

Le Principe Anthropique

La place de l'homme dans l'Univers

It is not only that man is adapted to the universe. The universe is adapted to man.

John Archibald Wheeler

Marc Santolini - Mémoire de M1 LOPHISS,
sous la direction de Marc Lachièze-Rey.

Sommaire

Introduction.....	8
I. Le Principe anthropique et son utilisation.....	11
1. A l'origine du Principe Anthropique.....	11
a. Panorama de la physique contemporaine.....	11
i. La cosmologie.....	11
-La Relativité Générale.....	11
- La cosmologie.....	12
ii. Mécanique quantique et physique des particules.....	14
-Mécanique quantique et théorie quantique des champs.....	14
-Modèle standard et physique des particules.....	15
iii. Indéterminés en physique des particules et en cosmologie.....	16
b. Le fine-tuning.....	17
i. Des coïncidences remarquables... ..	17
ii. ... à l'idée de nécessité.....	20
-L'étonnement devant notre présence fortuite.....	20
-Les coïncidences des grands nombres.....	20
○A l'origine des grands nombres : de Archimède à Eddington.....	21
○L'hypothèse de Dirac.....	23
○Apparition de l'anthropomorphisme.....	23
2. Définitions.....	24

a.	Le Principe Anthropique Faible.....	25
i.	Le version originale de Carter.....	25
ii.	La version faible réinterprétée par Barrow et Tipler.....	27
b.	Le Principe Anthropique Fort.....	28
i.	La version de Carter.....	28
ii.	La version de Barrow et Tipler.....	29
c.	Le Principe Anthropique Participatif.....	30
d.	Le Principe Anthropique Final.....	31
3.	Utilisations du Principe Faible.....	31
a.	Utilisation des propriétés des probabilités bayésiennes.....	32
b.	Estimation de l'âge de l'univers.....	32
c.	L'argument de Hoyle.....	33
d.	Autres utilisations.....	34
i.	Mise en défaut de l'argument des grands nombres.....	34
ii.	Calcul de paramètres fondamentaux.....	35
iii.	La rareté des observateurs.....	35
iv.	Le doomsday argument.....	36
v.	Conclusion.....	36
4.	Les interprétations du Principe Anthropique Fort.....	37
II.	L'alternative des mondes multiples.....	39
1.	Histoire des mondes multiples.....	39
a.	Mondes multiples en Grèce Antique.....	40

b.	Mondes multiples du Moyen-âge à l'âge classique.....	40
c.	Plurivers en philosophie contemporaine.....	41
2.	Introduction du multivers dans le milieu scientifique.....	43
a.	Le succès du finalisme.....	43
b.	Introduction de la notion de multivers.....	43
c.	Calculer l'improbable : manière de faire des mondes.....	45
3.	Les différents types de multivers.....	46
a.	Préliminaire : théorie de l'inflation et théorie des cordes.....	47
-	L'inflation.....	47
-	Théorie des cordes.....	48
b.	Niveau I : variation des paramètres cosmologiques (régions hors de notre horizon).....	49
c.	Niveau II : variation des constantes fondamentales.....	50
-	Un multivers "en étendue".....	50
-	Un multivers "en poupées russes".....	51
d.	Niveau III : Le multivers quantique.....	52
e.	Niveau IV : un multivers platonicien.....	53
4.	Réfutabilité et prédictions.....	53
a.	Les multivers : une surabondance injustifiée?.....	53
b.	La réfutabilité.....	54
c.	Les prédictions dans le multivers.....	55

III. Quelques considérations épistémologiques et philosophiques.....	58
1. Considérations épistémologiques.....	59
a. La notion de modèle.....	59
i. Dégénérescence des paramètres : de l’îlot anthropique à l’océan des possibles.....	59
ii. Fausseté des modèles.....	60
b. La notion de cause.....	62
i. La causalité en physique.....	62
ii. La causalité en biologie.....	63
iii. La causalité historique.....	66
c. Le hasard et la contingence.....	69
d. La notion de probabilité : de l’improbable à l’incalculable.....	70
i. La théorie mathématique des probabilités.....	71
ii. Les probabilités en physique.....	72
iii. Les probabilités en biologie.....	73
2. Considérations philosophiques.....	75
a. La notion de finalité.....	76
i. Dessein et téléologie.....	76
– Le dessein en philosophie.....	76
○ Des causes finales à la raison suffisante.....	76
○ La nécessité face au dessein.....	77
○ Entre contingence et nécessité : le principe esthétique.....	78
– La téléologie en physique “classique”.....	79

ii. Philosophies du progrès : le sens du temps.....	81
- Herbert Spencer.....	81
- Henri Bergson.....	82
- Alfred Whitehead.....	83
iii. Auto-organisation et complexité : la fin de la finalité (?).....	85
- Le problème de la téléologie en biologie : la téléonomie et l'émergence d'une fin.....	85
- Ordre spontané en sciences sociales et en économie.....	86
- La fin de la finalité?.....	88
b. Les lois.....	90
i. Les lois en philosophie : le problème de Hume.....	91
ii. Les lois en sciences	94
- Le réductionnisme.....	94
- La Théorie du Tout.....	95
- Émergence.....	97
○ La notion d'émergence en philosophie des sciences.....	97
○ Des lois émergentes.....	99
c. La fin de la raison suffisante : la fin du Principe Anthropique?.....	102
Conclusion.....	105
Bibliographie.....	110
Remerciements.....	112

Introduction

La physique moderne est bâtie autour du postulat “classique” qu’il existe dans la nature des lois objectives, indépendantes de l’observateur qui les met à jour, qui régissent l’enchaînement des phénomènes au sein de l’univers où ils se déroulent. Les lois dites “fondamentales” ont un caractère universel et nécessaire qui en font des spécificités de notre monde. Elles contiennent des valeurs brutes (au sens où celles-ci ne s’expliquent pas par une théorie plus fondamentale, ou du moins pas encore), appelées “constantes universelles”, comme la vitesse de la lumière dans le vide ou la constante de Planck, qui paraissent pour le physicien théoricien être des données *a priori* d’un Univers que l’homme habite par hasard. En plus de ces constantes qui fixent des contraintes quantitatives fondamentales au sein des lois, d’autres paramètres régissent l’évolution dynamique de l’Univers en fixant les conditions initiales à partir desquelles les lois agissent : ce sont ceux que nous retrouvons en cosmologie. D’autres encore contraignent la structure fine de la matière et en expliquant la stabilité, nous les retrouvons en physique des particules. Dans un Univers où l’homme (en grec *anthropos*) est le produit d’une évolution matérielle sans surprise, réglée par quelques lois élémentaires à partir desquelles le reste se déduit logiquement (un Univers où, comme le dit Bergson, “tout est donné”), il est naturel de s’interroger sur la particularité de l’apparition humaine vis-à-vis de situations alternatives possibles où d’autres constantes, d’autres lois, auraient mené à d’autres univers d’où toute forme de vie aurait été exclue, des univers si arides qu’ils seraient déjà “morts”, inertes, froids et sans vie à leur naissance (quand bien même y aurait-il une “naissance”).

La progression de pensée en physique moderne, qui a mené à la “révélation” des lois et des constantes les plus fondamentales qui régissent l’ordre de la nature, que ce soit dans l’infiniment petit ou l’infiniment grand, a initié un mouvement naturel d’interrogation sur l’aspect justement très particulier, et au final très improbable de l’existence de l’homme dans un monde qui ne le désirait pas. Les constantes fondamentales semblent être finement ajustées pour assurer notre apparition : on parle de réglage fin (*fine-tuning*). Alors que l’astrophysique, et par suite la physique, s’étaient bâties sur le socle du Principe Copernicien, rejetant ainsi l’idée d’un Univers fait à notre mesure et dont nous serions le centre, voilà que l’on s’interroge à nouveau sur notre présence au sein du monde. En 1974, l’astrophysicien Brandon Carter énonça ainsi un principe rompant avec l’idéal copernicien : l’homme est apparu sur Terre à un certain moment de l’histoire de l’univers, dans un certain lieu où les conditions étaient réunies pour son émergence, et il y a donc bien une spécificité à notre position spatio-temporelle. Pour reprendre les mots de Carter, “*nous nous situons à un endroit de l’Univers nécessairement privilégié en ce qu’il a permis notre existence en tant qu’observateurs*”. Cette version du Principe Anthropique est dite *faible* car elle se limite à des considérations spatio-temporelles. Néanmoins, ces considérations mènent à s’interroger plus particulièrement sur les conditions plus profondes faisant de notre Univers un lieu *privilégié*, à savoir la valeur des constantes fondamentales et des conditions initiales régissant le devenir de l’Univers : “*l’Univers (et donc les paramètres fondamentaux dont il dépend) doit être tel qu’il admet l’apparition d’observateurs en son sein à un moment donné*”. C’est la version *forte* du Principe, qui est en grande partie responsable des controverses qui s’ensuivirent. En effet,

en posant l'apparition de l'homme comme fin et en cherchant à contraindre de façon récursive les conditions initiales ayant permis son apparition, certains ont vu poindre un retour à un finalisme que la physique s'est vouée à exclure depuis sa rupture avec le système aristotélicien. L'argument du *fine-tuning*, épaulé par un tel Principe, a d'ailleurs été repris par les théologiens pour argumenter en faveur d'une finalité imposée par Dieu à notre Univers. Les scientifiques, eux, ont montré deux types d'approche à ce problème. Pour certains, la résolution de cette apparente finalité se trouve dans le hasard fondamental. Ce hasard agit au sein d'un ensemble d'Univers qui existent, ont existé ou existeront de manière *réelle* : c'est le *multivers*. Ici, les constantes fondamentales et les conditions initiales peuvent varier d'un univers à l'autre, autorisant dans certains l'apparition d'observateurs conscients, l'excluant dans d'autres. Nous nous trouvons par un effet de sélection dans l'un des univers favorables à notre existence, et ceci sans invoquer d'entité divine l'ayant désiré et ayant agi *en vue* de cette fin. La solution des multivers est répandue chez les théoriciens, car elle propose une approche véritablement scientifique du problème : modélisation d'un ensemble de mondes possibles, avec le mode de génération de ces mondes, des valeurs des constantes et des conditions initiales (que ce soit ou non selon des "lois" du hasard), et possibilités de réfutation du modèle proposé en fonction des observations faites dans notre Univers. Pour d'autres, en rester à l'improbable n'est pas satisfaisant. Le *fine-tuning* doit pouvoir être expliqué par des arrangements supérieurs : la recherche de coïncidences numériques parmi certains grands nombres obtenus à partir des constantes fondamentales permet de sonder les relations cachées, et au final de révéler une loi supérieure inattendue. Ce genre de travail, popularisé par l'hypothèse des grands nombres de Dirac, proposant l'égalité des grands nombres sans dimension ayant des valeurs proches et étant issus de différentes relations entre constantes fondamentales, va introduire l'idée qu'il *doit* y avoir une nécessité première imposant le *fine-tuning*, et donc expliquant notre présence. D'autres tentatives suivront se proposant d'élucider scientifiquement une telle nécessité. Le combat se fait donc sur le plan de l'unicité/nécessité de notre univers, contre la pluralité/contingence des univers multiples.

Le Principe Anthropique est souvent présenté dans une telle optique de lutte des physiciens contre la finalité et contre les théologiens. Dans un sens, le Principe Anthropique évoque dans le domaine de la physique le problème posé à la biologie par les adeptes de l'*Intelligent Design*, une théorie finaliste et statique de génération des espèces vivantes, en concurrence avec la théorie de la sélection naturelle. De même, les physiciens tentent de résoudre le problème de l'arrangement particulier des constantes fondamentales en travaillant à une théorie qui serait aussi explicative, réfutable, et surtout non finaliste que la théorie de la sélection naturelle. Ceci nous amène à nous poser en spectateurs d'un tel combat, et de l'évaluer en termes épistémologiques. Il n'est en premier lieu pas évident que la finalité soit tout à fait exclue de la physique : en tant qu'elle est (pour sa part classique) déterministe, elle peut être traitée de manière absolument équivalente en termes finaux. Et même si une part d'indéterminisme est acceptée, reste la finalité inhérente au devenir lui-même : nous pensons ici aux philosophies du devenir de Bergson ou Whitehead par exemple, qui n'excluent pas la finalité, le devenir créatif, mais la mettent au profit d'une explication cohérente du monde. Par ailleurs, le travail même de l'anthropiste génère divers questionnements méthodologiques. Il y a d'abord l'assurance d'avoir un modèle théorique abouti, que ce soit en cosmologie ou en physique des particules, qui génère la prétention de connaître avec assez de précision l'espace de variation des paramètres et des

constantes fondamentales de notre Univers (ainsi que d’avoir un recensement assez complet de ces paramètres fondamentaux), et de pouvoir raisonner sur un tel espace pour y contraindre une région “anthropiquement favorable” avec l’assurance du travail abouti. Mais il y a surtout le point de vue de la physique classique, du déterminisme des lois, poussant à voir le monde comme se réduisant à quelques “axiomes” qui suffisent à donner raison au reste. La biologie, mais aussi la physique des systèmes complexes, développe un mode de pensée distinct, où contingence, créativité, fluctuations et émergence de propriétés nouvelles s’opposent au devenir sans surprise de la physique classique déterministe. Dans une telle conception de la science et du dialogue avec la nature, la recherche de l’anthropiste apparaît vaine, limitée, voire prétentieuse. En situant le Principe Anthropique dans l’optique de cette opposition entre “réductionnisme” et “émergentisme”, nous souhaitons pointer comment un tel Principe est intimement lié à un *type* de physique, une *manière* de concevoir et de décrire la nature qui souffre aujourd’hui de ce qui a pu assurer son succès auparavant : la simplicité, l’unicité, la linéarité des causes, et qui fait aujourd’hui face à l’émergence de complexité, aux instabilités et autres effets de physique non linéaire. Au final, il apparaît que, par-delà ces problèmes épistémologiques et méthodologiques, c’est la notion philosophique de loi de la nature qui est en jeu. En questionnant la causalité suprême, la nécessité inhérente à notre Univers, la physique rentre sur un terrain glissant que philosophie et théologie ont déjà longuement exploré. C’est dans cette dernière limite, ce fondement ultime du Principe Anthropique, ce questionnement de la Raison Suffisante à ce que lois et autres invariants soient posés ainsi *plutôt qu’autrement* sur notre monde, que peut se dégager une issue mettant un terme aux débats sur le sujet.

La structure de ce mémoire suit cette évolution de pensée ayant mené à l’avènement du Principe Anthropique, son utilisation, sa résolution en termes de multivers par les physiciens, puis expose la mise en perspective nouvelle qu’apporte une analyse épistémologique et méthodologique, pour finir sur des considérations radicalement philosophiques. La section I présente quelques bases essentielles de physique moderne pour situer le Principe Anthropique dans le contexte où les physiciens l’utilisent et le pensent, puis introduit des repères historiques mettant en lumière l’émergence des questions du *fine-tuning*, pour finalement introduire les diverses définitions du Principe Anthropique, et surtout ses utilisations *faibles*. Suite à quoi la section II présente les théories du multivers introduites en philosophie d’abord, puis en physique, où l’on interrogera leur réfutabilité et donc leur caractère “scientifique”. La section III, quant à elle, propose un éclairage nouveau de la question du Principe Anthropique sous l’angle de la querelle épistémologique entre réductionnistes et émergentistes. L’analyse des notions de modèle physique, de cause, mais aussi de hasard, de probabilité, de finalité et de loi fondamentale nous permettra de dresser un panorama des enjeux philosophiques du Principe Anthropique.

I. Le Principe anthropique et son utilisation

Cette première partie restitue les mouvements de pensée qui ont contribué à l'édification du Principe Anthropique, et tente de dresser un panorama des définitions diverses et utilisations concrètes qui ont été faites de ce principe. Il faut pour cela nous plonger dans la physique moderne, et notamment la cosmologie telle qu'elle s'est construite après l'avènement de la Relativité Générale d'Einstein, afin de bien comprendre le contexte dans lequel ces réflexions sur la particularité de la place de l'homme dans l'Univers, et la particularité de l'Univers lui-même ont pu naître.

1. A l'origine du Principe Anthropique

Nous relatons d'abord comment les nouvelles interrogations issues du développement de la physique moderne ont mené au problème du *fine-tuning* et à de nouvelles interrogations sur la place de l'homme dans l'Univers.

a. Panorama de la physique contemporaine

Nous allons nous intéresser ici à deux grands domaines de la physique théorique, au sens où ils régissent respectivement l'infiniment grand et l'infiniment petit : la cosmologie et la physique des particules. Nous aurons ainsi un panorama des différentes lois fondamentales à partir desquelles les interrogations sur le Principe Anthropique s'appréhendent véritablement.

i. La cosmologie

Avant d'étudier la cosmologie en elle-même, nous allons présenter rapidement la théorie de la relativité générale sur laquelle elle se base.

– La Relativité Générale

En premier lieu, il faut étudier la relativité restreinte, mise au point par le physicien Albert Einstein en 1905. Les hypothèses qui sous-tendent cette théorie sont peu nombreuses. Elles consistent à utiliser tout d'abord l'existence de référentiels d'inertie (c'est-à-dire de solides de référence par rapport auxquels le mouvement libre des corps s'effectue à vitesse constante) et à y appliquer la relativité de Galilée, qui stipule que les lois de la physique sont invariantes par changement de référentiel inertiel. On ajoute à cela des principes de symétrie concernant l'espace-temps (isotropie¹ et homogénéité de l'espace, homogénéité du temps), et on postule qu'il doit exister une vitesse limite pour la propagation des interactions : c'est la vitesse de la

¹ L'isotropie est l'invariance par changement de lieu.

lumière. En travaillant le formalisme pour s'accorder à cette contrainte, on peut déduire la transformation qui permet d'exprimer la façon dont espace *et* temps se modifient lors d'un changement de référentiel : c'est la transformation de Lorentz. Espace et temps, bien que posés *a priori*, perdent leur caractère absolu.

La relativité générale, développée pendant les années qui suivirent et finalisée en 1915, consiste à généraliser la vision précédente en y ajoutant la gravité. La relativité restreinte n'est en effet valable que pour un type précis de référentiels : ceux qui se déplacent à vitesse constante, ce qui exclut tout référentiel accéléré, donc tout corps en chute libre dans un champ de gravité par exemple. La relativité générale se fonde sur le *principe d'équivalence* : la pesanteur d'un corps dans un champ gravitationnel est équivalente au mouvement libre dans un référentiel accéléré (il y a équivalence entre la masse inerte et la masse pesante). Ainsi, la pesanteur ressentie sur Terre peut être reproduite artificiellement dans un ascenseur qui "monte" dans l'espace avec une accélération égale à l'accélération de la pesanteur. En introduisant cette notion dans la nouvelle conception de l'espace-temps qu'apporte la relativité restreinte, on en arrive à construire un espace-temps-masse : les masses courbent la structure de l'espace-temps, qui elle-même guide le déplacement des masses en mouvement libre.

-La cosmologie

Venons-en maintenant à la cosmologie. Cette discipline s'intéresse à l'Univers à grande échelle, celle où les galaxies sont des atomes composant le fluide cosmique peuplant le tout, ainsi qu'à son évolution dynamique. Cette discipline se base donc sur la théorie de la Relativité Générale, avec quelques approximations supplémentaires : l'homogénéité spatiale de la répartition de matière et donc de la structure spatiale (il n'y a pas de position privilégiée) ainsi que l'isotropie (pas de direction privilégiée) de l'Univers, ce que l'on nomme *principe cosmologique*. C'est ce principe qui permet une étude simple de l'univers à grande échelle, par les approximations auxquelles on est mené dans les équations de la relativité générale, et par le peu de paramètres requis pour l'étudier. On pourrait penser que ce principe d'isotropie et d'homogénéité dans l'univers est dépourvu de sens, au vu des fluctuations de densité de matière dans notre entourage : il y a bien du vide (en fait une zone de très faible densité) entre ces zones d'extrême densité que sont la Terre et la Lune. Néanmoins, l'observation à très grande échelle, celle où des centaines de millions de galaxies sont présentes, nous montre un paysage très homogène et isotrope, parsemé de faibles fluctuations de matière.

Plusieurs observations viennent étayer la théorie moderne de la cosmologie. En premier lieu, la loi de Hubble, énoncée en 1929, stipule que deux objets quelconques dans l'univers séparés par une certaine distance vont s'éloigner au cours du temps selon une vitesse proportionnelle à cette distance. Ce fut la première indication que notre univers était en *expansion*. L'image habituelle permettant de se représenter cette expansion en tout lieu est celle d'un ballon que l'on gonfle : deux points quelconques de la membrane s'éloigneront de plus en plus rapidement l'un de l'autre à mesure que le ballon se gonflera.

Ensuite, la découverte en 1964 par les ingénieurs de la Bell Telephone Company Arno Penzias et Robert Wilson du Fond diffus de Rayonnement Cosmologique (le CMB, pour *Cosmic Microwave Background*) fut le promoteur essentiel de la théorie du Big-Bang. Ce fond de rayonnement correspond à l'émission des

premiers photons de l'univers. En effet, dans un univers en expansion, remonter le temps correspond à contracter l'espace, et ce faisant à augmenter la température moyenne, supposée infinie lors du Big-Bang. Les températures extrêmes du début de l'univers faisaient régner des interactions incessantes entre matière et rayonnement, de sorte que ce dernier était *couplé* avec la matière : l'univers primordial est un corps noir des plus parfaits. Cependant, à mesure que la température chuta, il devint possible à l'électron de se lier au proton (on parle de "recombinaison") pour former de l'hydrogène stable qui, lui, interagit beaucoup moins avec les photons que l'électron seul. Cette époque est donc marquée par la "libération" des photons couplés avec la matière : c'est le découplage. Ces photons, ayant traversé un univers en expansion jusqu'à l'observateur, ont vu leur fréquence diminuer jusqu'aux fréquences micro-ondes, et c'est ce que Penzias et Wilson ont observé par accident comme bruit de fond dans leur antenne des laboratoires Bell. Cette observation est sans doute la plus précieuse pour la cosmologie moderne : elle renseigne sur les conditions initiales de l'univers, les fluctuations qui régnaient dans la matière à cette époque (se traduisant par des fluctuations de température des photons émis), elle conforte le principe cosmologique en ce qu'elle dévoile une isotropie et une homogénéité incroyables (les écarts à la densité moyenne sont de l'ordre du cent millième), et elle permet la contrainte précise des paramètres cosmologiques (c'est-à-dire les densités moyennes de matière, de rayonnement, la constante de Hubble etc., en bref tout ce qui régit la dynamique à grande échelle de l'Univers).

A côté de ces observations remarquables, d'autres observations ont aussi amené avec elles leur lot de nouvelles intrigues pour la physique. La courbe donnant la vitesse des étoiles dans les galaxies en fonction de leur distance au centre tend vers une vitesse constante en bord de galaxie, là où elle devrait tendre vers zéro. Pour expliquer cette observation, on introduisit la matière noire, une matière qui n'interagit que de façon gravitationnelle (une pure masse que l'on ne peut voir, puisqu'elle n'interagit pas avec les photons, ni sentir puisqu'elle n'interagit pas, ou du moins pas sensiblement, avec la matière par les interactions électromagnétiques, fortes ou faibles régissant la structuration de la matière à petite échelle). La nature de cette matière est encore un mystère aujourd'hui. Ensuite, les observations de supernovae lointaines en 1999 ont montré que l'univers était en phase d'expansion accélérée, ce qui peut se modéliser par l'introduction d'un paramètre supplémentaire dans les équations de base de la cosmologie : c'est la constante cosmologique (introduite à l'origine par Einstein pour rendre son univers statique). La nature de cette constante, qui apparaît comme un terme de répulsion gravitationnelle, et que l'on pense liée à l'énergie du vide (bien que la valeur de cette constante et la valeur prédite pour l'énergie du vide diffèrent d'un facteur de 10^{120}), est encore inconnue : on parle d'elle comme d'une "énergie sombre" (et même plus récemment de "quintessence", à croire que l'on veuille insister sur l'aspect mystique du phénomène). Enfin, l'observation du fond diffus montre que des zones si éloignées qu'elles n'ont pu entrer en contact causal auparavant sont pourtant corrélées (elles ont exactement la même température). Pour expliquer ceci, on adjoignit à l'expansion habituelle une phase initiale d'expansion accélérée, appelée inflation. Le statut de cette inflation est soumis à débat. Nous y reviendrons en partie II.

Ce qu'il importe de retenir dans cette introduction à la cosmologie, c'est que l'Univers est aujourd'hui étudié comme un objet dynamique, de la même manière qu'un thermodynamicien étudie l'évolution dynamique

d'un gaz, avec quelques paramètres moyens régissant l'évolution à grande échelle : les paramètres cosmologiques de densités moyennes d'énergie (que ce soit pour la matière, le rayonnement ou l'énergie sombre) sont ainsi facilement analysables en termes de pression et de densité telles que les utilise un thermodynamicien. Une fois fixés, ces quelques paramètres "macroscopiques" imposent l'évolution de notre Univers, et contraignent la répartition statistique de matière en son sein (de façon simpliste, un Univers qui s'étend vite et contient peu de matière aura une répartition parsemée et peu groupée, donc moins de chances de réaliser des systèmes galactiques stables etc.). Il apparaît donc déjà clairement que la cosmologie, en ce qu'elle s'intéresse à un objet qui nous apparaît *a priori* comme unique, mène, *via* la contrainte des paramètres cosmologiques, à considérer la possibilité de leur variation, c'est-à-dire la possibilité d'avoir des univers ne contenant pas de galaxies, et donc pas d'homme. Il est peu étonnant que le Principe Anthropique soit né au sein de cette discipline.

ii. *Mécanique quantique et physique des particules*

– Mécanique quantique et théorie quantique des champs

La mécanique quantique, seconde grande théorie du XX^{ème} siècle, a permis la description précise de l'infiniment petit. Alliée à la relativité restreinte, elle devint la théorie quantique des champs, et permit de rendre compte aussi du rayonnement (c'est-à-dire que le photon devint lui aussi un objet quantique). Dans cette théorie, la notion de champ est primordiale : de même que le photon est une manifestation du champ électromagnétique, l'électron est une manifestation du champ électronique. Cette vision est rendue possible par le concept de *fonction d'onde* introduit par le physicien Erwin Schrödinger en 1925 : la fonction d'onde d'une particule traduit le "flou" associé à la mesure des quantités observables (c'est-à-dire mesurables par un appareil adéquat) que sont sa position et sa vitesse (on dit que ces observables ne commutent pas). Ce flou même est liée à une propriété des observables non commutatives, qui est d'obéir au Principe (en fait Théorème) d'Heisenberg : le produit de leur incertitude est plus grand qu'une certaine valeur non nulle. On ne peut mesurer avec une précision infinie une observable sans perdre absolument toute information sur l'autre observable. Dans le cas de la position et la vitesse, on ne peut rendre compte précisément de la position sans perdre toute connaissance concernant la vitesse. Aussi la fonction d'onde va-t-elle traduire l'incertitude sur la position (extension spatiale du "paquet" d'onde) ainsi que l'incertitude sur la vitesse (mélange de différentes fréquences d'ondes). Le "lieu" dans lequel cette fonction d'onde se décrit n'est pas l'espace à trois dimension habituel, mais un espace appelé "espace de Hilbert", qui est complexe et dont le nombre de dimensions peut être infini. Schrödinger montra que, en prenant le carré de cette fonction d'onde (en fait le module au carré, puisque cette fonction d'onde est complexe), nous obtenons la probabilité de présence de la particule à tout endroit de l'espace. Ainsi, cette notion de fonction d'onde permet de traiter l'aspect le plus fondamental de la théorie quantique : la probabilité liée à l'incertitude fondamentale des mesures : toute mesure d'un objet quantique change de façon non déterministe le paquet d'onde. Cependant, l'évolution libre, lorsqu'aucune mesure n'est effectuée sur le système, est gouvernée par l'équation déterministe de Schrödinger : la mécanique quantique est probabiliste, mais l'évolution des probabilités y est

déterministe. Nous reviendrons sur ces considérations plus tard, en partie II, lorsque nous nous intéresserons à l'interprétation des mondes multiples d'Everett.

La théorie quantique des champs est donc la prise en compte des fonctions d'onde comme des excitations plus ou moins localisées du champ. Le principe d'incertitude, appliqué au cas des observables "énergie" et "temps", stipule aussi que des excitations ayant une certaine énergie peuvent se produire pendant un certain temps sans que cela puisse être observé (car il faut pour qu'il y ait observation que nous soyons au-delà d'une valeur critique non nulle). Aussi le vide quantique va-t-il être vu comme un bouillonnement incessant de création de particules dites 'virtuelles' en ce qu'elles ne sont pas observées, mais qui se révèlent être nécessaires à la théorie de la renormalisation décrivant les interactions entre particules et champ électromagnétique.

- Modèle standard et physique des particules

De même que la Relativité Générale est le socle théorique sur lequel est bâtie la cosmologie, la théorie quantique des champs a permis l'édification du modèle standard des particules, c'est-à-dire le modèle qui décrit l'ensemble des particules élémentaires (des protons aux quarks en passant par des particules plus exotiques), leurs propriétés (charge, spin, masse etc.), ainsi que les forces d'interaction à cette échelle. À propos de ces dernières, les physiciens des particules tentent d'élaborer une théorie de la "grande unification" (on parle de *Grand Unified Theories*, ou GUT), consistant à unifier les quatre forces fondamentales de la nature : la force forte assurant la cohésion des noyaux atomiques, la force faible intervenant dans les réactions de désintégration nucléaire, la force électromagnétique et la force gravitationnelle. Or, il se trouve que pour une température de 10^{27} K, cette unification est théoriquement possible! Les recherches en cosmologie primitive furent alors lancées : car si le Big-Bang permet d'atteindre de telles énergies, alors nous pouvons penser le début de l'univers comme une "transition de phase" entre un état symétrique de "vide quantique" rompant par la suite sa symétrie en différenciant les forces fondamentales. Pour le philosophe de la physique Dominique Lecourt, c'est ainsi que les physiciens des particules ont approché le problème du Principe Anthropique² : en exhibant un "sens" de l'Univers, une transition de l'homogénéité primordiale à l'hétérogénéité observée aujourd'hui à travers le modèle standard, ce qui permit à la matière de se structurer et à l'homme finalement d'exister. Reste un problème de "taille" quant à l'unification telle que l'entreprennent les physiciens contemporains³ : les objets que l'on considère comme "ultimes" dans la théorie unifiée, par exemple les cordes unidimensionnelles de la théorie des cordes, sont de l'ordre de grandeur de la longueur obtenue en combinant la Relativité Générale et la Mécanique Quantique, appelée longueur de Planck, qui vaut environ 10^{-35} m. L'observation semble donc difficile : en

² Lecourt, D., "Principe Anthropique", in *Dictionnaire d'histoire et philosophie des sciences*, PUF, 4^e éd., Paris, 2006, p 888

³ Ceux, disons, partisans d'une physique "réductionniste", au sens où ils espèrent pouvoir réduire l'ensemble des phénomènes physiques à des conséquences plus ou moins complexes d'une ou de quelques loi(s) simple(s) décrivant le substrat fondamental du monde matériel. Cette distinction se révélera importante en partie III.

équivalent énergétique, ces cordes se trouveraient à une énergie de 10^{19} GeV,⁴ à comparer aux 10^6 GeV accessibles avec les meilleurs accélérateurs de particules... Cette limite observationnelle, qui est aussi pour le moment une limite théorique marquant la frontière de notre connaissance de la nature, est appelée “Mur de Planck”, en hommage à Planck qui le premier construisit des longueurs, temps, masse et énergie typiques à partir des constantes fondamentales.

iii. *Indéterminés en physique des particules et en cosmologie*

Nous venons de le voir, l'enjeu de la physique théorique moderne est l'unification. Il faut bien comprendre que l'approche est réductionniste : on considère que le substrat fondamental que la physique théorique se charge de découvrir (pour donner l'exemple de la théorie des cordes, théorie réductionniste par excellence, ce sont des cordes infiniment petites associées à une certaine structure géométrique) permet d'expliquer de façon déductive l'ensemble des phénomènes physiques (comme des ‘axiomes’ de la physique en quelque sorte)⁵. Pour expliquer la “brisure de symétrie” qui mène d'un champ unifié à une dissociation des forces fondamentales, les physiciens doivent introduire des “paramètres libres” dans le modèle standard décrivant la physique des particules : ce sont les indéterminés. Parmi eux se rangent les masses des particules élémentaires, les constantes de couplage des interactions etc. La physique des particules possède plus de vingt indéterminés, et la cosmologie une quinzaine (nous en avons donné des exemples précédemment avec les densités d'énergie de matière et de rayonnement ou la constante cosmologique). Ce sont des grandeurs qui ne sont pas déjà déterminées dans le modèle dont elles font parties, mais qui sont ajustées de façon à ce que le modèle soit en adéquation avec les mesures. Lee Smolin, physicien théorique contemporain connu pour s'être dressé à de multiples reprises contre la théorie des cordes, évoque deux aspects troublants de la démarche consistant à chercher l'origine de la valeur de ces paramètres.⁶ Le premier est celui de la *naturalité* : exprimés sous la forme de rapports dans dimension, les paramètres se voient affligés de valeurs s'écartant de beaucoup de l'unité. Le second est celui de la *complexité* : notre univers est structuré et organisé, depuis la cellule jusqu'à l'amas de galaxies. Mais cet agencement extraordinaire dépend pour beaucoup des valeurs de certaines constantes fondamentales : un neutron d'une masse supérieure de 1% à celle qu'il possède actuellement rendrait les noyaux instables, l'univers gazeux et non structuré. Ces deux aspects sont à la base, nous le verrons, de l'idée du Principe Anthropique.

La notion d'indéterminé prend même une nouvelle dimension avec la théorie des cordes. Historiquement, la notion d'unification était liée à la réduction du nombre de paramètres (ce fut le cas lorsque Maxwell lia électricité et magnétisme dans la théorie de la lumière, par exemple). Aujourd'hui, les théories cherchant à

⁴ Le GeV est une unité de mesure typique de la physique des particules, il signifie GigaElectronVolt.

⁵ Dans son mémoire *Quelques éléments de physique et de philosophie des multivers*, le physicien théorique Aurélien Barrau précise (p 59) que l'idée d'unification est liée au “présupposé philosophique que la découverte de la théorie ultime s'accompagne nécessairement d'un élan réductionniste”. Cependant, “les avancées contemporaines ne corroborent plus cette évolution. La tendance s'inverse » (il fait ici référence à la notion d'émergence dont nous parlerons en section III).

⁶ Lee Smolin, “Scientific alternative to the anthropic principle”, arxiv hep-th/0407213, 2004

unifier les interactions fondamentales, comme la théorie des cordes, ont des indéterminés irréductibles dans leurs équations. Une nouvelle symétrie, la “supersymétrie” a été introduite pour palier à ces indéterminés, mais elle ne fait que les renforcer en incluant de nouveaux paramètres libres. Dans des approches plus récentes de Ashok et Douglas⁷, le nombre de théories distinctes compatibles avec l’existence d’un univers à quatre dimensions présentant une énergie du vide légèrement positive (comme l’observation semble le confirmer) est 10^{500} ! C’est ce que l’on nomme le “paysage”, ou *landscape* de la théorie des cordes. Les théories de ce *landscape* voient varier leur physique des particules, leurs paramètres fondamentaux etc.. Ce nombre est pour Lee Smolin un argument en défaveur de la falsifiabilité de la théorie des cordes, car quelles que soient les futures découvertes, elles pourront être expliquées par la théorie des cordes... Selon Aurélien Barrau, “il est bien clair que cette structure en paysage renforce considérablement le raisonnement anthropiste. Il lui confère même une dimension prédictive (en termes probabilistes)”⁸. Nous irons plus loin dans ces considérations en section II.

Nous voilà maintenant bien armés pour comprendre la problématique du *fine-tuning*. Nous avons vu comment l’apparition de constantes fondamentales et de paramètres libres dans les théories pouvait mener à des interrogations sur la possibilité qu’elles ait pu être autres. Examinons maintenant de plus près cette question.

b. Le fine-tuning

La vision d’un Univers finement ajusté (on parle de *fine-tuned Universe*) provient de l’idée selon laquelle les conditions permettant à la vie d’exister au sein de l’Univers ne sont réunies que pour un ensemble restreint des valeurs des divers paramètres cosmologiques et constantes physiques universelles⁹, si restreint en fait que si l’une de ces valeurs était même très légèrement différente, l’univers ne pourrait mener au développement de structures astrophysiques, à la diversité des particules élémentaires, et *in fine* à la vie telle que nous la connaissons. Le *fine-tuning* provoque l’étonnement devant ces remarquables coïncidences qui rendent notre situation improbable devant l’ensemble des possibles que l’on peut obtenir par la variation des paramètres fondamentaux de notre Univers. Nous allons voir quelles coïncidences sont le plus souvent mises en avant, et comment elles mènent rapidement à l’introduction de nécessité et de finalité dans l’interprétation qu’on leur donne.

i. Des coïncidences remarquables...

Dans son article “Principe Anthropique” du *Dictionnaire d’histoire et philosophie des sciences*, Dominique Lecourt évoque la façon dont les physiciens des particules ont pu s’étonner devant la série de coïncidences

⁷ S.K. Ashok & M. Douglas, JHEP, 0401 p 60, 2004

⁸ Aurélien Barrau, *op.cit.*, pp. 70-71.

⁹ Pour un exposé complet sur l’origine et la signification des constantes fondamentales, on pourra se référer à Cohen-Tannoudji, G., *Les constantes universelles*, Hachette, Paris, 1998. La thèse de l’auteur est notamment que les constantes fondamentales exhibent un “horizon” de connaissance qui contraint fondamentalement l’exploration du physicien.

jalonnant l'histoire de l'Univers : “A mesure qu'on entrait dans les détails du processus supposé amorcé après la “brisure de symétrie”, au sortir du vide quantique, on s'apercevait que si, lorsque la température est “tombée” à 10^{10} K, il n'y avait pas eu un très léger (et complètement énigmatique) excès de matière par rapport à l'antimatière, le processus qui a suivi n'aurait pas pu s'enclencher... Quant à ce processus lui-même, on voyait aussi comment, sur cette base, s'y était ajustées, *au prix d'une succession vertigineuse de hasards minutieux*, les constantes universelles qui régissent notre univers”¹⁰. Un exemple connu et souvent cité est celui de la valeur de la constante de couplage électromagnétique. Si cette valeur avait été trois fois plus grande, les noyaux d'hélium ne pourraient pas être stables et les noyaux plus lourds (par exemple le carbone, composant essentiel de la vie telle que nous la connaissons), ne pourraient certainement pas exister. Trois fois plus petite, et aucun atome neutre ne pourrait exister de façon stable, rendant aussi la vie impossible. Ce type de raisonnement entend exhiber le caractère confiné (par sélection anthropique) de la valeur de la constante de couplage électromagnétique au sein d'un intervalle étroit autour du nombre qui a été calculé par l'observation. Dans la même logique, le philosophe des sciences Ernan McMullin a remarqué¹¹ que les différentes forces fondamentales étaient finement réglées entre elles : si la force forte avait été 5% plus faible que sa valeur actuelle, l'Hélium n'aurait jamais pu se former.

Le philosophe des sciences Victor Stenger apporte une restriction à l'emploi de l'argument du *fine-tuning*¹². Une partie de l'argument du réglage fin des constantes fondamentales tient en effet à l'étonnement devant la “chance” que l'on a que les paramètres soient dans une fourchette de valeurs favorable à l'émergence de vie dans l'univers. Néanmoins, cet étonnement tient beaucoup au choix d'unité qui est fait. Lorsque l'on prétend qu'une masse de neutrino de 5×10^{-34} kg plutôt que 5×10^{-35} kg aurait conduit à un univers qui se contracterait plutôt que de s'étendre¹³, cela revient à dire, comme le remarque le philosophe des sciences Neil Manson, que si Michael Jordan avait été plus petit de 1×10^{-16} années lumières (c'est-à-dire un mètre), il n'aurait jamais été champion de basketball¹⁴. Il faut donc bien prendre garde à n'utiliser que des nombres sans dimensions. Pour Stenger, on trouve alors ces cinq principaux nombres “finement réglés” :

1. La force électromagnétique, 39 ordres de grandeur plus importante que la force gravitationnelle. Cette différence permet aux étoiles d'être stables assez longtemps pour que la vie apparaisse.
2. L'énergie du vide, 120 ordres de grandeurs en deçà de sa valeur théorique, assurant ainsi la stabilité de l'univers (et non son déchirement immédiat).

¹⁰ Lecourt, D., *op.cit.*, p. 888. (Nous mettons en italique)

¹¹ McMullin, E., “Indifference Principle and Anthropic Principle in Cosmology”, *Studies in the History and Philosophy of Science*, 24, 1993, pp. 359–89

¹² Stenger, V.J., *God : The Failed Hypothesis – How Science Shows That God Does Not Exist*, 2007, Prometheus Books, p 146.

¹³ C'est l'argument du théologien John Jefferson Davis, “The Design Argument, Cosmic ‘Fine-tuning’, and the Anthropic Principle”, *Philosophy of religion* 22, 1987, pp. 139-50

¹⁴ Neil A. Manson, “There is no adequate definition of ‘fine-tuned for life’”, *Inquiry* 43, 2000, pp. 341-52

3. La masse de l'électron, plus petite que la différence de masse entre le proton et le neutron : ce dernier peut alors se désintégrer en proton, électron et antineutrino. Ceci nous permet au final d'avoir de l'hydrogène, combustible essentiel des étoiles.
4. Le neutron est de masse comparable à celle du proton, ce qui lui permet d'être inclus dans le noyau des atomes et d'obtenir des éléments lourds qui sont à la base de la vie.
5. L'état d'énergie du carbone excité (prédit par Fred Hoyle sur la base d'arguments anthropiques, ce sur quoi nous reviendrons à la fin de cette partie), qui est essentiel à sa production massive dans les étoiles.

Le cas de la valeur de la constante cosmologique semble le plus extrême étant donné la différence extraordinaire entre valeur théorique et valeur mesurée, ce qui dans la mesure actuelle des connaissances ne s'explique que par une compensation extrêmement précise des paramètres du modèle standard : pour le physicien Larry Abbott, "la faible valeur de la constante cosmologique nous indique qu'une relation remarquablement précise et tout à fait inattendue existe entre les paramètres du Modèle Standard de la physique des particules, la constante cosmologique brute et une partie inconnue de la physique"¹⁵.

Victor Stenger tente de se poser à l'encontre de l'argument du *fine-tuning*, en ce qu'il peut mener à une exploitation théologique, *via* l'argument du Dessein (le *Design Argument*) selon lequel notre Univers aurait été créé dans le but que l'homme y apparaisse, le *fine-tuning* étant alors le résultat d'un choix délibéré fait par un Dieu omniscient. Il objecte notamment l'idée selon laquelle nous puissions faire des prédictions sur ce qui se serait passé dans un Univers ayant des valeurs de constantes fondamentales différentes en se basant sur ce qui a lieu dans notre Univers¹⁶. Il s'agit pour lui de renverser la question du *fine-tuning*, en ne voyant pas les paramètres comme "faits" pour l'homme, mais l'homme comme "fait" pour les paramètres¹⁷. L'idée est ici de montrer que le *fine-tuning* peut apparaître comme un retour du providentialisme, où l'on louait à quel point tout dans la nature était fait pour l'homme. Victor Stenger, à l'instar de beaucoup de physiciens, préconise plutôt la pensée des multivers, selon laquelle l'ensemble des variations possibles de paramètres est réalisé de fait dans un "méta-Univers". Nous reviendrons sur ce point très largement en partie II.

