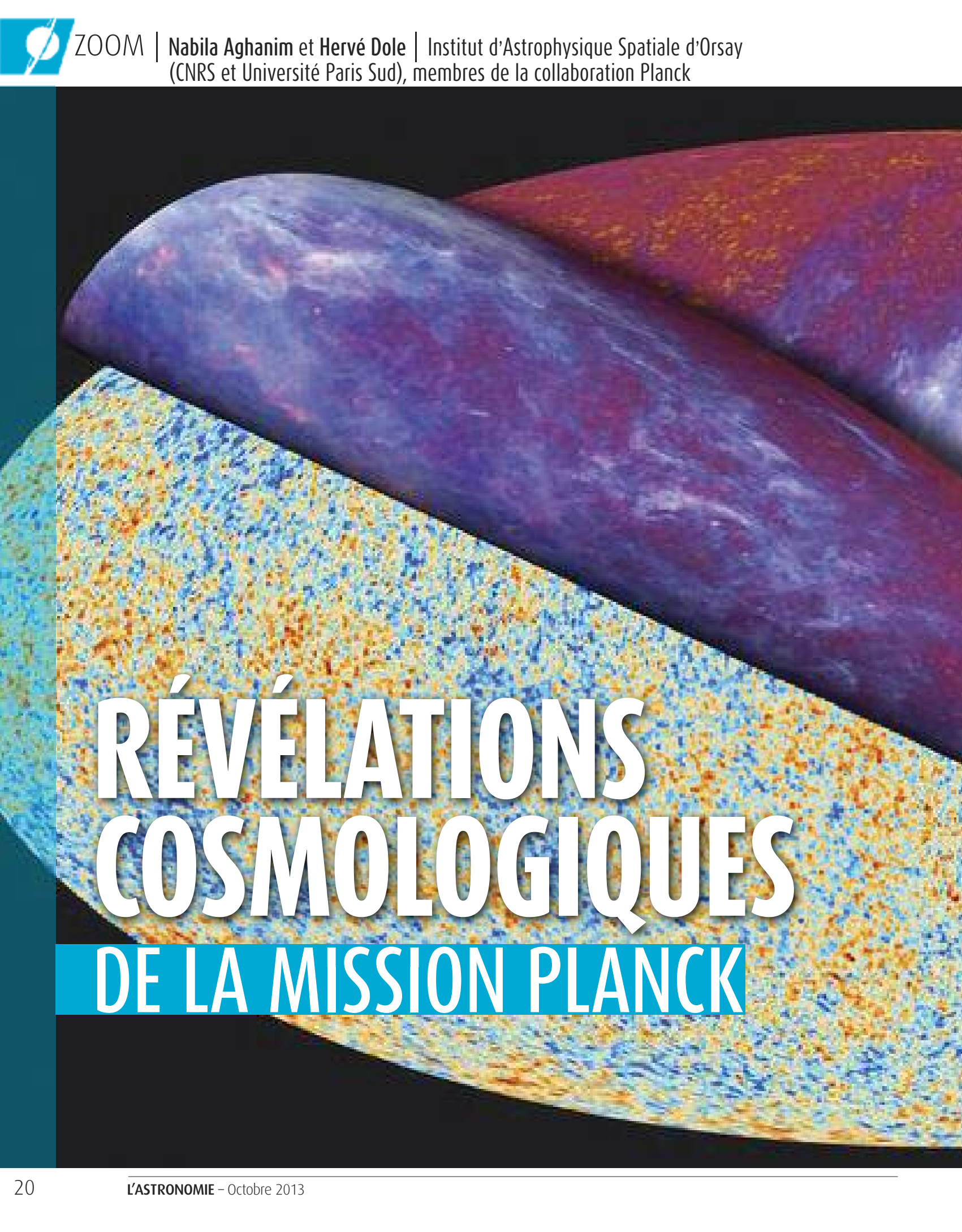




RÉVÉLATIONS COSMOLOGIQUES DE LA MISSION PLANCK



L'histoire de l'Univers, telle qu'appréhendée par les scientifiques – astrophysiciens, cosmologistes et physiciens, observateurs, expérimentateurs et théoriciens – peut se résumer au « modèle standard de Big Bang chaud ». Bien que contenant des variantes et des imperfections, ce modèle remarquablement cohérent satisfait tous les tests observationnels. Il s'est enrichi avec le temps, nourri conjointement de nouvelles données plus précises et de réflexions plus complexes, afin de tenter de répondre à deux principaux défis.

Le premier concerne la très grande homogénéité de l'Univers jeune tel qu'il est observé à 0,0027% de son âge actuel, soit environ 380 000 ans. (Pour fixer les idées, rapporté à l'âge d'un humain de 60 ans, cette époque correspond à 14h après la naissance). C'est l'époque correspondant à l'émission du rayonnement fossile, dont il sera question plus bas (encadré : *Petite Histoire de l'Univers*). Cette homogénéité, meilleure que 0,001% (on parle de 10^{-5} en contraste) en température et densité de la totalité de l'Univers paraît énigmatique, puisque certaines régions très éloignées l'une de l'autre n'ont jamais été en relation causale et ne devraient donc pas avoir les mêmes propriétés. Comment alors expliquer leur parfaite « synchronisation » en température ? *A contrario*, comment expliquer l'origine des faibles inhomogénéités ?

Les avancées théoriques lèvent un peu le voile. Les scientifiques s'accordent aujourd'hui à penser qu'elle est liée aux premiers instants de l'Univers. Vers 1980, les théoriciens suggèrent qu'aux environs de 10^{-35} s après le Big Bang l'Univers est dominé par l'énergie du vide quantique¹. Ce vide possède un effet répulsif foudroyant qui induit une expansion exponentielle, l'inflation cosmique, permettant de multiplier la taille de l'Univers par un facteur 10^{80} en volume. Dans le modèle standard et simple, à partir des fluctuations quantiques de l'énergie du vide, l'inflation produit des perturbations de matière ou « germes » qui sont amplifiées, et à partir desquelles les galaxies vont pouvoir se former.

