

ampoule électrique, sans parler de tirer un missile... et là-dessus, tous les dirigeants chinois s'entendaient.

Que de jeunes Occidentaux sensibles et intelligents se détournent des sciences de la nature pour suivre la tradition chinoise et ne deviennent ni des Einstein ni des Bill Gates, cela ne pouvait les gêner. En revanche, que dans leur pays aussi, de plus en plus de voix s'élèvent pour exiger un retour aux vieux concepts leur paraissait menaçant. Rien d'étonnant au fait que dans le cadre du combat des civilisations, ils y aient vu un possible nouvel affaiblissement de la Chine.

Pourquoi la République populaire de Chine lance-t-elle en Occident des campagnes pour y améliorer la position de la TCM ? Pour des raisons commerciales ! Comme dans d'autres secteurs économiques, la Chine désire abattre les barrières limitant ses exportations. Ses efforts tendent aussi à faire passer à l'Ouest l'interprétation moderne de la médecine chinoise élaborée en Chine. Dans cette conception, la TCM est une partie de la médecine moderne, qui a aussi des fondements dans les sciences

biologiques et moléculaires. Les bureaucraties estiment qu'en maintenant fermement ce point de vue, on évitera que l'espoir répandu en Occident de trouver dans la « médecine traditionnelle chinoise » une alternative à la médecine moderne... ne passe en Chine et ne s'y propage !

Des enjeux culturels, politiques, commerciaux

C'est dans ce contexte que la Chine a activement participé à l'organisation d'un grand congrès de l'Organisation mondiale de la santé à Pékin en 2008. Cet événement visait à situer dans un cadre clair l'emploi des médecines traditionnelles et est à l'origine de la déclaration dite de Pékin, qui appelait à développer un usage plus fréquent de la « médecine traditionnelle » et son intégration aux autres formes de traitement. Le congrès de Pékin a été suivi d'un congrès sino-européen sur la médecine traditionnelle chinoise à Bologne en 2012, dans le même esprit.

Au premier regard, il semble absurde que les Chinois soulignent que la TCM est

une composante importante de la culture chinoise, qui ne peut être enseignée qu'en Chine et par des Chinois, puisqu'on pourrait prétendre alors la même chose de cette émanation de la culture européenne qu'est la médecine moderne.

Derrière cette affirmation chinoise se cache en réalité une peur de perdre le contrôle de l'avenir. L'Occident réagit en effet de façon très diverse à la TCM : les groupes qui voient dans la « médecine traditionnelle chinoise » une alternative à la médecine moderne font face à d'autres, où l'on essaie de mener des recherches sur l'efficacité de l'acupuncture et de la pharmacie traditionnelle chinoise.

La question de l'absurdité ou au contraire du sens de la TCM est un sujet complexe, tant sur le plan culturel que sociopsychologique. Elle n'est pas qu'une question médicale ; elle relève aussi de la vision que l'on a du monde et d'enjeux politiques et commerciaux dans le secteur de la santé. Pour cette raison, il est probable que la TCM ne pourra pas être étudiée de façon raisonnable avant longtemps. ■

LES RENDEZ-VOUS DU MUSÉUM { Partagez les savoirs }

Entrée gratuite

FILMS
Dimanche 12 mai – 15h30 : L'homme aux serpents
Réal. : Éric Flandin, 2010, 85 min., VOSTFR.
Invités : Éric Flandin, réalisateur, Pierre-Michel Forget, Dépt. Écologie et Gestion de la Biodiversité, Muséum.

MÉTIER DU MUSÉUM
Dimanche 26 mai – 14h30 : Expert naturaliste, Pascal Dupont

UN CHERCHEUR/UN LIVRE
Lundi 27 mai – 18h : À la cueillette des plantes sauvages utiles
Nathalie Machon, Dépt. Conservation des Espèces, Restauration et Suivi des Populations. Séance suivie d'une dédicace par l'auteur.

Auditorium de la Grande Galerie de l'Évolution — 36 rue Geoffroy St-Hilaire

BAR DES SCIENCES
Dimanche 26 mai – 17h30 : L'inventaire faune-flore, pourquoi faire ?
Animé par Marie-Odile Monchicourt, journaliste à France Info.
Intervenants : Laurent Poncet, Directeur adjoint, stratégie connaissance, Muséum/Service du Patrimoine Naturel (SPN), Régine Vignes-Lebbe, Professeur au Centre de Recherches sur la Paléobiodiversité et les Paléoenvironnements, Université Paris VI et Muséum, Pierre-Édouard Guillain, Chef du bureau de la connaissance et de la stratégie nationale pour la biodiversité, Ministère de l'écologie.

Café restaurant la Baleine — 47 rue Cuvier

Au Jardin des Plantes
Détails sur jardindesplantes.net, dans "l'agenda du jardin"

MUSÉUM NATIONAL D'HISTOIRE NATURELLE

Les données du télescope spatial *Planck* sur le fond diffus cosmologique, le rayonnement le plus ancien de l'Univers, confirment les hypothèses principales du modèle du Big Bang avec une précision notablement supérieure à celle des expériences précédentes.

Alain Riazuelo

Planck géomètre

Les photons qui se propagent dans l'espace sont des témoins du passé, notamment de l'Univers primordial et des conditions qui y ont régné. Il est possible d'observer le rayonnement qui a été émis par l'Univers âgé de 370 000 ans, alors qu'il était plus dense et plus chaud, donc très lumineux. Comme l'Univers est en expansion, cette lueur émise il y a plus de 13 milliards d'années s'est diluée et refroidie au cours du temps sans disparaître pour autant. Elle existe encore aujourd'hui, sous la forme d'un rayonnement froid et uniforme: le fond diffus cosmologique, écho du Big Bang et vestige de l'époque la plus violente de l'histoire de l'Univers.

Le télescope spatial européen *Planck* avait pour mission d'étudier le rayonnement de ce fond diffus cosmologique et d'en établir une carte avec une résolution jamais atteinte auparavant (voir la figure 1). En mars 2013, l'équipe qui analyse les données recueillies par le télescope a publié un nombre important de résultats. Les données de *Planck* ont précisé les prévisions du modèle du Big Bang et permettent de tester certains scénarios décrivant les phénomènes qui ont pu se produire dans les premiers instants de l'Univers. Mais elles ont aussi réservé quelques surprises aux

cosmologistes, confirmant que le modèle de l'Univers primordial n'est pas encore définitif.