De ces considérations concernant les diverses coïncidences parmi les paramètres fondamentaux de l'Univers ressort l'idée que les événements ayant mené à l'émergence de la vie n'ont été réalisables que grâce à l'existence de conjonctions *a priori* extrêmement improbables dans l'ensemble des cas possibles. Nous

¹⁵ Larry Abbott, "The Mystery of the Cosmological Constant," *Scientific American*, vol. 3, no. 1 (1991): 78; cité dans Michael A Corey, *The God Hypothesis: Discovering Divine Design in Our Goldilocks Universe*, Rowman and Littlefield, 2001. ("the small value of the cosmological constant is telling us that a remarkably precise and totally unexpected relation exists among all the parameters of the Standard Model of particle physics, the bare cosmological constant and unknown physics.")

¹⁶ Il cite à ce propos David Hume : "Il ne peut y avoir d'argument démonstratif pour prouver que les faits dont nous n'avons pas fait l'expérience ressemblent à ceux dont nous avons fait l'expérience" ("There can be no demonstrative argument to prove that those instances in which we have no experience, resemble those of which we have had experience")

¹⁷ Stenger, V., "Is The Universe Fine-Tuned For Us?"

allons maintenant étudier de plus près comment l'idée de nécessité a pu être introduite dans les discours sur le *fine-tuning*.

ii. ... à l'idée de nécessité

- L'étonnement devant notre présence fortuite

Dans le livre de référence au sujet du Principe Anthropique, *The Anthropic Cosmological Principle*, écrit par les astrophysiciens John Barrow et Frank Tipler, nous pouvons trouver évoquée dès la préface l'idée qu'il y a derrière l'agencement particulier des constantes fondamentales une certaine nécessité : "ces relations [entre les constantes fondamentales] ainsi que bien d'autres aspects étranges de l'évolution de l'Univers paraissent être nécessaires à l'évolution d'organismes carbonés comme nous-mêmes"¹⁸. Nous sentons bien dans cette remarque l'étonnement devant l'improbabilité que l'homme se trouve dans cet univers qui ne le désire pas. Comme le font remarquer avec justesse la philosophe Isabelle Stengers et le physicien et chimiste Ilya Prigogine dans *La nouvelle alliance*,¹⁹ ce type d'énoncé, posant l'homme comme un étranger dans le monde que la science décrit, est le contrepoint tragique d'une science "classique" qui a voulu isoler l'homme de la nature, et dont Jacques Monod se fait l'interprète lorsqu'il tire les leçons des progrès théoriques de la biologie moléculaire : "L'ancienne alliance est rompue ; l'homme sait enfin qu'il est seul dans l'immensité indifférente de l'Univers d'où il a émergé par hasard"²⁰. Cet étonnement devant le grand hasard qui fait que nous sommes là va pousser à chercher des explications, des relations au sein des constantes fondamentales de l'Univers. Ce fut le cas pour les "coïncidences des grands nombres", que nous allons maintenant traiter plus en détail.

- Les coïncidences des grands nombres

La forme moderne de la pensée de l'auto-sélection par Principe Anthropique (c'est-à-dire du fait que l'existence de l'homme contraigne les constantes fondamentales à se trouver dans un intervalle étroit) se développa suite aux remarques du physicien et mathématicien Paul Dirac concernant certaines coïncidences remarquables entre des nombres sans dimension qui semblaient entièrement indépendants : ce sont les fameuses "coïncidences des grands nombres" (*Large Number Coincidences*).

Il faut différencier, dans les coïncidences aux grands nombres pouvant être invoquées à propos de certains résultats, celles qui relèvent de la pure coïncidence de celles qui relèvent d'une conséquence plus globale de la valeur d'une certaine constante ou d'un jeu de constantes. Voici comment l'on procède : dans un premier temps, il s'agit de remarquer que la structure des composants du monde est déterminée par un état d'équilibre entre des forces fondamentales en compétition. Cette remarque conduit à l'établissement de

¹⁸ Barrow, J.D., & Tipler, F.J., *The Anthropic Cosmological Principle*, Oxford University Press, 1986, p vii (préface de J.A. Wheeler) : "These relationships [between fundamental constants] and many other peculiar aspects of the Universe's make-up appear to be necessary to allow the evolution of carbon-based organisms like ourselves"

¹⁹ Prigogine, I. & Stengers, I., *La nouvelle alliance*, Gallimard, 1979, p. 30.

²⁰ Monod, J., *Le hasard et la nécessité*, Paris, Seuil, 1970, pp. 194-195.

certaines nombres sans dimension élémentaires dont la variation permet d'envisager la conséquence sur la structure élémentaire du monde, et donc de contraindre leur valeur en vertu de notre présence en tant qu'observateurs. Deux cas se profilent, donc :

- Soit la coïncidence est une conséquence des valeurs des constantes fondamentales régissant la structure de la matière à différentes échelles. Par exemple, le fait que la masse de l'homme soit une moyenne géométrique des masses planétaire et atomique, ou encore que la masse d'une planète soit la moyenne géométrique des masses de l'univers observable et de l'atome tient à ce que les constantes définissant les interactions gravitationnelle et électromagnétique diffèrent d'une certaine valeur.
- A contrario, certains faits relèvent de la pure coïncidence, comme le fait que la taille angulaire de la lune et celle du soleil coïncident parfaitement, et n'ont donc aucune influence sur l'existence d'observateurs. Par contre, le rapport de la distance Terre-Soleil et de la taille de la Terre est une pure coïncidence qui joue un rôle important pour l'existence d'observateurs.

Aussi, certains faits sont des éléments nécessaires à l'existence d'observateurs. Ce peuvent être de pures coïncidences ou les conséquences de rapports supérieurs entre constantes fondamentales, qui peuvent en dernier lieu se ramener soit à une nouvelle pure coïncidence, soit à une nécessité. Ces remarques permettent de corrélérer des aspects de l'Univers qui semblaient indépendants, mais aussi de souligner la présence, à la base, de pures coïncidences que semblent contraindre fortement la présence d'observateurs. C'est ainsi que Barrow et Tipler déclarent que "de nombreuses observations du monde naturel, bien que remarquables *a priori*, peuvent être vues sous cet angle comme des conséquences inévitables de notre propre existence"²¹. Nous trouvons ici l'essence même du Principe Anthropique. Avant d'aller plus loin, revenons sur l'origine de la pensée des coïncidences des grands nombres, afin de mieux mettre en perspective l'apparition de l'homme dans le récit.

○ *A l'origine des grands nombres : de Archimède à Eddington*

On retrouve déjà chez Archimède une certaine passion pour les grands nombres²² : en 216 av. J.C, il proposa un système symbolique permettant d'écrire de très grands nombres de manière simple, et mit en application ce système au travers d'un exemple, le comptage du nombre de grains de sables dans l'univers (qu'il trouva être égal à 10^{63}). Mais ce fut le physicien Hermann Weyl qui nota, en 1919, que le calcul de rapports dans dimensions à partir de l'électron pouvait donner des nombres très grands devant l'unité, par exemple en construisant le rapport du rayon de l'électron au rayon d'action de sa force gravitationnelle²³. Pour Arthur Eddington, astrophysicien du début du XXème siècle, c'était par de telles combinaisons que nous pouvions trouver la théorie fondamentale de notre monde physique, celle qui rendrait compte de toutes les forces et

²¹ Barrow & Tipler, *op.cit.*, p 219 (Many observations of the natural world, although remarkable *a priori*, can be seen in this light as inevitable consequences of our own existence).

²² Archimedes, *The sand reckoner*, in *The works of Archimedes*, ed. T.L. Heath, Dover, NY, 1953, pp. 221-32. Cité dans Barrow & Tipler, *op.cit.*

²³ Weyl, H., *Ann. Physik.* **59**, 129 (1919).

particules élémentaires. L'étonnement que l'on a devant de telles valeurs serait dissipé en rendant compte d'un fait premier qui les aurait fixées : "il est difficile de rendre compte de la présence d'un nombre pur (d'ordre de grandeur très différent de l'unité) dans l'ordre des choses ; mais cette difficulté serait enlevée si nous pouvions la connecter avec le nombre de particules dans le monde – un nombre que l'on présume avoir été décidé par pur accident"²⁴. Ainsi, chez Eddington, le nombre de particules dans l'univers, N , joue un rôle déterminant vis-à-vis des constantes de la nature. Il tenta donc d'en donner une évaluation précise (qu'il pensait pouvoir être exacte) : $N \sim 10^{79}$. Ce nombre est parfois appelé "nombre d'Eddington".

Ne connaissant pas encore les interactions faibles et fortes, Eddington construisit des rapports sans dimension à partir des constantes d'alors : la constante gravitationnelle G , la vitesse de la lumière dans le vide c , la masse de l'électron m_e , la masse du proton m_N , la charge de l'électron e , et la constante de Planck h (on utilise souvent $\hbar = h/2\pi$). A partir de ces constantes, il évalua trois rapports sans dimensions indépendants :

$$\frac{m_N}{m_e} \sim 1840; \quad \frac{\hbar c}{e^2} = \alpha^{-1} \sim 137; \quad \frac{e^2}{G m_N m_e} \sim 10^{39}$$

Le paramètre α que nous avons introduit est la constante de structure fine : elle représente en électrodynamique quantique la force d'interaction entre photons et électrons, et est aujourd'hui connue avec une précision absolument remarquable (jusqu'à 12 chiffres après la virgule). Le dernier rapport est celui des forces électromagnétique et gravitationnelle. A ceci, Eddington ajouta des paramètres tirés de l'observation cosmologique : le nombre de particules dans l'univers N , la constante de Hubble H_0 , et la constante cosmologique introduite par Einstein Λ . A partir de ces paramètres il construisit un dernier rapport :

$$c/H_0 \left(\frac{m_N m_e}{\Lambda} \right)^{1/2} \sim 10^{39}$$

Cette expression s'interprète comme le rapport du rayon de courbure de l'univers sur la moyenne géométrique des longueurs d'onde du proton et de l'électron. De ces quatre rapports, Eddington nota qu'ils étaient répartis, à quelques centaines près, autour des valeurs $N^0 = 1$, $N^{1/2} \sim 10^{39}$, et $N \sim 10^{79}$, et non pas sur des valeurs arbitraires parmi l'ensemble des réels. Le nombre de particules dans l'univers lui semblait donc être le lien entre les valeurs du monde microscopique et celles du monde macroscopique²⁵.

Aussi, bien que son travail paraisse plus tenir de la numérologie que du véritable travail scientifique, il est intéressant de noter la volonté d'*unifier*, derrière un principe premier, fut-il aléatoire, les diverses régularités physiques qui peuvent au premier abord paraître digne d'étonnement. Son travail est aujourd'hui relégué au

²⁴ A.S. Eddington, *The mathematical theory of relativity*, Cambridge University Press, Londres, 1923, p 167. ("It is difficult to account for the occurrence of a pure number (of order greatly different from unity) in the scheme of things; but this difficulty would be removed if we could connect it with the number of particles in the world—a number presumably decided by pure accident")

²⁵ Une revue plus détaillée de sa méthodologie se trouve p 226 de *The Anthropic Cosmological Principle*, op.cit..

rang de curiosité. Cependant, un autre physicien et mathématicien moderne, Paul Dirac, a su approcher ce problème des grands nombres de manière neuve.

○ *L'hypothèse de Dirac*

Pour Dirac, la primauté de ces trois valeurs (1 , 10^{39} et 10^{79}) parmi les nombres sans dimensions ne devait pas être éclaircie par des exploits combinatoires couverts de mysticisme, à la manière d'Eddington, mais plutôt en utilisant différents modes d'explication. Le nombre sans dimension qui va jouer un rôle important va cette fois être lié à l'âge de l'univers (ou âge de Hubble), t_0 :

$$N_1 = \frac{t_0}{e^2/m_e c^3} \sim 10^{40}$$

Ce rapport correspond à celui de l'âge de l'univers sur le temps d'interaction de la lumière au niveau atomique. C'est, pour Dirac, le véritable rapport à prendre en compte dans les raisonnements sur les grands nombres. Il proposa que tout nombre sans dimension dont la valeur approchait 10^{40} devait être égal à N_1 : c'est l' "hypothèse des grands nombres" (*Large Number Hypothesis*, ou *LNH*). Il la formula ainsi :

*"Deux très grands nombres sans dimensions quelconques qui existent dans la Nature, quelque soit la quantité qu'ils représentent, sont connectés par une relation mathématique, dans laquelle les coefficients sont de l'ordre de grandeur de l'unité"*²⁶

Aussi, cette hypothèse fait rentrer une nouvelle donnée en compte : l'âge de l'univers. En reprenant les nombres sans dimension précédents, Dirac en conclut que la constante de gravitation G devait varier aussi avec le temps, d'après son hypothèse des grands nombres (et en tenant compte du fait qu'une variation des quantités e , m_N ou m_e avec le temps aurait des conséquences trop importantes sur la mécanique microscopique pour être vraiment pensables). On devait donc avoir :

$$G \sim t^{-1}$$

Bien que la prédiction que les constantes fondamentales puissent varier ne soit pas nouvelle en physique à cette époque²⁷, elle donna un souffle nouveau à la recherche en cosmologie, en y développant l'idée que les constantes puissent changer au cours du temps.

○ *Apparition de l'anthropomorphisme*

A la fin des années 1950 et au début des années 1960, Robert Dicke et Carl Brans, astrophysiciens à l'université de Princeton, développèrent une théorie de la gravitation avec une constante G variant au cours du temps, et qui redonnait la théorie de la relativité générale d'Einstein lorsque ces variations tendaient vers

²⁶ Dirac, P.A.M., *Nature* **139**, 323 (1937). ("Any two of the very large dimensionless numbers occurring in Nature are connected by a simple mathematical relation, in which the coefficients are of the order of magnitude unity"Ö)

²⁷ On citera l'exemple de Lord Kelvin (alors encore sous le nom de Thomson) et Tait qui, en 1874, publièrent un article dans *Natural Philosophy* où ils prétendaient avoir observé une diminution de la vitesse de la lumière de $8 \text{ km s}^{-1} \text{ siècle}^{-1}$

zéro²⁸. Cette théorie permet d'avoir un cadre pour examiner plus précisément les conséquences de l'hypothèse des grands nombres. Dans une publication de 1957, Dicke fit des remarques reliant la coïncidence des grands nombres de Dirac avec la présence d'observateurs dans l'univers : "Il n'y a un seul grand nombre sans dimension qui soit aléatoire à l'origine. C'est le nombre de particules dans l'univers. L'âge de l'univers 'maintenant' n'est pas aléatoire mais est conditionné par des facteurs biologiques. Le taux de radiation d'une étoile varie comme ε^{-7} et pour des valeurs de ε bien plus importantes que la valeur présente, toutes les étoiles seraient froides. *Cela ne permettrait pas à l'homme d'exister et d'étudier ce problème*"²⁹. On trouve là une première version du Principe Anthropique Faible, selon lequel l'observation de certains aspects de l'univers *a priori* remarquables et étonnants sont en fait *nécessaires* à notre propre existence. A partir de là, il est assez immédiat de franchir le pas consistant à questionner cette nécessité, et d'invoquer des arguments du dessein pour montrer que l'univers *doit nécessairement* ou *a été réalisé* pour permettre à la vie d'apparaître : c'est le Principe Anthropique Fort.

Maintenant que nous avons vu l'origine du Principe Anthropique, nous allons en étudier les diverses définitions et interprétations.

2. Définitions

"Definitions are like belts. The shorter they are, the more elastic they need to be" S. Toulmin,

En physique et en cosmologie, le Principe Anthropique stipule que les humains doivent prendre en compte les contraintes que leur propre existence en tant qu'observateurs impose sur le type d'univers qui peut être observé. Ce type de raisonnement mène rapidement à la considération que des "superlois" doivent exister qui exigent un Univers où la vie, essentiellement sous forme carbonée (ou même humaine) puisse apparaître. Cette manière de raisonner permet d'évaluer une zone de paramètres fondamentaux pour lesquels l'Univers serait effectivement tel que la vie puisse apparaître, et semble ainsi apporter un nouveau critère scientifique pour l'estimation de ces paramètres. Quant à la question de savoir pourquoi tel jeu de paramètres fut "choisi" plutôt qu'un autre, deux types de réponses sont habituellement apportées : la première est celle du "dessein intelligent" (*Intelligent Design*), voyant dans ce jeu de paramètres le "meilleur choix possible", à la manière du Dieu leibnizien préparant son "meilleur des mondes possibles" (considérant alors qu'avec ce jeu de paramètres, "tout est donné", pour reprendre l'expression de Bergson), et la seconde est celle des *multivers*, où l'ensemble de mondes possibles (c'est-à-dire de jeu de paramètres possibles) est effectivement réalisé dans un méta-Univers les contenant tous. Le premier type de réponse se trouve plutôt être l'apanage des théologiens qui voient dans le Principe Anthropique une justification de l'existence divine. Afin de mieux cerner ces diverses interprétations, nous allons à présent présenter les diverses variations de définition du

²⁸ Brans, C., & Dicke, R., *Phys. Rev.* **124**, 924 (1961)

²⁹ Dicke, R. H. (1961). "Dirac's Cosmology and Mach's Principle". *Nature* **192**: 440–441. C'est nous qui mettons en italique. ("There is a single large dimensionless number which is statistical in origin. This is the number of particles in the Universe. The age of the Universe 'now' is not random but is conditioned by biological factors. The radiation rate of a star varies as ε^{-7} and for very much larger values of ε than the present value, all stars would be cold. *This would preclude the existence of man to consider this problem.*")

Principe Anthropique. Ce compte-rendu, quoique déjà très complet pour ce qui nous intéresse, ne saurait être pleinement exhaustif, puisque plus de trente différentes versions de ce Principe ont déjà été données³⁰. Nous présenterons les versions faible et forte de ce Principe, telles qu'elles furent introduites initialement par l'astrophysicien Brandon Carter en 1974, puis telles qu'elles furent réinterprétées par les auteurs de *The Anthropic Cosmological Principle*, John Barrow et Frank Tipler, en 1986. Nous étudierons ensuite deux autres versions moins courantes, la version "participative" introduite par le physicien théorique John Archibald Wheeler en 1975 et la version finale, introduite par Barrow et Tipler.

a. Le Principe Anthropique Faible

i. *La version originale de Carter*

Depuis Copernic, nous nous sommes convaincus que nous n'occupons nullement une position privilégiée dans l'univers. En réaction à l'usage intensif du Principe Copernicien (notamment pour justifier le *Principe Cosmologique Parfait* selon lequel toutes les régions suffisamment larges de l'espace-temps doivent être statistiquement identiques), qui ne reste finalement qu'une hypothèse de travail, l'astrophysicien de Meudon Brandon Carter énonça pour la première fois le "Principe Anthropique" lors du congrès de Cracovie de 1973 conduit en hommage au 500^{ème} anniversaire de Copernic :

Principe Anthropique Faible de Carter : "*Nous nous situons à un endroit de l'Univers nécessairement privilégié en ce qu'il a permis notre existence en tant qu'observateurs*"³¹.

Ce que Dominique Lecourt réécrit sous cette forme légèrement différente : "*ce que nous devons nous attendre à observer doit être restreint par les conditions nécessaires à notre présence comme observateurs*"³². Aussi, des propriétés qui nous paraissent improbables dans l'univers sont vues sous une nouvelle perspective lorsque l'on constate que, sans elles, la vie ne serait pas possible. En fait, le biais qu'exhibe une telle remarque est ce que l'on appelle un "effet de sélection" (*selection effect*). Un de ces effets est bien connu des cosmologistes : c'est la variance cosmique. Cet effet est dû au fait que nous n'observons qu'une partie de l'Univers, une sphère dont nous sommes le centre et dont le rayon est la distance qu'a pu parcourir la lumière depuis le Big-Bang (qui définit ainsi "l'horizon" de notre observation). Ce biais ruine d'avance toute statistique à grande échelle, car nous ne pouvons pas réaliser d'échantillon composé de plusieurs "sphères" d'univers. Il n'y a dans cet énoncé aucune dimension finaliste, nous sommes pleinement dans le cadre de tout travail scientifique sérieux.

³⁰ N. Bostrom, *Anthropic Bias : Observational Selection Effects in Science and Philosophy*, New York: Routledge, 224pp, 2002

³¹ *Confrontation of cosmological theories with observation*, ed. M. S. Longair, 1974, p.291. ("our location in the Universe is necessarily privileged to the extent of being compatible with our existence as observers").

³² Lecourt, D., *op.cit.*, p. 888

Dans la vision de Carter, le Principe Anthropique semble être l'intermédiaire entre deux positions extrêmes.³³ La première, le *principe autocentrique*, stipule que les observateurs terrestres ont une place absolument privilégiée au centre de l'univers. La seconde, le *principe cosmologique*, stipule que l'univers est homogène et isotrope, c'est-à-dire que nous n'y occupons pas une place privilégiée, et que de plus notre environnement est représentatif de l'ensemble en tant qu'échantillon statistique aléatoire. De façon plus technique, dans le premier cas la distribution de probabilités *a priori* d'avoir une présence humaine en un certain endroit de l'espace est restreinte à la région où nous nous trouvons, alors que dans le deuxième cas elle est uniformément étendue à tout l'espace. En conséquence, le premier cas n'autorise aucune généralisation des observations locales à l'Univers entier, contrairement au second cas où tout le reste de l'Univers peut être décrit à partir de ce qui est mesuré ici et maintenant. Entre ces deux extrêmes, le principe anthropique stipule que la **distribution de probabilité *a priori* d'avoir une présence humaine doit être pondérée d'un poids anthropique**. La distribution de probabilité est donc uniforme là où des observateurs "anthropiques" existent. Il est à noter que Carter ne restreint pas son principe à la vie carbonée, mais à toute forme hypothétique de cognition. Il regrettera plus tard d'avoir utilisé le terme "anthropique", qui fut à l'origine des interprétations trop anthropocentriques qui s'ensuivirent³⁴ (le physicien Aurélien Barrau parle de dérive vers un "principe anthropotéléologique"). Cette notion d'indépendance de l'observateur et de la nature observée présuppose par ailleurs une position réaliste (selon laquelle il existe une réalité en-soi indépendante de l'observateur qui la dévoile), nous reviendrons sur ce point en section III. Ce poids anthropique peut être vu de deux manières. La première est celle qui mène à l'interprétation faible du Principe Anthropique : le poids anthropique concerne uniquement le modèle particulier d'Univers avec lequel l'observateur est confronté, c'est-à-dire que nous nous limitons à des considérations spatio-temporelles (ce qui était explicité dans l'énoncé initial). Le pas qui sera franchi par la version forte du Principe sera d'étendre ces contraintes aux constantes physiques fondamentales, ce que nous verrons en 2.b.

Le Principe Anthropique de Carter, dans sa version faible, n'est au final pas plus qu'une **tautologie**, exprimant que là où il y a des observateurs, il y a effectivement des observateurs. Ainsi, selon le cosmologiste Marc-Lachièze Rey, "le 'Principe Faible' se réduit [...] à l'expression d'une évidence. Sans aucun contenu physique, il est *au mieux* superflu"³⁵. Néanmoins, le fait de postuler (de manière *externe* à l'énoncé initial) que cette situation dépend de certains paramètres cruciaux qui doivent se répartir dans un

³³ Carter, "Antropic Principle in cosmology", preprint gr-qc/0606117, 2006

³⁴ Carter, B., "Anthropic Principle in Cosmology." (2004). Publication présentée à la conférence "Cosmologie : Faits et Prolèmes" tenue au Collège de France.

³⁵ Lachièze-Rey, M., *Au-delà de l'espace et du temps*, éd. Le Pommier, 2003, p. 198.

intervalle étroit de valeurs possibles rend cette tautologie utilisable, ce que nous verrons au paragraphe 3 de cette section ³⁶.

Revenons une dernière fois sur cette notion de poids anthropique. Elle peut sembler être évidente au premier abord, mais n'est en fait pas si simple à cerner. En effet, la réponse des multivers consisterait à accorder un poids anthropique de 1 pour notre monde et de 0 pour les autres univers. Seulement, dans tous les possibles, seul l'Univers que nous observons était *a priori* observable : nous ne pouvons donc appliquer aussi simplement un poids anthropique qui soit lui-même *a priori*. À l'inverse, on pourrait penser que la vie, processus par essence adaptatif, puisse réussir à émerger dans tout univers, même si c'est sous une forme radicalement différente de celle que nous connaissons. Dans ce cas, la distribution de probabilité est uniforme, et l'argument anthropiste s'effondre. Ainsi, ce qui est dit du poids anthropique dépend largement de la compréhension des conditions de possibilité d'une vie intelligente, ce qui est bien sûr loin d'être assuré.

ii. *La version faible réinterprétée par Barrow et Tipler*

Dans *The Anthropic Cosmological Principle*, Barrow et Tipler font un pas supplémentaire par rapport à Carter : il passent de la notion très ouverte d'observateur à celle, très restreinte, de vie à base d'éléments carbonés. La question de savoir cerner la notion de vie est bien sûr très délicate, essentiellement parce que nous ne connaissons que les exemples de la vie terrestre. Victor Stenger pense notamment que nous pourrions très bien avoir d'autres formes de vie plus "exotiques" dans des univers soumis à d'autres types de lois ou ayant des constantes fondamentales différentes³⁷. La restriction de Barrow et Tipler peut donc être critiquée comme un manque d'imagination de la part des auteurs, voyant dans la chimie à base de carbone le seul mode d'existence d'êtres cognitifs. C'est que les auteurs mettent en lumière la notion "anthropique" du principe plus que Carter ne le faisait : "nous sommes une forme de vie intelligente à base de carbone qui a évolué spontanément sur une planète tellurique autour d'une étoile de type spectral G2, et toute observation que nous réalisons est nécessairement conditionnée par ce fait absolument fondamental"³⁸. L'univers que nous observons, soumis à cette sélection, doit donc *nécessairement* contenir les propriétés nécessaires à ce que l'observateur (ici l'homme) puisse effectivement l'observer. Voici comment ils formulent leur version du Principe :

Principe Anthropique Faible de Barrow et Tipler : "*Les valeurs observées de toute quantité physique et cosmologique ne sont pas uniformément probables mais prennent des valeurs restreintes par la condition*

³⁶ Dans "Anthropic Principle in cosmology", *op.cit.*, Carter précise ce point : "Although oversimplified expressions of the anthropic principle (such as the version asserting that life only exists where it can survive) reduce to mere tautology, the more complete formulation (prescribing an a priori probability distribution) can provide non-trivial predictions that may be controversial, and that are subject to rational contestation since different from what would be obtained from alternative prescriptions for a priori probability, such as the ubiquity principle that would attribute a priori (but of course not a posteriori) probability even to uninhabited situations". (p 4)

³⁷ Stenger, V., "Is The Universe Fine-Tuned For Us?"

³⁸ Barrow, J., & Tipler, F., *op.cit.*, p 3. ("We are a carbon-based intelligent life-form which spontaneously evolved on an earthlike planet around a star of G2 spectral type, and any observation we make is necessarily self-selected by this absolutely fundamental fact")

(requirement) qu'il existe des endroits où la vie à base de carbone puisse évoluer et par le fait que l'Univers soit assez vieux pour que ce soit déjà accompli".³⁹

Immédiatement, les auteurs mettent cette définition en relation avec son corollaire : "le Principe Anthropique Faible nous invite à isoler les propriétés de l'Univers qui sont nécessaires à l'évolution et au maintien de notre forme de vie"⁴⁰. Ces propriétés sont par exemple l'âge et la taille de l'Univers, ou encore les constantes fondamentales (ce que Carter réserve au Principe Fort). L'accent est directement mis sur la possibilité de contraindre des paramètres fondamentaux, sortant ainsi du cadre de la simple tautologie pour procurer un principe effectivement utilisable. Néanmoins, pour les auteurs, l'évolution par sélection naturelle ayant un caractère essentiellement non téléologique, les conditions que nous trouverons seront nécessaires mais pas suffisantes pour qu'apparaissent des êtres vivants à base d'éléments carbonés.

Contrairement aux versions plus spéculatives que nous allons voir après, le Principe Anthropique Faible n'a, pour les auteurs, rien de choquant ou qui sorte du domaine établi de la méthodologie scientifique : "Le Principe Anthropique Faible n'est qu'une reformulation, quoique subtile, de l'un des principes les plus importants et les mieux établis de la science : le fait qu'il soit essentiel de prendre en compte les limites de l'appareil de mesure lorsque l'on interprète ses observations"⁴¹. Aussi, comme le dit Marc Lachièze-Rey, "[Le Principe Anthropique Faible] ne constitue rien d'autre que la simple définition d'une mesure physique, telle qu'on peut l'effectuer à partir de l'expérience ou de l'observation : les principes de base de la science exigent que toute loi de la nature, tout modèle de l'univers et de son évolution soient compatibles avec les résultats d'observations ; y compris, mais pas particulièrement, le fait que nous existions"⁴².

b. Le Principe Anthropique Fort

i. La version de Carter

Alors que dans le cas du Principe Anthropique Faible, Carter restreignait sa distribution de probabilité à une simple mise en lumière spatio-temporelle de la présence d'observateurs, il l'étend dans le cas fort à un ensemble de modèles cosmologiques ayant différentes valeurs pour les constantes "fondamentales". Voici comment se formule alors la définition du Principe Anthropique Fort :

³⁹ Barrow, J., & Tipler, F., *op.cit.*, p 16 ("The observed values of all physical and cosmological quantities are not equally probable but they take on values restricted by the requirement that there exist sites where carbon-based life can evolve and by the requirement that the universe be old enough for it to have already done so")

⁴⁰ Barrow, J., & Tipler, F., *op.cit.*, p 16 ("the WAP [Weak Anthropic Principle] also challenges us to isolate that subset of the Universe's properties which are necessary for the evolution and continued existence of our form of life")

⁴¹ Barrow, J., & Tipler, F., *op.cit.*, p 23 ("the WAP is just a restatement, albeit a subtle restatement, of one of the most important and well-established principles of science : that it is essential to take into account the limitations of one's measuring apparatus when interpreting one's observations")

⁴² Lachièze-Rey, M., *op.cit.*, p 198.

Principe Anthropique Fort de Carter : “*L’Univers (et donc les paramètres fondamentaux dont il dépend) doit être tel qu’il admet l’apparition d’observateurs en son sein à un moment donné. Pour paraphraser Descartes, ‘cogito ergo mundus talis est’.*”⁴³

La citation en latin (“Je pense, donc le monde est tel [qu’il est]”) explicite le fait que le “*must be*” (“doit être”) est ici une déduction faite à partir du fait de notre existence, faisant aussi de cette définition une tautologie, quoique plus élaborée que la version faible. Aussi, on voit qu’à l’origine, le principe Anthropique, que ce soit dans sa forme faible ou forte, ne postule en rien que l’Univers ait été créé pour l’homme. La reformulation donnée par Dominique Lecourt rapproche ce Principe Fort du Principe Faible de Barrow et Tipler : “La présence d’observateurs dans l’Univers impose des contraintes, non seulement sur leur position temporelle, mais aussi sur l’ensemble des propriétés de l’univers”⁴⁴. Comme nous l’avons vu pour le Principe Faible, cette tautologie est utilisable en postulant qu’on accède aux autres mondes possibles dans lesquels nous aurions pu nous trouver par variation de quelques paramètres essentiels. Dans ce cas, on explique la valeur des constantes de notre Univers en remarquant que dans d’autres modèles avec des valeurs différentes, la vie ne pourrait pas apparaître. C’est bien parce qu’aucune théorie fondamentale n’explique ces valeurs de constantes que ce principe revêt un intérêt scientifique. Ainsi que le dit Carter lui-même : “Bien que je serais personnellement plus satisfait par des explications liant les valeurs des constantes de couplage fondamentales etc. à une structure mathématique plus profonde (dans laquelle elles ne seraient plus fondamentales mais dérivées), je pense qu’il vaut la peine de réaliser entre-temps une exploration systématique des limites *a priori* qui peuvent être placées sur ces paramètres (tant qu’ils restent fondamentaux) par le Principe Anthropique Fort”⁴⁵.

ii. La version de Barrow et Tipler

Pour Barrow et Tipler, la formulation du Principe Anthropique Fort est la suivante :

Principe Anthropique Fort de Barrow et Tipler : “*Il faut que l’Univers possède les propriétés qui conduisent au développement de la vie à un moment donné dans son histoire*”⁴⁶

⁴³ "The Universe (and hence the fundamental parameters on which it depends) must be such as to admit the creation of observers within it at some stage. To paraphrase Descartes, 'cogito ergo mundus talis est'."

⁴⁴ Lecourt, D., *op.cit.*, p. 888

⁴⁵ Carter, B., “Large number coincidences and the anthropic principle in cosmology”. “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 p. 298. (“Even though I would personally be happier with explanations of the values of the fundamental coupling constants etc. based on a deeper mathematical structure (in which they would no longer be fundamental but would be derived), I think it is worthwhile in the meanwhile to make a systematic exploration of the *a priori* limits that can be placed on these parameters (so long as they remain fundamental) by the strong anthropic principle”).

⁴⁶ Barrow, J., & Tipler, F., *op.cit.*, p 21. (“The universe must have those properties which allow life to develop within it at some stage in its history”).

Bien que très similaire à la version de Carter, il y a dans cette définition une connotation plus impérative au “*must*” (“il faut”). C’est donc aisément que l’on peut franchir le pas et formuler une interprétation qui soit dans la tradition de l’argument du dessein :

Interprétation du type “Argument du dessein” (*Design Argument*) : “*Il existe un seul Univers possible destiné (designed) à générer et à maintenir des observateurs*”⁴⁷

Ce type d’argument est typique de la théologie rationnelle, mais a été tout de même repris par des scientifiques modernes, au rang desquels figurent le chimiste de Harvard Lawrence Henderson et l’astrophysicien britannique Fred Hoyle. Aussi ce dernier énonça-t-il, en se référant à ses découvertes sur les états d’énergie du carbone (sur lesquelles nous reviendrons en paragraphe 3) : “Je ne crois pas qu’il puisse y avoir un scientifique qui, ayant examiné la preuve, manquerait d’en inférer que les lois de la physique atomique ont été délibérément conçues (*designed*) en vertu des conséquences qu’elles ont dans les étoiles”⁴⁸. Ce type d’argument est déjà plus de l’ordre de la croyance religieuse que de l’hypothèse scientifique.

c. Le Principe Anthropique Participatif

L’introduction de la Mécanique Quantique (où l’ “observateur” joue un rôle crucial puisque, lors de la mesure, il modifie le paquet d’onde) dans le Principe Anthropique Fort amène un autre type d’interprétation. C’est le Principe Anthropique Participatif (*Participatory Anthropic Principle*) introduit par John Wheeler, qui s’énonce ainsi :

Principe Anthropique Participatif de John Wheeler : “*La présence d’observateurs est nécessaire pour que l’Univers existe*”⁴⁹

Il faut pour comprendre les enjeux de ce Principe Anthropique rappeler l’interprétation de la Mécanique Quantique que favorisait John Wheeler : celle des Mondes Multiples (on parle de *Many-Worlds Interpretation*) selon laquelle toute mesure d’un objet quantique partage l’Univers selon les différents résultats de la mesure d’un même paquet d’onde. Nous ne voyons qu’un seul de tous ces univers possibles, celui dans lequel nous vivons. Aussi, le Principe Anthropique Participatif suggère une vision où l’Univers primordial est un multivers quantique explorant toutes les possibilités (la récente découverte des ordinateurs quantiques laisse penser à un multivers s’auto-programmant, c’est notamment la vision développée par le physicien quantique Seth Lloyd⁵⁰) jusqu’à générer un observateur conscient capable d’actualiser la

⁴⁷ Barrow, J., & Tipler, F., *op.cit.*, p 22. (“There exists one possible Universe ‘designed’ with the goal of generating and sustaining ‘observers’”)

⁴⁸ Hoyle, F., in *Religion and the scientists*, SCM, Londres, 1959. (“I do not believe that any scientist who examined the evidence would fail to draw the inference that the laws of nuclear physics have been deliberately designed with regard to the consequences they produce inside the stars.”)

⁴⁹ Barrow, J., & Tipler, F., *op.cit.*, p 22. (“Observers are necessary to bring the Universe into being”)

⁵⁰ Lloyd, Seth, *Programming the universe, A quantum computer scientist takes on the cosmos*, New York : Random House, éd. Alfred A. Knopf, 2006

possibilité en la réalité de son environnement. C'est cette réflexion qui a mené Barrow et Tipler à proposer cette autre variante du Principe Anthropique Fort :

L'interprétation des Mondes Multiples : *“L'existence d'un ensemble d'univers différents du nôtre est nécessaire à l'existence de notre Univers”*⁵¹

Nous reviendrons extensivement sur l'interprétation des mondes multiples en section II.

d. Le Principe Anthropique Final

De manière générale, le Principe Anthropique, surtout dans la façon avec laquelle Barrow et Tipler le présentent, entend interroger une certaine nécessité à ce que l'Univers aboutisse à l'existence de l'homme. La version Finale du Principe, introduite par les auteurs, entend étendre cette vision à celle d'une nécessité à ce que cette existence se perpétue. Il serait en effet absurde qu'interprétant l'apparition de l'homme comme l'apogée d'un Univers dont c'est le dessein, cette existence arrive à extinction et laisse un Univers sans vie. De façon intéressante, l'hypothèse que la vie doive ne jamais s'éteindre mène à des prédictions testables : un univers clos, avec une structure causale globale très spéciale. Voici donc comment s'exprime ce Principe Final :

Principe Anthropique Final de Barrow et Tipler : *“Le traitement intelligent de l'information doit forcément apparaître dans l'Univers, et, une fois apparu, ne jamais disparaître”*⁵²

Ce principe semble plus moral que physique, au sens où aucune morale ne peut se penser sans vie.

3. Utilisations du Principe Faible

Maintenant que nous avons vu les différentes définitions et interprétations du Principe Anthropique, nous allons présenter quelques-unes des applications qui en ont été faites. Nous commencerons par remarquer que ce Principe peut se traduire en probabilité bayésiennes (c'est-à-dire en probabilités *a priori*), ce qui permet de mieux justifier son utilisation. Puis nous verrons deux des cas les plus connus de son application : l'estimation de l'âge de l'Univers ainsi que la prédiction de l'état d'énergie du carbone sous forme excitée par l'astrophysicien Fred Hoyle. Enfin, nous ferons une revue de diverses utilisations de ce principe, peut-être plus “anecdotiques”⁵³.

⁵¹ Barrow, J., & Tipler, F., *op.cit.*, p 22. (“An ensemble of other different universes is necessary for the existence of our universe”)

⁵² Barrow, J., & Tipler, F., *op.cit.* p 23 (“Intelligent information-processing must come into existence in the Universe, and, once it comes into existence, it will never die out.”)

⁵³ On peut trouver sur le site internet <http://www.anthropic-principle.com/preprints.html> une liste très complète de publication traitant des diverses utilisations du Principe Anthropique, que ce soit pour les justifier ou les critiquer.

a. Utilisation des propriétés des probabilités bayésiennes

Il existe deux types de probabilités : la première est une probabilité *a posteriori* qui prend en compte la fréquence d'un évènement (le nombre d'occurrences d'un évènement divisé par le nombre de réalisations totales), et la deuxième, appelée probabilité bayésienne, prend en compte les données *a priori* en relation à l'information possédée (la probabilité d'occurrence d'un évènement "sachant que" d'autres évènements se sont passés). Lorsqu'il introduisit le Principe Anthropique Faible, Carter avait déjà noté qu'il n'était qu'une reformulation du théorème de Bayes⁵⁴. L'idée est que la probabilité qu'une hypothèse O soit vérifiée est la même avant (B pour before) que l'on en ait obtenu une preuve tangible E qu'après (A pour After) :

$p_B(O) = p_A(O/E)$. Le théorème de Bayes fournit alors la relation :

$$\frac{p(\alpha/E)}{p(\beta/E)} = \frac{p_A(E/\alpha)p_A(\alpha)}{p_A(E/\beta)p_A(\beta)}$$

Cette relation permet de comparer les théories α et β en fonction du fait que l'observation favorise la présence de la preuve E (ce sont les termes type $p_A(E/\alpha)$), par exemple la présence de l'observateur. En l'explicitant de cette façon, le principe revêt pour Barrow et Tipler une utilité : "le Principe Anthropique Faible n'est surtout pas un énoncé tautologique superficiel"⁵⁵. Prenons un exemple, celui de la taille de l'univers. Si α est l'hypothèse "la grande taille de l'univers est un fait superflu vis-à-vis de l'existence de vie sur Terre" et β l'hypothèse "vie sur Terre et grande taille de l'univers sont des faits corrélés", l'observation E que l'univers a une taille de plus de dix milliards d'années lumière donne $p_A(E/\beta) \approx 1$ alors que $p_B(E/\beta) \ll 1$.

b. Estimation de l'âge de l'univers

Une des "réussites" du Principe Anthropique Faible est d'avoir permis d'obtenir des contraintes *a priori* sur notre localisation temporelle. Les éléments nécessaires à la vie carbonée proviennent en effet de l'explosion de supernovae, et l'alchimie stellaire nécessaire à leur réalisation prend dix milliards d'années. Forcément, l'univers doit avoir au moins dix milliards d'années pour permettre à ces éléments de se former. Donc l'univers doit être très large. L'observation du fait que nous sommes là, doublée de l'assomption que les éléments qui nous composent sont issus de mécanismes stellaires particulièrement longs, mène à une contrainte fondamentale sur l'âge de l'univers. Aussi ce principe permet-il de conclure que la vie (telle que nous la connaissons) ne serait pas possible dans un univers plus petit.

Robert Dicke alla plus loin en interprétation, en notant que la période dans laquelle nous vivons est très spécifique : dans un Univers dix fois plus jeune, il n'y aurait pas eu assez de temps pour qu'assez de carbone soit produit par nucléosynthèse dans les étoiles, et dans un Univers dix fois plus vieux, les étoiles de la

⁵⁴ Carter, B., *Phil. Trans. R. Soc. A* **310**, 347 (1983)

⁵⁵ Barrow, J., & Tipler, F., *op.cit.* ("The WAP is certainly not a powerless tautological statement")

séquence principale ainsi que les systèmes planétaires stables seraient à la fin de leur “âge d’or”. Selon ce raisonnement, nous nous trouvons à un âge bien spécifique, où les conditions sont au mieux pour notre existence.

