotransformation sur la marge. Une manière de faire un monde

en brouillant les bords du monde. Une façon de s'immiscer dans l'inchoatif de l'ineffable. Un mode de déconstruction vers le *continuum*.

Pluriel, relationnel, fonctionnel, multiple-en-soi jusque dans sa profondeur ontique, le nouveau monde est un espace ouvert et dynamique. Peut-être n'est-il qu'un *jeu-de-mots*. Peut-être, d'ailleurs, ne suis-je moi-même qu'un *je-de-mots*. Peut-être est-ce l'unique sens de ce *jeu-de-mondes*. Le mythe a toujours quelque chose à voir avec le devenir des mots. Il vient d'un savoir, il le longe et le prolonge.

Bibliographie

T. d'AQUIN, *Somme théologique*, I, q 47, a. 3, traduit par A ; M. Roguet), Paris, Cerf, 1984

A. AGUIRRE, « Making predictions in a multiverse : conundrums, dangers, coincidences », pp 367-368 in B. CARR (éd.) *Universe or Multiverse*, Cambridge, Cambridge University Press, 2007

S.K. ASHOK & M. DOUGLAS, JHEP, 0401 p 60, 2004

J.B. BARBOUR. *The end of time*. Oxford, Oxford university press, 2001

A. BARRAU, « Could the Next Generation of Cosmology Exclude Supergravity ? », *Physical Review D*, 69, 2004, p105021

A. BARRAU *et alii*, « Gauss-Bonnet black holes at the LHC : beyond the dimensionality of space », *Phys. Lett. B*584 p114, 2004

A. BARRAU, « World making with extended gravity black holes for cosmic natural selection in the multiverse scenario », *Proc. of the 11th Marcel Grossmann meeting on General Relativity*, Berlin, 2006

D. BLOOR, *Knowledge and social imagery*, Chicago, Chicago University Press, 1991

R. BOUSSO & J. POLCHINSKI, JHEP, 0006, p 6, 2000

P. BRICKER, "David Lewis: On the Plurality of Words" *Central Works of Philosophy, Vol. 5: The Twentieth Century: Quine and After*, Acumen Publishing, 2006

M. CALLON (dir), *La science et ses réseaux, genèse de la circulation des faits scientifiques*, Paris, Edition la découverte, 1988

B. CARTER, « The anthropic principle and its implication for biological evolution », *Phil. Trans. Roy. Soc. A*310, pp. 474-363, 1983

B. CARTER, « Large number coincidences and the anthropic principle in cosmology », in *Confrontations of Cosmological Theories with Observational Data* (I.A.U. Symposium 63) ed. M. Longair, Reidel, Dordrecht, 1974 pp. 291-298

B. CARTER, « Anthropic principle un cosmology », preprint gr-qc/0606117, 2006

C. CASTORIADIS, *Figures du Pensable – les carrefours du labyrinthe VI*, Paris, Seuil, 1999

S. CHANDRASEKHAR, *Truth and Beauty: Aesthetics and Motivations in Science*, Chicago, University of Chicago Press, 1987

- C. COHEN-TANNOUJJI, B. DIU, F. LALOE, *Mécanique Quantique*, Paris, Hermann, 1998 (1^e éd. 1973)
- G. COLLI, P. GABELLONE, *La Sagesse Grecque*, Paris, l'Eclat, 1991.
- H.M. COLLINS., *Changing order. Replication and induction in Scientific Practice*, The University of Chicago Press, 1992
- G. D. COUGHLAN, J. E. DODD, *The Ideas of Particle Physics*, Cambridge, Cambridge University Press, 1991 (1^e éd. 1984)
- A. DANTO, *Analytical Philosophy of Action*, Cambridge University Press, 1973
- P.C.W. DAVIES, « The mind of God », New-York, Simon and Schuster, 1992
- G. DELEUZE, *Cours sur Leibniz*, Vincennes, 1980, disponible sur <http://www.webdeleuze.com/>
- G. DELEUZE et F. GUATTARI, *Mille Plateaux*, Paris, éditions de minuit, 1980
- J. DEMARET, D. LAMBERT, *Le Principe Anthropique*, Paris, Armand Collin, 1994
- J. DERRIDA, *La vérité en Peinture*, Flammarion, Paris, 1978
- A. D. DOLGOV, M. V. SAZHIN, Ya. B. ZELDOVICH, *Modern Cosmology*, Gif sur Yvette, Frontières, 1990
- J.F. DONOGHUE, K. DUTTA & A. ROSS, « Quark and lepton masses in the landscape », *Phys. Rev. D*, 73, 113002, 2006
- P. DUHEM, *Le Système du Monde. Histoire des doctrines cosmologiques de Platon à Copernic*, 10 volumes, Paris, Hermann, 1958
- M. DUMMETT, *Realism*, in « Truth and Other Enigmas », Harvard, Harvard University Press, 1978
- A. EINSTEIN, « The Foundation of the General Theory of Relativity », *Annalen der Physik*, 49, 1916, pp. 769-822
- E. ELBAZ, *Cosmologie*, Paris, Ellipses, 1992
- L. Z. FANG, R. RUFFINI (éd.), *Quantum Cosmology*, Singapore, World Scientific, 1987
- P. FEYERABEND, *La Science en tant qu'Art*, traduit de l'allemand par F. Périgaut, Paris, Albin Michel, 2003 (1^e éd. all. 1983)
- V.P. FROLOV, M.A. MARKOV, V.F. MUKHANOV, *Phys. Lett. B*, 216, 272, 1989
- J. GARCIA-BELILDO, « The Paradigm of Inflation », *preprint hep-ph/0406191*

