

# 35 ÉNIGMES

## 1 → TEMPS ZÉRO

**■ EN DEUX MOTS ■** Depuis l'avènement et les succès de la théorie du Big Bang, la question de l'origine du temps, ignorée tant qu'on pensait l'Univers

éternel, est devenue incontournable. Les deux théories décrivant le monde physique, la relativité générale pour l'infiniment grand et la mécanique quan-

tique pour l'univers microscopique, sont incapables de décrire cet instant où les caractéristiques de l'Univers prennent des valeurs soit nulles, soit infinies.

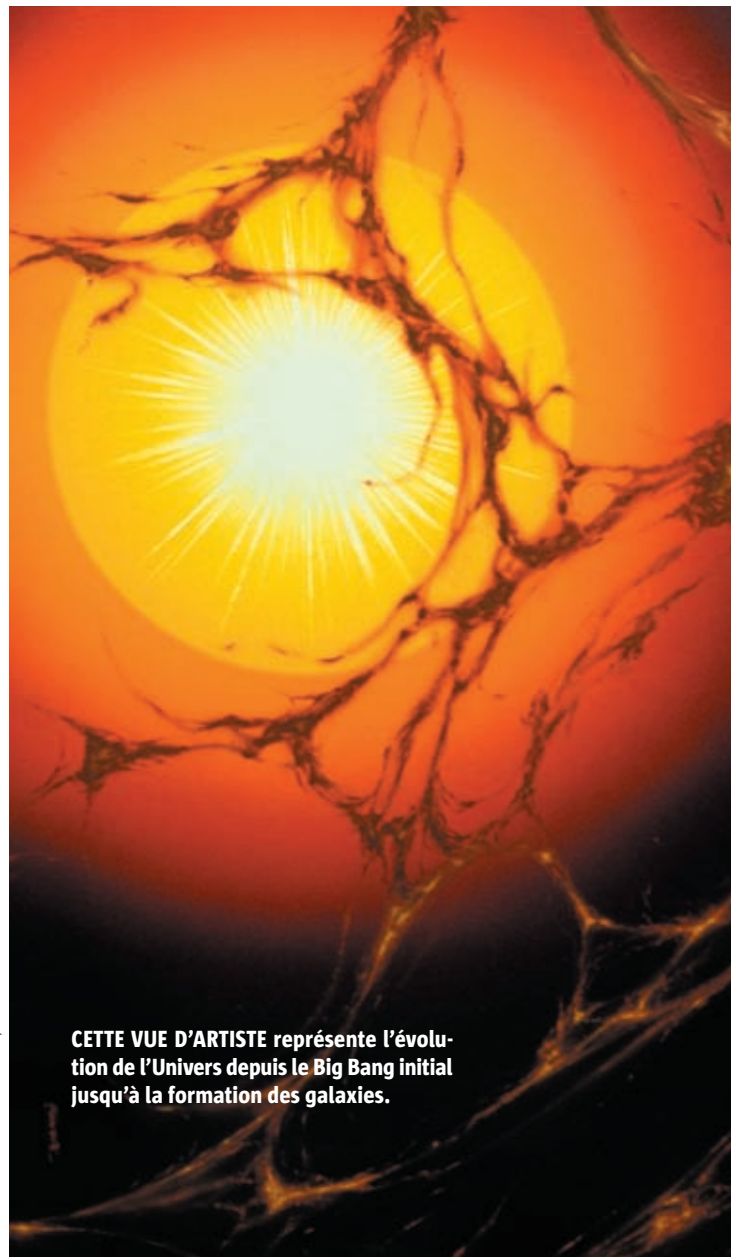
ASTRES

# 1 À la recherche du temps zéro

Jean-Pierre Luminet

Les modèles de Big Bang prévoient que plus on remonte dans le passé, plus l'Univers est chaud et dense, et ce, jusqu'à un moment singulier, très proche de l'origine, où la physique actuelle ne peut plus rien décrire. Mais l'origine elle-même a-t-elle une quelconque réalité ?

