



## Philosophia Scientiæ

Travaux d'histoire et de philosophie des sciences

15-3 | 2011

L'espace et le temps

---

# Espace-temps thermodynamique ?

Christian Maes

---



### Édition électronique

URL : <http://journals.openedition.org/philosophiascientiae/688>

DOI : 10.4000/philosophiascientiae.688

ISSN : 1775-4283

### Éditeur

Éditions Kimé

### Édition imprimée

Date de publication : 1 octobre 2011

Pagination : 141-154

ISBN : 978-2-84174-569-2

ISSN : 1281-2463

### Référence électronique

Christian Maes, « Espace-temps thermodynamique ? », *Philosophia Scientiæ* [En ligne], 15-3 | 2011, mis en ligne le 01 octobre 2014, consulté le 23 avril 2019. URL : <http://journals.openedition.org/philosophiascientiae/688> ; DOI : 10.4000/philosophiascientiae.688

---

Tous droits réservés

# Espace-temps thermodynamique ?

*Christian Maes*

Instituut voor Theoretische Fysica, K.U.Leuven (België)

**Résumé :** La thermodynamique est fondée sur le premier et le second principe, c'est à dire, la conservation de l'énergie et l'augmentation de l'entropie. Ces lois imposent de fortes contraintes à tout modèle de l'univers. En plus, certaines propriétés de l'espace et du temps sont émergentes dans un sens thermodynamique. Ces notions ne devraient par conséquent pas être considérées comme structures de base des interactions fondamentales. Dans ce sens l'espace-temps *est* thermodynamique. En outre, si on consent à incorporer des arguments statistiques, il faut se demander si les forces de l'univers sont peut-être thermodynamiques. Notre univers serait ainsi régi par des forces entropiques plutôt que par des forces absolues.

**Abstract:** Thermodynamics is based on the first and the second law, conservation of energy and the increase of entropy. These laws impose firm constraints on every model of the universe. Moreover, certain aspects of space and of time are emerging in a thermodynamic sense. These notions should then not be considered as providing the basic background structure for fundamental interactions. In that sense space-time *is* thermodynamic. And, if one allows to incorporate statistical arguments, the question arises whether perhaps the fundamental forces of the universe are *only* thermodynamic. Our universe would then be governed by entropic forces rather than by absolute laws.

## 1 Situation

Combiner l'espace-temps comme structure de base pour nos théories physiques avec la thermodynamique est une vue peu conventionnelle<sup>1</sup>. Depuis

---

*Philosophia Scientiæ*, 15 (3), 2011, 141–154.

1. Même dans le sens de *La Science et l'Hypothèse*, 1902, de Henri Poincaré, né à Nancy, lieu de ce colloque. Certainement, la thermodynamique ne donne pas simplement une représentation mathématique différente de la géométrie de l'espace-temps. La géométrie et la physique ne sont pas mutuellement indépendantes. Cependant, depuis un certain temps, ce lien entre l'espace-temps et la thermodynamique est devenu moins controversé.

un siècle à peu près nous considérons traditionnellement l'espace-temps comme le niveau fondamental de nos pensées scientifiques, l'ultime réalité selon les termes d'Einstein<sup>2</sup>. La chrono-géométrie est identifiée à la théorie de la relativité générale, la théorie de la gravitation. La gravitation est une des interactions fondamentales, ainsi que l'électromagnétisme (la mieux connue et présente partout autour de nous), les interactions faibles (qui apparaissent dans la radioactivité) et forte (se manifestant dans le noyau atomique). De là suit une ambition importante de la physique moderne : comprendre tous les phénomènes en termes de ces quatre interactions, réduire donc toutes les forces aux interactions fondamentales en les unifiant dans une grande théorie dite finale<sup>3</sup>. C'est un héritage du XX<sup>e</sup> siècle avec ses révolutions scientifiques et ses énormes succès.

William Thomson (le futur Lord Kelvin) utilise pour la première fois le terme thermodynamique dans un article de 1849 sur l'efficacité des machines à vapeur, le principal sujet de recherche de Lazare et Sadi Carnot. En 1878, Maxwell définit la thermodynamique comme l'étude des propriétés dynamiques et thermiques des corps. Ces propriétés sont entièrement dérivables de la Première et la Deuxième Loi de la thermodynamique, sans faire aucune hypothèse concernant la composition moléculaire des corps. L'atomisme de Ludwig Boltzmann et la mécanique statistique de Josiah Willard Gibbs allaient étendre et corriger cette thermodynamique. Quoique les nouvelles idées statistiques et les nouvelles méthodes analytiques aient été vraiment révolutionnaires, ce furent surtout le formalisme quantique, l'électrodynamique quantique relativiste, et la physique nucléaire qui allaient dominer la recherche en physique pour bien longtemps.

