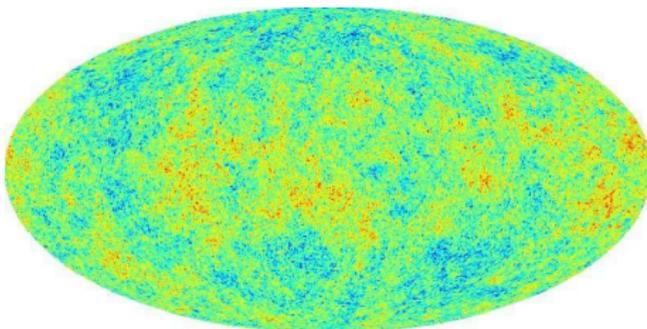


Analyse des données du fond diffus cosmologique : simulation et séparation de composantes

Marc BÉTOULE

Direction : Jacques DELABROUILLE (APC) et Marc-Antoine MIVILLE-DESCHÊNES (IAS)

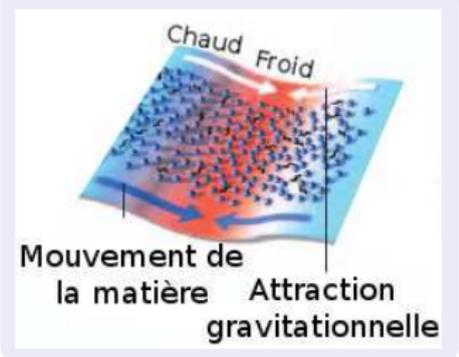
Soutenance de thèse, 25 septembre 2009



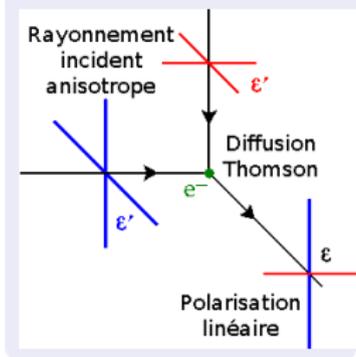
Le fond diffus cosmologique



Rayonnement anisotrope



et polarisé



Enjeux futurs

Chercher des écarts au modèle standard

- Non gaussianité
- Fluctuations isocourbure

Contraintes sur l'inflation

- Mesure plus précise de l'indice spectrale des modes scalaires n_s
- Détection des modes B, mesure de $r = T/S$

Détection et exploitation d'autres effets

- Lentille gravitationnelle, réionisation, effet SZ, effet Vishniac
- ISW, contraintes sur l'énergie noire



Enjeux futurs

Chercher des écarts au modèle standard

- Non gaussianité
- Fluctuations isocourbure

Contraintes sur l'inflation

- Mesure plus précise de l'indice spectrale des modes scalaires n_s
- Détection des modes B, mesure de $r = T/S$

Détection et exploitation d'autres effets

- Lentille gravitationnelle, réionisation, effet SZ, effet Vishniac
- ISW, contraintes sur l'énergie noire



Contexte expérimental

Lancement de PLANCK le 14 mai 2009



- 9 canaux entre 30 et 857 GHz (7 polarisés)
- Résolution 5 arcminutes $\ell \sim 2000$
- Sensibilité

Haute résolution



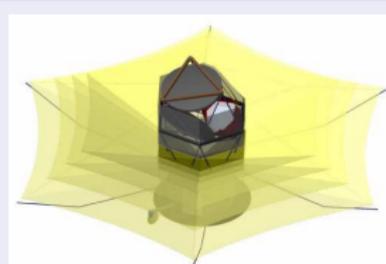
SPT, ACT...

Modes B



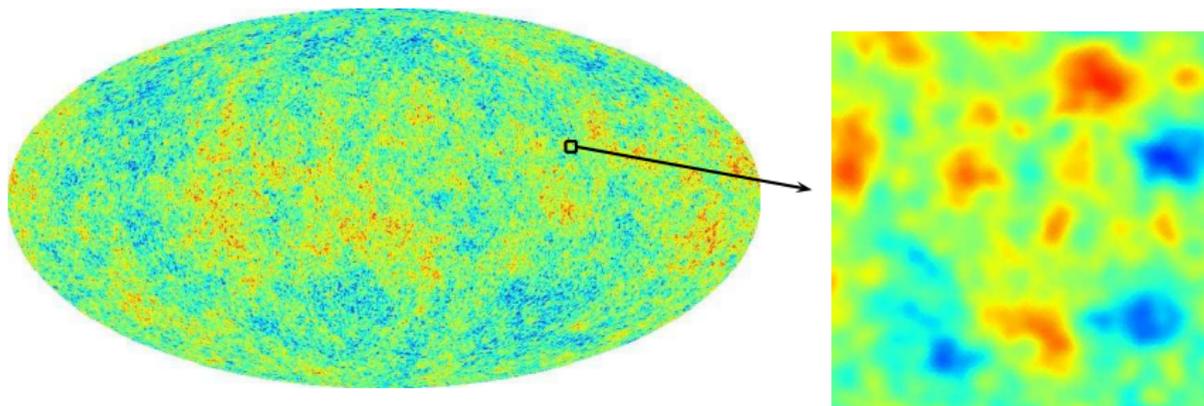
BICEP, QUAD,
QUIET, EBEX,
SPIDER...

4^{ème} génération

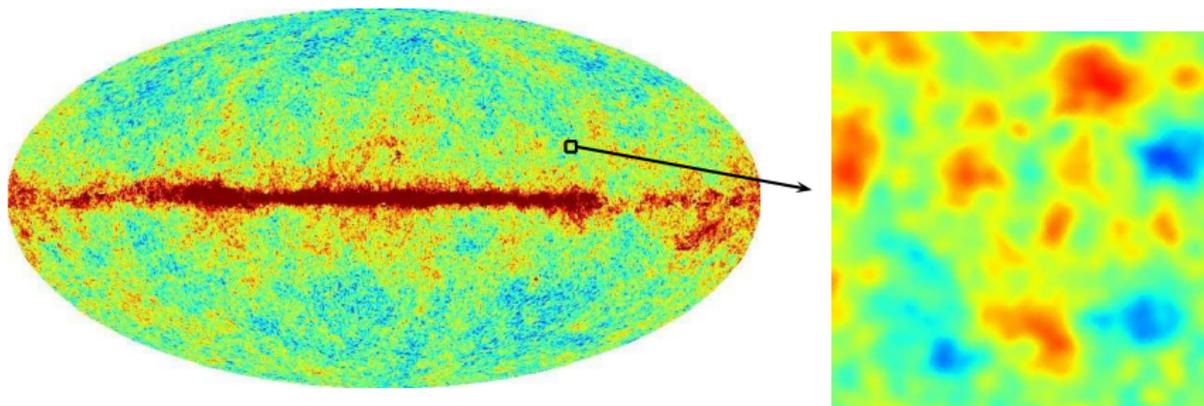


CMBPol et BPol.