Le second défi concerne, à l'opposé, la très grande hétérogénéité de l'Univers

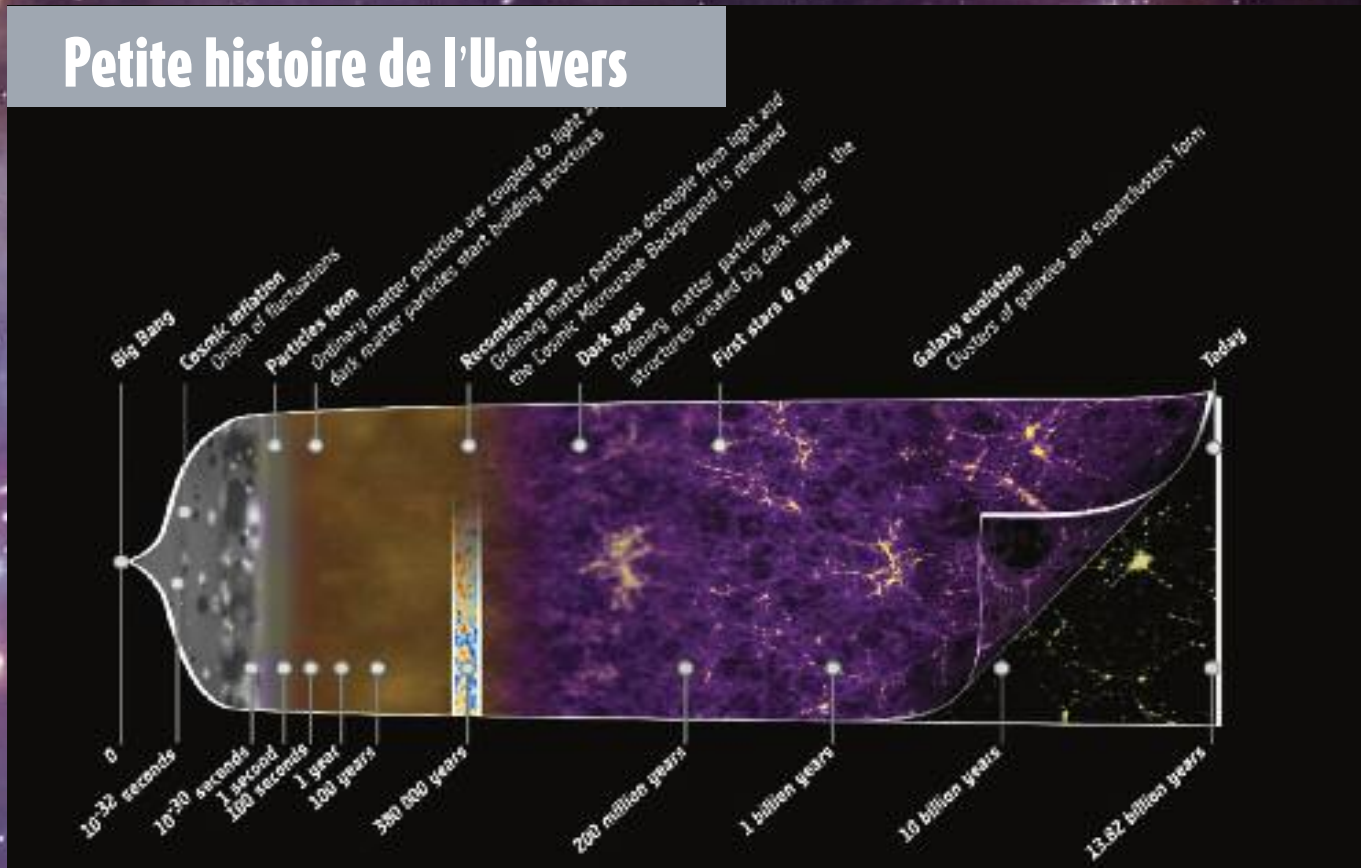
L'ESSENTIEL

Le satellite Planck a été lancé en 2009 pour mesurer avec une précision sans précédent les propriétés de la lumière du rayonnement fossile – aussi appelé fond diffus cosmologique, sorte d'écho lumineux du Big Bang. Les scientifiques de la collaboration Planck ont publié une première série de résultats cosmologiques, parmi lesquels les mesures les plus précises jamais obtenues de l'âge de l'Univers et sa composition globale. De plus, les données apportent un éclairage nouveau sur une période particulièrement énigmatique : l'inflation juste après le Big Bang. L'analyse révèle en outre une mine d'informations impressionnantes concernant la formation des grandes structures. Cet article propose une revue des principaux résultats déjà publiés en mars 2013, en attendant d'autres découvertes l'année prochaine, lorsque la totalité des données sera analysée.

actuel qui est structuré en amas de galaxies, puis galaxies, et au sein de ces dernières, étoiles, gaz et poussières notamment (plus un ingrédient dominant décrit plus loin). Un simple calcul indique qu'il n'y a pas assez de temps pour former des galaxies par simple gravité avec de la matière ordinaire à partir des faibles fluctuations de densité observées 380 000 ans après le Big Bang. Pourtant, notre Voie lactée et de nombreuses galaxies existent. Comment expliquer cette « structuration » en objets denses comme les amas de galaxies ou galaxies beaucoup plus rapide que prévue ? Cette question de la formation des structures est en partie résolue par l'introduction d'une énigmatique matière sombre insensible au rayonnement, qui peut dès lors se concentrer par gravité bien avant la matière ordinaire. Cette dernière, une fois libérée de ses interactions avec la lumière, ira se concentrer dans les régions déjà denses de matière sombre bien plus rapidement que s'il n'y en avait pas. Les structures peuvent ainsi se former en un temps record mais néanmoins cosmique, i.e. sur des échelles de temps de l'ordre de centaines de millions d'années ou de milliards d'années.

Le modèle standard a ainsi évolué en variantes pour expliquer l'un ou l'autre de ces aspects, celles-ci étant parfois non encore testables, ou empreintes de para-

Petite histoire de l'Univers



Cette histoire représente le temps en échelle logarithmique. Les zones grise et orangée à gauche correspondent aux premiers 380 000 ans, soit jusqu'au décalage spectral (redshift) de 1090 quand l'Univers était un plasma chaud. Le fond cosmologique est libéré lors de cette transition vers l'état neutre (tranche colorée, « recombination »). Puis les structures se forment – d'abord les premières étoiles durant les âges sombres représentés en violet – avec les galaxies et amas jusqu'à nos jours. ●

mètres libres difficiles à contraindre. Dès lors, les scientifiques cherchent à mettre au défi les modèles en effectuant des mesures de nature à les départager et, éventuellement, les exclure. Les chercheurs vont donc identifier des « observables » qui, une fois mesurées, seront susceptibles de défier les modèles. Il existe de nombreuses observables en cosmologie, comme les galaxies et quasars (et plus spécifiquement leurs spectres, leurs flux et luminosités, leur distribution sur le ciel et dans l'espace, ou leurs masses, taux de formation d'étoile), les amas de galaxies (et leurs caractéristiques physiques comme masse, taille, température du gaz), le gaz (hydrogène) et de nombreuses variantes, comme les altérations de la lumière avec des objets : lentillage gravitationnel, raies d'absorption – en plus des observables relevant plus de la

physique des particules comme les neutrinos ou la mystérieuse matière sombre. L'une des observables majeures en cosmologie demeure le rayonnement fossile – ou fond diffus cosmologique (FDC) dont les faibles inhomogénéités, zones du ciel avec des brillances ou températures différentes de la moyenne par moins de 0,001%, sont reliées aussi bien aux germes ayant donné naissance aux galaxies, qu'aux processus physiques dans l'Univers primordial.

LE FOND COSMOLOGIQUE ET SES INHOMOGÉNÉITÉS

Dans l'Univers primordial très dense, la lumière ne pouvait pas se propager librement : l'Univers était opaque, un peu comme actuellement au centre d'une étoile, à cause de l'interaction – dite dif-

fusion Thomson – entre lumière (photons) et matière chargée (essentiellement électrons) dans le plasma chaud. Lumière et matière sont couplées. Mais la matière, on l'a vu, subit des perturbations. La compétition entre la gravité (qui domine la dynamique de croissance des perturbations de matière) et la pression des photons (piégés par leurs interactions avec la matière, et qui s'oppose à l'effondrement gravitationnel) génère une sorte d'oscillation : des ondes acoustiques, analogues aux ondes sonores, qui se propagent dans le plasma. Sous l'effet conjugué de l'expansion et de la formation des atomes neutres, le parcours des photons dans le plasma croît de plus en plus. Lorsque l'Univers devient neutre, environ 380 000 ans après le Big Bang (soit un décalage spectral vers le rouge de 1090



$\pm 2,5$ précisément), la matière et les photons se découplent : les ondes acoustiques sont « gelées » et impriment sur le FDC des motifs de tailles et de brillances différentes, qui pourront ensuite être observées.

Les inhomogénéités de température observées dans le FDC sont les traces lumineuses des perturbations initiales de matière permettant d'enclencher le processus de formation des galaxies. L'observation de plus en plus précise du FDC et de ses inhomogénéités, aussi appelées anisotropies, est donc la promesse de résultats impressionnants. Depuis sa découverte en 1964, avec des observations au sol, depuis l'espace avec COBE et WMAP, ainsi qu'en ballon (dont celui du Centre National d'Etudes Spatiales, Archeops), l'état des connaissances du FDC a considérablement avancé et a permis de mieux cerner les paramètres cosmologiques qui permettent de remonter à l'âge de l'Univers et à la répartition relative en densité d'énergie des principales composantes, comme la matière ordinaire, la matière sombre et la mystérieuse énergie sombre.

Il faut désormais de nouvelles observations significativement meilleures en sensibilité et en résolution angulaire pour provoquer un saut dans la connaissance et de notre compréhension à la fois de l'Univers primordial et de la formation des structures. Le satellite *Planck* est la réponse ambitieuse à ce défi.

PLANCK

Décidé par l'agence spatiale européenne en 1996 (après une longue histoire préparatoire sous la direction d'une équipe de l'IAS et avec des laboratoires français et le CNES), *Planck* sera lancé en mai 2009, soit presque 10 ans plus tard que l'américain WMAP (pourtant décidé la même année que *Planck*). Pourquoi ce délai ? Parce que les stratégies technologiques étaient différentes. La NASA et les équipes de WMAP ont choisi d'une part d'utiliser des technologies existantes permettant un lancement dans des délais courts (en 2001), et l'observation plusieurs années de suite pour augmenter la sensibilité. Les européens ont choisi une voie plus ambitieuse, donc coûteuse, longue et risquée mais avec à

la clef des mesures et des résultats insurpassables pour longtemps (« high risk, high gain » disent les anglophones) : celle de développer une nouvelle technologie à base de détecteurs ultrasensibles – des bolomètres – refroidis à une température record de 0,1 Kelvin. Ainsi, une seule année d'observation de *Planck* équivaldrait à environ 1000 années d'observations de WMAP. Cela valait certainement la peine d'engager des nouveaux développements, de gérer les risques, et d'attendre quelques années de plus pour le lancement.

Afin d'atteindre la précision requise pour s'attaquer aux deux grandes questions cosmologiques, l'une sur l'inflation et l'autre sur la formation des structures, il est nécessaire de disposer :

- des observations qui cartographient la totalité du ciel, puisque les phénomènes intervenants au début de l'Uni-

vers seront vus aujourd'hui à très grande échelle angulaire sur le ciel – typiquement des dizaines de degré d'angle – du fait de l'expansion de l'Univers. Ces observations sont essentiellement impossibles à effectuer depuis le sol.

