

Université de Montréal

**La flèche du temps. Analyse philosophique d'une métaphore
scientifique**

par
David Montminy

Département de philosophie
Faculté des arts et des sciences

Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures en vue de l'obtention du
grade de Maître ès arts (M.A.) en philosophie

Avril, 2015

© David Montminy, 2015

Résumé

Le problème de la direction du temps est un problème classique autant en physique qu'en philosophie. Quoiqu'il existe plusieurs façons de s'interroger sur ce problème, l'approche thermodynamique est la plus fréquemment utilisée. Cette approche consiste à considérer la flèche du temps thermodynamique comme la flèche fondamentale de laquelle les autres flèches ne sont que des manifestations. Ce mémoire vise à fournir une analyse philosophique de cette approche. Pour ce faire, nous esquisserons la problématique générale, nous exposerons les différentes approches et théories alternatives visant à résoudre ce problème et nous présenterons la thèse forte soutenant l'approche thermodynamique. Ensuite, nous évaluerons la pertinence du recours à la mécanique statistique et à la cosmologie visant à remédier aux déficiences de cette même approche. Enfin, nous analyserons en quoi cette approche, et plus particulièrement la notion d'entropie, est en mesure de fournir un cadre conceptuel pour la résolution du problème de la flèche du temps.

Mots-clés: Entropie, Épistémologie, Flèche du temps, Hypothèse sur le passé, Réalisme.

Abstract

The problem of the direction of time is a classical problem in both physics and philosophy. Although there are various ways to tackle this problem, the thermodynamic approach is the most commonly used. This approach considers the thermodynamic arrow of time as the fundamental arrow of which all other arrows are only manifestations. This essay aims to provide a philosophical analysis of this approach. To do this, we sketch the research question, we introduce various alternate theories and approaches set to answer this problem, and present the strong thesis underlying the thermodynamic approach. Then we will evaluate the use of statistical mechanics and cosmology that are used in attempt to mitigate the deficiencies of this approach. Finally, we will analyze how this approach, and more importantly the notion of entropy, can provide an adequate conceptual scheme to solve the problem of the arrow of time.

Keywords : Arrow of time, Entropy, Epistemology, Past Hypothesis, Realism

Table des matières

1	Introduction	1
1.1	Problématique	3
1.2	Structure générale de l'ouvrage	4
2	Science et philosophie du temps	6
2.1	Définitions	6
2.2	Qu'est-ce que le temps ?	10
2.3	La théorie causale du temps	12
2.4	La théorie présentiste du temps	14
2.5	La théorie géométrique de la flèche du temps	15
2.6	Asymétrie du temps ou asymétrie dans le temps	18
2.6.1	L'importance de l'observateur	19
3	L'approche thermodynamique classique	22
3.1	Thermodynamique	23
3.1.1	Description phénoménologique	27
3.2	Mécanique statistique	30
3.2.1	Problème principal de la mécanique statistique	36
3.3	Cosmologie	39
3.4	Conclusions	43
4	Analyse	45
4.1	Approfondissement des notions centrales de l'approche thermodynamique classique	45
4.1.1	Le second principe	46

4.1.1.1	Les approches causales	46
4.1.1.2	L'approche à asymétrie unique	48
4.1.1.3	Problèmes avec l'approche de Boltzmann	50
4.1.2	Entropie	52
4.1.2.1	Asymétrie et entropie	52
4.1.2.2	Équilibre et entropie	53
4.1.2.3	Information et entropie	58
4.1.2.4	Comparaison et entropie	62
4.2	L'Hypothèse sur le passé : les conditions initiales requièrent-elles une explication ?	71
4.2.1	La réponse négative : Craig Callender	71
4.2.1.1	L'Hypothèse sur le passé comme loi fondamentale	76
4.2.2	La réponse positive : Huw Price.	79
4.2.2.1	Qu'est-ce qu'une explication satisfaisante ?	83
5	Conclusion	86
	Bibliographie	90

Notation

\wedge	conjonction
δ	différence (delta)
\vee	disjonction
\in	élément
λ	facteur de mesure (<i>scaling</i>)
\rightarrow	implication
\subset	inclusion
\prec	préséance
$\not\prec$	préséance (négation de)
\prod	produit
\exists	quantificateur existentiel
\forall	quantificateur universel
\sum	sommation
$:$	tel que

À mes soeurs, Martine, Catherine et Nadine.

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier M. Yvon Gauthier, mon directeur de recherche, pour ses conseils et ses enseignements de grande qualité. Je remercie également Messieurs Perinetti, Guillin, Lepage et Bouchard de m'avoir transmis, en plus de leur amour pour la connaissance, les outils pour l'atteindre et l'organiser

Sur une note plus personnelle, je tiens également à remercier mes parents, qui à travers leur support ont su me fournir un environnement dans lequel j'ai pu me développer et acquérir les moyens de mener une vie bonne. Merci à Benoît Hardy, qui depuis plus de deux décennies, à coup d'affrontements et de défis, a su attiser en moi le désir de dépassement et d'excellence. Merci à Martine Montminy de m'avoir fait connaître l'importance et la valeur des arts et de la culture. Merci à Gabriel Meunier pour ses commentaires sur une version antérieure de ce manuscrit, et plus fondamentalement, pour sa présence à mes côtés en tant qu'homme de science et partenaire dans notre entreprise de sape des pseudosciences et irrationalismes en tous genres. Enfin, je me dois de conclure ces remerciements avec le plus important d'entre tous, celui adressé à Andrea, *mi querida*, qui depuis trois ans m'inspire et me comble d'un amour vif et authentique. Merci.

Avant-propos

La métaphore est un outil remarquable. Elle permet la simplification, l'exemplification et la comparaison, qui toutes ont le pouvoir d'étoffer et d'approfondir la compréhension. Elle est utile en science, suspecte en philosophie et essentielle en art. Ce travail se conçoit donc comme une entreprise visant à départager l'utilité et la suspicion dans l'utilisation des métaphores pour comprendre le monde qui nous entoure. Le temps, par son aspect fluide, transcendant, fuyant et insaisissable appelle la métaphore : peu de notions physiques sont si fondamentales qu'elles demandent presque toujours une métaphore pour en saisir ne serait-ce qu'une portion de réalité. C'est en étant fasciné par le temps, motivé par un idéal de clarté et de rigueur propre à la philosophie des sciences, et inspiré par *La persistance de la mémoire* que j'entreprends de traiter de la flèche du temps. C'est donc avec Aristote comme modèle et Dalí comme bougie d'allumage que je rédige ce mémoire, en espérant qu'il puisse permettre une compréhension moins métaphorique, mais tout aussi riche de ce qu'est le temps.

Chapitre 1

Introduction

*O speculatori dello continuo moto,
quanti vani disegni in simile cerca
ave' creati! Accompagnatevi colli
cercator d'oro. - Leonardo Da
Vinci*

*Les métaphores sont dangereuses.
L'amour commence par une
métaphore. - Milan Kundera*

Déterminer quelles sont les composantes fondamentales et le fonctionnement du monde naturel est l'objet de la physique ; déterminer quels sont les moyens appropriés pour accomplir ceci est la tâche de la philosophie. La physique, jadis appelée philosophie naturelle, a longtemps mis l'accent sur la nature de l'espace et du temps. La philosophie du temps est quant à elle animée par une grande variété de questions. Quelle est la nature du temps ? Le temps existe-t-il indépendamment de nous ? Le temps a-t-il une direction, un commencement ou encore une fin ?

La relativité générale, la mécanique quantique, la mécanique statistique et la thermodynamique offrent des réponses à ces questions, or certaines de celles-ci ne s'accordent pas et d'autres sont même littéralement contradictoires. Une réflexion

critique sur les théories qui s'affrontent ici nous semble donc tout à fait requise. Cette entreprise devrait selon nous, s'effectuer sur deux fronts : une analyse des structures logicomathématiques des théories et des lois fondamentales postulées par celles-ci ; ainsi qu'une étude approfondie des présupposés et des conséquences épistémologiques de ces mêmes entités théoriques.

Le sujet sur lequel portera ce mémoire est celui de la direction du temps, le problème philosophique classique associé à ce « thème » philosophique est communément désigné « le problème de la flèche du temps ». La métaphore de la flèche fut introduite en 1927 par Arthur Eddington qui voulait désigner l'unidirectionnalité temporelle des phénomènes physiques de façon plus élégante. Aujourd'hui, la littérature réfère souvent à ce phénomène en parlant d'asymétrie temporelle.

Or, l'existence même d'une telle asymétrie est parfois remise en question. Selon la position épistémologique que l'on adopte, on peut prétendre que le temps coule réellement dans une direction, ou encore affirmer que cette asymétrie n'est que dans le sujet observateur. La mise en place de la problématique de recherche semble donc mériter à elle seule une réflexion philosophique.

Une certaine tradition allant de Boltzmann à Hawking, prétend que la réponse à la direction du temps se trouve dans la thermodynamique, en particulier dans le second principe de cette discipline, celle concernant le concept d'entropie. Pour d'autres auteurs, ce concept n'est en rien lié à la direction du temps, il n'est qu'une mesure du désordre. D'autres encore sont sceptiques quant à l'existence réelle d'une flèche du temps, ou encore soutiennent que la thermodynamique nous permet d'expliquer une variété de phénomènes, allant de l'expansion de l'Univers à l'asymétrie de la connaissance et de la possibilité d'intervention.

Une question centrale de tout ce débat porte sur la nature des théories scientifiques. Si elles sont le reflet fidèle de la « réalité physique », alors suivant la mécanique quantique, la causalité et le déterminisme laissent place au hasard et à l'indéterminisme. En contrepartie, si les théories scientifiques ne sont que des constructions humaines, la tâche semble donc de critiquer principalement les structures de celles-ci, or cette seconde approche laisse poindre un relativisme possiblement néfaste.

Nous nous proposons donc de traiter de la question du temps, en nous concentrant sur son apparente asymétrie, en utilisant pour ce faire la physique contempo-

raine jumelée à une réflexion épistémologique. Nous pourrions ainsi nous attaquer de façon pertinente à des questions du type : existe-t-il une asymétrie du temps, ou seulement une asymétrie des objets dans le temps ? Quelle est la portée philosophique du concept d'entropie ? Quelle est la valeur des hypothèses statistiques concernant par exemple, les conditions initiales d'un système, ou les distributions uniformes de probabilités ?

L'objectif principal de ce mémoire est de présenter au lecteur une appréciation philosophique du débat actuel sur le problème de la direction du temps.

1.1 Problématique

L'expérience quotidienne semble indiquer que le temps coule toujours dans la même direction, c'est-à-dire du passé vers le futur et jamais dans la direction inverse. Nous appelons cette caractéristique du temps l'asymétrie temporelle. Cette asymétrie se manifeste de plusieurs façons. Nous naissons jeunes et mourrons vieux, nous avons des souvenirs du passé et non pas du futur, nous avons, en revanche la possibilité d'agir sur le futur, mais le passé semble quant à lui immuable. Il semble également exister différentes flèches du temps. Celle qui sera au cœur de notre analyse ici est la flèche thermodynamique. Celle-ci est responsable du fait que la chaleur se déplace d'un corps chaud vers un corps froid et qu'elle ne fait jamais le chemin inverse. Cette flèche semble être la plus banale et avoir la portée la plus restreinte des flèches communément admises. Pourtant, plusieurs personnes, et ce depuis plus d'un siècle, croient que c'est la flèche du temps thermodynamique qui est la plus importante de toutes et que les autres ne sont que des manifestations de celle-ci.

Un des problèmes posés par la direction du temps est le fait qu'il ne semble pas exister de loi physique qui puisse rendre compte de ce phénomène qui semble somme toute assez évident. Le problème se complique davantage lorsqu'on apprend que toutes les équations au sein des théories fondamentales de la physique sont symétriques, c'est-à-dire qu'elles peuvent décrire les phénomènes comme se déroulant du passé vers le futur, mais également du futur vers le passé. Parmi ces théories qui sont indifférentes quant au renversement temporel, on retrouve les lois newtoniennes du mouvement, la relativité générale, la mécanique quan-

tique, le théorème CPT et la théorie des cordes¹. Nous voulons rendre compte d'une asymétrie qui semble affecter la totalité des objets de l'Univers, or les lois que nous avons pour décrire les objets de l'Univers (les lois de la physique) sont parfaitement symétriques².

1.2 Structure générale de l'ouvrage

Le premier et présent chapitre s'affaire, après une courte introduction et exposition de la problématique, à présenter chacun des chapitres individuellement afin de bien cerner en quoi le thème de chacun de ceux-ci est relié aux autres de façon conceptuelle ou pour des raisons épistémologiques.

Le second chapitre offre, outre une définition des termes techniques majeurs, une présentation des différentes flèches et théories du temps. Cette entreprise a pour but de donner des exemples concrets et de souligner l'ampleur des phénomènes qui sont potentiellement expliqués par certaines des approches englobantes que nous présenterons au cours de cet ouvrage.

Le troisième chapitre fait la présentation de la thèse thermodynamique. Une rapide mise en contexte historique précède une exposition technique primaire du fonctionnement de cette discipline. Par la suite, nous introduisons le lecteur aux deux autres disciplines nécessaires à l'élaboration de la thèse forte : la mécanique statistique et la cosmologie.

Le quatrième chapitre consiste en l'analyse proprement dite. L'approche thermodynamique étant sans contredit l'approche la plus importante dans le traitement du problème de la direction du temps, nous consacrons la première partie de ce chapitre à un approfondissement des notions centrales de cette approche,

1. Le cas de l'électromagnétisme fait l'objet d'un débat quant à sa symétrie, Malament (2003) présente des arguments en faveur d'une interprétation classique, donc symétrique, alors qu'Albert (2000) argumente en faveur d'une interprétation asymétrique.

2. Cet aspect symétrique des lois du mouvement peut, dans certains contextes, s'avérer de nature conventionnelle seulement. Il suffit d'imaginer une particule dans un Univers sans aucune autre particule. “*One can even ask whether the result is so interesting for the philosophy of time, or threatening for the harmony between different parts of physics. After all, Hamiltonian mechanics also allows the existence of irreversible processes, for example, the motion of a free particle in an otherwise empty universe*”. (Jos Uffink. “Bluff your Way in the Second Law of Thermodynamics.” *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, Vol. 32, No. 3, 2001, p. 93)

c'est-à-dire le second principe et l'entropie. La seconde partie s'intéresse à l'Hypothèse sur le passé qui est introduite au chapitre précédent et présente deux thèses contemporaines sur la portée et la validité de cette hypothèse.

Le cinquième chapitre fait office de conclusion. Adoptant une perspective épistémologique, ce dernier chapitre énonce les limites des approches mentionnées antérieurement et propose divers principes de précaution philosophique et méthodologique pour éviter les écueils du réalisme.

Chapitre 2

Science et philosophie du temps

Quel est l'élément fondamental que l'on doit prendre en considération lorsqu'on tente d'établir une théorie sur la nature du temps ? C'est précisément parce qu'il n'y a pas consensus sur cette question que le sujet est intéressant et mérite une attention particulière. C'est également pour cette raison que nous présenterons les approches les plus importantes historiquement et les plus prometteuses théoriquement. Or avant toute chose, il est de mise de bien s'entendre sur la terminologie qui sera utilisée lors de l'ouvrage, nous fournirons donc une brève définition des termes techniques les plus fréquemment utilisés.

2.1 Définitions

Afin de bien s'assurer d'éviter la confusion due à l'utilisation de termes qui peuvent soit avoir une grande variété de signification, ou encore présenter un haut niveau de technicité, nous introduirons ici les termes principaux.

Approches. Nous présenterons ici plusieurs approches et théories. L'approche est à distinguer de la théorie. Alors que la théorie est un ensemble de propositions et d'explications sur un thème ou sujet précis, l'approche est le cadre dans lequel s'effectue la théorisation et l'observation menant à l'élaboration d'une théorie. L'approche est davantage assimilable au programme de recherche. Choisir une approche implique des choix épistémologiques, ontologiques, méthodologiques et esthétiques.

La flèche causale. La causalité est le phénomène asymétrique par excellence. Les notions de causes et d'effets sont intimement liées à la question du temps, afin d'être qualifiée de cause, un événement doit précéder un effet. Cette nécessaire préséance est une claire indication de la direction du temps. Quiconque a cependant fréquenté un tant soit peu Hume sait que définir ce qu'est la causalité en tant que telle n'est pas chose aisée. La constante conjonction de phénomènes n'est pas la causalité et inférer qu'elle le soit peut, comme nous le verrons plus bas, être source de plusieurs complications.

La flèche cosmologique. Le fait qu'il y ait eu un événement de type Big Bang, suivi d'une expansion rapide de l'espace-temps et formation d'étoiles, de galaxies et éventuellement de la vie intelligente, est ce qu'on appelle la flèche cosmologique.

La flèche psychologique. Le fait que le temps semble filer du passé vers le futur et que nous connaissons le passé et non le futur est ce à quoi l'on fait référence lorsqu'on parle de la flèche psychologique. Cette dernière différence de connaissance est fréquemment appelée l'accès épistémique asymétrique. Le fait que nous ayons des souvenirs du passé et non du futur est également une caractéristique de cette flèche.

La flèche thermodynamique. Cette flèche qui est cœur de tout cet ouvrage stipule que la perte d'énergie, sous forme de chaleur ou de travail, inhérente à tous processus thermiques est irréversible et cette perte s'effectue dans la direction que l'on nomme futur. Bien entendu cette flèche est de très près liée à la flèche causale et la flèche cosmologique, or, la thèse thermodynamique forte soutient que la flèche thermodynamique est la flèche fondamentale de laquelle les autres ne sont que des manifestations.

Possible. Plusieurs versions du second principe parlent de l'impossibilité de certains processus. Selon Uffink (2001) une analyse permet de dégager trois interprétations. Le premier sens de « possible » signifie : ce qui est permis selon une certaine théorie. Le second sens de « possible » signifie : ce qui est disponible (réalisable) dans le monde actuel (physique). Le troisième sens de « possible » signifie : ce qui est disponible à « nous », utilisable par nous. Nous pouvons certainement ajouter à ces trois interprétations celle que nous inspire la logique modale. Un quatrième sens de « possible » signifie : tout ce qui peut être, à l'exception de ce qui est impossible.

Symétrie. Le terme de symétrie et l'utilisation du qualificatif « asymétrique » seront très communs tout au long de l'ouvrage. Cette notion de symétrie est à distinguer de celle de réversibilité. On parle de symétrie lorsqu'on traite de théorie ou de loi. On qualifie une théorie de symétrique si la classe des processus possibles (*allow[ed]*) est symétrique dans le temps. Considérant un espace des phases Γ qui contient la totalité des états possibles du système, un état donné (instantané) étant représenté par s , et un processus \mathcal{P} comme une courbe paramétrée, Uffink (2001, p. 11) propose le formalisme suivant :

$$\mathcal{P} = \{s_t \in \Gamma : t_i \leq t \leq t_f\}.$$

Il propose également cette condition :

$$\mathcal{P} \in W \rightarrow \mathcal{P}' \in W$$

où \mathcal{P}' représente l'inversée temporelle de \mathcal{P} et où W représente la classe des mondes possibles qui admettent une symétrie dans le temps. La condition n'est pas violée si un processus possible dans W , demeure tout aussi possible dans sa version inversée dans le temps.

Irréversibilité. Une théorie peut donc être symétrique ou non, un processus est quant à lui réversible ou non. Les processus irréversibles sont évidemment le propre des théories asymétriques. Cette acception des termes est partagée à la fois par les défenseurs d'un réductionnisme géométrique (Castagnino *et al* 2003, p. 884)¹ ainsi que chez ceux qui privilégient l'approche thermodynamique. Uffink soutient cependant que l'usage du concept d'irréversibilité peut avoir une signification particulière en thermodynamique. La nature des transformations thermodynamiques influe sur l'interprétation que l'on fait de l'irréversibilité des processus en question.

1. "Time-reversal invariance is a property of laws : loosely speaking, a law is time-reversal invariant when it is expressed by a differential equation which is invariant under the transformation $t \rightarrow -t$ (we will return to this point later). By contrast, irreversibility is a property of processes : a process is irreversible if it is always observed in the same temporal order, and never in the inverse one. The problem of irreversibility consists in finding out how irreversible processes can be explained by means of time-reversal invariant laws. This problem may be related, in certain cases, to the problem of the arrow of time, but this fact does not cancel the conceptual difference between them". (Mario Castagnino, Olimpia Lombardi, Luis Lara. "The Global Arrow of Time as a Geometrical property of the Universe". *Foundations of Physics*, Vol. 33, No. 6, 2003, p. 884)

Cette impossibilité des états finaux à être restaurés à leur état initial s'apparente à une *irrécupérabilité* (*irrecoverability*). L'effet du vieillissement et de dégradation propre à un système thermodynamique représente ce qui constitue l'essence du second principe selon Planck² (Uffink 2001, p.13). Cette impossibilité de retour complet à l'état initial est ce qui caractérise le *riversibel* de Planck :

Ein Prozeß der auf keine einzige Weise vollständig rückgängig gemacht werden kann, heißt "irreversibel", alle andere Prozesse "reversibel".
(Planck 1897, § 122 in Uffink 2001, p. 45)

Quasi statique. Nous parlons d'un processus quasi statique lorsque ce dernier est caractérisé par des mouvements de particules si lents et délicats que le système demeure près de l'équilibre pour l'entièreté du processus (Uffink 2001, p. 15). Cette notion de processus quasi statique est à distinguer de celle de processus adiabatique.

Adiabatique. Un processus est adiabatique si ce processus s'effectue sans transfert de chaleur entre le système dans lequel a lieu le processus et son environnement. Un processus adiabatique s'effectue donc à température constante. En notation classique : U énergie interne ; W travail ; Q : chaleur, un processus adiabatique est caractérisé par $\delta Q = 0$, donc si

$$\delta U = \delta Q - \delta W$$

et

$$\delta Q = 0$$

on obtient

$$\delta U = -W.$$

Lieb et Yngvason (1999) utilisent quant à eux une définition particulière de transformations et d'accessibilité adiabatique³ que nous expliciterons plus bas.

2. "Planck puts the second law, the concepts of entropy and irreversibility at the very centre of thermodynamics. For him, the second law says that for all processes taking place in nature the total entropy of all systems involved increases, or, in a limiting case, remains constant. In the first case these processes are irreversible, in the second case reversible. Increase of entropy is therefore a necessary and sufficient criterion for irreversibility." (Uffink 2001, p. 42)

3. "A state t is adiabatically accessible from a state s , in symbols $s \prec t$, if it is possible to

2.2 Qu'est-ce que le temps ?

Quoique les points de vue présentés dans ce travail varient grandement, ils ont néanmoins plusieurs points en commun, notamment, le fait qu'ils s'inscrivent tous dans un contexte scientifique. Le thème général de l'ouvrage est certes la flèche du temps, or notre analyse est effectuée dans le cadre d'une étude systématique des théories scientifiques sur le problème de la direction du temps. Il ne s'agit pas ici de faire une recension de toutes les approches concernant la flèche du temps, mais bien de cerner et de présenter au lecteur les pistes de solutions les plus prometteuses en philosophie contemporaine des sciences. Alors, il est donc naturel que les différentes approches et théories présentées ici soient en accord avec les principes généraux de la science moderne, et plus principalement la physique. Une connaissance approfondie des débats actuels en astrophysique et en physique des particules n'est pas nécessaire afin de bien saisir les enjeux que soulèvent les différentes approches qui se succéderont au cours de l'ouvrage. Cependant, une connaissance sommaire et une acceptation de la validité des principes généraux de la physique contemporaine sont partagées par tous les auteurs majeurs cités dans cet ouvrage.

De façon générale, ces connaissances partagées émanent de la théorie de la relativité, autant restreinte que générale, de la mécanique quantique, de la thermodynamique, de la mécanique statistique, de la cosmologie contemporaine et des différentes approches en théories des probabilités.

En accord avec ces disciplines qui représentent, à bien des égards, l'apothéose du savoir humain, il sera donc acquis pour le reste de l'ouvrage que le temps est une des deux composantes du continuum fondamental qu'est l'espace-temps. Il s'agit en fait de la dimension temporelle qui s'ajoute aux trois dimensions communes de l'espace. Étant partie intégrante de ce continuum, le temps est donc conditionné par l'énergie et la masse des objets qui affectent, via la gravitation, la courbure de l'espace-temps. Comme l'exprime si bien Étienne Klein dans l'entrée « temps

change the state from s to t by means of an interaction with some device (which may consist of mechanical and electric parts as well as auxiliary thermodynamic systems) and a weight, in such a way that the auxiliary system returns to its initial state at the end of the process whereas the weight may have changed its position in a gravitational field" (Lieb & Yngvason 1999, p. 17 in Uffink 2001, p. 87)

» du *Dictionnaire d'histoire et philosophie des sciences* : « [d]ans un tel contexte, non seulement la vitesse des observateurs, mais aussi la masse influent directement sur la vitesse d'écoulement du temps. Par ce biais, le temps est maintenant soumis aux phénomènes⁴. » Dès lors, le temps n'est plus absolu comme le croyait Newton, mais il dépend de différents facteurs : il est relatif.

Cette relativité est bien entendu celle d'Einstein. Notre position est évidemment ici simplifiée à son maximum, car il existe en philosophie de la physique un intéressant débat concernant la nature de l'espace-temps en tant que tel. L'ouvrage de Frank Arntzenius fournit une excellente présentation des divers enjeux de cette thématique⁵. Le *substantialisme* soutient que l'espace-temps existe aux côtés des particules et des champs ; le *relationnisme* soutient que seuls les particules et les champs existent ; et le *supersubstantialisme* soutient que seul l'espace-temps existe, et que particules et champs ne sont que des propriétés de celui-ci (Arntzenius 2012, p. 125). Déterminer laquelle de ces approches est à privilégier dépasse largement notre propos, or nous ne postulons pas l'existence d'autres entités que celles présentées dans ces trois approches.

Tel que le mentionne Luciano Boi dans *Theories of Space-Time in Modern Physics*⁶, les théories fondamentales contemporaines s'articulent au sein de trois composantes géométriques essentielles : une topologie, une variété (*manifold*) et une métrique. La première nous permet de traiter de la relation entre plusieurs points dans un espace, la seconde nous permet de comparer les différents vecteurs à différents points de l'espace et la troisième permet de caractériser les vecteurs et les courbes, et par conséquent la structure des relations causales potentielles (Boi 2004, p. 477).

C'est dans cette optique que s'articulent, à des degrés divers, les théories et approches qui sont présentées dans ce texte.