Signalons néanmoins que ce raisonnement a au final peu à voir avec la présence d’observateurs dans l’Univers : c’est un raisonnement scientifique, partant d’une observation (la présence relativement importante d’éléments carbonés), la reliant à une hypothèse (le carbone est produit par les étoiles), et dressant des conclusions en fonction des observations (la durée de vie des étoiles conditionne le début de la nucléosynthèse et donc le moment à partir duquel il pourra y avoir assez de carbone pour expliquer le phénomène observé). On comprend donc bien en quoi Carter a pu être confus d’avoir utilisé le terme anthropique : il y a bien une spécificité à notre localisation, mais il ne faut pas voir en elle une “faveur” divine accordée à l’homme (et le terme “âge d’or” qui a pu être employé par certains⁵⁶ ne fait que renforcer cette idée). Comme nous l’avons déjà dit, le Principe Anthropique Faible est tout juste une manière inhabituelle de considérer la mesure physique. Nous allons voir un deuxième exemple qui confirme cette vue.

c. L’argument de Hoyle

Nous avons donné en première partie de cette section un rapide aperçu des coïncidences remarquables qui donnèrent un élan à la pensée anthropiste. Nous allons à présent nous plonger dans un exemple fameux, celui qui mena à la prédiction de l’état d’énergie excité du carbone.

Au début des années 1950, Fred Hoyle, cosmologiste britannique⁵⁷, fit une prédiction basée sur le Principe Anthropique Faible. Il étudiait alors les réactions de nucléosynthèse se déroulant dans les étoiles, notamment la synthèse du carbone à partir de l’Hélium et du Béryllium. Cette réaction, selon lui, devait se produire de façon *résonante*, car c’est à partir d’elle que se crée le carbone qui nous entoure et nous compose. Sans résonance, il n’y aurait pas assez de carbone dans l’univers pour s’accorder avec l’observation que cet élément est prépondérant sur notre planète. Cette prédiction fut effectivement vérifiée en 1953⁵⁸. Cette résonance est due à une *coïncidence* : l’ajustement du niveau d’énergie du carbone et de celui du couple Hélium plus Béryllium. De plus, une seconde coïncidence permet à cette formation d’élément carboné de ne pas continuer plus en avant pour former de l’oxygène : le niveau d’énergie de ce dernier est *juste au-dessous* du niveau de résonance de sa réaction de formation à partir de carbone et d’hélium, de sorte que cette résonance ne peut pas se produire. On comprend alors que la découverte de cette chaîne de coïncidences ait porté Hoyle à poser les bases d’un discours anthropiste : “Hoyle réalisa que [ces] coïncidences [...] étaient des conditions nécessaires, et remarquablement finement ajustées (*fine-tuned*) pour notre propre existence, et de surcroît pour l’existence de n’importe quelle vie à base de carbone dans l’Univers. Ces coïncidences

⁵⁶ Davies, P., *The Goldilocks Enigma*. Allen Lane, 2006

⁵⁷ Il est notamment l’inventeur du terme “big-bang”, dont il voulait ridiculiser la théorie.

⁵⁸ Hoyle, F., Dunbar, D.N.F., Wensel, W.A., et Whaling, W., *Phys. Rev.* **92**, 649 (1953)

pourraient, en principe, être expliquées à leurs racines où se dévoilerait un ajustement (*fine-tuning*) méticuleux entre les forces des interactions atomiques et électromagnétiques ainsi que les masses relatives des électrons et des nucléons. Malheureusement, aucune explication de ce type n'est pratique du fait de l'énorme complexité des larges systèmes quantiques impliqués ; de tels niveaux de résonance ne peuvent être localisés que par l'expérience brute"⁵⁹.

De même que précédemment, nous pouvons émettre des doutes sur l'utilisation "anthropiste" de cette prédiction. Aussi, Lee Smolin, présente une objection⁶⁰ à l'argument de Hoyle, c'est-à-dire au fait que la résonance de la réaction de formation du carbone dans les étoiles soit une nécessité pour que la vie puisse apparaître, en y exhibant l'inutilité de l'introduction de la vie dans le raisonnement.

Voici comment peut se formaliser l'argument de Hoyle :

- (1) X (la présence de carbone) est nécessaire pour que la vie existe
- (2) X est vrai dans notre Univers
- (3) Les lois de la physique (ici la physique quantique), ainsi que les faits observés Y (les réactions thermonucléaires dans les étoiles), permettent de déduire que si X est vrai pour notre Univers, alors Z (la résonance de la réaction) l'est aussi.
- (4) On prédit que Z est vrai

La proposition (1) n'est ici d'aucune utilité pour le raisonnement. Cette propriété n'a rien d'anthropique, ni n'est spécifique à notre position spatio-temporelle : il n'y a pas d'effet de sélection. Le principe faible est donc inutile ici. Par contre, le principe fort réclamerait une analyse probabiliste plus complexe (ce que Fred Hoyle suggère en fin de citation ci-dessus).

d. Autres utilisations

Voyons à présent quelques autres utilisations du Principe Anthropique, plus ou moins importantes.

i. Mise en défaut de l'argument des grands nombres

Un exemple d'utilisation du Principe Anthropique Faible est la mise en défaut de l'argument des grands nombres de Dirac appliqué à la constante fondamentale régissant la force de Gravité : G. Comme nous l'avons vu en 1.b.ii, selon Dirac, la constante de couplage associée à la gravité (proportionnelle à G) ayant à

⁵⁹ Barrow, J., & Tipler, F., *op.cit.*, p. 253. ("Hoyle realized that this remarkable chain of coincidences [...] were necessary, and remarkably fine-tuned, conditions for our own existence and indeed the existence of any carbon-based life in the Universe. These coincidences could, in principle, be traced back to their roots where they would reveal a meticulous fine-tuning between the strengths of the nuclear and electromagnetic interactions along with the relative masses of electrons and nucleons. Unfortunately no such back-track is practical because of the overwhelming complexity of the large quantum systems involved; such resonance levels can only be located by experiment in practice")

⁶⁰ Lee Smolin, "Scientific alternative to the anthropic principle", arxiv hep-th/0407213, 2004

la fois une valeur si faible (10^{-39}) et étant reliée de manière simple au nombre de particules dans l'univers (10^{78}), il devait y avoir un lien sous-jacent (une racine carrée) dû à une loi de la nature encore inconnue. De plus, le fait que la densité de matière évolue dans le temps laissait supposer qu'il en était de même pour la constante de gravité. Le principe Anthropique Faible, lui, montre qu'il est nécessaire que l'âge de l'univers soit celui qu'on observe (cf b. de cette partie), et en vertu de cette valeur nous obtenons de fait un rapport entre les deux "grands nombres" de Dirac : cette coïncidence n'a donc pas besoin d'un argument des grands nombres *ad hoc*, mais peut s'expliquer par des arguments anthropistes⁶¹. Néanmoins, le Principe ne donne pas de raison à ce que les grands nombres soient, en l'occurrence, grands.

ii. *Calcul de paramètres fondamentaux*

On a aussi tenté de répondre à l'aide du Principe Faible à des questions telles que "Pourquoi l'Univers a trois dimensions ?". Pour reprendre les mots de Barrow et Tipler : "lorsqu'elle est formulée en trois dimensions, la physique mathématique présente beaucoup de propriétés uniques qui sont des prérequis nécessaires à l'existence de traitement rationnel de l'information et d'observateurs comme nous-mêmes".⁶²

Une autre contrainte importante a trait à la constante cosmologique que nous avons déjà évoquée. Selon Aurélien Barrau, la valeur de la constante cosmologique "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 les observateurs n'auraient pu y exister"⁶³.

Là encore, ces exemples montrent que l'on entend par "observateurs" plutôt la présence d'éléments carbonés et de vie telle que nous la connaissons. Comme nous l'avions dit précédemment en 2.a.i, les difficultés liées à poser à définir les limites de l'émergence de cognition rendent l'exercice relativement difficile, voire infalsifiable.

Néanmoins, le Principe Anthropique permet de faire certaines prédictions falsifiables. Dans un article de 1983, Carter émet notamment deux propositions⁶⁴.

iii. *La rareté des observateurs*

La première est que l'occurrence d'observateurs anthropiques doit être rare, même sur des planètes similaires à la nôtre. En effet, notre apparition sur Terre a requis un temps important comparé au temps d'activité du soleil. Dans le cadre du principe cosmologique, ce serait inexplicable car ce qui advient sur

⁶¹ Les calculs sont effectués dans Barrow & Tipler, *op.cit.*, p 21.

⁶² Barrow, J., & Tipler, F., *op.cit.*, pp. 15-6. ("When formulated in three dimensions, mathematical physics possesses many unique properties that are necessary prerequisites for the existence of rational information-processing and 'observers' similar to ourselves")

⁶³ Aurélien Barrau, *op.cit.*, p. 54

⁶⁴ B. Carter, "The anthropic principle and its implication for biological evolution", *Phil. Trans. Roy. Soc. A310*, pp. 474-363, 1983

notre planète devrait être typique et la vie serait banale. Dans le cadre du principe anthropique, cela reste 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. Néanmoins, "c'est exactement ce à quoi on s'attendrait si l'évolution biologique de vie comme la nôtre dépendait d'évènements accidentels avec des temps caractéristiques longs comparés à ceux de l'évolution stellaire"⁶⁵. Aussi l'observation anthropique permet-elle de déduire la rareté des observateurs anthropiques dans l'univers. En rencontrer serait une réfutation à cette théorie.

iv. *Le doomsday argument*

La deuxième proposition traite de la fin du monde. Elle est connue sous le nom du *Doomsday Argument* (l'argument du jugement dernier), et a été développée par Brandon Carter et le philosophe John A. Leslie. Voici en quoi elle consiste. 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. Selon le principe anthropique, il y a plus de chances que l'humanité arrive à terme dans des délais qui sont de l'ordre de grandeur de notre présence sur Terre, faisant ainsi de nous des observateurs typiques (ni trop proches du début, ni trop proches de la fin), plutôt que de s'éterniser, et de faire de nous des observateurs spéciaux (car il serait surprenant que nous fassions partie de l'infime première fraction d'êtres humains). Ceci amène à poser de manière *a priori* que notre distribution de probabilité de présence sur la liste est uniforme. Nous avons donc 95% de chances de nous trouver dans les 95% finaux de l'intervalle $[0, N]$. Or, on peut estimer que déjà 60 milliards d'hommes ont habité la Terre jusqu'à présent (c'est notre rang n), ce qui correspond à 5% de N . Aussi, à un niveau de confiance de 95%, on peut dire que N ne dépassera pas $20 \cdot n$ (sans quoi nous serions des observateurs "exceptionnels" se situant dans les premiers 5%). Il y aura donc moins de 1200 milliards d'hommes. En estimant que la population se stabilise à 10 milliards d'hommes, cela correspond à l'an 9120. Des contre-arguments peuvent être formulés, qui reposent sur l'analyse en termes de probabilités bayésiennes. Par exemple, le cosmologue Ken Olum pense⁶⁶ qu'avant même de considérer notre rang dans l'ensemble des N humains qui auront vécu, nous devrions considérer le fait même que nous vivions comme augmentant la probabilité *a priori* qu'un grand nombre de personnes vivent (car plus N est grand, plus il y a de chances que moi-même, en tant qu'observateur, j'existe dans cet échantillon).

v. *Conclusion*

Aussi les arguments et contre-arguments reposant sur le Principe Anthropique Faible semblent liés de façon importante à la légitimité de ce que nous admettons comme pertinent pour le calcul de probabilité *a priori*. Les "utilisations" du Principe Faible semblent au mieux se borner au jeu scientifique, au pire n'être rien de plus qu'une manière anthropocentrique de concevoir la mesure physique. En s'attaquant à la question des

⁶⁵ Carter, B., "Anthropic principle in cosmology". ("it is just what would be expected if the biological evolution of life like ours depends on chance events with characteristic timescales long compared with those of stellar evolution")

⁶⁶ Ken D. Olum, "The doomsday argument and the number of possible observers", *Phil.Q.* **52**, 2002, 164, arxiv gr-qc/0009081

constantes fondamentales, le Principe Fort peut quant à lui se targuer de mener à une analyse scientifique plus sérieuse.

4. Les interprétations du Principe Anthropique Fort

Le Principe Anthropique Fort, en tentant notamment d'apporter une réponse au problème du *fine-tuning*, soulève la question de savoir sur quelle distribution des possibles porte notre contrainte *a priori* des paramètres fondamentaux : est-ce un ensemble effectivement réalisé dans la nature, faisant de notre Univers un îlot dans le grand océan des possibles réels, où la chance aurait permis que la vie apparaisse (c'est ce que l'on appelle "l'hypothèse ensembliste" ou *ensemble hypothesis*), ou est-ce un ensemble abstrait qu'une intelligence divine a parcouru afin d'y sélectionner un unique monde possible, un monde finement réglé qui aboutirait forcément à l'émergence de l'homme (c'est "l'hypothèse du dessein", ou *design hypothesis*)? Cet ensemble est-il même totalisable? Le physicien Paul Davies⁶⁷ a répertorié de façon détaillée les réponses qui ont pu être apportées à propos de la nature de notre Univers. Voici les diverses alternatives qu'il donne :

- L'univers absurde : il n'y a aucune raison à ce que l'Univers soit ainsi, il n'y a pas de sens caché à chercher en son sein. Cette absence de raison fondamentale fera l'objet d'une exploration philosophique plus poussée en section III.
- L'univers unique : il existe une unité profonde de la physique qui rend nécessaire que l'Univers soit ainsi. Une Théorie du Tout, lorsqu'elle sera dévoilée, expliquera pourquoi les différentes constantes de l'Univers doivent avoir la valeur que nous observons. Une partie des physiciens se range derrière cette interprétation, et espère trouver une explication nécessaire et suffisante à la "manière d'être" de notre univers.
- Le multivers : il existe plusieurs univers réalisant toutes les combinaisons possibles des paramètres fondamentaux, et nous nous trouvons naturellement dans l'un de ceux qui a permis à la vie d'apparaître. Certains physiciens préfèrent cette approche, en ce qu'elle remplace la nécessité et l'unicité par le hasard et la pluralité. Néanmoins, et nous y reviendrons en section III, nous gardons ici l'idée d'une "méta-loi" du hasard qui explique le multivers, et ne sortons finalement pas de l'optique d'une recherche d'une "raison suffisante" à l'être-ainsi de notre Univers, même si raison semble moins "contraignante" que la précédente.
- Le dessein intelligent : un Créateur Intelligent a conçu notre Univers spécifiquement pour qu'il supporte la complexité et l'émergence de la vie. On associe cette interprétation à l'optique finaliste, qui voit dans l'homme une fin de l'évolution cosmologique.
- Le Principe de Vie (*life principle*) : il y a un principe caché qui contraint l'Univers à évoluer vers la génération de vie et d'esprit. Ce principe sera présent dans certaines philosophies du devenir du XX^{ème} siècle.

⁶⁷ Davies, P., *op.cit.*

- L'univers auto-explicatif : il y aurait une boucle causale ou explicative fermée, ne permettant qu'aux univers contenant de la conscience d'exister. Ceci fait référence au Principe Anthropique Participatif que nous avons vu en I.2.c.
- Le faux Univers : nous vivons dans une simulation de réalité virtuelle. Cette interprétation a été popularisée en philosophie par la question du philosophe américain Hilary Putnam, dans son livre *Reason, Truth and History* (1983), consistant à se demander si nous ne sommes pas un "cerveau dans une cuve" (*brain in a vat*) qui se verrait imposé des influx nerveux par un ordinateur puissant et évoluerait ainsi dans une réalité virtuelle aussi vraie que nature. Plus récemment, le film *Matrix* (1999) a illustré au cinéma cette expérience de pensée.

À ceci nous devons ajouter l'hypothèse de Lee Smolin dite de la Sélection Naturelle Cosmologique⁶⁸, aussi appelée hypothèse des Univers Féconds, selon laquelle les Univers auraient des "descendants" (peut-être à l'intérieur des trous noirs), "survivant" d'autant mieux qu'ils ont des caractères comparables à ceux de notre propre Univers.

Dans les sections qui vont suivre, nous allons étudier de façon plus précise ces questions. Nous commencerons par traiter l'alternative la plus répandue chez les physiciens, celle des multivers. Puis nous traiterons dans la section suivante de la finalité et des questions philosophiques et épistémologiques liées aux notions de loi fondamentale, de probabilité, de modélisation. Cette mise en perspective nous permettra d'avoir un panorama complet de ce qui peut être dit du Principe Anthropique, de ses interprétations et de ses limites.

⁶⁸ Lee Smolin, *The Life of the Cosmos*, Oxford University Press, 1997

II. L'alternative des mondes multiples

En soulevant le problème de la spécificité des conditions initiales (les divers paramètres utilisés pour modéliser la dynamique de l'Univers en cosmologie) ainsi que des constantes fondamentales (vitesse de la lumière ou constante de Planck par exemple) de notre Univers, le Principe Anthropique a ouvert la voie à deux grands types de réflexions : soit notre Univers a été “conçu” pour être ainsi, soit il est né du pur hasard, sans entité transcendante proclamant son existence par rapport à d'autres possibles. Le premier cas, plutôt prisé des théologiens⁶⁹, mène à des considérations finalistes auxquelles ne peuvent se résoudre les scientifiques. Par contre, le second cas permet d'envisager des modèles d'un “méta-univers” dont nous serions part et où s'actualiseraient diverses possibilités d'Univers, liées à diverses conditions initiales et/ou diverses constantes, voire lois fondamentales, et où l'improbabilité apparente que des êtres vivants apparaissent serait compensée par l'infinité des univers existant. L'aspect plus scientifique de ce second type d'explication, nourri par les progrès en cosmologie et en physique quantique réalisés au cours du XX^{ème} siècle, ainsi que par les nouveaux concepts introduits par la toute jeune théorie des cordes, en ont fait l'apanage des scientifiques qui voulaient outrepasser le caractère métaphysique et théologique lié à la “création” d'univers, et remplacer la finalité par le hasard. C'est notamment le cas du physicien Aurélien Barrau, dont le mémoire *Quelques éléments de physique et de philosophie des multivers*⁷⁰ donne un compte-rendu complet et précis de l'histoire et de la pensée actuelle des multivers. Nous nous centrerons dans cette section sur cet aspect de la réponse apportée au Principe Anthropique. Nous verrons comment la pensée des multivers a déjà pu traverser les époques, jusqu'à s'introduire chez les scientifiques au cours du XX^{ème} siècle. Nous étudierons les différents types de multivers, puis verrons comment il est possible de faire des prédictions à partir des modèles que nous en faisons, et comment ils passent le critère de réfutabilité de Karl Popper qui fait aujourd'hui office de critère de scientificité.

1. Histoire des mondes multiples

La problématique de la pluralité des mondes a déjà été longuement étudiée en philosophie, depuis les philosophes grecs jusqu'aux plus contemporains. Les modalités du nécessaire, du possible et du contingent qui y apparaissent nous serviront pour une analyse philosophique plus détaillée en section III.

⁶⁹ Le théologien Richard Swinburne est notamment un défenseur de l'idée selon laquelle le *fine-tuning* serait un acte divin (voir par exemple Swinburne, R., “Argument from the Fine-Tuning of the Universe” in *Modern Cosmology and Philosophy*, ed. John Leslie, Amherst, NY: Prometheus Books, 1998, pp. 160–79)

⁷⁰ Barrau, A., *op.cit.*

a. Mondes multiples en Grèce Antique

La pensée des mondes multiples remonte sans doute au philosophe grec Anaximandre (c'en est du moins le penseur le plus lointain dont nous ayons une trace). C'est à travers le commentateur Simplicius que nous en connaissons la substance : "Anaximandre [...] a dit que *l'illimité est le principe et l'élément des choses qui sont*. [...] Ce dont la génération procède pour les choses qui sont est aussi ce vers quoi elles retournent sous l'effet de la corruption, *selon la nécessité; car elles se rendent mutuellement justice et réparent leurs injustices selon l'ordre du temps*"⁷¹. La pluralité des mondes est donc, chez Anaximandre, la perpétuelle naissance de mondes venant rendre justice à la mort d'autres mondes. Ce mouvement est éternel car seul le mouvement permet de penser la génération et la corruption, et il se réalise dans l'apeiron (απειρον), que l'on peut traduire par "illimité", ou "indéfini", fournissant ainsi une détermination (ou plutôt une indétermination) de la trame du "multivers". La philosophie d'Anaximandre est donc fondée sur un principe (αρχή) déterminant l'ordre du Monde. Ce principe est dégagé de ce qui constitue notre monde matériel : temps, espace, qualités. Il est immortel et unique, contrairement aux mondes engendrés selon lui. Bien qu'ici liée à un sens moral de justice, la notion des mondes multiples d'Anaximandre se trouvera avoir des analogies nombreuses avec le fond de la pensée moderne des multivers (notamment dans l'indétermination quantique du champ d'inflaton initial).

Les atomistes, tels Démocrite et Lucrèce, vont quant à eux remettre au pur hasard ce qu'Anaximandre remettait à la justice. Ils pensent qu'il y a une limitation à la division de la matière : ce sont les atomes (du grec *atomos*, littéralement "que l'on ne peut couper"). Ces atomes, en nombre infini, ont des formes variées, qui sont quant à elles d'un nombre indéfini (au sens de l'apeiron). Ils chutent selon la verticale, et sont affligés de manière aléatoire de légères déviations, ce que traduit la notion de *clinamen*. Fondé sur une nécessité première, celle de la chute verticale des atomes, l'atomisme délègue donc au hasard la complexification du monde : de l'aléatoire introduit par le clinamen peuvent naître des mondes organisés, dans l'infinité des agencements possibles que permet l'infinité des atomes. De cette façon, tout événement improbable, par exemple l'apparition de l'homme, se produira quelque part dans l'Univers et cet événement pourra se produire une infinité de fois.

b. Mondes multiples du Moyen-âge à l'âge classique

Pour le théologien Thomas d'Aquin (1225-74), les atomistes grecs ont tort lorsqu'ils refusent l'unicité du monde, car ils ne pensent pas en termes finaux : "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 », et "la raison pour laquelle le monde est unique, c'est que toutes choses doivent être ordonnées à un but

⁷¹ Simplicius, *Commentaire sur la physique d'Aristote* (1121, 5-9), cité dans *Les Présocratiques*, coll. "Philosophies", éd. France Loisirs, 2000, p 30. Les passages en italiques sont des citations originales d'Anaximandre.

unique, selon un ordre unique” ; “l’unicité du monde découle de sa finalité”.⁷² L’exemple de Giordano Bruno montre à quel point une telle pensée pouvait être dogmatique : penseur de l’infinité des mondes, copernicien convaincu, il fut brûlé à Rome en 1600 après avoir été emprisonné par les inquisiteurs pendant huit ans.

Pour ce qui est de l’âge classique, nous trouvons en Gottfried Wilhelm von Leibniz (1646 - 1716) le “théoricien” des mondes multiples. Pour lui, l’ensemble des mondes possibles se situe dans l’entendement divin. Leur cohérence interne est assurée par le Principe de Non Contradiction, stipulant qu’une chose ne peut pas être elle-même et son contraire en même temps (un pot ne peut pas être entièrement rouge et non-rouge à la fois). Dans *Essais de théodicée*, il explicite sa vision en ces termes : “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 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”⁷³. Dans l’entendement divin, chaque monde “prétend” à l’existence, à la hauteur de son essence. Il faut bien voir qu’ici il y a une pensée qualitative : l’essence (la définition abstraite, la caractéristique), qui précède l’existence (concrète), peut être plus ou moins bonne. Meilleure est l’essence, plus assurée s’en trouve l’existence. Dieu, qui est l’Être ayant l’essence par définition la plus parfaite, est ainsi assuré d’exister (c’est l’argument ontologique). De plus, parmi tous les mondes possibles se situant dans son entendement infini, Dieu va *choisir* le meilleur, c’est-à-dire celui dont l’essence est la plus parfaite⁷⁴. Ce concept de *choix* parmi les possibles, c’est le Principe de Raison Suffisante qui le motive : tout ce qui est possède une raison d’être tel qu’il est. Aussi faut-il qu’un Créateur initial ait fourni la cause première de l’existence de notre monde, et ce Créateur doit par ailleurs être cause de lui-même (*causa sui*) pour ne pas tomber dans le piège d’une nouvelle régression dans l’échelle des raisons.

c. Plurivers en philosophie contemporaine

Délaissé en occident depuis les Grecs au profit d’une vision finaliste favorisée par la pensée judéo-chrétienne, le concept de mondes multiples va resurgir dans la philosophie contemporaine, sous la forme d’une analyse en termes modaux (c’est-à-dire en termes de possible, de nécessaire, d’impossible et de contingent).

⁷² Thomas d’Aquin, *Somme théologique*, I,q 47,a. 3, traduit par A.M. Roguet, Paris, Cerf, 1984, p. 492

⁷³ Leibniz, *Essais de Théodicée*, Paris, GF, 1969 (1^{ère} ed. all. 1710)

⁷⁴ Cette théorie a par ailleurs valu à Leibniz d’être caricaturé dans le *Candide* de Voltaire sous le personnage de Pangloss, professeur de métaphysico-théologo-cosmolonigologie, proclamant sans cesse que “tout va pour le mieux dans le meilleur des mondes possibles”

Ainsi, le philosophe David Kellogg Lewis (1941-2001), dont l'œuvre majeure est *On the plurality of worlds*⁷⁵, défend le "réalisme modal", c'est-à-dire la thèse selon laquelle tous les mondes possibles existent de manière effective, mais sont spatialement et causalement séparés les uns des autres. De manière philosophique, nous pouvons dire que l'actuel et le possible ne présentent pas de différence ontologique : ce qui est possible *est effectivement* actuel (au sens anglais *actual*, c'est-à-dire concrètement réalisé). Son œuvre, néanmoins, tend plus à proposer une métaphysique modale nouvelle qu'à convaincre de son argument de l'actualité des mondes possibles⁷⁶. Dans cette métaphysique, la nécessité est vue comme ce qui est actuellement réalisé dans *tout* monde possible, et la possibilité comme ce qui est actuellement réalisé dans *au moins un* monde possible. Un monde est quant à lui défini comme "une somme méréologique⁷⁷ maximale de choses spatio-temporellement reliées"⁷⁸. Dans leur ensemble, les mondes sont *abondants* : il n'y a pas de "vides" dans l'espace logique. Ceci est lié au "principe de fécondité" introduit par le philosophe Robert Nozick⁷⁹, assurant la profusion de *tous* les possibles : "il y a tant d'autres mondes, en fait, qu'absolument *chaque* manière possible dont un monde pourrait être est une manière dont quelque monde *est*"⁸⁰. Les considérations anthropistes sont aussi clairement annoncées : "J'aurais vraiment pu ne pas exister – ni moi, ni aucune de mes contreparties⁸¹. Il aurait pu n'y avoir jamais personne. Les constantes physiques auraient pu avoir des valeurs quelque peu différentes de ce qu'elles sont, incompatibles avec l'émergence de la vie. Il aurait pu y avoir aussi des lois de la nature totalement différentes. Au lieu d'électrons et de quarks, nous aurions pu avoir des particules étrangères, sans charge ni masse ni spin, mais pourvues de propriétés physiques étrangères, qu'aucune chose de ce monde ne partagerait. Il y a tant et tant de manières dont un monde pourrait être, et l'une de ces nombreuses manières est la manière dont ce monde est"⁸². Nous sommes ici très proches de la pensée moderne des multivers en physique théorique : une pensée qui évacue toute contrainte sur les possibles et toute finalité en posant comme postulat fondamental que tout ce qui peut se faire se fait, que tout ce qui peut être est (en vertu d'un modèle explicatif qui se doit néanmoins d'être falsifiable).

⁷⁵ David Lewis, *On the plurality of worlds*, Blackwell, Oxford, 1986, trad. fr. *De la pluralité des mondes*, M. Caveribère et J.-P. Cometti, Paris, éd. De l'Éclat, 2007

⁷⁶ Dans l'introduction, nous pouvons notamment lire : "Pourquoi faudrait-il dès lors croire en une pluralité de mondes ? Parce qu'il s'agit d'une hypothèse commode, ce qui en fait une raison de penser qu'elle est vraie" (§1.1 p 18).

⁷⁷ Ce terme traduit la relation entre les parties (les objets du monde) et le tout (le Monde lui-même)

⁷⁸ David Lewis, *On the plurality of worlds*, Blackwell, Oxford, 1986, trad. fr. *De la pluralité des mondes*, M. Caveribère et J.-P. Cometti, Paris, éd. De l'Éclat, 2007, I, 6, "Isolement", p 121.

⁷⁹ R. Nozick, *Philosophical explanations* (Harvard Univ. Press, Cambridge, 1981)

⁸⁰ David Lewis, *op. cit.*, p 17

⁸¹ Une contrepartie est une personne identique à nous, dont la vie coïncide avec la nôtre jusqu'à un certain point, pour diverger lorsqu'elle prend une décision différente ou décide d'agir autrement que nous ne l'avons fait. L'ensemble de nos contreparties est ainsi l'ensemble des devenirs possibles que nous aurions pu avoir.

⁸² *Ibid.*, p 16

2. Introduction du multivers dans le milieu scientifique

a. Le succès du finalisme

L'idée de Leibniz d'une finalité imposée par un Créateur tout-puissant qui aurait doté notre Univers d'une optimalité universelle a conduit le mathématicien et astronome Pierre Louis Moreau de Maupertuis (1698-1759) à proposer le "Principe d'Action" qui permet de reformuler la physique newtonienne en termes finalistes. Pour Maupertuis, les chemins dynamiques à travers l'espace qui posséderaient des valeurs non minimales de la quantité mathématique appelée Action (qui est grossièrement l'énergie du système le long de la trajectoire multipliée par le temps de parcours entre deux points donnés) seraient observés dans un monde où les lois de la Nature seraient moins "parfaites" que les nôtres. Voici ce qu'il classe comme les autres mondes possibles. Cela donne donc une justification mathématique précise et rigoureuse à l'idée que notre Monde, avec ses lois, soit le "meilleur".

Devenu le Principe roi de toute étude dynamique (notamment avec l'apparition des formalismes Lagrangien et Hamiltonien), le Principe d'Action reste un postulat qu'aucune théorie ne justifie, un "axiome" de la physique. Il apparaît être l'une des nécessités les plus fondamentales de notre Univers. Nous reviendrons sur ce Principe plus amplement en section III.

b. Introduction de la notion de multivers

L'idée selon laquelle notre univers ferait partie d'un super-espace contenant tous les univers possibles se retrouve dès le milieu du XX^{ème} siècle chez le zoologiste de Cambridge Carl Pantin⁸³. Habitué à l'idée darwinienne que la Sélection Naturelle peut remédier à toute conception finaliste, il affiche déjà le type de raisonnement qui sera développé plus tard par les cosmologistes : "Les propriétés de l'Univers matériel sont particulièrement propices à l'évolution de créatures vivantes. [...] Si nous pouvions constater que notre Univers n'était qu'un seul parmi un nombre indéfini d'Univers avec des propriétés variables, nous pourrions peut-être faire appel à une solution analogue au principe de Sélection Naturelle : que seulement certains Univers, dont le nôtre se trouve faire partie, réunissent les conditions à l'existence de vie, conditions sans lesquelles il n'y aurait pas d'observateurs pour remarquer ce fait. Mais même si d'une quelconque manière nous pouvions concevoir de tester une telle hypothèse nous n'aurions que remis à plus tard la question de savoir pourquoi, parmi tous ces Univers, le nôtre devrait-il être possible ?!"⁸⁴. De manière intéressante, Pantin pointe du doigt une problématique essentielle de la notion de multivers : même en invoquant un "méta-univers" où divers possibles se réalisent, il reste à donner un loi d'émergence de ces possibles, une

⁸³ Pantin, C.F.A., *Adv. Sci.* **8**, 138 (1951)

⁸⁴ Pantin, C.F.A., in *Biology and personality*, ed. I.T. Ramsey, Blackwell, Oxford, 1965, pp. 103-4. ("The properties of the material Universe are uniquely suitable for the evolution of living creatures. [...] If we could know that our Universe was only one of an indefinite number with varying properties we could perhaps invoke a solution analogous to the principle of Natural Selection, that only in certain Universes, which happen to include ours, are the conditions suitable for the existence of life, and unless that condition is fulfilled there will be no observers to note the fact. But even if there were any conceivable way of testing such a hypothesis we should only have put off the problem of why, in all those Universes, our own should be possible?")

raison à ce que notre Univers puisse être produit, et ainsi nous ne faisons que reculer l'échelle des nécessités. Néanmoins, le succès qu'a pu avoir la Sélection Naturelle dans la lutte de la science face à la théologie a donné une puissance et une "naturalité" scientifique à cet argument qui a su séduire les futurs tenants de l'idée de multivers.

On parle alors d'interprétation ensembliste du Principe Anthropique (*ensemble interpretation*) : un certain ensemble de mondes possibles, régis par des paramètres distincts, peut mener à l'apparition d'observateurs en son sein. Mais ce type d'Univers capable d'accueillir la vie est rare : selon les études de Carter, "la plupart des perturbations des constantes fondamentales de la Nature autour de leur valeur numérique actuelle conduisent à des modèles d'Univers qui sont mort-nés, incapables de générer des observateurs intelligents (*become cognizable*). La plupart du temps, ils n'admettent l'existence ni des noyaux, ni des atomes, ni encore des étoiles"⁸⁵. Afin de quantifier la probabilité d'apparition de vie au sein d'un Univers donné, Barrow et Tipler se proposent d'introduire un analogue de l'équation de Drake. Cette équation, introduite par Frank Drake en 1961, est connue pour fournir le nombre de civilisations extra-terrestres dans notre galaxie avec lesquelles nous serions capables de rentrer en contact en fonction d'un certain nombre de paramètres pertinents (nombre de systèmes planétaires stables, nombre de planètes où la vie a pu apparaître, a pu devenir intelligente, a voulu tenter de communiquer etc.). Cette équation s'écrit $N = R \cdot f_p \cdot n_e \cdot f_i \cdot f_c \cdot L$, où N est le nombre de civilisations capables de communiquer dans la galaxie, R le taux (*rate*) de formation d'étoiles dans la galaxie, f_p la fraction de ces étoiles autour desquelles des planètes se forment, n_e le nombre de planètes dans ces systèmes qui sont propices à la vie, f_i la fraction de ces planètes où la vie a effectivement émergé, f_c la fraction de celles où la vie est devenue intelligente, f_c la fraction de celles où les intelligences peuvent communiquer sur des distances interstellaires, et L le temps moyen de vie d'une telle civilisation. Ce type de problème rappelle les "problèmes de Fermi", qui entendent donner des ordres de grandeurs crédibles sans information *a priori*, en multipliant différents paramètres pertinents dont nous pouvons connaître la valeur. Par exemple, la question "combien y a-t-il d'accordeurs de piano à Chicago ?" peut recevoir une réponse approximative en prenant en compte la population de Chicago, le nombre d'individus par famille, la fraction des familles qui possède des pianos, etc. Néanmoins, dans le cas de l'équation de Drake, les facteurs f_i , f_c , et L demeurent très incertains⁸⁶. L'analogie dans le cadre des multivers consisterait donc à exprimer la probabilité que la vie apparaisse à un endroit quelconque de l'Univers comme un produit de probabilités rendant compte du réglage fin des paramètres.

⁸⁵ Carter, B., in *Confrontation of cosmological theories with observation*, ed. M.S. Longair, Reidel, Dordrecht, 1974, p. 291. ("Most perturbations of the fundamental constants of Nature away from their actual numerical values lead to model worlds that are still-born, unable to generate observers and become cognizable. Usually, they allow neither nuclei, atoms nor stars to exist")

⁸⁶ Informations recueillies dans Chyba, C.F., & Hand, K.P., "Astrobiology: The Study of the Living Universe", *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* 2005, **43**, 31-74. Ce travail donne par ailleurs un compte-rendu détaillé de la situation actuelle en astrobiologie (domaine de l'astrophysique où l'on s'intéresse à la présence possible de vie dans l'Univers, et à ses conditions de possibilité).

c. Calculer l'improbable : manière de faire des mondes

Il y a un problème dans le type de raisonnement proposé par l'équation de Drake : c'est qu'il n'est pas précisé la façon dont on peut évaluer *a priori* la probabilité d'avoir notre univers plutôt qu'un autre. En fait, cette évaluation ne se fait qu'*a posteriori* dans un univers qui possède déjà certaines caractéristiques structurelles, mais peut très bien manquer d'autres structures qui auraient pu exister dans un autre univers. Afin de permettre un travail *a priori*, il faut créer un modèle falsifiable de multivers où serait identifiable une mesure de probabilité, c'est-à-dire qu'il faut générer un ensemble d'univers (engendrer une certaine *totalité* close de possibles, donc) afin d'y appliquer les méthodes de calcul habituelles de la théorie des probabilités. C'est un postulat fort et contraignant, mais nécessaire si l'on veut mener une véritable entreprise scientifique qui soit *au moins* réfutable. Aussi, comme le disent Barrow et Tipler, "plusieurs suggestions ont été avancées quant à la manière de générer un ensemble de mondes possibles, chacun ayant des caractéristiques différentes; certains étant capables d'accueillir la vie et d'autres non. Il serait alors possible d'exhiber dans cet ensemble les caractéristiques structurelles nécessaires pour générer des 'observateurs'. Cette recherche mènerait finalement à isoler un sous-ensemble d'univers propices à l'émergence d'intelligence dans le méta-espace de tous les mondes possibles"⁸⁷. C'est cette idée d'un travail véritablement scientifique qui est à la base de l'attrait subséquent pour les multivers.

Surgirent à partir de là diverses idées quant à la manière de "faire" des multivers. Wheeler suggéra en 1977 une cosmologie où l'univers est cyclique, alternant phases de contraction et d'expansion, de sorte qu'à chaque 'rebond' les constantes de la nature changent de valeurs⁸⁸. Alors, en une infinité d'oscillations, il y aurait une infinité de mondes viables. En 1978, Ellis proposa la solution d'un Univers infini et aléatoire, de sorte que nous nous trouvons déjà dans l'ensemble d'univers que nous cherchons. Alors, si l'on peut évaluer une probabilité finie pour que notre portion d'univers visible ait la dynamique qu'elle a, le modèle prédira que cette dynamique, ainsi que tout événement se produisant dans notre univers local, se répètera une infinité de fois dans l'Univers entier (nous sommes très proches de la vision des atomistes grecs). Enfin, Everett proposa en 1957 une interprétation de la Mécanique Quantique qui postulait l'existence réelle d'univers parallèles pour résoudre le 'problème de la mesure'⁸⁹. Selon cette interprétation, un super-espace contient tous les mondes issus des différents résultats des observations quantiques. Les mondes que contient ce super-espace sont causalement disjoints, et l'évolution du super-espace dans son ensemble est déterministe, même si le cheminement que nous y faisons y est aléatoire.

⁸⁷ Barrow & Tipler, *op.cit.*, p. 248. ("Various suggestions have been made as to how one might generate an entire ensemble of possible worlds, each with different characteristics; some able to support life and some not. One might then examine the ensemble for structural features which are necessary to generate 'observers'. This scrutiny should eventually single out a cognizable subset from the metaspaces of all possible worlds")

⁸⁸ Wheeler, J.A., in *Foundational problems in the special sciences*, Reidel, Dordrecht, 1977, pp. 3-33.

⁸⁹ Everett, H., *Rev. Mod. Phys.* **29**, 454, 1957.

Voici donc comment se sont introduits les multivers dans le cadre du travail scientifique. Nous allons à présent étudier plus en détail les différents types de multivers qui ont pu être introduits, afin d’avoir une vision complète de l’état des choses en physique contemporaine.

3. Les différents types de multivers

Nous pouvons trouver une classification complète des différents types de multivers actuellement considérés comme possibles selon les standards de la physique moderne chez le physicien théorique Max Tegmark⁹⁰. Précisons tout d’abord ce que nous entendons par “Univers” dans la suite. La notion d’Univers est ici associée à la région interne à l’*horizon*, c’est-à-dire l’ensemble des points qui ont pu échanger de l’information depuis le Big-Bang ; on appelle aussi une telle région “volume de Hubble”. Notre “Univers” est donc une sphère de rayon égal à la vitesse de la lumière (la vitesse maximale de transmission de toute information) multipliée par l’âge de l’Univers. Plusieurs types de multivers (compris en tant que “méta-univers”, totalité dont notre Univers n’est qu’une partie) sont alors imaginables :

- Dans un premier cas, on peut décider, comme hypothèse, que les constantes de la Nature ainsi que les lois de la physique sont fixées, et on ne fait varier que les paramètres caractérisant la *dynamique* de l’univers : taux d’expansion, densité de matière, de rayonnement... Nous nous trouvons alors un peu à la place d’un thermodynamicien qui étudierait un gaz soumis aux diverses conditions possibles de pression, température, ou volume. Mathématiquement parlant, cela revient à considérer différents jeux de paramètres en conditions initiales et à observer la dynamique correspondante conformément aux lois de la Relativité Générale d’Einstein. La contrainte que l’univers produit en modèle corresponde à l’observation est doublée de la contrainte qu’il doive, en sus, permettre la présence d’éléments carbonés, donc l’apparition de la vie. L’interprétation en termes de multivers est celle d’un espace spatialement infini contenant une infinité de volumes de Hubble réalisant de manière aléatoire toutes les conditions initiales (de répartition des fluctuations de matière et de rayonnement notamment), et produisant donc exhaustivement, à l’infini, toutes les combinaisons possibles.
- Ensuite, on peut penser à un multivers composé de plusieurs régions aux lois différentes (constantes fondamentales, contenu en particules, etc.), mais décrit par une unique méta-théorie. Ces régions sont causalement disjointes, que ce soit par une séparation spatiale ou par un “emboîtement” impénétrable (par exemple des Univers à l’intérieur même des trous noirs de notre propre Univers, mais inaccessibles à l’observation). Chaque région peut elle-même être un multivers au sens entendu précédemment.

⁹⁰ M. Tegmark, “The multiverse hierarchy”, pp 99-125 in B. Carr (éd.) *Universe or multiverse*, Cambridge, Cambridge University Press, 2007

- Dans un autre registre (celui de la théorie quantique plutôt que la théorie de la relativité), on peut concevoir un multivers composé des réalisations possibles des diverses mesures opérées à tout instant sur les objets quantiques : ce sont les univers parallèles de l'Interprétation des Mondes Multiples ("*Many-Worlds Interpretation*") de la Mécanique Quantique proposée par les physiciens du milieu du XX^{ème} siècle Hugh Everett (alors en thèse) et John Archibald Wheeler. Il y aurait dans ce cas existence d'un nombre infini de mondes également réels, mais causalement disjoints.
- Enfin, et c'est peut-être le "plus grand" multivers que l'on puisse imaginer (en gardant le postulat d'un ensemble *clos* de possibles), on peut avoir une vision plus platonicienne du multivers, où celui-ci serait composé de toutes les possibilités imaginables par la pure logique mathématique, sans loi autre que celle du Principe de Non Contradiction.

Nous allons à présent traiter plus en détail ces différents multivers.

a. Préliminaire : théorie de l'inflation et théorie des cordes

- L'inflation

Avant d'aborder les multivers "spatiaux", il faut introduire une notion fondamentale de la cosmologie moderne : la théorie de l'inflation.

