

**Texte de la 186<sup>e</sup> conférence de l'Université de tous les savoirs donnée le 4 juillet 2000.**

**Le Big-bang  
par Marc Lachièze-Rey**

Si les modèles de Big-bang sont l'expression de notre cosmologie contemporaine, la discipline est loin d'être nouvelle : aussi loin que l'on remonte dans l'Antiquité, les regards et les pensées sont tournés vers le Ciel, le Monde, le Cosmos, l'Univers,... Concernée par l'Univers dans son ensemble, la cosmologie nous indique sans doute quelque chose sur la place que nous y occupons. Aujourd'hui, la cosmologie est devenue une science.

On fait le plus souvent remonter l'origine de la science moderne à l'époque de Galilée et Newton. La cosmologie scientifique prend naissance au même moment. Le vingtième siècle bouleversera cette cosmologie scientifique en lui conférant un caractère relativiste, et en la concrétisant sous forme de modèles, en particulier la famille des modèles de Big-bang. Il ne s'agit pas d'un modèle unique, d'une vision totalement figée de l'Univers et de son évolution, mais plutôt d'un ensemble de descriptions possibles, partageant des caractéristiques communes, mais aussi des différences. Une grande part du travail actuel des astrophysiciens et des cosmologues consiste, précisément, à examiner, au sein de la classe des modèles de Big-bang, lesquels semblent décrire le mieux notre Univers. Ils vérifient également sans cesse, avec jusqu'à présent des succès toujours grandissants, la validité de cette classe de modèles.

**L'Univers**

Le concept d'univers, tel que nous le concevons aujourd'hui, constitue l'objet même de la cosmologie. Mais il ne remonte pas plus tôt que le XVII<sup>e</sup> siècle, le moment où l'unité du Monde fut reconnue et admise. Deux millénaires plus tôt, Platon qualifiait le Monde de Cosmos, insistant ainsi sur son harmonie (à la source étymologique du terme grec). L'Antiquité décrivait un monde très différent du nôtre : hiérarchisé plutôt que unifié, d'extension très petite et bien moindre que ce que nous concevons aujourd'hui puisque limitée au système solaire. Ce monde se constituait d'un emboîtement hiérarchique de sphères, centrées sur la Terre située au centre du monde : sphères de la Lune, du Soleil, des planètes, jusqu'à la Sphère des Fixes, portant les étoiles (fixes). Celle-ci constituait la frontière du Monde, fini, borné.

Ces idées, développées essentiellement par Platon et Aristote et mises en œuvre par de nombreux mathématiciens, géomètres et astronomes, ont régné pendant près de deux millénaires. D'origine pythagoricienne, l'idée de la prééminence du cercle et de la sphère fut reprise et promue par Platon. Ces figures hautement symétriques ont joué un rôle déterminant, conforme à la nécessité de décrire le monde harmonieux de manière harmonieuse. Le dogme a tenu deux mille ans, tous les mouvements célestes devant être décrits par des combinaisons de sphères et de cercles en rotation, jusqu'à ce que Johannes Kepler découvre la nature elliptique des orbites planétaires. L'événement, à la charnière des XVI<sup>e</sup> et XVII<sup>e</sup>, constitue l'un des ingrédients essentiels d'une première révolution cosmologique. Cet ample mouvement débute après la Renaissance (avec de nombreux précurseurs comme Nicole Oresme, Nicolas de Cuse...) et se poursuit jusqu'à la fin du XVII<sup>e</sup> siècle. Newton y porte la touche finale avec ses Principia qui synthétisent les travaux de nombreux précurseurs (Giordano Bruno, Nicolas Copernic, Tycho Brahe, Johannes Kepler, Galilée...). Il établit ainsi les bases de la mécanique, de l'astronomie, de la cosmologie, et fonde la physique moderne.

L'univers du XVII<sup>e</sup> est devenu beaucoup plus vaste que celui de l'antiquité. Il ne s'arrête pas à la Sphère des Fixes, ne se réduit pas au système solaire : les étoiles ne sont pas toutes à la même distance de nous mais se répartissent dans tout l'espace. Copernic déplace le centre du Monde de la Terre vers le Soleil, mais Newton niera l'idée même d'un centre du Monde. Telle est notre conviction actuelle : dans le Monde dépourvu de tout centre, tous les points sont équivalents, aucun n'est particulier. Le Monde – l'Univers en tant que Monde unifié – est homogène. Cela signifie que tous les points sont équivalents dans un Univers, et que les lois physiques sont donc partout et toujours identiques. Cette idée d'universalité (des lois physiques, des mouvements, de la composition de la matière) rend tout simplement possible la physique, et l'astrophysique. L'universalité, le concept d'univers, garantit que le résultat d'une expérience menée là-bas est identique à celui d'une expérience menée ici ; que les résultats seront encore les mêmes si je mène l'expérience demain. Une telle reproductibilité fonde la possibilité de faire de la physique.