**L'**Univers est en expansion, nous suggèrent fortement les observations des galaxies et de leurs amas. Qu'elle soit accélérée ou non, il semble que cette expansion ne connaisse pas de fin. L'Univers serait donc éternel. Et si nous remontions le film de l'Univers à l'envers ? Le temps cosmique se prolonge-t-il, dans le passé, jusqu'à une valeur infinie, ou bien est-il borné à une valeur finie ? C'est l'une des plus grandes énigmes de l'astrophysique. Selon la théorie de la relativité générale, la réponse dépend du contenu de l'Univers. Si ses propriétés sont celles de la matière ou du rayonnement que nous connaissons, alors les distances cosmiques diminuent inexorablement avec le temps passé. Il existe nécessairement un instant, un « temps zéro », où toutes les longueurs cosmiques ont une valeur nulle. Cet événement singulier aurait présidé à l'apparition de l'espace, du temps et de la matière. C'est ce qu'énoncent les modèles de Big Bang, définis comme ceux où l'expansion cosmique ne s'écoule que depuis une durée finie. Ce « temps zéro » se situe à 13,7 milliards d'années dans le passé selon les calculs et les observations actuels, fondés sur l'analyse du rayonnement cosmologique fossile ou des supernovae lointaines. Cela exclut évidemment de considérer tout instant antérieur. Cela implique aussi qu'il ne peut exister aucun objet dont l'âge puisse dépasser 13,7 milliards d'années, et qu'aucune horloge n'a jamais pu mesurer une durée plus longue. Or les âges



**CETTE VUE D'ARTISTE** représente l'évolution de l'Univers depuis le Big Bang initial jusqu'à la formation des galaxies.

© MANCHU/CIEL ET ESPACE

des étoiles, mesurés grâce aux isotopes radioactifs à longue durée de vie, véritables chronomètres naturels, se distribuent précisément entre 0 et 14 milliards d'années. À elle seule, cette observation constitue un argument remarquable en faveur des modèles de Big Bang. Ceux-ci sont en outre confirmés par beaucoup d'autres résultats : l'abondance observée des éléments légers, la découverte du rayonnement de fond cosmologique et de ses propriétés, l'évolution des galaxies... Aussi ces modèles sont-ils aujourd'hui quasi unanimement adoptés par les astrophysiciens. Conjugués aux observations accumulées tant par les grands télescopes que dans les accélérateurs de particules, ils permettent de retracer les principales étapes de l'histoire de l'Univers (voir l'encadré « Petite chronologie de l'Univers », page 32).

Que le temps ait connu un début préoccupe le physicien. Car, dans le cadre de la relativité générale, cette limite temporelle se présente sous la forme d'une « singularité », un point vers lequel on tend sans jamais l'atteindre : l'Univers aurait été concentré dans un volume infiniment petit, infiniment dense,

[1] E. M. Lifshitz et I. M. Khalatnikov, *Advances in Physics*, 12, 185, 1963.