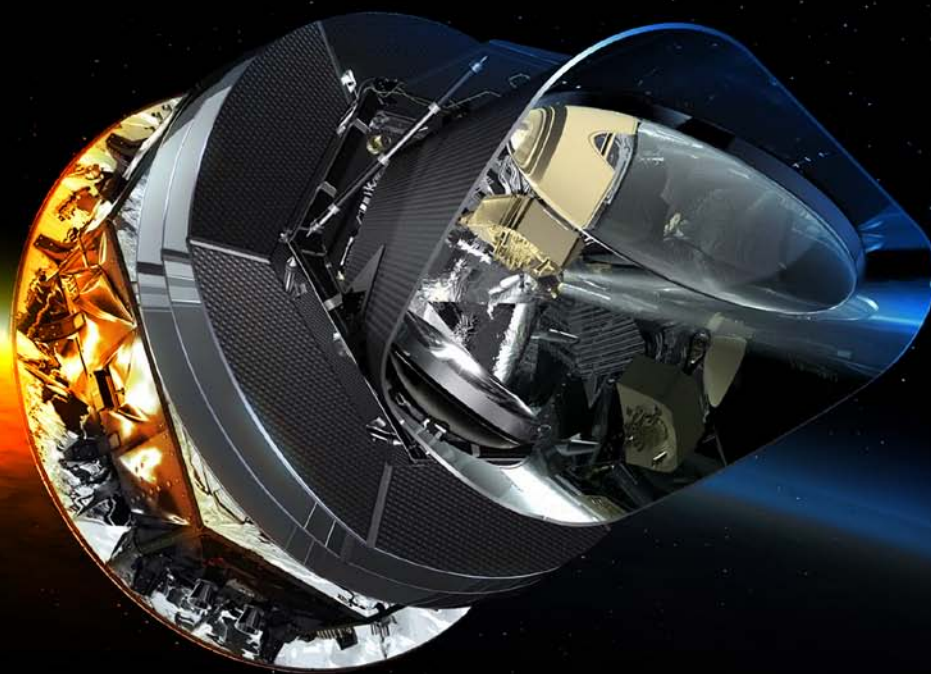
Le fond diffus cosmologique fut prédit en 1948 par l'astrophysicien américain Ralph Alpher et ses collègues. Il fut découvert en 1964 par les radioastronomes Arno Penzias et Robert Wilson, qui s'intéressaient à l'émission radio de la Voie lactée. Lors de leurs observations, ils enregistrèrent fortuitement un signal venant de toutes les directions: la première photographie de l'Univers primordial. Cette observation est l'une des plus importantes confirmations des prévisions du modèle du Big Bang.

Rappelons que, dans le modèle du Big Bang, le fond diffus cosmologique résulte d'une étape importante qui s'est déroulée environ 370 000 ans après la naissance de l'Univers. Ce dernier était alors rempli d'un plasma complètement ionisé et les électrons libres diffusaient la lumière prisonnière de ce plasma. Avec le refroidissement de l'Univers, les électrons libres se sont associés aux noyaux atomiques pour former les premiers atomes. À ce moment, nommé recombinaison, l'Univers est devenu transparent. Le fond diffus, libéré de l'emprise de la matière, a pu s'échapper, et nous parvenir sans guère subir d'altérations autres que son refroidissement.

Les mesures rudimentaires de Penzias et Wilson ne permettaient pas de déterminer avec précision l'homogénéité du rayonnement. Les prévisions théoriques supposaient que le fond diffus cosmologique présentait de faibles fluctuations de la température indiquée par les photons. Ces fluctuations étaient dues aux conditions physiques qui régnaient dans l'Univers lors de la recombinaison. Les cosmologistes se sont donc intéressés à l'étude de ces fluctuations pour récolter de nombreux indices sur l'Univers primordial.

Mesurer les fluctuations

La mission *Planck* se situe dans la continuité d'un ensemble d'expériences sur l'étude des fluctuations du fond diffus et améliore la précision des mesures. Après un retour sur les missions spatiales qui ont étudié ce rayonnement, nous rappellerons l'origine des fluctuations et comment le satellite *Planck* mesure ces hétérogénéités. En analysant les données, les cosmologistes obtiennent de nombreux résultats: ils mesurent avec précision les paramètres du modèle standard de la cosmologie, ce qui leur permet d'exclure certains scénarios proposés à la place de ce modèle. Dans la dernière partie, nous verrons que les résultats de *Planck*



de l'Univers primordial

soulèvent quelques questions, qui restent ouvertes pour le moment.

Le défi de la mesure des fluctuations fut relevé en premier, à partir de 1989, par le satellite américain COBE. Les chercheurs annoncèrent la première détection des fluctuations cosmologiques du fond diffus en 1992. Deux missions ont suivi, une américaine, WMAP, et une européenne, *Planck*. De surcroît, de nombreuses expériences au sol ou embarquées à bord de ballons stratosphériques virent le jour. Lancé en 2001, le satellite WMAP avait pu être mis au point dans des délais assez brefs pour une mission spatiale, car il utilisait des techniques déjà disponibles. Deux années plus tard, il livra la première carte complète du ciel à haute résolution, permettant un gain remarquable par rapport à son prédécesseur COBE (voir la figure 4). Le 14 mai 2009, *Planck* était mis en orbite avec la mission de réaliser une carte encore plus précise des fluctuations de température du fond diffus (voir la figure 3).

Nous l'avons évoqué, ces fluctuations sont liées aux conditions qui régnaient dans l'Univers lors de la recombinaison. Pour comprendre leur origine et comment elles permettent de déterminer les grandeurs physiques qui caractérisent l'Univers primordial, rappelons le scénario

L'ESSENTIEL

■ Le satellite *Planck* a enregistré les fluctuations de température dans le rayonnement du fond diffus cosmologique.

■ L'analyse des fluctuations permet d'estimer avec précision la densité en matière ordinaire, en matière noire et en énergie sombre de l'Univers.