Ce n'est que dans la deuxième moitié du siècle dernier que certains scientifiques (re)considèrent également la complexité de la nature comme fondamentale, mais dans un autre sens. C'est que pour vraiment comprendre le comportement macroscopique, on a besoin d'autres méthodes, non seulement des équations, mais aussi des conditions au bord et des arguments statistiques. La physique s'intéresse aussi à la vie et va se mêler aux débats biochimiques par une thermodynamique hors équilibre et une compréhension détaillée de

---

2. Ceci est magnifiquement saisi par un *cartoon* de Rea Irvin pour le magazine *New Yorker* en 1929, qui montre une scène de rue de New York composée d'un balayeur déconcerté se grattant la tête et entouré par des commerçants et des acheteurs de passage dans diverses poses de perplexité. La légende cite Einstein : *Les gens se sont peu à peu habitués à l'idée que les états physiques de l'espace lui-même étaient la réalité physique finale.*

3. Le modèle standard (des années 1970) est une théorie quantique des champs qui décrit les particules élémentaires ; cette théorie constitue une unification formelle des interactions forte, faible et électromagnétique. La force de gravitation n'est pas incluse. Dans un sens précis, il n'y a même pas de force fondamentale de gravitation parce que localement "la gravitation disparaît en chute libre".

l'émergence des transitions de phase<sup>4</sup>. Mais en général, on regarde encore la thermodynamique et la physique statistique comme des applications ou des continuations d'une physique plus fondamentale (et plus profonde)<sup>5</sup>.

Ce point de vue n'était pas celui du XIX<sup>e</sup> siècle. Quoi que nous parlions assez souvent d'Ernst Mach comme d'un pré-révolutionnaire des théories espace-temps d'Einstein<sup>6</sup>, (démystifiant les représentations mécanistes/newtoniennes de son époque<sup>7</sup>), Mach n'a jamais considéré l'espace-temps comme étant fondamental. Il avait une vision chimique du monde<sup>8</sup>. À cette époque des énergétistes, Wilhelm Ostwald reprenait les idées de Carnot en parlant de l'analogie fondamentale entre la chute de la chaleur entre deux bains thermiques et la chute d'une pierre dans le champ gravitationnel<sup>9</sup>. Carnot était encore soutenu

4. Quelques dates plus ou moins arbitraires : La première édition de la « Physique Médicale » a été publiée en 1944 (avec Otto Glasser comme rédacteur en chef). Cette même année *What is life ?* d'Erwin Schrödinger, donne une perspective physique à la biologie moléculaire. En 1947, paraît l'*Étude thermodynamique des phénomènes irréversibles* d'Ilya Prigogine. En 1968, *General System Theory* de Ludwig von Bertalanffy va combiner la physique hors équilibre avec la biologie. En 1972, paraît *More is different* de Phil Anderson sur l'émergence, cf. [Lebowitz 2007]. En 1979, Henri Atlan publie *Entre le cristal et la fumée, Essai sur l'organisation du vivant*. Puis, dans les années 1980, on voit renaître la science du chaos, de la turbulence, des verres, des systèmes granulaires, des automates cellulaires. . .

5. Ce qui ne va pas réduire l'admiration pour la thermodynamique, au moins chez les pères fondateurs de la physique moderne comme Landau, Fermi, Schrödinger, Planck ou aussi Einstein, qui lui-même écrivait : « Une théorie est d'autant plus impressionnante que ses prémisses sont simples, qu'elle met en rapport des choses aussi variées que possible, et que son domaine d'application est vaste. C'est ainsi que je suis très impressionné par la thermodynamique classique. C'est la seule théorie d'un contenu si universel que, j'en suis convaincu, elle ne sera jamais mise en défaut dans le cadre de l'applicabilité de ses concepts élémentaires. » Spécifiquement, la thermodynamique des champs classiques a mené à la théorie quantique dans les travaux de Planck et d'Einstein. Et, ce qui est moins apprécié, la thermodynamique a joué le rôle de modèle pour la formulation initiale par Einstein en 1905 de la relativité restreinte (à partir de deux postulats — l'invariance galiléenne et l'invariance de la vitesse de la lumière).

6. C'est son ami Michele Besso qui initie Einstein aux idées de *la Mécanique* d'Ernst Mach. Mach était le parrain de Wolfgang Ernst Pauli, déjà jeune grand interprète de la théorie de la relativité et *filis electif* d'Einstein.

7. Ernst Mach est connu dans ce contexte pour avoir essayé de débarrasser la mécanique de tout concept métaphysique. On confond parfois ce point avec la tradition positiviste ou opérationnelle. On parle alors de Mach comme protopositiviste, pour le positivisme logique du cercle de Vienne. Mais il faut bien comprendre que c'était aussi le temps de la physiologie. Par exemple, l'école de Berlin des physiologues se développait autour d'un autre thermodynamicien, Hermann von Helmholtz.

8. *Chemische Auffassung*, cf. le chapitre 14 dans [Banks 2003].