4. Dominique Lecourt. *Dictionnaire d'histoire et philosophie des sciences*. Presses Universitaires de France, Paris, 2006, 1196 p.

5. Frank Arntzenius. *Space, Time and Stuff*. Oxford University Press, 2012

6. Luciano Boi. "Theories of Space-Time in Modern Physics" *Synthese*, Vol. 139, No. 3 2004, pp. 429-489

2.3 La théorie causale du temps

Comme son nom l'indique, cette théorie met l'accent sur la causalité. Il s'agit en fait de considérer l'asymétrie causale comme l'asymétrie fondamentale. Cette théorie prétend pouvoir rendre compte d'une variété de phénomènes. La flèche du temps cosmologique par exemple, est causalement expliquée par le fait qu'il existe une série d'événements, qu'on imagine divergeant et ayant un point commun (le Big Bang) qui, lorsqu'observés de façon consécutive forme en fait le matériel même de la flèche du temps. Sans postuler de téléologie, cette théorie considère la nature mouvante du temps comme le résultat d'une suite immensément longue de causes et d'effets.

L'asymétrie psychologique est expliquée par le fait que nous connaissons le passé, car ce sont les événements de ce dernier qui ont causé en nous ces connaissances. De même, notre compréhension intuitive de la causalité joue un rôle crucial dans notre conception même de ce que sont le passé et le futur. Nous considérons comme passé ce sur quoi nous ne pouvons agir, et futur ce sur quoi nous avons une possibilité d'action. On note deux problèmes potentiels avec cette théorie.

Le problème de la circularité : la définition de ce qui constitue le futur par ce qui est causé, et donc arrive *après* une cause qui est elle-même définie comme ce qui se passe *avant* l'effet observé.

Et le problème du pouvoir explicatif limité à la psychologie et à l'action. Toutefois, nous sommes contraints de reconnaître que le pouvoir explicatif exerce néanmoins un certain attrait. En effet, si la relation passé-futur s'explique par son adéquation à la relation cause-effet, il est aisé d'inférer, par exemple, que le coup de pied porté est la cause de l'ecchymose sur la cuisse. À l'inverse, tenter d'expliquer que c'est cette ecchymose qui a causé le coup de pied semble voué à l'échec. Il s'agit donc d'une forme de clause de plausibilité.

Or, le recours à ce genre de clause pour justifier la validité d'une théorie est épistémologiquement douteux. Notons au passage qu'un tel appel à la meilleure explication est également chose courante dans l'approche thermodynamique lorsqu'il s'agit de justifier cette approche eu égard à la portée des phénomènes tombant sous la coupe explicative. (Voir section 4.2.1)

Malgré les points faibles énumérés ci-dessus, il faut mentionner que dans une

perspective cosmologique, l'approche causale prend une tournure assez intéressante. Marc Lachièze-Rey (Hawking & Penrose 1997, p. 12) fait habilement remarquer que le principe de causalité peut s'avérer crucial dans une tentative de déterminer comment la structure même de l'Univers influe sur la nature du temps. La propagation de la matière (et de la lumière) est régie en partie par les structures des géodésiques. En fait, la structure de l'espace-temps est déterminée par le contenu énergétique de l'Univers, ce dernier étant naturellement défini $E = mc^2$. C'est l'organisation de ces droites idéalisées que sont les géodésiques qui déterminent quelles régions de l'espace-temps sont susceptibles d'être affectées par une autre région. Évidemment, ce qui est en jeu ici est la possibilité d'échange d'information entre deux régions. Étant soumis au champ gravitationnel, l'espace-temps est déformé et l'information se déplace le long des géodésiques qui forment donc la structure causale des événements (Lachièze-Rey in Hawking & Penrose 1997, p. 15)⁷.

Le point crucial ici est que notre accès épistémique est conditionné par cette structure. En effet, notre position dans l'Univers, quoiqu'idéalisée à plusieurs niveaux, demeure néanmoins située dans une région. Ceci a pour effet de limiter notre capacité d'observateur à considérer des phénomènes ayant lieu dans des régions qui nous sont accessibles. Nos observations se voient donc limitées à notre passé causal que l'on nomme également « horizon⁸ ». Pour un observateur situé, aucune connaissance n'est possible au-delà de cet horizon. Considérant ceci, il est approprié d'intégrer le concept de causalité dans une théorie du temps. Reste à savoir cependant si c'est en effet ce concept qui doit être considéré comme fondamental.

Les approches mettant l'accent sur les états d'équilibres font également intervenir la notion de causalité. Afin de postuler une évolution entre un état d'équilibre x et un autre état y , il faut postuler un mécanisme, une chaîne causale menant de l'un à l'autre. (Voir Uffink 2001, p. 14 et Mikkelsen 2004, p. 121)

7. Stephen Hawking & Roger Penrose. *La nature de l'espace et du temps*. Gallimard, Paris, 1997

8. *Ibid.*, p. 15

2.4 La théorie présentiste du temps

Outre Eddington, Reichenbach (1956) et Prigogine (1980) ont soutenu que le second principe permet de rendre compte de cet aspect de l'expérience humaine qui concerne l'écoulement du temps. Ce progrès du temps, cette actualisation des événements trouverait son fondement physique dans le second principe de la thermodynamique. Or, nous mentionne Uffink (2001, p. 10) en s'appuyant sur Grünbaum (1967) et Kroes (1985), cette posture est aujourd'hui intenable. Il dit : “[i]n fact the concept of time flow hardly ever enters in any physical theory⁹.” Uffink mentionne qu'une seule exception à cette règle est peut-être Newton avec sa conception de temps absolu qui « coule » par lui-même (*of itself*).

La question à laquelle répondent les défenseurs de cette théorie est la suivante : existe-t-il une différence objective entre le présent d'un côté, et le futur et le passé de l'autre ? Leur réponse est bien sûr affirmative. Le présent est cet instant toujours évanescant entre ce qui fut et ce qui sera. À contrario, le futur et le passé sont fixes et il ne semble y avoir aucune difficulté à les saisir. Or, la tentative même d'identifier le présent s'avère rapidement problématique. Il semble toujours y avoir un certain degré de convention lorsqu'on utilise le terme de présent. Tout dépendant du contexte dans lequel il est utilisé, le terme peut signifier une durée très variable, allant de la fraction de nanoseconde à plusieurs heures. Nonobstant ces imprécisions, certains penseurs soutiennent que c'est du côté du concept de « présent » que se trouve la solution du problème de la flèche du temps.

Il y a plusieurs formes de théorie présentiste du temps, aussi appelé présentisme, or, selon Price dans *The flow of time* (2011)¹⁰ elles ont toutes en commun le fait de considérer la notion de passage comme centrale dans la compréhension de ce qu'est le temps. Le présent est considéré comme un « cadre » ou un « morceau » de temps. C'est ce cadre qui constitue ce qui existe réellement lorsqu'on parle de temps. Évidemment, ces instants de présent changent constamment, il passe l'un après l'autre.

Une forme de présentisme proposée par C.D. Broad dans *Scientific Thought*

9. Uffink 2001, p. 10

10. Huw Price. “The flow of time.” in Craig Callender (ed.), *The Oxford Handbook of Time*, Oxford University Press, 2011, 690p.

(1923)¹¹ est ce qu'on appelle le *moving spotlight view*, il s'agit en fait de considérer le moment présent comme une maison qui est éclairée par le phare d'une voiture de police circulant dans une rue éclairant l'une à la suite de l'autre les maisons de la rue. Cette conception du présent est problématique à plusieurs niveaux. Price (2011, p. 3-5) en mentionne un qui suffit, à notre avis, à la discréditer. Cette forme de présentisme est problématique, car elle tente d'inclure au sein de sa théorie deux éléments qui sont incompatibles. Elle considère à la fois les morceaux de présent comme étant exclusifs, c'est-à-dire qu'ils ont une existence objective propre. On se souvient que selon cette théorie, c'est précisément, et uniquement le présent qui existe réellement. Mais du même souffle, ces morceaux sont également considérés inclusivement en ce qu'ils sont censés défiler l'un après l'autre. C'est précisément cette idée de défilement qui garantit la notion cruciale de passage. La théorie nous apparaît donc déficiente dans son articulation même.

2.5 La théorie géométrique de la flèche du temps

L'espace qu'occupent les mathématiques dans la physique contemporaine est considérable, à tel point qu'une compréhension des fondements mathématiques de la discipline est essentielle afin d'avoir une perspective d'ensemble sur les problèmes qui persistent au sein de cette dernière. À certains égards, les mathématiques ne sont pas seulement un outil pour quantifier ce qui est étudié par la physique, mais sont bel et bien un élément de ce qui est à l'étude. C'est dire que les propriétés mathématiques sont parfois considérées comme les propriétés de la nature en tant que telle. Cette approche envers le rapport des mathématiques à la physique varie considérablement et prend plusieurs formes. La version qui nous intéresse ici considère qu'une propriété fondamentale du monde physique est attribuable à une propriété mathématique de l'Univers. Cette théorie, mainte fois défendue, soutient que la flèche du temps est la résultante de la nature géométrique de l'espace-temps.

Une version récente de cette théorie est attribuable à Mario Castagnino, Olimpia Lombardi et Luis Lara dans une série de texte dont *The Global Arrow of Time as a Geometrical property of the Universe* (2003)¹² est un fidèle représentant.

11. C. D. Broad. *Scientific Thought*, Routledge & Kegan Paul, London, 1923

12. Mario Castagnino, Olimpia Lombardi, Luis Lara. "The Global Arrow of Time as a Geo-

Ces derniers la présentent comme la façon la plus fondamentale de s'attaquer au problème et celle permettant de rendre compte de la flèche du temps de manière globale. Cette approche géométrique s'oppose bien évidemment à l'approche classique, c'est-à-dire l'approche thermodynamique. L'approche de Castagnino *et al.* se fonde principalement sur la cosmologie et non sur la thermodynamique et la mécanique statistique.

La compréhension de deux principes cosmologiques est nécessaire à la formulation de la théorie géométrique de la flèche du temps. Ces principes sont l'unicité et l'universalité. Outre cette compréhension, la connaissance de deux hypothèses, empiriquement adéquates, ajoute de la profondeur à l'analyse philosophique de la cosmologie. Ces hypothèses sont l'homogénéité et le caractère dynamique de l'Univers (Castagnino *et al.* 2003, p. 880-881).

L'unicité est érigée en principe, car il est acquis qu'il n'y a qu'un seul Univers. Quoique possible, l'existence, ou encore un événement dans un autre espace-temps est absolument invérifiable (Castagnino *et al.* 2003, p. 880-881).

L'universalité souligne le fait que les lois de la physique sont partout et toujours vraies. Encore une fois, quoiqu'il soit logiquement possible que les lois changent dans le temps, ou d'un endroit à un autre, il n'y a aucune observation de cette nature et il serait impossible d'observer un tel changement dans un espace-temps inobservable. En fait, l'universalité est souvent considérée, par Feynman entre autres, comme une des caractéristiques les plus importantes d'une loi physique, spécialement en cosmologie¹³.

L'homogénéité ainsi que le caractère isotropique de l'Univers sont postulés. Le fait de considérer les étoiles et les galaxies comme des inhomogénéités locales et de se fier à la mesure du fond de radiation cosmique, ou rayonnement fossile, qui indiquent une isotropie quasi complète, permet de postuler avec confiance l'homogénéité et l'isotropie de l'Univers (Castagnino *et al.* 2003, p. 880).

Le caractère dynamique de l'Univers est responsable de l'expansion de l'espace-temps. Les structures cosmiques à grande échelle (galaxie et amas de galaxies) s'éloignent les unes des autres à une vitesse proportionnelle à leur distance relative

metrical property of the Universe". *Foundations of Physics*, Vol. 33, No. 6, 2003,

13. "The best characteristic of physical law is its universality, and if anything is universal it is the expansion of all the nebulae." (Richard Feynman. *The Character of Physical law*. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1985 p. 87)

de façon à ce que $\nu = H_0 d$, où H_0 est la valeur actuelle de la constante de Hubble. Ce constat, inféré à partir du décalage vers le rouge, permet de postuler le caractère non statique de l'Univers dans son ensemble.

Malgré l'absence de contenu strictement empirique des deux principes, ils permettent néanmoins de fournir des modèles et de participer à l'élaboration d'une méthodologie optimale à employer en cosmologie (Castagnino *et al.* 2003, p. 880). En fait, l'utilisation de modèles mathématiques sert à s'assurer, lorsque ceux-ci dérivent de données empiriques, que nous conjecturons effectivement à propos de l'Univers dans lequel nous vivons et non pas à propos d'une fiction mathématique abstraite.

C'est donc bien ancrée dans la cosmologie que s'articule la théorie de Castagnino *et al.* S'inspirant entre autres des travaux d'Hermann Weyl, ils soutiennent que ce sont les lignes d'Univers postulées par ce dernier qui fournissent les assises théoriques sur lesquelles se basent la théorie géométrique de la flèche du temps. Ces lignes d'Univers sont en fait ce qui organisent la distribution du couple matière-énergie au sein de l'espace-temps quadridimensionnel. Cette organisation est le résultat des équations des champs de la relativité générale qui assurent la forte connexion entre la distribution du couple énergie-matière et les propriétés géométriques de l'espace-temps. En simplifiant outrageusement, la thèse est la suivante : l'asymétrie temporelle se résume à l'asymétrie des propriétés géométriques de l'espace-temps suivant la dimension temporelle de celle-ci. Parmi ces objets aux propriétés géométriques spécifiques, on retrouve les fameux cônes de lumière de l'espace de Minkowski.

Comme il s'agit d'une présentation sommaire de la position géométrique, nous n'exposerons pas les démonstrations et les arguments détaillés de cette approche. Or, nous pouvons ajouter que tout comme l'approche classique, cette approche a recours aux probabilités. Cependant, contrairement à l'approche classique où les probabilités sont utilisées de manière à justifier la croissance de l'entropie, elles le sont ici seulement de manière à rendre compte du fait que dans un modèle de type Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker (FLRW) utilisant la mesure de Lebesgue sur l'espace des phases, la probabilité d'un Univers symétrique est de zéro, d'où l'inférence d'une asymétrie temporelle (Castagnino *et al.* 2003, p. 902). Initiateur de l'hypothèse sur les lignes d'Univers de Weyl, Penrose soutient effectivement que

cette hypothèse conditionne les propriétés du jeune Univers de façon à ce qu'il soit conforme à un modèle FLRW¹⁴.

Une dernière comparaison est de mise avant de clore cette section. Alors que l'approche classique se fonde sur l'observation locale pour en inférer des régularités au niveau global, l'approche géométrique procède dans l'autre direction. Elle considère dans un premier temps les structures globales de l'Univers, en analyse ses propriétés et infère l'existence de structures analogues à l'ensemble des phénomènes naturels. Elle passe donc du global au local et non l'inverse. Enfin, les auteurs insistent sur le fait que même si dans leur approche la direction du temps est en quelque sorte une propriété émergente de l'espace-temps, ceci n'altère en rien son objectivité. C'est-à-dire, et la thèse est assez forte, que la flèche du temps émane de propriétés qui sont elles-mêmes objectives¹⁵, donc elles ne dépendent pas d'observations empiriques ou encore d'une perspective propre due à notre position d'observateur (Castagnino *et al.* 2003, p. 910 ; Lombardi 2002¹⁶).

2.6 Asymétrie du temps ou asymétrie dans le temps

Le temps est-il réellement asymétrique ou est-ce seulement les objets, pris au sens le plus large possible, qui présentent des caractéristiques asymétriques ? Nous avons tendance à attribuer une existence objective au temps et à considérer qu'il passe, qu'il « coule » dans la direction que l'on nomme futur. Or, une courte réflexion nous indique bien qu'une observation directe du temps est impossible. Nous ne pouvons qu'inférer son existence à travers une observation indirecte, c'est-à-dire via l'effet qu'a le temps sur les objets physiques. Même la notion intuitive de passage du temps est médiatisée par un substrat physique : le cerveau. Même cette

14. “*There is now some good mathematical evidence that some form of ‘Weyl curvature hypothesis’ indeed adequately constrains the Big Bang in a way that the resulting universe closely resembles an FLRW model in its early stages.*” (Penrose 2006, p. 768-769)

15. “*In other words, the geometrical approach has conceptual priority over the entropic approach, since the geometrical properties of the universe are more basic than its thermodynamic properties : the definition of entropy and the calculation of the entropy curve for the whole universe are possible only if the space-time has certain definite geometrical features.*” (Castagnino *et al.* 2003, p. 886)

16. Olympia Lombardi. “Determinism, internalism and objectivity” in *Between Chance and Choice*. H. Atmanspacher and R. Bishop (Eds.), Imprint-Academic, Thorverton, 2002

appréciation du temps qui est probablement la plus directe, celle qui ne requiert pas l'observation d'un système, est néanmoins dépendante d'un système soumis au paramètre temps : le corps humain.

Devant ce constat, la position classique des philosophes et hommes de sciences est de reconnaître que, quoique l'observation directe du temps est impossible, on peut néanmoins conjecturer à propos de sa nature via une multitude d'observations indirectes. C'est en partie ce en quoi consiste le pari de l'approche thermodynamique. La thermodynamique est une science phénoménologique, c'est-à-dire qu'elle s'occupe des manifestations macroscopiques des phénomènes thermiques. Même une fois jumelée à la mécanique statistique, qui s'occupe des manifestations microscopiques des mêmes phénomènes thermiques, la thermodynamique ne nous permet pas de décrire ce qu'est le temps *per se* (North 2011, p. 312). L'idée derrière l'approche thermodynamique sera donc d'observer dans le temps les systèmes thermodynamiques et de tenter d'inférer des propriétés générales à partir des observations et des analyses répétées. Quoique ces observations des objets dans le temps puissent très bien s'effectuer à l'extérieure de la thermodynamique, cette dernière semble avoir une relation privilégiée avec celui-ci, à travers le second principe notamment, nous reviendrons sur ces considérations au chapitre 3.

2.6.1 L'importance de l'observateur

La notion d'observateur est certes importante depuis longtemps dans le domaine de l'analyse scientifique, or cette notion a pris au courant du XXe siècle une importance capitale. Ceci est manifeste à travers la place centrale qu'occupe la position de l'observateur en théorie de la relativité et celle qu'occupe la notion de mesure en mécanique quantique.

La notion d'observateur est essentielle à la formulation de la théorie causale dont nous avons discuté plus haut. En effet, si la flèche causale est la flèche fondamentale, elle est censée rendre compte de toutes les autres flèches, or la notion même de causalité semble requérir un autre élément essentiel. Afin de constater un lien causal, on doit supposer un observateur qui est témoin de cette relation. Notre but ici n'est pas de traiter de l'objectivité de la causalité comme le commanderait une perspective humienne, or nous croyons néanmoins qu'il soit judicieux d'ajou-

ter le fait que la postulation d'un lien causal est une chose plus ardue qu'il n'y semble à première vue. De plus, comme le fait remarquer Price (2011, p. 25), la perspective d'un observateur semble nécessaire à l'explication du caractère intuitif de la causalité, ce qui nous apparaît problématique, car l'approche causale fait en définitive dépendre la flèche du temps d'une notion philosophiquement riche, mais controversée. Mais il faut avouer qu'il en est de même pour la notion d'entropie.

Le rôle de l'observateur prend des proportions cosmiques dans ce qu'on appelle couramment l'approche anthropique. Les variantes de celles-ci vont de la plus folle spéculation métaphysico-religieuse aux approches plus modérées, mais elles ont toutes en commun d'accorder un statut particulier à l'observateur, ou plus précisément à l'humanité dans son ensemble. De façon très sommaire, l'approche anthropique soutient que la flèche du temps existe et a les propriétés qu'on lui connaît afin que la vie et l'humanité puissent fleurir dans notre région de l'Univers. Dans une des versions de l'approche anthropique par exemple, il est soutenu que l'Univers a débuté dans un état d'entropie extrêmement faible afin que celle-ci puisse augmenter graduellement, et ceci parce que la croissance de l'entropie est une condition nécessaire au développement de la vie biologique et par conséquent à l'avènement de l'humanité. Une version plus modérée affirme que ce n'est pas en raison de l'apparition éventuelle de la vie sur terre que la flèche du temps est ainsi faite, mais bien que c'est uniquement parce que vivons dans une région où l'entropie est relativement faible que nous sommes en mesure de théoriser sur la nature du temps et de l'Univers. Une certaine lecture des travaux de Boltzmann tend à favoriser cette interprétation.

Nous pouvons bien entendu faire écho ici à la mécanique quantique et au problème de la mesure, c'est-à-dire le fait que toute mesure effectuée sur un système altère le système de façon à ce qu'il soit impossible de savoir dans quel état se trouvait le système avant la mesure. En modifiant un peu l'approche anthropique de façon à éviter les excès métaphysiques, on imagine une thèse qui soutiendrait non pas que les lois physiques sont ainsi faites en fonction du confort maximal de l'homme, mais seulement que certaines notions fondamentales — la causalité, la notion de passage ou de direction du temps — ne sont détectables que par un agent observateur. On voit ici poindre l'analogie avec le problème de la mesure.

Une composante du monde physique dépendrait donc de l'intervention hu-

maine, ou dans une moindre mesure de ses capacités cognitives. Price mentionne explicitement que le fait de prétendre que certaines propriétés physiques ne peuvent être détectées qu'avec un agent conscient est très similaire à la position d'Eugene Wigner qui prétend que l'effondrement du paquet d'onde, ou selon la terminologie exacte, la réduction de la fonction d'onde est attribuable à un observateur conscient (Price 2011 p. 29). Même chez un réaliste comme Penrose, la question de la mesure est associée à l'asymétrie temporelle. Il soutient que de façon générale, une perte d'information et une asymétrie temporelle sont liées au processus de la mesure (Lachièze-Rey in Hawking & Penrose 1997, p. 21). De plus, cette asymétrie postulée lors de la mesure peut être rapprochée d'une asymétrie gravitationnelle. Cette dernière est une conséquence de l'hypothèse sur la courbure de Weyl que soutient Penrose et que nous exposerons lors de la section concernant l'Hypothèse sur le passé. (Voir section 4.2) En fait, l'approche de Penrose est englobante en ce qu'elle tente de réduire l'asymétrie résultant de la mesure en mécanique quantique à l'asymétrie fondamentale qui est de nature gravitationnelle et qui s'exprime à travers la différence d'information qui se trouve dans les singularités passées et les singularités futures (Lachièze-Rey in Hawking & Penrose 1997, p. 23).

Notons en terminant qu'une des critiques qu'émettent les partisans de l'approche géométrique est d'affirmer que les défenseurs de l'approche thermodynamique utilisent un observateur idéal qui se situe au niveau local, alors qu'il faudrait selon eux, fournir les outils conceptuels afin de rendre compte d'un phénomène global. En revanche, les défenseurs de l'approche thermodynamique soutiennent que dans un contexte global, il faut également postuler un observateur idéal, seulement celui-ci est soumis au problème de l'universalité. C'est-à-dire que sa position est absolue, il ne peut prétendre, par exemple, se tenir à l'extérieur du système observé, car ce système est l'Univers dans son entièreté.

Chapitre 3

L'approche thermodynamique classique

Cette approche dont nous parlons indirectement depuis le début de l'ouvrage consiste à considérer la flèche du temps thermodynamique comme la flèche fondamentale de laquelle les autres flèches ne sont que des manifestations. Ce chapitre vise à fournir une analyse philosophique de cette approche. Pour ce faire, nous présenterons la thèse forte soutenant l'approche thermodynamique. Ensuite, nous analyserons la pertinence du recours à la mécanique statistique et à la cosmologie visant à remédier aux déficiences de cette même approche¹.

Le second principe de la thermodynamique stipule que certaines choses sont possibles dans une direction temporelle et non dans l'autre. C'est pourquoi ce principe exerce un si fort attrait et que plusieurs y ont vu la source de toutes les asymétries temporelles.

Nous tenterons de voir si la thèse forte selon laquelle la flèche thermodynamique est la flèche fondamentale peut être philosophiquement défendue. Il existe plusieurs façons de réaliser ceci, nous le ferons en présentant les grandes lignes de la thèse, les problèmes qu'elle pose, ainsi que les solutions à ces problèmes que proposent les défenseurs de cette thèse. Notons enfin que la thermodynamique a un statut plutôt particulier en tant que discipline scientifique : elle est portée au rang d'autorité absolue pour certains (Maxwell et Einstein), et est considérée comme une science obsolète pour d'autres (Brush, Arnold et von Neumann)(Uffink 2001, p. 7).

1. Une partie importante de ce chapitre fut constituée à partir d'un travail effectué dans le cadre du cours PHI6365 à l'hiver 2013.

3.1 Thermodynamique

La thèse forte est inférée à partir du second principe de la thermodynamique. La force que certains, Stephen Hawking par exemple, accordent à ce principe est très considérable. Ce dernier soutient que ce principe peut expliquer pourquoi on constate que des phénomènes peuvent survenir dans une direction et jamais dans l'autre. Il est très clair à cet effet. « L'explication généralement donnée pour comprendre pourquoi nous ne voyons pas les tasses brisées se recoller sur le plancher et bondir sur la table est que cela est interdit par le second principe de la thermodynamique² ». Le principe semble suffisamment fort pour interdire certains phénomènes qui semblent très loin de la thermodynamique, qui après tout, est une discipline qui s'occupe de la chaleur et des applications techniques de celle-ci. Hawking va encore plus loin et affirme qu'une flèche thermodynamique forte est nécessaire au développement de la vie. Il dit : « [c]ependant, une flèche thermodynamique forte est nécessaire pour que la vie puisse agir³ ». Encore une fois, on semble très loin des machines thermiques et des déplacements de la chaleur à travers un corps quelconque. Un exposé de la thermodynamique, et en particulier de son second principe permettra de bien voir pourquoi plusieurs lui accordent une si grande importance, et surtout, pourquoi est-il pertinent dans la quête pour trouver une loi physique afin de rendre compte de la direction du temps.

Comme nous l'avons mentionné, la thermodynamique est une branche de la physique qui s'occupe de la chaleur et de la force dégagée par celle-ci. Cette discipline fut développée au XIXe siècle dans la foulée de la Révolution industrielle. Une des composantes que l'on peut immédiatement mentionner, qui sera pertinente pour nous, est la notion de dispersion des molécules, ou encore de la perte de chaleur. Les grandes figures de la thermodynamique peuvent être divisées en deux camps. Les premiers la considèrent comme une science des processus (Boltzmann, Clausius, Kelvin, Planck), alors que les seconds la considèrent davantage comme une science permettant de décrire des états d'équilibre (Gibbs, Carathéodory) (Uffink 2001, p. 12). Au cours de son développement, la thermodynamique a émis trois principes.

