

La nouvelle cosmologie : De l'écume de l'espace-temps à l'univers chiffonné

Jean-Pierre Luminet, lauréat du Prix Lemaître 1999

Département d'Astrophysique Relativiste et de Cosmologie

Observatoire de Paris-Meudon (France)



La cosmologie est l'étude de l'univers dans son ensemble, à toutes les échelles de temps, d'espace et de matière. Cette discipline, vieille de vingt-cinq siècles, a toujours eu un impact philosophique considérable car l'espace est notre demeure, le temps est notre fleuve, la matière est notre substrat.

Dès l'Antiquité grecque, trois grandes questions cosmologiques se sont posées : le temps a-t-il une origine? l'espace est-il fini ou infini? quelle est la composition ultime de la matière? Ce n'est qu'au XX^e siècle que les acquis théoriques et observationnels ont permis d'aborder en profondeur ces questions. La cosmologie contemporaine est en effet fondée

sur les théories de la relativité générale et de la physique quantique, sur les observations accomplies par les grands télescopes au sol et dans l'espace dans les divers domaines de longueurs d'onde, et sur certaines expériences en physique des hautes énergies.

Du modèle classique au modèle standard

Selon la relativité générale, l'univers est décrit par une structure géométrique spatio-temporelle et un contenu énergétique (matière, rayonnements et champs de diverses natures), dont le couplage et la dynamique sont régis par les équations d'Einstein :

GÉOMÉTRIE = ÉNERGIE (1)

Ce cadre formel permet de concevoir une grande variété de modèles d'univers, dont les prédictions caractéristiques doivent être confrontées aux observations. Les astrophysiciens retiennent les solutions qui décrivent un univers homogène et isotrope, c'est-à-dire contenant de la matière uniformément répartie dans l'espace, indépendamment de la direction. Cette hypothèse, en grande partie justifiée par les observations à très grande échelle, implique que la courbure de l'espace est la même en chaque point. Soit cette courbure constante est négative, auquel cas l'espace est de géométrie hyperbolique, soit elle est positive, auquel cas l'espace est de géométrie elliptique, soit elle est nulle, et l'espace est de géométrie euclidienne. Lorsque la distribution de matière est décrite par un fluide parfait de galaxies avec ou sans rayonnement, les solutions exactes des équations d'Einstein sont appelées modèles classiques de Friedmann-Lemaître, du nom de leurs découvreurs (voir Luminet 1997 pour toutes les références historiques mentionnées dans cet article). Le terme "classique" signifie que certains aspects fondamentaux ne sont pas pris en compte, comme les propriétés quantiques de la matière ou les variantes topologiques de l'espace-temps.

Malgré leur grande simplicité, les modèles de Friedmann-Lemaître permettent de dresser de l'univers une impressionnante fresque, longue d'environ quinze milliards d'années, qui conduit à envisager la naissance de

l'espace-temps dans un événement singulier – le big bang –, dont toutes les structures matérielles existantes constitueraient une sorte d'écume. L'évolution cosmique qui s'est déroulée au cours de l'expansion plus ou moins rapide du tissu spatial rend compte de la formation progressive des structures à différentes échelles de taille et de complexité, comme les noyaux atomiques, le rayonnement de fond cosmologique, les nuages d'hydrogène moléculaire, les galaxies, amas et superamas de galaxies, les étoiles et les planètes. Les observations de nature cosmologique comme le noir du ciel, le décalage spectral vers le rouge des galaxies, la proportion des éléments chimiques légers et l'existence d'un rayonnement diffus de corps noir à la température de 2.728 K uniformément réparti sur le fond de ciel sont parfaitement expliqués par les modèles relativistes classiques. En revanche, la structure détaillée des petites irrégularités observées dans le rayonnement de fond, ainsi que diverses questions de physique fondamentale comme l'existence d'une constante cosmologique, le nombre d'espèces différentes de neutrinos, l'asymétrie matière/antimatière, etc., nécessitent un élargissement de la théorie classique.

Ce qu'il est convenu d'appeler la *nouvelle cosmologie* repose sur l'importation de concepts issus de la physique quantique au sein des modèles de big bang classiques : unification des interactions, brisures spontanées de symétrie, défauts topologiques, fluctuations du vide, etc. Le caractère spéculatif de ces apports confère au débat cosmologique actuel une vivacité qu'il n'avait plus connue depuis l'époque où les thèses novatrices de Lemaître changèrent de façon irréversible le cours de la discipline. Nombre de physiciens souffrant d'amnésie (parfois volontaire), il est bon de rappeler point par point les thèses cosmologiques que Lemaître proposa entre 1927 et 1933:

- interprétation des observations du décalage vers le rouge des galaxies par une expansion générale de l'espace, prévue par la théorie de la relativité;

