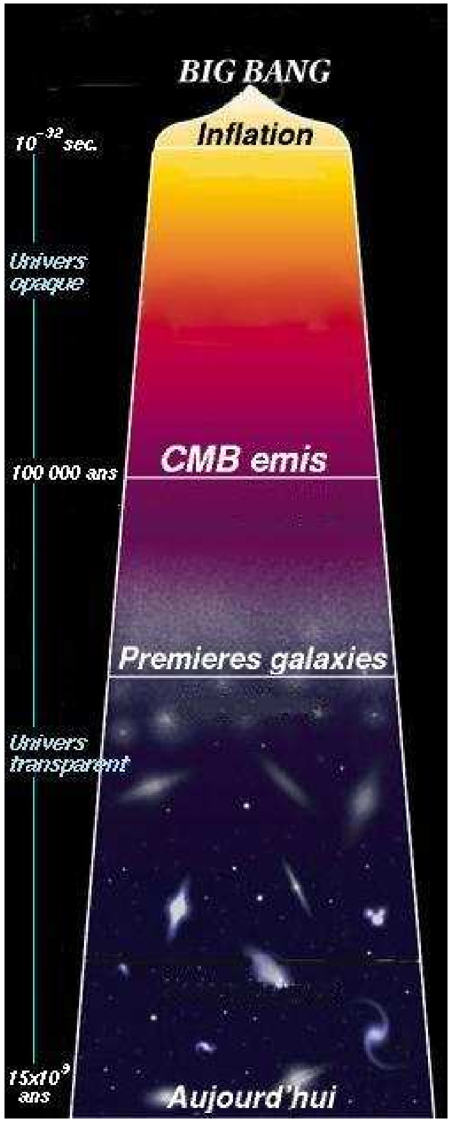
Anisotropies et polarisation du rayonnement fossile (CMB) : méthodes de détection et traitement de données

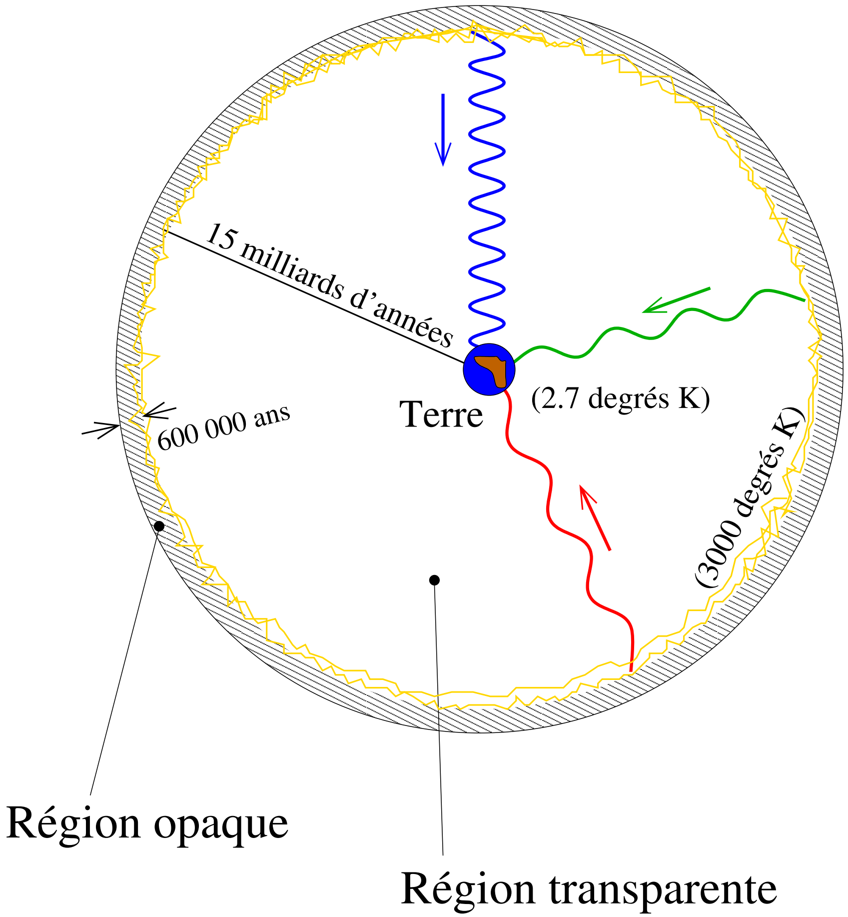
Benoît Revenu

I.
CMB et polarisation

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

III.
Traitement des données de COSMOSOMAS


BIG BANG
Inflation
10^{-32} sec.
Univers opaque
CMB emis
100 000 ans
Premieres galaxies
Univers transparent
$15x10^{9}$ ans
Aujourd'hui


15 milliards d'années
Terre
(2.7 degrés K)
600 000 ans
(3000 degrés K)
Région opaque
Région transparente

Intérêts :

- mesure des paramètres cosmologiques (H_0, Ω_0, Ω_b, $\Omega_{\Lambda 0}$, paramètres de l'inflation. . .)
- statistique des fluctuations primordiales
- contrainte sur la période de réionisation
- ondes gravitationnelles primordiales

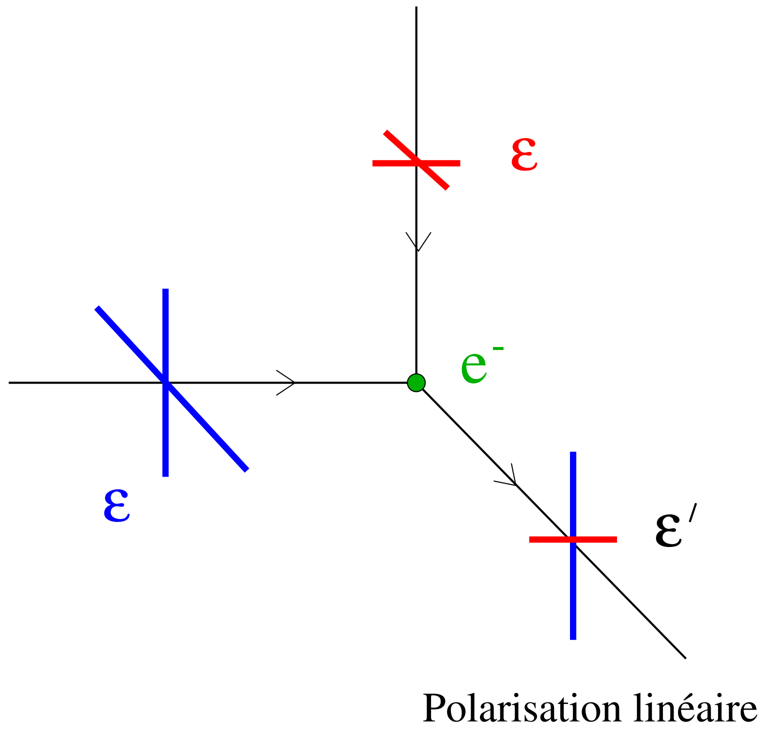
Ordres de grandeur

rayonnement fossile	2.73	K
dipôle	10^{-3}	K
ΔT	10^{-5}	K
intensité polarisée	10^{-6}	K

Le CMB devrait être polarisé

Interaction : diffusion Thomson des photons sur les électrons du plasma

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



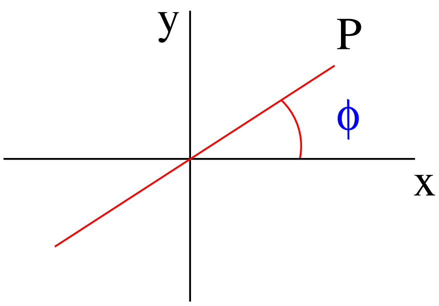
Les paramètres de Stokes

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 :

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



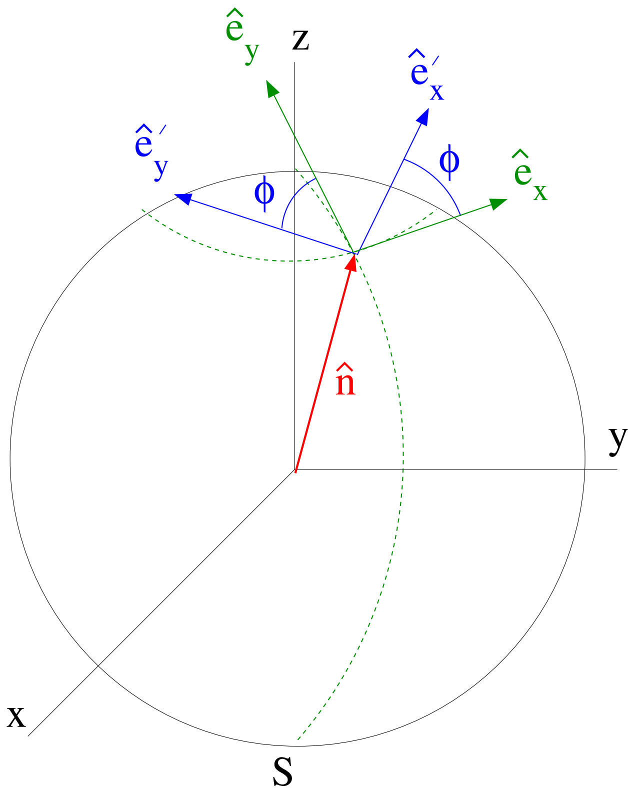
$$P = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2 + V^2}}{I}$$

$$\phi = \mathrm{atan}(U/Q) / 2$$

I et V sont invariants par rotation

contrairement à Q et U.

Transformation de Q et U

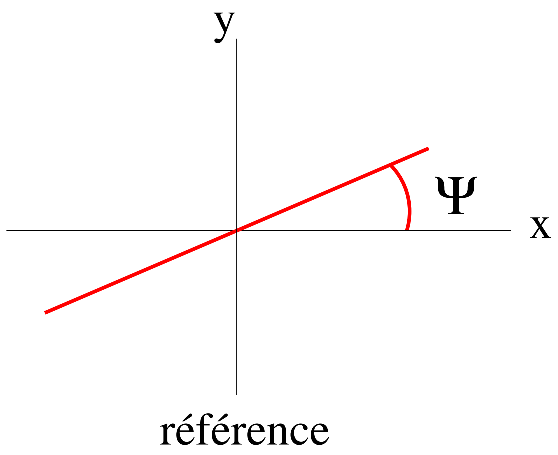


$$\begin{pmatrix} I' \\ Q' \\ U' \end{pmatrix} = R\,(2\phi) \begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \end{pmatrix}$$

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

Comment les mesurer ?

I, Q et U sont les paramètres de Stokes de l'onde incidente définis dans ce système de référence :



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

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

où Ψ est l'angle entre le polarimètre et l'axe x.

Dépend du système de référence.

