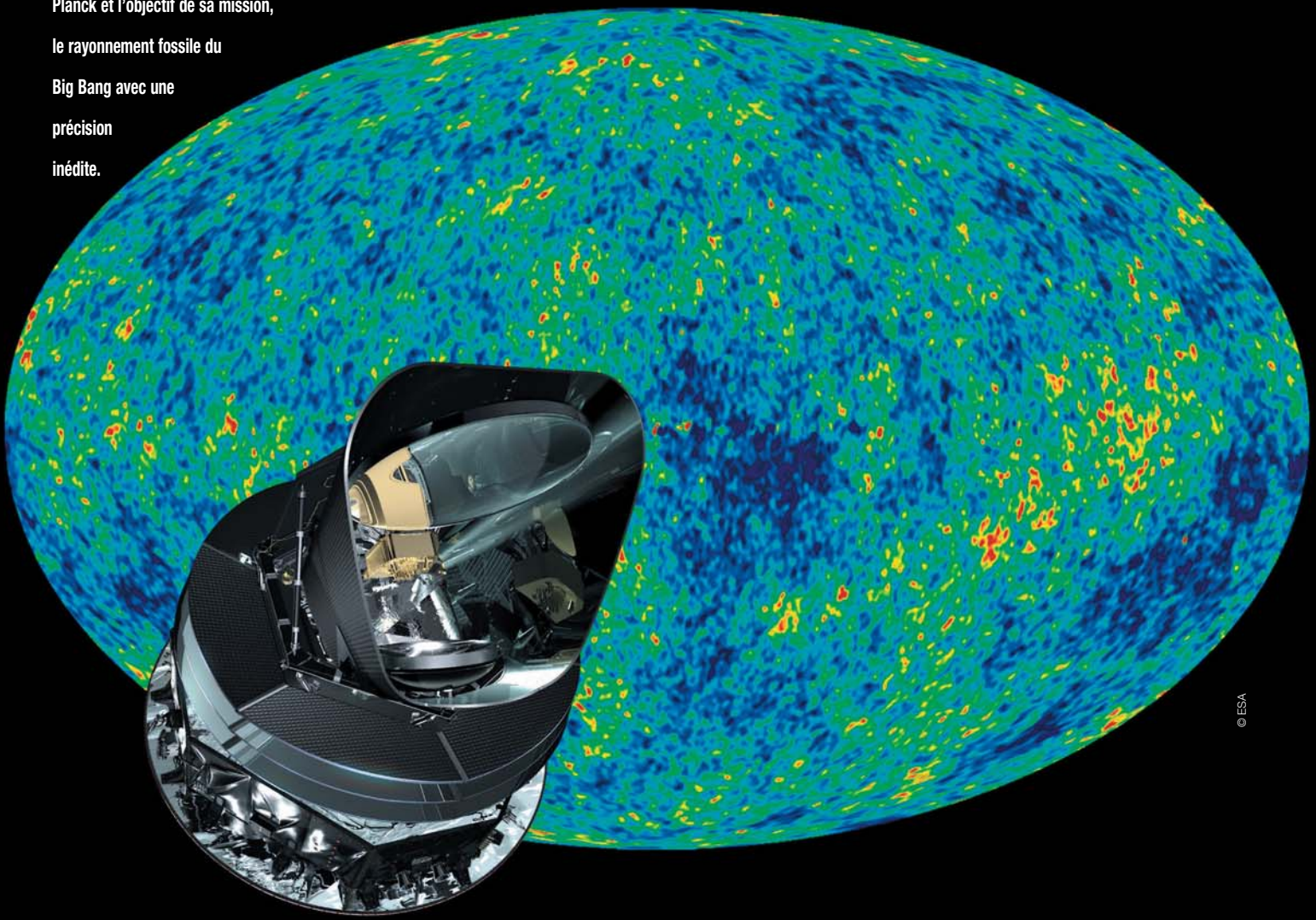


COSMOLOGIE

PLANCK : LA PROCHAINE ÉTAPE

Planck et l'objectif de sa mission,
le rayonnement fossile du
Big Bang avec une
précision
inédite.



© ESA

En 2008, un satellite de l'Agence Spatiale Européenne va effectuer un relevé d'une précision sans précédent du rayonnement de fond cosmologique. L'enjeu ?

Comprendre l'Univers !



Toutes les civilisations se sont penchées sur la création pour développer leur propre scénario de la naissance du monde. Tentative de réponse aux éternelles questions “d’où venons-nous et où allons-nous ?”, cette quête de la genèse traverse l’histoire de l’Humanité et fascine encore aujourd’hui.

Au début du 20^{ème} siècle, la relativité d’Einstein et la découverte de l’expansion de l’Univers par l’astronome Edwin Hubble bouleversent les fondamentaux qui prévalaient jusqu’alors. Le Cosmos cesse d’être une réalité figée pour se voir borner par un début et peut-être une fin. Einstein lui-même sera dans un premier temps réticent à cette lecture de ses propres équations.

