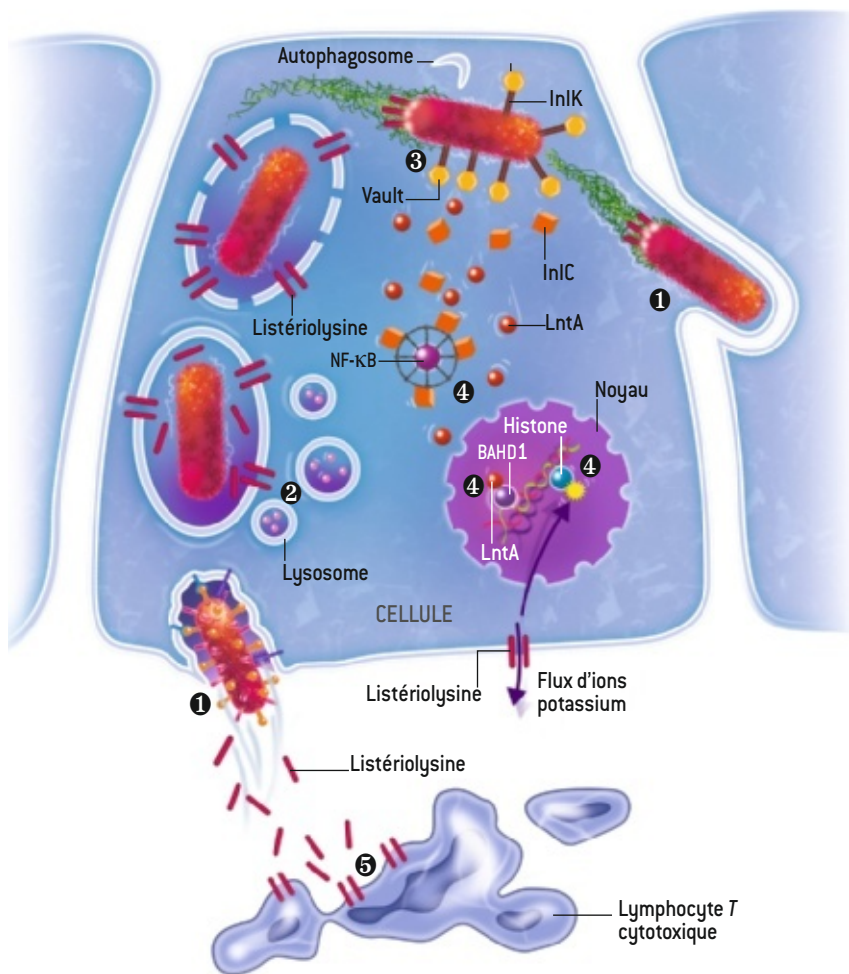




3. *LISTERIA* dispose d'un arsenal de ripostes pour déjouer les défenses de l'hôte. La bactérie passe inaperçue des anticorps circulant hors des cellules en entrant dans les cellules et en s'y déplaçant (1). Elle évite d'être dégradée en bloquant la fusion des lysosomes avec le phagosome et en modifiant sa surface (2). Elle se dissimule des molécules sentinelles de la cellule hôte qui conduisent à l'autophagie ou à la stimulation de l'inflammation en recrutant des protéines de la cellule (par exemple Vault, 3). Elle module l'expression des gènes de l'hôte impliqués dans la réponse immunitaire en perturbant l'activité de protéines (4) : NF-κB est séquestrée dans le cytoplasme par InlC, BAHD1 ne régule plus l'activité de certains gènes sous l'effet de LntA, et le flux d'ions potassium causé par la listériolysine perturbe une protéine impliquée dans la régulation des gènes, l'histone. La listériolysine détruit aussi les lymphocytes T cytotoxiques (5).

Peut-être parviendrons-nous même un jour à détourner *Listeria monocytogenes* à notre avantage. Une particularité de la réponse immunitaire contre *Listeria* est de reposer principalement sur les lymphocytes T cytotoxiques. Or l'organisme ne produit en général pas de lymphocytes T cytotoxiques contre ses propres cellules, même malignes, car elles ne sont pas reconnues comme des corps étrangers. Aussi plusieurs équipes développent-elles actuellement des souches de *Listeria* génétiquement modifiées, sécrétant des molécules spécifiques de cellules cancéreuses, afin de concevoir des vaccins contre certains cancers.

Ces bactéries dépourvues de pouvoir pathogène infecteraient l'organisme pendant de courtes périodes, puis seraient éliminées. Entre-temps, elles stimuleraient la production de lymphocytes T cytotoxiques qui reconnaîtraient et détruiraient aussi bien les cellules infectées par les bactéries *Listeria* modifiées que les cellules cancéreuses. Par exemple, une souche de *Listeria* atténuée exprimant la mésothéline est en cours de développement, afin de produire un vaccin contre les métastases dans les cancers avancés du foie. Fortement exprimée à la surface des cellules tumorales à ce stade, et peu à la surface des cellules saines, la mésothéline aiderait les lymphocytes T cytotoxiques activés par la *Listeria* modifiée à détruire spécifiquement les cellules tumorales. ■

hôte, dans un sens ou un autre lors des différentes phases de l'infection.

Grâce aux multiples stratégies de colonisation et de dissimulation qu'elle met en place lors de l'infection, *Listeria monocytogenes* persiste dans l'organisme, passant inaperçue des mécanismes de reconnaissance immunitaire. Elle peut infecter de très nombreux types cellulaires, y compris des cellules mobiles (des cellules de l'immunité telles que les macrophages et les cellules dendritiques), et ainsi se propager dans tout l'organisme. Souvent, le patient ne montre aucun symptôme pendant plusieurs jours, voire plusieurs semaines, durant lesquels s'instaure sans doute un équilibre entre croissance et élimination des bactéries. Cependant, l'équilibre entre la bactérie pathogène et son hôte bascule parfois vers une forme aiguë, le plus souvent chez des sujets âgés ou immunodéprimés. Dans certains cas, cette rupture d'équilibre conduit à une septicémie : une infection générale de l'organisme accompagnée d'un emballement de la réponse inflammatoire. Dans d'autres cas,

la bactérie parvient à franchir les barrières protégeant le cerveau, déclenchant une méningite ou une encéphalite, ou celles protégeant le fœtus chez la femme enceinte.