Contamination du signal



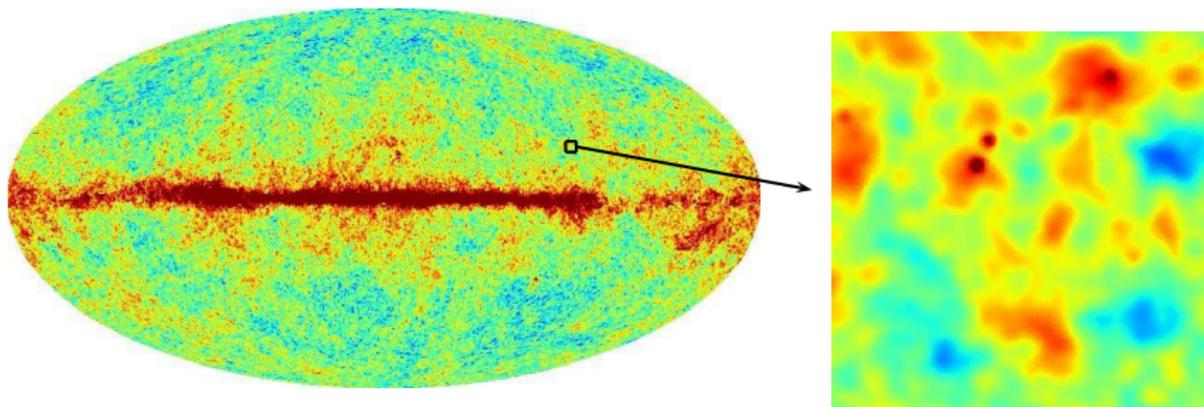
Contamination du signal



- Émission galactique



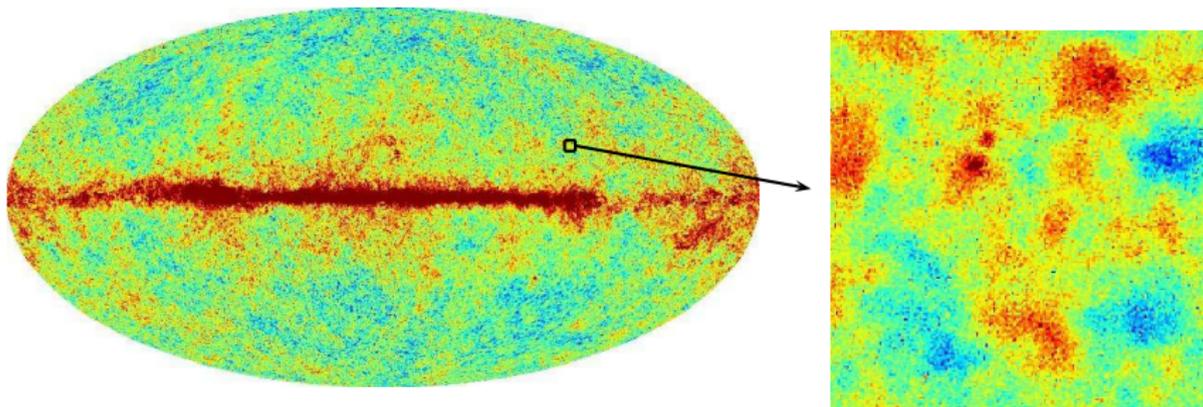
Contamination du signal



- Émission galactique
- Sources extragalactiques



Contamination du signal

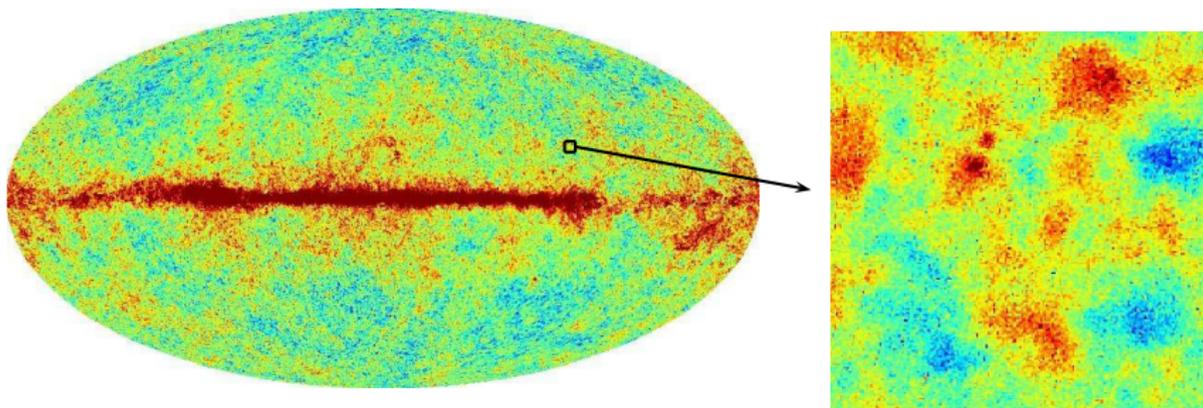


- Émission galactique
- Sources extragalactiques

- Bruit instrumental



Contamination du signal

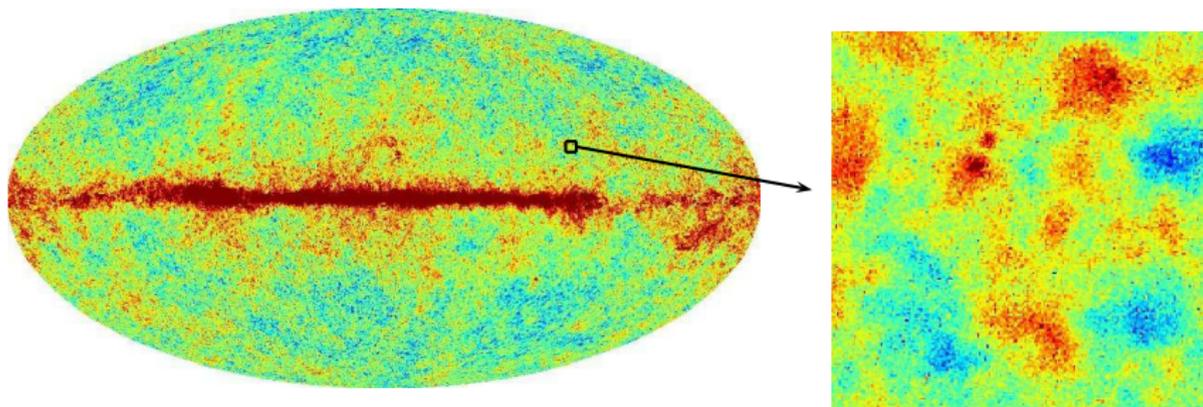


- Émission galactique
- Sources extragalactiques

- Bruit instrumental
- Anisotropies secondaires (Lensing, SZ ...)