■ Les données confirment certaines hypothèses du modèle du Big Bang, telle l'inflation, mais présentent quelques anomalies que les cosmologistes devront expliquer.

© Shutterstock.com/ESA - mediabab

général de leur apparition. Dans l'Univers primordial, la matière n'est pas répartie de façon homogène. Des zones légèrement plus denses existaient déjà et ont servi d'amorce pour la formation des galaxies et amas de galaxies observés aujourd'hui. Dans le plasma de l'Univers primordial, les hétérogénéités sont surtout présentes dans la matière noire – une composante importante de l'Univers dont la nature et la détection directe font l'objet de nombreuses recherches. La matière ordinaire – le plasma d'ions et d'électrons – était, à cette époque, plus uniforme. Les zones denses en matière noire ont attiré la matière ordinaire par des effets gravitationnels, mais le rayonnement qui baignait le plasma et la pression de radiation qu'il exerçait s'opposaient à la chute de matière ordinaire vers les zones où la matière noire était concentrée. Cela a provoqué un mouvement oscillant de la matière ordinaire, et fait apparaître des ondes de densité (voir la figure 2). Tout s'est passé comme si l'Univers primordial avait été parcouru d'immenses vibrations. Lors

1. LE SATELLITE *PLANCK* a enregistré le rayonnement du fond diffus cosmologique. Sur cette vue d'artiste, on distingue les miroirs et le détecteur (à droite), et le module de service avec les panneaux solaires (à gauche).

de la recombinaison, les photons se sont échappés du plasma après avoir enregistré une image de la distribution de la matière ordinaire. La température associée aux photons dépend de la densité de matière de la région où ils ont été émis : supérieure dans les zones plus denses, inférieure dans les zones moins denses. Les variations de températures enregistrées par le satellite *Planck* représentent précisément les fluctuations de la densité de matière de l'Univers primordial. Elles sont de l'ordre de 10^{-5} kelvin par rapport à la température moyenne des photons qui est d'environ 2,7 kelvins ($-270,5^{\circ}\text{C}$).

Notons que la démarche des cosmologistes rappelle celle des astrophysiciens qui utilisent l'héliosismologie, l'analyse des vibrations détectées à la surface du Soleil, pour sonder la structure interne de l'astre. De même, les données de *Planck*, les fluctuations de température, sont reliées aux vibrations de la matière lors de la recombinaison.

Si les approches dans ces deux domaines présentent des similarités, le traitement des données est très différent. Le satellite *Planck* est équipé d'un détecteur refroidi (voir la figure 5) à une fraction de kelvin, qui enregistre le rayonnement venant de l'espace à différentes fréquences. Le signal est ensuite

traité pour isoler les fluctuations du fond diffus cosmologique (voir l'encadré page 50) et éliminer le rayonnement parasite provenant, par exemple, de la poussière interstellaire. À partir de la carte des fluctuations (voir la figure 3), les cosmologistes effectuent une analyse statistique (voir l'encadré page 49) pour déterminer les propriétés des vibrations de la matière lors de la recombinaison. Les chercheurs en tirent alors les grandeurs physiques qui régnaient dans l'Univers primordial.

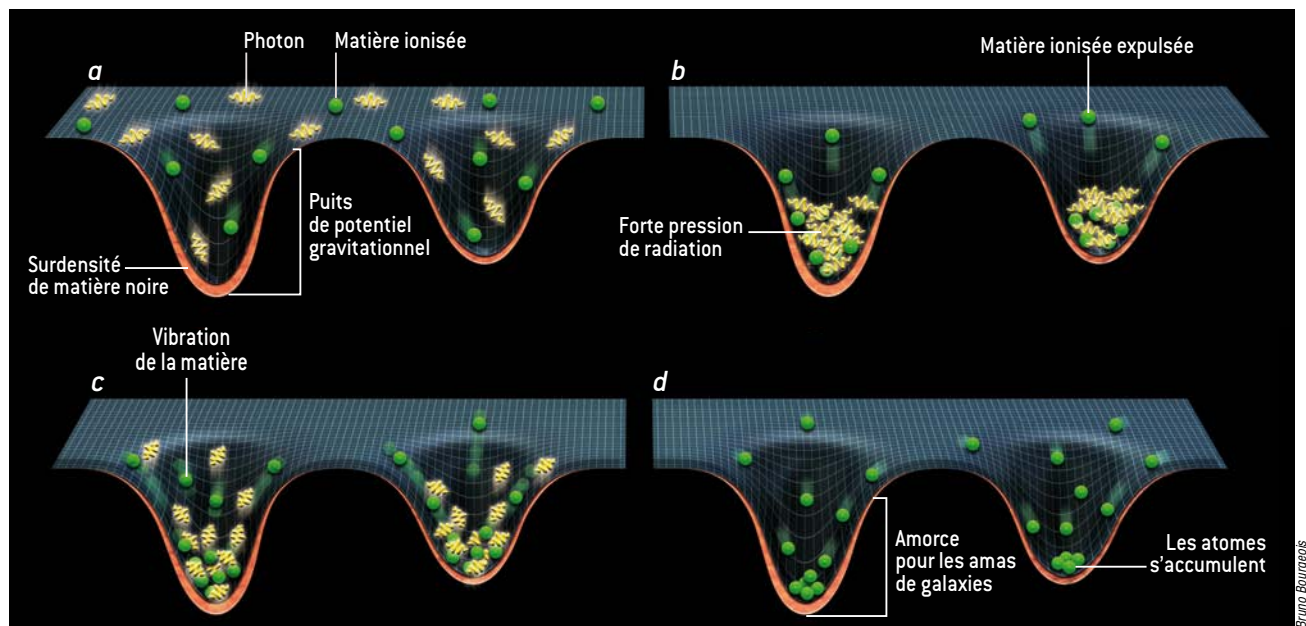
Six ingrédients pour décrire le modèle

Dans le modèle standard de la cosmologie, un petit nombre de paramètres suffit pour interpréter les résultats de *Planck*. Il s'agit des grandeurs physiques liées aux vibrations de la matière et à la propagation des photons du fond diffus. Certains paramètres sont bien connus grâce aux expériences précédentes ou d'après des arguments théoriques : la densité de photons et de neutrinos dans l'Univers primordial et la courbure de l'espace. Les autres paramètres ont été estimés auparavant, mais sont entachés d'incertitudes. Les résultats de *Planck* permettent d'évaluer, avec une bonne précision, ces six ingrédients : la densité de matière ordinaire, la densité de

matière noire, la densité d'énergie sombre, la date de la réionisation et deux paramètres qui caractérisent les fluctuations de densité de la matière noire.