Utiliser *Listeria* en thérapie ?

L'aptitude remarquable de *Listeria* à détourner les fonctions de la cellule qu'elle infecte conduit les chercheurs à explorer de nombreux processus cellulaires fondamentaux, bien au-delà des mécanismes infectieux et des moyens de protection. Ainsi, l'étude d'ActA a permis de découvrir le complexe Arp2/3 et son rôle crucial dans le mouvement des cellules. L'étude de LntA a aussi conduit à la découverte et à la caractérisation approfondie du facteur chromatinien BAHD1. Enfin, l'étude des mécanismes d'entrée de *Listeria* dans la cellule a contribué à comprendre le rôle de différents acteurs de l'endocytose permettant aux cellules de capter et transporter des particules extracellulaires vers le cytoplasme.

Le multivers existe-t-il

George Ellis

L'idée d'univers parallèles radicalement différents du nôtre est séduisante, mais excessivement spéculative.

Depuis une dizaine d'années, une hypothèse extraordinaire passionne les cosmologistes : l'Univers que nous sommes en mesure d'observer ne serait pas unique, il en existerait des milliards d'autres. En d'autres termes, l'Univers ferait partie d'un « multivers » plus vaste. Certains scientifiques de renom ont parlé de révolution super-copernicienne. Selon cette idée, non seulement la Terre n'est qu'une planète parmi tant d'autres, mais l'Univers est lui-même insignifiant à l'échelle cosmique, un parmi un nombre incalculable d'autres univers régis par leurs propres lois.

Le terme multivers a plusieurs significations. Nous pouvons sonder l'espace qui nous entoure jusqu'à environ 42 milliards d'années-lumière, distance qui correspond à celle parcourue par la lumière depuis le Big Bang en tenant compte de l'expansion cosmique. Mais il n'y a aucune raison de penser que l'Univers s'arrête à cet

horizon cosmologique. Il pourrait se prolonger indéfiniment au-delà, semblable à notre région observable. Seule la distribution de matière différerait d'une région à l'autre, mais les lois physiques seraient identiques. Presque tous les cosmologistes, et j'en fais partie, acceptent cette vision du multivers comme une collection de régions similaires. Le cosmologiste d'origine suédoise Max Tegmark l'a qualifié de « multivers de niveau 1 ».

Mais certains vont plus loin. Ils imaginent une infinité d'univers différents, régis par des lois physiques différentes, ayant des histoires différentes, voire des espaces n'ayant pas le même nombre de dimensions. La plupart seraient stériles, mais certains grouilleraient de vie. L'un des principaux partisans de ce multivers de « niveau 2 » est le cosmologiste d'origine russe Alexander Vilenkin, qui dresse le tableau spectaculaire d'un ensemble infini d'univers renfermant une infinité de galaxies, une infinité de planètes et une infinité de personnes qui sont votre sosie et qui sont en train de lire cet article.

De telles représentations ne datent pas d'hier et se retrouvent dans de nombreuses cultures à travers l'histoire. Ce qui est nouveau, c'est l'idée que le multivers soit une théorie scientifique, avec tout ce que cela implique de rigueur logique et de confrontation à l'expérience. Cette idée me laisse sceptique. Je ne pense pas que l'existence de ces autres univers ait été prouvée, ou même qu'elle puisse jamais l'être. Selon moi, les partisans du multivers ne se contentent pas d'élargir notre conception de la réalité physique, ils redéfinissent implicitement ce qu'on entend par « science ».

Ceux qui souscrivent à l'hypothèse du multivers de niveau 2 ne manquent pas d'idées pour expliquer cette prolifération d'univers ou pour les mettre en évidence. Ces univers pourraient par exemple se situer dans des régions très éloignées de l'espace, qui ne se sont pas dilatées au même rythme que la nôtre, comme l'envisage le modèle d'inflation éternelle d'Alan Guth, Andrei Linde et d'autres. Ces univers pourraient avoir existé avant le nôtre, comme le propose le modèle cyclique de Paul Steinhardt

L'ESSENTIEL

✓ D'après de nombreux cosmologistes, il existerait, au-delà de l'horizon de notre univers observable, un nombre immense d'autres Univers, chacun doté de ses propres lois physiques. L'ensemble de ces univers constitue le « multivers ».

✓ Cependant, selon George Ellis, aucune observation astronomique ne pourra jamais mettre en évidence ces autres univers.

✓ Les arguments en faveur du multivers sont au mieux indirects. Et même s'il existe, des questions profondes restent sans réponse.

Levi Brown

et Neil Turok. Ou encore exister en parallèle, en tant que d'autres réalisations des états quantiques de l'Univers, comme le soutiennent David Deutsch et Michael Lockwood. Ces univers pourraient aussi être complètement déconnectés de notre espace-temps, comme l'ont suggéré M. Tegmark et Dennis Sciama.

Parmi tous ces scénarios, celui qui est le plus largement accepté est l'inflation éternelle. C'est donc sur ce dernier que je vais me focaliser. Cependant, la plupart de mes remarques s'appliquent aussi aux autres propositions. L'idée du scénario inflationnaire est que l'espace est un vide en perpétuelle expansion, au sein duquel les fluctuations quantiques font en permanence se dilater en accéléré de nouvelles régions, donnant ainsi naissance à des chapelets d'univers, comme des bulles dans un bain moussant.

