

données éparses l'avaient suggéré ; c'est en montrant que la fréquence des dimères était supérieure à celle des produits d'oxydation qu'au milieu des années 2000, nos équipes ont remis en lumière cet aspect de la photochimie des ultraviolets A.

En outre, les travaux d'autres groupes ont confirmé que des dimères de pyrimidines participent à l'apparition de mutations dans les cellules humaines exposées aux ultraviolets A. Nous avons par ailleurs montré que la proportion des différents photoproduits dimériques était différente de celle obtenue avec les ultraviolets B : nous ne trouvons pas de photoproduits (6-4), très peu de dimères de cytosines, et une majorité de dimères de thymines. Les dimères thymine-cytosine ne représentent qu'environ dix pour cent du total. Cette proportion se retrouve dans tous les types cellulaires. De plus, à l'inverse des ultraviolets B, la peau protège peu contre la formation des dimères par les ultraviolets A (car la mélanine absorbe moins ces rayons).

Nous avons donc affaire à une photochimie de l'ADN particulière dans les cellules exposées aux ultraviolets A : l'absorption de ces photons par l'ADN, bien que faible, est assez efficace pour créer des photoproduits. C'est la différence des états excités initiaux de l'ADN qui expliquerait la différence de nature des dommages entre ultraviolets A et ultraviolets B.

Des crèmes anti-ultraviolets A

Les conséquences de ces résultats récents sont importantes. Bien que la formation des dimères avec les ultraviolets A soit moins efficace qu'avec les ultraviolets B, la prédominance des ultraviolets A dans la lumière à laquelle nous sommes exposés suggère qu'une fraction non négligeable des photoproduits mutagènes provienne de cette partie du spectre. Ces données soulignent aussi les propriétés génotoxiques des ultraviolets A, c'est-à-dire qu'ils peuvent engendrer des mutations, voire des cancers.

Ce risque cancérigène, ajouté au rôle prédominant des ultraviolets A dans le vieillissement cutané, a conduit les législateurs à imposer aux écrans solaires du commerce une photoprotection efficace dans cette partie du spectre solaire. La réévaluation du pouvoir cancérigène des ultraviolets A a entraîné un autre changement : le Centre de recherche interna-

Voir les lésions de l'ADN

Quand l'ADN absorbe les ultraviolets, il peut être cassé ou oxydé et subir des dommages, c'est-à-dire que ses bases fusionnent pour former des photoproduits. Plusieurs approches ont été développées pour « observer » ces lésions.

La plus fréquente repose sur l'utilisation d'anticorps – des molécules du système immunitaire – reconnaissant les photoproduits ; on injecte de l'ADN irradié – donc lésé – à des lapins, de sorte que leur système immunitaire produit des anticorps dirigés contre les lésions de l'ADN qu'il ne reconnaît pas. Puis on récupère les anticorps dans le sang des animaux et on les utilise comme des marqueurs qui se fixent sur l'ADN des cellules plus ou moins bien selon la quantité de photoproduits. On visualise ainsi des dommages dans des coupes de peau.



Patrick Avavan / CEA

D'autres techniques permettent aux scientifiques de quantifier les cassures des brins d'ADN, ainsi que certaines bases modifiées et des dimères. On « traite » d'abord l'ADN pour qu'il soit coupé aux endroits des lésions. Puis on visualise les fragments en les séparant dans un gel selon une technique dite de chromatographie. En couplant cette approche avec la technique de PCR (*polymerase chain reaction*), qui recopie un

grand nombre de fois les fragments d'ADN, on peut même déterminer la position des photoproduits dans un gène.

La dernière technique permet de compter et de caractériser les dommages après les avoir « détachés » de l'ADN. Pour ce faire, on couple un appareil de chromatographie liquide avec un spectromètre de masse (*voir la photo*), qui peut quantifier en une seule fois tous les dimères et une dizaine de produits d'oxydation.

tional sur le cancer a classé les équipements de bronzage artificiel riches en ultraviolets A parmi les agents cancérigènes pour l'homme. L'Institut national du cancer a repris cette classification et a publié un rapport sur le sujet en 2010.

Depuis une trentaine d'années, on conçoit mieux le rôle des dommages de l'ADN dans l'apparition des cancers de la peau. Ces informations ont permis aux scientifiques de mieux comprendre la réaction des cellules aux ultraviolets et d'améliorer les stratégies de protection contre cet agent mutagène que sont les rayonnements ultraviolets du Soleil.