- résolution des équations du champ d'Einstein pour les univers à courbure spatiale constante, constante cosmologique et fluide parfait avec pression, donnant tous les cas de figure possibles pour l'évolution passée et future de l'univers;
- hypothèse de l'atome primitif, c'est-à-dire d'un état initial de l'univers ultra dense et ultra chaud;
- idée que des fossiles de cette époque primitive doivent subsister aujourd'hui sous forme de rayonnements de diverses natures;
- vues originales sur la constante cosmologique, permettant de réconcilier l'âge théorique de l'univers avec l'âge observé des plus vieilles étoiles, permettant également de laisser le temps aux galaxies de se former sur des échelles de temps adéquates, et tentative d'interprétation théorique de cette constante par une redéfinition du niveau zéro de l'énergie gravitationnelle;
- affirmation que la structure locale de l'espace, qu'il soit elliptique, euclidien ou hyperbolique, ne préjuge en rien de sa structure globale, c'est-à-dire de sa topologie;
- idée enfin que l'origine ultime de l'espace-temps ne pourra éventuellement s'expliquer que si l'on dispose d'une théorie unifiée de la relativité et de la physique quantique.

Si certains de ces points ont rapidement été adoptés par la communauté astronomique, d'autres ont traversé un véritable purgatoire avant de resurgir aujourd'hui, tel des sphinx, à la lueur de la "nouvelle" cosmologie. Cette dernière propose un modèle dit standard, toujours bâti sur l'équivalence entre géométrie de l'espace-temps et distribution de matière-énergie stipulée par l'équation relativiste (1), à la différence près que le membre de droite de l'équation est dorénavant traité dans le cadre de la théorie quantique des champs et des modèles de grande unification (GUT).

Il est à noter qu'à ce stade, l'unification qualifiée de "grande" par les physiciens des particules ne porte que sur trois des quatre interactions fonda-

mentales, c'est-à-dire les interactions électromagnétique, faible et forte, ce qui laisse de côté l'interaction gravitationnelle. Malgré tout, certains faits qui restaient inexpliqués par les modèles classiques de big bang, comme l'abondance et la nature de la matière sombre, l'absence d'antimatière, le spectre des fluctuations du fond diffus cosmologique ou l'uniformité de la répartition de la matière à grande échelle, semblent trouver une explication naturelle grâce à cette physique des hautes énergies appliquée à l'univers primitif. Les brisures spontanées de symétrie associées aux découplages des interactions au cours du refroidissement cosmique, l'apparition de défauts topologiques tels que cordes, murs ou textures cosmiques, ou l'avènement de la fameuse inflation – brève période pendant laquelle les dimensions de l'univers primitif auraient augmenté dans des proportions gigantesques – sont des conséquences (bienvenues ou non) de cette approche, qui soulèvent des problèmes cosmologiques nouveaux, non prévus par les modèles classiques.

Quelques opinions orthodoxes en cosmologie

Comme en tout autre domaine de la pensée, ce bouillonnement d'idées neuves n'est pas exempt d'une certaine pensée orthodoxe, qui restreint le débat en l'orientant selon certains partis pris arbitraires. L'opinion orthodoxe en sciences a souvent tendance à devenir conventionnelle. Dirigée dans le double but d'éviter les complications et de publier vite, elle devient hâtive, superficielle et oublieuse de ses sources historiques. D'autre part, en devenant hégémonique, elle tend à freiner le développement d'autres approches qui sont à contre-courant des modes et des effets d'annonce, ou bien exigent une maturation lente. Lemaître a été l'exemple parfait d'un chercheur à la pensée non conventionnelle, et c'est l'une des raisons pour lesquelles certaines de ses idées ont subi d'aussi longs purgatoires.

L'orthodoxie cosmologique a notamment cherché à imposer les trois vues réductrices suivantes :

- la constante cosmologique serait nulle
- l'espace serait euclidien (ou, ce qui revient au même, la densité totale de matière-énergie serait exactement égale à la densité critique)
- la topologie de l'espace serait simplement connexe.

Ces hypothèses restrictives sont en réalité fondées sur des applications douteuses du "principe de simplicité". Or, les arguments de simplicité sont parfaitement subjectifs. Ils varient au cours du temps, dépendant notamment du cadre théorique consensuel et de l'état d'avancement des vérifications expérimentales. Analysons les deux premiers points, ayant trait à l'existence d'une constante cosmologique et au caractère euclidien de l'espace. Le dernier point sera développé en fin d'article.

La constante cosmologique

Les équations du champ relativiste (1) s'écrivent sous la forme générale

$$S_{\mu\nu} = T_{\mu\nu} \quad (2)$$

où S est le tenseur géométrique décrivant les propriétés de courbure de l'espace-temps et T est le tenseur matériel (dit aussi d'impulsion – énergie) décrivant la distribution de matière – énergie. Pour des raisons de cohérence physico – mathématique, S et T doivent être des tenseurs symétriques du second ordre, à divergence nulle, ne dépendant que des potentiels de métrique $g_{\mu\nu}$ et de leurs dérivées premières et secondes, ces dernières y figurant de façon linéaire.