Le concept d'inflation remonte aux années 1980 et a été revisité depuis dans le cadre de la théorie des cordes, la théorie des interactions fondamentales la plus prometteuse à ce jour. Ce cadre autorise des univers-bulles très différents les uns des autres. En effet, chacun commence son existence non seulement avec une distribution aléatoire de matière, mais aussi avec un jeu aléatoire de particules et de lois physiques. Notre Univers contient par exemple des électrons et des photons interagissant par le biais de la force électromagnétique; d'autres univers pourraient avoir d'autres types de particules et de forces, ce qui signifie différentes lois physiques. L'ensemble complet de lois locales autorisées est ce qu'on appelle le paysage. Dans certaines interprétations de la théorie des cordes, le paysage est immense, ce qui autorise une prodigieuse variété d'univers.

De nombreux physiciens qui s'intéressent au multivers, en particulier les partisans du paysage de la théorie des cordes, ne prêtent pas vraiment d'attention aux univers parallèles en eux-mêmes. Pour eux, les objections au concept de multivers n'ont pas d'importance. Leurs théories survivent ou meurent sur la base de leur cohérence interne et, *in fine*, il faut l'espérer, de leur vérification expérimentale. Le multivers est un cadre donné pour leurs théories, et son origine importe peu : c'est le problème des cosmologistes.

Pour un cosmologiste, le problème de base du concept de multivers est l'existence de l'horizon cosmologique. Par définition, les signaux émis au-delà de l'horizon n'ont pas eu le temps de se pro-

pager jusqu'à nous depuis le début de l'Univers. Tous les univers parallèles sont situés au-delà de l'horizon et y resteront quels que soient les progrès techniques. Ils sont trop éloignés pour avoir eu une quelconque influence sur notre Univers. Ainsi, aucune des affirmations concernant le multivers ne peut être prouvée de façon directe.

Les partisans du multivers prétendent pouvoir dire de façon approximative ce qui se passe au-delà de notre horizon cosmique, ou même à une distance infinie, à partir des seules données que nous observons de notre côté de l'horizon. C'est une extrapolation audacieuse ! Peut-être l'Univers se referme-t-il sur lui-même à très grande échelle, et qu'il n'est pas infini. Peut-être que la matière s'arrête quelque part, et qu'il n'y a plus que de l'espace vide au-delà. Peut-être que l'espace et le temps prennent fin au niveau d'une singularité qui délimite l'Univers. Nous ignorons tout simplement ce qui se passe au-delà de l'horizon, car nous n'avons pas d'information sur ces régions et nous n'en aurons jamais.

Sept arguments discutables

La plupart des partisans du multivers sont conscients du problème, mais pensent que nous pouvons néanmoins émettre des hypothèses sur ce qui se passe au-delà de l'horizon. Leurs arguments se regroupent en sept grandes catégories. Examinons-les une par une.

Premier argument : l'espace n'a pas de fin. Tout le monde ou presque admet que l'espace s'étend au-delà de l'horizon cosmique. Si ce type limité de multivers existe, nous pouvons extrapoler ce que nous voyons aux régions situées au-delà de l'horizon, avec une incertitude d'autant plus grande que la région est éloignée. Il est alors facile d'imaginer des variations plus élaborées, telles des lois physiques alternatives ayant cours là où il ne nous est pas donné d'observer. Le problème avec ce type d'extrapolation est que personne ne peut prouver que l'on a tort. Comment les scientifiques peuvent-ils décider si leur tableau d'une région non observable de l'espace-temps est une extrapolation légitime ou irréaliste de ce que nous voyons ? D'autres univers peuvent-ils avoir une distribution initiale de matière différente, ou bien des valeurs différentes des constantes physiques fondamentales ? On peut

QU'Y A-T-IL AU-DELÀ ?

L'Univers observable est une boule d'environ 42 milliards d'années-lumière de rayon centrée sur la Terre. Sa frontière, notre horizon cosmique, correspond à la distance que la lumière a pu parcourir depuis le Big Bang, il y a 13,7 milliards d'années, distance à laquelle s'ajoute l'expansion du cosmos durant cette période. En supposant que l'espace s'étend au-delà de cet horizon cosmique, à quoi ressemble-t-il alors ?

MULTIVERS DE NIVEAU 1 : PLAUSIBLE

L'hypothèse la plus simple est que notre volume d'espace est un échantillon représentatif du reste. Des observateurs distants voient des volumes centrés sur des points différents, mais équivalents, hormis peut-être en ce qui concerne la distribution de matière. L'ensemble de ces régions forment le multivers basique.

MULTIVERS DE NIVEAU 2 : DISCUTABLE

De nombreux cosmologistes imaginent qu'assez loin, le cosmos est très différent de notre Univers observable. Celui-ci serait une bulle-univers parmi de nombreuses autres, flottant toutes dans un espace vide par ailleurs. Les lois de la physique seraient différentes d'une bulle à l'autre, ce qui donnerait lieu à une variété presque inconcevable d'univers. Ces autres bulles d'univers seraient impossibles à observer, même en principe.



avoir l'un comme l'autre, selon les hypothèses que l'on fait.

Deuxième argument : les théories physiques actuelles prédisent l'existence d'autres univers. Les théories proposées pour unifier les interactions font intervenir des champs scalaires, parents hypothétiques d'autres champs tels que le champ magnétique. Ces champs seraient à l'origine de l'inflation cosmique et créeraient des bulles-univers à l'infini. Ces scénarios sont solides d'un point de vue théorique, mais la nature précise des champs hypothétiques n'est pas connue, et aucune expérience n'a encore démontré leur existence et encore moins permis de mesurer leurs propriétés supposées. Autre point crucial, il n'est pas établi que le comportement de ces champs entraîne des lois physiques différentes dans les univers-bulles distincts.