Toutefois, de nombreuses questions liées à la formation de ces dommages restent ouvertes. Ainsi, les photoproduits joueraient un rôle de « détecteurs » pour déclencher le bronzage et protéger davantage la peau (mais on ignore comment). Leur présence serait aussi liée à la modulation des défenses immunitaires et à l'apparition des coups de soleil. Depuis la première description du dimère de thymine il y a un demi-siècle, les dommages engendrés par les ultraviolets dans l'ADN méritent encore l'attention des scientifiques de toutes disciplines. ■

✓ BIBLIOGRAPHIE

A. Banyasz *et al.*, Base pairing enhances fluorescence and favors cyclobutane dimer formation induced upon absorption of UVA radiation by DNA, *Journal of the American Chemical Society*, vol. 133, pp. 5163-5165, 2011.

S. Mouret *et al.*, UVA-induced cyclobutane pyrimidine dimers in DNA : a direct photochemical mechanism ?, *Organic & Biomolecular Chemistry*, vol. 8, pp. 1706-1711, 2010.

S. Mouret *et al.*, Cyclobutane pyrimidine dimers are predominant DNA lesions in whole human skin exposed to UVA radiation, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 103, pp. 13765-13770, 2006.

J.-L. Ravanat *et al.*, Singlet oxygen-mediated damage to cellular DNA determined by the comet assay associated with DNA repair enzymes, *Biological Chemistry*, vol. 385, pp. 17-20, 2004.

L'inflation cosmique

Paul Steinhardt

Selon la théorie de l'inflation, proposée il y a 30 ans, l'Univers aurait connu une brève phase d'expansion vertigineuse juste après le Big Bang. Cependant, cette théorie qui est au cœur de la cosmologie moderne souffre de sérieuses difficultés.

Il y a 30 ans, en 1981, Alan Guth, alors postdoctorant au Centre de l'accélérateur linéaire de Stanford, a donné une série de séminaires qui ont introduit l'« inflation » dans le lexique de la cosmologie. Ce terme désigne une brève phase d'expansion monstrueusement accélérée, qui aurait eu lieu juste après le Big Bang. L'un de ces séminaires se tenait à l'Université Harvard, où j'étais moi-même postdoctorant. J'ai été immédiatement enthousiasmé par l'idée et j'y ai souvent réfléchi depuis. Nombre de mes collègues en astrophysique, en physique gravitationnelle et en physique des particules ont aussi été séduits. Aujourd'hui encore, le développement de la théorie de l'inflation et ses tests forment un domaine de recherche très dynamique.

La raison d'être de la théorie de l'inflation est de combler une lacune dans la théorie du Big Bang. Selon cette dernière, l'Univers se dilate en se refroidissant lentement depuis ses débuts il y a quelque 13,7 milliards d'années. L'expansion et ce refroidissement expliquent précisément de nombreuses caractéristiques de l'Univers actuel et passé. Mais il y a un problème. Dans la théorie du Big Bang, les conditions initiales de l'Univers sont

précisément fixées : il était initialement très homogène, ne présentant que d'infimes variations de la distribution d'énergie, et il était plat, c'est-à-dire que les rayons lumineux et les objets en mouvement libre se propageaient en ligne droite, comme dans l'espace euclidien usuel.

Une théorie présentée comme un fait établi

En vertu de quoi l'Univers primordial aurait-il dû être homogène et plat ? *A priori*, ces conditions initiales semblent improbables. C'est là que l'inflation intervient. Selon A. Guth, même si l'Univers avait fait une entrée en scène en désordre, avec une distribution d'énergie très hétérogène et une courbure compliquée, une expansion brève et brutale aurait dilué l'énergie jusqu'à ce qu'elle soit uniformément répartie et aurait aplani toute courbure de l'espace. Après cette brève période d'inflation, l'Univers aurait continué à se dilater, mais au rythme modéré de la théorie du Big Bang, à partir des conditions initiales adéquates pour que son contenu évolue vers les étoiles et les galaxies que nous voyons aujourd'hui.

L'inflation est une idée tellement séduisante que les cosmologistes, moi compris, la présentent souvent aux étudiants et au grand public comme un fait établi. Et pourtant, si les arguments en sa faveur n'ont cessé de se renforcer depuis qu'A. Guth en a proposé l'idée, il en est de même des arguments qui vont à son encontre !