L'idée d'univers, comme tant d'autres idées nouvelles émises à cette époque, va à l'encontre des conceptions aristotéliennes : plus de centre du Monde, plus de position privilégiée de la terre, plus d'espace borné, clos, plus de mouvements circulaires. L'Univers n'est plus constitué de quatre éléments (la terre, l'eau, l'air et le feu) mais de petites particules (retour à l'atomisme). Sa composition est universelle comme le vérifieront les astrophysiciens au XIX<sup>e</sup> : l'Univers est bien ... un univers. La matière est la même sur terre, dans les étoiles, dans les galaxies, dans le vide interstellaire, etc. Les lois de la gravitation, l'électromagnétisme, la physique quantique, la relativité, s'y appliquent pareillement.

### **Espace, temps, espace-temps**

Newton énonce, et c'est essentiel, les propriétés de l'espace et du temps. Ce cadre immuable de la physique est identifié à l'Univers vu d'un point de vue géométrique. La physique newtonienne ira de succès en succès pendant trois siècles, et reste encore aujourd'hui très efficace pour de très nombreux problèmes. Ce sont des difficultés purement conceptuelles, et non pas observationnelles ou expérimentales – rien ne remet en cause la pertinence de cette théorie pour prédire ou interpréter tous les résultats observés –, qui conduisent à sa remise en cause au début du XX<sup>e</sup> siècle, et à l'introduction des théories relativistes. En 1917, la Relativité Générale renouvelle fondamentalement la cosmologie. Quelques décennies plus tard, se mettra en place la physique quantique, volet complémentaire de la physique du XX<sup>e</sup> siècle.

Ce début de XX<sup>e</sup> siècle voit donc un renouveau total de la physique, qui provoquera une seconde révolution cosmologique fondée à la fois sur la nouvelle théorie de la Relativité générale et sur de nouveaux résultats observationnels. La cosmologie moderne, relativiste, et en particulier les modèles de Big-bang, n'auraient pas vu le jour sans cette conjonction remarquable entre nouvelles théories (introduites, j'insiste, pour des raisons purement conceptuelles) et nouveaux résultats d'observations dus à l'introduction de grands télescopes, l'utilisation de la photographie et de la spectroscopie (ceci permettant d'étudier des objets très peu lumineux, et donc très éloignés tels que galaxies, quasars,...). Cette convergence entre théorie et observations permit le développement d'une nouvelle cosmologie, aboutissant à la construction des modèles de Big-bang.

### **Le grand Univers**

Depuis la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, un Grand Débat occupait la communauté astrophysique, à propos de l'extension de notre Univers. Après la Renaissance, les philosophes de la nature avaient compris qu'il s'étendait beaucoup plus loin que le système solaire, les étoiles se répartissant à des éloignements divers et très importants. Il devenait possible d'envisager un univers très grand, voire même infini comme l'avaient imaginé quelques précurseurs dont Giordano Bruno. A la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, de nombreux dénombrements d'étoiles font comprendre aux astronomes que notre système solaire (l'étoile Soleil entourée de ses planètes) n'est qu'une zone minuscule au sein d'un rassemblement d'étoiles beaucoup plus vaste : notre galaxie, la Voie Lactée, comprend des dizaines ou des centaines de milliards d'étoiles. Les astronomes en dessinent les contours, y situent notre système solaire. La plupart estiment, à l'époque, que notre galaxie constitue la totalité de l'Univers. Au-delà de notre galaxie, il n'y aurait rien : du vide mais pas de matière, pas d'étoiles. Pourtant, certains avaient déjà soupçonné qu'il y avait peut-être autre chose, bien au-delà. Parmi eux, le philosophe Emmanuel Kant avait par exemple suggéré, dès la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle, l'existence d'autres univers-îles. En visionnaire, il anticipait notre vision d'un Univers constitué d'un rassemblement de galaxies, semblables en effet aux îles d'un archipel au milieu de l'océan.