L’EXPLOSION QUI N’EN EST PAS UNE

La boîte de Pandore ouverte, les scientifiques la “pillent” allégrement et l’homme de la rue voit ses certitudes vaciller alors qu’apparaissent la physique quantique - très peu “naturelle” à appréhender reconnaissons-le - et le Big Bang. Avec ce dernier, on croit retrouver une idée de genèse presque rassurante. Cette “explosion” originelle n’évoque-t-elle point de façon troublante le “que la lumière soit” de l’Ancien Testament ? Que l’un de ses théoriciens soit Georges Lemaître, un physicien chanoine catholique, ajoute au trouble et explique aussi peut-être pourquoi certains scientifiques affichèrent de franches réticences. L’appellation Big Bang est d’ailleurs au départ une moquerie ! Avec le “gros boum” (pour traduire en français), le physicien anglais Fred

Reno Mandolesi

Responsable scientifique de l’instrument LFI

© Agence Rea



PLANCK POUR COMPRENDRE L’UNIVERS

Grâce à ses instruments LFI et HFI*, Planck va réaliser la carte la plus précise des variations du rayonnement de fond cosmologique. LFI inclut une capacité supplémentaire qui vise à tenter de mesurer la polarisation de ce rayonnement, ce qui nous donnera des informations supplémentaires pour mieux comprendre la naissance de l’Univers et son évolution. Les mesures sur la polarisation devraient contraindre certaines valeurs et c’est ce dont nous avons besoin pour savoir par exemple quand la phase d’inflation a commencé et combien de temps elle a duré. N’oublions pas que nous ne connaissons que 4 % de ce qui constitue l’Univers, soit la matière visible, mais ignorons la nature exacte des 20-21 % de matière noire et les 75 % d’énergie noire ! Par exemple, l’énergie noire est-elle un phénomène physique ou une conséquence de la constante cosmologique des équations d’Einstein ? Planck peut nous aider à le savoir.”

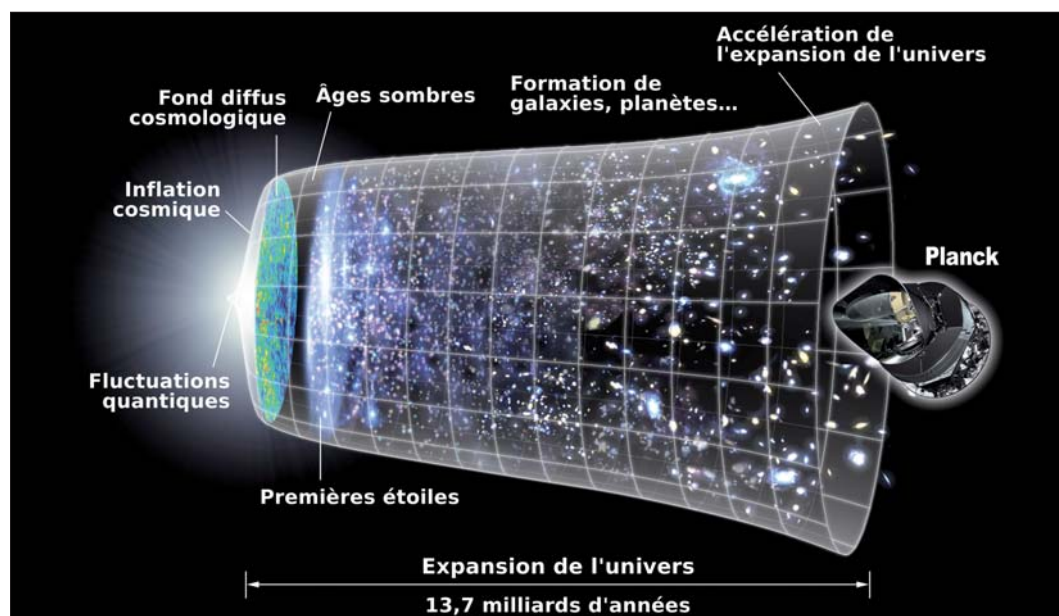
(*) Définitions de LFI et HFI en page 31

Hoyle entend dans les années 1950 tourner en dérision cette idée d’“explosion” (qui n’en est pas une puisque dans quoi aurait eu lieu celle-ci ?) car il penche pour un modèle d’Univers stationnaire. Au bout du compte, la cosmologie façon Big Bang finit par toujours s’accommoder de la réalité des observations contrairement à ses concurrentes et le terme moqueur de Fred Hoyle perd même toute connotation péjorative.

Le Big Bang implique qu’autrefois l’Univers a été extrêmement dense et chaud et dans les années 1940 le physicien russo-améri-

Pour bien comprendre ce dossier :

- **Inflation** : phase d’expansion extrêmement rapide et courte de l’Univers juste après le Big Bang.
- **Matière noire** : matière non-visible qui représente environ 20 % de la densité de l’Univers.
- **Energie noire** : forme d’énergie hypothétique qui accélère l’expansion de l’Univers et qui se comporterait ainsi comme une force répulsive (aussi appelée énergie sombre).



