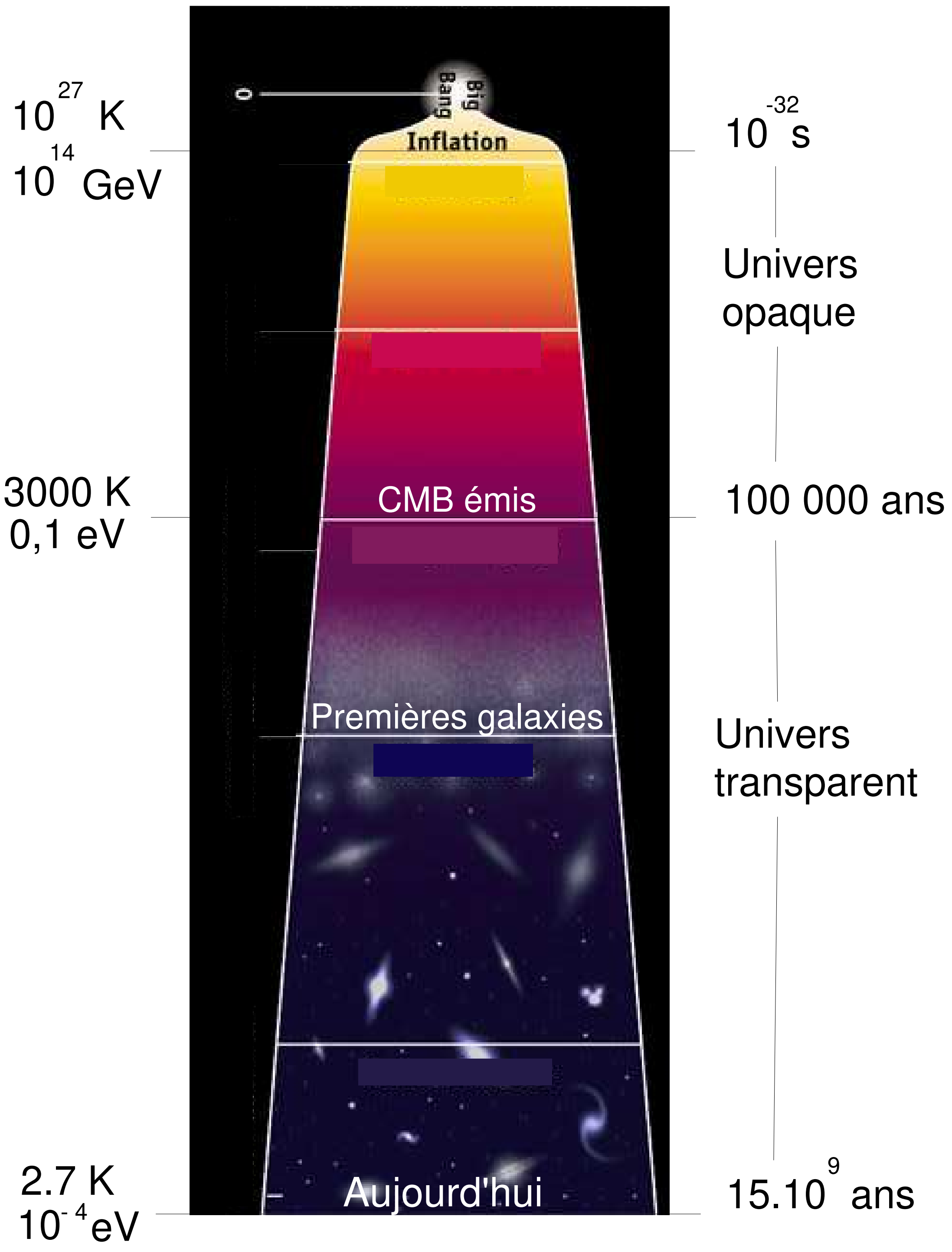
I.
CMB et polarisation

II.
Mesure de la polarisation et traitement du bruit basse fréquence

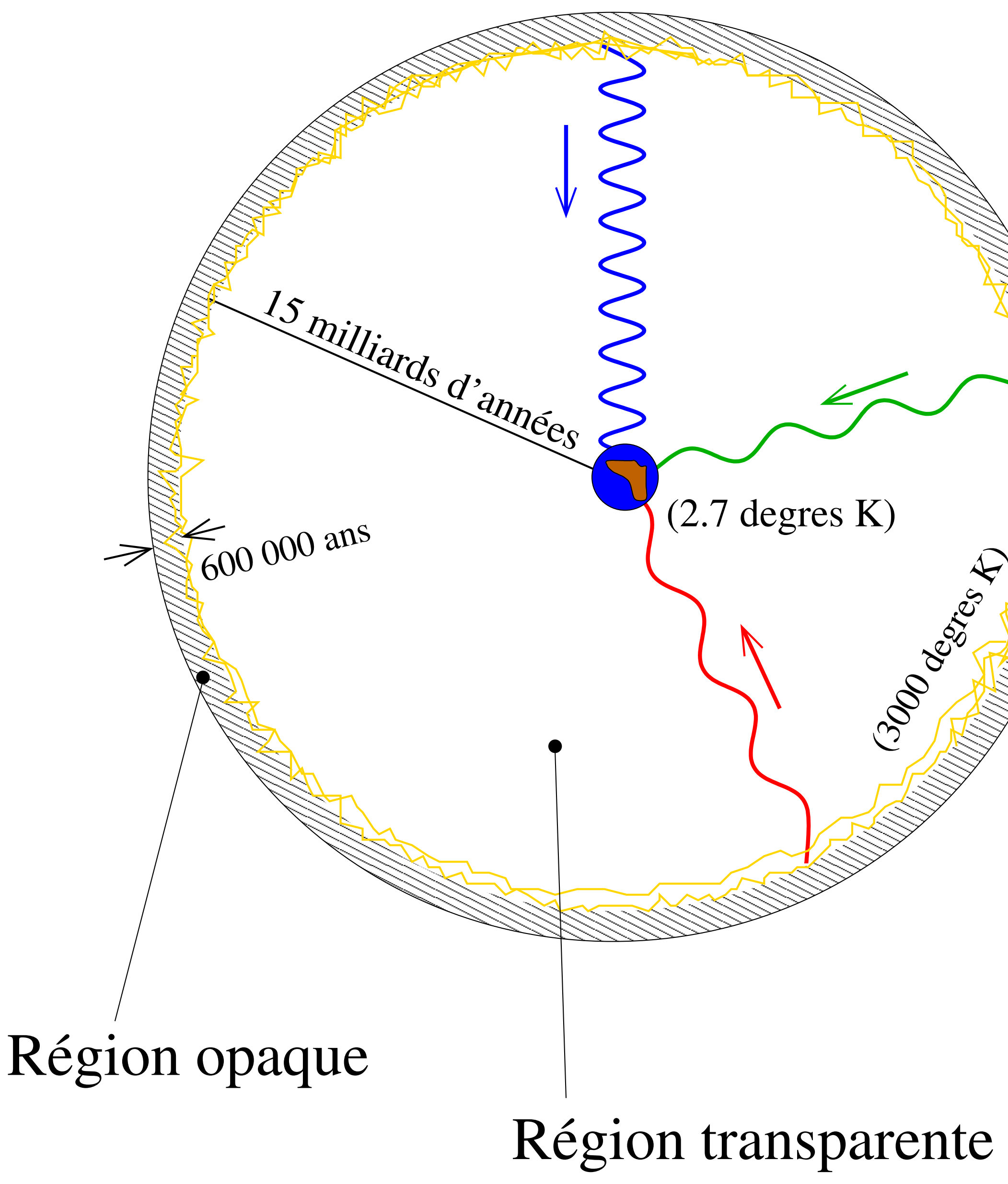
Kim A. (PCC), Delabrouille J. (PCC), Kaplan J. (PCC), Ansari R. (LAL),

Couchot F. (LAL), Revenu B. (PCC)



10^{27} K
10^{14} GeV
0
Big Bang
Inflation
10^{-32} s
Univers opaque
3000 K
0,1 eV
CMB émis
100 000 ans
Premières galaxies
Univers transparent
2.7 K
10^{-4} eV
Aujourd'hui
15.10^{9} ans

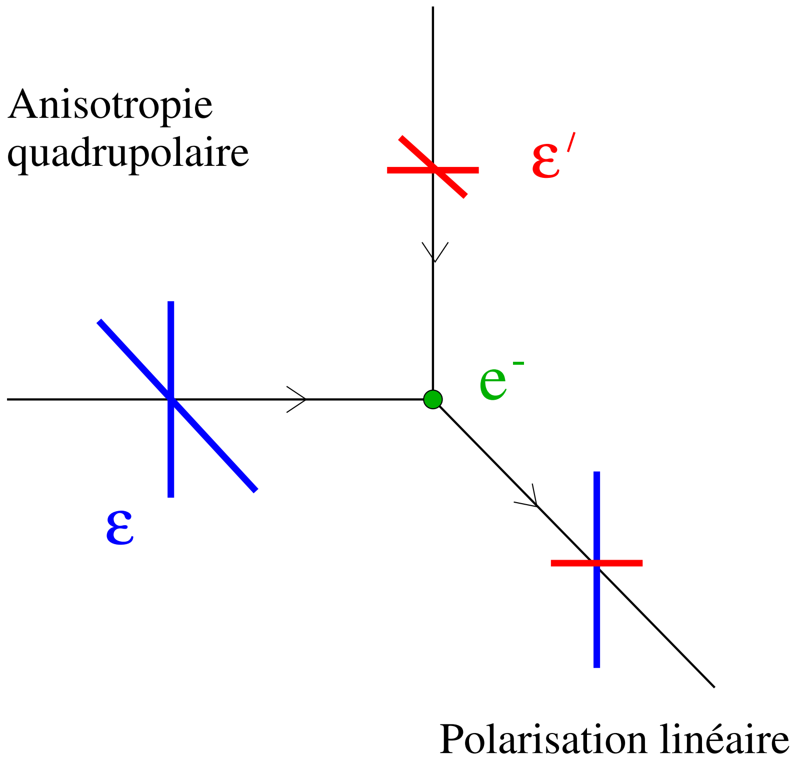
L'origine du CMB



Le CMB devrait être polarisé

Interaction : diffusion Thomson des photons sur les électrons du plasma

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} \propto |\hat{\epsilon}.\hat{\epsilon}'|^2$$



Quadrupoles dans le CMB ?

température : $\delta T \sim 10^{-5}$ K, $T = 2.728$ K
polarisation : $P \sim 10^{-6}$ K

Les paramètres de Stokes

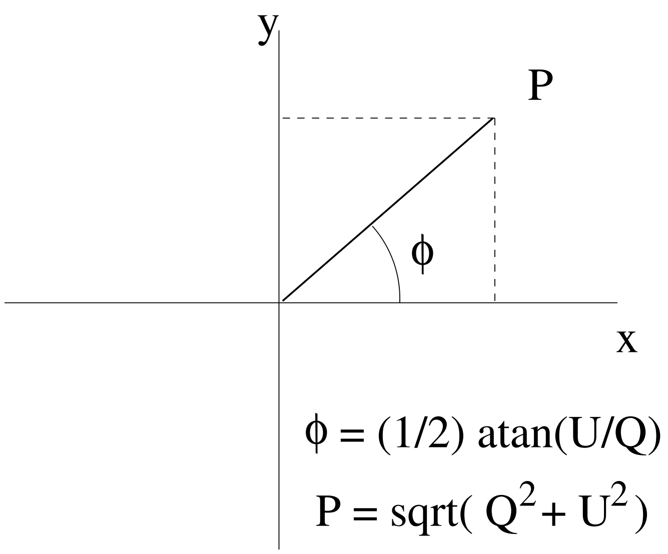
Une onde est caractérisée par :

$$
\begin{aligned}
E_x &= a_x \cos(\omega t - \phi_x) \\
E_y &= a_y \cos(\omega t - \phi_y)
\end{aligned}
$$