Ces questions suscitèrent des débats de plus en plus virulents à la charnière des deux siècles. Les arguments présentés par les opposants aux univers-îles semblaient très convaincants, mais il apparut par la suite qu'ils reposaient sur des résultats d'observations erronés. Le débat fut définitivement tranché en 1924 grâce aux observations menées par l'astronome américain Edwin Hubble. Utilisant les grands télescopes à sa disposition, il réussit à montrer qu'un objet céleste, appelé à cette époque la Grande Nébuleuse d'Andromède, se situait en dehors de notre propre Galaxie, et même très loin d'elle : il devenait évident que l'Univers s'étendait bien au-delà de notre Galaxie, qu'il était immense, beaucoup plus grand que la Voie Lactée. Et il se révélait peuplé d'innombrables galaxies : la nébuleuse d'Andromède (appelée aujourd'hui galaxie d'Andromède) est l'une d'elles, à-peu-près analogue à la nôtre mais située à des millions d'années-lumière. Par la suite, les astronomes en ont découvert des milliers, des millions, peut-être bientôt des milliards. Ainsi, en 1924, l'Univers est brusquement devenu extrêmement grand, nous ne savons toujours pas aujourd'hui jusqu'à quel point. Nous ne savons même pas si l'espace est fini ou infini. La Relativité Générale, fondée sur une géométrie nouvelle particulière, dite non euclidienne, permet un univers de volume et de circonférence finis, mais dépourvu de toute limite.

### **Expansion relativiste**

L'Univers est donc immense, constitué d'innombrables galaxies. Mais ce n'est qu'un premier aspect de la révolution cosmologique en cours. Toute une série d'observations remontant à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, effectuées essentiellement par l'astronome américain Vesto Slipher, suggèrent un mouvement apparent et global de toutes les galaxies. Bien plus, des régularités surprenantes se manifestent : toutes s'éloignent, aucune ne se rapproche (les très rares exceptions n'ont guère d'importance dans ce schéma). Enfin, moins les galaxies sont lumineuses (et donc, plus elles sont lointaines), plus elles semblent s'éloigner rapidement. Cela dévoile une sorte de mouvement d'expansion, dont l'extension, la régularité et les propriétés, dépassent de loin l'échelle des galaxies. Les astronomes comprennent rapidement qu'il s'agit d'un phénomène d'échelle cosmologique (impliquant l'Univers dans son ensemble et non pas telle ou telle de ses parties) mais ils ne savent pas l'interpréter. Découverte de manière empirique, cette expansion

restait encore en 1929 un mystère complet pour les astronomes, lorsque Hubble énonça sa fameuse loi de Hubble qui déclare que la vitesse d'expansion d'une galaxie est proportionnelle à son éloignement. La solution avait en fait déjà été trouvée en 1927 par le physicien belge Georges Lemaître (qui avait énoncée la loi de Hubble) mais elle ne fut portée à la connaissance de la communauté astronomique qu'en 1930 (**voir xxx**). Lemaître avait trouvé la solution du problème cosmologique, en montrant que les équations de la Relativité Générale impliquent que l'Univers doit être en expansion ou en contraction. Ayant eu connaissance des premiers résultats observationnels de Slipher, il les avait interprétés comme une manifestation de cette expansion de l'Univers comprise dans un cadre relativiste.

Les résultats initiaux de Lemaître, publiés en 1927 dans une revue belge, n'ayant eu quasiment aucun écho, les cosmologues se demandaient encore, en 1930, comment interpréter les résultats de Slipher et de Hubble. En 1931, Georges Lemaître envoya une copie de son article à son ancien professeur Arthur Eddington. Ce dernier, le publiant de nouveau, lui donna la publicité qu'il méritait. L'expansion de l'Univers fut alors comprise et admise par la majorité de la communauté astronomique (il est à signaler que le physicien soviétique Alexandre Friedmann avait trouvé dès 1922 les mêmes solutions de la relativité générale, néanmoins sans les relier aux résultats observationnels) : le mouvement observé des galaxies, si régulier, d'extension si grande, est bien de nature cosmique, et relativiste. Il est impossible de l'imputer à une cause locale : ce sont ne sont pas les galaxies qui s'attirent ou se repoussent par leurs interactions. Il s'agit d'une propriété de l'Univers lui-même, parfaitement comprise et interprétée dans le cadre de la Relativité Générale.

Cette théorie énonce essentiellement deux points extrêmement nouveaux. Le premier (déjà présent en relativité restreinte) implique de mêler l'espace et le temps dans une entité plus globale que l'on appelle l'espace-temps. Deuxième point, la géométrie de cet espace-temps peut être déformée, posséder une courbure, une topologie, et elle peut varier dans le temps. En fait, la nouvelle géométrie spatio-temporelle fait apparaître toute modification des propriétés de l'espace dans le temps comme une courbure de l'espace-temps. C'est un avantage de cette approche : ce que l'on considèrerait comme une variation dans le temps, est maintenant considéré comme un pur effet géométrique, dans la géométrie étendue incluant la dimension temporelle. Parler de la géométrie de l'espace-temps, c'est donc parler à la fois de la géométrie de l'espace et de son évolution dans le temps. Dans ce cadre, l'expansion cosmique (de l'espace) apparaît comme un aspect géométrique de la géométrie de l'espace-temps.