2. Stephen Hawking. *Une brève histoire du temps*. Flammarion, 2008, p. 187

3. *Ibid.*, p. 196

Le premier est celui que l'on nomme régulièrement le principe de conservation d'énergie. Ce principe stipule qu'il existe trois composantes à une relation thermodynamique, qui sont : l'énergie interne d'un système U ; la quantité d'énergie transférée par chaleur Q ; et la quantité de travail effectuée par le système W . Le premier principe s'énonce ainsi : $\delta U = Q - W$. C'est-à-dire que la quantité d'énergie interne d'un système est égale à la quantité d'énergie transférée par chaleur moins le travail effectué par le système. C'est ce principe qui garantit l'impossibilité des machines à mouvement perpétuel du premier ordre.

Bien entendu, il est requis qu'il y ait une différence de température entre une source et un réservoir pour tout échange de température. Cependant, cette différence peut être aussi petite que l'on désire. Un processus quasi statique caractérise précisément un type de processus qui s'effectue lorsque la différence δ entre deux corps est infinitésimale (Uffink 2001, p. 21). Ceci s'avère essentiel à considérer lorsqu'on modélise ou caractérise l'évolution d'un système en terme de paires d'états d'équilibre.

Le second principe fait intervenir une nouvelle notion qui n'est pas présente dans l'énoncé du premier principe. Il s'agit de la notion d'entropie S . Nous qualifierons cette notion, pour l'instant seulement, d'une mesure de la perte de chaleur. Le second principe s'énonce ainsi : $\delta S = Q(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1})$, où on calcule l'entropie S à la différence de quantité d'énergie transférée par chaleur Q à deux températures T différentes. Il est judicieux de noter au passage que ce principe fait indirectement intervenir la notion de temps. Les deux températures sont différentes, car elles sont deux mesures prises d'un même système à deux moments distincts. Bien entendu la seconde mesure prise sur un système isolé indiquera une température plus faible, ceci en raison de la perte de chaleur interne due au travail. La présence d'une soustraction dans l'énoncé du premier principe exprime cela de façon évidente. Kelvin est en fait le premier qui soutiendra l'existence, au sein de la nature, d'une directionnalité des phénomènes (Uffink 2001, p. 30). Cette « dissipation de l'énergie mécanique » est ce qui entraîne l'impossibilité d'une restauration complète de l'énergie au sein des phénomènes de friction, de conduction et de radiation (Kelvin 1852). C'est évidemment ce principe qui garantit l'impossibilité des machines à mouvement perpétuel du second ordre.

Le troisième principe est à la base de la notion de zéro absolu. Ce principe

stipule deux choses. Qu'il est impossible d'atteindre, en un nombre fini d'étapes, le zéro absolu (0 Kelvin), et deuxièmement que l'entropie est nulle à cette température. Cette seconde facette du principe s'énonce ainsi : $S(0) = 0$.

Un autre principe, appelé le principe zéro, définit le concept de température. Deux objets sont en équilibre thermique si de la chaleur a la possibilité de passer de l'un à l'autre, mais ne le fait pas. Trois objets dans cette situation partagent une propriété : ils ont la même température.

Ce qui nous intéresse est bien sûr le second principe, et en particulier une notion au sein de celui-ci : celle d'entropie. Qu'est-ce que l'entropie ? Les définitions divergent grandement, toutefois, il est possible de faire ressortir trois interprétations dominantes de cette intrigante notion.

Une première définition, qui est la plus simple et la moins chargée en termes de pouvoir explicatif, définit l'entropie uniquement comme une simple perte de chaleur. L'entropie représente la mesure de la quantité de chaleur perdue entre deux mesures distinctes.

Une seconde définition, un peu plus abstraite et plus chargée en termes de capacité potentielle à décrire des phénomènes naturels, définit l'entropie comme la mesure du désordre. Il faut ici distinguer le désordre du chaos. Selon cette définition, l'entropie serait la mesure de l'évolution de l'ordre vers le désordre. Une première mesure constaterait un certain niveau de désordre et la seconde une augmentation de celui-ci. En accord avec cette définition de l'entropie, le stade final de cette évolution, le désordre maximal serait également l'entropie maximale.

Une troisième définition, peut-être devrions nous dire interprétation, qui est sans contredit la plus riche et la plus chargée de toutes, définit l'entropie comme l'indicateur absolu de la direction du temps. Cette troisième façon de considérer l'entropie ne réfute en aucun cas les deux précédentes, simplement elle les considère comme trop réductrices. L'idée est que la perte de chaleur constitue un accroissement du désordre et que cet accroissement s'effectue dans la direction temporelle que l'on nomme le futur. Plus précisément, la thèse est que dans un système fermé, l'entropie ne peut décroître, elle ne peut que rester stable ou augmenter. Ceci est clairement visible à la fois dans un système thermodynamique classique et dans l'expérience quotidienne des systèmes autres que thermodynamiques.

Dans un système thermodynamique, la quantité de chaleur qui est perdue par

travail ou par rayonnement l'est de façon définitive. Ce processus est irréversible. Ici, le désordre s'exprime en quantité de chaleur qui était confinée à un espace restreint qui est libérée et augmente le désordre des autres systèmes dans son entourage. Dans l'expérience quotidienne, nous observons des systèmes plus ou moins ordonnés, comme des tasses pour reprendre l'exemple de Hawking, qui croissent vers le désordre, soit lentement, en s'usant sous l'effet de la lumière, de l'eau et des contacts répétés, soit rapidement, en se fracassant contre le sol. Ici le désordre est facilement identifiable, la tasse brisée sur le sol est hautement plus désordonnée que la tasse en bon état.

La notion de réversibilité est encore une fois essentielle ici. Dans sa version originale, celle de Carnot, on qualifie un processus de réversible s'il peut fonctionner « à l'envers », c'est cette voie qu'utilisera Planck ; et on qualifie d'irréversible un processus si, et seulement si ce processus implique un échange de température (Uffink 2001, p. 21).

Il est important de préciser que nous parlons ici de système fermé. Il est bien entendu possible de renverser le processus et d'augmenter de nouveau la température au sein d'un système thermodynamique x , cependant la quantité de chaleur doit provenir de l'extérieur, d'une source y . Cette opération ne peut s'effectuer à coût nul, la source externe y de chaleur qui est utilisée afin d'augmenter la température de x subira elle-même une diminution de sa chaleur. Il y aura donc augmentation de l'entropie du système y pour compenser la perte de chaleur du système x . La situation est analogue avec la tasse, il est certes possible de reconstituer une tasse dans un état plus ordonné que lorsqu'elle est fracassée, or pour réaliser ceci, il faut un apport énergétique immense afin de rassembler les éclats, les reconstituer et remodeler la tasse. Ce qu'il faut retenir ici, c'est qu'afin de faire baisser l'entropie d'un système fermé, il faut augmenter l'entropie totale de l'univers. Ainsi, il suffit de considérer l'Univers comme un système fermé et il n'y a aucun moyen de faire diminuer l'entropie.

En fait, Planck insistait sur le fait qu'afin de qualifier un processus de *reversibel*, ce dernier devait pouvoir être renversé complètement, c'est-à-dire que l'état initial est recouvert, ainsi que tous les systèmes auxiliaires avec lesquels le système observé a interagi (Uffink 2001, p. 14).

La thermodynamique classique, celle avec laquelle nous travaillons ici, est la

thermodynamique de l'équilibre. Nous le précisons, car il existe également une thermodynamique du non-équilibre, instaurée entre autres, par Ilya Prigogine et Isabelle Stengers dans *La nouvelle alliance*⁴. Nous le précisons également, car nous voulons insister sur la notion d'équilibre. La thermodynamique classique est la thermodynamique de l'équilibre parce que c'est vers l'équilibre que tendent tous les systèmes thermodynamiques. Cette progression vers l'équilibre est considérée par certains comme l'élément fondamental à prendre en considération lors d'une analyse de l'asymétrie temporelle des phénomènes physiques. (Voir à cet effet le texte de Brown et Uffink⁵ qui est analysé à la section 4.1.2.2). L'équilibre est l'état le plus stable des états possibles d'un système thermodynamique. Or, nous avons également mentionné que tous système thermodynamique tend vers une augmentation de l'entropie, c'est donc dire que les systèmes thermodynamiques évoluent naturellement vers l'équilibre et vers une plus grande entropie. Donc l'équilibre représente l'entropie maximale d'un système. Il représente également l'état le plus stable. Malgré que ceci semble contre-intuitif, l'équilibre maximal est égal au désordre maximal.

Si on considère un état initial s_i et un état final s_f et une transformation (ou processus) \mathcal{P} se produisant dans un environnement Z

$$\langle s_i, Z_i \rangle \xrightarrow{\mathcal{P}} \langle s_f, Z_f \rangle$$

est réversible si

$$\langle s_f, Z_f \rangle \xrightarrow{\mathcal{P}'} \langle s_i, Z_i \rangle$$

où \mathcal{P}' est le processus \mathcal{P} inversé (Uffink 2001, p. 14).

3.1.1 Description phénoménologique

Un autre aspect de la thermodynamique qui nous intéresse est la nature de la description physique que nous propose cette discipline. Cette description est phénoménologique, c'est-à-dire, dans ce cas, qu'elle nous offre une description du

4. Ilya Prigogine, Isabelle Stengers. *La Nouvelle Alliance*. Gallimard, Paris, 1979

5. Harvey R. Brown, Jos Uffink. "The Origins of Time-Asymmetry in Thermodynamics : The Minus First Law." *Studies in History and Philosophy of Modern Physics.*, Vol. 32, No. 4, pp. 525-538, 2001

monde physique qui est directement observable. Des instruments de mesure sont certes requis, cependant ce qui y est mesuré est un ensemble de phénomènes macroscopiques. Les mesures s'effectuent sur le volume V , la température T et la pression P d'un corps, ou plus généralement d'un gaz. Se limitant à une description de ces trois éléments, la thermodynamique ne fournit pas une description de ce qui se passe au sein du gaz étudié. De ce fait, la thermodynamique ne peut rendre compte du mouvement des molécules de gaz en question. C'est pourquoi nous considérons que la thermodynamique est limitée au niveau macroscopique.

En prenant l'exemple du gaz, nous pouvons illustrer certaines des notions introduites précédemment. Imaginons un contenant de gaz dans une pièce. Le contenant peut être une cannette de boisson gazeuse et la pièce une salle de classe. Imaginons la cannette fermée, contenant tout le gaz à l'intérieur et la salle de classe ne contenant seulement que cette cannette. Pour l'instant, nous avons une pièce dans laquelle il y a une distribution uniforme des molécules de gaz x à travers la pièce, à l'exception d'une quantité de gaz y qui est concentré dans une très petite partie de son volume : la cannette. Donc, au stade initial, toutes les molécules du gaz y sont concentrées dans un petit espace de la pièce, cette disposition du gaz constitue un arrangement ordonné et instable. Ordonné, car toutes les molécules sont concentrées dans un petit espace, et instable, car les molécules de gaz sont comprimées et donc hautement agitées dans ce même petit espace. Lorsque nous ouvrons le contenant de gaz, les molécules dudit gaz se répandent aussitôt dans la pièce et après un certain temps, vont finir par remplir la pièce. Cet état, qui n'est pas le second, mais bien l'état final de notre exemple, caractérisé par une distribution uniforme des molécules de gaz dans tout le volume disponible, constitue un arrangement désordonné et stable. Désordonné, car les molécules sont dispersées dans un espace beaucoup plus grand qu'auparavant, et stable, car les molécules occupent la totalité de l'espace, l'agitation des molécules y est donc réduite.

Une précision de langage est importante ici, lorsque nous mentionnons qu'une distribution est ordonnée, ou encore qu'elle est stable, nous ne parlons évidemment pas en termes absolus, mais bien en termes relatifs. L'état final décrit plus haut où les molécules occupent la totalité du volume de la pièce est stable, seulement s'il est comparé à l'état initial où les molécules étaient comprimées dans un espace plus restreint. La distribution des molécules dans la pièce est certes plus stable que

celle dans la cannette, mais elle l'est moins que, disons, dans un édifice en entier, ou simplement dans une pièce plus grande. Un usage adéquat devrait plutôt être de dire qu'une telle distribution est plus stable, ou moins stable qu'une autre.

Deux choses à retenir de cet exemple. Premièrement, l'entropie maximale de notre système (cannette/salle de classe) se trouve au stade final, c'est-à-dire lorsque les molécules de gaz occupent la totalité de la pièce parce cette disposition est à la fois plus désordonnée et plus stable. L'entropie augmentant avec le désordre, et étant maximale lorsqu'un système atteint l'équilibre et la stabilité, il apparaît manifeste que le stade final de notre exemple possède une entropie plus élevée que le stade initial.

Deuxièmement, le processus que nous avons décrit, celui des molécules de gaz se dispersant dans l'espace, est un processus irréversible. Une fois la cannette ouverte, ce processus s'est effectué sans aucun travail de l'extérieur. Le processus inverse ne s'effectue jamais. Du moins, jamais si ce système fermé ne subit aucune influence de l'extérieur. Il est certes possible de remettre toutes les molécules de gaz à l'intérieur de son contenant original, or la quantité d'énergie requise pour effectuer cela est immense en comparaison au processus original, qui lui n'a requis aucun travail externe. Donc ce processus où l'entropie a augmentée s'est effectué du passé vers le futur, le processus inverse, où l'entropie augmenterait de façon encore plus grande, s'effectuerait également du passé vers le futur. Nous voyons donc pourquoi il est invitant de considérer la croissance de l'entropie comme un indicateur de la direction du temps. L'entropie augmenterait toujours dans la direction que l'on nomme futur.

Dans notre exemple, nous avons fait intervenir les molécules de gaz, et nous avons mentionné qu'une description thermodynamique se limitait aux éléments macroscopiques V , P , T . Le mouvement des molécules de gaz est décrit par la théorie cinétique des gaz et non par la thermodynamique. Cette dernière décrit les manifestations macroscopiques de plusieurs phénomènes, dont les mouvements des molécules de gaz, qui sont décrits par la théorie cinétique des gaz. Cette théorie est une théorie concernant le mouvement des molécules, alors, elle fait intervenir, comme toutes les théories classiques du mouvement, les équations newtoniennes. Il faut se rappeler que nous avons mentionné que les équations newtoniennes sont indifférentes quant au renversement temporel. Il faut également se rappeler que

nous nous occupons de thermodynamique, car c'est au sein de cette discipline que semble se trouver une loi qui ne soit pas indifférente quant au renversement temporel, à savoir : le second principe.

Le problème apparaît donc clairement, la thermodynamique ne nous offre qu'une description macroscopique des phénomènes. Une telle description ne pourrait fournir une explication du comportement des molécules responsables des phénomènes qu'étudient la thermodynamique, c'est-à-dire, le volume, la température et la pression. Ce que l'on devrait réellement chercher, c'est une façon de rendre compte de nos observations au niveau macroscopique à l'aide d'une description des phénomènes au niveau microscopique. C'est précisément ce que soutient Jill North dans son article *Time in thermodynamics* « [t]he puzzle comes up in connection with the project of explaining our macroscopic experience with microphysics : of trying to fit the macroscopic world of our everyday life onto the picture of the world given by fundamental physics⁶ »

Cette explication microscopique des phénomènes thermodynamiques se trouve du côté de la mécanique statistique. C'est pour cette raison que la prochaine section s'y consacrera.

3.2 Mécanique statistique

Déterminer quelle est la relation entre les molécules de gaz et les propriétés macroscopiques de ce même gaz est la tâche de la mécanique statistique. Cette branche de la physique porte sur les propriétés thermodynamiques des systèmes possédant une énorme quantité d'individus, par exemple les molécules d'une quantité de gaz.

Ceci est d'une grande importance pour nous, car cette discipline peut potentiellement nous fournir des pistes de réponse nous permettant de comprendre pourquoi, malgré le fait que les équations responsables du mouvement des molécules de gaz peuvent être symétriques, elles peuvent néanmoins être à la base de phénomènes asymétriques.

La discipline fut développée dans les années 1870 pour répondre au défi de la

6. Jill North. "Time in thermodynamics" *Oxford handbook of philosophy of time*. 2011, p. 313

thermodynamique et en particulier aux problèmes posés par la jeune notion d'entropie. Un de ses principaux architectes est Ludwig Boltzmann. Voulant répondre aux objections de plusieurs physiciens, en particulier Zermelo et Loschmidt, qui prétendaient que le caractère symétrique des lois gouvernant les particules empêchait que l'accroissement de l'entropie puisse être expliqué par ces lois⁷. Ce que fit Boltzmann fut de montrer que le caractère symétrique et déterministe des lois régissant le mouvement des molécules n'empêche pas qu'un accroissement de l'entropie puisse être expliqué à partir de celles-ci. Simplement, il fait du second principe un principe probabiliste, et non absolu. La thèse de Boltzmann est donc qu'une baisse de l'entropie n'est pas impossible, mais extrêmement improbable (North 2011, p. 319).

Voyons de plus près ce que contient, très sommairement, la mécanique statistique. Nous avons fait référence à plusieurs reprises à des niveaux d'observations et de connaissance des phénomènes physiques. Précisons notre langage. Nous appellerons macro-état ce qui relève de l'observation directe d'un système thermodynamique, qui est limitée, à ce niveau de résolution, au volume V , à la pression P et à la température T . Nous appellerons micro-état ce qui relève de la description des composantes internes d'un gaz, c'est-à-dire la position et la vitesse des molécules de ce gaz. Maintenant, nous pouvons dire que la tâche de la mécanique statistique est de décrire mathématiquement la relation entre micro-état et macro-état.

Afin de pouvoir décrire la position et la vitesse des molécules de gaz, la mécanique statistique fait intervenir les équations newtoniennes du mouvement. Ces dernières considèrent précisément le mouvement d'un objet dans l'espace en fonction de sa position et de sa vitesse. L'espace newtonien est un espace tridimensionnel classique. Il y a donc pour chaque objet dans l'espace trois coordonnées spatiales, et trois vitesses de déplacement selon les axes de mouvement. Maintenant, au lieu de considérer trois axes et trois vitesses, il existe une façon de représenter le même objet, mais cela en faisant intervenir six dimensions : trois espaces et trois vecteurs. Cet espace mathématique s'appelle un espace des phases. De cette façon, un point dans cet espace des phases correspond à une description complète des conditions dynamiques (position et vitesse) d'une particule dans un

7. *“If the laws of governing the particles of thermodynamic systems are symmetric in time, then entropy increase can't be explained by these laws”* (North 2011, p. 313)

système ; ou en ce qui nous concerne, d'une molécule dans une quantité de gaz (Albert 2000, p. 41)⁸. Une ligne dans cet espace représente l'histoire d'une molécule (North 2011, p. 321).

Nous pouvons maintenant revenir à notre sujet. Nous avons affirmé dans les sections précédentes que l'entropie était maximale lorsque les molécules composant un gaz sont uniformément dispersées dans l'espace. C'est donc dire que l'entropie d'un système est plus grande lorsque l'espace occupé par les composantes de ce système est plus grand. On peut penser à la perte de chaleur par rayonnement d'un corps. La chaleur, qui est une forme d'énergie hautement désordonnée, donc haute en entropie, qui est émise par un corps chaud introduit dans une pièce plus froide, va graduellement occuper un plus grand espace dans cette pièce, jusqu'à réchauffer la pièce en entier. En utilisant le vocabulaire de la mécanique statistique, nous affirmons que l'entropie est donc supérieure lorsque la distribution des molécules occupe un plus grand espace des phases. Ce que nous appelons distribution des molécules fait évidemment référence à une description du micro-état d'un système. Or il n'y a pas qu'un seul micro-état. Nous pouvons considérer les molécules en grappes (*coarse graining*), ou encore individuellement. C'est d'ailleurs une description de la position et de la vélocité de chacune des molécules que nous avons décrite comme une description du, ou des micro-états. L'idée ici est que si nous considérons chacune des molécules individuellement, une augmentation du volume dans l'espace des phases, entraîne une augmentation des différentes configurations, ou arrangements, que peut prendre chacune des molécules, tout en étant compatible avec le macro-état correspondant. Nous pouvons donc affirmer, pour boucler la boucle, que les macro-états compatibles avec un plus grand nombre de micro-états distincts ont une entropie plus élevée que les macro-états compatibles avec un nombre plus petit de micro-états distincts (North 2011, p. 322).

Si l'on se souvient bien, un des buts de Boltzmann était de réfuter les objections de Zermelo et Loschmidt. Ce que fit Boltzmann est de déterminer de quelle façon l'entropie peut croître dans un système où les équations décrivant le mouvement des particules sont symétriques. Bien entendu, cette croissance est la mesure de la relation entre un macro-état et le nombre de micro-états compatible avec celui-ci. Cette relation s'exprime par une équation que l'on appelle la formule de

8. David Albert. *Time and chance*. Harvard University Press, 2000

Boltzmann. Cette formule est la suivante :

$$S = K \log n,$$

où S est la mesure de l'entropie, K est constante de Boltzmann (1.38062×10^{-23} joule/kelvin), n est nombre de micro-états compatibles avec le macro-état (probabilité thermodynamique). Cette formule, qui se base sur une interprétation statistique, fait suite à la première tentative de Boltzmann d'expliquer le mouvement des molécules à l'aide de la mécanique classique. C'est cette dernière approche que l'on appelle le Théorème- H .

Une expérience de pensée de James Clerk Maxwell permet de saisir le fait que l'accroissement de l'entropie est une affaire de probabilité et non de certitude (Bub 2001, p. 2). Maxwell imagine un démon, qui est en fait un observateur idéal, qui a la capacité d'interagir sur un système thermique. Le dispositif est composé de deux contenants de gaz adjacents, l'un contient un gaz chaud et l'autre un gaz plus froid. Il existe une porte entre ces deux contenants et c'est sur cette porte que le démon a la possibilité d'agir. Ce démon a un accès épistémique privilégié en ce qu'il connaît la position et la vitesse de chacune des molécules de gaz des deux contenants. Ce que fait le démon est qu'il ouvre la porte à chaque fois qu'une molécule de gaz froid se déplaçant un peu plus vite que la moyenne (donc plus chaude) s'approche de la porte, il ouvre celle-ci et laisse cette molécule traverser, et il fait la même chose avec les molécules de gaz chaud se déplaçant un peu plus lentement que la moyenne. Après un certain temps, la distribution devient donc moins uniforme qu'elle l'était au début. Le gaz chaud est plus chaud et le froid est plus froid, ce qui bien évidemment va à l'encontre du second principe. L'idée ici est que ce démon a un accès privilégié, or on peut très bien penser qu'une telle situation puisse se produire sans l'intervention d'un démon, mais seulement par le mouvement brownien des molécules.

Deux choses à retenir de cet exemple. Premièrement, il serait faux de prétendre que cette expérience de pensée démontre qu'il est possible de faire baisser l'entropie d'un système, car le démon lui-même est soumis à l'entropie, l'acquisition d'information sur la position et la vitesse des molécules entraîne également une dépense d'énergie donc un accroissement de l'entropie globale de l'univers.

Deuxièmement, il serait judicieux de retenir de cet exemple qu'il faut considérer l'accroissement de l'entropie comme hautement probable, mais non pas absolument certain. Ceci constitue la première forme de notion probabiliste avec laquelle nous avons à traiter en mécanique statistique, la seconde se manifestera sous peu.

Laissons les démons et les probabilités et revenons à la mécanique statistique. Nous considérons donc maintenant l'entropie comme une relation entre les parties individuelles d'un système et le système dans son ensemble. Or, ceci semble assez loin de notre préoccupation originale, c'est-à-dire la flèche du temps. Quelques exemples pourront peut-être aider à voir en quoi l'approche développée par la mécanique statistique permet d'éclairer notre problème. La notion qui nous intéresse ici est celle d'irréversibilité. Nous avons vu que rien dans la théorie cinétique des gaz ne prévoit que les molécules d'un gaz uniformément dispersées dans une pièce se rassemblent et se compriment dans une petite partie de cette pièce. Cette même théorie prévoit en revanche très bien le processus inverse, c'est-à-dire, les molécules de gaz se dispersant afin d'occuper la totalité de l'espace. Ce processus, qui s'effectue entre des micro-états (disposition des molécules) et un macro-état (volume total occupé par le gaz) semble pouvoir s'effectuer dans une direction et non dans l'autre⁹.

Ensuite, un casse-tête, qui peut également être considéré comme un système composé de parties individuelles et d'un tout, semble pouvoir témoigner d'un autre aspect pertinent, celui de l'accroissement de l'entropie au sein des systèmes comportant un nombre important de parties. Un casse-tête de mille morceaux est considéré effectué, c'est-à-dire ordonné, lorsque les mille morceaux sont disposés de façon à rendre l'image qui se trouve sur la boîte. Cette configuration est unique, c'est-à-dire qu'il existe une seule configuration ordonnée, et un nombre *extrêmement* plus élevé de configurations désordonnées. Cet exemple montre bien qu'il existe beaucoup plus de façons pour un système d'être désordonné qu'ordonné. Si l'on ajoute la dimension temporelle à l'exemple du casse-tête, on remarque que le système va tendre au désordre, on ne peut faire autrement que considérer qu'un

9. "And so we have apparently succeeded here in deducing (from what seem like entirely innocent and reasonable assumptions about the behaviors of microsystems) an irreversibility. We have succeeded in deducing (that is) that whereas concentrated distribution of gas can be expected to evolve into dispersed ones, dispersed ones are not to be expected to evolve into concentrated ones". (Albert 2000, p. 52)

casse-tête complété a beaucoup plus de chance de se retrouver désordonné, qu'un casse-tête désordonné de se retrouver ordonné.

Un dernier exemple permet de bien faire ressortir toutes les notions introduites jusqu'ici. Imaginons un café au lait, ou plutôt trois cafés au lait. Dans le premier, le café et le lait sont complètement séparés, dans le second, café et lait commencent à se mélanger, et dans le troisième, le mélange est complété et il n'y plus aucun moyen de départager le lait du café. Le premier représente la distribution la plus ordonnée, café et lait sont clairement séparés et chacun occupe une portion définie de l'espace total, dans ce cas : le verre. Le troisième café représente la distribution la plus désordonnée, les molécules de café et celles de lait sont parfaitement mélangées, il n'y a aucun moyen de les distinguer, chacune des distributions occupe l'espace maximal. Le second café est évidemment à mi-chemin entre les deux, il sert à introduire la dimension temporelle dans l'exemple. En effet, cette progression, des deux liquides complètement séparés, aux liquides complètement mélangés, en passant par le stade où ces deux liquides sont partiellement mélangés, témoigne d'une irréversibilité. Une fois mélangés, ces deux liquides ne se sépareront pas. Ensuite, une fois que les deux liquides sont complètement mélangés, il y a beaucoup plus de configurations des molécules de lait et de café distincts compatibles, que lorsque ces deux liquides étaient complètement séparés. Tout simplement parce les molécules occupent un plus grand volume dans le troisième café que dans le premier.

