

lointaines suggère une deuxième hypothèse : l'existence d'une énergie supplémentaire qui agirait comme de la matière étrange, courbant l'espace comme le fait la matière ordinaire. Elle aplatiserait l'espace, et la théorie de l'inflation n'aurait rien à craindre (voir *L'antigravité*, par Lawrence Krauss, page 42). Pour l'instant, les calculs sont imprécis parce qu'on connaît mal les poussières de l'Univers et la nature des étoiles qui explosent, et ils ne permettent pas de clore (si l'on peut dire) le débat.

Une troisième approche consiste à dissocier la géométrie de l'Univers du processus d'inflation, en incluant dans la théorie la description d'étapes antérieures à l'inflation. Ces idées, explorées au début des années 1980, ont été reprises et développées récemment.

On peut trouver un potentiel associé à l'inflaton tel que l'Univers soit légèrement courbé au lieu d'être complètement plat. Supposons ainsi que la

fonction énergie potentielle possède deux minima : un minimum local et un minimum absolu (voir la figure 2, à droite). Quand l'inflaton roule le long de la pente, l'Univers se dilate en restant uniforme (comme dans la théorie exposée précédemment). Puis l'inflaton reste bloqué dans le minimum local. Les physiciens nomment cet état un « faux vide » : toute la matière et tout le rayonnement du cosmos y sont presque totalement sous la forme de l'énergie de l'inflaton. Les fluctuations inhérentes à la mécanique quantique font osciller l'inflaton et lui permettent de s'échapper du minimum local, par effet tunnel (comme on libère une bille coincée dans un flipper en secouant l'appareil).

La sortie du minimum local, ou désintégration du faux vide, ne s'est pas produite partout en même temps. Elle a d'abord eu lieu en un point quelconque, puis elle s'est propagée. Le

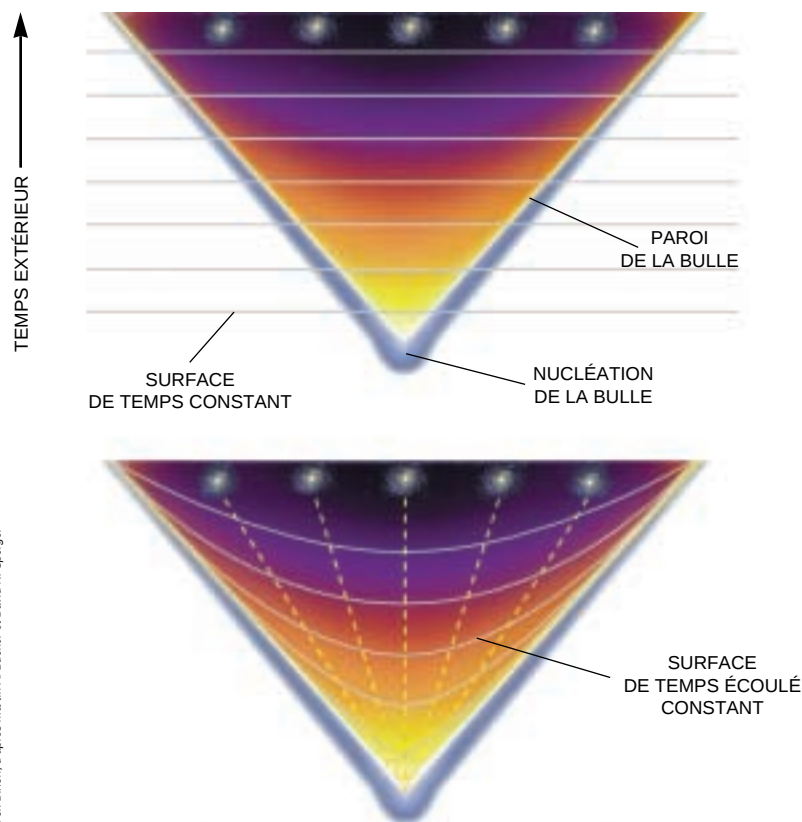
processus est comparable à l'ébullition d'une casserole d'eau : l'eau ne se transforme pas partout instantanément en vapeur. En raison du mouvement aléatoire des molécules, des bulles éparses se forment dans le liquide ; lorsque leur taille est inférieure à une taille critique, elles s'effondrent parce que la tension superficielle est supérieure à leur pression interne ; dans les bulles plus grosses, la pression à l'intérieur surmonte la tension superficielle, et ces bulles croissent.