9. *C'est à la chaleur que doivent être attribués les grands mouvements qui frappent nos regards sur la terre ; c'est à elle que sont dues les agitations de l'atmosphère, l'ascension des nuages, la chute des pluies et des autres météores, les courants d'eau qui sillonnent la surface du globe... ; enfin les tremblements de terre, les éruptions*

par la confusion entre la chaleur et le calorique, mais pour Ostwald, il s'agissait vraiment d'un mouvement entropique. Cela serait resté un bel exemple de la confusion entre le premier et le second principe de la thermodynamique<sup>10</sup>, si ce n'était les développements des 50 dernières années concernant les forces entropiques comme on verra ci-après. Il faut d'abord considérer l'émergence du temps et contempler la non-localité spatiale.

## 2 L'émergence du temps

Le paradoxe de l'irréversibilité est assez clair : au niveau microscopique tout se fait en vertu de lois du mouvement réversibles, c'est-à-dire invariants par renversement du temps ; comment cette dynamique microscopique réversible peut-elle engendrer des processus irréversibles ?

Les lois microscopiques sont invariantes<sup>11</sup> par rapport au renversement du temps — le comportement macroscopique subit la flèche du temps<sup>12</sup>. Dans ce sens le temps (microscopique), soit n'existe pas, soit existe seulement en tant que paramètre ou en tant que rythme convenu et sans direction. La distinction entre le passé et le futur reste arbitraire. Cela est d'autant plus vrai dans la théorie de la relativité. Non seulement des horloges en déplacement sont plus lentes que des horloges immobiles, mais aussi, à très haute altitude, où la force gravitationnelle est moindre, le temps passe plus vite que sur terre. Si on ne tenait pas compte de ce phénomène, la mesure de la position par notre GPS serait faussée. Là, le temps fait partie des coordonnées générales, relatif, intriqué avec l'espace. Dans la théorie de la relativité on ne peut parler d'un temps local : pour une géométrie donnée les directions du temps sont déterminées par la structure des cônes de lumière (structures de causalité) et on ne parle plus d'une évolution *dans* le temps (absolu). L'extensivité du temps (*sa durée*) est quantifiée localement par des horloges idéales et dépend de la métrique. La flèche du temps naît dans la thermodynamique,

---

*volcaniques, reconnaissent aussi pour cause la chaleur.* Extrait des *Réflexions sur la puissance motrice du feu*, 1824, par Sadi Carnot, repris de [Locqueneux 1996].

10. Comme l'explique Max Planck dans son autobiographie scientifique.

11. L'interaction faible probablement est asymétrique sous le renversement du temps. Cette interaction n'est pas négligeable, mais elle ne peut être responsable de l'irréversibilité macroscopique, qui existe déjà dans un monde purement classique (mais inimaginable). De toute façon, n'est pas vraiment évident ce que signifie le renversement du temps dans le formalisme habituel de la mécanique quantique, du moins si on le prend au sérieux, notamment en ce qui concerne la réduction du paquet d'onde quantique.

12. Comme l'indiquait Arthur Eddington en 1928, en invoquant l'irréversibilité macroscopique. En général, il est utile de distinguer entre plusieurs flèches : cosmologique, thermodynamique, psychologique, électrodynamique... , mais elles sont toutes liées.

plus spécifiquement dans le second principe avec la loi de l'augmentation de l'entropie de l'univers<sup>13</sup>.

C'est Ludwig Boltzmann<sup>14</sup> qui a expliqué comment faire la transition entre le temps sans sens et le temps dirigé en donnant une dérivation (microscopique) du second principe de la thermodynamique. Ce second principe, *première loi des sciences*, parle de l'évolution des états macroscopiques. Ce qui veut dire : quelle est la densité des particules, quel est le profil de l'énergie, ou de l'aimantation, etc. Ces profils ou ces états macroscopiques sont des fonctions des états microscopiques, comme prendre des moyennes des énergies ou des masses dans une certaine région de l'espace. Les états microscopiques nous informent sur toutes les positions et les vitesses des particules. Ces états sont tous (considérés comme) équivalents — c'est la description microcanonique. Les valeurs possibles des quantités macroscopiques font une partition de cet ensemble des états microscopiques. Maintenant il faut se rendre compte que l'échelle macroscopique induit des différences énormes entre différents états macroscopiques. Autrement dit, le « nombre » d'états microscopiques qui réalisent un état macroscopique peut varier énormément. Le changement d'entropie pour l'expansion libre d'une mole de gaz d'un volume  $V$  initial à un volume  $V' = 2V$  final vaut  $R \ln 2$  qui correspond à un rapport de volumes de phase de

$$\frac{W}{W'} = \exp \frac{S - S'}{k_B} = 0.015^{10^{23}}$$

qui est minuscule<sup>15</sup>. C'est pourquoi on s'attend à ce que l'évolution s'effectue dans la direction de la plus grande entropie. C'est-à-dire l'entropie augmente et nous donne la flèche du temps.