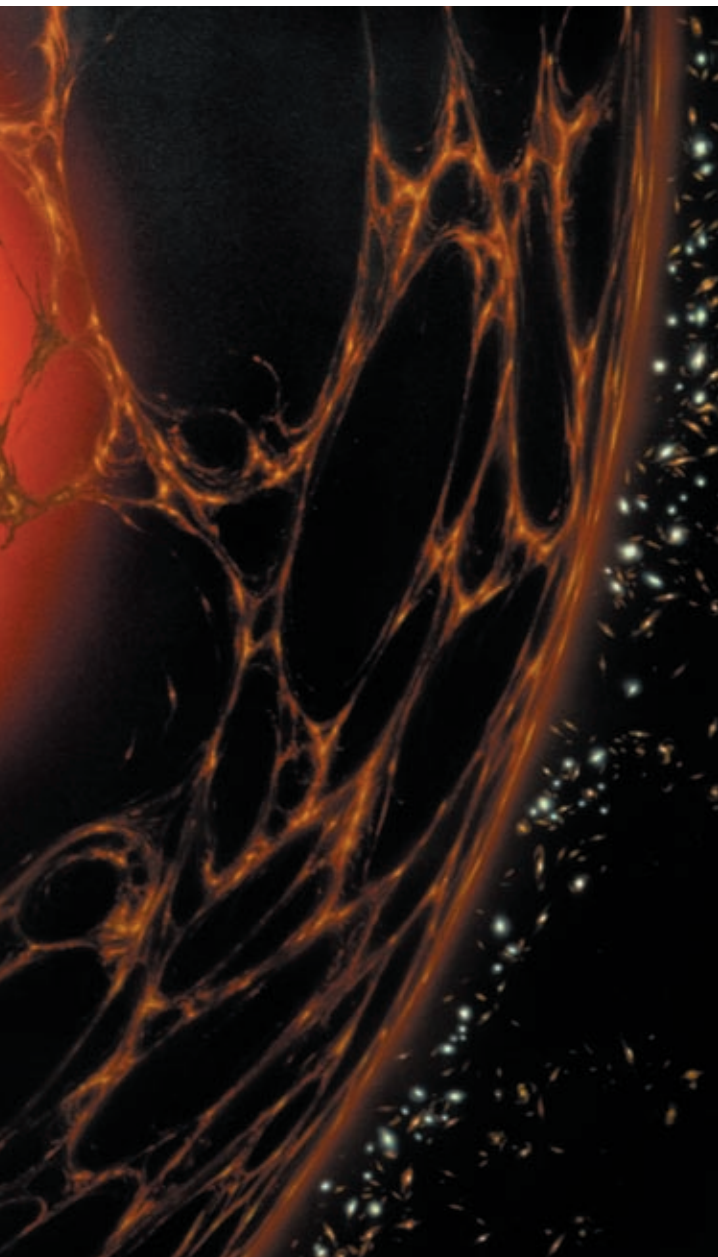
[2] S. W. Hawking et R. Penrose, *Physical Letters*, 17, 246, 1965 ; *Proceedings of the Royal Society of London*, A 314, 529, 1970.

elle échappe nécessairement au champ de nos théories ! Pour le mathématicien, la singularité constitue un bord temporel, situé à une durée passée finie. Difficile à admettre ! Pourtant, le problème est identique à celui de la finitude de l'espace, qui avait longtemps buté contre une telle question de limite, jusqu'à l'introduction des géométries non euclidiennes et de la topologie. Celles-ci ont permis de considérer un espace fini mais sans limites. Ce qui n'est pas contradictoire. Mais le bord temporel pose un problème d'une autre nature, tenant à la fois à son caractère fini – la finitude du temps correspond à l'arrêt brutal des lignes d'Univers – et à son caractère infini au vu des valeurs inconcevables de la densité et de la courbure.

et de courbure infiniment grande. Cette singularité initiale marque une réelle interruption (vers le passé) des lignes d'Univers des galaxies, c'est-à-dire de leurs trajectoires d'espace-temps [fig. 1]. La singularité n'est pas réellement un événement : elle n'a pas pris place et n'a pas eu lieu. Par là même,

