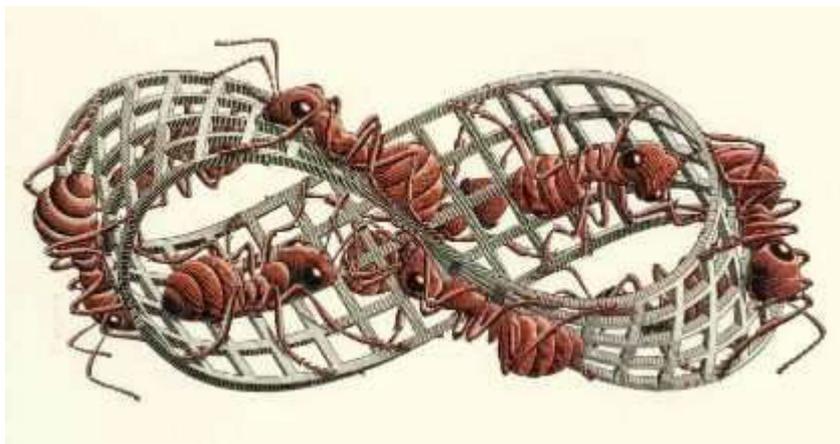


# Cosmologie

Dossier élaboré à partir d'un texte de Thierry LOMBRY publié sur LUXORION  
<http://www.astrosurf.com/luxorion/cosmos-modeleunivers.htm>

## *Les modèles d'Univers*

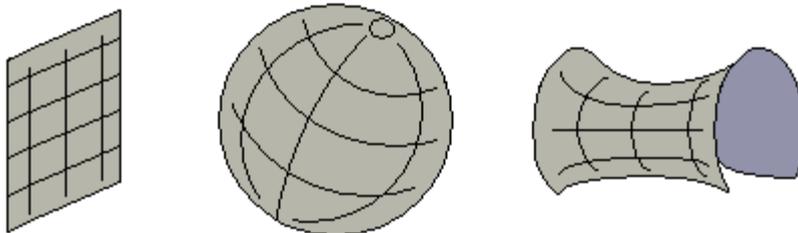
L'étude des formes géométriques d'Univers repose sur la topologie. Ce domaine exotique des mathématiques que chacun connaît à travers le ruban de Moebius, nous dit par exemple qu'une tasse disposant d'une anse et un tore ont la même topologie : tous deux ont un trou dans leur volume, espace qui change la façon dont les éléments sont connectés, déformations qui n'existent pas dans une sphère par exemple.



La topologie s'intéresse seulement aux connexions et ne se préoccupe pas de leur dimensions, de la forme ou de la courbure des objets (en pratique, l'effet de la gravité par exemple).

La topologie pourrait expliquer ce que devient l'espace dans une singularité, si les régions de l'espace-temps sont interconnectées ou non. Avant toute chose, Jean-Claude Pecker, professeur honoraire au Collège de France, nous rappelle qu'il ne faut pas confondre la géométrie de l'univers tridimensionnel  $(x,y,z)$ , et celle de l'espace-temps  $(x,y,z,t)$ .

En topologie, la courbure de l'espace est définie comme étant égale au produit de l'inverse du rayon de courbure de 2 sections principales tracées sur sa surface. Si on coupe par exemple transversalement une sphère, on obtient 2 arcs de cercle de même courbure. La courbure est dite positive. Si on coupe une surface hyperbolique transversalement par rapport à son axe, les deux arcs de cercle ont des courbures en sens opposés. La courbure est dite négative.



La courbure se mesure donc directement sur la surface et ne dépend donc pas du choix des coordonnées. On dit qu'elle est entièrement déterminée par la métrique.