Cependant, cet argument reste valable pour des temps négatifs comme pour des temps positifs — le même raisonnement nous fait croire que l'entropie augmente également vers le passé, comme vers le futur. C'est exactement là où entre le deuxième ingrédient : le rôle et l'importance des états initiaux. Selon les mots de Boltzmann qui réagit contre les arguments de Ostwald<sup>16</sup>,

13. Il existe un lien étymologique entre les mots « le temps » et « la température ». L'origine commune latine est *temperatus*, « bonne proportion ».

14. Aidé et accompagné de certains prédécesseurs et de contemporains comme Clausius, Maxwell et Gibbs. Pour les argumentations statistiques, c'est, je pense, surtout la *Physique sociale* d'Adolphe Quetelet qui a influencé d'abord Maxwell.

15. On prend les volumes  $W, W'$  de l'espace de phase par rapport à la mesure de Liouville sur la surface d'énergie constante.

16. *Dans toutes les équations mécaniques le signe de la variable représentant le temps peut changer, en d'autres termes les phénomènes de la mécanique rationnelle peuvent suivre le cours du temps ou le remonter. . . il n'y a ni passé, ni avenir. . . le fait que dans la nature, les phénomènes ne sont pas réversibles condamne sans appel le matérialisme physique (le mécanisme en physique)*, W. Ostwald 1895, traduction selon [Locqueneux 1996, 241].

Constatant que les équations différentielles de la mécanique sont invariantes si l'on change le signe de la variable temporelle, Monsieur Ostwald conclut qu'une vision mécanique du monde est incapable d'expliquer pourquoi les processus naturels ne se déroulent que dans un seul sens. Mais une telle conception oublie que les événements d'ordre mécanique sont déterminés non seulement par des équations différentielles, mais aussi par des conditions initiales. Tout à fait à l'opposé de Monsieur Ostwald, je considère donc que le succès le plus brillant de la mécanique est justement de nous fournir une image très précise de la dissipation d'énergie, dès lors que l'on suppose que le monde a commencé dans un état initial satisfaisant certaines conditions initiales. L. Boltzmann 1905, traduction selon [Klein 2004, 13]

On ne peut identifier une évolution irréversible que si l'on part d'un état hors équilibre. Le vrai problème de l'irréversibilité est donc d'expliquer d'où viennent ces états initiaux hors équilibre. De cette façon, on entre dans une chaîne d'arguments, qui finalement nous amènent aux questions cosmologiques.

Conclusion : le temps acquiert une flèche lors du passage des lois microscopiques au comportement macroscopique en raison 1) du changement d'échelle (les états macroscopiques étant vraiment inéquivalents), et 2) par la présence d'un état initial hors équilibre. Cela nous enseigne deux choses : d'un côté et d'une manière générale, c'est l'existence de phénomènes irréversibles qui permet de fixer le sens d'écoulement objectif du temps, de l'autre côté, cela fournit des contraintes absolues aux conditions initiales de l'univers (pour chaque modèle de l'univers). Ces contraintes peuvent être perçues comme des conditions de compatibilité. Mais il est tout aussi possible de les regarder comme fondamentales et déterminantes pour l'univers que nous connaissons. La dynamique n'est pas constituée seulement des équations du mouvement, mais aussi des conditions initiales et de bord. Il semble que la thermodynamique, par le second principe, détermine au moins certains aspects de cette dynamique<sup>17</sup>.

### 3 Non-localité

Quand vous consultez un livre sur la mécanique quantique, vous y trouvez deux sortes d'évolution quantique. D'abord, en dehors des opérations de

---

17. Que la thermodynamique entre dans des considérations cosmologiques est bien évident pour un tas de raisons. Toute l'histoire de l'univers, du *big bang* jusqu'à l'évolution des étoiles et l'apparition de la vie est remplie des processus thermodynamiques. Aujourd'hui encore, la thermodynamique des trous noirs est fondatrice pour la compréhension de la gravitation dans un formalisme quantique.

mesure, l'évolution est donnée par l'équation de Schrödinger. Ensuite, on applique la réduction de la fonction d'onde, lorsqu'une mesure a lieu. À ce moment, il faut bien comprendre que la fonction d'onde est fonction, non de l'espace physique, mais des configurations de toutes les particules. Donc, pour  $N$  particules et à chaque instant la fonction d'onde<sup>18</sup>  $\psi(x_1, x_2, \dots, x_N)$  est une fonction sur  $\mathbb{R}^{3N}$ . Typiquement, cette fonction ne se factorise pas, par exemple  $\psi(x_1, x_2, \dots, x_N) \neq \varphi_1(x_1)\varphi_2(x_2, \dots, x_N)$  et il existe une intrication entre les positions. Dans le formalisme habituel,  $|\psi|^2$  donne la probabilité de « trouver » ces particules aux positions  $(x_1, x_2, \dots, x_N)$ . Or, mesurer, disons, la position de la première particule réduit la fonction d'onde. Cela peut impliquer que la position d'une autre particule soit déterminée tout de suite, à n'importe quelle distance. Par conséquent, l'opération de réduction est, ou pourrait être, manifestement non-locale. L'importance que l'on attache à ce fait dépend du statut que l'on accorde à la fonction d'onde et à l'opération de réduction, cf. [Bricmont & Zwirn 2009]. Je ne veux pas entrer dans les différentes interprétations et leurs problèmes<sup>19</sup>. Heureusement, ce n'est pas vraiment nécessaire et cela grâce au travail de John Bell en 1964.

