

et il est donc peu probable de déboucher sur un univers plat. Mais la conclusion, assez troublante, de R. Penrose est qu'il est $10^{(10^{100})}$ fois plus probable d'obtenir un univers plat sans inflation qu'avec inflation !

Les tourments d'une inflation éternelle

Une autre approche qui conduit à la même conclusion est d'extrapoler l'histoire de l'Univers primitif à partir des conditions actuelles en remontant le temps à l'aide des lois physiques. Une telle extrapolation n'est pas univoque : étant donné les conditions moyennes actuelles, homogènes et de courbure nulle, de nombreux événements différents auraient pu avoir lieu dans le passé. Mais en 2008, Gary Gibbons, de l'Université de Cambridge, et Neil Turok, de l'Institut *Perimeter* de physique théorique dans l'Ontario, ont montré qu'un nombre écrasant d'extrapolations font intervenir une inflation insignifiante.

Cette conclusion est en accord avec celle de R. Penrose. Un univers plat et homogène est improbable, et l'inflation est un mécanisme puissant pour obtenir ces propriétés, mais cet atout est contrebalancé par le fait que les conditions requises pour amorcer la bonne dose d'inflation sont encore plus improbables ! Tous facteurs pris en compte, l'Univers a plus de chances d'être arrivé à son état actuel sans l'aide de l'inflation qu'avec.

De nombreux physiciens et cosmologistes trouvent ces arguments théoriques peu convaincants comparés à l'accord entre les prédictions formulées au début des années 1980 et les observations cosmologiques de précision disponibles aujourd'hui. Après tout, une expérience concluante l'emporte sur n'importe quelle spéculation théorique. Mais il y a un piège : les prédictions du début des années 1980 s'appuyaient sur une interprétation naïve du mécanisme de l'inflation, représentation qui s'est révélée en grande partie fausse.

Ce changement de point de vue a commencé lorsqu'on s'est rendu compte que l'inflation est éternelle : une fois entamée, elle ne s'arrête jamais. Cela résulte de la combinaison de la physique quantique avec l'expansion accélérée. Nous avons vu que les fluctuations quantiques peuvent légèrement retarder le moment où l'inflation prend fin. Les petites fluctua-

tions ont de petits effets. Cependant, les fluctuations étant aléatoires, elles seront grandes dans certaines régions de l'espace, et conduiront à des retards importants.

Ces régions en retard sont extrêmement rares, et on pourrait penser qu'elles sont négligeables. Mais elles sont en inflation ! Elles continuent ainsi à se dilater vertigineusement et, en quelques instants, éclipsent les régions où l'inflation s'est déjà terminée. Le résultat est un océan d'espace en inflation entourant de petites îles emplies

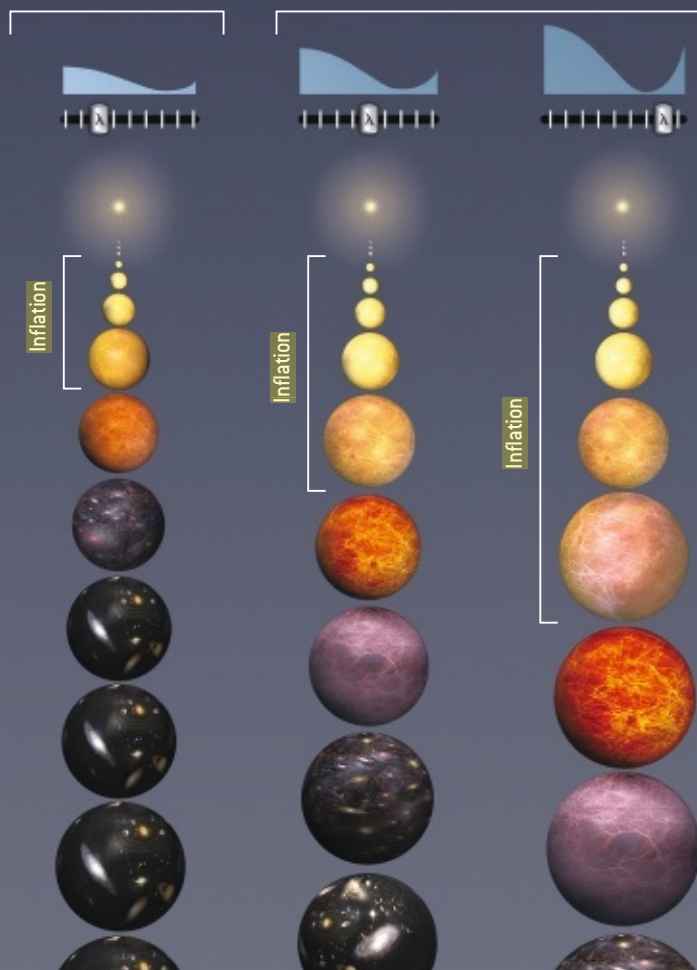
de matière et de rayonnement. Qui plus est, l'inflaton fluctue aussi dans les régions qui croissent de façon sauvage, et engendrent à leur tour de nouvelles régions en inflation et de nouvelles îles de matière, chacune constituant un univers en soi. Ce processus se poursuit à l'infini, créant un nombre illimité de régions où l'inflation est terminée, entourées par une quantité sans cesse grandissante d'espace qui se dilate. Si cette idée ne vous déroute pas, ne soyez pas inquiet : le problème reste à venir.