En étudiant la topologie, Friedmann découvrit qu'un univers vide de matière n'était pas plat comme on le pensait jusqu'alors, mais présentait une courbure négative, tandis que l'injection de matière lui donnait une courbure positive. Friedmann découvrit que les formes d'univers se résumaient dès lors à trois principaux modèles en fonction du signe de leur courbure :

- Le modèle **euclidien**, tridimensionnel, s'applique à toutes les formes d'espace respectant les lois de la géométrie classique : deux lignes parallèles ne se rejoignent jamais à l'infini. La surface d'un cercle vaut  $4\pi r^2$ , son volume valant  $4/3\pi r^3$ . L'Univers que nous connaissons peut-être représenté par une surface infinie à deux dimensions. En théorie le modèle euclidien contient 10 variantes qui s'étendent à l'infini et 8 variantes finies, dont l'espace cylindrique et le tore.
- Le modèle **sphérique**, symboliquement représenté par une sphère, dans lequel les postulats de la géométrie d'Euclide ne s'appliquent plus. L'espace se courbe et se referme sur lui-même. Deux lignes parallèles se rejoignent à une distance déterminée par le rayon de courbure, l'aire d'un cercle est inférieure à  $4\pi r^2$ , son volume est inférieur à  $4/3\pi r^3$ . Ce modèle géométrique contient une infinité de formes d'espace finies mais sans limites. Selon ce modèle, notre Univers pourrait être fini tout en n'ayant pas de frontière.
- Le modèle **hyperbolique** (représenté par une selle de cheval mais qui n'aurait pas de centre), dans lequel les lois de la géométrie d'Euclide ne s'appliquent plus non plus. Comprenez bien ce que cela signifie : lorsque la distance double, sur une surface à courbure positive la surface totale reste inférieure au carré du rayon et inversement sur une surface négative hyperbolique ! C'est la raison pour laquelle, mis à plat, la surface d'une sphère présente une échancrure et qu'une surface négative présente des plis. L'aire d'un cercle d'une surface hyperbolique devient supérieure à  $4\pi r^2$  et son volume est supérieur à  $4/3\pi r^3$ . L'Univers est infini. Qu'il soit ouvert ou fermé, le modèle hyperbolique comprend lui aussi un nombre infini de variantes.

Ainsi que nous allons le détailler dans les autres pages de ce dossier, dans ces trois modèles d'Univers, le rayon de courbure de l'espace,  $R$ , varie en fonction du temps. On aboutit ainsi à deux évolutions : s'il croît, l'Univers est en expansion, s'il décroît il est en contraction.

Mais ces concepts sont ambigus. Un univers tridimensionnel hyperbolique ou sphérique peut être en expansion constante, pensez à la fameuse image du ballon qui se gonfle. Mais à quatre dimensions, le même univers peut faire ce qu'il veut, selon la variation du rayon de courbure avec le temps !... La forme de l'espace, à 3 dimensions, dépend donc de la distribution de la matière. Devant cette ambiguïté entre finitude spatiale et temporelle, la plupart des astronomes ont tranché... et préfèrent ne pas utiliser ces concepts.

Dans la pratique, si nous pouvons déterminer la surface ou le volume d'une région de l'espace, nous serons à même de déterminer si l'Univers est plat, ouvert ou fermé (euclidien, hyperbolique ou sphérique). Cependant, cette thèse est physiquement indémontrable car il est matériellement impossible de mesurer l'espace sur des millions, voire des milliards d'années-lumière. C'est donc par le truchement de la quantité de matière qu'il contient que nous pourrions déterminer sa densité, donc son volume et prévoir son évolution. Cette détermination pose de nombreux problèmes et conduit quelquefois à des paradoxes. Seul l'échafaudage de nouvelles hypothèses mathématiques et physiques résolvent ces dilemmes.

## *La création de l'univers*

Plusieurs théories ont vu le jour mais bien peu apportaient une réponse analytique, les outils théoriques et de mesure étant inexistantes ou à peine ébauchés. Au fil du temps, dans les laboratoires ou l'œil rivé à l'oculaire des télescopes, les physiciens et les astronomes accumulèrent une charge d'événements considérables à expliquer.

Tout bascula au début du XXe siècle lorsque les théories furent progressivement étayées par les observations de l'Univers dans le rayonnement radioélectrique puis infrarouge. En l'espace de quelques décennies toutes les croyances primitives ont été balayées. Ces faits expérimentaux permirent aux cosmologistes de travailler sur des modèles d'Univers. Ceux-ci, quelquefois à l'avant-garde de la science et moyennant certaines incertitudes sont en parfait accord avec les observations.

## *L'expansion de l'Univers*

La véritable cosmologie date du XXe siècle. Toutes les conceptions antérieures, malgré un bon sens évident étaient empiriques. Les astronomes se basaient tout au plus sur des observations trop imprécises ou à la limite de la résolution de leurs instruments que pour réellement poser les jalons d'une étude scientifique.