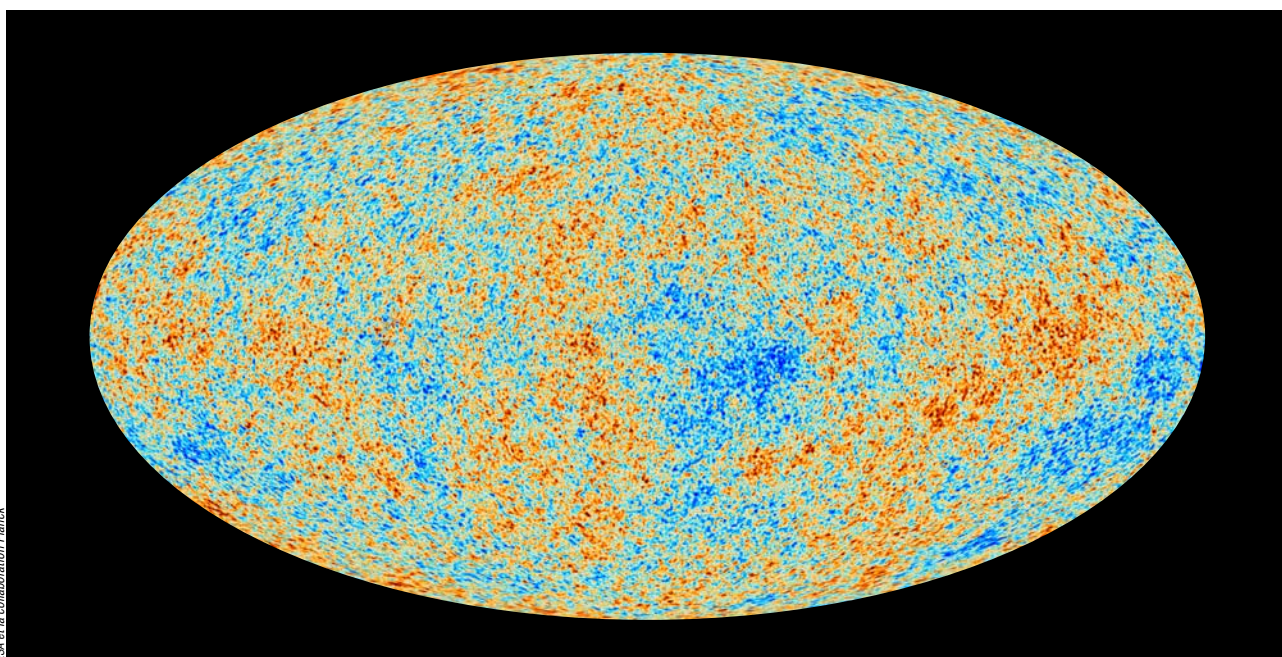
Les deux premiers ingrédients sont les densités de matière ordinaire et de matière noire dans l'Univers primordial. Le premier influe notablement sur l'amplitude des vibrations de la matière. Les données de *Planck* permettent d'estimer sa valeur, environ 0,249 proton par mètre cube, avec une précision de l'ordre de deux pour cent. La densité de la matière noire est moins bien connue, car son impact sur la carte du fond diffus est moindre. La précision sur la valeur de sa densité est de quatre pour cent.

Le rôle de l'énergie sombre – une composante hypothétique qui explique que l'expansion de l'Univers s'accélère – diffère. L'énergie sombre intervient dans l'estimation de la distance apparente séparant la région d'émission du fond diffus cosmologique et le satellite. En effet, pour analyser les vibrations du plasma, il faut connaître la distance maximale parcourue par les ondes de vibration. Or la carte des fluctuations ne livre qu'une information sur la taille angulaire de ces ondes. Du fait de son action sur la dynamique d'expansion de l'Univers, la densité d'énergie sombre



2. DANS L'UNIVERS PRIMORDIAL, l'interaction de la matière noire avec la matière ordinaire, alors sous forme d'ions et d'électrons (en vert), et les photons (en jaune) impose les propriétés du rayonnement du fond diffus cosmologique. Le plasma est homogène tandis que la matière noire présente des régions de surdensité (en orange dans les puits de potentiel gravitationnel). Ces régions attirent le

plasma (a). Le surplus de photons crée une pression qui fait vibrer la matière ordinaire (b). Les oscillations de la matière ordinaire redistribuent la matière (c). Lors de la recombinaison, les photons s'échappent en enregistrant un instantané des vibrations du plasma. Ensuite, la matière ordinaire s'accumule à nouveau dans les régions riches en matière noire (d) qui deviendront les amas de galaxies.



3. LA CARTE DES FLUCTUATIONS DE TEMPÉRATURE obtenue par *Planck* montre les variations par rapport à la valeur moyenne du rayonnement du fond diffus cosmologique, qui est d'environ 2,7 kelvins. Ces fluctuations sont de l'ordre de 10^{-5} kelvin. Par rapport à cette moyenne, certaines zones sont plus chaudes (*en orange*),

d'autres plus froides (*en bleu*). Si l'ensemble est assez homogène, on constate pourtant que de vastes régions sont globalement plus chaudes ou plus froides. C'est le cas, par exemple, de la tache bleue en bas à droite. Ces taches sont liées à un événement très ancien de l'histoire de l'Univers.

intervient dans le calcul de la distance apparente de la région d'émission du fond diffus, ce qui influe sur la position des pics dans le spectre dit de puissance (*voir l'encadré page 49*). Ce dernier représente l'amplitude des ondes en fonction de leur diamètre angulaire. Des trois densités, celle de l'énergie sombre est la moins bien estimée par les données de *Planck*, son incertitude étant de cinq pour cent.