Les galaxies ne sont pas en mouvement dans l'espace. Mais l'espace lui-même est en expansion, entraînant les galaxies comme le courant d'une rivière peut entraîner des bateaux dont les moteurs sont à l'arrêt. Ces derniers sont immobiles par rapport à l'eau ; de même, les galaxies sont immobiles, ou plutôt comobiles, par rapport à l'espace qui les entraîne. Si l'on ne peut voir directement un tel courant d'espace, la Relativité prévoit un tel phénomène et lui donne un sens : l'espace est en expansion, la découverte observationnelle a coïncidé avec l'invention de la Relativité qui offre un cadre théorique pour l'interpréter.

Une fois l'expansion reconnue, il reste à en tirer les conséquences physiques. Là encore, Georges Lemaître fut un précurseur, avec son modèle de l'atome primitif (1931) qui en tire les conséquences physiques sur l'histoire de l'Univers. On ne connaissait encore, à l'époque, ni la physique nucléaire ni la physique des particules, et à peine la physique quantique, aussi ces idées restaient encore vagues. Mais ces modèles, retravaillés, réajustés, sont finalement devenus les modèles de Big-bang. À l'époque, les idées de Lemaître, impossibles à tester, ne suscitèrent que très peu d'intérêt. Dès le début, elles suscitèrent même une certaine hostilité. Le recul historique

montre aujourd'hui l'aspect dogmatique (encore parfois présent) d'une bonne part des critiques contre le Big-bang, résultant de la difficulté de remettre en cause une idée établie depuis des siècles, quasiment mythique : celle d'un monde éternellement identique à lui-même, sans évolution. Des opposants aux Big-bang ont tenté de soutenir, sans doute au-delà du raisonnable, un modèle cosmologique selon lequel l'Univers resterait toujours identique à lui-même (état stationnaire), alors que les observations nous montrent de plus en plus clairement l'expansion et l'évolution des galaxies. Ces modèles, originellement intéressants et astucieux, ne purent résister à la confrontation aux observations. D'autres esprits critiques, parfois les mêmes, soulignaient une ressemblance entre les idées de Lemaître et le Fiat Lux des Écritures. De ce fait, ils accusaient Georges Lemaître, simultanément physicien et prêtre catholique, de concordisme : n'aurait-il pas introduit ses convictions religieuses dans la physique ? Il faut pourtant rendre justice à Lemaître qui s'est constamment défendu de cette accusation. Les bases scientifiques des modèles de Big-bang ont été affirmées d'autant plus soigneusement qu'elles ont été fortement critiquées.

L'intérêt pour les modèles de Big-bang renaît dans les années 1940, avec le début du développement de la physique nucléaire. Les physiciens nucléaires comprennent que, selon ces modèles, l'Univers a dû passer par un état très dense, très chaud et très concentré, idéal pour le déroulement de réactions nucléaires. Puisque ces dernières fabriquent des éléments chimiques, ne serait-il pas possible que tous les éléments chimiques que l'on rencontre dans l'Univers - fer, azote, oxygène, carbone, etc... - aient été fabriqués durant les instants très reculés de l'Univers, selon le modèle du Big-bang chaud ? La réponse est en fait négative, nous le savons maintenant, car ces éléments n'ont pas eu le temps de se former. Cependant, les plus légers d'entre eux (le deutérium, l'hélium et le lithium en partie), ont sans doute bien été fabriqués de cette manière, lors d'un épisode de nucléosynthèse primordiale caractéristique des modèles de Big-bang. Nous en avons aujourd'hui la conviction car les distributions universelles de ces éléments sont en accord avec les prédictions de ces modèles.

L'intérêt pour ces modèles a repris de nouveau dans les années 1960. Effectuant de nouveaux calculs de réactions nucléaires, quelques physiciens de Princeton ont pu prédire que, si l'histoire de l'Univers s'est effectivement déroulée conformément aux modèles de Big-bang, il doit subsister aujourd'hui des vestiges d'un passé très reculé - l'époque où l'Univers était très chaud et très condensé - sous la forme d'un rayonnement « fossile » observable. Ce rayonnement électromagnétique devrait baigner tout l'Univers d'ondes radio. En 1964, alors que ces physiciens de Princeton commençaient à construire un appareillage pour tenter de le détecter, deux collègues radioastronomes de la compagnie Bell Telephone (Penzias et Wilson, qui reçurent pour cela le prix Nobel) le découvrent fortuitement en testant une antenne destinée à la radioastronomie. L'ayant tout d'abord interprété comme un parasite gênant à éliminer, ils conclurent finalement à l'existence d'un rayonnement omniprésent. Ses propriétés, rapidement mesurées, se révélèrent en accord avec les prédictions des modèles de Big-bang. Ces derniers furent alors acceptés par une large fraction (mais pas la totalité) de la communauté scientifique.