En travaillant sur les spectres de celle qu'on dénommait encore la "nébuleuse d'Andromède", M31, en 1912 l'astronome américain Vesto Slipher nota un léger décalage de ses raies d'absorption par rapport à l'état stationnaire d'un élément équivalent mesuré en laboratoire. En deux ans il déterminera les décalages Doppler d'une quinzaine de "nébuleuses spirales". Mais il n'exploita pas ses observations. Pourtant ces "redshift" ou décalages vers le rouge des systèmes de raies indiquaient que certaines galaxies s'éloignaient de nous - de la Voie Lactée - à plus de 1800 km/s.

Les études sur les spectres s'étalèrent sur dix années si bien qu'avant la découverte de la "récession des galaxies", une première théorie cosmologique fut proposée en 1917 par Willem De Sitter : le modèle stationnaire. En fait l'Univers mathématique de De Sitter ne contient pas de matière, il n'y a pas de mouvement. Mais il suffit d'y incorporer quelques particules pour créer des perturbations; le modèle s'anime, devient instable suite à l'effet gravitationnel, imposant le rapprochement ou la fuite des éléments proportionnellement à leur distance. Il devient dynamique. Voyons comment on obtient cet important résultat.

Dans un univers homogène et isotrope, à courbure constante, l'intervalle entre 2 événements obéit à la métrique FRW où  $r$ ,  $\phi$  et  $\theta$  sont les coordonnées sphériques comobiles :

Puisqu'il est convenu que l'univers est isotrope, l'élément de longueur  $ds^2$  ne dépend pas des angles  $\phi$  et  $\theta$  mais uniquement du **facteur d'échelle**  $R(t)$ .

$$ds^2 = c^2 dt^2 - R(t)^2 \left\{ \frac{dr^2}{(1 + r^2/R_c^2)} + r^2 (d\phi^2 + \sin^2\phi d\theta^2) \right\}$$

Le **rayon de courbure**  $R_c$  affecte les distances dans l'intervalle  $dr$ , de telle manière que 2 points sont séparés d'une distance  $dl$  égale à :

$$dl = R(t) \frac{dr}{\sqrt{1 + r^2/R_c^2}}$$

Si l'on pose  $|k| = (Rc)^{-2}$ , cette équation admet trois solutions :

$k = 0$ , l'espace est euclidien et ouvert

$k = 1$ , l'espace est sphérique et fermé

$k = -1$ , l'espace est hyperbolique et ouvert

En posant le principe de la relativité générale, Einstein transposa ces formules dans l'équation tensorielle du champ gravitationnel, afin de décrire la courbure de l'espace-temps :

$$\frac{(dR/dt)^2}{R^2} + \frac{k}{R^2} = \frac{8}{3} \pi G \rho$$

Le premier terme en  $[t^{-2}]$  est la courbure du temps, le second terme ( $k$ ) est la courbure de l'espace.

Mettons-nous à la place d'Einstein. Il sait que cette équation est dynamique car elle est construite à partir des équations de la gravitation qui donne sa forme et la dynamique de l'espace-temps. En d'autres termes, si elle représente l'univers réel et si l'univers contient de la matière, celle-ci obéit aux lois de la gravitation. Cela signifie aussi que  $dR/dt$  serait positif, que l'univers serait en expansion. L'Univers aurait donc connu un début avec toutes les conséquences que cela impose. Einstein ira à l'observatoire du mont Wilson et demandera aux astronomes s'ils avaient détecté un mouvement global de récession des galaxies. Mais à cette époque, on réalisait à peine les premiers spectres extragalactiques si bien que les astronomes lui répondirent qu'ils n'avaient encore rien détecté de particulier. Einstein en conclut que l'univers était statique.

Rejetant la solution de ses équations, pour résoudre cette difficulté Einstein imagina alors un principe d'isotropie, où la métrique était invariable, le rayon de courbure de l'Univers étant constant. Il introduisit une nouvelle force capable de résister à l'attraction gravitationnelle, la force de répulsion gravitationnelle du vide, baptisée la constante cosmologique. Très faible elle ne se manifeste que sur de grandes distances cosmologiques. A grande échelle en effet, l'énergie du vide a un effet gravitationnel non négligeable sur la géométrie de l'Univers. Plus la constante cosmologique est grande, plus les distorsions spatio-temporelles sont évidentes sur la distance considérée.