Contamination du signal

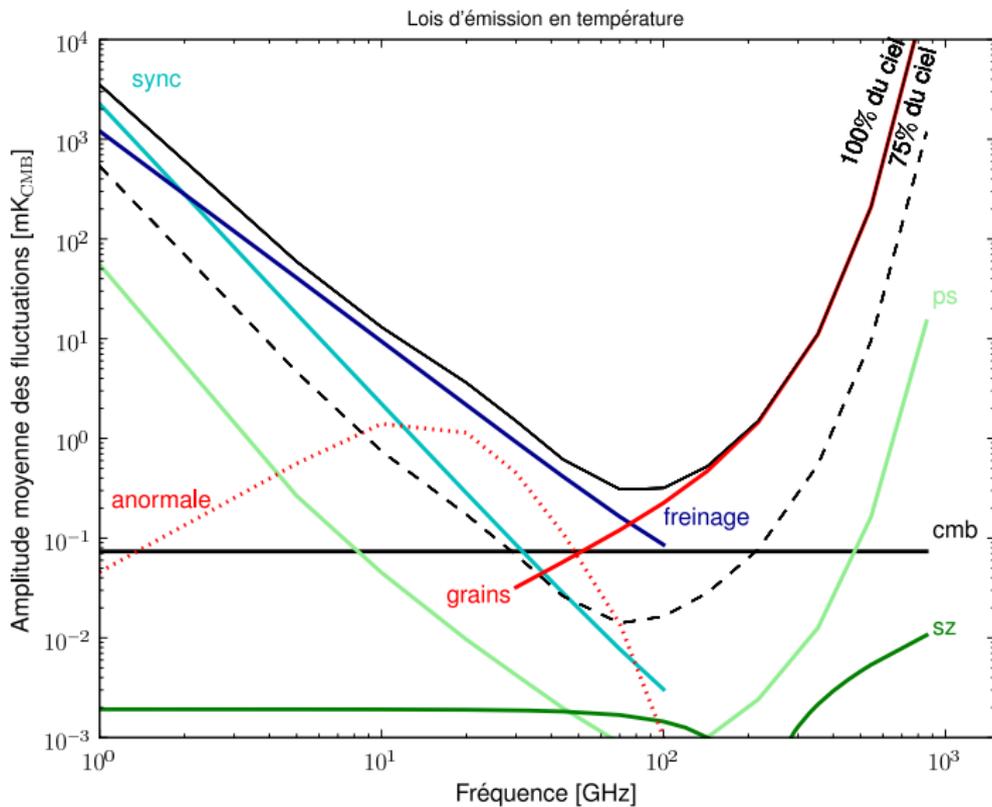


- Émission galactique
- Sources extragalactiques
- Bruit instrumental
- Anisotropies secondaires (Lensing, SZ ...)

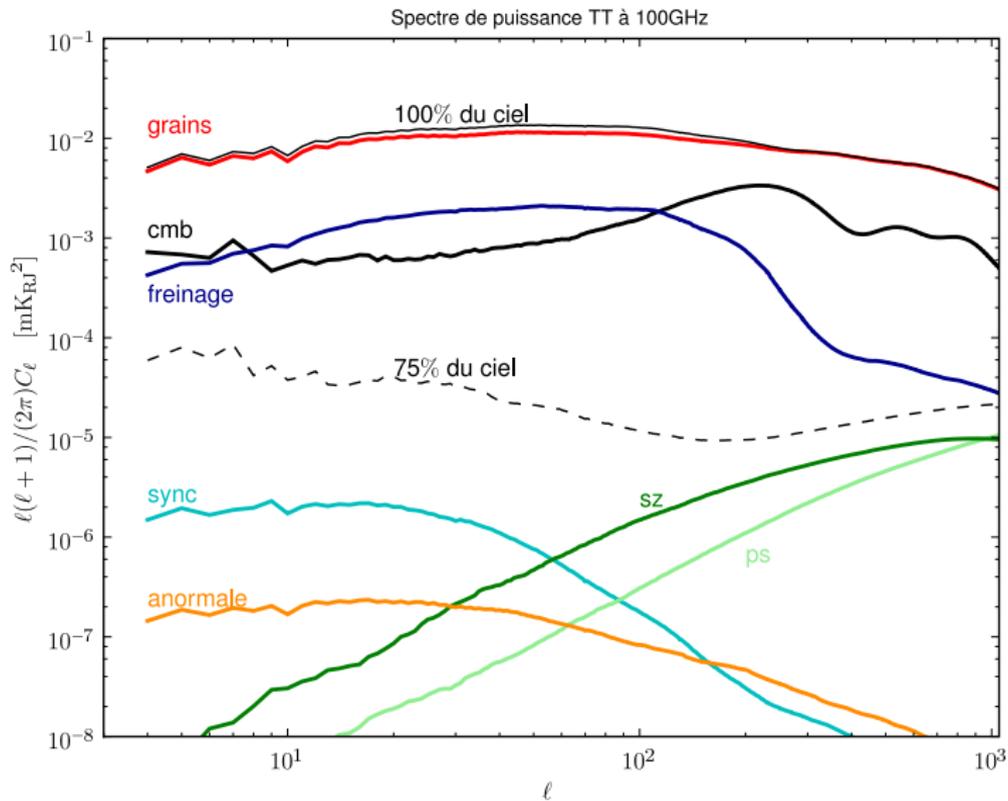
La réalisation des objectifs scientifiques dépend de notre capacité à isoler ces différentes contributions.



Contributions aux échelles $>1^\circ$

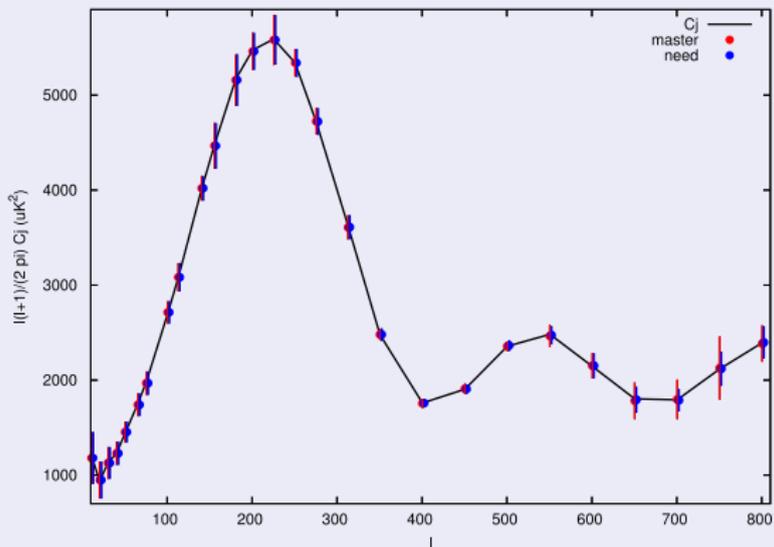


Contributions aux différentes échelles



Caractérisation de la méthode

Premiers résultats



Problématique de la séparation des sources ponctuelles

Théorie de la détection et de l'estimation

Source unique de forme connue dans un bruit gaussien stationnaire :
Le filtre optimal est le *filtre adapté* (anglais Matched Filter)

Mise en pratique délicate

- Arrière-plan non stationnaire
- Statistique non gaussienne
- Confusion ?