Dans la première version des équations du champ proposée par Einstein (1915), le tenseur géométrique était donné par

$$S_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - 1/2 g_{\mu\nu} R \quad (3)$$

où $R_{\mu\nu}$ est le tenseur de courbure de Ricci et R sa valeur scalaire contractée. Lorsque Einstein (1917) calcula pour la première fois une solution cosmologique sphérique des équations (2), il s'aperçut que sa théorie prédisait un modèle d'univers non statique, c'est-à-dire variable au cours du temps. Persuadé que le rayon de l'univers devait au contraire rester constant, Einstein modifia le tenseur

géométrique S de façon à forcer sa solution à rester statique. Le prix à payer fut l'introduction d'un terme supplémentaire dans (3) :

$$S_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - 1/2 g_{\mu\nu} R + \Lambda g_{\mu\nu} \quad (4)$$

Le paramètre Λ , destiné à "sauver les apparences", avait pour effet d'engendrer une force de répulsion cosmique à grande échelle, contrebalançant la tendance naturelle à la contraction. Il fut baptisé "constante cosmologique". Une décennie plus tard, les apparences changèrent du tout au tout avec la découverte expérimentale de l'expansion cosmique, par Slipher et Hubble, et la constante cosmologique devint apparemment inutile.

Mais la situation n'était pas aussi simple. Dès 1922, Elie Cartan avait démontré que l'expression (4) du tenseur géométrique était la forme la plus générale permettant d'assurer à la relativité générale sa cohérence mathématique. On mesure ainsi le côté arbitraire du principe de simplicité; ici, la propriété de généralité mathématique pouvait parfaitement être invoquée pour définir un nouveau critère de simplicité maximale, dans lequel la constante cosmologique perdait non seulement son caractère superflu, mais acquérait au contraire un statut d'existence impérative. Malgré tout, Lemaître resta seul avocat de la constante cosmologique. Ses échanges verbaux ou épistolaires avec Einstein à ce sujet sont éclairants (voir Luminet, 1997). Après des années de réticence à l'égard des solutions dynamiques, Einstein avait fini par céder aux arguments observationnels et par renier la constante cosmologique, ne cessant d'en regretter le caractère "superflu et abominable". Lemaître soutint qu'au contraire, il fallait impérativement conserver cette constante, répétant sans relâche à Einstein qu'il avait eu "sans le savoir" une idée de génie ! Si Lemaître tenait tant à ce facteur, c'est notamment parce que les modèles dynamiques à constante cosmologique nulle entraient en conflit avec les observations, en produisant un univers trop jeune. En outre, une constante cosmologique à la valeur bien ajustée permettait d'allonger la phase de formation des galaxies, processus qui possédait déjà à l'époque

un problème d'échelle de temps. Lemaître soupçonnait enfin, de façon tout à fait prémonitoire, qu'une justification physique de la constante cosmologique devait résider dans la mécanique quantique, laquelle devrait un jour permettre de fixer le niveau minimum de l'énergie gravitationnelle, qui en relativité n'est définie à une constante additive près.

Lemaître ne parvint jamais à convaincre ni Einstein, ni l'essentiel de la communauté scientifique. La constante cosmologique passa par un long purgatoire. En 1964, le physicien russe Zeldovich concrétisa l'idée de Lemaître en suggérant que le vide quantique possédait une énergie non nulle se manifestant à l'échelle cosmique par une constante cosmologique. Les théoriciens de la grande unification s'intéressèrent de nouveau à ce facteur, mais leurs modèles prédisaient une valeur incommensurablement trop grande de la constante, de sorte que les cosmologistes continuèrent à considérer cette constante comme superflue. Aussi, la plupart d'entre eux furent-ils surpris lorsqu'en 1998, deux équipes différentes d'observateurs, étudiant la luminosité de certaines supernovae T_1 , annoncèrent que l'expansion cosmique s'accélérait au lieu de se ralentir, l'interprétation la plus simple étant une constante cosmologique non nulle, équivalente à une densité d'énergie du vide constante au cours de l'expansion. Mais quelle valeur numérique adopter? L'échantillon de supernovae étudié étant peu profond et les supernovae elles-mêmes étant soumises à des effets d'évolution, la marge d'erreur expérimentale était grande, de sorte qu'il était difficile d'attribuer une valeur numérique précise à la constante cosmologique ainsi "redécouverte".

Nous allons voir comment la deuxième opinion orthodoxe, relative cette fois au caractère euclidien de l'espace, est alors venue à la rescousse pour conférer à la constante cosmologique une valeur parfaitement ajustée.

