

Archeops et Planck-HFI : L'étude du fond cosmologique

D. Santos, A. Garrigue, J.-C. Hamilton, J.F. Macías-Pérez, A. Pelissier, G. Perrin, N. Ponthieu, C. Renault, P. Stassi, M. Tristram, F. Vezzu, O. Zimmermann

Archeops is a balloon-borne experiment designed to measure the anisotropies of the Cosmic Microwave Background (CMB). The LPSC is deeply involved in full data analysis, going from raw data to angular power spectrum, through sky maps. Both temperature and polarization analyses have been performed and first results have been published. In parallel the Planck satellite mission is prepared.

► L'expérience Archeops

L'expérience Archeops vise à mesurer les anisotropies du fond de rayonnement cosmologique à 3 K (CMB pour Cosmic Microwave Background) avec une résolution angulaire de 10 minutes d'arc sur environ un quart de la voûte céleste. L'instrument est refroidi à 0,1 K par un système de dilution à cycle ouvert développé au CRTBT en vue d'applications spatiales, notamment du satellite Planck. La description de l'objectif scientifique, de l'instrument, le résumé des diverses campagnes de vol d'Archeops et les résultats sont disponibles sur le site www.archeops.org.

Archeops est une collaboration internationale entre le CNRS [SPM (CRTBT), IN2P3 (CdF, ISN, LAL, CSNSM), INSU (IAS, IAP, LAOG, CESR, OMP)], le CEA (SPP), l'Université La Sapienza (Rome, Italie), l'IROE-CNR (Florence, Italie), le Queen Mary College (Cardiff, UK), le California Institut of Technology (Pasadena, USA) et le Jet Propulsion Laboratory (Pasadena, USA).

Le second vol scientifique d'Archeops a eu lieu depuis Kiruna, au nord de la Suède, le 7 février 2001.

Au terme de 19 h de prise de données à 34 km d'altitude, la nacelle s'est posée en Russie à l'est de l'Oural. Le plan focal était composé de 8 photomètres à 143 GHz, 5 à 217 GHz, 6 polarisés à 353 GHz et 1 à 545 GHz, chaque pixel photométrique étant composé d'un bolomètre refroidi à 0,1 K, de filtres à 1,6 K et de cornets destinés à guider l'onde à 10 K. La mesure de l'intensité du rayonnement à différentes fréquences permet de séparer les contributions venant de l'atmosphère, de la poussière galactique et du CMB, chacune ayant une dépendance en fréquence particulière. La stratégie d'observation d'Archeops est différente de celle des autres expériences ballon : au lieu de regarder intensivement quelques pour cents de la voûte céleste, la nacelle tourne sur elle-même à la vitesse de 2 tours par minute avec une élévation constante de 41°. Les grands cercles ainsi obtenus ont permis de couvrir 30 % du ciel en 12 h, donnant ainsi accès au spectre de puissance angulaire de $l = 15$ à $l = 350$.

L'ensemble a été conçu comme un banc-test pour l'expérience Planck-HFI, que ce soit au niveau des détecteurs ou de la stratégie d'observation. Les années 2002 et 2003 ont donc été consacrées essentiellement à l'analyse des données obtenues au cours de ce vol, qu'il s'agisse des données polarisées ou non.

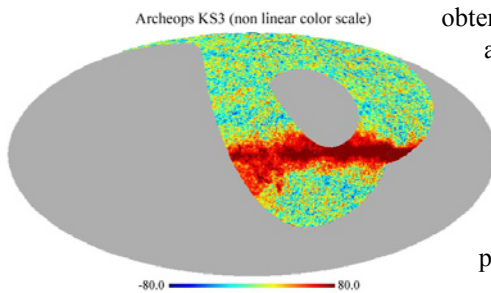


Figure 1

L'analyse des données

Les principales étapes de l'analyse sont :

- signaler et traiter les données manifestement corrompues ;
- réduire les effets systématiques ;
- étalonner en utilisant Jupiter, la Galaxie ou le dipôle cosmologique ;
- obtenir la direction de pointage des bolomètres à l'aide des données du senseur stellaire ;
- faire une carte par fréquence (environ 600 000 pixels) ;
- soustraire les composantes atmosphérique et galactique ;
- estimer le spectre de puissance angulaire du CMB ;
- en déduire des contraintes sur les paramètres cosmologiques.

Le laboratoire a été largement impliqué dans toutes ces étapes, à l'exception de la dernière.

