

Séparation de composantes pour la mesure des anisotropies du fond diffus cosmologique

Une approche en aveugle basée sur la diversité spectrale

Keywords

Méthode d'ajustement spectrale MDMC, Approche en aveugle, Sphère céleste, Mesure des anisotropies.

■ Par G. Patanchon¹, H. Snoussi², J.-F. Cardoso³, J. Delabrouille¹

¹ PCC – Collège de France

² L2S, Supélec

³ CNRS/ENST

Une méthode d'estimation du spectre spatial de puissance des fluctuations du fond de rayonnement cosmologique fossile, permettant de séparer les contributions de différentes composantes astrophysiques d'avant-plan dans des observations multi longueur d'onde, a été développée. Cette méthode permet d'exploiter la structure des données pour en extraire au mieux l'information scientifique utile.

1. Introduction

La mesure précise des anisotropies du fond diffus cosmologique est l'un des objectifs majeurs de la cosmologie moderne. Les petites fluctuations de température, témoins des perturbations primordiales de densité, sont une mine d'information sur les propriétés globales de notre Univers et sur la physique intervenant pendant les premières fractions de seconde après le Big-Bang.

Si l'on remonte dans le passé, à des temps inférieurs à 300 000 ans après le Big-Bang, l'Univers était suffisamment chaud et dense pour maintenir la matière à l'état de

plasma : un mélange d'atomes ionisés, d'électrons, et de photons. Une des conséquences de l'expansion de l'Univers est son refroidissement. Lorsque sa température devint inférieure à environ 3000 Kelvins, les électrons se lièrent aux protons et la grande quantité de photons fut libre de se propager dans toutes les directions. C'est ce rayonnement, appelé fond diffus cosmologique (CMB) que nous détectons aujourd'hui à la température très uniforme de 2,726 K. Toutefois, il existe des petites anisotropies de température au niveau de $\Delta T/T \approx 10^{-5}$. Ces anisotropies sont la conséquence directe des petites inhomogénéités de densité et de

L'ESSENTIEL

- La mesure du spectre de puissance spatial des anisotropies du fond diffus cosmologique est d'une grande importance en cosmologie.
- Il est nécessaire de séparer les autres sources d'émissions astrophysiques, présentes dans le domaine de fréquence du fond diffus cosmologique, pour une mesure précise du spectre de puissance.
- Nous exposons une méthode d'estimation spectrale multi-détecteur multi-composantes en aveugle basée sur l'indépendance et la diversité spectrale des composantes.
- La méthode, appliquée sur des simulations d'observations de l'ensemble du ciel par le satellite Planck permet :
 - une estimation précise du spectre de puissance du fond diffus cosmologique
 - de contraindre les lois d'émission des composantes.

SYNOPSIS

- Measurement of cosmic microwave background spatial power spectrum is of prime importance in cosmology.
- It is necessary to separate the other astrophysical emission sources present in the frequency range of Cosmic Microwave Background observations for a precise measurement of the power spectrum.
- A blind multi-detector multi-component spectral matching method, based on the independance of sources and on their spectral diversity, is presented.
- The method, when applied on all-sky Planck observation simulations, allows:
 - an accurate estimate of cosmic microwave background power spectrum
 - to constrain the emission laws of components.

vitesse de la matière au moment du découplage entre les photons et la matière.

Le spectre spatial de puissance des anisotropies du CMB dépend d'un certain nombre de paramètres fondamentaux comme par exemple la densité totale d'énergie dans l'Univers, ou encore la densité de la matière « ordinaire » (baryons). La détermination du spectre spatial de puissance fait l'objet d'importants efforts au sein de la communauté. Il sera l'objectif de la mission spatiale Planck prévue pour 2007, qui permettra de cartographier le CMB sur l'ensemble du ciel avec un niveau de signal sur bruit inégalé.

La précision de la mesure du spectre de puissance des anisotropies du CMB est limitée par la contamination des observations par d'autres sources d'émissions astrophysiques présentes dans le domaine de longueur d'onde submillimétrique. Une grande partie de ces émissions trouvent leur origine dans notre propre galaxie, comme l'émission thermique de la poussière et l'émission synchrotron. D'autres émissions sont d'origine extragalactique comme les effets Sunyaev-Zeldovich. Ces composantes sont appelées avant-plans (car elles trouvent leur origine à des distances très inférieures à celle du CMB). Il est donc crucial de séparer ces émissions d'avant-plan du signal cosmologique.