### Inévitable singularité cosmique

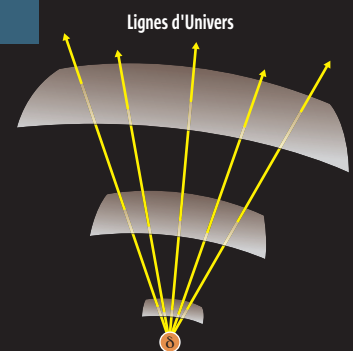
C'est la raison pour laquelle les cosmologistes ont cherché à se débarrasser de cette monstruosité et tenté de démontrer que le temps zéro n'a pas pu réellement se produire. Ainsi, en 1963, les Russes Isaac Markovich Khalatnikov et Evgenii Mikhailovich Lifshitz ont vainement suggéré que l'utilisation d'hypothèses simplificatrices injustifiées avait peut-être faussé les calculs [1] ; elle aurait fait apparaître, dans les solutions des équations de la relativité générale, une singularité qui n'existerait pas réellement. Ce n'est pas le cas. Les singularités cosmologiques sont une conséquence inéluctable de la relativité générale, moyennant une hypothèse raisonnable portant sur la nature de la matière et de l'énergie qui emplit l'Univers. C'est ce qu'avait déjà esquissé, dès 1933, le Belge Georges Lemaître. Il anticipait ainsi les « théorèmes sur les singularités », redémontrés de façon plus générale en 1965 et qui rendront célèbres leurs auteurs, les astrophysiciens britanniques Stephen Hawking et Roger Penrose [2] : une singularité cosmique est inévitablement présente dans le passé de n'importe quel modèle d'Univers, ⇨



**Fig.1** Point de convergence

**LES LIGNES D'UNIVERS DES GALAXIES SONT LEURS TRAJECTOIRES SPATIO-TEMPORELLES.** Dans les modèles de Big Bang, elles proviennent inéluctablement d'un temps zéro, la singularité où toutes les lignes se coupent.

© INF. BRUNO BOURGEOIS



# 35 ÉNIGMES

## 1 → TEMPS ZÉRO

⇒ pour peu qu'il satisfasse à la relativité générale et contienne autant de matière que ce qui est observé.

La seule solution pour se débarrasser des infinis gravitationnels est de sortir du cadre de la relativité générale classique. Cette voie semble raisonnable, car les physiciens considèrent que l'apparition d'une singularité, caractérisée par des grandeurs infinies, marque la limite de validité d'une théorie. Or la relativité générale n'est pas une théorie complète, faute d'incorporer les préceptes de la physique quantique qui décrit le monde microscopique. Il semble donc absolument téméraire, et quasi injustifié, d'extrapoler les résultats de la relativité générale jusqu'à des distances extrêmement petites, en particulier celles correspondant à une singularité. C'est le cas des distances inférieures à la longueur de Planck, soit  $10^{-35}$  mètre. Cette échelle joue le rôle d'une sorte d'horizon microscopique. Sans savoir ce qui se passe exactement à ces dimensions, les physiciens estiment que la géométrie pourrait devenir elle-même sujette à des fluctuations quantiques, que la relativité ne permet pas de prendre en considération.

### Géométrie floue

Or, selon les modèles de Big Bang, la reconstitution passée de l'évolution des longueurs dans l'Univers mène à une valeur aussi petite que  $10^{-35}$  mètre. Cela se passe à un moment de l'histoire cosmique appelé « ère de Planck », qui correspond à  $10^{-43}$  seconde après le temps zéro. Les valeurs de la température et de la densité étaient alors énormes, respectivement  $10^{32}$  kelvins et  $10^{94}$  grammes par centimètre cube. Dans des conditions si terribles, la relativité générale ne peut être appliquée, ne serait-ce que parce qu'elle est impuissante à prendre en compte les effets quantiques, alors prépondérants. Aborder cette période nécessite impérativement le soutien d'une théorie de la gravitation quantique, ou du moins d'une théorie qui unifie les quatre interactions fondamentales.

La physique actuelle ne permet donc de remonter l'histoire passée de l'Univers que jusqu'à l'ère de Planck, car les tentatives d'imaginer les états antérieurs débouchent sur un flou quantique. Et pourtant on voudrait en dire davantage sur l'ère de Planck. Cette limite sur laquelle bute la physique, frontière de nos connaissances, implique que le cadre habituel de la variété espace-temps, continue, à quatre dimensions, éclate complètement.