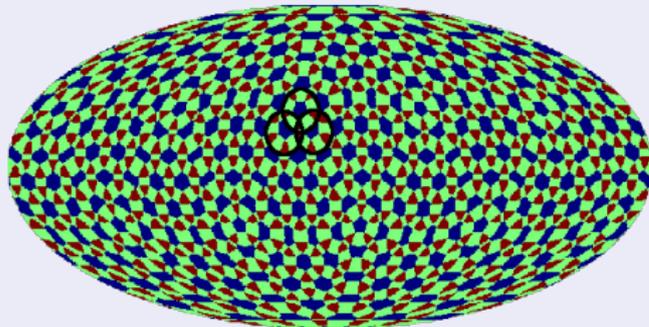
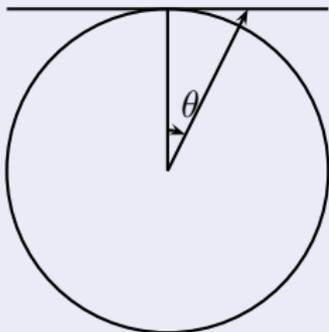
Proposition

- Division du ciel en zones de dimensions restreintes
- Estimation empirique du spectre de l'arrière-plan



Méthode localisée

Découpage de la sphère et projection sur un plan tangent



Pipeline

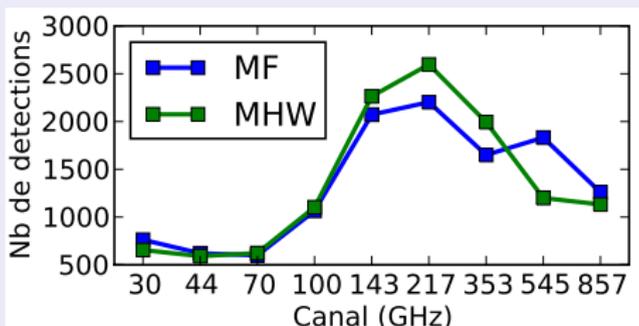
- 1 Projection sur la collection de plans tangents
- 2 Filtrage adapté et détection des sources fortes (seuil $20\text{-}\sigma$)
- 3 Masquage des sources fortes
- 4 Filtrage adapté et détection des sources faibles (seuil $5\text{-}\sigma$)
- 5 Association des catalogues



Résultats pour la détection

Data challenge séparation de composantes

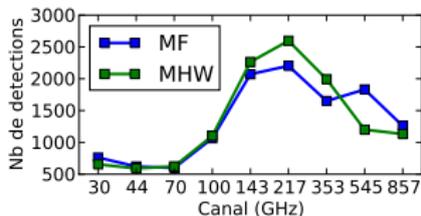
- Simulation d'un jeu de données PLANCK
- 2 méthodes :
 - Filtre adapté (mon travail)
 - Mexican Hat Wavelet (MHW) (groupe de Santander Gonzales-Nuevo et al., 2006)
- Nombres de détection pour un taux de fausse détection de 5% :



- Publié dans Leach et al. (2008) *A&A*

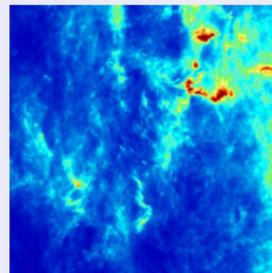


Discussion



Limitations

- Localisation identique pour toutes les échelles
- Compromis estimation spectrale du fond / variabilité



Améliorer

- Localisation dans un espace d'ondelettes (MF needlets)
- Itération avec la séparation de composantes diffuses



Estimation du flux et de la position des sources

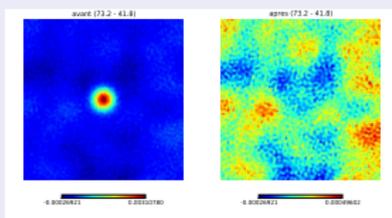
- 2 Objectifs :
- 1 Catalogue
 - 2 Soustraction pour CMB

Ajustement d'une forme connue θ

Modèle local du bruit : iid gaussien de moyenne b et de variance σ^2 ,
 $n(\xi) \sim \mathcal{N}(b, \sigma^2)$:

$$\chi^2(\xi_0, A, b) = \sum_i^{N_i} \left(\frac{x(\xi_i) - b - \theta(\xi_i; \xi_0, A)}{\sigma} \right)^2. \quad (1)$$

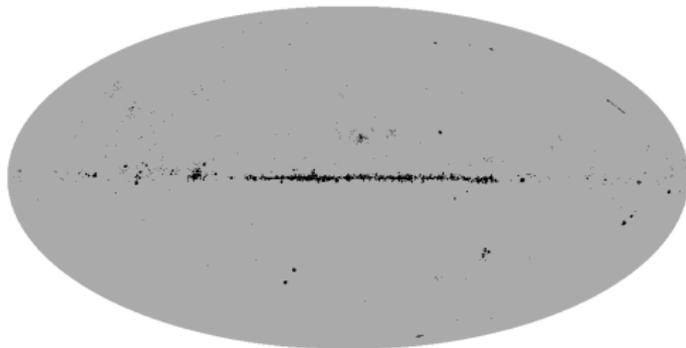
Résultats sur le jeu de données PLANCK'Full Focal Plane'



Traitement des sources non ajustées

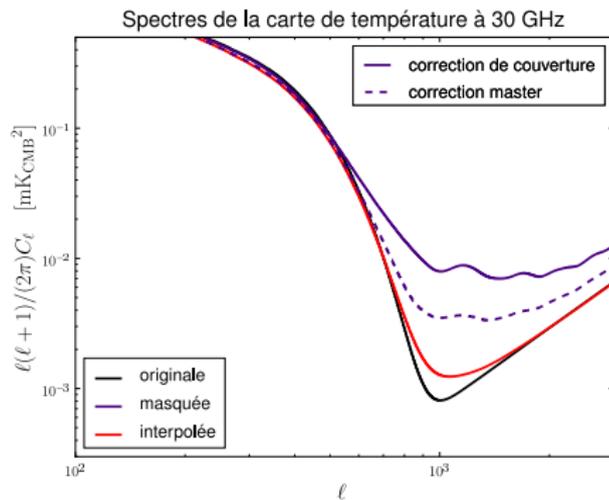
Certaines sources sont mal ajustées

- Arrière-plan complexe
- Sources étendues



Traitement des sources non ajustées

- Les masques de sources ponctuelles ont des effets spectraux importants
- La majorité de l'effet provient de la discontinuité introduite
- Solution : restaurer au minimum la continuité par interpolation

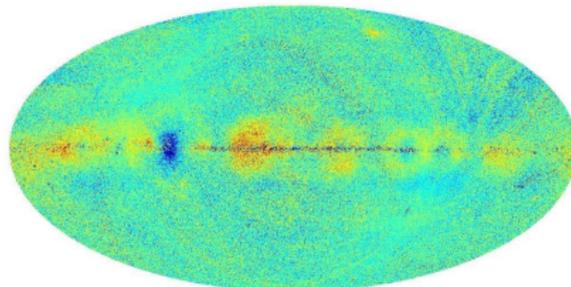
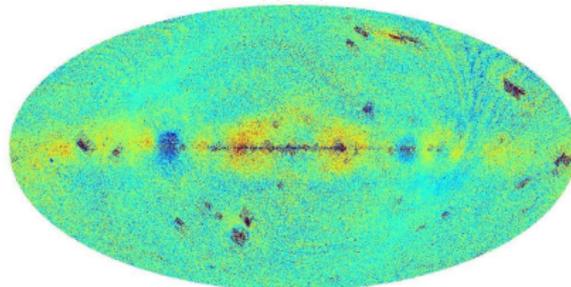


