

# La mission spatiale Planck : un regard sur la lumière la plus ancienne de l'Univers

Jacques Delabrouille  
XVII<sup>ème</sup> Festival d'Astronomie de Fleurance, 10 Août 2007

La mission spatiale Planck, qui doit être lancée par l'agence spatiale européenne dans le courant de l'été 2008, est conçue pour cartographier avec une précision inégalée le fond de rayonnement cosmologique. Cinquante fois plus sensible que la mission spatiale précédente, Planck nous apportera une quantité d'informations précieuses sur les premiers instants de l'univers...

## Introduction

Au 4<sup>ème</sup> siècle avant notre ère, Ératosthène mesura le rayon terrestre avec une méthode toute simple. Simple certes, mais ingénieuse.

Au moment où le soleil est à la verticale de Syène (l'ancienne Assouan), éclairant le fond d'un puits vertical profond, à midi, un jour particulier de l'année, on constate qu'il n'est pas à la verticale d'Alexandrie, comme en témoigne l'ombre portée des bâtiments. Le rayon de la terre peut être calculé simplement à partir de la mesure de la hauteur d'un obélisque situé à Alexandrie, de la longueur de son ombre, et de la distance d'Alexandrie à Syène. Par cette méthode, Ératosthène mesura le rayon de la terre avec la précision remarquable de 2/1000 (avec un peu de chance, reconnaissons le, compte tenu de la précision des mesures, et notamment de la distance de Syène à Alexandrie).

Si cette méthode est simple, elle repose sur quelques hypothèses, non évidentes a priori :

- La terre est ronde,
- Le soleil est assez loin pour que ses rayons puissent être considérés comme parallèles,
- Syène et Alexandrie sont à la même longitude (seule façon à l'époque de se synchroniser, midi étant alors au même instant pour les deux villes).

Il est remarquable que cette approche, se basant sur un *modèle* (hypothèses que la terre est ronde, que les rayons du soleil sont parallèles...), sur des mesures (ici des distances et des longueurs), et sur des notions de mathématiques (avancées pour l'époque) permettant de relier ces observations à la grandeur à mesurer, a permis d'effectuer de façon indirecte la mesure d'une grandeur qu'il n'était pas possible d'appréhender immédiatement. Il n'est manifestement pas possible, par exemple, de se munir d'un mètre et d'aller au centre de la terre pour en mesurer la distance ; Il n'était pas non plus concevable, à l'époque d'Ératosthène, de faire le tour de la Terre pour en mesurer la circonférence, afin d'en déduire le rayon. Conceptuellement donc, cette mesure est très différente de la mesure de la distance entre deux maisons, accessible directement *in situ* et mesurable avec un mètre.

Quel rapport avec la mission Planck et le fond diffus cosmologique, objet de cet

exposé? Tout simplement le fait que nous aussi allons essayer nous aussi, en partant d'hypothèses simples, d'observations bien choisies, et d'outils d'analyse mathématiques appropriés, de mesurer quelques paramètres décrivant le monde dans lequel nous vivons : notre Univers.

### **Connaître notre Univers**

L'Univers est bien plus grand que la Terre, peut-être infiniment plus grand. On sait aujourd'hui qu'il est plus grand que 10 milliards d'années lumières, soit environ  $10^{26}$  m (cent mille milliards de milliards de kilomètres). Il est même fort possible qu'il soit infini dans une ou plusieurs de ses dimensions, spatiales ou temporelle, mais nous n'en avons aucune preuve directe.

Il n'est pas envisageable pour un observateur de se déplacer suffisamment loin pour constater *in situ* les propriétés de l'Univers à une distance « cosmologique » – ni de se déplacer dans le temps. Malgré cela, il est possible de mesurer un certain nombre de paramètres et de propriétés de notre Univers, comme sa courbure, sa densité, son âge... Il est possible de prédire son évolution à grande échelle et de connaître son passé. Ces mesures, tout comme celle d'Ératosthène, se basent sur un modèle (de l'Univers, des lois de la physique) et sur des observations qui, dans le cadre de ce modèle, dépendent des paramètres à mesurer. Parmi ces observations, celle du fond diffus cosmologique, rayonnement fossile émis lorsque l'Univers était âgé de 380.000 ans seulement, joue un rôle de toute première importance. Mais avant de discuter de ces observations, il convient de donner quelques bases de cosmologie... Patience donc... et commençons par le commencement.

#### *L'expansion*

Aujourd'hui, le modèle standard de la cosmologie est relativement bien établi. On sait, à partir de l'observation des galaxies distantes, qui semblent s'éloigner de nous à une vitesse proportionnelle à leur distance, que l'Univers est en expansion. Deux objets quelconques abandonnés dans l'espace s'éloignent à une vitesse  $v$  d'autant plus grande qu'ils sont loin l'un de l'autre, selon la loi de proportionnalité  $v = H_0 \times D$ , où  $v$  est la vitesse et  $D$  la distance. La constante de proportionnalité  $H_0$ , nommée constante de Hubble, vaut (aujourd'hui) environ 70 km/s/Mpc (pour une mesure de vitesse en km/s et de distance en Mpc, où 1 Mpc = 1 Mégaparsec = 1 million de parsec = 3,26 millions d'années lumière). Notons que, bien que dénommée « constante » (car elle est sensiblement la même pour toutes les galaxies qui ont servi aux observations), cette grandeur varie (assez lentement) dans le temps.

