

Archeops

D. Santos, J. Aumont (th), J. Macías-Pérez, C. Renault, M. Tristram (th).

Archeops is a balloon-borne experiment designed to be the prototype of the HFI-Planck satellite with the purpose to measure the temperature angular power spectrum of the Cosmic Microwave Background (CMB) radiation at large and intermediate angular scales. Archeops consists of 4 frequency channels at 143, 217, 353 and 545 GHz permitting to separate CMB and foregrounds. In the last scientific campaign Archeops covered 30 % of the sky performing circular scans during 12 hours of night flight. In the last few years we have proceeded to the scientific exploitation of these data.

Archeops était une expérience ballon qui a volé à 35 km d'altitude afin d'observer les anisotropies du fond diffus cosmologique et les avant-plans entre 143 et 545 GHz. Elle a été un test grandeur nature de l'instrument hautes fréquences de la mission satellite Planck. Un vol technique a eu lieu en juillet 1999 depuis la Sicile et les deux vols scientifiques ont été effectués avec succès les 29 janvier 2001 et 7 février 2002 depuis Kiruna (Suède) au-delà du cercle polaire. Les bolomètres étaient refroidis à 100 mK par un système de dilution $^3\text{He} - ^4\text{He}$, la résolution spatiale a été d'environ 12 minutes d'arc et la couverture du ciel d'environ 30% en 12 heures d'observation nocturne. Cette grande surface a été obtenue par une stratégie de pointage originale: l'instrument est à une élévation constante de 41 degrés et tourne sur lui-même à la vitesse de 2 tours par minute. La rotation de la Terre et le déplacement du ballon du au vent conduisent à l'observation d'une grande surface du ciel avec une bonne redondance nécessaire à l'augmentation du rapport signal sur bruit et à l'étude des erreurs systématiques. L'objectif d'Archeops était double: d'une part l'obtention du spectre de puissance angulaire des anisotropies en température du CMB avec les canaux à basses fréquences et d'autre part de contraindre les émissions d'avant-plans polarisées notamment l'émission des poussières galactiques.

Les activités de la collaboration Archeops en 2004 - 2005 ont été centrées sur l'exploitation scientifique des données et la mise à disposition de ces dernières. Dans ce cadre, le groupe Archeops-Planck du LPSC a contribué de manière significative à:

- la chaîne d'analyse des données,
- la reconstruction du spectre de puissance angulaire du CMB,
- la mesure de la polarisation de l'émission des poussières galactiques,
- l'étude de la non-gaussianité des données,
- la mesure statistique de l'effet Sunyaev-Zeldovich thermique local avec Archeops et WMAP.

◊ Chaîne d'analyse des données

Pendant ces deux dernières années le travail a consisté principalement à construire des cartes finales de l'émission du ciel aux 4 fréquences d'observation d'Archeops: 143, 217, 353 et 545 GHz. Ces cartes sont actuellement les seules disponibles dans le domaine millimétrique avec une aussi grande couverture du ciel et permettent par conséquent l'accès aux très grandes échelles angulaires. L'ensemble du travail sur la chaîne d'analyse des données fera l'objet d'une publication de la collaboration Archeops au début de l'année 2006. En particulier, le groupe a travaillé sur l'analyse temps-fréquence des données d'Archeops qui a permis la sélection des meilleurs bolomètres d'Archeops en fonction de leur sensibilité et de leur taux de contamination par des effets systématiques [1].

◊ Reconstruction du spectre de puissance angulaire du CMB

Le groupe a travaillé sur la reconstruction du spectre de puissance angulaire des anisotropies en température du CMB obtenues avec Archeops. Plus particulièrement dans l'extension des premiers résultats d'Archeops à de plus grandes échelles angulaires pour une mesure plus précise du plateau Sachs-Wolfe, mais également à des échelles angulaires plus petites afin d'atteindre le deuxième pic acoustique dans le spectre et de combler ainsi le manque de mesures entre les données de COBE et de BOOMERANG-MAXIMA. Pour cela, nous avons considéré six bolomètres au lieu des deux utilisés pour la première estimation, et amélioré ainsi l'analyse des données. Dans ce cadre, nous avons développé à Grenoble une nouvelle méthode d'analyse de la réponse optique de l'instrument, Asymfast, afin de tenir compte de l'asymétrie des lobes. Asymfast permet, en décomposant les lobes en une somme de lobes circulaires gaussiens de positions et de tailles différentes, de convoluer rapidement une carte avec un lobe asymétrique et par conséquent de retrouver par simulations sa fonction de transfert dans des harmoniques sphériques. Enfin, nous avons aussi constaté dans la première analyse que l'estimation du bruit dans les données ordonnées en temps, nécessaire à la correction du spectre de puissance mesuré, était à la fois très coûteuse en temps et particulièrement difficile pour les bolomètres les plus bruités qui sont aussi les

