

Le Cosmos avant Einstein.

L'idée cosmologique avant la science cosmologique

Michel PATY

Directeur de recherche émérite au CNRS

1 LA COSMOLOGIE N'A PAS TOUJOURS ETE CE QU'ELLE EST.

Nous sommes habitués depuis deux ou trois générations à considérer la cosmologie comme une science, au même titre que les autres disciplines scientifiques, et il existe une catégorie de chercheurs scientifiques dénommés cosmologues ou cosmologistes, spécialistes de cette discipline, qui travaillent en étroite conjonction avec les astronomes, les astrophysiciens et les physiciens de divers domaines, sans oublier les mathématiciens, les chimistes et d'autres encore. Mais il n'en est pas toujours allé ainsi, et la cosmologie n'est devenue une science, proche de celles mentionnées, qu'au début du XX^e siècle, plus précisément lorsqu'il apparut que cela avait un sens de considérer l'Univers dans son ensemble comme un système physique auquel pouvait s'appliquer la théorie de la relativité générale. Cette dernière fournissait la théorie générale relativiste de la gravitation qui remplaçait la théorie newtonienne développée et mise en œuvre en astronomie pendant plus de deux siècles. On peut dater la naissance de la cosmologie contemporaine (ou cosmologie relativiste) de 1917, année où Albert Einstein eut l'idée d'appliquer sa récente théorie de la relativité générale au système matériel de l'Univers entier. Très vite d'autres physiciens théoriciens lui emboîtèrent le pas en proposant différents modèles d'Univers (Willem de Sitter, Alexander Friedmann, etc.) et les astronomes fournirent des résultats d'observation des objets célestes qui purent être mis en correspondance avec ces théories, en particulier la récession (ou éloignement mutuel) des galaxies, observée par Edwin Hubble et diagnostiquée par la suite comme répondant aux solutions non statiques de l'équation d'Univers.

La cosmologie d'observation et la cosmologie théorique se conjuguèrent ainsi pour assurer les bases de la cosmologie contemporaine. Cette dernière se développa ensuite en confortant l'idée d'Univers en expansion : cette expansion manifeste le déroulement de l'espace dans le temps avec la genèse et les agencements des objets cosmiques ; elle peut être suivie jusqu'à des périodes extrêmement reculées, par l'observation de galaxies très éloignées, qui correspondent à des objets célestes très anciens (leur âge, selon l'échelle du temps cosmique rapportée à notre présent, s'exprime en milliards d'années par le même nombre que leur distance à la Terre en unités d'année-lumière). Il est même possible de reconstituer par la

théorie les “premiers instants” de l’“Univers primordial”, dont la “radiation fossile” fut observée en 1965. Les propriétés de cette phase précoce de l’Univers impliquent de recourir, en plus du champ de gravitation, aux autres champs d’interaction des éléments de matière quantique, électromagnétique et subatomiques. La cosmologie actuelle nous offre ainsi une vue sur une très grande durée (celle d’un *temps cosmique* attaché à l’Univers pris dans sa totalité), de l’Univers et des objets matériels qu’il contient, soumis à un processus d’évolution sur les grandes distances spatiales (évolution de l’Univers) aussi bien que localement (“vie et mort” des étoiles). Cette connaissance est obtenue sur une base théorique et observationnelle en même temps, tout comme les autres connaissances scientifiques, à commencer par la physique à laquelle la cosmologie se rattache directement.

En ce début du XXI^e siècle où nous nous situons, la science cosmologique, bien que récente, possède une grande cohérence et exerce un indéniable pouvoir de fascination en se proposant non seulement comme la science de l’Univers dans sa totalité, mais aussi dans son évolution, c’est-à-dire dans son histoire, malgré des questions fondamentales qui restent encore sans réponse.

Mais il n’en fut pas toujours ainsi, et il semblait plutôt, avant ces développements, que la cosmologie ne pourrait jamais devenir un jour une science comme les autres, à considérer les canons admis de la science moderne depuis le XVII^e siècle, et en particulier de la physique. Comment a-t-elle pu le devenir, tout en respectant l’exigence d’exactitude théorique et d’accord à l’observation la plus précise ? Une remarquable conjonction d’un progrès de la théorie physique et de l’observation astronomique et astrophysique a créé les conditions de cette innovation. Nous allons voir comment, sous le rejet affirmé antérieurement de l’idée d’une cosmologie scientifique, se maintenait une “idée cosmologique”, sous-jacente aux avancées mêmes de la physique et de l’astronomie, et qui contribuerait, le moment venu, à l’affirmation de la nécessité de faire de l’Univers dans sa totalité un objet de science.

2. PRIMAUTE DU TOUT OU DES PARTIES ?

L’idée d’une *cosmologie*, ou pensée du Cosmos, se retrouve dans toutes les civilisations, écrites et non écrites, au long de l’histoire humaine. Elle s’y conjugue généralement avec des récits mythologiques sur la formation du monde, les cosmogonies (comme le mythe de l’Atlantide, narré par Platon dans *Le Timée*). Si l’on considère l’histoire des sciences de l’Antiquité à nos jours, on peut distinguer des périodes différentes en fonction de la place qu’y occupe ou non l’idée de Cosmos (ou Univers) physique comme objet (matériel) dont il est possible de parler en termes de connaissance.