Les deux argumentaires n'ont pas eu le même écho. Les éléments en faveur de l'inflation sont connus d'un grand nombre de physiciens, astrophysiciens et amateurs. Mais peu de gens s'intéressent aux arguments en défaveur de l'inflation, hormis quelques physiciens qui essaient de répondre aux questions gênantes. La plupart des cosmologistes ont mené leurs travaux en utilisant ou en testant les prédictions de la théorie de l'inflation sans se soucier des questions de fond, en espérant qu'elles finiraient par être résolues. Malheureusement, les problèmes ont résisté à tous nos efforts jusqu'à présent.

Ayant contribué à la fois à la théorie de l'inflation et aux théories concurrentes, je me sens partagé, et j'ai le sentiment que de nombreux collègues ne savent pas trop quoi penser non plus des arguments contre l'inflation. Pour mettre en scène cette situa-

en débat



SUR CETTE REPRÉSENTATION
de l'expansion de l'Univers au fil du temps,
l'inflation est la période de dilatation
brutale qui succède immédiatement
au Big Bang [point lumineux].

tion inconfortable, je vais instruire le procès de la cosmologie de l'inflation en présentant les deux points de vue extrêmes. Je vais d'abord jouer le rôle de la défense, en présentant les points forts de la théorie, puis, avec tout autant de conviction, je me glisserai dans le rôle de l'accusation, en présentant les problèmes non résolus les plus préoccupants.

Des arguments en faveur de l'inflation

L'inflation est une théorie aujourd'hui si populaire que son exposé peut être bref. Quelques détails supplémentaires sont nécessaires pour apprécier pleinement ses avantages. L'inflation repose sur un ingrédient nommé énergie inflationnaire qui, combiné à la gravité, entraîne une expansion fulgurante de l'Univers en un bref instant. L'énergie inflationnaire doit être extraordinairement dense, et cette densité doit rester presque constante au cours de toute la période d'inflation. Sa propriété la plus étonnante est qu'elle exerce une force répulsive qui s'oppose à la gravité. C'est cette répulsion qui est à l'origine de l'expansion rapide.

Si l'idée de A. Guth a séduit les théoriciens, c'est parce qu'ils avaient déjà identifié plusieurs sources possibles pour cette énergie. Le principal candidat est un « champ scalaire », une grandeur qui associe à chaque point de l'espace et à tout instant un nombre (un champ électrique est un champ vectoriel, puisqu'il associe à chaque point un vecteur). Dans le cas particulier de l'inflation, ce champ scalaire porte le nom d'inflaton. Le célèbre boson de Higgs recherché actuellement au LHC (Grand collisionneur de hadrons) du CERN, à Genève, est la particule associée à un autre champ scalaire.

Comme tout champ, l'inflaton a une certaine intensité en chaque point, qui détermine la force qu'il exerce sur lui-même et sur les autres champs. Pendant la phase d'inflation, son intensité est restée presque constante partout. Un champ est doté d'une certaine quantité d'énergie dite potentielle, qui dépend de son intensité. La relation entre l'intensité et l'énergie peut être représentée par une courbe. Pour l'inflaton, la courbe supposée ressemble à la coupe verticale d'un plateau en pente douce qui plonge dans une vallée encaissée (voir l'encadré page 55).

L'ESSENTIEL

✓ L'inflation cosmique est une théorie largement admise. Selon elle, la géométrie et l'uniformité actuelles du cosmos résultent d'une expansion fulgurante juste après le Big Bang.

✓ À mesure que la théorie de l'inflation se développait, des failles sont apparues dans ses fondements.

✓ De très improbables conditions initiales auraient été nécessaires pour enclencher l'inflation. Pire, celle-ci serait éternelle et la théorie n'aurait alors pas de pouvoir prédictif. Les théoriciens s'efforcent de lever les difficultés ou de forger d'autres théories.

Le champ est initialement sur le plateau, dans un état de haute énergie et d'intensité élevée, et va perdre progressivement à la fois de l'intensité et de l'énergie pour évoluer vers l'état d'énergie minimale, en glissant le long de la pente vers le fond de la vallée. En fait, les équations qui décrivent son évolution sont assez semblables à celles d'une bille qui dévalerait une pente de la même forme que la courbe de l'énergie potentielle.