plus affectés par des non-stationarités. À ce propos, à Grenoble nous avons développé une nouvelle méthode de reconstruction du spectre de puissance du CMB Xspect qui utilise une combinaison de cross corrélations entre détecteurs indépendants pour estimer le spectre de puissance du CMB final. Comme le bruit n'est en général pas corrélé entre les détecteurs, cette estimation n'est pas biaisée et par conséquent ne nécessite pas d'estimation du spectre de bruit. De plus Xspect permet le calcul des barres d'erreur analytiques évitant ainsi le recours à de lourdes simulations Monte-Carlo.

Les figures 1 et 2 montrent la carte des anisotropies du CMB mesurée avec Archeops et la nouvelle mesure du spectre de puissance angulaire des anisotropies en température du CMB Xspect.

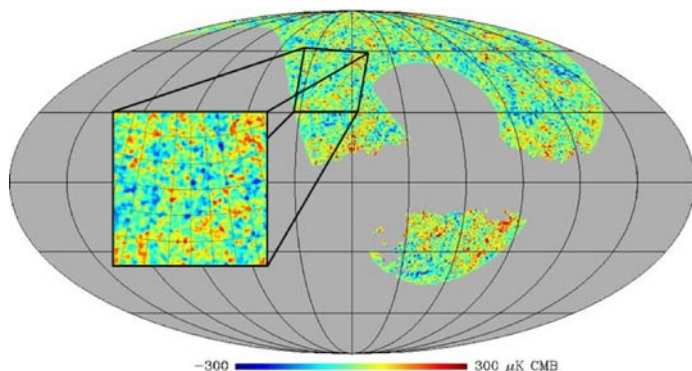


Figure 1: Carte des anisotropies du CMB mesurée avec Archeops. Le plan galactique est masqué pour éviter la contamination par des émissions galactiques. Le zoom représente la région avec le meilleur signal sur bruit.

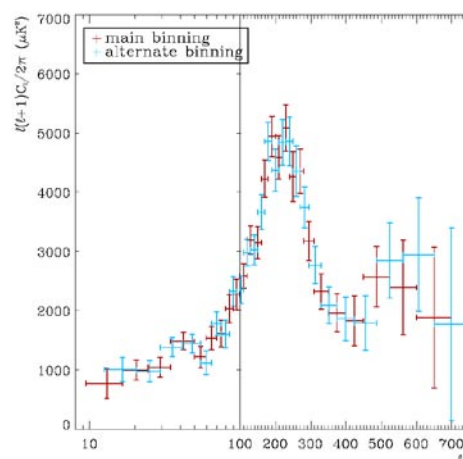


Figure 2: Spectre de puissance des anisotropies du CMB mesuré par Archeops en fonction de la taille angulaire de celles-ci.

◆ Mesure de la polarisation de l'émission des poussières galactiques

Un des grands défis de la mesure de la polarisation des anisotropies du CMB est la soustraction de l'émission polarisée des avant-plans galactiques tels que le synchrotron et la poussière. En ce qui concerne la poussière, Archeops, grâce à son canal polarisé à 353 GHz et à sa grande couverture du ciel, a pu fournir les premières cartes polarisées de cet avant-plan, à grande échelle angulaire. Ces cartes sont à l'heure actuelle les seules mesures disponibles. Les cartes en polarisation d'Archeops à 353 GHz ont mis en évidence une polarisation importante dans le plan galactique allant de 5 à 10% et un angle de polarisation en bon accord avec la structure du champ magnétique galactique sur les bras spiraux.