3 paramètres de Stokes $\Longrightarrow$ 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 la sphère :

$$I(\hat{n}) = \sum_{\ell m} a^T_{\ell m}\ Y_\ell^m(\hat{n})$$

$$(Q \pm iU)(\hat{n}) = \sum_{\ell m} a_{\pm 2\ell m}\ {}_{\pm 2}Y_\ell^m(\hat{n})$$

Champs invariants par rotation :

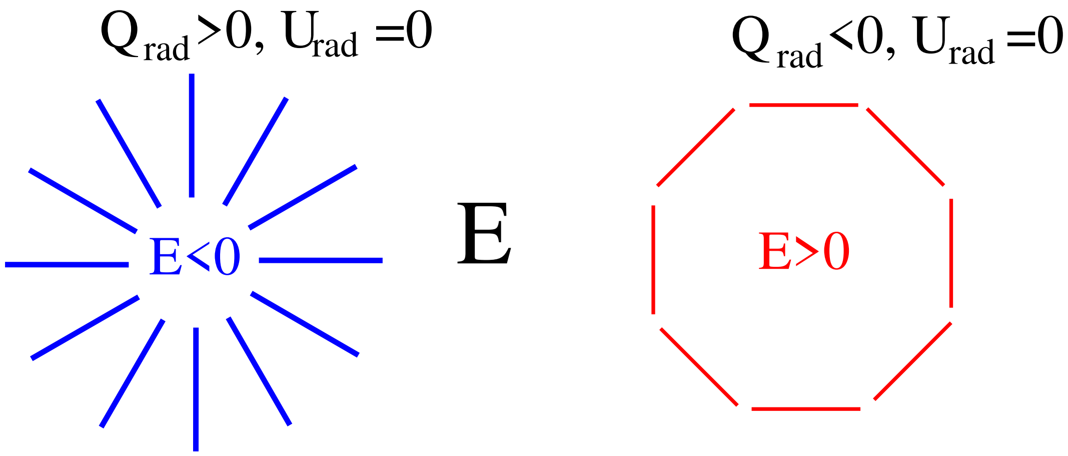
$$\begin{aligned} E(\hat{n}) &= \sum_{\ell m} a^E_{\ell m}\ Y_\ell^m(\hat{n}) \\ B(\hat{n}) &= \sum_{\ell m} a^B_{\ell m}\ Y_\ell^m(\hat{n}) \end{aligned}$$

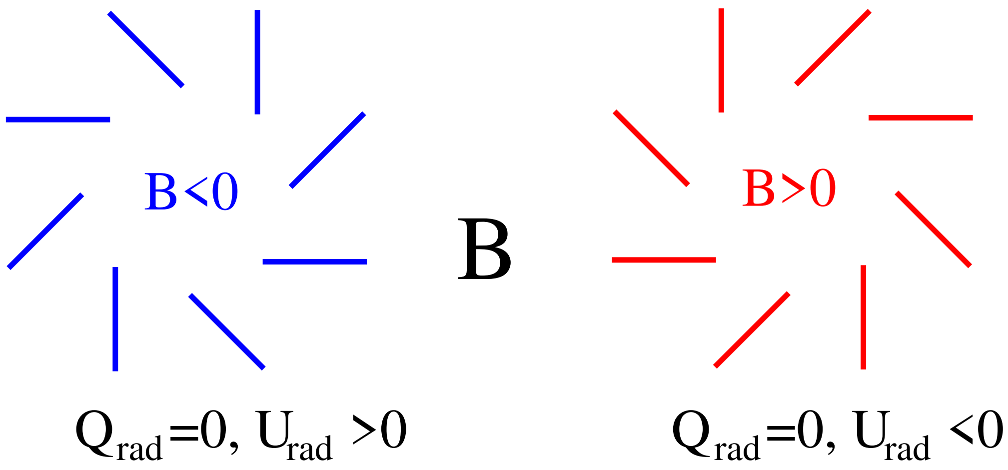
avec

$$\begin{aligned} a^E_{\ell m} &= -\frac{a_{2\ell m} + a_{-2\ell m}}{2} \\ a^B_{\ell m} &= i\,\frac{a_{2\ell m} - a_{-2\ell m}}{2} \end{aligned}$$

Champs E et B
et polarisation

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





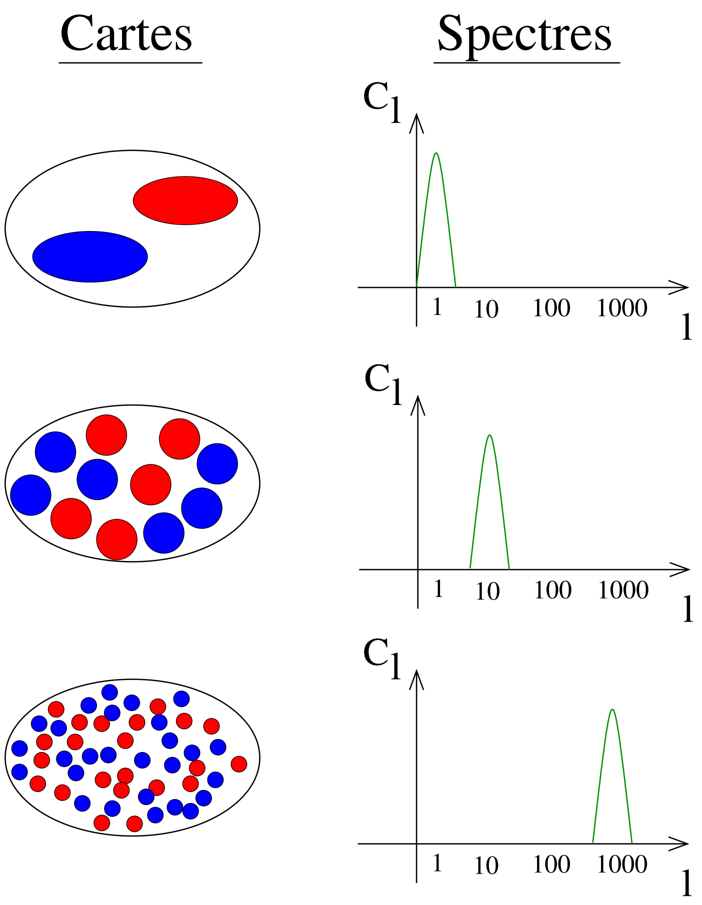
$$B \propto -\int U \qquad \text{pseudo} - \text{scalaire}$$

Les spectres de puissance

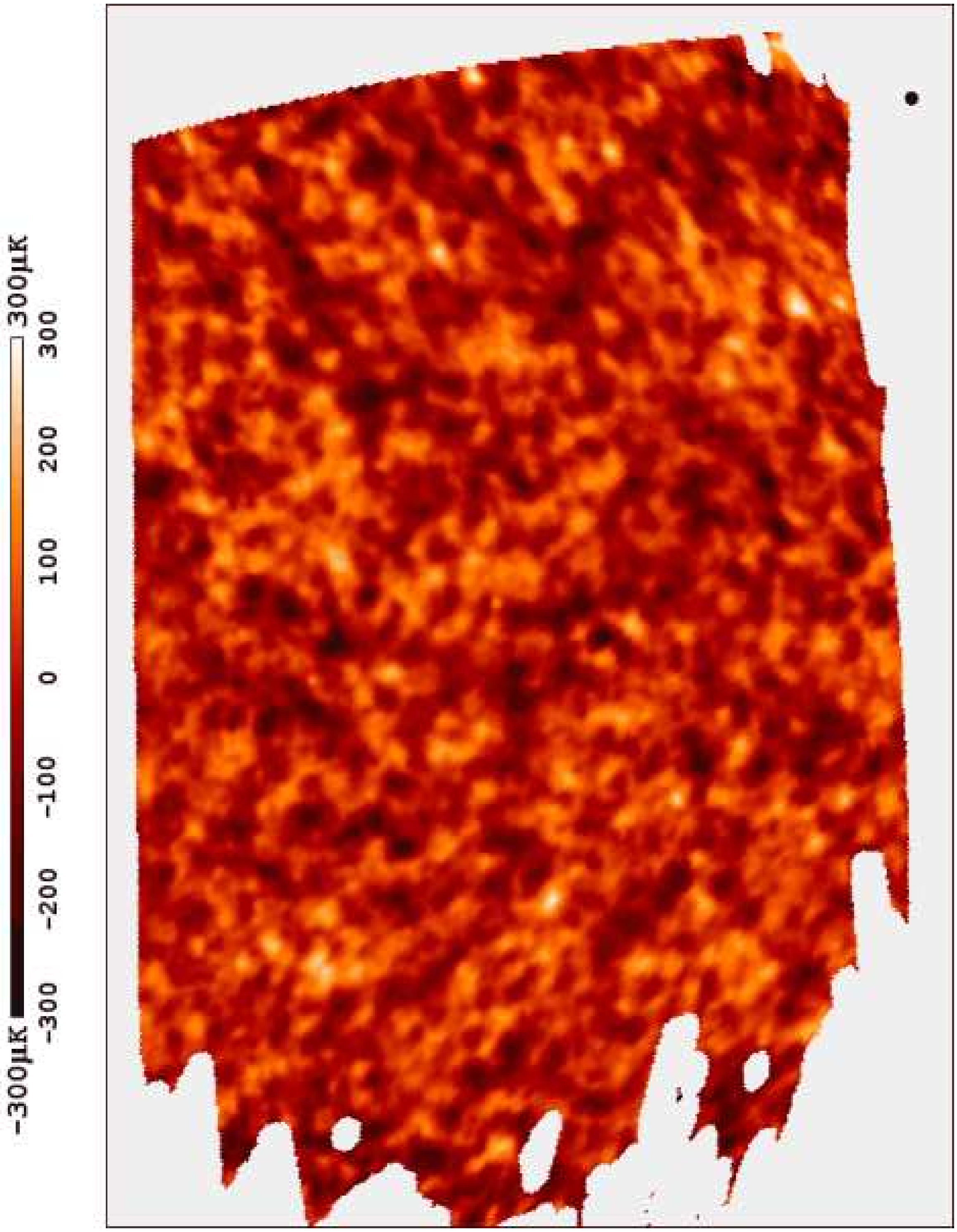
On définit :