La plupart des expériences possèdent plusieurs détecteurs observant le ciel à différentes longueurs d'onde. En particulier, le satellite Planck opérera à 10 fréquences comprises entre 30 et 857 GHz. Il est donc possible de faire une séparation de composantes, ces dernières ayant des comportements différents en fonction de la longueur d'onde. Des méthodes de séparation de composantes, ont été étudiées par de nombreux auteurs [1-5]. Elles consistent d'abord à produire des cartes de composantes séparées et, dans un second temps, à estimer le spectre de puissance du CMB sur la carte obtenue. Cette approche n'est pas entièrement satisfaisante pour deux raisons. La première est qu'elle nécessite la connaissance a priori des lois d'émission des composantes, qui sont, pour bon nombre d'entre elles, connues avec une mauvaise précision. Ensuite, il serait préférable d'estimer le spectre de puissance du CMB en une seule étape par l'analyse jointe des cartes d'observation.

Une nouvelle approche d'analyse multi-détecteur multi-composantes a été développée et exposée dans les articles [6, 7]. La méthode est basée sur la maximisation de la vraisemblance dans l'approximation de Whittle, et prend en compte la présence de bruit additif dans les données (dans les observations du CMB une quantité importante de bruit est attendue). Un des points forts de cette approche est qu'elle permet aussi, le cas échéant, d'estimer les coefficients du mélange des différentes composantes, quand ces dernières présentent une diversité spectrale suffisante.

Dans cet article, nous avons raffiné l'ajustement spectral multi-détecteurs multi-composantes sur différents points afin de prendre en considération certaines caractéristiques des observations du CMB. Tout d'abord, comme les expériences actuelles couvrent des portions du ciel aussi larges que possible, nous avons adapté la méthode à l'analyse des

coefficients de décomposition en harmoniques sphériques de la totalité de la voûte céleste, ceci dans le but de prendre en compte toute l'information contenue dans les cartes. Ensuite, nous avons adapté notre méthode à un modèle d'observation par des détecteurs ayant une résolution angulaire finie dépendant de la fréquence d'observation. Enfin, la méthode permet naturellement d'inclure des *a priori* physiques sur les composantes. Nous incluons ces informations en fixant certains paramètres du modèle et en maximisant la vraisemblance par rapport aux paramètres restant. Cette opération permet par exemple de lever des dégénérescences entre des composantes ayant des spectres de puissance proportionnels.

Nous avons testé la méthode sur des simulations d'observations de l'ensemble du ciel par le satellite Planck. Nous comparons le spectre de puissance estimé dans l'approche en aveugle avec celui obtenu en fixant les paramètres de mélange à leurs valeurs vraies, ce qui suppose une connaissance parfaite des lois d'émission des composantes.

2. Modèle des observations du fond diffus cosmologique

La première hypothèse fondamentale, sur laquelle s'appuie notre méthode d'estimation spectrale (et en général les méthodes de séparation de composantes), est que l'émission du ciel à une fréquence donnée est une superposition linéaire de différentes composantes astrophysiques. De plus, on suppose que les lois d'émission des composantes sont indépendantes de la position sur le ciel. Ainsi, l'émission totale se factorise en une fonction de la fréquence et une fonction de la position. Le signal total mesuré par un détecteur en un point donné est l'émission du ciel convoluée avec une fonction de réponse des détecteurs (lobes), à laquelle s'ajoute du bruit. En supposant que les lobes sont symétriques, l'observation par un détecteur d est donnée par :

$$x_d(\vec{r}) = \sum_{c=1}^{N_c} A_{dc} \cdot \int b_d(|\vec{r} - \vec{r}'|) \cdot s_c(\vec{r}') d\vec{r}' + n_d(\vec{r}) \quad (1)$$

\vec{r} est la direction d'observation sur le ciel ; s_c est la forme spatiale de la composante c ; n_d représente le bruit du détecteur d , $b_d(|\vec{r} - \vec{r}'|)$ représente le lobe et dépend seulement de $|\vec{r} - \vec{r}'|$ (ou de $\vec{r} \cdot \vec{r}'$) pour un lobe symétrique et A est la matrice de mélange. Chaque élément de la matrice de mélange résulte de l'intégration de la loi d'émission d'une composante sur une bande de fréquence d'un détecteur.