© NASA/WMAP Science Team/ESA/ESPACE Magazine

Schéma de la cosmologie dite standard : le Big Bang avec variante inflation.

cain Georges Gamow avance qu'en raison de cet état passé on devrait observer un rayonnement fossile omniprésent, témoin d'un époque où l'Univers, vieux d'environ 300.000 ans affichait une température de 3.000° Kelvin (0° Kelvin = le zéro absolu à -273,15° Celsius). Gamow calcule qu'en raison de l'expansion de l'Univers, la "température" de ce rayonnement est décalée à 2,3 Kelvin et s'observe dans le domaine des micro-ondes. Or, en 1965, les radio-astronomes américains Arno Penzias et Robert Wilson détectent ce rayonnement avec une antenne des laboratoires Bell (ce qui leur vaudra une partie du prix Nobel de Physique de 1978). La saga du fond diffus cosmologique - parfois identifié par l'acronyme CMB pour Cosmic Microwave Background en anglais - ne fait que commencer...



QUAND L'INFLATION VA, TOUT VA...

Ce rayonnement fossile provient de 380.000 ans après le Big Bang, un moment où l'Univers est 1.000 fois plus chaud (on retrouve les 3.000° Kelvin) et un milliard de fois plus dense que maintenant. Cette densité qui défie l'imagination s'avère pourtant alors suffisamment faible pour que la lumière puisse se propager et ainsi parvenir jusqu'à nous puisque sa vitesse étant finie (300.000 km/s) regarder loin, c'est voir dans le passé. Le rayonnement fossile ou encore de fond cosmologique constitue donc un véritable témoin de cette époque où n'existait ni étoile ni galaxie et, selon les prédictions du Big Bang, il s'avère uniforme... ou presque.

Nous l'avons dit plus haut, le Big Bang doit son succès à sa capacité à survivre à la réalité des observations. Et il y est parvenu grâce à de nombreux aménagements théoriques. L'inflation est de ceux-là. Cette expansion très rapide, seulement 10^{-38} secondes après le

Jean-Jacques Juillet

Directeur des programmes science à Alcatel Alenia Space

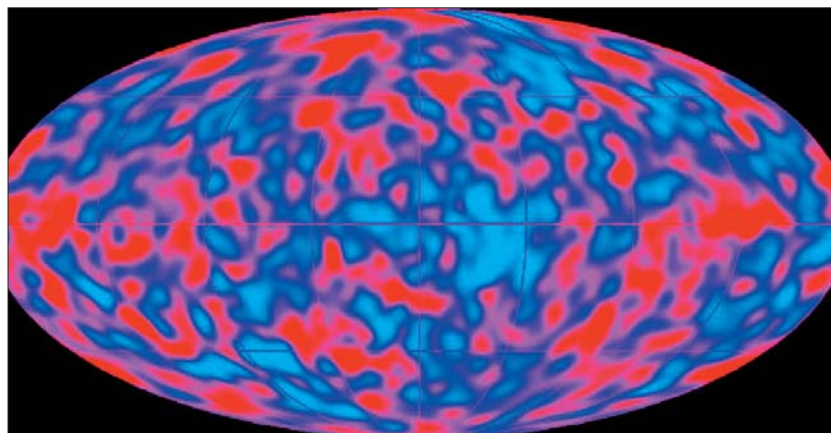
© ESPACE Magazine / O. Sanguy



LE DÉFI DU FROID

Sur Planck, certains détecteurs vont être maintenus à seulement 1/10^{me} de degré au-dessus du zéro absolu. Pour donner une idée, cela représente l'énergie que s'échangeraient par leur chaleur deux individus distants de 400 km ! Pour y parvenir, nous avons une stratégie de poupée russe qui vise à isoler et refroidir de plus en plus le satellite au fur et à mesure que nous nous approchons des miroirs et des récepteurs. Il faut aussi que les rayonnements issus de la Terre ou du Soleil ne viennent pas perturber les mesures. À titre d'exemple, le baffle [sorte de cache, NDLR] et la combinaison optique du télescope atténuent la lumière du Soleil à 10 milliardièmes.

