

# L'Univers inflatoire autoreproducteur

ANDREI LINDE

*L'Univers semble être composé de bulles qui se forment sans cesse, constituant une mousse éternelle.*

**D**evrons-nous bientôt abandonner l'idée que l'Univers s'est créé par expansion d'une boule unique, extrêmement chaude et dense? Mes collègues et moi avons quelques raisons de penser que cette théorie du Big Bang est fautive : notre nouvelle théorie se fonde sur la notion, apparue il y a 15 ans, que l'Univers a connu une période d'«inflation» au cours de laquelle il a grossi exponentiellement en une fraction infinitésimale de seconde ; après la phase d'expansion, l'Univers a poursuivi son évolution selon le modèle du Big Bang. Les cosmologistes, en affinant la théorie inflatoire, ont découvert des conséquences surprenantes : au lieu d'être une bulle incandescente en expansion, l'Univers serait une énorme mousse fractale qui se régénérerait en permanence ; il se composerait de nombreuses bulles, qui se dilateraient, produiraient de nouvelles bulles, lesquelles engendreraient ensuite d'autres bulles, et ainsi *ad infinitum*.

Les cosmologistes n'ont pas imaginé arbitrairement cette vision nouvelle de l'Univers. L'hypothèse inflatoire, qui en est le fondement, fut introduite, parce que la théorie du Big Bang présentait quelques insuffisances. Dans la théorie standard du Big Bang, l'Univers est né il y a 15 milliards d'années d'une singularité cosmologique – un état de température et de densité infinies. Naturellement nous ne pouvons pas vraiment considérer ces grandeurs comme infinies ; on suppose généralement que les lois de la physique, telles que nous les connaissons, ne s'appliquent pas à cette époque. Elles n'entrent en vigueur que lorsque la densité de l'Univers a chuté

pour atteindre la densité de Planck, soit environ  $10^{97}$  kilogrammes par mètre cube.

L'expansion de l'Univers s'est accompagnée de son refroidissement progressif. Un vestige de la boule de feu cosmique nous environne sous la forme du fond diffus de rayonnement cosmologique, qui indique que la température de l'Univers n'est plus, aujourd'hui, que 2,7 kelvins (soit -270 degrés Celsius environ). La découverte du rayonnement cosmologique par Arno Penzias et Robert Wilson, en 1965, fit beaucoup pour établir la théorie du Big Bang, laquelle expliquait bien l'abondance de l'hydrogène, de l'hélium et des autres éléments chimiques dans l'Univers.

Toutefois, en développant cette théorie, les cosmologistes se heurtèrent à des problèmes compliqués. Par exemple, la théorie standard du Big Bang, couplée à la théorie moderne des particules élémentaires, prédit l'existence de particules supermassives, porteuses d'une charge magnétique – c'est-à-dire des objets ne possédant qu'un seul pôle magnétique ; la masse de ces monopôles magnétiques serait  $10^{16}$  fois supérieure à celle du proton, soit environ 0,00001 milligramme. La théorie standard du Big Bang prédit que ces monopôles devraient être apparus très tôt dans l'évolution de l'Univers et qu'ils seraient aujourd'hui aussi abondants que les protons. Dans cette hypothèse, l'Univers serait  $10^{15}$  fois plus dense qu'il n'est actuellement (sa densité actuelle est égale à  $10^{-26}$  kilogramme par mètre cube).

Cette difficulté et quelques autres ont amené les physiciens à examiner

plus attentivement les hypothèses fondamentales qui sous-tendent la théorie cosmologique standard. Beaucoup d'entre elles ont paru douteuses, et six, notamment, semblent difficiles à admettre. La première, la principale, est l'existence même du Big Bang. Qu'y avait-il avant? Si l'espace-temps n'existait pas alors, comment rien a-t-il engendré tout? Qu'est-ce qui est apparu en premier lieu, l'Univers ou les lois qui gouvernent son évolution? Expliquer cette singularité initiale – où et quand tout a commencé – demeure le problème le plus insurmontable de la cosmologie moderne.

La planéité de l'espace est une seconde difficulté. Selon la théorie de la relativité générale, l'espace pourrait être très courbé, avec un rayon de l'ordre de la longueur de Planck, soit  $10^{-35}$  mètre. Toutefois nous observons que notre Univers est plat sur des distances de  $10^{26}$  mètres (le rayon de la partie observable de l'Univers). Ce résultat d'observation diffère des prévisions théoriques de plus de 60 ordres de grandeur!

## Les insuffisances du Big Bang

Le fossé entre la théorie et l'observation est analogue à propos de la taille de l'Univers. Des études cosmologiques montrent que notre portion d'Univers contient au moins  $10^{88}$  particules élémentaires. Pourquoi l'Univers est-il si massif? Si nous considérons un univers de taille initiale donnée par la longueur de Planck et d'une densité initiale égale à la densité de Planck, l'application de la théorie standard du Big Bang indique que l'Univers tout

entier ne pourrait renfermer qu'une seule particule élémentaire – dix tout au plus. La théorie présente incontestablement un défaut.

Le quatrième problème concerne la chronologie de l'expansion. Dans sa forme standard, la théorie du Big Bang suppose que toutes les parties de l'Univers sont entrées simultanément en expansion. Comment toutes les parties de l'Univers ont-elles synchronisé le début de leur dilatation? Qui donna le signal?