Nous avons affaire à des chiffres, des distances, des dimensions qui ne nous sont pas familiers. Essayons de voir ce que cela veut dire.

Pour la valeur actuelle d'  $H_0$ , les distances augmentent d'un pour cent en 150 millions d'années environ. Deux objets éloignés de 3,26 millions d'années lumière s'éloignent l'un de l'autre à environ 70 kilomètres par seconde. Deux objets un million de fois plus proches, éloignés de 3,26 années lumière (distance approximative de l'étoile la plus proche) s'éloignent de 7 centimètres par seconde. Enfin, deux points éloignés de cent mille kilomètres, sous l'effet seul de l'expansion, s'éloigneraient d'une distance d'un dix-millième de micron par seconde, soit la taille d'un atome...

En pratique, ceci n'est valable à de petites distances qu'en l'absence de forces qui viendraient perturber ce mouvement, ce qui est rarement le cas.

Par exemple, l'expansion de l'Univers ne fait pas grandir une table solide au cours du temps. Les forces électromagnétiques qui rigidifient sa structure empêchent une telle dilatation. De même, la terre ne grandit pas avec le temps. De même, les forces gravitationnelles qui structurent le système solaire induisent des mouvements relatifs bien supérieurs à l'expansion cosmique.

### *Homogénéité*

L'observation, à l'aide de télescopes, de l'Univers lointain, montre que la matière visible (essentiellement les galaxies) se répartit à peu près uniformément, sans concentration particulière à très grande échelle. On dit que notre univers est homogène à grande échelle. Les étoiles, les galaxies, et même les amas de galaxies, qui engendrent, selon la relativité générale, des "petites" perturbations de la courbure de l'espace, sont des détails à l'échelle de l'Univers observable, un peu comme les montagnes et les collines sont des détails de la courbure de la surface terrestre si l'on considère la terre dans son ensemble. Pour fixer les idées, une coquille d'œuf est moins lisse, à l'échelle, que la surface de la terre. A l'échelle de l'univers observable, les variations de courbure spatiale sont encore 100 fois plus faibles, proportionnellement. L'univers est extraordinairement homogène.

### *Isotropie*

Toutes les directions d'observation, par ailleurs, semblent être équivalentes (isotropie). Les lois de la physique, par exemple, semblent être indépendantes de la direction (par exemple, vous ne pouvez pas jeter un caillou plus loin vers le sud que vers l'ouest)... Le fait, par contre, qu'il soit plus facile de jeter un caillou vers le bas que vers le haut, est un détail essentiellement local, dû à la présence de l'attraction terrestre. Dans le vide spatial, les directions sont équivalentes à grande échelle (si l'on fait abstraction des phénomènes locaux).

### *Big-Bang*

Ces observations fondamentales, récession des galaxies, homogénéité et isotropie, permettent d'établir un modèle cosmologique "standard", le modèle du Big-Bang. L'homogénéité et l'isotropie de l'espace en effet imposent une géométrie simple à l'espace-temps.

Cette géométrie peut être décrite mathématiquement par un modèle (qui s'appelle la métrique de Friedman-Robertson-Walker). Ce modèle nous permet de nous représenter la réalité telle que nous la percevons. Il est utile pour faire des calculs dans le cadre de la relativité générale, qui est à ce jour le meilleur modèle que nous ayons pour décrire la gravitation.

Cette géométrie correspond à un espace en expansion au cours du temps, et semble indiquer un événement situé dans le passé, où la densité était infinie. Cet événement est défini (conventionnellement) comme l'origine de la coordonnée "temps" (et donc, l'origine des temps).

Ce modèle, bien évidemment, a fait marcher l'imagination. Tout semble se passer comme si l'Univers avait trouvé son origine dans une sorte de grande explosion initiale.

Ceci a valu au modèle son nom de Big-Bang (inventé, en fait, par ses détracteurs pour le tourner en dérision). Mais les succès de ce modèle sont tels qu'aujourd'hui, pratiquement aucun scientifique ne le remet sérieusement en question – sinon pour le tester de plus en plus finement. Les détails restent à affiner, mais les grandes lignes sont essentiellement correctes.

### *Equation d'Einstein et géométrie*

A grande échelle, les interactions dans l'Univers sont dominées par les lois de la gravitation. Dans le cadre de la relativité générale, l'équation d'Einstein permet de relier la géométrie de l'espace-temps (les paramètres de l'espace de Friedmann-Robertson-Walker), et son contenu en masse et en énergie. Cette équation fondamentale de la gravitation (l'équation d'Einstein) nous dit en substance : La géométrie de l'espace-temps est fixée par son contenu. Plus l'Univers est dense, plus la courbure de l'espace est grande. Par conséquent, si l'on connaît la géométrie précise de l'espace-temps, on peut en déduire son contenu en masse-énergie. Inversement, si l'on connaît le contenu, on peut en déduire la géométrie.

### *Paramètres cosmologiques*

Si l'on devait décrire la terre en quelques paramètres, on pourrait, par exemple, donner les paramètres suivants

- Rayon
- Masse
- Température moyenne
- ...

Bien sûr, si l'on s'intéressait au détails, on pourrait donner l'altitude de la plus haute montagne, la forme des terres et des océans, le nom et la position des villes, ... Si l'on voulait être exhaustifs, il faudrait décrire la Terre en spécifiant la position, la nature, le mouvement de chacun de ses atomes, ce qui serait manifestement hors de portée !