Interaction avec la séparation de composantes diffuses

Données test : "Full Focal Plane" dans PLANCK

- ILC needlets (moins sensible au phénomène)
- Comparaison de deux pipelines
 - Sans traitement
 - Soustraction
Masquage / Interpolation

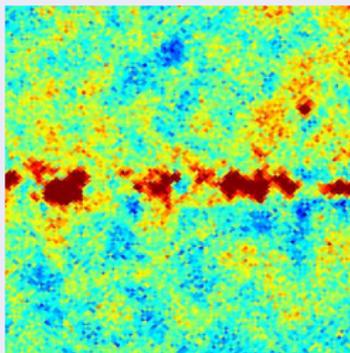
Résidu :



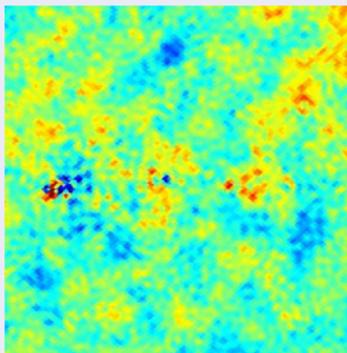
Traitement des sources ponctuelles dans WMAP

Zoom sur le plan galactique

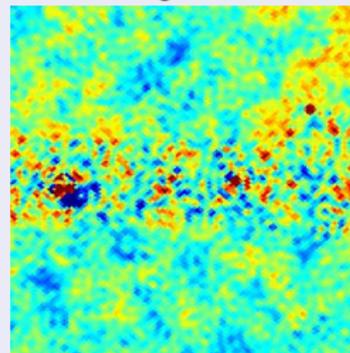
WMAP



ADAMIS



Tegmark



-0.50



0.50

(45.0, 0.0) Galactic

Publié dans Delabrouille et al. (2008), *A&A*



Plan

- 1 Problématique
 - Contexte
 - Le problème des avant-plans

- 2 Modélisation de l'émission millimétrique
 - Contexte
 - Le PLANCK Sky Model (PSM)

- 3 Analyse de données
 - Estimation spectrale en needlets
 - Extraction des sources ponctuelles
 - Avant-plans et détection des modes B

- 4 Conclusion
 - Conclusion
 - Perspectives



Étude de mission CMBPol

L'inflation prédit l'existence d'un fond d'ondes gravitationnelles

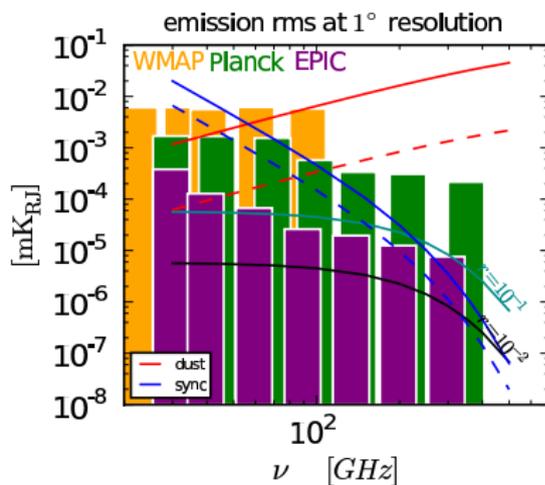
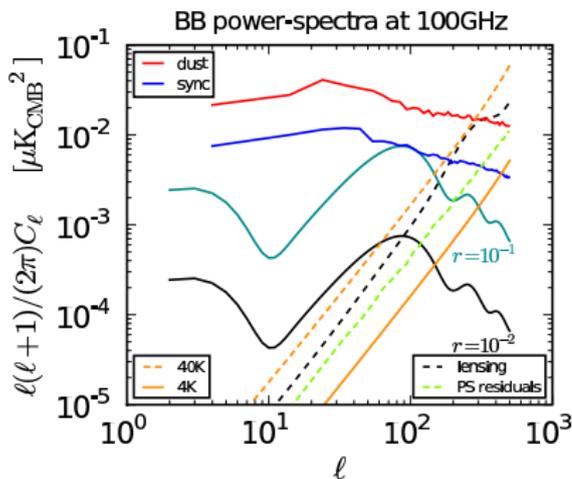
- Modes tenseurs \rightarrow motif de polarisation de type B
- Polarisation du CMB : un moyen unique de détection de ces modes
- Mesure de $r = T/S \rightarrow$ contraintes sur la physique de l'inflation

Contexte expérimental

- $r \lesssim 0.22$ (WMAP - Komatsu et al. 2008)
- Nombreuses expériences (dont PLANCK)
- Motive la conception d'une quatrième mission spatiale



Problématique de la détection des modes B



- Émission diffuse galactique est le principal contaminant
- Séparation de composantes cruciale pour la détection des modes B



Contexte

Deux appels à projets

- BPol
- CMBPol : Plusieurs réponses, dont EPIC (Bock et al. 2008)

La séparation de composantes gouverne des choix critiques

- Couverture spectrale (nombre de canaux)
- Résolution et sensibilité

Plusieurs études prospectives

- Hypothèses sur la contamination résiduelle
 - Verde (2006), Gratton (2009), soustraction de templates
 - Amblard (2007), ILC
- Modèle physique des avant-plans
 - Dunkley (2008)
- Notre approche : Modèle flexible sans paramétrisation physique des avant-plans
 - Betoule (2009)

Séparation aveugle des composantes avec SMICA

SMICA (Delabrouille et al. 2003, Patanchon 2003, Cardoso, Le Jeune, Delabrouille, Betoule, Patanchon 2008)

- Ajustement d'un modèle des matrices de covariance spectrales
- Analyse en composantes indépendantes
- Modèle flexible

Adaptable à la mesure de r

- Analyse sur les cartes de modes B
- Forme générale du \mathcal{S}_ℓ spectre BB connue

$$\mathbf{R}_\ell^{\text{cmb}} = \mathcal{C}_\ell \mathbf{A}_{\text{cmb}} \mathbf{A}_{\text{cmb}}^\dagger \longrightarrow \mathbf{R}_\ell^{\text{cmb}} = r \mathcal{S}_\ell \mathbf{A}_{\text{cmb}} \mathbf{A}_{\text{cmb}}^\dagger$$



Modèle flexible

3 composantes indépendantes

$$\mathbf{R}_\ell = \mathbf{R}_\ell^{\text{cmb}} + \mathbf{R}_\ell^{\text{avant-plan}} + \mathbf{R}_\ell^{\text{bruit}}$$

- $\mathbf{R}_\ell^{\text{cmb}} = \mathbf{C}_\ell \mathbf{A}_{\text{cmb}} \mathbf{A}_{\text{cmb}}^\dagger \longrightarrow \mathbf{R}_\ell^{\text{cmb}} = r \mathcal{S}_\ell \mathbf{A}_{\text{cmb}} \mathbf{A}_{\text{cmb}}^\dagger$
- $\mathbf{R}_\ell^{\text{bruit}}$ connu

Modèle des avant-plans

- Mélange linéaire de N_{obs} "composantes" corrélées
- Matrice $\mathbf{R}_\ell^{\text{avant-plan}}$ de rang $N_{\text{obs}} < N_{\text{freq}}$

$$S_\nu(\xi) = S_0(\xi) \left(\frac{\nu}{\nu_0} \right)^{\beta(\xi)}$$

$$S_\nu(\xi) \approx S_0(\xi) \left(\frac{\nu}{\nu_0} \right)^\beta + S_0(\xi) \delta\beta(\xi) \left(\frac{\nu - \nu_0}{\nu_0} \right) \left(\frac{\nu}{\nu_0} \right)^\beta$$

Représentation approximative de toute émission mesurée à un nombre fini de fréquences.



