Thèse de doctorat

de l'Université Sorbonne Paris Cité
Préparée à l'Université Paris Diderot

Ecole doctorale Savoirs scientifiques (ED 400)
Labotaroire SPHERE (UMR 7219)

Du monde mécanique à l'univers physique

Pour une histoire de la cosmologie à l'âge classique autour de *Leçons sur les hypothèses cosmogoniques* de Henri Poincaré (1911)

Jeesun Rhee

Thèse de doctorat d'épistémologie et histoire des sciences

Dirigée par Jean-Jacques Szczeciniarz
Présentée et soutenue publiquement
à l'Université Paris Diderot, le 7 juillet 2018

Mme Nadine de Courtenay (Maîtresse de Conférence HDR, Université Paris Diderot)	Présidente du jury
M. Philippe Nabonnand (Professeur des Universités, Université de Lorraine)	Rapporteur du jury
M. Michel Paty (Directeur de Recherche émérite, C.N.R.S)	Membre du jury
M. Jean-Jacques Szczeciniarz (Professeur des Universités, Université Paris Diderot)	Directeur de thèse
Mme Christiane Vilain (Maitresse de Conférence, Université Paris Diderot)	Membre du jury
M. Scott Walter (Professeur des Universités, Université de Nantes)	Rapporteur du jury

Du monde mécanique à l'univers physique. Pour une histoire de la cosmologie à l'âge classique autour de *Leçons sur les hypothèses cosmogoniques* de Henri Poincaré (1911)

Jeesun Rhee
Thèse dirigée par Jean-Jacques Szczeciniarz

Résumé

Ce travail prend pour point de départ *Leçons sur les hypothèses cosmogoniques* de Henri Poincaré, ouvrage qui est issu de son cours à la Sorbonne et l'une de ses dernières publications. L'objectif du travail est de restituer la pensée cosmologique du mathématicien et de l'inscrire dans l'histoire de la cosmologie, proposant une introduction aux *Leçons* et une grille de lectures historiques et philosophiques de cet ouvrage autour de deux axes : la cosmologie classique et la philosophie poincaréenne. La première partie est consacrée à la science classique qui oscille entre la possibilité d'une cosmogonie mécaniste et l'impossibilité d'une cosmologie en tant que science. L'ambivalence s'observe chez les auteurs des XVIIe et XVIIIe siècles notamment Kant et Laplace avec leur hypothèse cosmogonique, jusqu'au XIXe siècle qui reste récitent à s'étendre au-delà du système solaire et développer une cosmologie proprement dite. La seconde partie de la thèse vise une lecture systématique de l'œuvre de Poincaré à partir des trois ouvrages philosophiques composés et édités par lui-même comme *La science et l'hypothèse*. La lecture procède en trois temps, autour de trois problèmes : 1° la stabilité et le mécanisme, mis en question par la thermodynamique et le probabilisme (avant 1900) ; 2° la loi et le principe en mécanique et en physique, notamment le principe de relativité et le second principe de la thermodynamique, mis en question par le développement de la physique (1900–1905) ; 3° l'espace, mis en lumière par la nouvelle mécanique et la théorie cinétique (après 1905). Chaque problème est ouvert ou dirigé vers la problématique cosmologique, sans pour autant qu'elle soit poursuivie dans le concret ni dépasser le niveau conceptuel. Ainsi Poincaré est amené aux hypothèses cosmogoniques, pour finir par une philosophie plutôt qu'une cosmologie.
Mots clefs Poincaré, Henri (1854-1912), épistémologie, philosophie-cosmologie, histoire-cosmologie, cosmogonie

Abstract

This study takes as a primary source *Lectures on Cosmogonic Hypotheses* of Henri Poincaré, which was originally his course at the Sorbonne and one of his last publications. With the main objective to understand the cosmological thinking of Poincaré and its place in the history of cosmology, I propose an introduction to *Lectures* and its historical and philosophical reading around two axes : classical cosmology and Poincaré's philosophy. The first part is devoted to classical science to show how it seeks both the possibility of a mechanistic cosmogony and the impossibility of a cosmology as a science. This ambivalence can be seen in authors of the 17th and 18th centuries, especially Kant and Laplace with their cosmogonic hypothesis, as well as in the 19th century, where cosmological thinking remained speculative and restricted to the solar system, despite the advance of astronomy and physics, both in theory and observation. The second part suggests a systematic reading of Poincaré's philosophy from three philosophical books composed and edited by himself such as *Science and Hypothesis*. The reading proceeds in three steps, divided by a chronological order which is also thematic and problematic : (1) stability and mechanism, questioned by thermodynamics and probability theory (before 1900) ; (2) law and principle of mechanics and physics, especially the principle of relativity and the second principle of thermodynamics (1900–1905) ; 3 ° space, in the light of the new mechanics and the kinetic theory of gases (after 1905). Each problem shows its own cosmological moment that remains at the conceptual rather than the concrete level. Thus Poincaré is led to cosmogonic hypotheses, ending with a philosophy rather than a cosmology.
Keywords Poincaré, Henri (1854-1912), philosophy-cosmology, history-cosmology, cosmogony

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à tous ceux qui m'ont soutenue pendant toutes ces années, notamment :

M. Jean-Jacques Szczeciniarz, mon directeur de thèse, qui m'a soutenue avec une intelligence et une indulgence inégalées, et sans qui je n'aurais pas pu mener à bien et enfin mettre à terme ce travail ;

M. Michel Paty, à qui je dois l'une des plus belles chances de ma vie, celle d'entamer mes études à Paris et de bénéficier du fonds de recherche et des activités académiques de l'Université Paris Diderot et du laboratoire SPHERE qui m'ont fourni, avec d'autres institutions parisiennes comme Institut Henri Poincaré ou Bibliothèque nationale de France, les meilleures conditions pour un entrainement en « épistémologie française » ;

Mme Christiane Vilain, à qui je dois l'une des plus belles leçons et l'un des plus beaux souvenirs de mes années parisiennes, avec son accueil chaleureux et sa lecture attentive de mes premiers textes ;

Les membres du jury qui ont accepté de me lire, MM. Philippe Nabonnand et Scott Walter, pour leurs prérapports stimulants à la fois moralement et intellectuellement, et Mme Nadine de Courtenay, pour ses conseils bienveillants qui m'ont guidée dans mes premières années de thèse ;

M. Christophe Soulé, membre de l'Académie des sciences, qui m'a permis, par l'intermédiaire de M. Szczeciniarz, d'accéder aux Archives de l'Académie des sciences ;

M. Laurent Rollet aux Archives Henri Poincaré et l'équipe Google Books, pour leur aide à la documentation ;

Volny Fages et Rafaella Toncelli qui m'ont permis de consulter leurs thèses inédites ;

Kim Hee-Kyung Scholarship Foundation for European Humanities qui m'a accordé une bourse d'études durant trois ans et demi, pour son aide qui n'a pas été seulement financière, mais aussi « humaine » ;

Jocelyn Bézecourt, pour sa lecture à la fois généreuse et méticuleuse des premières versons de la thèse, avec son bon œil d'astrophysicien ;

Mes ami-e-s qui m'ont accompagnée, d'abord Seoyeon Hong, Nara Lee et

Seo-Young So pendant mes premières années parisiennes, puis Jae-Hyung Joo (dont la lecture systématique et dialectique de Bergson m'a inspiré ma propre lecture de Poincaré), Eunyoung Lee et Seo-Young So (encore elle) pendant mes années formatives, et enfin, pendant mes dernières années de thèse, Youngjoo Kim, Bobae Oh, Hye Min Park, surtout Nam-Hee Jung et Daniel Bageac (dont la bonté digne d'une sainteté m'a fait tenir dans les moments les plus difficiles) ;

La famille de mon frère qui m'a accueillie chez elle à Paris pendant mes derniers jours de thèse, mon petit frère Jaedong Lee, ma belle sœur Hye Kyong Yoon, mon neveu Leo et surtout ma nièce Hanna qui a eu la gentillesse de me prêter sa nouvelle chambre ;

Enfin mes parents, pour leur patience presque surhumaine et leur soutien presque illimité, sans lesquels je ne serais sans doute pas ce que je suis ni serais arrivée jusqu'ici, et auxquels je devrai tout ce que j'aurai de meilleur.

Je dédie cette thèse à mes deux grands-mères qui sont restées derrière moi pendant toutes ces années, avec une présence tantôt éloquente tantôt silencieuse.

A mes grands-mères

Sommaire

Abréviations **xi**

Introduction générale **3**

Ouverture. Introduction aux *Leçons sur les hypothèses cosmogoniques* **11**
1 Un aperçu du texte 15
2 Du cours parlé à l'écrit 23
3 Pourquoi et comment lire ? Vers une nouvelle lecture 58

I. Avant les *Leçons* **65**

Discours préliminaire **67**
1 Objet physique pas comme les autres. L'univers dans la cosmologie moderne 71
2 Idée transcendantale/transcendante 75
3 Pour une archéologie de la cosmologie 80

Chapitre I. L'« émergence » du monde classique **87**
1 L'espace et ses problèmes cosmologiques 87
2 Mécanisation et bifurcation de la cosmogonie 105
3 Une science disparue, aussitôt inventée 119

Chapitre II. L'hypothèse de Kant et Laplace **129**
1 Deux systèmes cosmogoniques qui ne font qu'un ? 131
2 Penser l'univers sous le sillage des nébuleuses 148
3 D'une cosmogonie positive à une cosmologie physique. Réticence positiviste ou héritage criticiste ? 164

Chapitre III. Détour cosmologique et retour cosmogonique **177**
1 Origine et fin thermiques 179
2 Nouvelle manière de penser le ciel. Renouveaux théoriques en astronomie 190
3 Hypothèse nébuleuse revisitée 203
Conclusion provisoire de la première partie 216

II. Vers les *Leçons* 221

Philosophie entre mécanique et physique. Discours préliminaire 223
1 Caractéristiques de la philosophie de Poincaré 223
2 Formation et développement des idées 226
3 Construction du corpus philosophique 237

Chapitre IV. Le monde mécanique face à la mort thermique 245
1 Perfectionnement de la mécanique newtonienne 247
2 Thermodynamique au cours 259
3 Les années de débats (1893–1896) 270
4 Tournant probabiliste ? 285

Chapitre V. Entre loi et principe. Deux usages de l'univers 295
1 La notion de loi 296
2 Parcours d'une pensée relativiste 310
3 Bifurcation des deux principes de la thermodynamique 323

Chapitre VI. L'univers éthéré ou gazéifié. L'espace à la lumière de la mécanique relativiste et de la théorie cinétique des gaz 339
1 Apport de la nouvelle mécanique 341
2 Théorie cinétique et son application cosmologique 353
3 Les gaz comme source de pensée cosmologique 368
Conclusion provisoire de la seconde partie 379

Clôture. Retour aux *Leçons* 389
1 Relecture de l'hypothèse nébuleuse 392
2 De la thermodynamique à la physique 396
3 Bilan et épilogue 405

Conclusion générale 415

Appendices 422

Autour des *Leçons*. Appendices pour la première partie 425
1 Notices biographiques 425
2 Cours de Poincaré à la Sorbonne (1885–1912) 428
3 Références des *Leçons* 431
4 Réceptions des *Leçons* 434

Vers les *Leçons*. Appendices pour la seconde partie 436
1 Corpus philosophique 437
2 Table synoptique et chronologique 442

Bibliographie **445**

Œuvres de Poincaré **447**
Ouvrages 447
Articles 448

D'autres sources **450**
Généralités 451
Références poincaréennes et épistémologiques 451

Table des figures **477**

Table des matières **478**

Abréviations

DP *Dernières pensées*, Coll. « Nouvelle bibliothèque scientifique », Paris : Flammarion, 1913 ; réédition (Paris : Flammarion, 1963).

Leçons *Leçons sur les hypothèses cosmogoniques*, réd. par Henri Vergne, Paris : Hermann, 1911.

Œuvres *Œuvres de Henri Poincaré*, sous la dir. de Paul Appell, Albert Châtelet, Jules Drach, René Garnier, Gaston Julia, Jean Leray, Jacques Lévy et Gérard Petiau, Paris : Gauthier-Villars, 1916-1956 ; réimpréssion (Paris : J. Gabay).

SH *La science et l'hypothèse*, Coll. « Bibliothèque de Philosophie scientifique », Paris : Flammarion, 1902 ; réédition (Paris : Flammarion, 1968).

SM *Science et méthode*, Coll. « Bibliothèque de Philosophie scientifique », Paris : Flammarion, 1908 ; réédition (*Philosophia scientiae* 3, Paris : Kimé, 1999).

VS *La valeur de la science*, Coll. « Bibliothèque de Philosophie scientifique », Paris : Flammarion, 1905 ; réédition (Paris : Flammarion, 1970).

Introduction générale

Dernières leçons de Poincaré

« Le problème de l'origine du Monde a de tout temps préoccupé tous les hommes qui réfléchissent ; il est impossible de contempler l'Univers étoilé sans se demander comment il s'est formé[1]. » C'est avec ces belles phrases que s'ouvre *Leçons sur les hypothèses cosmogoniques*, l'ouvrage issu du cours de Henri Poincaré à la Faculté des Sciences de Paris durant l'année scolaire 1910–1911. Il s'achève par les mots suivants, non moins mémorables : « Après cet exposé, on attend sans doute de moi une conclusion et c'est cela qui m'embarrasse. Plus on étudie cette question de l'origine des astres, moins on est pressé de conclure. [...] Nous ne pouvons donc terminer que par un point d'interrogation. »

Lues plus de cent ans après, ces phrases font songer. D'abord parce qu'elles sont parmi les dernières écrites par le mathématicien, à qui la mort survint peu de temps après. Ensuite, elles font penser à l'ironie de l'histoire, parce que le problème en question ne devait pas tarder à trouver une réponse, non pas décisive, certes, mais, peut-être pour la première fois depuis la nuit des temps, fondée sur une cosmologie enfin quitte de la pure contemplation et prête à devenir une science proprement dite. En 1917, Albert Einstein tira ses « considérations cosmologiques » de la théorie de la relativité générale qu'il avait lui-même élaborée deux ans auparavant. A la suite de quoi proliféra toute une série de modèles de l'univers, parallèlement aux observations de plus en plus précisées et étendues, accumulant des données jusqu'alors jugées insondables (la distance exacte et la constitution des nébuleuses, la dimension de la Voie lactée, le mouvement propre des galaxies...). Cette révolution d'idées atteignit son point culminant lors de la découverte du décalage vers le rouge par Edwin Hubble, et la confirmation, par la suite, de la théorie de l'expansion cosmique fondée sur le modèle dynamique de Friedmann-Lemaître. De tout cela, Poincaré ne pouvait rien savoir. Il ne savait pas non plus qu'il devait cesser de « contempler l'Univers étoilé » et donc de « se demander comment il s'est formé », dans quelques mois à peine.

1. Henri Poincaré (1911c), *Leçons sur les hypothèses cosmogoniques*, réd. par Henri Vergne, Paris : Hermann (ci-après *Leçons*).

Et nous, qui le savons, sommes intrigués, et tentés de nous interroger sur le point d'interrogation qui achevait les *Leçons*. De quoi est-il signe ce point d'interrogation ? Est-ce un signe de la réserve et de la prudence en présence des hypothèses ou des théories, attitude dont Poincaré fut tributaire comme tant d'autres scientifiques ? Ou bien, un signe des temps qui marque la fin de toute une époque, ou bien même une révolution, un changement de paradigme, dans l'histoire de la cosmologie ? Ou bien encore, un signe qui recèle derrière lui quelque chose de profond et fondamental à la nature même de la raison humaine et à la nature même de la question qui se pose et s'impose, sans pour autant être résolue à jamais ? C'est ce point d'interrogation qui sert de point de départ pour le travail qui suit.

L'étude présente entreprend de restituer une histoire de la cosmologie à l'âge classique. Par « l'âge classique », je désignerai la période qui sépare l'Antiquité et l'époque moderne et s'étale du XVIIe siècle au XIXe siècle comme il en est coutume en histoire des sciences, mais couvrirai principalement la période entre la fin du XIXe siècle et le début du XXe. Elle se veut, dans un premier temps, une continuation de l'œuvre d'Alexandre Koyré comme l'indique son titre qui paraphrase le célèbre, « Du monde clos à l'univers infini » [2]. Elle prétend également suivre l'œuvre de Jacques Merleau-Ponty, notamment sur « la science du cosmos à l'âge du positivisme [3]. »

Koyré rapproche la notion de monde du cosmos grec, et celle d'univers, de l'espace identifié à l'espace géométrique, et caractérise la science classique par la substitution de l'univers au monde, « en vertu duquel l'homme [...] a perdu sa place dans le monde lui-même ». Merleau-Ponty reprend de son côté la distinction d'Auguste Comte pour attribuer au monde un sens plus étroit et précis, limité au système solaire et adapté à la mécanique, par opposition à l'univers, démesurée et indéterminable par sa définition même.

Dans ce qui suit, je tenterai d'établir une synthèse de ces deux conceptualisations de l'univers. Elle tient non seulement à la dimension, mais également à la conception ainsi qu'à la méthodologie, surtout quand elle est couplée avec une autre entre la mécanique et la physique, *mécanique* et *physique*. Quelque peu obscur à première vue, ce dualisme a le mérite d'encadrer deux transformations majeures de l'histoire de la cosmologie : 1° la disparition du cosmos au profit de la représentation du monde dans un espace géométrique et idéalisé ; 2° la reprise d'une image concrète de l'univers et ne manquant pas d'une réalité

2. Alexandre Koyré (1962), *Du monde clos à l'univers infini*, trad. par Raissa Tarr, nouvelle éd. Paris : Gallimard.

3. Jacques Merleau-Ponty (1983), *La science de l'Univers à l'âge du positivisme. Etude sur les origines de la cosmologie contemporaine*, Paris : J. Vrin.

physique, pour faire à nouveau l'objet de la physique. Nous allons voir comment ces deux moments sont vécus par Poincaré et illustrés dans son œuvre.

La thèse s'ouvrira avec un chapitre à part, « Ouverture », conçu comme une introduction aux *Leçons*. Il présentera l'ouvrage et les contextes de la fabrique de son texte, du cours professé et sa publication, jusqu'à sa réception. Il sera suivi de deux parties principales, l'une consacrée à l'histoire et la philosophie de la cosmologie, celle de l'âge classique en particulier, et l'autre, à la philosophie poincaréenne.

La première partie propose une « archéologie », au sens foucaldien du terme, de la cosmologie à l'âge classique. Elle commence par un « Discours préliminaire » qui expose des enjeux épistémologiques et méthodologiques de la cosmologie, afin de dégager les idées directrices et les cadres conceptuels qui serviront tout au long de la thèse.

Les trois premiers chapitres montreront comment l'univers est pris pour une « idée » ou un « problème », sans pour autant faire l'objet d'une science proprement dite. Nous allons voir pourtant ce que Merleau-Ponty appelait « incidences cosmologiques », c'est-à-dire des moments où les problèmes cosmologiques se posent presque accidentellement, mais inévitablement, dans les discussions qui, à l'origine, n'ont pas à voir avec la cosmologie. C'est ce que j'appellerai « moments cosmologiques ».

Le chapitre I aura pour but de restituer les premiers moments cosmologiques chez les auteurs des XVIIe et XVIIIe siècles comme Descartes, Newton et Leibniz, suivis des philosophes du XVIIIe siècle comme d'Alembert, Buffon et Wolff. Suivant la méthode et la problématique « archéologiques », mon approche de ces grands auteurs classique ressemblera moins à une exégèse qu'à une lecture orientée et délibérée, mobilisée même autour de son objectif, celui de dégager des moments cosmologiques dans leur éclairement des problèmes relatifs à l'espace, au temps et à la science.

L'hypothèse cosmogonique de Kant et Laplace fera l'objet du chapitre II. Je montrerai d'abord les motifs et les contenus de cette hypothèse, mettant l'accent davantage sur les points communs que les différences. La différence vient de l'apport de l'hypothèse à la pensée cosmologique. Si l'un finit par conclure l'impossibilité de la cosmologie en tant que science, l'autre, par fonder un modèle de cosmogonie mécaniste, qui marqua tout le XIXe siècle, à commencer par deux représentants de l'esprit de l'époque : Comte et Cournot. Je discuterai d'abord de la distinction entre le monde et l'univers chez Comte, ensuite de la question de l'origine ainsi que de la possibilité de la cosmologie telles qu'elles sont traitées du point de vue positiviste.

Le chapitre III esquissera les moments cosmologiques de la fin du XIXe siècle, principalement entre 1870 et 1900, inspirés et même imposés par le développement des nouveaux domaines de la physique comme la thermodynamique et l'astrophysique. Tandis que la thermodynamique multipliait des spéculations cosmogoniques sur l'« âge » des astres ou l'entropie de l'univers, l'astronomie, jusqu'alors dominée par la mécanique céleste, devait faire face à l'astrophysique naissante, tout en empruntant de nouvelles méthodes à la statistique et à la géométrie. Mais tout ceci demeurait soit trop spéculatif et scientifiquement peu fondé, soit trop abstrait et mathématique, témoignant par cela même le conflit et la confusion qui persistaient tant sur le plan scientifique que sur le plan philosophique autour de l'idée d'univers. C'est ce que montrera la dernière section du chapitre où l'on aura l'occasion de revenir sur l'hypothèse de Kant et Laplace, reprise ou remise en question au tournant du siècle.

Après un long détour, il sera temps de faire un « retour » à Poincaré. La seconde partie de la thèse aura pour objectif de restituer la philosophie du mathématicien à partir de ses livres composés et édités par lui-même, de *La science et l'hypothèse* (1902) à *Science et méthode* (1908), en passant par *La valeur de la science* (1905)[4]. Comme la première partie, elle s'ouvrira par un discours préliminaire. Commençant par une étude sur la genèse du *corpus philosophique* chez lui, je m'efforcerai de dégager une unité systématique propre à son œuvre et d'esquisser la méthode qui sera poursuivie dans les chapitres suivants.

Les trois chapitres de cette partie correspondront respectivement à trois « périodes » de la philosophie poincaréenne, qu'on pourrait nommer respectivement la période que j'appellerai « classique » (avant 1900), la période « prérelativiste » (1900–1904) et la période « postrelativiste » (après 1905). Il s'agira d'une périodisation tant thématique que chronologique, pour que chaque chapitre s'ordonne autour d'un thème ou d'un *problème* : la *stabilité* pour le quatrième chapitre, la *loi* (et/ou de *principe*) pour le cinquième, et l'*espace* pour le sixième. Chemin faisant, nous allons devoir confronter l'un des sujets les plus étudiés de l'histoire de la physique : la théorie de la relativité. Mon but ne sera pas de contribuer à cette histoire qui a déjà fait couler beaucoup d'encre, mais d'éclairer le sens et le statut du principe en question dans la pensée poincaréenne. Si la périodisation fait référence à la théorie de la relativité restreinte

4. Henri Poincaré (1902c), *La science et l'hypothèse*, Paris : Flammarion ; réédition (Paris : Flammarion, 1968) (ci-après *SH*) ; Henri Poincaré (1905d), *La valeur de la science*, Paris : Flammarion ; réédition (Paris : Flammarion, 1970) (ci-après *VS*) ; Henri Poincaré (1908c), *Science et méthode*, Paris : Flammarion ; réédition (*Philosophia scientiae* 3, Paris : Kimé, 1999) (ci-après *SM*).

en 1905, c'est entre autres par la commodité, mais aussi, nous allons le voir, pour refléter l'évolution et la rupture dans cette pensée d'une période à une autre.

Dans le quatrième chapitre, je m'occuperai d'abord des travaux de Poincaré des années 1890 en mécanique céleste, notamment ses contributions importantes sur le problème des trois corps et la stabilité du système solaire, en mettant l'accent sur la notion de stabilité et sur son rapport avec la pensée probabiliste.

Parallèlement, je retracerai le parcours de Poincaré autour de la thermodynamique et de la théorie cinétique des gaz. C'est dans ce contexte qu'il prend partie des débats autour du second principe, débats particulièrement vifs vers la fin du XIXe siècle. Si la participation de Poincaré n'est pas aussi active comme telle, son nom ne marquera pas moins cette histoire, par l'un de ses résultats sur le problème des trois corps évoqué lors du célèbre échange entre Ludwig Boltzmann et Ernst Zermelo. Poincaré, de son côté, reviendra sur les enjeux principaux de ces débats et sera amené à prendre au sérieux la mécanique statistique qui venait tout juste de s'implanter et de s'imposer en mécanique.

Le cinquième chapitre aura pour objet les notions de loi et de principe dans *La science et l'hypothèse* et *La valeur de la science*. Deux principes marquent tant l'histoire de la physique que la pensée de Poincaré : le principe de relativité et le second principe de la thermodynamique. Alors qu'ils sont, à l'origine, introduits dans le but de l'explication des phénomènes et présentés comme résultats de l'expérience, et enfin pris pour infaillibles, ces principes sont remis en doute par de nouvelles expériences toujours plus raffinées et élargies vers la fin du XIXe siècle, à l'instar de l'expérience de Michelson-Morley. On remarquera une évolution significative de ses pensées à ce sujet de 1900 à 1905.

Dans le sixième chapitre, il sera encore question de la relativité, mais d'un autre point de vue, avec un accent mis sur le problème de l'espace et autour des textes « postrelativistes », écrits *après* 1905 et publiés dans *Science et méthode*. Mon analyse empruntera deux axes : la mécanique relativiste et la théorie cinétique des gaz. Il s'agira de voir d'abord l'impact de la nouvelle mécanique sur la notion d'espace, en particulier dans son rapport avec le problème de l'éther, et, ensuite, un cas du raisonnement analogique qui consiste à appliquer la théorie cinétique à l'astronomie. On verra comment Poincaré fait synthèse des travaux de Kelvin, mais aussi de ses propres contributions précédentes en mécanique céleste et en physique mathématique.

Je reviendrai aux *Leçons* dans « Clôture », avec une nouvelle perspective

établie dans les parties précédentes de ce travail ainsi qu'à l'appui des autres articles de Poincaré produits après ses dernières leçons. Remontant aux premiers écrits philosophiques *après* une première lecture des *Leçons* dans « Ouverture », j'aurai renversé l'ordre chronologique de la bibliographie poincaréenne et l'ordre de lecture généralement adopté qui commence par *La science et l'hypothèse*. Lire l'œuvre de Poincaré à rebours, prenant *Leçons* pour une *base*, plutôt qu'une conséquence, des autres qui le précèdent, ce sera là une manière de la mieux comprendre. Nous comprendrons mieux aussi pourquoi il termine sa dernière leçon par un point d'interrogation et saurions, peut-être, terminer autrement que lui.

Ouverture

Introduction aux *Leçons sur les hypothèses cosmogoniques*

Travailleur infatigable, Poincaré nous légua une œuvre énorme. Le premier recensement plus ou moins complet de ses publications compte 495 écrits [1], et le deuxième, « Bibliography of Henri Poincaré », 547 [2]. Le nombre atteint plus de 700 d'après l'inventaire le plus récent, qui comprend de nouvelles publications et rééditions [3].

Auteur prolifique, il fut également l'un des plus éclectiques, illustre sous le nom de « dernier savant universaliste ». Il touchait tous les domaines de ce qu'on appelait les sciences mathématiques, passant librement d'une thématique à une autre et faisant croiser divers domaines qu'il maîtrisait. L'analyse qu'il avait faite lui-même sur ses propres travaux scientifiques couvrait sept thématiques :

> 1° Equations Différentielles.
> 2° Théorie générale des Fonctions.
> 3° Questions diverses de Mathématiques pures (Algèbre, Arithmétique, Théorie des Groupes, Analysis Situs).
> 4° Mécanique Céleste.
> 5° Physique Mathématique.
> 6° Philosophie des Sciences.
> 7° Enseignement, vulgarisation, divers (Bibliographies, rapports divers) [4].

1. Ernest Lebon (1912), *Henri Poincaré. Biographie, bibliographie analytique des écrits*, 2e éd., Paris : Gauthier-Villars.

2. Felix E. Browder (éd.) (1983), *The Mathematical Heritage of Henri Poincaré. Part 2*, Providence : American Mathematical Society ; Proceedings of the symposium on the mathematical heritage of Henri Poincaré held at Indiana University, Bloomington, Indiana, 1980.

3. Archives Henri Poincaré, UMR 7117 (2018), *Henri Poincaré Papers*, (visité le 11/03/2018).

4. Henri Poincaré (1921), « Analyse des travaux scientifiques de Henri Poincaré faite par lui-même », *Acta mathematica*, 38, p. 36. Dans Introduction, Gösta Mittag-Leffler, rédacteur en chef de la revue, nous signale que ce fut à 1901, à sa demande, Poincaré composa cette analyse. La publication fut suspendue par des circonstances imprévues jusqu'en 1912. Une fois le projet repris, Poincaré se mit à renouveler ses biographies, mais un autre imprévu

Toujours est-il que, tous ces thèmes n'étant pas poursuivis séparément, il y a « entre eux plus d'une connexion imprévue » et « quelques mémoires ont dû figurer plusieurs fois, sous deux ou trois rubriques différentes [5] ».

Poincaré pratiquait de diverses activités, et ceci est reflété dans son œuvre elle-même. Une large part de cette œuvre consistait, d'une part, dans ses mémoires destinés aux revues de haute autorité telles que *Acta mathematica* ou *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, et d'autre part, dans les livres issus des cours qu'il fit de 1885 à 1912 à la Faculté des sciences de l'Université de Paris. En même temps, il se préoccupait continuellement de la philosophie et/ou de la vulgarisation, des contributions aux revues philosophiques comme *Monist* ou *Revue de métaphysique et de morale*, aux allocutions et conférences publiques, en passant par les préfaces insérées dans ses cours publiés. D'où les titres célèbres comme *La science et l'hypothèse* et *La valeur de la science* dans la collection « Bibliothèque de philosophie scientifique » chez Flammarion, qui lui valurent un succès public considérable et un fauteuil à l'Académie française en 1908.

Il était encore au sommet de sa carrière lumineuse quand il fit paraitre l'un de ses derniers ouvrages, *Leçons sur les hypothèses cosmogoniques*. L'ouvrage fut présenté par l'auteur lui-même à la séance de l'Académie des sciences du 30 octobre 1911 [6] :

> Dans ce volume où sont reproduites les leçons qu'il a professées à la Sorbonne l'année dernière, l'auteur passe en revue les diverses hypothèses proposées pour expliquer l'origine du monde. Celle de Laplace reste une des plus vraisemblables, et l'on a pu répondre sans trop de peine aux principales objections qu'on lui a opposées. Les théories de Faye, de [sic] Ligondès, de See sont également discutées, ainsi que celle de Darwin où les marées jouent un rôle prépondérant. Puis viennent les théories qui sortent des limites du système solaire, qui s'efforcent de rendre compte de la variété des systèmes stellaires et dont les principales sont celles de Lockyer et d'Arrhénius [*sic*].

On dirait que *Leçons* est un ouvrage qui résume et exemplifie à lui seul toute la caractéristique de l'œuvre poincaréenne. Par son contenu, en ce que les contributions précédentes du mathématicien sont constamment rappelées, mais aussi par la forme et le mode de production de l'ouvrage : issu d'un enseignement dispensé à la Faculté des sciences, rédigé par un auditeur et

lui survint au 17 juillet de la même année... Le manuscrit récupéré par Mittag-Leffler sera publié à peu près dix ans après la disparition du savant français.

5. *ibid.*

6. « M. Poincaré fait hommage à l'Académie d'un volume intitulé les Hypothèses Cosmogoniques », *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences* 153 (1911), p. 795.

publié chez un éditeur scientifique renommé, aussi bien qu'accompagné d'une préface, écrite postérieurement au cours, dans laquelle on reconnait facilement le style du Poincaré philosophe et membre de l'Académie française, tout ceci exactement de la même manière que ses autres cours qui ont déjà été publiés et lui ont fait tant de gloire.

Leçons est un livre aussi singulier qu'exemplaire, peut-être l'unique exemple parmi les œuvres poincaréennes, par l'ampleur de la question posée (« l'origine du monde »), la diversité des sujets abordés (hypothèse laplacienne, théorie des marées, astronomie stellaire. . .) et les personnages historiques évoqués, dont les noms sont connus (Laplace, Darwin, Lockyer, Arrhenius. . .) ou moins connus (Du Ligondès, See. . .) de nos jours. Le titre aura déjà sauté aux yeux modernes, pour qui les mots « hypothèses cosmogoniques » ne correspondent pas toujours à la matière digne d'un traité scientifique proprement dit. Tout en admettant qu'on puisse étudier scientifiquement l'origine du monde ou de l'univers comme c'est bien le cas de nos jours, la « cosmogonie » elle-même n'est pas bien placée dans la classification des sciences actuelle, souvent qualifiée de mythique ou de religieuse, et accompagnée d'une connotation non- ou pseudo-scientifique [7]. A quoi on aurait du mal à associer le nom de l'illustre mathématicien que fut Poincaré.

Aujourd'hui, on dispose des *Œuvres* de Poincaré qui regroupent ses mémoires et notes scientifiques, toujours disponibles dans les librairies [8], tout comme ses cours ou *Les méthodes nouvelles de la mécanique céleste* qui font eux aussi l'objet de réimpression. On peut également se procurer sans difficulté ses ouvrages philosophiques, dont *La science et l'hypothèse* et *La valeur de la science* sont continuellement réédités, sans oublier les correspondances dont on doit les éditions critiques aux Archives Poincaré [9]. Ce qui reflète le fait que les études poincaréennes visent principalement, soit les théories dont on considère Poincaré comme précurseur incontestable (théorie du chaos, topologie ou théorie de la relativité), soit les thèses philosophiques qu'on a coutume de lui

7. Le mot même « cosmogonie » n'est pas exempt d'ambiguïté. Il mériterait d'une précision, dans son rapport, en particulier, avec le mot « cosmologie ». Ce qui fera l'objet de l'introduction à la première partie de l'étudie présente. Je me contenterai pour le moment d'une définition provisoire : par la cosmologie on entendra la science de l'univers en général, et, par la cosmogonie, la science de l'origine de l'univers ou de ses sous-systèmes.

8. Henri Poincaré (1916-1956), *Œuvres de Henri Poincaré*, sous la dir. de Paul Appell *et al.*, Paris : Gauthier-Villars ; réimpréssion (Paris : J. Gabay) (ci-après *Œuvres*). Ces *Œuvres* ont été complétées en 1955 par le onzième et dernier volume, contenant qui est recueil des allocutions faites à l'occasion du centième anniversaire de la naissance du mathématicien : Henri Poincaré (1955), *Le livre du centenaire de la naissance de Henri Poincaré : 1854-1954*, sous la dir. de Paul Appell *et al.*, Paris : Gauthier-Villars, t. XI ; réimpréssion (Paris : J. Gabay).

9. Ajoutons à cela nombreuses publications qui ont vu le jour à l'occasion du centenaire de la mort de Poincaré en 2012.

attribuer (conventionnalisme ou intuitionnisme).

En revanche, *Leçons* demeure l'une des moins connues parmi les œuvres poincaréennes. L'ouvrage n'a pas été réédité depuis 1913 ; il est trouvable, rarement cité, et n'est jamais vraiment étudié pour lui-même. Son titre figure rarement dans les bibliographies des études poincaréennes, sinon pour un simple rappel bibliographique ou une illustration de la réputation du mathématicien d'être « universaliste » [10]. Même sa valeur historique semblerait faire défaut : pour les historiens des sciences, spécialistes de la cosmologie et de l'astronomie en l'occurrence, *Leçons* serait « l'un des plus marquants » parmi les traités similaires parus au même moment [11], mais pas tout à fait fidèle ni complet comme témoignage de son temps [12]. Les philosophes n'y trouveront que des théories « périmées » au sens bachelardien du terme, c'est-à-dire des théories anciennes qu'il n'y a pas de lieu de réactualiser par la marche de la science contemporaine. Il manque entre autres l'originalité qui est pourtant la marque du mathématicien : son lecteur habitué s'étonnera de découvrir un Poincaré plutôt *lecteur* qu'*auteur* qui demeure plutôt passif et réservé, placé derrière les théories qui ne sont pas les siennes, sans même prendre clairement sa position. Résultat : *Leçons*, un ouvrage oublié.

Le but de ce chapitre préliminaire est de sortir cet ouvrage de l'oubli.

Je commencerai par un compte rendu textuel des *Leçons* pour montrer *de quoi* parle ce livre, c'est-à-dire ses contenus, et aussi *comment* il en parle, c'est-à-dire ses formes (structure, références utilisées, style...). Je restituerai l'« origine » des *Leçons*, à savoir les *leçons* professées à la Sorbonne et divers contextes autour de la publication et de la réception de ce texte.

10. Pour ne citer qu'un exemple : « il n'est pas un sujet de mathématiques pures ou de physique théorique que Poincaré n'ait traité ; même la matière douteuse de la cosmologie, que, sans nul doute, Poincaré, s'il vivait encore, persisterait à nommer *hypothèses cosmogoniques*, a été l'objet de ses leçons. » Eric Audureau, « Présentation. Lire Poincaré cent ans après », *Philosophiques* 31, 1 (2004), p. 4.

11. Jean-Claude Pecker (1964), « Astrophysique théorique », in *La science contemporaine*, sous la dir. de René Taton, Paris : P. U. F., t. II, p. 574.

12. Citons tout de même l'une des rares exceptions, récemment parue, où *Leçons* est généreusement cité comme source majeure : Jean-Pierre Verdet (2010), *Aux origines du monde. Une histoire de la cosmogonie*, Paris : Editions du Seuil.

1 Un aperçu du texte

Leçons comporte quatorze chapitres [13]. Chaque chapitre a pour objet l'hypothèse d'un auteur, dont le nom est indiqué dès le titre : « L'hypothèse de Laplace » (les chapitres II et III), « L'hypothèse de Faye » (IV), « L'hypothèse de Belot » (XVI)... A deux exceptions près, qui s'intitulent d'après les *problèmes*, traités par plusieurs auteurs : le chapitre VIII, « Sur l'origine de la chaleur solaire et de la chaleur terrestre » où il est question des théories du Soleil de Mayer, Helmholtz et Kelvin, ou bien encore le XII, « La Voie lactée et la théorie des gaz », celle de Kelvin et Poincaré lui-même.

Les hypothèses se divisent en trois catégories. Les premières, auxquelles Poincaré consacre la première moitié de l'ouvrage (du chapitre I au chapitre VII), ont pour but d'expliquer l'origine du système solaire sur la base de la mécanique newtonienne. Les deuxièmes, regroupées en un seul chapitre (VIII), étudient le mécanisme du rayonnement du Soleil et la constitution de la Terre afin d'éclairer l'origine de ces deux astres. Les troisièmes s'étendent au-delà du système solaire, prenant en compte une vaste gamme de systèmes sidéraux et d'autres découvertes récentes d'alors (du VIII au XIV).

1.1 Trois sortes d'hypothèses

Hypothèses mécaniques

Laplace est la figure centrale de tout livre. Son hypothèse consiste à supposer une nébuleuse à l'origine, étendue au-delà de l'orbite de Neptune et condensée vers le centre, puis ramenée à une rotation uniforme [14]. La nébuleuse se refroidit puis se contracte, afin d'abandonner de la matière vers le niveau de l'équateur sous forme annulaire. Les anneaux se rompent et puis se rassemblent en plusieurs masses. Ces dernières donnent naissance aux planètes, tandis que le noyau dense devient le Soleil.

Historiquement parlant, Laplace est précédé par Kant. Selon Kant, les matières sont répandues dans tout l'espace. Une partie d'elles d'une légère prépondérance de densité par rapport au reste forme tôt ou tard un centre de gravitation, autour duquel les autres parties sont mises en circulation. Au sein des matières en circulation apparaissent quelques points de condensation pour donner naissance aux planètes. Poincaré ne tarde pas à indiquer l'erreur de

13. Pour un tableau synoptique des hypothèses traitées dans *Leçons*, l'on se reportera à Appendice A, 3.
14. *Leçons*, p. VII.

cette hypothèse : elle fait découler toute une révolution du système à partir d'un repos, au détriment du principe de la conservation du moment angulaire.

L'hypothèse de Laplace fait l'objet de l'analyse dans le chapitre III qui constitue l'un des plus fouillés du livre. D'abord les conditions de la formation des anneaux sont examinées, référence faite aux travaux d'**Edouard Roche**[15]. Ensuite, il est question d'examiner la condition relative à la densité de la nébuleuse primitive. Poincaré insiste sur l'hypothèse d'une condensation centrale : c'est une hypothèse indispensable dont l'abandon remettrait en cause toute l'entreprise de Laplace. Il appuie son argument sur le calcul des moments angulaires du système solaire fait par **Maurice Fouché**, pour y ajouter son propre calcul de la densité de la nébuleuse initiale. Suit un autre examen assez long sur la constitution et la condition de stabilité des anneaux de Saturne. Poincaré examine les travaux de Laplace, Maxwell et **Gustave A. Hirn** à ce sujet, avant de les appliquer aux anneaux primitifs de Laplace. Quant à la formation des satellites, Laplace suppose un mécanisme analogue à celui des planètes. Cette « nébuleuse planétaire » serait-elle homogène ou a-t-elle une forte condensation comme la nébuleuse solaire ? Poincaré passe en revue les théories portant sur les figures d'une masse fluide en rotation, problème auquel il reviendra encore dans le chapitre VII, en particulier concernant la formation du système Terre-Lune.

Si ce long chapitre est essentiellement consacré à l'éclaircissement de l'hypothèse de Laplace, les derniers passages, relativement succincts, sont quant à eux des objections faites à cette théorie, qui seraient, d'après notre mathématicien, tantôt corrigibles (par exemple, la rotation directe des planètes peut s'expliquer par les marées) tantôt négligeables, sans qu'aucun ne soit décisif.

Pourtant, **Hervé Faye** trouve une objection décisive : les rotations rétrogrades de certains satellites ou les mouvements propres des étoiles lointaines qui sont ignorés chez Laplace. Il n'en était pas moins fidèle à l'idée générale de son devancier, à quelques « variations » près : les « mouvements giratoires », observés dans les nébuleuses spirales, auraient existé et joué un rôle capital au moment de la formation des objets célestes. Il propose aussi une loi d'attraction qui varie pendant la période d'évolution, une modification donc de la loi de Newton. Les anneaux de la nébuleuse laplacienne, suivant cette loi, subissent deux phases d'évolution dont la première donnera les planètes à rotation directe, et la seconde, celles à rotation rétrograde. Ce que Poincaré ne trouve pas tout à fait convaincant : si Faye réussit à rendre compte d'un point inexpliqué chez Laplace, il en tire une conséquence difficile à accepter selon

15. Les personnages dont le nom est mis en gras font l'objet des notices biographiques, regroupées dans l'appendice A, 1.

laquelle la Terre serait plus ancienne que le Soleil. Pour expliquer les rotations directes de certains astres, il suffirait, d'après Poincaré, de rendre compte de l'influence des marées, comme l'a bien vu G. H. Darwin.

L'hypothèse de **Raoul-Marie du Ligondès** fait l'objet d'un exposé assez long (pages 83–115) au chapitre suivant. Elle pose un état qui précède la nébuleuse laplacienne, un véritable chaos, composé des molécules qui se meuvent en tous sens et en toutes vitesses, tout en étant constamment en choc. Les chocs ont un double effet : d'une part, une condensation par perte de force vive, d'autre part, un aplatissement dû à une légère prépondérance du moment angulaire dans le plan équatorial. Ainsi se constitue le noyau central qu'est le Soleil entouré des molécules qui forment un disque aplati, exactement comme la nébuleuse laplacienne. Prenant appui sur l'analogie avec la théorie cinétique des gaz, Poincaré montre comment les projectiles cosmiques tendent vers une vitesse moyenne par les chocs élastiques. Mais il faut supposer également l'existence de chocs *inélastiques*, puisque sans ceux-ci il n'y aurait pas de condensation ni d'aplatissement des molécules, une étape essentielle dans l'évolution cosmique.

Par ailleurs, selon **Thomas J. J. See**, les planètes et les satellites ne se sont pas détachés d'une nébuleuse commune. Ils ont pour origine des astres extérieurs venus vers le Soleil qui s'est formé indépendamment et entouré d'une atmosphère. Les planètes ont pour origine des astres extérieurs, « captés » à la périphérie de la nébuleuse primitive par le mécanisme de la « résistance de milieu ». Celle-ci continue à agir et à modifier les trajectoires des astres. Une fois « capté », l'astre circule autour du Soleil sur une orbite hyperbolique qui devient, perdant sa vitesse, elliptique et puis circulaire. Ainsi s'explique la faible excentricité des orbites planétaires, mais non pas leur faible inclinaison.

Dans le chapitre VII, un autre chapitre important, Poincaré discute (i) les principes généraux de la cosmogonie de **George H. Darwin**, (ii) la formation de la Lune à partir de la Terre primitive, et (iii) les effets des marées sur les planètes.

Il existe, chez Darwin, deux actions de force qui servent de supplément à la gravitation : l'une, accélératrice, due au refroidissement, et l'autre, retardatrice, des marées. Ces dernières ont un rôle spécifique, plutôt que global : c'est par leur action que les révolutions des planètes, rétrogrades au début, sont rendues directes. La Terre est à l'origine dans un état fluide et visqueux et sa partie intérieure subit un frottement fort des « marées solaires ». A un moment donné s'égalisent les périodes d'oscillation de la planète et des marées solaires, de telle façon qu'une partie de la protubérance se détache dans le plan de l'équateur de la Terre. D'où la constitution de la Lune, qui se distancie de la Terre au

cours du temps et dont la période de rotation aurait diminué jusqu'à ce qu'elle devienne égale à celle de sa révolution.

Poincaré propose une autre hypothèse, s'appuyant sur ses propres travaux précédents relatifs aux figures d'équilibre : une nébuleuse en rotation, parfaitement homogène, se refroidit, se contracte et accélère sa rotation ; elle s'aplatit pour s'allonger en trois axes inégaux comme un « ellipsoïde de Jacobi » ; sa rotation continuant, elle finit par devenir « piriforme », en se creusant au centre et en se divisant en deux masses. Reste à savoir si les masses demeureront stables en cette forme. Dans tous les cas, admet notre auteur, l'hypothèse ne s'appliquerait pas à la séparation de la Lune à partir de la Terre, mais, peut-être, aux étoiles doubles.

Approches thermodynamiques

Si les sept premiers chapitres sont consacrés uniquement aux théories issues de la mécanique céleste, le lecteur assiste à un changement de perspective au chapitre VIII, intitulé « Sur l'origine de la chaleur solaire et de la chaleur terrestre ». De Laplace à Darwin, les cosmogonistes font recours exclusivement aux lois de la mécanique newtonienne et se bornent au système solaire et à certains de ses phénomènes, notamment à ses mouvements révolutionnaires et rotatoires. Les physiciens se tournent vers un tout autre phénomène qu'est la chaleur, notamment « l'étonnante dépense de chaleur que fait le Soleil chaque seconde ». Poincaré s'appuie largement sur l'exposé de W. Thomson sur l'origine de la chaleur du Soleil, sans pour autant oublier d'ajouter les résultats récents de la géologie qui lui servent de critère de choix des théories.

Notre étoile ne devrait pas sa chaleur à une origine « chimique », à savoir la combustion de la matière qui ne l'aurait pas rendu « capable d'éclairer les hommes pendant la durée de l'histoire ». Mayer l'attribuait à des météorites qui tombent sur la surface du Soleil, tandis que Helmholtz, au travail de la gravitation qui se transformerait en une quantité considérable de chaleur. Le physicien anglais donna un calcul de l'âge du Soleil en partant de l'hypothèse de Helmholtz, mais il n'aboutit qu'à un résultat assez faible (50 millions d'années), inférieur même au temps nécessaire à l'évolution de la vie sur la Terre (200 millions d'années). La solution se trouverait-elle dans la radioactivité ? Même si elle ne donnait pas toute explication de la chaleur solaire, ajoute Poincaré, « tout au moins [elle] nous montrait qu'il reste bien des mystères à découvrir [16] ».

16. *Leçons*, pp. XIV-XV.

Au-delà du système solaire

Les cosmogonies issues de la « Chimie stellaire », l'objet des chapitres IX et X, marquent encore un changement, sinon un tournant. Les hypothèses précédentes, qu'elles soient mécaniques ou physiques, se bornaient au système solaire et ne s'adaptaient pas à la variété remarquable de l'univers étoilé, avec ces nébuleuses de toute forme – disques, anneaux, spiraux ou en amas irréguliers... Ceci marque aussi un changement méthodologique : il n'y a plus lieu de faire des hypothèses mécaniques ou physiques, puisque « nous avons sous les yeux des objets qu'il suffit de comparer pour reconstruire tout le passé des astres, comme le naturaliste qui a dans le champ de son microscope des cellules présentant toutes les phases de la division cellulaire [17]. » L'observation directe de l'évolution des astres permet à la cosmogonie de « sortir de l'âge des hypothèses et de l'imagination pour devenir une science expérimentale, ou tout au moins une science d'observation ».

Norman Lockyer établit une classification des astres selon leur composition chimique et leur température, déterminées par les spectres, de laquelle il dégage une théorie sur l'évolution cosmique : à haute température les astres se dissocient en corps plus simples appelés « protométaux » qui se condensent à leur tour et produisent de la chaleur, ce qui donne naissance aux étoiles. L'étoile, une fois née, s'échauffe, jusqu'à atteindre sa température maximale, puis se refroidit et s'éteint pour devenir une nébuleuse. Quant à **Arthur Schuster**, il établit un rapport entre la température et le stade d'évolution ou l'âge d'une étoile : plus les étoiles sont chaudes (gazeuses), plus elles sont jeunes ; elles se refroidissent avec l'âge et s'enrichissent en métaux.

Dans ces deux derniers chapitres, Poincaré semble se contenter de reproduire les résultats de ces astronomes, sans critique ni commentaire. Il n'en est plus de même pour le chapitre suivant, portant sur la cosmogonie de **Svante Arrhenius*, qui est « l'une des théories cosmogoniques les plus récentes, et à coup sûr l'une des plus originales » [18]. Elle consiste dans les échanges, entre étoiles et nébuleuses, de l'électricité, de la matière ou bien même des germes de la vie par un mécanisme particulier qu'est la pression de la radiation. Et ceci à l'infini. Après une discussion quelque peu technique sur la théorie de la pression de radiation, Poincaré se laisse libre dans ses propres réflexions sur des sujets les plus divers, parfois même spéculatifs.

« Le mystère s'accroît, continue-t-il, quand au lieu de considérer chaque étoile en particulier, on en envisage l'ensemble et qu'on réfléchit sur leurs mu-

17. *Leçons*, p. XVII.
18. *Leçons*, p. XX.

tuels rapports[19]. » Dans cette optique qu'on pourrait qualifier de « globale », Poincaré propose, dans le chapitre XII intitulé « La Voie lactée et la théorie des gaz », sa propre hypothèse qui consiste à assimiler la Voie lactée à une masse gazeuse pour appliquer la théorie cinétique des gaz. Partant de cette supposition il calcule la dimension de la Voie lactée et le nombre d'étoiles, résultat à évaluer par l'ordre de grandeur, sans pour autant oublier de prendre une précaution sur la portée et la limite de l'analogie. Le reste du chapitre est consacré à approfondir l'hypothèse, avec toute une série de questions : à quelle sorte de gaz ressemble la Voie lactée, au gaz adiabatique et monoatomique ou à une « matière de Crookes », c'est-à-dire du gaz extrêmement raréfié ? Et quelle est sa figure : sphère, disque aplati ou spiral ? Si elle était une nébuleuse spirale, ce qui est très probable, quel serait le mécanisme de sa formation et de son mouvement ?

La nébuleuse spirale fait à elle seule l'objet du chapitre XIII, portant sur la théorie de T. J. J. See. Selon ce dernier, deux nuages cosmiques d'origines différentes s'approchent l'un de l'autre par l'attraction et finissent par se réunir en une nébuleuse spirale avec deux bras en mouvement ; s'ils ne se réunissent pas, leur forme finale est annulaire. Or, d'après Poincaré, See n'explique pas la « symétrie » des mouvements de ces bras, dont il est difficile de rendre compte selon lui s'ils n'avaient pas une origine commune.

Le quatorzième et dernier chapitre a pour l'objet l'hypothèse de **Emile Belot**. D'après Belot, le système solaire doit sa naissance aux *chocs* entre deux nébuleuses distinguées. Selon Belot, il est peu probable que tout le système solaire découle d'une seule et même nébuleuse comme chez Laplace ; un tel modèle ne suffirait pas surtout à expliquer la nature et l'origine des *novae*, ce phénomène céleste qui a été observé depuis au moins Tycho et n'a cessé d'émerveiller des esprits. Poincaré ne fait pas exception comme le montre tout une série de questions qu'il se pose[20]. S'agit-il d'un choc entre plusieurs corps célestes ? Si oui, ce choc est-il entre un astre et des météorites ou bien une étoile et une nébuleuse gazeuse ? « De tout cela nous ne savons rien », conclut notre auteur[21]. Il semble particulièrement intrigué par les nébuleuses spirales, auxquelles l'hypothèse d'une nébuleuse en condensation de type laplacien ne s'applique probablement pas. Non qu'il faut abandonner la « vieille hypothèse », en tout cas pas entièrement : « il y a très peu de choses à faire pour la remettre à neuf[22] » ; elle reste pour notre auteur « une des plus vraisemblables », quoiqu'elle soit loin d'être convaincante et, encore moins, concluante.

19. *Leçons*, p. XIX
20. *Leçons*, pp. XVIII-XIX.
21. *Leçons*, p. XIX.
22. *Leçons*, p. XXIV.

1.2 Remarques préliminaires

A sa première sortie en 1911, *Leçons* sera salué par son choix des hypothèses assez large, mais raisonnablement délimité ainsi que par la maîtrise des sujets d'une extrême variété, allant des théories les plus classiques jusqu'aux plus récentes [23]. Une circonstance exceptionnelle survenue un an après, qu'est la disparition de son auteur, produira des réactions encore plus élogieuses. Le mathématicien Jacques Hadamard dira, dans son hommage au savant désormais regretté, à propos des *Leçons* :

> Nul ouvrage ne nécessitait plus et ne met mieux en évidence cette universalité, cette maîtrise simultanée des domaines les plus divers, qui est une des caractéristiques de son génie. Pour éclairer les propriétés des molécules par celles des nébuleuses et inversement, il fallait dominer à la fois les unes et les autres [24].

Bien des lecteurs sont marqués par l'attitude singulièrement réservée que l'auteur avait maintenue tout au long de l'ouvrage. « C'est, dit l'astronome **Charles André**, avec le plus bienveillant scepticisme et l'éclectisme le meilleur que procède l'auteur, ajoutant discrètement à certaines de ces théories quelque chose de son propre fonds, à seule fin d'en élargir la base et d'en orner la façade [25]. » Peut-être trop discrètement, selon T. J. J. See, à qui, nous l'avons vu, deux chapitres des *Leçons* ont été consacrés, l'astronome américain regrette que notre mathématicien se soit contenté de « résumer » les hypothèses existantes [26]. En effet, ce sont les hypothèses cosmogoniques de Kant à Belot qui font l'objet du livre, hypothèses dont Poincaré n'est pas l'auteur lui-même, la seule exception faite à celle sur la Voie lactée. Tout se passe comme si l'auteur avait borné son rôle à recenser, présenter, commenter et critiquer les théories des autres. Réserve pourtant compréhensible, d'après **Alexandre Véronnet**, vu l'état des connaissances de l'époque en la matière, voire naturelle pour quelqu'un comme Poincaré qui était « trop mathématicien pour se contenter de l'à peu près dans la solution du problème, et ici ce ne sont guère que des aperçus

23. Ernest Lebon (1911), « Poincaré (H.). – Leçons sur les hypothèses cosmogoniques (Compte rendu et analyse) », *Bulletin de la Société mathématique de France*, 35, Pietro Burgatti (1912), « Les hypothèses cosmogoniques jugées par M. H. Poincaré », *Scientia*, 12, Anonyme (1912), « Cosmogonies, Old and New », *Nature*, 89, 2218, Charles André (1912b), « Poincaré (H.), Leçons sur les Hypothèses cosmogoniques », *Revue générale des sciences pures et appliquées*, 23, 9. Pour un recensement des comptes-rendus, des critiques et des analyses des *Leçons*, voir Appendice 1. 5.

24. Jacques Hadamard (1914), « Le problème des trois corps », in *Henri Poincaré. L'œuvre scientifique, l'œuvre philosophique*, Paris : F. Alcan, pp. 113-114.

25. André, « Poincaré (H.), Leçons sur les Hypothèses cosmogoniques », p. 362.

26. Thomas Jefferson Jackson See (1912), « Review of Poincaré's Lectures on Cosmogony », *Popular Astronomy*, 20.

plus ou moins plausibles qui nous sont permis »[27].

La facture formelle de l'ouvrage fait l'objet des critiques, surtout par son manque d'homogénéité et de systématicité. En effet, *Leçons* ressemble moins à une monographie qu'à un recueil de textes, dont il est difficile de relever une logique d'enchaînement, composé de façon peu soignée, voire improvisée, sans un plan préalablement fixé, écrit chapitre par chapitre au fur et à mesure du progrès des lectures des autres livres[28]. A première vue, il semblerait que les hypothèses soient rangées à peu près dans l'ordre chronologique : Kant et Laplace viennent en premier, suivis des auteurs du XIXe siècle comme Helmholtz, Kelvin ou Faye, tandis que les contemporains de Poincaré sont présentés comme Arrhenius ou Belot aux derniers chapitres. Or, cet ordre apparent s'avère plutôt inopérant dans les détails : pourquoi répartir l'hypothèse de See dans deux chapitres différents (VI et XIII) ? Et pourquoi, après avoir examiné les hypothèses apparues à la fin du XIXe siècle (Faye, du Ligondès, Darwin), revenir en arrière au milieu du siècle dans le chapitre VIII (Mayer, Helmholtz et Kelvin) ? Un autre défaut : traitement peu équilibré des hypothèses : certaines sont analysées très en détail (notamment celle de Laplace) alors que les autres le sont trop brièvement (Kant, See, Lockyer et Schuster).

A quoi s'ajoute la variété de style ou de technicité. Certains chapitres conforment au niveau de manuel d'enseignement universitaire, exigeant des acquis assez avancés en matière de mécanique rationnelle et de physique entre autres (les chapitres III, sur Laplace, et VII, sur Darwin), mais il y en a qui sont accessibles à des non initiés, écrits sans aucune ou très peu de formules mathématiques (les chapitres XI, sur Arrhenius, et XII, sur la Voie lactée et la théorie cinétique des gaz). Qui plus est, même les parties qui contiennent des calculs élevés ne dissuadent pas totalement les lecteurs non initiés, les résultats étant exprimés en langage ordinaire. Par ailleurs, les ouvrages cités par l'auteur alternent eux aussi entre deux niveaux : articles ou ouvrages dits techniques d'un côté, et d'un autre côté, livres de vulgarisation scientifique[29].

Mais avant tout, *Leçons* a pour origine un cours professé dans le cadre de l'*enseignement scientifique supérieur*. Ch. André, lui-même professeur d'astronomie à l'Université de Lyon, insiste sur l'aspect pédagogique de cette œuvre :

> La poussée intensive de l'étudiant vers la recherche personnelle et originale, telle est la caractéristique des Leçons sur les Hypothèses cosmogoniques. C'est, depuis pas mal d'années, l'esprit commun

27. Alexandre Véronnet (1914), *Les hypothèses cosmogoniques modernes*, Paris : Hermann, p. 2.

28. « It would seem that a book here or a paper there has caught the eye of the author, and has been introduced into the work. But no attempt has been made to form a complete survey of recent work » in Anonyme, « Cosmogonies, Old and New », p. vii.

29. Pour les ouvrages cités dans *Leçons*, voir Appendice 1. 4.

> des chaires d'Astronomie de nos différentes Universités. Nous n'en sommes que plus reconnaissants à M. Poincaré de nous prouver, par son exemple, qu'il faut y persévérer [30].

On ne saurait oublier que *Leçons* est un produit de son époque, qui porte en lui plusieurs contextes en jeu dans sa construction même. De tels contextes ne se relèvent pas par une lecture textuelle seule. J'aborderai d'abord des contextes institutionnels autour de la « Sorbonne scientifique », du fonctionnement des cours au public visé, qui ne sont pas sans rapport avec la pratique ou le style d'enseignement de Poincaré. J'exposerai ensuite des contextes éditoriaux, relatifs à l'édition, à la publication et à la réception de *Leçons*.

2 Du cours parlé à l'écrit

Les cours du premier semestre de l'année 1910–1911 de la Faculté des sciences de Paris s'ouvrent le jeudi 3 novembre [31].

En sciences mathématiques, Elie Cartan, qui vient tout juste de succéder à Jules Tannery, récemment décédé, donne son premier cours intitulé « Théorie des courbes gauches et propriétés des lignes tracées sur les surfaces ». **Gaston Darboux**, professeur de géométrie supérieure, dispense un cours de géométrie infinitésimale pendant le premier semestre, et un autre sur les cartes géographiques au second semestre. Emile Borel, à la chaire de théorie des fonctions, enseigne sur les « Fonctions libres », qu'il enchaînera au second semestre par un cours de « Calcul des probabilités et ses applications ». Les cours de calcul des probabilités et physique mathématique, par Joseph Boussinesq, ont pour titre « Théorie mécanique de la lumière ». Du côté des sciences physiques, Marie Curie enseigne la « Théorie de l'ionisation des gaz et notion sur la radioactivité » et Jean Perrin, nommé tout récemment à la chaire de chimie physique, une chaire créée spécifiquement pour lui, la « Théorie cinétique et atomistique. »

A côté de ces cours se trouve une annonce :

30. André, « Poincaré (H.), Leçons sur les Hypothèses cosmogoniques », p. 362.

31. *Le livret de l'étudiant de l'Université de Paris* (microfiche, côte BnF 8-R–22598), L'année 1910–1911, p. 40.

Publié annuellement depuis 1887 sous les auspices du Conseil de l'Université de Paris, *Le livret de l'Etudiant de l'Université de Paris* (ci-après Livret) réunit les renseignements concernant les programmes des cours des Facultés (Droit, Médecine, Sciences, Lettres) et d'autres établissements parisiens. Notons que *Revue scientifique*, ancienne *Revue des cours et conférences*, publiait les annonces de ces cours dans sa rubrique « Vie scientifique universitaire ». Pour l'année en question, l'annonce parait dans *Revue scientifique* 48, 18 (du 20 octobre 1910), p. 567–568.

> **Astronomie mathématique et mécanique céleste** - H. Poincaré - Hypothèses cosmogoniques. Lundi, jeudi. 10h 1/2. *Amphithéâtre Chasles*

Un cours sur les « hypothèses cosmogoniques » dans une faculté des sciences, au même titre que « Calcul des probabilités » ou « Théorie de la lumière », dispensé, pas pour une ou deux séances, ni dans une conférence, mais pendant tout un semestre, c'est une chose bien rare, d'autant plus curieuse qu'il tient lieu dans l'une des meilleures facultés des sciences du monde et, de plus, à la main de l'un des meilleurs savants du monde.

2.1 Cours

Deux chaires à la Sorbonne et deux types d'enseignement

C'est par les mathématiques, dont son génie avait déjà été connu dès sa jeunesse, que Poincaré fait ses débuts dans le monde académique [32]. Après ses études à l'Ecole polytechnique et à l'Ecole des mines, suivies d'une brève carrière d'ingénieur, il soutient sa thèse d'État intitulée « Sur l'intégration des équations aux dérivées partielles » en 1879. Dès la même année, il est chargé du cours d'Analyse à la Faculté des Sciences à Caen, puis à Paris de 1881 à 1885.

Parallèlement, il prépare un tournant de sa carrière, non moins grande : physicien et astronome. Après avoir occupé un poste de chargé de cours de *mécanique physique et expérimentale*, il succède **Gabriel Lippmann** à la chaire de *physique mathématique et calcul des probabilités* en 1886 [33]. Quant à l'astronomie, il avait déjà fait un nom en la matière grâce au mémoire primé au concours du Prix d'Oscar II, « Les équations dynamiques et le problème des

32. Pour la biographie de Poincaré, la référence a été faite notamment aux notices nécrologiques lors du décès du mathématicien comme les suivants : Gaston Darboux (1913), « Eloge historique de Henri Poincaré », *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, repris in *Œuvres* II ; Ernest Lebon (1913), « Notice sur Henri Poincaré », in *Leçons sur les hypothèses cosmogoniques*, 2e éd.

Parmi des études plus récentes, entre autres : Laurent Rollet (1999), *Henri Poincaré, des mathématiques à la philosophie. Etude du parcours intellectuel, social et politique d'un mathématicien au début du siècle*, Thèse de doctorat, Université de Nancy II ; Jeremy Gray (2013), *Henri Poincaré : A Scientific Biography*, Princeton et Oxford : Princeton University Press.

33. Sur la « bagarre » entre mathématiciens et physiciens autour de cette nomination, voir Michel Atten (1988), « La nomination de H. Poincaré à la chaire de physique mathématique et calcul des probabilités de la Sorbonne », *Cahier du séminaire d'histoire des mathématiques*, 9. Et aussi Introduction de S. Walter in Henri Poincaré (2007), *La correspondance entre Henri Poincaré et les physiciens, chimistes et ingénieurs*, éd. établie et annot. par Scott Walter *et al.*, introd. de Scott Walter, Basel : Birkhäuser, pp. ix-xvi.

trois corps » (1890), sans parler de ses activités prolifiques en qualité d'examinateur ou de rapporteur à des sociétés savantes, ou de ses publications dans *Bulletin astronomique* et *Comptes rendus de l'Académie des sciences*. Rien d'étonnant donc que G. Darboux, alors doyen de la Faculté, lui propose la chaire d'*astronomie mathématique et mécanique céleste*, devenue vacante suite au décès de **Félix Tisserand**. Ce que Poincaré accepte « sans hésitation » :

> Avec des hommes tels que vous, la Faculté allait toute seule. Il y a plus, lorsque la considération du bien du service m'a déterminé à vous demander de changer d'enseignement, vous l'avez fait sans hésitation, une première fois pour prendre la chaire de Physique mathématique, une seconde fois pour passer à celle de Mécanique Céleste. Et ainsi, j'ai aujourd'hui la joie et l'orgueil de penser que j'ai pu avancer le moment où, en même temps que grand géomètre, vous avez été proclamé par tous grand physicien et grand astronome. Pourquoi la Faculté ne possède-t-elle pas aussi une chaire de philosophie scientifique ? j'aurais pu vous demander aussi de l'occuper [34].

Une belle carrière universitaire donc, qui reflète l'universalité de notre savant. Or, si par l'universalité de son savoir Poincaré rend service à la Faculté, celle-ci ne lui sert pas moins. L'éducation ne se sépare pas de la recherche chez lui, servant d'initiatives pour passer d'un domaine à un autre ou d'un thème à un autre et jouant ainsi un rôle significatif et même constitutif à ses « spéculations scientifiques » comme le suggérera Paul Appell, son ami d'enfance et collègue à la Faculté des sciences, dont il fut doyen de 1903 à 1920 :

> Nulle carrière ne se prête plus aux spéculations scientifiques que celles de professeur dans un établissement d'enseignement supérieur où se dispense l'enseignement supérieur c'est-à-dire de première main reposant essentiellement sur la recherche et soumis au seul contrôle des auditeurs [35].

En physique mathématique, en particulier, la nomination permet à Poincaré de s'investir dans un domaine où il vient de s'initier à peine et n'a pas encore publié grand-chose [36]. Aux cours, assurés et renouvelés tous les semestres, Poincaré aborde et approfondit ses propres préoccupations, des théories déjà

34. Gaston Darboux (1912), *Éloges académiques et discours*, Paris : Hermann, p. 481.
35. Paul Appell (1925), *Henri Poincaré*, Paris : Plon, pp. 35-36.
36. Ne serait-ce qu'en apparence, car, selon M. Atten, l'intérêt de Poincaré pour la physique était déjà de longue date. Preuve : il put traiter dès ses premiers cours (1887–1888) de la théorie de Maxwell qui n'était pas encore universellement connue en France, ce qui veut dire qu'il avait déjà travaillé sur cette théorie Atten signale également la correspondance de Poincaré où il discutait, dès 1882, sur la théorie électrodynamique avec son ami Henri Becquerel. Voir Atten, « La nomination de H. Poincaré à la chaire de physique mathématique et calcul des probabilités de la Sorbonne », pp. 227-228.

faites par lui-même à celles qu'il est en train de faire au même moment, comme en témoigne Darboux :

> Nous entendons fréquemment, avec quelque impatience, émettre des appréciations inexactes sur nos cours de la Sorbonne, et en général sur ceux de nos Universités. Dans les Universités, nous dit-on, on enseigne la *science toute faite* ; c'est ailleurs, au Collège de France, au Muséum, que l'on enseigne la *science qui se fait*. En admettant que cette démarcation entre la science qui se fait et celle qui est faite n'ait pas quelque chose de puéril, rien n'est moins juste que cette opinion, surtout si on la prend dans son sens le plus littéral.
>
> Les cours de nos Universités embrassent toute la science, celle qui est faite et celle qui se fait. Poincaré, comme d'autres professeurs que je pourrais citer, ne négligeait certes pas les travaux déjà publiés qui se rapportaient au sujet de ses leçons. Mais ses cours étaient originaux et contenaient toujours une bonne part de ses découvertes personnelles. Et celles de ces découvertes qui ne pouvaient entrer dans son enseignement de Physique mathématique, il les a exposées dans des Mémoires originaux qui ne le cèdent en rien à ses plus beaux écrits de Mathématiques pures [37].

Les cours de physique mathématique de Poincaré, c'est un véritable lieu de production du savoir, d'une science « qui se fait » : 20 cours au total, sur les thèmes extrêmement variés tels que « Théorie mathématique de la lumière » (1887–88), « Capillarités » (1888–89), « Théorie des tourbillons » (1891–92)... En l'espace de neuf ans parvient-il, comme le dit Langevin, « bien vite [à] dominer toutes les questions, anciennes et nouvelles, et [à] apporter aux recherches une contribution de premier ordre », parcourant « successivement toutes les parties de notre science [physique] dans ces cours [38] ». Pourtant, une fois passé à la chaire de mécanique céleste, le mathématicien ralentit le rythme d'enseignement et dispensera ses cours uniquement aux premiers semestres, aux mêmes horaires (lundi et jeudi, 10 h 30) au même lieu (Amphithéâtre Chasles). Ce qui signifie naturellement, d'une part, le nombre réduit des cours professés

37. Darboux, « Eloge historique de Henri Poincaré », p. IX. C'est moi qui souligne.

38. Paul Langevin (1913), « L'œuvre de Henri Poincaré. Physique », *Revue de métaphysique et de morale*, 21, 5, repris in Henri Poincaré. L'œuvre scientifique, l'œuvre philosophique, p. 678.

Cet aspect a fait l'objet des études poincaréennes surtout en physique mathématique. O. Darrigol sert des cours de Poincaré en physique mathématique pour une étude génétique de la théorie de la relativité. Voir Olivier Darrigol (1995), « Henri Poincaré's criticism of Fin de Siècle electrodynamics », *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 26, 1, pp. 5-8. L'approche d'A. Rougé souligne davantage l'aspect pédagogique des travaux de Poincaré. Voir André Rougé (2008), *Relativité restreinte. La contribution d'Henri Poincaré*, Palaiseau : Les éditions de l'École polytechnique, pp. 12, 29-34, 140-147. Pour une présentation générale de la carrière de physicien du savant, on consultera Introduction in Poincaré, *La correspondance Poincaré-physiciens*, p. x. La liste de ses cours témoigne une productivité impressionnante. Voir Appendices pour la première partie, 2.

(seize au total, sur seize ans), et d'autre part, le rapport entre l'enseignement et la recherche n'est plus aussi intime qu'en physique mathématique. Et pour cause : il s'agit désormais d'une science qui est « toute faite » pour lui.

Contrairement à sa carrière en physique qui s'était développée à peu près en même temps que son enseignement, il avait déjà atteint le sommet en mécanique céleste au moment de la nomination, ayant produit des travaux importants et parcouru presque tous les sujets classiques du domaine : le problème des trois corps, déjà évoqué, avec ses thèmes liés (fonctions perturbatrices, invariants intégraux, etc.), les anneaux de Saturne, les marées ou bien les figures d'équilibre d'une masse fluide en rotation [39]. Avant même la nomination à la chaire en 1896, Poincaré avait publié les deux premiers volumes des *Méthodes nouvelles* en 1892 et 1893, l'ouvrage qu'il avait conçu à partir du mémoire couronné du Prix d'Oscar II et du cours de l'année 1889–1890 consacré au même sujet. Pour ses cours de mécanique céleste, avec son *opus magnum* en la matière qu'est *Méthodes nouvelles* à la main, il n'avait qu'à en tirer directement des matières : « Sur le problème des trois corps et les perturbations planétaires » (1896–1897) ou « Sur le développement de la fonction perturbatrice et les méthodes de Gyldèn et de Hansen » (1897–1898)... De nouvelles questions sont également abordées, certes, mais ce n'est pas tant pour s'investir dans un nouveau domaine que pour revenir aux sujets précédemment abordés et prolonger des résultats acquis. La théorie de la Lune, par exemple, qui est le sujet du cours de l'année 1899–1900, elle est prise pour une application du problème des trois corps.

Dans ses cours de physique mathématique, le mathématicien se souciait de suivre le plus près possible l'actualité de cette science, de « passer en revue les différentes théories et [de] les soumettre à la critique [40] ». La présentation d'une nouvelle théorie suivait généralement un « état des lieux » et une critique des théories existantes, mais toujours dans la continuité de celles-ci. Par exemple, quand il introduit la théorie de Maxwell, le premier dans l'enseignement supérieur en France, il se sert des « images artificielles » employées par ses prédécesseurs, pour faire « un pont » entre les anciennes et nouvelles.

> A cette époque, on ne s'était pas encore familiarisé sur le continent avec les idées de Maxwell, et il était nécessaire de jeter un pont pour ainsi dire entre les anciennes manières de penser et les nouvelles. Maintenant que tout le monde est passé, ce pont peut

39. Pour le parcours du savant en ce domaine du point de vue de l'enseignement, voir Daniel L. Goroff (1993), « Henri Poincaré and the birth of chaos theory. An Introduction to the english translation of Les Méthodes nouvelles de la Mécanique céleste », in Henri Poincaré, *New Methods of Celestial Mechanics*, éd. établie et introd. par Daniel L. Goroff, Woodbury : American Institute of Physics, t. 1, pp. 13-15.

40. Poincaré, « Analyse des travaux », § XXIV, p. 343.

> paraître inutile et les précautions que j'ai cru devoir prendre étonneront quelques personnes. Néanmoins je crois qu'aujourd'hui encore les deux images artificielles dont je me suis servi pour faire comprendre les idées de Maxwell, celle du fluide inducteur, et celle des diélectriques cellulaires, peuvent faciliter pour certains esprits l'étude des théories électriques [41].

L'intérêt des « anciennes manières de penser » est double : pédagogique et heuristique. Étudier d'anciennes idées, c'est, d'une part, une manière de « faire comprendre » les nouvelles théories et « faciliter » l'étude de celles-ci ; cela constitue, d'autre part, une méthode de recherche qui lui est propre. Il commence par passer en revue les différentes hypothèses existantes et critiquer leurs principes de base, ce qui le conduit à découvrir une nouvelle hypothèse, voire à renouveler l'ensemble de connaissances en question [42]. Le style est mis en relief dans l'enseignement par un besoin pédagogique. Mais Poincaré enseignant s'instruit lui-même autant qu'il instruit ses élèves. Et pour cause : l'enseignement d'un savoir n'est-il pas une manière, si ce n'est la meilleure, de l'apprendre, plutôt qu'une simple transmission ? « L'*acte d'enseigner* ne se détache pas aussi facilement qu'on le croit de *la conscience de savoir* », dira Gaston Bachelard [43]. On serait d'autant plus incliné à cet acte qu'on n'est pas sûr de son savoir et tente d'en avoir conscience.

Il en est autrement pour la science toute faite comme la mécanique céleste. sont Dans les derniers volumes des *Méthodes nouvelles*, qui ne sont pas un livre d'enseignement, mais de *recherche*, destiné donc aux spécialistes, il était toujours question de présenter les nouveaux acquis de ses propres travaux et Poincaré tenait à montrer les liens entre les « méthodes nouvelles » et les anciennes, ainsi que « la façon dont celles-là sont sorties de celles-ci » [44]. Pourtant, une fois la mécanique mécanique devenue une science toute faite, ses théories, déjà établies, font l'objet d'enseignement magistral, pour ne pas dire dogmatique, où les résultats essentiels sont directement traités sans passer par le « pont ». Tel est le cas des *Leçons de mécanique céleste*, comme le dit Poincaré dans Introduction :

> Dans les *Méthodes nouvelles* je me suis placé le plus souvent au point de vue du géomètre et j'ai recherché la rigueur analytique [...] D'autre part, dans ces Volumes, j'ai poussé l'approximation beaucoup plus loin que ne l'exige la pratique ; j'ai pu ainsi faire

41. Poincaré, *cit.*, § XXXI, p. 355.

42. Ce style a été remarqué et notamment comparé à celui d'Einstein. Michel Paty (1993), *Einstein philosophe*, Paris : P. U. F., Rougé, *Relativité restreinte*.

43. Gaston Bachelard (1949), *Le rationalisme appliqué*, Paris : P. U. F., Ch. II « Le rationalisme enseignant et le rationalisme enseigné », p. 12.

44. Introduction in Henri Poincaré (1905c), *Leçons de mécanique céleste professées à la Sorbonne*, Paris : Gauthier-Villars, t. 1 ; réimpression (Paris : J. Gabay, 2003), p. VI.

> ressortir des circonstances tout à fait imprévues, dont l'importance analytique est très grande, mais qui n'ont aucun intérêt pour l'astronome praticien [...] Au contraire, j'ai regardé les résultats anciens comme connus, de sorte que j'ai pu insister sur le lien qui rattache les *Méthodes nouvelles* aux anciennes et sur la façon dont celles-là sont sorties de celles-ci.
>
> L'ouvrage n'était donc pas accessible au débutant et ne convenait qu'au lecteur déjà familier avec la Mécanique céleste.
>
> Ici, au contraire, je me borne à reproduire les *Leçons* que j'ai professées devant les élèves de la Sorbonne et je prends le problème à son début, en supposant connus seulement les principes de l'Analyse et de la Mécanique, ainsi que les lois de Képler [sic] et de Newton. Je n'emprunte aux *Méthodes nouvelles* que leurs résultats essentiels, ceux qui sont susceptibles d'une application immédiate, en m'efforçant de les rattacher le plus intimement possible à la méthode classique de la variation des constantes [...]
>
> J'ai été plus droit au but ; le chemin suivi par nos devanciers n'a pas toujours été le plus direct : en pareil cas, j'ai coupé au court ; je me privais ainsi de tout ce qu'ils avaient vu en route et qui souvent était plein d'intérêt [45].

Le contraste entre *Leçons de mécanique céleste*, dont le premier volume date de 1892, et *Méthodes nouvelles*, de 1905, est manifeste. En espace d'une dizaine d'années qui sépare les deux ouvrages, la mécanique céleste est devenue une science faite : il ne reste plus qu'à tirer des résultats et à les soumettre à l'application, sans avoir besoin de passer par « le chemin suivi par nos devanciers ».

Dans la liste des cours (voir section 2, quelques exceptions retiennent notre attention. Le cours de 1899 en est une. Poincaré reprend l'un de ses sujets préférés qu'est l'électromagnétisme : les théories nouvelles de l'électrodynamique et en particulier sur la théorie de Lorentz. Mais cette fois-ci il se préoccupe bien davantage qu'auparavant de la théorie de Lorentz et en tire un mémoire qui sera par la suite publié dans *Festschrift* en 1900, dont l'importance sera remarquée après le développement de la théorie de la relativité [46]. Tout ceci conformément à sa coutume d'« enseignant-chercheur », à ceci près que c'est un cours *hors cursus*, qu'il fait non plus en tant que titulaire de la chaire de physique mathématique, mais de *mécanique céleste*. D'autres particularités de ce cours consistent à ce qu'il débute en janvier, contrairement à ses cours habituels dont le début est toujours fixé en novembre ; il est « fermé », auquel seuls les étudiants inscrits étaient admis sur la présentation de leur carte [47]. L'ex-

45. *ibid.*

46. Henri Poincaré (1900a), « La théorie de Lorentz et le principe de réaction », *Archives néerlandaises des sciences exactes et naturelles*, 5, repris in *Œuvres* IX. Voir *infra*, Ch. V.

47. *Livret*, 1898–1899, p. 15. Il s'agit d'un cours annexe, qu'on appelait à l'époque « confé-

ception ne se reproduira pas : l'enseignement de Poincaré reprend son cours normal dès le second semestre de la même année, consacré celui-ci à un sujet « traditionnel » de la mécanique céleste, « Figures des Corps célestes et leurs mouvements autour de leur centre de gravité [48] ».

« Conférence mondaine » de Poincaré ? Le savant et son public

Si l'on s'intéresse à la « réalité quotidienne » de l'enseignement, on est conduit naturellement à s'interroger sur son public [49]. Un enseignant ne peut se passer du public à qui il s'adresse ; il a à prendre en compte la composition, le niveau ou l'attente de son auditoire pour déterminer ses pratiques d'enseignement (mode de présentation, didactique...), mais aussi le contenu et les matières à enseigner. En ce faisant, il lui arrive de réorganiser et de repenser son savoir, parfois même de le renouveler. Un cours ne consiste donc pas seulement dans la transmission unilatérale du savoir établi ; c'est aussi un lieu de production de savoir où le public joue son propre rôle. Raison de plus pour les hommes de science contemporains de Poincaré qui sont en voie de la *professionnalisation* au cours du XIXe siècle. Ils s'emparent des institutions de l'enseignement scientifique supérieur comme les grandes écoles et les universités [50]. « Scientifiques » plutôt que de « savants », hommes publics plutôt que mondains et, avant tout, à la fois professeurs et professionnels : ils forment eux-mêmes leurs successeurs et, pour dépasser le cercle restreint de leur établissement, publient des manuels et des ouvrages de vulgarisation.

Il en est de même chez Poincaré. A Peter Guthrie Tait, qui lui reproche de n'avoir pas suffisamment discuté des expériences dans son cours de thermodynamique, rétorque notre savant :

> Toutefois il est certain que je consacre relativement peu de place à la description des expériences, et on aurait le droit de s'en étonner

rences » et distinguait des conférences publiques. Sur la distinction entre cours public et cours fermé, voir *infra*.

48. *Livret*, 1898–1899, p. 20.

49. Prenant le cours magistral pour l'objet d'histoire, je me réfère à la problématique et à la méthodologie de l'équipe de recherches dirigée par A. Bruter. Voir Annie Bruter (2007), « Le cours magistral : modalités et usages (XVIe-XXe siècles) », in *Action concertée. Histoire des savoir. 2003–2007. Receuil de synthèse*, sous la dir. de Karine Chemla, CNRS-Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche ; Annie Bruter (2008), « Le cours magistral comme objet d'histoire », *Histoire de l'éducation*, 120, 4.

50. Sur l'histoire de la professionnalisation des savants en France au XIXe siècle, voir Harry W. Paul (1985), *From Knowledge to Power : The Rise of the Science Empire in France 1860-1939*, Cambridge : Cambridge University Press ; Robert Fox (1995), *Science, Industry and the Social Order in Post-Revolutionary France*, Aldershot : Variorum ; Robert Fox (2012), *The Savant and the State : Science and Cultural Politics in Nineteenth-Century France*, Baltimore, Etats-Unis d'Amérique : Johns Hopkins University Press.

> si je n'en donnais l'explication. Mon livre est la reproduction textuelle de mon cours ; or mes auditeurs avaient tous suivi déjà un cours de physique expérimentale, où ces expériences leur étaient décrites en détail. Je n'avais donc qu'à leur en rappeler brièvement les résultats [51].

Non seulement Poincaré organisait ses cours tout en tenant compte de son public, mais le public jouait un rôle décisif notamment dans les reproductions écrites de son enseignement, comme je le montrerai plus loin. Ici il y a lieu de s'interroger sur la nature et le rôle du public « immédiat », c'est-à-dire celui qui venait écouter les cours magistraux du savant [52].

Qui était donc ce public ? Difficile de savoir, puisqu'il reste peu de témoignages directs. On pourrait pourtant penser que notre savant ne disposait pas d'un large auditoire, compte tenu du niveau de ses leçons. Loin d'être accessibles à tous, elles étaient non méthodiques et souvent livrées à l'improvisation, réputées « être inintelligibles » même parmi les meilleurs élèves [53]. On s'imagine en effet l'embarras des étudiants de voir leur éminent professeur « repousser ses notes, annoncer qu'il allait essayer une nouvelle méthode, et continuer, sans broncher, en improvisant [...] au tableau noir [54] ».

Accessibles ou non, les cours de Poincaré étaient ouverts à tous. A l'époque, la Sorbonne disposait de trois sortes de cours : (1) cours de professeurs titularisés, magistraux, voire oratoires, ayant pour objectif « d'exposer au public, sur des questions générales, l'état actuel et les résultats de la science » ; (2) cours de maîtres de conférences ou de chargés de cours, didactiques et méthodiques ceux-ci, pour « un enseignement plus approfondi, de nature à familiariser [les étudiants] avec les méthodes de recherche scientifique », cours qui devaient être « complétés par les conférences, les exercices pratiques faits dans les Instituts, Séminaires ou Salles de travail, et par les recherches » ; (3) cours libres de personnes extérieures, ouverts sous proposition de la Faculté et autorisation auprès du Conseil de l'Université [55].

---

51. Lettre à la revue *Nature* du 17 mars 1892 in Poincaré, *La correspondance Poincaré-physiciens*, § 55.3, p. 348. Sur le cours et le débat en question, voir *infra*, Ch. IV.

52. D'après la distinction d'A. Bruter entre public « immédiat » et public « différé ». Le public immédiat est défini comme « l'auditoire qui vient l'écouter dans la salle ou l'amphithéâtre où il se donne » ; le public différé, comme « celui qui, sans assister physiquement au cours, en prend connaissance grâce, précisément, à une publication, manuscrite ou imprimée. » Voir Bruter, « Le cours magistral comme objet d'histoire », p. 25 et p. 38.

53. D'après Poul Heegaard, mathématicien danois et un des fondateurs de la topologie moderne, qui fit un séjour scientifique à Paris. Voir George G Szpiro (2009), *La conjecture de Poincaré*, trad. par Bernard Sigaud, Paris : Editions du Seuil, p. 125. Voir aussi pp. 80–81.

54. Léon Brillouin (1959), *Vie, matière et observation*, Paris : A. Michel, p. 198. Physicien de renom, qui sera connu de nos jours pour ses travaux en théorie de l'information, L. Brillouin témoigne ici du cours de Poincaré de 1911 auquel il avait assisté lui-même.

55. D'après les règlements relatifs aux cours dispensés, indiqués dans les *Livret* de l'année 1911–1912, p. 11.

Ce dispositif est le fruit d'une série de réformes relatives à l'enseignement et à la recherche des universités, réformes lancées dès la fin des années 1860, et fraîchement et massivement investies par la Troisième République naissante [56]. L'une des visées de ces réformes, ce sont précisément les cours magistraux des facultés des sciences et des lettres, si caractéristiques du Second Empire aux yeux des républicains et qualifiés de nettement inférieurs aux « séminaires » des universités allemandes. Nombreux sont les discours critiques sur les enseignements supérieurs français : oratoires et peu didactiques, superficiels et peu originaux, adressés et adaptés moins aux étudiants qu'au « grand public »...

A la suite des réformes, les cours « fermés » en programme fixe (2) sont installés, destinés à former des étudiants. Tels sont les cours supplémentaires (« conférences », qu'on doit distinguer des conférences publiques) ou exercices pratiques aux laboratoires (travaux pratiques). Quant aux cours généraux (1), ils sont eux aussi réinstitués de façon à inciter les professeurs titulaires à avancer leurs recherches personnelles et à les délivrer immédiatement devant le public - pour embrasser la « science qui se fait ». Quant aux cours libres (3), ils sont désormais contrôlés par le Conseil de l'Université [57]. Or, cela ne fera pas disparaitre le public général. Sauf les cours annexes et conférences (2), réservés ceux-ci aux étudiants inscrits et munis d'une carte d'immatriculation, les cours (1) et (3) restent ouverts et connaissent parfois des succès vifs auprès d'un auditoire de composition essentiellement variée. Il est curieux de constater la persistance de la tradition de la conférence publique dans les cours libres (3) d'une part, et d'autre part, la présence du public aux cours généraux (1). Les deux sortes de cours ne sont évidemment pas les mêmes, l'un étant dans le cursus, alors que l'autre, non. Mais on peut aussi penser que les deux sont susceptibles d'être confondues quant au public auquel ils s'adressent.

D'un autre côté, les cours libres servent à faire entrer dans l'enseignement les sciences ou les théories qui ne sont pas encadrées par le cursus universitaire. C'est ainsi que H. Faye donne une conférence en 1883 sur la constitution

56. Pour une synthèse historiographique récente voir Fabien Locher (2009), « Les sciences et les techniques dans l'enseignement supérieur français (XIXe-XXe siècles) », *Histoire de l'éducation*, 122, 2. Je me bornerai à indiquer l'effet de ces réformes dans la pratique de l'enseignement et son rapport avec le public. Voir à ce sujet Boris Noguès (2008), « Élèves ou auditeurs ? Le public des facultés de lettres et de sciences au XIXe siècle (1808-1878) », *Histoire de l'éducation*, 120, 4, sous la dir. d'Annie Bruter.

57. *Livret* précise les conditions d'autorisation : « A côté de ces cours et conférences peuvent venir se placer des cours *libres*, cours autorisés par le Conseil de l'Université, sur la proposition ou après avis de l'Assemblée de la Faculté près de laquelle le cours doit être ouvert. Ces cours sont professés par des personnes pourvues du grade de docteur, ou du diplôme supérieur de pharmacie. L'autorisation de faire des cours libres peut d'ailleurs être aussi accordée à des personne non pourvues de grades, mais qui justifient d'études spéciales sur les matières devant faire l'objet de leurs cours. Cette autorisation est accordée pour un an, mais est renouvelable. » *Livret* 1905–1906, p. 10.

physique du soleil, et une autre, en 1884, sur les hypothèses cosmogoniques, « favorablement accueillie par le public de la Sorbonne et par la Presse[58] ». Toutes deux seront reproduites dans un ouvrage du même auteur qui, publié la même année, connaitra un succès : sa deuxième édition a paru dès l'année suivante, et la quatrième, en 1907.

Les cours de Poincaré sont eux aussi publics. Il y a lieu de se rappeler quelques éléments biographiques, c'est-à-dire ce qu'il y a eu de « personnel » dans l'enseignement des dernières années de Poincaré auquel Langevin fait allusion concernant les *Leçons*[59]. D'un côté, notre mathématicien multiplie ses activités d'astronome auprès de ces deux institutions, après la nomination à la Chaire de mécanique céleste en 1896 et le prix d'Oscar II en 1899. Lauréat du Gold Medal de Royal Astronomical Society et élu président à la Société astronomique de France, il continue d'intervenir en qualité d'examinateur ou de rapporteur pour *Bulletin astronomique* ou pour l'Académie des sciences[60]. Et pour cause : personne n'est mieux placé que lui pour tenir le public au courant sur les derniers acquis de l'astronomie[61]. Raison de plus : après son élection à l'Académie française, Poincaré devient un savant « en vogue », sollicité partout (sociétés, associations, congrès internationaux, conseils et comités scientifiques...) et suivi de près par la presse et le public parisien. Tout ceci atteint le sommet en 1910, qui est aussi l'année de l'arrivée des deux comètes avec un retentissement considérable. Sollicité par le grand public, Poincaré donne une conférence pour faire des théories des comètes[62]. Il n'y a pas à s'étonner que, quand il inaugure, un mois plus tard, ses *Leçons sur les hypothèses cosmogoniques*, les « gens du monde » remplissent l'amphithéâtre Chasles pour l'écouter... avant qu'ils ne se dissipent rapidement pour laisser quelques élèves

58. Hervé Faye (1884), *Sur l'origine du monde. Théories cosmogoniques des anciens et des modernes*, Paris : Gauthier-Villars, p. 5.

59. « Je dois rappeler ici la manière dont il sut appliquer les méthodes de la théorie cinétique à certaines des questions les plus importantes et les plus actuelles de la théorie des mondes. Il me faudrait, en réalité, analyser tout ce qui lui est personnel dans l'enseignement qu'il donna pendant la dernière année de sa vie sur les hypothèses cosmogoniques » Langevin, « L'œuvre de Henri Poincaré. Physique », p. 713.

60. Pour la carrière d'astronome de Poincaré de ces années, voir Stéphane Le Gars (2007), *L'émergence de l'astronomie physique en France (1860-1914). Acteurs et pratiques*, Thèse de doctorat, Université de Nantes, p. 257.

61. Henri Poincaré (1902c), « Les progrès de l'astronomie en 1901 », *Bulletin de la société astronomique de France*, 16.

62. Conférence donnée à la Société industrielle de Mulhouse en octobre 1910. Henri Poincaré (1910a), « Conférences sur les comètes », *Bulletin de la Société industrielle de Mulhouse*, 80, sous la dir. de Paul Appell *et al.*, réimpréssion (Paris : J. Gabay).

« Poincaré dut combattre à diverses reprises, employant des arguments à portée du public, comme celui d'après lequel la tradition rattache à l'apparition des comètes l'abondance du bon vin plutôt que celle de l'eau ». Lévy« Poincaré et la mécanique céleste », in Henri Poincaré*Œuvres*, sous la dir. de Paul Appell *et al.*, t. 11, p. 228.

et fidèles[63].

Cette présence du public n'aurait-elle pas quelque chose à voir avec le registre quelque peu « vulgarisateur » des *Leçons* ? N'aurait-elle pas conduit Poincaré, toujours attentif à ses auditeurs, à remettre le niveau de ses leçons de façon à les rendre plus accessibles ? Toujours est-il que le dualisme entre science et vulgarisation n'est pas aussi net qu'il parait. Prenons un autre exemple, « La Voie lactée et la théorie cinétique des gaz ». C'est un article issu des conférences faites devant la Société astronomique de France et publié dans *Bulletin de la Société astronomique de France*, avant d'être inséré dans *Science et méthode* en 1908. Le même texte sera repris dans les *Leçons* quasi textuellement, sauf quelques ajouts de calculs adaptés au cursus de la Faculté des sciences. D'une conférence publique à un manuel d'enseignement de haut niveau, c'est un renversement du sens de transmission de savoir.

2.2 Production du texte

« La distance est grande entre les paroles qu'on confie librement à un auditoire sympathique et la discipline nécessaire pour écrire un livre. Dans l'enseignement oral, animé par la joie d'enseigner, parfois la parole pense. En écrivant un livre, il faut tout de même réfléchir, » dit Bachelard en parlant d'un recueil de ses cours publics donnés à la Sorbonne[64]. On pourrait dire que cette distance entre la liberté des paroles et la discipline de l'écriture était épargnée en quelque sorte chez Poincaré, puisque ce sont ses élèves qui se chargeaient de cette dernière. Toujours est-il que les publications des cours lui ont donné l'occasion de revenir à ce qui a été enseigné, puis rédigé, sans pour autant l'avoir « écrit » lui-même.

Composition et publication des cours

La publication des cours magistraux, qui est une tradition de l'enseignement scientifique qui remonte au XVIIIe siècle, prend son essor à la fin du XIXe siècle avec l'expansion des universités et des publications académiques

63. « Poincaré was, in 1910 and 1911, a fashionable scientist attracting the mundane Paris crowd to listen to him. During the first lectures, the room was more than full, but rapidly and happily, the crowd decreased soon. From the third lecture, only a few students and a few passionates remained. Poincaré always ended with simple formulas, translated in a language full of imagery, that we were forced to understand. » Bourgouin, *Savants modernes. Leur vie, leur œuvre* (1947), cité en anglais in Jean Mawhin (2005), « Henri Poincaré. A Life in the Service of Science », *Notices of the AMS*, 52, 9, p. 3

64. Gaston Bachelard (1957), *La poétique de l'espace*, P. U. F., p. 21.

et devient une entreprise éditoriale complexe où divers facteurs et acteurs sont en jeu[65].

J'ai déjà souligné la place de l'enseignement dans l'œuvre de Poincaré. La plupart des monographies publiées de son vivant (pas moins de quinze sur vingt-quatre) sont issues de ses cours à la Sorbonne, mis à part ses notes et mémoires scientifiques qu'il produisait lui-même en même temps. Qui plus est, ceux-ci le poussaient à des réflexions philosophiques, auxquelles on doit les fameuses préfaces ainsi que les ouvrages philosophiques. Ces cours ont ceci de particulier qu'ils sont presque tous rédigés par les élèves et auditeurs.

> Les étudiants de nos Facultés s'attachent de préférence aux professeurs dont les travaux font autorité. Non contents d'écouter les leçons de Poincaré, ses élèves voulurent qu'elles fussent utiles à d'autres et résolurent de les imprimer. Il n'était pas dans la nature de l'esprit de Poincaré de faire comme beaucoup de ses collègues de la Sorbonne, et de publier lui-même ses cours en les amenant au plus haut degré de perfection. On doit donc savoir beaucoup de gré à l'*Association amicale des élèves et des anciens élèves de la Faculté des Sciences* du soin qu'elle a pris de recueillir et de publier presque toutes les leçons de notre Confrère. Elle a ainsi rendu un service inappréciable aux hautes études scientifiques[66].

L'association amicale des élèves et des anciens élèves de la Faculté des Sciences est fondée en 1886, la même année où, rappelons-le, Poincaré est nommé à la chaire de physique mathématique. Entièrement bénévole et autonome, l'association a pour activité majeure la publication des notes de cours : elle sélectionne les cours à publier, organise les comités de rédaction, obtient l'autorisation auprès des professeurs, et réalise les éditions et parfois les rééditions[67]. Les notes éditées sont imprimées sous forme autographiée par l'association elle-même, et d'où la rédaction des deux premiers cours de Poincaré, ainsi que *Thermodynamique* de Lippmann (1886), *Chimie organique* de Charles Friedel, en trois volumes (1886–1888), ou bien *Analyse* d'Emile Picard (1887). Après, l'impression sera confiée à des éditeurs scientifiques spécialisés comme Gauthier-Villars ou Hermann et fils.

---

65. Caroline Ehrhardt (2011), « Du cours magistral à l'entreprise éditoriale », *Histoire de l'éducation*, 130, 2.

66. Darboux, « Eloge historique de Henri Poincaré », § VIII, XXXII-XXXIII.

67. Dans *Annuaire de l'Association amicale des élèves et des anciens élèves de la Faculté des Sciences de Paris* [BNF cote 8-JO–4438, ci-après Annuaire] de l'année 1908–1909, lit-on : « Les pourparlers continuent toujours au sujet de la réédition du cours de thermodynamique de M. Poincaré » (Compte rendu de la séance du 28 janvier 1908, Annuaire 1908–1909, p. 45). Il s'agit de *Thermodynamique*, déjà cité, publié pour la première fois en 1889 et et la seconde, en 1908.

Un autre exemple : « L'assemblé approuve la réédition du *Calcul des probabilités* de M. Poincaré » (Procès-verbal de l'Assemblée générale du 18 décembre 1909, *Ibidem*, p. 55). La seconde édition de *Calcul des probabilités* sortira en 1912.

La rédaction des cours de Poincaré est confiée aux élèves et anciens élèves de l'Ecole normale (Emile Borel, Jules Drach, Edouard Le Roy...), agrégés de l'Université (Jules Blondin, Lamotte, Charles Maurain), ou docteurs ès sciences (Guillet) ; souvent au nombre de deux (*Elasticité*, par Borel et Drach ; *Théorie analytique de la propagation de la chaleur* par Rouyer et Baire ; *Théorie du potentiel newtonien* par E. Le Roy et Georges Vincent) ou de trois (*Théorie mathématique de la lumière* par Blondin, Lamotte et Hurmusescu).

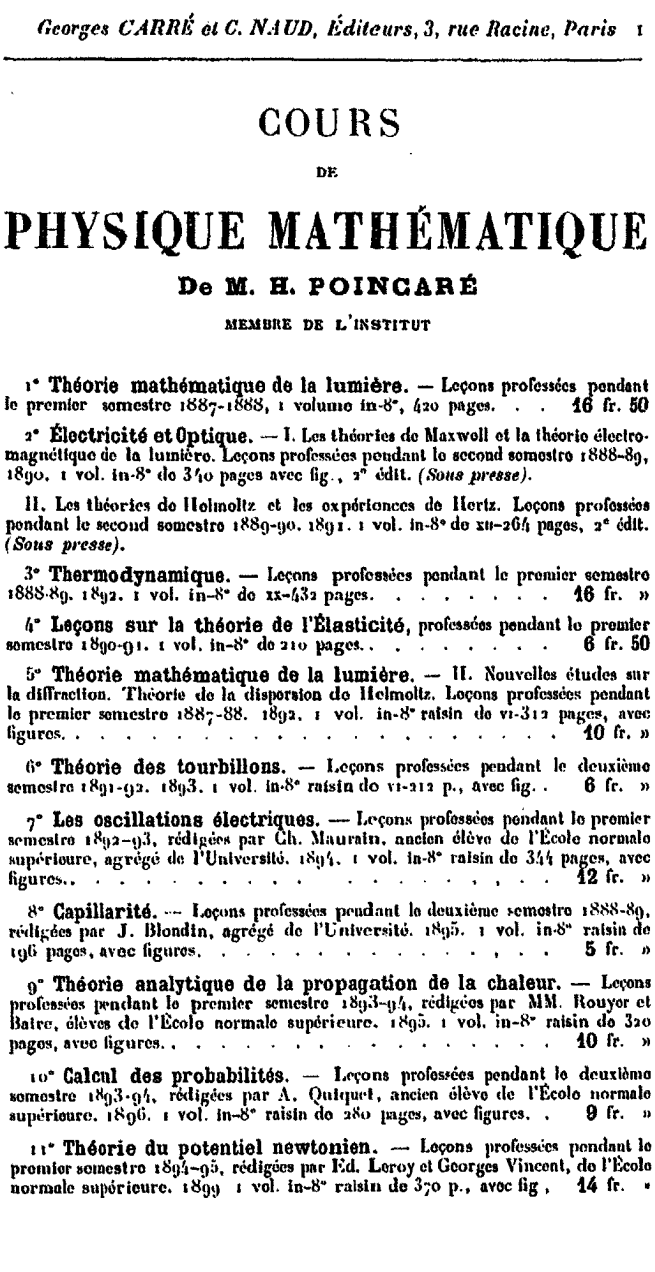
Un autre contributeur : les éditeurs. Excepté les deux premiers, presque tous les cours de physique mathématique paraissent chez la maison d'édition Carré et Naud jusqu'à *Figures d'équilibre d'une masse fluide* paru en 1902. L'éditeur spécialisé des manuels du niveau secondaire ou universitaire ès sciences, Carré et Naud publie des revues comme *L'éclairage électrique* et *Revue générale des sciences pures et appliquées*. Vers 1900, la plupart des cours de Poincaré et les deuxièmes éditions des textes précédents paraissent désormais chez Gauthier-Villars dans la collection « Cours et conférences de la Sorbonne ». Gauthier-Villars est l'un des éditeurs scientifiques les plus influents de l'époque : imprimerie et libraire d'institutions prestigieuses comme le Bureau des Longitudes ou l'Observatoire de Paris, la maison publie entre autres les *Comptes rendus hebdomadaires de l'Académie des sciences* depuis la création de cette revue par Arago en 1835 et, sous les auspices de la même Académie, les œuvres complètes de grands auteurs tels que Fermat, Laplace, Lagrange ou Cauchy. En 1900, la maison édite plus de 35 périodiques et son catalogue comptait 3 000 ouvrages où figurent les savants de renom comme Berthelot, Becquerel, Darboux, Bertrand, Boltzmann... et Poincaré [68].

Le rôle des éditeurs dans l'édition et la diffusion des cours était considérable. Le travail éditorial professionnel est décisif pour le registre d'un ouvrage : tandis que les livres édités par l'Association restaient souvent autographiés, non illisibles certes, mais pas tout à fait agréables à lire, les éditions prises en charge par Carré et Gauthier-Villars étaient toutes dactylographiées, correctement mises en forme, accompagnées des tables de matières et des index.

Quelle était la participation de Poincaré à cette entreprise ? « Poincaré corrigeait sans doute, dit Darboux, les épreuves de ces publications. En tout cas, il ajoutait fréquemment des préfaces pleines de sens et d'esprit, qui mériteront d'être toujours lues [69]. » Avec son emploi subtilement nuancé des deux mots « sans doute » et « en tout cas », Darboux nous laisse douter si Poincaré cor-

68. Sur Gauthier-Villars, voir H. W. Paul, *From Knowledge to Power*, pp. 252-254, 263 ; Valérie Tesnière (1985), « L'édition universitaire », in *Le temps des éditeurs. Du romantisme à la Belle Epoque*, sous la dir. d'Henri-Jean Martin et Roger Chartier, Paris : Fayard, t. 3 ; Ehrhardt, « Du cours magistral à l'entreprise éditoriale », pp. 127-128.

69. Darboux, « Eloge historique de Henri Poincaré », § VI ; § XXXIII



Georges CARRÉ et C. NAUD, Éditeurs, 3, rue Racine, Paris 1

COURS

DE

PHYSIQUE MATHÉMATIQUE

De M. H. POINCARÉ

MEMBRE DE L'INSTITUT

1° **Théorie mathématique de la lumière.** — Leçons professées pendant le premier semestre 1887-1888, 1 volume in-8°, 420 pages. . . **16 fr. 50**

2° **Électricité et Optique.** — I. Les théories de Maxwell et la théorie électromagnétique de la lumière. Leçons professées pendant le second semestre 1888-89, 1890. 1 vol. in-8° de 340 pages avec fig., 2° édit. *(Sous presse).*

II. Les théories de Helmoltz et les expériences de Hertz. Leçons professées pendant le second semestre 1889-90. 1891. 1 vol. in-8° de XII-264 pages, 2° édit. *(Sous presse).*

3° **Thermodynamique.** — Leçons professées pendant le premier semestre 1888-89. 1892. 1 vol. in-8° de IX-432 pages. . . . . **16 fr. »**

4° **Leçons sur la théorie de l'Élasticité,** professées pendant le premier semestre 1890-91. 1 vol. in-8° de 210 pages. . . . . **6 fr. 50**

5° **Théorie mathématique de la lumière.** — II. Nouvelles études sur la diffraction. Théorie de la dispersion de Helmoltz. Leçons professées pendant le premier semestre 1887-88. 1892. 1 vol. in-8° raisin de VI-312 pages, avec figures. . . . . **10 fr. »**

6° **Théorie des tourbillons.** — Leçons professées pendant le deuxième semestre 1891-92. 1893. 1 vol. in-8° raisin de VI-212 p., avec fig. . **6 fr. »**

7° **Les oscillations électriques.** — Leçons professées pendant le premier semestre 1892-93, rédigées par Ch. Maurain, ancien élève de l'École normale supérieure, agrégé de l'Université. 1894. 1 vol. in-8° raisin de 344 pages, avec figures. . . . . **12 fr. »**

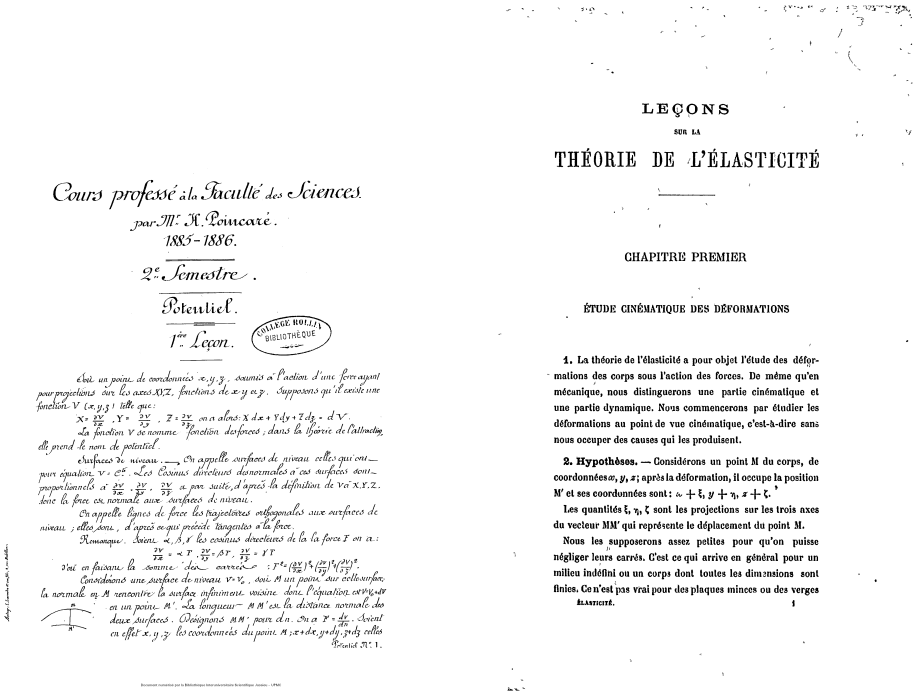
8° **Capillarité.** — Leçons professées pendant le deuxième semestre 1888-89, rédigées par J. Blondin, agrégé de l'Université. 1895. 1 vol. in-8° raisin de 196 pages, avec figures. . . . . **5 fr. »**

9° **Théorie analytique de la propagation de la chaleur.** — Leçons professées pendant le premier semestre 1893-94, rédigées par MM. Rouyer et Baire, élèves de l'École normale supérieure. 1895. 1 vol. in-8° raisin de 320 pages, avec figures. . . . . **10 fr. »**

10° **Calcul des probabilités.** — Leçons professées pendant le deuxième semestre 1893-94, rédigées par A. Quiquet, ancien élève de l'École normale supérieure. 1896. 1 vol. in-8° raisin de 280 pages, avec figures. . **9 fr. »**

11° **Théorie du potentiel newtonien.** — Leçons professées pendant le premier semestre 1894-95, rédigées par Ed. Leroy et Georges Vincent, de l'École normale supérieure. 1899 1 vol. in-8° raisin de 370 p., avec fig. **14 fr. »**

FIGURE 1 – Cours de physique mathématique de Poincaré publiés chez G. Carré et C. Naud



Cours professé à la Faculté des Sciences
par M. H. Poincaré.
1885-1886.

2e Semestre.

Potentiel.

1re Leçon.

LEÇONS
SUR LA
THÉORIE DE L'ÉLASTICITÉ

CHAPITRE PREMIER

ÉTUDE CINÉMATIQUE DES DÉFORMATIONS

1. La théorie de l'élasticité a pour objet l'étude des déformations des corps sous l'action des forces. De même qu'en mécanique, nous distinguerons une partie cinématique et une partie dynamique. Nous commencerons par étudier les déformations au point de vue cinématique, c'est-à-dire sans nous occuper des causes qui les produisent.

2. Hypothèses. — Considérons un point M du corps, de coordonnées x, y, z; après la déformation, il occupe la position M' et ses coordonnées sont : $x+\xi$, $y+\eta$, $z+\zeta$.

Les quantités ξ, η, ζ sont les projections sur les trois axes du vecteur MM' qui représente le déplacement du point M.

Nous les supposerons assez petites pour qu'on puisse négliger leurs carrés. C'est ce qui arrive en général pour un milieu indéfini ou un corps dont toutes les dimensions sont finies. Ce n'est pas vrai pour des plaques minces ou des verges

ÉLASTICITÉ. 1

FIGURE 2 – A gauche, extrait de *Cours de potentiel* publié par l'Association ; à droite, *Cours de théorie de l'élasticité*, publié chez G. Carré et C. Naud

rigeait réellement les notes prises par ses auditeurs. Il parait bien que son rôle dans la production des textes se bornait au choix d'éditeur et à la relecture et à l'approbation des épreuves, mais même ceci n'était pas si fréquent [70]. Et Appell d'affirmer le doute :

> Cette publication est un monument élevé à la science française. Elle a été faite avec l'autorisation d'Henri Poincaré, mais sans son concours. Poincaré considérait sa tâche comme terminée quand il avait libéralement donné ses idées à ses auditeurs ; c'était leur affaire si bon leur semblait ; exemple admirable de désintéressement scientifique [71] !

Il convient donc de dire que les élèves et auditeurs s'occupent entièrement de composer et d'établir les textes, mettant ainsi en « œuvre » au sens littéral du terme les leçons orales du maître. Ils effectuent alors un travail éditorial

70. Le procès-verbal du comité du 28 février 1899 nous apprend que l'Association reçut l'offre, de la part de l'éditeur Carré et Naud, d'une nouvelle édition de *Cinématique*, cours professé à l'année 1885–1886 et publié en 1886 par l'Association. La proposition fut adoptée à l'unanimité (*Annuaire*, Année 1899–1900, 5). Le comité se chargea alors d'une nouvelle composition, au cours de laquelle, pour une raison inconnue, l'Association décida de publier elle-même au lieu de confier à la maison Carré et Naud. Or, à la séance du 17 avril, une lettre de Poincaré adressée à l'Association fut lue : « M. Poincaré exprime le désir que l'on garde comme éditeurs, pour son ouvrage en cours de publication, MM. Carré et Naud. » (*Ibidem*). Conformément au désir de l'auteur, la seconde édition de *Cinématique* fut publié chez Carré et Naud.

71. Appell, *Henri Poincaré*, pp. 36-37. Signalons tout de même qu'il arrive à Poincaré de lire des épreuves avant de rédiger ses préfaces. Tels sont les cas de *Thermodynamique* et d'*Electricité et optique*. Voir *infra*.

considérable qui dépassait largement une simple dictée, travail qui nécessite rédacteurs ou éditeurs scientifiques, parfois même collaborateurs ou coauteurs. Tel est, en particulier, le cas de J. Blondin : il réalise la rédaction de quatre cours, dont on citera notamment *Thermodynamique*, et compose lui-même tout un chapitre pour la seconde édition d'*Electricité et optique*. Son travail pour ce dernier ouvrage lui vaudra une reconnaissance de la part de son maître :

> Sa tâche a été cette fois plus difficile. La science a marché avec une rapidité que rien ne permettait de prévoir au moment où j'ai ouvert ce cours. Depuis cette époque la théorie de Maxwell a reçu, d'une manière éclatante, la confirmation expérimentale qui lui manquait. Je n'avais pu exposer dans mes *Leçons* que les premières expériences de Rontgen [*sic*] et de Hertz, auxquelles les conquêtes plus récentes et plus complètes de ce dernier savant ont enlevé beaucoup d'intérêt. M. Blondin a donc dû remanier et étendre considérablement cette partie du cours.
>
> Le chapitre XIII où sont exposées ces diverses tentatives de vérification expérimentale, est entièrement son œuvre personnelle [72].

Les leçons en question ont été professées en 1888 pendant le second semestre d'été, et publiées en 1890. Ceci dit, en l'espace de moins de deux ans, la théorie a changé d'allure, passée d'une hypothèse qui attend la vérification à une théorie désormais confirmée par l'expérience. Une « science qui se fait » donne lieu à un livre qui se fait : la construction même du livre reflète l'état de cette science en temps quasiment réel de son évolution. Si l'on se tourne vers le Poincaré à la chaire de mécanique céleste, force est de constater un ralentissement du rythme d'enseignement et, par conséquent, une baisse significative de la publication de cours. La mécanique céleste est une science faite, voire accomplie, son sommet étant atteint par la publication des *Méthodes nouvelles* en 1899. Poincaré prend charge de la rédaction de ses cours, et d'où sortent les deux premiers volumes des *Leçons de mécanique céleste*, rédigés par lui-même. Un autre exemple : « Cours d'astronomie générale », avec un supplément intitulé « Mécanique céleste ». C'est une note de cours exceptionnellement professé à l'Ecole polytechnique de 1904 à 1908, relativement « élémentaire » et « classique » par rapport à son enseignement à la Sorbonne, avec un exposé plus clair, puisqu'il s'agit des théories classiques et déjà bien établies, pas en plein de développement comme la physique [73].

72. Préface, Henri Poincaré (1890a), *Electricité et optique*, Paris : G. Carré ; professées pendant le second semestre 1888, p. XVIII.

73. Goroff, « Henri Poincaré and the birth of chaos theory », p. I 15.

Caractères des cours écrits

Les cours de physique mathématique de Poincaré font légende. Une fois publiés, ils sont appréciés, maintes fois cités et commentés, suscitant un retentissement considérable et marquant toute une génération de mathématiciens et de physiciens français.

> Tous les jeunes gens de ma génération qui s'intéressaient à la Physique mathématique (il y en avait assez peu) se sont nourris des livres de Henri Poincaré. L'enseignement de la Physique mathématique à la Sorbonne étant alors un peu vieilli, Paul Langevin n'ayant jamais publié ses beaux cours du Collège de France, c'est dans les livres de Poincaré que nous pouvions trouver, exposées sous une forme parfaite, les récentes théories de la Physique et cette lecture était de celles dont, bien des années plus tard, on ressent encore des bienfaits [74].

Tout comme les cours de Poincaré est l'antipode de l'image du cours magistral, dogmatique, autoritaire, répétitif et clos sur lui-même, les livres qui en sont tirés ne ressemblent pas aux autres manuels universitaires. Vu son mode de production, c'est un travail collectif en quelque sorte, construit par divers acteurs, contenant des parties hétérogènes et renvois à d'autres ouvrages et d'autres textes, tout en résistant à l'idée même de l'unité entre l'auteur et le livre.

On peut dire que les rédacteurs qualifiés et les éditeurs de renom nous assurent suffisamment de la qualité des rédactions et de leur authenticité. Or, tant qu'elles ne sont pas « écrites », ni même relues ou retravaillées, par l'auteur lui-même, la question se pose toujours : n'y aurait-il pas une différence entre cours professés, transcrits et enfin publiés ? Les cours écrits ne « trahiraient »-ils pas, tant soit peu, les idées de l'auteur ? En effet, il lui est arrivé que les rédactions contrarient ses intentions.

> En relisant mes épreuves, je suis un peu effrayé de la longueur du Chapitre où je traite des machines à vapeur. Je crains que le lecteur, en voyant le nombre des pages que j'y consacre, ne s'attende à trouver une théorie complète et satisfaisante et qu'il ne me sache ensuite mauvais gré de sa déception.
> Une pareille théorie n'est pas près d'être faite je n'ai même pas la compétence nécessaire pour exposer l'état actuel de la question. J'ai voulu seulement montrer par un exemple quel usage on doit faire du théorème de Clausius ; j'ai voulu faire voir également quelle

74. Louis de Broglie (2012), « Discours du Prince Louis de Broglie », *Bulletin de la Sabix. Société des amis de la Bibliothèque et de l'Histoire de l'École polytechnique*, 51, repris de l'allocution faite en 1954, p. 73.

> est la complexité de ces sortes de problèmes et à quelles erreurs on s'expose quand on veut la méconnaître [75].

Ce mode d'écriture, très particulier il est vrai, n'était pas à l'abri des critiques. Pierre Duhem reproche au mathématicien d'avoir laissé « ses auditeurs livrer à la publicité des recherches à peine écloses et toutes chaudes encore de l'improvisation », et de ne pas avoir consacré « sa puissante intelligence à poser sur des bases solides des principes de la théorie de la lumière et à en dérouler méthodiquement les conséquences [76] ». Même si, aux dires de l'astronome américain **Forest Ray Moulton**, ces cours constituent une contribution remarquable à la science, ils ne sont pas exempts de défauts, dus principalement à ce qu'ils ne sont pas pris en charge par l'auteur lui-même.

> Cela ne doit pas être pris pour une remarque sur les éditeurs de ces œuvres précieuses, mais signifie seulement que les cours souffrent en comparaison avec les mémoires achevés [77].

Le manque de clarté et de cohérence des cours rédigés en seconde main ne serait flagrant que quand on les compare avec les mémoires directement écrits par le savant sur le même sujet :

> Un grand nombre de résultats que Henri Poincaré a développés dans ses Mémoires [...] ont été reproduits dans les Ouvrages classiques où ses enseignements ont été recueillis tels que « Théorie du potentiel newtonien », « Théorie analytique de la propagation de la chaleur », « Les oscillations électriques » etc., mais dans le texte même des Mémoires originaux, on en apercevra mieux les détails et l'enchaînement [78].

Ce qu'on voit dans les cours écrits de Poincaré, c'est un savant à l'œuvre : suivant tout près l'actualité des sciences qui ne cessent d'évoluer, il professe les premières idées qui viennent à l'esprit de ses travaux à peine ou pas encore terminés, non pas toujours longuement réfléchies ou méditées, mais sujettes au développement ultérieur. Si les premières intuitions qui restent intactes, elles sont raffinées au cours du temps et revêtues d'une autre expression. Il serait

75. Henri Poincaré (1892b), *Thermodynamique. Cours de physique mathématique*, Paris : Gauthier-Villars ; seconde édition revue et corrigée, 1908, p. XVI.

76. *Revue des questions scientifiques* 33 (1893), p. 257–265. Passage cité in H. W. Paul, *From Knowledge to Power*, p. 266. La critique vise au deuxième volume de *Théorie mathématique de la lumière*. Il faut pourtant nuancer cette critique, nous signale H. Paul, compte tenu de l'opposition sur le plan épistémologique entre deux savants. En effet, sur le plan scientifique, Duhem était opposant virulent de la tendance « mathématicienne » de la physique, ce qui l'opposa à Poincaré et bien d'autres physiciens et mathématiciens de l'époque. Pour Duhem, le défaut principal de l'ouvrage en question réside dans l'« abus » des mathématiques pour expliquer le phénomène physique. Par rapport à quoi d'autres imperfections seraient plutôt mineures.

77. Forest Ray Moulton (1912), « M. Henri Poincaré », *Popular Astronomy*, 22, 10, p. 624.

78. Louis de Broglie, Préface pour le tome IX in *Œuvres*, p. IX.

alors vain de chercher dans ces cours une idée fixe, et, *a fortiori*, une « théorie d'ensemble » toute faite.

Les préfaces constituent l'un des points les plus marquants de ces publications. Si Poincaré préfère, une fois les cours terminés, les laisser tels qu'ils étaient enseignés, ou, mieux, perçus par ses élèves-rédacteurs, c'est à lui de rédiger lui-même les préfaces. Il ne craint guère, par son goût pour la nouveauté et les paradoxes, de présenter dans ses cours des théories récentes, souvent prématurées et insuffisantes, et les préfaces lui servent à la fois de synthèse et de conclusion générale de ces théories, où s'exposent plus librement ses opinions et ses réflexions philosophiques [79]. Plus le sujet est à « l'ordre du jour », plus il raisonne intensément et plus la préface est détaillée et travaillée. Tels sont les cas de *Thermodynamique* (20 pages) ou de deux volumes d'*Electricité et optique* (20 pages et 12 pages respectivement), deux domaines qui sont tous deux en pleine mutation et font l'objet de vives discussions à l'époque. Il n'en est pas de même pour les cours de mécanique céleste : ils ne disposent pas de préface. L'unique exception est faite à *Leçons de mécanique céleste*, mais la préface de ce livre se contente de résumer le livre qu'elle précède. Tout se passe comme si la mécanique céleste ne laissait peu ou prou à réfléchir puisque « déjà faite », contrairement à la physique mathématique, puisque « en train de se faire ». Ceci se manifeste dans les préfaces, aussi bien que dans les styles d'enseignement.

« Mise au point » des *Leçons*

Revenant maintenant aux *Leçons*, on retrouve les traits qui caractérisent ses ouvrages d'enseignements. La qualité de la rédaction des *Leçons* a été particulièrement appréciée [80]. Le rédacteur, **Henri Vergne**, était ingénieur des Arts et Manufactures. Il avait soutenu, en 1909, une thèse de physique mathématique, intitulée « Contribution à la théorie des ondes liquides », devant un jury composé de P. Appell, J. Boussinesq et E. Picard. La thèse a été dédiée à ces deux derniers savants. Sans être « disciple » proprement dit de Poincaré, Vergne était pourtant auditeur assidu des cours du mathématicien pendant plusieurs années ; il avait déjà rédigé le cours de 1906 évoqué plus haut, « Limites de la loi de Newton ». A la publication de ce dernier texte en 1953, Jean Chazy rappellera aux lecteurs que « Henri Vergne avait fait lui-même du cours

79. Olivier Darrigol (2007), « Diversité et harmonie dans la physique mathématique dans les préfaces de Henri Poincaré », in *Pour comprendre le XIXe. Histoire et philosophie des sciences à la fin du siècle*, sous la dir. de Jean-Claude Pont *et al.*, Firenze : Léo S. Olschki Editore.

80. « It should be added that the work of editing the lectures has been done very satisfactorily by Dr. Vergne » (Anonyme, « Cosmogonies, Old and New », p. vii).

de l'année 1910–1911, une mise au point qui, revue par Poincaré, a été publiée, et est illustre sous le nom de *Leçons sur les hypothèses cosmogoniques*[81] ».

Qu'est-ce qu'une « mise au point » ? Mettre au point, c'est ajuster l'image d'un appareil optique en photographie. C'est aussi, en sculpture en particulier, dégrossir le matériau d'une statue d'après le plâtre pour que le sculpteur n'ait plus qu'à lui donner le fini et l'expression. D'après le dictionnaire Littré, il existait au XIXe siècle un métier - « metteur au point » - pour un tel travail dans des ateliers de sculpture : travail à part entière, non négligeable en tout cas, pour l'achèvement d'une œuvre.

En effet, Vergne a effectué un travail éditorial considérable : il a ajouté l'index des noms et la table des matières détaillée, qui fournit un précis de tous les chapitres et les sections, ains que les notes de renvois aux pages correspondantes à l'intérieur du livre ou à d'autres références, d'une précision irréprochable... Ce qui aurait été, pendant le cours, un simple rappel (« au cours précédent, j'ai parlé de... » ou « on a déjà discuté de... ») devient : « Nous sommes donc en présence d'une question analogue *à celle qui a été étudiée au Chapitre précédent (n° 64, p. 75)*[82] » ; « Nous avons *déjà signalé* ce point, à propos de l'hypothèse de Kant (Ch. I, n° 1, p. 2)[83]. » De plus, le lecteur bénéficie des « *infra* », c'est-à-dire renvois aux pages qui viennent après, ce qui n'aurait certainement pas été disponible aux auditeurs, compte tenu de la tendance improvisatrice du Poincaré enseignant : « Ce fait est à comparer au suivant que nous rencontrerons au Chapitre prochain [...] Nous aurons plus loin (Ch. VIII, n° 168) l'occasion de constater un autre paradoxe du même genre[84] » ; « Nous verrons un peu plus loin (n° 163)[85] ». En somme, on peut dire que, vu sa facture formelle, *Leçons* est l'un des complets parmi les livres d'enseignement de Poincaré.

Leçons a aussi ceci de particulier qu'il est publié, pour la première fois dans la bibliographie poincaréenne, chez la Librairie scientifique Hermann et fils. Fondée en 1876 et restée modeste jusqu'à la fin du XIXe siècle, la maison d'édition Hermann devient, dès le début du siècle suivant, l'unique concurrent de Gauthier-Villars dans l'édition scientifique en France[86]. La maison a dans son catalogue les revues scientifiques réputées comme *Acta mathema-*

81. Jean Chazy, Introduction in Henri Poincaré (1953), « Les limites de la loi de Newton », *Bulletin astronomique, Série I*, 17, p. 121. Sur ce cours et aussi Vergne, Scott Walter (2014a), « Poincaré on Clocks in Motion », *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 47, p. 134, note 7.

82. *Leçons*, p. 88. Mes soulignements.

83. *Leçons*, p. 90, note 1. Mes soulignements.

84. *Leçons*, p. 95, note 1.

85. *Leçons*, p. 209, note 1.

86. Tesnière, « L'édition universitaire » ; Elisabeth Parinet (2004), *Une histoire de l'édition à l'époque contemporaine. XIXe-XXe siècle*, Paris : Editions du Seuil, p. 230.

COURS DE LA FACULTÉ DES SCIENCES DE PARIS

LEÇONS

SUR LES

HYPOTHÈSES COSMOGONIQUES

PROFESSÉES A LA SORBONNE

PAR

H. POINCARÉ

MEMBRE DE L'ACADÉMIE FRANÇAISE ET DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES

Rédigées par **Henri VERGNE**,
Ingénieur des Arts et Manufactures, Docteur ès sciences mathématiques

PARIS
LIBRAIRIE SCIENTIFIQUE A. HERMANN ET FILS
LIBRAIRES DE S. M. LE ROI DE SUÈDE
6, RUE DE LA SORBONNE, 6

1911

FIGURE 3 – Couverture de la première édition des *Leçons*

LIBRAIRIE SCIENTIFIQUE HERMANN & Cie
6, rue de la Sorbonne, PARIS (Ve)

ANDOYER. — **Cours d'Astronomie.** T. I. Astronomie théorique..... 63 fr.
— — — II. Astronomie pratique..... 56 fr.
— — — III. Astrophysique par J. Bosler. 140 fr.
— **Tables logarithmiques à 13 décimales**..... 16 fr.
BOREL. — **Théorie des probabilités**..... 30 fr.
CAHEN. — **Théorie des nombres.** Tome I..... 60 fr.
— — — II..... 100 fr.
CARTAN. — **Leçons sur les invariants intégraux**..... 35 fr.
COSSERAT. — **Théorie des corps déformables**..... 25 fr.
DARBOUX. — **Sur une classe remarquable de courbes**..... 50 fr.
DELASSUS. — **Leçons sur la dynamique**..... 30 fr.
DRUMAUX. — **L'évidence de la théorie d'Einstein**..... 8 fr. 50
DU PASQUIER. — **Le calcul des probabilités**..... 49 fr.
— **L. Euler et ses amis**..... 22 fr.
FABRY. — **Nouveau traité de mathématiques générales.** Tome I. 42 fr.
— — — II. 56 fr.
FITZ PATRICK. — **Exercices d'arithmétique**..... 50 fr.
FRODA. — **Sur la distribution des propriétés de voisinage des fonctions de variables réelles**..... 25 fr.
GAUSS. — **Recherches arithmétiques**..... 70 fr.
GODEAUX. — **La géométrie**..... 15 fr.
— **Leçons de géométrie projective**..... 45 fr.
GOURSAT. — **Leçons sur le problème de Pfaff**..... 60 fr.
HADAMARD. — **Cours d'analyse.** Tome I..... 100 fr.
— — — II..... 140 fr.
— **Leçons sur le calcul des variations.** Tome I..... 70 fr.
— **Leçons sur le problème de Cauchy et le cas hyperbolique des équations linéaires aux dérivées partielles**.. 100 fr.
HILBERT. — **Théorie des corps de nombres algébriques**..... 140 fr.
HENRY (A.). — **Le calcul des différences finies et ses applications**..... 50 fr.
MACH. — **La mécanique**..... 60 fr.
MIE. — **Principes de la théorie Einsteinienne et de la gravitation**..... 10 fr.
MONTESSUS DE BALLORE (DE). — **Probabilités et statistiques**.. 60 fr.
OLTRAMARE. — **Leçons sur le calcul de la généralisation**..... 20 fr.
POINCARÉ. — **Sur les hypothèses cosmogoniques**..... 50 fr.
POTRON. — **Exercices de calcul différentiel et intégral.** Tome I. 50 fr.
— — — II. 35 fr.
RICHARD. — **La gamme**..... 28 fr.
ROMANE. — **Le problème de Fermat et l'idéal concret**..... 15 fr.
ROUSE BALL. — **Récréations mathématiques** (3 vol.) chacun..... 20 fr.
— **Histoire des Mathématiques.** Tome I..... 40 fr.
SOMMER. — **Introduction à la théorie des nombres algébriques.** 50 fr.
TANNENBERG. — **Leçons sur les applications géométriques du calcul différentiel**..... 20 fr.
TANNERY. — **Introduction à la théorie des fonctions d'une variable.** Tome I..... 55 fr.
— II..... 60 fr.
VOLTERRA. — **Leçons sur l'intégration des équations différentielles aux dérivées partielles**..... 25 fr.
WRONSKI. — **Œuvres mathématiques** (4 vol.)..... 700 fr.

Librairie A. HERMANN, 6, place de la Sorbonne. PARIS

POINCARÉ (Henri), Membre de l'Académie française et de l'Académie des sciences. — **Leçons sur les hypothèses cosmogoniques** professées à la Sorbonne, rédigées par H. Vergne, docteur ès sciences, 2e édition précédée d'une notice sur l'œuvre de Henri Poincaré par Ernest Lebon, avec portrait de M. Poincaré en héliogravure. Gr. in-8° de LXV-290 pages, avec 43 figures, 1913 . . . 12 francs

TABLE DES MATIÈRES. — Préface. CHAP. I. *Hypothèse de Kant.* — CHAP. II. *Hypothèse de Laplace.* — CHAP. III. *Analyse de l'hypothèse de Laplace. Travaux de Roche. Etude de la stabilité d'un anneau. Formation des satellites.* — CHAP. IV. *Hypothèse de H. Faye.* — CHAP. V. *Hypothèse de M. du Ligondès.* — CHAP. VI. *Hypothèse de M. See.* — CHAP. VII. *Théorie de sir G. H. Darwin.* — CHAP. VIII. *Sur l'origine de la chaleur solaire et de la chaleur terrestre.* — CHAP. IX. *Théorie de Sir Norman Lockyer.* — CHAP. X. *Théorie de M. Schuster.* — CHAP. XI. *Théorie de M. Arrhenius.* — CHAP. XII. *La voie lactée et la théorie des gaz.* — CHAP. XIII. *Formation des nébuleuses spirales d'après M. See.* — CHAP. XIV. *Hypothèse de M. E. Belot.*

POINCARÉ (Henri). **L'Œuvre d'Henri Poincaré,** par Brunschwicg, Hadamard, Lebeuf, Langevin. Gr. in-8°, 120 pages, avec 2 port. . . . . 4 francs.

ARRHENIUS (Svante), Correspondant de l'Institut de France, Directeur de l'Institut Nobel (Stockholm). — **Les atmosphères des planètes.** Conférences faites le 8 mars 1911. Paris, 1912, in-8°, 11 pages, 2 pl., ... 1 franc.

DUHEM (P.), Membre de l'Académie des Sciences, Professeur à la Faculté des Sciences de Bordeaux. — **Études sur Léonard de Vinci.** 3 beaux volumes in-8° raisin (17 × 25). Première série, 1906, VII-350 pages.

I. Albert de Saxe et Léonard de Vinci. — II. Léonard de Vinci et Villapand. — III. Léonard de Vinci et Bernardino Baldi. — IV. Bernardino Baldi, Roberval et Descartes. — V. Thémon le fils du juif et Léonard de Vinci. — VI. Léonard de Vinci, Cardan et Bernard Palissy. — VII. La Science de ponderibus et Léonard de Vinci. — VIII. Albert de Saxe.

Seconde série. 1909, IV-475 pages.

IX. Léonard de Vinci et les deux infinis. — X. Léonard de Vinci et la pluralité des mondes. — XI. Nicolas de Cues et Léonard de Vinci. — Léonard de Vinci et les origines de la Géologie.

Troisième Série. 1913. Les précurseurs parisiens de Galilée, gr. in-8° de XIV-610 pages. . . . . 20 francs.

Les trois volumes. . . . . 50 francs.

DUHEM. Le Système du Monde. *Histoire des doctrines cosmologiques de Platon à Copernic.* Tome premier. — Un fort volume in-8° raisin de 550 pages, sur papier vergé fort . . . . . 18 fr. 50

Il a été livré en outre, sur papier de Hollande de Van Gelder, cent exemplaires dont cinquante seront mis en vente au prix de . . . . . 25 francs.

BOUTROUX (Pierre), professeur à l'Université de Poitiers. — **Les principes de l'analyse mathématique,** exposé historique et critique. Tome I. Les nombres. — Les grandeurs. — Les figures. — Le calcul combinatoire. — Le calcul algébrique. — Calcul des fonctions. — L'algèbre géométrique. Grand in-8° de 550 pages. 1913 . . . . . 14 francs.

BURALI-FORTI et **MARCOLONGO** (Traduit de l'italien par P. Baridon), docteur ès sciences mathématiques. **Analyse vectorielle générale.**

I. Transformations linéaires. 1912, in-8°, préface XIX pages, 179 pages. 6 francs.
II. Applications à la mécanique et à la physique. Pavie, 1913. in-8°, préface XII pages, 143 pages . . . . . 5 francs.

ROUSE BALL (W.), Fellow and Tutor of Trinity College Cambridge. **Histoire des Mathématiques.** Édition française originale revue et augmentée, traduite sur la troisième édition anglaise. 2 beaux volumes gr. in-8° se vendant séparément. Tome premier : Les mathématiques dans l'antiquité. L'Ecole byzantine. Les mathématiques au Moyen Age et pendant la Renaissance. Les mathématiques chez les Arabes. Les mathématiques modernes de Descartes à Huyghens. Grand in-8° de 400 pages, avec nombreuses figures . . . . . 12 francs.

Tome second : Les mathématiques modernes depuis Newton jusqu'à nos jours (avec addition de M. R. de Montessus). Note complémentaire de M. G. Darboux. Grand in-8° de VII-275 pages. . . . . 8 francs.

ROUSE BALL (W.), Fellow and Tutor of Trinity college, Cambridge. — **Récréations mathématiques et problèmes des temps anciens et modernes.** 2e édition française entièrement refondue. 3 volumes in-8°, chaque . . . . . 5 francs.

FIGURE 4 – Ouvrages édités chez Hermann, d'après le catalogue de 1913 et celui de 1914. *Leçons* figure dans les deux catalogues : la première édition de 1911 dans le catalogue de 1913 et la seconde de 1913 dans celui de 1914. Le prix est passé de 50 francs à 12 francs.

tica, les « classiques » de grands auteurs comme (Legendre, Carnot...), et les cours de mathématiques ou de physiques des Facultés (Hermite, Hadamard, Appell, Painlevé, Borel, Andoyer...), et, entre autres, les livres de Duhem. Si Gauthier-Villars se spécialise en sciences mathématiques (mathématiques pures, astronomie et physique mathématique), la spécialité de Hermann s'étend aux sciences physiques (physique, chimie, géologie), mais c'est surtout à l'histoire des sciences qu'elle doit sa réputation, éditant *L'évolution de la mécanique* de Duhem (1903) ou *La mécanique* d'Ernst Mach (traduction française parue en 1904).

Comment peut-on expliquer ce choix d'éditeur ?

Entre les soussignés :
Monsieur Henri Poincaré, Membre de l'Académie Française et de l'Académie des Sciences, d'une part,
et Messieurs A. Hermann et Fils, Editeurs, rue de la Sorbonne 6, à Paris, d'autre part, il a été convenu ce qui suit :
MM. Hermann et Fils s'engagent à éditer à leurs frais le cours professé par Monsieur Poincaré pendant le premier Semestre de l'année 1910-1911,
intitulé
Hypothèses cosmogoniques
Leçons professées à la Faculté des Sciences de Paris pendant le 1er semestre 1910-1911.

L'ouvrage sera rédigé par Monsieur Henri Vergne, Docteur dès Sciences mathématiques.

Il sera mis en vente douze cents exemplaires, et Monsieur Poincaré recevra quinze pour cent de droits d'auteur, calculés d'après le prix fort de l'ouvrage. Les règlements de compte auront lieu chaque année en Janvier.

Monsieur Poincaré recevra en outre gratuitement quarante exemplaires.

Si une nouvelle édition de l'ouvrage devenait nécessaire, les mêmes conditions subsisteraient, et l'ouvrage serait réédité chez les mêmes éditeurs.

L'ouvrage [pourra être] traduit en langue étrangère sans l'autorisation de Messieurs Hermann, et dans ce cas la somme provenant de la vente du droit de traduction sera partagée également entre l'Auteur et les Editeurs.

Fait en double à Paris le Quatre Mars Mille neuf cent onze.

Le contrat de publication est signé le 4 mars 1911, c'est-à-dire peu de temps après la fin du cours. Il est conclu à peu près dans les mêmes conditions que chez d'autres éditeurs de livres d'enseignement, peut-être sauf l'indication du nom du rédacteur, Henri Vergne.

Entre les soussignés:

Monsieur Henri Poincaré, Membre de l'Académie Française et de l'Académie des Sciences, d'une part,

et Messieurs A. Hermann et Fils, Editeurs, rue de la Sorbonne 6, à Paris, d'autre part, il a été convenu ce qui suit:

MM. Hermann et Fils s'engagent à éditer à leurs frais le cours professé par Monsieur Poincaré pendant le premier Semestre de l'année 1910-1911, intitulé

Hypothèses cosmogoniques
Leçons professées à la Faculté des Sciences de Paris pendant le 1er semestre 1910-1911.

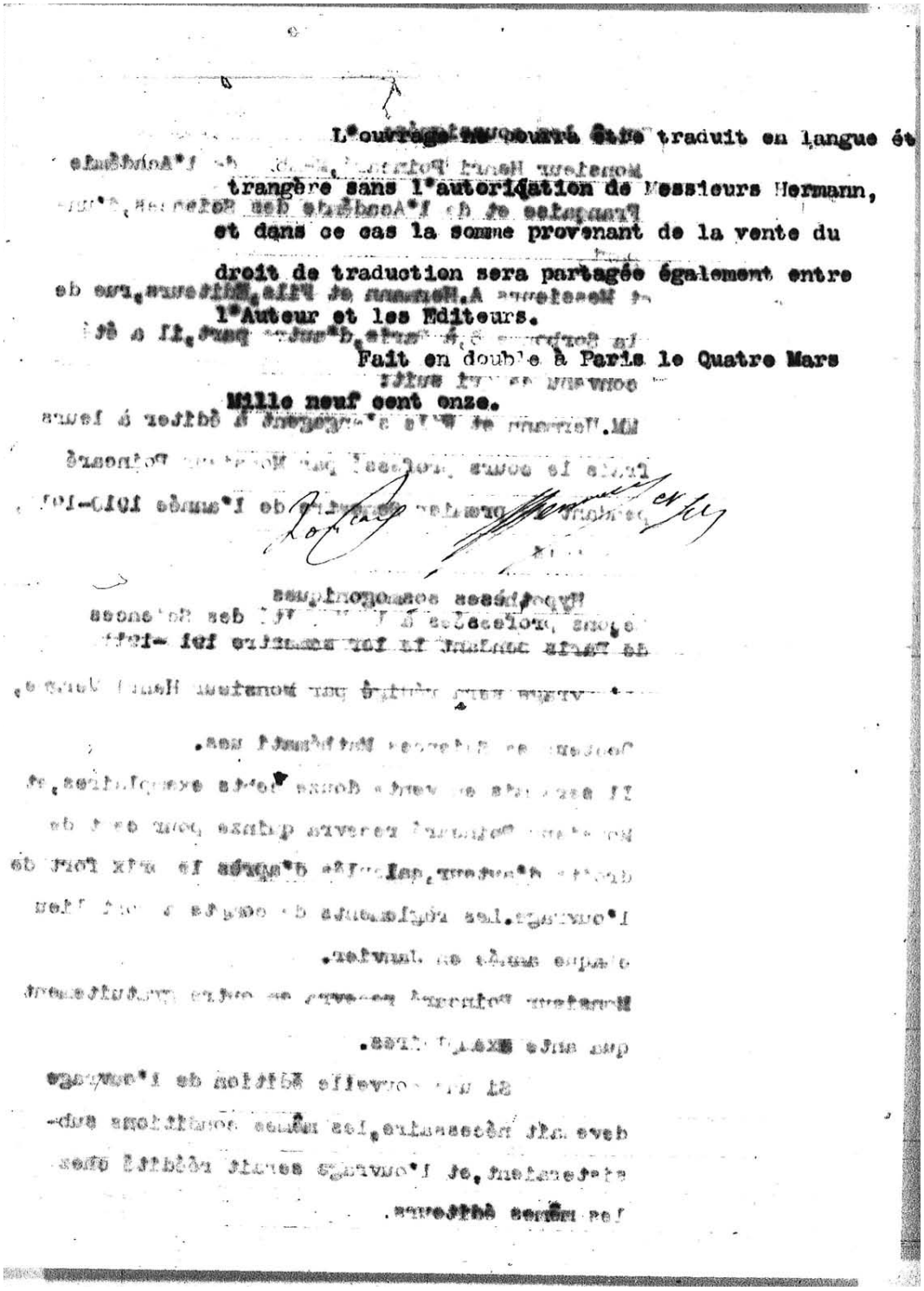
L'ouvrage sera rédigé par Monsieur Henri Vergne, Docteur es Sciences Mathématiques.

Il sera mis en vente douze cents exemplaires, et Monsieur Poincaré recevra quinze pour cent de droits d'auteur, calculés d'après le prix fort de l'ouvrage. Les règlements de compte auront lieu chaque année en Janvier.

Monsieur Poincaré recevra en outre gratuitement quarante exemplaires.

Si une nouvelle édition de l'ouvrage devenait nécessaire, les mêmes conditions subsisteraient, et l'ouvrage serait réédité chez les mêmes éditeurs.

La seconde édition tirée à 1800 exemplaires 1912 paraît après la dernière [illegible]



L'ouvrage ne pourra être traduit en langue étrangère sans l'autorisation de Messieurs Hermann, et dans ce cas la somme provenant de la vente du droit de traduction sera partagée également entre l'Auteur et les Editeurs.

Fait en double à Paris le Quatre Mars Mille neuf cent onze.

FIGURE 5 – Le contrat recto verso de la première édition des *Leçons*. Document : Laboratoire d'histoire des sciences et de philosophie - Archives Henri Poincaré (communiqué par L. Rollet)

2.3 Réception

L'« unique exemple dans le monde mathématique ». Deux éditions

Les cours de Poincaré sont légendaires à ses contemporains, surtout à ses collègues. Il est intéressant de constater que *Leçons* a attiré un lectorat nettement plus large que *Thermodynamique* ou *Méthodes nouvelles*. Un an après sa première parution en octobre 1911, *Leçons* a fait l'objet d'un nouveau tirage. Lebon s'en est chargé et a confié la relecture et la correction à Vergne, désormais répétiteur à l'Ecole centrale. La parution, prévue au courant de l'année 1912, a été retardée, probablement dû à la mort de Poincaré survenue entretemps. La seconde et dernière édition a vu le jour en 1913, précédée d'une notice inédite sur la vie et les travaux scientifiques de l'auteur regretté, ainsi qu'un avertissement, tous deux rédigés par Lebon [87].

> Cette *seconde édition* n'est pas un simple second tirage de la première : elle a été de nouveau *composée* et, tout en respectant scrupuleusement le texte que Henri Poincaré avait approuvé, elle a été relue par M. H. Vergne qui a corrigé quelques légères fautes d'impression qui s'étaient glissées dans la première. Henri Poincaré m'avait chargé de donner le bon à tirer de cette nouvelle édition.
>
> Je croirais manquer à mon devoir si je ne remerciais ici MM. A. Hermann et Fils d'avoir bien voulu faire précéder l'Ouvrage si soigné qu'ils éditent d'un beau Portrait en héliogravure et d'une *Notice sur* Henri Poincaré.
>
> Janvier 1913.
>
> Er L.

Une nouvelle composition s'imposait-elle ? Contrairement à ce que dit Lebon, la nouvelle édition ne comporte aucune modification significative de contenus. Les « quelques légères fautes » ont été corrigées, l'errata de l'édition précédente ayant été pris en compte, mais il s'agit soit d'erreurs mineures [88], soit d'une faute d'orthographe [89], mais aucune d'elles ne nécessitant à elles seules une composition toute nouvelle. Ce n'était donc pas une nouvelle édition, mais un nouveau tirage qui s'est imposé.

87. *Leçons*, Avertissement pour la seconde édition de 1913.
88. Errata de la première édition contient seulement deux notices :

    Page 95 note (1) : au lieu de : (Ch. VIII, n° 171), lire : (Ch. VIII, n° 168)

    Page 262, ligne 14 : au lieu de $\frac{16}{1000}$, lire $\frac{1}{16000}$

89. A la Préface de la première édition, lit-on : « protéburances solaires » (*Leçons*, p. XIII). Cette faute sera corrigée dans la seconde édition : « protubérances solaires » (*Leçons*, p. LXIII).

COURS DE LA FACULTÉ DES SCIENCES DE PARIS

LEÇONS

SUR LES

HYPOTHÈSES COSMOGONIQUES

PROFESSÉES A LA SORBONNE

PAR

HENRI POINCARÉ

MEMBRE DE L'ACADÉMIE FRANÇAISE ET DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES

Rédigées par Henri VERGNE,

Docteur ès sciences mathématiques, Répétiteur de Mécanique à l'Ecole Centrale

SECONDE ÉDITION

avec un Portrait en héliogravure

et une Notice sur Henri Poincaré

Par Ernest LEBON

PARIS

LIBRAIRIE SCIENTIFIQUE A. HERMANN ET FILS

LIBRAIRES DE S. M. LE ROI DE SUÈDE

6, RUE DE LA SORBONNE, 6

1913

BIBLIOTHEQUE
Mathématiques
Recherche
CENTRE INTERUNIVERSITAIRE JUSSIEU-ST-BERNARD

FIGURE 6 – Couverture de la seconde édition de *Leçons*

On peut donc raisonnablement penser que *Leçons* a connu un succès, en tout cas plus vendu que l'éditeur ne l'avait prévu, au point d'être épuisé en moins d'un an - un succès en effet, dû à la « curiosité attentive » des deux mondes, les savants et le public :

> Un an à peine après sa publication, il en est déjà à sa seconde édition. C'est un exemple unique peut-être dans le monde mathématique et qui prouve bien à la fois l'intérêt que le public attache à ces questions [de l'origine du monde], que l'on est tenté parfois de croire bien nébuleuses, et la curiosité attentive qui suit dans le monde entier chaque parcelle de l'œuvre du Maître, trop brutalement et trop prématurément brisée, dans son plein épanouissement [90].

Pour bien mesurer ce succès, il faut tenir compte de la situation de l'édition scientifique et universitaire de l'époque. Il s'agit d'un marché destiné exclusivement à des producteurs spécialisés (éditeurs scientifiques) et à une clientèle réservée (étudiants et universitaires ès sciences). Le marché a connu un développement considérable à partir des années 1880, grâce aux réformes universitaires et à l'expansion des universités [91] : le nombre des étudiants et des élèves des écoles ès sciences a augmenté (passé de 1350 en 1880 à 6000 en 1914) ; la recherche pure et la formation de futurs chercheurs ont été instituées à l'aide de l'assistanat (recrutement de maîtres de conférences et de chargés de cours), ainsi que la recherche appliquée (du type « Recherche et Développement »), par la création des instituts universitaires. Ce qui a conduit, pour l'édition scientifique, à une croissance des publications académiques d'une part, et d'autre part, à la création d'un nouveau lectorat instruit et cultivé aspirant à approfondir ses savoirs acquis et à se tenir au courant de l'actualité des sciences [92].

Face à ce nouveau type de lecteurs, la vulgarisation ne pouvait rester ce qu'elle était au milieu du XIXe siècle. La science devenait de moins en moins accessible à mesure que le public s'agrandissait. Un nouveau genre littéraire a surgi : la vulgarisation dite de « haut niveau », souvent confiée aux savants de renom et versée à des réflexions historiques et philosophiques sur les sciences, au même titre, ou même plus que, l'acquisition de nouvelles connaissances qui s'adressait, comme les livres académiques, à un public assez restreint, déjà muni d'une certaine culture. Et c'est justement *La science et l'hypothèse*, un « best-seller vendu à 24 000 exemplaires avant 1914 [93] », qui demeure l'exemple type de cette nouvelle forme de vulgarisation.

---

90. Préface, Véronnet, *Les hypothèses cosmogoniques modernes*, pp. 1-2.
91. Parinet, *Une histoire de l'édition à l'époque contemporaine. XIXe-XXe siècle*, p. 230.
92. Elisabeth Parinet (1992), *La librairie Flammarion 1875-1914*, Paris : IMEC Éditions, p. 234.
93. Parinet, *Une histoire de l'édition à l'époque contemporaine. XIXe-XXe siècle*, p. 78.

Si l'on mesure la réception d'un ouvrage par le nombre et la fréquence d'éditions, on dirait que *Leçons* a apporté le plus grand succès à notre savant, même plus que *La science et l'hypothèse*. Après plusieurs réimpressions et la réédition en 1906, la vente de *La science et l'hypothèse* est allée jusqu'à 5 000 exemplaires en six mois, à 16 000 en 1912 et à 24 000 en 1914, avant de parvenir à 40 000 en 1925 – chiffres énormes pour l'époque et aussi pour un ouvrage de ce genre[94]. La deuxième édition de ce *best-seller* et *steady-seller* hors pair paraitra seulement quatre ans après, alors que celle des *Leçons*, en deux ans. On ne saurait évidemment pas conclure de là que *Leçons* ait connu un succès encore plus grand que *La science et l'hypothèse*. Le succès des *Leçons* était relatif et provisoire. Relatif, comparé aux livres techniques ou d'autres cours publiés : les premiers tirages restaient entre 1 000 et 2 000 exemplaires ; 500 pour la plupart, pouvant aller jusqu'à 5 000, mais celui de base restait 1 000. *Théorie mathématique de la lumière*, par exemple, a été tiré à 1 000 exemplaires, alors que le premier tome des *Méthodes nouvelles*, à 1 700[95]. Provisoire, puisque *Leçons* connaitra une seule *réédition* et ne fera plus faire l'objet de *réimpression*, contrairement à d'autres ouvrages de Poincaré.

Quoique relatif et limité, le succès n'en était pas moins réel, ce qui ne s'expliquerait pas seulement par les lecteurs habituels des ouvrages scientifiques d'enseignement et de recherche. Les mathématiciens (Lebon, Darboux, Hadamard), astronomes (André) ou physiciens (Langevin) n'étaient pas les seuls à réagir à la sortie du livre à travers les comptes rendus ou critiques dans les revues spécialisées comme *Bulletin des sciences mathématiques* ou *Le Radium*. *Leçons* intéressait les revues de haute vulgarisation, telles que *Revue générale des sciences* ou *Scientia*[96]. Si *Leçons* n'a pas fait l'objet d'une traduction complète, seuls les trois chapitres VI, IX et XIII ont été traduits, tous publiés dans des revues de vulgarisation. La traduction du chapitre IX, qui est sur la théorie de Lockyer, a été faite, en roumain, par Victor Anestin, journaliste et traducteur roumain[97]. Elle a été publiée dans *Orion*, revue que le traducteur lui-même avait fondée pour la diffusion de l'astronomie au public général[98]. Quant aux deux autres, anglaises celles-ci, portent sur la théorie de

94. Voir à ce sujet Rollet, *Henri Poincaré, des mathématiques à la philosophie*, p. 134 et p. 174. Voir aussi Parinet, *Une histoire de l'édition à l'époque contemporaine. XIXe-XXe siècle*, p. 78.

95. Rollet, *Henri Poincaré, des mathématiques à la philosophie*, p. 176.

96. Voir *infra*, Appendice pour la première partie, 5 Réception des *Leçons*.

97. « Teoria cosmogonica a lui Sir NORMAN LOCKYER », *Orion*, Bucuresti, Avril 5 1912, p. 57–60.

98. Notons que V. Anestin avait également fondée, en 1909, la Société astronomique roumaine Flammarion, inspiré de l'homologue française créée par l'astronome français. Institut Astronomique de l'Académie Roumaine, *Histoire céleste entre la Roumanie et la France*, Brochure dédiée au centenaire de la création de l'Observatoire de Bucarest, Magda Stavin-

T. J. J. See. Elles ont été parues dans *Monist*, revue américaine de philosophie des sciences dont Poincaré était l'un des contributeurs [99]. Même *Le temps*, un journal quotidien, y a consacré l'une de ses colonnes.