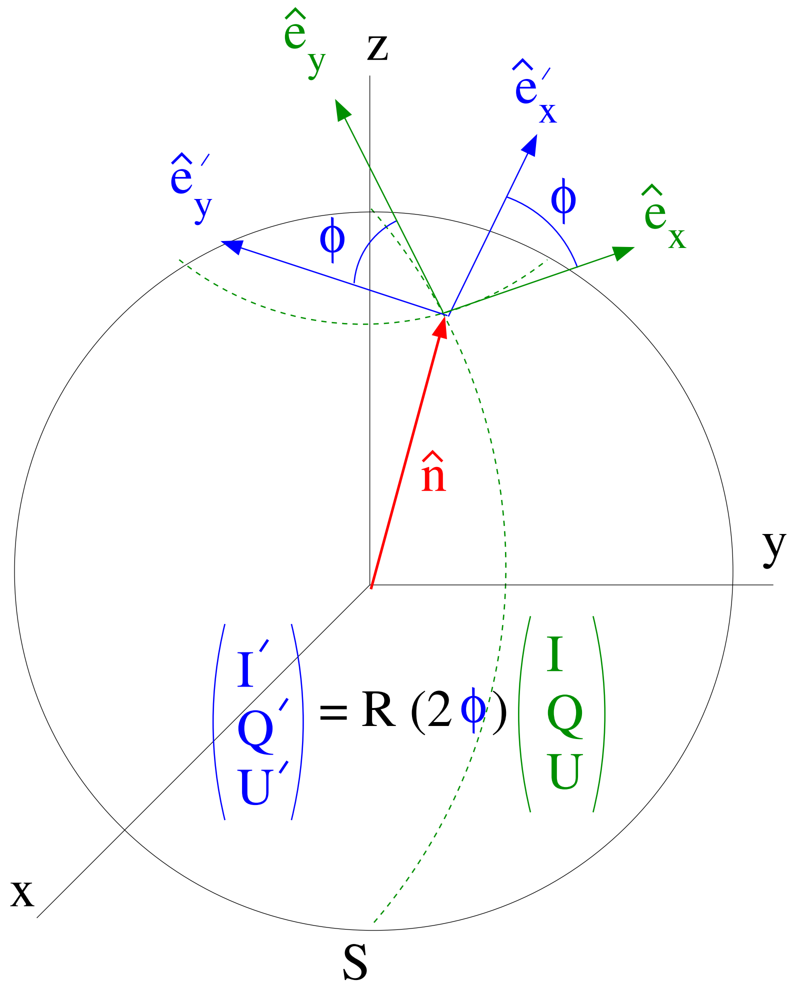
et peut être décrite par :

$$
\begin{aligned}
I &= < a_x^2 > + < a_y^2 > \\
Q &= < a_x^2 > - < a_y^2 > \\
U &= 2 < a_x a_y \cos(\phi_x - \phi_y) > \\
V &= 2 < a_x a_y \sin(\phi_x - \phi_y) >
\end{aligned}
$$

I et V sont invariants par rotation contrairement à Q et U.



Comportement de Q et U



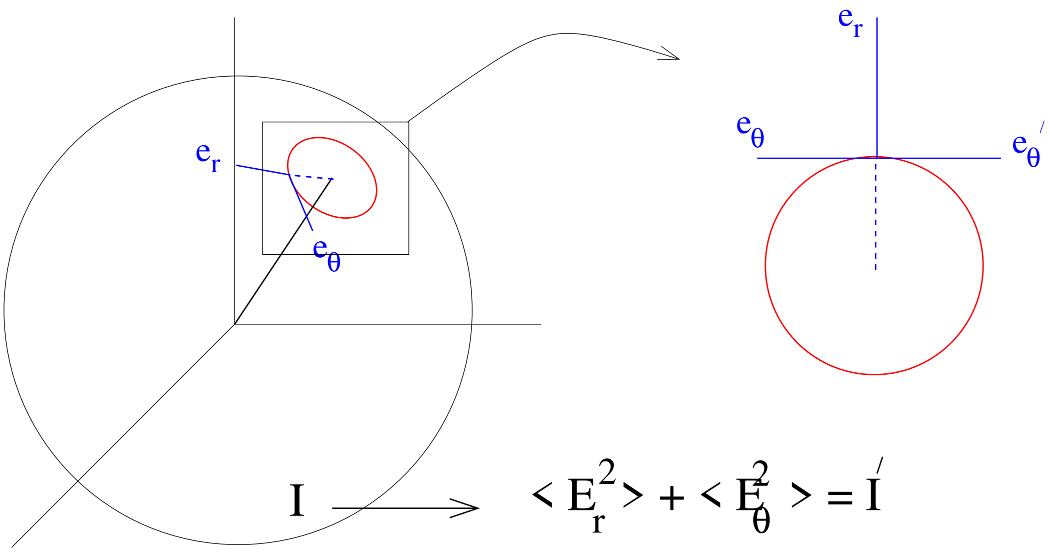
$$(Q \pm iU)'(\hat{n}) = e^{\mp 2i\phi}(Q \pm iU)(\hat{n})$$

Intérêt de mesurer la polarisation

1. Fournir des contraintes fortes sur les modèles cosmologiques (inflation notamment) :
   - mettre en évidence et séparer les perturbations scalaires et tensorielles ;
   - prouver l'existence des ondes gravitationnelles primordiales (figures de polarisation).
2. contraindre la période de réionisation : signature dans les cartes de polarisation ;
3. Estimer les paramètres cosmologiques indépendamment des fluctuations de température.

Figures de polarisation

Perturbations scalaires :



$$I \longrightarrow \langle E_r^2 \rangle + \langle E_\theta^2 \rangle = I'$$

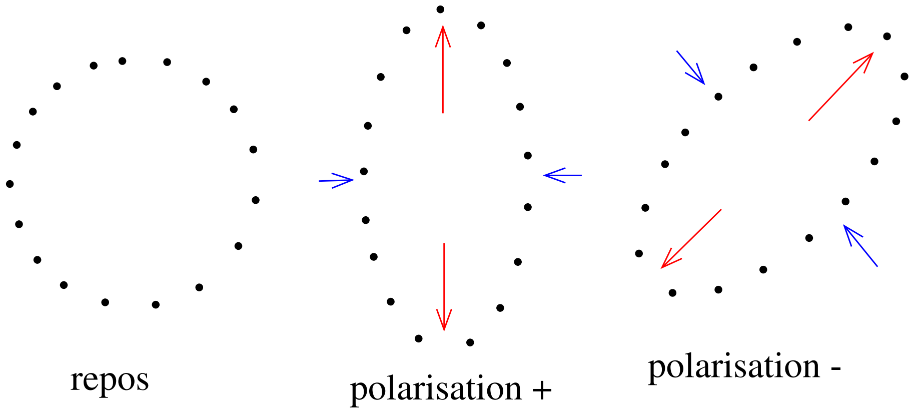
$$Q \longrightarrow \langle E_r^2 \rangle - \langle E_\theta^2 \rangle = Q'$$

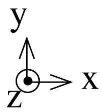
$$U \longrightarrow -2\langle E_r\, E_\theta \rangle = -U \text{ donc } \boxed{U = 0}$$

Q>0, U=0

Q<0, U=0

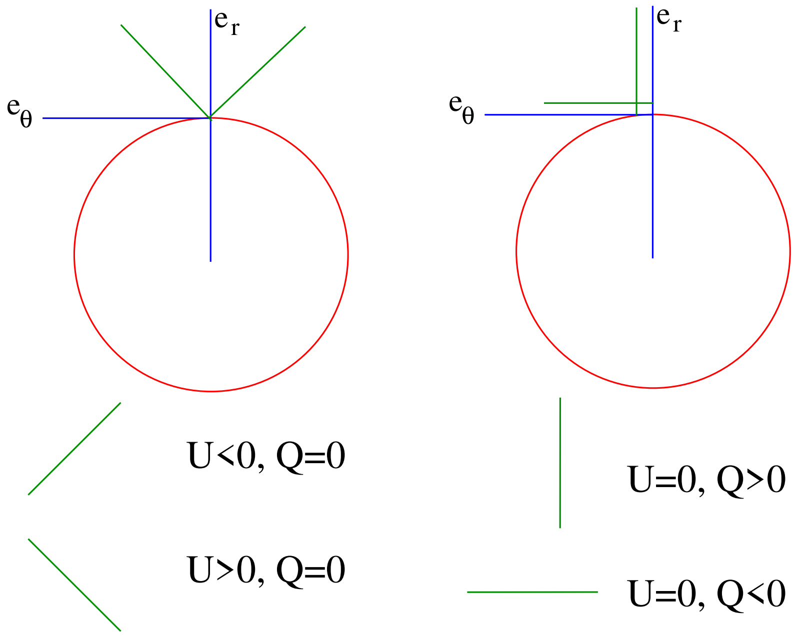
Ondes gravitationnelles :



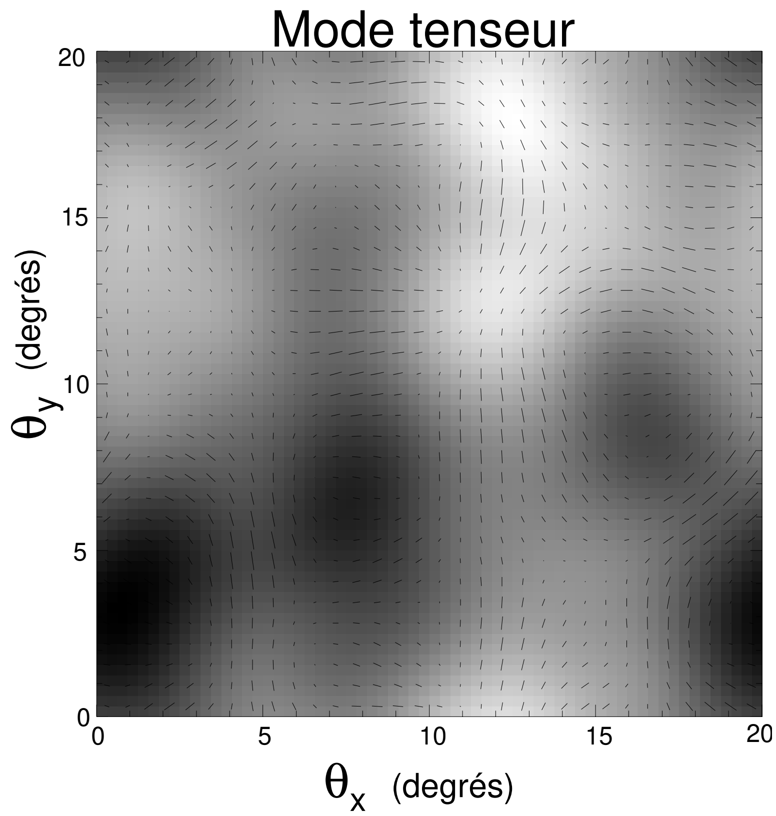


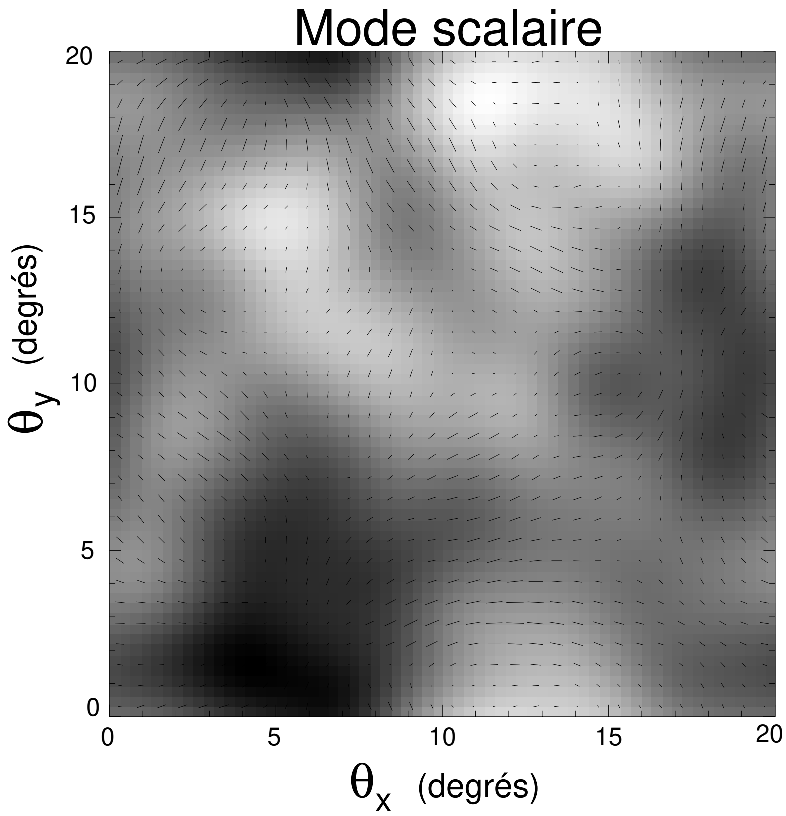
$$\boxed{U \neq 0}$$

(éventuellement)