La courbure de l'espace

En cosmologie relativiste, la courbure (constante) de l'espace est liée à la

densité totale de matière-énergie contenue dans l'univers. Si celle-ci est inférieure à une certaine valeur critique calculée par la théorie, l'espace est hyperbolique; si celle-ci est supérieure à la valeur critique, l'espace est elliptique. À la frontière exacte, l'espace est euclidien. On définit donc un paramètre observable Ω , rapport de la densité réelle à la densité critique. Le cas euclidien correspond à $\Omega = 1$.

Il va de soi que pendant des décennies, la précision des données sur la densité réelle de l'univers était trop médiocre pour fournir d'autre contrainte que l'intervalle $0.01 < \Omega < 2$. Les premiers modèles relativistes d'Einstein (1917) et de Sitter (1917) supposèrent une courbure positive. Les solutions dynamiques découvertes par Friedmann (1922) étaient également à géométrie elliptique, tandis que les solutions hyperboliques furent étudiées dans son second article (1924). Lemaître (1927) examina tous les cas de courbure possibles, tout en privilégiant l'hypothèse elliptique. Robertson et Walker (1929) fournirent la métrique très générale des univers spatialement homogènes et isotropes, contenant l'espace euclidien comme cas très particulier.

C'est alors que se produisit un coup de théâtre épistémologique : en 1932, Einstein et de Sitter, les deux promoteurs de l'univers statique, unirent leurs efforts pour "rattraper leur erreur" et reconnaître enfin la réalité de l'expansion cosmique. Ils publièrent un article d'une page où ils firent valoir qu'un univers en expansion était possible sans introduire ni courbure spatiale, ni pression de matière, ni constante cosmologique. Il suffisait pour cela que la densité de matière fût exactement égale à la valeur critique séparant les cas elliptique (courbure positive) et hyperbolique (courbure négative). Leur solution avait le mérite d'être parée de toutes les vertus liées au "principe de simplicité" : faisant intervenir le nombre minimum de paramètres, elle était plus facilement compréhensible et calculable! En l'absence de toute observation contradictoire, et grâce à ses deux prestigieux signa-

taires, le modèle euclidien d'Einstein - de Sitter devint l'opinion orthodoxe et s'imposa pendant soixante ans, occultant toute la richesse potentielle des solutions de Friedmann-Lemaître.

Dans la mesure où la théorie relativiste de la gravitation fait intervenir des espaces riemanniens naturellement courbes, il peut paraître étrange de supposer que l'espace cosmique ait une courbure globale strictement nulle. Malgré tout, l'orthodoxie euclidienne se vit considérablement renforcée avec les modèles d'inflation développés à partir des années 1980. En effet, les GUT* prédisent que les fluctuations du champ scalaire associé au vide quantique créent des bulles de "faux-vide", c'est-à-dire des régions à pression fortement négative, dont l'effet sur le tissu spatial est d'engendrer une dilatation exponentiellement rapide, le conduisant à acquérir rapidement une géométrie euclidienne. Ce processus singulièrement "lisseur" se serait déroulé vers 10^{35} seconde après le big bang.

Mais ce concept de base, reposant sur une physique encore bien incertaine et sur un champ scalaire inconnu, a engendré de nombreux modèles tentant chacun à leur tour, en vain, d'accorder leurs prédictions théoriques aux données expérimentales (fluctuations de densité dans le rayonnement de fond cosmologique, distribution à grande échelle des amas de galaxies, etc). C'est ainsi que l'on vit successivement fleurir - ou sévir, selon le point de vue - l'inflation ordinaire, l'inflation hybride, la double inflation, l'inflation chaotique, l'inflation hyperbolique, l'inflation éternelle, etc. Sur le plan épistémologique, on ne peut s'empêcher de comparer ces scénarios inflatoires aux épicycles de la théorie planétaire de Ptolémée.

Toutefois, les observations astronomiques suggéraient plutôt un univers de densité sous-critique; les recensements de la matière visible et sombre conduisent en effet à $\Omega_M = 0.3$, impliquant un espace à géométrie hyperbolique, contraire à l'opinion orthodoxe. Une autre source de désaccord, généralement négligée par les astrophysiciens car de nature purement mathé-

matique (tout comme l'argument de Cartan en faveur de la constante cosmologique), est que parmi toutes les géométries possibles pour les variétés riemanniennes tridimensionnelles à courbure constante, la géométrie hyperbolique est *générique*, tandis que la géométrie euclidienne n'est qu'un sous-ensemble de mesure nulle.