PROBLÈME N° 1 : LA MAUVAISE INFLATION

L'inflation est censée engendrer naturellement un grand volume d'espace homogène et plat reproduisant les structures à grande échelle observées. Malheureusement, cela se produit seulement lorsque la courbe de potentiel de l'inflaton a un profil très particulier, obtenu par un ajustement fin des paramètres (désignés collectivement ci-dessous par λ). Pour tous les autres profils d'énergie potentielle, le résultat est en contradiction avec les observations ; on considère alors que l'inflation est « mauvaise ».

« Bonne » inflation
Pour la bonne courbe de l'énergie potentielle, l'inflation produit la densité de galaxies observée.

« Mauvaise » inflation
En général, l'inflation dure trop longtemps et produit trop de galaxies.



Matcom Godwin

Ces régions ne sont pas toutes semblables. La nature aléatoire des lois quantiques garantit que certaines sont très hétérogènes, ou de courbure très élevée. Cela ressemble au problème de l'inflation mal ajustée décrit précédemment, mais la cause en est différente. La mauvaise inflation est probable parce que les paramètres contrôlant la forme du potentiel de l'inflaton ont de fortes chances d'être trop grands. Mais dans le cas présent, l'hétérogénéité résulte de l'inflation sans fin et

des fluctuations quantiques aléatoires, quelles que soient les valeurs des paramètres initiaux.

Pour être exact, les régions en inflation retardée sont en fait en nombre infini. Et un nombre infini d'îles où l'inflation est achevée auront des propriétés semblables à celles que nous observons, tandis qu'un nombre également infini auront des propriétés différentes. A. Guth a résumé ainsi la vraie nature de l'inflation : « Dans un univers en inflation éternelle, tout ce