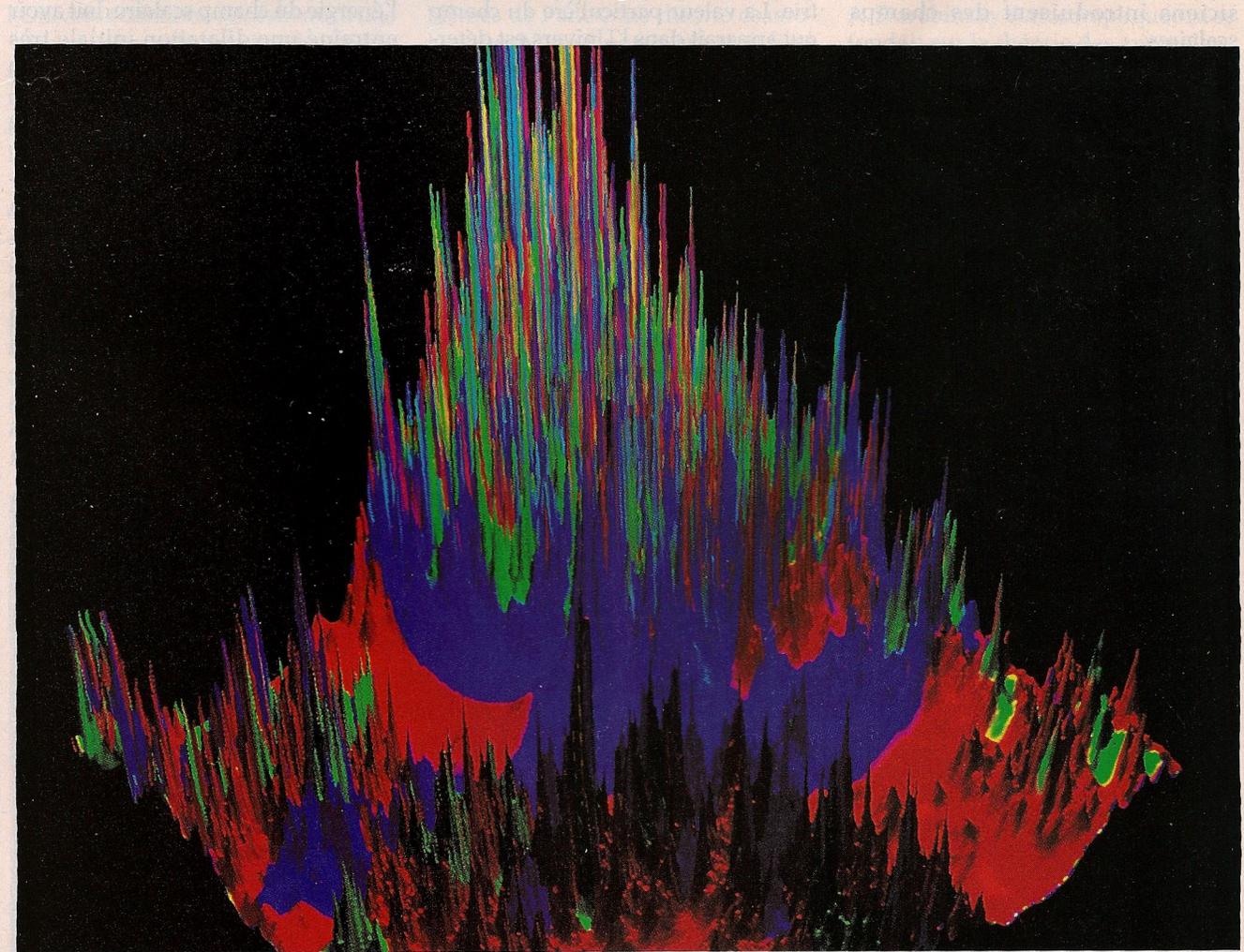
Ensuite se pose la question de la répartition de la matière dans l'Univers. À grande échelle, la matière se répartit de manière remarquablement uniforme : sur plus de dix milliards d'années-lumière, l'homogénéité est parfaite à moins d'un dix-millième près. Pendant longtemps, personne n'a compris pourquoi l'Univers est si homogène, mais les principes ont pallié le manque d'idées : l'un des piliers de la cosmologie standard est le «principe

cosmologique», qui stipule l'homogénéité de l'Univers. Comment admettre cette hypothèse et reconnaître simultanément que l'Univers comporte des hétérogénéités aussi considérables que les étoiles, les galaxies et les divers autres amas de matière? Si l'Univers est si uniforme à grande échelle, nous devons trouver un mécanisme qui explique la formation des galaxies.

Enfin les cosmologistes rencontrent le problème de l'«unicité», qu'Albert Einstein avait envisagé quand il avait observé : «Ce qui m'intéresse vraiment, c'est de savoir si Dieu avait le choix dans la création du monde.» Si les constantes physiques avaient été un peu différentes, l'histoire de l'Univers aurait pu changer du tout au tout. Par exemple, selon de nombreuses théories des particules élémentaires, l'espace-temps initial avait bien plus de quatre dimensions (trois spatiales et une temporelle). Afin de concilier les calculs théoriques avec le monde

physique qui nous entoure, ces modèles affirment que les dimensions supplémentaires se sont progressivement réduites jusqu'à devenir imperceptibles. Pourquoi le rétrécissement s'est-il arrêté à quatre dimensions, et non à deux ou à cinq?

En outre, la façon dont certaines dimensions ont rétréci est importante, car elle détermine les valeurs des constantes de la nature et la masse des particules. Selon certaines théories, le compactage peut se produire d'une multitude de manières différentes. Il y a quelques années, on ne se serait sans doute pas demandé pourquoi l'espace-temps a quatre dimensions, pourquoi la constante de gravitation est si petite ou pourquoi le proton est 2 000 fois plus massif que l'électron, mais, aujourd'hui, en raison des progrès de la physique des particules élémentaires, l'étude de ces questions est cruciale pour comprendre l'architecture de notre monde.



1. UN UNIVERS AUTOREPRODUCTEUR, simulé par ordinateur, se compose de domaines gigantesques ayant chacun leurs propres lois physique (représentées par les couleurs). Les pics étroits sont les nouveaux «Big Bang» ; leur hauteur correspond à la densité d'énergie

de l'Univers qui se crée. Au sommet des pics, les couleurs fluctuent rapidement, parce que les lois physiques n'y sont pas encore stabilisées. En revanche, elles sont figées dans les vallées, dont l'une correspond au type d'Univers où nous vivons aujourd'hui.

## La rénovation cosmologique

Tous ces problèmes (et d'autres que je n'ai pas mentionnés) sont extrêmement déroutants. Voilà pourquoi il est encourageant que nombre de ces énigmes soient résolues par la théorie de l'Univers inflatoire autoreproducteur.

Le scénario inflatoire se fonde sur la physique des particules élémentaires, examinons brièvement le monde unifié des interactions faibles et électromagnétiques. Ces deux types de forces s'exercent par l'intermédiaire de particules : les photons transmettent les forces électromagnétiques, et les bosons W et Z transmettent les forces nucléaires faibles. Tandis que les photons sont sans masse, les particules W et Z sont extrêmement lourdes. Pour unifier les interactions faibles et électromagnétiques, malgré les différences manifestes entre le photon et les particules W et Z, les physiciens introduisent des champs scalaires.

Les champs scalaires ne sont pas familiers, mais il en existe des analogues simples, tel le potentiel électrostatique, dont on mesure des différences (les « tensions ») dans les circuits électriques. Les champs électriques n'apparaissent que lorsque le potentiel électrostatique varie selon les points de l'espace, comme, par exemple, entre les pôles d'une batterie, ou lorsqu'il varie au cours du temps. Si l'Univers tout entier était au même potentiel électrostatique, égal à 110 volts par exemple, personne ne le remarquerait ; le potentiel semble

rait n'être qu'un autre état vide. Plus généralement, les champs scalaires constants sont analogues au vide : nous ne les ressentons pas, quand bien même nous y serions plongés.

Ces champs scalaires qui baignent l'Univers se manifestent en agissant sur les particules élémentaires. Un champ scalaire interagissant avec les particules W et Z leur confère une masse. Les particules n'interagissant pas avec ce champ scalaire, tels les photons, conservent une masse nulle.

Ainsi, pour décrire la physique des particules élémentaires, les physiciens utilisent une théorie où toutes les particules sont initialement de masse nulle et où il n'existe aucune différence fondamentale entre les interactions faibles et les interactions électromagnétiques. Cette distinction apparaît plus tard, lorsque l'Univers se dilate et s'empli de divers champs scalaires. Le mécanisme de séparation des forces fondamentales est une brisure de symétrie. La valeur particulière du champ qui apparaît dans l'Univers est déterminée par la position du minimum de son énergie potentielle.

