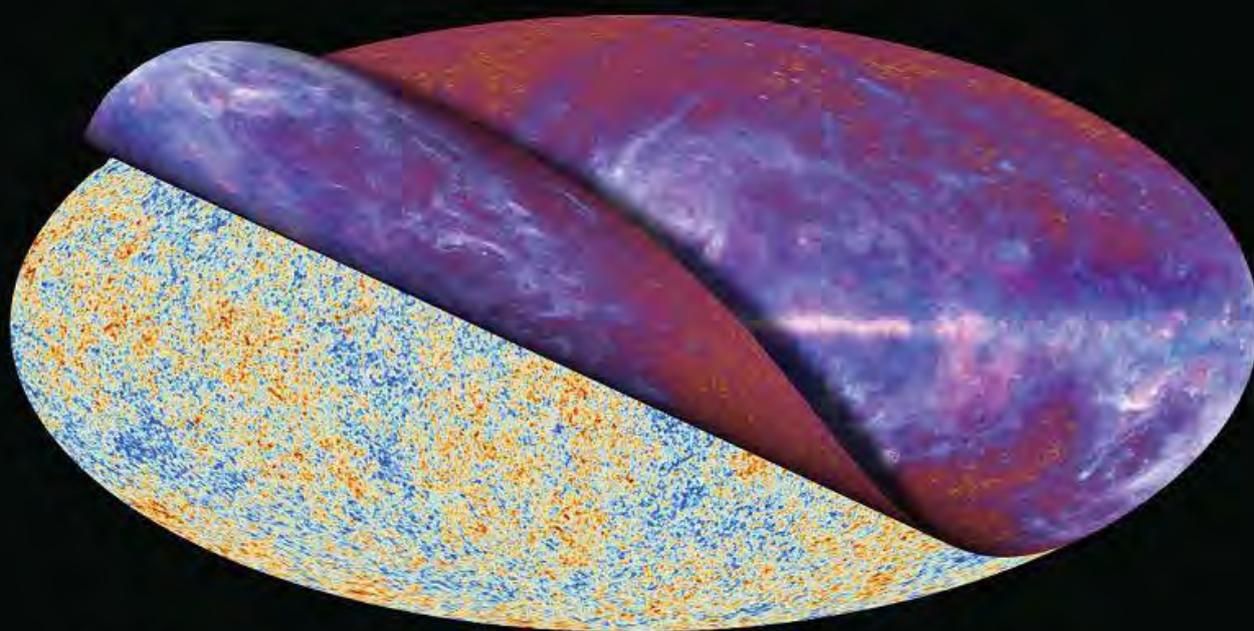


Dossier de presse
juin 2013

UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

MISSION PLANCK

l'histoire de l'univers dévoilée



Avec la participation de trois chercheurs du CNRS, acteurs de cette mission:
François R. Bouchet (Paris), Alain Benoit et Andrea Catalano (Grenoble)

Conférence
Mardi 2 juillet 2013 à 20h

Lancé en 2009, Planck, le satellite de l'Agence spatiale européenne (ESA) a permis de révéler le visage de notre Univers tel qu'il était « seulement » 380 000 ans après sa naissance. Il livre aujourd'hui les résultats de ses quinze premiers mois d'observations. Ils apportent une moisson de renseignements sur l'histoire et la composition de l'Univers : la carte la plus précise jamais obtenue du rayonnement fossile, la mise en évidence d'un effet prévu par les modèles d'inflation, une révision à la baisse du rythme de l'expansion de l'Univers, ou encore une nouvelle évaluation de la composition de l'Univers. Bon nombre de ces données ont été obtenues grâce au principal instrument de Planck, HFI, de maîtrise d'œuvre française.

F CUS

OSUG



planck

esa

cnes

cnrs

Université
Joseph
Fourier
GRENOBLE



Crédits photos : satellite : ESA - medialab / carte du rayonnement fossile : ESA - collaboration Planck

Contact Presse
Géraldine FABRE
04 76 82 61 81
geraldine.fabre@grenoble-univ.fr

Conférence Planck - 2 juillet 2013

Dossier de presse

| | |
|---|-----------|
| Programme de la conférence | 3 |
| I - Planck, un regard vers l'origine de l'Univers | 4 |
| 1 – La mission Planck | 4 |
| 2 – Le satellite Planck..... | 5 |
| II - Les résultats : l'Univers à l'ère de Planck | 6 |
| 1 – Un succès rayonnant | 6 |
| Le visage de l'Univers jeune | 6 |
| L'histoire de l'Univers | 8 |
| Un modèle qui marche incroyablement bien..... | 13 |
| 2 – Ce qu'il reste à écrire | 13 |
| Une ombre au tableau..... | 13 |
| Encore un peu de patience ! | 14 |
| Une théorie à compléter..... | 15 |
| Les résultats de Planck en bref | 15 |
| III – Les clés de la réussite de Planck | 16 |
| 1 – Une prouesse technologique | 16 |
| 2 – HFI, l'instrument du succès | 19 |
| Fiche technique | 19 |
| Equipe..... | 19 |
| 3 – La collaboration Planck | 21 |
| Comment travaille-t-on à 500 personnes ? | 21 |
| Le financement du projet | 21 |
| 4 - La contribution de la recherche française dans la mission Planck | 22 |
| Les laboratoires français impliqués..... | 23 |
| Zoom sur l'implication grenobloise..... | 23 |
| IV - En savoir plus | 24 |
| L'économie de la connaissance | 24 |
| Contacts scientifiques locaux | 24 |
| Liens et ressources complémentaires | 24 |

CONTACTS

Contact presse en page de couverture

Contacts scientifiques en fin de dossier

Pour le **comité d'organisation** :

Pierre Kern, coordinateur du LabEx Focus :

04 76 63 58 41 / 06 12 27 22 46 – pierre.kern@obs.ujf-grenoble.fr

Programme de la conférence



INTERVENANTS :

François R. Bouchet, Directeur de recherche CNRS à l'Institut d'Astrophysique de Paris, responsable scientifique de Planck-HFI. Ce cosmologiste est l'un des trois fondateurs du projet Planck. Il est responsable du centre de traitement des données de l'instrument HFI et son équipe est au cœur de l'étude de l'univers primordial d'après la carte du rayonnement fossile.



Alain Benoit, Directeur de recherche CNRS à l'Institut Néel, Grenoble, membre de l'Académie des Sciences. Physicien du solide, il a conçu le système de refroidissement extrême de l'instrument Planck-HFI pour lequel il a reçu la médaille de l'innovation du CNRS en 2012 et qui a fait de cet instrument l'objet le plus froid dans l'espace pendant près de 1000 jours.

Andrea Catalano, Chargé de recherche CNRS au Laboratoire de physique subatomique et de cosmologie, Grenoble. Il a joué un rôle essentiel dans la préparation et la compréhension fine de l'instrument HFI, indispensable pour garantir la fiabilité des résultats. Dès à présent ce spécialiste de l'instrumentation conçoit et teste les détecteurs de l'éventuel successeur du satellite Planck.



Credit : P. Maraval

Conférence
Mardi 2 juillet 2013 à 20h
Salle de conférence du CRDP
11 avenue du Général Champon, Grenoble
www.grenoble-univ.fr/Planck2013

Entrée libre et gratuite

F CUS OSUG planck esa cnes CNRS Université Joseph Fourier

I - Planck, un regard vers l'origine de l'Univers

1 – La mission Planck



© ESA

Lancé en 2009, le satellite spatial Planck a pour objectif de retrouver l'enfance de l'Univers par l'analyse du rayonnement fossile. Produit « seulement » 380000 ans après le Big Bang, ce rayonnement, également appelé fond diffus cosmologique, nous arrive quasi inchangé et permet aux scientifiques d'accéder à l'image de ce que fut le Cosmos, il y a environ 13,8 milliards d'années.

Ainsi, la mission Planck du programme scientifique « Horizon 2000 » de l'Agence spatiale européenne (ESA) permet de mieux répondre aux questions clés de la cosmologie relatives à l'âge de l'Univers, à sa géométrie, à son destin (expansion infinie ou implosion), à la naissance des premières étoiles et galaxies, etc.

Donc, de savoir si, aujourd'hui, les théories décrivant la naissance et l'évolution de l'Univers sont correctes.

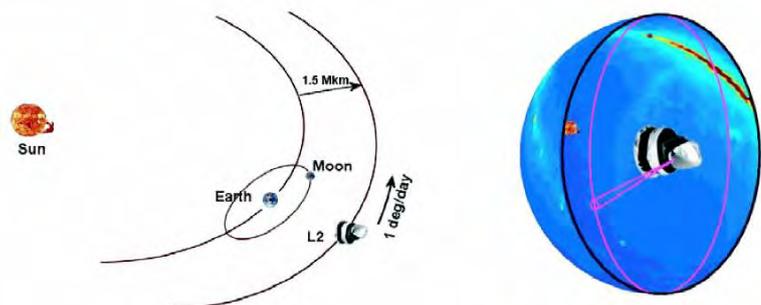
Le rayonnement fossile est une lumière qui baigne tout l'Univers ; ce flux de photons - ou de grains de lumière - est néanmoins détectable sur l'ensemble du ciel dans le domaine des ondes radio.

Pour enregistrer ces données qui proviennent de très loin, Planck embarque un télescope et deux instruments scientifiques couvrant ainsi une large gamme de fréquences (30-857 GHz) : LFI (*Low Frequency Instrument*) développé par l'Italie, qui détecte les micro-ondes basse fréquence, et HFI (*High Frequency Instrument*) confié à la France, qui capte les micro-ondes haute fréquence jusqu'à l'infrarouge lointain.

C'est depuis un point de l'espace situé à environ 1,5 millions de kilomètres de la Terre, appelé point de Lagrange L2, que le satellite Planck a cartographié le ciel.

Planck tourne autour du Soleil en 1 an. Pour s'astreindre de la lumière parasite de la Terre, l'orbite choisie est une petite orbite Lissajous au point de Lagrange L2. En orbite, il balaie systématiquement la voûte céleste avec une vitesse de rotation de 1 tour/minute et un angle de visée à 85 degrés environ du Soleil, de la Terre et de la Lune. Pour permettre un balayage plus homogène du ciel, Planck ne suit pas exactement la Terre mais oscille légèrement autour du plan de l'écliptique.

L'éloignement, la faible manœuvrabilité de ce satellite dos au Soleil et l'orbite choisie ont imposé des contraintes dans la détermination de la fenêtre de lancement. Planck a été mis en orbite, avec succès, le 14 mai 2009, par un lanceur ARIANE 5 qui embarquait aussi à son bord le satellite Herschel. Le temps de transfert de Planck vers le point de Lagrange L2 a duré approximativement un mois et demi.