En fait, l'histoire commence avec l'article d'Einstein, Podolsky et Rosen (EPR) de 1935. L'idée est d'utiliser la corrélation parfaite pour les résultats de certaines mesures des deux particules initialement préparées dans un certain état (enchevêtré, mais que l'on trouve dans la nature). Par exemple, dans la version de David Bohm, on mesure le spin d'un électron dans une des trois directions spatiales, ou, dans un autre type d'expérience, la polarisation de la lumière, etc. Quand on a envoyé deux électrons initialement préparés dans un singulet<sup>20</sup>, après avoir mesuré le spin de l'électron à gauche dans la direction  $X$ , on constate que le spin de l'électron à droite dans la direction  $X$  est toujours opposé. EPR concluent qu'il y a quelque chose dans la nature, des variables ou des mécanismes déterministes ou probabilistes qui devraient « compléter » la mécanique quantique. Sinon, cette influence de la gauche vers la droite serait réelle, ce qui voudrait dire que la nature est non-locale<sup>21</sup>. Ce que Bell a montré est une sorte de méta-théorème : ces variables ou mécanismes locaux n'existent pas, étant donné la statistique des mesures (y compris mesurer dans la direction

18. Nous nous référons la représentation de Schrödinger.

19. Par exemple, quand vous consultez les livres sur la théorie des champs quantiques, vous aurez du mal à trouver une discussion sur la réduction d'onde. Comme on peut s'imaginer, il serait difficile de la traiter de façon relativiste.

20. Une paire d'électrons de spin  $1/2$  peut être combinée à un état total de spin  $1$  ou de spin  $0$ . La forme singulet d'une paire d'électrons aboutit à l'état de spin  $0$ .

21. On se souvient des mots de Newton :

qu'un corps puisse agir sur un autre à distance, à travers le vide et sans la médiation de quelqu'autre corps... me paraît être d'une telle absurdité que je pense qu'aucune personne ayant la faculté de raisonner dans des questions philosophiques ne pourra jamais y croire.



$Y$  à gauche et mesurer dans la direction  $X$  à droite, etc.) sur ces deux électrons. L'argument est très simple, et il est important de souligner qu'on n'a pas besoin d'hypothèses comme l'existence de certaines mesures de probabilité, ni de la mécanique classique. L'argument de Bell est simplement une analyse statistique des expériences, vérifiées par la mécanique quantique. La conclusion est que la nature est non-locale, dans la mesure où l'on semble rencontrer une action à distance : instantanée, individuée et à portée infinie. Il est difficile de dire si cette « influence » entre en contradiction avec la relativité<sup>22</sup>, mais il est évident que l'image spatio-temporelle qui s'ensuit est contraire à la vision de la relativité einsteinienne. Peut-être l'idée d'un espace-temps fondamental n'est-elle plus valable quand on est forcé de renoncer à la localité<sup>23</sup>.

Par ces aspects de non-localité nous sommes rappelés de nouveau à la vision thermodynamique — Mach termine son livre *Mécanique* (1883) en observant que les problèmes purement mécaniques n'existent pas, sauf comme une idéalisation — tous les aspects de l'univers sont énergétiquement et entropiquement reliés. L'étude quantitative de ces effets EPR rencontre la thermodynamique dans la notion d'entropie d'intrication<sup>24</sup>. Le degré d'intrication d'un système composé (deux électrons) mesure l'augmentation de l'entropie lorsque la possibilité de faire des mesures sur le système dans son ensemble disparaît et que nous n'avons accès localement qu'à l'un des deux sous-systèmes. Dans ce sens l'influence entre les deux électrons peut être appelée une force entropique. Ce qui est fascinant, c'est que cette entropie d'intrication croît typiquement (mais pas toujours) avec la surface et non pas avec le volume du sous-espace, ce qui peut être lié au principe holographique, cf. [Penrose 2005]; depuis l'étude thermodynamique de Bekenstein (1973), on identifie l'entropie d'un trou noir à sa surface (la surface de l'horizon des événements qui caractérise le trou noir).

## 4 Forces entropiques

Le XIX<sup>e</sup> siècle est celui de la révolution industrielle dont le moteur était la thermodynamique. La vision thermodynamique de la nature, des interactions et de l'espace-temps est bien présente dès cette époque. La fin de ce siècle, avec

---

22. Il est cependant assez bien compris que cette non-localité ne permet pas la transmission de messages.

23. Un autre cas d'une différente sorte de non-localité se manifeste dans l'effet de Aharonov-Bohm (1959). Là, on peut décider d'admettre que le potentiel électromagnétique offre une description plus complète de l'électromagnétisme que les champs électriques et magnétiques ne le peuvent.