L'énergie potentielle de l'inflaton peut entraîner l'expansion de l'Univers à un rythme accéléré. Ce processus peut lisser et aplanir l'Univers à condition que le

Les arguments en faveur de l'inflation peuvent être résumés en trois points. Premièrement, l'inflation est inévitable. Les développements de la physique théorique depuis la proposition de A. Guth n'ont fait que renforcer l'idée que l'Univers contenait à sa naissance des champs susceptibles d'entraîner l'inflation. Ils apparaissent par centaines dans les théories d'unification de la physique, telles que la théorie des cordes. Dans l'Univers primitif chaotique, il est presque certain qu'il existait une région de l'espace où l'un de ces champs remplissait les conditions pour qu'il y ait inflation.

L'INFLATION A DILATÉ L'UNIVERS D'UN FACTEUR 10^{25} en moins de 10^{-30} seconde, de quoi le rendre homogène et aplanir toute courbure.

champ reste sur le plateau suffisamment longtemps (environ 10^{-30} seconde) pour dilater l'Univers d'un facteur 10^{25} ou plus.

L'inflation s'achève quand le champ atteint la fin du plateau et se précipite vers le fond de la vallée. À ce stade, l'énergie potentielle se convertit en formes d'énergie plus familières, à savoir la matière ordinaire, le rayonnement et la matière noire, qui emplissent l'Univers actuel. L'Univers entre alors dans une période d'expansion modérée qui ralentit doucement, au cours de laquelle la matière s'aggrave pour former les structures cosmiques.

L'inflation lisse l'Univers, mais, de la même façon que l'étirement d'un morceau de caoutchouc laisse de petites irrégularités, ce lissage n'est pas parfait. De petites irrégularités subsistent à cause d'effets quantiques. Les lois de la physique quantique imposent que l'intensité d'un champ ne peut avoir exactement la même valeur partout dans l'espace : elle subit des fluctuations aléatoires. En raison de ces fluctuations quantiques, l'inflation prend fin à des instants légèrement différents selon les régions de l'espace, qui se retrouvent donc à des énergies légèrement différentes. Ces variations spatiales sont les germes qui donneront à terme les étoiles et les galaxies. L'une des prédictions de la théorie de l'inflation est que ces fluctuations de température sont pratiquement invariantes d'échelle, c'est-à-dire que leur amplitude ne dépend pas de la taille de la région considérée ; elle est comparable à toutes les échelles.

Deuxièmement, l'inflation explique pourquoi l'Univers est si homogène et plat aujourd'hui. Personne ne sait dans quelle mesure cela était le cas au moment du Big Bang, mais avec l'inflation, on n'a pas besoin de le savoir, car la période d'expansion accélérée l'a étiré, lui conférant son homogénéité et sa courbure nulle.

Troisièmement, et ce point est certainement le plus convaincant, la théorie de l'inflation a une grande portée prédictive. De nombreuses observations du rayonnement de fond diffus cosmologique (le fossile de la première lumière émise après le Big Bang) ou de la distribution des galaxies ont ainsi confirmé que les fluctuations de la distribution d'énergie dans l'Univers primitif étaient presque invariantes d'échelle.

Des arguments à charge

Passons maintenant en revue les arguments en défaveur de la théorie de l'inflation. Les premiers signes qu'une théorie est vouée à l'échec sont en général de petits désaccords entre les observations et les prédictions. Ce n'est pas le cas ici : les données observationnelles concordent parfaitement avec les prédictions de la théorie de l'inflation formulées au début des années 1980. Les arguments contre l'inflation remettent plutôt en cause les fondements logiques de la théorie. Cette dernière fonctionne-t-elle vraiment aussi bien qu'on l'a présentée ? Les prédictions faites au début des années 1980 sont-elles encore

celles du modèle inflationnaire tel que nous le comprenons aujourd'hui ? Il y a de bonnes raisons de penser que la réponse à ces deux questions est non.

Reprenons le premier point : l'inflation est-elle vraiment inévitable ? Peut-être, mais si c'est le cas, il y a un corollaire embarrassant : une « mauvaise » inflation est plus probable que la « bonne ». Par mauvaise inflation, on entend une période d'expansion accélérée dont le résultat est en contradiction avec les observations, par exemple qui engendre des fluctuations de température trop grandes. La différence entre la bonne et la mauvaise inflation dépend de la forme précise de la courbe de l'énergie potentielle, qui est contrôlée par un paramètre numérique susceptible en principe de prendre n'importe quelle valeur entre zéro et un. Mais seul un intervalle très étroit de valeurs conduit aux variations de température observées. Dans un modèle inflationnaire typique, cette valeur doit être proche de 10^{-15} . Une valeur un peu moins proche de zéro, par exemple 10^{-8} ou 10^{-10} , engendre une mauvaise inflation, ayant un même facteur d'accélération de l'expansion, mais accompagnée de fortes variations des températures.