Tous ces exemples ont pour but de renforcer la thèse forte voulant que l'augmentation de l'entropie, qu'elle soit considérée comme perte de chaleur, croissance du désordre, ou nombre plus élevé de micro-états compatible avec un macro-état, s'effectue non seulement dans la direction que l'on nomme futur, mais plus fondamentalement que c'est la croissance de l'entropie qui est responsable de la flèche du temps.

Avant d'évaluer la thèse forte en vertu de nos nouvelles connaissances en thermodynamique et en mécanique statistique, nous devons préciser la notion de probabilité qui est en jeu ici. Nous voulons simplement faire ressortir le fait que cette notion est double. Premièrement, la croissance de l'entropie dans un système n'est pas une certitude. L'interprétation boltzmannienne du second principe de la thermodynamique est seulement probabiliste, une baisse d'entropie est possible, ce-

pendant, elle est *extrêmement* improbable¹⁰. Feynman affirme qu’il serait ridicule de s’attendre à observer le processus inverse de plusieurs phénomènes courants¹¹.

Deuxièmement, considérant que tout système tend vers le désordre, il est beaucoup plus probable de rencontrer un système en désordre qu’un système ordonné. Les systèmes à entropie élevée sont donc beaucoup plus probables que les systèmes à faible entropie. Il est par conséquent plus raisonnable de s’attendre à rencontrer dans le monde physique davantage de systèmes à haute entropie que l’inverse. *Une collection d’observations empiriques faisant intervenir plus d’états à haute entropie est donc plus probable qu’une collection d’observations empiriques faisant intervenir plus d’états à faible entropie.* Ceci en accord avec une analyse probabiliste uniquement, car dans nos observations empiriques, nous constatons une entropie relativement faible.

3.2.1 Problème principal de la mécanique statistique

Nous sommes maintenant en mesure d’évaluer l’apport de la mécanique statistique en ce qui a trait à la thèse forte. À bien y penser, la mécanique statistique ne fournit en rien des éléments de preuve à la thèse forte. Premièrement, elle nous ne permet pas de déduire une irréversibilité des processus thermodynamiques, la théorie cinétique des gaz fait cela, la mécanique statistique nous offre un cadre mathématique pour analyser cette irréversibilité. Elle fournit du même coup une formule permettant de décrire la croissance de l’entropie en lien avec les états micros et macros d’un système, mais à aucun moment elle n’indique qu’il existe un lien clair entre la croissance de l’entropie et la direction du temps.

Deuxièmement, la mécanique statistique nous dit pourquoi une distribution occupant un plus grand espace des phases est plus élevée en entropie, mais se

10. “As above, the basis of the law is simple statistical reasoning : there are more ways for a system to have higher entropy, and “more ways” means it is more likely that a system will evolve into one of these high-entropy configurations. Notice, though, that this is not a law in the conventional sense since, although such events are rare and unlikely, something can go from a state of high entropy to one of lower entropy” (Greene 2004, p. 156)

11. “It would never happen in a million years. And that is the answer. Things are irreversible only in a sense that going one way is likely, but going the other way, although it is possible and is according to the laws of physics, would not happen in a million years. It is just ridiculous to expect that if you sit there long enough the jiggling of the atoms will separate a uniform mixture of ink and water into ink on one side and water on the other.” (Feynman 1985, p. 112)

fondant sur les équations newtoniennes du mouvement, qui sont symétriques, la mécanique est aussi valable pour inférer une croissance de l'entropie vers le futur que vers le passé.

Troisièmement, et c'est ici que la situation devient hautement problématique, considérée d'un point de vue uniquement statistique, il est plus probable que l'entropie d'un système fut plus élevée dans le passé¹². Pourquoi ? Deux raisons : parce que les équations newtoniennes le permettent, et parce qu'il est plus probable, de façon générale, de trouver des systèmes dans un état élevé d'entropie que dans un état plus faible. Ceci est évidemment contre-intuitif et va à l'encontre du second principe de la thermodynamique et de tout ce que nous avons dit jusqu'ici.

Un exemple permettra d'explicitier la situation. Imaginons un cube de glace partiellement fondue sur une table. Une observation est effectuée à 10 h constatant un cube plus ou moins fondu. Suivant le second principe, il est adéquat de postuler que celui-ci devait être moins fondu lors d'une observation à 9 h 55, et encore moins à 9 h 50, et encore moins à 9 h 45, et ainsi de suite. Appelons cette série d'observations *A*. Imaginons maintenant une série alternative débutant avec la même observation à 10 h, simplement cette fois, il est assumé qu'une observation aurait permis d'observer un cube plus fondu à 9 h 55, et encore plus fondu à 9 h 50, et encore plus fondu à 9 h 45, et ainsi de suite. Appelons cette série d'observations *B*. Le problème est que malgré que cela aille contre notre intuition, notre expérience, ainsi que le second principe, la série *B* est plus probable, d'un point de vue strictement statistique, que la série *A*. Ceci tout simplement parce la série *B* fait intervenir des états plus probables à chacune des observations. Plus probables, car les états plus élevés d'entropie sont plus probables que ceux moins élevés. Des deux observations, celle de *A* à 9 h 50 et celle de *B* à 9 h 50, celle de *B* est plus probable. La même chose s'applique à toutes les observations individuelles de ces deux séries. Donc de ce point de vue, il est plus probable que l'entropie fut plus élevée par le passé.

Faut-il donc abandonner tout recours à la mécanique statistique puisqu'elle postule précisément le contraire de ce que nous cherchons à démontrer ? Non. Quelques précisions sont requises afin de mettre cette aporie de côté et de poursuivre en ne

12. Ce problème est abordé par Albert (2000, p. 116), Greene (2004, p. 164) et (North 2011, 324), et tous le considèrent comme le problème majeur sur lequel l'attention devrait être portée.

reniant pas la mécanique statistique.

Cette thèse selon laquelle il est plus probable que l'entropie fut plus élevée dans le passé est vraie seulement dans certaines situations et ne s'applique pas à la thermodynamique. Cette thèse fait intervenir des observations discrètes, alors bien sûr, chaque observation individuelle faisant intervenir un état plus élevé d'entropie est plus probable qu'une autre observation faisant intervenir un état plus faible d'entropie, mais ceci ne s'applique pas à la thermodynamique. La thermodynamique s'occupe des processus, alors que chaque observation individuelle devrait statistiquement constater un état maximal d'entropie à cet instant. *La thermodynamique est une science des systèmes, et le temps est essentiel à la description des systèmes dynamiques.* Les observations ne sont pas en parallèle, les séries *A* et *B* font intervenir le temps, il semble donc qu'il s'agisse d'un système en continu. La dimension du temps ne pouvant être exclue, deux observations (distinctes et successives) suffisent à inférer que l'entropie s'accroît dans la direction que l'on nomme futur. Considérée ainsi, l'analyse des systèmes thermodynamiques avec l'aide de la mécanique statistique semble écarter cette difficulté.

Quoique nous rejetions cette troisième difficulté issue de la mécanique statistique, la seconde demeure toujours valide. Cette seconde difficulté vient du fait qu'il soit possible d'inférer une croissance de l'entropie à la fois vers le passé et vers le futur. Afin de contrer cette fâcheuse situation, il faut faire plusieurs observations en série et constater un accroissement de l'entropie vers le futur. Or, cela n'est pas suffisant, car rien ne garantit que les observations ne constituent pas une fluctuation entropique. Cette apparente croissance de l'entropie n'est peut-être qu'un épisode de croissance inclus dans une tendance plus générale à la baisse. N'ayant pas accès à la totalité de l'historique des systèmes, nous ne pouvons qu'affirmer que l'entropie a augmentée entre la première et la dernière observation, rien de plus. Ceci n'est pas du tout satisfaisant pour quelqu'un déterminé à prouver la thèse forte. Le temps ne semble pas connaître de fluctuation, il semble toujours couler dans la même direction : le futur.

Comme les observations en série montrent toujours un accroissement de l'entropie, si l'on postule que l'entropie était plus faible cinq minutes avant la première observation, et encore plus faible cinq minutes auparavant, la mise est sauvée. L'entropie croît constamment, car elle était plus faible hier qu'aujourd'hui, et elle

était encore plus faible avant-hier qu'hier. De cette façon, l'entropie croit toujours dans la direction que l'on nomme le futur. Afin d'éviter le résultat obtenu par la mécanique statistique, d'un accroissement de l'entropie vers le passé, nous n'avons qu'à postuler une entropie très faible vers le passé. Pour éviter une régression à l'infini, il suffit de postuler un état très faible d'entropie immédiatement après le Big Bang. C'est cette postulation que l'on appelle l'Hypothèse sur le passé. C'est sur cette hypothèse que portera la prochaine section.

3.3 Cosmologie

Il semble naturel qu'un texte portant sur la direction du temps traite de cosmologie. Après tout, le temps n'est pas limité à certaines régions de l'espace, au contraire, il semble être un élément fondamental de l'Univers en entier. Nous avons jusqu'ici considéré des exemples et des situations ayant une portée très limitée. Les contenants de gaz et les cubes de glace n'ont pas un grand rapport avec les galaxies. Ceci est vrai à plusieurs égards, or les cubes de glace et les galaxies ont tous deux en commun d'être dans le temps, et si le temps a une direction ces deux entités sont également concernées. Qui plus est, si le second principe de la thermodynamique est ce qui détermine cette direction, alors ce principe doit s'appliquer autant aux cristaux de glace qu'aux supernovae.

Comme nous l'avons mentionné dans la section précédente, le sujet principal de cette section sera l'Hypothèse sur le passé. Tel qu'indiqué, cette hypothèse consiste à postuler une entropie extrêmement faible immédiatement après le Big Bang. Ceci a pour effet d'éviter les problèmes de la mécanique statistique mentionnés plus haut. De plus, cela permet de comprendre pourquoi l'entropie de tous les systèmes augmente toujours. Cette hypothèse permet d'expliquer pourquoi les systèmes thermodynamiques, et certains autres phénomènes, comme la radiation par exemple¹³, se comportent de façon asymétrique malgré le fait que les lois gouvernant les molécules au sein de ceux-ci sont symétriques. En effet, même si les équations du mouvement sont symétriques, cela ne change rien, car l'entropie est

13. "I go on to suggest that the asymmetry of radiation, like the asymmetry of thermodynamics, results from the initial state of the universe." (Jill North. "Understanding the Time-Asymmetry of Radiation." *Philosophy of Science*, 2003, Vol. 70, No. 5, p. 1086)

considérée comme à son plus bas au début de l'univers, alors l'entropie ne peut que croître. Elle ne peut tout simplement pas avoir été plus élevée auparavant. L'appellation d'« Hypothèse sur le passé » fut popularisée par Albert (2000), mais ce dernier en attribue l'origine à Feynman. En effet, il a défendu l'idée que c'est la disposition initiale des particules est ce qui est à la base de l'irréversibilité des processus naturels¹⁴.

Deux questions légitimes apparaissent bien évidemment. Pourquoi serions-nous affectés par un événement survenu il y a plus de treize milliards d'années ? En quoi l'entropie des étoiles et des galaxies lointaines affecte l'entropie des tasses de café sur terre ? Nous sommes affectés par le niveau d'entropie du Big Bang, car c'est cet état extrêmement faible d'entropie qui est la source de l'ordre que l'on observe aujourd'hui dans l'Univers¹⁵. Comme tout tend vers le désordre et inversement rien ne tend à s'ordonner par soi-même, cet ordre doit avoir une source et cette source n'est autre que le Big Bang lui-même. C'est le fait que nous vivons à une époque qui est, au niveau cosmologique, très rapprochée du Big Bang qui explique pourquoi l'ordre instauré à cette époque influence encore la nôtre.

Afin de répondre à la seconde question, nous devons faire intervenir une seconde hypothèse. Il s'agit du Postulat Statistique¹⁶. Ce postulat est présent dans la mécanique statistique et il traite de la relation entre les systèmes et les sous-systèmes. Il postule qu'il soit plausible qu'une distribution uniforme dans l'espace des phases entraîne une uniformité dans les sous-espaces de l'espace initial¹⁷. Sui-

14. *“And so the apparent irreversibility of nature does not come from the irreversibility of the fundamental physical laws; it comes from the characteristic that if you start with an ordered system, and have the irregularities of nature, the bouncing of molecules, then the thing goes one way.”* (Feynman 1985, p. 113)

15. *“Our most refined theories of the origin of the universe our most refined cosmological theories tell us that by the time the universe was a couple of minutes old, it was filled with a nearly uniform hot gas composed of roughly 75 percent hydrogen, 23 percent helium, and small amounts of deuterium and lithium. The essential point is that this gas filling the universe had extraordinarily low entropy, the big bang started the universe off in a state of low entropy, and that state appears to be the source of the order we currently see. In other words, the current order is a cosmological relic.”* (Greene 2004, p. 171)

16. *“The Statistical Postulate (which is that the right probability distribution to use for making inferences about the past and the future is the one that's uniform, on the standard measure, over those regions of phase space which are compatible with whatever other information — either in the form of laws or in the form of contingent empirical facts — we happen to have.)”* (Albert 2000, p.96)

17. *“A standard assumption in statistical mechanics makes it plausible that, for any system,*

vant cela, le niveau d'uniformité de la distribution des composantes de l'Univers serait un indicateur de ce même niveau dans une sous-région de l'Univers, la terre par exemple. Si l'on se souvient que l'uniformité d'une distribution est un indicateur du niveau d'entropie, il est légitime d'inférer que le niveau d'entropie général de l'Univers et le niveau d'entropie des tasses sur terre sont, non seulement analogues, mais également que le premier détermine le second.

En combinant l'Hypothèse sur le passé, le Postulat Statistique, les équations newtoniennes et des observations empiriques, nous avons ce qu'il nous faut pour expliquer plusieurs phénomènes naturels, dont celui qui nous tient à cœur ici, c'est-à-dire la flèche du temps (Albert 2000, p. 96). Nous pouvons être beaucoup plus ambitieux et affirmer que cette approche combinant ces éléments est, non seulement intuitive, mais qu'elle permet également d'expliquer les intuitions de Boltzmann, certains des éléments fondamentaux de la cosmologie, la naissance des étoiles et des galaxies, l'apparition de la vie comme forme d'existence consommant de l'énergie, donc productrice d'entropie, et une multitude d'autres choses encore, par exemple, l'existence de ce texte de philosophie. Nous pourrions considérer ce potentiel explicatif comme une clause de plausibilité, ou encore percevoir la fécondité de cette approche comme une marque de sa pertinence ou de sa vérité. Nous croyons toutefois qu'il n'en est rien.

La fécondité d'une théorie est effectivement un critère de scientificité, or ce critère ne peut à lui seul garantir la validité d'une théorie. Toutefois, le problème majeur de cette approche se trouve du côté des deux hypothèses. Les deux, croyons-nous, sont déficientes à certains égards. Voyons ce qui en est de l'Hypothèse sur le passé. La première chose qui saute aux yeux est l'apparente circularité de cette solution. Pour rendre compte de la flèche thermodynamique, il faut postuler une faible entropie au Big Bang. Et de l'autre côté : les moments après le Big Bang devaient être faibles en entropie, car la thermodynamique postule que les systèmes tendent vers l'augmentation de l'entropie.

Ensuite, afin de corroborer cette hypothèse il faut des preuves empiriques que l'entropie fut effectivement très faible immédiatement après le Big Bang. Ceci

the initial distribution will be relatively uniform throughout any sub-space of the higher-dimension phase space. So that we conditionalize the initial distribution of a sub-space (and renormalize) we get another distribution that is relatively uniform." North 2011, p. 329

est difficile, mais possible. Les images que nous avons de cette époque semblent effectivement indiquer une faible entropie, mais qu'il s'agisse des travaux pionniers de Penzias et Wilson, ou des reconstructions modernes, attribuables à la sonde Hubble et au télescope Planck (Ade *et al.* 2014) les preuves ne sont pas définitives. Ceci n'invalide évidemment pas cette approche, seulement des recherches doivent encore être effectuées afin de pouvoir affirmer avec certitude que la situation fut bel et bien telle que le suppose l'Hypothèse sur le passé. De plus, lorsque nous parlons d'image des premiers instants de l'Univers, il faut bien sûr préciser qu'il s'agit de reconstruction à partir du rayonnement électromagnétique ou fond diffus cosmologique (*cosmic microwave background*).

Un autre problème doit également être porté à l'attention, il s'agit de l'inversion du rapport entre entropie et uniformité en cosmologie. Lorsque la force gravitationnelle est négligeable, comme dans tous les exemples que nous avons mentionnés jusqu'ici, l'uniformité d'une distribution est signe de stabilité et d'entropie maximale. La situation est exactement l'inverse lorsque l'on considère des systèmes où la force gravitationnelle est importante. Ce qui pose problème pour nous, c'est que nous avons mentionné que, suivant l'Hypothèse sur le passé et le Postulat Statistique, l'uniformité du grand système qu'est l'Univers est ce qui détermine l'uniformité des sous-systèmes que sont les planètes et les machines thermiques. Alors, comment rendre compte de cet apparent problème ? L'uniformité de l'un détermine celle de l'autre, mais pour l'un cette uniformité représente une entropie faible, alors qu'elle représente une entropie forte pour l'autre, et que par-dessus le marché, les deux sont censées voir leur entropie respective s'accroître dans la même direction.

Enfin, le Postulat Statistique pose à lui seul un autre problème assez important. Ce postulat ne semble absolument pas applicable dans le monde réel et c'est pourtant ce qu'il est supposé faire. Les exemples qui contreviennent à ce postulat sont très nombreux. David Albert en formule un supposant l'uniformité des appartements contenant une spatule par rapport à la localisation à l'intérieur de ces appartements de ladite spatule et affirme que le postulat nous indique qu'il est équiprobable de retrouver ladite spatule dans la baignoire que dans un tiroir de la cuisine¹⁸. Un autre exemple assez simple permet de bien comprendre l'inap-

18. “Suppose for example, that X is the property of being an apartment that contains a spa-

plicabilité d'un tel postulat dans le monde empirique. Considérons un verre d'eau bien froide placé dans une pièce à température ambiante. La situation est jusqu'ici en accord avec le postulat, à savoir qu'il semble justifié que la distribution des molécules d'eau soit également uniforme, autant au niveau du verre dans son ensemble qu'au niveau des différentes sections du verre d'eau. Cependant, l'exemple s'écroule aussitôt que l'on procède à une opération des plus banales : en rajoutant des cubes de glace dans le verre. Cette situation qui est très courante va directement à l'encontre du Postulat Statistique, alors il est plutôt douteux de vouloir utiliser ce même principe afin de rendre compte de caractéristiques si fondamentales de notre Univers, comme la croissance de l'entropie ou la direction temporelle.

3.4 Conclusions

Quelles conclusions pouvons-nous tirer de ces différentes observations ? Si l'on se souvient bien de notre point de départ, celui-ci était d'étudier ce que nous avons appelé la thèse forte. Cette dernière appellation fait référence à la thèse affirmant que le second principe de la thermodynamique est à considérer comme une loi fondamentale, et que de l'irréversibilité de ce principe nous pouvons déduire toutes les autres formes d'irréversibilités temporelles. En somme, la thèse soutient que la flèche thermodynamique est la flèche fondamentale dont les autres flèches ne sont que des manifestations ou des variantes.

Cette thèse nous semble hautement problématique, et ceci pour au moins six raisons. Les trois premières sont celles mentionnées dans la section précédente, c'est-à-dire la grande difficulté empirique de prouver une entropie faible immédiatement après le Big Bang ; la dichotomie entre l'uniformité et l'entropie en cosmologie et son rapport avec l'entropie en thermodynamique ; et l'inapplicabilité du postulat statistique dans des situations empiriques réelles. La quatrième raison est que,

tula, and consider the large collections of such apartments on earth. If the percentage of any large collection of randomly selected X -systems whose microconditions lie within any particular subregion of the X -region of the phase space is as a general matter proportional to the volume of that subregion, then the ratio of the percentage of those apartments in which the spatula is in the kitchen drawer to the percentage of those apartments in which the spatula is (say) in the bathtub, ought to be equal to the ratio of the amounts of space those two containers take up." (Albert 2000, p. 65)

non seulement ces hypothèses ne fonctionnent pas très bien, mais qu'elles ne sont justement que des hypothèses et des postulats qui n'offrent absolument pas la rigidité souhaitée afin de déduire un phénomène aussi fondamental que la direction du temps. La cinquième est que la symétrie des lois fondamentales de la physique n'est pas seulement une composante anodine de celles-ci, mais bien plutôt une des conditions de l'efficacité et de la précision de ces lois, équations et théories¹⁹.

Enfin, cette approche est déficiente, car elle suppose un réalisme très fort des principes de la thermodynamique. Cette approche soutient qu'un principe qui est, certes très efficace pour décrire les phénomènes thermiques, devrait être élevé au rang de lois fondamentales de l'univers et de ce fait, être la source de la flèche du temps. Nous croyons donc pour l'instant, que le second principe doit voir sa portée restreinte à la thermodynamique et à quelques autres phénomènes qui sont susceptibles d'être régis par ce même principe.

19. Nous n'avons qu'à penser au théorème CPT qui implique les symétries de la conjugaison de la charge, de la parité (gauche-droite) et de la symétrie temporelle futur-passé, ou encore à l'électrodynamique quantique.

Chapitre 4

Analyse

Maintenant que nous avons exposé les éléments nécessaires à la compréhension du problème de la direction du temps, nous pouvons procéder à l'analyse proprement dite. Nous verrons dans un premier temps les conclusions que nous permet de tirer une analyse du second principe, ainsi qu'une évaluation de la portée philosophique du concept d'entropie (section 4.1). Dans un second temps, nous proposerons une analyse de deux positions antagonistes en ce qui concerne l'Hypothèse sur le passé (section 4.2).

4.1 Approfondissement des notions centrales de l'approche thermodynamique classique

Le chapitre précédent a exposé les grandes lignes de la thèse thermodynamique de façon à mettre l'accent sur son développement historique et ses apports au problème de la direction du temps. La prochaine section se veut comme un élargissement des thèses et notions les plus importantes au sein de cette approche. Nous y exposerons certaines des lacunes principales, nous verrons en quoi certaines conceptions du second principe sont plus solides théoriquement que d'autres, et enfin, nous verrons en quoi l'entropie peut être formalisée de façon à s'affranchir totalement des notions de la thermodynamique classique. Tout ceci est effectué évidemment dans le but d'identifier les notions et concepts les plus aptes à la mise sur pied d'une théorie cohérente sur la flèche du temps.

4.1.1 Le second principe

Le second principe stipule que la chaleur se déplace toujours d'un corps chaud vers un corps froid, et jamais l'inverse. Ceci est bien compris et notre but ici n'est pas de refaire l'exposé de ce principe, mais plutôt de savoir comment s'articule conceptuellement ce principe. Est-ce préférable de centrer notre analyse sur la causalité qu'implique ce principe, sur ses états d'équilibre ou encore sur les processus qui sous-tendent les transferts thermiques ?

4.1.1.1 Les approches causales

Le second principe traite de processus dynamiques qui ont la particularité de se produire une seule fois, ou du moins, une fois réalisés, ces processus ne peuvent, sans force extérieure, se reproduire dans la direction inverse. Or, quels sont les éléments au sein de ce principe qui garantissent l'existence, la direction et l'asymétrie de ces processus ? À travers le large éventail de réponses possibles, plusieurs tentatives ont en commun le fait de baser leur théorie sur la causalité physique, c'est pourquoi nous les qualifions d'approches causales de l'asymétrie.

Comme le fait remarquer Price (2004, p. 5) dans sa contribution à l'ouvrage de C. Hitchcock *Contemporary Debates in the Philosophy of Science*¹, il y a derrière les principes de la thermodynamique l'idée de loi de la nature. Nous utilisons le terme de principe dans ce travail, or celui de loi de la thermodynamique est également utilisé. Il y a qui plus est, inclus dans l'idée de loi de la nature une certaine conception de nécessité ou de force. Bien entendu, dans l'approche boltzmannienne, la croissance de l'entropie n'est pas une certitude absolue, elle est probabiliste, or ceci n'affecte pas le fait qu'elle soit extrêmement probable. Ajoutons qu'empiriquement la croissance de l'entropie peut certainement être considérée comme une loi de la nature. Price (2004, p. 5) propose d'ailleurs de parler de *propensity* au lieu de *necessity*, donc de propension au lieu de nécessité.

La plus évidente de ces approches causales est bien entendu celle découlant du Théorème-*H* de Boltzmann. Nous avons présenté cette approche et également ses problèmes, le principal étant le fait que l'entropie croît, dans cette approche,

1. Christopher Hitchcock. (editor), *Contemporary Debates in the Philosophy of Science*. Wiley-Blackwell, 2004

dans les deux directions. C'est donc dire qu'il y a certes croissance de l'entropie, or comme elle croit dans les deux directions, il n'y a pas d'asymétrie au sein même de la structure de la théorie. La solution est, on le sait, d'ajouter un autre élément à la théorie en incluant une contrainte. Cette contrainte est un ensemble de conditions initiales. Price (2004) considère donc que cette tentative est caractéristique d'une approche à deux asymétries : le mécanisme de croissance et les conditions initiales à faible entropie. Il s'agit donc d'établir un processus dynamique et des conditions de départ loin de l'équilibre.

Il est intéressant de noter qu'outre l'approche classique exposée au chapitre précédent, il y a eu au cours du dernier siècle d'autres approches. Celle de Samuel Burbury insiste sur l'indépendance des différentes molécules de gaz avant leurs collisions et la perte de cette indépendance par la suite (Burbury 1894 in Price 2004). Cette transition de l'indépendance à la dépendance est due à la théorie des gaz de Boltzmann et à son hypothèse sur le chaos moléculaire, impliquée par son fameux Théorème-*H*. Il faut mentionner, suivant encore une fois Price (2004), qu'il ne faut pas croire que Burbury affirme que les collisions sont la source de la corrélation, mais bien que cette corrélation est simplement requise afin que l'entropie diminue dans la direction que l'on nomme passé.

Plus récemment, une approche caractérisée par un effondrement stochastique fut considérée, par Albert (2000) entre autres, où une extension de la physique quantique serait, à l'aide d'un processus de randomisation, garante de la croissance de l'entropie.