24. L'intrication quantique a été découverte et décrite d'abord par Schrödinger en 1935. Ironiquement, l'intrication fut considérée jusqu'aux années 1980 comme *trop philosophique* par la plupart des physiciens. Toutefois, elle joue aujourd'hui un rôle important dans les domaines de l'information quantique, tels que la cryptographie et la téléportation.

l'interprétation statistique de l'entropie, a vu naître l'idée des forces statistiques ou entropiques (Maxwell, Boltzmann, Gibbs, Einstein, ...). Un premier exemple en est le retour à l'équilibre dû à des effets statistiques (comme expliqué plus haut, toujours pour la physique macroscopique). L'équilibre est l'état macroscopique typique et final si l'on enlève des contraintes initiales, parce que l'équilibre, bien entendu, signifie le désordre maximal. Quand on divise des deux réservoirs sont typiquement égales, même si jamais dans le passé il n'y eut des contacts causaux entre les deux réservoirs<sup>25</sup>. On peut même construire des témoins explicites de cette approche vers l'équilibre, comme l'a fait Boltzmann par sa fonctionnelle  $H$  pour un gaz dilué.

Cette approche ou ce retour vers l'équilibre sont des effets statistiques mais réels. Ils n'ont que peu à voir avec notre *information*. L'équilibration a lieu même si on ne regarde pas et même si on connaissait l'état microscopique à chaque instant, les courants initiaux meurent et la température et les pressions deviennent homogènes. Mais les forces statistiques prennent aussi un caractère réel dans des cas tels que la migration au travers d'une membrane entre une solution diluée et le solvant pur (l'osmose), ou par l'effet Soret (la thermophorèse), etc.

Ces forces entropiques sont également qualifiées de forces induites par des fluctuations. Ce n'est qu'un changement d'orientation — l'entropie comptabilise les fluctuations pour ainsi dire. Toutefois ce n'est que depuis une soixantaine d'années que ces forces induites par les fluctuations ont été comprises et ont été rendues visibles autant que forces motrices. L'effet le plus connu est l'effet Casimir (1948) — l'apparition d'une force attractive entre deux plaques parallèles conductrices. Je voudrais illustrer ce concept par un exemple très simple, la chaîne entropique.

Je considère une chaîne qui, pour simplifier, est le parcours d'un marcheur aléatoire dans une direction spatiale fixée. Les pas sont totalement décorrélés les uns des autres. Il y a  $N$  essais; à chaque essai ou bien il reste sur place ou bien il fait un pas en avant d'une longueur  $\lambda$ . La longueur totale de la chaîne est désignée  $\ell$  et donc  $\ell \in \{0, \lambda, 2\lambda, \dots, N\lambda\}$ . La chaîne est fixée à l'origine tandis que l'autre extrémité est attachée à un ressort de raideur  $\kappa$ . Pour une extension  $x$  le ressort prendra une énergie  $\kappa x^2/2$ . Tout se passe à une dimension. Une longueur  $\ell = aN\lambda$  de la chaîne peut être réalisée par le nombre  $N!/((aN)!((1-a)N)!)$  de configurations de la chaîne (de la marche). Donc, depuis Gibbs, dans une ambiance à température  $\beta^{-1}$  la probabilité de trouver une longueur  $\ell$  vaut

$$\text{Prob}[\ell] \propto \frac{N!}{(aN)!((1-a)N)!} \exp -\kappa\beta \frac{x^2}{2}$$

---

25. Le fait que l'équilibre est une propriété statistique ou entropique et pas (seulement) dynamique, est souvent oublié, notamment par ceux qui veulent résoudre le problème de l'horizon pour motiver la théorie de l'inflation, cf. [Penrose 2005, 747].

Maintenant, la somme  $x + \ell = d$  est fixée et donnée par la distance de l'origine jusqu'à la position d'équilibre du ressort. On peut donc exprimer cette probabilité en fonction de  $\ell$  et de  $d$  :

$$\text{Prob}[\ell] \propto \exp -(x - m)^2 / (2\sigma^2)$$

où  $m$  peut être calculé, et vaut

$$m = d(1 + 4\beta\lambda^2 N\kappa)^{-1}$$

différent de zéro : la chaîne exerce une force (égale à  $\kappa m$ ) sur le ressort, mais il est difficile de dire quelle interaction fondamentale est impliquée ici. C'est une force entropique.