> Chaque page en effet est toute hérissée de formules dont la lecture est malaisée pour quiconque n'est pas initié aux redoutables mystères des mathématiques. Pourtant les problèmes qu'examine le livre de M. Henri Poincaré sont si essentiels, ils présentent aux yeux des hommes qui réfléchissent un intérêt si impérieux et si poignant tout ensemble, qu'il convient de faire un effort de bonne volonté non peut-être pour en résoudre les équations innombrables, mais pour en extraire précisément ce qu'il contient d'utile à chacun [100].

La réception inattendue de l'ouvrage s'expliquerait alors, comme l'a suggéré A. Véronnet dans le passage déjà cité, par l'attachement du public général non seulement à « l'œuvre du Maître », mais aussi au sujet du livre qu'est la question de l'origine du monde, question qui intéresse tout le monde qu'il soit ou non initié. Le journaliste signale d'autres raisons de succès :

> Au surplus le livre de M. Henri Poincaré n'est nullement un livre ésotérique. Bien au contraire, l'illustre mathématicien s'est préoccupé surtout de faire œuvre de vulgarisateur scientifique. Et c'est dans ce dessein qu'il a analysé avec autant de scrupule que de sagacité les principaux travaux qui ont été écrits depuis un siècle sur la manière dont s'est organisé notre univers. De cette énorme étude, sa préface présente un résumé synthétique que tout le monde comprendra très aisément [101].

L'accent est mis sur l'aspect « vulgarisateur scientifique » des *Leçons*, sans pour autant ignorer le « scrupule » de l'analyse. Quelle qu'ait été l'intention réelle de l'auteur, qu'il ait ou non voulu faire une telle œuvre, il est clair que la réception était bel et bien celle d'une « œuvre de vulgarisateur scientifique ». A la croisée de la philosophie et de la science, *Leçons* n'en illustre pas moins une autre facette de l'œuvre poincaréenne qu'est la vulgarisation notamment par sa préface.

---

schi, 2008, p. 12.

99. Traduit par Lydia G. Robinson, « The Capture Hypothesis of T.J.J. See », *Monist* 22, 1912, p. 460–472. Fait curieux, puisque ces chapitres sont loin d'être la partie centrale du livre : la discussion de Poincaré y est succincte et limitée à résumer les théories en question (d'où le mécontentement de See). Pour le choix de chapitres, Paul Carus, rédacteur en chef, explique comme suit (page 480 du même numéro) : « The sixth chapter treats the hypothesis Prof. T. J. J. See, which will be of special interest to American readers because he is a native American and is the astronomer of the Naval Observatory, Mare Island, California. This chapter together with the thirteenth is reproduced in an English translation on another page of the issue. »

100. M. M (?), « La formation du monde » in *Le Temps* 51e année, le 25 décembre 1911, p. 3.

101. *Ibidem.*

Préface que tout le monde a lue d'un livre peu lu

Il n'est pas rare que la préface « survive » à ce qu'elle est censée introduire. Deux exemples les plus illustres de l'histoire des sciences viennent à l'esprit : *Discours de la méthode* de Descartes, ou si l'on veut remonter plus loin, *De revolutionibus* de Copernic. Ces ouvrages, qui demeurent toujours de grands classiques, ont ceci de commun que tout le monde en a lu la préface, sans qu'ils soient lus autant dans leur intégralité [102]. En effet, de même qu'on ne lit pas autant les trois *Essais* que *Discours de la méthode* qui les précède, la lecture de *De revolutionibus* se limite le plus souvent à l'avertissement « Au lecteur sur les hypothèses de cette œuvre », écrit par Osiander, suivie de la *Lettre au Pape* et du livre I. Une telle postérité disparate, pour ne pas dire contrastée, doit dans une certaine mesure aux conjonctures historiques et culturelles et aux principes éditoriaux qui en dépendent [103]. Mais elle tient aussi à ce que ces préfaces, quoiqu'inséparables des livres qu'elles introduisent, se distinguent de ceux-ci notamment par leurs caractères manifestement *philosophiques*.

Il parait que *Leçons* fait partie des livres qui ont fait leur époque, sans pour autant résister au temps... excepté la préface. De nos jours, la plupart des références faites aux *Leçons* sont tirées de la préface [104]. Souvent considérée comme la partie plus remarquable de tout le livre [105], elle a déjà été reprise peu après sa publication dans les deux revues de vulgarisation, *Revue du mois* et *Bulletin de la société française de l'astronomie* [106]. On peut très bien imaginer qu'elle aurait pu faire partie d'un des livres philosophiques de Poincaré, tout comme la préface de *Thermodynamique*, reprise celle-ci dans *La science et l'hypothèse*. Telle a été, en effet, l'idée de Louis Rougier, fin connaisseur de Poincaré, à qui il avait consacré sa thèse d'État [107].

102. Je fais ici allusion au « livre que tout le monde a lu » par lequel Koyré désignait *De revolutionibus*. L'expression a été reprise récemment par O. Gingerich qui a intitulé son ouvrage sur Copernic de manière quelque peu ironique : *Le livre que nul n'avait lu : à la poursuite de « De revolutionibus » de Copernic*. Voir aussi Jean-Jacques Szczeciniarz (1998), *Copernic et la révolution copernicienne*, Paris : Flammarion.

103. Dans son introduction à la nouvelle édition de *Discours de la méthode et Essais* (2009), F. de Buzon remarque l'apparence de disparate de ces quatre éléments unis dans un seul volume. Apparence renforcée par « le destin ultérieur de l'ouvrage » : le *Discours*, séparé des *Essais*, ont connu à lui seul d'innombrables éditions, largement dû aux principes éditeurs, instaurés au XIXe siècle et devenus normes depuis.

104. Voir, à titre d'exemple, A. Brahic qui cite les deux premiers paragraphes de la préface des *Leçons* dans son ouvrage de vulgarisation : André Brahic (2000), *Enfants du soleil*, Paris : O. Jacob, pp. 273-274. Ou encore Jacques Merleau-Ponty et Bruno Morando (1971), *Les trois étapes de la cosmologie*, Paris : R. Laffont, où les auteurs font référence à la même préface dans leur introduction.

105. « The most valuable part of the book under review is undoubtedly the preface. » Anonyme, « Cosmogonies, Old and New », p. vi.

106. *Revue du mois* (XII, 70, 1911), sous le titre « Vue d'ensemble sur les hypothèses cosmogoniques » puis *Bulletin de la société française de l'astronomie* (XXVI, Janvier 1912).

107. Louis Rougier (1920), *La philosophie géométrique de Henri Poincaré*, Paris : F. Alcan.

L. Rougier avait l'idée de publier un nouveau recueil philosophique, intitulé « L'opportunisme scientifique ». Au deuxième livre devaient figurer les articles sur la mécanique céleste, dont la préface des *Leçons*[108]. L'approbation d'E. Boutroux en main et aussi celle de Gustave Le Bon, éditeur de la collection « Bibliothèque Philosophie scientifique » en main, Rougier adresse une lettre à la famille de Poincaré pour demander la permission. C'est à Léon Daum d'examiner le projet du jeune philosophe. Gendre de Poincaré, Daum est connaisseur non moins fin de la pensée de son beau-père et éditeur de *Dernières pensées* après le décès de ce dernier en 1913[109]. Dans sa réponse, Daum constate que les articles proposés par Rougier ne nécessitent pas une nouvelle publication[110]. Leur échange prend fin avec un accord plutôt timide : parmi une douzaine d'articles proposés par Rougier, seulement deux articles « Cournot et les principes du calcul infinitésimal » et « Le démon d'Arrhenius » soient inclus dans une nouvelle édition de *Dernières pensées*.

Le conflit tant exégétique qu'éditorial n'est pas sans rappeler la difficulté d'interprétation de la philosophie poincaréenne, sinon toute la philosophie dite « scientifique ». Que faut-il entendre par la philosophie de Poincaré ou chez Poincaré et qu'est-ce qu'on attend d'elle ? On pourrait dire que c'est Daum qui reste fidèle à la pensée de son beau-père. Prenons « Sur le problème des trois corps » et « Sur la stabilité du système solaire », tous deux parus dans *Revue scientifique*[111]. Portant sur les deux problèmes les plus classiques de la mécanique céleste, ces articles ont également ceci de commun qu'ils sont issus de *Revue générale des sciences*. D'après Daum, ils « pourraient être insérés dans le volume en question si on le publiait, mais ils ne s'imposent en aucune façon[112] ». Et pour cause : « Henri Poincaré n'y traite pas ces questions *à un point de vue philosophique* – et comme exposé purement scientifique, ces notices, déjà anciennes, doivent avoir un peu vieilli[113]. » Il en est de même pour la conférence sur les comètes, ainsi que « La lumière et l'électricité d'après

108. Parmi les articles qui ont été en vue, on citera : Préface des *Leçons* (1911) – « Sur le problème des trois corps » (1891) – « Sur la stabilité du système solaire » (1898) – « Conférence sur les comètes » (1910) – « Le démon d'Arrhenius » (1911).

Pour une table des matières complète envisagée par Rougier, voir Appendice pour la seconde partie, 1.5.

109. Henri Poincaré (1913), *Dernières pensées*, Paris : Flammarion ; réédition (Paris : Flammarion, 1963) (ci-après *DP*).

110. Lettre non datée, citée in Laurent Rollet (2002), « Henri Poincaré's Last Philosophical Book », in Poincaré (2002), pp. xvii-xx.

111. Henri Poincaré (1891a), « Le problème des trois corps », *Revue générale des sciences pures et appliquées*, 2, *Œuvres* VIII ; Henri Poincaré (1898b), « Sur la stabilité du système solaire », *Revue scientifique*, 9, repris in *Œuvres* VIII. Pour l'analyse de ces articles, voir *infra*, Ch. IV.

112. Rollet, « Henri Poincaré's Last Philosophical Book », p. xviii.

113. *ibid.* Mes soulignements.

Maxwell et Hertz », où la « portée philosophique » qui justifierait « l'insertion dans un volume de Philosophie scientifique » fait défaut [114]. Bref, ces articles sont trop scientifiques et/ou peu philosophiques pour convenir à l'œuvre philosophique de Poincaré.

La suite de l'histoire donnera raison à Daum : les articles en question seront insérés dans les *Œuvres*, notamment dans les volumes VII et VIII, consacrés à la mécanique céleste. Faut-il s'étonner, puisqu'il n'a été que fidèle à la pensée de son beau-père en la matière ? *Méthodes nouvelles* ou *Leçons de mécanique céleste* n'ont pas eu ce privilège de se munir des préfaces « philosophiques », pas plus que d'autres écrits qui portent sur le sujet semblable. De même, dans « Analyse de ses travaux », la catégorie 6° « Philosophie des Sciences » se divise par les thématiques suivantes : « Arithmétique et Analyse », « Géométrie », « Mécanique », « Physique » et « Physiologie scientifique et Pédagogie » [115]. L'astronomie et la mécanique céleste ne figurent pas dans cette liste, même si elles sont constamment rappelées dans les parties sur la physique ou sur la géométrie dans le rapport avec celles-ci.

Tout se passe comme si le Poincaré philosophe ne s'inspirait pas suffisamment en cette matière et que l'astronomie apprêtait chez lui à une autre forme d'écriture qu'est la vulgarisation qui constitue la sous-catégorie 7° « vulgarisation [116] ». « Dans ces articles, dit notre savant, je me suis astreint à éviter complètement l'emploi des signes algébriques [117]. » Pas de thèse philosophique ni de théorie scientifique à venir, mais seulement de véritables « résumés » des théories existantes, ces écrits, probablement jugés plus « vulgarisateurs » que « philosophiques » proprement dits ne se reproduisent pas dans les ouvrages philosophiques.

Pourtant, il y a lieu de s'interroger ce qu'il y a de « philosophique » et à quoi consiste la philosophie dans les écrits de Poincaré. Ainsi Rougier rétorque-t-il :

> Ces questions ne sont pas traitées au point de vue philosophique sans doute – sinon qu'elles montrent les approximations successives de la pensée et des méthodes scientifiques.
>
> Mais il en est absolument de même de plusieurs parties des autres volumes. Que trouvez-vous de philosophique dans les livres III et IV de Science et méthode ?
>
> [...] De plus ces articles résument des travaux essentiels de Poincaré. Comme vous le dites vous-même, ils *pourraient* être insérés

114. *ibid.*
115. Poincaré, « Analyse des travaux », pp. 348-353.
116. Poincaré, *cit.*, § XXXII. Il s'agit de : Henri Poincaré (1892a), « Les formes d'équilibre d'une masse fluide en rotation », *Revue générale des sciences pures et appliquées*, 3, *Œuvres* VII, p. 203-217 ; Poincaré, « Sur la stabilité du système solaire ».
117. Poincaré, « Analyse des travaux », p. 357

dans le volume en question [118].

Dans les livres III et IV de *Science et méthode* dont parle Rougier, il est question de la « mécanique nouvelle », à savoir la mécanique relativiste, et de « la science astronomique ». Poincaré se place ici plus comme mécanicien ou astronome que comme philosophe, avec une intention de « résumer », de « présenter » ses propres travaux et des autres à ce sujet. Mais se passe-t-il, en ce faisant, totalement de la philosophie ? Un résumé est-il totalement privé d'interprétations de la part de celui qui résume ? N'est-il pas, en ce sens, déjà une interprétation, voire une réinterprétation, de ce qui est résumé ?

A vrai dire, nous avons affaire à l'œuvre d'un savant-philosophe, dont la pensée se fonde et porte sur les sciences pratiquées par lui-même avant toute chose ; c'est aussi une pensée qui fait volontiers recours, voire appel, à la philosophie, qu'elle soit ou non de lui, que ce soit dans les rapports ou notes réputés les plus techniques ou dans les écrits dits vulgarisateurs, non seulement dans les textes conventionnellement qualifiés de philosophiques. C'est ce que nous allons voir dans ce qui suit, en particulier dans la seconde partie.

Par ailleurs, pour ce qui concerne la préface des *Leçons*, Daum et Rougier sont du même avis : elle conviendrait, commente Daum, au « cadre habituel » des autres volumes philosophiques du savant... si elle n'était pas soumise à d'autres conditions, tout à fait externes à son contenu : « les Hypothèses Cosmogoniques sont très répandues et cela nous semble peu délicat vis à vis [*sic*] de l'éditeur de publier cette préface en dehors de son volume » [119]. Elle ne sera donc pas reprise dans son intégralité en aucun livre philosophique du savant. Ce qui ne l'empêchera pas de se répandre, en tout cas de demeurer célèbre, bien plus que ce que le livre lui-même. Et pour cause : elle a tout ce qui fait gloire à l'œuvre de Poincaré, tant en forme (de la vulgarisation à la philosophie, en passant par l'enseignement) qu'en matière (la mécanique céleste et la physique mathématique)...

3 Pourquoi et comment lire ? Vers une nouvelle lecture

Plus de cent ans après sa première publication, que reste-t-il des *Leçons* aujourd'hui ?

118. Lettre du 9 septembre 1919, citée in Rollet, « Henri Poincaré's Last Philosophical Book », p. xxi.
119. Rollet, *cit.*, p. xvii.

En 2012, à l'occasion du centenaire de la disparition du savant, *Leçons* a fait l'objet d'un exposé au colloque scientifique international tenu à l'Institut Henri Poincaré [120]. A. Morbidelli, astrophysicien spécialisé en formation et évolution des systèmes planétaires, passait en revue dans son exposé les hypothèses telles qu'elles sont présentées et discutées dans les *Leçons*, pour les soumettre à ses propres examens du point de vue moderne. Il s'agissait d'un commentaire sur ce qui était déjà un commentaire : l'hypothèse de Laplace occupe une place centrale dans les *Leçons*, à laquelle Poincaré semble « sentimentalement attaché », mais ce sentiment qui ne parlerait plus aux astronomes de nos jours ; une bonne partie de l'exposé est consacrée à la théorie de du Ligondès, laquelle s'approcherait le plus de la théorie moderne... Le clivage le plus fondamental consiste, selon Morbidelli, à ce que les cosmogonistes d'aujourd'hui ne se posent pas les mêmes *problèmes* que leurs prédécesseurs, ne disposant pas de mêmes théories ni de mêmes observations [121]. Par exemple, la rotation directe des planètes, l'un des problèmes majeurs jusqu'au début du XXe siècle, n'intrigue plus autant nos astronomes ; ceux-ci se préoccupent davantage de la bifurcation du système solaire au cours de son évolution en deux types de planètes (terrestres et géantes), problème qui ne se posait même pas au temps de Poincaré.

Faut-il s'étonner que l'ouvrage ne demeure pas d'actualité sur le plan scientifique, surtout pour les scientifiques, vu le progrès de la connaissance empirique et théorique tant en cosmogonie qu'en cosmologie ? S'il ne manque toujours pas d'intérêt dû aux discussions pertinentes et aux contributions originales de son auteur, cet intérêt resterait largement historique selon F. Verhulst, spécialiste des systèmes dynamiques, dans sa biographie scientifique de Poincaré, parue également en 2012 [122]. Rien d'étonnant non plus, si l'on pense au « destin » des livres classiques, surtout en histoire des sciences. Bien d'ouvrages ont fait autorité à leur époque comme livres de référence [123], mais fini par n'intéresser que des historiens de nos jours [124].

120. Alessandro Mobidelli, « Leçons sur les hypothèses cosmogoniques : Poincaré's view of solar system formation. What remains today ? », Colloque scientifique international, Institut Henri Poincaré, du 19 au 23 novembre 2012.

121. A propos de la notion de problème et son rôle en la cosmologie, voir *infra*, « Discours préliminaire » à la première partie. Sur les problèmes cosmogoniques qui sont en question ici, on aura l'occasion de revenir tout au long de l'étude présente, notamment dans les chapitre II et III.

122. Ferdinand Verhulst (2012), *Henri Poincaré : Impatient Genius*, New York : Springer, pp. 213-227. Signalons que cette biographie attire l'attention sur *Leçons*, au point d'y consacrer une discussion détaillée et instructive.

123. Livres qui font références à *Leçons* : Véronnet, *Les hypothèses cosmogoniques modernes* ; Pierre Busco (1924), *Les cosmogonies modernes et la théorie de la connaissance*, Paris : F. Alcan. Exemple plus récent : Alexandre Dauvillier (1963), *Les hypothèses cosmogoniques. Théories des cycles cosmiques et des planètes jumelles*, Paris : Masson.

124. Tels sont les cas de Melreau-Ponty, dans son ouvrage de 1983, S. Brush, J.-P. Verdet,

Mais *Leçons* a ceci de particulier qu'il est lui-même un livre d'*histoire* : c'est un exposé de l'histoire de la cosmogonie depuis Kant jusqu'à l'époque moderne, qui ressemblerait donc moins à une première source qu'à une littérature secondaire, moins à un livre de référence qu'il ne fait référence à d'autres œuvres originales telles que *Théorie de ciel* de Kant ou *Exposition du système du monde* de Laplace. Son auteur se soucie de donner des précisions bibliographiques sur les sources utilisées. Par exemple, il signale à ses lecteurs que Kant avait écrit en 1755 son traité de cosmogonie, ouvrage qui est resté longtemps inconnu, en tout cas encore beaucoup moins connu que son œuvre philosophique. Mais la discussion reste très limitée – seulement six pages, qui, de plus, sont chargées de citations tirées non pas de l'ouvrage original, mais d'un résumé postérieurement fait par le philosophe lui-même en 1763. Par quoi notre auteur signifie-t-il une sorte d'indifférence. Par ailleurs, le chapitre II s'ouvre par une indication bibliographique assez précise sur le livre de Laplace, sans oublier un fait bien connu : une note spécifiquement consacrée au problème de l'origine sera ajoutée dans les éditions ultérieures. Suit une description de l'hypothèse dans ses grands traits, accompagnée de nombreux extraits de la fameuse note à partir de l'édition ultime de 1884 parue dans *Œuvres complètes de Laplace*.

Poincaré se veut-il historien ? Quel est l'intérêt de l'histoire pour lui, celle de la cosmogonie en l'occurrence ? Mais d'abord de quelle sorte d'histoire est-elle en question ici ? Il parait difficile de qualifier les *Leçons* d'un travail d'historien ou d'une histoire « historienne », comme celui de Pierre Duhem. L'auteur de *Système du monde* avait l'intention bien réelle de faire de l'histoire des sciences proprement dite, dont il a eu lui-même sa part dans la mise en place en tant que discipline [125]. Une telle intention est absente chez Poincaré : au lieu de *faire de l'histoire* proprement dite comme le ferait un historien, il s'approche d'un *pédagogue qui en fait l'usage*, non pour restituer un auteur ou une œuvre du passé comme tel, mais dans un but précis et circonscrit qu'est *l'enseignement*.

D'un autre côté, c'est entre autres un rôle de *critique* qu'il joue ici, comme le remarqueront ses « critiques » : « Aussi Poincaré s'est-il cantonné fort sagement dans un rôle de critique. Il a déblayé ainsi le terrain de toutes les constructions caduques, en ne laissant que les parties solides sur lesquelles on pourra désormais essayer de construire [126]. » Chaque fois qu'il discute d'une hypothèse, comme il en a coutume, il commence par l'exposer en ses propres

cité plus haut, et H. Kragh.

125. Sur l'opposition entre Poincaré et Duhem autour de l'histoire des sciences, voir Anastasios Brenner (2003), *Les origines françaises de la philosophie des sciences*, Paris : P. U. F., p. 38.

126. Véronnet, *Les hypothèses cosmogoniques modernes*, p. 2.

termes et la reconstruire à sa manière, de façon à en dégager des points essentiels d'une part, et d'autre part, l'assujettir aux vérifications mathématiques. La reformulation rend les hypothèses beaucoup plus claires que dans leur forme originale, ce qui est d'autant plus utile que quand elles ne sont pas mathématiquement bien maîtrisées comme c'était souvent le cas [127]. Or, sa critique est loin d'être un jugement dogmatique.

> Quelles que soient les critiques que nous ayons cru devoir formuler sur divers points de cette théorie, cette tentative mérite l'attention. Si on peut reprocher à M. Belot d'avoir été un peu plus ambitieux qu'il ne convient de l'être dans l'état actuel de la Science et d'avoir voulu prématurément trop embrasser, et si ses idées ne semblent pas pouvoir être acceptées sous leur forme actuelle, il semble qu'il peut être utile de les faire connaître, parce qu'on pourra un jour y trouver à glaner d'intéressantes vérités [128].

Chose curieuse, la théorie de Belot, toute récente alors, Poincaré la considère comme si elle était déjà dépassée. Les mêmes remarques peuvent s'appliquer à d'autres hypothèses : malgré leurs points faibles, elles ne manquent pas d'« intéressantes vérités », susceptibles d'être dévoilées un jour, à condition d'être revêtues sous une nouvelle forme. Par ses « balayages » critiques Poincaré offre-t-il justement de nouvelles formes qui couvriront peut-être des vérités à venir. Il n'a donc pas pour but de restituer les hypothèses telles qu'elles sont actuellement ou telles qu'elles ont été dans le passé, mais de les dessiner à nouveau et les inscrire dans la science et son histoire qui sont toutes les deux en train de se faire.

Ceci revient à dire que, malgré quelques remarques « historiques », *Leçons* n'est pas un livre d'histoire, pas plus que les autres ouvrages de Poincaré. La liste des cosmogonies exposées dans *Leçons* est loin d'être exhaustive. Même le critère de choix reste obscur, et c'est cela, beaucoup plus que la non-exhaustivité, ce qui rend douteuse l'objectivité historique des *Leçons* qu'on demanderait à un historien [129]. Non que son point de vue soit purement sub-

127. « The literature on cosmogony is very heterogenous and in part impenetrable in consequence of prolixity, pretension, confusion, and general lack of mathematical control. Poincaré has gathered together from this wild garden quite a multitude of fine fruits, a collection of ideas, of which perhaps everyone is likely to touch some part or other of the making of the worlds. He has not destroyed these ideas by criticism, but laid bare core and even represented many of them in a clearer way than their authors » : Karl Schwarzschild (1913), « Leçons sur les hypothèses cosmogoniques by H. Poincaré and Researches on the Evolution of the Stellar Systems by T. J. J. See », *Astrophysical Journal*, 37.

128. *Leçons*, § 211, p. 279.

129. Le « reviewer » des *Leçons* de la revue *Nature* a remarqué que les hypothèses proposées dans d'autres pays que la France, notamment la théorie de la capture de l'astronome anglais Moulton (qui fut concurrent de See, mais plus connue que celui-ci), sont passées sous silence : Anonyme, « Cosmogonies, Old and New », p. vii. Le silence de Poincaré concernant les théories courantes et même considérables de son époque est signalée également par les

jectif, mais son objectivité doit être jugée autrement que celle d'un historien [130]. Un peu comme un doxographe à la Théophraste, disciple d'Aristote, il sélectionne et expose les cosmogonies à sa propre manière, ne serait-ce que pour les critiquer en ses propres termes. On pourrait rapprocher également l'« auteur » des *Leçons* d'un *compilateur* à la Diogène Laërce, dont le rôle est limité à inventorier et classer, ou bien d'un *commentateur* à la manière de Simplicius ou Proclus qui fait l'exégèse des textes dont il n'est pas lui-même auteur, se défendant d'avancer ses opinions.

L'intérêt d'une telle approche n'est pourtant pas moindre, dès qu'on s'intéresse autant, sinon davantage, à celui qui parle qu'à ce dont il parle. Ce que nous dit Aristote de Thalès de Milet ou d'Anaximandre, par exemple, renseigne beaucoup mieux sur le Stagirite lui-même que ses prédécesseurs dont il discute au profit de sa propre philosophie, si bien qu'il sert mieux aux aristotéliciens qu'aux historiens de la philosophie présocratique. De même, *Leçons* ne pourrait-il pas nous apprendre, sur *celui* qui le dit plutôt que sur ce qui est dit, servant d'instrument pour une élucidation de la philosophie de son auteur ?

> Dans le livre : *Leçons sur les hypothèses cosmogoniques*, mise au point de l'un de ses derniers cours, et l'une de ses dernières publications, Poincaré critique les différentes hypothèses, apporte à l'appui de chacune d'elles les ressources multiples des Mathématiques et de la Physique, et parfois des arguments qui avaient échappé à l'auteur. Le livre présente un haut intérêt philosophique, et comme une sérénité olympienne. Il n'a pas tellement vieilli [131].

A mon sens, *Leçons* porte un intérêt philosophique double.

D'abord comme un livre de philosophie. Dans ce livre, Poincaré ne cherche pas moins à examiner des *problèmes philosophiques* aussi bien que des hypothèses scientifiques. C'est en philosophe que Poincaré raisonne dans les *Leçons*, mettant au service les hypothèses cosmogoniques, tant pour examiner sa propre thèse que pour en tirer des leçons d'ordre plus général ou philosophique. N'aurait-il pas ainsi devancé l'épistémologie historique, tradition qui sera mise

---

historiens de nos jours : Stephen George Brush (1996b), *Nebulous Earth : The Origin of the Solar System and the Core of the Earth from Laplace to Jeffreys*, Cambridge : Cambridge University Press, p. 32 ; Jean-Claude Pecker (2001), *Understanding Heavens : The Centuries of Astronomical Ideas from Ancient Thinking to Modern Cosmology*, Berlin : Springer, pp. 368-372.

130. Mais à quoi consiste au juste l'objectivité dans l'histoire ? Même s'il n'est pas lieu ici de discuter cette grande question, il serait intéressant de noter le cas de Duhem, déjà mentionné. Quoique la qualité d'historien de Duhem ne fasse aucun doute, ses travaux historiques étaient souvent orientés par son autre préoccupation, le christianisme, qui l'amenait parfois à des résultats contestables. Voir à ce sujet M. Fichant, « De Galilée à Duhem » in Michel Pêcheux et Michel Fichant (1969), *Sur l'histoire des sciences*, Paris : F. Maspero

131. Jean Chazy (1953), « Poincaré et la mécanique céleste », *Bulletin astronomique, Série II*, 16, 2, p. 159.

en place plus tard par Bachelard ? Une telle manière de lecture permettra une autre voie pour aborder la philosophie du mathématicien. Nous allons voir que celle-ci ne manque pas de systématicité propre à une philosophie, avec toute une série de thèses et d'arguments récurrents, généraux, et plus ou moins cohérents. Nous allons revenir également sur la manière dont Poincaré s'approprie l'histoire des sciences au profit de cette philosophie.

Ensuite comme un livre de cosmologie, par son caractère éminemment « interrogateur » qui se trouve dans beaucoup d'ouvrages de cosmologie, des manuels aux vulgarisations [132]. Si *Leçons* est un texte qui exemplifie et incarne même le style « poincaréen », tant par sa matière que par son niveau, susceptible de se caractériser en même temps comme livre de mécanique, physique, ou bien philosophie, il n'en est pas moins exemplaire en tant que livre de cosmologie par son hétérogénéité, et surtout, par son interrogation même. C'est un livre plein de points d'interrogation, livre qui se pose des problèmes bien plus qu'il n'y répond, qui interroge, s'interroge lui-même et interroge ses lecteurs, tout comme un bon livre de cosmologie et/ou de philosophie.

132. Sur ce point, voir Jacques Merleau-Ponty (1986), « Science et doxa. Qu'est-ce que la vulgarisation ? », in *Philosophies et sciences*, sous la dir. de Gilbert Hottois, Bruxelles : Edtions de l'Université de Bruxelles.

Première partie

Avant les *Leçons*

Comment penser et connaitre l'univers ? Discours préliminaire

« A quelques années d'intervalle entre 1917 et 1925 un physicien de génie et un télescope gigantesque, manié par un astronome à sa mesure, apportèrent à la Philosophie de la Nature, l'un une idée, l'autre une vision de l'Univers dont on ne sait laquelle était plus surprenante et plus exaltante. *La Cosmologie moderne est née de cette rencontre* », disait Jacques Merleau-Ponty dans son ouvrage de 1965, *Cosmologie du XXe siècle*[1]. Tel est le scénario généralement admis d'après l'histoire « standard » de la cosmologie, selon laquelle ce « physicien de génie », que fut Einstein, et à cet astronome observateur « à sa mesure », que fut Hubble, la cosmologie finit par devenir une science proprement dite.

Généralement admis, le scénario n'a pourtant pas été accepté à l'unanimité. Selon certains, la cosmologie serait née « officiellement » à un lieu et à une date précise : à Londres, le 31 octobre 1931, lors d'un congrès de la *British Association for the Advancement of Science*, dans une session spéciale intitulée « The Evolution of the Universe », proclamant ainsi la cosmologie au titre de science[2]. Pour les autres, à tendance plus empiriste ou positiviste, elle n'est devenue une science proprement dite qu'après avoir disposé des données observationnelles suffisamment fondées et consolidées notamment au moment de la découverte du rayonnement de fond cosmologique par Penzias et Wilson en 1965 pour confirmer une de ses théories, la théorie du Big Bang en l'occurrence[3].

La question de datation est loin d'être une affaire purement historiographique, portant en elle plusieurs enjeux tant philosophiques qu'historiques, et, surtout, épistémologiques. On connait la grande thèse d'Alexandre Koyré

1. Jacques Merleau-Ponty (1965), *Cosmologie du XXe siècle*, Paris : Gallimard, p. 7. Mes soulignements.

2. George Gale (1993), « Philosophical Aspects of the Origin of Modern Cosmology », in Hetherington (1993), pp. 484-485 ; George Gale (2015), « Cosmology : Methodological Debates in the 1930s and 1940s », in *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, sous la dir. d'Edward N. Zalta, Summer 2015.

3. Stephen George Brush (1992), « How Cosmology Became a Science », *Scientific American*, 267, 2.

selon laquelle il existe l'affinité et la résonance, sinon l'unité même, entre la philosophie, la science et la religion d'une époque, tant qu'elles sont toutes des produits du même esprit du temps, dont la cosmologie en marque le point culminant en tant qu'elle est synthèse de tous les apports théoriques et empiriques de ces domaines [4]. Cependant, toute civilisation a disposé d'une théorie ou au moins d'une conception du monde. Qu'est-ce qui fait démarquer alors cette « cosmologie proprement dite » des autres cosmologies qui l'ont précédée et la suivront peut-être encore ? A partir de quel moment et à quelle condition une entreprise cosmologique devient-elle une science ? Quel est le critère de scientificité qui est en jeu ici ?

Chose remarquable, aucune science n'a été soumise à la question de scientificité plus fréquemment, et aussi radicalement que la cosmologie. Ceci est encore vrai même quand elle ne manquait pas de résultats théoriques et empiriques suffisamment fondés, dignes du droit de cité des sciences. On dirait que la scientificité est une question qui concerne toutes les sciences ou d'autres discours qui prétendent l'être (qu'on songe à l'astrologie, par exemple). Or, en cosmologie, elle venait souvent et vient encore se poser et s'imposer de façon récurrente, et aussi radicale, comme si cette science était sans cesse en « crise identitaire » et sa raison d'être mise en doute... Ce qui a rendu la cosmologie prodigieusement autoréflexive : un cosmologue ne s'empêche pas de se demander si la science qu'il pratique est une science comme les autres ni de s'interroger, même quand il n'y a plus de doute de l'effectivité scientifique de sa science, à quoi consiste cette scientificité ; la réflexion sur elle-même fait partie de la pratique du cosmologue, à l'intérieur même son activité, tout en jouant un rôle déterminant à l'élaboration des théories.

J. Merleau-Ponty n'a cesse de réfléchir à cette question tout au long de son œuvre. En bon épistémologue soucieux du travail effectif des cosmologues, il fait au sujet de la cosmologie ce que Kant avait fait des mathématiques et de la physique de son temps. « De ces sciences, disait Kant dans Introduction à la *Critique de la raison pure* [5], puisqu'elles sont réellement données, il

4. « Les étapes de la cosmologie scientifique » in Alexandre Koyré (1973), *Études d'histoire de la pensée scientifique*, Réédition de la première édition de 1963, Paris : Gallimard, pp. 87-98.

5. Introduction, Immanuel Kant (1980a), *Critique de la raison pure*, in *Œuvres philosophiques*, éd. établie et introd. par Ferdinand Alquié, trad. et annot. par Alexandre Delamarre et François Marty, Paris : Gallimard, t. 1, B20. Comme nous allons le voir dans le chapitre suivant, la cosmologie fait partie chez Kant de la métaphysique au même titre que la psychologie et la théologie, dont la possibilité « à titre de science » devait être mise en cause dans la *Dialectique transcendantale* de la *Critique*. Voir *infra*, chapitre II.

Par ailleurs, puisqu'il s'agit de l'un des auteurs les plus fréquemment cités tout au long de ce travail, il serait utile de signaler, une fois pour toutes, que les références aux ouvrages de Kant sont indiquées d'après *Gesammelte Schriften de Akademie de Berlin*, conformément à la norme établie dans les études kantiennes. Quant à *Critique de la raison pure*, la différence

convient bien de demander *comment* elles sont possibles ; car qu'elles doivent être possibles, c'est prouvé par leur réalité. » De même, Merleau-Ponty commence par « constater *d'abord* que la Cosmologie scientifique est *un fait* et la Cosmologie est maintenant insérée dans le cadre de la recherche scientifique ». Une fois admis le fait que la cosmologie existe réellement, il effectue une critique kantienne avec ces questions qu'on pourrait qualifier volontairement de transcendantales : comment la cosmologie est-elle possible ?

La situation n'est certes pas la même pour les deux philosophes, et ce n'est pas seulement par les deux siècles qui les séparent. Pour Kant, la question de la scientificité ne se posait même pas à l'égard des sciences en question. Et pour cause : comment en douter, puisque c'est précisément la géométrie d'Euclide et la physique de Newton qui lui servaient de modèle même de la science ainsi que de critère même de la scientificité ? Le projet de la *Critique de la raison pure* consistait donc à établir, précisément sur le modèle de la physique newtonienne, le fondement de la connaissance empirique dans sa forme (que sont les principes a priori de l'entendement) et sa matière (les données du sens appréhendé sous la forme a priori de l'intuition), afin de procéder, en fin de compte, à une autre *critique* laquelle porte sur la métaphysique et s'interroge « *Comment la métaphysique est-elle possible à titre de science*[6] ».

Merleau-Ponty prendra la *cosmologie scientifique* pour un *fait épistémologique* et en viendra à renverser la direction de la critique de Kant. Pour lui, il n'est pas question d'appliquer les critères usuels à la cosmologie et de la comparer avec la science de modèle par excellence qu'est la physique, ce qui contraindrait à adopter une vue réductrice qui « concède trop aux traditions de l'épistémologie moderne ». Il prend pour point de départ « ce fait épistémologique qu'est la fondation (en un certain sens la résurgence) d'une science dont les praticiens reconnaissent eux-mêmes et discutent la spécificité et les enjeux philosophiques[7] ». La cosmologie a ceci de particulier que ses « praticiens » réfléchissent eux-mêmes sur la science qu'ils pratiquent et les questions qu'elle soulève, si bien que ce qui serait externe à l'activité scientifique dans d'autres sciences s'impose en elle et fait partie de sa pratique même à part entière. Un physicien a pour objet quelque chose de bien défini et circonscrit (Boson de Higgs, onde gravitationnelle...) ; il n'a pas à réfléchir dans la pratique sur les normes ou les méthodes de sa science ni, encore moins, sur les notions et les

entre l'édition de 1781 et celle de 1787 important peu pour l'étude présente, la référence sera faite uniquement à la seconde, désignée par B.

6. Kant, *cit.*, B22.

7. « La cosmologie contemporaine doit-elle intéresser les philosophes ? », Jacques Merleau-Ponty (2003), *Sur la science cosmologique. Conditions de possibilité et problèmes philosphiques*, éd. établie et introd. par Michel Paty et Jean-Jacques Szczeciniarz, Paris : EDP Sciences, pp. 214-215.

principes fondamentaux. Pas plus qu'un biologiste qui, qu'il soit entomologiste ou bactériologiste, ne s'interroge pas toujours sur ce que c'est que la vie, en tout cas pas explicitement comme tel. Pour lui, ce genre de questions restent secondaires, externes ou postérieures, à son activité scientifique. En revanche, il arrive souvent à un cosmologue de s'engager dans des débats de nature *philosophique* poussés, d'aller parfois encore plus loin dans leurs réflexions et à en construire leur propre philosophie des sciences [8].

De nos jours, la cosmologie est étudiée le plus souvent comme une discipline *scientifique*, rarement confondue avec la cosmologie *philosophique* à la Whitehead décrite dans *Process and Realty*, sous-titré justement « *An Essay in cosmology* ». La cosmologie scientifique a pour objectif d'« obtenir une description *physique* de l'univers (de son aspect géométrique, spatial et temporel, c'est-à-dire de son évolution, et aussi de son contenu) », et de « comprendre la formation et l'évolution des structures cosmiques et à reconstituer et à comprendre les phénomènes qui se sont déroulés dans le passé très lointain de l'univers [9] ». Elle prend appui sur d'autres sciences, notamment l'astronomie et la physique, surtout l'astrophysique : tant pour des données d'observation que pour les théories... Le rapport n'est pourtant pas latéral : elle est censée fournir *l'environnement* qui couvre tous les objets des sciences, des objets célestes (galaxies, étoiles...) jusqu'à la vie en passant par les planètes, en faisant fonctionner tout ceci de manière « symbiotique » [10]. Une science « ultime » donc, qui fournit l'« encadrement » (« framework ») à toutes les autres sciences et détermine leur possibilité même.

La cosmologie a ceci de particulier qu'elle pose des questions qui tendent à retomber dans les vieux problèmes philosophiques (si l'univers est fini/infini dans le temps et l'espace) ou portent en elles-mêmes des notions essentiellement philosophiques (espace, temps, origine, cause...).

> La cosmologie est traversée par des problèmes, en proie à des questions qui en rendent le développement difficile. [...] Ces questions, voire ces apories sont étroitement liées à la nature de son objet : l'Univers. Mais en même temps les concepts qu'elle construit, si spécifiques, assument entièrement ces paradoxes et ces dialectiques. Ce qui fait de ces théories des théories toujours à la limite des

8. Sur l'histoire des controverses qui ont marqué la cosmologie moderne, voir, pour ne citer que des études désormais « classiques » : Merleau-Ponty, *Cosmologie du XXe siècle* ; Helge Kragh (1996), *Cosmology and Controversy : The Historical Development of Two Theories of the Universe*, Princeton : Princeton University Press.

9. Marc Lachièze-Rey (2008), *Au-delà de l'espace et du temps : la nouvelle physique*, Paris : Le Pommier, p. 157.

10. George F. R. Ellis (2006), « Issues in the Philosophy of Cosmology », in *Philosophy of Physics*, sous la dir. de Jeremy Butterfield et John Earman, Amsterdam : Elsevier, t. B, p. 1184.

> sciences et de la science d'un côté et de la spéculation dialectique de l'autre. [...] C'est sans doute là la scientificité spécifique de la cosmologie [11].

Qu'est-ce donc cet objet, l'univers, et qu'est-ce qui le rend si spécifique ?

1 Objet physique pas comme les autres. L'univers dans la cosmologie moderne

L'univers se définit comme le tout ou la totalité de ce qui existe. Il va sans dire que les connotations du « tout » ou « totalité » n'ont cessé de varier au cours du temps, allant de pair avec la manière de concevoir et de connaitre ce tout. Dans son ouvrage de 1960, *Cosmology*, Herman Bondi introduit ce qui deviendra l'une des définitions de l'univers les plus courantes : « *largest set of physically significant objects* [12] ». Avec son sens *physique* déterminé par les propriétés spatio-temporelles telles que sa forme métrique (courbure) ou la densité ou la distribution de sa matière [13], l'univers se distingue de la totalité absolue, désignée parfois par « Univers » en majuscule. L'univers fait partie de cette totalité ; il n'en est qu'une partie, même s'il rassemble le plus grand nombre possible de ces objets « physiquement significatifs ». Suivant le même ordre d'idée, on peut distinguer l'univers physique de l'univers logique, également appelé l'univers du discours.

> Pour le philosophe ou le logicien le mot « Univers » peut désigner quelque chose de plus large, comprenant tout ce qui peut faire l'objet d'un discours conforme aux lois de la Logique, comme les nombres, les êtres imaginaires, les lois civiles, les phénomènes de conscience, toutes choses qui ont certes des supports physiques, mais qui n'« existent » pas au même sens que ces supports. La cosmologie ne s'occupe donc que des choses qui ont une existence physique ou matérielle, ce qui lui impose tout naturellement de s'appuyer sur les sciences physiques [14].

Au même titre que la physique ou d'autres sciences de la nature, la cosmologie traite des phénomènes physiques auxquels on peut attribuer une existence

11. Jean-Jacques Szczeciniarz (2010a), « La cosmologie au XXe siècle et sa structure dialectique et positive », in *Vers une nouvelle philosophie de la nature : actualités mathématiques, physiques et biologiques*, sous la dir. de Joseph Kouneiher, Paris : Hermann, p. 153.
12. Hermann Bondi (1960), *Cosmology*, 2e éd., Cambridge : Cambridge University Press, pp. 3-10.
13. Szczeciniarz, « La cosmologie au XXe siècle et sa structure dialectique et positive », pp. 157-158.
14. « La cosmologie. Le point de vue du philosophe », Merleau-Ponty, *Sur la science cosmologique*, p. 190.

au sens physique du terme, phénomènes qui sont régis par les lois de la physique ou susceptibles de l'être, et pourvu de supports concrets ou matériels pour être soumis à l'expérience (l'expérimentation ou l'observation). En ce sens, son objet ne se distingue guère des autres objets de la physique. Un objet scientifique comme les autres... seulement s'il en est un. Car, comment le *tout* serait le même que ses *parties* qu'il rassemble, ordonne, unifie, et représente de préférence par des modèles mathématiques en lui ?

En effet, il est difficile de dire si l'univers peut être pris pour un *objet physique*, voire *scientifique*, au même titre que le proton, le Soleil ou le virus. Et ceci pour deux raisons. D'abord parce que c'est une chose *unique* qui n'a pas d'autre exemplaire : il n'est pas reproductible, ni manipulable, ni donc susceptible de l'expérience ; ses conditions initiales sont absolument fixes, déterminées une fois pour toutes, ce qui empêche de procéder à la démarche habituelle de la physique, laquelle consiste à varier ce qu'il y a de variable dans la nature pour en dégager ce qui n'est pas variable – la loi. Peut-on établir des lois pour un seul objet qu'est l'univers, pour lequel l'on ne dispose pas d'« échantillons » comme dans des cas typiques en physique ? Tel est l'un des enjeux principaux de la philosophie de la cosmologie contemporaine [15].

Pour trouver la loi des projectiles, par exemple, on discerne d'abord les propriétés communes à tous les objets lancés horizontalement. On se rend compte alors qu'ils décrivent tous des trajectoires paraboliques, malgré la diversité de directions et de vitesses initiales. C'est ainsi qu'on qualifie ces propriétés communes d'« essentielles » (ou de « fondamentales »), lesquelles se distinguent d'autres propriétés, qu'on peut arbitrairement choisir et librement varier, d'« accidentelles ». Ces propriétés essentielles, on les appelle *lois*, tandis que les accidentelles, *conditions initiales*.

> Maintenant, quand nous étudions les propriétés à grande échelle de l'Univers, c'est justement la difficulté à laquelle nous faisons face, car il n'y a qu'un Univers. Nous n'avons donc aucune base

15. Dennis W. Sciama (1961), « Les trois lois de la cosmologie », *Annale de l'Institut Henri Poincaré*, 17, 1 ; Milton K. Munitz (1962), « The Logic of Cosmology », *British Journal for the Philosophy of Science*, 13, 38 sqq. Dennis W. Sciama (1973), « The Universe as a Whole », in *The Physicist's Conception of Nature*, sous la dir. de Jagdish Mehra, Springer, p. 18. Plus récemment : Ellis, « Issues in the Philosophy of Cosmology », pp. 1216-1218 ; Jean-Jacques Szczeciniarz (2010b), « La cosmologie comme science spéculative ou comme théorie philosophique scientifique », in Barrau *et al.* (2010), pp. 284-286 ; Chris Smeenk (2013), « Philosophy of Cosmology », in *The Oxford Handbook for the Philosophy of Physics*, sous la dir. de Robert W. Batterman, New York : Oxford University Press, pp. 16-19.

Notons également qu'il n'est pas lieu ici d'entamer une discussion sur la notion de loi en elle-même. En renvoyant ce sujet aux chapitres ultérieurs de l'étude présente (notamment les II et VI), je me bornerai à la manière dont elle est traitée dans le contexte de la philosophie de la cosmologie.

pour distinguer ces aspects fondamentaux et accidentels. On doit considérer toutes ces propriétés comme également fondamentales [16].

On rétorquera que la cosmologie n'est pas la seule science à traiter un objet unique et impossible à soumettre à l'expérimentation. Les sciences comme l'histoire, la paléontologie ou la géologie ont elles aussi pour objet quelque chose d'*unique* (Socrate ou la Révolution française, la Terre...), donné une fois pour toutes, qui, une fois donné, n'est pas susceptible de modification ou de reproduction, ni donc d'expérimentation. Ces sciences peuvent être qualifiées d'« historiques », distinguées des sciences « physiques » telles que la physique, la chimie ou la microbiologie, lesquelles consistent essentiellement dans l'expérience [17]. La cosmologie est elle aussi « historique » en ce sens, à ceci près que, contrairement à d'autres sciences historiques, elle ne dispose pas d'objets *similaires* ou comparables les uns aux autres.

Prenons pour exemple Socrate [18]. L'historien ou le biographe s'intéressera à la vie du philosophe, le philosophe à son œuvre plus qu'à sa vie ; même le logicien ne se prive pas d'un certain « usage » de Socrate, en se servant d'exemple canonique du syllogisme (Tous les hommes sont mortels ; Socrate est un homme ; donc Socrate est mortel). Socrate est avant tout un individu singulier. Mais, aussi singulier soit-il, il ne lui échappe pas de servir d'*exemple* pour cette raison qu'il appartient à un groupe d'individus (Athéniens, philosophes, personnages historiques...). S'il est unique en tant qu'individu, son unicité n'en implique pas moins la pluralité, pour cette raison qu'il appartient à la même espèce que plusieurs individus qui lui sont semblables et partagent certains points communs avec lui : Socrate est mortel tout comme d'autres hommes, en tant qu'il est un homme. Ces points communs permettent de passer de l'individuel au pluriel, et du pluriel au général jusqu'à l'universel : tout homme est mortel. Ainsi s'obtiennent des énoncés universels, qu'on pourrait appeler lois. Ce qui ne s'applique pas à l'univers : il est absolument *sui generis* par définition ; rien ne lui étant identique, ni semblable ni comparable, il ne peut être exemplifié ; rien n'est plus complet et inclusif que l'ensemble de tout ce qui existe, en dehors duquel rien n'existe. Qui plus est, « nous en connaissons des parties, non des échantillons ; en outre nous sommes dedans et ne pouvons en sortir » [19]. La limite de l'expérience qui s'impose ici, tant pour l'observation

16. Sciama, « Les trois lois de la cosmologie », p. 22.

17. Sur la distinction entre deux catégories de sciences, voir Ellis, « Issues in the Philosophy of Cosmology », pp. 1216-1217 ; Szczeciniarz, « La cosmologie comme science spéculative ou comme théorie philosophique scientifique », pp. 289-290. Sur la même distinction qui se trouve chez Kant et chez Cournot, voir *infra*, le chapitre II.

18. Gilles-Gaston Granger (1998), *L'irrationnel*, Paris : O. Jacob, p. 210.

19. « La cosmologie. Le point de vue du philosophe », Merleau-Ponty, *Sur la science cosmologique*, p. 190 et *passim*. Voir aussi Munitz, « The Logic of Cosmology » ; Ellis,

que pour l'expérimentation, est quelque chose d'absolument insurmontable, parce que nous faisons partie de cet univers.

L'univers est-il le tout qui est plus grand que la somme de ses parties ? Le problème du rapport entre le tout et les parties n'est pas réservé exclusivement à la cosmologie. Dans un volume de gaz, par exemple, chaque molécule se meut suivant des lois déterministes, ce qui n'empêche pas leur ensemble de se comporter de façon stochastique [20]. Ce que les molécules sont au gaz est ce que nos systèmes partiels sont à l'univers, ou ce que les individus sont à l'humanité, la société, la nation, etc. Le tout n'obéit pas toujours aux mêmes lois que ses parties. Il est toujours possible d'établir des lois à partir des objets contenus *dans* l'univers, tels que galaxies ou amas de galaxies. C'est ainsi que Hubble établit la loi qui porte son nom : c'est une loi empirique par excellence tirée à partir de plusieurs échantillons, des galaxies en l'occurrence, exactement de la même manière que celle des projectiles. On ne peut pourtant pas dire qu'elle soit une loi *de* l'univers puisque cet ensemble des galaxies est l'univers lui-même et leur loi, la loi *de* l'univers. Quoiqu'il soit le système le plus global qui existe *dans* l'univers, ce n'est que les parties composantes de celui-ci. Une loi de l'univers, s'il y en a une telle, doit se distinguer également d'une loi « universelle ». Une loi comme la gravitation newtonienne se dit universelle en ce sens qu'elle s'applique à *tous* les corps qui se trouvent *dans* l'univers. Rien ne nous dit, pourtant, si elle s'applique autant à l'univers lui-même.

Il parait que tous ces enjeux relatifs à l'unicité changent la donne en cosmologie contemporaine de ses dernières années avec l'idée de « multivers ». Ceci a ouvert en effet toute une nouvelle problématique et ne cesse de susciter des débats philosophiques tant spéculatifs que passionnés. Sans entrer dans le détail sur ce sujet encore récent, il suffit ici de remarquer que la définition même de l'univers n'est pas une affaire close. On aura toujours beau le traiter comme un *objet physique*, en tout cas au sens qu'on lui a attribué historiquement et attribue encore ordinairement [21]. Et, en effet, s'il ne l'était pas ?

« Issues in the Philosophy of Cosmology », pp. 1216-1219 ; George F. R. Ellis (2014), « On the philosophy of cosmology », *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 46, A, pp. 7-9.

20. L'analogie est empruntée à Evandro Agazzi (1991), « The Universe as Problem », in *Philosophy and the Origin and Evolution of the Universe*, sous la dir. d'Evandro Agazzi et Alberto Cordero, Dordrecht : Springer, p. 15. Voir aussi Munitz, « The Logic of Cosmology », p. 38. Il n'est pas question ici de traiter les problèmes méréologiques du point de vue logique. Pour la théorie cinétique des gaz, *infra*, Chapitre V.

21. « [T]he Universe *as a whole* cannot be considered as a *scientific object* in any sense that such words have had in the historical development of physics. » : Massimo Pauri (1991), « The Universe as a Scientific Object », in *Philosophy and the origin and evolution of the universe*, sous la dir. d'Evandro Agazzi et Alberto Cordero, Dordrecht : Springer, p. 291. M. Pauri définit l'univers comme un « objet-modèle », notion empruntée à Mario Bunge, ce que R. Torretti accepte (« Though reluctantly at first, I have slowly come to think that Pauri is

2 Idée transcendantale/transcendante

Kant appelait *idées transcendantales* les concepts purs de la raison auxquels aucun objet de l'expérience ne puisse correspondre [22]. L'univers, défini comme *synthèse absolue de la totalité des phénomènes*, est aussi une idée transcendantale, au même titre que moi et Dieu. Si elle est, comme ces dernières idées, un pur produit de pensée qui se sent incapable de rendre compte de son propre produit, l'idée d'univers a ceci de particulier qu'elle ne se prive pas totalement du rapport avec les phénomènes qui sont, on le sait, l'unique objet de la connaissance chez Kant, et de pouvoir présupposer son objet et la synthèse qui exige que cet objet soit « *donné* ». Or, en réalité, rien de tel ne peut être donné dans aucune expérience et la synthèse en question ne peut jamais être achevée par les facultés usuelles de la connaissance que sont l'entendement et l'intuition [23]. Pour celle-ci, l'idée d'univers est « trop grande » pour être représentée dans ses formes, alors qu'elle est « trop petit[e] » pour correspondre à un concept, quel qu'il soit et de quelque manière qu'il soit accommodé [24].

L'univers n'est pas un *objet*, dira encore Bachelard, mais une *idée* qui a pour fonction « de réaliser, au sein même de la philosophie réaliste, une transcendance susceptible de compléter facilement toutes les données de l'expérience, [...] une transcendance, non pas lointaine, mais quasi immédiate, contemporaine du premier décrochement de l'attention, de la réflexion, de l'expérience [25] ». C'est une idée qui *transcende* le phénomène, procédant à une simplification voire à une totalisation des choses et faisant synthèse de ceux-ci. Alors que, pour Kant, une telle synthèse était une opération qui ne s'achèvera jamais, elle n'est pas seulement possible en cosmologie, selon Bachelard, mais le plus souvent une chose déjà faite, accomplie de manière « quasi immédiate », voire « trop tôt » [26]. C'est précisément pour cette raison que la cosmologie est incompatible avec la science moderne : en science moderne, le phénomène est défini au sens « profondément *instrumental* et *rationaliste* », en ce qu'il est *constitué* à partir des théories mathématiques et des moyens techniques qui le précèdent [27] ; le phénomène pris pour déjà donné une fois pour toutes, la

right. » : Roberto Torretti (2000), « Spacetime Models for the World », *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 31, 2, p. 182).

22. Kant, *Critique de la raison pure*, B384.
23. Kant, *cit.*, B507.
24. Kant, *cit.*, B517. Je vais revenir longuement au chapitre II.
25. Gaston Bachelard (1972b), « L'univers et la réalité », in *L'engagement rationaliste*, Paris : P. U. F., p. 107. Voir aussi Daniel Parrochia, « Gaston Bachelard et la cosmologie » in Barrau et Parrochia, *Forme et origine de l'univers. Regards philosophiques sur la cosmologie*, pp. 235-247.
26. G. Bachelard, « L'univers et la réalité », pp. 107-108.
27. G. Bachelard, *Le rationalisme appliqué*, p. 104.

cosmologie a pour point de départ des données immédiates de l'expérience et, pour point d'arrivée, des conclusions générales et à embrasser le tout de la nature qui dépasse largement l'expérience. De même que les « cosmologies » antiques prétendaient ramener tout phénomène des éléments simples (feu, eau, air, terre...) ou des concepts géométriques (sphère, centre...), de même les « cosmologies relativistes » tentent de rapporter les faits localement établis (« déformation locale de l'espace ») à la totalité (« fermeture totale »).

En un certain sens, Bachelard n'a pas tort et la cosmologie moderne ne semble pas aller plus loin que les « cosmologies » de l'Antiquité, malgré tous ses progrès théoriques et observationnels et son dispositif conceptuel et matériel extrêmement riche. En effet, il est étonnant de voir que les cosmologues de nos jours se posent à peu près les mêmes problèmes que leurs devanciers d'il y a plus de deux mille ans. Evidemment pas dans les mêmes termes ni sous les mêmes formes. Les questions techniques autour du taux d'expansion, de la densité, de la courbure et de la topologie de l'univers, ou bien de la formation des particules élémentaires ou de celle des structures galactiques, s'accompagnent toujours d'autres questions dites « grandes » : la nature et le fondement des lois physiques et de la causalité, la possibilité ou le mode d'existence des objets inobservables ou purement théoriques, et, en fin de compte, l'existence même de l'univers. Si elles sont abordables et effectivement abordées par la science, elles restent tout de même sans réponse définitive. Tout comme un bon vieux problème philosophique.

En effet, Kant disait lui-même que les idées sont données comme « un problème qui ne comporte aucune solution et que nous nous acharnons pourtant à traiter comme si un objet effectivement réel lui correspondait » [28]. Qu'est-ce qu'un problème ? Le mot grec *problema* vient du verbe *proballein*, qui veut dire projeter, lancer vers l'avant. En mathématiques, un problème n'a de sens que quand il est déterminé par d'autres propositions préalablement établies que sont des théorèmes. Le théorème, *theorema*, provient de *theorein*, qui signifie regarder, contempler. Un théorème est une proposition qui n'est pas évidente en soi, mais découle d'un raisonnement fondé sur des des propositions vraies que sont définitions et axiomes, servant notamment à *résoudre* un problème. Par exemple, pour résoudre le *problème* de trouver l'hypoténuse d'un triangle, on a recours au *théorème* de Pythagore.

Le rapport théorème-problème se traduit, en logique propositionnelle aristotélicienne, par celui entre proposition-problème, où le sens d'un problème n'est donné que quand il est subordonné à une proposition. C'est celle-ci qui

28. Kant, *Critique de la raison pure*, B510. Rappelons que c'est Gilles Deleuze qui fait remarquer ce petit passage de la *Critique*.

« génère » le problème et garantit la solution de celui-ci. Ce qui revient à dire qu'un problème (exemple d'Aristote : « animal-pédestre-bipède est la définition de l'homme, n'est-ce pas ? ») n'est qu'une autre forme de la proposition dont il n'est qu'un simple changement de tournure, sans pour autant changer de sens ni de valeur (« est-ce que animal-pédestre-bipède est ou non la définition de l'homme ? »). Le problème n'est jamais donné sans la proposition qui en est à la fois l'origine et la solution elle-même.

Mais Deleuze entreprend une tout autre interprétation de la notion de problème, eu égard aux idées transcendantales de Kant. Les idées ne sont pas seulement *données comme* problèmes, mais elles *sont* de vrais problèmes. Ces problèmes qui « ne sont pas supprimés par leurs solutions puisqu'elles sont la condition indispensable sans laquelle aucune solution n'existerait jamais [29] ». Une fois les solutions données, les problèmes se déterminent à nouveau *avec* ces solutions, en dévoilant les *conditions* de celles-ci et ouvrant tout un champ de nouvelles solutions à venir. L'idée-problème ne se rapporte pas à un *objet* particulier, mais à ce par quoi un objet se détermine en tant qu'objet, « le champ systématique unitaire orientant et subsumant les recherches ou les interrogations, de telle manière que les réponses à leur tour forment précisément des cas de solutions » [30]. Les solutions sont cherchées à l'aide des autres sciences et de leurs propres questions et réponses plus ou moins précises et concrètes, déterminées et adaptées à chaque théorie. Or, aussi loin qu'on aille dans cette direction, les problèmes ne s'épuiseront jamais, susceptibles de se déterminer à nouveau et de faire surgir de nouvelles questions et réponses [31].

Revenant à l'idée d'univers, on pourrait dire qu'elle pose elle-même comme problème. Selon Kant, toute tentative de faire de l'univers un objet de la connaissance n'aboutit à rien, sinon à des antinomies qui se posent comme des *questions* comme : si le monde est fini ou infini dans le temps et dans l'espace ;

29. Gilles Deleuze (1968), *Différence et répétition*, Paris : P. U. F., p. 212.

30. Deleuze, *cit.*, p. 219.

31. « Un problème n'existe pas hors de ses solutions. Mais loin de disparaître, il insiste et persiste dans ces solutions qui le recouvrent. Un problème se détermine en même temps qu'il est résolu ; mais sa détermination ne se confond pas avec la solution, les deux éléments différents en nature, et la détermination est comme la genèse de la solution concomitante. (C'est ainsi que la répartition des singularités appartient complètement aux conditions du problème, tandis que leur spécification renvoie déjà aux solutions construites sous ces conditions.) » Deleuze, *cit.*, p. 212.

Deleuze fait référence à la théorie des équations différentielles telle qu'elle a été interprétée et transposée en philosophie par Albert Lautman. Lautman, lui, s'est référé aux travaux de Poincaré, l'un des résultats décisifs en la matière. Dans une équation différentielle, les points singuliers ne sont pas des solutions, mais renseignent justement ce que les solutions *ne sont pas*. Poincaré avait montré que les points singuliers sont décrits eux-mêmes par des courbes, par ou à travers lesquelles les solutions sont configurées et distribuées selon une certaine typologie. Si ces courbes ne sont pas elles-mêmes les solutions cherchées, elles permettent de décrire, de façon *indirecte* en quelque sorte, les traits généraux de ces solutions.

s'il est composé des parties invisibles ou divisé à l'infini ; y a-t-il une place pour le libre arbitre ou tout y est enchaîné dans l'ordre de la nature ; existe-t-il par un être absolument inconditionné et nécessaire, ou tout être est conditionné sans exception ? Ce sont des questions qui sont loin d'être arbitraires, mais nécessaires et naturelles, si nécessaires et naturelles qu'il est impossible de s'en détourner.

Merleau-Ponty parlait des moments *philosophiques* chez les cosmologues contemporains, moments où ceux-ci s'interrogent sur les problèmes philosophiques. De même, il existe en philosophie, comme en physique, certains « moments » qu'on pourrait qualifier de *cosmologiques*, où la cosmologie est appelée, voire réclamée, presque accidentellement, mais impérativement en fin de compte, même quand elle n'est pas cherchée comme telle ni parvient à constituer une théorie systématique. Ces moments, Merleau-Ponty les appelait « l'incidence cosmologique » et J.-J. Szczeciniarz, de son côté, la « situation aristotélicienne », c'est-à-dire le « besoin d'une conception a priori de l'Univers comme un Tout, dont une théorie physique peut se déduire » [32].

L'espace et le temps servent de tels moments. Les questions sur la limite de l'univers (fini ou infini), mais aussi sur sa « métrique », c'est-à-dire sa structure, sa figure ou son modèle géométriques, se rapportent au concept d'*espace* ainsi qu'à toute une « métaphysique de base du temps » [33]. Nous allons voir que l'âge classique effectue un renouvellement fondamental des questions par la géométrisation de l'espace : l'espace hétérogène, concret et différencié, constitué des « lieux » aristotéliciens, que fut le cosmos a été substitué par l'espace homogène, abstrait et indifférencié, parfaitement identique à l'espace euclidien [34]. La notion de cosmos perdra son sens et sa place dans les sciences, tant en physique qu'en astronomie. Ceci va de pair avec une nouvelle notion de loi et de cause, qui a pour conséquence une conception mécaniste du monde, où la question de l'origine et de l'histoire se réduit à un problème *mécanique*, au même titre que les mouvements actuels des corps.

Un autre moment se rapporte à la question de la *science*.

> Nous nous étions posé une question : la Cosmologie est-elle une Science ? Et nous y avons répondu par une longue histoire ; c'est qu'il n'y a pas à une telle question de réponse d'une autre sorte ; car

32. Jean-Jacques Szczeciniarz (2004), « La maıtrise de l'infini », *Ciel et espace*, Hors-série, 2 : *Einstein, l'homme qui a inventé l'Univers*, p. 65.

33. « Ideas of Beginning and Endings in Cosmology » in Merleau-Ponty, *Sur la science cosmologique*, pp. 68-81.

34. Passim. Par exemple, Alexandre Koyré (1968), *Etudes newtoniennes*, Paris : Gallimard, p. 29 ; Alexandre Koyré (2001), *Études galiléennes*, Nouveau tirage de l'édition de 1966, Paris : Hermann, Ch. III ; Koyré, *Études d'histoire de la pensée scientifique*, p. 54, p. 170, p. 197–198...

> le sens et la portée variables [...] de l'entreprise cosmologique sont, en fait, inséparables du sens et de la portée conférés à l'entreprise scientifique, à l'entreprise de comprendre la Nature et de la maîtriser avec la Raison. S'agissant de la valeur et de la signification conférées à la Cosmologie, ce n'est pas le contenu du savoir scientifique ni les résultats de la Science qui sont en question, mais la Science elle-même et la destinée de la Raison ; en d'autres termes, il s'agit d'une question *philosophique*[35].

Venons-en à la question de distinguer la cosmologie et la *cosmogonie*. D'une manière générale, la cosmogonie se caractérise par une étude de la formation et de l'évolution de l'univers, c'est-à-dire ses états variés du passé et, si possible, du futur, alors que la cosmologie quant à elle traite l'univers principalement dans son état *actuel*, pour déterminer sa forme et ses limites spatio-temporelles[36]. La distinction reste toujours ambigüe sinon vaine, et pour cause : comment restituer son passé sans rendre compte de son état actuel ou décrire ce qu'il est, sans expliquer *comment* et même *pourquoi* il est devenu ce qu'il est ? De même, il parait difficile à la cosmologie de se borner uniquement au présent de l'univers sans retracer son histoire et prédire sa fin. On aura déjà compris, il n'y a pas lieu de distinguer la cosmologie de la cosmogonie puisque l'on a affaire à l'*espace-temps* qui se détermine par la matière qu'il contient, de sorte que la séparation de l'espace et du temps n'a plus de sens, pas plus que celle de contenu et de contenant. Ce qui revient à dire que « les résultats de la recherche structurale ont un sens cosmogonique et, inversement, tout progrès dans la connaissance de l'évolution concrète du problème de structure[37] ».

Pourtant, la séparation est maintenue d'une façon ou d'une autre. La cosmogonie constitue une discipline plutôt bien circonscrite, désignant une science de l'origine de notre système, c'est-à-dire, planètes, satellites, météorites et d'autres objets qui se trouvent à l'intérieur du système solaire. Ces problèmes sont abordés de manière indépendante des hypothèses sur l'univers dans son ensemble, sans rapport direct donc à la cosmologie, parfois même, « dans un esprit délibérément anti-cosmologique, réduits à des inductions de portée très strictement bornée, à partir des résultats de l'enquête empirique[38] ». Le « séparatisme » tient sous un autre angle : le *Petit Robert* définit la cosmogonie comme « théorie (*scientifique ou mythique*) expliquant la formation de l'univers, ou de certains objets célestes », et la cosmologie comme « théorie (*philosophique et scientifique*) de la formation et de la nature de l'univers ». La

35. Merleau-Ponty et Morando, *Les trois étapes de la cosmologie*, p. 17.
36. Pour la distinction de cosmologie avec la cosmogonie, l'astronomie ou bien l'astrophysique, voir Merleau-Ponty et Morando, *cit.*, p. 13 ; Michel Paty (2003), *La physique du XXe siècle*, Les Ulis : EDP Sciences, pp. 169-170.
37. Merleau-Ponty, *Cosmologie du XXe siècle*, p. 300.
38. Merleau-Ponty, *La science de l'Univers à l'âge du positivisme*, p. 164.

différence ne se trouverait-elle pas dans les parenthèses, « scientifique ou mythique » d'un côté et « philosophique *et* scientifique » d'un autre, ou, plus précisément, entre le « *ou* » du premier couplet et le « *et* » dans le second ? M. Serres caractérise de son côté la cosmogonie comme « récit des devenirs », pour l'opposer à la description *spatiale* de l'univers qu'est la cosmologie : cette dernière est, selon Serres, incontestablement une science, alors que cela n'est pas le cas pour la cosmogonie [39].

Mais il n'en a pas toujours été ainsi...

3 Pour une archéologie de la cosmologie

Il y a lieu de se rappeler que l'univers est lui-même un produit *historique*, à savoir l'objet d'une science elle-même non exempte d'une histoire, et, tant qu'il fait l'objet d'une science, il constitue un *objet* de l'*histoire des sciences.*

Qu'est-ce qu'un objet de l'histoire des sciences ? Selon Georges Canguilhem qui a magistralement traité la question, l'histoire des sciences, c'est l'histoire d'un objet qui a une histoire [40]. L'objet *naturel* comme l'atome ou le Soleil ou la Terre *devient* un objet *scientifique* quand une science parvient à constituer son propre objet. Il est bien naturel que l'univers fasse l'objet de l'histoire, tant que la science qui en fait l'objet n'est pas sans histoire, mais « l'effectuation d'un projet intérieurement normé, traversée d'accidents et interrompue par de crises, moments de jugement et de vérité » [41]. L'histoire de l'Egypte est l'histoire de l'égyptologie, selon Léon Brunschvicg. On pourrait paraphraser la formule pour l'univers et dire ceci : l'histoire de l'univers est l'histoire d'une science qui en fait l'objet, à savoir la cosmologie [42]. Mais qu'en est-il de l'objet *avant* que la science qui en fait l'objet n'existe ? Comment un objet devient-il l'objet d'une science ?

A cela on pourrait répondre, suivant Michel Foucault, par « l'épistémè », à savoir l'ensemble de savoirs apparemment hétérogènes, qui sont donnés, ap-

39. « C'est une gonie, non une logie. Le cosmos des Anciens, celui des stoïciens ou d'Aristote, était des logies, des discours sur le cosmos, des descriptions spatiales. Aujourd'hui nous sommes plutôt dans des gonies, dans des devenirs. Il faut distinguer la cosmologie, le discours sur le cosmos, et la cosmogonie, le récit du cosmos. » Michel Serres, « Cosmos » *in Philosophie*, Hors-Série, 2011, p. 10.

40. « L'objet de l'histoire des sciences » in Georges Canguilhem (1968), *Études d'histoire et de philosophie des sciences*, Paris : J. Vrin.

41. Canguilhem, *cit.*, pp. 16-17.

42. Il est intéressant de noter que Canguilhem prend justement pour exemple la mécanique et la cosmologie, avec les deux « Principes », ceux de Descartes et de Newton, en particulier par ce dernier, par sa prise en conscience sinon son parti pris, en réfutant la cosmologie cartésienne qui a pourtant été l'origine de sa nouvelle science.

parus et rendus possibles à une même époque. Il y a lieu de rapprocher la taxonomie de Linné de la logique de Port-Royal qui lui est contemporaine (le XVIIe siècle), plutôt que de l'évolutionnisme de Darwin, ce dernier ayant plus à voir avec la linguistique ou la philologie qui datent de la même époque (le XIXe siècle). *Les mots et les choses* décrit l'itinéraire des pensées à travers lesquelles la vie, le langage, le travail et, enfin, l'homme, deviennent l'objet de recherches au nom de la science. Ces objets ne sont pas *donnés* comme tels une fois pour toutes, mais *constitués*, en même temps que les sciences qui en font l'objet. Si l'histoire de l'homme est l'histoire de l'anthropologie, celle-ci se constitue elle-même par la constitution même de son propre objet qu'est l'homme. D'où la célèbre formule : « l'homme n'est pas le plus vieux problème ni le plus constant qui se soit posé au savoir humain. En prenant une chronologie relativement courte et un découpage géographique restreint – la culture européenne depuis le XVIe siècle – on peut être sûr que l'homme y est une invention récente [43]. »

On serait tenté de se demander si l'univers ne se place justement pas à l'opposé exact du problème de l'homme, s'il n'est pas le problème « le plus vieux », « le plus constant problème posé au savoir humain ». J'ai déjà remarqué l'ancienneté et l'universalité du questionnement sur l'univers. Si l'homme est une invention récente dont la disparition est imminente, le problème de l'univers remonte bien loin, à savoir à la pensée grecque du *cosmos*. Et ce, non pas en tant qu'objet d'une science particulière, mais de *la* science, le premier et le dernier objet du *logos*.

La notion d'univers possède trois étymologies : *to holon*, *to pan* et *kosmos*, Les deux premiers désignaient littéralement le tout (*holon*) ou la totalité englobante et indifférenciée (*to pan* : mot substantivé de l'adjectif *pan* par l'article *ta*, qui devient *panta*, puis passé au singulier) [44]. Le *kosmos* signifiait originairement l'ornement, l'ordre ou l'harmonie, avant qu'il ne soit transposé, par les pythagoriciens, à « l'englobement de toutes choses à cause de l'ordre qui règne en lui [45] ». Les traductions latines comme *universum* et *mundus* seront retenues, deux notions restant toujours subtilement, sinon difficilement, discernables : *universum* évoque la totalité ou collection englobante et exhaustive

43. Michel Foucault (1966), *Les Mots et les choses*, Paris : Gallimard, p. 355.

44. Pour les approches étymologiques, voir Paul Clavier (2000), *Le concept de monde*, Paris : P. U. F., pp. 239-240 ; Rémi Brague (2002), *La sagesse du monde : histoire de l'expérience humaine de l'Univers*, Paris : Livre de poche, pp. 35-45 ; Jean Seidengart (2006), *Dieu, l'univers et la sphère infinie. Penser l'infinité cosmique à l'aube de la science classique*, Paris : A. Michel.

45. Actius, *Platia*, DK 14 A 21, passage cité in Brague, *La sagesse du monde*, p. 36. L'attribution du cosmos aux pythagoriciens serait probablement erronée, selon Brague : elle ne serait qu'une « rétroprojection sur Pythagore de conceptions platoniciennes ».

sans connotation particulière, d'où l'*univers*, tandis que le second, l'agencement régulier et ordonné de l'ensemble, donne naissance au mot « monde » sans pour autant perdre le jugement esthétique qu'il portait à l'origine.

Qu'il y ait un ordre dans le monde, c'est une idée qui vient immédiatement à l'esprit à la première observation de ce qui l'entoure. C'est ce qu'il y a du plus « naturel » de penser, d'après Aristote : « il n'y a rien de désordonné dans les choses qui sont par nature ou conformément à la nature, car la nature est pour toute une cause d'ordre [46]. » Pourtant, il ne va pas de soi que cet ordre ne soit dû à un être surnaturel ou à une origine lointaine, ou transcendante. C'est avec la transposition pythagoricienne que l'ordre du monde se trouve « naturalisé » ou « spatialisé », de telle façon que le spatial (lien simultané et réciproque) l'emporte sur le temporel (enchaînement causal), pour ne plus se rapporter à une origine lointaine qui a jadis existé dans le passé, sans pour autant demeurer effective (comme c'était le cas dans les mythes), à ce qui existe *présentement*, le monde tel qu'il est *actuellement* [47]. L'ordre est désormais inhérent et immanent au monde, ce « tout fini et bien ordonné, dans lequel la structure spatiale incarnait une hiérarchie de valeur et de perfection » [48]. Or, c'est justement aux dépens de l'idée de cosmos qu'apparait, dit Foucault toujours dans *Les mots et les choses*, l'épistémè de l'âge classique : l'ordre de l'abstraction remplace l'ordre de la représentation, au nom de la *mathesis*.

L'âge classique est une période qui a marqué l'esprit humain comme une « profonde transformation intellectuelle dont la physique moderne, ou plus exactement classique, fut à la fois l'expression et le fruit » [49]. Après les travaux pionniers de Descartes et Galilée, Newton accomplit la mécanique classique et inaugure la physique mathématique avec la « synthèse » qui porte son nom. Or, cet événement se caractérise également par la « destruction du Cosmos » selon

46. Aristote (2005), *Physique*, trad. par Pierre Pellegrin, Paris : Flammarion, VIII, 1, 252a11–12.

47. Maurice Clavelin (1968), *La philosophie naturelle de Galilée*, Paris : P. U. F. ; réédition (Paris : Albin Michel, 1996), pp. 28-29. Sur la « spatialisation » de la notion de cosmos chez les Grecs, voir aussi dans Jean-Pierre Vernant (2005), *Mythe et pensée chez les grecs : études de psychologie historique*, 13, Paris : La Découverte ; Nouv. éd. rev. et augm. Nous allons voir plus loin que la spatialisation s'effectuera à l'âge classique d'une tout autre manière, mais avec une ampleur non moins grande.

48. Koyré, *Du monde clos à l'univers infini*, p. 11.

49. Koyré, *Études galiléennes*, p. 12. Et l'auteur d'ajouter une note, à propos du terme « classique » : « En face de la révolution scientifique des dix dernières années, il est préférable, semble-t-il, de lui réserver l'épithète »moderne« et de désigner la physique préquantique comme 'classique'. » *ibid.*, note 1.

La périodisation adoptée ici, déjà indiquée dans Introduction, est très générale, mais assez pratique, d'abord parce qu'elle est juxtaposable avec l'évolution de la physique ainsi que l'histoire des idées ou bien celle des « épistémès ». Il existe bien entendu des écarts : chez Foucault l'âge classique désigne les XVIIe et XVIIIe siècles, tandis que le XIXe siècle fait partie de l'âge moderne.

la formule de Koyré, à savoir « la substitution à celui-ci d'un Univers indéfini, et même infini, ne comportant plus aucune hiérarchie naturelle et unie seulement par l'identité des lois qui le régissent dans toutes ses parties, ainsi que celle de ses composants ultimes placés, tous, au même niveau ontologique [50] ». Ce qui se traduit par le *déclin*, sinon l'*abandon*, de la science cosmologique, comme J. Merleau-Ponty ne cesse de souligner :

> Vague après vague, avec Copernic, Galilée et Descartes, la révolution scientifique qui préluda aux temps modernes avait pulvérisé le Cosmos antique et projeté ses fragments dans l'espace infini. La notion même de cosmologie, l'idée que l'on puisse décrire la configuration réelle de l'Univers considéré dans sa totalité, voire en retracer l'histoire, cette idée était devenue inutile et finit même par être abandonnée [51].

C'est cette problématique qui amène le philosophe à étudier l'âge classique dans son ouvrage de 1983, *après* ses premiers travaux sur la cosmologie moderne. C'est la même problématique qui travaille l'étude présente, non seulement pour comprendre la destinée de la cosmologie moderne, mais pour comprendre la destinée de la pensée de Poincaré.

Un autre fait non moins remarquable attire l'attention : les *discours* cosmologiques, surtout *cosmogoniques*, prolifèrent à la même époque. C'est que l'univers, est singulièrement présent dans les discours, scientifiques ou non, et au nom de la cosmologie ou d'autres formes de savoir. C'est un fait d'autant plus remarquable que le mot même cosmologie est une invention de l'époque, sans pour autant que ce soit au nom d'une science proprement dite. C'est que la science qui fait l'objet de l'univers est absente, malgré la présence singulière de la notion d'univers. Ce n'est donc pas par hasard que le mot cosmologie est une invention de l'époque. Quoique l'existence du mot ne s'accompagne pas toujours de celle de la chose, il y a de quoi s'étonner d'un tel écart entre le langage et la réalité. Comment expliquer tel écart ? Pourquoi autant de discours sur l'univers, en ces termes, pas d'autres, à ce moment-là précisément, pas plus tôt ni plus tard ? Quelle est la condition de possibilité d'une telle apparition soudaine ? C'est à l'archéologie à la Foucault d'étudier ces questions.

L'archéologie se définit chez Foucault comme une étude des conditions d'« émergence » de savoirs à une époque donnée. Elle consiste à retracer le mouvement d'idées plutôt global, dont il faut déceler un ensemble de facteurs et dispositifs, certes variés, pourtant pas impossible à déterminer de façon

50. Koyré, *Du monde clos à l'univers infini*, p. 11. Voir aussi Koyré, *Études galiléennes*, Ch. III ; Koyré, *Études d'histoire de la pensée scientifique*, p. 54, p. 170, p. 197–198 et *passim*.

51. « Les bases de la cosmologie moderne », Merleau-Ponty, *Sur la science cosmologique*, p. 84. Et *passim*.

plus ou moins précise. Elle ne s'intéresse pas tant à telle ou telle œuvre ou tel ou tel auteur, qu'à l'ensemble de savoirs ou des « événements discursifs », dans lesquels ces œuvres sont construites, pour déceler ce qui les a rendus possibles et les a fait exister. C'est ce que Foucault appelle les « conditions d'*existence* », conditions à la fois « a priori » et historique : condition de possibilité au sens kantien, c'est-à-dire transcendantal du terme, qui n'est pourtant pas sans mettre en relief un aspect totalement négligé chez Kant qu'est l'*historicité*.

On peut se demander si le travail de J. Merleau-Ponty n'est pas une étude archéologique sur la cosmologie. Dans *La science du cosmos à l'âge du positivisme*, qui a pour sous-titre « L'étude sur les *origines* de la cosmologie moderne », Merleau-Ponty restitue tout un champ de discours produits à cet « âge du positivisme » au sujet de l'univers et son origine sans se borner à quelques auteurs et œuvres particuliers. Il montre ainsi comment la cosmologie perd peu à peu sa place pour ne rester plus qu'une « cosmologie sans le cosmos », pour finir par laisser place à la physique.

> Dans la conception du savoir rationnel qui a prévalu en Europe jusqu'à la fin du XVIIe siècle [...], sans être la Science suprême, la Cosmologie, qu'on distingue alors imparfaitement de la Physique, est au moins un élément essentiel du savoir rationnel suprême que l'on appelle encore la Philosophie. Mais la découverte, au XVIIe siècle, d'une nouvelle science – Newton disait encore la *Philosophie* naturelle –, d'une science de la Nature, expérimentale et mathématique à la fois, qui allait progressivement devenir ce que nous appelons la *Physique*, cette découverte modifia à tel point la position de la Cosmologie dans le système des sciences qu'elle parut devoir s'effacer peu à peu dans les brumes de l'inconnaissable, à l'horizon du savoir accessible, voire du savoir *permis*[52].

L'idée d'une science du cosmos a disparu, aussitôt inventée, à moins d'être substituée à la physique en même temps que les normes relatives à la science, le critère et le modèle de la scientificité sont instituées de façon à rendre l'univers non conforme au nouveau dispositif théorique et empirique de la science. Allons plus loin : c'est aux dépens de l'univers, par son rôle de condition de possibilité joué d'une certaine façon, ou, de façon plutôt négative, que s'instaure la science.

Dans les chapitres qui suivent, et aussi tout au long de la thèse, je tenterai de montrer l'inexistence ou la disparition de cette science au long des trois siècles, du XVIIe au XIXe. Ceci ne sera pas sans nuancer la thèse « absentéiste » de Koyré et de Merleau-Ponty : je tiendrai à constater que cette disparition n'est que l'autre face de la constitution d'un nouvel objet ainsi

52. Merleau-Ponty et Morando, *Les trois étapes de la cosmologie*, p. 15.

que d'une nouvelle science par laquelle se construit cet objet qu'est l'univers. L'histoire de la cosmologie de cette époque, notamment celle du XIXe siècle, a été magistralement analysée par Merleau-Ponty dans son ouvrage de 1983, suivi par les historiens S. Brush et H. Kragh dont les travaux couvrent les périodes plus vastes [53]. Sans entreprendre une synthèse exhaustive ni même d'un résumé approximatif, je vais étudier quelques « figures » et leur corpus qui illustre cette pensée de la fin de siècle. Sans viser non plus une exégèse des œuvres au sens classique du terme, mon analyse mettra l'accent sur les *usages* de l'idée d'univers ou d'autres motifs cosmologiques dans diverses théories et spéculations, servant tantôt d'arguments d'appui ou complémentaires, tantôt d'extrapolation.

53. Brush, *Nebulous Earth*, en particulier pp. 37–91 et pp. 107–117 ; Erich Robert Paul (1993), *The Milky Way Galaxy : Statistical Cosmology 1890-1924*, Cambridge : Cambridge University Press, pp. 13-51 ; Helge Kragh (2007), *Conceptions of Cosmos from Myths to the Accelerating Universe : A history of Cosmology*, Oxford : Oxford University Press, pp. 67-124.

Chapitre I

L'« émergence » du monde classique

1 L'espace et ses problèmes cosmologiques

1.1 Géométrisation de l'espace et ses conséquences

Espace géométrisé

> Quoi qu'il en soit ce fut Descartes (et non pas Bruno ou Galilée) qui formula clairement et distinctement les principes de la science nouvelle et de la nouvelle cosmologie mathématique, son rêve de *reductione scientiae ad geometriam*[1].

La matière est une substance étendue qui occupe certaines portions dans l'espace, en trois dimensions : largeur, longueur et hauteur[2]. Elle est conçue, dès lors, comme un vrai corps parfaitement solide, remplissant l'espace en longueur, largeur et profondeur et recevant toutes sortes de figures et de mouve-

1. Koyré, *Du monde clos à l'univers infini*, p. 127.

2. II, § 4, AT IX 65 in René Descartes (1963c), *Principes de la philosophie*, in *Œuvres philosophiques*, éd. établie et annot. par Ferdinand Alquié, Paris : Garnier frères, t. 3.

Les premières idées cosmologiques de Descartes, surtout celles relatives à la cosmogonie, se trouvent dans *Monde ou Traité de la lumière*, inédit jusqu'en 1664, c'est-à-dire quatorze ans après la mort de son auteur. Pourtant, les idées principales du livre seront continuellement évoquées et revisitées par son auteur dans les ouvrages postérieurs tels que *Discours de la méthode* (1637) et *Les principes de la philosophie première* (1644).

Dans ce qui suit, la référence sera faite majoritairement aux *Principes*. Une étape décisive entre *Monde* et *Principes* est marquée par la mise au point de la doctrine des vérités éternelles et de l'équivalence de la conservation avec la création en Dieu dans les *Méditations métaphysiques* (1641). Toujours est-il que, pour ce qui concerne les idées cosmologiques, c'est dans les *Principes* qu'elles se présentent dans leur forme plus ou moins définitive.

ments[3]. La matière et l'espace ne se distinguent pas dans leur essence, « [c]ar l'extension en longueur, largeur et profondeur qui constitue l'espace est en vérité tout à fait la même que celle qui constitue le corps[4] ». Seulement la matière se rapporte à des étendues *partielles* (ou « singulières ») qui s'identifient avec des corps solides, tandis que l'espace est une étendue *générale* (ou « générique »). Ce qu'on appelle ordinairement l'espace n'est pas autre chose que l'extension ou l'abstraction de la première espèce d'étendue, distingué de celle-ci non pas par l'ordre réel des choses, mais seulement par notre *pensée*. Etendue, propriété d'occuper de l'espace, c'est la vraie forme et essence de la matière, exactement comme des objets géométriques, alors que l'espace, qui en sont l'extension, exactement *comme l'espace géométrique*.

On sait que, chez Aristote, l'espace physique se distinguait de l'espace géométrique de tout point de vue. « Et pour cause : comment l'espace euclidien avec ses droites et ses plans homogènes et infinis pourrait-il convenir à l'univers aristotélicien, fini et anisotrope[5] ? » L'espace physique était hétérogène, anisotrope, plein, limité, doté d'un centre qu'est la Terre ; il se divisait en deux mondes, « la terre et les cieux », composés de divers « lieux naturels » attribués aux corps ; il servait à la fois à représenter l'univers et à expliquer les mouvements qui ont lieu dans cet univers – en un mot à *fonder* même la physique. En revanche, l'espace géométrique était homogène, isotrope, vide, illimité, pas de centre, inadéquat donc à représenter les corps physiques et leurs états. En fin de compte, d'après Aristote, les objets de la géométrie ne pouvaient avoir aucun rapport avec les choses *réelles* ni donc faire l'objet de la physique. Tous ces dispositifs ne servent plus à rien à partir du moment où l'étendue constitue l'essence des corps et aussi l'unique moyenne de concevoir ceux-ci, si bien que les positions de corps comme les mouvements font l'objet d'une étude géométrique (qu'on appellera la *cinématique*), indépendante de la cosmologie. « L'univers plein d'Aristote, sans contenant sous-jacent, permet tout de même de déterminer les positions et le mouvement de façon absolue, grâce à la finitude et à l'ordre du Monde, tandis que celui de Descartes ne le permet pas[6]. »

3. Sur ce point, voir l'exposé du *Monde*, qui est plus concis et clair : René Descartes (1963b), *Le Monde ou traité de la lumière*, in *Œuvres philosophiques*, éd. établie et annot. par Ferdinand Alquié, Paris : Garnier frères, t. 1, VI, AT XI 31 *sqq*.

4. Descartes, *Principes de la philosophie*, II, § 10, AT IX 68. Passage cité d'après la traduction française revue in Frédéric de Buzon et Vincent Carraud (1994), *Descartes et les Principia II : corps et mouvement*, Paris : P. U. F., p. 57.

5. Max Jammer (2008), *Concepts d'espace : une histoire des théories de l'espace en physique*, trad. par Laurent Mayet et Ivahn Smadja, introd. d'Albert Einstein et Marc Lachièze-Rey, Paris : J. Vrin, p. 40.

6. Christiane Vilain (1998), « L'espace classique », *Acta cosmologica*, 24, 1, p. 151. Voir aussi p. 152–153. Sur le rapport entre la physique et la cosmologie chez Aristote, voir

> Il n'y a donc qu'une même matière en tout l'univers, et nous la connaissons par cela seul qu'elle est étendue ; pour ce que toutes les propriétés que nous apercevons distinctement en elle, se rapportent à ce qu'elle peut être divisée et mue selon ses parties, et qu'elle peut recevoir toutes les diverses dispositions que nous remarquons pouvoir arriver par le mouvement de ses parties [7].

Il n'y a donc plus de différence essentielle entre une plume et un plomb : lâchés à la même hauteur, ils tombent tous les deux à la même vitesse, indépendamment de leur masse. Tant qu'ils occupent un même volume d'espace, ils s'équivalent l'un à l'autre, tout en étant équivalents du solide géométrique de même volume. Tous les points de l'espace peuvent être traités de la même manière, suivant les mêmes lois. Il n'y a plus de lieu naturel, ni donc de mouvement naturel ; la notion de lieu désormais dépourvu de sens et celle de mouvement change le sien. La physique ne peut rester plus ce qu'elle était.

Descartes définit le mouvement comme « le transport d'une partie de la matière, ou d'un corps, du voisinage de ceux qui le touchent immédiatement, et que nous considérons comme en repos, dans le voisinage de quelques autres [8] ». Il est *dans le mobile*, non pas dans ce qui le meut, quelle que soit la cause, que ce soit la force ou l'action. Un corps se dit en mouvement, non pas d'un *lieu* à un autre, mais *au voisinage d'autres corps*, ou mieux, *par rapport à* d'autres corps. Ceci dit, le mouvement du corps perd son sens sans ce *par rapport à quoi* il se meut. Et c'est toujours un *corps réel*, non le lieu ni même l'espace, qui sert de tel point de référence. Tout corps peut jouer le rôle de référentiel : le navire, la Terre ou bien les étoiles fixes... enfin n'importe quel corps qui se trouve dans l'univers. Tous les points sont équivalents les uns aux autres et tous les mouvements sont relatifs. Le mouvement uniforme et rectiligne est équivalent du repos tant qu'il n'a aucun effet réel sur le corps ni sur le milieu qui l'environne. D'où vient le principe du « mouvement comme rien », qu'on appelle aujourd'hui le principe de relativité galiléenne et qui constitue le fondement de la cinématique.

> En ce sens, on peut dire qu'une même chose en même temps est mue et ne l'est pas, selon que l'on détermine son lieu diversement [9].

Ce qui revient à dire qu'aucun point de l'univers ne peut être considéré comme véritablement immobile, ce qui le privilégierait comme unique référen-

---

également Clavelin, *La philosophie naturelle de Galilée*, pp. 28-37.

7. Descartes, *Principes de la philosophie*, II, § 23, AT IX 75.
8. Descartes, *cit.*, II, § 25, AT IX 76.
9. Descartes, *cit.*, III, § 28, AT IX 113.

Si Galilée se sert de la relativité pour constater le mouvement de la Terre (argument déjà servi à Copernic), il ne la pose pas systématiquement ni explicitement comme un principe proprement dit. Voir Vilain, « L'espace classique », pp. 156-157. Sur la relativité comme un principe, voir *infra*, chapitre V.

tiel, une sorte de centre de tous les mouvements qui existe dans l'univers. S'il existait un point considéré comme « véritablement immobile », ce point servirait d'unique référence possible, d'une sorte de centre de tous les mouvements qui existent dans l'univers. Relativement au papillon, le navire est immobile, mais par rapport à celui-ci c'est la Terre qui est immobile pour laquelle le Soleil est immobile, ainsi de suite. Mais parviendrait-on à jamais à celui qui serait absolument immobile à toutes choses, comme c'était le cas de la Terre chez Aristote ? « A la finitude du Monde aristotélicien répond la finitude de la pensée chez Descartes [10]. » En conséquence de quoi tout est en mouvement dans le monde : « Chaque corps peut participer à une infinité d'autres mouvements en tant qu'il fait partie de quelques autres corps en mouvements divers. » Il existe en effet « une infinité de divers mouvements qui durent perpétuellement dans le monde », la Terre, la mer, les fontaines et les rivières, les plantes et les animaux... « bref, il n'y a rien, en aucun lieu, qui ne se change [11] ». Qui plus est, il est les petites parties qui se meuvent à l'intérieur des corps, dont les actions ne sont pas aperçues par nos sens à cause de leur petitesse. L'univers est donc plein de mouvements.

Qui dit la matière dit l'étendue, ainsi que l'espace, et *vice versa*. S'il en est ainsi, l'espace vide de corps sans matière est dépourvu de sens ; ce n'est qu'une contradiction dans les termes. Une bonne partie des « cieux » nous parait vide, mais ce n'est pas parce qu'elle est vide en réalité, mais parce qu'elle est occupée et remplie par une matière subtile [12]. Cette matière, quoique peu « matérielle » et impossible à apercevoir pour nous, n'en est pas moins capable d'environner et de toucher de tous côtés les corps matériels, au point de ne laisser aucun vide. C'est aussi elle qui permet de tourner les astres, à l'image de l'eau qui fait frotter les corps [13]. C'est ce qui sera précisé dans les *Principes de la philosophie* avec le terme *tourbillon*, défini comme « toute la matière qui tourne [...] en rond autour de chacun de ces centres », capable de faire tourner les astres, à l'image des « détours des rivières, où l'eau se replie sur elle-même, et tournoyant ainsi fait des cercles ». Le vide devient alors encore plus impossible, pour cette raison que, puisque l'espace est indéfini, un corps en mouvement rectiligne dans le vide poursuivrait jusqu'à infini, mais un tel mouvement nécessiterait une quantité du mouvement infinie, ce qui est absurde. En réalité, un corps est continuellement empêché par d'autres corps et incité à changer son mouvement.

10. *ibid.* Ceci n'est d'autant moins possible que le monde est pratiquement infini. Voir *infra*.

11. Descartes, *Le Monde*, IV, AT XI 9–11.

12. Descartes, *cit.*, AT XI 27–29. Il s'agit des deuxièmes éléments qui constituent le monde. Voir *infra*.

13. Descartes, *cit.*, AT XI 16–18.

Et ceci, jusqu'à ce qu'« il y ait toujours tout cercle de matière ou anneau de corps qui se meuvent ensemble en même temps », « ce grand tourbillon qui compose le ciel, duquel le soleil est le centre ». Les tourbillons servent de clé pour expliquer non seulement les mouvements des planètes, mais aussi, nous allons le voir, leur formation des planètes et surtout leur mise en mouvement.

Espace absolutisé

Newton commence par critiquer la doctrine de Descartes relative à l'espace et son rapport à la matière, ainsi que la conception cinématique du mouvement. La cinématique passe sous silence la cause de la *production* et du *changement* du mouvement, en prétendant qu'« un mouvement peut être *produit* sans qu'aucune force ne soit imprimée [14] ». Un corps peut-il avoir une infinité de mouvements, selon les corps qui servent de référentiels ? Qu'en est-il du mouvement qui n'est pas sans effet ? Tel est le cas du mouvement de la Terre, mais aussi celui du mouvement uniformément accéléré comme la chute libre où le corps ne cesse de changer de vitesse, qui est précisément un effet réel et le signe de la présence d'une force. Newton a pour but de « sauver » les mouvements *réels* qui s'effectuent indépendamment du référentiel, tout en produisant des effets réels. Ils doivent pour cela se rapporter, non pas à tels ou tels *corps*, mais à quelque chose qui est totalement distinct de tout corps, « à quelque être immobile tel que l'étendue seule ou l'espace considéré comme quelque chose de réellement distinct des corps [15] ». Ce « quelque être immobile », quelque chose de réellement « distinct des corps », sera appelé, dans les *Philosophiae naturalis principia mathematica* de 1687, « l'espace absolu » :

> L'espace absolu, de par sa nature, sans relation à quoi ce soit d'extérieur [sans relation aux choses externes], demeure toujours similaire et immobile. L'espace relatif est cette mesure ou dimension mobile de l'espace absolu, laquelle tombe sous nos sens par sa relation aux corps, et que le vulgaire confond avec l'espace immobile [16].

14. Isaac Newton (1995), *De la gravitation*, trad. par François de Gandt et Marie-Françoise Biarnais, introd. de François de Gandt, Paris : Gallimard, pp. 118-119.

15. Newton, *cit.*, p. 122.

16. Isaac Newton (p. d.), *Principes mathématiques de la philosophie naturelle*, trad. par Emilie du Châtelet, trad. fr. en 1759 à partir de la troisième édition de 1727 ; réimpréssion (Paris : J. Gabay, 1966), pp. 10-11.

Sur les débats que ces notions ont suscités et suscitent encore, je me borne à indiquer quelques travaux qui m'ont été particulièrement utiles : Lawrence Sklar (1977), *Space, Time, and Spacetime*, Berkeley : University of California Press, pp. 182-191 ; Françoise Balibar (1984), *Galilée, Newton lus par Einstein. Espace et relativité*, Paris : P. U. F. Pour les travaux plus récents : Lawrence Sklar (2013), *Philosophy and the Foundations of Dynamics*, Cambridge : Cambridge University Press, chapitre 6, en particulier p. 57–69 ; Christopher Smeenk et Eric Schliesser (2013), « Newton's Principia », in *The Oxford Handbook of the*

Les parties conservent leurs mouvements par rapport au tout et en même temps participent au mouvement de ce même tout. Si le tout est en mouvement circulaire, ce mouvement prend effet dans toutes les parties et, en ce sens, il peut être considéré comme réel. Pourtant, s'il est en translation, ses parties sont en repos relatif par rapport au tout, même si elles sont de fait transportées avec ce tout dont elles ne « sentent » pas le mouvement. Dans l'expérience, en effet, on ne « sent » pas la rotation de la Terre. De telles possibilités, Descartes n'avait pas totalement tort, et « il se peut faire qu'il n'y ait aucun corps véritablement en repos, auquel on puisse rapporter les lieux et les mouvements [17] ». C'est pourquoi le mouvement réel doit être défini par quelque chose qui n'est pas seulement *considéré comme* en repos, mais *véritablement* en repos.

> Il n'y a qu'un seul mouvement circulaire d'un seul corps tournant, correspondant à son seul pouvoir de tendre à s'éloigner de son axe, à son effet propre et adéquat ; mais les mouvements relatifs pour un seul corps sont innombrables selon les relations variées qu'il a par rapport aux corps extérieurs, et, comme les autres relations, sont tout à fait dépourvues d'effets réels sauf dans la mesure où elles participent de ce mouvement unique et vrai [18].

Newton procède ensuite à *prouver* le mouvement absolu par deux expériences de pensée : celle du vase et celle des deux globes en rotation. Puisque la première est trop célèbre et peut-être moins significative du point de vue cosmologique, je me contenterai ici à la seconde.

Imaginons deux globes en rotation autour d'un centre de gravité commun, tout en étant connectés par une corde. Si ces corps subissent une tension à travers la corde, ils peuvent se dire en rotation, en mouvement absolu. La tension de la corde est le seul moyen de savoir s'ils sont vraiment en mouvement, à moins que leurs mouvements ne soient relatifs à d'autres systèmes extérieurs. C'est pourtant ce qui est généralement admis : il existe toujours, hormis ces deux globes, des systèmes suffisamment éloignés, celui des étoiles fixes par exemple, auxquels les mouvements des globes peuvent se rapporter. L'expérience de Newton consiste à extraire ces deux corps de tous les autres corps de l'univers, de sorte qu'ils soient les seuls dans l'univers, autrement dit, dans un espace « vidé » d'autres corps. Même si c'était le cas, on aura toujours la tension sur la corde pour voir si les rotations des globes sont réelles ou non ; s'il y a tension, c'est que l'accélération du système est bien réelle, indépen-

History of Physics, sous la dir. de Jed Z. Buchwald et Robert Fox, Oxford : Oxford University Press ; Robert Rynasiewicz (2014), « Newton's Views on Space, Time, and Motion », in *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, sous la dir. d'Edward N. Zalta.

17. Newton, *Principia*, p. 11.
18. Newton, *cit.*, p. 14.

dante des autres corps, restant la même indépendamment de la présence ou de l'absence des corps dans l'univers.

La rotation d'un corps ne se rapporte donc pas à d'autres corps, mais à quelque chose qui se distingue absolument des autres corps et aussi des espaces relatifs, de façon à servir de système de référence à tout corps et à tout mouvement dans l'univers. L'espace absolu existe, mais pas de la même manière que la matière ou l'espace relatif en ceci que son *mode d'existence* qui ne tombe pas « sous nos sens par sa relation aux corps ». Ainsi s'effondre l'identification cartésienne entre la matière et l'espace.

En conséquence de quoi, entre autres, les tourbillons n'ont plus aucune place. Si les tourbillons existaient dans l'espace cosmique, ils auraient *troublé* les mouvements des planètes, en les entrainant à ralentir ; une violation aux lois de Kepler aurait été inévitable. Si l'espace n'était pas vide, mais rempli par un fluide quelconque, il n'aurait pas été privé de résistance et cela aurait affecté les corps célestes, si bien que leur masse aurait pu « être diminuée par raréfaction [...] même jusque'à l'infini ». Ceci revient à réaffirmer la possibilité, voire la nécessité, du *vide* dans l'espace, comme il sera encore précisé dans le Scolie général : à la démonstration expérimentale de Robert Boyle, Newton en vient à ajouter une autre preuve, prenant appui sur sa mécanique, par l'absence de résistance aux mouvements planétaires dans l'espace cosmique.

Dans le système de Newton, dira Einstein plus tard, l'espace joue un « rôle absolu [...] dans l'ensemble de la structure causale de la théorie [...] au sens où l'espace (en tant que système inertiel) agit sur tous les objets matériels, tandis que ceux-ci, en retour, n'exercent aucune action sur l'espace[19]. » En d'autres termes, l'espace sert d'*explication causale* de l'inertie. Qu'est-ce que l'inertie ? C'est une « force » qui permet au corps de continuer son mouvement et de résister à tout ce qui fait changer son état de mouvement. Mais d'où vient que tout corps possède une telle force ? Est-ce une force inhérente, donnée à tout corps ? L'espace sert d'explication causale du comportement inertiel des corps, de raison pour laquelle l'inertie peut être considérée comme la force innée. C'est en effet ce que Newton suggère dans le corollaire V, conçu pour définir ce qu'on appelle aujourd'hui un système de référence inertiel et la relativité galiléenne :

> Les mouvements des corps enfermés dans un espace quelconque sont les mêmes entre eux, soit que cet espace soit en repos, soit qu'il se meuve uniformément en ligne droite sans mouvement cir-

19. Jammer, *Concepts d'espace*, pp. 13-14. Voir aussi Françoise Balibar et Rafaella Toncelli (2008), *Einstein, Newton, Poincaré. Une histoire de principes*, Paris : Belin, p. 111 et p. 143.

culaire [20].

Le corollaire sert à fonder à la fois l'équivalence entre de tels systèmes et leur validité pour la description des mouvements ou bien des phénomènes physiques en général [21]. Ces systèmes valident le principe d'inertie [22], et l'espace en question est conçu comme un « lieu » en quelque sorte des mouvements inertiels, dans lequel le corps soustrait à toute force extérieure, qu'il soit en repos ou continue son mouvement uniforme et rectiligne, et ceci jusqu'à l'infini, tout en ayant pour fonction d'assurer la *réalité* des mouvements.

Pourtant, il existe une autre sorte de force : la force imprimée, qui s'oppose à l'inertie. Si l'inertie est un principe passif et effectif à un corps seul, la force imprimée, active et relationnelle, agissant *entre* deux ou plusieurs corps. Or, il est pratiquement impossible d'observer un mouvement purement inertiel, parce qu'il existe bel et bien plus d'un corps en ce monde et il est effectivement impossible de soustraire un corps à tous les autres. En réalité, c'est seulement quand une telle force *s'exerce* sur le corps que celui-ci exerce de sa part son inertie. La force d'inertie est une force « virtuelle » en quelque sorte, avant qu'elle ne soit « actualisée » par l'ajout d'une force imprimée.

Cette « autre force » prend son ampleur au nom de la loi de la gravitation universelle quand il est question de rendre compte du mouvement voire du changement en général qui a lieu *effectivement* en ce monde. La gravitation « engage » en quelque sorte l'espace, afin qu'elle prenne effet *à distance*, mais ceci pose de redoutables difficultés au nom de l'action à distance, difficultés qui ne seront pas résolues avant la théorie de la relativité générale [23]. Faute de celle-ci, Newton ne peut se contenter que d'une solution quelque peu facile, mais peut-être pratiquement la seule qui lui soit disponible. Il resépare l'espace de la matière. Distinguée de l'espace, la matière ne demeure pas qu'une simple étendue ; elle possède une masse, de même qu'elle occupe un espace. L'espace reprend de son côté son indépendance et même une priorité logique vis-à-vis de la matière, en tant qu'il est lieu unique et commun à tous les corps, capable de les contenir tous en lui et aussi d'être « rempli » par eux. Newton ira jusqu'à considérer l'espace comme une substance, « une affection de l'être en tant qu'être [24] », voire un agent omniprésent, capable d'exercer et de « transporter »

20. Newton, *Principia*, tome I, p. 26.

21. Roberto Torretti (1984), *Philosophy of Geometry from Riemann to Poincaré*, Dordrecht : D. Reidel, p. 323.

22. Stamatia Mavridès (2000), *La relativité*, 4e édition (1re : 1988), Paris : P. U. F., pp. 8-9.

23. Sur ce point, voir Michael Friedman (2008), « Einstein, Kant, and the A Priori », *Royal Institute of Philosophy Supplements*, 63, pp. 41-42.

24. Newton, *De la gravitation*, p. 128. A quoi ajoute-t-il : « Aucun être n'existe ni ne peut exister sans être rapporté, de quelque manière, à l'espace ». C'est ce qui amène Newton,

les actions d'un corps à un autre à distance, de telle façon que l'espace lui serve de son organe (*sensorium dei*).

Espace désubstantialisé, en voie d'idéalisation

Pour Leibniz, l'espace, et le temps se définissent comme des *relations* des choses existantes ou possibles. L'ordre des choses qui *coexistent simultanément* s'appelle l'espace, tandis que celui des choses qui *se succèdent*, le temps. L'espace reste alors séparé de la matière comme chez Newton, à ceci près qu'il est dévêtu de la substantialité et de l'absoluité. L'opposition avec « l'Espace réel absolu, idole de quelques Anglais modernes » se précise davantage dans la fameuse correspondance avec Clarke, disciple et « porte-parole » de Newton [25].

> Ces Messieurs soutiennent donc que l'Espace est un être réel absolu ; mais cela les mène à de grandes difficultés. Car il paraît que cet être doit être éternel et infini. C'est pourquoi il y en a qui ont cru que c'était Dieu lui-même, ou bien son attribut, son immensité. Mais comme il a des parties, ce n'est pas une chose qui puisse convenir à Dieu.
>
> Pour moi j'ai marqué plus d'une fois que je tenais l'Espace pour quelque chose de purement relatif, comme le temps ; pour un ordre des Coexistences comme le Temps est un ordre des successions. Car l'espace marque en termes de possibilité un ordre des choses qui existent en même temps, en tant qu'elles existent ensembles [*sic*], sans entrer dans leur manière d'exister particulières [*sic*] : et lorsqu'on voit plusieurs choses ensemble, on s'aperçoit de cet ordre des choses entre elles [26].

L'espace ne peut être que relatif ou, mieux, relationnel, si bien qu'il est dépourvu de sens de parler de son *existence* ou de sa *réalité* [27]. L'ordre des

---

dans le Scolie général (écrit plus tard sous l'influence de l'échange avec Bentley : voir *infra*), à attribuer à l'espace un statut de substance, voire un attribut divin. Voir aussi Michael Friedman (2009), « Newton and Kant on Absolute Space : From Theology to Transcendental Philosophy », in *Constituting Objectivity : Transcendental Perspectives on Modern Physics*, sous la dir. de Michel Bitbol *et al.*, Dordrecht : Springer, p. 39.

25. Gottfried Wilhelm Leibniz (1991), *Correspondance Leibniz-Clarke*, éd. établie et annot. par André Robinet, présentée d'après les manuscrits originaux des bibliothèques de Hanovre et de Londres, Paris : P. U. F. Les citations sont tirées de cette édition de référence, avec les orthographes modernisés et les lettres majuscules gardées.

Sur cette correspondance, voir aussi Koyré, *Du monde clos à l'univers infini* ; Michel Ghins (1990), *L'inertie et l'espace-temps absolu de Newton à Einstein. Une analyse philosophique*, Bruxelles : Académie royale de Belgique, pp. 50-73. Pour une relecture du débat à la lumière de la cosmologie moderne, voir Merleau-Ponty, *Cosmologie du XXe siècle*, pp. 187-189.

26. Troisième écrit daté du 25 février 1716, Leibniz, *Correspondance Leibniz-Clarke*, pp. 52-53.

27. M. Ghins qualifie la position de Leibniz de *relationniste* plutôt que de relativiste : « Leibniz, qui sur ce point [sur le concept de mouvement réel] est évidemment influencé

choses n'est pas lui-même une chose, ni, *a fortiori*, « une substance, ou du moins quelque être absolu [28] ». Pour le démontrer, Leibniz fait appel aux principes métaphysiques, notamment au principe de la raison suffisante et celui de l'identité des indiscernables. L'espace est généralement uniforme, homogène et isotrope ; il n'y a pas de différence entre deux points quelconques sans qu'il y ait des choses placées. Les deux points dans l'espace diffèrent alors uniquement par les choses qui les occupent chacune. Alors la question se pose : pourquoi les corps se trouvent-ils sur telles ou telles positions, pas sur d'autres ? Et l'ensemble de ces corps, pourquoi se trouve-t-il dans l'espace infini ? « Il est impossible, dit Leibniz, qu'il y ait une raison pourquoi Dieu, gardant les mêmes situations des corps entre eux a placé les corps dans l'espace ainsi pas autrement ; et pourquoi tout n'a pas été mis à rebours (par exemple) par un échange de l'orient et de l'occident [29]. » Or, d'après la relativité de l'espace, il n'y a pas de différence entre tels états : si l'espace n'existe tout simplement pas et que les positions ne sont que relatives, le problème ne se pose même pas alors qu'il est irrésolu et impossible à résoudre, pour les absolutistes, entrainant l'existence d'une chose sans raison suffisante.

Selon Descartes, il n'existe pas d'espace vide de corps, si l'on entend par là l'étendue sans corps ou hors de corps ; un tel espace serait imaginaire, fictif donc irréel. Or, selon Clarke-Newton, si l'espace n'est plus vide, cela n'aurait pas été sans influence sur les mouvements qui s'effectue dans ce même espace. Qu'il n'y ait aucune influence de la sorte, c'est ce qui prouve empiriquement l'existence du vide dans le monde. Ce vide ne désigne pas seulement celui qui est *dans* le monde, mais aussi celui qui est *hors* du monde ; si ce dernier est fini, l'espace vide ne doit pas être imaginaire, mais réel [30].

Dans le quatrième écrit, Leibniz introduit une nouvelle notion qu'est l'*idéalité* par opposition à la réalité et l'attribue à l'espace et le temps. Prenons les noms collectifs comme famille, état ou nation. Ce qui existe réellement, ce sont les individus (« substances individuelles », pour reprendre le terme leibnizien) ; tous ces noms collectifs ne sont que des noms et leur existence n'est que nominale. Mais qu'en est-il des *relations* entre ces substances ? Ce ne sont pas des « êtres absolus », mais des « choses idéales », tout comme la proportion ou d'autres êtres mathématiques ne sont pas de l'ordre de l'*existence*, mais de l'*essence*. Qu'ils ne « participent » pas à la *réalité*, cela ne leur exclut pourtant pas la part de la *vérité*. L'idéalité plutôt que la réalité, tel est leur propre mode

par Aristote, apparaitra comme un relationnaliste moins radical contrairement à l'opinion répandue par les empiristes logiques. » Ghins, *L'inertie et l'espace-temps absolu*, p. 27.

28. Leibniz, *Correspondance Leibniz-Clarke*, p. 53.
29. Troisième écrit, *ibid.*, paragraphe (5).
30. Quatrième réponse de Clarke, Leibniz, *cit.*, p. 109.

d'existence, qu'il ne faut pas confondre avec ce qui appartient à d'autres choses matérielles.

La conception newtonienne du monde, celle d'« un univers matériel fini qui se promène tout entier dans un espace vide infini », est une « fiction », « déraisonnable et impraticable », d'après Leibniz [31]. Il n'y a pas d'espace réel hors de l'univers matériel. Qui plus est, s'interroge le philosophe, en quoi consisterait une telle « promenade », un tel mouvement qui ne produit aucun changement observable ? Ce qui change, continue-t-il un peu plus loin, c'est la situation des parties entre elles, ou l'ordre de leurs rapports. Qu'en est-il alors de la relativité du mouvement, selon laquelle le mouvement est indépendant de l'observation de ce qui se meut et qu'« un vaisseau peut avancer, sans que celui qui est dedans s'en aperçoive [32] » ? Leibniz ne l'accepte pas en constatant que, si le mouvement est indépendant de l'observation, il n'est pas indépendant de l'*observabilité*. « Il n'y a point de mouvement quand il n'y a point de changement observable. Et même quand il n'y a point de changement observable, il n'y a point de changement du tout [33]. » En somme, il n'y a aucune raison pour supposer l'existence d'un espace, lui-même inobservable, auquel se rapporteraient les changements réels, mais inobservables.

1.2 Infinitisation et ses « prix »

Monde in(dé)finitisé

Aristote s'interrogeait sur la représentation géométrique de l'univers et trouva une réponse on ne peut plus claire et simple : « Il est nécessaire que le ciel ait une forme sphérique, car c'est là aussi bien la forme la plus appropriée par son essence que la première par nature [34]. » Aussi paradoxal que cela puisse paraitre, Descartes, lui, qui géométrise le monde et lui dote de toute une caractéristique de l'espace géométrique, lui prive la possibilité d'une telle représentation. Il ne lui est plus question de chercher la figure géométrique, mais la *dimension* de l'univers.

Pour Descartes, « l'étendue du monde est indéfinie [35] ». Nous concevons une étendue en tant que « vraie idée » que nous possédons du corps et ceci *en quelque espace que ce soit*. Il avait remarqué un peu plus haut : « on ne peut

31. Cinquième écrit, Leibniz, *cit.*, p. 135 (paragraphe 29).
32. Leibniz, *cit.*, p. 149 (paragraphe 52).
33. Leibniz, *cit.*, p. 135.
34. Aristote (2004), *Traité du ciel*, trad. par Catherine Dalimier et Pierre Pellegrin, Paris : Flammarion, 286b10.
35. Descartes, *Principes de la philosophie*, II, § 21, AT IX 74.

prouver ni même concevoir qu'il y ait des bornes en la matière dont le monde est composé. » Chaque fois qu'on imagine une limite, nous *pensons* toujours à quelque chose qui est au-delà de cette limite et ce quelque chose ne peut être un espace vide, qui est impossible pour Descartes. Nous sommes incapables de concevoir une limite à l'étendue, et c'est en raison d'une telle ignorance que nous qualifions le monde d'indéfini. A cet argument épistémologique s'ajoute un autre, qu'on pourrait qualifier de cinématique :

> Mais si nous pensons qu'on ne saurait rencontrer en tout l'univers aucun point qui soit véritablement immobile (car on connaitra par ce qui suit que cela peut être démontré), nous conclurons qu'il n'y a point de lieu d'aucune chose au monde qui soit *fermé* et *arrêté*, sinon en tant que nous arrêtons par notre pensée [36].

Descartes revient sur la dimension de l'univers à la troisième partie des *Principes*. L'argument infinitiste prend ici appui sur un fait astronomique qu'est l'incommensurabilité de la distance des étoiles fixes. La distance entre le Soleil et Saturne, prise à l'époque pour la dernière planète du système solaire, n'est même comparable à la distance des étoiles mêmes les plus proches. Ce fait n'explique pas seulement pourquoi la mesure des parallaxes n'est pas disponible, mais aussi pourquoi il faut considérer que les étoiles fixées sont extrêmement éloignées et, par conséquent, le monde, indéfini.

> Mais il est aisé de répondre que la grande distance qui est entre la Terre et les étoiles en est cause : car je la suppose si immense que tout le cercle que la Terre décrit autour du Soleil, à comparaison d'elle, ne doit être compté que pour un point [...] ; les astronomes, qui savent déjà que la Terre comparée au ciel ne tient lieu que d'un point, ne le trouveront point si étrange [37].

Il est vrai que Descartes prend soin d'employer la notion d'*infini* pour le réserver exclusivement à Dieu. Si le monde est indéfini seulement à l'égard de notre connaissance, du vrai infini, il est à Dieu, cet être incomparablement plus grand que tout ce qui a une fin. Cette infinité divine ne peut se réduire à ce qui n'a pas de fin comme c'est le cas du monde ; ce serait là une définition négative, qui ne conviendrait pas à Dieu : « il ne peut y avoir de progrès à l'infini au regard des idées qui sont en moi, à cause que je me sens fini [...], mais quand je n'ose par après nier le progrès à l'infini, c'est au regard des œuvres de Dieu, lequel je sais être infini, et par conséquent que ce n'est pas à moi à proscrire aucune fin à ces ouvrages, » dit Descartes dans une lettre écrite en 1649 [38]. Par « le progrès à l'infini », Descartes fait référence à la distinction entre l'infini

36. Descartes, *cit.*, II, § 13, AT IX 70.
37. Descartes, *cit.*, III, § 40, AT IX 121. Voir aussi § 20–23, AT IX 110–112.
38. Lettre à Clerselier du 23 avril 1649. AT V 356.

en acte et l'infini en puissance qui remonte à Aristote. Elle est plus ou moins maintenue à l'âge classique, mais avec un changement sinon d'un renversement de la donne :

> Car l'infini est conçu comme étant déjà là et non comme le résultat d'un processus interminable. L'espace vide infini doit également être conçu comme tout entier déjà là, non comme le résultat d'une accumulation qui prend du temps. Il est donc, en lui-même, une suppression du temps. Admettre l'infini actuel suppose un autre rapport au temps, particulièrement flagrant lorsque cet infini est spatial. La simultanéité des parties de cet infini constitue une véritable victoire sur le temps, une abolition implicite dont il faudrait chercher les racines profondes, hors du discours explicite. Car de celui-ci le temps est précisément absent [39].

Descartes s'approprie de son côté cette distinction de manière assez originale. Chez Aristote, l'infini actuel était impossible et le véritable infini, c'était l'infini potentiel. L'infini en acte, c'est une *grandeur* définie, tandis que l'infini en puissance, une *série* qui n'en est pourtant pas moins définie [40]. La série des nombres entiers, par exemple, est sans fin en ce sens que chaque nombre a toujours un autre plus grand. De même, chaque fois qu'on attribue au monde une grandeur, on peut toujours imaginer une autre plus grande, de façon à faire augmenter successivement la grandeur sans jamais parvenir au terme.

Centre dans un monde infini ?

Après avoir érigé une axiomatique des principes de la mécanique dans les deux premiers livres des *Principia*, Newton entreprend d'appliquer ces principes aux phénomènes réels, tant terrestres que célestes dans le troisième et dernier livre, intitulé « Système du monde ». Contrairement aux livres précédents, il est désormais question de la *constitution réelle* du monde où l'action de la gravité devient effective.

Ce monde est représenté comme un immense nombre d'étoiles-soleils, un système de masse d'un grand nombre, mais *fini*, dans l'espace *infini*. Cette conception de la matière finie dans l'espace infini est finalement peu distinguée donc de la conception antique, notamment de la conception stoïcienne, mais parfaitement intégrée dans la science classique depuis Giordano Bruno. Mais elle pose problème au sein même du système de Newton. L'infinité de l'espace

39. Vilain, « L'espace classique », pp. 154-155.

40. C'est un point qui n'a pas été assez remarqué, selon D. Garber, alors que Descartes lui-même insiste à plusieurs reprises. La distinction sera reprise chez Kant, dans la *Critique de la raison pure*, plus précisément dans la première antinomie relative à la grandeur du monde. Voir Daniel Garber (2006), « Les limites du monde », in *Descartes en Kant*, sous la dir. de Michel Fichant et Jean-Luc Marion, Paris : P. U. F., pp. 350-353 et *infra*, Ch. II.

semblerait aller de soi, surtout s'il est absolu et mathématique. N'est-il pas en fin de compte, malgré tout l'effort de Newton d'en avoir une preuve empirique, une construction théorique servant de fondement à la théorie du mouvement ? Un espace infini n'a pas besoin d'un centre, comme nous l'enseigne l'adage pascalien, « une sphère infinie dont le centre est partout, la circonférence nulle part ». Or, dans un système soumis à la gravitation, il existe un centre de gravité, alors le monde devrait avoir un tel centre. L'incompatibilité de l'existence d'un centre, une idée « peu sympathique », avec la conception pascalienne, telle a été « une difficulté inhérente » à la mécanique newtonienne, comme le remarquera Einstein [41].

> **Hypothèse I**. Le centre du Système du Monde est en repos. C'est ce dont on convient généralement, les uns seulement prétendent que la Terre est ce centre, et d'autres que c'est le Soleil. Voyons ce qui résulte de cette Hypothèse [42].

Le passage n'a guère attiré d'attention. Hermann Weyl est l'une des rares exceptions, ne serait-ce que pour le soumettre à une sévère critique [43]. Pourquoi, après avoir déclaré *hypotheses non fingo*, Newton pose-t-il une telle hypothèse qui va apparemment dans le contresens de ses propres « règles », apparemment infondées, qui ne donne que « l'effet d'une fausse note dans un concert » ? Mais on pourrait tenter d'interpréter autrement cette note : ce ne serait pas là une hypothèse « feinte », mais une hypothèse de travail, choisie bien qu'elle ne soit pas directement tirée de l'expérience, un peu comme un postulat dans la géométrie, pour cette raison qu'elle est jugée utile, voire nécessaire, pour poursuivre le raisonnement [44].

En effet, de l'hypothèse découlent les deux propositions-théorèmes, dont la première s'énonce comme suit :

> **Proposition XI – Théorème XI**. Le centre commun de gravité du Soleil, de la terre, et de toutes les planètes, est en repos [45].

Pour preuve, Newton renvoie au corollaire 4 des lois du mouvement selon lequel le centre commun de gravité des corps en mouvement est, ou bien en repos, ou bien en translation uniforme. Or, continue Newton, « si ce centre

41. Einstein nomme le problème du centre comme « une seconde difficulté inhérente à la Mécanique céleste classique », la première provenant de l'espace absolu. Mais d'après moi, ces deux problèmes sont liés. Albert Einstein (1956), *La relativité*, trad. par Maurice Solovine ; réédition (Paris : Payot-Rivages, 2001), pp. 147-148.

42. Newton, *Principia*, p. 28, Livre III (tome II de l'édition française).

43. Balibar et Toncelli, *Einstein, Newton, Poincaré*, pp. 133-134.

44. Pierre Kerszberg (1989), *The Invented Universe : the Einstein-De Sitter Controversy (1916-17) and the Rise of Relativistic Cosmology*, Oxford : Clarendon Press, pp. 45-49. Nous allons revenir longuement sur ce rôle de l'hypothèse et son rapport avec l'expérience, sujet important de la philosophie poincaréenne. Voir *infra*, Ch. V.

45. Newton, *Principia*, p. 28.

avançait toujours, le centre du monde ne serait donc pas en repos, ce qui est contre l'Hypothèse », à savoir l'hypothèse première qu'il vient d'énoncer. Le centre ne peut donc être qu'en repos. Mais sur quoi fonde-t-il ce constat ? De la prémisse selon laquelle le centre de gravité du système solaire, qui est un centre dynamique et réel, est identique au centre du monde, qui est un centre stationnaire et hypothétique.

Le *centre du Système du Monde* dans l'hypothèse s'identifie d'abord au *centre commun de gravité* du système solaire dans la proposition XI, avant d'être rapproché au Soleil lui-même dans la proposition XII :

> **Proposition XII – Théorème XII**. Le Soleil est toujours en mouvement mais il s'éloigne très peu du centre commun de gravité de toutes les planètes [46].

Ici la preuve est plus détaillée. D'après le corollaire 2 de la proposition VIII, on peut connaitre la masse de chaque planète par les forces attractives à égales distances de leurs centres. La masse de Jupiter est à la masse du Soleil (1 à 1067), et leur distance est égale à peu près demi-diamètre du Soleil, le centre de gravité de ce système tombe sur un point « un peu au-dessous de la surface du Soleil ». Idem pour d'autres planètes. D'où le corollaire à cette proposition :

> Cor. Le commun centre de gravité du Soleil, de la Terre, et de toutes les planètes doit donc être regardé comme le centre du monde. Car la Terre, les planètes et le Soleil s'attirant mutuellement, ils sont toujours en mouvement par la force de leur gravité en vertu des Lois du mouvement, ainsi leurs centres mobiles ne peuvent être pris pour le centre du monde qui doit être en repos. Si le corps vers lequel la gravité entraine plus fortement que tous les autres devait être placé dans ce centre (comme c'est l'opinion vulgaire), ce privilège appartiendrait au Soleil. Mais comme le soleil se meut, il faut choisir pour le centre commun un point immobile duquel le centre du Soleil s'éloigne très peu, et duquel il s'éloignerait encore moins si le Soleil était plus grand et plus dense, car alors il serait mû moins fortement [47].

Il existe deux sortes de centres [48]. L'un, « le centre du Système du monde », qu'on peut choisir à son gré, soit la Terre soit le Soleil, et suppose en repos par l'hypothèse de départ. L'autre, le centre de gravité du monde, c'est ce qui résulte de toutes les matières en mouvement comme le Soleil, la Terre et d'autres planètes. Les deux ne sont pas toujours identiques, mais le mouvement du second entrainerait celui du premier. Le second, comme tout centre de gravité de système selon le corollaire 4, il est soit en repos, soit en mouvement rectiligne

46. *ibid.*
47. Newton, *cit.*, p. 29.
48. Je suis toujours Kerszberg, *The Invented Universe*, en particulier p. 47.

et uniforme, les deux étant pris pour équivalents. Or, si le centre de gravité était en mouvement, le centre de l'univers serait lui aussi en mouvement, ce qui contredit l'hypothèse. Par conséquent, le centre de gravité doit être lui aussi en repos.

Pour ce centre exceptionnellement, le repos et le mouvement inertiel ne sont plus équivalents : il est en repos absolu, un point absolument immobile dans l'espace absolu, « vrai et mathématique », demeurant « toujours semblable et immobile ». Pourtant, ce centre « mathématique » ne correspond pas exactement au centre « physique » du système qu'est le Soleil (ou son centre à lui). Et pour cause : le Soleil est en mouvement. Toujours est-il que, conclut Newton, le Soleil est assez grand et son mouvement, assez lent par rapport aux planètes, pour qu'on puisse le rapprocher au centre de gravité de l'ensemble du système. Mais quel est l'apport d'une telle assimilation d'un centre mathématique avec un centre physique, le Soleil ?

Stabilité et infinité. Paradoxe

Quelle est la place de Dieu dans tout cela ? Pour répondre à l'interrogation de Richard Bentley sur l'implication théologique de sa mécanique [49], Newton ne fait pas seulement le point sur celle-ci, mais traite des questions d'ordre cosmologique.

> [I]l me semble que si la matière de notre soleil, et toute la matière de l'Univers, étaient également dispersées à travers tous les cieux, et chaque particule possédait une gravité innée vers tout le reste, et tout l'espace à travers lequel cette matière était dispersée n'était que fini : la matière, située aux confins de cet espace, tendrait par sa gravité vers toute la matière placée à l'intérieur et, en conséquence, tomberait vers le centre de l'espace entier, et y formerait une grande masse sphérique [50].

Il suppose d'abord que la matière est uniformément distribuée dans l'espace infini. Comme les étoiles représentent la matière notamment quant à la masse au niveau cosmique, l'hypothèse de l'homogénéité se traduit par ce que le

49. Sur la correspondance entre Newton et Bentley, voir Koyré, *Du monde clos à l'univers infini*, p. 215 *sqq* et « Newton, Galilée et Platon » in Koyré, *Etudes newtoniennes*, pp. 245-265.

Pour les problèmes cosmologiques évoqués dans cette correspondance, voir Kerszberg, *The Invented Universe*, pp. 28-33, Pierre Kerszberg (2013), « Deduction Versus Discourse : Newton and the Cosmic Phenomena », *Foundations of Science*, 18, 3. Et aussi John D. Norton (1999), « The Cosmological Woes of Newtonian Cosmology », in *The Expanding Worlds of General Relativity*, sous la dir. de H. Goenner *et al.*, Springer, t. 7, p. 305, note 50.

50. Lettre I du 10 décembre 1692, citée in Koyré, *Du monde clos à l'univers infini*, p. 223.

nombre d'étoiles par *unité de surface* (n) reste partout le même[51]. La masse totale (M) est alors simplement calculable par la somme de la totalité des masses, égale à la multiplication de n par la masse d'une étoile (m), et la surface sphérique de l'ensemble de l'espace (S). Cela dit, M dépend uniquement de S, ayant un rayon r égal à la distance depuis le centre ($S = 4\pi r^2$), de façon à s'accroître proportionnellement au carré de la distance ($M \propto r^2$). Par conséquent, la *densité moyenne* de la matière renfermée sur S, ρ ($\rho = M/V$), V étant le volume ($V = \frac{4}{3}\pi r^3$), peut s'écrire comme :

$$\rho = \frac{S}{V} \propto \frac{r^2}{r^3} \propto \frac{1}{r}$$

Autrement dit, la densité moyenne est variante, inversement proportionnelle à la distance r, allant à l'infini vers le centre ($r \to 0, \rho \to \infty$). En revanche, quand r s'accroît indéfiniment, elle devient nulle ou au moins infiniment faible, trop faible pour se dire « matérielle ». Par conséquent, la matière ne peut s'étendre indéfiniment et son « extension » doit s'arrêter quelque part « aux confins de l'espace ». D'où la nécessité d'assigner une *limite* à la partie occupée par la matière dans l'espace qui est, lui, évidemment infini.

Pourtant, ces étoiles-masses ne sont pas simplement « distribuées » comme le seront des points géométriques : elles sont pourvues de masse et de volume, exerçant la force gravitationnelle les unes sur les autres. Chaque étoile subira aussi la force due à la totalité des masses des étoiles, donc à tout l'univers de masse M. Or, selon la loi de Newton, cette force est proportionnelle à M et inversement proportionnelle à $r^2 (F = \frac{M}{r^2})$[52]. Si M est *finie* comme le suppose Newton ici, F sera toujours infinie au centre et nulle à une distance infiniment grande ($r \to 0, F \to \infty; r \to \infty, F \to 0$). Une tendance similaire s'observe au cas de la densité variante : la force gravitationnelle diminue depuis le centre à l'extérieur, mais avec un taux de décroissance plus rapide que celle-ci. En conséquence de quoi les masses finiraient-elles par s'agglomérer vers celles qui sont plus puissantes que les autres, et en fin de compte, la plus puissante qui se trouve au centre de gravité de l'univers, avant de former, avec toutes ces matières réunies, « une grande masse sphérique ». Or, on n'en observe rien de tel dans l'univers et puis, si l'univers tombe dans un tel état, cela ne conviendrait pas à l'image de l'« être puissant » qui l'a créé.

51. Il ne faut pas confondre, comme l'a remarqué J. Norton, la densité moyenne sur la *surface* sphérique avec celle du *volume* entier de la sphère. Dans le second cas, M est constante et la densité dépend uniquement du V et donc de r^3 ; dans premier cas, dont il est question ici, M dépend de S aussi bien que du V. Ce qui donne le résultat qui vient d'être exposé. Voir Norton, « The Cosmological Woes of Newtonian Cosmology », p. 305, note 50.

52. Le même traitement se trouvera chez William Thomson deux cents ans plus tard. Voir *infra*, Ch. V.

C'est pourquoi Newton s'écarte du modèle de la matière finie dans l'espace infini pour passer à une nouvelle conception :

> Mais si la matière était également distribuée à travers un espace infini, elle ne pourrait jamais se réunir en une seule masse ; mais une certaine partie se réunirait en une masse, et une certaine autre, dans une autre, de façon à former un nombre infini de grandes masses, dispersées à de grandes distances l'une de l'autre à travers cet espace [53].

Une infinité d'étoiles dispersées dans l'espace infini, également et suffisamment espacées entre elles, où il n'existe plus un seul et même centre de gravité, mais *plusieurs*. Mais, comment se fait-il que cet ensemble d'une infinité de centres de gravité échappe à l'effondrement gravitationnel ? La question s'était déjà posée et même résolue dans les *Principia* : « Peut-être les étoiles fixes, qui sont également dispersées dans toutes les parties du ciel, détruisent-elles leurs forces mutuelles par leurs attractions contraires. » Chaque étoile est soumise à la gravitation due à d'autres étoiles, voire à toutes les autres matières de l'univers, mais chacune ne subira qu'une attraction nulle ou presque, puisque les actions s'annulent les unes par les autres. Telle est, apparemment, l'interprétation de Bentley dont Newton indiquera le paralogisme dans sa deuxième lettre :

> Vous affirmez que toute particule de matière dans un espace infini est entourée d'une quantité de matière infinie et, subissant par conséquent une attraction infinie dans toutes les directions, doit donc demeurer *in equilibrio* parce que tous les infinis sont égaux. [...] Quand donc je disais que de la matière également répartie dans tout l'espace se rassemblerait sous l'action de sa propre gravité en une ou plusieurs masses énormes, j'entendais cela pour la matière ne se trouvant pas dans un équilibre parfait [54].

En résumé, l'infinitisation de la matière au même titre que l'espace dans le but de « sauver » le monde de la destruction ne règle pas le problème, mais seulement accentue la contradiction qui réside au fondement même de la théorie de la gravitation. Le problème sera reformulé dans les années 1890 et servira à Einstein de point de départ pour ses « Considérations cosmologiques » de 1917 [55]. La densité de la matière reste constante, contrairement au premier cas où ρ est une fonction de r... Mais elle s'approchera de zéro. Par contre, c'est la masse totale M qui dépend de $r^3 (\because M = \rho V = \rho \frac{4}{3} \pi r^3)$. Et si M augmente

53. Cité d'après Koyré, *Du monde clos à l'univers infini*, p. 223.

54. Lettre II du 17 janvier 1692/3, citée in Edward Harrison (1998), *Le noir de la nuit : une énigme du cosmos*, trad. par Christian Jeanmougin, Paris : Éd. du Seuil, pp. 90-91.

55. Einstein, *La relativité*, p. 148. Voir aussi Norton, « The Cosmological Woes of Newtonian Cosmology », pp. 272-274. Voir *infra*, chapitres III et VI.

à mesure de r^3, et F, proportionnelle à M ainsi qu'à r^2, toujours selon la loi de Newton $F = \frac{GM}{r^2}$, on s'aperçoit que la force résultante F s'accroît avec r, et ce, indéfiniment si r va à l'infini.

Mais ce qu'il importe le plus ici, c'est que de nouveaux *problèmes* qui se glissent les uns vers les autres et se développent à nouveau et en d'autres registres. Ainsi un problème proprement cosmologique se transposait en un autre, cosmogonique par exemple : « Et c'est ainsi que le soleil et les étoiles fixes auraient pu être formés, à supposer que la matière fût d'une nature lumineuse », dit-il dans la première lettre à Bentley, sans d'autres justifications [56]. De même, un autre problème, celui qui marquera la mécanique céleste à venir : la *stabilité du système solaire*. Comment expliquer la stabilité *actuelle* qui s'observe effectivement au moment dans le monde et, *en même temps*, le mettre à l'abri d'un éventuel effondrement gravitationnel de l'univers dans l'avenir ? Le problème préoccupera d'autant plus ses successeurs qu'ils seront insatisfaits de l'attitude de leur maître.

2 Mécanisation et bifurcation de la cosmogonie

2.1 Instauration de la cosmogonie mécaniste

Dans la cinquième partie du *Discours de la méthode*, Descartes nous relate la genèse de ses idées cosmogoniques.

> [J]'ai remarqué certaines lois, que Dieu a tellement établies en la nature, et dont il a imprimé de telles notions en nos âmes, qu'après y avoir fait assez de réflexion, nous ne saurions douter qu'elles ne soient exactement observées, en tout ce qui *est* ou qui *se fait* dans le monde. Puis en considérant la suite de ces lois, il me semble avoir découvert plusieurs vérités plus utiles et plus importantes, que tout ce que j'avais appris auparavant, ou même espéré d'apprendre [57].

Descartes reprend la thèse de *création continue* de Thomas d'Aquin à sa manière, de façon à instaurer l'idée d'*évolution* sans pour autant abandonner totalement celle de *création*. Le monde a été créé par Dieu et se conserve depuis, exactement de la même manière. L'action divine sur le monde est la même à la

56. Cité d'après Koyré, *Du monde clos à l'univers infini*, p. 223.
57. René Descartes (1963a), *Discours de la méthode*, in *Œuvres philosophiques*, éd. établie et annot. par Ferdinand Alquié, Paris : Garnier frères, t. 1, AT VI 41. Mes soulignements.

création qu'à la conservation [58]. Si la création et la conservation ne font qu'un seul et même acte en Dieu, le monde n'a cessé de se créer continuellement et progressivement, c'est-à-dire avec le temps, pas une fois pour toutes. Cette idée d'évolution, qui ne doit pas être confondue avec l'évolutionnisme de Darwin ni avec le créationnisme au sens moderne, souvent entendu au sens opposé du premier, est assez novatrice à l'époque. Si le monde, une fois créé, évolue selon les lois de la nature, c'est que Dieu ne crée pas tout ; son rôle créateur se limite à donner des matières premières et à établir les lois de la nature, rôle qui n'en est pas moins grand en fin de compte.

> Pour ombrager un peu toutes ces choses, et pouvoir dire plus librement ce que j'en jugeais, sans être obligé de suivre ni de réfuter les opinions qui sont reçues entre les doctes, je me résolus de laisser tout ce monde-ci aux disputes et de parler seulement de ce qui arriverait dans un nouveau monde, si Dieu créait maintenant quelque part dans les espaces imaginaires assez de matière pour le composer, et qu'il agitât diversement et sans ordre les diverses parties de cette matière, en sorte qu'il en composât un chaos aussi confus que les Poètes en puissent feindre, et que par après il ne fît que prêter son concours ordinaire à la nature, et la laisser agir selon les lois qu'il a établies [59].

Matière et mouvement soumis aux lois de la nature, c'est tout ce qui est nécessaire pour montrer, « sans faire tort au miracle de la création », comment « toutes les choses qui sont purement matérielles auraient pu, avec le temps, s'y rendre telles que nous les voyons à présent [60] ». La nature des choses s'avère « bien *plus aisé[e] à concevoir*, lorsqu'on les voit naitre peu à peu en cette sorte, que lorsqu'on ne les considère que toutes faites [61] ». Les lois sont insérées en nous de façon à nous garantir l'intelligibilité de son œuvre, à nous permettre de les connaitre sans avoir besoin de recourir à nos sens, mais uniquement à la raison. Tout changement, « tout ce qui est et tout ce qui se fait dans le monde », doit être soumis à l'explication mécanique, c'est-à-dire par la communication du mouvement d'un corps à un autre qui s'effectue uniquement par un contact entre ces corps.

Une fois les matières créées avec une certaine quantité de matières et de mouvement, ces deux quantités restent constantes pendant qu'elles continuent leurs mouvements selon leur « inclinaison à continuer leur mouvement en ligne droite ». Elles ne cessent de s'entrechoquer ni de se diviser et de s'agglomérer,

58. « Il est certain, et c'est une opinion communément reçue entre les théologiens, que l'action, par laquelle maintenant il [Dieu] le conserve, est toute la même que celle par laquelle il l'a créé. » Descartes, *cit.*, AT VI 45.
59. Descartes, *cit.*, AT VI 43.
60. Descartes, *cit.*, AT VI 45.
61. Descartes, *cit.*, AT VI 45.

jusqu'à donner naissance aux trois éléments primordiaux[62] : d'une part, les éléments du feu, qui sont les plus subtils et pénétrants ; d'autre part, ceux de l'air, eux aussi subtils, mais non sans quelque grosseur, ronds et joints ensemble comme les grains de sable ou de poussière, munis de pores dans lesquels interpénètrent les premiers éléments ; et enfin les éléments de la terre, qui sont gros et agissent moins vite que les deux premiers. Les « feux » ont tendance à se concentrer vers les centres pour former les étoiles ; les « airs » proviennent des premiers qui se sont arrondis par frottement, pour former des fluides subtils (mais toujours matériels) qui constituent l'espace céleste ; les « terres », grossières et irrégulières, susceptibles de s'agglomérer. Certains mouvements des deuxièmes éléments se mettent à la circulation et de là s'établissent les tourbillons autour du Soleil et des étoiles. Parmi les astres il y en a qui s'« affaiblissent » à cause des tourbillons qui les environnent, au point d'être couverts de taches et d'écorces ; ceux qui s'obscurcissent deviennent des planètes. Les planètes elles-mêmes forment leurs propres tourbillons pour donner naissance à des satellites.

On sait que la cosmogonie mécaniste de Descartes fait l'objet des critiques sévères. On se souvient notamment de la chicanerie de Pascal : « Je ne puis pardonner à Descartes ; il aurait bien voulu, dans toute sa philosophie, se pouvoir passer de Dieu ; mais il n'a pu s'empêcher de lui faire donner une chiquenaude, pour mettre le monde en mouvement ; après cela, il n'a plus que faire de Dieu[63]. » Newton comme Leibniz acceptent que la plupart des phénomènes soient bel et bien soumis aux enchaînements des causes mécaniques, conformément à l'idée cartésienne, avec cette différence que, pour l'un, il y en a qui comportent une cause non mécanique et pour l'autre, ceci doit se distinguer des principes supérieurs qui en sont l'*origine* proprement dite, la raison ultime des choses.

En outre, il est intéressant de remarquer que la question de l'origine se pose de telle façon que le temps ne joue aucun rôle, bien contrairement à l'espace : « Le temps ne fait plus l'objet d'aucun débat et doit être considéré comme implicitement absolu avant la déclaration newtonienne, l'absolu étant concrétisé par l'accord possible entre les astres et les nouvelles horloges construites au pendule galiléen[64], » comme le note Ch. Vilain. En effet, pour Descartes la création du monde est un *processus continu*, pas un acte ou événement ponctuel : tout le processus qui s'explique par les mêmes éléments et par les mêmes lois ; tout comme il n'existe plus de différence entre le monde terrestre et le

62. Descartes, *Le Monde*, V, AT XI 25–27.
63. *Pensées*, 77 (édition de Brunschvicg)
64. Vilain, « L'espace classique », p. 152.

monde céleste, il n'y a plus de différence ontologique ou épistémologique entre l'état primitif et l'état actuel du monde, entre le passé et le présent. Le temps a disparu, à moins d'être spatialisé comme le disait Bergson, soit représenté par une ligne droite équivalente de l'espace parcouru comme chez Galilée, soit réduit au paramètre dans les équations, à une quantité infinitésimale, assimilée à des points, plutôt que des segments, sans que la caractéristique qui lui est propre et le distingue de l'espace telle que l'asymétrie ou l'unidimensionnalité ne soit prise en compte[65]. « L'infini spatial est toujours déjà là. Le mouvement est aussi toujours déjà là, et sera toujours là. La permanence des lois, puis de l'espace, remplace l'évolution temporelle du monde aristotélicien[66]. »

2.2 Cause primitive, « certainement pas mécanique »

Loi comme cause, loi sans cause

La notion de loi, qui avait déjà subi un changement considérable par Descartes (en tant que vérité éternelle établie et imprimée en nous par Dieu), prend un sens encore radicalement nouveau chez Newton, notamment celle de la gravitation. Le cosmos disparu et son pouvoir causal perdu, l'univers est représenté par l'espace d'abord géométrisé par Descartes, puis absolutisé par Newton. (Re)séparé de la matière tout en contenant celle-ci, il est considéré dans un premier temps un « lieu » des lois : une loi se dit « universelle » quand elle s'applique à tous les corps de l'univers, qu'ils soient sur la Terre ou ailleurs, n'importe quelle partie dans l'espace cosmique. Or, l'universalité repose sur un autre caractère des lois qu'est la *localité* : « une vue globale qui comprendrait tout le sensible est en réalité *moins pénétrante* qu'une vue locale où le sensible s'ajoute à des lois idéales. De fait, les lois de la physique newtonienne sont censées rester les mêmes, quelle que soit la configuration globale des éléments qui composent l'univers[67]. »

En effet, les lois en question sont *locales*, consistant à mettre en lien des parties, immédiatement voisines dans le temps et dans l'espace. Après Galilée et avant Newton, la loi se caractérisait par une relation entre des quantités variables : la loi de la chute libre, par exemple, se définit par la relation entre le temps arbitraire et le chemin parcouru ; la troisième loi de Kepler, entre la

65. Emily Grosholz (2011), « Space and Time », in *The Oxford Handbook of Philosophy in Early Modern Europe*, sous la dir. de Desmond M. Clarke et Catherine Wilson, Oxford : Oxford University Press, p. 55.

66. Vilain, « L'espace classique », p. 167.

67. Pierre Kerszberg (2005), « L'idée d'Univers et la cosmologie comme science », *Kairos*, 26, p. 98.

durée de révolution d'une planète et le rayon de l'orbite de celle-ci. Ces relations s'expriment en langage mathématique, plus précisément analytique, en termes de fonction de deux ou plusieurs variables. Chez Newton, la relation établie par la loi n'est plus entre des quantités directement mesurables, mais entre les deux *états* d'un système qui se succèdent *immédiatement*. Plus concrètement, un état du système à l'instant t se définit par un ensemble de variables $x_1, x_2, ..., x_n$, tout ceci *lié* à un autre état qui le suit ou le précède à l'instant $t \pm dt$, dt étant infiniment petit ($dt \approx 0$). Bien qu'une telle loi n'observe pas directement, il est possible de dériver ou retrouver des relations empiriquement établies, et, de plus, d'en tirer quelques *prédictions* qui reviendraient à vérifier la loi en question. Ainsi, les trois « lois » de Kepler sur les mouvements des planètes, obtenues à partir des données observationnelles de Tycho Brahe, en viennent à confirmer à leur tour les lois de Newton.

La loi de la gravitation a ceci de particulier qu'elle est *appliquée* au système de points matériels où il est supposé que la force d'attraction s'exerce entre eux proportionnellement au carré de la distance. Si une planète est dans une telle position à un instant donné, c'est parce que, d'une part, le mouvement de la planète obéit à la loi de Newton, et d'autre part, elle se trouvait à un instant antérieur dans telle ou telle position, avec telle ou telle vitesse, ces dernières constituant la condition initiale. Tous ces éléments sont essentiels à l'explication du mouvement de la planète, sans pour autant qu'ils en soient la *cause* du phénomène en ce sens qu'aucun n'est antérieur, ni simultané ou postérieur, à ce dernier.

Il parait, en effet, difficile de trouver une place à la notion de cause dans ce schème, à moins de parler d'une « causalité différentielle » qui consiste essentiellement dans le lien entre l'événement d'un instant donné et un autre de l'instant immédiatement postérieur ou antérieur. Newton reste extrêmement prudent à l'utilisation du mot cause, surtout quand il est question de la gravité, l'un des piliers les plus capitaux, mais aussi les plus vulnérables (et effectivement les plus critiquées depuis) de sa philosophie. Si la gravitation explique tous les phénomènes, comment s'explique-t-elle elle-même ? Qu'est-ce donc cette force imprimée, supposée inhérente à tout corps et agissante par « action à distance », dont on ignore la cause si elle n'est pas une réhabilitation de la cause qualitative, métaphysique ?

> Il est inconcevable que la matière brute inanimée, sans la médiation de quelque chose d'autre qui n'est pas matériel, puisse agir sur une autre matière et l'affecter sans contact mutuel, comme cela devait être si la gravitation, dans le sens d'Epicure, lui était essentielle et inhérente. Et cela est une raison pour laquelle je désirais que vous ne m'attribuiez pas la gravité innée. Que la gravité soit innée, in-

> hérente et essentielle à la matière, de telle façon qu'un corps puisse agir sur un autre à distance et à travers le vide sans la médiation de quelque chose d'autre, par quoi cette action soit convoyée de l'un à l'autre, est pour moi une absurdité si grande que je crois qu'aucun homme tant soit peu compétent en matière de philosophie ne pourra jamais tomber dans cette erreur[68].

Toujours intrigué, Newton est amené à ajouter dans *Optique* une « Question » en particulier sur la « cause de la pesanteur », forme proposée exprès pour cette raison que « je n'ai pas pu me satisfaire encore sur cet article, faute d'Expérience[69] ». Il récapitule d'abord sa critique du mécanisme dont Descartes reste toujours la figure emblématique. Les mécanistes ont tendance à imaginer toute sorte d'hypothèses comme celle des tourbillons, particulièrement désastreuse, sous prétexte d'expliquer toutes choses mécaniquement, c'est-à-dire par la matière et le mouvement. Mais sur la gravité, Newton prend un ton un peu plus atténué. En fin de compte, la gravité « innée, inhérente et essentielle à la matière » ne semble pas aussi désastreuse que les tourbillons comme hypothèse : pourquoi ne pas rejeter, comme les atomistes antiques comme Epicure, de remplir l'espace par un fluide quelconque en mouvement pour y substituer le vide, et attribuer à la matière la pesanteur comme cause de leur mouvement de chute ? Qui plus est, cette force n'est-elle pas nécessaire à supposer pour expliquer bien d'autres phénomènes comme la cohésion des corps, l'élasticité, le frottement... Toujours est-il qu'il faut se garder d'attribuer une cause quelconque à cette force.

> J'use ici de ce mot seulement pour désigner d'une manière générale *toute force en vertu de laquelle* les corps tendent les uns vers les autres, quelle qu'en soit la *cause*. Car nous devons apprendre par les phénomènes de la nature quels sont les corps qui attirent les uns les autres, et quelles sont les lois et les propriétés de l'attraction *avant de chercher la cause par laquelle l'attraction est produite*[70].

Il existe donc deux notions de cause : la « force en vertu de laquelle » les corps s'attirent et se meuvent, la force étant la cause de ces mouvements ; la cause de cette cause. Ce ne sont pas les mêmes causes, donc ce n'est pas les mêmes types d'explication causale. Or, le premier type de cause, la force d'attraction, sans explication causale, ne retombe-t-elle pas là à une cause qualitative, métaphysique ? Tel a été en effet l'un des points les plus critiqués

68. Lettre II, citée in Koyré, *Du monde clos à l'univers infini*, p. 216.

69. La première édition anglaise d'*Opticks* date de 1704, suivie de l'édition latine en 1706. Des objections, *Optique* n'en manque pas moins, si bien que Newton fait paraitre à la deuxième édition publiée en 1717 d'autres questions. Sur les éditions de cet ouvrage, voir Koyré, *cit.*, pp. 247-250 ; Koyré, *Etudes newtoniennes*, pp. 73-74, note 1.

70. *Question* 23 (31), d'après Koyré, *Du monde clos à l'univers infini*, p. 253. Mes soulignements.

par ses contemporains comme Huygens, ou Leibniz, qu'ils soient ou non mécanistes et/ou cartésiens. Quant à Newton, il se résigne à donner un fondement causal à la gravitation et se limite à multiplier des exemples confirmant ses lois, en traitant ces forces, remarque Koyré, « en tant que causes d'effets observables, [...] comme des causes ou forces *mathématiques*, c'est-à-dire comme des concepts ou relations mathématiques [71] ». Dans tous les cas, la philosophie a bien d'autres problèmes à traiter. Elle a pour tâche principale de raisonner directement à partir des phénomènes, à déduire les causes des effets, jusqu'à arriver à la « toute première cause qui, certainement, n'est pas mécanique [72] ».

A la fin du Scolie général, ajouté lors de la deuxième édition des *Principia* de 1713, Newton revient encore sur la gravité :

> La gravité vers le Soleil est composée des gravités vers chacune de ses particules, et elle décroît exactement, en s'éloignant du Soleil, en raison doublée des distances, et cela jusqu'à l'orbe de Saturne, comme le repos des aphélies des planètes le prouve, et elle s'étend jusqu'aux dernieres [sic] aphélies des comètes, si ces aphélies sont en repos.
>
> Je n'ai pu encore parvenir à déduire des phénomènes la raison de ces propriétés de la gravité, et je n'imagine point d'hypothèses. Car tout ce qui ne se déduit point des phénomènes est une hypothèse : et les hypothèses, soit métaphysiques, soit physiques, soit mécaniques, soit celles des qualités occultes, ne doivent pas être reçues dans la philosophie expérimentale.
>
> Dans cette philosophie, on tire les propositions des phénomènes, et on les rend ensuite générales par induction. C'est ainsi que l'impénétrabilité, la mobilité, la force des corps, les lois du mouvement, et celles de la gravité ont été connues. Et il suffit que la gravité existe, qu'elle agisse selon les lois que nous avons exposées, et qu'elle puisse expliquer tous les mouvements des corps célestes et ceux de la mer [73].

Si les lois mathématiques qui supposent la gravitation comme cause sont suffisamment confirmées dans les phénomènes, on peut dire que la gravitation en est bien la cause, même si elle n'est pas causalement fondée. Les mouvements des choses matérielles se font *en vertu* des lois mathématiques, les lois sont en ce sens, en ce sens seulement, la *cause*, mais elles ne le sont pas pour tous les phénomènes. Ce *en vertu de quoi* toutes les choses matérielles sont mises en mouvement et, *a fortiori*, leur composition, productrice des effets mécaniques qui en suivent, ne peut être mécanique. Il existe aussi des phénomènes qui ne sont pas parfaitement réguliers pour être un phénomène purement mécanique,

71. Koyré, *cit.*, p. 256.
72. *Question* 20 (28). Passage traduit et cité in Koyré, *cit.*, p. 251.
73. Newton, *Principia*, tome II, p. 178–119.

sans pour autant être fortuits pour avoir été dus au hasard : ceux du système solaire.