Résultats principaux

Étude sur des simulations PSM

PLANCK : Borne pessimiste $r \sim 0.1$

- Mission nominale
- Seul *BB* est exploité

Sol (Clover)

- Peu de fréquences (90,150,225) → avant-plans limitent $r \sim 0.09$
- Sol+PLANCK $r \sim 0.035$

EPIC : 3 versions, coût croissant →

Version	EPIC-LC	EPIC-2m	EPIC-CS
Diamètre	0.3	2 m	3 m
Canaux (GHz)	7 (30-300)	9 (30-800)	8 (30-500)
Durée	2 ans	4 ans	4 ans
sensibilité	Comparable $\sim 1.5\mu K\sqrt{s}$		
$r \sim 0.001$	3- σ	6- σ	5.5- σ



Résultats principaux

Étude sur des simulations PSM

PLANCK : Borne pessimiste $r \sim 0.1$

- Mission nominale
- Seul *BB* est exploité

Sol (Clover)

- Peu de fréquences (90,150,225) → avant-plans limitent $r \sim 0.09$
- Sol+PLANCK $r \sim 0.035$

EPIC : 3 versions, coût croissant →

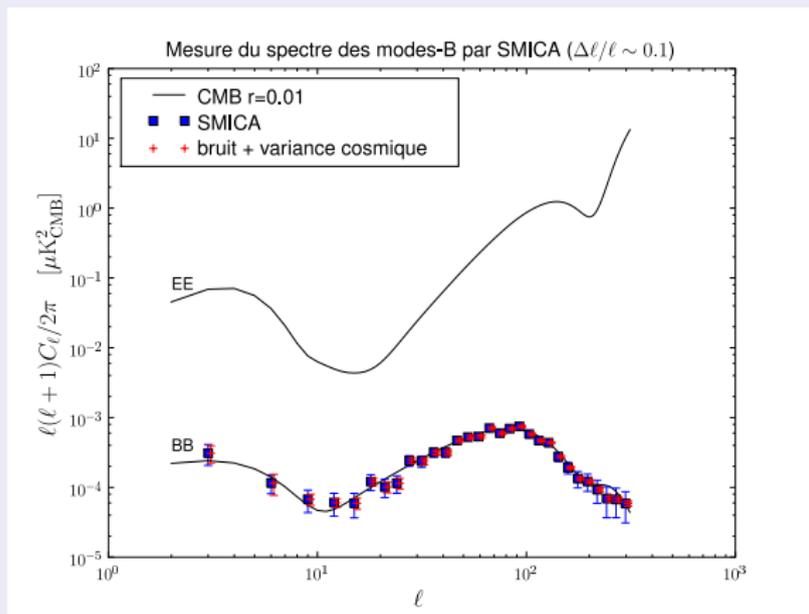
Version	EPIC-LC	EPIC-2m	EPIC-CS
Diamètre	0.3	2 m	3 m
Canaux (GHz)	7 (30-300)	9 (30-800)	8 (30-500)
Durée	2 ans	4 ans	4 ans
sensibilité	Comparable $\sim 1.5\mu K\sqrt{s}$		
$r \sim 0.001$	3- σ	6- σ	5.5- σ



Mesure du spectre

L'objectif scientifique évolue pour EPIC-IM 4K

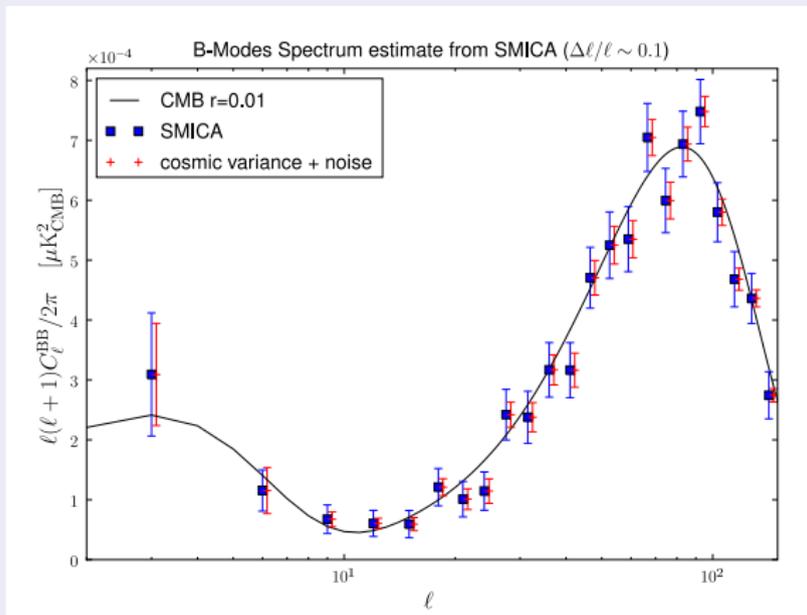
- Similaire à EPIC-2m
- Télescope entièrement refroidi à 4K



Mesure du spectre

L'objectif scientifique évolue pour EPIC-IM 4K

- Similaire à EPIC-2m
- Télescope entièrement refroidi à 4K



Résultats fiables ?

Les simulations sont-elles représentatives de la réalité ?

- Pas de modèle physique des données
- Rang N_{comp} de la matrice $\mathbf{R}^{\text{avant-plan}}$ réelle comparable à la simulation

Exploiter le PSM pour faire varier les simulations

- Synchrotron : $S_{\nu}^X(\xi) = S_{\nu_0}^X(\xi) \left(\frac{\nu}{\nu_0} \right)^{\beta_s(\xi) + \alpha C(\xi) \log(\nu/\nu_1)}$ pour

$$\alpha = -0.3$$

- Poussière : Spectre de puissance $\times 2$

→ La qualité de l'ajustement ne varie pas, la dimension N_{comp} nécessaire non plus.