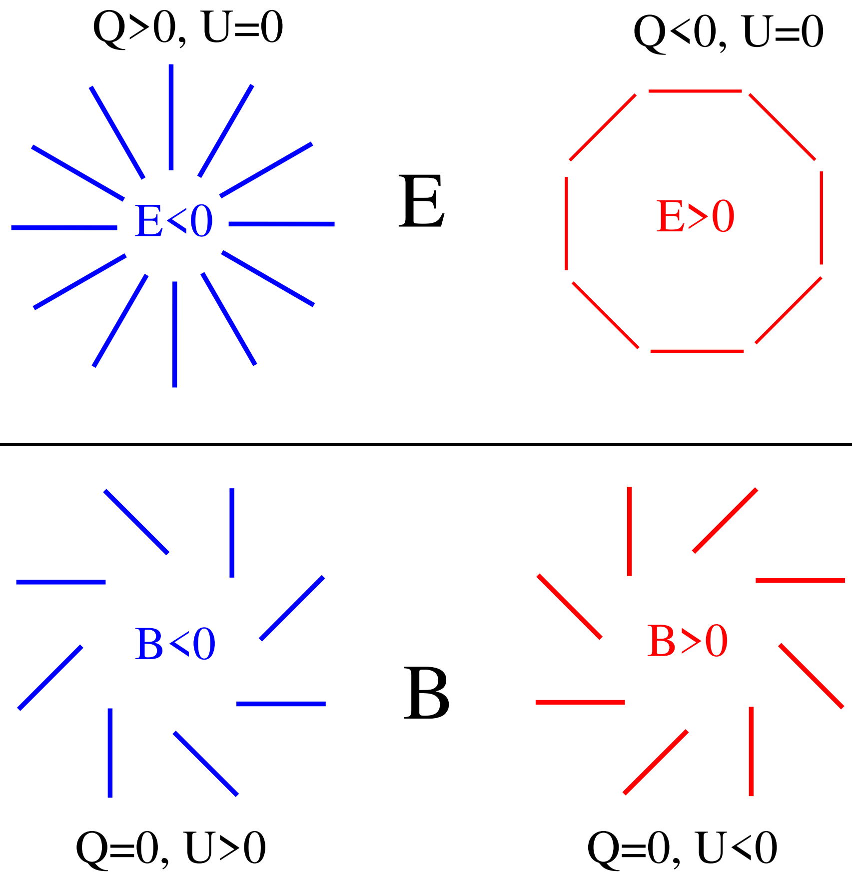
(Coulson, Crittenden & Turok, 1995)





Symétries de E et B

$$E \propto -\int Q \qquad \text{vrai scalaire}$$



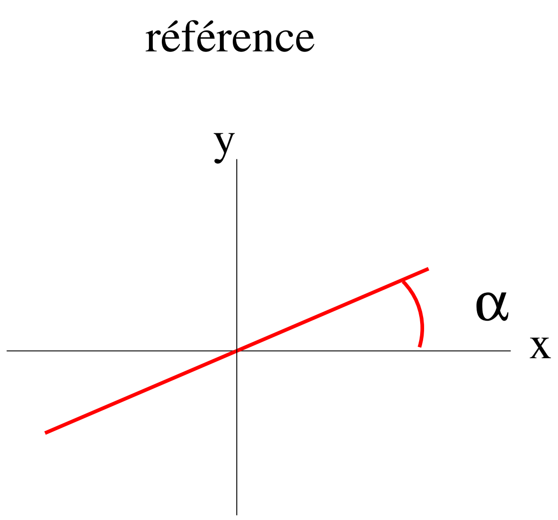
$$B \propto -\int U \qquad \text{pseudo} - \text{scalaire}$$

Comment les mesurer ?

Utilisation d'un polarimètre : il mesure un signal de la forme

$$m_p = \frac{1}{2}\left(I + Q\cos 2\alpha + U\sin 2\alpha\right)$$

où I, Q et U sont les paramètres de Stokes de l'onde incidente et α est l'angle entre le polarimètre et un axe quelconque pris comme référence.



Dépend du système de référence.

3 paramètres de Stokes : au moins 3 polarimètres.

Analyse de cartes

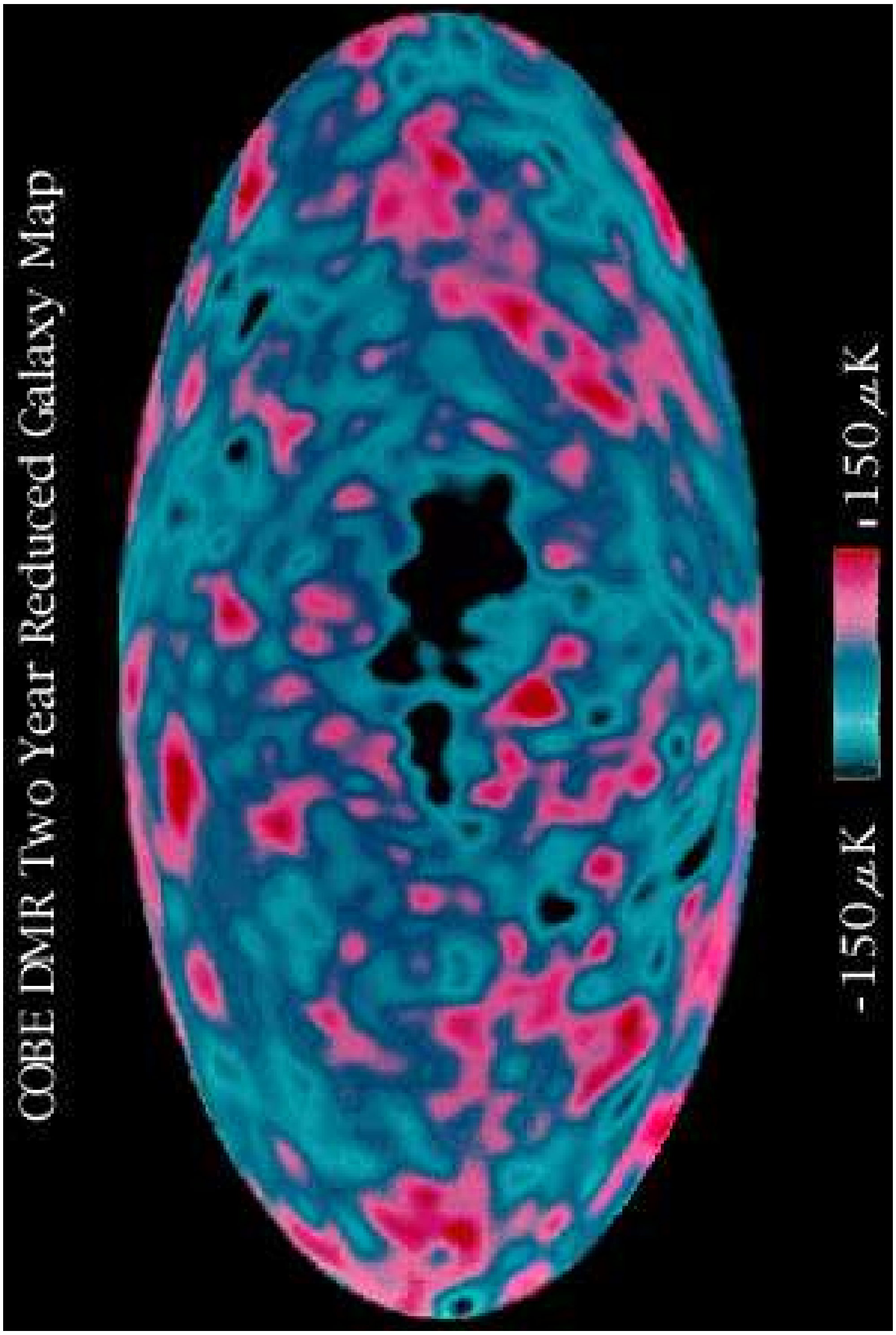
Mesure des paramètres de Stokes sur la sphère céleste : obtention de cartes $I(\hat{n})$, $Q(\hat{n})$ et $U(\hat{n})$ qu'on analyse par développement sur les Y_{lm} :

$$I(\hat{n}) = \sum_{lm} a_{lm} \, Y_{lm}(\hat{n})$$

$$(Q \pm iU)'(\hat{n}) = e^{\mp 2i\alpha}(Q \pm iU)(\hat{n})$$

Quantités invariantes par rotation :

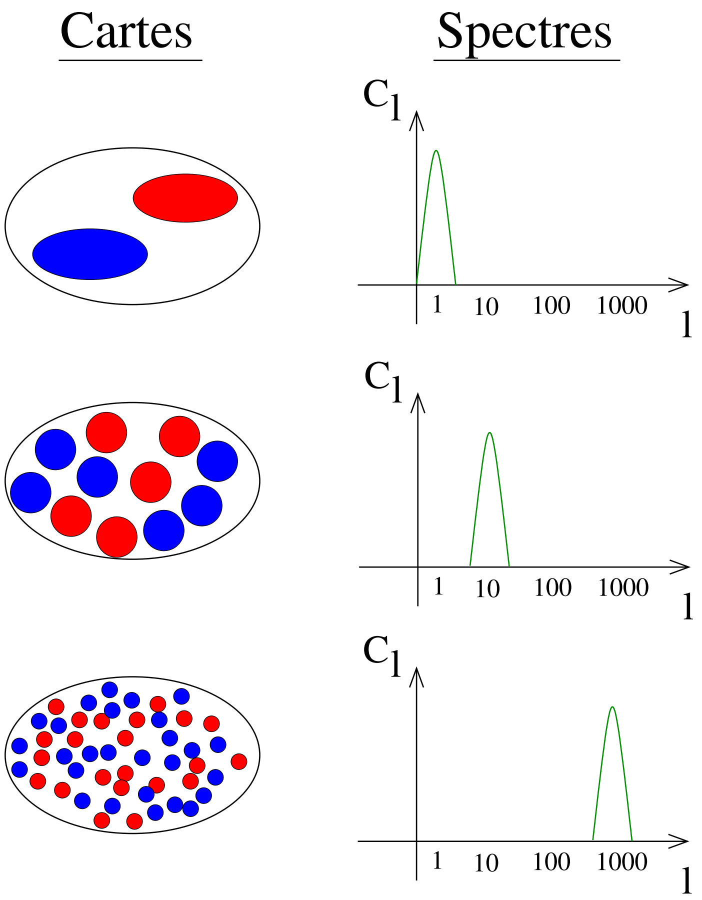
$$\begin{aligned} E(\hat{n}) &= \sum_{lm} a_{E,lm} \, Y_{lm}(\hat{n}) \\ B(\hat{n}) &= \sum_{lm} a_{B,lm} \, Y_{lm}(\hat{n}) \end{aligned}$$


