

COSMOLOGIE ET COSMOGONIE

Le problème des origines dans la physique moderne

Science depuis un siècle à peine et succédant à des discours poétiques, religieux et philosophiques, la cosmologie se donne pour but de retracer l'histoire du monde depuis les origines. Mais en quoi diffère-t-elle des cosmogonies qui l'ont précédée, ces récits mythiques qui expliquaient l'origine de l'univers et son évolution ? Toutes les sociétés humaines ont en effet éprouvé le besoin de se construire un mythe des origines qui reflète l'imaginaire des peuples et l'enrichit, la nôtre ferait-elle exception ? Selon Paul Ricœur, "le mythe est un récit traditionnel qui rapporte des événements arrivés à l'origine des temps et qui est destiné à fonder l'action rituelle des hommes d'aujourd'hui." Le but n'est donc pas tant de raconter ce qui s'est réellement passé que de fonder la cohésion d'une société et de lui donner une éthique.

C'est peut-être là que se trouve la différence essentielle entre les cosmogonies du passé et la cosmologie contemporaine : personne ou presque ne demande à la théorie du big bang de fonder une éthique pour notre temps. Au contraire, notre récit des origines conduit à la vision d'un monde dénué de sens, où les règles de vie ne tombent pas du ciel mais doivent être forgées par les hommes eux-mêmes. Cette vision est désespérante pour beaucoup et il est donc normal qu'ils la combattent avec des arguments moraux, mais aussi avec des arguments scientifiques puisque la cosmologie est un discours scientifique et donc par nature toujours susceptible d'être remis en cause. Les cosmologistes veulent aborder les questions sur le monde en se dégageant le plus possible du mythe et de la religion, mais ce sont des hommes de leur temps et ils ne sauraient donc faire totalement abstraction de leurs croyances et préjugés. De fait, la cosmologie voit se pénétrer les principes philosophiques et les énoncés scientifiques à un degré qu'on ne retrouve guère que dans les discussions sur l'évolution darwinienne.

Comment raconte-t-on aujourd'hui ce récit des origines ?

Vers le temps de Planck

Galaxies (par ex. le Hubble Deep Field)

Il s'agit d'un récit provisoire, parce qu'il s'agit de science et non d'idéologie, qui présente cette particularité par rapport aux mythes anciens de la création de remonter le temps. Il se fonde sur les

connaissances actuelles de la physique (physique des particules, physique nucléaire, physique des fluides et des plasmas, gravitation, etc.) et sur un certain nombre d'observations bien établies. La première est que le ciel est noir la nuit. Ce simple fait implique que l'espace ou le temps ne sont pas infinis, sinon le ciel nocturne serait aussi brillant que la surface du Soleil (paradoxe d'Olbers). La seconde observation est beaucoup moins évidente : l'univers est remarquablement homogène à grande échelle. Cela peut étonner tous ceux qui ont admiré ces belles images de galaxies ou de nébuleuses brillant au milieu d'un ciel noir (justement) et compris que les étoiles n'étaient pas dispersées dans tout l'espace mais rassemblées en amas et groupes. Ces variations de densité sont néanmoins assez faibles pour que les vitesses des corps matériels soient beaucoup plus faibles que la vitesse de la lumière. De plus la gravitation accentuant les variations de densité au cours du temps, on en déduit qu'elles étaient encore plus faibles dans le passé. Ceci est corroboré par la troisième observation, celle que l'univers baigne dans un fond de rayonnement électromagnétique qui est essentiellement celui d'un corps noir à la température de 2.73 K. Ce rayonnement est extrêmement isotrope, sa température ne variant pas de plus de 0.001% dans toutes les directions du ciel (hormis une asymétrie de 0.2% due au mouvement de la Terre). Son spectre de corps noir parfait n'a pas de meilleure explication que de voir en lui le reste refroidi d'une phase beaucoup plus chaude de l'univers au cours de laquelle un équilibre thermique a pu s'établir. Cet équilibre du rayonnement avec la matière implique que les fluctuations de densité de la matière à cette époque restent aujourd'hui encore imprimées dans le rayonnement. Elles étaient donc très faibles. D'autre part, une phase très chaude autorise des réactions nucléaires au cours desquelles des éléments tels que le deutérium, l'hélium et le lithium ont pu être synthétisés à partir de l'hydrogène. Cela explique la grande uniformité des abondances de ces éléments à travers l'univers, en contraste avec la grande variation observée des éléments plus lourds (du carbone à l'uranium en passant par le fer), éléments dont on pense qu'ils sont synthétisés dans les étoiles à un rythme extrêmement variable selon les conditions locales.