Enfin, il y a toujours en filigrane la possibilité que la croissance de l'entropie soit attribuable à une intervention, plus ou moins aléatoire, plus ou moins détectable et contrôlable d'une force externe à un système donné. Cette approche, appelée interventionnisme, insiste sans surprise sur l'incomplétude potentielle de la relation épistémique avec un système observé. Notons toutefois, que lorsqu'il s'agit d'un système extrêmement simple, le paradigmatique contenant de gaz par exemple, le contrôle de variable est relativement aisé. Disons donc que pour le but de ce travail cette approche n'est pas d'une grande utilité.

4.1.1.2 L'approche à asymétrie unique

Les approches causales exposées ci-dessus requièrent deux asymétries, une statique : des conditions initiales de faible entropie ; et une dynamique : une force, ou un processus garantissant la croissance de l'entropie. L'approche que nous voulons présenter ici ne comporte qu'une seule asymétrie : celle des conditions initiales. Comment peut-on postuler une croissance de l'entropie sans du même coup inclure dans sa théorie un mécanisme de croissance digne de ce nom ? En fait, un tel processus existe, il n'est cependant pas de même nature que ceux exposés précédemment, une simple question de nuance encore une fois.

Il n'y a en fait aucun besoin de postuler un mécanisme de croissance de l'entropie si l'on comprend bien la mécanique statistique et l'on impose une contrainte à une des extrémités temporelles de notre système, dans ce cas, comme dans celui de la cosmologie d'ailleurs : le passé. Ce qu'indique la mesure de Boltzmann² est que dans la très grande majorité des cas, les molécules de gaz de notre paradigmatique système se trouvent dispersées de façon relativement uniforme. Et malgré le fait que les trajectoires de cesdites molécules sont symétriques, les lois newtoniennes obligent, le fait de postuler, ou encore mieux, de constater, que ces molécules furent dans le passé confinées dans une région plus petite, est suffisant pour inférer une croissance de l'entropie.

C'est en fait ce postulat qui est la clé. Il suffit de combiner ces conditions initiales avec les probabilités boltzmanniennes. Après le confinement dans une région de l'espace totale on suppose — ou *conditionnalise* — une évolution vers une dispersion complète où les particules atteignent une distribution de Maxwell

$$f(v) = \sqrt{\left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^3} 4\pi v^2 e^{-\frac{mv^2}{2kt}},$$

où m est la masse de la particule, et kT le produit de la température et de la

2. “This means that Boltzmann’s assignment of probabilities to instantaneous microstates applies equally to whole trajectories. Accordingly, consider the set of all trajectories, with this Boltzmann measure. The key idea of Boltzmann’s statistical approach is that in the overwhelming majority of possible trajectories, the system spends the overwhelming majority of the time in a high entropy macrostate—i.e., among other things, a state in which the gas is dispersed throughout the container. And there is no temporal bias in this set of possible trajectories. Each possible trajectory is matched by its time-reversed twin, just as Loschmidt had pointed out.” (Price 2004, p. 7)

constate de Boltzmann. Ceci est valide seulement dans la mesure il n'y a pas de contrainte dans le futur. Un scénario de type Big Crunch serait dévastateur pour cette approche (ainsi que pour l'Univers en entier), mais cela ne nous concerne pas pour l'instant. En effet, si nous postulons une contrainte de faible entropie dans le futur, nous ne pouvons pas coupler la direction du temps à celle de la croissance de l'entropie, simplement parce que ce que l'on considère comme la flèche du temps continuerait d'exister alors que l'entropie globale de l'Univers serait en décroissance. Considérant que ce type de phénomène de re-contraction de l'Univers est encore l'objet de théorisation et de spéculation, disons que cette portion de l'approche boltzmannienne, à défaut d'être parfaite, semble tenir le coup.

Avant de clore cette section, il faut cependant mentionner un autre problème allégué de la théorie. Dans les années suivant les travaux de Boltzmann, nombre de critiques furent formulées à son égard. Alors que certains l'accusaient de pratiquer des mathématiques suspectes, Henri Poincaré formula un théorème qui avait le potentiel de renverser irrémédiablement la théorie de Boltzmann. Le théorème de récurrence de Poincaré stipule que pour un système dynamique clos (ergodique ou non (Earman 2006, p. 409)), les éléments dudit système retrouveront leurs conditions initiales, et ce de façon récurrente. Ceci va manifestement à l'encontre du second principe et de l'approche boltzmannienne. La réponse de ce dernier excède le cadre simplement théorique, elle est plutôt de nature empirique. Il admet bien évidemment la démonstration du théorème de récurrence de Poincaré, or il soutient que ce théorème ne s'applique pas à la thermodynamique (Steckline 1983, p. 895), de plus, il évalue le temps de récurrence pour toutes les particules de l'Univers à 10^N où $N \gg 1$, ce qui excède le temps d'existence du présent Univers. Qui plus est, il soutient que ce théorème ne peut être appliqué à l'Univers dans son ensemble, car rien ne permet de confirmer qu'il est effectivement fini et que par conséquent les particules et l'énergie le sont également³.

3. *“Part of Boltzmann’s (1896, p. 218) response was to question the applicability of Poincaré’s recurrence theorem to the universe; in particular, he deemed “questionable” the assumption that the “space available for motion, and the total energy [of the particles], are finite”. If this assumption fails, then so does the normalizability of the natural invariant measure, which is a necessary condition of Poincaré’s theorem.”* (Earman 2006, p. 418)

4.1.1.3 Problèmes avec l'approche de Boltzmann

Face aux problèmes rencontrés avec l'approche de Boltzmann dans le chapitre précédent, nous avons suivi le parcours classique de l'approche thermodynamique, c'est-à-dire de se tourner vers la mécanique statistique et ensuite vers la cosmologie. Le but de cette section n'est certes pas de refaire ce parcours, mais bien d'identifier des problèmes au sein même de la démarche de Boltzmann.

Nous considérons que cette approche fait généralement face à deux problèmes distincts, le premier étant de savoir pourquoi un système tend à évoluer vers l'équilibre et le second, pourquoi est-il aussi probable de prévoir une entropie supérieure après une première observation, mais également avant cette même observation.

Dans notre présentation de l'approche thermodynamique classique, nous avons affirmé que Boltzmann répond au premier problème à l'aide du caractère probabiliste de la mécanique statistique. De plus, nous avons affirmé que le second problème s'estompe lorsque nous considérons les diverses observations (x, x_{-1}, x_{-2}) non pas comme discrètes, mais comme différentes instances d'un processus continu (x_i, \dots, x_j) .

Peut-être est-ce un peu fort de parler de problème, mais il y a certainement une autre faiblesse avec l'approche de Boltzmann. Celle qui concerne notre position dans une région de l'espace où l'entropie est suffisamment faible pour que la vie se développe. Notre but ici n'est pas de traiter de l'approche anthropique, mais bien d'exposer les problèmes liés à la tentative de Boltzmann d'expliquer pourquoi notre région de l'Univers est si faible en entropie. Cette faiblesse s'exprime, entre autres, par le fait que nous trouvons plusieurs systèmes hautement ordonnés autour de nous.

Cette proposition de Boltzmann a l'avantage de rendre compte de l'asymétrie thermodynamique et elle permet également de conserver l'asymétrie de l'Univers dans son ensemble. Ainsi il pourrait y avoir un gradient entropique local et un état d'équilibre relatif au niveau global. Cette proposition fait du temps quelque chose de relatif à la position de l'observateur, à très grande échelle (quelques galaxies, par exemple). Si le temps est soumis à la croissance de l'entropie et que celle-ci se comporte de façon indépendante dans diverses régions de l'Univers, c'est donc dire

qu'il n'existe pas de temps universel. Qu'en est-il donc du recours à la cosmologie et de son insistance sur les conditions initiales de l'Univers, qui ont un impact global? L'Hypothèse sur le passé a le potentiel de rendre compte d'un nombre incroyablement grand de phénomènes, or les failles de sa construction deviennent de plus en plus apparentes.

Price (2004) souligne que cette hypothèse est si géniale qu'elle mérite d'être vraie, or, elle ne l'est tout simplement pas, et il est le premier à le reconnaître. Le premier problème est lié selon Price à l'utilisation des probabilités. On se souvient que la croissance de l'entropie est due, dans l'approche de Boltzmann, à la probabilité, extrêmement favorable, qu'une quantité de gaz occupe le volume maximal à sa disposition. L'entropie est même calculée avec le logarithme de n au sein de la fameuse formule de Boltzmann : $S = K \log n$. On se souvient que n signifie le nombre de micro-états compatible avec le macro-état (probabilité thermodynamique). On affirme l'augmentation constante de l'entropie, car cette croissance est extrêmement plus probable qu'une diminution. En contrepartie, le fait que nous nous trouvions dans une région à très faible entropie est extrêmement improbable considérant le fait que la norme est un état à l'équilibre et qu'une faible entropie est très loin de l'équilibre. Le problème est que Boltzmann utilise les probabilités de deux façons différentes : à la fois pour justifier la croissance de l'entropie, qui est extrêmement probable ; et également pour justifier notre position dans un état de faible entropie, ce qui est extrêmement improbable. Price (2004, p. 12) souligne notamment cette difficulté.

Or ce recours aux probabilités pour inférer deux choses qui ont des probabilités diamétralement opposées ne nous cause aucun problème. Il semble qu'une compréhension adéquate des probabilités permette sans problème de comprendre pourquoi un tel état de fait est possible. Justifier la croissance de l'entropie par le fait que dans la très grande majorité des cas, un système va évoluer vers l'équilibre est conforme à une interprétation probabiliste. Justifier qu'une région de l'Univers se trouve dans un état entropique très faible par le même recours aux probabilités est également justifié, mais seulement dans un cas très précis. Cette situation de faible entropie doit être exceptionnelle, il doit s'agir d'une situation extrêmement rare et isolée. Du fait que cette situation, quoiqu'extrêmement improbable, puisse se produire, il est possible d'affirmer qu'il soit plausible que nous nous trouvions

effectivement dans une de ces régions exceptionnelles. Il faut tout de même rester prudent, le fait que nous ne connaissions pas d'autres régions dans une situation analogue à la nôtre n'est point un argument en faveur de cette approche. L'absence d'observation d'une telle région est due à des facteurs épistémiques et n'indique en rien leur inexistence.

4.1.2 Entropie

Degré de perte de chaleur, mesure du désordre, augmentation du chaos, niveau d'ignorance, quantité d'information : l'entropie prend plusieurs formes et peut facilement avoir l'air d'un concept fourre-tout. Est-ce le cas ? Et en quoi toutes ces conceptions diverses de l'entropie nous informent-elle sur le problème de la direction du temps ?

4.1.2.1 Asymétrie et entropie

Le premier qui a clairement employé le terme d'entropie au sein de sa définition du second principe est Clausius en 1867. Uffink synthétise la définition dans ce qu'il appelle le « principe d'entropie » de Clausius :

For every nicht umkehrbar process in an adiabatically isolated system which begins and ends in an equilibrium state, the entropy of the final state is greater than or equal to that of the initial state. For every umkehrbar process in an adiabatical system, the entropy of the final state is equal to that of the initial state. (Uffink 2001, p. 37)

C'est la force de la thèse de Clausius qui présente un intérêt pour nous ici. Cette thèse, qui on se souvient, soutient que tous les processus naturels s'accompagnent d'une croissance de l'entropie. Toutefois, même les contemporains de Clausius avaient des doutes, ou du moins ne s'entendaient pas sur la terminologie à employer. Uffink (2001, p. 40) nous rappelle par exemple, que Kelvin définissait un processus irréversible par son incapacité à recouvrer son état initial, alors que pour Clausius un processus est irréversible seulement s'il n'est pas quasi statique.

Bien entendu, la notion d'irréversibilité est liée à celle de la direction temporelle, un processus ne pouvant se produire que dans une direction temporelle est une claire indication de la flèche du temps. Or, les deux définitions de l'irréversibilité

de Clausius et Kelvin ne s'accordent pas. Il faut attendre Planck afin d'avoir une définition unifiée de cette notion. L'apport de ce dernier est considérable. Non seulement il a l'idée de considérer les réservoirs de chaleur dans un environnement comme un gaz parfait, ce qui permet une description thermodynamique classique (Uffink 2001, p. 59), mais il réduit différentes conceptions de l'irréversibilité à une seule⁴. Cet apport de Planck a pour avantage de faire de la croissance de l'entropie une condition nécessaire et suffisante de l'irréversibilité⁵. Il postule également que tous les processus naturels sont caractérisés par une croissance de l'entropie, ou par son maintien, et donc que la croissance de l'entropie au sein des systèmes naturels, et l'irréversibilité qui en découle est un indicateur privilégié de la direction du temps.

4.1.2.2 Équilibre et entropie

Le second principe est-il responsable de l'asymétrie temporelle, ou est-ce seulement que nos observations sont soumises à la flèche psychologique et nous paraissent donc se dérouler dans une seule direction ? La relation entre le second principe et l'asymétrie temporelle est plutôt complexe, et ce, depuis le temps de Boltzmann. Nous tenterons donc dans cette section de jeter un éclairage sur les problèmes principaux qui furent surmontés, et également ceux qui demeurent encore présents aujourd'hui concernant cet important aspect de la thèse thermodynamique forte.

Pour certains, il s'agit comme nous l'avons vu, de questionner l'approche probabiliste de Boltzmann (Price 2004, p.12). Pour d'autres, nous devrions davantage concentrer nos efforts du côté de l'atteinte de l'équilibre que du côté du transfert unidirectionnel de chaleur pour rendre compte de l'asymétrie temporelle. La

4. "Before Planck's work there were also alternative views. We have seen that Kelvin attributed irreversibility to processes involving special forms of energy conversion. This view on irreversibility, which focuses on the 'dissipation' or 'degradation' of energy instead of an increase in entropy was still in use at the beginning of the century; see e.g. Bryan (1904). Planck's work extinguished these views, by pointing out that mixing processes are irreversible even though there is no energy being converted or degraded." (Uffink 2001, p. 43)

5. "Planck puts the second law, the concepts of entropy and irreversibility at the very centre of thermodynamics. For him, the second law says that for all processes taking place in nature the total entropy of all systems involved increases, or, in a limiting case, remains constant. In the first case these processes are irreversible, in the second case reversible. Increase of entropy is therefore a necessary and sufficient criterion for irreversibility". (Uffink 2001, p. 43)

thèse de Harvey Brown et Jos Uffink, exposé dans *The origins of time-asymmetry in thermodynamics : the minus first law* (2001)⁶, est que l'atteinte de l'équilibre n'est pas le résultat du second principe, mais plutôt que ledit principe ne fait que caractériser ce processus. C'est donc les états d'équilibre qui deviennent le centre d'intérêt principal.

Un souci constant de bien comprendre la terminologie utilisée dans les définitions des auteurs est évident chez Brown et Uffink. Avant de s'interroger sur la thèse de Hawking selon laquelle la croissance de l'entropie est vraie en vertu de sa définition, c'est à l'analyse de la formulation de Kelvin du second principe que s'attaquent nos auteurs. Cette formulation, qu'ils résument ainsi :

no cyclic process can have the sole effect of extracting heat from a reservoir and producing a corresponding amount of work. (Brown & Uffink 2001, p. 527)

comporte un élément clé qui indique que l'irréversibilité des processus d'échange thermique est limitée à un certain type de transformation, c'est-à-dire les transformations ayant lieu au sein de processus cycliques. Pour Brown et Uffink, la formulation de Kelvin n'implique pas l'irréversibilité des processus non cycliques. La formulation du second principe de Kelvin devient donc un conditionnel, qui bien entendu est beaucoup moins fort et d'autant moins intéressant dans la quête de trouver un fondement physique à l'asymétrie thermodynamique et encore moins intéressant lorsque nous voulons traiter de l'asymétrie temporelle. C'est le caractère conditionnel et limité de la formulation de Kelvin qui est suspect et c'est ce qui permet à Brown et Uffink de maintenir leur opposition à l'idée selon laquelle c'est le second principe qui est responsable de l'évolution vers l'équilibre d'un système, et que par conséquent c'est du côté de ce principe que se trouve l'élément essentiel pour comprendre l'asymétrie thermodynamique. Cette clé est ailleurs, chez le *Principe d'équilibre* notamment.

La tendance des systèmes thermodynamiques à évoluer vers l'équilibre peut être décrite, voire expliquée, sans recours au second principe. Ce sur quoi l'attention doit être prioritairement portée est la notion d'équilibre, Brown et Uffink

6. Harvey R. Brown, Jos Uffink. "The Origins of Time-Asymmetry in Thermodynamics : The Minus First Law." *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, Vol. 32, No. 4, pp. 525-538, 2001

s'inscrivent donc dans la tradition de Gibbs et Carathéodory. Les travaux de Gibbs, et son principe⁷ impliquent un déplacement de l'intérêt vers la notion d'équilibre et non de processus, et par le fait même introduit la notion de limite très commune dans les principes variationnels en physique. Afin qu'un système isolé soit en équilibre, la variation entropique doit être nulle ou négative. Pour l'entropie, la variation se formalise ainsi

$$\delta U < 0.$$

Sans surprise, la variation de l'énergie doit quant à elle être positive

$$\delta U > 0.$$

Uffink (2001 p. 62-63), suivant Gibbs, nomme la première inéquation le principe d'entropie maximale, et la seconde, le principe d'énergie minimale. Cette notion de limite maximale de l'entropie sera reprise dans la nouvelle formalisation de l'entropie que proposent Lieb et Yngvason (2000). (Voir section 4.1.2.4)

Pour Brown et Uffink, non seulement la notion d'équilibre est logiquement antérieure à celle de transfert de chaleur, elle est également la composante principale du principe zéro de la thermodynamique. On se souvient bien entendu que lorsque deux systèmes sont en équilibre avec un troisième, ces trois systèmes partagent une propriété, et c'est précisément cette propriété que l'on appelle température. Or, ce principe n'est pas suffisant afin de saisir intégralement la notion d'équilibre, c'est du moins ce que soutiennent Brown et Uffink, et ils remédient à cette lacune en proposant un principe moins un. Plus fondamental que le principe zéro, il permet de caractériser plus précisément ce qu'est un état d'équilibre et quels processus ont effectivement la capacité d'évoluer vers un état d'équilibre. Insistant sur l'unicité et la spontanéité, le *Principe d'équilibre* ou *Principe moins un* est ainsi défini :

[a]n isolated system in an arbitrary initial state within a finite fixed volume will spontaneously attain a unique state of equilibrium. (Brown & Uffink 2001, p. 528)

7. "For the equilibrium of any isolated system it is necessary and sufficient that in all possible variations of the state of the system which do not alter its energy, the variation of its entropy shall either vanish or be negative" (Gibbs 1906, p.56 in Uffink 2001, p. 61)

Il faut noter cependant que ce principe moins un n'est pas caractérisé que par deux propriétés, mais bien trois propriétés fondamentales : la persistance, l'unicité et la spontanéité.

La persistance garantit que l'équilibre est l'état final d'un système isolé et que ce dernier n'évoluera pas vers un nouvel état d'équilibre subséquent.

L'unicité indique qu'il existe un seul état d'équilibre possible pour un système isolé.

La spontanéité caractérise le fait qu'un système enclenche de façon spontanée son évolution vers l'équilibre. Nous pouvons également parler de relaxation spontanée vers l'équilibre⁸. Aussitôt que l'on retire une contrainte à un système (retrait d'un mur, ouverture d'une soupape), les éléments au sein dudit système évoluent immédiatement vers un nouvel état d'équilibre (Uffink 2001, p. 64).

Les auteurs insistent sur le fait que l'asymétrie thermodynamique est déjà présente au sein même de la notion de persistance. Une fois qu'un système a atteint un état d'équilibre, cet état persistera, un retour en arrière est impossible sans intervention externe. C'est du même coup au sein de cette notion de persistance que se trouve la solution au second problème de Boltzmann. Le second problème étant celui de la rétrodition, c'est-à-dire le fait que l'on soit justifié d'inférer un état à plus grande entropie lors d'une observation antérieure (x_{-1}) à x . Il n'y a pas de fluctuations (significatives) possibles (sans intervention externe) à partir d'un état d'équilibre donné.

Enfin, cette nouvelle approche, se fondant sur le principe moins un, permet de clairement distinguer les éléments asymétriques aux fondements de l'asymétrie temporelle présents en thermodynamique et ceux présents en mécanique statistique. Évidemment, en thermodynamique il s'agit de la notion d'équilibre, et de ces caractéristiques de persistance, d'unicité et de spontanéité. Tandis qu'en mécanique statistique, il s'agit, comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, de conditions initiales de l'univers, d'où le recours nécessaire à la cosmologie. Pour Brown et Uffink, cette seconde approche (la mécanique statistique) est beaucoup moins prometteuse, car elle requiert des conditions immensément improbables. Alors que l'approche thermodynamique renouvelée qu'ils proposent pourrait très bien se voir renforcée à l'aide de la mécanique quantique, et plus précisément des

8. On peut se référer au modèle des époux Ehrenfest.

équations de Wheeler-DeWitt qui sont utilisées, par Hawking entre autres, afin de calculer l'évolution de la fonction d'onde, qui est associé à un espace comme « amplitude de probabilité⁹ » (Brown & Uffink 2001, p. 532).

Brown et Uffink traitent également d'autres approches au sein desquelles l'asymétrie temporelle est associée davantage à la notion d'équilibre qu'à celle de transfert et d'irréversibilité propre au second principe. Carathéodory, Hawking et Lieb et Yngvason sont mentionnés. Nous avons traité de Hawking et de sa thèse forte, nous traiterons de Lieb et Yngvason dans une prochaine section, il reste donc Carathéodory. À première vue, l'approche de ce dernier semble invariable quant au renversement temporel, or, un examen approfondi semble indiquer le contraire. Carathéodory soutient qu'il n'existe pas d'état qui puisse accéder de façon adiabatique à tous ses états avoisinants. Brown et Uffink soutiennent que la converse est également vraie et que le formalisme de Carathéodory admet cependant des transformations respectant les conditions de la converse, c'est-à-dire qu'il n'existe pas d'états qui puissent être atteints adiabatiquement par l'ensemble de ses états avoisinants. Formellement, pour tout voisinage $U_s \in \Gamma$,

$$\forall s \in \Gamma \quad \forall U_s \exists T \in U_s \quad \& \quad \exists U_t \subset U_s \quad \forall r \in U_t : s \not\prec r,$$

où U_s et U_t sont les voisinages ouverts (*open neighborhoods*) de s et t . On voit clairement qu'un état r dans U_t ne peut être atteint (de façon adiabatique) à partir de s (Uffink 2001, p. 67).

La position de Brown et Uffink est que cette possibilité ne s'applique que dans des cas rarissimes, voire « pathologiques », dès lors, la formulation de Carathéodory n'est donc pas réellement asymétrique. Ils proposent donc d'exclure ces cas extrêmes et de considérer l'approche de Carathéodory comme temporellement symétrique. Or, cette mise de côté nous semble quelque peu problématique. Bien entendu, le fait de réduire la portée de l'analyse au cas qui se produisent dans les systèmes « normaux » est bénéfique pour l'allègement du formalisme et de l'analyse, toutefois, ce que nous recherchons ici ce n'est pas un moyen d'axiomatiser le plus efficacement possible une théorie, mais bien de rendre compte d'une composante essentielle de l'univers physique dans lequel nous vivons.

9. Lachièze-Rey in Hawking & Penrose 1997, p. 28

Bien sûr, la vigilance est de mise, parler de réalité physique au détriment du formalisme mathématique est la principale faute du réalisme naïf, or, exclure de son analyse des événements marginaux et problématiques, relève également de l'entêtement idéologique. Enfin, malgré ces précautions, il est clair que l'approche défendue par Gibbs, Carathéodory et Brown & Uffink n'a pas de conséquence directe sur la flèche du temps. Non pas que cette approche est en soi atemporelle, mais seulement parce que dans son but et son argumentation, elle se concentre sur le formalisme et non pas sur une interprétation philosophique de la thèse thermodynamique voulant que le second principe soit ce qui explique la flèche du temps.

4.1.2.3 Information et entropie

L'idée que l'entropie est, d'une certaine façon, reliée à l'information n'est certes pas très nouvelle. Elle se retrouve très clairement déjà chez Boltzmann. L'entropie est même parfois définie comme le niveau d'ignorance d'une personne par rapport à un système observé (Bub 2001, p. 5).

Avant toute chose, il faut s'entendre sur la signification à accorder aux termes principaux de cette approche, nous pensons plus particulièrement à la *communication* et à l'*information*. Nous devons entendre communication dans le sens le plus large possible, c'est-à-dire qu'est une communication toute procédure par laquelle un mécanisme en affecte un autre. Pour ce qui est de l'information, la situation est tout autre, il s'agit de concevoir l'information dans un sens bien précis. Il faut dans un premier temps savoir que l'information ne s'applique pas à l'individu, qu'il s'agisse d'un symbole ou d'un message, mais bien à la situation en son entièreté.

Dans le cas de la transmission d'un discours oral par exemple, ce qui est de l'information concerne, non pas ce qui est dit, mais bien ce qui *peut* être dit. Ce que nous entendons par information est en fait la mesure de liberté qu'un locuteur a lorsqu'il sélectionne un message. L'acquisition d'une information x parmi un ensemble de $x : \{x_0, x_1, \dots, x_n\}$ équiprobables est l'opération qui est à la base de la mesure de l'entropie (Bub 2001, p. 3). En fait, depuis les travaux pionniers de Claude Shannon, l'information est mesurable par le logarithme du nombre de choix disponible : $\log_2 x$. Une unité d'information est un ensemble de deux valeurs

possibles : vrai/faux ou 0/1, appelé un bit (abréviation de *binary unit*). Placé devant une situation à une alternative, un locuteur a une capacité de transmettre un bit d'information, devant 8 possibilités, 3 bits, devant 16, 4 bits, car $\log_2 16 = 4$, et ainsi de suite. Lorsque nous connaissons le nombre de bits pouvant être communiqués, ainsi que l'ensemble des symboles qu'a à sa disposition un locuteur, nous pouvons analyser la communication en détail, dans le cas qui nous intéresse ici, une séquence d'émission de symbole.

Encore une fois la puissance de cette théorie réside dans son analyse et son utilisation judicieuse des probabilités. Dans l'analyse d'une séquence de symboles, la probabilité de rencontrer un contenu x est déterminée par les contenus précédents. Il s'agit d'une séquence de symboles discrets, un processus de Markov (Weaver 1949, p. 6)¹⁰.