Jacques Merleau-Ponty, en particulier, a bien caractérisé, dans ses ouvrages d’histoire et d’épistémologie de la cosmologie, les différences de

conceptions cosmologiques scientifiques selon trois périodes¹. La première s'étend de l'Antiquité au Moyen-âge et jusqu'à la fin de la Renaissance, avec une pensée physique des *qualités substantielles*, celles-ci étant soumises à une idée de la totalité, et réglées au sein d'un Cosmos ordonné. La seconde est celle de la science classique, du XVII^e au début du XX^e siècle, où l'idée d'une science de l'Univers disparaît pratiquement des perspectives admises, avec toutefois quelques exceptions (comme l'astronome William Herschel), mais où la permanence d'une idée cosmologique peut être décelée, portant ses effets sur divers domaines des sciences. La troisième période est celle de la Cosmologie contemporaine, conçue comme une science au sens plein.

La cosmologie géocentrique d'Aristote et de Ptolémée, théorie de l'astronomie antique, se représentait l'Univers comme fermé et structuré selon des sphères concentriques emboîtées (les sphères d'Eudoxe de Cnide, compliquées par les épicycles de Ptolémée et de ses successeurs, notamment de langue arabe)². La physique, ou science de la nature (*phusis*), dans cette conception héritée d'Aristote, était placée sous la subordination de la métaphysique, et les êtres qui constituent le monde y étaient menés par leur finalité naturelle. Les mathématiques n'y avaient qu'un rôle circonscrit à l'astronomie et à quelques sciences "mathématiques mixtes" telles que l'optique géométrique, l'acoustique, la statique, et la cosmologie, science de la totalité, y était la seule à être totalement mathématique (les sphères étaient mues, sous l'impulsion du Premier Moteur, d'un mouvement circulaire uniforme, le seul mouvement parfait, formulé par la géométrie).

Toutefois, les astronomes anciens furent amenés, à partir de Ptolémée, avec l'introduction des épicycles et la substitution, au centre d'un cercle, d'un autre point intérieur - l'*équiant* - autour duquel s'effectuait le mouvement uniforme, à dissocier l'astronomie physique et l'astronomie mathématique. En effet, dans la conception de l'époque, seul le mouvement circulaire uniforme correspondait à une explication physique acceptable, en termes d'orbites ou de sphères corporels. L'astronomie ancienne, qui était une cosmologie, fut ainsi amenée à se dissocier de la physique de l'époque, c'est-à-dire d'une pensée explicative en termes de propriétés de corps matériels. Cette dissociation de l'astronomie mathématique et de la physique devait se perpétuer jusqu'à Copernic et Kepler. Avec Galilée et Newton, l'astronomie retrouverait pleinement son lien avec la physique, mais selon une conception nouvelle de cette dernière.

Ce "système du monde"³, soutenu par la géométrie et l'astronomie classiques, et qui se présentait comme une connaissance scientifique, avec théorie

¹ Voir les ouvrages de Jacques Merleau-Ponty, notamment : *Cosmologie du XX^e siècle* (1965), *La science de l'Univers à l'âge du positivisme* (1983), *Sur la science cosmologique* (2003).

² Je renvoie au livre récent de Jean-Jacques Szczeciniarz, *La Terre immobile* (2003). Voir également Alexandre Koyré, "Les étapes de la cosmologie scientifique", dans Koyré [1973]. Sur l'histoire de l'astronomie dans le monde arabo-musulman, voir les travaux de Régis Morelon, de George Saliba, et notamment leurs contributions dans Rashed & Morelon [1997], *Histoire des sciences arabes*, vol. 1.

³ Pierre Duhem a publié sous ce titre, *Le Système du Monde*, une somme en 10 gros volumes, consacrée à l'*Histoire des doctrines cosmologiques de Platon à Copernic*, exhumant notamment de nombreux textes, longtemps oubliés, d'auteurs du Moyen-âge chrétien (Duhem [1913-1959]).

et observation, régna dans le monde euro-méditerranéen entre le IV^e siècle avant J.C. et le XVI^e siècle de notre ère.

L'ouverture des cieux par Nicolas Copernic mit ensuite à bas cette cosmologie scientifique au sens ancien, qui céda progressivement la place à l'idée "que l'idéal de la science n'est pas, au fond, celui d'un système du monde, (...), que la science nouvelle n'a pas besoin de l'Univers et que la théorie de l'Univers est à la fois inaccessible et indifférente"⁴.

Dès le XVII^e siècle, qui voit la naissance de la science moderne, l'approche du monde physique se fait plus locale et limitée, avec la constitution de la mécanique puis de la physique classiques. Celles-ci s'expriment par des lois comme celles du "mouvement local" et de la chute des corps (Galilée), formulées ensuite à l'aide du calcul différentiel ou infinitésimal, pour exprimer une causalité instantanée et locale, avec Isaac Newton, Leonhard Euler, Jean d'Alembert, Joseph-Louis Lagrange, etc.

Ce faisant, un renversement s'était opéré : au lieu de comprendre la partie par le tout, on se proposait de comprendre des totalités (par intégration ou synthèse) à partir des éléments (par différenciation ou analyse). En même temps, il était possible de concevoir une unité de la matière dans toute l'étendue infinie de l'Univers. Le Cosmos, tout en étant admis dans son infinité, disparaissait de l'horizon de la science : il était, pour ainsi dire, le lieu (ou plutôt, les lieux) de la science, mais non son objet. Pour la pensée de la science moderne classique, la notion même de cosmologie changeait de nature, signifiant désormais les propriétés générales et universelles de la matière dans l'espace (dans tous les lieux de l'Univers) et dans le temps, en raison de son unité.

