

La géométrie de l'Univers

Si l'Univers avait un «dehors» d'où on pouvait l'observer, la cosmologie serait bien plus facile. Confinés dans l'intérieur, les astronomes doivent déduire la forme de l'Univers de ses propriétés géométriques. L'expérience quotidienne indique que l'espace est euclidien, ou «plat», à petite échelle : deux lignes parallèles ne se coupent jamais, la somme des angles d'un triangle est de 180 degrés, la circonférence d'un cercle de rayon r est $2\pi r$. Toutefois, on ne peut pas en déduire que l'Univers est euclidien à grande échelle : ce serait comme si l'on affirmait que la Terre est plate parce que la surface qui nous entoure semble plate.

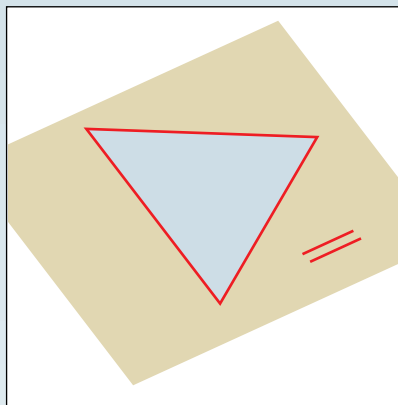
Si l'on admet que l'Univers est homogène (tous les points de l'espace sont équivalents) et isotrope (toutes les directions sont équivalentes), deux autres géométries tridimensionnelles sont possibles. Ce sont les géométries sphérique, ou «fermée», et hyperbolique, ou «ouverte». Elles sont caractérisées toutes les deux par un rayon de courbure, analogue au rayon terrestre. Si le rayon de courbure est positif, la géométrie est sphérique ; s'il est négatif, la géométrie est hyperbolique. Dans les deux cas, l'Univers semble euclidien aux distances inférieures au rayon de courbure.

Dans un univers sphérique, comme à la surface de la Terre, des lignes parallèles se coupent, la somme des angles d'un triangle peut atteindre 540 degrés, et la circonférence d'un cercle est inférieure à $2\pi r$. Comme l'espace se referme, l'univers sphérique est fini. Dans un univers hyperbolique, les lignes parallèles divergent, la somme des angles d'un triangle est inférieure à 180 degrés, et la circonférence d'un cercle est supérieure à $2\pi r$. Un tel univers est de taille infinie, comme l'espace euclidien (il existe des méthodes pour rendre finis les univers hyperbolique et plat, mais elles ne modifient pas les conclusions de la théorie de l'inflation).

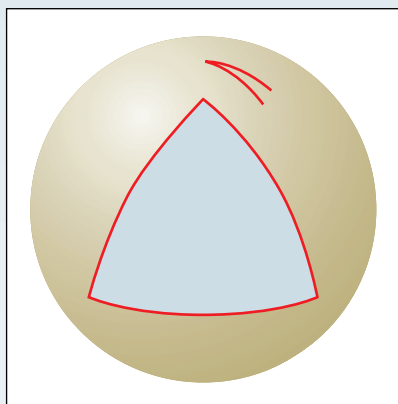
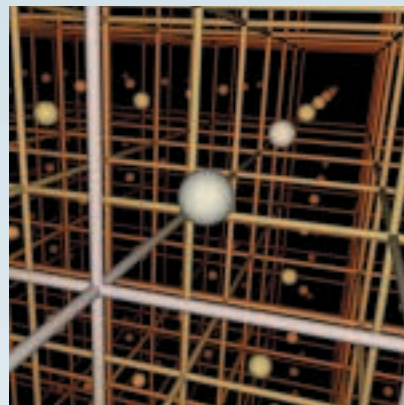
Dans ces trois géométries, les lois de la perspective diffèrent (à droite), et les structures du rayonnement cosmologique doivent apparaître différemment. Les fluctuations les plus grandes ont la même dimension absolue quel que soit le processus spécifique d'inflation. Si l'Univers est euclidien, les fluctuations les plus grandes ont une largeur d'environ un degré. Cependant, si l'Univers est hyperbolique, leur taille apparente n'est que d'un demi-degré, à cause de la déformation géométrique des rayons lumineux.