On peut trouver dans une publication récente⁹¹ un résumé de cette théorie. Elle fut introduite pour rendre compte de deux observations majeures de la cosmologie moderne : l'invariance d'échelle présente dans la répartition des fluctuations de matière dans l'espace⁹², et l'aspect euclidien (c'est-à-dire "plat") de l'espace qui nous entoure. Elle consiste en une idée simple selon laquelle l'Univers primordial, à un temps très proche du Big-Bang, aurait subi une phase d'expansion exponentielle ayant étiré toutes les échelles, produisant un Univers plat, homogène, et portant les fluctuations quantiques microscopiques à une échelle macroscopique les inscrivant dans la matière à grande échelle. Ce sont alors ces fluctuations aléatoires qui se retrouvent dans l'observation du CMB comme d'infimes fluctuations de température. Cette théorie a d'ailleurs le mérite de remédier au problème des corrélations à très longue distance qui existent dans le CMB (le fait que ce fond de rayonnement soit quasiment homogène de part en part, ce qui n'est possible que si toutes les parties ont été en contact causal à un moment de l'histoire cosmique) : dans une phase d'expansion "normale", cela ne pourrait pas être expliqué par des interactions se propageant à une vitesse inférieure de celle de la lumière, alors que dans le cas d'une phase d'expansion "accélérée", il est toujours possible de trouver un temps non nul après le Big-bang tel que deux régions aussi éloignées que l'on veut aient pu entrer en contact causal. Les

⁹¹ Garcia-Bellido, "The paradigm of inflation", *Advances in Astronomy*, 2005, pp 19-39.

⁹² D.N. Spergel *et al.*, "Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Three Year Results: implication for cosmology", *Astrophys. J. Sup.*, 2007, **170**, 377, (2007). Cette invariance d'échelle est comparable à l'invariance que nous trouvons sur une mer agitée : que nous y regardions de très près (au niveau des plus infimes rides) ou de loin (au niveau des plus déferlantes des vagues), nous y verrions le même phénomène reproduit à une même intensité relative à l'échelle à laquelle il se déroule. Dans le cas de la répartition de matière, les "infimes rides" sont des groupes de galaxies et les "déferlantes" des regroupements immenses d'amas de galaxies, par exemple.

observations astrophysiques récentes ont par ailleurs confirmé les prédictions originellement établies dans les années 1980, mais il reste des progrès techniques à effectuer pour que nous puissions sonder directement l'échelle d'énergie à laquelle l'inflation a eu lieu. Et surtout, il reste à construire une véritable théorie qui rende compte de cet événement postulé ici pour "sauver les phénomènes" (pour reprendre l'expression chère à Duhem). L'inflation possède des critères de réfutabilité : une topologie non triviale de l'univers, ou une anisotropie à grande échelle, ainsi qu'une déviation par rapport à l'invariance d'échelle observée dans la répartition des fluctuations seraient des indices permettant de la réfuter. Néanmoins ce cadre de travail scientifique n'a pas de théorie microphysique sous-jacente pour en rendre compte complètement. C'est donc aujourd'hui plus une notion *ad hoc* qui permet d'expliquer de manière simple certains phénomènes rencontrés en cosmologie. Les physiciens théoriques modernes ont l'espoir de trouver la clé dans une meilleure compréhension de la physique des hautes énergies (puisque, dans le paradigme du Big Bang, le début de l'univers se caractérise par des températures incroyablement hautes, donc des énergies très importantes), notamment la physique liant l'infiniment petit des particules décrit par la mécanique quantique à l'infiniment grand de la relativité générale, infinis qui se joignent à la singularité initiale, physique que l'on nomme "gravité quantique" (*quantum gravity*). Nous l'avons déjà mentionné, une des théories en vogue pour cette description ultime est la fameuse "théorie des cordes".

- Théorie des cordes

La théorie des cordes pose comme éléments matériels fondamentaux des cordes infinitésimales, caractérisées par leur longueur et leur tension, et dont les modes de vibrations produisent les différentes particules, ainsi que leurs caractéristiques (masse, spin, charge, etc.). Ces cordes se déplacent dans un espace à 11 dimensions, ce qui est nécessaire à générer les mathématiques les décrivant de façon cohérente afin que leur existence s'accorde avec les théories actuelles. Il doit donc exister des dimensions "cachées", par exemple enroulées sur elles-mêmes à des échelles inaccessibles pour nos moyens d'observation. Dans cet espace surdimensionné gigantesque, il est possible d'opérer différentes "coupes" pour y générer un espace à 4 dimensions (3 spatiales et une temporelle) comme le nôtre. Il y a ainsi de nombreux univers possibles, qui sont causalement disjoints du nôtre, et qui ont leur propres constantes fondamentales : on parle de *Landscape* (auquel sont donc associés différents types de "vides" ou *vacua*). Comme nous l'avons déjà vu en section I, le nombre de coupes compatibles avec la présence d'observateurs (sous-entendu humains) est souvent cité⁹³ comme égal à 10^{500} , et on parle dans ce cas de *landscape* anthropique. On comprend donc que, pour les tenants de la théorie des cordes, le Principe Anthropique se voit être immédiatement résolu par cet apport gigantesque de possibles qu'offre le *Landscape*.

⁹³ Douglas, M., "The statistics of string / M theory vacua", *JHEP* **0305**, 46 (2003)

b. Niveau I : variation des paramètres cosmologiques (régions hors de notre horizon)

Voici notre premier type de multivers, peut-être le plus simple et le plus proche de ce qui a déjà pu être introduit chez les atomistes grecs. L'espace est ici infini, et la matière y est distribuée de façon homogène à grande échelle. Tous les événements possibles, en accord avec les lois de la nature, doivent donc avoir lieu quelque part. En particulier, il y a une infinité d'autres planètes habitées, hébergeant une infinité de copies à l'identique de chacun d'entre nous. Des calculs d'ordre de grandeurs établissent ainsi que nous avons une copie à l'identique de nous à $10^{10^{29}}$ m, et une copie de notre univers à $10^{10^{115}}$ m. Ce sont des nombres gigantesques, mais finis.

Ce premier type de multivers évacue donc la finalité par l'introduction d'un infini cosmologique. Cette idée remonte notamment à Lucrèce, qui ne pouvait concevoir qu'une lance jetée hors d'un univers fini ne soit plus pensable comme étant dans un lieu (ce que pensait Aristote, partisan d'un Univers clos) : pour lui, cette situation était semblable à celle d'un navire échappant à l'horizon mais ne perdant pas pour autant de réalité ontologique ni de localisation spatiale. Il semble, en tout cas pour ce qui est de l'intuition, qu'un univers infini est plus facile à penser qu'un univers fini par-delà duquel aucun lieu n'existerait. Notons néanmoins que l'introduction des géométries non euclidiennes a pu modifier cette notion : il est notamment possible d'avoir un Univers fini mais illimité, exactement de la même manière que la surface de notre Terre est finie mais peut se parcourir de manière illimitée.

Pour ce qui est des données observationnelles, la courbure de l'Univers nous apparaît quasi-nulle, favorisant un espace euclidien infini, et la répartition de matière est homogène à grande échelle, ce que des arguments coperniciens peuvent pousser à étendre à l'espace entier.

La vision est alors proche de celle de David Lewis, mais ici les différents univers sont juste spatialement séparés du nôtre. Les lois de la physique sont imposées, et les conditions initiales sont vues comme des contingences : elles sont établies par le principe d'incertitude d'Heisenberg, qui génère les fluctuations quantiques primordiales que l'inflation portera au niveau macroscopique.

Ainsi, ce qui *peut* arriver, et qui est conforme aux lois de la physique que nous découvrons, *arrivera* quelque part dans ce multivers. Pour Barrow et Tipler, il y a là une forme de "sélection naturelle étendue" (*extended form of natural selection*). Cette expression semble un peu forte, car il n'y a ici aucune notion de mort d'univers, et donc de "sélection", il y a juste une auto-sélection des univers observés (*cognizable*) assurée par la présence d'observateurs (ce qu'on appelle sélection anthropique). Nous préférons garder l'expression de Robert Nozick, "Principe de fécondité", pour cette idée que "tous" les possibles se réalisent. Et là encore, nous prenons des précautions quant à la soi-disante infinité de ces possibles : ils restent contraints par de très restrictives lois physiques, imposées à nous mais pas expliquées par elles-mêmes, comme les axiomes mathématiques s'imposent aux théories qui en découlent sans explication aucune. Cet infini pourrait en fait être aussi grand que l'infini d'un plan dans un volume infini, c'est-à-dire n'être qu'un "petit" infini. Nous reviendrons sur ces considérations en section III.

c. Niveau II : variation des constantes fondamentales

Dans une approche plus générale du multivers, on pourrait voir varier des quantités aussi fondamentales que la charge de l'électron ou le nombre de dimensions spatiales. Celles-ci pourraient notamment varier dans le temps, ou encore changer à chaque Big-Bang dans le cadre d'un univers cyclique (ou un Univers emboîté du type Lee Smolin, où les Big-Bangs se produisent au sein des trous noirs). Ou enfin, nous pouvons penser à une théorie de physique des particules qui produise une distribution de probabilité des constantes fondamentales dans l'Univers : c'est ce qui a été tenté avec les "théories de jauge chaotiques". Celles-ci permettent en principe de calculer la probabilité d'observer une certaine loi de la nature ou une certaine symétrie en physique des particules après un certain nombre d'années (l'âge de l'univers par exemple). Nous nous intéresserons ici aux deux premiers cas de multivers de niveau II.

- Un multivers "en étendue"

C'est le cas le plus simple de multivers de niveau II. Reprenons le multivers de niveau I. Il peut se rentrer dans une bulle de volume fini, car comme nous l'avons vu, l'introduction de courbure dans les dimensions spatiales permet de raisonner à la façon d'une sphère de surface illimitée mais de volume fini. On peut alors penser un multivers contenant plusieurs de ces bulles, avec des variations des lois physiques, ou du nombre de dimensions spatiales entre ces différents Univers. L'espace entre les bulles est en inflation éternelle, de sorte qu'aucun observateur ne puisse les joindre (si l'on considère que la vitesse de la lumière est une limitation fondamentale dans le multivers de niveau II aussi).

Dans ce multivers de niveau II, une méta-loi régit les variations aléatoires des autres lois. Ainsi, la loi "ultime" de la physique reste identique partout dans le multivers, mais les équations effectives varient d'une "bulle" à l'autre. Le "paysage" de la théorie des cordes est un exemple d'un tel multivers.

C'est ce multivers de niveau II qui permet véritablement de crédibiliser le principe anthropique dans sa version forte. Nous retrouvons chez Aurélien Barrau un discours typique de ce que les physiciens peuvent répondre au Principe Anthropique en utilisant les multivers : "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**"⁹⁴.

Ce modèle est aujourd'hui assez populaire chez les physiciens, en ce qu'il est basé sur de réelles théories physiques (ici la théorie de l'inflation, étendue au multivers entier), qu'il permet de "résoudre" le problème du *fine-tuning* en multipliant les Univers et les lois possibles, faisant de tout événement improbable un

⁹⁴ Barrau, A., *op.cit.*, p. 80

événement réalisé, et enfin qu'il supprime (ou du moins repousse) le problème de l'origine du temps, puisque le Big-Bang n'est plus vu que comme un épiphénomène au sein d'un méta-Univers "atemporel".

– Un multivers "en poupées russes"

Lee Smolin a proposé une alternative au multivers inflationnaire de niveau II.⁹⁵ Celle-ci se fonde sur un phénomène quantique interne aux trous noirs. Ces astres sont d'anciennes étoiles à neutron si denses qu'elles s'effondrent sur elles-mêmes et font apparaître une singularité dans l'espace-temps, c'est-à-dire qu'elles créent un "puits sans fond" hors duquel la lumière ne peut sortir, la vitesse d'échappement (la vitesse requise pour "échapper" au champ gravitationnel) étant dans ce cas supérieure à la vitesse de la lumière. Néanmoins, la prise en compte d'une théorie quantique, à ces échelles où l'on s'approche du "mur de Planck" (l'échelle obtenue en combinant gravité et mécanique quantique, que nous avons déjà vue en section I), a mené John Wheeler et Bryce deWitt à conjecturer dans les années 1960 que les effets de gravité quantique devraient renverser l'effondrement sur la singularité et engendrer une expansion (on parle de "rebond"). Un nouvel Univers naît alors, causalement séparé de l'Univers qui l'a engendré par l'horizon du trou noir. Dans cette vision, les singularités de la relativité générale sont remplacés par des rebonds de gravité quantique, et la question de savoir ce qu'il y avait avant le Big-Bang prend à nouveau sens (même si, encore une fois, l'on ne fait que repousser le problème de l'origine à un niveau supérieur, sans le résoudre aucunement).

Pour ce qui est de la crédibilité de l'argument, on peut d'abord remarquer que les observations sont en faveur de l'existence de trous noirs, que l'on peut nombrer à 10^{18} dans notre Univers⁹⁶. De manière plus théorique, la notion de rebond semble bien comprise et admise. Pour ce qui est des univers créés, leur observation est impossible, et il s'agit alors d'accorder une certaine confiance à nos modèles d'inflation au sein de trous noirs, qui semblent pour Barrau plus assurés que ceux d'inflation éternelle du multivers "en étendue".

Ce qui est intéressant dans ce modèle, c'est l'aspect "darwinien" du processus : chaque univers possède de multiples descendants (10^{18} dans notre cas) au sein desquels les lois sont légèrement modifiées : on a transmission des caractères majeurs mais les fluctuations quantiques autorisent de légères variations des constantes fondamentales. Dans le cas de notre Univers, si nous considérons qu'il est "typique" au sein de l'ensemble des mondes générés par le modèle, il doit être "probable". Il doit donc être aussi un Univers qui maximise le nombre de trous noirs (c'est-à-dire de descendants). Une façon de tester cette hypothèse serait donc de vérifier que nos lois physiques sont telles que la production de trous noirs est "maximale". Et si à cette production de trous noirs est associée un certain réglage des paramètres de l'Univers et de structure des lois, alors le problème du Principe Anthropique est résolu de manière neuve.

⁹⁵ Lee Smolin, "Scientific alternative to the anthropic principle", arxiv hep-th/0407213, 2004

⁹⁶ Barrau, A., *op.cit.*, p.82

d. Niveau III : Le multivers quantique

Ce type de multivers est très différent des deux précédents, et pourrait en fait très bien “coexister” avec l’une des deux descriptions précédentes. Il se base sur une certaine interprétation de la Mécanique Quantique. C’est par ailleurs au sein de la mécanique quantique que les premières idées de mondes multiples ont été sérieusement envisagées.

L’interprétation usuelle de la Mécanique Quantique est celle dite de “l’école de Copenhague”, associée notamment à Niels Bohr et Werner Heisenberg. C’est une interprétation très positiviste, qui rend compte des phénomènes observés sans pour autant en déduire la réalité concrète des êtres qu’elle décrit : la “fonction d’onde” est une description qui n’a pas forcément de réalité en soi. Cette interprétation bute devant une difficulté majeure évoquée comme le “problème de la mesure” : lors d’une expérience réalisée sur un objet quantique en superposition d’états (que l’on peut penser comme la superposition de plusieurs ondes différentes, disons par analogie avec la lumière plusieurs couleurs mélangées), l’observateur modifie l’état du système en n’actualisant de façon probabiliste que l’un des états possibles parmi ceux qui composaient la fonction d’onde initiale (chaque observateur ne verra que certaines couleurs, et ceci avec une certaine probabilité). Aussi, la mesure rompt avec le déterminisme de l’évolution libre selon l’équation de Schrödinger, en introduisant une “coupure”, appelée “réduction du paquet d’onde”, qui est par essence non déterministe et non unitaire (elle ne garde qu’une partie de la totalité de la fonction d’onde, le reste se “perdant” définitivement dans l’appareil de mesure macroscopique). Cette coupure est aussi celle du monde “classique” que nous offre l’intuition, et du monde “quantique” qui se situe dans l’infiniment petit et perd ses propriétés étranges lorsque le nombre d’interactions est grand.

Cette réduction, qui est un postulat de la théorie quantique, peut être interprétée d’une autre manière. Hugh Everett proposa en 1957, avec Graham, deWitt et Wheeler, une interprétation en termes d’univers multiples : lors de la mesure, il n’y a plus réduction du paquet d’ondes mais apparition d’un nouvel univers, de sorte que tous les états possibles du système continuent d’exister dans des univers disjoints mais bien réels. Cette vision a tendance à choquer et à être marginale chez les physiciens contemporains, essentiellement pour ce qu’elle fait proliférer les créations d’univers à l’infini (puisque’il y a chaque instant une infinité de mesures). Cette vision, quoique difficilement acceptable, est pourtant celle qui s’accorde le mieux avec un réalisme fort comme il peut être accepté par la plupart des physiciens contemporains.

Cette interprétation a pu mener à divers débats en philosophie. En fait, la situation est proche de celle du multivers de niveau I, où une infinité de copies de nous-mêmes existent, réalisant les différents choix, mais nous sommes alors dans l’espace tridimensionnel usuel et non pas l’espace de Hilbert de dimension infinie du monde quantique. Loin de décrire une *création* de différents univers à chaque mesure, il faut voir le multivers quantique comme le *partage* à chaque instant de l’Univers quantique regroupant tous les possibles en une quantité finie d’univers. Le passage du temps pourrait alors être la marque d’une perception psychique des bifurcations d’un observateur se frayant un chemin dans ce multivers⁹⁷.

⁹⁷ Barbour, J.B., *The end of time*, Oxford, Oxford University Press, 2001

e. Niveau IV : un multivers platonicien

Max Tegmark propose de penser le multivers comme l'ensemble du monde mathématique : pour lui "l'existence physique est équivalente à l'existence mathématique"⁹⁸. Ce qu'il nomme existence mathématique, c'est simplement ce qui est soumis au Principe de Non Contradiction. Il rapproche sa théorie du "principe de fécondité" de Robert Nozick que nous avons déjà évoqué (tout monde logique existe), et la décrit même comme une forme de "Platonisme radical". Comme tout ce qui peut être mathématiquement décrit existe, il nomme aussi cette théorie la "théorie ultime des Ensembles".

A partir de là, une structure mathématique (c'est-à-dire un système formel constitué de symboles, de règles pour les manipuler, et d'axiomes desquels découlent des théorèmes), sera dite "physique" s'il existe une sous-structure consciente (*Self-Aware Structure* ou SAS) de celle-ci qui se perçoit comme vivant dans un monde physique réel (ceci n'est pas sans rappeler le Principe Anthropique Participatif de Wheeler). Pour Tegmark, toutes les structures mathématiques ont une existence physique. En tant qu'observateurs, nous nous trouvons en fait dans une région favorable de cet ensemble mathématique, où les lois sont ajustées finement afin de permettre à la vie d'apparaître. Nous verrons en section III une vision peu différente en principe (un multivers uniquement basé sur le Principe de Non Contradiction), mais qui conduit à des conclusions différentes (l'impossibilité de construire un "ensemble" de mondes, ni de prédire sur notre monde même).

4. Réfutabilité et prédictions

Les multivers sont pour les physiciens une tentative de donner une explication *scientifique* au problème du *fine-tuning*, en se basant sur des théories plus ou moins établies (la théorie de l'inflation et la théorie des cordes restant très discutées), et en tentant d'en tirer des *probabilités* quant à la génération d'un certain jeu de paramètres fondamentaux. Dans sa publication originale, Carter avançait déjà que l'introduction d'un "ensemble de mondes" (*world ensemble*) permettrait en dernier recours (*as a last resort*) de convertir les prédictions faites par le Principe Anthropique en explications. Il y a dans cette idée la volonté d'éviter toute introduction de notion de chance, d'élan vital ou d'*intelligent design* dans la description cosmologique contemporaine. Mais à quel point restons-nous dans le cadre scientifique? Quels critères de réfutabilité les multivers nous offrent-ils, et quelles prédictions peuvent réellement être effectuées à partir des théories avancées? C'est ce que nous allons voir dans cette partie.

a. Les multivers : une surabondance injustifiée?

L'un des principes phares guidant le travail scientifique est celui dit du "rasoir d'Occam"⁹⁹ : il ne faut point multiplier les hypothèses sans nécessité. C'est ainsi que se distingueront les théories les plus remarquables :

⁹⁸ Max Tegmark, "Is the theory of everything merely the ultimate ensemble theory", *Ann. Phys.* **270**, 1, 1988. ("Physical existence is equivalent to mathematical existence")

⁹⁹ Attribué au frère franciscain et philosophe du XIV^{ème} siècle Guillaume d'Occam, il s'énonce dans sa version originale ainsi : "*Entia non sunt multiplicanda praeter necessitatem* », littéralement "Les entités ne doivent pas être multipliées au-delà de ce qui est nécessaire ».

par leur simplicité, leur élégance, leur clarté limpide due à la dérivation de la théorie entière à partir de quelques très simples hypothèses (comme c'est le cas par exemple pour la Relativité Restreinte, souvent citée comme un cas exemplaire de théorie "esthétique" et élégante). En multipliant les univers, les multivers ne vont-ils pas à l'encontre de ce principe? En fait, la quantité d'information nécessaire à la description du multivers est sans doute moins grande que celle décrivant un seul univers. Voici comment ceci se comprend : lorsque l'on veut calculer la quantité d'information nécessaire à la description d'un objet donné, on calcule son "contenu en information algorithmique ». Celui-ci avait été introduit dans les années 1960 par le mathématicien Ray Solomonoff, qui cherchait une manière formelle de traduire le rasoir d'Occam. Dans le cas d'un nombre par exemple, c'est le plus petit programme qu'il faut écrire pour obtenir ce nombre en sortie. Un nombre donné qui ne comporte pas de régularités spéciales devra être précisé entièrement dans le programme, alors que l'ensemble des entiers pourra être produit de façon systématique à partir de quelques lignes de programme. C'est ce type d'argument que traduit le jeu de mot anglais "*many worlds versus many words*" (que l'on pourrait traduire par "pluralité des mondes contre pluralité des mots"). Dans le cas des multivers, on s'affranchit de certaines nécessités à spécifier dans le contenu informationnel : la nécessité de spécifier les conditions initiales dans le multivers de niveau I, celle de fixer les constantes fondamentales au niveau II, et celle de fixer quoique ce soit au niveau IV. Le multivers est alors vu comme un outil conceptuel simple qui permet de palier aux étonnements de l'ajustement des constantes fondamentales.

b. La réfutabilité

Karl Popper, un des philosophes des sciences les plus éminents du XX^{ème} siècle, a introduit dans son œuvre majeure, *La logique de la découverte scientifique* (1959), le criterium aujourd'hui couramment utilisé par les physiciens comme démarcation de ce qui peut être considéré de nature "scientifique". Une proposition scientifique ne peut en effet jamais être entièrement vérifiée, elle peut par contre être soumise à falsification : c'est le critère de réfutabilité (*falsifiability*, ce qui a notamment mené à l'usage courant mais impropre du terme "falsifiabilité").

Signalons d'abord que le Principe Anthropique peut être soumis à ce critère. Aurélien Barrau propose pour cela un exemple de raisonnement anthropique au sein de notre univers, expliquant le fait que l'orbite de la Terre soit proche d'un cercle. Si notre orbite était très excentrique, l'eau se vaporiserait lorsque nous serions proches du soleil et elle gèlerait dans le cas contraire, ce qui est incompatible avec la vie. Une faible excentricité ne pose par contre pas de problème particulier. Cependant, si on observait une valeur de l'excentricité qui soit de 0.000001 (le cercle parfait ayant une excentricité exactement nulle), cela mettrait en difficulté une approche où nous posons une distribution de probabilité *a priori* plate entre 0 et 1 : il y aurait quelque chose à expliquer. Le fait d'observer une excentricité de 0.1 est raisonnable compte tenu d'un modèle aléatoire (distribution plate) *et* d'une sélection anthropique (poids renforçant les valeurs proches de 0). Ainsi, nous pouvons dire que l'argument anthropiste est réfutable, cependant il ne constitue pas une explication, il n'est que prédictif. C'est la théorie, soumise à réfutation, qui est explicative.

Comment les multivers, quant à eux, peuvent-ils s'accorder à ce critère ?

Il y a en premier lieu le problème de l'horizon : les multivers sont hors de toute observation possible. Pour Aurélien Barrau, en tant que prédiction associée à des théories nécessaires à la compréhension de notre univers, l'existence d'autres univers n'a rien de choquant, scientifiquement parlant. Nous sommes dans le même cas que les astrophysiciens prédisant sur des galaxies si lointaines qu'on ne les a pas encore observées. La démarche n'a en soi rien de métaphysique ou de théologique.

Pour ce qui est du critère de réfutabilité, il sera à même de juger de la théorie sous-jacente qui prédit un certain type de multivers. Une théorie de la gravitation quantique sera soumise à un tel critère, et les prédictions qu'elle fera (notamment l'existence d'autres univers) pourront être prises au sérieux, comme conséquences de la théorie. Si cette théorie avait le succès et la certitude qu'ont aujourd'hui les théories de la relativité générale ou de la physique quantique, la thèse des univers multiples ne serait alors pas moins scientifique que ce qui est dit du vide quantique aujourd'hui, par exemple.

Puisque les théories du multivers apparaissent satisfaire les critères de réfutabilité, voyons plus précisément comment, en pratique, des prédictions pourraient être effectuées sur la valeur des paramètres fondamentaux.

c. Les prédictions dans le multivers

Effectuer des prédictions dans le multivers suit une logique simple. Grossièrement, si nous notons $P(i)$ la proportion d'univers ayant un vide de type i , et $f(i)$ la probabilité de trouver un observateur dans ce vide de type i , la probabilité que nous nous trouvions effectivement dans un univers de type i est proportionnelle à $P(i) \cdot f(i)$. Une théorie qui décrit le multivers doit donc permettre de calculer des probabilités d'occurrence pour les différents types d'univers, et en comparant les caractéristiques de notre univers avec la distribution de probabilités prédite nous pouvons réfuter ou confirmer le modèle à un certain niveau de confiance. Regardons donc de façon plus précise comment cela se passe en pratique.

Soit une théorie T , des conditions aux limites cosmologiques caractérisées par certains paramètres (les "constantes fondamentales") et des lois physiques fixes (pour la simplicité de l'exposé). L'objet d'étude est un multivers où chaque réalisation est un univers dans lequel peuvent être observées et testées des prédictions. Un cas simple de réfutation serait d'observer dans notre univers une valeur d'un paramètre qui entre en contradiction avec les prédictions théoriques (par exemple la prédiction que dans tous les univers, la valeur d'un paramètre soit fixée à une certaine grandeur, différente de celle effectivement mesurée dans notre Univers), auquel cas T est exclue. Réciproquement, si T prédit une valeur non triviale d'un paramètre dans tous les multivers et que nous l'observons effectivement dans notre Univers, cela corroborerait la théorie. Entre les deux, nous entrons dans le domaine des probabilités et des taux de confiance. Si T prédit une situation A avec une probabilité de 99.9999% et une situation B avec une probabilité de 0.0001% (les deux situations étant anthropiquement neutres), l'observation de B dans notre Univers jettera avec une certitude élevée de grands doutes sur la théorie T . Néanmoins, cette certitude ne pourra pas être augmentée par reproductibilité de l'expérience (nous ne pouvons pas aller voir d'autres univers), comme habituellement en physique, elle le sera par l'utilisation d'autres paramètres indépendants. Au final, la réfutabilité de T dépend de sa capacité à prédire des distributions de probabilités pour ses paramètres.

Pour calculer une telle distribution de probabilités dans le multivers, il faut réunir plusieurs conditions¹⁰⁰ :

- D'abord, il faut qu'un ensemble d'univers soit clairement défini, chacun ayant des lois homogènes, mais ces lois pouvant varier de l'un à l'autre.
- Il faut ensuite définir un jeu de paramètres pertinents pour caractériser les différents univers : paramètres cosmologiques, paramètres du modèle standard de la physique des particules etc. Notons ces paramètres A_i (avec $i=1 \dots N$).
- Étant donné ces paramètres, il faut une *mesure* pour calculer leur densité de probabilité $P(A_i)$ dans l'espace à N dimensions du jeu de paramètres. Cette mesure est difficile à définir : nous pouvons naturellement la relier à une probabilité d'avoir un jeu de paramètres par univers, mais la notion d'univers dépend du découpage choisi et nous pourrions changer la fonction de distribution en subdivisant des univers en sous-univers ; nous pouvons la relier au volume d'espace ayant un certain jeu de paramètre, mais nous la ferions dépendre du temps... Cette question reste ouverte en physique des multivers. C'est en fait le même problème que pour définir la proportion des nombres pairs dans l'ensemble des entiers naturels. Écrivant ceci selon l'ordre usuel : 1,2,3,4,..., et passant à la limite, nous déduisons qu'il y a une proportion 1/2 d'entiers pairs parmi les entiers naturels. Mais les écrivant selon cet ordre atypique : 1,3,2,5,7,4,9,11,6..., c'est-à-dire deux nombre impairs consécutifs alternés avec un pair, nous déduisons cette fois un rapport de 1/3. Cette proportion est donc définie de manière ambiguë. Dans le cas du multivers, on s'y réfère comme du "problème de la mesure"¹⁰¹.
- Supposons qu'une telle mesure M ait été choisie. On note $PM(A_i)$ la densité de probabilité selon cette mesure. Il s'agit de calculer explicitement ces probabilités, et cela peut se révéler ardu, notamment dans le cas où M est une mesure type "volume" et que nous comparons des univers de volume infini... Des articles récents¹⁰² essaient de réaliser de tels calculs et d'en tirer des prédictions, mais ces règles restent très heuristiques.
- Supposons $PM(A_i)$ connu. Nous souhaiterions savoir dans quel univers nous sommes. Cette question dépend de la connaissance que nous avons de notre Univers, ce qui rend les probabilités conditionnées (ce sont des probabilités "sachant que" nous avons telle connaissance), et donc dépendantes de ce que nous voulons bien y inclure. Il y a trois approches admettant des degrés croissant de conditionnement : considérer seulement les probabilités $PM(A_i)$, qui sont minimalement conditionnées (simplement par une mesure de volume, par exemple), considérer les probabilités conditionnées par la présence d'un observateur, ou enfin considérer les probabilités conditionnées par les lois connues de notre univers. Ce sont respectivement les approches "ascendante",

¹⁰⁰ A. Aguirre, "Making predictions in a multiverse : conundrums, dangers, coincidences", *op. cit.*

¹⁰¹ A. Vilenkin, "A measure of the multiverse", *J. Phys. A : Math. Theor.* **40**, pp 6777-6785, 2007

¹⁰² J. Garriga *et al.*, "Probabilities in the inflationary multiverse", *JCAP*, **0601** p 17, 2006

“anthropique” et “descendante”. Notons O l’objet de conditionnement (qui peut être la mesure M, l’observateur, ou notre monde et ses lois).

- Les “objets” M et O étant choisis, il s’agit alors d’évaluer le nombre $N(O,M,A_i)$ d’objets O par objet M (par exemple le nombre d’observateurs par unité de volume). Nous pouvons ensuite calculer $PO(A_i)=PM(A_i)*N(O,M,A_i)$, c’est-à-dire la probabilité qu’un objet O (par exemple un observateur) réside dans un univers avec les paramètres A_i . Ce calcul est difficile, mène souvent à des infinis, et est relatif au O choisi, ce qui rend encore le raisonnement difficilement applicable.
- Finalement, reste une dernière étape, consistant à supposer que nous sommes des observateurs typiques au sein de l’espace des paramètres autorisant notre existence : c’est ce qu’on appelle le “principe de médiocrité”¹⁰³, postulat supplémentaire à la démarche.

Voici la démarche permettant, à partir d’observations dans notre univers et des choix de O et M, de réfuter une théorie T et ses *conséquences* en ce qui concerne l’existence et la structure des univers multiples. Des difficultés viennent se poser à l’encontre de ce raisonnement. Tout d’abord, la probabilité d’émergence d’une conscience intelligente dans un univers donné est incalculable : le développement de la vie est un processus trop mal connu, et la définition même de la vie est sujette à caution. Ensuite, comme nous l’avons vu, le “problème de la mesure” n’assure même pas que nous puissions véritablement calculer de façon stricte les densités de probabilités initiales. Et c’est sans compter la difficulté consistant à définir un temps unique dans ce méta-univers. Les théories de multivers restent donc pour le moment seulement théoriquement testables, mais ses adeptes attendent des avancées scientifiques pour que les critères poppériens soient remplis.

¹⁰³ A. Vilenkin, “Predictions from quantum cosmology”, *Phys. Rev. Lett.*, **74**, p 846, 1995

III. Quelques considérations

épistémologiques et philosophiques

Le raisonnement anthropiste est, comme nous l'avons vu, une contrainte des probabilités *a priori* que les paramètres fondamentaux de notre Univers aient la valeur qu'ils ont effectivement en partant du fait que nous sommes à présent là, afin d'en déduire un ensemble de situations initiales passées compatibles avec cette observation. L'interprétation de cette contrainte conduit à deux courants majeurs : l'un considère que notre Univers, unique, devait posséder ces paramètres *afin que* l'homme puisse apparaître, et l'autre estime qu'il faut établir une théorie des univers multiples qui permette d'*expliquer* rationnellement, sans intervention divine, le fait que ce jeu de paramètres particulier soit présent dans notre Univers. Ces deux visions font intervenir diverses notions de philosophie et d'épistémologie qu'il va s'agir de discuter. Du côté épistémologique, d'abord, il faut bien comprendre les limites de la modélisation, car c'est à partir d'elle que se basent les prédictions cosmologiques. De plus, il faut explorer la notion de cause et les difficultés associées à sa définition, notamment telles qu'elles apparaissent en biologie évolutive ou même en histoire, car le raisonnement anthropiste est avant tout un raisonnement historique qui entend retrouver la cause par l'effet. À ces deux notions clés de l'entreprise scientifique, viendra s'ajouter celle du hasard, qui joue ici un rôle majeur comme recours face à l'interprétation finaliste et anthropocentrique de l'*intelligent design*. Cette notion nous permettra d'introduire celle de probabilité, c'est-à-dire de *mesure* du hasard, qui est la clé de voûte du raisonnement anthropiste. Du côté philosophique, il va s'agir de discuter la finalité, comment elle a déjà pu être introduite et en quoi elle a pu être une interprétation cohérente du monde dans certains systèmes philosophiques. Cela nous permettra d'interroger le devenir, l'inscription dans la flèche du temps qui sous-tend le raisonnement historique tel qu'il est pratiqué par les anthropistes. Puis nous discuterons en profondeur l'élément fondamental de la perspective scientifique sur le sujet : les lois de la nature. Quel est leur statut, comment sont-elles aujourd'hui perçues? En quoi cela encourage-t-il le raisonnement anthropiste? En interrogeant la notion de loi, nous terminerons par discuter celle de nécessité même : y a-t-il vraiment plus dans le monde que la seule logique mathématique, a-t-on bien une nécessité physique qui dicte le déroulement particulier des choses *via* des lois préétablies qui sont nécessaires et inexplicables? Peut-on réellement garder un Principe de Raison Suffisante qui assure à toute chose une raison d'être telle qu'elle est plutôt qu'autrement? Car c'est bien là le point métaphysique à partir duquel se fonde toute entreprise d'explication scientifique du Principe Anthropique : la pensée qu'il existe une nécessité fondamentale d'où le reste découle, notamment notre existence.

1. Considérations épistémologiques

a. La notion de modèle

i. *Dégénérescence des paramètres : de l'îlot anthropique à l'océan des possibles*

Dans la perspective du Principe Anthropique, la notion de modèle apparaît avec l'utilisation de modèles cosmologiques pour raisonner sur "l'improbabilité" que les paramètres fondamentaux mènent à l'existence de l'homme. L'inspection des caractéristiques d'un modèle peut en fait mener à une vision différente de cette "improbabilité". En effet, dans le cadre d'un modèle cosmologique, lorsqu'un changement est effectué sur un paramètre du modèle considéré, il est parfois possible de le compenser en effectuant un changement sur un autre paramètre : c'est la *dégénérescence des paramètres cosmologiques*. Aussi, si nous réussissons à contraindre un ensemble de situations favorables à l'existence de l'homme, il peut être possible de recréer cet ensemble en réajustant en compensation les valeurs d'autres constantes.

Ceci peut se formaliser en étudiant plus précisément les caractéristiques de toute modélisation¹⁰⁴. Supposons que l'on puisse traiter les lois de la physique comme un ensemble de N équations différentielles gouvernant l'évolution de quantités physiques x_1, x_2, \dots, x_N et contenant des paramètres λ_i , qui sont nos constantes de la nature. Nous pourrions alors exprimer l'évolution dans le temps des différentes composantes x_i du vecteur \mathbf{x} selon la formule :

$$\dot{\mathbf{x}} = F(\mathbf{x}, \lambda_i), \quad \mathbf{x} \in (x_1, x_2, \dots, x_N)$$

où $\dot{\mathbf{x}}$ est la dérivée temporelle du vecteur \mathbf{x} . La structure de notre monde correspond aux solutions de ce système. Ce type de modélisation est typique de ce qui est réalisé en cosmologie, où un modèle dépendant de certains paramètres fondamentaux (les constantes de la nature) et de paramètres cosmologiques dynamiques (taux d'expansion de l'univers, densité de matière etc.) est évalué dans le temps, de façon à le comparer à des données observationnelles provenant d'époques différentes (notamment la nôtre et celle du Fond de Rayonnement Cosmologique, 300 000 ans après le Big Bang). Notons \mathbf{x}^* les quantités telles qu'elles sont observées expérimentalement, et λ_i^* les constantes de la nature associées. Nous voudrions connaître la stabilité de la solution \mathbf{x}^* pour des variations de λ_i autour de λ_i^* : s'il y a stabilité, il faut s'attendre à ce que des permutations dans les valeurs des constantes n'entraînent pas de changement de comportement global dans la dynamique de l'univers, alors que dans le cas d'une instabilité, un changement des paramètres fondamentaux mènera à un comportement très différent du modèle. En fait, une étude mathématique montre que, pour $N \geq 3$, il est fréquent que la solution soit un "attracteur étrange" (*strange attractor*), c'est-à-dire une région compacte de l'espace des phases (l'espace d'évolution de \mathbf{x}) où les trajectoires solutions du

¹⁰⁴ Raisonnement tiré de Barrow & Tipler, *op.cit.*, pp. 254-5.

problème ont la propriété de diverger entre elles : un tel attracteur a la propriété de rendre les solutions chaotiques, c'est-à-dire qu'un changement infinitésimal des données initiales entraîne une modification importante du comportement final. Ainsi, dans le cas où nous avons des attracteurs étranges, nous avons instabilité suivant la valeur des paramètres λ_i , ce qui signifie que nous aurons de nombreux types d'attracteurs différents pour des valeurs de paramètres différents, et donc qu'il est possible qu'un jeu de paramètres tout à fait différent redonne le même type d'attracteur : il y a alors dégénérescence. Dans le cas simple où il n'y a pas d'attracteur étrange, la solution est stable et elle occupera une place très particulière concernant le choix des paramètres : il n'y aura sans doute pas de dégénérescence. Comme nous sommes sans doute dans le cas $N \geq 3$, il s'ensuit que notre jeu de paramètre n'est pas si particulier que cela, et que d'autres jeux auraient pu mener à des univers où la vie apparaîtrait.

ii. *Fausseté des modèles*

L'aspect que nous venons de traiter est une manière de voir les choses qui estime, comme postulat, que le modèle cosmologique décrit *entièrement* l'Univers et peut nous servir à raisonner sur l'ensemble des possibles. Néanmoins, un traitement épistémologique plus poussé peut nous dissuader d'une telle efficacité.

Habituellement, on distingue deux façons différentes de penser le rôle du modèle¹⁰⁵. On peut d'abord penser d'abord la théorie comme un système formel axiomatisé et non interprété, que le modèle se charge ensuite d'interpréter. Le modèle n'est alors que le négatif de la théorie, il n'a pas besoin d'être vrai mais il doit suivre la théorie en termes de structure déductive. C'est la vision **syntactique**, commode pour le travail en logique. Dans l'autre vision, la théorie donne un comportement général sous forme de prédicats (par exemple "être une particule classique" en relativité) et le modèle donne une entité satisfaisant ce comportement. C'est la vision **sémantique**, qui est celle des sciences de la nature. Ici les modèles sont des espaces d'état, avec des trajectoires et des contraintes définies dans ces espaces. Ceux-ci sont associés aux phénomènes empiriques en associant un point de l'espace d'état à un état du système empirique. Pour le logicien et philosophe Alfred Tarski, père de la théorie des modèles, le modèle se définit ainsi comme "une réalisation possible dans laquelle tous les énoncés valides d'une théorie T sont satisfaits"¹⁰⁶. La théorie est un ensemble d'énoncés, et le rôle du modèle est de fournir les conditions requises pour que la théorie soit vérifiée.

Néanmoins, d'après la philosophe des sciences contemporaine Margaret Morrison, les modèles contiennent souvent plus que ce qui est inclut dans la théorie. Ils en sont même autonomes, en ce qu'ils représentent des phénomènes physiques desquels la théorie seule ne peut rendre compte. Mais cette autonomie a un coût : l'approximation. Ainsi, "la caractéristique majeure d'un modèle est le degré d'inexactitude qu'offre sa représentation. En d'autres mots, c'est un modèle car il n'est pas capable de rendre compte de la nature avec

¹⁰⁵ Morrison, Margaret, 2007, "Where have all theories gone?", in *Philosophy of Science*, Vol. 74 (Apr. 2007), pp. 195-228

¹⁰⁶ Tarski, A., "A General Method in Proofs of Undecidability", in A. Tarski, A. Mostowski, and R. M. Robinson (eds.), *Undecidable Theories*. Amsterdam: North-Holland. ("A possible realization in which all valid sentences of a theory T are satisfied is called a model of T").

exactitude”¹⁰⁷. Néanmoins, bien qu’approximatif, le modèle a un avantage majeur : il permet de rendre compte d’un système (économique, social, écologique, physique) ou d’un phénomène (la chute d’une avalanche, le vol d’un avion, l’explosion d’une étoile) que nous ne connaissons pas dans les détails. C’est sans doute l’aspect le plus motivant de la modélisation, qui fait sa force, tout en acceptant que *tout modèle est faux*. Cette remarque est importante pour ce qui est de la modélisation cosmologique : il faut bien se rendre compte que notre modélisation se base sur des paramètres phénoménologiques (densités d’énergie, dynamique spatiale) qui peuvent ne pas être les paramètres les plus pertinents pour le modèle en question, qui rendent peut-être imperceptibles d’autres paramètres qui se révéleraient importants sous d’autres contraintes ou dans l’avenir¹⁰⁸. Un exemple de cette limite inhérente à la modélisation est celui du ressort tournant autour d’un axe : une tige rigide est accrochée horizontalement à un mât vertical tournant autour de lui-même. On enroule un ressort le long de la tige ; on le fixe au mât et on accroche à l’autre extrémité une masse mobile le long de la tige. La situation est facilement modélisable : lorsque le mât tourne, la masse est emportée vers l’extérieur par la force centrifuge, et le ressort exerce une force contraire tendant à ramener la masse vers le mât. Néanmoins, pour une certaine vitesse de rotation finie, les équations divergent et le ressort s’étend à l’infini. Cette “erreur de modélisation” faisant surgir un infini tient au fait que l’on ne tient pas compte dans le modèle de la structure microscopique du ressort qui, bien que de peu d’importance dans les cas usuels, se révélera essentielle lorsque le ressort sera soumis à de très fortes tensions. Il nous manque donc dans le modèle la possibilité que le ressort casse. En analogie, nous pourrions objecter au Principe Anthropique que, lorsque nous faisons varier les paramètres “fondamentaux” de l’Univers pour déceler le comportement des différents univers possibles, nous nous basons sur un modèle de *notre* Univers, soumis à certaines contraintes qui font que *certain*s paramètres sont importants et nécessaires à la relative justesse du modèle, mais que la variation de ces paramètres peut mener à un comportement inattendu car non inclus dans notre modèle. Raisonner sur notre “improbabilité” en tant qu’observateurs à partir de la modélisation cosmologique est donc très contraint par le fait que nous raisonnons *pour un modèle donné*. Et, comme le dit Margaret Morrison, contrairement à une théorie, un modèle n’est *pas* généralisable¹⁰⁹. Aussi, le travail consistant à bâtir une réelle *théorie* des multivers est une tentative épistémologiquement plus instructive que la simple évaluation anthropique des possibles à partir de notre Univers telle qu’elle est pratiquée en cosmologie classique.