- des observations effectuées avec une résolution angulaire relativement fine par rapport à la granularité du FDC, soit à l'échelle de quelques minutes d'angle, pour mesurer finement les fluctuations du FDC ainsi que la plupart des effets des grandes structures.

- des observations dans le domaine spectral millimétrique et centimétrique (on parle parfois de « micro-ondes » ou de domaine radio) où le FDC est le plus intense et où il est possible de mesurer ses principaux contaminants.

- des observations non seulement en intensité, mais également en polarisation de la lumière.

- d'une stratégie d'observation permettant de parfaitement caractériser précisément et de contrôler tous les effets instrumentaux pouvant dégrader ou impacter le signal.

- d'une stratégie d'analyse pertinente (incluant un contrôle par simulation ou sur des ensembles partiels de données) afin d'extraire le signal cosmologique des nombreux autres signaux astrophysiques.

Planck a été pensé pour répondre à chacun de ces points. *Planck* dispose de deux instruments (lire l'article de F. Bouchet, 06/09, *L'Astronomie* #17, pp. 14-19) :

- HFI (High Frequency Instrument) réalisé sous la maîtrise d'œuvre de l'IAS à Orsay et sous la responsabilité de Jean-Loup Puget. Il est composé d'une cinquantaine de bolomètres refroidis à 0,1K, et observe à 6 fréquences entre 100 et 857 GHz (soit environ 300 microns et 3 cm de longueur d'onde).

- LFI (Low Frequency Instrument) réalisé sous responsabilité italienne. Il est composé de radiomètres plus classiques et observe à 3 fréquences entre 33 et 70 GHz dans le domaine radio.

La mission s'est parfaitement déroulée (encadré : *Le ciel de Planck*). Bien au delà de ce qui avait été prévu, en fait ! Des 12 mois d'observations prévus pour couvrir deux fois la totalité du ciel (appelé « relevé »), *Planck* a finalement observé durant 29 mois pour obtenir cinq

PLANCK : LES CHIFFRES

- Un tour sur le ciel par minute (répété 50 fois au même endroit).

- 200 mesures du ciel par seconde et par détecteur, en continu pendant 30 mois à 0,1K.

- environ 1000 milliards d'échantillons (72 voies, 30 mois) et quelques milliards de paquets de télémetrie à « descendre » sur Terre.

- données brutes d'un détecteur (TOI) : 50 Go (et il y a 52 détecteurs, et plusieurs versions de traitement à stocker).

- 1 livraison de données : 1 mois de calcul sur un supercalculateur dédié, 2200 cartes.

L'équivalent du calcul sur un hypothétique ordinateur personnel nécessiterait 6 ans, avec un disque dur de plus de 200 To et des accès disques rapides (lisant et écrivant plus de 11 CDRom à la seconde pendant toute la durée du calcul).

- cartes du ciel: 50 millions de pixels chaque fois, 6 fréquences HFI + 3 fréquences LFI ;

- Spectres de puissance du fond diffus cosmologique: 1000 valeurs.

- Seulement 6 paramètres cosmologiques ajustant parfaitement les données.

- Le tout pour obtenir la meilleure image du fond diffus cosmologique à $z=1090$.

- Le tout pour un coût d'environ 7 centimes / européen / an sur 20 ans.

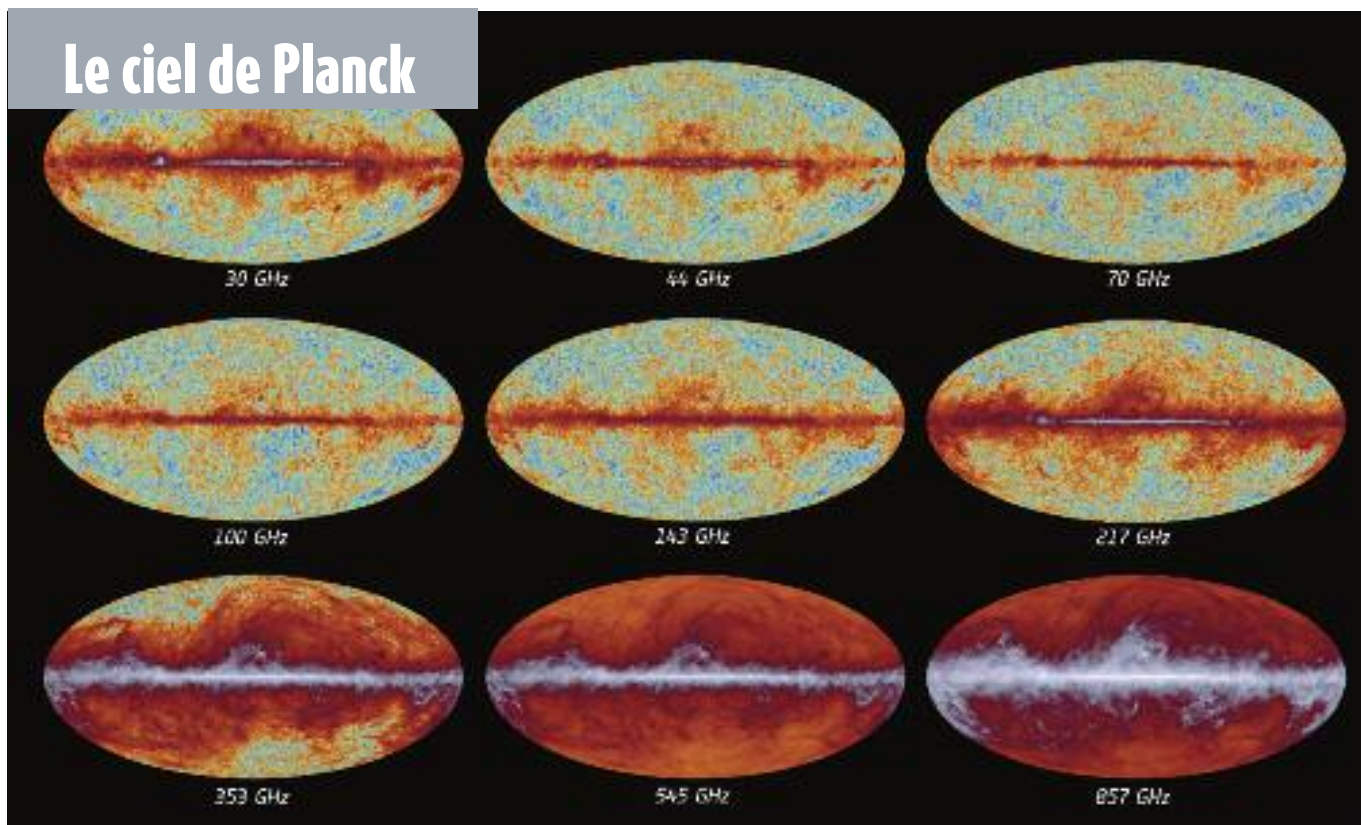
relevés complets, bien au delà de nos espérances. La raison en est la très grande stabilité du refroidissement de HFI.

Planck est tellement sensible qu'il est surnommé « la mission définitive et ultime de l'observation des anisotropies de température du fond cosmologique. » En effet, pour la première fois en cosmologie, la mesure des fluctuations du FDC

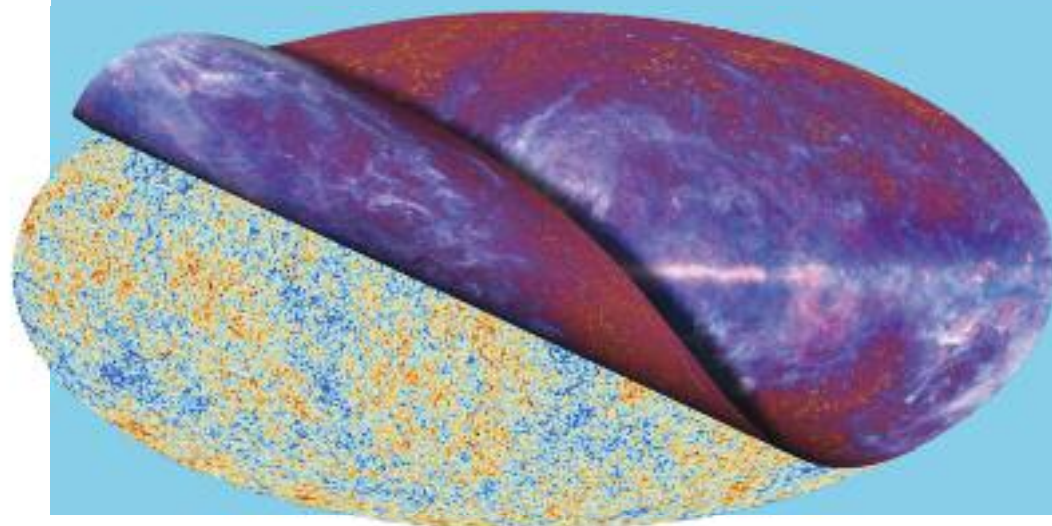
n'est plus limitée par la sensibilité des détecteurs, mais par notre capacité à bien séparer le fond cosmologique des émissions contaminantes d'avant-plan comme les émissions ou altérations de la lumière de notre Galaxie, des autres galaxies, et des amas de galaxies. La qualité de cette « séparation des composantes astrophysiques » dépend non seulement

de la qualité de mesure du fond cosmologique lui-même, mais aussi des dits avant-plans. C'est pour cela que *Planck* observe à neuf fréquences différentes, afin de mesurer finement les émissions non cosmologiques d'avant-plan en vue de les soustraire du signal total pour faire apparaître comme jamais l'image du fond cosmologique.