Dieu créateur et régulateur

A la question de Bentley qui porte, apparemment, sur la « cause » des mouvements des planètes, Newton répond qu'ils « ne pouvaient pas résulter d'une *cause naturelle* seulement, mais leur ont été imprimés par un Agent intelligent [74] ». Ceci pour trois raisons. D'abord, la présence des comètes qui, tout en faisant partie du même système du monde que les planètes, n'en présentent pas moins de caractères *exceptionnels* dans leurs orbites (fortement excentriques et inclinées par rapport au plan général, sans être uniformes dans les sens de rotation). Un système solaire dû à une cause purement mécanique aurait été parfaitement régulier et n'aurait pas fait de telles exceptions. Qui plus est, il existe certains phénomènes du système solaire qu'on ne peut rendre compte comme on le fait pour les mouvements des planètes : « il est clair qu'il n'y a pas de cause naturelle qui puisse déterminer toutes les planètes [...] à se mouvoir dans le même sens, et dans le même plan, sans déviation de quelque importance : ceci doit avoir été l'effet d'une délibération [75] ». Il en est de même, dernièrement, pour la distribution des orbites des planètes : leurs distances, vitesses et masses, bref « ceux justement qui étaient requis pour les faire se mouvoir en décrivant, autour de ces corps, des orbites concentriques déterminées ». La cause de tout ceci ne peut être « naturelle », c'est-à-dire « aveugle et fortuite, mais très bien versée en mécanique et géométrie [76] ».

Revenant dans *Optique* à la « toute première cause qui, certainement, n'est pas mécanique », Newton rapporte celle-ci à d'autres problèmes, cosmologiques :

> [Q]u'est-ce qu'il y a dans les lieux séparés presque vides de matières ? Et d'où vient-il que le soleil et les planètes gravitent les un vers les autres sans qu'il y ait de la matière dense entre eux ? D'ou vient-il que la nature ne fait rien en vain, et d'où proviennent tout cet ordre et toute cette beauté que nous voyons dans le monde ? A quelle fin sont [créées] les comètes ? Et d'où vient-il que les planètes se meuvent toutes dans le même sens sur des orbes concentriques tandis que les comètes se meuvent de toutes sortes de manières sur des orbes très excentriques ? Et qu'est-ce qui empêche les étoiles fixes de tomber les unes sur les autres ? [...] *Et si chaque pas en*

74. Lettre I de Newton à Bentley, citée in Koyré, *Du monde clos à l'univers infini*, p. 222. Mon soulignement.
75. Koyré, *cit.*, pp. 222-223.
76. Koyré, *cit.*, p. 224.

> *avant fait dans cette philosophie ne nous conduit pas immédiatement à la connaissance de cette Première Cause, cependant il nous en rapproche, et de ce fait doit être hautement estimé*[77].

La composition de l'espace cosmique, le mécanisme de la gravitation, l'ordre, la beauté et la finalité et l'équilibre du monde... chaque phénomène est très probablement dû à des causes « naturelles » et donc soumis aux lois de la mécanique, mais chacun constitue un problème local, indépendant et séparé de l'autre. La connaissance de tout ceci serait une condition nécessaire, mais pas suffisante, pour la connaissance de la « première cause » en vertu de laquelle les choses sont créées et mises en ordre selon les lois.

> C'est avec l'aide de ces principes [les principes passifs et actifs, à savoir la force d'inertie et la force d'attraction] que toutes les choses matérielles semblent avoir été composées [...], mises ensemble de manières variées dans leur première création par le conseil d'un Agent intelligent. Car il convenait à Celui qui les a créées de les mettre en ordre. Et s'il le fit, il est antiphilosophique de chercher pour le monde toute autre origine, ou de prétendre qu'il pourrait surgir du Chaos en vertu des seules lois de la Nature ; quoique une fois formée, il peut continuer [...] en vertu de ces lois pendant des âges[78].

Revenant à la question dans le Scolie général des *Principia*, Newton réaffirme que si, l'ordre maintenu dans le système solaire s'explique par la gravitation, celle-ci n'explique pas à elle seule la création même de cet ordre, avec les positions et vitesses des planètes.

> [D]es espaces célestes au-dessus de l'atmosphère de la terre, [...] sont vides d'air : tous les corps *doivent* se mouvoir très-librement dans ces espaces ; et par conséquent, les planètes et les comètes *doivent* y faire continuellement leurs révolutions dans des orbes donnés d'espèce et de position, en suivant les lois ci-dessus exposées. Et elles *doivent* continuer par les lois de la gravité à se mouvoir dans leurs orbes, mais la position primitive et régulière de ces orbes ne peut être attribuée à ces lois[79].

L'espace ne peut agir sur les corps ; il ne peut exercer aucune force, servant uniquement de contenant de ce qu'il contient. Un corps, une fois lancé et laissé dans cet espace presque vide, continue son mouvement tout en conservant son état de mouvement, avant d'entrer dans l'interaction avec d'autres corps et par conséquent d'agir selon les lois de la gravitation. Ainsi s'expliquent les mouvements des planètes, mais il n'en est pas de même pour la distribution de

77. *Question* 20 (28). Passage traduit et cité in Koyré, *cit.*, p. 251. Mes soulignements.
78. *Question* 23 (31) in Koyré, *cit.*, p. 262.
79. Newton, *Principia*, pp. 174-175. C'est moi qui souligne les « doivent ».

leurs « positions primitives » qui présente d'emblée un arrangement régulier, un ordre remarquable : les révolutions des « six planètes principales » et des « dix Lunes » qui tournent autour des planètes sont toutes concentriques et se font toutes dans la même direction et sur le même plan... à l'exception des comètes.

> Tous ces mouvements si réguliers n'ont point de causes mécaniques puisque les comètes se meuvent dans les orbes fort excentriques, et dans toutes les parties du ciel [80].

Tout en étant membres de notre système, les comètes ont des trajectoires fort excentriques et éloignées sans pour autant avoir d'influence sur le reste du système. Si elle en était un phénomène, l'arrangement du système aurait été encore plus régulier, le plus régulier possible, et aucune anomalie comme l'existence des comètes n'aurait eu de place. Toujours est-il qu'il est assez régulier pour suggérer que Dieu eût laissé notre système au hasard aveugle. Ceci prouve la nécessité d'une cause primitive, ni mécanique ni absente, mais divine, initialement et continuellement active sur le monde.

> Cet admirable arrangement du Soleil, des planètes et des comètes, ne peut être que l'ouvrage d'un Etre tout puissant et intelligent. Et si chaque étoile fixe est le centre d'un système semblable au nôtre, il est certain que, tout portant l'empreinte d'un même dessein, tout doit être soumis à un seul et même Etre, car la lumière que le soleil et les étoiles fixes se renvoient mutuellement est de même nature. De plus on voit que celui qui a arrangé cet Univers a mis les étoiles fixes à une distance immense les unes des autres, de peur que ces globes ne tombassent les uns sur les autres par la force de gravité [81].

Cette cause ne couvre pas seulement notre système, mais l'ordre cosmique. Et ceci pour deux raisons qu'on pourrait qualifier de « cosmologiques » : l'un, la ressemblance des divers systèmes de l'univers du point de vue optique (l'échange de la lumière entre les étoiles) et l'autre, le positionnement du système solaire au sein de l'univers par rapport à d'autres systèmes (la distribution espacée des étoiles fixes). La mécanique explique bel et bien le maintien du monde, mais pas sa création ni sa régularisation. Déclarer que le problème de l'origine ne fait pas partie de la mécanique, c'est une négation de la possibilité de toute cosmogonie mécaniste, pour ne pas dire scientifique, dont la voie fut ouverte par Descartes. Ceci entrainera une crise de la cosmogonie au siècle suivant, à ce siècle newtonien [82]. Ce sera exactement là où Kant et Laplace placeront le point de départ de leur hypothèse cosmogonique.

80. Newton, *cit.*, p. 175.
81. *ibid.*
82. Pierre Busco (1925b), « Le problème cosmogonique. Son origine, son évolution, sa valeur », *Revue philosophique de la France et de l'étranger*, 99, p. 52.

2.3 Cause et/ou raison du monde

Le monde, un agrégat ou une série des choses finies, peut être représenté par la succession des états, dont chacun s'enchaîne à un état antérieur et à un état postérieur [83]. Bien curieusement, Leibniz compare ces enchaînements aux éditions d'un livre, celui d'Euclide par exemple. Chaque édition est une copie de l'édition précédente, qui est elle aussi faite sur une autre qui la précède, et ainsi de suite. On pourra remonter successivement jusqu'à la première, mais cela donnera-t-il « la raison complète de l'existence du livre », raison pour laquelle il y a eu ce livre, il a été rédigé et il a connu telles ou telles éditions ? De même, « aussi loin qu'on remonte en arrière à des états antérieurs, on ne trouvera jamais dans ces états la raison complète, pour laquelle il existe un monde et qui est tel [84] ». Tout ce qu'on peut espérer accéder, ce sera toujours le premier état du monde (la toute première édition des *Eléments*), mais celui-ci, pas plus que la série des états postérieurs (différentes éditions des *Eléments*), n'apprendra pas la raison même de son existence ni celle des autres. C'est ce qui sera encore précisé au nom de la *raison suffisante* :

> Jusqu'ici nous avons parlé qu'en simples *physiciens* : maintenant il faut s'élever à la *métaphysique*, en nous servant du *grand principe*, peu employé communément, qui porte que *rien ne se fait sans raison suffisante*, c'est-à-dire que rien n'arrive, sans qu'il soit possible à celui qui connaitrait assez les choses, de rendre une raison qui suffise pour déterminer, pourquoi il en est ainsi, et non pas autrement. Ce principe posé, la première question qu'on a droit de faire, sera : *pourquoi il y a plutôt quelque chose que rien* ? Car le rien est plus simple que quelque chose. De plus, supposé que des choses doivent exister, il faut qu'on puisse rendre raison, *pourquoi elles doivent exister ainsi*, et non autrement [85].

Pour Leibniz, l'ultime raison des choses se divise en deux « pourquoi ». Le premier concerne l'existence même du monde, un questionnement métaphysique par excellence qu'est « pourquoi il y a quelque chose plutôt que rien ». Or, une chose est l'existence du monde, la production des séries dans ce monde en est une autre. On peut donner une date et un lieu à quelque chose,

83. Gottfried Wilhelm Leibniz (2001), *De la production originelle des choses prises à sa racine*, in *Opuscules philosophiques choisis*, éd. établie et trad. par Paul Schrecker, Paris : J. Vrin, *Philosophische Schriften* VII 302-308. Pour les commentaires de ce texte, voir Henri Bergson (2007), « Cours de Bergson sur De rerum originatione radicali de Leibniz », in *Bergson et la science*, éd. établie, annot. et introd. par Matthias Vollet, Paris : P. U. F., t. 3 ; Emily Grosholz (1996), « Plato and Leibniz against the Materialists », *Journal of the History of Ideas*, 57, 2.

84. Leibniz, *De la production originelle des choses prises à sa racine*, p. 171.

85. Gottfried Wilhelm Leibniz (p. d.), « Principes de la nature et de la grâce », in *Principes de la nature et de la grâce ; Monadologie et autres textes, 1703-1716*, sous la dir. de Christiane Frémont, Paris : Flammarion, 1996, Flammarion, § 7, p. 228.

un peu comme on établit l'acte de naissance. Le lieu et la date de naissance d'un individu jouent exactement le même rôle que son nom, son prénom, son sexe, servant à *identifier* cette personne. Mais qu'en est-il de son « origine » ? Qu'entend-on par origine ici ? Dans le langage courant, elle désigne la nationalité en question et permet d'identifier au même titre que d'autres attributs identifiants, inscrits sur la pièce d'identité. Mais on peut se demander si cela donne une *raison* à la naissance d'une personne ou à son existence : le fait qu'elle soit née à telle ou telle date à tel ou tel lieu, cela donne-t-il sa *raison d'être* ?

> Or cette raison suffisante de l'existence de l'univers ne saurait trouver dans la suite des choses contingentes, c'est-à-dire, des corps et de leurs représentations dans les âmes : parce que la matière étant indifférente en elle-même au mouvement et au repos, et à un mouvement tel ou autre, on n'y saurait trouver la raison du mouvement, et encore moins d'un tel mouvement. Et quoique le présent mouvement, qui est dans la matière, vienne du précédent, et celui-ci encore d'un précédent, on n'en est pas plus avancé, quand on irait aussi loin que l'on voudrait ; car il reste toujours la même question [86].

Ce que la naissance de la personne à l'acte de naissance ou à la pièce d'identité est ce que la première édition des *Eléments* est à ce livre. De même que la première édition des *Eléments* n'est pas une « origine », mais un « original », l'état qu'on obtient quand on remonte le plus loin possible, ce n'est pas l'origine de la série des états qui le précèdent, mais seulement un *commencement* de cette série. C'est un état de choses qui ne diffère pas essentiellement d'autres états qui le suivent et sont liés par les lois, qui se dit « cause » non parce qu'il les « cause », mais purement et simplement parce qu'il les précède. Un état peut être la *cause* d'un autre qui fait partie de la même série d'états, mais pas la *raison* ne peut être confinée à une telle série et doit être cherchée en dehors de celle-ci.

> Ainsi il faut que la raison suffisante, qui n'ait plus besoin d'une autre raison, soit hors de cette suite des choses contingentes, et se trouve dans une substance, qui en soit la cause, ou qui soit un être nécessaire, portant la raison de son existence avec soi ; autrement on n'aurait pas encore une raison suffisante, où l'on puisse finir. Et cette dernière raison des choses est appelée Dieu [87].

L'explication du mécanisme d'une horloge ne conduit pas nécessairement à connaitre la source même de ce mécanisme, et *vice versa*. Ce sont les deux questions séparées. Il distingue ainsi la question du *pourquoi* de celles d'un *où*

86. Leibniz, *cit.*, § 8, p. 228.
87. Leibniz, *cit.*, § 8, p. 228–229.

et d'un *quand*, pour renvoyer la première au domaine de la métaphysique, et la seconde, par exemple concernant l'âge et à l'état primitif de la Terre, sujet qui intéresse Leibniz à un moment de sa vie aux sciences physiques. C'est évidemment la première qui l'emporte sur la seconde ; ceci est d'autant plus vrai que les questions « où » et « quand » sont une affaire *relative*, questions spatio-temporelles liées à l'espace et le temps qui sont *relatifs*. Ainsi, dans la correspondance avec Clarke, Leibniz revient sur l'espace et le temps absolus de Newton en faisant appel au principe de la raison suffisante, avec l'ajout d'un autre principe qu'est le principe de l'identité des indiscernables [88]. Si l'espace était absolu, le monde posséderait une position fixe, et il faudrait y avoir une raison pour un tel endroit, pas ailleurs. Mais ce n'est qu'une question absurde, qui ne se pose même pas en dehors de la conception absolutiste. Il en est de même pour le temps. Si le temps était absolu se pose la question : pourquoi Dieu créa le monde à ce moment-là précis, pas quelques années plus tôt [89] ?

> C'est une fiction semblable, c'est à dire impossible, de supposer que Dieu ait créé le monde quelques millions d'années plutôt. Ceux qui donnent dans ces sortes de fictions ne sauraient répondre à ceux qui argumenteraient pour l'éternité du monde. Car Dieu ne faisant rien sans raison, et point de raison étant assignable pourquoi il n'ait point créé le monde plutôt ; il s'ensuivra, ou qu'il n'ait rien créé du tout ; ou qu'il ait produit le monde avant tout temps assignable, c'est à dire que le monde soit éternel. Mais quand on montre que le commencement quel qu'il soit, est toujours la même chose, la question pourquoi il n'en a pas été autrement, cesse.

Rien ne se fait sans raison suffisante ; s'il y a quelque chose à laquelle on ne peut donner aucune raison, c'est que ce quelque chose n'existe pas ; son existence physique ne peut être assurée. Les « où » et « quand » ne vont pas sans le « pourquoi ». La question sera reprise par Kant et Laplace d'une tout autre manière : ils ne s'interrogeront ni pourquoi ni où ni quand, mais *comment*, considérant la création comme un processus mécanique et surtout immanent à ce même monde, sans avoir besoin de recours au transcendant.

Par ailleurs, Leibniz établit aussi le principe de l'équivalence entre cause pleine et effet entier, l'équivalence signifiant l'« égalité dynamique » entre les états qui s'enchaînent [90]. Non seulement il existe des causes, mais ces causes sont quantitativement égales avec les effets. Un corps en chute libre acquiert une vitesse qui le rend capable de remonter à la même hauteur où il se situait

88. Quatrième écrit, Leibniz, *Correspondance Leibniz-Clarke*, pp. 85-89, paragraphe (5)-(14).

89. Quatrième écrit, Leibniz, *cit.*, p. 89, paragraphe (15).

90. Sur ce point, je me suis référée notamment à Isabelle Stengers (2003), *Cosmopolitiques I*, Paris : La Découverte, pp. 103-110.

initialement (position initiale, tout simplement). La cause (chute libre), si elle est pleinement consommée, produit un effet (vitesse acquise) qui lui est égal en quantité. Cet effet sert à son tour de cause en produisant un deuxième effet (rebondissement du corps jusqu'à la hauteur initiale). Les éditions, qu'elles soient bonnes ou mauvaises, fidèles ou infidèles à l'orignal, ont toutes le même rapport causal : l'une sert de cause à l'autre.

Quand un phénomène est encadré ou décrit par de tels principes, un état quelconque du phénomène implique d'autres états : la connaissance du premier entraine celle des autres. Une fois donné l'état d'un moment quelconque (appelé aussi condition initiale), tous les états du système se trouvent entièrement déterminés : à partir d'un état à un instant quelconque (conditions initiales) découlent tous les états successifs du système, de telle façon qu'il est permis de *prédire* son état postérieur ainsi que de *rétrodire* son état antérieur. Et pour cause : tout est déjà tout fait et écrit comme le livre d'Euclide, du passé au futur, et ces deux derniers ne se distinguent finalement pas parce que c'est toujours le même livre qui se répète... C'est en ce sens que « l'état présent est gros de l'avenir et chargé du passé ». L'état présent du monde contient toute l'histoire du passé au futur du monde, tous les états étant égaux les uns aux autres, de telle façon qu'un coup d'œil sur l'état présent donnerait une connaissance parfaite sur tous les états du monde à l'intelligence suprême. Ce qui sert de principe d'intelligibilité du monde quoique la compréhension totale ne soit permise qu'aux yeux aussi perçants que ceux de Dieu.

Cependant, c'est justement ce qui rend incompatible la dynamique classique avec le devenir ou la nouveauté. Par l'élaboration du langage par Lagrange et Hamilton avec lequel s'établit la représentation canonique du système dynamique, le principe d'équivalence est parfaitement intégré dans la mécanique classique ainsi que dans la conception de causalité au nom du déterminisme. La causalité au sens de la raison suffisante est tellement intégrée qu'elle devient chez Kant une catégorie de l'entendement.

Une fois créées les matières et les lois, que reste-t-il à Dieu ? Quels sont son rôle et sa place dans un monde qui a, une fois créé, à évoluer ? Selon Clarke-Newton, Dieu aurait *décrété* ces lois par un acte pur de volonté et, par la même volonté, les aurait imprimées dans les choses. Comme un bon monarque, il aurait effectué son acte au moment de la création du monde et continué à s'en occuper après. Leibniz constate que les lois sont *imprimées* dans la nature même des choses, de façon à rendre celles-ci les meilleures possible et y laisser des effets durables de la touche divine. Tout est mis en ordre dans le monde dès sa création par un seul acte de Dieu, et cet ordre se conserve tout seul, sans avoir besoin de l'intervention de Dieu. Alors que chez Newton

l'idée de conservation n'existe pas et le monde nécessite, pour sa stabilité, l'intervention d'une autre cause qui lui est extérieure, le monde leibnizien n'en a pas besoin parce que le système se conserve tout seul. C'est pourquoi le problème de stabilité ne se pose pas chez Leibniz, en tout cas pas au point de faire appel à une cause extérieure.

3 Une science disparue, aussitôt inventée

Malgré tout, le siècle suivant demeurera newtonien et la conception newtonienne l'emportera sur ses concurrentes. Mais ceci simplement pour cette raison qu'elle s'intègre parfaitement aux principes de la mécanique qui est quant à elle essentiellement newtonienne. Dans la préface de sa *Traité de dynamique*, Jean le Rond d'Alembert conteste d'abord l'identification matière-étendue. Il faut distinguer deux sortes d'étendue : l'une, impénétrable, ce qu'on appelle communément la matière ou le corps, qui est censé être sujet au mouvement ; l'autre, « simplement étendue », qui, pénétrable et immobile, sert de lieu aux corps et de leurs mouvements, à laquelle on attribue le nom d'espace. Il lui importe peu de savoir s'il est absolu ou relatif, réel ou fictif ; il suffit de « concevoir un espace indéfini comme le lieu des corps, soit réel, soit supposé, et de regarder le mouvement comme le transport du mobile d'un lieu dans un autre ». Le temps des débats métaphysiques sur l'essence et la nature de l'espace et du temps est désormais révolu : c'est la nature des *lois* de la mécanique et de la physique, la question de savoir si elles sont vérités nécessaires ou contingentes, qui intéressent, à tel point que l'Académie des sciences de Berlin en fait le sujet de son concours de 1756, pour lequel d'Alembert compose son *Traité de dynamique*[91]. Egalement disparaissent les moments cosmologiques qui s'y accompagnaient, excepté la loi de la gravitation qui prend une signification cosmologique et occupera une place centrale dans la pensée cosmologique post-newtonienne[92].

91. Rougier, *La philosophie géométrique de Henri Poincaré*, p. 7.
92. Merleau-Ponty, *La science de l'Univers à l'âge du positivisme*, pp. 18-22.

3.1 Invention d'une science du cosmos

Cosmologia generalis, entre métaphysique et physique

L'invention du mot « cosmologie » n'est pas un événement anodin tant pour l'histoire de la cosmologie que pour l'histoire de la philosophie [93]. Son inventeur, Christian Wolff, l'introduit dans son ouvrage de 1731, *Cosmologia generalis*. Il est aussi le premier à traiter la cosmologie séparément et indépendamment de la théologie.

Wolff définit la cosmologie comme « la science du monde en général, en tant qu'il est un être composé et modifiable [94] ». Le monde, avec les corps qui le composent, ainsi que les éléments dont les corps sont tirés, est un être composé de corps soumis au mouvement comme dans une machine [95]. Wolff ne proscrit pas la philosophie mécaniste sur ce point : elle a le mérite de ne laisser aucune place à la contingence, même si elle ne rend évidemment pas compte de tout. D'où la nécessité du *nexus rerum*, le principe qui lie tous les corps en un monde et aussi gouverne ce monde, lequel doit se distinguer des lois du mouvement et du changement en général des corps. La cosmologie qui fait l'objet de ce principe supérieur est qualifiée de « transcendantale », fait partie de la métaphysique au même titre que l'ontologie et la théologie, placée entre ces deux dernières : si l'ontologie s'occupe de l'être en tant qu'être et de leurs composés, la cosmologie consiste à appliquer les principes de l'ontologie au monde pour en tirer comme conséquence la contingence de ce monde ou la présence de l'ordre dans ce même monde. Ceci revient à servir à la théologie, en dernière instance : la découverte de la contingence par exemple revient à prouver la nécessité de l'existence d'un être capable de donner naissance à un tel monde, à savoir Dieu [96].

Il arrive à Wolff de distinguer la cosmologie transcendantale de la cosmologie *expérimentale*. Cette dernière vise une théorie du monde dans son ensemble qui part toujours des observations non sans considération d'ordre philosophique certes souvent à part ; la première, une théorie beaucoup plus générale, sans ignorer l'expérience, certes, mais l'empirie joue le rôle ici non de *fondement*, mais d'*instrument* pour vérifier ou prouver des principes a priori. Une telle

93. Je suis Jean École (1985), « Un essai d'explication rationnelle du monde ou la Cosmologia generalis de Christian Wolff », in *Introduction à l'Opus metaphysicum de Christian Wolff*, Paris : J. Vrin. Voir aussi Agazzi, « The Universe as Problem », pp. 44-46, les notes 1 et 2 ; Paul Clavier (1997), *Kant, les idées cosmologiques*, Paris : P. U. F., pp. 35-37 ; Seidengart, *Dieu, l'univers et la sphère infinie*, p. 17.

94. *Cosmologia generalis*, § 1, cité d'après École, « Un essai d'explication rationnelle du monde ou la Cosmologia generalis de Christian Wolff », p. 22.

95. École, *cit.*, p. 27, *sqq.*

96. École, *cit.*, pp. 22-23.

théorie « se veut et est essentiellement philosophique[97] », de façon à s'éloigner et à se séparer des sciences empiriques, notamment de la physique. C'est exactement dans le contresens que va d'Alembert pour qui la cosmologie n'est pas autre chose qu'une « physique générale et raisonnée ».

« Physique générale et raisonnée »

Le néologisme ne tarde pas à entrer dans les vocabulaires courants, comme le montrent le titre de l'ouvrage de Maupertuis, *Essai de cosmologie* en 1752, ou l'entrée du mot « cosmologie » dans l'*Encyclopédie* parue en 1754, article signé par d'Alembert.

> La Cosmologie est donc proprement une Physique générale & raisonnée, qui, sans entrer dans les détails trop circonstanciés des faits, examine du côté métaphysique les résultats de ces faits mêmes, fait voir l'analogie & l'union qu'ils ont entr'eux, & tâche par-là de découvrir une partie des lois générales par lesquelles l'Univers est gouverné. Tout est lié dans la Nature ; tous les êtres se tiennent par une chaîne dont nous apercevons quelques parties continues, quoique dans un plus grand nombre d'endroits la continuité nous échappe[98].

Si la cosmologie se définit avant tout comme une *physique*, ayant pour but de prendre en compte des *faits* empiriques, elle ne les traite pas dans leurs détails, mais par leurs traits *généraux*, afin de découvrir les lois générales. C'est par son « côté métaphysique » qu'elle se distingue de la *cosmographie*[99] : la cosmographie se limite à décrire des *parties* de l'univers, la cosmologie s'intéresse à l'univers *un tout*, un « être composé, et pourtant simple par l'union et l'harmonie des parties ». On est déjà bien loin de la conception wolffienne de la cosmologie : la cosmologie, qui empruntait, chez Wolff, ses principes à l'ontologie et son objectif à la théologie, acquiert pour la première fois chez d'Alembert un statut de *science* à part entière[100].

Quoiqu'elle repose sur le principe de continuité (« tout est lié dans la nature »), qui est un principe qu'on peut qualifier d'ontologique, c'est toujours à l'expérience qui revient à vérifier ce qui en résulte, « [d]e sorte qu'on peut dire qu'il y a une double *Cosmologie* ; *Cosmologie scientifique*, et *Cosmologie expé-*

97. École, *cit.*, p. 47.
98. « Cosmologie » in *Encyclopédie*, vol. IV (1754), 294a, cité d'après D'Alembert (2011), *Discours préliminaire de l'Encyclopédie et articles de l'Encyclopédie : introduits par la querelle avec le Journal de Trévoux*, éd. établie et introd. par Martine Groult, Paris : H. Champion. Pour une analyse des articles de d'Alembert relatifs à la cosmologie dans l'*Encyclopédie*, voir Merleau-Ponty, *La science de l'Univers à l'âge du positivisme*, pp. 19-21
99. « Cosmographie », vol. IV (1754), 293a–294a.
100. M. Groult, Note d'éditeur, D'Alembert, *Discours préliminaire*, p. 223.

rimentale[101]. » Wolff se penchait sur le côté « général » ou « transcendantal » (ce que d'Alembert qualifie de sa part de « scientifique » par une terminologie curieuse), Maupertuis prend pour point de départ l'*expérience*, afin d'arriver à un principe ontologique qu'on nommera le principe de la moindre action et, en fin de compte, à une preuve de l'existence de Dieu. Le reste de l'article est consacré à exposer la théorie cosmologique de Maupertuis, la partie théologique mise de côté jugée peu convaincante. Mais faut-il s'en étonner, puisque, en fin de compte, l'intérêt voire l'utilité de la cosmologie ne vient pas seulement de ce qu'elle nous élève aux lois générales de la nature, mais à la connaissance de leur auteur, ce que Newton appelait « l'intelligence suprême » ? Tout se passe comme si l'univers était « gouverné par une intelligence suprême » et par conséquent qu'il nécessitait l'existence d'un tel être :

> Mais l'utilité principale que nous devons retirer de la Cosmologie, c'est de nous élever par les lois générales de la Nature, à la connaissance de son auteur, dont la sagesse a établi ces lois, nous en a laissé voir ce qu'il nous était nécessaire d'en connaitre pour notre utilité ou pour notre amusement, et nous a caché le reste pour nous apprendre à douter. Ainsi la Cosmologie est la science du monde ou de l'Univers considéré en général, en tant qu'il est un être composé, et pourtant simple par l'union et l'harmonie de ses parties ; un tout, qui est gouverné par une intelligence suprême, et dont les ressorts sont combinés, mis en jeu et modifiés par cette intelligence[102].

Cette conception déiste teintée de rationalisme, si caractéristique du XVIIe siècle, évoque systématiquement l'idée de cause finale, contre laquelle tous les philosophes des Lumières n'ont cessé de combattre[103]. D'Alembert veut réduire la cosmologie à la partie *physique*, la seule qui soit acceptable, sinon de l'intégrer à la physique elle-même. En effet, il parait difficile de distinguer ce qui reste valable en cosmologie, en particulier sa partie « expérimentale », de la physique. Chez Aristote, la physique, séparée de l'astronomie, s'occupait des changements des corps matériels et leurs *causes*. Tandis que les mouvements des cieux faisaient naturellement l'objet de la géométrie (sphérique) par leur nature même d'être uniforme et circulaire sans exception, il n'était ni nécessaire ni possible de faire intervenir les mathématiques dans les études de la physique. Désormais, c'est la notion même de cause qui prend un nouveau

101. « Cosmologie », 294b, D'Alembert, *cit.*
102. « Cosmologie », 294b, D'Alembert, *cit.*
103. Voir par exemple l'article « Causes finales », toujours signé par d'Alembert. Fort critique à l'utilisation des causes finales non sans réserve pourtant : « Mais s'il est dangereux de se servir des causes finales à priori pour trouver les lois des phénomènes ; il peut être utile, et il est au moins curieux de faire voir comment le principe des causes finales s'accorde avec les lois des phénomènes, pourvu qu'on ait commencé par déterminer ces lois d'après des principes de mécanique clairs et incontestables. »

sens : par cause entend-on désormais « tout ce qui produit du changement dans l'état d'un corps, c'est-à-dire, qui le met en mouvement ou qui l'arrête, ou qui altère le mouvement [104] » ; elle fait l'objet non seulement de la physique, mais aussi de l'astronomie, toutes deux se confondant avec la mécanique, la science *mathématique* du mouvement.

> Une des branches les plus brillantes et les plus utiles des sciences *physico-mathématiques* est l'Astronomie physique [...] ; j'entends ici par Astronomie physique, non la chimère des tourbillons, mais l'explication des phénomènes astronomiques par l'admirable théorie de la gravitation. [...] Si l'Astronomie est une des sciences qui font le plus d'honneur à l'esprit humain, l'Astronomie physique newtonienne est une de celles qui en font le plus à la Philosophie moderne. La recherche des causes des phénomènes célestes, dans laquelle on fait aujourd'hui tant de progrès, n'est pas d'ailleurs une spéculation stérile et dont le mérite se borne à la grandeur de son objet et à la difficulté de le saisir. Cette recherche doit contribuer encore à l'avancement rapide de l'Astronomie proprement dite [105].

La dichotomie entre physique et astronomie n'a plus guère de sens, comme le montre le fait que l'expression même de « l'astronomie physique » n'est plus considérée comme un oxymore ; l'astronomie et la physique ne sont pas seulement compatibles, mais inséparables. L'astronomie physique au sens de d'Alembert ne doit pas être confondue, certes, de « l'astrophysique » de nos jours, c'est-à-dire l'étude des propriétés physico-chimiques des objets célestes ; elle n'en diffère pas moins de l'astronomie traditionnelle en ce que son objectif ne se limite pas à *décrire* les mouvements célestes, mais aussi à *expliquer* par leurs « véritables causes » que sont les lois de Newton, et, de plus, à prédire des phénomènes inconnus.

La cosmologie, en tant que « Physique générale et raisonnée », n'est finalement pas autre chose que cette physique renouvelée. Elle n'a plus pour objet le cosmos grec, mais des *lois*. Les lois de Newton en sont des exemples. Ce sont des lois générales qui s'observent « dans un grand de phénomènes » et servent de « chainons » entre les faits observés, sans pour autant qu'on puisse les qualifier d'universelles, c'est-à-dire d'applicables à *tous* les phénomènes leur fondement même de ces lois n'étant pas suffisamment établi.

> Figure et mouvement (j'entends le mouvement qui vient de l'impulsion), voilà une grande partie des principes sur lesquels roule la *Cosmologie*. Il ne faut pas s'en écarter sans nécessité, mais aussi il ne faut pas trop affirmer qu'ils soient les seuls : nous ne connaissons pas tous les faits, comment pourrions-nous donc assurer qu'ils

104. « Cause, en Méchanique & en Physique », vol. II, 1752, p. 789.
105. « Sciences physico-mathématique », vol. XII, 1765, 536b in D'Alembert, *Discours préliminaire*, pp. 289-290.

> s'expliqueront tous par une seule et unique loi ? Cette assertion serait d'autant plus téméraire, que parmi les faits mêmes que nous connaissons, il en est que les lois de l'impulsion n'ont pu expliquer jusqu'aujourd'hui [106].

La cosmologie se réduit à un programme essentiellement mécaniste qui a pour principes « figure et mouvement », en est-il de même pour la cosmogonie ? Peut-on traiter l'origine du monde sans faire aucune concession à la connotation téléologique et théologique, notamment de celle de la cause finale ?

> COSMOGONIE, s. f. (Physiq.) est la science de la formation de l'Univers. Ce mot est formé de deux mots grecs, , monde„ , je sais. La Cosmogonie diffère de la Cosmographie, en ce que celle-ci est la science des parties de l'Univers, supposé tout formé, et tel que nous le voyons, et elle diffère de la Cosmologie, en ce que celle-ci raisonne sur l'état actuel & permanent du Monde tout formé ; au lieu que la Cosmogonie raisonne sur l'état variable du Monde dans le temps de sa formation [107].

Les éléments de la cosmogonie sont 1° la création du monde à un moment donné (il ne doit pas être éternel) ; 2° un être ou un mécanisme capable de créer le monde (ou la première matière), et de le développer jusqu'à attendre son état actuel. Pour une cosmogonie scientifique, le monde ne doit pas s'être fait d'un seul coup et ce processus doit être susceptible d'une explication mécanique. Toujours est-il qu'il est difficile que toute cosmogonie ne soit pas « purement conjecturale ».

3.2 A la recherche d'une cause non originelle

Nexus comme origine

Leibniz définissait le monde ou l'univers comme « toute la suite et toute la collection de toutes les choses existantes », un « tout d'une pièce, comme un océan ; le moindre mouvement y étend son effet à quelque distance que ce soit quoique cet effet devienne moins sensible à proportion de la distance [108] ». Wolff reprend la définition du monde de son maître presque mot à mot, mais avec plus de précision.Que les choses se trouvent rassemblées et arrangées dans tel ou tel ordre, cela ne suffit pas à en faire un monde proprement dit. De même que le tout est plus grand que l'ensemble des parties, de même le monde est plus qu'un agrégat des choses, comprenant leur *connexion* (*nexus*), dans

106. « Cosmologie », D'Alembert, *cit.*, 294b.
107. « Cosmogonie », vol. IV, 292.
108. *Théodicée*, Première partie, § 8.

laquelle chacune des choses contient la « raison suffisante de la coexistence, ou de la succession de l'autre[109] ».

Quelle est donc cette connexion ? D'abord la connexion *successive* s'établit entre deux événements ou deux choses qui se succèdent temporellement, selon l'ordre chronologique. Cette relation correspond à la relation causale, d'une cause efficiente à son effet. Prenons pour exemple, suivant Wolff lui-même, le rayonnement de la lumière par le Soleil et la réception de la lumière par la Terre. Le premier précède le second chronologiquement (de huit minutes), mais aussi en est la *cause* proprement dite, une cause « efficiente » plus précisément. Or, dit Wolff, il est une autre sorte de nexus, un nexus peut-être encore plus fondamental :

> C'est ce qu'on obtient avec les effets du soleil, qui coexistent avec le soleil, non en tant que le soleil est leur cause efficiente, mais en tant que pour ainsi dire le corps total du monde perdure[110].

Les « effets du soleil », de l'émission à l'absorption de sa lumière, ont ceci de commun qu'ils *coexistent* avec l'ensemble du *corps total du monde*. Autrement dit, la connexion des choses successive (*nexus successivorum*), à savoir la relation causale et temporelle, dépend du fait que ces choses existent au même monde, en tant qu'elles sont en connexion simultanée (*nexus simultaneorum*)[111]. Que la connexion simultanée fonde la connexion successive et donc la relation causale, cela signifie que les causes n'ont plus aucune priorité logique ni chronologique sur les effets ; les causes et les effets, ils s'équivalent les uns aux autres, ce qui revient à confirmer le principe de l'équivalence cause et effet prescrit par Leibniz. Et ce, par le fait même qu'ils appartiennent au « *corps total du monde qui perdure* », c'est-à-dire à un seul et même monde. Ce rôle unificateur pris en compte, qui unit les choses pour les asseoir dans les relations causales, l'univers mériterait une nouvelle définition : « la nature dans son ensemble (*natura universa*) comme l'agrégat de toutes les forces motrices, qui sont inhérentes aux *corps coexistants pris tous en même temps dans le monde*[112] ».

---

109. « Sont dites connectées entre elles, les choses dont l'une contient la raison suffisante de la coexistence, ou de la succession de l'autre », *Cosmologia generalis*, § 10, cité in Clavier, *Kant, les idées cosmologiques*, p. 35. La définition donnée à § 48 : « On appelle monde ou encore univers la série des choses finies, simultanées ou successives, en connexion mutuelle » in Clavier, *cit.*, p. 36.

110. *Cosmologia generalis*, § 27, in Clavier, *cit.*, pp. 35-36.

111. « Mais la totalité du monde (*totalitas mundi*) ne peut inclure et intégrer au titre de parties l'existence d'êtres simultanés ou successifs qu'en vertu de 'la dépendance de la connexion des êtres successifs par rapport à la connexion des êtres simultanés (*dependentia nexus successivorum a nexus simultaneorum*) » Clavier, *cit.*, § 64, p. 36.

112. *Cosmologia* § 508, cité d'après Clavier, *cit.*, p. 30. Mes soulignements.

Il y a lieu de comparer la distinction que fera Kant dans *Critique de la raison pure* entre

On se demanderait si Wolff ne fait pas un retour au cosmos grec en lui restituant son pouvoir causal. Bien loin de là, le « corps total du monde » est homogène, indifférent à ce qu'il contient, assimilable sinon identifiable à l'espace géométrique, un peu comme l'espace absolu de Newton. A la place de la raison ultime des choses tant cherchée par Leibniz, Wolff restitue la série des causes efficientes (ou mécaniques), qui n'ont pas directement à voir avec la création divine. L'exemple du rayonnement est déjà révélateur, évoquant l'image d'une horloge (plutôt que d'un océan, exemple privilégié de Leibniz) : si tout est lié dans l'univers, ce n'est pas parce qu'il est comme un vivant, un organisme, mais parce qu'il est comme une *machine*, composée de matière et de mouvements dont les parties sont connectées, *partes extra partes*, sans pour autant qu'elles soient entremêlées les unes avec les autres. Cette machine est certes un ouvrage de Dieu qui est toujours la raison ultime des choses, comme une horloge doit son existence à son horloger, mais l'horloger du monde, une fois accompli son travail de création, n'intervient plus jamais, laissant sa créature continuer son cours toute seule. Toujours fidèle à son maître Leibniz, contre Descartes et Newton, ce Wolff pour qui le monde est certes une création divine, mais cette création n'est pas continuée (Descartes) ni incomplète au point d'être réparé de temps en temps (Newton).

La nouvelle conceptualisation de la cause, ainsi que la notion de force en tant qu'elle produit ou change le mouvement de corps et du mode d'action *local* des deux forces fondamentales, l'inertie et la gravitation, tout ceci n'empêche pas que ces causes agissent de la même manière pour tous les corps de l'univers, c'est-à-dire *universellement*. Cela dit, il n'est pas nécessaire que le Soleil et la Terre forment un « corps total du monde » pour avoir une relation causale, celle-ci étant assurée par la loi de la gravitation, vérifiée et validée pour tous les corps du monde, célestes comme terrestres, si bien qu'elle s'impose comme un fait incontestable, véritablement général, pour ne pas dire universel. Reste la question épineuse qu'est la nature même de la gravitation (si elle est une action à la distance ou si elle se propage à travers un médium, etc.), question qui ne se dissipe pas tout à fait malgré sa *loi*, aussi empiriquement fondée et universellement attestée soit-elle.

deux sens du concept du l'univers : l'un, mathématique, que Kant appelle le monde (*Welt*), et l'autre, la nature (*Natur*) qui est celle-ci dynamique. Voir *infra*.

Histoire naturelle ou « naturalisée » de la Terre

« L'Histoire naturelle prise dans toute son étendue, est une Histoire immense, elle embrasse tous les objets que nous présente l'Univers[113]. » C'est ainsi que Buffon ouvre le premier discours de sa monumentale *Histoire naturelle générale*. L'idée d'histoire naturelle, qui est ancienne, n'impliquait pas à l'origine l'idée d'*histoire*[114]. Elle avait pour objectif l'observation et la description de faits (au lieu de l'explication par les lois), faits historiques, opposés à la connaissance des lois en physique. Rapportée à l'histoire, elle devient une manière de voir, de restituer, de reconstruire, le passer dans le présent, tout en tenant compte de la contingence.

Si l'astronomie ne fait pas partie de l'« Histoire naturelle », celle-ci ne peut se passer des « principaux phénomènes de la Terre » mis au point par l'astronomie, à savoir sa formation, son mouvement et sa figure[115]. Matière et deux forces primitives que sont l'attraction et l'impulsion, au sein de laquelle est né l'ensemble de l'univers. L'impulsion et l'attraction n'agissent pourtant pas de la même façon. Si, pour Buffon, l'attraction, l'une des deux forces fondamentales, est incontestablement universelle, innée donc à tout corps y compris les planètes, il n'en est pas de même pour l'autre, l'inertie (« impulsion »), force qui empêche les planètes de tomber au Soleil. D'où vient la première impulsion des planètes ?

> Cette force d'impulsion a certainement été communiquée aux astres en général par la main de Dieu, lorsqu'elle donna le branle à l'Univers ; mais comme on doit, autant qu'on peut, en physique s'abstenir d'avoir recours aux causes qui sont hors de la Nature, il me paraît que dans le système solaire on peut rendre raison de cette force d'impulsion d'une manière assez vraisemblable, et qu'on peut en trouver une cause dont l'effet s'accorde avec les règles de la mécanique, et qui d'ailleurs ne s'éloigne pas des idées qu'on doit avoir au sujet des changements et des révolutions qui peuvent et doivent arriver dans l'Univers[116].

Elle doit expliquer l'« arrangement merveilleux » dont parlait Newton, ce fait que les planètes, qui comptent six à l'époque tournent et se tournent sur elles-mêmes dans le même sens et presque dans le même plan que le Soleil.

113. « De manière d'étudier et de traiter l'histoire naturelle », *Histoire naturelle générale*, 1749, Georges-Louis Leclerc Buffon (2007), *Œuvres*, éd. établie et annot. par Stéphane Schmitt, Paris : Gallimard, p. 29. Tous les textes de Buffon seront cités d'après cette dernière édition.

114. Bernard Balan (2011), *L'évolution des idées en géologie : des cosmogonies à la physique du globe*, Paris : J. Vrin et aussi Michel Morange (2011), *La vie, l'évolution et l'histoire*, Paris : O. Jacob, pp. 150-151.

115. « De la formation des planètes », *Histoire naturelle* I, 1749, Buffon, *Œuvres*, p. 107.

116. Buffon, *cit.*, p. 110.

La probabilité que toutes les six révolutions planétaires aient pris la même direction par un pur hasard est égale à un sur 2^6, à savoir 1/64 (« 64 à parier contre un ») [117]. On peut donc raisonnablement supposer l'existence d'une cause commune. Selon Buffon, cette cause serait une comète venue de l'espace extérieur et tombée à un choc avec le Soleil, en arrachant un torrent de matière de celui-ci.

> Ne peut-on pas imaginer avec quelque sorte de vraisemblance qu'une comète tombant sur la surface du Soleil, aura déplacé cet astre, et qu'elle en aura séparé quelques petites parties auxquelles elle aura communiqué un mouvement d'impulsion dans le même sens et par un même choc, en sorte que les planètes auraient autrefois appartenu au corps du Soleil, et qu'elles en auraient été détachées par une force impulsive commune à toutes, qu'elles conservent encore aujourd'hui [118] ?

Buffon suppose que, parmi les comètes qui tombent sur le Soleil, il en est qui chutent obliquement de façon à arracher à ce dernier une partie de sa masse, en leur communicant une force d'impulsion. Les parties chassées continuent de tourner autour du Soleil dans le même sens et dans le même plan, pour devenir des planètes dans leur état de liquéfaction.

La Terre aurait été fluide, comme d'autres planètes, avant de se refroidir et de s'aplatir jusqu'à prendre sa forme actuelle, à savoir un ellipsoïde renflé à l'équateur et aplati aux pôles. Déjà théoriquement démontré par Newton et vérifié grâce à la mesure de la géodésie par Maupertuis et d'autres, cela n'en est pas moins confirmé par les faits géologiques actuels tels que la chaleur intérieure de la Terre, d'une quantité considérable et indépendante de celle qui est due au rayonnement du Soleil, surtout si l'on prend en compte du temps. D'où la chronologie fondée de l'histoire de la Terre, mettant en place nouveau cadre temporel, considérablement étendu et totalement indépendant, déterminable par une méthode rigoureuse et positive. Telle a été la découverte du « temps profond ».

117. Buffon, *cit.*, p. 111.
118. *ibid.* Voir aussi d'autres écrits postérieurs, dont *Des époques de la Nature*, 1778, en particulier « Première époque. Lorsque la Terre et les planètes ont pris leur forme » in Buffon, *cit.*, pp. 1216-1233.

Chapitre II

L'hypothèse de Kant et Laplace

Il est coutume d'associer les idées cosmogoniques de Kant et de Laplace, au point de leur attribuer un terme générique qu'est « l'hypothèse Kant-Laplace ». Si l'association n'est pas sans fondement, elle ne doit pourtant pas dissimuler les différences qui existent entre les deux hypothèses et leurs auteurs que tout semble opposer : l'un, philosophe allemand et l'autre, géomètre français, chacun mène sa vie de son côté du Rhin et poursuit son parcours en son domaine dans une ignorance réciproque.

Le contraste n'en est pas moins apparent dans les textes. *Histoire générale de la Nature et Théorie du ciel*, publié en 1755, constitue l'un des premiers écrits de Kant [1]. L'ouvrage comporte trois parties. Après une esquisse succincte sur la théorie de Newton, Kant expose dans la première partie des idées hardies sur les systèmes stellaires, et dans la deuxième, qui est la partie centrale, la formation (« constitution ») de ces systèmes à partir d'un état simple par les lois de la nature seules – « le propos le plus original de cet essai » comme le dit Kant lui-même dans la préface [2]. Suivent les discussions sur d'autres problèmes (la densité et la masse des planètes, l'anneau de Saturne ou bien l'infinité du monde et la formation du Soleil), avant une récapitulation et d'autres justifications de l'ensemble de l'hypothèse (huitième). La troisième et dernière partie, présentée par l'auteur comme un appendice, « contient un essai de comparaison, fondée sur les analogies de la nature, entre les habitants des diverses planètes ».

1. Il existe trois traductions françaises de ce texte qui sont, dans l'ordre chronologique : 1° celle de Wolf parue en 1886, déjà mentionnée dans Ouverture de l'étude présente ; 2° Immanuel Kant (1980c), *Histoire générale de la nature et théorie du ciel*, in *Œuvres philosophiques*, éd. établie et introd. par Ferdinand Alquié, trad. et annot. par François Marty, Paris : Gallimard, t. 1 ; 3° Immanuel Kant (1984), *Histoire générale de la nature et Théorie du ciel*, trad. par Anne-Marie Roviello, introd. de Jean Seidengart, postf. de Pierre Kerszberg, Paris : J. Vrin. Sauf cas mentionnés, toute citation de l'ouvrage est tirée de cette dernière, la plus récente et la plus « littérale ».

2. Kant, *cit.*, I, 234.

Exposition du système du monde de Laplace a pour but d'exposer à un public relativement large la série des découvertes en astronomie, des anciennes jusqu'aux plus récentes, voire à venir [3]. Le premier livre consacré aux mouvements *apparents* des astres qui régnaient l'astronomie pendant des siècles, et le second, dédié aux mouvements « réels » décrits par le système de Copernic et aux lois de Kepler, sont suivis des parties proprement mécaniques : l'une sur le mouvement en général et l'autre sur la loi de la gravitation universelle ainsi que ses résultats relatifs à la connaissance des phénomènes célestes. Le dernier livre esquisse l'histoire de l'astronomie, couvrant les premières observations chaldéennes, les théories grecques et arabes, en passant par celles de Ptolémée et de « l'Europe moderne », jusqu'à celle de Newton. Il s'achève avec une « Considération sur le Système du Monde et sur les progrès futurs de l'Astronomie » qui est à la fois un discours historique, un état des lieux et un programme de recherche en la matière. C'est dans ce dernier livre que se place son hypothèse cosmogonique.

Vite épuisé à sa première publication, *Théorie du ciel* sera réédité en 1790, sans pour autant être vraiment repris par son auteur, pas plus que par ses contemporains et successeurs, à qui, tout digne du « *Kant als Naturphilosopher* » qu'il est, l'ouvrage reste un travail de jeunesse surtout comparé à l'œuvre immense laissée par le philosophe [4]. Tout autre est le destin de l'*Exposition.* L'ouvrage fait époque dès son début : publié pour la première fois en 1796 au moment où son auteur est au sommet de sa carrière, de sorte que l'ouvrage marque la synthèse d'une œuvre déjà accomplie. Le souci d'actualisation l'oblige, l'ouvrage ne cessera d'être retravaillé et sera réédité quatre fois de 1802 à 1824, peu avant la mort de son auteur en 1827 [5]. L'hypothèse présentée dans le dernier livre fait l'objet principal de ces modifications : elle est concrétisée et raffinée au cours des rééditions, en fonction des nouveaux acquis en astronomie ; à partir de la quatrième édition, elle s'appuie sur les observations des nébuleuses portées par William Herschel ; elle sera tellement augmentée qu'à la dernière édition l'auteur la reporte dans une note à la fin de l'ouvrage. D'où la fameuse « septième et dernière note » qui connaitra à elle seule un retentissement considérable tout au long du XIXe siècle.

Les deux cosmogonies, malgré les différences sinon contrastes ainsi que

3. Pierre-Simon de Laplace (1884), *Exposition du système du monde*, in *Œuvres complètes de Laplace*, Paris : Gauthier-Villars, t. 6. Sixième et dernière édition de 1835.

4. Sur la postérité, ainsi que l'édition et la diffusion de ce texte, voir Avant-propos de J. Seidengart in Kant, *Théorie du ciel*, 9-13.

5. Pour les éditions de cet ouvrage, qui est aussi une étude génétique de la cosmogonie de Laplace, voir Stanley L. Jaki (1976), « The Five Forms of Laplace's Cosmogony », *American Journal of Physics*, 44, 1 ; Merleau-Ponty, *La science de l'Univers à l'âge du positivisme*, pp. 54-57

l'espace de cinquante ans qui les sépare, ne manquent pas de points communs [6]. L'attention a été attirée tant sur la différence que sur la similarité, et les opinions ont toujours été partagées. Je mettrai l'accent sur la *simultanéité* plutôt que sur la ressemblance ou la dissemblance, de façon à situer les deux hypothèses sur le même plan épidémique et à en dégager la problématique et les termes avec lesquels les problèmes ont été posés afin de les situer sur le même plan.

1 Deux systèmes cosmogoniques qui ne font qu'un ?

[Deux systèmes cosmogoniques]

1.1 Formation de la problématique cosmogonique

« Découvrir le système » et « bâtir un monde à partir de la matière »

Théorie du ciel a pour origine l'opuscule destiné au concours de l'Académie des sciences de Berlin de 1752, autour de la question sur les causes de la stabilité du mouvement de la Terre et son éventuelle inégalité [7] : « Le mouvement de la Terre a-t-il été de tout temps de la même vitesse ou non ? Par quels moyens s'en assurer ? Au cas où il y aurait quelque inégalité, quelle en est la cause ? » La préparation pour le concours incite le jeune Kant à composer un « échantillon d'une Histoire Naturelle du Ciel, dans laquelle l'état premier de la Nature, la production des corps célestes et les causes de leurs rapports systématiques devraient être déterminées à partir des indices ou des marques que font apparaitre les relations constitutives de la structure du monde », en d'autres termes, d'une « Cosmogonie, ou essai pour déduire l'origine de l'Univers, la formation des corps célestes et les causes de leurs mouvements à partir des lois universelles du mouvement de la matière, conformément à la théorie de Newton [8] ».

6. Pour une étude comparée des deux hypothèses, voir Pierre Busco (1925a), « Kant et Laplace », *Revue philosophique de la France et de l'étranger*, 99 ; Paul Clavier (1994), « La conjonction Kant-Laplace », in *La réception de la philosophie allemande en France aux XIXe et XXe siècles*, Lille : Presse universitaire de Lille. Et *infra*, chapitre III.

7. Cité in J. Seidengart, Introduction, Kant, *Théorie du ciel*, p. 28.

8. *Op. cit.*, p. 28–29.

« Découvrir le système qui relie les grands membres de la création dans toute l'étendue de l'infinité, faire dériver des lois mécaniques la formation des corps célestes eux-mêmes et l'origine de leurs mouvements du premier état de la nature[9] », tel est le sujet de *Théorie du ciel*. Sujet difficile à traiter, comme le dit Kant lui-même, puisqu'il risque de dépasser la limite de la connaissance humaine et, de plus, d'inspirer des préjugés, notamment des confusions avec le « mécanisme aveugle ». Il s'agira d'établir la constitution et la formation du monde comme conséquences des *lois* de la mécanique. C'est une entreprise mécaniste, certes, sans pour autant être « aveugle » comme celle des atomistes antiques. Contrairement à ceux-ci qui recouraient au hasard pour permettre aux atomes en chute libre de s'incliner et se heurter les uns aux autres, de manière à donner naissance au monde. Il n'y a pas à recourir à une telle échappatoire pour Kant.

> Je prends la matière du monde entier dans une dispersion générale et j'en fais un chaos parfait. Je vois la substance (*Stoff*) se former selon les lois bien établies de l'attraction, et modifier son mouvement du fait de la répulsion. Je jouis de voir sans l'aide d'interventions arbitraires, sous l'action de lois du mouvement bien établies, se produire un tout bien ordonné qui ressemble tellement à ce système du monde que nous avons sous nos yeux, je ne puis m'empêcher de le tenir pour le même[10].

De la matière en chaos à l'ordre du monde, uniquement à l'aide des lois de la nature, le passage rappelle à bien des égards *Le monde* de Descartes, dont Voltaire traduisait le problème cosmogonique en une phrase mémorable :

> *Donnez-moi seulement de la matière, je vais avec cela vous bâtir un monde !*[11]

Ce que Kant retraduit, avec un changement de tournure :

> C'est-à-dire, donnez-moi de la matière, je vous montrerai comment un monde *doit* naitre[12].

On voit ici tout un programme de cosmogonie mécaniste avec prétention réaliste, qui n'est plus écrite sur le mode du possible d'une fable, comme c'était le cas chez Descartes, mais davantage dans la continuité du *vrai* système du monde tel qu'il a été montré dans le troisième livre des *Principia* de Newton. « Car, dit Kant, si on a de la matière douée d'une force d'attraction essentielle, il n'est pas difficile de déterminer les *causes* qui ont pu contribuer

9. Préface, Kant, *Théorie du ciel*, I. 221.
10. Kant, *cit.*, I, 225-226.
11. Kant, *cit.*, I, 230. Phrase soulignée dans le texte original.
12. *ibid.* C'est moi qui souligne.

à l'organisation du système du monde considéré dans son ensemble[13]. » Ces causes sont relativement faciles à déterminer et, de plus, parmi toutes les « premières causes », « ce qu'on peut espérer saisir à fond et avec sûreté[14] », pour cette raison que les corps célestes sont eux-mêmes *aptes* à la mécanique par la simplicité de leur figure (sphérique) et de leur mouvement (circulaire). Ce qui est loin d'être le cas pour d'autres objets, les vivants par exemple, dont il parait difficile d'établir un mécanisme, vu leur complexité et leur diversité manifestes... si mécanisme il y a. C'est ainsi que les planètes et satellites ont fait l'objet des premières applications de la loi de Newton avec tant de succès. Si la forme et le mouvement des astres ont été ramenés aux causes mécaniques les plus simples, il *doit* en être de même pour leur origine, de la mise à disposition à la mise en mouvement.

Une autre idée directrice de la cosmogonie de Kant est celle de *système*, ou « constitution systématique ». La systématicité consiste à ce que les mouvements se trouvent autour d'un centre commun et confinés dans un même plan, « de telle sorte qu'ils aient aussi peu que possible de s'écarter par eux-mêmes des deux côtés ». Dans ce cas, et dans ce cas seulement, les corps peuvent se dire « reliés ensemble en une constitution systématique[15] ».

Kant remarque que la composition purement « mathématique » ou cinématique que présentent les corps célestes peut servir d'indice d'une relation « dynamique » : s'ils sont en rotation et révolution dans un sens unique, autour d'un même centre, sur le même plan, c'est qu'ils sont tous animés par la même force (force gravitationnelle), donc par une seule et même cause, et reliés par les mêmes relations (lois de Kepler). A partir de cette « constitution systématique » s'élargit le champ de raisonnement « à une grande échelle parmi les membres de l'Univers (*Weltalls*)[16] ». C'est ainsi que les étoiles fixes qui se trouvent le plus près possible du même plan que le nôtre peuvent se dire appartenir au même système que notre système. De plus, elles ne seraient finalement pas « fixes », mais ne circulent pas moins que nos planètes et satellites, autour d'un centre commun et sur le même plan, conformément aux lois de Kepler (plus elles s'approchent du centre, plus elles se meuvent rapidement). Toujours par analogie, Kant attribue à l'ensemble de ces étoiles une figure elliptique et aplatie due à leur révolution collective, tout comme à la Terre.

> [C]omme la même cause, qui a donné aux planètes la force centrifuge par laquelle elles accomplissent leur révolution, a également disposé leurs orbites de telle sorte qu'elles se rapportent toutes à

13. *ibid.*
14. Kant, *cit.*, I, 229.
15. Kant, *cit.*, 246.
16. Kant, *cit.*, 247.

> un seul plan, de même la cause, quelle qu'elle soit, qui a donné aux soleils du monde supérieur comme à autant d'étoiles en mouvement d'ordres du monde supérieur la force de révolution, a amené tout à la fois leurs orbites autant que possible sur un plan, et s'est efforcée de limiter les écarts par rapport à ce plan [17].

Il est en effet des phénomènes qui indiquent leur origine commune : le positionnement de leurs orbites, la direction de leur mouvement, ainsi que leur excentricité. Ce qui signifie que la cause qui a disposé notre système et produit ses mouvements a fait la même chose pour les étoiles fixes, produisant les mouvements similaires, sur le même plan, dans le même sens [18].

« Embrasser les états passés et futurs du Système du monde »

Fidèle à l'esprit des philosophes des Lumières et à l'épistémè des géomètres français de son temps, dont il est, d'ailleurs, l'un des représentants les plus illustres, Laplace construit son œuvre autour d'un « programme », celui de perfectionner le système de Newton, d'assurer la concordance avec l'expérience des lois de la mécanique, y compris celle de la gravitation [19]. *Exposition du système du monde* fait la synthèse de ses travaux, faisant suite aux *Principia* de Newton, notamment au troisième livre qui s'intitulait précisément, rappelons-le, « Système du monde ».

> De toutes les sciences naturelles, l'Astronomie est celle qui présente le plus long enchaînement de découvertes. Il y a extrêmement loin de la première vue du ciel à la vue générale par laquelle on embrasse aujourd'hui les états passés et futurs du Système du monde [...] L'exposition de ces découvertes et de la manière la plus simple dont elles ont pu naître et se succéder aura le double avantage d'offrir un grand ensemble de vérités importantes et la vraie méthode qu'il faut suivre dans la recherche des lois de la nature. C'est l'objet que je me suis proposé dans cet Ouvrage [20].

Une de ces découvertes les remarquables est la démonstration de la stabilité du système solaire, obtenue par Laplace lui-même. Les orbites des planètes sont parfaitement décrites par les lois de Kepler et expliquées par celle de Newton, à quelques variations d'excentricité près, l'inclinaison sur l'équateur ou bien la position de nœud de périhélie. Ces variations, appelées les « inégalités séculaires », sont généralement négligeables, mais, aussi petites soient-elles, tendent à croître proportionnellement au temps de façon à prendre effet au

17. Kant, *cit.*, 250.
18. *ibid.*
19. Merleau-Ponty, *La science de l'Univers à l'âge du positivisme*, p. 22, *sqq.*
20. Laplace, *Exposition du système du monde*, p. 1.

bout d'un temps suffisamment long, à l'ordre de siècles (d'où l'expression « séculaire »), et produire des écarts sensibles par rapport à l'ensemble de notre système. Ainsi Laplace donne-t-il une nouvelle définition de la stabilité : un système mécanique est stable même quand il n'échappe pas à des inégalités dans leurs orbites à condition que leur écart de la valeur moyenne ne dépasse pas une limite (« ce système ne fait qu'osciller autour d'un état moyen dont il ne s'écarte jamais que de quantités très petites »), de telle façon que les mouvements moyens restent toujours à peu près uniformes. Et, si les inégalités ont lieu, cela n'arrive que rarement et de façon régulière : « toutes les inégalités séculaires sont périodiques » [21].

Il reste d'autres phénomènes qui n'en sont pas moins réguliers, sans pour autant qu'ils soient suffisamment expliqués chez Newton. Exemples : (i) les planètes sont distribuées de telle manière qu'aucune d'elles ne s'approche des autres pour ne pas perturber leur mouvement ; (ii) les mouvements des planètes et des satellites dans le même sens, dans un même plan, sur des orbes qui sont peu excentriques. Ces phénomènes sont d'autant plus intéressants qu'ils renseignent sur l'*origine* ou la « cause primitive » du système solaire. Newton l'avait attribuée, dans le Scolie général des *Principia*, à une « intelligence suprême », quelque chose donc d'étranger à la mécanique.

> Mais cet arrangement des planètes ne peut-il pas être lui-même un effet des lois du mouvement ? Et la suprême intelligence que Newton fait intervenir ne peut-elle pas l'avoir fait dépendre d'un phénomène plus général ? Tel est, suivant nos conjectures, celui d'une matière nébuleuse éparse en amas divers dans l'immensité des cieux [22].

Laplace veut alors dessiner lui aussi une cosmogonie purement et simplement mécaniste, tout en assumant que l'idée d'une origine mécanique du système solaire est loin d'être nouvelle. Il se borne pourtant à mentionner les transformistes français du XVIIIe siècle et leur idée d'« une tendance à changer dans les choses même les plus fixes en apparence [23] ». Mais en la matière de la cosmogonie Laplace ne reconnait qu'un seul devancier : « Buffon est le seul que je connaisse, qui, depuis la découverte du vrai système du monde ait essayé de remonter à l'origine des planètes et des satellites », dira-t-il dans la note VII [24]. Toujours est-il que l'hypothèse du naturaliste, toute mécaniste

21. Laplace, *cit.*, p. 477.
22. Laplace, *cit.*, p. 479. Et Laplace de commenter, quelque peu en historien des sciences : « Ce scolie ne se trouve point dans la première édition de l'ouvrage. Il parait que Newton jusque alors s'était uniquement livré aux sciences mathématiques qu'il a, malheureusement, pour elles et pour sa gloire, trop tôt abandonnées. » *ibid.*
23. *ibid.*
24. Laplace, *cit.*, p. 498.

qu'elle est, ne prend pas en compte tous les phénomènes essentiels, notamment les inclinaisons faibles des orbites par rapport à l'écliptique, d'où la nécessité d'une nouvelle hypothèse.

Laplace constate que « l'arrangement des planètes » est « un *effet* des lois du mouvement » d'un phénomène plus général, *au même titre* que la relation de ces orbites avec leurs périodes selon les lois de Kepler. Il n'y a pas de différence de nature entre l'état actuel et l'état primitif, seulement une différence de degré, de généralité. Tout comme l'aplatissement des planètes s'explique par la loi de Newton, il doit en être de même pour leur arrangement, ni plus ni moins. Mais quelle est cette « matière nébuleuse éparse en amas divers » qui, en tant que « phénomène général », sert de cause au phénomène actuel ? D'où sort-elle ? On peut remonter à l'atmosphère des corps célestes, l'un des sujets « classiques » de la mécanique céleste depuis les *Principia*.

Laplace avait déjà étudié l'atmosphère des astres et déterminé la limite où la force centrifuge balance la pesanteur du corps central et au-delà de laquelle se dissipe l'atmosphère [25]. Quand le fluide en rotation se refroidit et par conséquent se contracte, sa vitesse de rotation augmente, cette limite doit s'approcher du centre pour équilibrer la force d'attraction avec la force centrifuge. Grâce à l'observation de Herschel, Laplace se persuade de la *nébulosité* de l'univers dans son état primitif, qu'il identifie par la suite avec de l'atmosphère qui entoure les étoiles. La théorie de l'atmosphère décrit les caractères de la nébuleuse primitive, notamment sa nature *physique* et son comportement, et en fin de compte expliquer la formation des planètes. Une fois la nébuleuse mise en refroidissement puis en contraction, le reste du processus se construit uniquement par les lois de la mécanique avec la conservation du moment angulaire.

1.2 Scénario(s)

Dispositifs communs

Durant les quarante années qui séparent *Théorie du ciel* et *Système du monde*, l'astronomie stellaire connait un grand essor. Contrairement à Kant, Laplace pouvait s'appuyer sur les résultats de W. Herschel des années 1780 sur une grande variété de nébuleuses [26]. Or, pour le système solaire, Kant et Laplace disposent d'à peu près les mêmes données : hormis les six planètes et

25. Laplace, *cit.* (Liv. III, Ch. VI.)
26. Sur Herschel, Merleau-Ponty, *La science de l'Univers à l'âge du positivisme*, p. 78, *sqq.*

dix satellites à l'époque de Kant s'étendent, en 1796, respectivement à sept et à dix-huit, comprenant Uranus, découvert par Herschel en 1781 et des astéroïdes (Cérès, Pallas, Junon et Vesta), alors considérés comme de petites planètes et tous possédant les mêmes attributs que d'autres membres du système solaire, surtout les faits significatifs du point de vue cosmogonique, susceptibles de servir d'indice ou de vestige de l'origine des mouvements planétaires.

On se rappelle que Newton énumérait, dans le Scolie général des *Principia* et dans *Optique*, les mêmes phénomènes (les mouvements planétaires suivant toujours la même direction, autour d'un centre commun, ainsi que les comètes, toujours dans la même direction, mais dans des orbes excentriques), afin d'en déduire l'existence d'une « Première Cause » qui ne peut se réduire à des causes mécaniques. C'est ce que Kant et Laplace reprennent de façon plus précise que Newton, chacun à sa manière et en ses propres termes.

> [S]i on considère tout cet ensemble, on est alors amené à penser qu'une *cause*, quelle qu'elle soit, a une influence générale dans tout l'espace du système, et que la *concordance dans la direction et la position des orbites des planètes* est une conséquence de l'accord que toutes ont dû avoir avec cette cause *matérielle* par laquelle elles ont été *mises en mouvement*[27].

C'est une seule et même qui a fait que les mouvements des planètes soient mis en mouvement, tous en concordance dans la position et la direction. Et cette cause est matérielle, à savoir mécanique. Laplace fait appel à la notion de cause dans un sens limité, c'est-à-dire relatif à celle des mouvements primitifs.

> On a [...] pour remonter à la cause des mouvements primitifs du système planétaire, les *cinq phénomènes* suivants : les mouvements des planètes dans le même sens, et à peu près dans un même plan ; les mouvements des satellites dans le même sens que ceux des planètes ; les mouvements de rotation de ces différents corps et du soleil, dans le même sens que leurs mouvements de projection et dans des plans peu différents ; le peu d'excentricité des orbes des planètes et des satellites ; enfin, la grande excentricité des orbes des comètes, quoique leurs inclinaisons aient été abandonnées au hasard[28].

Jeu des trois forces

Les trois parties de *Théorie du ciel* sont précédées d'une esquisse sur les principes de la mécanique newtonienne. Outre les deux forces fondamentales que sont l'inertie (« force d'impulsion ») et l'attraction (« force de chute, force

27. Kant, *Théorie du ciel*, I, 261-262.
28. Laplace, *Exposition du système du monde*, p. 498.

centripète ou encore gravité »), Kant en introduit une troisième qui jouerait un rôle prépondérant en matière de cosmogonie : la force de *répulsion*. On a affaire ici au niveau moléculaire, voire atomique, peuplé de petits corps à petites distances, pour lequel la validité de la mécanique newtonienne n'est pas aussi évidente que pour les mouvements des planètes ou la chute libre des corps par exemple. Kant attribue à la répulsion un rôle aussi important, sinon plus, qu'à l'attraction, surtout pour l'état primitif de l'univers ainsi que pour son évolution [29]. Elle prédominerait, souligne-t-il, « tout particulièrement lorsque la matière est décomposée en fines particules », qui « se repoussent les unes les autres, et [...] produisent par leur lutte contre l'attraction ce mouvement qui est comme une vie constante [30] ». C'est cette force qui explique certains phénomènes comme l'élasticité ou l'émanation d'odeur, ce qui suffit à prouver son existence au même titre dans la gravitation chez Newton. C'est aussi elle qui permet de rendre compte des phénomènes qui restent inexpliqués dans la mécanique newtonienne, surtout pour ce qui concerne l'état primitif du système solaire où les corps sont censés être encore assez petits pour que la répulsion l'emporte sur l'attraction. C'est ainsi s'expliquerait la mise en mouvement circulaire de la masse primitive [31]. La prédominance de la force répulsive persisterait jusqu'à ce que les corps s'agglomèrent en une masse suffisamment grande et que la gravitation finisse par se manifester.

L'univers est à son état primitif dans un « chaos parfait », composé de toute sorte de corps, divers en masse et en figure. Parmi ces particules, il en est qui, plus denses que les autres, commencent à ramasser les éléments légers, formant plusieurs centres d'attraction (**i. agglomération des matières en plusieurs centres d'attraction**). Les corps les plus denses réunissent les matières pour former une masse unique, qui est aussi un « centre de la gravitation générale », où se situera le futur Soleil (**ii. formation d'un centre commun**). Mais il n'est pas encore complètement formé à ce stade, faute notamment de la chaleur. Les corps tombent continuellement vers le centre, mais la force de répulsion, qui l'emporte sur la gravité dans les petits corps, provoque quelques déviations à la chute libre. Soumis à la fois à l'attraction centrale et à la déviation, les corps commencent à former de « grands tourbillons » (**iii. production de « grands tourbillons »**). A l'intérieur de chaque tourbillon, les mouvements s'uniformisent et les corps, ayant tendance à suivre le « chemin de la moindre distance », c'est-à-dire les orbites sur lesquelles ils s'entravent les uns les autres aussi peu que possible. En conséquence de quoi les corps se mettent aux mou-

29. Sur ce point, voir Brush, *Nebulous Earth*, p. 7.
30. Kant, *Théorie du ciel*, 264.
31. Kant, *cit.*, 265.

vements circulaires libres, c'est-à-dire des révolutions concentriques autour du même centre (**iv. mise en « mouvements circulaires libres »**). Ceux qui se trouvent au centre rassemblent beaucoup de matière pour devenir le Soleil, tandis que ceux qui continuent circuler « avec le même degré, dans la même direction » finissent par former une planète (**v. formation du Soleil et des planètes**).

D'un mécanisme « physique » à un système mécanique

Pour l'état primitif, Laplace pose une « matière nébuleuse, éparse en amas », une masse gazeuse déjà toute formée dont le centre est entouré d'une atmosphère, et en rotation en bloc.

> Quelle que soit sa nature, puisqu'elle a produit ou dirigé les mouvements des planètes, *il faut* qu'elle ait embrassé tous ces corps, et, vu la distance prodigieuse qui les sépare, *elle ne peut avoir été qu*'un fluide d'une immense étendue. Pour leur avoir donné dans le même sens un mouvement presque circulaire autour du Soleil, *il faut* que ce fluide ait environné cet astre comme une atmosphère. La considération des mouvements planétaires nous conduit donc à penser qu'en vertu d'une chaleur excessive, l'atmosphère du Soleil s'est primitivement étendue au-delà des orbes de toutes les planètes, et qu'elle s'est resserrée successivement jusqu'à ses limites actuelles [32].

Après cette considération physique, tout découle des lois de la mécanique, notamment des deux lois de Kepler. Selon la première loi, une planète décrit l'orbite elliptique dont l'un des foyers est occupé par le Soleil. La deuxième stipule que les aires balayées par une planète dans un temps égal sont toujours identiques, quelle que soit sa position. D'où le nom de « théorème des aires ».

Ces lois se traduisent par une loi encore plus générale dans la mécanique newtonienne [33]. Un corps m attiré par un autre M, séparé de celui-ci d'une distance r subit une force d'attraction selon la loi de Newton : $G\frac{Mm}{r^2}$ (G est une constante, dite constante gravitationnelle). Si m est en révolution avec une vitesse angulaire de ω, m subit également une force centrifuge : $m\omega^2 r$. Cette dernière doit être égale à la force gravitationnelle.

$$m\omega^2 r = G\frac{Mm}{r^{\ 2}}$$

$$\omega^2 r^3 = GM = C(\text{constante})$$

32. Laplace, *Exposition du système du monde*, p. 499. Mes soulignements.
33. Le passage qui suit doit de beaucoup à la leçon que Mme Ch. Vilain m'a chaleureusement accordée. Qu'elle soit remerciée.

L'aire, S, peut être calculée par les deux paramètres, la distance r, la vitesse angulaire ω ou la vitesse linéaire v ($v = \omega r$), telle que $S = rv = \omega r^2$. Cette valeur reste constante par la conservation du moment de rotation ($m\omega r^2$) :

$$m\omega r^2 = mS = C'(\text{constante})$$

Ainsi se retrouve la deuxième loi de Kepler. Par ailleurs, si l'on substitue ω à la *période* de rotation T ($T = \frac{2\pi}{\omega}$) :

$$\frac{4\pi^2}{T^2} = \frac{GM}{r^3}$$

$$\frac{r^3}{T^2} = \frac{GM}{4\pi^2}$$

On reconnait dans la formule la troisième loi de Kepler qui relie la période de révolution d'une planète et le rayon de son orbite :

$$\frac{r^3}{T^2} = C''(\text{constante})$$

Cette loi a ceci de particulier de s'appliquer au système de plusieurs corps qui sont tous en circulation autour du même centre, comme les planètes autour du Soleil. Si l'on prend la vitesse angulaire ω d'une planète et celle d'une autre ω', qui demeurent constantes pendant leur révolution :

$$\omega^2 r^3 = \omega'^2 r'^3$$

Résultat à retenir pour ce qui suit : pour qu'un corps m qui circule autour du centre M à la distance r, avec une vitesse de rotation ω reste dans sa trajectoire, il faut que $\omega^2 r^3$ reste constante. S'il s'approche du centre de sa révolution, sa vitesse angulaire augmentera.

Venons-en à la nébuleuse laplacienne, à laquelle nous allons attribuer une masse M, égale à la masse de notre Soleil actuel et une vitesse angulaire Ω. Elle se refroidit et se contracte progressivement (**a. refroidissement de la nébuleuse et contraction**), entrainant la diminution de son rayon et, par conséquent, l'augmentation de sa vitesse (**b. accélération**). Il arrive alors que les corps situés aux confins de la nébuleuse n'appartiennent plus à la circulation globale, devenue trop rapide pour eux. Ces corps, abandonnés, continueront pourtant de circuler sur les mêmes orbites, avec la même vitesse angulaire initiale qu'au début, tant que la force centrifuge reste égale à la pesanteur (**c. détachement des anneaux**). La nébuleuse continue de son côté sa contraction, tout en laissant les corps former des anneaux concentriques.

A l'intérieur de chacun des anneaux qui sont, quoique séparés, toujours en rotation concentrique, les mouvements des molécules sont régularisés par les

frottements entre eux (**d. régularisation des mouvements internes**). Mais il reste des mouvements irréguliers. L'anneau devient instable puis se rompt en plusieurs masses. Celles-ci continuent d'appartenir à l'anneau, poursuivant leurs mouvements, tant rotatoires que circulaires, toujours dans le même sens. A l'intérieur de chaque anneau, une masse, plus grave que les autres, réunit le reste par son attraction. L'anneau de vapeur se transforme en une seule masse. D'où la naissance d'une planète (**e. formation des planètes**). A partir des planètes, par le même processus, se forment les satellites (**f. formation des satellites**).

1.3 Questions communes

« Ainsi, affirme Laplace, les phénomènes singuliers du peu d'excentricité des orbes des planètes et des satellites, du peu d'inclinaison de ces orbes à l'équateur solaire, et de l'identité du sens des mouvements de rotation et de révolution de tous ces corps avec celui de la rotation du Soleil, découlent de l'hypothèse que nous proposons et lui donnent une grande vraisemblance [34] ». Comme toutes les révolutions ont une seule et même origine qu'est la nébuleuse en rotation, l'on comprend pourquoi elles sont communes à toutes les planètes et ont des excentricités si faibles. Quant aux rotations directes des planètes, elles s'expliquent de la manière suivante : une fois les anneaux séparés, les vitesses angulaires des molécules s'uniformisent par le frottement intérieur d'une part, et d'autre part, par la contraction continue de l'ensemble de la nébuleuse ; plus la vitesse linéaire de la partie supérieure augmente, plus celle de la partie inférieure diminue en compensant la différence entre les deux, et cela toujours conformément à la loi de Kepler. Si les orbites planétaires sont peu excentriques et inclinées par rapport au plan du Soleil, c'est parce qu'il y a la variété de température et de densité des molécules au sein des anneaux qui les éloignent de l'équateur solaire. Les comètes font exception : elles sont dues aux nébuleuses « errantes » qui proviennent de l'extérieur du système solaire.

Une fois ces phénomènes « sauvés », Kant et Laplace tentent de rendre compte d'autres phénomènes, que ce soit la distribution de densité et de masse des planètes (Kant), la lumière zodiacale ou les longitudes des trois satellites de Jupiter (Laplace) [35]. Ils ne se posent certes pas toujours les mêmes problèmes, sans pour autant manquer de points communs tels que l'état primitif (quel est l'état auquel on peut remonter le plus loin possible ?), la formation des anneaux (pourquoi une seule planète annulaire ?), le sens des rotations des

34. Laplace, *Exposition du système du monde*, p. 502.
35. Laplace, *cit.*, pp. 508-509.

astres (pourquoi directe ?), ou bien le mouvement synchronique entre rotation et révolution que présentent certains satellites, dont la Lune.

Au commencement du monde, univers-îles ou masse fluide ?

Newton affirmait, après avoir définitivement écarté l'hypothèse des tourbillons, que « pour assurer les mouvements réguliers et durables des Planètes et des Comètes, il est absolument nécessaire que les Cieux soient vides de toute matière, excepté peut-être quelques vapeurs très-légères. » Kant prend l'espace, suivant Newton, pour entièrement vide ou extrêmement raréfié pour le moins, totalement *passif* et incapable d'agir et de transmettre les mouvements sur les corps. Toujours est-il que, ajoute Kant s'approchant sur ce point de la position de Descartes contre le vide, ce même espace aurait été « autrefois constitué autrement et rempli d'une matière suffisamment capable de communiquer le mouvement à tous les corps célestes qui se trouvent là, pour les accorder avec son propre mouvement et par suite les accorder tous les uns avec les autres [36] ». Plus qu'une probabilité, c'est même une nécessité, puisque, si l'espace avait toujours été aussi vide qu'il l'est actuellement, comment les actions des forces qui déterminent les mouvements circulaires auraient-elles pu se déployer ?

Pourtant, cet état primitif doit se distinguer de l'état présent. L'univers, « le système qui relie les grands membres de la création dans toute l'étendue de l'infinité », n'est plus un chaos de molécules mouvementées, désordonnées et peu distanciées, mais un ordre des étoiles et des systèmes d'étoiles séparés par des vides. Les nébuleuses en font partie des systèmes d'étoiles malgré leur ressemblance avec la matière diffuse. Chaque point lumineux qui les constitue correspond à une étoile et, probablement, à un système planétaire qui l'accompagne, et leur nébulosité n'est qu'en apparence due à la faiblesse et l'affaiblissement de la lumière en raison de leur distance. La Voie lactée occupe la partie centrale de ce grand système portant en lui des « soleils innombrables » ; les nébuleuses, ces objets lumineux qui sont en réalité l'amoncellement d'étoiles, « autant de soleils, centres de systèmes semblables, » tous appartenant au même système [37]. C'est une hypothèse de grande ampleur, que la postérité nommera « l'univers-île ».

Laplace s'appuie sur les observations de W. Herschel. De fait, Herschel connait une évolution de ses idées au cours du temps, à mesure de ses observa-

36. Kant, *Théorie du ciel*, I, 263.
37. Kant, *cit.*, I, 233.

tions[38]. Dans ses premiers mémoires de 1784–1785, les nébuleuses sont identifiées à des agrégats d'étoiles (des « Voies lactées ») qui ont la même constitution que notre Voie lactée. Il va, par extrapolation, jusqu'à établir une hypothèse selon laquelle *toutes* les nébuleuses seraient en réalité des étoiles et leur apparence « laiteuse » serait due à leur grande distance, non à leur nature. Cette hypothèse de la « résolubilité universelle des nébuleuses » ne sera pourtant pas maintenue pour longtemps : « J'ai découvert *une étoile*, [...] *entourée d'une atmosphère faiblement lumineuse, d'une étendue considérable* », déclare-t-il en 1791[39]. Il abandonne son hypothèse précédente et adopte l'existence d'une véritable nébulosité, toujours lumineuse, mais pas résoluble en étoiles. Sans être des étoiles elles-mêmes, pourtant susceptibles d'en accompagner, ces nébuleuses authentiques n'en possèdent pas moins d'implication *cosmogonique* : la matière lumineuse que représentent les nébuleuses serait « bien plus propre à produire une étoile par sa condensation qu'à dépendre de l'étoile pour son existence[40] ». Il en découle tout un programme de recherche, dit « l'histoire naturelle des cieux » qui se résume comme suit :

> Le ciel ressemble à un jardin luxuriant renfermant la plus grande variété de productions, à des états différents de leur existence, et son examen actuel nous permet d'étendre notre expérience à une immense durée ; le spectacle qu'il nous offre est, en effet, le même que si nous voyions s'accomplir en même temps sous nos yeux les différents actes de la vie végétale depuis la germination, la floraison et la fécondation jusqu'à la dessiccation et enfin la pourriture définitive[41].

On s'aperçoit alors que la supposition de Laplace sur la matière primitive qui aurait « produit » et « dirigé » le système solaire n'est pas une conjecture gratuite, mais prend appuie sur les données observationnelles qui font autorité en la matière : un centre brillant, autour duquel se trouve une atmosphère ténue et susceptible de se condenser vers le centre et de transformer en étoiles correspond aux observations dernières en date de Herschel. A partir de quoi Laplace remonte, « par analogie », à un état encore plus antérieur :

> Si l'on conçoit, par analogie, toutes les étoiles formées de cette manière, on peut imaginer leur état antérieur de nébulosité précédé lui-même par d'autres états dans lesquels la matière nébuleuse était de plus en plus diffuse, le noyau étant de moins en moins lumineux

38. Sur Herschel, voir Merleau-Ponty, *La science de l'Univers à l'âge du positivisme*, tout le chapitre II, en particulier p. 78–91 et p. 99–105.
39. Cité in Merleau-Ponty, *cit.*, p. 87.
40. Cité in Merleau-Ponty, *cit.*, p. 88.
41. W. Herschel in « Construction of the Heavens » in *Philosophical Transactions* 79 (1789). Passage traduit et cité in Charles André (1899), *Traité d'astronomie stellaire*, Paris : Gauthier-Villars, t. 1, p. 360.

> et dense. On arrive ainsi, en remontant aussi loin qu'il est possible, à une nébulosité tellement diffuse que l'on pourrait à peine en soupçonner l'existence [42].

On revient ainsi au chaos dont parlait Kant, avec cette différence que Laplace s'appuie sur l'observation faite sur les Pléiades qui révèle plusieurs noyaux condensés de la matière. Ceci ne doit pas dissiper les différences entre les deux : tandis que Kant compose son chaos des éléments primitifs qui sont également constitutifs de notre monde et de l'espace cosmique actuels, Laplace ne dispose pas de supposition particulière ni spécifique sur les composantes de cette matière, sauf sur leur nébulosité diffuse et leur extension au-delà des orbites de toutes les planètes ; la nébuleuse kantienne ressemble à ce qui s'appellera plus tard les météorites, et celle de Kant, à une masse gazeuse [43].

Dans ce qui suit, nous allons voir comment ce même problème se pose, de la fin du XIXe siècle jusqu'au début du XXe, tantôt comme argument d'appui de l'hypothèse nébuleuse tantôt comme contre-argument de celle-ci. De deux choses l'une : soit les nébuleuses sont *toutes* résolubles en étoiles, soit elles ne le sont pas, mais constituées de véritables nuages gazeux, chaud et lumineux. Ces deux possibilités, qui sont d'ailleurs aujourd'hui acceptées toutes les deux, ont été prises comme critère de jugement dans le contexte exclusivement cosmogonique avant qu'elles ne soient *transposées* dans une perspective cosmologique, plus proche de la vision de Kant.

Rotation comme un problème central

Kant explique la production des tourbillons par l'action composée des deux forces fondamentales : la force d'attraction provenant du centre et la force de répulsion entre les particules [44]. L'explication ne suffit pas, voire va à l'encontre d'un principe fondamental de la mécanique qu'est celui de la conservation du moment angulaire. C'est un point qui reste obscur dans le texte de Kant et qui a laissé perplexe plus d'un lecteur, dont Poincaré : « Pourquoi Kant n'a-t-il pas mis en rotation comme l'a fait Laplace ? », s'interrogeait le mathématicien dans les *Leçons*.

Pourtant il est une autre manière de voir les choses, comme Poincaré l'admet lui-même d'ailleurs [45]. Les actions intérieures à elles seules n'auraient certainement pas capables de faire tourner toute la nébuleuse en bloc. Mais si elle n'était pas soustraite à toute action extérieure, ou, au moins, qu'elle était

42. Laplace, *Exposition du système du monde*, p. 500.
43. Busco, « Kant et Laplace », pp. 247-248.
44. Kant, *Théorie du ciel*, I, 265.
45. *Infra*, Clôture.

composée de plusieurs systèmes qui sont soumis à l'action de tous les autres, dont l'ensemble aurait été à l'origine en repos, avec son moment de rotation nul, sans que chacun ne le soit nécessairement [46] ? C'est ce que Laplace quant à lui suggère à l'égard de la cause du mouvement de la nébuleuse initiale :

> L'attraction peut encore faire naitre et entretenir sans cesse le mouvement dans un système de corps primitivement en repos ; car il n'est pas vrai de dire, avec plusieurs philosophes, qu'elle doit les réunir tous à leur centre commun de gravité. Les seuls éléments qui doivent toujours rester nuls sont le mouvement de ce centre et la somme des aires décrites autour de lui dans un temps donné par toutes les molécules du système projeté sur un plan quelconque [47].

Quoi qu'il en soit, c'est à Laplace d'attribuer explicitement une *rotation* à la nébuleuse, restant donc fidèle au théorème des aires [48]. C'est un présupposé indispensable sans lequel s'effondre son hypothèse, avec ses deux mécanismes essentiels : le refroidissement (et contraction) du gaz d'une part, et d'autre part, l'accélération de la rotation de ce même gaz. Dans un premier temps, à mesure du rétrécissement de la nébuleuse, la vitesse angulaire augmente ; certains corps restent et circulent avec leur vitesse originale, à une certaine distance. La distance peut être calculée par la limite où s'équilibrent à nouveau la force centrifuge et la pesanteur. Une fois détachées, les molécules continuent de circuler en bloc, de se contracter et de tourner de plus en plus vite jusqu'à échapper à nouveau à la limite de l'atmosphère. Par ailleurs, précise Laplace, ce sont les molécules situées parallèlement à l'équateur de la nébuleuse qui « n'ont cessé de lui appartenir » au cours de la condensation où a lieu l'égalité entre la pesanteur et la force centrifuge de telle façon qu'« elles se sont rapprochées de cet équateur [49] ».

Qu'en est-il du *sens* de la rotation ? Pourquoi est-elle directe dans la plupart des cas ? D'après Kant, la circulation obtenue a déjà été directe, sens qui sera maintenu pour les particules qui forment les planètes. La première rotation commune était directe plutôt qu'indirecte, c'est dû au hasard. Après quoi le sens de rotation est maintenu dans les particules puis dans les planètes. Laplace a recours quant à lui aux frottements des particules qui se trouvent à l'intérieur des anneaux [50]. Une fois séparé, chaque anneau continue sa rotation qui est une rotation originale qui est solide. Les frottements augmentent à mesure de la contraction de la nébuleuse, rendant les molécules visqueuses et uniformisant

46. Busco, « Kant et Laplace », p. 251.
47. Laplace, *Exposition du système du monde*, p. 445.
48. Mais le problème du moment angulaire n'échappera cependant pas totalement à Laplace, comme on va voir plus loin. Voir *infra*.
49. Laplace, *Exposition du système du monde*, p. 501.
50. Les frottements augmentent à mesure de la contraction de la nébuleuse, c

leurs vitesses angulaires. Les mouvements des molécules s'approchent de la circulation solide : celles qui sont extérieures auront une vitesse de rotation plus grande que les intérieures ; la vitesse s'accroît avec la distance depuis le centre. Par conséquent, chaque anneau est amené à la rotation rigide, avec une vitesse angulaire constante ; quant aux particules, celles qui sont extérieures circuleront plus rapidement que celles qui sont intérieures.

Saturne, ce « fossile vivant » du système solaire

Depuis la découverte de sa forme annulaire par Huygens en 1656, Saturne n'a cessé d'éblouir, mais aussi de troubler, les astronomes [51]. Qu'est-ce qui compose cet anneau ? Est-il unique ou multiple ? Solide ou fluide ? Qu'en est-il de son orbite, et quel est le rapport de celle-ci à Saturne et aux satellites de celle-ci ? Cassini a observé en 1675 que l'anneau de Saturne est divisé en deux bandes concentriques, chacune circulant en bloc à sa propre vitesse de rotation (« grande division de Cassini »). Au milieu du XVIIIe siècle, il est largement accepté que les anneaux sont composés d'innombrables satellites. Ce qui fait de la composition et de la rotation des anneaux de Saturne l'un des sujets les plus classiques de la mécanique céleste.

La planète suscite un intérêt particulier pour la cosmogonie qui nous occupe ici dans laquelle la formation et la rupture des anneaux constituent une étape cruciale. Elle peut servir à la fois d'exemple et d'exception, car elle est la seule à conserver des anneaux, la seule « preuve subsistante », comme le dit Laplace, de l'étape essentielle de cette théorie. Or, justement parce qu'elle est la seule exception, son existence même demande une explication. Si les autres nébuleuses planétaires ont été condensées en une ou plusieurs masses et transformées en satellites, comment la nébuleuse saturnienne est-elle arrivée à échapper à ce processus ?

La composition de la bande saturnienne fait l'objet de la spéculation de Kant. Les anneaux seraient formés selon Kant de vapeurs divisées en plusieurs particules en provenance de la planète Saturne.

Par ailleurs, c'est à Laplace de poser le problème en termes de *stabilité* ou de condition de l'équilibre. Dans le livre III d'*Exposition*, la planète et ses anneaux sont décrits comme deux anneaux concentriques (même s'ils étaient un, ils auraient été divisés par leur instabilité), puis traités dans le chapitre intitulé « la figure de l'anneau de Saturne » avec la question suivante : par quel mécanisme les anneaux sont-ils amenés à circuler autour de leur planète-mère ?

51. Sur l'histoire des théories de Saturne, voir « Saturn's Ring », écrit en collaboration avec C. W. F. Everitt et Elisabeth Garber in Brush, *Nebulous Earth*, 1.6.

S'ils se tenaient seulement par l'adhésion au niveau moléculaire sans d'autres forces récompensantes (notamment la force centrifuge due à la circulation), la partie inférieure et proche de Saturne aurait déjà fini par se détacher à cause de la pesanteur. Les anneaux doivent alors leur maintien aux lois de l'équilibre, relatives à la rotation. Il faut qu'ils tournent eux-mêmes « afin que leur pesanteur soit balancée par leur centrifuge dû à ce mouvement [52] ».

Dès lors, un nouveau problème se pose : « Imaginons un fluide homogène, répandu en forme d'anneau autour de Saturne, et voyons quelle doit être sa figure pour qu'il soit en équilibre en vertu de l'attraction mutuelle de ses molécules, de leur pesanteur vers Saturne et de leur force centrifuge [53]. » A l'observation, la figure qui environne Saturne ne semble pas homogène : ils ne s'observaient pas toujours identiques dans toutes leurs parties. A quoi Laplace ajoute-t-il qu'il est *nécessaire* que les surfaces soient irrégulières parce que, sinon trop lisse, la moindre force extérieure aurait troublé l'équilibre et ceux-ci auraient fini par s'effondrer vers Saturne. L'irrégularité serait à la fois un fait et une condition de stabilité de tout le système.

> Les anneaux dont Saturne est environné sont, par conséquent, des solides irréguliers d'une largeur inégale dans les divers points de leur circonférence, en sorte que leurs centres de gravité ne coïncident pas avec leurs centres de figure. Ces centres de gravité peuvent être considérés comme autant de satellites, qui se meuvent autour du centre de Saturne, à des distances dépendantes des inégalités des anneaux et avec des vitesses angulaires égales aux vitesses de rotation de leurs anneaux respectifs [54].

Revenant à Saturne dans la note VII, Laplace rappelle à ses lecteurs l'exemplarité et l'exceptionnalité de la planète.

> Si toutes les molécules d'un anneau de vapeurs continuaient de se condenser sans se désunir, elles formeraient à la longue un anneau liquide ou solide. Mais la régularité que cette formation exige dans toutes les parties de l'anneau et leur refroidissement a dû rendre ce phénomène extrêmement rare. Aussi le système solaire n'en offre-t-il qu'un seul exemple, celui des anneaux de Saturne [...] La distribution régulière de la masse des anneaux de Saturne autour de son centre et dans le plan de son équateur résulte naturellement de cette hypothèse, et, sans elle devient inexplicable : ces anneaux me paraissent être des preuves toujours subsistantes de l'extension primitive de l'atmosphère de Saturne et de ses retraites successives [55].

52. Laplace, *Exposition du système du monde*, p. 290.
53. *ibid.*
54. Laplace, *cit.*, p. 291.
55. Laplace, *cit.*, pp. 502-503.

Qui plus est, Saturne fournit pratiquement le seul moyen de vérification empirique et quantitative de l'hypothèse. Si les anneaux provenaient de l'atmosphère primitive de la planète, leur *révolution* devrait être moins rapide que la *rotation* de leur planète sans pour autant qu'il y ait beaucoup de différence, en tout cas pas de différence d'ordre de grandeur. De même, la durée de rotation du Soleil ne l'emportait pas sur celle des planètes, et ceci est confirmé par observation. De même, aussi, pour Saturne et ses anneaux : Saturne se tourne plus vite que ses anneaux ne font une tour. C'est ce qui a été confirmé par Herschel, nous renseigne Laplace : la rotation de Saturne est une période de 0,427 jour, tandis que la révolution de l'anneau intérieur, 0,438 jour [56]. La différence de 0,011 jour, soit 2,4 heures s'expliquerait par la faiblesse de l'atmosphère laissée par la planète était très peu considérable et peu augmentée depuis.

2 Penser l'univers sous le sillage des nébuleuses

Kant ne reviendra plus à sa théorie cosmogonique, sauf pour évoquer l'hypothèse cosmogonique, mais brièvement, et dans un tout autre contexte, celui de la preuve physico-théologique de l'existence de Dieu par exemple. Pourtant, il ne reniera ni n'abandonnera explicitement cette préoccupation de jeunesse ; il se dirige vers un tout autre itinéraire, d'un savant newtonien au philosophe au plein sens du terme, il gardera à l'esprit son œuvre de jeunesse : ce n'est rien d'autre que le problème cosmologique qui tire le philosophe de son « sommeil dogmatique », pour le conduit à la « critique de la raison pure [57] ». Ne serait-ce que pour remettre en cause la légitimité du même questionnement et le proscrire du domaine de la science. C'est un tournant décisif de l'histoire de la philosophie, mais aussi de celle de la pensée cosmologique [58].

On pourrait penser que Laplace attachait une grande importance à son hypothèse cosmogonique. Si elle a été mise dans une note supplémentaire, c'est parce que son auteur tenait à ce que son hypothèse soit distinguée du corps de son « vrai Sytème du monde », et à ce qu'elle soit reçue avec défiance. On ne saurait pourtant pas ignorer que Laplace avait déjà noté dès le chapitre VI

56. Laplace, *cit.*, pp. 503-504.

57. Plusieurs sources, dont la fameuse lettre à Christian Garve de 1798 ou *Prolégomènes* : c'est l'idée cosmologique qui, « de toutes, agit avec le plus de vigueur pour éveiller la philosophie de son sommeil dogmatique et la mouvoir en direction de cette affaire ardue qu'est la critique de la raison ». *Œuvres philosophiques* II (trad. par Jacques Rivelaygue), p. 338.

58. Merleau-Ponty, *La science de l'Univers à l'âge du positivisme*, p. 255.

du *Système du monde* que son hypothèse résultait avec « une grande vraisemblance des phénomènes », même si ce n'était certes pas sans « défiance que doit… » Encore faut-il ajouter son souci au sujet de l'hypothèse pour la rendre encore plus « vraisemblable », souci qui était bien réel. Comment peut-on expliquer autrement les modifications et augmentations apportées par l'auteur lui-même à cette dernière note dans les éditions successives ?

2.1 Du *Weltsystem* à l'idée-univers. Transposition transcendantale du problème cosmologique

Comment se fait-il que le *Weltsystem* de *Théorie du ciel*, dont le jeune Kant avait restitué la constitution et montré la production à partir de la matière et des forces, devient-il dans *Critique de la raison pure*, les *idées cosmologiques* (*Weltbegriffe*), « un produit de la raison pure » qui ne fait pas seulement l'objet de la connaissance, mais provoque le « phénomène le plus remarquable de cette faculté » ? Dans *Dissertation* de 1770, l'ébauche de la philosophie critique, Kant établit la nature de l'espace et du temps, ainsi que leur rôle dans la connaissance en tant que forme a priori. Or, remarque Merleau-Ponty, « c'est *l'idée du monde* qui, par l'effort d'élucidation à laquelle elle est soumise, conduit à la doctrine nouvelle de l'espace et du temps, alors que dans la *Critique* c'est cette doctrine présentée dogmatiquement qui fournira à la fois l'explication de l'antinomie et sa solution [59] ». La *Critique* renverse le rapport : non seulement la notion de monde se « désubstantialise », mais s'avère impossible à encadrer par l'espace et le temps ; ceux-ci en viennent à leur tour à fonder les antinomies de la raison dans *Dialectique transcendantale*.

Genèse de l'idée de monde

« Voici donc le phénomène le plus étrange de la raison humaine, dont on ne peut montrer d'exemple dans aucun autre de ses usages, » dira plus tard Kant dans les *Prolégomènes*. C'est un résultat « habituel, voire inévitable sans notre critique », qui vient de ce que « nous concevons les phénomènes du monde sensible comme des choses en soi », et que « nous admettons les principes de leur liaison comme ayant une valeur universelle pour des choses en soi et non pas simplement pour l'expérience [60] ». L'analyse *génétique* des idées de

59. Merleau-Ponty, *cit.*, p. 256.
60. Immanuel Kant (1985), *Prolégomènes à toute métaphysique future qui pourra se présenter comme science*, in *Œuvres philosophiques*, éd. établie et introd. par Ferdinand Alquié, trad. par Jacques Rivelaygue, Paris : Gallimard, t. 2, 120, § 52a.

la *Dialectique transcendantale*, partie qui précède « Antinomies de la raison pure », montre qu'elles se produisent par une opération propre à la raison qu'est la synthèse successive.

L'opération en question s'effectue en deux directions : ou bien par la « progression » qui procède de la *condition*, c'est-à-dire ce qui conditionne, au *conditionné*, c'est-à-dire ce qui est conditionné dans la direction ascendante ; ou bien par la « régression » qui se fait dans le sens opposé, remontant du conditionné à la condition. Or, cette dernière est la seule à garantir une série *complète*, à faire l'objet d'une synthèse *absolue*, de façon à se conformer à l'intérêt de la raison. En effet, tandis que la progression s'effectue continuellement et indéfiniment, la régression est susceptible de s'achever, d'avoir un *terme final*. Quel est au juste ce terme qui achève la régression ? Trois possibilités : ou bien la synthèse totale de conditions-conditionnés, ou bien l'*inconditionné*, à savoir la condition, qui conditionne toutes les conditions, sans pour autant qu'elle soit elle-même conditionnée, ou bien les deux, puisqu'en ce terme ultime la synthèse totale et l'inconditionné ne font qu'un. Autrement dit, la totalité des conditions ne peut être qu'inconditionnée qui est à son tour le seul à rendre possible la synthèse absolument intégrale.

Une telle totalité, absolue, ne peut s'appliquer aux phénomènes, parce qu'elle « n'a de valeur que comme condition des choses en soi », tandis que les phénomènes, eux, « n'existent que dans notre représentation » n'ayant rien à voir avec les choses en soi. Le désaccord entre choses en soi d'un côté, et phénomènes d'un autre, voilà ce qui fonde les conflits de la raison pure et les antinomies. Loin d'être des « supercheries », elles touchent « au fond des choses, sous la supposition que les phénomènes et un monde sensible qui les comprend tous en lui-même seraient des choses en soi [61] ». A quoi s'ajoute une autre supposition selon laquelle l'ensemble de tous les phénomènes serait lui aussi une *chose en soi* qui est de plus « un tout existant en soi [62] ». Mais d'où viennent ces suppositions et sur quoi se fondent-elles ?

L'idée cosmologique se distingue des autres concepts *purs* de l'entendement pour cette raison qu'elle a pour origine les phénomènes. Elle ne fait donc pas l'objet de la déduction transcendantale. Pour la même raison, elle se distingue également d'autres idées transcendantales : elle se rapporte directement aux phénomènes, ce qui fait que la synthèse qui en résulte reste toujours empirique.

> Les idées cosmologiques ont seules cette propriété qu'elles peuvent présupposer comme *donnés* leur objet et la synthèse empirique qu'exige le concept de cet objet, et la question qui en résulte ne

61. Kant, *Critique de la raison pure*, B535.
62. Kant, *cit.*, B535.

> concerne que le progrès de cette synthèse, en tant qu'il doit contenir une réalité absolue qui n'est plus rien d'empirique[63].

Le fruit de cette synthèse, à savoir « l'absolue totalité dans la synthèse des phénomènes », sera nommé « le concept de tout du monde (*Weltbegriff*)[64] ». Il est désigné par deux noms : le Monde (*Welt*) pour son aspect « mathématique », et la Nature (*Natur*) qui est quant à elle dynamique. Le « monde » signifie l'assemblage *mathématique* dans lequel les phénomènes se présentent dans l'espace et le temps, de telle façon que sa dimension puisse se mesurer sur le mode du possible. Ce même monde peut s'appeler « la Nature » quand il est considéré comme un tout *dynamique* dans lequel les phénomènes sont considérés comme une unité dans leur *existence*[65]. Distinction qui parait purement nominale, elle prendra son ampleur à l'approche de la fin de la *Critique*.

Idée cosmologique, source de l'antinomie

Comment Kant arrive-t-il à résoudre l'antinomie par introduction de la notion d'indéfini ? Les preuves pour chacune des thèses consistent dans la démonstration indirecte de la négation de la thèse en question, en un mot, la réduction à l'absurde. Pour la thèse « le monde a une limite », c'est sa *négation* (« le monde n'a pas de limite ») qui est mise en considération, de façon à montrer conduit à l'absurdité voire l'impossibilité.

> **Thèse**. Le monde a un commencement dans le temps, et il est aussi, quant à l'espace, renferme dans des limites.
> **Antithèse**. Le monde n'a ni commencement ni limites dans l'espace, il est infini aussi bien par rapport au temps que par rapport à l'espace[66].

La preuve consiste à réfuter l'infinitisme, à démontrer l'impossibilité d'un monde infini. L'argumentation prend forme d'un syllogisme :

> (i) En effet, si l'on admet que le monde n'ait pas de commencement dans le temps, alors, jusqu'à chaque instant donné, une éternité s'est écoulée, et, par conséquent, il y a une série infinie passée d'états successifs des choses dans le monde.

63. Kant, *cit.*, B507. Sur la spécificité des idées cosmologiques, on lit un peu plus haut (B447–448), qu'elles « ont uniquement affaire au monde sensible (et non aux noumènes), elles poussent néanmoins la synthèse jusqu'à un degré qui dépasse toute expérience possible, on peut les désigner toutes très exactement, suivant moi, sous le nom de concepts du monde ».

64. « J'appelle toutes les idées transcendantales, en tant qu'elles concernent l'absolue totalité dans la synthèse des phénomènes, des *concepts du monde*, en partie à cause de cette totalité inconditionnée sur laquelle se fonde le concept du tout du monde qui n'est lui-même qu'une idée, en partie parce qu'elles tendent simplement à la synthèse des phénomènes, et, par conséquent, à une synthèse empirique. » Kant, *cit.*, B434–435.

65. Kant, *cit.*, B446–447.

66. Kant, *cit.*, B454–455.

(ii) Or, l'infinité d'une série consiste précisément en ce que cette série ne peut jamais être achevée par une synthèse successive.
(iii) Donc une série infinie écoulée du monde est impossible, et, par conséquent, un commencement du monde est une condition nécessaire de son existence[67].

La majeure, (i), est une définition qui nous dit ce que c'est qu'un monde sans commencement. Dans un monde infini, chaque instant est précédé, et aussi suivi, d'une éternité, à savoir une infinité d'états successifs. C'est une définition tout à fait acceptable et applicable au monde, mais pas seulement au monde, à toute chose. La mineure (ii) est elle aussi une définition, celle de l'infinité. Une série est infinie quand elle n'est pas soumise à la synthèse successive, que la synthèse ne peut *jamais être* achevée. Comment cela ? Dans la *Dissertation* de 1770, Kant parlait de la « double genèse » du monde. La notion de monde est générée par deux sortes de synthèse. L'une, conceptuelle, consiste à soumettre au concept de l'entendement et l'autre, représentative, à « *produire cette notion* » et à « se la représenter concrètement par une intuition ». Comment, précisément, se représenter concrètement le monde (dont il n'est pas difficile de donner conceptuellement une notion) ? Par additionner successivement les parties, de telle façon que ce même concept « devienne génétiquement possible », à condition que cette opération soit soumise aux lois de l'intuition[68]. Or, d'après celles-ci, toute représentation ne se fait que *dans le temps* ou, plus précisément, « en un temps fini et assignable[69] ». Ce qui est repris ici. Puisque toute représentation se fait nécessairement dans le temps, et ce, *en un temps fini*, une série qui n'est pas dénombrable en un temps fini ne peut faire l'objet de la représentation.

Or, qu'est-ce qui fait une telle synthèse ? Elle est une affaire de l'esprit. S'il est impossible de faire une synthèse de la série en question, ce n'est pas parce qu'elle l'est en soi, mais parce que nous ne sommes pas capables de nous la représenter. Ce que dit Kant, c'est que la synthèse successive d'une série infinie n'est pas représentable (pour nous) et ne satisfait pas à la condition de représentabilité. Il glisse de la condition de *représentabilité* à la condition de *possibilité*, pour arriver à la conclusion (iii) : le commencement du monde comme une « condition nécessaire de son existence ». Pourtant, on pourrait se demander si l'*irreprésentabilité* implique nécessairement l'*impossibilité*, si l'impossibilité de la synthèse d'un objet entraine l'impossibilité de l'*existence* même de cet objet.

67. Kant, *cit.*, B454. Ma numérotation.
68. Immanuel Kant (1980b), *De la forme et des principes du monde sensible et du monde intelligible*, in *Œuvres philosophiques*, éd. établie, trad., annot. et introd. par Ferdinand Alquié, Paris : Gallimard, t. 1, 387.
69. Kant, *cit.*, 388.

L'argumentation prend une autre allure passée à l'antithèse où il s'agit de prouver l'infinité du monde, toujours par *reductio ad absurdum*.

> (iv) En effet, supposons que le monde ait un commencement ; comme le commencement est une existence précédée d'un temps où la chose n'est pas, il doit y avoir eu un temps où le monde n'est pas, c'est-à-dire un temps vide.
> (v) Or, dans un temps vide, il n'y a pas de naissance possible de quelque chose puisque aucune partie de ce temps n'a en soi plutôt qu'une autre quelque condition qui distingue l'existence et la fasse prévaloir sur la non-existence (soit que l'on suppose que cette condition naisse d'elle-même, soit qu'on lui suppose une autre chose).
> (vi) Donc il peut se faire que maintes séries de choses commencent dans le monde, mais le monde lui-même ne saurait avoir de commencement, et par conséquent il est infini par rapport au temps passé [70].

Si l'on suppose une limite au monde, limite tant spatiale que temporelle, on est obligé d'admettre (il en découle de la première supposition) un espace et un temps, vides de contenu, sans aucun corps ni aucun phénomène – en un mot, rien. De quels espace et temps s'agit-il ici ? Dans la thèse, l'espace comme le temps sont implicitement pris pour « formes a priori », conformément à ce qui a été établi dans l'*Esthétique transcendantale*, la première partie de la *Critique* : l'espace et le temps se distinguent du phénomène, tous deux séparés et indépendants de celui-ci, sans pour autant être substances ou ni même concepts puisqu'ils ne sont que des *formes*. Pour l'antithèse, au contraire, Kant fait référence à l'un des contre-arguments servis à la critique leibnizienne de l'espace et le temps absolus [71]. Chez Leibniz, rappelons-le, l'espace et le temps se définissent comme *relations* des choses. Ils n'ont pas d'existence en soi ; leur existence, en tant que *formes*, se rapporte non pas à la réalité, mais à l'*idéalité*. Dans tous les cas, quelque chose comme un « temps vide » n'existe tout simplement pas et n'a aucun sens.

Il se peut que les deux propositions en contradiction soient toutes deux fausses [72]. Prenons l'exemple parlant qui se trouve dans les *Prolégomènes* [73]. Les deux énoncés, « un cercle carré est rond » et « un cercle carré n'est pas rond », sont des propositions contradictoires l'une à l'autre, tout en étant également fausses, puisque le concept même d'« un cercle carré » est une impossibilité,

70. Kant, *Critique de la raison pure*, B455. Ma numérotation.
71. Kant, *cit.*, B460. Voir aussi Milton K. Munitz (1951), « Kantian Dialectic and Modern Scientific Cosmology », *The Journal of Philosophy*, 48, 10, pp. 328-329 ; Merleau-Ponty, *La science de l'Univers à l'âge du positivisme*, pp. 260-265.
72. Kant, *Critique de la raison pure*, B531–532, septième section.
73. Kant, *Prolégomènes*, § 52, p. 120.

concept dans lequel il n'y a absolument rien qui soit pensé. De même, la thèse comme l'antithèse sur la grandeur du monde peuvent être toutes deux fausses. La question relative à la grandeur du monde, c'est un problème dont la solution sera « sera aussi toujours fausse, que l'on tente une réponse affirmative ou une réponse négative[74] ». Toujours est-il que le concept même du monde n'est pas logiquement impossible. S'il est impossible, c'est seulement en ce sens précis qu'il n'est pas compris dans l'expérience et qu'il ne fait pas l'objet de l'expérience. Le monde, répétons-le, ce n'est qu'une idée. Une idée peut se déterminer en soi-même, indépendamment de l'expérience, comme un existant en soi, mais cela n'est pas envisageable par un autre versant de la définition même du monde sensible : l'ensemble et la totalité des phénomènes. Le monde, en tant qu'il est phénomène, « n'est pas une chose en soi, mais seulement un mode de représentation ». Et ce par sa définition même, de telle façon que la notion de « monde existant en soi » n'est pas moins contradictoire dans les termes que celle de cercle carré. A quoi s'ajoute un autre argument qui sert à son tour d'argument d'appui pour l'une des thèses fondamentales de la philosophie kantienne : l'idéalisme transcendantal :

> Si le monde est un tout existant en soi, il est ou fini, ou infini. Or, le premier cas comme le second sont faux (en vertu des preuves, rapportées plus haut, de l'antithèse d'un côté, et de la thèse de l'autre). Il est donc faux aussi que le monde (l'ensemble de tous les phénomènes) soit un tout existant en soi. D'où il suit par conséquent que les phénomènes en général ne sont rien en dehors de nos représentations, et c'est précisément ce que nous voulions dire en parlant de leur idéalité transcendantale[75].

Que monde ne soit pas qualifiable d'infini ou d'infini, il s'ensuit que le monde n'est pas existant en soi, mais lui-même un phénomène. On comprend alors le sens profond de toute l'antithétique de la raison pure, ainsi que le rôle joué par l'idée cosmologique au « réveil du sommeil dogmatique » du philosophe et à la construction même de sa philosophie critique. Derrière les antinomies réside cette supposition que « les phénomènes et un monde ensemble qui les comprend tous en lui-même seraient des choses en soi »[76]. La supposition s'avère fausse, avec toutes les thèses et les antithèses et par leur fausseté même, afin d'en venir à soutenir l'idéalisme transcendantal.

Dans la thèse comme dans l'antithèse, c'est toujours la régression à l'infini qui est en jeu. Kant distingue *regressus in infinitum* et *regressus in indefinitum*[77]. La représentation du monde doit, puisque nous n'en avons pas d'intui-

74. Kant, *cit.*, § 52c, 123–124. Et aussi Kant, *Critique de la raison pure*, B534–535.
75. Kant, *cit.*, B534–535.
76. Kant, *cit.*, B535.
77. Kant, *cit.*, B547–548.

tion, s'effectuer par une régression empirique. Et ce, conformément à la règle de toute régression selon laquelle « si loin que nous soyons arrivés dans la série des conditions empiriques, nous ne devons admettre nulle part une limite absolue, [...] nous devons subordonner tout phénomène, comme conditionné, à un autre, comme à sa condition, et par conséquent, continuer de marcher encore vers cette condition ». Si le monde n'est ni infini ni fini, il n'en est pas moins vrai que sa détermination procède de la régression de la série des phénomènes, série supposée *indéfinie*.

On pourrait dire qu'il est dans la lignée de l'argument cartésien qui consiste en l'incapacité propre à l'être fini de connaitre l'infini. C'est aussi un curieux tournant relatif au concept d'infini dans son rapport à l'espace et au temps. Nous avons vu dans le chapitre précédent l'infinitisation de l'espace comme une conséquence de sa géométrisation, ainsi que la difficulté qu'elle a soulevée. J'ai aussi montré le problème du temps « calqué » sur celui de l'espace, ainsi que l'infini en acte qui était à la base, cet infini spatial ou spatialisé. Et Kant de renverser ce rapport, pour promouvoir le temps au premier rang et *temporaliser* l'infini : si le temps est lui aussi une forme a priori de l'intuition au même titre que l'espace, c'est le temps qui l'emporte sur l'espace en tant qu'il est la condition de l'*existence* de toutes choses.

Le monde, tant qu'il est créé par l'être infini, *peut* être infini, sinon doit-il l'être, mais nous, les êtres finis, ne pouvons pas le connaitre comme tel, tout au plus nous pouvons le connaitre comme illimité ou indéfini. Il en est de même pour Kant, avec cette différence radicale que l'inintelligibilité repose non pas sur les choses elles-mêmes, mais sur la nature même de l'esprit humain pour qui ce qui n'est *dans* le temps ne peut être connu aucunement, le temps étant une condition de possibilité de la connaissance [78].

2.2 Une origine déterministe ?

Descartes avait fondé sa cosmogonie sur le critère de l'intelligibilité, sans prétention réaliste : ainsi le monde s'avère plus facile à comprendre, disait-il,

78. Chez Kant, le temps est représenté par l'analogie avec les nombres réels d'après laquelle chaque nombre correspond à un et seulement un nombre réel. On peut penser pourtant à d'autres manières de représenter le temps, comme le dit Merleau-Ponty : ou bien un temps « compact et fermé », à savoir un intervalle ouvert, mais borné dans le passé, ou bien un temps limité à une singularité. D'après cette dernière conception, le temps n'existe qu'*avec* et *dans* le monde, né lui-même *en même temps* que le monde. Il est alors dépourvu de sens de parler d'un « avant » la création du monde. « Vers le passé, la suite des événements converge vers une limite, physiquement irréelle, qui est non seulement le commencement du monde dans le temps mais le commencement du temps. » Merleau-Ponty, *Cosmologie du XXe siècle*, p. 332.

suffisamment pour garantir la vérité. Le programme mécaniste a été poursuivi par Kant et Laplace, de manière encore plus radicale que Descartes ne l'aurait imaginé lui-même. Que ce soit à partir d'un chaos diffus et homogène comme le suppose Kant, ou d'une masse fluide en voie de contraction et probablement différenciée comme chez Laplace, une chose est sure : le monde a évolué, et cette évolution s'est effectuée de manière purement *mécanique*, conformément à la mécanique newtonienne.

Mais le monde a-t-il eu une *cause* ? Qu'est-ce qui prouve l'existence même d'une *origine* qu'elle soit ou non mécanique ? Rappelons cet état primitif tel que le suggérait Kant, « autrefois constitue autrement et rempli d'une matière ». C'est aussi, Kant le précisera quelques années plus tard, « la condition qui, seule, rend possible une explication mécanique des mouvements du ciel [79] », condition sans laquelle aucune explication mécanique de l'état actuel (qui en est des « vestiges ») ne serait possible, sans pour autant qu'il soit lui-même susceptible d'une explication mécanique : c'est aussi l'état le « plus primitif du monde » auquel « dans l'état présent du monde, nous ne pouvons assigner aucune cause naturelle [80] ». Telle est la cause primitive du monde à son état actuel, dont on ne peut pourtant assigner aucune cause. Laplace, de son côté, s'appuie sur un argument probabiliste pour constater l'existence même d'une cause mécanique : il est *peu probable*, disait le mathématicien, au sens mathématique du terme, c'est-à-dire d'une probabilité faible, que l'état actuel du système solaire ait été tiré par un jeu de hasard, il est *donc* un phénomène qui a une cause.

Le monde est stable, et Laplace est mieux placé que quiconque pour le constater, à l'appui de la preuve qu'il avait fournie lui-même. Qu'est-ce que signifie l'« origine » dans un monde stable, qui se meut de la même manière, demeure en ce sens précis tel qu'il est, comme il l'a été et il le sera ? L'état dit primitif, c'est un état comme les autres, qui ne diffère pas des états qui les suivent. Cela étant dit, la cosmogonie laplacienne a à établir un tel état initial, de telle façon qu'elle soit un chapitre ajouté à sa mécanique céleste. Le problème cosmogonique posé ou reposé en termes mécaniques, encadré par la mécanique céleste, accomplit le projet de la mécanisation de l'origine initié par Descartes. En ce monde il n'y a pas d'origine proprement dite, à moins qu'on ne la prenne en un sens spécifique. C'est ce que je montrerai à l'appui de l'analyse de la notion de *loi*.

79. Immanuel Kant (1980d), *L'unique fondement de l'existence de Dieu*, in *Œuvres philosophiques*, éd. établie et introd. par Ferdinand Alquié, trad. et annot. par Sylvain Zac, Paris : Gallimard, t. 1, 145.

80. *ibid.*

Notion de loi et ses implications cosmologiques

Une loi, comme nous en avons déjà discuté au sujet de la loi de l'univers, c'est une relation qui s'établit entre une multitude de phénomènes, multipliés par la pensée ou par l'expérience dans les circonstances variées, pour que ce qu'il y a de *commun* entre eux se distingue de ceux qui ne le sont pas. Laplace n'en est pas loin quand il définit la loi avant tout comme des *faits* généraux « empreints dans tous les cas particuliers, [...], mais elles y sont compliquées de tant de circonstances étrangères que la plus grande adresse est souvent nécessaire pour les découvrir [81] ». Une loi s'exprime en termes causaux, qu'ils soient l'attraction du Soleil (cause) au mouvement de la Terre (effet), ou l'attraction de la Terre (cause) à la chute libre des corps terrestres (effet).

> Tous les événements, ceux mêmes qui par leur petitesse semblent ne pas tenir aux grandes lois de la nature, en sont une suite aussi nécessaire que les révolutions du Soleil. Dans l'ignorance des liens qui les unissent au système entier de l'univers, on les a fait dépendre des causes finales ou du hasard, suivant qu'ils arrivent et se succédaient avec régularité ou sans ordre apparent : mais ces causes imaginaires ont été successivement reculées avec les bornes de nos connaissances, et disparaissent entièrement devant la saine philosophie, qui ne voit en elles que l'expression de l'ignorance où nous sommes des véritables causes [82].

Dans l'*Analytique* de la *Critique de la raison pure*, Kant entreprenait de déduire le principe de causalité à partir de l'analogie de l'expérience. Dans un changement quelconque, de l'état antécédent A à l'instant t à l'état conséquent B à l'instant *t'*, il existe entre ces deux états un nombre indéfini d'états intermédiaires D_n, soumis eux aussi aux changements $(A \to D_1, D_1 \to D_2, \ldots, D_n \to B \ : n \to \infty)$; le passage de A à B consiste à parcourir tous les D_n, de façon à épuiser toutes les différences en degrés qui existent entre A et B.

> Telle est la loi de continuité de tout changement, qui a pour fondement que ni le temps, ni le phénomène dans le temps ne se composent de parties qui soient les plus petites possible, et que cependant l'état de la chose, en son changement, parvient à son second état en passant par toutes ces parties, comme par autant d'éléments [83].

81. Laplace, *Exposition du système du monde*, p. 462.
82. Pierre-Simon de Laplace (1878-1894), *Essai philosophique sur les probabilités*, in *Œuvres complètes de Laplace*, 3e édition de 1820, Paris : Gauthier-Villars, t. 7, Préface, p. VI. Comme dit plus haut, la dernière leçon à l'Ecole normale dispensée en 1795 a pour l'objet la théorie des probabilités. Cette leçon sera d'abord reprise dans *Théorie analytique des probabilités* en 1812, en guise d'introduction, avant de faire l'objet d'une publication séparée en 1820.
83. Kant, *Critique de la raison pure*, B254.

La loi de continuité concise en la détermination d'un état à un autre est *continue* tant qu'ils sont dans le temps « par la série des causes et des effets, dont les premières entrainent inévitablement l'existence des seconds [84] ». C'est elle qui rend « la connaissance empirique des rapports de temps valable pour chaque temps (en général), par conséquent objectivement valable [85] ». Si le temps forme la condition sensible (de l'intuition), la loi de continuité est la condition formelle (de l'entendement), résidant en nous et étant alors donnée antérieurement à tous les changements pour que nous puissions en avoir la connaissance. Il arrivera à Kant plus loin dans la *Critique* de promouvoir la continuité au rang d'un principe plus général [86].

Chez Laplace, au contraire, la causalité est prise pour une reprise de la relation logique entre l'antécédent et le conséquent, qui est une relation atemporelle. Une telle relation causale, pas plus que dans la relation antécédent-conséquent dans un argument logique, n'implique pas nécessairement un ordre temporel : quand les deux états sont liés par une équation différentielle, ils peuvent se nommer antécédent et conséquent de façon indifférente et interchangeable, de telle façon que l'antécédent ne précède pas toujours chronologiquement le conséquent et l'antériorité de l'antécédent ne constitue pas une condition nécessaire.

C'est avec la théorie des équations différentielles que le vieil adage « *natura non facit saltum* » prend un sens encore plus précis rigoureux, voire mathématiquement fondé. Une équation différentielle met en lien l'état d'un système à l'instant t à son état après un laps de temps δt ; elle permet, une fois donnée la condition initiale, c'est-à-dire les valeurs de position et de vitesse à un instant donné t_0, de dériver d'autres états du système. Pour que la formulation soit encore plus complète, il a fallu un théorème fondamental du calcul différentiel : celui de l'unicité des solutions d'une équation différentielle, selon lequel il existe une unique solution à une équation différentielle, qui est en continuité en fonction des données initiales. Le théorème devait encore attendre une trentaine d'années pour être démontré par Cauchy. Pourtant, si Laplace n'avait probablement pas anticipé le théorème en question qui sera démontré trente ans plus tard, on peut toujours dire qu'il en avait une intuition, s'inspirant librement du principe métaphysique de Leibniz (qui n'était probablement pas non plus à l'abri de l'idée) qu'est le principe de la raison suffisante [87]. Qu'il

84. Kant, *cit.*, B256.
85. Kant, *cit.*, B256.
86. Kant, *cit.*, B281.
87. « Il n'est nullement exagéré d'attribuer à Laplace une certaine intuition de ce résultat, qu'il aurait sans doute considéré comme une évidence, » dit René Thom dans sa préface à Pierre-Simon de Laplace (1986), *Essai philosophique sur les probabilités : texte de la 5e édition, 1825 ; suivi d'extraits de Mémoires*, Paris : C. Bourgois, p. 11. Voir aussi Giorgio Israel

n'existe qu'une solution unique à l'équation différentielle qui modélise le système, cela signifie que l'évolution de ce système est déterminée une fois pour toutes[88]. D'où vient le déterminisme.

> Nous devons donc envisager l'état présent de l'Univers comme l'effet de son état antérieur, et comme cause de celui qui va suivre. Une intelligence qui, pour un instant donné, connaîtrait toutes les forces dont la nature est animée, et la situation respective des êtres qui la composent, si d'ailleurs elle était assez vaste pour soumettre ces données à l'analyse, embrasserait dans la même formule les mouvements des plus grands corps de l'Univers et ceux du plus léger atome : rien ne serait incertain pour elle, et l'avenir comme le passé serait présent à ses yeux[89].

A première vue, c'est un constat à portée manifestement cosmologique : « des plus grands corps de l'Univers » au « plus léger atome ». Les phénomènes aussi divers que les mouvements elliptiques, les inégalités de mouvements de la Lune et l'effet de la rotation sur le globe terrestre (variation de la pesanteur), la précession des équinoxes, le flux et le reflux de la mer, tout ceci est soumis aux lois au même titre que les révolutions du Soleil. Le constat est aussi cosmogonique, où cet « Univers » se présente, à son état présent, de son état antérieur à son état ultérieur, tous deux déduits de son état présent. C'est l'état présent qui sert de « cause de celui qui va suivre », mais aussi, peut-on ajouter, de celui qui l'a précédé. Une fois connus, d'une part, l'état (« la situation ») de tous les corps de l'univers à un instant donné, qu'on appellera plus tard la condition initiale, et d'autre part, les lois de la « force dont la nature est animée » qui relient cet état à un autre, il en découlera tous les états de ce corps, « l'avenir comme le passé ». Tout est « entièrement déterminé, au moins du point de vue divin ». C'est ainsi qu'il faut entendre la notion de causalité. « Les connexions entre cause et effet doivent être aussi fortes que celles entre les prémisses et les conclusions des démonstrations mathématiques. Le déterminisme est donc devenu en ce temps-là une précondition de la description mathématique de la nature[90]. »

Toujours est-il que notre connaissance ne serait qu'une faible esquisse, comme le préconise Laplace lui-même, toujours éloignée de ce que dessinerait cette intelligence. Une équation différentielle ne nous renseigne pas sur la condition initiale ; ne nous indiquera rien du tout non plus sans condition ini-

(1992), « L'histoire du principe du déterminisme et ses rencontres avec les mathématiques », in Dahan-Dalmédico *et al.* (1992), p. 260.

88. Anouk Barberousse (2011), « Philosophie de la physique », in *Précis de philosophie des sciences*, sous la dir. d'Anouk Barberousse, Paris : Vuibert, p. 365.

89. Laplace, *Essai philosophique sur les probabilités*, pp. VI-VII.

90. Lorraine Daston (1989), « L'interprétation classique du calcul des probabilités », *Annales. Économies, Sociétés, Civilisations*, 44, 3, p. 723.

tiale. La condition initiale de l'astre est un facteur déterminant pour que la loi détermine la position et la vitesse, sans pour autant être déterminée elle-même par la loi. La transposition cosmique de la situation physique mathématique est pratiquement impossible.

> On peut représenter les états successifs de l'univers par une courbe dont le temps serait l'abscisse, et dont les ordonnées exprimeraient ces divers états. Connaissant à peine un élément de cette courbe, nous sommes loin de pouvoir remonter à son origine, et si, pour reposer l'imagination toujours inquiète d'ignorer la cause des phénomènes qui l'intéressent, on hasarde quelques conjectures, il est sage de ne les présenter qu'avec une extrême réserve [91].

A la rigueur, les états successifs sont représentables, y compris l'état primitif qui aurait produit et dirigé les mouvements qui en suivent. Mais là se trouverait moins une origine proprement dite qu'une *limite*. Comme le dira Merleau-Ponty, « rien ne permet de savoir si cet état présent peut se caractériser autrement que comme le catalogue d'un nombre indéfini, et peut-être infini, de données sans liaison systématique entre elles [92] ». Une intelligence qui les connaitrait tous reste une possibilité, une « possibilité de principe », qu'il faut distinguer de la possibilité effective : celle-ci n'est faible à nos yeux qu'à cause de notre ignorance sur les lois et sur les états de chaque composante de l'univers [93]. D'où la nécessité de la mesure de cette ignorance, à savoir le calcul des probabilités.

Pensée probabiliste comme motif de la cosmogonie

« Pourquoi l'ordre règne-t-il dans le système solaire s'il n'est pas dû au hasard ? » Ainsi formulait Poincaré le questionnement cosmogonique de Laplace dans les *Leçons*. Nul besoin pour le mathématicien de se demander « pourquoi il y a quelque chose plutôt que rien », de questionner sur l'existence même du monde qui est un fait tant inutile qu'impossible à expliquer. Il vise directement à des questions, tant susceptibles que dignes de la recherche mathématique, lesquelles renseignent non pas sur la *raison* de l'existence du monde lui-même, en un mot, sa *création*, mais sur la *cause* de l'état actuel de ce même monde, l'*état* qu'il représente actuellement et qu'on peut présumer suffisamment connu, aussi bien connu que les mouvements giratoires des planètes.

91. Laplace, *Essai philosophique sur les probabilités*, pp. CXXI-CXXII
92. Merleau-Ponty, *La science de l'Univers à l'âge du positivisme*, p. 66.
93. « La question du démon de Laplace n'est pas celle de la possibilité effective d'une prévision déterministe du cours des choses, c'est la question de sa possibilité de principe, et cette possibilité de principe d'une prescience totale est impliquée par la dualité de la loi dynamique et de la description des conditions initiales. » Ilya Prigogine et Isabelle Stengers (1986), *La nouvelle alliance*, 2e éd., Paris : Gallimard, p. 272

Cet état, tout contingent qu'il est, doit être soumis à la cause qui ne doit pas s'écarter de celle des mouvements planétaires. Si la raison ultime des choses qui transcende nécessairement celles-ci chez Leibniz, cette « cause primitive » qui aurait « produit ou dirigé les mouvements des planètes », demeure immanente au même phénomène que ceux-ci et elle-même totalement soumise aux lois de la mécanique.

Il ne faut pas oublier que le passage célèbre « Une intelligence... » est tiré d'*Essai philosophique sur les probabilités*. Les idées probabilistes avaient déjà été présentes chez Pascal, Leibniz et surtout chez les Bernoulli pour qui cette science est une « mathématique mixte » qui sert à juger et, en l'occurrence, de décider, en cas d'incertitude par guider les raisonnements [94]. Laplace gardera le même souci, à ceci près qu'il se préoccupe davantage du perfectionnement des notions et des techniques très peu développées à l'époque. Toujours est-il que, pour lui, les probabilités sont essentiellement une expression des limites inhérentes à la connaissance humaine. C'est ce que L. Daston appelle le « déterminisme épistémologique », selon lequel « tous les événements pouvaient être prédits en principe, et que les probabilités étaient donc relatives à nos connaissances » [95]. Si l'univers est régi par les lois sous forme d'équations différentielles, la connaissance de ces équations ainsi que des conditions initiales permet de dériver tous les états de l'univers. Reste à savoir si l'on peut acquérir une telle connaissance : d'abord comment connaitre les positions et les vitesses de toutes les particules de l'univers à un moment donné ? Il en est de même pour les équations du mouvement qui doivent comprendre toutes les forces qui existent et prennent effet dans les choses, dont la connaissance pour nous ne peut rester qu'incomplète et incertaine, peu réalisable, quoique possible en principe. Par l'existence d'une intelligence, Laplace signale cette possibilité aussi petite qu'elle soit. C'est parce que les événements sont strictement et absolument déterminés, enchaînés l'un à l'autre par une relation causale, qu'il est possible de calculer la probabilité des hypothèses grâce au théorème de Bayes.

La description de l'état d'un corps (qui possède une masse) est complète quand sa position (à trois dimensions) ainsi que sa vitesse à un moment donné

94. Daston, « L'interprétation classique du calcul des probabilités », p. 719.

95. Daston, *cit.*, pp. 720-723. L. Daston indique trois conceptions de la probabilité : 1° celle des possibilités égales (fondées sur la symétrie physique ; dans les jeux du hasard) ; 2° celle des fréquences observées des phénomènes (qui présupposent l'accumulation de données d'observations pendant une certaine durée de temps ainsi que leur traitement méthodique, c'est-à-dire la statistique) ; 3° celle des degrés de certitude subjective ou croyance (probabilité signifiant alors vraisemblance, surtout en matière juridique). Nous les modernes distinguerons notamment la première, objective, qui se rapporte aux états des choses, de la troisième, subjective liée à l'ignorance, qui se rapporte aux états d'esprit, ce que les probabilistes classiques ne faisaient point.

sont connues ; tous ses états seront déterminés une fois cet état relié par ses lois du mouvement. De même, un état de tous les corps présents dans l'univers sera complètement décrit une fois connues la position et la vitesse de ces corps à un moment donné ; si ces paramètres sont reliés par les lois déterministes, *tous* les états de l'univers à tout moment seront connus. Le probabilisme en vient à renverser ce *nexus successivorum*. Le passé n'influence pas sur le présent, pas plus que celui-ci sur le futur, tel est, avec le principe de l'équipossibilité, l'un des principes de base du calcul des probabilités [96]. Chaque événement ayant lieu indépendamment de l'autre, la connaissance de l'un ne garantit aucune connaissance de l'autre. Par exemple, la probabilité d'avoir la face 1 dans un coup de dès à l'instant t est toujours la même.

Il faut d'abord savoir distinguer le phénomène régulier, dû à des causes régulières, c'est-à-dire soumis aux lois, de celui dû au hasard ou sans cause. Le probabilisme sert à Laplace d'une sorte de principe transcendantal, principe qui permet de juger si un événement est une nécessité ou un hasard. En principe, tous les phénomènes sont réguliers ; s'il en est qui paraissent dus au hasard, ce n'est pas par l'*absence* de cause, mais par l'*ignorance* de cause. « Le hasard n'a donc aucune réalité en lui-même ; ce n'est qu'un terme propre à désigner notre ignorance sur la manière dont les différentes parties d'un phénomène se coordonnent entr'elles & avec le reste de la Nature [97]. » Mais il est des événements qui sont vraiment dus au hasard : ils ont lieu sans cause, purement et simplement d'après probabilité. Prenons pour exemple le jeu de pile ou face. Si l'on a au premier essai l'un des deux, croix par exemple, cela n'a pas d'influence sur le résultat du deuxième essai. Il serait absurde de dire que le premier essai soit la « cause » du deuxième résultat [98]. Quand la probabilité est trop faible pour que l'événement ait lieu par hasard, cela suffit à suggérer l'existence d'une cause. L'arrangement d'une table de caractères d'imprimerie en est un exemple. Il est incomparablement plus probable qu'elle ne soit pas arrangée par l'effet du hasard. Ce n'est pas parce que tel arrangement est moins possible que les autres, mais, puisque nous connaissons l'ordre qui le constitue, il est plus probable qu'il soit constitué par quelqu'un qui connait la même langue.

96. « [L]es événements passés influencent sur la possibilité des événements futurs, ce qui n'est point admissible. Les combinaisons régulières n'arrivent plus rarement que parce qu'elles sont moins nombreuses. Si nous cherchons une cause là où nous apercevons de la symétrie, ce n'est pas que nous regardions un événement symétrique comme moins possible que les autres ; mais, cet événement devant être l'effet d'une cause régulière ou celui du hasard, la première de ces suppositions est plus probable que la seconde. » Laplace, *Essai philosophique sur les probabilités*, p. LXV.

97. Mémoire de 1773, cité in Roger Hahn (2004), *Le système du monde : Pierre Simon Laplace, un itinéraire dans la science*, trad. par Patrick Hersant, Paris : Gallimard, p. 62.

98. Laplace, *Essai philosophique sur les probabilités*, pp. LVI-LVII.

> La régularité que l'Astronomie nous montre dans le mouvement des comètes a lieu, sans aucun doute, dans tous les phénomènes. La courbe décrite par une simple molécule d'air ou de vapeurs est réglée d'une manière aussi certaine que les orbites planétaires : il n'y a de différence entre elles que celle qu'y met notre ignorance [99].

De manière générale, les phénomènes sont dus ou bien aux causes régulières, donc aux lois, ou bien aux causes fortuites, c'est-à-dire au hasard. A quoi s'ajoute une troisième possibilité : les causes, qu'elles soient régulières ou fortuites, sont assujetties à une certaine *limite*, de telle façon que le phénomène oscille autour d'une valeur moyenne (non sans quelque déviation, mais celle-ci ne dépasse pas elle-même et n'apparait que périodiquement). L'expression analytique obtenue à partir des premières observations devient linéaire à mesure que les expériences se répètent et se détaillent, assez pour en faire des « équations de condition » [100]. Face à un grand nombre d'anomalies ou d'inégalités qui s'observent dans la nature, les géomètres ont coutume de négliger quelques termes dans leurs calculs sous prétexte que ceux-ci n'influencent pas sensiblement les résultats. Or, une fois avertis sur une anomalie, ils reviennent à leurs calculs pour trouver la cause dans les termes négligés, sans avoir besoin de corriger la loi de la gravitation. Tel est le principe fondamental de la mécanique céleste [101].

> [C]'est ici que le *calcul des probabilités devient indispensable* pour déterminer jusqu'à quel point il faut multiplier les observations ou les expériences, afin d'obtenir en faveur des agents qu'elles indiquent une probabilité supérieure aux raisons que l'on peut avoir d'ailleurs, de ne pas les admettre [102].

Le calcul des probabilités a déjà servi à Laplace dans ses travaux de mécanique céleste et en physique mathématique, notamment relatifs aux « inégalités séculaires » des mouvements du corps céleste comme la Lune. Pour rendre compte de telles inégalités, il fallait introduire de nouveaux termes ou agents, de nouvelles explications, voire un nouveau type d'explication, souvent confondu avec les causes finales ou le hasard. Le calcul en vient à servir autrement pour rendre légitime, sinon nécessaire, la tentative d'expliquer l'origine du système solaire.

Onze planètes et dix-huit satellites qui constituent ce système ont ceci de particulier que leurs mouvements, rotatoires ou révolutionnaires autour du

99. Laplace, *cit.*, p. VIII.
100. Laplace, *cit.*, pp. LVI-LVII.
101. Laplace, *cit.*, p. LXVII.
102. Laplace, *Exposition du système du monde*, p. 476 et Laplace, *Essai philosophique sur les probabilités*, pp. LXVI-LXVI. Voir aussi Merleau-Ponty, *La science de l'Univers à l'âge du positivisme*, p. 29, *sqq.*

même centre, s'effectuent dans le même sens, identique à la rotation du Soleil [103]. Ce qui fait un ensemble de quarante-deux mouvements au total qui s'effectuent dans le même sens, c'est-à-dire direct [104]. Si les directions de tous ces mouvements avaient été arbitrairement attribuées, c'est-à-dire dues au hasard, quelle en serait la probabilité ? La probabilité qu'un sens de rotation soit direct est égale à $\frac{1}{2}$; celle que tous les quarante-trois mouvements soient directs, à $(\frac{1}{2})^{42}$, soit

$$\frac{1}{4\ 398\ \ 046\ 511\ \ 104} \approx 4.4 \times 10^{-12}$$

On peut se demander s'il n'est pas quelque peu arbitraire d'attribuer une probabilité de $\frac{1}{2}$ à ce que la circulation soit directe. S'il n'y a que deux sens, direct et rétrograde, ne faut-il pas supposer que la première impulsion d'un astre, qui déterminent la rotation ultime de celui-ci, ait été beaucoup plus variée de telle façon que la probabilité soit encore plus faible, moins que $\frac{1}{2}$? Dans tous les cas, rien n'empêche Laplace de rejeter le hasard comme cause de ces phénomènes.

> [O]n trouve, par l'Analyse des Probabilités, qu'il y a plus de quatre mille milliards à parier contre un que cette disposition *n'est pas l'effet du hasard*, ce qui forme une probabilité bien supérieure à celle des événements historiques sur lesquels on ne se permet aucun doute. Nous devons donc croire, au moins avec la même confiance, qu'une *cause primitive* a dirigé les mouvements planétaires, surtout si nous considérons que l'inclinaison du plus grand nombre de ces mouvements à l'équateur solaire est fort petite [105].

3 D'une cosmogonie positive à une cosmologie physique. Réticence positiviste ou héritage criticiste ?

[Réticence positiviste ou héritage criticiste]

103. Notons que Neptune n'a pas été prise en compte, découverte par Le Verrier en 1846. Pour les planètes, Laplace a compté, conformément à la coutume de l'époque ; les planètes « téléscopiques » que sont Cérès, Pallas, Junon et Vesta. Pour la description de ces astres, voir Liv. I, Ch. IX in Laplace, *Exposition du système du monde*, p. 50.

104. Laplace compte quarante-trois, probablement par erreur. Si l'on additionne les mouvements mentionnés, on obtient le nombre de 42 : révolutions et rotations des onze planètes (11×2) + révolutions des satellites (18) + rotation de la Lune qui était connue (1) + rotation du Soleil (1) = 42. C'est aussi le chiffre que Laplace utilise lui-même dans son calcul de la probabilité.

105. Laplace, *Essai philosophique sur les probabilités*, pp. LXVII-LXVIII. Soulignement ajouté. Il est à noter que, avec le chiffre de 43, la probabilité serait huit mille milliards contre un, deux fois plus faible, mais dans le même ordre de grandeur.

L'hypothèse de Kant-Laplace aura une postérité singulière, défendue par les uns et objectée par les autres, sans pour autant qu'elle soit définitivement adoptée ni rejetée, si elle n'est pas tombée dans l'oubli ou l'indifférence. Car l'oubli et l'indifférence, elle les a connus dès son apparition, due moins à son défaut sur le plan scientifique qu'à la circonstance relative à l'édition (mais c'est aussi à une circonstance particulière, comme on le verra plus loin dans le chapitre III, qu'elle doit sa résurgence à la fin du XIXe siècle) ou à l'attitude ambigüe de ses auteurs eux-mêmes et ainsi que de ses héritiers.

Sur ce point, aucune autre figure n'est plus symptomatique qu'Auguste Comte. Comte est notamment le premier, et aussi le seul pendant la première moitié du XIXe siècle, à prendre au sérieux l'hypothèse de Laplace. Après un aperçu de l'hypothèse en question dans ses *Cours de philosophie positive* de 1831, il dépose à l'Académie des sciences, en 1835, un mémoire intitulé « Premier mémoire sur la cosmogonie positive », où il tente « une vérification mathématique de l'hypothèse proposée par Herschel et Laplace pour expliquer la formation de notre système solaire [106] ». Alors que la « cosmogonie positive » vaut encore une leçon dans les *Cours de philosophie positive*, dont la publication s'achève en 1842, elle n'apparait plus dans la réédition du *Traité philosophique d'astronomie populaire* parue en 1844, pour cette raison qu'« une telle recherche est réellement inaccessible », écrit-il à John Stuart Mill [107]. « Cet effort est, continue-t-il, une concession vicieuse aux dernières habitudes d'athéisme métaphysique qui poursuivent, à leur manière, des questions que la saine philosophie doit finalement écarter. »

Auguste Antoine Cournot était, selon Merleau-Ponty, « celui qui, après Comte, sur le statut de la science cosmologique et l'idée d'Univers, se montre le plus positif, le plus explicite, le plus pertinent, non seulement par rapport à la science de son temps, mais aussi du nôtre [108] ». Avec le même goût encyclopédique classificatoire que Comte, mais accompagné d'un certain esprit de système, Cournot suivait de près l'évolution des sciences, sans pour autant laisser de côté de nouveaux domaines en plein développement comme la statistique, l'économie ou d'autres sciences sociales [109] ; il ne se préoccupe pas

106. Auguste Comte (1970), « Premier mémoire sur la cosmogonie positive », in *Écrits de jeunesse, 1816-1828. Suivis du Mémoire sur la cosmogonie de Laplace, 1835*, éd. établie et annot. par Paulo E. Carneiro et Pierre Arnaud, Paris : Mouton. Le mémoire en question a été lu aux séances des 19 et 26 janvier 1835 de l'Académie des sciences... sans pour autant qu'il soit vraiment reçu, en tout cas pas assez pour paraitre dans les prestigieux *Comptes rendus*. Il restera inédit portant à la marge une note de François Arago, l'académicien et astronome « officiel » : « il n'y a pas lieu à rapport ».

107. Lettre à Mill, citée dans l'introduction des éditeurs in Comte, *cit.*, p. 584.

108. Merleau-Ponty, *La science de l'Univers à l'âge du positivisme*, p. 304

109. Pour une étude comparative de ces deux philosophes du point de vue tant philosophique que biographique, voir François Vatin (2003), « Comte et Cournot. Une mise en

moins de la classification et du système de l'ensemble des sciences. Ceci lui permet d'éviter une des erreurs les plus notoires de Comte qu'est l'interdiction de l'astronomie stellaire. Une telle interdiction lui est d'autant moins envisageable qu'il est l'un des connaisseurs, peut-être pas le meilleur, mais en tout cas un des premiers, en la matière : Cournot traduit *Traité d'astronomie* de John Herschel, dont un chapitre important traite justement de l'astronomie sidérale [110]. Or, tout connaisseur qu'il était en matière de l'astronomie, Cournot n'en représente pas moins la « docte ignorance » de l'esprit positiviste. C'est un cas d'autant plus intéressant que les termes relatifs à la cosmologie (cosmologique, cosmogonie positive, Univers...) font régulièrement apparition dans son œuvre.

3.1 Monde sans univers ni ciel, fondement de la philosophie positive

Traité philosophique d'astronomie populaire a pour origine l'enseignement dispensé de 1838 à 1842, à la mairie du troisième arrondissement de Paris. C'est un cours atypique dans les deux sens : pour un public qui n'est pas habitué en matière de l'autonomie, et pour par un enseignant qui n'est pas non plus astronome de formation ni de profession [111]. Le sujet n'est pourtant pas choisi par hasard. Pour Comte, une « exposition systématique » de l'astronomie s'impose, pour cette raison qu'elle répond à un « besoin spontané des esprits modernes ». *Exposition du système du monde* de Laplace, et, un peu avant lui, *Entretiens sur la pluralité des mondes* de Fontenelle en avaient fourni d'illustres exemples. Entre ces deux textes se place l'« astronomie populaire », à la fois comme une « élaboration didactique » et comme une « initiation systématique ». Elle constitue également « un préambule indispensable, ou plutôt un premier degré normal, de l'établissement prochain d'un nouveau système philosophique pleinement homogène, seul susceptible désormais d'organiser des

regard biographique et épistémologique », *Revue d'Histoire des Sciences Humaines*, 8, 1.

110. Cournot rédige lui-même une préface et une « Addition sur la distribution des orbites cométaires dans l'espace ». A quoi s'ajoute, dans une seconde édition parue deux ans après en 1836, un chapitre sur l'application de la théorie des chances à la série des orbites des comètes, toujours rédigé par Cournot lui-même.

111. Ce qui l'oppose à l'astronomie populaire que François Arago professe à peu près au même moment (1813 à 1847) à l'Observatoire de Paris. Tandis que l'auditoire d'Arago est *informé* sur l'astronomie comme une science « toute faite », Comte *forme* son public à travers l'enseignement de cette science, peut-être pas en tant qu'elle est « en train de se faire », mais, du moins, en tant qu'elle s'était faite. Sur Comte et Arago, voir Chapitre 4 de Bernadette Bensaude-Vincent (2013), *L'opinion publique et la science. A chacun son ignorance*, Paris : La Découverte, pp. 63-83.

convictions durables et unanimes[112] ».

D'habitude, les astronomes se limitent aux phénomènes célestes plus ou moins directement observables, lesquels concernent les propriétés mécaniques comme la distance, la grandeur, le mouvement et, probablement l'atmosphère et la température. Ils ne s'intéressent point à la composition chimique ou structure intérieure de ces astres[113]. D'après Comte, il est nécessaire que l'astronomie en reste là, sans tenter d'aller plus loin, parce que là est une « harmonie constante et nécessaire entre l'étendue de nos vrais besoins intellectuels et la portée effective, actuelle ou future, de nos connaissances réelles[114] ». Pour la même raison, elle doit se borner au système solaire, le seul objet qui convienne à la fois à nos besoins, puisqu'il agit directement sur notre planète, et, à la portée de notre observation, qui est aussi « le monde dont nous faisons partie ». Quant à d'autres systèmes sidéraux, « l'univers », « ces astres innombrables disséminés dans le ciel », ils n'ont pas d'autre intérêt que « celui de nous servir de jalons dans nos observations, leurs positions pouvant être regardées comme fixes relativement aux mouvements intérieurs de notre système[115] ». Ces « astres innombrables disséminés dans le ciel » ne sont, il est vrai, qu'une partie de l'univers – une idée vague et indéfinie par sa définition même, qu'il faut donc exclure de toute philosophie. Le monde est « le plus élevé auquel nous puissions réellement atteindre, et c'est aussi le seul qui nous intéresse véritablement », et aussi « la pensée la plus étendue qu'il ne soit permis de poursuivre habituellement avec fruit ». C'est le seul objet digne de l'astronomie qui doit s'écarter de cette notion vague qu'est l'univers, « le cosmos moins le ciel[116] ».

La position de Comte a souvent été réduite à la restriction de l'astronomie sidérale et de l'astrophysique, parfois de façon caricaturée[117]. Elle est pourtant plus profonde qu'elle ne parait, tant par son argumentation que par son implication.

---

112. Auguste Comte (1844), *Traité philosophique d'astronomie populaire. Exposition systématique de toutes les notions de philosophie astronomique, soit scientifiques, soit logiques, qui doivent devenir universellement familières*, Carlilian-Goeury et Dalmont ; Réédition, Paris : Fayard, 1985, pp. VII-IX.

113. Auguste Comte (1998), *Cours de philosophie positive*, éd. établie et annot. par Michel Serres *et al.*, Paris : Hermann, t. 1, 300 *sqq.* Cette dix-neuvième leçon, qui ouvre la partie consacrée à la science astronomique du *Cours*, a été faite en 1835, l'année du mémoire sur la « cosmogonie positive ».

114. Comte, *cit.*, p. 304.

115. *ibid.*

116. Comte, *cit.*, p. 361.

117. Poincaré, pour ne citer que lui : « Auguste Comte a dit, je ne sais où, qu'il serait vain de chercher à connaître la composition du Soleil, parce que cette connaissance ne pourrait être d'aucune utilité pour la Sociologie. Comment a-t-il pu avoir une vue si courte ? » in « L'astronomie », *VS*, p. 121.

Par son argumentation, d'abord, puisqu'elle repose sur un des principes fondamentaux de la mécanique classique qu'est la loi de la gravitation. D'après celle-ci la force gravitationnelle est inversement proportionnelle au carré de la distance, alors il est légitime de négliger l'influence des astres lointains. Plus que légitime, c'est aussi une restriction nécessaire, parce que, si l'on prend en compte le fait que tous les astres sont liés l'un à l'autre par la gravitation, l'astronomie serait impossible. Et pour cause : s'il faut nous restreindre au « petit nombre de corps célestes qui composent le monde », ce n'est pas pour une raison anthropocentrique, mais pour une raison théorique ; non parce que nous faisons partie de ce monde, mais parce que c'est là le fondement même de la mécanique céleste, et aussi par sa limite, qui s'impose par son fondement même ; elle ne sera dépassée que par la théorie de la relativité générale.

Par son implication, puisque la restriction servira de fondement même de l'astronomie surtout dans le *Traité*, par sa démonstration de l'incompatibilité radicale entre la science et la théologie. Si l'astronomie mathématique marchait déjà séparément de la religion dès en Grèce, c'est surtout la révolution copernicienne qui a poussé définitivement l'esprit humain à sortir du régime théologique et à se promouvoir à son état positif. Outre son rôle libérateur, la révolution copernicienne a posé « l'une des bases indispensables de la nouvelle philosophie générale, en substituant la notion relative de *monde* à l'idée absolue d'*univers*[118] ». La conception d'univers qui reposait sur la Terre immobile en tant que centre du monde et aussi centre de tout mouvement et « constituait vraiment l'ensemble total des corps existants en un système unique », perd toute signification une fois la Terre décentrée et mise en mouvement. Rien n'assure si les étoiles constituent un système général, au lieu de rester indépendantes les unes des autres en tant que systèmes partiels. Même si elles étaient en relations mutuelles, nous n'aurions pas de connaissance sur celles-ci, vu leurs distances incommensurables par rapport à celles des planètes, pas plus qu'elles n'exercent, pour la même raison, aucune influence sur ce qui nous est connu et nous concerne. « Toute qualification de véritable système a tendu dès lors à se réduire exclusivement au *monde* dont nous faisons partie, et qui seul nous offre une liaison vraiment appréciable, autour de la masse centrale du soleil. »

« Cette réduction fondamentale de l'ancien point de vue cosmique au moderne point de vue solaire » prendra appui, plus loin dans le *Traité*, sur ce que la mécanique céleste nous fait savoir : « l'entière indépendance des mouvements intérieurs de notre monde, les seuls que nous puissions connaitre, envers les mouvements généraux quelconques que peut avoir un tel système,

118. Comte, *Traité philosophique d'astronomie populaire*, pp. 328-239.

et qui nous sont nécessairement inconnus[119] ». En effet, poursuit Comte, les phénomènes se font ou s'observent dans notre monde « comme si les autres n'existaient pas ». Ce fait, empirique au départ, vient s'ériger chez Comte sur une loi du mouvement, qu'il appelle également la loi de Galilée et qui n'est pas effectivement autre chose que la relativité galiléenne selon la terminologie de nos jours. La relativité, qui ne fait pas partie des trois lois du mouvement de Newton (mais aux corollaires de celles-ci, comme nous allons voir plus loin), vient remplacer l'une de celles-ci, la loi $F=ma$.