¹⁰⁷ Morrison, Margaret, *op.cit.*, p.211. (“The most important feature of a model is that it contains a certain degree of representational inaccuracy. In other words it is a model because it fails to accurately represent nature”)

¹⁰⁸ Dans de nombreuses publications de cosmologie, nous trouvons écrit que nous sommes dans une période très spéciale de l’histoire de l’Univers, car nous sommes à un moment où l’énergie sombre (liée à la constante cosmologique) commence à dominer le budget énergétique total de l’univers. Cette remarque a tendance à générer des conclusions anthropistes. Néanmoins, ceci serait peut-être atténué si nous gardions une attitude modeste face au modèle, et que nous ne présagions pas du fait qu’un autre type d’énergie encore inconnu et imperceptible pourrait plus tard dominer ce budget tout en étant inséré de façon tout à fait cohérente dans un nouveau modèle plus complet. Après tout, c’est bien ce qui fut le cas il y a à peine dix ans dans le cas de l’énergie sombre...

¹⁰⁹ Morrison, Margaret, *op.cit.*, p.218. (“Although my claim here is that theories can explain/represent the general features of a physical system, the important difference between their representational function and that of models is that the latter, unlike the former, tend not to be generalizable”)

b. La notion de cause

Dans son principe, le raisonnement anthropique entend “remonter” l’échelle des causes pour poser des contraintes sur les causes premières qui, au final, mènent à l’apparition de l’homme. Mais la notion de causalité telle qu’elle apparaît en physique classique ne s’accorde pas forcément avec les notions de causalité “historique” que l’on retrouve en biologie évolutive ou même, bien sûr, en histoire. Néanmoins, ces différentes visions de la causalité nous feront apparaître le Principe Anthropique sous un jour nouveau, utile à sa pleine compréhension.

i. La causalité en physique

En physique, la notion de cause est aujourd’hui intimement liée à celle de loi. Elle traduit en fait ce que des relations quantitatives imposent : le mouvement de la balle tombant vers le sol sera causé par l’attraction gravitationnelle, qui fait intervenir les diverses quantités que sont la masse de la balle, la masse de la Terre, la constante gravitationnelle et la distance qui sépare la balle du sol. Cette notion est distincte de celle, qualitative, que nous trouvons dans la physique aristotélicienne : la balle tombe vers le sol car elle rejoint son “lieu naturel”. La rupture entre ces deux modes de pensée est attribuée à l’œuvre de Galilée (1564-1642), qui réalisa les premiers pas vers la science telle que nous la pensons aujourd’hui : tournée vers l’expérience, cherchant des lois quantitatives permettant de mieux comprendre le monde pour aussi agir sur lui, une science qui déchiffre ce livre écrit en langage mathématique qu’est la nature, pour reprendre la métaphore de Galilée. Dans cette vision embryonnaire, il y a une idée de cause unique : à un phénomène physique est associée une cause déterminée par une loi. C’est ce que résume cette définition de la cause par Galilée : “ La cause est ce qui est tel que, lorsqu’elle est posée, l’effet s’ensuit, lorsqu’elle est ôtée, l’effet est ôté”¹¹⁰. Cette notion est très empirique : elle est liée à la reproductibilité de l’expérimentation scientifique, l’un des plus importants critères de toute science expérimentale¹¹¹. Il est donc peu étonnant de la retrouver chez le philosophe écossais David Hume, l’un des plus importants fondateurs de l’empirisme moderne, sous une forme très similaire : “*Des mêmes causes, il doit s’ensuivre les mêmes effets, toutes circonstances égales par ailleurs*”¹¹². On parle de Principe de Causalité, ou encore Principe d’Uniformité, pour traduire la notion de lois immuables qui est sous-jacente. La limitation introduite (“toutes choses égales par ailleurs, traduction du latin *ceteris paribus*”), parfois référée comme la “clause *ceteris paribus*”, est censée protéger ce principe de toute attaque concernant le fait que nous pourrions méconnaître une certaine loi qui pourrait un jour intervenir, faisant qu’une certaine cause ne produirait pas le même effet dans des conditions légèrement différentes. La clause *ceteris paribus* inclut donc l’imprévisible. Hume interroge à travers ce Principe de Causalité notre tendance à chercher des causes et à penser l’expérience comme toujours reproductible. Sa

¹¹⁰ Galilée, Discours sur les corps flottants (1612), cité dans E. Yakira, *La causalité de Galilée à Kant*, PUF, “Philosophies”, n°53, 1994., p. 9

¹¹¹ Ce critère manque d’ailleurs à la cosmologie, puisque nous ne pouvons pas “reproduire” notre Univers. Cela lui confère une place spéciale en tant que discipline scientifique du point de vue épistémologique.

¹¹² Hume, D., *Traité de la nature humaine*

réponse est qu'il n'existe pas de preuve *a priori* à ce que ce principe soit vérifié. Seule l'*habitude* que le sujet humain acquiert à force de voir toute expérience se reproduire à l'identique lorsque les causes impliquées sont les mêmes permet de fonder sa *croyance* en une telle uniformité de la causalité. C'est donc l'induction et non pas la déduction qui permet d'établir ce principe. C'est ce qui mènera plus tard Kant à introduire la causalité comme une catégorie de l'entendement humain qui permet de rendre le monde intelligible.

Cette image d'une causalité "mécanique" (l'exemple de Hume est celui de boules de billard s'entrechoquant) est le pendant d'une certaine approche réductionniste de la physique. Les notions de complexité et d'émergence, qui sont des problématiques très présentes en biologie contemporaine, apportent des limitations à une telle définition de la cause.

ii. La causalité en biologie

C'est chez Ernst Mayr, biologiste et l'un des fondateurs de la philosophie de la biologie, que nous trouvons les bases d'une réflexion sur la causalité en biologie¹¹³. En suivant le philosophe des sciences Ernest Nagel¹¹⁴, il distingue plusieurs sens de la causalité :

- Une position *a posteriori* : c'est l'explication des événements passés.
- Une position *a priori* : c'est la prédiction d'événements futurs.
- Une position *téléologique* : la compréhension des phénomènes dirigés vers une fin, un but.

Nous retrouvons ainsi différents types de causalité selon que l'on considère la biologie fonctionnelle ou évolutive. La biologie fonctionnelle pose la question "Comment ?" : l'expérimentateur cherche la *fonction* d'un système. Il veut pouvoir contrôler toutes les variables, comprendre la variation de l'expérience avec les diverses conditions, jusqu'à avoir clarifié de façon complète la fonction qu'il étudie. La biologie évolutive pose quant à elle la question "Pourquoi?". Ce "Pourquoi" peut être vu comme un "Comment cela se fait que", c'est-à-dire un "Pourquoi" historique, mais aussi comme un "Pour quoi", c'est-à-dire un "Pourquoi" téléologique. Dans le cas du biologiste évolutionniste, nous sommes toujours dans une recherche historique. Contrairement à la physique, il n'y a ici pas l'uniformité des lois, il faut ici penser la causalité comme fortement liée à la contingence de l'évolution. Le physicien devenu biologiste Max Delbrück disait ainsi qu' "un physicien mature, se mesurant pour la première fois aux problèmes de la biologie, est intrigué par le fait qu'il n'y a pas de 'phénomène absolu' en biologie. Tout est limité dans le temps et dans l'espace. L'animal ou la plante ou le micro-organisme sur lequel il travaille n'est qu'un lien dans une chaîne évolutive de formes changeantes [*evolutionary chain of changing forms*], aucune n'ayant de validité permanente"¹¹⁵.

¹¹³ Mayr, Ernst, 1988, "Cause and effect in biology", in: Ernst Mayr, *Toward a new philosophy of biology*, Cambridge: Harvard, pp. 24-37.

¹¹⁴ Nagel, E. 1961. *The Structure of Science*. New York: Harcourt, Brace and World.

¹¹⁵ Delbrück M., 1949, "A physicist looks at biology", *Trans. Cam. Acad. Arts Sci.*, **33**, pp. 173-190

La notion de cause en biologie est donc plurielle. Ceci s'illustre bien avec un exemple simple : quelle est la cause de la migration des oiseaux ? Plus spécifiquement, demandons pourquoi un certain oiseau a commencé sa migration vers le Sud la nuit du 25 Août. A ceci peuvent correspondre quatre réponses correspondant à quatre causes :

- (1) Une cause écologique : si l'oiseau ne migrerait pas, il ne pourrait pas trouver d'insecte à manger et mourrait de faim.
- (2) Une cause génétique : il est inscrit dans son programme génétique que cet oiseau doit répondre à certains stimuli de l'environnement en migrant vers le Sud.
- (3) Une cause physiologique intrinsèque : le système physiologique de l'oiseau répond automatiquement à une baisse de la longueur des journées en le préparant à migrer.
- (4) Une cause physiologique extrinsèque : l'oiseau a migré le 25 Août car, ce jour-là, une masse d'air froid est passée au-dessus de son lieu d'habitat. L'oiseau, déjà dans un état prêt à migrer, a donc décollé ce jour précis plutôt qu'un autre.

Les causes (1) et (2) sont ultimes : elles ont une histoire et ont été incorporées dans le système après des milliers de générations par sélection naturelle. Par contre, les causes (3) et (4) sont proximales : elles sont des réponses directes aux demandes de l'environnement selon des processus fonctionnels immédiats. Comment accorder ces causes avec la notion habituelle de cause définie à la manière de Galilée comme la condition sans laquelle un événement ne serait pas arrivé, où si l'on veut introduire un ensemble de causes, l'élément d'un ensemble de raisons conjointement suffisantes sans lequel un événement ne serait pas arrivé? Il faut ajouter à la notion de cause physique la notion de finalité inhérente à l'étude du vivant. Le problème de la finalité, ou téléologie, était déjà envisagé par Aristote à travers les causes finales. La cause finale est définie comme "la cause responsable de l'atteinte systématique d'une fin préconçue". En biologie, une telle finalité s'envisage dans le cadre d'individus qui ont été *programmés génétiquement*. On peut alors parler de "finalité mécaniste", dans le sens où cette finalité est le résultat d'un programme conçu selon les lois de la physique, et qui a évolué selon la sélection naturelle de Darwin, qui est quant à elle purement non finaliste. Il faut aussi prendre garde, néanmoins, à ne pas faire reposer toute cause ultime sur l'incorporation génétique d'un comportement : nous rentrons alors dans le domaine de la psychologie évolutive, qui tente d'expliquer les comportements humains par le fait qu'ils aient pu être favorisés au cours de l'évolution, et ceci mène rapidement à des dérives quant à ce qui est inné chez l'homme.

Lié au problème de la causalité, le problème de la prédiction est tout aussi complexe. On peut avoir des prédictions par classification (en trouvant des individus d'une espèce proche d'une espèce déjà connue, on peut prédire des comportements généraux), des prédictions de phénomènes au niveau moléculaire (des phénomènes physiologiques liés à des réactions physico-chimiques bien connues), des prédictions concernant les écosystèmes (par modélisation notamment, en identifiant les paramètres clés), ou bien sûr des

prédictions concernant les processus évolutifs (ce sont les prédictions les plus mauvaises, en fait). Il y a une part d'indéterminé dans toutes ces prédictions. On peut en donner quatre classes :

- (1) Le caractère aléatoire d'un événement comparé à l'importance de l'évènement : on ne peut prévoir le résultat d'une pression de sélection¹¹⁶ donnée car les processus de mutation, recombinaison ou encore d'homéostasie développementale ont des contributions totalement indéterminées à cette pression.
- (2) Le caractère unique des entités au plus haut niveau d'intégration biologique : les faits sont statistiques en biologie, il n'y a pas de validité universelle.
- (3) La complexité extrême : il y a tellement de boucles de retour, d'appareils régulateurs, de chemins différents dans un organisme qu'une description complète semble impossible.
- (4) L'émergence de nouvelles qualités au plus haut niveau d'intégration : ici, c'est une indétermination basée sur une pure imprévisibilité, celle du résultat de la combinaison de différentes entités comme un "tout" ayant de nouvelles propriétés. Nous reviendrons sur cette notion importante d'émergence plus tard.

Cette excursion dans le domaine de la biologie nous intéresse pour plusieurs raisons. Tout d'abord, elle nous permet d'introduire des notions importantes sur lesquelles nous allons revenir et que la physique classique n'a pas l'habitude de poser : la finalité, la complexité, l'émergence, ou encore la contingence. Ces notions sont à la base d'une nouvelle physique, à l'interface avec la biologie, qui étudie les systèmes complexes et s'accorde avec l'imprévisibilité de l'émergence, jusqu'à même reconsidérer la notion de loi fondamentale, de sorte que le Principe Anthropique n'y a plus de sens. Nous y reviendrons plus tard dans cette section. Ensuite, nous sommes plus à même de comprendre la difficulté de définir "l'émergence d'êtres vivants" dans un univers donné, un des problèmes majeurs auquel fait face le Principe Anthropique, et qui a pu lancer la "mode" de l'exobiologie, domaine de la biologie s'occupant de l'étude du vivant hors de notre planète. Le problème de la causalité y est primordial : "La tendance à identifier en quoi la Terre est spéciale peut être dangereuse lorsque les analystes, ayant une certaine connaissance *post hoc*, choisissent dans un système compliqué l'élément précis qui, s'il était absent, entraînerait des conséquences négatives pour la vie. Mais interpréter ce résultat comme une preuve de la nature contingente ou fragile de la biologie est trompeur si l'on ne se demande pas aussi de quelles autres manières le système total devrait différer pour que cet élément

¹¹⁶ La "pression de sélection" est le fait qu'une contrainte environnementale donnée va favoriser le maintien de certaines mutations plutôt que d'autres au cours de l'évolution, "guidant" ainsi la sélection naturelle, mais sans introduire de téléologie toutefois : les mutations restent aléatoires, seule la sélection est "orientée".

spécifique manque à présent, et aussi quels chemins parallèles il aurait pu y avoir vers des résultats similaires à l'original"¹¹⁷. Ici, le raisonnement anthropiste est directement critiqué.

iii. *La causalité historique*

Nous avons vu en quoi la biologie posait la causalité sous un angle historique (notamment en biologie évolutive). La notion d'histoire apparaît primordiale dans le cadre du raisonnement anthropiste : il s'agit d'évaluer les cheminements possibles menant à une certaine situation présente. Ceci tient à la particularité de la science cosmologique dans le domaine de la physique : cette science nous conte l'histoire de l'Univers, une histoire unique, non reproductible, que nous questionnons à la lumière de nos théories physiques. Entre lois et histoires, la cosmologie nous pousse à réfléchir plus profondément sur la notion de cause historique. Afin de cerner ce sujet, nous allons présenter deux ouvrages traitant de la Révolution Française de 1789, l'un¹¹⁸ de Philippe Sagnac, l'autre¹¹⁹ d'Ernest Labrousse. Ces deux auteurs présentent l'évènement sous deux aspects différents, l'un purement historique et événementiel, l'autre problématique et "scientifique". Ce qui va se dégager de cette comparaison, c'est le passage d'une vision unique de l'histoire à celle d'une pluralité des points de vue, de la volonté de totaliser les faits à celle de questionner un échantillon de sources spécifiques sous l'angle d'une problématique donnée, c'est-à-dire d'hypothèses postulées, enfin de la volonté de *raconter* à celle d'*expliquer*. Une transition qu'a dû vivre la cosmologie lors de l'avènement de la cosmologie moderne, et qui éclaire le Principe Anthropique sous un jour nouveau en le replaçant dans un nouveau contexte.

Nous avons chez les deux auteurs deux approches distinctes, qui font apparaître aussi deux écoles historiographiques différentes. Sagnac appartient à l'école méthodiste : le récit historique doit être complet, c'est-à-dire que les dossiers sont dépouillés pour être certain de n'omettre aucun fait, les interprétations des faits sont bannies, et l'analyse se limite à une chronologie. Roland Barthes parlera de "l'effet de réel" qu'apporte une telle documentation pour le lecteur : nous voilà plongés dans la Révolution, suivant le déroulement des faits bruts, constatant les hasards qui font que les événements ont lieu. Néanmoins, une telle manière d'écrire l'histoire ne peut qu'être utopique : jamais le dépouillement des archives ne pourra être absolument complet, ni l'interprétation absolument bannie. Aussi, François Simiand, économiste de formation et proche du fondateur de la sociologie Émile Durkheim, dénonce-t-il¹²⁰ les «idoles de la tribu des historiens» (l'expression est de Bacon) : l'«idole politique» concerne le fait que l'histoire est toujours vue

¹¹⁷ Chyba, C.F., & Hand, K.P., *op.cit.*, p.46. ("The drive to identify ways in which Earth is special carries dangers when analysts, with good *post hoc* knowledge, pick the exact element of a complicated system that, if somehow removed, would have especially negative consequences for life. But interpreting this result as evidence of the contingent or fragile nature of biology is misleading if we do not also ask in what other ways the total system would have to have been different for that single element to be missing now, and also what parallel paths there might have been to outcomes similar to the original one")

¹¹⁸ P. Sagnac, "La Révolution (1789-1792)", Tome 1 de la collection *Histoire de la France contemporaine : Depuis la Révolution jusqu'à la paix de 1919*, sous la direction d'E. Lavisse, Paris, Hachette, 1920

¹¹⁹ C.E. Labrousse, *La crise de l'économie française à la fin de l'Ancien Régime et au début de la Révolution*, Paris, PUF, 1943, pp. 39-41.

¹²⁰ François Simiand, "Méthode historique et science sociale", *Revue de synthèse historique*, 1903

sous l'angle politique (révolutions, guerres...), l' "idole individuelle" le fait que l'accent y est mis sur les acteurs importants (le Ministre de la Marine plutôt que la marine par exemple), ou encore l' "idole chronologique", le fait que l'histoire soit écrite comme un récit chronologique qui enchaîne les faits, sans jamais au final avoir de chance d'apercevoir leur origine dans la chaîne infinie des causalités.

A l'inverse, l'autre courant essaie de repenser le mode de description historique pour passer à une histoire qui pose des problèmes, entend sélectionner ses sources de manière précise et répondre à une problématique donnée. C'est selon cette ligne de pensée que naquit l'Ecole des Annales, ainsi nommée en référence à la revue "Annales d'histoire économique et sociale" fondée en 1929 par Marc Bloch et Lucien Febvre. Cette école se caractérise par une diversité des sources utilisées (qui ne sont plus essentiellement les sources politiques et institutionnelles des méthodistes), une histoire globale et non plus événementielle, c'est-à-dire que l'on se permet de se placer à différents niveaux (individuels, sociaux, économiques) afin de mieux comprendre les enjeux du problème et d'expliquer des tendances à ce que certains événements se produisent, ce qui passe par une histoire quantitative, c'est-à-dire que l'effort est mis à obtenir des données statistiques pour marquer des tendances de façon mathématique. Ce type d'histoire se rapproche donc de l'idée essentielle de Durkheim selon laquelle la science sociale, en tant que science, doit pouvoir tirer des lois générales : l'histoire sociale doit aussi trouver des explications rationnelles derrière l'apparente contingence du fait brut historique. Aussi, Ernest Labrousse, dans son texte sur la Révolution Française, cherche-t-il à repérer des tendances économiques qui auraient pu entraîner la Révolution. Pour cela, il utilisa comme source les relevés des prix des différents aliments dans l'ensemble du pays de 1787 à 1789, ce qui lui permit une étude quantitative. Les acteurs de son récit ne sont plus des individus, mais des catégories sociales (vigneron, chef d'entreprise, fermier, rentier...), définies par rapport à leur statut dans le système économique étudié. L'étude permet alors de noter l'augmentation importante du prix du blé au cours de ces deux années qui, dans une société agricole, entraîne l'augmentation générale des prix, notamment le prix du pain auquel les individus sont sensibles. Le but est ici de pointer une des causes possibles, mais non suffisantes, du mécontentement général du peuple qui a conduit à la Révolution. L'histoire-problème n'entend pas expliquer absolument (comme l'histoire méthodique entendait raconter absolument), elle entend poser des problèmes et y répondre de façon argumentée et rationnelle.

Nous avons ici deux visions différentes d'un même événement qui s'opposent : la première qui essaie d'évacuer toute finalité, en évitant toute interprétation des faits, et la deuxième qui cherche à traiter la finalité en proposant des explications générales à l'avènement d'un fait particulier. Le premier cas pourrait rappeler une pensée démocratéenne : le hasard des interactions a fait que l'événement "Révolution Française" a eu lieu, mais on ne peut tirer d'interprétation générale, de loi décrivant les événements de façon à *expliquer* que cet événement *devait effectivement arriver*. Dans le second cas, nous questionnons au contraire l'origine et la possibilité d'être de cet événement en étudiant méthodiquement le conditionnement général (ici économique, ou encore social) qui a pu être favorable à sa réalisation. Nous cherchons des lois mathématiques (ici une augmentation de la variable "prix du pain") qui décrivent la dynamique économique et influencent en retour les acteurs de ce monde économique. Et en remontant ces tendances jusqu'à leur origine, on remarque qu'il existe un fait, qui semble par essence contingent, qui explique le reste : dans ce cas, "la mauvaise récolte a

comme d'ordinaire décidé de tout", comme on pourrait dire dans le cas du Principe Anthropique "la masse du neutron a décidé de tout", ou de façon plus générale en cosmologie "tel valeur de paramètre devait mener à tel dynamique de l'Univers". Aussi, avec l'histoire-problème, l'historien utilise ici la téléologie comme *outil* de travail pour ses qualités explicatives, sans néanmoins présumer de la réelle finalité de l'évènement. Celui-ci est le fruit d'une association de tendances et de contingences, mais jamais le fruit d'une décision unique.

Comment tisser un lien entre ce qui vient d'être dit et la physique? Nous pouvons dire que, comme dans le cas de l'histoire-problème qui instaure un dialogue entre l'historien et le fait historique, celle-ci établit un véritable dialogue avec la nature, dans lequel on considère qu'elle nous apportera plus qu'une accumulation hasardeuse de faits incohérents : si la question est pertinente, si la mesure est judicieuse et bien réalisée, la réponse confirmera ou non l'hypothèse dissimulée derrière la question, et un modèle ou une théorie naîtra de cet entretien. Dans le cas du Principe Anthropique, la présence d'observateur se voit posée en fin, fin d'un parcours historique qui a mené à sa réalisation. Cette fin est posée de manière *a posteriori*, afin de procéder à une étude des conditions la rendant possible : c'est là l'essence du Principe Anthropique (qui se ramène comme nous l'avons déjà remarqué à l'expression détournée d'une *mesure physique*) que de déterminer les paramètres essentiels régissant les tendances globales permettant l'existence d'observateurs. Ce raisonnement fait apparaître des faits premiers remarquables : le fait que ces paramètres exhibés possèdent des propriétés des plus particulières. La tendance naturelle pousse alors à poser cette fin comme nécessaire. Ce que nous apprend le raisonnement historique sur ce point, c'est qu'il faut se méfier du renversement des causalités, où comme le disait l'historien des sciences Alexandre Koyré "l'effet est cause de la cause"¹²¹. Car c'est bien là ce que nous réalisons avec le Principe Anthropique : nous utilisons des faits présents pour contraindre les probabilités *a priori* des paramètres fondamentaux de l'Univers, c'est-à-dire que nous désignons ceux-ci comme précurseurs en y insufflant une certaine causalité, et surtout un embryon de téléologie, de manière *a posteriori*.

La question qui ressort au final de cette analyse est la suivante : en quoi les lois de la physique sont-elles assez différentes des "lois" historiques dégagées des analyses socio-économiques de l'histoire-problème pour prétendre une différence ontologique et méthodologique entre ces deux disciplines? Cette question pointait déjà dans les paragraphes précédents lorsque nous traitions de biologie évolutive, la voilà qui s'expose pleinement dans le cadre du raisonnement historique que nous retrouvons en cosmologie *via* le Principe Anthropique. Nous reviendrons amplement sur cette notion profonde de la nature des lois dans la deuxième partie de cette section. Attardons-nous avant cela sur les notions de hasard, de contingence, et de probabilité, qui sont partie intégrante des interprétations anthropistes et du raisonnement historique.

¹²¹ Koyré, A., *Du monde clos à l'univers infini*, Gallimard 1973, p.18.

c. Le hasard et la contingence

Chez les anthropistes, le hasard est souvent invoqué comme recours contre l'idée de l'*intelligent Design* : plutôt que d'avoir un Univers où les paramètres auraient été "choisis", nous serions nés au hasard d'un îlot favorable du multivers. Quelle consistance donner à ce hasard? Notamment, en quoi se distingue-t-il de la contingence?

Contrairement à ce que l'on pourrait penser au premier abord, la notion de hasard est très restreinte : il y a des "lois" du hasard, car il y a une détermination possible des résultats du hasard. Étymologiquement, le mot hasard vient de l'arabe *az-zahr* renvoyant aux notions de "dé", "coup de dés", "jeu de dés" (de même que le terme latin *alea*, d'où dérive l'adjectif "aléatoire"). Cette notion de jeu de dé renvoie immédiatement au pendant du hasard : le calcul de probabilité, et donc bien à une totalisation des réalisations possibles. C'est déjà la notion que l'on retrouve chez les atomistes grecs : pour Leucippe (fondateur avec Démocrite de l'atomisme), "Rien dans la nature ne vient par soi-même, mais tout est le fruit d'une loi et de la nécessité"¹²². Cette loi, cette nécessité, c'est celle de la chute verticale des atomes. Le hasard introduit par le *clinamen*, cette déviation qui permet le regroupement et l'organisation des atomes, mène seulement à un grand choix de possibles parmi la variété préexistante (c'est encore l'idée d'un "dé", ici celui dont les "faces" seraient les agencements possibles des atomes). Avec l'introduction de la causalité "moderne" chez les physiciens classiques, nous allons garder cette idée de détermination cachée derrière le hasard. Aussi, le mathématicien du XIX^{ème} siècle Antoine-Augustin Cournot définit le hasard comme un "entrecroisement de séries causales indépendantes" : des lois déterministes régissent les enchaînements des séries causales, et leur rencontre fortuite mène à un événement que nous n'avions pas forcément prévu, du fait de notre connaissance incomplète du monde qui nous entoure. Pour le physicien du XVIII^{ème} siècle Pierre-Simon Laplace, représentant de la physique classique déterministe, le hasard n'est que le reflet de notre méconnaissance des raisons profondes et premières des événements. Si notre connaissance était complète, nous pourrions connaître entièrement le passé et le futur, nous deviendrions un "démon de Laplace". Avec les progrès en théorie du chaos, où le changement infinitésimal des conditions initiales mène à des changements radicaux dans l'état final, le hasard va devenir une notion plus précise. Pour le mathématicien du XIX^{ème} siècle Henri Poincaré, fondateur de la théorie du chaos avec son travail sur le problème à trois corps, ce qui caractérise le hasard, c'est la disproportion entre la cause et l'effet. On pense notamment au fameux "effet papillon", selon lequel, étant donné que la météorologie est basée sur les théories du chaos, le battement d'aile d'un papillon (c'est-à-dire une perturbation infinitésimale des conditions météorologiques en un certain endroit de la planète) peut causer un ouragan aux antipodes, effet disproportionné devant la cause qui a participé à son avènement. Un autre exemple est celui d'un cône que l'on pose sur sa pointe : il tombera "au hasard" dans une certaine direction, mais ce hasard est dû à la complexité des causes qui entrent en jeu (le choc des molécules d'air sur le cône à cet instant précis, l'imperfection de la pointe du cône qui favorise un côté, etc.). Reste enfin la Mécanique Quantique, qui introduit dans ses postulats même la notion de hasard, laissant

¹²² cité par Dauchin A., "Hasard et biologie moléculaire", in *Le hasard aujourd'hui*, éd. Du Seuil, 1991 (entretiens diffusés sur France Culture dans le cadre des "Perspectives scientifiques"), p 112.

penser qu'il serait inhérent à l'Univers (quoique cette interprétation soit encore très discutée). Ce hasard mène en tout cas à l'élaboration de probabilités, comme nous l'avons déjà vu en I.1.a.ii, dont l'évolution est déterminée par les équations de la théorie.

La notion de contingence se différencie du hasard en ce qu'elle n'implique pas de notion de calcul de probabilité. Le terme de contingence renvoie au latin *contingere*, qui signifie "arriver". Comme le signale le philosophe contemporain Quentin Meillassoux, alors que le terme de hasard ramène à la notion de totalisation, de clôture des possibles, le terme de contingence réfère plutôt à ce qui arrive "enfin", "quelque chose *d'autre*, qui, échappant à tous les possibles déjà répertoriés, met fin à la vanité d'un jeu où tout, y compris l'improbable, est prévisible"¹²³. De ce point de vue, "le hasard, c'est la contingence mise en calcul"¹²⁴. Cette notion de contingence est notamment reprise en biologie¹²⁵ : plutôt que de parler du hasard d'une "soupe prébiotique" où se dérouleraient un grand nombre de réactions chimiques, on parlera plutôt de la contingence de la combinatoire des premières molécules qui, une fois ayant réalisé une combinaison possible, seront "piégées" dans ce premier choix et formeront le socle d'une nouvelle réalisation de possibles. La contingence, c'est le fait brut qui arrive en détruisant et reconstruisant le hasard. On parlera aussi de contingence pour la rupture de symétrie qui conduisit certaines molécules du vivant à être d'un certain type (par exemple lévogyre, c'est-à-dire qu'elles font tourner la lumière polarisée vers la gauche) plutôt qu'un autre (dextrogyre, la lumière tournant cette fois vers la droite), alors qu'à l'équilibre (lorsque l'on produit ces molécules par une certaine réaction chimique) les deux types sont représentés au même titre : ce "choix" originel est lié à une fluctuation locale, dans le temps et dans l'espace, qui a entraîné la rupture d'équilibre cloisonnant les possibles. Le vivant apporte même une autre notion proche de celle de contingence : c'est la notion d'opportunisme. Ainsi, une molécule pourra être brutalement détournée de sa fonction pour en prendre une autre, de même qu'un livre peut servir de presse-papier. Ou encore, plusieurs protéines différentes peuvent servir à réaliser une même fonction, comme c'est le cas pour la structure vitreuse du cristallin des oiseaux, des amphibiens, des souris et des humains. Aussi, ces notions de contingence et d'opportunisme amènent une véritable création de possibles que ne contient pas la notion de hasard, du moins pas dans son acception du "jeu de dés".

d. La notion de probabilité : de l'improbable à l'incalculable

Sous-jacente à la distinction entre hasard et contingence, il y a donc la notion de probabilité. Cette notion revient souvent dans le cas du Principe Anthropique : notre présence est "improbable" dans l'infinité des cas possibles. La théorie des multivers invite quant à elle à former des ensembles de cas possibles pour rendre cette (im)probabilité calculable. Ainsi, l'on entend échapper au finalisme, en introduisant l'infini actuel des possibles comme avaient pu le faire les atomistes. On retrouve ce type de pensée chez le philosophe Émile

¹²³ Meillassoux, Q., *Après la finitude, essai sur la nécessité de la contingence*, préface d'Alain Badiou, L'ordre philosophique, Seuil, 2006, p.149.

¹²⁴ Meillassoux, Q., "Nécessité et contingence, le problème de Hume", cours à l'École Normale Supérieure de Paris, 2007-2008.

¹²⁵ Dauchin, A., *op.cit.*

Boutroux par exemple : “On ne peut dire d’aucune fin qu’elle doive nécessairement se réaliser. Car nul évènement n’est, à lui seul, tout le possible. Il y a, au contraire, une infinité de possibles autres que l’évènement que l’on considère. Les chances de réalisation de cet évènement sont donc à l’égard des chances de réalisation d’autre chose comme un est à l’infini ; et ainsi la réalisation d’une fin donnée quelconque, fût-ce l’uniformité de succession des phénomènes, est, en soi, infiniment peu probable, bien loin d’être nécessaire »¹²⁶. Nous allons à présent voir les limites de cette “logique probabilisante”.

i. La théorie mathématique des probabilités

La théorie des probabilités ne naquit que tardivement en mathématiques. Sans doute les Grecs voyaient-ils dans le hasard la marque des Dieux, qui réglaient le Destin au gré de leur volonté, et ils n’eurent pas l’idée de le quantifier. D’abord utilisées pour régler des questions d’assurances maritimes, les probabilités se virent réellement introduites en mathématiques lors d’une correspondance entre Pierre de Fermat et Blaise Pascal en 1654. Le chevalier de Méré, un ami à ce-dernier, lui avait posé le problème suivant : deux amis sont engagés dans une partie de cartes, un jeu de hasard, mais l’un des deux doit partir avant la fin de la partie. On peut voir les cartes sur la table, mais la partie n’est pas allée jusqu’au bout. Cependant, les joueurs ont misé et constitué un pot. Comment se répartir ce pot ? Si l’on ne faisait que rendre l’argent misé, on ne rendrait pas justice aux possibilités de gain qu’offraient chaque main. Pascal introduisit alors le concept de probabilité en calculant, à partir des mains des deux partenaires de jeu, la probabilité qu’ils avaient de réaliser un certain jeu connaissant les cartes qui restaient à jouer. Suite à ces réflexions, Christiaan Huygens publiera en 1657 un premier ouvrage important sur la théorie des probabilités, *De ratiociniis in ludo aleae* (*Raisonnements sur les jeux de dés*). La théorie moderne des probabilités naîtra quant à elle avec les notions de mesure et d’ensembles mesurables introduites par le mathématicien Émile Borel en 1897. Mais il faudra attendre le mathématicien russe du XX^{ème} siècle Andreï Kolmogorov pour que ce qui n’était qu’un ensemble de méthodes et d’exemples devienne en 1933 une véritable théorie axiomatisée¹²⁷. Il apportera aussi à la notion de hasard une vision originale. En théorie de l’information, tout message peut être compressé (c’est-à-dire résumé) en exprimant les redondances sous une forme simplifiée. Par exemple, au lieu d’écrire “1111...” cent fois à la suite, j’écris une boucle qui, de 1 à 100, écris le chiffre 1. Le résultat est le même, mais la manière de le programmer est plus succincte (nous parlions en section II de “contenu en information algorithmique”). Le hasard pur sera alors ce qui, pour être décrit, ne peut être résumé. Un chiffre véritablement aléatoire devra être écrit en entier, et le programme ne pourra être compressé à l’aide de boucles, aucune régularité ne pouvant être décelée.

Néanmoins, ce qui peut être calculé avec une théorie mathématique des probabilités ne peut rendre compte de tout ce que le hasard recouvre. Ecrire des probabilités, c’est avant tout *nombrer* des cas possibles, et donc *prédire* un ensemble de cas possibles. Se restreindre au possible et au prévisible donne certainement une théorie précise et rigoureuse, mais qui pêchera dans son application au monde réel, c’est ce que nous avons

¹²⁶ Boutroux, Émile, *De la contingence des lois de la nature*, [1874], 2^{nde} éd., Paris, 1895., Ch. I.

¹²⁷ Kolmogorov, A., *Grundbegriffe der Wahrscheinlichkeitsrechnung* (*Fondements de la théorie des probabilités*), 1933.

vu précédemment en différenciant les notions de hasard et de contingence. Le mathématicien Ivar Ekeland évoque notamment un exemple mythologique montrant comment la contingence peut être bien plus “grande” que le hasard calculé par les probabilités¹²⁸. Cet exemple se trouve dans une saga¹²⁹ du roi norvégien Olaf Haraldsson, dit Saint Olaf. Le roi de Norvège et le roi de Suède se disputaient un petit village. Ne voulant pas se battre pour cette bourgade de peu d’importance, ils décidèrent de la tirer au sort avec un dé. Le roi de Suède lança le premier dé et tira un 6. Le roi de Norvège lança le dé à son tour et tira aussi un 6. Il fallait recommencer. Le roi de Suède lança un autre dé, et tira à nouveau un 6. Assuré de sa victoire, il dit au roi de Norvège : “Tu vois bien. Ce n’est pas la peine de continuer. Tu n’en tireras pas un autre”. Le roi de Norvège, ne voulant s’avouer vaincu, répondit : “Il y a encore un 6 dans les dés, et Dieu mon Seigneur est bien capable de le faire sortir encore une fois”. Il lança alors le dé, mais l’excitation lui fit donner à ce jet une impulsion si forte qu’il le cassa, dévoilant un 1 et un 6, faisant au total un 7. Aussi, la morale de cette histoire est que la totalisation des cas possibles qui permet le calcul des probabilités liées au hasard n’est jamais une édification réaliste.

ii. *Les probabilités en physique*

Pour ce qui est des sciences physiques, c’est en physique statistique que l’on trouve l’utilisation la plus avancée de la théorie des probabilités. Cette discipline, initiée par le physicien autrichien du XIX^{ème} siècle Ludwig Boltzmann, entend décrire la thermodynamique (qui consiste essentiellement à cette époque en l’étude du comportement des machines thermiques utilisées dans l’industrie, notamment de la dynamique des gaz soumis à certaines conditions de température et de pression) à partir de la cinétique d’entités microscopiques indivisibles qui les composeraient (les atomes, qui à cette époque restaient du domaine de l’hypothèse). Cette vision fut formalisée par l’introduction d’une quantité liant l’évolution macroscopique du système considéré aux états microscopiques accessibles à ce système : c’est l’entropie. Celle-ci augmente avec le nombre d’états disponibles, et pour un système isolé, elle est maximale lorsque l’équilibre (pour lequel peuvent alors se définir une température, une pression, etc.) est atteint : c’est le Principe Entropique (ou Seconde Loi de la Thermodynamique, la Première étant la conservation de l’énergie totale du système). Boltzmann mit notamment au point la formule célèbre qu’il fit graver sur sa tombe : $S = k \ln(W)$, où S est l’entropie, k la constante qui porta son nom, et W le nombre d’états microscopiques disponibles pour le système étudié. L’entropie marque l’irréversibilité des phénomènes, en ce qu’elle indique un sens du temps qui ne peut être remonté (une tasse se brisant par terre a une probabilité infiniment faible de remonter en l’air et de se reconstituer entièrement). Le fait que tous les états microscopiques possibles d’un état macroscopique donné interviennent dans le calcul de l’entropie était pour Boltzmann le signe que l’on devait leur accorder, du fait de notre connaissance incomplète de l’état microscopique du système, une probabilité d’être effectivement réalisé. C’est d’ailleurs le postulat fondamental de la mécanique statistique moderne : pour un système isolé à l’équilibre, tous les états microscopiques accessibles sont également probables. Aussi, à mesure que l’on se rapproche de l’équilibre et de l’équiprobabilité des états microscopiques, notre

¹²⁸ Ekeland, I., “La mathématisation du hasard”, in *Le hasard aujourd’hui, op.cit.*

¹²⁹ Les sagas sont des récits historiques écrits en Islande vers le XII^{ème} siècle.

connaissance sur l'état microscopique diminue : l'entropie est une marque de l'ignorance que nous avons de l'état microscopique du système. Si des probabilités interviennent, c'est parce que tous les états accessibles sont effectivement parcourus par le système au cours du temps (c'est ce qu'on appelle le Principe ergodique), mais à une cadence si rapide que notre observation ne nous fait observer que des moyennes : comme le dit le physicien Bernard Diu, "l'entropie mesure le manque d'information qui est dû au fait que nous ne sommes pas capables de voir ces sauts du système entre les différents états microscopiques"¹³⁰. Aussi, la seule manière de justifier le second Principe est en invoquant l'imprécision de la mesure par l'observateur : pour Barrow et Tipler, "personne n'a jamais été capable de déduire rigoureusement la Seconde Loi à partir de mécanique classique ou quantique sans utiliser d'arguments anthropiques ou d'hypothèses non physiques. C'est seulement en présumant qu'un observateur mesure de façon grossière le facteur H [égal à l'opposé de l'entropie] que l'on peut montrer la décroissance de H avec le temps. Le H exact ne peut pas changer avec le temps, et ceci est vrai quelque soient les conditions initiales"¹³¹. Encore une fois, de tels arguments peuvent mener à l'idée d'un Principe Anthropique Participatif, où l'observateur participe à créer le monde qu'il observe effectivement.

Nous l'avons déjà rappelé à plusieurs reprises, les probabilités interviennent aussi de façon constitutive en Mécanique Quantique, et leur interprétation est très discutée. Nous ne nous étendrons pas sur ce sujet complexe, mais nous tenions à préciser les difficultés conceptuelles qu'ont pu apporter une telle présence du hasard dans une théorie aussi fondamentale que la théorie quantique, faisant notamment dire à Albert Einstein que "Dieu ne joue pas aux dés". Néanmoins, la vision moderne de la théorie quantique des champs intéresse surtout par la théorie du "vide quantique" qui en découle : un vide "plein" du bouillonnement incessant créant des paires particules-antiparticules dans la limite de l'incertitude fondamentale d'Heisenberg, un vide qui semble être un véritable infini/indéfini comme pouvait l'être l'*apeiron*, une puissance d'émergence d'Univers dans le multivers dont il serait le fondement, une fondation dans l'aléatoire "véritable" de tout ce qui est.

iii. *Les probabilités en biologie*

En génétique, la théorie probabiliste de l'hérédité développée par le botaniste Gregor Mendel au XIX^{ème} siècle, qui assigne des probabilités aux différents mélanges génétiques possibles dans une descendance (où chaque moitié des gènes provient d'un individu différent), a permis de poser les bases de la théorie moderne de l'hérédité. Néanmoins, cette théorie a été revue avec les découvertes ultérieures des phénomènes complexes liés aux interactions chromosomiques, qui rendent la migration de gènes possible au sein des chromosomes, et donc créent une incertitude sur les probabilités effectives mesurées dans la ligne descendante : encore une fois la contingence nuit au hasard.

¹³⁰ Diu, B., "Hasard et physique statistique", in *Le hasard aujourd'hui*, *op.cit.*

¹³¹ Barrow & Tipler, *op.cit.*, p. 180. ("no one has ever been able to deduce the Second Law rigorously from either classical or quantum mechanics without using anthropic arguments or unphysical assumptions. [...] Only by assuming that the observer only roughly measures the factor H can it be shown that H decreases with time. The *exact* H cannot change with time, and this is true whatever the initial conditions.")

Pour ce qui est de la biologie évolutive, nous l'avons déjà vu, l'idée d'introduire des probabilités est très discutée, en ce que l'émergence imprévisible de nouveauté y rompt continuellement les possibles pour engager une nouvelle voie évolutive. De plus, le hasard de la Mécanique Quantique y fait irruption : les mutations génétiques sont des phénomènes moléculaires directement dus à des effets quantiques.