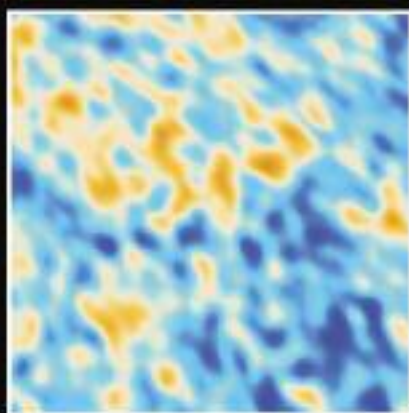
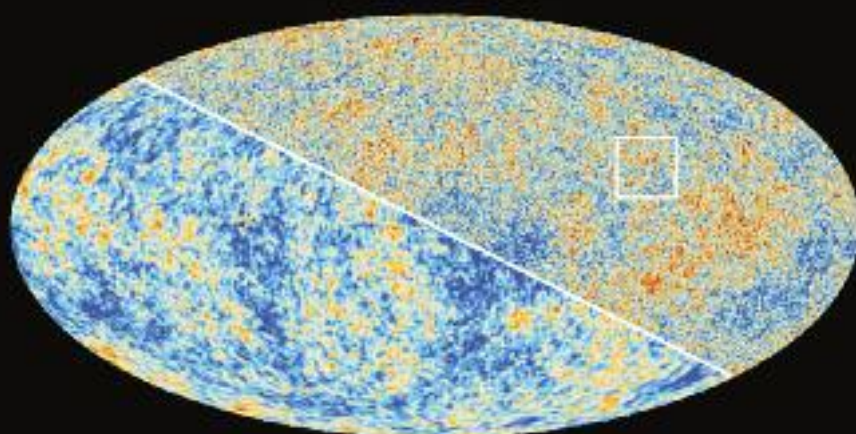
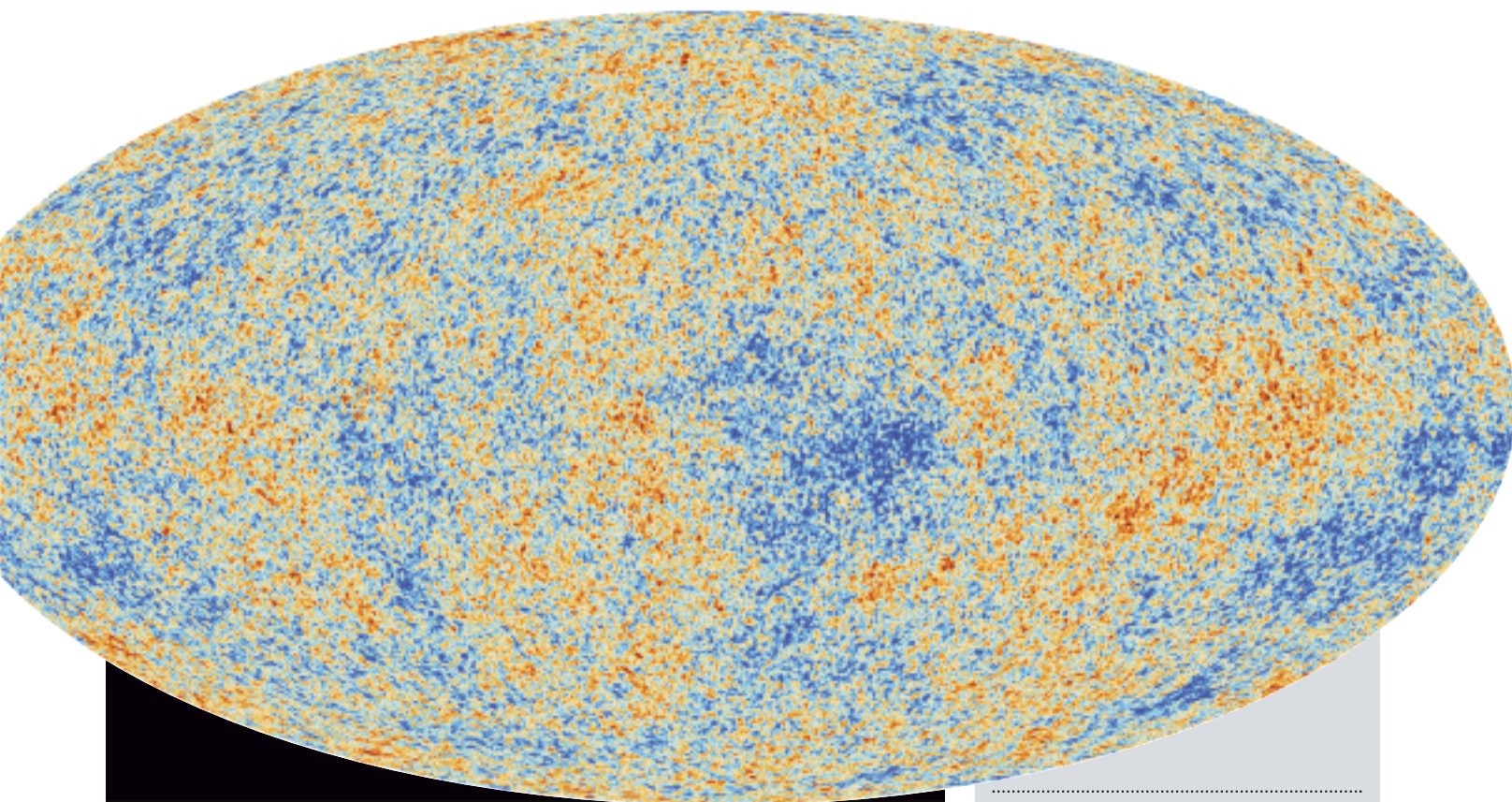
Le ciel de Planck



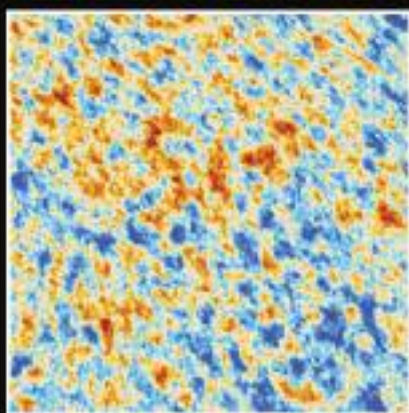
Les 9 images du ciel complet de Planck. De haut en bas et de gauche à droite, par fréquence croissante : 30, 44, 70, 100, 143, 217, 353, 545 et 857 GHz. Les canaux dominés par le fond cosmologiques sont 70, 100 et 143 GHz. Aux plus basses fréquences, le ciel est dominé par l'émission synchrotron et free-free de notre Galaxie. À plus haute fréquence, le ciel est vraiment dominé par la poussière froide (grains) et le CO de notre Galaxie. © ESA and the Planck Collaboration



Grâce à la mesure précise des avant-plans, les données de Planck permettent d'avoir accès à la meilleure image du fond cosmologique jamais réalisée. . © ESA and the Planck Collaboration



WMAP



Planck

© ESA and the Planck Collaboration.

1. L'image la plus précise du fond cosmologique, ou l'Univers alors qu'il n'avait que 380 000 ans (soit redshift de 1090), mesuré par Planck sur la totalité du ciel. – 2 (EN BAS).

Comparaison de la très bonne image du fond cosmologique obtenue par WMAP il y a quelques années, et par l'excellente image du fond cosmologique tout juste obtenue par Planck. La sensibilité et les détails obtenus par Planck permettent de bien mieux sonder l'époque de l'inflation d'une part, et de mieux contraindre les paramètres cosmologiques et la formation des structures d'autre part.