$$C_{X\ell} = \frac{1}{2\ell+1} \sum_m |a^X_{\ell m}|^2$$

avec $X = T,\ E,\ B,\ ET,\ BT,\ EB.$

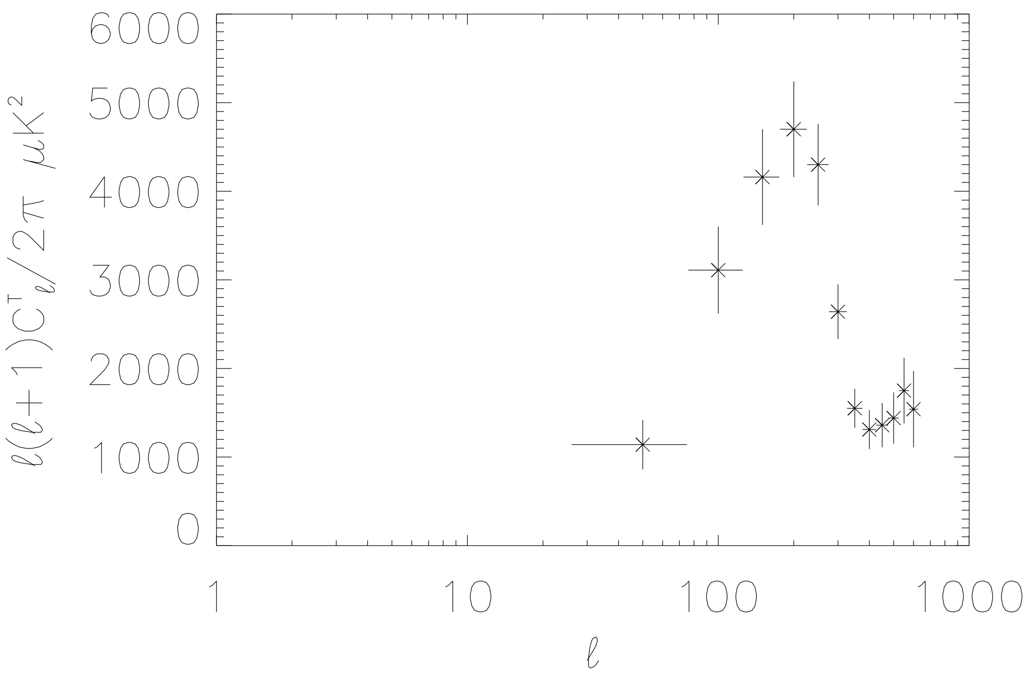


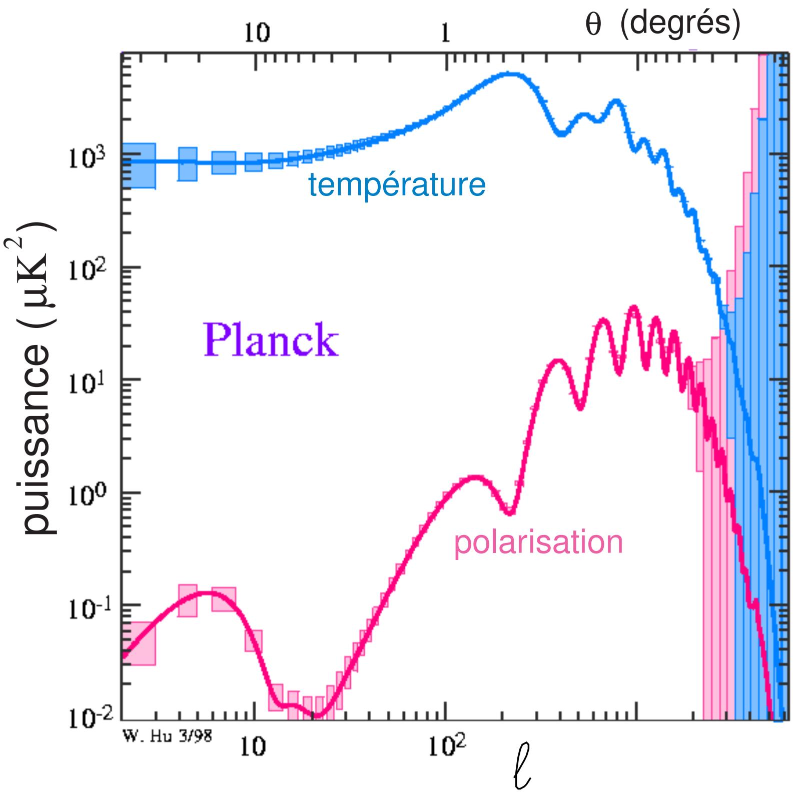
on a approximativement $\ell \sim \frac{200^\circ}{\theta}$.



de Bernardis et al., Nature, 404, 955-959, 2000

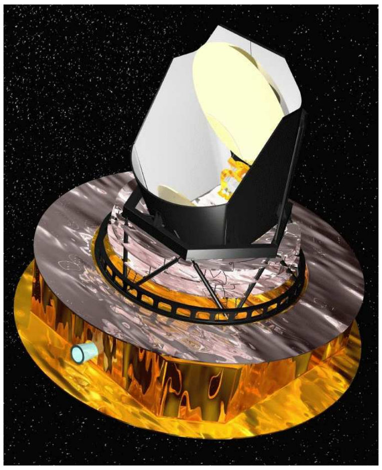
Mesure du spectre — Avril 2000





de Bernardis et al., Nature, 404, 955-959, 2000

La mission Planck



lancement en 2007

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

http://astro.estec.esa.nl/SA-general/Projects/Planck/

II.

Mesure de la polarisation et traitement du bruit basse fréquence

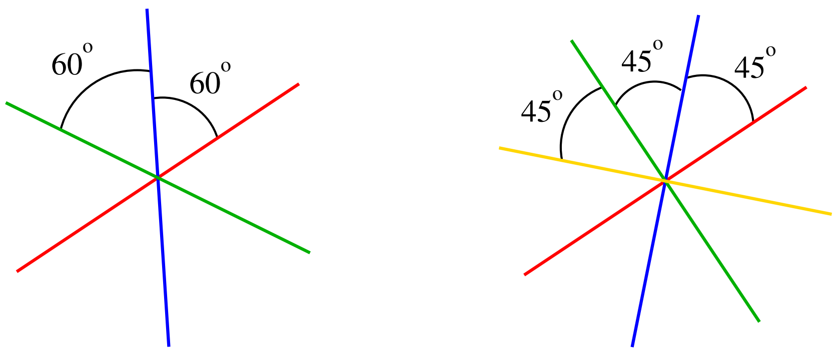
Disposition des polarimètres

On cherche à minimiser le volume de la boîte d'erreur sur les paramètres de Stokes.

On montre que :

- si les erreurs sont identiques sur les polarimètres
- si elles sont de plus décorrélées

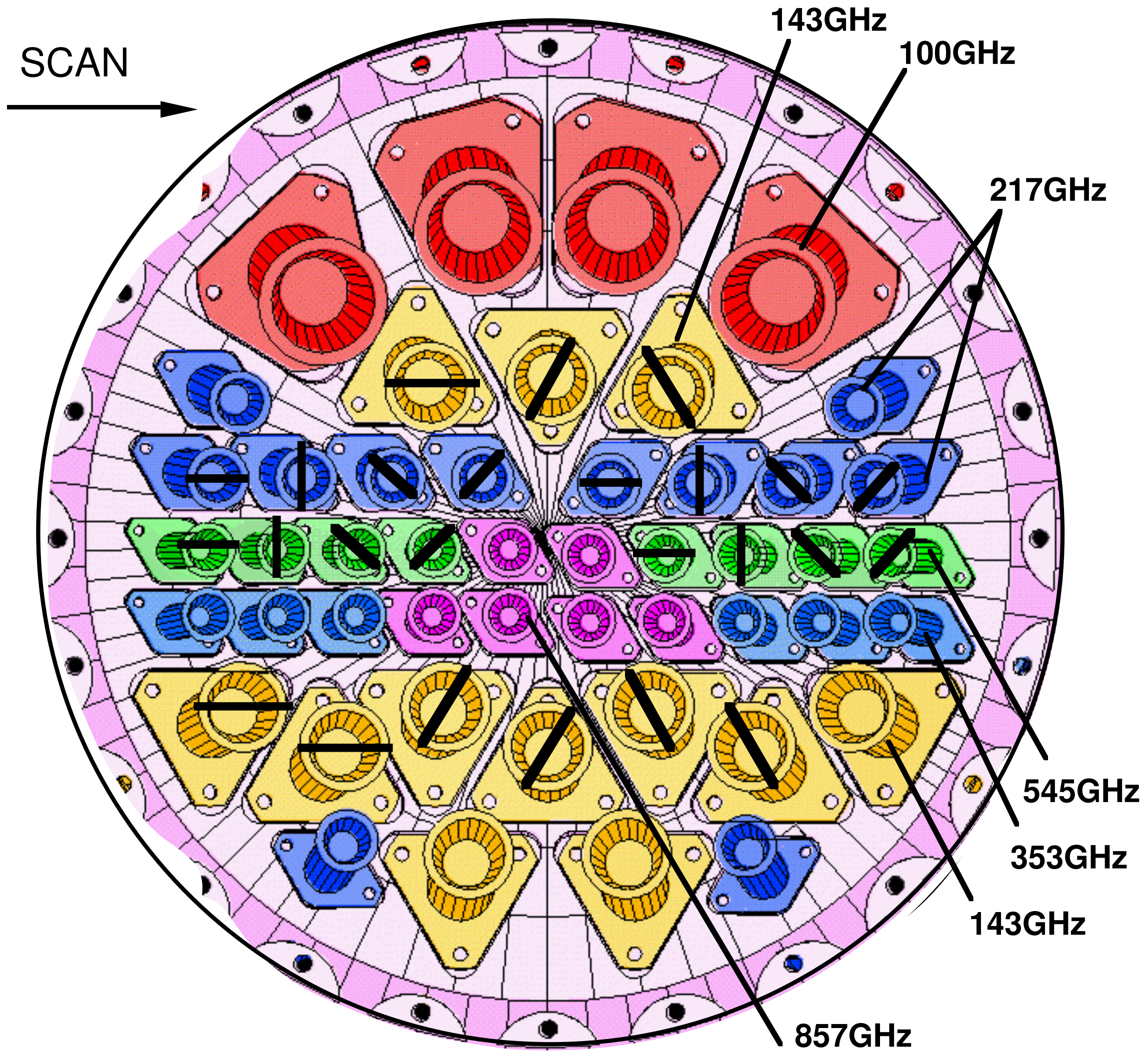
alors si les polarimètres sont régulièrement espacés et couvrent $180°$ ($\delta\Psi = 180° / n_{\mathrm{polar}}$),