COBE DMR Two Year Reduced Galaxy Map
-150 μK
+150 μK

Les spectres de puissance

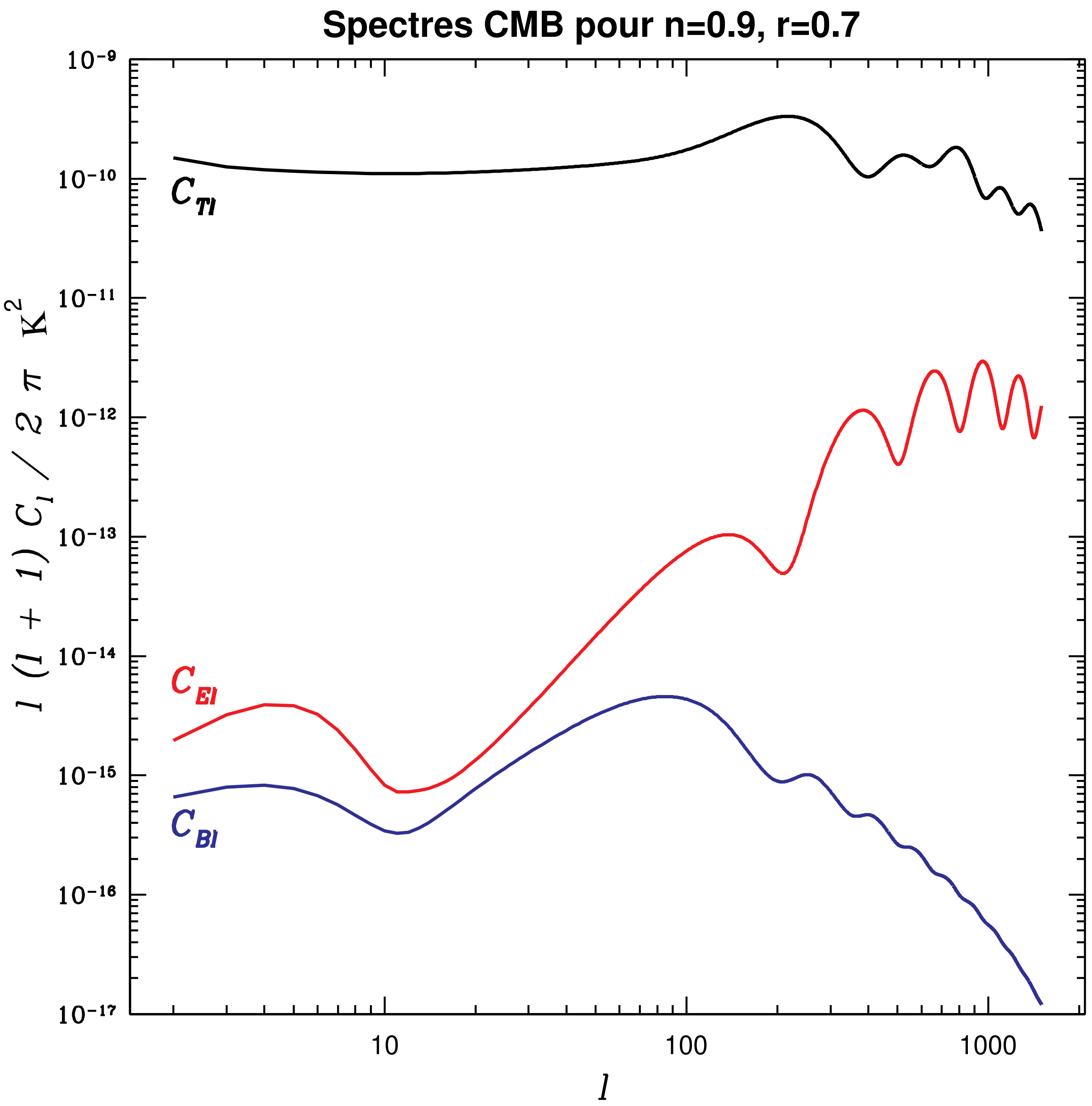
On définit :

$$C_{Xl} = \frac{1}{2l+1} \sum_m |a_{X,lm}|^2$$

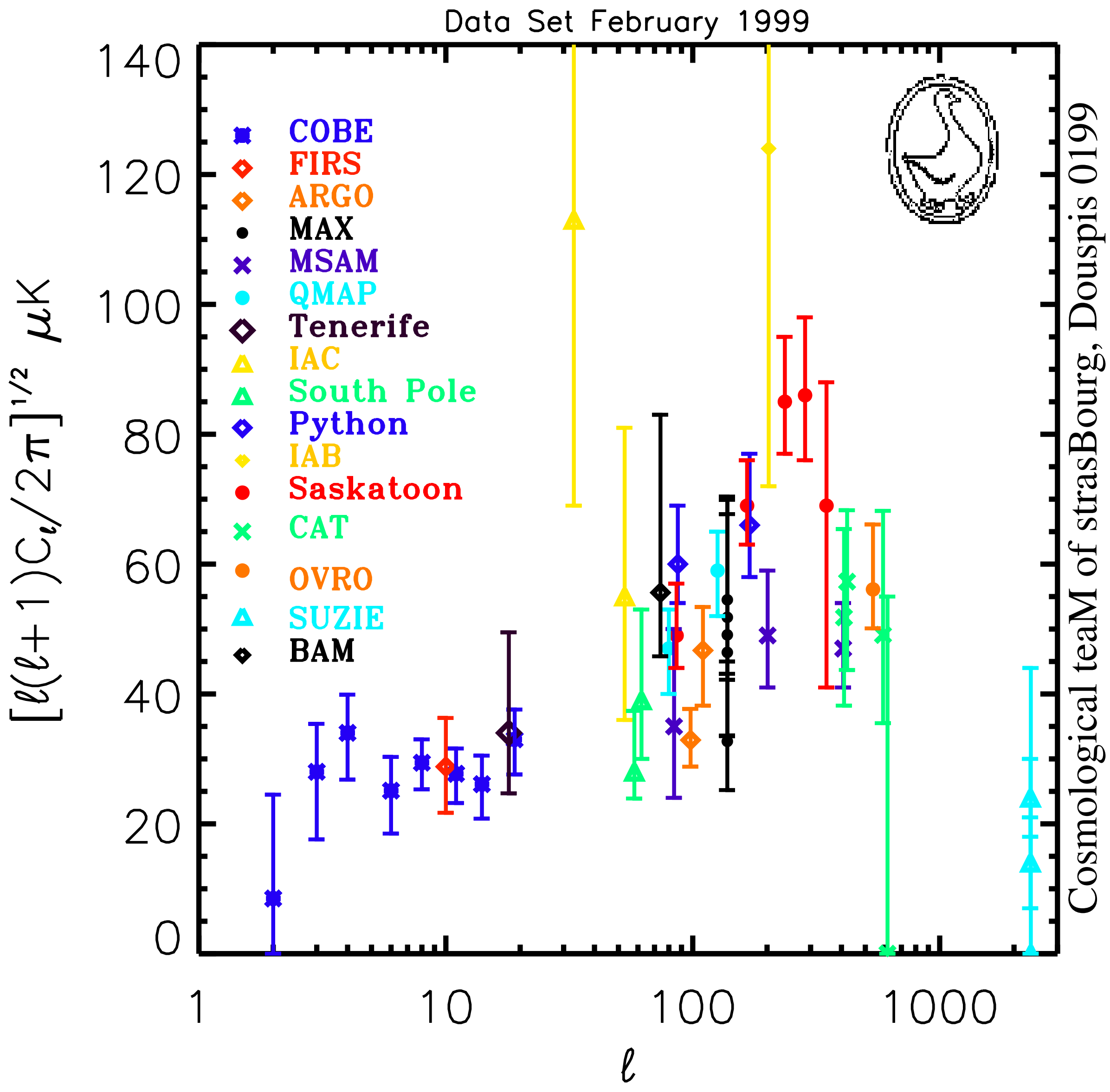


on a approximativement $l \sim \frac{100°}{\theta}$.

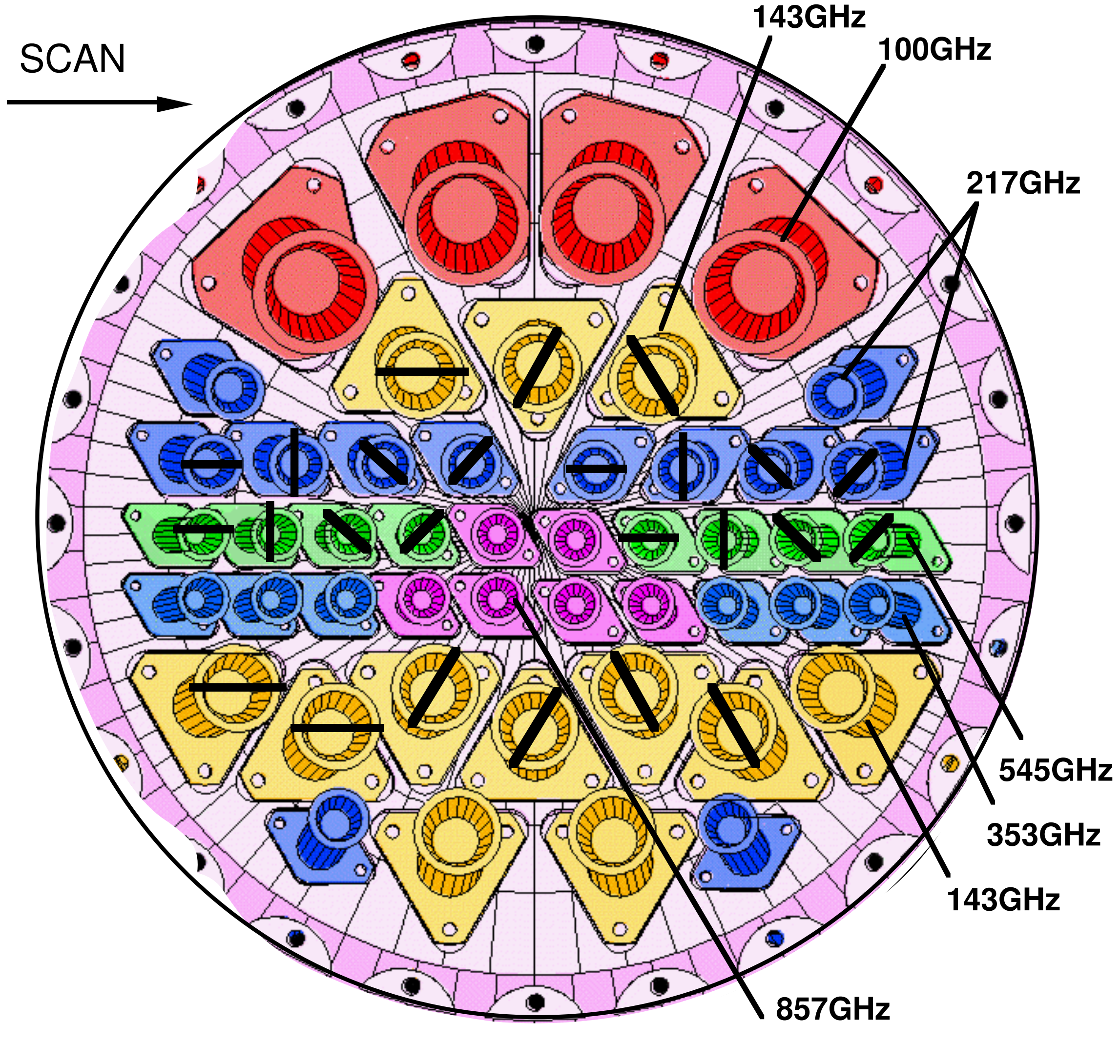
Spectres typiques (simulation)



Mesure du spectre – Février 99



Le plan focal – HFI



Aperçu de la mission Planck

Fréqu.	GHz	100	143	217	353	545	857
FWHM	arcmin	10.7	8.0	5.5	5.0	5.0	5.0
nb Temp		4	3	4	6	0	6
$\delta T/T$	μK/K	1.7	2.0	4.3	14.4	147	6670
nb Pol		0	9	8	0	8	0
Q et U	μK/K		3.7	8.9		208	

Stratégie de balayage du ciel :

- le plan focal décrit des cercles autour de l'axe de rotation du satellite
- chaque cercle est parcouru ~ 60 fois (scans) puis l'axe de spin se décale

Objectif : Optimiser la mesure de la polarisation.