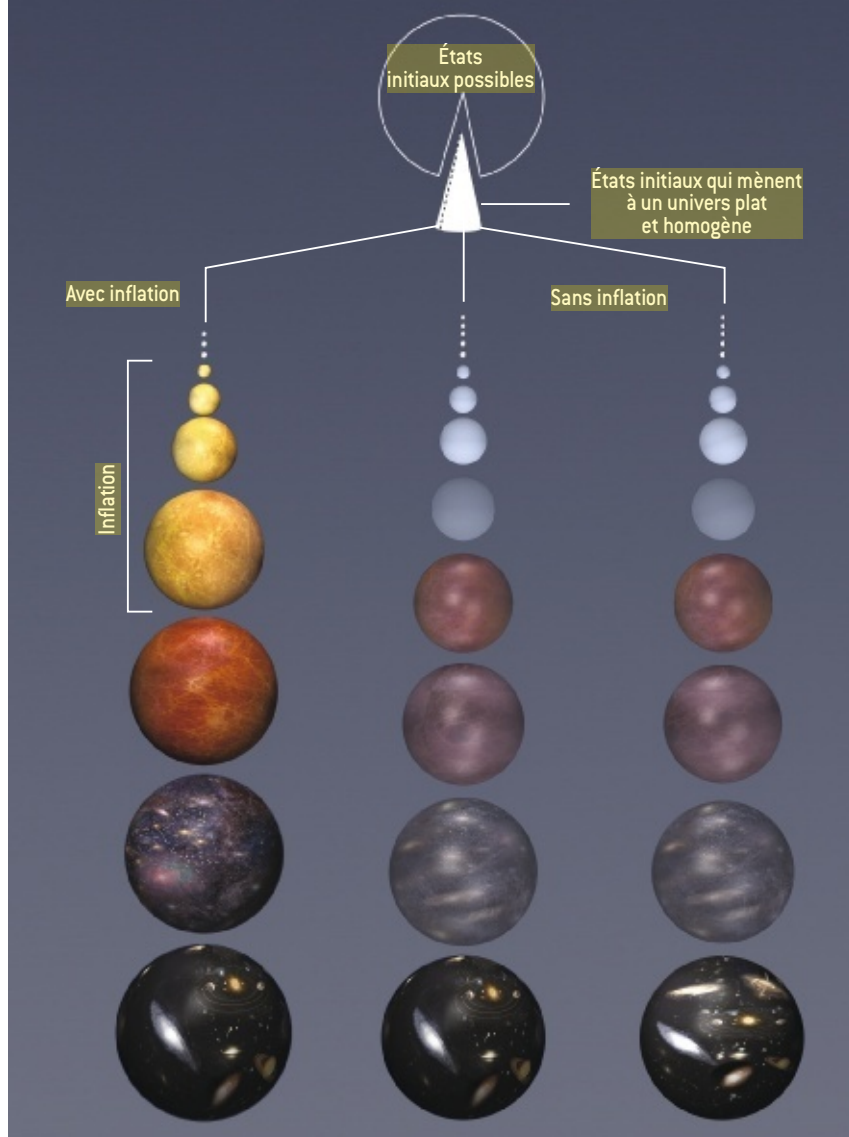
qui peut arriver arrive ; en fait, cela arrive un nombre infini de fois. »

Alors, notre Univers est-il l'exception ou la règle ? Dans un ensemble infini d'îles-univers, c'est difficile à dire. Imaginez que l'on trie les univers par catégories pour essayer d'évaluer leurs probabilités. La difficulté est qu'il y a un nombre infini de façons de trier un ensemble infini, qui produisent un nombre infini de probabilités. Il n'y a donc aucune façon de juger quel type de région-univers est le plus probable dans un univers en inflation éternelle.

Nous avons maintenant un problème. Que signifie l'affirmation que l'inflation est prédictive (par exemple « L'univers est homogène »), si tout ce qui peut arriver arrive un nombre infini de fois ? Et si la théorie ne fait pas de prédictions testables, comment prétendre que la théorie est en accord avec les observations ?

PROBLÈME N° 2 : LES CONDITIONS INITIALES

L'inflation est censée se produire quelles que soient les conditions initiales de l'Univers. Une analyse plus poussée montre cependant qu'elle requiert des conditions de départ précises. De tous les états initiaux possibles, seule une petite fraction conduit à des univers homogènes et plats semblables à celui que l'on observe. Parmi ceux-ci, la plupart ne passent même pas par une période d'inflation, tandis que seule une part infinitésimale subit l'inflation.



Des rustines sur la théorie

Les théoriciens sont conscients du problème, mais, en dépit du fait qu'ils se débattent avec depuis 25 ans, ils espèrent parvenir à le résoudre et à rétablir le tableau inflationnaire naïf du début des années 1980, qui les avait convaincus d'adopter cette théorie.

Certains suggèrent d'essayer de construire des théories où l'inflation n'est pas éternelle, pour étouffer dans l'œuf cette épineuse infinité d'univers. Mais le caractère éternel est une conséquence naturelle de l'inflation couplée à la physique quantique. Pour l'éviter, l'Univers devrait être au départ dans un état très particulier et rempli d'une forme spéciale d'énergie inflationnaire, de sorte que l'inflation se termine en toute région de l'espace avant que les fluctuations quantiques aient une chance de la faire redémarrer. Mais dans ce scénario, le résultat final est très sensible à l'état initial. Cela va à l'encontre du but recherché : expliquer l'univers observé quelles qu'aient été les conditions qui prévalaient lors de l'inflation.