© ESA

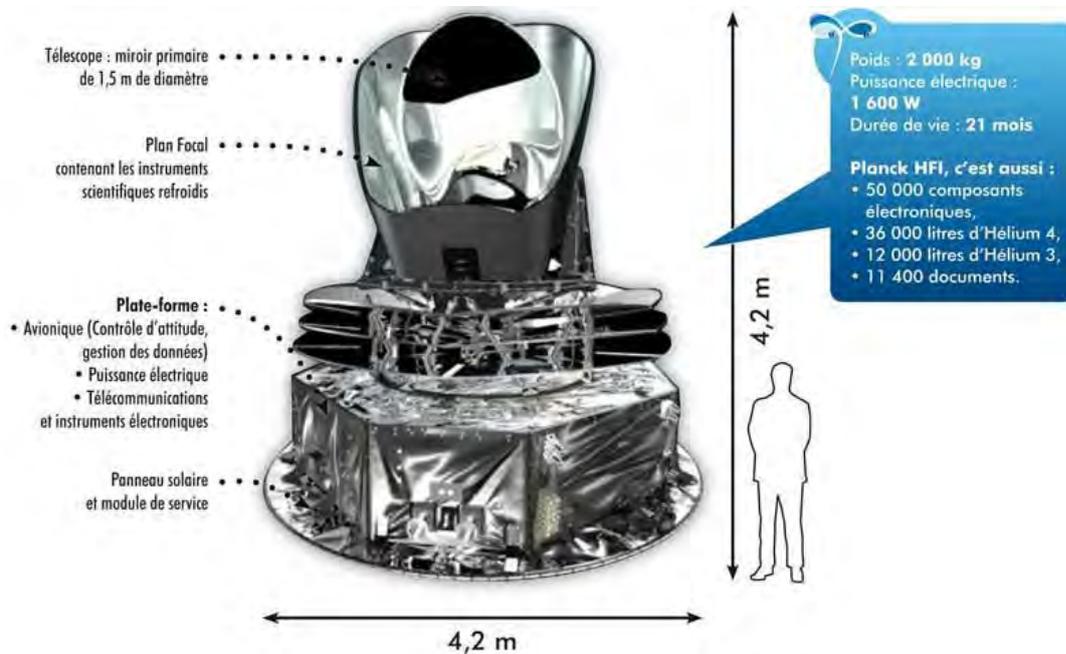
Le satellite a fonctionné parfaitement

Prévu pour être opérationnel pendant une durée minimum 18 mois, correspondant à deux balayages complets du ciel, il a pu réaliser presque 5 balayages complets. La mission s'est arrêtée pour l'instrument HFI le 14 janvier 2012 lorsqu'il a été à court de liquide de refroidissement.

2 – Le satellite Planck

Vingt années de travail, des centaines de milliers d'euros, Planck est un bijou de technologies innovantes

Le satellite Planck d'une hauteur et d'un diamètre maximum de 4,2 mètres, a une masse au lancement d'environ 2 tonnes. Le satellite comprend un module charge utile et un module de service.



La charge utile de Planck comprend :

- un télescope grégorien de 1,75 x 1,5 m, équipé d'un baffle de protection, d'un miroir primaire et d'un miroir secondaire qui collectent les radiations micro-ondes et les dirigent sur le plan focal des instruments,
- les deux instruments HFI et LFI au plan focal, couvrant 9 bandes spectrales :

LFI (30, 44 et 70 GHz)

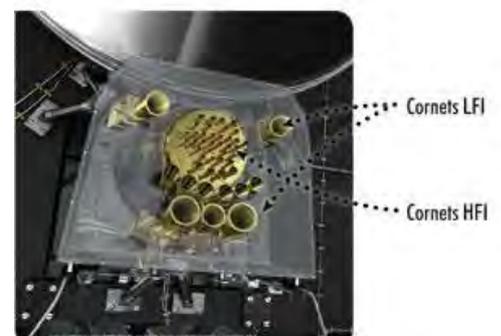
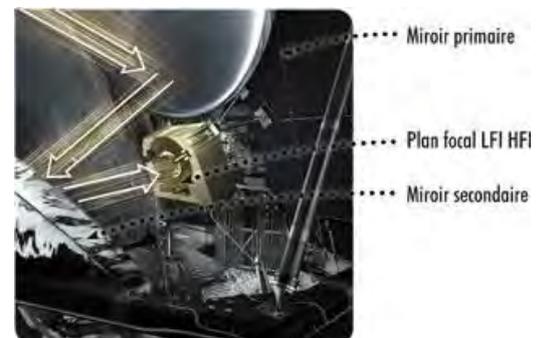
HFI (100, 143, 217, 353, 545 et 857 GHz)

- les systèmes de refroidissement.

Le rayonnement fossile collecté par les deux miroirs est couplé optiquement aux détecteurs par l'intermédiaire de cornets corrugués (striés).

Le module de service héberge :

- les systèmes pour la génération et le conditionnement de l'énergie,
- le contrôle d'attitude,
- la gestion des données et les communications,
- les parties chaudes des instruments scientifiques (HFI et LFI).



II - Les résultats : l'Univers à l'ère de Planck

Le satellite Planck a récolté une moisson de renseignements sur l'évolution de l'Univers. Au total, ces découvertes feront l'objet d'une trentaine de publications simultanées dans la revue *Astronomy & Astrophysics*, les preprints étant disponibles depuis le 22 mars 2013 sur <http://sci.esa.int> et sur www.arxiv.org.

1 – Un succès rayonnant

C'est peut-être une étape décisive vers la compréhension des origines du Cosmos que viennent de franchir les scientifiques de la mission Planck. Le 21 mars, l'Agence spatiale européenne (ESA) a annoncé, au cours d'une conférence de presse à Paris, que les données accumulées par ce satellite avaient confirmé de « façon éclatante et avec une précision inégalée le modèle cosmologique standard », le plus simple d'entre tous. Entre autres découvertes majeures, les chercheurs ont mis en évidence, et de manière incontestable, un phénomène prévu par les théories de l'inflation. Ce concept, imaginé au début des années 1980 pour décrire l'évolution de l'Univers dans les premiers instants qui ont suivi le Big Bang, n'avait jusqu'ici jamais réussi à convaincre l'ensemble des astrophysiciens. La découverte d'aujourd'hui renforce considérablement sa crédibilité.

Le visage de l'Univers jeune

Le « modèle de concordance » (dit aussi modèle cosmologique standard) est la théorie cosmologique qui rassemble la majorité des suffrages scientifiques aujourd'hui. Le début de notre univers correspondrait au Big Bang, véritable singularité de l'espace et du temps, où il était à la fois infiniment plus dense et plus chaud. Depuis cet instant, datant de 13,8 milliards d'années selon l'interprétation des observations astronomiques, l'Univers se dilate et se refroidit progressivement.

En remontant suffisamment tôt dans l'histoire du cosmos, il est possible de l'observer lorsqu'il était encore dense et chaud : le ciel actuel garde la trace de ce passé brûlant, sous la forme d'un très faible rayonnement, dit cosmologique, appelé aussi « rayonnement fossile ». Ce rayonnement invisible, car émis dans le domaine infrarouge et millimétrique essentiellement, baigne le cosmos entier dans une « douce chaleur » de $-270,42\text{ }^{\circ}\text{C}$, soit $2,73$ degrés seulement au dessus du zéro absolu ($-273,15$ degrés Celsius, soit 0 K). C'est ce rayonnement infime, extraordinairement difficile à capter, qu'a mesuré Planck en dressant la carte du fond du ciel en le balayant à l'aide d'un télescope infrarouge et millimétrique détectant simultanément neuf longueurs d'onde différentes, de $0,35\text{ mm}$ à 1 cm .

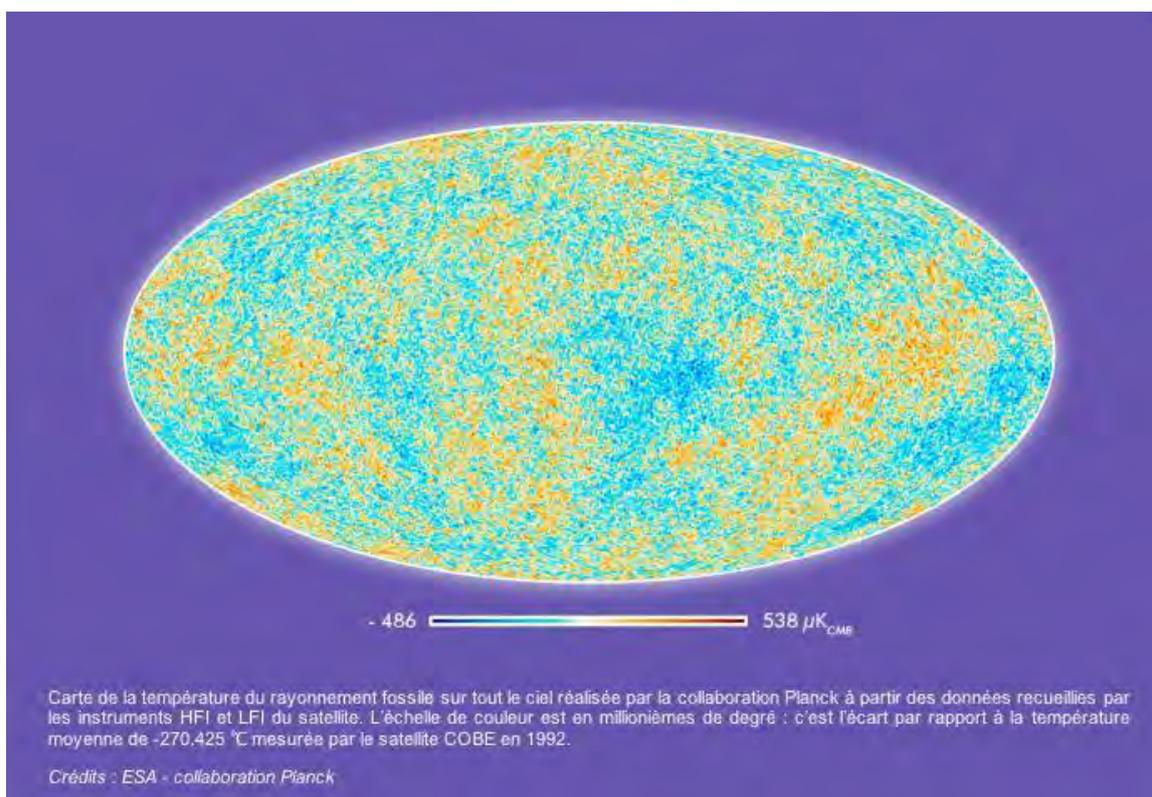
Prédit par Gamow, détecté en 1965 par Penzias et Wilson (prix Nobel à la clé), le **rayonnement fossile** constitue une source de connaissance précieuse pour les cosmologistes. Véritable « **Pierre de Rosette** », ce flux de photons produit $380\,000$ ans après le Big Bang, qui nous arrive quasi inchangé, témoigne du visage de l'Univers lors de sa prime jeunesse, voici environ $13,8$ milliards d'années, et recèle les traces des grandes structures qui se développeront par la suite.

A propos de cette lumière originelle de l'Univers

Pourquoi le cosmos a-t-il émis sa première lueur, son premier flash $380\,000$ ans après le Big bang ? Avant, l'Univers était sombre et opaque. Dans ce brouillard à plus de 3000 degrés (gaz chaud et quasi-homogène), les particules (électrons et protons) y étaient tellement agitées que chaque photon de lumière émis par l'une d'elles était instantanément réabsorbé par une voisine. A la faveur de la baisse de température qui a accompagné l'expansion de l'Univers, électrons et protons forment des atomes ; le cosmos devient alors transparent, car les photons s'y propagent librement. Ceux émis à cet instant, aujourd'hui refroidis (à $2,7\text{ K}$) près du zéro absolu, forment une sorte de trace dans le fond du ciel, un rayonnement « congelé » aussi qualifié de « fossile ». Après un voyage à travers le temps et l'espace de plus de 13 milliards d'années, ce rayonnement capté par Planck nous montre la plus ancienne photographie possible de l'Univers, lorsque la lumière s'est allumée ! Le premier autoportrait du cosmos.