Troisième argument : la théorie de l'inflation, qui prédit une infinité d'univers, a passé avec succès le test observationnel du rayonnement du fond diffus cosmologique. Celui-ci révèle en effet à quoi ressemblerait notre Univers à la fin de sa phase d'expansion initiale. Les motifs du fond diffus suggèrent que notre Univers a réellement connu une période d'expansion accélérée. Mais tous les types d'inflation ne durent pas éternellement

en créant une infinité d'univers-bulles. Les observations ne permettent pas de distinguer le type d'inflation requis des autres. Certains cosmologistes, comme P. Steinhardt, pensent même que l'inflation éternelle aurait conduit à des motifs de fond diffus différents de ceux observés. A. Linde et d'autres ne sont pas d'accord. Qui a raison ? Tout dépend des hypothèses faites sur la nature du champ responsable de l'inflation.

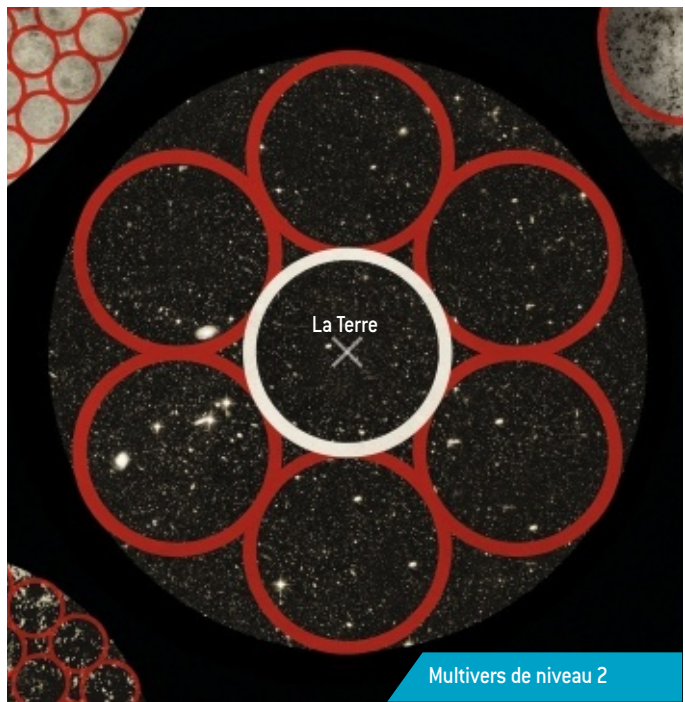
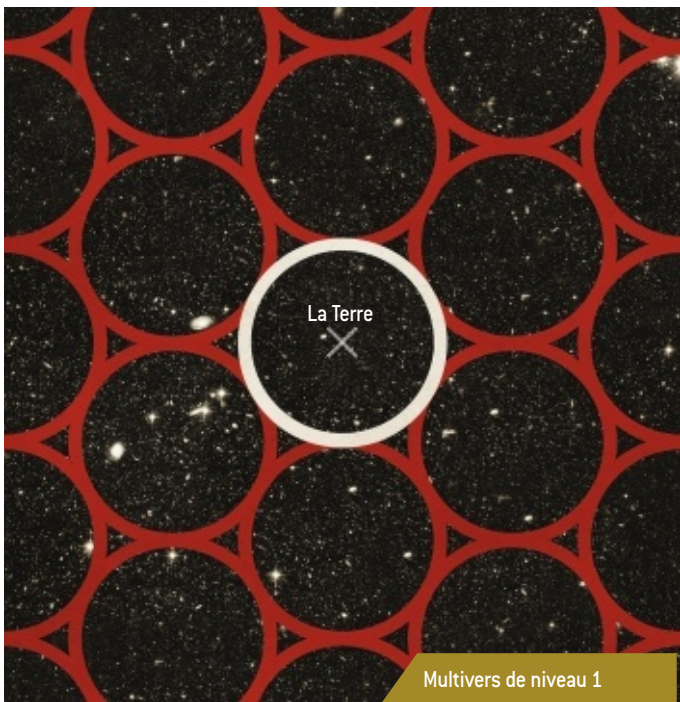
Des hypothèses impossibles à vérifier

Quatrième argument : les constantes fondamentales sont ajustées précisément pour que la vie soit possible. Un des aspects remarquables de notre Univers est que les constantes physiques y ont juste les bonnes valeurs pour permettre l'émergence de structures complexes, et donc de la vie. Steven Weinberg, Martin Rees, Leonard Susskind et d'autres soutiennent que l'existence d'un multivers de niveau 2 apporte une explication élégante à cette coïncidence : si toutes les valeurs possibles des constantes sont réalisées dans un ensemble suffisamment grand d'univers, alors il y en a sûrement quelques-uns qui peuvent héberger la vie. Ce raisonnement a été invoqué

notamment pour expliquer la densité d'énergie sombre, responsable de l'accélération de l'expansion cosmique.

Le multivers est certes une solution plausible pour expliquer cette densité. C'est peut-être même la seule piste dont nous disposons aujourd'hui. Cependant, nous n'avons aucun espoir de la valider un jour par l'observation. En outre, la plupart des raisonnements supposent que les équations de base de la physique restent valables partout, et que seules les constantes changent. Or si l'on considère le multivers dans son sens le plus général, ce n'est pas nécessairement le cas.

Cinquième argument : les constantes fondamentales concordent avec les prédictions des théories de multivers. Cet argument affine les précédents en suggérant que l'Univers n'est pas plus ajusté pour la vie que ce qui est strictement nécessaire. Les tenants de cette idée ont évalué les probabilités de diverses valeurs de la densité d'énergie sombre (voir l'encadré page 54). Plus cette valeur est élevée, plus elle est probable, mais plus l'univers résultant est hostile à la vie. La densité que nous observons devrait être juste à la limite du domaine de valeurs compatibles avec la vie, et il semble que ce soit le cas. Cet argument probabiliste



achoppe cependant sur le fait qu'il est nécessaire que le multivers existe pour calculer ce type de probabilité. Il est inapplicable s'il n'existe qu'un seul univers. En d'autres termes, on suppose *a priori* le résultat que l'on veut prouver. Ainsi, les probabilités sont un test de la cohérence du concept de multivers, mais pas une preuve de son existence.