### **Les fondements du Big-bang**

Les modèles de Big-bang sont quasiment inévitables. Les observations astronomiques et les lois physiques que nous connaissons nous y mènent de manière quasiment inéluctable. Il s'agit en premier lieu de la constatation de l'immensité de l'Univers fait de galaxies, confirmée depuis

1924 par d'innombrables observations de galaxies lointaines, avec des télescopes toujours plus puissants.

Les cosmologues énoncent un principe fondamental, le principe cosmologique. Expriment l'abandon définitif des conceptions pré-coperniciennes, il énonce l'équivalence de tous les points : pas de centre, pas de bords. L'Univers est homogène, d'une homogénéité qui prend son sens à l'échelle cosmologique : il peut y avoir une galaxie ici, et pas à côté. Mais aux très grandes échelles, dépassant celles des amas ou des superamas de galaxies (soit plusieurs dizaines de millions d'années-lumière, mais ceci est bien inférieur aux échelles cosmologiques) il n'y a pas de zone où les galaxies soient plus ou moins nombreuses, ou différentes. Ce principe s'oppose à toute conception « anthropique » ou géocentrique. Il énonce également que l'Univers est isotrope : non seulement il n'y a aucun point particulier, mais aucune direction particulière non plus : pas de haut et de bas, pas de centre de l'Univers, donc pas de direction vers un centre, pas d'axe de rotation. En l'absence d'indices suggérant le contraire, ce principe est adopté pour construire les modèles cosmologiques.

Cependant, le fondement essentiel des modèles de Big-bang reste l'expansion de l'Univers. Elle se fonde sur ce que l'on appelle l'effet Doppler : lorsqu'un objet (une source) émet un rayonnement, nous voyons ce rayonnement « resserré » (c'est-à-dire avec une fréquence plus grande) si l'objet se rapproche, ou « desserré » (avec une fréquence inférieure) si la source s'éloigne. Lorsqu'une étoile ou une galaxie émet de la lumière (un type particulier de rayonnement, dans le domaine électromagnétique) qui parvient jusqu'à nous, cette lumière est décalée à une longueur d'onde plus petite ou plus grande (vers le bleu ou vers le rouge) si la source se rapproche ou s'éloigne de nous. C'est exactement ce que l'on observe : un décalage vers le rouge d'autant plus prononcé que la galaxie est éloignée. Dans le spectre d'une galaxie, c'est-à-dire dans la décomposition de la lumière qu'elle a émise, les astronomes savent parfaitement reconnaître un éventuel décalage, vers le rouge ou vers le bleu (on le mesure à partir de certaines « raies » présentes à des longueurs d'onde bien définies). C'est ainsi que, depuis Vesto Slipher, les astronomes mesurent les vitesses des galaxies et établissent l'expansion de l'Univers. Quelques physiciens et astrophysiciens ont contesté cette interprétation, mais ils n'ont pas réussi à proposer d'autre explication satisfaisante. L'expansion de l'Univers est donc très fermement établie.

D'autres ont suggéré que l'évolution de l'Univers pourrait être gouvernée par autre chose que la gravitation. Pourtant, toutes les autres interactions connues, par exemple électromagnétiques, sont de portée très limitée. L'univers semble donc bien gouverné par la gravitation, elle-même décrite par la théorie de la relativité générale (cette dernière hypothèse est aujourd'hui discutée : même si les analyses du système solaire et de certains systèmes astrophysiques la confirment<sup>1</sup>, il n'est pas définitivement prouvé qu'elle s'applique à l'échelle de l'Univers entier. Mais aucune autre théorie n'existe actuellement et il reste raisonnable d'admettre sa validité. Au demeurant, l'adoption d'une théorie concurrente ne modifierait sans doute pas les caractéristiques essentielles des modèles de Big-bang).

La relativité générale décrit l'Univers comme un espace-temps, muni de propriétés géométriques (courbure en particulier) qui incluent l'évolution temporelle. Selon la relativité générale, ces propriétés géométriques dépendent, par les équations d'Einstein, du contenu en énergie de l'Univers. Par exemple, la matière massive contribue à ralentir l'expansion. Selon que

---

<sup>1</sup> Voir la 183<sup>e</sup> conférence de l'Université de tous les savoirs donnée par T. Damour.

l'Univers en contient plus ou moins (en moyenne), c'est-à-dire qu'il est plus ou moins dense, l'expansion se ralentira plus ou moins (il est même possible d'envisager qu'elle s'accélère).