Cette constante cosmologique  $\Lambda$  avait déjà été utilisée par Friedmann mais elle nécessitait un choix particulier de conditions initiales pour se conformer à l'univers statique d'Einstein, son équation s'écrivant alors :

$$\frac{(dR/dt)^2}{R^2} + \frac{k}{R^2} = \frac{8}{3} \pi G \rho + \frac{\Lambda}{3}$$

Cette constante  $\Lambda$  impose  $dR/dt = 0$  et du même coup l'univers se vide de matière, puisque celle-ci n'a plus aucun effet et ne courbe plus l'espace-temps. Il était aussi fermé, c'est-à-dire qu'en partant droit devant lui, un observateur situé à la surface de l'Univers reviendrait à son point de départ après avoir parcouru une circonférence complète (en théorie, car en pratique il n'aurait probablement jamais le temps de terminer son tour). Einstein rejoignait l'idée du philosophe autrichien Ernst Mach qui recherchait une théorie du champ totale capable d'unifier les propriétés d'inertie de la matière et la distribution d'énergie dans l'Univers.

Malheureusement pour Einstein, Friedmann démontra à partir de 1922 qu'en supprimant la constante cosmologique il apportait de nombreuses solutions au problème des décalages spectraux analysé par Hubble. L'Univers restait homogène et isotrope mais au lieu d'être fermé et statique il devint dynamique, affecté d'un mouvement d'expansion. Il expliqua le déplacement des raies observé dans les spectres obtenus par Slipher et Hubble en considérant que les spectres des galaxies offraient un décalage spectral d'autant plus important qu'elles étaient éloignées. Friedmann corrigea la théorie d'Einstein en liant le rayon de courbure de l'Univers à une fonction simple du temps :  $t^{1/2}$  si la densité de l'énergie est supérieure à la densité de la matière,  $t^{2/3}$  si la matière prédomine, conformément à la relativité générale. Il s'ensuit qu'à un moment déterminé du passé, l'Univers s'est trouvé concentré en un point unique.

Dans le nouveau modèle d'Univers de Friedmann, si la densité de la matière est supérieure à la densité critique, l'espace se courbe sur lui-même permettant aux lignes parallèles de converger. Plus significatif, dans ce cas la gravité peut ralentir l'expansion de l'Univers et le forcer à décélérer jusqu'à entraîner une phase de contraction dénommée le "Big Crunch". Dans ce cas l'Univers devient elliptique et fermé.

Le facteur de décélération permettant à l'Univers de se contracter est égal au rapport du rayon de courbure actuel de l'Univers sur le rayon de courbure estimé. Il est fixé à 1/2. Il signifie qu'en deçà de 0.5 la décélération est assez faible pour que l'expansion se poursuive indéfiniment. Obéissant à la loi de Hubble, dans ce cas la vitesse des galaxies dépasse la vitesse de libération. La densité de la matière devient négligeable et la taille de l'Univers augmente proportionnellement à la puissance 2/3 du temps.

Einstein, certain que les équations qui décrivaient l'état de l'univers devaient avoir une solution statique, indépendante du temps, pensa que l'article de Friedmann était erroné. A la mi-Septembre 1922 le magazine allemand "Zeitschrift für Physik" reçut cette petite note d'Einstein qui disait d'une manière quelque peu hautaine selon l'appréciation du Pr. V.A. Fock, "*que les résultats de Friedmann semblaient suspects et qu'il y trouva une erreur; après correction, la solution de Friedmann se réduit à celle [de l'état] stationnaire*".

Informé de l'avis d'Einstein par son collègue Krutkov alors aux Pays-Bas, Friedmann écrivit une lettre à Einstein en Décembre 1922, dans laquelle il développa ses calculs et présenta la preuve de l'exactitude de ses résultats, demandant à Einstein s'il lui était possible de publier un addendum à sa note précédente ou un extrait de sa présente lettre. Il semble qu'Einstein n'ait pas attaché beaucoup d'importance à cette lettre, étant quasiment certain que Friedmann s'était trompé.