D'un autre côté, l'observation précise put, dès le XVII^e siècle, s'ouvrir à des domaines d'objets de dimensions jusqu'alors hors d'atteinte de la perception directe, avec les inventions à peu près concomitantes du microscope (par Cassegrain) et du télescope (par Galilée, puis par Newton). Ces objets pouvaient être ramenés à une commune mesure de l'intelligibilité, qui ne cessait pas d'être la même que celle de la connaissance des objets à notre échelle, moyen terme entre les "deux infinis", l'infiniment grand et l'infiniment petit dont parle Blaise Pascal, témoin à cet égard des nouvelles voies de la connaissance de son temps.

3. LA TOTALITE HORS D'ATTEINTE ET LES EXCEPTIONS

Les lois newtoniennes sont des lois locales (en un point et en un instant) et non plus globales (comme les lois de Képler sur le mouvement des planètes et de Galilée, de la chute terrestre des corps), mais elles sont par là-même plus universelles et unificatrices. Exprimées par le moyen de l'analyse mécanique rationnelle, elles permettent de rapporter à une même raison, la loi d'attraction ou de gravitation universelle, le mouvement des planètes et de leurs satellites, celui des comètes, le phénomène des marées, la chute des corps... Cette fécondité, dans un vaste champ de phénomènes, de l'analyse locale a pour contrepartie sa limitation relative dans l'espace. Bien que le troisième livre des *Principia* (les *Principes mathématiques de la philosophie*

⁴ Merleau-Ponty [2003], chap. 1. Sur Copernic et la portée de ses travaux, voir Jean-Jacques Szczeciniarz, *Copernic* [1998].

naturelle) de Newton s'intitule “Système du monde”, il ne va pas au-delà de la considération du système solaire, et la théorie, ne traitant pas de l'Univers, n'est pas une cosmologie.

D'Alembert donne, dans son article “Cosmologie” de l'*Encyclopédie*, la définition suivante : “La cosmologie est la science de 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...”. Il insiste surtout sur “les lois générales par lesquelles l'univers est gouverné” et sur la chaîne continue qui lie les êtres” et que nous n'apercevons que très partiellement. Ces lois sont en premier lieu celles du mouvement, qui fondent la causalité différentielle qui constitue alors la forme idéale de la liaison des mouvements des corps et des êtres dans le monde telle que peut la formuler l'approche scientifique. Dès qu'il est question de davantage, et par exemple, de “cosmogonie” (autre article de d'Alembert), on quitte le domaine de la science pour celui de la métaphysique ou de la théologie.

Et de fait, dans le mouvement de mathématisation qui établit au XVIII^e siècle la mécanique rationnelle et analytique, et qui se portera, au siècle suivant, sur l'ensemble de la physique, l'idée d'une représentation de l'Univers s'éloigne des perspectives pensables. Si l'on voit, notamment au XVIII^e siècle, fleurir de nombreuses tentatives d'explications globales du monde, ou cosmogonies, c'est généralement dans le courant contraire, en voie de marginalisation, des auteurs non spécialistes et non “géomètres”, qui veulent garder la “vraie physique” loin des abstraction mathématiques, et continuer de l'aborder dans une perspective “métaphysique”, qualitative et substantialiste, proche de l'empirisme du quotidien.

Dans le courant scientifique, les exceptions au frein mis à l'approche cosmologique furent rares, déjà au XVIII^e siècle et plus encore au XIX^e. Il faut tout d'abord mentionner l'ouvrage *Lettres cosmologiques sur l'organisation de l'Univers*, du mathématicien et philosophe Jean-Henri Lambert (**aj note**), où est proposée une organisation hiérarchique des assemblages de corps célestes tournant autour d'un “régent” (sorte de préfiguration des trous noirs situés aux centres des galaxies), et l'essai de cosmogonie naturelle publié en 1755 par le philosophe Emmanuel Kant sous le titre *Histoire générale de la nature et théorie du Ciel*, qui suggère un mécanisme de formation, par attraction gravitationnelle, des planètes du Système solaire à partir d'une nébuleuse de poussières initiales. La même idée fut reprise indépendamment, quelques années plus tard, par Pierre Simon Laplace, dans son *Exposition du système du monde* (1796)⁵, et développée de manière plus quantitative dans sa *Mécanique céleste* (4 volumes parus de 1799 à 1825)⁶.

La théorie de Laplace de la formation du système solaire se proposait comme une “hypothèse cosmogonique” naturelle pour expliquer la constitution du système solaire dans sa forme observée, et rendre compte en particulier de ce que les mouvements des planètes et de leurs satellites se font dans le plan de l'écliptique, suivant des orbites presque circulaires et parcourues dans le même sens. Elle constitue un audacieux passage de la causalité locale (celle de la théorie newtonienne de la gravitation étendue aux systèmes de plusieurs corps, par laquelle Laplace démontra par ailleurs la

⁵ Laplace (1796).

⁶ Laplace (1799-1825).

stabilité du système solaire dans son ensemble) à une explication causale globale qui lui ajoute une hypothèse sur les conditions initiales. Laplace montrait ainsi que la forme actuelle du système solaire résulte d'un processus d'évolution, par le simple jeu des lois de la mécanique et de la gravitation, à partir d'une sphère de matière diffuse et homogène entourant le Soleil. Par là, l'ordre cosmique lui-même trouvait sa raison sans causes finales ni recours à une intervention divine. Mais ces tentatives restèrent pratiquement isolées, ne correspondant pas à l'esprit de l'époque.

L'œuvre de William Herschel constitue une autre exception remarquable à l'absence de préoccupation cosmologique de son époque. Il s'agit cette fois de cosmologie observationnelle, et de l'Univers lui-même, au-delà du système solaire.