Une stratégie alternative suppose que les régions telles que notre Univers observable sont le résultat le plus probable de l'inflation. Les partisans de cette approche imposent une « mesure », une règle spécifique pour attribuer une probabilité à un type de région. Mais cette notion *ad hoc* de mesure est un aveu implicite que la théorie de l'inflation à elle seule n'explique ni ne prédit rien.

Pire encore, les théoriciens ont proposé de nombreuses mesures aussi raisonnables les unes que les autres qui conduisent à des conclusions différentes. Par exemple, la mesure du volume suggère que les régions soient pondérées par leur taille. Au premier abord, ce choix paraît sensé. L'idée qui sous-tend l'inflation est qu'elle explique l'homogénéité et la platitude que nous observons en créant de grands volumes d'espace. Malheureusement, la mesure du volume ne convient pas. En effet, en vertu de la croissance exponentielle, les régions qui

se sont formées après la nôtre, après davantage d'inflation, vont occuper un volume total considérablement plus important. Par conséquent, les régions plus jeunes que la nôtre sont beaucoup plus répandues. Avec cette mesure, notre existence même serait plus qu'improbable.

Les partisans des mesures ont adopté une approche par tâtonnements : ils inventent et testent des mesures jusqu'à trouver celle qui produira la réponse souhaitée, à savoir que notre Univers est hautement probable. Supposons qu'ils y parviennent. Ils auront alors besoin d'un autre principe justifiant l'utilisation de cette mesure plutôt que d'une autre, et d'un principe pour choisir ce principe, et ainsi de suite.

Une autre approche encore consiste à invoquer le principe anthropique. Alors que le concept de mesure suppose que nous vivons dans une région typique, le principe anthropique suppose que nous vivons dans une région très particulière, dotée des conditions *a minima* nécessaires pour abriter la vie. L'idée est que les conditions régnant dans les régions les plus typiques sont incompatibles avec la formation de galaxies ou d'étoiles, ou toute autre condition préalable à la vie telle que nous la connaissons. Même si les régions typiques occupent plus d'espace que la nôtre, on peut les ignorer parce que seules les régions habitables comptent.

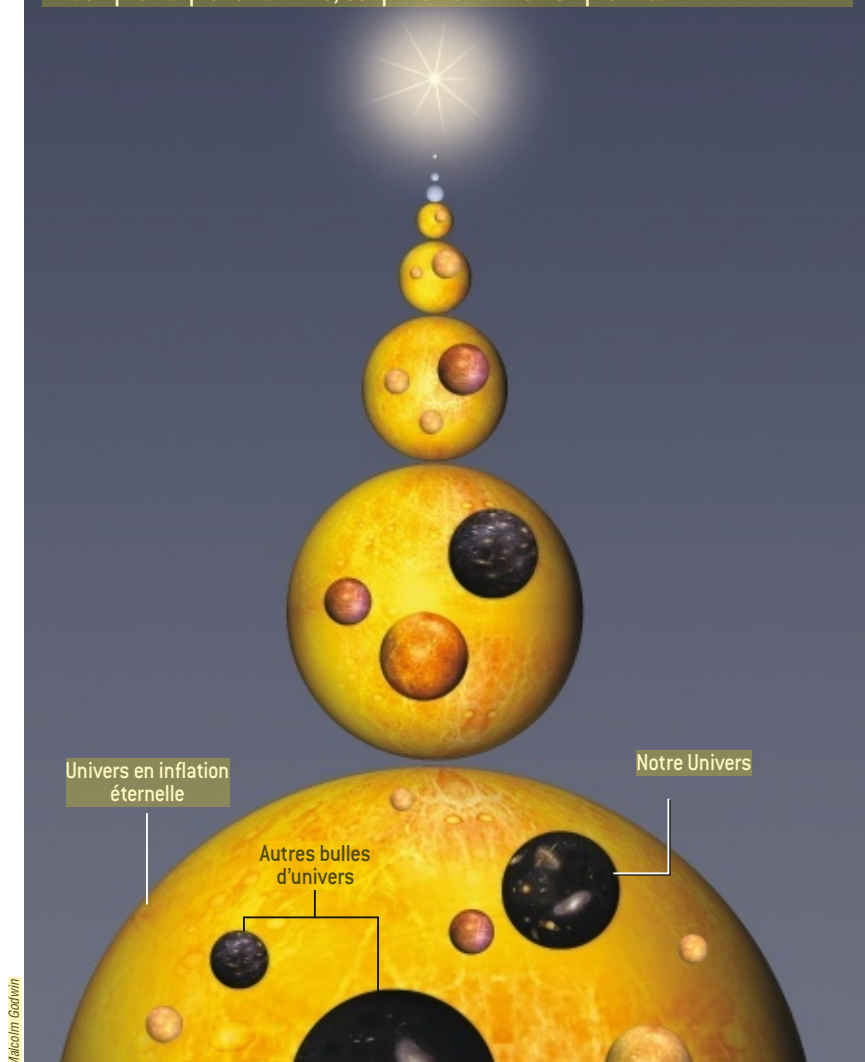
Malheureusement pour cette idée, les conditions de notre Univers ne sont pas le minimum requis pour la vie : l'Univers est plus plat, plus homogène et plus invariant d'échelle qu'il n'aurait besoin de l'être pour héberger la vie. Les régions plus typiques, par exemple plus jeunes que la nôtre, sont *a priori* tout aussi habitables et beaucoup plus nombreuses.