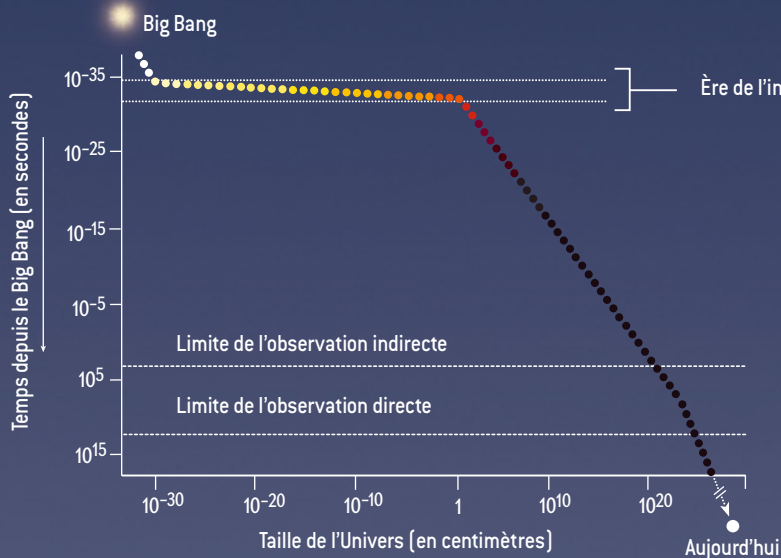
Nous pourrions être tentés d'ignorer simplement la mauvaise inflation si elle était incompatible avec la vie. Dans ce cas, même si de fortes variations de température survenaient, personne ne serait là pour les observer. Ce type de raisonnement relève du « principe anthropique ». Mais il ne s'applique pas ici. Des hétérogénéités primordiales plus importantes conduiraient à un nombre plus élevé d'étoiles et de galaxies, et l'Univers serait sans doute plus habitable qu'il ne l'est aujourd'hui.

Non seulement la mauvaise inflation est plus probable que la bonne, mais il est encore plus vraisemblable qu'il n'y ait pas d'inflation du tout ! Le théoricien britannique Roger Penrose a soulevé ce point dès les années 1980. Il a appliqué des principes thermodynamiques, semblables à ceux qui servent à décrire les configurations des molécules dans un gaz, pour dénombrer les configurations initiales possibles de l'inflaton et du champ gravitationnel. Certaines de ces configurations conduisent à de l'inflation et donc à une distribution homogène de la matière et à une courbure nulle. D'autres configurations aboutissent directement à un univers homogène et plat, mais sans inflation. Les deux jeux de configurations sont rares,

UNE POUSSEE DE CROISSANCE HORS DU COMMUN

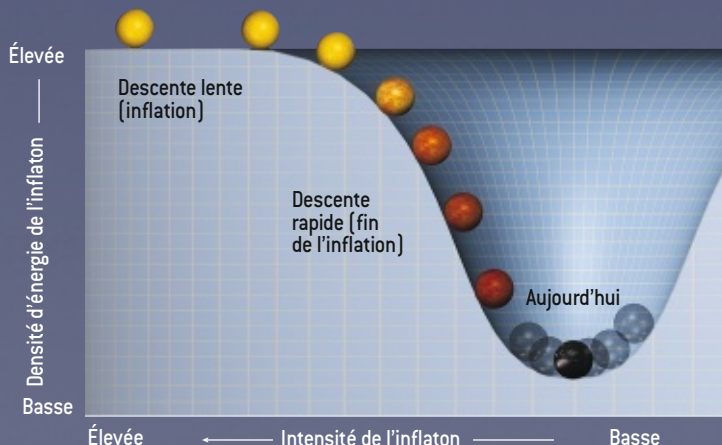
D'après les observations, l'Univers est en expansion depuis 13,7 milliards d'années. Mais que s'est-il passé au tout début, quand il était encore trop tôt pour que nous puissions le voir directement ? L'idée dominante est celle de l'inflation. Elle suppose que l'Univers embryonnaire s'est brièvement, mais énormément dilaté. Une telle poussée de croissance aurait aplani toute courbure de l'espace, ce qui expliquerait la géométrie plane de l'Univers actuel. Elle aurait par ailleurs dilué son contenu, ce qui expliquerait son homogénéité à grande échelle. Enfin, l'inflation aurait semé les graines des futures galaxies.