L'Univers Primordial photographié par Planck

Le satellite d'un demi-milliard d'euros a largement rempli sa mission : observer tout le ciel à haute résolution ! A la suite des satellites COBE¹ et WMAP², des expériences en ballon ou des télescopes installés dans des déserts qui avaient fait de précieuses mesures du rayonnement fossile, Planck a obtenu une image des fluctuations du rayonnement fossile sur l'ensemble du ciel avec une sensibilité et une résolution jamais atteintes jusqu'alors. Sur ce cliché de 50 millions de pixels, sont perceptibles des variations de l'intensité lumineuse de quelques parties par million (le contraste nécessaire pour distinguer quelques cheveux au sommet de la tour Eiffel !) et des détails aussi fins qu'un sixième de la taille de la Lune.



Souvent représentée à plat, sous la forme d'une ellipse, l'image du fond du ciel a en réalité la forme d'une sphère, exactement comme la surface de la Terre est représentée par un planisphère.

Une carte ultime et indépassable ?

S'il est rare de pouvoir parler de mesure définitive en physique, avec la mission Planck on peut considérer que **l'objectif est atteint** !

Non seulement parce que la totalité du ciel a été observée et que le rayonnement fossile constitue la frontière de tout l'Univers visible, mais aussi parce que, comme l'explique François Bouchet, Directeur de recherche CNRS à l'Institut d'Astrophysique de Paris, responsable scientifique de Planck HFI : « *jamais aucun télescope ne pourra surpasser cette image en sensibilité, car elle n'est pas limitée par la qualité des instruments, mais par l'incertitude liée à la nature quantique de la lumière* ». En effet, la résolution de l'image permet de voir tous les détails de cette lumière primordiale, dans la mesure où l'émission du rayonnement fossile n'ayant pas été instantanée, un flou originel en gomme les détails plus fins. Autrement dit, aucun autre cliché ne pourra jamais faire mieux.

La carte de Planck fera donc à jamais date et va désormais servir de phare aux cosmologistes ! Elle s'impose dorénavant comme référence incontournable de la cosmologie observationnelle.

« On se dit qu'on participe à une étape notable de l'histoire des sciences »
explique François Bouchet

¹ COBE : satellite de la NASA lancé en 1989, pour la cartographie du fond diffus cosmologique (résultats en 1992)

² WMAP : satellite de la NASA lancé en 2001 pour préciser les résultats de COBE sur l'anisotropie du fond diffus cosmologique

Démasquer le rayonnement fossile : une carte épluchée comme un oignon !

Pour pouvoir élaborer cette carte, le satellite devait être en mesure de différencier le signal du rayonnement fossile - équivalent au rayonnement d'un corps noir à une température de 2,7K - de celui ayant pour origine d'autres sources : Voie lactée, galaxies voisines et amas lointains, poussières interstellaires, nuages de gaz, radiosources...

« *C'est pourquoi, explique **Cécile Renault** du Laboratoire de Physique Subatomique et de Cosmologie à Grenoble, la mission a été conçue pour réaliser durant un an et demi, des mesures de l'intensité et de la polarisation de la lumière en provenance de la voûte céleste dans neuf longueurs d'onde différentes : trois dans le domaine radio pour l'instrument LFI, et six dans le submillimétrique et l'infrarouge lointain pour l'instrument HFI.* » De quoi faire ressortir le précieux rayonnement fossile de la multitude de signaux brouillés en provenance de tous les recoins du cosmos !

Ce ne sont pas les bolomètres froids qui fournissent les cartes du rayonnement fossile !

On mesure en fait à leur sortie, une tension proportionnelle à la puissance reçue du ciel dans une certaine « couleur », avec quelques indésirables comme du bruit électronique, l'émission thermique de l'optique ou encore des signaux parasites laissés par le rayonnement cosmique.

Planck, ce sont 500 milliards de données brutes récoltées au cours des deux premiers balayages de l'ensemble du ciel effectués (un an et demi d'observation). Ces données sont à transférer du satellite vers la Terre et à analyser pour construire un ensemble de 9 cartes de 50 millions de pixels chacune, afin d'extraire environ 20 paramètres cosmologiques fondamentaux.

Il faut donc plusieurs années de travail pour passer de la mesure brute aux cartes par fréquence ! Et c'est là que quelques dizaines de chercheurs dans le monde - dont 4 Grenoblois en particulier (François-Xavier Désert (astronome à l'IPAG), Andrea Catalano, Juan Macías-Pérez, Cécile Renault (chercheurs CNRS au LPSC), entrent en scène. Ils sont au cœur de l'analyse des données de Planck-HFI, ce qui exige une compréhension en profondeur à la fois de l'instrument et de l'astrophysique.

Après reconstitution de la carte complète du ciel sur neuf fréquences micro-ondes, restait aux chercheurs une vaste entreprise de nettoyage pour extraire les enregistrements de toutes les lumières parasites. De ces 3 mois de « **séparation des avant-plans** », **un peu comme quand on ôte les pelures d'un oignon**, les scientifiques de la collaboration Planck en ont tiré cette plus ancienne image de notre Univers.

Une animation en ligne décrypte cet énorme travail d'extraction de l'information :

<http://public.planck.fr/resultats/202-le-rayonnement-fossile-vu-par-planck-la-nouvelle-reference-en-cosmologie>

Un autre défi pouvait alors être relevé : décrypter les informations imprimées dans cette carte et en déduire le contenu et l'histoire de l'Univers depuis les premiers instants.

L'histoire de l'Univers

La photographie du rayonnement fossile n'est pas seulement un cliché de notre Univers jeune. L'avancée cruciale est qu'elle vient valider le scénario de l'histoire de l'Univers, en le précisant (voire en le réajustant).

Confronter ces mesures aux modèles théoriques va apporter de multiples informations aux « planckien(ne)s »³ : non seulement sur l'évolution de l'Univers depuis l'apparition du rayonnement fossile, mais également sur des événements antérieurs qui en sont la cause et pour lesquels les astrophysiciens disposent de peu d'observations.

**« Ce cliché, c'est surtout une fenêtre ouverte sur la genèse de l'Univers »
s'enthousiasme Cécile Renault**

³ « planckien(ne)s » est le nom d'usage donné à l'ensemble des membres (chercheurs, ingénieurs, techniciens) de la collaboration Planck

Ainsi était l'Univers à l'origine !

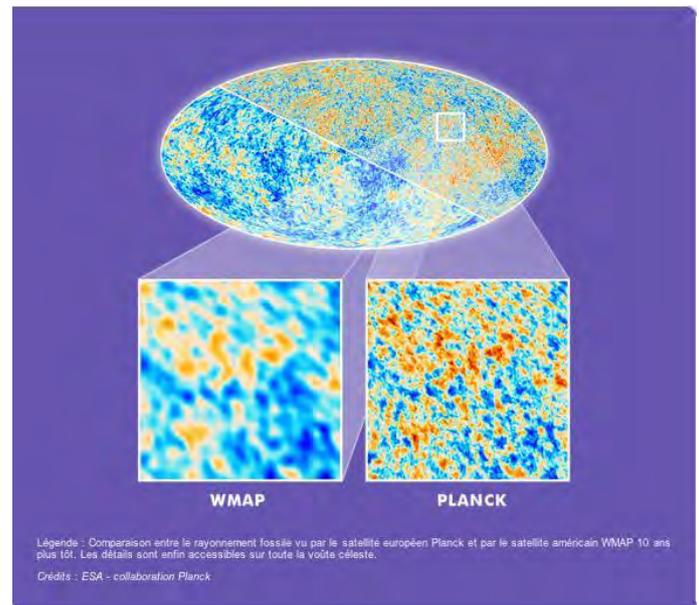
C'est l'une de ces fenêtres sur l'Univers primordial que vient d'ouvrir la mission Planck.

D'après les modèles théoriques, 380 000 ans après le big bang, l'Univers est devenu transparent : la lumière a enfin pu se libérer de la matière et se propager librement. A l'époque, rien de ce qui brille dans le ciel d'aujourd'hui n'existait : ni galaxies, ni nébuleuses, ni étoiles, ni planètes, rien sauf un gaz uniformément brillant d'une température approchant 3000 degrés... Comment, à partir de ce gaz chaud, dense et homogène, l'Univers s'est-il structuré ? C'est à cette question que tentent de répondre les chercheurs.

Planck a pu mesurer avec une sensibilité sans précédent les anisotropies ou infimes fluctuations de température du rayonnement fossile (autour de sa valeur moyenne à 2,725 K), venant affiner les observations des missions spatiales COBE et WMAP de la NASA dans les années 1990.

Ces variations d'intensité lumineuse de l'Univers primordial (qui se présentent sous la forme de taches plus ou moins brillantes, dont l'existence avait été établie par les précédentes missions) sont précisément l'empreinte des germes des grandes structures actuelles du cosmos. Elles désignent les endroits où la matière s'est par la suite assemblée, puis effondrée sur elle-même, avant de donner naissance quelques centaines de millions d'années après le big bang aux étoiles, galaxies et amas de galaxies.

Planck peut fournir des cartes de ces anisotropies avec une sensibilité en température de quelques microkelvins, mais aussi de polarisation du CMB (Cosmic Microwave Background). La large couverture en fréquences de Planck (30-857 GHz) a été choisie pour fournir des résultats détaillés sur l'émission galactique et étudier les amas de galaxies.



Un net gain de précision

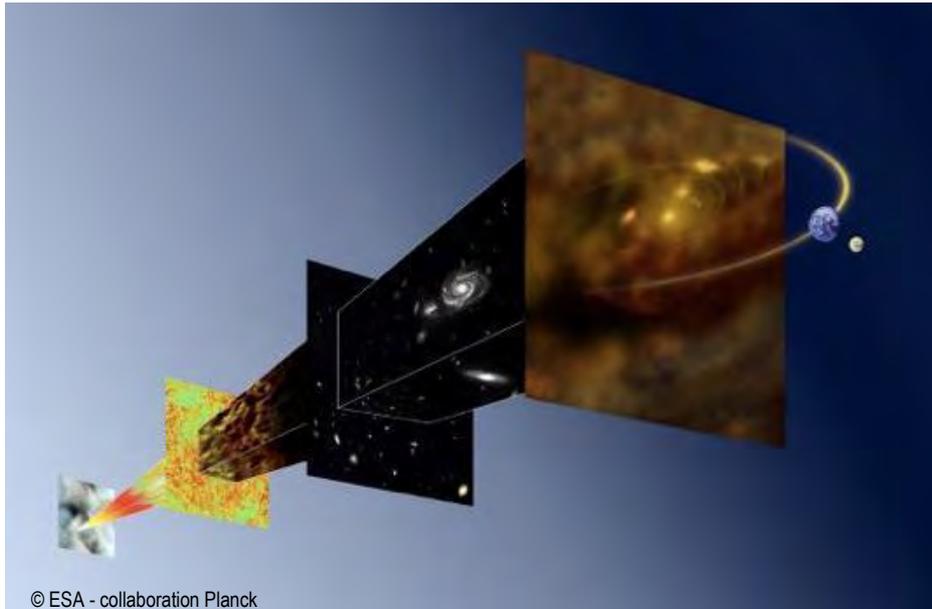
Selon certaines théories, l'origine de ces « grumeaux » ou « fluctuations » du fond diffus cosmologique (en anglais CMB, Cosmic Microwave Background) est à chercher du côté de l'« inflation », un événement survenu plus tôt dans l'histoire de l'Univers. Proposée par le théoricien Alan Guth à la fin des années 70, la théorie de l'inflation dit que durant cet épisode très violent, qui se serait déroulé environ 10^{-35} secondes⁴ après le « Big Bang », l'Univers aurait connu une brusque phase d'expansion et aurait grossi de manière considérable, au moins d'un facteur 10^{26} .