L'astronomie observationnelle de Herschel était dirigée vers l'exploration profonde de l'Univers, à l'aide de télescopes de grande puissance de pénétration (en opposition aux canons de son époque, qui prônaient au contraire la puissance de résolution), et ouvrait la voie de la connaissance de la « constitution des cieux ».

Il étudia la Voie lactée, montrant qu'elle est constituée d'étoiles, que sa forme est étendue et aplatie, et rendant compte de sa configuration apparente par la position de l'observateur terrestre ; il sonde l'espace extragalactique, y étudia les nébuleuses, les comptant et les classifiant suivant leurs types, en faisant des catalogues; il formula une hypothèse proprement cosmologique sur la formation des étoiles et des systèmes stellaires par condensation de la matière nébuleuse, la forme des systèmes et leur évolution étant déterminée par l'attraction universelle ; il émit en contrepoint l'idée que ces nébuleuses pouvaient être des “univers-îles”, c'est-à-dire d'autres galaxies constituées d'étoiles. Notons aussi que l'on doit à William Herschel la remarque, faite pour la première fois dans l'histoire de l'astronomie, que l'observation à l'aide de grands télescopes scrute, en même temps que l'espace lointain, le temps passé, et la proposition de prendre l'année-lumière comme unité de distances astronomiques.

Herschel poursuivait un projet explicitement cosmologique, conçu en relation à ses observations, et porté par une perspective théorique sur “la construction des cieux”, selon l'heureuse expression du titre de l'un de ses mémoires, qui visait à établir l'existence et les propriétés de l'univers profond, pour lequel il proposa l'hypothèse de l'uniformité, qui reste la base de la pensée cosmologique actuelle (comme “principe cosmologique”).

L'intérêt de cette cosmologie, non spéculative et s'appuyant sur l'observation, échappa aux contemporains de Herschel et à ses successeurs du XIX^e siècle, et ne fut vraiment comprise que par les protagonistes de la cosmologie contemporaine dont elle contribuait à préparer l'avènement⁷. Des données de plus en plus précises sur les distances astronomiques (avec l'observation, longtemps attendue, des parallaxes stellaires par Bessel) et sur la constitution des objets célestes (notamment par la spectroscopie), avec les

⁷ Sur Laplace et Herschel, en qui Jacques Merleau-Ponty voyait « deux des plus grands cosmologues de tous les temps », voir les livres de ce dernier : *La science de l'Univers à l'âge du positivisme* (Merleau-Ponty [1983]) ; *Sur la science cosmologique* (Merleau-Ponty [2003]).

systèmes d'étoiles, les galaxies-univers îles, etc.), les travaux d'astronomes comme Olbers..., fournissaient une autre base factuelle qui assurerait la légitimité de parler de l'Univers.

L'astronomie du XIX^e siècle, soucieuse de précision numérique, abandonna la préoccupation cosmologique en se repliant sur une « docte ignorance », analysée par Jacques Merleau-Ponty, **qui montre aussi comment certains savants entretenaient en même temps une nostalgie de l'idéal perdu, tels notamment Alexandre von Humboldt (auteur de l'ouvrage *Cosmos*, en 4 vols.) et John Herschel, mathématicien et astronome, qui reprit en partie l'œuvre de son père William. D'autres investirent leur pensée cosmologique dans de nouvelles sciences, au premier rang desquelles la science de la chaleur suivie par la thermodynamique naissante.**

L'idée d'une cosmologie comme science paraissait donc impensable à la plupart des savants et des philosophes du XIX^e siècle, tant en raison de la prégnance des idées positivistes avec leur conception étroite de la science, que par l'importance très grande donnée à l'observation, à l'expérimentation et à la précision des mesures réalisées à l'aide d'instruments de plus en plus perfectionnés. Aussi grande cette précision fût-elle, pensait-on, jamais elle ne pourrait atteindre ce qui serait requis pour mesurer l'Univers, c'est-à-dire, proprement, l'infini. **Auguste Comte excluait que l'on puisse connaître par la science non pas seulement les régions lointaines de l'Univers, mais aussi l'intérieur des étoiles, et aussi bien la nature intime de la matière dont nous ne pourrions jamais savoir si elle est constituée d'atomes. De telles questions étaient considérées comme oiseuses, et renvoyées à la "métaphysique", considérée, par définition, comme le domaine des questions sans réponse et donc dénuées d'intérêt.**

Même sans de tels interdits péremptoires, la considération théorique de l'Univers dans sa totalité était un projet que la science moderne paraissait devoir exclure. Tel était le prix à payer pour réaliser une connaissance scientifique de plus en plus exacte et précise, et adéquate aux objets de la nature. La physique s'élaborait à travers sa mathématisation de plus en plus poussée par celle des grandeurs continues, différentiables, qui servent à décrire les propriétés des corps et des phénomènes, mises en relation par des équations différentielles. Ces dernières servaient, en particulier, à exprimer les relations de causalité, en un lieu et en un instant donné, mais valables en droit dans tout l'Univers et dans toute l'étendue du temps. Ainsi, en même temps que l'Univers comme objet paraissait échapper définitivement à la prise de la science, l'idée d'un Univers dont toutes les parties sont soumises aux mêmes lois, en raison de l'unité de la matière qui y est contenue, continuait de s'affirmer avec force. En quelque sorte, l'ambition du projet scientifique, tout en abandonnant la perspective de décrire une totalité (le Monde, ou l'Univers dans son ensemble, avec tout ce qu'il contient), se renforçait en intensité dans sa pénétration des objets de ce monde, considérés en tous lieux et en tous temps. L'idée d'Univers était souterrainement présente dans une pensée scientifique qui excluait en même temps de considérer l'Univers comme objet de science. Elle en préparait, ce faisant, sans le savoir, les conditions.