En Mai 1923 Krutkov rencontra Einstein chez Paul Ehrenfest, à Leiden et finit par persuader Einstein que Friedmann avait raison. Immédiatement après sa rencontre, Einstein envoya la note suivante aux "Zeitschrift für Physik" : "*A propos de l'article de Friedmann "Sur la courbure de l'espace". Ma note précédente a critiqué l'article mentionné ci-dessus. Toutefois, la lettre de Friedmann qui m'a été communiquée par M. Krutkov a éclairci le fait que ma critique était fondée sur un mauvais calcul. Je crois que les résultats de Friedmann sont corrects et jettent une nouvelle lumière [sur ce problème]. On a trouvé que les équations du champ autorisent, en plus des solutions statiques, des solutions dynamiques (c'est-à-dire variable dans le temps) de la structure de l'espace*".

Cette solution sera confirmée par les observations précises d'Edwin Hubble qui devait démontrer en 1927 que le décalage vers le rouge du spectre des galaxies représentait bel et bien un effet Doppler et ne souffrait aucun terme correcteur : l'univers était bien en expansion et les galaxies

suivaient ce mouvement par inertie. Comprenant que  $(dR/dt)/R > 0$ , Einstein reconnu qu'il avait fait "*la plus grande erreur de sa vie*".

Par la suite Einstein continua de reconnaître l'importance du travail de Friedmann dans le développement de la cosmologie moderne. Il écrivit notamment en 1931 : "*Friedmann... fut le premier à débiter dans cette voie*".

## ***L'âge de l'Univers***

Nous pouvons également connaître l'avenir de l'Univers à partir de 3 paramètres (l'indice 0 faisant référence à l'époque actuelle) :

- La **constante de Hubble**,  $H_0$
- Le **facteur de décélération**,  $q_0$
- La **densité de la matière**,  $\Omega_0$ .

Les deux premières méthodes permettent de calculer la distance des galaxies. Leurs valeurs permettent de fixer une limite maximale pour l'âge de l'Univers, appelé l'âge ou le "temps de Hubble". Ces deux méthodes furent améliorées par Allan Sandage en 1970. La constante de Hubble  $H_0$  et le facteur de décélération  $q_0$ , sont tous deux liés à la courbure de l'espace. Ils varient en fonction de la densité de la matière, des amas de galaxies sans oublier l'extinction de la lumière par la poussière.

La *constante de Hubble* détermine à la fois l'âge de l'Univers et son taux d'expansion. " $H_0$ " varie entre 50 et 100 km/s par Mpc. Il y a lieu de prendre la valeur de cette constante avec circonspection, car elle signifie qu'à 1 Mpc la vitesse d'une galaxie oscille entre 50 et 100 km/s. Mais lorsque le décalage vers le rouge (redshift  $Z$ ) égal 1, la vitesse de l'objet serait égale à " $c$ ". Selon la loi d'Einstein il devrait convertir toute sa masse en énergie, or le quasar PC 1247+3406 découvert en 1991 par Donald Schneider donne  $Z = 4.9$ . La constante de Hubble n'est pas linéaire et une correction relativiste s'impose pour rétablir cette concordance.

La formule de Hubble traitée à l'envers permet de connaître le temps écoulé depuis que les galaxies ont commencé à se mettre en mouvement suite à l'expansion de l'Univers. Dans le modèle cosmologique Einstein-De Sitter ( $\Omega = 1$ ) pour une constante égale à 75 km/s/Mpc, on a ainsi  $3.0856 \times 10^{13} / 75 = 4.1 \times 10^{12}$  secondes soit 13 milliards d'années. Inversement, on peut calculer la distance à partir de laquelle nous pouvons atteindre la vitesse de la lumière :  $299792/75 = 3997$  Mpc, soit 13 milliards d'années-lumière. Telle est la distance de l'horizon cosmologique. C'est-à-dire la distance à partir de laquelle le redshift des galaxies devient infini. C'est donc là que se situe le Big Bang, il y a 13 ou 15 milliards d'années d'ici.

Si " $H_0$ " diminue le rapport  $c/H_0$  augmente dans les mêmes proportions, gonflant du fait même le volume de l'Univers. Mais la loi de Hubble présente quelques anomalies. Certaines zones de l'Univers sont vides de quasars, n'appliquant pas la loi de façon linéaire. D'autres régions semblent influencées par des phénomènes gravitationnels locaux combinés avec des phénomènes globaux. Mais d'autres facteurs sont plus trompeurs.