On pourrait spéculer que toutes les forces de l'univers sont des forces entropiques. On peut commencer par la force gravitationnelle. Après tout, l'équation d'Einstein peut être écrite comme

$$D(g) = \kappa \mathbb{T}$$

qui ressemble à une loi de l'élasticité de l'espace-temps, similaire à la loi de Hooke, où  $D$  est la déformation, ici la courbure en fonction de la métrique  $g$ , et où  $\kappa$  est le coefficient d'élasticité, ici élasticité de l'espace-temps  $\kappa = 8\pi G/c^4$ . La tension ou la source de la déformation est le tenseur d'énergie-impulsion  $\mathbb{T}$  (densité d'énergie, d'impulsion et de tensions)<sup>26</sup>, cf. [Damour 2005]. En fait, obtenir formellement la loi d'Einstein n'est pas très compliqué. Cela a déjà été fait en tenant compte des fluctuations, ce qui le rend intéressant pour nous. Il y eut d'abord l'article [Sakharov 1968] qui considère l'hypothèse identifiant l'action d'Einstein-Hilbert avec le changement au premier ordre dans l'action des fluctuations quantiques du vide par la courbure de l'espace<sup>27</sup>. L'élasticité de l'espace est alors une conséquence d'un déplacement de niveau. Cette idée a été retenue par plusieurs chercheurs. Plus récemment, dans la théorie des cordes, on voit apparaître plusieurs publications sur l'émergence de l'espace-temps, e.g. [Seiberg 2006]. Dans l'esprit de cette contribution, il est intéressant de mentionner le très récent papier [Verlinde 2010], où l'idée de la chaîne entropique est prise très au sérieux et, ce qui est plus original, a été combinée avec l'hypothèse holographique mentionnée plus haut.

## 5 L'épistémologie de l'espace-temps

La vision thermodynamique s'étend aussi aux questions épistémologiques : que peut-on connaître de l'espace-temps et de quelle manière correspond-il avec nos expériences ?

---

26. Comme résumé par l'historien des sciences E. T. Whittaker qui décrivait le principe de Hilbert — principe variationnel pour la théorie de la relativité : « la gravitation représente simplement un effort continu de l'univers de se redresser. »

27. Je remercie Walter Troost de m'avoir signalé ce travail.

J'aime faire le rapprochement avec des problèmes domestiques (du type thermodynamique) de chauffage ou de plomberie, etc<sup>28</sup>. Il n'y a pas assez d'eau, ou il n'y a pas d'eau chaude, ou il y a une fuite, peu importe. On appelle un expert. Le plombier vient. Il a une certaine expérience, il a étudié ces problèmes, il a de l'équipement sophistiqué. Il vient à la maison avec tout ça. Il regarde la situation, il fait certaines hypothèses initiales, il fait des tests. Ce qu'il va faire, c'est unifier ces observations et les phénomènes dans un cadre, une théorie, qui va expliquer ce qui ce passe. Cette théorie dépasse notre maison ; on y voit des approximations, des idéalizations et des abstractions. Elle offre une compréhension qu'on peut utiliser dans d'autres maisons. Nous obtiendrons ainsi, espérons-le, un gain de confort touchant certains aspects de la vie quotidienne. Nous aimons bien que le plombier nous explique ce qu'il fait et comment les choses vont évoluer. Il nous parle à notre niveau de compréhension et il nous explique en faisant un dessin ou il donne des exemples simplifiés, etc. Peut-être la solution ne marche que pour un certain temps et les problèmes réapparaissent en hiver, ou tout dépend du nombre de personnes dans notre famille. À ce moment, il faut chercher peut-être des solutions plus fondamentales ou, alternativement, des solutions plus efficaces, et reconsidérer ce que nous souhaitons réellement, une plus grande compréhension à la lumière des problèmes. Il se pourrait que le vrai problème vienne du jardin, et qu'on aura besoin d'un autre expert, d'autres méthodes, etc.

L'idée devrait être claire maintenant. Comme notre plombier nous n'avons pas un accès direct à la réalité totale. Elle entre par nos sens, mais seulement très partiellement, car nous sommes de grosses créatures formées par des conditions terrestres spéciales. Ce sont nos théories qui vont créer le cadre d'une compréhension cohérente de la complexité de nos sensations. Nous voulons bien faire des liens et réduire des phénomènes divers à une théorie de plus en plus simple et forte. Cela signifie également créer une langue et des techniques mathématiques et expérimentales pour arriver à une discussion systématique de tout ce que nous *voyons*, souvent même avec des hypothèses ou des théories sur ce que nous ne pouvons pas *voir*. Ces résumés descriptifs des phénomènes, nous les appelons des théories *vraies*. De là les concepts et les notions prennent un sens et seront identifiés avec la réalité.

À titre d'exemple, appliquons ces idées à l'âge de l'univers. Il peut être troublant de trouver en même temps des expressions comme *le temps n'existe pas* et *l'univers a 14 milliards d'années*. Ce sont des façons de parler. C'est un peu comme parler des couleurs ; la couleur n'existe pas comme une réalité indépendante ou dans un sens absolu, mais le ciel est bleu pour de bonnes

---

28. Je prends le point de vue d'un pragmatisme scientifique, comme dans [Haack 2006, 26] : « Et, bien sûr, les scientifiques enquêtent sur le même monde — un monde réel et unique — comme le font les historiens, les journalistes d'investigation, les détectives, les juristes et les philologues, les garagistes, les plombiers, et le reste d'entre nous ».

raisons. Quand on dit que le temps n'existe pas<sup>29</sup>, cela veut dire le plus souvent qu'il n'y a pas en général un temps absolu dans la théorie générale de la relativité. Ce qui résulte des équations d'Einstein sont les structures locales de causalités, les cônes de lumière. Un temps absolu voudrait dire qu'on peut définir des surfaces  $\mathbb{E}^3$  qui coupent la variété quadridimensionnelle de l'espace-temps et qui donneraient lieu à une direction de temps préférentielle à chaque point.