L'idée de la gravité quantique, émise par John Wheeler au début des années 1960 [3], et de la nouvelle cosmologie qui en découlerait, est qu'au niveau microscopique la géométrie de l'Univers

### TECHNIQUE

## Petite chronologie

#### ■ AVANT $10^{-43}$ SECONDE

Cette ère, dite de Planck, à durée indéterminée, est dominée par les champs quantiques. Le temps, l'espace et toutes les grandeurs physiques usuelles se mêlent inextricablement, au point de perdre tout leur sens actuel. Seul régnerait le vide quantique, bouillonnant d'énergie et de particules virtuelles dont les relations seraient régies par une superforce unique, et qui serait doté d'une propension à l'expansion. La superforce universelle se scinderait en deux : la gravitation, et une interaction « électroforte » gouvernant les relations entre particules.

#### ■ DE $10^{-43}$ À $10^{-32}$ SECONDE

La température chutant à  $10^{27}$  kelvins, l'interaction électroforte se scinde en l'interaction forte et l'interaction électrofaible. La physique des particules suggère qu'apparaissent alors des défauts topologiques tels que cordes, murs ou textures cosmiques, et l'inflation – brève période durant laquelle les dimensions de l'Univers primitif auraient augmenté dans des proportions vertigineuses. À cette époque déjà, une petite préférence de la Nature pour la matière aurait suffi à faire disparaître l'antimatière. Les particules hypermassives initiales se désintègrent pour engendrer les quarks, électrons et autres neutrinos.

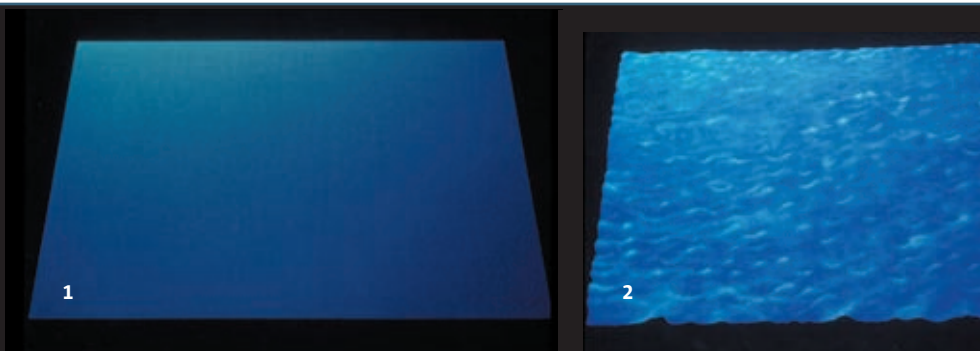
© S. NUMAZAWA/APPB/CIEL ET ESPACE

pourrait être floue, comparable à une sorte d'écume constamment agitée de petites fluctuations [fig. 2]. On pourrait la comparer à la surface d'un océan : vu d'avion, l'océan paraît lisse. D'une plus basse altitude, sa surface apparaît toujours continue, mais on commence à percevoir quelques mouvements qui l'agitent. Plongé dans l'océan, le nageur le voit tumultueux, discontinu même, puisque des vagues se brisent, projetant des gouttes d'eau qui s'élèvent et retombent. De la même façon, l'espace-temps paraît continu à l'échelle humaine, et aussi à celle des noyaux atomiques, mais son « écume » pourrait devenir perceptible à l'échelle de Planck. Certaines de ses gouttes pourraient se manifester à nous sous forme de particules élémentaires.

### Fig.2 Trois visions de l'espace

L'ESPACE N'EST PEUT-ÊTRE PAS AUSSI « LISSE » QUE NOUS LE CROYONS. Selon certaines idées de gravitation quantique, il ne paraîtrait lisse que parce que nous le voyons grossièrement (1), comme la surface de la mer vue d'avion. Une vision mieux résolue (2) nous révélerait une allure plus tourmentée. Aux échelles les plus microscopiques, voisines de la longueur de Planck, sa structure pourrait être totalement chaotique (3).

© J.-M. JOLY / CIEL & ESPACE.