De même, il est hors de portée de décrire l'Univers en spécifiant la position et le mouvement de chacune de ses galaxies, de ses étoiles, de ses planètes... Par contre, il est possible de définir quelques paramètres globaux qui le décrivent dans ses grandes lignes.

Ces quelques paramètres sont appelés "paramètres cosmologiques". Les principaux de ces paramètres sont :

- La constante de Hubble qui décrit la vitesse d'expansion;
- La courbure de l'espace,  $k$ . Pour  $k=0$ , l'espace est plat (c'est-à-dire, les hypersurfaces spatiales sont Euclidiennes). Pour  $k>0$ , l'espace a une géométrie sphérique (identique à la « surface » d'une sphère, de dimension 3, dans un espace Euclidien de dimension 4). Pour  $k<0$ , l'espace est "hyperbolique" (semblable à la surface d'une selle à cheval).
- La constante cosmologique  $\Lambda$ , constante universelle qui, si elle ne s'annule pas, influe sur la gravitation en apparaissant dans l'équation d'Einstein (et qui peut être interprétée comme une énergie du vide) ;
- Le contenu en matière et énergie de l'Univers, sous ses différentes formes (matière, rayonnement, particules de différents types) ;
- Des paramètres qui décrivent les conditions initiales de l'Univers : amplitude, distribution, nature des inhomogénéités initiales qui donneront naissance, par la suite,

aux galaxies et amas de galaxies...

La mesure de tous ces paramètres, aussi précisément que possible, est l'un des défis de la recherche actuelle en cosmologie. Compte tenu de l'équation d'Einstein, deux stratégies peuvent être envisagées : soit il est possible de mesurer directement le contenu en matière et énergie de l'Univers, et l'on peut en déduire sa géométrie, soit on peut mesurer la géométrie, et l'on en déduit le contenu en matière et énergie. En pratique, les cosmologistes essaient de mesurer les deux, afin de tester la cohérence du modèle, en testant au passage l'applicabilité de l'équation d'Einstein à la Cosmologie.

C'est, en particulier, à partir de la mesure de la façon dont l'expansion évolue au cours du temps que les cosmologistes en déduisent quel type de matière la remplit. C'est ainsi que nous aurons la surprise (un peu plus loin) de constater que l'univers est constitué à 4,4% seulement de matière ordinaire (appelée matière baryonique). 25% environ est constitué de matière de nature inconnue, qui ne brille pas et que l'on n'observe pas directement (la fameuse "matière noire"). Enfin, un peu plus de 70% est constitué d'une forme mystérieuse d'énergie dont la densité ne varie pas avec l'expansion, et appelée, faute d'information supplémentaire "énergie du vide" – car ce type d'énergie semble être omniprésent dans l'espace vide de toute autre forme de matière et d'énergie.

## Les plus vieux photons de l'Univers

Nous avons tous fait l'expérience du refroidissement d'une bombe de mousse à raser ou de crème chantilly lorsqu'on la vide. Inversement, une pompe à vélo chauffe lorsque l'on comprime le gaz.

De façon semblable, comme un gaz qui se détend, l'univers se refroidit avec l'expansion. Si l'on remonte suffisamment loin dans le temps, l'Univers était suffisamment dense et chaud pour que les atomes soient *ionisés* (un peu comme à l'intérieur du Soleil aujourd'hui). A cette époque, l'univers était entièrement rempli d'un plasma – un gaz de particules ionisées en interaction, qui contenait des particules de matière (noyaux d'hydrogène et d'hélium ainsi que des électrons, essentiellement) et des particules de lumière (les photons) – entre autres.

L'Univers se refroidissant, les électrons ont été capturés par les noyaux d'hydrogène et d'hélium. La matière ordinaire composant notre univers a alors quitté l'état plasma pour se mettre dans un état gazeux ordinaire. Cette époque est appelée *recombinaison*, un peu abusivement puisque les électrons se combinent à ce moment pour la première fois aux noyaux (il n'y a donc pas recombinaison, mais combinaison tout court). Les photons peuvent alors se propager librement à travers ce gaz sans interagir.

C'est par ce raisonnement qu'il est possible de prédire, si le modèle du Big-Bang est correct, l'existence d'un grand nombre de photons primordiaux qui doivent actuellement encore remplir l'Univers d'un rayonnement « fossile », le fond diffus cosmologique. C'est là ce que l'on peut appeler "la lumière la plus ancienne de l'Univers".

### *Le fond diffus*

La détection fortuite (ils testaient une antenne de télécommunications) d'un fond de rayonnement inexplicable par Arno Penzias et Robert Wilson aux Bell Laboratories en 1965 leur valut le prix Nobel de physique. Ce n'était pas là seulement un coup de chance, vu les efforts qu'ils ont fait pour comprendre d'où pouvait bien venir l'excès de

bruit de leur antenne... Il venaient, sans le savoir, de détecter le fond cosmologique que leurs collègues de Princeton, à quelques kilomètres de là, recherchaient activement !

Ce fond de rayonnement, qui avait donc été prédit quelques années auparavant, est extraordinairement homogène, ce qui confirme l'homogénéité de l'Univers à grande échelle. Il a par ailleurs la même loi d'émission qu'un corps à la température de 2,725 K, ce qui confirme que la source des photons était à l'équilibre thermodynamique – une propriété prévue par le modèle du Big-Bang.

