

Bientôt un siècle de cosmologie scientifique

Par **Marc LACHIÈZE-REY**

Astrophysicien et physicien théoricien,
directeur de recherche au CNRS, Centre d'Études de Saclay, CEA

En conférence le 6 février

Il n'est guère de mythe antique qui n'évoque la structure du monde, son histoire ou sa création. De tels discours cosmologiques n'ont bien sûr rien de scientifique. Comment comprendre alors que deux prix Nobel de physique, les plus éminentes consécration scientifiques, soient venus récompenser la cosmologie ?

Sous quelles conditions une discipline peut-elle être qualifiée de science ? Épistémologues et scientifiques s'accordent au moins sur trois critères. Le premier, de nature sociologique, consacre la nature scientifique d'une activité dès lors que la communauté des scientifiques (et le regard extérieur des épistémologues) la reconnaît comme telle.

Le second, que beaucoup considèrent comme nécessaire et suffisant, exige qu'une théorie permette des prédictions *falsifiables* : si l'une n'est pas vérifiée, la théorie doit être rejetée. Selon le troisième, une science doit se définir par son *objet*, dont les propriétés sont bien définies et (au moins en principe) mesurables.

La cosmologie d'avant le XX^{ème} siècle ne satisfaisait aucun de ces critères. De nombreuses « théories du Monde » avaient été proposées, y compris par des scientifiques (par exemple, le monde newtonien). Mais aucune de ces approches ne répondait au critère de falsifiabilité. Aucune n'exhibait de propriété de l'univers susceptible d'une mesure. La communauté des scientifiques était loin de reconnaître la cosmologie comme une science.

Tout change en 1917 : la théorie de la relativité générale invite à voir l'univers comme un objet géométrique aux propriétés bien définies et mesurables. Einstein propose un espace-temps dont on peut mesurer le rayon de courbure par triangulations cosmiques. La cosmologie commence à être vue comme une science.

Le début du XX^{ème} siècle apporte une moisson de résultats observationnels pertinents pour la cosmologie, sous la forme des mesures des décalages vers le rouge des galaxies et de la « loi de Hubble » (1929). Pour résumer une longue histoire, ceci a finalement mené, grâce au physicien belge Georges Lemaître, à la reconnaissance de l'expansion cosmique. L'observation des décalages fournit la première propriété *mesurée* de la géométrie de l'espace-temps : son taux d'expansion ou « constante de Hubble » H .

Lemaître a montré que les solutions de la relativité représentant l'univers – les modèles cosmologiques relativistes – prédisent non seulement des valeurs de H , mais aussi une panoplie d'autres quantités physiques mesurables. Elles concernent bien l'univers dans sa globalité ; et non pas, par exemple, les galaxies qui ont pu servir d'intermédiaire pour

les mettre en évidence. Des protocoles observationnels précis, les « tests cosmologiques », sont conçus pour les mesurer. Les modèles sont ainsi réfutables. L'univers, muni de propriétés mesurables, se révèle un objet physique de bon aloi, un objet de science. La cosmologie vérifie les critères d'une discipline scientifique.

Lemaître poursuit ses travaux vers ce que l'on appelle aujourd'hui les « modèles de big bang ». Il en existe toute une famille ; chaque version se présente comme une solution de la relativité générale et prédit des valeurs particulières pour les quantités cosmiques. Tout l'effort des cosmologues jusqu'à aujourd'hui s'est consacré à les mesurer. Les premières observations, cependant, ne permettaient guère de mesurer quoi que ce soit au-delà de H , d'où une désaffection certaine, dans ces années, à l'égard de la cosmologie.

Par ailleurs, les nouveaux résultats dérangent. Comme Lemaître l'a compris le premier, l'expansion cosmique implique que l'univers évolue, qu'il a peut-être eu un début. Certains acceptent difficilement cette remise en cause du dogme millénaire d'un univers toujours égal à lui-même. Dans un premier temps, conformément à la méthodologie scientifique, sont proposés des modèles concurrents, tels ceux d'*univers stationnaire*. Leurs prédictions diffèrent clairement de celles du big bang et il est possible de tester par des observations : une illustration du statut scientifique de la cosmologie du milieu du XX^{ème} siècle.

Après de premiers résultats (en fait erronés) qui firent pencher la balance en faveur de l'univers stationnaire, celui-ci apparaît au contraire intenable, incompatible avec une collection de résultats successifs : l'âge de l'univers, les abondances des éléments chimiques légers, la physique des particules, et surtout la découverte du fond diffus cosmologique en 1964. Cette dernière clos le débat, ce qui lui vaut le prix Nobel de physique : sont consacrés en même temps le statut scientifique de la cosmologie et la conclusion d'un long débat entre modèles concurrents, au bénéfice du big bang.