## de l'Univers

### ■ DE $10^{-32}$ À $10^{-6}$ SECONDE

À  $10^{-11}$  seconde, les quatre interactions fondamentales régissant l'Univers actuel sont désormais découplées. L'Univers est formé d'un plasma de quarks et de gluons à mille milliards de kelvins.

### ■ DE $10^{-6}$ SECONDE À 100 SECONDES

À  $10^{-6}$  seconde, à un milliard de kelvins, les quarks se rapprochent trois par trois pour former les premiers protons et neutrons. À 100 secondes, les protons s'assemblent. En plus des noyaux d'hydrogène, se créent ses isotopes (deutérium, tritium), puis des noyaux d'hélium-3, d'hélium-4 et de lithium-7.

### ■ 380 000 ANS

En se dilatant et en se refroidissant à moins de 3 000 kelvins, l'Univers devient transparent au rayonnement. Le libre parcours moyen du photon passe de quelques centimètres à plusieurs millions d'années-lumière. L'Univers émet son premier signal électromagnétique, le « rayonnement de fond cosmologique ». Il exhibe de minuscules inhomogénéités de température et de densité, qui sont les germes de toutes les structures astronomiques.

### ■ UN MILLION D'ANNÉES

Les électrons se combinent aux noyaux pour former les premiers assemblages électriquement neutres : les atomes d'hydrogène et d'hélium. Les atomes eux-mêmes, à plus basse température, s'associent en molécules. Les vastes nuages d'hydrogène moléculaire sont nés, matrices de toutes les étoiles à venir.

### ■ DE DEUX CENTES MILLIONS À 13,7 MILLIARDS D'ANNÉES (AUJOURD'HUI)

L'action de la gravité accentue les infimes excès de densité du gaz primordial. Chaque grumeau finit par donner naissance à une structure astronomique, galaxie ou amas de galaxies. Les étoiles naissent et meurent, fabriquent en leur sein des éléments lourds, les essayant dans le milieu interstellaire. Autour d'elles naissent des planètes. Notre système solaire s'est formé voici 4,566 milliards d'années, soit 9 milliards d'années après le Big Bang.

Jusqu'à présent, aucune théorie complètement cohérente et calculable de gravité ou de cosmologie quantique n'a été établie. Diverses descriptions préliminaires ont été tentées, comme la géométrie dynamique quantique des Américains John Wheeler et Bryce de Witt en 1967 [4]. Cette théorie voudrait traiter la géométrie de l'espace-temps de la même manière que la physique quantique ordinaire traite la matière et l'énergie, c'est-à-dire en termes de grains ou « quanta » d'espace et de temps.

### Une équation inutilisable

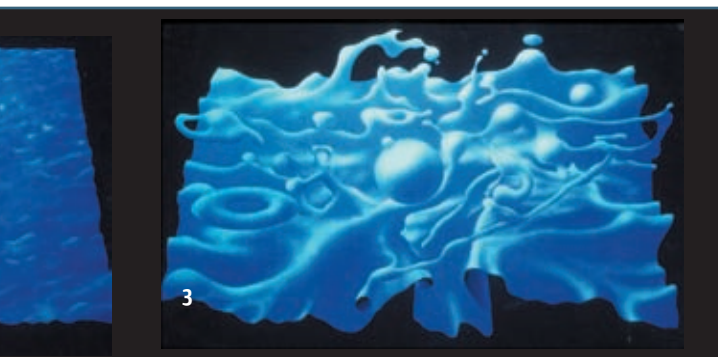
La première version de la géométrie dynamique quantique, dite « canonique », est régie par une équation proposée en 1967 par