LE FOND COSMOLOGIQUE TEL QUE RÉVÈLE PAR PLANCK

Au printemps, la collaboration *Planck* a analysé et publié les données prises durant 15 mois. Les données révèlent le FDC comme jamais vu auparavant (figure 1), avec une bien meilleure sensibilité et résolution angulaire (figure 2). Les cosmologistes analysent cette image avec des outils statistiques. En effet, ni modèle ni théorie ne sont en mesure de prédire la position exacte dans le ciel d'une variation de température. En revanche, la théorie prédit précisément leur comportement collectif – ou statistique. La première

Des observations aux C_ℓ et aux paramètres cosmologiques

a) La carte du fond diffus cosmologique sert de point de départ, et couvre tout le ciel, comme une sphère au centre de laquelle nous trouverions (c'est une image pour représenter les données).

b) La carte est projetée selon différentes échelles angulaires indépendantes : on appelle cela une projection en harmoniques sphériques.

c) La projection en harmoniques sphériques (le terme $Y_{\ell m}$ étant effectuée, on n'utilise désormais la série de termes alm du FDC, qui

représente l'intensité des fluctuations à une certaine échelle et position dans le ciel.

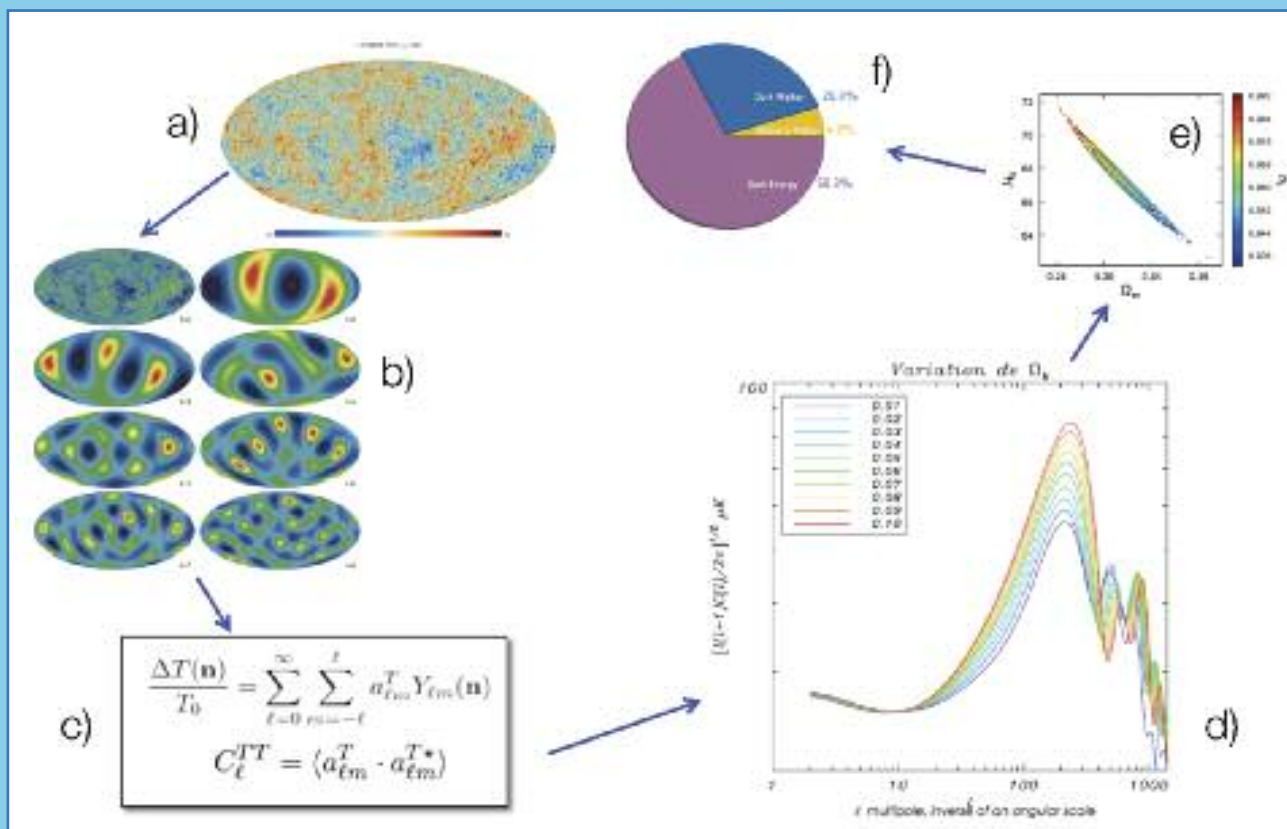
d) Le produit de plusieurs alm permet d'obtenir la puissance (ou corrélation) à une certaine échelle angulaire l (auss appelé multipôle): le fameux C_ℓ (prononcer « C de elle »), qui donne le spectre de puissance angulaire des fluctuations (voir figure 3). Des milliers de modèles sont générés en C_ℓ , et sont comparés aux données.

e) Les familles de modèles qui ajustent le mieux les données sont conservées, et les dégénérescences

éventuelles sont tracées, i.e.

plusieurs combinaisons de paramètres peuvent donner un très bon ajustement. Heureusement avec Planck, la mesure de plusieurs pics acoustiques réduit considérablement ces dégénérescences.

f) Les valeurs des paramètres ayant « survécu » au processus sont quantifiées avec leurs barres d'erreur, et donnent les paramètres cosmologiques finaux Planck 2013 (cf. aussi figure 5).



étape de l'analyse consiste donc en une caractérisation statistique des données, dont le résultat pourra être directement comparé aux modèles. En termes techniques, on mesure un spectre de puissance angulaire de la carte du ciel: c'est une décomposition en harmoniques sphériques (une sorte de transformée de Fourier sur la sphère) du signal observé, moyenné quadratiquement ensuite selon l'échelle angulaire qui fait office de mesure de corrélation à deux points dans toutes les directions angulaires (encadré : *Des observations aux C_ℓ et aux paramètres cosmologiques*).

laire qui fait office de mesure de corrélation à deux points dans toutes les directions angulaires (encadré : *Des observations aux C_ℓ et aux paramètres cosmologiques*).

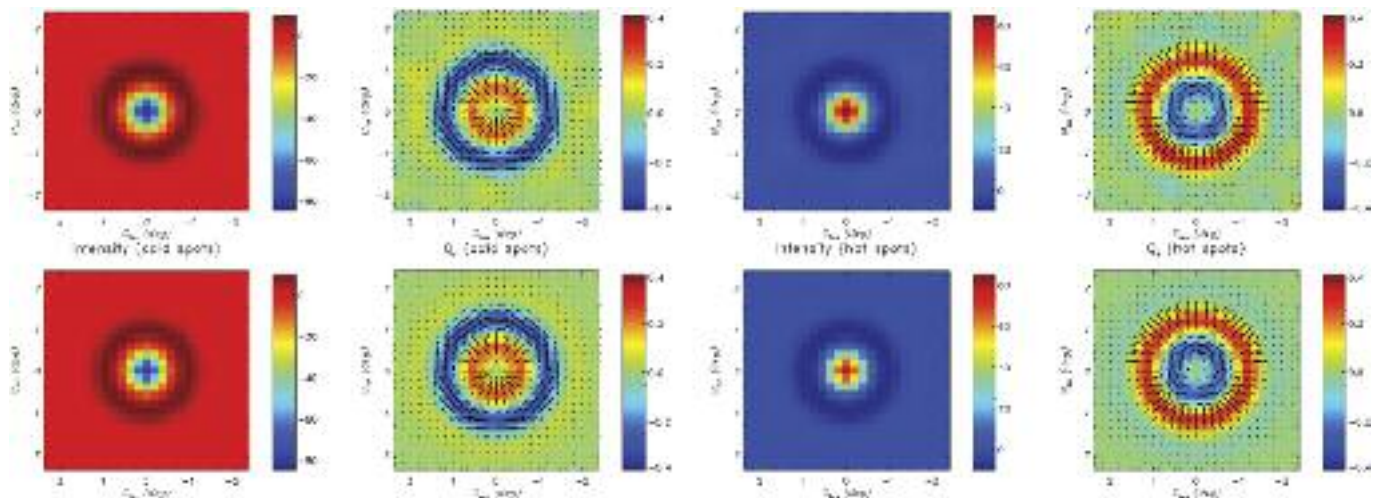
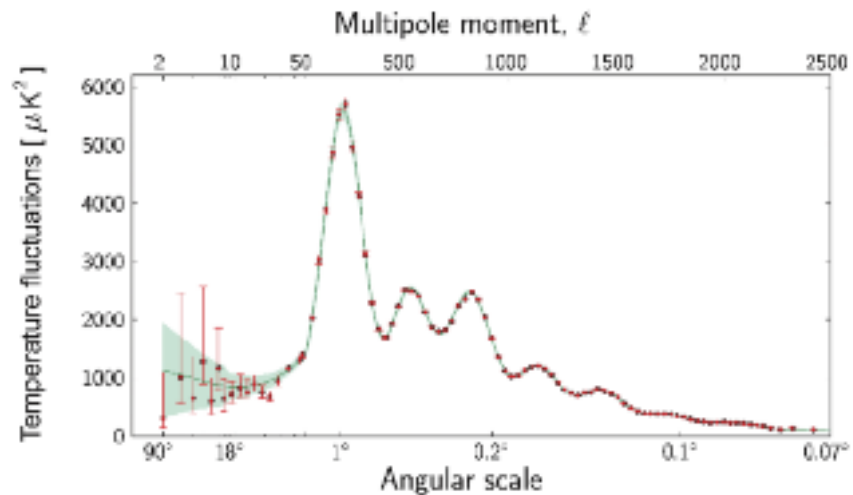
DU FOND DIFFUS AUX PARAMÈTRES COSMOLOGIQUES

L'analyse statistique, ou encore le spectre de puissance angulaire, de la distribution

des inhomogénéités du FDC montre que leur distribution en taille est dominée par des motifs de l'ordre du degré sur le ciel. Ce sont les motifs associés à la première harmonique des ondes acoustiques, ou encore le premier pic acoustique. Grâce à sa résolution angulaire, *Planck* mesure sept harmoniques ou pics acoustiques du FDC : une grande première (figures 3 et 4).