En 1976 Gérard de Vaucouleurs résuma la façon d'évaluer la constante de Hubble en rappelant les différents indicateurs de distances. Malheureusement Sandage et Tammann de l'observatoire du mont Palomar ne l'entendaient pas ainsi et n'utilisaient qu'un seul indicateur de distance pour

chaque échelle. La constante de Hubble évaluée par de Vaucouleurs est en général deux fois plus élevée que celle évaluée par Sandage et son équipe,  $H_0=100$  contre 50 Km/s/Mpc.

En 1994 *Nature* publia deux nouvelles mesures effectuées l'une au Télescope Spatial Hubble, la seconde au télescope CFH de 3.60m de l'île Hawaii s'échelonnant entre 80 et 85 Km/s/Mpc. Aujourd'hui les nouvelles mesures du HST se rapprochent plus encore de 75 Km/s/Mpc. Ces valeurs sont tout à fait en accord avec les mesures de de Vaucouleurs à condition d'inclure l'extinction de la luminosité due à la Voie Lactée.

### ***La nouvelle constante cosmologique***

Jusqu'ici nous nous sommes efforcé de trouver une méthode qui nous permettrait de déterminer la structure de l'Univers. En 1917 déjà, rappelons qu'Einstein considérait que la constante cosmologique était la condition nécessaire pour que l'Univers soit statique, homogène et isotrope. Friedmann corrigea sa théorie en 1922 stipulant que l'Univers pouvait être homogène et isotrope tout en étant en expansion. Il supprima la constante cosmologique qu'Einstein avait introduite. Mais nous avons vu à propos de la théorie inflationnaire que le modèle Standard du Big Bang contient quelques constantes irréductibles qui ne permettent pas de déterminer, à l'heure actuelle, les paramètres de certaines particules élémentaires. Grâce à une nouvelle constante cosmologique, qui reste un artifice de travail, les physiciens peuvent relier tous ces paramètres arbitraires et essayer de cerner les propriétés ultimes de la matière.

En publiant sa théorie de la relativité générale, Einstein démontra que la structure de l'Univers dépendait de l'influence potentielle de toutes les sources d'énergie sur la densité totale. Les théories de symétrie qui manipulent allègrement la physique quantique, permettent au vide d'avoir une densité d'énergie non nulle - l'un des nombreux paradoxes de la physique quantique -. Il s'agit des fluctuations quantiques qui sont fonctions des champs de Higgs. Andreï Sakharov a défini une constante cosmologique qui permet justement de mesurer cette énergie, appelée l'énergie du vide. Mais de la valeur qu'on lui attribue dépend la structure géométrique de l'Univers. Raison pour laquelle sa détermination fait l'objet d'une attention toute particulière. Les théories du Big Bang permettent d'aboutir à une solution, mais les valeurs qu'elles proposent pour cette constante sont en contradiction avec l'observation. Aux yeux des physiciens, cela signifie que le monde des particules élémentaires est loin d'avoir livré tous ses secrets et qu'il existe encore de nombreux problèmes non résolus.

Deux idées doivent nous guider. Nous avons vu à propos de la théorie inflationnaire qu'en physique quantique les équations du champ associées aux particules élémentaires servent à définir la théorie du Big Bang. La célèbre équation d'équivalence d'Einstein nous dit que l'énergie crée un champ gravitationnel comme l'électron en mouvement provoque un champ électromagnétique. Il découle de ces deux observations qu'en mesurant le champ gravitationnel nous avons un moyen de déterminer l'énergie du vide. Le champ gravitationnel ne concerne plus la matière mais bien la densité d'énergie du vide. Or la constante cosmologique est directement proportionnelle à la constante de la gravitation, G. Sa mesure est un jeu très dangereux car de sa valeur dépend plusieurs lois fondamentales de physique.

Si la constante cosmologique  $\Lambda$  permet de mesurer la densité d'énergie du vide, l'une est proportionnelle à l'autre. Il faut alors être très prudent et définir cette constante avec une grande acuité :

$$\Lambda = \frac{8 \pi G}{c^4} R = \frac{1}{\text{distance}^2}$$

avec  $R$ , la densité d'énergie du vide

$G$ , la constante de la gravitation

$c$ , la vitesse de la lumière

$\Lambda$  se définit également comme une distance si l'on calcule la racine carré de l'inverse de cette formule.