Wheeler et de Witt. Cette équation est l'équivalent pour la gravitation de l'équation de Schrödinger pour la mécanique quantique, qui décrit la probabilité de présence d'une particule en termes d'une « fonction d'onde ». La différence est que, dans l'équation de Wheeler-de Witt, les variables ne sont plus la position et la vitesse d'une particule, mais la géométrie de l'espace et son contenu matériel ! Cette équation très complexe est inutilisable, en pratique, sous sa forme générale. La seule chance d'en trouver des solutions est de simplifier considérablement le problème. Par exemple, on peut se limiter à considérer, pour l'espace, une famille restreinte de géométries possibles, très simples, comme celles à courbure constante. Il faut encore, pour cela, spécifier des conditions aux limites pour l'Univers, en particulier ce que devient l'espace-temps à l'approche de la singularité. Ces conditions façonnent le comportement spatio-temporel de la fonction d'onde de l'Univers, à peu près de la même façon que la trajectoire d'une particule en mécanique classique est spécifiée par sa position et sa vitesse initiales. Dans le cas de la cosmologie, cela soulève des questions fondamentales qui sont loin d'être résolues.

Diverses suggestions ont été proposées, notamment par « l'école russe » dirigée par Andreï Linde et Alex Vilenkin au début →

[3] J. A. Wheeler, *Geometrodynamics*, Academic Press, 1962.

[4] B. S. de Witt, *Phys Rev.* 160, 1113, 1968 ; J. A. Wheeler, in *Battelle Rencontres*, dir. C. M. de Witt et J. A. Wheeler (Benjamin, New York, 1968).



# 35 ÉNIGMES

## 1 → TEMPS ZÉRO

⇒ des années 1980 [5], [6] et par « l'école anglo-saxonne », notamment par Jim Hartle et Stephen Hawking. En termes simples, le modèle quantique de Hartle et Hawking [7] n'envisage que des géométries spatio-temporelles sans frontière ni bord, comme l'est la surface d'une sphère, mais avec deux dimensions supplémentaires. Selon ces modèles, l'Univers serait fini non seulement dans l'espace (son volume total est fini) mais aussi dans le temps. La problématique singularité initiale disparaît alors. Plus exactement, elle se transforme en une simple singularité des coordonnées, comme le pôle Nord d'une sphère. Aucune violation des lois de la physique n'y apparaît. L'Univers n'aurait plus aucune frontière, ni spatiale ni temporelle. Il n'aurait pas eu de commencement et n'aura jamais de fin. Cette nouvelle « éternité du temps » n'est toutefois retrouvée qu'au prix de l'abandon du temps cosmique réel (mesuré par les horloges ou par l'expansion des galaxies) au profit d'un temps imaginaire (au sens mathématique du terme). Il resterait à proposer une interprétation satisfaisante de tout ceci, ce qui est loin d'être le cas.

### Une « mousse de mini-Univers »

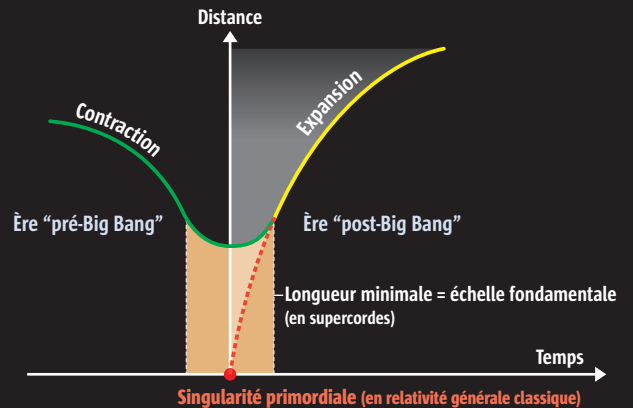
La suggestion d'Andrei Linde est très différente. Elle suppose des conditions initiales chaotiques. Qualitativement, la solution se présente sous la forme d'un gigantesque Univers éternel et auto-reproducteur, que l'on compare parfois à une « mousse de mini-Univers ». Chacune des « bulles » de cette mousse aurait ses propres caractéristiques : constantes physiques, nombre de dimensions spatiales, dynamique... , ce qui permet de la considérer, de manière abusive, comme un « autre Univers ». La totalité de notre Univers observable (à distinguer de l'Univers dans sa totalité) serait constituée d'une infime partie de l'une de ces

[5] A. D. Linde, *Physics Letters*, 1298, 177, 1983.