Weaver utilise l'exemple de la langue comme suite de symboles discrets : la probabilité de rencontrer un verbe à l'infinitif après un « la » est assez faible. Dans certains contextes, comme celui de la langue, il peut s'agir de processus ergodiques, ce qui permet une prédictibilité accrue. En effet, l'observation d'une séquence suffisamment grande est représentative de la séquence dans son ensemble. Tout comme l'observation d'un système thermique à plusieurs instants permet de prédire une croissance de l'entropie. Mais quelle place prend donc l'entropie dans une théorie de la communication ?

L'entropie est la quantité¹¹, obtenue par une fonction de probabilité, qui correspond à l'information transmise par une source. L'entropie augmente proportionnellement avec le degré de liberté qu'a un locuteur dans la sélection du prochain symbole. Dans le cas des jeux de hasard par exemple, le résultat d'un jet de dé possède une entropie supérieure à celle d'un tir à plie ou face, car dans le premier cas, il y a un choix parmi six possibilités, alors que dans le second, il n'y a que deux possibilités. Le cas du dé s'exprime ainsi

$$\sum_i x_i \log_2 x_i$$

10. Warren Weaver. "A Recent Contribution to The Mathematical Theory of Communication." *The mathematical theory of communication*, Vol. 1, 1949

11. "The quantity which uniquely meets the natural requirements that one sets up for "information" turns out to be exactly that which is known in thermodynamics as entropy." (Weaver 1949, p. 5)

$$\begin{aligned}
&= -6x \left(\frac{1}{6} \log_2 \frac{1}{6} \right) \\
&= 2,58
\end{aligned}$$

l'entropie est donc égale à 2,58. Le cas du tir à pile ou face est encore plus simple

$$\begin{aligned}
&\sum_i x_i \log_2 x_i \\
&= -(0.5) \log_2 0.5 + (0.5) \log_2 0.5 \\
&= 1.
\end{aligned}$$

La situation peut sembler confuse. En thermodynamique, l'entropie est toujours en croissance, tout système thermodynamique tend vers l'équilibre, c'est-à-dire vers un état de plus en plus probable. Or en théorie de la communication, l'entropie est plus élevée, lorsque l'information est obtenue à travers un plus grand ensemble de possibilités, cette information est donc en quelque sorte moins probable¹². Il semble que l'entropie puisse prendre deux formes différentes qui sont contraires à première vue.

Toutefois, peut-être est-ce seulement notre manipulation des concepts qui est déficiente ici. Car lorsqu'on sélectionne d'autres éléments à analyser, l'entropie thermodynamique et celle en théorie de la communication semblent aller main dans la main. On se souvient que l'entropie est plus grande lorsqu'une distribution occupe un plus grand volume dans l'espace des phases, dans l'exemple du café donné antérieurement (section 3.2), cette augmentation du volume de la distribution dans l'espace des phases se traduit par une homogénéité complète du café et du lait. Si l'on y réfléchit bien, dans cet état d'homogénéité accrue, la position d'une molécule de café est davantage incertaine que lorsque café et lait étaient bien distincts. En appuyant un peu sur les termes, nous pourrions affirmer qu'à l'instant où la solution est homogène, la molécule de café a « une plus grande

12. Les exemples fournis ici sont évidemment d'une grande simplicité, ceci afin de faciliter la compréhension, or lors de l'analyse de système complexe, la mesure de l'entropie peut être définie approximativement. (Voir à ce sujet Pincus 1991.)

liberté de choix » quant à sa position dans la tasse¹³. Sous cet angle, la situation ne pose aucun problème, la croissance de l'entropie va de pair avec la croissance de la « liberté », ou du caractère aléatoire, donc désorganisé d'un système.

Les notions d'information et d'entropie sont également présentes dans une panoplie de disciplines scientifiques.

En génomique fonctionnelle, l'entropie de Shannon est utilisée en tant qu'outil statistique afin d'interpréter un important ensemble de données. Il s'agit par exemple de déterminer quels sous-ensembles de gènes sont les plus susceptibles d'être affectés par un traitement pharmaceutique donné (Furhman *et al.* 2000).

En biologie, l'indice de Shannon est un des indicateurs utilisés pour calculer la biodiversité d'un écosystème donné. Plusieurs auteurs (Peirce 1877; Matthen & Ariew 2002 in Bouchard & Rosenberg 2004, p.701-704) soutiennent également qu'il soit possible d'analyser la « fitness » d'une population x de manière analogue à la croissance de l'entropie. Cette approche probabiliste est cependant fortement critiquée, tant sur des bases biologiques que mathématiques par Bouchard et Rosenberg, au profit d'une approche causale (Bouchard & Rosenberg 2004, p. 701-704).

En cosmologie, la relation entre entropie et information surgie lorsqu'il est question des trous noirs, et des hypothétiques trous blancs. Lorsqu'un objet « tombe » dans un trou noir, celui-ci disparaît, ainsi que toute l'information qui lui était rattachée. Cette perte d'information est une forme d'entropie cosmique. La situation se complexifie du moment que l'on postule — par souci de symétrie — l'existence de trous blancs, qui ne sont que des images miroirs des trous noirs. Alors qu'un trou noir est un endroit d'où rien ne peut s'échapper, un trou blanc est un endroit d'où l'information ne peut que surgir. Or, selon le second principe, en théorie de la communication, de l'information peut être perdue, mais ne peut jamais être « créée à partir de rien » (Lachièze-Rey in Hawking & Penrose 1997, p. 16). Pour Penrose, qui privilégie une lecture réaliste du second principe, ceci est suffisant pour réfuter leur existence. Alors que chez Hawking, les trous blancs ne sont pas réfutés, simplement parce qu'il soutient qu'en fait, les trous blancs sont

13. “*The greater this freedom of choice, and hence the greater the information, the greater is the uncertainty that the message actually selected is some particular one. Thus greater freedom of choice, greater uncertainty, greater information go hand in hand.*” (Weaver 1949, p. 8)

identiques aux trous noirs.

L'aspect thermodynamique des trous noirs est également très intéressant. Tel que mentionné, en relativité générale classique, on ne peut attribuer de température à un trou noir. Cependant, lorsqu'on considère les effets quantiques — ce que fait Hawking — nous pouvons considérer le rayonnement des trous noirs comme une émission thermique. Ce rayonnement est identique à celui d'un corps noir de température $\frac{1}{8}\pi M$, où M est la masse du trou noir. Dans ce contexte, la gravitation joue le rôle de la température, « alors que l'aire de l'horizon peut être véritablement assimilée à une entropie gravitationnelle intrinsèque¹⁴ ».

En terminant, il est judicieux de rappeler que l'entropie est une propriété d'un système, allant du paradigmatique piston avec gaz au plus grand des systèmes : l'Univers, et non pas une propriété d'une substance comme l'est la masse par exemple. Cette propriété est le fruit d'un regard analytique sur un système, ou sur la nature dans son ensemble. À l'instar d'autres métapropriétés, elle est porteuse de sens, or l'esprit avisé doit prendre garde de ne pas se laisser aveugler par sa beauté ou son pouvoir unificateur afin de lui attribuer une existence qui dépasse largement celle des entités théoriques¹⁵. Prenons garde au réalisme débridé.

4.1.2.4 Comparaison et entropie

Dans l'approche thermodynamique, la croissance de l'entropie est la direction avec laquelle nous déterminons la direction du temps. L'entropie ne peut que croître dans le temps, donc lorsque nous constatons une croissance de l'entropie entre deux observations distinctes (x_1, x_2) l'observation où l'entropie est plus élevée est l'observation postérieure (subséquente). Cette observation où l'entropie est supérieure sera donc t_2 et l'autre t_1 . Il existe toutefois des conceptions alternatives de l'entro-

14. Lachièze-Rey in Hawking & Penrose 1997, p. 20

15. “Suppose that we were asked to arrange the following in two categories—distance, mass, electric force, entropy, beauty, melody. I think there are the strongest grounds for placing entropy alongside beauty and melody, and not with the first three. Entropy is only found when the parts are viewed in association, and it is by viewing or hearing the parts in association that beauty and melody are discerned. All three are features of arrangement. It is a pregnant thought that one of these three associates should be able to figure as a commonplace quantity of science. The reason why this stranger can pass itself off among the aborigines of the physical world is that it is able to speak their language, viz., the language of arithmetic.” (Arthur Eddington “The Nature of the Physical World” in Weaver 1949, p. 12)

pie, tout comme il existe également des solutions alternatives au problème de la direction du temps. Cette prochaine section présentera une « nouvelle » conception de l'entropie et du second principe de la thermodynamique.

Se positionnant également dans la tradition de Carathéodory, c'est en 2000 que Elliot H. Lieb et Jakob Yngvason ont publié *A Fresh Look at Entropy and the Second Law of Thermodynamics*¹⁶, un texte dans lequel ils prétendent offrir un nouveau point de vue sur l'entropie, et ceci en omettant toutes références aux machines thermiques, ou encore à la flèche du temps¹⁷. Cette approche est précise et représente à bien des égards un progrès dans la tentative de formuler le second principe le plus adéquatement possible¹⁸.

La thèse principale est que l'entropie se résume en fait à un ensemble de propriétés et de relations mathématiques ou ensemblistes totalement indépendantes soit des modèles statistiques ou encore des atomes¹⁹. Cette simplicité nous rappelle la tentative de formalisation de Carathéodory, la version exacerbée de celle-ci voulant que ce soit le formalisme qui décide ce qui est possible (Uffink 2001, p. 70). Le formalisme et son caractère outrageusement précis, et indépendant des préciosités inhérentes à tout modèle, sert à inférer l'indépendance des fondations logiques du second principe. Les auteurs veulent exposer ces fondations en s'inspirant de l'ouvrage pionnier de R. Giles *Mathematical foundations of thermodynamics*²⁰. S'éloignant considérablement de Clausius, Boltzmann et Planck, cette approche ne fonde pas son analyse de l'entropie sur les systèmes thermiques, elle se base plutôt sur le concept de « comparaison ».

Ce que nous voulons réellement considérer, ce sont les états d'équilibre. Cette approche consiste donc en la comparaison de différents états. Le paradigme est le

16. Elliot H. Lieb, Jakob Yngvason. "A Fresh Look at Entropy and the Second Law of Thermodynamics". *Physics Today*, 2000

17. L'approche développée ici est en une qui se fonde sur les travaux de Carathéodory, c'est donc dire qu'il s'agit là d'une théorisation portant sur des phénomènes locaux uniquement. C'est donc sans surprise que toute volonté d'étendre les conclusions de Lieb et Yngvason au niveau global n'est que velléité (Uffink 2001, p. 71). A cet égard, Carathéodory et Planck occupent des positions bien distinctes.

18. "This approach combines mathematical precision with clear and plausible axioms and achieves a powerful and remarkable theorem. This is true progress in the formulation of the second law." (Uffink 2001, p. 85)

19. "Our main point is that the existence of entropy relies only on a few basic principles, independent of any statistical model—or even of atoms." Lieb & Yngvason 1999, p. 3

20. Robin Giles. *Mathematical Foundations of Thermodynamics*, Pergamon, Oxford, 1964

suivant : un système est observé et se trouve dans un état x , puis observé plus tard dans un état y . Ces deux observations sont discrètes, or nous imaginons bien qu'il y eut une succession de nouvel état d'équilibre entre ces deux observations. Existe-t-il une différence entre ces états « transitoires » de x à y et d'autres états qui ne purent pas mener de x à y ? Certes, répondent Lieb et Yngvason. Il existe une fonction des états d'équilibre S qui est caractérisée par les possibles pairs d'équilibre (x, y) de la façon suivante $S(x) \prec S(y)$. Sans surprise cette fonction S est l'entropie. Cette dernière peut être analysée sous ses différentes formes utilisant cette approche formalisée. D'où l'insistance des auteurs à réaffirmer l'indépendance de l'entropie par rapport à une approche statistique.

Un système est rarement si simple qu'il ne contienne que quelques éléments. Plus souvent on a affaire à des systèmes de systèmes, ce que l'on nomme un système composé. L'entropie d'un de ces systèmes composés peut être comparée par composition (x, x') de deux systèmes indépendants. Nous pouvons également en effectuer la mesure, par exemple un état x peut être mesuré par un facteur $\lambda > 0$, menant à un état noté λx . Les propriétés extensives comme le volume et l'énergie sont multipliées par λ , alors que les propriétés intensives, comme la masse, restent intactes.

La notion centrale sur laquelle insistent nos auteurs est celle d'accessibilité adiabatique. Cette notion fut développée en grande partie dans les travaux de Carathéodory. Ce dernier insista sur la forme « *Gestalt* » d'un système thermodynamique, si un état thermodynamique donné est caractérisé par un ensemble de coordonnées, un changement de celles-ci (les coordonnées) modifie la forme du système dans l'espace des phases. L'utilisation du terme « adiabatique » est inopinée ici, car elle renvoie à l'usage que Carathéodory faisait de cette notion. C'est-à-dire qu'un système est adiabatique si son, ou ses sous-systèmes demeurent en état d'équilibre, nonobstant les changements pouvant survenir dans l'environnement du système²¹.

Si y est accessible à partir de x nous écrivons $x \prec y$, dans le sens que x précède y . Pour les systèmes macroscopiques, cette relation \prec est absolue, c'est-à-dire que

21. “He calls a container adiabatic if the system contained in it remains in equilibrium, regardless of what occurs in the environment, as long as the container is not moved nor changes its shape.” (Uffink 2001, p. 66)

si elle est possible, elle l'est toujours, si elle est impossible elle n'aura jamais lieu. Cette relation, une fois couplée à l'entropie se formalise ainsi :

$$x \prec y \text{ ssi } S(x) < S(y).$$

Pour un système composé, l'entropie nous est donnée ainsi :

$$S(x, x') = S(x) + S(x').$$

Un processus irréversible (suivant Carathéodory) sera noté ainsi (Uffink 2001, p. 86) :

$$\forall s \in \Gamma \exists t : s \prec t \ \& \ t \not\prec s.$$

Lieb et Yngvason insistent sur le fait que l'additivité n'est pas triviale, car il s'agit d'une des propriétés les plus importantes du second principe. Il est assez remarquable que l'inégalité $S(x) + S(x') < S(y) + S(y')$ caractérise exactement les possibles transitions adiabatiques pour ce système composé, même lorsque $S(x) > S(y)$! Cette additivité implique que l'entropie d'un système composé n'est que la somme de l'entropie de ses systèmes simples. Ceci entraîne, comme le mentionnent Brown et Uffink, que cette formalisation de l'entropie rappelle celle de Schrödinger qui affirme que pour deux systèmes quelconques n'interagissant pas ensemble, les changements entropiques se produiront toujours dans la même direction (Brown & Uffink 2001, p. 536). En plus de l'additivité, l'extensivité est une propriété importante de cette conception de l'entropie :

$$S(\lambda x) = \lambda S(x),$$

l'entropie peut donc être mesurée par rapport à un référent constant. La volonté de s'écarter encore une fois de l'approche de Kelvin et autres est manifeste par l'insistance des auteurs sur le fait que l'existence et l'unicité de l'entropie sont équivalentes à certaines propriétés de la relation \prec ²². La scission s'effectue également quant à la définition de la fonction de l'entropie. L'approche classique

22. "The basic message we wish to convey is that existence and uniqueness of entropy are equivalent to certain simple properties of the relation \prec ". (Lieb & Yngvason 2000, p. 7)

de Boltzmann utilise le logarithme des probabilités des micro-états :

$$S = K \log n.$$

Alors que pour Lieb et Yngvason l'entropie est dérivée uniquement à partir de la liste des paires $x \prec y$. La signification de l'entropie est similaire à celle de potentiel pour un champ vectoriel et n'est pas basée sur la formule classique de l'entropie de Shannon²³ :

$$\sum_i p_i \ln p_i$$

ou

$$\sum_i x_i \log_2 x_i.$$

Étant limitée à cette liste de propriétés logicomathématiques, fournie par la physique, l'entropie n'est donc plus soumise aux caprices définitionnels de direction du temps et d'irréversibilité. Les notions de chaleur, et de machines thermiques réversibles ne font pas partie de la liste des propriétés pertinentes.

Outre les deux propriétés évidentes de transitivité ($(x \prec y) \wedge (y \prec z) \rightarrow (x \prec z)$) et de réflexivité ($x \prec x$ pour tout x), cette nouvelle conception de l'entropie possède d'autres caractéristiques logiques intéressantes. La plus importante étant que la relation se comporte « raisonnablement », ou est directement influencée par la composition et la mesure (*scaling*) des états d'équilibre.

L'accès adiabatique est consistant avec la composition desdits états (consistance)

$$(x \prec y) \wedge (z \prec w) \rightarrow (x, z) \prec (y, w).$$

La mesure proprement dite n'affecte pas l'accès adiabatique (invariance)

$$x \prec y \rightarrow (\lambda x \prec \lambda y).$$

23. "An analogy leaps to mind : When can a vector-field, $E(x)$, be encoded in an ordinary function (potential), $\varphi(x)$, whose gradient is E ? The well-known answer is that a necessary and sufficient condition is that $\text{curl } E = 0$. The importance of this encoding does not have to be emphasized to physicists; entropy's role is similar to the potential's role and the existence and meaning of entropy are not based on any formula such as $\sum_i p_i \ln p_i$ involving probabilities p_i of "macrostates"." (Lieb & Yngvason 2000, p. 7)

Un système adiabatique peut être coupé en deux parties distinctes (décomposition)

$$(0 < \lambda < 1) \rightarrow (x \prec ((1 - \lambda)x, \lambda x)),$$

et la recombinaison de ces deux parties est également adiabatique (recomposition)

$$((1 - \lambda)x, \lambda x) \prec x.$$

Il est également important de noter que l'accès adiabatique demeure stable sous de petites perturbations, pour un ϵ arbitrairement petit $\epsilon > 0$

$$(x, \epsilon z) \prec (y, \epsilon w) \rightarrow x \prec y.$$

Pour Lieb et Yngvason, ces propriétés sont généralement admises comme allant de soi dans les approches traditionnelles. Cependant, quoique nécessaires, ces propriétés ne sont pas suffisantes pour définir l'entropie. L'apport de nos auteurs est l'ajout de l'hypothèse de comparaison des relations \prec . Cette hypothèse peut se résumer ainsi : tous les états d'équilibre, simples ou complexes, peuvent être regroupés au sein de classes de telle façon que si x et y se retrouvent dans la même classe, alors soit $x \prec y$ ou $y \prec x$ ²⁴.

La conclusion que tentent fermement de démontrer Lieb et Yngvason est que l'entropie est la résultante de deux choses seulement : l'hypothèse de comparaison et l'accès adiabatique. Voici comment s'articule la démonstration menant à cette conclusion. Prenons trois états d'un système $x : x_0, x_1, x_2$, ainsi qu'un facteur de mesure (*scaling*) λ entre 0 et 1. En vertu de l'hypothèse de comparaison²⁵, soit

$$x \prec ((1 - \lambda)x_0, \lambda x_1)$$

est vrai, ou

$$((1 - \lambda)x_0, \lambda x_1) \prec x$$

24. "In essence, this is the hypothesis that all equilibrium states, simple or compound, can be grouped into classes, such that if X and Y are in the same class, then either $X \prec Y$ or $Y \prec X$." (Lieb & Yngvason 2000, p. 8)

25. Quoique de façon générale, Lieb & Yngvason se positionnent dans la tradition de Carathéodory, Uffink (2001, p. 84) mentionne que l'hypothèse de comparaison n'est pas compatible avec la définition que donne Carathéodory d'« adiabatique ».

est vrai. Si les deux sont vrais, alors la propriété de l'entropie exige que

$$S(x) = (1 - \lambda)S(x_0) + \lambda S(x_1).$$

Si les propriétés exposées précédemment et

$$x_0 \prec x \prec x_1,$$

sont vrais, alors nous pouvons toujours supposer l'existence d'une mesure telle que

$$0 < \lambda < 1.$$

C'est évidemment le plus grand λ , noté λ_{max} , qui fournit l'indicateur privilégié de la mesure de l'entropie. Nous définissons les états de référence arbitrairement

$$S(x_0) = 0 \text{ et } S(x_1) = 1,$$

à partir de

$$((1 - \lambda)x_0, \lambda x_1) \prec x.$$

C'est ainsi qu'est posée la *formule pour l'entropie* :

$$S(x) = \lambda_{max} \text{ unités.}$$

La formule pour l'entropie peut également être énoncée ainsi : $S(x)$ est la fraction maximale d'une substance dans l'état x_1 qui peut être transformée de façon adiabatique dans l'état x avec l'aide d'une fraction complémentaire de substance dans l'état x_0 (Lieb & Yngvason 2000, p. 9). Selon les auteurs, cette façon de mesurer l'entropie rappelle celle que préconisait Laplace et Lavoisier lorsqu'ils proposaient de mesurer l'entropie par la quantité de glace fondue dans un processus.

Ainsi, x est une quantité d'eau liquide, x_0 de glace et x_1 de vapeur d'eau. Alors $S(x)$ pour un kilo d'eau liquide (mesurée avec l'entropie d'un kilo de vapeur d'eau comme unité) est la fraction maximale d'un kilo de vapeur pouvant être transformée (de façon adiabatique dans un état x) avec l'aide d'une fraction

complémentaire d'un kilo de glace. Lieb et Yngvason insistent sur le fait que λ_{max} est uniquement défini par le fait qu'il soit requis que l'on puisse passer (de façon adiabatique) de x à $((1 - \lambda_{max}) x_0, \lambda_{max} x_1)$. C'est donc dire que dans l'exemple précédent cette transformation ne pourrait s'effectuer simplement en appliquant la vapeur sur la glace, car cela serait un processus irréversible, c'est-à-dire qu'il ne serait pas possible de reproduire la quantité initiale de vapeur de glace à partir du liquide.

Cette version de l'entropie se veut donc totalement indépendante de la flèche du temps, or malgré cet isolement dans le formalisme, l'observateur avisé y voit néanmoins une certaine notion de passage. L'accès adiabatique cher à nos auteurs constitue une transformation, et celle-ci s'effectue dans le temps. Toutefois, cette transformation ne constitue en rien une thèse en faveur de la flèche du temps comme propriété émanant du second principe.

C'est avec la même approche que Lieb et Yngvason rendent compte d'autres propriétés de la thermodynamique. En ce qui concerne par exemple la stabilité d'un système thermodynamique à l'équilibre, cette dernière s'explique en termes de concavité et de convexité. La concavité du processus exprimé ici

$$S(y) > \lambda S(x) + (1 - \lambda)S(z)$$

sert selon les auteurs à établir la base de la stabilité thermodynamique, c'est-à-dire la chaleur spécifique et la compressibilité des substances au sein d'un système. La formulation classique du second principe est réductible à deux éléments, la concavité de S ainsi que l'existence d'au moins un processus (*state change*) adiabatique irréversible à partir de n'importe quel état de départ (Lieb & Yngvason 2000, p. 11). Le principe zéro, celui définissant le concept de température n'y échappe pas non plus. Si deux systèmes sont en stabilité thermique avec un troisième, alors ils sont en équilibre entre eux. Cette propriété, nécessaire pour l'additivité, est celle qui permet un ajustement constant de la mesure de l'entropie pour différents systèmes. C'est ce qui permet de formaliser le concept de température en utilisant la formule classique :

$$1/T = (\delta S / \delta U)_V.$$

Pour conclure sur cette « fraîche » approche, voyons ce que les auteurs énoncent

comme les avantages de cette approche. Premièrement, l'élimination de concepts intuitifs, mais difficilement définissables de façon précise, comme chaud, froid et chaleur permet de se concentrer sur des notions sur lesquelles nous avons un ancrage conceptuel solide.

Deuxièmement, le fait que l'entropie puisse être comprise comme une codification des possibles changements d'états $x \prec y$, ayant comme seul changement qu'un poids a été déplacé, permet d'éliminer également la température comme concept a priori²⁶. Ceci a aussi comme conséquence qu'il est désormais possible de définir la température comme une quantité dépendante de l'entropie et non pas l'inverse.

Troisièmement, ce formalisme permet d'escamoter à la fois, les machines et leurs processus d'échanges thermiques (pour les empiristes), ainsi que les modèles (pour les adeptes de la mécanique statistique). Ceci permet de supporter la thèse des auteurs, à savoir que l'entropie doit être vue comme un ensemble de propriétés émanant de paires d'états d'équilibre étant accessibles de façon adiabatique (Lieb & Yngvason 2000, p. 12).

Enfin, cette approche comporte des éléments à la fois symétriques et asymétriques. Pour Uffink (2001, p. 89) c'est l'angle d'analyse qui détermine si l'on considère cette approche comme étant symétrique ou non²⁷. L'importance que l'on attribue à la relation \prec influence directement la signification physique de l'approche de Lieb et Yngvason. Le contenu empirique de cette relation est corrélé à l'interprétation que l'on accorde à la relation de préséance. Lieb et Yngvason offrent une interprétation beaucoup plus généreuse que celle de Carathéodory (Uffink 2001, p. 90), nous serions donc tentés de conclure qu'ils accordent une plus grande portée à cette opérateur, or rien ne nous permet d'inférer que cet élargissement milite en faveur de la corroboration de la thèse forte, bien au contraire.

26. Cette volonté d'élimination de termes « primitifs » est présente chez plusieurs auteurs, autant chez des représentants de l'approche thermodynamique (Carathéodory), que chez des défenseurs de l'approche géométrique (Castagnino, Lombardi, Lara).

27. "Therefore, the answer to the question whether this approach is time-symmetric or not depends on whether one analyzes the question from the point of view of the formalism or its interpretation." (Uffink 2001, p.89)

4.2 L'Hypothèse sur le passé : les conditions initiales requièrent-elles une explication ?

L'Hypothèse sur le passé stipule que la disposition initiale de la matière dans le jeune Univers est responsable de l'irréversibilité des processus, de la croissance inévitable du désordre et enfin de la flèche du temps. Cette hypothèse fait désormais partie des incontournables pour quiconque entreprend une étude du problème de la direction du temps. Or malgré cette récente popularité, l'hypothèse n'est pas exempte de dissension et d'oppositions des plus frontales.

Nous entendons par conditions initiales l'ensemble de conditions dans lesquelles se trouvait l'Univers à la fin de la phase d'inflation, c'est-à-dire, selon Earman (2006, p. 415) 10^{-35} secondes après le Big Bang. S'agit-il d'un simple fait de la nature ne requérant pas davantage de justification, ou est-ce un phénomène naturel important qui doit être expliqué afin de rendre compte de la flèche du temps ?