### Les champs scalaires

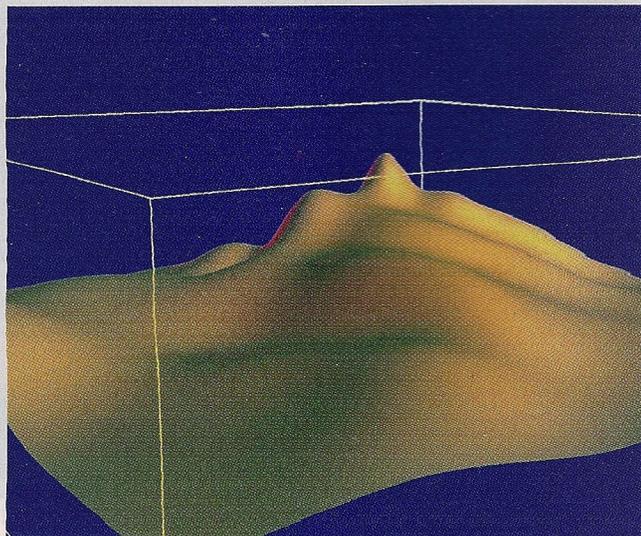
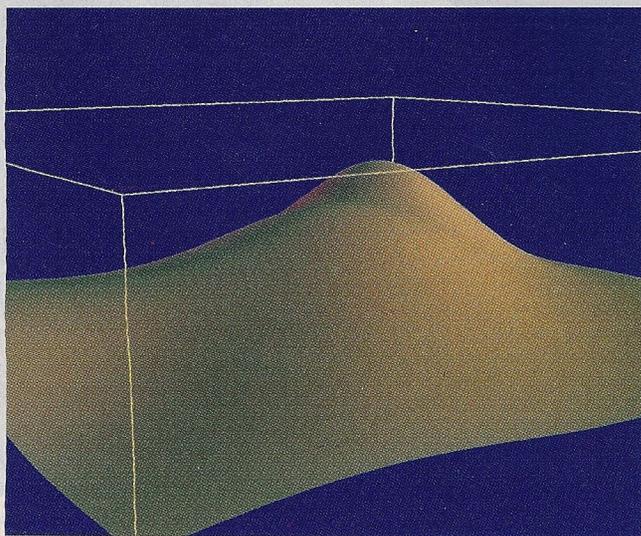
Les champs scalaires jouent un rôle important en cosmologie et en physique des particules : ils sont responsables de la rapide inflation de l'Univers. En effet, selon la relativité générale, l'Univers se dilate à une vitesse proportionnelle à la racine carrée de sa densité. Si l'Univers était plein de matière ordinaire, sa densité diminuerait rapidement en raison

de l'expansion, et l'expansion de l'Univers ralentirait avec la décroissance de la densité. Toutefois, en raison de l'équivalence (établie par Einstein) entre la masse et l'énergie, l'énergie potentielle du champ scalaire contribue également à l'expansion. Dans certains cas, cette énergie décroît bien plus lentement que la densité de la matière ordinaire.

### L'inflation

La persistance de cette énergie peut conduire à une phase d'expansion extrêmement rapide de l'Univers : l'inflation. Cette possibilité se manifeste même quand on ne considère que la version la plus simple de la théorie du champ scalaire : quand l'énergie potentielle est minimale au point où le champ scalaire s'annule. Dans ce cas, plus le champ scalaire est grand, plus l'énergie potentielle est élevée. Selon la théorie de la gravitation, l'énergie du champ scalaire doit avoir entraîné une dilatation initiale très rapide de l'Univers, et l'expansion ne s'est ralentie que lorsque le champ scalaire a atteint l'énergie potentielle minimale.

On peut représenter le champ scalaire par une bille qui roule dans un bol (voir la figure 3) : le fond du bol représente l'énergie minimale ; la distance latérale de la bille par rapport à l'axe du bol correspond à la valeur du champ scalaire. Naturellement les équations décrivant l'évolution du champ scalaire (le mouvement de la bille) dans un Univers en expansion sont plus compliquées que les équations de la



2. L'ÉVOLUTION D'UN CHAMP SCALAIRE conduit à de nombreux domaines inflatoires, comme l'illustre cette séquence d'images créées

par ordinateur. Dans la plupart des régions de l'Univers, le champ scalaire décroît (ce que représentent les dépressions et les val-

bille dans un bol vide ; elles contiennent notamment un terme de «viscosité», qui correspond au frottement. Imaginons que le bol est plein d'une sorte de miel liquide, dont la viscosité dépend de l'énergie du champ : plus la bille est haut dans le bol, plus le liquide est épais. Ainsi, si le champ scalaire était initialement très grand, l'énergie a diminué extrêmement lentement, parce que la bille n'est redescendue que très lentement vers le fond du bol.

Cette lenteur de l'affaiblissement du champ scalaire influe sur la vitesse d'expansion : la décroissance était initialement si lente que l'énergie potentielle du champ scalaire est demeurée quasi constante au cours de la dilatation de l'Univers. Ce comportement est bien différent de celui de la matière ordinaire, dont la densité diminue rapidement quand l'Univers se dilate. Grâce à la grande quantité d'énergie du champ scalaire, l'Univers a continué de se dilater à une vitesse bien supérieure à celle prédite par les théories cosmologiques pré-inflationnaires. La taille de l'Univers a augmenté exponentiellement au cours de l'inflation.

Cette inflation auto-entretenue, exponentiellement rapide, aurait duré seulement  $10^{-35}$  seconde. Quand l'énergie du champ a diminué, la viscosité s'est presque annulée et l'inflation a pris fin. Comme une bille qui roule dans le fond du bol, le champ scalaire a oscillé autour de l'énergie potentielle minimale. Quand le champ scalaire oscille, il perd de l'énergie, qu'il rayonne sous forme de particules élé-

mentaires. Ces particules interagissent et s'équilibrent finalement à une certaine température. À partir de ce stade, la théorie standard du Big Bang décrit bien l'évolution de l'Univers.

La différence principale entre la théorie inflatoire et l'ancienne cosmologie devient évidente lorsqu'on calcule la dimension de l'Univers à la fin de l'inflation. Certains modèles d'inflation prédisent que le diamètre de l'Univers, égal à  $10^{-35}$  centimètre au début de l'inflation, atteint  $10^{10^{12}}$  mètres (un nombre qui s'écrit avec un et mille milliards de zéros) après  $10^{-35}$  seconde d'inflation. La taille calculée dépend du modèle utilisé, mais, pour la plupart d'entre eux, elle est supérieure à la taille de l'Univers observable (soit  $10^{26}$  mètres) de plusieurs ordres de grandeur.