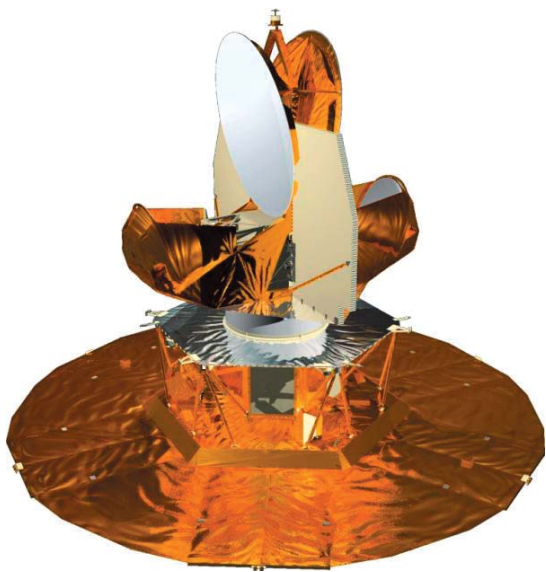
© NASA



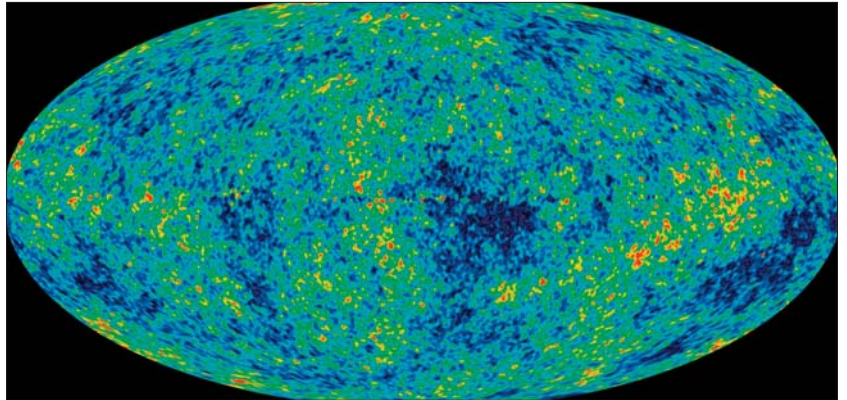
Le fond cosmologique par COBE (COsmic Background Explorer) : d'infimes fluctuations (codées en couleurs) comme autant de confirmations du Big Bang pour certains cosmologistes.

Big Bang parvient à rendre compte à la fois du caractère homogène de l'Univers et comment d'infimes fluctuations de départ, des différences de densité, ont été en quelque sorte les "amorces" de ce qui deviendra plus tard les étoiles, galaxies, amas et super amas de galaxies. On appelle ces irrégularités anisotropies et elles apparaissent dans le fond diffus cosmologique comme d'infimes variations de température, ainsi que le prévoit l'inflation.

Les satellites COBE en 1989-1993 puis WMAP depuis 2001 s'imposent comme les principaux cartographes spatiaux de ces anisotropies. George Smoot (interviewé en page 33) a reçu le prix Nobel de Physique 2006, avec John Mather, pour son travail sur les données de COBE, vues comme des confirmations du Big Bang, confortant cette théorie dans son statut de modèle cosmologique standard. Il faut dire que l'étude des anisotropies du rayonnement fossile se révèle un domaine prometteur et fécond : elle doit nous donner les clés pour comprendre comment notre Univers s'est structuré et apporter des réponses sur la na-



© NASA



ture de la matière noire et de l'énergie noire ! La matière noire, c'est cette matière dont on mesure la présence par la manifestation de sa gravité mais qui reste invisible. L'énergie noire est cette "force" (entre guillemet pour ne pas donner l'impression de trancher un débat loin d'être résolu) qui accélère l'expansion de l'Univers. Matière et énergie noires dominent notre réalité, la matière baryonique - la "classique", celle qui nous compose par exemple - ne représentant que 4 % du bilan cosmique.

PLANCK : DU FROID NAÎT LA PRÉCISION

Comme l'explique George Smoot en page 33, plus nous gagnons en précision dans la mesure des différences de températures du fond diffus cosmologique et également en résolution sur leur répartition, plus nous contraignons les modèles théoriques et éliminons d'autant les mauvaises hypothèses. Programme de l'Agence Spatiale Européenne, Planck a été conçu dans ce sens et pour y parvenir ambitionne de mesurer des variations de température de l'ordre du millionième de degrés ! Seule solution : ses détecteurs travailleront très proches du 0° Kelvin, le zéro absolu à -273,15° C rappelons-le... De plus, le domaine des fréquences observées - les micro-ondes - court du 1/3 de millimètre au centimètre de longueur d'onde, soit un très large spectre. Trop large. La tâche est donc partagée entre deux instruments : le **LFI** et le **HFI**.

Le **Low Frequency Instrument** s'occupe de la partie "basse" des fréquences (entre 4 mm et 1 cm de longueur d'onde) grâce à 22 récepteurs radio maintenus à -253°C. Cet instrument a été développé par l'institut de physique spatiale et cosmologique de Bologne en Italie.

Le **High Frequency Instrument**, de son côté, se consacre logiquement à la partie "haute" des fréquences (entre 1/3 de mm et 3 mm de longueur d'onde). Ici, nous sommes confrontés à 52 bolomètres (détecteurs qui trans-

forment l'énergie d'un rayonnement électromagnétique en chaleur) qui fonctionnent à une température de seulement 1/10^{ème} de degré au-dessus du zéro absolu : une première spatiale ! Pour parvenir à une température aussi basse, plusieurs types de "réfrigérateurs" sont combinés, le plus froid de tous employant notamment une quantité pour le moins impressionnante du très rare hélium 3 (voir les propos de Yvan Blanc). Au total, une vingtaine d'instituts ont relevé le défi de cet instrument hors du commun sous la houlette de l'Institut d'Astrophysique Spatiale d'Orsay (France).

UN PROFIL DE VOL PARTICULIER

Pour "nourrir" le LFI et le HFI, Planck emploie un télescope de 1,5 m de diamètre à la configuration optique particulière (les deux miroirs semblent se regarder de biais). Ce grand diamètre et la qualité de la partie télescope participe à une meilleure résolution angulaire. Planck ne réalisera donc pas seulement une mesure affinée des variations de températures : il en dressera aussi une cartographie plus détaillée. ▶

Depuis 2001, WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) affine les mesures et conforte l'inflation dans le modèle standard du Big Bang.