A cette température, l'essentiel de l'énergie d'un rayonnement de corps noir se situe dans le domaine de longueur d'onde millimétrique à centimétrique – à des longueurs d'onde proches de celles utilisées pour la télévision Hertzienne et pour les communications avec les mobiles. Ainsi, si vous allumez votre télévision sans régler la fréquence, une fraction de la « neige » aperçue sur l'écran est due, en fait, au fond de rayonnement cosmologique...

Ce rayonnement de corps noir cosmologique constitue le second des trois « piliers » du Big Bang (le premier est la récession des galaxies observée par Hubble ; le troisième, l'abondance des éléments légers produits lors de la nucléosynthèse primordiale, ne sera pas abordé ici).

### *Inhomogénéités...*

La preuve flagrante de l'homogénéité de l'Univers primordial vient de l'extraordinaire homogénéité de la température du fond cosmologique : *dans toutes les directions*, sa température est de 2,725 degrés au dessus du zéro absolu. Cette uniformité valide à très grande échelle l'une des hypothèses cruciales du modèle du Big-Bang. Mais si cette extraordinaire homogénéité du fond de rayonnement est l'une des preuves éclatantes de son origine cosmologique, elle a commencé par poser deux problèmes de taille.

On le sait, la matière a tendance à homogénéiser sa température. Par exemple, un bol de thé chaud et un verre de thé glacé abandonnés sur la table de la cuisine se retrouvent rapidement tous deux à la température ambiante. Dans l'univers primordial, les choses se passent de la même façon : les zones chaudes et les zones froides ont tendance à toutes se mettre à la même température.

Ceci nécessite toutefois que l'on laisse à la chaleur le temps de se propager.

Imaginons que, sur la table de la cuisine, on dispose un grand nombre de tasses serrées les unes contre les autres, pour un grand nombre de convives. Pour une partie d'entre eux, on sert un thé bien chaud. Pour l'autre moitié, on sert un thé glacé. Si par malheur les convives se font attendre, toutes les boissons seront à la même température tiédasse.

Les choses se passent exactement de la même façon dans l'Univers primordial. Les zones chaudes et les zones froides ont tendance à homogénéiser leurs températures. Toutefois, une zone chaude et une zone froide dans l'univers primordial ne peuvent voir leurs températures s'équilibrer que si la chaleur a le temps de passer de l'une à l'autre. Combien de temps cela prend t-il ?

Bien évidemment, le temps est proportionnel à la taille des zones en question. Une grande tasse de thé bien pleine refroidit plus lentement qu'une tout petite tasse de thé à moitié vide. Dans l'univers primordial, le temps nécessaire pour homogénéiser la température d'une zone donnée est de l'ordre d'une année pour des zones dont la taille

est de l'ordre d'une année lumière... et de 400.000 ans pour une zone de taille 400.000 années lumière...

Or le rayonnement cosmologique a été émis lorsque l'Univers était âgé de 380.000 ans environ. A cette époque, les régions de l'Univers distantes de plus de 380.000 années lumière n'avaient pas eu, en principe, le temps de se mettre à la même température. On dit qu'elles n'étaient pas *causalement connectée*. ! Par quel miracle pourraient t-elles être à la même température partout?

### *L'inflation*

Pour l'expliquer, il est tentant d'imaginer un mécanisme pour que ces régions *aient été* à un moment causalement connectées. Un tel mécanisme a été imaginé dans les années 1980. Il a été dénommé *l'inflation*. Selon la théorie, lorsque l'Univers était âgé d'une fraction de milliardième de seconde, il a subi une phase d'expansion accélérée extrêmement rapide, pendant laquelle sa taille a augmenté d'un facteur gigantesque, une portion de la taille d'une tête d'épingle augmentant à une taille de plusieurs milliards de milliards de fois la taille actuelle de l'univers visible ! Grâce à l'inflation, l'ensemble de l'Univers observable aujourd'hui aurait été, *avant*, causalement connecté.

L'inflation a aussi le bon goût de résoudre également le deuxième souci que suscite l'extraordinaire homogénéité du CMB, le problème de la formation des structures. Si l'on observe aujourd'hui des galaxies et des amas de galaxies, il doit avoir existé par le passé des petites inhomogénéités de densité (de petits grumeaux) à l'origine de ces structures. Or l'inflation prédit justement la présence de petites fluctuations initiales, dues à des fluctuations quantiques pendant la phase inflationnaire. La théorie résout donc deux problèmes d'un coup ! Elle permet d'expliquer l'extraordinaire homogénéité de l'Univers, mais aussi pourquoi il y a de toutes petites inhomogénéités, qui serviront pour fabriquer par la suite les galaxies et amas de galaxies que nous observons aujourd'hui.

Dit comme cela, cette théorie semble être un postulat complètement ad-hoc. Nous avons besoin d'un mécanisme pour que l'Univers soit homogène mais pas tout à fait, et on invente une histoire tirée par les cheveux d'expansion plus rapide que la lumière pour résoudre notre problème !

En réalité, l'inflation était à l'origine motivée par des questions liées à la physique des particules, trop techniques pour être évoquées ici. Il était plausible qu'un mécanisme de physique produise exactement cette inflation dont nous avons besoin ! C'est là une coïncidence trop grande pour être négligée, qui fait de l'inflation une théorie extrêmement attrayante.

Enfin, l'inflation permet aussi, comme on le verra par la suite, de prédire certaines propriétés générales des perturbations de densité dans l'Univers, et donc elle permet de prédire ce que l'on devrait observer si l'on regarde le fond cosmologique. Miracle, les observations, jusqu'ici, collent parfaitement aux prédictions de la théorie... Tout porte à croire que le modèle, là encore, est correct dans ses grande lignes.