Un Univers cyclique

À la lumière de ces arguments, le *credo* selon lequel les observations cosmologiques ont vérifié les prédictions principales de la cosmologie inflationnaire est trompeur. On peut juste dire que les données ont confirmé les prédictions de la théorie de l'inflation naïve telle qu'elle était comprise avant 1983. Mais cette théorie n'est pas la cosmologie inflationnaire d'aujourd'hui. La première théorie suppose que l'inflation conduit à un résultat prévisible régi par les lois de la physique classique. En réalité, c'est la physique quan-

PROBLÈME N° 3 : UNE INFLATION ÉTERNELLE

Les prédictions de l'inflation sont censées avoir été vérifiées par les observations. Mais est-ce vraiment le cas ? En raison des fluctuations quantiques qui font varier son énergie potentielle, l'inflation continue indéfiniment dans l'ensemble de l'espace. Mais là où elle s'achève localement, une bulle d'univers voit le jour et grandit à un rythme normal. Nous vivons dans une telle région, mais il en existe un nombre infini ayant une variété infinie de propriétés. Tout ce qui peut arriver se produit dans une certaine bulle d'univers. En d'autres termes, l'inflation prédit que tout arrive, ce qui revient à ne rien prédire.



Malcolm Godwin

tique qui gouverne l'inflation, et tout ce qui peut arriver arrive. Et si la théorie de l'inflation ne fait pas de prédictions fermes, à quoi sert-elle ?

Le problème sous-jacent est que les comportements atypiques ne sont pas pénalisés, et même au contraire. Les régions où la fin de l'inflation est en retard continuent à croître à un rythme accéléré et prennent donc immanquablement le dessus. Dans une situation idéale, toute région qui ne suit pas le rythme général se dilaterait plus lentement ou, mieux encore, rétrécirait. L'essentiel de l'Univers serait alors constitué de régions au comportement « sage », où le lissage prend fin en temps et en heure, et l'univers observé aurait alors le confort de la normalité.

Une théorie alternative à la cosmologie inflationnaire que mes collègues et moi-même avons proposée jouit précisément de cette propriété. Selon cette « théorie cyclique », comme on la nomme, le Big Bang n'est pas le commencement de l'espace et du temps, mais plutôt un « rebond » à partir d'une phase précédente de contraction vers une nouvelle phase d'expansion, accompagnée par la création de matière et de rayonnement. Cette théorie est cyclique parce que, au bout de 1 000 milliards d'années, l'expansion dégénère en contraction, jusqu'à un nouveau rebond et ainsi de suite. Le point clef est que le lissage de l'Univers se produit avant le Big Bang, au cours de la période de contraction (de façon moins intuitive que la dilatation, une contraction suffisante rend aussi un matériau homogène). Toute région en retard continue à se contracter pendant que les régions normales rebondissent en temps et en heure et commencent à se dilater, si bien que les régions retardées restent comparativement petites et négligeables.