Comte parlait déjà dans la quinzième leçon du *Cours de la philosophie positiviste* (dont la rédaction remonte à 1830), du « principe de l'indépendance ou la coexistence des mouvements[120] ». De ce principe découlaient la loi de la composition des forces dans les mouvements ou d'autres, notamment celle sur la relation $F=ma$, alors qu'il est vain de le fonder de façon a priori. « C'est donc, disait-il, seulement comme un simple résultat général de l'observation et de l'expérience que cette loi peut être en effet solidement établie. » Revenant à la même loi au *Traité*, Comte met en lien cette loi aux mouvements intérieurs du monde, de façon à montrer que l'indépendance du monde envers l'univers n'est pas seulement un fait empiriquement établi (jamais contesté par l'observation), mais aussi fondé sur la loi. C'est encore « l'immensité des distances sidérales » par laquelle s'annulent les actions et les mouvements de l'extérieur sur la surface terrestre, de telle manière que la loi de l'indépendance s'applique au monde. Ce qui revient à assurer suffisamment l'indépendance du monde.

> Nous pouvons donc, sans faire aucune hypothèse hasardée sur la loi mathématique des actions cosmiques, expliquer ainsi l'indépendance effective des phénomènes intérieurs de notre monde envers tous les phénomènes plus généraux de l'univers proprement dit. Cette grande notion devient alors parfaitement analogue au principe, déjà pleinement familier, qui nous fait envisager tous les divers mouvements partiels des corps terrestres comme naturellement indépendants du mouvement total de notre globe[121].

Chose encore plus remarquable, Comte place cette « idée nette et circonscrite de *monde* » qui substitue « l'idée vague et indéfinie d'*univers* » au centre même de son système philosophique. Elle est, rappelons-le, fondée sur la loi la plus parfaite qui soit, celle de la gravitation. D'une part, elle permet de centrer la connaissance sur les phénomènes liés plus ou moins directement à l'homme (« l'humanité ») au lieu de se perdre dans l'univers. D'autre part, elle attribue

119. Comte, *cit.*, p. 476.
120. Comte, *Cours de philosophie positive*, p. 236.
121. Comte, *Traité philosophique d'astronomie populaire*, p. 477.

à la philosophie positive un état de perfection et par cela même un statut de « l'unique science de l'humanité ».

3.2 Question d'origine et possibilité d'une « cosmologie physique »

A la recherche des lois aux dépens de l'origine

L'idée même d'origine n'est qu'une préoccupation propre à l'esprit dans son état primitif. Cet état, dit « théologique », consiste précisément à chercher « la nature intime des êtres, les causes premières et finales de tous les effets qui le frappent, en un mot, vers les connaissances absolues [122] ». L'origine et la destination de l'univers, c'est justement ce que l'esprit a à renoncer à connaitre une fois atteint son état positif, pour « s'attacher uniquement à découvrir, par l'usage bien combiné du raisonnement et de l'observation », les *faits* et « leurs lois effectives, c'est-à-dire leurs relations invariables de succession et de similitude [123] ». La quête des lois, qui lient les faits ou les généralisent (que Comte appelle « faits généraux », dont le prototype est la loi de la gravitation newtonienne), remplace des questions « insolubles » sur les « causes génératrices » comme l'origine de ces lois fondamentales ou celle de l'univers [124].

La recherche des causes reste valable tant qu'elle se borne aux phénomènes qui sont « parfaitement connus et susceptibles peut-être de porter un témoignage décisif de sa véritable origine immédiate » et la formation est « la seule que nous puissions raisonnablement chercher [125] ». Ce qui permet de poser le problème cosmogonique de manière limitée, mais en termes plus précis et concrets : il se réduit à la question de savoir si le calcul de la période de *rotation* de l'atmosphère primitive, étendue jusqu'à Neptune, dérive la période de *translation* actuelle de cette planète. Le résultat ne serait pas tout à fait convaincant, à cause des perturbations des planètes, mais surtout pour une raison plus fondamentale qu'est la limite inhérente à la connaissance en la matière laquelle ne peut jamais égaler à une démonstration mathématique. C'est le sujet même qui « n'en comporte pas [126] ». Cette limite conduira le philosophe à contester « ce qui comporte un caractère de positivité des hypothèses cosmogoniques » et à « retrancher entièrement » ces dernières « comme n'étant

122. Comte, *Cours de philosophie positive*, p. 21.
123. Comte, *cit.*, p. 22.
124. Comte, *cit.*, p. 26.
125. Comte, *cit.*, p. 432.
126. Comte, *cit.*, p. 438.

pas suffisamment positives[127] ».

Significative en ce sens est la vingtième leçon du *Cours*, consacrée à la théorie des hypothèses en physique.

> Toute hypothèse scientifique, afin d'être réellement jugeable, doit exclusivement porter sur les lois des phénomènes, et jamais sur leurs modes de production[128].

Ce qui va de pair avec son fameux interdit de toute l'astronomie sidérale, déjà signalé dans le *Cours* : une « restriction essentielle et nécessaire de nos véritables recherches célestes à l'étude approfondie des phénomènes intérieurs de notre monde[129] ». Même l'observation ne suffit pas pour les recherches de ce genre comme moyen de vérification positive, car elle n'échappe pas à son incertitude inévitable issue de la distance des étoiles.

Mill parle de l'hypothèse de Laplace dans le chapitre intitulé « Sur les limites de l'explication de la loi de la nature ». Et des hypothèses.

L'hypothèse est nommée « spéculation ». Elle a un caractère inductif au même titre que la théorie géologique. L'atmosphère solaire étendue au-delà la limite du système solaire à l'origine ; elle se refroidit, jusqu'à la limite actuelle (Neptune) ; d'après les principes généraux de la mécanique, la contraction de l'atmosphère a pour résultat l'argumentation de la vitesse de rotation ; la force centrifuge augmente et accélère encore la rotation, de telle façon que, faute de balance de la force centrifuge avec l'attraction depuis le centre, des vapeurs s'abandonnent successivement en forme d'anneau. Chaque anneau se condense pour devenir une planète. Ainsi de suite. L'hypothèse a ceci de particulier qu'elle ne fait entrer aucune substance inconnue (contrairement, notamment, à Descartes, ses trois éléments) ni aucune loi inconnue.

La considération physique est-elle fondée ? Mill explique que le rayonnement fait perdre de la chaleur, donc a pour résultat le refroidissement[130]. Et puis contraction. C'est ainsi que Laplace avait déduit du présent état du Soleil, lumineux et rayonnant, son état ancien, d'une extension extrême. De là aussi on peut supposer que l'anneau, une fois séparé, continue à circuler toujours de la même vitesse jusqu'au présent. Tout ceci constitue un raisonnement tout à fait légitime.

> il n'y a ainsi, à proprement parler, rien d'hypothétique dans cette théorie de Laplace. Elle est un exemple de conclusion légitime d'un

127. Lettre à Mill déjà citée in Comte, « Premier mémoire sur la cosmogonie positive », p. 584.
128. Comte, *Cours de philosophie positive*, p. 463.
129. Comte, *cit.*, p. 431.
130. Il n'en est pas toujours ainsi, le sait-on désormais depuis Helmholtz et Thomson : un rayonnement ne s'accompagne pas toujours d'un refroidissement selon la chaleur spécifique.

> effet présent à une cause passée possible, d'après les lois connues de cette cause. Elle a donc, comme je le disais, le caractère des théories géologiques, mais leur est très inférieure en évidence. En effet, quand même il serait prouvé (et ce ne l'est pas) que les conditions nécessaires pour déterminer la séparation successive des anneaux auraient positivement été réalisées, il y aurait toujours plus de chances d'erreur de supposer que les lois actuelles de la nature sont les mêmes qui existaient à l'origine du système solaire, que d'admettre simplement, avec les géologues, que ces lois ont toujours subsisté au travers d'un petit nombre de révolutions et de transformations d'un seul corps parmi ceux qui composent le système [131].

Or la validité même des lois de la nature n'est pas toujours certaine...

« Monde » et « origine » comme problèmes propres à de la cosmologie

Si Comte n'utilise jamais le mot « cosmologie », Cournot l'utilise abondamment dans ses textes, non pas comme un substantif ni comme une science à part entière, mais comme un terme « sortal » souvent sous forme d'un adjectif qu'est « cosmologique ». Le cosmologique est pris pour synonyme de « historique », et antonyme de « physique » ou « théorique » [132]. La distinction revient à la distinction fondamentale dans toute la pensée de Cournot qu'est celle entre la loi et le fait, deux éléments qui constituent la connaissance :

> En général dans tous les phénomènes s'observe le contraste de la *loi* et du *fait*, de ce qui est *essentiel* ou *nécessaire* en vertu d'une loi [...], et de ce qui résulte *accidentellement* ou *fortuitement* de certaines dispositions initiales ou de certaines rencontres dont nous n'admettons pas la nécessité en vertu d'une loi ; quoique dans chacune des séries qui se recentrent fortuitement, parce qu'elles sont indépendantes les unes des autres, chaque fait soit nécessairement lié aux faits antécédents dans sa propre série, et complètement déterminé par ses antécédents [133].

131. Mill, John Stuart, *Système de logique déductive et inductive, exposé des principes de la preuve et des méthodes de recherche scientifique.* Tome II (Livre III), Chapitre XIV. Traduit de la 6e éd. anglaise par Louis Peisse. Liège : P. Mardaga, 1988, p. 27–28.

132. Ch. XXII, § 343, Antoine Auguste Cournot (1975), *Essai sur les fondements de la connaissance et sur les caractères de la critique philosophique*, in *Œuvres complètes*, sous la dir. d'André Robinet, Paris : J. Vrin, t. 2, pp. 408-409

133. § 7 in Antoine Auguste Cournot (1979), *Matérialisme, vitalisme, rationalisme. Études sur l'emploi des données de la science en philosophie*, in *Œuvres complètes*, sous la dir. d'André Robinet, Paris : J. Vrin, t. 5, pp. 67-68.

La distinction apparait constamment dans l'œuvre de Cournot, de *Essai sur les fondements de la connaissance et sur les caractères de la critique philosophique* (1851), à *Matérialisme, vitalisme, rationalisme* (1875), en passant par *Traité de l'enchaînement des idées fondamentales dans les sciences et dans l'histoire* (1861), trois ouvrages qui contiennent les

Distinction à la fois ontologique et épistémologique, recouvrant tous les ordres de phénomènes ainsi que les sciences qui y correspondent. D'abord la notion de « Nature » se distingue de celle de « Monde »[134]. Si la « Nature » est renvoyée à des lois nécessaires et universelles et fait l'objet de la science physique, le « Monde », dont Cournot n'oublie pas de remarquer l'affinité étymologique à l'idée de « Cosmos », désigne l'ensemble des *faits*, contingents, particuliers, et attribués à la science cosmologique. La « Nature » avec ses lois fait l'objet des sciences « physiques » comme la physique et la chimie, tandis que l'astronomie ou la géologie, sciences qui ont à décrire des faits ou objets *particuliers* comme le Soleil ou la Terre, s'occupent des faits du « Monde ». Et ces dernières sciences sont qualifiées de « *cosmologiques* ».

Le dualisme n'est certes pas évident. Les sciences, excepté les mathématiques, ne sauraient se réduire aux principes mécaniques abstraits (de sorte que le mécanisme radical n'a pas de sens) tant qu'elles contiennent la moindre partie des données concrètes de l'expérience. Car celle-ci a toujours quelque chose de contingent et donc, en terme cournotien, d'*historique*. Déjà chaque loi contient non seulement la relation mathématique, mais aussi des constantes qui sont des données de fait[135]. Qui plus est, il existe des phénomènes où lois physiques et données cosmologiques se trouvent connectées et entremêlées les unes aux autres, si bien qu'il est difficile de discerner le « physique » du « cosmologique », et de ne pas trouver ce qu'il y a de « physique » dans les sciences cosmologiques[136]. C'est ainsi que, si Cournot distingue la science naturelle de l'histoire naturelle, les mêmes phénomènes célestes peuvent appartenir à la fois à la première et à la dernière, en ceci qu'ils font l'objet de la théorie de la gravitation universelle, mais aussi de la description qui repose sur l'observation à la l'histoire naturelle. L'astronomie n'en dispose pas moins des « faits cosmiques accidentels » comme la distribution des étoiles et des amas d'étoiles, la présence des anneaux sur Saturne ou bien les dispositions des satellites.

> Ce sont là autant de faits cosmiques qu'expliqueraient peut-être la connaissance des phases antérieures par lesquelles le monde planétaire aurait passé à des époques très reculées, mais qui, pour être expliqué de la sorte, ne perdraient pas le caractère de faits cosmiques accidentels, tandis que les lois de Kepler et celles de la réfraction de la lumière, établies par la théorie à titre de corollaires

---

passages essentiels concernant la pensée cosmologique cournotienne. Voir Merleau-Ponty, *La science de l'Univers à l'âge du positivisme*, p. 305.

134. Cournot, *Matérialisme, vitalisme, rationalisme*, pp. 69-70.

135. Sur ce point, voir l'article « Loi » in *Vocabulaire technique*, A. Lalande (éd), p. 414–415.

136. Antoine Auguste Cournot (1982), *Traité de l'enchainement des idées fondamentales dans les sciences et dans l'histoire*, in *Œuvres complètes*, sous la dir. d'André Robinet, Paris : J. Vrin, t. 3, § 183.

> d'autres lois, ne passeront jamais pour des accidents, quel que soit l'état futur de nos connaissances[137].

Par exemple, la Terre est un objet particulier, donc fait l'objet de la science historico-cosmologique, mais son aplatissement vers les pôles est un résultat *nécessaire* qui découle des lois de la nature qui s'applique à tous les astres voire toutes les masses fluides en rotation sur lui-même comme notre Terre. De même, la physique, la chimie et la cristallographie sont des sciences naturelles-physiques, tout en côtoyant une histoire naturelle propre à la Terre.

L'enjeu n'est donc plus dans la recherche de causes, y compris efficientes, mais seulement de rapports constants entre faits hétérogènes qui permet la prédiction. La mécanique surtout quand elle est analytique transcrit l'évolution de phénomène en langage mathématique (souvent les équations différentielles) qui est un rapport spatio-temporel entre deux faits/événements qui sont contigus et immédiatement successifs. La causalité n'a pas de place en mécanique analytique, à moins qu'elle ne soit locale au sens analytique. Dans ce cas, le rapport entre deux événements devient antécédent et conséquent comme en logique, plutôt que cause et effet, conformément à la doctrine déterministe.

Les faits sont considérés comme effets des faits antérieurs, qui sont eux-mêmes des résultats de ceux qui les précèdent. Ils se produisent successivement les uns les autres, les uns s'expliquant les autres ; leurs enchaînements causaux peuvent remonter jusqu'aux faits les plus antérieurs, ceux qui ne peuvent plus s'expliquer eux-mêmes, mais seulement expliquer les autres. « En d'autres termes, dira Cournot plus tard, les explications qu'admettent les sciences cosmologiques se fondent principalement sur l'histoire des phénomènes passés[138]. » Si ces faits ne s'expliquent pas par les lois, mais par d'autres faits antérieurs. Peut-on toujours parler de l'explication dans ce dernier cas ? Il faut un autre modèle d'explication. Quand on remonte de l'état initial à l'état final, l'histoire n'intervient pas et on peut dire que le système se développe en dehors du temps. Mais dans le cas contraire, ou bien même quand il s'agit seulement de l'état actuel du système, il devient nécessaire de faire appel à des faits indépendants, qui ne s'expliquent pas par les lois ni se permettent pas à la prédiction. C'est là qu'intervient l'histoire.

Qu'entendre par l'histoire et l'historicité ? L'histoire, c'est un synonyme de contingent chez Cournot. Souvent, surtout chez les déterministes, le hasard est-il pris pour résultat de l'ignorance inhérente à notre connaissance imparfaite, qui ne fait donc pas partie de la réalité physique proprement dite. Ce que Hume avait montré de façon la plus clairement par sa définition de hasard

137. Cournot, *Matérialisme, vitalisme, rationalisme*, p. 71.
138. Cournot, *Traité de l'enchaînement des idées*, § 182.

comme « l'ignorance où nous sommes des véritables causes ». Cette conception subjectiviste du hasard et de la probabilité, déjà nuancée par Laplace, est remise en cause par Cournot. Il définit la contingence comme intersection entre deux séries causales indépendantes l'une de l'autre. Soit une pierre tombe sur un homme au chemin vers la poste. La chute de la pierre est un phénomène tout à fait naturel, physique tandis que la sorte de l'homme pour aller à la poste, historique. Le premier est gouverné par les lois de la physique ; dans la série causale de ce phénomène, les effets sont déterminés par les causes et ne viennent qu'après celles-ci. En ce sens il est dans le temps. En revanche, le second, il n'y a pas de relation causale proprement dite entre événements : la volonté de l'homme de sortir ne « détermine » pas sa sortie de la même manière que la gravité fait tomber la pierre. Les séries peuvent ou bien converger vers un même point, ce qui est souvent le cas pour les phénomènes physiques, ou bien, bifurquer à partir d'un même point. Point de convergence ou de divergence, c'est ce qu'on appelle le hasard ou la contingence. La contingence devient ainsi une notion positive et objective.

La nouvelle conception du hasard fait différence entre la connaissance du passé et celle du futur. C'est que, « parmi les séries de phénomènes qui s'enchaînent, en devenant successivement effets et causes les uns des autres, il y a des séries qui s'arrêtent et d'autres qui se prolongent indéfiniment », et les séries du présent au futur font partie des premiers, et celle qui remontent au passé ; des derniers, qui sont indéfinis. Asymétrie à laquelle même les phénomènes dits déterministes, dont les séries cause-effet sont déterminées de façon rigoureuse, n'échappent pas. En ce sens, si le présent est toujours gros de l'avenir, il n'est pas chargé du passé... en tout cas pas autant.

> *[L]e présent est gros de l'avenir*, et de tout l'avenir, en ce sens que toutes les phases subséquentes sont implicitement déterminées par la phase actuelle, sous l'action des lois permanentes ou décrets éternels auxquels la nature obéit ; mais on ne pourra pas dire sans restriction que le présente et de même gros du passé, car il y a eu dans le passé des phases dont l'état actuel n'offre plus de traces, et auxquelles l'intelligence la plus suprême ne saurait remonter, d'après la connaissance théorique des lois permanentes et l'observation de l'état actuel [...] Ainsi, quelque bizarre que l'assertion puisse paraitre au premier coup d'œil, la raison est plus apte à connaitre scientifiquement l'avenir que le passé [139].

Cournot n'accepte pas l'univers déterministe tel que le conçoit Laplace, pour cette raison qu'il existe de différents ordres du monde qui se distinguent l'un de l'autre.

139. Cournot, *Essai sur les fondements*, p. 447, § 302, p. 447.

Si chaque science physique se double d'une science historique, cela ne doit pas dissiper la différence, surtout la possibilité de différenciation des sciences. L'importance des données historiques s'accroît avec le degré de complication des phénomènes. « Dans le domaine de la biologie, le point de vue historique devient prédominant et il est presque exclusif dans le domaine humain [140]. »

140. Lalande, *ibid.*

Chapitre III

Détour cosmologique et retour cosmogonique

L'astronomie du XIXe siècle restait marquée par la découverte de Neptune en 1846 et centrée sur le système solaire. Si Friedrich Wilhelm Bessel réussit le premier en 1837 la mesure des parallaxes annuelles, il demeura toujours dans la tradition de « la culture de la précision », l'accent mis sur le moyen d'observation et le traitement méthodique des données [1]. Il n'en tira aucune signification cosmologique. Pour lui, la mesure était elle-même la fin, plutôt qu'un moyen de vérifier des théories ; il n'y avait point à se soucier de quelque chose d'« immesurable » qu'est l'univers.

Pourtant, tout un nouveau champ s'ouvrait à l'astronomie, justement grâce à la technique observationnelle, surtout à une nouvelle méthode empruntée à la physique – la spectroscopie, inventée par Kirchhoff. Appliquée par son inventeur lui-même à l'observation du ciel, elle eut pour résultat de résoudre le spectre du rayon du Soleil en multiples raies d'éléments chimiques et révéler la présence des éléments chimiques. Les astronomes se mirent à décomposer les lumières provenant des étoiles (Secchi et Rutherford en 1862) ou des nébuleuses (Huggins en 1864), et ce fut un apport immense à l'astronomie, comme on peut lire dans un rapport publié en 1868 :

> A l'exception du Soleil d'où nous recevons à la fois de la lumière et de la chaleur, la présence des astres ne se manifeste à nos sens que par la lumière qu'ils nous envoient. Nous jugeons ainsi de la position que chacun d'eux occupe dans l'espace à chaque instant, et en outre de sa forme et des particularités que présente sa surface, s'il n'est pas trop éloigné de nous. Là semblaient devoir se borner pour toujours les indications fournies par la lumière venant des astres. Qui eût pu prévoir que, par l'examen minutieux de cette lumière, en

1. Sur Bessel, voir Merleau-Ponty, *La science de l'Univers à l'âge du positivisme*, p. 107 et pp. 117–123 et l'article « Bessel » in Merleau-Ponty, *Sur la science cosmologique*.

> analysant les divers rayons dont elle est formée, on parviendrait à y trouver des traces nettes et irrécusables, non seulement de l'état physique, mais même de la composition chimique des corps qui nous envoient ces rayons ? C'est cependant ce qui a eu lieu [2].

Une autre nouveauté : au milieu du XIXe siècle apparurent des réflexions cosmologiques d'un type nouveau, inspirées de la thermodynamique ou de la géométrie non euclidienne, deux domaines en vogue à l'époque. L'avènement de la thermodynamique était un des moments décisifs tant dans l'histoire de la cosmologie que dans l'histoire de la physique. Avec elle se posaient de nouveaux problèmes comme l'origine de la chaleur du Soleil et de la Terre ; surtout ses deux principes marquèrent profondément l'esprit de l'époque, notamment par leur implication cosmologique. Ces réflexions, plus ou moins spéculatives, en tout cas souvent restées dans l'abstrait pour constituer une théorie unifiée de l'univers, contribueront à mettre en branle les fondements de la science classique tels que les axiomes d'Euclide et les principes de la mécanique newtonienne.

Entre les méthodes anciennes et nouvelles de l'astronomie se trouvait l'hypothèse nébuleuse de Kant et de Laplace. A la même année que la première analyse spectrale par Kirchhoff, le Bureau des longitudes fait paraitre dans son *Annuaire* l'extrait de la note VII de l'*Exposition du système du monde* de Laplace, avec une notre d'éditeur :

> Des recherches récentes et de nature diverses, parmi lesquelles on peut citer notamment l'étude des météorites et l'analyse spectrale de la lumière des corps célestes, appellent de nouveau l'attention sur l'hypothèse cosmogonique de Laplace. Il y a donc une véritable opportunité à répandre la connaissance de la *Note* remarquable où cette hypothèse a été exposée par son auteur [3].

Après être passée sous silence pendant la première moitié du XIXe siècle, l'hypothèse connut un engouement, revêtue du nom Kant-Laplace [4] et corro-

2. M. Delaunay, « Notice sur la constitution de l'univers », *Annuaire du Bureau des longitudes* (1868) p. 449. Dans cette notice, Delaunay expose l'histoire de l'« Analyse spectrale » et de son application à la composition chimique des corps célestes. Pour une histoire contemporaine et concise sur la spectroscopie, David Dewhirst et Michael Hoskin (1999), « The message of starlight : the rise of astrophysics », in *The Cambridge Concise History of Astronomy*, sous la dir. de Michael Hoskin, Cambridge : Cambridge University Press, pp. 224-227.

3. « Note sur l'origine et la formation de notre système planétaire par Laplace », *Annuaire du Bureau des longitudes* 1867, p. 433. Cette note est suivie de l'extrait en question, p. 434–458.

4. C'est Hermann von Helmholtz qui est à l'origine du rapprochement, dans une conférence publique, faite à Königsberg en 1854, lors de la célébration du cinquantième anniversaire de Kant. Quoique contestée depuis comme rétrospective et superficielle, l'association sera largement adoptée, avec l'expression « l'hypothèse de Kant-Laplace » qui voit quant à elle le jour en 1865 par l'astronome allemand Karl F. Zöllner. Voir Alquié, Introduction in

borée par l'évolutionnisme de Charles Darwin et surtout de Herbert Spencer [5]. Même si elle demeura limitée au système solaire et éventuellement à des nébuleuses censées avoir donné naissance à des étoiles et leurs planètes, sans s'étendre à l'univers dans son ensemble, et qu'elle ne fut toujours pas acceptée à l'unanimité, une chose était sûre : il n'était plus possible de lui rester indifférent.

1 Origine et fin thermiques

La théorie de la chaleur marqua l'essor de la « physique moléculaire » de Laplace, mais aussi un signe de son déclin et sa limite, ouvrant la voie à un nouveau champ que les historiens appelleront la « cosmologie énergétique » ou la « physique cosmique » [6]. Le phénomène de la chaleur pose un problème cosmologique par son essence même. Chez Laplace il s'agissait avant tout de décrire et éventuellement d'expliquer les mouvements du système solaire, des phénomènes purement mécaniques, l'objet digne et privilégié de la mécanique céleste. La chaleur ne faisait pas partie de ces cinq phénomènes énumérés par Laplace comme cosmogoniquement significatifs ; elle constituait elle-même la cause primitive de ces phénomènes, susceptibles de rendre compte du comportement de la nébuleuse initiale (extension et raréfaction puis en contraction). A partir du moment où l'on s'interroge sur la chaleur des astres et leur origine, la question change d'ordre et de termes. Une chose est de dire que la Terre est en rotation directe ; c'en est un autre qu'elle rayonne de la chaleur (et de la lumière) vers l'espace tout en conservant sa température...

C'est alors en termes physiques que le problème se pose ou bien même s'impose. Le mécanisme du rayonnement solaire est, en effet, l'un des problèmes

Kant, *Histoire générale de la nature*, p. 15. Sur Zöllner, voir Helge Kragh (2012a), *Geometry and Astronomy : Pre-Einstein Speculations of Non-Euclidean Space*, arXiv : 1205.4909, pp. 13-34.

5. « C'est le philosophe anglais, Herbert Spencer, qui l'a exhumée des œuvres de Laplace, où elle était oubliée, pour en faire la pierre d'angle de tout un système ou l'analogie sert trop souvent de base au raisonnement, mais dont les imaginations ont été facilement séduites. » : Clémence Royer (1901), *Histoire du ciel*, Paris : Schleicher frères, p. 238. « Mais si les problèmes d'origine ont subi une éclipse partielle dans la première moitié du XIXe siècle, ils reprennent faveur avec Darwin et son *Origine de l'espèce* (1859), avec Spencer qui esquisse dans les *Premiers principes* (1862) une théorie générale de l'évolution. » : Busco, « Kant et Laplace », p. 237.

6. L'histoire de la thermodynamique étant déjà étudiée et bien connue, il suffira ici de se référer à des études qui portent sur son apport à la cosmologie comme : Merleau-Ponty, *La science de l'Univers à l'âge du positivisme*, en particulier chapitre IV ; Brush, *Nebulous Earth* ; Helge Kragh (2008), *Entropic Creation : Religious Contexts of Thermodynamics and Cosmology*, Aldershot : Ashgate, Ch. 3 « Thermodynamics and the heat death » ; Helge Kragh (2013), *The rise and fall of cosmical physics : notes for a history, ca. 1850-1920*

fréquemment posés par les fondateurs de la thermodynamique comme Mayer, Helmholtz ou Kelvin.

Vers le milieu du XIXe siècle, la chaleur n'était plus pensée séparément de l'énergie, capable de travail : l'énergie *totale* du système ne se crée ni s'annihile, mais se transforme sous diverses formes dont la chaleur est une. L'équivalence entre la chaleur et le travail mécanique fut généralisée et formalisée au nom du principe la conservation de l'énergie tel qu'on le connait. D'un autre côté, Sadi Carnot montera, dans son mémoire de 1824 sur la machine à vapeur et sa « puissance motrice », à savoir l'énergie, que la transformation de l'énergie s'accompagne de la production de la chaleur qui ne peut être restaurée quant à elle entièrement en l'énergie mécanique, de telle sorte que celle-ci finit par s'épuiser ou se dissiper. Si les deux principes de la thermodynamique s'installèrent dans l'esprit de l'époque, c'était surtout le second qui fascinait, par son implication sur l'*évolution* plutôt que la *conservation* du premier [7]. En effet, le premier principe renseigne seulement que, s'il y a un changement dans le système, l'énergie totale reste constante ; il ne dit pas si le système subira ou non effectivement un changement et c'est à cela que répond la seconde loi : tout système *évolue* dans un sens déterminé, qui est celui de la croissance de l'entropie.

1.1 Théorie de la chaleur et nouveaux problèmes cosmogoniques

Origine de la chaleur du Soleil

Si le Soleil perdait sans cesse de la chaleur par rayonnement, il aurait subi une baisse de température considérable, mais ceci n'est évidemment pas le cas. On peut alors attribuer au Soleil un mode spécifique de production et de conservation de la chaleur. Pour Ernst Mayer, ce sont des corps extérieurs qui tombent sur le Soleil et font le *travail* qui se transforme ensuite en énergie ainsi qu'en chaleur, conformément au principe de l'équivalence entre la chaleur et l'énergie mécanique. Cependant, l'hypothèse n'est pas difficile à objecter : si de telles chutes se produisaient, la masse solaire aurait dû sensiblement s'accroître et cela n'aurait pas été sans influence sur le système solaire entier ; l'augmentation de la force de gravitation aurait entrainé un ralentissement de la vitesse de révolution des planètes, contrairement à toutes les observations

7. Kragh, *Entropic creation*, p. 32.

astronomiques qui ont été faites jusqu'ici [8].

Helmholtz introduit un autre mécanisme, que l'on appellera plus tard la « condensation gravitationnelle ». Dans sa conférence de 1854, il entreprend de mettre en lien les deux principes de la thermodynamique avec l'hypothèse de Kant et Laplace. Si celle-ci est acceptable dans les grandes lignes, d'après Helmholtz, elle ne renseigne guère sur l'origine de la chaleur. C'est ce que Helmholtz tente d'expliquer par « notre nouvelle loi », à savoir le principe de l'équivalence entre chaleur et énergie : dans la nébuleuse initiale en contraction, les particules se rapprochent pour se rencontrer ou se rattacher par leur propre gravitation ; les chocs leur font perdre la force vive, à savoir l'énergie cinétique, laquelle se transforme en chaleur. La condensation par attraction est considérée comme supplémentaire au processus cosmogonique tel qu'il est conçu par Laplace considérée comme une étape importante dans la cosmogonie laplacienne : dû au rétrécissement par le refroidissement de la nébuleuse initiale, elle entrainait l'augmentation des vitesses de rotation conformément au théorème des aires. La différence vient de ce que, si Laplace l'attribuait à un comportement thermique, Helmholtz, à l'action purement mécanique.

Revenant au même sujet en 1871, Helmholtz développe davantage son hypothèse [9]. Si aucun mécanisme ne rend compte du rayonnement du Soleil à débit considérable sans pour autant s'épuiser, c'est parce qu'il est soumis à *un autre mécanisme*, ayant existé, mais disparu ou rendu inactif depuis. La chaleur *actuelle* du Soleil a pour origine sa provision emmagasinée lors de sa création, mais aussi le *temps* pendant lequel le Soleil a duré avec cette provision initiale du rayonnement au rythme actuel. L'explication de l'*état actuel* du Soleil fait appel à son *histoire*. C'est ainsi que la chaleur, qui a été au départ un problème typiquement physique (où il est question de la cause, de la source), se transpose en un problème cosmogonique. Et *vice versa* : le temps calculé en vient à servir d'indice pour l'*âge* du Soleil, mais aussi d'argument d'appui pour ce qui a été le point de départ de Helmholtz dans cette conférence, à savoir l'hypothèse cosmogonique de Kant et Laplace.

William Thomson s'intéresse lui aussi au problème dès 1854, auquel il revient constamment et accorde visiblement une importance encore plus grande que Helmholtz :

> Voici donc un splendide sujet de méditations et de recherches pour la Philosophie naturelle, ou la Physique, ou la Science de la matière

8. Merleau-Ponty, *La science de l'Univers à l'âge du positivisme*, p. 239 et p. 347, note 59 où Merleau-Ponty fait référence à *Leçons* de Poincaré, § 141.

9. « Uber die Entstehung des Planentensystems » (Sur la genèse du système planétaire) in *Vorträge und Reden* II, p. 53–91. Voir Merleau-Ponty, *La science de l'Univers à l'âge du positivisme*, pp. 243-245.

> brute. Le Soleil, simple fragment de matière dont les dimensions ont la valeur modérée que nous connaissons, et complètement entouré d'éther froid, a produit pendant 3000 ans du travail au taux de 481 000 millions de millions de millions de chevaux-vapeur, et pendant quelques millions d'années à un taux plus élevé peut-être, et certainement pas beaucoup moindre. Comment expliquera-t-on cela ? La Philosophie naturelle ne peut pas éluder la question, et aucun des physiciens qui n'essaient pas de la résoudre n'est excusable, à moins que tout son temps ne soit pris par des travaux sur quelque autre sujet ou quelques autres sujets de sa compétence, par l'étude desquels il ait plus d'espoir de faire avancer la Science [10].

Il assimile le système solaire au mécanisme d'horloge (« clockwork ») du point de vue dynamique. Si l'on ne peut remonter au moment de la naissance de ce système, il en est autrement pour ses états postérieurs. Tandis que l'état d'il y a trois mille ans par exemple est tout aussi abordable que celui de maintenant, tout comme le mécanisme d'horloge d'il y a trois heures. Et pour cause : l'énergie potentielle, la capacité de faire du travail, se transforme ou se consume en chaleur, mais la chaleur n'est pas disposée entièrement à faire monter un poids ou donner une impulsion à l'horloge ; si le Soleil émettait la lumière dans toutes les directions il y a trois mille ans comme aujourd'hui, on ignore si cela a été toujours le cas.

Même l'horloge s'use, nous rappelle Thomson ; de même, le Soleil ne peut rester toujours le même, en particulier à cause de l'influence de la gravitation mutuelle entre ses parties intérieures. La condensation due aux forces attractives (et soumise aux lois dynamiques) dégage une immense quantité d'énergie, par rapport à laquelle d'autres énergies, notamment celle de sources chimiques, qui font elles aussi du travail, mais « absolument infinitésimal ». Et Kelvin de rejoindre Helmholtz : la condensation gravitationnelle est la vraie source de la chaleur.

L'hypothèse prend appui, continue Thomson, sur des résultats de la « physique solaire » obtenus par **Jonathan Homer Lane** [11]. Lane avait établi une relation entre la distribution de densité et la température dans les masses gazeuses en équilibre, dont le Soleil fait partie. Si la masse est en contraction

10. « Sur la chaleur solaire ». Conférence faite au 21 janvier 1887, repris in William Thomson (1893), *Constitution de la matière. Conférences scientifiques et allocutions*, trad. par P. Lugol, annot. de Marcel Brillouin, Paris : Gauthier-Villars, p. 239. Sur l'intérêt de Thomson à la cosmogonie et éventuellement à la cosmologie, voir Merleau-Ponty, *La science de l'Univers à l'âge du positivisme*, pp. 245-249.

11. « On the Theoretical Temperature of the Sun », *American Journal of Science* 50, juillet 1870, p. 57–74, cité in Thomson, *Constitution de la matière*, pp. 257-258 et également dans *Leçons*, § 164–169. Selon Merleau-Ponty, J. H. Lane inaugure « la recherche moderne sur le problème physico-théorique du Soleil », avant d'être poursuivie par Eddington dans les années 1920 avec ses théories sur la structure interne du Soleil et des étoiles. Merleau-Ponty, *La science de l'Univers à l'âge du positivisme*, p. 249.

(due entre autres au rayonnement de la chaleur dans l'espace) tout en gardant son état gazeux, sa température doit augmenter. Or, si la température reste constante, c'est la *compressibilité* qui diminue, inversement proportionnelle à la pression. Si la masse est homogène et adiabatique, avec un rayonnement faible et lent, sa densité centrale sera vingt fois plus grande que la moyenne, quelle que soit sa masse et quelle que soit sa composition chimique. Or, si la densité est trop grande, la compression n'augmentera plus selon cette loi et la chaleur produite par le travail du gaz en contraction l'emportera sur la chaleur perdue par rayonnement, au point de faire augmenter la température résultante. Ceci ne continuera pourtant pas éternellement, puisque la contraction ralentit et s'arrête quand le gaz acquiert une quantité suffisante de pression et de densité pour se transformer en liquide ou en solide.

Suivant Lane, Thomson considère le Soleil comme une masse gazeuse, à l'intérieur de laquelle la chaleur se produit par la gravitation mutuelle des parties [12]. Il peut y avoir, comme l'a suggéré Mayer, des combustions des matériaux à la surface qui peuvent contribuer à la production de la chaleur, mais cela ne représente qu'une partie comparée à la part accomplie par la condensation gravitationnelle. « L'énergie de combinaison chimique n'est rien si on la compare à l'énergie que développe la condensation à la gravitation, et qui entretient presque seule l'activité solaire [13], » dit-il. Le Soleil doit toute son activité à sa « substance même », non à « une influence extérieure quelconque », qui est développée et entretenue presque uniquement par la condensation gravitationnelle.

Dans le modèle de Helmholtz-Kelvin, le mécanisme consiste dans le réchauffement dû à la contraction par opposition à la contraction due au refroidissement chez Laplace. C'est ce que le physicien allemand et son homologue anglais tentent d'*expliquer* à la fois causalement et mécaniquement, pour revenir en fin de compte à un mécanisme parfaitement encadré par la mécanique classique qu'est la contraction gravitationnelle.

La Terre et la température de l'espace

Kelvin suppose que la Terre est à l'origine d'une température suffisamment haute pour qu'elle ne contînt que de la matière fluide. Elle se serait refroidie puis solidifiée, mais il y aurait eu des écarts entre la croûte et le noyau, pour lesquels la solidification et le changement de température n'auraient pas été les mêmes. Ainsi s'obtient la température maximale au-delà de laquelle aucune

12. Thomson, *Constitution de la matière*, p. 240.
13. Thomson, *cit.*, p. 249.

matière ne peut tenir, ainsi que le temps requis pour que la Terre soit refroidie jusqu'à ce qu'elle atteigne sa température actuelle. Il emprunte aussi à Poisson une idée selon laquelle la température de la Terre aurait changé en parcourant différentes régions de l'espace cosmique : dans un milieu chaud, elle aurait pris une température uniformément distribuée, et celle-ci aurait été perdue dans un milieu froid. Prenant la Terre elle-même pour un milieu en contact avec le milieu qui lui est extérieur, on arrive à calculer sa température et le temps requis pour son refroidissement. C'est ainsi qu'on dégagera son âge.

L'estimation des géologues est comparée avec le calcul de Fourier et ses successeurs comme Kelvin. L'écart est considérable : Kelvin constate que l'âge ne peut dépasser 200 millions, d'autant moins que le Soleil n'aurait pas existé d'après le calcul de Helmholtz et lui-même, plus de 20 millions, et qu'il est peu imaginable que la Terre soit plus âgée que le Soleil.

Ne voit-on pas là une manière de poser le problème cosmogonique caractéristique de l'âge classique, une preuve de l'époque révolue, passée à l'âge moderne que M. Foucault appelle justement l'« âge de l'histoire » ? La physique se met à s'interroger sur l'histoire, faisant face aux défis des deux sciences en plein développement au point de guetter sa place que sont la géologie (formation des couches sédimentaires) et la biologie (évolution des êtres vivants). Par ailleurs, dans l'idée de comparer l'âge du Soleil avec les évidences géologiques et biologiques (paléontologiques) établies sur la Terre, ne demeure-t-il pas une sorte de retour au cosmos grec, à la conception où tout concourt dans l'univers ? On sait que ce sont deux phénomènes qui ne sont pas sans lien causal (sans le rayonnement du Soleil, la vie serait impossible), mais leurs ordres de grandeur sont incomparables sinon incommensurables.

1.2 Sens et portée cosmologiques des principes de la thermodynamique

« Mort thermique » comme une extrapolation du principe de Carnot

Kelvin signale l'existence d'« une tendance universelle de la dissipation de l'énergie mécanique », comme l'indique la conférence emblématique prononcée en 1852 [14]. Deux ans plus tard, il nous apprend, de façon encore plus significative, que « l'énergie potentielle de la gravitation mutuelle de ces corps s'épuise peu à peu au fil des âges » et que « la fin du monde, en tant qu'habitat pour

14. « On A Universal Tendancy in Nature to the Dissipation of Mechanical Energy », *Philosophical Magazine* 4, 1852, p. 304–306.

l'homme, pour toute créature vivante ou pour toute plante existant actuellement, est *mécaniquement inévitable* ». Ceci ne sera pas sans conséquence pour notre planète, non seulement pour la matière inerte (« inanimée »), mais aussi à la matière organisée. Et Kelvin d'aller plus loin pour remonter dans le passé :

> Selon les lois de la matière et du mouvement, certainement vérifiées dans toutes les actions de la nature qu'il nous a été permis d'observer, nous découvrons qu'il a dû y avoir une époque où la Terre, sans Soleil pour l'éclairer, les autres corps que l'on appelle planètes, et les innombrables masses planétaires plus petites que l'on détecte aujourd'hui dans la lumière zodiacale, ont été indéfiniment éloignés les uns des autres et de tous les autres corps solides de l'espace [...] Si, dans la science purement mécanique, nous nous exposons toujours à oublier cette limitation, nous devrions nous en souvenir en considérant qu'un raisonnement purement mécanique nous montre qu'il existe une époque où la Terre fut inhabitée ; et nous enseigne que notre corps, ainsi que toutes les plantes et animaux vivants, ainsi que tous les restes organiques fossiles, sont des formes de matières organisées auxquelles la science ne peut désigner d'antécédent excepté la Volonté d'un Créateur [15].

Si ce monde matériel avait gardé la même énergie totale depuis sa naissance, il aurait été dans un état totalement différent de ce qu'il est à présent, avec plus d'énergie mécanique dans sa forme pure susceptible de se transformer en d'autres formes dont, entre autres, la chaleur. Le même monde verra s'épuiser son énergie mécanique toute transformée en chaleur à son état final, ne laissant aucune transformation, aucun mouvement à venir. On s'éloigne ainsi du système du monde tel qu'il avait été dessiné par Newton, et aussi par Laplace, qui se caractérisait par la stabilité. Faut-il envisager, comme Thomson semble le suggérer, d'éventuelles opérations actuellement inconnues et probablement non soumises à nos lois actuelles, dont les deux lois de la thermodynamique ? Pas besoin d'imaginer d'autres opérations pour cela, il suffit d'élargir son horizon à une échelle plus grande. En effet, Thomson proposera à sa manière une alternative appuyée sur l'infinitisme et une sorte d'argument créationniste.

> Le résultat serait nécessairement un état de repos et de mort, si l'univers était fini et continuait à obéir aux lois existantes. Mais il est impossible de concevoir une limite à l'étendue de la matière dans l'univers ; la Science, par conséquent, conduit plutôt à admettre un développement sans fin, dans un espace sans bornes, d'une action qui entraine la transformation de l'énergie potentielle en mouvement sensible et par suite en chaleur, qu'à considérer l'univers

15. « On Mechanical Antecedents of Motion, Heat and Light », reproduit in *Mathematical and Physical Papers* II, p. 34. Passage cité d'après Harrison, *Le noir de la nuit*, p. 188.

comme un mécanisme fini, fonctionnant à la manière d'un mouvement d'horlogerie et s'arrêtant pour toujours [16].

Thomson examine donc deux prémisses de la thèse de mort thermique : l'une l'univers fini, et l'autre la validité des « lois existantes » au cours du temps. C'est la première qui est mise en question : l'univers est illimité dans l'espace, mais aussi en énergie (potentielle), et c'est pour cette raison très simple, sinon trop, que son antithèse est incompréhensible [17]. Si la « mort » est prédictible par la tendance universelle à la dissipation de l'énergie, elle se limite à un monde limité qu'est la Terre, non pas à l'univers infini qui possède une infinité d'énergies, autrement dit inépuisable. Cet univers verrait son énergie se transformer sans cesse en chaleur et sa température qui augmente, mais ce processus continuera indéfiniment.

N'est-ce pas là une solution à la première antinomie de Kant ? L'argument de la création entropique traduit la « thèse » de la première antinomie : si l'univers était infini dans le temps, l'univers aurait déjà touché à son terme, selon le second principe ; ce qui n'est pas le cas ; alors il y a un commencement. Quant au raisonnement de Thomson, on pourrait parler d'un *renversement* : c'est l'« antithèse » de la première antinomie qu'est l'infinitisme, qui est préalablement supposée, dans le but de réfuter la mort thermique, une conséquence du principe de Carnot. Une fois la mort thermique évitée, Thomson se tourne vers un autre problème qu'est l'origine de la chaleur solaire, laissant ainsi de côté la seconde prémisse concernant la validité des « lois existantes », dont le second principe.

L'entropie de l'univers

La notion d'entropie est introduite par Clausius en 1865, faisant référence au mot grec « trope » qui signifie la transformation. Elle mesure la modification du système par la relation entre le changement de cette quantité avec la température du système, en d'autres termes, la variation de la quantité de chaleur

16. « Sur l'âge de la chaleur solaire », *Macmillan's Magazine*, 1862 in Thomson, *Constitution de la matière*, pp. 225-226.

17. Le même argument « infinitiste » sera repris par Thomson encore en 1884, quand il explique la vibration des ondes de la lumière en grand nombre, 400 millions de millions par seconde. « Je dis que dans l'Univers la limitation est incompréhensible, l'infini est compréhensible. Appliquons maintenant à ceci un peu de logique. La négation de l'infini est-elle incompréhensible ? Que penseriez-vous d'un univers dont vous rencontreriez les bornes après avoir parcouru un kilomètre, ou dix, ou mille, ou même la distance qui vous sépare de la Californie ? Pouvez-vous supposer une fin à la matière ou une limite à l'espace ? Cette idée est incompréhensible. » « La théorie ondulatoire de la lumière ». Conférence de 1884 in Thomson, *cit.*, p. 205.

(Q) divisée par la température absolue (T) du système (dQ/T)[18]. Cette quantité reste constante dans un processus réversible, qui n'est qu'un cas idéal, mais augmente dans la plupart des cas. Autrement dit, toute transformation dite naturelle ou spontanée s'effectue dans un sens déterminé, à moins qu'elle ne soit récompensée par un travail supplémentaire depuis l'extérieur du système.

Dans la dernière section du mémoire, Clausius entre dans un sujet qu'il ne « pourrai[t] pas traiter ici complètement, parce que les développements qu'il comporte sont trop étendus[19] ». Si l'on considère, comme l'a déjà fait W. Thomson, tous les changements qui ont lieu dans l'univers, on s'apercevra que celui-ci marche dans un sens unique, s'approchant d'un certain « état limite ». Quel serait donc cet « état limite » ? Impliquerait-il une « mort thermique » ? Pour le savoir, il faut calculer la somme des quantités équivalentes à ces transformations. Mais serait-elle calculable ? Comment prendre en compte ces valeurs de transformation, qui comprendrait la quantité de chaleur rayonnée dans tout l'univers, à savoir « la chaleur qui se trouve répandue dans l'espace sous la forme des vibrations de l'éther, et en outre d'autres mouvements que l'on ne peut pas comprendre sous le nom de *chaleur*[20] » ? Le problème, c'est qu'on ignore à quoi consistent ces « autres mouvements » et si la chaleur n'en fait pas partie, de façon à faire l'objet de la théorie mécanique. De manière générale, une transformation s'accompagne d'une production de la chaleur si bien que la valeur de transformation peut se mesurer par la chaleur produite (dQ). Il n'en est pas de même pour la chaleur qui rayonne dans l'espace.

> Je me bornerai pour le moment à indiquer le résultat suivant : si l'on imagine que l'on ait formé d'une manière conséquente pour l'univers entier, en tenant compte de toutes les circonstances, la quantité que j'ai nommée *entropie* pour un corps particulier, ainsi que la quantité désignée sous le nom d'*énergie* et dont le sens est plus facile à saisir, on pourra exprimer très-simplement [*sic*], sous la forme suivante, les lois fondamentales de l'univers qui correspondent aux deux principes essentiels de la théorie mécanique de

18. « Si l'on cherche pour S un nom caractéristique, on pourrait lui donner celui de *contenu de transformation*, de même qu'on a nommé U le *contenu de chaleur et d'œuvre*. Mais je préfère emprunter aux langues anciennes les noms de quantités scientifiques importantes, afin qu'il puissent rester les mêmes dans toutes les langues vivantes ; je proposerai donc d'appeler la quantité S l'*entropie* du corps, d'après le mot grec tropè, transformation. C'est à dessein que j'ai formé ce mot *entropie*, de manière qu'il se rapproche autant que possible du mot *énergie* ; car ces deux quantités ont une telle analogie dans leur signification physique qu'une certaine analogie de dénomination m'a paru utile. » Passage cité d'après « Sur diverses formes des équations fondamentales de la théorie mécanique de la chaleur, qui sont commodes dans l'application » (1865), repris in Mémoire IX, Rudolf Clausius (1868), *Théorie mécanique de la chaleur*, trad. par Folie, Paris : E. Lacroix, p. 411. Voir aussi Merleau-Ponty, *La science de l'Univers à l'âge du positivisme*, pp. 252-253.

19. Clausius, *Théorie mécanique de la chaleur*, p. 419

20. Clausius, *cit.*, pp. 419-420

la chaleur :

1) *L'énergie de l'univers est constante.*
2) *L'entropie de l'univers tend vers un maximum*[21].

Ces deux derniers énoncés, si célèbres, laissent plus de questions qu'ils n'apprennent quelque chose. En effet, quelle serait la formule exacte, « formée d'une manière conséquente », de l'entropie de l'univers ? Et quel en serait le sens ? Même si l'on arrive à établir la définition ainsi que la signification de cette quantité, pourrait-on dire qu'elle « tend vers un maximum », comme tous les autres systèmes fermés ? Et serait-ce là une des « lois fondamentales de l'Univers » ? Rappelons que, comme nous en avons déjà discuté au chapitre I, une chose est de dire qu'un principe est universellement vrai, applicable à tous les systèmes *dans* l'univers, ç'en est une autre de lui attribuer le nom de la « loi de l'univers », applicable à l'univers lui-même.

La notion d'entropie de l'univers a suscité autant d'enthousiasme que de scepticisme, tant au XIXe siècle qu'aujourd'hui. Pour les uns, la notion n'a même pas de sens, « d'abord parce que nous ne savons pas si l'univers est limité – ensuite parce que nous ne savons pas ce que c'est que son *entropie* »[22]. Probablement plus pour la première raison que pour la seconde : la notion même d'entropie est elle-même problématique (« prodigieusement abstrait » comme le dit Brunhès faisant référence à Poincaré[23]), mais moins que celle de l'univers. Comment en effet attribuer une grandeur comme entropie à un système dont on ne sait même pas s'il est ou non limité ? « L'assimilation du monde matériel tout entier à un système limité et soustrait à toute influence extérieure à lui, reste une hypothèse[24]. » C'est pourquoi, en somme, « il faut soigneusement éviter de parler de l'entropie de l'univers »[25].

Pourtant, pour les autres, bien au contraire, non seulement l'univers est un système véritablement isolé et totalement fermé, mais il est le seul à l'être, donc « le seul *système* dépourvu par définition d'échanges avec un environnement quelconque », donc le seul auquel le principe s'applique véritablement, le seul à permettre, comme le remarquera I. Stengers, « à l'énergie et à l'entropie d'être sujets d'énoncés semblables »[26]. Max Planck fait partie de ces derniers. De manière générale, rappelle Planck, l'énergie d'un système varie proportion-

21. Clausius, *cit.*, p. 420. Phrases soulignées dans le texte original.
22. Bernard Brunhes (1909), *La dégradation de l'énergie*, Paris : Flammarion ; réédition (Paris : Flammarion, 1991), p. 369.
23. Brunhes, *cit.*, p. 368. Pour la discussion de Poincaré sur l'entropie, voir *infra*, Ch. IV et V.
24. Brunhes, *cit.*, p. 370.
25. Brunhes, *cit.*, p. 397. Ce que Poincaré reprendra à son compte dans les *Leçons*. Voir *infra*.
26. Stengers, *Cosmopolitiques I*, p. 200.

nellement aux actions extérieures de ce système ; elle reste constante quand le système est dépourvu de telles actions, c'est-à-dire parfaitement isolé. « Les diverses grandeurs qui déterminent l'état du système peuvent notablement varier, mais elles restent toujours soumises à la condition : U = constante [27]. » Toujours est-il que : « l'ensemble des corps matériels de l'univers est dans une perpétuelle action réciproque, et d'après cela on ne peut appliquer strictement le principe de la conservation de l'énergie à aucun système réel » [28]. Si un isolement absolu n'est pas possible, il existe dans l'univers des systèmes à peu près isolés. Plus grand est le système, plus faibles sont les actions extérieures et peuvent aller jusqu'à ce qu'elles soient négligeables par rapport à l'énergie du système et à des variations de ses diverses parties. Dans un tel élargissement du système, ajoute Planck, les actions s'affaiblissent beaucoup plus rapidement que l'énergie intérieure du système : les premières dépend de l'ordre de grandeur de la *surface*, tandis que la seconde, de l'ordre de grandeur du *volume*. Bref, plus le système est étendu et mieux isolé, mieux il convient au principe de la conservation de l'énergie :

> On commettra une faute assez faible déjà si on suppose constante l'énergie de notre système solaire ; et une faute encore moindre si on fait de même pour la totalité du système des étoiles fixes que nous connaissons : et dans ce sens cette proposition que l'énergie de l'univers reste constante possède bien une signification effective [29].

Il en est naturellement du même pour l'entropie :

> C'est de façon toute semblable qu'il faut entendre la proposition de l'augmentation constante de l'entropie dans l'univers. Plus un système est étendu et moindre sera l'erreur relative qu'on commettra en général, en exprimant la proposition que l'entropie du système augmente, abstraction totalement faite de tous les changements qui se produisent en dehors du système. Mais il ne peut pas du tout être question, au sens physique, d'un maximum de l'entropie de l'univers [30].

Dès lors, selon Planck, il n'est pas seulement légitime de parler de l'entropie de l'univers, mais c'est le seul cas auquel la notion d'entropie s'applique de manière légitime.

Il faudra distinguer deux problèmes : 1° la validité universelle ou l'universalité du principe ; 2° ses implications ou conséquences cosmologiques. Car une chose est de vérifier s'il s'applique à tous les corps de l'univers ou à l'univers lui-même ; c'en est une autre de dire quelle en est la conséquence et cette

27. Max Planck (1913), *Leçons de thermodynamique*, trad. par R. Chevassus, Paris : Hermann et Fils ; reproduction en fac-similé (Paris : J. Gabay, 2008), p. 53.
28. *ibid.*
29. Planck, *cit.*, pp. 110-111.
30. Planck, *cit.*, p. 111.

conséquence est ou non acceptable. L'entropie d'un système ne fait qu'augmenter. Pourtant, l'augmentation entropique dans *tous* ses systèmes n'entraine pas nécessairement l'augmentation de l'entropie de l'ensemble de ces systèmes, à savoir l'univers. Nous avons vu plus haut, dans Discours préliminaire, qu'une loi universelle *dans* l'univers n'est pas une loi de l'univers.

2 Nouvelle manière de penser le ciel. Renouveaux théoriques en astronomie

2.1 Astronomie, vers la « libération » de la mécanique céleste ?

Comment compter les étoiles ? Astronomie statistique

Les étoiles restaient jadis « fixes » sans réalité concrète et servaient par cela même de référentiel idéal pour l'observation du système solaire. Elles font désormais l'objet d'études elles-mêmes. Il est toujours question de déterminer des paramètres classiques tels que la position, la vitesse et la masse comme en astronomie classique, avec cette différence qu'il ne s'agit plus des planètes, mais des étoiles qui sont, loin d'être « fixes », mais elles-mêmes « mouvementées ». C'est ainsi qu'apparaissent des données complètement nouveaux, non seulement auparavant indisponibles, mais aussi inimaginables comme des vitesses radiales des étoiles. A quoi s'ajoutent des propriétés *physiques* comme la température, la luminosité et la composition chimique, rendues accessibles grâce à la photographie et à la spectroscopie [31].

Un autre signe que le temps de Comte est révolu : l'astronomie statistique [32]. La statistique s'avère féconde pour l'étude dynamique des systèmes stellaires qui s'intéresse aux mouvements des étoiles et à leur distribution. Elle s'imposait déjà par besoin d'un traitement des données d'observation non exemptes d'*erreurs*. Gauss s'en sert notamment pour calculer l'orbite d'un astre nommé Cérès réputé par les équations du mouvement impossible à résoudre par

31. Michael Hoskin (1999), « The astronomy of the universe of stars », in *The Cambridge Concise History of Astronomy*, sous la dir. de Michael Hoskin, Cambridge : Cambridge University Press, p. 168.

32. Sur l'astronomie statistique, voir E. R. Paul, *The Milky Way Galaxy : Statistical Cosmology 1890-1924* ; Oscar Sheynin (1996), « The introduction of statistical reasoning into astronomy : from Newton to Poincaré », in *Planetary Astronomy from the Renaissance to the Rise of Astrophysics*, sous la dir. de René Taton *et al.*, Cambridge : Cambridge University Press, t. 2B.

la méthode traditionnelle, c'est-à-dire analytique[33]. Elle s'utilise aussi par W. Herschel comme le moyen d'aborder l'ensemble des « cieux » plutôt que chaque étoile ou chaque nébuleuse individuellement. Elle s'avère particulièrement utile au recensement des étoiles et d'autres données nouvellement disponibles grâce à l'avancement technique, de façon à servir plus que d'instrument, mais de méthodologie ou de technique. Si elle ne s'intéresse guère qu'à des propriétés « traditionnelles » telles que la position, la vitesse et la masse, c'est toujours avec cette différence que ses objets ne sont plus des planètes, mais des *étoiles* et des galaxies qui *brillent* ayant pour attribut essentiel la luminosité et, de plus, ne sont plus prises pour fixes, mais *en mouvement*, dotées donc de vitesse.

Pour les planètes, il suffit d'avoir sa position et sa vitesse actuelles pour déterminer son mouvement, du passé au futur. Mais pour les étoiles, on ne dispose pas de même type de données : elles sont trop éloignées pour que l'astronome suive leur mouvement directement et individuellement ; elles sont aussi observées en multiplicité et de plus en grand nombre, si bien que devant elles l'astronome ne se sentirait pas moins embarrassé que le physicien devant ses molécules gazeuses et obligé de faire recours à la méthode statistique et de se concentrer sur des valeurs *moyennes* et à la distribution des données. Quelle est la masse moyenne des étoiles ? Quelle est la « fréquence » d'une masse donnée : combien d'étoiles ont une masse double, triple, un demi ou un tiers de cette moyenne ? Ces moyennes et fréquences sont-elles toujours les mêmes pour différentes portions de l'espace stellaire ? Sinon, quelle en est la variation ? Quelle est la luminosité moyenne des étoiles ? Et la fréquence ? Comment ces quantités varient-elles selon les positions dans l'espace ? Quelle est la distance moyenne entre des étoiles et quelle en est la fréquence ? La *densité d'étoiles*, c'est-à-dire le nombre d'étoiles par unité de volume, serait-elle la même quelle que soit la distance depuis le Soleil, que ce soit extérieur ou intérieur de la Voie lactée ? Quelle est la vitesse moyenne des étoiles ? Quelle est la fréquence d'une valeur déterminée de la vitesse et comment ces quantités varient-elles selon les positions ? Telles sont les questions qui se posent en astronomie statistique. Pour répondre à ces questions, une « constellation » statique ne suffit plus ; ce qu'il faut, c'est une carte du ciel encore plus complexe et dynamique qui ne renseigne pas seulement sur la structure de la Voie lactée et des systèmes stellaires, mais aussi sur leur *évolution*.

33. Merleau-Ponty, *La science de l'Univers à l'âge du positivisme*, p. 111. Sur Gauss, voir Stéphane Callens (1997), *Les maitres de l'erreur. Mesure et probabilité au XIXe siècle*, Paris : P. U. F., pp. 59-67.

Evolution des questions « nébuleuses »

Nous avons déjà vu dans le chapitre précédent le sens et le rôle de la nébuleuse dans l'hypothèse cosmogonique de Kant et de Laplace. Les nébuleuses conçues par Herschel et Laplace sont celles dites non résolubles, c'est-à-dire composées de molécules gazeuses, parmi lesquelles il y en a, en effet, qui sont en train de ou en voie de former des centres condensés qui attirent l'atmosphère qui les environne pour devenir des étoiles. En outre, il y en a qui sont résolubles en étoiles, c'est-à-dire en réalité des galaxies, comme le sont la plupart des cas de nébuleuses spirales ou elliptiques. Ainsi Ch. André parlera-t-il dans son *Traité d'astronomie stellaire* de deux « principes différents » : le « principe nébuleux » et le « principe sidéral » [34]. Si la lumière est relativement faible et uniforme, étendue sur un grand espace, il s'agit de la matière gazeuse (principe nébuleux), tandis qu'elle est plus fortement concentrée sur un point, ou rassemblée en amas, elle a pour origine des étoiles (principe sidéral).

Ce dispositif en apparence purement cosmologique ou cosmographique s'avère tout aussi pertinent à la cosmogonie, relativement à la formation des étoiles à partir des nébuleuses. « Mais ces deux principes sont intimement liés l'un à l'autre, l'élément nébuleux étant la matière première qui a servi à former l'élément stellaire [35]. » La forme sphérique et la condensation centrale peuvent être prises comme conséquence des attractions mutuelles des astres qui agissent continuellement et produisent des effets proportionnels à la durée de son action. En conséquence de quoi la matière se condense-t-elle vers le centre, jusqu'à ce que ce dernier prenne l'apparence d'une étoile. Or, toutes les étoiles n'ont pas le même âge ; elles ne vieillissent pas ensemble. Ceci dit, s'il est impossible d'observer directement toute l'évolution d'une étoile, depuis sa naissance jusqu'à sa mort, chaque étape qu'une étoile passe durant sa vie peut s'observer, par l'intermédiaire d'autres étoiles en différentes étapes d'évolution : plus les nébuleuses sont sphériques et condensées, plus elles sont dans l'état avancé. La distribution de la matière, c'est-à-dire la disposition des parties par rapport au centre, permet donc d'en déduire l'état d'*évolution*.

La notion même de nébuleuse évoluera et les questions qui se posent autour d'elle se préciseront avec la notion de *résolubilité* [36] : ou bien les nébuleuses sont des amas d'étoiles, dont l'individualité de chacune échappe à nos sens par son immense distance ; ou bien ce sont des nuages des gaz en contraction, c'est-à-dire en voie de devenir de nouveaux systèmes planétaires. Et aussi en termes cosmogoniques : si les nébuleuses ne sont pas résolubles en étoiles, mais consti-

34. André, *Traité d'astronomie stellaire*, p. 359.
35. *ibid.*
36. Pour une histoire concise de ce problème, voir Harrison, *Le noir de la nuit*, p. 130.

tuées de gaz, cela sert d'argument d'appui pour l'hypothèse nébuleuse. Dans ce cas, les nébuleuses sont destinées à évoluer vers des systèmes planétaires conformément au scénario de Laplace. Dans le cas contraire, les nébuleuses *sont* en réalité des étoiles déjà formées, non pas des gaz en train de le devenir ; il n'y a donc pas lieu de chercher d'implication cosmogonique ; il ne s'agit plus de vérifier l'hypothèse nébuleuse, mais c'est une autre hypothèse qui vient prendre appui, de toute autre nature, plutôt cosmologique que cosmogonique : celle de l'univers-île où l'apparence « nébuleuse » des étoiles est due à la grande distance des étoiles.

Au tournant du XXe siècle, on assiste à une transposition du problème *cosmogonique* en problème *cosmographique*. La question centrale n'est plus de chercher les vérifications empiriques de l'hypothèse nébuleuse, mais la *nature* et la *position* des nébuleuses elles-mêmes, c'est-à-dire de savoir si elles (en particulier spirales) sont résolubles ou non d'une part, et d'autre part, si elles sont intergalactiques ou extragalactiques. Pour les uns, qu'on pourrait qualifier de « laplaciens » ou de « herschelien » les nébuleuses sont essentiellement des gaz et/ou des poussières ; qu'elles possèdent des centres condensés en vue de « devenir » des étoiles et des systèmes planétaires, cela n'importe plus tant ; ce qui compte, c'est de vérifier si ces nébuleuses sont extérieures ou intérieures à notre Voie lactée [37]. Les autres, partisans de la théorie de l'univers-île, envisagent une vision cosmique qui dépasse de loin de notre galaxie. La raison en est que, selon eux, si les nébuleuses s'avèrent résolubles en étoiles, leur apparence « nébuleuse » s'explique par leur immense distance et aussi par l'univers lui-même, finalement beaucoup plus grand qu'il ne parait [38].

Ceci renouvelle la question relative à la Voie lactée. Notre galaxie est-elle aussi une « île » solitaire dans le vide ou est-elle seulement une seule parmi d'innombrables îles ? La question avait déjà intrigué Herschel pour qui elle n'est pas sans lien avec une autre question liée à l'extension et la limite de l'univers :

37. Agnes Clercke constatera en 1905 l'intériorité des nébuleuses et leur... « nébulosité » : « La question de savoir si les nébuleuses sont des galaxies extérieures ne demande plus de longues discussions. Le progrès de la recherche y a répondu. Nous pouvons dire en toute sécurité qu'avec toutes les preuves disponibles devant lui, aucun penseur compétent ne peut désormais soutenir que les nébuleuses sont des systèmes d'étoiles de même rang que la Voie lactée. Une certitude pratique a été atteinte à propos du fait que l'entier des contenus stellaire et nébulaire de la sphère [céleste] appartient à une agglomération considérable, et se tient à l'intérieur des limites d'un vaste schéma par des relations mutuelles ordonnées. » Agnes Clerke, *The System of the Stars*, 1905, cité in Frédéric Chaberlot (2003), *La Voie lactée : Histoire des conceptions et des modèles de notre galaxie des temps anciens aux années 1930*, Paris : CNRS Editions, pp. 109-110.

38. A. S. Eddington par exemple restera sceptique encore en 1914 quant à l'extériorité des nébuleuses spirales, tout en défendant la théorie de l'univers-île comme « hypothèse de travail », dont « les conséquences sont si utiles que cela suggère une nette probabilité à sa vérité ». cité in Chaberlot, *cit.*, p. 112.

la Voie lactée est-elle identique à l'univers entier ? Si c'est le cas, les nébuleuses doivent être à l'intérieur de la Voie lactée, et, en même temps, elles en marquent la limite ; ce serait là la limite de l'univers. Dans le cas contraire, les nébuleuses ne font pas partie de notre galaxie, mais sont extérieures à ce dernier, à distance qui peut aller jusqu'à quelques millions d'années-lumière. Une telle distance serait la raison pour laquelle ces nébuleuses paraissent irrésolubles : pas parce que ces étoiles ne sont petites ni peu lumineuses, mais parce qu'elles sont éloignées. Ceci revient à dire que l'univers, ou plutôt à notre vision sur lui, ne peut que s'élargir.

2.2 Impacts de la géométrie non euclidienne

L'introduction de la géométrie non euclidienne est un moment crucial pour l'histoire des mathématiques, mais aussi pour celle des sciences voire des idées en général. Elle met en cause ce que cette science avait d'essentiel depuis Euclide : les notions claires et distinctes et les propositions tout aussi rigoureuses, à partir desquelles s'établit tout un système d'axiomes, ces éléments qui faisant d'elle le modèle même de la science pendant si longtemps. C'est un moment décisif aussi pour la cosmologie, notamment par son impact sur la manière dont se posent les problèmes sur la notion d'espace, le fondement de la géométrie et son rapport avec d'autres domaines comme la physique ou l'astronomie.

Dans « Sur les hypothèses qui servent de fondement à la géométrie », son *Habilitationsvortrag* prononcé à Göttingen en 1854, Bernhardt Riemann constate les axiomes géométriques ne sont pas des propositions a priori ni ne découlent nécessairement des concepts primitifs comme point, ligne ou espace [39]. Puisque ceux-ci ne sont pas eux-mêmes évidents en soi, il y a lieu d'établir une nouvelle notion plus générale qu'est la « grandeur multiplement étendue » ou, pour faire court, la multiplicité (*Mannigfaltigkeit*) [40]. Ce qu'on a coutume d'appeler l'espace, à savoir l'espace euclidien à trois dimensions, n'est

39. Bernhard Riemann (1867), « Sur les hypothèses qui servent de fondement à la géométrie », in *Oeuvres mathématiques*, trad. par Guillaume Jules Hoüel, Sceaux : J. Gabay, avec une préface de Ch. Hermitte et un essai de F. Klein. Reproduction en fac-similé de l'édition française de 1898. Mémoire posthume de B. Riemann, publié par R. Dedekind et insérée dans le tome XIII des *Mémoires de la Société Royale des Sciences de Gœttingue* (1867).

Parmi des études innombrables sur ce mémoire, je me suis bornée à celles qui se rapportent spécifiquement à l'histoire de la cosmologie comme Torretti, *Philosophy of Geometry from Riemann to Poincaré*, où se trouve une partie consacrée à ce sujet, ainsi que des articles récents de H. Kragh : Kragh, *Geometry and Astronomy : Pre-Einstein Speculations of Non-Euclidean Space* ; Helge Kragh (2012b), « Is space flat ? Nineteenth century astronomy and non-euclidean geometry », *Journal of Astronomical History and Heritage*, 15.

40. Ou *varietas*, qui peut se traduire par variété.

plus qu'une parmi les multiplicités possibles, choisi par Euclide en moyennant de certains *faits empiriques*.

> Ces faits, comme tous les faits possibles, ne sont pas nécessaires ; ils n'ont qu'une certitude empirique, ce sont des hypothèses. On peut donc étudier leur probabilité, qui est certainement très considérable dans les limites de l'observation, et juger d'après cela du degré de sûreté de l'extension de ces faits en dehors de ces mêmes limites, tant dans le sens des immensurablement grands que dans celui des immensurablement petits [41].

Les axiomes ne sont pas a priori et leur « certitude » n'est plus nécessaire, mais au mieux « empirique », rapportée aux expériences empruntées. Ce sont le plus souvent des faits simples comme la propagation de la lumière qui font référence et ceci explique le choix presque exclusif de la géométrie euclidienne. Pourtant, elle pourrait être substituée par une autre, référence faite à un système de faits. A partir du moment où il n'y a plus qu'une seule géométrie, mais plusieurs, le problème de la géométrie change la donne. La question ne se pose plus sur la condition de possibilité de la géométrie avec ses jugements synthétiques a priori, mais sur la raison pour laquelle une géométrie particulière est choisie plutôt qu'une autre, raison qui valide et justifie ce choix.

Ceci complique le rapport de la géométrie avec l'expérience. L'expérience ne fonde pas la géométrie ; c'est à la géométrie elle-même d'offrir des rapports métriques possibles ; l'expérience ne sert qu'au choix parmi ces possibilités. Mais qu'en est-il des faits au-delà de l'expérience ? Si le choix dépend exclusivement de l'expérience, celle-ci « limite » celui-là ? L'extension de ces faits en dehors de ces mêmes limites, « tant dans le sens l'immensurablement grand que dans celui des immensurablement petits », serait-elle possible ? Telle est la question traitée dans la dernière partie du mémoire de Riemann, intitulée « Application à l'espace ». C'est surtout dans la distinction entre l'illimité et l'infini que s'accentue la différence entre les rapports métriques et les rapports d'étendue :

> Que l'espace soit une variété illimitée de trois dimensions, c'est là une hypothèse qui s'applique dans toutes nos conceptions du monde extérieur, qui nous sert à compléter à chaque instant le domaine de nos perceptions effectives et à construire les lieux possibles d'un objet cherché, et qui se trouve constamment vérifiée dans toutes ces applications. La propriété de l'espace d'être illimité possède donc une plus grande certitude empirique qu'aucune autre donnée externe de l'expérience.
>
> Mais l'infinité de l'espace n'en est en aucune manière la conséquence ; au contraire, si l'on suppose les corps indépendants du

41. Riemann, « Sur les hypothèses qui servent de fondement à la géométrie », p. 281.

> lieu, et qu'ainsi l'on attribue à l'espace une mesure de courbure constante, l'espace serait nécessairement fini, dès que cette mesure de courbure aurait une valeur positive, si petite qu'elle fût [42].

Si la possibilité des géométries non euclidiennes était une chose acquise vers le milieu du XIXe siècle, le statut de la géométrie euclidienne ne laissait toujours aucun doute, tant comme le cadre exclusif pour la description du monde sensible que comme la forme même de la forme a priori de la sensibilité. En effet, une chose est de fonder la nouvelle géométrie et de montrer sa possibilité, c'est-à-dire la non-contradiction de l'ensemble de ses axiomes, ainsi que l'équivalence ou la traductibilité à d'autres géométries ; c'en est une autre de s'en servir pour décrire les phénomènes physiques. Pour une bonne partie du siècle, il était impensable que la nature soit écrite dans un autre langage que celui de la géométrie euclidienne.

« Les déterminations métriques exigent l'indépendance entre les grandeurs et le lieu [43], » dit Riemann. Par exemple, une ligne peut être déterminée indépendamment de sa position dans un système de coordonnées. Elle peut se décomposer en éléments linéaires qui s'expriment à leur tour par la racine carrée d'une fonction de grandeurs variables dx, comme $ds = \Sigma(dx)^2$, pour laquelle ce qu'on appelle communément l'espace devient une partie de « variétés planes » [44]. Dans ce contexte, Riemann réintroduit et redéfinit la notion de courbure [45]. Le problème de la courbure préoccupait déjà Gauss dans le cadre de la géométrie des *surfaces*, c'est-à-dire de l'espace à deux dimensions. Il avait ainsi l'idée de dériver la courbure de l'espace, en l'occurrence, une partie de la surface terrestre, par la mesure des trois montagnes autour de Göttingen : si la somme des angles s'écartait de 180°, cela signifierait que la courbure serait différente de zéro et la géométrie euclidienne ne tiendrait plus. Une fois généralisée comme chez Riemann, la notion de courbure en vient à s'appliquer à l'espace à n dimensions pour être promue au rang du fondement même de la géométrie.

> Mais si cette indépendance entre les corps et le lieu n'existe pas, alors des rapports métriques reconnus dans le grand on ne peut rien conclure pour ceux de l'infiniment petit ; alors la mesure de courbure de chaque point peut avoir suivant trois directions une valeur arbitraire, pourvu que la courbure totale de toute portion mesurable de l'espace ne diffère pas sensiblement de zéro ; il peut s'introduire des rapports encore plus compliqués, lorsqu'on ne suppose plus que l'élément linéaire puisse être représenté par la racine

42. Riemann, *cit.*, p. 295.
43. Riemann, *cit.*, p. 286
44. Riemann, *cit.*, p. 288.
45. Riemann, *cit.*, p. 292.

> carrée d'une expression différentielle du second degré. Or il semble que les concepts empiriques, sur lesquels sont fondées les déterminations métriques de l'étendue, le concept du corps solide et celui du rayon lumineux, cessent de subsister dans l'infiniment petit. Il est donc très-légitime [*sic*] de supposer que les rapports métriques de l'espace dans l'infiniment petit ne sont pas conformes aux hypothèses de la Géométrie, et c'est ce qu'il faudrait effectivement admettre, du moment où l'on obtiendrait par là une explication plus simple des phénomènes [46].

Riemann sera suivi par quelques tentatives d'appliquer les résultats de Riemann au modèle géométrique de l'univers, comme celles de K. F. Zöllner [47] ou de Auguste Calinon [48]. Calinon cherchera à établir une « géométrie générale » selon laquelle « la géométrie euclidienne n'est plus qu'une solution très approximative, mais simplifiée, des faits géométriques réels de notre Univers [49] ». Quels sont donc ces « faits géométriques réels » ? Il existe des « faits géométriques » liés à nos expériences, aussi bien que des faits physiques et astronomiques, mais les expériences se limitent généralement à une petite portion de l'univers. La géométrie « réelle » de l'univers, qui n'est qu'une espèce d'une géométrie encore plus générale dont elle reste toujours approximative et indéterminée :

> Mais il est évident que l'ensemble des données fournies directement par l'expérience est chose essentiellement variable et dépend des progrès mêmes de la science. [...] Nous conclurons donc en disant que *l'indétermination géométrique de notre espace comporte plusieurs degrés, suivant l'état même de nos connaissances* [50].

Calinon s'interroge sur le rapport de la géométrie de l'univers avec les lois de la physique et de l'astronomie. Nos lois ne se rapportent pas directement à l'univers lui-même, mais à « la représentation euclidienne de cet Univers » selon laquelle la ligne droite se rapporte au rayon lumineux. La loi de la gravitation ne fait pas exception : elle est conditionnée par la géométrie euclidienne pour qu'elle demeure une loi générale, valable dans tout l'univers. Toujours est-il qu'elle peut s'exprimer autrement, notamment dans « l'infiniment grand » :

> [A] ces grandes distances, la loi de l'attraction, devenue différente, trouverait sa forme la plus simple dans une autre représentation

46. Riemann, *cit.*, pp. 296-297.
47. Kragh, *Geometry and Astronomy : Pre-Einstein Speculations of Non-Euclidean Space*.
48. Auguste Calinon (1893), « Etude sur l'indétermination géométrique de l'univers », *Revue philosophique de la France et de l'étranger*, 36. Voir aussi Philippe Nabonnand (2008), « Le conventionnalisme géométrique, une alternative radicale au réalisme spatial. Le contexte français du conventionnalisme géométrique de Poincaré », *Cahiers de philosophie de l'Université de Caen*, 45, pp. 68-71.
49. Auguste Calinon (1891), « Les espaces géométriques », *Revue philosophique de la France et de l'étranger*, 32, p. 374.
50. Calinon, « Etude sur l'indétermination géométrique de l'univers », pp. 597-598.

> géométrique de l'Univers que la représentation euclidienne [...] nous avons le droit de chercher dans d'autres géométries la loi qui exprimerait, par exemple, de la façon la plus simple les attractions à grandes distances entre le soleil et les étoiles fixes [51].

Entre deux molécules séparées d'une distance infiniment petite, ou bien entre deux étoiles d'une distance infiniment grande, la loi peut varier de façon à trouver sa forme plus simple dans une autre géométrie que la géométrie euclidienne. Le rapport entre la géométrie et la physique ne peut plus être le même.

2.3 Deux problèmes cosmologiques de la mécanique newtonienne et leurs solutions

Si l'espace n'est pas totalement vide, mais *contient* de la matière, jusqu'où le contenu qu'est la matière peut ressembler au contenant qu'est l'espace ? Pour que l'espace qui la contient soit identifié, au moins assimilé, à l'espace euclidien qui est homogène et isotrope, il faut que la matière soit distribuée uniformément dans ce même espace. « En d'autres termes à la rigueur, dira Einstein plus clairement, si loin qu'on voyage à travers l'espace de l'univers, il se trouve partout une multitude éparse d'étoiles fixes à peu près du même genre et de la même densité [52]. » Or, on ne peut observer cet espace que localement et l'observation ne nous donne pas l'impression de l'homogénéité.

Mais la conception de Newton devient encore plus problématique avec le problème de l'infinité de l'univers. Si l'univers est infini en matière, en quantité infinie et uniformément distribuée, un corps quelconque subirait la force gravitationnelle due à tout le reste de la matière de cet univers, à savoir l'infini ; s'il est fini, la matière ne tardera pas à se condenser en une région limitée, et finira par se réunir en une masse unique. Ce dilemme sera résolu, on le sait désormais, par la théorie de la relativité générale.

Le problème a déjà été bel et bien posé, chez Newton, à l'instigation de Bentley. D'abord la gravitation à laquelle la matière est soumise met les géomètres dans l'embarras quant à son fondement, malgré la multiplication incessante des données qui prouvent empiriquement la validité des lois. Comment la réconcilier avec l'infinité en extension ? Aucune expérience n'est possible et les arguments ne manquent pas comme le montrent les preuves que Kant fournit pour la thèse et l'antithèse de la première antinomie. Et si les deux problèmes étaient liés ?

51. Calinon, *cit.*, p. 607.
52. Einstein, *La relativité*, p. 147.

Pourquoi la nuit est-elle noire ? Problème optique

Pourquoi la nuit est-elle noire ? Le problème a été posé par Kepler comme un argument contre l'infinitisme : si l'univers était infini, avec une distribution uniforme d'une infinité d'étoiles, la nuit aurait autant brillé par celles-ci que ne l'est le jour par le Soleil. Ce qui n'est pas le cas ; alors l'univers n'est pas infini. Mais c'est Olbers qui est le premier à avoir formulé aussi explicitement que clairement dans son écrit de 1823, « Sur la transparence de l'espace cosmique » :

> L'espace n'est-il pas infini ? Ses bornes se laissent-elles elles-mêmes penser ? Est-il concevable que toute-puissance infinie ait laissé vide cet espace infini ?
> Alors se présente aussitôt une très forte objection. S'il y a réellement des soleils dans tout l'espace infini, qu'ils soient séparés par des distances à peu près égales ou répartis dans des systèmes de Voies lactées, leur ensemble est infini et alors, le ciel tout entier devrait être aussi brillant que le soleil [53].

Si l'on suppose que les étoiles sont uniformément distribuées et que le Soleil se situe au centre, il est aisé de voir que les étoiles observables s'accroissent à mesure du *volume* de la sphère qui les contient, c'est-à-dire au cube du rayon (R^3), tandis que l'éclat des mêmes étoiles *décroît* à mesure de la *surface*, c'est-à-dire au carré du rayon (R^2). Ce qui fait que le rayonnement reçu à la Terre augmente proportionnellement au rayon R. Si R va jusqu'à l'infini, infinie sera aussi la lumière émise depuis les étoiles. En d'autres termes, comme le dit Olbers lui-même, « toute ligne que j'imagine tirée à partir de nos yeux rencontrera nécessairement une étoile fixe quelconque et par conséquent tout point du ciel devrait nous envoyer de la lumière stellaire, donc de la lumière solaire [54] ». Si bien que la Terre aurait été éclairée, la nuit comme le jour. Ce qui n'est pourtant pas le cas, comme on le sait depuis la nuit des temps.

Le raisonnement n'est donc plus tenable, vu l'écart entre la conclusion et la réalité, à moins de rectifier au moins l'une des hypothèses de départ, sinon toutes. Celle de l'infinité est sans doute la première qui vienne à l'esprit. Il n'en est rien, pour un infinitiste convaincu comme Olbers : il y a lieu de mettre en cause, au lieu de la thèse infinitiste, l'autre hypothèse qu'est celle sur « la transparence absolue de l'espace cosmique ». Hypothèse moins explicite, mais toujours opérante, elle s'éloigne pourtant de la vérité : l'espace cosmique n'est pas vide, mais contient quelque chose de subtil, mais toujours de matériel, comme en témoigne, dans les comètes, surtout sur les queues ; la présence d'une certaine matière de quantité faible en interaction avec la lumière suffirait

53. « Ober die Durchsichtigkeit des Weltraumes » trad. fr. in Merleau-Ponty, *La science de l'Univers à l'âge du positivisme*, pp. 321-322.
54. Toujours cité d'après Merleau-Ponty, *cit.*, p. 322.

pour empêcher celle-ci de conserver la même intensité pendant sa transmission. Mais à quoi consisterait une telle matière ? Sans se soucier de la constitution de la matière, l'astronome se contente de supposer son existence, fût-elle hypothétique. Ce qui ne serait pas sans effet sur elle-même : « une perte de lumière si petite [...] serait suffisante, sur ces grandes distances, pour représenter les apparences célestes comme nous les voyons, même si l'ensemble des étoiles [...] est infini [55] ».

L'absorption de la lumière par l'espace, telle est l'hypothèse *physique* qui vient sauver le phénomène (la nuit noire), accompagnée d'une autre hypothèse qui ne relève pas de la physique, qu'est l'infinité de l'univers. Toute physique qu'elle est, l'hypothèse ne précise pourtant pas la nature de cette « perte », ni, *a fortiori*, celle de la lumière ou de la chaleur, problèmes qui n'intéressaient visiblement pas l'astronome. Si la lumière était absorbable et absorbée dans le milieu interstellaire, elle ne se serait pas contentée d'éclairer notre nuit terrestre ; elle n'aurait pas été sans laisser de trace sur l'espace lui-même, car elle rayonne la chaleur qui aurait chauffé le milieu ; le milieu échauffé aurait fini par atteindre la température égale à la surface des étoiles, pour rayonner ensuite la chaleur absorbée. « Celle-ci [...] exerce encore une action en échauffant le milieu absorbant qui doit alors soit accroître sa température – le processus se poursuivant à l'infini –, soit, devenant à son tour rayonnant, émettre en tout point et à chaque instant autant de chaleur qu'il en reçoit », dit John Herschel en 1848 [56].

Cette « transparence de l'espace cosmique », nous allons la voir revenir régulièrement sur la scène sous une forme ou une autre, au nom de l'éther par exemple. Olbers a le mérite d'avoir donné un sens physique, d'avoir reposé une question aussi ancienne que l'infinité du monde d'un point de vue plus physique qu'astronomique au sens traditionnel du terme. Nous allons revenir dans le chapitre VI à la solution de W. Thomson.

Problème gravitationnel

Seeliger revient à la question posée par Bentley. Si la matière était finie et laissée à l'interaction gravitationnelle seule dans l'espace infini, elle finirait par se ramasser en une masse unique. A quoi Newton répondait par l'infinitisation de la matière : si la matière était infinie, il y aurait l'équilibre gravitationnel. Mais est-ce vrai ? Dans cette dernière les notions même de potentiel et de force perdent sens puisque l'attraction subie par chaque étoile (qu'on appelle

55. *ibid.*
56. D'après la citation in Harrison, *Le noir de la nuit*, p. 120.

le potentiel newtonien) sera infinie de toute direction (puisque les étoiles sont infinies). Ce qui laisserait indéfinis le potentiel à chaque point et la force subie par un corps à ce point.

Peut-on appliquer la loi de la gravitation à l'univers ? Telle est la question avec laquelle Seeliger ouvre son article de 1909. Selon Seeliger, la cosmologie newtonienne repose sur deux hypothèses : 1° l'infinité de l'univers en extension, ainsi que son homogénéité ; 2° l'universalité de la loi de la gravitation, applicable donc à tout l'univers comme au système solaire. Il montre ensuite que ces deux hypothèses sont incompatibles l'une avec l'autre. Force est alors d'abandonner l'une des deux hypothèses. Laquelle ?

Venons-en d'abord à l'infinitisme. Mais que faut-il entendre ici par l'infini ? L'infinitisation de l'univers impliquait, rappelons-le, l'actualisation de l'infini, c'est-à-dire l'adoption de l'infini en acte. Or, la réhabilitation de l'infini en acte doit attendre Cantor vers la fin du XIXe siècle. Il est intéressant de voir Seeliger constater l'intérêt et l'utilité de l'infini cantorien malgré son ambigüité pour la physique et surtout pour la cosmologie [57]. Supposons qu'un point quelconque O subit l'effet de la gravitation due à tous les autres points de l'univers. Cet effet se mesure par le potentiel gravitationnel sur O, dérivé par l'intégrale de la densité de l'univers ρ et son rayon r. Or, si l'univers est infini ($r \to \infty$) et homogène (ρ est une constante), l'intégrale ne convergerait pas et il n'y aurait donc pas de valeur déterminée pour la force résultante. Chaque point de l'univers posséderait un potentiel gravitationnel infini, donc une force infinie ; son mouvement s'accélérerait indéfiniment jusqu'à atteindre une vitesse infiniment grande. « Ce qui est absolument inadmissible si l'on ne veut pas remettre en cause toute la mécanique », dit l'astronome. En effet, le sait-on désormais, il fallait remettre en cause toute la mécanique pour résoudre le problème.

Par conséquent, à partir de l'hypothèse sur l'exactitude absolue de la loi de Newton, on parvient à conclure que « des parties infiniment étendues de l'univers ne peuvent pas être remplies d'une masse dont la densité moyenne soit finie [58] ». Que la densité soit finie ou infinie, cela importe finalement peu ; si la masse totale est infiniment grande, l'univers, aussi peu dense soit-il et quelle que soit sa densité, ne peut se tenir. Ce qui est remarquable ici, c'est que Seeliger prend en compte les propriétés physiques telles que gravité, distribution et surtout *densité moyenne*, afin d'instituer l'infinité comme un problème *physique*. Et Seeliger de conclure : « Si la masse totale de l'univers (la densité

57. E. R. Paul, *The Milky Way Galaxy : Statistical Cosmology 1890-1924*, p. 68.
58. Hugo von Seeliger (1909), « Sur l'application des lois de la nature à l'univers », *Scientia*, 6, 2, p. 93.

moyenne étant finie) est infiniment grande, la loi de Newton ne peut pas être considérée comme l'expression mathématiquement exacte des forces d'attractions agissantes [59]. » La loi de la gravitation devrait donc être modifiée de telle façon que le potentiel s'annule à chaque point [60].

La proposition de Seeliger consiste à ajouter un terme $\exp(-\Lambda r)$, telle que la loi s'écrit $F = GmM/r^2 \times \exp(-\Lambda r)$, où r désigne toujours la distance entre les deux masses. La valeur de Λ est supposée suffisamment petite afin que, quand la r n'est pas exceptionnellement grande, c'est-à-dire dans la plupart des cas, la loi de Newton reste valide. L'effet de la modification ne devient sensible qu'à longue distance, c'est-à-dire dans le contexte cosmologique : quand r va à l'infini, F s'approche de 0. Mais cela concerne aussi les phénomènes locaux, notamment ceux qui sont relatifs au système solaire. Ainsi s'expliqueraient, d'après Seeliger, les anomalies dans les mouvements des planètes, dont celle de l'avancement du périhélie de Mercure [61].

Charlier cherche de son côté à établir un modèle infinitiste à sa manière tout en échappant à l'objection d'Olbers et à celle de Seeliger. Pour ce faire, il met en cause les deux hypothèses sur l'univers généralement admises que sont l'homogénéité (la distribution *uniforme* de la matière) et tente de les remplacer par une hypothèse tout à fait nouvelle, d'après laquelle il existe plusieurs ordres selon lesquels les étoiles et les galaxies sont structurées et hiérarchisées : un groupe d'étoiles forment un agrégat qu'on appelle généralement une galaxie et celle-ci fait partie d'un groupe de galaxies, pour former un agrégat à ordre supérieur (qu'on appellera aujourd'hui un amas de galaxies).

Il pose d'abord trois critères. Le premier est celui d'Olbers : si les étoiles sont uniformément distribuées dans l'espace en nombre infini, la totalité de leur lumière sera elle aussi infinie, ce qui est contredit par le fait que la nuit est noire. Il en serait de même pour la force gravitationnelle. Tel est le deuxième critère, celui de Seeliger. Par ailleurs, un objet céleste tombé dans un champ gravitationnel se détermine par la hauteur du potentiel. Comme la hauteur va à l'infini, alors la vitesse finale est elle aussi susceptible d'aller à l'infini. Or, la vitesse doit être finie, comme c'est ce que nous apprend l'observation [62]. En-

59. *ibid.* Ou encore, un peu plus loin : « Le seul procédé acceptable consiste évidemment à corriger la loi de Newton, qui n'est en somme qu'un produit de l'esprit humain, [...] il serait évidemment plus sage de douter de sa validité rigoureuse et illimitée que de faire, en faveur d'une formule qui se vérifie brillamment, mais dans un domaine très restreint, des hypothèses qui nous conduisent à admettre ce qu'aucune expérience ne peut atteindre. » Seeliger, *cit.*, p. 95.

60. E. R. Paul, *The Milky Way Galaxy : Statistical Cosmology 1890-1924*, p. 69.

61. Norton, « The Cosmological Woes of Newtonian Cosmology », pp. 294-295.

62. Notons que cette interdiction de la vitesse infiniment grande n'est pas due à la théorie de la relativité, mais à l'observation de l'époque dans laquelle les vitesses les plus grandes ne dépassent pas .

suite il part d'une double hypothèse : 1° les nébuleuses spirales appartiennent à notre galaxie et ne sont pas elles-mêmes des galaxies ; 2° l'univers est un système de galaxies de plusieurs dimensions, s'emboîtant les uns dans les autres – « un système d'ordre n ayant pour éléments des systèmes d'ordre $n-1$: étoiles, galaxies, galaxies des galaxies, » comme le décrira Merleau-Ponty [63]. Ainsi s'établit une équation entre des systèmes d'ordres différents selon laquelle le rapport entre les systèmes d'ordre i et leurs sous-systèmes d'ordre $i-1$, supposés sphériques au rayon de R_i et de R_{i-1} satisfait la relation suivante (avec $\sqrt{N_i}$ qui définit le nombre des sous-systèmes $i-1$) [64] :

$$\frac{R_i}{R_{i-1}} > \sqrt{N_i}$$

Dans un tel univers, la densité n'est pas partout la même dans tout l'univers ; si chaque ordre possède sa densité moyenne de la matière, elle s'annule dans les autres ordres. Même si la matière est infinie, ce qui ferait que la densité moyenne de cet ordre est également infinie, il n'en est pas nécessairement ainsi pour l'espace au niveau duquel s'annule la densité. Il en est de même pour le potentiel qui sera nul ou infiniment petit. Autrement dit, la série de luminosité, comme la série de forces gravitationnelles, peut être convergente en une valeur finie sur un point. C'est ainsi qu'il arrive à un modèle géométrique d'univers, que J. Merleau-Ponty qualifiera de « même la première construction théorique qui mérite ce nom [65] ».

3 Hypothèse nébuleuse revisitée

3.1 Contextes. « Renaissance cosmogonique »

Durant la première moitié du XIXe siècle, l'hypothèse nébuleuse est largement acceptée. Or, elle ne fait pas tant l'objet d'examen scientifique proprement dit : pas d'analyse des détails techniques, ni confrontation avec les observations, ni, *a fortiori*, d'élaboration ou extrapolation des conséquences ; souvent est-elle présentée de façon simple ou simplifiée et ce, rarement par les astronomes professionnels. A deux exceptions près : E. Roche et J. Babinet.

Roche se met à étudier l'hypothèse dans la continuité de ses travaux précédents en mécanique céleste sur la figure et l'atmosphère des astres, soumettant au calcul les étapes imaginées par Laplace, surtout les premières relatives à la

63. Merleau-Ponty, *Cosmologie du XXe siècle*, p. 15.
64. Merleau-Ponty, *cit.*, p. 127.
65. Merleau-Ponty, *cit.*, p. 15.

formation des anneaux[66]. Ses contributions resteront pourtant dans l'ombre avant d'être réunies et publiées en 1873. Parallèlement à Roche, et sans doute indépendamment de lui, Babinet présente en 1867 une note de quatre pages à l'Académie des sciences afin d'évoquer un point inexpliqué dans le scénario de Laplace : le problème de la distribution des masses et des moments angulaires du système solaire[67]. Sa note n'attire pas plus d'attention que les travaux de Roche : elle restera pratiquement à l'ombre avant qu'elle ne soit redécouverte, aux premières années du XXe siècle, par l'intermédiaire des astronomes anglo-saxons comme T. J. J. See[68].

La guerre franco-allemande de 1870 a un effet inattendu sur l'hypothèse nébuleuse. Dans son article de 1883 pour la revue *L'astronomie*, M. Fouché évoque la question *Laplace oder Kant*[69]. Selon Fouché, c'est d'abord en Allemagne que l'éventuelle « connexion » entre les deux figures a attiré l'attention, principalement due au nationalisme exacerbé dans le pays après la guerre : « certains auteurs s'étant efforcés, dans un sentiment mesquin de rivalité nationale, de rabaisser le premier [Laplace] pour exalter le second[70] [Kant]. » L'association des idées de Kant et de Laplace suscite des réactions sur l'autre côté du Rhin et ressuscite l'intérêt pour l'hypothèse elle-même.

Pour Fouché, tout oppose les deux hypothèses, sauf la conception d'une nébuleuse primitive. Là où Laplace pose la condensation de l'ensemble de la nébuleuse vers un centre unique, laquelle aurait l'augmentation de la vitesse de

66. « Mes études sur la figures des corps et sur la disposition des couches de niveau dans les atmosphère qui les entourent, m'ont conduit à quelques résultats applicables au Soleil, à son atmosphère, et à la condition progressive par suite de laquelle se sont formées, comme on sait, les diverses planètes. » « Essai sur la constitution et l'origine du système solaire », publié dans *Mémoires de l'Académie de Montpellier* dont l'extrait se trouve dans Edouard Roche (1873), *Essai sur la constitution et l'origine du système solaire*, Paris : Gauthier-Villars ; Extrait des Mémoires de l'Académie des Sciences et Lettres de Montpellier (Section des Sciences, tome VIII), p. 5. Sur Roche, voir Brush, *Nebulous Earth*, pp. 110-112.

67. Jacques Babinet (1861), « Note sur un point de la cosmogonie de Laplace », *Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences*, 52, 11. Séance du 18 mars 1861.

68. Ch. André notera dans son article de 1912 sur la théorie de See : « Pour mon compte personnel, avant les écrits de M. See, j'ignorais complètement ce soi-disant critérium ; et les astronomes qu'il m'a été donné d'interroger sur ce sujet, savaient pas plus que moi. » Charles André (1912a), « L'hypothèse nébulaire de Laplace et la théorie de la capture de M. T. J. J. See », *Scientia*, 11, p. 154.

Sur Babinet, Merleau-Ponty, *La science de l'Univers à l'âge du positivisme*, p. 165 et p. 177–178 ; Brush, *Nebulous Earth*, p. 38 ; Volny Fages (2012), *Les origines du monde. Cosmogonies scientifiques en France (1860-1920) : acteurs, pratiques, représentations*, Thèse de doctorat, EHESS, pp. 63-68.

69. Maurice Fouché (1883), « La formation du systeme Solaire, d'après Laplace », *L'Astronomie*, 2. Deux ans plus tard, Fouché soumettra une communication sur le sujet à l'Académie des sciences, lue par Ch. Wolf. et analysée par Poincaré dans les *Leçons* : Maurice Fouché (1884), « Sur la condensation de la nébuleuse solaire, dans l'hypothèse de Laplace », *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 99.

70. Fouché, « La formation du systeme Solaire, d'après Laplace », p. 292.

rotation pour « *conséquence mécanique et nécessaire*[71] », Kant voit plusieurs centres de condensation, l'un devenant le Soleil, et les autres, indépendamment de ce dernier, les planètes, ce qui rend difficile à accepter du point de vue mécanique. Tous les faits connus du système solaire semblent se rattacher à la doctrine de Laplace. L'auteur mentionne également la théorie relative à l'atmosphère des astres de Roche qui, l'appliquant à la nébuleuse primitive, arrive à établir les relations des distances des satellites de Jupiter et de Saturne[72], relations analogues à la loi de Bode.

Mais, d'après Fouché, c'est surtout « la belle théorie que M. Faye propose de substituer à l'hypothèse de Laplace sur la formation du système solaire, et les remarquables études de M. Wolf », qui ont « attiré de nouveau l'attention sur les hypothèses cosmogoniques[73] ». Quelques années plus tard, Poincaré ne dira pas autre chose : « C'est grâce à lui que les questions cosmogoniques, si longtemps délaissées, ont rencontré de nouveau l'attention qu'elles méritent[74]. »

Faye avait élaboré une théorie physique sur le Soleil. Selon lui, le Soleil est constitué d'un noyau chaud à un état gazeux et d'une photosphère à un état incandescent ; si la photosphère maintient son état malgré le rayonnement qui fait perdre sans cesse de la chaleur, c'est par la réaction chimique d'une part, et d'autre part, par la circulation interne des gaz, de la même manière que les mouvements de courants d'air ou d'autres phénomènes météorologiques qui s'observent sur la Terre. Faye poursuit ces rapprochements des phénomènes terrestres et solaires pour les étendre à l'univers et à son origine. « Ce qui reste aujourd'hui de plus net de la nébuleuse primitive, ce qui en représente la partie la moins modifiée après tant de millions d'années, c'est le Soleil. C'est donc aussi par une étude approfondie du Soleil qu'il faut commencer quand on veut remonter à l'origine de notre système[75]. »

A la suite de Faye, Ch. Wolf publie une série d'articles sur le sujet dans *Bulletin astronomique*, ce qu'il réunit en un volume et fait paraitre en 1886. Le livre se divise en deux parties, l'une sur la formation de l'univers ainsi que des « soleils », et l'autre, sur la formation des planètes. La première a pour point de départ l'hypothèse d'une matière primitive, diffuse, souvent représentée comme un chaos, qui reste toujours, malgré de diverses observations

71. Fouché, *cit.*, p. 293.
72. Fouché, *cit.*, p. 294.
73. Fouché, *cit.* Sur la « renaissance » de la cosmogonie en France à cette période, Pour les études historiques récentes : Chaberlot, *La Voie lactée*, p. 255 ; Le Gars, *L'émergence de l'astronomie physique en France (1860-1914)*, p. 323 ; Fages, *Cosmogonies scientifiques en France (1860-1920)*.
74. Henri Poincaré (1902b), « La vie et les travaux de M. Faye », *Bulletin de la Société astronomique de France*, 16, p. 501.
75. Faye, *Sur l'origine du monde*, p. 241.

des nébuleuses, « dans le domaine du roman et de l'imagination pure[76] », la seconde repose sur des faits bien établis (l'identité des sens des mouvements, la concordance des plans...), complétés par de nouveaux acquis (l'identité des éléments constitutifs du Soleil et des planètes, révélée par l'analyse spectrale), de telle façon que le problème cosmogonique se pose en termes précis et de manière proprement scientifique.

Contrairement à Faye, Wolf se borne à analyser et commenter les théories existantes, notamment celles de Laplace, Faye et Darwin, et les compléter avec quelques mises à jour théoriques et observationnelles. Si son examen est suivi d'une première traduction française complète de *Théorie du ciel* de Kant, faite par lui-même, son objectif principal reste de défendre Laplace. Il contribuera notamment à faire connaitre les travaux de Roche qui est, selon lui, le « premier interprète véritable » de Laplace ou bien même son « premier collaborateur réel, quoique posthume[77] ».

Après dix ans passés sans publication significative en la matière, c'est au Colonel R.-M. du Ligondès de renouer le fil dans on ouvrage de 1897. Contrairement à Wolf, du Ligondès ne se borne pas à examiner les hypothèses existantes, mais s'inspire de celles-ci pour développer sa propre cosmogonie. Il tâche notamment de donner une précision à l'état primitif : « Que demande-t-on à une théorie cosmogonique ? C'est de nous remonter à un état initial de la matière tel qu'on ne puisse concevoir un état antérieur ni même plus simple[78]. » De nombreuses cosmogonies commencent par poser le chaos comme l'état primitif, pour cette raison qu'il est le plus simple et le plus « naturel » à imaginer sans recourir à d'autres hypothèses arbitraires. A quoi consiste ce chaos précisément ?

3.2 D'autres cosmogonies mécaniques/mécanistes

A la recherche d'autres mécanismes

Selon Faye, la nébuleuse primitive serait dotée, au lieu d'une rotation uniforme comme chez Laplace, des mouvements tourbillonnaires internes, quelque chose comme des tourbillons de Descartes[79]. Descartes avait évidemment tort d'attribuer ces tourbillons aux mouvements des planètes. Pourtant, si les tour-

76. Charles Wolf (1886), *Les hypothèses cosmogoniques. Examen des théories scientifiques modernes sur l'origine des mondes*, Paris : Gauthier-Villars, p. 5.
77. Wolf, *cit.*, p. 38.
78. Raoul-Marie Du Ligondès (1907), *Formation mécanique du Système du Monde*, 2e éd., Paris : Gauthier-Villars, p. 7.
79. Faye, *Sur l'origine du monde*, p. 181.

billons ne sont pas capables de « remplir » l'espace ni faire mouvoir en rond les astres, comme l'avait victorieusement montré Newton dans le livre II de ses *Principia*, ils peuvent toujours s'appliquer à d'autres phénomènes, et ceci peut-être de manière encore mieux adaptée à la conception mécaniste que la loi de Newton, sans recourir à l'action à distance. Et si les tourbillons avaient en effet joué un autre rôle, un rôle créateur ? S'ils avaient donné naissance aux étoiles et à leurs systèmes planétaires ? Faye réhabilite ainsi la théorie des tourbillons, mais ses tourbillons ne sont pas tout à fait cartésiens : ils se rapportent à sa propre théorie du Soleil. Selon cette dernière il existe des « courants convectifs » sur la surface solaire, dans lesquels les particules tombent par la gravité sur les couches inférieures puis se décomposent en raison de la haute température, pour être remplacées par celles qui s'approchent de la surface et dégagent de la chaleur vers l'extérieur.

Faye constate aussi la nécessité de prendre en compte en matière de la cosmogonie une autre force que l'attraction qu'est la force répulsive. Nous avons vu que cette dernière a été supposée par Kant comme une « troisième force » fondamentale, derrière l'inertie et la gravitation, aussi indispensable et même prépondérante que les autres, surtout au moment de la formation du monde. La notion de force répulsive sera réactualisée et réinterprétée relativement au nom de la pression de radiation. Cette action fut théorisée par Maxwell et Bartholi dans les années 1870 et attribuée à la lumière pour expliquer notamment les queues des comètes. La lumière exerce une telle action quand elle rayonne sur les corps qu'elle touche, normalement trop faible pour affecter des corps matériels, mais elle peut devenir sensible à des corps suffisamment légers, par exemple sur les poussières et d'autres matières subtiles qui entoure les comètes. Elle jouera un rôle essentiel dans certaines cosmogonies, dont celle d'Arrhenius.

Chaos comme état primitif

Librement inspiré de l'hypothèse de Kant, du Ligondès prend pour point de départ « un chaos général extrêmement rare, formé d'éléments divers mus en tous sens et soumis à leurs attractions mutuelles », qui « s'est partagé en lambeaux qui ont donné naissance, par voie de condensation progressive, à tous les Mondes de l'Univers[80] ». C'est un état à la fois le plus antérieur et le plus simple, comme chez Kant, où les particules en mouvement de toutes sortes et en tous sens, avec cette différence qu'elles sont soumises à « la loi du hasard » :

80. Du Ligondès, *Formation mécanique du Système du Monde*, p. 14.

> Nous ne faisons aucune hypothèse sue la nature de ces mouvements ; nous les abandonnons entièrement à ce qu'on est convenu d'appeler le hasard. C'est en cela que l'hypothèse dont nous allons développer les conséquences diffère essentiellement de toutes celles qui ont été émises jusqu'ici ; c'est ce qui lui donne un caractère de vraisemblance et de généralité qui doit, a priori, la faire préférer à toute autre. L'hypothèse de Kant, malgré son apparente simplicité, est moins générale que la nôtre, puisque la matière y est primitivement en repos ; le repos n'est qu'un cas particulier du mouvement [81].

Ce qu'on observe ici, c'est un usage curieux de l'idée du hasard. Cette dernière, *contre* laquelle Laplace avait construit toute son hypothèse, vient à servir de condition d'intelligibilité voire de fondement même, d'une cosmogonie : « Pour nous, ajoute-t-il dans une note, nous ne comprenons guère une théorie cosmogonique dans laquelle les mouvements initiaux ne seraient pas abandonnés au hasard [82]. » C'est aussi un renversement d'idées relatives au chaos : le chaos primitif n'implique pas tant une absence d'ordre qu'une source d'ordre, portant en lui, sous l'apparence d'une « simplicité actuelle », une « richesse potentielle » ou « maximum de virtualités et d'organisation possible [83] ». L'état primitif prend ainsi un nouveau sens : non seulement il précède les autres états chronologiquement ; sa primauté ne reste pas dans l'échelle du temps, lui servant de principe à la fois de principe de commencement et de développement du monde [84]. Ces conditions initiales ne sont soumises aux lois de la mécanique sans pour autant nécessairement se rapporter à une cause non mécanique comme chez Newton : elles font partie des phénomènes bel et bien mécaniques, avec cette différence qu'elles obéissent à « la loi du hasard » comme dans la théorie cinétique des gaz, « laissant subsister dans la cosmogonie une sorte de contingence irréductible, et la situant dans le plan des sciences *historiques* par opposition aux sciences *rationnelles*, suivant la distinction établie par Cournot [85] ».

Le chaos a été capable de « diffuser les gaz ou les vapeurs presque indéfiniment et de les amener à un état d'extrême rareté, tout en leur conservant leurs propriétés élastiques [86] ». A force des chocs, il arrive à une partie des molécules de perdre de la force vive et de se condenser vers le centre jusqu'à ce qu'elles se mettent à circuler autour d'un centre en orbite elliptique. On

81. Du Ligondès, *cit.*, p. 15.
82. *ibid.*, note 2.
83. Busco, « Kant et Laplace », pp. 244-245.
84. Busco, *cit.*, p. 245. Busco commente sur l'état primitif chez Kant, mais le commentaire s'applique aussi bien, sinon plus, à la théorie de Du Ligondès.
85. Busco, *cit.*, p. 276, note 1.
86. Du Ligondès, *Formation mécanique du Système du Monde*, p. 8.

retrouve dès lors la condensation forte vers le centre de la nébuleuse : elle n'est plus une supposition a priori comme chez Laplace, mais un phénomène tout à fait naturel et probable, explicable par la mécanique.

3.3 Mise au point des détails

Formation des anneaux

L'atmosphère qui entoure un astre ne peut s'étendre au-delà d'une limite où se balancent la force centrifuge et la gravitation. Il en est de même pour la nébuleuse primitive. Ce point, déjà signalé par Laplace et précisé par Roche à l'appui de son propre calcul et présenté comme « une conséquence de [sa] théorie géométrique des atmosphères [87] ». Cette limite, désignée L, se détermine par l'équation entre la force centrifuge, qui dépend de la vitesse angulaire de rotation (ω), et la force de la gravitation, qui est due à la masse totale M et varie en raison inverse du carré de la distance [88] :

$$\omega^2 L = \frac{M}{L^2}$$

A mesure qu'elle se refroidit et se condense, la nébuleuse initiale abandonne la partie qui dépasse L. Les molécules échappées continuent leur rotation, avec la même vitesse qu'à l'origine, plus lentement donc que la nébuleuse-mère désormais séparée [89].
Cette dernière, une fois rétrécie, se contracte encore et accélère sa rotation, jusqu'à ce qu'elle entre dans une nouvelle phase de séparation d'atmosphère, avec un autre rayon et une autre période.

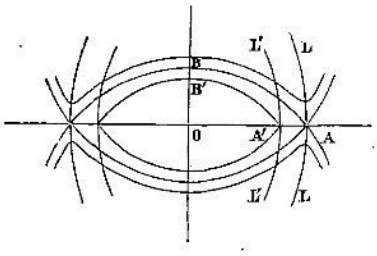


FIGURE 7 – Séparation des anneaux d'après Roche

Quand la nébuleuse diminue et que le rayon se resserre de OA à OA', elle laisse des molécules entre AL et $A'L'$ et se sépare d'elles. Parallèlement,

87. Roche, *Essai sur la constitution et l'origine du système solaire*, § 8, p. 11.
88. Roche, *cit.*, § 2, p. 6. Cette limite L, la postérité l'appellera « la limite de Roche ».
89. Roche, *cit.*, § 3, p. 7.

une partie de l'atmosphère sur le pôle B', ne parvenant plus à être attirée par la nébuleuse, descend vers l'équateur OA' pour joindre la couche déjà en circulation autour du centre O. Ainsi se produit un nouvel anneau équatorial.

Roche fait une autre précision. Si le rétrécissement était uniforme et le rétrécissement, continu, la vapeur s'abandonnerait continuellement sur le plan équatorial de façon à former une sorte de plage, non une série d'anneaux successifs, pourtant séparés de vides qui distinguent les uns des autres. Quelles sont donc les conditions nécessaires pour un refroidissement discontinu ? Il doit être central plutôt que superficiel, assez rapide pour que la vitesse de rotation augmente rapidement.

Si l'on désigne le rayon du nouvel anneau a, et sa période de révolution, désignée T, on aura la relation suivante :

$$\frac{4\pi^2 a}{T^2} = \frac{M}{a^2}$$

L'équation peut se réécrire comme suit, où l'on retrouve la troisième loi de Kepler :

$$\frac{4\pi^2 a^3}{T^2} = M$$

Pour chaque anneau, a et T doivent correspondre respectivement à la distance de la planète qui en résulte et cette période de révolution. Pourtant, ajoute Roche, si cette concordance a lieu, ce sera sans apprendre quelque chose de nouveau sur le système solaire ni vérifier l'hypothèse de son origine ; elle constitue seulement « une condition à laquelle toute théorie doit satisfaire [90] ».

« Sauver » les rotations

Les mouvements rétrogrades des deux satellites d'Uranus ont déjà été observés par W. Herschel, suivi par la découverte d'autres satellites en rotation rétrograde de Neptune ou de Jupiter au milieu du XIXe siècle [91]. Est-ce qu'ils sont des cas exceptionnels ou des contrexemples servant d'objection, au moins de limitation, à l'hypothèse de Laplace ? D'après Faye, ceci ne prouve pas la fausseté de l'hypothèse, mais seulement son incomplétude. Il propose donc de la compléter pour prendre en compte *toutes* les rotations, tant directes que rétrogrades.

90. Roche, *cit.*, § 4, p. 7.

91. Faye, *Sur l'origine du monde*, p. 189. Jusqu'au début du XXe siècle, les sens de circulation des satellites, voire des planètes, ne sont pas rigoureusement déterminés. C'est ainsi que Faye et du Ligondès considèrent comme rétrogrades les rotations d'Uranus et de Neptune, mais ceci s'avérera faux : ce ne sont pas ces planètes mais leurs satellites qui sont en mouvement rétrograde. Sur les données disponibles au XIXe siècle concernant les mouvements du systèmes solaire, ceux des satellites compris, voir Brush, *Nebulous Earth*, pp. 29-32.

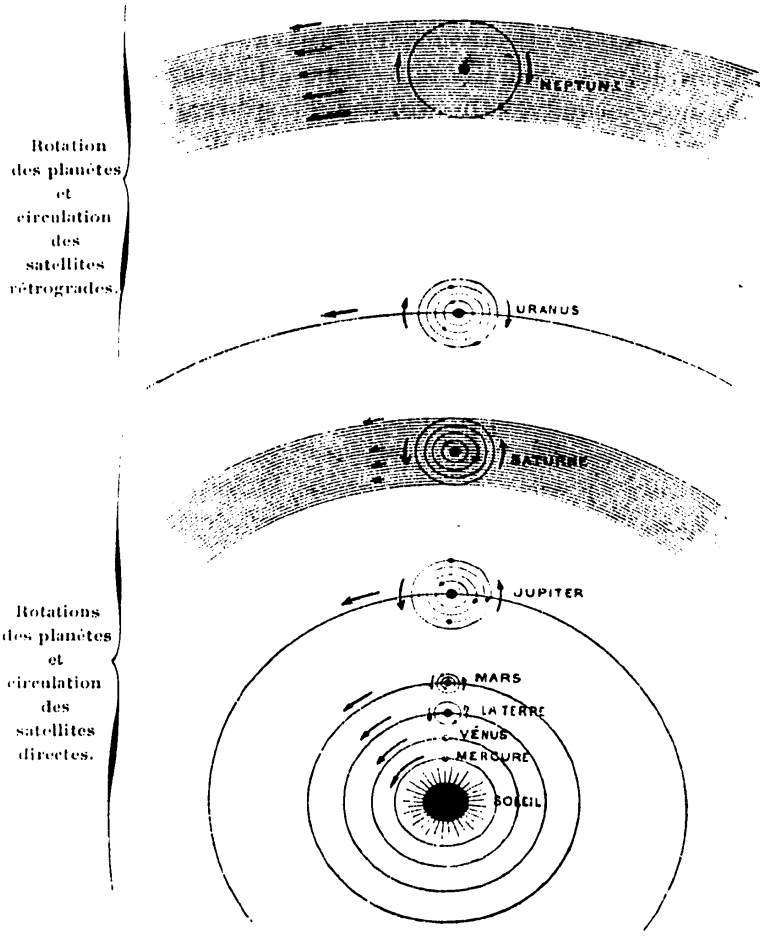


FIGURE 8 – Deux modes de circulation d'après Faye

L'évolution de la nébuleuse initiale se divise en deux phases [92]. Dans la première la nébuleuse est en rotation rigide dans laquelle une molécule subit la force proportionnelle à la distance depuis le centre : $F = Ar$, A étant une constante quelconque. Dans la phase finale, la nébuleuse suffisamment condensée devient le Soleil, de sorte que l'attraction agisse sur les molécules conformément à la loi de la force centrale, c'est-à-dire inversement proportionnelle au carré de la distance : $F = B/r^2$, B étant une autre constante quelconque. Entre les deux phases, la force s'exprime comme :

$$F = ar + \frac{b}{r^2}$$

$$0 < a < A, 0 < b < B$$

La trajectoire d'une molécule à la distance depuis le centre r, avec une vitesse angulaire ω, se détermine comme suit :

$$\omega^2 r = ar + \frac{b}{r^2}$$

92. Faye, *Sur l'origine du monde*, pp. 201-203. Voir aussi Verdet, *Aux origines du monde*, pp. 225-226.

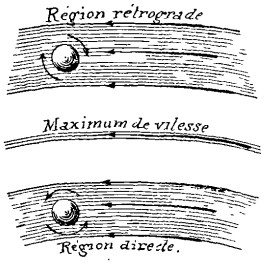


FIGURE 9 – Deux modes de rotation d'après Faye

La vitesse linéaire, ωr, qui s'écrit comme $\sqrt{ar^2 + \frac{b}{r}}$, varie différemment selon les valeurs a et b (voir Fig. 8 et 9 empruntée à l'ouvrage de Faye [93]). Dans la première phase où a est assez grand que b, ωr croît avec r, c'est-à-dire en raison de la distance : plus les molécules s'éloignent du centre, plus elles circulent rapidement, comme dans une rotation solide. Quand une partie des molécules se détachent pour former un anneau, leur rotation prendra le sens des molécules extérieures, c'est-à-dire le sens direct. Tels sont les cas de la plupart des planètes, Jupiter et Saturne incluses. En revanche, dans la seconde phase, a diminue et b augmente, de telle façon que ωr décroisse en raison de la racine carrée de r ; les molécules externes tourneront moins vite que les intérieures, comme dans une rotation différentielle ; la rotation de l'ensemble prendra le sens rétrograde.

Du Ligondès reprend et explicite cette partie du travail de Faye. Il calcule le rayon de la nébuleuse où sa vitesse angulaire atteint un maximum. Dans une région au-delà de ce maximum (« région rétrograde »), les matériaux restants et leur agrégat qu'est l'astre n'auront pas le même sens de circulation comme dans une région plus proche du centre (« région directe ») où les mouvements restent sous influence de la nébuleuse originale [94].

Le même mode d'explication s'appliquerait, selon du Ligondès, à la différence des inclinaisons des axes de la rotation qu'on observe actuellement dans les planètes, d'autant plus considérables qu'elles s'éloignent du Soleil [95].

> Que conclure de là ? C'est évidemment que les planètes comprises dans la région centrale, la région la plus étroite de la nébuleuse, depuis Mercure jusqu'à Saturne, se sont formées sous l'émir de la première loi, lorsque le Soleil n'existait pas encore ou n'avait pas acquis une masse prépondérante, et que les planètes comprises dans la région extérieure, de beaucoup la plus large, se sont formées lorsque le Soleil existait déjà [96].

93. Faye, *Sur l'origine du monde*, p. 191.
94. Du Ligondès, *Formation mécanique du Système du Monde*, p. 88, Figure 32.
95. Du Ligondès, *cit.*, p. 90.
96. Faye, *Sur l'origine du monde*, p. 192.

D'après Faye, la formation des planètes inférieures aurait précédé celle du Soleil. Celui-ci serait donc plus jeune que notre planète, la Terre, qui aurait déjà eu son écorce solidifiée bien avant que la nébuleuse ne soit suffisamment contractée pour former un centre bien condensé. Le rayonnement du Soleil et son affectation sur la surface terrestre, conditions indispensables à la vie, tout ceci n'aurait été réalisé que tardivement. « Ainsi disparait la contradiction inquiétante qui s'était révélée entre deux grandes sciences, l'Astronomie et l'Histoire naturelle du globe terrestre [97], » estime l'astronome.

Problème du moment angulaire

Tandis que la masse presque entière s'est accumulée dans le Soleil, représentant la masse totale du système. Ceci s'oppose à l'autre distribution non moins fondamentale et non moins déséquilibrée, celle des moments angulaires : le Soleil ne représente qu'une partie infime de l'ensemble des rotations effectives dans le système. Comment expliquer ces deux faits ? Ils paraissent si étrangers à l'ordre et à l'harmonie que présente le système du monde, qu'on ne s'étonnera pas que Laplace ne les prît pas en compte pour sa cosmogonie. Seraient-ils explicables si tous les mouvements de ces planètes sont dus à un et seul mouvement de la nébuleuse primitive ? C'est ce que la postérité nommera la barrière angulaire, une des objections majeures à l'hypothèse nébuleuse.

Supposons d'abord que la nébuleuse initiale possède la même masse que le Soleil actuel, mais s'étend jusqu'à la position qu'occupe actuellement la Terre. L'idée consiste à calculer la vitesse de rotation qu'aurait une telle masse, le rayon étendu jusqu'à la Terre, pour la comparer avec la valeur actuelle. La rotation du Soleil s'effectue tous les 25,3 jours et son rayon mesure 112 fois plus que le rayon terrestre représenté par R ($112R$) ; la distance entre le Soleil et la Terre mesure $24000R$. Alors s'écrit la période de rotation de la nébuleuse primitive (du rayon égal à la distance actuelle de la Terre et l'autre) :

$$25,3 \times (\frac{24000R}{112R})^2 \approx 1,2 \times 10^6 (\text{jours})$$

On ne tardera pas à remarquer que les chiffres sont trop élevés : 1,2 million de jours, soit environ trois mille années (3182 ans), alors que la période de révolution de la Terre ne compte qu'un an. Le même résultat s'obtiendra par un autre calcul appliqué à la nébuleuse étendue jusqu'à Neptune, en substituant la distance du Soleil à la Terre par celle à Neptune, $30 \times 24.000R$:

$$25,3 \times (\frac{30 \times 24.000R}{112R})^2 \approx 9 \times 10^8 (\text{jours})$$

97. Faye, *cit.*, p. 201.

Ceci se traduit par une période de Neptune égale à 900 millions de jours, soit 27 000 siècles, à savoir 27 000 fois plus grande que la valeur actuelle (un siècle).

> Ces nombres étant infiniment supérieurs à ceux qui marquent le temps de révolution de la Terre et de Neptune, on voit qu'il est impossible d'admettre que ces planètes ont été formées de la masse même du Soleil dilatée jusqu'aux orbes planétaires, ce qui n'empêche pas d'admettre que les étoiles elles-mêmes ont été formées aux dépens d'une matière cosmique universelle, mais qui n'aurait eu que des mouvements de rotation extrêmement faibles autour du centre de gravité de chaque masse qui devait s'isoler en Soleil individuel.
>
> On doit conclure de qui précède que si le Soleil entier eût été dilaté jusqu'aux orbes des planètes, il eût eu un mouvement de rotation beaucoup trop faible pour que la force centrifuge balançât la pesanteur et par suite pour l'abandon d'un anneau équatorial isolé de la masse totale [98].

Il n'y a donc pas à abandonner l'hypothèse de Laplace, mais seulement une partie d'elle : celle d'une nébuleuse initiale dilatée jusqu'à l'orbe de la Terre ni à celui de Neptune. On remarquera que c'est un défaut relativement facile à corriger par une autre supposition, celle d'une condensation centrale dans la nébuleuse initiale.

Le problème sera repris par M. Fouché d'une autre manière [99]. Le moment d'*inertie* de la nébuleuse, I, aurait varié proportionnellement au carré du rayon équatorial r ($I = mr^2$), alors que son moment de rotation, $\omega I = \omega mr^2$, devait rester constant au cours de son évolution ($\sum \omega mr^2$ =constante). Il en aurait été de même lors l'abandon des deux anneaux successifs de rayon a et a', a' étant plus proche du centre ($a > a'$) :

$$\omega a^2 = \omega' a'^2$$

Après la séparation, la vitesse angulaire de l'anneau nouvellement séparé (ω') ne devrait pas plus grande que celle de ce qui reste (ω). Les moments de rotation restent les mêmes, mais les moments d'inertie, I et I', varient selon la *densité* :

98. Babinet, « Note sur un point de la cosmogonie de Laplace », pp. 483-484.

99. « J'ai cru intéressant de faire ressortir une conséquence de la théorie de Laplace qui m'est venue à l'idée à la suite d'une conversation avec M. Flammarion, et qui, quoique fort simple, ne me paraît pas avoir été remarquée. » Fouché, « Sur la condensation de la nébuleuse solaire, dans l'hypothèse de Laplace », pp. 903-904. Note présentée par Ch. Wolf.

Fouché ne mentionne pas le nom de Babinet, mais celui de l'astronome anglais David Townbridge comme le premier à avoir remarqué dès 1864 le problème de la densité ainsi que la nécessité de la condensation initiale dans l'hypothèse de Laplace.

> Or il est bien évident que, pour une même masse et un même rayon, I sera d'autant plus petit que la condensation vers le centre sera plus prononcée. Il faut donc que dans la nébuleuse de Laplace, non seulement la condensation centrale n'ait pas fait de progrès depuis la formation de la première planète, mais qu'au contraire la distribution des densités y soit devenue de plus en plus uniforme. On remarquera que cette marche des phénomènes est exactement l'opposé de celle qu'admet M. Faye [100].

Pour Faye, la nébuleuse primitive avait une distribution *homogène* de masse, avant d'être soumise à une condensation assez lente. Fouché propose une démarche exactement opposée : la condensation centrale dès le début puis l'homogénéisation autour du noyau, toujours condensé.

La masse du Soleil et sa période de rotation étant connues, son moment total des quantités de mouvement peut être donné comme suit :

$$\omega I = \omega \times \frac{2}{5} M R^2$$

On aura alors

$$\frac{2\pi}{25,19} \times \frac{2}{5}(\frac{108,56}{23000})^2 = 2\pi \times 0,0000003538$$

Et celui de l'ensemble des planètes, $\sum m\omega a^2$:

$$2\pi \times 0,0000096116$$

La somme du moment de l'ensemble du système solaire actuel serait donc :

$$2\pi \times 0,0000003538 + 2\pi \times 0,0000096116 = 2\pi \times 0,0000099654$$

Soit environ

$$2\pi \times 0,00001$$

Venons-en à la nébuleuse primitive, d'une masse égale à celle du Soleil actuel, uniformément distribuée et étendue jusqu'aux confins du système. Si elle avait un rayon égal à l'orbite de Neptune avec une vitesse égale à celle de la révolution de la même planète, elle aurait dû avoir un moment total égal à $2\pi \times 0,00604$, soit 600 fois plus grand que le moment total actuel. « On voit quelle énorme condensation il faut accepter pour réduire le moment d'inertie à la six-centième partie de ce qu'il eût été dans le cas de l'homogénéité », observe Fouché [101]. Pourtant, la division de la nébuleuse en deux parties avec de différentes densités, un noyau d'une énorme condensation et une atmosphère raréfiée, n'aurait pas suffi pour sauver l'hypothèse de Laplace, à moins

100. Fouché, *cit.*, p. 904.
101. Fouché, *cit.*, p. 905.

de supposer ou bien l'existence des masses supplémentaires d'une quantité considérable, jusqu'ici inconnues et dont il faudra expliquer la formation, ou bien un moment d'inertie beaucoup plus grand que l'estimation [102]. Et Fouché de conclure qu'« il y a là une difficulté très sérieuse contre la théorie de Laplace [103] ».

Penser l'univers dans le monde. Conclusion provisoire de la première partie

Le passage « Du monde clos à l'univers infini » procède d'abord par la géométrisation de l'espace ou, en d'autres termes, l'identification de l'espace physique avec l'espace géométrique. Chez Descartes, tout est espace, et tout phénomène s'explique par le mouvement, entendu au sens cinématique, c'est-à-dire géométriquement. Or, tout mouvement, comme toute position, est relatif ; il est déterminé par rapport à d'autres corps ou à d'autres mouvements. Newton rétablit de son côté, une conception de l'espace séparée de celle du corps. L'espace se trouve ainsi attribué d'une réalité distinguée du corps et ceci revient à fonder la réalité et la possibilité même du mouvement, qualifié par Newton d'« absolu », c'est-à-dire *réel* et indépendant du référentiel. Qu'il soit relatif ou absolu, une chose est sûre : le cosmos grec n'a plus de place et laisse sa place à l'espace géométrique.

Se posent des problèmes cosmologiques relatifs à l'espace, comme l'infinité ou la finitude de l'univers. Depuis Bruno, tout le monde est pratiquement infinitiste [104]. Descartes ne fait pas exception : une fois établie sa doctrine de *res extensa*, nous l'avons vu, il affirme que la matière et l'espace sont *indéfinis*. Or, tout le monde n'en finit pas avec la géométrisation de l'espace, au moins avec l'identification de l'espace avec l'étendue : la matière « résiste » en quelque sorte à la confusion avec l'espace ; elle empêche d'infinitiser celui-ci par se soumettre à la gravitation. Newton, de son côté, interrogé par Bentley, réfléchit sur le problème et affronte un dilemme : si la matière est finie dans un espace infini, elle finit par se réunir en une sphère ; si elle est infinie, elle se heurte à l'équilibre gravitationnel.

102. Fouché, *cit.*, pp. 905-906.
103. Fouché, *cit.*, p. 906.
104. « [P]resque *toutes* les grandes philosophies de ce [XVIIe] siècle se rallièrent à l'infinitisme métaphysique et cosmologique nouvellement élaboré, bien que ce fût sous des formes diverses et variées. L'univers illimité était devenue désormais *pensable* sans contradiction, alors que l'idée même d'un univers borné paraissait au contrairement purement inconcevable. » Seidengart, *Dieu, l'univers et la sphère infinie*, p. 566.

Le sens même de la notion de mécanique a connu un changement radical, comme le signale Newton dans la préface des *Principia*[105]. Traditionnellement, la mécanique se divisait en deux : du côté théorique, elle appartenait aux sciences mathématiques, empruntant à la géométrie d'Euclide le modèle de système déductif ; du côté pratique, elle se rapportait à la mesure des grandeurs ou à la construction des machines en tant qu'« art », non sans se subordonner à la géométrie pour garder la rigueur. Newton en vient à renverser le rapport en mettant la mécanique au-dessus de la géométrie : c'est désormais à la géométrie de faire recours à la mécanique pour la description de ses propres objets, qu'ils soient lignes ou figures, ainsi que pour la solution de ses problèmes. La mécanique est ainsi érigée en une science du mouvement en général, « la science démonstrative des mouvements qui résultent des forces quelconques, des forces nécessaires pour engendrer des mouvements quelconques »[106].

Dans les derniers chapitres, nous avons caractérisé l'âge classique par le détournement de la pensée cosmologique et la préoccupation au problème cosmogonique, tout ceci conformément à la conception mécaniste. Le monde subit une évolution et cette évolution est un processus mécanique. Si les phénomènes actuels s'expliquent par la mécanique, il en doit être de même leur *origine* ; il n'y a pas de différence ontologique entre l'état initial et l'état final, il n'y a pas, non plus, de différence *méthodologique* dans les explications. Mais jusqu'où ira le mécanisme ? Newton renonce à assigner une cause mécanique à l'origine du monde ni à son état actuel qui est stable, mettant un frein un projet des *Principes de la philosophie* de Descartes, mais, en même temps, laissant une lacune dans le le « Système du monde » de ses *Principia*.

Kant et Laplace tentent de combler cette lacune avec leur hypothèse cosmogonique, pour finir par réaliser le rêve cartésien d d'une cosmologie mécaniste. Ils posent un état primitif qui, qu'il soit sous forme de chaos ou déjà doté d'un certain ordre, ne diffère pas de l'état actuel, pour cette raison qu'il est composé des mêmes éléments et gouverné par les mêmes principes de la mécanique. Mais ils finiront par un détour, pour ne pas dire un rejet (Kant) ou bien une ignorance (Laplace), des problèmes cosmologiques ; voies suivies jusqu'au bout par Comte et Cournot.

> Et, d'ailleurs très progressivement, cette science cosmologique se perd. Elle est remplacée par autre chose, et précisément par autre chose qui n'est pas une cosmologie. C'est-à-dire que, dans l'évolution des idées, à partir de la révolution copernicienne qui n'est

105. Sur le sens de la mécanique, voir Balibar et Toncelli, *Einstein, Newton, Poincaré*, pp. 104-111 ; Christiane Vilain (2009), *Naissance de la physique moderne : méthode et philosophie mécanique au XVIIe siècle*, Paris : Ellipses, pp. 33-37, pp. 163–166 et *passim*.

106. Newton, *Principia*, p. xv. Passage cité d'après la traduction revue dans Balibar et Toncelli, *Einstein, Newton, Poincaré*, p. 106.

> que le début, ce qui se produit, ce n'est pas la substitution d'une cosmologie à une autre, c'est la substitution d'une non-cosmologie à une cosmologie [107].

La thermodynamique aurait pu changer la donne. Elle a donné effectivement naissance à un programme de recherche cosmologique, avec une série de nouveaux problèmes, dont l'origine de la chaleur du Soleil, mettant en cause la « valeur paradigmatique » de la mécanique classique [108]. Les progrès de l'observation encouragent les théoriciens à faire de la cosmologie à leur manière, tantôt par appliquer la méthode statistique pour le recensement des objets célestes, tantôt par réconcilier la cosmologie et la mécanique newtonienne. L'immense progrès de l'observation encourage les théoriciens à faire de la cosmologie à leur manière, soit par appliquer la méthode statistique pour le recensement des objets célestes, soit par réconcilier la cosmologie et la mécanique newtonienne. La géométrie non euclidienne suscite quant à elle des débats au sujet de la forme géométrique de l'univers, mais aussi des réflexions épistémologiques sur la notion même d'espace, la nature des axiomes géométriques ou le rapport de ceux-ci avec l'expérience. Nous avons vu aussi comment l'univers « surgit » au milieu des discussions sur les deux principes de la thermodynamique, surtout le second, ou bien sur les géométries non euclidiennes.

> L'idée cosmologique, qui courait souterraine sous l'énoncé de principes généraux de la nature [...], réapparait plus explicitement comme une désignation de l'Univers physique, quoique *sur le mode du possible*, vers la fin de la période « classique » de la physique [109].

Cet univers sur le « mode du possible » se trouve « réalisé » en quelque sorte dans l'univers « du discours » : si l'univers ne fait pas directement l'objet des discours, mais il y a des discours qui font appel à l'univers, que ce soit sur la nature de l'espace et des axiomes des géométries ou sur les fondements de la mécanique ou de la physique, mais, surtout, dans les discussions relatives à la loi.

Les lois de la mécanique et de la physique comme la loi de la gravitation sont-elles des vérités nécessaires ou contingentes ? Telle est la préoccupation des esprits du XVIIIe siècle, sinon de tout l'âge classique. Une loi établie sur la base des phénomènes observés est qualifiée d'« universelle », c'est-à-dire identique toujours et partout dans l'univers, susceptible de prédire l'avenir ainsi que de remonter au passé, applicable tant au monde terrestre qu'au monde

107. « Une idéologie cosmique est-elle possible au XXe siècle ? », Merleau-Ponty, *Sur la science cosmologique*, p. 41.
108. Merleau-Ponty, *La science de l'Univers à l'âge du positivisme*, pp. 211-212.
109. Michel Paty (2004), « Le cosmos avant Einstein », *Ciel et espace. Hors-série* : *Einstein, l'homme qui a inventé l'Univers*, p. 33. C'est moi qui souligne.

céleste. Rien ne semble donc plus naturel que de les étendre pour couvrir un domaine plus large dans l'espace et dans le temps, des molécules à l'univers, du premier instant jusqu'à son futur. L'univers, aussi vaste et aussi varié soit-il, ne doit pas s'éloigner autant de notre petit système solaire, en ceci que tous ces mondes sont semblables au nôtre, surtout en ce qu'ils sont gouvernés de la même manière que le nôtre, c'est-à-dire par la même loi que la nôtre qu'est la loi de la gravitation. La gravitation est universelle au sens où c'est une loi valide *dans* l'univers, sans pour autant être la loi *de* l'univers, « plus comme la clé universelle pour l'analyse de mouvement que le principe d'ordre qui façonne et maintient la *facies totius universi*[110] ».

Dans la première partie, j'ai parcouru l'histoire de la cosmologie à l'âge classique, de Descartes jusqu'aux cosmogonistes au tournant du vingtième siècle, cités dans les *Leçons*, en passant par Kant, Laplace, Comte et Cournot. Dans la seconde partie, je parcourrai l'œuvre de Poincaré, notamment la partie philosophique de cette œuvre, écrite à diverses occasions et recueillie par les propres soins de son auteur dans les livres comme *La science et l'hypothèse*, sans pour autant me dispenser d'étudier le versant scientifique, les deux étant difficiles à séparer chez lui.

110. Merleau-Ponty, *La science de l'Univers à l'âge du positivisme*, p. 117.

Deuxième partie

Vers les *Leçons*

Philosophie entre mécanique et physique. Discours préliminaire

1 Caractéristiques de la philosophie de Poincaré

Poincaré était-il philosophe ? Y avait-il une philosophie chez lui ? « Qu'elle soit dogmatique ou critique, qu'elle consente à la relativité de notre connaissance ou qu'elle prétende s'installer dans l'absolu, une philosophie est généralement l'œuvre d'un philosophe, une vision globale et unique du tout. Elle est à prendre ou à laisser [...] La philosophie ne peut être qu'un effort pour se fondre à nouveau dans le tout », dit Henri Bergson dans *L'évolution créatrice*[1]. Si l'on tient à cette définition, on pourrait dire que Poincaré était bel et bien philosophe, et son œuvre, une philosophie. En effet, ne s'efforçait-il pas tout au long de sa carrière, probablement pas de « se fondre » dans le tout, mais au moins de s'approcher de ce même tout et d'en avoir une « vision globale et unique » ?

S'il était philosophe, il ne l'était pourtant pas de formation ni de profession. Il n'a pas procédé de la même manière que les philosophes comme Platon, Kant ou Hegel, ces philosophes qui ont bâti leurs systèmes à partir des études solides de l'histoire de la philosophie. C'était un « autodidacte » en la matière, qui « éprouvait à l'égard des systèmes une méfiance particulière » comme le dit Pierre Boutroux, le neveu du mathématicien et lui-même mathématicien[2]. Ses pensées se sont nourries des relations qu'il entretenait avec les philosophes, qu'ils soient ses proches comme Emile Boutroux, son beau-frère (et père de Pierre), ou ses correspondants comme Russell, Dedekind ou Le Roy, avec qui il débattait du fondement des mathématiques ou des caractères des lois de la physique. Il n'a pas laissé des œuvres comme *Critique de la raison pure*

1. Henri Bergson (1907), *L'évolution créatrice*, Paris : P. U. F., pp. 192-193.
2. Pierre Boutroux (1914), « L'œuvre philosophique », in *Henri Poincaré. L'œuvre scientifique, l'œuvre philosophique*, Paris : F. Alcan, p. 205.

ou *Phénoménologie de l'esprit* qui sont des « monuments » de l'histoire de la philosophie ; il a légué des écrits plus ou moins disparates, composés à diverses occasions et sous diverses formes, avant d'être réunis dans ses ouvrages philosophiques.

La pensée de Poincaré se caractérise, entre autres, par la *critique* des sciences qu'il pratique lui-même, un « exercice de réflexion critique » comme J. Gray la note qui, au lieu de partir d'une problématique prédéterminée, s'effectue en fonction de la *situation*[3]. Elle ne se rapporte à des discussions philosophiques que « lorsqu'elles s'imposent à partir des problèmes rencontrés et n'a jamais besoin de s'appuyer sur d'autres autorités que la science, à savoir celle de sa propre raison aux prises avec l'évolution de la science qui lui est contemporaine[4] », comme le remarque H. Barreau. Au lieu de « se fondre dans le tout » ou bien même de tenter « une vision globale et unique du tout » à la manière de Bergson, elle part des *exemples concrets* rencontrés dans les sciences que le savant connaissait puisqu'il les pratiquait lui-même, faisant référence à l'histoire des *sciences* plutôt qu'à l'histoire de la philosophie ; elle se limite à des problèmes ou thèmes plutôt restreints : le fondement de chaque science, ou, selon les propres expressions du mathématicien, les « conditions » dans lesquelles travaille le savant, qu'elles soient les notions (l'espace, le temps...) ou les principes de base (le principe de continuité...), les méthodes (l'induction, l'usage d'hypothèses...) ou bien le travail effectif du savant (soit décrivant le « savant à l'œuvre », soit en s'autoanalysant lui-même).

On a eu beau généraliser cette philosophie et l'assimiler à tels ou tels courants de pensée, que ce soit le kantisme, l'intuitionnisme, l'idéalisme, sans oublier le conventionnalisme. On a fini par s'apercevoir qu'il n'en est rien ou il est tout à la fois. Et pour cause : il n'y a pas qu'une seule philosophie chez Poincaré, mais plusieurs ; une philosophie pour l'arithmétique, une autre pour la géométrie, encore une autre pour la physique, Jules Vuillemin l'a dit : « [c]onventionaliste [*sic*] en Géométrie, Poincaré ne l'est ni en Arithmétique ni en Physique[5] ».

C'est sans doute par la notion de convention que « Poincaré s'engage véritablement sur le terrain philosophique » et que « sa position devient alors

3. « Philosophy, as Poincaré saw it, is an exercise in critical reflexion on the essential features of a situation. It is interested in analyzing the situation, and as interested in analyzing the analysis, and asking why do we think this way about this problem. » Jeremy Gray (2006), « Poincaré - Between Physics and Philosophy », in *The Kantian Legacy in Nineteenth-Century Science*, sous la dir. de Michael Friedman et Alfred Nordmann, Cambridge, M.A. et London : MIT Press, p. 295.

4. Hervé Barreau (1987), « Temps et espace-temps chez Henri Poincaré », in *Cahiers d'histoire et de philosophie des sciences*, Centre universitaire de Luxembourg - Société française d'histoire des sciences et des techniques, t. 23, p. 2.

5. Introduction in *VS*, p. 8.

pleinement originale[6] ». Pourtant, si elle demeure le concept clé de sa philosophie, ce n'est pas au sens fondateur ni réducteur, mais au sens *transversal*. La convention n'est pas ce sur quoi se « fonde » tout un système philosophique ou ce à quoi se réduisent tous les éléments du système. Elle est plutôt une sorte de passepartout, permettant de transgresser d'une science à une autre, de la géométrie à la physique, en passant par la mécanique, incarnée sous divers noms (principe, hypothèse, loi...) et accompagnée du changement de sens et de rôle, même de validité. Que la notion ne soit pas utilisée de manière cohérente, ni même clairement définie dans ses textes, ce serait là, pour les uns, une preuve de l'éclectisme qui était le sien, et pour les autres, surtout, aux yeux philosophiques, d'un usage de concepts qui peut paraitre quelque peu « sauvage ». Pourtant, c'est précisément une telle équivoque qui incite Poincaré à approfondir ses pensées sur les rapports et les analogies entre les mathématiques et la physique.

La géométrie était le point de départ de la philosophie poincaréenne[7]. Depuis son premier écrit à caractère philosophique sur « Les hypothèses fondamentales de la Géométrie » de 1887, elle demeurait le sujet de prédilection chez le mathématicien : il participait activement aux discussions autour des géométries non euclidiennes, en plein essor à l'époque, tout en approfondissant ses réflexions et en les élargissant à d'autres domaines, jusqu'à construire une doctrine philosophique que l'on nommera le conventionnalisme. Mais cette doctrine ne correspond pas à sa conception de l'arithmétique, à laquelle l'on n'aurait pas tout à fait tort d'attribuer l'intuitionnisme (quoique la notion d'intuition ne prenne pas son sens habituel), contrairement à celle de la géométrie. La mécanique de son côté ne serait pas dépourvue du conventionnalisme chez lui, mais pas tout à fait de la même manière que la géométrie ou, encore moins, la physique.

Cette philosophie a été et encore est qualifiée d'une « épistémologie locale », en ce sens qu'elle ne dispose pas de théorie unique ou unificatrice et réserve à chaque science une épistémologie qui lui est propre. On pourrait tenter tout de même, suivant la « maxime » de Vuillemin pour la lecture des auteurs du passé, à savoir celle de « supposer éveillée leur attention à la cohérence systématique[8] », qu'il n'est pas impossible de restituer des éléments relativement constants et stables (« invariants ») et de reconnaître un « isme » – l'intuition-

6. Brenner, *Les origines françaises de la philosophie des sciences*, p. 40.
7. Gray, *Henri Poincaré*, p. 34 *sqq.*
8. *Le Dieu d'Anselme et les apparences de la raison*, Paris : Aubier, 1971, p. 173, cité d'après Eric Audureau (2005), « Cosmologie et classification des systèmes philosophiques », in *Philosophie des mathématiques et théorie de la connaissance. L'œuvre de Jules Vuillemin*, sous la dir. de Roshdi Rashed et Pierre Pellegrin, Paris : A. Blanchard, p. 149.

nisme en l'occurrence, dont le conventionnalisme serait une « conséquence » [9].

Dans ce qui suit, je tenterai de montrer qu'il existe chez Poincaré bel et bien une philosophie qui constitue un *système* qui lui est propre, avec une « cohérence systématique », et les trois ouvrages édités par Poincaré lui-même, *La science et l'hypothèse*, *La valeur de la science* et *Science et méthode*, un *corpus* ou une seule et même *œuvre*, de façon à assurer l'unité de la philosophie [10].

2 Formation et développement des idées

2.1 Rapport comme un style philosophique

A l'aube du XXe siècle, les lieux de savoir subissent un changement radical. Libérés du monopole de l'Académie des sciences et des universités, ces lieux se multiplient et se diversifient, en s'étendant aux sociétés savantes et d'autres en marge, ainsi que des réunions publiques et internationales. Un savant ne peut plus rester isolé dans sa tour d'ivoire et indifférent au grand public ; au lieu de se contenter de donner ses cours universitaires ou de travailler tranquillement et solitairement dans son bureau, il a désormais à délivrer des conférences publiques ou à intervenir à des congrès scientifiques, nationaux ou internationaux. Et ceci non seulement pour des raisons circonstancielles et sociales, mais aussi du fait même du progrès de la science. Poincaré décrit bien cette situation qu'il connait peut-être mieux que quiconque.

> A mesure que la science se développe, il devient plus difficile de l'embrasser tout entière ; alors on cherche à la couper en morceaux, à se contenter de l'un de ces morceaux ; en un mot, à se spécialiser. Si l'on continuait dans ce sens, ce serait un obstacle fâcheux aux progrès de la Science. Nous l'avons dit, c'est par des rapprochements inattendus entre ses diverses parties que ses progrès peuvent se faire. Trop se spécialiser, ce serait s'interdire ces rapprochements. Espérons que des congrès comme ceux de Heidelberg ou de Rome, en nous mettant en rapport les uns avec les autres, nous ouvriront des vues sur le champ du voisin, nous obligeront à le comparer

9. Eric Audureau (2004), « Le conventionnalisme, conséquence de l'intuitionnisme », *Philosophiques*, 31, 1, pp. 61-63.

Ces éléments sont les suivants : la connaissance est une faculté du moi ; il n'y a pas d'infini en acte ; la logique est stérile ; l'ordre de la succession préexiste à celui de la coexistence (priorité du temps sur l'espace) ; la connaissance physique est subordonnée à la connaissance mathématique, et la cosmologie dépasse les possibilités de la connaissance positive.

10. *Dernières pensées* est une publication posthume, éditée par L. Daum. Voir *supra*, Ouverture.

> au nôtre, à sortir un peu de notre petit village ; ils seront ainsi le meilleur remède au danger que je viens de signaler [11].

Une telle situation ne sert pas seulement à remédier le danger de l'isolement et de la spécialisation, mais aussi à *réfléchir*, pour ne pas dire à *philosopher*. On se demanderait si les congrès représentent une circonstance spécialement favorable à la spéculation philosophique. Un congrès, c'est pour lui un moment de bilan et de réflexion, une occasion d'élaborer une nouvelle « manière de travailler et même de penser », comme le dit Vito Volterra dans un hommage fait à son collègue désormais regretté :

> Le temps presse ; on craint qu'à la minute suivante la découverte ne soit perdue. Mais les communications des Congrès, qu'on n'a pas même le loisir de rédiger, ont dépassé en rapidité les comptes rendus des Académies et des Sociétés savantes. On veut savoir ce qu'on n'a pas encore fait. On dit ce qu'on espère trouver. On expose ce qu'on n'aura jamais le courage d'imprimer. Ce mouvement a créé un état d'âme particulier des savants et a transformé leur vie, leur manière de travailler et même de penser. [...] Poincaré fut un savant moderne dans toute l'acception du mot. Il n'y eut ni Congrès, ni réunion scientifique où sa parole ne se fit entendre [12].

Prenons le Poincaré au mois d'août de l'an 1900. Paris accueille le monde entier pour les congrès internationaux qui tiennent lieu à l'occasion de l'Exposition universelle [13]. Le premier Congrès international de philosophie a lieu du 1 au 5 août, présidé par E. Boutroux. Il est immédiatement suivi du deuxième Congrès international des mathématiciens et du Congrès de physique, tenus du 6 au 12 août et présidés respectivement par notre mathématicien lui-même et par le physicien Alfred Cornu. Poincaré est sollicité par tous les trois congrès et obligé de rédiger trois discours en même temps, comme il en témoigne dans une lettre adressée à Louis Olivier, l'éditeur de la *Revue générale des sciences* :

> Je ne crois pas que l'article en question sera d'une longueur démesurée, mais je crains qu'il n'y ait beaucoup de redites avec l'article qui a paru antérieurement dans la Revue. Nous en jugerons mieux quand il sera terminé.
>
> Il pourrait peut-être y introduire des développements nouveaux que je ne pourrais donner en m'adressant à un public moins scientifique que celui de la Revue. Cela serait plus intéressant pour vos lecteurs.

11. « L'avenir des Mathématiques ». Discours au Congrès des mathématiciens, Rome, 1908, repris in *SM*, pp. 34-35. Sur ce discours, voir Gray, « Poincaré - Between Physics and Philosophy », pp. 296-297.

12. Vito Volterra (1914), « L'œuvre mathématique », in *Henri Poincaré. L'œuvre scientifique, l'œuvre philosophique*, Paris : F. Alcan, pp. 6-8.

13. Sur ces congrès, voir Umberto Bottazzini (2002), *Poincaré : philosophe et mathématicien*, Paris : Belin, pp. 24-30 ; Richard Staley (2008), *Einstein's Generation : The Origins of the Relativity Revolution*, Chicago : University of Chicago Press, pp. 174-179 ; Gray, *Henri Poincaré*, p. 59, *sqq.*

> [...] Je dois vous avertir que je fais en outre deux articles analogues (ou conférences). L'un pour le Congrès de Physique sur les rapports de la Physique Mathématique ou de la Physique Expérimentale. L'autre pour le Congrès de Mathématiques sur le rôle de la Logique et de l'Intuition dans la Science Mathématique. Quand ils seront écrits, vous pourrez juger quel est celui de ces articles qui vous convient le mieux [14].

Le premier article en question, c'est « Sur les principes de la mécanique ». Destiné au Congrès de philosophie, il sera lu le 2 août à la séance « Logique et histoire des sciences », présidée par Poincaré lui-même [15]. Une fois le congrès terminé, l'article sera envoyé à Xavier Léon, l'éditeur de *Revue de métaphysique et de morale*, avec un mot de la part de l'auteur : « Je crains qu'il ne soit trop long et je vous prie de me dire franchement votre sentiment à ce sujet [16]. » La publication dans la revue ne sera pas aboutie en fin de compte, mais ceci ne sera pas à cause de sa longueur ou de sa difficulté, mais pour une raison éditoriale : *Revue de métaphysique et de morale* publiera un numéro spécial pour le mois de septembre dédié au Congrès en question, qui rend compte de toutes les interventions et discussions, y compris celle de Poincaré. Les contributions elles-mêmes seront recueillies dans les actes du même Congrès, publiés entre 1900 et 1903, « Sur les principes de la mécanique » de notre mathématicien inclus [17].

Le discours préparé pour le Congrès de physique, intitulé « Les relations entre la physique mathématique et la physique expérimentale », sera prononcé le 7 août, à la première séance du Congrès de physique. Il sera repris intégralement dans *Revue générale des sciences* et dans *Revue scientifique*, et aussi dans le premier tome des actes officiels du congrès, *Rapports présentés au Congrès international de physique*, tous parus en 1900 [18]. Quatre ans après, Poincaré

14. Lettre à Louis Olivier, [Avant le 01.08.1900], Archives Henri Poincaré.

15. « Compte rendu du Congrès international de philosophie », *Revue de métaphysique et de morale* 8 (1900), numéro spécial, p. 556–561. Voir aussi le compte rendu d'André Lalande paru dans *Revue philosophique* 50, 7 (1900), p. 490–492.

16. Lettre 13, datée de 1900, cité in Rollet, *Henri Poincaré, des mathématiques à la philosophie*, p. 380. « Si, *continue Poincaré*, M. Couturat a l'occasion de le lire, je serais heureux qu'il voulût bien me dire s'il a trouvé certains passages obscurs et s'il est nécessaire de donner quelques éclaircissements. » Couturat fut l'organisateur de la section « Logique et histoire des sciences », section centrale du congrès. Lettre à Xavier Léon, Archives Henri Poincaré. La réponse de Léon reste inédite.

17. Henri Poincaré (1901b), « Sur les principes de la mécanique », in *Bibliothèque du Congrès internationale de philosophie*, Paris : A. Colin, t. 3.

18. Henri Poincaré (1900b), « Relations entre la physique expérimentale et la physique mathématique », in *Rapports présentés au congrès international de physique*, sous la dir. de Charles-Édouard Guillaume et Lucien Poincaré, Paris : Gauthier-Villars, t. 1. *Revue générale des sciences pures et appliquées* 11, p. 1163 –1175 et *Revue scientifique* 14, p. 705 – 715. Signalons une traduction anglaise qui est parue d'abord en résumé (*Scientific American* 83, 1900, p. 282), puis dans son intégralité (*Monist* 12, 1902, p. 516–557).

reviendra au même sujet, à peu près dans le même cadre : à l'occasion du *Congress of Arts and Science* à Saint-Louis aux Etats-Unis, auquel il participe avec P. Langevin en tant que membre de la délégation française, il prononce une conférence qui a pour titre « L'état actuel et l'avenir de la physique mathématique » dans la section « Applied Mathematics » du congrès [19].

Le troisième article, « Le rôle de l'intuition et de la logique en mathématiques », sera lu le 11 août au Congrès international des mathématiciens. C'est un deuxième congrès qui fait suite à celui qui s'est tenu à Zürich trois ans avant, où il a fait un discours intitulé « Sur les rapports de l'Analyse pure et de la Physique mathématique », publié par la suite dans plusieurs revues dont la prestigieuse *Acta mathematica*. Contrairement à ce dernier discours, la conférence de 1900 ne sera publiée que dans *Compte rendu du IIe Congrès international des Mathématiciens* paru chez Gauthier-Villars en 1902, sans connaitre aucune autre reprise. La raison en est, parait-il, qu'elle n'est visiblement pas aussi retentissante que les deux autres discours à l'adresse des philosophes et des physiciens, ni aussi marquante que la célèbre conférence de Hilbert au même congrès, « Problèmes futurs des mathématiques », ou bien même sa propre intervention précédente à Zürich.