Des observations préliminaires indiquent que les rides mesurent bien un degré. Si ces résultats se confirment, on devra conclure que la théorie de l'inflation ouverte est fautive, mais attendons les prochaines observations satellitaires.

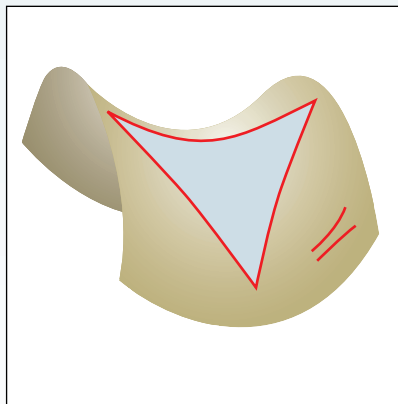
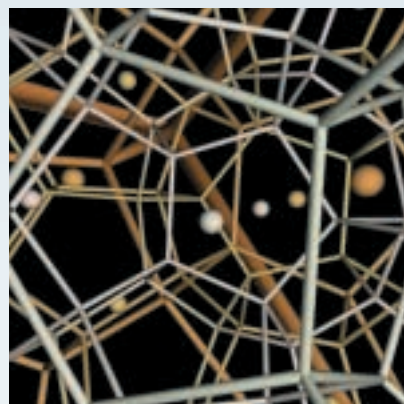
LES TROIS GÉOMÉTRIES à courbure constante sont représentées ici sous deux vues différentes : une vue de l'extérieur d'un espace à seulement deux dimensions (*colonne de gauche*) et une vue de l'intérieur qui montre les trois dimensions de l'espace comprenant un réseau régulier (*colonne de droite*). La vue extérieure montre les règles géométriques de base. La vue intérieure révèle les dimensions apparentes des objets (qui, dans ces diagrammes, sont en fait de la même taille) à différentes distances ; sur ces images, les objets et les repères sont d'autant plus éloignés qu'ils sont plus rouges.



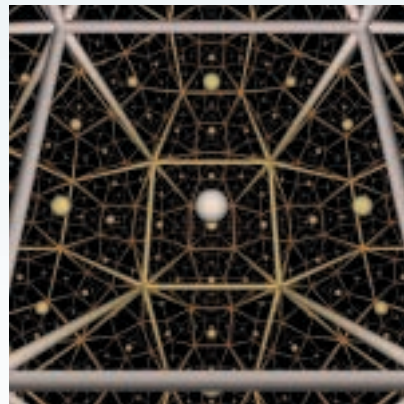
Dans un espace plat, les règles de la géométrie euclidienne s'appliquent. Le diamètre apparent de sphères identiques est inversement proportionnel à leur distance.



Dans un espace sphérique, les propriétés géométriques sont celles d'une sphère. Quand la distance augmente, les sphères semblent d'abord plus petites, leur diamètre apparent passe par un minimum, puis il réaugmente (de même, les méridiens issus d'un pôle ont une séparation maximale à l'équateur, puis se rejoignent au pôle opposé). Le maillage de l'espace représenté ici se compose de dodécaèdres (des solides réguliers à 12 faces).



Un espace hyperbolique a la géométrie d'une selle. Le diamètre apparent des sphères se réduit beaucoup plus vite avec la distance que dans l'espace euclidien. Comme les angles sont plus aigus, cinq cubes peuvent être adjacents par une arête, au lieu de quatre seulement dans l'espace euclidien.



Stuart Levy, National Center for Supercomputing Applications, et Tamara Munzner, Stanford University

