

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.

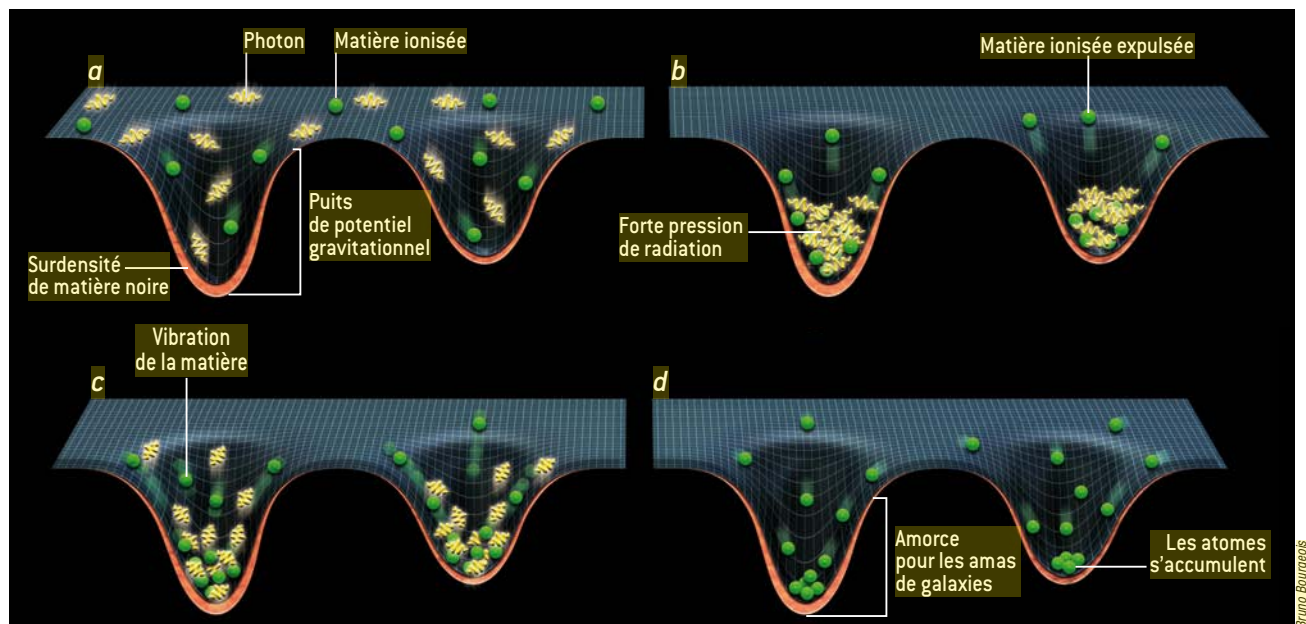
Six ingrédients pour décrire le modèle

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.

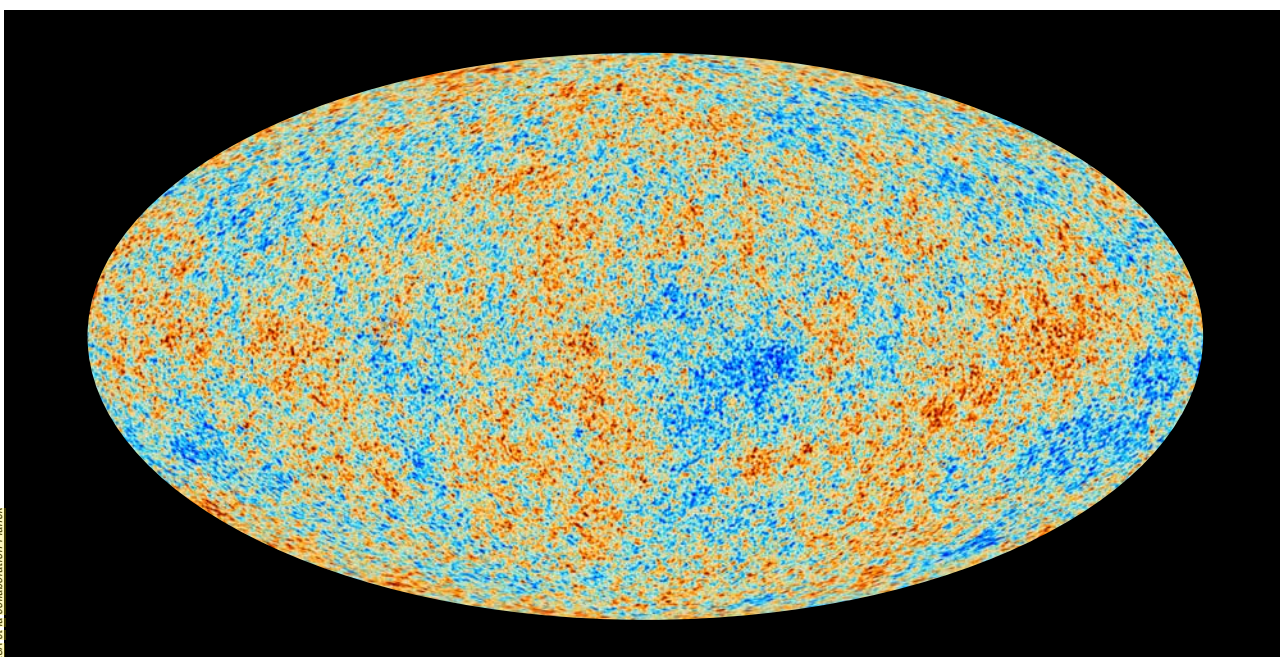
Les deux premiers ingrédients sont les densités de matière ordinaire et de matière noire dans l'Univers primordial. Le premier influe notablement sur l'amplitude des vibrations de la matière. Les données de *Planck* permettent d'estimer sa valeur, environ 0,249 proton par mètre cube, avec une précision 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.