Sixième argument : la théorie des cordes conduit à une grande diversité d'univers. La théorie des cordes, à l'origine censée être une théorie qui explique toute la physique connue, est devenue une théorie où presque tout est possible. Dans sa forme actuelle, elle prédit que de nombreuses propriétés essentielles de notre Univers sont de purs hasards. Si l'Univers est unique, ces propriétés sont difficilement explicables. Pourquoi les lois de la physique présentent-elles précisément ces propriétés qui permettent à la vie d'exister ? En revanche, si notre Univers n'est qu'un parmi d'autres, ces propriétés s'expliquent naturellement. Elles ne sont pas privilégiées ; ce sont simplement celles qui ont émergé dans notre région de l'Univers. Dans une autre région, si tant est que nous ayons pu y apparaître (la plupart sont inhabitables), nous aurions observé des propriétés différentes.

Cependant, la théorie des cordes n'est pas une théorie éprouvée. Ce n'est même pas une théorie complète. Si nous avions la preuve que la théorie des cordes est correcte, ses prédictions théoriques validées par l'expérience pourraient légitimement être utilisées pour étayer l'existence d'un multivers. Mais cette preuve fait défaut.

Septième argument : tout ce qui peut arriver arrive. En cherchant à expliquer pourquoi la nature obéit à certaines lois et pas à d'autres, certains physiciens ont imaginé que la nature n'avait en fait jamais fait un tel choix : toutes les lois concevables s'appliquent quelque part. L'idée est inspirée en partie de la mécanique quantique qui, comme Murray Gell-Mann l'a exprimé avec humour, veut que tout ce qui n'est pas interdit est obligatoire. Une particule emprunte tous les chemins possibles, et ce que nous voyons est la moyenne pondérée de toutes ces possibilités. Peut-être en va-t-il de même pour l'Univers entier : il existerait alors une superposition de tous les univers possibles, c'est-à-dire un multivers. Mais là encore, nous n'avons pas la moindre chance d'observer ces multiples réalisations. Pire, nous ne pouvons même pas savoir quelles sont les possibilités. Il manque un principe d'organisation

L'AUTEUR

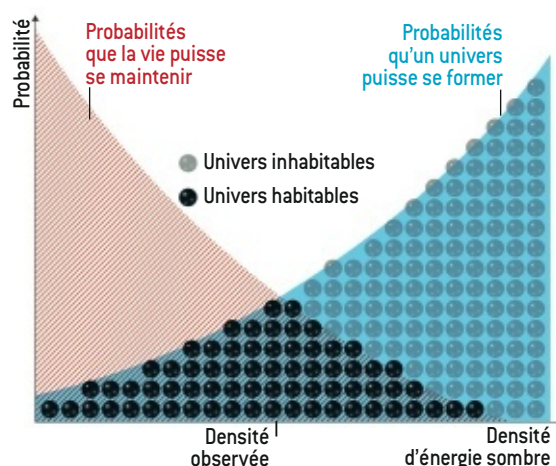


George ELLIS, cosmologiste, est professeur émérite à l'Université du Cap, en Afrique du Sud.

La densité d'énergie sombre est souvent invoquée comme preuve de l'existence du multivers. Le processus d'inflation éternelle donne naissance à des univers ayant des valeurs aléatoires de la densité d'énergie sombre. Peu d'entre eux ont une densité nulle ou faible tandis que la plupart ont une densité élevée (*région bleue*). Mais une densité d'énergie sombre trop élevée conduit à une expansion brutale, qui disperse la matière avant qu'elle n'ait pu former des structures

complexes. La plupart des univers sont ainsi inhabitables.

Or la densité d'énergie sombre de probabilité maximale parmi les densités compatibles avec la vie est précisément celle de notre Univers (*pic de la zone de recouvrement*) ! Cela justifierait la distribution des densités d'énergie sombre, et donc le multivers. Mais ce raisonnement est circulaire : il n'a de sens que si l'on fait au départ l'hypothèse du multivers.



Jean Christensen

ou un cadre permettant de déterminer ce qui est autorisé et ce qui ne l'est pas. M. Tegmark a par exemple proposé que toutes les structures mathématiquement possibles doivent être réalisées dans un domaine physique ou un autre. Cependant, nous n'avons pas la moindre idée du type d'univers que ce principe autorise, en dehors du nôtre. Et nous n'avons aucun moyen de vérifier l'existence ou la nature d'un tel principe organisateur. C'est peut-être une proposition séduisante, mais aussi une pure spéculation.

Des tests empiriques

Parallèlement à ces arguments théoriques, les tenants du multivers ont aussi proposé divers tests empiriques. Voyons les principaux.

Le rayonnement du fond diffus cosmologique pourrait porter la trace d'univers alternatifs. Ce serait le cas si, par le passé, notre Univers était entré en collision avec un autre univers-bulle, tels ceux engendrés dans le scénario d'inflation éternelle. Dans le scénario de l'univers cyclique, des vestiges d'univers qui existaient avant le Big Bang pourraient aussi être décelables dans le fond diffus. De tels motifs dans le fond diffus seraient un élément de preuve en faveur du multivers. Certains cosmologistes ont même affirmé voir de telles signatures, mais ces annonces sont très débattues. En outre, beaucoup des multivers potentiellement possibles ne donneraient pas lieu à de tels indices observationnels. Ainsi, l'observation du fond diffus cosmologique ne permettrait de vérifier l'existence que de quelques classes particulières de multivers.