### L'inflation de l'inflation

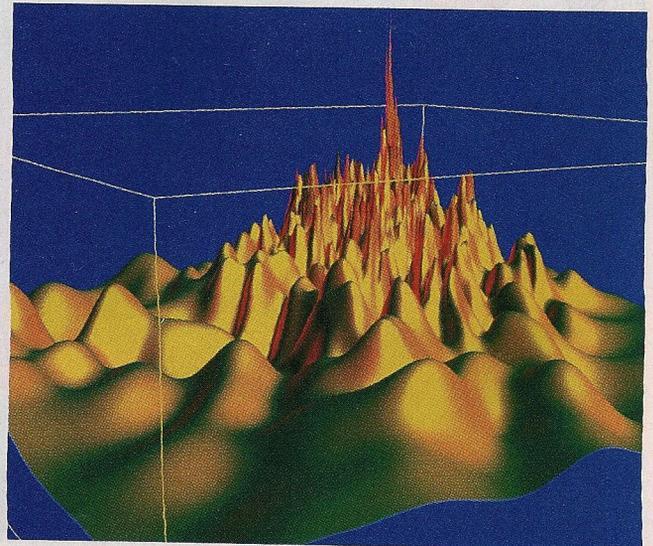
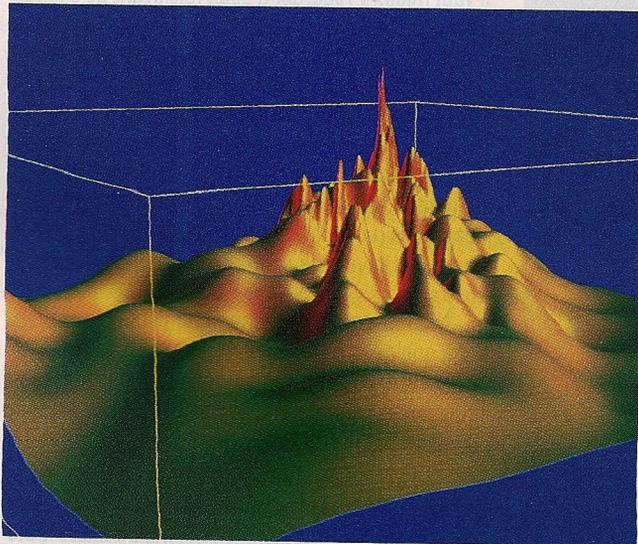
L'inflation résout la plupart des problèmes de l'ancienne théorie cosmologique. Notre Univers apparaît lisse et uniforme, notamment, parce que toutes les hétérogénéités ont été aplanies  $10^{10^{12}}$  fois. De même, la densité de monopôles primordiaux et d'autres «défauts» indésirables devient exponentiellement petite (nous avons récemment découvert que les monopôles peuvent eux-mêmes se dilater, et disparaître ainsi de l'Univers observable). L'Univers est devenu si grand que nous n'en voyons plus qu'une infime partie. Voilà pourquoi notre environnement semble plat : c'est comme si nous n'occupions qu'une toute petite partie d'un ballon déme-

surement gonflé. Voilà aussi pourquoi nous supposons que l'expansion n'a pas eu lieu simultanément en tous les points de l'Univers. Un domaine d'une taille de  $10^{-35}$  mètres est plus que suffisant pour engendrer tout ce que nous observons aujourd'hui.

La théorie inflatoire n'a pas toujours eu cet air de simplicité conceptuelle : on a longtemps cherché une description cohérente de la phase de dilatation exponentielle de l'Univers. En raison de barrières politiques, cette histoire n'est que partiellement connue du public occidental.

La première version réaliste de la théorie inflatoire fut proposée en 1979 par Alexei Starobinsky, de l'Institut de physique théorique L. D. Landau, à Moscou. Ce modèle eut tant de succès parmi les astrophysiciens russes que, pendant deux ans, il demeura le principal thème des conférences de cosmologie, en Union soviétique. Cependant la théorie de A. Starobinsky était compliquée (il se fondait sur la théorie des anomalies, en gravitation quantique) et décrivait mal le commencement de la phase inflatoire.

En 1981, à l'Institut de technologie du Massachusetts, Alan Guth proposa également que l'Univers, quand il était encore chaud, se soit dilaté exponentiellement pendant quelque temps ; cette idée se fondait sur une théorie que David Kirzhnits et moi avions proposée en 1972 et qui interprétait le développement de l'Univers primordial comme une succession de transitions de phase : l'Univers se serait condensé sous différentes



lées). Ailleurs, les fluctuations quantiques font croître le champ scalaire : dans ces zones, représentées par des pics, l'Univers se

dilate rapidement, provoquant la création de régions inflatoires. Nous nous trouvons dans une vallée, où l'espace ne subit plus l'inflation.

formes lorsqu'il s'est dilaté et refroidi, un peu comme les molécules d'eau passent de l'état gazeux à l'état liquide, puis à l'état solide.

## Le nouvel Univers inflatoire

A. Guth imaginait que l'inflation avait eu lieu parce que l'Univers s'était trouvé dans un état de surfusion instable, comme lorsque l'eau

demeure liquide aux températures inférieures à 0 °C ; la solidification soudaine de l'Univers, analogue au brusque passage de l'état surfondu de l'eau à l'état de glace, aurait correspondu à la fin de la période inflatoire. L'idée de la surfusion résolvait de nombreux problèmes de la théorie du Big Bang, mais la théorie de A. Guth prévoyait que l'Univers devait être hétérogène, à la fin de l'inflation. Après avoir testé son modèle

pendant un an, A. Guth l'abandonna finalement.

En 1982, j'ai introduit «la nouvelle théorie inflatoire», qui fut redécouverte plus tard par Andreas Albrecht et Paul Steinhardt, de l'Université de Pennsylvanie (voir *L'univers inflatoire*, par Alan Guth et Paul Steinhardt, *Pour la Science*, juillet 1984). Les principaux problèmes du modèle de A. Guth étaient évités, mais la théorie restait compliquée et peu réaliste.

## Le huitième jour...

**P**our devenir aussi populaire que la théorie du Big Bang, la nouvelle théorie inflatoire devra être expliquée en termes aussi simples qu'elle. On compare l'expansion de l'Univers à celle d'un ballon que l'on gonfle. Comment se représenter un univers fractal éternellement autoreproducteur ? Les simulations numériques nous y aident : celles que nous verrons ici ont été réalisées par mon fils Dmitri, étudiant à l'Institut de technologie de Californie.

Nous avons commencé nos simulations avec une tranche bidimensionnelle d'Univers où un champ scalaire était quasi homogène. Nous avons calculé la variation du champ scalaire en chaque point du domaine après le début de l'inflation. Puis nous avons ajouté des ondes sinusoïdales correspondant aux fluctuations quantiques qui gèlent.