Mais l'orthodoxie guette tout événement susceptible de la (ré)conforter. Un tel événement s'est produit en 1998 : la prétendue découverte expérimentale, fondée sur l'étude de supernovae, de l'accélération de l'expansion cosmique. La nouvelle était providentielle. Il suffisait d'oublier les barres d'erreur et d'en extraire la valeur "probable" de la contribution de la constante cosmologique à la densité d'énergie totale: $\Omega_\Lambda = 0.7$, et le tour de passe-passe était joué, puisque $0.3 + 0.7 = 1!$

Bien des articles ont montré depuis les faiblesses des observations de supernovae et la façon dont les nombreux biais observationnels pouvaient parfaitement expliquer les données sans constante cosmologique. Mais rien n'y fait. L'hypothèse orthodoxe $\Omega = 1$ ainsi revigorée ne peut être abandonnée aussitôt. Ajoutons à cela de très récentes observations utilisant soit les données du rayonnement de fond cosmologique (dépendantes d'hypothèses sur la statistique des fluctuations) soit les comptages de galaxies, suggérant elles aussi un univers plat dominé par la constante cosmologique : le couple $(\Omega_M, \Omega_\Lambda) = (0.3, 0.7)$ a toutes les chances de faire office de nouvelle opinion orthodoxe au cours des prochaines années.

L'écume de l'espace-temps

Il y a des questions de fond posées par le modèle standard de big bang, concernant la *singularité initiale* (en mathématiques, une singularité est un point où certaines quantités deviennent infinies; ici la courbure, la température, la densité d'énergie, etc.) et la *topologie* de l'espace-temps. Elles mettent en jeu la validité même de la relativité générale.

Il est courant de souligner que la théorie d'Einstein est incomplète à très

* Grand Unified Theories.

petite échelle de distance (ou, ce qui revient au même, à très haute énergie), dans la mesure où elle n'incorpore pas les préceptes de la physique quantique qui décrit le monde microscopique. Il serait donc extrêmement téméraire d'extrapoler les résultats de la relativité générale jusqu'à des distances arbitrairement petites, en particulier celles correspondant à une singularité. On sait même que l'on ne peut pas le faire à des échelles spatiales inférieures à la longueur de Planck (10^{-33} cm). Cette échelle joue le rôle d'une sorte d'horizon microscopique. Sans savoir ce qui se passe exactement à ces dimensions, les physiciens estiment que la géométrie pourrait devenir elle-même sujette à des fluctuations quantiques, que la relativité classique ne permet pas de prendre en considération.

Or les modèles de big-bang indiquent que le facteur d'échelle spatiale de l'univers a dû atteindre une valeur comparable à 10^{-33} cm dans le passé. À cette "ère de Planck", température et densité étaient énormes, respectivement voisines de 10^{32} K et 10^{94} g/cm³. Dans ces conditions, la relativité générale ne peut être appliquée car les effets quantiques deviennent prépondérants : une théorie de la *gravitation quantique* devient impérative, ou du moins une théorie qui unifie les interactions physiques.

Ceci interdit donc de remonter l'histoire passée de l'univers jusqu'au temps zéro de la singularité. Les lois de la physique s'y sont plus valables, ni même les concepts les plus élémentaires d'espace et de temps. Lorsque l'on essaye d'imaginer les états antérieurs, on débouche sur un flou quantique. Ainsi l'histoire de l'univers ne peut être considérée qu'à partir de l'ère de Planck. Ce n'est pas le "vrai" début de l'univers, mais c'est le début de la période pendant laquelle on peut le décrire, et dans une certaine mesure le comprendre.

Dans le programme ambitieux de quantification du champ gravitationnel lui-même (mettant en jeu des théories de supergravité, supercordes ou membranes, dimensions supplémentaires de l'espace ou autres approches), le membre de gauche de l'équation serait lui-même modifié,

mais à ce jour aucun modèle de gravité quantique consistant et calculable n'est à portée de main, que ce soit au niveau théorique ou expérimental.

Peut-on en dire davantage sur cette ère de Planck qui marque la frontière de nos connaissances? Le cadre habituel de la variété espace-temps, continue, à quatre dimensions, éclate complètement. Une approche possible consiste à considérer qu'au niveau microscopique, la géométrie de l'univers pourrait être "floue", comparable à une sorte d'écume constamment agitée de petites fluctuations : on pourrait la comparer à la surface d'un océan. Vu d'avion, l'océan paraît lisse. A plus basse altitude, sa surface reste continue mais on commence à percevoir quelques mouvements qui l'agitent. Examiné de très près, l'océan est tumultueux, discontinu même puisque des vagues se brisent, projetant des gouttes d'eau qui s'élèvent et retombent. De la même façon, si l'espace-temps paraît continu à l'échelle humaine et même à celle des noyaux atomiques, son "écume" deviendrait perceptible à l'échelle de Planck et produirait des gouttes se manifestant à nous sous formes de particules élémentaires.