- J. GARRIGA *et alii*, « Probabilities in the inflationary multiverse », JCAP, 0601 p17, 2006
- N. GOODMAN, *Langages de l'Art*, traduit de l'anglais par J. Morizot, Nîmes, Catherine Chambon, 1990 (1^e éd. ang. 1968)
- N. GOODMAN, *Manières de Faire des Mondes*, traduit de l'anglais par M.-D. Popelard, Nîmes, Catherine Chambon, 1992 (1^e éd. ang. 1977)
- N. GOODMAN, *Of Mind an Other Matters*, New-York, Harvard University Press, 1984
- N. GOODMAN et C. Z. ELGIN, *Reconceptions en Philosophie*, traduit de l'anglais par J.-P. Cometti et R. Pouivet, Paris, PUF, 1994 (1^e éd. ang. 1988)
- A. GUTH, « The Inflationary Universe : a Possible Solution to the Horizon and Flatness Problems », *Physical Review D*, 23, 1981, pp. 347-356
- S. HAWKING, *Information Loss in Black Holes*, Phys. Rev. D 72, 084013, 2005
- HESIODE, *Théogonie*, traduit du grec par J.-L. Bakès, Paris, Gallimard, 2001
- Q. HO-KIM, P. X. YEM, *Elementary Particles and their Interactions, Concepts and Phenomena*, Berlin, Springer, 1998
- F. HOYLE, D.N.F. DUNBAR, W.A. WENZEL & W. WHALING, « A state in carbon prediction from astrophysical evidence », Phys. Rev. 92, p1095 (1953)
- M. KAKU, *Introduction to Superstrings and M-theory*, Berlin, Springer, 1999
- E. W. KOLB, M. S. TURNER, *The Early Universe*, New York, Addison-Wesley, 1990
- A. KOYRE, *Du monde clos à l'Univers infini*, traduit de l'anglais par R. Tarr, Paris, Gallimard, 1973 (1^e éd. ang. 1957)
- M. LACHIEZE-REY, *Initiation à la Cosmologie*, Paris, Masson, 1992
- L. LANDAU, E. LIFCHITZ, *Physique Théorique*, traduit du russe par S. Medvédev, Moscou, Mir Moscou, 1989 (1^e éd. russe 1964)
- D. LEWIS, *Countrefactuals*, Cambridge, MA : Harvard University Press, 1973
- D. LEWIS, « On the plurality of worlds », Oxford, Blackwell, 1986
- J.-M. LEVY-LEBLOND, « One More Derivation of the Lorentz Transformation », *American Journal of Physics*, 44, 3, 1976, pp: 271-277
- A. LINDE, « Prospects for Inflation », *talk at the Nobel Symposium "Cosmology and String Theory"*, 2004, preprint hep-th/0402051

- B. LATOUR, *Nous n'avons jamais été modernes. Essai d'anthropologie symétrique*, Paris, La Découverte, 1997
- J.-P. LUMINET, *Le destin de l'univers*, Paris, Fayard, 2006
- C. MISNER, K. S. THORNE, J. WHEELER, *Gravitation*, New York, W. H. Freeman and company, 1970
- P.-M. MOREL, *Atome et nécessité*, Paris, PUF, 2000
- V. MUKHANOV, « Cosmology and the many world interpretation of quantum mechanics », pp 267-274 in B. CARR (éd.) , Cambridge University Press, 2007
- A. NESCHKE, « Philosophie ou Science : La question des mondes multiples chez Anaximandre », *Rech. philos. lang.*, 1996, n° 18, pp. 189-200
- R. NOZICK, « Philosophical explanations », Cambridge, Harvard University Press, 1981
- T. PADMANABHAN, *Theoretical Astrophysics*, Cambridge, Cambridge University Press, 2000
- D. PARROCHIA, *Mathématiques et existence*, Seyssel, Champ Vallon, 1991
- D. PARROCHIA, *Les grandes révolutions scientifiques du XXème siècle*, Paris, PUF, 1997
- D. PARROCHIA, *Philosophie et Musique Contemporaine*, Paris, Champ Vallon, 2006
- J. A. PEACOCK, *Cosmological Physics*, Cambridge, Cambridge University Press, 1999
- P. J. E. PEEBLES, *Principles of Physical Cosmology*, Princeton, Princeton University Press, 1993
- S. PERLMUTTER *et alii*, « Measurements of Omega and Lambda from 42 High Redshift Supernovae », *Astrophysica. Journal*, 517, 1999, pp: 565-586
- M. E. PESKIN, D. V. SCHROEDER, *Quantum Field Theory*, New York, Addison-Wesley, 1995
- D. PESTRE, « Les sciences et l'histoire aujourd'hui. » *Le Débat*, n° 102, novembre-décembre 1998
- B. PINCHARD, *Méditations mythologiques*, Paris, Les empêcheurs de penser en rond, Le Seuil, 2002
- K. POPPER, *La logique de la découverte scientifique*, traduit de l'anglais par N. Thyssen-Rutten et P. Devaux, Paris, Payot, 1995 (1^{er} ed. ang. 1959)
- F. RABELAIS, *Le Cinquième Livre*, Paris, Le Livre de Poche, 1994 (1^e éd. 1564)
- F. RABELAIS, *Le Quart Livre*, Paris, Le Livre de Poche, 1994 (1^e éd. 1552)