Une base naturelle est celle des harmoniques sphériques. Le signal $x_d(\vec{r})$ se décompose sous la forme :

$$x_d(\vec{r}) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=-l}^l x_d(l, m) Y_l^m(\vec{r}) \quad (2)$$

où $Y_l^m(\vec{r})$ sont les harmoniques sphériques. En utilisant la relation d'orthogonalité des harmoniques sphériques, on en déduit :

$$x_d(l, m) = \int_{4\pi} x_d(\vec{r}) Y_l^m(\vec{r})^* d\Omega. \quad (3)$$

La convolution entre un lobe symétrique et le signal dans l'espace réel devient un produit dans cette base. En combinant les équations (1) et (3), nous obtenons :

$$x_d(l, m) = b_d(l) \sum_{c=1}^{N_c} A_{dc} s_c(l, m) + n_d(l, m) \quad (4)$$

où $b_d(l)$ est l'expansion en polynômes de Legendre de $b_d(\cos \Theta)$, Θ étant la distance angulaire par rapport au centre du lobe tel que $\cos \Theta = \vec{r} \cdot \vec{r}'$. Pour un lobe Gaussien, $b(l) \simeq \exp(-\sigma_b^2 l(l+1)/2)$ et $\sigma_b = \Theta_{\text{beam}} / \sqrt{8 \ln 2}$, où Θ_{beam} est la largeur à mi-hauteur de la Gaussienne. Notons $B(l)$ la matrice diagonale telle $B_{dd}(l) = b_d(l)$. Et $x'(l, m) = B(l)^{-1} x(l, m)$. Il est utile d'écrire ces nouveaux coefficients sous la forme :

$$x'(l, m) = A s(l, m) + B(l)^{-1} n(l, m). \quad (5)$$

L'introduction de ces coefficients (qui sont ceux de la décomposition en harmoniques sphériques des observations « déconvoluées ») sera justifiée par la suite.

■ Statistiques spectrales

Les spectres de puissance des observations $x'(l, m)$, sont donnés par $R_x(l, m) = \langle x'(l, m) x'(l, m)^\dagger \rangle$, où \dagger signifie transposé-conjugué, et $\langle \rangle$ signifie espérance. D'après l'équation (5), on a :

$$R_x(l, m) = AC(l, m)A^\dagger + B(l)^{-1}N(l, m)B(l)^{-\dagger} \quad (6)$$

où $C(l, m)$ et $N(l, m)$ sont les matrices de covariances des composantes et du bruit respectivement. La propriété d'indépendance des composantes implique que $C(l, m)$ est une matrice diagonale. Nous supposons, de plus, que le bruit est blanc et indépendant d'un détecteur à l'autre,

$N(l, m) = \text{diag}(\sigma_1^2, \dots, \sigma_d^2)$. L'intérêt principal de travailler avec x' est que l'on peut moyenner les matrices de covariances spectrales $R_x(l, m)$ sur des domaines spectraux tout en préservant la structure simple de l'équation (6) pour la partie « composantes ». Écrivons les matrices de covariances spectrales moyennées sur des domaines spectraux, dont nous choisissons une forme particulière :

$$R_x(q) = \frac{1}{n_q} \sum_{l=l_{\min}(q)}^{l_{\max}(q)} \sum_{m=-l}^l R_x(l, m). \quad (7)$$

Ici $q = 1, Q$ est l'indice de la bande spectrale, les modes (l, m) qui contribuent à la bande q sont tels que $l_{\min}(q) < l < l_{\max}(q)$. Puisque m peut varier entre $-l$ et l , le nombre de modes dans chaque bande est $n_q = \sum_{l=l_{\min}(q)}^{l_{\max}(q)} (2l+1)$. Pour des composantes isotropes sur le ciel, $C(l, m) = C(l)$ (nous avons des raisons théoriques de penser que les composantes cosmologiques sont isotropes), ce qui justifie notre choix

particulier de domaines spectraux. Les matrices de covariances moyennées sont :

$$R_x(q) = AC(q)A^\dagger + M(q) \quad (8)$$

où $M(q) = 1/n_q \sum_{l=l_{\min}(q)}^{l_{\max}(q)} (2l+1) B(l)^{-2} N$ est une matrice diagonale.

Ces matrices sont estimées dans les données par :

$$\tilde{R}_x(q) = \frac{1}{n_q} \sum_{l=l_{\min}(q)}^{l_{\max}(q)} \sum_{m=-l}^l x'(l, m) x'(l, m)^\dagger$$

qui est constituée d'éléments réels puisque $x'(l, -m) = x'(l, m)^\dagger$ pour les données réelles.