Un autre test consiste à rechercher des variations des constantes fondamentales, ce qui corroborerait l'hypothèse que les lois de la physique ne sont pas immuables. Certains chercheurs affirment avoir découvert de telles variations. La plupart des cosmologistes considèrent cependant que ces observations ne sont pas probantes.

Un troisième test s'appuie sur la forme de l'Univers observable : est-il sphérique (courbure positive), hyperbolique (courbure négative) ou plat (courbure nulle) ? Les scénarios de multivers prédisent en général que l'Univers n'est pas sphérique, parce qu'une sphère se referme sur elle-même, ce qui implique un volume fini. Néanmoins, ce test n'est pas totalement concluant. L'Univers situé au-delà de notre horizon pourrait prendre une forme différente de celle de la région observable ; en outre, tous les scénarios de multivers n'excluent pas une géométrie sphérique.

La topologie de l'Univers offre un meilleur test : est-il replié en boucle sur lui-même ? Si c'est le cas, l'Univers serait formé d'un volume de taille finie répété à l'infini, ce qui invaliderait certaines versions de la théorie de l'inflation, et en particulier les scénarios de multivers fondés sur l'inflation éternelle. Les observateurs ont cherché des motifs qui se répètent – ce qui prouverait que l'Univers forme une boucle sur lui-même – sans les trouver. Mais ce résultat négatif n'est pas pour autant un point en faveur du multivers.

Enfin, certaines des théories qui prédisent un multivers pourraient être réfutées. On pourrait par exemple trouver des preuves observationnelles allant à l'encontre de l'inflation éternelle, ou décou-

BIBLIOGRAPHIE

P. Steinhardt, *L'inflation cosmique en débat*, Pour la Science, n° 406, août 2011, <http://bit.ly/408inflation>

A. Riazuelo, *Un autre univers est-il possible ?*, Dossier Pour la Science, n° 71, avril-juin 2011, <http://bit.ly/y4snRY>

A. Barrau et al., *Multivers - Mondes possibles de l'astrophysique, de la philosophie et de l'imaginaire*, Éditions La ville brûle, 2010.

A. Jenkins et G. Perez, *La vie est-elle possible dans d'autres univers ?*, Pour la Science, n° 390, avril 2010, <http://bit.ly/390jenkins>

M. Bojowald, *L'univers rebondissant*, Dossier Pour la Science, n° 71 - avril-juin 2011, <http://bit.ly/w2b1ke>

M. Tegmark, *De l'univers au multivers*, Pour la Science, n° 308, juin 2003.

vrir une incohérence mathématique ou empirique qui contraigne à abandonner le paysage de la théorie des cordes. Le concept de multivers perdrait alors une bonne partie de son intérêt, sans que cela suffise à le rejeter totalement.

Trop de flexibilité

En fin de compte, les arguments en faveur du multivers ne sont pas très concluants. La raison fondamentale en est que cette idée est extrêmement flexible. C'est davantage un concept qu'une théorie bien définie. La plupart des scénarios mettent en jeu un assemblage d'idées différentes plutôt qu'un tout cohérent. Par exemple, le mécanisme de l'inflation éternelle, en soi, n'entraîne pas une physique différente dans chaque région du multivers; pour cela, il faut le coupler à une autre théorie spéculative. Cette combinaison n'a rien d'inévitable.

L'étape clef pour étayer l'hypothèse du multivers est une extrapolation du connu à l'inconnu, du vérifiable à l'invérifiable. On obtient des réponses différentes selon ce que l'on choisit comme extrapolation.

Puisque les théories du multivers peuvent expliquer pratiquement n'importe quoi, toute observation peut être conciliée avec une des variantes de multivers. Les différentes «preuves» proposées sont de nature théorique. Or il se trouve que jusqu'à présent, l'exigence centrale de toute démarche scientifique était la vérification par les observations. Si nous relâchons cette exigence de données tangibles, cela revient d'une certaine façon à abandonner le principe fondamental qui a fait le succès de la science au cours des siècles derniers.

Certes, une explication unifiée et cohérente d'un ensemble de phénomènes disparates a intrinsèquement plus de valeur qu'une collection d'arguments distincts pour chacun de ces phénomènes. Si ce cadre unificateur suppose l'existence d'entités non observables telles que le multivers, c'est un argument en faveur de celui-ci.

Mais la question est ici de savoir combien d'entités hypothétiques invérifiables sont nécessaires. Le cadre unificateur suppose-t-il d'introduire plus ou moins d'entités que le nombre de phénomènes à expliquer? Dans le cas du multivers, nous

supposons l'existence d'un nombre immense, voire infini, d'univers non observables pour expliquer un seul univers dont l'existence est avérée, le nôtre. Cela s'accorde mal avec le principe d'économie, ou «rasoir d'Ockham» qui stipule qu'il ne faut pas multiplier les éléments d'une théorie sans nécessité.

Les partisans du multivers ont un dernier argument: il n'y a pas de bonne alternative. Aussi déplaisante que soit la prolifération des univers parallèles, si c'est la meilleure explication, nous devrions l'accepter. Réciproquement, si nous abandonnons l'idée du multivers, nous avons besoin d'une alternative viable. Cette recherche d'alternatives dépend du type d'explications que nous sommes prêts à accepter. Les physiciens ont toujours espéré que les lois de la nature sont inévitables, c'est-à-dire que les choses sont telles qu'elles sont parce qu'il est impossible qu'elles soient autrement. Mais nous n'avons jamais réussi à le montrer. Il existe d'autres options. L'Univers pourrait être le fruit du hasard; il se trouve alors simplement qu'il a pris



{ Partagez
les savoirs }

**LES
RENDEZ-
VOUS DU
MUSÉUM**

Entrée
gratuite

CONFÉRENCES

Cycle : le centenaire de la Ligue pour la Protection des Oiseaux (LPO)

Lundi 6 février — 18h
Les rapaces, de la guerre sans merci à la réhabilitation
M. Terrasse, responsable de la Mission Rapace de la LPO, président de la Vulture Conservation Foundation