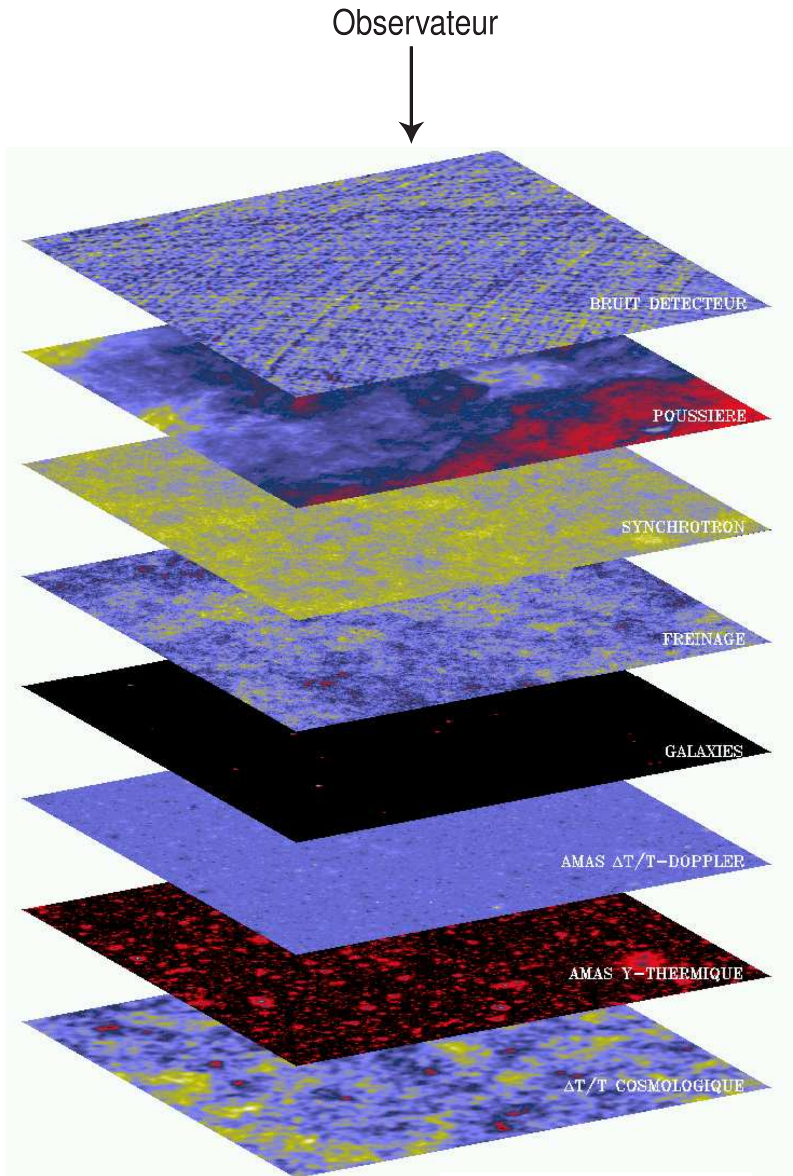
les erreurs sur I, Q et U seront aussi décorrélées et le volume de la boîte d'erreur sera minimal.

Adoptées pour la mission Planck ; Couchot et al., A&ASS, 1999, **135**, 579

Planck — Le plan focal — HFI



Contributions



Bouchet & Gispert (1996)

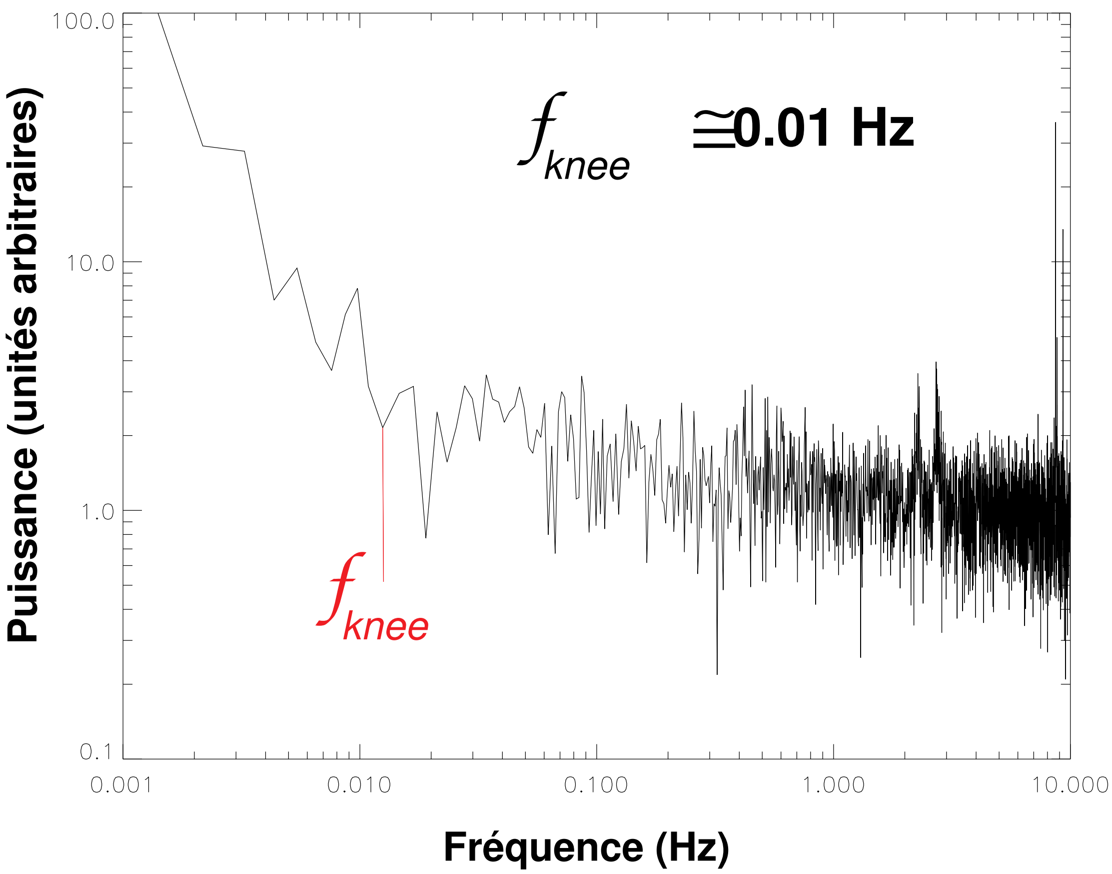
soustraction de la composante détecteur

Le bruit basse fréquence

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

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

Spectre mesuré :

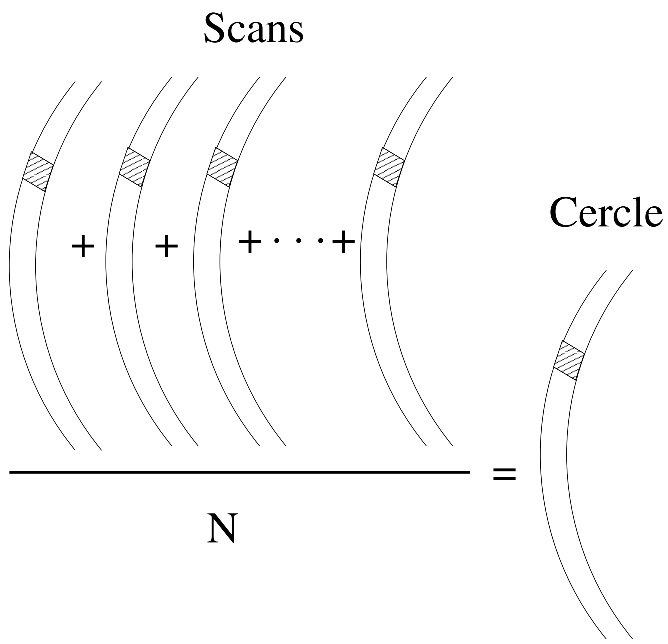


Dans le cadre de la mission Planck

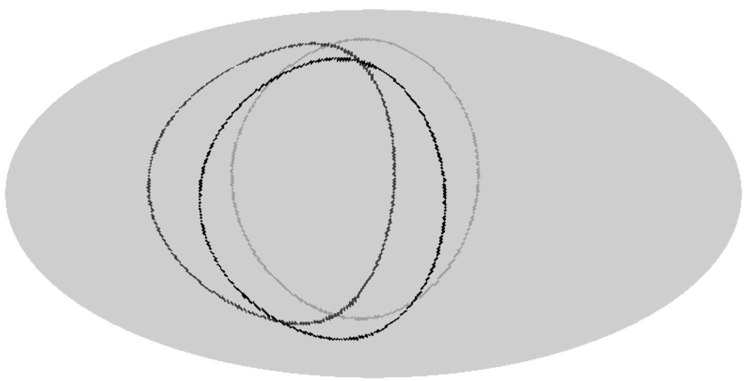
utilisation des redondances

dans la stratégie de balayage :

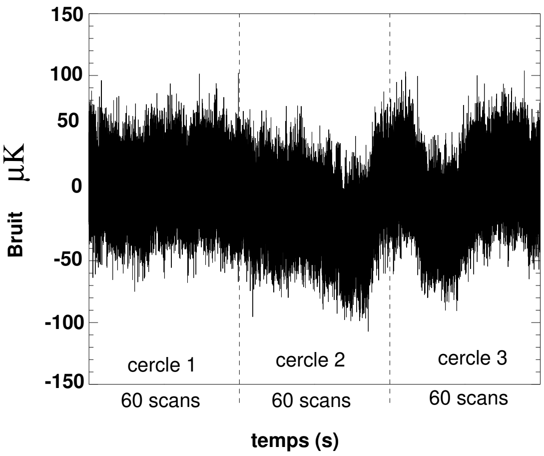
▶ moyennage

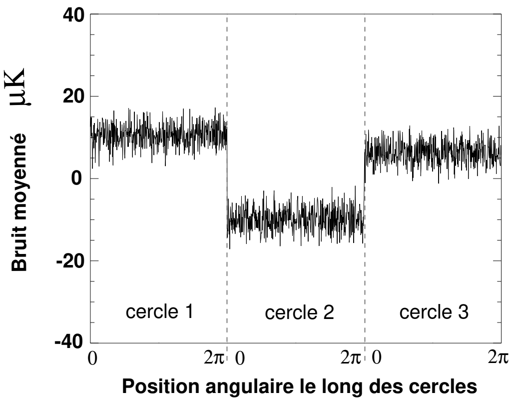


▶ intersections

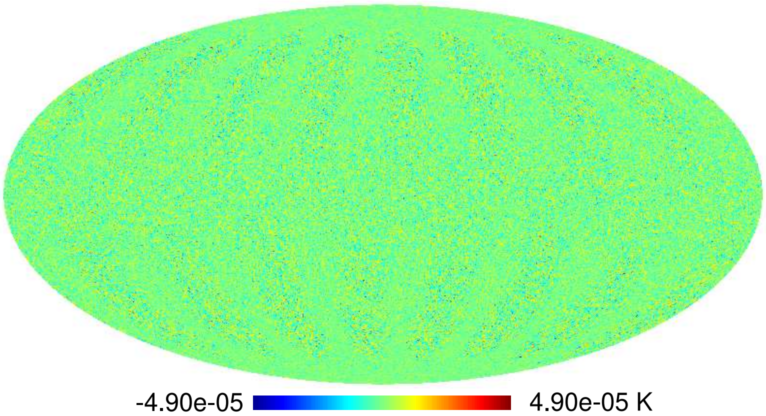


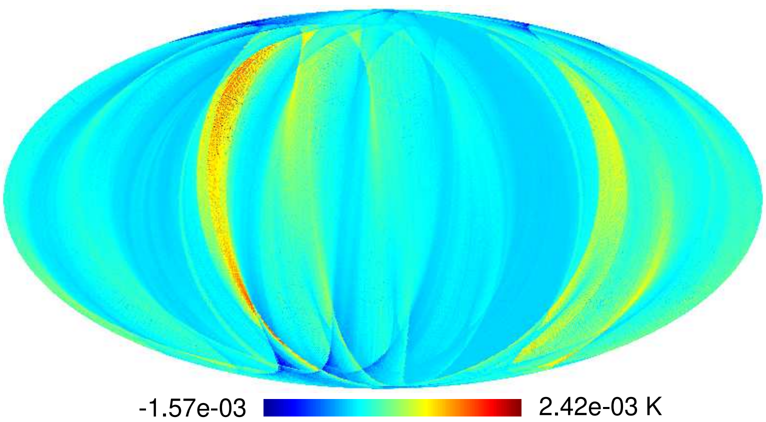
▶ moyennage : chaque cercle est la moyenne d'environ 60 rotations superposées ; dépend de $f_{\rm knee}/f_{\rm spin}$.