L'inflation, la zone d'ombre de l'histoire de l'Univers !

Le concept d'inflation a été introduit il y a une trentaine d'années, pour pallier des manques à la thèse du Big Bang. En effet, l'existence de cette vertigineuse phase d'expansion est une hypothèse théorique qui s'est imposée comme étant probablement le moyen le plus simple d'expliquer à la fois la remarquable isotropie de l'Univers à grande échelle (propriétés semblables de régions pourtant éloignées dans la carte du rayonnement fossile), la platitude de l'espace (ce qui n'a rien à voir avec sa forme) et la genèse des fluctuations que l'on observe dans la carte du rayonnement fossile, germes des futures grandes structures de l'Univers. La théorie de l'inflation s'incarne en une constellation de modèles, entre lesquels les spécialistes étaient bien en peine de trancher... jusqu'à Planck ! Il est venu exclure les modèles d'inflation les plus complexes, comme ceux qui prédisaient que ce sont les champs produits par plusieurs particules qui auraient fait enfler l'Univers.

⁴ 0, 00...[quelques 35 zéros après la virgule, plus loin]...001 seconde !

« L'inflation est définitivement établie »

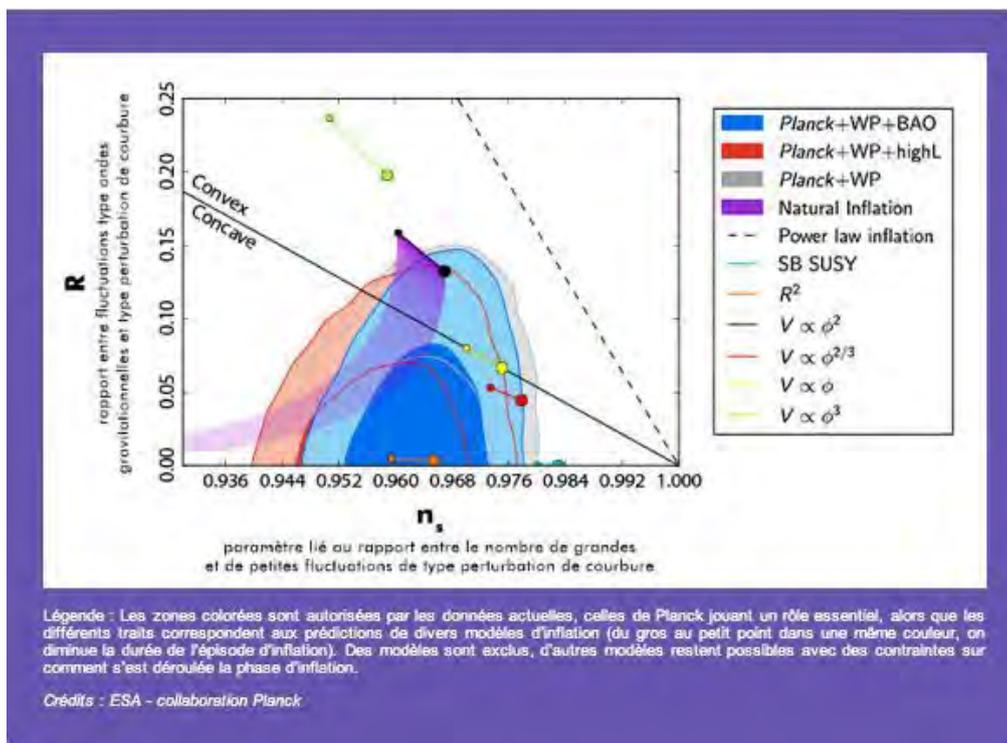


© ESA - collaboration Planck

« L'inflation est définitivement établie » explique Jean-Loup Puget

Planck a permis de démontrer la validité de l'une des prédictions essentielles de la **théorie d'inflation** : l'intensité lumineuse des fluctuations varie avec leur taille ; l'intensité lumineuse des « fluctuations à grande échelle » doit être légèrement supérieure à celle des « fluctuations à petite échelle ».

Planck contraint donc fortement la façon dont cette inflation a dû se comporter durant l'étirement produit par l'expansion de l'Univers pour engendrer les fluctuations que nous observons. « *Nous pénétrons enfin au cœur de la phase inflationnaire, pour en observer la dynamique ! Ce qui permet de commencer à faire le tri entre les différents modèles d'inflation* » s'enthousiasme Jean-Loup Puget, co-responsable de Planck-HFI et Directeur de l'Institut d'astrophysique spatiale d'Orsay. Les données de Planck réduisant la plage possible des paramètres qui caractérisent les différents scénarii d'inflation, certains modèles se voient invalidés. C'est finalement le modèle d'inflation le plus simple qui concorde le mieux !



Avant la matière, il y avait donc vraisemblablement « l'inflaton », un champ scalaire comme le boson de Higgs récemment découvert au LHC du CERN. C'était alors l'unique substance que contenait l'Univers.

La structure et la géométrie de l'Univers expliquées

Cette période située entre 10^{-38} et 10^{-30} secondes après le big bang, durant laquelle l'Univers aurait connu une fulgurante phase de dilatation exponentielle, ne se serait donc pas arrêtée brutalement, mais aurait connu un ralentissement progressif jusqu'à se stabiliser. La structure hétérogène de l'Univers composé de galaxies et amas de galaxies, séparés de vides intergalactiques, serait au final le reflet des soubresauts spontanés d'origine quantique qui agitaient l'espace-temps de la soupe primordiale de l'Univers à sa naissance. « *C'est là la chance des cosmologistes, explique François Bouchet, entre le big bang et l'émission du rayonnement fossile, les fluctuations primordiales, bien qu'étirées, n'ont pas connu de transformations violentes et ont gardé la mémoire de leur origine, sous la forme d'un paramètre que nous avons mesuré avec Planck* ».

Un autre résultat essentiel vient étayer la théorie de l'inflation : Planck confirme que **l'Univers est « plat »** ! Ce qui n'a rien à voir avec sa forme mais signifie que sa géométrie est « euclidienne ». Selon les termes d'Einstein, « la courbure totale de l'Univers est nulle » récitent les cosmologistes ! C'est-à-dire que la lumière s'y déplace en obéissant aux lois de la géométrie euclidienne et sans être déviée par autre chose que les masses (les photons se déplacent en ligne droite sauf lorsqu'ils sont déviés par une masse de matière qui les attire). Mais si on traçait un triangle de plusieurs milliards d'années-lumières de côté, la somme de ses angles serait toujours égale à 180 degrés... Cette hypothèse est précisément vérifiée puisque, dans le modèle de concordance, les « planckien(ne)s » mesurent un paramètre de courbure compris entre -0.01 et +0.01.

Récapitulons le scénario : 10^{-32} secondes après le Big Bang, l'Univers aurait achevé une phase fulgurante de dilatation gigantesque appelée « inflation ». Les infimes fluctuations, naturellement présentes avant cet épisode, seraient devenues alors macroscopiques. Ces « graines » ont grandi et sont devenues des concentrations de matière noire et de matière ordinaire. **Le rayonnement fossile témoigne de cette évolution**. Ces jeunes structures portées par un espace plat (c'est à dire où les lois de la géométrie euclidienne sont valides) en expansion poursuivent leur croissance et deviennent de plus en plus complexes sous l'action de la gravité jusqu'à former notre paysage cosmique actuel.

De la carte du rayonnement fossile, les astrophysiciens ont extrait quantité d'informations sur l'évolution de l'Univers. Outre la platitude relatée précédemment, ils ont pu préciser d'autres **paramètres cosmologiques**. Planck révisé sensiblement à la baisse la constante de Hubble qui donne le taux d'expansion actuel de l'Univers, ce qui conduit également à revoir légèrement son âge à la hausse. Les dernières estimations tournaient autour de 13,8 milliards d'années.

Plus ou moins 13 milliards d'années, tel est désormais l'âge officiel de l'Univers !

Et notre cosmos s'étendrait (autrement dit, les galaxies s'éloignent les unes des autres) à la vitesse de 67,9 km/s/megaparsec. Quand les « planckien(ne)s » réalisent que cette vitesse déduite de Planck est 10% plus faible que la mesure faite par le Hubble Space Telescope de la NASA, ils pensent avoir fait une erreur de calcul... Mais après vérification, ce chiffre est resté !

La recette de l'Univers

Planck révèle aussi un dosage un peu modifié du trio des « ingrédients de la soupe cosmologique » : matière ordinaire, matière noire et énergie noire.

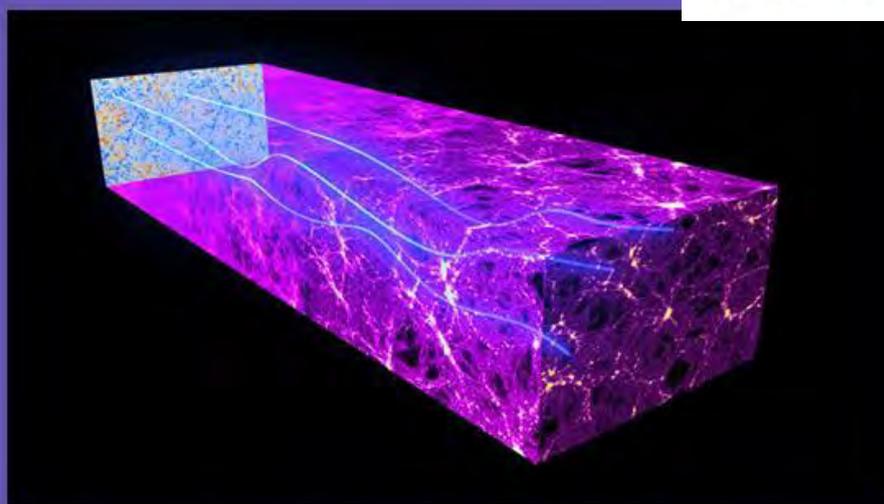
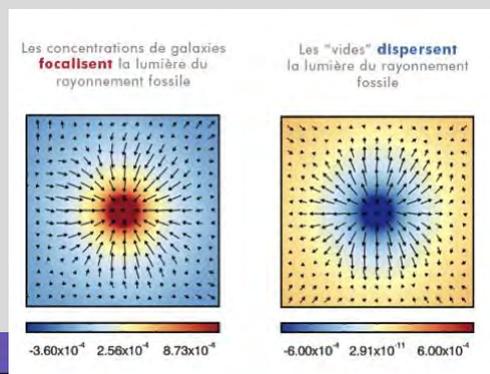
La matière ordinaire est celle des objets que nous voyons : galaxies, étoiles ou nuages de gaz et de poussières. La matière noire est cette fameuse substance de nature inconnue, mais dont l'existence a été déduite de l'observation de la masse des galaxies. Quant à l'énergie noire, elle correspond à une forme d'énergie d'origine, elle aussi, inconnue mais agissant à l'échelle de l'Univers comme une force répulsive, responsable de l'accélération de l'expansion de l'Univers.

« *Les proportions de ces trois éléments, estimées à partir du seul rayonnement fossile par Planck, passent ainsi à 4,8% (contre 4,3% auparavant) pour la matière ordinaire ou baryonique, à 25,8% (contre 23% du temps de WMAP) de matière noire, et à 69,4% (contre 72,8% naguère) d'énergie noire* » indique Cécile Renault.