Yvan Blanc

Chef de projet Herschel-Planck au CNES

PRÉCIEUX HÉLIUM

« Le refroidissement du plan focal* de HFI n'est possible que par un système à dilution de deux isotopes d'hélium, l'hélium 4 et l'hélium 3. Le premier se trouve partout, mais l'hélium 3 est un produit très rare. Pour donner un ordre de grandeur, l'hélium 3 nécessaire pour Planck représente 2 années de production mondiale ! Cela a donc été anticipé depuis longtemps. »

(* Plan où le télescope focalise le rayonnement capté.)

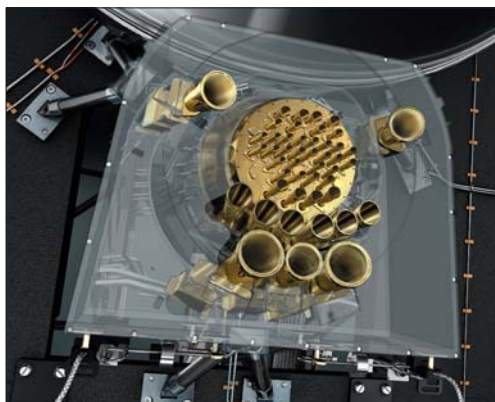
© ESPACE Magazine / O. Sanguy



La fabrication de ce satellite appelé à écrire la prochaine étape de la cosmologie a été confiée par l'Agence Spatiale Européenne à Alcatel Alenia Space et plus particulièrement à son unité de Cannes (voir *ESPACE Magazine* n°24). Le satellite accumule les premières technologies et présente de plus un profil de vol assez particulier. Fin juillet 2008, il décollera à bord d'une Ariane 5 en tandem avec Herschel, un télescope spatial infrarouge. Tous deux iront se poster à 1,5 million de km de la Terre, diamétralement opposé au Soleil. Certains auront reconnu là le point de Lagrange L2, point d'équilibre gravitationnel entre notre planète et l'astre du jour. Les bizarreries de la gravitation font que L2 n'a pas besoin d'être situé entre les deux corps pour fournir le précieux équilibre. Plus étonnant, les deux observatoires européens graviteront autour de ce point !

L'avantage réside en une zone où les perturbations (rayonnement infrarouge de la Terre par exemple) sont minimisées et les observations possibles quasiment en continu. Lancés ensemble et partageant la même "bonne adresse", Herschel et Planck entameront cependant deux modes de fonctionnement différents. Le premier sera orienté vers des endroits précis de la voûte céleste en fonction des demandes des astronomes tandis que le second scannera l'intégralité du ciel plusieurs fois sur 15 mois afin de renvoyer (3h de transmission chaque jour) ses précieuses données qui serviront à dresser des cartes. Compilées et comparées, elles révéleront le rayonnement de fond cosmologique dans toute la finesse attendue, pour explication lire les propos de François Bouchet ci-contre. Ce dernier estime d'ailleurs que Planck constitue "un test fort des théories actuelles". Après avoir levé la voile sur Titan avec Huygens en 2005, l'Europe pourrait bien en 2008 signer une étape décisive en cosmologie.

» Olivier Sanguy



© ESA

François Bouchet

Directeur de recherche à l'Institut d'Astrophysique de Paris et coresponsable de l'instrument HFI

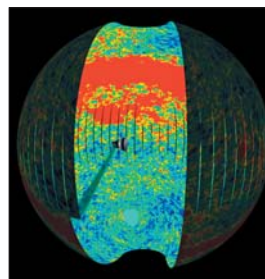
ACCUMULER POUR EXTRAIRE LE RAYONNEMENT COSMOLOGIQUE

La stratégie générale de mesure consiste à accumuler des relevés dans des circonstances différentes. Tout d'abord sur des échelles de temps courtes : Planck fait environ un tour sur lui-même par minute et reste stable 45 minutes, ce qui donne 45 mesures d'un point donné du ciel séparées d'une minute. Ensuite sur des échelles de temps plus longues : plus tard dans l'année, d'autres mesures seront effectuées. On construit donc progressivement un ensemble de cartes du ciel dans différentes fréquences afin d'éliminer tout ce qui n'est pas le rayonnement cosmologique comme des galaxies en avant-plan, notre propre galaxie et d'éventuelles erreurs de mesure."