Si la théorie du Big Bang se limitait à la gravitation, la constante cosmologique pourrait être déterminée par l'observation seule. Mais les champs de Higgs et les fluctuations quantiques contribuent à la densité d'énergie du vide alors que ces particules sont encore hypothétiques !

À l'échelle de la constante cosmologique, par définition l'énergie du vide a un effet gravitationnel non négligeable sur la géométrie de l'Univers. En corollaire, nous pouvons mesurer la constante cosmologique à partir des propriétés géométriques de l'Univers. Malgré les approximations sur la contribution des particules élémentaires, la constante cosmologique est au moins égale à  $1/(1 \text{ km})^2$ . Plus la constante cosmologique est grande, plus les distorsions spatio-temporelles sont évidentes sur la distance définie... Si la constante cosmologique est proche de zéro, plus l'espace-temps paraît euclidien. Dans ce cas les effets gravitationnels n'apparaîtraient qu'à très grande échelle. Étant donné qu'il ne semble pas y avoir de distorsions spatio-temporelles à l'échelle galactique (10 milliards d'années-lumière), on peut également fixer une limite supérieure à  $1/(10^{23} \text{ km})^2$ , valeur en parfait accord avec le modèle standard du Big Bang. Plus insidieusement, cela signifie que les composantes de l'équation qui définit la constante cosmologique contribuent dans un rapport de 46:1 à cette marge d'erreur!

Quelle relation existe-t-il donc entre les paramètres du Big Bang ? Existe-t-il une solution idéale? Les astrophysiciens ont tendance à donner une valeur très faible à la constante cosmologique, en accord avec les résultats des observations. Pour clore ce débat, ils doivent fixer les paramètres "libres" de la théorie du Big Bang - c'est l'objectif de la théorie de l'inflation chaotique qui accepte des paramètres arbitraires - et donc modifier les modèles actuels. Ils peuvent préciser la distribution des galaxies lointaines, évaluer leurs vitesses et leurs déplacements pour déduire la structure géométrique de l'espace. Ils peuvent également proposer une masse non nulle du photon au repos. Si les chercheurs souhaitent unifier toutes les théories, ils devront également préciser la constante cosmologique avec une précision de  $1/10^{46}$ ...

Si solution il y a, ils devront peut-être redéfinir la notion de vide ou de continuum espace-temps. L'effet d'une telle remise en question bouleverserait nos lois physiques; les physiciens seraient dans une impasse... Au vu de ces difficultés, en 1985 G.Ellis mettait en doute la validité de la théorie inflationnaire à peine âgée de quelques années, estimant qu'en inventant de nouvelles particules dans l'espoir de résoudre leurs problèmes, les physiciens n'ont fait que les reposer : "*Il n'existe pas de faits dit-il, qui corroborent cette théorie et la seule prédiction qu'elle fasse apparaît incorrecte. [...] de nombreux théoriciens ont accepté de renoncer au rasoir d'Occam et ont admis des circonvolutions additionnelles*".

Mais les observations du satellite COBE ont infirmé les propos de G.Ellis. Nous avons également vu de quelle manière les travaux d'Andrei Linde et consorts nous permettent d'entrevoir une solution. Mais de l'aveu même de l'un des plus grands cosmologistes, Linde se demande s'il ne faudrait pas faire appel au principe anthropique. C'est une opinion individuelle mais c'est aussi un principe universel qui soulagerait les physiciens de nombreux maux de tête.

Grâce à cette pléthore d'informations, nous pouvons à présent dresser un tableau plus précis de la théorie du Big Bang. Mais soyons prudent.

Les processus qui conduisirent à la production de la matière ont suivi des mécanismes très complexes dont on ne peut extraire que des estimations. Malgré ce flou sur le taux de désintégration, sur le rapport proton/neutron ou photon/baryon, les physiciens peuvent expliquer la genèse de l'Univers. Le modèle inflationnaire doit expliquer la formation des éléments et des corps célestes, tout en gardant son isotropie et une homogénéité à grande échelle. Ce modèle doit pouvoir se prononcer jusqu'à  $10^{-43}$  sec, en attendant de considérer les quatre interactions fondamentales comme unifiée.