Rapportés à la densité totale de l'Univers, l'énergie sombre contribue pour 69,3 pour cent, tandis que la matière noire et la matière ordinaire représentent 25,9 et 4,8 pour cent.

Le quatrième ingrédient est de nature astrophysique, il s'agit de la date de la réionisation. Quelques centaines de millions d'années après la recombinaison, les premières étoiles ont commencé à se former. Très chaudes, elles ont provoqué une ionisation importante et rapide de la matière, un phénomène confirmé par certaines observations astrophysiques. L'Univers est redevenu légèrement opaque, ce qui crée un léger flou sur la carte du fond diffus. Nous ne savons pas déterminer le moment précis de formation des premières étoiles, ce qui nous empêche de déterminer la date de la réionisation. On la considère donc comme un paramètre libre qui est déterminé à partir de l'analyse de la

carte du fond diffus. On estime ainsi la date de réionisation à 409 millions d'années avec une incertitude de 25 pour cent.

Enfin, à ces inconnues, il faut ajouter une description de la distribution de la matière telle qu'elle existait dans l'Univers primordial. Comme nous ne connaissons pas avec certitude le mécanisme qui a créé ces fluctuations, d'où sont issues les régions de surdensité de matière noire, la description des fluctuations de densité est statistique. En d'autres termes, il faut décrire l'amplitude initiale des fluctuations en fonction de leur taille. Pour cela, deux paramètres sont nécessaires : l'amplitude à une échelle de taille donnée, et la façon dont cette amplitude varie avec l'échelle.

L'un des principaux résultats de *Planck* concerne la description du processus responsable des fluctuations de densité. En effet, les mesures permettent de bien caractériser les fluctuations de densité et de comparer leurs propriétés aux prévisions des modèles théoriques développés par les cosmologistes. Parmi tous les scénarios, le plus étudié est celui de l'inflation cosmique. Selon ce scénario, l'Univers a connu une phase d'expansion rapide au tout début de son existence. Les distances ont été multipliées par un facteur 10^{25} en une fraction de seconde. Ce mécanisme a été

■ L'AUTEUR



Alain RIAZUELO est chargé de recherche CNRS à l'Institut d'astrophysique de Paris

et membre de l'équipe *Planck* HFI.



NASA/JPL-Caltech/ESA

4. TROIS SATELLITES ont étudié le rayonnement du fond diffus cosmologique.

proposé pour expliquer pourquoi l'Univers est globalement le même dans toutes les directions. Sinon, comment expliquer que deux régions de la carte du fond diffus, si éloignées l'une de l'autre qu'elles n'ont jamais pu être en contact dans l'Univers primordial, présentent la même température moyenne de 2,7 kelvins ? Ce scénario assure que ces régions ont été en contact (car initialement très proches) et que les conditions qui y régnaient se sont équilibrées avant le début de l'inflation.

Quel est le rapport avec les fluctuations de densité ? La réponse tient à ce que les relations d'incertitude du monde microscopique se trouvent, elles aussi, largement amplifiées par le même phénomène. Elles donnent naissance aux fluctuations de densité de l'Univers primordial. Mais au-delà du rôle *ad hoc* de l'inflation, on peut tester concrètement la pertinence de ces idées.

L'inflation se confirme

L'inflation autorise en effet plusieurs prévisions robustes, indépendantes du détail de son déroulement. Tout d'abord, l'Univers doit être plat (sans courbure intrinsèque), ce que confirment les mesures de *Planck*. Par ailleurs, l'inflation prévoit, au moins pour ses versions les plus simples, plusieurs propriétés statistiques des fluctuations. Elles

doivent être presque « invariantes d'échelle » : leur amplitude dépend peu de l'échelle à laquelle on les étudie, et, à une échelle donnée, la répartition des amplitudes suit une distribution gaussienne. Suggérés par les expériences passées, ces résultats sont confirmés par *Planck*. Ils permettent d'écarter des modèles d'inflation plus complexes qui prévoyaient des distributions non gaussiennes et des scénarios non fondés sur l'inflation, tel le scénario ekpyrotique, un modèle cyclique de l'Univers.

Ainsi, le satellite *Planck* a permis d'évaluer avec précision les paramètres du modèle standard de la cosmologie qui rendent compte de l'Univers primordial, apportant de nouvelles confirmations du modèle standard de la cosmologie. Pourrait-on utiliser les données de *Planck* pour invalider certains modèles alternatifs ? Comme nous l'avons évoqué pour l'inflation, les données du satellite permettent de tester des scénarios alternatifs et d'exclure ceux qui ne sont pas compatibles avec les résultats.

Par exemple, une question débattue depuis plus de dix ans est la suivante : les constantes fondamentales changent-elles au cours du temps ? Certains modèles supposent que la constante de structure fine, qui régit l'intensité de la force électromagnétique, varie avec le temps. En intervenant dans le processus de diffusion des photons sur les

■ BIBLIOGRAPHIE

Collaboration *Planck*, *Planck 2013 results. I. Overview of products and scientific results*, soumis à *Astronomy & Astrophysics*, 2013.

Collaboration *Planck*, *Planck 2013 results. XVI. Cosmological parameters*, soumis à *Astronomy & Astrophysics*, 2013.

Collaboration *Planck*, *Planck 2013 results. XVII. Gravitational lensing by large-scale structure*, soumis à *Astronomy & Astrophysics*, 2013.

Collaboration *Planck*, *Planck 2013 results. XXIV. Constraints on primordial non-Gaussianity*, soumis à *Astronomy & Astrophysics*, 2013.

Collaboration *Planck*, *Planck 2013 results. XXVI. Background geometry and topology of the Universe*, soumis à *Astronomy & Astrophysics*, 2013.

électrons du plasma, la valeur de la constante influe sur le fond diffus cosmologique. Les résultats de *Planck* montrent que ce paramètre ne varie pas, dans la limite de précision de l'expérience. De même, parmi les nombreux modèles d'énergie sombre développés par les cosmologistes, certains supposent que cette composante hypothétique de l'Univers a des propriétés qui évoluent avec le temps. Si les données de *Planck* peuvent difficilement préciser les caractéristiques de l'énergie sombre, elles n'indiquent pas que l'énergie sombre varie au cours du temps.