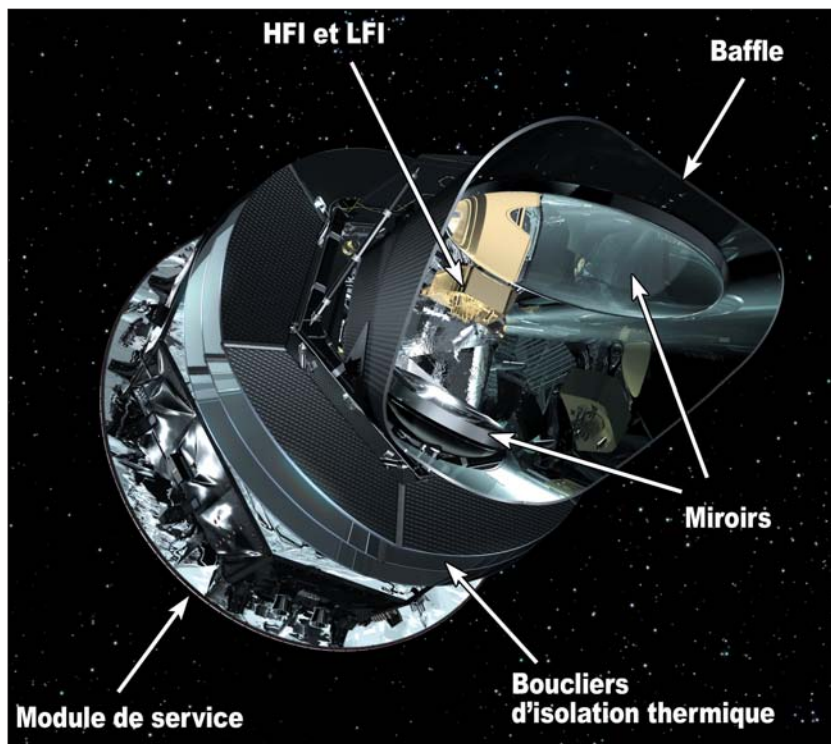
© ESPACE Magazine / O. Sanguy



© ESA



© ESA



Le projet Planck a démarré sous l'appellation COBRAS/SAMBA (COsmic Background Radiation Anisotropy Satellite and SAtellite for Measurement of Background Anisotropies) avant de rendre hommage au physicien allemand Max Planck (1858-1947), prix Nobel de Physique en 1918. Le satellite de l'ESA aura une masse au décollage de 1,9 t pour un diamètre global de 4,2 m. Le budget total de la mission se monte à 600 millions d'euros. À gauche, dessin des instruments HFI (cercle de cornets) et LFI (plus gros cornets autour).

George SMOOT

“Mesurer l’Univers à 1% près”

Prix Nobel de Physique 2006, George Smoot nous explique ce que Planck peut apporter à la cosmologie de demain.

ESPACE Magazine : Malgré son efficacité, on a l'impression que le Big Bang est un peu la théorie à abattre. Pourquoi ?

George Smoot : Il y a eu tout d'abord pas mal de controverses au début dans les années 1940, 1950 et 1960. Puis, lorsque Penzias et Wilson ont découvert le rayonnement de fond cosmologique, beaucoup de gens ont fini par penser que le Big Bang était peut-être une bonne théorie. De plus il y avait d'autres éléments favorables comme le fait que les galaxies apparaissent différentes au fur et à mesure qu'on les regarde loin, ce qui montre que l'Univers a évolué dans le temps par opposition à la théorie qui veut qu'il soit stable et que de la matière nouvelle soit créée sans cesse. Bien sûr d'autres controverses ont surgi mais au fur et à mesure qu'on étudiait le rayonnement de fond cosmologique, le Big Bang s'est imposé. En fait, c'est peut-être parce que le Big Bang a autant de succès que des gens pointent ses quelques anomalies et obtiennent une bonne couverture médiatique. En fait, ce que nous faisons consiste à affiner la théorie. Avec Planck, on espère mesurer les paramètres de l'Univers avec une précision telle que nous pourrions non seulement tester le Big Bang mais aussi aller plus loin et comprendre certains de ses mécanismes ou mystères comme la matière noire ou l'énergie noire.

ESPACE Magazine : Ce qui semble étonnant, c'est que ces infimes variations dans le rayonnement fossile puissent contraindre les modèles cosmologiques à ce point.

George Smoot : Ce rayonnement est pratiquement uniforme. Donc, comment passons-nous d'une situation où l'Univers est presque aussi parfaitement uniforme à celle que nous

connaissons aujourd'hui avec ces étoiles, ces galaxies et ces amas de galaxies ? Une des théories est qu'il existe dès le départ de faibles variations et, au cours de milliards d'années, la gravité y rassemble lentement de la matière, et plus il y a de matière, plus ces blocs grandissent pour former les étoiles et galaxies qui apparaissent dès 100 millions d'années ou au plus tard 1 milliard d'années. Mais dans le temps présent nous voyons des galaxies qui se forment encore, donc c'est un processus qui continue et où les petits agrégats mettent plus longtemps à se développer que les grands. Pour d'autres, ce sont des ruptures et défauts qui sont apparus par la suite qui expliquent la formation des étoiles et galaxies, mais lorsqu'on mesure les vibrations des variations on voit de belles harmoniques qui ne s'expliquent que s'il y a une phase de début, un peu comme une corde de violon ne vibre correctement que si elle est tenue au moins à un bout. En quelque sorte, nous avons le début de l'Univers fixé à un bout et les fluctuations se produisent. Donc vous découvrez que vous êtes terriblement contraint et qu'il faut une phase d'inflation au commencement et essentiellement une fluctuation aléatoire d'un certain type et non des défauts qui surgissent avec le temps.