Malheureusement, si les grandes lignes de la théorie sont assez bien établies, les détails sont encore largement incompris, et il existe des tas de modèles d'inflation tous aussi plausibles (ou aussi peu plausibles) les uns que les autres, faute d'une compréhension fine des mécanismes physiques mis en jeu.

C'est là l'un des enjeux des mesures du satellite Planck : observer cet univers primordial

de façon suffisamment fine pour être capable de distinguer, parmi les modèles possibles d'inflation, lesquels sont possibles, et lesquels sont exclus.

### *Formation des structures*

Résumons maintenant en quelques mots le mécanisme de formation des structures observables aujourd'hui : galaxies, amas et super-amas de galaxies...

Selon la théorie, des petites perturbations initiales de densité sont générées aux tous premiers instants de l'Univers. Ces perturbations seraient liées aux fluctuations quantiques du vide pendant l'inflation. La physique de l'inflation est encore assez spéculative. On postule qu'à la sortie de l'inflation est présent un champ de petites fluctuations de densité – auxquelles correspondent des fluctuations de température (toujours l'histoire du gaz dense chaud et du gaz ténu froid...).

Ces petites fluctuations de densité vont évoluer sous l'effet combiné de l'attraction gravitationnelle et de la pression du plasma. Les détails de cette évolution dépendent des paramètres cosmologiques. Observer ces inhomogénéités dans l'univers primordial permet de mieux comprendre ce qui s'est passé.

### *L'origine des photons fossiles et anisotropies du fond diffus*

Le fond diffus a été émis par de la matière à l'équilibre thermique. Les photons fossiles, émis à une température de 3000 K à l'origine, sont maintenant à 2,725 K, en raison du refroidissement dû à l'expansion.

Cependant, les petites inhomogénéités présentes au moment de l'émission du rayonnement fossile ont perturbé très légèrement cette température, créant de petites inhomogénéités de température qui devraient être observables, à supposer que nous disposions d'instruments suffisamment sensibles pour le faire.

L'observation des fluctuations de température du fond diffus correspond, en quelque sorte, à une photographie des conditions régnant dans l'Univers, il y a 13,7 milliards d'années, quand il n'était âgé que de 380.000 ans.

En pratique, les propriétés des fluctuations de température du rayonnement fossile, pour une cosmologie donnée (décrite par un certain nombre de paramètres - une grosse douzaine), peuvent être calculées en résolvant les équations qui gouvernent l'évolution du plasma primordial. La résolution des équations permet l'interprétation des observations en termes de paramètres cosmologiques. En pratique, ceci se fait à l'aide de programmes informatiques, qui permettent de calculer des milliers de modèles afin de trouver celui qui « colle » le mieux aux observations. C'est de cette façon que sont obtenus les paramètres cosmologiques à partir des expériences actuelles d'observation du fond cosmologique...

## Capter les photons fossiles

Venons-en maintenant au problème de la mesure des fluctuations elles-mêmes, c'est-à-dire, de la capture des photons fossiles par un instrument dédié...

Le fond diffus a une température de 2,725K environ. Les fluctuations, pour être à l'origine des structures observables aujourd'hui, devraient avoir une amplitude de quelques dizaines à quelques centaines de microkelvin, tout au plus. Il s'agit là d'une signature extrêmement ténue, que seuls des instruments prodigieusement sensibles seront capables de détecter. Des instruments si sensibles, qu'aujourd'hui, un détecteur destiné à ces mesures est capable de détecter en une seconde d'observation seulement la chaleur dégagée par une allumette à la distance de la Lune !

Entre la découverte du fond diffus lui-même par Penzias et Wilson, en 1965, et le début des années 1990, de nombreuses équipes expérimentales se sont attachées au problème de développer un instrument suffisamment sensible pour détecter les fluctuations de température. Ce formidable défi expérimental a tenu la communauté scientifique en échec pendant près de 30 ans.

C'est le développement d'amplificateurs faible bruit fonctionnant à très haute fréquence (large bande), puis l'utilisation de bolomètres à très basse température, qui a permis les succès des expériences les plus remarquables. En 1992, l'expérience DMR (Différential Microwave Radiometer) sur le satellite américain COBE détecte pour la première fois de petites fluctuations de température, d'amplitude environ 30  $\mu\text{K}$  – trente millièmes de degré ! Aujourd'hui, le satellite WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) utilise la même technologie, mais sensiblement améliorée : 30 fois plus sensible ! Bientôt, l'instrument Planck HFI, équipé de bolomètres refroidis à 100 millièmes de degré au dessus du zéro absolu, détectera ces fluctuations avec une sensibilité encore 50 fois supérieure à celle de WMAP.

## Les mesures actuelles

Pour l'instant, les meilleures mesures à très petite échelle angulaire ont été obtenues depuis le sol, où il est possible d'utiliser de grandes antennes nécessaires pour observer des fluctuations de toute petite taille. Les meilleures mesures sur l'ensemble du ciel ont été obtenues par les satellites équipés de technologies radiométriques (COBE puis WMAP).

### *COBE et la première détection des anisotropies*

Au début des années 1990, le satellite COBE, lancé par la NASA, emportait à son bord trois instruments destinés à sonder les propriétés du fond cosmologique. Le premier de ces instruments, le Spectromètre FIRAS, a mesuré avec précision la loi d'émission du fond cosmologique, confirmant son origine cosmologique. Le second, DIRBE, était dédié à la détection d'un fond infrarouge lié à la formation des premières galaxies. Le troisième, DMR, a détecté, pour la première fois, de petites fluctuations de la température du fond cosmologique à grande échelle angulaire.