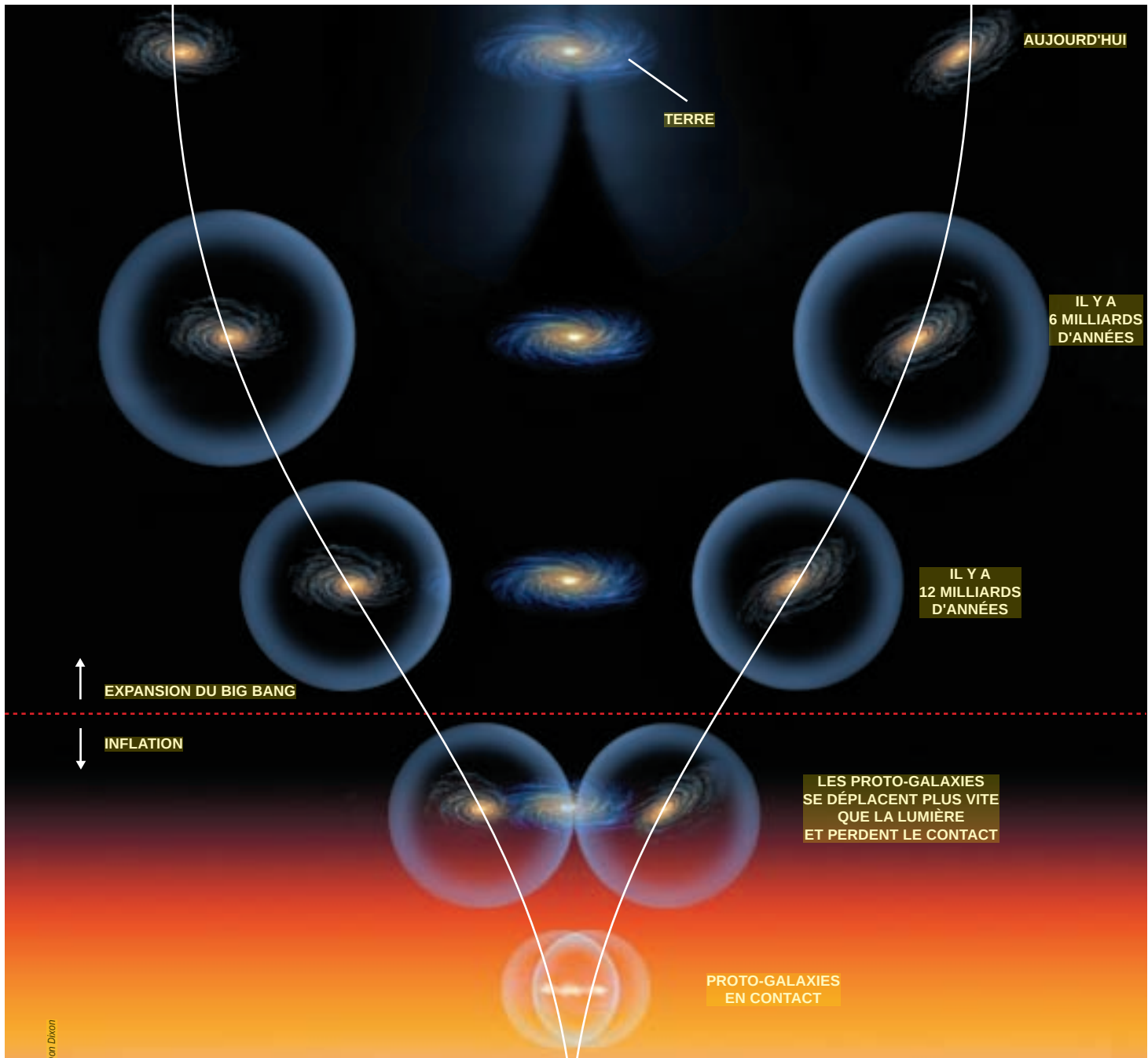
à l'intérieur de la bulle perçoivent comme un «temps» constant. Il diffère du temps mesuré en dehors de la bulle.

Comment un concept aussi fondamental que le temps peut-il être différent à l'intérieur et à l'extérieur de la bulle? Avant l'énoncé de la théorie de la relativité par Einstein, une telle différence aurait semblé impossible, mais,

selon cette théorie, la distinction entre l'espace et le temps disparaît. Ce qu'un observateur nomme «espace» et «temps» est largement une convention. Le temps représente la direction dans laquelle les choses changent et, dans la bulle, le changement est gouverné par l'inflaton.