ESPACE Magazine : Étant donné que tout cela est issue de mesures de variations extrêmement faibles, comment avez-vous fait - notamment sur COBE - pour extraire les véritables données et non un bruit de fond ?

George Smoot : Lorsque j'ai commencé, les théoriciens disaient que les différences seraient de 1 pour 1.000, ce qui est très difficile. En fait ils se trompaient, et il s'agit de 1 pour 100.000 ! Donc l'Univers est véritablement “lisse” et on ne peut mesurer cela directement. Il faut une comparaison. Nous avons



© ESPACE Magazine / O. Sanguy

Avec John Mather, George Smoot a reçu le prix Nobel 2006 de Physique pour ses travaux sur les données du satellite COBE qui révèlent des anisotropies dans le rayonnement de fond cosmologique.

Retrouvez ce sujet en podcast vidéo (voir présentation page 13) sur **Espace Mag TV :** www.espace-magazine.com



ainsi scanné le ciel encore et encore pour en extraire le véritable signal. Pour chaque pixel nous avons des milliers de mesures dont nous avons fait la moyenne.

ESPACE Magazine : Votre travail reposant sur ces infimes variations, qu'attendez-vous d'un satellite comme Planck ?

George Smoot : Pour bien comprendre, sur COBE, nous avons 2 récepteurs avec des cornets qui captaient les radiations. La résolution angulaire était faible : 7° . C'est assez grossier car si vous dressez une carte de la Terre avec une telle résolution tout ce que vous voyez ce sont les 5 continents, l'Australie n'est qu'une tache floue et la France ne fait que quelques pixels. Avec Planck, nous disposons de ce grand télescope et de récepteurs dans des fréquences plus élevées ce qui procure une meilleure résolution. Nous passons de 7° à $1/6^{\text{ème}}$ de degré, et même $1/10^{\text{ème}}$ de degré sur certaines fréquences, ce qui donne 10 millions de relevés sur le ciel au lieu de 6.000 ! Maintenant nous distinguons Paris et sa banlieue ! Nous commençons à discerner les dé-

tails. Les images de l'Univers actuel et à ses débuts seront aux mêmes échelles de précision et nous pourrons donc les comparer. Planck va nous permettre de mesurer les paramètres de l'Univers avec une précision de 1 %. Cela signifie que nous allons faire des simulations avec nos modèles théoriques, prédire à quoi doit ressembler l'Univers, et cela devra correspondre à ce que nous observons à 1 % près !

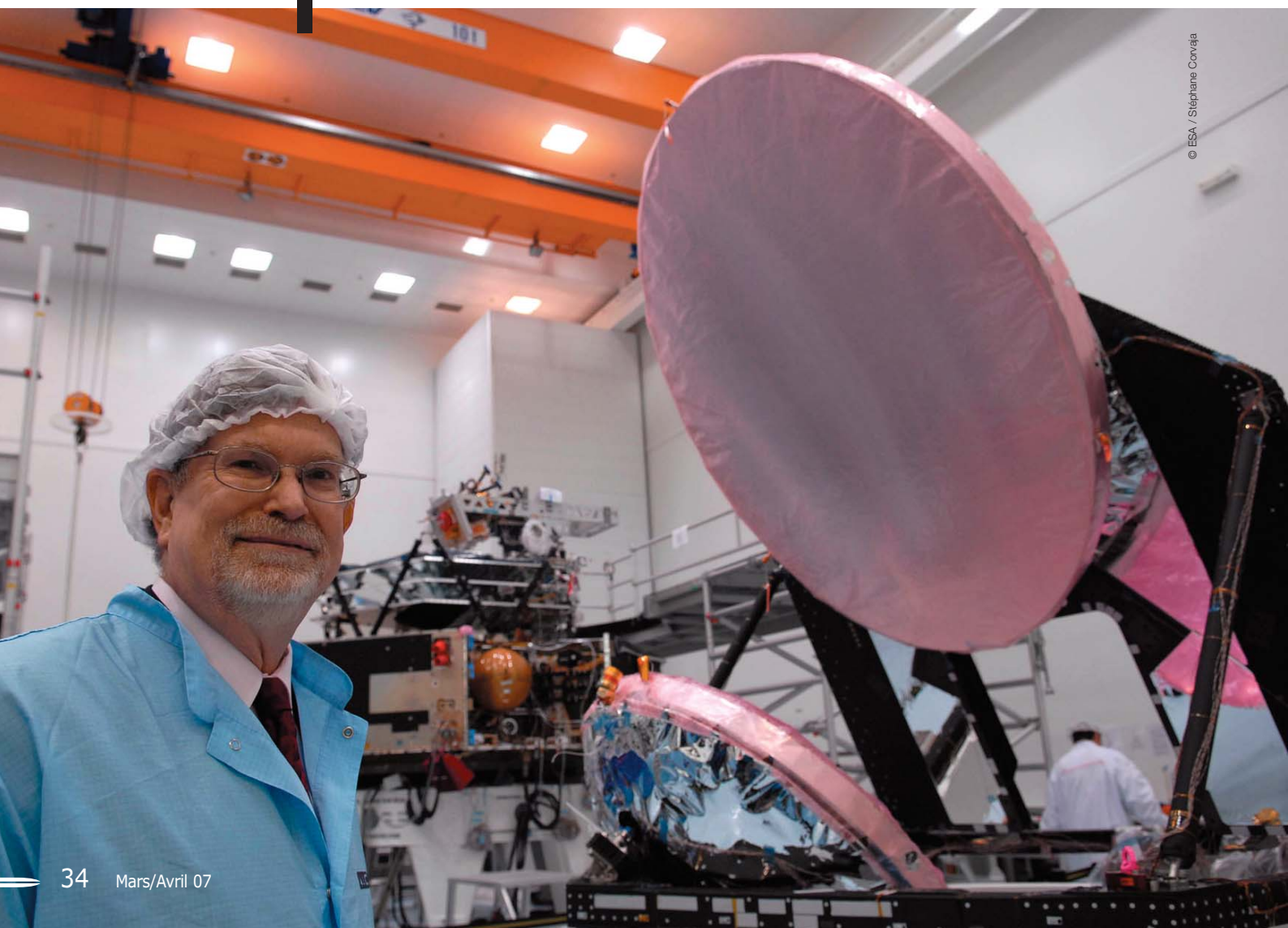
ESPACE Magazine : WMAP avait permis un bond significatif dans la confirmation de l'inflation pour le Big Bang. Planck peut-il contribuer de façon aussi décisive sur ce point ?