Ne serait-il pas possible de faire une typologie des « rapports » ? Du célèbre rapport de Duruy de 1868 sur l'enseignement supérieur, aux rapports des philosophes comme Ravaisson, Boutroux et Bergson, il existe en France une tradition particulière de la production tantôt bureaucratique tantôt académique, dans laquelle les « rapporteurs » ne se contentent plus du rôle plutôt passif, seulement soucieux d'être fidèle à ce qu'ils ont à rapporter. On pourrait dire que les rapports de Poincaré font partie de cette tradition, mais là, comme toujours, pas de la même manière. Pour son allocution annuelle de 1903 à la Société astronomique de France, délivrée en qualité du président, il ne se contente pas de faire un état des lieux sur les progrès de l'astronomie de l'année coulée, comme le veut la tradition de la Société à laquelle il est resté fidèle l'année précédente, il développe ses propres réflexions philosophiques et historiques au sujet de cette science [20]. Il arrive à Poincaré de créer, de ces

19. Henri Poincaré (1904), « L'état actuel et l'avenir de la physique mathématique », *Bulletin des sciences mathématiques*, 28. Aussi dans les actes du Congrès, sous le titre « The Principle of Mathematical Physics », p. 604–622, traduit par G. B. Halsted, traducteur de *La science et l'hypothèse*.

20. « L'usage impose au président de la Société astronomique, une allocution annuelle sur les progrès récents de l'Astronomie. En 1902, Poincaré sacrifia à la mode, mais l'année suivante, il modifia son cadre et fit son discours sous le titre : *Grandeur de l'Astronomie*. Bull. de la Société, juin 1903. Reproduit dans l'ouvrage : La valeur de la Science. » Auguste Lebeuf (1913), « Astronome », *Revue de métaphysique et de morale*, 21, 5, p. 669.

Les deux interventions en question sont : Poincaré, « Les progrès de l'astronomie en 1901 » ; Henri Poincaré (1903b), « Grandeur de l'astronomie », *Bulletin de la Société as-*

rapports, une *manière* de penser et aussi une *matière* à penser.

2.2 Physique mathématique comme un problème philosophique

L'une des préoccupations philosophiques de Poincaré consiste dans le rapport entre les mathématiques et la physique, encore plus précisément, dans les « relations entre la physique mathématique et la physique expérimentale ». Il est hors de doute que la physique est une science tout aussi *expérimentale*, sinon plus, que la mécanique. Mais qu'en est-il de la physique *mathématique* ?

Suzanne Bachelard construira tout un programme philosophique à partir du problème de la distinction entre la physique théorique et la physique mathématique [21]. La distinction perd sens, dit-elle, « le couplage entre mathématique et physique est désormais si serré, les intuitions entre physique théorique et physique mathématique sont si corrélatives qu'on ne peut plus penser la physique elle-même sans penser mathématiquement [22] ». Pourtant, les deux physiques ne s'en distinguent pas moins l'une de l'autre par les *méthodes* ou « l'*attitude* d'esprit qui les dirige », mais surtout par les « intentions » de la « conscience de rationalité assurée » [23]. La physique théorique se préoccupe principalement de la confrontation avec l'expérience dans laquelle les mathématiques servent essentiellement d'instrument ; la physique mathématique se caractérise par la déduction mathématique d'une part, et d'autre part, la « conversion » de l'empirique par le rationnel. A tel point qu'elles sont plus qu'un instrument, mais elles-mêmes un objet, même l'objet principal, un « *thème primaire* », où « l'instrument » se perfectionne par lui-même et pour lui-même. D'où vient une « instrumentalité d'un type nouveau » aux mathématiques, comme un « instrument *polyvalent* » [24], instrument qui a ceci de particulier qu'il indique lui-même voire crée le but et le moyen d'y atteindre, au lieu de rendre service à une fin particulière qui ne lui est pas intrinsèque. « Il est l'index d'une communauté de structure qui, sans lui, ne pourrait se manifester. Le moyen est devenu méthode [25]. »

Ce serait peut-être une problématique qui ne serait pas très pertinente aux yeux modernes. Pourtant, jusqu'à la fin du XIXe siècle, il était coutume de

tronomique de France, 17, repris in *VS*, chapitre VI.

21. Suzanne Bachelard (1958), *La conscience de rationalité. Etude phénoménologique sur la physique mathématique*, Paris : P. U. F.
22. S. Bachelard, *cit.*, p. 19.
23. S. Bachelard, *cit.*, p. 30.
24. S. Bachelard, *cit.*, pp. 31-33.
25. S. Bachelard, *cit.*, p. 33

ranger la physique mathématique parmi les sciences *mathématiques* et de la distinguer de la physique *théorique* qui est quant à elle une science *physique* par excellence. Au tournant du XXe siècle la démarcation ne va plus de soi et apparait une certaine tension entre mathématiciens et physiciens, comme le montre la « bagarre » entre eux lors de la nomination de Poincaré à la chaire de la physique mathématique à la Sorbonne.

L. de Broglie écrira, pour le centenaire de la naissance de Poincaré, combien la figure de ce dernier était emblématique en la matière. Selon de Broglie, la physique mathématique cherche à examiner et critiquer les théories physiques déjà construites, le plus souvent menée par les mathématiciens pour parfaire les démonstrations et apporter de la rigueur. De quoi « Poincaré, mathématicien de haute classe, esprit pénétrant et critique, était particulièrement désigné pour s'occuper avec fruit [26] ». En revanche, la physique théorique consiste à rendre compte des faits de l'expérience et à en construire des théories. Une bonne connaissance en mathématiques lui est nécessaire, mais elle n'est pas aussi essentielle que la connaissance sur les faits eux-mêmes. « [E]lle exige une grande connaissance des faits expérimentaux et surtout une sorte d'intuition physique que tous les mathématiciens ne possèdent pas [27]. » Poincaré, lui, il la possédait et excellait dans ce domaine ; surtout il continuait de réfléchir à ce sujet, sans pour autant faire une distinction nette entre les deux, comme le dit de Broglie lui-même [28].

« Et pourtant, la physique mathématique existe ; elle a rendu des services indéniables ; il y a là un *fait* qu'il est nécessaire à expliquer [29], » déclare Poincaré au Congrès de physique à Paris. Une fois admise son existence, on s'interroge sur « les conditions qui ont permis le développement de la physique mathématique » [30]. Le même questionnement se posait par Kant dans la *Critique de la raison pure*, rappelons-le, au nom de la « *condition de possibilité* ». Avec cette différence que, le philosophe allemand entreprend une philosophie de la connaissance en général, cherchant dans ce qu'il y a d'a priori dans notre faculté de la connaissance et prenant la physique mathématique comme modèle, en particulier celle de Newton, tandis que l'analyse de notre mathématicien s'approche d'une philosophie de la physique qui étudie cette science plus di-

26. Broglie, « Discours du Prince Louis de Broglie », p. 73.
27. *ibid.*
28. « Certains auteurs ont distingué la Physique théorique de la Physique mathématique : c'est une distinction que Henri Poincaré lui-même dans ses célèbres livres de Philosophique scientifique (*La science et l'Hypothèse*, *La Valeur de la Science*, *Science et Méthode*, *Dernières pensées*) n'a jamais faite. Je crois cependant qu'elle correspond à quelque chose d'important. » *ibid.*
29. *SH*, p. 157. C'est moi qui souligne.
30. *SH*, p. 167.

rectement et génétiquement, prenant en compte le but et les méthodes qui sont effectivement poursuivis dans son développement.

Pour Poincaré, l'édifice de la physique repose sur deux piliers, l'un, expérimental et l'autre, mathématique, qui joue le rôle de « catalogue », généralisateur et classificateur des faits. C'est à l'expérience d'*enrichir* la physique, non aux mathématiques, tout comme la bibliothèque s'enrichit par les livres. De même que le catalogue sert à procurer à la bibliothèque de l'utilité, voire de la valeur de ses biens, la physique fait recours aux mathématiques pour généraliser et classer des données, afin de prédire, à partir de là, de nouveaux faits à venir [31]. Les mathématiques jouent un rôle important sans doute, mais est-il indispensable, voire nécessaire, sans quoi la physique serait impossible ? Elles sont bel et bien *nécessaires*, mais suffisent-elles à elles seules pour fonder la physique ? Il faut d'autres conditions qui les rendent applicables et, de plus, « efficaces », dans les sciences, et à cela consiste la condition de possibilité de la physique mathématique.

Chose curieuse, Poincaré appelle « origine » les conditions de possibilité dans *La science et l'hypothèse*. L'origine, ici entendue dans le sens transcendantal, prendra progressivement un autre sens, sens *historique*. Ainsi à Saint-Louis en 1904, les questions restent toujours les mêmes qu'en 1900, mais elles sont traitées en pleine conscience de crise.

> Quel est l'état actuel de la Physique mathématique ? Quels sont les problèmes qu'elle est amenée à se poser ? Quel est son avenir ? Son orientation est-elle sur le point de se modifier ? Le but et les méthodes de cette science vont-ils apparaitre dans dix ans à nos successeurs immédiats sous le même qu'à nous-mêmes ; ou au contraire allons-nous assister à une transformation profonde ? Telles sont les questions que nous sommes forcés de soulever, en abordant aujourd'hui notre enquête [32].

En 1900, l'« existence » de la physique mathématique ne faisait pas doute. Quatre ans plus tard, elle n'est plus considérée comme un fait incontestable, mais un fait *historique* : « La Physique mathématique, nous le savons, est née de la Mécanique céleste qui l'a engendrée à la fin du XVIIIe siècle, au moment où elle venait elle-même d'atteindre son complet développement [33]. » C'est que la physique mathématique n'a pas toujours existé ; elle a pour *origine*, au sens *historique* du terme, la mécanique céleste ; une fois née, elle n'en est pas restée, mais a connu une évolution ; elle est désormais en « crise » et probablement sur le point de traverser une transformation profonde. Pourtant, s'il s'agit

31. *SH*, p. 111.
32. *VS*, p. 123.
33. *ibid.*

bien d'une crise, l'histoire apprend qu'elle n'est pas la première. L'histoire est appelée aussi pour cette raison qu'« il importe, pour la comprendre, de se rappeler celles qui l'ont précédée[34] ». C'est pourquoi ce compte rendu de « l'état actuel et l'avenir de la physique mathématique » s'ouvre avec « un court historique ».

2.3 Histoire comme une méthode de philosphie

L'intérêt pour l'histoire n'a rien de nouveau chez Poincaré. Un an après avoir achevé sa thèse d'Etat, il publie une petite note supplémentaire à *La monadologie* de Leibniz, édition signée par E. Boutroux[35]. Il présente une interprétation originale de la fameuse controverse autour de la *vis viva* du XVIIe siècle, contenant ainsi en germe les critiques du mathématicien sur le fondement des principes de la mécanique. Cette œuvre de jeunesse témoigne de l'intérêt du mathématicien pour l'histoire, qu'on retrouve dans ses enseignements pour son rôle instructif, notamment dans le cours de thermodynamique.

> Pour expliquer par quelles raisons tous les physiciens ont été amenés à adopter ces deux principes, je n'ai rien trouvé de mieux que de suivre dans mon exposition la marche historique. Le spectacle des longs tâtonnements par lesquels l'homme arrive à la vérité est d'ailleurs très instructif par lui-même. On remarquera le rôle important joué par diverses idées théoriques ou même métaphysiques, aujourd'hui abandonnées ou regardées comme douteuses. Service singulier que nous a ainsi rendu ce qui est peut-être erreur ! [...] C'est ainsi que l'on débarrasse la voûte de ses cintres quand elle est complètement bâtie[36].

Dans son compte rendu général de l'Exposition universelle de 1900, E. Picard mentionnera deux modes d'exposition de la mécanique courants de son temps[37]. Les géomètres comme Largage ou Laplace, ainsi que les physiciens contemporains de Picard comme Boltzmann et Hertz, adoptent le mode « déductif », qu'on peut qualifier aussi d'axiomatique, construisant tout un système (« un ensemble de représentations ») à partir de quelques axiomes. Cette voie, la clarté et la systématicité de l'exposition sont garanties, mais « elle ne montre pas comment on a été conduit à échafauder la construction, et en cela ne satisfait pas l'esprit[38]. » Les principes de la mécanique sont eux-mêmes

34. *VS*, p. 124.
35. Henri Poincaré (1880), « Note sur les principes de la mécanique dans Descartes et dans Leibniz », in Gottfried Wilhelm Leibniz, *La monadologie*, éd. établie et annot. par Emile Boutroux, Paris : Delagrave.
36. Poincaré, *Thermodynamique*, Préface, p. XIV.
37. [Picard1903], chapitre II, « Mécanique et énergétique », pp. 19–34.
38. [20][Picard1903].

les résultats « la succession d'efforts et de tâtonnements des créateurs de la science du mouvement »[39], extrêmement généralisés après d'innombrables vérifications expérimentales. L'autre mode d'exposition, qualité d'« historique », rend compte de la marche historique de cette science. Malgré son caractère « à moitié inductif et à moitié déductif qui [lui] donne peu d'unité »[40], il a longtemps préféré et le sera encore : puisque les principes de la mécanique ne semblent pas aller de soi comme les axiomes de la géométrie, leur choix exige une explication, pour laquelle il parait difficile de trouver, comme le dit Poincaré, « de mieux que de suivre [...] la marche historique ».

L'étude des théories anciennes vient moins de la curiosité historique que du besoin pédagogique, de ce que « le spectacle de longs tâtonnements » est « instructif par lui-même ». Le mot « instructif » réapparait dans la préface à *Electricité et optique*, dont l'histoire est « particulièrement instructive à notre point de vue[41] ». En effet, l'histoire le domaine abonde en hypothèses, qu'elles soient sur la matière, l'éther, la lumière, dont une bonne partie s'avérera erronée. Pourtant, ces erreurs nous apprennent des choses si bien que « l'histoire de ces variations n'en sera pas moins instructive ; elle nous apprendra à quels pièges le savant est exposé, et comment il peut avoir l'espoir d'y échapper[42] ».

Mais il y a plus. Remonter à l'« origine » de la science en question, c'est une manière de comprendre et faire comprendre cette science. Tout enseignement de la mécanique doit être *expérimental*, dit-il, pour cette raison que « [c]'est ainsi seulement qu'il pourra nous faire nous faire comprendre la genèse de la science, et cela est indispensable pour l'intelligence complète de la science elle-même[43]. » Nous l'avons déjà noté, Poincaré a coutume de faire recours à l'histoire dans son enseignement : celui-ci ne doit pas se contenter de prodiguer ses résultats, mais a à transférer les *méthodes* et des dispositifs provisoirement employés pour obtenir ces résultats.

> La théorie de la chaleur de Fourier est un des premiers exemples de l'application de l'analyse à la physique ; en partant d'hypothèses simples qui ne sont autre chose que des faits expérimentaux généralisés, Fourier en a déduit une série de conséquences dont l'ensemble constitue une théorie complète et cohérente. Les résultats qu'il a obtenus sont certes intéressants par eux-mêmes, mais ce qui l'est plus encore est la méthode qu'il a employée pour y parvenir et qui

39. Emile Picard (1903), « Troisième partie : Sciences », in *Exposition universelle internationale de 1900 à Paris. Rapports du jury international*, Paris : Imprimérie nationale, t. 2, p. 23.
40. *ibid.*
41. *SH*, p. 227.
42. *SH*, p. 243.
43. *SH*, p. 153.

> servira toujours de modèle à tous ceux qui voudront cultiver une branche quelconque de la physique mathématique[44].

Le jeu entre l'actualité et l'historicité qui caractérisait l'enseignement des sciences chez Poincaré, notamment de celles qui sont « en train de se faire ». L'histoire s'ordonne en fonction de l'actualité des sciences actuelles qui, à leur tour, se dynamisent par le fait même de leur historicité. Sur ce point, G. Bachelard est plus proche de notre savant qu'il ne parait : il incite l'historien des sciences à prendre en compte les sciences dans leur forme la plus aboutie possible et dans leur état actuel. L'histoire des sciences, c'est une histoire « jugée », délibérément orientée et même biaisée. Un tel anachronisme, qui serait généralement un défaut pour un historien, devient chez lui à la fois un droit et une obligation. Il n'y a pas à restituer le passé tel quel, mais à le re*situer* dans la ligne du temps, ligne sur laquelle la science marche par sa propre logique et sa propre causalité, vers une organisation de plus en plus rationnelle[45]. On serait tenté d'aller encore plus loin et de penser au « devenir scientifique » dont parlait l'un des contemporains de Poincaré, L. Brunschvicg :

> [C]'est à la condition d'avoir compris d'abord la science qui agit et qui s'étend sous nos yeux, que l'on pourra, éclairé par elle, restituer au passé ce qui a été sa vie et son actualité, et suivre de là, dans son ordre naturel, la continuité du devenir scientifique. La philosophie mathématique entre alors en possession de son objet : entre les péripéties de l'invention qui n'intéresse qu'une invention individuelle, et les formes du discours qui concernent surtout la tradition pédagogique, elle délimitera le terrain où s'est produite l'acquisition collective du savoir ; elle reconnaitra la « voie royale » qu'y a tracée l'intelligence créatrice[46].

A partir du moment où « la connaissance se dynamise par le fait même de son historicité », un autre usage de l'histoire devient possible : elle reste d'actualité, tout en accomplissant une action positive sur la science actuelle, et ceci, de façon moins rétrospective que *constitutive*. Une fois prise en compte, l'actualité en vient à restituer le passé et à montrer la continuité du devenir de la science, ainsi que la « voie royale de l'intelligence créatrice », aux dires de Brunschvicg.

Toujours est-il que le jugement de l'historien sur le passé n'est jamais définitif une fois pour toutes. Et pour cause : l'actualité, qui est le critère du

44. Henri Poincaré (1895), *Théorie analytique de la propagation de la chaleur. Leçons professées pendant le premier semestre 1893-1894*, Paris : G. Carré ; reproduction en fac-similé (Paris : Jacques Gabay, 2008), p. 1.

45. Gaston Bachelard (1972a), « L'actualité de l'histoire des sciences », in *L'engagement rationaliste*, Paris : P. U. F., pp. 146-147.

46. Léon Brunschvicg (1993), *Les étapes de la philosophie mathématique*, introd. de Jean-Toussaint Desanti, Paris : A. Blanchard, pp. 458-459.

jugement, n'est-elle pas elle-même éphémère, toujours susceptible de changer ? Si l'histoire des sciences entretient un rapport avec l'actualité de son objet, rapport qui la rend dynamique et distinctive par rapport à d'autres histoires, ce rapport lui-même n'en est pas moins dynamique, surtout quand il s'agit d'une science qui n'est pas encore parvenue à sa maturité, en tout cas pas assez pour que son état actuel serve de critère de jugement. En revanche, devant une science « mure », l'historien est prêt à rectifier son jugement, à le refaire et le reconsidérer, bref l'*actualiser*. Mais comment peut-on savoir si une science atteint suffisamment sa maturité ? Est-il possible de le savoir ? Bachelard nous signale le danger qui guette une telle approche, délibérément anachronique, surtout quand il s'agit des sciences dites prématurées, celles qui n'ont pas conquis « cette hiérarchie des valeurs qui caractérise, en particulier, la science du XIXe et XXe siècle[47]. »

Il en serait de même pour les sciences récemment établies dont l'actualité n'est pas encore tout à fait « maitrisable », surtout pour l'historien, comme ce qui était déjà le cas du début du XXe siècle. Devant une science qui n'est pas encore accomplie, mais toujours en train de se faire et de se modifier, il vaut mieux se garder d'en faire l'histoire et de fonder sur elle un critère de jugement, justement parce que le rapport entre le passé et le présent serait, dans ce cas, susceptible de s'ébranler. Son histoire est elle aussi loin d'être fixe, sinon encore plus flexible que la théorie elle-même ; elle se fait et se refait en même temps que son objet, si bien qu'une théorie du passé peut s'actualiser, de même qu'une théorie récente est destinée à entrer tôt ou tard dans l'histoire.

Poincaré ne procède pas de l'actualité au passé, mais inversement, surtout quand il est question de rendre compte des sciences en train de se faire comme l'électrodynamique de son temps, dont l'actualité n'est pas encore faite et toujours en devenir. Il lui arrive d'insister sur « l'ordre historique de la genèse des conceptions », certes, mais ce n'est dans le but d'établir un fait historique : les commentaires historiques proprement dits restent limités, voire marginaux dans ses textes. Sans faire l'objet d'une recherche historique proprement dite, l'histoire est chez lui toujours construite et reconstruite dans un but précis, pour un besoin pédagogique, en particulier pour l'enseignement des théories actuelles. En somme, l'histoire, pour Poincaré, c'est une histoire *instrumentalisée*.

Pourtant, nous allons voir que l'histoire est évoquée pour une tout autre raison, c'est-à-dire par la nature même de la science en question : l'historicité des principes en mécanique, et surtout en physique, sera progressivement prise en compte dans la pensée de Poincaré avec le temps, mais aussi avec le dé-

47. G. Bachelard, « L'actualité de l'histoire des sciences », p. 144.

placement de son centre d'intérêt de la mécanique à la physique ainsi qu'avec l'évolution même de ces sciences.

3 Construction du corpus philosophique

Un autre moment philosophique venait quand Poincaré revenait à ses écrits précédents lors de l'édition des livres comme *La science et l'hypothèse*. Les réflexions qu'il faisait occasionnellement, aussi philosophiques soient-elles, seraient restées fragmentaires et n'auraient pas constitué une philosophie proprement dite si elles n'étaient pas mises au point et littéralement mises en *œuvre* dans ces ouvrages. Pourtant, si les sciences touchent à la même réalité, ce n'est pas toujours de la même manière. C'est pourquoi il n'y a pas qu'une seule science, mais plusieurs. C'est aussi pourquoi les sciences sont classables et effectivement classées.

La classification est loin d'être purement nominale dans la philosophie de Poincaré, servant elle-même d'« argument épistémologique » [48]. Elle se rapporte, dans un premier temps, aux *faits* qui font l'objet de chaque science et, dans un deuxième temps, à la *méthode* employée par celle-ci pour choisir et traiter ces faits. L'agencement de chapitres de ses ouvrages répond à l'exigence d'une telle raison classificatoire ; les tables des matières nous témoignent non seulement du système de savoirs tel qu'il est conçu généralement dans les premières années du XXe siècle, mais aussi de l'*évolution*, pour ne pas dire de la révolution, en train de se faire au même moment dans ces sciences au point de rendre caduque la classification classique.

Selon la classification classique, maintenue et restée dominante tout au long du XIXe siècle, de l'Académie des sciences aux Facultés des sciences, les sciences mathématiques comprennent les mathématiques dites pures (l'arithmétique, l'analyse, le calcul différentiel et intégral...) et les mathématiques appliquées telles que la mécanique (la mécanique analytique et la mécanique céleste) et l'astronomie (l'astronomie mathématique et l'astronomie physique). Les sciences physiques occupent une place relativement restreinte, de laquelle font partie la physique expérimentale, la chimie et la biologie. A quoi Poincaré demeure plus ou moins fidèle, mais, comme c'est souvent le cas chez lui, et ceci tout en suivant les changements vertigineux de chaque science et de l'ensemble

48. Brenner, *Les origines françaises de la philosophie des sciences*, p. 77. M. Friedman a souligné lui aussi sur l'importance de la série ou de l'hiérarchie que constituent les sciences. Michael Friedman (1995), « Poincaré's Conventionalism and the Logical Positivists », *Foundations of Science*, 1, 2.

du système de savoirs et en apportant quelques nouveautés. Tels ont été les cas de la mécanique et de la physique.

A première vue, ce sont des recueils de textes précédemment écrits et publiés qui ne demandent pas un grand effort éditorial sinon pour des choses purement formelles, sans modifier le contenu dans le fond : le retrait des formules mathématiques, la modification de phrases, le coupage et le découpage de passages, l'actualisation des références, l'ajout de passages et d'explications [49]... Une bonne partie du travail consistait, certes, à « mettre à niveau » conformément au lectorat visé, mais il lui arrivait souvent de retravailler ces matériaux et de restituer dans un nouveau contexte – une *mise en œuvre* proprement dite [50].

J'ai déjà discuté de la différence faite par Bachelard entre la parole et l'écrit concernant les cours publiés [51]. Dans ceux-ci Poincaré a tendance à confier le rôle d'éditeur aux autres, notamment ses auditeurs, alors que ce rôle est joué par lui-même pour ses livres de philosophie. Sa pratique éditoriale n'a pas pour but une simple mise en ordre. Dans son effort d'assurer la cohérence et la systématicité qu'on attendrait d'un livre, et, *a fortiori*, quand il s'agit d'un livre de *philosophie*, Poincaré l'éditeur parvient à élaborer un système proprement dit.

De *La science et l'hypothèse* à *Science et méthode*, chacun de trois livres se divise en trois ou quatre parties (sauf le troisième, en « Livres », pratiquement équivalents aux parties) de façon à représenter le *système* des sciences et à permettre les lecteurs de « parcourir la série depuis l'arithmétique et la géométrie jusqu'à la mécanique et à la physique expérimentale [52] ». Il est intéressant de noter que Poincaré parle de la « série » plutôt que du système, qui comprend l'astronomie et la physique en général, jusqu'à s'étendre à la biologie, à la sociologie ou bien même à l'histoire [53]. Tout se passe comme s'il n'y avait pas de différence de nature dans les sciences, mais seulement de différence de degré, qu'elles constituaient un « continuum », et qu'elles faisaient toutes partie de *la science*. Ceci expliquerait l'emploi du substantif « science » au singulier dans les titres, sans exception pour les trois livres [54].

49. Pour une étude génétique des livres philosophiques de Poincaré, voir le chapitre 4 de Rollet, *Henri Poincaré, des mathématiques à la philosophie*, en particulier pp. 225–235 et pp. 399–410.

50. « Poincaré must be given due credit as an editor. [...] he saw it [*La science et l'hypothèse*] as an integrated whole rather than a collection of essays, as developing a few specific themes in a cohesive and non redundant way. » Yemina Ben-Menahem (2006), *Conventionalism : From Poincare to Quine*, Cambridge : Cambridge University Press, p. 40.

51. *Supra*, Ouverture, 2.2

52. Introduction in *SH*, p. 25.

53. *SM*, pp. 12-13.

54. C'est ce que suggère J.-P. Bourguignon dans sa présentation. Henri Poincaré (2013),

La science et l'hypothèse

Introduction
1. Le nombre et la grandeur
2. L'espace
3. La force
Conclusions générales de la troisième partie
4. La nature

La valeur de la science

Introduction
1. Les sciences mathématiques
2. Les sciences physiques
3. La valeur objective de la science

Science et méthode

Introduction
1. Le savant et la science
2. Le raisonnement mathématique
3. La mécanique nouvelle
4. La science astronomique
Conclusions générales

Table des matières des trois premiers ouvrages philosophiques de Poincaré

Les trois livres possèdent à peu près les mêmes structures, les mêmes objets qui se résument à un seul qu'est la science. Chaque ouvrage s'ouvre avec une *introduction* rédigée à l'occasion par Poincaré lui-même, mais pas de conclusion. Faut-il s'étonner, si l'on se rappelle comment, avec quelle difficulté, Poincaré concluait ses *Leçons*, au point de « terminer avec un point d'interrogation ». Si ses cours s'accompagnent souvent de *préface*, mais jamais de conclusion, ces préfaces se produisent toujours *après* les chapitres, achevant ainsi les livres qu'elles introduisent, et, par cela même, servant pratiquement de *conclusion*.

La science selon Henri Poincaré, éd. établie et introd. par Jean-Pierre Bourguignon, Paris : Dunod, p. IV.

Première partie Le nombre et la grandeur
Ch. I – Sur la nature du raisonnement mathématique
Ch. II – La grandeur mathématique et l'expérience
Deuxième partie L'espace
Ch. III — Les géométries non euclidiennes
Ch. IV — L'espace et la géométrie
Ch. V — L'expérience et la géométrie
Troisième partie La force
Ch. VI — La mécanique classique
Ch. VII — Le mouvement relatif et le mouvement absolu
Ch. VIII — Énergie et thermodynamique
Conclusions générales de la troisième partie
Quatrième partie La nature
Ch. IX — Les hypothèses en physique
Ch. X — Les théories de la physique moderne
Ch. XI — Le calcul des probabilités
Ch. XII — L'optique et l'électricité
Ch. XIII — L'électrodynamique
Ch. XIV — La fin de la matière

Table des matières de SH

Dans *La science et l'hypothèse*, le plus « structuré » parmi les livres philosophiques de Poincaré, les chapitres sont ordonnés commençant par l'arithmétique jusqu'à la physique [55].

La première partie, intitulée « Le nombre et la grandeur », traite de l'arithmétique et de l'analyse. Il est question de la caractéristique du raisonnement mathématique et l'induction mathématique, « là où [la pensée mathématique] est restée pure [56] ». A quoi fait suite la deuxième partie, « L'espace », qui porte sur la géométrie. La géométrie est avant tout une étude de groupes, mais elle a ceci de particulier qu'elle sort l'esprit de son domaine pour pur, pour qu'il fasse face à l'expérience et que l'espace s'engendre avec d'autres objets propres à la géométrie. Si le rôle de l'expérience reste limité à nous *guider* à choisir des axiomes en géométrie, il devient décisif en mécanique et, *a fortiori*, en physique.

La troisième partie, intitulée « La force », se place entre les parties sur la géométrie et sur la physique, comprenant les trois chapitres relatifs à la

55. Brenner, *Les origines françaises de la philosophie des sciences*, p. 82. Voir aussi Audureau, « Le conventionnalisme, conséquence de l'intuitionnisme », p. 66.
56. « Nature du raisonnement mathématique » in *SH*, p. 34.

mécanique et à la thermodynamique. Placée entre la géométrie et la physique, elle constitue l'une des parties les plus « éditées » de l'œuvre poincaréenne. Elle a pour source principale le discours au Congrès international de philosophie de l'an 1900, « Sur les principes », comprenant une conclusion. La section « Conclusions » de l'article original est reprise pour le livre, Poincaré élabore une sorte de collage avec quelques passages inédits nouvellement écrits lors l'édition du livre ou bien tirés d'un autre article précédent qu'est « Les idées de Hertz » [57].

La quatrième partie, « La nature », concerne la physique. Les deux premiers chapitres sont tirés de l'intervention au Congrès de physique de 1900, « Relations », divisée en deux dont le premier est focalisé sur les méthodes. Suit le chapitre « Le calcul des probabilités ». La partie s'achève avec les théories de l'électromagnétisme dans les derniers chapitres.

Première partie Les sciences mathématiques
- Ch. I — L'intuition et la logique en mathématiques
- Ch. II — La mesure du temps
- Ch. III — La notion d'espace
- Ch. IV — L'espace et ses trois dimensions

Deuxième partie Les sciences physiques
- Ch. V — L'analyse et la physique
- Ch. VI — L'astronomie
- Ch. VII — L'histoire de la physique mathématique
- Ch. VIII — La crise actuelle de la physique
- Ch. IX — L'avenir de la physique mathématique

Troisième partie La valeur objective de la science
- Ch. X — La science est-elle artificielle ?
- Ch. XI — La science et la réalité

Table des matières de VS

La valeur de la science simplifie la classification. Les sciences sont divisées seulement en deux catégories : les sciences mathématiques (première partie) et les sciences physiques (deuxième partie) [58]. La troisième et dernière partie, intitulée « La valeur objective de la science », est conçue comme une réponse

57. Pour la comparaison entre les textes originaux et repris dans *SH*, voir Rollet, *Henri Poincaré, des mathématiques à la philosophie*, pp. 401-402.

58. On remarquera aussi le temps occupe désormais une place (Ch. II – « La mesure du temps ») au même titre que l'espace, et ce, dans la partie mathématique alors que c'est le traitement *physique* qui fait l'objet du chapitre. Etrange est le destin de cet article de 1898. Voir *infra*, Ch. VI.

de Poincaré à des critiques qui lui ont été faites lors de ses écrits précédents, notamment *La science et l'hypothèse*, et, ce faisant, aborde les problèmes généraux de la philosophie des sciences.

Livre premier Le savant et la science
Ch. I – Le choix des faits
Ch. II – L'avenir des mathématiques
Ch. III – L'invention mathématique
Ch. IV – Le hasard
Livre II Le raisonnement mathématique
Ch. I – La relativité de l'espace
Ch. II – Les définitions mathématiques et l'enseignement
Ch. III – Les mathématiques et la logique
Ch. IV – Les logiques nouvelles
Ch. V — Les derniers efforts des Logisticiens
Livre III La mécanique nouvelle
Ch. I — La mécanique et le radium
Ch. II — La mécanique et l'optique
Ch. III — La mécanique nouvelle et l'astronomie
Livre IV La science astronomique
Ch. I — La Voie lactée et la théorie des gaz
Ch. II — La géodésie française

Table des matières de SM

Science et méthode comporte quatre « livres », encadrés d'une introduction et d'une conclusion. Le premier livre est consacré à la *méthodologie* scientifique, correspondant à la dernière partie de *La valeur de la science*. Il s'ouvre avec « Le choix des faits », un chapitre qui a pour origine la *préface* écrite pour l'édition américaine de *La valeur de la science*. En effet, ce chapitre s'apparente à une seconde introduction, dévoilant une vision synoptique des sciences classées selon les *faits* qui font l'objet de chaque science ainsi qu'à la *méthode* que celle-ci emploie pour les traiter.

Le chapitre « L'invention mathématique » est exceptionnel. Il fait partie de la partie *méthodologique* (Livre I), pas de la partie mathématique (Livre II). Dans cette célèbre conférence donnée à la Société de psychologie, Poincaré raconte comment il est parvenu à la découverte de la fonction de Fuchs, montrant ainsi « le savant à l'œuvre » d'une part, et d'autre part, ce que la postérité appellera la « logique de la découverte ».

Le livre III a pour objet la « nouvelle mécanique », à savoir la mécanique relativiste. Le dernier chapitre de ce livre III porte sur l'apport de la nouvelle mécanique à l'astronomie, auquel fait suite le livre IV, intitulé « La science astronomique ».

Si l'astronomie n'a pas un chapitre qui lui est entièrement réservé, elle n'en est pas moins présente dans *La science et l'hypothèse*. C'est une science modèle, science qui fait référence pour toute science et toute discussion sur les sciences. Une place est assignée dans *La valeur de la science*, parmi les sciences *physiques*... ne serait-ce que pour laisser parler de sa « grandeur » comme l'indique le titre de l'article original. Il en est tout autrement dans *Science et méthode*, où la présence de l'astronomie est prépondérante. Elle fait l'objet de la discussion pour son rapport avec la mécanique relativiste (« La nouvelle mécanique et l'astronomie »), avant d'occuper tout le livre IV à part entière. L'astronomie se sépare ainsi, progressivement, des sciences mathématiques puis de la physique, pour faire suite à cette dernière.

Science et méthode s'achève, exceptionnellement, avec « Conclusions générales » [59]. Tout se passe comme si « Conclusions générales » bouclaient la boucle et que ces trois petites pages concluaient la série de trois livres. Chacun des trois ouvrages porte en lui une cohérence et une *unité*, mais il n'en demeure pas moins vrai qu'ils font partie d'*une seule et même œuvre*. C'est ce qu'on remarquera facilement en regardant l'édition récente qui rassemble précisément les trois ouvrages en question en un seul, ayant le mérite de présenter la philosophie poincaréenne de manière systématique et synoptique, ainsi que de montrer les liens étroits qu'entretiennent les trois ouvrages [60].

Dans la seconde partie, je retracerai l'itinéraire du Poincaré philosophe. Commençant par une étude génétique du corpus philosophique chez lui qui vient de se faire, je m'efforcerai de mettre en relief la systématicité de cette philosophie et de montrer son historicité, restant fidèle à l'ordre chronologique de son évolution, afin de montrer comment un mouvement plus ou moins unique traverse toute l'œuvre, d'un livre à l'autre.

Les trois chapitres IV, V et VI ont été constitués de façon à correspondre aux « périodes » de la philosophie poincaréenne : 1° la période classique (avant 1900) ; 2° la période prérelativiste (1900–1904) ; 3° la période postrelativiste (après 1905). La périodisation chronologique recoupe avec celle qui est problématique/thématique : chaque période est restituée autour d'un thème/

59. Outre ces « Conclusions générales » pourrait-on ajouter « Conclusions générales de la troisième partie » de *La science et l'hypothèse*.

60. Jean-Pierre Bourguignon, « Présentation » in Poincaré, *La science selon Henri Poincaré*, p. IV.

problème : 1° la stabilité et le mécanisme ; 2° la loi et/ou le principe ; 3° l'espace. Par cette périodisation tant thématique que chronologique, j'ai essayé de montrer moins une rupture qu'une unité propre à une œuvre voire à un système philosophique. Ceci nous amènera à retrouver les *Leçons* et à en faire l'objet d'une lecture « archéologique » des *Leçons* à travers ses « archives », dans l'œuvre de Poincaré et son rapport avec d'autres.

Chapitre IV

Le monde mécanique face à la mort thermique

Tout mathématicien de formation qu'il fut, Poincaré ne se limitait pas aux théories mathématiques. Il ne se souciait pas moins de l'application des théories abstraites à des cas plus ou moins concrets dès ses premières contributions en mathématiques pures. Il débuta sa carrière par une série de mémoires, tirés de sa thèse d'Etat soutenue en 1879 et intitulés « Sur les courbes définies par une équation différentielle », dans lesquels s'introduit une nouvelle manière de résoudre les équations différentielles, méthode qualifiée de « qualitative » ou « géométrique ».

> Diverses questions fort importantes d'Analyse et de Mécanique peuvent en effet s'y ramener. Prenons pour exemple le problème des trois corps : ne peut-on pas se demander si l'un des corps restera toujours dans une certaine région du ciel ou bien s'il pourra s'éloigner indéfiniment ; si la distance de deux des corps augmentera ou diminuera à l'infini, ou bien si elle restera comprise entre certaines limites ? Ne peut-on pas se poser mille questions de ce genre qui seront toutes résolues quand on saura construire les trajectoires des trois corps ? Et si l'on considère un nombre plus grand de corps, qu'est-ce que la question de l'invariabilité des éléments des planètes, sinon une véritable question de Géométrie qualitative, puisque faire voir que le grand axe n'a pas de variations séculaires, c'est montrer qu'il oscille constamment entre certaines limites [1] ?

A l'occasion du concours d'Oscar II, Poincaré fit la synthèse de ses travaux pour approcher directement le problème des trois corps. La publication de *Les méthodes nouvelles de la mécanique céleste* entre 1892 et 1899 marquera l'histoire comme acte fondateur de la théorie des systèmes dynamiques. De cette

1. « Mémoire sur les courbes définies par une équation différentielle », *Journal de mathématiques pures et appliqués* (aussi connu au nom de « Journal de Liouville ») 3e série, t. VII (1881). Passage repris in Poincaré, « Analyse des travaux », p. 276.

histoire désormais bien établie et bien connue [2], il est intéressant de signaler qu'elle était liée à une partie des travaux de Poincaré relativement peu étudiée : la thermodynamique.

Il consacra un de ses premiers cours de physique mathématique à la thermodynamique. C'était au premier semestre 1888–1889, à peu près au même moment que son mémoire pour le concours, dont le travail devait, d'ailleurs, se prolonger jusqu'en 1890 ; la publication de *Thermodynamique*, tiré du cours éponyme, date de la même année que le premier tome des *Méthodes nouvelles*. Que signifie cette coïncidence, ou bien « synchronie » si chère à l'archéologie foucaldienne ? « Attiré comme il l'était par la joie de faire la lumière dans les questions les plus difficiles et les plus obscures, Poincaré ne pouvait manquer de s'intéresser aux efforts tentés pour pénétrer la signification profonde des principes de la thermodynamique et particulièrement du principe de Carnot », dit P. Langevin dans son hommage au « Poincaré physicien » [3].

Dans le chapitre III du travail présent, nous avons suivi les débats qui ont marqué la thermodynamique dès son début au milieu du XIXe siècle. Vers la fin du même siècle, les polémiques deviendront encore plus vives et riches surtout sur le second principe, mais avec une nouvelle tournure. Auparavant, il était hors de question de mettre en doute la validité du principe ; il ne restait plus qu'à l'*appliquer* à l'univers pour en tirer des conséquences, dont la mort thermique était une ; désormais, c'est le principe lui-même qui est mis en cause, avec sa signification, son fondement, son statut de principe et son rapport avec l'autre pilier de la thermodynamique qu'est le premier principe, ou encore avec d'autres principes de la mécanique. Si les deux principes servent de fondement à la thermodynamique, ces fondements sont-ils bien assurés eux-mêmes ? S'ils sont *généraux*, c'est-à-dire valides dans la plupart des cas, cela suffit-il pour les ériger en principes *absolus* ? Sur ces questions maintes fois débattues, comme elles le sont encore, Poincaré assistait et parfois participait à d'importantes

2. A ce sujet les littératures sont extrêmement abondantes. Parmi les plus classiques notera-t-on : Hadamard, « Le problème des trois corps » ; Chazy, « Poincaré et la mécanique céleste ». Parmi les récentes : Jeremy Gray (1992), « Poincaré, topological dynamics, and the stability of the solar system », in *The Investigation of difficult things : essays on Newton and the history of the exact sciences in honour of D.T. Whiteside*, sous la dir. de Peter Michael Harman et Alan E Shapiro, Cambridge : Cambridge University Press ; Dahan-Dalmédico et Chabert « Les idées nouvelles de Poincaré », in *Chaos et déterminisme*, sous la dir. d'Amy Dahan-Dalmédico *et al.* ; June Barrow-Green (1997), *Poincaré and the three body problem*, Providence : American Mathematical Society et London Mathematical Society ; Jean-Christophe Yoccoz (2013), « Une erreur féonde du mathématicien Henri Poincaré. Le prix en l'honneur des 60 ans du roi Oscar et la découverte des orbites homoclines », *Letter of Mathematical Institute*, 1 ; Gray, *Henri Poincaré*, en particulier chapitre 4, « The Three Body Problem ».

3. Langevin, « L'œuvre de Henri Poincaré. Physique », p. 704 et toute la section VIII, intitulée « La thermodynamique et la mécanique statistique ».

discussions. Son engagement n'était peut-être pas aussi marquant que ce qu'il faisait au sujet du fondement des mathématiques ou de la nature des lois de la physique, mais ce n'était pas sans laisser trace dans l'histoire des débats ainsi que dans ses propres pensées.

Dans ce qui suit, nous allons retracer l'itinéraire du mathématicien pendant les dix dernières années du XIXe siècle, d'un problème pur et dur de l'analyse (la solution des équations différentielles), en passant par l'un des problèmes de phare de la mécanique céleste (le problème des trois corps), à un problème physique et philosophique par excellence (la nature du second principe de la thermodynamique).

1 Perfectionnement de la mécanique newtonienne

1.1 D'un problème ancien à un théorème nouveau

Le système solaire reste-t-il toujours le même ? Ses planètes suivent-elles toujours les mêmes trajectoires ? Si elles sont restées dans les mêmes orbites de tout temps, y demeureront-elles toujours, sans s'en éloigner un jour ? Si l'arrangement des planètes n'est pas invariable, l'augmentation ou la diminution des distances entre elles n'entraineraient-elles pas des perturbations sur l'ensemble du système ? Telles sont les questions que pose le problème de la stabilité du système solaire, l'un des plus classiques de la mécanique céleste.

> [I]l ne s'agit pas seulement, en effet, de calculer les éphémérides des astres quelques années d'avance pour les besoins de la navigation ou pour que les astronomes puissent retrouver les petites planètes déjà connues. Le but final de la Mécanique céleste est plus élevé ; il s'agit de résoudre cette importante question : la loi de Newton peut-elle expliquer à elle seule tous les phénomènes astronomiques [4].

On sait, depuis Kepler, que les orbites sont elliptiques. On sait également, depuis Newton, pourquoi : l'ellipse est la forme où la gravitation du Soleil s'équilibre avec la force centrifuge d'une planète en révolution autour de lui. Or, aucune planète ne constitue pas un système isolé avec le Soleil ; elle n'en est pas moins en interaction avec un troisième corps, sinon de plusieurs : la Lune ne se

4. Henri Poincaré (1891b), « Sur le problème des trois corps », *Bulletin astronomique*, 8, *Œuvres* VII, p. 490 ; Poincaré, « Le problème des trois corps », p. 530. La même phrase se trouvera dans Introduction à Henri Poincaré (1892-1899), *Les méthodes nouvelles de la mécanique céleste*, Paris : Gauthier-Villars ; reproduction en fac-similé (Paris : A. Blanchard, 1987), p. 1, et aussi dans Poincaré, « Les limites de la loi de Newton », p. 122.

meut pas sans influence sur la Terre, pas moins que d'autres planètes voisines et d'autres étoiles que le Soleil, pour ne pas dire tout l'univers. Le système de deux corps comme Terre-Soleil n'est qu'un cas particulier des systèmes de plusieurs corps, partant de celui de trois corps, pour lesquels il n'est plus possible d'avoir recours à la méthode traditionnelle, les équations devenant impossibles à intégrer. Le problème se réduit alors à *résoudre* ces équations, et, éventuellement, à démontrer que les équations sont *résolubles*, pourvues d'au moins une solution.

Les géomètres du XVIIIe siècle comme Lagrange et Laplace développèrent la méthode dite analytique qui consistait à éliminer les termes séculaires. Ils parvinrent à montrer que les oscillations des orbites planétaires ne dépassent pas certaines limites autour d'une valeur moyenne, dont la déviation est assez négligeable pour donner lieu à des changements considérables. Toujours est-il que ces oscillations, aussi petites soient-elles au début, finissent par s'accumuler et devenir sensibles avec le temps.

Poincaré fait appel à la méthode qu'il avait établie à propos des courbes définies par les équations différentielles. Cette méthode consiste à déterminer l'ensemble des courbes qui caractérisent les solutions des équations, soit directement par les points portant des solutions, soit indirectement par les points singuliers où il n'y a justement pas de solutions. A observer le voisinage d'un point singulier, on n'obtient plus une courbe unique, mais « l'allure » de l'ensemble des courbes qui reviennent à renseigner sur les traits généraux des solutions, servant de « guide sûr » pour trouver d'autres séries de solutions.

Certaines solutions attirent l'attention par leur intérêt pratique pour l'astronomie : les solutions dites *périodiques* pour lesquelles les distances des trois corps sont représentées par des fonctions *périodiques* du temps, de sorte que les corps se trouvent régulièrement dans les mêmes positions relatives ; les solutions asymptotiques pour lesquelles les deux satellites de la planète ont des orbites peu différentes l'une de l'autre [5]. Ce sont des solutions difficilement observables, pour ne pas dire réalisables, dans le système solaire : « *a priori* la probabilité pour que cette circonstance se présentât était manifestement nulle », admet Poincaré. Il n'en est pas moins probable que celles qui diffèrent peu des solutions périodiques se réalisent effectivement [6]. En tout cas, ces solutions constituent « la seule brèche par où nous puissions essayer de pénétrer dans une place jusqu'ici réputée inabordable [7] ».

Si cette place est réputée inabordable, ce n'est pas seulement pour une rai-

5. Poincaré, « Le problème des trois corps », pp. 532-533.
6. Poincaré, *cit.*, p. 534.
7. Poincaré, *Méthodes nouvelles*, pp. 81-82. cf. Dahan-Dalmédico et Chabert, « Les idées nouvelles de Poincaré », pp. 290-295.

son analytique. C'est par la nature même du problème de la stabilité, qui est, « à vrai dire une question mathématique plutôt que physique ». On a affaire à une réalité physique du système, où des facteurs divers et variés sont en jeu : les forces qui influencent sur les astres ; la constitution physique des étoiles ou encore du milieu interstellaire ; l'effet des marées. On ne saurait ignorer qu'un traitement mathématique, à lui seul, ne peut résoudre le problème qu'approximativement. Pourtant, ajoute Poincaré, les causes « physiques » n'auront pas un effet aussi déterminant et immédiat que les causes « mathématiques », à savoir les perturbations dues à la gravitation des corps ; « et si ces dernières n'étaient pas capables d'en altérer la stabilité, le système solaire serait assuré d'une existence beaucoup plus longue [8] ».

Toujours est-il que, « [l]e mot stabilité a été entendu sous les sens les plus différents, et la différence de ces divers sens deviendra manifeste si l'on se rappelle l'histoire de la Science ». On en distinguera entre autres deux sens, d'après *Treatise on Natural Philosophy* de William Thomson et Peter G. Tait, livre de référence en la matière pendant bien longtemps [9], auquel Poincaré fait lui aussi référence : la stabilité d'une masse fluide en rotation et de sa figure d'équilibre ; celle d'un système de plusieurs corps en mouvement sous l'emprise de la gravitation [10].

Stabilité des figures d'équilibre

Aussitôt nommé chargé du cours de mécanique physique et expérimental en 1885, il consacre ses premiers cours à la théorie sur la figure d'équilibre d'une masse fluide en rotation, suivi d'un cours sur la capillarité au second semestre de l'année 1888–1889. Le sujet sera repris d'abord au second semestre de l'année 1898–1899, cette fois-ci à la chaire de mécanique céleste, avec le titre : « Figures des corps célestes et leurs mouvements autour de leur centre de gravité ». Ce dernier cours sera publié en 1902 sous le titre : *Figures d'équilibre d'une masse fluide.*

8. Poincaré, « Le problème des trois corps », p. 536.

9. La stabilité du mouvement est traitée, dans ce livre, comme l'un des problèmes les plus fondamentaux de la physique. « There is scarcely any question in dynamics more important for Natural Philosophy than the stability and the instability of motion. » William Thomson et Peter Guthrie Tait (1883), *Treatise on Natural Philosophy*, 2e éd., Cambridge University Press, t. 1, § 346, p. 416. Sur le statut de *T &T* dans l'histoire du problème, voir Tatiana Roque (2011), « Stability of trajectories from Poincaré to Birkhoff : approaching a qualitative definition », *Archive for History of Exact Sciences*, 65, 3, p. 305, *sqq.* Pour une présentation historique de ce problème, voir Remco Leine (2010), « The historical development of classical stability concepts : Lagrange, Poisson and Lyapunov stability », *Nonlinear Dynamics*, 59, 1-2.

10. Roque, « Stability of trajectories from Poincaré to Birkhoff », pp. 300-304.

> Imaginons une masse fluide se contractant par refroidissement, mais assez lentement pour rester homogène et pour que la rotation soit la même dans toutes ses parties. D'abord très voisine d'une sphère, la figure de cette masse deviendra un ellipsoïde de révolution qui s'aplatira de plus en plus, puis, à un certain moment, se transformera en un ellipsoïde à trois axes inégaux. Plus tard, la figure cessera d'être ellipsoïdale et deviendra piriforme, jusqu'à ce qu'enfin la masse, se creusant de plus en plus dans sa partie médiane, se scinde en deux corps distincts et inégaux [11].

Ce problème d'hydrostatique a toujours suscité des intérêts des astronomes, par son rapport à la figure de la Terre ou par son implication cosmogonique. Les astres sont considérés comme des masses fluides, liquides ou gazeuses, à leur origine [12]. Par quel jeu de forces prennent leurs formes actuelles et quelles sont précisément ces formes ? Newton se posa le problème et répondit par l'ellipsoïde qui, après la vérification empirique de Maupertuis, servit de symbole fort du triomphe de la mécanique newtonienne sur la philosophie cartésienne. Collin McLaurin montra de façon plus rigoureuse que la Terre forme un ellipsoïde aplati et précisa la notion de « figure d'équilibre ». Mais ce fut surtout à Jacobi d'apporter un progrès considérable au problème, par une démonstration de l'existence d'une autre figure d'équilibre : « un ellipsoïde à trois axes inégaux », appelé « ellipsoïde de Jacobi ».

Poincaré en vient à dériver une série de solutions représentées par une famille de figures d'équilibre, pour arriver à un résultat, plus général que ses prédécesseurs, qui se rapporte aux relations entre plusieurs figures possibles comme ellipsoïde, ellipsoïde à trois axes inégaux... ainsi qu'une toute nouvelle : « piriforme », figure qui a ceci de particulier d'avoir tendance à se creuser sur sa partie médiane et enfin à se scinder en deux corps [13]. La condition de la stabilité pour ces figures, à savoir la condition pour laquelle la masse atteint et conserve son état d'équilibre. Par exemple, elle peut être empêchée par des frottements qui, « *quelques faibles qu'ils soient* », finissent le plus souvent par « avoir raison » [14]. Telle est « la stabilité ordinaire », qui se distingue d'une autre sorte de stabilité, qualifiée de « séculaire », qui ne se détruit pas par frottement. Ainsi donc une masse fluide, sphérique, homogène et en rotation uniforme [15], à mesure qu'elle se refroidit et se contracte, avec sa vitesse de rotation en augmentation, s'aplatit pour prendre d'abord une forme d'ellipsoïde, mais elle finira par perdre la stabilité séculaire et être remplacée par un ellipsoïde de

11. Poincaré, « Analyse des travaux », § XXI, p. 335.
12. Sur l'historique du problème, Poincaré, « Les formes d'équilibre d'une masse fluide en rotation », pp. 203-205. Voir aussi Brush, *Nebulous Earth*, pp. 123-127.
13. Hadamard, « Le problème des trois corps », p. 69.
14. Poincaré, « Les formes d'équilibre d'une masse fluide en rotation », pp. 208-209
15. Poincaré, *cit.*, pp. 208-212

Jacobi. Et ainsi de suite, jusqu'à devenir piriforme et enfin se diviser en deux masses.

« Stabilité à la Poisson »

Pour Laplace et Lagrange, le système planétaire se dit stable si les grands axes des mouvements planétaires ne s'écartent de la moyenne qu'inférieurement à certaines limites au point d'être pratiquement invariables [16]. La stabilité signifie ici la périodicité stricte de la trajectoire. Poisson proposa une définition plus « faible » : pour que le système soit stable, il suffit que les planètes retournent à leur position initiale ou à leur voisinage. Le mouvement d'un système est stable si toutes les perturbations possibles se limitent à des perturbations « conservatives » (où l'énergie totale se conserve), dont chacune donne lieu à un mouvement alternatif suivant une trajectoire non perturbée, en un temps fini, et sans plus qu'une digression infiniment petite [17]. Poincaré attribue la « stabilité à la Poisson » à des systèmes où les corps repassent une infinité de fois aussi près qu'on veut de leurs positions initiales.

Soit un point mobile P. P retourne à sa position initiale au bout d'un temps suffisamment long ; s'il P ne retourne pas exactement à sa position initiale, il en passe à une position très proche, aussi près qu'on voudra, et ce, une infinité de fois :

> **Théorème**– *Supposons que le point* P *reste à distance finie, et que le volume* $\int dx_1 dx_2 dx_3$ *soit un invariant intégral ; si l'on considère une région* r_0 *quelconque, quelque petite que soit cette région, il y aura des trajectoires qui la traverseront une infinité de fois* [18].

P passe par les régions r_n qui décrivent une fonction du temps, désigné τ [19]. Partant de sa position initiale r_0, P parvient après τ à r_1, et à r_2 après 2τ, ainsi de suite... r_n pour $n\tau$. Or, le volume par lequel P passe reste constant, il arrive nécessairement que P de repasser les positions par lesquelles il est *déjà*

16. Dahan-Dalmédico et Chabert, « Les idées nouvelles de Poincaré », pp. 296-297 ; François Béguin (2012), *Le théorème de récurrence de Poincaré*, (visité le 09/05/2018)

17. « The actual motion of a system, from any particular configuration, is said to be *stable* if every possible infinitely small conservative disturbance of its motion through that configuration may be compounded of conservative disturbances, any one of which would give rise to an alteration of motion which would bring the system again to some configuration belonging to the undisturbed path, in a finite time, and without more than an infinitely small digression. If this condition is not fulfilled, the motion is said to be *unstable*. » Thomson et Tait, *Treatise on Natural Philosophy*, § 347, p.

18. Henri Poincaré (1890b), « Sur le problème des trois corps et les équations de la dynamique », *Acta Mathematica*, 13, 1, *Œuvres* VII, p. 262-479, p. 314. Souligné dans le texte original.

19. Poincaré, *cit.*, pp. 265-266. Voir aussi Laurent Mazliak (2012), « Poincaré et le hasard », *Séminaire Poincaré*, 14, p. 144 ; Gray, *Henri Poincaré*, p. 273.

passé. En d'autres termes, il existe une partie commune pour au moins deux de ces régions arbitrairement choisies, r_p et $r_q (p < q)$, partie qui superpose sur une autre partie commune entre r_{q-p} et r_0. Si l'on considère les points qui vont et viennent dans les parties communes, ils retournent aussi souvent que possible à la position initiale de P.

Le théorème s'accompagne d'un corollaire :

> **Corollaire.** – *Il résulte de ce qui précède qu'il existe une infinité de trajectoires qui traversent une infinité de fois la région r_0 ; mais il peut en exister d'autres qui ne traversent cette région qu'un nombre fini de fois. Je me propose maintenant d'expliquer pourquoi ces dernières trajectoires peuvent être regardées comme exceptionnelles*[20].

Il est remarquable que Poincaré explique pourquoi et en quel sens les trajectoires non récurrentes peuvent être considérées comme « exceptionnelles ». L'existence des exceptions n'empêche pas que les « stables » fassent toujours règle, « au même titre que les nombres rationnels sont l'exception et que les nombres incommensurables sont la règle[21] ». Qu'il existe des solutions qui assurent le retour à la position initiale pour une infinité de fois, cela n'empêche pas qu'il y ait des *exceptions* : il peut y avoir des positions initiales dans lesquelles P ne retourne pas aussi près que l'on voudra de ces positions. Ce sont là des solutions instables. Pourtant, il existe aussi une infinité de solutions *stables* au sens de Poisson qui rendent possible le retour du P à sa position initiale pour une infinité de fois.

> Il y a donc une infinité de solutions particulières qui sont instables, [...] et une infinité d'autres qui sont stables. J'ajouterai que les premières sont exceptionnelles (ce qui permet de dire qu'il y a stabilité en général)[22].

Nous allons voir comment la stabilité ainsi conceptualisée a été reprise dans un tout autre contexte, relativement à l'irréversibilité des phénomènes naturels ou l'irréductibilité du second principe à la mécanique. Ici, il suffit de remarquer l'approche probabiliste a été, de fait, l'une des nouveautés de la version corrigée du mémoire pour le concours d'Oscar II[23]. Qu'est-ce qui l'a amené à préciser le sens du mot « exceptionnel », et à l'*expliquer* faisant recours au probabilisme ? Il ne pouvait pas rester indifférent la « révolution probabiliste »

20. Poincaré, « Sur le problème des trois corps et les équations de la dynamique », p. 316.
21. Poincaré, « Sur le problème des trois corps », p. 490.
22. Poincaré, « Le problème des trois corps », p. 537.
23. Mazliak, « Poincaré et le hasard », p. 144 ; João Prıncipe (2014), « Henri Poincaré : The Status of Mechanical Explanations and the Foundations of Statistical Mechanics », in *Poincaré, Philosopher of Science*, sous la dir. de Marıa de Paz et Robert DiSalle, Dordrecht : Springer.

en cours, ce « profond bouleversement des modes de représentation scientifique [24] », entamée par Maxwell et accomplie avec Boltzmann.

1.2 Introduction de la conception statistique

Aux origines de la théorie cinétique des gaz

En dépit du déterminisme toujours dominant tout au long du XIXe siècle, la statistique s'installe progressivement et la « fin de siècle » voit s'émerger, voire s'imposer, un nouveau regard sur le hasard [25]. Le hasard ne signifie plus l'absence de loi (sens ontologique) ni l'ignorance de loi (sens épistémologique) ; une fois « apprivoisé » (*tamed*) et infiltré en divers domaines, il est considéré comme facteur non négligeable, voire déterminant, aux phénomènes tant sociaux que naturels. Nous avons déjà vu brièvement, dans le chapitre III, l'apport de la statistique, la science dite de grands nombres, à l'astronomie observationnelle. L'impact de la statistique a été aussi grand, sinon plus en physique, plus précisément, en théorie cinétique des gaz développée par Clausius, Maxwell et Boltzmann. Ces derniers furent les premiers à « montrer l'importance de ces méthodes et à en généraliser l'emploi », comme le notent Paul et Tatiana Ehrenfest dans leur étude de l'histoire de la mécanique statistique, l'un des classiques en la matière [26].

La théorie cinétique des gaz a pour idée de base de supposer que le gaz est composé de particules parfaitement élastiques. Elles sont en mouvement dans tout sens et par conséquent constamment en chocs, toujours élastiques, c'est-à-dire sans perte de force vive. Pourtant, il est impossible de suivre ces mouvements une à une, bien plus par leur grand nombre que par leur petitesse : il s'agit de 6×10^{22} de molécules contenues dans un volume, elle est en collision de millions de fois par seconde. D'où la nécessité d'une autre méthode que la mécanique ondulatoire, « nouvelle dans le département de la Physique mathématique », mais « en usage depuis longtemps dans la section des Statis-

24. Anouk Barberousse (2002), *La mécanique statistique. De Clausius à Gibbs*, éd. établie et introd. par Anouk Barberousse, Paris : Belin, p. 79.

25. Ian Hacking (1990), *The Taming of Chance*, Cambridge : Cambridge University Press, en particulier Ch. I (dont le résumé se trouve à p. vii). Voir aussi Paul Ehrenfest *et al.* (1915), « Mécanique statistique », in *Encyclopédie des Sciences Mathématiques pures et appliquées*, Gauthier-Villars, t. 4 ; Anouk Barberousse (2004), « Le nouveau visage du hasard », in *Le moment 1900 en philosophie*, sous la dir. de Frédéric Worms, Villeneuve d'Ascq : Presses universitaires du Septentrion ; Olivier Darrigol et Jürgen Renn (2013), « The Emergence of Statistical Mechanics », in *The Oxford Handbook of the History of Physics*, sous la dir. de Jed Z. Buchwald et Robert Fox, Oxford : Oxford University Press...

26. Ehrenfest *et al.*, « Mécanique statistique », p. 188.

tiques[27] ».

Qu'il s'agisse d'une planète ou d'un individu, on décrit son changement d'états définis par la position et la vitesse. Une fois connues la position et la vitesse d'une planète à un moment quelque, toute sa trajectoire devient alors disponible. De même, on peut observer un individu et décrire la variation de ses états dans le temps, et on préférera appeler cela l'*histoire* plutôt que la trajectoire. Pour étudier l'individu comme l'astre, on emploie la méthode « historique » ; même si la détermination complète de l'histoire de cet individu n'est pas envisageable comme on retrace l'astre, on fait appel au même principe méthodologique. Il en est autrement lorsqu'on s'intéresse à un certain nombre d'individus, groupés selon quelques critères (l'âge, la région, la nationalité, le revenu...).

> Mais la plus petite partie de matière que nous pouvons soumettre à l'expérience consiste en des millions de molécules, dont aucune ne pourra jamais devenir sensible, individuellement, pour nous. Nous ne pouvons, par conséquent, établir le mouvement réel d'aucune de ces molécules ; de sorte que nous sommes obligés d'abandonner la méthode strictement historique ; et d'adopter la méthode statistique pour traiter de grands groupes de molécules[28].

Malgré la variété et la diversité des mouvements des molécules contenues dans un volume de gaz, soumis aux lois des chocs élastiques, et les vitesses restent peu écartées de leur *moyenne* et en ce sens suffisamment stable, de telle façon qu'on puisse calculer l'énergie *moyenne* qui définit à son tour la température de l'ensemble de la masse gazeuse. A quoi se rapportent les paramètres physiques tels que la pression, le volume et la température, les relations établies entre eux (la loi adiabatique en est un exemple), et d'autres caractéristiques propres aux gaz comme la compressibilité ou la dilatation. Ainsi, il devient possible de rendre compte de l'ensemble des mouvements moléculaires, sans tenir compte de chaque molécule individuellement, pour en tirer des lois dites *macroscopiques* ou « phénoménologiques ».

> Ainsi la science moléculaire nous enseigne-t-elle que nos expériences ne peuvent jamais nous donner plus que l'information statistique, et qu'aucune loi qui est déduite d'elles ne peut prétendre à la précision absolue. Mais lorsque nous passons de la contemplation de nos expériences à celle des molécules elles-mêmes, nous quittons le monde du hasard et du changement, et entrons dans une région où tout est certain et immuable[29].

27. Maxwell« Molécules », in *La mécanique statistique. De Clausius à Gibbs*, éd. établie et introd. par Anouk Barberousse, p. 128.
28. Maxwell, *cit.*, p. 129.
29. Maxwell, *cit.*, p. 130.

Tout se passe comme s'il existait deux ordres, incompatibles et irréductibles l'un à l'autre : l'ordre macroscopique, celui du phénomène directement observable d'une part, et d'autre part, l'ordre microscopique, celui des molécules inobservables. Chaque ordre correspond à sa propre notion de loi, l'une qui régit le mouvement de chacune des molécules conformément aux lois des chocs classiques, et l'autre, un « nouveau type de régularité, la régularité des moyennes [30] », qui concerne la distribution des vitesses des molécules. Les lois statistiques de l'ordre macroscopique n'ont apparemment aucune prise sur le niveau microscopique qui reste quant à lui soumis aux lois déterministes qui sont de véritables lois. Contrairement à ces dernières, les lois statistiques ne touchent pas directement à la réalité des molécules ; elles ne sont valables que parce qu'elles se rapportent à un ensemble de molécules que nous sommes incapables d'apercevoir ou manipuler.

Maxwell reste sensible au conflit entre la théorie cinétique et la thermodynamique, avec une dose de scepticisme à l'égard de la statistique : la statistique comme méthode est mise chez lui au-dessous de la « méthode historique ». L'expérience de pensée qui sera connue sous le nom du « démon de Maxwell » illustre bien cette position. Un gaz, initialement séparé en deux parties, l'une chaude (des molécules de grandes vitesses) et l'autre froide (petites vitesses) par un mur. Une fois retiré le mur, le gaz est homogénéisé et atteint l'état d'équilibre à température moyenne, pour ne plus jamais retrouver la séparation initiale. Imaginons maintenant « un petit être très observateur, et aux doigts habiles », un « démon » si l'on veut, capable d'observer directement le mouvement de chaque molécule. L'état d'équilibre n'a rien de définitif ni de significatif pour lui ; il pourrait discerner chaque molécule selon sa vitesse et les ranger et les faire passer par le petit orifice, sans faire aucun travail, tout ce qu'il a à faire étant de fermer ou d'ouvrir l'orifice, ni besoin de créer ou diminuer l'énergie totale du système ; il verrait le système perdre l'équilibre et récupérer la séparation initiale. Pour ce démon, l'équilibre de la masse gazeuse ne serait jamais final, mais provisoire, voire apparent ; ce ne serait qu'un *effet statistique*.

Mécanique face à la statistique

Les équations de mouvements sont invariables par rapport au temps. Il n'en est pas de même pour les phénomènes au niveau macroscopique. Tout se passe comme si le système évolue vers un état d'équilibre de manière irréversible,

30. *ibid.*

contrairement aux molécules qui le composent [31]. Le problème avait déjà retenu l'attention dès les premières élaborations de la théorie cinétique des gaz aux années 1870, notamment en rapport avec la seconde loi de la thermodynamique. Pour Maxwell, le second principe est avant tout une *loi statistique*, laquelle équivaut à l'énoncé suivant : « si vous jetez un verre rempli d'eau à la mer, vous ne pouvez pas récupérer le même verre d'eau » [32]. La métaphore du verre rempli jeté dans l'océan, assez mémorable, paraitrait pourtant moins réussie, comparée à celle du « démon » : un être imaginaire dans un récipient rempli de gaz, initialement séparé en deux parties, l'une chaude l'autre froide, avant d'être mélangé, capable de réaliser la séparation initiale [33]. Que l'opération d'un être pareil soit concevable pour le moins sans conduire à contradiction avec des lois connues, cela signifie que les phénomènes *sont* réversibles *en principe*, quoiqu'ils ne s'observent pas comme tels *effectivement*. « C'est seulement pour un être de niveau intermédiaire, qui peut mettre la main sur certaines formes d'énergie alors que d'autres lui échappent, que l'énergie semble se transformer de manière inévitable d'un état où elle est disponible en un état où elle est dissipée, » dit encore Maxwell [34]. Si nous ne pouvons observer rien de tel, c'est à cause de notre « niveau intermédiaire », la finitude et l'ignorance qui nous sont propres, seulement à nous qui sommes incapables d'observer et de manier ces innombrables molécules.

31. Soit $x(t)$ qui représente la trajectoire, c'est-à-dire la position en tant que fonction du temps d'une molécule en mouvement, avec $v(t)$, sa vitesse et son accélération $a(t)$ qui s'écrivent respectivement comme suit :

$$v(t) = \frac{dx}{dt}$$

$$a(t) = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2}$$

Supposons maintenant qu'une molécule mise en mouvement dans un sens quelconque. Maintenant si l'on projette le film à l'envers, la trajectoire de la molécule suit $x(-t)$ avec une vitesse et une accélération suivantes :

$$v(-t) = \frac{dx(-t)}{dt} = -\frac{dx}{dt} = -v(t)$$

$$a(-t) = \frac{dv(-t)}{dt} = -\frac{dv(t)}{dt} = -\frac{d^2x}{dt^2} = -a(t)$$

Les équations restent les mêmes pour $-t$ ainsi que pour t. David Z. Albert (2000), *Time and Chance*, Cambridge, M.A. : Harvard University Press, p. 7, note 6.

32. Lettre à Strutt, 1870 ; phrase citée d'après Olivier Darrigol (2003), « The Origin of the Concept of Entropy », *Séminaire Poincaré*, 2, p. 5.

33. Voir les écrits de Maxwell cités in *ibid.*, note 14. C'est W. Thomson qui reprend la métaphore pour la baptiser « le démon de Maxwell » dans une conférence de 1879 « The Sorting Demon of Maxwell », traduite en français in « Le démon distributeur de Maxwell », Thomson, *Constitution de la matière*, pp. 90-92. Voir aussi Stengers, *Cosmopolitiques I*, pp. 170–172 et pp. 234–235.

34. L'article « Diffusion » écrit en 1787 pour *Encyclopedia Britannica*. Passage cité in Stengers, *cit.*, p. 170.

Le physicien autrichien Joseph Loschmidt remet en cause le lien entre la mécanique et la thermodynamique, questionnant sur la possibilité d'une preuve mécanique du second principe. Chose curieuse, il dit avoir été motivé par l'application cosmologique de ce principe dont la mort thermique est le résultat le plus notoire : « C'est la monstruosité de ces conclusions qui m'incita durant des années à en soumettre à nouveau les fondements à l'épreuve ». L'objection de Loschmidt a ceci de particulier selon Boltzmann, et d'où son importance, qu'elle montre le lien du second principe avec la théorie des probabilités de laquelle le premier principe demeure, au contraire, indépendant [35]. La contradiction vient d'une application inadéquate, mais aussi du principe lui-même : un principe qui porte en lui une telle conséquence est pour le moins questionnable. C'est dans sa tentative de répondre à l'objection de Loschmidt, son maître devenu collègue, que Boltzmann est conduit à développer une nouvelle approche du problème et par la suite à jeter les bases de la mécanique sur le calcul des probabilités [36].

Prenons l'inégalité de Clausius, $dQ/T \geq 0$. L'égalité tient pour les processus réversibles, et l'inégalité, pour les irréversibles. Si l'on change v en $-v$, c'est-à-dire un mouvement quelconque en un mouvement au sens inverse (une planète mise en rotation rétrograde par exemple) après une durée de temps t_1, le système retrouvera sa position initiale après la même durée que t_1. Or, s'il en est ainsi, le système aura, à $t_2(t_2 = t_1 + t_1)$, une valeur dQ/T équivalente qu'à t_0, moins grande donc qu'à t_1, et l'entropie subira une augmentation puis une diminution. Autrement dit, qu'elle soit toujours positive, cela n'a rien de nécessaire : ce n'est pas une conséquence de la nature des corps (présumés élastiques et innombrables selon la théorie cinétique) ou des forces qui s'exercent entre eux (attractive et/ou répulsives, ou bien tout simplement nulles), mais d'une *condition initiale* particulière qui n'a elle-même rien de nécessaire.

Si l'on prend un système d'un nombre fini de points matériels, isolé du reste de l'univers, il est « naturel » de penser que le système finira par atteindre un état d'équilibre où les positions et vitesses initiales sont uniformément réparties

35. Ludwig Boltzmann (2003a), « On the Relation of a General Mechanical Theorem to the Second Law of Thermodynamics », in Brush *et al.* (2003), p. 367.

36. « C'est exclusivement à l'occasion de ces attaques et des répliques de *L. Boltzmann* que se sont développées les recherches sur les bases de la théorie qui relie la mécanique au calcul des probabilités. » Ehrenfest *et al.*, « Mécanique statistique », p. 188.

Sur l'évolution des idées de Boltzmann, voir Introduction in Brush et Hall, *The Kinetic Theory of Gases* ; Prigogine et Stengers, *La nouvelle alliance*, p. 193–200 et p. 268–291. Parmi des études plus récentes : Albert, *Time and Chance*, les chapitres 3 et 4 ; Stengers, *Cosmopolitiques I*, Ch. IV ; Harvey R. Brown *et al.* (2009), « Boltzmann's H-theorem, its Discontents, and the Birth of Satistical Mechanics », *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 40, 2 ; Darrigol et Renn, « The Emergence of Statistical Mechanics » ; Jos Uffink (2014), « Boltzmann's Work in Statistical Physics », in *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, sous la dir. d'Edward N. Zalta.

quelle que soit la condition initiale, à savoir l'état initial du système[37]. Ceci n'est nullement une conséquence de la loi de la mécanique, mais de la théorie de la probabilité.

Boltzmann établit une nouvelle interprétation de l'entropie sur une base probabiliste, comme une fonction des *complexions* : $S = k \times \ln W$, k étant une constante (qu'on nomme désormais constante de Boltzmann) et W, le nombre des états microscopiques qui correspondent à un état macroscopique du système. Si W est grand, les molécules sont désordonnées et plus de manières de configurer que quand elles sont arrangées d'une manière régulière et organisée. Plus le nombre d'états correspondant est grand, plus ils sont probables et plus il existe d'états effectivement réalisés ; les cas contraires ne sont pas impossibles, mais seulement peu probables. Et pour cause : comment examiner toutes les positions et vitesses aussi nombreuses pour voir si le système . On peut seulement démontrer qu'il y a un infiniment plus grand nombre d'états initiaux microscopiques qui mènent à une configuration macroscopique uniforme qu'à une configuration non uniforme, sans prouver que la distribution de toutes les positions et vitesses *doive* devenir uniforme après certains temps[38].

Par ailleurs, le « théorème de Loschmidt » a une conséquence curieuse : l'univers aurait connu, dans un passé lointain, un état d'équilibre sans différence de température. Après un certain temps, il aurait pu passer à un non-équilibre (en raison de sa probabilité, quoique très faible, mais toujours non nulle) et puis évoluer vers un équilibre. Tels passages n'ont rien de nécessaire ; tout est une affaire de probabilités. En fin de l'analyse, Boltzmann rejoint Loschmidt quand il trouve douteux d'appliquer le second principe à l'univers entier, tant que le principe n'a pas de fondement sûr, mais seulement probable. Toujours est-il que les lois des probabilités sont confirmées par l'expérience et restent valables en elles-mêmes. Il ne cessera par la suite de revenir sur la légitimité du calcul des probabilités comme méthode en physique mathématique[39].

37. Boltzmann, « The Kinetic Theory of Gases », p. 365.

38. Boltzmann, *cit.*, p. 366. Boltzmann distingue le macroétat du microétat (termes adoptés par la postérité) pour dire que le nombre d'états microscopiques compatibles avec des états macrocopiques uniformes est infiniment plus grand que des cas contraires. Darrigol et Renn, « The Emergence of Statistical Mechanics », p. 7.

39. « [C]omme ce mode de calcul a été mis à l'épreuve dans un très grand nombre de cas plus particuliers, je ne vois vraiment aucune raison pour en contester l'application aux phénomènes naturels d'une espèce plus générale. » Ludwig Boltzmann (1905), *Leçons sur la théorie des gaz*, trad. par Alexandre Gallotti et Henri Bénard, annot. de Marcel Brillouin, introd. de Marcel Brillouin, Paris : Gauthier-Villars, t. 2, p. 254. Boltzmann publie *Leçons de théorie des gaz* en deux volumes, le premier en 1896 et le second, en 1898.

2 Thermodynamique au cours

2.1 Deux principes, deux approches

Thermodynamique est précédé d'une préface qui est, quant à elle, au lieu et avant d'introduire un premier chapitre, une page préliminaire, suivie d'une page préliminaire. La page se lit comme une sorte d'avertissement :

> La Thermodynamique repose sur deux principes :
>
> > 1° Le principe de la *conservation de l'énergie* dont un cas particulier, le plus intéressant au point de vue qui nous occupe, est le principe de l'*équivalence de la chaleur appelé aussi principe de Mayer* ;
> > 2° Le principe de la *dissipation de l'entropie*, plus souvent nommé *principe de Carnot ou principe de Clausius.*
>
> Nous étudierons successivement ces deux principes, ainsi que leurs conséquences les plus immédiates. Les premiers Chapitres seront principalement consacrés à l'historique de la découverte de ces principes [40].

L'usage de l'histoire qui caractérise l'enseignement du mathématicien, on y revient : « Pour expliquer par quelles raisons tous les physiciens ont été amenés à adopter ces deux principes, je n'ai rien trouvé de mieux que de suivre dans mon exposition la marche historique [41], » lit-on dans la préface. *Thermodynamique* adoptera et alternera deux modes de présentation, l'un axiomatique et l'autre historique : il sera question de déduire des conséquences se déduisent à partir de ces deux principes, tout en rendant compte de l'histoire de la « découverte » de ces principes.

Reconstruction historique

Il est difficile de dire à qui on doit la découverte du principe de l'équivalence entre la chaleur et le travail mécanique. Sadi Carnot a sans doute le droit de cité des « découvreurs », mais sa découverte restait trop longtemps dans l'ombre pour tirer un « profit pour la Science » [42]. Si Robert Mayer arriva à reconnaitre et à faire connaitre le principe, il partagea sa découverte, à son insu, avec Joule et Colding :

> Cette simultanéité de recherches, convergeant vers le même but, rappelle la découverte du calcul infinitésimal, découverte à laquelle Newton et Leibnitz [sic] possèdent des droits équivalents.

40. Poincaré, *Thermodynamique*, p. 1.
41. Poincaré, *cit.*, p. XIV. Passage déjà cité dans Ouverture.
42. Poincaré, *cit.*, p. 1.

> Mais, pour qu'une vérité apparaisse ainsi en même temps à des savants travaillant isolément, et ce fait n'est pas rare dans l'histoire de la Science, il est nécessaire que les esprits s'y trouvent naturellement préparés. Ainsi ne peut-on séparer l'exposé du principe de Mayer de celui du mouvement scientifique qui a précédé sa découverte [43].

Descartes fut le premier à établir l'idée de conservation dans un langage mathématique. « Dieu étant immuable, il a dû conserver la même quantité de mouvement », ce qui se traduit en mécanique par ceci : dans un système de corps, la somme des quantités de mouvement de chaque corps, calculé par mv, reste la même [44]. Malgré sa valeur historique non négligeable, « l'inexactitude de cette égalité est évidente » dit notre mathématicien. « Pour s'en convaincre, il suffit de remarquer que, si elle est vraie dans le mouvement absolu, elle cesse de l'être dans le mouvement relatif lorsque les axes sont animés d'un mouvement de translation [45]. » En effet, selon la relativité du mouvement (relativité dite galiléenne, principe établi, rappelons-le, par Descartes lui-même indépendamment de Galilée), chaque corps en mouvement rectiligne et uniforme comporte comme s'il était en repos et la quantité de son mouvement, nulle. Cette quantité ne sera plus nulle du point de vue d'un autre corps s'il est en translation par rapport au premier. Par conséquent, deux corps de masses différentes m_1 et m_2 ne se mesureront pas par la même quantité de mouvement. La quantité mv ne demeure donc pas invariante, contrairement à l'estimation de Descartes.

Si cette conclusion n'apporte rien de nouveau, elle a ceci de particulier de s'accompagner d'un commentaire *historique* fait par Poincaré lui-même :

> Descartes s'est bien aperçu que son principe n'est pas confirmé par l'expérience ; on peut s'en assurer en lisant une remarque qui vient à la suite de sa théorie du choc des corps ; mais il croyait que l'accord serait rétabli si l'on tenait compte de la quantité de mouvement de l'éther [46].

Il est douteux, pourtant, que Descartes fît allusion à la quantité du « mouvement de l'éther ». Le passage en question dans les *Principes* de Descartes est le suivant :

> En effet, il arrive souvent que l'expérience peut sembler d'abord répugner aux règles que je viens d'expliquer, mais la raison en est évidente. Car elles présupposent que les deux corps B et C sont parfaitement durs, et tellement séparés de tous les autres, qu'il n'y en a aucun au-

43. Poincaré, *cit.*, pp. 1-2.
44. Poincaré, *cit.*, § 4 (« Le principe de la conservation du mouvement ») et § 5 (« La force vive »).
45. Poincaré, *cit.*, p. 5.
46. Poincaré, *cit.*, p. 6, note (1).

tour d'eux qui puisse aider ou empêcher leur mouvement ; et nous n'en voyons point de tels en ce monde [47].

Ce n'est donc pas l'éther pour Descartes, contrairement ce que dit Poincaré, mais l'*atmosphère* qui sert d'obstacle au mouvement et d'où vient le désaccord de la réalité du mouvement avec ces « règles ». Pourtant, il est remarquable que Poincaré prenne en compte le rapport du principe de la conservation avec la théorie du choc chez Descartes. Il est intéressant aussi de noter qu'« une grande importance historique » est attribuée à Descartes pour avoir « préparé et conduit Leibnitz à la considération de la *force vive* », avec cette idée selon laquelle « *quelque chose* doit rester invariable dans l'univers » [48]. Avec cette différence que, si pour Descartes la vitesse est une quantité dont seule la grandeur compte, Leibniz prend en considération un ensemble de trois composantes de directions arbitraires (nommées par Poincaré ξ_i, η_i, ζ_i), défini par la somme des carrés des composantes de vitesse $v_i = \sqrt{{\xi_i}^2 + {\eta_i}^2 + {\zeta_i}^2}$. Le produit de la masse et du carré de vitesse, à savoir la force vive, s'écrit alors :

$$m_i {v_i}^2 = m_i {\xi_i}^2 + m_i {\eta_i}^2 + m_i {\zeta_i}^2$$

Dans un système de points matériels, continue Poincaré, ce « *quelque chose* » qui reste invariable doit être la somme de la force vive, $\sum m_i {v_i}^2$, non pas la somme $\sum m_i v_i$. Leibniz a également considéré « l'action latente » qu'un poids à une certaine hauteur ou un ressort tendu sont capables de produire. Si, à cette action qui correspond à notre énergie potentielle, s'ajoute la force vive, c'est-à-dire notre énergie cinétique, cela constitue l'« action motrice », ce qui est l'énergie totale pour nous. Leibniz savait que c'est l'action motrice, à savoir la somme de la force vive et de l'action latente, qui reste constante ; il « était donc sur la voie de la découverte du principe de la conservation de l'énergie », commente notre mathématicien [49].

Deux siècles plus tard, ce principe sera redécouvert par Joule et Mayer par une voie empirique et sous une forme généralisée comprenant les phénomènes de la chaleur, et suppléé par le second principe. Mais Poincaré indique que l'énoncé exact se trouve également dans un manuscrit posthume de Carnot dans le chapitre III de son cours, intitulé « Dernières idées de Sadi Carnot ». En effet, dans son mémoire « Réflexions sur la puissance motrice du feu », Carnot établit le principe qui portera son nom :

La production de la puissance motrice est donc due, dans les machines à vapeur, non à une consommation réelle du calorique, mais *à son*

47. Descartes, *Principes de la philosophie*, Partie II, § 53, AT IX 93.
48. Poincaré, *Thermodynamique*, p. 6.
49. Poincaré, *cit.*, p. 7.

> *transport d'un corps chaud à un corps froid*, c'est-à-dire à son rétablissement d'équilibre, équilibre supposé rompu par quelque cause que ce soit, par une action chimique, telle que la combustion, ou par un autre [50].

C'est quand il y a deux sources différentes en température que se produit ce transport, ou l'« effort » de rétablir l'équilibre. La différence de température suffit à elle seule à produire un tel effet, quels que soient le mécanisme ou les composantes dont dispose la machine. Principe qui s'applique à « toute machine mise en mouvement par la chaleur », et s'énonce de manière générale, voire universelle :

> Partout où il existe une différence de température, partout où il peut y avoir rétablissement d'équilibre *du calorique*, il peut y avoir aussi production de puissance motrice. La vapeur d'eau est un moyen de réaliser cette puissance, mais elle n'est pas le seul [*sic*] : tous les corps de la nature peuvent être employés à cet usage ; tous sont susceptibles de changements de volume, de contradictions et de dilatations successives par des alternatives de chaleur et de froid ; tous sont capables de vaincre, dans leurs changements de volume, certaines résistances et de développer la puissance motrice [51].

Tout corps peut servir de machine productrice de la puissance motrice. Il s'agit d'une machine non au sens mécaniste dont le mouvement est déterminé par la masse et la vitesse comme, par exemple, une horloge ou une roue, mais une machine qui travaille par la *différence de température*, dont le mouvement provient de la tendance naturelle à rétablir l'équilibre (« du calorique », pour reprendre les mots de Carnot) et à échanger de la chaleur jusqu'à l'effacement de cette même différence. C'est la différence de température qui sert de « moteur » au mouvement de la vapeur, mouvement qui a pour « fin » l'anéantissement de cette différence même. Toujours est-il que, comme on peut le voir dans le passage qui vient d'être cité, la conception du *calorique* subsiste chez Carnot : la chaleur serait donc due à une propriété du corps au même titre que la masse, avec sa quantité qui se conserve ; elle « cause » des mouvements sans pour autant être un mouvement elle-même, ni porteuse de la puissance motrice. C'est pourquoi l'autre principe de la thermodynamique, celui de la conservation de l'énergie, ne portera pas son nom. Ce sera à Mayer et Joule de s'écarter de la conception substantialiste de la chaleur et, par conséquent, d'établir correctement l'équivalence du travail et la chaleur de manière quantitative.

50. Sadi Carnot (1978), *Réflexions sur la puissance motrice du feu*, éd. établie et annot. par Robert Fox, Paris : J. Vrin, pp. 10-11.
51. Carnot, *cit.*, pp. 12-13. Mon soulignement.

Il est vrai que Carnot reposa sur deux hypothèses : celle du calorique et celle de l'impossibilité du mouvement perpétuel. Pourtant, il finira par abandonner la première et changera ses idées tardivement, comme il le montre dans une note postérieure, écrite juste après *Réflexions* mais restée inédite avant d'être publiée en 1878 par son frère cadet Hippolyte.

> La chaleur n'est autre chose que la P[uissance] M[otrice], ou plutôt que le mouvement qui a changé de forme, C'est un mouvement dans les particules du corps, partout où il y a destruction de la P[uissance] M[otrice], il y a en même temps production de chaleur en quantité précisément proportionnelle à la quantité de la P[uissance] M[otrice] détruite. Réciproquement partout où il y production de chaleur, il y a destruction de la P[uissance] M[otrice].
>
> On peut donc poser en Thèse générale que la P[uissance] M[otrice] est en quantité invariable dans la nature, qu'elle n'est jamais à proprement parler ni produite, ni détruite, à la vérité elle change de forme, c'est-à-dire elle produit tantôt un genre de mouvement, tantôt un autre, mais elle n'est jamais anéantie [52].

Poincaré cite le passage en son entier, ce qui est assez rare chez Poincaré qui était visiblement peu enclin à citer d'autres auteurs et préférait exprimer ou transposer leurs idées dans son propre langage. Ensuite lit-on son commentaire [53] : « Pouvait-on exprimer d'une manière plus claire et plus précise le principe de la conservation d'énergie ? »

Le principe de la conservation en question désigne le principe de l'équivalence entre la puissance motrice, à savoir l'énergie, et la chaleur. Il est au départ une *loi empirique*, découverte par l'expérience et soumise à la vérification expérimentale ; suffisamment vérifié, il prend une tout autre allure : il en vient à se fonder moins par l'expérience qu'à l'appui des autres principes plus fondamentaux, de façon à s'imposer pour une raison *logique*. On comprend alors pourquoi Poincaré, après avoir historiquement restitué les raisonnements des Mayer ou des Carnot tels qu'ils étaient conçus par ces auteurs, avec leurs « longs tâtonnements », Poincaré procède à une « reconstruction logique », c'est-à-dire à examiner l'équivalence, la compatibilité ou bien la compatibilité entre ces deux principes et plusieurs formes d'énoncés de ces principes.

Reconstruction logique

L'une des raisons pour lesquelles le principe de Mayer s'impose, c'est que sa négation entraine la contradiction avec l'un des principes fondamentaux de la

52. Carnot, *cit.*, p. 247. Feuille F, 7 recto.
53. Poincaré, *Thermodynamique*, p. 54.

mécanique rationnelle qu'est l'impossibilité du mouvement perpétuel[54]. Selon le principe de l'impossibilité du mouvement perpétuel, une machine n'épuise jamais tout le travail dont elle est *capable*, autrement dit, son travail *potentiel* ne se transforme pas dans sa totalité en travail *effectif*. Pourtant, de ce principe s'ensuit-il seulement que le travail ne *se crée* pas à nouveau ; il ne dicte pas si le travail une fois créé *se perd* ou pas. Pour arriver à la formulation correcte du principe de conservation, la non perte du travail devait être prise en compte à l'appui d'une « métaphysique supérieure » qui remonte à Descartes et Leibniz selon laquelle il y a quelque chose qui se conserve dans tout l'univers.

L'idée se retrouve chez Carnot, que Poincaré retranscrit comme suit :

> Dans une machine parfaite, la puissance motrice de la chaleur est indépendante des agents mis en œuvre pour la réaliser ; sa quantité est fixée par la température des corps entre lesquels se fait en dernier résultat le transport du calorique[55].

Parmi les machines qui travaillent sur la base de deux sources de différentes températures, aucune ne peut être plus efficace que la « machine parfaite », à savoir celle qui suit le cycle de Carnot avec des transformations réversibles[56]. Une machine plus efficace, si elle existait, effectuerait un travail plus grand que le travail nécessaire pour reproduire le calorique d'origine, de façon à perpétuer le mouvement de la machine, ce qui est absurde. « Tout d'abord on croit que nous ne pourrions le rejeter ou même douter de sa rigueur absolue sans admettre la possibilité du mouvement perpétuel ; nous nous défions bien entendu d'une telle perspective et nous nous croyons moins téméraires en affirmant qu'en niant, » dit Poincaré[57].

Mais d'où vient la croyance à cette impossibilité absolue d'un tel mouvement ? Ce fut à Clausius de traduire la formule de Carnot par l'impossibilité du transfert de la chaleur de la source froide à la chaude, sans faire recours à la notion de mouvement perpétuel. A quoi ajouta-t-il la transformation de cette chaleur, d'au moins une partie, au travail, de telle façon que le principe prenne une forme plus générale et intégrer la formule de Joule sur l'équivalence de la chaleur et du travail. Poincaré poursuit la généralisation plus loin, jusqu'à appliquer le principe à l'univers entier... même si, généralisé et absolutisé, il n'est même pas facile à énoncer :

> Il ne nous reste plus qu'un énoncé pour le principe de la conservation de l'énergie ; *il y a quelque chose qui demeure constant*. Sous cette forme,

54. Poincaré, *cit.*, § 2–3 et § 10. La référence sera également faite au chapitre VIII de *SH*, qui est une reprise partielle de la préface de la *Thermodynamique*.
55. Poincaré, *Thermodynamique*, § 91, p. 109.
56. Poincaré, *cit.*, *ibid.* Voir aussi Darrigol, « The Origin of the Concept of Entropy », pp. 1-2.
57. *SH*, p. 145.

> il se trouve à son tour hors des atteintes de l'expérience et se réduit à une sorte de tautologie. Il est clair que si le monde est gouverné par des lois, il y aura des quantités qui demeureront constantes. Comme les principes de Newton, et pour une raison analogue, le principe de la conservation de l'énergie, fondé sur l'expérience, ne pourrait plus être infirmé par elle [58].

Toute loi indique qu'il existe quelque chose qui demeure constant, et ce, par définition ; c'est un jugement analytique a priori ou une *tautologie*, en ceci que l'existence d'une telle constante est déjà impliquée dans la notion même de loi. Le principe de la conservation n'apporte alors aucune nouveauté, à part l'introduction d'un nouveau terme qu'est l'énergie. Pourtant, le principe pourrait avoir un sens si on l'applique, non à l'univers entier, mais à ses *parties* : « Dans chaque cas particulier on voit bien ce que c'est que l'énergie et l'on en peut donner une définition au moins provisoire ; mais il est impossible d'en trouver une définition générale [59]. »

Considérons une des parties comme un système limité et isolé, soustrait à toute force extérieure, où toutes les variables x ne suivent pas les lois, mais certaines, de nombre p, varient indépendamment, de sorte que seuls $n - p$ paramètres sont susceptibles d'être déterminés. On arrivera alors à spécifier ce « quelque chose » qui demeure constant. Pourtant qu'est-ce qui garantit l'indépendance réelle de ces paramètres dits « indépendants » ? Et s'ils n'étaient pas, malgré l'apparence, totalement soustraits de force extérieure ? Rien n'assure, en effet, de l'absence totale de l'influence des corps extérieurs et cette dernière peut s'avérer plus grande qu'on ne le présume. Par conséquent, le principe ne peut avoir qu'un sens relatif, relativement à des systèmes particuliers et à peu près isolés les uns des autres.

> En résumé, et pour employer le langage ordinaire, la loi de la conservation de l'énergie ne peut avoir qu'une signification, c'est qu'il y a une propriété commune à tous les possibles ; mais, dans l'hypothèse déterministe, il n'y a qu'un seul possible, et alors la loi n'a plus de sens [60].

Toujours est-il que « la loi de Mayer est une forme assez souple pour qu'on y puisse faire rentrer tout ce qu'on veut » ; elle a un sens « parfaitement clair » pour un système relativement isolé, et c'est cette « souplesse » qui explique sa durabilité et la confiance qu'elle nous inspire.

58. Préface, Poincaré, *Thermodynamique*, p. IX ; *SH*, p. 143. Nous allons revenir à la discussion de Poincaré sur les principes de Newton et sur les notions de loi et de principe en général dans le chapitre V.
59. *SH*, p. 146.
60. Poincaré, *Thermodynamique*, p. XII ; *SH*, p. 148.

Qu'en est-il du second principe ? Il a ceci de particulier qu'il s'exprime par une inégalité comme :

$$\int \frac{dQ}{T} < 0$$

Prenant pour point de départ l'« axiome de Clausius » selon lequel « on ne peut pas passer de chaleur d'un corps froid sur un corps chaud », Poincaré limite son rôle à celui de la physique mathématique, à savoir de fixer la signification précise, de trouver les hypothèses à associer à l'axiome et de retrouver l'inégalité en question par la déduction de ces hypothèses [61]. Les deux principes de la thermodynamique, à eux seuls, ne suffiraient peut-être pas à expliquer tous les phénomènes. Les tentatives d'en déduire les phénomènes chimiques ou électriques n'ont pas abouti. Pourtant, affirme Poincaré, même si tout ne se déduit pas des deux principes, leur richesse n'est pas atteinte : ils rendent toujours service en tant que majeures dans les raisonnements thermodynamiques ; s'il n'en découle pas toujours des mêmes conclusions, c'est parce qu'ils ne s'appliquent pas toujours aux mêmes mineures. La tâche de la physique mathématique est d'expliciter telles mineures et de les énoncer explicitement en particulier celles qui sont sous-jacentes.

2.2 Compatibilité ou réductibilité du second principe à la mécanique

Le dernier point du cours de thermodynamique consiste dans la démonstration de l'incompatibilité du second principe avec le mécanisme ou, en d'autres termes, de l'impossibilité d'une explication mécanique des phénomènes irréversibles [62]. De même que le premier principe est réductible à celui de la conservation de l'énergie, une fois la chaleur prise comme une forme d'énergie, quelle que soit la forme qu'elle prend, il semblerait naturel qu'il en soit de même pour le second principe. Ne serait-il pas réductible à l'un des principes mécaniques, par exemple, au principe de la moindre action ? Poincaré pose le problème en termes suivants :

> Les phénomènes irréversibles se prêtent-ils de la même manière à une explication purement mécanique ; peut-on par exemple, en se représentant le monde formé d'atomes, et ces atomes comme soumis à des attractions dépendant des seules distances, expliquer pourquoi la chaleur ne peut pas passer d'un corps froid sur un corps chaud ? Je ne le

61. Poincaré, *Thermodynamique*, p. XV

62. Sur cette question, je me suis référée notamment à Prıncipe, « Henri Poincaré : The Status of Mechanical Explanations and the Foundations of Statistical Mechanics », pp. 130-137.

> crois pas, et je vais expliquer pourquoi la théorie de l'illustre physicien ne me semble pas s'appliquer à ce genre de phénomènes[63].

Pour cet « illustre physicien », Hermann von Helmholtz, les équations ordinaires de la dynamique, décrites par la fonction dite hamiltonienne $H = H(p, q)$, restent invariantes au changement du signe de temps, de t à $-t$. C'est en ce sens, et en ce sens seulement, que le système décrit par ces équations peut se dire *réversible*. Le système monocyclique imaginé par Helmholtz est un système constitué de mouvements invisibles en raison de leur rapidité ; c'est à de tels mouvements « cachés », dont les vitesses ne peuvent être renversées, que l'on doit les phénomènes irréversibles.

Dans un système pareil peut-on définir une fonction de l'état comme l'entropie, celle qui ne fait qu'augmenter ? Si oui, peut-elle être conciliable avec d'autres principes de la mécanique, tels que celui de la moindre action ? Poincaré démontre l'impossibilité d'une fonction en croissance constante avec le temps qui soit compatible avec le mécanisme. Si le système contient une fonction comme celle d'entropie, qui augmente continuellement avec le temps, une telle symétrie ne sera pas garantie.

> Nous devons donc conclure que les deux principes de l'augmentation de l'entropie et de la moindre action (entendu au sens hamiltonien) sont inconciliables. Si donc M. von Helmholtz a démontré, avec une admirable clarté, que les lois des phénomènes réversibles découlent des équations ordinaires de la Dynamique, il semble probable qu'il faudra chercher ailleurs l'explication des phénomènes irréversibles et renoncer aux hypothèses familières de la Mécanique Rationnelle d'où l'on a tiré les équations de Lagrange et de Hamilton[64].

Le problème sera repris dans le chapitre XVII de *Thermodynamique*, qui est le dernier du livre, intitulé « Réduction des principes de la thermodynamique aux principes généraux de la mécanique ». Clausius a le premier tenté de ramener le second principe à la mécanique rationnelle, mais c'est toujours Helmholtz qui « a développé une théorie beaucoup plus parfaite », sans pour autant parvenir à « rendre compte des phénomènes irréversibles[65] ».

Poincaré prend le mouvement du pendule de Foucault comme un exemple des phénomènes irréversibles seulement en apparence. Le pendule est en oscillation, cette oscillation elle-même est en *translation* dans le sens opposé de la rotation de la Terre qui en est la cause. Cette translation n'ira jamais dans l'autre sens, mais, en réalité, elle est l'effet du mouvement de la Terre[66] : le

63. Henri Poincaré (1889), « Sur les tentatives d'explication mécanique des principes de la thermodynamique », *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 108, 11, p. 550.
64. Poincaré, *cit.*, pp. 552-553.
65. Poincaré, *Thermodynamique*, § 309, p. 392.
66. Poincaré, *cit.*, § 327, p. 444.

mouvement de notre planète est « caché » pour nous en ce sens qu'il n'est pas « visible » pour nous les observateurs terrestres. Mais il n'en est pas de même pour les phénomènes irréversibles. A un système soustrait à toute action extérieure, qu'est-ce qui arriverait quand l'entropie atteint le maximum [67] ? Puisque l'entropie ne peut décroitre, elle devrait rester à la valeur maximale et le système, en équilibre.

En conclusion : « les phénomènes irréversibles et le théorème de Clausius ne sont pas explicables au moyen des équations de Lagrange [68]. » La tentative helmholtzienne de réduire les principes de la thermodynamique aux principes généraux de la mécanique est donc vouée à l'échec, force est de conclure l'incompatibilité du mécanisme avec au moins l'un des deux principes de la thermodynamique. « Il y a deux sortes de mécanismes [69] » : l'un, cinétique, où l'univers est représenté par les mouvements d'atomes sans action à distance entre eux, et soumis exclusivement aux lois des chocs ; l'autre, dynamique, toujours constitué des atomes, avec cette différence que ceux-ci sont soumis à l'action à distance par la force d'attraction et/ou celle de répulsion, lesquelles dépendent de la masse et de la distance.

2.3 Autour du débat avec Tait

Lors de la publication du cours en 1892, P. G. Tait fait paraitre un compte rendu critique du livre dans la revue *Nature* le 14 janvier 1892 [70]. Ceci engage notre mathématicien dans une controverse sur les colonnes de la même revue : il ne tarde pas à répondre (le 24 février) sur les pages de la même revue, entamant un échange bref, mais assez vif qui durera jusqu'au 20 mai.

Tait qualifie l'approche de Poincaré de trop « mathématicienne » : elle ne respecte guère la « règle » des physiciens selon laquelle l'usage de l'analyse mathématique doit être limité et encadré par la compréhension préalable des enjeux proprement *physiques*, c'est-à-dire directement liés et dus à l'expérience [71]. D'où, d'après Tait, des passages peu clairs, voire inexacts. Mais le jugement plus sévère, et peut-être plus significatif, vient de ce que le livre laisse trop peu de place au principe de Carnot, dont l'auteur aurait, de plus, ignoré le fondement réel qu'est la statistique [72]. A quoi répond notre savant :

67. Poincaré, *cit.*, § 329, p. 446.
68. Poincaré, *cit.*, § 330, p. 449.
69. Poincaré, *cit.*, pp. XVIII-XIX.
70. « Poincaré's *Thermodyanamics*, by P. G. Tait », repris in Poincaré, *La correspondance Poincaré-physiciens*, pp. 384-388. La correspondance entre Poincaré et Tait est reprise dans *Œuvres* X, p. 231–233, puis dans Poincaré, *cit.*, § 55, pp. 345–351.
71. Poincaré, *cit.*, p. 385.
72. « It completely ignores the real (i.e. statistical) basis of the Second Law of Thermo-

> J'ai laissé complètement de côté une explication mécanique du principe de Clausius que M. Tait appelle « the true (i.e. statistical) basis of the second Law of Thermodynamics ».
>
> Je n'ai pas parlé de cette explication, qui me parait d'ailleurs assez peu satisfaisante, parce que je désirais rester complètement en dehors de toutes les *hypothèses moléculaires* quelques ingénieuses qu'elles puissent être ; et en particulier *j'ai passé sous silence la théorie cinétique des gaz*[73].

A quoi rétorque Tait :

> As regards the foundation of the Second Law, it is unfortunately clear that M. Poincaré and I must continue to differ : so that further discussion of this point would be unprofitable. For I presume that M. Poincaré has not formed his opinion without careful study of all that Clerk-Maxwell said on the point : so that even a perusal of Lord Kelvin's latest paper (*Fortnightly Review*, March 1892) is not likely to induce him to change it[74].

Si Tait mentionne « On the Dissipation of Energy », une conférence de 1892 de Kelvin, c'est probablement parce que c'est l'un de ses écrits les plus récents à ce sujet. Dans cet article, Kelvin retrace le chemin qu'il a parcouru en thermodynamique, de sa « découverte » du mémoire de Carnot avec les notes posthumes pendant son séjour à Paris, à l'extrapolation du second principe, pour en dégager une « tendance universelle » de la dissipation de l'énergie, en passant par l'origine de la chaleur solaire. Il est aussi question de ce que Tait appelle « foundation of the Second Law » : Kelvin tente, en effet, de chercher dans l'hypothèse des chocs fortuits des atomes (« fortuituous concourse of atoms ») une explication complète de la dissipation de l'énergie (« the full explanation of the theory of the dissipation of energy[75] »).

Qu'il ait formé son opinion avec ou sans un examen attentif de « all that Clerk-Maxwell said on the point[76] », Poincaré ne semble pas tenir spécialement à l'interprétation fondée sur la théorie cinétique des gaz et les « hypothèses moléculaires » : elle n'est qu'une explication mécanique parmi plusieurs pour lui, tout aussi « peu satisfaisante » que les autres. Il n'en reste pourtant pas

---

dynamics. » Lettre du 4 mars 1892 in Poincaré, *cit.*, p. 347.

73. Poincaré, *cit.*, p. 348. C'est moi qui souligne.

74. Lettre du 26 mars 1892 in Poincaré, *cit.*, § 55. 5, pp.349–350.

75. William Thomson (1892), « On the Dissipation of Energy », *Fortnightly Review*, 51, *Popular Lectures and Addresses* II (London : MacMillan, 1894), p. 451-474, p. 465.

76. Il est curieux de constater que, à peu près au même moment, Poincaré s'engage dans une correspondance plus ou moins intense au sujet de la stabilité avec Kelvin, qui aurait été probablement motivé par le mémoire d'Oscar II de 1890. Les échanges continueront entre les deux, chacun faisant part à l'autre de ses ouvrages et articles. Nous allons revenir sur le rapport de Poincaré avec Kelvin dans le chapitre VI. Voir *infra*. A tel point que, comme nous allons le voir, Poincaré rédigera la notice nécrologique .

indifférent à la critique de Tait ; celle-ci l'a probablement incité à réviser et même à refaire le cours – chose plutôt rare chez lui.

Au second semestre de l'année 1892–1893, c'est-à-dire au début 1893, Poincaré fait son deuxième cours sur la thermodynamique qui donne lieu à une seconde édition de *Thermodynamique*, publiée en 1908 [77]. C'est une véritable réédition, non seulement « revue et corrigée », mais aussi « augmentée », contenant une vingtaine de pages ajoutées, comprenant des sections sur la vérification expérimentale du principe de l'équivalence, l'expérience de Joule, la définition de la température absolue ou bien l'entropie, et, surtout, un bref passage sur la mécanique statistique à la fin du livre avec le nom de Boltzmann, en parlant de la réduction du second principe à la mécanique :

> Toutes les tentatives de cette nature doivent donc être abandonnées ; les seules qui aient quelques chances de succès sont celles qui sont fondées sur l'intervention des *lois statistiques* comme, par exemple, la théorie cinétique des gaz.
> Ce point de vue, que je ne puis développer ici, peut se résumer d'une façon un peu vulgaire comme il suit :
>
> > Supposons que nous voulions placer un grain d'avoine au milieu d'un tas de blé ; cela sera facile ; supposons que nous voulions ensuite l'y retrouver et l'en retirer ; nous ne pourrons y parvenir. Tous les phénomènes irréversibles, d'après certains physiciens, seraient construits sur ce modèle [78].

Il ne parait donc pas tout à fait convaincu de l'interprétation statistique du second principe. L'appréciation viendra progressivement.

3 Les années de débats (1893–1896)

3.1 Evolutionnisme ou mécanisme ? Un débat français

Créée en 1893, *Revue de métaphysique et de morale* ne tarde pas à devenir un haut lieu de rencontre entre philosophes et savants, avec la participation active des philosophes-savants. Les sujets « d'actualité » de l'époque, comme le fondement de la géométrie non euclidienne ou la possibilité et la spécificité de la science de la vie, suscitent des controverses et produisent des articles enchaînés au long de plusieurs numéros, ce qui est prisé et même intentionnellement

77. Un nouveau tirage sortira en 1923 sur cette « Deuxième édition, revue et corrigée », toujours chez Gauthier-Villars et avec les mêmes paginations : XIX - 458 p.

78. Henri Poincaré (1908c), *Thermodynamique*, sous la dir. de Jules Blondin, 2e éd., Paris : Gauthier-Villars, § 333, p. 450.

ARTICLES ORIGINAUX

Connaissance (Essai sur le caractère général de la), par G. Remacle... 249-280
Continu mathématique (le), par H. Poincaré..... 26-34
Dialogue philosophique entre Eudoxe et Ariste, par Criton..... 522-533
Évolutionnisme physique (l'), par L. Weber..... 425-452
Hégel (du vrai sens de la dialectique de), par J.-E. Mac Taggart..... 538-552
Maine de Biran (Lettres inédites de — à André-Marie Ampère), communiquées par A. Bertrand..... 313-323 461-484 553-563
Mécanisme et Expérience, par H. Poincaré..... 534-537
Métaphysique et Morale, par F. Ravaisson..... 6-25
Nombre (le concept du — chez les Pythagoriciens et les Éléates)..... 140-156
Nombre (de l'Idée de — considérée comme fondement des sciences mathématiques), par C. Riquier..... 346-368
Philosophie première (Essai sur quelques problèmes de), par F. Rauh. 35-62
Spinoza (la logique de), par L. Brunschvicg..... 453-467
Spinoza (Le problème moral dans la philosophie de), par V. Delbos... 126-139
Spir et sa doctrine, par A. Penjon..... 216-248
Vie (Sur l'origine de la — terrestre), par Sully Prud'homme..... 324-345
Zénon d'Élée (le mouvement et les arguments de), par G. Noël..... 107-125
Zénon d'Élée (les prétendus sophismes de), par V. Brochard..... 209-215

DISCUSSIONS

Discussion (la — en philosophie)..... 163-166
Droit (Les transformations du), réponse à M. R. Berthelot par G. Tarde. 573-575
Évolutionnisme (l' — physique et le principe de la conservation de l'énergie), réponse à M. L. Weber par L. Couturat..... 564-572
Géométrie non euclidienne (la — et le principe de similitude), réponse à M. L. Couturat par G. Lechalas..... 199-201
— (Note sur la — et la relativité de l'espace), réponse à M. Lechalas par L. Couturat..... 302-309
Zénon d'Elée (à propos de). — Le mouvement et les partisans des indivisibles, par F. Evellin..... 383-395
— Note sur les arguments de Zénon d'Élée, par G. Lechalas..... 396-400
— Réponse à M. Brochard, par G. Milhaud..... 400-404

FIGURE 10 – Extrait de la table des matières du premier volume de *Revue de métaphysique et de morale*, 1893

recherché par la rédaction [79]. **Louis Weber** ouvre l'une de telles controverses avec son premier article « L'évolutionnisme physique » ; la controverse ne résistera pas au « triage » du temps, mais elle mérite toujours une anamnèse si ce n'est que pour une unique raison qu'elle engage notre mathématicien [80].

Début

Inspiré de la philosophie de H. Spencer, L. Weber oppose l'évolutionnisme au mécanisme, ainsi qu'au déterminisme. D'après lui, l'évolutionnisme est une idée « primitive », immédiatement donnée et affirmée par notre expérience ordinaire. En revanche, le mécanisme considère le monde comme un système *conservatif*, à savoir un système soumis au principe de la conservation de

79. Ainsi lit-on dans un éditorial, justement intitulé « Discussion en philosophie » : « Certes nous ne désirons pas que la discussion donne ainsi une vie factice, une importance trompeuse aux travaux des philosophes. Mais nous souhaitons de tout notre cœur qu'elle les signale à l'attention du public, qu'elle l'aide à en estimer le prix ; qu'elle éprouve les idées nouvelles pour discerner celles qui méritent de durer, qu'elle guide et hâte le triage que le temps ferait tout seul peut-être, mais plus négligemment. » « Note critique. Discussion en philosophie », *Revue de métaphysique et de morale* 1, p. 165.

80. Louis Weber (1893), « L'évolutionnisme physique », *Revue de métaphysique et de morale*, 1. Sur le débat en question, voir Brunhes, *La dégradation de l'énergie*, pp. 337-339.

l'énergie, tel un pendule en mouvement périodique, ou encore un corps en chute libre. Les systèmes mécaniques sont *périodiques*, composés de mouvements rythmiques ou répétitifs à certains intervalles. Il semble donc y avoir une « connexion étroite » entre le système *conservatif* et la périodicité. L'autre caractère du système conservatif : il est *fermé*, isolé, c'est-à-dire soustrait à toutes les matières et forces extérieures. Puisque l'énergie totale d'un système n'est pas infinie, et conserve la même valeur tout en se transformant sans cesse, il arrive nécessairement à ce système de revenir à ce qu'il a déjà été, à l'état par lequel il est déjà passé et aussi par lequel il va repasser après. En d'autres termes, un système conservatif est un système oscillatoire qui se répète à certains intervalles de temps, retourne régulièrement à un même état ; il n'y a pas de différence entre les états initial et final, ni, par conséquent, d'origine ou de formation proprement dites. Et Weber de tirer un argument anti*cosmogonique* :

> Il s'ensuit que toute cosmogonie fondée sur les principes de la mécanique rationnelle n'a en réalité aucune prise ni sur le passé ni sur l'avenir ; son domaine est l'actuel et elle n'en sort point, quelque effort qu'elle fasse. Et c'est aussi pourquoi toute cosmogonie mécaniste et géométriquement déterministe est illusoire [81].

Poincaré répond à Weber, sans le nommer explicitement, dans le numéro suivant, intitulé « Le mécanisme et l'expérience » [82]. Il adopte l'opposition entre la conception mécaniste et les « faits expérimentaux », mais en termes qui étaient absents chez Weber : la *réversibilité* et l'*irréversibilité*. Le mécanisme représente le monde comme *réversible*, à la différence du phénomène tel qu'il nous *apparait* (au sens strict et propre au mot « phénomène ») et tel que nous l'observons dans l'expérience, qui parait, en effet, *irréversible*.

> Dans l'hypothèse du mécanisme, tous les phénomènes doivent être *réversibles* ; par exemple les astres pourraient parcourir leurs orbites dans le sens rétrograde sans que la loi de Newton fût violée ; il en serait encore de même avec une loi d'attraction quelconque. Ce n'est donc pas un fait particulier à l'astronomie, et la *réversibilité* est une conséquence nécessaire de toute hypothèse mécaniste [83].

Poincaré prend pour exemple la rotation des astres dans un sens unique, au lieu d'évoquer, comme l'a fait Weber, des corps en chute libre ou des pen-

81. Weber, « L'évolutionnisme physique », p. 449.

82. Si l'article n'a pas été repris dans les œuvres philosophiques de Poincaré, il paraitra, en traduction anglaise, dans Brush et Hall, *The Kinetic Theory of Gases*, pp. 377-381 (Part II, Chapter 6). Il est d'ailleurs qualifié par S. Brush d'un des plus intéressants parmi les écrits de Poincaré au sujet de la cosmologie : Brush, *Nebulous Earth*, p. 129. Pour une discussion plus en détail de l'article, voir Brown *et al.*, « Boltzmann's H-theorem, its Discontents, and the Birth of Satistical Mechanics », p. 178 ; Prıncipe, « Henri Poincaré : The Status of Mechanical Explanations and the Foundations of Statistical Mechanics », pp. 138-139.

83. Henri Poincaré (1893a), « Le mécanisme et l'expérience », *Revue de métaphysique et de morale*, 1, p. 534.

dules qui sont, d'ailleurs, exemples canoniques de la mécanique rationnelle. La rotation d'une planète s'effectue dans un sens inverse de la rotation d'horloge et qu'on a coutume d'appeler « direct ». Pourtant, elle peut se dire réversible pour cette raison qu'elle *peut* s'effectuer dans le sens rétrograde, sans compromettre la loi. Et pour cause : la loi, qui détermine les *mouvements* des astres c'est-à-dire leurs *positions* et *vitesses* tout au long de leur trajectoire, reste totalement indifférente à la *direction* de ces mêmes mouvements. Une fois la position et la vitesse fixées au commencement du système solaire, les astres tournent toujours dans le même sens, mais la translation rétrograde demeure toujours une possibilité. Si une planète dans un état A passe à un état B, il lui est possible de passer de B à A, selon les mêmes lois du mouvement.

Il n'en est pas de même pour les phénomènes irréversibles. Si un système composé d'une source chaude et d'une source froide (état A) arrive à l'équilibre (B), il ne revient jamais de B à A. Et ce, « ni par le même chemin ni par un chemin différent » : les molécules ne peuvent retracer leurs trajectoires exactement inverses pour que le système retourne à l'état A ; A ne sera pas non plus retrouvé en aucune autre manière. « C'est ce qu'on peut exprimer en disant que non seulement il n'y a pas réversibilité directe, mais qu'il n'y a pas même réversibilité indirecte [84]. »

Poincaré discute des deux hypothèses proposées pour résoudre la difficulté : celle de Helmholtz et celle des « mécanistes anglais ». Pour la première il revient sur le pendule de Foucault, pour exemplifier non pas les mouvements périodiques et réversibles comme chez Weber, mais, bien au contraire, les phénomènes irréversibles. La rotation du pendule se fait dans un sens unique ; si le changement de sens est « bien entendu *irréalisable*, pour nous il est *concevable* ; il ne le serait pas pour un homme qui croirait notre planète immobile » [85]. De même, les phénomènes, pour paraitre irréversibles, ne cacheraient-ils pas des mouvements « invisibles » ? Ce serait là une explication « séduisante », mais « insuffisante » ; « elle fait voir pourquoi il n'y a pas de réversibilité *directe* ; mais on démontre qu'il devrait y avoir quand même réversibilité *indirecte* [86] », commente Poincaré. Si le retour au même état n'est pas possible par le même chemin, cela n'implique pas nécessairement une impossibilité absolue, le retour par une autre voie, à savoir la réversibilité indirecte, étant toujours possible.

C'est pourquoi Poincaré se tourne vers l'autre explication, statistique celle-ci, reprenant la métaphore du mélange de l'orge et du blé [87] : il est facile de

84. Poincaré, *cit.*, pp. 534-535.
85. Poincaré, *cit.*, p. 535.
86. *ibid.*
87. Le deuxième cours de thermodynamique, évoqué plus haut, date du début de 1893. Le passage relatif à la théorie cinétique des gaz aurait été prononcé à la fin du cours, mais il

cacher un grain d'orge dans un sac du blé, mais, une fois caché, impossible de le retrouver, *pour cette raison* que les grains sont tellement « petits et nombreux » qu'il y a un très grand nombre de combinaisons possibles. Autrement dit, l'irréversibilité des phénomènes tient à ce que les molécules qui les constituent sont trop petites et nombreuses à nos sens, qui sont trop grossiers pour observer directement les mouvements granulaires, non pas à ce que la réversibilité soit absolument impossible. Fidèle à l'interprétation de Maxwell, Poincaré fait aussi recours à la métaphore du démon, non sans ajouter un détail : si le démon restituait au récipient son état initial, chaque molécule ne retournerait pourtant pas nécessairement à sa position initiale, pas plus qu'elle ne passe exactement par le même chemin. Ainsi la réversibilité *indirecte* est-elle sauvée.

Cette manière de voir les choses, qui est la base de la théorie cinétique des gaz, permettra-t-elle de concilier le mécanisme avec l'expérience et, éventuellement, d'éviter la mort thermique ? Il peut y avoir une autre manière de voir [88] :

> Un théorème facile à établir nous apprend qu'un monde limité soumis aux seules lois de la mécanique, repassera toujours par un état très voisin de son état initial. Au contraire, d'après les lois expérimentalement admises (si on leur attribue une valeur absolue et qu'on veuille en pousser les conséquences jusqu'au bout), l'univers tend vers un certain état final dont il ne pourra plus sortir. Dans cet état final, qui sera une sorte de mort, tous les corps seront en repos et à la même température. Le monde, d'après elles, tend d'abord vers un état où il restera longtemps sans changement apparent ; et cela est conforme à l'expérience.

Nous avons vu plus haut l'objection de Loschmidt au second principe, à l'appui de l'incompatibilité avec les équations dynamiques qui sont réversibles. Poincaré développe un argument similaire, sans probablement le savoir : le conflit entre le mécanisme et l'expérience vient de ce qu'on octroie aux « lois expérimentalement admises » une « valeur absolue » et en tire des conséquences poussées jusqu'au bout, dont la mort thermique de l'univers. Pourtant, s'agit-il vraiment d'un conflit ? Ces lois sont-elles réellement incompatibles les unes avec les autres ? C'est ici qu'intervient ce théorème « facile à établir » :

> mais il ne s'y maintiendra pas toujours, de sorte que le théorème cité plus haut n'est pas violé ; il y demeurera seulement pendant un temps énorme, d'autant plus long que les molécules seront plus nombreuses. Cet état ne sera donc pas la mort définitive de l'univers, mais une sorte de sommeil, d'où il se réveillera après des millions de millions de siècles [89].

aurait toujours précédé « Le mécanisme et l'expérience », celui-ci étant publié en novembre de la même année.

88. Poincaré, « Le mécanisme et l'expérience », p. 536.
89. *ibid.*

L'état final ne sera alors pas « une sorte de mort », ni, d'ailleurs, tout à fait final ; il y restera pendant une longue période de temps avant de retourner à son état initial. La mort thermique est substituée à « une sorte de sommeil » qui attend de se réveiller au bout d'un temps extrêmement long. D'où vient alors le conflit ? Il n'y a plus de conflit, répond Poincaré : c'est le mécanisme qui sert de base aux lois de l'expérience. Comment se fait-il que « les prémisses sont en contradiction au moins apparente avec la conclusion, où l'on trouve en effet la réversibilité dans les prémisses et l'irréversibilité dans la conclusion »[90] ? La réponse en est qu'il n'y a pas l'irréversibilité dans la conclusion, mais une réversibilité à long terme.

Nous allons voir comment le mathématicien Ernest Zermelo reprend cette idée trois ans plus tard, pour faire une objection à l'interprétation statistique de Boltzmann. Mais Zermelo est précédé d'un autre « logisticien » qui s'est intéressé à ce problème mécanique et physique : Louis Couturat.

Suite et fin

Peu de temps après « Le mécanisme et l'expérience », Couturat fait paraitre un article de revue. Il critique d'abord le constat selon lequel tous les systèmes *conservatifs* sont oscillatoires ou périodiques, qui n'est, selon lui, que la formulation plutôt inexacte d'un théorème plus général, auquel « M. Poincaré fait allusion dans l'article qu'on a lu ci-dessus » et Couturat propose d'attribuer le nom de « théorème de la phase » :

> Étant donné un état quelconque du système, qu'on peut toujours considérer comme initial, concevons chacun de ses points comme le centre d'une petite sphère. Le théorème de la phase signifie que le système passera par une infinité d'états tels que chacun de ses points se retrouve, sinon dans sa position initiale, du moins dans la petite sphère qui l'entoure, et avec une vitesse très voisine de celle qu'il avait dans l'état initial[91].

Si le système ne repasse pas exactement par les mêmes états, il repassera du moins par des états infiniment voisins, en tout cas suffisamment pour qu'on parle d'un retour *à peu près* aux mêmes états. A un tel système peut-on attribuer une *périodicité* « sinon parfaite, au moins approximative », même si sa période est trop longue[92]. Mais cela ne peut constituer à lui seul un contre-argument, rétorquera Weber : si le théorème ne manque pas d'exceptions, ce

90. Poincaré, *cit.*, p. 537.
91. Louis Couturat (1893), « L'évolutionnisme physique et le principe de la conservation d'énergie », *Revue de métaphysique et de morale*, 1, p. 569, note 1.
92. *ibid.*

sont toujours des cas exceptionnels, même « infiniment peu probables », trop peu probables pour servir d'objection décisive à l'évolutionnisme.

Couturat juxtapose l'incompatibilité de l'évolutionnisme physique avec le déterminisme mécanique, à celle entre deux principes de la thermodynamique signalée par Poincaré, l'un impliquant la réversibilité et l'autre, l'irréversibilité, cette dernière étant due à l'augmentation d'une fonction d'état qu'est l'entropie [93]. La contradiction se manifeste, toujours selon le philosophe, dans la théorie cinétique des gaz, et si le gaz est constitué d'un ensemble de molécules gazeuses, de deux choses l'une : ou bien chacun des points du système se retrouve dans sa position initiale, si bien que le système « oscille » autour de son état initial, ou bien il se rapproche de l'état final où les molécules sont également réparties. Couturat essaie de l'expliquer en faisant référence encore à notre mathématicien, encore plus précisément à son « cours sur la *Théorie cinétique des gaz*, professé à la Sorbonne en 1893 » [94]. Tant que le nombre des molécules est supposé extrêmement grand ; plus il est grand et va à l'infini, plus la période de la « phase » est longue, jusqu'à devenir infinie et à perdre la périodicité et donc la réversibilité. On pourrait toujours se demander à quoi ressemblerait un tel mouvement, parfaitement ou approximativement périodique, si sa « période » correspondait à un temps excessivement long, pratiquement équivalent au mouvement *irréversible* ? En effet : « L'irréversibilité n'est donc pas en contradiction avec la réversibilité : elle en est un cas particulier. Un phénomène irréversible est un phénomène réversible dont la période est infinie [95], » affirme le philosophe. Il n'y a donc pas de contradiction entre les deux principes, pas plus qu'entre l'évolutionnisme et le mécanisme. Il n'y a pas non plus à condamner le mécanisme, contrairement à ce que dit Weber.

Par ailleurs, Couturat indique une analogie peut s'établir entre le gaz et l'univers, tous deux comme systèmes isolés et conservatifs. De même qu'on s'interroge sur l'état final d'un système de gaz, on pourrait se demander au sujet de l'univers : « Tend-il vers un état final, ou oscille-t-il périodiquement autour d'un état moyen [96] ? » Toujours est-il qu'il faut prendre garde à ce genre de questions qui dépassent inéluctablement le domaine de l'expérience :

> Tout ce que l'expérience permet d'affirmer, c'est que nous nous trouvons dans une période où l'entropie va constamment en augmentant ; mais, comme elle ne nous permet pas de décider si cette période a une durée finie ou infinie, rien ne nous assure que l'univers tend vers un

93. Couturat, *cit.*, pp. 570-571.
94. Couturat, *cit.*, p. 571, note 1. Il est très probable que Couturat ait assisté lui-même à ce cours, car, autrement, il n'aurait pas pu savoir du cours qui n'a jamais été publié.
95. *ibid.*
96. Couturat, *cit.*, p. 570.

DISCUSSIONS

Évolutionnisme (Sur l' — et le principe de la conservation de l'énergie), par Louis Weber..... 87-92
Imitation (L' — et la logique sociale), par R. Berthelot..... 93-97
Mécanisme (Le — et l'expérience), réponse à M. Lechalas, par H. Poincaré..... 197-198
Nombre entier (Le — considéré comme fondement de l'analyse mathématique), par E. Ballue..... 317-328
Raisonnement mathématique (Note sur le —), par G. Lechalas..... 709-718
Réversibilité du monde matériel (Note sur la —), par G. Lechalas..... 191-197
Socialisme (La définition du —), par P. Lapie..... 199-204

FIGURE 11 – Extrait de la table des matières du deuxième volume de *Revue de métaphysique et de morale*, 1894

> état vraiment final, d'où il puisse sortir pour recommencer, sinon le même cycle, du moins un cycle analogue.
>
> En tout cas, c'est une question toute spéculative de savoir si le principe de l'entropie est éternellement vrai ; pratiquement et au point de vue de l'expérience, un processus réversible à très longue période équivaut à un processus irréversible (à période infinie) et en est discernable. Ce qui est certain, c'est que la période universelle est extrêmement longue, et cela doit suffire à rassurer ceux de nos contemporains qui craindraient la fin du monde[97].

L'année suivante, L. Weber répond dès le premier numéro de la revue. Il souligne que sa critique a pour but de montrer que l'idée de l'*évolution* ne se déduit pas à partir de celle de la *conservation*[98]. Le système conservatif reste toujours *périodique*, tant dans le cas général à période finie, que dans le cas limite, exceptionnel, à période infinie, incapable d'évoluer dans tous les cas.

> Que penserait-on du raisonnement suivant : la figure d'équilibre d'une masse fluide en rotation est un ellipsoïde de révolution aplati ; or la sphère est un cas particulier dans cette classe de figures ; il en résulte que la terre, qui a été autrefois à l'état fluide, doit avoir la forme sphérique ? C'est à un raisonnement du même genre qu'on peut ramener la prétendue démonstration de l'évolution du cosmos en partant du principe de la conservation[99].

Georges Lechalas intervient de son côté[100]. Selon lui, Poincaré aurait « exagéré » sur l'irréversibilité et la limite du mécanisme. Il s'interroge si la

97. Couturat, *cit.*, p. 571.
98. Louis Weber (1894), « Discussion sur l'évolutionnisme et le principe de la conservation d l'énergie. Réponse à M. L. Couturat », *Revue de métaphysique et de morale*, 2, p. 87.
99. Weber, *cit.*, p. 88.
100. « Lorsque la *Revue de métaphysique et de morale* a publié, au mois de novembre 1893, l'article si substantiel de M. Poincaré sur le *Mécanisme et l'expérience*, il y avait longtemps que la question de la réversibilité de l'univers préoccupait notre pensée. N'étant pas arrivé à y répondre d'une façon qui nous satisfait pleinement, nous n'avions pas encore osé en aborder la discussion publique ; mais, puisque la question est soulevée et qu'il est reçu, à la *Revue*, que chacun apporte sa pierre sans avoir la prétention de construire un édifice complet, nous nous hasarderons à ses lecteurs les réflexions suivantes. » Georges Lechalas (1894), « Note sur la réversibilité du monde matériel », *Revue de métaphysique et de morale*, 2, p. 191.

conception mécaniste du mathématicien ne serait pas trop « restreinte » en ce que, selon elle, la force dépend uniquement des distances (on pensera à la loi de la gravitation, $F = GmM/r^2$). Or, poursuit Lechalas, si la force était une fonction de vitesses v, c'est-à-dire des dérivées premières de positions par rapport au temps ($v = dr/dt$), elle changerait de signe selon le changement de signe de v à $-v$; une fois une puissance impaire des vitesses introduite, le système ne serait plus réversible. Ce que veut dire Lechalas, c'est que la réversibilité n'est pas une conséquence nécessaire, mais contingente.

Dans tous les cas, si les phénomènes réversibles sont possibles, la probabilité de leur réalisation reste d'autant plus faible que le système contient un grand nombre d'éléments comportant un nombre non moins grand de combinaisons entre eux. Ici on assiste à un renversement de l'argument probabiliste dont Poincaré se servait à propos de la stabilité par laquelle il entendait le retour à l'état initial pour une infinité de fois infiniment plus probable que d'autre cas. Il s'agissait de qualifier un système de stable (à la Poisson) s'il est infiniment plus probable de retourner à son état initial. Pour Lechalas, au contraire, un tel retour serait infiniment peu probable et pratiquement impossible.

Les éditeurs de la revue ont décidé de faire paraitre la réponse de Poincaré à la fin de l'article de Lechalas :

> Je n'ai jamais eu la pensée de restaurer les qualités occultes ni de m'élever contre la conception mécaniste entendue dans le sens « large », c'est-à-dire dans le sens de M. Lechalas. Quoi qu'on doive en penser en effet, il est évident qu'elle ne peut être réfutée par des arguments empruntés à la science, qui commence par la postuler. Mes objections n'ont porté que sur certaines formes particulières du mécanisme et en particulier sur celles qui suppriment complètement la force [101].

Poincaré remarque aussi que l'introduction des vitesses dans la loi ne fera pas affaire. Pourtant, cette note, trop courte (seulement deux pages) et peu développée, sera passée sous silence [102].

Deux ans après, Lechalas publiera *Etude sur l'espace et le temps*. Ce livre sert à Couturat de rédiger une nouvelle note, qui est à la fois une critique et

101. Henri Poincaré (1894a), « Le mécanisme et l'expérience. Réponse à M. Lechalas », *Revue de métaphysique et de morale*, 2, pp. 197-198.

102. De fait, Poincaré avait écrit à Léon, qui lui a probablement réclamé une réponse à Lechalas : « Quelque intérêt que présente la note de M. Lechalas, je n'ai pas l'intention d'y répondre ou plutôt je désire différer ma réponse. » Lettre parue in Rollet, *Henri Poincaré, des mathématiques à la philosophie*, p. 377 (Lettre 5). Il parait que Poincaré fait allusion à un nouvel article de Lechalas dans lequel il critique directement un autre article de Poincaré, sur la nature du raisonnement mathématique. C'est en 1896, après l'article de synthèse par Couturat, que Poincaré se met à rédiger une réponse. « En attendant l'article dont je vous ai parlé et que je vous enverrai dans l'honneur de vous adresser sous pli recommandé une réponse aux articles de M. Lechalas et de M. Couturat. » Rollet, « Henri Poincaré's Last Philosophical Book », p. 379 (Lettre 10). La « Réponse à quelques critiques » de Poincaré sera publiée en 1897.

une synthèse des travaux de ses contemporains sur le même sujet, de Weber à Lechalas et Poincaré, en passant par Bergson[103]. Dans le chapitre IV du livre, Lechalas remarque que la croyance à la réversibilité de l'univers suppose une conception mécaniste qui n'est qu'une autre croyance, celle à la possibilité d'une explication mécanique de l'univers. Or, selon Couturat, une explication mécanique ne va pas à elle seule sans d'autres suppositions sur la force (qu'elle dépende uniquement de distance et constitue un potentiel) ou l'univers (qu'il soit un système fermé). Mais tout ceci ne serait-il pas une « restriction gratuite que MM. Poincaré et Boutroux imposent à l'idée du mécanisme, en le considérant comme lié au principe de la conversation de l'énergie[104] » ? La conservation et la réversibilité ne sont pas conséquence nécessaire du mécanisme. Et Couturat de conclure « avec M. Lechalas que ni l'un ni l'autre de ces problèmes de Philosophie naturelle ne permet de constater un échec de la Mécanique, et de considérer la Physique comme irréductible au mécanisme[105] ».

A peu près au même moment, il y eut deux autres débats, l'un outre-Manche et l'autre côté du Rhin, à peu près sur le même sujet et à peu près de la même nature, mais d'une grande ampleur et marqueront l'histoire.

3.2 Objections mécanistes et défenses cosmologiques

Objection de l'irréversibilité

Boltzmann définit une fonction, appelée H, pour mesurer la déviation d'un état par rapport à l'état d'équilibre, dont il avait montré ensuite l'équivalence à l'entropie. Le théorème de H signifie que, quelle que soit la valeur initiale, le système évolue de telle façon que la valeur de H diminue jusqu'à atteindre le minimum, où les positions et les vitesses sont uniformément réparties selon la loi de la distribution de Maxwell, renseignant ainsi sur l'évolution de la distribution du système au cours du temps. Contrairement à Maxwell qui se contente de dériver par les calculs la valeur d'équilibre de la distribution, Boltzmann entreprend de décrire l'*évolution* même du système vers cet équilibre[106]. D'après ce théorème, l'état de non-équilibre est *moins probable* que l'état d'équilibre ; le passage du premier état au second, équivalent à la diminution de H et à la croissance de l'entropie, peut se traduire donc par la

103. Louis Couturat (1896), « Études sur l'espace et le temps de MM. Lechalas, Poincaré, Delboeuf, Bergson, L. Weber et Evellin », *Revue de métaphysique et de morale*, 4.
104. Couturat, *cit.*, p. 657.
105. Couturat, *cit.*, p. 658.
106. Stengers, *Cosmopolitiques I*, p. 238.

transition vers un état plus probable, plus « randomisé », avec des microétats en distribution uniforme.

Ce théorème, central à la théorie cinétique des gaz, avait déjà fait l'objet des critiques, dont celle de Loschmidt, déjà évoquée. « Will someone say exactly what the H theorem proves ? » C'est avec cette interrogation que le physicien britannique E. P. Culverwell réanime le débat, posant le problème de l'irréversibilité encore en nouveaux termes [107].

A la question posée par Culverwell, Samuel H. Burbury évoque un argument similaire à celui de Loschmidt [108]. Dans un système soumis aux lois de la mécanique, toute évolution est réversible, impliquant une évolution inverse. Si le système évolue avec la H décroissante, son évolution inversée doit être possible. En d'autres termes, l'augmentation de H est aussi vraisemblable que sa diminution. Or, une telle augmentation, c'est justement ce qu'interdit le théorème H. En effet, Boltzmann répond [109], il est impossible de prouver par les équations dynamiques que la fonction H *doit* diminuer ; la croissance de H doit être aussi fréquente que sa décroissance. Seulement les lois des probabilités nous apprennent que, si l'état initial n'est pas arrangé de manière particulière, mais par le hasard, c'est-à-dire arbitrairement, la probabilité que H décroisse est plus grande que dans le cas contraire.

Boltzmann introduit une courbe qui décrit le comportement de H au cours du temps, nommée « la courbe H », où l'abscisse x désigne le temps et l'ordonnée, la valeur de H qui correspond [110] (voir Figure 13). H ne dépassera pas, la plupart du temps, la valeur H_0. Il se peut que la courbe atteigne une grandeur plus grande que H_0 où $H > H_0$, mais la probabilité en reste extrêmement faible, nettement moins grande que la majorité des cas où $H < H_0$: dans la figure ci-dessus, parmi plus de trente sommets de la courbe, on ne compte que trois qui dépassent H_0. Autrement dit, une valeur H plus grande que H_0 n'est « pas mathématiquement impossible, mais seulement très improbable [111] ».

107. La discussion a lieu à la British Association en 1894, en présence de Boltzmann lui-même, invité pour une conférence. Les interventions seront publié à la revue *Nature* 51, 1895. Voir Darrigol, « The Origin of the Concept of Entropy », pp. 8-9 ; Brown *et al.*, « Boltzmann's H-theorem, its Discontents, and the Birth of Satistical Mechanics », p. 177 et p. 182–184.

108. En outre, Burbury indique aussi une condition de validité du théorème, qu'il appelle la « condition A », selon laquelle les vitesses des molécules ne doivent pas être corrélées entre elles, pas plus que leurs positions. Les historiens remarqueront la similarité de cette condition avec *Stosszahlensatz* de Boltzmann, c'est-à-dire l'hypothèse du « chaos moléculaire ».

109. Ludwig Boltzmann (1895), « On Certain Questions of the Theory of Gases », *Nature*, 51, 1322, p. 414.

110. *ibid.* et Boltzmann« On Zermelo's paper on the mechanical explanation of irreversible processes », in *The Kinetic Theory of Gases*, sous la dir. de Stephen George Brush et Nancy S. Hall, pp. 418-419. La figure est tirée de ce dernier article.

111. Boltzmann, « On Certain Questions of the Theory of Gases », p. 414.

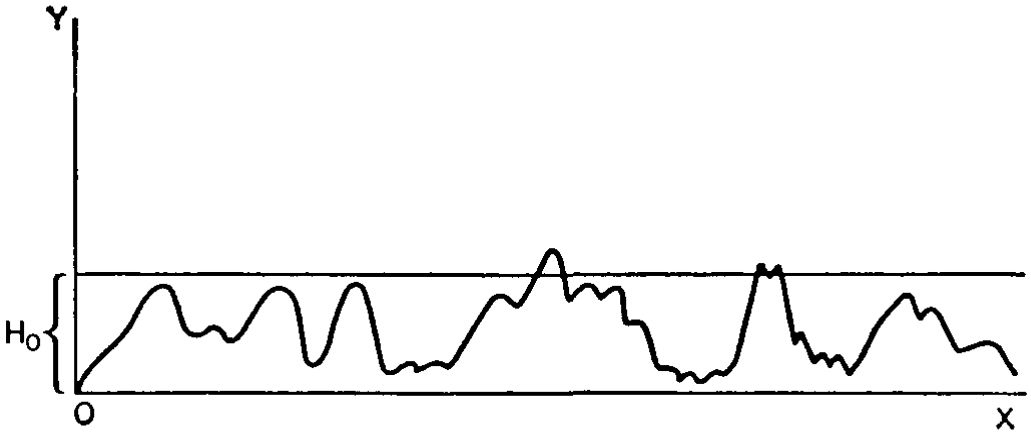


FIGURE 12 – La courbe H parue l'article de Boltzmann de 1897

Qu'est-ce que la courbe renseigne sur l'évolution de H ? La courbe ne révèle aucune direction privilégiée, H décroît ($dH/dt < 0$) autant qu'elle s'accroît ($dH/dt > 0$) au long de l'abscisse. Prenons une certaine valeur $H_1(H_1 > H_0)$ [112]. Autour de celle-ci, le comportement de H sera ou bien croissant, ou bien décroissant. Or, il est plus probable que H soit plus grande que H_1, et que H a tendance à diminuer qu'à augmenter autour de H_1 ; « si l'on choisit arbitrairement H_1, il ne sera pas certain, mais très probable, que H_1 fasse partie de la courbe en décroissance, qu'on passe à une direction ou à une autre [113], » ajoute Boltzmann.

Burbury fait une autre objection : si le théorème de H implique l'évolution de l'univers vers un état d'équilibre où tous les atomes sont distribués autour de la même valeur moyenne, pourquoi cet état n'est-il pas encore atteint ? Pour répondre à l'objection, Boltzmann fait appel à une hypothèse cosmologique inspirée d'Alfred Schuetz, son disciple et assistant.

L'univers passe la plupart de son temps à rester dans l'état d'équilibre ; il ne manque pourtant pas quelques déviations sur sa courbe H. Chaque phase de déviation est toujours précédée d'un état d'équilibre et suivi d'un autre état d'équilibre. Par ailleurs, la probabilité qu'une partie de l'univers reste dans un état quelconque est faible si cet état s'éloigne de l'équilibre. Or, elle devient plus grande dans un univers plus grand, puisqu'il contiendra plus d'états possibles, plus de variations de H. Si un univers comme le nôtre se trouve dans une phase qui évolue vers un état d'équilibre sans en arriver encore là et encore bien loin de là, c'est parce qu'il est tellement grand que la probabilité de sa phase présente n'est plus aussi faible, en tout cas pas plus faible que d'autres

112. Boltzmann, *cit.*, pp. 414-415.
113. Boltzmann, *cit.*, p. 415.

phases. S'il en est ainsi, si le monde se trouve loin de l'état d'équilibre, mais s'approche d'elle, cela n'infirmera pourtant pas le théorème H ; il confirme seulement la *grandeur* de l'univers.

> Si cette supposition était correcte, notre monde retournerait de plus en plus à l'équilibre thermique ; mais, puisque l'univers entier est tellement grand, il serait probable que d'autres mondes se trouvent, à un moment donné dans le futur, aussi éloignés de l'équilibre que le nôtre. Dans ce cas, l'univers décrirait par la courbe H ci-dessus mentionnée. Les sommets de la courbe représenteraient les mondes où il existe les mouvements et la vie [114].

L'irréversibilité n'a donc rien de nécessaire. Sa « raison d'être » ne se trouve pas, comme Boltzmann le précisera plus tard dans ses *Leçons sur la théorie des gaz*, « dans les équations qui déterminent le mouvement des molécules, car celles-ci ne sont pas modifiées quand le temps change de signe [115]. » « Cette irréversibilité est, *continue-t-il*, bien plutôt déterminée par les conditions initiales purement et simplement [116]. » En d'autres termes, elle est due à un hasard, c'est-à-dire à la condition initiale particulière, réservée à certains mondes comme le nôtre qui ont pour commencement des états d'une probabilité faible. C'est précisément cette condition-là qui rend possibles les phénomènes irréversibles, l'évolution en général, « les mouvements et la vie » dans notre monde. Comment, pourtant, un état a-t-il pu être *réalisé*, malgré sa probabilité faible ?

Objection de la récurrence

Zermelo fit en 1896 une autre objection, aussi décisive que celle de Loschmidt. Disciple de Planck, le jeune Zermelo se préoccupait alors des problèmes physiques au point de publier un article assez provocant sur la théorie de Boltzmann dans *Annalen der Physik*, tout en gardant un point de vue du mathématicien et faisant référence à un théorème mathématique qu'est celui de Poincaré, qu'on appellera « le théorème de récurrence » [117]. Nous avons déjà vu plus haut comment Poincaré discute de ce théorème « facile à établir » dans son article de 1893, « Le mécanisme et l'expérience », à peu près dans le même contexte. Visiblement à l'insu de ce dernier article, Zermelo remarque que, ce théorème, établi et utilisé par Poincaré par le mémoire de 1890 pour traiter du

114. *ibid.*
115. Boltzmann, *Leçons sur la théorie des gaz*, pp. 246-247.
116. Boltzmann, *cit.*, p. 247.
117. « Ueber mechanische Erklarungen irreversibler Vorgange », *Annalen der Physik* 59 (1896), repris in Brush et Hall, *The Kinetic Theory of Gases*, pp. 403-411, sous le titre « On the Mechanical Explanation of Irreversible Processes ». Voir p. 383.

problème des trois corps, ne manque pas de généralité pour s'appliquer à des problèmes *physiques* de la théorie mécanique de la chaleur [118].

Selon le théorème, rappelons-le, dans un système de points matériels sous influence des forces dépendant seulement de distance (et de vitesse) dans l'espace, il arrive suffisamment souvent que le système repasse par un état déjà passé ou s'approche de celui-ci à un degré approximatif, si bien que l'évolution du système n'est jamais irréversible : quel que soit son état initial, le système doit le retrouver à un moment donné. Si le système dispose d'une fonction qui est censée s'accroire comme celle d'entropie, elle devrait être sujette aussi à se décroitre. Il en doit être de même pour une fonction telle que l'entropie qui s'accroit indéfiniment : là où il y a une croissance, il faut y avoir décroissance qui y correspondent. S'il en est ainsi, si le système retourne à son état initial, l'entropie du système doit décroitre ; même si le système commence par un état *peu* probable à l'état initial et, selon le principe de Carnot, évolue vers d'autres états plus probables, le théorème de récurrence exige qu'il repasse au même état ou à un état voisin au bout d'un certain temps, état qui aura la même valeur d'entropie. Une fois retourné à son état initial, le système retrouvera son « entropie initiale », ce qui aura pour conséquence une décroissance entropique. La théorie cinétique ne fournit donc pas une explication des phénomènes irréversibles, à moins d'avoir un présupposé complémentaire selon lequel seuls les phénomènes irréversibles sont réalisés (hypothèse qui ne serait qu'ad hoc), alors que les réversibles, quoique peu probables, ne le sont pas.

Boltzmann rétorque, d'abord par un argument probabiliste : le second principe n'est qu'un théorème probabiliste, qui ne peut être démontré ni expliqué rigoureusement par la mécanique. Il se peut qu'un système commence dans un état d'une faible probabilité et évolue de manière à s'approcher d'un état plus probable au cours du temps : c'est la définition, sinon la condition même, de l'évolution, sans laquelle aucun changement d'état ne serait possible. A quoi s'ajoute l'hypothèse cosmologique, reprise, mais sous une forme encore plus ample et plus détaillée.

L'univers est composé d'une infinité d'étoiles (que Boltzmann appelle les « mondes individuels »), petites par rapport à l'ensemble de l'univers et suffisamment isolées les unes des autres, comparable donc à une masse gazeuse (univers) contenant d'innombrables molécules (étoiles). Même s'il est dans un état d'équilibre, avec le minimum de H et l'entropie maximale, il peut y avoir

118. Ensuite Zermelo restitue la preuve du théorème, de façon aussi simple que possible, dit-il, pour dispenser les physiciens de la peine de lire eux-mêmes le mémoire de Poincaré, « long et difficilement accessible ». Il indique par ailleurs la discussion de Poincaré sur le monocyclique de Helmholtz, comme une « preuve » de l'intérêt du mathématicien français à ce sujet.

une fluctuation où H varie sensiblement. La probabilité reste faible, certes, mais dans un temps infini, un état peu probable peut avoir lieu à un certain moment donné et dans une région limitée. C'est là où se situe notre système, et c'est pourquoi il est dans une phase de croissance entropique.

La récurrence n'est donc pas impossible, mais seulement rare. Elle a lieu « au bout d'un temps encore énorme comparé à $10^{10^{10}}$ années » pour le cas du gaz mélangé, si bien qu'on peut pratiquement dire qu'elle ne se réalise jamais [119]. Pourquoi n'observons-nous pas actuellement le passage d'un probable à un non probable dans notre monde à nous ? Du point de vue du calcul des probabilités, il est d'une « rareté extrême, inimaginable » qu'un tel passage ait lieu, d'autant plus « extraordinairement rare » et difficile à observer que notre observation est soumise à une courte durée et à un espace limités.

> On peut se représenter le monde comme un système mécanique composé d'un nombre énorme de particules, et de durée immensément longue, de sorte que les dimensions de notre monde stellaire d'étoiles fixes soient minuscules comparées à l'étendue de l'univers, et que la durée des temps que nous qualifions d'ères éternelles (Æonen) soit insignifiante comparée à la durée de l'univers. Dans cet univers, règne presque partout l'équilibre thermique, et, par suite, la mort ; mais on y trouve par-ci par-là des domaines relativement petits, de la dimension de notre monde stellaire (nous les appellerons des mondes individuels), qui, pendant la dur6e relativement courte de l'ordre des ères, s'écartent notablement de l'équilibre thermique, ceux pour lesquels la probabilité des états croit étant tout aussi nombreux que ceux pour lesquels elle décroît. Pour l'univers tout entier, les deux directions du temps sont donc impossibles à distinguer, de même que dans l'espace, il n'y a ni dessus ni dessous. Mais, de même qu'en une région déterminée de la surface de notre planète, nous considérons comme le dessous la direction qui va vers le centre de la Terre, de même un être vivant dans une phase déterminée du temps et habitant un tel inonde individuel, désignera la direction de la durée qui va vers les états les moins probables autrement que la direction contraire : la première sera pour lui le passé ou le commencement, et la seconde l'avenir ou la fin ; et, d'après cette désignation, pour le même petit domaine isolé dans l'univers, on aurait toujours, au début du temps, un état improbable. Cette méthode me semble la seule qui permette de concevoir le deuxième principe de la Thermodynamique, la mort thermique de chaque monde individuel, sans entrainer une modification irréversible de l'univers tout entier depuis un état initial déterminé jusqu'à un état final définitif [120].

L'irréversibilité n'est pas un fait objectif ni universel : elle est un effet dû à la limite de notre connaissance. Sur le plan cosmologique, l'argument probabiliste devient susceptible presque inutile. Le passage d'un état à entropie basse à un

119. Boltzmann, *Leçons sur la théorie des gaz*, § 88, p. 249.
120. Boltzmann, *cit.*, § 90, p. 252.

état à entropie haute n'a pas lieu *parce que* le premier est moins probable que le second ; un tel passage n'est pas irréversible, puisqu'un passage dans le sens opposé est tout aussi possible et probable, mais parce que notre monde est tombé sur une phase soumise à la croissance entropique.

Qu'un système quelconque ait tendance à passer d'un état *moins* probable au *plus* probable, c'est la condition nécessaire, condition de possibilité de changement même, sans laquelle le système resterait dans un état d'équilibre. Qu'on observe que le monde, à son état actuel, c'est qu'il est en état moins probable de façon à être sujet au passage vers un état plus probable. Si cela était le cas, remarque Zermelo, cela signifierait que l'état du passé, bien que *peu probable*, aurait été *actualisé*, tandis que l'état d'équilibre, quoique *hautement probable* (aussi probable que possible), n'a pas *effectivement* lieu. Ce qui contredit le mécanisme selon lequel « tous les états mécaniques *imaginables* sont physiquement *possibles*, au moins dans une certaine limite », même si ces états peuvent s'écarter de ceux qui ont réellement lieu.

Boltzmann n'en tient pas moins à objecter la thèse de la mort thermique : si l'entropie s'accroit, c'est seulement pour un système fermé, confiné à un espace et un temps limités ; il serait peu fondé « de considérer a priori comme absolument nécessaire l'extension à l'univers tout entier d'une telle conclusion, basée sur l'expérience [121] ». Pourtant, il fait recours à un argument cosmologique justement pour « sauver » les phénomènes irréversibles : c'est une sorte d'inversement de raisonnement qu'il effectue ici, procédant non pas du local au global, mais du global au local : il prend pour point de départ une hypothèse qui porte directement sur l'univers pour revenir sur notre monde dans laquelle nous avons l'expérience de la croissance entropique et des phénomènes irréversibles [122].

4 Tournant probabiliste ?

Avec l'introduction des idées probabilistes, l'interprétation statistique du second principe se trouvera plus fondée, sans pour autant échapper à des objections. Dans tous les cas, on ne saurait nier le mérite de l'interprétation, à savoir celui « de souligner, si besoin était, le caractère collectif, *macroscopique*, de ce concept, qui n'a pas de sens pour une particule isolée [...], mais

121. Boltzmann, *cit.*, § 89, p. 251.
122. Boltzmann, *cit.*, p. 251.

seulement pour des systèmes ayant un grand nombre de degrés de liberté » [123].

Qu'on se rappelle son mémoire de 1889 sur les explications mécaniques des phénomènes irréversibles où il est question de celle de Helmholtz avec son système monocyclique, qualifiée de « la plus intéressante », mais jamais de la statistique ni de la théorie cinétique. Revenant des années après sur le mémoire en question en 1908, pour faire un rapport de ses travaux en physique à l'adresse du comité du Prix Nobel de la physique, Poincaré parle des « deux tentatives » :

> Est-il possible d'expliquer l'irréversibilité des phénomènes physiques par des actions à distance analogues à l'attraction newtonienne. Deux tentatives ont été faites ; l'une est fondée sur les lois statistiques et la théorie cinétique des gaz. L'autre est celle de Helmholtz, il veut expliquer l'irréversibilité par des mouvements cachés, produisant des espèces de forces centrifuges composées. La note avait pour but de montrer l'inanité de cette dernière tentative [124].

En 1900, Poincaré écrivait encore dans *Analyse des travaux* :

> **Théorie Cinétique des Gaz** (8°) Mon cours sur la théorie cinétique des gaz n'a pas été publié ; j'ai donné dans la *Revue Générale des Sciences* un article où j'examinais et où je réfutais certaines objections faites par lord Kelvin au théorème de Boltzmann-Maxwell. Dans le *Journal de Physique* je cherche à concilier cette théorie avec l'irréversibilité des phénomènes, ce qui est la grande difficulté ; et pour éclaircir la question j'examine ce qui se passerait dans diverses hypothèses, plus ou moins éloignées du cas de la nature, telles que seraient celle d'un gaz à une dimension, ou de gaz très raréfiés.
>
> La chaire de Physique Mathématique a pour titre officiel : Calcul des Probabilités et Physique Mathématique. Ce rattachement peut se justifier par les applications que peut avoir ce calcul dans toutes les expériences de Physique ; ou par celles qu'il a trouvées dans la théorie cinétique des gaz. Quoiqu'il en soit, je me suis occupé des probabilités pendant un semestre et mes leçons ont été publiées [125].

En effet, ce n'est qu'en 1894 que Poincaré délivre son premier cours au sujet du calcul des probabilités, qui sera aussi le dernier, le mathématicien étant nommé titulaire de la chaire de mécanique céleste peu de temps après en 1896. Cela témoigne-t-il de l'indifférence sinon de l'ignorance de la part de notre auteur sur le sujet ? On ne saurait pourtant oublier que la pensée probabiliste

123. Rémy Lestienne (2003), *Les fils du temps. Causalité, entropie, devenir*, Paris : CNRS Editions, p. 150. Et elle ne manque pas d'inconvénient, celui « de donner l'impression que l'entropie est un concept irrémédiablement entaché de subjectivité, un concept portant sur nos relations aux choses, plutôt qu'une qualité ou une grandeur attachée aux choses elles-mêmes ». *ibid.* Sur le « dogmatisme » de l'interprétation probabiliste, voir Stengers, *Cosmopolitiques I*, pp. 228-251.

124. Poincaré, *La correspondance Poincaré-physiciens*, p. 413.

125. Poincaré, « Analyse des travaux », § XXIV, p. 343.

a déjà été présente bien avant, nous l'avons vu plus haut, au moins lors de la correction de son mémoire pour le concours d'Oscar II qui introduit la pensée probabiliste pour la conceptualisation de la stabilité.

Un an avant, juste après la controverse avec Tait, Poincaré faisait son deuxième cours de thermodynamique et introduisait la théorie cinétique des gaz.