En particulier des méthodes originales de suppression des signaux laissés dans les détecteurs par le rayonnement cosmique, d'estimation des constantes de temps des bolomètres, de modélisation des lobes [1], de filtrage, de soustraction de l'ozone et de la Galaxie, traitement du bruit non-stationnaire [2] ont été développées au laboratoire. L'ensemble de ces techniques est décrit dans [3] et [4]. La figure 1 est une carte présentant à la fois le plan galactique et les fluctuations du CMB à 143 GHz.

La détermination du spectre de puissance en température

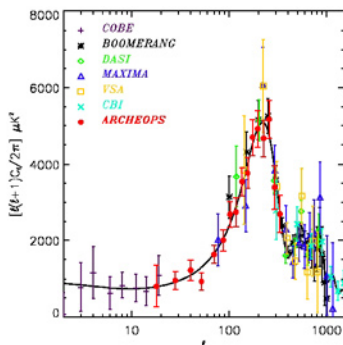


Figure 2

Les cartes obtenues à partir des deux détecteurs les plus sensibles à 143 et 217 GHz montrent des signaux compatibles avec des anisotropies primaires du fond diffus cosmologique. De plus ces signaux semblent incompatibles avec toute source astrophysique connue autre que le CMB. Le spectre de puissance angulaire de ce signal entre les multipoles $l = 15$ et $l = 350$ montre sans ambiguïté un pic vers $l = 200$. Ces résultats sont en accord avec les cosmologies motivées par des modèles d'inflation. Avec seulement une demi-journée d'observation de nuit, Archeops a fourni la meilleure description du premier pic acoustique et en particulier de sa montée à bas l disponible avant les résultats du satellite WMAP publiés en février 2003. Une batterie de tests permet d'estimer la

contribution des erreurs systématiques à une petite fraction des erreurs statistiques et de l'erreur en étalonnage de l'expérience. Le spectre de puissance publié [5] est présenté dans la figure 2. Les paramètres cosmologiques déduits de ce spectre et d'autres expériences [6] ont permis de mieux contraindre les modèles cosmologiques possibles et favorisent particulièrement les modèles inflationnaires.

Une méthode nommée Xspect, basée sur la combinaison optimale des cartes provenant de plusieurs détecteurs, est actuellement en développement [7]. Nous calculons les spectres de puissance croisés à partir d'un ensemble de cartes provenant de différents détecteurs ou différents instruments. Chaque spectre de puissance croisé est une estimation non biaisée des $C(l)$ tant que les bruits des détecteurs sont décorrélés. Les spectres sont alors combinés de façon optimale en un spectre de puissance et les erreurs calculées analytiquement. Cette méthode est testée sur les données de WMAP et sera appliquée à Archeops très prochainement. Elle permettra notamment l'utilisation de plus de bolomètres, ce qui réduira sensiblement les erreurs statistiques.

La détermination de la polarisation

Dès 1968, M. Rees [8] prédit que le CMB doit être polarisé par diffusion Thomson sur les électrons du plasma chaud qui constituait l'Univers au moment du découplage

matière-rayonnement. L'état de polarisation peut être caractérisé par les paramètres de Stokes Q , U (polarisation linéaire) et V (polarisation circulaire). Ces paramètres sont variables dans un repère lié à la direction d'observation, ils ne peuvent donc être exprimés dans un repère commun avec lequel on pourrait faire un développement en harmoniques sphériques similaire à celui employé pour l'étude des anisotropies de température. Pour y remédier, on bâtit à partir de Q et U deux nouvelles observables E et B par une projection de Q et U sur une base adaptée. Ces champs sont indépendants du repère d'observation, comme la température, mais conservent l'information sur la nature de la perturbation qui a engendré la polarisation des photons. En effet, une perturbation scalaire ne crée pas de mode B , contrairement aux ondes gravitationnelles primordiales. Les spectres de E et B sont naturellement sensibles aux paramètres cosmologiques : ils permettent donc d'obtenir une redondance avec les résultats obtenus à partir du spectre en température et de mieux contraindre ces derniers. Ainsi, malgré la faible amplitude du signal - typiquement 100 fois plus faible que l'amplitude des fluctuations de température - les anisotropies de polarisation contiennent des informations précieuses sur l'Univers primordial.