II.

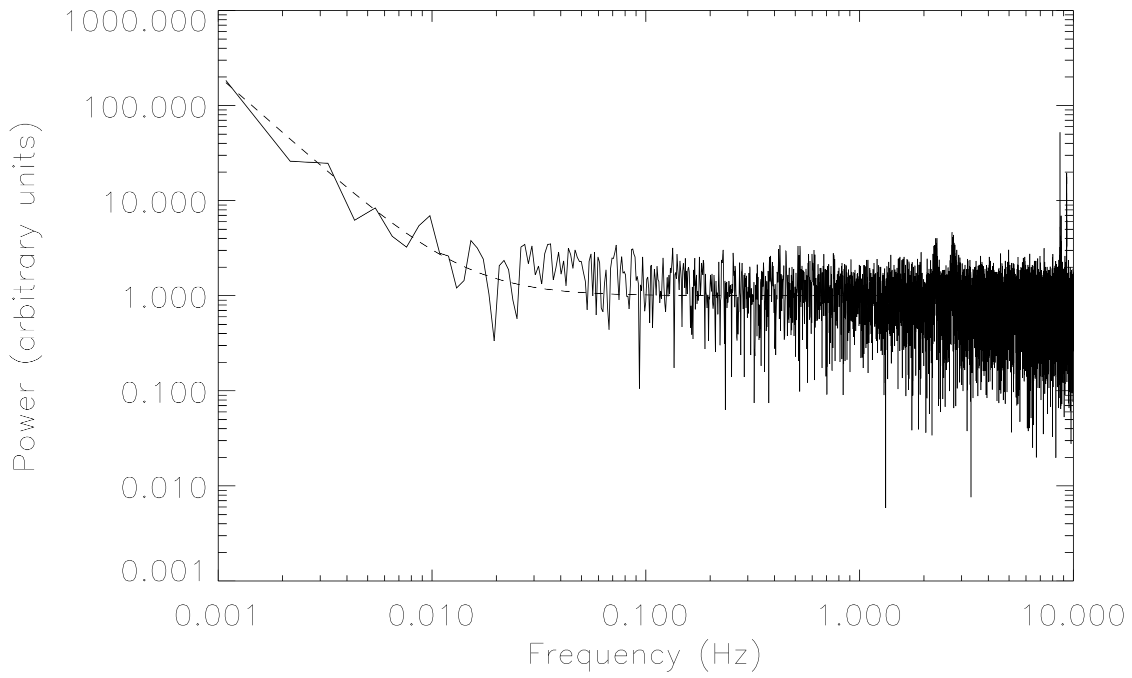
Traitement du bruit basse fréquence

Le bruit basse fréquence

Sources d'instabilités thermiques : $1/f^2$

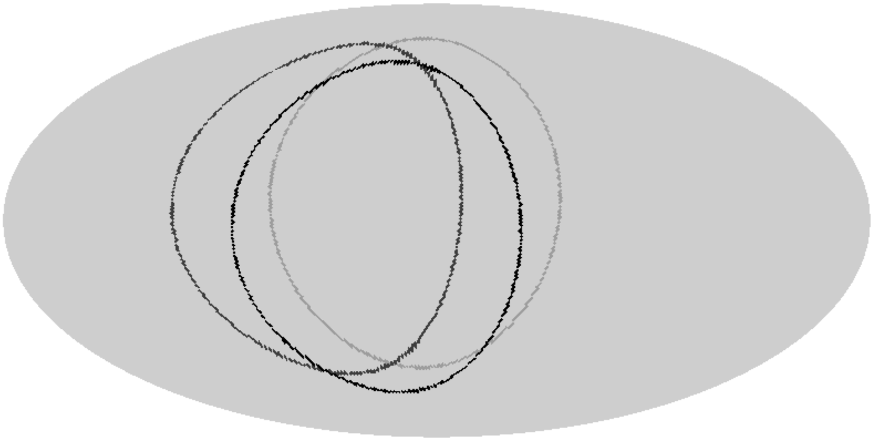
et bruit en $1/f$ provenant de l'électronique.

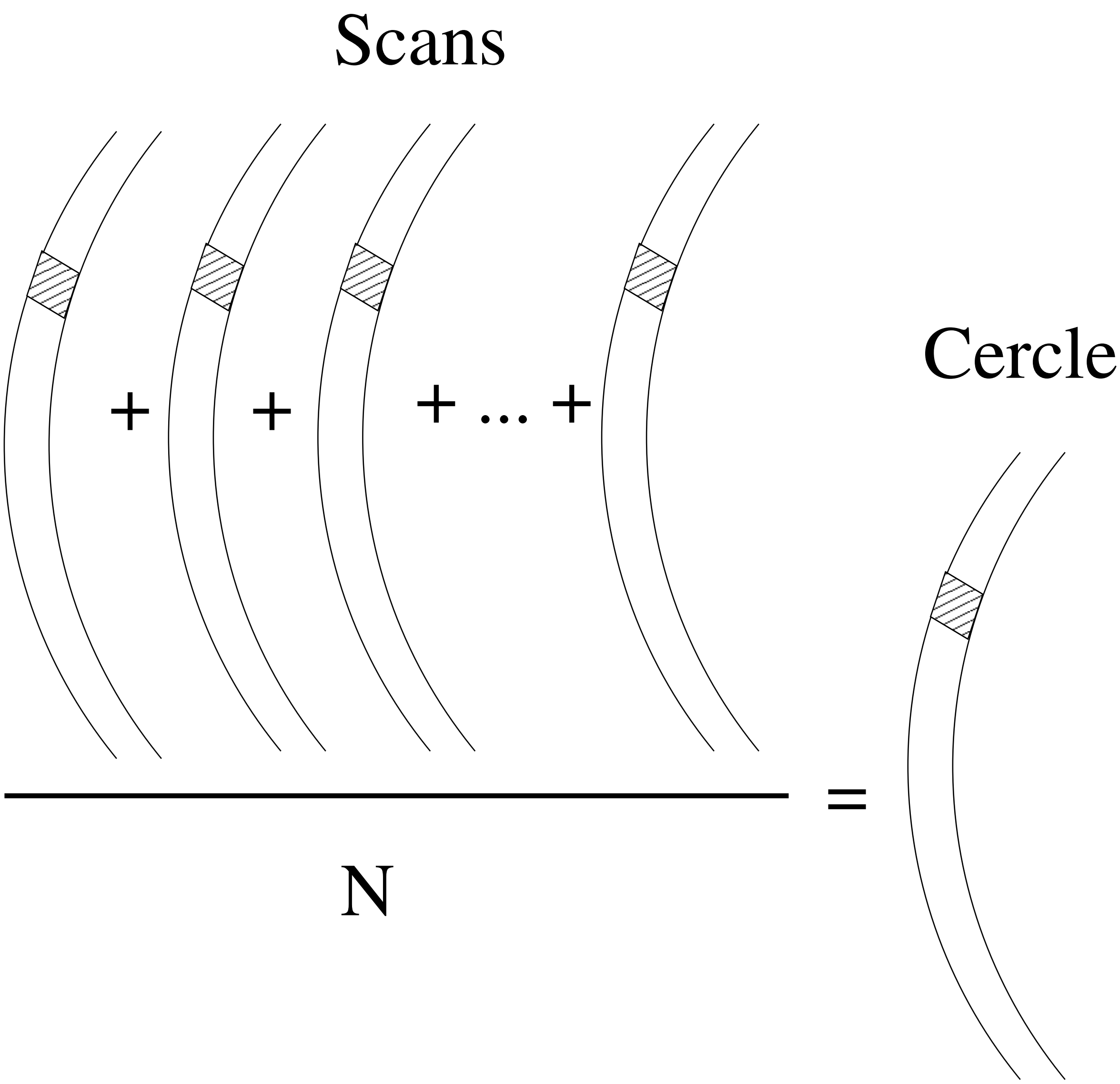
Spectre mesuré :



Ce bruit rend impossible la mesure de la polarisation. On le retire en utilisant les 2 types de redondances fournies par la stratégie de balayage du ciel :

1. chaque cercle est parcouru par ~ 60 scans
2. il existe des intersections entre les cercles

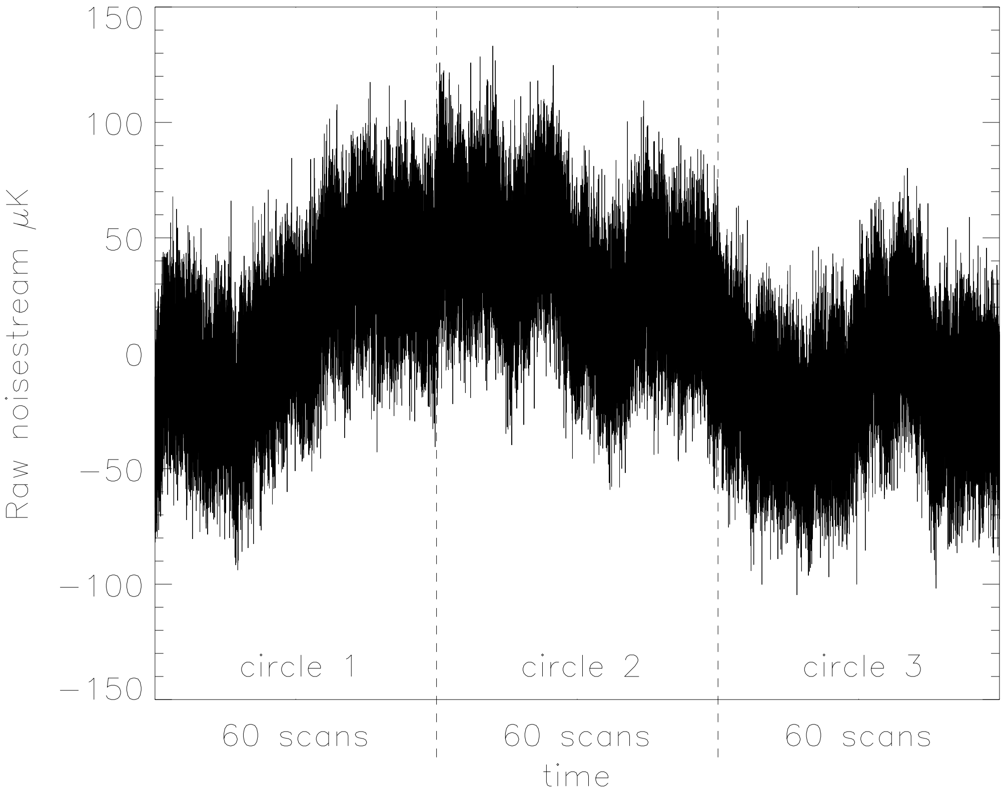




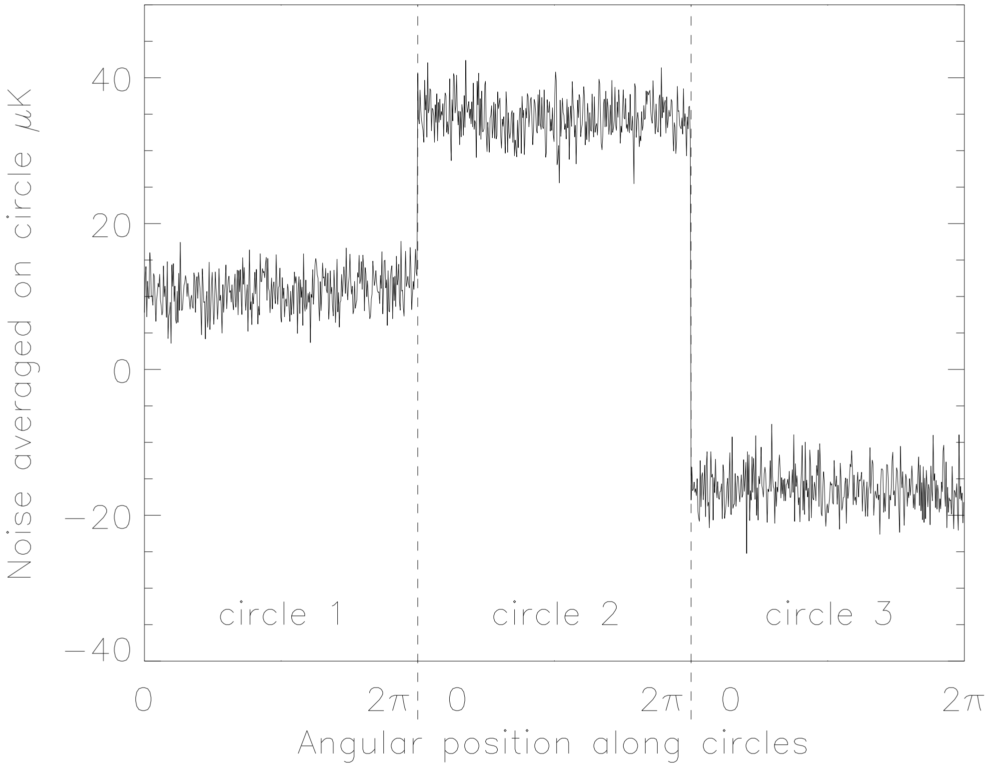
ceci pour chaque polarimètre.