« Le rayonnement infrarouge émis par la poussière nous indique la masse totale associée aux galaxies au moment où elles formaient la majorité de leurs étoiles. » poursuit Cécile Renault « Tandis qu'en étudiant la déviation de la lumière du fond diffus, nous avons cartographié une grande partie de la matière noire, cette substance que nous ne pouvons détecter directement mais dont nous percevons les effets gravitationnels. »

L'effet de lentille gravitationnelle, une déviation précieuse

La carte du rayonnement fossile est « brouillée » par la présence de toutes les galaxies. En effet, les lois de la gravitation relativiste enseignent que la matière attire la matière mais dévie aussi la trajectoire de la lumière. Loin d'être un défaut, cet effet se révèle pour les « planckien(ne)s » un outil précieux pour tracer la distribution de la matière.



Les photons du rayonnement fossile suivent une trajectoire affectée par la présence des concentrations de matière.

Crédits : ESA - collaboration Planck

De façon remarquable, l'observation du rayonnement fossile permet de connaître l'Univers quelques milliards d'années après que ce rayonnement est émis.

Le satellite a par ailleurs permis de dresser un **jeu inédit de cartes** figurant la répartition sur la route céleste de phénomènes précieux pour comprendre la physique qui régit l'évolution de l'Univers : taux de monoxyde de carbone (un traceur de la poussière des amas de galaxies) ; effet Sunyaev-Zeldovitch (lire ci-dessous) ; potentiel gravitationnel (masses additionnées de la matière ordinaire et de la matière noire) et fonds diffus infrarouge (luminosité cumulée des galaxies).

Au sein des galaxies se trouvent des zones de matière dense et froide. Cependant, entre les galaxies d'un amas, la matière est très ténue mais très chaude. Le rayonnement fossile est réchauffé lorsqu'il traverse ces zones. C'est **l'effet Sunyaev-Zeldovitch**. En étudiant les altérations locales du spectre d'émission du rayonnement fossile - et Planck a détecté plus de 1200 amas de galaxies - on peut alors déterminer les propriétés de ce gaz chaud, la façon dont il se répartit entre les galaxies et l'utiliser comme traceur de la distribution de matière noire.

Des groupes de travail de quelques chercheurs ont pris en charge chacune de ces études. Laurence Perotto (LPSC) et Nicolas Ponthieu (IPAG), chercheurs CNRS grenoblois, ont joué un rôle important dans la reconstruction de la carte du potentiel gravitationnel ou celle du fond diffus infrarouge. De nombreux doctorants et post-doctorants de ces laboratoires, encadrés par l'équipe grenobloise, ont également largement contribué au cours des dernières années à ces études de l'effet Sunyaev-Zeldovitch ou de l'émission du monoxyde de carbone.

Un modèle qui marche incroyablement bien

Le modèle cosmologique standard (ou modèle de concordance), érigé au long du XXème siècle sur la base de la relativité générale, sort renforcé de sa mise à l'épreuve avec les observables du plus pointu des instruments.

« Les points s'alignent parfaitement sur la courbe, c'est juste hallucinant ! » s'exclame François Bouchet. Tous les membres de la collaboration Planck font le même constat : Planck a confirmé au-delà des espérances l'édifice théorique sur lequel cosmologistes et astrophysiciens s'appuient pour décrire l'évolution de l'Univers.

C'est d'abord le scénario de la genèse de l'Univers qui se trouve conforté, par le tableau « impressionniste » du rayonnement fossile. « La carte de Planck colle parfaitement à la théorie ; les gradients de température correspondent exactement à ceux prédits par la théorie » relate François Bouchet.

Ce qui laisse supposer que les scientifiques ont correctement décrit ce qui constituait l'Univers avant même la création de la matière.

C'est au tour de chacune des étapes de l'histoire de l'Univers de se trouver ensuite confirmée avec une précision qui ne cesse d'étonner : inflation, condensation de la matière à partir des fluctuations originelles, structuration des halos de poussières et formation des galaxies, etc.

**« Les données
dont nous rêvions sont là »
s'exclame François Bouchet**

Dans ce modèle standard, l'Univers se décrit avec 6 paramètres seulement (parmi lesquels figurent les trois ingrédients). Une recette éprouvée puisqu'en jouant quelque peu sur les proportions des ingrédients, les cosmologistes sont aisément parvenus à lui faire épouser les mesures astronomiques issues de Planck ! En ajustant au passage ces paramètres qui régissent la marche du monde et les caractéristiques qui en découlent, le bilan énergétique de l'Univers (composition matière-énergie), son âge et sa vitesse d'expansion ont ainsi légèrement changé. Mais au final, rien de révolutionnaire : Planck confirme notre compréhension du cosmos au travers de... seulement six paramètres.

Aucune des nombreuses extensions du modèle standard testées (nouveau neutrino, forme plus compliquée du spectre des fluctuations, géométrie non plate...) n'a indiqué une quelconque préférence des observations pour un modèle plus complexe. Astronomiquement simple !

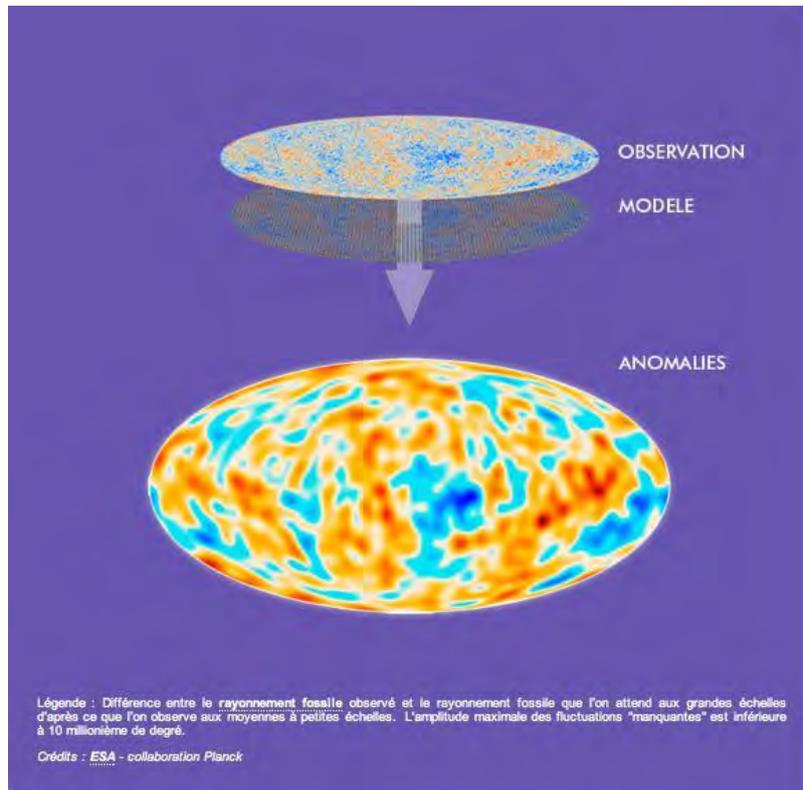
2 – Ce qu'il reste à écrire

« La fraction de ce qu'on ne comprend vraiment pas est en baisse ! » clament les « planckien(ne)s ». Mais alors, les cosmologistes peuvent-ils aller plus loin ? Oui, répondent-ils en cœur, la cosmologie n'en reste pas là, car...

Une ombre au tableau...

A première vue, tout était parfait. Mais à y regarder de plus près, les cosmologistes ont détecté 3 défauts. La peinture en majesté de l'Univers offerte par Planck se voit entachée par trois anomalies qui semblent tirailler le modèle de concordance...

Tout d'abord, notre Univers observable aux très grandes échelles n'est en fait que marginalement compatible avec ce modèle. Ce dernier fonctionne remarquablement bien pour expliquer l'histoire des galaxies et amas (comparer leurs embryons à ce qu'ils sont devenus), mais quand on l'extrapole aux plus grandes structures, alors des anomalies, petites mais significatives, apparaissent.



L'intensité observée est inférieure de 10% aux prédictions de l'Inflation et les très grosses tâches ne sont pas aussi nombreuses que prévu. Un mystère qu'aucune variante du modèle actuel⁵ ni aucun modèle alternatif envisagé jusque-là ne parvient à expliquer aujourd'hui. Cette observation ne pourrait être qu'un simple effet du hasard - les « planckien(ne)s » estiment à une chance sur 100 la probabilité que ce soit le cas - mais ce pourrait également être l'indice d'un nouvel ingrédient, encore inconnu, à ajouter au modèle de notre Univers !

Par ailleurs, Planck confirme avec certitude l'existence de quelques anomalies observées par le passé, dont une mystérieuse asymétrie des températures moyennes observées dans des directions opposées et l'existence d'un point froid.

La dissemblance des deux hémisphères du fond diffus semble entrer en contradiction avec le principe copernicien à la base de la relativité générale, selon laquelle l'Univers est isotrope à grande distance, c'est à dire qu'il ne présente aucune direction privilégiée.

Et comment expliquer cette région de 5 degrés sur le ciel située au sud de l'axe de la Voie lactée, baptisée « cold spot » (point froid) qui affiche un déficit de 70 microkelvins ?

Des failles dans le modèle standard ? Le débat est ouvert ! Une chose est sûre, la communauté scientifique va s'emparer de ces observations singulières, qui révéleront - qui sait ? - des régularités insoupçonnées... Il faudra sans doute attendre que Planck livre sa carte de la polarisation du rayonnement fossile pour y voir plus clair.

Encore un peu de patience !

Planck n'a pas encore délivré tous ses résultats ! Ces premiers résultats ont été obtenus avec seulement la moitié des données de l'instrument HFI et un quart de celles de l'instrument LFI qui devrait achever son huitième et dernier balayage complet du ciel... en août prochain.

« Nous avons montré que dans un cadre qui suppose l'inflation, Planck permet de la caractériser avec une précision inégalée, précise Jean-Loup Puget. Mais nous n'aurons de preuve de son existence qu'à la condition de détecter les ondes gravitationnelles qui sont censées avoir pris corps en son sein ».

Des ondes qui pourraient avoir imprimé leur marque dans la polarisation du CMB, mesurée elle aussi par Planck.

⁵ via l'ajout d'une nouvelle famille de neutrinos, la modification des propriétés de la matière, de l'énergie noire ou de la courbure de l'Univers, etc. Sauf que pour l'heure, les modélisations résultantes sont pires. Cela ne veut pas dire que le modèle est faux, mais qu'il est incomplet.

Mais il faut attendre encore un an avant que soit publiée la carte de la polarisation de la lumière du rayonnement fossile... Les membres de la collaboration Planck sont déjà en train de s'atteler à faire parler cette seconde moitié des données recueillies par le satellite, et le travail ne fait que commencer ! La part polarisée ne représente qu'1% environ du signal du rayonnement fossile, c'est pourquoi il faut encore quelques mois de travail aux chercheurs pour en extraire de façon fiable tous les secrets.

S'il est trop tôt pour analyser les cartes de la partie polarisée du signal, les « planckien(ne)s » ont pu en revanche déduire des observations en température ce que l'on s'attend à observer en polarisation et le comparer à ce que l'on observe effectivement (polarisation du signal cosmologique). Cette première analyse montre que les données de Planck sont remarquablement cohérentes avec celles sur l'intensité du rayonnement fossile aux échelles correspondantes aux futurs amas de galaxies.