Le signal polarisé venant du CMB étant très faible, la mesure n'est pas accessible avec Archeops. Cependant, à 353 GHz, l'émission thermique de la poussière galactique domine celle du CMB au voisinage du plan galactique. Archeops a fourni les premières cartes à large couverture spatiale dans le domaine submillimétrique avec une résolution angulaire de 13 minutes d'arc et des détecteurs sensibles à la polarisation. Nous avons montré que l'émission diffuse dans le plan galactique dans la bande de longitude observée par Archeops était polarisée au niveau de 4-5 %, à l'exception de la région du Cygne. Son orientation est grossièrement perpendiculaire au plan galactique et orthogonale, comme attendu, à l'orientation de l'extinction polarisée de la lumière stellaire. Plusieurs nuages de quelques degrés carrés sont polarisés à plus de 10 %, suggérant ainsi un mécanisme efficace d'alignement des grains de poussière dans le milieu interstellaire. Nos résultats sont compatibles avec les modèles basés sur un fort champ magnétique cohérent coplanaire au plan galactique qui suivrait les bras spiraux, tel qu'observé dans des galaxies externes. La figure 3 présente le plan galactique vu à 353 GHz par Archeops. Cette étude a été le sujet d'une thèse [9] et d'une publication [10].

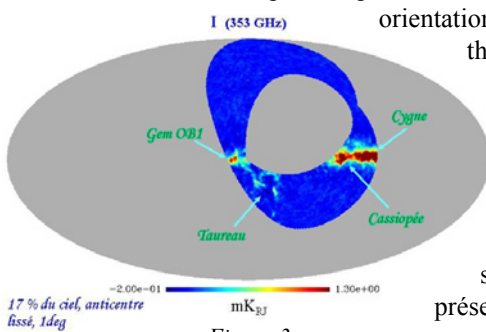


Figure 3

► L'expérience Planck-HFI

En 2007 sera lancé le satellite Planck (ESA) avec à son bord deux instruments : LFI (Low Frequency Instrument) et HFI (High Frequency Instrument). La communauté cosmologique française, dont le LPSC, est fortement impliquée dans HFI. La grande sensibilité de l'instrument ($\Delta T/T \sim 10^{-6}$ à 100 GHz), la couverture totale du ciel et la grande redondance obtenue lors des 18 mois de prise de données donneront accès au spectre des anisotropies de température de $l = 2$ à $l = 2000$ - les erreurs seront essentiellement dominées par le bruit de photons et la variance cosmique. Les premiers spectres en polarisation des modes E et B seront également obtenus. Une version de test de l'instrument ainsi que du code d'analyse doivent être livrés fin 2004 : la préparation de Planck est donc d'ores et déjà une activité importante du groupe.

Ce travail se répartit dans deux domaines : la polarisation avec notamment la fabrication des cartes polarisées et le traitement des données (signaux laissés par le rayonnement cosmique, décorrélation, mesure des lobes, etc). Nous mettons ainsi à profit l'expertise acquise sur Archeops au service de l'analyse de Planck dans le cadre du Niveau 2.

[1] M. Tristram, J.F. Macías-Pérez, C. Renault, J.-Ch. Hamilton, Phys. Rev. D (2003) soumis, astro-ph 03100260

[2] J.F. Macías-Pérez, en préparation « Wavelets analysis of CMB timelines. An application to the Archeops experiment »

[3] A. Benoît et al., en préparation « In-flight performance of the Archeops balloon experiment for mapping CMB anisotropies »

- [4] A. Benoît et al., en préparation « Data processing of the Archeops data and first maps »
 [5] A. Benoît et al., A&A 399 (2003) 19
 [6] A. Benoît et al., A&A 399 (2003) 25
 [7] M. Tristram, J.F. Macías-Pérez et al., en préparation « Xspect, estimating the angular power spectrum by cross-correlation »
 [8] M. Rees et al., Apl. J. 153 (1968) L1
 [9] N. Ponthieu, 2003, thèse de doctorat
 [10] A. Benoît et al., A&A (2003) accepté pour publication, astro-ph 0306222

► Planck-HFI : Électroniques de vol

D. Santos, G. Barbier, O. Bourrion, J. Bouvier, B. Boyer, R. Foglio, A. Garrigue, F. Pancher, P. Stassi, E. Vernay, C. Vescovi, F. Vezzu, O. Zimmermann

Our laboratory is engaged in the on board electronics of the PLANCK satellite, a ESA mission to measure the temperature and polarisation anisotropies of the cosmological microwave background. The LPSC has the responsibility of the analogic, digital and power electronics design, and the software of the sorption cooler electronics (SCE) controlling the sorption cooler compressors built by the Jet Propulsion Laboratory in Pasadena (USA) and assuring the 20 K temperature for LFI (Low Frequency Instrument) and HFI (High Frequency Instrument) instruments. The LPSC has also the responsibility of the analogic, digital and power electronics design, as well as the thermal and mechanical design and fabrication of the dilution cooler electronics (DCE) to perform the fluid control used by the dilution cryogenics made by Air Liquide (France), assuring a temperature of 100 mK on the HFI bolometers. To perform the different tests, we have to develop the different simulators (space-craft, compressors for the SCE, valves, sensors for the DCE), allowing to put the electronics in the equivalent circuits to study their behaviour and measure the different parameters to be checked (ranges, accuracies, noise, etc.).