Lundi 13 février — 18h
La connaissance des migrations d'oiseaux au service de la conservation
G. Jarry, ornithologue, expert du Muséum auprès de l'Union Européenne

Lundi 27 février — 18h
Il y a cinquante ans aux Saintes-Maries - Les zones humides
T. Salathé, biologiste, conseiller principal au secrétariat de la Convention sur les zones humides, Gland, Suisse et Michel Métais, ornithologue, directeur général de la LPO

MÉTIER DU MUSÉUM

Dimanche 26 février — 15h, Entomologiste, C. Villemant

Auditorium de la Grande Galerie de l'Évolution
 36 rue Geoffroy Saint-Hilaire, Paris 5^e - Métro : Jussieu

COURS PUBLICS

Cycle : La taxinomie
Judi 2 février — 18h
Nomenclature phylogénétique : une révolution en nomenclature biologique
M. Laurin, dir. de recherche, CNRS, Muséum

Grand Amphithéâtre du Muséum
 57 rue Cuvier, Paris 5^e - Métro : Jussieu

Au Jardin
des Plantes

Détails sur
www.jardindesplantes.net,
 dans "l'agenda du jardin"



Un pari raisonnable

George Ellis invite dans cet article à la prudence vis-à-vis de l'idée de multivers. C'est une sage précaution dans la mesure où cette proposition est incontestablement spéculative. Il faut toutefois se méfier d'un excès de circonspection qui, au regard de l'histoire des sciences, pourrait se révéler plus dangereux qu'une audace responsable. Le « pari » du multivers me semble raisonnable, et ce pour plusieurs raisons.

Tout d'abord, l'idée du multivers est réfutable, même s'il est impossible d'observer les autres univers. En effet, le multivers n'est pas un modèle – auquel cas il serait effectivement artificiel –, mais une conséquence, parmi d'autres, de modèles élaborés pour répondre à des questions précises en gravitation ou en physique des particules (relativité générale, puis théorie des cordes). Or ces modèles peuvent, en principe, être mis à l'épreuve en la-

boratoire ! Si les théories qui prédisent l'existence du multivers étaient invalidées par des expériences locales, les univers multiples qu'elles engendrent s'évaporerait avec elles. *A contrario*, si ces théories atteignaient un niveau de confiance suffisant pour être acceptées, il serait naturel de considérer sérieusement les autres univers qu'elles impliquent.

Il en va de même avec la relativité générale – pourtant archétype d'une théorie solide : ses nombreux succès sont assez convaincants pour qu'elle soit utilisée, sans que personne ne s'en offusque, pour décrire l'intérieur des trous noirs, alors qu'il est impossible de vérifier directement de telles prédictions.

La réfutation du multivers ne peut se faire que de façon probabiliste – avec un certain niveau de confiance, qui n'est jamais de 100 pour cent – puisque nous ne disposons que d'un seul échantillon

accessible : notre Univers. Mais il n'y a rien ici de très spécifique ; qu'il s'agisse d'incertitudes d'origine classique ou quantique, les théories sont toujours infirmées (ou corroborées) de façon statistique (la découverte d'une nouvelle particule par le LHC, par exemple, ne s'entend qu'avec une certaine probabilité de vraisemblance). La spécificité de la situation est quantitative – on connaît mal les probabilités en question –, mais pas qualitative.

Le multivers explique de nombreuses coïncidences : s'il existe une infinité d'autres univers avec des lois physiques différentes, il est plausible que nous nous trouvions dans un de ceux compatibles avec l'existence de structures complexes. Cet univers n'est évidemment pas représentatif de l'ensemble du multivers, de la même façon que la Terre n'est pas représentative de notre Univers en général. Le principe d'économie conceptuelle – le rasoir

d'Ockham – invite donc plutôt à accepter ce scénario qui est non seulement prédit par certaines de nos meilleures théories, mais qui permet aussi d'expliquer sans hypothèse supplémentaire l'étrange ajustement des lois de l'Univers à l'existence de la vie. Il y aurait un certain acharnement à compliquer les modèles pour « empêcher » l'émergence de ces univers alternatifs qui résolvent pourtant beaucoup de paradoxes !

De ce point de vue, faire l'hypothèse du multivers ne constitue pas une révolution dans la démarche scientifique. Il est vrai qu'elle pourrait néanmoins légitimer un cadre de pensée davantage spéculatif. Mais si aujourd'hui, comme souvent dans le passé, la physique voyait ses pratiques évoluer, y aurait-il nécessairement lieu de s'en offusquer ?

Aurélien Barrau

LPSC (CNRS-IN2P3), Grenoble

cette configuration particulière parmi d'autres. Autre possibilité : que les choses aient été destinées à être telles, un but ou un dessein sous-tendant leur existence. La science ne peut pas trancher, car ce sont des options métaphysiques, c'est-à-dire non scientifiques.

Les scientifiques ont proposé le concept de multivers pour résoudre des questions fondamentales sur la nature de l'Univers et de l'existence, mais, en fin de compte, ces questions restent sans réponse : elles se posent encore à propos du multivers. Par exemple, si le multivers existe, est-il le fruit de la nécessité, du hasard ou d'un dessein ? C'est une question à laquelle aucune théorie physique ne peut répondre, ni pour l'Univers ni pour le multivers.