Néanmoins, il y a un sens à parler des premières secondes ou de l'âge de l'univers. Pour cela on fait référence à une théorie, le modèle standard de la cosmologie physique. Le modèle standard de la cosmologie du Big Bang est notre meilleure théorie pour expliquer l'existence et la structure à grande échelle des amas de galaxies, la distribution des éléments chimiques, l'accélération de l'expansion de l'univers observé (l'augmentation observée d'un décalage vers le rouge avec la distance), etc. C'est le modèle le plus simple, qui est en accord général avec les phénomènes observés. Il faut remonter à 1922 pour les premières solutions d'Alexandre Friedmann. Il a supposé un contenu matériel de l'univers assez simple et il a résolu les équations d'Einstein. La solution dépend encore de quelques autres hypothèses et l'on parle maintenant des modèles de Friedmann-Lemaître-Walker-Robertson. On peut les étudier et vérifier que notre univers visible correspond plus ou moins à ces modèles. Ces modèles sont spatialement isotropiques et homogènes. Cela veut dire au fond que la physique est la même dans toutes les directions et qu'il n'y pas d'endroits spécifiques. Ces symétries rendent possible la définition des variétés spatiales  $M_t$ , et qui définissent le temps. De ces modèles on conclut que c'est la constante de Hubble qui contrôle l'âge de l'univers, avec une correction provenant de la matière et du contenu énergétique. La théorie actuelle et les observations suggèrent que l'âge de l'univers est de  $13,75 \pm 0,17$  milliards d'années.

Il est important de réaliser que cette conclusion nécessite de savoir 1) ce qu'on entend par l'âge de l'univers (en théorie) et 2) comment il doit être mesuré. Ce sont précisément ces deux points que la thermodynamique nous a enseignés.

**Remerciements :** Je remercie les organisateurs du colloque pour leur hospitalité à Nancy ainsi que Jean-Charles Walter, Frans Cerulus et Jean Bricmont pour les corrections qu'ils m'ont suggérées.

---

29. Même et déjà dans l'espace-temps galiléen il n'y a pas vraiment d'espace absolu parce que l'espace change dans le temps; successivement, il y a différents espaces Euclidiens  $\mathbb{E}^3$  à chaque instant. Dans la représentation mathématique, cela signifie que l'espace-temps galiléen possède une structure additionnelle à celle de l'ensemble  $\mathbb{E}^1 \times \mathbb{E}^3$ .

## Bibliographie

BANKS, ERIC C.

2003 *Ernst Mach's World Elements, A Study in Natural Philosophy, The Western Ontario Series in Philosophy of Science*, t. 68, Kluwer Academic Publishers.

BRICMONT, JEAN & ZWIRN, HERVÉ

2009 *Philosophie de la mécanique quantique*, Paris : Vuibert.

DAMOUR, THIBAUT

2005 Einstein et la physique du vingtième siècle.

[http://www.academie-sciences.fr/activite/archive/dossiers/Einstein/Einstein\\_pdf/Einstein\\_Damour.pdf](http://www.academie-sciences.fr/activite/archive/dossiers/Einstein/Einstein_pdf/Einstein_Damour.pdf).

HAACK, SUSAN

2006 Not cynicism, but synechism : Lessons from classical pragmatism, dans *Companion to pragmatism*, édité par MARGOLIS, JOSEPH & SHOOK, JOHN, Blackwell, 41.

KLEIN, ÉTIENNE

2004 Faut-il distinguer cours du temps et flèche du temps ?, texte du séminaire SPEC (Saclay).

LEBOWITZ, JOEL L.

2007 Emergent phenomena, *Physics Journal*, 6, 1–6.

LOCQUENEUX, ROBERT

1996 *Préhistoire et Histoire de la Thermodynamique Classique (Une histoire de la chaleur)*, n° 45 dans Cahiers d'Histoire et de Philosophie des Sciences, ENS Éditions.

PENROSE, ROGER

2005 *The Road to Reality : A Complete Guide to the Laws of the Universe*, Knopf.

SAKHAROV, ANDREI DMITRIEVICH

1968 Vacuum quantum fluctuations in curved space and the theory of gravitation, *Sov. Phys. Dokl*, 12, 1040, reprinted in *Gen. Rel. Grav.* **32**, 365–367 (2000).

SEIBERG, NATHAN

2006 Emergent spacetime.  
[arXiv:hep-th/0601234v1](https://arxiv.org/abs/hep-th/0601234).

VERLINDE, ERIK

2010 On the origin of gravity and the laws of newton.  
arXiv:1001.0785v1.