3. La méthode MDMC

Nous présentons dans cette partie la méthode d'estimation spectrale pour des observations multi-détecteurs multi-composantes (MDMC). Le but de l'ajustement spectral MDMC est d'obtenir une estimée de différents paramètres du modèle, qui sont aussi des paramètres d'intérêt en astrophysique et cosmologie, sans inclure d'*a priori*. Ces paramètres sont la matrice de mélange A , les spectres de puissance des composantes moyennés sur des domaines spectraux $C(q)$ et les variances du bruit N . Ils sont regroupés dans $\theta = \{A, C(q), N\}$.

La méthode est basée sur la minimisation d'une mesure de l'écart entre les matrices de covariance spectrales empiriques (Éq. (9)) et leurs espérances qui dépendent des paramètres θ (Éq. (8)). Nous adoptons la forme suivante pour notre critère :

$$\Phi(\theta) = \sum_{q=1}^Q n_q D(\tilde{R}_x(q), R_x(q)) \quad (10)$$

où $D(R_1, R_2)$ est la divergence de Kullback entre deux matrices positives et n_q est le nombre de modes dans chaque bande q . En supposant que les modes $x'(l, m)$ sont des réalisations de champs Gaussiens de variance $R_x(q)$ et sont décorrélés, la log-vraisemblance (à un facteur non-significatif près) prend la même forme que dans l'équation (10). La divergence est donnée dans ce cas par :

$$D(R_1, R_2) = \text{tr}(R_1 R_2^{-1}) - \log \det(R_1 R_2^{-1}) - m_d. \quad (11)$$

L'estimée du paramètre est donnée par $\hat{\theta} = \arg \min_{\theta} \Phi(\theta)$. La connexion avec la log-vraisemblance garantie des bonnes propriétés statistiques de l'estimateur (au moins asymptotiquement).

■ L'algorithme d'optimisation

L'optimisation est réalisée en utilisant un algorithme EM (Expectation Maximization), et complété par un algorithme de Quasi-Newton (BFGS) dans le but d'accélérer la convergence. L'algorithme d'optimisation est décrit dans le

papier [6] (quelques modifications sont nécessaires pour tenir compte de l'effet du lobe).

■ Dégénérescences

Il est possible d'échanger un facteur entre une colonne de la matrice de mélange A et le spectre de puissance $C(q)$ de la composante correspondante tout en gardant constante l'intensité des observations, comme le montre l'équation (8). Nous fixons cette dégénérescences dans l'étape EM en fixant la norme de chaque colonne de A à l'unité ; la normalisation des spectres de puissance est ajustée en conséquence. Dans l'étape de Quasi-Newton, un terme de pénalité est ajouté à Φ pour pénaliser la déviation de la norme de chaque colonne de A par rapport à l'unité.

4. Application

Nous nous intéressons à l'application de la méthode d'ajustement spectral MDMC sur des simulations d'observations.

4.1. Les simulations d'observations de Planck

Nous utilisons les simulations d'observation de la mission Planck sur l'ensemble du ciel fournies par la collaboration. Les cartes sont simulées à toutes les fréquences des instruments de Planck (30, 44, 70, 100 GHz pour l'instrument basse fréquence et 100, 143, 217, 353, 545, 857 GHz pour l'instrument haute fréquence). Cinq composantes, ainsi que du bruit blanc aux niveaux nominaux des instruments de Planck ont été mélangés suivant le modèle exposé dans l'équation (4) (les résolutions angulaires des observations sont par ordre croissant de fréquence : 33 ; 23 ; 14 ; 10 ; 10,6 ; 7,4 ; 4,9 ; 4,5 ; 4,5 ; 4,5 minutes d'arc). Les composantes sont : le CMB, l'émission thermique de la poussière, l'effet synchrotron et les effets SZ thermiques et cinétiques des amas de galaxies. Elles sont obtenues de la façon suivante :

Les modes $s(l, m)$ du CMB sont tirés au hasard suivant une statistique Gaussienne de variances $C(l)$, prédites par CMBFast [8], en utilisant des paramètres cosmologiques standards. Les composantes galactiques ont été obtenues à partir des cartes observées par d'autres expériences à des fréquences très différentes. L'émission de la poussière galactique est modélisée en utilisant les cartes à 3000 GHz de l'analyse des données DIRBE-IRAS. L'émission synchrotron est simulée à partir de cartes à 408 MHz auxquelles ont été ajoutées des structures aux petite échelles (voir Réf. [4]). Les effets SZ thermiques et cinétiques ont été entièrement simulés [9]. Notons que l'effet SZ cinétique (toujours sous-dominant) et le CMB ont des lois d'émission proportionnelles. Les simulations ont été réalisées jusqu'à la résolution de 3,5 minutes d'arc. La figure 1 montre les cartes d'observations simulées à toutes les fréquences de Planck.