Pour ces mesures, John Mather (responsable de l'expérience FIRAS) et George Smoot (responsable de l'expérience DMR) se sont partagé le prix Nobel de physique 2007. Ces mesures en effet ont définitivement tranché en faveur du modèle du Big-Bang, aucun de

ses détracteurs ne pouvant désormais proposer une alternative valable.

Toutefois, la résolution et la sensibilité de DMR ne lui permettaient pas de détecter les structures causalement connectées à la dernière diffusion. Il était nécessaire de compléter ces mesures par des mesures à plus petite échelle angulaire pour vérifier le scénario décrit plus haut – et, en particulier, les prédictions de l'inflation.

#### *Les missions ballon Archeops, Boomerang, Maxima*

Toute une génération d'instruments destinés à détecter les anisotropies à petite échelle a fait suite à COBE. Parmi les plus remarquables, les ballons stratosphériques Archeops, Boomerang, et Maxima, ont mesuré, en observant le fond cosmologique, la courbure spatiale de l'Univers, en mesurant la taille angulaire des plus grandes structures causalement connectées au moment de l'émission du fond. La conclusion est claire : l'Univers est spatialement plat. Cela veut dire que sa courbure est nulle, ou si faible qu'elle n'est pas mesurable à l'échelle de notre Univers observable aujourd'hui.

#### *Le satellite WMAP*

Les mesures les plus spectaculaires à ce jour ont été effectuées par le satellite américain WMAP, lancé en juin 2001 depuis Cap Canaveral en Floride. WMAP a cartographié avec une résolution de 15 minutes d'arc environ l'ensemble de la voûte céleste à cinq longueurs d'onde entre 20 et 90 GHz. Ces mesures ont permis d'estimer la valeur actuelle de plusieurs paramètres cosmologiques, et en particulier :

- L'âge de l'Univers : 13,7 milliards d'années environ
- La courbure de l'espace : compatible avec 0 (espace plat)
- La teneur en matière ordinaire (appelée baryons) :  $\Omega_B = 4,4\%$
- La quantité de matière noire (matière de nature encore inconnue) :  $\Omega_{DM} = 22,6\%$
- La densité d'énergie du vide (une forme d'énergie encore mal comprise) :  $\Omega_\Lambda = 73\%$

#### **La mission Planck**

La mission Planck, après les missions COBE et WMAP, est le satellite de troisième génération pour détecter les fluctuations de température du fond cosmologique.

Le satellite Planck est nommé ainsi en l'honneur du célèbre physicien Max Planck, qui a découvert la loi d'émission d'un corps à une température donnée (ce qu'on appelle *rayonnement de corps noir*, ou *rayonnement thermique*). Il se trouve que le fond cosmologique, justement, a une loi d'émission de corps noir. C'est cela qui démontre son origine cosmologique, en l'occurrence son émission par un plasma de température homogène.

L'instrument DMR sur COBE était conçu pour une première détection de fluctuations du fond cosmique. Les expériences suivantes, notamment les ballons Archeops, Boomerang et Maxima, ainsi que la mission spatiale WMAP et les expériences au sol ACBAR, CBI, VSA, et bien d'autres, étaient des expériences de seconde génération, destinées à montrer que les perturbations avaient bien les propriétés attendues, et d'en déduire les premières contraintes sur les paramètres cosmologiques – ainsi que de confirmer le scénario cosmologique basé sur l'inflation. L'objectif, notamment, était de gagner sur la résolution angulaire de 7° de COBE-DMR, afin de vérifier que les perturbations à l'échelle du degré, ou plus petites, avaient les propriétés statistiques

attendues.

L'objectif de Planck est de réaliser la mesure "ultime" des fluctuations de température, à toutes les échelles angulaires jusqu'à 5 minutes d'arc environ, avec une précision limitée par les incertitudes d'origine astrophysique, et non plus limitée par la sensibilité de l'instrument.

### *Deux instruments*

Deux instruments distincts sont embarqués sur le satellite Planck. L'instrument LFI (Low Frequency Instrument), qui observe le ciel à trois fréquences, à 30, 44 et 70 GHz, et l'instrument HFI, qui observe le ciel dans six bandes de fréquence entre 100 et 850 GHz. L'instrument LFI, de conception essentiellement italienne, utilise une technologie proche de celles embarquées sur COBE et WMAP. L'instrument HFI, de conception essentiellement française, utilise des détecteurs bolométriques.

### *Bolomètres*

Un bolomètre est un détecteur utilisé dans le domaine de l'infrarouge lointain (les longueurs d'onde "submillimétriques") pour détecter des rayonnements extrêmement ténus.

Le principe de fonctionnement d'un instrument bolométrique consiste à disposer au foyer d'un télescope un petit cristal capable d'absorber le rayonnement, et de s'échauffer en absorbant les photons. Le détecteur mesure un signal proportionnel à cet échauffement. Pour être très sensible, un bolomètre doit être refroidi à très basse température. C'est pourquoi Planck utilise des bolomètres refroidis à 100 mK (cent millièmes de degré au dessus du zéro absolu).