Afin d'estimer la possible contamination par la poussière galactique de la mesure de la polarisation du CMB, nous avons procédé à l'estimation des spectres de puissance angulaire en température et en polarisation des données d'Archeops à 353 GHz et à haute latitude galactique ($|b| > 5^\circ$). Les résultats obtenus montrent que la poussière galactique est un contaminant majeur de la mesure de la polarisation du CMB à haute fréquence. Nous avons obtenu, par deux analyses indépendantes, une détection significative à 4σ de l'émission de la poussière dans les modes de cross corrélation TE et TB pour des grandes échelles angulaires. Cependant, nous avons montré que ces résultats ne remettent pas en question l'excès de puissance mesuré par WMAP dans le spectre TE, interprété comme une reionisation globale de l'Univers plus tôt que prévue.

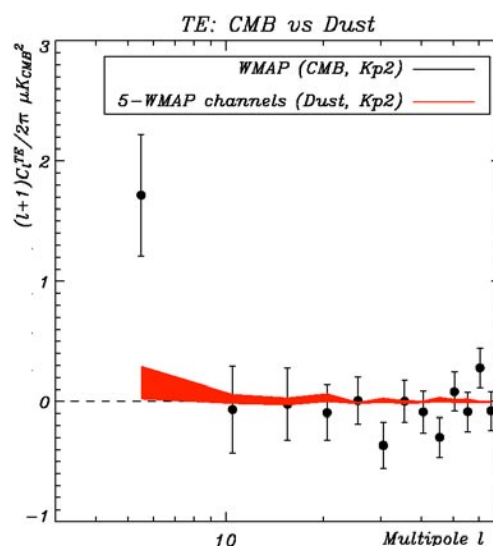


Figure 3: Spectre de puissance croisé en température et polarisation TE du CMB (en noir) mesuré par le satellite WMAP et la contamination de ce spectre par l'émission de la poussière mesurée par Archeops.

◇ Étude de la non-gaussianité des données d'Archeops

Les anisotropies en température du CMB telles que prédites par les théories inflationnaires ont une statistique gaussienne. De nombreuses méthodes mathématiques ont été développées pour vérifier cette hypothèse fondamentale sur les cartes du CMB mesurées. Notre groupe n'ayant pas l'expertise nécessaire pour ce type d'analyse, nous avons organisé une collaboration avec le groupe CMB de Santander en Espagne dans le cadre d'une action intégrée. Nous avons travaillé sur l'application du *test de goodness of fit* de Rayner & Best ainsi que des tests statistiques basés sur les ondelettes sphériques aux données d'Archeops. La méthode de Rayner & Best est particulièrement sensible aux effets systématiques comme la contamination par des émissions d'avant-plan (poussière et résidus atmosphériques) et les erreurs de calibration dans les spectres du bruit et du signal. Des résultats préliminaires indiquent que ces dernières sont les plus importantes. Ce travail permet aussi de contraindre les effets systématiques dans la mesure du spectre de puissance du CMB par Archeops. La publication des résultats obtenus est prévue avant fin juin 2006.

◇ Mesure statistique de l'effet Sunyaev-Zeldovich thermique local avec Archeops et WMAP

Les données d'Archeops sont particulièrement intéressantes pour l'étude de l'effet Sunyaev-Zeldovich (SZ), c'est-à-dire le Compton inverse des photons du CMB avec les électrons chauds dans les amas de galaxies. Cet effet est nul à 217 GHz, une des fréquences d'observation d'Archeops, ce qui permet de le différencier des autres émissions comme le CMB ou la poussière galactique. Pour mesurer l'effet SZ avec Archeops nous avons mis en place une collaboration avec Carlos Hernandez Monteagudo (post-doc sous la direction de Rashid Sunyaev). Après analyse jointe de la corrélation des données d'Archeops et de WMAP avec un patron de la densité de matière obtenu à partir des données 2MASS, nous avons obtenu une détection à plus de 5σ de l'effet SZ sur un ensemble d'amas [2]. En outre, les résultats obtenus en ce qui concerne le paramètre de *comptonisation* moyen sont en très bon accord avec les modèles de formation des structures de type matière sombre froide.