Notre Univers est une bulle

Dans la désintégration du faux vide, les fluctuations quantiques ont joué le rôle du mouvement moléculaire aléatoire, provoquant la nucléation de bulles de vrai vide. Une force analogue à la tension superficielle a détruit la plupart des bulles, mais quelques-unes ont tant grossi que les effets quantiques sont devenus négligeables. Rien ne s'y opposant, le rayon de ces bulles a continué de croître à la vitesse de la lumière. Quand la paroi externe d'une bulle passe par un point de l'espace, l'inflaton en ce point est délogé du minimum local et il reprend sa descente vers le minimum absolu d'énergie potentielle : au sein de la bulle, l'espace se dilate comme dans la théorie de l'inflation. L'intérieur de cette bulle correspond à notre Univers. Le moment où l'inflaton a quitté le minimum local correspond au Big Bang.

Ce dernier s'est donc produit à des instants différents aux points situés à des distances différentes du centre de nucléation de la bulle. L'inflaton peut alors être utilisé comme un chronomètre : sa valeur en un point de l'espace indique le temps écoulé depuis le Big Bang en ce point. L'inflaton est maximal sur la paroi de la bulle et décroît régulièrement vers le centre. Mathématiquement, la valeur de l'inflaton reste constante sur des surfaces tridimensionnelles de forme hyperbolique (voir la figure 3).

La valeur de l'inflaton n'est pas qu'une grandeur mathématique. Elle a déterminé les propriétés fondamentales de l'Univers au sein de la bulle : sa densité moyenne et la température du rayonnement cosmologique diffus (aujourd'hui égale à 2,7 kelvins). Sur une surface hyperbolique, la densité, la température et le temps écoulé sont constants. Ces surfaces sont ce que les observateurs



Don Dixon, d'après Martin A. Bucher et David N. Spergel

3. UN UNIVERS OUVERT DANS UN ESPACE FERMÉ ? Ce serait possible si l'espace et le temps étaient perçus différemment en dehors (*en haut*) et à l'intérieur (*en bas*) d'une bulle d'Univers. Ici, le temps, mesuré par des observateurs extérieurs, augmente vers le haut de chaque ligne. Par définition, l'espace est n'importe quelle ligne ou surface qui relie des points à un certain temps (*lignes horizontales du schéma supérieur*). La bulle a une courbure sphérique et est donc fermée. Les observateurs intérieurs, toutefois, ne sont conscients que du temps écoulé, l'intervalle depuis que le bord de la bulle a atteint un point donné. Quand le temps écoulé augmente, la température diminue, ce qui entraîne un changement physique (*chaud en jaune ; froid en noir*). Les surfaces de temps écoulé constant sont des hyperboles, qui se courbent vers le haut et ne touchent jamais la paroi de la bulle. Les points internes s'éloignent mutuellement, à cause de l'expansion cosmique (*lignes pointillées*). L'Univers a une courbure hyperbolique et est donc ouvert.

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.

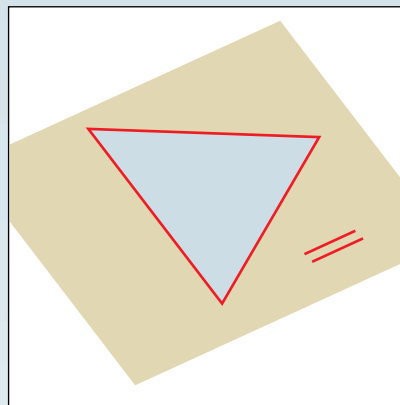
Si l'on admet que l'Univers est homogène (tous les points de l'espace sont équivalents) et isotrope (toutes les directions sont équivalentes), deux autres géométries tridimensionnelles sont possibles. Ce sont les géométries sphérique, ou «fermée», et hyperbolique, ou «ouverte». Elles sont caractérisées 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).

