



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 - mediab

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.

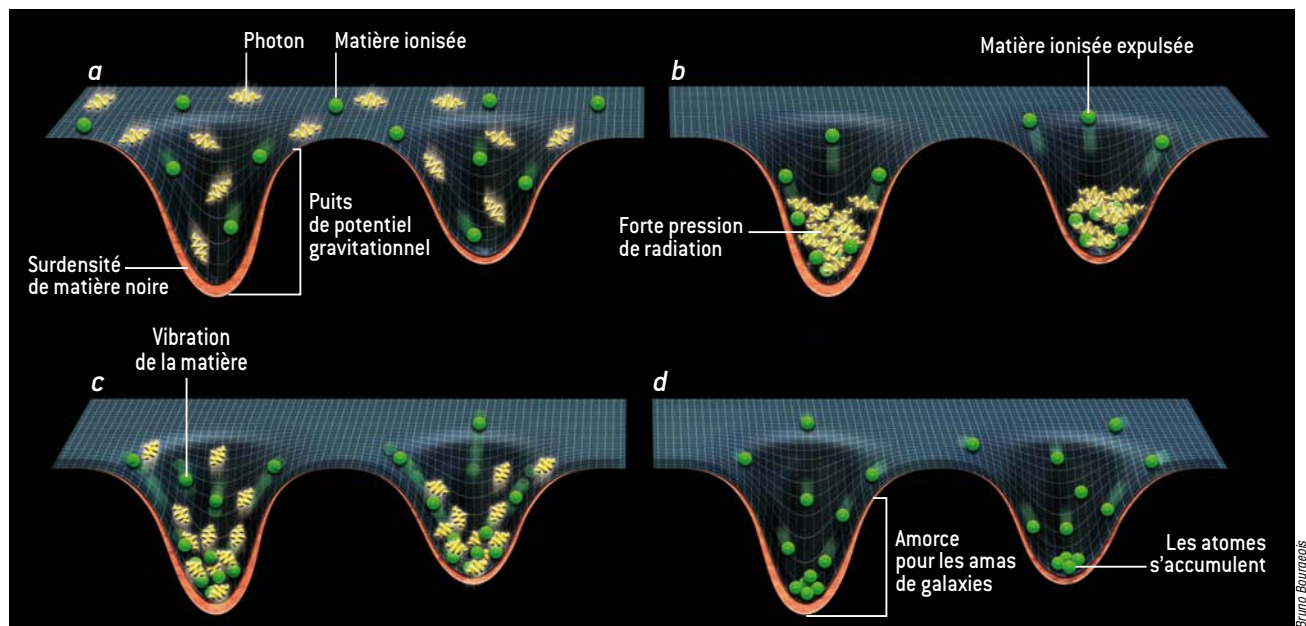
Six ingrédients pour décrire le modèle

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.