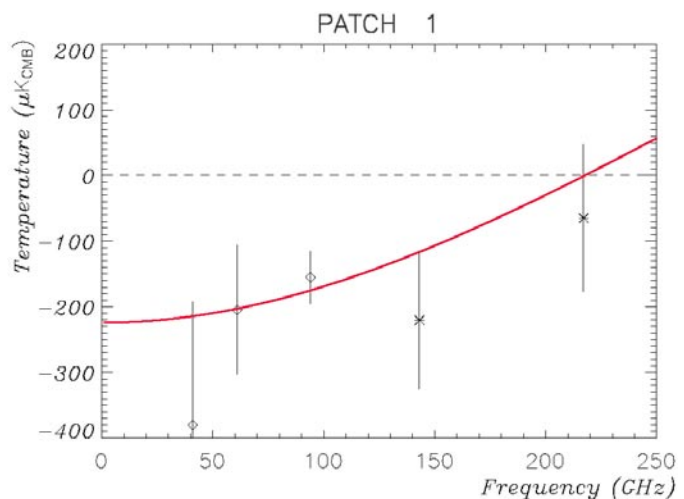


Figure 4: Spectre électromagnétique de l'effet SZ mesuré (noir) en combinant les données d'Archeops et de WMAP et attendu (rouge) en supposant uniquement comme paramètre libre le niveau moyen de SZ (la forme du spectre électromagnétique de l'effet SZ est parfaitement connue).

[1] On the wavelet analysis of CMB time ordered data: application to Archeops, J. F. Macías-Pérez, A. Bourrachot (2005) A&A, accepté.

[2] Spectral indications of thermal Sunyaev-Zel'dovich effect in Archeops and WMAP data, C. Hernández-Monteagudo, J. F. Macías-Pérez, M. Tristram, F.-X. Désert (2005) A&A, sous presse.

Planck

D. Santos, J. Aumont (th), J. Macías-Pérez, C. Renault, M. Tristram (th).

Planck is an European Spatial Agency (ESA) mission concerning the measurement of the cosmic microwave background anisotropies that will be launched in 2007. The laboratory has responsibilities on the on-board hardware related to the Sorption Cooler Electronics (SCE) and the Dilution Cooler Electronics (DCE), in the on-board software controlling the SCE, in the interface that receives the telemetry and sends the commands to the SCE and in the data analysis preparation (L2). The team also participates to the calibration of the High Frequency Instrument (HFI).

L'expérience Planck est le projet le plus ambitieux de la communauté internationale sur le fonds diffus cosmologique et elle sera très probablement une référence pour les années à venir en ce qui concerne la mesure des anisotropies en température et en polarisation E du fond diffus à 3 K.

La mission satellite Planck sera mise en orbite par l'ESA en août 2007 au point de Lagrange, L2. Les objectifs de Planck sont multiples : tout d'abord la cartographie des anisotropies en température et en polarisation du CMB mais aussi l'étude des émissions diffuses des avant-plans galactiques, la fabrication d'un catalogue d'amas de galaxies pour des études cosmologiques via l'effet Sunayev-Zeldovich (SZ), la fabrication d'un catalogue de sources ponctuelles dans le domaine millimétrique ainsi que l'étude des objets astrophysiques compacts et froids, entre autres. Le satellite Planck est constitué de deux instruments : LFI (instrument basses fréquences) composé de radiomètres entre 30 et 70 GHz et HFI (instrument hautes fréquences) composé d'une matrice de bolomètres entre 100 et 857 GHz. Les radiomètres sont refroidis à 20 K par une machine cryogénique appelée « sorption cooler ». Par contre, les bolomètres sont refroidis à 100 mK par le même système de dilution $^3\text{He} - ^4\text{He}$ que pour l'expérience Archeops. Outre le système de refroidissement Planck-HFI et Archeops ont en commun le système optique (télescope hors axe grégorien et cornets de type « dos à dos ») et la stratégie de balayage du ciel via des grands cercles. En revanche, Planck a une résolution maximale d'environ 5 minutes d'arc (13 minutes d'arc pour Archeops), une sensibilité maximale de $40 \mu\text{K s}^{1/2}$ (entre 100 et $200 \mu\text{K s}^{1/2}$ pour Archeops) et couvrira 100% du ciel (30% pour Archeops) avec un temps d'intégration de 14 mois (12 heures pour Archeops). Planck devrait donc effectuer une mesure ultime du spectre de puissance du CMB en température pour des échelles angulaires supérieures à 10 arcmin et mesurer avec grande précision l'autocorrélation des modes E ainsi que leur corrélation avec la température. Par rapport aux modes B, Planck pourra fixer une limite supérieure sur l'énergie de l'inflation aux alentours de 10^{15} GeV.