Mais rendez-vous est pris pour le prochain épisode en 2014, avec une analyse plus complète de la polarisation, ainsi que d'autres résultats de la mission Planck !

Une théorie à compléter

Si les observations de Planck jettent pour la première fois un pont entre les sciences de l'infiniment grand et de l'infiniment petit, que sont cosmologie et physique quantique, il reste qu'à lui seul, le modèle cosmologique standard ne répond pas à toutes les questions de la physique, tel un Graal.

Or, plus le regard porté sur le fin fond du cosmos et des âges s'aiguise, plus les mystères de la physique s'avivent !

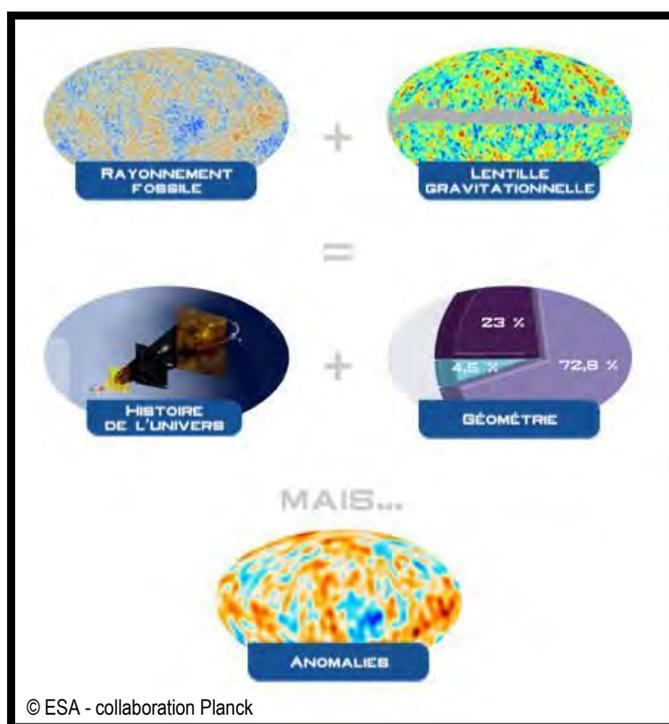
Que sont ces matière et énergie noires que les cosmologistes ont eu besoin d'introduire comme « ingrédients » mais qu'aucun accélérateur de particules n'a encore réussi à produire ? Si Planck en confirme l'existence, il n'apporte aucune réponse quant à leur nature.

Quelle est la force physique responsable de l'inflation originelle dont Planck renforce l'hypothèse ? Peut-on la détecter sous la forme d'un « inflaton » à l'instar du boson de Higgs découvert au LHC du CERN ?

Comment concilier relativité générale et physique quantique ?

Le grand livre de l'histoire de l'Univers reste ouvert !

Les résultats de Planck en bref



Pour aller plus loin

Ces résultats sont décrits de manière approfondie dans les onglets (niveaux averti & expert) de <http://public.planck.fr/resultats>

III – Les clés de la réussite de Planck

Avec ce satellite, l'Europe prétend être le leadership dans une science jusqu'ici dominée par les équipes américaines. Mais quelle a été la clé de ce succès ?

La définition de la mission résulte de la mise en commun de multiples compétences pour maximiser le retour scientifique final. Le concept de l'instrument HFI découle de l'émergence de techniques instrumentales nouvelles. Elles sont rassemblées dans une architecture totalement novatrice, qui entrelace optique et empilement cryogénique. Cette architecture est le fruit de 15 ans de travail et d'expérience, ainsi que de réflexions sur la transposition des concepts pour l'espace. L'optimisation du retour scientifique requiert de plus la prise en compte globale du contexte astrophysique (émissions autres que celle du rayonnement fossile) et des avancées du traitement des données. Leur conception est issue de la synthèse des acquis de la décennie précédente.

Planck, l'héritier européen d'une histoire qui fut jusqu'ici essentiellement américaine :

- L'expansion de l'Univers ?
Découverte par Edwin Hubble en Californie en 1929.
- Le rayonnement fossile ?
Découvert par les chercheurs américains Arno Penzias et Robert Wilson en 1964.
- La première « photographie » de l'Univers primordial ?
Réalisée par le satellite américain Cobe en 1993.
- La plus récente et précise image de ce rayonnement cosmologique ?
Réalisée par le satellite américain WMAP en 2003...

1 – Une prouesse technologique

Lorsqu'il démarre en 1993, le projet de ce satellite paraît extrêmement ambitieux : dresser la carte "ultime" de la plus ancienne image de notre univers. « *Le rayonnement fossile a une température de 2,73 kelvins, soit -270,42 °C, et notre but était de mesurer des variations de température de quelques millièmes de degré !* » se souvient François Bouchet, co-responsable de l'instrument haute fréquence HFI de Planck.

Les chercheurs imaginent alors un satellite doté de deux instruments travaillant sur des longueurs d'onde différentes dont l'un, HFI, devrait être composé de quelques dizaines de bolomètres de type « toile d'araignée » fabriqués au Jet Propulsion Laboratory (Caltech/JPL) aux États-Unis.

Alors que le satellite COBE vient de dresser la première carte du rayonnement fossile, Jean-Loup Puget, futur responsable de Planck-HFI et Directeur de l'Institut d'astrophysique spatiale d'Orsay, se demande comment faire fonctionner dans l'espace ces bolomètres. En effet, ce sont les seuls détecteurs susceptibles de capter avec assez de sensibilité les photons fossiles aux fréquences les plus intéressantes. La sensibilité exigée est phénoménale : il faut donc, pour les capter avec précision, que ces détecteurs soient refroidis à un dixième de degré au-dessus du zéro absolu !

« *Pour détecter de très faibles signaux comme le rayonnement de galaxies lointaines ou le passage de particules élémentaires, il faut refroidir les instruments, explique Alain Benoît. Sinon, leur agitation thermique masque les signaux qu'on veut observer.* » Pour se rapprocher de la limite du zéro absolu (0 kelvin, soit -273,15 °C), on utilise le plus souvent de l'hélium liquide. « *Un bain d'hélium permet de refroidir jusqu'à 4 kelvins. Si on pompe le gaz liquéfié pour le détendre, comme dans un réfrigérateur, on peut descendre jusqu'à 1 K.* »

Problème : pour faire ce type de refroidissement dans l'espace, aucun procédé n'était disponible...

La solution viendra de Grenoble !



BOLOMETRE
Capteur qui absorbe le rayonnement et mesure les très faibles variations de température qui en résultent.

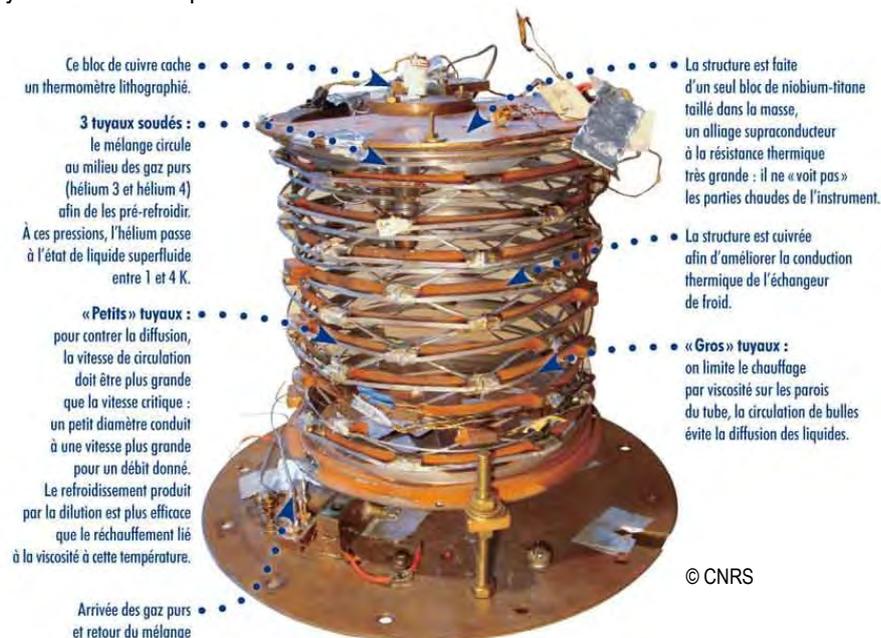
En effet, Jean-Loup Puget en parle à Alain Benoît, à l'époque chercheur au sein du Centre de recherches sur les très basses températures de Grenoble (devenu Institut Néel), car cet hyperfroid, Alain et son équipe savent l'obtenir en laboratoire. Cependant, leur méthode ne s'applique que sur Terre, avec la pesanteur. Le génie du chercheur grenoblois sera de s'en affranchir et d'inventer un système qui fonctionne dans un satellite, à zéro G !

« *Quand j'ai proposé dans les années 1990 de faire un cryostat à dilution à gaz perdu, on m'a pris pour un fou.* » En effet, ce dispositif de refroidissement repose sur la dilution de l'hélium 3 dans l'hélium 4, deux isotopes⁶ stables de l'hélium - mais l'hélium 3 est très rare et donc très onéreux. Jusqu'alors, ces cryostats fonctionnaient en circuit fermé, mais le système de recyclage pour séparer les deux formes d'hélium et les réutiliser n'était pas adapté à une utilisation dans l'espace. Un premier prototype développé par Alain Benoît est construit et breveté avec l'appui du Centre national d'études spatiales.

C'est donc cette technologie nouvelle, un cryostat (système de refroidissement) à dilution hélium 3-hélium 4, qui constituera le troisième étage de la chaîne cryogénique de Planck. « *Le principe de ce dispositif est d'amener ces deux gaz dans le cryostat afin d'obtenir une dilution de l'hélium 3 dans l'hélium 4 à même de faire baisser la température de 1 kelvin à 0,1, puis de récupérer ce mélange pour refroidir, lors de la détente de ce liquide, l'enceinte extérieure de 4 kelvins à 1* », explique Alain Benoît, qui a obtenu en 2012 la médaille de l'innovation du CNRS pour cette invention. Une fois l'opération réalisée, les deux gaz sont simplement rejetés dans l'espace.



Un exemplaire de ce système équipe la mission Archeops d'étude du rayonnement cosmologique à bord d'un ballon stratosphérique⁷. Le succès de l'expérience, qui viendra confirmer en 2002 que l'Univers est plat, prouve alors que les responsables du satellite européen Planck ont eu raison de faire confiance à ce procédé innovant pour étudier le rayonnement émis par notre Univers dans son enfance.



Démonstrateur construit à l'Institut Néel par Alain Benoît, son équipe et les services techniques de son laboratoire.

⁶ Atomes dont le noyau possède le même nombre de protons mais un nombre de neutrons différent.

⁷ En fait, l'histoire est un peu plus longue !

Dans les années 1990, Alain Benoît et François-Xavier Désert, astronome à l'IAS, travaillent sur DIABOLO, premier instrument qui étudiera le rayonnement fossile en France. Construit principalement à Grenoble, cet instrument au sol utilisé sur le télescope de POM2 (LAOG) au Plateau de Bure et le télescope de 30 m (IRAM7) en Espagne a montré que le système de refroidissement par dilution mis au point par Alain Benoît et son équipe fonctionne sur un instrument à vocation d'astrophysique.

En 1998, le projet Planck est très retardé, Alain et François-Xavier décident alors de réaliser le premier vol suborbital du système de refroidissement par dilution, c'est-à-dire, vol avec gravité pour observer le rayonnement fossile. C'est le projet Archeops, « projet ballon » qui servira de test pour leur travail sur Planck.