Admettant la Relativité Générale et la physique bien établie (électromagnétisme, physique atomique, thermodynamique, physique nucléaire, astronomie etc.) on est inévitablement conduit aux modèles de Big-bang. Pour les contester, et décrire l'Univers par un autre modèle (qui resterait à trouver), il faudrait remettre en cause des pans entiers de notre physique d'aujourd'hui. Par exemple, les partisans des « modèles stationnaires » avaient dû supposer des phénomènes physiques nouveaux : présence de particules de masses négatives, création spontanée de matière (à partir de rien). Aujourd'hui, seuls les modèles de Big-bang réussissent à décrire ce que nous observons, toutes les propositions de modèles concurrents ayant été démenties par l'expérience. Mais peut-être un jour ...

### **Les modèles de Big-bang**

Ces modèles disent en premier lieu que l'Univers est homogène et isotrope, en expansion. Calculs et observations concordent pour établir que cette expansion se déroule sans changement notable depuis une certaine durée  $t_U$ , que l'on appelle âge de l'Univers, actuellement estimé à 15 milliards d'années environ (compte tenu des incertitudes, il vaut mieux dire entre 10 et 25 milliards d'années). Cela implique, conséquence immédiate, que rien dans l'Univers ne peut être plus âgé que  $t_U$ . Or, les estimations d'âges de planètes, étoiles, galaxies, donnent à peu près toutes les valeurs possibles entre 0 et 15 milliards d'années. Un succès pour le Big-bang ! En effet, si l'Univers n'est pas lui-même âgé de quinze milliards d'années, comment comprendre que nous n'observons aucune étoile ou galaxies d'un âge supérieur ?

À cause de l'expansion, la matière cosmique se trouve dans des volumes de plus en plus grands. Autrement dit, elle se dilue et donc, en conformité avec les lois de la physique, se refroidit. En même temps, dilution et refroidissement sont accompagnés d'une lente structuration. Ainsi, les modèles de Big-bang énoncent l'histoire d'un Univers en expansion depuis quinze milliards d'années, en dilution, en refroidissement et qui se structure.

Plus on remonte dans le passé, plus l'Univers était concentré et chaud, moins il était structuré. Il est aujourd'hui peuplé d'objets structurés, aussi bien au niveau microscopique – atomes, molécules, cristaux – qu'au niveau astronomique: des étoiles, des galaxies, des planètes. Rien de tout cela n'existait dans l'Univers primordial. Les modèles de Big-bang permettent de reconstituer l'évolution passée de l'Univers par l'application des lois de la physique. Cela conduit à distinguer deux époques : l'Univers primordial correspond au premier million d'années ; l'ère de la matière qui suit est beaucoup plus longue et dure à-peu-près quinze milliards d'années. Bien que beaucoup plus court, l'Univers primordial fut le siège de nombreux phénomènes d'importance cosmique.

La limite entre ces deux périodes est marquée par une transition, événement très important appelé recombinaison. L'Univers primordial (premier million d'années) était opaque au rayonnement électromagnétique : on ne pourra jamais rien observer directement de cette période. On ne peut que le reconstituer en appliquant les lois de la physique, ce que font les modèles de Big-bang. C'est durant l'Univers primordial que furent fabriqués d'abord les particules élémentaires, puis les noyaux atomiques les plus légers. A la fin, précisément au moment de la recombinaison, furent fabriqués les premiers atomes proprement dits. L'Univers primordial était baigné de rayonnement électromagnétique, dont l'énergie dépassait alors de beaucoup celle de la matière (alors qu'aujourd'hui l'énergie du rayonnement est mille fois inférieure à celle de la

matière). Les atomes n'étant pas encore formés, il n'existait dans l'Univers primordial aucune structure, hormis quelques noyaux d'atomes.

La recombinaison marque le moment où l'Univers devient transparent. Tout ce que les astronomes sont capables d'observer se situe donc plus tardivement. La recombinaison est elle-même un évènement très intéressant car c'est à ce moment-là que fut émis le fameux rayonnement diffus cosmologique, que nous observons tout autour de nous, dans toutes les directions : nous avons l'impression d'être au centre d'une gigantesque sphère brillante de luminosité (en ondes radio) uniforme. Au-delà de cette surface, réside l'Univers opaque inobservable (à cause de la vitesse finie de la lumière, cet « au-delà » possède une signification à la fois spatiale et temporelle). Les plus récentes observations ont montré que l'intensité de ce rayonnement est parfaitement identique dans toutes les directions du ciel, à quelques millièmes près. C'est l'un des arguments forts qui montre qu'il ne peut avoir été engendré que dans le cadre des modèles de Big-bang. En plus de cette remarquable uniformité, il se caractérise par une répartition en énergie extrêmement particulière : un spectre de corps noir, bien connu des physiciens, qui manifeste une situation d'équilibre thermique. L'observation du fond diffus cosmologique indique donc que l'Univers dans son ensemble devait être en équilibre thermique dans un passé très reculé, exactement ce que prédisent les modèles de Big-bang. Les très nombreux résultats d'observation du fond diffus cosmologique (dont les plus fameux par le satellite COBE) confirment de mieux en mieux l'accord exceptionnel entre la réalité et les prédictions théoriques des modèles de Big-bang.