En répétant ce mécanisme, nous avons obtenu une série d'images qui montrent la répartition du champ scalaire dans l'Univers inflatoire (pour conserver une vue d'ensemble, l'ordinateur rétrécissait l'image originale au lieu de dilater les domaines). Les images

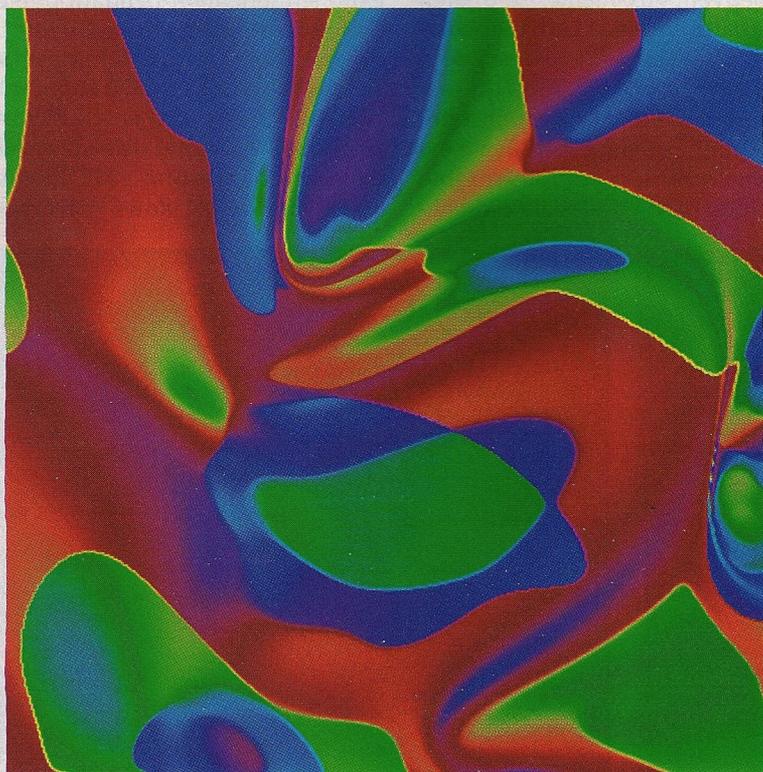
montrent que, dans la partie centrale du domaine initial, le champ scalaire diminue lentement (voir la figure 2).

Nous vivons dans une partie d'Univers de ce genre. De petites ondes, figées dans un champ quasi homogène, finissent par engendrer les fluctuations de la température du fond diffus cosmologique découvertes par le satellite COBE. D'autres parties de l'image présentent des pics croissants qui correspondent aux densités d'énergie considérables qui provoquent une inflation extrêmement rapide. Nous pouvons donc interpréter chaque pic comme un nouveau «Big Bang» qui crée un nouvel Univers inflatoire.

La nature fractale de l'Univers est devenue encore plus apparente après l'adjonction d'un autre champ scalaire. Pour rendre les choses plus intéressantes, nous avons considéré une théorie où l'énergie potentielle de ce champ possède trois minima, représentés par des couleurs différentes (voir la figure 1). Dans une coupe bidimensionnelle de l'Univers, les couleurs au voisinage des pics changent en permanence, indiquant que le champ scalaire saute rapidement d'un minimum d'énergie à un autre. Les lois de la physique ne sont pas encore fixées dans ces régions, mais, dans les vallées, où le taux d'expansion est faible, les couleurs ne fluctuent plus. Nous vivons aujourd'hui dans un de ces domaines. D'autres domaines sont très éloignés du nôtre. Les propriétés des particules élémentaires et les lois qui régissent leurs interactions varient d'un domaine à l'autre : il vaut mieux y regarder à deux fois avant de changer de domaine !

Dans un autre groupe de figures, nous avons exploré la nature fractale de l'Univers, conformément à une théorie différente de physique des particules. Décrire la signification physique de ces images est plus difficile. L'étrange motif de couleurs (à gauche) correspond à la répartition d'énergie dans la théorie des axions (un type de champ scalaire). Nous l'avons nommé «Univers de Kandinsky», du nom du peintre abstrait russe Vassili (page ci-contre).

Nous avons effectué nos premières simulations il y a quelques années, après que la Société *Silicon Graphics* nous avait prêté l'un de ses plus puissants ordinateurs pendant une semaine. La mise au point des simulations fut difficile, et il fallut attendre le septième jour pour que, la première série de calculs achevée, nous voyions pour la première fois tous ces pics qui représentaient des domaines en inflation. Grâce aux simulations, nous nous sommes glissés

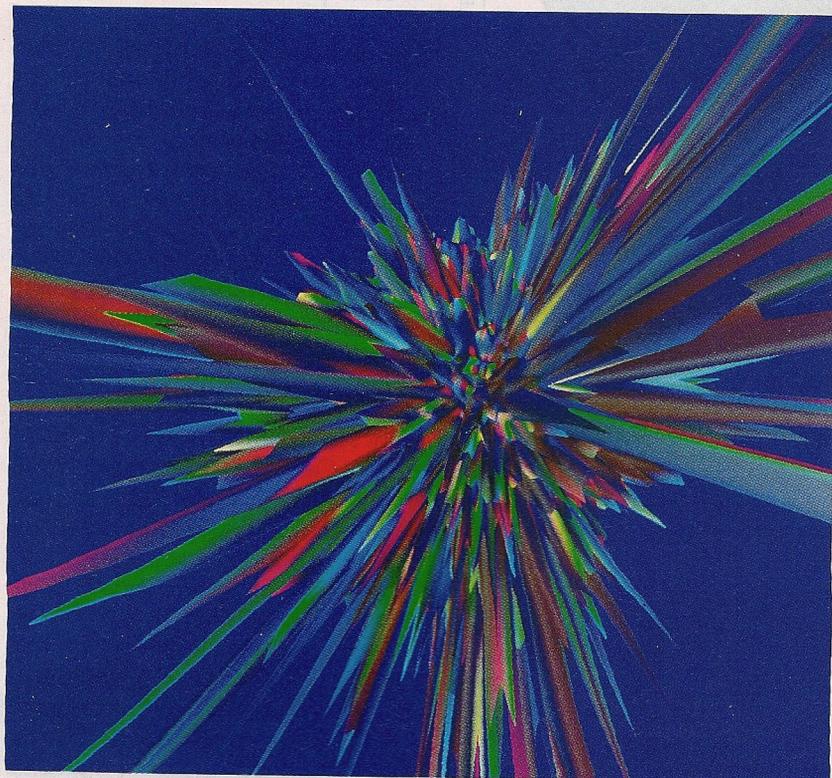


Un «univers de Kandinsky».

Puis, un an plus tard, je compris que l'inflation découle naturellement de nombreuses théories des particules élémentaires, tel le modèle le plus simple du champ scalaire, considéré précédemment. Dans cette théorie, on n'utilise ni la gravitation quantique, ni les transitions de phase, ni la surfusion, ni même l'hypothèse classique que l'Univers était initialement chaud ; on considère seulement les divers champs scalaires

possibles et leurs valeurs, dans l'Univers primordial, et l'on cherche si l'un d'entre eux conduit à l'inflation. Les endroits négligés par l'inflation demeurent petits. Les domaines où l'inflation a lieu deviennent exponentiellement grands et occupent la majeure partie de l'Univers. Comme les champs scalaires peuvent avoir des valeurs arbitraires dans l'Univers primordial, j'ai nommé ce scénario «inflation chaotique».

L'inflation chaotique est si simple que je comprends mal pourquoi elle ne fut pas découverte plus tôt. La raison est, je pense, purement psychologique : les succès de la théorie du Big Bang ont longtemps abasourdi les cosmologistes ; nous supposons que tout l'Univers naquit d'un coup, qu'il était initialement chaud et que le champ scalaire avait son énergie potentielle minimale depuis le début de l'Univers. Quand nous avons commencé à abandonner ces hypothèses, nous avons immédiatement découvert que l'inflation n'est pas un mécanisme sophistiqué, utilisé par les théoriciens pour résoudre leurs problèmes ; c'est un régime général qui se déroule dans une large classe de théories des particules élémentaires.