Tels les anti-coperniciens quelques siècles plus tôt, certains acceptent mal la situation. Les observations ayant tranché, il n'est plus question d'attaquer le big bang sur le plan scientifique. Se met en place un refus dogmatique qui

conteste la démarche scientifique elle-même : les observations n'auraient que peu de valeur face à l'affirmation péremptoire que l'univers n'évolue pas ; Lemaître ne serait pas un bon scientifique, car trop motivé par son concordisme¹ (alors qu'il en fut au contraire un adversaire farouche). Par dérision, Fred Hoyle introduit le terme de « big bang », porteur d'un contresens qui fut la source de bien des malentendus. Comme pour toutes les révolutions scientifiques, la contestation s'éteint peu à peu avec la disparition des opposants. La cosmologie a parcouru depuis beaucoup de chemin. Les progrès des techniques astronomiques ont conduit à mesurer effectivement, et de plus en plus finement, plusieurs des propriétés de l'espace-temps : taux d'expansion, taux de décélération, âge de l'univers, courbure de l'espace, température cosmique... La cosmologie, devenue une science observationnelle *de précision*, œuvre à déterminer quelle version, au sein de la famille des modèles de big bang, décrit le mieux notre univers. Quantitativement, ceci est exprimé par les valeurs de certains « paramètres cosmologiques », qui caractérisent la géométrie spatiotemporelle. Les observations les plus déterminantes furent celles du fond diffus. Rappelons qu'il s'agit d'un objet physique tout à fait concret, dont on mesure avec précision la température, le spectre (distribution en longueurs d'ondes), la polarisation, la distribution sur le ciel... Chacune de ces caractéristiques a fait l'objet d'une ou de plusieurs expériences dédiées (télescopes, ballons, fusées, satellites), avec des résultats de précision croissante. Le satellite COBE a fait franchir une étape à cette connaissance, consacrée par le Nobel de physique de 2006. Celui de 1965 saluait l'avènement de la cosmologie scientifique et du big bang ; celui de 2006 consacre la *précision* de la science cosmologique et le degré extrême de confirmation du big bang. Notons que les observations de COBE, très délicates, avaient été confirmées en 2001 par le satellite WMAP, dédié lui aussi au fond diffus.

Depuis près d'un siècle, la cosmologie a clairement défini son objet : l'espace-temps, muni d'une panoplie de propriétés aujourd'hui mesurées. Les modèles proposés ont été falsifiés, sauf ceux de big bang, chaque nouveau test confirmant davantage leur validité. Pleinement reconnue comme discipline scientifique, la cosmologie a été consacrée par deux prix Nobel de physique.

Quel est son avenir ? Aucun scientifique n'affirmera qu'un modèle ou une théorie puisse être *définitivement* validé. Chaque cosmologue est motivé par le désir de trouver un résultat non conforme au big bang, qui obligerait à le

remettre en cause. Les tentatives n'ont pas manqué, mais chacune a finalement augmenté notre confiance : il n'existe aujourd'hui *aucune* proposition concurrente. Pour l'avenir, nous devons attendre !

Reste que ces modèles n'ont pas vocation de tout expliquer. Par exemple, ils ne disent pratiquement rien sur les instants les plus reculés du passé cosmique, probablement gouvernés par des phénomènes quantiques : l'ère de Planck. Cette incertitude motive tout un pan de la recherche actuelle qui requiert, pensent les physiciens, de remplacer nos théories actuelles – relativité générale et physique quantique – par de nouvelles encore inconnues. Supercordes, gravité quantique, ..., les théoriciens explorent de nombreuses pistes. Le big bang, considéré comme bien établi, est utilisé ici comme un premier test : toute nouvelle théorie proposée n'est reconnue comme viable que si elle s'accorde avec lui. Les physiciens considèrent ainsi aujourd'hui le big bang comme un fondement de nos connaissances scientifiques ; à peu près comme le « modèle standard » [de la physique des particules] pour le monde microscopique.

Le XX^{ème} siècle a vu émerger la cosmologie scientifique. Le XXI^{ème} l'a vue devenir une science de précision et une science de référence pour la physique.

¹ Tentative de vouloir accorder science et religion.

Bibliographie :

- *Initiation à la cosmologie*, Marc Lachièze-Rey, Dunod 2004.
- *Essais de cosmologie, l'invention du big bang*, Jean-Pierre Luminet, Alexandre Friedmann et Georges Lemaître, Le Seuil/Points Sciences, 2004.