Betoule et al. (2009) *A&A*, Dunkley et al. (2009), Bock et al. (2009)



Bilan

Mise à disposition du Planck Sky Model

- Simulation aisée
- Possibilité de réaliser des simulations Monte-Carlo
- Standard pour PLANCK

Estimateur Spectral en Needlets

Gain pour les régimes intermédiaires/fusion d'expériences

Traitement des sources ponctuelles

- Amélioration notable de la reconstruction du CMB
- Implémenté pour PLANCK
- Appliqué à WMAP

Mesure des modes tenseurs

- Tenant compte de l'incertitude sur les avant-plans
- Application à la conception de mission

Perspectives

Dans la continuité

- Modélisation des données `PLANCK` dans le PSM
- Estimateur Spectral en Needlets croisé (Application possible à WMAP)
- Estimateur Spectral en Needlets polarisé
- Filtre adapté dans l'espace needlets (SZ)
- Application directe de la détection des modes B à `PLANCK`

À plus long terme

Intégration séparation de composantes diffuses et ponctuelles au sein d'un pipeline needlets

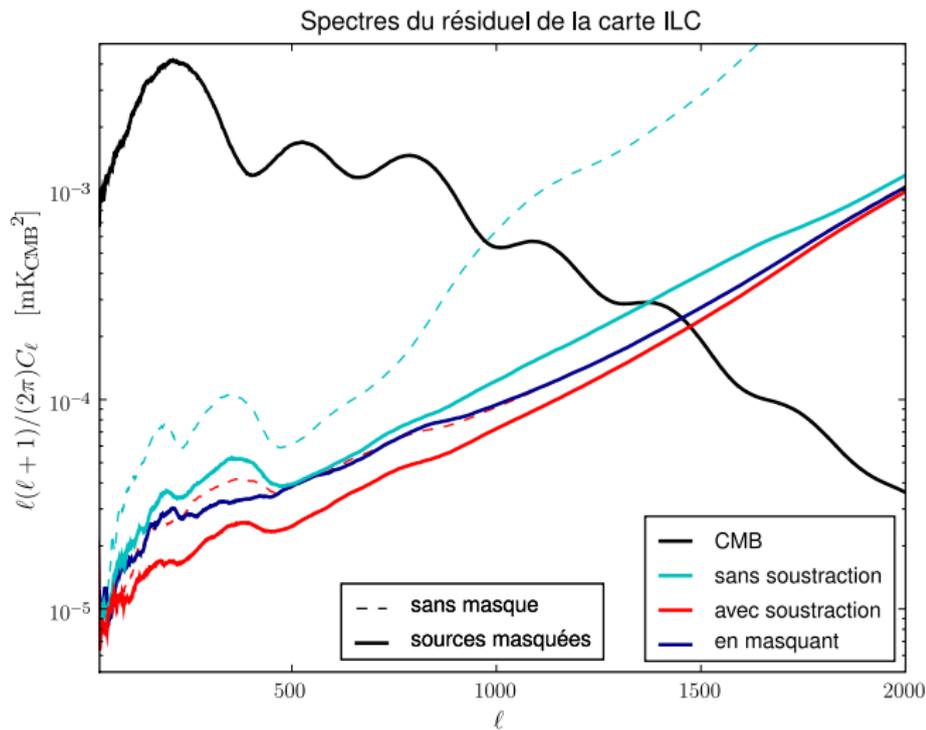


Bibliographie

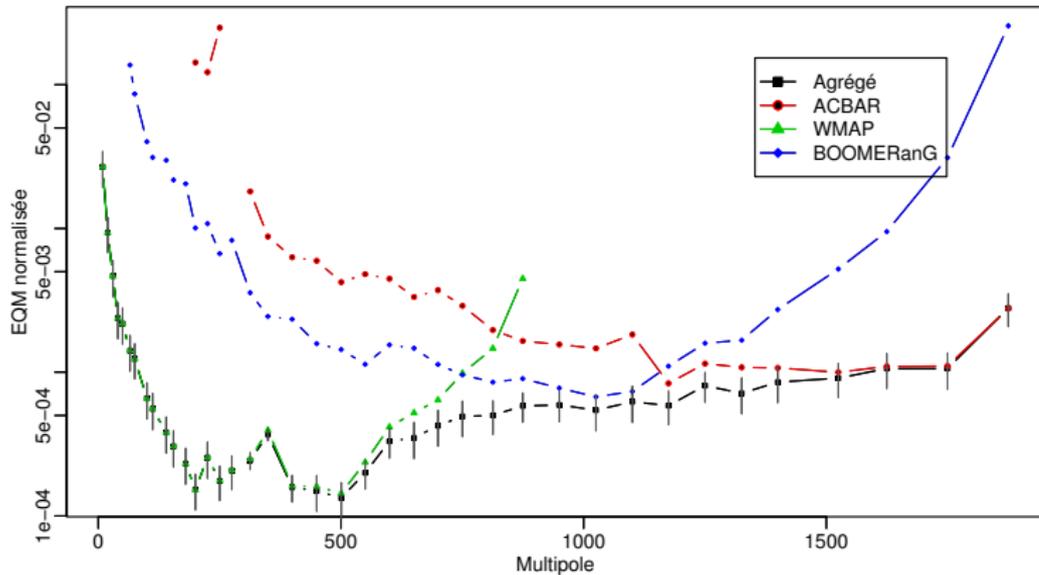
-  M. Betoule, E. Pierpaoli, J. Delabrouille, M. Le Jeune, J.F. Cardoso.
A&A. Volume 503, Issue 3, 2009, pp.691-706
-  Delabrouille, J. ; Cardoso, J.-F. ; Le Jeune, M. ; Betoule, M. ; Fay, G. ; Guilloux, F.
A&A, Volume 493, Issue 3, 2009, pp.835-857
-  Faÿ, G. ; Guilloux, F. ; Betoule, M. ; Cardoso, J.-F. ; Delabrouille, J. ; Le Jeune, M.
Physical Review D, vol. 78, Issue 8
-  Cardoso, Jean-François ; Le Jeune, Maude ; Delabrouille, Jacques ; Betoule, Marc ; Patanchon, Guillaume
IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, vol. 2, issue 5, pp. 735-746
-  Leach, S. ; Cardoso J.-F. et al.
A&A, Volume 491, Issue 2, 2008, pp.597-615



Prétraitement des sources ponctuelles et ILC



Fusion d'expériences



SMICA

$$\mathbf{x}(\xi) = \sum_{c=1}^C \mathbf{x}^c(\xi), \mathbf{a}_{\ell m} = \sum_{c=1}^C \mathbf{a}_{\ell m}^c \quad (2)$$

$$\mathbf{R}_\ell(\theta) = \sum_{c=1}^C \mathbf{R}_\ell^c(\theta^c). \quad (3)$$

$$-2 \ln \mathcal{L} = \sum_{\ell} (2\ell + 1) f_{\text{ciel}} K(\hat{\mathbf{R}}_\ell, \mathbf{R}_\ell(\theta)) + \text{const.} \quad (4)$$

où $\hat{\mathbf{R}}_\ell$ est l'estimateur de \mathbf{R}_ℓ :