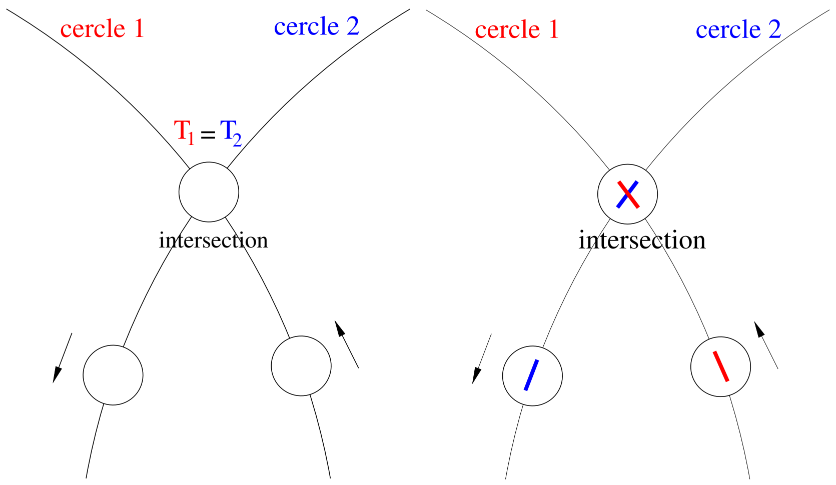




Reprojection :



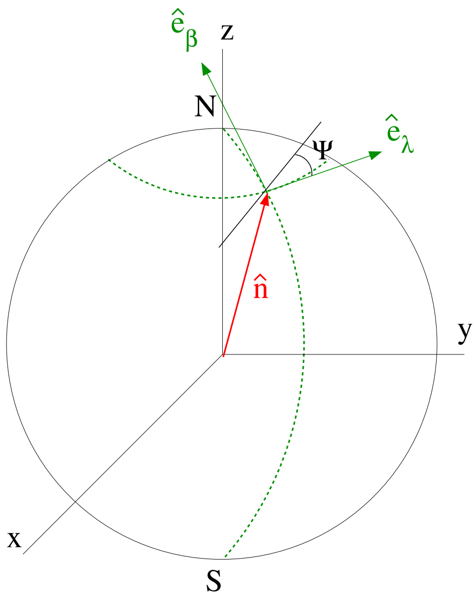




Les bolomètres ne mesurent pas le même signal (les polarimètres ont tourné).

$$\Downarrow$$

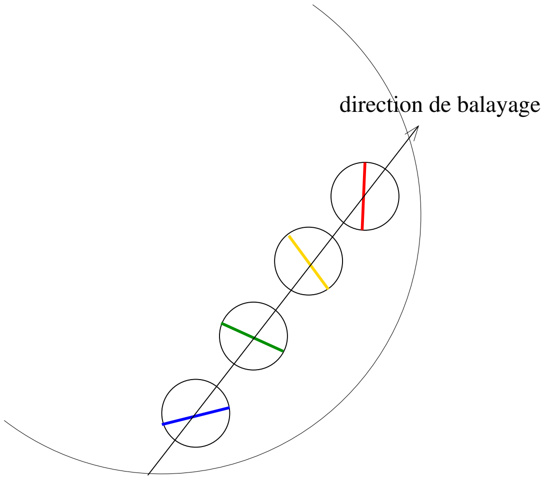
définir I, Q et U dans un référentiel global, indépendant de la stratégie de balayage du ciel, par exemple :

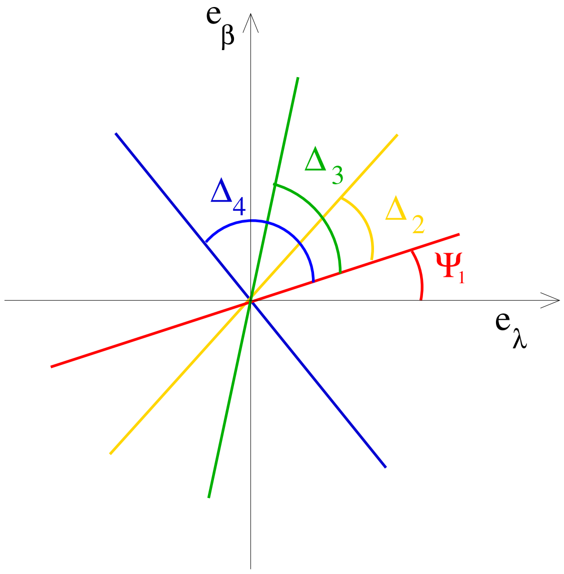


rappel : un polarimètre mesure

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

avec $\Psi_p = \Psi_1 + \Delta_p$





Pour h polarimètres, on écrit sous la forme matricielle :

$$\boxed{\mathbf{M} = \mathcal{A}\ \mathbf{R}(\Psi_1)\ \mathbf{S}}$$

où

$\mathcal{A}$	caractérise la géométrie du plan focal
$\mathbf{R}(\Psi_1)$	rend compte de la rotation du plan focal
$\mathbf{S}$	sont les paramètres de Stokes.

En ajoutant la contribution des constantes :

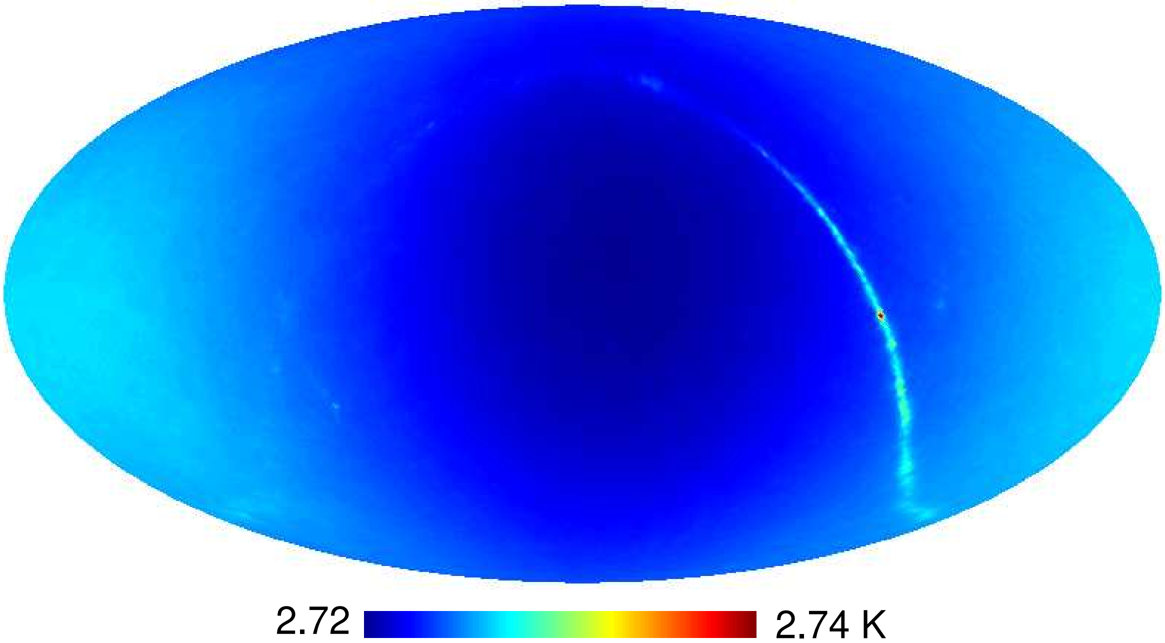
$$\boxed{\mathbf{M} = \mathbf{O} + \mathcal{A}\,\mathbf{R}(\Psi_1)\,\mathbf{S} + \text{ bruit blanc}}$$

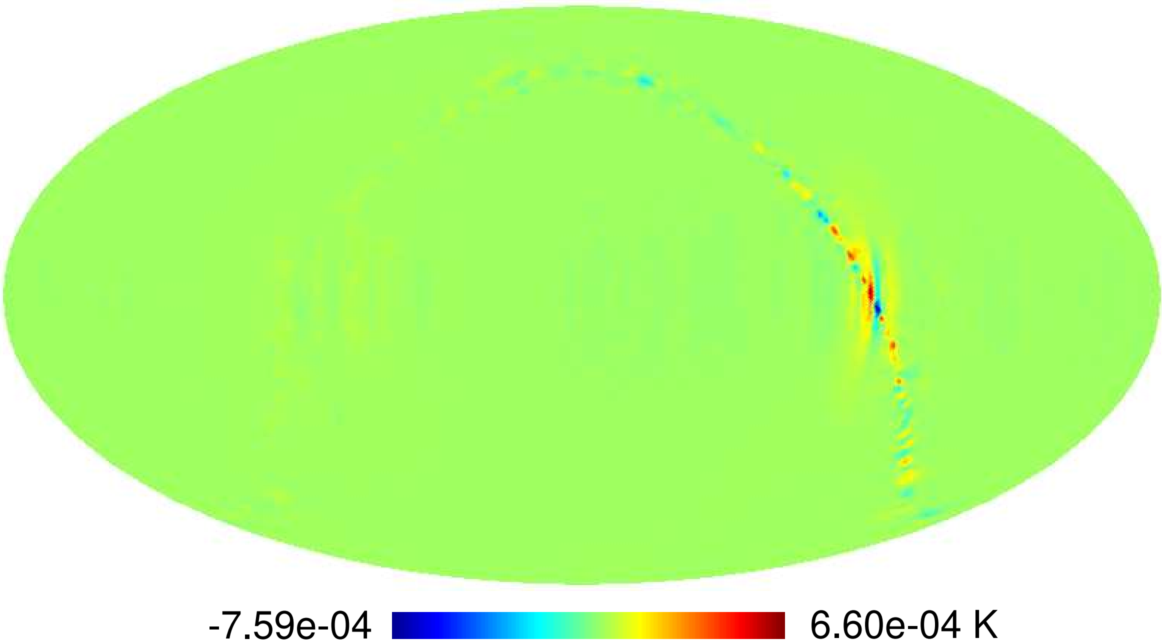
Les constantes $\mathbf{O}$ (une par cercle et par polarimètre) et les paramètres de Stokes $\mathbf{S}$ sont obtenus en minimisant :

$$\chi^2 = \sum_{\text{intersections}} (\mathbf{M} - \mathbf{O} - \mathcal{A}\ \mathbf{R}(\Psi_1)\ \mathbf{S})^T \times \mathbf{N}^{-1} \times (\mathbf{M} - \mathbf{O} - \mathcal{A}\ \mathbf{R}(\Psi_1)\ \mathbf{S})$$