Un tel schéma est invoqué dans certains scénarios de naissance spontanée de l'univers par fluctuation spontanée du vide quantique – ce dernier jouant le rôle de l'océan d'énergie. Par exemple, avec "l'inflation chaotique", A. Linde présente une solution (qui n'est qu'approximative) sous forme d'un gigantesque univers éternel et auto-reproducteur constitué d'une "mousse de mini-univers". Chaque bulle de cette mousse aurait ses propres caractéristiques : constantes physiques, nombre de dimensions spatiales, dynamique. Tout notre univers observable ne serait qu'une infime partie de l'une de ces bulles, démesurément gonflée par une expansion ultra-efficace, l'inflation. Même si chaque bulle individuelle - en particulier celle qui constituerait "notre univers" – pourrait naître et mourir, l'univers global ou "multivers" n'aurait ni commencement ni fin. Bien évidemment, ceci ne sera sans doute jamais vérifiable ni observable. On est donc vraiment aux frontières de

l'approche scientifique, et sans doute déjà de l'autre côté.

La topologie de l'univers

Il est moins courant de remarquer que la relativité générale est aussi incomplète à grande échelle spatiale ; en tant que théorie métrique de la gravitation gouvernée par des équations aux dérivées partielles, elle ne permet de traiter que les propriétés géométriques locales de l'univers, et non ses caractéristiques globales comme sa topologie. La relativité générale nous enseigne que l'espace peut avoir une courbure positive, négative ou nulle, mais elle ne nous dit pas quelle est la taille de l'espace, si son volume est fini ou infini, quelle est sa forme. Ce champ nouveau de recherches, appelé *topologie cosmique*, connaît un fort regain d'intérêt depuis un article de synthèse publié par M. Lachièze-Rey et moi-même (1995). On a vu dès lors une croissance exponentielle du nombre d'articles sur la topologie cosmique, provenant de divers groupes à travers le monde (voir par exemple Starkman, 1998, et Luminet, Starkman & Weeks, 1999). Le point de départ est que les univers euclidiens ou hyperboliques, dits "ouverts" car en expansion perpétuelle, peuvent parfaitement être fermés dans l'espace, c'est-à-dire de volume fini, et de taille plus petite que l'espace observé, si leur topologie n'est pas simplement connexe.

Mathématiquement, un espace est dit posséder une topologie simplement connexe si en chacun de ses points, toute courbe fermée peut être continûment contractée en un point; c'est le cas, par exemple, du plan euclidien infini ou de la surface d'une sphère. Dans le cas contraire, la topologie est dite *multiplément connexe*. Toute surface qui possède par exemple un trou (comme un tore ou une sphère munie d'une poignée) est multiplément connexe. A trois dimensions, un modèle simple d'espace plat multiplément connexe est l'hypertore, qui peut se concevoir à partir d'un cube dont les faces opposées sont identifiées. C'est un espace euclidien sans bord ni frontières, mais de volume fini.

Pour une métrique donnée, la topologie la plus simple est celle de l'espace simplement connexe ayant localement cette métrique. Mais la pertinence physique ne se mesure pas nécessairement à l'aune de la simplicité mathématique : les variétés riemanniennes utilisées en relativité générale sont moins "simples" que l'espace euclidien. Dès lors, qu'est-ce qui peut guider le choix du physicien en matière de topologie?

Sur le plan théorique, de nouvelles approches de l'espace-temps, comme celle de la cosmologie quantique, suggèrent la nécessité d'un volume spatial fini pour bâtir des modèles d'univers consistants, et certains calculs de probabilité d'apparition d'univers favorisent les espaces hyperboliques de plus petit volume – ce qui peut fournir un nouveau paradigme de ce qu'on peut appeler l'espace "le plus simple".

Sur le plan expérimental, comment les topologies théoriquement possibles peuvent-elles être confrontées aux observations? Pour un ensemble de valeurs données des paramètres de courbure et de la constante de Hubble, la taille d'un univers hypertextorique peut, par exemple, être aussi petite que 3 milliards d'années-lumière ou aussi grande que l'horizon (15 milliards d'années-lumière). Mais l'évolution des fonctions de luminosité des galaxies et des quasars, le taux de formation d'étoiles au cours de l'histoire cosmique et autres quantités observationnelles de même nature ne permettraient pas de faire la distinction entre ces topologies admissibles. Ce type d'observations ne contraint pas la taille réelle de l'univers. Bien que le rayon de courbure et la constante de Hubble aient des effets importants sur la taille de l'univers *observable*, c'est-à-dire sur le rayon de l'horizon, leur influence sur la taille de l'univers physique est faible. La seule signature topologique possible ne peut venir que des photons effectuant différents trajets dans l'espace multiplement connexe, de sorte que chaque source de radiation peut être vue sous des images topologiques multiples. Si le volume de l'univers est comparable ou plus petit que celui de l'univers observable

(défini par le rayon de l'horizon), il doit exister des signatures de la topologie codées dans la distribution à grande échelle des objets cosmiques et dans le rayonnement de fond cosmologique.