Dans un autre domaine, lié à la physique des particules, les données de *Planck* permettent de tester le nombre de familles de neutrinos. Initialement, ce nombre est fixé à trois comme dans le modèle standard de la physique des particules. Mais certaines expériences qui étudient l'oscillation des neutrinos – la transformation périodique d'un neutrino d'une famille en un repré-

sentant d'une autre famille – présentent des anomalies. Celles-ci suggèrent l'existence possible d'une quatrième famille de neutrinos, nommés neutrinos stériles, car ces particules interagissent avec d'autres particules uniquement *via* les oscillations. Une famille supplémentaire de neutrinos aurait eu une influence sur les fluctuations du fond diffus, mais ce type de modification n'est pas observé dans les résultats. Il n'y aurait bien que trois familles de neutrinos.

Que dire sur la forme globale de l'Univers? L'expérience WMAP avait déjà montré qu'à grande échelle, l'Univers a une géométrie euclidienne ou plate. Cela signifie que les règles usuelles de la géométrie s'appliquent à l'Univers : la somme des angles d'un triangle est égale à 180 degrés ou encore deux droites parallèles ne se croisent jamais. On écarte ainsi des géométries sphériques ou hyperboliques. Les observations de *Planck* confirment

■ À ÉCOUTER

Le jeudi 2 mai 2013 de 14h à 15h, Alain Riazuelo reviendra sur les résultats de *Planck* dans la partie Actualités de l'émission **La marche des sciences**, sur *France Culture*. www.franceculture.com

Des fluctuations de température aux grandeurs physiques

La carte du fond diffus cosmologique représente les fluctuations de température des photons autour de la valeur moyenne de 2,7 kelvins (voir la figure 3). Ces variations de température donnent un aperçu de la distribution de la matière au moment de la recombinaison, lorsque les ions et les électrons ont formé les atomes neutres. Les structures observées résultent de l'évolution des fluctuations de densité primordiales issues d'un processus aléatoire plus ancien, qui pourrait être l'inflation.

Pour exploiter cette carte, les cosmologistes vont dans un premier temps reconstituer les propriétés statistiques des structures observées, essentiellement en effectuant une décompo-

sition par échelle et en déterminant pour chacune d'entre elles l'amplitude typique des écarts à la moyenne des fluctuations.

Ce principe d'analyse est très utilisé en traitement du signal, qu'il soit sonore ou électrique. Par exemple, un signal sinusoïdal est caractérisé par la fréquence des oscillations et l'amplitude du signal. Pour un signal quelconque, il est possible de le décomposer comme une somme infinie de sinusoïdes, chacune avec sa fréquence et son amplitude (décomposition de Fourier). Le signal est décrit par l'ensemble des amplitudes et des fréquences, ce qui en facilite l'analyse.

Dans le cas du fond diffus, il s'agit d'un signal en deux dimensions – celles

de la carte – et il correspond à l'enchevêtrement d'ondes tridimensionnelles, les vibrations de la matière ordinaire dans le plasma. Il existe des outils mathématiques adaptés à cette situation, équivalente à la décomposition en une somme infinie de sinusoïdes.

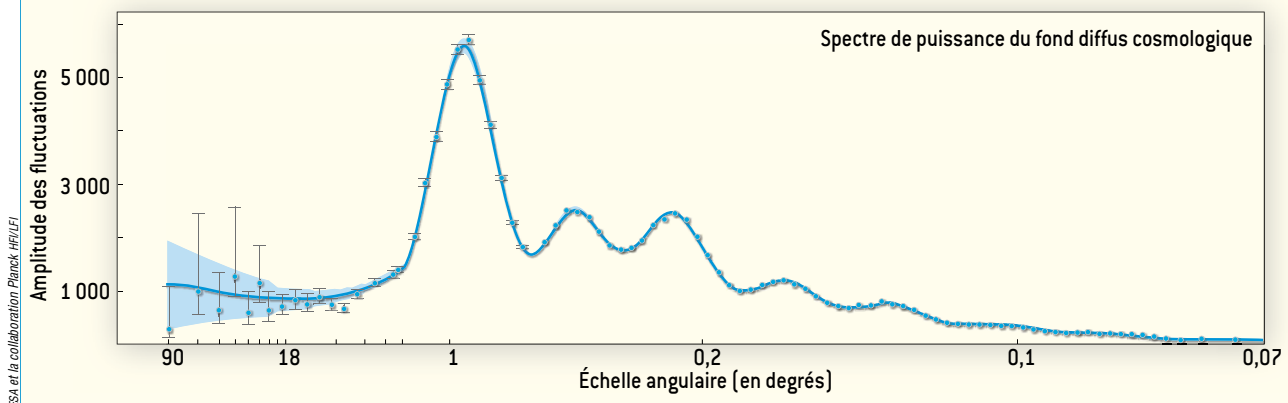
Ce traitement produit le spectre de puissance (voir la figure) qui représente les amplitudes de chaque terme de la décomposition en fonction de l'échelle. Les termes à gauche correspondent à des structures de grande taille dans le ciel, tandis que celles qui sont à droite sont les structures les plus petites. On remarque que ces incertitudes sur les données de *Planck* (points bleus), à l'exception des premiers points (à gauche),

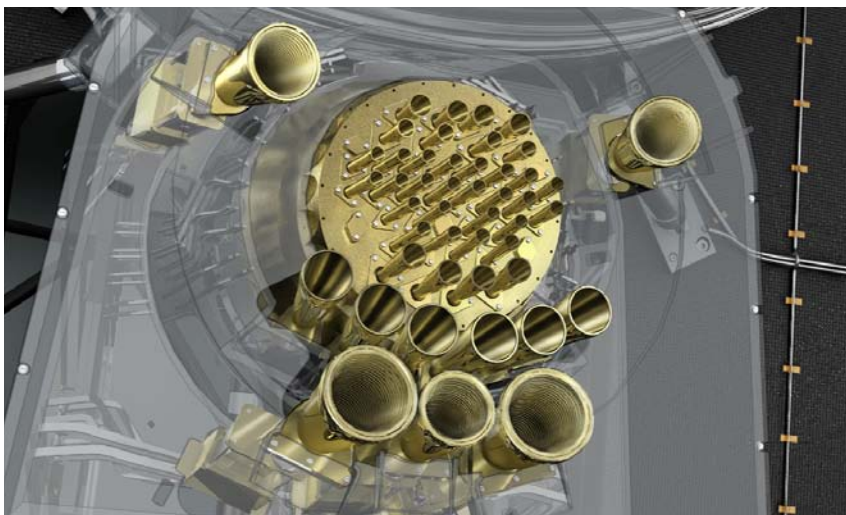
sont très petites, signe de la grande précision des mesures du satellite.