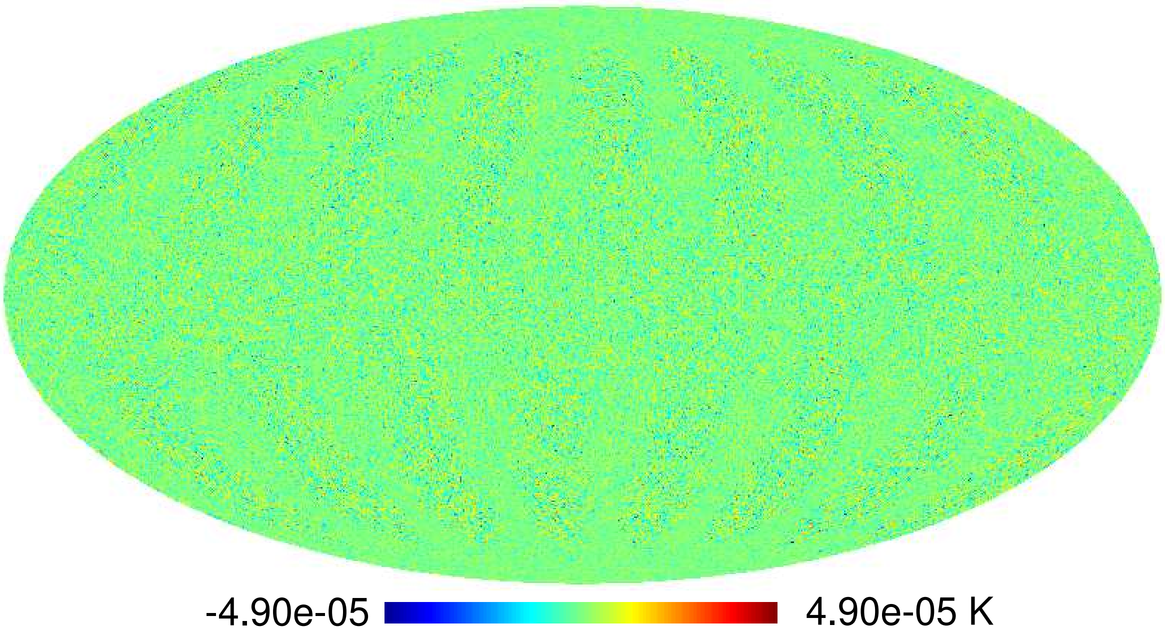
▶ Test du destriage : simulations.

Cartes initiales

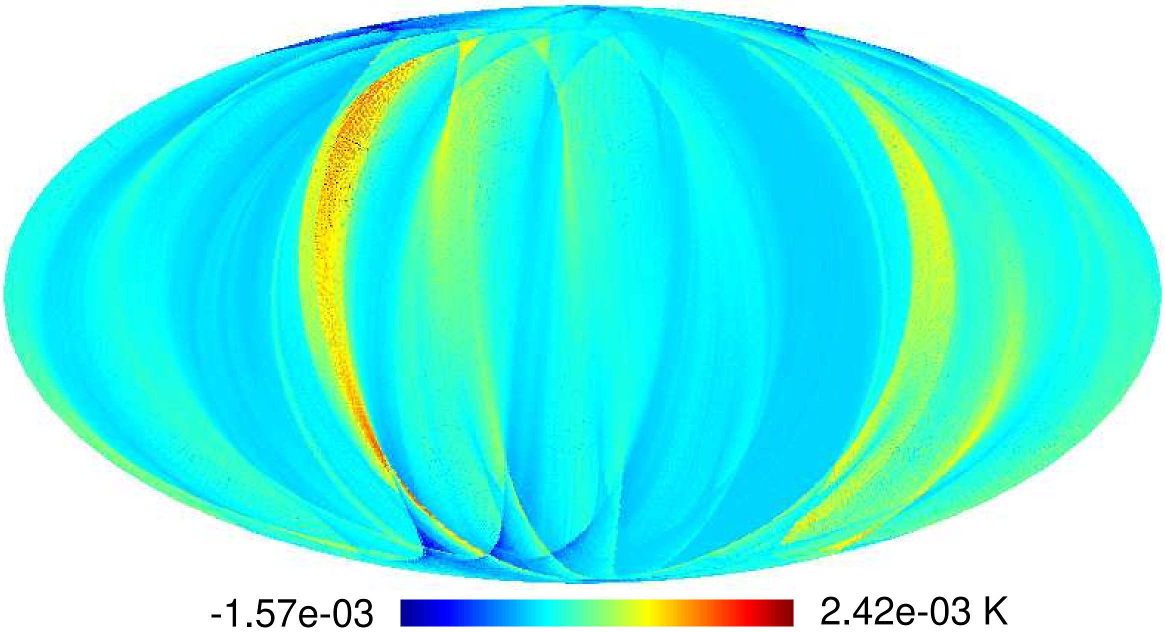




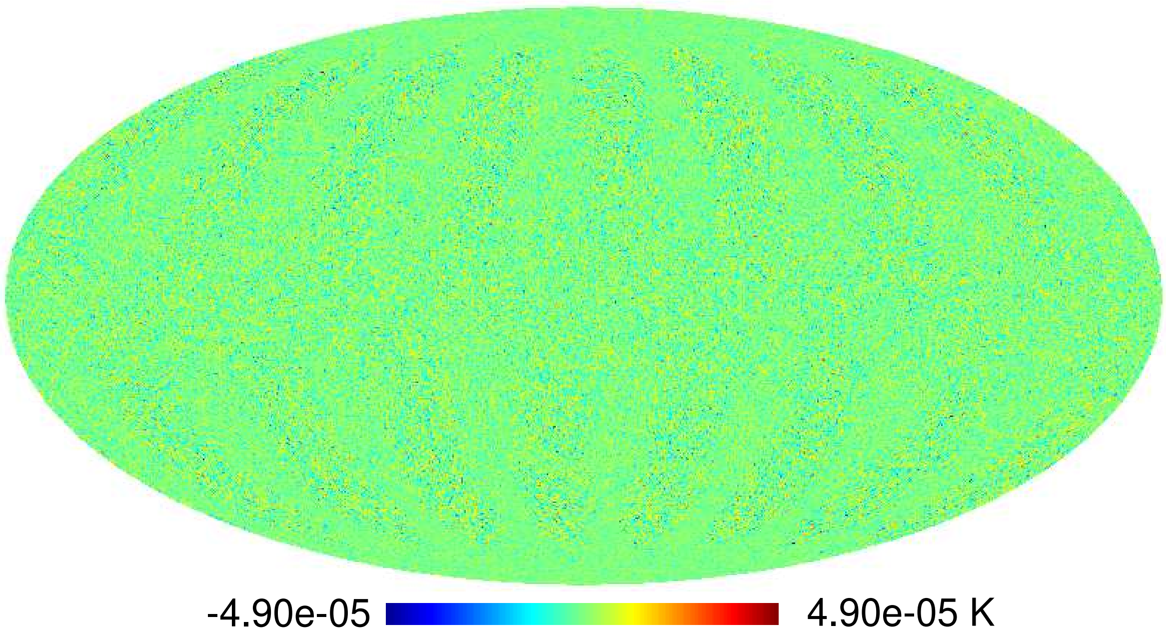
Bruit blanc :



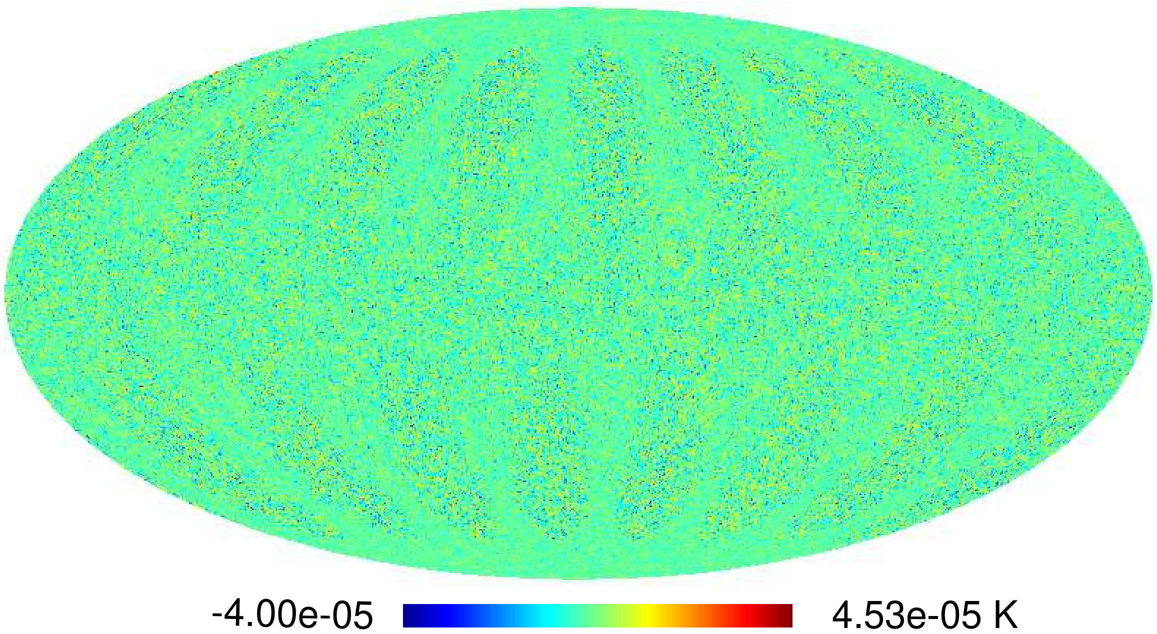
Sans destriage :