CE QUE L'INFLATION A FAIT



Le taux de croissance durant l'inflation était impressionnant, même à l'échelle cosmique. En 10^{-30} seconde, l'Univers s'est dilaté d'un facteur 10^{25} au moins. Les régions de l'espace se sont éloignées les unes des autres à une vitesse supérieure à celle de la lumière.

CE QUI A CAUSÉ L'INFLATION



Un champ scalaire nommé inflaton engendre une force répulsive qui entraîne la dilatation de l'espace. Initialement, ce champ a une énergie potentielle élevée ; il en perd progressivement jusqu'à atteindre un état d'énergie minimale, qui marque l'arrêt de l'inflation. Le comportement de ce champ est mathématiquement analogue à celui d'une bille qui roule sur la pente douce d'un plateau et dévale ensuite la pente vers le fond d'une vallée.

Le volume d'espace que nous observons aujourd'hui était initialement un million de milliards de fois plus petit qu'un atome d'hydrogène. Après l'inflation, il a atteint la taille d'une pièce de dix centimes. Durant les 13,7 milliards d'années écoulés depuis, l'espace a continué de se dilater, mais à un rythme moins effréné, ce qui a permis à des structures complexes telles que les galaxies de se former.

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

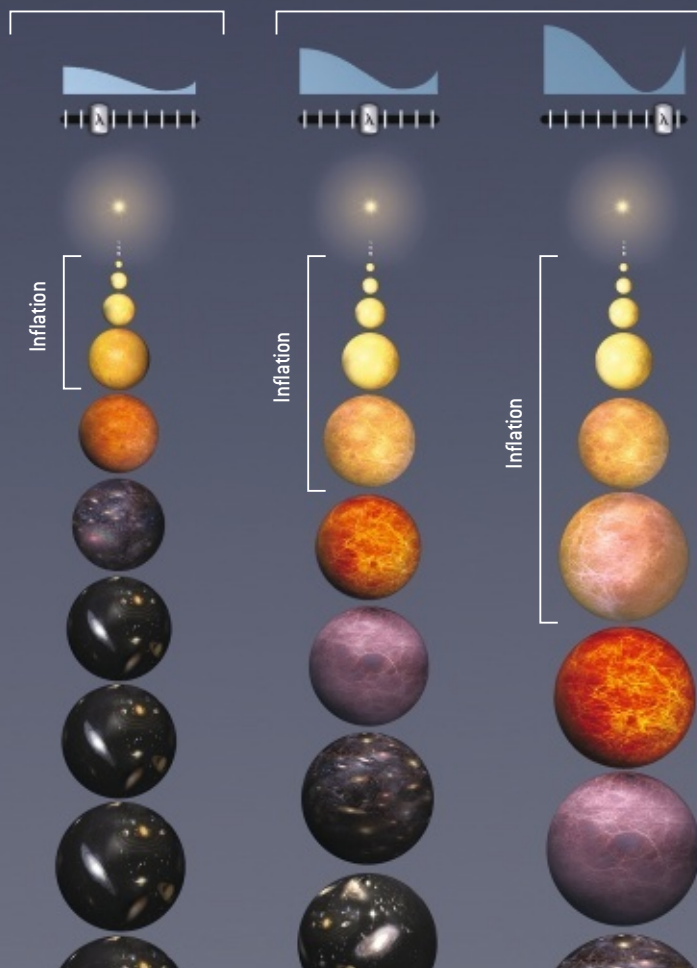
L'inflation est censée engendrer naturellement un grand volume d'espace homogène et plat reproduisant les structures à grande échelle observées. Malheureusement, cela se produit seulement lorsque la courbe de potentiel de l'inflaton a un profil très particulier, obtenu par un ajustement fin des paramètres (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.



Malcolm 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 ?