Dans le cadre de la biochimie, les choses sont un peu différentes, car nous sommes à un niveau où les phénomènes s'expliquent apparemment bien par les théories classiques de la chimie et de la physique. Une tentative de calculer la probabilité d'émergence du vivant a été réalisée par le biologiste Robert Shapiro. Il calcule notamment qu'il a pu y avoir au cours de l'histoire de la Terre 2.5×10^{51} possibilités que la vie émerge par hasard¹³². Pour ce qui est de réussir un tel essai, il tente de calculer la probabilité d'obtenir la bactérie E.Coli à partir d'une séquence d'acides aminés, par le pur hasard des rencontres moléculaires. Cela implique un réseau d'enzymes lui permettant notamment de se dupliquer, et la probabilité tombe à un nombre infinitésimal (de l'ordre de $1/10^{40\,000}$). A partir de là, on tire forcément comme conséquence que nous sommes chanceux d'avoir émergé. Les théories du théoricien de la biologie Stuart Kauffman ont révolutionné une telle approche de la biochimie. Ayant participé à formaliser la théorie moderne de l'auto-organisation, c'est-à-dire de l'émergence de processus stables bien que hors de l'équilibre qui s'organisent dans leur environnement sans action d'un agent extérieur. Pour lui, il faut voir l'émergence de la vie comme l'accomplissement d'un réseau de réactions qui a élaboré une "clôture catalytique collective" (*collective catalytic closure*), c'est-à-dire une chaîne de réactions qui s'entretiennent entre elles de façon à mettre à jour un "tout" qui transcende les entités réagissant dans ces réactions. Une telle vision s'oppose à celle décrite par Penrose en ce qu'elle est "holiste", c'est-à-dire qu'elle pense le tout comme l'achèvement d'une autonomie supérieure transcendant les parties. La physique hors-équilibre qui permet de penser ces phénomènes n'a été véritablement développée que depuis les quelques dernières décennies sous le nom de "physique des systèmes complexes adaptatifs", souvent regroupé sous le seul terme "complexité". La recherche de Stuart Kauffman de lois de la complexité, notamment dans son ouvrage majeur *The Origins of Order* publié en 1993, l'a mené à reconsidérer le calcul de probabilités tel qu'il a pu être effectué par Roger Penrose : s'il y a des lois de l'auto-organisation, alors nous ne sommes pas improbables mais bien "chez nous dans l'univers" (*at home in the universe*, qui est aussi le titre de l'ouvrage où il vulgarisa les résultats présentés plus en détail dans *The Origins of Order*). Nous reviendrons sur cette question dans la partie suivante, car nous pointons là une vision des lois qui s'échappe de la vision classique entretenue par la physique depuis Galilée. La frontière de la physique et de la biologie se brouille aujourd'hui au profit d'une mise en commun de deux visions différentes, l'une où la loi détermine tout, l'autre où l'histoire joue un rôle majeur. Et c'est peut-être un tel espace qui permettrait aux scientifiques de mieux cerner le Principe Anthropique, qui est entre lois et histoire : un espace que nous avons rencontré avec l'histoire-problème de l'Ecole des Annales, et qui pourrait bien représenter l'idéal d'un retour au dialogue positif et prolifique de la physique avec la nature, dialogue multiple et jamais dogmatique, qui rendrait immédiatement caduque toute réelle prétention à déduire de considérations anthropistes une finalité retrouvée et nécessaire à rendre compte du monde dans sa toute spécificité.

¹³² Shapiro, R., *Origins, a Skeptic's Guide to the Creation of Life on Earth*, Simon & Schuster, 1986

2. Considérations philosophiques

Nous venons de voir, au travers des diverses grandes thématiques de la philosophie des sciences que met à jour le Principe Anthropique, comment l'idée même d'un raisonnement anthropiste était dépendante d'une vision classique de la physique, la vision d'une science sans histoire où "tout est donné" dans la structure fondamentale des lois (même si celles-ci ont émergé "au hasard" d'un multivers les contenant toutes), et où la notion de probabilité tend à clôturer tous les possibles pour mieux les prédire. Avec la biologie, cette vision change. La causalité ne se pense plus sans créativité. La prévisibilité est affaire de cours terme. À la frontière entre physique et biologie, les notions se brouillent, et l'image du monde inerte du physicien se mue en celle d'un monde actif, qui s'organise et s'extirpe de l'équilibre. Alors que la première vision nous donnait à penser qu'il devait y avoir, embusquée dans les lois fondamentales, une finalité opérante que le Principe Anthropique pourrait démasquer, ou si ce n'est une finalité, au moins une nécessité à ce que les choses aient été *posées* telles qu'elles sont (fut-ce par l'aléatoire du monde quantique), la deuxième vision apporte des idées d'imprévisibilité, de créativité, et d'émergence qui, opérant dans le vivant, ont bâti une finalité dans une matière qui n'en avait point. Voici donc ce qui va nous intéresser en premier lieu. Le Principe Anthropique questionne la finalité, car il nous pose indubitablement comme fin, même s'il est possible d'interpréter cette fin comme atteinte par hasard. Mais en questionnant le substrat fondamental de notre monde, il pose le problème des lois : qu'est-ce qu'une loi fondamentale? Cette interrogation nous plonge au milieu d'un conflit ardent entre les partisans d'une réduction totale de tout ce qui est matériel à des lois physiques fondamentales qu'une Théorie du Tout peut expliquer, et les partisans d'une vision où des phénomènes nouveaux et des lois nouvelles peuvent émerger de façon imprévisible à partir des interactions entre leurs éléments de base, de manière à bâtir *au fur et à mesure* un monde stratifié où l'on ne peut simplement réduire chaque niveau à un autre. Chez les émergentistes, l'idée même d'un Principe Anthropique est la défaite d'une physique réductionniste en perte de vitesse, la recherche métaphysique d'un substrat fondamental qui nous échappe, lors même que l'universalité de l'émergence semble transcender les échelles. Nous nous situons ici dans la continuité de ce que nous exprimions déjà dans la première partie avec les théories de Stuart Kauffman. Pour terminer notre analyse philosophique du Principe Anthropique, nous questionnerons le fait même d'établir un ensemble de possibles, qui est à la base du raisonnement anthropiste. Nous verrons comment cette pratique est liée à la notion de loi, c'est-à-dire en dernier lieu à l'idée d'une *nécessité physique* qui soit plus contraignante que la simple *nécessité logique*. Si, comme le fait Quentin Meillassoux, nous postulons qu'il n'y a qu'une nécessité logique régissant l'Univers, nous édifions une nouvelle vision d'un temps, celle d'un devenir qui soit si créatif qu'il puise l'actuel hors des possibles que les lois mettent dans notre monde. L'idée mathématique du transfini, qui introduit la notion de non-totalisation, nous permet alors de donner une structure cosmologique qui rende compte de ce postulat, et met à mal le Principe Anthropique dans son fondement même.

a. La notion de finalité

L'idée de finalité a une longue histoire, que ce soit en philosophie ou dans les sciences. Cette idée culmine notamment avec l'idée de Dessein Intelligent (*Intelligent Design*) qui est au milieu d'un débat ardent en biologie évolutive depuis plusieurs décennies. Nous retracerons dans un premier temps l'origine de la pensée en finaliste en philosophie, et son impact en physique classique. Dans notre cas, plus qu'une simple finalité, ce qu'il convient de penser proprement, c'est l'écoulement du temps, un temps où se déroule l'histoire qui mène à l'homme : ce fut là l'affaire des philosophies du devenir, ou encore philosophies du progrès, que nous étudierons au travers de trois auteurs, Herbert Spencer, Henri Bergson et Alfred North Whitehead. La science moderne a investi cette philosophie, au travers de la théorie des systèmes avec l'avènement de la cybernétique d'abord, puis avec le paradigme naissant de la complexité. De nouvelles notions, comme l'auto-organisation, vont apparaître qui apporteront un regard neuf sur l'émergence de finalité dans ce qui se *fait*, et non plus une finalité posée dans ce qui *est*.

i. Dessein et téléologie

– Le dessein en philosophie

○ Des causes finales à la raison suffisante

Avant de dresser le panorama de la notion de dessein en philosophie, il convient de différencier deux notions : la téléologie et l'eutaxiologie¹³³. Dans le premier cas, on affirme que l'ordre est réalisé de façon à atteindre un *but*, tandis que dans le second cas, on affirme plus modestement que l'ordre doit avoir une *cause planifiée*. La notion de dessein que nous allons introduire ici se rapprochera plus d'une vision eutaxiologique que téléologique.

Nous l'avons vu, l'idée de finalité est déjà présente chez Aristote qui développa le concept de cause finale en s'inspirant de la biologie. Cette finalité est pleinement intégrée dans son système philosophique, notamment dans sa physique, ce qui rendit difficile la révolution de pensée qui permit de constituer la science moderne à l'époque de Galilée. Reprise au XIII^{ème} siècle par le théologien St Thomas d'Aquin, cette idée de finalité constitue la base des réflexions sur l'argument du Dessein selon lequel l'apparente finalité qui nous entoure est une preuve de l'existence divine. Pour Thomas d'Aquin, les atomistes grecs ont tort lorsqu'ils refusent l'unicité du monde, car ils ne pensent pas en termes finaux : "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 », et "la raison pour laquelle le monde est unique, c'est que toutes choses doivent être ordonnées à un but unique, selon un ordre unique" ; "l'unicité du monde découle de sa finalité".¹³⁴ C'est ce type d'argument auquel s'opposent les physiciens, en introduisant notamment des théories du multivers.

¹³³ Distinction faite par Hicks, L. E., *A Critique of Design Arguments*. Scribner's, New York, 1883, cité dans Barrow & Tipler, *op.cit*.

¹³⁴ Thomas d'Aquin, *Somme théologique*, I,q 47,a. 3, traduit par A.M. Roguet, Paris, Cerf, 1984, p. 492

En philosophie classique, c'est chez le philosophe et mathématicien allemand Gottfried Wilhelm von Leibniz que nous trouvons la pensée la plus aboutie de la finalité. Celle-ci repose sur un principe majeur de sa philosophie, le Principe de Raison Suffisante, qui s'énonce ainsi : "aucun fait ne saurait se trouver vrai ou existant, aucune Énonciation véritable, sans qu'il y ait une raison suffisante pourquoi il en soit ainsi et non pas autrement"¹³⁵. En résumé : *rien n'est sans raison (nihil est sine ratione)*. Avec ce principe, Leibniz pointe la particularité de notre monde par rapport à toute autre réalisation possible, raisonnement qui est à la base du raisonnement anthropiste. L'implication d'un tel Principe est que, tout ayant une cause extérieure à lui-même d'être tel qu'il est, il faudra, pour éviter une régression à l'infini des causes, que se trouve *hors de l'univers* une Cause Finale transcendante. Cette cause première doit être cause d'elle-même (*causa sui*) pour ne pas se voir infliger le raisonnement porté aux éléments qui composent notre Univers : nous voilà en présence du Dieu leibnizien, dont l'entendement infini discerne les mondes possibles et qui fulgure avec une infinie bonté le meilleur des mondes possibles. Notons par ailleurs que le mot "cause" est ici entendu au sens de "raison" : on parle de cause *ontologique* (concernant l'existence de ce qui est) à différencier à la cause *chronologique* (qui concerne la succession des événements). Cette distinction est très intéressante, car elle laisse transparaître une rupture que nous verrons plus tard, celle entre une pensée réductionniste où l'on peut remonter de cause ontologique en cause ontologique à une théorie des particules qui explique tout et, on l'espère, s'explique elle-même, et une pensée émergentiste où la part de l'histoire oblige la prise en compte des causes chronologiques comme élément essentiel de la nature.

○ *La nécessité face au dessein*

L'argument que nous venons de rapporter, utilisant le Principe de Raison Suffisante pour en déduire une Finalité transcendante à l'Univers, est appelé "Argument Cosmologique". Il est possible de critiquer la pétition de principe sur laquelle se fonde tout l'argument : celle selon laquelle les choses de l'Univers sont contingentes. Cette prémisse, qui implique une notion de choix parmi les possibles, et donc mène à penser en termes finaux, peut être discutée si nous pensons qu'il y a une nécessité cachée à ce que les choses soient telles qu'elles sont. Par exemple, Hume, dans ses *Dialogues sur la religion naturelle*, remarque que la notion de contingence peut être une illusion due à notre ignorance : "Il se peut qu'un observateur superficiel admire une si merveilleuse régularité [qu'une propriété complexe des nombres entiers] comme étant l'effet du hasard ou du dessein ; mais un algébriste averti conclut immédiatement qu'elle est l'œuvre de la nécessité, et il démontre qu'elle doit toujours suivre de la nature de ces nombres. N'est-il point probable, je [Philon] vous prie, que toute l'économie de l'univers soit régie par une nécessité semblable, bien qu'aucune algèbre humaine ne fournisse la clé propre à résoudre la difficulté ?"¹³⁶. Certains cosmologistes modernes ont repris cette idée qu'il ne devait y avoir qu'un seul Univers logiquement possible. Par exemple, les physiciens James Hartle et Stephen Hawking ont écrit une expression de la fonction d'onde de l'univers, qui est pour l'essentiel une liste de toutes les histoires possibles ayant mené l'univers à l'état dans lequel il est au temps

¹³⁵ Leibniz, G.W., *Monadologie* (1703), éd. Michel Fichant, Gallimard, 2004, p 227.

¹³⁶ Hume, D., *Dialogues sur la religion naturelle* (1779), éd. Michel Malherbe, Vrin, 1997, p 170.

présent, état incluant toutes les particules et tous leurs arrangements possibles¹³⁷. Dans l'interprétation des Mondes parallèles que nous avons exposée en section II, toutes ces possibilités ont une existence actuelle. Dans cette vision, tous les possibles consistant (c'est-à-dire non contradictoires) existent "actuellement" (au sens de l'anglais *actually*).

Avec cette idée de nécessité, nous sommes cette fois plus proche du raisonnement téléologique que du raisonnement eutaxiologique. Dans le cadre du Principe Anthropique, cette nécessité peut être vue comme la réalisation selon des méta-lois nécessaires (fut-ce des lois du hasard) d'un multivers régissant les devenir possibles des univers. Aussi, comme le disent bien les auteurs Barrow et Tipler : "Le Principe Anthropique n'est pas l'idée nouvelle et révolutionnaire telle que la considèrent beaucoup de scientifiques. [...] Les Principes Anthropiques ne sont qu'une manifestation moderne de la tendance traditionnelle à mettre en lumière des arguments de dessein dans des modèles mathématiques de la Nature qui ont fait leur preuve."¹³⁸

○ *Entre contingence et nécessité : le principe esthétique*

Nous pouvons trouver une position intermédiaire entre les deux précédentes : avec assez de prescription divine pour guider l'actuel, et assez d'autonomie des étants pour explorer les possibles. Nous trouvons par exemple chez Émile Boutroux un Principe Esthétique comme fondement de sa doctrine de la contingence des lois de la nature : " Dans le monde physiologique, la vie ne se réduit pas à un ensemble de fonctions observables. C'est, au fond, une puissance interne, tendant à réaliser, au sein de chaque espèce, les formes, non seulement les plus utiles aux êtres eux-mêmes, mais encore les plus *belles*, que cette espèce comporte. Dans le monde physique, les propriétés sont de véritables puissances de changement d'état, de combinaisons et de décomposition, tendant à réaliser les formes, non seulement les plus stables, mais encore les plus *belles* que puisse admettre la nature des corps. Dans le monde mécanique, la force n'est pas seulement l'expression de relations observables entre les mouvements : c'est encore une puissance effective, tendant à réaliser le *beau* en le traduisant dans la langue de l'étendue, de la figure, de la symétrie et du mouvement. [...] Selon cette doctrine, les principes suprêmes des choses seraient encore des lois, mais des lois morales et esthétiques, expressions plus ou moins immédiates de la perfection divine, préexistant aux phénomènes et supposant des agents doués de spontanéité : ce serait le bien pratique, ou idéal qui mérite d'être réalisé, qui cependant peut ne pas l'être, et qui ne se réalise en effet que lorsqu'il est accompli spontanément" ¹³⁹. Il y a donc ici une fin qui guide les êtres : celle du triomphe du bien et du beau. C'est un sens *moral* qui s'accorde avec la spontanéité de la créativité mais influe sur la pérennité de ce qui est en favorisant le beau. On retrouve en fait une notion qui a traversé les âges et les pensées philosophiques : celle d'harmonie. Chez Leibniz, elle est donnée comme *préétablie* dans l'entendement divin : Dieu peut concevoir le devenir des *monades*, ces entités élémentaires indivisibles qui suivent leur loi propre insufflée par le créateur et

¹³⁷ Hartle, J., & Hawking, S.W., *Phys. Rev. D* **28**, 2960, 1983

¹³⁸ Barrow & Tipler, *op.cit.*, pp. 108-9 ("The Anthropic Principle is not the new and revolutionary idea that many scientists see it to be. [...] The Anthropic Principles are but a modern manifestation of the traditional tendency to frame design arguments around successful mathematical models of Nature.)

¹³⁹ Boutroux, É., *op.cit.*, pp. 167-8. C'est nous qui mettons en italique.

n'interagissent pas avec l'extérieur, et choisir l'agencement le plus harmonieux, comme un ingénieur choisirait l'agencement de rouages mécaniques qui ferait marcher au mieux un automate. Dans le cas de Boutroux, cette harmonie est en continuelle création, elle n'est pas posée d'avance.

– La téléologie en physique “classique”

Notons d'abord que par physique “classique”, nous entendons ici la physique réductionniste telle qu'elle a pu se faire depuis trois siècles. Nous étudierons plus tard la physique de la complexité, ainsi que la biologie moderne, où la téléologie n'est pas posée d'avance mais élaborée au cours de l'évolution.

Les idées téléologiques ont joué un rôle en physique mathématique notamment sous la forme de principes de minimisation, qui requièrent comme leur nom l'indique la minimisation (en fait l'extremisation, car l'on inclue aussi les maxima comme résultats possibles) d'une certaine quantité. Le mathématicien Pierre de Fermat fit ainsi une utilisation fameuse du Principe de Moindre Temps : la trajectoire d'un rayon de lumière dans les cas de réflexion et de réfraction peut être prédite en utilisant le principe selon lequel elle minimisera toujours la durée du trajet de la lumière.

Comme nous l'avons déjà abordé en section II, ce fut Maupertuis qui proposa, dans une publication¹⁴⁰ de 1744, que l'on pouvait prédire le comportement des corps lors d'un impact si l'on considérait que le produit mvs , où m est la masse, v la vitesse, et s la distance, était minimisé. Il baptisa cette quantité l'*action*, et il l'interpréta comme une indication qu'un Être Suprême devait faire agir des causes finales dans la nature. Le mathématicien Leonhard Euler généralisa ce Principe en un théorème portant sur une intégrale, théorème valide pour le mouvement d'une particule sur laquelle agit une force conservative (c'est-à-dire qu'il n'y a pas de dissipation d'énergie dans l'environnement). Maupertuis appela son théorème Principe de Moindre Action, bien que dans certains cas l'action soit en réalité *maximale* et non *minimale*. Ce principe fut ensuite étendu au cas d'un système de particules interagissant entre elles par Lagrange en 1760, puis formalisé selon une formulation aujourd'hui incontournable en physique par Hamilton en 1835. Pour Euler, ce principe revêtait la véritable marque d'une finalité supérieure : “Puisque l'étoffe de l'univers est des plus parfaites, et fruit du travail du plus sage Créateur, absolument rien n'arrive dans l'univers qui ne fasse apparaître quelque relation de maximum et de minimum”¹⁴¹.

Pour ce qui est des opposants à une telle vision finaliste, nous pouvons citer Siméon Poisson, Heinrich Hertz ou encore Ernst Mach¹⁴² : selon eux, une telle approche n'est pas différente de l'approche habituelle en mécanique qui est de stipuler un état initial et de déduire l'état suivant selon des équations différentielles déterministes. En effet, le Principe de Moindre Action n'est en réalité utilisé que pour *inférer* les équations

¹⁴⁰ Maupertuis (de), P.L.M., in *Accord de différentes lois de la Nature*, Vol. 4, p. 3, 1768

¹⁴¹ Euler, L., *Methodus inveniendi lineas curvas maximi minimive proprietate gaudentes, additamentum*, in *Collected works*, Vol. 24 (ed. C. Carathéodory, 1952). Trad. ang. W.A. Oldfather, C.A. Ellis, D.M. Brown, *Isis* **20**, 72, 1933. (“Since the fabric of the universe is most perfect, and the work of a most wise Creator, nothing whatsoever takes place in the universe in which some relation of maximum and minimum does not appear”)

¹⁴² cf Barrow & Tipler, *op. cit.*, p 150.

différentielles régissant l'évolution du système. En réalité, c'est l'aspect *déterministe* des équations qui permet de déduire un état initial sachant un état final, c'est-à-dire que *le déterminisme de la mécanique classique est de façon équivalente une description téléologique*. Ce point est très important : c'est sans doute là que réside l'idéologie qui permet d'introduire de la finalité dans le Principe Anthropique, en s'appuyant sur le déterminisme classique qui trace le chemin des lois et constantes fondamentales jusqu'à l'apparition de l'homme et en retournant la situation en finalité.

Plus récemment, le physicien Richard Feynman développa avec John Wheeler, qui était alors son professeur, une théorie de l'électrodynamique (à savoir, la théorie décrivant l'évolution des champs électromagnétiques) où une particule chargée semble réagir à l'interaction avec d'autres particules chargées dans le passé *et* dans le futur : c'est là l'empreinte d'une téléologie. Cette idée mena Feynman à exprimer la Mécanique Quantique selon une nouvelle formulation : celle des "intégrales des Feynman". Elle consiste à considérer que la fonction d'onde d'une particule à un temps et lieu x_1 donné est déduite de sa fonction d'onde à un temps précédent et un lieu différent x_0 en sommant une fonction donnée de l'action classique de la particule sur tous les chemins possibles que la particule a pu effectuer entre x_0 et x_1 . Comme si, dans une certaine mesure (à un certain poids donné), toutes ces trajectoires étaient effectivement suivies par la particule : au lieu d'avoir une trajectoire unidimensionnelle, nous avons un faisceau de trajectoires (le poids tendant rapidement vers zéro lorsque nous nous éloignons de la trajectoire "moyenne" observée macroscopiquement) qui traduit géométriquement la notion d'incertitude et de "flou" quantique. L'exemple typique traduisant cette délocalisation est celui des fentes d'Young : cette expérience consiste à faire passer un faisceau de lumière à travers deux fentes très rapprochées (leur séparation doit être de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde de la lumière afin que les effets quantiques puissent être observés) et à porter sur un écran les franges d'interférences produites en sortie (les "bosses" et les "creux" des ondes lumineuses provenant de chaque fente pouvant se superposer ou s'annihiler en sortie, et donc produire des zones éclairées et des zones sombres sur un écran). Ces franges apparaissent même lorsque nous envoyons les photons un par un, alors qu'*a priori* nous penserions que, chaque photon passant par une fente donnée, on retrouverait un paquet de photons en face de chaque fente, mais aucune superposition ni annihilation en sortie, donc aucune frange sur l'écran. Il n'est possible de rendre compte de ce phénomène qu'en admettant que les photons passent *par les deux fentes à la fois*. L'intégrale de Feynman permet de traiter ce problème de façon immédiate, car on somme sur les deux chemins possibles du photon *comme s'il* les avait effectués actuellement, ce qui semble bien être ce que l'expérience montre. Voici donc ce que la Mécanique Quantique apporte en sus au Principe de Minimisation classique : un indéterminisme fondamental, un "flou" microscopique moyenné à grande échelle. Bien que difficilement cernable par l'intuition, cet indéterminisme n'enlève rien au formalisme de minimisation, source des interprétations finalistes.

ii. *Philosophies du progrès : le sens du temps*

Nous sommes pour le moment restés dans le cadre d'une vision classique de la science physique, où déterminisme et réversibilité sont maîtres mots, et où le temps n'est qu'une illusion due à notre relative ignorance du monde qui nous entoure et des lois qu'il déroule. À la suite de la découverte "révolutionnaire" du Principe Entropique, lié à l'irréversibilité des phénomènes macroscopiques, il fallait donc effectuer un travail philosophique sur le temps pour mieux comprendre le devenir, et renouveler une philosophie basée sur la réversibilité des lois mécaniques. Les philosophies du devenir de Spencer, Bergson et Whitehead vont apporter de telles considérations, en même temps qu'elles poseront un certain cadre finaliste en ce qu'elles supposent un "progrès".

– Herbert Spencer

Au cours du XIX^{ème} siècle, les idées de la biologie naissante ont laissé en philosophie une empreinte remarquable chez ceux qu'on appelle "philosophes du progrès". Cette vision d'une histoire humaine progressant vers une fin n'est pas nouvelle, mais elle prend alors une place remarquable au sein des théories philosophiques. Les plus connus des philosophes du progrès sont Karl Marx et Herbert Spencer. Pour le premier, sa vision d'une évolution d'une société capitaliste vers une société communiste est bien connue. La philosophie de Spencer, par contre, l'est moins. Pour lui, le progrès s'effectue au travers de la coopération volontaire d'individus. Aussi, un marché libre (selon la vision classique d'Adam Smith) doit inévitablement accroître l'hétérogénéité parmi les hommes, du fait de la division du travail. Une société plus hétérogène a une connaissance nette supérieure à une société plus homogène, car chaque individu peut se concentrer sur un domaine plutôt que de devoir tout savoir. Le but de la philosophie spencerienne est au final la liberté individuelle¹⁴³. De cette philosophie du progrès social, Spencer va tirer une cosmologie : son cosmos commence avec un nuage homogène de matière, que la force de gravité différencie en étoiles et planètes¹⁴⁴. Il s'inquiétait néanmoins des limites d'une hétérogénéité croissante, ainsi que du problème de la mort thermique de l'univers. Ce dernier est un problème apparu avec la notion d'entropie, et qui a été popularisé par les ouvrages de science-fiction : l'univers étant un système isolé (par définition), son entropie doit croître jusqu'à ce que nous atteignons l'équilibre thermique, c'est-à-dire jusqu'à ce que plus aucun travail ne puisse être fourni. Sa cosmologie, pour être sauvée, devait donc être cyclique : l'Univers doit au final s'homogénéiser à nouveau. Une telle vision, au moins pour sa partie économique de libéralisme total, est mise en branle aujourd'hui par les contrôles de l'Etat sur l'économie : il y a un retour du Tout sur les parties. Et le fait même de penser *prédire* l'évolution d'un système aussi complexe qu'une société ne peut laisser de marbre un épistémologue, habitué au manque de rigueur des modèles. Un modèle d'un système social complexe ne peut permettre de prédictions à long terme, car, pour être précis, il faudrait qu'il puisse au final se coder lui-même (puisqu'il fait partie de la société). C'est le problème de l'auto-référence introduit par le

¹⁴³ Nisbet, R., *History of the idea of progress*, Basic Books, NY, 1980

¹⁴⁴ Spencer, H., *First Principles*, Appleton, NY, 1901. Notons que cette vision est très proche de celle que nous avons aujourd'hui en cosmologie primordiale : un nuage quasi-parfaitement homogène où les très légères fluctuations de densité vont être "creusées" par la gravité.

mathématicien Gödel et traduit comme “incomputabilité” par le fondateur des sciences informatiques (et créateur de la machine qui porte son nom) Alan Turing.

– Henri Bergson

Henri Bergson (1859-1941), un des philosophes français les plus importants du XX^{ème} siècle, a basé sa philosophie sur la notion de “devenir” comme concept métaphysique fondamental, remplaçant ainsi la notion d’Être, concept fondamental de l’école cartésienne. Il se fait critique des notions classiques de mécanisme et de finalisme. Pour lui, dans les deux cas, on retrouve le fait que *tout est donné d’avance*. Ces doctrines ne laissent pas de place à une quelconque créativité. Dans le cas du mécanisme, avenir et passé sont calculables en fonction du présent, de sorte que, pour une intelligence embrassant l’univers entier, le calcul de tout évènement se déroulant au cours du temps dans l’univers est réalisable : c’est le démon de Laplace, que nous avons déjà introduit. Pour Bergson, “le mécanisme radical implique une métaphysique où la totalité du réel est posée en bloc, dans l’éternité, et où la durée apparente des choses exprime simplement l’infirmité d’un esprit qui ne peut pas connaître tout à la fois”¹⁴⁵. Ceci ne peut s’accorder avec la philosophie du devenir de Bergson, une philosophie inspirée de la créativité de l’évolution biologique. Avec le mécanisme, nous n’avons que la monotone répétition des effets soumis aux mêmes causes : “le mécanisme n’envisage de la réalité que l’aspect similitude ou répétition. Il est donc dominé par la loi qu’il y a dans la nature que du même reproduisant du même”¹⁴⁶. Le temps d’un mécaniste radical est une variable sans ontologie, elle ne fait que refléter notre méconnaissance des causes. Mais le temps bergsonien est plus que cela, il est empreint d’irréversibilité : “nous percevons la durée comme un courant qu’on ne saurait remonter”¹⁴⁷, ou encore de façon plus imagée : “la durée réelle est celle qui mord sur les choses et qui y laisse l’empreinte de sa dent”¹⁴⁸. Bergson montre que l’on peut exprimer les mêmes critiques envers le finalisme classique que l’on retrouve notamment chez Leibniz : “les choses et les êtres ne font que réaliser un programme une fois tracé. Mais, s’il n’y a rien d’imprévu, point d’intervention ni de création dans l’univers, le temps devient encore inutile. Comme dans l’hypothèse mécaniste, on suppose encore ici que tout est donné”¹⁴⁹. Face aux difficultés du finalisme à montrer empiriquement que l’univers est la réalisation d’un plan, il a rétréci son champ d’action, pour se cerner sur l’individu, voyant dans l’harmonie de son organisme une finalité *interne* : “chaque être est fait pour lui-même, toutes ses parties se concertent pour le plus grand bien de l’ensemble et s’organisent avec intelligence en vue de cette fin”¹⁵⁰. Néanmoins, la thèse de Bergson est que “la finalité est externe ou elle n’est rien du tout”¹⁵¹. En effet, il est facile de montrer que la finalité interne s’y ramène au

¹⁴⁵ Henri Bergson, *L’évolution créatrice*, [1907], PUF éd. “Quadrige”2007, p 39

¹⁴⁶ *Ibid.*, p 45

¹⁴⁷ *Ibid.*, p 39

¹⁴⁸ *Ibid.*, p 46

¹⁴⁹ *Ibid.*, p 39

¹⁵⁰ *Ibid.*, p 41

¹⁵¹ *Ibid.*, p 41

final : les parties d'un corps peuvent elles-mêmes être vues comme des organismes subordonnés au tout auxquels ils participent. De même que Leibniz avait besoin d'une cause transcendante pour ne pas sombrer dans l'infinie régression des causes, Bergson a besoin d'une finalité première qui transcende les finalités particulières qui apparaissent dans le devenir. Cette finalité externe, c'est l'empreinte d'un élan initial commun, partagé, le fameux *élan vital*. L'harmonie qui s'ensuit n'est pas le reflet d'une finalité pensée à l'avance, mais d'un élan commun acquis au début : "[l'harmonie] tient à une identité d'impulsion et non pas à une aspiration commune"¹⁵². Aussi la finalité n'est-elle qu'apparente : "Parler d'un but est penser à un modèle préexistant qui n'a plus qu'à se réaliser. C'est donc supposer, au fond, que tout est donné, que l'avenir pourrait se lire dans le présent. [...] La vie, elle, progresse et dure. Sans doute on pourra toujours, en jetant un coup d'œil sur le chemin une fois parcouru, en marquer la direction, la noter en termes psychologiques et parler comme s'il y avait poursuite d'un but. [...] Mais du chemin qui allait être parcouru, l'esprit humain n'a rien à dire, car le chemin a été créé au fur et à mesure de l'acte qui le parcourait »¹⁵³. Aussi, la vision bergsonienne de la finalité est-elle de l'ordre psychologique plutôt qu'ontologique : "Jamais l'interprétation finaliste, telle que nous la proposerons, ne devra être prise pour une anticipation sur l'avenir. C'est une certaine vision du passé à la lumière du présent"¹⁵⁴. Nous sommes ici pleinement dans le cadre des remarques que nous faisons précédemment quant au travail de l'historien, et de sa tendance à exposer une téléologie pour rendre compte d'une façon explicative du déroulement des faits. La vision de Bergson est aujourd'hui essentielle pour cette "nouvelle" physique que nous décrivions, en ce qu'elle propose avec beaucoup de rigueur et de clarté un système cosmologique dans lequel penser l'émergence.¹⁵⁵ Et dans le cadre du Principe Anthropique, les réflexions que nous venons de présenter sont majeures : elles caractérisent comment, à la fois, le mécanisme nous entraîne à considérer que "tout est donné" dans les constantes fondamentales, mais aussi à traduire en termes finaux ce déterminisme évacué de toute créativité.

– Alfred Whitehead

Alfred North Whitehead (1861-1947), originellement formé à la physique mathématique, était un métaphysicien au courant des développements modernes de la physique (relativité et mécanique quantique). Sa cosmologie est présentée de manière complète dans les conférences Gifford qu'il donna à l'université d'Edimbourg en 1927-1928, et publiées quelques décennies plus tard¹⁵⁶. Pour lui, la Nature est comparable à un organisme : l'essence de chaque objet n'est pas à penser selon sa nature intrinsèque, mais plutôt dans sa relation avec le tout. Ce tout émerge naturellement des parties, et en régit l'ordre, de façon comparable au fonctionnement d'une société : une norme naît naturellement du contact des membres de la société, qui ne

¹⁵² *Ibid.*, p 51

¹⁵³ *Ibid.*, p 51

¹⁵⁴ *Ibid.*, p 52

¹⁵⁵ On trouve notamment dans *La nouvelle alliance* (Stengers, I., & Prigogine, I., *op.cit.*) de très intéressantes réflexions sur le passage de la physique de "l'être" à la physique du "devenir", ainsi que de nombreuses références à Bergson.

¹⁵⁶ A.N. Whitehead, *Process and reality: an essay in cosmology*, édition corrigée, éd. D.R. Griffin et F.W. Sherburne, Free Press, NY, 1978.

préexistait pas à l'établissement de la société. Pour Whitehead, les entités physiques forment une telle société : “ Les équations de Maxwell du champ électromagnétique sont cohérentes en raison des groupes [c'est-à-dire groupes sociaux, ici] que forment les électrons et les protons.[...] Ainsi, dans une société, les membres ne peuvent exister qu'en vertu des lois qui dominent la société, et les lois ne peuvent être engendrées qu'en vertu des caractères analogues des membres de la société”¹⁵⁷. Pour résumer sa pensée, les lois de la physique et les particules élémentaires viennent à l'existence de manière spontanée par un principe d'auto-organisation, ou plutôt d'“auto-consistance mutuelle”. Mais cette organisation est précaire : “ Une société émerge à partir du désordre, où le ‘désordre’ est défini par référence à l'idéal de cette société ; l'arrière-plan favorable que constitue un environnement plus large s'anéantit soit de lui-même, ou bien cesse de favoriser la persistance de la société après un certain stade de croissance : la société cesse de reproduire ses membres, et finalement après un certain stade d'anéantissement, disparaît totalement”¹⁵⁸. Les lois (que ce soient les lois de l'électromagnétisme, ou même la structure de notre espace-temps, ou encore les axiomes de notre géométrie) et les particules élémentaires sont temporaires et vouées au changement. De cette manière, nous pouvons distinguer des périodes de stabilité qui sont appelées “époques cosmiques” (*cosmic epochs*). Il y a alors, au cours du temps, existence successive de tous les mondes logiquement possibles. Le nôtre n'est qu'un exemplaire parmi cette infinité, et est aussi précaire : ceci permet d'offrir une alternative à la théorie du meilleur des Mondes Possibles de Leibniz. On retrouve ici des aspects de la théorie des multivers que nous avons vu en section II. Cette existence actuelle de l'ensemble des possibles porte un nom : c'est ce que le philosophe et historien américain du début du XX^{ème} siècle Arthur Oncken Lovejoy a appelé le ‘Principe de Plénitude’, qui stipule “qu'aucune véritable possibilité d'existence ne peut rester inassouvie, [et] que l'étendue et l'abondance de la création doivent être aussi grandes que la possibilité d'existence, et se mesurer à la capacité productrice d'une Source ‘parfaite’ et inépuisable”¹⁵⁹. Dans son cas, il avait introduit cette notion à propos de ce que les biologistes du début du XIX^{ème} siècle appelaient la “grande chaîne du vivant”, qui irait des êtres unicellulaires à Dieu, en passant par les hommes et les anges, qui serait statique (aucune espèce ne s'y éteint), et où toutes les espèces possibles seraient réalisées ; dans le cadre métaphysique la notion a glissé vers la réalisation des *mondes* possibles.

Pour ce qui est de la téléologie, elle est la base du changement chez Whitehead : lorsqu'un objet A devient un objet B, il ne faut pas penser que cela se fait au hasard, mais bien que A dirige son changement *vers* B.¹⁶⁰

¹⁵⁷ *Ibid.*, p 91, (“Maxwell's equations of the electromagnetic field hold sway by reason of the throngs of electrons and protons. [...] Thus in a society, the members can only exist by reason of the laws which dominate the society, and the laws only come in to being by reason of the analogous characters of the members of the society”)

¹⁵⁸ *Ibid.*, p 91, (“A society arises from disorder, where ‘disorder’ is defined by reference to the ideal for that society; the favourable background of a larger environment either itself decays, or ceases to favour the persistence of the society after some stage of growth: the society ceases to reproduce its members, and finally after a stage of decay passes out of existence. Thus a system of ‘laws’ determining reproduction in some portion of the universe gradually rises into dominance; it has its stage of endurance, and passes out of existence”)

¹⁵⁹ Lovejoy, A.O., *The Great Chain of Being* (Harvard University Press, Cambridge, Mass., 1936. (“... that no genuine potentiality of being can remain unfulfilled, [and] that the extent and abundance of creation must be as great as the possibility of existence, and commensurate with the productive capacity of a ‘perfect’ and inexhaustible Source”).

¹⁶⁰ R.G. Collingwood, *The idea of Nature*, Oxford University Press, Oxford 1945, p 167

Cette orientation dépend de l'époque cosmique, et est régie par des "objets externes", équivalents des formes platoniciennes, qui agissent comme des 'appâts' (*lure*) pour le changement. Cette téléologie fondamentale permet de rendre compte des causes efficientes que les physiciens étudient. Aussi, pour Whitehead, causes finales et causes efficientes sont deux modes d'explication complémentaires et valables. Enfin, les causes finales sont valables pour les "bulles d'univers", mais pas pour l'ensemble des choses existantes : l'univers dans sa totalité n'a pas de but.

iii. Auto-organisation et complexité : la fin de la finalité (?)

- Le problème de la téléologie en biologie : la téléonomie et l'émergence d'une fin

En biologie, l'idée selon laquelle il existerait un dessein vient de l'observation de la parfaite harmonie entre les espèces, et de la finalité présente dans les actes des individus qui la réalisent. L'idée d'une "grande chaîne du vivant" qui serait préconçue, statique et finalisée a néanmoins été mise en branle non pas par un philosophe, mais par l'œuvre d'un biologiste : Charles Darwin, retournant l'argument la finalité globale par l'adaptation locale des espèces au cours de l'évolution¹⁶¹. Avec les progrès de la biologie moléculaire au milieu du XX^{ème} siècle, et la découverte du code génétique "programmant" le vivant, la finalité peut être pensée dans le temps : passant outre les filets de la sélection naturelle, elle s'inscrit dans l'histoire à travers la transmission du patrimoine génétique. Pour décrire cette téléologie émergente, purement *a posteriori*, et la différencier de la téléologie posée *a priori*, le biologiste Jacques Monod introduisit dans son ouvrage majeur, *Le Hasard et la nécessité* (1970), la notion de *téléonomie*, traduisant le fait que les êtres vivants réalisent et poursuivent un projet dans leur structure et leurs performances. Ce projet est issu du hasard des mutations et de la "nécessité" liée à la transmission du patrimoine héréditaire.

Même si nous accordons que l'ensemble du monde biologique peut se réduire, à terme, à des interactions entre des particules physiques bien connues (c'est le *réductionnisme ontologique*), et que ces interactions à faible niveau de complexité, par exemple au niveau des molécules, peuvent expliquer les comportements observés à plus grand niveau de complexité, par exemple le fonctionnement du corps humain (c'est le *réductionnisme méthodologique*), les lois et théories de la biologie, téléologiques par essence, ne semblent pas se ramener à celles déterministes de la physique (c'est-à-dire que l'on ne peut accorder de *réductionnisme épistémologique*). La téléologie est donc un mode d'explication propre au domaine de la biologie, qui avait conduit Aristote à introduire les causes finales (le projet du sculpteur) en plus des causes efficientes (les coups donnés dans la pierre). Le fait qu'un animal mange un fruit fait intervenir une finalité qui ne serait pas discernable dans l'entrelacs des phénomènes bruts qui, au travers des sensations que créent la couleur, l'odeur ou la rugosité du fruit, amènent l'animal à réagir en coordonnant ses mouvements pour l'ingurgiter. Même si nous arrivions à créer artificiellement une machine aussi puissante que le cerveau humain, nous ne pourrions la comprendre pleinement : "nous ne serons *jamais* capables de comprendre complètement une telle machine à un niveau causal ; elle agira parfois de manière imprévisible, et nous trouverons plus utiles des explications téléologiques de ses actions que des explications causales, au moins

¹⁶¹ Darwin, C., *The Origins of Species*, 1859.

pour ce qui est de comprendre son comportement le plus complexe”¹⁶². Ici, ce qui est visé, c’est ce que l’on appelle le *déterminisme épistémologique*, à savoir que les systèmes complexes seraient déterministes si l’on avait une compréhension complète de leurs parties. Mais ceci est irréalisable pour une raison bien connue des sciences informatiques : certains problèmes ne peuvent pas être calculés, car ils nécessiteraient une quantité de mémoire supérieure à ce que pourrait posséder un ordinateur aussi grand que l’univers observable. On parle notamment de problème insoluble (*intractable*) si le nombre de calculs nécessaires à sa résolution augmente exponentiellement avec la durée sur laquelle la prédiction doit être réalisée¹⁶³. On parle aussi d’ “explosion combinatoire” pour traduire le fait que la considération d’un trop grand nombre de données pose de grandes difficultés pour résoudre le problème, alors qu’il pourrait l’être par certaines considérations *a posteriori* (comme c’est le cas avec la téléologie en biologie).

L’économiste libéral contemporain Friedrich Hayek prend l’exemple du marché économique libre : la téléologie réside dans les individus qui ont des objectifs à court terme, et les interactions de ces individus créent une téléologie supérieure gouvernant le système en son ensemble (la “main invisible” déjà introduite par Adam Smith). Nous avons donc un retour naturel du “Tout” sur les parties, ce que l’on nomme causalité descendante (*downward causation*). L’évolution globale est imprévisible à cause de la complexité de la situation et du caractère temporaire et changeant des téléologies individuelles : c’est aussi une caractéristique de l’évolution biologique. Néanmoins, en complexifiant le système, les téléologies à court terme amènent un facteur important de stabilité : un système complexe sera plus apte à réagir aux changements divers de son environnement ou de sa structure interne.