Refroidir des détecteurs à cette température dans l'espace est un formidable défi technologique. Planck HFI utilise un réfrigérateur conçu au Centre de Recherche sur les Très Basses Températures à Grenoble. C'est la première fois qu'un tel système sera embarqué sur une mission spatiale.

### *Avant-Plans*

Planck observe le ciel dans une large gamme de fréquence. Cette couverture spectrale permet de distinguer les fluctuations d'émission d'origine primordiale (qui sont des fluctuations de température du fond de ciel) des fluctuations d'émission d'autre origine, par exemple, dues à l'émission du milieu interstellaire dans la galaxie.

### *Polarisation*

Outre les fluctuations de température du fond cosmologique, Planck aura la capacité de mesurer la polarisation de la lumière fossile. Comme un polariseur, en photographie, permet d'éliminer des reflets afin de sélectionner les éléments intéressants de la scène photographiée, la mesure de la polarisation avec Planck permet de distinguer les perturbations selon leur origine au moment de la recombinaison. Cela permet de lever des incertitudes quant à l'interprétation des mesures. Cela permet aussi, en principe, de distinguer deux types de modes de perturbation générés lors de l'inflation : les modes scalaires, et les modes tenseurs. Les premiers sont liés aux perturbations de densité dans l'univers primordial. Les seconds sont liés à l'existence d'ondes gravitationnelles. Aujourd'hui, les différents modèles d'inflation prédisent des quantités différentes de

modes tenseurs. Planck permettra pour la première fois d'espérer mesurer ces modes tenseurs, et par là de mieux comprendre les mécanismes de l'inflation.

### *Astrophysique*

Enfin, Planck est non seulement un formidable instrument pour observer l'univers primordial ; mais aussi une expérience extraordinaire pour cartographier toutes les émissions astrophysiques aux longueurs d'onde submillimétriques. Ainsi, il permettra d'étudier la formation des amas de galaxies, la physique du milieu interstellaire, les différentes sources d'émission radio et infrarouge, et même de repérer des petits objets et des astéroïdes dans notre propre système solaire. Il fournira les premières cartes de l'émission totale du ciel dans le domaine submillimétrique. Gageons qu'il y a là un potentiel de découverte immense pour de nombreuses branches de l'astronomie.

## **Conclusions et perspectives**

Pour finir cet aperçu sur le fond diffus cosmologique, il convient de passer quelques instants à se poser deux questions fondamentales :

- Sommes-nous bien sûrs de comprendre les mesures, et de ne pas nous tromper dans l'interprétation des mesures actuelles ? Quel est notre degré de confiance ?
- Quel est le futur de ce domaine de la recherche en Cosmologie ? Faut-il continuer à faire des mesures plus précises ? avec une meilleure résolution ? quel est l'instrument de demain ?

### *Interprétation ?*

Si l'on analyse le cheminement qui nous a conduits à nos conclusions sur les paramètres cosmologiques qui décrivent notre Univers, force nous est de constater que celui-ci est loin d'être direct. De plus, il repose sur des hypothèses qui, bien que plausibles, ne sont aucunement démontrées à ce jour. Il convient donc toujours de se remettre en question. La mission Planck est aussi là pour cela.

Sur le plan des hypothèses, par exemple, nous supposons que l'Univers dans son ensemble est homogène et isotrope à grande échelle. Malheureusement, nous n'avons pas la possibilité de vérifier cette hypothèse au-delà d'une certaine distance. Est-ce grave ? Probablement pas, car si l'Univers était différent bien au-delà de la distance limite observable, ceci n'aurait pas d'impact sur la physique dans notre Univers local.

Nous supposons aussi que les lois de la physique sont invariantes dans l'espace et dans le temps, autrement dit, nous supposons que les forces fondamentales qui gouvernaient les interactions quand l'Univers était âgé de quelques minutes étaient les mêmes que celles que nous observons en laboratoire aujourd'hui. Est-ce plausible ? Certainement, mais ce n'est nullement démontré. Toutefois, aucune observation ne nécessitant aujourd'hui clairement une variation des lois de la physique dans le temps ou dans l'espace, les cosmologistes s'en tiennent à l'hypothèse minimaliste, qui consiste à supposer que les lois sont les mêmes partout tant qu'il n'y a pas de bonne raison de penser autrement.

Par contre, nous pouvons avoir une petite inquiétude en examinant les conclusions obtenues. Quelques peu déroutantes, elles nous conduisent à examiner tout ceci avec circonspection. L'univers serait constitué pour moins de 5% seulement de matière

ordinaire comme nous la connaissons, pour 25%, de matière noire de nature inconnue, qui échappe jusqu'ici à toute détection directe, et pour 70% d'énergie noire, encore plus mystérieuse, une forme d'énergie du vide qui ne se dilue pas lorsqu'on augmente le volume, et dont la pression serait négative !? Face à cette situation, le cosmologiste adopte une attitude pragmatique :

Tout d'abord, il s'en tient aux hypothèses qui lui semblent les plus plausibles. Ainsi, il est plus facile d'admettre aujourd'hui qu'il existe de la matière qui ne rayonne pas (la fameuse matière noire) plutôt que de remettre en question la relativité générale ou le modèle général du big-bang, qui sont bien établis par ailleurs, et ont permis de prédire de nombreuses observations qui ont été faites par la suite...