Dans un univers "chiffonné", c'est-à-dire multiplement connexe sur une échelle plus petite que l'horizon, les sources cosmiques (ou les différentes régions du plasma émettrices du fond diffus cosmologique) peuvent être vues plusieurs fois dans des directions différentes et, en général, à des époques différentes, c'est-à-dire des décalages spectraux différents. Dans cette hypothèse, les objets observés comme étant les plus "distants", comme les quasars et les amas de galaxies lointains, ne seraient que les images multiples de sources plus proches, par un effet de mirage topologique dû à la forme même de l'espace. Mais à la différence du mirage gravitationnel, l'espace joue lui-même le rôle de lentille, de sorte que les séparations angulaires et radiales entre les images topologiques se mesureraient généralement par de grandes fractions de π et du rayon de l'horizon respectivement, contrairement aux écarts que l'on rencontre dans les lentilles gravitationnelles, qui se mesurent respectivement en secondes d'arc et en fractions d'année-lumière.

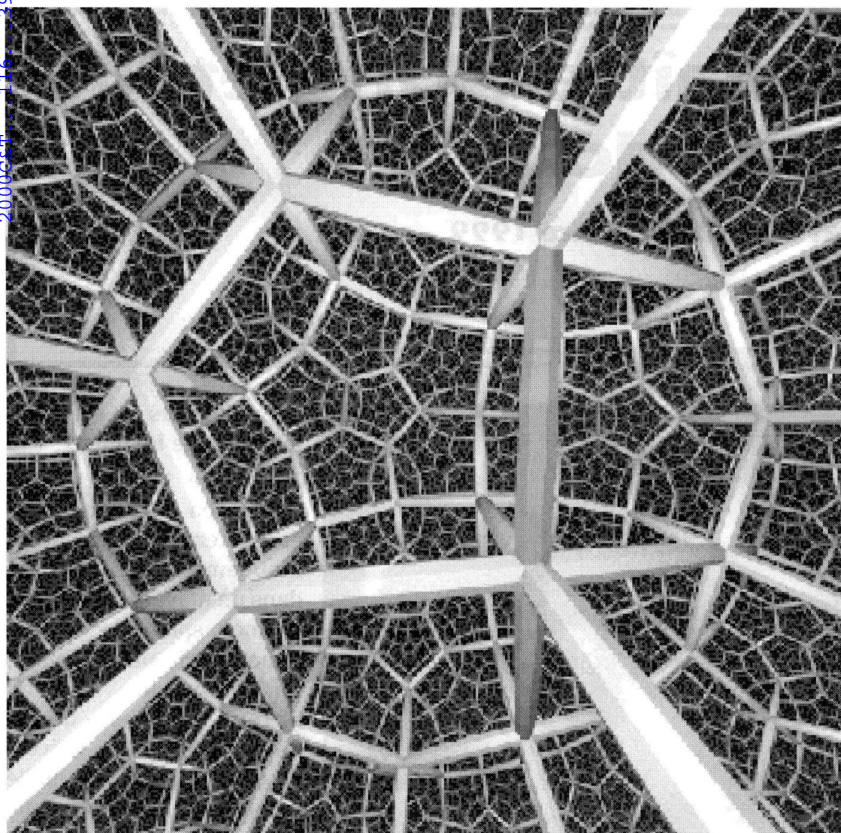
Pour l'instant, les modèles d'espaces chiffonnés plats et hyperboliques sont tout aussi consistants avec les observations sur des échelles comprises entre 3 et 60 milliards d'années-lumière que les modèles correspondants simplement connexes. Des contraintes interdisant un espace chiffonné de taille inférieure entre 3 et 12 milliards d'années-lumière (la limite inférieure dépendant des autres paramètres cosmologiques) ont été avancées par plusieurs groupes, en réalité elles sont davantage liées aux hypothèses qui sont faites sur la statistique des perturbations qu'à la topologie elle-même. Les méthodes de détection expérimentale de la topologie sont encore en phase de perfectionnement, et chacun cherche la stratégie réaliste optimale pour y parvenir.

J.-P. Uzan, R. Lehoucq et moi-même (1999) avons développé une méthode statistique qui devrait permettre de

décélérer sans ambiguïté une topologie "chiffonnée" de l'espace. Cette méthode, dite de *cristallographie cosmique*, tente de repérer dans la distribution tridimensionnelle des objets célestes lointains des corrélations spécifiques qui signaleraient des répétitions de structures analogues à celles des cristaux. Nous avons particulièrement étudié les espaces hyperboliques finis de petit volume, repliés sur eux-mêmes grâce à une topologie complexe, ce qui aurait pour effet de démultiplier les images des galaxies lointaines, faisant paraître l'espace observable plus grand que l'espace réel. En effet, si l'univers est à courbure négative, l'élément de volume spatio-temporel augmente rapidement avec la distance, de sorte que même si le volume de l'univers est proche de celui de l'horizon, de nombreuses "copies" de l'univers peuvent s'insérer à l'intérieur du volume observable. De plus, si la densité totale de l'univers est $\Omega = 0.3$, l'échelle de courbure est suffisamment petite pour laisser place à un nombre gigantesque de topologies différentes, toutes ayant des volumes propres significativement plus petits que le volume propre de l'horizon.