4. LA PERMANENCE DE L'IDEE COSMOLOGIQUE.

Du point de vue conceptuel, la permanence de l'idée cosmologique, même bridée, ferait à terme sentir ses effets dans les considérations qui permettraient la naissance d'une cosmologie comme théorie physique de l'Univers dans sa totalité.

L'idée cosmologique, qui courait souterraine sous l'énoncé de principes généraux de la nature (comme on le voit aux définitions de d'Alembert, reprises par de Littré), réapparaît 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. Il est question de l'Univers, d'une part, à propos de la signification des deux principes de la thermodynamique, et surtout du second. **On se demande, avec William Thomson-Lord Kelvin, si la croissance de l'entropie pour les systèmes fermés s'applique à l'Univers entier. Et encore, on applique la théorie cinétique, conçue initialement pour les molécules et les gaz, à des objets célestes, comme la Voie lactée, faite de soleils qui dans leur ensemble peuvent être traités comme un gaz moléculaire (W. Thomson, H. Poincaré)⁸.**

L'Univers est invoqué, d'autre part, à propos des *rapport de l'espace et des géométries*, euclidienne et non euclidiennes (Riemann) et, en physique, de la *nature des principes généraux* (Poincaré) et de la *critique des concepts absolus* (Mach). Dès 1854, Bernhard Riemann s'interroge, dans sa *Dissertation inaugurale* "Sur les hypothèses qui servent de fondement à la géométrie", sur la géométrie convenant aux propriétés de l'espace physique dans les dimensions "incommensurablement grandes", ce qui correspond à formuler l'idée d'une géométrie d'Univers⁹. L'analyse du problème fut reprise par Hermann von Helmholtz aussi bien que par Henri Poincaré, en termes du rapport de la géométrie à l'expérience, sur la possibilité ou non de mettre en évidence le caractère euclidien ou non-euclidien de l'espace physique, chacun y trouvant argument pour sa propre philosophie de la connaissance (empiriste pour Helmholtz, conventionnaliste en ce qui concerne la géométrie pour Poincaré)¹⁰. Cette question, qui devait s'avérer centrale pour la signification de la théorie de la relativité générale et des théories cosmologiques relativistes, indiquait de manière prémonitoire le lien intrinsèque qui unit la physique, la géométrie et l'idée d'Univers.

En ce qui concerne les principes généraux de la "physique mathématique", ils viennent, selon Poincaré, de l'expérience et sont généralisables par choix de convention ; ils ne seraient vrais en toute rigueur que pour l'Univers

⁸ Poincaré [1908]. *Science et méthode*, chapitre sur "La Mécanique nouvelle et l'Astronomie".

⁹ Riemann, Bernhard, *Dissertation inaugurale* de 1854 (Riemann [1854]), "Sur les hypothèses qui servent de fondement à la géométrie" (trad. fr. in Riemann [1898]). Riemann s'interroge aussi sur la géométrie pour les dimensions "incommensurablement petites" (qui correspondrait, aujourd'hui, au domaine subatomique).

¹⁰ Ces débats sont analysés, et prolongés par l'examen des conceptions d'Einstein sur ce même sujet, dans Paty [1993] (chapitres 6 et 7).

entier (ils se réduiraient, si on les envisageait pour celui-ci, à de simples tautologies). Ce qui fait leur force et leur intérêt pour la physique, c'est qu'on ne les applique, de fait, qu'à l'approximation de systèmes finis et séparés. Il en va ainsi, par exemple, du principe de relativité du mouvement, ou du principe de la conservation de l'énergie auquel Poincaré comparait volontiers le premier¹¹.

Pour Poincaré¹², l'objet de la géométrie n'était pas l'espace, en lequel il ne voyait quant à lui qu'une forme malléable, impensable sans les corps qu'il contient, mais le groupe des déplacements des corps solides naturels (idéalisés) dans l'espace. En conséquence, le principe de relativité des mouvements n'était, à ses yeux, que l'une des formes du principe de la relativité de l'espace. Ce dernier pouvait être considéré soit comme invariance par translation, c'est-à-dire comme un simple changement de lieu pour les corps, soit comme relativité de similitude au sens de la géométrie, c'est-à-dire pour des transformations homothétiques sur les dimensions ou les distances, "qui doivent être considérées pour l'univers entier". Une autre forme de la relativité de l'espace, ajoute Poincaré en 1912, tenant compte de la dynamique relativiste (qu'il avait lui-même contribué à élaborer), et associant aux unités de distances spatiales la vitesse de la lumière (la constante d'espace-temps), est la "relativité dynamique" ou "principe de relativité physique"¹³.

Poincaré fait encore valoir à ce propos que l'idée de relativité de l'espace et du temps implique celle de lois pour le monde dans son entier - autrement dit, l'idée cosmologique -, puisque toutes les parties du monde sont en dépendance l'une de l'autre. **Le principe de relativité ne s'applique qu'aux équations différentielles, et non aux équations finies, qui supposent des constantes d'intégration et sont donc sensibles à des changements d'axes. Mais, indique-t-il, « si on veut que les équations différentielles qui régissent le monde soient exactes, elles devront être le système unique d'équations différentielles qui s'appliquera à tout l'univers ». A quoi il ajoute : « Or, si nous n'avons qu'un seul système de lois s'appliquant à tout l'univers, l'observation ne nous donnera qu'une solution unique, celle qui est réalisée; car l'univers n'est tiré qu'à un seul exemplaire »**¹⁴. L'auteur des *Leçons sur les hypothèses cosmogoniques* était ainsi proche de concevoir l'Univers comme objet, du moins à titre de référence pour la pensée physique, et dont il était cependant nécessaire de se distancier.