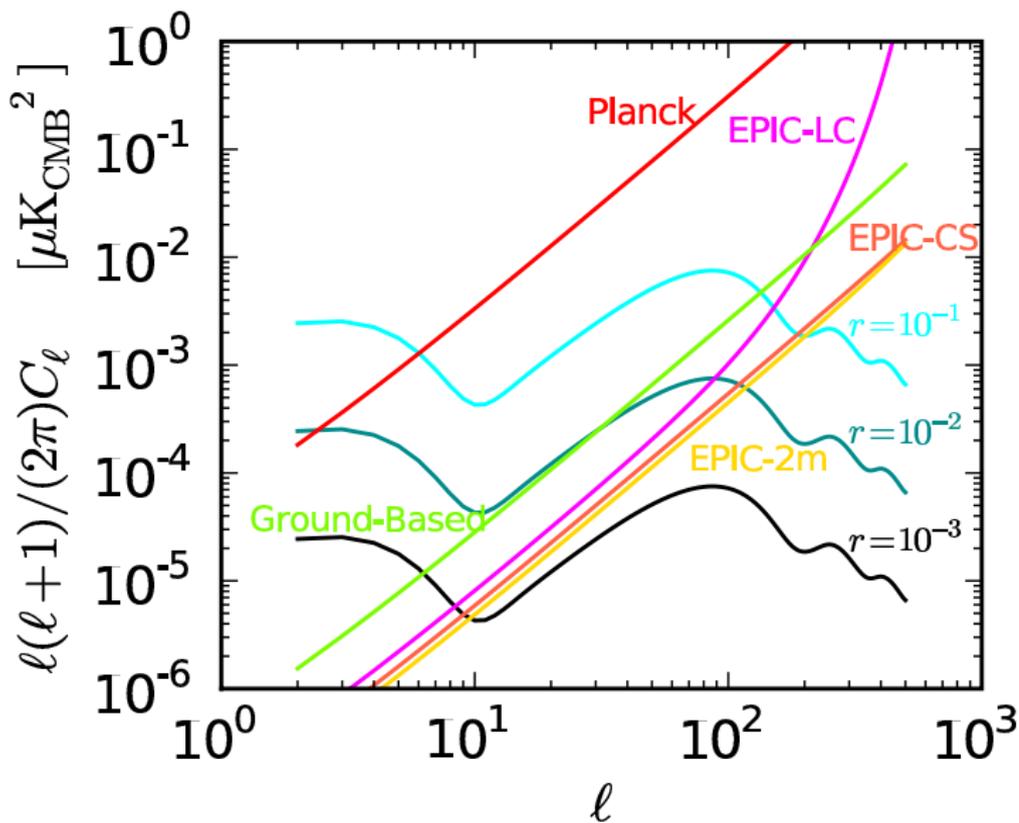
$$\hat{\mathbf{R}}_\ell = \frac{1}{2\ell + 1} \frac{1}{f_{\text{ciel}}} \sum_{m=-\ell}^{\ell} \mathbf{a}_{\ell, m} \mathbf{a}_{\ell, m}^\dagger \quad (5)$$

et où $K(\cdot, \cdot)$ est une mesure de la divergence entre deux matrices définies positives :

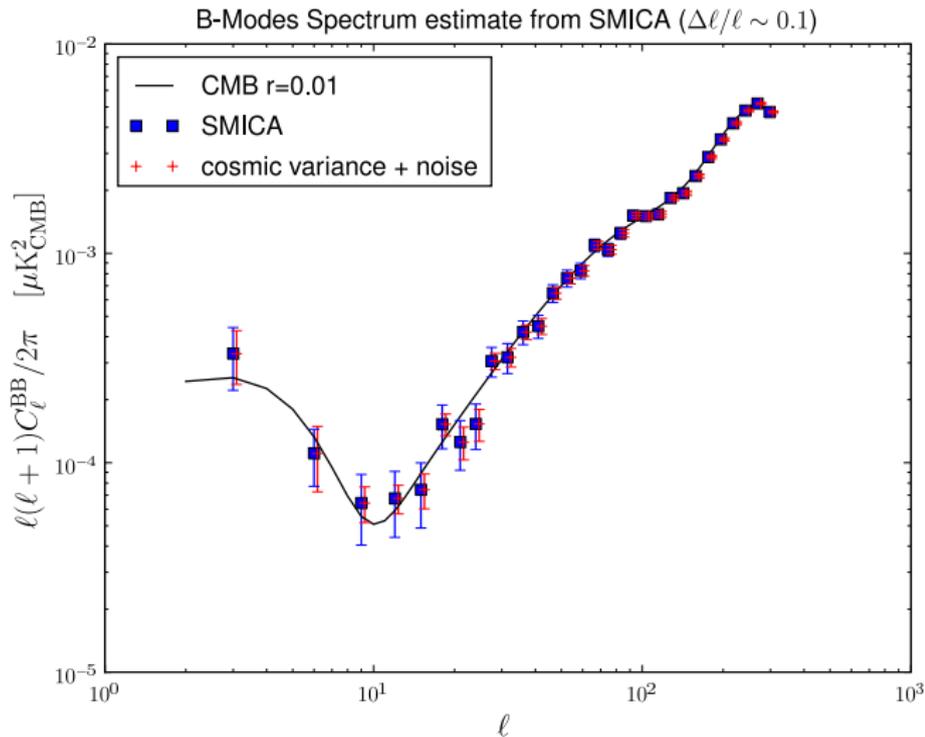
$$K(\hat{\mathbf{R}}, \mathbf{R}) = \frac{1}{2} \left[\text{trace}(\mathbf{R}^{-1} \hat{\mathbf{R}}) - \log \det(\mathbf{R}^{-1} \hat{\mathbf{R}}) - F \right]. \quad (6)$$



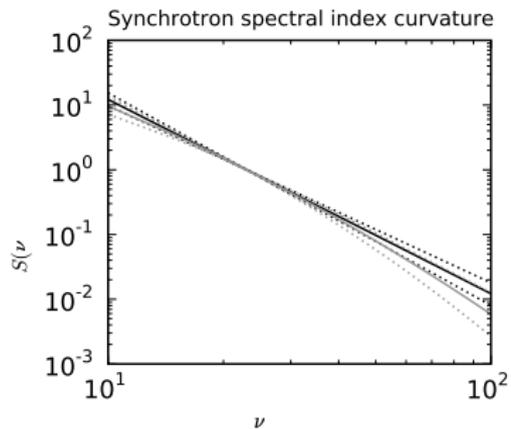
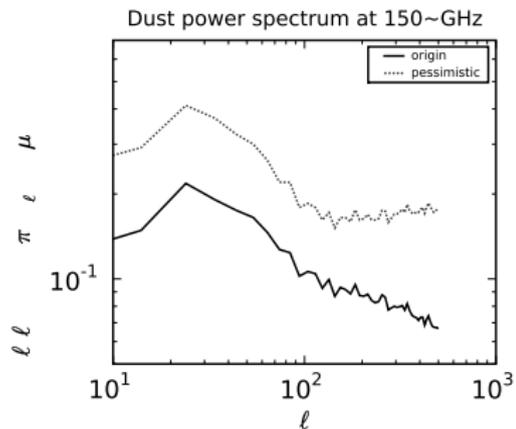
Sensibilité



Lensing



Variations



Sources ponctuelles - lensing

r	$r^{\text{no-ps}}$	r^{ideal}	$r^{\text{no-model}}$	$\sigma_r^{\text{no-ps}}$	σ_r^{ideal}	$\sigma_r^{\text{no-model}}$
0.001	$1.07 \cdot 10^{-3}$	$1.04 \cdot 10^{-3}$	$2.00 \cdot 10^{-3}$	$1.84 \cdot 10^{-4}$	$1.91 \cdot 10^{-4}$	$2.49 \cdot 10^{-4}$

Expérience	sans lensing			lensing		
	σ_r/r	$\sigma_r^{\ell \leq 20}/r$	$\sigma_r^{\ell > 20}/r$	σ_r/r	$\sigma_r^{\ell \leq 20}/r$	$\sigma_r^{\ell > 20}/r$
EPIC-CS	0.18	0.26	0.29	0.21	0.26	0.38
Ciel profond	0.13	—	—	1.1	—	—