Des rustines sur la théorie

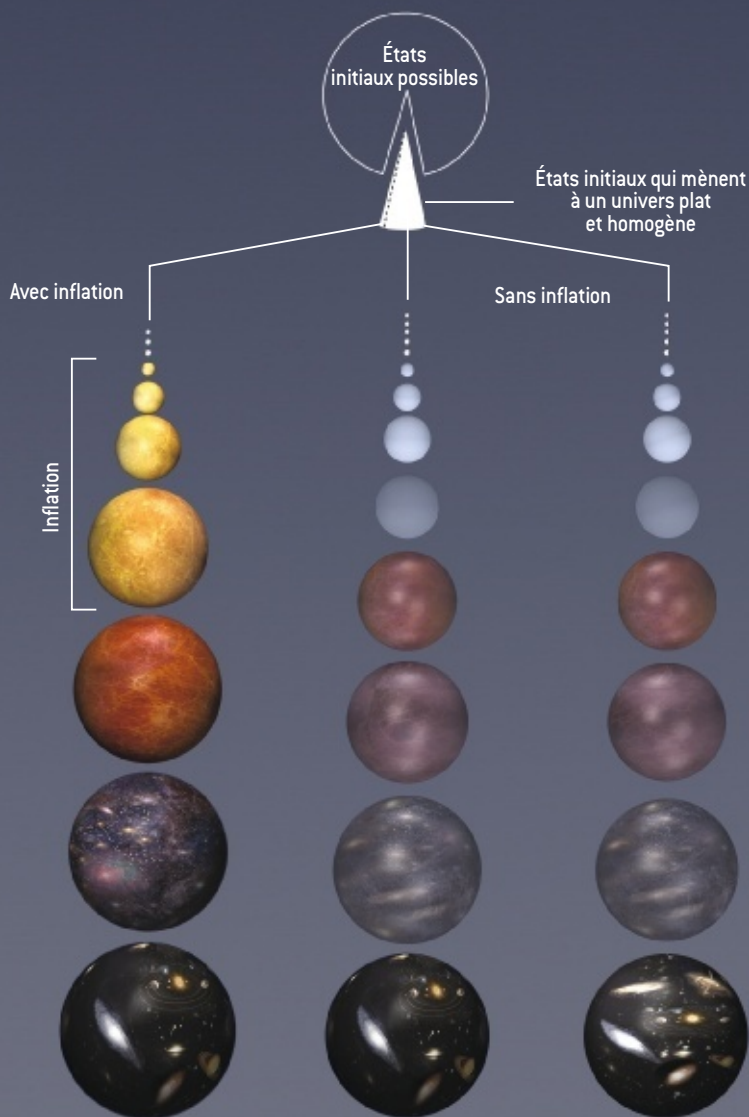
Les théoriciens sont conscients du problème, mais, en dépit du fait qu'ils se débattent avec depuis 25 ans, ils espèrent parvenir à le résoudre et à rétablir le tableau inflationnaire naïf du début des années 1980, qui les avait convaincus d'adopter cette théorie.

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.

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.



Malcolm Godwin

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.

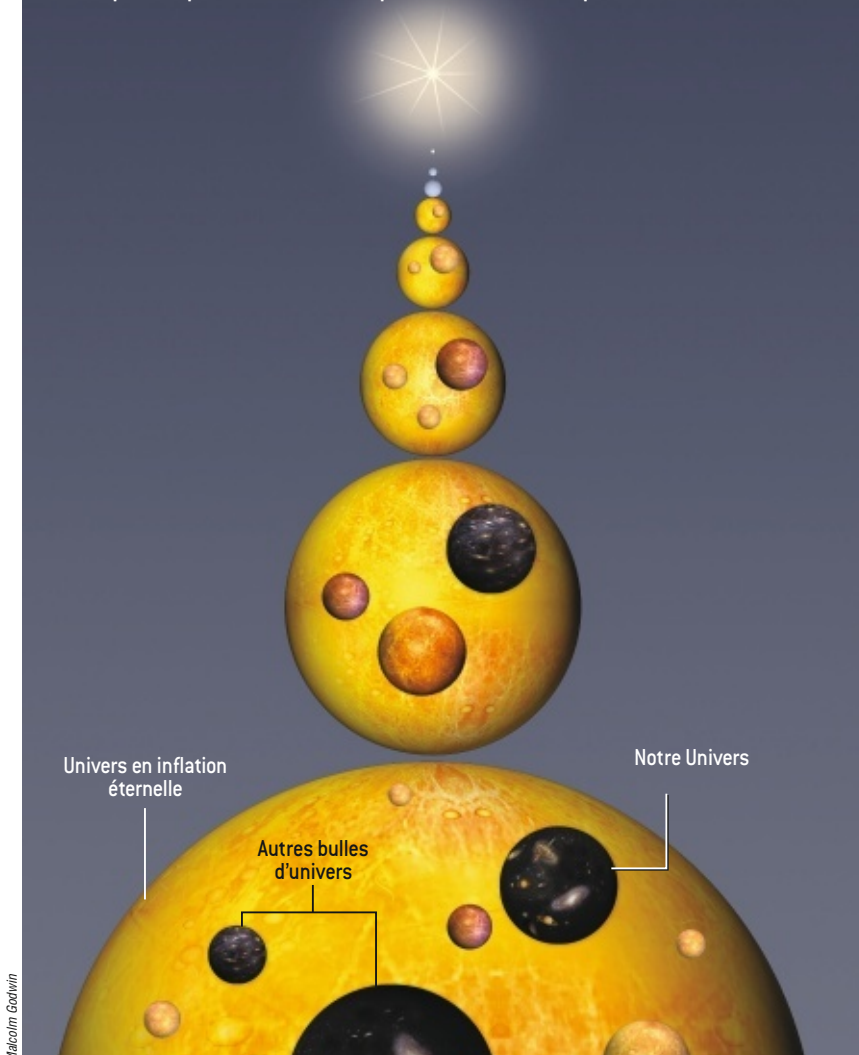
Malheureusement pour cette idée, les conditions de notre Univers ne sont pas le minimum requis pour la vie : l'Univers est plus plat, plus homogène et plus invariant d'échelle qu'il n'aurait besoin de l'être pour héberger la vie. Les régions plus typiques, par exemple plus jeunes que la nôtre, sont *a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