Après la recombinaison, l'Univers entre dans l'ère de la matière, où il commence à ressembler à ce qu'il est aujourd'hui. Le rayonnement électromagnétique perd son influence au profit de la matière. Celle-ci, continuant à se diluer et à se refroidir, commence à s'organiser. Aux petites échelles spatiales, se forment des atomes (à la recombinaison), des molécules, des cristaux, des poussières... Une partie de ces objets, avec le gaz omniprésent (essentiellement de l'hydrogène) s'agglomèrent et donnent naissance aux galaxies, aux étoiles, aux planètes, aux amas de galaxies ... à tous les objets que les astronomes observent dans l'Univers.

### **Géométrie cosmique**

Telle est l'histoire de l'Univers du point de vue de la physique. Cependant, il n'y a pas un seul modèle de Big-bang, mais toute une famille dont les membres se distinguent par certaines caractéristiques de leur géométrie. D'une part l'aspect spatial de cette géométrie conduit à distinguer trois familles selon la courbure spatiale négative, nulle ou positive. Un espace à courbure positive généralise, à trois dimensions, la surface d'une sphère. Un espace à courbure nulle généralise à trois dimensions la surface d'un plan. Il existe en outre des espaces à courbure négative, moins familiers. Les trois versions sont possibles, seules les observations permettent de trancher. Les affirmations récentes selon lesquelles « l'Univers serait plat » correspondent à la version intermédiaire où l'espace est plat (les modèles de Big-bang se distinguent également, en principe, par leur topologie spatiale). Par ailleurs, la loi d'expansion cosmique constitue la partie temporelle de la géométrie de l'espace-temps. L'expansion indique que l'espace-temps ne peut être plat, même si l'espace peut l'être.

La relativité générale permet aussi, en principe, de prévoir le destin de l'Univers. Deux possibilités se présentent, dont nous ne savons pas encore laquelle est la bonne. Ou bien la phase d'expansion continuera indéfiniment. Ou bien elle se terminera et l'Univers débutera une phase de recontraction sur lui-même, processus inverse de l'expansion, qui mènera à une fin *grosso modo*



symétrique au Big-bang, appelée le *big crunch*. Nul ne sait ce qui se passera alors, pas plus que l'on ne sait ce qui s'est passé aux tous premiers instants de l'Univers primordial. Peut-être que l'Univers rebondira pour amorcer une nouvelle phase d'expansion. Peut-être sera-ce la fin de tout, ou ...

Aujourd'hui, certains indices suggèrent que l'expansion pourrait continuer éternellement, voire s'accélérer. Mais tout ceci est à prendre avec de grandes précautions car nous ne savons pas encore précisément lesquels, dans la famille des modèles de Big-bang, conviennent le mieux pour décrire notre Univers. Astrophysiciens et cosmologues s'interrogent sur la courbure et la topologie de la géométrie spatiale, sur la valeur de la constante de Hubble qui mesure le taux actuel de l'expansion, sur la forme précise de la loi d'expansion, accélérée ou décélérée, sur son futur, éternel ou débouchant sur un *big crunch*.

Le plus surprenant est la simplicité, notamment géométrique, de ces modèles cosmologiques fondés sur la relativité générale. Comment se fait-il que des modèles aussi simples décrivent si bien quelque chose d'aussi compliqué que l'Univers dans sa globalité ? Bien entendu, ce n'est pas aux modèles eux-mêmes qu'il faut demander la réponse à cette question. Certains l'oublient un peu facilement et critiquent les modèles à ce propos, mais il faudrait critiquer de même l'ensemble de la physique, sinon de la science. À vrai dire, tenter de comprendre pourquoi un modèle fonctionne exige de se placer dans un cadre plus général, une sorte de super-modèle, de super-théorie. Nous avons d'ailleurs d'autres motivations à cela car aujourd'hui, les deux théories physiques de base, relativité générale et (physique) quantique, sont incompatibles. Outre le malaise que cela suscite d'un point de vue conceptuel, cela interdit de décrire les trous noirs, ou l'Univers primordial. La recherche est extrêmement active, en vue d'une théorie plus fondamentale que la Relativité Générale ou la physique quantique, qui les engloberait chacune comme une approximation (tout comme la relativité générale englobe la physique newtonienne). Cela pourrait mener à une cosmologie (quantique ?) plus globale qui permettrait peut-être de comprendre l'origine du bien fondé des modèles de Big-bang. Cette nouvelle théorie reste encore inconnue même si des pistes intéressantes (cosmologie quantique, supercordes, supersymétrie,...) sont explorées.