L'Hypothèse sur le passé est parfois considérée comme une conjecture scientifique des plus avisées nécessitant un travail de théorisation et de justification de premier plan (Price 2004). Certains reconnaissent sa pertinence et son utilité et la positionne d'emblée comme une loi de la nature ne requérant pas davantage de justification théorique ou de corroboration empirique (Callender 2004b). Enfin, d'autres ne voient dans cette hypothèse qu'une forme d'hystérie très peu féconde²⁸ et pas du tout essentielle à l'édification d'une théorie sur la flèche du temps (Earman 2006).

Laissant temporairement la position d'Earman, la prochaine section présentera deux attitudes possibles face à l'Hypothèse sur le passé et son besoin de justification.

4.2.1 La réponse négative : Craig Callender

Callender (2004b) s'appuie sur David Hume lorsque ce dernier soutient dans les *Dialogues sur la religion naturelle* (1779) qu'on ne peut avoir de connaissance

28. "In sum, the Past Hypothesis, even if true, does not explain why ordinary thermodynamics works as well as it does for the types of systems of interest to us, and the widespread celebration of this hypothesis has been counter-productive in obscuring the hard work that still needs to be done to secure a satisfactory explanation". (Earman 2006, p. 419)

précise des conditions initiales de l'Univers, car celles-ci ne furent réunies qu'une seule fois. Le fait qu'il soit impossible de reproduire ces conditions implique, selon Callender, que nous ne pouvons émettre de grand principe justifiant la réunion de ces conditions, réunion qui est somme toute contingente. Deux points motivent cette position.

1- Tout d'abord, si l'on se place d'un point de vue empiriste, il semble assez douteux que l'on puisse envisager de tester empiriquement ces conditions initiales. Principalement, imagine-t-on, parce qu'elles représentent une situation unique qui, si la théorie classique s'avère exacte, ne s'est produite qu'une fois, et ne peut pas se reproduire. Ceci est vrai si nous excluons évidemment l'approche de production successive d'univers et des univers-bébés, défendue, entre autres, par Carroll (2010). Avant de passer au second point, une remarque nous semble pertinente. Il semble que cette absence de grand principe ne soit pas une raison si forte de rejeter la demande explicative. Le fait de ne pas pouvoir tester empiriquement certaines propositions comme l'hypothèse sur le passé est certes à considérer, surtout dans une perspective empiriste, or la nature même de la cosmologie fait en sorte que les demandes classiques de l'empiriste sont rarement satisfaites. Le caractère hautement théorique, voir même souvent spéculatif de cette discipline multicéphale vient, nous semble-t-il, diminuer le besoin de reproductibilité et d'expérimentation directe. C'est donc dire que cette absence de principe en appelle un autre, celui de la prudence et de l'adaptation des critères et techniques, aux objets ou hypothèses étudiées.

2- Callender (2004b) se questionne ensuite sur les critères de ce qui constitue un fait brut (*basic fact*) ne nécessitant pas de justification, et de sa différence par rapport à un simple fait trouvant sa justification dans un phénomène plus fondamental. Il cite en exemple les tenants de ce succédané pseudo-scientifique et cryptoreligieux de théorie qu'est le Design Intelligent²⁹, qui maintiennent que le Big Bang est un simple fait qui requiert une explication, alors que Dieu est un élément si fondamental qu'aucune justification de son existence n'est requise. Or, Callender prétend que cette distinction n'est pas claire. Il va sans dire que nous

29. L'expression est de Daniel C. Dennett, "[...] *the Intelligent Design movement, that disingenuous, pseudo-scientific, crypto-religious campaign to undermine the richly deserved authority of evolutionary biology*" (Dennett 2013, p. 221)

sommes d'accord en ce qui concerne le Design Intelligent, or quant est-il pour les éléments qui sont partie prenante des théories que nous ne considérons pas comme farfelues ? La situation n'est pas si simple. Ce qu'il faut faire, c'est établir des critères qui servent à caractériser ce qui constitue un fait brut ne requérant pas de justification. Simplement, c'est précisément ce que les tenants de la posture explicative — dont Price est un bon exemple pour Callender — ne font pas. Pourtant, ils soutiennent que certains éléments doivent absolument être expliqués. Pourquoi ceux-ci et pas d'autres ? Callender soutient qu'à défaut d'établir des critères universels, il faut juger des faits avérés selon leur importance théorique, leurs vertus empiriques, etc. C'est donc une approche particulariste qu'il met de l'avant et il puise dans l'histoire de la science pour appuyer sa position.

Le rejet de la théorie newtonienne de la gravitation est selon lui un exemple de premier choix. Ce rejet était majoritairement motivé par le fait que la théorie stipulait des actions-à-distance. Callender demande : pourquoi les forces à distances (non locales) seraient-elles a priori inacceptables alors que les forces avec contact (locales) seraient-elles a priori acceptables ? Aucune justification n'existe a priori, on ne peut donc pas parler de principe ou de loi universelle, mais seulement de cas particuliers, et qui plus est, a posteriori. C'est donc clairement l'inexistence de critères précis de ce qui doit être expliqué qui est en jeu ici. Callender indique également que plusieurs à l'époque ont également essayés d'imaginer une panoplie de mécanisme dans le but de restaurer les forces locales, non seulement ces efforts furent-ils vains, ils se sont avérés impossibles à tester indépendamment (Callender 2004b).

Callender prétend qu'il puise encore chez Hume des raisons additionnelles de remettre en question le bien-fondé de demander absolument des justifications pour les conditions initiales. On se souvient que Hume, ainsi que plusieurs autres soit dit en passant, se sont opposés à l'argument thomiste voulant que l'existence de Dieu soit justifiée grâce à l'argument cosmologique. Cet argument soutient que tout effet doit avoir une cause et que ceci est possible de deux façons seulement, soit il y a une chaîne infinie de cause et d'effet, ou il y a une cause « non-causée » ou cause première. Pour Thomas d'Aquin, la première option, celle de la chaîne infinie est injustifiée, il opte donc pour la seconde. Bien évidemment, il va sans dire que pour lui cette première cause est Dieu. Voici le même argument dans sa

formulation classique : 1- Toute chose ayant un commencement d'existence a une cause à cette existence ; 2- L'Univers a un commencement à son existence ; donc : l'Univers a une cause à son commencement (et pour un théiste, cette cause est Dieu).

Pour Callender, la réaction de Hume est de demander : qu'est-ce qui cause la première cause ? Ensuite Callender propose, et ce sans préciser s'il emprunte cette stratégie à Hume, de tordre (*bend*) la question. Cette torsion consiste à se demander si nous devons absolument chercher une cause externe à cette première cause. Ce premier moteur, pour parler aristotélicien, n'est-il pas lui-même sa propre cause ?

C'est donc dire que Callender accepte la proposition de Thomas d'Aquin, or il ne se commet pas au sophisme de ce dernier en caractérisant cette première cause, mais s'arrête plutôt juste avant et soutient que l'Univers doit bien effectivement avoir une cause, or celle-ci ne doit pas nécessairement être de nature différente. L'Univers en tant que tel est sa propre cause³⁰.

Callender demande ensuite quels sont donc les éléments manquants à l'Hypothèse sur le passé ? Elle lui semble très adéquate : elle est simple, en accord (provisoire) avec la cosmologie, et possède une énorme quantité de preuves indirectes en provenance de la thermodynamique. Cela ne compense-t-il pas le fait qu'elle soit hautement improbable ?

C'est donc maintenant à la relation entre probabilité et explication que s'attaque Callender. Il demande si le fait que l'Hypothèse sur le passé soit hautement improbable appelle nécessairement une explication ? Nous serions tentés de répondre, bien sûr, et ceci en vertu du principe *extraordinary claims require extraordinary evidence*. Callender, quant à lui, soutient que presque tout ce qui se produit est improbable, nous pourrions bien entendu penser à l'apparition de la vie et de l'évolution des espèces et lui donner raison. Ce n'est cependant pas cet exemple qu'il utilise, il suggère plutôt l'improbabilité de la chute d'un astéroïde et

30. "But then, one thinks, if it's acceptable for something to cause itself or to selectively apply the explanatory demand, we have gone a step too far in positing God as the causer or mover of the universe. Just let the universe itself or the big bang be the "first" mover or cause and be done with it. [...] should we posit a first Unlow Low Entropy State (or in Price terminology, a Normal Abnormal State) ? No. We should just posit the original low entropy state and be done with it." (Callender 2004b, p.6)

de l'extinction subséquente des dinosaures. Ce n'est pas tous les événements improbables qui requièrent une explication. D'accord, mais Callender va encore plus loin, il soutient que des événements peu probables peuvent même servir d'*explanans* et non seulement d'*explananda* (Callender 2004b, p. 8). Par exemple, la probabilité a priori d'un astéroïde frappant la terre étant plus faible que l'extinction des dinosaures et pourtant cette chute est bien ce qui explique l'extinction des dinosaures. Un événement improbable est donc la cause (la justification utilisée) d'un événement considéré plus probable. Pour ceux qui doute des probabilités propres à ces deux événements, Callender nous dirige vers Lange dans *Philosophy of Physics* (2001, p. 108). Ce que cherche à faire ressortir Callender ici est le fait qu'il ne soit pas automatique que les événements peu probables requièrent tous une explication et qui plus est, que dans la majorité des cas — chez Price notamment — les explications proposées sont follement spéculatives, potentiellement non testables, et pas nécessairement plus probables (Callender 2004b, p.5).

Une des premières raisons avancées dans ce qu'on pourrait appeler les recours au gros bon sens, c'est-à-dire l'aspect rationnel ou plausible d'une proposition, c'est le fait qu'il soit parfaitement normal que les conditions initiales furent infiniment improbables, pour parler comme Penrose (1989, p. 344), car elles furent à la base de 13,7 milliards d'années d'évolution vers des états toujours de plus en plus probables. 13,7 milliards d'années est effectivement très long pour un processus de croissance. Or, outre son aspect impressionniste et comique, que vaut vraiment ce genre d'argument (Callender 2004b, p. 5) ?

Un autre grand physicien verse dans cette approche, Richard Feynman parle d'une supposition raisonnable « *reasonable assumption* », car cette dernière est utile. Elle permet de fournir une explication à une panoplie d'observations empiriques. Et ceci est suffisant, c'est-à-dire qu'on ne devrait pas chercher à déduire cet état initial de faible entropie de quoi que ce soit d'autre³¹.

Enfin, la thèse de Callender est donc plutôt déflationniste. Elle comporte quatre éléments. 1- Il n'existe pas de caractéristiques, propres au faits eux-mêmes, qui permettraient de juger s'ils peuvent être considérés comme fait de base (ne requérant

31. “[...]a *reasonable assumption* to make, since it enables us to explain the facts of experience, and one should not expect to be able to deduce it from anything more fundamental” (Feynman in Callender 2004b, p. 6).

pas de justification) ou comme fait devant être expliqué.

2- Ce qui nous permet de juger ce genre de question est une évaluation holiste des édifices théoriques au sein desquels se trouvent les faits en question. Comme le précise Callender lui-même, les critères de cette évaluation sont évidemment variables, ils sont davantage axés sur l'adéquation empirique pour un empiriste, alors qu'ils seront axés sur les vertus et implications théoriques pour un idéaliste.

3- Cette variation dans les critères à privilégier indique clairement qu'il ne peut exister de vérités absolues sur la nature de l'Univers (*substantive truths about the world a priori*) (Callender 2004b, p. 8).

4- Enfin, Callender nous met en garde contre une tentation réductionniste trop forte. Pourquoi faudrait-il ramener les phénomènes cosmologiques à deux ou trois grandes lois fondamentales ? Pourquoi ne pourrait-il pas en avoir une quinzaine, voire une centaine ? Adéquatement comprise, la notion de modèle nous semble directement abonder dans le même sens. Un modèle est un ensemble de postulats théoriques plus ou moins empiriquement adéquat et théoriquement consistant. Tout modèle est avant tout une construction théorique visant à expliquer les divers phénomènes naturels sur lesquels elle se pose. Or il est illusoire de penser que la recherche scientifique serait terminée lorsque tous les phénomènes seront catalogués et expliqués, car précisément, ces explications découlent de modèles qui sont des constructions mentales, donc perfectibles. (Voir Gauthier 1992, p. 108)

4.2.1.1 L'Hypothèse sur le passé comme loi fondamentale

C'est encore une fois le grand Feynman qui est à la source de cette idée que l'Hypothèse sur le passé doit être comprise comme une loi de la nature³². Contrairement à ce qui concerne la nécessité de fournir une explication pour l'Hypothèse sur le passé, Callender est d'accord avec Price que cette hypothèse fonctionne comme

32. "Therefore I think it necessary to add to the physical laws the hypothesis that in the past the universe was more ordered, in the technical sense, than it is today - I think this is the additional statement that is needed to make sense, and to make an understanding of the irreversibility. That statement itself is of course lopsided in time; it says that something about the past is different from the future. But it comes outside the province of what we ordinarily call physical laws, because we try today to distinguish between the statement of the physical laws which govern the rules by which the universe develops, and the law which states the condition that the world was in in the past. This is considered to be astronomical history - perhaps some day it will also be a part of physical law." (Feynman 1985, p. 116)

une loi fondamentale. Et il en rajoute, si nous nous entendons que l'Hypothèse sur le passé fonctionne réellement comme une loi, alors pourquoi devrait-on demander une explication de celle-ci ? Callender soutient évidemment qu'une telle demande est farfelue, car les lois fondamentales sont au fondement de l'édifice théorique, et ainsi ne requiert pas de justification.

Qu'entend donc Callender par loi fondamentale ? Sans fournir lui-même une définition explicite, il s'appuie sur la version de Lewis-Ramsey. Callender prend la peine de mentionner qu'il existe plusieurs conceptions de ce qu'est une loi de la nature, or il précise que celle qu'il privilégie en est une qui l'est souvent par les empiristes. Encore une fois il s'agit, avec cette définition, d'adaptabilité et de jugement critique. Lewis définit son approche ainsi :

*[t]ake all deductive systems whose theorems are true. Some are simpler and better systematized than others. Some are stronger, more informative than others. These virtues compete : An uninformative system can be very simple, an unsystematized compendium of miscellaneous information can be very informative. The best system is the one that strikes as good a balance as truth will allow between simplicity and strength. How good a balance that is will depend on how kind nature is. A regularity is a law iff it is a theorem of the best system. (Lewis 1994, p. 478)*³³

Le jugement dont nous parlions apparaît évidemment ici, il s'agit de considérer le système étudié en question, ainsi que de déterminer ce qu'est un équilibre approprié entre la simplicité et portée ou force (*strength*). Il y a toutefois un second élément qui est important dans cette définition de Lewis : celui de la régularité. Il s'agit d'un aspect fondamental de la scientificité en général : exposer la constance et la reproductibilité des expériences est bien entendu une des bases de la méthode scientifique. Lorsque les mêmes expériences donnent, *ceteris paribus*, les mêmes résultats, nous pouvons parler d'observations ayant la rigueur scientifique, et lorsque ces expériences — qu'elles soient pratiques ou théoriques — ont la prétention de rendre compte de phénomènes élémentaires ou de la totalité des phénomènes de même nature, nous parlons d'une loi de la nature, ou d'une loi fondamentale. Tout ceci ne pose pas vraiment problème, il s'agit de

33. David Lewis. "Humean supervenience debugged" *Mind*, Vol. 103, 1994, pp. 473-490

notions méthodologiques de base, là où la situation devient plus épineuse, c'est lorsque Callender veut faire de l'Hypothèse sur le passé — un événement qui s'est, rappelons-nous, produit qu'une seule fois — une loi fondamentale.

Dans la mesure où ce que nous recherchons est un équilibre entre la simplicité et la portée d'une part ainsi qu'une régularité d'autre part, il semble que nous ayons un sérieux problème : un événement unique peut difficilement avoir les caractéristiques pour être considéré comme une régularité. Peut-être la solution est de trouver un équilibre entre ces deux aspects de la définition de Lewis : l'équilibre et la régularité. Mais encore une fois il n'y a aucun équilibre possible : la force (portée) et la simplicité sont immensément plus grandes que la régularité de ce phénomène qu'il semble absurde de parler d'équilibre entre ces deux aspects, or, précisément c'est cette disproportion qui permet de justifier la validité de la définition. Malgré le fait que cet événement ne se produise qu'une seule fois, il est si simple dans sa formulation et permet de rendre compte de tellement de phénomène, et ce depuis 13,7 milliards d'années. La position de Lewis est très près de celle-ci, il soutient que certains événements, quoique ne présentant pas de régularité, peuvent néanmoins être partie intégrante du meilleur système d'explication disponible (Callender 2004b, p. 10).

Cependant, il ajoute que seuls les axiomes représentant des régularités peuvent être considérés comme des lois³⁴. Callender n'est pas tout à fait de cet avis. Il prétend que cette insistance sur la nécessité de la régularité n'est qu'un caprice dû au langage. Bien sûr, affirme-t-il, il est contre-intuitif d'appeler un événement unique une loi fondamentale, or ce qui compte réellement ce n'est pas notre intuition par rapport au terme, mais bien — petit clin d'œil à Wittgenstein — la façon dont nous utilisons un terme.

En accord avec Price, Callender affirme que nous utilisons effectivement l'Hypothèse sur le passé comme une loi fondamentale. Ceci parce que nous ne modifions pas la loi lorsque nous constatons que l'entropie continue de croître, parce nous définissons l'entropie comme tellement basse qu'elle sied à rendre compte du passé et à inférer l'entropie future, et parce que nous sommes convaincus qu'à aucun

34. “[T]he ideal system need not consist entirely of regularities; particular facts may gain entry if they contribute enough to collective simplicity and strength. (For instance, certain particular facts about the Big bang might be strong candidates.) But only the regularities of the system are to count as laws.” (Lewis 1983, p. 367)

moment nous assisterons à une baisse du niveau d'entropie totale de l'Univers (Callender 2004b, p.10). Pour ces raisons, et ainsi formulée, l'Hypothèse sur le passé fonctionne dans les faits comme un *explanans* de la nature de l'Univers, et ceci au sein du meilleur système explicatif, nous imaginons que ce système est la physique et la science contemporaine³⁵.

4.2.2 La réponse positive : Huw Price.

Contrairement à ce que soutient Callender, Price (2002, 2004) affirme qu'il n'est pas satisfaisant d'arrêter la quête explicative aux conditions initiales. Certes, ces dernières ont un statut particulier, or ceci ne justifie en rien qu'elles devraient être tenues pour vraies. Il élabore sa stratégie argumentative en trois points. Il nous propose de se tourner vers notre intuition dans un premier temps, ensuite il explique pourquoi l'Hypothèse sur le passé doit être considérée comme plus qu'une simple condition initiale et qu'il s'agit davantage d'une loi de la nature. Une position qui est comme nous l'avons vu, partagée par Callender. Enfin, il soutient que le scepticisme humien de Callender est injustifié.

1- Price reconnaît d'entrée de jeu que demander des explications pour l'Hypothèse sur le passé est assez particulier, considérant le fait qu'une explication est très souvent de nature causale et que dans ce cas-ci, il est impossible de fournir un tel type d'explication. Tout simplement, parce qu'on explique généralement un événement en s'appuyant sur les événements précédents qui sont la cause de cet événement que l'on considère comme la conséquence. Or, précisément, il n'y a pas d'événements préalables à celui dont nous tentons de fournir une explication. Price soutient toutefois que ceci est sans grande importance, car il se positionne dans ce qu'il qualifie de perspective boltzmannienne, c'est-à-dire qu'il n'existe pas de distinction *de facto* entre les directions temporelles que l'on nomme passé et futur³⁶. Ainsi, si un phénomène présente une importance particulière et requiert

35. "But this just means that the Past Hypothesis is functioning as a brute explainer in the best systematization we have of the world." (Callender 2004b, p.10)

36. "I've merely taken advantage, once again, of the fact that if there is no objective sense in which what we call the future is really the 'positive' direction of time, then we can equally well describe the world by reversing the usual temporal labeling. Relabeled in this way, the familiar expansion from a smooth big bang becomes a contraction to a smooth big crunch, with the extraordinary characteristics just described. And surely if it is a proper matter for explanation described

une explication — ce qui est évidemment le cas de l'Hypothèse sur le passé — nous pouvons très bien expliquer « rétroactivement » un événement si nous avons des observations de qualité indiquant une croissance par exemple. Nous sommes donc en mesure d'inférer un point de départ extrêmement bas, de la même façon que nous inférerions un point terminal ou ultime extrêmement élevé.

2- L'Hypothèse sur le passé n'est pas seulement un ensemble de conditions initiales, et personne n'agit comme si elle l'était, même ceux qui prétendent que nous devons l'accepter ainsi et ne pas nous en soucier davantage. C'est du moins le deuxième argument de Price. Ce dernier pose la question suivante : est-il possible que nous concevions cette hypothèse comme simple « conditions initiales » simplement parce notre connaissance commence à cet instant ? Si réellement ces conditions initiales ne doivent pas être expliquées (*account[ed] for*), alors, soutient Price, nous les considérons par conséquent comme un événement dû au hasard³⁷. Si réellement ces conditions initiales et le processus qui s'en suit, sûrement et inévitablement, d'après nos meilleures observations empiriques, sont juste un coup de dé, pourquoi devrions-nous avoir quelque attente envers la réplication des dites conditions initiales ? Et qui plus est, que justifie notre propension à prédire et inférer à partir de nos observations de régularité ? Rien ne peut la justifier si nous n'avons aucune information additionnelle. Or dans le cas qui nous intéresse, nous avons une pléthore d'informations additionnelles : 13,7 milliards années à observer, et à théoriser à propos, et une panoplie d'observations et d'expérimentations. Que dit toute cette information ? Plusieurs choses certainement, or l'une d'elle est que tout système est soumis à un processus dynamique dans lequel une variable augmente toujours et ne peut diminuer, sans inférer une augmentation de cette même variable dans un autre système, minimalement, dans le système dans lequel ce dernier est inclus. Le processus en question est thermodynamique et la variable est bien évidemment l'entropie.

La thèse profonde est la suivante : nous pouvons très bien rendre compte de l'Hypothèse sur le passé et ceci de la même façon dont nous expliquons tout système thermodynamique. C'est-à-dire que la première observation constitue la première

one way, it is a proper matter for explanation described the other ?” (Price 2004, p. 17)

37. Pour Price, ce qui doit être expliqué se sont les conditions initiales en tant que tel, alors que pour North (2002, p. 125) ces conditions doivent être expliquées seulement dans le but d'enrichir notre compréhension de la thermodynamique.

mesure et que toute mesure subséquente verra l'entropie s'accroître. Ceci n'est pas une explication qui revêt un caractère particulièrement renversant, or c'est tout ce dont nous avons besoin, ou du moins c'est tout ce que l'on peut espérer vu la situation dans laquelle nous nous trouvons.

Une considération d'épistémologie générale est de mise ici. L'acquisition — et plus particulièrement le moment de cette acquisition — des premières connaissances sur un état x , marque inévitablement un point incontournable dans la construction (concepts, définition, relation/interaction) de cet état. Il s'agit en fait du *donné* initial. Nos analyses et évaluations nous proposent ensuite un ensemble de données distinctes plus ou moins ordonnées et structurées. C'est cet ensemble que nous considérons comme les conditions initiales. Évidemment, plus notre analyse est raffinée et efficace, plus nous croyons détenir une compréhension de qualité sur lesdites conditions initiales. Or le fait demeure, nous les traitons comme conditions initiales. Il existe toutefois des situations dans lesquelles nous ne traitons pas ces conditions initiales comme une simple donnée. Si nous observons, par ailleurs, une certaine forme de régularité, soit d'une disposition physique, soit d'une tendance de développement, soit d'un processus qui se répète, nous considérons dès lors ces conditions comme une régularité, et si cette régularité est sûre et inévitable, alors nous les considérons comme une loi de la nature, ou une des expressions les plus simples, complètes et évidentes de cette loi de la nature. Un exemple concret est la nature du temps avant le Big Bang : ce que nous appelons « temps » est une caractéristique de notre Univers, nous n'avons aucune connaissance antérieure au Big Bang. Peut-être y a-t-il quelque chose avant le Big Bang, mais on ne peut savoir s'il s'agit de ce l'on nomme temps³⁸ (Voir Lachièze-Rey in Hawking & Penrose 1997, p. 29).

Comme nous postulons une forte régularité et nous rendons compte de l'existence de plusieurs objets en vertu de l'Hypothèse sur le passé, nous la considérons, non pas comme quelque chose qui est simplement survenu, mais bien comme une loi de la nature. Tel est le second point de Price³⁹. Simplement, nous ne comprenons

38. La censure cosmique, une simple conjecture mathématique selon Penrose, pourrait être à même d'expliquer l'impossibilité de détenir de l'information sur les propriétés d'un espace-temps de « l'autre côté » de la singularité initiale. (Penrose 2006, p. 768)

39. *The hypothesis is thus being accorded a lawlike status, rather than treated as something that 'just happens'.* (Price 2004, p. 21)

pas encore la raison sous-jacente de cet état de fait ⁴⁰.

3- Dans un troisième temps, Price s'attaque à l'argument humien utilisé par Callender. On se souvient que cet argument soutient que le fait qu'il n'y eut qu'un seul moment où les conditions initiales furent réunies (au Big Bang ou quelques instants subséquents) est d'une importance majeure. Car nous ne pouvons pas espérer recréer cet ensemble de conditions afin de l'étudier et déterminer quels sont les facteurs contribuant à son avènement. Encore une fois, la réponse de Price à cette objection est tripartite.

1- Cet ensemble de conditions n'est pas nécessairement unique. Un univers en expansion, soutient Price pourrait très bien créer un contexte dans lequel cet ensemble de conditions, ou un très similaire, surviendrait. Le Big Crunch est un exemple, ou encore les univers-bébés dont nous avons déjà discuté. Il suffit de concevoir, comme Hawking et Penrose nous invitent à le faire, le Big Bang comme une simple instance d'un type de phénomène général. Bien entendu, le Big Bang revêt une importance particulière pour nous, or en quoi diffère-t-il, « objectivement » des autres singularités ?

2- Un cas unique peut fournir une généralité. Price soutient que l'observation de différentes régions de l'Univers choisies au hasard devrait rendre explicite le fait que la matière fut initialement uniformément distribuée. C'est dire qu'il considère le Big Bang comme un événement unique et procède à une généralisation par la suite. Cependant, il nous apparaît plutôt douteux de parler d'un événement unique fournissant une généralisation. L'événement en tant que tel est certes unique, or ce n'est que les différentes observations répétées de ce même « type » d'événements qui permettent de justifier cette généralisation. Donc, soutient Price, une généralité peut être justifiée par un événement unique dont nous observons plusieurs manifestations (Price 2004, p. 12).