[6] A. Borde et A. Vilenkin, *Phys. Rev. Lett.*, 72, 3305, 1994.

[7] J. B. Hartle et S. W. Hawking, *Phys. Rev.*, D28, 2960, 1983.

### Fig.3 Éviter la singularité



SI, DANS LE CADRE D'UNE THÉORIE UNIFIÉE comme la théorie des supercordes, on suppose l'existence d'une plus petite longueur fondamentale, alors la singularité ponctuelle prévue par la relativité générale ordinaire est évitée. On peut alors envisager une ère « pré-Big Bang » au cours de laquelle l'Univers aurait été en contraction, puis aurait « rebondi » sur cette longueur fondamentale pour entrer en expansion.

© INFOGRAPHIE BRUNO BOURGEOIS

bulles, partie qui aurait été démesurément gonflée par un processus ultra-efficace d'expansion, baptisé « inflation ». Chaque bulle individuelle – en particulier celle qui constituerait « notre Univers » – pourrait naître et mourir. Mais l'Univers « global » n'aurait ni commencement ni fin.

Bien évidemment, une telle idée ne sera sans doute jamais vérifiable, ni observable. On se situe ici aux frontières de l'approche scientifique... et sans doute déjà de l'autre côté.

D'autres approches de la gravité quantique existent, telles la théorie des supercordes, la théorie des boucles ou les géométries non commutatives. Certains modèles cosmologiques qui en découlent permettent d'éliminer la singularité initiale et d'envisager une ère « pré Big Bang » pour l'histoire de l'Univers [fig. 3]. Malgré tout, les diverses théories de cosmologie quantique soulèvent autant, sinon plus, de problèmes qu'elles n'en éclairent sur les débuts de l'Univers. Mais c'est ce qui fait leur richesse et leur intérêt. Résolvent-elles l'énigme du temps zéro ? La réponse est ambiguë : oui, selon certains modèles, non selon d'autres. L'incertitude résulte peut-être de la simplification exagérée imposée pour pouvoir résoudre les équations. Quoi qu'il en soit, les singularités devront disparaître dans le cadre de la nouvelle vision unifiée que cherchent à construire les physiciens. ■

**Jean-Pierre Luminet**, directeur de recherche au CNRS. Il est astrophysicien au laboratoire Univers et théories de l'observatoire de Paris-Meudon. En collaboration avec Marc Lachièze-Rey, il publie ce mois-ci *De l'infini...* aux éditions Dunod. [jean-pierre.luminet@obspm.fr](mailto:jean-pierre.luminet@obspm.fr)

### POUR EN SAVOIR PLUS

- J.-P. Luminet et M. Lachièze-Rey, *De l'infini...*, Dunod, 2005.
- L. Z. Fang et R. Ruffini (dir.), *Quantum Cosmology*, World Scientific, 1987.
- A. Linde, *Inflation and Quantum Cosmology*, Academic Press, 1990.
- S. Hawking, *Une brève histoire du temps*, Flammarion, Coll. « Champs », 1999.

## FIGURES Ils ont étudié la question



**JOHN WHEELER** est professeur émérite de l'université de Princeton, dans le New Jersey. Il est le premier auteur, en 1962, de la théorie de la gravité quantique, qui indique qu'à l'échelle microscopique, l'Univers est une sorte d'écume fluctuante.



**ANDREI LINDE** est depuis 1990 professeur de physique à l'université Stanford, en Californie. Il est l'un des auteurs de la théorie inflationniste et promoteur d'un multi-Univers éternel, une sorte de mousse dans lequel se créent des bulles-Univers avec chacune des dimensions, des constantes et une dynamique particulières.



**STEPHEN HAWKING** occupe aujourd'hui la chaire de mathématiques de l'université de Cambridge, en Angleterre. Avec son compatriote Roger Penrose, il démontra en 1979 que, selon la théorie de la relativité générale, l'Univers avait forcément commencé par une singularité, une sorte de limite inatteignable.