> Dans mon cours sur la Thermodynamique et la Théorie Cinétique des Gaz (1893, 2), j'ai exposé la démonstration des deux principes de la Thermodynamique sous une forme un peu plus générale et plus abstraite que la forme ordinaire. J'ai ensuite expliqué le théorème du viriel, justifié le principe de Boltzmann-Maxwell et analysé l'ouvrage de Maxwell. J'ai discuté l'influence de la loi des grands nombres sur les équations de la Mécanique, mais sans arriver sur ce point à une conclusion définitive [126].

Si la partie relative aux deux principes a été bien intégrée dans la seconde édition de *Thermodynamique*, les éléments de la théorie cinétique de gaz tels que le théorème du viriel, le principe de Boltzmann-Maxwell ou bien « l'influence de la loi des grands nombres » ne sont pas pris en compte. Pourtant, on peut raisonnablement imaginer que le cours n'en a pas été moins riche en la matière, si l'on se réfère à l'article du savant sur le sujet publié au même moment.

4.1 Stabilité remise en question

« L'idée fondamentale de la théorie cinétique des gaz est ancienne », dit Poincaré, même si la théorie « n'a pris sa forme définitive que quand Clausius a démontré le théorème du *viriel* » [127]. Référence faite au mot grec *vis*, à savoir la force, le viriel désigne la valeur moyenne de l'énergie cinétique d'un système de points matériel et son théorème stipule que cette valeur est égale à la moitié de la valeur moyenne de l'énergie potentielle. Il s'accompagne d'un « postulat » selon lequel le système ne passera que par les états pour lesquels il y a quelque chose qui demeure constant (l'énergie totale par exemple) ; il ne parcourra donc pas par tous les états possibles, mais seulement par les états dans lesquels les

126. Poincaré, *cit.*, § XXXI, p. 356.

127. Henri Poincaré (1894b), « Sur la théorie cinétique des gaz », *Revue générale des sciences pures et appliquées*, 5, p. 513. Pour d'autres interprétations de la théorie parmi les contemporains de Poincaré, voir Pierre Duhem (1992), *L'évolution de la mécanique*, éd. établie et introd. par Anastatios Brenner, 1er éd. parue en 1903, Paris : J. Vrin, chapitre IX.

intégrales existent, ce, une infinité de fois. Tel est ce que Poincaré appelle « le postulat de Maxwell »[128].

Mais dans un système déterministe le postulat ne tient pas ou ne dit pas grand-chose. Une fois donnée une situation initiale d'un système à un instant quelconque, la situation suivante ainsi que toutes les situations seront déterminées, du passé au futur. S'il en est ainsi, le système n'aura qu'une seule trajectoire à parcourir, et ceci, une seule fois[129]. D'un autre côté, il ne satisfait pas la condition de ce que Poincaré appelait la « stabilité à la Poisson », selon laquelle le système repasse par des états initiaux ou près une infinité de fois.

> [S]i le postulat est vrai, le système solaire serait instable ; s'il est stable, en effet, il ne peut passer que par des situations peu différentes de sa situation initiale. C'est là la définition même de la stabilité. Or si la stabilité du système solaire n'est pas démontrée, l'instabilité l'est moins encore et est même peu probable. Il est possible et même vraisemblable que le postulat de Maxwell est vrai pour certains systèmes et faux pour d'autres, sans qu'on ait aucun moyen certain de discerner les uns des autres[130].

Rappelons les résultats obtenus en 1890 et dans les *Méthodes nouvelles*, relatifs aux solutions « périodiques » ou « asymptotiques ». Quoiqu'elles soient exceptionnelles, la probabilité même de telles solutions suffit pour ne pas compromettre la stabilité du système. Le postulat en question devra donc s'énoncer comme suit :

> Quelle que soit la situation initiale du système, le système passera toujours une infinité de fois aussi près qu'on voudra d'une quelconque des situations compatibles avec l'existence des intégrales, [...] sauf pour certaines situations initiales exceptionnelles[131].

Rappelons que le cours de thermodynamique est professé à peu près au même moment que la rédaction du mémoire sur le problème des trois corps[132].

128. « Il en résulte qu'un système, partant d'une situation initiale donnée, ne peut pas atteindre une situation quelconque : les valeurs des intégrales doivent, en effet, être les mêmes pour la situation initiale et pour toutes les situations ultérieures. Maxwell admet que, quelle que soit la situation initiale du système, il passera toujours une infinité de fois, je ne dis pas par toutes les situations *compatibles avec l'existence des intégrales, mais aussi près qu'on voudra* d'une quelconque de ces situations. C'est ce qu'on appelle le *postulat de Maxwell.* » Poincaré, « Sur la théorie cinétique des gaz », p. 516.

129. « Dans les problèmes de dynamique rationnelle, analogues à celui qui nous occupe ici, les forces ne dépendent que de la position du système ; si donc on connaît la situation du système, on connaîtra, non seulement les coordonnées des divers points et leurs vitesses, mais encore leurs accélérations. On pourra en déduire la situation nouvelle du système au bout d'un temps infiniment petit. On peut donc dire que, si l'on connaît la situation initiale du système, on connaîtra sa situation à un instant ultérieur quelconque. » Poincaré, *cit.*, p. 514.

130. Poincaré, *cit.*, p. 518.

131. Poincaré, *cit.*, pp. 516-518.

132. Langevin, « L'œuvre de Henri Poincaré. Physique », p. 706.

Une planète retourne une infinité de fois à son état initial ou à un état très voisin, sans pour autant s'en écarter de manière significative. Si l'écart, aussi petit soit-il, peut devenir assez sensible après un long laps du temps, il ne dépassera jamais une limite qui n'est pas très grande, de façon à permettre à la planète de retrouver sa valeur primitive.

> Si l'on découvrait une démonstration générale et rigoureuse, on n'en devrait pas conclure que le système solaire est éternel. Il peut en effet être soumis à d'autres forces que celle de Newton, et les astres ne se réduisent pas à des points matériels [133].

Nous avons vu que l'approche poincaréenne du problème des trois corps était « restreinte ». Mais, de façon plus fondamentale encore, comme il le dira en revenant au même problème en 1898, la restriction consiste à soumettre le monde « aux seules lois de la mécanique », monde où les astres se réduisent aux points matériels et obéissent exclusivement à la loi de gravitation de Newton.

> Mais ce n'est pas ainsi que le problème se pose.
>
> Le mathématicien ne considère que des astres fictifs, réduits à de simples points matériels, et soumis à l'action *exclusive* de leurs attractions mutuelles qui suit *rigoureusement* la loi de Newton.
>
> Comment se comporterait un pareil système : serait-il stable ? C'est là un problème aussi difficile qu'intéressant pour l'analyste. Mais ce n'est pas celui qui correspond au cas de la nature.
>
> Les astres réels ne sont pas des points matériels, et ils sont soumis à d'autres forces que l'attraction newtonienne.
>
> Ces forces complémentaires devraient avoir pour effet de modifier peu à peu les orbites, alors même que les astres fictifs envisagés par le mathématicien jouiraient de la stabilité absolue.
>
> Ce que nous devons nous demander alors, c'est si cette stabilité sera plus vite détruite par le simple jeu de l'attraction newtonienne, ou par ces forces complémentaires [134].

Nous l'avons vu plus haut, le problème de la stabilité consistait à vérifier si les orbites du système solaire ne varient pas trop sensiblement par le jeu des forces d'attraction entre les corps. S'il y a des écarts, ils ne seront pourtant jamais significatifs et seulement exceptionnels, par rapport aux « normes » où les astres demeurent sur leurs orbites et retournent à leurs états initiaux.

> Mais il y a une autre raison qui s'oppose à ce que les astres se meuvent sans s'écarter jamais beaucoup de leur orbite primitive.
>
> D'après la seconde loi thermodynamique, connue sous le nom de *principe de Carnot*, il y a une dissipation continuelle de l'énergie, qui tend à perdre la forme du travail mécanique pour prendre la forme de la

133. Poincaré, « Le problème des trois corps », pp. 535-536.
134. Poincaré, « Sur la stabilité du système solaire », p. 540.

> chaleur ; il existe une certaine fonction, nommée *entropie*, dont il est inutile de rappeler ici la définition ; l'entropie, d'après cette seconde loi, peut rester constante ou diminuer, mais ne peut jamais augmenter [*sic*]. Dès qu'elle s'est écartée de sa valeur primitive, ce qu'elle ne peut faire qu'en diminuant [*sic*], elle ne peut plus jamais y revenir, puisque pour cela il faudrait augmenter [*sic*].
> Le monde, par conséquent, ne pourra jamais revenir à son état initial ou dans un état peu différent, dès que son entropie a changé. C'est le contraire de la stabilité.
> [...] Si nous observons alors qu'il n'y a pas en réalité de phénomène réversible, que la réversibilité n'est qu'un cas limite, un cas idéal dont la nature peut approcher plus ou moins, mais qu'elle ne peut jamais atteindre, nous serons amenés à conclure que l'instabilité est la loi de tous les phénomènes naturels [135].

L'existence d'une fonction comme l'entropie, fonction qui ne change que dans un sens unique, empêche de retrouver l'état initial, de « revenir en arrière », bref d'être stable [136]. Les astres ne font pas exception, si l'on ne se borne plus à les regarder comme des points matériels soumis à la loi de Newton dans l'espace vide.

> Le système solaire tendrait donc vers un état limite où le Soleil, toutes les planètes et leurs satellites tourneraient, avec une même vitesse, autour d'un même axe, comme s'ils étaient des parties d'un même corps solide invariable. La vitesse angulaire finale différerait, d'ailleurs, peu de la vitesse de révolution de Jupiter. Ce serait là l'état final du système solaire [137].

Si l'espace n'était pas vide et qu'il existait un milieu résistant, il aurait influencé sur les mouvements des planètes, l'état final serait toujours le même. L'ensemble du système solaire est sous l'influence des autres actions que la gravitation comme les marées et les frottements, dont les effets sont plus ou moins directs ; l'énergie de rotation et de translation de la Terre se dissipe, pour être cédée à la Lune ou transformée en chaleur. La Terre ralentit sa rotation et sa force vive perdue vient s'ajouter à la circulation de son satellite. En conséquence de quoi la Lune a acquis une révolution relativement rapide (d'une période de vingt-huit jours sidéraux), au point d'être synchronisée avec sa rotation, relativement lente, dû aux frottements subis au cours de son histoire. Si cela continue, la rotation de la Terre diminuera tandis que la révolution de la Lune augmentera jusqu'à concurrencer avec la première.

> Le même phénomène se produira donc, bien qu'extrêmement atténué par la distance ; mais les effets, se produisant toujours dans le même

135. Poincaré, *cit.*, pp. 541-542.
136. Dans le passage cité, l'entropie est définie comme une fonction qui *diminue*, apparemment par une simple erreur verbale.
137. Poincaré, « Sur la stabilité du système solaire », pp. 545-546.

sens, finiront par s'accumuler ; ils s'ajoutent, d'ailleurs, à ceux des marées, et tendent à amener le système au même état final.

Ainsi les corps célestes n'échappent pas à cette loi de Carnot, d'après laquelle le monde tend vers un état de repos final. Ils n'y échapperaient même pas s'ils étaient séparés par le vide absolu.

Leur énergie se dissipe, et, bien que cette dissipation n'ait lieu qu'avec une extrême lenteur, elle est assez rapide pour que l'on n'ait pas à se préoccuper des termes négligés dans les démonstrations actuelles de la stabilité du système solaire [138].

La loi de Carnot s'impose et remet en question la stabilité à peine démontrée à peine par la mécanique. Le système solaire évolue et finit par atteindre un état qui est autre que son état initial. Mais pour cela est-il nécessaire de faire appel à la « loi de Carnot » ? Les effets, toujours prédits par les lois de la mécanique, s'accumulent avec le temps, et deviennent « effectifs » au bout d'un certain temps. « *Le temps se charge de réaliser le probable*, de rendre effective la probabilité. Il y a passage d'une loi en quelque manière statique, calculée à partir des possibilités additionnées sur un instant, à un développement temporel. [...] Ainsi la réalité aidée par la durée finit toujours par incorporer le probable à l'être, » dira Bachelard [139]. C'est *à force du temps* que les valeurs « historiques » dont parlait Maxwell sont ramenées à des valeurs « statistiques ». Tout se passe comme si le temps faisait synthèse des deux méthodes et des deux conceptions de loi.

4.2 Nouvelles méthodes et nouveaux problèmes de la mécanique

Toujours considérées comme distinguées des « vraies » lois comme celles de Newton, c'est-à-dire déterministes, les lois statistiques en viennent à s'étendre et même s'imposer aux sciences naturelles, au point de renouveler le modèle même de la connaissance [140]. Parmi les phénomènes auxquels nous attribuions indistinctement le nom de hasard, il y en a qui sont, d'un côté, véritablement fortuits, purement et simplement dus au hasard, et d'un autre côté, ceux qui suivent des lois qui nous échappent actuellement, mais pas nécessairement. Il est aussi des phénomènes qui sont bel et bien régis par les lois connues et par conséquent prévisibles en principe, tout en nous restant inconnus, en tout cas pas parfaitement connus, en raison de notre ignorance de leurs *conditions initiales*. Dès lors, une limite à la prédictibilité s'impose : la prédiction d'un

138. Poincaré, *cit.*, pp. 546-547.
139. Gaston Bachelard (1934), *Le nouvel esprit scientifique*, Paris : P. U. F. ; 4e éd. (Paris : Puf, 1991), p. 122.
140. Hacking, *The Taming of Chance*.

état futur du système n'est faite qu'à quelque probabilité, une probabilité proche de, mais jamais identique à, la certitude. Ce n'est pourtant pas aller dans le contresens de la conception déterministe de la loi, puisque l'incertitude et l'imprédicitiblité ne sont dues qu'à l'indétermination dans les conditions initiales, non à celle des lois... ou presque.

La statistique et le calcul des probabilités s'emparent progressivement des domaines d'intérêt de Poincaré. En 1899, il publie un compte rendu du manuel d'astronomie de Ch. André, *Traité d'astronomie stellaire*, qui a le mérite d'avoir traité de « [c]ette branche de la Science où Herschel s'est illustré, [qui] était un peu délaissé en France » et « d'avoir de nouveau attiré l'attention sur ces questions si mystérieuses, si grandioses et si attachantes »[141]. Avec l'astronomie stellaire s'introduit également l'astronomie statistique. A la même année, Poincaré publie deux articles sur le sujet, « Réflexions sur le calcul des probabilités » dans *Revue générale des sciences*, faisant référence aux premiers paragraphes de son cours[142] de calcul des probabilités qu'il avait publié deux ans plus tôt en 1896.

Le calcul des probabilités est indispensable pour établir et appliquer les lois ; toute induction est fondée sur lui. Il y a trois degrés de l'ignorance : 1° condition et loi inconnues l'un et l'autre ; 2° condition inconnue et loi connue ; 3° condition connue et loi inconnue. On se sert des probabilités à partir du deuxième degré, l'une des occasions les plus typiques est le cas où la loi est connue, alors que l'état initial, inconnu[143]. Deux exemples : la distribution des petites planètes et la distribution des vitesses des molécules gazeuses. Dans l'un comme dans l'autre, les conditions initiales ne sont pas disponibles alors que les lois sont connues, et le calcul des probabilités est l'unique moyen de recherche. Au troisième degré, on fait intervenir les probabilités afin de dériver les lois elles-mêmes (« probabilités des causes »), d'interpoler. L'interpolation est un cas de raisonnement véritablement scientifique[144].

Mais les lois qui en résultent, ce sont des hypothèses qui s'énoncent en termes des probabilités. C'est l'existence même de la loi qui est en question ; c'est aussi un problème général de toute méthode expérimentale. Si la valeur de vérité des lois n'est que probable et approximative, comment peut-on savoir si elle n'est pas elle aussi un fruit du hasard ? Qu'est-ce qui nous assure que la prédiction d'aujourd'hui ne se révèle fausse demain ? Il n'est pas impossible

141. Henri Poincaré (1899a), « Ch. André, Traité d'astronomie stellaire », *Bulletin astronomique, Série I*, 16, p. 124.
142. Henri Poincaré (1899b), « Réflexions sur le calcul des probabilités », *Revue générale des sciences pures et appliquées*, 10, repris dans *La science et l'hypothèse*, le chapitre XI auquel les références seront faites dans ce qui suit.
143. *SH*, pp. 196-197.
144. *SH*, pp. 209-210.

qu'un astre s'approche de Jupiter de façon à changer la trajectoire de la planète. Pas impossible, mais la probabilité est bien faible. C'est ce que les savants savent en établissant et appliquant les lois. Mais qu'est-ce que la loi ?

Chapitre V

Entre loi et principe. Deux usages de l'univers

Dans *La science et l'hypothèse*, une notion traverse toute le livre : celle d'hypothèse (d'où le titre). « Pour un observateur superficiel, la vérité est hors des atteintes du doute », mais, dit clairement l'auteur dès le début de l'ouvrage, « quand on a un peu réfléchi, on a aperçu la place tenue par l'hypothèse [1] ». Elle joue un rôle nécessaire et légitime dans toutes les sciences, des mathématiques aux sciences expérimentales (« le mathématicien ne saurait s'en passer et [...] l'expérimentateur ne s'en passe pas davantage [2] », mais pas toujours de la même manière ni au même degré : « il y a plusieurs sortes d'hypothèses », dit Poincaré dans Introduction, les unes sont vérifiables par l'expérience et susceptibles de « vérités fécondes », les autres, adoptées seulement pour fixer notre penser, ou encore d'autres qui sont « des définitions ou des conventions déguisées » [3].

Si l'usage du mot « hypothèse » ne paraît pas cohérent, Poincaré parvient par cette équivoque même à approfondir sa pensée sur les rapports, plus précisément, les analogies, entre les sciences mathématiques et physiques, et aussi à montrer comment ces divers usages sont articulés sans pour autant réduire les uns aux autres [4]. La différence tient à ce que chaque science a son propre rapport avec l'expérience. En géométrie, ou plus généralement « dans les mathématiques et les sciences qui y touchent [5] », une hypothèse s'établit indépendamment de l'expérience tandis qu'elle s'appuie, en mécanique, sur les données empiriques plus directement qu'en géométrie, mais moins qu'en physique.

1. Introduction, *SH*, p. 24.
2. *ibid.*
3. *ibid.*
4. Gerhard Heinzmann (2009), « Hypothses and Conventions in Poincaré », in *The Significance of the Hypothetical in the Natural Science*, sous la dir. de Michael Heidelberger et Gregor Schiemann, Berlin : Walter de Gruyter, p. 170.
5. *SH*, p. 24.

« L'expérience est l'unique source de la vérité : elle seule peut nous apprendre quelque chose de nouveau ; elle seule peut nous donner la certitude. Voilà deux points que nul ne peut contester[6]. » Est-ce là un manifeste empiriste ? Si Poincaré ne cesse d'insister sur le rôle de l'expérience, cela ne va jamais sans oublier la complexité de son rapport avec les sciences : puisque la science consiste avant tout à généraliser, à quoi résiste toute expérience, le rapport entre les deux ne peut être que complexe, pour ne pas dire incompatible. Pour que les faits expérimentaux fassent l'objet des sciences, il faut qu'ils s'énoncent sous forme générale ou généralisée, à savoir sous forme de *lois*.

Une loi a pour origine des faits expérimentaux. Elle se déduit directement à partir des données empiriques telles que les positions des planètes, ou les pressions et les volumes pour le cas de gaz. Tels sont les cas des lois de Kepler et des lois de Mariotte. Il arrive qu'une loi se généralise au plus haut point à devenir absolument générale, souple à souhait. Ainsi s'établissent les principes comme le principe de Newton (l'égalité entre la réaction et la réaction) et le principe de Carnot. Alors se pose une question capitale : « Comment une loi peut-elle devenir un principe[7] ? »

1 La notion de loi

1.1 De l'expérience à la convention

Du fait au principe, en passant par la loi

Tout commence donc par l'expérience, mais pas n'importe quelle expérience. Les faits scientifiques se distinguent des faits historiques, c'est-à-dire des événements qui n'ont lieu qu'une seule fois comme la Révolution française ou la naissance de Newton. Un fait singulier qui ne se répète ou ne se reproduit pas comme « Jean sans Peur a passé par ici » ne peut intéresser la science, pour cette raison qu'il ne permet pas la généralisation et ni, par conséquent, la prédiction[8]. En revanche, les faits scientifiques ne se distinguent pas des faits *bruts*[9]. Entre deux énoncés « Il fait noir » et « L'éclipse a lieu », il n'y a pas de différence de nature, mais seulement de degré, la même différence entre deux énoncés exprimés en français (« il pleut ») et en anglais (« it rains »). Ce

6. *SH*, p. 157.
7. *SH*, p. 153.
8. *SH*, p. 158.
9. *VS*, toute la section « 3. Le fait brut et le fait scientifique », pp. 156–163.

que crée le savant, c'est le langage pour exprimer le fait. Telle est la réponse de Poincaré à la thèse nominaliste de Le Roy selon laquelle « *le savant crée le fait* ».

Une loi, c'est un ensemble de faits généralisés, une généralisation des faits. Or, « un fait quelconque peut se généraliser d'une infinité de manières [10] ». Un ensemble de faits peuvent correspondre à une infinité de manières de généraliser, donc à une infinité de lois possibles. Ceci s'expliquerait aussi par le fait qu'une loi s'exprime. Une loi s'exprime sous forme d'équation différentielle. « Une loi, pour nous, [...] c'est une relation constante entre le phénomène d'aujourd'hui et celui de demain ; en un mot, c'est une équation différentielle [11]. » Un état se définit par n paramètres $x_1, x_2, ..., x_n$ qui sont liés les uns aux autres par un ensemble d'équations différentielles qui s'écrivent comme suit :

$$\frac{dx_i}{dt} = \phi_i(x_1, x_2, ..., x_n)$$

Les dérivées des valeurs de x_i par rapport au temps sont liées à une fonction de l'ensemble des valeurs de $x_1, x_2, ..., x_n$. D'une manière générale, chaque équation comporte une *infinité de solutions*. Le théorème de Cauchy nous apprend qu'il n'y a qu'une seule solution à une équation différentielle à la disposition d'un état initial, c'est-à-dire toutes les valeurs de x_i à un instant quelconque (t =0). Dès lors, on verra s'écouler toutes les valeurs à tout moment, du passé ($t < 0$) à l'avenir ($t > 0$). Appliqué à l'univers avec des paramètres au nombre n, n étant un nombre « excessivement grand », on retrouve la formule du déterminisme de Laplace, où tous les états de l'univers sont donnés une fois pour toutes et le passé se déduit du présent exactement de la même manière que l'avenir.

Si la loi se définit comme une relation entre l'antécédent et le conséquent, permettant de déduire le conséquent de l'antécédent, elle n'en permet pas moins de déduire l'antécédent du conséquent, autrement dit, elle rend possible de prédire l'avenir du présent tout autant que de conclure le passé du présent [12]. La notion de loi n'implique pourtant pas en elle-même d'ordre temporel ni d'enchaînement causal si ce n'est que de manière *nominale* ; on peut toujours prendre l'antécédent pour une cause et le conséquent, pour son effet, afin de prétendre que le premier précède le second temporellement, mais ce ne sera là qu'une manière de dire, qui n'a rien de nécessaire sinon pour simplifier les énoncés de nos lois. En somme, le lien entre l'ordre chronologique et

10. *SH*, p. 162 et *passim*. Par exemple, un peu plus haut dans le même ouvrage : « Mais toute proposition peut être généralisée d'une infinité de manières. Parmi toutes les généralisations possibles, il faut bien que nous choisissons. » *SH*, p. 145.
11. *VS*, p. 125 et *passim*.
12. *VS*, p. 174.

l'ordre causal, celui, celui entre la temporalité et la causalité est une affaire de convention [13].

Mais venons-en à la question capitale déjà citée plus haut : comment une loi peut-elle devenir un principe ? « Les principes sont des conventions et des définitions déguisées. Ils sont cependant tirés des lois expérimentales, ces lois ont été pour ainsi dire érigées en principes auxquels notre esprit attribue une valeur absolue [14]. » Une loi, c'est l'expression d'un rapport entre deux termes réels, A et B [15]. Pour qu'elle ne soit pas seulement approximative, mais rigoureuse, il est nécessaire d'introduire un terme fictif, qu'on nommera C. Il est supposé que le terme C est lié avec A par une relation logique ou déductive d'un côté, et d'autre côté, avec B une relation *expérimentale*, c'est-à-dire obtenue à partir des paramètres directement observables. Entre A et C s'établit un *principe*, absolu et rigoureux, tandis que entre B et C, une *loi*, approchée et révisable. La loi AB peut être rigoureusement vraie, sans avoir besoin de craindre d'aucune infirmation, grâce à sa part conventionnelle qu'elle doit au principe AC.

De même que les lois sont des faits qui sont généralisés, les principes sont des lois généralisées « obtenus en cherchant ce qu'il y a de commun dans l'énoncé de nombreuses lois physiques ; ils représentent donc comme la quintessence d'innombrables observations [16] ». Ils vont jusqu'à s'éloigner de leur origine qu'est l'expérience et à aller hors de toute atteinte à la vérification empirique, exactement comme des axiomes de la géométrie qui ne sont rien d'autre que des *conventions*. Mais qu'est-ce qu'une convention ? A quoi reconnait-on une convention ?

Sens de la convention

Les « hypothèses qui servent de fondement à la géométrie » ne peuvent se déduire des concepts généraux de grandeur, constatait Riemann ; elles n'ont ayant rien d'apriori ni de nécessaire, mais seulement une « certitude empirique » [17]. Poincaré reprend les idées de Riemann avec une nouvelle notion qu'est celle de *convention*.

Selon L. Rougier, le conventionnalisme est une « conséquence nécessaire

13. Sur la question de la causalité et de la temporalité, voir *VS*, Ch. II « La mesure du temps », §§ IX-XI, pp. 49–52.
14. « Conclusion générale de la troisième partie », *SH*, p. 153.
15. *SH*, p. 154, *sqq.*
16. *SH*, p. 177.
17. Riemann, « Sur les hypothèses qui servent de fondement à la géométrie », p. 281. Voir *supra*, Ch. III.

des prolégomènes logiques et mathématiques[18] ». Au sens logique du mot, une convention signifie tout simplement une proposition à laquelle on ne peut attribuer une valeur de vérité. Si un énoncé ne peut être jugé vrai ou faux, c'est qu'il n'est pas un « *jugement qui s'impose à l'assentiment de notre entendement pour des motifs rationnels et propres à déterminer une certitude apodictique ou assertorique* », mais « *un décret, issu d'une libre décision de notre esprit, qui se propose à l'acquiescement de notre volonté, toujours maîtresse de l'accepter ou de le rejeter*[19] ». Une convention ne peut être dite vraie ou fausse, mais « plus ou moins indispensable et commode[20] ». Un axiome n'est qu'un parmi tous ceux qui sont également probables ; il n'est pas a priori ni nécessaire ; il ne s'impose pas par la nature, mais se donne en quelque sorte par un choix *libre* de l'esprit.

Prenons un exemple typique de la proposition géométrique : « la somme des angles d'un triangle est égale à deux angles droits ». Tout bascule à partir du moment où l'on se rend compte qu'il est tout aussi probable que la somme des angles d'un triangle est *plus grande* ou *plus petite* que deux angles droits. La proposition n'est pas, 1° un fait expérimental, puisque, si elle l'était, elle aurait été sujette à d'incessantes révisions, ce qui l'aurait rendue inapte à une science aussi exacte que la géométrie ; 2° ni un jugement analytique, puisque, comme Kant l'avait bien vu, le concept de triangle n'implique pas celui de deux angles droits, et l'analyse du concept ne nous renseigne point sur la somme des angles d'un triangle ; 3° ni un jugement synthétique a priori, contrairement à ce qu'avait dit Kant, ce qui aurait mis la géométrie à l'abri de toute modification et, par conséquent, d'autres géométries que la géométrie euclidienne n'auraient pas été possibles.

> Ce sont des *conventions* ; notre choix, parmi toutes les conventions possibles, est *guidé* par des faits expérimentaux ; mais il reste *libre* et n'est limité que par la nécessité d'éviter toute contradiction. C'est ainsi que les postulats peuvent rester *rigoureusement* vrais quand même les lois expérimentales qui ont déterminé leur adoption ne sont qu'approximatives.
>
> En d'autres termes, *les axiomes de la géométrie* (je ne parle pas de ceux de l'arithmétique) *ne sont que des définitions déguisées*[21].

Les faits *expérimentaux* qui « guident » le choix, similaires aux « faits simples » dont parlait Riemann, prennent un nouveau sens chez Poincaré : ces faits se rapportent à des expériences particulières, à savoir celles que nous

18. Rougier, *La philosophie géométrique de Henri Poincaré*, p. 117.
19. Rougier, *cit.*, p. 121. Les phrases sont soulignées par Rougier lui-même.
20. *ibid.*
21. *SH*, pp. 75-76.

produisons avec les corps qui nous entourent et dont nous mesurons les mouvements à l'aide des sensations ainsi que des instruments de mesure. Ces expériences sont menées sur certains corps particuliers ; d'autres d'expériences auraient très bien pu, et pourraient encore, nous guider à établir une autre géométrie que la nôtre, sans pour autant que celle-ci ne soit infirmée.

> Peut-on soutenir que certains phénomènes, possibles dans l'espace euclidien, seraient impossibles dans l'espace non euclidien, de sorte que l'expérience, en constatant ces phénomènes, contredirait directement l'hypothèse non euclidienne ? Pour moi, une pareille question ne peut se poser. A mon sens elle équivaut tout à fait à la suivante, dont l'absurdité saute aux yeux de tous : y a-t-il des longueurs que l'on peut exprimer en mètres et centimètres, mais que l'on ne saurait mesurer en toises, pieds et pouces [22].

G.-G. Granger rappellera, de son côté, l'usage du mot « convention » dans le langage ordinaire et en dégagera deux sens : l'intersubjectivité et la virtualité. Le choix d'une convention signifie « l'acceptation d'un énoncé ou d'une règle de conduite par plusieurs sujets, fussent-ils fictifs [23] ». Ce sont des énoncés « librement choisis parmi d'autres possibles [...] non pas nécessairement arbitraires, mais sans que soient explicitement et ordinairement données les raisons de leur choix ». La possibilité de choix signifie une certaine liberté. Or, je ne suis pas libre de toute contrainte, par exemple, celle de la nécessité d'éviter toute contradiction. Si mon choix n'est pas nécessaire, je n'en ai pourtant pas moins de raison pour mon choix, même si ces raisons ne sont pas immédiatement ou intuitivement données. Je peux toujours conférer une vérité à mon choix, et si une convention se dite vraie, c'est parce que c'est *moi* qui veux qu'elle soit vraie. Encore faut-il que mon choix soit fondé suffisamment sur un bon raisonnement pour convaincre pas seulement moi, mais acquérir un « accord intersubjectif », c'est-à-dire une épreuve et un consensus au sein de la communauté à laquelle j'appartiens.

Mais il en est autrement dans d'autres sciences comme la mécanique ou la physique. En mécanique, les principes sont des conventions au même titre que les axiomes de la géométrie, mais pas tout à fait de la même manière. Contrairement aux axiomes qui ne font jamais l'objet de la vérification, les principes de la mécanique restent susceptibles d'*être vérifiés* ou de *n'être pas vérifiés*. Si les axiomes de la géométrie sont choisis par leur commodité, le choix d'un principe de la mécanique ne peut se faire indifféremment à l'expérience, à la concordance avec elle. En conséquence de quoi, la question de *la valeur de*

22. *SH*, p. 96.

23. Gilles-Gaston Granger (2003), « Vérité et convention », in *Philosophie, langage, science*, éd. établie et introd. par Michel Paty et Jean-Jacques Szczeciniarz, Paris : EDP Sciences, p. 245.

vérité et de son rapport avec l'expérience ne se pose pas de la même manière qu'en géométrie, comme le dit Poincaré.

> [L']énoncé d'un fait ne peut être que *vrai* ou *faux*. Il n'en serait pas de même pour une proposition quelconque ; si cette proposition est l'énoncé d'une convention, on ne peut pas dire que cet énoncé soit *vrai*, au sens propre du mot, puisqu'*il ne saurait être vrai malgré moi et qu'il est vrai seulement parce que je veux qu'il le soit*[24].

Granger rapproche la valeur de vérité d'une convention d'une *virtualité*, qu'il distingue de l'ambiguïté ou de la dualité. Une convention reste *vérifiable*, susceptible de la validation et de la modification. Si elle n'est pas actuellement vérifiée ou validée par l'expérience actuelle, elle reste toujours dans la possibilité d'être vérifiée ou *n'être pas* vérifiée. D'autre part, elle peut être vérifiée par une toute nouvelle expérience quand elle fait l'objet de la *prévision*, fait appel aux nouvelles expériences à venir de la manière « virtuelle ». Dans ce cas, l'« objet » de la vérification est substitué par un « projet » ou un « objet virtuel »[25]. Tant qu'elle fait référence à de tels « objets », sa valeur de vérité reste indéterminée.

Ce que la langue française est aux états des choses exprimées par cette langue est ce qu'un axiome est aux phénomènes comme la propagation de la lumière. Un axiome n'est ni vrai ni faux, pas plus que la langue française n'est pas elle-même vraie, mais un des *moyens* d'exprimer la vérité. Pourtant, alors qu'un axiome de la géométrie ne peut être vrai ni faux, un *théorème* peut l'être : ou bien il est vrai s'il est rigoureusement démontré à partir d'un ensemble d'axiomes et de définitions, ou bien il est faux dans le cas contraire. De même, un principe ne peut être vrai ni faux, tandis qu'une loi de la mécanique peut être vraie ou fausse ; elle ne peut être que *vraie ou fausse*, ne serait-ce qu'approximatif. Ce que la langue française est aux états des choses exprimées par cette langue est ce que les principes de l'inertie ou de l'égalité entre l'action et la réaction sont à la mécanique. Les lois, c'est-à-dire les énoncés qui touchent directement les phénomènes, peuvent être vraies ou fausses, mais pas les principes, sans lesquels les lois deviendraient inutilement compliquées à énoncer, mais toucheraient la vérité et la mécanique tiendrait toujours.

Une convention n'est ni vraie ni fausse en soi. Or, elle peut l'être *plus ou moins* vraie, si elle est choisie par le « guide » de l'expérience. Toujours est-il que le rôle de « guide » n'est jamais simple, d'autant plus compliqué que quand on passe à la mécanique et *a fortiori* à la physique, « le domaine des lois proprement dites[26] ». Dans ces dernières, les conventions prennent

24. *VS*, p. 158.
25. Granger, « Vérité et convention », p. 248.
26. *SH*, p. 154.

forme de *principes* et jouissent d'une généralité absolue, avec cette conséquence « qu'ils ne peuvent plus ne pas être vérifiés [27] ». L'expérience est, répétons-le, l'unique source de la vérité, et aussi de l'objectivité, sans pour autant garantir la généralité et la certitude. A la différence d'une loi qui peut être vérifiée ou n'être pas vérifiée, un principe est *invérifiable*, puisque tiré de l'expérience, mais pas susceptible de faire l'objet d'une vérification décisive par l'expérience.

Un principe n'est donc pas vrai au sens traditionnel du terme : il n'est pas tributaire des caractères attribués à la notion de vérité comme nécessaire, universelle, a priori, universellement valide... sauf peut-être général. En effet, il se peut qu'un principe soit absolument général ; sa généralité n'est pourtant pas donnée a priori, mais *constituée*, fondée sur des expériences du passé. Autrement dit, un principe doit sa généralité et sa validité absolue à l'*histoire* derrière lui.

1.2 Contingence et historicité

Seul le fait singulier peut être certain. A plusieurs, ils le sont moins, à moins qu'ils ne soient généralisés et forment des lois. Mais une loi ne peut jamais être certaine : elle est seulement *probable* et essentiellement contingente.

Dès le XVIIe siècle, à l'aube de la science classique, les lois de la nature étaient prises pour contingentes, contrairement à celles de la logique et des mathématiques, absolument nécessaires, comme le remarquera E. Boutroux :

> Connus par la seule expérience, les rapports les plus généraux des choses demeurent pour nous, comme le disait Newton, radicalement contingents. *Pourquoi* les corps s'attirent-ils en raison de leur masse et non du carré de leur masse ? *C'est là un fait, et rien de plus.* La mécanique céleste implique, en définitive, l'idée même de loi naturelle, en tant que distincte de la relation simplement mathématique, à savoir en tant que rapprochant l'un de l'autre deux termes, dont l'un ne peut en aucune façon se tirer de l'autre [28].

Une loi contingente, c'est une relation entre deux termes qui n'impliquent pas logiquement l'un l'autre et dont la négation n'entraine pas une contradiction. C'est ce que Leibniz appelait précisément la *vérité du fait*, par opposition à la *vérité de la raison*. Que les corps s'attirent en raison de leur masse, cela est vrai sans pour autant qu'il le soit nécessairement. La valeur de cette vérité doit se fonder et se mesurer autrement que les lois de la logique, sur quelque chose

27. *SH*, p. 177.
28. Émile Boutroux (1895), *De l'idée de loi naturelle dans la science et la philosophie contemporaines*, Paris : Lecène, Oudin et Cie : F. Alcan, p. 138. C'est moi qui souligne.

comme le principe de la raison suffisante selon Leibniz, pas sur le principe de la non contradiction.

La prédiction, ou, éventuellement, la rétrodiction, en est un moyen : ceci consiste à déduire à partir des lois quelques conséquents pour voir si ceux-ci sont en accord avec les phénomènes, prétendu que les antécédents, à savoir les conditions nécessaires pour produire les conséquents, soient mis en considération. La loi devrait alors s'énoncer comme suit : « si *toutes* les conditions sont remplies, tel phénomène aura lieu [29] ». Or, est-il possible de remplir *toutes* les conditions nécessaires ? Pour cela, il faut considérer *tous* les états de l'univers à instant t sans aucune exception, pour cette raison que toutes les parties de l'univers pouvant influencer sur le phénomène produit à l'instant $t + dt$. Il est évidemment impossible de décrire tous les états de pareille manière ; même si toutes les conditions nécessaires étaient prises en compte, il resterait toujours difficile de savoir si elles sont effectivement réalisées à un moment donné. Dès lors, l'énoncé de la loi se réduit à dire que « si telles ou telles conditions sont réalisées, *il est probable* que tel phénomène se produira [30]. » Si la loi est fondée sur un grand nombre de faits, sa probabilité augmente ; elle peut même aller jusqu'à s'assimiler pratiquement à la certitude. Or, d'une manière générale, il faut dire que toutes les lois *sont* probables en soi, tant que les conditions antécédentes ne sont pas toutes réalisables, ou, si elles le sont, impossibles pour nous de nous en rendre compte [31].

On a affaire à une conception probabiliste de la loi, qui n'a rien de nouveau comme telle. Mais ce n'est pas tout, ce n'est qu'un début : si Poincaré se contente, au début, de dire que les lois sont seulement probables et approchées, il s'approche progressivement d'un constat ontologique tout à fait original touchant la loi ainsi que la nature. René Thom parlait de l'absence de l'ontologie chez Poincaré. Cette thèse absentéiste mérite d'être nuancée, voire révoquée : il parait que Poincaré est amené progressivement une sorte d'argument transcendantal au sujet de la loi, qu'il fonde sur le probabilisme.

Mais si la loi était contingente et qu'elle devait sa concordance avec les phénomènes purement et simplement au hasard ?

Logique de vérification et lois d'à peu près

Si la loi de Newton corroborait les phénomènes par un hasard, si cela a été vrai *dans le passé*, cela ne veut pas dire qu'il en soit de même *dans le futur* : un autre hasard peut avoir lieu un jour pour compliquer les choses et faire

29. *VS*, p. 171.
30. *VS*, p. 172.
31. *VS*, pp. 172-173.

surgir des faits qui ne concourent plus à la loi ; la loi peut aussi se modifier par un autre hasard quelconque, grâce à un concours de circonstances qui n'ont aucun lien entre elles ni avec la loi elle-même.

Prenons le principe d'inertie, plus connu sous le nom de la première loi de Newton, qui s'énonce comme :

> **Principe d'inertie.** Un corps qui n'est soumis à aucune force ne peut avoir qu'un mouvement rectiligne et uniforme [32].

Ce principe ne s'impose pas à l'esprit comme une vérité a priori, puisque si elle l'était, dit Poincaré faisant appel encore à son argument « grec », à elle aurait été déjà connue chez les Grecs au même titre que le principe de la non-contradiction. En effet, il n'y a pas de raison a priori pour que tout corps ait tendance au mouvement rectiligne et uniforme plutôt qu'à un autre, le mouvement circulaire par exemple. Les Grecs ne trouvaient-ils pas eux-mêmes la circulation plus « naturelle » comme mouvement aux corps célestes au moins, avant que Descartes ne vienne renverser le schème naturel-non naturel et ériger le principe d'inertie ? Si le principe nous parait « naturel », ce n'est pas parce qu'il est établi et vérifié par l'expérience : on n'expérimente pas sur un corps soustrait à toute force extérieure afin de vérifier directement si le principe tient vrai ; une bille roulée sur un plan lisse ne fera pas une affaire parfaite tant qu'elle reste sur la Terre. Mais il peut s'énoncer autrement, sous une forme plus *générale* ou *généralisée*, dont le principe d'inertie serait un cas particulier :

> **Principe d'inertie généralisé (1).** L'accélération d'un corps ne dépend que de la position de ce corps et des corps voisins et de leurs vitesses [33].

Ce que les mathématiciens entendraient par un autre énoncé suivant :

> **Principe d'inertie généralisé (2).** Les mouvements de toutes les molécules matérielles de l'univers dépendent d'équations différentielles du second ordre [34].

En quoi ces deux derniers énoncés sont-ils « généralisés » ou « naturels » par rapport au principe d'inertie ? On remarque d'abord qu'ils sont exempts de « force », cette notion déjà difficile à définir et impliquant souvent une « action » quelconque, à distance ou non. Ils nous dispensent également de savoir si ce mouvement est dû à une force innée aux corps, etc. Pour se rendre compte du mouvement en question, il suffit de connaitre les positions et les vitesses du corps et celle des autres corps qui lui sont proches. Ces deux formules (1)

32. *SH*, p. 112. Ici comme les citations suivantes, c'est moi qui ajoute et met en gras les noms du principe.
33. *SH*, p. 113.
34. *SH*, p. 114.

et (2) ne sont pourtant pas *plus* vraies que le principe d'inertie sous forme originale. Elles ne sont pas non plus les seules alternatives ; il peut exister d'autres généralisations également possibles, « tout aussi bien [...] compatibles avec le principe de raison suffisante[35] ».

Supposons, par exemple, que l'accélération d'un corps ne dépende que de la *position* d'un corps et de celle de ses corps voisins au lieu de leurs vitesses, de telle façon que les mouvements de tous les corps de l'univers suivent les équations différentielles du *premier* ordre. Poincaré invite ses lecteurs à s'imaginer un monde gouverné par une telle loi. Ce monde serait analogue à notre système solaire, à l'exception de ses planètes qui décrivent les orbites sans excentricité, ni inclinaison, ni effet perturbateur (à cause de la petitesse de leurs masses). Une fois connue la position d'une planète à un instant donné, les astronomes de ce monde connaitraient la vitesse et toute la trajectoire de cette planète.

Or, si, un jour, un astre extérieur arrivait en ce monde avant de s'en éloigner, que deviendrait ce système ? Les orbites planétaires seraient d'abord perturbées, elles ne seraient alors plus comme avant même après l'éloignement de l'astre perturbant, et les distances entre les planètes auraient évidemment changé. Cela inciterait les habitants de cette planète à modifier leurs lois, jusqu'à ce qu'elles retrouvent les formes qui s'approchent de nos lois, celles de Kepler par exemple. Ceci étant dit, la concordance avec l'expérience pourrait être elle-même un effet du hasard : il est *probable* que des facteurs dus au hasard concourent à chacune de nos confrontations des lois aux phénomènes, de telle façon que ceux-ci soient toujours en concordance avec la loi ;

> Une pareille hypothèse est trop invraisemblable pour que l'on s'y arrête. Personne ne croira qu'il puisse y avoir de tels hasards. [...] La probabilité d'un événement simple n'est pas plus petite que celle d'un événement compliqué ; et pourtant si le premier se produit, nous ne voudrons pas croire que la nature ait fait exprès de nous tromper. L'hypothèse d'une erreur de ce genre étant écartée, on peut donc admettre qu'en ce qui concerne l'astronomie, notre loi a été vérifiée par l'expérience[36].

Que les excentricités des orbites planétaires soient non nulles dans notre monde, cela n'est pas une vérité nécessaire, mais un fait empirique. C'est à l'expérience de le vérifier. Soumise à la vérification empirique qui n'est jamais irrévocable, une loi reste toujours susceptible de modification et de remplacement par une autre.

Quand une loi est vérifiée par l'expérience, ce n'est pas parce qu'elle est plus *probable* que les autres, sa probabilité étant égale à celle des autres, mais

35. *ibid.*
36. *SH*, p. 116.

parce qu'elle est impossible à vérifier rigoureusement. Pour vérifier cette loi rigoureusement, il faut mettre tous les corps de l'univers à leurs positions initiales et à leurs vitesses initiales, pour voir si tous ces corps repassent les trajectoires décrites telles qu'elles sont décrites par la loi. Une telle épreuve ne sera jamais complète et il restera toujours quelques corps qui ne passent pas à leurs positions initiales. Une « épreuve décisive » consisterait à « attendre » que *tous les corps de l'univers* reprennent leurs positions et vitesses initiales pour qu'on voie s'ils reprendront les mêmes trajectoires. Le retour à l'état initial est *probable* en principe, nous l'avons vu plus haut, sans pour autant que ce soit *pratiquement* envisageable. Si l'on met quelques corps à leur état initial sans savoir s'il n'y en a pas d'autres qui ne retrouvent pas leurs conditions initiales, on aura recours à d'autres explications au lieu de mettre en cause la loi ; tant que la vérification n'est pas complète, on aura droit de dire « toute dérogation à la loi trouvera facilement son explication [37] ».

L'histoire de l'astronomie dispose de deux exemples qui sont également célèbres, mais s'opposent l'un à l'autre. Du fait que la trajectoire de Uranus s'écarte de la prédiction de la loi de Newton, Le Verrier en déduit l'existence d'une nouvelle planète et fut amené à la découverte de Neptune. En revanche, l'écart de la trajectoire de Mercure conduit le même Le Verrier à soupçonner l'existence d'une autre planète, à tort ; dans ce cas précis, il fallut aller à l'encontre de la loi de Newton et la remplacer par une autre, celle de la relativité générale en l'occurrence. De manière générale, on est moins enclin à faire ce genre d'hypothèses. Et pour cause : il y aura toujours, en tout cas on aura toujours le droit de supposer, un corps dont on ignorait l'existence jusque-là, quelque part dans l'univers. C'est pourquoi on se garde, jusqu'à preuve du contraire, à les abandonner ou amender.

Tel est le cas de l'astronomie. Mais qu'en est-il pour d'autres sciences, notamment la physique, puisque « l'astronomie n'est pas la physique tout entière [38] » ?

De l'astronomie à la physique

Les phénomènes astronomiques avaient séduit tant les savants de l'âge classique que leurs devanciers grecs par leur aptitude à la mesure avec une grande précision, grâce à leur périodicité et à l'observabilité de leur mouvement sur un très long intervalle de temps, ainsi qu'à l'assimilation à des points matériels en mouvement ; les phénomènes physiques (ou terrestres) sont trop irréguliers

37. *SH*, p. 117.
38. *SH*, p. 116.

et variables pour se soumettre à la mesure et, *a fortiori*, à la prédiction, en tout cas pas autant que les mouvements des astres.

> Si nous n'avions pas connu les astres, quelques esprits hardis auraient peut-être cherché à prévoir les phénomènes physiques ; mais leurs insuccès auraient été fréquents et ils n'auraient excité que la risée du vulgaire [...] Combien de fois, les physiciens, rebutés par tant d'échecs, ne seraient-ils pas laissés aller au découragement, s'ils n'avaient pas eu, pour soutenir leur confiance, l'exemple éclatant du succès des astronomes [39] !

Prenons encore pour exemple la loi de la chute libre des corps. C'est l'un des phénomènes terrestres les plus faciles à *observer*, mais loin d'être facile à subordonner à la mesure. Pour dégager de là un rapport commun à toutes les chutes, il ne suffit pas de dépasser la conception aristotélicienne du mouvement ; il faut savoir mesurer et, pour cela, il faut avoir déjà eu l'idée et la nécessité même de mesurer, les mouvements des corps qui tombent sur la Terre, généralement trop rapides à observer à l'œil nu. Mais une fois la loi de la chute libre établie et, de plus, incorporée à une loi plus générale qu'est la loi de la gravitation universelle, elle en vient à se mettre à l'abri de toute réfutation expérimentale, par la même logique de vérification qu'en astronomie :

> Ne pourrait-on craindre que quelque expérience nouvelle ne vînt un jour mettre la loi en défaut dans quelque canton de la Physique ? Une loi expérimentale est toujours soumise à la révision ; on doit toujours s'attendre à la voir remplacée par une autre loi plus précise.
>
> Personne cependant ne redoute sérieusement que celle dont nous parlons doive être jamais abandonnée ou amendée. Pourquoi ? Précisément parce qu'on ne pourra jamais la soumettre à une épreuve décisive [40].

Les astronomes prennent en compte uniquement les mouvements des corps visibles, le plus souvent pris à l'abri des actions invisibles. C'est pourquoi la découverte d'un nouvel astre est un événement plutôt exceptionnel. Non qu'ils ne s'en soucient moins de la vérification empirique des lois :

> Ce n'est pas tout : en Astronomie, nous *voyons* les corps dont nous étudions les mouvements, et nous admettons le plus souvent qu'ils ne subissent pas l'action d'autres corps invisibles. Dans ces conditions, il faut bien que notre loi se vérifie ou ne se vérifie pas.
>
> Mais en Physique, il n'en est pas de même : si les phénomènes physiques sont dus à des mouvements, c'est aux mouvements de molécules que nous ne voyons pas [41].

39. *VS*, p. 117.
40. *SH*, p. 116.
41. *SH*, p. 117.

L'existence de Neptune *vérifie* la loi de Newton, jusqu'à la preuve du contraire comme l'avancement du périhélie de Mercure. Toujours est-il que cette preuve même ne conduit pas nécessairement à la même conclusion et il peut y en avoir qui préfèrent l'ancienne loi à la nouvelle. En physique, au contraire, les mouvements sont attribués à des corps *invisibles* que sont des atomes, et l'anomalie, à « une autre chose », c'est-à-dire d'autres corps que les atomes, aussi invisibles, mais peut-être plus petits que ceux-ci, dont nous pouvons constater volontiers la présence.

> En résumé, cette loi, vérifiée expérimentalement dans quelques cas particuliers, peut être étendue sans crainte aux cas les plus généraux, parce que nous savons que dans ces cas généraux l'expérience ne peut plus ni la confirmer, ni la contredire [42].
>
> On s'explique maintenant comment l'expérience a pu servir de base aux principes de la mécanique et cependant ne pourra jamais les contredire [43].

La validité d'une loi s'appuie sur l'impossibilité de soumettre la loi par rapport à tous les corps de l'univers, à tout l'univers.

Une loi est aussi un produit du temps en quelque sorte. Il faut du temps pour que les faits s'accumulent suffisamment, leur régularité apparaisse et, en fin de compte, un ensemble des faits accumulés *au cours du temps* et *à force du temps* deviennent des principes. Autrement dit, les principes sont *historiques* dans leur essence même.

Des lois de force centrale aux principes

A son origine, la physique mathématique avait pour base, comme la mécanique céleste, l'hypothèse des forces centrales. Selon cette hypothèse, les phénomènes se rapportent à la force de la gravitation qui agit entre les corps, représentés par des points matériels en raison directe de leur masse et en raison inverse du carré de leur distance, conformément à la loi de Newton. Les phénomènes sont représentés comme un vaste mécanisme constitué des pièces, ou des particules, liées l'une à l'autre par les forces moléculaires, dont l'ensemble fonctionne, justement, comme une machine.

> C'est aussi une machine beaucoup plus compliquée que toutes celles de l'industrie, et dont presque toutes les parties nous sont profondément cachées ; mais en observant le mouvement de celles que nous pouvons voir, nous pouvons, en nous aidant de ce principe, tirer des conclusions

42. *ibid.*
43. A développer *SH*, p. 124.

> qui resteront vraies quels que soient les détails du mécanisme invisible qui les anime [44].

La physique des forces centrales dominait tout le XIXe siècle avec sa puissance explicatrice des phénomènes hors pair. A quelques exceptions près, pour lesquelles il semblait suffire de remplacer l'exposant – 2 par – 5 ou – 6 (« – 6, ou – 5, au lieu de l'exposant – 2, mais c'est toujours un exposant », dit Poincaré), sans pour autant compromettre la validité de l'hypothèse elle-même. Quand la physique mathématique devait renoncer à « démonter » ce mécanisme, c'est-à-dire à analyser un à un ses éléments inobservables, pour ne pas dire inexistants même (en tout cas leur existence ne va pas de soi), elle devait affronter la première « crise » de son histoire. Résultat : elle se sépara de la mécanique et finit par adopter un autre modèle qu'est celui des *principes*.

> On renonça à pénétrer dans le détail de la structure de l'univers, à isoler les pièces de ce vaste mécanisme, à analyser une à une les forces qui les mettent en branle et on se contentât de prendre pour guides *certains principes généraux* qui ont précisément pour objet de nous dispenser de cette étude minutieuse [45].

Ces « certains principes généraux » ne diffèrent pourtant pas de l'hypothèse des forces centrales. Bien au contraire, elle « contenait tous ces principes ; elle les entrainait comme des conséquences nécessaires ». Quoiqu'ils ne soient pas à l'abri de la confrontation avec l'expérience et la modification qui en résulte, les principes finissent par se « familiariser » et se généraliser, au prix de la précision, jusqu'à ce qu'ils soient considérés « non comme des vérités expérimentales, mais comme des théorèmes [46] ». Or, il arrive qu'ils élargissent leur domaine d'application pour leur consolidation, jusqu'à ce qu'ils ne soient plus considérés comme des théorèmes, mais des *vérités expérimentales*, c'est-à-dire susceptibles d'être mise en cause par l'expérience et remplacée par une autre.

Ces principes sont à l'origine des faits expérimentaux, « des résultats d'expériences fortement généralisés [47] », après avoir été soumis à un grand nombre de contrôles expérimentaux. Vérifiés par nombreuses expériences et raffinés au niveau formel, ils deviennent inébranlables, hors de tout doute possible. Impossibles à mettre en doute. On revient ainsi à la conclusion précédente : une loi s'établit et se vérifie partiellement et localement, mais une fois étendue aux cas généraux, elle devient un principe dont la vérification exige une épreuve globale ou cosmologique, impossible à réaliser, au point de devenir invérifiable, donc

44. *VS*, p. 126.
45. *ibid.*
46. *VS*, p. 128.
47. *VS*, p. 127.

universellement valide. Revêtue du nom de principe, et surtout de convention, la loi demeure à jamais immune à la révision ; il lui arrive même de jouer le rôle constitutif à toute théorie (sans laquelle aucune science n'est plus possible).

Parmi ces « cinq ou six principes », le principe de relativité et le second principe de la thermodynamique, que Poincaré aime appeler le principe de Carnot, attirent l'attention en ce qu'ils montrent la transition, de la loi au principe et/ou de la mécanique à la physique. Au début ils sont présentés comme des principes tellement établis, comme résultats déduits des autres lois ; vers la *fin de siècle*, ces principes sont remis à la vérification expérimentale et tombés en crise ; une fois sortis de la crise, ils arrivent à renforcer leur statut principiel. C'est ainsi que la relativité, d'abord prise pour une loi de la géométrie puis pour un principe déduit des lois de de la mécanique, finit par redevenir une loi de la physique, suffisamment prouvée par des expériences (notamment celles de Michelson et Morley) et absolument générale comprenant les phénomènes optiques (grâce à l'hypothèse de Lorentz).

2 Parcours d'une pensée relativiste

> [I]l n'existe pas une authentique et imperfectible Relativité.
> Aucune ébauche imparfaite, mais prometteuse
> n'attend sous le voile des ignorances et des préjugés une sorte d'investiture.
> Cette idée même est antirelativiste.
> Née dans la confusion de l'aristotélisme finissant, rénovée par les contradictions attachées à un insaisissable éther,
> l'idée de Relativité semble chaque fois liée davantage à ce qui la suit qu'à ce qui la précède.
> Vision novatrice, elle éclaire son propre chemin et même,
> dans une large mesure, en définit les méandres
> et en détermine l'approfondissement [48].

L'idée de relativité est loin d'être nouvelle. Galilée fut le premier à exprimer clairement à l'aide de l'expérience du navire cette idée selon laquelle les lois du mouvement ne changent pas selon le système de référence qu'il soit en repos ou en mouvement rectiligne et uniforme. Ainsi s'établit ce qu'on appelle aujourd'hui la relativité galiléenne ou l'invariance galiléenne. Elle fut reprise par Newton, nous l'avons vu plus haut, dans un des corollaires aux lois du mouvement :

48. Marie-Antoinette Tonnelat (1965), *L'histoire du principe de relativité*, Paris : Flammarion, p. 13.

> Les mouvements des corps enfermés dans un espace quelconque sont les mêmes entre eux, soit que cet espace soit en repos, soit qu'il se meuve uniformément en ligne droite sans mouvement circulaire [49].

Il est significatif que ce corollaire ne figure pas parmi les lois du mouvement chez Newton. Pourquoi est-il présenté comme un *corollaire*, c'est-à-dire une proposition qui est déduite des lois, plutôt qu'une loi ou un principe ? La question n'est pas anodine. Il parait que Newton eut à l'origine l'intention d'ériger son système sur la relativité au même titre que d'autres lois fondamentales d'après les premiers manuscrits des *Principia*, mais finit par ne laisser que trois lois telles qu'elles sont connues aujourd'hui [50]. La relativité n'était donc pas considérée comme une loi ou un principe chez Newton, mais comme une conséquence tirée des autres lois (Scolie V, Définition VIII). En conséquence de quoi, quelque chose d'incompatible avec elle comme la notion d'espace absolu en vint s'ajouter au système newtonien.

Au cours du XIXe siècle, le problème de l'incompatibilité s'accentuait avec le problème de l'*éther*. Ce milieu était supposé responsable de la propagation des ondes électromagnétiques, et pris pour la matérialisation ou l'équivalent physique d'un espace absolument immobile, à savoir l'espace absolu newtonien. Selon cette conception, la propagation de la lumière dépend de son mouvement *relatif* à l'éther, et, par conséquent, la vitesse de la lumière s'observe différemment selon la direction dans laquelle elle est dirigée par rapport à l'observateur sur la Terre. Or, il n'en était rien, d'après les expériences de Michelson et Morley : il était impossible de prouver le mouvement de la Terre relatif à l'éther et la vitesse de la lumière devait rester constante tout comme les équations de Maxwell. Puisqu'il était impossible de soumettre le mouvement de la lumière à la transformation de Galilée comme d'autres mouvements inertiels, s'imposait l'introduction d'un nouveau groupe de transformations, qu'on nommera, suivant Poincaré, la « transformation de Lorentz », transformations par lesquels les équations de Maxwell ne changent pas, avec la vitesse de la lumière constante, que le système de référence soit immobile ou en mouvement rectiligne et uniforme.

Einstein a pris pour point de départ les deux principes : celui de la constance de la vitesse de la lumière d'un côté, et celui de relativité d'un autre. Le premier principe pose la vitesse de la lumière comme une constante totalement indépendante du mouvement, que ce soit du mobile ou de l'observateur, et le

49. Newton, *Principia*, Livre I, Corollaire V, p. 26. Passage déjà cité *supra*, Ch. I.

50. Roger Penrose (1989), « Newton, Quantum Theory and Reality », in *Three Hundred Years of Gravitation*, sous la dir. de Stephen William Hawking et Werner Israel, Cambridge : Cambridge University Press, pp. 23-24, in Balibar et Toncelli, *Einstein, Newton, Poincaré*, p. 72, *sqq.*

second, l'invariance des lois dans tous les systèmes de référence dits inertiels, à savoir en mouvement rectiligne et uniforme. Les principes sont posés « en avant » sans d'autres arguments d'appui, un peu comme s'ils allaient de soi. A quoi consiste l'originalité de la pensée d'Einstein, surtout quant au principe de relativité. « Qu'un principe d'une si grande généralité soit valable avec une telle exactitude pour un ordre de phénomènes, mais en défaut pour un autre, ceci est a priori peu probable, » ajoutera-t-il plus tard. Son attitude était d'autant plus originale que, comme le dira M. Paty, « [i]l n'était pas évident pour beaucoup, en 1905, que ce qui était le plus important, en physique – du moins concernant un large domaine –, était le principe de relativité. Les physiciens étaient alors avant tout préoccupés de l'électrodynamique (pour les corps en mouvement) [51]. »

Il est désormais établi que la contribution de Poincaré a été aussi incontestable et décisive que celle d'Einstein à la théorie de la relativité restreinte. L'approche de « La dynamique de l'électron » a été aussi indépendante que différente de « Sur l'électrodynamique des corps en mouvement », dont la publication pratiquement simultanée (le premier étant soumis en été 1905 et publié en 1906, tandis que le second, en 1905) a alimenté les polémiques autant que la curiosité [52]. La relativité a souvent été traitée comme si elle était liée « davantage à ce qui la suit qu'à ce qui la précède », aux dires de M.-A. Tonnelet. La réticence de Poincaré vis-à-vis de la nouvelle mécanique a souvent été comparée avec l'attitude d'Einstein qui n'éprouvait aucune difficulté à l'accepter et l'intégrer dans une nouvelle conception de l'espace et du temps. On s'est beaucoup demandé pourquoi Poincaré n'est pas allé jusqu'où Einstein est arrivé, pourquoi il n'a pas fait ce qu'Einstein a fait, pourquoi il a fini par revenir à la mécanique classique. Par son conventionnalisme, selon les uns, et un scepticisme qui lui était propre et que son lecteur reconnait en lui ; par son attachement à la mécanique classique, selon les autres, la marque d'un certain conservatisme qui était lui aussi le sien.

Poincaré a parcouru un itinéraire plus long et compliqué que le physicien allemand ; il a été détourné en quelque sorte, plus que raccourci, par ses propres travaux précédents d'abord en géométrie, puis en mécanique, et, en fin de compte, en physique. Je tenterai de retracer cet itinéraire, en restituant *ce*

51. Michel Paty (1996), « Le principe de relativité au sens de Poincaré », in *Henri Poincaré. Science et philosophie*, sous la dir. de Jean-Louis Greffe *et al.*, Berlin et Paris : Akademie Verlag-Blanchard, p. 5.

52. Henri Poincaré (1906e), « Sur la dynamique de l'électron », *Rendiconti del circolo matematico di Palermo*, 21, repris in *Œuvres* IX. Einstein, « Zur Elektrodynamik bewegter Körper », *Annalen der Physik* 17 (1905). Dans ce qui suit, l'article d'Einstein sera cité d'après la traduction française, reprise dans Albert Einstein (1993), *Albert Einstein. Physique, philosophie, politique*, éd. établie et annot. par Françoise Balibar, Paris : Editions du Seuil.

qu'a fait Poincaré et *pourquoi* il l'a fait, dans quels rapports il a entretenu avec d'autres acteurs et par quelles conjonctures théoriques et expérimentales [53]. Il ne s'agit point de « réviser » de l'histoire de la relativité ni de confronter notre mathématicien à Einstein du point de vue rétrospectif : ce serait une erreur de faire, toujours selon M. Paty, « [c]omme s'il y avait eu, alors, une seule attitude possible, une réponse et une seule, devant les questions posées par la physique, quand nous savons, en vérité, que la pensée de Poincaré et ses contributions font partie du corpus de la théorie de la relativité restreinte et ont eu un rôle décisif dans la mise au jour du caractère fondamental du principe de relativité en physique, au-delà de la mécanique » [54]. C'est ce fait, que « nous savons » déjà, qui nous servira de point de départ, surtout ce qui concerne le principe de relativité, sa « mise au jour du caractère fondamental » qui est, de fait, la conséquence de sa remise en cause. Comment la relativité est-elle devenue un principe fondamental ?

2.1 De la relativité de l'espace au mouvement relatif

Relativité géométrique de l'espace

Pour rendre compte du mouvement d'un système, l'on considère d'abord des états de ce système décrits par des qualités observables telles que la température ou le potentiel électrique, et leurs positions déterminées soit par les distances mutuelles entre eux soit par leurs positions absolues. Or, nous ne pouvons connaitre que les distances mutuelles, pas les positions absolues. C'est ce que Poincaré appelle, « pour abréger le langage, *la loi de la relativité* » :

> **La loi de relativité (1).** Les lois des phénomènes qui se produiront dans ce système pourront dépendre de l'état de ces corps et de leurs distances mutuelles ; mais, à cause de la relativité et de la passivité de l'espace, elles ne dépendront pas de la position et de l'orientation absolues du système.
>
> En d'autres termes, l'état des corps et leurs distances mutuelles à un instant quelconque dépendront seulement de l'état de ces mêmes corps et de leurs distances mutuelles à l'instant initial, mais ne dépendront nullement de la position absolue initiale du système et de son orientation absolue initiale [55].

53. Olivier Darrigol (2004), « Faut-il réviser l'histoire de la relativité ? », *Lettre de l'Académie des sciences*, 14, p. 6. Bien que l'étude que je mène n'ait pas pour but de « réviser » de l'histoire de la relativité, je ne saurais ignorer que celle-ci est intimement liée à la pensée cosmologique de Poincaré. Ici je me réfère à la problématique de Darrigol.

54. Paty, « Le principe de relativité au sens de Poincaré », pp. 4-5. Voir aussi Darrigol, « Faut-il réviser l'histoire de la relativité ? », p. 6.

55. *SH*, p. 98.

L'espace est passif et relatif ; la *position* qu'un corps occupe dans l'espace n'a rien à voir avec les états et les changements d'états de ce corps, ni, par conséquent, avec les lois qui régissent les mouvements et d'autres changements. Nous pouvons ainsi mesurer tranquillement les états des corps avec nos instruments et établir les relations entre ces états, sans craindre qu'elles ne soient pas valides dans un autre espace que le nôtre. C'est cette *relativité* de l'espace qui assure l'*universalité* des lois. Mais, la relativité elle-même, sur quoi se fonde-t-elle ? C'est pour répondre à cette question que Poincaré fait appel à un argument cosmologique, sur lequel il renvidera constamment dans ses raisonnements relatifs aux notions de loi et de principe.

> [E]n effet, pour qu'on puisse appliquer la loi de relativité en toute rigueur, il faut l'appliquer à l'univers entier. Car si on considérait seulement une partie de cet univers, et si la position absolue de cette partie venait à varier, les distances aux autres corps de l'univers varieraient également, leur influence sur la partie de l'univers envisagée pourrait par conséquent augmenter ou diminuer, ce qui pourrait modifier les lois des phénomènes qui s'y passent.
>
> Mais si notre système est l'univers entier, l'expérience est impuissante à nous renseigner sur sa position et son orientation absolue dans l'espace. Tout ce que nos instruments, si perfectionnés qu'ils soient, pourront nous faire connaître, ce sera l'état des diverses parties de l'univers et leurs distances mutuelles [56].

Appliquer une loi rigoureusement, nous l'avons vu plus haut, c'est de l'appliquer à l'univers entier. Mais quand on applique la loi de relativité à l'univers, qu'entend-on par là ? De deux choses l'une. Ou bien notre système est une partie de l'univers, ou bien il est lui-même l'univers entier. Dans le premier cas, il y aura des exceptions à la loi de relativité ; on pourra parler de quelque chose d'absolu et attribuer à un système quelconque une seule position et un seul mouvement par rapport à un référentiel unique, à un système de référence absolument immobile. Dans le second cas, une position absolue ou un mouvement absolu n'auront plus aucun sens. C'est seulement dans ce cas-ci que la loi de relativité sera maintenue.

En somme, la relativité signifie ici qu'une position ou une orientation dans l'espace ne veut justement rien de dire ; il n'a rien de significatif, parce que la définition d'un point d'origine ne peut être qu'arbitraire. Aucune mesure, aucune lecture sur les instruments, ne peuvent être absolues. Dès lors la loi de relativité s'énonce comme suit :

> **La loi de relativité (2).** Les lectures que nous pourrons faire sur nos instruments, à un instant quelconque, dépendront seulement des

56. *SH*, p. 99.

lectures que nous aurions pu faire sur ces mêmes instruments à l'instant initial[57].

La critique de l'espace absolu n'a jamais été aussi claire et décisive et là se trouverait, commentera R. Torretti[58], la contribution la plus décisive de Poincaré dans le développement de la mécanique relativiste, même plus que la formulation du groupe de Lorentz et son application à l'électrodynamique. L'espace absolu en tant que tel n'est pas observable ni apte à l'expérience. Et, par cela même, en raison de son inobservabilité et son inaptitude à l'expérience, on peut conclure l'*inexistence* d'un tel espace. L'expérience ne renseigne rien sur la véritable structure de l'espace et, par conséquent, le choix d'une géométrie pour décrire les phénomènes physiques est une pure affaire de convention.

Relativité comme principe de la mécanique, mais (pas encore) physique

Les hypothèses fondamentales de la mécanique classique sont (i) l'espace absolu, auquel on apporte les mouvements, qui ne sont que relatifs, (ii) le temps absolu, par lequel on mesure l'égalité des durées (iii) l'intuition directe sur le temps, qui sert à définir l'égalité de deux durées et la simultanéité de deux événements et (iv) la géométrie euclidienne. Ce sont des hypothèses qui paraissent évidentes, difficiles à nier, sans pour autant qu'elles aillent de soi : elles ne sont pas « des conditions qui s'imposent à la mécanique ; toutes ces choses ne préexistent pas plus à la mécanique que la langue française ne préexiste logiquement aux vérités que l'on exprime en français[59] », affirme Poincaré. Elles ont été choisies en raison de leur commodité, mais toujours remplaçables par d'autres choix. Qu'en est-il des principes de la mécanique comme les trois lois du mouvement de Newton (l'inertie, la proportionnalité des forces aux masses et aux accélérations, l'égalité de l'action et de la réaction), le mouvement rectiligne et uniforme du centre de gravité, ou encore le principe des aires[60] ?

Prenons la deuxième loi de Newton : « l'accélération d'un corps est égale à la force qui agit sur lui divisée par sa masse[61], » qui s'écrit généralement comme $F=ma$. Cette loi comprend dans son énoncé trois grandeurs : l'accélération, la force et la masse. La vérification consistera donc à mesurer le rapport entre les trois grandeurs en question. Pour mesurer, il faut d'abord savoir bien définir ces grandeurs. Si on laisse de côté l'accélération, qui est une notion dérivée de

57. *ibid.*
58. Torretti, *Philosophy of Geometry from Riemann to Poincaré*, p. 325 et p. 332.
59. *SH*, p. 112.
60. Tels sont les principes de la dynamique énuméré par Poincaré : *SH*, p. 123.
61. *SH*, p. 117.

l'espace et du temps, il reste à définir les deux autres, la masse et la force. Si elles sont des notions fondamentales dans la mécanique newtonienne, elles ne vont pas de soi : la force se définit par la masse (« La force est une quantité qui se mesure par la masse et l'accélération d'un corps »), tandis que la masse, elle, par la force (« La masse est la quantité de matière d'un corps, qui se mesure par la force exercée à ce corps et l'accélération qu'il reçoit »). En fin de compte, la loi en question se réduit à un énoncé circulaire où le *definiens* (ce qui définit) et le *definiendum* (ce qui est défini) ne sont pas clairement déterminés, à moins de faire appel à une autre loi qu'est l'égalité de l'action et la réaction, connue sous le nom de la troisième loi de Newton.

Quant à la troisième loi de Newton, sa vérification consiste à voir si les *actions* de deux corps, A et B, sont les mêmes, et, pour cela, à les soustraire à toutes les autres actions extérieures, de telle façon que le système de A et B soit traité comme un système isolé et le mouvement de leur centre de gravité comme uniforme et rectiligne, conformément à la loi d'inertie.

> Mais il n'existe pas de système soustrait à toute action extérieure ; toutes les parties de l'univers subissent plus ou moins fortement l'action de toutes les autres parties. *La loi du mouvement du centre de gravité n'est rigoureusement vraie que si on l'applique à l'univers tout entier.*
> Mais alors il faudrait, pour en tirer les valeurs des masses, observer le mouvement du centre de gravité de l'Univers. L'absurdité de cette conséquence est manifeste ; nous ne connaissons que des mouvements relatifs ; le mouvement du centre de gravité de l'univers restera pour nous une éternelle inconnue.
> Il ne reste donc rien et nos efforts ont été infructueux ; nous sommes acculés à la définition suivante, qui n'est qu'un aveu d'impuissance : *les masses sont des coefficients qu'il est commode d'introduire dans les calculs*[62].

Deux impossibilités expliquent pourquoi une vérification complète du principe n'est pas possible : l'impossibilité d'isoler parfaitement un corps du reste de l'univers d'une part, et d'autre part, l'impossibilité d'observer un mouvement absolu, celle d'attribuer une position ou une vitesse à un corps de manière absolue. Par conséquent, il se peut que le prince ne soit pas rigoureusement vrai. Pourtant, cela ne nous empêchera pas de nous en servir, car notre système est « à peu près » isolé, en tout cas suffisamment pour que nous le considérions comme indépendant des autres parties de l'univers.

> Il n'y a pas, dans la nature, de système parfaitement isolé, parfaitement soustrait de toute action extérieure. Mais il y a des systèmes *à peu près* isolés.

62. *SH*, pp. 122-123.

> Si l'on observe un pareil système, on peut étudier non seulement le mouvement relatif de ses diverses parties l'une par rapport à l'autre, mais le mouvement de son centre de gravité par rapport aux autres parties de l'univers. On constate alors que le mouvement du centre de gravité est *à peu près* rectiligne et uniforme, conformément à la troisième loi de Newton [63].

D'après le principe d'inertie généralisée, que nous avons vu plus haut, les accélérations d'un corps ne dépendent que de la position de ce corps et des corps voisins, ainsi que de leurs vitesses. De manière similaire, on peut dire que les lois du mouvement restent les mêmes que l'axe soit en repos ou en mouvement rectiligne et uniforme. D'où un autre principe, qui s'énonce plus précisément comme suit :

> **Le principe du mouvement relatif.** Le mouvement d'un système quelconque doit obéir aux mêmes lois, qu'on le rapporte à des axes fixes ou à des axes mobiles entrainés dans un mouvement rectiligne et uniforme [64].

Ce principe n'est pas déductible à partir d'autres lois, sans pour autant être primitif ni intuitif. Mais il n'en est pas moins évident : les expériences les plus ordinaires nous le confirment d'une part, et d'autre part, il est la « conséquence nécessaire » de l'hypothèse des forces centrales. Que les expériences les plus ordinaires l'affirment, cela est évident : la Terre est en translation à une vitesse non négligeable, cela ne nous empêche pas d'avoir toujours les mêmes lois de la mécanique. Pourtant, même s'il est confirmé par l'expérience, il n'est pas tout à fait comme d'autres lois empiriques : il prend appui sur le fait que « l'hypothèse contraire répugnerait singulièrement à l'esprit [65] », un fait qui n'est pas expérimental.

Poincaré se demande pourquoi ce principe est restreint au mouvement uniforme et rectiligne. Un mouvement qui n'est ni uniforme ni rectiligne serait soumis à une force, et cette force se mesurerait par son accélération selon la deuxième loi de Newton. Qu'en est-il d'autres types de mouvement, un mouvement uniforme, mais non rectiligne comme la rotation uniforme ? Newton pensa qu'un tel mouvement n'obéit pas au principe de relativité et en tira l'existence du mouvement réel, c'est-à-dire absolu, et, de là, celle de l'espace absolu. Il n'en est rien pour Poincaré. Même dans une planète couverte du nuage si bien qu'il est impossible d'observer les mouvements des étoiles, ses astronomes découvriront que leur planète tourne parce que ce serait là l'hypothèse la plus simple, qui rend leurs équations du mouvement les plus simples.

63. *SH*, p. 124.
64. *SH*, p. 129.
65. *ibid.*

2.2 Du principe mécanique à la loi physique. Vers l'historicité de la relativité

Chose étrange, un grand changement, plutôt une grande coupure, a lieu autour de la thermodynamique dans la préface. Tout ce qui est dit sur l'inégalité de Clausius, sur le but de la physique mathématique, l'incompatibilité du mécanisme avec le théorème de Clausius, ne subsiste plus dans *La science et l'hypothèse*. Alors que la « découverte » est considérée même en 1908 comme l'une des contributions majeures en physique par Poincaré lui-même.

Premier énoncé complet du principe de relativité (1900–1904)

Mais il en est autrement en physique.

Dans les premiers chapitres sur la physique de *La science et l'hypothèse*, Poincaré discute de l'incompatibilité de la théorie de Lorentz avec des principes, notamment le principe de l'égalité de l'action et de la réaction [66]. Partant des résultats négatifs des tentatives de mettre en évidence l'influence de la translation de la Terre sur le mouvement de la lumière, Lorentz proposa une explication assez générale pour se soucier d'autres épreuves à venir, mais ce ne fut pas sans avoir recours à des hypothèses *ad hoc*, dont celle sur l'éther. L'éther fait l'objet d'une discussion assez longue : sa nature (son rapport avec la matière et sa matérialité même : la matière primitive ou bien même seule matière véritable ?), l'origine de notre croyance à son existence, son comportement ou bien son fonctionnement dans le mouvement de la lumière, ainsi que sa place dans la théorie optique en comparaison avec des « anciens fluides » comme le calorique dans la théorie de la chaleur. L'hypothèse de Lorentz consiste à appliquer le principe de Newton à l'éther, alors que l'applicabilité de ce principe à l'éther ni la matérialité de l'éther restent toujours discutables.

> [J]e dois expliquer, en effet, pourquoi je ne crois pas, malgré Lorentz, que des observations plus précises puissent jamais mettre en évidence autre chose que les déplacements relatifs des corps matériels. On a fait des expériences qui auraient dû déceler les termes du premier ordre ; les résultats ont été négatifs ; cela pouvait-il être par hasard ? Personne ne l'a admis ; on a cherché une explication générale, et Lorentz l'a trouvée ; il a montré que les termes du premier ordre devaient se détruire, mais il n'en était pas de même de ceux du second. Alors on a fait des expériences plus précises ; elles ont aussi été négatives ; ce ne pouvait non plus être l'effet du hasard ; il fallait une explication ; on l'a trou-

66. Il s'agit des chapitres IX et X, tirés du discours au Congrès de physique de Paris en 1900, tenu au même moment que le Congrès de philosophie.

vée ; on en trouve toujours ; les hypothèses, c'est le fonds qui manque le moins[67].

Pourtant, l'expression exacte du « principe de relativité » n'apparaitra que dans l'avant-dernier chapitre de *La science et l'hypothèse*, portant sur l'électrodynamique. La théorie de Lorentz n'a pas encore convaincu tout le monde et il y en a toujours qui tiennent à la possibilité de mesurer la vitesse absolue de translation d'un système, « ce qui est, dit Poincaré, contraire à l'idée que nous faisons de la relativité de l'espace[68] ». Qu'une telle vitesse n'est pas mesurable, cela est certain, mais cela n'entraine pas nécessairement la négation de l'existence de l'éther ; une chose est la vitesse absolue et ç'en est une autre, la vitesse relative par rapport à l'éther. « Non, répondaient les partisans de Lorentz ; ce qu'on mesurerait ainsi, ce n'est pas leur vitesse absolue, mais leur vitesse relative *par rapport à l'éther*, de sorte que *le principe de relativité est sauf*[69]. »

On sent un changement net de ton dans *La valeur de la science*. Un peu comme si, en l'espace de trois ou quatre ans (ou de quelques chapitres, pour le lecteur de nos jours de *La science et l'hypothèse*[70]), le principe de relativité n'était plus ce qu'il avait été auparavant. A Saint-Louis en 1904, Poincaré traite du principe de relativité au même titre que ces « cinq ou six principes généraux » après l'avoir défini comme suit :

> **Le principe de relativité.** [L]es lois des phénomènes physiques doivent être les mêmes pour un observateur fixe et pour un observateur entrainé dans un mouvement de translation uniforme, de sorte que nous n'avons pas et ne pouvons avoir aucun moyen de discerner si nous sommes, oui ou non, emportés dans un pareil mouvement[71].

Comparé au principe du mouvement relatif, le principe nouvellement énoncé a ceci de particulier qu'il se rapporte à l'*observateur* et à des phénomènes variés, non seulement *mécaniques*, mais aussi *physiques*[72]. Quoique confirmé par les expériences ordinaires et imposé à notre esprit, le principe se trouve, comme

67. *SH*, p. 182.
Dans un autre article rédigé à ce sujet en 1900, « La théorie de Lorentz et le principe de réaction », Poincaré conclura que « l'hypothèse de Lorentz » est la seule à rendre compte avec succès ce fait qu'« aucune expérience ne pourra mettre en évidence le mouvement absolu ». Poincaré, « La théorie de Lorentz et le principe de réaction ». Il n'est pas repris dans *La science et l'hypothèse*.
68. *SH*, p. 242.
69. *SH*, pp. 242-243. Soulignement dans le texte original.
70. Dans le dernier chapitre ajouté à la nouvelle édition de *La science et l'hypothèse*, datée de 1907, qui est aussi la base de l'édition récente, le principe est évoqué comme une « loi générale de la nature », à admettre « comme postulat ». *SH*, p. 249. Sur ce dernier chapitre, voir *infra*, Ch. VI.
71. *VS*, p. 127.
72. Balibar et Toncelli, *Einstein, Newton, Poincaré*, pp. 47-48.

d'autres principes de la physique, « en cause » ou « en danger » [73], notamment par son incompatibilité avec la théorie de Maxwell, accentuée par les expériences Michelson et Morley. Celles-ci ont déjà été effectuées et leurs résultats, publiées dès les années 1880 ; mais c'est bien des années après et après tant de tentatives de preuve du contraire que leur implication est pleinement pris en compte.

> Cette fois la physique expérimentale a été plus fidèle aux principes que la Physique Mathématique ; les théoriciens en auraient fait bon marché afin de mettre en concordance leurs autres vues générales ; mais l'expérience s'est obstinée à le confirmer. On a varié les moyens, enfin Michelson a poussé la précision jusqu'à ses dernières limites ; rien n'y a fait. C'est précisément pour expliquer cette obstination que les mathématiciens sont forcés aujourd'hui de déployer toute leur ingéniosité [74].

C'est en effet ce que fit Lorentz, même si « ce n'est qu'en accumulant les hypothèses [75] », ajoute Poincaré, que ce soit sur le temps (temps local) ou bien sur la disposition de la matière (contraction uniforme dans le sens du mouvement). Qui plus est, Poincaré n'en reste pas moins ambiguë que Lorentz le problème de l'éther : pour l'un comme pour l'autre il n'est pas certain si le principe de relativité met en évidence l'impossibilité du mouvement *par rapport à l'éther* avec autant de clarté que celle du mouvement absolu. Une chose est sûre en tout cas : le principe n'est plus une *conséquence* de la relativité géométrique, mais une *loi empirique*, dont il ne reste plus qu'à tirer des conséquences.

Loi générale ou postulat, plutôt que principe (*circa* 1905)

Suivant Minkowski, on peut distinguer trois étapes du principe de relativité [76]. Dans un premier temps, celle de Lorentz selon laquelle il existe un groupe de transformations qui rend covariantes les équations de Maxwell. C'est « un fait purement mathématique », que Minkowski propose d'appeler « *le théorème de la relativité* ». De ce « théorème » découlent quelques conséquences *physiques*, comme celle de Lorentz sur la contraction des corps dans la direction de leur mouvement. On passe ainsi d'un *théorème* mathématique à un *postulat* physique qu'est le « *postulat de la relativité* ». Par le postulat faut-il entendre une « intime conviction [...] qui relève plus de la persuasion que d'un

73. *VS*, p. 129, *sqq.*
74. *VS*, pp. 132-133.
75. *VS*, p. 133.
76. « Les équations fondamentales régissant les processus électromagnétiques dans les corps en mouvement » (1908). Extrait reproduit dans Balibar et Toncelli, *Einstein, Newton, Poincaré*, pp. 69-71.

savoir achevé », que l'on pose de la même manière qu'on « postule » la conservation de l'énergie, avant même que les formes d'énergie ne soient connues. C'est ainsi qu'on arrive à établir des relations entre les grandeurs physiques jusqu'à obtenir un ensemble des équations du mouvement en général.

Chez Einstein la relativité est promue « au rang du postulat » ou de « présupposé » (*Vorausetzung*) dès le début [77]. Il n'en est pas de même chez Poincaré, nous venons de le voir ; il s'approche de ce choix einsteinien dans ces écrits ultérieurs, mais ceci lui parviendra seulement après l'évolution des idées qui parcourt toutes les trois étapes par ordre. La relativité est d'abord considérée comme un principe géométrique, puis mécanique et, enfin, physique, sans pour autant que son statut en tant que principe ne soit totalement assumé. Comme un principe de la physique, la relativité a un double trait : d'une part, comme un *principe conventionnel* qui pourrait aller prendre une valeur absolue sans aucune restriction ; d'autre part, comme une *loi empirique*, susceptible de vérification et de modification. Lequel entre les deux ? Le doute n'est toujours pas dissipé chez Poincaré même dans « Sur la dynamique de l'électron », l'article fondateur de 1905 :

> Il semble que cette impossibilité de mettre en évidence expérimentalement le mouvement absolu de la Terre soit *une loi générale de la Nature* ; nous sommes naturellement portés à admettre cette loi, que nous appellerons le *Postulat de Relativité* et à l'admettre sans restriction. Que ce postulat, jusqu'ici en accord avec l'expérience, doive être *confirmé ou infirmé plus tard par des expériences plus précises*, il est en tout cas intéressant de voir quelles en peuvent être les conséquences [78].

Un postulat n'est pas un fait vérifié ni une proposition qui va de soi, mais il nous parait « naturel » à admettre, puisqu'il n'a jamais été contredit par l'expérience. Même si cela n'exclut pas totalement la possibilité de sa réfutation à l'avenir, cela suffit pour fonder pour qu'il soit admis sans restriction. Dès lors, il n'est plus question de vérifier ou d'infirmer le principe, mais d'examiner, tout en supposant sa validité, ses conséquences qui en découlent. Or, une fois ses conséquences acquises et reconnues, ce « postulat » ne laisse plus aucun doute. Basé à l'origine sur « un instinct commun de tous les physiciens » et suffisamment prouvé par des expériences, il prend un statut principiel, pour ne plus avoir « aucune restriction dans la nouvelle mécanique », définitivement promu au rang d'« une loi générale de la nature » [79]. C'est ainsi que Poincaré fut conduit à dériver les transformations de Lorentz et à affirmer, par cela même,

77. Einstein, *Albert Einstein. Physique, philosophie, politique*, p. 254. Sur la traduction du mot « Vorausetzung », voir Balibar et Toncelli, *Einstein, Newton, Poincaré*, pp. 51-58.

78. Poincaré, « Sur la dynamique de l'électron », p. 495. Mes soulignements.

79. Henri Poincaré (1906a), « La fin de la matière », *Athenaeum*, 4086, repris in *SH*, à partir de la deuxième édition de 1907, p. 249.

la relativité galiléenne : la translation d'un système n'a aucune influence sur les phénomènes à l'intérieur du système ; « deux systèmes, l'un immobile, l'autre en translation, deviennent ainsi l'image exacte l'un de l'autre [80] ».

Quand il revient sur le principe un an à peine après, il ne le limite pas au mouvement de la Terre, mais étend au mouvement en général, y compris le mouvement « par rapport à l'éther » :

> Quoi qu'il en soit, il est impossible d'échapper à cette impression que le principe de relativité est *une loi générale de la Nature*, qu'on ne pourra jamais, par aucun moyen imaginable, mettre en évidence que des vitesses relatives, et j'entends par là non pas seulement les vitesses des corps par rapport à l'éther, mais les vitesses des corps les uns par rapport aux autres. Trop d'expériences diverses ont donné des résultats concordants pour qu'on ne se sente pas tenté d'attribuer à ce principe de relativité *une valeur comparable à celle du principe d'équivalence*, par exemple. Il convient, en tout cas, de voir à quelles conséquences nous conduirait cette façon de voir et de soumettre ensuite ces conséquences au contrôle de l'expérience [81].

Comparant le passage avec le précédent, on remarquera quelques différences subtiles dans les expressions : le principe de relativité reste toujours « une loi générale de la Nature », mais il n'est plus appelé « le postulat » ; sa valeur est « comparable à celle du principe d'équivalence », à savoir le principe de Mayer.

Face à la « deuxième crise » de la physique mathématique, il reste deux choix : ou bien l'abandonner le principe de relativité ; ou bien le conserver en adoptant suivant Lorentz de nouvelles hypothèses telles que le temps local ou la déformation des corps en mouvement en direction de celui-ci. Poincaré examine la plausibilité de cette dernière option et admet sa validité. Passé de la mécanique à la physique, le principe est pris d'abord pour une loi, soumis à la vérification, mais finit par redevenir un principe, convention ou définition, servant à guider la formulation d'une théorie comme c'est le cas chez Lorentz. Mais ceci ne va pas sans perdre soit sa vérité rigoureuse (appliqué à des systèmes partiels), soit son sens concret (appliqué à l'univers) : quoique promu au rang d'un principe général qui s'applique aux phénomènes *physiques*, au point de s'élargir et devenir universel, il s'appauvrit en quelque sorte aux prix d'approximations et d'abstractions ; là où il gagne la généralité et la certitude, il perd l'objectivité et la vérité [82].

La différence fondamentale avec Einstein proviendrait, selon M. Paty, de ce que Poincaré prend au fond le principe comme une autre forme, ou bien l'une

80. Poincaré, « Sur la dynamique de l'électron », p. 495.
81. *SM*, p. 240.
82. Paty, « Le principe de relativité au sens de Poincaré », p. 11.

des formes, du principe de relativité au sens géométrique[83]. Si les principes de la mécanique, bien que tirés de l'expérience, mais une fois devenus conventions, ne sont plus réfutables, ceux de la physique peuvent être falsifiés, aussi remarquablement généraux ou même certains fussent-ils. Considérée comme un de ces principes de la physique destinés à remplacer l'hypothèse des forces centrales, la relativité serait elle aussi, en tant que principe physique, susceptible de n'être pas vérifiée. Or, une fois la relativité prise pour une convention au même titre que les principes mécaniques et les postulats géométriques. La conséquence négative des expériences de Michelson-Morley ne se traduit pas nécessairement par une « preuve » du principe de la relativité. Ce qui est en jeu, ce n'est plus de vérifier expérimentalement la relativité, elle n'est plus qu'un principe comme les autres : elle sert de condition pour que toute vérification soit possible.

3 Bifurcation des deux principes de la thermodynamique

Au tournant du siècle, l'incompatibilité entre le second principe avec le mécanisme préoccupe les physiciens peut-être plus que jamais, et peut-être plus que les autres. Elle est discutée et débattue notamment au Congrès de physique de 1900 comme une « grande question de la philosophie scientifique », rapporte B. Brunhes[84]. L'exposé du physicien G. Lippmann touche directement le sujet[85]. Conformément à l'interprétation statistique de Maxwell (à l'appui de la citation d'un passage de *Theory of Heat* de ce dernier), Lippmann constate que la validité du principe de Carnot tient à ce que les molécules sont prises en masse et ne sont pas observées directement. L'incompatibilité en question consisterait alors moins dans une contradiction que dans une *restriction* : la validité du principe reste limite ; il n'est plus valide au niveau moléculaire. Par conséquent, conclut Lippmann, les phénomènes de la chaleur ne se ramènent pas à une explication mécanique ; ils se concilient avec le principe de l'équivalence, mais pas avec le second principe.

E. Picard consacre lui aussi à ce sujet une bonne partie de son rapport sur l'Exposition de 1900.

83. Paty, *cit.*, p. 5.

84. Bernard Brunhes (1910), « L'objectivité du principe de Carnot », *Revue de métaphysique et de morale*, 18, 2, pp. 178-179.

85. Gabriel Lippmann (1900), « La théorie cinétique des gaz et le principe de Carnot », in *Rapports présentés au Congrès international de physique*, sous la dir. de Charles-Edouard Guillaum et Lucien Poincaré, Paris : Gauthier-Villars, t. 1.

> Tout phénomène est-il susceptible d'une explication mécanique ? Sur une question d'une manière si générale, la réponse est difficile, pour ne pas dire impossible. Les avis sont partagés, et c'est surtout dans l'étude des phénomènes calorifiques qu'apparaissent les divergences d'opinion. [...] Je me garderai bien, pour ma part, de formuler une réponse sur une question qui me paraît trop vague. Pourquoi supposer qu'il n'y a d'explication que celle qui cadrerait avec les équations de Lagrange ? Ne pourrait-on pas adopter un point de vue plus compréhensif, et alors n'est-on pas menacé de tomber dans une querelle de mots [86] ?

Est-ce que les pages sont tournées et ces questions, révolues, après la fin de siècle et avec un nouveau siècle ? Dans la préface à *Thermodynamique*, Poincaré discutait longuement de l'inégalité de Carnot, de l'incompatibilité du mécanisme avec le théorème de Clausius, ainsi que de l'impossibilité d'une explication mécanique des phénomènes irréversibles. Dans *La science et l'hypothèse*, la thermodynamique fait suite à un long développement sur les principes de la mécanique rationnelle, mais toujours dans la continuité avec la critique de cette dernière et avec le premier principe qui fait l'objet principal de la discussion [87], renvoyant le second à la partie *physique* [88]. C'est ainsi que Poincaré revient sur le principe de Carnot, passé pratiquement sous silence devant les philosophes. Tout se passe comme s'il était un principe de la physique, plutôt qu'un principe de la thermodynamique [89].

3.1 Principes mécaniques appliqués aux phénomènes physiques

L'explication mécanique est une « prédilection constante » chez les physiciens [90]. Qu'est-ce qu'une explication mécanique ? Est-ce qu'elle s'applique aux phénomènes physiques et comment ? Elle consiste à prendre des paramètres directement accessibles par expérience et à établir des lois des variations de ces paramètres, rapportées à un très grand nombre de molécules en mouvement, du point de vue soit dynamique (où les molécules sont supposées en action mutuelle à distance), soit cinétique (par les chocs entre molécules en mouve-

86. [26–27][Picard1903].
87. *SH*, p. 139, *sqq.*
88. *SH*, pp. 177-178 ; p. 187–188.
89. Le résultat sur l'explication mécanique de l'irréversibilité sera encore considéré par Poincaré lui-même comme l'une de ses contributions principales en physique, ceci même jusqu'en 1908. C'est ce qu'on voit dans la lettre de Poincaré à G. Darboux, écrite pour la préparation du dossier à l'adresse du Comité du prix Nobel. § 62. 18 « Poincaré à G. Darboux » in Poincaré, *La correspondance Poincaré-physiciens*, p. 413
90. *SH*, p. 178.

ment rectiligne, sans interaction à distance). Écrites sous forme d'équations différentielles, ces lois doivent suivre les principes de la mécanique [91].

Toute explication est composée de deux termes, l'un, l'énergie potentielle (U), qui dépend des positions des points matériels et non des vitesses, et l'autre, l'énergie cinétique (T), qui dépend des vitesses (plus précisément au carré des vitesses). U s'écrit comme une fonction des q ($U = U(q_k)$), q étant des paramètres directement accessibles à l'expérience ; T, celle des q et de leurs dérivées, q' ($T = T(q'_k, q_k)$. Ces deux fonctions ont à suivre « deux lois expérimentales » que sont :

1. La somme de l'énergie cinétique et de l'énergie potentielle est une constante. C'est le principe de la conservation de l'énergie.
2. Si un système de corps est dans la situation A à l'époque t_0 et dans la dissuasion B à l'époque t_1, il va toujours de A à B par un chemin tel que la valeur *moyenne* de la différence entre les deux sortes de l'énergie, dans l'intervalle de temps qui sépare les deux époques t_0 et t_1, soit aussi petite que possible.

C'est là le principe de Hamilton, qui est une des formes du principe de moindre action [92].

$T + U$ reste donc constante, mais il peut y avoir aussi une fonction quelconque $\phi(T + U)$ qui reste constante, même s'il ne sera pas plus facile de discerner ce qui est de T et ce qui est de U. Si l'on veut prendre en compte d'autres formes d'énergie comme la chaleur (Q), on aura qu'à réécrire le principe comme : $T+U+Q =$ constante. Dans ce cas, il y aura encore une fonction, $\phi(T + U + Q)$, qui reste constante, mais il ne sera toujours pas facile de décomposer les trois termes et de les discerner les uns des autres, afin de dégager la quantité qui reste vraiment constante. Tout ce qu'on peut dire, c'est qu'il y a une quantité qui demeure constante, sans savoir exactement laquelle.

Selon le principe 2., le système passe parmi tous les itinéraires possibles celui qui se réalise de telle façon que la différence entre T et U, $T - U$, appelée « l'action », soit la moindre [93]. Ce principe serait, précise Poincaré un peu plus loin, encore plus général que le principe de la conservation de l'énergie ; ce dernier en est même une conséquence. La raison en est que, dès que les deux fonctions T et U sont connues, ce principe permet à lui seul de déterminer par conséquent ses équations du mouvement (les équations de Lagrange).

> Parmi tous les chemins qui permettent de passer d'une situation à une autre, il y en a évidemment un pour lequel la valeur moyenne de l'action

91. *SH*, p. 139 *sqq*, pp. 178–183 et p. 219 *sqq*. Ce dernier passage est une reprise d'Introduction à Poincaré, *Electricité et optique*, pp. IX-VIII.
92. *SH*, p. 139.
93. *SH*, p. 220.

est plus petite que pour tous les autres. Il n'y en a d'ailleurs qu'un, et il en résulte que le principe de moindre action suffit pour déterminer le chemin suivi et par conséquent les équations du mouvement [94].

Bref, la somme $T + U$ est constante, tandis que la différence $T - U$, aussi petite que possible. Si les fonctions T et U sont convenablement choisies s'obtiennent les équations du mouvement communément appelées les équations de Lagrange, « les équations les plus générales de la mécanique [95] », qu'on peut accorder aux lois obtenues directement de l'expérience avec des q. Mais des explications mécaniques, il peut y en avoir une infinité : un phénomène peut s'expliquer d'une infinité de manières, que ce soit par des forces centrales, par de simples chocs ou bien d'autres mécanismes.

Que faut-il pour déduire de là une explication mécanique ? Il faut que U puisse être regardé comme l'énergie potentielle d'un système et T comme la force vive de ce même système.

Pas de difficulté en ce qui concerne U ; mais T pourra-t-il être regardé comme la force vive d'un système matériel ?

Il est aisé de montrer que cela est toujours possible, et même d'une infinité de manières. [...]

Ainsi si on ne peut pas satisfaire au principe de moindre action, il n'y a pas d'explication mécanique possible ; si on y peut satisfaire, il y en a non seulement une, mais une infinité, d'où il résulte que dès qu'il y en a une, il y en a une infinité d'autres.

[...] Si donc un phénomène comporte une explication mécanique complète, il en comportera une infinité d'autres qui rendront également bien compte de toutes les particularités révélées par l'expérience [96].

Si donc un phénomène obéit aux principes de la conservation et de la moindre action, il n'est pas seulement susceptible d'une explication mécanique, mais comporte une infinité d'explications possibles, par exemple, que ce soit par le modèle des chocs simples entre molécules ou repose sur l'hypothèse des forces centrales. Ainsi s'expliqueraient tous les phénomènes physiques... seulement s'ils étaient tous *réversibles* : les phénomènes irréversibles ne sont pas faciles à soumettre à ce modèle d'explication.

Les phénomènes irréversibles sont beaucoup plus rebelles. Eux aussi cependant s'ordonnent et tendent à rentrer dans l'unité ; la lumière qui les a éclairés nous est venue du principe de Carnot. Longtemps la thermodynamique s'est confinée dans l'étude de la dilatation des corps et de leurs changements d'état. Depuis quelque temps, elle s'est enhardie et elle a considérablement élargi son domaine. [...] Partout règnent les mêmes lois ; partout, sous la diversité des apparences, on

94. *SH*, p. 221
95. *SH*, p. 186.
96. *SH*, pp. 222-224. Et *passim*, par exemple, p. 179.

> retrouve le principe de Carnot ; partout aussi ce concept si prodigieusement abstrait de l'entropie, qui est aussi universel que celui de l'énergie et semble comme lui recouvrir une réalité [97].

Les phénomènes restent soumis aux lois de la mécanique et donc réversibles ; c'est seulement les éléments qui constituent les phénomènes sont extrêmement nombreux, et forment un mélange qui nous *parait* se diriger vers l'uniformité. « L'irréversibilité apparente n'est qu'un effet de la loi des grands nombres. Seul un être infiniment subtil, comme le démon imaginaire de Maxwell, pourrait démêler cet écheveau inextricable et ramener le monde en arrière [98]. » Nous avons vu que, dans son article de 1893, Poincaré opposait le mécanisme à l'expérience, caractérisés, respectivement, par la réversibilité et par l'irréversibilité. Pour réconcilier les deux, il faisait allusion à l'interprétation statistique des « physiciens anglais », mais préférait sa propre solution, celle de cadrer les phénomènes *physiques* par un théorème *mécanique* établi par lui-même. Revenant au problème dans *La science et l'hypothèse*, Poincaré se montre plus ouvert et plus favorable à la théorie cinétique et à la mécanique statistique.

3.2 Energie et entropie. Querelles de définitions

Qu'il y ait dans les phénomènes une certaine quantité qui demeure constante, ce serait peut-être là l'un des enseignements les plus généraux de la physique. Le principe n'en dit rien de plus ; il se réduit à dire « *il y a quelque chose qui demeure constant* ». Et ce quelque chose s'appelle l'énergie. Plus tard, l'énergie sera prise pour un exemple de mot scientifique bien choisi, « prodigieusement fécond » : elle « créait la loi en éliminant les exceptions, [...] donnait le même nom à des choses différentes par la matière et semblables par la forme [99] », tandis que l'entropie, c'est « un concept si prodigieusement abstrait » [100]. En effet, tandis que le mot d'énergie était déjà bien adopté et adopté à l'esprit du XIXe siècle, l'entropie restait une notion abstraite, voire obscure, même après sa redéfinition sur la base de la conception probabiliste de Boltzmann.

Ce « quelque chose qui demeure constant »

> Il ne nous reste plus qu'un énoncé pour le principe de la conservation de l'énergie ; *il y a quelque chose qui demeure constante.* Sous cette forme, il se trouve à son tour hors des atteintes de l'expérience et se réduit à

97. *SH*, pp. 186-187.
98. *SH*, p. 187.
99. *SM*, p. 30.
100. *SH*, p. 187.

> une sorte de tautologie. Il est clair que si le monde est gouverné par des lois, il y aura des quantités qui demeureront constantes. Comme les principes de Newton, et pour une raison analogue, le principe de la conservation de l'énergie, fondé sur l'expérience, n'en pourrait plus être infirmé par elle [101].

De manière générale, le « quelque chose » d'un système isolé peut se définir par la comparaison avec d'autres systèmes. Quand on veut appliquer le principe au plus grand des systèmes qu'est l'univers et vérifier s'il y en a toujours qui demeurent constante, il n'y a aucun moyen. Sans être universel, le principe reste pourtant général ; sa généralité consiste, en ce qu'il est une « forme assez souple pour qu'on y puisse faire rentrer presque tout ce que l'on veut » [102]. Tant de « quelque chose », tant de sortes d'énergie. Cette souplesse montre justement la « haute valeur » que le principe partage avec d'autres principes généraux : ils portent en eux ce qu'il y a de commun dans les phénomènes, « la quintessence d'innombrables observations » [103]. Sans pour autant qu'il soit dépourvu d'une « réalité objective » ou se réduise à une tautologie, « puisque, dans chaque cas particulier, et pourvu qu'on ne veuille pas pousser jusqu'à l'absolu, elle a un sens parfaitement clair » [104].

Il en doit être de même pour le second principe, d'après notre mathématicien : « Presque tout ce que je viens de dire s'applique au principe de Clausius. Ce qui le distingue, c'est qu'il s'exprime par une inégalité [105]. » Cette inégalité de Clausius ne signifie pas l'inexactitude ou l'imperfection de nos moyens d'observation, ajouter Poincaré : elle est due à la « nature même de la question » et d'où sa particularité par rapport à d'autres lois de la physique [106].

Autour de la définition de l'entropie

Entre 1902 et 1903, l'entropie fait l'objet d'une controverse parmi les savants britanniques. Elle se développe dans les revues d'ingénieurs telles que *The Electrician* ou *Electrical Review*, initiée et menée majoritairement par des ingénieurs [107]. James Swinburne, ingénieur et spécialiste de la thermodynamique, lance le débat. Sa critique vise les définitions adoptées dans les manuels de physique, « *fundamentally wrong* » d'après lui, dénuées de sens du point de

101. *SH*, p. 143.
102. *SH*, p. 148.
103. *SH*, p. 177.
104. *SH*, p. 148.
105. *SH*, p. 149.
106. *ibid.*
107. Sur cette controverse, voir Figure 14, d'après un article de revue écrit en 1907 : Sidney Reeve (1907), « The Question of Entropy », *Harvard Engineering Journal*, 6.

vue physique, a fortiori, pratique. Pourtant, Sydney Everched, lui aussi ingénieur, compte au moins cinq définitions courantes dues à Clausius, Maxwell ou bien Tait, toutes subtilement différentes les unes des autres. Le débat ne se limite pourtant pas à la notion elle-même ; il s'oriente vers les questions fondamentales relatives à la thermodynamique, si bien que les éditeurs de *The Electrician* font appel à l'autorité scientifique de l'époque comme Oliver Lodge, Max Planck, Oliver Heaviside et... Henri Poincaré [108].

C'est, en effet, la controverse entre « Messrs. Swinburne, Perry and Sir Oliver Lodge » qui sert au mathématicien d'occasion de revenir sur la nature des « raisonnements thermodynamiques » [109]. Le problème a déjà été traité dans son cours de thermodynamique notamment dans le chapitre XIl de *Thermodynamique*, intitulé « Extension du théorème de Clausius », où il était question de définir la réversibilité (en deux manières) et de démontrer l'inégalité de Clausius avec une nouvelle définition d'entropie [110].

Soit un système Σ dont les états sont définis par un certain nombre de paramètres comme des positions et des vitesses [111]. Considérons deux états de ce système, A et B. Selon la première loi de la thermodynamique, le changement de A à B $A \to B$ est possible si la valeur d'une certaine fonction reste constante, fonction qu'on appelle communément l'énergie. Le passage $A \to B$ s'effectue « directement » si le système Σ est ou isolé. S'il n'est pas isolé, le changement d'états s'accompagne du changement d'un autre système extérieur à Σ, qu'on nommera Σ'. Σ' est censé retrouver son état initial une fois le passage effectué $A \to B$. Ceci dit, si $A \to B$, alors $B \to A$, que le changement soit direct ou indirect ; seulement il se peut que $B \to A$ soit excessivement, voire « infiniment », lent. C'est ce que veut dire la seconde loi [112].

108. Henri Poincaré (1903a), « Entropy », *Electrician*, 50, repris in *Œuvres* X. Ecrit en français à l'origine, l'article a été traduit en anglais, très probablement par l'éditeur de la revue. Seule la version anglaise reste disponible ; c'est elle qui est reprise dans les *Œuvres*, contenant quelques fautes d'orthographe probablement générées lors de la transcription.

C'est un cas similaire à « On the Foundations of Geometry », reproduit dans l'édition de *Des fondements de la géométrie*, une anthologie éditée par L. Rougier. Rougier écrit dans sa note d'éditeur : « Le mémoire d'Henri Poincaré [...] a paru en langue anglaise dans une revue américaine *The Monist*, en janvier 1898. L'original français n'en a pas été conservé ; la traduction qui suit s'est appliquée à retrouver, sous un anglais qui semble avoir été littéral, ce que devait être le texte initial. »

109. Poincaré, *cit.*, p. 264.

110. Poincaré, *Thermodynamique*, § 172–193, p. 219–258.

111. Dans le texte anglais, les notations ne sont pas les mêmes que dans *Thermodynamique*. Elles suivent, apparemment, les règles d'*Electrician* ou bien celles des ingénieurs anglophones. Par exemple, le système est désigné par la lettre S, contrairement à la lettre grecque Σ dans *Thermodynamique*. Je suivrai les notations de *Thermodynamique* qui ont le mérite de réserver S à l'entropie conformément à la coutume des physiciens.

112. « Theoretically, we have to consider the limiting case, where the two changes are possible, but infinitely slow ; and then we say that the change is reversible. That is the second law. » Poincaré, « Entropy », p. 265.

ENTROPY.

BY PROF. H. POINCARÉ.

The controversy about entropy, in which Messrs. Swinburne, Perry and Sir Oliver Lodge have taken part, has a lively interest for me, and if I intervene it is because it affords a chance of going more deeply into the nature and the methods of thermodynamical reasoning.

§ 1. Take any system, S, whose state is defined by a certain number of variables, or "co-ordinates." It is needless to say I will include among these variables the positions and the speeds of the different parts of the system, so that if the *vis viva* of one of these parts varies, I say that the state of the system has not remained the same.

Let A and B be two states of the system S. What is the condition under which we can pass from the state A to the state B? The first law tells us, first, that if the sytem S is isolated, we cannot pass from A to B, or, on the other hand, from B to A unless a certain function of the co-ordinates, which is called the energy, has the same value in A as in B.

§ 2. What does the second law tell us? It may be true that we can pass from the state A to the state B *directly*—that is to say, while the system S remains completely isolated; and it may also be true that we can pass from A to B indirectly, that is to say, with the help of the intervention of other auxiliary systems, S′, *but in such a way that at the end of the change these auxiliary systems have come back to their original states.*

Then it is generally admitted that when we have two states, A and B, corresponding to the same energy value, and two changes by which the system goes from A to B, and from B to A, one of these transformations is always possible, either directly or indirectly, while the other is impossible, directly or indirectly. Theoretically, we have to consider the limiting case, where the two changes are possible, but infinitely slow; and then we say that the change is reversible. That is the second law.

§ 3. On what foundations does the second law rest? Two states, A and B, being given, can we imagine an auxiliary system, S, which will enable us to pass indirectly, either from A to B, or from B to A? This is a question which must be discussed in each particular case; so far we have always succeeded. If we had a system such that we could not imagine the auxiliary system S′ enabling us to carry out one of the inverse transformations, the ordinary reasoning of thermodynamics would not be applicable to this system, and entropy could not be defined.

Then how are we to show that only one of the two transformations is possible? This is the ordinary way. We conceive an auxiliary system S, so chosen that we can change S from the state A to the state B in *a reversible manner*, and *so that the system S′ changes from the state C to the state D.* In accordance with what we have already said, it would be impossible to bring S from A to B *by reversible change without changing the state of S′.*

If, then, S could pass directly or indirectly from B to A, S would pass indirectly from C to D; all that is needed is to make the transformation of which we have just spoken reversible, which would bring S from A to B, and S′ from C to D, then to bring S back from B to A; finally S would have passed from C to D and S would not have changed. *The impossibility of the change C to D is then a criterion of the impossibility of the change B to A.*

If, therefore, we know already (either by experiments numerous enough for us to deduce a general law from them, or by reasoning) that the change C to D is impossible, we must conclude that the change from B to A is also impossible. It is in this way that from Clausius' axiom, which referred only to one particular change, we have been able to deduce the impossibility of a host of other changes, and finally the second law of thermodynamics in all its generality.

We can only reason in this way if we are able to conceive this auxiliary reversible change of which I have just spoken. So far we have always succeeded. Let me take but two examples: I assume that the system S is made up of two bodies, α and β, at different temperatures, and that the change from A to B consists in passing heat from the hotter α to the colder β. We will take for our system S a body γ at the same temperature as α and a thermodynamic engine, with which we can describe a Carnot cycle, using the bodies α, β and γ as reservoirs. We can then, by means of the engine, pass a certain amount of heat from the hot body to the cold body by *reversible changes*, while the engine at the same time borrows an additional amount of heat from the body γ to transform it into work.

The system S will thus have passed from the state A to B, and the system S′ will have also changed (and passed from the state C to the state D), since the body γ has lost heat, and the work or kinetic energy of the system is increased. These two changes taken together are reversible. It is in this way that from the impossibility of making an engine work with only one source we can prove the impossibility of a cold body giving heat to a hot one.

Another example. The system S is made up of two gases; in the state A these two gases are separate; in the state B they are mixed. I will take it that the two gases are nitrogen and carbonic anhydride; and I will add an auxiliary system S′, consisting of lime and various sources of heat. To pass from A to B by a reversible path, I absorb the carbonic anhydride by the lime, *at the pressure of dissociation*, giving up the heat so produced (without fall of temperature) to the reservoirs of the system S′; I put the calcium carbonate into the vessel containing nitrogen, then I dissociate the carbonate by taking the necessary heat from the reservoirs of S; finally, we get the two gases mixed, and S passed from A to B; at the same time there has been an exchange of heat from the reservoirs of S′, so that S′ has changed from the state C to the state D. The impossibility of separating two gases once they are mixed in such a way that the auxiliiary system comes back to its original state, can thus be demonstrated.

§ 4. I trust I may be forgiven for the length of this explanation, as it seems a little far from the point of the controversy; but perhaps it will not be useless, and it leads up to the point I will make directly.

I now come to the main point of the discussion—the definition of entropy. If we admit the second law as I have given it, it is that there is a function of the co-ordinates which is greater in B than in A, if we can pass either directly or indirectly from A to B, but not from B to A. This function is, by definition, the entropy; but this definition of entropy is still incomplete, for two reasons: In the first place, it only allows us to compare the entropy of the system S in the two states A and B if the two states correspond to the same value of the energy, as, *if it is isolated*, it is in that case alone that the system S can pass from one state to the other. In the second place, the entropy so defined is not a measurable quantity, for, though we can easily see that it is greater in B than in A, we cannot see whether it is two or three time as great. If, then, ϕ is a function which answers the definition, any function of ϕ which increases would do as well.

§ 5. But we can get out of this double difficulty. Take a system, S, made up of three partial systems, S_1, S_2 and S_3, and suppose we can separate these three systems sufficiently for them to have no action on one another. Then let $x_1, x_2, \ldots x_n$ be the variables which define the state of the system S_1, $y_i \ldots$ those which define the state of the system S_2, $z_i \ldots$ those which define the state of the system S_3. Let ϕ be the entropy of the whole system, and let us write

$$d\phi = \Sigma A_i dx_i + \Sigma B_i dy_i + \Sigma C_i dz_i.$$

We will take for ϕ any one of the functions which satisfy the preceding definition. Then we can imagine a reversible change produced as follows:—The systems S_1 and S_2 are brought together, and they act on each other, then they are separated. In these conditions the x's and the y's have varied, but not the z's. Moreover, the entropy is constant, so that we have:

$$\Sigma A_i dx_i + \Sigma B_i dy_i = 0,$$

but the system S having been kept out of the way during the change, has not been acted upon, and the transformation is independent of the z's. Whence it follows that the relations of the partial differential coefficients A and B cannot depend

Digitized by Google

on the z's; similarly, the relations between the B and C terms cannot depend on the x's, and those between the A and C terms cannot depend on the y's.

Collecting these three results, we find easily

$$d\phi = W(d\phi_1 + d\phi_2 + d\phi_3),$$

W being a function of the x's, the y's and the z's, ϕ a function of the x's alone, ϕ_2 a function of the y's alone, and ϕ_3 a function of the z's alone. On the other hand, we see that ϕ and W can only be functions of $(\phi_1 + \phi_2 + \phi_3)$.

We can take advantage of the indeterminateness of ϕ to put

$$\phi = \phi_1 + \phi_2 + \phi_3,$$

and to say that *the entropy of the whole system is the sum of the entropies of the partial systems.* This new convention gets rid of the double ambiguity which I have already mentioned. It is clear, too, that we can have any number of partial systems.

§ 6. Suppose now that among the partial systems there are "sources," by which I mean systems, whose mass is so large that on that account they experience only very small changes, and further, that the state of each of the sources or reservoirs is defined by a single independent variable.

Under these conditions, if S_1 is one of the reservoirs, ϕ_1 its entropy, and U_1 its energy, U_1 will be a function of ϕ_1, and as these two functions suffer only infinitesimal changes, the ratio $dU_1/d\phi_1$ will be constant. This constant can be regarded as the temperature of the reservoir. To entitle me to say this, it is enough for me to show that if we compare the different reservoirs this ratio varies in the same direction as the temperature. In fact, if it were otherwise, in passing heat from a cold to a hot body we should increase the entropy, and the change would be possible.

We may then put

$$\frac{dU_1}{d\phi_1} = \theta_1.$$

Let there be a complete system containing a partial system S whose entropy is ϕ, and several reservoirs S_i at temperatures θ_i and with energies U_i and entropies ϕ_i. For a change to be possible we must have

$$d\phi + \Sigma d\phi_i > 0,$$

or

$$d\phi > -\Sigma\frac{dU_i}{\theta_i}.$$

For a reversible change we have $d\phi = -\Sigma dU_i/\theta_i$.

§ 7. We now come to the equations of Clausius. Suppose that each part of the system S borrows its heat from a source at the same temperature as its own; or, in other words, that the properties of the system S are the same, whatever the *exterior* reserviors may be from which the different parts of the system receive their heat. This is a hypothesis which it is difficult not to admit when the transmission of the heat is by conduction, but which can be certain no longer with radiated heat. Admitting this, take an infinitely little element of the system S, and suppose that its temperature is θ and that it receives *from outside* a quantity of heat, dH; the corresponding reservoir, according to our hypothesis, will also be at the temperature θ, and its energy will increase by $dU = -dH$. We have, then,

$$-\Sigma\frac{dU}{\theta} = \int\frac{dH}{\theta},$$

and, consequently,

$$d\phi > \int\frac{dH}{\theta},$$

and for the reversible change,

$$\delta\phi = \int\frac{dH}{\theta}.$$

In the preceding integrals we have taken heat in only *from the outside*, but the same inequalities hold *a fortiori* if we only allow the quantities of heat dH which are exchanged between the different parts of the system S to figure in the integral $\int dH/\theta$.

§ 8.—Conclusions.

A. The entropy is a function of the co-ordinates.

B. Is not defined by the equation

$$d\phi = \int dH/\theta.$$

This equation, arising from *another* definition of entropy, can be demonstrated for reversible changes.

C. It is wrong for *all* irreversible changes, and not only for those where there is exchange of heat in the narrow sense of the word.

D. In an irreversible change in which there is no exchange of heat the entropy increases.

E. It increases, for instance, in the case of a mixture of gases, and the increase can be calculated by the artifice I have discussed at the end of section 3.

F. If the universe is regarded as an isolated system, it can never come back to its original state; for its entropy is always growing, and this entropy being a function of the co-ordinates, would come back to its original value if the universe came back to its original state.

§ 9. In what I have said I have been careful to state explicitly the hypotheses I have made. To what extent the reasoning is on an artificial basis is evident; and if this article were not already rather long, I would further insist on that point—it is clear that the reasoning must be continually controlled by experiment. There has been no want of such control so far; and there is really no doubt left as to the validity of the second law. But it is well, all the same, to remember what the mathematical basis is, and how far this basis is not quite satisfactory.

THE PHOTOMETRY OF ELECTRIC LAMPS.

(*Concluded from page 640.*)

The following is the conclusion of the discussion on Dr. Fleming's Paper on the above subject:—

Mr. F. H. VARLEY said that the variation in the candle-power of a pentane lamp was not due to any fault of the pentane nor to the lamp itself, but was entirely due to the impurities in the air. The lamp drew in air through the valve and was saturated with pentane vapour, if the air was moist, then there was a repellant action, and it did not absorb so much pentane vapour as when the air was perfectly dry. The effect of moisture in the air, as far as combustion was concerned, was well known. It chilled the flame and caused imperfect combustion of the carbon, with the result that the flame smoked. If precautions were taken so that the air was perfectly dry, and the organic matter, chiefly ammonia and carbonic dioxide, removed, it was possible to remove, by using pure air, all the variations of the pentane lamp, except those of barometric pressure and temperature. But these, surely, could be calibrated, and a constant given for each millimetre change in barometric pressure and for each degree of temperature. In the year 1889 he devised a direct-reading photometer which had the advantage of being able to be used in a very small space. He illustrated the principle of his device by a cardboard disc. It was a sector photometer. There were two openings—one small and one large. By getting a full opening on one sector the other was entirely closed. By twisting the discs the length of the opening was shortened, and the corresponding opening on the other side made larger.

Mr. LEON GASTER thought it would be interesting if the price of the pentane required for the Vernon Harcourt lamp could be given, and also the price of the lamp itself.

Mr. H. E. MOUL, who emphasised throughout his remarks that he only spoke on the commercial side of the question, said that engineers ought to take great interest in the subject; but in England, at any rate, they did very little with it. No photometric results were really comparable when taken by different observers and different instruments. It seemed to him that if comparative tests were to be made at different places—one in Germany and one in England—a standard class of photometer must be adopted for doing it, just as much as a standard source of light. Anyone who had worked with a Lummer-Brodhun photometer would never go back to anything else. It was now being superseded by the Kruss type, a modification with straight telescope and contrast field. As engineers they were not so much interested in what was to be the final standard as in getting a standard at all. It was not possible in actual commercial practice in Great Britain to refer any readings which might be taken to a standard, for the simple reason that there was none, and the net result of this state of affairs was that lamp makers supplied what they said was a good thing, but which the central station engineer said was a bad thing, and really neither party knew what it was talking about. If they differed they had no standard of reference and no place in which to refer for a legal decision on the question. While this battle of standards was going on there ought to be one class of standard to which instruments could be correlated, even if something else was adopted afterwards. If central station engineers were going to set up their own standards it was necessary to have some other than what had been seen at the meeting. Standardised lamps were the right thing, they could be obtained on the Continent from the Reichsanstalt standardised at a cost of 2s. 6d. with the position marked on them on which they had been standardised, and one knew that they were as accurate as they were wanted—technically, not scientifically. The potentiometer was a a very pretty instrument in the laboratory, but how it would turn out in the ordinary course of events he did not know. When stations supplied their own lamps, which would be the case in the future, the lamps would go through the photometer rooms in thousands, and what would be the state

Digitized by Google

FIGURE 13 – Article paru dans *The Electrician* (1903). Merci à l'équipe Google Books pour la numérisation de ce numéro en réponse de ma demande.

Journal.	*Date and Page.*	*Remarks.*
The Electrician.	1902—253, 274, 315, 344, 394.	Mr. Swinburne's presidential address.
Engineering.	1902—749.	Editorial thereon.
The Engineer.	1902—564.	Editorial thereon.
The Electrician.	1902—398.	Letter from Prof. John Perry, combatting Mr. Swinburne's position.
Engineering.	1902—843.	
Electrical Review.	1903— 11.	Letter from "Ad. H. F."
The Electrician.	1903—442.	Mr. Swinburne *vs.* Prof. Perry.
Engineering.	1903— 15.	Letter from M. J. Garcin, Paris.
The Electrician.	1903—477.	Prof. Perry *vs.* Mr. Swinburne.
The Electrician.	1903—478.	Letter from Mr. Evershed.
Electrical Review.	1903— 52.	"Entropy," by Mr. Swinburne.
Electrical Review.	1903— 58.	Mr. Swinburne *vs.* Prof. Perry.
Engineering.	1903— 53.	Mr. Swinburne *vs.* the editors.
Engineering.	1903— 84.	The same.
The Electrician.	1903—526.	Mr. Swinburne *vs.* Mr. Evershed.
The Electrician.	1903—560.	"Entropy." Sir Oliver Lodge.
The Electrician.	1903—542.	Editorial on the above.
Electrical Review.	1903—135.	"Entropy." Prof. Perry.
The Engineer.	1903— 84.	
The Electrician.	1903—610.	Letter from Mr. Swinburne.
Electrical Review.	1903—177.	"Entropy." Mr. Swinburne.
The Engineer.	1903—114.	"Entropy." Prof. Robt. H. Smith.
The Engineer.	1903—122.	Letter from Mr. Swinburne.
The Engineer.	1903—149.	"Entropy." Prof. Perry.
The Electrician.	1903—656.	Letter from Mr. Wm. Robinson.
Electrical Review.	1903—220.	"Heat and Temperature." Prof. Perry.
The Electrician.	1903—688.	"Entropy." Prof. Poincaré.
The Electrician.	1903—694.	"Mr. Swinburne and Entropy." Prof. Max Planck.
The Electrician.	1903—695.	Letter from Mr. Swinburne.
The Engineer.	1903—171.	Letters from Prof. Mark Robinson, Mr. J. W. Cable and Mr. Swinburne.
The Engineer.	1903—199.	"Entropy." Mr. J. W. Cable.
The Electrician.	1903—735.	Letters from Sir Oliver Lodge and Mr. Oliver Heaviside.
The Engineer.	1903—210.	"Rankine's Thermodynamic Function and Entropy."
The Electrician.	1903—821.	Letter from Prof. Max Planck.
The Engineer.	1903—236.	Review of Prof. Reeve's "Thermodynamics" in which entropy is identified with physical mass.

FIGURE 14 – Table chronologique du débat sur l'entropie 1902-1903 par S. Reeve en 1907. L'article de Poincaré se trouve in The Electrician – 1903 – 688, suivie de celui de Planck.

Pour un « raisonnement ordinaire de la thermodynamique » (« *ordinary reasoning of thermodynamics* »), Σ' est choisi de la manière suivante : si Σ passe de A à B ($A \to B$) de manière réversible, Σ' de son côté passe d'un état C à l'autre état D ; si Σ parcourt le passage à l'envers ($B \to A$), Σ' passera de son côté de C à D. Quand Σ repasse, par un deuxième renversement, de A à B, se produira toujours une transformation de C à D dans le Σ'. Si Σ' ne change pas de C à D, il serait également impossible de changer de B à A.

> C'est ainsi qu'on était capable de déduire, de l'axiome de Clausius qui se limitait à un changement particulier, l'impossibilité de certains changements et, en fin de compte, la seconde loi de la thermodynamique dans toute sa généralité [113].

Certains changements sont donc impossibles. Par exemple, si un système composé de deux gaz passe de l'état A où les gaz sont séparés à l'état B où

113. *ibid.*

ils sont mélangés, le retour de B à A et impossible : lors du passage $A \to B$ il y a une perte de chaleur ; si cette dernière est absorbée par un autre système auxiliaire (réservoir de ces gaz), ce dernier passe de C à D, dont le passage à l'envers n'est pas envisageable.

Qu'en est-il de la définition de l'entropie ? D'une manière générale, la seconde loi signifie qu'il existe une *fonction* qui ne fait qu'augmenter de A à B, mais pas de B à A. C'est cette fonction qui se définit comme l'entropie. Mais la définition n'est pas encore complète, pour deux raisons : 1° les valeurs à A et à B peuvent être comparés seulement quand elles ont la même valeur d'énergie, c'est-à-dire quand le système est complètement isolé ; 2° il n'est pas évident si la valeur de cette fonction est mesurable et comment elle peut se mesurer [114]. Dans *Thermodynamique*, Poincaré disait :

> On peut particulariser la définition de l'entropie de telle façon que l'entropie du système total soit la somme des entropies des systèmes partiels toutes les fois que ces systèmes sont indépendants.
> Ainsi se trouve complétée la définition de l'entropie et l'on voit que ce complément se rattache à la possibilité d'associer un système quelconque à d'autres systèmes indépendants [115].

Prenons un système Σ composé de systèmes partiels, qui sont indépendants les uns aux autres $\Sigma_1, \Sigma_2, \Sigma_3$. L'état de chaque sous-système est défini un ensemble de variables comme $x_1, x_2, ..., x_n$ pour le Σ_1, $y_1, y_2, ..., y_n)$ pour le Σ_2, et $z_1, z_2, ..., z_n$ pour le Σ_3. Si l'on désigne l'entropie du système entier par S et les valeurs d'entropie des sous-systèmes, par S_1, S_2, S_3, S peut être choisie de façon à satisfaire à la formule suivante [116] :

$$S = S_1 + S_2 + S_3$$

Dès lors, l'entropie devient ainsi comptable et mesurable. Et Poincaré de conclure :

> D. Dans un changement irréversible où il n'y a pas d'échange de chaleur, l'entropie augmente.
> E. Elle augmente, par exemple, dans un mélange des gaz, et cette augmentation est calculable [117].

En somme, la croissance entropique n'est pas donnée à tous les phénomènes ; elle se borne à des systèmes en changement irréversible sans échange de chaleur avec l'extérieur ; la croissance entropique et l'irréversibilité des phénomènes ne vont pas toujours ensemble. Poincaré n'est pas le seul à se retrouver

114. Poincaré, *cit.*, pp. 266-267.
115. Poincaré, *Thermodynamique*, § 193g, p. 254–255.
116. Poincaré, « Entropy », p. 267.
117. Poincaré, *cit.*, p. 269.

dans une telle position. Pour Planck, c'est la première qui est *la* loi de la nature, alors que pour Heaviside, la première a pour cause la seconde, autrement dit, c'est parce que les phénomènes sont irréversibles que l'énergie se dissipe et l'entropie augmente, mais la croissance ralentit, avec son taux de croissance étant en baisse. Dans son livre de synthèse écrit d'un point de vue d'intérieur (*from an engineer's standpoint*) et publié en 1904, l'ingénieur américain James Swinburne réclamera une idée physique de l'entropie qui doit être selon lui complètement dégagée des phénomènes réversibles, impossibles à réaliser dans la nature et donc purement fictifs ou idéaux [118]. Ce n'est plus à la mécanique, mais à la physique, la chimie ou bien même l'ingénierie, de rendre compte des phénomènes réels, c'est-à-dire irréversibles.

Mais, si l'irréversibilité des phénomènes de la nature ne se déduit pas nécessairement de la croissance entropique, celle-ci conduit à conclure, et d'où la spécificité du raisonnement de Poincaré, l'irréversibilité de l'univers :

> F. Si l'univers est un système isolé, il ne retourne jamais à son état d'origine, car, si l'univers retournait à son état initial, son entropie retrouverait elle aussi sa valeur originale, alors qu'elle est toujours en croissance [119].

3.3 Principes en crise

Le principe de Carnot, ou le principe de la dégradation de l'énergie, est « l'exemple le plus frappant » parmi les principes physiques [120]. Il a été fondé, à l'origine, sur une hypothèse fausse qu'est le calorique, avant d'être correctement reformulé par Clausius ; le raisonnement original de Carnot comprenait pourtant des « rapports véritables », mais aussi des faux, mais ceux-ci n'empêchaient pas d'avoir pour résultat « la seconde loi fondamentale de la Thermodynamique » [121].

Le principe a également ceci de particulier que « [c]'est le seul qui ne se présente pas comme une conséquence immédiate de l'hypothèse des forces centrales ; bien mieux, il semble sinon contredire directement cette hypothèse, du moins ne pas se concilier avec elle sans un certain effort [122]. » On s'en serait douté, il s'agit toujours de la contradiction entre l'irréversibilité des phénomènes et la réversibilité des lois de la mécanique : si les vitesses étaient renver-

118. Introduction in *Entropy or Thermodynamics from an Engineer's Standpoint and the Reversibility of Thermodynamics* (Westminster : A. Constable et Co.).
119. Poincaré, « Entropy », p. 270.
120. *SH*, p. 177. Le chapitre a pour origine le discours prononcé au Congrès de physique, c'est-à-dire le même congrès que Lippmann.
121. *ibid.*
122. *VS*, p. 129.

sées, les mouvements suivraient les mêmes trajectoires, mais en sens contraire ; par exemple, la révolution de la Terre serait *rétrograde*, tout en décrivant la même orbite elliptique. Qu'un phénomène comme la révolution directe de la Terre soit possible, cela signifie qu'un phénomène qui lui est inverse, à savoir la révolution indirecte est également possible.

> A ce compte, si un phénomène physique est possible, le phénomène inverse doit l'être également et on doit pouvoir remonter le cours du temps. Or, il n'en est pas ainsi dans la Nature, et c'est précisément ce que le principe de Carnot nous enseigne, la chaleur peut passer du corps chaud sur le corps froid, et il est impossible ensuite de lui faire reprendre le chemin inverse et de rétablir des différences de température qui se sont effacées [123].

La propagation ou la dissipation de la chaleur ne sont pas précisément pas le même phénomène que la révolution d'une planète : si la chaleur passe d'un corps chaud à un corps froid, il est impossible de lui faire le chemin inverse. La contradiction n'est pourtant apparente selon l'interprétation statistique de Maxwell et Boltzmann.

> Si le monde tend vers l'uniformité, ce n'est pas parce que ses parties ultimes, d'abord dissemblables, tendent à devenir de moins en moins différentes, c'est parce que, se déplaçant par hasard, elles finissent par se mélanger. [...] Chaque grain de cette poussière conserve leur originalité de plus en plus intime, nos sens grossiers n'aperçoivent plus que l'uniformité. Voilà pourquoi, par exemple, les températures tendent à se niveler sans qu'il soit possible de revenir en arrière [124].

Ce n'est pas la première présentation, nous l'avons déjà vue exposée ; la nouveauté ici vient de ce que Helmholtz ne fait plus référence comme cela a été le cas dans *Thermodynamique* ou « Le mécanisme et l'expérience », remplacé par le nom de Gibbs, considéré comme « celui qui l'a vu le plus nettement, dans un livre trop peu lu parce qu'il est un peu difficile à lire [...] dans ses principes de Mécanique statistique » [125]. Une autre nouveauté consiste dans l'argument épistémologique pour la validité du second principe : elle prend appui sur l'effet statistique et sur la limite de notre connaissance. Nous allons voir comment il en vient à être remplacé par une hypothèse sur la « tendance » de la matière à homogénéiser par l'effet de l'équilibre statistique.

Qu'il ne soit possible de revenir en arrière, ce n'est qu'une impossibilité *pratique*, pas *théorique*, surtout pas aux yeux du « démon de Maxwell ». Chose curieuse, c'est le point de vue de cet être *imaginaire* qui est identifié à la

123. *VS*, p. 130.
124. *ibid.*
125. *ibid.*

« prise de vue réelle », selon laquelle le second principe n'est qu'« un principe imparfait, une sorte de concession à l'infirmité de nos sens »[126]. Il n'y a pas d'irréversibilité en réalité ; ce n'est qu'un phénomène dû à l'ordre réel des choses, mais seulement à la grossièreté de nos sens. Le retour en arrière (ou la « rétrogradation » comme le dit Poincaré) n'est donc pas une impossibilité, mais seulement une probabilité faible qui ne manque pas toujours de chances, possibilité qui peut se réaliser avec un concours des circonstances et un temps extrêmement long, « dont il faudrait des millions de chiffres pour écrire le nombre »[127]. C'est ainsi que le principe de Carnot se réduit à une vérité provisoire, sans pour autant perdre sa valeur pratique.

« Mais voici que la scène change », continue Poincaré, et ceci, grâce au mouvement brownien[128]. Découvert par le botaniste Robert Brown en 1827, ce mouvement des particules dans un liquide ne s'arrête jamais en apparence, comme s'il avait une énergie inépuisable à jamais et sa chaleur produite par le frottement, éternellement transformable en travail. Le physicien Georges Gouy propose une interprétation selon laquelle les particules, directement observables par le microscope, mais toujours assez petites, seraient capables de « faire marcher le monde à contre-courant »[129]. Ainsi l'irréversibilité ne serait plus universelle comme phénomène ; tout se passe comme si le microscope de botaniste remplaçait l'être imaginé par le physicien.

Certes, nous disposons aujourd'hui d'une explication complète de ce phénomène sur la base de la mécanique statistique, faite par Einstein en 1905. Signalées dès *La science et l'hypothèse* et longuement discutées dans *La science et l'hypothèse*, les « idées originales de M. Gouy » n'occuperont plus guère de place dans les pensées de Poincaré ou d'autres physiciens. Mais il importe ici de remarquer comment un principe physique jusque-là bien établi peut être remis en cause par un nouveau résultat de l'expérience. De cette manière le principe ne sera peut-être pas « sauvé », mais « on comprendra mieux [son] sens, et sa place dans l'ensemble de la Dynamique, et l'on sera mieux armé pour interpréter convenablement la curieuse expérience de Gouy »[130].

Tout comme le principe de relativité, le principe de Carnot est mis en doute par les défis provenant de l'expérience sur « les infiniment petits » que sont des molécules microscopiques dans un liquide brownien[131]. Les exceptions ne

126. *ibid.*
127. *VS*, p. 131.
128. *ibid.*
129. *SH*, p. 188.
130. Poincaré, « L'état actuel et l'avenir de la physique mathématique », p. 319. Passage omis dans *La valeur de la science*.
131. Le principe de moindre action serait le seul à résister parmi les « cinq ou six principes généraux », probablement, selon Poincaré, en raison de sa généralité et aussi de son

seront pourtant pas définitives : ne pourrait-il pas y avoir d'autres « infiniment petits » qui obéissent au principe ? La théorie n'a-t-il qu'à attendre tout simplement que l'expérience arrive à résoudre à elle seule le problème ? Mais la théorie a elle aussi sa tâche de « sauver » les principes aussi bien que les phénomènes. C'est ce qui a été fait dans la théorie cinétique des gaz : non seulement elle a tenté d'*expliquer* la seconde loi de la thermodynamique, elle est allée encore plus loin pour redéfinir la notion même de loi :

> Alors les faits qui d'abord nous apparaissent comme simples ne seraient plus que les résultantes d'un grand nombre de faits élémentaires que les lois seules du hasard feraient concourir à un même but. La loi physique alors prendrait un aspect entièrement nouveau ; ce ne serait plus seulement une équation différentielle, elle prendrait le caractère d'une loi statistique [132].

Ne faut-il donc pas rebâtir à neuf la mécanique, avec de nouveaux principes sinon une nouvelle notion de principe ou de loi ? C'est en effet une autre mécanique toute nouvelle que Poincaré laisse entrevoir en terminant sa conférence à Saint-Louis, avec une nouvelle définition de l'inertie ou celle de la vitesse-limite, sans pour autant nécessiter l'abandon des anciens principes. « Ils sont si utiles qu'il faudrait leur conserver une place. Vouloir les exclure tout à fait, ce serait se priver d'une arme précieuse. Je me hâte de dire, pour terminer, que nous n'en sommes pas là et que rien ne prouve encore qu'ils ne sortiront pas de la lutte victorieux et intacts [133]. »

ambiguïté. *VS*, p. 141.

132. *VS*, p. 147.

133. *ibid.*

Chapitre VI

L'univers éthéré ou gazéifié. L'espace à la lumière de la mécanique relativiste et de la théorie cinétique des gaz

Le problème de l'espace, qui traverse toute l'œuvre poincaréenne, devra faire face à un défi considérable par la théorie de relativité et sa remise en cause des notions fondamentales de la mécanique classique comme la masse, la matière ou l'inertie. C'est dans ce contexte qu'il reviendra sur le problème du temps et révise celui de l'espace à partir de là, jusqu'à jeter la base d'un concept de phare de la relativité qu'est celui d'espace-temps, mais ce sera bien tardivement et non sans réserve envers ces nouvelles notions [1].

Science et méthode est le dernier ouvrage philosophique de Poincaré, mais aussi l'un des premiers qu'on pourrait qualifier de « postrelativistes » parmi ses œuvres. Ici aussi le problème de l'espace se place au premier plan, avec trois facettes :

1° Espace représentatif
2° Espace géométrique
3° Espace physique

Le premier peut se nommer l'espace psychologique ou physiologique, à savoir l'espace par ou dans lequel nous nous représentons le monde. Cet espace est constitué par la synthèse des sensations avec la notion de groupe, qui est une notion innée en nous : nous avons tous été un « géomètre inconscient [2] »

1. Ici encore parmi d'innombrables littératures, notamment Scott Walter (2008), « Henri Poincaré et l'espace-temps conventionnel », *Cahiers de philosophie de l'Université de Caen*, 45 ; Scott Walter (2014b), « The Historical Origins of Spacetime », in *Springer Handbook of Spacetime*, sous la dir. d'Abhay Ashtekar et Vesselin Petkov, Berlin et Heidelberg : Springer.
2. *SM*, p. 309.

dans notre enfance comme le furent nos ancêtres ; ce géomètre en nous fait appel à ses perceptions qui s'effectuent sur les corps extérieurs, les rapporte à des concepts qui lui sont innés, afin de dégager enfin une notion d'espace qui lui est propre. L'espace est ainsi « engendré » ; il est différent et indépendant de l'espace géométrique. « Nous ne nous *représentons* donc pas les objets extérieurs dans l'espace géométrique, mais nous *raisonnons* sur ces objets, comme s'ils étaient dans l'espace géométrique [3], » disait Poincaré dans *La science et l'hypothèse*. En revanche, l'espace sert aussi en physique et d'autres sciences, notamment à représenter les phénomènes, tantôt comme réceptacle, tantôt comme repère ou référentiel [4].

On peut relever deux traits de l'espace physique tel qu'il est traité dans *Science et méthode*. Le premier trait : l'éther. Considéré comme dispositif indispensable pour la physique du XIXe siècle notamment pour la théorie de la lumière, il était aussi associé, sinon identifié, à l'espace absolu, incompatible donc avec le principe de relativité. Il tenait pour les phénomènes purement mécaniques, mais pas pour les phénomènes physiques. De nombreuses tentatives de résoudre cette incompatibilité est née la révolution relativiste, nous l'avons déjà vu, sans pour autant que le compte ne soit complètement réglé avec l'éther. C'est ainsi que, quand Poincaré revient au principe de relativité et l'énoncé à nouveau, resurgit le mot d'éther :

> Quoi qu'il en soit, il est impossible d'échapper à cette impression que le principe de relativité est une loi générale de la Nature, qu'on ne pourra jamais, par aucun moyen imaginable, mettre en évidence que des vitesses relatives, et j'entends par là non pas seulement les vitesses des corps par rapport à l'*éther*, mais les vitesses des corps les uns par rapport aux autres [5].

Poincaré a toujours été clair sur la relativité de l'espace, nous l'avons vu dans le chapitre précédent, et, ce qui revient au même, l'impossibilité ou l'inutilité de l'espace absolu. Mais il en était autrement sur le problème de l'éther. Le problème n'a jamais été simple, pas seulement chez Poincaré.

Pourquoi l'éther a-t-il résisté si longtemps, même après la théorie de la relativité, alors qu'il ne devait même pas attendre une nouvelle mécanique pour se dissiper compte tenu du principe de relativité, déjà mis en place depuis Descartes et Galilée ?

Le deuxième trait de l'espace : la Voie lactée, considérée à l'époque comme l'ensemble de l'univers, l'essaim d'étoiles et les espaces interstellaires. A quoi

3. *SH*, p. 82.

4. La distinction deviendra plus claire dans un article ultérieur : Henri Poincaré (1912), « L'espace et le temps », *Scientia*, 12, 25, repris dans *DP*. Sur cet article, voir *infra*, « Clôture ».

5. *SM*, p. 240. Passage déjà cité plus haut, dans le chapitre V. C'est moi qui souligne.

consiste ces espaces, du vide ou de la matière subtile ? Nous avons déjà traité la question, eu égard aux deux problèmes cosmologiques de la mécanique newtonienne, optique et gravitationnel. C'est par la voie de l'éther et son rapport avec la matière que Lord Kelvin est conduit à s'intéresser à des problèmes cosmologiques liés à la Voie lactée, travail qui inspire Poincaré pour pousser une analogie avec la théorie cinétique des gaz.

1 Apport de la nouvelle mécanique

La troisième partie de *Science et méthode* s'intitule « La nouvelle mécanique ». Elle a pour origine un article homonyme de 1908, qui est lui-même une reprise de l'article de 1905, « Sur la dynamique de l'électron ». C'est à la fois une synthèse et une analyse critique de la nouvelle théorie et de ses apports à divers domaines, rapportés dans trois chapitres : 1° la mécanique et le radium ; 2° la mécanique et l'optique ; 3° la mécanique et l'astronomie. Les principes de l'ancienne mécanique sont revisités et discutés à nouveau, notamment les trois « lois » de Newton. Ces principes newtoniens ont déjà fait l'objet d'une critique dans *La science et l'hypothèse*, suivie des affirmations suivantes :

> 1° Il n'y a pas d'espace absolu et nous ne concevons que des mouvements relatifs ; cependant on énonce le plus souvent les faits mécaniques comme s'il y avait un espace absolu auquel on pourrait les rapporter ;
> 2° Il n'y a pas de temps absolu ; dire que deux durées sont égales, c'est une assertion qui n'a par elle-même aucun sens et qui n'en peut acquérir un que par convention ;
> 3° Non seulement nous n'avons pas l'intuition directe de l'égalité de deux durées, mais nous n'avons même pas celle de la simultanéité de deux événements qui se produisent sur des théâtres différents ; c'est ce que j'ai expliqué dans un article intitulé la *Mesure du temps*[6].

L'impossibilité de se présenter, sinon l'impossibilité tout court, de l'espace absolu, c'est-à-dire vide et indépendant de corps, c'est une idée claire et ferme chez Poincaré dès le début. Elle est plus manifeste que jamais dans *Science et méthode* : « tout le monde sait que l'espace est relatif, ou plutôt tout le monde le dit, mais que de personnes pensent encore comme si elles le croyaient absolu ; il suffit cependant de réfléchir un peu pour apercevoir à quelles contradictions elles sont exposées[7]. » L'espace et relatif, c'est une chose sure, mais dans quel sens ? La relativité se rapporte d'abord à la position (ma position sur un point de l'espace quelconque, à la place du Panthéon par exemple, qui est fixe par

6. *SH*, pp. 111-112.
7. *SM*, pp. 2-3.

rapport à la Terre, mais pas par rapport au Soleil autour duquel elle tourne), ou bien à la distance et la grandeur (les objets de la mesure comme ma taille, la longueur de mon lit...)[8]. Mais dans un sens plus large et peut-être plus profond, elle se rapporte à l'essence même de l'espace qui « est en réalité amorphe et les choses qui sont dedans lui donnent seules une forme[9], » mais dont nous n'avons aucune intuition directe.

Le temps n'en est pas moins relatif. L'impossibilité du temps absolu se traduit par celle de l'*égalité de deux durées* et celle de la *simultanéité de deux événements*. Il est curieux de constater le temps n'occupe pas autant de place que l'espace dans l'œuvre de Poincaré. « La mesure du temps », un article de 1898, constitue l'un des rares écrits poincaréens consacrés au temps[10]. Chose curieuse, il est repris dans *La valeur de la science*, pas dans *La science et l'hypothèse* dont il aurait pu, sinon dû, faire partie comme d'autres articles épistémologiques écrits aux alentours de 1900. Quels sont les motifs pour ce choix éditorial et quelles circonstances concourent-ils à basculer l'ordre chronologique plus ou moins respecté dans d'autres cas de reprise ? L'emplacement de ce chapitre entre « L'intuition et la logique en mathématiques » et « La notion d'espace » dans la partie des « Sciences mathématiques » de *La valeur de la science* n'est pas anodin ; il est d'autant plus significatif que la publication de *La valeur de la science* date du mois de juillet 1905, un mois à peine après la soumission de « Sur la dynamique de l'électron » au comité de rédaction de *Rendiconti*. La relativité aurait-il réveillé quelque chose en lui ?

1.1 De l'espace au temps avant la relativité

Trois espaces... qui ne mènent à nulle part ?

Poincaré critique l'espace absolu de Newton. « Non, il n'y a pas d'espace absolu[11]. » Il n'est évidemment pas le seul. Mais il ne le fait pas de la même manière que ses prédécesseurs comme Berkley ou Mach. On l'a déjà comparée

8. *SM*, p. 95, *sqq.*
9. *SM*, pp. 102-103.
10. Après avoir été quelque peu délaissé, l'article a récemment fait l'objet du regain d'intérêt dans les études poincaréennes. H. Barreau est l'un des premiers à remarquer l'importance de l'article, comme « l'exemple le plus remarquable, peut-être, pour cette époque, d'une étude épistémologique qui fasse appel à des exemples tirés de l'histoire des sciences, ici de l'histoire de la physique et de l'astronomie » : Barreau, « Temps et espace-temps chez Henri Poincaré », p. 2.

Pour l'analyse détaillée de cet article, voir Peter Louis Galison (2005), *L'empire du temps : les horloges d'Einstein et les cartes de Poincaré*, trad. par Bella Arman, Paris, France : R. Laffont ; Walter, « Poincaré on Clocks in Motion ».
11. *VS*, p. 185.

à celle d'Einstein qui s'inspira d'ailleurs de Mach, en particulier « L'expérience et la géométrie » et « La géométrie et l'expérience ». Dans « L'expérience et la géométrie », Poincaré fait appel à ce qu'il appelle la loi de relativité selon laquelle on ne peut connaitre les rapports des corps entre eux, ni leurs rapports avec l'espace, ni les rapports mutuels avec diverses parties de l'espace. Ce n'est pas uniquement pour dire que l'espace absolu n'existe pas, mais pour proposer une tout autre manière de concevoir l'espace. « Connaître la hauteur du grand mât, cela ne suffit pas pour calculer l'âge du capitaine [12]. » Ceci dit, les rapports des corps entre eux n'ont rien à voir avec les rapports des parties dans l'espace.

Pour Poincaré, la géométrie est avant tout une étude des groupes ; elle n'a pas d'autres objets que l'analyse et l'arithmétique ; elle se sépare de celles-ci par l'appel de la physique, par le besoin de celle-ci pour rendre compte de l'expérience. Mais le rapport de la géométrie avec l'expérience est loin d'être simple. Selon la thèse conventionnaliste, rappelons-le, les axiomes de la géométrie ne sont pas des vérités expérimentales, mais des conventions, choisies par nous-mêmes en raison de leur commodité. Notre choix est guidé par les expériences que nous faisons. Quelles sont précisément ces expériences et comment nous guident-elles ? Mais d'abord de quel espace s'agit-il ?

La géométrie est la science de l'espace, dit-on. Et pour cause : si elle reste toujours une science de l'espace, il n'y a pas qu'un espace, mais plusieurs, qu'on pourrait dire à plusieurs niveaux. Il existe d'abord « ce continuum à trois dimensions [...] primitivement amorphe [13] », qui est un « fond commun » pour toutes sortes de géométries, tous les espaces, représentatif ou géométrique, euclidien ou non euclidien. Il fait l'objet d'« une science qui a été cultivée par plusieurs grands géomètres et en particulier par Riemann et Betti et qui a reçu le nom d'Analysis Sitûs [sic] » [14]. Cette science, qu'on appellera plus tard la topologie, a pour but d'étudier des propriétés spatiales qui sont indépendantes de toute idée de mesure et invariables sous « transformation ponctuelle quelconque ».

> Je crois donc que si par espace on entend un continu mathématique à trois dimensions, fût-il d'ailleurs amorphe, c'est l'esprit qui le construit, mais il ne le construit pas avec rien, il lui faut des matériaux et des modèles. Ces matériaux comme ces modèles préexistent en lui. Mais il n'y a pas un modèle unique qui s'impose à lui ; il a du choix ; il peut choisir, par exemple, entre l'espace à quatre et l'espace à trois dimensions. Quel est alors le rôle de l'expérience ? C'est elle qui lui donne les indications d'après lesquelles il fait son choix [15].

12. *SH*, p. 96
13. *VS*, p. 55 et *passim*.
14. *VS*, p. 59.
15. *VS*, p. 98.

L'expérience la plus immédiate consiste dans les sensations et les représentations des corps extérieurs par nos sens, la vue ou le toucher par exemple. Chaque sensation n'est pas isolée, mais toujours associée avec d'autres sensations ou « l'ensemble d'impressions [16] ». Mais nos sensations varient, nous le savons bien, et se modifient sans cesse ; leur modification provient, soit du changement d'*état* des choses (par la réaction chimique, par exemple, ce qui altère la « qualité » des choses), soit du changement de *position* des choses par rapport à nous. Pour distinguer deux espèces de changement, il suffit de voir si nous pouvons restaurer les sensations initiales en nous déplaçant nous-mêmes ou en modifiant nos sensations musculaires ; nous arriverions ainsi à déplacer ou replacer les objets sans que ceux-ci soient altérés eux-mêmes.

Quand un corps subit un changement de position, nous n'avons qu'à suivre le corps avec notre œil pour corriger le changement et le corps sera replacé à sa position initiale [17]. Dans ce cas, le changement peut être représenté par un groupe de transformations. Si nous arrivons à retrouver l'ensemble d'impressions initiales de telle manière, nous dirons que c'est un changement de position (Poincaré l'appelle également « volontaire » ou encore « interne »), et un changement d'*état* dans le cas contraire (« involontaire » ou « externe ») [18]. Mais comment saurions-nous qu'un corps subit uniquement un changement de position, non d'état ?

L'expérience que nous faisons n'est pas sur l'espace lui-même, elle porte sur les *corps* qui nous sont extérieurs et se fait avec nos propres *corps*. Elle ne dépend donc pas uniquement de notre capacité, mais aussi de la nature des objets qui nous entourent, séparés et indépendants de nous.

> Parmi les objets qui nous entourent, il y en a qui éprouvent fréquemment des déplacements susceptibles d'être ainsi corrigés par un mouvement corrélatif de notre propre corps, ce sont les corps solides. [...] *Si donc il n'y avait pas de corps solides dans la nature, il n'y aurait pas de géométrie* [19].

La nature dispose de ces corps remarquables qui possèdent quelque chose d'invariant sous certaines transformations, comme celui du mouvement local. Les corps solides, que Poincaré appelle également « solides naturels », ont ceci

16. *SH*, p. 83.
17. *SH*, p. 84.
18. L'appellation n'est pas tout à fait réussie et porte des confusions. Poincaré le reconnaît lui-même et tentera plus tard de préciser la distinction : « les changements que peuvent subir nos impressions en deux catégories que j'ai appelées d'un nom peut-être impropres : 1° les changements internes, qui sont volontaires et accompagnés de sensations musculaires ; 2° les changements externes, dont les caractères sont opposés ». *VS*, p. 69. Dans le même passage, les changements externes sont désormais divisés en deux : changement de *position* et changement d'*état*.
19. *SH*, pp. 85-86. Soulignement de Poincaré.

de particulier qu'ils sont capables de se mouvoir sans changer de forme ni d'état, mais uniquement de position. Une fois la « solidité » des corps prise en compte, il nous est permis de distinguer les changements de position de ceux d'état, tantôt en les replaçant à leurs positions initiales, tantôt en *nous* plaçant à leur place, en rétablissant, par un mouvement réciproque, l'ensemble initial de nos impressions. A ces déplacements s'appliquent la notion de *groupe* ainsi que tout ce qui s'y accompagne, notamment la notion de nombre et ses règles.

En somme, l'espace n'est pas un produit pur de nos sensations ni celui de notre esprit seul. « Cette notion est construite par l'esprit avec des éléments qui préexistent en lui, et l'expérience externe n'est pour lui que l'occasion d'exercer ce pouvoir, ou au plus un moyen de déterminer la meilleure manière de l'exercer [20], » concluait notre savant en 1898. Mais cet espace, qui se crée à partir de nos sensations associées, d'une « parade » de telles sensations qui ont lieu au niveau élémentaire de notre système nerveux, c'est l'espace le plus élémentaire qui se construit à partir des relations entre notre corps et les objets extérieurs [21] ; ce n'est qu'une petite partie de l'espace, que Poincaré propose d'appeler l'*espace restreint* et le distingue de l'*espace étendu* ; si le premier se rapporte à un ensemble de sensations *simultanées*, le second, à des sensations *successives*, par l'intermédiaire de la *mémoire* [22].