Alexandre Friedmann Georges Lemaître

La meilleure théorie de la gravitation que nous ayons, la relativité générale, décrit l'univers comme un espace-temps rempli de matière et de rayonnement, ce contenu matériel définissant la forme de l'espace-temps qui à son tour régit le mouvement du contenu. Les équations de la relativité générale possèdent beaucoup de solutions possibles, décrivant aussi bien le champ de gravité d'une étoile que l'expansion de l'univers. Le modèle le plus simple décrivant un univers homogène est dû à Alexandre Friedmann et (indépendamment) à Georges Lemaître. Dans ce modèle, l'espace-temps

n'est pas statique, les distances augmentent ou diminuent inévitablement avec le temps. C'est précisément ce que l'on observe : les distances entre objets augmentent d'autant plus vite qu'ils sont éloignés. L'univers est donc en expansion. En remontant le temps, il était de plus en plus compact, dense et chaud. Jusqu'où peut-on ainsi remonter ? Les limites viennent d'une part des incertitudes des observations qui ne sont jamais aussi complètes et précises qu'on le souhaiterait, et d'autre part des frontières des théories actuelles de la physique. Une extrapolation hardie des connaissances actuelles conduit à placer la naissance de l'univers, de l'espace, du temps et de la matière il y a 15 milliards d'années. Naissance en effet de l'espace et du temps en même temps que de l'univers, ce qui n'est pas vraiment une notion neuve : "De même que le monde n'a pas de dehors, n'a pas d'au-delà, puisqu'il contient et embrasse toute chose, de même le temps qui a commencé à la création du monde n'a pas d'auparavant ni de précédemment, puisqu'il contient en lui tous les temps qui sont ses parties." (Guillaume d'Auvergne, 1180-1249).

Guillaume d'Auvergne

La théorie du big bang présente des problèmes de fond et des problèmes secondaires. Les problèmes secondaires concernent l'origine de l'asymétrie observée entre matière et antimatière, la nature de la majeure partie de la matière qui n'émet pratiquement pas de lumière et n'est donc connue que par ses effets indirects sur la matière lumineuse (matière noire), le mécanisme de formation des galaxies, ou l'origine de l'homogénéité et de l'isotropie. Ce sont indiscutablement des problèmes très importants pour notre compréhension de l'évolution de l'univers, mais ils ne remettent pas en question la théorie du big bang. Les problèmes de fond concernent la topologie de l'univers et la singularité initiale. Les équations de la relativité générale sont des équations différentielles qui décrivent la relation entre la forme locale de l'espace-temps et le contenu matériel local. Elles ne disent rien de la forme globale de l'espace-temps, sa topologie, et cette information doit venir d'ailleurs, par exemple d'un principe mathématiquement indémontrable comme le principe cosmologique (l'univers est partout identique à ce qu'il est autour de nous).

La question de la singularité initiale est plus grave encore. Prise au pied de la lettre, la théorie du big bang conduit en remontant le temps à un état de densité et de température infinies, un état où toutes les distances tendent vers zéro. Ces zéros et ces infinis sont en général interprétés comme le signal que la théorie de la gravitation utilisée n'est plus applicable dans ces conditions extrêmes. Il est donc plus exact de dire que la théorie actuelle du big bang décrit en fait l'évolution de l'univers depuis 15 milliards d'années, mais pas vraiment l'origine de l'univers. Les conditions extrêmes qui

règnent lors de la création du temps et de l'espace, de la matière et du rayonnement, ne sont pas décrites par les théories physiques actuelles. Jusqu'où ces théories peuvent-elles aller ?