Une «explosion» du champ scalaire.

## Les hétérogénéités de l'Univers

Une dilatation rapide de l'Univers peut-elle vraiment résoudre d'un coup les principaux problèmes cosmologiques ? Cela semblait trop beau pour être vrai. Si toutes les hétérogénéités ont été aplanies, comment les galaxies se sont-elles formées, par exemple ? L'inflation, qui gomme les hétérogénéités précédentes, en engendre de nouvelles.

Ces hétérogénéités résultent d'effets quantiques. Selon la mécanique quantique, l'espace vide n'est pas totalement vide ; il est le siège de petites fluctuations quantiques, des ondes, ou variations périodiques des champs physiques. Toutes les longueurs d'onde sont possibles, et les ondes se propagent dans toutes les directions. Nous ne pouvons les détecter, car elles sont microscopiques et de courte durée de vie.

Dans l'Univers inflatoire, la structure du vide devient encore plus complexe : l'inflation étire rapidement les ondes qui, dès que leur longueur d'onde devient suffisamment grande, commencent à «ressentir» la courbure de l'Univers. Elles s'immobilisent alors, en raison de la viscosité du champ scalaire (nous avons vu que les équations décrivant le champ contiennent un terme de frottement).

Les fluctuations qui se figent les premières sont celles dont les longueurs d'onde sont les plus grandes. L'Univers poursuivant son expansion, de nouvelles fluctuations sont étirées et se figent au-dessus d'autres ondes

entre les sommets et nous avons eu une vision de l'Univers aux premiers instants de sa création. Nous fixions l'écran et nous étions heureux : nous regardions l'Univers et il nous paraissait bon ! Toutefois notre œuvre ne dura pas longtemps : le huitième jour, nous rendîmes l'ordinateur, et le lecteur de disque de la machine tomba en panne, annihilant l'Univers que nous avions créé.

Aujourd'hui, nous poursuivons nos études par d'autres méthodes (avec un ordinateur *Silicon Graphics* différent). Ne pourrait-on pas délaissier ces contemplations de l'Univers pour des tentatives de re-création en laboratoire ? Cette idée semble farfelue, mais certains (tels Alan Guth et moi-même) ne veulent pas totalement écarter cette possibilité. Il faudrait comprimer de la matière de façon à permettre aux fluctuations quantiques de faire commencer l'inflation. Des estimations simples suggèrent que moins de un milligramme de matière peut engendrer un Univers éternel et autoreproducteur.

Nous ignorons aujourd'hui si l'expérience est possible. La théorie des fluctuations quantiques qui pourrait nous mener à un nouvel univers est extrêmement compliquée et, même s'il est possible de façonner de nouveaux univers, qu'en ferions-nous ? Pourrions-nous envoyer des messages à leurs habitants, qui percevraient leurs univers microscopiques comme aussi vastes que nous observons le nôtre ? Et notre propre Univers a-t-il été créé par un physicien sorcier ? Un jour, peut-être, aurons-nous les réponses à ces questions.

immobilisées. À ce stade, les ondes ne sont plus des fluctuations quantiques : la plupart possèdent des longueurs d'onde extrêmement grandes ; comme elles ne se propagent pas et ne

disparaissent pas, elles accroissent la valeur du champ scalaire dans certaines régions et la réduisent dans d'autres, créant ainsi des hétérogénéités. Ces perturbations du champ

scalaire provoquent les fluctuations de densité à partir desquelles se forment ensuite les galaxies.

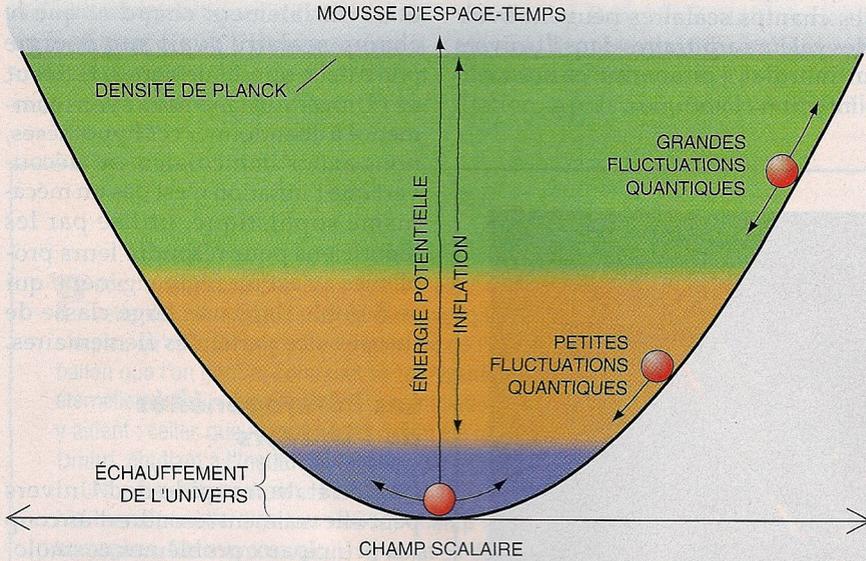
La théorie inflatoire explique de nombreuses caractéristiques de notre monde et fait plusieurs prévisions importantes que l'on peut tester. Tout d'abord, elle prédit que l'Univers est extrêmement plat. La planéité de l'Univers peut être vérifiée expérimentalement, parce que la densité d'un Univers plat est reliée simplement à sa vitesse d'expansion. À ce jour, les observations sont compatibles avec les prédictions.

## Les succès de l'inflation

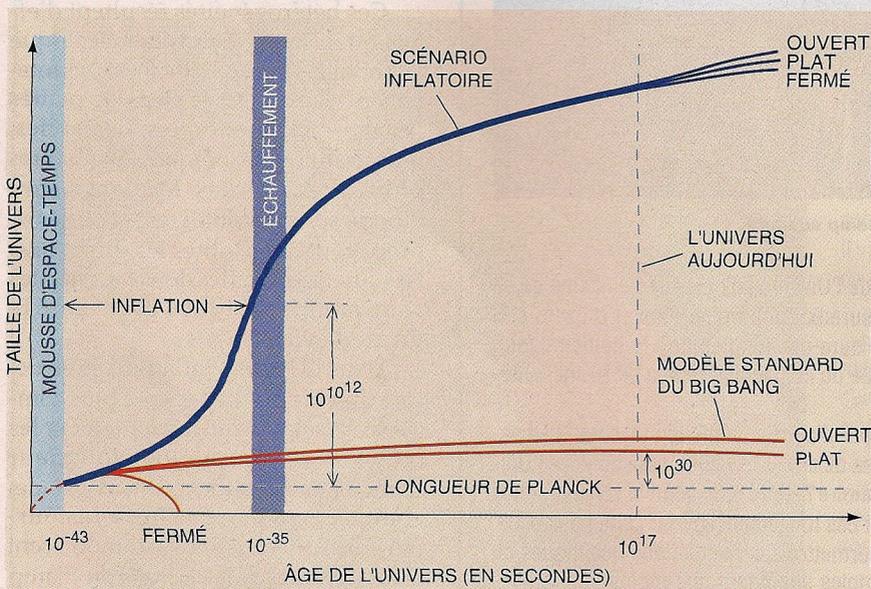
La théorie inflatoire prévoit également les perturbations de densité produites durant l'inflation. Ces fluctuations de densité déterminent la répartition de la matière dans l'Univers, et elles peuvent s'accompagner d'ondes gravitationnelles. Perturbations de densité et ondes gravitationnelles laissent toutes deux leur empreinte sur le rayonnement cosmologique. À cause d'elles, la température de ce rayonnement varie légèrement selon les régions du ciel. Ces irrégularités furent découvertes il y a deux ans par le satellite COBE, puis retrouvées par d'autres expériences.