Je choisis une position initiale plus ou moins arbitrairement ; je construis un espace en remontant par la mémoire aux positions successivement occupées par mon corps dans le passé, c'est-à-dire *relativement* à la position initiale que j'ai choisie. Je peux montrer que deux points quelconques a et b de tel espace sont liés par un mouvement M, qui est le même qu'un autre mouvement. M' entre a' et b', de sorte que je puisse établir l'équivalence entre a et a' et, par cela même, l'homogénéité de mon espace. A partir de quoi puis-je même passer à un espace plus grand, « qui ne sert plus seulement pour moi, mais où je *peux loger l'univers* [...] par un acte d'imagination [23] ». Par imagination, en effet, puis-je m'imaginer sous la peau d'un géant ou dans un monde en miniature, afin de représenter et réinterpréter autrement les corps et les mouvements. Mais comment ? Poincaré ne le montre pas ; il se contente de dire que ceci ne serait possible sans construction des deux espaces précédents « pour [son]

20. Poincaré« Des fondements de la géométrie », in *Scientific opportunism*, sous la dir. de Louis Rougier et Laurent Rollet, trad. par T. J. McCormack et Louis Rougier, introd. de Laurent Rollet.

21. « C'est ce système complexe d'associations, c'est ce tableau de distribution, pour ainsi dire, qui est toute notre géométrie, ou, si l'on veut, tout ce que notre géométrie a d'instinctif. Ce que nous appelons notre intuition de la ligne droite ou de la distance c'est la conscience que nous avons de ces associations et de leur caractère impérieux. » *SM*, p. 107.

22. *SM*, p. 110.

23. *SM*, p. 113.

usage personnel[24] ».

Mais tout cela constitue un « espace grossier », l'objet d'une géométrie primitive, qui diffère de l'espace géométrique. Nous l'avons vu, ce dualisme auquel Aristote tenait tant : le premier reste flou, discontinu, fini, hétérogène et anisotrope, le second, infiniment précis, continu, infini, homogène et isotrope ; le premier est probablement commun à l'homme et d'autres animaux supérieurs (même s'il s'accompagne, pour nous, de l'ajout d'une notion innée de l'esprit qu'est celle de groupe), alors que le second, propre à l'homme. Toujours est-il que ce dernier est né du premier.

Il n'existe pas dans la nature quelque chose de *triangulaire*, c'est-à-dire des objets par lesquels les propositions qui portent sur les triangles sont soumises à la vérification directe. Ce qui existe, ce sont des objets naturels, surtout "solides", qui ont ceci de particulier qu'ils restent invariants sous tout déplacement et la plupart des transformations. Qu'en est-il de ce corps naturel particulier qu'est la lumière dont dépend toute observation en astronomie ? leur mesure ne va pas sans supposer la propagation de la lumière en ligne droite, mais aussi la rigidité des corps d'instruments de mesure. Et la parallaxe, ce triangle que composent les rayons lumineux émis d'une étoile ? La mesure de la parallaxe, considérée par beaucoup comme *experimentum crucis* pour vérifier des axiomes de la géométrie[25]. Si donc la parallaxe dépasse 180°, de deux choses l'une : ou bien il faut conserver la géométrie euclidienne en révisant les suppositions relatives à la mesure, ou bien faudra-t-il abandonner la géométrie euclidienne au profit de ces suppositions sur la lumière et les corps naturels. Pourtant, l'observation à elle seule ne saurait trancher la question.

Temps ni universel ni même relatif

Poincaré s'oppose à Kant à propos du temps comme sur l'espace : de même que l'espace n'est pas la forme a priori de l'intuition, jamais préalablement *donné* comme déjà tout fait à notre esprit, mais *constitué* par nos perceptions des corps, en particulier de leurs mouvements, de même le temps est constitué à partir de nos perceptions des choses ou, plus exactement, de leurs *relations*. Si l'on veut poursuit la comparaison avec Kant, on peut dire que le temps reste une forme chez Poincaré : le problème du temps consiste à établir une forme pour « faire entrer les faits physiques » dans *les consciences*, pas seulement la nôtre, mais celle des autres, forme donc des sens *externes*, pas sens internes comme chez Kant.

24. *ibid.*
25. *SH*, p. 95, *sqq.*

> Mais ce n'est pas tout ; dans cette forme nous voulons faire rentrer non seulement les phénomènes de notre conscience, mais ceux dont les autres consciences sont le théâtre. Bien plus, nous voulons y faire rentrer les faits physiques, ces je ne sais quoi dont nous peuplons l'espace et que nulle conscience ne voit directement. Il le faut bien car sans cela la science ne pourrait exister. En un mot, *le temps psychologique nous est donné et nous voulons créer le temps scientifique et physique*[26].

La distinction entre le temps psychologique et le temps physique est loin d'être nouvelle, mais relativement peu usitée dans les discussions philosophiques sur le temps qui reviennent souvent au dualisme ontologique et/ou métaphysique entre le sujet et l'objet, le subjectif et l'objectif : est-ce un phénomène de notre conscience ou du monde indépendant de, et extérieur à, nous ? Mais ce n'est pas la question que se pose Poincaré, en tout cas pas dans ces termes : le temps psychologique est essentiellement qualitatif, et le temps physique, mesurable et donc quantitatif ; leur différence n'est pas *de nature*, mais *de degré*, tout comme le cas des espaces psychologique et physique[27]. Quel est le rapport entre ces deux temps ? Peuvent-ils passer l'un à l'autre ? Le temps psychologique deviendrait-il le temps physique de la manière dont l'espace psychologique *se transforme* en l'espace géométrique ?

Mais ce qui importe avant tout pour Poincaré, c'est de *mesurer* le temps, à savoir de « réduire à une même mesure des faits qui se passent dans des mondes différents[28] », non seulement dans notre conscience à nous, mais dans les autres consciences. La mesure du temps repose sur des principes comme l'égalité de deux durées, l'ordre de succession ou bien la simultanéité des événements, sur lesquels nous n'avons aucune intuition. Dans un premier temps, nous nous servons des mouvements dits périodiques qui se répètent constamment et régulièrement en une durée égale comme le battement de cœur, l'oscillation d'un pendule ou bien la circulation de la Terre. Pour ce faire nous posons comme postulat l'identité de durées des phénomènes identiques, postulat qui se tra-

26. *VS*, p. 42. C'est moi qui souligne.

27. Est-ce une allusion au dualisme de Bergson entre la durée et le temps « spatialisé » ? La distinction entre « multiplicité distincte » ou « spatialité » d'un côté, et « durée réelle », « continuité indivisée et création » d'un autre, c'est une chose acquise, due à sa première intuition philosophique ; elle est placée au centre du premier ouvrage de 1889 issu de sa thèse d'État, *Essai sur les données immédiates de la conscience*.

Il est probable que notre mathématicien connût le philosophe dès son début, de nom pour le moins, par l'entremise de son beau-frère. Boutroux avait fait partie du jury de la soutenance de Bergson. Toujours est-il que le nom de Bergson figurera sous la plume de Poincaré qu'une seule fois à ma connaissance : « L'espace et le temps », son dernier texte de 1912, dans lequel le temps psychologique est clairement identifié à « la durée bergsonienne ». Voir *infra*, « Clôture ».

En outre, on dispose d'une lettre de Marie Bonaparte qui remercie Poincaré pour sa recommandation des livres de Bergson et James. Si cela ne *prouve* pas nécessairement que Poincaré les ait lus, il suffit tout de même pour approuver sa connaissance de ces philosophies.

28. *VS*, p. 42.

duit par ceci que non seulement les mêmes causes produisent les mêmes effets, elles mettent *le même temps* à produire ces mêmes effets. « Et c'est là au premier abord une bonne définition de l'égalité de deux durées [29]. » Toujours est-il que, « [d]ans la réalité physique, une cause ne produit pas un effet, mais une multitude de causes distinctes contribuent à le produire sans qu'on ait aucun moyen de discerner la part de chacune d'elles. »

Strictement parlant, il est impossible d'identifier deux causes ; deux causes comme deux effets ne peuvent identifiés qu'à peu près. Qui plus est, si la définition du temps dépend de notre loi comme celle de Newton, qui n'est qu'approximative comme toute loi, elle n'en serait pas moins approximative. Autrement dit, tant que la définition de l'égalité de temps fonde sur l'identité de causes et d'effets, « [n]otre définition n'est donc plus qu'approchée [30] ».

Il en est de même pour l'ordre des événements. Soit deux événements quelconques, A et B. De trois choses l'une : 1° A précède B ; 2° B précède A ; 3° B a lieu au même moment que A ou, en d'autres termes, A et B sont *simultanés*. Comment, pourtant, les mettre en ordre ? On pourrait les ordonner de plus proche à moins proche du présent, mais dans ce cas que signifierait la « proximité » ici ? « Mon présent, dit Poincaré, n'est-il pas plus près de mon passé d'hier que du présent de Sirius [31] ? » En effet, l'évènement A qui a lieu sur la Terre serait « plus proche » du B qui aura lieu *demain*, mais toujours sur la Terre, qu'un autre évènement A' qui a peut-être lieu *au même moment* que A, mais à Sirius ? A' et sa simultanéité avec A ne seront jamais connus de nous qu'après 8,7 années, le temps que la lumière a à parcourir depuis Sirius jusqu'à la Terre.

On fait souvent recours à la causalité pour donner l'ordre chronologique, mais aussi l'inversement. « Nous disons tantôt *post hoc, ergo propter hoc* ; tantôt *propter hoc, ergo post hoc* ; sortira-t-on de ce cercle vicieux [32] ? » A (un coup de tonnerre) suit B (une décharge électrique) ; A est la conséquence de B. De même, B est la cause de A et c'est *pourquoi* B est suivi de A ; B est *à la suite* de quoi et *à cause* de quoi arrive A. Or, A suit aussi un autre événement, un éclair, qu'on nommera C. C a lieu généralement à la suite et à cause de B. Et pourtant, on sait que C ne précède pas réellement A ; en réalité, non seulement A et C ont lieu simultanément, ils ont B pour une seule et même cause. Ce n'est pas tout. « De deux coups de foudre, l'un lointain, l'autre rapproché, le premier ne peut-il pas être antérieur au second, bien que

29. *VS*, p. 44.
30. *VS*, p. 45.
31. *VS*, p. 49.
32. *VS*, p. 50.

le bruit du second nous parvienne avant celui du premier [33] ? »

Qu'en est-il de la simultanéité ? Si nous n'en avons pas d'intuition, comment saurions-nous que deux évènements, un coup de tonnerre A et un éclair C, ou bien un événement A sur la Terre et un autre A' sur Sirius, ont lieu *en même temps* ? Ce dernier cas représente concerne le principe même de la mesure en astronomie : l'expérience guide le choix d'une théorie et, dans le cas d'astronomie, cette expérience consiste dans la mesure faite par ce corps naturel qu'est la lumière ; elle ne va pas sans supposition fondamentale sur la nature de cette même lumière, à savoir la constance de sa vitesse dans toute direction.

> C'est là un postulat sans lequel aucune mesure de cette vitesse ne pourrait être tentée. Ce postulat ne pourra jamais être vérifié directement par l'expérience ; il pourrait être contredit par elle, si les résultats des diverses mesures n'étaient pas concordants. Nous devons nous estimer heureux que cette contradiction n'ait pas lieu et que les petites discordances qui peuvent se produire puissent s'expliquer facilement [34].

Un postulat mainte fois vérifié jusqu'à devenir invincible, la constance de la vitesse de la lumière prend alors toute allure d'une loi expérimentale promue au rang des principes, au même titre que le principe de relativité.

En somme, il n'y a pas de temps universel ; il n'y a que des événements susceptibles d'être synchronisés, et ceci, d'une infinité de manières.

> La simultanéité de deux événements, ou l'ordre de leur succession, l'égalité de deux durées, doivent être définies de telle sorte que l'énoncé des lois naturelles soit aussi simple que possible. En d'autres termes, toutes ces règles, toutes ces définitions ne sont que le fruit d'un opportunisme inconscient [35].

1.2 L'éther « relativiste » et l'espace-temps poincaréen

Si l'espace absolu n'a pas attendu la mécanique relativiste pour faire l'objet d'une critique, la critique devait changer la donne quand elle se rapporte à l'*éther*. Comme déjà dit maintes fois, Poincaré n'a pas été toujours clair sur l'éther : il a toujours gardé une réticence, sans pour autant complètement l'abandonner même dans « Sur la dynamique de l'électron » de 1905 et bien après ; l'éther est bel et bien présent dans Livre III de *Science et méthode*, intitulé « La nouvelle mécanique ».

33. *VS*, p. 51.
34. *VS*, p. 52.
35. *VS*, p. 54.

> Tous ces électrons baigneraient dans l'éther. L'éther serait partout identique à lui-même, et les perturbations s'y propageraient suivant les mêmes lois que la lumière ou les oscillations hertziennes dans le vide. En dehors des électrons et de l'éther, il n'y aurait rien. Quand une onde lumineuse pénétrerait dans une partie de l'éther, où les électrons seraient nombreux, ces électrons se mettraient en mouvement sous l'influence de la perturbation de l'éther, et ils réagiraient ensuite sur l'éther. C'est ainsi que s'expliqueraient la réfraction et l'absorption. De même, si un électron se mettait en mouvement pour une cause quelconque, il troublerait l'éther autour de lui et donnerait naissance à des ondes lumineuses, ce qui expliquerait l'émission de la lumière par les corps incandescents [36].

Dans ses ouvrages précédents, Poincaré n'est ni pour ni contre ce milieu subtil ; en le caractérisant comme une entité métaphysique ou en qualité d'une « hypothèse indifférente », il se préoccupe de donner des explications historiques comment et pourquoi, notamment pour quels besoins théoriques, les physiciens ont inventé et fini par l'accepter [37]. Quand Fresnel l'imagina le premier, c'était pour s'en servir comme une *hypothèse* explicative des phénomènes optiques, pas pour attribuer une existence ni une nature quelconque. Une fois cette hypothèse ancrée dans les théories, les physiciens en ont inventé plusieurs modèles, soit comme support matériel pour la propagation de la lumière, soit comme un référentiel absolu des corps en mouvement par lequel les mouvements peuvent être repérés, dont celui de la Terre [38]. L'impossibilité du mouvement absolu de la Terre, c'est-à-dire par rapport à quelque chose en repos absolu, si elle est « prouvée » par l'expérience, n'entraine pas nécessairement l'impossibilité du mouvement *relatif* à l'éther ; la vitesse de la lumière peut toujours être « relative *par rapport à l'éther*, de sorte que le principe de relativité est sauf [39] ».

Beaucoup d'hypothèses sont entassées pour satisfaire au plus de principes possibles. La théorie de Lorentz en est un exemple : elle suppose le déplacement des électrons s'effectue dans tous les sens et toujours à la même vitesse (égale à la lumière), et ceci à travers, et aussi par l'intermédiaire de, l'éther. L'un n'exclut pas l'autre si l'on ajoute des hypothèses comme cette de la contraction. Or, ne pourrait-on pas s'imaginer d'autres hypothèses ? L'éther était considéré absolument immobile, en repos absolu, de façon à rendre son existence serait incompatible avec le principe de relativité.
Mais s'il était mobile relativement aux corps en mouvement, lui-même donc en mouvement relatif, de façon à rendre *relatifs* tous les mouvements qui se

36. *SM*, pp. 226-227.
37. *SH*, pp. 173, 180–183, 215–218 ;
38. *SH*, p. 181.
39. *SH*, p. 242.

rapportent à lui ? Et s'il était entrainé par les corps qui l'environne, tout en agissant et réagissant sur ces corps, corps, exactement comme ceux-ci ? Dans ce cas, « on pourrait se passer de cette extraordinaire contraction de tous les corps [40] », mais rien n'indique laquelle serait plus simple et naturelle comme hypothèse.

> Peu nous importe que l'éther existe réellement, c'est l'affaire des métaphysiciens ; l'essentiel pour nous c'est que tout se passe comme s'il existait et que cette hypothèse est commode pour l'explication des phénomènes. Après tout, avons-nous d'autre raison de croire à l'existence des objets matériels ? Ce n'est là aussi qu'une hypothèse commode ; seulement elle ne cessera jamais de l'être, tandis qu'un jour viendra sans doute où l'éther sera rejeté comme inutile [41].

Aux alentours de 1904, Poincaré rend compte de la vérité « absolue » du principe de relativité, sans aucune restriction, même dans les phénomènes optiques, mais ce n'est toujours pas sans supposer l'existence de l'éther. Qui plus est, une fois son existence prouvée, en tout cas garantie, l'éther en viendra à compromettre la conception de la matière classique, pour ce qui concerne l'électron au moins : la masse ne serait plus constante, mais augmente selon la vitesse ; elle n'appartiendrait plus à la *matière* seule, pas plus que l'inertie ; l'éther serait de son côté même doté de l'inertie voire de l'énergie ; la matière ne serait rien d'autre qu'un « vide dans l'éther, seul réel, seul doué d'inertie [42] »...

Tout se passe comme si Poincaré tirait de la théorie de la relativité comme une leçon fondamentale des implications (anti)matérialistes plutôt que la nouvelle conception de l'espace et du temps. Nous avons vu comment Poincaré s'engageait aux débats sur le problème de l'espace, dans la lignée de Riemann-Helmholtz-Lie, plus activement que quiconque de ses contemporains. Comment se fait-il que quelqu'un comme lui passe sous silence l'apport de la nouvelle mécanique à la géométrie ? Ce serait, selon les uns, par son « engagement à la physique de l'éther », à laquelle faisait partie Lorentz comme beaucoup de ses contemporains ; ce serait aussi la raison pour laquelle il ne considère pas la relativité comme un « postulat » ou un premier principe, mais comme une condition préalable et non nécessaire, ou bien comme une hypothèse parmi une infinité d'autres également possibles [43]. Selon les autres, ce serait toujours

40. *VS*, p. 143.
41. *SH*, p. 215.
42. *SH*, p. 248. Voir aussi *SM*, p. 230.
43. « His commitment to an ether physics had the consequence that in spite of a phenomenalist epistemology very similar to that which informed the work of Einstein, he was forced to interpret the principle of relativity not as first principle of physics (since to do so would have been incompatible with many of the theoretical propositions which involved the ether) but as a condition referring only to empirical relations. » Susan Wright (1975), *Henri Poincaré : A Developmental Study of His Philosophical and Scientific Thought*, PhD

« un réalisme de l'éther qui empêche Poincaré ici d'adhérer à un réalisme plus subtil de l'espace-temps [44] ».

Dans le cadre de la relativité restreinte, l'espace sert de cadre ou de contenant au nom du référentiel inertiel, dans lequel les mouvements ont lieu et auquel ils se rapportent, en tant que « composante indépendante de la description de la réalité physique » comme le dira Einstein [45]. C'est la théorie de la relativité *générale* qui en vient à abolir le privilège du référentiel inertiel ainsi que le dualisme entre espace-contenant et matière-contenu de telle façon que la « réalité physique » et l'espace ne se séparent plus : la matière affecte l'espace (sa courbure), tandis que l'espace n'en contribue pas moins à la matière et à son mouvement. Cela ne veut cependant pas dire le retour à la conception cartésienne ou l'abolition du dualisme entre l'espace et la matière. On reste, certes, plus ou moins adepte de la conception newtonienne, avec un espace séparé et indépendant de la matière, on n'en est pas moins tenté d'attribuer à l'espace un *sens physique* avec un attribut *matériel* et susceptible d'agir sur le monde physique.

Dans le dernier chapitre de *La science et l'hypothèse*, intitulé « La fin de la matière », un article éponyme de 1906, conçu comme une réponse à à l'ouvrage de Gustave Le Bon, *L'évolution de la matière*. Ce texte est ajouté à partir de la deuxième édition de 1907, publiée *après La valeur de la science* et *avant Science et méthode*, datés de 1905 et de 1908 respectivement [46]. Il existe, certes, des « motifs circonstanciels » dans l'édition des livres postérieurs comme *La valeur de la science* et *Science et méthode*, si on les compare avec *La science et l'hypothèse* [47]. Quels motifs ont-ils conduit Poincaré à reprendre l'article puis à l'ajouter dans un livre précédent, *La science et l'hypothèse*, au lieu de *La valeur de la science*, et, de plus à le placer à la fin, comme s'il s'agissait d'une conclusion ?

Dans son article fondateur, le problème de l'espace et celui de temps ne se posent pas comme tels. A ceci près qu'il fait allusion au changement de la conception de l'espace due à la théorie de Lorentz.

Thesis, Harvard University, p. 496.

44. Barreau, « Temps et espace-temps chez Henri Poincaré », p. 18.

45. Einstein, *La relativité*, p. 171.

46. Poincaré, « La fin de la matière ».

47. E. Audureau serait de cet avis : « Dans ses livres ultérieurs, Poincaré ne fait qu'approfondir, éclaircir, et consolider les thèses qui déterminent cette progression de l'examen des matières, et les plans de *La Valeur de la science* et de *Science et méthode*, on le vérifie facilement, n'obéissent, contrairement à celui de *La Science et l'hypothèse*, qu'à des motifs circonstanciels. » A quoi ajoute-t-il une note (note 16) : « Si le plan de *La Science et l'hypothèse* n'avait pas organisé le choix des textes, on verrait mal pourquoi Poincaré n'aurait pas inclus La mesure du temps dans ce dernier recueil. » Audureau, « Le conventionnalisme, conséquence de l'intuitionnisme », p. 66.

> Comment faisons-nous nos mesures ? En transportant, les uns sur les autres, des objets regardés comme des solides invariables, répondra-t-on d'abord ; mais cela n'est plus vrai dans la théorie actuelle, si l'on admet la contraction lorentzienne. Dans cette théorie, deux longueurs égales, ce sont, par définition, deux longueurs que la lumière met le temps à parcourir.

L'hypothèse de la contraction met en cause la solidité, la rigidité des corps naturels qui sert de raison principale du choix de la géométrie euclidienne. Les solides n'ont plus le rôle fondamental qui est conféré aux longueurs d'un rayon lumineux. Le mètre rigide est substitué par l'étalon lumineux. Elle a pour résultat la relativité de la simultanéité et par cela même (ou ce qui revient au même) l'impossibilité de la simultanéité absolue.

Ce ne sera que bien tardivement que Poincaré revient au sujet. Dans l'article de 1907, Poincaré parle de la traductibilité de notre physique en géométrie à quatre dimensions. Toujours est-il que « la langue des trois dimensions » est la langue la mieux adaptée à la description du monde physique [48].

A Saint-Louis, Poincaré disait que le temps doit être défini comme local pour que le principe de relativité tienne. Mais dans *Science et méthode*, il constate la nécessité du temps local pour accorder l'existence de l'*éther* et ses propriétés avec le principe de relativité.

Sur la relativité de l'espace, c'était du point de vue *cinématique*. Il en était autrement du point de vue *dynamique*.

2 Théorie cinétique et son application cosmologique

L'année 1906 marque la mort de Boltzmann. Poincaré rend hommage au physicien autrichien, à la séance de l'Académie des sciences du 17 décembre 1906 qui le comptait parmi ses correspondants. Mais il n'a pas attendu la tragédie pour réveiller son intérêt pour la théorie de Boltzmann. Au mois de mars de la même année, il a déjà délivré une conférence sur « La Voie lactée et la théorie des gaz » à la Société astronomique de France [49], suivie d'un article

48. Walter, « Henri Poincaré et l'espace-temps conventionnel », p. 98.

49. Henri Poincaré (1906b), « La Voie lactée et la théorie des gaz », *Bulletin de la Société astronomique de France*, 20, suivi d'un compte rendu du congrès de la Société (p. 171) :

> M. H. Poincaré, membre de l'Institut, ancien président de la Société, fait sur *La Voie lactée et la théorie des Gaz*, la savante conférence, très applaudie, reproduite en tête du présent *Bulletin*.
>
> M. Le Président fait remarquer que c'est une bonne fortune pour la Société Astronomique de France d'avoir reçu là une nouvelle primeur des incessants travaux

LA VOIE LACTÉE ET LA THÉORIE DES GAZ

Par **H. POINCARÉ**, de l'Institut, ancien président de la Société.

Les considérations dont je veux vous entretenir aujourd'hui ont peu attiré jusqu'ici l'attention des astronomes; je n'aurais guère à vous citer qu'une

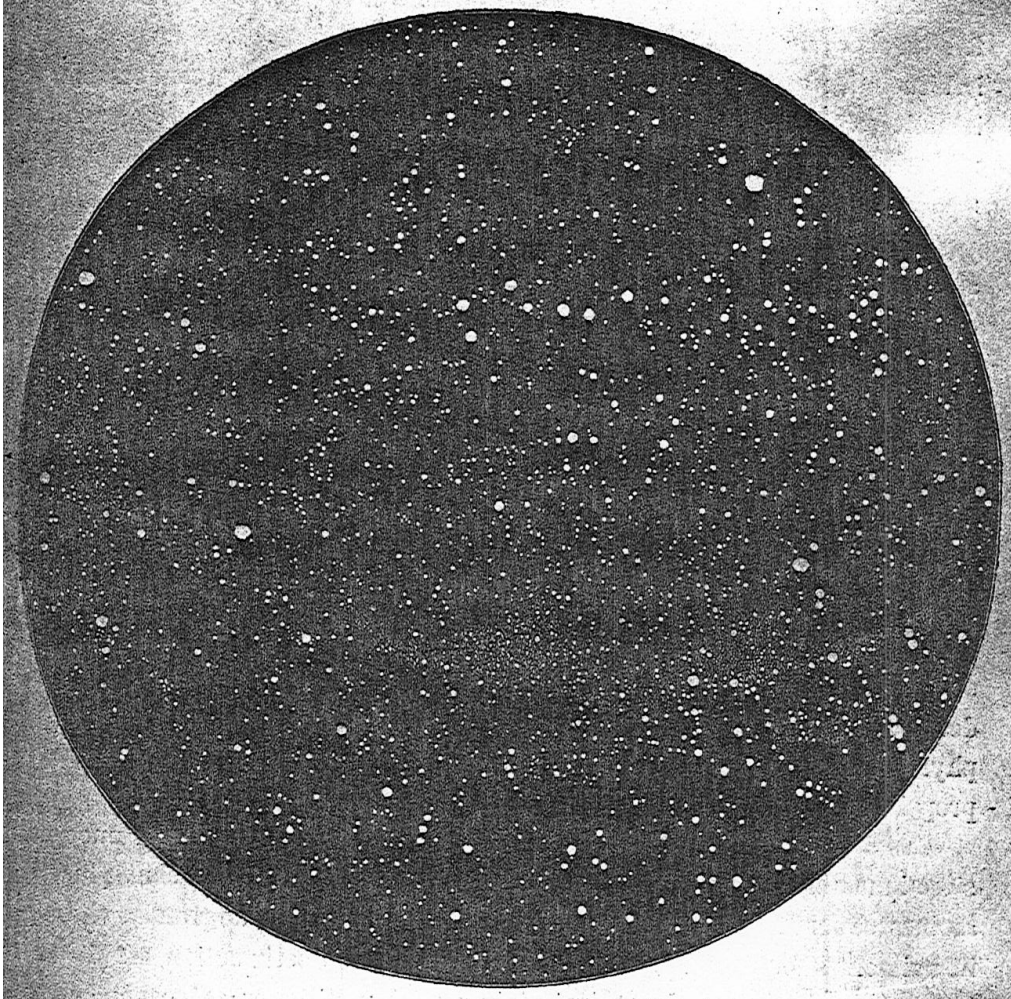
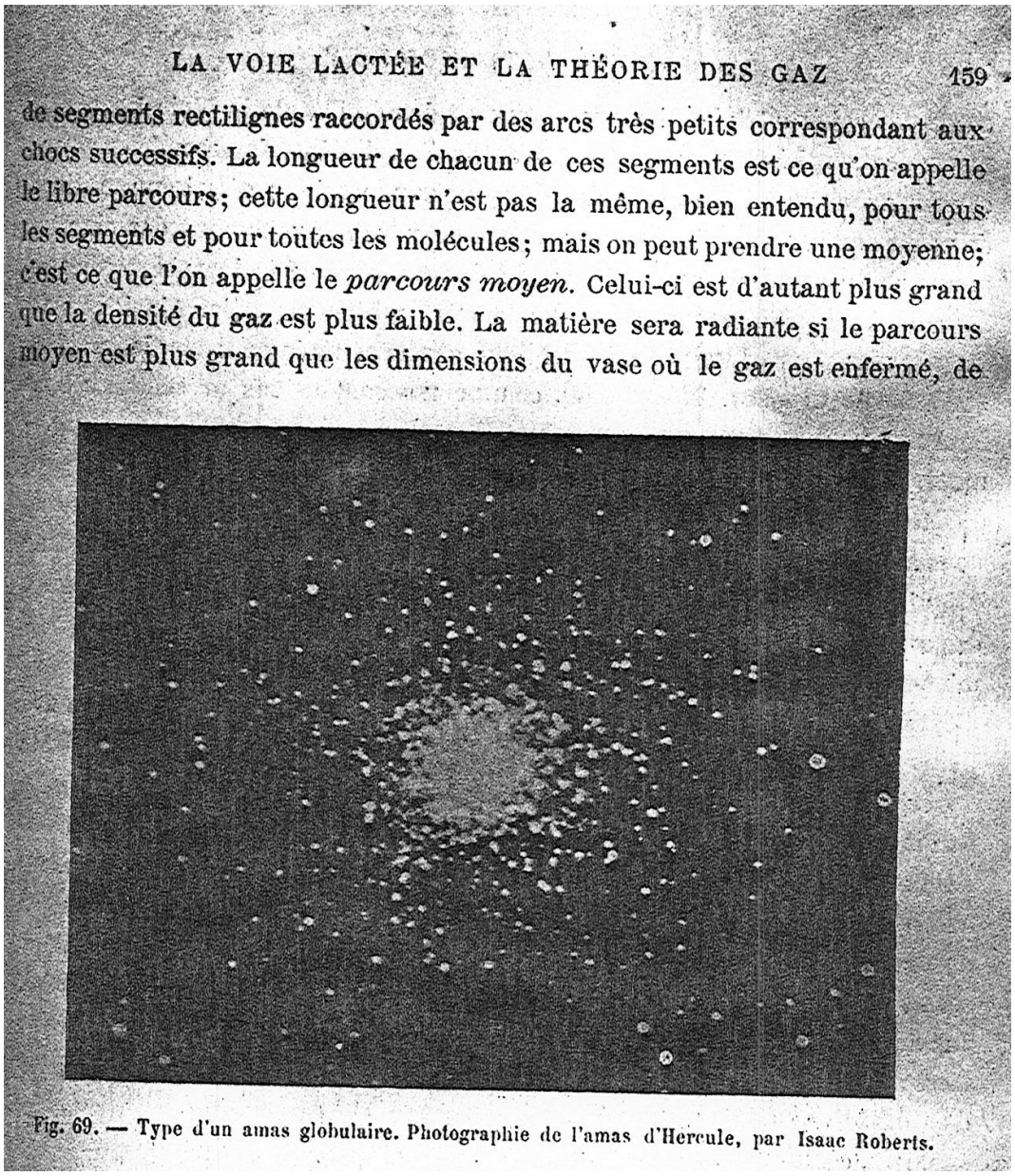


Fig. 66. — La Voie Lactée dans l'Hémisphère Boréal.

idée ingénieuse de lord Kelvin, qui nous a ouvert un nouveau champ de recherches, mais qui attend encore qu'on l'y suive. Je n'ai pas non plus de résultats originaux à vous faire connaître, et tout ce que je puis faire, c'est de vous donner une idée des problèmes qui se posent, mais que personne jusqu'à ce jour ne s'est préoccupé de résoudre.

Vous savez tous comment un grand nombre de physiciens modernes se représentent la constitution des gaz; les gaz sont formés d'une multitude



LA VOIE LACTÉE ET LA THÉORIE DES GAZ 159

de segments rectilignes raccordés par des arcs très petits correspondant aux chocs successifs. La longueur de chacun de ces segments est ce qu'on appelle le libre parcours; cette longueur n'est pas la même, bien entendu, pour tous les segments et pour toutes les molécules; mais on peut prendre une moyenne; c'est ce que l'on appelle le *parcours moyen*. Celui-ci est d'autant plus grand que la densité du gaz est plus faible. La matière sera radiante si le parcours moyen est plus grand que les dimensions du vase où le gaz est enfermé, de

Fig. 69. — Type d'un amas globulaire. Photographie de l'amas d'Hercule, par Isaac Roberts.

FIGURE 15 – Deux pages illustrées de l'article de 1906

sur la théorie cinétique dans *Journal de physique* au mois de juin, ainsi que d'une conférence en juillet sur le même sujet, sous le même titre, à la Société française de physique[50].

---

de M. Poincaré, et adresse à l'éminent conférencier les sincères remerciements de l'Assemblée.

L'article sera reproduit dans *Science et méthode*, puis dans le chapitre IX des *Leçons*, avec des ajoutes considérables. Sur cette dernière version, nous allons revenir dans Clôture.

En outre, l'article original contient des photographies signées d'Isaac Roberts de la Voie lactée, des nébuleuses et d'un amas globulaire (voir Figure 15), conformément au principe iconographique propre à Flammarion et sa revue. Ce ne sera plus le cas de l'article repris dans *SM*.

50. Henri Poincaré (1906c), « Reflexions sur la théorie cinétique des gaz », *Bulletin des séances de la Société française de physique*; Henri Poincaré (1906d), « Réflexions sur la

Cette vague a été précédée d'un regain d'intérêt pour la théorie cinétique auprès des physiciens français. La première traduction française du premier volume *Leçons sur la théorie des gaz* de Boltzmann date de 1902, et celle du second volume, de 1905, signalant ainsi la période énergétique révolue. Paul Langevin a défendu la méthode statistique pour la théorie des gaz dans une note présentée à l'Académie des sciences. « La seule méthode rigoureuse en théorie cinétique des gaz est la méthode dynamique introduite par Maxwell et développée par Kirschhoff, à laquelle M. Boltzmann consacre une partie importante de ses *Leçons sur la théorie des gaz* », une méthode « concrète, tangible » qui permet, « sans trop d'efforts analytiques, de pénétrer dans le détail des phénomènes de diffusion [...] où l'on évalue le nombre total des chocs, en faisant jouer à tous le même rôle, que la perturbation apportée par eux dans le mouvement des molécules soit importante ou légère[51]. » Le 26 novembre de la même année, la Société française de philosophie invitait Jean Perrin à exposer sur les principes de la thermodynamique du point de vue atomiste[52]. Enfin, en janvier 1906, Emile Borel publiait un article important en la matière[53].

Du côté de l'astronomie, l'histoire remonte un peu plus loin. En 1904 au *Congress of Art and Science* de Saint-Louis, pendant que Poincaré faisait l'état des lieux de la physique, Boltzmann critiquait l'énergétique et défendait l'atomisme. En outre, le physicien américain Robert Simpson Woodward évoquait, dans son discours plénier pour la section « Physical science », comme l'un des progrès marquants des sciences physiques du XIXe siècle, une publication de Lord Kelvin de 1901 dans laquelle il était question de soumettre quelques faits astronomiques à la loi de la gravitation et d'en tirer des conséquences à portée cosmique[54]. Au même moment, Kapteyn faisait de son côté une intervention marquante sur ce qu'il appelle le « problème sidéral », à savoir la constitution de la Voie lactée et d'autres systèmes stellaires, pour lequel il montrait l'insuffisance de la mécanique newtonienne et la nécessité d'avoir recours à la méthode statistique[55]. Il rapportait sur la distribution des étoiles et de leurs

théorie cinétique des gaz », *Journal de physique théorique et appliquée*, 5, repris dans *Œuvres* IX, p. 587-619.

51. « Sur une formule fondamentale de la théorie cinétique », *Comptes rendus de l'Académie des sciences* 140, 1905.

52. Jean Perrin (1906), « Le contenu essentiel des principes de la thermodynamique », *Bulletin de la Société française de Philosophie*, 6, 3.

53. Émile Borel (1906), « Sur les principes de la théorie cinétique des gaz », *Annales scientifiques de l'École normale supérieure. 3e série*, 23.

54. Robert Simpson Woodward (1906), « The Unity of Physical Science », in *Congress of Arts and Science : Universal Exposition*, sous la dir. d'Howard J. Rogers, St Louis, 1904, Boston et New York : Houghton, Mifflin et Co., t. 4, p. 8.

55. Jacobus Cornelius Kapteyn (1906), « Statistical Methods in Stellar Astronomy », in *Congress of Arts and Science : Universal Exposition*, sous la dir. d'Howard J. Rogers, St

mouvements qui se caractériseraient selon lui par les « courants d'étoiles » (« *star streams* »)[56].

2.1 Sources directes

« Idée grandiose » de Kelvin

En pleine préparation de la publication de ses conférences données à Baltimore en 1884, Kelvin publie un article dans *Philosophical Magazine*, en guise d'« amplification » de la seizième conférence de ses « Baltimore Lectures »[57]. L'article sera suivi, au mois d'octobre de la même année, d'un discours fait à la British Association puis publié en 1902 encore dans *Philosophical Magazine*, avant d'être repris en appendice de *Baltimore Lectures* en 1904[58]. Pourtant, ces articles seront omis dans les *Mathematical and Physical Papers*, ainsi que dans la bibliographie de ses publications figurant dans *The Life of William Thomson*, la première biographie du physicien écrite par Silvanus Thompson. Ce serait là, d'après E. Harrison, une preuve de l'indifférence à ce problème, sinon au problème cosmologique en général, « totalement négligé lors des discussions postérieures du 'paradoxe d'Olbers'[59] ».

Louis, 1904, Boston et New York : Houghton, Mifflin et Co., t. 4, p. 396.

56. Il y a lieu de rappeler que l'astronome Pierre Salet a déjà publié un article sur le problème de la distribution des étoiles en 1902 dans *Bulletin astronomique*, revue d'astronomie plus savante que vulgarisatrice (comparée, si l'on veut, au *Bulletin de la Société astronomique de France*). L'article est bien documenté et fondé sur une série de calculs techniques, mais apparemment passé sous silence à l'époque. Il a ceci de particulier qu'il aborde le problème sous un angle à la fois optique que gravitationnel (« Cette question du nombre des étoiles est grave, tant au point de vue cosmogonique qu'à celui de l'attraction qu'elles exercent sur le Soleil. »), pour conclure par la thèse infinitiste (« Au point de vue mathématique, il n'y a donc pas plus de raison de dire que le nombre des étoiles n'est pas infini parce que la somme de leurs éclats apparents est petite, que de considérer comme limité le nombre de termes d'une série parce qu'elle est convergente. ») Pierre Salet (1902), « L'attraction dans l'univers stellaire », *Bulletin Astronomique, Serie I*, 19, p. 233.

57. « This is an amplification of Lecture XIV., Baltimore, Oct. 15, 1884, now being prepared for print in a volume on Molecular Dynamics and the Wave Theory of Light, which I hope may be published within a year from the present time. » William Thomson (1901), « On Ether and Gravitational Matter through Infinite Space », *Philosophical Magazine*, 2, 8, p. 161.

Une section de l'article (§ 18) a été traduite en français et publié sous le titre « Sur l'éther et la matière gravitationnelle dans l'univers infini » dans Harrison, *Le noir de la nuit*.

58. William Thomson (1904), « On the Clustering of Gravitational Matter in Any Part of the Universe », in *Baltimore Lectures on Molecular Dynamics and the Wave Theory of Light*, London : Cambridge University Press.

59. Harrison, *Le noir de la nuit*, p. 183.

Pour cette partie de l'œuvre du physicien, relativement peu étudiée, voir les travaux d'Edward Harrison, dont Edward Harrison (1986), « Kelvin on an old, celebrated hypothesis », *Nature*, 322, 6078 ; Harrison, *Le noir de la nuit*. Voir aussi Norton, « The Cosmological Woes of Newtonian Cosmology », pp. 283-285.

Il est intéressant de noter que la question portait initialement sur l'*éther*, en particulier sur son rapport avec la matière et l'espace [60]. Comme la plupart des physiciens de son temps, Kelvin considère l'éther comme médium responsable de la transmission des ondes électromagnétiques, ayant pour fonction de relier les sources de la lumière (des étoiles en l'occurrence), ainsi que de remplir l'espace qui sépare ces sources, sinon tout l'univers, pour le moins « notre univers (*our universe*) » qui n'occupe en réalité qu'une partie de tout l'espace dans lequel il y a des matières pondérables [61]. Quelle est sa nature ? Est-elle une matière ou non ?

D'après Kelvin, l'éther est bel et bien une matière, mais pas comme les autres matières qui sont pondérables et gravitationnelles. Si, 1° l'éther s'étendait jusqu'à remplir tout l'espace, 2° qu'il était soumis à la gravitation, et 3° incompressible, c'est-à-dire résistant à l'action des forces compressives ou dilatoires, le centre de l'univers serait soumis à la gravitation d'une quantité hors norme due à toute la matière, y compris l'éther, et ce ne serait pas sans conséquence sur l'état d'équilibre à l'échelle cosmique. Mais il en serait autrement si l'éther ne ressemblait pas à une « pondérable » : il serait incapable d'exercer une action semblable à la gravitation, et aucune de ses parties ne serait soumise à la gravitation ni à d'autres actions des corps pondérables.

Contrairement à Baltimore Lecture de 1884 et encore à sa reprise de 1899, dont une bonne partie était consacrée au problème de l'éther, Kelvin se concentre sur la contrepartie de ce dernier qu'est la matière, notamment sur la distribution de la *matière* ou le comportement de l'ensemble de la matière sous l'influence de la gravitation. Il est amené à attribuer une limite à la dimension et à la densité moyenne de l'univers, par deux raisonnements : l'un gravitationnel et l'autre, optique.

Soit notre univers observable, une sphère à rayon r, r étant la distance des étoiles les plus lointaines, à savoir 3.09×10^{16} km ou 10^6 UA. Supposons que toutes les étoiles se ressemblent ou presque les unes des autres, et qu'elles sont uniformément distribuées sur l'ensemble de la sphère. Kelvin suppose que l'univers compte un milliard d'étoiles et sa masse totale M, égale à celle d'un milliard (10^9) de soleils [62]. Un corps qui a été initialement situé aux confins de la sphère tombe vers le centre. La vitesse qu'il acquerra après l'épuisement total

60. Thomson, « On the Clustering of Gravitational Matter in Any Part of the Universe », pp. 532-533.

61. Thomson, *cit.*, p. 534.

62. Newcomb donnait 30 à 50 millions au nombre des étoiles « télescopiques » et Young, 100 millions. Si Kelvin parie pour un chiffre qui dépasse l'estimation disponible à l'époque, c'est pour faciliter le calcul, mais aussi pour prendre en compte des étoiles inobservées soit par qu'elles ne sont pas lumineuses soit parce qu'elles sont trop lointaines. Thomson, *cit.*, p. 536.

(« *exhaustion* ») de l'énergie gravitationnelle en énergie cinétique est de 50,4 km/sec, chiffre qui est à peu près conforme aux observations des étoiles visibles de l'époque [63]. En outre, d'après le théorème de Green, la force résultante est plus grande quand cette masse est distribuée de façon non uniforme (concentrée sur le centre) que de façon uniforme (homogène). Si M était plus grande et, de plus, concentrée sur le centre, la vitesse moyenne des étoiles aurait été encore plus grande. On peut donc raisonnablement constater la distribution uniforme de la masse égale à un milliard de masses solaires sur la sphère de rayon de 3.09×10^{16} km [64]. Telle est la considération gravitationnelle.

Du point de vue *optique*, il est question d'examiner « une vieille et célèbre hypothèse », à savoir :

> si nous pouvions voir suffisamment loin dans l'espace, le ciel entier nous apparaitrait tapissé de disques stellaires ayant peut-être tout l'éclat de notre Soleil, et [...] la différence de luminosité entre le disque solaire et la totalité du ciel nocturne s'explique par l'absorption subie par la lumière en voyageant dans l'espace [65].

Kelvin prend appui sur quelques hypothèses sous-jacentes. Celle sur la distribution uniforme des étoiles en est une. Il est aussi supposé que les étoiles sont toutes égales au Soleil sans exception quant à l'éclat et à la dimension, deux facteurs majeurs de l'observabilité. Ceci assume un grand écart avec la réalité (une grande majorité des étoiles qui comptent des milliers de millions seraient sombres, et c'est cela qui explique le noir de la nuit), sans pour autant empêcher de calculer la quantité totale de la lumière émise par les étoiles de tout l'univers [66]. Prenant le nombre d'étoiles par unité de volume (n), le rayon de chaque étoile (a) ainsi que le nombre total (N) des étoiles distribuées dans une surface sphérique de rayon r ($N = n \times \frac{4\pi}{3} r^3$), on peut calculer l'éclat de la totalité du ciel nocturne par rapport à celui du disque solaire, α :

$$\alpha = \frac{3N}{4}(\frac{a}{r})^2$$

63. Thomson, *cit.*, p. 534. Le calcul détaillé se trouve dans Thomson, « On Ether and Gravitational Matter through Infinite Space », p. 170.

64. Thomson, « On the Clustering of Gravitational Matter in Any Part of the Universe », p. 534. L'article de *Philosophical Transactions* contient trois tableaux des mouvements des étoiles plus ou moins récents : du Bureau des longitudes, de Lick Observatory, établi par W. Campbell, et Potsdam Observatory. Les deux premiers datent de 1901, le dernier, de 1889–1891.

65. Thomson, « On Ether and Gravitational Matter through Infinite Space », § 19, p. 175. Phrase citée d'après Harrison, *Le noir de la nuit*, p. 184. Il s'agit de l'hypothèse d'Olbers, sans qu'elle soit explicitée ni le nom de l'astronome allemand ne soit mentionné. Rappelons encore une fois que c'est H. Bondi qui est le premier à associer le premier le nom d'Olbers à cette hypothèse, au nom du « paradoxe ».

66. Pour le calcul détaillé qui dérive la formule de α, voir Thomson, « On Ether and Gravitational Matter through Infinite Space », pp. 174-175.

Reprenant les données précédentes relatives au nombre total d'étoiles pour N $N = 10^9$, le rayon de 3.09×10^{16} km) pour r, ainsi que le rayon du Soleil pour a ($a = 7 \times 10^5 km$), Kelvin obtient une α égale à 3.87×10^{-13}. S'il en est ainsi, il n'y rien de « paradoxal » dans notre nuit noire : le ciel nocturne ne peut avoir qu'une luminosité extrêmement faible, même quand il est éclairé par toutes les étoiles de l'univers. A quoi faut-il ajouter : la lumière ne peut être transmise immédiatement sa vitesse étant finie ; elle prend un temps pour parcourir d'une étoile pour arriver éclairer notre planète. Qui plus est, les étoiles ne sont pas éternelles, leur source énergique étant limitée, comme Kelvin l'avait prouvé lui-même par « notre dynamique irréfutable » qu'est la thermodynamique :

> Nous disposons d'une dynamique irréfutable qui prouve que la durée de vie de notre Soleil en tant que corps lumineux correspond à un nombre de millions d'années tout à fait modeste, probablement inférieur à 50, peut-être compris entre 50 et 100. Soyons généreux et accordons à chacune de nos étoiles une durée de vie lumineuse de 100 millions années [67].

On sait désormais que l'espérance de vie d'une étoile dépasse bien loin de 100 millions, mais cela n'affaiblit pas la pertinence de la réponse de Kelvin à la « vieille et célèbre hypothèse ». Au lieu d'avoir recours à une hypothèse *ad hoc* comme celle d'absorption de la lumière, Kelvin fait appel à deux faits bien connus déjà depuis longtemps et finalement assez simples : les étoiles ne brillent pas éternellement d'une part, et d'autre part, la lumière se transmet à une vitesse limitée. Plus une étoile est lointaine, plus sa lumière voyage longtemps, plus tôt elle a dû avoir commencé à rayonner, donc plus elle est âgée. Toutes les étoiles ne brillent pas en même temps, pas plus que toutes lumières n'atteignent par la Terre toutes en même temps. Certaines sont probablement trop lointaines pour nous faire parvenir leur lumière. Dès lors se trouve une explication de la visibilité de l'univers réduite, avec sa limite si considérable, et, en fin de compte, du noir de la nuit. « Ainsi, si toutes les étoiles de notre immense sphère ont commencé de briller en même temps [...] la lumière atteignant la Terre à chaque instant ne proviendrait au plus que d'une quantité d'étoiles extrêmement limitée [68]. » Si l'univers ne fait pas briller notre nuit étoilée autant que le jour, ce n'est pas parce qu'il n'est pas infini ; la nuit peut rester noire même si l'univers est infini dans l'espace et peut-être dans le temps, avec une infinité d'étoiles qui le peuplent.

67. Thomson, *cit.*, p. 177, phrase citée d'après Harrison, *Le noir de la nuit*, p. 187.
68. Thomson, « On Ether and Gravitational Matter through Infinite Space », p. 177, toujours d'après la traduction in Harrison, *Le noir de la nuit*, p. 187.

« Problème sidéral » de Kapteyn

Ce que l'astronomie du XIXe siècle est au mouvement de notre système solaire, sera, l'astronomie du XXe le sera à l'arrangement et au mouvement de l'univers stellaire, avec des armes à sa disposition que sont la photographie et la spectroscopie, dit Kapteyn dans sa conférence à Saint-Louis. Une fois ouverte la voie au monde stellaire par Herschel, les astronomes entreprennent d'établir la constitution (« l'arrangement ») de la Voie lactée et/ou des systèmes stellaires avec peu de données à leur disposition (seulement quelques mesures de parallaxes des étoiles relativement proches, faute de techniques fondamentales pour mesure de position exacte et de luminosité absolue) – problème qualifié de « sidéral » (« *sidereal problem* »)[69].

On doit à Kapteyn une importante découverte : les galaxies ne sont pas distribuées par hasard, surtout leurs mouvements. Il annonce justement en 1904 l'existence d'une direction privilégiée dans les mouvements stellaires. Mais comment expliquer l'existence de tels mouvements préférés ? Kapteyn présume que la Voie lactée a pour origine la rencontre des deux courants d'étoiles. Mais une telle rencontre serait-elle probable dans notre univers sidéral ?

2.2 L'hypothèse de Kelvin lue par Poincaré

Quand Lord Kelvin est mort en 1908, c'est à Poincaré, qui connait bien ses travaux, de rédiger la notice nécrologique adressée aux physiciens français.

> Quittons maintenant cette Terre, notre système solaire lui-même et jetons un coup d'œil sur l'ensemble de l'univers. [...] Supposons qu'à l'origine cette matière soit uniformément distribuée sur une sphère que la lumière mettrait 6.000 ans à traverser ; une molécule placée à l'origine en repos à la surface acquerrait en quelques millions d'années des vitesses énormes, et la comparaison de ces vitesses avec celles que nous observons nous force à limiter les dimensions et la densité moyenne de l'univers ; elle nous apprend en même temps que l'éther n'obéit pas à la gravitation ; et en creusant cette idée grandiose de Thomson, on apercevra la Voie-Lactée [sic] se comportant comme font les gaz dans la théorie cinétique, sauf que les atomes y sont remplacés par des soleils[70].

C'est un fait désormais bien établi, accepté en tout cas par « un grand nombre de physiciens modernes », que les gaz sont constitués d'« une multitude innombrable de molécules qui, animées de grandes vitesses, se croisent

69. Kapteyn, « Statistical Methods in Stellar Astronomy », p. 396. La méthode des Céphéides par exemple ne sera introduite qu'en 1912, par Henrietta Leavitt. Voir l'Appendice.
70. Henri Poincaré (1908a), « Lord Kelvin », *Lumière électrique (2e série)*, 1, 5, p. 144.

et s'entrecroisent dans tous les sens[71] ». Puisque les molécules sont petites et le récipient qui les contient assez grand, les forces intermoléculaires sont suffisamment négligeables ; chacune d'elles poursuit son mouvement rectiligne et uniforme jusqu'à ce qu'elle rencontre d'autres molécules et connaisse une déviation sur sa trajectoire. Tout ceci exactement de la même manière que le *choc élastique*, qu'on a coutume de représenter par des billes et dont on peut fixer certaines règles sans avoir besoin de prendre en compte des *forces* qui agissent entre elles. Encore faut-il préciser qu'« il n'y a pas lieu d'entendre ce mot *choc* dans son sens habituel ; il n'est pas nécessaire que les deux molécules viennent en contact, il suffit qu'elles approchent assez l'une de l'autre pour que leurs attractions mutuelles deviennent sensibles[72] », afin que s'appliquent les lois habituelles du choc à ces molécules.

Pourtant, ce qu'on observe en réalité, ce n'est qu'un « chaos inextricable devant lequel l'analyste doit reculer ». Elles sont aussi innombrables qu'inobservables, susceptibles donc d'être soumises à « la loi des grands nombres » qui, « dans le désordre extrême [...] rétablit une sorte d'ordre moyen où l'esprit peut se reprendre ». Lors même que les mouvements moléculaires sont initialement répartis de façon extrêmement variée en direction et en vitesse, mais « cette variation même est soumise à une loi, dite loi de Maxwell ».

Reprise et approfondissement de l'analogie

Après un exposé sur la théorie cinétique des gaz, Poincaré compare quelques faits connus sur la Voie lactée avec les propriétés physiques des gaz et restitue les résultats de Kelvin, à l'appui de quelques suppositions supplémentaires. L'analogie se justifie par le fait qu'il existe dans notre galaxie un grand nombre d'étoiles en mouvement à grande vitesse, dont les interactions gravitationnelles sont négligeables à cause de la distance entre elles, sans pour autant s'empêcher d'influencer les unes sur les autres au point de faire dévier les trajectoires (autrement toujours rectilignes). Et ceci de façon à s'assimiler aux molécules gazeuses confinées dans un récipient.

> [L]a théorie cinétique des gaz sera pour l'astronome un modèle qu'il ne devra pas suivre aveuglément, mais dont il pourra utilement s'inspirer. Jusqu'à présent, la Mécanique céleste ne s'est attaquée qu'au système solaire, ou à quelques systèmes d'étoiles doubles. Devant cet ensemble présenté par la Voie lactée, ou les amas d'étoiles, ou les nébuleuses résolubles, elle reculait, parce qu'elle n'y voyait que le chaos. Mais la Voie Lactée n'est pas plus compliquée qu'un gaz ; les méthodes statis-

71. *SM*, pp. 273-274.
72. *SM*, p. 274.

tiques fondées sur le calcul des probabilités applicables à celui-ci, le sont aussi à celle-là [73].

L'insuffisance observationnelle est telle que la conception même de la Voie lactée reste obscure. La théorie cinétique permet de dépasser justement la limite imposée par l'observation : les étoiles proches, dont on peut mesurer les vitesses relativement exactes, permettent de calculer la valeur moyenne de l'ensemble d'étoiles, ce qui correspond à la température dans une bulle gazeuse. Et de cette « température » se déduit la dimension de la galaxie ; tout comme dans un volume de gaz. Avec quelques suppositions simplificatrices : notre gaz fictif est supposé sphérique et homogène où les masses sont uniformément distribuées. En outre, nous nous en trouvons au centre, ce qui « privilégie » notre place à observer les vitesses propres des étoiles qui décrivent des trajectoires elliptiques autour de ce même centre.

Le raisonnement consiste à prendre la Voie lactée comme une masse abandonnée dans le vide, à l'intérieur de laquelle les éléments s'attirent d'après la loi de Newton. La gravitation augmente vers le centre, et la densité et la pression aussi, celle-ci étant nulle à la superficie. La vitesse centrale, proportionnelle au rayon de la sphère (r) et à la racine carrée de sa densité ($\sqrt{\rho}$), peut s'écrire comme suit [74] :

$$v \propto r\sqrt{\rho}$$

Imaginons une massez gazeuse sphérique, dont la masse est égale à celle du Soleil et le rayon correspondant à celui de l'orbite terrestre r_0 (r_0=1 UA). Un corps situé à la surface aurait une vitesse égale à celle de la Terre v_0. Si une masse pareille était répartie au rayon $r_1 (r_1 = 10^6\ UA = 10^6\ r_0)$, qui est la distance des étoiles les plus proches, la densité de ce volume (ρ_1) doit être 10^{18} fois plus petite que le système solaire : $\rho_1 = 10^{-18}\rho_0 (\because\ \rho \propto r^{-3})$. Or, les observations nous apprennent que les vitesses des étoiles proches sont du même ordre que celle de la Terre ($v_0 = v_1$), si bien que :

$$r_0\sqrt{\rho_0} = r_1\sqrt{\rho_1}$$

$$r_1 = r_0\sqrt{\frac{\rho_0}{\rho_1}}$$

Par conséquent, $r_1 = 10^9 r_0$. En d'autres termes, le rayon de la Voie lactée est 10^9 fois plus grand que celui du système solaire, soit 10^9 UA. Si les étoiles sont également espacées à la distance de 10^6 UA, dans une sphère au rayon de 10^9 UA ($\approx 10^4$ a.l.), soit 10^3 fois plus grand que 10^6 UA, le nombre total

73. *SM*, pp. 275-276.
74. *SM*, pp. 278-279. Les formulations sont de moi.

des étoiles atteindrait $(10^3)^3$, soit un milliard [75]. On retrouve ainsi le même résultat que Kelvin avait dégagé de son premier raisonnement, correspondant également au chiffre donné par les observations télescopiques de l'époque [76].

Poincaré poursuit son raisonnement. Cette masse assimilée à la notre galaxie, elle ressemble plus à des gaz *monoatomiques*, qu'à des polyatomiques comme l'air. Ceci ne tient pas tant à la Voie lactée elle-même qu'à notre point de vue : prenant un point de vue macroscopique, nous négligeons volontiers la variété des étoiles et de leurs sous-systèmes. En effet, « aux yeux d'un géant pour qui nos soleils seraient pour nous nos atomes », les planètes seraient « de bien petits personnages » ; les systèmes d'étoiles doubles, quoiqu'elles soient beaucoup plus grandes que les planètes, ne présenteraient pas de différence avec ceux qui sont « uniques ». La précision, si elle ne change finalement pas grand-chose au résultat du calcul, n'est pourtant pas qu'un détail, puisque la loi adiabatique peut être modifiée selon les composantes du gaz : elle s'écrit comme $pv^{C/c} = nRT$, où le rapport entre la chaleur spécifique à pression constante nommée (C), et celle à volume constant (c) correspond à 1,42 pour le polyatomique comme l'air, et 1,66 pour le monoatomique comme l'hélium, l'argon ou bien même la vapeur de mercure [77].

Et pourtant, compte tenu de la densité extrêmement faible de la Voie lactée, ne ressemble-t-elle pas, moins au gaz ordinaire qu'à la « matière radiante », appelée aussi « quatrième état de matière [78] » ? Pour trancher la question, Poincaré évoque la notion de libre parcours [79]. Le libre parcours d'un fluide se définit comme la distance moyenne qu'une molécule puisse parcourir « librement », sans rencontrer d'autres molécules ou passer près d'eux de façon à avoir une déviation dans son mouvement. Cette valeur dépend de la densité du fluide d'une part, et d'autre part, du récipient qui l'enferme : plus le fluide est dense, moins ses molécules sont « libre » à continuer leurs trajectoires. Dans le fluide d'une densité si faible que le libre parcours est plus grand que la dimension du récipient, les molécules auraient tendance à échapper à ce dernier jusqu'à devenir « radiants ». Appliqué à la Voie lactée, le libre parcours peut se traduire par la chance d'une étoile de poursuivre la trajectoire sans rencontrer

75. Le résultat est annoncé un peu trop rapidement, probablement par l'intention de Poincaré pour ne pas peiner ses lecteurs à suivre son calcul. C'est dans les *Leçons* qu'on retrouvera les détails. Voir *infra*, Clôture.

76. D'après les estimations actuelles, la Voie lactée s'étend à 10^5 a.l., soit dix fois plus grande, contenant 10^{11} d'étoiles, soit cents fois plus peuplée (et l'univers contient autant de galaxies). L'écart s'explique par l'estimation erronée de la vitesse moyenne des mouvements propres, un peu rapidement identifiée à la vitesse de la Terre, ainsi que la supposition du Soleil situé au centre de l'univers.

77. *SM*, pp. 277-278. Sur la loi adiabatique, voir Poincaré, *Thermodynamique*, pp. 85-86.

78. *SM*, p. 280.

79. *SM*, pp. 280-281.

au passage une autre étoile. Si l'on suppose que chacune d'un milliard d'étoiles est enveloppée par « une sphère de garde » d'un rayon égal à la distance qui la sépare d'une autre étoile (10^6 UA), la partie recouverte par la totalité des étoiles représente une seize millième sur la sphère céleste totale du rayon de 10^9 UA.

De la figure à l'âge. Considération dynamique et transposition cosmogonique

Kelvin avait adopté le modèle sphérique sans aucune difficulté. Il remontre bien loin, rappelons-le, à Platon et Aristote chez qui la sphéricité est prise pour le fondement même de la cosmologie. Si le modèle perd son sens lors de la géométrisation et l'infinitisation de l'espace, il se pose, non plus comme un *fondement* (ou « théorème »), mais comme un *problème* (et aussi une solution à ce problème) de l'hydrodynamique dont les applications se trouvent en astronomie, en rapport à la figure de la Terre, au nom de la figure d'équilibre d'une masse fluide en rotation : si la Terre est un ellipsoïde, ce n'est pas parce qu'il est une figure parfaite ou imparfaite, mais parce que telle est la conséquence des lois de la mécanique.

Poincaré propose d'appliquer ce problème à la Voie lactée à l'image d'une masse gazeuse adiabatique en équilibre gravitationnel ou en voie de le devenir. Il est tout à fait probable que cette bulle de points matériels-lumineux soit sphérique, mais il peut y avoir d'autres figures. Il existe notamment des amas d'étoiles ou des nébuleuses, par exemple, de forme *globulaire*, comme W. Herschel les avait déjà observés et étudiés. Selon Herschel, les étoiles sont uniformément distribuées dans les amas ; chaque amas forme une figure sphérique qui est, encore, celle que va prendre une masse gazeuse homogène. Dans un amas chaque étoile décrit une trajectoire elliptique, tout en participant en bloc au même mouvement de l'ensemble, à savoir en rotation *rigide* : plus les étoiles s'éloignent du périphérique, plus elles sont rapides. Au bout d'un certain temps, elles reprennent leurs positions initiales et tout l'amas devient stable et tend à se condenser vers le centre, pour devenir sphérique. Tout cela permet de comparer la Voie lactée avec un gaz en équilibre adiabatique.

Mais il est une deuxième figure possible, qui parait encore plus probable : un disque aplati [80]. La dimension de la Voie lactée a été dérivée à partir de la supposition que les vitesses propres des étoiles sont comparables à celle de notre Terre. Or, s'il en est ainsi, toutes les étoiles n'auront plus les mêmes mouvements : les corps tombant depuis la surface vers le centre n'auront pas

80. *SM*, p. 284.

la même vitesse selon les cas ; ils s'accéléreront moins s'ils partent des pôles que de l'équateur, parce qu'ils auront plus de distance à parcourir jusqu'à arriver au centre. Lequel serait donc r_1, l'épaisseur, le rayon, ou bien entre les deux ? Quoi qu'il en soit, il reste deux possibilités. Premièrement, les étoiles circulent majoritairement et uniformément dans le sens parallèle du plan galactique. Dans ce cas, si la galaxie est en équilibre, cela ne durera pas longtemps, puisque, par les chocs interstellaires, les étoiles à vitesse perpendiculaire au plan galactique s'en écarteront et l'ensemble finira par prendre une forme sphérique, « la seule figure d'équilibre d'une masse gazeuse isolée ». Deuxièmement, s'il y a un aplatissement considérable, ceci implique une rotation relativement rapide. La raison en est que la densité de la Voie lactée est 10^{25} fois plus faible que celle du Soleil, ce qui donne, toujours selon l'équation $v \propto r\sqrt{\rho}$, une vitesse de rotation $\sqrt{10^{25}} = 10^{12}$ fois plus petite que notre étoile. Pourtant, une telle rotation n'est pas aussi lente qu'il ne parait du point de vue cosmologique, même assez rapide, « très rapide, presque trop rapide pour que l'équilibre stable soit possible [81]. »

Il reste encore une troisième figure possible, « qui est peut-être la plus semblable [82] » qu'est la *spirale*. Poincaré attire l'attention sur les apparences des nébuleuses spirales. Contrairement à d'autres types de nébuleuses, très probablement irrésolues, les nébuleuses spirales semblent formées des étoiles et indépendantes de notre galaxie, formant elles-mêmes « d'autres Voies lactées, étrangères à la nôtre [83] ». Elles ont ceci de particulier qu'elles sont toutes en rotation dans un sens déterminé, avec des rayons spiraux (« ailes ») courbés toujours dans le même sens, avec leurs apparences « trop régulières et trop constantes pour être dues au hasard [84] ». Dès lors, il n'est plus question d'assimiler ces nébuleuses à une masse fluide en repos ou en rotation uniforme, mais à un gaz en mouvement, ou bien le mouvement du gaz, composé de courants « intestins » – un tourbillon, dans lequel la force centrifuge l'emporte sur la force d'attraction à l'équateur de façon à perdre des molécules.

Chose curieuse, cette considération de l'équilibre statistique amène Poincaré à un problème *cosmogonique* qu'est la question de l'*âge* de la galaxie.

> Cette espèce d'équilibre statistique dont les gaz nous donnent le modèle ne peut s'établir qu'à la suite d'un grand nombre de chocs. Si ces chocs sont rares, il ne pourra se produire qu'après un temps très long ; si réellement la Voie Lactée (ou du moins les amas qui en font partie), si les nébuleuses ont atteint cet équilibre, c'est qu'elles sont très vieilles,

81. *SM*, p. 285.
82. *SM*, p. 286.
83. *SM*, p. 285.
84. *SM*, p. 287.

et nous aurons une limite inférieure de leur âge [85].

L'âge de la Voie lactée correspond donc au temps pour atteindre l'équilibre (limite supérieure), ainsi qu'au temps pour rester en équilibre une fois atteint avant de se déséquilibrer (limite inférieure). La viscosité d'un gaz dépend des fréquences et de l'« élasticité » des chocs (plus il est visqueux, moins diminue la force vive lors du choc) ; elle doit être extrêmement faible dans une galaxie ou une nébuleuse, compte tenu du peu de densité de l'espace et le peu de chance de rencontres interstellaires, « de sorte que le régime actuel pourra persister pendant un temps extrêmement long, pas toujours cependant, de sorte que nos Voies Lactées ne pourront vivre éternellement ni devenir infiniment vieilles [86] ». La formation d'une galaxie spirale ainsi que son éventuelle destruction exigent une durée colossale, et ceci semble aller à l'encontre de la théorie de l'évolution des étoiles de l'époque qui n'accordent qu'une existence relativement brève à ces « Soleils », par exemple cinquante millions d'années chez Kelvin.

> Faut-il croire que l'évolution de la Voie Lactée a commencé quand la matière était encore obscure ? Mais comment les étoiles qui la composent sont-elles arrivées toutes en même temps à l'âge adulte, âge qui doit si peu durer ? ou bien doivent-elles y arriver toutes successivement, et celles que nous voyons ne sont-elles qu'une faible minorité auprès de celles qui sont éteintes ou qui s'allumeront un jour ? Mais comment concilier cela avec ce que nous avons dit plus haut sur l'absence de matière obscure en proportion notable ? Devrons-nous abandonner l'une des deux hypothèses et laquelle ? Je me borne à signaler la difficulté sans prétendre la résoudre : je terminerai donc sur un grand point d'interrogation. Aussi bien est-il intéressant de poser des problèmes, même quand la solution en semble bien lointaine [87].

L'image de l'univers comme « fluide cosmique », « un gaz plutôt un fluide dont les molécules seraient les galaxies », est novatrice de tout point de vue, en ce qu'elle se distingue à la fois du cosmos grec et de l'espace géométrisé.

> [C]ar c'est une idée qui est en rupture, non seulement avec la notion pré-copernicienne du Cosmos, mais même en rupture totale avec cette image imparfaite, incomplète, énigmatique que l'astronomie du XIXe siècle essayait, sans succès, de se faire de l'Univers. C'est une image que sur laquelle nous, philosophes, pouvons méditer : cette régularité sans structure, cette espèce d'ordre, je ne sais pas si c'est l'extrême de l'ordre ou l'extrême du désordre – c'est difficile à dire – des éléments identiques les uns aux autres, des éléments qui se répètent indéfiniment et sans limite ; c'est quelque chose qui est très surprenant et qui est en

85. *SM*, p. 290.
86. *ibid.*
87. *SM*, p. 291.

contraste très net, en tout cas, avec la complexité locale que nous observons avec l'extrême différenciation, l'extrême complexité des structures locales [88].

3 Les gaz comme source de pensée cosmologique

La science et l'hypothèse consacre un chapitre au calcul des probabilités. Tiré d'un article de « Réflexions sur le calcul des probabilités », le chapitre se place dans la partie « La nature », à savoir la partie sur la physique, pas dans « La grandeur et le nombre », sur les mathématiques. C'est un placement original [89], si peu commun à l'époque que Poincaré l'éditeur sent le besoin d'une explication.

> On s'étonnera sans doute de trouver à cette place des réflexions sur le calcul des probabilités. Qu'a-t-il à faire avec la *méthode* des sciences physiques ?
> Et pourtant les questions que je vais soulever, sans les résoudre, se posent naturellement au philosophe qui veut réfléchir sur la physique. Et c'est à tel point que dans les deux chapitres précédents j'ai été amené plusieurs fois à prononcer les mots de probabilité et de hasard [90].

En effet, ces « mots de probabilité et de hasard » s'observent fréquemment dans les chapitres précédents du livre, sur le rapport entre la physique mathématique et la physique expérimentale. Poincaré soulignait constamment le rôle de l'expérience comme « unique source de la vérité » et attirait également l'attention sur les *méthodes* servant à en tirer quelque chose de significatif, comme une loi par exemple. Il n'était pourtant pas question des probabilités sinon concernant le caractère essentiellement probabiliste des lois.

> Ainsi, grâce à la généralisation, chaque fait observé nous en fait prévoir un grand nombre ; seulement nous ne devons pas oublier que le premier seul est certain, que tous les autres ne sont que probables. Si solidement assise que puisse nous paraitre une prévision, nous ne sommes jamais sûrs *absolument* que l'expérience ne la démentira pas. Mais la probabilité est souvent grande pour que pratiquement nous puissions nous en contenter. Mieux vaut prévoir sans certitude que de ne pas prévoir du tout [91].

88. Merleau-Ponty, *Sur la science cosmologique*, p. 98.
89. Brenner, *Les origines françaises de la philosophie des sciences*, p. 87.
90. *SH*, p. 191.
91. *SH*, p. 159. Passage partiellement repris dans le chapitre IX de *SH*, p. 191.

Dans « Conclusions générales » de *Science et méthode*, Poincaré revient sur le thème principal qu'est la *méthode*. Le premier chapitre de *Science et méthode* traite de la méthodologie et s'intitule « Le choix des faits ». Les faits sont toujours le point de départ de toute recherche [92]. Mais nous ne pouvons nous intéresser à tous les faits, parce que nous sommes des êtres finis ; nous sommes contraints à nous limiter à quelques faits particuliers, notamment ceux qui sont « à grand rendement », couvrant une large partie des faits et permettant d'ériger de nouvelles *lois* de par sa généralité et de prévoir de nouveaux faits. Les faits à grand rendement sont des *faits simples*, soit qu'ils le sont réellement par leur nature même, soit qu'ils ne le sont qu'en apparence dû à la complication des facteurs, de façon à obéir aux lois du hasard [93]. Ils ont ceci de particulier et de commun qu'ils font découvrir non seulement des lois, mais aussi des *liens* entre plusieurs faits apparemment indépendants les uns aux autres. C'est qui a lieu en « mécanique nouvelle » où se trouvent réunies la mécanique, l'optique et l'astronomie [94].

Le hasard, loin d'être négatif et contraire à la loi, c'set une notion « si indispensable et si insaisissable [95] », servant de fondement même à la science tant dans l'observation des faits que dans l'établissement des lois. Il sera montré que le hasard est loin d'être un négatif ou un défaut à la loi, mais sert de fondement même, au nom des « lois du hasard », à savoir celles du calcul des probabilités, tant pour les observations des faits particuliers que pour en établir des lois générales.

3.1 Loi du hasard et hasard de la loi. Statistique comme méthode et fondement

Question de méthode

Revenons à la question de la fabrique d'une loi. Tout commence avec l'expérience, mais l'expérience, seule, ne suffit évidemment pas ; elle doit être généralisée. La généralisation procède par approximation, par abstraction, ou bien, surtout, par *interpolation*.

> Si timide que l'on soit il faut bien que l'on interpole ; l'expérience ne nous donne qu'un certain nombre de points isolés il faut les réunir par un trait continu ; c'est là une véritable généralisation. Mais on fait plus, la courbe que l'on tracera passera entre les points observés et près de ces

92. *SM*, p. 13. Voir aussi p. 21–22.
93. *SM*, pp. 307-309.
94. *SM*, p. 310.
95. *SM*, p. 2.

points ; elle ne passera par ces points eux-mêmes. Ainsi on ne se borne pas à généraliser l'expérience, on la corrige ; et le physicien qui voudrait s'abstenir de ces corrections et se contenter vraiment de l'expérience toute nue serait forcé d'énoncer des lois bien extraordinaires [96].

Au lieu de décrire des faits donnés, l'on a tendance à en tirer des traits simples et continus, parfois même à corriger s'il y en a qui s'écartent de la régularité, sous prétexte de prendre en compte d'éventuelles erreurs dues à la limite de l'expérience. Une fois les faits interpolées et érigés en une loi, on peut considérer cette loi comme générale et porteuse des faits précédents et mais aussi à venir [97]. L'interpolation est « le cas le plus banal » de généralisation [98], mais elle n'a pas été simple ni évidente. Elle a été rendue possible par les efforts des physiciens de « résoudre le phénomène complexe donné directement par l'expérience en un nombre très grand de phénomènes élémentaires [...] de trois manières différentes », à savoir dans le temps, dans l'espace et par l'expérience [99].

La résolution dans le temps consiste à relier l'état d'un instant donné avec l'état de l'instant immédiatement antérieur (ou postérieur), « au lieu d'[en] embrasser dans son ensemble le développement progressif d'un phénomène ». Cette méthode repose sur une hypothèse selon laquelle « l'état actuel du monde ne dépend que du passé le plus proche, sans être directement influencé pour ainsi dire par le souvenir d'un passé lointain [100] ». C'est ainsi que le monde peut être soumis à des équations différentielles comme celles de Newton, au lieu de se borner à des équations finies comme celles de Kepler. La résolution dans l'espace, à savoir la décomposition spatiale du phénomène, donne lieu à « localise[r] dans une région très petite de l'espace » et à relier à une autre région qui lui est voisine. Elle ne va pas non plus sans cette hypothèse qu'« il n'y a pas d'action à distance ou du moins à grande distance [101]. »

La troisième manière de décomposer le phénomène fait appel à l'expérience elle-même [102], comme, par exemple, la décomposition spectroscopique de la lumière blanche en lumières monochromatiques ou polarisées. L'expérience sert de guide, certes, mais elle n'est pas, à elle seule, toujours un bon guide. Et pour cause : un élément décomposé ne peut-elle pas s'analyser encore en d'autres

96. *SH*, p. 159. Sur la représentation de la loi par une courbe, voir aussi *VS*, p. 177.
97. Sur ce point, on pourrait rapprocher Poincaré de Duhem, de sa thèse célèbre (thèse de Duhem-Quine) sur la sous-détermination des lois par rapport aux faits empiriques. A ceci près que, selon Duhem, un fait particulier peut être soumis à une infinité de lois, et une loi, à une infinité de faits, avec lequel Poincaré ne serait pas d'accord.
98. *SH*, p. 162.
99. *SH*, p. 167.
100. *SH*, p. 168.
101. *SH*, p. 169.
102. *SH*, p. 170.

éléments encore plus élémentaires ? En effet, une raie monochromatique, aussi fine soit-elle, peut se décomposer en d'autres raies spectrales encore plus fines. « Ici donc le passage à la limite nous aurait trompés ; il a fallu que l'esprit devançât l'expérience et, s'il l'a fait avec succès, c'est qu'il s'est laissé guider par l'instinct de la simplicité [103]. »

Un peu plus haut dans le même chapitre, Poincaré parlait de trois sortes d'hypothèses [104]. Il est des hypothèses « indifférentes » et des hypothèses « naturelles ». Souvent prises sous forme de constats ontologiques (ou métaphysiques), les hypothèses indifférentes servent d'hypothèses de travail, de point de départ à toute recherche en physique. Le physicien pourrait supposer que « la matière est continue » comme hypothèse de départ (ou de travail), laissant de côté la vérité de cet énoncé ; il pourrait sélectionner une autre hypothèse, celle de l'atomisme par exemple. Quelle que soit son hypothèse choisie, il aurait toujours le même résultat. Il n'en est pas de même pour les hypothèses naturelles :

> Il est difficile de ne pas supposer que l'influence des corps très éloignés est tout à fait négligeable, que les petits mouvements obéissent à une loi linéaire, que l'effet est une fonction continue de sa cause. J'en dirai autant des conditions imposées par la symétrie. Toutes ces hypothèses forment pour ainsi dire le fonds commun de toutes les théories de la physique mathématique. Ce sont les dernières que l'on doit abandonner [105].

Ces hypothèses sont-elles vérifiables à jamais ? La validité de cette hypothèse consiste à ce qu'elle ne soit pas démentie par l'expérience, mais aussi à ce que sans elle la science ne serait pas possible et que l'esprit nous guide à les choisir par son « instinct de la simplicité ».

> C'est là une hypothèse ; elle n'est pas toujours vraie, la loi de la gravitation nous le prouve ; il faut donc le soumettre à la vérification ; si elle est confirmée, même approximativement, elle est précieuse, car elle va nous permettre de faire de la physique mathématique au moins par approximations successives [106].

Qu'est-ce que c'est que « l'instinct de la simplicité » de l'esprit ? La simplicité est préférée à la complexité parce que c'est là « le seul terrain sur lequel nous pourrons élever l'édifice de nos généralisations [107] ». Mais si nous voulons avant tout que notre loi soit simple, mais nous n'attentons pas de cette loi

103. *SH*, p. 171.
104. *SH*, p. 166.
105. *ibid.*
106. *SH*, p. 169.
107. *SH*, p. 164.

d'être simple en soi. Encore faut-il distinguer la simplicité d'une *loi* de la simplicité d'un *phénomène* : une loi de la nature *simple* n'implique pas toujours que la nature soit simple elle-même. Nous avons pourtant tendance réaliste, les choses nous apparaissent telles qu'elles sont dans l'ordre réel, sans que quelque chose comme le malin génie de Descartes ne nous trompions.

> Nous avons vérifié une loi simple dans un grand nombre de cas particuliers ; nous nous refusons à admettre que cette rencontre, *si souvent répétée*, soit un *simple effet du hasard* et nous en concluons que la loi doit être *vraie dans le cas général*[108].

Même après avoir écarté la possibilité du malin génie, Descartes dut faire appel à Dieu pour fonder les vérités éternelles et la validité des lois de la nature. Le temps est révolu : sans malin génie ni Dieu, le « terrain » de la simplicité serait donc assez solide. La simplicité n'est pas seulement la question de notre croyance, mais se trouve dans la nature elle-même, « dû à la superposition d'un grand nombre de phénomènes élémentaires *tous semblables entre eux* »[109]. *Vérifiée* dans un grand nombre des cas et, par conséquent, *statistiquement fondée*, elle s'érige ainsi en un constat ontologique (ou métaphysique) ; résultat de la tendance de la matière à se combiner du semblable au semblable, jusqu'à s'homogénéiser, elle ne fait plus partie des hypothèses indifférentes contrairement à d'autres constats du même genre comme le continuisme et l'atomisme. « C'est donc grâce à l'homogénéité approchée de la matière étudiée par les physiciens que la physique mathématique a pu naître[110]. » Autrement dit, ce sont là les « *conditions* qui ont permis le développement de la physique mathématique ».

Fondement statistique des choses

Pourquoi préfère-t-on la simplicité à la complexité ? Mais qu'est-ce qu'on qualifie de simple ? Qu'est-ce qui est qualifié de simple ? Des faits simples, en astronomie, ce sont les phénomènes des astres : leurs distances sont suffisamment grandes qu'ils peuvent être traités comme des points matériels. En physique, les phénomènes élémentaires qui sont censés être composés des atomes tous semblables les uns aux autres. En somme, les faits simples sont des faits réguliers, fréquents, souvent différents dans la matière, mais semblables dans la forme, de façon à permettre de dégager « l'âme du fait », à savoir des *lois*[111]. Ce sont des faits « à grand rendement », qui condensent un grand nombre de

108. *ibid.* C'est moi qui souligne.
109. *SH*, p. 171.
110. *ibid.*
111. « Les faits seraient stériles s'il n'y avait des esprits capables de choisir entre eux en discernant ceux derrière lesquels il se cache quelque chose et de reconnaître ce qui se cache derrière, des esprits qui, sous le fait brut, sentiront l'âme du fait. » *SM*, p. 23.

faits sous une formule simple, de façon à contenir les faits passés et ceux qui sont à venir.

A quoi s'opposent les faits dits fortuits, généralement attribués au hasard et résistants à la prédiction et soumis au calcul des probabilités [112]. Prenons un cône qui repose sur sa pointe et sur le point de tomber, il est difficile de savoir de quel côté se fera cette chute, d'autant plus qu'une cause petite, à peine discernable (un souffle d'air par exemple), peut conduire à un effet qui s'écarte considérablement de la prédiction. Il en est de même en météorologie, qui constitue un deuxième cas d'équilibre instable où la moindre déstabilisation dans l'atmosphère peut donner naissance à un cyclone. La distribution des astéroïdes en est un autre exemple. Ici il ne s'agit pas de l'équilibre ou de la stabilité, mais de la force du temps, à savoir de l'accumulation de petites causes pendant un laps du temps pour avoir de grands effets.

Ne voit-on pas là une atteinte au déterminisme laplacien, en tout cas sous sa forme la plus stricte ? Cela n'implique-t-il pas l'imprédictibilité ? Qui plus est, à part petites différences dans les causes et grandes différences dans les effets, il faut avoir en vue les cas contraires, de grandes différences dans les causes et petites différences dans les effets. C'est ce que prévoit le second principe de la thermodynamique : deux corps qui n'ont pas la même température, une fois mis en contact, finissent par une température égale ; à partir de tels effets, nous pouvons dire des causes seulement ceci que les corps avaient de différentes températures, mais pas lequel était plus chaud que l'autre. Pourtant, d'après Poincaré, l'égalisation de température ne serait jamais parfaite. Et par conséquent, sans savoir certes quelle était la température initiale, nous pourrions toujours dire lequel était plus chaud que l'autre, si seulement nous avions un thermomètre plus puissant, aussi sensible que le démon de Maxwell. La rétrodiction ne nous serait pas tout à fait impossible.

Mais il est d'autres exemples du hasard où les causes sont petites et les effets, grands (ou plutôt il y a une grande différence entre causes et effets), avec cette différence que les causes sont complexes et les effets, simples, comme dans le cas de la théorie cinétique des gaz. Les molécules sont en choc sans cesse ; même si chaque choc ne donne qu'une déviation infiniment petite, les molécules sont tellement nombreuses et leurs chocs, tellement complexes, que leur ensemble s'approche d'une loi simple du hasard, plus précisément d'une distribution uniforme. D'autres exemples : la distribution des gouttes de pluie, le mouvement brownien (grains de poussière en suspension dans l'eau, dû à la complication des courants qui sillonnent le vase), le mélange des deux liquides ou bien même le battage des cartes de jeu (plus les cartes sont battues, plus

112. *SM*, p. 68, *sqq.*

elles sont uniformément distribuées, après avoir passé par de nombreuses permutations successives). Ces phénomènes ont ceci de commun que leurs causes sont assez compliquées et nombreuses pour avoir des effets régis par une distribution uniforme, c'est-à-dire le hasard.

Il existe un troisième exemple du hasard, sur lequel il insiste moins pour cette raison qu'elle peut se réduire aux deux premières, à savoir deux séries d'enchainement causal qui se télescopent.

> Notre faiblesse ne nous permet pas d'embrasser l'univers tout entier, et nous oblige à le découper en tranches. Nous cherchons à faire aussi peu artificiellement que possible, et néanmoins, il arrive, de temps en temps, que deux de ces tranches réagissent l'une sur l'autre. Les effets de cette action mutuelle nous paraissent alors dus au hasard [113].

Pour illustrer ce type de hasard, Cournot prend un exemple classique : un passant se fait tuer par la tuile tombée de la main d'un couvreur de toit. Nous ne pouvons pas voir que ces deux faits sont liés par qu'ils ne sont pas proches l'un de l'autre, mais c'est moins à cause de la nature de ces faits que celle de notre connaissance. Ces deux mondes, l'un du passant et l'autre du couvreur, s'ils sont tranchés de manière arbitrairement, ils font partie du même univers, de façon à se rapporter aux deux premiers cas de hasard (causes petites et grands effets ; causes complexes qui diffèrent considérablement des effets).

A la question de départ, « pourquoi le hasard obéit à des lois », Poincaré répond par deux cas. Dans un premier temps, les causes sont petites, les effets peuvent être grands, ceci conformément aux lois déterministes, sans pour autant impliquer nécessairement la prédictibilité, en raison de l'imprécision des données (ou, en termes modernes, la sensibilité aux conditions initiales). Dans un deuxième temps, les causes sont complexes et nombreuses, les effets sont uniformes, plus précisément distribués uniformément autour de la valeur moyenne, conformément à des lois simples dites du hasard. Il s'agit des « régularités statistiques qui proviennent de la moyennisation sur de grands ensembles », dira P. Cartier [114].

Si aucune observation ou expérience ne sont exemptes d'erreurs, on peut espérer que les erreurs se compensent dans les moyennes, à force d'essais et de temps, mais surtout par l'*effet du hasard*. Un mélange homogène dont les éléments ne se distinguent pas a littéralement plus de chance de se reproduire qu'un mélange hétérogène où les éléments ne distinguent plus les uns des autres et s'ordonnent de manière particulière. Il n'est pas impossible, mais *peu probable*, qu'un si grand nombre de cas soient tous arrangés de la même manière,

113. *SM*, p. 77.
114. Pierre Cartier (2006), « Le calcul des probabilités de Poincaré », in *L'héritage scientifique de Poincaré*, sous la dir. d'Éric Charpentier *et al.*, Paris : Belin, chap. 14, p. 306.

et de plus de manière si simple, sans être soumis à une loi ou une règle ; il est plus probable qu'il existe une loi derrière eux qu'ils aient lieu arbitrairement, mais finissent par devenir un phénomène régulier. Ainsi la loi du hasard est-elle promue au rang du principe transcendantal au sens kantien du terme, c'est-à-dire de la condition de possibilité pour la science.

3.2 Prédictibilité et irréversibilité. Entre l'univers et les gaz

Une fois établie, la loi permet de prédire, à moins que le système en question ne lui résiste. Dans ce dernier cas, de deux choses l'une : ou bien le système est intrinsèquement imprédictible, par sa nature même, dû à la complexité ou à l'instabilité qui lui est propre ; ou bien l'imprévisibilité n'est qu'apparente et accidentelle, dû au trop grand nombre de facteurs du système l'impossibilité de prendre en compte tous les facteurs du système, pour essentiellement déterministe qu'il soit.

> Qu'on me permette à ce propos une réflexion un peu étrangère à mon sujet. Un philosophe a dit il y a quelques années que l'avenir était déterminé par le passé, mais que le passé ne l'était pas par l'avenir ; ou, en d'autres termes, que de la connaissance du présent nous pouvions déduire celle de l'avenir, mais non celle du passé ; parce que, disait-il, une cause ne peut produire qu'un effet, tandis qu'un même effet peut être produit par plusieurs causes différentes. Il est clair qu'aucun savant ne peut souscrire à cette conclusion ; les lois de la nature lient l'antécédent au conséquent de telle sorte que l'antécédent est déterminé par le conséquent aussi bien que le conséquent par l'antécédent [115].

Le philosophe en question, c'est André Lalande, comme le dira Poincaré lui-même plus tard [116]. L'article de Lalande est le fruit d'un débat autour du déterminisme relancé à nouveau par Charles Dunan. Son article paru dans *Revue de métaphysique et de moral* suscite une polémique et attire l'attention des philosophes comme L. Brunchvicg et A. Lalande [117]. Lalande s'interroge

115. *SM*, p. 71.

116. « Je ne puis m'empêcher ici de me reporter à un article que j'ai écrit sur le hasard ; j'y rappelais l'opinion de M. Lalande qui avait dit, au contraire, que si l'avenir est déterminé par le passé, le passé ne l'est pas par l'avenir. D'après lui une cause ne peut produire qu'un effet, tandis qu'un même effet peut être produit par plusieurs causes différentes. » Henri Poincaré (1911a), « L'évolution des lois », *Scientia*, 9, 4, repris dans *DP*, p. 56.

117. Léon Brunschvicg (1899), « Essais de philosophie générale : de M. Charles Dunan », *Revue de métaphysique et de morale*, 7, 2 ; Charles Dunan (1899), « Déterminisme et contingence. Réponse à l'article de M. Brunschvicg », *Revue de métaphysique et de morale*, 7, 6, à quoi répond Lalande. Ch. Dunan fut un participant actif à la Société française de la philosophie et auteur d'une série d'articles parus en 1892 dans *Revue philosophique* intitulés « Le problème de la vie », cités par Bergson dans la préface de son *L'évolution créatrice* :

sur « le rapport de détermination de la cause à l'effet » ou de la prémisse à la conclusion [118]. Par exemple, dans l'équation $x+3 = 10$, il n'y a qu'une racine : le nombre 7. Mais il est impossible de « déduire », de cette racine, spécifiquement $x + 3 = 10$, parmi une infinité d'autres équations ayant pour racine le 7. Par conséquent, dit le philosophe : « les prémisses engendrent nécessairement la conséquence, mais non pas inversement [119]. » Il en est de même dans l'ordre physique : si l'on chauffe l'eau, elle bout ; mais il y a d'autres manières de faire bouillir l'eau, par l'augmentation de pression par exemple.

En somme, le même effet peut se produire par une infinité de causes différentes. Ceci s'explique, selon Lalande, par « ce qui est peut-être la loi la plus générale de la physique » qu'est la seconde loi de la thermodynamique. D'après cette loi, toute transformation est l'homogénéisation de l'hétérogénéité, l'égalisation de l'inégalité et l'indifférenciation de la différence : la différence dans les causes tend à s'effacer dans les effets ; un effet peut avoir plusieurs causes, mais une cause ne peut avoir qu'un seul effet. N'est-ce pas un renversement du schème habituel de la causalité et, ce qui revient au même, de la temporalité ?

> Il en résulte que tandis qu'on peut passer du présent à l'avenir par la raison, on ne peut passer du présent au passé que par la raison aidée de la mémoire, et que dans certains cas, des indéterminations complètes se présenteraient à l'entendement humain, fût-il infiniment puissant sans changer de nature [...] Il est donc vrai de dire avec Leibniz que le présent est gros de l'avenir, mais il est faux de dire qu'il résume le passé, si ce n'est avec l'aide de cet enregistrement qui est le souvenir ; il ne le résume pas logiquement [120].

La thèse de Lalande sur la non réciprocité de cause à effet ne heurte pas seulement au sens commun qui suppose l'indétermination de l'avenir et la détermination du passé. Le déterminisme stipule le passé et le futur sont liés au passé par les mêmes lois, ils sont donc tous déterminés. Or, d'après Lalande, le déterminisme ne signifie rien sinon ceci que seul le lien biunivoque entre le présent et l'avenir serait accessible à l'entendement humain. Le monde va dans le sens où il y a de moins en moins d'indéterminés. La cause porte en elle plus d'intelligibilité, plus de « déterminabilité » que l'effet, et *idem* pour le passé par rapport au présent. Or, pour un déterministe aussi ferme que Poincaré, ce n'est là qu'une erreur : il n'y a pas plus de difficulté de rétrodire que de

---

« L'idée de considérer la vie comme transcendante à la finalité aussi bien qu'au mécanisme est d'ailleurs loin d'être nouvelle. En particulier, on la trouvera exposée avec profondeur dans trois articles de M. Ch. Dunan sur Le problème de la vie (*Revue philosophique*, 1892). » Bergson, *L'évolution créatrice*, p. X.

118. André Lalande (1900), « Note sur l'indétermination », *Revue de métaphysique et de morale*, 8, p. 96.

119. *ibid.*

120. Lalande, *cit.*, pp. 96-97.

prédire, pas plus que de raisonner dans le sens de l'antécédent au conséquent ou du conséquent à l'antécédent. Et cette erreur, c'est encore au principe de Carnot de l'expliquer.

> Mais quelle a pu être l'origine de l'erreur de ce philosophe ? Nous savons qu'en vertu du principe de Carnot, les phénomènes sont irréversibles et que le monde tend vers l'uniformité. Quand deux corps de température différente sont en présence, le plus chaud de la chaleur au plus froid ; nous pouvons donc prévoir que les températures s'égaliseront. Mais une fois que les températures sont devenues égales, si on nous interroge sur l'état antérieur, que pourrons-nous répondre ? Nous dirons bien que l'un des corps était chaud et l'autre froid, mais nous ne pourrons pas deviner lequel des deux états autrefois le plus chaud [121].

En effet, le principe de Carnot permet de « prédire » l'état final du système de ces deux corps, par un raisonnement pareil à celui qui a donné lieu à la thèse de la mort thermique de l'univers. Est-il permis aussi de remonter à un état antérieur ? On pourrait constater tout au plus qu'il y a eu une différence de température, mais même cela reste une *possibilité* : il n'en est pas moins probable que le système ait toujours été en équilibre déjà pendant bien longtemps. Ce n'est plus la réversibilité qui est en question, mais la prédictibilité et/ou la rétrodictibilité : il est plus question de connaitre le passé ou le futur à partir du présent, que de savoir si le phénomène est ou non réversible en soi [122]. Ce sont des deux questions différentes, l'une épistémologique et l'autre ontologique qui sont liées l'une à l'autre, mais pas de manière simple : un phénomène peut être à la fois irréversible et prédictible ; ou bien réversible et en même temps imprédictible.

> Et cependant en réalité, les températures n'arrivent jamais à l'égalité parfaite. La différence des températures tend seulement vers zéro d'une façon asymptotique. Il arrive alors un moment où nos thermomètres sont impuissants à la déceler. Mais si nous avions des thermomètres mille fois, cent mille fois plus sensibles, nous reconnaîtrons qu'il subsiste encore une petite différence, et que l'un des corps est resté un peu plus chaud que l'autre ; et alors nous pourrions affirmer que c'est celui-là qui a été autrefois beaucoup plus chaud que l'autre [123].

Si « l'égalité parfaite » n'est pas réalisée (ce qui est toujours probable), nous dit Poincaré, il serait toujours possible de déceler la différence de température et sélectionner la partie plus chaude que l'autre et de « rétrodire » aussi l'état antérieur du système. La rétrodiction devient possible tant que si le principe

121. *SM*, pp. 71-72.
122. Sur ce point, voir les articles paru dans Dahan-Dalmédico *et al.*, *Chaos et déterminisme* ; Sara Franceschelli *et al.* (éd.) (2007), *Chaos & systèmes dynamiques. Eléments pour une épistémologie des systèmes dynamiques*, Paris : Hermann.
123. *SM*, p. 72.

de Carnot « ne tient pas jusqu'au bout », de façon à empêcher l'égalisation définitive. Encore faut-il faire recours, pour réaliser une telle différence, à des moyens purement idéaux, voire imaginaires, comme le démon de Maxwell ? Dans tous les cas, l'uniformisation finale n'aura lieu qu'asymptotiquement, et la différence initiale ne s'efface jamais définitivement. En conséquence de quoi il n'y a pas d'asymétrie entre causes et effets ; il est tout aussi possible de rétrodire du présent au passé que de prédire du présent au futur.

Revenons à la question du rapport entre la causalité et la temporalité. Il n'y a pas de lien nécessaire entre les deux ; la question est d'autant plus inextricable qu'il y a toujours l'univers derrière.

> Autre difficulté ; avons-nous bien le droit de parler de la cause d'un phénomène ? si toutes les parties de l'univers sont solidaires dans une certaine mesure, un phénomène quelconque ne sera pas l'effet d'une cause unique, mais la résultante de causes infiniment nombreuses ; il est, dit-on souvent, la conséquence de l'état de l'univers un instant auparavant [124].

Il arrive souvent à Poincaré de se servir de l'analogie comme une méthode privilégiée, de ses premiers travaux sur les équations différentielles, dont il trouve immédiatement une application au problème des trois corps, jusqu'à l'un de ses derniers sur la Voie lactée. C'est par la voie de l'analogie qu'un « fait de grand rendement » comme les gaz s'approche d'un tout autre domaine que le sien.

> Et quand les sciences n'ont pas de lien direct, elles s'éclairent encore mutuellement par l'*analogie*. Quand on a étudié les lois auxquelles obéissent les gaz, on savait qu'on s'attaquait à un fait de grand rendement ; et pourtant, on estimait encore ce rendement au-dessous de sa valeur, puisque les gaz sont, à un certain point de vue, l'image de la Voie Lactée, et que ces faits qui ne semblaient intéressants que pour le physicien, ouvriront bientôt des horizons nouveaux à l'Astronomie qui ne s'y attendait guère [125].

Cet ensemble d'étoiles sont lui-même en mouvement sans ordre particulier en apparence, au même titre qu'un ensemble des molécules gazeuses, susceptible donc d'être étudiées par la théorie cinétique. L'analogie conduit ainsi à dépasser la limite de l'observation et à déterminer les grandeurs comme le rayon, la figure et même l'âge de la Voie lactée. « C'est ainsi que, par une voie détournée, la méthode du physicien peut venir en aide à l'astronome [126]. » Par cette voie détournée, qu'est l'analogie, se renverse à nouveau le rapport

124. *VS*, p. 51.
125. *SM*, p. 311.
126. *SM*, p. 4.

de l'astronomie avec la physique. La séparation entre l'astronomie du monde céleste, digne d'une science mathématique, et la physique du monde terrestre, difficile sinon impossible à mathématiser, on n'en était plus là depuis déjà bien longtemps. Pourtant, il restera, pendant bien longtemps encore, à l'astronomie de servir de modèle et surtout de fournir des méthodes pour la physique, pas impossible, mais toujours difficile, à maitriser par les mathématiques.

En paraphrasant sans doute *L'œil et l'esprit* de son cousin philosophe Maurice, J. Merleau-Ponty parlait, à la fin de son ouvrage de 1965 sur la cosmologie moderne, du dilemme entre l'œil et l'esprit, à savoir l'observation et la théorie en cosmologie [127]. Il peut y avoir des objets célestes qui échappent à l'œil de l'observateur, notamment faute d'éclats, alors que l'esprit du théoricien n'a aucune difficulté de se représenter quelque chose comme « matière obscure ». L'œil prend appui exclusivement sur les phénomènes *optiques*, tandis que l'esprit, sur les phénomènes gravitationnels, pour lesquels l'« invisible » peut l'emporter sur le visible en raison d'une masse considérable. Il est aussi probable que l'esprit commette un abus de l'analogie et le résultat de son calcul soit surestimé. En fin de compte, rien n'oblige l'esprit à supposer « qu'il n'y a pas de matière obscure, ou du moins qu'il n'y en a pas tant que de matière brillante [128] », pas plus qu'à considérer toutes les étoiles comme des points *matériels* et à la fois *lumineux*, avec une même masse et une même luminosité. Il suffirait, pour l'esprit, que son calcul s'accorde avec l'estimation de l'œil, d'après ses observations au moins dans l'ordre de grandeur.

Quelques usages de l'univers. Conclusion provisoire de la seconde partie

Bien curieusement, Poincaré ne prête guère son attention à la question de mort thermique. Peut-être par son silence témoigne-t-il du sentiment établi des physiciens qui ont tendance à s'écarter de l'engouement du monde et à garder le scepticisme vis-à-vis de l'extension des principes physiques comme le principe de Carnot. E. Picard résumait ce sentiment, dans son compte rendu général de l'Exposition universelle de 1900 :

> Il est peut-être exagéré de déduire de principes expérimentaux, dont les vérifications sont bien limitées, des vues générales sur l'avenir de l'Uni-

127. Merleau-Ponty, *Cosmologie du XXe siècle*, le dernier chapitre intitulé « L' Univers pour l'œil et l'Univers pour l'esprit ». Voir aussi, sur le même problème qui s'observe chez W. Herschel, Merleau-Ponty, *La science de l'Univers à l'âge du positivisme*, p. 99, *sqq.*
128. *SM*, p. 280.

vers. Disons seulement que la Thermodynamique *autorise à penser que l'Univers marche fatalement dans un sens déterminé*[129].

Comment, en effet, appliquer les propriétés d'un système limité et isolé, de manière aussi simple et démesurée, à un système qui en est exactement l'opposé qu'est l'univers ? Duhem dira, de son côté, faisant référence à l'article de Picard : « Cette marche de l'Univers dans un sens déterminé parait échapper aux prises de toute explication mécanique[130]. » Selon Duhem, c'est un *fait* qui s'impose à tous les phénomènes physiques qu'il soit ou non explicable par la mécanique. Le physicien reviendra à cette « assimilation grandiose » qui tente d'étendre le domaine d'application du principe à tous les phénomènes, voire à l'univers, pour l'évoquer comme un exemple de l'usage d'« un principe de Physique théorique à l'appui d'une doctrine métaphysique », de façon à attribuer à ce principe « un sens qui n'est pas le sien, une valeur qui ne lui appartient pas[131] ». Qu'on en déduise la croissance de l'entropie vers un maximum, ou bien, inversement, qu'on y fonde la thèse créationniste, le raisonnement est voué à l'échec tant qu'il assimile l'univers à « un ensemble limité de corps, isolés dans un espace absolument vide de matière »[132].

Mais Duhem passe à une tout autre question, celle sur la validité même de ce principe. Il ne lui est plus question de savoir si le principe est applicable à l'*univers*, mais s'il est valable même dans notre petit *monde* à nous toujours de la même manière dans le temps. A-t-il été le même à l'état primitif de ce même monde comme à son état final ? Qu'est-ce qui permet de dire, en effet, que le monde a toujours été valable dès le commencement et qu'il le sera encore à la fin ? En fin de compte, nos lois sont fondées sur les expériences qui ont été faites jusqu'ici, mais rien ne garantit qu'il en a toujours été ainsi, pas plus qu'il le sera dans un futur lointain.

Nous possédons une Thermodynamique qui représente fort bien une foule de lois expérimentales, et qui nous affirme que l'entropie d'un système isolé croît éternellement. Nous pourrons sans peine construire une Thermodynamique nouvelle qui, tout aussi bien que la Thermodynamique ancienne, représenterait les lois expérimentales connues jusqu'ici ; donc, pendant dix mille ans, les prévisions marcheraient d'accord avec celles de la Thermodynamique ancienne ; et cependant, cette Thermodynamique nouvelle pourrait nous affirmer que l'entropie de l'Univers, après avoir crû pendant cent millions d'années, décroîtra

129. Picard, « Troisième partie : Sciences », p. 31. C'est moi qui souligne. Sur le rapport de Picard, voir *infra*, Introduction à la seconde partie.
130. Duhem, *L'évolution de la mécanique*, p. 153.
131. Pierre Duhem (1906), *La théorie physique, son objet et sa structure*, Paris : J. Vrin ; réédition à partir de la 2e éd. revue et augmentée de 1914 (Paris : J. Vrin, 1997), p. 435. Le passage en question est tiré de « Physique de croyant », article publié en 1905.
132. Duhem, *cit.*, p. 436.

> pendant une nouvelle période de cent millions d'années, pour croître derechef par une alternance éternelle [133].

On revient ainsi à la question de la validité universelle et du sens cosmologique du second principe, mais aussi à la notion de loi en général : une loi fondée sur l'expérience du *monde* peut-elle s'étendre et s'extrapoler à l'*univers* sur lequel aucune expérience ne semble possible ? L'univers peut-il faire à jamais l'objet de l'application d'une loi quelconque ? Il ne s'agit peut-être pas seulement de l'univers ; pourrait-on à jamais qualifier une loi d'universelle proprement dite ? Il est d'ailleurs assez frappant de voir que Duhem est amené à une sorte d'hypothèse cosmologique fort similaire à celle de Boltzmann dont il ne cite pas le nom, celle de l'équilibre cosmique et des oscillations temporaires (« une alternance éternelle »), jusqu'à faire allusion à la possibilité d'une période de décroissance de l'entropie.

Boltzmann et ses constitutions commencent à être reconnues à peine quand H. Bergson publie *L'évolution créatrice* en 1907, où s'élabore toute une cosmologie, peut-être la seule cosmologie proprement dite à l'époque, mis en lien avec les réflexions du physicien autrichien sur les principes de la thermodynamique [134].

« L'univers est un assemblage de systèmes solaires que nous avons tout lieu de croire analogues au nôtre [135], » dit le philosophe. Liés entre eux, que ce soit par les rayonnements émis et reçus par chacun ou par les mouvements communs, les systèmes n'en sont pourtant pas moins indépendants l'un de l'autre : les liens entre les mondes n'est pas aussi fort que les liens à l'intérieur d'un monde (la solidarité « intramondaine » l'emporte sur la solidarité « intermondaine »), « [d]e sorte que ce n'est pas artificiellement, pour des raisons de simple commodité, que nous isolons notre système solaire ; la nature elle-même nous invite à l'isoler [136]. » Pourtant, notre physique adoptée par nous et adaptée à notre monde peut s'étendre à d'autres mondes tant qu'ils sont suffisamment isolés comme le nôtre. Mais il en est autrement quant à l'univers entier.

> En tant qu'êtres pensants, nous pouvons appliquer les lois de notre physique à notre monde à nous, et sans doute aussi les étendre à chacun des mondes pris isolément, mais rien ne dit qu'elles s'appliquent encore à l'univers entier, ni même qu'une telle affirmation ait un sens, car

133. Duhem, *cit.*, p. 437.
134. Bergson est l'un des rares, peut-être avec Emile Meyerson, à prendre au sérieux les travaux de Boltzmann et son « explication par l'*immense* » du second principe de la thermodynamique qui est, d'après Meyerson, la seule véritable loi de la nature. Émile Meyerson (1908), *Identité et réalité*, Paris : Félix Alcan, pp. 252-253.
135. Bergson, *L'évolution créatrice*, p. 242.
136. *ibid.*

l'univers n'est pas fait, mais se fait sans cesse. Il s'accroît sans doute indéfiniment par l'adjonction de mondes nouveaux[137].

Prenons les deux principes de la thermodynamique. Ce sont « les lois les plus générales de notre science » d'après Bergson, mais elles « n'ont pourtant pas la même portée métaphysique[138] ». D'après le premier, « *quelque chose* se conserve en quantité constante » dans toute transformation d'un système si bien que la transformation d'une partie du système entraine la transformation d'une autre partie[139]. Toujours est-il que la mesure de l'énergie porte en elle, comme toute quantité, quelque chose d'arbitraire et « [l]a part de convention inhérente à ce principe est assez grande[140] » ; il ne renseigne rien sur la « nature du tout ». C'est au second principe de renseigner sur ce tout : « la plus métaphysique des lois de la physique en ce qu'elle nous montre du doigt, sans symboles interposés, sans artifices de mesure, la direction où marche le monde[141] ». Le monde change jusqu'à ce qu'il épuise sa capacité de changement, que Bergson appelle « *mutabilité* ». Cette entité prend plusieurs formes, le plus souvent qualitatives et donc peu conventionnelles : elle est décrite tantôt comme la tendance à la dégradation de l'énergie en chaleur, tantôt comme la répartition uniforme de la chaleur ; même la quantité qui lui est liée, l'entropie, n'est pas une quantité comme les autres, ouverte à toute interprétation.

La seconde loi de la thermodynamique, « la plus métaphysique des lois de la physique », est sans doute une loi des *mondes*, c'est-à-dire *universelle*, applicable à tous les systèmes dans l'univers tant qu'ils sont isolés l'un de l'autre. Mais serait-elle une loi de l'*univers entier* ? « Mais, [...] avons-nous le droit d'étendre à l'univers entier des considérations tirées de l'état présent de notre système solaire ? A côté des mondes qui meurent, il y a sans doute des mondes qui naissent[142]. » De fait, l'idée même d'une loi de l'univers n'a guère de sens : aucune loi ne serait adéquate à cet univers qui « n'est pas fait, mais se fait sans cesse ». Au lieu d'appliquer ce principe à l'univers, Boltzmann tentait de le *fonder* sur une idée ou une image d'univers et d'expliquer l'irréversibilité des phénomènes dans la condition initiale propre et limitée à notre monde. Bergson entreprend d'attribuer l'origine même de la « mutabilité » à l'état primitif de l'univers. Puisque la mutabilité ne peut que diminuer avec le temps, elle aurait

137. *ibid.*
138. *ibid.*
139. *ibid.* Sur ce point, Bergson fait référence au *L'évolution de la mécanique* de Duhem, paru deux ans avant. Cependant, il est tentant de se demander si la référence n'est pas faite aussi, sinon plus, aux livres de Poincaré. Il me parait difficile de supposer Bergson à l'insu de *La science et l'hypothèse*, impossible à passer inaperçu à quelqu'un d'une très bonne connaissance en sciences et toujours attentif à l'actualité en la matière comme lui.
140. Bergson, *cit.*, p. 243.
141. *ibid.* Picard, « Troisième partie : Sciences », p. 31
142. Bergson, *L'évolution créatrice*, p. 247, note 1.

été le maximum au commencement. Mais d'où viendrait cette mutabilité à la fois maximale et « originelle » ? La question n'autorise pas seulement, mais aussi *oblige*, à aller au-delà des « mondes » et à réfléchir sur l'univers.

Selon Boltzmann, la mutabilité n'est pas toujours en diminution ni toujours en augmentation, mais en *fluctuation* ; il est théoriquement probable qu'elle augmente, voire se crée, quoique ce soit si peu probable que pratiquement impossible.

> Cette hypothèse est théoriquement convenable, comme on l'a montré avec précision dans ces derniers temps ; mais, d'après les calculs de Boltzmann, elle est d'une improbabilité mathématique qui passe toute imagination et qui équivaut, pratiquement, à l'impossibilité absolue. En réalité, le problème est insoluble si l'on se maintient sur le terrain de la physique, car le physicien est obligé d'attacher l'énergie à des particules étendues, et, même s'il ne voit dans les particules que des réservoirs d'énergie, il reste dans l'espace : il mentirait à son rôle s'il cherchait l'origine de ces énergies dans un processus extra-spatial. C'est bien là cependant, à notre sens, qu'il faut la chercher [143].

Quel est donc ce « processus extra-spatial » qui est à l'origine de l'univers ? Selon Bergson, il y a cette « réalité concrète » qui ne se dirige peut-être pas dans le sens contraire de « la pente indiquée par la loi de Carnot », mais de manière à perturber et retarder la descente sur cette même pente. Là se trouve l'essence de la vie qui n'exclut pourtant pas la matière ; même une matière inerte possède une vitalité qui, pour « vague et floue » qu'elle soit, aurait pu donner la « vie » partout dans l'univers, « c'est-à-dire, sans doute, dans tous les mondes suspendus à toutes les étoiles [144] ».

Pour Poincaré, les principes sont tirés de l'expérience et établis comme des vérités expérimentales ; une fois généralisés, ils ne peuvent être contredits par aucune expérience ; aucune vérification ne peut être considérée comme décisive. Pour que la vérification soit décisive, il faut appliquer à l'univers les principes en question, mais ceci n'est pas possible ; mais il n'en est pas moins difficile pour une partie, parce que toutes les parties de l'univers sont liées les unes aux autres et par conséquent il n'y a pas de système parfaitement isolé.

La dépendance mutuelle des phénomènes ou des choses est une idée fondamentale chez Mach. Puisqu'aucun corps n'est jamais isolé parfaitement des autres, il faut rapporter tout mouvement à tous les mouvements de l'univers,

143. Bergson, *cit.*, p. 245. Bergson cite ici *Vorlesungen über Gastheorie* de Boltzmann directement dans sa version originale : « Boltzmann, *Vorlesungen über Gastheorie*, Leipzig, 1898, p. 253 et suiv. »
144. Bergson, *cit.*, p. 257.

plus précisément, à l'ensemble des mouvements relatifs les uns aux autres[145]. Pas besoin donc comme chez Newton d'espace qui se distinguerait des corps matériels et servirait de système de coordonnées cosmique qui détermine les positions de tous les corps de l'univers. « Dire qu'un corps conserve sa vitesse et sa direction dans *l'espace* est simplement une manière abrégée de s'en référer à *l'univers entier*[146] », affirme le physicien autrichien. Ni besoin de mouvement, inobservable et soustrait à toutes les actions des forces, qui s'associerait éventuellement au mouvement du centre de gravité de l'univers : tous les mouvements se rapportent à l'ensemble des corps, y compris les mouvements inertiels. Ces derniers n'ont rien à voir avec la propriété innée des corps ni avec l'espace, mais un résultat (propriété/qualité secondaire ?) de l'interaction de ce corps avec les autres corps.

> Ces considérations montrent qu'il est inutile de rapporter la loi de l'inertie à un espace absolu quelconque. Tout au contraire, on reconnaît que les masses qui, suivant la phraséologie courante, exercent les uns sur les autres des actions mutuelles et celles qui n'en exercent pas se trouvent entre elles dans des relations d'accélération parfaitement identiques, et l'on peut effectivement considérer *toutes* les masses comme en rapport les unes avec les autres[147].

La notion d'espace absolu, inventée, rappelons-le, par Newton pour expliquer l'inertie, Mach l'abolit pour le remplacer par l'ensemble des corps existants. Un corps continue son mouvement tant qu'aucune force extérieure n'agit sur lui, et ce n'est pas un espace quelconque, mais d'autres corps qui en sont responsables. S'il en est ainsi, c'est parce qu'il existe d'autres corps dans l'univers et que tous les corps sont en interaction les uns sur les autres, fût-ce très faible et même négligeable. Dès lors, le principe d'inertie n'est que le résultat

145. Ernst Mach (1904), *La mécanique. Exposé historique et critique de son développement*, trad. par Emile Bertrand, introd. d'Emile Picard, trad. fr. sur la quatrième édition allemande de 1901, Paris : Hermann ; reproduction en fac-sim (Paris : J. Gabay, 1987), *passim*. Par exemple, Ch. II, section V, § 3, p. 212.

Nul doute que *Die Mechanik* d'Ernst Mach, paru pour la première fois en 1883, a eu une immense influence pour les critiques de la mécanique newtonienne au tournant du siècle comme celles de Hertz, Duhem ou Einstein. La première édition allemande de *La mécanique* date de 1883. L'ouvrage a été traduit en français en 1904 sur sa quatrième édition par Emile Bertrand avec une introduction d'E. Picard. Si le nom de Mach n'est guère évoqué dans ses écrits, il aurait difficilement échappé à Poincaré qui ne connait pas seulement le traducteur et l'introducteur, mais possède une bonne connaissance de la littérature germanophone en la matière comme il le montre dans son compte rendu du livre de Hertz dans « Les idées de Hertz ».

Mach, de sa part, reste toujours actif à réagir aux critiques ou à d'autres publications qui suivent la sienne ; *La science et l'hypothèse* est mentionné dans la neuvième et dernière édition de *La mécanique* (§ 7, pp. 243–244). Le passage n'est pas retenu dans la traduction française, faite sur la quatrième édition.

146. Mach, *cit.*, § 6, p. 226.

147. Mach, *cit.*, p. 228.

d'une abstraction de la *totalité* des corps qui se trouvent dans l'univers, en d'autres termes « une référence abrégée de l'univers entier ».

C'est aussi une loi essentiellement expérimentale, c'est-à-dire suffisamment fondée sur les expériences ; prise pour approximativement vraie, elle sert à la déduction logique ou mathématique, tout en admettant, voire réclamant, « le contrôle perpétuel de l'expérience [148] ». Mais il existe « certaines conjectures des lois de mouvement qui sont, par leur simplicité et leur exactitude, prises pour hypothèses », dont le critère de jugement se penche sur la validité logique ou mathématique (cohérence logique) ou sur la « commodité », bien davantage que sur la concordance avec la réalité physique. S'il est absolument impossible de soumettre *tous* les corps de l'univers, il n'en est pas moins vrai que quelques repères, les étoiles fixes par exemple, peuvent servir à vérifier convenablement la validité du principe en question. Tant que les conjectures restent valables et surtout commodes, nous avons le droit de les adopter comme des propositions fondamentales (*Grundsätze*), c'est-à-dire des principes. Et Mach de rapprocher ce genre de proposions à la convention poincaréenne.

Nous avons vu comment Poincaré fait recours à la notion d'univers dans ses discussions relatives à la validité notamment du principe de relativité, ce que j'ai appelé l'argument cosmologique. L'univers n'a tiré qu'à un seul exemplaire, impossible donc à vérifier empiriquement ; il ne fait pas non plus l'objet de l'application du principe ; c'est seulement pour les « mondes » que le principe prend sens. Or, quel est justement ce sens, sinon l'indépendance totale ou presque de chacun de ces mondes envers les autres ? Bref, appliqué à l'univers, le principe est invérifiable. Il est vérifiable s'il est appliqué à des mondes, mais prend finalement peu de sens, puisque tautologique, même quand il se révèle *vrai*. « Tel est certainement, pour Poincaré, le fait qui discrédite le principe de relativité dans sa portée ontologique, » commentera H. Bareau [149].

Dans les trois derniers chapitres, nous avons suivi le parcours de Poincaré depuis le début de sa carrière jusqu'en 1908, l'année du sommet de sa réputation avec la publication de *Science et méthode* et l'entrée à l'Académie française. Il s'achève avec ses *Leçons*. A quoi il est temps de revenir.

148. Mach, *cit.*, p. 230.
149. Barreau, « Temps et espace-temps chez Henri Poincaré », p. 22.

Clôture

Retour aux *Leçons*. Pour une relecture

Après *Science et méthode* et avant *Leçons*, la théorie de la relativité est toujours en voie d'élaboration et s'installe progressivement. Dans sa conférence à Cologne en 1908, H. Minkowski propose une interprétation géométrique de l'espace-temps à quatre dimensions, grâce à laquelle la théorie entre dans le centre d'intérêt des physiciens. Le perfectionnement de la théorie avec la relativité générale doit attendre encore cinq ans, et sa réception, une dizaine d'années. Le premier cours de la relativité est professé au Collège de France par P. Langevin qui restera pratiquement le seul à enseigner la relativité en France jusqu'en 1919 [1].

Poincaré, de son côté, donne quelques conférences publiques sur la nouvelle mécanique avant 1910, mais pas de cours à la Faculté des sciences en la matière, à une exception près : un cours intitulé « Les limites de la loi de Newton » pour l'année 1906–1907, où il est question d'examiner des problèmes irrésolus dans le cadre de la mécanique newtonienne, tels que l'avancement du périhélie de Mercure, le mouvement séculaire de la Lune ou bien l'accélération des comètes, ainsi que plusieurs hypothèses proposées pour les résoudre. Toujours à la chaire de mécanique céleste, mais le cadre du cours est beaucoup plus général et son approche, résolument physique [2]. Mais il n'y reviendra plus dans les cours qui suivent ; il s'attellera plutôt sur un nouveau sujet : la cosmogonie.

Leçons, ce n'est pas seulement le premier cours de cosmogonie fait à la Faculté des sciences de l'université de Paris, mais aussi le dernier [3]. Le *Livret de*

1. Michel Biezunski (1992), *Einstein à Paris. Le temps n'est plus...* Saint-Denis : Presses universitaires de Vincennes, p. 131.

2. Poincaré, « Les limites de la loi de Newton ». Sur ce cours, voir Darrigol, « Henri Poincaré's criticism of Fin de Siècle electrodynamics » ; Rougé, *Relativité restreinte* ; Scott Walter (2018), « Figures of Light in the Early History of Relativity (1905-1914) », in *Beyond Einstein : Perspectives on Geometry, Gravitation, and Cosmology in the Twentieth Century*, sous la dir. de David E. Rowe *et al.*, New York : Springer.

3. Il est à signaler qu'un cours de cosmogonie est annoncé au Collège de France pour l'année 1912–1913 par Grégoire Wyrouboff, titulaire de la chaire d'histoire générale des sciences depuis 1903 (« Programme de l'année 1912–1913 », *Annuaire du Collège de France*, 12 1912) :

l'étudiant de Paris pour la rentrée de l'année 1911–1912 annonce une deuxième série des *Leçons sur les hypothèses cosmogoniques*[4] ; une modification aura lieu entre-temps, le cours annoncé en octobre 1911 s'intitulera « Théorie du potentiel newtonien et ses applications à l'étude de la figure des planètes »[5], qui restera inachevé. *Leçons* reste pratiquement le dernier cours du savant.

Il est aussi le dernier cours d'astronomie dans la tradition de la mécanique céleste, Poincaré demeurant pratiquement le dernier titulaire de la chaire. La chaire d'astronomie est créée par Jean-Baptiste Biot, suivie de celle d'*astronomie mathématique et mécanique céleste*, par Le Verrier. Devenue vacante en 1912 après le décès de Poincaré, la chaire sera transformée en celle de *mécanique analytique et mécanique céleste*, plus penchée sur la mécanique plutôt que sur l'astronomie. P. Appell, ancien titulaire de la chaire de mécanique analytique, en sera le premier et dernier occupant. En outre, la chaire de « astronomie physique », occupée par Henri Andoyer depuis 1903, deviendra celle d'« astronomie » tout court après 1912, alors qu'une nouvelle chaire sera instituée pour la « *physique céleste* », attribuée à Pierre Puiseux, astronome observateur contrairement à ses prédécesseurs qui furent théoriciens ou mathématiciens[6]. L'astronomie n'occupera plus une chaire de science mathématique à la Sorbonne, mais une chaire plus directement attachée à la science *physique*, plus proche donc de ce qu'on appelle aujourd'hui l'astrophysique.

En revanche, la cosmogonie semble plutôt bien installée dans l'enseignement secondaire de l'époque. *Leçons de cosmographie*, un manuel rédigé par F. Tisserand et H. Andoyer, consacre le dernier chapitre à l'histoire de l'astronomie, qui finit par une section intitulée « Hypothèse cosmogonique de Laplace »[7]. Un autre manuel, *Eléments de cosmographie* de Théophile Moreux discute, lui aussi vers la fin de l'ouvrage, de Laplace et d'autres auteurs de cosmogonie comme Faye, du Ligondès, Darwin, See, Lockyer, ou bien même Chamberlin et Moulton pour leur « théorie planétésimale »[8].

---

a) Histoire générale des sciences. —M. Wyrouboff fera l'historique des théories cosmogoniques dans la première partie du cours et l'histoire des théories géologiques dans la seconde, les mardis et vendredis A5 heures, salle 3. Ouverture le dernier mardi de janvier.

Le cours « Histoire des hypothèses cosmogoniques et des théories géologiques » est reporté pour le mois de janvier 1914, mais sera finalement annulé en raison du décès de Wyrouboff en décembre 1913. Les notes préparatoires ont été conservées aux archives du Collège de France.

4. *Livret de l'étudiant de Paris*, l'année 1911–1912, p. 60.

5. *Revue scientifique* 49, 18 (numéro daté du 28 octobre 1911), p. 568.

6. D'ailleurs, Puiseux avait déjà côtoyé Poincaré en tant que chargé de cours attaché à la chaire de mécanique céleste.

7. François-Félix Tisserand et Henri Andoyer (1912), *Leçons de cosmographie*, 6ème édition revue et corrigée, Paris : A. Colin. La première édition date de 1895.

8. Théophile Moreux (1915), *Eléments de cosmographie. Conformes aux Programme*

C'est une période particulièrement riche de nouvelles théories sur l'origine du monde. Nous en avons déjà jeté un regard sur quelques-unes qui sont dispersées dans les *Leçons* et, retenu des noms comme N. Lockyer, T. J. J. See, E. Belot ou S. Arrhenius. Belot, dont les notes reçues à l'Académie des sciences sont présentées par Poincaré lui-même, propose une « cosmogonie dualiste » par opposition au « monisme » de l'hypothèse nébuleuse [9]. Sa théorie est qualifiée aussi de « tourbillonnaire », prenant le tourbillon pour le mécanisme principal tant dans l'*évolution* que dans la formation en cosmogonie. Arrhenius établit de son côté un vaste programme cosmogonique dans son ouvrage de 1907, dans lequel les composantes cosmiques forment toutes un seul « cycle », des étoiles à des amas d'étoiles, en passant par des nébuleuses spirales [10]. Ces nouvelles hypothèses se veulent alternatives ou complémentaires à l'hypothèse laplacienne qui fait pourtant toujours autorité.

> Malgré les objections qu'on lui a opposées, malgré les découvertes que les astronomes ont faites et qui auraient bien étonné Laplace, elle est toujours debout, et c'est encore elle qui rend le mieux compte de bien des faits ; c'est elle qui répond le mieux à la question que s'était posée son auteur. Pourquoi l'ordre règne-t-il dans le système solaire, si cet ordre n'est pas dû au hasard ? De temps en temps une brèche s'ouvrait dans le vieil édifice ; mais était promptement réparée et l'édifice ne tombait pas [11].

Une nébuleuse extrêmement raréfiée se tourne sur elle-même. Pendant que sa rotation s'uniformise, elle se refroidit et se contracte ; les anneaux se séparent progressivement, tout en continuant leur circulation autour du noyau devenu entre-temps le Soleil, ils finissent par se rompre en plusieurs masses, dont les unes, plus denses que les autres, forment de nouveaux centres de gravitation qui deviendront des planètes. Tel est le « vieil édifice » bâti pour expliquer les mouvements des planètes et des satellites, leurs rotations et révolutions dont les plans et les sens sont presque les mêmes, ayant tous de faibles excentricités, bref presque tous les faits que Laplace avait en vue. Cet édifice est-il tombé depuis ?

---

du Baccalauréat (séries littéraires), 2e édition (1re : 1914), Paris : J. de Gigord, p. 116. Auteur prolifique de la vulgarisation scientifique, l'abbé Th. Moreux avait écrit aussi une introduction à *Formation mécanique du système du monde* de du Ligondès.

9. « Le développement de quatre Notes de M. E. Belot présentées à l'Académie des Sciences par M. H. Poincaré de 1905 à 1908, a fourni à l'autre la matière d'un *Essai*, où il s'élève à une conception nouvelle du mécanisme de l'Univers, en partant de l'hypothèse d'un dualisme originel. » Résumé de *L'origine dualiste des mondes. Essai de Cosmogonie tourbillonaire* in *Bulletin de la Société astronomique de France* 26 (1912), p. 92.

10. Svante Arrhenius (1910), *L'évolution des mondes*, trad. par T. Seyrig, trad. fr. sur la 2e éd. de 1907, Paris : Librairie polytechnique Ch. Béranger.

11. *Leçons*, p. VI.

Si l'on se limite au système solaire, les phénomènes qui servaient de point de départ à Laplace sont à peu près les mêmes aux alentours de 1910. A quelques exceptions près, surtout sur les détails comme, par exemple, les planètes dites « intérieures », de Mercure jusqu'à Mars, nettement moins massives, mais plus denses, que les « extérieures » [12]. Faye avait déjà attiré l'attention sur la différence entre deux catégories de planètes, mais il s'était préoccupé des rotations, pas de la distribution des masses. La question fondamentale reste toujours la même : pourquoi l'ordre règne-t-il sans qu'il ne soit dû au hasard ? A-t-elle été répondue depuis ?

1 Relecture de l'hypothèse nébuleuse

1.1 Derniers efforts des mécaniciens célestes

Dans un article publié en juillet 1911, Poincaré reprend les sujets traités dans ses cours de cosmogonie de l'année précédente, et relève des enjeux principaux de l'hypothèse de Laplace : 1° la stabilité des anneaux et cause de leur destruction ; 2° la densité des anneaux ; 3° la condensation centrale de la nébuleuse ; 4° le sens de la rotation [13].

La rotation directe s'explique assez facilement, d'après notre mathématicien qui suit sur ce point G. H. Darwin. Il existe, chez Darwin, deux actions de force qui servent de supplément à la gravitation : l'une, accélératrice, due au refroidissement, et l'autre, retardatrice ou perturbatrice, des marées. Ces dernières jouent un rôle « [d]ans l'histoire, tant passée que future, des astres du système » [14], rôle d'autant plus significatif que ces astres auraient été encore plus fluides et visqueux à l'origine au'à présent. Facteurs principaux du ralentissement des mouvements, les marées n'expliquent pas seulement pourquoi la période de rotation de la Lune a diminué jusqu'à synchroniser avec celle de sa révolution comme il est généralement admis, mais aussi, d'après Poincaré, comment les rotations des planètes sont rendues directes dans l'hypothèse laplacienne. Darwin va plus loin et cherche à expliquer la formation même de la Lune par les marées. La Terre aurait été tellement sensible aux « marées solaires » dans son état primitif qu'une partie de sa protubérance aurait fini par se détacher dans le plan de son équateur pour donner naissance à un satellite.

12. Verhulst, *Henri Poincaré : Impatient Genius*, p. 214.
13. Henri Poincaré (1911c), « Remarque sur l'hypothèse de Laplace », *Bulletin de la Société astronomique de France*, 28.
14. *Leçons*, § 94, p. 131.

Poincaré cherche une autre possibilité, faisant référence à la théorie des figures d'équilibre, qui a été question dans le chapitre IV de l'étude présente, en rapport avec la stabilité. Une masse fluide en rotation se refroidit, se contracte, accélère sa rotation et accroit son excentricité ; elle prend d'abord une forme d'ellipsoïde, s'aplatit, puis s'allonge en trois axes inégaux comme un « ellipsoïde de Jacobi », avant de devenir piriforme. La figure finale se creuse (ou « s'étrangle ») dans sa partie médiane et se divise en deux masses du même ordre de grandeur.

> La figure piriforme [...] est peut-être stable ; mais il n'est pas certain qu'elle le soit réellement. Sir G. H. Darwin a trouvé que cette figure est stable, mais, d'après M. Liapounov, elle serait instable. Pour trancher la question, il faudrait recommencer le calcul : or, ce calcul est extrêmement pénible [15].

Poincaré n'en reste pas moins réservée sur la portée cosmogonique de ce modèle, sur sa pertinence pour le Soleil avec ses planètes ou le système Terre-Lune. Et pour cause : dans l'un comme dans l'autre il existe une différence de masse importante, différence d'ordre de grandeur. Un tel scénario ne serait pourtant pas impossible, notamment pour des étoiles doubles : elles devraient avoir des masses « inégales sans doute, mais comparables » [16], il est alors probable qu'elles se soient formées à partir d'une masse homogène devenant piriforme.

1.2 Hypothèse salvatrice, hypothèse sauvée. Face à la « barrière angulaire »

Il y a des hypothèses tantôt implicites, tantôt explicites, dans l'hypothèse de Laplace. Poincaré se met à des présupposés de celle-ci, afin de vérifier s'ils sont valides, et si valides, nécessaires ou *ad hoc*. L'« hypothèse d'une concentration centrale » en est une [17]. Si la masse de la nébuleuse initiale était uniformément distribuée, quelle aurait été la condition pour qu'elle abandonne des anneaux et ceux-ci, une fois abandonnés, parviennent à se stabiliser ?

15. *Leçons*, § 137, p. 189.
16. *Leçons*, pp. XV-XVI. Jeans remarquera plus tard, le résultat de la rotation n'est pas le même selon qu'il s'agit du fluide relativement « solide » et incompressible comme la Terre, ou du gaz compressible comme cela aurait été le cas de la nébuleuse en question. Si la masse est composée de gaz incompressible, elle continuera à s'aplatir jusqu'à acquérir une excentricité assez grande, sans pour tant perdre certaine sphéroïdicité ; une masse gazeuse compressible ne pourra plus garder sa forme sphéroïdale et finira par donner naissance à des anneaux. Pourtant, d'après Jeans, le dernier mécanisme explique moins la formation des planètes ou des satellites que celle des nébuleuses spirales. James Jeans (1923), *The Nebular Hypothesis and Modern Cosmogony*, Oxford : The Clarendon Press ; Halley lecture delivered on 23 May, 1922, pp. 7-8.
17. *Leçons*, § 17–19, p. 18–23.

Le volume d'un anneau doit satisfaire la formule de Green relative au potentiel total U :

$$(U = V(x, y, z) + \frac{\omega^2}{2}(y^2 + z^2))$$

D'après la formule de Green,

$$\Delta U < 0$$

Si l'on prend ρ pour la densité moyenne de l'anneau, on obtiendra, selon la formule de Poisson :

$$\Delta V = -4\pi\rho$$

La vitesse de rotation ω satisfait à la relation :

$$\Delta \frac{\omega^2}{2}(y^2 + z^2) = 2\omega^2$$

Par conséquent :

$$\Delta U = \Delta V + \Delta \frac{\omega^2}{2}(y^2 + z^2) = -4\pi\rho + 2\omega^2 < 0$$

Poincaré dérive un rapport entre densité et vitesse de rotation permet d'assigner une limite de la densité à la nébuleuse primitive comme suit :

$$\rho > \frac{\omega^2}{2\pi}$$

La valeur $\frac{\omega^2}{2\pi}$ désigne la limite inférieure de la densité moyenne pour une masse en rotation à la vitesse de rotation ω. Si on prend la *vitesse angulaire* de la Terre, par exemple, qui doit être supposée la même que la vitesse de l'anneau primitif qui en est l'origine (d'après la conservation du moment angulaire), on aura la densité minimale de ce dernier, une « limite inférieure de la densité de l'anneau, et a fortiori de la nébuleuse », à savoir $\frac{\omega^2}{2\pi}$. Autrement dit, si l'anneau en rotation à la vitesse de ω n'a pas une densité plus grande que $\frac{\omega^2}{2\pi}$, il ne peut subsister. Or, cette limite inférieure donne un chiffre trop grand : si la nébuleuse était à vitesse angulaire égale à la rotation de Neptune, sa densité minimale ρ aurait représenté « un chiffre tellement grand que, d'après ce chiffre, la masse totale de la nébuleuse serait très supérieure à celle du Soleil [18] ». Si l'on suppose que la nébuleuse avait la même masse que le Soleil actuel, son volume aurait dû être extrêmement réduit, si bien que presque toute la masse eût été concentrée au centre. On serait tenté de sauver l'hypothèse de la distribution homogène en supposant une compensation de moment angulaire par d'autres facteurs comme marées ou forces magnétiques, mais cela n'aurait pas suffi à couvrir tout le volume du système solaire.

18. *Leçons*, § 19, p. 23.

« Les calculs précédents ne sont relatifs qu'à des ordres de grandeur ; mais ils suffisent pour montrer combien est capital, dans la théorie de Laplace, le *fait* de la condensation centrale [19], » conclut Poincaré. Ce « fait » est loin d'être *ad hoc* comme hypothèse, en ceci que la validité de toute l'hypothèse nébuleuse dépend d'elle. Pourtant, une nébuleuse initiale fortement concentrée aurait-elle suffi, à elle seule, à donner au système solaire toutes ses masses et tous ses mouvements, comme le suggère Poincaré ? Pour certains, surtout les partisans de la théorie de la capture comme Moulton, Chamberlin et T. J. J. See, le problème du rapport entre la densité (ou la masse) et la vitesse angulaire, nommé « la barrière angulaire », constituait une objection décisive à l'hypothèse laplacienne, de façon à rendre celle-ci impossible à « sauver » en aucune manière. La nébuleuse primitive, à elle seule, n'aurait pas pu donner naissance à tout le système solaire et à tous ses mouvements circulaires ; elle aurait dû recevoir des astres provenant de l'extérieur.

Le problème de la distribution des moments de rotations reste l'objection principale, voire fatale. Après la première remarque de Fouché, elle a été mise en évidence par Chamberlin dès 1900, mais Poincaré, lui, « ne parait pas en avoir réalité toute la portée : cette distribution extraordinaire lui sert seulement, comme nous l'avons vu, à montrer la nécessité d'une condensation centrale [20] », remarquera un commentateur bien des années plus tard. A cette objection, qui est d'ordre mécanique, faut-il ajouter une autre, « très grave d'ordre physique », qui est relative à la densité dans la nébuleuse laplacienne [21] : selon un calcul fait avec la vitesse de Neptune, on obtiendra $1,26 \times 10^{-13}\ gr/cm^3$, un chiffre encore plus et beaucoup trop faible, incomparable même dans l'ordre de grandeur à la densité moyenne de l'air, à savoir $1,3 \times 10^{-3}\ gr/cm^3$. Aucun fluide aussi peu dense ne saurait se condenser en un anneau ni, *a fortiori*, en une planète ; bien loin de là, il aurait tendance à se dissiper [22].

19. *Leçons*, § 18, p. 21. C'est moi qui souligne.
20. David Belorizky (1937), « Sur l'hypothèse cosmogonique de Laplace », *Journal des observateurs*, 20, 5, p. 72.
21. *ibid.*
22. Poincaré démontre le théorème sans pour autant le prendre pour une objection sérieuse à l'hypothèse nébuleuse. Stephen George Brush (1996a), *Fruitful Encounters : The Origin of Solar System and of the Moon from Chamberlin to Appollo*, Cambridge : Cambridge University Press, pp. 8-9.

2 De la thermodynamique à la physique

2.1 La chaleur et l'âge du Soleil et de la Terre

Nous avons vu plus haut, dans le chapitre III de l'étude présente, comment les fondateurs de la thermodynamique furent conduits, par la nature même de leur sujet, aux problèmes cosmogoniques. C'était aussi un défi à la cosmogonie elle-même qui était avant tout mécaniste et se préoccupait exclusivement de l'origine des *mouvements* des astres :

> Jusqu'ici c'est surtout au point de vue *mécanique* que nous avons envisagé le problème cosmogonique. Nous ne nous sommes pas encore préoccupés du point de vue *thermodynamique*. Nous allons aborder cette face du problème, et rechercher *l'origine de la chaleur*.
> Cette question s'est imposée lorsque, vers le milieu du siècle dernier, on est arrivé à se rendre compte de la quantité énorme de chaleur que le Soleil perd par an [23].

Puisque le Soleil conserve sa température malgré une telle perte de chaleur, on peut s'interroger sur la chaleur spécifique de cet astre (qui doit être « très considérable »), son origine même (« pouvant être due à l'énormité des pressions qui existent à l'intérieur [24] »), ainsi que ses propriétés physiques comme la viscosité dont dépend la chaleur spécifique :

> Si, maintenant, nous supposons le Soleil *visqueux*, ainsi qu'il l'est certainement dans la réalité, sa contraction aura pour effet, non seulement d'augmenter la chaleur spécifique, mais encore de déterminer une véritable *création* de chaleur, car la contraction fait naître des frottements qui produisent de la chaleur. C'est le travail de la gravitation, ainsi transformé en chaleur par les frottements, qui, d'après Helmholtz, entretient la radiation solaire [25].

En outre, il est probable que notre étoile soit en état d'équilibre adiabatique, avec une différenciation de température selon le degré de condensation : les parties plus proches du centre, c'est-à-dire plus condensées, seront plus chaudes que les parties proches de la surface. Arrhenius dérive ainsi le gradient de la température et, à partir de là, la température centrale du Soleil (6 millions de degrés) [26]. Tout suggère au Soleil une grande quantité de chaleur et aussi une grande chaleur spécifique, sans que la température ne baisse ni s'élève trop à la surface, mais il ne suffit pas pour expliquer la provision de chaleur : « si nous

23. *Leçons*, § 139, p. 191.
24. *Leçons*, § 148, p. 202.
25. *Leçons*, § 151, p. 207.
26. *Leçons*, § 153, p. 208.

admettons que cette provision est due à l'énergie de gravitation, elle se trouve toujours limitée par le calcul de Helmholtz et la difficulté reste entière [27]. »

En effet le calcul donne une limite d'âge beaucoup trop restreinte : quelque 50 millions d'années. « La difficulté est d'autant plus fâcheuse que Lord Kelvin a calculé aussi combien de temps il a fallu à la Terre elle-même pour se refroidir, et qu'il est arrivé à un chiffre du même ordre que pour l'âge du Soleil [28], » avec des hypothèses empruntées à Poisson telles que la température uniforme de la Terre ou le refroidissement de celle-ci lors de son passage de la partie « froide » de l'espace cosmique [29]. Kelvin arrive lui aussi à un chiffre beaucoup trop faible, même inférieur à l'estimation du temps requis pour l'évolution de la Terre (200 millions d'années, d'après les calculs de l'époque), si bien que « les transformistes et les géologues ont jeté les hauts cris » : les premières exigeaient, « au nom du transformisme », centaines de millions d'années pour l'évolution des espèces, tandis que les seconds montraient plusieurs « temps géologiques » bien au-delà de quelques millions [30].

Poincaré a déjà fait observer le conflit entre le temps astronomique et le temps géologique dans le cas de Faye. Partant d'une hypothèse de deux modes de la formation des planètes correspondant à la loi de l'attraction en deux phases, Faye concluait que les planètes formées à la première phase de l'évolution, y compris la Terre, seraient plus anciennes que le Soleil. C'est une conséquence difficile à accepter, constate Poincaré, prenant appui sur les résultats en géologie : « l'étude des fossiles de l'époque cambrienne nous invite à penser que les conditions générales de la vie n'étaient pas alors extrêmement différentes de ce qu'elles sont aujourd'hui, et il paraît assez difficile d'admettre que les êtres de cette époque aient vécu sans soleil, ou mieux encore, à l'intérieur de l'atmosphère solaire [31] ».

Tous ces problèmes pourraient être résolus par une toute nouvelle méthode : le phénomène radioactif de l'uranium ou du radium, dont les géologues ont déjà commencé à se servir pour calculer les âges des différentes couches de la Terre. La chaleur du Soleil ne s'expliquerait-elle pas de la même manière ? « La radioactivité paraissait capable de tout expliquer. » Et notre savant d'en tirer la morale : « tout au moins il nous montrait qu'il reste bien des mystères à découvrir [...][et]qu'il ne faut pas se hâter d'affirmer qu'un phénomène est inexplicable [32] ».

27. *Leçons*, § 153, p. 209.
28. *Leçons*, § 154, p. 209.
29. *Leçons*, § 157–159, p. 213–217.
30. Poincaré mentionne la découverte de « mutation » par De Vries, qui aurait « raccourci » la durée nécessaire à l'évolution et par conséquent affaibli l'argument des transformistes.
31. *Leçons*, § 59, p. 71.
32. *Leçons*, XIV–XV.

2.2 Nébuleuse « gazéifiée ». Théorie des gaz au service de la cosmogonie

L'état primitif. Chaos ou ordre ?

Laplace attribue à sa nébuleuse initiale une rotation uniforme, une sorte d'ordre donc, si bien que « c'est cette harmonie initiale qui a produit l'harmonie finale que nous admirons », comme le dit Poincaré [33]. L'ordre de notre système (« l'harmonie finale ») est donc dû à un autre ordre (« un commencement d'ordre » ou « l'harmonie initiale »). Il ne s'agit pourtant pas d'une hypothèse gratuite, en ceci qu'elle peut être soumise à une explication mécanique selon laquelle « les frottements internes de la masse ont dû promptement détruire les irrégularités de ses mouvements intestins et ne laisser subsister qu'une rotation d'ensemble parfaitement régulière ». Cette idée d'équilibre statistique approche Laplace de Kant pour qui l'ordre initial n'est pas seulement précédé de, mais aussi engendré par, un état encore plus initial qu'est le chaos. Seulement la transition de l'un à l'autre aurait dû prendre un temps à l'ordre de milliards d'années qui parait bien long, mais s'approcherait plutôt, à l'échelle astronomique, d'« un court épisode dans l'évolution générale ».

Du Ligondès imagine « un essaim de projectiles se croisant au hasard dans tous les sens », un « chaos véritable » qui n'en est pas moins porteur de l'ordre, susceptible de se transformer en « un cosmos admirablement réglé, où l'uniformité primitive a fait place à la variété, mais à une variété harmonieuse [34] ». Si les chocs des projectiles continuent, certaines perdraient leur force vive (transformée en chaleur) et tomberaient vers les corps lourds – ce qui deviendra un centre. D'où la concentration et, par conséquent, la différenciation.

Dans le monde primitif imaginé par du Ligondès, les atomes sont en mouvement avec une variété extrême de vitesse et de sens, avant qu'ils ne se mettent en circulation commune, exactement comme chez Kant. Qu'on se rappelle le reproche fait au philosophe allemand d'avoir introduit un mouvement circulaire sans explication, à l'encontre de la loi de la conservation de la somme des moments angulaires. Observe-t-on la même erreur ? Tout dépend de ce qu'on entend par la *somme* : la « somme arithmétique » n'est pas la même que la « somme géométrique » dans laquelle les mouvements sont pris en compte comme vecteurs, c'est-à-dire avec leur direction. Si les mouvements sont arbitrairement distribués, leur somme arithmétique doit être nulle, mais leur somme géométrique ne le serait pas : elle s'en écarterait très peu, mais l'écart ne sera jamais nul, « c'est-à-dire [...] ce qu'elle serait si tous ces vecteurs

33. *Leçons*, p. VII.
34. *Leçons*, p. IX.

avaient la même direction[35] ». Si petite soit-elle, cette somme peut servir à ce que le moment angulaire ne se crée *ex nihilo* et la nébuleuse ne se mette à la circulation en bloc, tout ceci conformément au principe de la conservation du moment angulaire.

Poincaré se demande si ces « projectiles cosmiques » sont ou non élastiques : si élastiques, ils produiraient des chocs élastiques de façon à conserver la force vive ; le système tendrait vers un état d'équilibre à une température où les vitesses des projectiles sont distribuées à la proximité de la moyenne, conformément à la loi de Maxwell. Or, il y a selon Poincaré un paradoxe : « des prémisses en apparence identiques conduisent, ici et là, à des conséquences diamétralement opposées[36] ». Les molécules d'un volume de gaz ont tendance à s'uniformiser et à atteindre l'équilibre, c'est-à-dire l'état indifférencié. Les choses se passent-elles dans une nébuleuse de la même manière que dans des gaz ? C'est l'élasticité qui fait la différence : contrairement aux molécules gazeuses, supposées parfaitement élastiques, les projectiles cosmiques sont inélastiques et soumis à des chocs « physiques » où il y a des scissions et des collisions entre particules, ainsi que pertes de force vive.

Pour poursuivre son raisonnement analogique, Poincaré fait appel au *théorème du viriel*, un théorème sur le rapport entre les valeurs moyennes de l'énergie cinétique et de l'énergie potentielle d'un système à plusieurs corps[37]. Dans un système de points matériels, la valeur moyenne de l'énergie potentielle ($\bar{W}$) est deux fois plus grande que celle de l'énergie cinétique ($\bar{T}$), telle que $2\bar{T} + \bar{W} = 0$. Appliquant cette équation au gaz renfermé dans un vase, on obtient une relation entre la pression, le volume et la force vive moyenne, à savoir $3pv = 2\bar{T}$. Cette relation se rapporte à la loi bien connue, celle de Mariotte et Gay-Lussac entre le volume, la pression et la température, compte tenu du fait que la force vive est proportionnelle à la température absolue du gaz[38].

D'après le théorème, à mesure que les chocs continuent, les molécules perdent leurs vitesses de façon à diminuer l'énergie cinétique $\bar{T}$ et, par conséquent, à augmenter l'énergie potentielle $\bar{W}$; l'énergie cinétique perdue se transforme en chaleur et, ce serait là « l'origine d'une tendance à la condensation et

35. *Leçons*, § 68, p. 84.
36. *Leçons*, § 73, p. 90.
37. *Leçons*, § 74. Notons au passage que, sans être le premier à le découvrir, Poincaré a contribué à ce que ce théorème attire l'attention. Par exemple, James Jeans s'inspirera de ce passage des *Leçons* et appliquera le même théorème pour développer une théorie sur la relation entre la distribution des vitesses des galaxies (liées à l'énergie cinétique) et leurs positions (relatives à l'énergie potentielle). La méthode s'utilise aujourd'hui pour calculer la masse d'une galaxie à partir de sa vitesse et son rayon. Lévy, « Poincaré et la mécanique céleste », p. 229.
38. *Leçons*, § 75, p. 92–93.

par conséquent à la différenciation[39] ». Ainsi la nébuleuse primitive perdrait-elle l'énergie cinétique à force des chocs intermoléculaires et se mettrait à la contraction, contrairement à un gaz idéal qui se refroidit par la perte de chaleur, puis se contracte jusqu'à se réchauffer[40]. La différence vient aussi de la composition du gaz : s'il s'agit d'un gaz monoatomique ou diatomique, la perte de la chaleur par rayonnement entraine une contraction et une augmentation de température intérieure ; pour un gaz polyatomique ou dans un état déjà assez condensé, le refroidissement entrainera davantage une contraction.

Reprise de « La Voie lactée et la cinétique des gaz »

Le travail de 1906 est repris, mais plus détaillé et précisé ici[41]. Un astre quelconque, appartenant à la Voie lactée, sphérique et homogène par hypothèse, à la distance depuis le centre $r(r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$, décrit l'équation des forces vives suivante avec $\alpha^2 = \frac{4}{3}\pi\rho$:

$$\alpha^2(x^2 + y^2 + z^2) + (\frac{dx}{dt})^2 + (\frac{dy}{dt})^2 + (\frac{dz}{dt})^2 = C(\text{constante})$$

La vitesse de l'astre V se définit comme :

$$V^2 = (\frac{dx}{dt})^2 + (\frac{dy}{dt})^2 + (\frac{dz}{dt})^2$$

On aura alors :

$$\alpha^2 r^2 + V^2 = C$$

Si l'on prend un astre à la surface de la sphère qui est en repos (V=0), on obtient la C ($r = r_0$, r_0 correspondant au rayon de la sphère, à savoir celui de la Voie lactée) :

$$C = \alpha^2 {r_0}^2$$

L'équation s'écrit alors comme :

$$\alpha^2 r^2 + V^2 = \alpha^2 {r_0}^2$$

Pour notre système solaire, $r = 0$, puisqu'il est situé au centre de la sphère par hypothèse, la vitesse du Soleil, V, doit être égale à αr_0. Or, α se définit par $\sqrt{\frac{4}{3}\pi\rho}$. Ainsi s'obtient la formule $V \propto r\sqrt{\rho}$.

Si l'on connait V et la densité (plus exactement à la racine carrée de celle-ci, α étant proportionnelle à $\sqrt{\rho}$), on aura r_0, à savoir le rayon de la Voie lactée. Si le Soleil avait toute sa masse confinée dans une sphère qui couvre

39. *Leçons*, p. X.
40. *Leçons*, p. XIV.
41. *Leçons*, § 195, p. 258.

seulement l'orbite terrestre, il aurait un rayon égal à la distance Terre-Soleil, soit 1 UA ; sa vitesse de rotation serait celle de la révolution de notre planète, soit 25 km/sec. Comme la Voie lactée est supposée homogène, la masse totale (la somme des masses stellaires) est uniformément distribuée sur l'ensemble de la sphère au rayon de 10^6 UA équivalant à la distance des étoiles les plus rapprochées. Le volume serait alors à l'ordre de 10^{18} et la densité, à l'ordre de 10^{-18} ($\because \rho \propto r^{-3}$). Ceci donne une valeur de α, qui est proportionnelle à $\sqrt{\rho}$, à l'ordre de 10^{-9}. Or, la vitesse moyenne des étoiles proches est du même ordre celle de la Terre, si bien que la valeur de r_0 mesure 10^9 fois plus grande que la distance Terre-Soleil, c'est-à-dire 10^9 UA, soit 16 000 années-lumière. Puisqu'il existe une étoile — le Soleil — dans le rayon de 10^6 UA, on peut penser qu'une étoile pour toutes les distances de 10^6 UA ; par conséquent une Voie lactée d'un rayon de 10^9 UA compterait 10^9 d'étoiles, soit 1 milliard.

On ne peut pas dire que cette concordance confirme l'hypothèse, pour plusieurs raisons. D'abord, la Voie lactée ne ressemblerait pas forcément au gaz homogène, mais hétérogène, ou à celui de Crookes, gaz extrêmement raréfié où les molécules ont un grand « libre parcours »(limite dans laquelle une molécule se meut sans choc avec une autre). De plus, la Voie lactée n'aurait sans doute pas atteint l'équilibre et ne saurait donc pas s'assimiler à un gaz. Deuxièmement, elle n'est très probablement pas sphérique. Dans son article de 1906, Poincaré prenait envisageait de trois possibilités : sphère, disque aplati et spiral. Il s'interroge aussi sur le modèle dynamique de ces figures concernant la distribution des vitesses, ainsi que la rotation de l'ensemble de la galaxie. S'il est aplati, c'est que l'ensemble est en rotation commune avec une vitesse relativement rapide. Relativement, par rapport au Soleil par exemple. Et pour cause : la densité de la Voie lactée est 10^{25} fois plus petite que notre étoile, et sa vitesse, 10^{12} ($\sqrt{10^{25}}$) plus petite celle du Soleil. Ceci donne une vitesse équivalente à un trentième de second d'arc par siècle, qui est une vitesse assez rapide pour que l'équilibre du système soit maintenu spontanément.

Mais c'est visiblement la spirale qui intéresse le plus notre mathématicien, comme beaucoup d'autres à l'époque. La Voie lactée serait constituée de deux essaims d'étoiles, dont l'ensemble prend une forme spirale, de telle façon qu'il serait difficile à assimiler à une masse gazeuse qui tend à un état d'équilibre. S'agirait-il là d'un mouvement double ou séparé ? Les étoiles sont-elles concentrées vers le centre de la galaxie ou uniformément réparties ? Leur ensemble est-il en rotation ? S'il est en rotation, il serait en équilibre et stable ; s'il ne l'est pas, il ne serait pas en équilibre. Pas d'équilibre ni de stabilité sans rotation.

L'importance cosmogonique du modèle du choc a été révélée par l'étude des

novae[42]. Si un choc entre « deux voies lactées » aurait pu donner naissance à divers objets célestes, dit Poincaré toujours d'un air réservé, l'analogie doit être cherchée dans les « deux bulles gazeuses » qui ne sont pas mélangées ni nivelées. Poincaré reprend les travaux sur la forme d'équilibre[43]. Comme vu plus haut, la figure d'une masse gazeuse passe de la sphère à l'ellipsoïde à trois axes inégaux, avec l'augmentation de sa vitesse de rotation. Si ce processus continue, la force centrifuge l'emporte sur l'attraction, conformément au mécanisme étudié par Roche, en laissant à deux extrémités les jets dont « l'*aile marchante* prend un retard sur le *pivot* » (en vertu du principe des aires). On peut considérer comme deux « voies lactées » qui se sont rencontrées, mais pas « encore exercé l'une sur l'autre une action assez prolongée pour que les différences qui les distinguent se soient entièrement nivelées », tout comme « deux bulles gazeuses qui se seraient rencontrées, mais n'auraient pas encore eu le temps de se mélanger[44] ».

La considération sur l'équilibre conduit Poincaré à déduire l'âge de la Voie lactée. L'équilibre statistique serait atteint à la suite d'un grand nombre de chocs. Si les chocs sont rares, il faut envisager par la suite d'un temps extrêmement long. Si le nombre de chocs augmente, la vitesse augmente elle aussi, de sorte qu'il y ait beaucoup d'étoiles qui sortent de la Voie lactée. Ceci constitue la condition de la limitation de durée. Qu'en est-il de l'espérance de vie des étoiles fixée par Kelvin, pas plus de 100 millions d'années ?

N'empêche que le résultat de Kelvin reste valable en tant que limite au moins dans ses traits généraux. S'il y avait plus d'étoiles, brillantes ou obscures, leurs masses « concouraient à l'attraction totale et les mouvements propres des étoiles seraient beaucoup plus grands que ceux qu'on a observés[45] ». De plus, « nous devons penser que tous les flambeaux de notre ciel se sont allumés à peu près en même temps et que l'âge de la Voie Lactée ne dépasse pas un petit nombre de vies d'étoiles[46] ». Ce seront les derniers mots du mathématicien en la matière.