3. Le spectre de puissance angulaire des fluctuations de température du fond diffus cosmologique publié par la collaboration Planck. L'échelle horizontale est exprimée en multipôles « ℓ » en haut (ou échelle angulaire en degrés en bas). Points rouges : données Planck. Zone verte : modèle cosmologique Λ CDM ajustant le mieux les données. 7 pics acoustiques sont mesurés avec Planck, ce qui limite considérablement les dégénérescences entre paramètres cosmologiques (ce qui était le cas avec WMAP qui n'observait que 2 pics, et un peu le troisième).

© ESA and the Planck Collaboration



4. Données Planck et simulations. (DE GAUCHE À DROITE) : Images d'empilements (« stacks ») d'environ 10 000 points du fond cosmologique en intensité et en polarisation de la lumière (vecteurs noirs), montrant la matière en train de s'accumuler dans les puits de potentiels en accord avec la théorie, respectivement pour des points froids (sur fond rouge) et des points chauds (sur fond bleu). Quelles sont les données ? Données Planck (en haut) et Simulations (en bas). © ESA and the Planck Collaboration

L'analyse du spectre de puissance du FDC permet de mesurer un ensemble de paramètres dits « cosmologiques » qui décrivent le contenu de l'Univers en matière ordinaire et sombre, en neutrino, en énergie sombre, par exemple. Ces ingrédients cosmiques sont exprimés en terme de leur rapport à la densité totale d'énergie dans l'Univers et ils sont notés Ω_b , Ω_{CDM} , Ω_ν , Ω_Λ respectivement. Les paramètres cosmologiques nous renseignent aussi sur les conditions de l'Univers : son âge, à travers la constante de Hubble H_0 qui mesure le rythme d'expansion de l'Univers, sa géométrie, via son pa-

ramètre de courbure Ω_k , et son degré de neutralité, par exemple. Par exemple, la brillance des motifs de taille 1 degré (l'amplitude du premier pic acoustique) et leur taille exacte dépendent de la densité totale d'énergie et de la courbure de l'Univers, respectivement. Ou encore, la brillance relative des motifs de taille inférieure à 1 degré (amplitude relative des premier et deuxième pics) dépend de la quantité de matière ordinaire dans l'Univers.

L'ensemble des paramètres cosmologiques est mesuré à travers une étude statistique complexe où les différents signaux d'avant-plan mesurés par Planck,

en plus du FDC, sont pris en compte. Le spectre de puissance est ensuite comparé à des milliers de modèles cosmologiques (dont les paramètres varient). On recherche alors l'ensemble des paramètres qui rendent le mieux compte du modèle complet du ciel, étant données les observations. Seuls « survivront » les modèles, et par conséquent les paramètres cosmologiques, qui s'accordent au mieux avec les observations et leurs incertitudes.

Par ailleurs, l'analyse statistique du FDC permet de mieux cerner le processus d'inflation en mesurant ses propriétés globales. En particulier, l'inflation

prévoit que la distribution des perturbations de matière est indépendante de leur taille physique, et est caractérisée notamment par l'indice n_s qui doit être de l'ordre de $-0,96$. n_s exprime en quelque sorte la variation de la granulosité en fonction de l'échelle. L'inflation prévoit aussi que les perturbations sont en équilibre thermique les unes avec les autres (perturbations adiabatiques). Pour finir, les modèles les plus simples et usités d'inflation standard stipulent que les inhomogénéités du FDC suivent une distribution gaussienne. Un écart à la distribution gaussienne révélerait une classe spécifique de modèles d'inflation. Grâce à la qualité inégalée des données

supernovae. C'est-à-dire que la constante de Hubble vaut 67,15 kilomètres par seconde par mégaparsec², donc 10% de moins que les précédentes estimations. L'Univers s'étend moins vite.

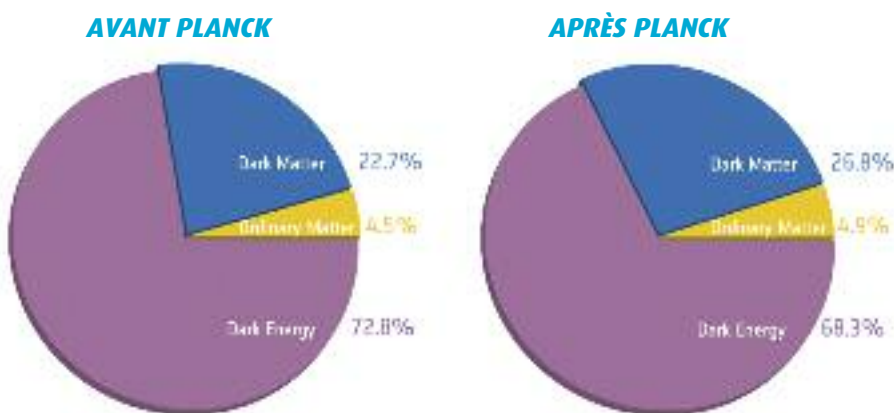
Du point de vue de la théorie, les mesures de *Planck* permettent de conforter de manière déterminante et précise le paradigme de l'inflation standard. En effet, *Planck* a permis pour la première fois la mesure non-ambiguë d'une part de l'indice $n_s = -0,96$ avec une précision de l'ordre du pourcent, et d'autre part du caractère Gaussien de la distribution des inhomogénéités du FDC. De plus, avec la mesure de la polarisation du FDC aux

étoiles pour donner naissance aux toutes premières galaxies qui évoluent sous la forme des structures cosmiques (galaxies, amas de galaxies, etc.) que nous connaissons et observons le long des filaments du réseau cosmique ou à leurs intersections.

Il existe deux méthodes pour visualiser le réseau de filaments de matière sombre. La première consiste à observer comment les galaxies se distribuent dans l'espace (et dans le temps). La seconde consiste à identifier comment la gravité, induite par la matière sombre dans les filaments, courbe les rayons lumineux des galaxies distantes et distord leurs images. C'est l'effet de lentille gravitationnelle faible. Cet effet intervient aussi en distordant et lissant les motifs les plus petits (quelques minutes d'arc sur le ciel) de l'image du FDC. Ces distorsions sont utilisées dans l'analyse fine des cartes du FDC effectuée par la collaboration *Planck* pour reconstituer la distribution sous-jacente de matière sombre. Grâce à l'effet de lentille gravitationnelle faible, *Planck* a permis pour la première fois de visualiser l'accumulation (sur la ligne de visée) de matière sombre sur la totalité du ciel. *Planck* a fourni une cartographie complète de la matière sombre et une caractérisation de ses propriétés statistiques (figure 6). Cette carte de l'ensemble de la matière sombre dans l'Univers représente en quelque sorte l'ensemble des écrans de matière sombre dans lesquels les galaxies vont se former et évoluer. On les désigne sous la terminologie de puits de potentiel de matière sombre. Le gaz des amas de galaxies va aussi s'y agréger, pour y atteindre des températures extrêmes jusque des centaines de millions de degrés.

En corrélant la carte de matière sombre déduite de l'effet de lentille gravitationnelle sur le FDC aux positions des galaxies et aux amas connus, la collaboration *Planck* a montré de manière magistrale que le modèle hiérarchique de formation des structures cosmiques décrit dans ses grandes lignes parfaitement bien la distribution et l'agrégation des objets astronomiques jusqu'à des époques très reculées, de l'ordre de redshift 2.