Bien que les observations de COBE soient conformes aux prédictions de la théorie inflatoire, il serait prématuré de prétendre que le satellite a confirmé la théorie. Certes, les résultats recueillis par le satellite, à la précision actuelle, auraient pu réfuter définitivement la plupart des modèles inflatoires, ce qui n'a pas été le cas, et aucune autre théorie n'explique la remarquable homogénéité de l'Univers tout en prédisant les «rides d'espace» découvertes par le satellite COBE. Néanmoins nous devons rester ouverts, car de nouvelles données d'observation viendront peut-être contredire la cosmologie inflatoire. Si les observations nous montrent que la densité de l'Univers diffère considérablement de la densité qui correspond à un Univers plat, par exemple, la théorie inflatoire sera difficile à sauver (le problème pourra être résolu, mais au prix de complications théoriques).

D'autre part, les modèles inflatoires se fondent sur la théorie des particules élémentaires, laquelle n'est pas totalement établie. Certaines ver-



**3. LE CHAMP SCALAIRE d'un univers inflatoire est comme une bille qui roule dans un bol.** Le bord supérieur correspond à la densité de Planck de l'Univers, au-dessus duquel se trouve une «mousse» d'espace-temps, une région de fortes fluctuations quantiques. Sous ce niveau (en vert), les fluctuations sont moindres, mais elles assurent l'autoreproduction de l'Univers. Quand la bille est dans le bol, elle glisse très lentement vers une région d'énergie inférieure (en orange). L'inflation prend fin dès que la bille approche du minimum d'énergie (en violet), où ses oscillations échauffent l'Univers et engendrent les particules élémentaires.



**4. LA THÉORIE DU BIG BANG et la théorie de l'inflation chaotique prévoient des évolutions différentes de l'Univers.** L'inflation multiplie la taille de l'Univers par  $10^{40}$ , de sorte que même des régions de rayon aussi faible que  $10^{-35}$  mètre (la longueur de Planck) deviennent rapidement plus grosses que l'Univers observable, dont le diamètre est égal à  $10^{26}$  mètres. L'inflation prédit aussi que l'Univers est quasi plat : des droites localement parallèles le restent à l'infini (dans un univers fermé, des lignes parallèles se coupent comme sur la surface d'une sphère ; dans un univers ouvert, elles divergent). En revanche, selon la théorie du Big Bang, l'Univers, initialement de la taille de Planck, n'aurait atteint qu'un rayon de dix micromètres sous l'effet de l'expansion, et la géométrie de l'espace différerait de celle prédite par la théorie inflatoire.

sions, telle la théorie des supercordes, ne conduisent pas simplement à l'inflation. L'obtention de l'inflation à partir de la théorie des supercordes nécessiterait peut-être des idées radicalement nouvelles. Aussi serait-il prudent de poursuivre la recherche d'autres théories cosmologiques. De nombreux cosmologistes croient que l'inflation ou un mécanisme analogue sont des ingrédients des théories cosmologiques. La théorie inflatoire elle-même doit s'adapter aux progrès rapides de la théorie des particules élémentaires. Les nouveaux modèles sont l'inflation étendue, l'inflation naturelle, l'inflation hybride, etc. Chaque modèle a des particularités qui peuvent être testées par des observations astronomiques ou par des expériences. La plupart ont néanmoins l'inflation chaotique comme fondement.

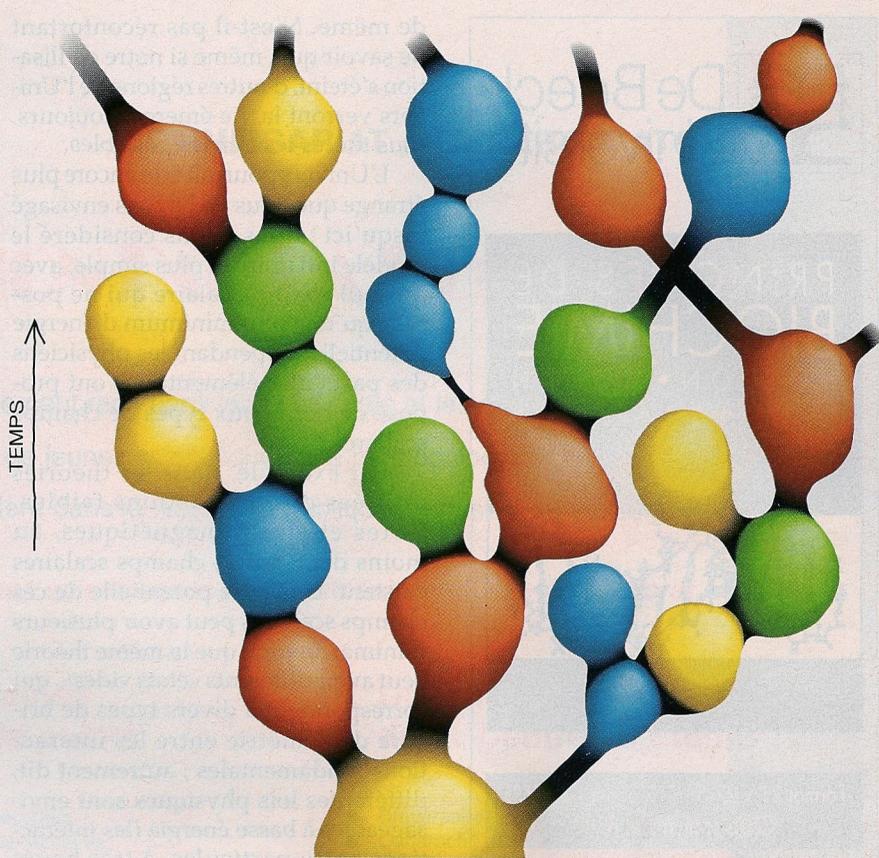
## Un Univers éternel

Venons-en maintenant au développement le plus intéressant de l'avenue inflatoire : la théorie d'un univers inflatoire éternel, autoreproducteur. Cette théorie générale semble particulièrement prometteuse et, dans le cas de l'inflation chaotique, ouvre des perspectives théoriques fascinantes.

Nous avons vu que les fluctuations quantiques du champ scalaire, dans un univers inflatoire, sont comme des ondes qui se propagent dans toutes les directions, puis se figent en s'accumulant. Chaque onde ainsi immobilisée augmente légèrement le champ scalaire dans certaines régions de l'Univers et le diminue dans d'autres.