3- Même les événements uniques requièrent parfois une explication. Les lois de la nature sont uniques nous rappelle Price. Elles le sont, car elles sont les lois d'un seul monde. Elles ne sont toutefois pas toutes de même nature, c'est-à-dire que certaines sont plus fondamentales que d'autres, certaines peuvent être dérivées

40. *"In my view, the present state of play is this. Modern cosmology is implicitly committed to the view that the smooth big bang is not merely a lucky accident. But we don't yet understand how this can be the case."* (Price 2004, p. 12)

de lois plus générales. La thèse de Price est que nous devons certes considérer l'homogénéité des conditions initiales comme une loi de la nature, or ceci n'empêche pas de chercher à trouver une explication, ou une loi plus fondamentale de laquelle nous pourrions dériver cet ensemble de conditions initiales.

4.2.2.1 Qu'est-ce qu'une explication satisfaisante ?

Que pourrait être une explication satisfaisante pour cet ensemble de conditions initiales ? Price ne répond pas directement à la question, dans le sens qu'il ne fournit pas une explication, il en est bien sûr incapable, d'où tout le temps que nous avons passé sur cette question. Il propose néanmoins des pistes de solutions. Il soutient qu'il existe au moins trois stratégies qui pourraient s'avérer pertinentes. Les modèles inflationnistes, l'approche anthropique et l'hypothèse sur les lignes d'Univers de Weyl.

1- Il existe plusieurs modèles inflationnistes ou inflationnaires, or malgré cette pluralité, ils partagent bien sûr certaines caractéristiques communes. Avant d'atteindre la « phase de transition » et de se refroidir, l'Univers est à certains égards, une copie inversée de celui que l'on connaît aujourd'hui. La gravité par exemple, n'agit point comme une force attractive, mais bien répulsive, d'où l'homogénéité et l'aspect « lisse » de l'Univers. Essentiellement, cette transition permet l'incarnation du Big Bang classique. Intéressant, soutient Price, mais insuffisant hélas⁴¹. Le raisonnement statistique à la base de ce modèle est applicable, évidemment, dans les deux directions temporelles. Ceci affaiblit donc l'aspect intéressant de cette approche en ne privilégiant pas une singularité plutôt qu'une autre.

2- Ensuite vient sans surprise l'approche anthropique. Price passe vite sur l'aspect métaphysique de cette épistémologie anthropocentrique, pour enfin souligner une difficulté soulevée par Penrose (1979, p. 634). Tout comme chez Boltzmann, il suffit seulement que notre région de l'Univers soit dans un état adéquat. Or, on peut y remédier en s'appuyant sur un modèle inflationniste, par conséquent, notre critique de ces modèles est tout aussi valide. Dans une perspective inflationniste, il suffit d'attendre suffisamment longtemps afin que les préconditions quantiques requises, quoique rarissimes, surviennent, et fournissent ainsi un Univers avec cet

41. *"If deflation is unlikely at one end, then inflation is unlikely at the other"* (Price 2004, p. 24).

ensemble de conditions permettant une distribution homogène⁴². Encore une fois, Price ne peut rejeter définitivement cette approche, mais il ne peut qu'espérer une avancée cosmologique majeure.

3- L'hypothèse de Penrose est que ce qu'Hermann Weyl appelle des lignes d'Univers. Ces dernières, approchant zéro aux singularités, donc au moment initial, seraient à même de nous indiquer la flèche du temps et l'homogénéité des régions dans le voisinage du Big Bang.

Un important outil mathématique afin de décrire la structure de l'Univers est le tenseur de Riemann. Ce dernier est composé de deux autres tenseurs, le tenseur de Ricci et le tenseur de Weyl. Penrose considère que ces deux tenseurs, à travers leurs fonctions diverses, sont la source de plusieurs caractéristiques fondamentales de l'espace-temps. Le tenseur de Ricci « exprime une structure globale et relativement régulière⁴³ » alors que le tenseur de Weyl « rend compte des éventuelles irrégularités présentes dans l'espace-temps⁴⁴ ». Alors que le Big Bang est caractérisé par un tenseur de Weyl presque nul, un trou noir est caractérisé par un tenseur de Weyl divergent (extrêmement intense).

C'est cette postulation du tenseur de Weyl nul à la singularité initiale qu'est le Big Bang qui constitue l'hypothèse de Penrose sur les courbures de Weyl. Si cette hypothèse se voyait confirmée, « l'homogénéité et l'isotropie de la singularité entraîneraient celle de l'Univers⁴⁵ ». Enfin, toujours selon Penrose, une certaine lecture de cette hypothèse permettrait de confirmer sa thèse selon laquelle l'entropie de l'Univers est liée à la gravitation.

Quoiqu'on pourrait penser que cette approche ne fait que fournir une description additionnelle de l'état lisse et homogène de l'Univers à ses débuts, d'autres, dont Price, soutiennent qu'au moins cette approche à l'avantage théorique d'indiquer vers quel objet nous devrions porter notre attention et nos efforts.

Tout comme les deux approches précédentes, cette dernière présente des difficultés. Il n'est pas clair notamment si nous devons privilégier la version symétrique

42. “*The quantum preconditions for inflation might be extremely rare, but this would not matter, so long as there is enough time in some background grand universe for them to be likely to occur eventually, and it is guaranteed that when they do occur a universe of our sort arises, complete with its smooth boundary.*” (Price 2004, p. 26)

43. Lachièze-Rey in Hawking & Penrose 1997, p. 17

44. *Ibid.*, p. 17

45. *Ibid.*, p. 17

ou asymétrique de cette approche, c'est encore une fois le Big Crunch qui est en jeu ici.

Ajoutons à ces trois approches une méta-approche, un modèle explicatif : l'inférence à la meilleure explication. Soit dans la version classique de Pierce (Hacking 1989, p. 98), soit dans la version contemporaine de Miller (2013, p. 1300) ou Lipton (2004). La portée, la simplicité et l'élégance sont marques de plausibilité, la meilleure explication est donc la plus probable. Le bayésiannisme comme méthode statistique sied évidemment bien à cette approche. L'induction éliminatoire proposée par Earman (1992, ch. 7) permet de déterminer quelle hypothèse est à conserver en vertu de son efficacité à éliminer des hypothèses rivales.

C'est donc dire que pour chacune des trois approches proposées par Price, il s'agirait de comparer, quantitativement si possible, les théories — et les hypothèses qui les sous-tendent — entre elles et déterminer lesquelles sont les plus plausibles en utilisant les critères mentionnés plus haut. Travail colossal s'il en est, or c'est de cette difficulté et de cette ampleur que naît l'importance d'un tel labeur.

Enfin, à l'aune des six difficultés soulevées à la section 3.4, l'Hypothèse sur le passé semble difficilement répondre au critère d'une explication satisfaisante. Ajouter à cela l'apparente circularité de l'hypothèse par rapport au second principe que nous avons mentionnée à la section 3.3, et il devient désormais essentiel de revoir l'articulation même de l'approche thermodynamique dans le problème de la direction du temps.

Chapitre 5

Conclusion

Tout comme la chaleur, l'eau est utilisée pour sa force mécanique. Tout comme la chaleur, l'eau semble obéir à une règle universelle : elle rejoint toujours l'endroit le moins élevé et ne peut, sans intervention externe, retourner à son endroit initial à plus haute altitude. Or malgré ces ressemblances, nul n'a proposé, à notre connaissance, une théorie basant la flèche du temps sur cette apparente irréversibilité des déplacements de l'eau (Uffink 2001, p. 24). Pourquoi la chaleur a-t-elle ce statut particulier ? Sans doute parce que la chaleur est une forme d'énergie et que cette notion est fondamentale et semble avoir une portée universelle. Le fait que l'on ait accolé à la perte de chaleur une notion si riche, polysémique et ambiguë que l'entropie n'est certes pas étranger à cet état de fait.

Cette caractéristique fascinante de l'entropie d'être une propriété d'un système, mais d'également se présenter à nous via un langage simple et précis : celui de l'arithmétique, la logique et les mathématiques est sans doute responsable de son attrait. Peut-être Eddington s'emporta-t-il envers cette sublime quantité, il reste que c'est devant cette puissance d'être à la fois précise et utile, et à la fois inévitable et universelle que réside notre intérêt, et notre labeur par conséquent, à propos de l'entropie. Le pas à ne pas franchir cependant est celui d'accorder un statut ontologique ou opératoire trop important — parce ce que sans justification empirique ou théorique — à cette propriété qui quoique remarquablement riche et pertinente philosophiquement et scientifiquement, n'en demeure pas moins qu'une simple caractéristique, une propriété que seule une analyse rend possible.

Planck, le dernier représentant des théoriciens croyant fermement à l'universalité du second principe a défendu cette idée que l'irréversibilité des processus naturels est l'élément essentiel de ce principe. Or, c'est précisément cet appel à l'universalité qui est déficient (Uffink 2001, p. 61). On ne peut escamoter le fait que deux des versions les plus achevées de l'analyse des systèmes thermodynamiques (le formalisme de Carathéodory et celui de Gibbs) ne nous permettent pas d'inférer une flèche du temps universelle. De plus, les travaux contemporains de Lieb et Yngvason et de Brown et Uffink sont parfaitement indépendants de toute référence à une croissance universelle de l'entropie qui indiquerait une flèche du temps.

Tel qu'indiqué lors de notre discussion sur les liens entre information et entropie, cette dernière est une propriété d'un système, d'un ensemble. Elle est considérée comme une propriété émergente (Castagnino *et al.* 2003; Bouchard & Rosenberg 2004). De ce fait elle doit être comprise comme l'expression d'une régularité, comme une manière de structurer l'évolution des relations entre un système complexe et ses éléments. Essentiellement analytique, cette propriété ne doit surtout pas être élevée au rang d'entité ayant des effets causaux, comme celui d'induire une croissance du désordre. Elle sert plutôt à quantifier celui-ci et par conséquent à prévoir son degré de croissance.

Or, que nous apprend donc le recours à la thermodynamique et à la cosmologie sur la flèche du temps? Un des aspects intéressants est l'utilisation du formalisme et l'importation des observations empiriques dans des modèles théoriques comme les espaces des phases utilisées par Carathéodory et l'espace de Minkowski utilisée par Einstein. Dans les deux cas, la causalité et les transformations possibles sont déterminées par l'espace mathématique dans lequel s'articule la théorie (Uffink 2001, p. 70). Comme le rappelle toutefois Gauthier (2005, p. 63), cette ordination des causes et effets, nécessaire à la notion de causalité, est effectuée par un sujet observateur. Ce dernier est donc responsable de la construction des outils formels et des interprétations des phénomènes naturels que permettent ces outils. Le formalisme abstrait commun à ces deux disciplines partagent également une propriété de première importance pour notre propos : l'irréversibilité des processus qui y sont décrits. Les cônes de lumières et les adiabats ne sont pas réversibles, il s'agit d'entités théoriques asymétriques. Doit-on rappeler que ces asymétries sont

le propre de théories qui sont, quoiqu'empiriquement adéquate, dépendante d'une communauté d'observateur ?

Doit-on voir dans cette proximité entre les approches et théories une certaine convergence. Et si oui, vers quoi ? Nous serions bien entendu tentés de dire qu'il s'agit d'un progrès vers l'unification, vers la connaissance de la réalité. Or, nous ne voulons pas franchir ce pas, mais cette prudence envers un réalisme, qu'il soit naïf ou critique, est-elle, elle-même justifiée, ou s'ancre-t-elle dans un cadre idéologique plus large ? Hacking nous rappelle, à juste titre croyons nous, la position de van Fraassen qui est sceptique quant à la notion d'unification. Il serait plus judicieux de parler d'approfondissement de la compréhension des phénomènes naturels et non pas d'unification au sens large (Hacking 1989, 103). Le fait d'unifier certaines disciplines est certes un progrès théorique, or rien n'indique que cette croissance des connaissances nous rapproche de la « réalité ». Ce type de progressisme réaliste ne semble pas avoir de justifications.

L'empirisme constructif de van Fraassen semble être l'approche à privilégier dans notre situation. Premièrement, parce que le fait de limiter l'acceptation d'une théorie à sa cohérence logicomathématique et son adéquation empirique, est suffisamment humble et permet d'éviter les dérives ontologiques du réalisme. Deuxièmement, parce que cette conception des liens entre science et réalité physique semble adéquate au regard d'une perspective historique. C'est-à-dire que ce cadre conceptuel permet de rendre compte de l'évolution des théories scientifiques tout en préservant la méthode scientifique et la primauté recherchée (ou prétendue) du savoir scientifique dans la description du monde.

C'est sans surprise que nous terminons cet ouvrage en insistant une fois encore sur la pertinence et la puissance d'une approche probabiliste. L'approche thermodynamique classique semble à ce jour la plus prometteuse, or les difficultés qui y sont inhérentes sont majeures et doivent faire l'objet d'une analyse constante. Ce n'est qu'en comparant cette approche à ces rivales — à l'aide d'une théorie de la confirmation (dont le bayésianisme à la Earman est une version remarquable) — que nous pourrions en attester la force théorique et l'adéquation avec nos observations empiriques¹.

1. *"In sum, the notion that our knowledge of the past would crumble unless the Boltzmann program can be made to work with the help of the Past Hypothesis is a kind of hysteria that can*

Il serait faux de prétendre que nous soutenons que l'approche thermodynamique est un échec définitif, elle permet d'éclairer plusieurs aspects de l'asymétrie temporelle. Simplement, nous croyons qu'il serait naïf d'affirmer que la nature du temps est ce qu'elle est en vertu du second principe. Il est clair en revanche, que lorsque dûment appliqué, ce principe est très utile et permet de décrire certains phénomènes physiques avec précision. Ce que nous suggérons, et qui est en fait ce que suggère Stephen Leeds est de limiter la portée du second principe jusqu'à la preuve qu'il puisse être appliqué à des phénomènes autres que ceux de la thermodynamique sans créer des résultats qui sont à la fois faux et risibles². Malgré ces précautions, nous croyons qu'il soit judicieux de continuer à explorer cette avenue, tout simplement parce que si elle s'avère à être juste, le potentiel explicatif est immense, et qu'elle contribuerait, dans une certaine mesure, à l'approfondissement de notre compréhension et à l'unification théorique des sciences³.

C'est donc sur une note de prudence que nous concluons ce travail. Tant que l'approche thermodynamique est circonscrite à son domaine, elle demeure pertinente, toutefois, quoiqu'il serait intéressant d'agrandir ce domaine, ceci ne peut être fait que si les résultats empiriques ainsi que les démonstrations théoriques le permettent, ce qui bien entendu n'est pas le cas à ce jour.

only be generated by the febrile minds of philosophers who have become too enamored with the Boltzmann apparatus. Nevertheless, it is certainly the case that some of our reasoning about the past does need to be grounded on thermo-statistical physics. If the explanation of why this physics works as well as it does is not to be based on Boltzmann entropy and the Past Hypothesis, it is a fair challenge to ask how an alternative explanation might go". (Earman 2006, p. 422)

2. *"In particular, we needn't try to connect the predictions of ordinary statistical mechanics by pushing the statistical postulate back so far as to get a theory with claim to universality (Albert, p. 95) [...] we should refrain from using it for the past given its manifest failure in that direction [...] spatulas are a far cry from the systems that statistical mechanics ordinarily talks about, such as boxes of gas. So we should refrain from statistical mechanics to predict these things, and not try to alter the theory so that we can."* (Leeds in North 2011, p. 338)

3. *"But Leeds pointed to trade-off. Either we accept a more limited version of the theory and evade the reversibility objections in that way, or end up with a theory that is committed to a lot, including much that it can get wrong. Since the stronger theory would be deeper and more unifying, explaining not only individual systems' behavior, but the success of thermodynamics as whole, and other macroscopic phenomena besides, it seems worthwhile to aim for it, unless we get evidence otherwise."* (North 2011, p. 339)

Bibliographie

- [1] Ade, P. A. R. *et al*¹. “Planck 2013 results. I. Overview of products and scientific results.” *Astronomy & Astrophysics*, Vol. 571, p. A, 2014
- [2] Albert, David Z. *Time and Chance*. Cambridge, Massachusetts, Harvard University Press, 2000
- [3] Arntzenius, Frank. “Mirrors and the Direction of Time.” *Philosophy of Science*, Vol. 64, pp. S213-S222, 1997
- [4] Arntzenius, Frank. *Space, Time, and Stuff*. Oxford University Press, Oxford, 2012
- [5] Arntzenius, Frank. “Time reversal operations, representations of the Lorentz group, and the direction of time.” *Studies in History and Philosophy of Science Part B : Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, Vol. 35, No. 1, pp. 31-43, 2004
- [6] Boi, Luciano. “Theories of Space-Time in Modern Physics.” *Synthese*, Vol. 139, No. 3, pp. 429-489, 2004
- [7] Bouchard, Frédéric. Alex Rosenberg. “Fitness, Probability and the Principles of Natural Selection.” *British Journal of Philosophy of Science*, Vol. 55, pp. 693-712, 2004
- [8] Brown, R. Harvey. Jos Uffink. “The Origins of Time-Asymmetry in Thermodynamics : The Minus First Law.” *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, Vol. 32, No. 4, pp. 525–538, 2001
- [9] Bub, J. “Maxwell’s Demon and the Thermodynamics of Computation.” *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, Vol. 32, No. 4, pp. 569–579, 2001
- [10] Burbury, S. H. “Boltzmann’s minimum function”. *Nature*, Vol. 51, No. 78, 1894

1. Pour la liste complète des 400 auteurs : <https://inspirehep.net/record/1224727?ln=fr#>

- [11] Callender, Craig. “Measures, Explanations and the Past : Should ‘Special’ Initial Conditions be Explained?” *British Journal for the Philosophy of Science*, Vol. 55, No. 2, pp. 195–217, 2004a
- [12] Callender, Craig. “Reducing Thermodynamics to Statistical Mechanics : The Case of Entropy.” *The Journal of Philosophy*, Vol. 96, No. 7, pp. 348-373, 1999
- [13] Callender, Craig. “There is No Puzzle about the Low Entropy Past.” in C. Hitchcock (ed.), *Contemporary Debates in the Philosophy of Science*, Oxford, Blackwell, Chapter 12, 2004b
- [14] Callender, Craig. “Thermodynamic Asymmetry in Time.” *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, [page consultée le 21 avril 2015], 2011
- [15] Callender, Craig. “What Is ‘The Problem of the Direction of Time’ ?” *Philosophy of Science*, Vol. 64, Supplement. Proceedings of the 1996 Biennial Meetings of the Philosophy of Science Association, Part II : Symposia Papers, pp. S223-S234, 1997
- [16] Carroll, Sean. *From Eternity to Here*. Dutton, 2010
- [17] Castagnino, Mario, Olimpia Lombardi, Luis Lara. “The Global Arrow of Time as a Geometrical property of the Universe.” *Foundations of Physics*, Vol. 33, No. 6, 2003
- [18] Clausius, R. *Abhandlungen über die mechanische Wärmetheorie*. (Braunschweig : F. Vieweg), Vol. 1, 1864
- [19] Clausius, R. *Abhandlungen über die mechanische Wärmetheorie*. (Braunschweig : F. Vieweg), Vol. 2, 1867
- [20] Dennett, Daniel C. *Intuitions Pumps and Others Tools for Thinking*. W.W. Norton & Company, New York, 2013
- [21] Earman, John. *Bayes or Bust : critical examination of bayesian confirmation theory*. MIT Press, 1992
- [22] Earman, John “The Past Hypothesis : Not Even False.” *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, Vol. 37, pp. 399–430, 2006
- [23] Feynman, Richard. *The Character of Physical law*. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1985
- [24] Fuhrman, Stefanie. Mary Jane Cunningham, Xiling Wen, Gary Zweiger, Jeffrey J. Seilhamer, Roland Somogyi. “The application of Shannon entropy in the identification of putative drug targets.” *BioSystems*, Vol. 55, pp. 5–14, 2000
- [25] Gauthier, Yvon. *Entre science et culture. Introduction à la philosophie des sciences*. Les Presses de l’Université de Montréal, 244p, 2005

- [26] Gauthier, Yvon. *La logique interne des théories physiques*. Bellarmin, Vrin, Montréal, Paris, 168 p, 1992
- [27] Giles, Robin. *Mathematical Foundations of Thermodynamics*. Oxford : Pergamon, 1964
- [28] Greene, Brian. *The fabric of the cosmos*. Knopf, 569p, 2004
- [29] Grünbaum, A. “The anisotropy of time.” in T.Gold (ed.), *The Nature of time*, Cornell University Press, Ithaca, 1967
- [30] Hacking, Ian. *Concevoir et expérimenter*. Christian Bourgeois Éditeur, 1989
- [31] Hawking, Stephen. Roger Penrose. *La nature de l'espace et du temps*. Gallimard, Paris, 224 p, 1997
- [32] Hawking, Stephen. *Une brève histoire du temps*. Flammarion, 256 p, 2008
- [33] Hitchcock, Christopher. (editor), *Contemporary Debates in the Philosophy of Science*. Wiley-Blackwell, 2004
- [34] Hume, David. *Dialogue sur la religion naturelle*. 1779
- [35] Kroes, P. *Time : Its Structure and Role in Physical Theories*. D.Reidel, Dordrecht, 1985
- [36] Lange, M. *Philosophy of Physics*. Blackwell, 2002
- [37] Lecourt, Dominique (dir.). *Dictionnaire d'histoire et philosophie des sciences*. Presses Universitaires de France, Paris, 1196 p, 2006
- [38] Lewis, David. “Humean supervenience debugged.” *Mind*, Vol. 103, pp. 473-490, 1994
- [39] Lewis, David. “New Work for a Theory of Universals.” *Australasian Journal of Philosophy*, vol. 61, pp. 343-377, 1983
- [40] Lewis, David. *Philosophical Papers*. Oxford University Press, vol. 2, New York, 1986
- [41] Lieb, Elliot, H. Jakob Yngvason. “A Fresh Look at Entropy and the Second Law of Thermodynamics.” *Physics Today*, 2000
- [42] Lieb, Elliot, H. Jakob Yngvason. “The Physics and Mathematics of the Second Law of Thermodynamics.” *Physics Reports*, Vol. 310, pp. 1-96, 1999
- [43] Lipton, P. *Inference to the best explanation*. (2nd ed.), Routledge, London, 2004
- [44] Malament, David B. “On the time reversal invariance of classical electromagnetic theory.” *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, Vol. 35, pp. 295–315, 2004

- [45] Matthen M. A, Ariew. “Two Ways of Thinking about Fitness and Natural Selection.” *Journal of Philosophy*, Vol. 99, pp. 55-83, 2002
- [46] Mikkelsen, Gregory M. “Biological diversity, ecological stability, and downward causation.” in Oksanen, M. and J. Pietarinen, (eds.) *Philosophy and Biodiversity*, Cambridge University Press. New York, pp. 119-129, 2004
- [47] Miller, Boaz. “When is consensus knowledge based? Distinguishing shared knowledge from mere agreement.” *Synthese*, Vol. 190, pp. 1293–1316, 2013
- [48] North, Jill. “Time in Thermodynamics.” in Craig Callender (ed.), *The Oxford Handbook of Time*, Oxford University Press, 690p, 2011
- [49] North, Jill. “Understanding the Time-Asymmetry of Radiation.” *Philosophy of Science*, Vol. 70, No. 5, pp. 1086-1097, 2003
- [50] North, Jill. “What Is the Problem about the Time-Asymmetry of Thermodynamics? A Reply to Price.” *The British Journal for the Philosophy of Science*, Vol. 53, No. 1 pp.121-136, 2002
- [51] Peirce, C.S. “The Fixation of Belief.” *Popular Science Monthly*, 12, pp. 1-15, 1877
- [52] Penrose, Roger. “Singularities and time-asymmetry.” in S. W. Hawking, and W. Israel (eds.) *General relativity : an Einstein centenary*, Cambridge University Press, pp. 581–638, 1979
- [53] Penrose, Roger. *The Emperor’s New Mind*. Oxford University Press, 1989
- [54] Penrose, Roger, *The Road to Reality. A Complete Guide to the Laws of the Universe*. Alfred A. Knopf, New York, 2006
- [55] Pincus, Steven M. “Approximate entropy as a measure of system complexity.” *Proceedings of the National Academy of Science, USA* Vol. 88, pp. 2297-2301, 1991
- [56] Planck, Max. *Vorlesungen über Thermodynamik*. Veit & Comp. Leipzig, 1897
- [57] Price, Huw. “Boltzmann’s Time Bomb.” *The British Journal for the Philosophy of Science*, Vol. 53, No. 1, pp. 83-119, 2002
- [58] Price, Huw. “The Flow of Time.” in Craig Callender (ed.), *The Oxford Handbook of Philosophy of Time*, Oxford University Press, 690p, 2011
- [59] Price, Huw. “The Origin of the Arrow of Time : Why there is still a puzzle about the Low Entropy Past.” in Hitchcock, C. (editor), *Contemporary Debates in the Philosophy of Science*, Wiley-Blackwell, 2004

- [60] Price, Huw. *Time's Arrow and Archimedes' Point : New Directions for the Physics of Time*. Oxford University Press, Oxford, 1996
- [61] Prigogine, Ilya. *From Being to Becoming*. W.H. Freeman, San Francisco, 1980
- [62] Prigogine, Ilya. Isabelle Stengers. *La Nouvelle Alliance*. Gallimard, Paris, 1979
- [63] Reichenbach, H. *The Direction of Time*. University of California Press, Berkeley, 1956
- [64] Shannon, Claude. "The Mathematical Theory of Communication." *The Bell System Technical Journal*, Vol. 47, 1948
- [65] Sklar, Lawrence. *Physics and Chance : Philosophical Issues in the Foundations of Statistical Mechanics*. Cambridge University Press, Cambridge, 1993
- [66] Steckline, Vincent. "Zermelo, Boltzmann and the recurrence paradox." *American Journal of Physics*, Vol. 51, No. 10, 1983
- [67] Thomson, William (Lord Kelvin). "On the Dynamical Theory of Heat, with numerical results deduced from Mr Joule's equivalent of a Thermal Unit, and M. Regnault's Observations on Steam." *Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, XX (part II), pp. 261–298, 1851
- [68] Thomson, William (Lord Kelvin). "On a Universal Tendency in Nature to the Dissipation of Mechanical Energy." *Proceedings of the Royal Society of Edinburgh*, April 19, 1852
- [69] Uffink, J. "Bluff your Way in the Second Law of Thermodynamics." *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, Vol. 32, No. 3, pp. 305–394, 2001
- [70] Weaver, Warren. "A Recent Contribution to The Mathematical Theory of Communication." *The Mathematical Theory of communication*, Vol. 1, 1949