Selon la théorie de la relativité, l'Univers a quatre dimensions : trois

d'espace et une de temps. Dès que la direction du temps est déterminée, les trois directions restantes doivent être spatiales ; ce sont les directions dans lesquelles le temps reste constant. Nos calculs montrent qu'une bulle d'univers semble hyperbolique de l'intérieur. Pour nous qui sommes dans une telle bulle, un voyage dans l'espace est



4. L'UNIFORMITÉ DE L'UNIVERS est un paradoxe important en cosmologie. Dans l'expansion normale du Big Bang (*en haut*), une telle régularité est impossible. Il y a plusieurs milliards d'années, les galaxies de régions opposées du ciel ont commencé à briller. Malgré l'expansion de l'Univers, leur lumière nous a finalement atteints dans la Voie lactée. Les hommes, observant ces galaxies à l'aide de télescopes, ont remarqué qu'elles paraissaient très semblables. Pourtant la lumière d'une galaxie ne peut avoir atteint une galaxie distante de plus d'une quinzaine d'années-lumière. Com-

ment les galaxies de zones opposées de l'Univers ont-elles harmonisé leurs apparences sans interagir? L'inflation (*en bas*) fournit une réponse. Dans le premier quart de seconde de l'histoire cosmique, les précurseurs des galaxies se touchaient. L'Univers s'est ensuite dilaté à vitesse croissante, les séparant à une vitesse supérieure à celle de la lumière. Depuis, les galaxies n'interagissent plus. Quand l'inflation a pris fin, la lumière a pu à nouveau aller de l'une vers l'autre ; d'ici plusieurs milliards d'années, les galaxies entreront à nouveau en contact.

une trajectoire sur une hyperbole. Regarder dans le passé, c'est regarder vers la paroi de la bulle. En principe, nous pourrions regarder en dehors de la bulle et voir ce qui s'est passé avant le Big Bang, mais, en pratique, l'Univers primordial, dense et opaque, bloque la lumière en provenance de l'extérieur.

L'ouvert dans le fermé

Cette fusion de l'espace et du temps permet de loger un univers hyperbolique et ouvert à l'intérieur d'une bulle sphérique fermée, mais en expansion. Pour un observateur situé dans la bulle, l'espace est un mélange de l'espace et du temps tels qu'ils sont perçus par un observateur situé en dehors de la bulle.

Avec le concept étrange des bulles d'Univers, les cosmologistes peuvent admettre que Ω soit différent de un. Si la théorie de la formation des bulles explique les hyperboles, elle ne précise pas leur taille. Celle-ci est déterminée par le potentiel de l'inflaton et elle varie dans le temps en accord avec la valeur de Ω . Initialement, Ω est nul dans la bulle. Sa valeur augmente pendant l'inflation et tend vers un : les hyperboles commencent avec une forte courbure et elles s'aplatissent progressivement. Le potentiel de l'inflaton impose le rythme et la durée de l'aplatissement. Quand l'inflation dans la bulle prend fin, Ω est en équilibre extrêmement près de un, mais légèrement inférieur. On peut choisir le potentiel de l'inflaton tel que la durée de l'inflation dans la bulle ait juste la bonne valeur (à quelques pour-cent près) et que la valeur actuelle de Ω soit en accord avec la valeur observée.

À première vue, le processus d'inflation en plusieurs étapes semble alambiqué, mais la conclusion principale est simple : l'uniformité et la forme de l'Univers ne sont pas nécessairement reliées. Elles résultent, au contraire, d'étapes différentes de l'inflation : l'uniformité de l'inflaton avant la nucléation de la bulle ; la forme de l'inflaton au sein de la bulle. Comme les deux propriétés ne sont pas liées, le besoin d'uniformité ne détermine pas la durée de l'inflation, qui dure juste assez longtemps pour donner aux hyperboles le degré d'aplatissement désiré.

En fait, cette formulation est une extension directe de la théorie du Big Bang. La vision habituelle de l'inflation

décrit ce qui se passe juste avant l'expansion du Big Bang. La nouvelle théorie, ou théorie de l'inflation ouverte, décrit l'étape qui a précédé. Une théorie qui décrirait des temps encore plus reculés serait nécessaire pour expliquer la création originelle de l'Univers (voir l'encadré de la page 52).

La vie dans une bulle d'Univers a un certain nombre de conséquences intéressantes. Ainsi, un observateur extraterrestre pourrait passer de l'extérieur à l'intérieur de la bulle, mais, une fois à l'intérieur, cet observateur (comme nous) ne pourrait plus en sortir, car cela nécessiterait de voyager à une vitesse supérieure à celle de la lumière.