Les cosmologistes confrontent ces données aux spectres théoriques prévus par les différents modèles qu'ils ont imaginés.

En pratique, un modèle donné dépend d'un certain nombre de paramètres, que l'on fait varier afin de déterminer la combinaison qui s'ajuste le mieux aux données. Si le jeu de paramètres est satisfaisant, il permet de donner les valeurs de ces paramètres.

La courbe (en bleu) sur le spectre correspond au choix de paramètres qui restitue au mieux les résultats expérimentaux. On obtient ainsi les valeurs de la densité de matière noire, de matière ordinaire, de rayonnement.





5. LE DÉTECTEUR DE **PLANCK** est composé de neuf groupes de cornets, chaque groupe étant sensible à une fréquence du rayonnement.

LE FOND DIFFUS CACHÉ DERRIÈRE LES AVANT-PLANS

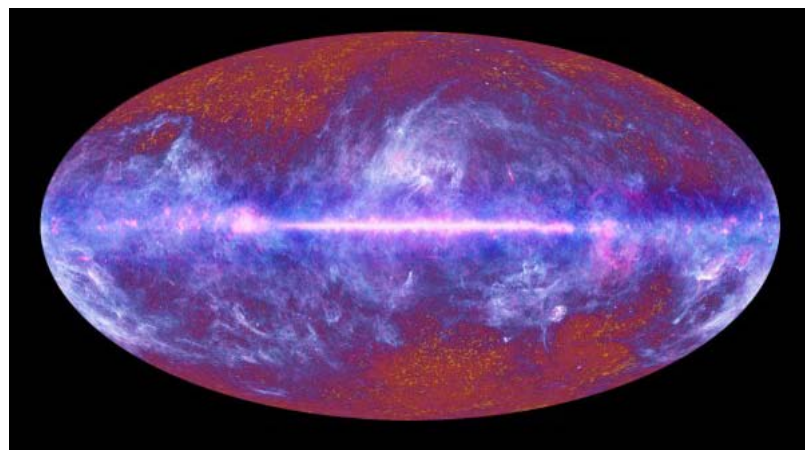
L'observation du fond diffus cosmologique n'est pas directe. Il faut soustraire les effets cinématiques du déplacement combiné de la Terre, du Soleil et de la galaxie par rapport à l'Univers lointain. À cause de l'effet Doppler, les photons provenant d'une direction – celle du mouvement – sont plus « chauds » que ceux de la direction opposée. Ce phénomène a été observé pour la première fois en 1971.

Après avoir soustrait cet effet cinématique, les cosmologistes doivent éliminer certains rayonnements enregistrés par les détecteurs de *Planck* qui se superposent au fond diffus. Ces rayonnements perturbateurs proviennent de processus as-

trophysiques d'avant-plan. Ces sources émettent de la lumière dans la même gamme de longueurs d'onde que le fond diffus. Ce rayonnement a diverses origines : il provient de l'émission galactique, de la poussière interstellaire, du rayonnement d'électrons diffusés sur des particules chargées, ou du rayonnement synchrotron émis par une particule chargée et déviée par un champ magnétique. La carte ci-dessous montre l'effet d'un type d'avant-plan sur la carte du fond. On distingue très nettement la Voie lactée d'où est émis le rayonnement parasite.

Aux fréquences comprises entre 100 et 217 gigahertz, les fluctuations du fond diffus cosmologique dominant tous les

avant-plans. Mais pour extraire au mieux la contribution qui intéresse les cosmologistes, il est nécessaire d'observer une plus vaste gamme de fréquences. Le détecteur de *Planck* est sensible à des fréquences comprises entre 30 et 857 gigahertz. Cela permet de mieux modéliser le rayonnement des particules chargées à basse fréquence et la lumière émise par la poussière à haute fréquence. Il est alors possible de nettoyer les cartes de rayonnement enregistrées entre 100 et 217 gigahertz. Le processus d'obtention de la carte du fond diffus est très complexe et nécessite le travail d'une grande équipe de physiciens pour démêler tous les signaux.



ce résultat et étendent son domaine de validité à des distances allant jusqu'à 660 milliards d'années-lumière, soit 15 fois le rayon de l'Univers observable.

Si l'Univers est plat, il n'est pas forcément infini. Il peut être replié sur lui-même, un peu à l'image d'une pièce dont les murs, le sol et le plafond seraient tapissés de miroirs : même finie, la pièce donnerait l'impression d'un espace infini à quiconque s'y trouverait. Le jeu des réflexions donne une infinité d'images de chaque objet que contient la pièce. La même chose se produit-elle pour l'Univers, est-il « chiffonné » selon l'expression de l'astrophysicien Jean-Pierre Luminet ? On ne trouve pas de trace d'images multiples du fond diffus, ce qui limite les possibilités que l'Univers soit replié sur lui-même.

Et, fini ou pas, l'Univers tourne-t-il sur lui-même ? Là encore, une rotation globale de l'Univers serait observable par le biais d'une série de motifs en spirale que l'on devrait observer dans des directions opposées, spirales dont la structure serait déterminée par les abondances de matière et d'énergie sombre. Là encore, l'analyse ne révèle rien qui serait compatible avec une telle rotation, pas plus qu'on ne trouve la trace de cordes cosmiques, sortes d'immenses concentrations filiformes d'énergie dont la formation est jugée possible à l'issue de l'inflation.