En 2009, le lancement du satellite Planck est pour Alain Benoît et François-Xavier Désert l'aboutissement d'une dizaine d'années de travail. Après l'observation du rayonnement fossile faite à partir du sol avec Diabolo, puis réalisée en vol gravitationnel avec Archeops, c'est un vol « sans gravité » que le système de refroidissement conçu par Alain Benoît va connaître avec Planck, pour donner à François-Xavier toutes les données nécessaires à l'étude du rayonnement fossile émis moins de 400 000 ans après le Big-Bang.

Grâce à cette innovation, la caméra HFI détient le record de froid pour un instrument spatial, avec un cryostat refroidi pendant près de 1000 jours à cent milli-kelvins, soit -273,05°C !

Ce système breveté est sans concurrence mondiale. La construction de l'étage cryogénique à 0.1 kelvin qui a refroidi les détecteurs de l'instrument HFI a été confiée à l'industriel Air Liquide à Sassenage, en Isère.

L'avenir de cette instrumentation de haute résolution

Alain Benoît vient, avec son collègue Philippe Camus et l'appui de la firme Air liquide, de breveter un nouveau système de dilution pour les cryostats de satellites. Objectif : allier la simplicité et la fiabilité du système à dilution démontrées lors de la mission Planck avec l'autonomie d'un dispositif en circuit fermé qui permet d'économiser l'hélium 3, la forme très rare de cet élément utilisée dans les cryostats à dilution.

Alain Benoît et son équipe participent également activement à la conception des caméras et de leur électronique : des matrices de bolomètres - des cristaux dont l'échauffement par absorption du rayonnement produit un signal électrique. Ou plus récemment des « Kids », des éléments supraconducteurs qui résonnent en fonction des ondes électromagnétiques qu'ils reçoivent, et dont le procédé de fabrication permet de construire des caméras à haute résolution : « nous allons nous attaquer à la conception d'une caméra de quatre mille pixels », annonce le physicien.

Alain Benoît n'hésite pas à rendre hommage à sa discipline: **parfois considérée comme le parent pauvre de la recherche, l'instrumentation est pourtant un facteur clé dans la réussite d'une expérience scientifique.** « *Les étudiants ne le comprennent pas toujours. Un stagiaire nous a demandé un jour pourquoi il fallait un diplôme de haut niveau pour remplir des réservoirs d'hélium. Mais notre travail ne se limite pas à cela, loin de là. Pour faire de bons instruments, il faut bien connaître les phénomènes que l'on étudie. Et cela passe par une collaboration étroite avec les utilisateurs. Les astrophysiciens l'ont bien compris, et ils nous soutiennent depuis longtemps.* »

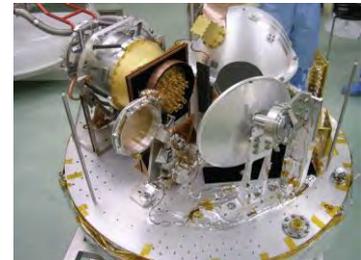
**« Les expériences spatiales ne seront plus limitées par l'autonomie d'un système de refroidissement. »
annonce Alain Benoit**

2 – HFI, l'instrument du succès

Fiche technique

Il est composé de bolomètres observant le ciel de 100 à 857 GHz et fonctionnant à une température de 0,1 K ; sa résolution angulaire est de 5 minutes d'arc ; sa sensibilité en température est de 5 μ K à 100 GHz.

L'instrument est basé sur l'utilisation de bolomètres à très basse température (0,1 K), dont la sensibilité sera limitée principalement par le bruit de photons du fond diffus lui-même et, aux courtes longueurs d'onde, par le bruit des photons du rayonnement thermique du télescope, bien que celui-ci ait une faible émissivité et soit refroidi à 50 K. Il approche donc la limite de sensibilité théorique pour ce type de mesures.



Etalonnage HFI - © CNRS

La stratégie d'observation est basée sur la rotation du satellite sur lui-même à un tour par minute : les détecteurs décrivent ainsi de grands cercles sur le ciel dans une direction approximativement perpendiculaire à la direction du soleil, depuis le point de Lagrange L2 du système Terre-Soleil. Le satellite suit le mouvement de la Terre autour du Soleil, tout en gardant ces astres chauds « dans le dos », ce qui lui permet d'observer la quasi-totalité de la voûte céleste en six mois.

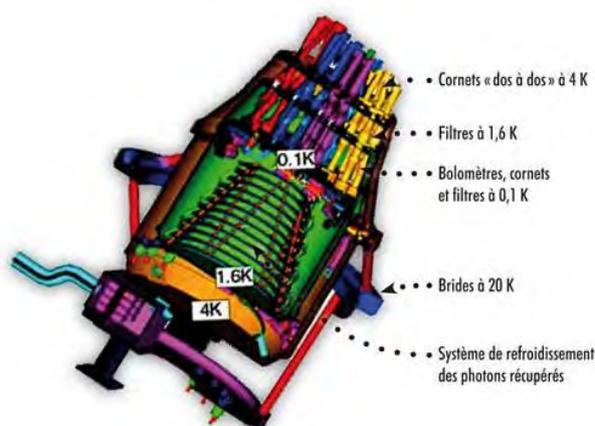
Les meilleurs détecteurs disponibles à l'heure actuelle ont un absorbant en forme de grille et un thermomètre en germanium dopé par transmutation (NTD). Ils sont développés par Caltech/JPL.

Les électroniques de lecture sont développées en France (CESR⁸) et constituent un apport essentiel au projet.

Le refroidissement des bolomètres à 0,1 K, nécessaire à l'obtention des performances requises, est assuré grâce au réfrigérateur à dilution en boucle ouverte (invention CNRS/CRTBT⁹ couverte par un brevet CNES).

D'importantes réserves d'hélium 3 et d'hélium 4 comprimés dans des sphères donnent une autonomie d'au moins 18 mois au réfrigérateur.

De cette exigence de 0,1 K au plan focal découle toute l'architecture instrumentale HFI. Ceci est obtenu par le pré-refroidissement passif de la charge utile et du télescope à moins de 50 K (-213°C). Deux refroidisseurs actifs, en cascade, baissent encore cette température à 18 K puis à 4 K, température à partir de laquelle démarre le réfrigérateur à dilution jusqu'à 0,1 K. L'électronique et l'informatique embarquées de la machine cryogénique qui fournit la température de 18 K, ainsi que l'électronique de la dilution à 0.1 K ont été développées au LPSC.



Instrument HFI - © ESA/Thalès Alenia Space

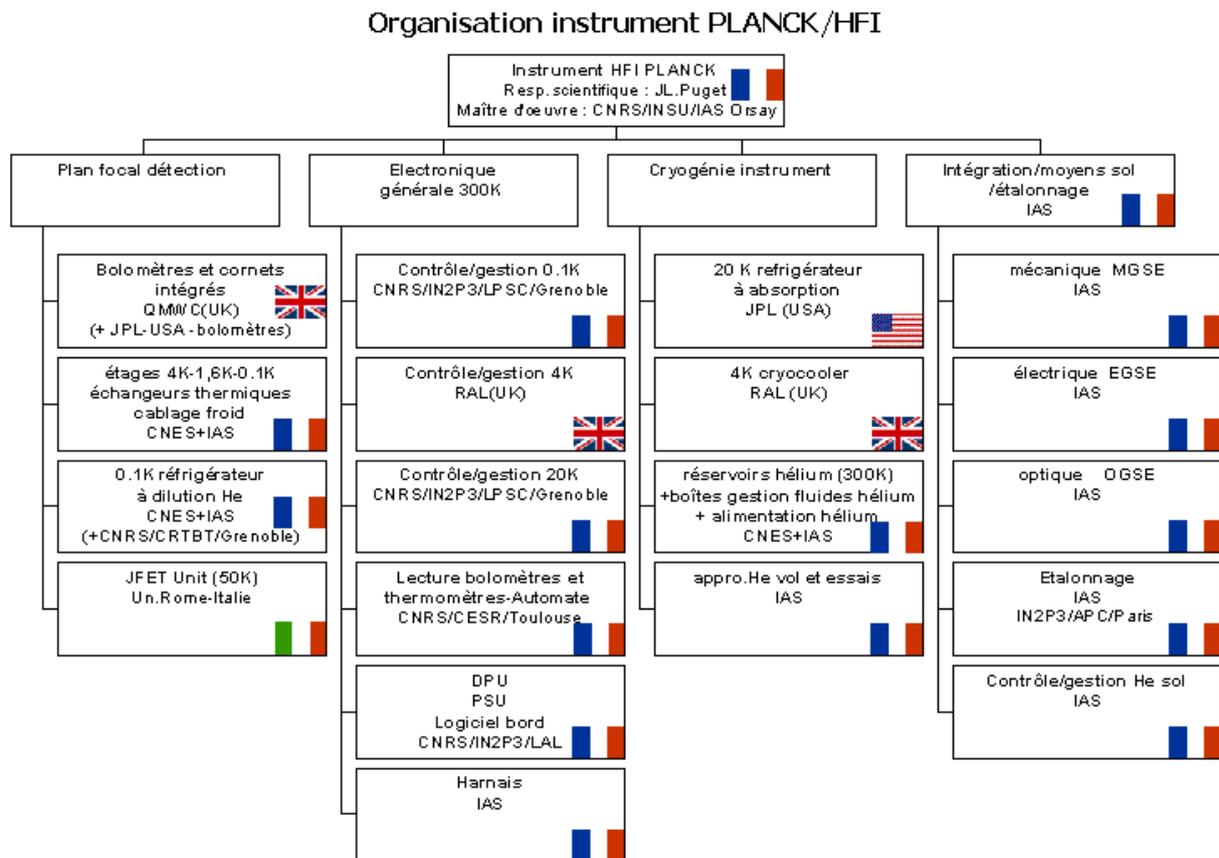
Le télescope, d'un diamètre utile de 1,5 m, est du type grégorien hors axe sans obstruction, de façon à minimiser la lumière parasite produite par diffraction. Le couplage des détecteurs avec le télescope est assuré par des cornets corrugués (striés), qui définissent des faisceaux gaussiens, et permettent un strict contrôle de la lumière parasite. Des filtres interférentiels permettent de contrôler le domaine spectral atteignant les bolomètres. Leur répartition sur les étages cryogéniques à 0,1 K ; 1,6 K ; et 4 K permet de limiter les charges thermiques sur les étages cryogéniques les plus sensibles.

⁸ CESR : Centre d'étude spatiale des rayonnements (CNRS/Univ.Toulouse3)

⁹ CRTBT : Centre de recherches sur les très basses températures (depuis 2001, fusionné dans l'Institut Néel – CNRS)

Equipe

L'instrument HFI (*High Frequency Instrument*) a été conçu et assemblé sous la maîtrise d'œuvre de l'Institut d'Astrophysique Spatiale d'Orsay (IAS – CNRS/Paris Sud11), avec un financement du CNES et du CNRS.



En tout, la construction et l'exploitation de HFI pour 140 millions d'euros ont mobilisé 200 chercheurs dans le monde.

Un tiers d'entre eux œuvrent dans dix laboratoires du CNRS, du CEA et des universités.

⇒ (voir les laboratoires français impliqués p. 23).

3 – La collaboration Planck

Comment travaille-t-on à 500 personnes ?