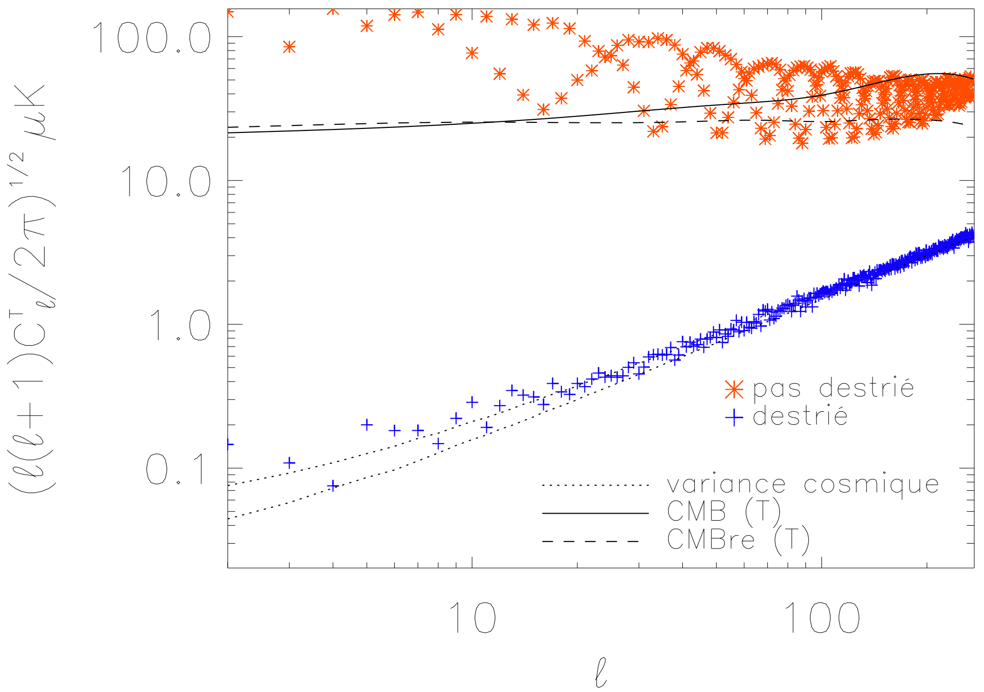
Bruit blanc :

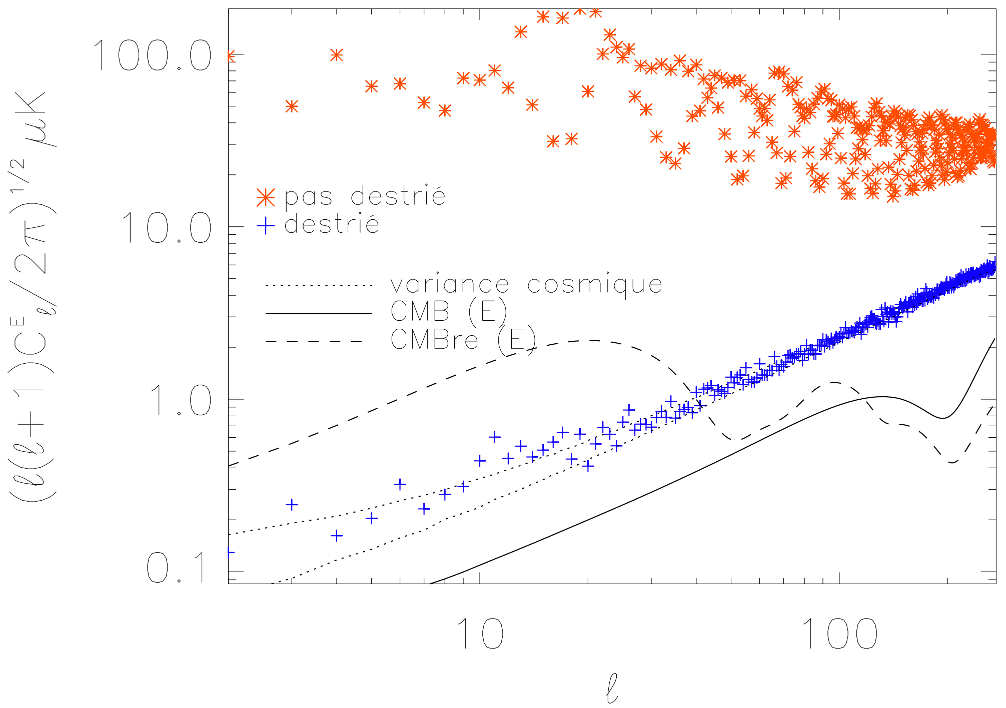


Après destriage :



Analyse statistique du destriage





Revenu et al., A&ASS, **142** (2000), 499

Résultats et perspectives

- le bruit basse fréquence est réduit jusqu'au niveau du bruit blanc ;
- Planck peut mesurer la polarisation du rayonnement fossile ;
- très importante économie de calcul par rapport au cas classique ;
- méthode applicable directement pour Archéops par exemple ;
- seule méthode à ce jour à s'appliquer à la polarisation ;
- étudier le cas $f_{\mathrm{knee}}/f_{\mathrm{spin}} \geqslant 1$,

$$\mathbf{M} = \underbrace{\mathcal{A}\,\mathbf{R}(\Psi_1)\,\mathbf{S}}_{\text{contribution du signal}} + \underbrace{\sum_{\ell=1}^{n_{\mathrm{fit}}} \boldsymbol{a}_i^\ell\, f_i^\ell(\Psi_1)}_{\substack{\text{fonction modélisant}\\ \text{le bruit résiduel}}} + \text{bruit blanc.}$$

III.

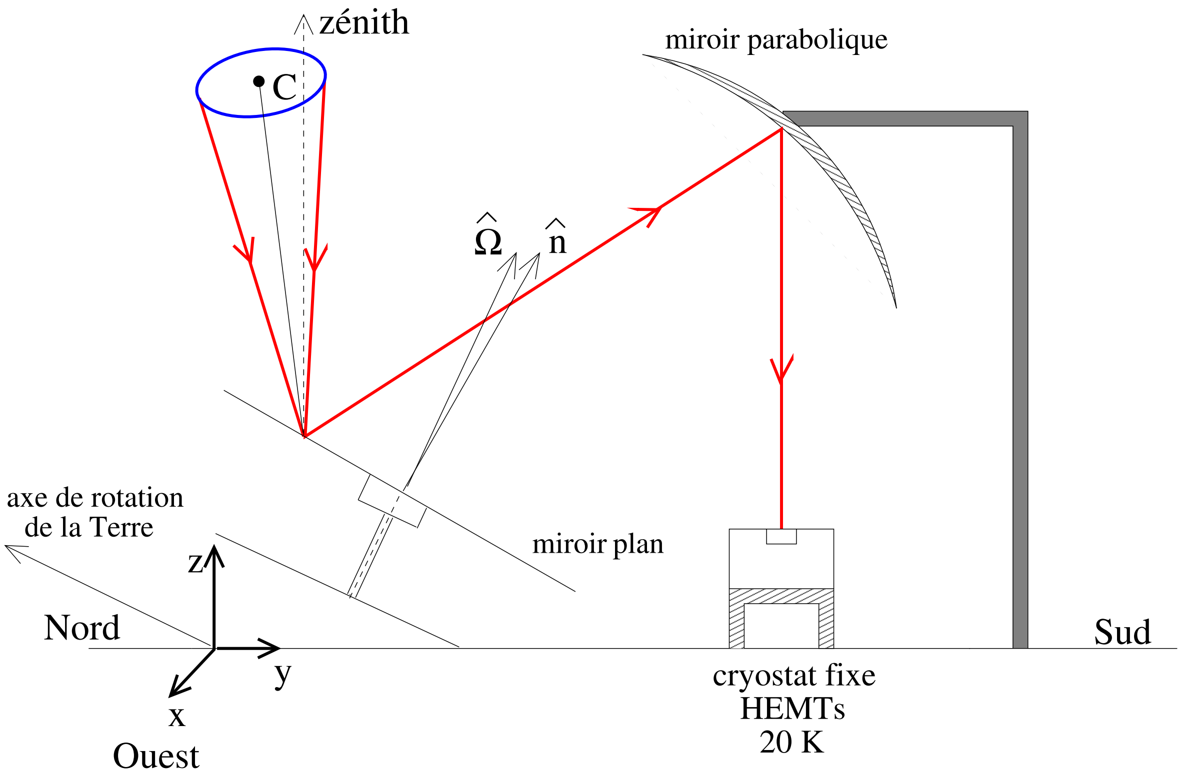
Traitement des données de COSMOSOMAS

COSMOSOMAS

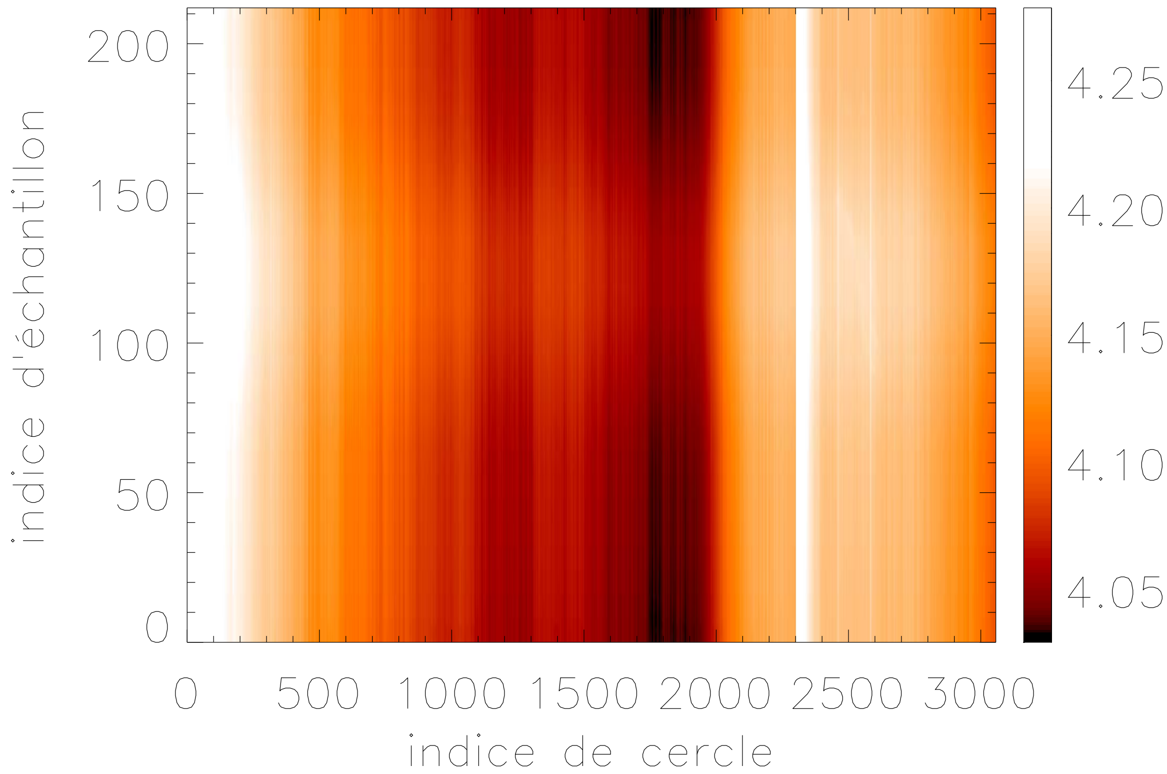
HEMT, 4 canaux de fréquence : 10, 13, 15 et 17 GHz, et une résolution angulaire de l'ordre du degré.