4.2. Estimation des paramètres

Nous avons appliqué la méthode sur les simulations présentées ci-dessus. Il est nécessaire de définir auparavant

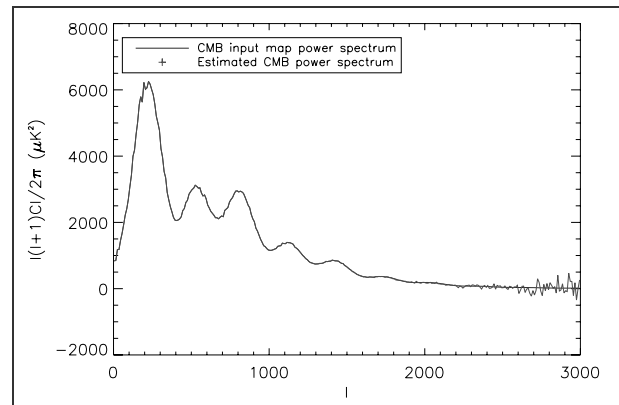


Figure 1. Cartes d'observations simulées du satellite Planck aux 10 fréquences entre 30 et 857 GHz.

le nombre de composantes que l'on estime être présentes dans les données. Nous choisissons de déterminer quatre composantes. Une des composantes dans les simulations, l'effet SZ cinétique, est négligeable à toutes les fréquences. De plus, il ne peut pas être séparé du CMB par notre approche puisque ces deux composantes ont des lois d'émission proportionnelles (CMB et SZ cinétique forment une composante unique). Les coefficients de la décomposition en harmoniques sphériques sont calculés jusqu'aux multipôles $l = 3000$ (qui correspondent à 3,5 minutes d'arc). Nous choisissons des bandes spectrales de largeur $\Delta l = 10$. Nous adoptons deux approches différentes :

- tout d'abord, nous appliquons la méthode en aveugle. Nous estimons tous les paramètres du modèle excepté trois que l'on fixe à zéro. Ces trois paramètres correspondent à trois des quatre éléments de la matrice de mélange relatif au canal à 857 GHz où seule la composante poussière est attendue. Nous discuterons plus précisément les raisons de ce choix dans la section 4.4. Tous les autres paramètres sont estimés, incluant les spectres de puissance des composantes et les variances de bruit. Le nombre total de paramètres est $10 \times 4 - 3 + 4 \times 300 + 10 = 1247$ comparé à $300 \times 10 \times (10 + 1)/2 = 16\ 500$ éléments de données indépendants ;
- dans une seconde approche, nous supposons parfaitement connues les lois d'émission des composantes et nous fixons à leurs valeurs vraies les paramètres de mélange. Nous estimons les spectres de puissance spatiaux des composantes et les variances de bruit.

4.3. Résultats

Dans le cas aveugle, l'ensemble des paramètres de la matrice de mélange est estimé avec une très bonne précision. Le tableau 1 donne le rapport entre les éléments de la matrice de mélange estimés et les paramètres vrais qui sont relatifs au CMB. Les éléments de la matrice de mélange relatifs à l'effet SZ thermique sont estimés avec une bonne précision. La loi d'émission de l'effet synchrotron est très bien contrainte aux plus basses fréquences, ainsi que la loi d'émission de la poussière aux plus hautes fréquences. Par

Fréquence	30	44	70	100(LFI)	100(HFI)	143	217	353	545
CMB	0,999984	1,000254	0,999780	1,000081	1	0,999993	0,999836	0,998972	0,990155

Tableau 1. Rapport entre les paramètres estimés et les paramètres vrais de la matrice de mélange relatifs au CMB. Les paramètres estimés sont recalés par rapport au détecteur à 100 GHz de l'instrument HFI (qui est le meilleur canal de Planck en terme de signal sur bruit).