– Ordre spontané en sciences sociales et en économie

En Chine, Lao-Tseu introduisit la notion de Tao dans le *Dao De Jing* (*Livre de la Voie et de la Vertu*, VII^{ème} siècle av. J.C) comme un principe d’organisation spontané dans la nature, contrastant ainsi avec l’ordre imposé par un agent conscient. Cette idée circule aussi chez Confucius : il y a une supériorité de l’ordre établi spontanément par les interactions sociales sur l’ordre imposé d’en haut par la force. Cette notion d’organisation sociale, où la question de l’émergence d’ordre spontané est prégnante, a aussi intéressé Friedrich Hayek. Il a pour coutume de comparer le marché libre au langage : non pas ordonné par le dessein conscient d’un individu ou un groupe d’individu, mais auto-organisé¹⁶⁴. Pour reprendre les mots de Hayek : “Le plus important, c’est la relation qu’entretient l’ordre spontané avec le concept de but. Puisqu’un tel ordre

¹⁶² Barrow & Tipler, *op.cit.*, p 135, (“We will never be able to completely understand such a machine at the causal level; it will sometimes act unpredictably, and we will find teleological explanations of its actions more useful than causal ones, at least in understanding its most complex behavior”). Voir aussi Rosenblueth, Wiener, Bigelow, *Purpose in nature*, ed. J. Canfield, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1966.

¹⁶³ Voir par exemple Garey M.R., Johnson D.S., *Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-completeness*, Freeman, NY, 1982.

¹⁶⁴ L’auto-organisation du langage a par ailleurs été explorée scientifiquement par les récents travaux du chercheur en cybernétique Pierre-Yves Oudeyer : on y apprend notamment comment l’aléatoire des sonorisations vocales, alliée à la capacité qu’ont les agents d’imiter des sons, peut mener à diverses convergences vers des langages différents. Voir notamment Oudeyer, P.-Y., *Self-Organization in the Evolution of Speech*, Studies in the Evolution of Language, Oxford University Press, Trad. James R. Hurford, 2006.

n'a pas été créé par un agent extérieur, l'ordre comme tel peut aussi ne pas avoir de but, bien que son existence puisse être fort utile aux individus qui le composent"¹⁶⁵. Aussi, les buts différents et souvent conflictuels que peuvent avoir les nombreux individus interagissant à travers le marché économique sont tissés ensemble en un tout ordonné. Le système entier évolue dans une direction que nul ne peut prédire, car la connaissance dispersée à travers le système, et y maintenant l'ordre, est bien plus importante que ce que ne peut saisir un seul individu. Il y a bien une téléologie à petite échelle : celle des acteurs interagissant et ayant en vue leur propre bien, mais pas de téléologie globale. La marché harmonise ces buts individuels, mais n'en a pas lui-même. Pour Hayek, on peut rapprocher cette notion de celle de la notion grecque de "Cosmos", qui signifie originellement "l'ordre harmonieux d'une communauté"¹⁶⁶.

Aussi, en économie, la finalité n'est pas "posée sur " mais "créée par", elle émerge des buts individuels. Cette idée transparaît notamment chez l'historien des sciences Thomas Kuhn, dans son ouvrage *La structure des révolutions scientifiques*, où il exprime l'idée que le développement scientifique n'a pas besoin d'un but global donné (l'approche d'une certaine vérité objective et unique à propos du monde par exemple) pour avancer : "Le processus de [développement scientifique] dans son ensemble peut s'être déroulé, comme nous le pensons aujourd'hui pour l'évolution biologique, sans bénéfice tiré d'un but prédéfini – une vérité scientifique fixée de manière permanente –, dont chaque stage du développement de la pensée scientifique serait un meilleur exemple"¹⁶⁷.

Le sociologue Robert Axelrod a aussi remarqué¹⁶⁸, en se basant sur la théorie des jeux, que la formation d'un ordre social par coopération requerrait une très forte téléologie au niveau individuel : les attentes à long terme des agents dans la société doivent dominer leurs attentes immédiates dans les choix qui guident leurs actions présentes. Un exemple typique de coopération est le dilemme du prisonnier. Deux prisonniers sont dans deux cellules différentes et ne peuvent communiquer. On leur demande de confesser un crime qu'ils ont commis. Selon qu'ils confessent (et dénoncent donc l'autre prisonnier : c'est l'absence de coopération, en anglais *defect*) ou ne confessent pas (c'est la coopération), ils se voient attribuer différentes peines. Aussi, si les deux confessent, ils ont chacun une peine de trois ans. Si l'un confesse mais l'autre ne confesse pas, celui-là sort libre alors que celui-ci obtient une peine de cinq ans. Enfin, si les deux refusent de confesser, ils obtiennent chacun une peine de un an. Quelle solution choisir ? *Si l'autre ne confesse pas*, le mieux est bien sûr de confesser, car c'est alors la liberté assurée. Cependant, chacun réfléchissant ainsi, les deux individus confessent et ont une peine effective de trois ans chacun. En fin de compte, la solution la plus rationnelle est

¹⁶⁵ Hayek, F.A., *La, legislation and liberty*, Vol. 1: *Rules and order*. University of Chicago Press, Chicago, 1973, p.37, cité dans Barrow et Tipler, *op.cit.*. ("Most important [...] is the relation of a spontaneous order to the conception of purpose. Since such an order has not been created by an outside agency, the order as such also can have no purpose, although its existence may be very serviceable to the individuals who move within such order").

¹⁶⁶ *Ibid.*, p. 37.

¹⁶⁷ Kuhn, T.S., *The structure of scientific revolutions*, 2nd ed., University of Chicago Press, Chicago, 1970, p. 173. ("The entire [scientific development] process may have occurred, as we now suppose biological evolution did, without benefit of a set goal, a permanent fixed scientific truth, of which each stage in the development of scientific knowledge is a better example")

¹⁶⁸ Axelrod, R., *The evolution of cooperation*, Basic Books, NY, 1984.

que les deux individus coopèrent en ne confessant pas, mais cette solution est *instable* : il est toujours plus favorable pour un individu, à partir de cette situation, de choisir de confesser. Néanmoins, en situation réelle, ce genre de dilemme est itéré : il ne faut pas penser en termes d'une coopération ou d'une absence de coopération, mais en termes de stratégies alternant coopération et non coopération au cours du temps, permettant "d'apprendre" à connaître son partenaire pour que la coopération ait vraiment un sens (en termes de confiance). Axelrod parle alors de stratégie "stable collectivement" (*collectively stable*) si, tout le monde utilisant cette stratégie, personne ne peut faire mieux en changeant de stratégie. Aussi, pour qu'une stratégie persiste dans la nature, elle doit être stable collectivement, car il y aura toujours des individus (des mutants dans le cas de la biologie) qui essaieront différentes stratégies. Pour John Maynard Smith, chercheur en biologie évolutionnaire, ces stratégies sont dites "évolutivement stables" (*evolutionarily stable strategies*). La plus efficace d'entre elles est la stratégie du Tit for Tat : coopérer au premier tour, puis faire à chaque tour ce que l'autre a fait au tour d'avant.

Ceci suggère pour Barrow et Tipler que si quelqu'un souhaiterait modéliser le cosmos à partir de ces modèles issus des sciences sociales ou de la biologie (ce que le Principe Anthropique Participatif sous-entend), alors il faut rendre compte de l'importance de la téléologie dans l'émergence d'ordre : l'état de l'Univers doit être une fonction non seulement de ce qui le précède, mais aussi de ce que seront ses états futurs.

– La fin de la finalité?

Nous trouvons chez les biologistes et dans une certaine partie de la communauté des physiciens une lutte argumentée contre la finalité, centrée autour de la problématique de l'apparition d'organismes complexes comme les êtres vivants (et notamment l'homme) à partir des simples lois physiques et d'une théorie de la Sélection Naturelle "aveugle" à la finalité.

Aussi, du côté des biologistes, on insiste sur le caractère providentialiste de la pensée d'un dessein intelligent où les êtres auraient été conçus complexes et adaptés dès l'origine, une harmonie préétablie où les êtres, comme les montres, auraient besoin d'un "horloger" (*watchmaker*) pour en régler les fins détails¹⁶⁹. Une telle pensée nous pose comme "bénéficiaires" de la bonne volonté divine, comme peut le sous-entendre une interprétation finaliste du Principe Anthropique. En effet, pour reprendre les mots de Bacon, les causes finales "tiennent plus à la nature de l'homme qu'à la nature de l'univers"¹⁷⁰ : le finalisme est pour lui anthropocentriste et anthropomorphiste¹⁷¹. Un exemple typiquement donné par les finalistes refusant l'idée d'une évolution naturelle vers la complexité est l'oeil et sa perfection à réaliser sa fonction. Pour les opposants au dessein, l'erreur est de voir dans l'oeil un objet conçu (*designed*) pour réaliser une certaine fonction : comme le dit Victor Stenger, "l'oeil n'est ni mal ni bien conçu. Il n'est tout simplement pas

¹⁶⁹ Voltaire avait effectivement coutume de dire que "l'horloge suppose l'horloger" (cf. Duflo, C., *La finalité dans la nature*, coll. Philosophies, PUF, 1996, p 9).

¹⁷⁰ Bacon, F., *Novum Organum*, Livre I, aphorisme 48., trad. M. Malherbe et J.-M. Pousseur, Paris, PUF, coll. "Épithémée", 1986, p. 115

¹⁷¹ Colas, D., *La finalité dans la nature de Descartes à Kant*, coll. Philosophies, PUF, 1996, p 18

conçu.”¹⁷² Ce dernier pointe aussi divers arguments à l’encontre du fait que Dieu a créé l’Univers pour l’homme : tout d’abord il aurait gâché énormément d’espace dans lequel l’humanité n’apparaîtra jamais, ensuite il aurait gâché beaucoup de temps avant que l’homme n’apparaisse, et enfin il aurait gâché beaucoup d’énergie, car “96 pourcent de la masse de l’univers n’est même pas du type de matière associée à la vie”¹⁷³. Pour le généticien Richard Dawkins, un tel Dieu ne pourrait se penser lui-même que comme la fin d’un processus darwinien le menant à la perfection¹⁷⁴.

Alors que les biologistes s’arment de Darwinisme contre la finalité et le providentialisme, les physiciens auront tendance à montrer comment des systèmes peuvent devenir complexes (par auto-organisation par exemple) lorsque plusieurs paramètres entrent en jeu. Aussi, lorsque de tels systèmes complexes sont modélisés, on peut faire apparaître des *attracteurs*, c’est-à-dire des points d’équilibres qui “attirent” le système : on fait apparaître une finalité dans le devenir du système, qui ne dépend que de la relation entre le système et son environnement¹⁷⁵. C’est par exemple le cas en écologie, où l’on s’intéressera à un système composé d’espèces vivantes dans un certain lieu avec une certaine quantité de nourriture renouvelable, qui dans certains cas pourra se “diriger” vers un attracteur assurant la survie de certaines des espèces, dans certains cas d’aucune etc. En adjoignant l’adaptation à la notion de système complexe, on obtient les systèmes complexes adaptatifs, qui font l’objet d’une étude approfondie dans le livre *The Origins of Order* de Stuart Kauffman.

Sélection naturelle et complexité permettent-ils alors de mettre à mal tout dessein et toute finalité externe dans l’univers? L’affaire ne semble pas se régler si facilement. Face au *watchmaker* des finalistes, les biologistes ont introduit le *blind watchmaker* (l’horloger aveugle) : c’est une manière de dire que l’évolution par Sélection Naturelle permet d’engendrer des êtres complexes de manière non finale. Ce qui est intéressant à noter néanmoins, c’est que même dans des systèmes téléologiques, le *blind watchmaker* est présent, ainsi que l’exprime Stuart Kauffman : “Aucune molécule de la bactérie E.Coli ne “connaît” le monde dans lequel vit E.Coli, pourtant E.Coli fait son chemin. Pas une seule personne à IBM, qui est maintenant en train de diminuer de taille et de devenir une entreprise plus horizontale, ne connaît le monde d’IBM, pourtant,

¹⁷² Stenger, V.J., *God : The Failed Hypothesis*, op.cit., p. 56.. “The retina of the eye evolved as a modification of the outer layer of the brain that gradually developed light sensitivity. The eye is neither poorly nor well designed. It is simply not designed”

¹⁷³ *Ibid.*, p 157, “(96 percent of the mass of the universe is not even of the type of matter associated with life”)

¹⁷⁴ Richard Dawkins, *The God Delusion*, Boston, New York: Houghton Mifflin, 2006.

¹⁷⁵ Une telle capacité d’émergence d’ordre dans la matière rompt avec l’idéal classique des systèmes clos, stables, “monadiques”. Aussi nous trouvons chez Hume (*Dialogues sur la religion naturelle*, op.cit.) cette vision d’un ordre forcément *posé* sur les choses, et non pas *acquis* par elles, lorsque le sceptique Philon résume en ces phrases la vision du théiste Cléanthe : “Jetez ensemble plusieurs picées d’acier, sans contour ni forme ; elles ne s’arrangeront jamais de façon à composer une montre ; pierre, mortier et bois, sans architecte, n’élèveront jamais une maison. Mais nous voyons que les idées dans l’esprit humain, par suite d’une économie inconnue inexplicable, s’arrangent de manière à former le plan d’une montre ou d’une maison. L’expérience prouve donc qu’il y a un principe originel d’ordre dans l’esprit, mais non dans la matière. D’effets semblables nous inférons des causes semblables. L’ajustement des moyens aux fins est pareil dans l’univers et dans une machine due à l’industrie humaines. Les causes doivent donc se ressembler” (p 100). L’enjeu de la physique des systèmes complexes adaptatifs est de redonner à la matière son pouvoir de faire émerger de la finalité, sans horloger qui en guide les moindres développements.

collectivement, IBM agit. Les organismes, les artefacts, et les entreprises sont des structures évoluées. Même lorsque des agents humains planifient et construisent avec intention, il y a plus de *blind watchmaker* au travail que nous le reconnaissons réellement”¹⁷⁶. Nous retrouvons cette idée dans le travail littéraire : il y a d’un côté l’intention de l’écrivain (la téléologie), et de l’autre le résultat final qu’il a écrit (empreint de téléonomie). Voici ce qu’en dit le chercheur Pierre-Marc de Biasi : “Il y a une logique leibnizienne du travail littéraire qui se pense comme un travail sur le possible : lorsqu’il rédige, l’écrivain ne cesse d’opérer une sélection parmi l’infini des possibles, un peu comme le Dieu de Leibniz, qui calcule et fait passer à la réalité une essence alors qu’il y a mille essences qui l’implorent de passer à la réalité. [...] Dans la première phase de la rédaction, vous trouverez des dizaines de versions variantes, divergentes et même parfois contradictoires du même récit. Les possibles se multiplient, s’entrecroisent ; le récit s’amplifie, se dilate au maximum. Et puis il y a un moment où, sous l’effet d’une contrainte plus globale, qui est celle de l’œuvre, les options se resserrent : *quelque chose se choisit*. Ce sera le texte.»¹⁷⁷

Voici donc qui nous laisse une note amère à toute critique radicale de la finalité : la question de la complexité soulève une nouvelle forme de finalité, intermédiaire entre la nécessité du devenir-complexe et la contingence des interactions organisantes. Dans le cadre du Principe Anthropique, c’est dans la notion de loi que l’on puisera une pensée finaliste : un Créateur peut avoir posé des lois fondamentales dont tout découle et à partir desquelles il saurait déduire la fin des choses, mais il peut aussi avoir “écrit” les lois d’organisation et du devenir de notre monde, tout en laissant le texte “se choisir”. Il n’est pas évident de se séparer de la finalité. Néanmoins, nous allons explorer plus en avant la notion de loi, et nous ferons poindre avec la notion d’émergence la possibilité d’une métaphysique qui exclue véritablement toute finalité, que celle-ci réside dans l’être ou dans le devenir.

b. Les lois

“There is no law except the law that there is no law” J.A. Wheeler

Le Principe Anthropique questionne dans son fondement même la notion de loi fondamentale : quelle est l’origine des constantes physiques qui gouvernent notre monde, et pourquoi n’ont-elles pas été autres? Quelle raison supérieure fait que les lois sont stables au cours du temps et semblent être posées de façon immuable sur notre Univers? En s’intéressant à cette dernière question, Hume en a conclu que seule l’habitude que l’on a que les phénomènes soumis aux mêmes causes se reproduisent identiques à eux-mêmes, toutes choses égales par ailleurs, peut fonder notre croyance en des lois de la nature : aucune preuve *a priori* ne peut être formulée montrant que cela doit être ainsi (c’est la position sceptique). Nous verrons

¹⁷⁶ Kauffman, S. *At home in the universe, The search for the laws of self-organisation and complexity*, Oxford University Press, 1996, p.246, (“No molecule in the bacterium E.Coli “knows” the world E.Coli lives in, yet E.Coli makes its way. No single person at IBM, now downsizing and becoming a flatter organization, knows the world of IBM, yet collectively, IBM acts. Organisms, artifacts, and organizations are all evolved structures. Even when human agents plan and construct with intention, there is more of the blind watchmaker at work than we actually recognize”)

¹⁷⁷ Biasi (de), P.-M., “Hasard et littérature”, in *Le Hasard aujourd’hui, op.cit.*, pp. 104-5.

quelles autres positions ont pu être avancées pour répondre au “problème de Hume”. Nous essaierons de montrer comment les réponses habituelles s’accordent avec l’idée d’un Principe Anthropique, alors que la réponse “spéculative” de Meillassoux prend le problème à la racine pour dégager une réfutation sérieuse au raisonnement anthropiste. Puis nous questionnerons la notion de loi fondamentale sous l’angle du dualisme qui découpe aujourd’hui la physique : celui du réductionnisme face à l’émergence. De façon intéressante, les deux positions entraînent deux visions diamétralement opposées de la notion de loi fondamentale, et donc du Principe Anthropique, mais ne se distinguent pas philosophiquement : dans les deux cas la recherche d’une “Théorie du Tout” entend exhiber la raison suffisante de notre univers.

i. Les lois en philosophie : le problème de Hume

Nous avons vu précédemment la formulation que donne Hume du Principe de Causalité, ou Principe d’Uniformité : “des mêmes causes, il doit s’ensuivre les mêmes effets, toutes circonstances égales par ailleurs”. Ce que l’on appelle “problème de Hume” se réfère à notre capacité à démontrer que les lois physiques demeureront à l’avenir ce qu’elles sont aujourd’hui. Nous pouvons avancer trois réponses possibles à ce problème¹⁷⁸ :

- La réponse métaphysique : un principe absolu (le Principe de Raison Suffisante par exemple) gouverne notre monde et explique le fait qu’il soit ainsi plutôt qu’autrement. C’est la réponse qui s’accorde le mieux à l’entreprise scientifique, en ce qu’elle entend donner un véritable *sens* à la recherche de lois. Elle donne surtout au Principe Anthropique une légitimité, celle de la quête d’une méta-loi explicative (celle d’un multivers par exemple) ou bien celle d’une recherche de finalité dans le monde, en bref une réponse à notre spécificité.
- La réponse sceptique : dans la section IV de *l’Enquête sur l’entendement humain*¹⁷⁹, Hume explique que la raison ne peut nous assurer, de manière *a priori*, que le principe d’uniformité se vérifiera toujours dans l’avenir. Aussi dit-il : “Quand je vois, par exemple, une bille de billard qui se meut en ligne droite vers une autre, à supposer même que le mouvement de la seconde bille me soit accidentellement suggéré comme le résultat de leur contact ou de l’impulsion, ne puis-je pas concevoir que cent événements différents pourraient aussi bien suivre de cette cause ? Les billes ne peuvent-elles pas toutes deux rester en repos absolu ? La première bille ne peut-elle retourner en ligne droite ou rebondir de la seconde dans une ligne ou une direction quelconque ? Toutes ces suppositions sont cohérentes et concevables. Alors, pourquoi donner la préférence à l’une d’elles, qui n’est ni plus cohérente ni plus concevable que les autres ? Tous nos raisonnements *a priori* ne seront jamais capables de nous montrer le fondement de cette préférence”. Le Principe de Raison Suffisante est ici mis au défi : cette raison est, pour Hume, inaccessible à la pensée. Ce qui nous fait croire en la nécessité des lois, c’est **l’habitude**, c’est-à-

¹⁷⁸ Classification tirée de Meillassoux, Q., *Après la finitude*, *op.cit.*

¹⁷⁹ David Hume, *Enquête sur l’entendement humain*, Garnier-Flammarion, 1983, trad. Fr. André Leroy revue par Michelle Beyssade, p. 89.

dire la propension à admettre que ce qui s’est toujours répété dans le passé continuera à se répéter à l’identique dans le futur. En raisonnant par l’absurde, Kant montre qu’il doit y avoir une nécessité à ce que le principe de causalité soit vérifié, car s’il ne l’était pas, toute forme de représentation serait détruite. Il utilise en fait un raisonnement de type anthropiste pour prouver le Principe d’Uniformité : si ce dernier n’était pas vrai, “le désordre phénoménal serait tel qu’aucune objectivité, et même aucune conscience, ne pourrait subsister durablement”¹⁸⁰, et l’observation *a posteriori* de notre présence et de notre persistance au sein des régularités de la nature suffit à prouver le contraire. Le sceptique continue donc à croire en la nécessité causale, et il pointe notre finitude nous empêchant de jamais la dévoiler par la raison pure.

- La réponse spéculative : il s’agit ici de *rejeter* toute nécessité causale, et d’en étudier les conséquences. On rejette par là l’idée que les lois sont nécessaires, et c’est par cette voie seulement que va se dessiner une voie de sortie du Principe Anthropique : on parle de “contingence radicale”. Il faut pour cela rompre avec la commune “inférence nécessitariste”, “à savoir que la stabilité des lois présuppose elle-même, comme sa condition impérative, la nécessité des lois”¹⁸¹. De cette inférence découle le raisonnement suivant : (1) si les lois pouvaient se modifier sans raison, elles le feraient fréquemment, (2) ce n’est pas ce que nous observons, (3) donc les lois sont nécessaires. On peut qualifier l’implication (1) (que l’on a vu précédemment chez Kant) d’*implication fréquentielle*. Ce raisonnement a été étudié par Jean-René Vernes¹⁸² : pour lui, le “nombre pratiquement infini” de possibles *a priori*, rapporté au nombre réduit des possibles *expérimentaux*, nous amène, au travers d’un raisonnement probabiliste, à accepter l’idée d’une nécessité derrière cette régularité de l’expérience. Ce raisonnement probabiliste, c’est le suivant : “ce qui est également pensable est également possible. C’est une telle égalité *quantitative* du pensable et du possible qui nous permet d’établir un calcul sur la probabilité ou la fréquence d’un évènement lorsque nous jouons à un jeu de hasard”¹⁸³. Alors, en appliquant ce raisonnement probabiliste, nous admettons que, étant donné que les mêmes causes entraînent toujours les mêmes effets parmi tous les effets possibles non contradictoires, il y a forcément un “biais”, une nécessité derrière cette régularité, de même qu’ “un dé tombant toujours sur la même face est *très probablement* truqué”¹⁸⁴. Nous faisons pour l’Univers ce que nous faisons dans le cas du jeu de dés : nous construisons “mentalement un “Univers-Dé” identifié à un *Univers des univers*, c’est-à-dire dont chaque face serait un univers régi par le seul impératif de la non-contradiction”. Alors, “l’inférence humo-kantienne est un raisonnement probabiliste appliqué non à un évènement de notre Univers, mais à notre

¹⁸⁰ Meillassoux, Q., *Après la finitude*, op.cit., p. 121

¹⁸¹ *ibid.*, p 128.

¹⁸² Jean-René Vernes, *Critique de la raison aléatoire, ou Descartes contre Kant*, préface de Paul Ricoeur, Aubier, 1982

¹⁸³ Meillassoux, Q., *Après la finitude*, op.cit., pp 131-132

¹⁸⁴ *ibid.*, p 131

Univers considéré lui-même comme le cas possible d'un Tout des Univers possibles"¹⁸⁵. La réfutation épicurienne à ce type de raisonnement est bien connue : l'émergence d'organismes complexes est comparable à un résultat aussi improbable que d'obtenir par exemple l'écriture de *L'Iliade* à partir d'un lancer hasardeux de lettres sur une surface donnée, résultat qui se conforme aux lois du hasard si le nombre d'essais est suffisamment immense¹⁸⁶. Mais, sous couvert de hasard, nous croyons pouvoir penser la contingence, ce qui n'est pas le cas, car ce hasard est soumis à une loi, lui aussi : "Le hasard suppose donc bien toujours une forme de constance physique : loin de permettre de penser la contingence des lois physiques, il n'est lui-même qu'un certain type de loi physique, une loi dite indéterministe"¹⁸⁷. Comme nous l'avons déjà remarqué, il s'agit donc de bien distinguer la contingence du hasard. En fait, l'inférence exposée précédemment est vraie à condition que nous puissions **totaliser** les possibles concevables : "Il faut supposer qu'un *ensemble de mondes possibles* (notre Univers-Dé de tout à l'heure) est effectivement concevable, sinon intuitionnable, au sein duquel nous pourrions alors opérer notre extension du raisonnement probabiliste, des objets *internes* à notre Univers [...] à l'Univers *lui-même*"¹⁸⁸. Quentin Meillassoux utilise pour sortir de cette idée de totalisation la notion mathématique de transfini, qui permet de "classer" les infinis selon leur "taille" (l'infini des entiers naturels étant plus "petit" que l'infini des réels, par exemple). L'intérêt de cette notion mathématique est qu'il n'existe pas d'ensemble des transfinis : on ne peut totaliser la collection des transfinis. Aussi, comme l'exprimait Alain Badiou dans *L'Être et l'Évènement*¹⁸⁹, le théorème de Cantor sur le transfini a dévoilé "*la pensabilité mathématique de la détotalisation de l'être-en-tant-qu'être*". Alors, "celui qui [...] détotalise le possible, peut penser une stabilité des lois sans la redoubler d'une énigmatique nécessité physique. On peut donc appliquer le rasoir d'Ockham à la nécessité réelle : puisque celle-ci devient une "entité" inutile pour expliquer le monde, on peut s'en passer, sans autre dommage que l'abolition d'un mystère"¹⁹⁰. Cette réponse spéculative met donc à terme à toute recherche de multivers, ou plutôt en est l'aboutissement, dans le sens où ici le multivers est un "Non-Tout", c'est-à-dire que l'on ne peut

¹⁸⁵ *ibid.*, pp 133-134

¹⁸⁶ Ce type d'explication est le même que celui des *singes dactylographes* d'Emile Borel : un million de singes tapant à la machine pendant un an pourraient reproduire tous les plus grands écrits des bibliothèques, mais la probabilité en est infiniment faible. Cet argument est en fait déjà réfuté chez Cicéron, dans *De natura deorum* (*De la Nature des Dieux*) : Balbus le Stoïque répond aux atomistes que si ceux-ci pensent que l'ordre de la nature provient de collisions aléatoires d'atomes, alors ils doivent aussi penser que d'innombrables copies des 21 lettres latines agitées et lancées ensemble sur le sol pourraient reproduire le texte des *Annales* de Ennius, ce qui pour Balbus consiste à donner trop de confiance au hasard. En termes de probabilités, nous trouvons chez le physicien Seth Lloyd (*Programming the Universe*) le calcul suivant : si l'on prend un clavier de 50 caractères, que l'on ignore les majuscules, il faudrait un milliard de milliard de singes, chacun tapant dix caractères par seconde depuis le début de l'univers (environ un milliard de milliard de secondes) pour qu'un seul écrive "hamlet. Act i, scene i."

¹⁸⁷ Meillassoux, Q., *Après la finitude, op.cit.*, p. 136

¹⁸⁸ *ibid.*, p 140

¹⁸⁹ Badiou, A., *L'Être et l'Évènement*, éd. du Seuil, Paris, 1988

¹⁹⁰ Meillassoux, Q., *Après la finitude, op.cit.*, p 148

y faire de recensement des possibles à la manière du dieu leibnizien, et donc y édifier des probabilités sur les constantes fondamentales. Nous pourrions en fait rapprocher cette spéculation d'une certaine vision de la notion d'émergence chez les physiciens, et nous verrons plus tard comment, philosophiquement parlant, il est possible de penser un tel "Non-Tout".

ii. Les lois en sciences

Nous allons à présent voir les deux visions des lois que l'on peut retrouver en sciences actuellement : la vision réductionniste, liée à l'idéal explicatif de la physique classique voulant réduire à quelques formules/axiomes simples la structure physique du monde, et la vision émergentiste, où l'on ne peut plus présager de la créativité des phénomènes, mais que l'on peut étudier avec la notion d'auto-organisation. Aux systèmes simples s'opposent les systèmes complexes, à l'immuable l'adaptatif, au réversible l'irréversible. Deux visions opposées, qui néanmoins cherchent toutes deux à atteindre une certaine universalité, que celle-ci soit dans une loi fondamentale ultime ou dans le principe d'auto-organisation.

– Le réductionnisme

De par la rigueur de ses lois, ainsi que leur portée universelle, la physique classique s'est vue consacrée comme la reine des sciences de la nature. Toute science voulant gagner du sérieux doit pouvoir s'y réduire, ou s'en inspirer pour sa méthodologie. Cette idée d'un réductionnisme fort selon lequel les différentes branches scientifiques peuvent se réduire en dernier lieu à la physique est exprimée de façon très claire dans le texte de 1958 des philosophes des sciences Hilary Putnam et Paul Oppenheim, "The unity of science as a working hypothesis"¹⁹¹. Le réductionnisme consiste à chercher une *unité* au sein des sciences. L'unité se pense comme unité de langage, de lois, de méthodes, et au final de disciplines. L'unité des sciences est l'état idéal de la science, et aussi la tendance, le but poursuivi au sein des sciences mêmes. Cette unité est atteinte par la "micro-réduction", qui consiste à réduire une branche scientifique à une autre qui traite de ses parties (comme passer de l'étude des multicellulaires à l'étude des cellules). Pour les auteurs, même la psychologie peut être un jour explicable par les lois de la physique atomique : "Il n'est pas absurde de supposer que des lois psychologiques puissent finalement être expliquées en termes de comportement de neurones individuels dans le cerveau. [...] Si ce but est atteint, alors les lois psychologiques auront, en principe, été réduites à des lois de la physique atomique, bienqu'il soit sans espoir de pouvoir déduire le comportement d'un être humain directement à partir de sa constitution en termes de particules élémentaires"¹⁹². La micro-réduction doit être considérée comme la meilleure hypothèse de travail pour unifier les sciences. Cette réduction théorique n'est pas forcément "explicative" en pratique, dans le sens où il sera plus simple de parler de la rigidité d'un cristal plutôt que des vibrations de chacun de ces constituants et des liaisons l'engendrant, mais elle l'est au moins

¹⁹¹ Putnam, Hilary, and Paul Oppenheim, 1958, "The Unity of Science as a Working Hypothesis", in Herbert Feigl, Grover Maxwell, Maw Scriven (eds.), *Minnesota Studies in the Philosophy of Science*, Vol. 2, pp. 3-36.

¹⁹² *ibid.*, p 7. ("It is not absurd to suppose that psychological laws may eventually be explained in terms of the behavior of individual neurons in the brain. [...] If this is achieved, then psychological laws will have, in principle, been reduced to laws of atomic physics, although it would nevertheless be hopelessly impractical to try to derive the behavior of a single human being directly from his constitution in terms of elementary particles")

théoriquement : il n'y a rien de plus dans la notion de rigidité qu'un phénomène collectif dû aux interactions entre constituants.

Une telle vision amène à penser des niveaux se réduisant les uns aux autres : groupes sociaux, être multicellulaires, cellules, molécules, atomes, particules élémentaires. Chaque niveau est nécessaire (la structure de la branche entière est tellement cohérente et satisfaisante pour les objets qu'elle explique qu'elle ne saurait être substituée par un niveau plus en aval) et suffisant (les théories majeures de toute branche peuvent se réduire à des théories d'une branche inférieure). Un tel réductionnisme est basé sur un sol empirique (notamment pour s'accorder sur le vocabulaire inter-théorétique). Aussi doit-on s'assurer d'avoir des hypothèses empiriques crédibles : elles doivent être simples, avoir des preuves variées, être fiables, et s'accorder avec les faits. Psychisme ou néo-vitalisme sont donc radiés des sciences. L'émergence de nouveaux niveaux peut se faire selon deux processus : de façon **évolutive** (les niveaux se sont constitués au fur et à mesure dans le temps) ou par **ontogénie** (les niveaux se sont produits à partir de leurs parties déjà constituées dans les niveaux inférieurs). Un tel réductionnisme est comparable à une "tendance démocratéenne" (*Democritean tendency*), c'est-à-dire la tendance méthodologique à essayer d'expliquer des phénomènes à première vue différents en termes de parties qualitativement identiques et de relations spatio-temporelles.

En conclusion, le réductionnisme n'est pas seulement un acte de foi : "essayer d'accepter cette croyance, l'accepter comme hypothèse de travail, est *justifié*, et [...] l'hypothèse est *crédible*, en partie pour des raisons méthodologiques (par ex., la simplicité de l'hypothèse, comparé à la bifurcation que les hypothèses rivales créent dans le système conceptuel de la science), et en partie parce qu'il y a vraiment une grande quantité de preuves directes et indirectes en sa faveur"¹⁹³. Cette hypothèse a mené les physiciens à penser que l'on pouvait s'attendre à trouver une loi finale à laquelle tout se réduirait, et à partir de laquelle tout se déduirait logiquement : c'est la Théorie du Tout.

– La Théorie du Tout

Émile Boutroux, dans sa thèse sur la contingence des lois de la nature, montre que pour exhiber une nécessité des lois (c'est-à-dire une nécessité physique qui soit plus que la simple nécessité logique exigeant que les faits soient non contradictoires, en quelque sorte une Raison Suffisante déguisée), il faudrait pouvoir réaliser une synthèse causale *a priori* : "L'idéal serait de tout ramener à une seule synthèse, loi suprême où seraient contenues, comme des cas particuliers, toutes les lois de l'univers"¹⁹⁴. Il prévient aussi de la limite d'un tel travail : "ces formules n'expliqueront jamais tout, parce qu'elles ne s'expliquent pas elles-mêmes"¹⁹⁵. Voilà qui préfigure deux tendances inverses qui diviseront le monde des physiciens : une tendance véritablement

¹⁹³ *ibid.*, p 28. ("A tentative acceptance of this belief, an acceptance of it as a working hypothesis, is *justified*, and [...] the hypothesis is *credible*, partly on methodological grounds (e.g., the simplicity of the hypothesis, as opposed to the bifurcation that rival suppositions create in the conceptual system of science), and partly because there is really a large mass of direct and indirect evidence in its favor")

¹⁹⁴ Boutroux, É., *op.cit.*, Ch. I.

¹⁹⁵ *ibid.*, pp 153-154

réductionniste, à la recherche de cette théorie ultime d'où tout découle, et une tendance émergentiste qui voit dans cette quête une ambition métaphysique démesurée et inutile, les phénomènes complexes nous entourant ne pouvant se comprendre ni s'expliquer par cette loi ultime. C'est aussi ce découpage qui influera sur la réception du Principe Anthropique : pour les premiers, il est pertinent et doit mener à une recherche d'explication ou au moins à une interprétation, tandis que pour les seconds il est justement l'aboutissement métaphysique et finaliste d'une physique classique réductionniste, et ne devrait même pas être questionné. Examinons ceci de plus près.

Au cours du XX^{ème} siècle, la physique théorique a réalisé des bonds conceptuels impressionnants, que ce soit avec la nouvelle mise en perspective de l'espace-temps qu'offre la Relativité Générale ou la découverte de l'étrangeté du comportement microscopique avec la physique quantique. La théorie quantique des champs a ensuite réussi à unifier la théorie quantique avec la relativité restreinte (la partie de la relativité qui ne s'intéresse pas aux phénomènes gravitationnels), et aujourd'hui les physiciens espèrent unifier la physique quantique (et les différentes forces fondamentales qu'elle décrit : les forces forte, faible, et électromagnétique) avec la gravité : cela donne lieu à la recherche de *Grand Unified Theories* dont nous avons parlé en section I. Il est difficile de ne pas se sentir porté vers une Théorie Ultime, une théorie unifiant toutes les autres, lorsque de tels succès d'unification ont déjà été accomplis et semblent orienter la recherche dans un sens, pointant même pour certains vers "la fin de la science". Néanmoins, pour la communauté des physiciens qui sont tournés vers l'expérience du monde qui nous entoure, avec ses phénomènes complexes, turbulents, organisés, ce questionnement n'est que trop métaphysique. Le physicien de la matière condensée Robert Laughlin, Prix Nobel de physique pour ses travaux sur l'effet Hall quantique, et le physicien des systèmes complexes adaptatifs David Pines se sont dressés dans une publication publiée en 2000 contre l'idée d'une Théorie du Tout¹⁹⁶. Une telle Théorie du Tout peut s'écrire, pour ce qui est des phénomènes macroscopiques, à l'aide de l'équation de Schrödinger (l'équation fondamentale de la mécanique quantique) où figurent l'ensemble des électrons et des nucléons (protons et neutrons) de la matière qui nous entoure ainsi que leurs interactions. Examinant une telle équation, nous nous trouvons peu avancés : en déduire une quelconque prédiction sur le monde qui nous entoure semble être une gageure. Le physicien Philip Anderson explique ainsi, dans son article "More is different" de 1972, article fondateur pour ce qui est de l'émergence en physique, que "la capacité à tout réduire à des lois fondamentales simples n'implique pas la capacité de partir de ces lois et de reconstruire l'univers"¹⁹⁷. Comme le disent avec ironie les auteurs (nous laissons le jeu de mot original) : "The Theory of Everything is not even remotely a theory of every thing"¹⁹⁸. L'équation de Schrödinger en question ne peut en fait pas être résolue avec précision dès que le nombre de particules dépasse dix. Ainsi, l'équation "finale" ne dévoile rien sur les choses qui importent vraiment, notamment en biologie, ou bien même pour ce qui est de la physique des liquides, c'est-à-dire tout ce qui est associé aux phénomènes

¹⁹⁶ Laughlin, Robert B., and Pines, D., "The theory of everything", in *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol. 97 (Jan. 4, 2000), pp. 28-31

¹⁹⁷ Anderson, Philip W., 1972, "More is different", in *Science*, New Series, Vol. 177, No. 4047 (Aug. 4, 1972), p.393. ("The ability to reduce everything to simple fundamental laws does not imply the ability to start from those laws and reconstruct the universe")

¹⁹⁸ *ibid.*, p 28

“complexes” et “adaptatifs”. Notamment, les nombres qui apparaissent dans la Théorie du Tout, comme la constante de Planck ou la charge électronique, ne peuvent être obtenus à partir de la théorie même, mais nécessitent des expériences basées sur les propriétés des supraconducteurs ou des superfluides. Aussi, il faut admettre qu’il existe dans la nature des principes d’organisation qui ne peuvent juste être reflétés dans un système déductif basé sur une loi ultime. Ces principes sont liés à la notion d’émergence, dont Robert Laughlin est un ardent défenseur, et qu’il convient à présent de cerner.

- Émergence

- *La notion d’émergence en philosophie des sciences*

Il faut distinguer plusieurs types d’émergence. Présentons d’abord celle qui nous semble la plus pertinente, à savoir l’émergence de conscience au sein de la matière. Le philosophe américain Jaegwon Kim est l’un des spécialistes de la question de l’émergence, surtout celle relative à la philosophie de l’esprit. Dans une publication¹⁹⁹ de 1999, il pointe les différentes propriétés des phénomènes émergents. Voici la définition qu’il donne de l’émergence : “lorsque les systèmes possèdent des degrés de complexité organisationnelle de plus en plus élevés, ils commencent à exhiber des propriétés nouvelles qui, dans un certain sens, transcendent les propriétés de leurs parties constitutives, et leur comportement ne peut être prédit à partir des lois qui gouvernent les systèmes plus simples”²⁰⁰. Ces propriétés nouvelles ne sont pas le fait d’une énigmatique force vitale, mais plutôt le résultat d’interactions créant de nouvelles capacités d’organisation. Le point important est que les phénomènes émergents ont des pouvoirs causaux, notamment sur les niveaux inférieurs (on parle de causalité descendante, ou *downward causation*) : les phénomènes émergents introduisent de nouvelles structures causales dans le monde (l’exemple le plus évident est celui de la volonté, qui permet à la conscience de faire agir le corps sur le monde). Ils ne sont ni *explicables*, ni *prévisibles*, à partir du niveau inférieur d’où ils émergent. Imaginons que nous ayons accès aux propriétés microstructurales totales d’un objet donné (les particules qui le constituent, leurs propriétés, leurs relations). Que dire des propriétés de l’objet lui-même ? On différencie dans ce cas les propriétés *résultantes* (*resultant properties*) qui sont additives et prévisibles, des propriétés *émergentes*, qui sont nouvelles et imprévisibles. Ici, ce qui est visé est l’imprévisibilité théorique : on peut très bien connaître les conditions basales M qui causent le phénomène émergent E en théorie, on ne pourra pas prédire forcément E. Cela peut tenir au fait que nous n’avons même pas le concept de E. Notamment, dans le cas où E est une qualité (une *qualia*), on ne saurait dire ce qu’est E avant d’en avoir l’expérience (c’est le cas des émotions). Par contre, on aura une prévisibilité inductive : on saura relier un certain état M à son état correspondant E (un état du cerveau à un état de conscience par exemple).

Il semble que la vision qu’ont les physiciens de l’émergence s’approche plus de ce que Kim nomme les phénomènes “résultants”. La philosophe de la physique Margaret Morrison présente ainsi une vision

¹⁹⁹ Kim, Jaegwon, 1999, “Making sense of emergence”, in *Philosophical Studies*, Vol. 95, pp. 3-36

²⁰⁰ *ibid.*, p. 3 (“as systems acquire increasingly higher degrees of organizational complexity they begin to exhibit novel properties that in some sense transcend the properties of their constituent parts, and behave in ways that cannot be predicted on the basis of the laws governing simpler systems”)

différente de la notion d'émergence, plutôt liée à la loi des grands nombres²⁰¹. Pour elle, un exemple typique de phénomène émergent est la cristallisation : les électrons et nucléons qui composent le réseau cristallin ne possèdent pas les propriétés de rigidité, de régularité ou d'élasticité qui sont des caractéristiques du solide. Ces propriétés "émergent" en ce qu'elles ne se manifestent que lorsque l'on a "assez" de particules et qu'on est à des températures "assez" basses. Ce qui est intéressant avec ce type de propriétés émergentes, c'est qu'elles dépendent peu du substrat d'où elles émergent : en ce sens on peut parler d'universalisme. Contrairement à la vision de Putnam et Oppenheim, la réduction méthodologique n'est plus possible : on est face à une "vue hiérarchique du monde où des phénomènes émergent de leurs parties constitutives mais en sont indépendants, dans le sens où ils ne peuvent être réduits à, expliqués par, ou prédits à partir de ses constituants"²⁰². Wilson introduisit²⁰³ en 1983 le Groupe de Renormalisation (*Renormalization Group*) afin de formaliser le fait que l'étude d'un phénomène à une certaine échelle d'énergie se faisait en "oubliant" les détails microscopiques. Laughlin a pour coutume d'utiliser l'exemple des peintures de l'impressionniste Claude Monet pour imager ce principe : de près, on ne discerne rien, mais de loin, on voit se former un dessin en laissant notre regard mélanger les couleurs et oublier les détails microscopiques qui nous brouillaient l'image. Par ailleurs, une autre caractéristique importante des phénomènes émergents (et c'est aussi la définition qu'en donne Robert Laughlin), c'est qu'ils *disparaissent* lorsque les éléments qui les composent sont dissociés : ainsi, dans un cristal, on pourra parler du phonon, le quantum élémentaire de son, comme d'une véritable particule, mais lorsque le cristal cesse d'exister, le phonon n'a plus d'existence car la notion de son n'a aucun sens pour un atome isolé.