Le monde d'Arrhenius et son démon

D'après Arrhenius, il existe des échanges continuels de la matière et de l'énergie entre étoiles et nébuleuses grâce à la pression de radiation[47]. Une étoile perd de la chaleur et se refroidit continuellement, jusqu'à ce qu'elle at-

42. *Leçons*, p. XX.
43. *Leçons*, § 198, p. 262–263.
44. *Leçons*, p. XX.
45. *ibid.*
46. *ibid.*
47. La pression de radiation fait l'objet de la discussion dans Poincaré, « Les limites de la loi de Newton », pp. 124-125.

teigne la température limite et sa surface commence à se solidifier. Un tel soleil ne serait pas visible, mais peut garder un centre à l'état fluide et de haute température, un peu comme « une bombe remplie d'explosifs [48] ». Il arrive à ces étoiles « éteintes » de se rencontrer et d'où l'engendrement une *Nova*.

Quelle serait la probabilité d'une telle rencontre ? « Etant données les distances qui séparent en moyenne les étoiles et les dimensions de celles-ci, il y a des chances pour qu'un choc se produise au bout d'un temps de l'ordre de 10^{17} années, » remarque Poincaré, alors que l'observation nous rapporte à peu près une étoile par an [49]. Il se peut qu'il y ait beaucoup plus d'étoiles qu'elles ne s'observent, en particulier celles qui sont obscures ; s'il existait 10 000 fois plus d'étoiles observables, les chocs interstellaires seraient beaucoup plus fréquents, assez fréquents pour faire apparaitre une étoile tous les ans. Mais, continue Poincaré, l'existence des étoiles aussi nombreuses n'aurait pas été sans conséquence ; elle aurait été difficile à passer sans être aperçue même au niveau du système solaire.

En tout cas, la rencontre des astres engendre une nouvelle étoile avec une rotation rapide, laissant autour d'eux des jets de matières. Si la rotation continue, la masse fusionnée aura une grande force centrifuge et ne tardera pas de s'approcher d'un disque aplati tout, toujours avec ses jets de matières sous formes « spiraloïdes ». Une fois née et stabilisée, une nébuleuse « capte » constamment les météorites qui viennent de l'espace. Parmi celles-ci il en est qui sont empêchées de tomber dans l'étoile à cause de la radiation. Les météorites poussées par la radiation vont joindre les nébuleuses gazeuses. Celles-ci, captant à leur tour les météorites, se transforment en amas.

L'univers ne manque jamais de particules poussées par cette radiation, des nébuleuses aux étoiles et vice versa, parce qu'il existe une infinité d'étoiles et de nébuleuses dans l'espace qui est lui aussi infini. On revient ainsi à l'infinitisme, conception qui est loin d'être nouvelle et a déjà fait l'objet de discussions et d'objections tant de fois, comme nous en avons examiné quelques-unes plus haut. Il revient à Poincaré d'examiner cette conception ainsi que ses objections. Le passage n'aurait peu à voir s'il n'était pas prononcé par Poincaré lui-même. Car c'est pour la première fois à ma connaissance qu'il est question de l'infini dans ce contexte, à savoir dans l'espace et le temps, dans son œuvre. Partisan fervent de l'infini potentiel en mathématique, il était plutôt peu enclin, sinon peu intéressé, à ces questions.

Et Poincaré de mentionner « une double objection » qui se rapporte de fait ce que nous avons appelé le paradoxe optique et le paradoxe gravitationnel.

48. *Leçons*, § 187, p. 248.
49. *Leçons*, pp. 248-249.

> D'une part, si la densité des étoiles est constante dans tout l'espace, leur lumière totalisée devrait donner au Ciel entier l'éclat même du Soleil. Cela serait vrai si le vide interstellaire laissait passer toute la lumière qui le traverse sans en rien garder, de sorte que l'éclat apparent d'un astre varierait en raison inverse du carré de la distance [50].

Or, l'objection peut être répondue assez facilement, selon notre auteur, par l'hypothèse de l'absorption de la lumière par le milieu interstellaire (« même s'il peut d'ailleurs l'être très peu », ajoute-t-il, sans citer le nom d'Olbers). Dans ce cas, une infinité d'étoiles aurait beau rayonner dans tout l'univers jusqu'à éclairer notre planète jour et nuit, puisque leur lumière émise se perdrait au cours de la transmission dans l'espace cosmique. Il en serait de même pour l'autre objection, celle sur la gravitation : si l'univers était infini, l'attraction serait « infini ou indéterminée » [51]. Le remède consisterait dans une modification de la loi de Newton par la supposition d'« une sorte d'absorption de la gravitation, se traduisant par un facteur exceptionnel ». Poincaré fait aussi allusion aussi au modèle riemannien, c'est-à-dire fini, mais illimité.

« Ce n'est pas tout : le monde de M. Arrhenius n'est pas seulement infini dans l'espace, mais il est éternel dans le temps ; c'est surtout ici que ses vues sont géniales et qu'elles nous apparaissent comme suggestives [52], » continue Poincaré. Prenons l'univers pour « une vaste machine thermique », avec les étoiles qui fonctionnent comme une source chaude et les nébuleuses, une source froide. En vertu du principe de Carnot, cette machine cosmique ne tardera pas à atteindre l'état équilibre et donc la « mort thermique », où il n'y aura plus d'échange. Mais si les échanges entre les sources ne s'arrêtaient pas et le monde revenait constamment à un état initial avec ses deux sources séparées ? « Pour revenir en arrière, il faudrait les [deux sources cosmiques] *démêler*, détruire le mélange une fois fait ; [...] il faudrait pour cela le démon de Maxwell, c'est-à-dire un être très délié et très intelligent [53]. » A cet être imaginaire, imaginé dans le but de faire exception, pour ne pas dire objection, au second principe de la thermodynamique, Arrhenius substitue quelque chose de bien réel qui se trouve effectivement dans les phénomènes : les nébuleuses.

Les nébuleuses sélectionneraient une à une des particules en provenance des étoiles, de telle façon que « l'entropie augmente dans les soleils, mais diminue dans les nébuleuses [54] ». Elles sont généralement d'une faible densité et d'une faible force d'attraction si bien qu'elles sont incapables de retenir des molécules rapides comme l'hélium ou l'hydrogène, de même que, dans les planètes,

50. *Leçons*, p. XXI.
51. *Leçons*, pp. XXI-XXII.
52. *Leçons*, p. XXII.
53. *ibid.*
54. *Leçons*, § 189.

les molécules légères ne restent plus dans l'atmosphère à cause de la faible gravité. Or, les molécules à grande vitesse, ce sont des molécules « chaudes ». Sans pouvoir retentir des molécules chaudes, les nébuleuses resteraient toujours « froides » tout en recevant constamment de la chaleur en provenance des étoiles extérieures. « Cette énergie communique de la vitesse à certaines molécules, mais ces molécules s'éloignent de la nébuleuse pour toujours. Ces molécules chaudes finiront par être absorbées par des soleils, contribuant ainsi à entretenir leur rayonnement [55], » ainsi résume Poincaré la théorie du chimiste suédois. Ainsi cette « vaste machine thermique » qu'est l'univers échappe-t-il à la mort thermique.

3 Bilan et épilogue

3.1 Des anneaux aux spirales

Parmi les hypothèses examinées, celle de Laplace est la meilleure, à ceci près qu'elle se borne au système solaire, mais de façon à rendre compte de la formation et de la constitution de l'univers dans son ensemble.

> S'il n'y avait que le système solaire, je n'hésiterai pas à préférer la vieille hypothèse de Laplace ; il y a très peu de choses à faire pour la remettre à neuf. Mais la variété des systèmes stellaires nous oblige à élargir nos cadres, de sorte que l'hypothèse de Laplace, si elle ne doit pas être entièrement abandonnée, devrait être modifiée de façon à n'être plus qu'une forme, adaptée spécialement au système solaire, d'une hypothèse plus générale qui conviendrait à l'Univers tout entier et qui nous expliquerait à la fois les destins divers des Etoiles, et comment chacune d'elles s'est fait sa place dans le grand tout [56].

Les nouvelles découvertes en viennent-elles à corroborer la vieille hypothèse ? Si les nébuleuses ne sont pas condensées toutes simultanément et qu'elles s'observent en diverses phases de condensation, cela peut servir de preuve qu'il existe de la condensation ou de l'agglomération de matières en voie de transformation en étoiles. En effet, Laplace avait trouvé une « preuve » de son hypothèse dans les nébuleuses en condensation observées par Herschel, ainsi que dans les anneaux de Saturne. Il n'en est plus de même à partir du moment où il est question de rendre compte de « la variété des systèmes ». Ce sont surtout les nébuleuses spirales qui attirent l'attention particulière par leur image particulièrement spectaculaire, mais aussi par son rapport avec l'hypothèse

55. *Leçons*, § 191, p. 254.
56. *Leçons*, p. XXIV.

cosmogonique selon laquelle le système solaire aurait pour origine une telle nébuleuse. La distribution actuelle des étoiles dans la Voie lactée et l'implication cosmogonique des nébuleuses spirales, ce sont deux préoccupations majeures des auteurs de cosmogonie de l'époque. J. Jeans résumera la situation comme suit :

> [L]a plupart des théories cosmogoniques cherchaient à prouver que les anneaux de Saturne (les plus extraordinaires objets astronomiques alors connus) étaient une étape intermédiaire dans l'évolution des systèmes planétaires : depuis la découverte des nébuleuses spirales, la tendance a été de tenter de prouver que ce sont les nébuleuses spirales qui constituent le maillon en question [57].

Nous avons déjà vu dans le chapitre III les deux « principes » par rapport à la résolubilité des nébuleuses : le principe nébuleux (ou gazeux) et le principe sidéral. Qu'en est-il des nébuleuses spirales ? Ou bien elles sont nébuleuses, c'est-à-dire des gaz, à l'intérieur de la Voie lactée, ou bien sidérales, c'est-à-dire des étoiles, en dehors de la Voie lactée (« Sont-elles à des distances énormes, en dehors de la Voie Lactée, et sont-elles elles-mêmes des voies lactées vues de loin ? Ou bien, malgré la nature de leur spectre, sont-elles incapables d'être assimilées à des amas de vraies étoiles [58] ? »). Comme d'autres nébuleuses, une nébuleuse spirale peut convenir tantôt au principe sidéral qui implique sa position éloignée, tantôt au principe nébuleux, c'est-à-dire en état de gaz ou de fluide, susceptibles d'évoluer en étoiles (« Est-il possible d'admettre que notre système solaire soit sorti d'une des espèces de nébuleuses que nous connaissons, par exemple des nébuleuses spirales, ou planétaires ou annulaires [59] ? »). Outre ces problèmes cosmographique (positionnement par rapport à notre galaxie) et cosmogonique (conformité avec l'hypothèse de Laplace), les nébuleuses spirales donnent lieu à des problèmes *dynamiques*, notamment en lien avec les courants d'étoiles de Kapteyn. Par quels mécanismes s'expliquent leur configuration si singulière et leur mouvement double, celui des « ailes marchantes », c'est-à-dire leur bras, et celui du pivot ? Comment peut-on restituer la formation de leurs morphologies et, éventuellement, différentes phases de leur évolution ?

T. J. J. See essaie d'expliquer par un choc entre deux « nuages cosmiques » [60]. Le modèle de choc est proposé aussi pour expliquer les *novae* : la naissance d'une étoile, ce serait moins une évolution uniforme qu'un événement catastrophique comme des chocs entre deux étoiles, étoile et météorite, étoile et

57. James Jeans (1919), *Problems of Cosmogony and Stellar Dynamics*, London : Cambridge University Press, p. 18. Passage traduit in Verdet, *Aux origines du monde*, p. 180.
58. *Leçons*, p. XXIV.
59. *ibid.*
60. *Leçons*, § 201, p. 267.

nébuleuse. Belot s'imagine de son côté un choc d'une nébuleuse en forme cylindrique et en mouvement tourbillonnaire (ce qu'il appelle « tube-tourbillon ») avec une autre nébuleuse qui est amorphe et en mouvement de translation (« nuage cosmique »). Ces chocs engendrent une onde stationnaire avec une série de nœuds et de ventres équidistants. Des ventres sont nées les planètes, tandis que le tube de l'origine devient le Soleil.

> Il ne parait donc pas impossible d'expliquer les formes spirales des nébuleuses en ne faisant intervenir que la loi de gravitation et des considérations statistiques rappelant celles de la théorie des gaz [61].

3.2 Dialogues manqués. *Leçons* lu par ses contemporains

Aloys Verschaffel s'interrogera sur la pertinence de l'analogie entre les nébuleuses et les gaz, ainsi que l'applicabilité de la loi de Maxwell à des mélanges d'étoiles comme à des mélanges de gaz, pour en faire une objection plus ou moins explicite à Poincaré et à Thomson, sinon à toute l'idée d'application cosmologique de la théorie des gaz. Poincaré suppose que la Voie lactée est en état d'équilibre. Que faut-il entendre par l'équilibre ici ? Soit un équilibre adiabatique ou gravitationnel, c'est-à-dire isolé des autres systèmes, soit un « équilibre statistique » selon lequel on peut dire statistiquement que les vitesses des étoiles sont réparties autour de la moyenne conformément à la loi de distribution de Maxwell et que, une fois atteintes à cet état, elles en resteront.

« L'équipartition de l'énergie entre les molécules gazeuses repose sur leur parfaite élasticité et sur leur indestructibilité par le choc dans les conditions de nos expériences. Nous ne pouvons rien invoquer de pareil pour les masses cosmiques [62] », dit Verschaffel. Il se met à calculer la probabilité des chocs des étoiles qui n'aurait pas été très grande dans l'univers primitif vu son état actuel plutôt raréfié. Poincaré avait montré que de telles rencontres ne sont guère envisageables pour 200 millions d'étoiles observables, à moins qu'on ne suppose

61. *Leçons*, p. 263.

62. Aloys Verschaffel (1914), « Essai d'une contribution à l'explication de quelques faits récemment découverts dans l'astronomie stellaire », *Bulletin astronomique, Série I*, 31, p. 267.

Voir la lettre de Poincaré à Verschaffel in Henri Poincaré (2016), *La correspondance entre Henri Poincaré, les astronomes, et les géodésiens*, éd. établie, annot. et introd. par Scott A. Walter *et al.*, Basel : Birkhäuser, section 45.1. ALS 2p. A. Verschaffel 371, Château d'Abbadia.

Les éditeurs signalent que la note en question a été soumise à *Bulletin astronomique* avant d'être remise à Poincaré par l'intermédiaire de Guillaume Bigourdan, membre de comité de rédaction de la revue. Elle sera publiée finalement en 1914, accompagné d'une remarque de P. Puiseux : Pierre Puiseux (1914), « Remarque au sujet de l'article précédent », *Bulletin astronomique, Série I*, 31.

un changement radical au cours de l'évolution de l'univers. Pourtant, qu'est-ce qui empêche que l'univers connût un tel changement et qu'autrefois il fût plus dense, avec des chocs encore plus nombreux et plus fréquents. Puiseux mentionne, de sa part, une autre explication, faisant recours à l'hypothèse d'une matière disséminée, impondérable et résistante à la loi de Newton – l'éther. D'après l'astronome, cette vieille idée d'éther dispose d'une preuve d'existence fondée sur les expériences, notamment l'observation des protubérances et la couronne du Soleil, de manière à expliquer l'équipartition de l'énergie dans un système stellaire sans avoir besoin de faire intervenir des chocs [63].

Poincaré avait lu la note de Verschaffel et même écrit une lettre à ce dernier, qu'il dit avoir trouvée intéressante, avec quelques observations de sa part :

> 1° S'il s'agit seulement des mouvements propres angulaires ou des vitesses radiales, car dans le 1er cas on pourrait supposer qu'elles sont lentes parce qu'elles sont loin.
> 2° S'il s'agit des mouvements propres observés, c'est-à-dire des mouvements par rapport au Soleil, ou des mouvements corrigés de la parallaxe c'est-à-dire des mouvements absolus. Dans l'exposé de votre théorie, il serait nécessaire d'expliquer nettement les hypothèses dont vous partez. Les vitesses v et v sont-elles rapportées au Soleil, ou au Centre de gravité du système Solaire ; à quelle loi de probabilité sont-elles supposées satisfaire, est-ce celle de Maxwell [64] ?

3.3 Dernières pensées (1911–1912)

Le IVe Congrès international de philosophie a lieu à Bologne en avril 1911. P. Langevin prononce une conférence intitulée « L'évolution de l'espace et du temps » [65]. Elle suscitera un retentissement considérable chez les philosophes, à tel point que la Société française de philosophie invite le physicien, au mois d'octobre de la même année, pour revenir sur le sujet [66]. Langevin s'interroge sur le rapport entre deux conceptions, l'une, le mécanisme, qu'il entend par la « fusion de la mécanique rationnelle et des hypothèses atomistiques », et l'autre, l'électromagnétisme, qui « constitue une discipline, un mode de pensée tout-à-fait [*sic*] à part, tout-à-fait distinct de la mécanique [...] et s'est assimilé sans aucun effort l'immense domaine de l'optique et de la chaleur rayonnante devant lequel le mécanisme était resté impuissant [67] ». Pour résoudre la contra-

63. « On peut aussi démontrer, je crois, que l'équipartition de l'énergie tend à s'établir à la longue, dans un système stellaire, sans intervention de chocs. » Puiseux, *cit.*
64. Poincaré, *La correspondance Poincaré-astronomes*, p. 308.
65. Paul Langevin (1911), « L'évolution de l'espace et du temps », *Scientia*, 10, 2.
66. Paul Langevin (1912), « Le temps, l'espace et la causalité dans la physique moderne », *Bulletin de la Société française de philosophie*, 12, 1, séance du 19 octobre 1911.
67. Langevin, « L'évolution de l'espace et du temps », pp. 33-34.

diction apparente entre elles, tout en tenant compte du « fait expérimental » énoncé par le principe de relativité, la nouvelle mécanique modifie les notions d'espace et de temps ainsi que celles qui sont liées comme la simultanéité ou la causalité. C'est dans ce contexte que Langevin expose sur la notion d'univers de Minkowski en tant que synthèse de l'espace et du temps et sur les conséquences qui en résultent, notamment ce qu'on appellera le « paradoxe des jumeaux ».

C'est en mai 2012, Poincaré se trouve à l'Université de Londres pour une conférence, qui lui sert d'occasion pour répondre à Langevin sur « une des questions qu'[il a] le plus souvent traitées », mais qu'il veut aborder cette fois-ci d'un tout autre point de vue, c'est-à-dire à la lumière de la mécanique relativiste.

> Le principe de relativité, tel que le conçoit Lorentz, ne va-t-il pas nous imposer une conception entièrement nouvelle de l'espace et du temps et par là nous forcer à abandonner des conclusions qui pouvaient sembler acquises ? N'avons-nous pas dit que la géométrie a été construite par l'esprit à l'occasion de l'expérience, sans doute, mais sans nous être imposée par l'expérience, de telle façon que, une fois constituée, elle est à l'abri de toute révision, elle est hors d'atteinte de nouveaux assauts de l'expérience ? et cependant les expériences sur lesquelles est fondée la mécanique nouvelle ne semblent-elles pas l'avoir ébranlée [68] ?

Au lieu de s'atteler à un éclaircissement de cette conception « entièrement nouvelle » et ses conséquences, Poincaré revient sur son fondement même qu'est la relativité. Cette dernière constitue elle aussi l'un des sujets le plus souvent traités chez lui ; nous avons vu comment ses idées en la matière évoluent en traversant de la géométrie à la physique, en passant par la mécanique. Il propose une nouvelle distinction entre la relativité psychologique et la relativité physique : la première se rapporte à la mesure des corps par les instruments qui sont eux-mêmes des corps, tandis que la seconde, aux *lois* elles-mêmes.

> **Le principe de relativité physique.** Considérons les lois auxquelles le monde obéit ; elles peuvent s'exprimer par des équations différentielles ; nous constatons que ces équations ne sont pas altérées, si l'on change les axes rectangulaires de coordonnées, ces axes restant fixes ; ni si l'on change l'origine du temps, ni si l'on remplace les axes rectangulaires fixes par des axes rectangulaires mobiles, mais dont le mouvement est une translation rectiligne et uniforme [69].

Dans « L'évolution des lois », qu'il devait présenter un an avant au Congrès de philosophie à Bologne, Poincaré revenait à un autre sujet de sa prédilection :

68. Poincaré, « L'espace et le temps », p. 97.
69. Poincaré, *cit.*, pp. 101-102. Les mots gras sont de moi.

la loi [70]. Une loi, toujours définie comme « lien constant entre l'antécédent et le conséquent, entre l'état actuel du monde et son état immédiatement postérieur, en un mot [...] une équation différentielle [71] », peut-elle se dire « évoluer » ? Une loi n'est-elle pas constante et immuable par définition même ? En effet, affirme Poincaré, l'immuabilité est une « prémisse de tous nos raisonnements » relatifs à la loi, prémisse qui doit donc se retrouver dans toutes les conclusions, que ce soit sur les orbites des planètes ou sur l'âge du Soleil ou de la Terre. Seulement le calcul du géologue est plus « exigeant » et contraignant que celui du mécanicien céleste, parce qu'il a à prendre en compte plusieurs causes qui concourent au point d'éloigner du cours tranquille assigné par la loi.

Lalande avait constaté, nous l'avons vu plus haut, qu'il est impossible de rétrodire du passé à partir du présent. Poincaré renouvelle l'objection et l'analyse qu'il avait déjà faites sur l'« erreur » du philosophe : les différences dans les causes tendent à diminuer dans les effets, de telle façon que l'équivalence entre les deux ne puisse plus subsister surtout en géologie et, *a fortiori*, dans la science de la vie. Même quand il y a un écart avec les résultats prévus par la loi dans les effets, nous ne saurions pas l'observer directement, que cette observation soit effectuée dans un long laps du temps ou à l'aide des instruments perfectionnés, car nous pourrions toujours prétendre qu'elle n'est pas à la hauteur de l'exactitude et il reste encore des moyens de compenser cet écart avec la prévision, de façon à garder notre loi immuable et constante. Cependant, si la loi n'est pas contingente en elle-même, il se peut qu'elle *ait* pour origine la contingence. Ainsi la loi de Mariotte est-elle une *conséquence* des mouvements des molécules qui obéissent aux lois du hasard. Encore faut-il que chaque molécule suive les lois déterministes, dont l'immuabilité reste toujours intacte. Entre la loi de Mariotte et celle de Maxwell relative à la théorie cinétique des gaz, il n'y a pas tant une évolution qu'un remplacement « synthétique », une généralisation ou bien même une compréhension. Ce sont plutôt les savants qui évoluent.

L'immuabilité des lois prend appui sur la relativité physique. Une loi exprimée par une équation différentielle ne s'observe pas directement. C'est à travers des équations finies, à savoir des relations établies entre grandeurs directement mesurables et modifiables par le changement d'axe, qu'il devient possible de « manipuler » des conditions initiales, ainsi que de rendre compte quelles sont « réelles » parmi plusieurs solutions possibles, c'est-à-dire réali-

70. Au Congrès, E. Borel lut le texte de son collègue absent en raison d'un problème de santé

71. Poincaré, « L'évolution des lois », p. 50, ou encore Henri Poincaré (1905a), « Cournot et les principes du calcul infinitésimal », *Revue de métaphysique et de morale*, 13, repris dans *DP*, p. 189.

sées ou susceptibles de l'être. Pour vérifier une loi, il faut pouvoir modifier des conditions initiales, afin de voir si les équations restent les mêmes après de telles modifications. Ceci est tout à fait réalisable pour un système isolé, qu'il soit le système solaire ou celui de Sirius. Mais qu'en est-il de l'univers ?

> Toutes les parties du monde sont solidaires et quelque loin que soit Sirius, il n'est sans doute pas absolument sans action sur ce qui se passe chez nous. Si donc nous voulons écrire les équations différentielles qui régissent le monde, ou bien ces équations seront inexactes, ou bien elles devront dépendre de l'état du monde tout entier. Il n'y aura pas un système d'équations pour le monde terrestre, et un autre pour le monde de Sirius, il y en aura un seul qui s'appliquera à tout l'univers [72].

Prenons ce deuxième cas, où il n'y a qu'un seul système de lois pour tout l'univers. La vérification de ces lois ne sera plus possible : « l'observation ne nous donnera qu'une seule solution unique, celle qui est réalisée ; car l'univers n'est tiré qu'à un seul exemplaire [73]. » Toujours *in*vérifiable, elles ne seront jamais prises en défaut. « Ces difficultés s'évanouiront, continue-t-il, si l'on ne tient pas à une rigueur absolue [74]. » Même si notre système est « solidaire » avec tous les autres d'étoiles de l'univers, ceux-ci sont suffisamment éloignés pour avoir des actions significatives sur le nôtre. Chaque monde dispose de son propre système de lois, lequel peut se rapporter à un autre système quelconque. « Le principe de relativité prend ainsi un sens : il devient vérifiable [75]. » Pour vérifier, nous n'avons qu'à rapporter nos équations à celle d'un autre système, celui de Sirius par exemple, tout en prétendant comme si ces deux systèmes étaient séparables, indépendants de toutes les autres parties de l'univers ; nous aurons beau vérifier, nous n'aurons qu'un résultat qui sera toujours le même.

> *[V]oyant en effet* qu'il reste vrai quelque éloignés que soient nos petits mondes les uns des autres, nous *convenons* de dire qu'il est vrai pour les équations exactes de l'univers ; et cette *convention* ne sera jamais prise en défaut, puisque, appliqué à l'univers entier, le principe est invérifiable [76].

On se demanderait si ce n'est pas une pétition de principe, argument circulaire ou tautologie. Au contraire, on trouve une traduction du principe de la relativité en un *fait expérimental*. Il devient ainsi « vérifiable et par conséquent il pourrait n'être pas vérifié », et par cela même d'« une vérité expérimentale à laquelle l'expérience impose des limites » [77]. L'expérience ne se contente plus

72. Poincaré, « L'espace et le temps », p. 102.
73. Poincaré, *cit.*, p. 103.
74. *ibid.*
75. Poincaré, *cit.*, p. 104.
76. *ibid.* C'est moi qui souligne.
77. Poincaré, *cit.*, pp. 105-106.

de son rôle de « guide » à l'esprit comme dans le cas des conventions ; elle en vient à s'imposer à l'esprit ce fait en soumettant le principe à une vérification directe et par cela même lui attribuant une signification, un *sens physique*.

> On voit donc quel est le sens du principe de relativité physique ; [...] il signifie que *l'action mutuelle de deux corps tend vers zéro quand ces deux corps s'éloignent indéfiniment l'un de l'autre* ; il signifie que *deux mondes éloignés se comportent comme s'ils étaient indépendants*[78].

C'est toujours l'expérience qui est l'unique source de la vérité et donne *sens* au principe. Le principe de relativité ne fait pas exception. S'il était une convention comme l'est la relativité psychologique, il aurait été *in*vérifiable, donc privé de toute possibilité d'être « *vrai* ». Son sens expérimental lui permet d'être « *vérifiable* », soumis donc au régime de vérité et risque par conséquent de « *n'être pas vérifié* ». Or, une fois soumis à la vérification expérimentale à l'appui de « son sens physique », il finit par se soustraire à toute vérification empirique et redevenir quasi invérifiable au même titre que des conventions de la géométrie.

> [L]'expérience nous apprend que cela est *à peu près* vrai ; elle ne peut nous apprendre que cela est *tout à fait* vrai, puisque la distance des deux systèmes demeurera toujours finie. Mais rien ne nous empêche de supposer que cela est *tout à fait* vrai ; rien ne nous en empêcherait même si l'expérience donnait au principe un apparent démenti[79].

Une fois redevenu une convention et allié à un nouveau groupe de transformations, le principe de relativité sert à définir l'espace, le temps et d'autres notions liées comme la simultanéité d'une part, et d'autre part, à corroborer de nouvelles hypothèses comme celles de Lorentz.

78. *ibid.* C'est moi qui souligne.
79. Poincaré, *cit.*, p. 107.

Conclusion générale

De la mécanique à la physique. Une philosophie et/ou une cosmologie à venir

En avril 1922, tout Paris accueillera Einstein. La Société française de philosophie le recevra pour une séance entièrement consacrée à la théorie de la relativité, en présence de philosophes et de savants aussi éminents que H. Bergson, L. Brunschvicg, E. Cartan, J. Hadamard, P. Langevin, E. Le Roy ou encore X. Léon [1]. Ce dernier, dans le discours d'introduction à la séance prononcé en qualité de président, évoquera le rôle de Poincaré « dans la création de ce qu'on a appelé la mécanique nouvelle, en montrant la part de convention qui existait dans la mécanique classique et en introduisant certaines notions fécondes ». Ce fut une révolution, continuera Léon, mais ce fut à Einstein de l'accomplir [2].

Ce sera à P. Langevin de faire l'intervention principale de la séance. Il mettra l'accent sur la nature essentiellement *expérimentale* de la théorie de la relativité, de son origine à sa méthode, partant des faits connus et prévoyant de nouveaux faits, sans introduire rien d'abstrait ni d'« absolu arbitraire ». D'après lui, la théorie a pour résultat de proscrire la géométrie euclidienne et le temps universel de leur place privilégiée, mais aussi de modifier le système de savoirs, notamment « la classification des connaissances humaines proposée par A. Comte » :

> Comte mettait à la base de nos concepts immédiats un espace et un temps absolus sur lesquels il édifiait la mécanique, la physique, les sciences physico-chimiques et leurs conséquences biologiques ; pour lui

1. Société française de Philosophie (1922), « La théorie de la relativité », *Bulletin de la Société française de philosophie*, 22, 3, compte rendu de la séance du 6 avril 1922. A cette séance a lieu la célèbre rencontre entre Einstein et Bergson. Sur cet évènement, voir Biezunski, *Einstein à Paris* ; Jimena Canales (2015), *The Physicist and the Philosopher : Einstein, Bergson, and the Debate That Changed Our Understanding Of Time*, Princeton : Princeton University Press.

2. « Quel spectacle c'eût été que la rencontre aujourd'hui, en cette enceinte, de ces deux créateurs de mondes, fils de pays différents, et quelle lumière en eût pu jaillir pour cette recherche de la vérité qui, par-delà les bornes des frontières, affirme l'universalité de l'esprit humain et réalise le consentement de toutes les intelligences ! » X. Léon, *Ibid.*

> la Physique avait essentiellement pour théâtre l'espace euclidien où régnait un temps absolu. La conception nouvelle est tout autre : c'est une fusion de la géométrie et de la physique rendant impossible l'existence d'un temps et d'un espace absolus [3].

Langevin parle ici en physicien plutôt qu'en commentateur de la philosophie de Comte. Quelle que soit la pertinence de son commentaire, il est intéressant de remarquer que le physicien discute de la classification des sciences en lien avec les notions d'espace et de temps. Chez Comte, la mécanique précédait la physique. Avec la relativité, qui est, selon Langevin, « avant tout une théorie physique », la géométrie est fusionnée avec la physique, et la mécanique ne peut plus occuper la même place... si seulement elle en occupe toujours une.

Un « absolu arbitraire » n'a jamais eu de place dans la pensée de Poincaré. Il tenait à classer les sciences de manière dynamique et historique. Nous avons vu comment il examinait la condition de possibilité de la physique en faisant appel à l'*histoire* de cette science. « La Physique mathématique, nous le savons, est née de la Mécanique céleste qui l'a engendrée à la fin du XVIIIe siècle, au moment où elle venait elle-même d'atteindre son complet développement [4], » disait-il. Il nous apprenait ainsi que la physique telle que nous la connaissons, c'est-à-dire sous sa forme mathématisée, n'a pas toujours existé ; elle n'a pas été créée *ex nihilo* mais *engendrée*, ayant pour origine la mécanique (céleste). Une fois née, elle n'en est pas restée ; elle a connu une évolution et traverse désormais une transformation profonde. Qu'est-ce qu'elle va devenir ? Est-ce qu'elle va engendrer elle aussi une nouvelle science ?

Qu'en est-il de la mécanique ? Qu'est-ce qu'elle est devenue après son « complet développement » à la fin du XVIIIe siècle et son « accouchement » de la physique au même moment ? La carrière de Poincaré est exemplaire d'un mathématicien de son temps, partant des mathématiques pures, allant à la mécanique céleste, en passant par la mécanique analytique et rationnelle, digne du nom de « dernier mécanicien céleste au sens traditionnel du terme », aux dires de B. Morando [5]. La mécanique céleste classique s'achève avec lui, pour ne pas dire *malgré* lui et ses efforts de pousser « les limites de loi de Newton » jusqu'à l'extrême jusqu'à laisser l'une des contributions les plus riches et les plus originales de son œuvre scientifique. Il en est autrement dans son œuvre *philosophique* : la mécanique ne fait guère l'objet d'une discussion approfondie, en tout cas beaucoup plus rarement que la physique. Tout se passe comme si une science aussi accomplie ne l'inspirait pas philosophiquement.

3. Société française de Philosophie, « La théorie de la relativité », p. 350.
4. *VS*, p. 124.
5. Bruno Morando (1995), « The Golden Age of Celestial Mechanics », in *Planetary Astronomy*, sous la dir. de René Taton et Curtis Wilson, Cambridge : Cambridge University Press, t. 2B.

Dans *La science et l'hypothèse*, il affirme que la mécanique est à l'origine une science *expérimentale*, dont les principes fondamentaux sont choisis par le guide de l'expérience, exactement comme en géométrie. La mécanique et la géométrie sont guidées par les mêmes sortes d'expérience faites sur la lumière en propagation, les corps naturels ou bien notre propre corps. De même, elles ont ceci de commun que, malgré leur origine expérimentale, ces principes finissent par devenir des *conventions*, dont la rigueur est tellement absolue qu'aucune expérience ne viendra les renverser.

> Qu'on ne nous dise pas que je trace ainsi des frontières artificielles entre les sciences ; que si je sépare par une barrière la géométrie proprement dite de l'étude des corps solides, je pourrais tout aussi bien en élever une entre la *mécanique expérimentale* et la *mécanique conventionnelle* des principes généraux. Qui ne voit en effet qu'en séparant ces deux sciences je les mutile l'une et l'autre, et que ce qui restera de la mécanique conventionnelle quand elle sera isolée ne sera que bien peu de chose, et ne pourra nullement être comparée à ce superbe corps de doctrine que l'on appelle la géométrie ?
>
> On comprend maintenant pourquoi l'enseignement de la mécanique doit rester expérimental.
>
> C'est ainsi seulement qu'il pourra nous faire comprendre la genèse de la science, et cela est indispensable pour l'intelligence complète de la science elle-même [6].

La mécanique ne serait-elle pas déjà devenue conventionnelle et réduite à ce « bien peu de chose » ? Elle occupait une place centrale dans la science classique, servant à la fois de modèle de la science et de conception du monde. La situation changera vers le tournant du XXe siècle et la mécanique ne sera plus ce qu'elle était ; on la considérera comme une *méthode* plutôt qu'une discipline proprement dite. L'œuvre philosophique de Poincaré nous en témoigne [7]. Dans *La science et l'hypothèse*, la mécanique occupait toute une partie placée de plus au centre de l'ouvrage. Elle n'apparait plus dans le plan de *La valeur de la science*, avant de réapparaitre au nom de la « nouvelle mécanique » dans *Science et méthode*.

Parallèlement à cette nouvelle mécanique entre en scène une autre mécanique tout aussi nouvelle : la mécanique statistique. A quoi Poincaré ne reste pas toujours indifférent, tout en gardant une réserve. Rappelons le petit passage ajouté à la deuxième édition de *Thermodynamique*, qui résume un peu trop rapidement toute la contribution du physicien viennois avec la métaphore

6. *SH*, pp. 152-153. Mes soulignements.

7. Sur le sens et la place de la mécanique chez Poincaré, voir Anne-Françoise Schmid (2015), « La double fonction de l'expérience chez Henri Poincaré », in *Les mathématiques et l'expérience. Ce qu'en ont dit les philosophes et les mathématiciens*, Paris : Hermann.

des grains [8]. Dans sa notice nécrologique de Boltzmann, Poincaré nous laisse un autre passage qui résume, de manière curieuse, non seulement les travaux du physicien autrichien, mais aussi toute la théorie cinétique :

> Boltzmann, qui vient de mourir tragiquement, professait depuis longtemps à Vienne ; il s'était surtout fait connaitre par ses recherches sur la théorie cinétique des gaz. *Si le monde obéit aux lois de la Mécanique qui permettent indifféremment de marcher en avant et en arrière, pourquoi tend-il constamment vers l'uniformité sans que l'on puisse le faire rétrograder ?* Telle est la question qu'il avait entrepris de résoudre et non sans quelques succès [9].

Boltzmann entreprenait, en effet, toute sa vie de résoudre la question de l'incompatibilité des lois de la mécanique avec le second principe ; s'il n'était ni le premier ni le dernier, ses « quelques succès » marqueront l'histoire et serviront d'acte fondateur de la mécanique statistique. On sent que l'époque est bel et bien révolue ; on a du mal à s'imaginer un système de connaissances qui exclue la statistique comme chez Comte. Reconnue d'abord pour sa valeur instrumentale puis comme une *méthode* proprement dite et indispensable notamment à la physique, elle finira par s'imposer comme une *discipline* indépendante à part entière d'une part, et d'autre part, comme le fondement même de toute science.

Pour Poincaré, le problème cosmologique s'impose à tout l'esprit qui réfléchit purement et simplement, mais aussi impérativement ; il est l'un des premiers questionnements sur le monde, et aussi l'un des plus fondamentaux, sans lesquels la science ne serait même pas possible.

> [N]ous devrions peut-être attendre pour chercher une solution que nous en ayons patiemment rassemblé les éléments, et que nous ayons acquis par là quelque espoir sérieux de la trouver ; mais si nous étions si raisonnables, si nous étions curieux sans impatience, il est probable que nous n'aurions jamais créé la Science et que nous nous serions toujours contentés de vivre notre petite vie. Notre esprit a donc réclamé impérieusement cette solution, bien avant qu'elle fût mûre, et alors qu'il ne possédait que de vagues lueurs, lui permettant de la deviner plutôt que de l'atteindre. C'est pourquoi les hypothèses cosmogoniques sont si nombreuses, si variées, qu'il en naît chaque jour de nouvelles, tout aussi incertaines, mais tout aussi plausibles que les théories plus anciennes, au milieu desquelles elles viennent prendre place sans parvenir à les faire oublier [10].

8. Poincaré, *Thermodynamique*, p. 450. Rappelons que, si la seconde édition date de 1908, le cours a été dispensé en 1893, juste après le débat avec Tait. *Supra*, chapitre IV.
9. *Comptes rendus de l'Académie des sciences* 163, 25 (1906), p. 997. Mes soulignements.
10. *Leçons*, p. V.

Cette question de l'origine, qui est à l'origine de la science, est-elle elle-même bien fondée et bien posée ? Elle suppose, dans un premier temps, que le monde dispose d'une « origine » et, dans un deuxième temps, qu'il n'a pas toujours été depuis son origine ce qu'il est actuellement, mais *évolué*. On pourrait penser le contraire et croire que le monde ait été toujours le même depuis son origine. « Mais il y a deux raisons de rejeter cette manière de voir, » dit notre auteur.

Premièrement, le spectacle céleste manifeste un ordre qui « ne peut être l'effet du hasard ». Qui plus est, continue Poincaré, « si l'ordre que nous constatons n'est pas dû au hasard, et si on renonce à l'attribuer à quelque décret divin immédiatement exécutoire, il faut qu'il ait succédé au chaos, il faut donc que les astres aient changé [11] ». Qu'il y ait dans le monde un ordre et que cet ordre ne soit pas dû au hasard ni à une cause divine, tel est, nous l'avons vu plus haut, le point de départ du questionnement cosmogonique de Laplace : « [p]ourquoi l'ordre règne-t-il dans le système solaire si cet ordre n'est pas dû au hasard [12] » ? Deuxièmement, d'après le second principe de la thermodynamique, l'énergie se dissipe jusqu'à ce que le monde atteigne son état final, un état d'équilibre parfait et uniforme. Puisqu'un tel état n'est toujours pas atteint, force est de constater que le monde doit et a toujours dû changer. Ce principe ne nous apprend pas seulement que le monde évolue, mais *comment* et dans quel sens s'effectue cette évolution : du non-équilibre à l'équilibre, de l'indifférencié au différencié, du désordonné à l'ordonné...

Prenons l'hypothèse de Kant-Laplace : qu'il soit un chaos comme chez Kant ou une nébuleuse en rotation uniforme comme chez Laplace, l'état primitif est supposé *peu différencié*, prêt à passer vers un état *plus différencié* et capable de produire l'*ordre* actuel du monde. Comment se fait-il qu'un système ordonné et différencié se forme à partir d'un système désordonné et indifférencié, et ceci, à l'encontre du second principe de la thermodynamique ? A-t-il fallu attribuer à ce monde une sorte d'état d'exception à un moment donné dans son histoire pour lui donner naissance même et rendre possible son évolution ? C'est ce qui incite Boltzmann à faire une hypothèse cosmogonique, nous l'avons vu plus haut.

Rappelons comment Poincaré essayait de réconcilier les lois réversibles de la mécanique avec les phénomènes irréversibles dans son premier article sur le sujet, « Le mécanisme et l'expérience » (1893). Pour lui, l'irréversibilité n'imposait pas nécessairement une limite à la mécanique ; le second principe se soumettait à un théorème mécanique, à savoir le théorème de récurrence.

11. *Leçons*, p. VI.
12. *ibid.*

Dans les *Leçons*, le mécanisme tient toujours debout, désormais appuyé sur les lois de la statistique :

> Mais nos machines thermiques ne tarderaient pas à s'arrêter, si on ne leur fournissait sans cesse de nouveaux combustibles ; abandonnées à elles-mêmes, les deux sources s'épuiseraient, c'est-à-dire que leurs températures s'égaliseraient et finiraient par se mettre en équilibre. C'est là qu'exige le principe de Carnot. Et ce principe lui-même est une *conséquence des lois de la Mécanique statistique*. C'est *parce que* les molécules sont *très nombreuses* qu'elles *tendent à se mélanger* et à *ne plus obéir qu'aux lois du hasard*[13].

La thermodynamique elle-même faisait partie de la partie sur la *mécanique* de *La science et l'hypothèse*, plus précisément à la charnière de la mécanique à la physique. Elle finit par s'installer dans la partie physique dans les ouvrages postérieurs comme *La valeur de la science*, avec ses deux principes présentés comme des principes *physiques* et promus au rang des plus fondamentaux, « invérifiable[s] et par là même irréfutable[s] »[14]. Toujours est-il que Poincaré finit par revenir à l'interprétation statistique de ce principe selon laquelle « le mécanisme » l'emporte sur « l'expérience ». L'oscillation entre le mécanisme et l'expérience, ou bien, en d'autres termes, la mécanique et la physique, s'observe toujours et partout dans les *Leçons*.

Tout au long des *Leçons*, Poincaré ne cesse de souligner la limite de la mécanique en matière de la cosmogonie : « Toutes ces hypothèses, si divergentes d'ailleurs, ont un caractère commun ; ce sont des théories de Mécanique rationnelle, d'Astronomie mathématique ; elles font peu d'emprunts aux sciences physiques ; elles sont par là incomplètes[15]. » Il n'adhère pourtant pas à des hypothèses physiques de son temps. « Chacune des théories proposées est séduisante par certains côtés. Les unes donnent d'une façon très satisfaisante l'explication d'un certain nombre de faits ; les autres embrassent davantage, mais les explications perdent en précision ce qu'elles gagnent en étendue ; ou bien, au contraire, elles nous donnent une précision trop grande, mais qui n'est qu'illusoire et qui sent le coup de pouce[16], » lit-on vers la fin des *Leçons*.

On revient ainsi au point d'interrogation avec lequel Poincaré conclut ses dernières leçons et, avec elles, toute une époque. Terminer par un point d'interrogation n'est-ce pas là la meilleure manière, sinon la seule possible, de conclure un livre de cosmologie comme les *Leçons* à l'âge d'une « non-cosmologie », au moment même où s'achève toute une évolution des idées depuis Descartes,

13. *Leçons*, p. XXII. C'est moi qui souligne.
14. *VS*, p. 146.
15. *Leçons*, p. XIII.
16. *Leçons*, pp. XXIII-XXIV.

Newton et Leibniz jusqu'à Mach, Bergson et Boltzmann, en passant par Kant, Laplace, Comte et Cournot ? C'est une fin ouverte qui, probablement sans laisser une cosmologie scientifique proprement dite, nous a apporté et apportera encore de nouveaux problèmes, toujours ouverts, voire dirigés, vers l'univers.

Appendices

Autour des *Leçons*. Appendices pour la première partie

1 Notices biographiques

— Ici sont regroupés les biographies des personnages qui figurent dans les *Leçons* ou bien dans « Ouverture », « Clôture » ainsi que le chapitre III de l'étude présente, qui représentent la « vague » de la cosmogonie de la fin du XIXe jusqu'au début du XXe siècle.

Arrhenius, Svante (1859–1927) Physicien et chimiste suédois. Prix Nobel de chimie 1903 pour. Nommé en 1911 correspondant pour la section de physique générale à l'Académie des sciences. Il s'intéressa à la cosmologie et publia *L'évolution des mondes* (1910). Il fit deux conférences en mars 1911 à l'Université de Paris.

Babinet, Jacques (1794–1872) Professeur de physique au Collège de Saint-Louis. Examinateur à l'Ecole polytechnique. Elu à l'Académie des sciences en 1840 pour la section de physique générale.

Brunhes, Bernard (1867–1910) Physicien et météorologiste. Professeur à l'Université de Clermont-Ferrand. Rédigea un cours de physique mathématique de Poincaré, *L'électricité et l'optique*. Auteur de *La dégradation de l'énergie* (1909), cité dans *Leçons*.

Belot, Emile (1857–1944) Polytechnicien et directeur de la Manufacture des Tabacs du Havre. Déposa plusieurs notes sur la cosmogonie à l'Académie des sciences, présentées par Poincaré, de 1905 à 1908, sur la base desquelles il publia en 1911 *Essai de cosmogonie tourbillonnaire*, cité dans *Leçons*. Il fit aussi des cours de cosmogonie à la Sorbonne de 1912 à 1914, sujet auquel il continua de se consacrer de *L'origine dualiste des mondes* (1924), jusqu'à son dernier ouvrage : *Enseignement de la cosmogonie moderne* (1933).

Bosler, Jean (1878–1973) Astronome à l'Observatoire de Marseille puis à Meudon. Auteur de *Les théories modernes du Soleil* (1910). Il donna, en suppléant Henri Andoyer, un « libre cours » d'astrophysique à la Sorbonne de 1919 à 1922, publié en 1928 sous le titre : *Cours d'astronomie III - Astrophysique*. Il écrit une notice nécrologique de Poincaré pour *Bulletin de la Société des amis de l'Ecole polytechnique*.

Darwin, George Howard (1845–1912) Astronome. Fils de Charles Darwin. Professeur d'astronomie et de philosophie expérimentale à Trinity College, Cambridge. Consacra une série de mémoires de 1879 à 1882, recueillis dans le volume 2 de ses *Scientific Papers* intitulé *Tidal Friction and Cosmogony* (Cambridge, 1908).

Darboux, Gaston (1842-1917) Mathématicien. Professeur de géométrie supérieure à la Faculté des sciences de Paris, dont il exécuta la fonction de doyen de 1889 à 1903. Membre du Bureau des longitudes. Secrétaire perpétuel à l'Académie des sciences en 1900.

Faye, Hervé (1814–1902) Astronome et météorologue. Professeur à l'Ecole polytechnique. Président du Bureau des longitudes. Membre de l'Académie des sciences (section d'astronomie) depuis 1847, qu'il présida en 1872. Figure importante de l'astronomie française de la fin du siècle. Traducteur de *Comos* de Humboldt (1855–1859) et *Sur l'origine du monde* (1884).

Fouché, Maurice (1855–1929) Agrégé et professeur de mathématique aux lycées parisiens, puis répétiteur de géométrie à l'Ecole polytechnique. Aide-astronome à l'Observatoire de Paris sous la direction de Le Verrier (1875–1881). Membre fondateur (1887), secrétaire et vice-président (1897–1901) de la Société astronomique de France. Écrit régulièrement pour *L'astronomie* sous le pseudonyme de Philippe Gérigny.

Hirn, Gustave-Adolphe (1815–1890) Physicien et ingénieur alsacien. Correspondant de l'Académie des sciences en section physique générale. *Conséquences philosophiques et métaphysiques de la thermodynamique. Analyse élémentaire de l'univers* (1868), *Analyse élémentaire de l'Univers* et *Constitution de l'espace céleste* (1889).

Kapteyn, Jacobus Cornelius (1851–1922) Astronome hollandais. Directeur du laboratoire astronomique de Groningue, Hollande. Nommé correspondant pour la section d'astronomie à l'Académie des sciences en 1909.

Lane, Jonathan Homer (1819–1880) Astrophysicien américain. Connu pour ses travaux sur la théorie du Soleil.

Du Ligondès, Raoul-Marie (1847–1917) Colonel d'artillerie. En 1897, il déposa une note intitulée « Sur la formation du système solaire » à l'Académie des sciences, présentée par Poincaré, et publia *Formation mécanique du Système du Monde* (1897).

Lockyer, Joseph Norman (1836–1920) Astronome anglais. Professeur à l'Ecole royale des mines de Londres. Nommé en 1873 correspondant pour la section d'astronomie de l'Académie des sciences. Fut connu d'une part par sa découverte de l'hélium du Soleil, et d'autre part, également par la fondation de la revue *Nature*. Auteur de *L'évolution inorganique* (trad. fr. Paris : Alcan, 1905) et *The Meteriote Hypothesis* (1890).

Newcomb, Simon (1835-1909) Astronome américain. Professeur de mathématiques et d'astronomie à Johns Hopkins. Spécialiste d'astronomie mathématique. Vulgarisateur renommé. S'intéressa aussi à l'économie.

Puiseux, Pierre (1855–1928) Astronome et professeur à la Faculté des sciences de Paris. Connu pour ses travaux sur la Lune (son accélération séculaire, son atlas photographique, etc.), les astéroïdes ainsi que pour ses contributions à la « Carte du ciel ».

Roche, Edouard (1820–1883) Astronome et météorologue. Professeur de mathématiques à la Faculté des sciences de Montpellier. Après ses deux thèses de physique mathématique (intitulée « Sur la distribution de la chaleur dans une sphère ») et d'astronomie (« Sur la figure des planètes »), soutenues en 1844, il publia continuellement sur les problèmes d'hydrostatique et de mécanique céleste, dont, en particulier, la figure et l'atmosphère des planètes.

Schuster, Arthur (1851–1934) Astronome britannique. Il dirigea le laboratoire Cavendish à Cambridge de à . Ses recherches recouvrent l'optique, la spectroscopie astronomique, l'électricité des gaz, le magnétisme terrestre et les rayons X.

See, Thomas Jefferson Jackson (1866–1962) Astronome américain. Il étudia l'astronomie stellaire à l'Université de Berlin et travailla à Mount Wilson Solar Observatory. Publia deux gros volumes de *Researches on the Evolution of the Stellar System* dont le premier parut en 1896 et le second, *The Capture Theory of Cosmical Evolution*, en 1910. Sa théorie de la capture fait l'objet des débats virulents avec Moulton et Chamberlin.

Tisserand, François-Félix (1845–1896) Astronome. Ancien élève d'Ecole normale supérieure, membre de l'Académie des sciences, de l'Observatoire de Paris, du Bureau des longitudes. Auteur des trois volumes de *Traité de mécanique céleste* (1889-1891) et coauteur avec H. Andoyer de *Leçons de cosmographie* (1912).

Vergne, Henri (1879–1943) Ingénieur des Arts et Manufactures, puis répétiteur de mécanique à l'Ecole centrale. Docteur ès sciences mathématiques. Auteur de *Contribution à la théorie des ondes liquides* (1909) et *Ondes liquides de gravité*(1928). Coauteur avec Jean Villey, physicien, de *L'équilibre thermodynamique des fluides homogènes* (1938).

Weber, Louis Directeur-adjoint au Ministère du travail. Professeur au Collège libre des sciences sociales. Il contribua activement à la Société française de philosophie.

Wolf, Charles Joseph Etienne (1827–1918) Astronome à l'Observatoire de Paris. Elu pour la section d'astronomie en 1883 à l'Académie qu'il présida en 1898. Chargé de cours d'astronomie physique à la Faculté des sciences de Montpellier, puis à celle de Paris.

2 Cours de Poincaré à la Sorbonne (1885–1912)

— Abréviations : AA (Association amicale des élèves et anciens élèves de la Faculté des sciences) ; CN (Carré et Naud) ; GV (Gauthier-Villars).

2.1 Cours à la chaire de *mécanique physique et expérimentale* (1885–1886)

Année	Sem.	Titre	Edition
1884–1885	2	Frottement	
1885–1886	1	Cinématique et Mécanismes	AA(1886)
1885–1886	2	Potentiel. Hydrostatique, Hydrodynamique	AA/CN(1886)

2.2 Cours à la chaire de *physique mathématique* (1887–1896)

Année	Sem.	Titre	Edition
1886–1887	1	Théorie du Potentiel	
1886–1887	2	Théorie du Potentiel et Propagation de la Chaleur	
1887–1888	1	Théorie mathématique de la lumière	
1887–1888	2	Théorie de Maxwell [a]	CN(1890) [b]
1888–1889	1	Thermodynamique et théorie cinétique des gaz	CN(1892)
1888–1889	2	Capillarité	CN(1895)
1889–1890	1	Problème des Trois Corps	
1889–1890	2	Electrodynamique	GV(1891) [c]
1890–1891	1	Élasticité	CN (1892)
1890–1891	2	Electrostatique	
1891–1892	1	Optique	
1891–1892	2	Théorie des tourbillons	GC(1893)
1892–1893	1	Les oscillations électriques	CN(1894)
1892–1893	2	Thermodynamique et théorie cinétique des gaz	GV(1908) [d]

a. Titre annoncé dans le Livret 1888–9 : « Théorie de Maxwell et la théorie électromagnétique de la lumière »

b. Poincaré, *Electricité et optique*

c. *Les théories de Helmholtz et les expériences de Hertz*, Henri Poincaré (1901a), *Electricité et optique*, 2e éd., Paris : Gauthier-Villars, t. 1 ; leçons professées en 1888, 1890 et 1899

d. Avec quelques modifications par rapport à la première édition de 1892.

1893–1894	1	Théorie analytique de la propagation de la chaleur	CN(1894)
1893–1894	2	Calcul des probabilités	CN(1896/1911)
1894–1895	1	Théorie du potentiel newtonien	CN(1899)
1894–1895	2	Electrostatique	
1895–1896	1	Elasticité	
1895–1896	2	Optique	

2.3 Cours à la chaire de *mécanique céleste* (1896–1912)

Année	Sem.	Titre	Edition
1896–1897	1	Sur le problème des trois corps et les perturbations planétaires [a]	GV
1897–1898	1	Sur le développement de la fonction perturbatrice et les méthodes de Gyldèn et de Hansen	
1898–1899	1	Les théories nouvelles de l'Électrodynamique et en particulier sur la théorie de Lorentz	GV(1901)
1898–1899	2	Figures des Corps célestes et leurs mouvements autour de leurs centres de gravité	CN(1902)
1899–1900	1	Théorie de la Lune	
1900–1901	1	Mouvement des Corps Célestes autour du leur centre de gravité	
1901–1902	1	Des différentes manières de calculer les perturbations des petites planètes, et en particulier des méthodes de Gyldèn et de Hansen	
1902–1903	1	Théorie des marées	GV(1910) [b]
1903–1904	1	Perturbations planétaires	GV(1905) [c]
1904–1905	1	De la détermination des orbites	
1905–1906	1	Perturbations des planètes et développement de la fonction perturbatrices	GV(1907) [d]
1906–1907	1	Limites de la loi de Newton	Bull. astro. (1953) [e]

a. Titre annoncé dans Livret : « Perturbation planétaire et développement de la Fonction perturbatrice »

b. Henri Poincaré (1910b), *Leçons de mécanique céleste professées à la Sorbonne*, Paris : Gauthier-Villars, t. 3 ; réimpression (Paris : J. Gabay, 2003), Vol. III

c. Henri Poincaré (1905d), *Leçons de mécanique céleste professées à la Sorbonne*, Paris : Gauthier-Villars, t. 1 ; réimpression (Paris : J. Gabay, 2003), Vol. I

d. Poincaré, *cit.*, Vol. II, 1re partie

e. Poincaré, « Les limites de la loi de Newton », *Bulletin astronomique*, Revue de l'Observatoire de Paris, publiée chez GV

1907–1908	1	Limites de la loi de Newton	
1908–1909	1	Théorie des Marées	GV(1910)
1909–1910	1	Mouvement des corps célestes autour de leur centre de gravité	
1910–1911	1	Hypothèses cosmogoniques	Hermann(1911/1913) [a]
1911–1912	1	La théorie du potentiel newtonien et ses applications à l'étude de la figure des planètes	

a. *Leçons*

3 Références des *Leçons*

3.1 Ouvrages cités

— Par ordre d'apparition dans *Leçons*, l'année indiquée entre parenthèses signalant l'édition citée.
— Abréviations : S (articles ou ouvrages scientifiques) ; V (vulgarisations)

Auteur	**Titre (Année)**	Cat.
Kant	L'unique fondement (1763 ; trad. fr. par H. Faye, 1886)	V
Wolf	*Les hypothèses cosmogoniques* (1886)	V
Laplace	*Exposition du système du monde* (1796 ; l'édition de l'Académie, 1884)	V
Roche	« Essai sur la constitution et l'origine du système solaire » (1873)	S
Babinet	« Note sur un point de la cosmogonie de Laplace » (1861)	S
Roche	« Mémoire sur la figure des atmosphères des corps célestes » (1854)	S
Fouché	« Sur la condensation de la nébuleuse solaire » (1884)	S
Hirn	« Mémoire sur les conditions d'équilibre et sur la nature probable des anneaux de Saturne » (1872)	S/V
Maxwell	« On the Stability of the Motion of Saturn's Rings » (1859)	S
Tisserand	*Traité de mécanique céleste* t. II (1891)	S
Poincaré	*Figure d'équilibre d'une masse fluide* (1902)	S
Poincaré	« Sur l'équilibre d'une masse fluide animée d'un mouvement de rotation » (1885)	S
Roche	« Mémoire sur la figure d'une masse fluide soumise à l'attraction d'un point éloigné » (1849, 1850, 1851)	S
Faye	*Sur l'origine du monde* (1884/1907)	V
Du Ligondès	*Formation mécanique du système du monde* (1897)	V/S
See	*The Capture Theory of Cosmical Evolution* (1910)	S
Darwin	*Tidal Friction and Cosmogony* (1908)	S
Lévy	*Leçons sur la Théorie des Marées* (1898)	S
Poincaré	*Leçons de mécanique céleste* (1910)	S
Poincaré	« Sur l'équilibre d'une masse fluide animée d'un mouvement de rotation » (1885)	S
Darwin	Address on presenting the Gold Medal of the Society to M. H. Poincaré (1900)	S
Thomson	« Sur l'âge de la chaleur solaire » (1862)	V
Bosler	*Les théories modernes du Soleil* (1910)	V/S
Rudzki	*Physik der Erde* (1911)	
Lane	« On the Theoretical Temperature of the Sun » (1870)	
Lockyer	*L'évolution inorganique* (1905 : trad. fr.)	V

Lockyer	« Further Researches on the Temperature Classification of Stars » (1904)	V
Nordmann	« Sur les atmosphères absorbantes et les éclats intrinsèques de quelques étoiles » (1910)	S
Schuster	« The Evolution of Solar Stars » (1903)	S
Arrhenius	*L'évolution des mondes* (trad. fr., 1910)	V
Brunhes	*La dégradation de l'énergie* (1909)	V
Poincaré	« La Voie lactée et la théorie des gaz » (1906)	V
Belot	*Essai de cosmogonie tourbillonnaire* (1911)	V

3.2 Hypothèses traitées

Ch.	**Date**	**Auteur**	**Echelle ou objet**	**Observations**
I	1755	Kant	système solaire et Voie lactée (= l'univers entier)	chaos comme le premier état, non stratifié et en repos relatif ; formation des planètes, séparé du Soleil
II-III	1796	Laplace	planètes (et éventuellement, l'univers dont le système solaire sert de modèle)	nébuleuse (masse fluide gazeuse) en rotation comme l'état initial ; refroidissement, contraction puis séparation en anneaux
III	1873	Roche	planètes	précision du processus de séparation en anneaux par surface de niveau et de la condition de stabilité des anneaux
IV	1884	Faye	planètes, nébuleuses, étoiles	giration des lambeaux (d'après le modèle du tourbillon cartésien), évolution des planètes en deux phases selon lesquelles les sens de rotation sont définis
V	1897	du Ligondès	planètes et Voie lactée	chocs élastiques des molécules soumis à la loi du hasard ; condensation vers le noyau

VI	1910	See	planètes	capture des astres au sein des nébuleuses par résistance de milieu
VII	1908–10	Darwin	Terre et Lune (étoiles doubles, éventuellement)	marées
VIII	1846	Mayer	Soleil et sa chaleur	chute des météores
VIII	1854	Helmholtz	Soleil et sa chaleur	condensation gravitationnelle
VIII	1854–1863	Thomson	Soleil, Terre et leur chaleur	condensation gravitationnelle
IX	1904–5	Lockyer	système stellaire	classification des étoiles à partir des observations spectroscopiques ; évolution des éléments en fonction de la température
X	1903	Schuster	étoiles	classification des étoiles par éléments
XI	1910	Arrhenius	étoiles, nébuleuses	pression de radiation, cycle cosmique, espace et temps infinis
XII	1906	Poincaré	Voie lactée (= l'univers observable)	application de la théorie cinétique du gaz
XIII	1910	See	nébuleuses spirales	capture
XIV	1911	Belot	systèmes solaire et stellaire, étoiles et nébuleuses confondues	tourbillon comme mécanisme principal, cycle nébuleuse- tourbillon (proto-soleil)

4 Réceptions des *Leçons*

4.1 Editions

1. *Leçons sur les hypothèses cosmogoniques* / professées à la Sorbonne par Henri Poincaré, rédigées. par Henri Vergne, Paris : A. Hermann et fils, 1911. 1 vol. (XXV-294 p.), fig., in-8
2. *Leçons sur les hypothèses cosmogoniques* / professées à la Sorbonne par Henri Poincaré, rédigées par Henri Vergne, avec une notice sur Henri Poincaré par Ernest Lebon, 2e édition, Paris : A. Hermann et fils, 1913. 1 vol (LXX-294 p.), fig., in-8
3. *Leçons sur les hypothèses cosmogoniques*, Gallica.fr, édition numérisée sur la première édition, mise en ligne le 15 octobre 2007 :
   `http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k95014`
4. Leçons sur les hypothèses cosmogoniques (Poincaré, 1911) — Wikisource, édition numérisée sur la première édition, page en ligne disponible le 13 mai 2016 :
   `http://fr.wikisource.org/w/index.php?title=Le%C3%A7ons_sur_les_hypoth%C3%A8ses_cosmogoniques_(Poincar%C3%A9,_1911)&oldid=5878179`

4.2 Reprises de la préface

1. *Revue du mois* (XII, 70, 1911), sous le titre « Vue d'ensemble sur les hypothèses cosmogoniques »
2. *Bulletin de la société française de l'astronomie* (XXVI, janvier 1912)
3. Poincaré, *Scientific opportunism*

4.3 Traduction

1. Traduit en roumain sur le chapitre IX, par Victor Anestin, « Teoria cosmogonica a lui Sir NORMAN LOCKYER », *Orion*, Bucuresti, 1912, pp. 57–60.
2. Traduit en anglais sur les chapitres VI et XIII, par Lydia G. Robinson, « The Capture Hypothesis of T. J. J. See », *Monist* 22, 1912, pp. 460–472.

4.4 Comptes rendus, analyses, etc.

1. E. Lebon, *Bulletin des sciences mathématiques* 35, 2e série, 1re année, 1911, pp. 309–319.
2. « La formation du monde », *Le Temps* 51e année, le 25 décembre 1911, pp. 3–4.
3. L. Dunoyer, *Le Radium*, M., t. 9, mars 1912, pp. 77–79.

4. A. Buhl, *L'enseignement mathématique* 14e année, 15 mars 1912, pp. 167–168.
5. L. Houllevigue, *Revue critique des livres nouveaux*, 2e série, 7e année, 15 avr. 1912, pp. 61–63.
6. « Cosmogonies, old and new », Supplement to *Nature*, *Nature* LXXXIX, 2218, May 2 1912, pp. vi-vii.
7. Ch. André, « Poincaré (H.), Leçons sur les Hypothèses cosmogoniques », *Revue générale des sciences* 23, 9, 1912, pp. 360–362.
8. P. Burgatti, « Les hypothèses cosmogoniques jugées par M. H. Poincaré », *Scientia* 12, 1912, pp. 464–472.
9. P. Carus, « Poincaré's Cosmogonic Hypotheses », *Monist* 22, 1912, pp. 480.
10. « Leçons sur les Hypothèses Cosmogoniques professées à la Sorbonne », *Nature* 91, Issue 2272, 1913 pp. 267
11. K. Schwarzschild, *Astrophysical Journal* 37, 1913, pp. 294–298. Compte rendu des *Leçons* et de *Researches on the Evolution of the Stellar System* de T. J. J. See (1910)

Vers les *Leçons*. Appendices pour la seconde partie

1 Corpus philosophique

— Les titres ne sont indiqués que quand ils se diffèrent des titres originaux.
— Chaque titre de chapitre est suivi de l'indication bibliographique de l'article original. Par exemple, « Ch. I – Sur la nature du raisonnement mathématique : RMM 2, 1894 » signifie que le chapitre est tiré de l'article homonyme paru dans *Revue de métaphysique et de morale* 2, 1894.
— Abréviations : RMM (*Revue de métaphysique et de morale*) ; Rg (*Revue générale des sciences pures et appliquées*) ; Rs (*Revue scientifique*) ; * (livre qui n'a pas été édité par Poincaré)

1.1 *La science et l'hypothèse* (1902)

Première partie. Le nombre et la grandeur

Ch. I – Sur la nature du raisonnement mathématique : RMM 2, 1894

Ch. II – La grandeur mathématique et l'expérience : « Le continu mathématique », RMM 1, 1893

Deuxième partie. L'espace

Ch. III — Les géométries non euclidiennes : Rg 2, 1891

Ch. IV — L'espace et la géométrie : RMM 3, 1895

Ch. V — L'expérience et la géométrie : « Sur les géométries non euclidiennes », Rg, 1891 ; « Sur les principes de la géométrie. Réponse à M. Russell », RMM 8, 1898 ; « Des fondements de la géométrie. A propos d'un livre de M. Russell », RMM 7, 1899

Troisième partie. La force

Ch. VI — La mécanique classique : « Les idées de Hertz », Rg, 1897 ; « Sur les principes de la mécanique », *Actes du Congrès international de philosophie* III, 1901

Ch. VII — Le mouvement relatif et le mouvement absolu : « Sur les principes de la mécanique », *Actes du Congrès international de philosophie* III, 1901

Ch. VIII — Énergie et thermodynamique : Préface de *Thermodynamique*, 1892 ; « Les idées de Hertz », Rg 8, 1897

Conclusion générale de la troisième partie : « Sur les principes de la mécanique », *Actes du Congrès international de philosophie* III, 1901

Quatrième partie. La nature

Ch. IX — Les hypothèses en physique : « Les relations entre la physique mathématique et la physique expérimentale », Rg 11, 1900 ; Rs 14, 1900 ; *Rapports présentés au Congrès international de physique*, 1900

Ch. X — Les théories de la physique moderne : *ibid.*

Ch. XI — Le calcul des probabilités : « Réflexions sur le calcul des probabilités », Rg 10, 1899

Ch. XII — L'optique et l'électricité : Préface à *Electricité et optique*, 1899

Ch. XIII — L'électrodynamique : « A propos des expériences de M. Crémieu », Rg 12, 1901

Ch. XIV — La fin de la matière : *Athenaeum*, 1906

1.2 *La valeur de la science* (1905)

Première partie. Les sciences mathématiques

Ch. I — L'intuition et la logique en mathématiques : « Du rôle de l'intuition et de la logique en mathématiques », *Compte-rendu du deuxième Congrès international des mathématiciens tenu à Paris du 6 au 12 août 1900*, 1900

Ch. II — La mesure du temps : RMM 6, 1898

Ch. III — La notion d'espace : « L'espace et ses trois dimensions », RMM 11, 1903

Ch. IV — L'espace et ses trois dimensions : RMM 11, 1903

Deuxième partie. Les sciences physiques

Ch. V — L'analyse et la physique : « Sur les rapports de l'analyse pure et de la physique mathématique », *Verhandlungen des ersten internationalen Mathematiker-Kongresses in Zürich vom 9. bis 11. August, 1897* ; *Acta mathematica* 21, 1897

Ch. VI — L'astronomie : « La grandeur de l'astronomie », *Bulletin de la Société astronomique de France* 17, 1903

Ch. VII — L'histoire de la physique mathématique : « L'état actuel et l'avenir de la physique mathématique », Discours au Congress of Arts and Science, St-Louis, 1904 ; *Bulletin des sciences mathématiques* 28, 1904 ; « The Principles of Physical Mathematics », *Congress of Arts and Science : Universal Exposition, Saint-Louis 1904*, 1906

Ch. VIII — La crise actuelle de la physique : « L'état actuel et l'avenir de la physique mathématique » (*ibid.*)

Ch. IX — L'avenir de la physique mathématique : « L'état actuel et l'avenir de la physique mathématique » (*ibid.*)

Troisième partie. La valeur objective de la science

Ch. X — La science est-elle artificielle ? : « Sur la valeur objective de la science », RMM 10, 1902

Ch. XI — La science et la réalité : « Sur la valeur objective de la science », RMM 10, 1902 (*ibid.*)

1.3 *Science et méthode* (1908)

Livre premier. Le savant et la science

Ch. I – Le choix des faits : *Université de Paris* 20, 190 ; « The Choice of Facts » in *The Value of Science*, traduction américaine de *La valeur de la science* par G. B. Halsted, New York, 1907 ; *The Monist* 19, 1909

Ch. II – L'avenir des mathématiques : Discours au Congrès international de Mathématiques de Rome, 1908 ; *Bulletin des sciences mathématiques* 32, 1908 ; *Rendiconti del Circolo matematico di Palermo* 26, 1908 ; Rg 19, 1908 ; *Scientia* 2, 1908

Ch. III – L'invention mathématique : *L'enseignement mathématique* 10, 1908 ; *Bulletin de l'Institut général de psychologie* 8, 1908 ; *Revue du mois* 6, 1908 ; Rg 19, 1908 ; *Année psychologique* 15, 1909 ; *Enquête de L'enseignement mathématique sur la méthode de travail des mathématiciens* (recueil édité par H. Fehr), Paris/Genève, Gauthier-Villars/Georg Cie, 1912

Ch. IV – Le hasard : *Revue du mois* 3, 1907

Livre II. Le raisonnement mathématique

Ch. I – La relativité de l'espace : *Année psychologique* 13, 1907

Ch. II – Les définitions mathématiques et l'enseignement : *L'enseignement des sciences mathématiques et des sciences physiques*, Paris, Imprimerie Nationale, 1904 ; *L'enseignement mathématique* 6, 1904

Ch. III – Les mathématiques et la logique : RMM 13, 1905

Ch. IV – Les logiques nouvelles : « Les mathématiques et la logique », RMM 13, 1905 (*Ibid.*) ; « Les mathématiques et la logique », RMM 14, 1906

Ch. V — Les derniers efforts des Logisticiens : « Les mathématiques et la logique », RMM 14, 1906 (*ibid.*)

Livre III. La mécanique nouvelle

Ch. I — La mécanique et le radium : « La dynamique de l'électron », Rg 19, 1908 (article simplifié des deux articles suivants : « Sur la dynamique de l'électron », CRAS 140, 1905 ; « Sur la dynamique de l'électron », *Rendiconti del Circolo matematico di Palermo* 21, 1906)

Ch. II — La mécanique et l'optique : « La dynamique de l'électron » (*ibid.*)

Ch. III — La mécanique nouvelle et l'astronomie : « La dynamique de l'électron » (*ibid.*)

Livre IV. La science astronomique

Ch. I — La Voie lactée et la théorie des gaz : Conférence publique à la Société astronomique de France, 1906 ; *Bulletin de la Société astronomique de France* 20, 1906

Ch. II — La géodésie française : Discours à la séance des cinq Académies, 1900 ; « La géodésie française », *Mémoires de l'Institut* 20, 1900 ; « La mesure

de la Terre et la géodésie française », *Bulletin de la Société astronomique de France* 14, 1900

1.4 *Dernières pensées* (1913)*

Table des matières D'après la seconde édition de 1926

La logique de l'infini : 1909

La morale et la science : *Foi et vie*, 1910

L'évolution des lois : *Scientia* 9, 1911

Les rapports de la matière et de l'éther : *Journal de physique* 5e série 2, 1912

La logique de l'infini : *Scientia* 12, 1912

L'espace et le temps : *Scientia* 12, 1912

L'hypothèse des quanta : Rs 4e série 17, 1912

L'union pour l'éducation morale : *Le Parthénon. Revue bimensuelle politique, littéraire et indépendante*, 1912

Pourquoi l'espace a trois dimensions : RMM 20, 1912

Appendice Suppléments ajoutés à partir de la seconde édition

Les fondements de la géométrie : *Journal des savant*, mai 1902

Cournot et les principes du calcul infinitésimal : RMM, 1905

Le libre examen en matière scientifique : *Revue de l'Université de Bruxelles* décembre 1909

Le démon d'Arrhénius : *Hommage à Louis Ollivier*, 1911

1.5 *L'opportunisme scientifique* (2000)*

Livre I Les conventions géométriques

Ch. I — On the Foundations of Geometry : « On the Foundations of Geometry », *The Monist* 9, 1898

Ch. II — Fondements de la géométrie : *Journal des savants*, 1902 ; *Acta mathematica* 11, 1912

Ch. III — Note de la 7e édition du *Traité de géométrie* de Rouché et Comberousse (Gauthier-Villars)

Livre II Les approximations de la mécanique céleste

Ch. I — Préface des Hypothèses cosmogoniques : *Leçons*, 1911

Ch. II — Sur la stabilité du système solaire : Rs, 1898

Ch. III — Le problème des trois corps : Rg, 1895

Ch. IV — Conférence sur les comètes : *Bulletin de la Société Industrielle de Mulhouse*, 1910

Ch. V — Le démon d'Arrhénius : *Hommage à Louis Olivier*, 1911

Livre III Problèmes scientifiques actuels ou questions scientifiques ou miscellanées

Ch. I — Cournot et les principes du calcul infinitésimal : RMM 1905

Ch. II — La lumière et l'électricité d'après Maxwell et Hertz : *Annuaire du Bureau des longitudes*, 1894 ; Rs 1894

Ch. III — La télégraphie sans fil : *Journal de l'Université des annales* 3, 1909

Ch. IV — Le libre examen en matière scientifique : Bruxelles m Weissenbach 1910

2 Table synoptique et chronologique

— Les éléments relatifs à Poincaré sont mis en gras.
— Abréviations : CRAS (*Comptes rendus de l'Académie des sciences*) ; RMM (*Revue de métaphysique et de morale*) ; Rg (*Revue générale des sciences pures et appliquées*) ; Rs (*Revue scientifique*)

2.1 Période classique (avant 1900)

Date	Thermo dynamique	Statistique	Relativité
1887			Expériences de Michelson-Morley [a]
1888	**Cours de thermodynamique**		
1892	**Controverse entre Poincaré et Tait** (*Nature*)		
1893	**Controverse sur l'évolutionnisme entre Weber, Poincaré et Couturat** (RMM) **« Le mécanisme et l'expérience »** (RMM) **« Sur une objection à la théorie cinétique des gaz »** (CRAS)		
	Cours de théorie cinétique des gaz		
1894	Suite de la controverse sur l'évolutionnisme entre Weber et Couturat (RMM) **« Sur la théorie cinétique des gaz »** (Rg) **« Le mécanisme et l'expérience. Réponse à M. Lechalas »** (RMM)	Seeliger, « Sur la loi de Newton »	
1895	Boltzmann, « On Certain Questions of the Theory of Gases »(*Nature*) Ostwald, « La déroute du matérialisme » (Rg) et son controverse avec les physiciens français		Lorentz, la théorie de l'électron et l'hypothèse de la contraction
1896	Controverse entre Zermelo et Boltzmann (*Annalen der Physik*) ; Lechalas, *L'étude sur l'espace et le temps* ; critique de Couturat (RMM)		
1897			**« Les idées de Hertz »** (Rg)
1898		Boltzmann, *Leçons de théorie de gaz*	
	« Sur la stabilité du système solaire » (Rs)		**« La mesure du temps »** (RMM) **« L'expérience et la géométrie »** (RMM)

a. Preuve décisive contre le mouvement absolu de la Terre et remise en cause de l'hypothèse de l'éther

1899	**« Réflexions sur le calcul des probabilités »** (Rg)	***Electricité et optique*, Vol. I** [a]

a. Première apparition de l'expression le « principe de relativité » dans la préface

2.2 Période prérelativiste (1900–1904)

Date	Thermodynamique	Statistique	Relativité
1900	Congrès internationaux à l'Exposition universelle de Paris		
			« Sur les principes de la mécanique »
	« Les rapports de la physique mathématique et de la physique expérimentale »		
			« La théorie de Lorentz et le principe de réaction »
1901	Kelvin, « On the Clustering... »		
1902		***SH***	
	Débat sur l'entropie par Swinburne (*The Electrician*)		
1903	Débat sur l'entropie entre Swinburne, Perry, Evershed, Lodge (*The Electrician*, *Engineering*, *Electrical Review*)		
	« Entropy » (*The Electrician*)		
1904	Boltzmann, *Leçons sur la théorie des gaz* (trad. fr.)		Kelvin, *Baltimore Lectures* [a]
	Congress of Arts and Science in Saint-Louis		
	« L'état actuel et l'avenir de la physique mathématique »		
		Kapteyn, « Statistical Methods in Stellar Dynamics »	

a. Publication à partir de la conférence faite en 1884

2.3 Période postrelativiste (après 1905)

Date	Thermodynamique	Statistique	Relativité
1905		Langevin, « Sur une formule fondamentale de la théorie cinétique », CRAS (janvier)	**« Sur la dynamique de l'électron » (CRAS, juin)**
			Einstein, « Sur l'électrodynamique des corps en mouvement » (*Annalen der Physik*, juin)
		VS	
1906	Borel, « Sur les principes de la théorie cinétique des gaz »		**« Sur la dynamique de l'électron » (*Rendiconti di Palermo*)**
	« La Voie lactée et la théorie cinétique des gaz »		**« La fin de la matière »**
	« Réflexions sur la théorie cinétique des gaz »		**Cours sur « Les limites de la loi de Newton »**
	Décès de Boltzmann		
1907	Bergson, *L'évolution créatrice*		Minkowski, « L'espace et le temps »

	Meyerson, *Identité et réalité*		**« La relativité de l'espace »**
		« Le hasard »	
1908	***Thermodynamique*** (2e éd.)		**« Sur la dynamique des électrons »** (Rg)
		SM	
1909		Arrhenius, « L'univers infini » (*Scientia*) Seeliger, « Sur l'application des lois de la nature à l'univers » (*Scientia*)	**« La mécanique nouvelle »**
1910			***Sechs Vorträge* à Berlin**
		Cours sur les hypothèses cosmogoniques	
1911		Congrès de philosophie à Bologne	
		« L'évolution des lois »	
			Langevin, « L'évolution de l'espace et du temps » [a]
		Seeliger, mesure statistique de la distance de la Voie lactée depuis le Soleil	
		« Le démon d'Arrhenius »	
		Leçons	
1912	**« Rapport entre la matière et l'éther »**	Leavitt, méthode des Céphéides	**« L'espace et le temps »** (*Scientia*) **« Pourquoi l'espace a trois dimensions ? »**
		Décès de Poincaré	
1913		Diagramme de Hertzsprung-Russell	
		DP	
1914		Arrhenius, « Le problème de la Voie lactée » (*Scientia*) Eddington, *Stellar Movements and the Structure of the Universe*	
1915			Einstein, la théorie de la relativité générale
1917			Einstein, « Considérations cosmologiques »

a. Premier énoncé du paradoxe des jumeaux

Bibliographie

Œuvres de Poincaré

Ouvrages

Poincaré, Henri

1890a *Electricité et optique*, Paris : G. Carré ; professées pendant le second semestre 1888.

1892b *Thermodynamique. Cours de physique mathématique*, Paris : Gauthier-Villars ; seconde édition revue et corrigée, 1908.

1895 *Théorie analytique de la propagation de la chaleur. Leçons professées pendant le premier semestre 1893-1894*, Paris : G. Carré ; reproduction en fac-similé (Paris : Jacques Gabay, 2008).

1901a *Electricité et optique*, 2e éd., Paris : Gauthier-Villars, t. 1 ; leçons professées en 1888, 1890 et 1899.

1902a *La science et l'hypothèse*, Coll. « Bibliothèque de Philosophie scientifique », Paris : Flammarion ; réédition (Paris : Flammarion, 1968).

1905b *La valeur de la science*, Coll. « Bibliothèque de Philosophie scientifique », Paris : Flammarion ; réédition (Paris : Flammarion, 1970).

1905d *Leçons de mécanique céleste professées à la Sorbonne*, Coll. « Cours de la Faculté des sciences de Paris », Paris : Gauthier-Villars, t. 1 ; réimpression (Paris : J. Gabay, 2003).

1908b *Science et méthode*, Coll. « Bibliothèque de Philosophie scientifique », Paris : Flammarion ; réédition (*Philosophia scientiae* 3, Paris : Kimé, 1999).

1908c *Thermodynamique*, sous la dir. de Jules Blondin, 2e éd., Paris : Gauthier-Villars.

1911b *Leçons sur les hypothèses cosmogoniques*, réd. par Henri Vergne, Paris : Hermann.

1913 *Dernières pensées*, Coll. « Nouvelle bibliothèque scientifique », Paris : Flammarion ; réédition (Paris : Flammarion, 1963).

1916-1956 *Œuvres de Henri Poincaré*, sous la dir. de Paul Appell, Albert Châtelet, Jules Drach, René Garnier, Gaston Julia, Jean Leray, Jacques Lévy et Gérard Petiau, Paris : Gauthier-Villars ; réimpréssion (Paris : J. Gabay).

Poincaré, Henri

1955 *Le livre du centenaire de la naissance de Henri Poincaré : 1854-1954*, sous la dir. de Paul Appell, Albert Châtelet, Jules Drach, René Garnier, Gaston Julia, Jean Leray, Jacques Lévy et Gérard Petiau, Paris : Gauthier-Villars, t. XI ; réimpréssion (Paris : J. Gabay).

2002 *Scientific Opportunism. An Anthology*, sous la dir. de Louis Rougier et Laurent Rollet, introd. de Laurent Rollet, Coll. « Publications des archives Henri-Poincaré », Basel : Birkhäuser.

2007 *La correspondance entre Henri Poincaré et les physiciens, chimistes et ingénieurs*, éd. établie et annot. par Scott Walter, Etienne Bolmont et André Coret, introd. de Scott Walter, Coll. « Publications des Archives Henri Poincaré », Basel : Birkhäuser.

2013 *La science selon Henri Poincaré*, éd. établie et introd. par Jean-Pierre Bourguignon, Paris : Dunod.

2016 *La correspondance entre Henri Poincaré, les astronomes, et les géodésiens*, éd. établie, annot. et introd. par Scott A. Walter, Philippe Nabonnand, Ralf Krömer et Martina Schiavon, Coll. « Publications des Archives Henri Poincaré », Basel : Birkhäuser.

1892-1899 *Les méthodes nouvelles de la mécanique céleste*, Paris : Gauthier-Villars ; reproduction en fac-similé (Paris : A. Blanchard, 1987).

Articles

Poincaré, Henri

1880 « Note sur les principes de la mécanique dans Descartes et dans Leibniz », in Gottfried Wilhelm Leibniz, *La monadologie*, éd. établie et annot. par Emile Boutroux, Paris : Delagrave, page(s) : 225-231.

1889 « Sur les tentatives d'explication mécanique des principes de la thermodynamique », *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 108, 11, page(s) : 550-553.

1890b « Sur le problème des trois corps et les équations de la dynamique », *Acta Mathematica*, 13, 1, page(s) : 1-270, *Œuvres* VII, p. 262-479.

1891a « Le problème des trois corps », *Revue générale des sciences pures et appliquées*, 2, page(s) : 529-537, *Œuvres* VIII.

1891b « Sur le problème des trois corps », *Bulletin astronomique*, 8, page(s) : 480-490, *Œuvres* VII.

1892a « Les formes d'équilibre d'une masse fluide en rotation », *Revue générale des sciences pures et appliquées*, 3, page(s) : 809-815, *Œuvres* VII, p. 203-217.

1893a « Le mécanisme et l'expérience », *Revue de métaphysique et de morale*, 1, page(s) : 534-537.

1893b « Sur une objection à la théorie cinétique des gaz », *Comptes rendus hebdomadaires de l'Académie des sciences*, 116, page(s) : 1017-1021.

1894a « Le mécanisme et l'expérience. Réponse à M. Lechalas », *Revue de métaphysique et de morale*, 2.

1894b « Sur la théorie cinétique des gaz », *Revue générale des sciences pures et appliquées*, 5, page(s) : 513-521.

1898a « Des fondements de la géométrie », in Poincaré (2002).

1898b « Sur la stabilité du système solaire », *Revue scientifique*, 9 (mai 1898), page(s) : 538-547, repris in *Œuvres* VIII.

1899a « Ch. André, Traité d'astronomie stellaire », *Bulletin astronomique, Série I*, 16, page(s) : 124-127.

1899b « Réflexions sur le calcul des probabilités », *Revue générale des sciences pures et appliquées*, 10, page(s) : 262-269.

1900a « La théorie de Lorentz et le principe de réaction », *Archives néerlandaises des sciences exactes et naturelles*, 5, page(s) : 252-278, repris in *Œuvres* IX.

1900b « Relations entre la physique expérimentale et la physique mathématique », in *Rapports présentés au congrès international de physique*, sous la dir. de Charles-Édouard Guillaume et Lucien Poincaré, Paris : Gauthier-Villars, t. 1, page(s) : 1-29.

1901b « Sur les principes de la mécanique », in *Bibliothèque du Congrès internationale de philosophie*, Paris : A. Colin, t. 3, page(s) : 457-494.

1902b « La vie et les travaux de M. Faye », *Bulletin de la Société astronomique de France*, 16, page(s) : 496-501.

1902c « Les progrès de l'astronomie en 1901 », *Bulletin de la société astronomique de France*, 16, page(s) : 214-223.

1903a « Entropy », *Electrician*, 50, page(s) : 264-270, repris in *Œuvres* X.

1903b « Grandeur de l'astronomie », *Bulletin de la Société astronomique de France*, 17, repris in *VS*, chapitre VI.

1904 « L'état actuel et l'avenir de la physique mathématique », *Bulletin des sciences mathématiques*, 28, page(s) : 302-324.

1905a « Cournot et les principes du calcul infinitésimal », *Revue de métaphysique et de morale*, 13, repris dans *DP*.

1905c *Leçons de mécanique céleste professées à la Sorbonne*, Cours de la Faculté des sciences de Paris, Paris : Gauthier-Villars, t. 1 ; réimpression (Paris : J. Gabay, 2003).

1906a « La fin de la matière », *Athenaeum*, 4086, page(s) : 201-202, repris in *SH*, à partir de la deuxième édition de 1907.

1906b « La Voie lactée et la théorie des gaz », *Bulletin de la Société astronomique de France*, 20 (avril 1906), page(s) : 153-165.

1906c « Reflexions sur la théorie cinétique des gaz », *Bulletin des séances de la Société française de physique*, page(s) : 150-184.

Poincaré, Henri

1906d « Réflexions sur la théorie cinétique des gaz », *Journal de physique théorique et appliquée*, 4e sér., 5, repris dans *Œuvres* IX, p. 587-619.

1906e « Sur la dynamique de l'électron », *Rendiconti del circolo matematico di Palermo*, 21, page(s) : 494-586, repris in *Œuvres* IX.

1907 « Le hasard », *Revue du mois*, 3.

1908a « Lord Kelvin », *Lumière électrique (2e série)*, 1, 5, page(s) : 139-147.

1910a « Conférences sur les comètes », *Bulletin de la Société industrielle de Mulhouse*, 80, sous la dir. de Paul Appell, Albert Châtelet, Jules Drach, René Garnier, Gaston Julia, Jean Leray, Jacques Lévy et Gérard Petiau, page(s) : 311-323, réimpréssion (Paris : J. Gabay).

1910b *Leçons de mécanique céleste professées à la Sorbonne*, Cours de la Faculté des sciences de Paris, Paris : Gauthier-Villars, t. 3 ; réimpression (Paris : J. Gabay, 2003).

1911a « L'évolution des lois », *Scientia*, 9, 4, page(s) : 48-67, repris dans *DP*.

1911c « Remarque sur l'hypothèse de Laplace », *Bulletin de la Société astronomique de France*, 28, page(s) : 251-266.

1912 « L'espace et le temps », *Scientia*, 12, 25, repris dans *DP*.

1921 « Analyse des travaux scientifiques de Henri Poincaré faite par lui-même », *Acta mathematica*, 38, page(s) : 36-135.

1953 « Les limites de la loi de Newton », *Bulletin astronomique, Série I*, 17, page(s) : 126-265.

D'autres sources

Généralités

Académie des sciences

1979 *Index biographique de l'Académie des Sciences*, 4e édition mise à jour, Paris : Gauthier-Villars.

Gillispie, Charles Coulston et Frederic Lawrence Holmes

1970 (éd.), *Dictionary of Scientific Biography*, New York : C. Scribner's Sons.

Hockey, Thomas A, Virginia Trimble et Thomas R Williams

2007 (éd.), *The biographical encyclopedia of astronomers*, Coll. « Springer reference », New York : Springer.

Murdin, Paul

2001 (éd.), *Encyclopedia of Astronomy and Astrophysics*, Bristol : Institute of Physics.

Références poincaréennes et épistémologiques

Agazzi, Evandro

1991 « The Universe as Problem », in *Philosophy and the Origin and Evolution of the Universe*, sous la dir. d'Evandro Agazzi et Alberto Cordero, Coll. « Synthese Library », Dordrecht : Springer.

Albert, David Z.

2000 *Time and Chance*, Cambridge, M.A. : Harvard University Press.

André, Charles

1899 *Traité d'astronomie stellaire*, Paris : Gauthier-Villars, t. 1.

1912a « L'hypothèse nébulaire de Laplace et la théorie de la capture de M. T. J. J. See », *Scientia*, 11.

André, Charles

1912b « Poincaré (H.), Leçons sur les Hypothèses cosmogoniques », *Revue générale des sciences pures et appliquées*, 23, 9 (mai 1912), page(s) : 360-362.

Anonyme

1912 « Cosmogonies, Old and New », *Nature*, Supplement, 89, 2218 (mai 1912), page(s) : vi-vii.

Appell, Paul

1925 *Henri Poincaré*, Coll. « Nobles vies - grands oeuvres », Paris : Plon.

Archives Henri Poincaré, UMR 7117

2018 *Henri Poincaré Papers*, `http://henripoincarepapers.univ-lorraine.fr/bibliohp/` (visité le 11/03/2018).

Aristote

2004 *Traité du ciel*, trad. par Catherine Dalimier et Pierre Pellegrin, Paris : Flammarion.

2005 *Physique*, trad. par Pierre Pellegrin, Paris : Flammarion.

Arrhenius, Svante

1910 *L'évolution des mondes*, trad. par T. Seyrig, trad. fr. sur la 2e éd. de 1907, Paris : Librairie polytechnique Ch. Béranger.

Atten, Michel

1988 « La nomination de H. Poincaré à la chaire de physique mathématique et calcul des probabilités de la Sorbonne », *Cahier du séminaire d'histoire des mathématiques*, 9, page(s) : 221-230.

Audureau, Eric

2004 « Le conventionnalisme, conséquence de l'intuitionnisme », *Philosophiques*, 31, 1.

2005 « Cosmologie et classification des systèmes philosophiques », in *Philosophie des mathématiques et théorie de la connaissance. L'œuvre de Jules Vuillemin*, sous la dir. de Roshdi Rashed et Pierre Pellegrin, Paris : A. Blanchard.

Babinet, Jacques

1861 « Note sur un point de la cosmogonie de Laplace », *Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences*, 52, 11, page(s) : 481-484.

Bachelard, Gaston

1934 *Le nouvel esprit scientifique*, Paris : P. U. F. ; 4e éd. (Paris : Puf, 1991).

1949 *Le rationalisme appliqué*, Paris : P. U. F.

1957 *La poétique de l'espace*, Coll. « Quadridge », P. U. F.

1972a « L'actualité de l'histoire des sciences », in *L'engagement rationaliste*, Paris : P. U. F., page(s) : 137-152.

1972b « L'univers et la réalité », in *L'engagement rationaliste*, Paris : P. U. F., page(s) : 103-108.

Bachelard, Suzanne

1958 *La conscience de rationalité. Etude phénoménologique sur la physique mathématique*, Paris : P. U. F.

Balan, Bernard

2011 *L'évolution des idées en géologie : des cosmogonies à la physique du globe*, Paris : J. Vrin.

Balibar, Françoise

1984 *Galilée, Newton lus par Einstein. Espace et relativité*, 00063, Paris : P. U. F.

Balibar, Françoise et Rafaella Toncelli

2008 *Einstein, Newton, Poincaré. Une histoire de principes*, Coll. « Belin sup. Histoire des sciences. Physique », Paris : Belin.

Barberousse, Anouk

2002 *La mécanique statistique. De Clausius à Gibbs*, éd. établie et introd. par Anouk Barberousse, Paris : Belin.

2004 « Le nouveau visage du hasard », in *Le moment 1900 en philosophie*, sous la dir. de Frédéric Worms, Coll. « Philosophie (Villeneuve-d'Ascq) », Villeneuve d'Ascq : Presses universitaires du Septentrion.

2011 « Philosophie de la physique », in *Précis de philosophie des sciences*, sous la dir. d'Anouk Barberousse, Coll. « Philosophie des sciences », Paris : Vuibert, page(s) : 350-377.

Barrau, Aurélien et Daniel Parrochia

2010 (éd.), *Forme et origine de l'univers. Regards philosophiques sur la cosmologie*, Coll. « UniverSciences », Paris : Dunod.

Barreau, Hervé

1987 « Temps et espace-temps chez Henri Poincaré », in *Cahiers d'histoire et de philosophie des sciences*, Centre universitaire de Luxembourg - Société française d'histoire des sciences et des techniques, t. 23, page(s) : 1-32.

Barrow-Green, June

1997 *Poincaré and the three body problem*, Coll. « History of mathematics », Providence : American Mathematical Society et London Mathematical Society.

Béguin, François

2012 *Le théorème de récurrence de Poincaré*, `http://images.math.cnrs.fr/Le-theoreme-de-recurrence-de-Poincare` (visité le 09/05/2018).

Belorizky, David

1937 « Sur l'hypothèse cosmogonique de Laplace », *Journal des observateurs*, 20, 5, page(s) : 69-73.

Ben-Menahem, Yemina

2006 *Conventionalism : From Poincare to Quine*, Cambridge : Cambridge University Press.

Bensaude-Vincent, Bernadette

2013 *L'opinion publique et la science. A chacun son ignorance*, Coll. « La Découverte-poche. Sciences humaines et sociales », Paris : La Découverte.

Bergson, Henri

1907 *L'évolution créatrice*, Paris : P. U. F.

2007 « Cours de Bergson sur De rerum originatione radicali de Leibniz », in *Bergson et la science*, éd. établie, annot. et introd. par Matthias Vollet, Paris : P. U. F., t. 3, page(s) : 25-52.

Biezunski, Michel

1992 *Einstein à Paris. Le temps n'est plus...* Coll. « Histoires de science (Saint-Denis) », Saint-Denis : Presses universitaires de Vincennes.

Boltzmann, Ludwig

1895 « On Certain Questions of the Theory of Gases », *Nature*, 51, 1322 (février 1895), page(s) : 413-415.

1905 *Leçons sur la théorie des gaz*, trad. par Alexandre Gallotti et Henri Bénard, annot. de Marcel Brillouin, introd. de Marcel Brillouin, Paris : Gauthier-Villars, t. 2.

2003a « On the Relation of a General Mechanical Theorem to the Second Law of Thermodynamics », in Brush *et al.* (2003), page(s) : 362-367.

2003b « On Zermelo's paper on the mechanical explanation of irreversible processes », in Brush *et al.* (2003).

Bondi, Hermann

1960 *Cosmology*, 2e éd., Coll. « Cambridge Monographs on Physics », Cambridge : Cambridge University Press.

Borel, Émile

1906 « Sur les principes de la théorie cinétique des gaz », *Annales scientifiques de l'École normale supérieure. 3e série*, 23, page(s) : 9-32.

Bottazzini, Umberto

2002 *Poincaré : philosophe et mathématicien*, Coll. « Pour la science », Paris : Belin.

Boutroux, Émile

1895 *De l'idée de loi naturelle dans la science et la philosophie contemporaines*, Paris : Lecène, Oudin et Cie : F. Alcan.

Boutroux, Pierre

1914 « L'œuvre philosophique », in *Henri Poincaré. L'œuvre scientifique, l'œuvre philosophique*, Paris : F. Alcan, page(s) : 205-259.

Brague, Rémi

2002 *La sagesse du monde : histoire de l'expérience humaine de l'Univers*, Coll. « Biblio essais », Paris : Livre de poche.

Brahic, André

2000 *Enfants du soleil*, Paris : O. Jacob.

Brenner, Anastasios

2003 *Les origines françaises de la philosophie des sciences*, Paris : P. U. F.

Brillouin, Léon

1959 *Vie, matière et observation*, Coll. « Science d'aujourd'hui », Paris : A. Michel.

Broglie, Louis de

2012 « Discours du Prince Louis de Broglie », *Bulletin de la Sabix. Société des amis de la Bibliothèque et de l'Histoire de l'École polytechnique*, 51 (nov. 2012), page(s) : 73-77, repris de l'allocution faite en 1954.

Browder, Felix E.

1983 (éd.), *The Mathematical Heritage of Henri Poincaré. Part 2*, Coll. « Proceedings of Symposia in Pure Mathematics », Providence : American Mathematical Society ; Proceedings of the symposium on the mathematical heritage of Henri Poincaré held at Indiana University, Bloomington, Indiana, 1980.

Brown, Harvey R., Wayne Myrvold et Jos Uffink

2009 « Boltzmann's H-theorem, its Discontents, and the Birth of Satistical Mechanics », *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 40, 2, page(s) : 174-191.

Brunhes, Bernard

1909 *La dégradation de l'énergie*, Paris : Flammarion ; réédition (Paris : Flammarion, 1991).

Brunhes, Bernard

1910 « L'objectivité du principe de Carnot », *Revue de métaphysique et de morale*, 18, 2, page(s) : 147-179.

Brunschvicg, Léon

1899 « Essais de philosophie générale : de M. Charles Dunan », *Revue de métaphysique et de morale*, 7, 2, page(s) : 189-225.

1993 *Les étapes de la philosophie mathématique*, introd. de Jean-Toussaint Desanti, Paris : A. Blanchard.

Brush, Stephen George

1992 « How Cosmology Became a Science », *Scientific American*, 267, 2, page(s) : 62-70.

1996a *Fruitful Encounters : The Origin of Solar System and of the Moon from Chamberlin to Appollo*, Coll. « A History of Modern Planetary Physics », Cambridge : Cambridge University Press.

1996b *Nebulous Earth : The Origin of the Solar System and the Core of the Earth from Laplace to Jeffreys*, Coll. « A History of Modern Planetary Physics », Cambridge : Cambridge University Press.

Brush, Stephen George et Nancy S. Hall

2003 (éd.), *The Kinetic Theory of Gases : An Anthology of Classic Papers with Historical Commentary*, Coll. « History of Modern Physical Sciences », London : Imperial College Press.

Bruter, Annie

2007 « Le cours magistral : modalités et usages (XVIe-XXe siècles) », in *Action concertée. Histoire des savoir. 2003–2007. Receuil de synthèse*, sous la dir. de Karine Chemla, CNRS-Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, page(s) : 127-130.

2008 « Le cours magistral comme objet d'histoire », *Histoire de l'éducation*, 120, 4 (sept. 2008), page(s) : 5-32.

Buffon, Georges-Louis Leclerc

2007 *Œuvres*, éd. établie et annot. par Stéphane Schmitt, Coll. « Bibliothèque de la Pléiade », Paris : Gallimard.

Burgatti, Pietro

1912 « Les hypothèses cosmogoniques jugées par M. H. Poincaré », *Scientia*, 12, page(s) : 464-472.

Busco, Pierre

1924 *Les cosmogonies modernes et la théorie de la connaissance*, Paris : F. Alcan.

1925a « Kant et Laplace », *Revue philosophique de la France et de l'étranger*, 99, page(s) : 235-279.

1925b « Le problème cosmogonique. Son origine, son évolution, sa valeur », *Revue philosophique de la France et de l'étranger*, 99, page(s) : 283-303.

Buzon, Frédéric de et Vincent Carraud

1994 *Descartes et les Principia II : corps et mouvement*, Coll. « Philosophies », Paris : P. U. F.

Calinon, Auguste

1891 « Les espaces géométriques », *Revue philosophique de la France et de l'étranger*, 32, page(s) : 368-375.

1893 « Etude sur l'indétermination géométrique de l'univers », *Revue philosophique de la France et de l'étranger*, 36, page(s) : 595-606.

Callens, Stéphane

1997 *Les maıtres de l'erreur. Mesure et probabilité au XIXe siècle*, Paris : P. U. F.

Canales, Jimena

2015 *The Physicist and the Philosopher : Einstein, Bergson, and the Debate That Changed Our Understanding Of Time*, Princeton : Princeton University Press.

Canguilhem, Georges

1968 *Études d'histoire et de philosophie des sciences*, Coll. « Problèmes et controverses », Paris : J. Vrin.

Carnot, Sadi

1978 *Réflexions sur la puissance motrice du feu*, éd. établie et annot. par Robert Fox, Coll. « L'Histoire des sciences, textes et études. Collection de travaux de l'Académie internationale d'histoire des sciences », Paris : J. Vrin.

Cartier, Pierre

2006 « Le calcul des probabilités de Poincaré », in *L'héritage scientifique de Poincaré*, sous la dir. d'Éric Charpentier, Étienne Ghys et Annick Lesne, Paris : Belin, chap. 14, page(s) : 302-315.

Chaberlot, Frédéric

2003 *La Voie lactée : Histoire des conceptions et des modèles de notre galaxie des temps anciens aux années 1930*, Paris : CNRS Editions.

Chazy, Jean

1953 « Poincaré et la mécanique céleste », *Bulletin astronomique, Série II*, 16, 2.

Clausius, Rudolf

1868 *Théorie mécanique de la chaleur*, trad. par Folie, Paris : E. Lacroix.

Clavelin, Maurice

1968 *La philosophie naturelle de Galilée*, Paris : P. U. F. ; réédition (Paris : Albin Michel, 1996).

Clavier, Paul

1994 « La conjonction Kant-Laplace », in *La réception de la philosophie allemande en France aux XIXe et XXe siècles*, Lille : Presse universitaire de Lille.

1997 *Kant, les idées cosmologiques*, Coll. « Philosophies », Paris : P. U. F.

2000 *Le concept de monde*, Coll. « Philosopher », Paris : P. U. F.

Comte, Auguste

1844 *Traité philosophique d'astronomie populaire. Exposition systématique de toutes les notions de philosophie astronomique, soit scientifiques, soit logiques, qui doivent devenir universellement familières*, Carlilian-Goeury et Dalmont ; Réédition, Paris : Fayard, 1985.

1970 « Premier mémoire sur la cosmogonie positive », in *Écrits de jeunesse, 1816-1828. Suivis du Mémoire sur la cosmogonie de Laplace, 1835*, éd. établie et annot. par Paulo E. Carneiro et Pierre Arnaud, Coll. « Archives positivistes », Paris : Mouton.

1998 *Cours de philosophie positive*, éd. établie et annot. par Michel Serres, François Dagognet et Allal Sinaceur, Paris : Hermann, t. 1.

Cournot, Antoine Auguste

1975 *Essai sur les fondements de la connaissance et sur les caractères de la critique philosophique*, in *Œuvres complètes*, sous la dir. d'André Robinet, Paris : J. Vrin, t. 2.

1979 *Matérialisme, vitalisme, rationalisme. Études sur l'emploi des données de la science en philosophie*, in *Œuvres complètes*, sous la dir. d'André Robinet, Paris : J. Vrin, t. 5.

1982 *Traité de l'enchaînement des idées fondamentales dans les sciences et dans l'histoire*, in *Œuvres complètes*, sous la dir. d'André Robinet, Paris : J. Vrin, t. 3.

Couturat, Louis

1893 « L'évolutionnisme physique et le principe de la conservation d'énergie », *Revue de métaphysique et de morale*, 1, page(s) : 564-572.

1896 « Études sur l'espace et le temps de MM. Lechalas, Poincaré, Delboeuf, Bergson, L. Weber et Evellin », *Revue de métaphysique et de morale*, 4, page(s) : 646-669.

D'Alembert

2011 *Discours préliminaire de l'Encyclopédie et articles de l'Encyclopédie : introduits par la querelle avec le Journal de Trévoux*, éd. établie et introd. par Martine Groult, Paris : H. Champion.

Dahan-Dalmédico, Amy et Jean-Luc Chabert

1992 « Les idées nouvelles de Poincaré », in Dahan-Dalmédico *et al.* (1992), page(s) : 274-305.

Dahan-Dalmédico, Amy, Jean-Luc Chabert et Karine Chemla

1992 (éd.), *Chaos et déterminisme*, Coll. « Points Série Sciences », Paris : Editions du Seuil.

Darboux, Gaston

1912 *Éloges académiques et discours*, Paris : Hermann.

1913 « Eloge historique de Henri Poincaré », *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, repris in *Œuvres* II.

Darrigol, Olivier

1995 « Henri Poincaré's criticism of Fin de Siècle electrodynamics », *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 26, 1 (jan. 1995), page(s) : 1-44.

2003 « The Origin of the Concept of Entropy », *Séminaire Poincaré*, 2, page(s) : 1-12.

2004 « Faut-il réviser l'histoire de la relativité ? », *Lettre de l'Académie des sciences*, 14.

2007 « Diversité et harmonie dans la physique mathématique dans les préfaces de Henri Poincaré », in *Pour comprendre le XIXe. Histoire et philosophie des sciences à la fin du siècle*, sous la dir. de Jean-Claude Pont, Laurent Freland, Flavia Padovani et Lilia Slavinskaia, Coll. « Bibliothèque d'Histoire des Sciences », Firenze : Léo S. Olschki Editore.

Darrigol, Olivier et Jürgen Renn

2013 « The Emergence of Statistical Mechanics », in *The Oxford Handbook of the History of Physics*, sous la dir. de Jed Z. Buchwald et Robert Fox, Oxford : Oxford University Press, page(s) : 765-788.

Daston, Lorraine

1989 « L'interprétation classique du calcul des probabilités », *Annales. Économies, Sociétés, Civilisations*, 44, 3, page(s) : 715-731.

Dauvillier, Alexandre

1963 *Les hypothèses cosmogoniques. Théories des cycles cosmiques et des planètes jumelles*, Paris : Masson.

Deleuze, Gilles

1968 *Différence et répétition*, Paris : P. U. F.

Descartes, René

1963a *Discours de la méthode*, in *Œuvres philosophiques*, éd. établie et annot. par Ferdinand Alquié, Paris : Garnier frères, t. 1.

Descartes, René

1963b *Le Monde ou traité de la lumière*, in *Œuvres philosophiques*, éd. établie et annot. par Ferdinand Alquié, Paris : Garnier frères, t. 1.

1963c *Principes de la philosophie*, in *Œuvres philosophiques*, éd. établie et annot. par Ferdinand Alquié, Paris : Garnier frères, t. 3.

Dewhirst, David et Michael Hoskin

1999 « The message of starlight : the rise of astrophysics », in *The Cambridge Concise History of Astronomy*, sous la dir. de Michael Hoskin, Cambridge : Cambridge University Press.

Du Ligondès, Raoul-Marie

1907 *Formation mécanique du Système du Monde*, 2e éd., Paris : Gauthier-Villars.

Duhem, Pierre

1906 *La théorie physique, son objet et sa structure*, Coll. « L'histoire des science. Textes et études », Paris : J. Vrin ; réédition à partir de la 2e éd. revue et augmentée de 1914 (Paris : J. Vrin, 1997).

1992 *L'évolution de la mécanique*, éd. établie et introd. par Anastatios Brenner, 1er éd. parue en 1903, Coll. « Mathesis », Paris : J. Vrin.

Dunan, Charles

1899 « Déterminisme et contingence. Réponse à l'article de M. Brunschvicg », *Revue de métaphysique et de morale*, 7, 6, page(s) : 647-683.

École, Jean

1985 « Un essai d'explication rationnelle du monde ou la Cosmologia generalis de Christian Wolff », in *Introduction à l'Opus metaphysicum de Christian Wolff*, Paris : J. Vrin.

Eddington, Arthur Stanley

1914 *Stellar Movements and the Structure of the Universe*, Coll. « Macmillan's Science Monographs », London : Macmillan.

Ehrenfest, Paul, Tatiana Ehrenfest-Afanassjewa et Émile Borel

1915 « Mécanique statistique », in *Encyclopédie des Sciences Mathématiques pures et appliquées*, Gauthier-Villars, t. 4, page(s) : 188-292.

Ehrhardt, Caroline

2011 « Du cours magistral à l'entreprise éditoriale », *Histoire de l'éducation*, 130, 2, page(s) : 111-139.

Einstein, Albert

1956 *La relativité*, trad. par Maurice Solovine ; réédition (Paris : Payot-Rivages, 2001).

1993 *Albert Einstein. Physique, philosophie, politique*, éd. établie et annot. par Françoise Balibar, Coll. « Seuil-Point », Paris : Editions du Seuil.

Ellis, George F. R.

2006 « Issues in the Philosophy of Cosmology », in *Philosophy of Physics*, sous la dir. de Jeremy Butterfield et John Earman, Amsterdam : Elsevier, t. B.

2014 « On the philosophy of cosmology », *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, Philosophy of cosmology, 46, A, page(s) : 5-23.

Fages, Volny

2012 *Les origines du monde. Cosmogonies scientifiques en France (1860-1920) : acteurs, pratiques, représentations*, Thèse de doctorat, EHESS.

Faye, Hervé

1884 *Sur l'origine du monde. Théories cosmogoniques des anciens et des modernes*, Paris : Gauthier-Villars.

Foucault, Michel

1966 *Les Mots et les choses*, Paris : Gallimard.

Fouché, Maurice

1883 « La formation du systeme Solaire, d'après Laplace », *L'Astronomie*, 2 (août 1883), page(s) : 292-294.

1884 « Sur la condensation de la nébuleuse solaire, dans l'hypothèse de Laplace », *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 99, page(s) : 903-906.

Fox, Robert

1995 *Science, Industry and the Social Order in Post-Revolutionary France*, Coll. « Collected studies series », Aldershot : Variorum.

2012 *The Savant and the State : Science and Cultural Politics in Nineteenth-Century France*, Baltimore, Etats-Unis d'Amérique : Johns Hopkins University Press.

Franceschelli, Sara, Tatiana Roque et Michel Paty

2007 (éd.), *Chaos & systèmes dynamiques. Eléments pour une épistémologie des systèmes dynamiques*, Visions des sciences, Paris : Hermann.

Friedman, Michael

1995 « Poincaré's Conventionalism and the Logical Positivists », *Foundations of Science*, 1, 2, page(s) : 299-314.

2008 « Einstein, Kant, and the A Priori », *Royal Institute of Philosophy Supplements*, 63 (sept. 2008), page(s) : 95-112.

Friedman, Michael

2009 « Newton and Kant on Absolute Space : From Theology to Transcendental Philosophy », in *Constituting Objectivity : Transcendental Perspectives on Modern Physics*, sous la dir. de Michel Bitbol, Pierre Kerszberg et Jean Petitot, Coll. « Western Ontario series in Philosophy of Science », Dordrecht : Springer, page(s) : 38-50.

Gale, George

1993 « Philosophical Aspects of the Origin of Modern Cosmology », in Hetherington (1993).

2015 « Cosmology : Methodological Debates in the 1930s and 1940s », in *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, sous la dir. d'Edward N. Zalta, Summer 2015.

Galison, Peter Louis

2005 *L'empire du temps : les horloges d'Einstein et les cartes de Poincaré*, trad. par Bella Arman, Paris, France : R. Laffont.

Garber, Daniel

2006 « Les limites du monde », in *Descartes en Kant*, sous la dir. de Michel Fichant et Jean-Luc Marion, Paris : P. U. F.

Ghins, Michel

1990 *L'inertie et l'espace-temps absolu de Newton à Einstein. Une analyse philosophique*, Bruxelles : Académie royale de Belgique.

Goroff, Daniel L.

1993 « Henri Poincaré and the birth of chaos theory. An Introduction to the english translation of Les Méthodes nouvelles de la Mécanique céleste », in Henri Poincaré, *New Methods of Celestial Mechanics*, éd. établie et introd. par Daniel L. Goroff, Woodbury : American Institute of Physics, t. 1.

Granger, Gilles-Gaston

1998 *L'irrationnel*, Coll. « Philosophie », Paris : O. Jacob.

2003 « Vérité et convention », in *Philosophie, langage, science*, éd. établie et introd. par Michel Paty et Jean-Jacques Szczeciniarz, Coll. « Penser avec les sciences », Paris : EDP Sciences, page(s) : 243-260.

Gray, Jeremy

1992 « Poincaré, topological dynamics, and the stability of the solar system », in *The Investigation of difficult things : essays on Newton and the history of the exact sciences in honour of D.T. Whiteside*, sous la dir. de Peter Michael Harman et Alan E Shapiro, Cambridge : Cambridge University Press.

2006 « Poincaré - Between Physics and Philosophy », in *The Kantian Legacy in Nineteenth-Century Science*, sous la dir. de Michael Friedman et Alfred Nordmann, 00002, Cambridge, M.A. et London : MIT Press, page(s) : 295-313.

2013 *Henri Poincaré : A Scientific Biography*, Princeton et Oxford : Princeton University Press.

Grosholz, Emily

1996 « Plato and Leibniz against the Materialists », *Journal of the History of Ideas*, 57, 2 (avr. 1996), page(s) : 255-276.

2011 « Space and Time », in *The Oxford Handbook of Philosophy in Early Modern Europe*, sous la dir. de Desmond M. Clarke et Catherine Wilson, Coll. « Oxford handbooks », 26 cm. Notes bibliogr., Oxford : Oxford University Press.

Hacking, Ian

1990 *The Taming of Chance*, Cambridge : Cambridge University Press.

Hadamard, Jacques

1914 « Le problème des trois corps », in *Henri Poincaré. L'œuvre scientifique, l'œuvre philosophique*, Paris : F. Alcan.

Hahn, Roger

2004 *Le système du monde : Pierre Simon Laplace, un itinéraire dans la science*, trad. par Patrick Hersant, Coll. « Bibliothèque des histoires », Paris : Gallimard.

Harrison, Edward

1986 « Kelvin on an old, celebrated hypothesis », *Nature*, 322, 6078 (juil. 1986), page(s) : 417-418.

1998 *Le noir de la nuit : une énigme du cosmos*, trad. par Christian Jeanmougin, Coll. « Points Série Sciences », Paris : Éd. du Seuil.

Heinzmann, Gerhard

2009 « Hypothses and Conventions in Poincaré », in *The Significance of the Hypothetical in the Natural Science*, sous la dir. de Michael Heidelberger et Gregor Schiemann, Berlin : Walter de Gruyter.

Hetherington, Norriss S.

1993 (éd.), *Encyclopedia of Cosmology : Historical, Philosophical and Scientific Foundations of Modern Cosmology*, New York : Garland Publisher.

Hoskin, Michael

1999 « The astronomy of the universe of stars », in *The Cambridge Concise History of Astronomy*, sous la dir. de Michael Hoskin, Cambridge : Cambridge University Press, page(s) : 168-218.

Israel, Giorgio

1992 « L'histoire du principe du déterminisme et ses rencontres avec les mathématiques », in Dahan-Dalmédico *et al.* (1992).

Jaki, Stanley L.

1976 « The Five Forms of Laplace's Cosmogony », *American Journal of Physics*, 44, 1.

Jammer, Max

2008 *Concepts d'espace : une histoire des théories de l'espace en physique*, trad. par Laurent Mayet et Ivahn Smadja, introd. d'Albert Einstein et Marc Lachièze-Rey, 00003, Paris : J. Vrin.

Jeans, James

1919 *Problems of Cosmogony and Stellar Dynamics*, London : Cambridge University Press.

1923 *The Nebular Hypothesis and Modern Cosmogony*, Oxford : The Clarendon Press ; Halley lecture delivered on 23 May, 1922.

Kant, Immanuel

1980a *Critique de la raison pure*, in *Œuvres philosophiques*, éd. établie et introd. par Ferdinand Alquié, trad. et annot. par Alexandre Delamarre et François Marty, Bibliothèque de la Pléiade, Paris : Gallimard, t. 1.

1980b *De la forme et des principes du monde sensible et du monde intelligible*, in *Œuvres philosophiques*, éd. établie, trad., annot. et introd. par Ferdinand Alquié, Bibliothèque de la Pléiade, Paris : Gallimard, t. 1.

1980c *Histoire générale de la nature et théorie du ciel*, in *Œuvres philosophiques*, éd. établie et introd. par Ferdinand Alquié, trad. et annot. par François Marty, Bibliothèque de la Pléiade, Paris : Gallimard, t. 1.

1980d *L'unique fondement de l'existence de Dieu*, in *Œuvres philosophiques*, éd. établie et introd. par Ferdinand Alquié, trad. et annot. par Sylvain Zac, Bibliothèque de la Pléiade, Paris : Gallimard, t. 1.

1984 *Histoire générale de la nature et Théorie du ciel*, trad. par Anne-Marie Roviello, introd. de Jean Seidengart, postf. de Pierre Kerszberg, Paris : J. Vrin.

1985 *Prolégomènes à toute métaphysique future qui pourra se présenter comme science*, in *Œuvres philosophiques*, éd. établie et introd. par Ferdinand Alquié, trad. par Jacques Rivelaygue, Bibliothèque de la Pléiade, Paris : Gallimard, t. 2.

Kapteyn, Jacobus Cornelius

1906 « Statistical Methods in Stellar Astronomy », in *Congress of Arts and Science : Universal Exposition*, sous la dir. d'Howard J. Rogers, St Louis, 1904, Boston et New York : Houghton, Mifflin et Co., t. 4, page(s) : 396-425.

Kerszberg, Pierre

1989 *The Invented Universe : the Einstein-De Sitter Controversy (1916-17) and the Rise of Relativistic Cosmology*, Oxford : Clarendon Press.

2005 « L'idée d'Univers et la cosmologie comme science », *Kairos*, 26.

2013 « Deduction Versus Discourse : Newton and the Cosmic Phenomena », *Foundations of Science*, 18, 3, page(s) : 529-544.

Koyré, Alexandre

1962 *Du monde clos à l'univers infini*, trad. par Raissa Tarr, nouvelle éd. Coll. « tel », Paris : Gallimard.

1968 *Etudes newtoniennes*, Coll. « Bibliothèque des idées », Paris : Gallimard.

1973 *Études d'histoire de la pensée scientifique*, Réédition de la première édition de 1963, Coll. « tel », Paris : Gallimard.

2001 *Études galiléennes*, Nouveau tirage de l'édition de 1966, Coll. « Histoire de la pensée », Paris : Hermann.

Kragh, Helge

1996 *Cosmology and Controversy : The Historical Development of Two Theories of the Universe*, Princeton : Princeton University Press.

2007 *Conceptions of Cosmos from Myths to the Accelerating Universe : A history of Cosmology*, Oxford : Oxford University Press.

2008 *Entropic Creation : Religious Contexts of Thermodynamics and Cosmology*, Coll. « Science, technology, and culture - 1700-1945 », Aldershot : Ashgate.

2012a *Geometry and Astronomy : Pre-Einstein Speculations of Non-Euclidean Space*, mai 2012, arXiv : `1205.4909`, `http://arxiv.org/abs/1205.4909`.

2012b « Is space flat ? Nineteenth century astronomy and non-euclidean geometry », *Journal of Astronomical History and Heritage*, 15 (nov. 2012), page(s) : 149-158.

2013 *The rise and fall of cosmical physics : notes for a history, ca. 1850-1920*, arXiv : 1304.3890, avr. 2013, `http://arxiv.org/abs/1304.3890`.

Lachièze-Rey, Marc

2008 *Au-delà de l'espace et du temps : la nouvelle physique*, Coll. « Essais (Paris. 2001) », Paris : Le Pommier.

Lalande, André

1900 « Note sur l'indétermination », *Revue de métaphysique et de morale*, 8, page(s) : 94-98.

Langevin, Paul

1911 « L'évolution de l'espace et du temps », *Scientia*, 10, 2, page(s) : 31-54.

1912 « Le temps, l'espace et la causalité dans la physique moderne », *Bulletin de la Société française de philosophie*, 12, 1, séance du 19 octobre 1911.

1913 « L'œuvre de Henri Poincaré. Physique », *Revue de métaphysique et de morale*, 21, 5, page(s) : 675-718, repris in Henri Poincaré. L'œuvre scientifique, l'œuvre philosophique.

Laplace, Pierre-Simon de

1884 *Exposition du système du monde*, in *Œuvres complètes de Laplace*, Paris : Gauthier-Villars, t. 6.

1986 *Essai philosophique sur les probabilités : texte de la 5e édition, 1825 ; suivi d'extraits de Mémoires*, 00000, Paris : C. Bourgois.

1878-1894 *Essai philosophique sur les probabilités*, in *Œuvres complètes de Laplace*, 3e édition de 1820, Paris : Gauthier-Villars, t. 7.

Le Gars, Stéphane

2007 *L'émergence de l'astronomie physique en France (1860-1914). Acteurs et pratiques*, Thèse de doctorat, Université de Nantes.

Lebeuf, Auguste

1913 « Astronome », *Revue de métaphysique et de morale*, 21, 5, page(s) : 659-674.

Lebon, Ernest

1911 « Poincaré (H.). – Leçons sur les hypothèses cosmogoniques (Compte rendu et analyse) », *Bulletin de la Société mathématique de France*, 35 (déc. 1911), page(s) : 309-319.

1912 *Henri Poincaré. Biographie, bibliographie analytique des écrits*, 2e éd., Coll. « Savants du jour », Paris : Gauthier-Villars.

1913 « Notice sur Henri Poincaré », in *Leçons sur les hypothèses cosmogoniques*, 2e éd.

Lechalas, Georges

1894 « Note sur la réversibilité du monde matériel », *Revue de métaphysique et de morale*, 2.

Leibniz, Gottfried Wilhelm

p. d. « Principes de la nature et de la grâce », in *Principes de la nature et de la grâce ; Monadologie et autres textes, 1703-1716*, sous la dir. de Christiane Frémont, Paris : Flammarion, 1996, 00012, Flammarion.

1991 *Correspondance Leibniz-Clarke*, éd. établie et annot. par André Robinet, présentée d'après les manuscrits originaux des bibliothèques de Hanovre et de Londres, Coll. « Bibliothèque de philosophie contemporaine. Histoire de la philosophie et philosophie générale », Paris : P. U. F.

2001 *De la production originelle des choses prises à sa racine*, in *Opuscules philosophiques choisis*, éd. établie et trad. par Paul Schrecker, Bibliothèque des textes philosophiques, Paris : J. Vrin, page(s) : 168-197, *Philosophische Schriften* VII 302-308.

Leine, Remco

2010 « The historical development of classical stability concepts : Lagrange, Poisson and Lyapunov stability », *Nonlinear Dynamics*, 59, 1-2, page(s) : 173-182.

Lestienne, Rémy

2003 *Les fils du temps. Causalité, entropie, devenir*, Paris : CNRS Editions.

Lévy, Jacques

1916-1956 « Poincaré et la mécanique céleste », in Poincaré (1916-1956), t. 11.

Lippmann, Gabriel

1900 « La théorie cinétique des gaz et le principe de Carnot », in *Rapports présentés au Congrès international de physique*, sous la dir. de Charles-Edouard Guillaum et Lucien Poincaré, Paris : Gauthier-Villars, t. 1, page(s) : 546-550.

Locher, Fabien

2009 « Les sciences et les techniques dans l'enseignement supérieur français (XIXe-XXe siècles) », *Histoire de l'éducation*, 122, 2, page(s) : 35-52.

Mach, Ernst

1904 *La mécanique. Exposé historique et critique de son développement*, trad. par Emile Bertrand, introd. d'Emile Picard, trad. fr. sur la quatrième édition allemande de 1901, Paris : Hermann ; reproduction en fac-sim (Paris : J. Gabay, 1987).

Mavridès, Stamatia

2000 *La relativité*, 4e édition (1re : 1988), Coll. « Que sais-je ? », 00010, Paris : P. U. F.

Mawhin, Jean

2005 « Henri Poincaré. A Life in the Service of Science », *Notices of the AMS*, 52, 9, page(s) : 1036-1044.

Maxwell, James Clerk

2002 « Molécules », in Barberousse (2002), page(s) : 115-134.

Mazliak, Laurent

2012 « Poincaré et le hasard », *Séminaire Poincaré*, 14, page(s) : 135-171.

Merleau-Ponty, Jacques

1965 *Cosmologie du XXe siècle*, Paris : Gallimard.

1983 *La science de l'Univers à l'âge du positivisme. Etude sur les origines de la cosmologie contemporaine*, Coll. « L'histoire des science. Textes et études », Paris : J. Vrin.

1986 « Science et doxa. Qu'est-ce que la vulgarisation ? », in *Philosophies et sciences*, sous la dir. de Gilbert Hottois, Coll. « Annales de l'Institut de philosophie de l'Université de Bruxelles », Bruxelles : Edtions de l'Université de Bruxelles.

2003 *Sur la science cosmologique. Conditions de possibilité et problèmes philosphiques*, éd. établie et introd. par Michel Paty et Jean-Jacques Szczeciniarz, Coll. « Penser avec les sciences », Paris : EDP Sciences.

Merleau-Ponty, Jacques et Bruno Morando

1971 *Les trois étapes de la cosmologie*, Coll. « Science nouvelle », Paris : R. Laffont.

Meyerson, Émile

1908 *Identité et réalité*, Paris : Félix Alcan.

Morando, Bruno

1995 « The Golden Age of Celestial Mechanics », in *Planetary Astronomy*, sous la dir. de René Taton et Curtis Wilson, Cambridge : Cambridge University Press, t. 2B.

Morange, Michel

2011 *La vie, l'évolution et l'histoire*, Paris : O. Jacob.

Moreux, Théophile

1915 *Eléments de cosmographie. Conformes aux Programme du Baccalauréat (séries littéraires)*, 2e édition (1re : 1914), Paris : J. de Gigord.

Moulton, Forest Ray

1912 « M. Henri Poincaré », *Popular Astronomy*, 22, 10 (déc. 1912), page(s) : 620-634.

Munitz, Milton K.

1951 « Kantian Dialectic and Modern Scientific Cosmology », *The Journal of Philosophy*, 48, 10, page(s) : 325-338.

1962 « The Logic of Cosmology », *British Journal for the Philosophy of Science*, 13, page(s) : 34-50.

Nabonnand, Philippe

2008 « Le conventionnalisme géométrique, une alternative radicale au réalisme spatial. Le contexte français du conventionnalisme géométrique de Poincaré », *Cahiers de philosophie de l'Université de Caen*, Réalisme et théories physique (coordonné par Ivahn Smadja), 45, page(s) : 63-86.

Newton, Isaac

p. d. *Principes mathématiques de la philosophie naturelle*, trad. par Emilie du Châtelet, trad. fr. en 1759 à partir de la troisième édition de 1727 ; réimpréssion (Paris : J. Gabay, 1966).

1995 *De la gravitation*, trad. par François de Gandt et Marie-Françoise Biarnais, introd. de François de Gandt, Coll. « Collection Tel », Paris : Gallimard.

Noguès, Boris

2008 « Élèves ou auditeurs ? Le public des facultés de lettres et de sciences au XIXe siècle (1808-1878) », *Histoire de l'éducation*, 120, 4 (sept. 2008), sous la dir. d'Annie Bruter, page(s) : 77-97.

Norton, John D.

1999 « The Cosmological Woes of Newtonian Cosmology », in *The Expanding Worlds of General Relativity*, sous la dir. de H. Goenner, J. Renn, J. Ritter et T. Sauer, Coll. « Einstein Studies », Springer, t. 7, page(s) : 271-322.

Parinet, Elisabeth

1992 *La librairie Flammarion 1875-1914*, Paris : IMEC Éditions.

2004 *Une histoire de l'édition à l'époque contemporaine. XIXe-XXe siècle*, Coll. « Points histoire », Paris : Editions du Seuil.

Paty, Michel

1993 *Einstein philosophe*, Paris : P. U. F.

1996 « Le principe de relativité au sens de Poincaré », in *Henri Poincaré. Science et philosophie*, sous la dir. de Jean-Louis Greffe, Gerhard Heinzmann et Kuno Lorenz, Publications des Archives Henri Poincaré, Berlin et Paris : Akademie Verlag-Blanchard, page(s) : 101-143.

2003 *La physique du XXe siècle*, Coll. « Sciences et histoires », Les Ulis : EDP Sciences.

2004 « Le cosmos avant Einstein », *Ciel et espace. Hors-série*, Hors-série (sept. 2004) : *Einstein, l'homme qui a inventé l'Univers*, page(s) : 29-35.

Paul, Erich Robert

1993 *The Milky Way Galaxy : Statistical Cosmology 1890-1924*, Cambridge : Cambridge University Press.

Paul, Harry W.

1985 *From Knowledge to Power : The Rise of the Science Empire in France 1860-1939*, Cambridge : Cambridge University Press.

Pauri, Massimo

1991 « The Universe as a Scientific Object », in *Philosophy and the origin and evolution of the universe*, sous la dir. d'Evandro Agazzi et Alberto Cordero, Coll. « Synthese Library », Dordrecht : Springer, page(s) : 291-339.

Pêcheux, Michel et Michel Fichant

1969 *Sur l'histoire des sciences*, Coll. « Théorie, Cours de philosophie pour scientifiques », Paris : F. Maspero.

Pecker, Jean-Claude

1964 « Astrophysique théorique », in *La science contemporaine*, sous la dir. de René Taton, Paris : P. U. F., t. II.

2001 *Understanding Heavens : The Centuries of Astronomical Ideas from Ancient Thinking to Modern Cosmology*, Berlin : Springer.

Penrose, Roger

1989 « Newton, Quantum Theory and Reality », in *Three Hundred Years of Gravitation*, sous la dir. de Stephen William Hawking et Werner Israel, Cambridge : Cambridge University Press, page(s) : 17-49.

Perrin, Jean

1906 « Le contenu essentiel des principes de la thermodynamique », *Bulletin de la Société française de Philosophie*, 6, 3, page(s) : 81-111.

Picard, Emile

1903 « Troisième partie : Sciences », in *Exposition universelle internationale de 1900 à Paris. Rapports du jury international*, Paris : Imprimérie nationale, t. 2.

Planck, Max

1913 *Leçons de thermodynamique*, trad. par R. Chevassus, Paris : Hermann et Fils ; reproduction en fac-similé (Paris : J. Gabay, 2008).

Prigogine, Ilya et Isabelle Stengers

1986 *La nouvelle alliance*, 2e éd., Coll. « Folio. Essais », Paris : Gallimard.

Prıncipe, João

2014 « Henri Poincaré : The Status of Mechanical Explanations and the Foundations of Statistical Mechanics », in *Poincaré, Philosopher of Science*, sous la dir. de Marıa de Paz et Robert DiSalle, Coll. « The Western Ontario Series in Philosophy of Science », Dordrecht : Springer, page(s) : 127-151.

Puiseux, Pierre

1914 « Remarque au sujet de l'article précédent », *Bulletin astronomique, Série I*, 31, page(s) : 272-273.

Reeve, Sidney

1907 « The Question of Entropy », *Harvard Engineering Journal*, 6, page(s) : 138-154.

Riemann, Bernhard

1867 « Sur les hypothèses qui servent de fondement à la géométrie », in *Oeuvres mathématiques*, trad. par Guillaume Jules Hoüel, Coll. « Les Grands classiques Gauthier-Villars », Sceaux : J. Gabay, page(s) : 280-299, avec une préface de Ch. Hermitte et un essai de F. Klein. Reproduction en fac-similé de l'édition française de 1898.

Roche, Edouard

1873 *Essai sur la constitution et l'origine du système solaire*, Paris : Gauthier-Villars ; Extrait des Mémoires de l'Académie des Sciences et Lettres de Montpellier (Section des Sciences, tome VIII).

Rollet, Laurent

1999 *Henri Poincaré, des mathématiques à la philosophie. Etude du parcours intellectuel, social et politique d'un mathématicien au début du siècle*, Thèse de doctorat, Université de Nancy II.

2002 « Henri Poincaré's Last Philosophical Book », in Poincaré (2002), page(s) : ix-xxv.

Roque, Tatiana

2011 « Stability of trajectories from Poincaré to Birkhoff : approaching a qualitative definition », *Archive for History of Exact Sciences*, 65, 3 (mai 2011), page(s) : 295-342.

Rougé, André

2008 *Relativité restreinte. La contribution d'Henri Poincaré*, Coll. « Histoire de la physique », Palaiseau : Les éditions de l'École polytechnique.

Rougier, Louis

1920 *La philosophie géométrique de Henri Poincaré*, Paris : F. Alcan.

Royer, Clémence

1901 *Histoire du ciel*, bibtex : Royer1901, Paris : Schleicher frères.

Rynasiewicz, Robert

2014 « Newton's Views on Space, Time, and Motion », in *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, sous la dir. d'Edward N. Zalta.

Salet, Pierre

1902 « L'attraction dans l'univers stellaire », *Bulletin Astronomique, Serie I*, 19, page(s) : 227-236.

Schmid, Anne-Françoise

2015 « La double fonction de l'expérience chez Henri Poincaré », in *Les mathématiques et l'expérience. Ce qu'en ont dit les philosophes et les mathématiciens*, Paris : Hermann, page(s) : 299-312.

Schwarzschild, Karl

1913 « Leçons sur les hypothèses cosmogoniques by H. Poincaré and Researches on the Evolution of the Stellar Systems by T. J. J. See », *Astrophysical Journal*, 37, page(s) : 294-298.

Sciama, Dennis W.

1961 « Les trois lois de la cosmologie », *Annale de l'Institut Henri Poincaré*, 17, 1, page(s) : 13-24.

1973 « The Universe as a Whole », in *The Physicist's Conception of Nature*, sous la dir. de Jagdish Mehra, Springer, page(s) : 17-33.

See, Thomas Jefferson Jackson

1912 « Review of Poincaré's Lectures on Cosmogony », *Popular Astronomy*, 20 (jan. 1912), page(s) : 13-14.

Seeliger, Hugo von

1909 « Sur l'application des lois de la nature à l'univers », *Scientia*, 6, 2, page(s) : 89-107.

Seidengart, Jean

2006 *Dieu, l'univers et la sphère infinie. Penser l'infinité cosmique à l'aube de la science classique*, Coll. « Bibliothèque Albin Michel des idées », Paris : A. Michel.

Sheynin, Oscar

1996 « The introduction of statistical reasoning into astronomy : from Newton to Poincaré », in *Planetary Astronomy from the Renaissance to the Rise of Astrophysics*, sous la dir. de René Taton, Curtis Wilson et Michael Hoskin, Coll. « The general history of astronomy », Cambridge : Cambridge University Press, t. 2B, page(s) : 198-208.

Sklar, Lawrence

1977 *Space, Time, and Spacetime*, ill. 23 cm. Bibliogr. à la fin de chaque chap. Index., Berkeley : University of California Press.

2013 *Philosophy and the Foundations of Dynamics*, 25 cm. Notes bibliogr., Cambridge : Cambridge University Press.

Smeenk, Chris

2013 « Philosophy of Cosmology », in *The Oxford Handbook for the Philosophy of Physics*, sous la dir. de Robert W. Batterman, New York : Oxford University Press.

Smeenk, Christopher et Eric Schliesser

2013 « Newton's Principia », in *The Oxford Handbook of the History of Physics*, sous la dir. de Jed Z. Buchwald et Robert Fox, Oxford : Oxford University Press, page(s) : 109-165.

Société française de Philosophie

1922 « La théorie de la relativité », *Bulletin de la Société française de philosophie*, 22, 3, page(s) : 349-370, compte rendu de la séance du 6 avril 1922.

Staley, Richard

2008 *Einstein's Generation : The Origins of the Relativity Revolution*, ill. 24 cm. Bibliogr.p. 423-465., Chicago : University of Chicago Press.

Stengers, Isabelle

2003 *Cosmopolitiques I*, Coll. « La Découverte-poche. Sciences humaines et sociales », Paris : La Découverte.

Szczeciniarz, Jean-Jacques

1998 *Copernic et la révolution copernicienne*, Coll. « Nouvelle bibliothèque scientifique », Paris : Flammarion.

2004 « La maıtrise de l'infini », *Ciel et espace*, Hors-série, 2 (sept. 2004) : *Einstein, l'homme qui a inventé l'Univers*, page(s) : 64-69.

2010a « La cosmologie au XXe siècle et sa structure dialectique et positive », in *Vers une nouvelle philosophie de la nature : actualités mathématiques, physiques et biologiques*, sous la dir. de Joseph Kouneiher, Coll. « Visions des sciences », Paris : Hermann, page(s) : 153-179.

2010b « La cosmologie comme science spéculative ou comme théorie philosophique scientifique », in Barrau *et al.* (2010).

Szpiro, George G

2009 *La conjecture de Poincaré*, trad. par Bernard Sigaud, Coll. « Points », Paris : Editions du Seuil.

Tesnière, Valérie

1985 « L'édition universitaire », in *Le temps des éditeurs. Du romantisme à la Belle Epoque*, sous la dir. d'Henri-Jean Martin et Roger Chartier, Coll. « Histoire de l'édition française », Paris : Fayard, t. 3.

Thomson, William

1892 « On the Dissipation of Energy », *Fortnightly Review*, 51, page(s) : 313-321, *Popular Lectures and Addresses* II (London : MacMillan, 1894), p. 451-474.

1893 *Constitution de la matière. Conférences scientifiques et allocutions*, trad. par P. Lugol, annot. de Marcel Brillouin, Paris : Gauthier-Villars.

1901 « On Ether and Gravitational Matter through Infinite Space », *Philosophical Magazine*, 6e sér., 2, 8, page(s) : 161-177.

1904 « On the Clustering of Gravitational Matter in Any Part of the Universe », in *Baltimore Lectures on Molecular Dynamics and the Wave Theory of Light*, London : Cambridge University Press, page(s) : 532-540.

Thomson, William et Peter Guthrie Tait

1883 *Treatise on Natural Philosophy*, 2e éd., Coll. « Cambridge Library Collection - Mathematics », Cambridge University Press, t. 1.

Tisserand, François-Félix et Henri Andoyer

1912 *Leçons de cosmographie*, 6ème édition revue et corrigée, Coll. « Cours complet pour la classe de Mathématiques A, B », Paris : A. Colin.

Tonnelat, Marie-Antoinette

1965 *L'histoire du principe de relativité*, Paris : Flammarion.

Torretti, Roberto

1984 *Philosophy of Geometry from Riemann to Poincaré*, Dordrecht : D. Reidel.

2000 « Spacetime Models for the World », *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 31, 2.

Uffink, Jos

2014 « Boltzmann's Work in Statistical Physics », in *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, sous la dir. d'Edward N. Zalta.

Vatin, François

2003 « Comte et Cournot. Une mise en regard biographique et épistémologique », *Revue d'Histoire des Sciences Humaines*, 8, 1, page(s) : 9-40.

Verdet, Jean-Pierre

2010 *Aux origines du monde. Une histoire de la cosmogonie*, Coll. « Science ouverte », Paris : Editions du Seuil.

Verhulst, Ferdinand

2012 *Henri Poincaré : Impatient Genius*, New York : Springer.

Vernant, Jean-Pierre

2005 *Mythe et pensée chez les grecs : études de psychologie historique*, Coll. « La Découverte-poche. Sciences humaines et sociales », 13, Paris : La Découverte ; Nouv. éd. rev. et augm.

Véronnet, Alexandre

1914 *Les hypothèses cosmogoniques modernes*, Paris : Hermann.

Verschaffel, Aloys

1914 « Essai d'une contribution à l'explication de quelques faits récemment découverts dans l'astronomie stellaire », *Bulletin astronomique, Série I*, 31, page(s) : 265-272.

Vilain, Christiane

1998 « L'espace classique », *Acta cosmologica*, 24, 1, page(s) : 149-167.

2009 *Naissance de la physique moderne : méthode et philosophie mécanique au XVIIe siècle*, Paris : Ellipses.

Volterra, Vito

1914 « L'œuvre mathématique », in *Henri Poincaré. L'œuvre scientifique, l'œuvre philosophique*, Paris : F. Alcan.

Walter, Scott

2008 « Henri Poincaré et l'espace-temps conventionnel », *Cahiers de philosophie de l'Université de Caen*, 45.

2014a « Poincaré on Clocks in Motion », *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 47 (août 2014), page(s) : 131-141.

2014b « The Historical Origins of Spacetime », in *Springer Handbook of Spacetime*, sous la dir. d'Abhay Ashtekar et Vesselin Petkov, Berlin et Heidelberg : Springer, page(s) : 27-38.

2018 « Figures of Light in the Early History of Relativity (1905-1914) », in *Beyond Einstein : Perspectives on Geometry, Gravitation, and Cosmology in the Twentieth Century*, sous la dir. de David E. Rowe, Tilman Sauer et Scott Walter, New York : Springer, page(s) : 3-50.

Weber, Louis

1893 « L'évolutionnisme physique », *Revue de métaphysique et de morale*, 1, page(s) : 425-452.

1894 « Discussion sur l'évolutionnisme et le principe de la conservation d l'énergie. Réponse à M. L. Couturat », *Revue de métaphysique et de morale*, 2, page(s) : 87-92.

Wolf, Charles

1886 *Les hypothèses cosmogoniques. Examen des théories scientifiques modernes sur l'origine des mondes*, Paris : Gauthier-Villars.

Woodward, Robert Simpson

1906 « The Unity of Physical Science », in *Congress of Arts and Science : Universal Exposition*, sous la dir. d'Howard J. Rogers, St Louis, 1904, Boston et New York : Houghton, Mifflin et Co., t. 4, page(s) : 3-14.

Wright, Susan

1975 *Henri Poincaré : A Developmental Study of His Philosophical and Scientific Thought*, PhD Thesis, Harvard University.

Yoccoz, Jean-Christophe

2013 « Une erreur féonde du mathématicien Henri Poincaré. Le prix en l'honneur des 60 ans du roi Oscar et la découverte des orbites homoclines », *Letter of Mathematical Institute*, 1, page(s) : 5-10.

Table des figures

Fig. 1 Cours de physique mathématique de Poincaré publiés chez G. Carré et C. Naud 37
Fig. 2 Extraits des cours publiés 38
Fig. 3 Couverture de la première édition des *Leçons* 44
Fig. 4 Ouvrages édités chez Hermann, d'après le catalogue de 1913 et celui de 1914 46
Fig. 5 Le contrat recto verso de la première édition des *Leçons* 49
Fig. 6 Couverture de la seconde édition de *Leçons* 51

Fig. 7 Séparation des anneaux d'après Roche 209
Fig. 8 Deux modes de circulation d'après Faye 211
Fig. 9 Deux modes de rotation d'après Faye 212

Fig. 10 Débat de 1893 sur l'évolutionnisme 271
Fig. 11 Débat de 1894 sur l'évolutionnisme 277
Fig. 12 La courbe H parue l'article de Boltzmann de 1897 281

Fig. 13 Article paru dans *The Electrician* (1903) 331
Fig. 14 Débat sur l'entropie 1902-1903 332

Fig. 15 Deux pages illustrées de l'article de 1906 355

Table des matières

Abréviations **xi**

Introduction générale **3**

Ouverture. Introduction aux *Leçons sur les hypothèses cosmogoniques* **11**

1 Un aperçu du texte 15
1.1 Trois sortes d'hypothèses 15
Hypothèses mécaniques 15
Approches thermodynamiques 18
Au-delà du système solaire 19
1.2 Remarques préliminaires 21
2 Du cours parlé à l'écrit 23
2.1 Cours 24
Deux chaires à la Sorbonne et deux types d'enseignement 24
« Conférence mondaine » de Poincaré ? Le savant et son public 30
2.2 Production du texte 34
Composition et publication des cours 34
Caractères des cours écrits 40
« Mise au point » des *Leçons* 42
2.3 Réception 50
L'« unique exemple dans le monde mathématique ». Deux éditions 50
Préface que tout le monde a lue d'un livre peu lu 55
3 Pourquoi et comment lire ? Vers une nouvelle lecture 58

I. Avant les *Leçons* **65**

Discours préliminaire **67**

1 Objet physique pas comme les autres. L'univers dans la cosmologie moderne 71
2 Idée transcendantale/transcendante 75
3 Pour une archéologie de la cosmologie 80

Chapitre I. L'« émergence » du monde classique **87**

1 L'espace et ses problèmes cosmologiques 87
1.1 Géométrisation de l'espace et ses conséquences 87
Espace géométrisé 87
Espace absolutisé 91
Espace désubstantialisé, en voie d'idéalisation 95
1.2 Infinitisation et ses « prix » 97
Monde in(dé)finitisé 97
Centre dans un monde infini ? 99
Stabilité et infinité. Paradoxe 102
2 Mécanisation et bifurcation de la cosmogonie 105
2.1 Instauration de la cosmogonie mécaniste 105
2.2 Cause primitive, « certainement pas mécanique » 108
Loi comme cause, loi sans cause 108
Dieu créateur et régulateur 112
2.3 Cause et/ou raison du monde 115
3 Une science disparue, aussitôt inventée 119
3.1 Invention d'une science du cosmos 120
Cosmologia generalis, entre métaphysique et physique . . 120
« Physique générale et raisonnée » 121
3.2 A la recherche d'une cause non originelle 124
Nexus comme origine 124
Histoire naturelle ou « naturalisée » de la Terre 127

Chapitre II. L'hypothèse de Kant et Laplace 129
1 Deux systèmes cosmogoniques qui ne font qu'un ? 131
1.1 Formation de la problématique cosmogonique 131
« Découvrir le système » et « bâtir un monde à partir de la matière » 131
« Embrasser les états passés et futurs du Système du monde » 134
1.2 Scénario(s) 136
Dispositifs communs 136
Jeu des trois forces 137
D'un mécanisme « physique » à un système mécanique . 139
1.3 Questions communes 141
Au commencement du monde, univers-îles ou masse fluide ? 142
Rotation comme un problème central 144
Saturne, ce « fossile vivant » du système solaire 146
2 Penser l'univers sous le sillage des nébuleuses 148
2.1 Du *Weltsystem* à l'idée-univers. Transposition transcendantale du problème cosmologique 149
Genèse de l'idée de monde 149
Idée cosmologique, source de l'antinomie 151
2.2 Une origine déterministe ? 155
Notion de loi et ses implications cosmologiques 157
Pensée probabiliste comme motif de la cosmogonie 160
3 D'une cosmogonie positive à une cosmologie physique. Réticence positiviste ou héritage criticiste ? 164

3.1 Monde sans univers ni ciel, fondement de la philosophie positive . . . 166
3.2 Question d'origine et possibilité d'une « cosmologie physique » . . . 170
A la recherche des lois aux dépens de l'origine . . . 170
« Monde » et « origine » comme problèmes propres à de la cosmologie . . . 172

Chapitre III. Détour cosmologique et retour cosmogonique 177
1 Origine et fin thermiques . . . 179
1.1 Théorie de la chaleur et nouveaux problèmes cosmogoniques . . . 180
Origine de la chaleur du Soleil . . . 180
La Terre et la température de l'espace . . . 183
1.2 Sens et portée cosmologiques des principes de la thermodynamique . . . 184
« Mort thermique » comme une extrapolation du principe de Carnot . . . 184
L'entropie de l'univers . . . 186
2 Nouvelle manière de penser le ciel. Renouveaux théoriques en astronomie . . . 190
2.1 Astronomie, vers la « libération » de la mécanique céleste ? 190
Comment compter les étoiles ? Astronomie statistique . . 190
Evolution des questions « nébuleuses » . . . 192
2.2 Impacts de la géométrie non euclidienne . . . 194
2.3 Deux problèmes cosmologiques de la mécanique newtonienne et leurs solutions . . . 198
Pourquoi la nuit est-elle noire ? Problème optique . . . 199
Problème gravitationnel . . . 200
3 Hypothèse nébuleuse revisitée . . . 203
3.1 Contextes. « Renaissance cosmogonique » . . . 203
3.2 D'autres cosmogonies mécaniques/mécanistes . . . 206
A la recherche d'autres mécanismes . . . 206
Chaos comme état primitif . . . 207
3.3 Mise au point des détails . . . 209
Formation des anneaux . . . 209
« Sauver » les rotations . . . 210
Problème du moment angulaire . . . 213
Conclusion provisoire de la première partie . . . 216

II. Vers les *Leçons* 221

Philosophie entre mécanique et physique. Discours préliminaire 223
1 Caractéristiques de la philosophie de Poincaré . . . 223
2 Formation et développement des idées . . . 226
2.1 Rapport comme un style philosophique . . . 226
2.2 Physique mathématique comme un problème philosophique . . . 230

2.3 Histoire comme une méthode de philosphie 233
3 Construction du corpus philosophique 237

Chapitre IV. Le monde mécanique face à la mort thermique 245
1 Perfectionnement de la mécanique newtonienne 247
1.1 D'un problème ancien à un théorème nouveau 247
Stabilité des figures d'équilibre 249
« Stabilité à la Poisson » 251
1.2 Introduction de la conception statistique 253
Aux origines de la théorie cinétique des gaz 253
Mécanique face à la statistique 255
2 Thermodynamique au cours 259
2.1 Deux principes, deux approches 259
Reconstruction historique 259
Reconstruction logique 263
2.2 Compatibilité ou réductibilité du second principe à la mécanique 266
2.3 Autour du débat avec Tait 268
3 Les années de débats (1893–1896) 270
3.1 Evolutionnisme ou mécanisme ? Un débat français 270
Début 271
Suite et fin 275
3.2 Objections mécanistes et défenses cosmologiques 279
Objection de l'irréversibilité 279
Objection de la récurrence 282
4 Tournant probabiliste ? 285
4.1 Stabilité remise en question 287
4.2 Nouvelles méthodes et nouveaux problèmes de la mécanique 291

Chapitre V. Entre loi et principe. Deux usages de l'univers 295
1 La notion de loi 296
1.1 De l'expérience à la convention 296
Du fait au principe, en passant par la loi 296
Sens de la convention 298
1.2 Contingence et historicité 302
Logique de vérification et lois d'à peu près 303
De l'astronomie à la physique 306
Des lois de force centrale aux principes 308
2 Parcours d'une pensée relativiste 310
2.1 De la relativité de l'espace au mouvement relatif 313
Relativité géométrique de l'espace 313
Relativité comme principe de la mécanique, mais (pas encore) physique 315
2.2 Du principe mécanique à la loi physique. Vers l'historicité de la relativité 318
Premier énoncé complet du principe de relativité (1900–1904) 318
Loi générale ou postulat, plutôt que principe (*circa* 1905) 320

3 Bifurcation des deux principes de la thermodynamique 323
3.1 Principes mécaniques appliqués aux phénomènes physiques 324
3.2 Energie et entropie. Querelles de définitions 327
Ce « quelque chose qui demeure constant » 327
Autour de la définition de l'entropie 328
3.3 Principes en crise 334

Chapitre VI. L'univers éthéré ou gazéifié. L'espace à la lumière de la mécanique relativiste et de la théorie cinétique des gaz 339
1 Apport de la nouvelle mécanique 341
1.1 De l'espace au temps avant la relativité 342
Trois espaces... qui ne mènent à nulle part ? 342
Temps ni universel ni même relatif 346
1.2 L'éther « relativiste » et l'espace-temps poincaréen . . . 349
2 Théorie cinétique et son application cosmologique 353
2.1 Sources directes 357
« Idée grandiose » de Kelvin 357
« Problème sidéral » de Kapteyn 361
2.2 L'hypothèse de Kelvin lue par Poincaré 361
Reprise et approfondissement de l'analogie 362
De la figure à l'âge. Considération dynamique et transposition cosmogonique 365
3 Les gaz comme source de pensée cosmologique 368
3.1 Loi du hasard et hasard de la loi. Statistique comme méthode et fondement 369
Question de méthode 369
Fondement statistique des choses 372
3.2 Prédictibilité et irréversibilité. Entre l'univers et les gaz . 375
Conclusion provisoire de la seconde partie 379

Clôture. Retour aux *Leçons* 389
1 Relecture de l'hypothèse nébuleuse 392
1.1 Derniers efforts des mécaniciens célestes 392
1.2 Hypothèse salvatrice, hypothèse sauvée. Face à la « barrière angulaire » 393
2 De la thermodynamique à la physique 396
2.1 La chaleur et l'âge du Soleil et de la Terre 396
2.2 Nébuleuse « gazéifiée ». Théorie des gaz au service de la cosmogonie 398
L'état primitif. Chaos ou ordre ? 398
Reprise de « La Voie lactée et la cinétique des gaz » . . . 400
Le monde d'Arrhenius et son démon 402
3 Bilan et épilogue 405
3.1 Des anneaux aux spirales 405
3.2 Dialogues manqués. *Leçons* lu par ses contemporains . . 407
3.3 Dernières pensées (1911–1912) 408

Conclusion générale **415**

Appendices **422**

Autour des *Leçons*. Appendices pour la première partie **425**
1 Notices biographiques 425
2 Cours de Poincaré à la Sorbonne (1885–1912) 428
2.1 Cours à la chaire de *mécanique physique et expérimentale* (1885–1886) 428
2.2 Cours à la chaire de *physique mathématique* (1887–1896) 428
2.3 Cours à la chaire de *mécanique céleste* (1896–1912) . . . 429
3 Références des *Leçons* 431
3.1 Ouvrages cités 431
3.2 Hypothèses traitées 432
4 Réceptions des *Leçons* 434
4.1 Editions 434
4.2 Reprises de la préface 434
4.3 Traduction 434
4.4 Comptes rendus, analyses, etc. 434

Vers les *Leçons*. Appendices pour la seconde partie **436**
1 Corpus philosophique 437
1.1 *La science et l'hypothèse* (1902) 437
1.2 *La valeur de la science* (1905) 438
1.3 *Science et méthode* (1908) 439
1.4 *Dernières pensées* (1913)* 440
1.5 *L'opportunisme scientifique* (2000)* 440
2 Table synoptique et chronologique 442
2.1 Période classique (avant 1900) 442
2.2 Période prérelativiste (1900–1904) 443
2.3 Période postrelativiste (après 1905) 443

Bibliographie **445**

Œuvres de Poincaré **447**
Ouvrages 447
Articles 448

D'autres sources **450**
Généralités 451
Références poincaréennes et épistémologiques 451

Table des figures **477**

Table des matières **478**