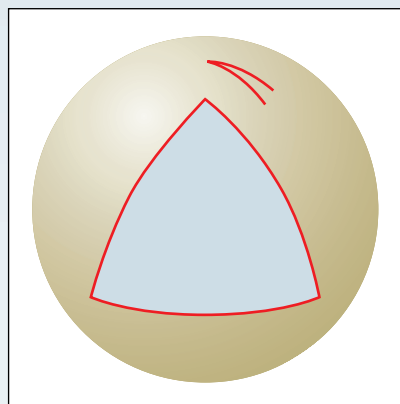
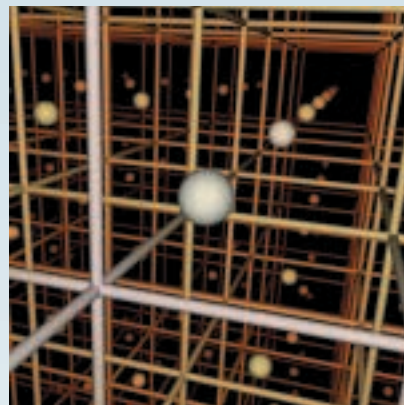
Dans ces trois géométries, les lois de la perspective diffèrent (à droite), et les structures du rayonnement cosmologique doivent apparaître différemment. Les fluctuations les plus grandes ont la même dimension absolue quel que soit le processus spécifique d'inflation. Si l'Univers est euclidien, les 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.

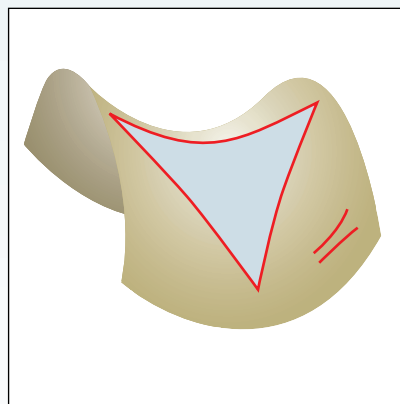
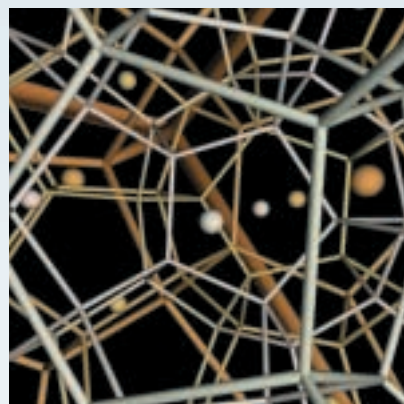
LES TROIS GÉOMÉTRIES à courbure constante sont représentées ici sous deux vues différentes : une vue de l'extérieur d'un espace à seulement deux dimensions (*colonne de gauche*) et une vue de l'intérieur qui montre les trois dimensions de l'espace comprenant un réseau régulier (*colonne de droite*). 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.



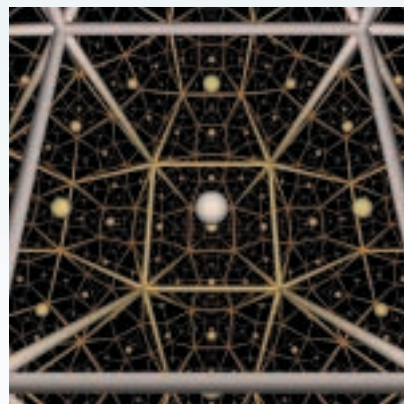
Dans un espace plat, les règles de la géométrie euclidienne s'appliquent. Le diamètre apparent de sphères identiques est inversement proportionnel à leur distance.



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