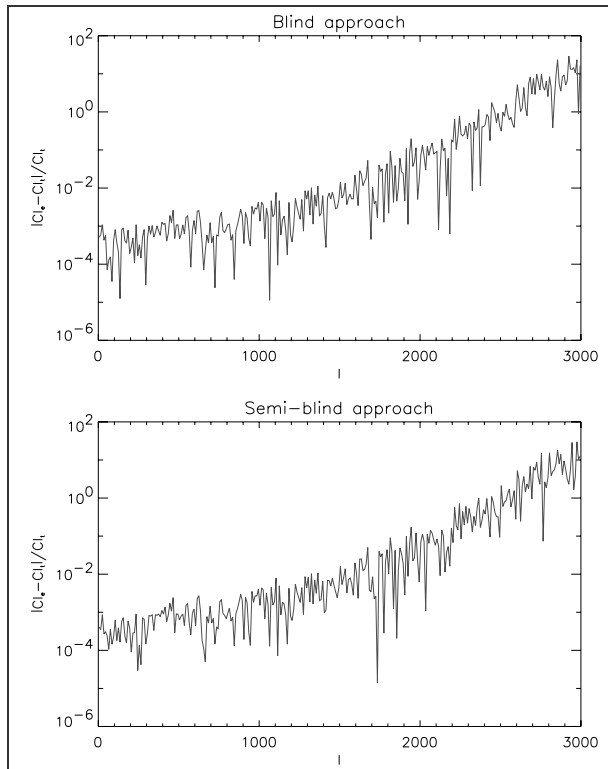


Figure 2. Spectre de puissance du CMB estimé en aveugle, comparaison avec le spectre mesuré sur la carte de CMB utilisée dans les simulations. De ce fait, la variance « cosmique » n'apparaît pas.

ailleurs, notre méthode permet de contraindre les composantes galactiques à des fréquences très éloignées de leur maximum d'émission.

Nous nous focalisons maintenant sur le spectre de puissance spatial du CMB. La figure 2 montre le spectre de puissance du CMB estimé dans l'approche aveugle. La figure 3 montre l'erreur relative d'estimation donnée par $|\hat{C}(q) - C(q)|/C(q)$ pour les deux approches. Le point important est que les erreurs relatives sont équivalentes dans les deux cas. Par conséquent, il semble que les paramètres de mélange des composantes aux différentes fréquences d'observation peuvent être estimés dans les données Planck sans perte de précision dans l'estimation du spectre de puissance du CMB.

La méthode permet dans les deux cas d'estimer précisément le spectre de puissance jusqu'au multipôle $l = 2500$. Aux plus petites échelles, la dispersion commence à être significative. Ce résultat n'est pas surprenant puisque le bruit et l'effet de lobe sont importants à ces échelles angu-

lares pour tous les détecteurs. Par ailleurs, les spectres de puissance estimés ne semblent pas être contaminés par l'effet SZ cinétique.

4.4. Discussion

4.4.1. Approche semi-aveugle ?

Comme on l'a vu précédemment, dans la cas où nous estimons à la fois la matrice de mélange et les spectres de puissance des composantes, nous avons fixé à zéro les contributions de trois composantes à 857 GHz. La seule composante que nous supposons présente à cette fréquence est l'émission thermique de la poussière. Cette hypothèse, très réaliste, apparaît être nécessaire parce que les composantes galactiques synchrotron et poussière ont des spectres de puissance quasiment proportionnels. Sans a priori, la méthode ne peut pas séparer ces deux composantes, mais la procédure simple qui consiste à fixer des paramètres permet de lever la dégénérescence.

4.4.2. Couverture partielle

Les composantes galactiques sont très inhomogènes sur le ciel. Dans la région du plan galactique, leurs intensités sont plusieurs centaines de fois plus fortes que dans les régions externes. Puisque nous supposons dans notre modèle que les composantes sont homogènes, notre méthode appliquée sur l'ensemble du ciel est sous optimale. Une estimation plus précise du spectre de puissance du CMB pourrait être obtenue en effectuant une coupure galactique, qui consiste à n'utiliser que l'information à haute latitude galactique. Les coefficients de la décomposition en harmoniques sphériques du signal sur une couverture partielle du ciel sont corrélés. Notre méthode d'ajustement spectral peut être utilisée sur de telles données et un choix judicieux serait de moyenner les matrices de covariances mesurées sur des domaines spectraux dont la largeur Δl serait plus grande que la longueur de corrélation. La méthode, en particulier, a été appliquée sur les données de la mission ballon Archeops, qui couvre environ 30 % du ciel.