Le lissage pendant la contraction a une conséquence observable. Durant toute phase de lissage, que ce soit dans la théorie de l'inflation ou la théorie cyclique, les fluctuations quantiques engendrent de petites distorsions de l'espace-temps qui se propagent, nommées ondes gravitationnelles, et qui laissent une empreinte caractéristique sur le rayonnement de fond diffus. Leur amplitude est proportionnelle à la densité d'énergie. Dans la théorie classique, l'inflation se produit à un stade où l'Univers est très dense, alors que le processus équivalent dans la théorie cyclique se produit quand l'Univers est pratique-

ment vide, si bien que l'empreinte des ondes gravitationnelles serait radicalement différente. Bien sûr, la théorie cyclique est relativement jeune et pourrait rencontrer ses propres problèmes, mais elle illustre l'existence d'alternatives qui ne seraient pas soumises à une inflation éternelle et incontrôlable. Nos travaux préliminaires suggèrent que le modèle cyclique n'est pas affecté par les autres problèmes décrits précédemment.

Bien sûr, je viens de présenter des arguments pour et contre l'inflation comme deux positions radicales, sans laisser la place à un contre-interrogatoire et sans y mettre de nuances. Lors d'une réunion sur ces sujets organisée en janvier 2011 au Centre de physique théorique de Princeton, de nombreux physiciens éminents ont plaidé que les problèmes de l'inflation n'étaient que des « douleurs de croissance », et ne devraient pas ébranler notre confiance dans l'idée de base de la théorie. D'autres, dont je suis, pensaient au contraire que les problèmes affectent le cœur de la théorie, et qu'elle doit être sérieusement corrigée ou remplacée.

Le test des ondes gravitationnelles

Au bout du compte, ce sont les données observationnelles qui trancheront. Les prochaines observations du fond diffus cosmologique par le satellite *Planck* et d'autres missions au sol ou embarquées en ballon seront déterminantes. Des expériences pour rechercher l'empreinte des ondes gravitationnelles sont déjà en cours, et les résultats devraient émerger d'ici deux à trois ans. La détection d'une empreinte d'onde gravitationnelle étayerait la théorie de l'inflation ; l'absence de détection serait un revers majeur. Pour que l'inflation ait un sens en dépit d'un résultat nul, les cosmologistes devraient supposer que l'inflaton avait un potentiel très particulier, avec juste la forme adéquate pour étouffer les ondes gravitationnelles, ce qui semble assez peu probable. De nombreux chercheurs se tourneraient alors vers des théories alternatives, comme celle de l'univers cyclique, qui prédit naturellement un signal d'ondes gravitationnelles si faible qu'il ne serait pas observable. Ce résultat sera un moment critique dans notre quête pour déterminer pourquoi l'Univers est tel qu'il est, et ce que l'avenir lui réserve. ■

L'AUTEUR



Paul STEINHARDT est directeur du Centre de physique théorique de l'Université de Princeton, aux États-Unis.

✓ BIBLIOGRAPHIE

M. Bojowald, *L'Univers rebondissant*, *Pour la Science*, n° 375, janvier 2009.
http://bit.ly/pls375_rebond

G. Gibbons et N. Turok, *The measure problem in cosmology*, *Physical Review D*, vol. 77 (6), 063516, mars 2008. Prépublication : <http://arxiv.org/abs/hep-th/0609095>

P. Steinhardt et N. Turok, *Endless Universe : Beyond the Big Bang*, Doubleday, 2007.

G. Veneziano, *L'Univers avant le Big Bang*, *Pour la Science*, n° 320, juin 2004.
http://bit.ly/pls320_bigbang

A. Linde, *Quantum cosmology, inflation, and the anthropic principle*, dans *Science and Ultimate Reality : Quantum Theory, Cosmology and Complexity*, Cambridge University Press, 2004.

A. Guth, *The Inflationary Universe*, Basic Books, 1998.