Les acides gras et la santé

Jean-Michel Lecerf et Sylvie Vancassel

Omniprésents dans l'organisme, les acides gras oméga 3 et oméga 6 sont indispensables. Une alimentation variée et riche en poisson en assure un apport suffisant. Leur éventuel usage thérapeutique, pour lutter notamment contre certaines formes de dépression, est étudié.

Les acides gras oméga 3 et 6 sont présents dans tout l'organisme et assurent de nombreuses fonctions physiologiques : ce sont des constituants importants des membranes cellulaires de tous les tissus. De ce fait, ils jouent un rôle essentiel – tant structurel que fonctionnel – dans le système nerveux, cardiovasculaire, hormonal, immunitaire, etc. Ce sont également des substances qui stockent de l'énergie (dans le tissu adipeux) et en fournissent à l'organisme, lors d'un effort musculaire par exemple.

Les acides gras sont des composés organiques constitués d'une chaîne hydrocarbonée (formée d'atomes d'hydrogène et de carbone) plus ou moins longue. Leur nomenclature dérive du nombre d'atomes de carbone et de liaisons doubles (ou insaturées) qu'ils contiennent (*voir l'encadré page 63*). La place de la première double liaison à partir du groupement méthyle (CH_3-) terminal définit une famille : les acides gras contenant plusieurs liaisons insaturées – les acides gras polyinsaturés – dont la première double liaison est située

sur le sixième atome de carbone de la chaîne appartiennent à la famille des oméga 6, et ceux dont la première double liaison est sur le troisième atome de carbone appartiennent à la famille des oméga 3. Il n'existe que deux familles d'acides gras polyinsaturés : les oméga 6 et les oméga 3. Les chefs de file de ces deux familles, respectivement l'acide linoléique et l'acide alpha linolénique, ne sont synthétisés ni par l'homme ni par les animaux, mais le sont par les végétaux : ils sont dits essentiels. Il existe également des acides gras saturés, apportés par l'alimentation, mais aussi synthétisés à partir des glucides ou de l'alcool, et des acides gras mono-insaturés (ne contenant qu'une seule liaison double) issus des acides gras saturés et de l'alimentation.

On a découvert l'importance de l'acide linoléique chez le rat en 1929 et chez l'homme en 1958. Et c'est en 1982 que l'on a mis en évidence que l'acide alpha linolénique est un acide gras essentiel de par ses fonctions, et que l'organisme ne le synthétise pas : il doit absolument être

L'ESSENTIEL

✓ L'acide alpha linolénique, chef de file des oméga 3 et l'acide linoléique, chef de file des oméga 6 sont indispensables.

✓ L'organisme ne les synthétise pas, de sorte qu'ils doivent être apportés par les aliments, les huiles végétales et le poisson.

✓ L'EPA et le DHA sont indispensables au bon fonctionnement du cerveau.

✓ Quand l'alimentation est variée, on ne constate pas de carence.

✓ Des apports élevés en oméga 3 soulageraient certaines personnes dépressives.