Notons encore que Poincaré lui-même, en considérant le principe de relativité, étendu de la mécanique à l'électromagnétisme et à la "nouvelle mécanique", ne le restreignait aux mouvements d'inertie que pour des raisons d'approximation nécessaire¹⁵. Il le concevait en fait dans sa généralité, concernant toutes sortes de mouvements, en raison de son rapport direct à la relativité de l'espace qui, idéalement, se rapporte à l'ensemble des

¹¹ «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» (Poincaré [1908b]).

¹² Poincaré [1902], *La science et l'hypothèse*, éd. 1968.

¹³ Poincaré [1912b].

¹⁴ *Ibid.*

¹⁵ Poincaré [1907, 1912]. Cf. Paty [1996].

corps contenus dans l'espace entier de l'Univers, en déplacements quelconques les uns par rapport aux autres. Mais cette proposition prise idéalement serait tautologique ou de pure définition et ne nous donnerait, estimait-il, aucune prise effective sur les propriétés des corps physiques réels. Il fallait donc se contenter, dans la pratique, de la considérer pour un ensemble plus local de corps, et pour des mouvements d'inertie.

Quant à la critique des concepts absolus de la mécanique, elle est développée dans l'ouvrage d'Ernst Mach de 1883, *La Mécanique*, et concerne avant tout le concept newtonien d'*espace absolu*¹⁶. Newton avait invoqué ce dernier pour justifier la mathématisation des grandeurs de sa mécanique : dans sa perspective (fondée sur une philosophie néo-platonicienne), les grandeurs spatiales et le temps devaient être “absolus et mathématiques” pour exprimer des lois vraies et non pas simplement apparentes. Le principe d'inertie et la relativité des mouvements se seraient contentées d'un espace (et d'un temps) relatifs. Mais la loi des changements de mouvement, qui implique une accélération, demandait, selon lui, que cette dernière soit en prise contre un support stable, et ce support était, à ses yeux l'espace absolu. Il en voulait pour preuve le mouvement de rotation d'un seau tournant autour de son axe, dans lequel l'eau prend progressivement une forme concave. Il rapportait ce mouvement aux axes absolus de l'Univers, à savoir le système des étoiles fixes¹⁷.

Pour Mach, qui déniait l'idée d'espace absolu, car pour lui l'espace ne nous est donné que par les corps qu'il contient, l'expérience du seau de Newton montrait non pas l'existence d'un espace absolu, mais l'effet de l'action sur le corps d'épreuve (que constitue l'eau dans le seau) des corps qui lui sont extérieurs et qui emplissent l'Univers. La masse d'inertie de l'eau du seau, coefficient de l'accélération, est le résultat de ces interactions, qui donnent à l'eau la forme concave dans sa rotation (par effet centrifuge). Cette explication dynamique de la masse d'inertie dégagée de la notion d'espace absolu faisait donc intervenir la considération de l'Univers dans sa totalité, en tant qu'il est constitué de corps physiques. “Dire qu'un corps conserve sa vitesse et sa direction dans l'*espace*”, écrivait Mach, “est simplement une manière abrégée de s'en référer à l'*univers entier*”¹⁸.

Cette idée fut d'une importance considérable dans l'élaboration, par Einstein, aussi bien de la théorie de la relativité générale que de sa cosmologie. On peut considérer que l'idée cosmologique se trouve présente dans la pensée constitutive de la théorie de la relativité générale, avant même toute considération de l'Univers physique comme objet de la cosmologie. C'est en 1912, au moment de mettre définitivement en place les éléments qui lui permettraient de formuler sa théorie (obtenue à la fin de 1915), qu'Einstein reprit à son compte la remarque de Mach, qu'il désigna comme un “principe de la relativité de l'inertie” : elle lui permettait de concevoir comment dépasser la limite de sa théorie de la relativité restreinte antérieure (de 1905), qui était de privilégier les systèmes d'inertie, dont le choix est anthropocentrique, alors que, du point de vue de l'Univers, aucun référentiel de cette nature ne peut être privilégié.

¹⁶ Mach [1883], chap. 2, § 6.

¹⁷ Newton [1687], livre I.

¹⁸ Mach [1883], chap. 2, § 6 (souligné par Mach).

Bien que l'on doive nécessairement raisonner à partir d'un choix de système de coordonnées, les lois obtenues devraient être indépendantes de ce choix. En s'inspirant de la définition relationnelle de l'inertie par Mach (rapportant l'inertie aux masses de l'Univers entier), Einstein la transcrivit en termes de champs (plus précisément, de "champ de déplacement", qui remplace la notion de système d'inertie), et énonça l'exigence de "covariance généralisée", pour obtenir les équations de transformation les plus générales des coordonnées spatio-temporelles, et des lois indépendantes de tout référentiel¹⁹.