Ce moyennage joue le rôle de filtre.

Après moyennage, les dérives basses fréquences...

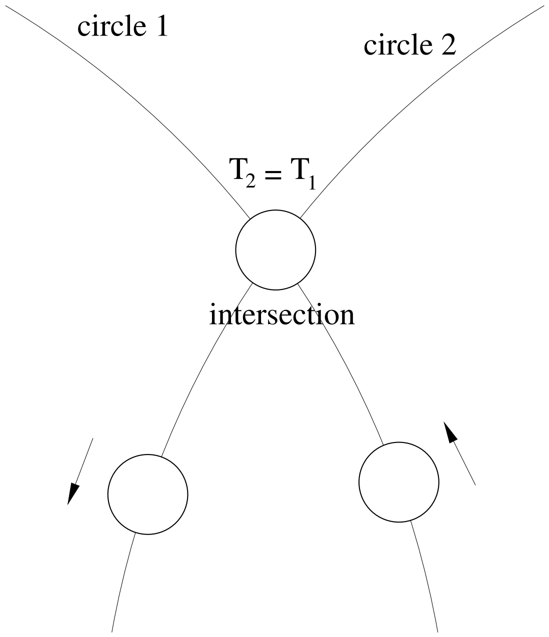


...se transforment en offsets :

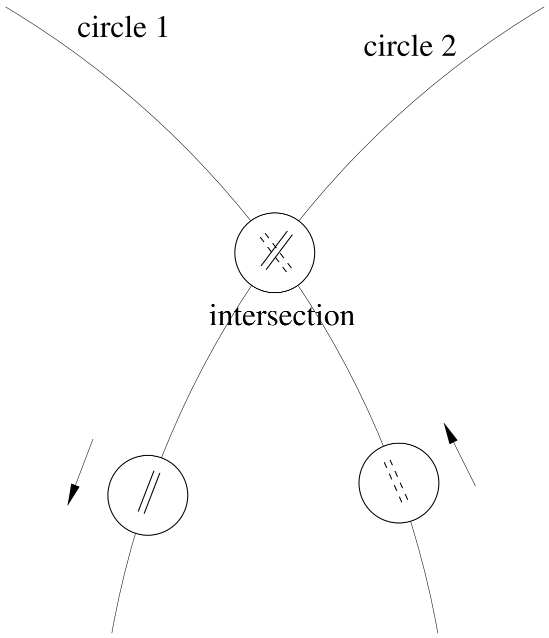


Et on utilise les intersections :

pour la température,



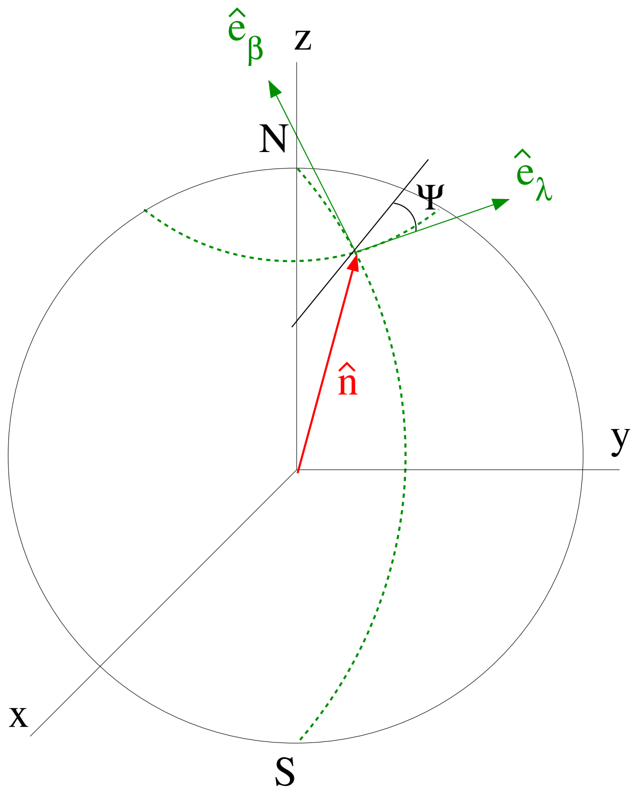
MAIS pour la polarisation,



Les bolomètres ne mesurent pas le même signal (les polarimètres ont tourné).

Solution :

définir les paramètres de Stokes dans un référentiel global, indépendant de la stratégie de balayage du ciel, par exemple :



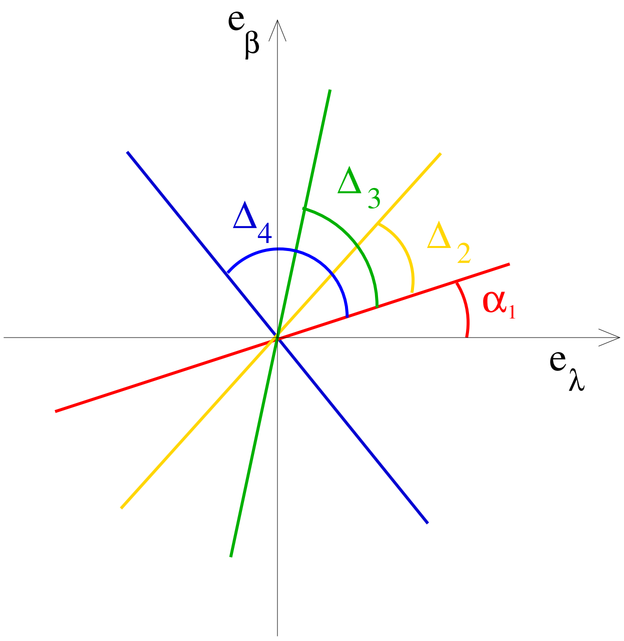
puis exprimer les mesures dans le plan focal en fonction des paramètres de Stokes dans le référentiel fixe.

rappel : un polarimètre mesure

$$m_p = \frac{1}{2}\left(I + Q\cos 2\alpha_p + U\sin 2\alpha_p\right)$$

avec

$$\alpha_p = \alpha_1 + \Delta_p$$



Pour h polarimètres, on écrit sous la forme matricielle :

$$M = A\ R(\alpha_1)\ S$$

où

A	caractérise la géométrie du plan focal
$R(\alpha_1)$	rend compte de la rotation du plan focal
S	sont les paramètres de Stokes.

On a :

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & \cos 2\Delta_2 & \sin 2\Delta_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \cos 2\Delta_h & \sin 2\Delta_h \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\alpha_1 & \sin 2\alpha_1 \\ 0 & -\sin 2\alpha_1 & \cos 2\alpha_1 \end{bmatrix} \times \begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \end{pmatrix}$$

En ajoutant la contribution des offsets :

$$M = O + A\ R(\alpha_1)\ S$$

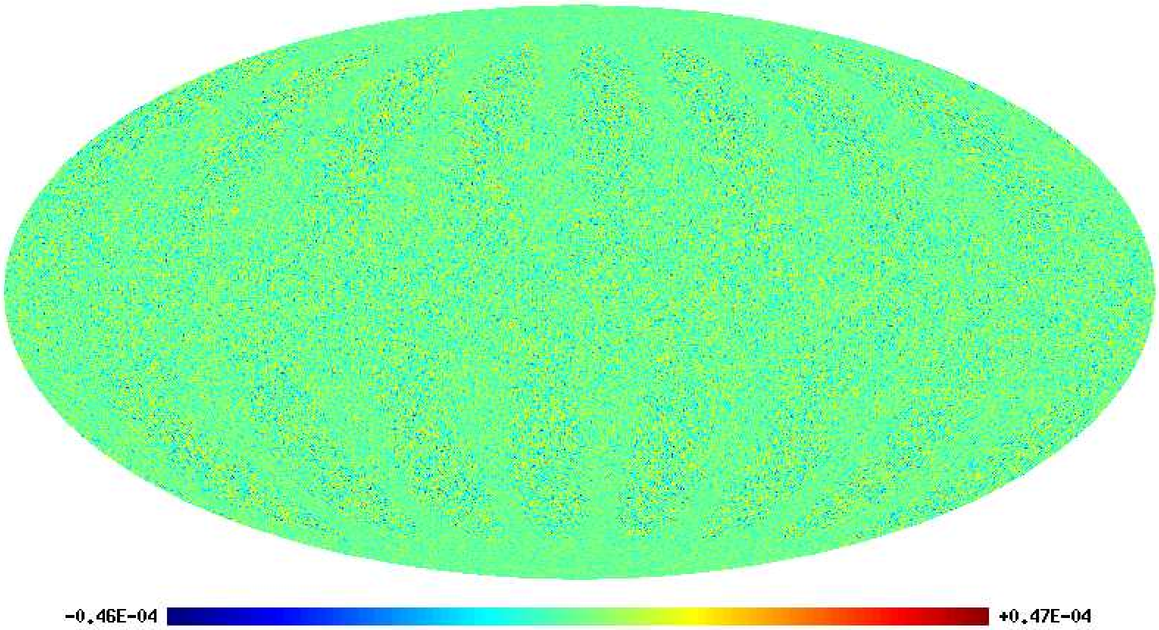
Les offsets et les paramètres de Stokes sont obtenus en minimisant :

$$\begin{aligned}\chi^2 \quad = \sum_{intersections} \quad & (M - O - A\ R(\alpha_1)\ S)^T \\ & N^{-1}\,(M - O - A\ R(\alpha_1)\ S)\end{aligned}$$

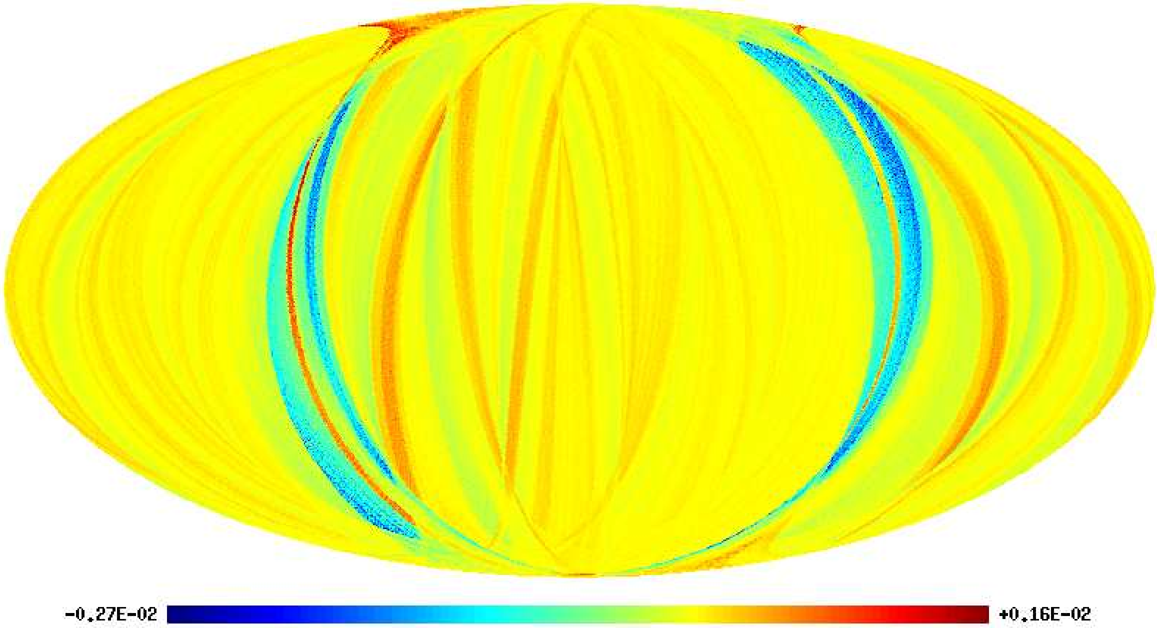
Test du destriping : simulations.