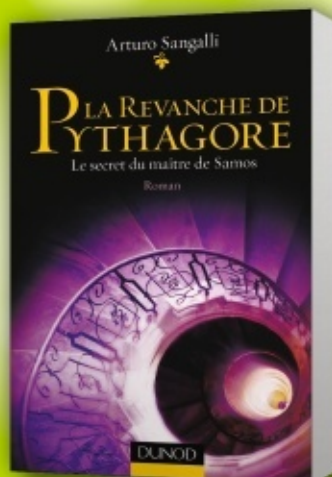
Pour avancer, nous devons nous en tenir à l'idée de la vérification empirique. Nous avons besoin d'une sorte de contact causal avec les entités que nous proposons ; sinon, il n'y a pas de limites à l'imagination. Ce lien peut être indirect. Si une entité n'est pas observable, mais absolument indispensable pour expliquer les propriétés d'autres entités qui, elles, sont effectivement vérifiées, on pourrait alors la considérer comme vérifiée. Il faut

cependant prouver de façon indiscutable que cette entité est absolument indispensable pour que l'échafaudage théorique tienne debout. Peut-on prouver que les univers parallèles inobservables sont indispensables pour expliquer l'Univers observable ? Et ce lien causal est-il essentiel et indéniable ?

Appeler les choses par leur nom

Aussi sceptique que je sois, je pense que la contemplation du multivers est une excellente occasion de réfléchir à la nature de l'Univers ainsi qu'à la méthode scientifique. Cette réflexion apporte des éclairages nouveaux et intéressants ; c'est donc un domaine de recherche productif. Pour explorer le concept de multivers, nous avons besoin de garder l'esprit ouvert, mais en restant prudents. Les univers parallèles peuvent exister ou non. La question n'est pas tranchée. Nous allons devoir vivre avec cette incertitude. Il n'y a rien de mal à faire des spéculations philosophiques fondées sur la science, et c'est exactement ce que sont les théories du multivers. Mais il faut appeler les choses par leur nom. ■

VARIEZ LES SAVOIRS AVEC DUNOD



A. SANGALLI

9782100565498 • 240 pages • **16,90 €**

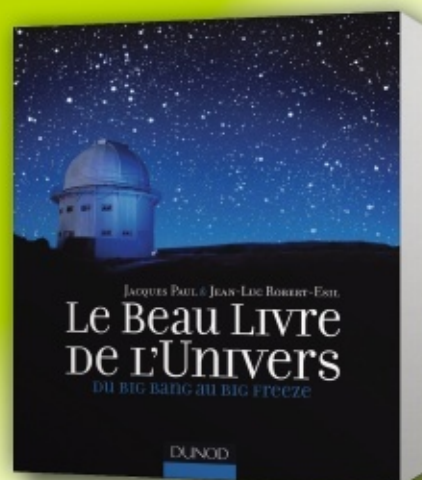
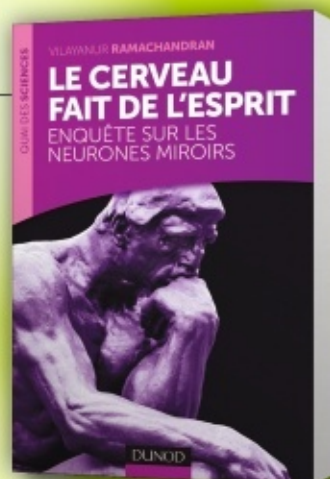
**On affirme que Pythagore n'a laissé aucun écrit.
Et si c'était faux ?**

**Rejoignez les deux héros de ce roman
et partez à la recherche du manuscrit perdu.**

V. RAMACHANDRAN

9782100543939 • 416 pages • **27,50 €**

**Découvrez comment l'un des plus
grands neurobiologistes envisage
ce qui fait le « propre de l'homme ».**



J. PAUL, J.-L. ROBERT-ESIL

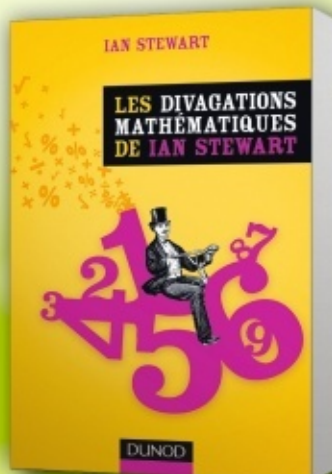
9782100567201 • 420 pages • **25,90 €**

**En 200 étapes magnifiquement
illustrées, déplacez-vous
le long de l'échelle du temps
et admirez les images du ciel
les plus étonnantes.**

DUNOD / LA RECHERCHE

9782100562992 • 176 pages • **16 €**

**Programmer des robots,
modéliser la chevelure humaine...
découvrez 32 situations
où « mathématiques »
rime avec « efficacité ».**



I. STEWART

9782100557967 • 272 pages • **18 €**

**Ian Stewart nous présente,
dans son style inimitable,
20 explorations mathématiques
passionnantes.**

Tous nos ouvrages sont disponibles en librairie

Les **CRIS** des plongeurs, des messages codés

Walter Piper, Jay Mager et Charles Walcott

Des oiseaux du grand Nord américain, les plongeurs huard, ont un cri remarquable. Il leur sert à signaler à leurs rivaux qu'ils sont prêts à défendre farouchement leur territoire.

Les visiteurs de la région des grands lacs américains et canadiens sont intrigués par le cri du plongeur huard, caractéristique de ces régions sauvages. Cet oiseau tire son nom des plongeurs spectaculaires qu'il fait pour attraper sa nourriture : il peut plonger à 12 mètres de profondeur et rester sous l'eau pendant plus d'une minute. Aussi gros qu'une oie, le plongeur huard (*Gavia immer*) atteint environ 1,50 mètre d'envergure. Cet oiseau est l'emblème de l'Ontario et du Minnesota et figure sur les pièces de un dollar canadien. Son aspect est tout aussi remarquable que son cri. Ses yeux, rouge vif, contrastent avec un plumage noir, et son cou est rehaussé d'un collier de rayures blanches. Ses ailes et son dos sont recouverts d'un motif blanc en damier. Le plongeur huard est prisé des photographes, qui le surprennent souvent en couple, s'occupant du nid ou des petits.

La femelle pond deux œufs par couvée, dont beaucoup sont victimes de pré-