5. Conclusion

Nous avons adapté notre méthode d'ajustement spectral MDMC en aveugle pour l'analyse d'observations sur l'ensemble de la sphère céleste. Les observations sont modélisées comme un mélange linéaire de composantes astrophysiques dégradées aux résolutions angulaires des détecteurs. En maximisant la vraisemblance du système, nous estimons le spectre de puissance des composantes, leurs amplitudes à chaque fréquence d'observation et les niveaux de bruit. La méthode a été appliquée sur des simulations de l'ensemble

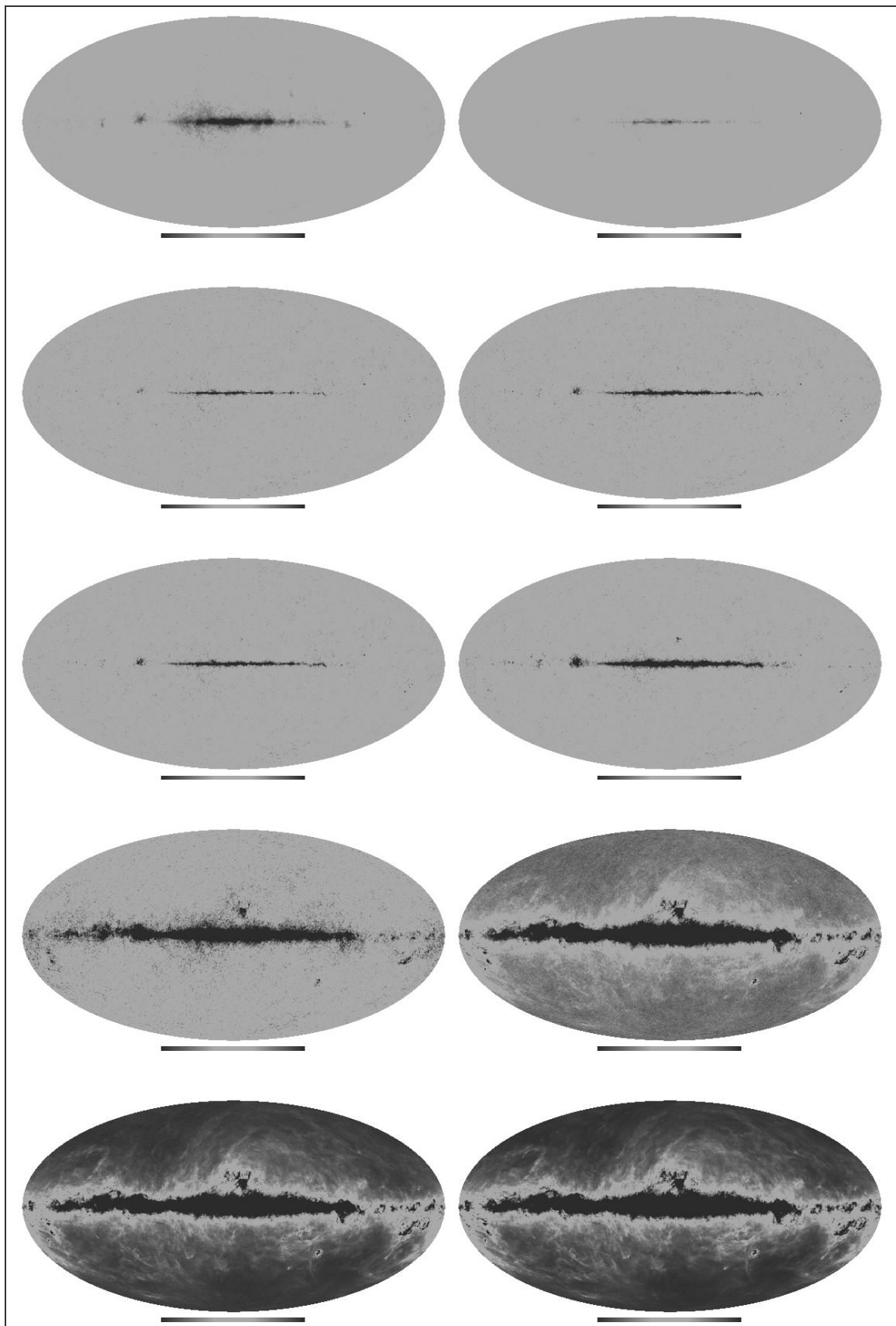


Figure 3. Erreur relative sur l'estimation du spectre de puissance du CMB dans les approches en aveugle (haut), où la matrice de mélange est estimée, et semi-aveugle (bas), où les paramètres de mélange sont fixés à leurs valeurs vraies.

du ciel observé par le satellite Planck, contenant cinq composantes et du bruit blanc. Les cartes d'observations sont décomposées dans la base des harmoniques sphériques.