L'IN2P3 participe à l'effort de conception d'une partie importante de l'électronique embarquée. Le LPSC a la responsabilité depuis novembre 1999, de produire l'électronique de pilotage et de contrôle du cryo-générateur à sorption qui assure le refroidissement à 20 K de LFI (Low Frequency Instrument) et représente une étape très importante dans la chaîne de refroidissement de HFI (High Frequency Instrument). L'équipe du LPSC a également la responsabilité de l'électronique de contrôle de la boîte à vannes de la dilution qui assure le refroidissement du plan focal de HFI à 100 mK.

Nos responsabilités sur Planck sont :

- sur le hardware embarqué : l'électronique du cryo-générateur à sorption (SCE) et l'électronique de la dilution (DCE) ;
- sur le software embarqué : le logiciel de pilotage et de contrôle de la SCE et l'interface avec un logiciel de l'ESA pour la télémétrie et les télécommandes ;
- la préparation à l'analyse de données de Planck-HFI : nombreux modules du niveau 2 de la DPC (Data Processing Center) ;
- la participation aux groupes de travail de Planck-HFI.

L'électronique du cryo-générateur à sorption (SCE) a dû être réalisée en coordination avec le travail de nos partenaires du Jet Propulsion Laboratory (JPL) à Pasadena (Californie-USA) responsables de la conception et construction des compresseurs de la machine cryogénique.

Les tests du logiciel de contrôle et de pilotage de la SCE ont exigé un effort important de toute l'équipe pendant toute l'année 2005. Une collaboration avec le laboratoire LSR (Logiciels Systèmes et Réseaux) de l'IMAG a été établie à ce sujet. Le travail en collaboration avec le LSR a été très utile et enrichissant. L'activité de l'équipe pendant la période 2004 - 2005 est détaillée dans les chapitres des différents services techniques concernés.

Une étape importante a été franchie en mai 2005, quand nous avons testé pendant un mois au Jet Propulsion Laboratory, le modèle cryogénique de qualification (CQM) de la SCE avec notre logiciel et l'avons couplé au modèle de vol des compresseurs (TMU) du JPL. Le test a permis de valider le logiciel et de démontrer que le

système (SCE+TMU) fonctionne. Pendant le deuxième semestre de 2005, l'équipe a dû assurer l'intégration de l'électronique SCE au satellite à Alcatel (Cannes) et participer aux différents tests. L'équipe du LPSC a également participé à l'étalonnage de HFI à Orsay en 2005.

◆ Participation à l'analyse de données de Planck-HFI

Depuis 2001, le LPSC participe activement à la préparation de l'analyse des données de Planck-HFI via le niveau 2 du Data Processing Center (L2). D'une part nous sommes responsables de la chaîne de prétraitement des données. Cette étape comprend notamment la correction des effets de l'électronique de lecture, la correction de gain dynamique et l'identification des signaux produits par des rayons cosmiques. Une étude statistique des caractéristiques de ces signaux sera par ailleurs un outil efficace pour caractériser le bon fonctionnement et la stabilité de chaque détecteur. Elle s'applique sur les données brutes et fournit des données ordonnées en temps utilisables par les éléments suivants de la chaîne d'analyse : traitement des effets systématiques ou production de cartes par exemple. D'autre part, continuant un effort commencé avec Archeops et qui se poursuit au-delà de Planck par une activité de recherche et développement sur les matrices de bolomètres, notre groupe participe à l'analyse des données polarisées par le développement de logiciels de production de cartes spécifiques. Enfin divers outils d'analyse permettant de vérifier ou de corriger la stationnarité des données grâce à l'utilisation des ondelettes par exemple sont mis à disposition de la collaboration.