Une autre conséquence est que notre univers fait partie d'une infinité d'autres bulles immergées dans une vaste écume de faux vide en expansion éternelle. Que se passerait-il si deux bulles entraient en collision ? Leur rencontre produirait une explosion cosmique qui détruirait tout dans les bulles au voisinage du point d'impact. Heureusement, comme la nucléation des bulles est un processus extrêmement rare, un tel cataclysme est peu probable. Même s'il s'en produisait un, une partie notable des bulles resterait intacte : aux yeux des observateurs situés dans la bulle, mais loin de l'impact, l'événement apparaîtrait comme une région très chaude dans le ciel.

Comment tester cette théorie ? Certes, elle explique pourquoi l'Univers est homogène, mais les cosmologistes cherchent des prévisions quantitatives que des travaux d'astrophysique analyseraient. Les conséquences spécifiques de l'inflation ouverte ont été calculées en 1994.

Les théories de l'inflation et de l'inflation ouverte font toutes deux des prévisions fondées sur des effets quantiques, à l'origine de faibles différences

dans la vitesse d'inflation en différents points de l'espace. Quand l'inflation a pris fin, l'excès d'énergie qui subsistait dans le champ d'inflation a pris la forme de rayonnements ordinaires et a provoqué l'explosion du Big Bang. Si la durée de l'inflation a varié selon les points de l'espace, la quantité d'énergie résiduelle a également varié, tout comme la densité de rayonnement.

Le rayonnement cosmologique diffus fournit un instantané de ces fluctuations. Selon l'inflation ouverte, il a été perturbé non seulement par les fluctuations qui existaient à l'intérieur de l'Univers, mais aussi par celles qui naissaient hors de la bulle et se propageaient à l'intérieur. D'autres fluctuations auraient été créées par des imperfections de la nucléation de la bulle. Ces caractéristiques devraient être les plus notables aux échelles les plus grandes : elles nous permettraient de regarder en dehors de notre bulle d'Univers. En outre, l'inflation ouverte devrait avoir d'autres conséquences, purement géométriques (voir l'encadré de la page 55).

Avec la précision actuelle des observations astronomiques, on ne peut savoir si les prévisions de l'inflation ouverte sont mieux vérifiées que celles de l'inflation classique. On ne pourra trancher qu'avec les mesures du *Détecteur d'anisotropies micrométriques*, un satellite que la NASA lancera à la fin de 2000. Un dispositif européen plus perfectionné, nommé *Planck*, devrait être lancé en 2007. Ces satellites effectueront des observations semblables à celles du satellite *COBE*, qui a mesuré le rayonnement cosmologique diffus il y a une dizaine d'années, mais avec une bien meilleure résolution. Si aucune théorie existante ne convenait, les cosmologistes devraient alors trouver de nouvelles idées pour décrire les événements des tout premiers moments de l'Univers.

Martin BUCHER est chercheur à l'Université de Cambridge. David SPERGEL est professeur d'astrophysique à l'Université de Princeton.

Alan GUTH et Paul STEINHARDT, *L'Univers inflatoire*, in *Pour la Science*, juillet 1984.

Eugene F. MALLOVE, *The Self-Reproducing Universe*, in *Sky & Telescope*, vol. 76, n° 3, pp. 253-256, septembre 1988.

P. JAMES, E. PEEBLES, David SCHRAMM, Edwin TURNER et Richard KRON, *L'évolution de l'Univers*, in *Pour la Science*, décembre 1994.

Andrei LINDE, *L'Univers inflatoire auto-reproducteur*, in *Pour la Science*, janvier 1995.

Martin BUCHER, Alfred S. GOLDBABER et Neil TUROK, *Open Universe from Inflation*, in *Physical Review D*, vol. 52, n° 6, pp. 3314-3337, 15 septembre 1995.

J. MATHER et J. BOSLOUGH, *The Very First Light : The True Inside Story of the Scientific Journey Back to the dawn of the Universe*, BasicBooks, 1996.

Alan H. GUTH, *The Inflationary Universe : The Quest for a New Theory of Cosmic Origins*, Perseus Press, 1997.