- M. REES, « Cosmology and the multiverse », pp.57-75 in B. CARR (éd.) *Universe or Multiverse*, Cambridge, Cambridge University Press, 2007
- R. RUCKER, « Infinity and the mind », Boston, Birkhauser, 1982
- B. RUSSEL, *The Problems of Philosophy*, Oxford, Oxford University Press, 1972 (1e ed. 1912)
- M.-L. RYAN, « Des mondes possibles aux univers parallèles », in *Fabula*, « la recherche en littérature », <http://www.fabula.org/>
- M. SERRES, *La Naissance de la Physique dans le Texte de Lucrèce, Fleuves et turbulences*, Paris, Editions de Minuit, 1977
- M. SERRES, « L'Incandescent », Paris, Le Pommier, 2003
- J. SILK, *le Big-Bang*, traduit de l'anglais par I. Souriau et E. Vangioni-Flam, Paris, Odile Jacob, 1997 (1^e éd. ang. 1980)
- L. SMOLIN, *Rien ne va plus en physique ! L'échec de la théorie des cordes.*, traduit de l'anglais par A. Grinbaum, Paris, Dunod, 2007 (1^{er} éd. ang. 2006)
- L. SMOLIN, « Scientific alternative to the anthropic principle » pp.323-366, in B. CARR (éd.) *Universe or Multiverse*, Cambridge, Cambridge University Press, 2007
- G. F. SMOOT *et alii*, « Structure in the COBE DMR first Year Map », *Astrophysical Journal*, 396, 1992, pp: 1-5
- STALNAKET, « Possible Worlds », *Nous*, Vol. 10, pp 65-75, 1976
- G.D. STARKMAN & R. TROTTA, « Why Anthropic Reasoning Cannot Predict Lambda », *Phys. Rev. Lett.*, 97, 201301, 2006
- D. N. SPERGEL *et alii*, « First Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Determination of Cosmological Parameters », *Astrophysical Journal Supplement*, 148, 2003, p. 175
- A. A. STAROBINSKI, « Spectrum of Relict Gravitational Radiation and the Early State of the Universe », *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 30, 1979, p: 682
- P. STEINHARDT & N. TUROK, « A cyclic model of the Universe », *Science*, 296, p1436, 2002
- L. SUSSKIND, *Le Paysage Cosmique*, traduit de l'anglais par B. Arman, Paris, Robert Laffon, 2007, (1^{er} éd. en ang. 2004)
- L. SUSSKIND, « The anthropic landscape of string theory » pp 247-266, in B. CARR (éd.) *Universe or Multiverse*, Cambridge, Cambridge University Press, 2007
- M. TEGMARK, « Is the theory of everything merely the ultimate ensemble theory », *Ann. Phys.* 270, 1, 1988

- M. TEGMARK, « On the dimensionality of spacetime », *Class. Quantum. Grav.*, 14, L69, 1997
- M. TEGMARK, « The importance of quantum décohérence in brain processes », *Phys. Rev. E*, 61, 4194, 2000
- M. TEGMARK, « The multiverse hierarchy », pp 99-125 in B. CARR (éd.) *Universe or Multiverse*, Cambridge, Cambridge University Press, 2007
- P. VEYNE, *Les grecs ont-ils cru à leurs mythes ?*, Paris, Seuil, 1992
- A. VILENKIN, « predictions from quantum cosmology », *Phys. Rev. Lett.*, 74, p 846, 1995
- A. VILENKIN, « A measure of the multiverse », *J. Phys. A : Math. Theor.* 40, pp 6777-6785, 2007
- S. WEINBERG, « Living in the multiverse », pp 29-42 in B. CARR (éd.) *Universe or Multiverse*, Cambridge, Cambridge University Press, 2007
- E.P. WIGNER, « Symmetries and reflections », Cambridge, MIT Press, 1967
- L. WITTGENSTEIN, *Tractatus Logico Philosophique*, traduit par G.-G. Granger, Paris, Gallimard, 2001 (1^e éd. 1921)
- S. WOLFRAM, « A New Kind of Science », New York, Wolfram Media, 2002
- A. ZEE, *Fearful Symmetry : The search for Beauty in Modern Physics*, New York, Publishers Weekly, 1999
- B. ZWIEBACH, « A first course in string theory », Cambridge, Cambridge university press, 2004