Ensuite, il ne développe pas de théories ou d'hypothèses plus compliquées que nécessaire pour expliquer les observations. Ainsi, la matière noire peut vraisemblablement être expliquée par la présence de particules nouvelles, les particules supersymétriques, dont l'existence a été proposée par les physiciens pour résoudre des problèmes du modèle standard de physique des particules, et qui ont donc déjà une bonne raison d'exister indépendamment de la cosmologie (même si elles n'ont pour l'instant jamais été observées). L'énergie noire, quant à elle, s'explique par la présence d'une constante cosmologique dans l'équation d'Einstein, parfaitement autorisée par la théorie existante. Tout cela reste très cohérent. Après-tout, nous avons, par le passé, fréquemment découvert de nouvelles particules et de nouvelles formes d'énergie. Il n'y a donc là rien de choquant.

Enfin, le cosmologiste valide (ou invalide) les modèles et théories en utilisant ceux-ci pour prédire ce qui serait observé dans des conditions non encore testées. Par exemple, la première validation de la relativité générale s'est faite en prédisant une observation (la déflexion de la lumière par le soleil) que l'ancienne théorie ne prédisait pas. Dans notre cas, le modèle cosmologique a été testé dans de nombreuses circonstances. Il a permis, par exemple, de prédire l'existence du fond diffus cosmologique et sa loi d'émission. Il a permis de prédire la forme des inhomogénéités, observées par la suite. Il est difficile d'imaginer que ce soient là des coïncidences...

Bien sûr, le cosmologiste recherche aussi, par d'autres méthodes, confirmation de ces mesures, afin de s'affranchir de l'impact des hypothèses nécessaires pour une mesure particulière. Dans le cas particulier qui nous intéresse, l'existence de matière noire est confirmée par les courbes de rotation des galaxies spirales, par les lentilles gravitationnelles, et par la masse des amas de galaxies. L'existence d'énergie noire, par ailleurs, est confirmée par l'observation de la luminosité de supernovae distantes. Il semble bien que les conclusions soient assez robustes...

Pour reprendre la comparaison de l'introduction, nous pouvons imaginer que du temps d'Ératosthène, des collègues lui auraient peut-être fait remarquer qu'il ne mesure qu'une fonction de plusieurs paramètres (rayon de la terre et distance du soleil). Cette remarque mérite, bien sûr, d'être considérée. Par exemple, si Ératosthène avait supposé que la terre était plate, il aurait imaginé mesurer *par la même expérience* la distance du soleil. Il aurait obtenu une distance complètement fautive, bien évidemment, l'hypothèse de départ étant erronée.

Ératosthène aurait pu aussi, se basant sur l'existence de collines, de montagnes, supposer que la terre n'a pas une forme simple, et en aucun cas sphérique. Il n'aurait alors rien pu mesurer du tout. Malgré ces fausses routes possibles, il a adopté les

hypothèses les plus simples et les plus plausibles. Ces hypothèses se sont avérées correctes, et lui ont permis d'accéder à une connaissance qu'il n'aurait pas pu obtenir autrement.

Pour toutes ces questions concernant notre univers, Planck va soumettre le modèle à des tests de cohérence de plus en plus précis. Si la cohérence des mesures reste avérée, alors nous aurons acquis encore un peu plus de confiance que notre modèle est représentatif de notre Univers. Dans le cas contraire, il faudra affiner le modèle pour qu'il soit compatible avec les observations. C'est là le renouvellement toujours riche en découvertes du cheminement de la recherche scientifique moderne.

### *Et demain ?*

Les mesures du fond de rayonnement cosmologique n'ont pas encore fini de nous apporter de nouvelles informations. Comme nous l'avons vu, le lancement de la mission spatiale Planck par l'agence spatiale européenne, en 2008, nous permettra de contraindre avec encore plus de précision le modèle et les paramètres cosmologiques. Ceci est crucial pour avancer, en testant la cohérence de mesures de plus en plus précises et contraignantes sur les paramètres.

Enfin, outre les anisotropies de température, le fond cosmologique nous apporte encore plus d'informations par le biais de sa polarisation. Le signal de polarisation, selon le modèle actuel dépend, lui aussi de façon prévisible des paramètres cosmologiques. Qui plus est, il doit porter, si le modèle est correct, la signature indubitable de la présence d'ondes gravitationnelles primordiales générées au moment de l'inflation. Sa mesure permettra donc de mettre à rude épreuve les modèles d'univers à  $t=10^{-32}$  s (un cent-millième de milliardième de milliardième de milliardième de seconde !), une aubaine pour mieux comprendre la physique à des énergies extrêmes, mal décrite par les théories actuelles basées sur la relativité générale et sur la théorie quantique des champs...

Toutefois, compte tenu de l'amplitude de ces signaux de polarisation, plusieurs ordres de grandeur plus faibles que les anisotropies de température, Planck n'en offrira qu'une première mesure, très imparfaite. Pour exploiter toute la richesse de l'information véhiculée par la polarisation du fond cosmologique, il faudra construire des instruments encore bien plus sensibles que les instruments actuels. Pour cela, il faut développer de nouveaux détecteurs, plus sensibles, et pouvant être fabriqués de façon industrielle pour créer des instruments de plusieurs milliers à plusieurs dizaines de milliers de détecteurs... C'est là le nouveau défi expérimental lancé par le fond cosmologique. Il occupera les chercheurs pendant les deux prochaines décennies, jusqu'au lancement d'un futur satellite encore 100 fois plus sensible que le satellite Planck, qui parviendra à décortiquer, jusqu'au plus ténu des signaux qu'il renferme, le foisonnement d'information que constitue ce Graal du cosmologiste : le fond de rayonnement cosmologique fossile.