La collaboration Planck comprend tous les scientifiques qui ont contribué au développement de la mission et qui ont participé à l'exploitation scientifique des données de Planck durant la période propriétaire. Cette période pendant laquelle seuls les membres de la collaboration Planck ont accès aux données des instruments est censée prendre fin avec la mise à disposition des produits scientifiques à l'ensemble de la communauté 3,5 ans après le début des observations, soit en janvier 2013¹⁰.

Chaque individu est membre d'un ou plusieurs consortia scientifiques parmi :

- le consortium HFI, sous la responsabilité de J.L. Puget de l'Institut d'Astrophysique Spatiale (Orsay, France) et la co-responsabilité de F. Bouchet de l'Institut d'Astrophysique de Paris (Paris, France) ;
- le consortium LFI, sous la responsabilité de N. Mandolesi de l'Istituto di Astrofisica Spaziale e Fisica Cosmica (Bologne, Italie) et la co-responsabilité de M. Bersanelli de Dipartimento di Fisica Universita' degli Studi di Milano (Milan, Italie) ;
- le consortium DK-Planck lié aux réflecteurs du télescope, conduit par H.U. NVorgaard-Nielsen du Danish National Space Institute (Copenhagen, Danemark) ;
- le bureau scientifique Planck (PSO pour Planck Science Office) de l'ESA, le responsable scientifique du projet étant J. Tauber.

Les instruments HFI et LFI, ont été conçus, construits, testés et livrés à l'ESA par des équipes dédiées sous la direction des responsables scientifiques de HFI et de LFI (respectivement majoritairement français et italiens) et des responsables de projet.

Une équipe de dix personnes partagent les responsabilités de la collaboration Planck. Cette « Science Team » est constituée du responsable ESA du projet Planck, du responsable du télescope et pour chaque instrument : du responsable scientifique, du responsable de l'exploitation scientifique, du responsable de l'instrument et de l'expert scientifique des cartes du ciel.

Le financement du projet

Planck est un projet de l'agence spatiale européenne (ESA). Les instruments sont fournis par deux consortia scientifiques financé par des états membres de l'ESA (en particulier les pays responsables : France et Italie) avec des contributions de la NASA (Etats-Unis) ; les réflecteurs du télescope sont fournis par une collaboration entre l'ESA et un consortium scientifique conduit et financé par le Danemark.

L'ESA a géré ce projet depuis sa conception en 1993, financé le développement du satellite, son lancement et ses opérations. Le projet LFI, qui inclut le développement de l'instrument et son opération, le traitement des données et l'analyse scientifique, est développé par un consortium international conduit par l'Italie et impliquant la Finlande, l'Allemagne, la Norvège, l'Espagne, la Suisse, le Royaume-Uni et les Etats-Unis. La contribution italienne est financée par l'agence spatiale italienne (ASI) et l'INAF (Istituto Nazionale di Astrofisica qui joue un rôle similaire à celui du CNRS pour HFI).

L'instrument HFI et le centre de traitement des données associé ont été conçus, construits et sont opérés par un consortium international de laboratoires, universités et instituts, avec d'importantes contributions de l'industrie, sous la conduite de l'institut du Principal Investigator (l'Institut d'astrophysique spatiale d'Orsay). Ils sont financés en particulier par le CNES et le CNRS en France, la NASA aux Etats-Unis, le STFC au Royaume-Uni et l'ASI en Italie.

¹⁰ Il y a eu un peu de retard et la publication n'a eu lieu qu'en mars 2013. Cependant les données ont été auparavant livrées à l'ESA en décembre 2012, donc en accord avec un calendrier décidé près de 20 ans plus tôt !

Les principales agences de financement et instituts scientifiques participant à la collaboration sont :



Qui met en œuvre ?

- ESA (maître d'ouvrage du programme Herschel/Planck)
- CNRS-INSU / IAS et CNES (maîtres d'œuvre de l'instrument HFI)
- ASI (Agence Spatiale Italienne, maître d'œuvre de l'instrument LFI)
- Thales Alenia Space (maître d'œuvre du satellite et responsable de l'intégration des instruments et des tests)
- Leurs sous-traitants industriels (Ex : Air Liquide pour la cryogénie à 0,1K)
- Et bien sûr, les laboratoires des scientifiques (CNRS, Universités, ...)

Les partenaires de la réalisation :

- 13 laboratoires européens et nord-américains dont 5 en France (3 à Grenoble)
- 5 industriels européens et nord-américains principaux (dont 1 en France : Thalès Aliena Space), et environ 80 sous-traitants (dont 1 à Grenoble : Air Liquide)
- 2 agences françaises : le CNES et le CNRS
- Plus de 70 ingénieurs, techniciens et administratifs en France

Le consortium scientifique :

- 25 laboratoires européens et nord-américains (dont 9 en France)
- Plus de 200 scientifiques

4 - La contribution de la recherche française dans la mission Planck

La France est leader de l'instrument haute fréquence Planck-HFI, essentiel pour les résultats cosmologiques : sa construction a coûté 140 millions d'euros et mobilisé 200 chercheurs dans le monde dont 80 chercheurs de dix laboratoires du CNRS, du CEA et d'universités, ainsi que de nombreux ingénieurs et techniciens.



Photo de groupe à l'occasion du « Core Team » de HFI à Paris le 19 janvier 2012.

La France a assuré plus de 50% du financement de cette construction ainsi que celui du traitement de ses données : ce financement provient pour moitié du CNES, pour moitié du CNRS et des universités. Elle participe également au financement de la mission elle-même via sa contribution financière au programme scientifique de l'ESA, soit 15% du coût de la mission.

Une contribution française essentielle au projet Planck a été la fourniture du système de refroidissement à 0.1 degrés au-dessus du zéro absolu de l'instrument HFI. Ce système, qui a fait l'objet d'un brevet CNES, a été inventé par Alain Benoît (CNRS) de l'Institut Néel (ce qui lui a valu la médaille de l'innovation 2012 du CNRS) et développé

par la société Air Liquide, à Sassenage. Grâce à cette innovation, la caméra HFI détient le record de froid pour un instrument spatial, avec un cryostat refroidi pendant près de mille jours à $-273,05^{\circ}\text{C}$.

L'exploitation des résultats scientifiques est assurée majoritairement par le CNRS, avec notamment Jean-Loup Puget (de l'IAS), « Principal Investigator » d'HFI, et François Bouchet (de l'IAP), « Co-Principal Investigator » :



Jean-Loup Puget
Directeur de recherche CNRS
Responsable scientifique du projet



François Bouchet
Directeur de recherche CNRS
Responsable de l'exploitation scientifique

Les laboratoires français impliqués

- APC, AstroParticule et Cosmologie (Université Paris Diderot-Paris 7, CNRS, CEA, Observatoire de Paris), à Paris : *développement de moyens de tests*
- IAP, Institut d'Astrophysique de Paris (CNRS, UPMC) : *développement des objectifs scientifiques et conception du traitement des données*
- IAS, Institut d'Astrophysique Spatiale (Université Paris-Sud, CNRS), à Orsay : *conception initiale et responsabilité scientifique et technique de l'instrument*
- IRAP, Institut de Recherche en Astrophysique et Planétologie de l'Observatoire Midi-Pyrénées (Université Paul Sabatier Toulouse III, CNRS), à Toulouse : *développement de l'électronique des détecteurs*
- CEA-IRFU, Institut de Recherche sur les Lois Fondamentales de l'Univers du CEA, à Saclay : *études de compatibilité électromagnétique*
- LAL, Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire (CNRS, Université Paris-Sud,), à Orsay : *développement de l'ordinateur de bord*
- LERMA, Laboratoire d'Etude du Rayonnement et de la Matière en Astrophysique (Observatoire de Paris, CNRS, ENS Paris, Université Cergy Pontoise, UPMC), à Paris : *modélisation de l'instrument*
- CC-IN2P3 du CNRS, Centre de Calcul de l'Institut national de physique nucléaire et de physique des particules (IN2P3) du CNRS : *participe au stockage et au traitement des données.*

Zoom sur l'implication grenobloise

Laboratoire de Physique Subatomique et de Cosmologie (LPSC : UJF/CNRS/G-INP)

Outre le traitement des données à venir, les équipes du LPSC ont eu la responsabilité, sous la direction de Daniel Santos, de deux systèmes électroniques et d'un logiciel de contrôle embarqués à bord du satellite (électronique de régulation de l'étage à 20 K, logiciel de contrôle et de pilotage du cryogénérateur, l'électronique de la dilution qui assure le refroidissement des bolomètres). Il a également développé des simulateurs de l'interface entre le satellite et la machine cryogénique à 20 K, ainsi que l'application de contrôle de ce cryogénérateur qui a été utilisé au Centre des Opérations. [Voir les acteurs de Planck au LPSC](#)

Institut Néel (CNRS)

Alain Benoît, son équipe et les services techniques de ce laboratoire sont à l'origine du système innovant de refroidissement de Planck (dilution Helium3-Helium4). *cf. p.17*

Institut de Planétologie et d'Astrophysique de Grenoble (IPAG-OSUG : UJF/CNRS)

Aux côtés de collègues travaillant sur Herschel - le compagnon de voyage de Planck qui donnera des informations sur la formation des étoiles, François-Xavier Désert et Nicolas Ponthieu, chercheurs à l'IPAG, ont travaillé sur l'étalonnage du satellite Planck et participent à l'analyse des données de cette mission.

IV - En savoir plus

L'économie de la connaissance

Planck est un projet spatial faisant intervenir de très nombreux partenaires : agences spatiales européennes et nationales (ESA, CNES, ASI...), industriels (Thales Alenia Space, Air Liquide...) et organismes de recherche (laboratoires du CNRS, des Universités...).



1 euro est environ la contribution financière par citoyen européen pour l'ensemble du projet. Il bénéficie en retour des progrès réalisés dans la connaissance du cosmos et plus ou moins directement des innovations technologiques initialement liées au projet.

Contacts scientifiques locaux

- Cécile Renault, chercheuse CNRS au Laboratoire de physique subatomique et de cosmologie (LPSC : UJF / CNRS / Grenoble INP), membre de la collaboration Planck
04 76 28 40 13 - rcecile@lpsc.in2p3.fr
- Alain Benoît, directeur de recherche à l'Institut Néel (CNRS / UJF) :
04 76 88 90 72 - alain.benoit@grenoble.cnrs.fr
- François-Xavier Désert, astronome à l'Institut de Planétologie et d'Astrophysique, Observatoire des Sciences de l'Univers de Grenoble (IPAG-OSUG : CNRS / UJF), médaille d'argent CNRS en 2008 :
04 76 63 55 12 - francois-xavier.desert@obs.ujf-grenoble.fr

Liens et ressources complémentaires

- Planck HFI : <http://public.planck.fr> | <http://public.planck.fr/resultats>
- CNES, Centre national d'études spatiales : <http://smc.cnes.fr/PLANCK/Fr/>
- ESA, Agence spatiale européenne : <http://planck.esa.int>
- CNRS :
Les observations depuis l'espace :
http://www.insu.cnrs.fr/a1506_observations-depuis-espace.html
Communiqué de presse « Planck dévoile une nouvelle image du Big Bang » :
<http://www2.cnrs.fr/presse/communiqu/3039.htm>
Podcast du débat de mars 2013 « Big Bang : Planck va-t-il nous révéler l'origine de l'Univers ? » :
<http://www.cnrs.fr/lesgrandsdebats/spip.php?article111>
- Exposition itinérante : <http://public.planck.fr/stands.php>
- Science & Vie n°1148, mai 2012