Résultats :

Bruit blanc :

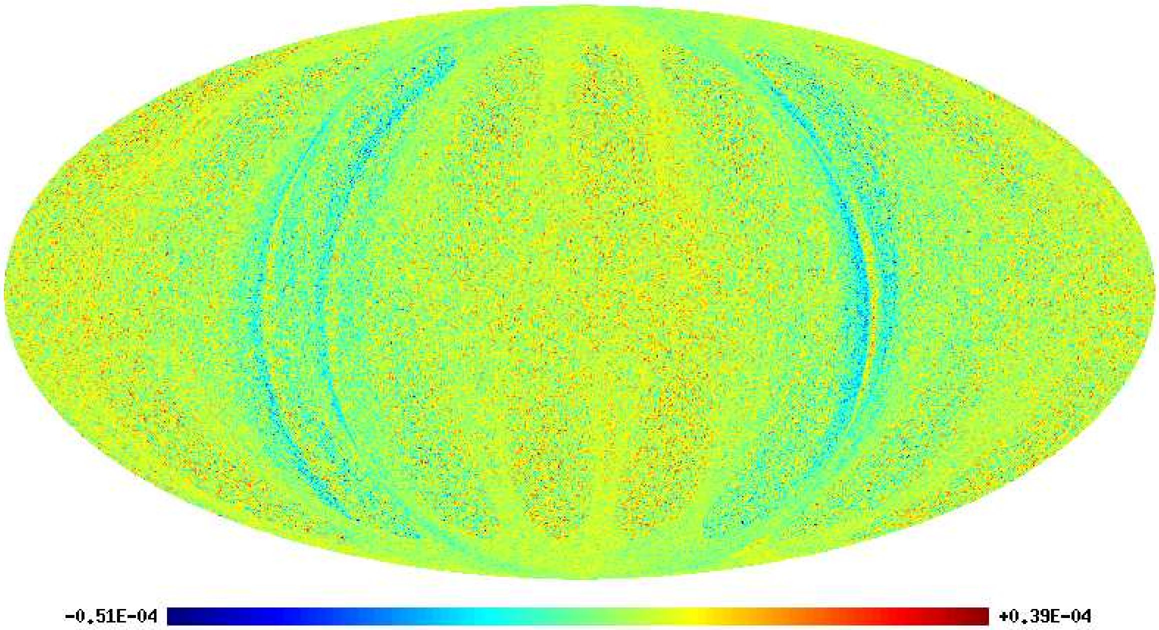


Pas destripé :

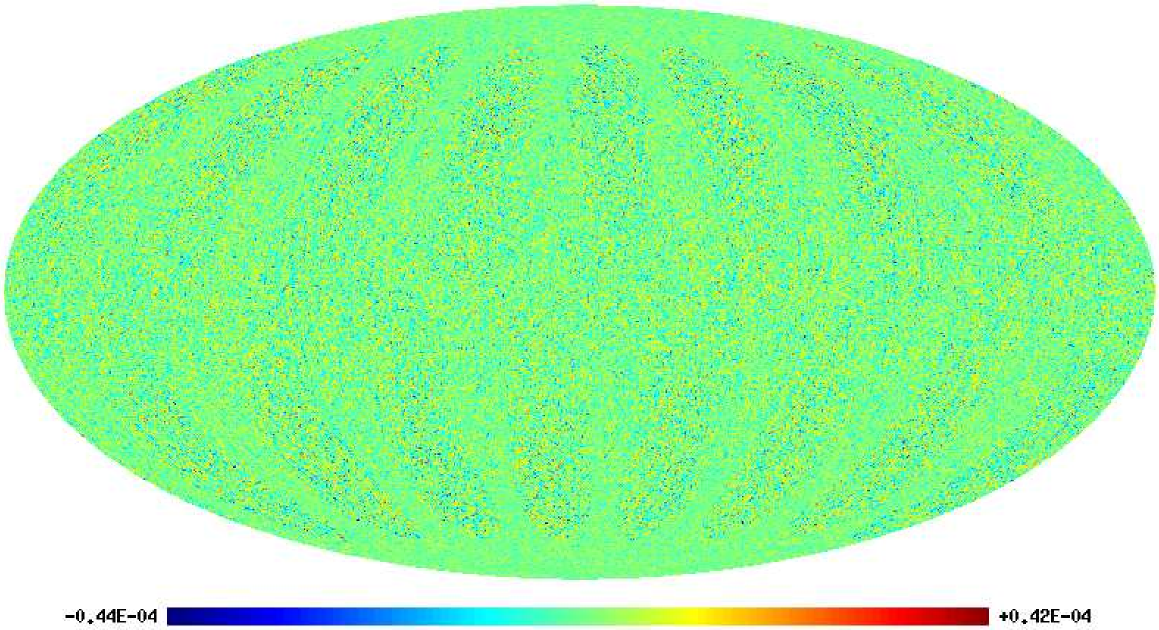


Résultats :

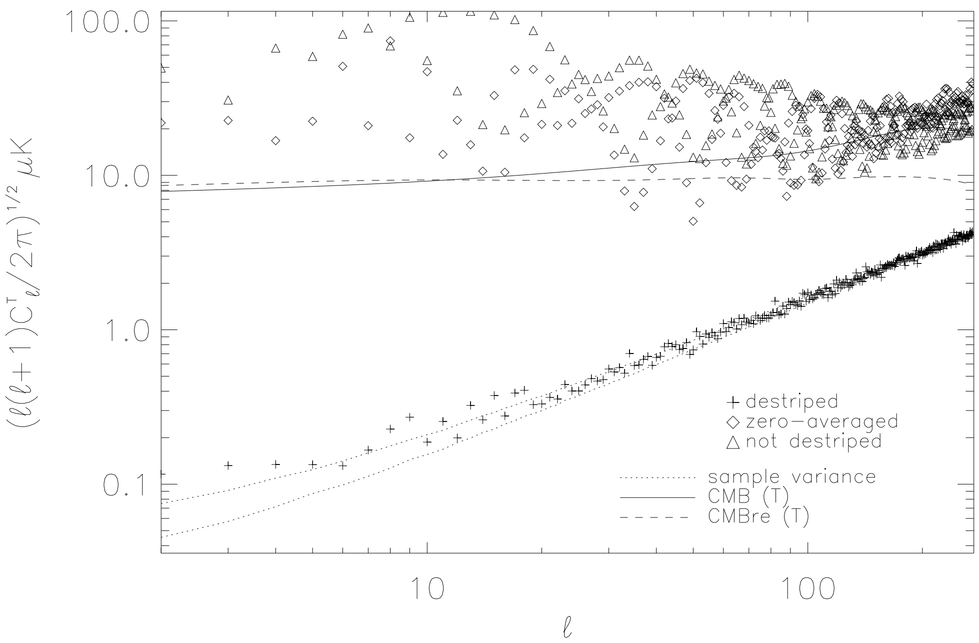
Moyenne nulle :

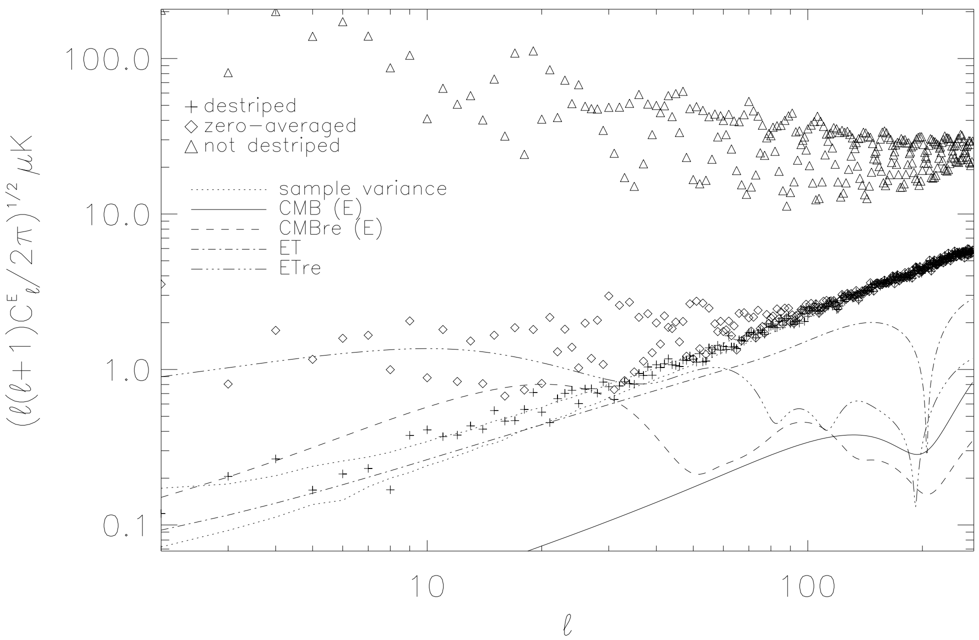


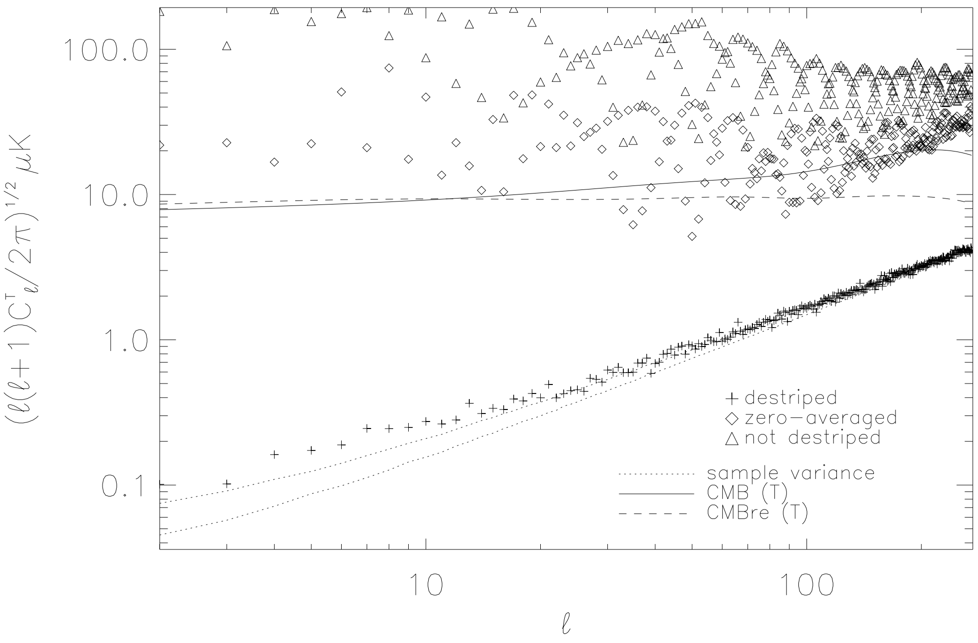
Destripé :