Fin 2005, une première série de logiciels développés par l'ensemble des membres de L2 a été assemblée afin d'analyser des simulations réalistes des observations du futur instrument. Cet effort va s'intensifier et s'affiner jusqu'au lancement du satellite et naturellement se poursuivre ensuite. Notre groupe, associé à F.-X. Désert du LAOG, sera en première ligne pour traiter les informations issues quotidiennement des 52 bolomètres et 20 thermomètres fins de Planck-HFI durant les 2 années d'observation.

◆ Séparation aveugle de composantes polarisées

Dans le cadre des groupes de travail de Planck WG2 (développement de méthodes de séparation de composantes) et WG7 (étude des émissions d'avant-plan) nous avons développé à Grenoble une nouvelle méthode de séparation aveugle de composantes appliquée à des données polarisées. Celle-ci est basée sur la méthode SMICA-MDMC en température que nous avons adaptée aux données polarisées multifréquence de type CMB. Nous l'avons implémentée et testée sur des données simulées en polarisation de Planck. Nous nous sommes particulièrement intéressés à la mesure des modes B du CMB en présence des émissions d'avant-plans. Ces modes B signeraient la présence d'ondes gravitationnelles primordiales issues de la période d'inflation et permettraient de mesurer l'échelle d'énergie de cette dernière. Une publication des résultats est en préparation.

◆ Phénoménologie autour de l'Inflation

Afin de profiter de l'accès aux données de très bonne qualité comme celles d'Archeops ou dans un avenir proche celles de Planck, nous avons initié au sein de l'équipe une étude sur le *pre-heating* qui est la période de transition à la sortie de l'inflation vers l'ère de rayonnement. Dans cette transition il y a une période où le champ scalaire, l'inflaton, va transformer son énergie en rayonnement et matière. Une collaboration avec Mar Bastero-Gil de l'Université de Grenade a été établie afin de produire un code de calcul sur réseaux qui nous permette d'estimer et de décrire la physique de cette période de transition en introduisant les perturbations de la métrique spatio-temporelle. Le laboratoire a invité Mme Bastero-Gil pendant 3 mois en 2004 et pendant cette période nous avons pu réaliser le programme de calcul en série pour le modèle le plus simple *phi4* et pour un modèle hybride, avec deux champs. Cette collaboration a été très productive et nous avons pu générer un code plus général que les codes existants sur le sujet, par exemple *latticeeasy*. Ce calcul demande des ressources importantes en temps de calcul pour un réseau de 128 points par dimension spatiale. Donc, une version parallélisée a dû être produite. Nous sommes en train de « debugger » cette version parallèle et nous comptons avoir un outil qui nous permette de produire des résultats avant mars 2006.

◆ R&D : matrices d'antennes pour la matrice bolométrique

La polarisation du CMB, type B, celle qui nous permettra de contribuer à l'estimation du fond stochastique des ondes gravitationnelles primordiales, exige une grande sensibilité et une haute densité des détecteurs sur le plan focal. Une solution serait de remplacer les cornets qui font le couplage optique entre le télescope et les bolomètres par une matrice d'antennes adaptée à la fréquence que l'on veut détecter. Dans notre cas, nous sommes intéressés par les canaux millimétriques 143 GHz et 217 GHz pour le CMB, et pour les contaminants d'avant-plans 353 et 545 GHz. Nous participons à une ligne de R&D autour de cette problématique dans le cadre du

projet DCMB, financé par le CNES, et piloté par Alain Benoît du CRTBT. Au LPSC nous avons l'expertise de l'utilisation du logiciel HFSS utilisé pour le calcul en éléments finis de la réponse électromagnétique des coupleurs pour les accélérateurs. Avec le service de Détection et Instrumentation nous avons commencé à étudier les configurations possibles des matrices d'antennes qui pourraient être validées par une mesure de leur réponse avec un interféromètre de type Martin-Puplett qui a été conçu mi 2004, et construit au LPSC. L'interféromètre utilise des polariseurs et des lames séparatrices à fils tissés au LPSC. La conception et la construction de cet interféromètre ont été un défi mécanique pour notre laboratoire. Nous avons mesuré les premiers interférogrammes fin 2005. Plus d'informations peuvent être trouvées dans les chapitres des services techniques concernés.