### **L'origine du monde ?**

Je ne puis terminer sans évoquer la question de l'Origine de l'Univers, que beaucoup associent au Big-bang. Le lien n'est cependant pas si clair. L'Univers étant en expansion, toutes les dimensions cosmiques augmentent avec le temps (on repère augmentation par l'évolution temporelle d'un facteur d'échelle : toute longueur cosmique augmente avec le temps proportionnellement à ce facteur). Vers le passé primordial, ce facteur d'échelle devient de plus en plus petit, tellement qu'il semble naturel de penser qu'il y eut un moment où il était nul. Ce moment est parfois assimilé à « l'origine de tout », quelquefois appelé Big-bang. À vrai dire, la physique et la cosmologie ne prédisent nullement un tel instant. Elles impliquent certes que le facteur d'échelle et toutes les longueurs cosmiques ont été très petites (en comparaison d'aujourd'hui), mais non pas nulles. On ne peut décrire aucun événement qui correspondrait à une explosion cosmique. La reconstitution vers le passé ne peut être menée jusqu'à un hypothétique instant zéro car les densité, énergie, température, très élevées de l'Univers primordial sortent du cadre de notre physique : elles impliquent qu'effets quantiques et relativistes devraient opérer simultanément, une situation que la physique actuelle est impuissante à traiter (à cause de l'incompatibilité mentionnée). Il est impossible de prolonger la reconstitution vers le passé au-

delà d'une « barrière de non-connaissance » (aucun événement cosmique spécial identifié, mais la limite de notre ignorance). Elle est baptisée barrière de Planck, en référence à la constante de Planck qui caractérise les phénomènes quantiques.

La physique quantique implique que toute grandeur dynamique doit fluctuer. La relativité générale implique que l'espace et le temps sont des grandeurs dynamiques. Espace et temps devraient donc tous deux fluctuer, y compris à l'échelle de l'Univers entier (très ramassé à cette époque). Cela interdit par exemple de savoir si deux événements se déroulent en un même point ou non, à un même instant ou non, si l'un précède l'autre ou si c'est l'opposé. Ces questions perdent même leur sens, ce qui empêche toute approche physique. Sans espace et temps bien définis, on ne peut faire de physique. Peut-être un cadre complètement différent, encore à trouver, permettra-t-il d'opérer sans temps ni espace.

Toujours est-il que la reconstitution du passé de l'Univers ne mène à aucune origine, à aucune création. La simple logique devrait d'ailleurs nous mettre en garde contre une assimilation entre la création de l'Univers et son début temporel. Selon nos conceptions, le temps est partie constituante de l'Univers, si bien que la création de ce dernier (pour autant que ceci ait un sens) intègre la création du temps. Or le temps ne peut être créé au sein d'un temps déjà existant !

Une création de l'Univers, si l'on tient absolument à l'envisager, ce serait la création de l'espace-temps, donc de l'espace et aussi du temps. Elle ne peut pas procéder dans le temps, et ne peut donc qu'être atemporelle. Rien dans la physique ou dans la cosmologie ne permet de parler d'un instant de Création !

Malgré les immenses succès des modèles de Big-bang, il nous faut rester modestes : la cosmologie, et la science en général, ne nous fournira jamais l'explication du monde, et de la place que nous y occupons.

### **Bibliographie**

- Figures du ciel, J.-P. Luminet et M. Lachièze-Rey, Seuil – BnF, 1998.
- Initiation à la cosmologie, M. Lachièze-Rey, Dunod, 1999.
- Du monde clos à l'univers infini, Alexandre Koyré, Gallimard 1973.
- Le rayonnement cosmologique, M. Lachièze-Rey et E. Gunzig, Masson 1995.
- Alexandre Friedmann et Georges Lemaître, Essais de cosmologie, l'invention du Big-bang, Seuil - Sources 1997.
- Connaissance du Cosmos, Marc Lachièze-Rey, Albin Michel , 1987.
- Gravitation and cosmology, Steven Weinberg, 1980, John Wiley and Sons, New York.
- Univers, J. Demaret, Le Mail 1991.
- À la poursuite du Big-bang, J Gribbin, Éditions du Rocher, 1991.
- Chronique de l'espace-temps, A. Mazure, G. Mathez et Y. Mellier, Masson 1994.
- Cosmologies du XXème siècle. Etude Epistémologique et historique des théories de la Cosmologie contemporaine, J. Merleau-Ponty, Gallimard, Paris, 1965.
- Le Big-bang en questions, Science et Vie Hors série n° 189, décembre 1994.