Reste un dernier cas d'émergence, qui fait le lien entre les deux précédents : c'est l'émergence en biologie. Ici, parler d'émergence a plusieurs conséquences : il s'agit de savoir si la biologie est une science autonome, ou juste une branche complexe de la physique, tout en ne tombant pas dans le "piège" du vitalisme, qui discerne le vivant de l'inerte par une métaphysique force vitale qui ne peut s'accorder avec le travail scientifique positif. C'est la question à laquelle s'est attelée Ernst Mayr²⁰⁴. Pour lui, le réductionnisme est aujourd'hui moins accepté en physique, car on y a reconnu l'importance du hasard et de l'indéterminé au sein des théories : "les scientifiques reconnaissent aujourd'hui que la plupart des lois physiques ne sont pas universelles mais plutôt de nature statistique, et donc que la plupart des prédictions ne peuvent qu'être probabilistes. Ils ont aussi réalisé que les processus stochastiques opèrent à travers tout l'univers, à tous les

²⁰¹ Morrison, Margaret, 2006, "Emergence, Reduction, and Theoretical Principles: Rethinking Fundamentalism", in *Philosophy of Science*, Vol. 73 (Dec. 2006), pp. 876-889.

²⁰² *ibid.*, p 882.

²⁰³ Wilson, K. G. (1983), "The Renormalization Group and Critical Phenomena", *Reviews of Modern Physics*, **47**, pp. 583-600.

²⁰⁴ Mayr, Ernst, 1988, "Is biology an autonomous science?", in: Ernst Mayr, *Toward a new philosophy of biology*, Cambridge: Harvard, pp. 8-23

niveaux, des particules subatomiques aux systèmes climatiques, aux courants océaniques, aux galaxies”²⁰⁵. La vision de la biologie s’accorde alors avec cette nouvelle physique de l’organisation statistique, non véritablement prévisible, la physique qu’aujourd’hui nous nommons physique des systèmes complexes adaptatifs, où l’organisation compte plus que la composition matérielle : “la différence qui existe entre la matière inerte et les organismes vivants n’est pas due à une différence de *substrat* mais plutôt à une *organisation* différente de la matière dans les systèmes vivants”²⁰⁶. À cette problématique de l’organisation est associée celle de la complexité du vivant, notamment liée au fait que ce sont des systèmes ouverts, c’est-à-dire qu’ils maintiennent leur état par des phénomènes d’homéostasie, des mécanismes de feed-back, qui permettent de réagir à l’environnement et de s’y adapter, ce que ne peut faire la matière inerte. Dans cette vision en termes de systèmes, on peut parler d’émergence dans le sens où les systèmes à chaque niveau hiérarchique agissent comme des Tous (comme s’ils étaient des entités homogènes et non pas composées d’entités hétérogènes), et leurs caractéristiques ne peuvent être déduites (même pas en théorie, selon Ernst Mayr, ce qui l’oppose pleinement au réductionnisme fort de Putnam et Oppenheim) de la connaissance complète des composants, pris séparément ou dans d’autres combinaisons : “de nouvelles caractéristiques du tout émergent sans pouvoir être prédites à partir de la connaissance des constituants”²⁰⁷.

○ *Des lois émergentes*

Avec la notion d’émergence, l’idée de créativité, d’imprévisibilité, de nouveauté, vient rompre avec la monotonie de l’entreprise réductionniste. Les lois peuvent alors être vues comme étant posées *par* les faits, c’est-à-dire comme construites dans le temps, plutôt que posées *pour* les faits, c’est-à-dire comme substrat fondamental auquel on peut attribuer un dessein, comme le Principe Anthropique peut amener à songer. Comme le résume Émile Boutroux, “les lois sont le lit où passe le torrent des faits : ils l’ont creusé, bien qu’ils le suivent”²⁰⁸. On se rappellera ici la notion whiteheadienne de société, d’accord commun tacite qui fait apparaître une *tendance* là où il n’y avait pas de finalité, un ordre là où il n’y avait qu’hétérogénéité.

Robert Laughlin se présente en physique comme un grand défenseur de la cause émergentiste, et de la notion selon laquelle toutes les lois seraient émergentes²⁰⁹. Pour lui, le concept de loi n’est pas naturel : la nature n’est pas aussi logique que de pures mathématiques. Les lois émergent de façon imprévisible au travers des principes d’organisation, et ce sont ces lois-ci que nous utilisons lorsque nous faisons de l’ingénierie : des

²⁰⁵ *ibid.*, p. 12. (“Scientists now recognize that most physical laws are not universal but are rather statistical in nature, and that prediction therefore can only be probabilistic in most case. They have also realized that stochastic processes operate throughout the universe, at every level, from subatomic particles to weather systems, to ocean currents, to galaxies”)

²⁰⁶ *ibid.*, p 12. (“The differences which do exist between inanimate matter and living organisms are due not to a difference in substrate but rather to a different organization of matter in living systems”).

²⁰⁷ *Ibid.* (“New characteristics of the whole emerge that could not have been predicted from a knowledge of the constituents”)

²⁰⁸ Boutroux, É., *op.cit.*, ch III

²⁰⁹ Nous reprenons ici des idées présentées lors d’une conférence intitulée “The Age of Emergence” donnée à l’université de Tübingen, en Allemagne, le 6 Mai 2008. Ces idées sont exposées dans son livre *A Different Universe: Reinventing physics from the Bottom Down*, Basic Books, NY, 2005.

lois “intuitives”, souvent phénoménologiques et qualitatives car complexes, mais essentielles à la pleine compréhension des systèmes étudiés. Par exemple, la rigidité est une notion que le scientifique des nanotechnologies ne connaîtra pas : regardant les atomes au microscope, il est comme l’amateur d’art qui regarderait un tableau impressionniste de près, il ne discerne pas ce phénomène, cette structure émergente. Robert Laughlin invite à un retour aux sciences “positives”, qui ne cherchent pas dans l’infiniment petit la solution ultime de l’Univers, mais regardent plutôt dans l’infiniment complexe les comportements émergents pour en comprendre la formation, l’organisation.

Cette quête de l’auto-organisation mène à la recherche de nouvelles lois, d’un autre universalisme, d’une nouvelle théorie du tout. Philosophiquement on peut dire que l’on passe d’une philosophie de l’être (celle qui cherche l’essence ultime des choses et qui, en une formule, nous “donne” le reste) à une philosophie du devenir (qui place dans le temps, à la manière de Bergson, la créativité, l’émergence de possibles, et ne présage de rien).²¹⁰ Comme nous l’avons déjà vu, Stuart Kauffman a posé les bases de la recherche de ces lois de l’auto-organisation. Il a notamment travaillé sur les “réseaux booléens NK”, c’est-à-dire des réseaux composés d’un nombre N de bits (c’est-à-dire d’éléments pouvant avoir comme valeur 0 ou 1), qui sont connectés par K liens. A chaque élément est associée une fonction booléenne décrivant comment la valeur de l’élément en question change *en fonction* de la valeur des éléments auxquels il est relié. De tels réseaux peuvent modéliser de nombreux systèmes différents : réseau de protéine, de gènes, de neurones, réseaux sociaux, économiques... Le comportement de tels réseaux peut être étudié simplement selon les paramètres N , K , et aussi un paramètre P biaisant les fonctions booléennes afin d’introduire une notion d’adaptation et d’apprentissage dans le réseau (par exemple un neurone “apprendra” à ne réagir qu’à certains signaux, ce qui équivaut à modifier sa fonction booléenne pour ne changer sa valeur que lorsque certaines entrées particulières changent). Grossièrement, trois comportements majeurs peuvent être mis en évidence : un comportement ordonné pour $K < 2$, où les éléments se bloquent rapidement dans une structure fixe (Kauffman parle de phase “solide” du réseau), un comportement chaotique pour $K > 2$, c’est-à-dire que les éléments changent souvent de valeur sans que des régularités puissent être mises en évidence (c’est l’état “gazeux” du réseau), et un comportement “complexe” pour $K = 2$, qui est celui qui nous intéresse, et dans lequel les éléments, ayant en moyenne une entrée et une sortie, vont faire apparaître des cycles collectifs, des états stables, robustes mais pouvant changer et s’adapter. Toute la théorie de Kauffman consiste à montrer que la sélection naturelle favorise l’apparition de tels états “à la frontière du chaos” (*at the edge of chaos*) où l’adaptation est rapide car l’auto-organisation bat son plein. Ceci l’amène à avoir un autre regard sur l’émergence de l’homme dans la nature : nous ne sommes pas un improbable accident comme les

²¹⁰ On retrouve cette idée dans *La nouvelle alliance*, (Prigogine, I. & Stengers, I., *op.cit.*). La transition philosophique de l’être au devenir suit la transformation des pensées en physique qui mène de l’étude réductionniste des lois fondamentales réversibles des systèmes simples à l’étude des phénomènes irréversibles qui gouvernent les systèmes complexes adaptatifs. La science ne peut plus déterminer *a priori* l’ensemble des déterminations possibles d’un système, mais doit déterminer par l’expérience *a posteriori* ce qu’il convient de prendre en compte pour le décrire. En effet, “loin de l’équilibre, c’est à partir du régime collectif d’activité et non *a priori* et une fois pour toutes que se décide ce qui est insignifiant et ce qui doit être pris en compte” (p 430). La sensibilité du système à de nouveaux paramètres qui nous paraissaient insignifiants à l’équilibre, voilà aussi ce qui nous préoccupait lorsque nous explorions la fausseté des modèles au début de cette section. Dans cette nouvelle optique épistémologique, “le dialogue expérimental se redécouvre dans son caractère de jeu risqué, dont l’enjeu est la pertinence de la question, la légitimité de la simplification” (p 431).

réductionnistes peuvent le laisser entendre, mais le fruit d'une nécessité née de l'auto-organisation et de la sélection naturelle : nous devions être là, mais il n'y avait aucune finalité à cela²¹¹.

L'idée d'auto-organisation, alliée à l'idée d'information, a notamment mené le physicien quantique Seth Lloyd à proposer une théorie de l'Univers comme étant "auto-programmé". L'imprévisibilité de l'émergence de structures ordonnées dans notre Univers est alors du même type que l'imprévisibilité qu'un programme étant écrit de façon aléatoire puisse donner un résultat non trivial. L'univers serait en constante auto-interprétation, et il aurait pu évoluer dans le temps en se raffinant vers plus de stabilité, à la manière de l'évolution biologique. Seth Lloyd base sa théorie sur la théorie de l'ordinateur quantique, et, en remarquant que l'Univers est quantique au niveau des particules fondamentales qui le composent, nous pouvons facilement en arriver à l'idée que l'Univers est un ordianteur quantique autonome.

En fait, par rapport à l'entreprise réductionniste où nous pouvons trouver un rêve de raison suffisante dans la quête de la loi ultime, les émergentistes semblent chercher le Dieu leibnizien au sein même des phénomènes : c'est la *causa sui*, l'auto-réalisation qui engendre ce qui est et qui persiste. Avec cette notion semble révolue l'idée même d'un Principe Anthropique²¹², car l'émergence suppose que l'on ne peut prédire de ce qui se réalisera, que tout se fait entre la contingence de l'évènement et la nécessité des principes d'organisation. On ne peut donc se placer dans cet "entendement" divin où tous les possibles sont donnés, exposés à l'avance, et où l'on choisirait celui dans lequel nous vivons et qui contraint fondamentalement notre présence. Une telle notion de l'émergence est très en vogue actuellement dans le milieu scientifique, mais elle manque néanmoins d'un soutien philosophique fort. C'est dans la théorie de Meillassoux que nous allons trouver la rigueur philosophique nécessaire à l'élaboration d'une pensée de la contingence et de l'émergence de possibles qui ne sont pas "donnés d'avance".

²¹¹ Le discours de Kauffman a des accents de prêcheur qui peut gêner certains scientifiques. On retrouve notamment dans *At Home in the Universe* des passages moquant la complainte réductionniste qu'il critique sans ménagement ("We the lucky. We the very, very lucky. We the impossible", p 44) à l'exaltation prophétique de celui qui a compris le sens des choses ("We, the expected, and we, the ad hoc. We, the children of the ultimate law. We, the children of the filigrees of historical accident", p 185)

²¹² C'est en voyant Robert Laughlin se rire ouvertement du Principe Anthropique et de la quête du multivers au cours d'un séminaire à Tübingen que s'est faite claire la divergence de pensée entre émergentistes et réductionnistes concernant ce qui est fondamental et ce que la science *peut* et *doit* dire. En contraste, quelques mois auparavant, nous avions assisté à une conférence à l'université de Princeton, au sein de département d'astrophysique, sur les multivers et les moyens d'émettre des probabilités sur la présence d'observateurs dans les univers, conférence que l'on pourrait qualifier de "réductionniste" et qui a aussi été, du moins en partie, à l'origine de l'écriture de ce mémoire.

c. La fin de la raison suffisante : la fin du Principe Anthropique?

*In the beginning, the world has nothing at all
Heaven was not, nor earth, nor space
Because it was not, it bethought itself:
I will be. It emitted heat.*

Texte d’Egypte Antique (cité dans Barrow et Tipler, *op.cit.*, §6.14)

Nous l’avons vu, la réponse faite par les physiciens non réductionnistes au Principe Anthropique est celle de l’émergent, de l’imprévisible, de l’auto-organisé ou de l’auto-programmé qui sous-tend la possibilité de nouveauté. D’une certaine manière, cette vision garde en elle ce qui fait l’essence même du travail scientifique : la fixation d’une entité immuable, ici le principe d’organisation, c’est-à-dire le devenir. Les lois fondamentales changent de type mais elles restent des nécessités premières indiscutables dans un cadre scientifique. Reste alors la spéculation philosophique pour aller plus en amont du problème et remonter à la source de tout questionnement sur le Principe Anthropique, c’est-à-dire sur la nécessité que certaines lois existent et mènent à notre (probable ou improbable) émergence. En “déprobabilisant” l’Univers, en pensant la contingence radicale des lois de la nature, Quentin Meillassoux nous emmène dans les arcanes du Principe Anthropique, qui nous l’avons vu repose sur les probabilités bayésiennes, puis y met à jour les postulats infondés qui peuvent générer un tel raisonnement, et propose une voie de sortie spéculative s’appuyant notamment sur la “création *ex nihilo*” pour fonder une nouvelle vision de la temporalité.

Comme nous l’avons vu en 2.b.i, pour Meillassoux, il s’agit de dénoncer “l’illusion fixiste du devenir sensible” : l’illusion qu’il y aurait des constantes, des lois immuables du devenir. [...] Aussi longtemps [...] que nous croirons qu’il existe une raison pour laquelle les choses doivent être ainsi plutôt qu’autrement, nous ferons de ce monde un mystère, puisqu’une telle raison, jamais, ne nous sera délivrée”²¹³. Selon lui, nous nous trouvons devant certains faits dont nous ne pouvons donner de raison d’être ainsi plutôt qu’autrement, c’est-à-dire des faits qui ne sont pas soumis au Principe de Non Contradiction leibnizien. C’est ce qu’il appelle le problème de la facticité, qu’il définit comme l’ignorance du “devoir-être-ainsi” du monde que nous observons, opposé à la contingence, qui est le savoir du “pouvoir-être-autre” des choses de notre monde. Le problème de la facticité est ce qui mena le philosophe Ludwig Wittgenstein à limiter notre jugement du monde au seul dicible : la proposition 6.522 du *Tractatus logico-philosophicus* dit ainsi qu’ “il y a assurément de l’indicible. Il se montre, c’est le Mystique”. En posant ainsi notre “finitude” comme limitation essentielle à la connaissance du monde, et en nous privant de la découverte d’un absolu par la raison, la philosophie moderne a laissé la place à un “retour exacerbé du religieux”. Le questionnement lié au Principe Anthropique en est la marque.

Pour sortir de cette finitude, il convient de penser un nouvel absolu. Meillassoux introduit alors “l’irraison”, qui est le concept d’absence pure de raison de ce qui existe (les choses, les lois...). L’irraison n’est pas une ignorance, c’est un savoir, celui que le Principe de Raison Suffisante est faux. De ce principe d’irraison découle l’idée d’un temps “capable d’abolir comme de faire émerger toute chose”, “un temps capable, de

²¹³ Meillassoux, Q., *Après la finitude*, op.cit., p 112

*détruire sans loi toute loi physique*²¹⁴. Ce temps est plus que le temps des émergentistes, qui admet encore des principes d'organisation comme raison du devenir-tel-quel du monde : “ce n'est pas un temps héraclitéen, car il n'est pas la loi éternelle du devenir, mais l'éternel devenir possible, et sans loi, de toute loi. C'est un Temps capable de détruire jusqu'au devenir lui-même en faisant advenir, peut-être pour toujours, le Fixe, le statique, et le Mort”²¹⁵. C'est un temps essentiellement créatif, une puissance d'émergence et de destruction sans raison, auquel Meillassoux donne le nom de “surchaos” (pour le différencier d'un chaos, qui n'est chaos qu'*étant données* des lois). La contingence est radicale en ce qu'elle est à la base de tout ce qui est. Seul le fait que tout soit contingent n'est pas contingent.

Que reste-t-il, si tout est contingent? Il ne reste que le Principe de non Contradiction, qui impose à ce qui est d'être non contradictoire, et la création *ex nihilo*, qui traduit la manière d'émerger de ce qui est. Ce “*ex nihilo*” a ici une signification précise liée à la *structure* des possibles. N'étant pas contraints par aucune raison suffisante, les possibles ne peuvent plus être totalisés : c'est que nous évoquions plus tôt lorsque nous marquions la différence entre le hasard qui totalise un ensemble de possibles pour calculer des probabilités et la contingence qui sort du cadre des probabilités. Cette idée de “Non-Tout”, Meillassoux la puise dans la notion de *transfini*. Cette notion mathématique est liée aux travaux du mathématicien Georg Cantor à la fin du XIX^{ème} siècle. Étant donnés certains axiomes, nous pouvons construire un “nombre ordinal” pour caractériser l'infini. De cette façon nous pouvons classer plusieurs infinis selon leur “grandeur” : le nombre ordinal associé à l'ensemble des entiers naturels est plus petit que le nombre ordinal associé à l'ensemble des réels. Ce qui nous intéresse, c'est le fait que la collection des ordinaux ne forme pas un ensemble : nous avons l'idée de “Non-Tout” dont s'inspire Meillassoux, l'idée d'une quantité plus qu'infinie, une quantité *transfinie* de possibles. À partir de là, nous pouvons voir notre monde comme un ensemble clos d'actualisations (des lois, des particules, etc.) auxquelles sont associés des possibles (c'est-à-dire possibles par les lois, les constantes universelles etc.), baignant dans une non-totalité de “virtualités” qui peuvent émerger dans notre Univers sans raison. Aussi la création *ex nihilo* est-elle l'émergence hors d'une non-totalité qui n'est pas *rien* mais qui est la collection des possibles non contradictoires.

Voilà alors la réponse que la théorie de Meillassoux peut apporter aux anthropistes. Ceux-ci entendent calculer le nombre d'univers possibles. L'impasse est que ce nombre ne peut être déterminé par l'expérience, ni *a priori*, puisqu'il n'y a pas de procédure strictement mathématique (c'est-à-dire sans “raison suffisante”) pour limiter les cas d'univers possibles. Pourquoi arrêter à un certain moment l'ensemble des univers possibles à une totalité déterminée ? En somme, ni les mathématiques ni la physique ne permettent de totaliser l'ensemble des univers possibles. L'anthropisme mélange de façon arbitraire des considérations *a priori* et *a posteriori* : il parle de mondes possibles théoriques, dont il limite le nombre pour des raisons empiriques, en décrétant qu'ils doivent tous être soumis à des lois structurellement comparables à celles que nous observons dans notre monde (c'est-à-dire que les univers possibles sont produits par variation des déterminations de notre propre univers). Ce principe d'homogénéité structurale des univers possibles ne peut

²¹⁴ *ibid.*, p 84

²¹⁵ *ibid.*, p 88

se réclamer ni de la physique, ni des mathématiques. On est bel et bien en présence d'un principe métaphysique de clôture des possibles. C'est encore le dieu de Leibniz, cet entendement qui fait clôture. L'intérêt du transfini est qu'il ne se contente pas d'ajouter des possibles, mais d'en changer la structure en les détotalisant : il ajoute des virtualités, non des potentialités. C'est une sortie radicale aux problèmes liés au Principe Anthropique, qui pose un absolu rigoureux là où la *croyance* en la Raison Suffisante laissait la place au retour de la religion et de la métaphysique dans les sciences.

Conclusion

Nous voici arrivés au terme de notre exploration du Principe Anthropique. Nous avons évoqué les questions qu'il soulève aussi bien en physique théorique qu'en philosophie, pour le voir se poser au final comme point d'ancrage remarquable d'un conflit interne à la physique, un conflit épistémologique centré autour de ce qui a assuré la réussite même de la physique classique : la réduction de la causalité à des lois fondamentales simples et objectives.

Le Principe Anthropique part d'un constat simple : nous, observateurs de notre Univers, sommes présents au sein de l'objet de nos descriptions. Il a donc bien fallu que les conditions soient réunies pour que notre émergence puisse avoir lieu. Notre connaissance de "l'objet Univers" consiste en un corpus de quelques lois fondamentales, qui permettent, à partir de certaines données quantitatives brutes que sont les constantes fondamentales et les conditions initiales de l'Univers, de réaliser des prédictions sur le devenir dynamique, la structure et le contenu de l'Univers. Avec un tel "Univers jouet", dont on peut faire varier les constantes, les conditions initiales et examiner les divers devenirs possibles, allant des plus proches au nôtre aux plus extravagants, il apparaît évident, et même *calculable*, que nous habitons une zone très restreinte de l'espace des paramètres fondamentaux, une zone où l'ensemble des données quantitatives invariantes fondamentales apparaît assez finement réglé pour permettre la stabilité de la matière, la profusion suffisante de systèmes planétaires stables, une chimie variée etc., conduisant au final à l'émergence de vie. Cette vision du Principe Anthropique, celle qui est véritablement originelle, ne questionne pas, ou du moins pas directement, comme on a pu le dire, la présence de l'homme au sein de l'Univers. Non, la question soulevée par le Principe Anthropique est bien plus profonde : c'est celle de la mesure physique, de la validité épistémologique du raisonnement récuratif consistant à partir de l'observation expérimentale pour contraindre les divers paramètres en jeu dans la modélisation du phénomène. Ce qui différencie le Principe Anthropique de la mesure habituelle, néanmoins, c'est la non-reproductibilité de l'expérience : nous ne pouvons pas *reproduire* l'histoire de l'Univers avec des conditions différentes, des paramètres fondamentaux différents, nous ne pouvons que reproduire une *modélisation* différente, une modélisation qui s'inspire de ce que *cet Univers-ci, notre Univers* a pu nous apprendre des lois et des paramètres pertinents pour calculer et modéliser sa dynamique. A ce dilemme contredisant le travail même du physicien, plusieurs approches sont possibles. Les uns opteront pour une recherche de *nécessité* qui coupe court à toute interrogation sur les possibles : l'arrangement subtil des constantes *devait* être ainsi et non pas autrement. Cette vision posant une nécessité derrière l'arrangement des invariants de la physique pousse au finalisme, en ce qu'elle exclue définitivement toute alternative à l'émergence de l'homme dans l'Univers. Pour d'autres, c'est le *hasard* qui a mené à cette situation, car à l'introduction de finalité et de nécessité, la réponse du hasard est toujours la plus commode : elle le fut pour les atomistes, la voilà qui réapparaît chez les physiciens modernes. Un tel hasard doit trouver sa source dans la matière : une vision matérialiste ne peut s'accorder de penser un "avant"-Big-Bang sans conservation d'énergie, c'est-à-dire de penser une création *ex-nihilo* de matière. Voilà alors qu'apparaissent les multivers, structures arborescentes d'Univers multiples où les possibles s'actualisent au gré de lois supérieures, lois suprêmes, fussent-elles les lois du hasard. Nous serions de façon logique dans l'un de ces

multiples Univers qui, par chance, permettrait l'émergence de vie. A la nécessité, on oppose la profusion. A la finalité, la chance, le hasard. C'est la réponse principale des physiciens au problème du principe Anthropique. Cette réponse satisfait à des critères scientifiques certains, puisqu'elle opte pour la modélisation d'un certain objet (le multivers), soumis à certaines lois faisant partie de nos théories actuelles (mécanique quantique, relativité générale, théorie des cordes), qu'elle émet de nombreuses hypothèses permettant de faire des prédictions, et donc d'être écartées si l'observation (bienque limitée, puisque restreinte à notre Univers observable) prouve le contraire. Un travail difficile de *fait*, mais possible en *droit*. Mais nous ne résolvons pas le problème de la nécessité introduite précédemment, nous ne faisons que la reporter à une méta-loi, un méta-univers qui est lui même contraint d'avoir une certaine structure, donnée par une théorie "socle", une théorie fondamentale, donnant raison au reste de nos théories qui en dérivent logiquement. Ces deux optiques, répondant au *fine-tuning* par la nécessité ou par le hasard, ne s'excluent donc pas fondamentalement, elle ne font que refléter le postulat fondateur de la physique classique, la physique "réductionniste", c'est-à-dire qu'il y a une *raison suffisante*, une loi ultime contraignant les choses de l'Univers, et l'Univers lui-même, à obéir à certains axiomes, peut-être un seul, faisant de la physique une mathématique limitée, close par ce principe souverain, excluant certaines possibilités accordées par l'utilisation du principe de Non Contradiction seul.

Ainsi, le Principe Anthropique n'est pas une *atteinte* à la physique, une dérive finaliste dans une science qui en refuse la moindre trace ; non, c'est au contraire le *fondement* de cette physique classique même, la marque visible des postulats oubliés, la résurgence de ce que la mécanique classique sous-entendait, avec son Principe de minimisation de l'Action liant définitivement déterminisme et finalisme, ou encore connaissance de la *fin* des choses et connaissance de *toutes* choses. Le Principe Anthropique, c'est la connaissance des moyens par la connaissance de la fin, la réversibilité du devenir de l'Univers, c'est la croyance que, la fin des sciences approchant, notre appareil théorique nous permettra de contraindre avec toujours plus de précision les conditions initiales par le phénomène observé, par la mesure effectuée. C'est la croyance en un devenir morne, prévisible, inactif, réductible à l'être qui le parcourt, ce qu'Einstein exprimait en ces termes : "Pour nous autres, physiciens convaincus, la distinction entre passé, présent et futur n'est qu'une illusion, même si elle est tenace"²¹⁶. Cette exclusion du devenir a une cause. En se séparant de la physique aristotélicienne, la physique en a nié tout héritage, à commencer par la présence de vie, de finalité au sein de ce qui nous est le plus proche : les êtres biologiques. Puis la méthode cartésienne, analytique, décomposant les problèmes complexes que notre entourage direct impose à notre intuition en des systèmes simples, idéalisés, au comportement réversible, a laissé entendre que cette complexité était, de façon récursive, recomposable à partir des éléments de base. La simplification de l'inerte, du stable : voilà ce qui fut la tâche de la physique dans les siècles qui suivirent. Cette révolution de pensée, qui a fondé pour une grande part la science que nous connaissons aujourd'hui, et qui mena à des succès remarquables dans la description de certains aspects de la nature, il n'est nullement question de la remettre en question. Nous avons ici voulu mettre en lumière les limites d'une telle physique réductionniste, ses postulats critiquables, pour montrer qu'elle *contenait déjà en elle* les bases du Principe Anthropique.

²¹⁶ *Correspondance Albert Einstein- Michele Besso, 1903-1955*, Paris, Hermann, 1972.

Nous avons pour cela tenté de rendre compte de ce que les sciences de la complexité, mais aussi la biologie, posent comme problèmes conceptuels proprement *inédits* à une telle vision réductionniste. La causalité unique, prévisible, “efficiente” de la physique classique fait face à la multiplicité, la complexité, et surtout la finalité des causes en biologie. Des propriétés, des fonctions émergent dans le vivant, et elles le font sans se réduire aux simples propriétés de ce à partir de quoi elles émergent. Le vivant nous montre une *évolution créatrice*, il exhibe du *sens* dans ses entités élémentaires, ses organes : des notions que la physique classique n’autorise pas. La biologie est une science où contingence des phénomènes et nécessité des lois d’organisation physique ou biochimique se lient dans la perpétuelle production de nouveau, c’est-à-dire une science proprement *historique*. L’enjeu des sciences de la complexité (aussi dite science des systèmes adaptatifs) est justement de lier les aspects légaux de la physique à ceux historiques de la biologie, car pour reprendre les mots de Stuart Kauffman, “nous n’avons pas de cadre de travail adéquat pour introduire des lois dans une science historique et pour introduire l’histoire dans une science faite de lois”²¹⁷. Une vision plus profonde de la physique, qui ne nie pas l’héritage réductionniste qui fut si prolifique, mais le réconcilie avec ce qu’il avait expressément occulté, à savoir les instabilités, le chaos détrônant les conditions initiales de leur suprématie sur le devenir, la non-linéarité des causes, et de façon plus générale les systèmes *ouverts*, où des régulations maintiennent le système en équilibre avec son environnement, pour le poser comme nouveau fondement stable, nouvelle pierre, nouvelle condition initiale d’un devenir encore tout contingent. Placé dans cette perspective, le Principe Anthropique apparaît désuet, voire prétentieux : poser la prééminence de l’être sur le devenir en prétendant pouvoir traquer l’origine dans la fin, c’est nier notre entourage, nier ce qui fonde notre vie même, nier l’histoire, la vie, l’art, nier la puissance d’émergence de nouveau au sein de l’actuel. Les philosophes du devenir, comme Bergson ou Whitehead ont analysé avec finesse et profondeur la métaphysique liée à une telle systématisation conceptuelle. Dans le cas de Bergson, il est peu étonnant que sa notion de temps vécu, de durée comme base métaphysique nécessaire à la pleine prise en compte de la créativité inhérente à notre Univers ait été pour Einstein une curiosité philosophique qui n’enlevait rien à la pleine prééminence du seul temps concevable, le temps du physicien. Ces métaphysiques pourraient suffire à poser de solides bases à notre travail, en assurant un suivi philosophique sérieux des thèses émergentistes, et en remplaçant ainsi le Principe Anthropique dans la perspective qu’il se doit : la reformulation de la notion de mesure en physique classique réductionniste. Néanmoins, nous avons voulu aller plus loin, car il *fallait* aller plus loin. En effet, remplacer l’être par le devenir, c’est transférer les nécessités : on passe des lois ontologiques aux lois organisationnelles. Les unes sont les bases fondamentales de l’Univers, et elles agissent sur des types très restreints d’êtres, les autres sont les contraintes fondamentales d’agencement de ce qui est, et elles sont peu dépendantes du substrat sur lequel elles agissent. Nous élargissons l’application de la nécessité, mais ne la supprimons pas : nous pensons qu’il *doit* y avoir complexification, ou de façon plus générale et abstraite un traitement d’information, et donc que l’univers *doit* voir de la nouveauté émerger. A ce titre, nous ne sommes plus isolés dans un monde qui ne nous désire pas, mais au contraire “chez nous dans l’univers”, un Univers qui ne fait que pousser infatigablement à l’émergence de possible. La simple opposition réductionnisme/émergentisme ne suffit

²¹⁷ Kauffman, S., *At Home in the Universe*, p. 185 (“We have no adequate framework for the place of law in a historical science and the place of history in a lawful science”).

donc pas à résoudre la question fondamentale que pose le Principe Anthropique, à savoir la question de la nécessité des lois de la nature. Le graal de la physique, la quête de lois fondamentales, qu'elles soient réductibles en une loi suprême à laquelle se réduisent toutes les autres ou qu'elles émergent d'une loi d'auto-organisation générale qui exprime la possibilité de créer du nouveau, est bien empli de métaphysique, encore : cette quête est celle de la *raison suffisante*, qui fut posée par principe par Leibniz pour rendre compte de la cause suprême ayant favorisé l'existence de notre monde devant tous les autres mondes possibles. Cette raison suffisante, rien ne l'implique de manière *a priori* : c'est l'habitude de voir *a posteriori* l'uniformité des lois qui nous pousse à croire en leur *éternelle* uniformité, et au final en leur nécessité. Le travail spéculatif de Meillassoux a justement été de rejeter ce Principe de Raison Suffisante pour ne garder que le seul Principe de Non Contradiction, base de la logique et des mathématiques. De manière concrète, ce geste conceptuel a un impact très puissant sur ce qui fonde l'idée même de Principe Anthropique, mais aussi celle des multivers : il "détotalise" les possibles, ne les contraint plus à la soumission à un certain type de loi, une certaine raison suffisante, mais pose la collection des possibles comme radicalement ouverte. Nous ne sommes même plus dans le cadre de l'infini, qui est encore totalisable sous le sceau du transfini, comme les travaux de Cantor en furent le témoignage troublant. Nous sommes cette fois dans un espace intotalisable à l'image de la collection des transfinis qui, eux, sortent de tout cadre, toute clôture possible. A cette idée de profusion véritablement illimitée des possibles, qui en établit la *structure*, correspond un principe ontologique d'émergence, d'*actualisation* de ces possibles : c'est le *principe d'irraison*. A l'inverse du Principe de Raison Suffisante, ce principe pose le temps comme puissance d'émergence *sans raison* de ce qui est, que ce soient les lois fondamentales, la matière, ou bien encore les *qualia* (sensations et autres qualités ressenties). C'est donc une vision de la contingence radicale qui est exposée, à opposer au hasard des physiciens qui reste contraint à un certain ensemble de possibles afin de *probabiliser* l'occurrence d'un évènement, c'est-à-dire de *prédire* sur un devenir possible *considérant* un certain état de réalisation actuelle. Cette capacité d'émergence sans raison n'est sans doute pas sans lien avec certaines visions émergentistes fortes ; ce qui change, c'est l'abandon total de la nécessité du devenir même. Cet abandon était pressenti par Ilya prigogine et Isabelle Stengers dans *La nouvelle alliance* : "aucune nécessité logique n'imposait que, dans la nature, des structures dissipatives²¹⁸ existent effectivement; il a fallu le "fait cosmologique" d'un Univers capable de maintenir certains systèmes loin de l'équilibre pour que le monde macroscopique soit un monde peuplé d' "observateurs", c'est-à-dire une nature"²¹⁹. La spéculation de Meillassoux construit un socle philosophique adéquat intégrant ce "fait cosmologique" dans un système de pensée cohérent. La finalité y est proprement évincée, et non plus dissimulée. Le Principe Anthropique se résume finalement à une analyse historique partielle : tout comme en histoire, il pose une finalité pour traiter des causes d'un évènement, et assume de ne pouvoir totaliser l'ensemble des données, c'est-à-dire en histoire l'ensemble des actions, conscientes ou inconscientes, et de toutes relatives importances, qui mènent à l'avènement d'un fait particulier, unique, irréversible, ce qui dans le cas du Principe Anthropique correspond à l'émergence de

²¹⁸ Les structures dissipatives sont des structures qui se maintiennent hors-équilibre par la relation qu'elles entretiennent avec leur environnement : un exemple d'une telle structure est le cyclone, dont la durée de vie est bien supérieure au temps que passent les particules d'air en son sein.

²¹⁹ Prigogine, I. & Stengers, I., *La nouvelle alliance*, Gallimard, 1979, p.372

l'homme. Certains voudraient voir les sciences historiques se dresser au statut de l'idéal scientifique que représente la physique classique. Toute la question est de savoir si ce n'est pas à la physique de s'élever au rang d'histoire, en combinant habilement régularités et nouveautés, stabilités et transitions. Nous terminerons en citant Émile Boutroux : "c'est l'acte qui implique l'essence, bien loin que l'essence puisse expliquer l'acte. Ce n'est donc pas la nature des choses qui doit être l'objet suprême de nos recherches scientifiques, c'est leur histoire"²²⁰.

²²⁰ Boutroux, É., *op.cit.*, p 145.

Bibliographie

- Anderson, P. W., 1972, "More is different", in *Science*, New Series, Vol. 177, No. 4047 (Aug. 4, 1972)
- Barrau, A., *Quelques éléments de physique et de philosophie des multivers*, disponible en téléchargement gratuit sur http://lpsc.in2p3.fr/ams/aurelien/aurelien/multivers_lpsc.pdf.
- Barrow, J.D., & Tipler, F.J., *The Anthropic Cosmological Principle*, Oxford University Press, 1986
- Bergson, H., *L'évolution créatrice*, [1907], PUF éd. "Quadrige" 2007
- Boutroux, Émile, *De la contingence des lois de la nature*, [1874], 2nd éd., Paris, 1895
- Carter, B., "Anthropic Principle in cosmology", preprint gr-qc/0606117, 2006
- Chyba, C.F., & Hand, K.P., "Astrobiology: The Study of the Living Universe", *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* 2005, **43**, 31-74
- Cohen-Tannoudji, G., *Les constantes universelles*, Hachette, Paris, 1998
- Colas, D., *La finalité dans la nature de Descartes à Kant*, coll. Philosophies, PUF, 1996
- Garcia-Belildo, "The paradigm of inflation", *Advances in Astronomy*, 2005, pp 19-39.
- Hume, D., *Dialogues sur la religion naturelle* (1779), éd. Michel Malherbe, Vrin, 1997
- Kauffman, S. *At home in the universe, The search for the laws of self-organisation and complexity*, Oxford University Press, 1996
- Kim, J., 1999, "Making sense of emergence", in *Philosophical Studies*, Vol. 95, pp. 3-36
- Lachière-Rey, M., *Au-delà de l'espace et du temps*, éd. Le Pommier, 2003
- Laughlin, Robert B., and Pines, D., "The theory of everything", in *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol. 97 (Jan. 4, 2000), pp. 28-31
- Lecourt, D., "Principe Anthropique", in *Dictionnaire d'histoire et philosophie des sciences*, PUF, 4^e éd., Paris, 2006
- Leibniz, G.W., *Monadologie* (1703), éd. Michel Fichant, Gallimard, 2004, p 227
- Le hasard aujourd'hui*, éd. Du Seuil, 1991 (entretiens diffusés sur France Culture dans le cadre des "Perspectives scientifiques")
- Lewis, D., *On the plurality of worlds*, Blackwell, Oxford, 1986, trad. fr. *De la pluralité des mondes*, M. Caveribère et J.-P. Cometti, Paris, éd. De l'Éclat, 2007
- Mayr, Ernst, "Cause and effect in biology", in: Ernst Mayr, *Toward a new philosophy of biology*, Cambridge: Harvard, pp. 24-37, 1988
- Mayr, Ernst, "Is biology an autonomous science?", in: Ernst Mayr, *Toward a new philosophy of biology*, Cambridge: Harvard, pp. 8-23, 1988
- Meillassoux, Q., *Après la finitude, essai sur la nécessité de la contingence*, préface d'Alain Badiou, L'ordre philosophique, Seuil, 2006

- Morrison, M., “Emergence, Reduction, and Theoretical Principles: Rethinking Fundamentalism”, in *Philosophy of Science*, Vol. 73, pp. 876-889, 2006
- Morrison, M., “Where have all theories gone?”, in *Philosophy of Science*, Vol. 74, pp. 195-228, 2007
- Prigogine, I. & Stengers, I., *La nouvelle alliance*, Gallimard, 1979
- Putnam, Hilary, and Paul Oppenheim, 1958, “The Unity of Science as a Working Hypothesis”, in Herbert Feigl, Grover Maxwell, Maw Scriven (eds.), *Minnesota Studies in the Philosophy of Science*, Vol. 2, pp. 3-36.
- Smolin, L., “Scientific alternative to the anthropic principle”, arxiv hep-th/0407213, 2004
- Stenger, V.J., *God : The Failed Hypothesis – How Science Shows That God Does Not Exist*, Prometheus Books, 2007
- Tegmark, M., “Is the theory of everything merely the ultimate ensemble theory”, *Ann. Phys.* **270**, 1, 1988.
- Weisberg, J., “Firing Squads and Fine Tuning: Sober on the Design Argument”, 2005

Remerciements

Je tiens ici à signaler l'importance qu'ont revêtu certains ouvrages dans l'écriture de ce mémoire : l'ouvrage de référence *The Anthropic Cosmological Principle*, la "bible" du Principe Anthropique, écrit par les physiciens John Barrow et Frank Tipler, l'excellent mémoire *Quelques éléments de physique et de philosophie des multivers* du physicien Aurélien Barrau, ainsi que l'essai de philosophie spéculative sur la contingence des lois de la nature, *Après la finitude*, écrit par le philosophe Quentin Meillassoux, dont les cours à l'Ecole Normale Supérieure furent une inspiration remarquable pour ce travail, et qui eut la gentillesse de guider mes recherches philosophiques lorsque celles-ci n'en étaient qu'à leur état embryonnaire. Je tiens aussi à remercier de façon plus générale l'Ecole Normale Supérieure d'avoir pu m'offrir l'opportunité d'effectuer un long séjour dans le laboratoire d'astrophysique de l'université de Princeton, où je me suis initié à la cosmologie, et où j'ai aussi pu appréhender de manière directe les problématiques du Principe Anthropique ; je remercie aussi le master LOPHISS de m'avoir permis d'explorer au cours d'une année remarquable les disciplines d'histoire et philosophie des sciences, en même temps que je reconsidérerai la biologie et même la physique sous un jour nouveau, année interdisciplinaire qui fut essentielle à la vision d'ensemble qu'exigeait la rédaction d'un tel mémoire. Je pus notamment effectuer une école d'été interdisciplinaire à l'université de Tübingen, où j'ai abordé les problématiques du réductionnisme et de l'émergence en présence d'étudiants et de professeurs de diverses disciplines, avec notamment l'intervention du physicien lauréat du Prix Nobel Robert Laughlin, dont l'ardeur à défendre l'émergence m'encouragea à inscrire le Principe Anthropique dans l'optique des thèses réductionnistes. Je tiens enfin bien entendu à remercier mon directeur de mémoire Marc Lachièze-Rey, que j'avais pu découvrir à travers ses travaux en cosmologie et en histoire de la cosmologie, qui m'accorda de son temps pour de multiples discussions sur le sujet, notamment sur les divers domaines de physique théorique traversés par le Principe Anthropique.

Les traductions présentes dans ce mémoire sont souvent inédites, et sont dues à l'auteur, avec l'aide précieuse de Charles Samuelson.