George Smoot : WMAP a apporté une mesure angulaire assez précise des variations du fond cosmologique. Mais ce que WMAP n'a fait qu'effleurer, est la mesure de la polarisation. Lorsque la lumière se reflète sur l'eau, elle se polarise. Du coup, si vous mettez ou non des lunettes de Soleil polarisantes vous éliminez ou non ce reflet. L'Univers se comporte un peu de la même façon. Il y a ces variations de température qui entraînent une polarisation et nous devrions le voir. La théorie de l'inflation induit aussi des ondes gravi-

George Smoot découvre avec émotion Planck en cours d'assemblage chez Alcatel Alenia

Space à Cannes : "Je suis enthousiasmé par cette mission.

Je veux voir les résultats !"



Avec Planck, l'Europe devient un acteur de premier plan en cosmologie»



© ESPACE Magazine / Didier Capdevila

L'étonnante partie télescope de Planck (modèle de test en évaluation à Alcatel Alenia Space).

tationnelles qui causent un autre type de polarisation. Si vous pouvez voir ces motifs, qui sont différents de ceux provoqués par les variations de densité à l'origine des galaxies, alors vous pouvez mesurer exactement l'échelle énergétique de l'inflation et encore plus la confirmer. Je dirais que les données de WMAP soutiennent l'inflation et vous permettent de commencer à estimer à quoi elle peut ressembler. Mais avec Planck, nous cherchons la preuve flagrante. Nous ne pouvons pas dire si Planck pourra le faire car ne connaissant pas les niveaux d'énergie de l'inflation, nous ne savons pas si ce sera visible ou non.

ESPACE Magazine : Ce pourrait être la surprise de Planck ?

George Smoot : Nous l'espérons. Je pense qu'il y a deux surprises. L'une c'est si nous voyons les ondes gravitationnelles de l'inflation : ce serait une grande découverte. L'autre serait de mesurer l'Univers à 1 % près, ce qui veut dire pouvoir le tester, le comprendre de façon approfondie et non plus grossièrement.

ESPACE Magazine : Après Planck, quelle pourrait être la prochaine étape ?

George Smoot : J'en vois deux et je travaille sur l'une d'elle. Il s'agit d'examiner pourquoi l'expansion de l'Univers s'accélère. Nous utili-

serons les supernovas et les lentilles gravitationnelles pour étudier la matière noire et l'énergie noire. Après cela, selon ce que Planck trouvera ou non, il faudrait une nouvelle mission d'étude du rayonnement fossile pour mesurer plus précisément sa polarisation.

ESPACE Magazine : Une question plus personnelle pour finir. Aujourd'hui vous visitez l'usine d'Alcatel Alenia Space à Cannes et voyez Planck bientôt prêt à partir. Que ressentez-vous ?

George Smoot : C'est intéressant parce que je faisais parti de ceux qui ont proposé Planck lorsqu'il s'appelait encore COBRAS/SAMBA et ça me semble si loin. C'était juste après COBE. J'ai été pris entre-temps par d'autres projets, l'enseignement... Mais maintenant, c'est à nouveau réel ! Je me sens comme un père. Avec les découvertes de COBE, ce domaine a pris soudainement un essor et la famille s'est agrandie avec un satellite de deuxième génération puis celui-ci de troisième et peut-être un jour une quatrième, cela dépendra de ce que Planck va trouver. L'intéressant est qu'avec Planck, l'Europe devient un acteur de premier plan en cosmologie. Enfin, je suis enthousiasmé par cette mission. Je veux voir les résultats !

» Propos recueillis par Olivier Sanguy

“Nous pourrions non seulement tester le Big Bang mais aussi aller plus loin”

Remerciements à Sandrine Bielecki et aux équipes d'Alcatel Alenia Space Cannes pour leur accueil.