Considérons les endroits de l'Univers où ces ondes figées renforcent le champ scalaire. De telles régions, très rares, jouent néanmoins un rôle important, car elles se dilatent à une vitesse exponentielle. Plus le champ scalaire y est notable, plus l'Univers se dilate rapidement. Bientôt ces petits domaines occupent un volume bien plus grand que les autres domaines.

De ce fait, l'Univers contient au moins un domaine en inflation d'une taille suffisamment grande, il se peuple sans interruption de nouveaux domaines en inflation. La dilatation peut s'arrêter rapidement, en n'importe quel point, mais de nombreuses autres régions continueront à gonfler. Le volume total de l'ensemble de ces domaines augmentera sans fin. Ainsi



**5. UN UNIVERS AUTOREPRODUCTEUR** est comme une ramification de bulles inflatoires. Les couleurs représentent des jeux différents de lois de la physique. Les propriétés de l'espace, dans chaque bulle, ne dépendent pas de l'instant de formation de la bulle. En ce sens, l'Univers tout entier peut être stationnaire, même si la théorie du Big Bang s'applique à l'intérieur de chaque bulle.

d'un Univers inflatoire germent d'autres bulles inflatoires qui, à leur tour, engendrent d'autres bulles inflatoires (voir la figure 5).

Ce mécanisme d'«inflation éternelle» se déroule comme une réaction en chaîne et forme une mousse fractale d'univers. Dans ce schéma, l'Univers entier est éternel : chaque région de l'Univers peut provenir d'une singularité à un moment quelconque du passé, et disparaître dans une singularité à un moment quelconque du futur. L'évolution de l'Univers tout entier ne connaîtra pas de fin.

Les tout premiers instants sont moins clairs. Il se peut que tout l'Univers ait été simultanément créé à partir d'une singularité de type Big Bang, mais cette hypothèse n'est plus nécessaire. En outre, le nombre total de bulles inflatoires de notre «arbre cosmique» croît exponentiellement avec le temps, et la plupart des bulles (notamment l'Univers que nous connaissons) se ramifient indéfiniment très loin du tronc de cet arbre. Bien que ce scénario rende l'existence

du Big Bang initial quasiment sans objet, nous pouvons considérer en pratique le moment de formation de chaque bulle inflatoire comme un nouveau «Big Bang». De ce point de vue, contrairement à ce que nous pensions voici 15 ans, l'inflation ne fait pas partie de la théorie du Big Bang ; c'est plutôt le Big Bang qui s'intègre au modèle inflatoire.

## L'homme dans l'Univers

Si l'on réfléchit au processus d'auto-reproduction de l'Univers, on ne peut éviter de faire des analogies, aussi superficielles soient-elles. L'évolution de l'Univers, notamment, ressemble à celle des hommes : nous sommes venus au monde à un moment du passé et, quand nous mourrons, toutes nos pensées, tous nos sentiments et tous nos souvenirs disparaîtront. D'autres ont vécu avant nous, d'autres vivront après nous et, si l'humanité est suffisamment intelligente, elle se perpétuera. La théorie inflatoire montre que l'Univers peut évoluer

de même. N'est-il pas réconfortant de savoir que, même si notre civilisation s'éteint, d'autres régions de l'Univers verront la vie émerger toujours, sous toutes les formes possibles.

L'Univers pourrait être encore plus étrange que nous ne l'avons envisagé jusqu'ici : nous avons considéré le modèle inflatoire le plus simple, avec un seul champ scalaire qui ne possède qu'un seul minimum d'énergie potentielle. Cependant les physiciens des particules élémentaires ont proposé de nombreux types de champs scalaires.

Par exemple, dans les théories unifiées des interactions faibles, fortes et électromagnétiques, au moins deux autres champs scalaires existent. L'énergie potentielle de ces champs scalaires peut avoir plusieurs minima, de sorte que la même théorie peut avoir différents «états vides», qui correspondent à divers types de brisure de symétrie entre les interactions fondamentales ; autrement dit, différentes lois physiques sont envisageables à basse énergie (les interactions entre particules, à très haute énergie, ne dépendent pas de la brisure de symétrie).

Si les champs scalaires sont plus élaborés, l'inflation pourrait conduire à des Univers divisés en domaines exponentiellement grands, caractérisés par des lois physiques différentes à basse énergie. Cette division se produit même si l'Univers tout entier a commencé dans un seul état, qui correspondait à un minimum particulier de l'énergie potentielle. En effet, de grandes fluctuations quantiques peuvent arracher les champs scalaires à leurs minima : elles éjectent certaines billes de leur bol pour les précipiter dans d'autres bols. Chaque bol correspond à des lois physiques qui décrivent les interactions entre particules. Dans certains modèles inflatoires, les fluctuations quantiques sont si fortes que même le nombre de dimensions de l'espace-temps peut changer.

Si cette théorie se révèle correcte, la physique seule ne peut fournir une explication complète de toutes les caractéristiques de notre Univers ; de vastes régions auraient des propriétés différentes, et nous nous trouvons au sein d'un domaine quadridimensionnel avec notre lot de lois physiques, non pas parce que des domaines de dimensionalités et de propriétés dif-

férentes sont impossibles ou improbables, mais simplement parce que notre forme de vie ne peut exister dans d'autres domaines.

Cela signifie-t-il que la compréhension de toutes les propriétés de notre région de l'Univers exige, outre une connaissance de la physique, une étude approfondie de notre propre nature, voire de la nature de notre conscience? Ce serait là une conclusion des plus inattendues que nous tirions des développements récents en cosmologie inflatoire.

Les développements de la théorie inflatoire ont rénové la cosmologie : les modèles inflatoires actuels diffèrent considérablement de l'ancienne théorie du Big Bang et, même, des premières versions inflatoires. L'Univers y apparaîtrait à la fois chaotique et homogène, en expansion et stationnaire. Notre habitat cosmique se dilate, fluctue et se reproduit éternellement sous toutes les formes possibles, comme s'il s'ajustait à toutes les formes de vie possibles qu'il puisse entretenir.

Nous espérons que certains pans de la nouvelle théorie résisteront aux tests. De nombreuses parties subiront certainement des modifications considérables pour rendre compte des nouvelles données d'observation et pour se conformer aux progrès de la physique des particules élémentaires. Cependant le développement de la cosmologie au cours des 15 dernières années a altéré irréversiblement notre compréhension de la structure et de l'évolution de l'Univers.

Andrei LINDE est professeur de physique à l'Université Stanford.

Andrei LINDE, *Particle Physics and Inflationary Cosmology*, in *Physics Today*, vol. 40, n° 9, pp. 61-68, septembre 1987.

M. ARYAL et A. VILENKIN, *The Fractal Dimension of the Inflationary Universe*, in *Physics Letters B*, vol. 199, n° 3, pp. 351-357, 24 décembre 1987.

Andrei LINDE, *Inflation and Quantum Cosmology*, Academic Press, 1990.

Andrei LINDE, *Particle Physics and Inflationary Cosmology*, Harwood Academic Publishers, 1990.

A. LINDE, D. LINDE et A. MEZHLUMIAN, *From the Big Bang Theory to the Theory of a Stationary Universe*, in *Physical Review D*, vol. 49, n° 4, pp. 1783-1826, février 1994.