Une question centrale de l'astrophysique



5. Estimation des densités d'énergie aujourd'hui telles que mesurées avant Planck (À GAUCHE) et après Planck (À DROITE). Ces changements sont dus à la meilleure précision des mesures de Planck. © ESA and the Planck Collaboration

Planck et aux analyses statistiques poussées, des mesures d'une précision jamais atteinte ont été obtenues pour l'ensemble des paramètres cosmologiques. En particulier, la « composition » de l'Univers a été révisée. La quantité de matière ordinaire et de matière sombre doit être augmentée de 10% par rapport aux estimations précédentes. La quantité d'énergie sombre, quant à elle, doit être diminuée d'autant (figure 5).

Planck mesure un paramètre de courbure compris entre $-0,01$ et $+0,01$ et établit donc que notre espace est plat ; ce qui signifie que sa géométrie est euclidienne. *Planck* établit l'âge de l'Univers à 13,8 milliards d'années, soit 100 millions d'années de plus que l'âge estimé par la mesure des distances aux

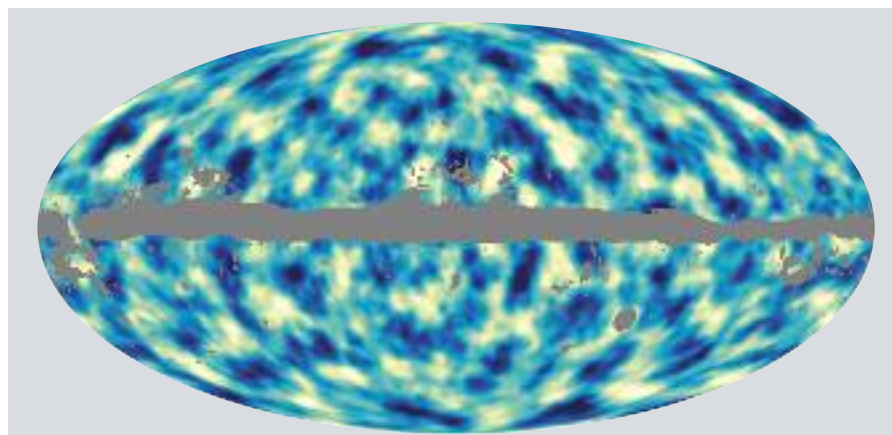
échelles angulaires inférieures au degré, *Planck* établit définitivement la nature adiabatique des perturbations de matière. C'est une avancée majeure en cosmologie. Les données de *Planck* permettent donc de mieux cerner l'état de l'Univers une fraction de seconde après le Big Bang.

LES GRANDES STRUCTURES

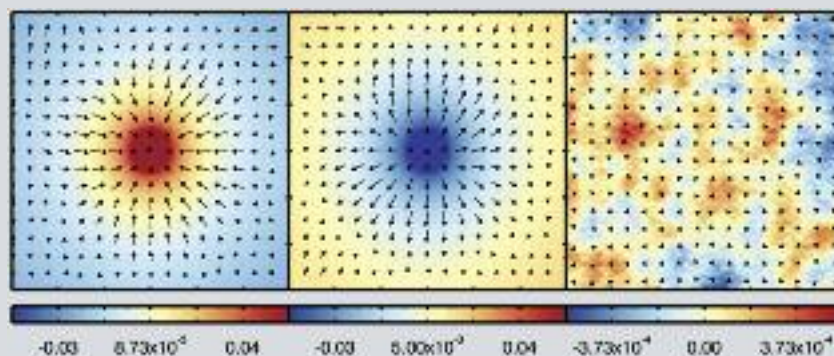
Les perturbations de densité initiales générées aux premiers instants de l'Univers accrètent de la matière, sous l'effet de la gravité, et croissent. Elles continuent de grandir par fusions successives et s'organisent sous la forme de filaments – voire d'un réseau cosmique complexe. Lorsqu'elles sont assez denses, les perturbations de matière forment en leur sein les premières

sique, non encore résolue, est la formation des étoiles dont seuls les grands principes de ce processus sont connus. En particulier, on ne sait pas quand se sont formées les premières étoiles, ni avec quelle efficacité ou sous quelles conditions environnementales du gaz dense dans des puits de potentiel de matière sombre se transforme en étoile. Il faut savoir que les premières étoiles se forment à partir de gaz dit primordial, i.e. contenant essentiellement de l'hydrogène et de l'hélium, à la grande différence des étoiles plus « contemporaines » observées traditionnellement et issues de gaz de composition chimique beaucoup plus complexe, ce qui offre d'autant plus de possibilités d'un refroidissement efficace – efficacité qui devait faire défaut pour les premières générations d'étoiles. Une des observables de choix pour cerner le problème est le fond diffus infrarouge (FDI). Il représente l'ensemble de l'émission des galaxies de l'Univers le long de son histoire, et se trouve être maximum dans l'infrarouge lointain. Il est ainsi dû à la totalité de la lumière émise par les poussières chauffées par les étoiles des galaxies tout au long de l'histoire de l'Univers. Le fond diffus infrarouge a été révélé avec une précision inégalée par *Planck* sur une très grande zone du ciel, ce qui permet pour la première fois d'en faire une description détaillée à toutes les tailles angulaires – une analyse similaire à celle du FDC est utilisée: le spectre de puissance angulaire. On en déduit notamment l'histoire de la formation stellaire dans l'Univers jusqu'à un redshift de l'ordre de 2,5 ainsi que le lien entre matière sombre et formation stellaire.

Par ailleurs, la corrélation de la carte de l'effet de lentille gravitationnelle et de l'émission du fond infrarouge, toutes deux mesurées par *Planck*, illustre parfaitement la concomitance de la formation des étoiles dans les galaxies avec la présence d'une densité de matière sombre distordant le FDC (figure 7). Enfin, l'analyse des images du fond infrarouge révèle des objets inconnus qui apparaissent « froids » dans le jargon des astrophysiciens, c'est-à-dire présentant une émission spectrale très décalée vers le rouge. Ces « points froids du FDI



6. Image de la distribution intégrée de matière sombre sur tout le ciel, telle que mesurée par *Planck* grâce à l'effet de lentillage gravitationnel sur le fond cosmologique. Une grande première. © ESA and the Planck Collaboration



7. Empilement du fond infrarouge et lensing. Ces trois images montrent, comme dans l'image 4, des empilements de signal *Planck* obtenus sur environ 20000 positions, correspondant à gauche à des maxima d'émission du fond diffus infrarouge, au milieu à des minima, et à droite à des positions aléatoires pour valider la méthode. Les flèches indiquent l'angle de déflexion par la matière (le gradient obtenu à partir de la carte de lensing – ou matière sombre, image 6). On observe une corrélation très forte entre intensité et angle de déflexion. En particulier à gauche, les maxima sont censés tracer les fortes concentrations de galaxies, et elles provoquent statistiquement une déflexion vers elles, i.e. ce sont des puits de potentiels. *A contrario*, aucune détection n'est présente à droite quand des positions aléatoires sur le ciel sont sélectionnées, ce qui valide le calcul.

© ESA and the Planck Collaboration

» pourraient être les proto-amas de galaxies (le chaînon manquant dans la formation des structures) ou des galaxies individuelles très fortement amplifiées par effet de lentille gravitationnelle. Dans les deux cas, ces objets se situeraient à des décalages spectraux supérieurs à 2. Un grand ensemble d'observations exceptionnelles notamment de l'observatoire européen spatial *Herschel*, a permis de prouver qu'en effet, sur des centaines d'objets « froids », certains se situent bien à des redshifts supérieurs à deux. La qualité des données *Planck* nous permet donc

de sonder aussi la formation des toutes premières structures individuelles et de compléter la « généalogie » des galaxies et des amas.

LES AMAS DE GALAXIES

Les galaxies se regroupent pour former les amas de galaxies à l'intersection des filaments de matière sombre du réseau cosmique. La matière ordinaire sous forme d'un gaz tenu est chauffée à des températures de l'ordre de dizaines à la centaine de millions de degrés, dans les puits de potentiel de matière sombre.

Les photons du FDC interagissent avec ce gaz chaud. Ils acquièrent un peu plus d'énergie à la sortie des amas qu'à leur entrée – les électrons « chauds » cédant une partie de leur énergie aux photons « froids » du CMB par interaction Compton inverse. Cet effet dénommé « effet Sunyaev-Zeldovich » (ou effet SZ en raccourci, lire encadré : *L'effet Sunyaev-Zel'dovich*) des noms de ses deux découvreurs. Dans les données *Planck*, l'effet SZ en direction d'amas de galaxies se manifeste comme une ombre négative (déficit de brillance) ou positive (excès de brillance) selon qu'on s'intéresse aux fréquences inférieures ou supérieures à 217GHz (environ 1,3 mm de longueur d'onde). Grâce à cette manifestation spectrale unique et caractéristique, *Planck* est particulièrement adapté pour la découverte des amas de galaxies jusqu'aux époques les plus reculées. Une combinaison de techniques adaptées a permis à la collaboration *Planck* de mettre en évidence plus d'un millier d'amas de galaxies. En particulier, *Planck* a découvert, à ce jour, plus de 200 nouveaux amas et

Pour la première fois, avec un seul et même instrument d'observation, nous sommes capables de suivre statistiquement les objets astronomiques depuis leurs premiers germes jusqu'à leur état le plus abouti

super-amas de galaxies, et a aussi découvert l'amas massif le plus lointain connu à ce jour (décalage spectral de 1 – ce qui est remarquable pour un objet de cette classe très récente). Environ 20 ans après le premier catalogue d'amas complet dans le domaine des rayons X – produit par le satellite ROSAT – les catalogues d'amas *Planck* mettent à jour une population d'amas massifs et lointains jamais observés auparavant.