Parallèlement, plusieurs équipes anglo-saxonnes se sont penchées sur la question topologique et ont proposé de tester les modèles d'univers chiffonné en analysant certaines corrélations de température dans le fond diffus cosmologique. Si, par exemple, l'univers est un tore tridimensionnel, alors deux directions différentes du ciel pointent vers le même point de l'espace, et il y doit y avoir des corrélations observables entre les températures du fond diffus cosmologique mesurées à des positions angulaires différentes. Comme la surface de dernière diffusion (lieu des points où fut émis le fond diffus cosmologique à $z \sim 1100$) est sphérique, des *paires de cercles corrélés* le long desquels les profils de température seraient identiques se révéleraient sur cartes du fond diffus cosmologique, à condition qu'une longueur caractéristique de l'espace soit plus petite que l'horizon.

Les méthodes tridimensionnelles de cristallographie et les méthodes bidi-



Structure apparente créée par un espace dodécédrique de courbure négative (variété de Seifert-Weber). De volume fini, relativement petit par rapport aux valeurs habituellement évoquées en cosmologie, il serait peuplé d'un nombre limité de galaxies. Mais le jeu de la multiconnexité de l'espace offrirait de ces galaxies un nombre quasi illimité d'images, parfois qualifiées de "fantômes". Plus encore que les mirages gravitationnels, les mirages topologiques nous plongeraient dans une vaste illusion d'optique, nous faisant paraître l'espace plus vaste qu'il n'est en réalité.

mensionnelles utilisant le fonds diffus cosmologique se complètent et sont en compétition à la fois. La résolution angulaire des données actuelles (COBE) est insuffisante pour détecter d'éventuelles paires de cercles corrélés. Les programmes futurs d'observation du fonds diffus cosmologique à haute résolution (BOOMERANG, MAP et PLANCK), ainsi que le développement de sondages tridimensionnels profonds à différentes longueurs d'ondes (SDSS, XMM) devraient permettre au cours des prochaines années de détecter un éventuel signal topologique et d'en déduire la véritable nature de l'espace. Nous avons par ailleurs démontré comment l'analyse du signal topologique pouvait conduire à une détermination précise des paramètres de courbure traditionnels. Par exemple, la détection de 5 à 10 images topologiques d'un même objet jusqu'à un décalage spectral $z \sim 2$ serait suffisante pour estimer

respectivement Ω_M et Ω_Λ à mieux que 1% et 10% (Roukema et Luminet, 1999).

Ainsi, aux questions : quelle est la forme globale de l'espace, est-il fini ou infini, est-il orienté ou non, a-t-il des trous ou non?, le temps où théorie et observations pourront fournir une réponse claire est peut-être proche, scellant par la même occasion notre connaissance du destin ultime du cosmos : expansion perpétuelle ou contraction.

Conclusion

Georges Lemaître aurait sans doute apprécié que le mot de la fin revînt au poète. Je terminerai donc par une citation littéraire extraite d'une nouvelle bien connue de Jorge Luis Borges, La bibliothèque de Babel. L'intuition de l'écrivain préfigure l'illusion d'optique qui serait créée si nous

vivions dans un univers chiffonné de petite taille :

L'univers (que d'autres appellent la Bibliothèque) se compose d'un nombre indéfini, et peut-être infini, de galeries hexagonales, avec au centre de vastes puits d'aération bordés par des balustrades très basses. De chacun des hexagones, on aperçoit les étages inférieurs et supérieurs, interminablement. La distribution des pièces est invariable. Dans le couloir il y a une glace, qui double fidèlement les apparences. Les hommes en tirent conclusion que la Bibliothèque n'est pas infinie ; si elle l'était réellement, à quoi bon cette duplication illusoire?

Références

- LACHIÈZE-REY M. & J.-P. LUMINET : *Cosmic Topology*, Physics Reports (1995) **254**, 135-214.
- LUMINET J.-P. : *L'invention du Big Bang*, suivi de *Friedmann, Lemaître : Essais de Cosmologie*, Le Seuil, coll. Sources du Savoir, 1997, 342 pages.
- LUMINET, J.-P. , G. STARKMAN & J. WEEKS: *Is Space finite?*, Scientific American, **280**, pp. 90-97 (avril 1999).
- ROUKEMA, B. & J.-P. LUMINET, *Constraining curvature parameters via topology*, Astron. Astrophys. **348**, 8 (1999).
- STARKMAN G., *Proceedings of the Topology of the Universe Meeting (Cleveland)*, Class. Quantum Gravity, **15** (1998), 2529.
- UZAN J.-P., R. LEHOUCQ & J.-P. LUMINET, *A New Crystallographic Method for Detecting Space Topology*, Astron. Astrophys. (1999) **351**, 766-774. ■