Un élément de réponse vient de la grande absente de la cosmologie que l'on vient de décrire sommairement : la mécanique quantique. On sait bien qu'une théorie "classique" comme la relativité générale doit donner des réponses erronées quand les distances ou les durées sont petites ou les densités d'énergie grandes. Un ordre de grandeur de ces distances peut être calculé à partir des constantes fondamentales que sont la vitesse c de la lumière, le quantum d'action h (constante de Planck) et la constante de Newton de la gravitation G . Ces constantes permettent de définir un système "naturel" d'unités, qui pourraient remplacer le mètre, la seconde et le kilogramme comme unités fondamentales. Dans ce système d'unités, l'unité de longueur serait la "longueur de Planck" $L_{\text{Planck}} = \sqrt{(Gh/2\pi c^3)} = 1.6 \cdot 10^{-35}$ m, l'unité de temps le "temps de Planck" $t_{\text{Planck}} = \sqrt{(Gh/2\pi c^5)} = 5.4 \cdot 10^{-44}$ s, et l'unité de masse la "masse de Planck" $M_{\text{Planck}} = \sqrt{(hc/2\pi G)} = 2.2 \cdot 10^{-8}$ kg. Bien que ces unités ne soient guère pratiques pour une utilisation quotidienne, elles permettent d'estimer à partir de quelle distance, de quel intervalle de temps ou de quelle densité les effets quantiques deviennent importants pour la gravitation. En-dessous de 10^{-43} s, la théorie classique du big bang est à revoir.

Bien sûr, on pourrait juger que ces 10^{-43} s inconnues ne pèsent pas lourd devant les 15 milliards d'années que l'on estime connaître dans leurs grandes lignes (d'autant qu'il s'agit peut-être de 12 ou 18 milliards d'années...) et que la question n'a qu'un intérêt académique. Mais en fait l'échelle linéaire des temps à laquelle nous sommes accoutumés ne reflète pas du tout le rythme des événements dans l'univers, pour lequel une échelle logarithmique est beaucoup plus adaptée. Sur une telle échelle, il se passe "autant de choses" entre un millième de seconde et cent secondes (5 facteurs 10) qu'entre cent mille ans et 10 milliards d'années (5 facteurs 10 aussi) : dans le premier cas se sont créés les éléments légers au cours de la nucléosynthèse, dans l'autre se sont formées les galaxies et les étoiles après la rupture de l'équilibre thermique entre matière et rayonnement. Sur une échelle logarithmique la distance entre 10^{-43} s et zéro est infinie, et on peut penser qu'il s'y passe infiniment de choses. D'où l'intérêt d'accéder à cette étape de l'histoire de l'univers.

Une chronologie du big bang ?

La difficulté est qu'il n'existe pas de théorie quantique de la gravitation. Une théorie quantique de l'espace-temps a bien été établie par Wheeler et DeWitt il y a près de quarante ans, mais l'équivalent de l'équation de Schrödinger pour un espace-temps qu'ils ont donné n'est soluble que