Ces amas permettent de mieux comprendre la physique de ces structures, mais permet aussi de mesurer certains paramètres cosmologiques, puisque la formation de ces objets très massifs y

est très sensible. Avec un sous-échantillon de 188 de ces amas, la collaboration *Planck* a obtenu les mesures les plus précises des paramètres cosmologiques, notamment la densité de matière et l'amplitude des perturbations initiales. De plus, pour la première fois, la mesure de l'effet SZ intégrée sur toute la sphère céleste a été effectuée par *Planck* mettant en évidence la contribution des amas non résolus. Cette mesure de l'ensemble de l'effet SZ pourrait rendre compte d'une grande partie des baryons manquants. Avec ce signal intégré de l'effet SZ, les paramètres cosmologiques ont été contraints.

Cependant, les résultats obtenus avec les deux mesures SZ ne sont pas tout à fait en accord avec les paramètres cosmologiques issus de la mesure du FDC par *Planck*. Ils provoquent naturellement un débat dans la communauté, car ils ouvrent la possibilité d'une mesure indirecte de la masse des neutrinos, ou d'une révision des estimations des masses des amas de galaxies.

CONCLUSION

Grâce à sa cartographie complète du ciel à 9 longueurs d'onde avec une résolution de 5 minutes d'arc, *Planck*, le satellite européen dédié à l'étude du fond cosmologique avec une très forte contribution française, a ouvert une fenêtre d'observation complètement nouvelle entre 100 et 900 GHz (350 microns à 3 millimètres de longueur d'onde). Le défi technologique a été relevé de façon magistrale, ainsi que celui de la gestion des nombreuses équipes et du traitement particulièrement complexe des données, ou la fraction de pourcent de signal est traquée, modélisée et comprise. Tout ceci a permis de



L'effet Sunyaev-Zel'dovich (SZ)

Il s'agit de l'interaction entre les photons issus du FDC avec le gaz chaud présent à l'intérieur des amas de galaxies provoquant des légers changements de fréquence des photons. L'effet SZ est très caractéristique, car, observé aux fréquences inférieures à 217 GHz (soit

1,3 mm de longueur d'onde), il apparaît comme une zone donnée du ciel plus sombre que la moyenne (signal négatif) mais il est plus brillant (signal positif) aux plus hautes fréquences. L'effet est nul à la fréquence 217 GHz, il n'y a alors pas de variation de brillance.

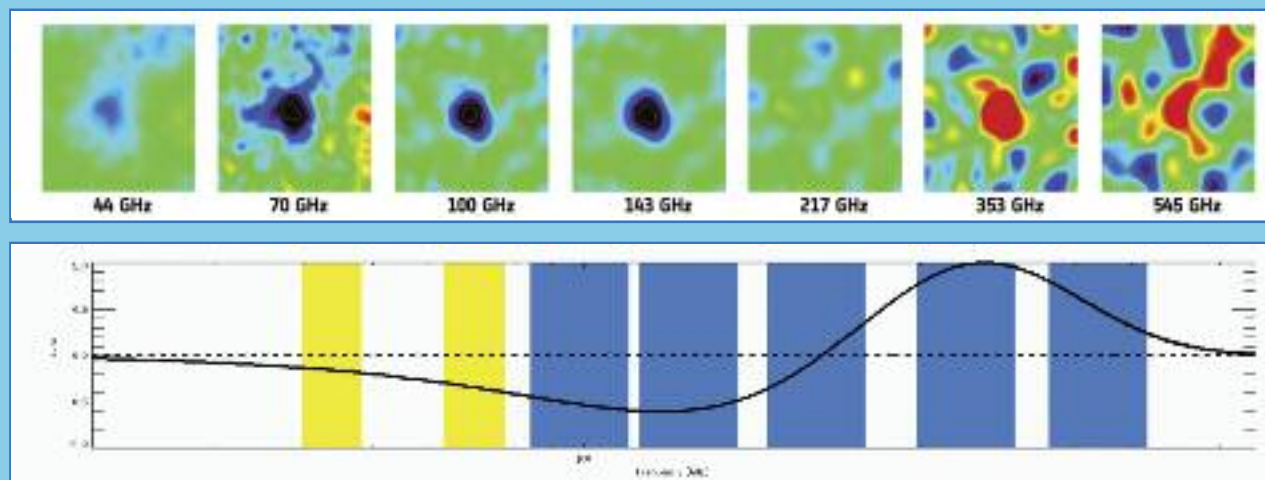


Illustration de l'effet Sunyaev-Zel'dovich (SZ): la frise d'images en haut illustre l'effet dans le cas d'un amas de galaxies connu et proche, Abell 2319. La variation de couleur due à l'effet SZ est observée avec les deux instruments de Planck, LFI et HFI, de 44 à 545 GHz. Le signal négatif (zone sombre centrale) est indiqué en bleu alors que le signal positif (zone brillante centrale) est indiqué en rouge. Le schéma en dessous montre la perte ou le gain en énergie, d'un point de vue théorique, dus à l'effet SZ (bandes de sensibilité de LFI à 44 et 70 GHz en jaune, bandes de sensibilité de HFI de 100 à 545 GHz en bleu). L'accord entre prédiction et observation est remarquable ! © ESA and the Planck Collaboration

faire des avancées significatives dans de nombreux domaines de l'astrophysique et de la cosmologie.

Pour la première fois, avec un seul et même instrument d'observation, nous sommes capables de suivre statistiquement les objets astronomiques depuis leurs premiers germes jusqu'à leur état le plus abouti, comme les galaxies et les amas de galaxies. *Planck* a permis d'établir solidement le paradigme de l'inflation et de vérifier la validité du scénario hiérarchique de formation des structures cosmiques. Il a en outre révisé la détermination des paramètres cosmologiques, comme la composition ou l'âge de l'Univers. *Planck* a de plus permis de découvrir des centaines de nouveaux amas de galaxies et super-amas, des pouponnières d'étoiles et des proto-amas de galaxies. Finalement, le plus impressionnant est probablement de

songer que *Planck* sonde directement la période de l'inflation – quand notre Univers avait la taille typique d'un pamplemousse – aussi bien que celle, bien plus récente, de la fusion de super-amas de galaxies.

Déjà couronnée de succès, l'aventure de *Planck* ne s'arrête pourtant pas ici : la collaboration a encore autant de données à analyser et à rendre publiques dans l'année qui vient. En particulier, les données en polarisation devraient nous révéler des secrets plus fascinants encore.

Plus près de nous, ces découvertes inspirent aussi, non sans humour, certains dessinateurs !

1. Ce vide en physique ne correspond pas au néant. Des particules et antiparticules y apparaissent et se désintègrent continuellement.
2. Un mégaparsec représente 3,36 millions d'années-lumière.

Pour aller plus loin

Documents :

- Articles scientifiques de la collaboration *Planck*: http://www.sciops.esa.int/index.php?project=PLANCK&page=Planck_Published_Papers
- « Un regard vers l'origine de l'Univers », H. Dole, N. Aghanim et al., *Plein Sud spécial Recherche* 2010/2011, p16-27 : <http://www.pleinsud.u-psud.fr/special-recherche/>
- « Non, la nuit n'est pas noire », H. Dole, *Le Monde*, 24 juin 2012, http://www.lemonde.fr/idees/article/2012/06/25/non-la-nuit-n-est-pas-noire_1723675_3232.html
- « Le fond infrarouge de galaxies livre ses secrets », Herve Dole, Guilaine Lagache, Jean-Loup Puget, *images de la physique* 2008, CNRS, http://www.cnrs.fr/publications/imagesdelaphysique/Auteurs2008/05_DLPhm
- Article de F. Bouchet sur *Planck* : juin 2009, *L'Astronomie* #17, Pages 14 – 19

Sites webs avec images et vidéos :

- www.planck.fr (Site grand public en français)
- www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Planck
- Produits scientifiques *Planck* (images, catalogues, etc.): www.sciops.esa.int/index.php?page=Planck_Legacy_Archive&project=planck
- Séminaire assez général sur les résultats de *Planck* en français (juin 2013): www.youtube.com/watch?v=w0qiOBhwig&list=PLW1LMV6eX05vCaFrGLYk8qncEB_dqHQ&index=1