Électronique du cryo-générateur à sorption (20 K)

Le laboratoire est fortement impliqué dans la conception, le suivi de la réalisation et les tests de l'électronique de pilotage et de contrôle du cryo-générateur à sorption construit par le Jet Propulsion Laboratory (JPL-NASA) pour la mission Planck. Le travail développé par l'équipe est décrit ailleurs par les différents services impliqués (Acquisition, Détecteurs Instrumentation, Électronique, Études et Réalisation Mécanique). Ce travail concerne la conception (électronique de puissance, analogique et digitale), le routage, l'étude mécanique et thermique des cartes et de la boîte, le suivi de fabrication, le simulateur de communication avec le satellite, le simulateur des éléments à commander du générateur, le logiciel de pilotage des simulateurs, la définition des connecteurs et des câbles cryogéniques et chauds et le logiciel de bord qui assurera le pilotage et le contrôle du cryo-générateur en vol aussi bien que les tests de validation de chaque modèle au JPL.

L'année 2002 a été cruciale pour le développement du premier modèle (EBB). Après une campagne de tests au LPSC du générateur et avec les simulateurs de communication, ce prototype a été couplé au cryo-générateur et testé au JPL, ainsi que la première version du logiciel de contrôle, pendant trois semaines en septembre 2002 (voir figure). Pendant cette période, les différents modes de fonctionnement ont également été explorés. Tous ces tests se sont déroulés avec succès.

Les modèles de qualification et de vol seront fabriqués par un sous-traitant choisi en avril 2003, qui nous a demandé une phase de description et de transfert d'informations. Cette phase a été finalisée avec succès en décembre 2003.

Le logiciel de bord a évolué également, et pour sa version de vol il a été écrit en suivant les règles fixées par l'ESA (European Space Agency). Nous allons tester cette version de vol pendant les prochains essais au JPL durant le mois de juillet 2004.

Électronique du cryo-générateur à dilution (100 mK)

L'électronique de contrôle des fluides ($^4\text{He} - ^3\text{He}$) du cryogénérateur à dilution qui assure une température de 100 mK, température nominale de fonctionnement des bolomètres de l'instrument HFI (High Frequency Instrument) de PLANCK, est sous la responsabilité de notre équipe au LPSC. Tout au long de ces deux dernières années, nous avons développé la conception (électronique de puissance, analogique et digitale), le routage, l'étude mécanique et thermique de la carte et de la boîte, le simulateur de communications avec le DPU (Data Processor Unit), la carte de simulation du comportement électrique des vannes et des senseurs de pression, la définition des câbles et des connecteurs. Pendant l'année 2004 nous allons tester et livrer le modèle CQM (Cryogenic Qualification Model) et le premier modèle de vol.

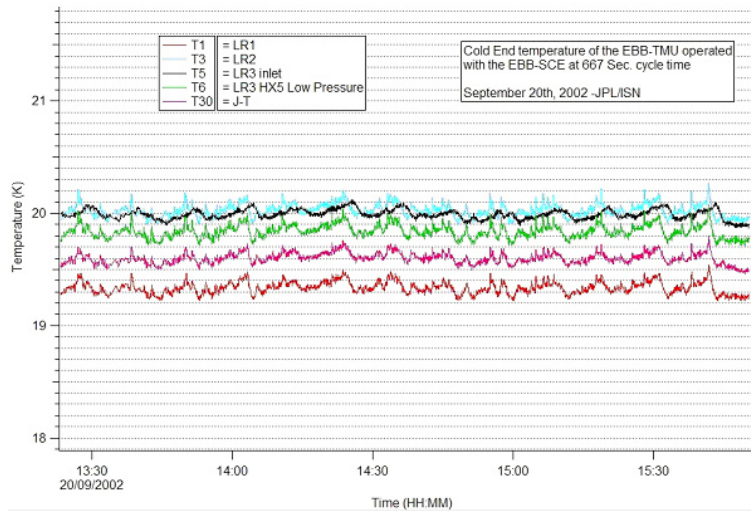


Figure 1