pour des mini-univers extraordinairement simplifiés et qui ne sont donc guère réalistes. Des solutions partielles sont apportées par Hawking et ses collaborateurs, d'autres (incompatibles) par Linde, Starobinski ou Vilenkin. Les problèmes conceptuels de la mécanique quantique sont plus difficiles aussi quand on l'applique à l'univers tout entier : quel sens donner à la fonction d'onde de l'univers, quelle interprétation donner aux probabilités d'obtenir tel ou tel résultat, quand le résultat est ici un univers ? Cette fonction d'onde décrit-elle alors une pluralité d'univers coexistants ou un ensemble d'univers possibles dont l'un seulement est réel ? Les concepts restent très flous et une confusion certaine règne dans ce domaine, que n'éclairent pas un vocabulaire parfois accrocheur (univers-bulles, inflation chaotique...) et les dessins naïfs de bulles ou de "trous de ver" qui illustrent souvent ces travaux. Les théories nouvelles de physique (supergravité, supercordes, etc.) ont l'ambition d'apporter la théorie quantique de la gravitation qui nous manque, mais ces théories sont encore si complexes qu'il est très difficile d'en tirer autre chose que des indications très fragmentaires et fragiles sur ce que pourrait être la résolution du problème de la singularité. Nous atteignons ici provisoirement la limite de la connaissance, et sur les zones blanches de notre carte nous ne pouvons qu'écrire "Hic sunt leones".

Dessin naïf et faux de bulles ?

Pourquoi y a-t-il quelque chose plutôt que rien ?

Est-ce la fin du récit des origines ? Certes non. N'oublions pas qu'en relativité générale la notion de temps n'a pas de sens par elle-même, seul l'espace-temps possède une réalité physique intrinsèque. Et comme, par définition, l'espace-temps contient l'intégralité du temps, passé, présent et futur confondu, il n'y a aucune raison de se focaliser sur un point particulier du temps (et qui plus est dans un système de coordonnées spatio-temporelles particulier) aussi singulier que soit ce point. En effet, l'espace-temps et son contenu matériel existent globalement, "de toute éternité" pourrait-on dire par abus de langage. Mais pourquoi existent-ils ? Un récit moderne de l'origine du monde ne porte donc pas tant sur l'origine temporelle de l'espace-temps global que sur son origine causale. La question n'est autre que l'antique et lancinante interrogation : "Pourquoi y a-t-il quelque chose plutôt que rien ?".

Les hommes ont toujours cherché à donner un sens à ce qu'ils observaient ou ressentaient, et les questions théologiques et téléologiques affleurent dès qu'il est question de cosmologie. Qu'est ce qui a causé la création ? D'où vient le monde ? Dans son abord de la question de l'origine de l'univers, non plus cette fois l'origine temporelle mais l'origine causale, la cosmologie quantique

rejoint en apparence les cosmogonies antiques. Celles-ci divergent entre elles : au début était le Chaos (Lao Tseu, Hésiode, les Sumériens), au début était le Vide (Hésiode encore), au début était le Néant (Upanishad), au début était le Verbe (Textes des Pyramides, Bible, Védas), au début était la Loi (Platon). Les cosmologistes hésitent eux aussi entre le chaos (rebaptisé vide quantique ou fonction d'onde de l'univers), le néant ou la loi. Beaucoup de correspondances entre mythes anciens et modernes ne sont souvent que de simples rapprochements de vocabulaire ou de très vagues analogies, mais elles reflètent parfois l'identité des idées fondamentales : la formulation de Guillaume d'Auvergne au XII^{ème} siècle sur l'identité entre le monde, le temps et l'espace est reprise dans sa forme et dans son fond par les cosmologistes modernes. Les modes de pensée et de représentation du monde accessibles à nos cerveaux restent les mêmes à toutes les époques, ce qui explique que l'on retrouve l'image de l'Œuf cosmique dans le big bang, et les conceptions de Platon et d'Aristote chez une grande figure de la cosmologie moderne comme Fred Hoyle (dont l'opposition irréductible à la théorie du big bang a considérablement perfectionné celle-ci en obligeant ses défenseurs à approfondir leurs descriptions).