5. D'UNE CONDITION AUX LIMITES A L'UNIVERS COMME OBJET

Une fois en possession de sa théorie de la relativité générale, par laquelle il pensait avoir définitivement éradiqué le concept d'espace absolu, Einstein se demanda s'il ne restait pas, malgré tout, un moyen par lequel ce dernier pourrait encore se manifester. La théorie de la relativité générale était conçue comme une théorie locale, qui s'appliquait à des régions finies d'espace-temps, et mettait en relation la structure d'un tel espace-temps (sa métrique) et les champs gravitationnels engendrés par les masses des corps qu'il contient. Sans champ de matière, concluait-il, pas d'espace-temps. Mais alors, s'interrogea-t-il, qu'en était-il dans les régions de l'espace vides de champ ? On pouvait imaginer, dans un espace infini, que la matière n'occupait qu'une région, où s'appliquait la relativité générale. Mais dans la région extérieure, que faire de l'espace sans les champs, sinon à en revenir à l'espace absolu ?

Einstein se refusait à une telle coexistence d'un monde gouverné par la relativité généralisée avec un autre dirigé par l'espace absolu : "Dans une théorie consistante de la relativité, il ne peut y avoir d'inertie par rapport à l'espace, mais seulement l'inertie de masses relativement les unes aux autres", écrit-il en 1917 dans son article fondateur de la cosmologie théorique²⁰. Il reprit l'idée de la relativité de l'inertie (il la rebaptisa peu après "principe de Mach"), adaptée à la masse comme source de champ. Pour annuler la condition aux limites de la matière, il fallait envisager l'Univers entier avec les masses qu'il contient, et le considérer comme fermé sur elles : il fallait donc admettre qu'il ne peut y avoir d'espace au-delà des masses et de leurs champs, et que l'Univers est fermé²¹. L'idée d'un tel Univers avait été rendue possible par l'"espace fini et illimité" de la géométrie de Riemann²². Par là s'ouvrait l'ère de la cosmologie physique (relativiste) du point de vue théorique.

Ainsi, de la considération des conditions aux limites de la théorie de la relativité, tributaire de l'idée cosmologique, naissait l'énonciation de l'Univers comme objet de la théorie, rendu nécessaire par la cohérence de cette dernière. La théorie de la relativité générale était entraînée au-delà de son objet initial (de ses objets possibles, l'espace-temps structuré par les champs de gravitation, dans

¹⁹ Voir, en part., Einstein [1916b, 1921]. Cf. Paty [1993], chap. 5.

²⁰ Einstein [1917].

²¹ Einstein [1917].

²² Riemann [1854].

toutes les situations locales envisageables), pour formuler une cosmologie scientifique et déterminer en toute légitimité un objet physique considéré jusqu'alors comme impensable selon les canons de la physique moderne antérieure, et tout en se basant, comme celle-ci, sur des lois exprimées en équations différentielles.

Avec la physique relativiste, les deux idées, naguère incompatibles, de la totalité d'une part, et de l'élémentaire et du local, d'autre part, se retrouvaient pour formuler la possibilité d'une cosmologie au sens scientifique, c'est-à-dire d'une science de l'Univers considéré dans sa totalité, unique et non reproductible. Ces caractères, paradoxaux pour l'idée que l'on se faisait traditionnellement des objets de science, étaient en fait implicitement contenus dans l'idée cosmologique.

BIBLIOGRAPHIE

D'ALEMBERT [1754]. Cosmologie, in d'Alembert & Diderot [1751-1780], *Encyclopédie ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers*, 17 vols + 11 vol. de planches, Briasson, David, Le Breton et Durant, Paris, 1751-1780., vol. 3.,

CASSIRER, Ernst [1932]. *La philosophie des Lumières* (original alld., 1932), trad. fr. par Pierre Quillet, Fayard, Paris, 1966.

DUHEM, Pierre [1913-1959]. *Le Système du Monde. Histoire des doctrines cosmologiques de Platon à Copernic*, 10 vols., Hermann, Paris, 1913-1959.

EINSTEIN, Albert [1916]. Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie, *Annalen der Physik*, ser. 4, XLIX, 1916, 769-822. [Edité également en opuscule, avec un "Einleitung", Barth, Leipzig, 1916]. English transl., The foundation of the generalized theory of relativity in Einstein et al. [1923] [ed. 1952, p. 109-164]. Trad. fr. Les fondements de la théorie de la relativité générale, in Einstein [1933c], p. 7-71.

EINSTEIN, Albert [1917]. Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie, *Preussische Akademie der Wissenschaften, Sitzungsberichte*, 1917, part 1, 142-152. Trad. angl., Cosmological considerations on the general theory of relativity, in Einstein [1923j] (ed. 1952, p. 175-188).

EINSTEIN, Albert [1921]. *Vier Vorlesungen über Relativitätstheorie*, Vieweg, Braunschweig, 1922. Trad. angl., par Edwin Plimpton Adams, *The Meaning of relativity: four lectures delivered at Princeton University*, Princeton University Press, Princeton (N.J.), 1922. Trad. fr. sur l'édition allemande de 1922 par Maurice Solovine: *Quatre conférences sur la théorie de la relativité faites à l'université de Princeton*, Gauthier-Villars, Paris, 1955.

EINSTEIN, Albert [1933c]. *Les fondements de la théorie de la relativité générale*, traduit par Maurice Solovine, Hermann, Paris, 1933.

EINSTEIN, Albert, LORENTZ, Hendryk Antoon, MINKOWSKI, Hermann, WEYL, Hermann [1923]. *The principle of relativity*, with notes by Arnold Sommerfeld, transl. by W. Perrett and G.B. Jeffery, Methuen, London, 1923. [Cf. Einstein 1913 h et Einstein 1922 m.] [Ed. utilisée: Dover, New York, 1952].