Des surprises dans les données

Le rôle de la mission *Planck* n'a pas été seulement d'améliorer la précision sur certaines grandeurs physiques. Il a permis de tester des modèles différents et d'écarter ceux dont les prévisions ne sont pas observées. Cependant, l'analyse réserve aussi quelques surprises dont il est difficile aujourd'hui de savoir qu'en penser. Par exemple, quand on examine le spectre de puissance (voir l'encadré page 49), on constate des anomalies. Les points pour les échelles angulaires les plus grandes sont presque tous situés au-dessous de la courbe, alors qu'on se serait attendu à ce qu'ils soient équitablement répartis de part et d'autre de celle-ci. Pour quelle raison ? On l'ignore. L'hypothèse la plus prudente serait d'imaginer un problème dans le traitement des données brutes, mais aucune explication n'a été trouvée jusqu'à maintenant. Du reste, cet effet est aussi visible dans les données, certes moins précises, de WMAP. Cela tend sans doute à rendre son

existence plus plausible ; ce ne serait pas un artefact lié au traitement de données.

Une autre observation inexpliquée de WMAP qui se confirme est la présence d'une tache froide dans la carte des fluctuations de température. Elle est située en bas à droite de la carte (voir la figure 3).

Autre surprise, la valeur de la constante de Hubble, qui indique la vitesse d'expansion de l'Univers, obtenue par l'équipe de *Planck* est plus basse, 67,8 kilomètres par seconde et par mégaparsec, mais néanmoins compatible avec celles déduites d'à peu près toutes les autres observations. Quand on combine les données de *Planck* à ces valeurs plus élevées de la constante de Hubble, on obtient des résultats étranges. Par exemple, les propriétés de l'énergie sombre suggèrent que sa densité augmente avec le temps, contrairement à l'analyse avec les données de *Planck* seul. Autrement dit, l'expansion de l'Univers accélérerait de plus en plus et précipiterait l'Univers vers une fin cataclysmique... La confiance à accorder à ce résultat reste à évaluer. En tout état de cause, la précision des données de *Planck* est précieuse : en poussant à l'extrême les

prévisions des modèles, il n'est pas exclu que l'on se rende compte que ceux-ci sont incomplets ou que certaines observations sont moins précises qu'on ne le pensait, voire entachées d'erreurs. Le temps nous dira laquelle de ces deux hypothèses est correcte.

Si les données de *Planck* présentent des écarts avec certaines observations, d'autres tests confirment les résultats de *Planck*. Par exemple, la nucléosynthèse primordiale décrit la production d'hydrogène et d'hélium dans l'Univers primordial. L'étude du fond diffus permet de calculer les concentrations de ces éléments, avec des résultats compatibles avec les observations.

La polarisation : des résultats à venir

Par ailleurs, la distribution de matière dans l'Univers influe sur la carte des fluctuations. En effet, la lumière du fond diffus est déviée de sa trajectoire lorsqu'elle passe à proximité d'une grande densité de matière, à cause des effets de courbure de l'espace suivant les lois de la relativité générale. Il est possible de déduire de cette carte la

distribution de la matière. Or cette distribution est compatible avec des analyses indépendantes de la distribution de matière dans l'Univers.

Les résultats impressionnants de *Planck* ne sont que le premier volet de cette mission. Ils seront encore précisés, en particulier ceux sur l'inflation, par des mesures de polarisation du fond diffus. Lors de la recombinaison, la lumière du fond diffus a acquis une polarisation électromagnétique. Ce phénomène permet notamment de préciser l'époque de la réionisation et l'amplitude des déformations produites par les effets de lentille gravitationnelle.

Un certain type de polarisation pourrait révéler que la naissance des fluctuations de densité que nous observons a été accompagnée de celle d'ondes gravitationnelles, sorte de rides de l'espace-temps se propageant au sein de celui-ci à la vitesse de la lumière. Ces ondes gravitationnelles, dont il n'est malheureusement pas possible de prédire l'amplitude, seraient un test pour l'inflation. La suite de l'analyse des données par l'équipe de *Planck* pourrait ainsi mettre un point final au modèle de l'inflation. ■



france culture

LA MARCHE DES SCIENCES

Découvertes, inventions, aventures savantes au fil de l'Histoire

Aurélie Luneau
14h-15h / chaque jeudi

franceculture.fr

SCIENCE

© 2013 France Culture. Tous droits réservés. Photo : M. D. / Getty Images

Du béton FLEXIBLE

Le béton est le matériau de construction le plus utilisé des sociétés modernes. Au cours des XIX^e et XX^e siècles, son usage s'est répandu pour nombre d'infrastructures : bâtiments, routes, barrages... La quantité de béton produite en 2012 est estimée à 12 milliards de tonnes, soit deux tonnes par an et par être humain. La plus haute construction (828 mètres) et le plus long pont (165 kilomètres) du monde, respectivement la tour Burj Khalifa, à Dubaï, et le pont reliant Danyang et Kunshan, en Chine, sont en béton.

Constitué de granulats (sable, graviers) maintenus par un liant, l'usage du béton s'est répandu après l'invention du ciment dit de Portland (en raison de sa couleur similaire à la roche de Portland, qui a notamment servi à la construction du palais de

L'ESSENTIEL

- Un type de béton à la fois flexible et résistant a été élaboré.
- Ces propriétés sont obtenues en contrôlant la taille des imperfections dans le béton et en renforçant ce dernier par des fibres spéciales.
- Ce béton flexible a été utilisé pour diverses infrastructures, tels des bâtiments et des ponts.

Buckingham) par le maçon britannique Joseph Aspdin en 1824. Ce ciment est le liant le plus utilisé aujourd'hui. Sa fabrication, donc celle du béton, consomme beaucoup d'énergie. On confectionne le ciment en broyant du calcaire (qui contient du calcium) et de l'argile (renfermant de la silice), puis en chauffant la poudre résultante à une température comprise entre 1 400 °C et 1 600 °C. Les grains résultants, nommés clinker, sont ensuite broyés et mélangés avec d'autres éléments en plus faible proportion. Le ciment de Portland contient deux types de silicate de calcium, l'alite ($(\text{CaO})_3(\text{SiO}_2)$) et le belite Ca_2SiO_4 , qui assurent respectivement la résistance du béton dès le début du durcissement et sa longévité.

Pour obtenir le béton, on mélange le ciment avec les granulats, puis on ajoute