Le spectre de puissance du CMB est estimé avec une bonne précision jusqu'au multipôle $l \approx 2500$ en choisissant des domaines spectraux de largeur $\Delta l = 10$. La comparaison des résultats obtenus dans les approches aveugle et semi-aveugle montrent que les éléments de la matrice de mélanges peuvent être estimés sans entraîner une perte de précision significative dans l'estimation du spectre de puissance du CMB.

Remerciements

Nous remercions la collaboration Planck pour les simulations d'observation et en particulier V. Stolyarov, R. Kneissl et M.A.J. Ashdown avec qui nous avons échangé de nombreuses discussions. Les routines HEALPix (voir <http://www.eso.org/science/healpix/>) ont été utilisées pour les décompositions en harmoniques sphériques

Références

- [1] F.R. Bouchet, R. Gispert, *Foregrounds and CMB experiments. Semi-analytical estimates of contamination*. *New Astronomy*, Vol. 4, pp. 443–479 (1999).
- [2] M. Tegmark, G. Efstathiou, *A method for subtracting foregrounds from multifrequency CMB sky maps*. *MNRAS*, Vol. 281, pp. 1297–1314 (1996).
- [3] M.P. Hobson, A.W. Jones, A.N. Lasenby, F.R. Bouchet, *Foreground separation methods for satellite observations of the cosmic microwave background*. *MNRAS*, Vol. 300, pp. 1–29 (1998).
- [4] V. Stolyarov, M.P. Hobson, M.A.J. Ashdown, A.N. Lasenby, *All-sky component separation for the Planck mission*. *MNRAS*, Vol. 336, pp. 97–111 (2002).
- [5] C. Baccigalupi, L. Bedini, C. Burigana, G. De Zotti, A. Farusi, D. Maino, M. Maris, F. Perrotta, E. Salerno, L. Toffolatti, A. Tonazzini, *Neural networks and the separation of cosmic microwave background and astrophysical signals in sky maps*. *MNRAS*, Vol. 318, pp. 769–780 (2000).
- [6] J. Delabrouille, J.F. Cardoso, G. Patanchon, *Multi-Detector Multi-Component spectral matching and applications for CMB data analysis*. astro-ph/0211504 (soumis à MNRAS).
- [7] J.F. Cardoso, H. Snoussi, J. Delabrouille, G. Patanchon, *Blind separation of noisy Gaussian stationary sources. Application to cosmic microwave background imaging*. Acte de conférence EUSIPCO, Vol. 1, pp. 561–564 (2002).
- [8] M. Zaldarriaga, U. Seljak, *CMBFAST for Spatially Closed Universes*. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, Vol. 129, pp. 431–434 (2000).
- [9] V.R. Eke, J.F. Navarro, C.S. Frenk, *The Evolution of X-Ray Clusters in a Low-Density Universe*. *ApJ*, Vol. 503, p. 569 (1998).

Les auteurs

Guillaume Patanchon a obtenu la maîtrise de Physique de l'Université Bordeaux I en 1999 et le DEA d'astrophysique de l'Université Paris 6 à l'Institut d'Astrophysique de Paris en 2000. Il est actuellement doctorant au Laboratoire de Physique Corpusculaire et Cosmologie du Collège de France. Son activité de recherche est l'analyse des données du fond diffus cosmologique.

Hichem Snoussi a obtenu le diplôme d'Ingénieur de l'école supérieure d'électricité (Supélec) de Gif-sur-Yvette en 2000. Il a obtenu le DEA Automatique et Traitement du Signal de l'université Paris 11 en 2000. Actuellement, il poursuit sa thèse dans le Laboratoire des Signaux et Systèmes du CNRS. Ses activités de recherche comprennent les techniques bayésiennes pour la séparation de sources, la géométrie de l'information et les modèles à variables cachées.

Jean François Cardoso est Directeur de Recherches au CNRS, au département du traitement du signal et des images de l'École Nationale Supérieure des Télécommunications (ENST) de Paris. Son activité de recherche est le traitement statistique du signal et en particulier la séparation de sources en aveugle. Depuis 2001, il travaille en collaboration avec des cosmologistes sur le traitement statistique des données astronomiques.

Jacques Delabrouille est cosmologiste au Laboratoire de Physique Corpusculaire et Cosmologie du Collège de France. Il a obtenu en 1991 le diplôme d'ingénieur de Télécom Paris, et en 1998 le Ph.D. de Physique de l'Université de Chicago et le doctorat Astrophysique et Techniques Spatiale de l'Université Paris 11. Son activité de recherche est l'étude des anisotropies du fond diffus cosmologique, et en particulier la préparation de la mission spatiale Planck.