GUSDORF, Georges [1971]. *Les principes de la pensée au siècle des Lumières*,

- Payot, Paris, 1971. (*Les sciences humaines et la pensée occidentale*, 4).
- GUSDORF, Georges [1972]. *Dieu, la nature et l'homme au siècle des Lumières*, Payot, Paris, 1972. (*Les sciences humaines et la pensée occidentale*, 5).
- KANT, Immanuel [1757]. *Histoire générale de la nature et théorie du Ciel*, Extr., trad. F. Marty, in E. Kant, *Oeuvres*, Bibliothèque de la Pléiade, Gallimard, Paris, vol. 1, p. 35-107.
- KOYRE, Alexandre [1951]. Les étapes de la cosmologie scientifique (Quatorzième Semaine de Synthèse, Paris, 1951), repris dans A. Koyré, *Etudes d'histoire de la pensée scientifique*, Presses Universitaires de France, Paris, 1966 ; ré-éd., Gallimard, Paris, 1973, p. 87-98.
- LAPLACE, Pierre-Simon [1796]. *Exposition du système du monde*. Réimpression sur l'éd. de 1835 revue, Fayard, Paris, 1984.
- LAPLACE, Pierre-Simon [1799-1825]. *Traité de mécanique céleste*, Paris, 5 vols, 1799-1825.
- MACH, Ernst [1883]. *Die Mechanik in ihrer Entwicklung historisch-kritisch Dargestellt*, Leipzig, 1883. Trad. fr. (sur la 4^e éd. allemande) par E. Bertrand, *La mécanique. Exposé historique et critique de son développement*, Hermann, Paris, 1904; ré-éd., 1923.
- MERLEAU-PONTY, Jacques [1965]. *Cosmologie du XX^e siècle. Etude épistémologique et historique des théories de la cosmologie contemporaine*, Gallimard, Paris, 1965.
- MERLEAU-PONTY, Jacques [1983]. *La science de l'Univers à l'âge du positivisme. Etude sur les origines de la cosmologie contemporaine*, Vrin, Paris, 1983.
- MERLEAU-PONTY, Jacques [2003]. *Sur la science cosmologique*. EDP-Science, Paris, 2003.
- NEWTON, Isaac. [1687]. *Philosophiæ naturalis principia mathematica*, Londres, 1687; 2^eme éd., 1713; 3^eme éd., 1726, éditée avec des variantes par Alexandre Koyré et I.B. Cohen, Cambridge University Press, Cambridge, 1972. *Mathematical principles of natural philosophy*, trad. angl. (d'après la 3^e éd.) par Andrew Motte (1729), rév. et éditée par Florian Cajori, University of California Press, Berkeley, 1934, ré-impr., 1962, 2 vols.
- PATY, Michel [1993]. *Einstein philosophe*, Presses Universitaires de France, Paris.
- PATY, Michel [1996]. Poincaré et le principe de relativité, in Greffe, Jean-Louis; Heinzmann, Gerhard et Lorenz, Kuno (éds.), *Henri Poincaré. Science et philosophie. Science and philosophy. Wissenschaft und Philosophie. Congrès international, Nancy, France, 14-18 mai 1994*, Akademie Verlag, Berlin/Albert Blanchard, Paris, 1996, p. 101-143.
- POINCARÉ, Henri [1902]. *La science et l'hypothèse*, Flammarion, Paris, 1902; 1970.
- POINCARÉ, Henri [1907]. La relativité de l'espace, *L'année psychologique* 13, 1907, 1-17. Repris dans Poincaré [1908a], Livre 2, chapitre 1.
- POINCARÉ, Henri [1908a]. *Science et méthode*, Flammarion, Paris, 1908.

POINCARÉ, Henri [1908b]. La dynamique de l'électron, *Revue générale des sciences pures et appliquées*, 19, 1908, 386-402. Repris dans Poincaré [1913-1965], vol. 9,

POINCARÉ, Henri [1911]. *Leçons sur les hypothèses cosmogoniques*, Hermann, Paris, 1911.

POINCARÉ, Henri [1912]. L'espace et le temps, *Scientia* 12^{ème} année, vol. XXV, 1912, 159-170 [Conférence faite le 4 mai 1912 à l'Université de Londres]. Egalement in Poincaré [1913], éd. 1963, p. 97-109.

POINCARÉ, Henri [1913]. *Dernières pensées*, Flammarion, Paris, 1913; ré-ed. avec un appendice, 1963.

POINCARÉ, Henri [1916-1965]. *Oeuvres*, Gauthier-Villars, Paris, 11 vols., 1916-1965.

RASHED, Roshdi & MORELON, Régis [1997]. *Histoire des sciences arabes*, vol 1 : *Astronomie théorique et appliquée*, Seuil, Paris, 1997.

RIEMANN, Bernhard [1854]. Ueber die Hypothesen, welche der Geometrie zugrunde liegen [Mémoire présenté le 10 juin 1854 à la Faculté philosophique de Göttingen], *Abhandlungender königlichen Gessellschaft der Wissenschaften zu Göttingen*, vol. 13, 1867. Trad. fr. par J. Houel, Sur les hypothèses qui servent de fondement à la géométrie, in Riemann [1898].

RIEMANN, Bernhard [1898]. *Oeuvres mathématiques*, trad. fr. par L. Laugel, Paris, 1898. Nouveau tirage, Paris, 1968.

SZCZECINIARZ, Jean-Jacques [1998]. *Copernic et la révolution copernicienne*, Nouvelle bibliothèque scientifique, Flammarion, Paris, 1998

SZCZECINIARZ, Jean-Jacques [2003]. *La Terre immobile*, Presses Universitaires de France, Paris, 2003.