Puisque parmi tous les univers possibles seuls certains permettent la présence d'êtres conscients, un courant de pensée soutient que notre existence même sélectionne notre univers parmi tous les possibles (principe anthropique). Les lois de la physique seraient ainsi en partie contingentes et résulteraient de conditions particulières de notre monde-univers. Il pourrait exister d'autres univers, ou d'autres régions de notre univers, avec des lois très différentes. Ces spéculations sont rendues possibles parce que les lois de la physique sont souvent traduites par des équations différentielles, et que les solutions de ces équations dépendent de conditions aux limites (conditions initiales, conditions "aux bords") qui sont fixées en dehors de ces lois. On peut donc facilement imaginer que les mêmes lois conduisent à des réalisations (des univers) très différentes selon les conditions aux limites imposées. Mais par quoi ces conditions aux limites sont-elles imposées ? Le hasard ou une autre loi ? La distinction entre loi et condition initiale est particulièrement floue en physique (à la différence des mathématiques) et l'histoire des sciences montre une continuelle réduction de la part du contingent dans les explications scientifiques du monde. Ce qui paraissait accidentel à une époque apparaît ensuite comme imposé par une loi plus générale.

William Blake - Dieu Architecte

Plusieurs physiciens, mathématiciens et cosmologistes ont par conséquent cherché à montrer que l'existence du monde tel qu'il est était une conséquence inévitable des lois de la physique. "Ce qui m'intéresse vraiment, c'est de savoir si Dieu avait quelque liberté en créant le monde" disait Albert

Einstein, répondant par delà les siècles à Etienne Tempier condamnant en 1277 les thèses cosmologiques d'Aristote sur la base de la toute-puissance divine. Certains modèles quantiques conduisent effectivement à des fonctions d'onde de l'univers prévoyant une probabilité très élevée pour un univers semblable au nôtre (avec toutes les incertitudes mentionnées plus haut sur la validité de la notion même de fonction d'onde de l'univers). Un univers très différent serait alors improbable sinon impossible. Si cela est vrai, la question se déplace alors vers celle de l'origine de ces lois physiques. Galilée disait que le livre de la nature était écrit en langue mathématique et nombreux sont les philosophes et savants qui ont brodé sur ce thème. Dans cette lignée, de gros efforts ont été accomplis ces dernières années pour démontrer que les lois fondamentales de la physique étaient les seules qui soient mathématiquement cohérentes. Toute autre loi serait aussi auto-contradictoire que des parallèles qui se coupent. Les premiers modèles de la théorie des cordes se présentaient par exemple comme fondés sur les seuls groupes de symétrie satisfaisant à certaines exigences. Mais ces efforts ne sont pas couronnés de succès, ou du moins pas encore, et de plus la question se poserait alors de savoir pourquoi les lois du monde devraient être des lois mathématiques. Cette question est bien sûr liée à celle de l'origine des mathématiques, construction de l'esprit humain ou réalité indépendante ?

On peut se demander, plus généralement, pourquoi les lois de l'univers devraient absolument être connaissables par l'esprit humain. A moins bien sûr que ce soit l'esprit humain qui fabrique ces lois et qu'elles ne codent en réalité que nos connaissances sur le monde et non le monde lui-même. C'est l'interprétation que Niels Bohr donnait de la mécanique quantique, mais elle correspond trop à une démission, un renoncement au savoir, pour pouvoir être durablement acceptée par les hommes.

Progrès ?

Les progrès scientifiques permettent de déplacer la frontière floue entre connu et inconnu, mais l'idée d'atteindre à la "fin de la physique" est un mythe aussi ancré que celui de "la fin de l'histoire". Où est la ligne séparant ce qui est connaissable (fût-ce dans un futur éloigné) de ce qui n'est que rêverie et fiction ? Il existe un acte de décision, un seuil au-delà duquel on décide à un moment donné de croire ou de ne pas croire à une théorie, un modèle ou un mythe. Notre connaissance du monde est immensément plus vaste qu'il y a quelques siècles, mais nous ne savons guère mieux répondre à la question "Pourquoi y a-t-il quelque chose plutôt que rien ?" La différence majeure est que la question est désormais posée au physicien, et non plus au théologien et au philosophe, et que la réponse éventuelle peut être critiquée sur des bases rationnelles et ne demande pas à être acceptée éternellement par un acte de foi.