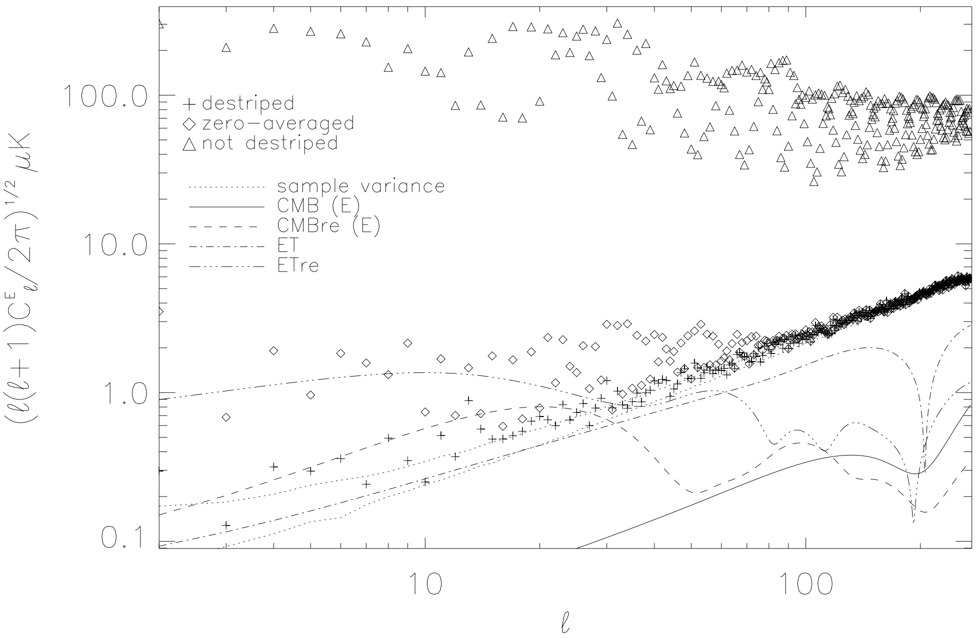


Analyse statistique du destriping

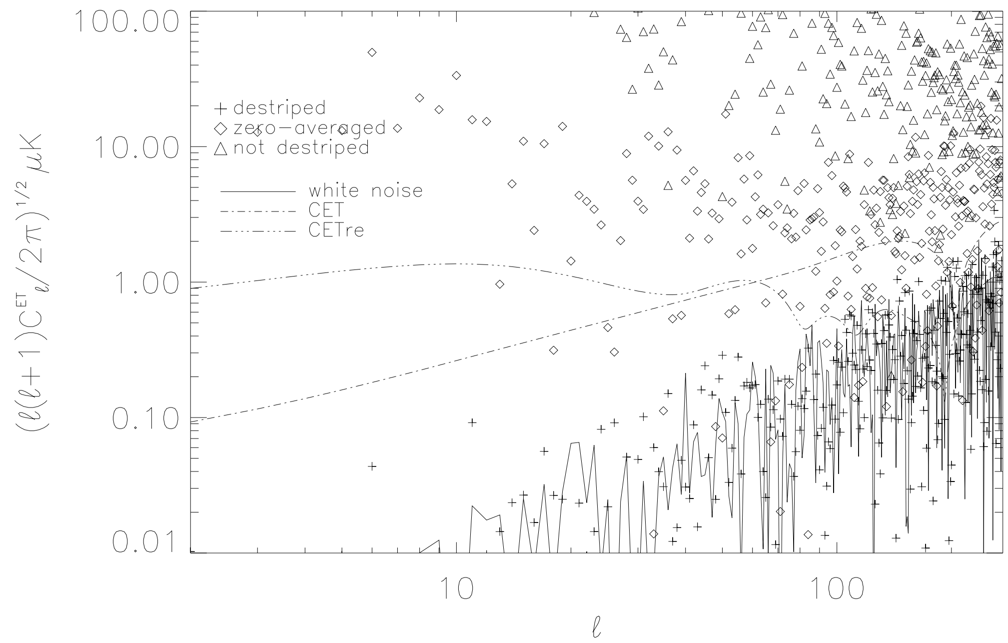


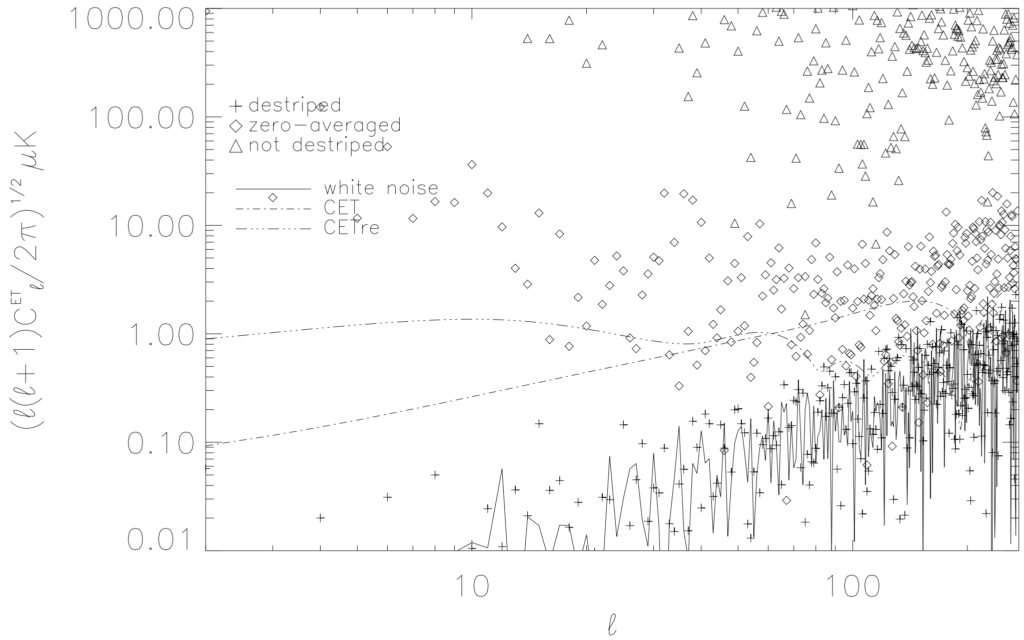



$(\ell(\ell+1)C^T_\ell/2\pi)^{1/2}\,\mu K$
100.0
10.0
1.0
0.1
10
100
ℓ
+ destriped
◇ zero−averaged
△ not destriped
sample variance
CMB (T)
CMBre (T)

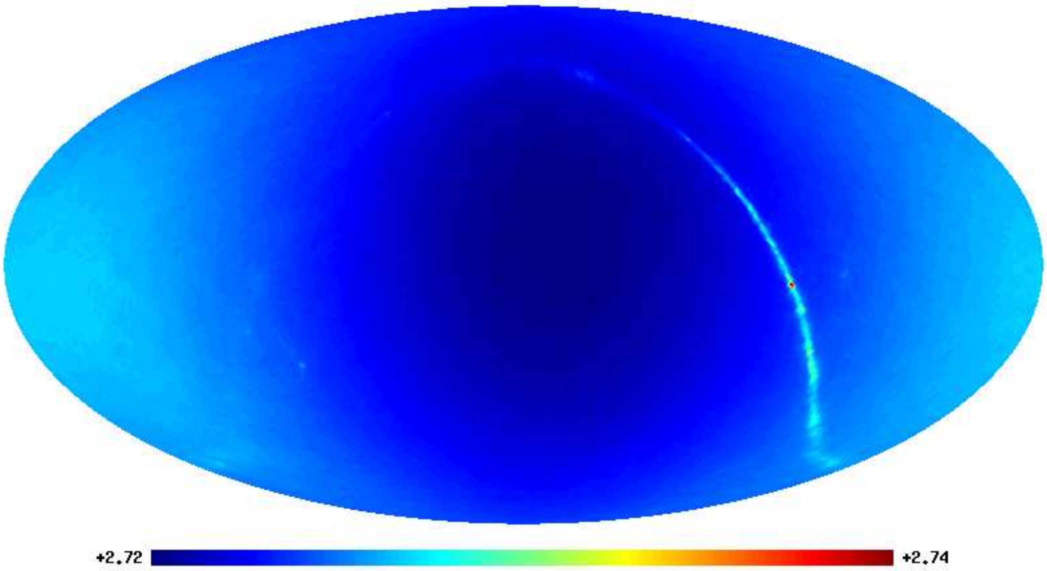

$(\ell(\ell+1)C^E_\ell/2\pi)^{1/2}\,\mu K$
100.0
10.0
1.0
0.1
10
100
ℓ
+ destriped
◇ zero−averaged
△ not destriped
sample variance
CMB (E)
CMBre (E)
ET
ETre

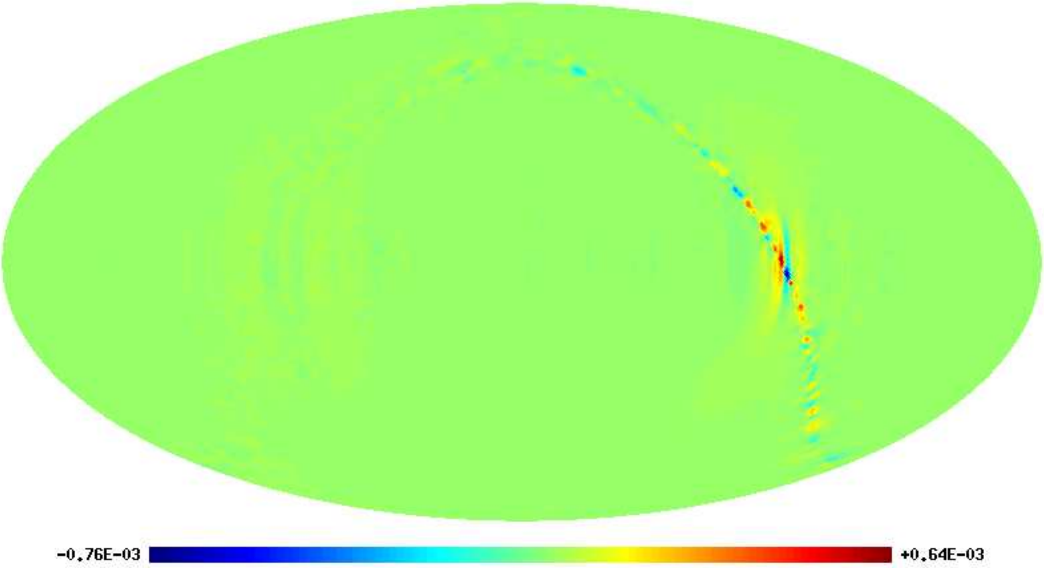
Analyse statistique du destriping





Cartes initiales





Conclusions

Nous sommes en mesure de ramener le bruit basse fréquence au niveau du bruit blanc.

Cependant, il va falloir

- prendre en compte les lobes secondaires
- considérer la polarisation induite par le télescope lui-même

Bibliographie

Bond, J. R. and Efstathiou, G., Astrophysical Journal,1984, vol. 285

Bond, J. R. and Efstathiou, G.,MNRAS,1987,vol. 226

Coulson, Crittenden and Turok (1995), Phys. Rev. Lett., vol. 73, number 18

Crittenden, Coulson and Turok, astro-ph/9411107

Hu, thèse et page web `http://www.sns.ias.edu/~whu/`

Kamionkowski, astro-ph/9803168

Kamionkowski *et al*, Phys. Rev. D55 (1997) 7368 (astro-ph/9611125)

Kosowsky Annals of physics 246, 49-85 (astro-ph/9501045)

Seljak, astro-ph/9608131

Zaldarriaga, `http://www.sns.ias.edu/~matiasz/`