Objectifs :

- cartographier l'émission polarisée de notre galaxie
- mesure de C_ℓ^T pour $\ell \leqslant 150$

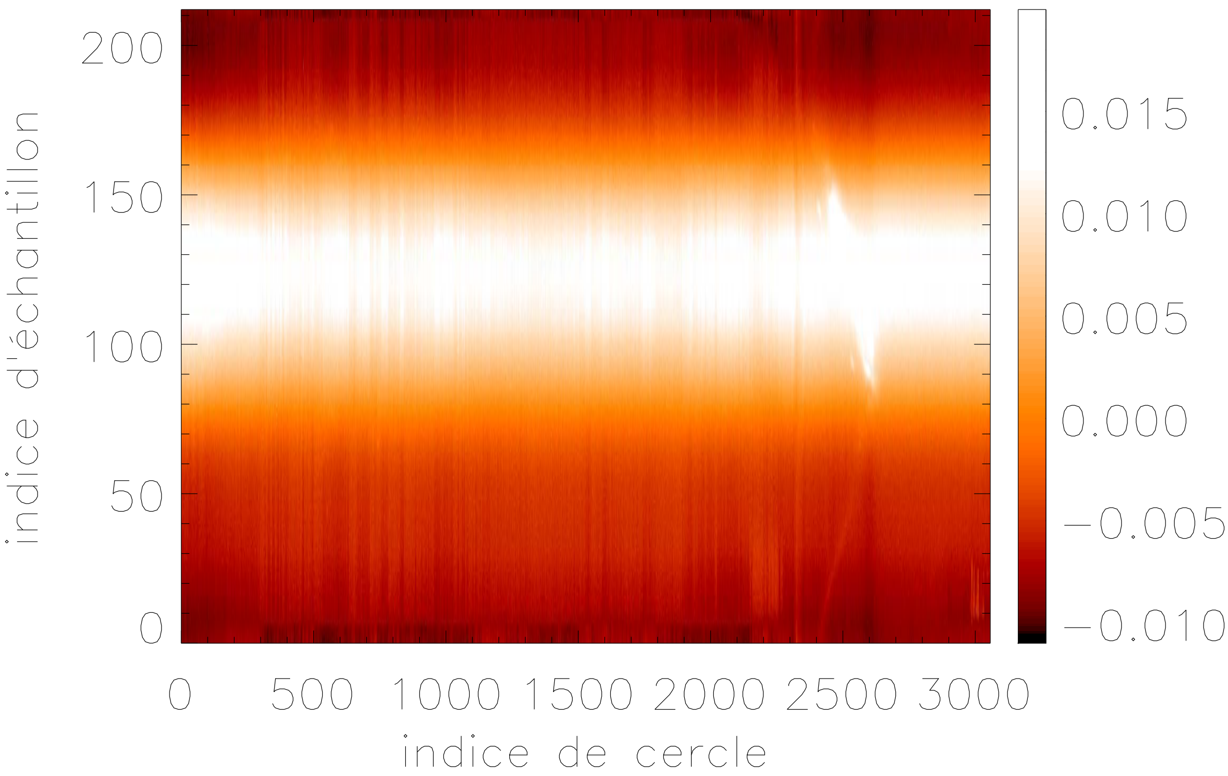


Allure des données brutes

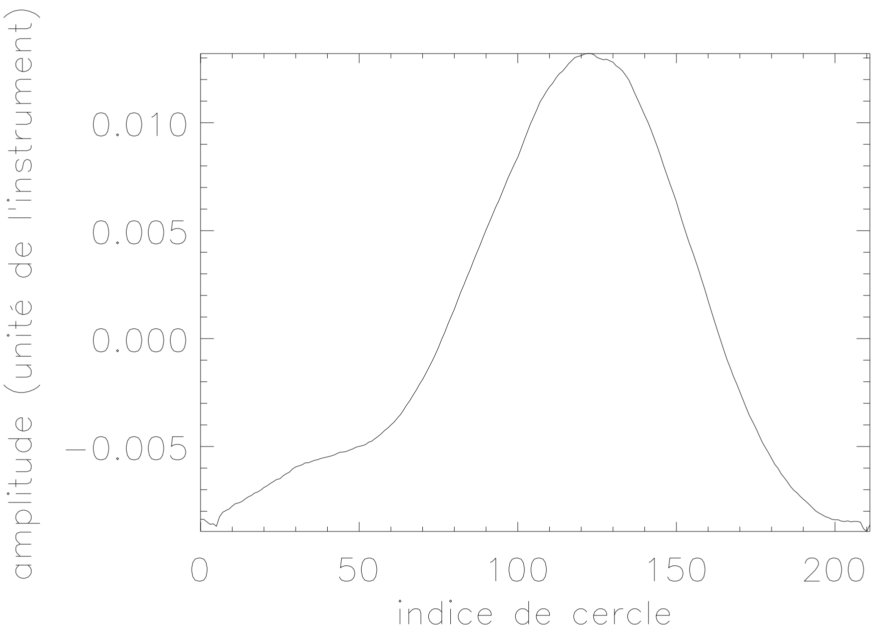


en unités de données (ud)

Après filtrage des très basses fréquences :



détermination itérative de la forme de l'effet systématique :



Méthode itérative

Initialisation : déterminer une première approximation de la forme de l'effet systématique sur la carte

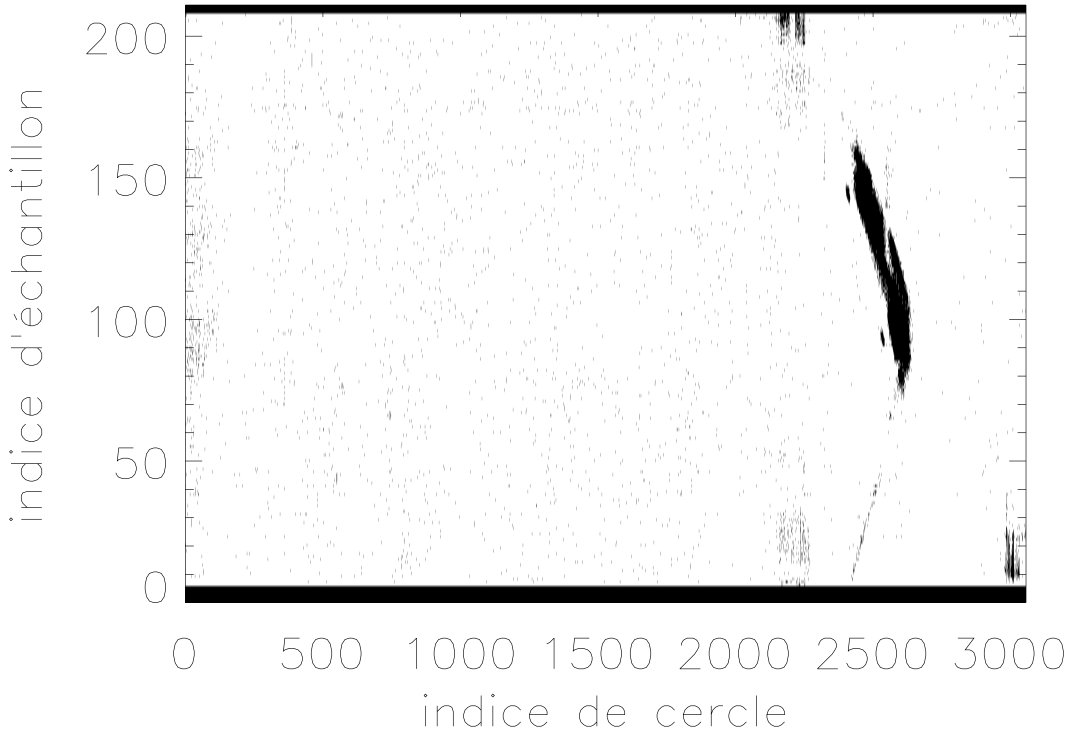
1. calcul des niveaux moyens et des amplitudes sur chaque cercle ; les mesures sont modélisées par :

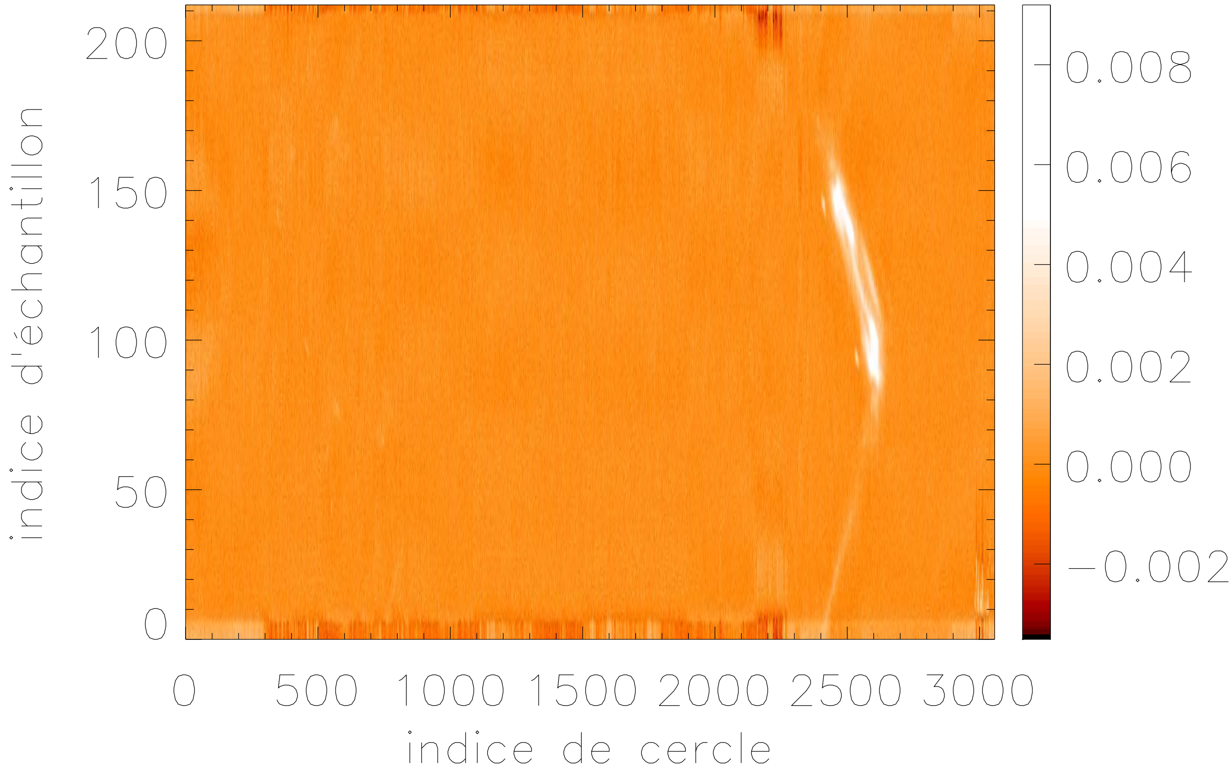
$$m_{i,k} = \underbrace{O_i}_{\substack{\text{niveau moyen} \\ \text{du cercle } i}} + \underbrace{a_i\, y_k}_{\substack{\text{amplitude} \\ \times\text{effet systématique}}} + \underbrace{s_{i,k}}_{\substack{\text{contribution} \\ \text{du ciel}}}$$

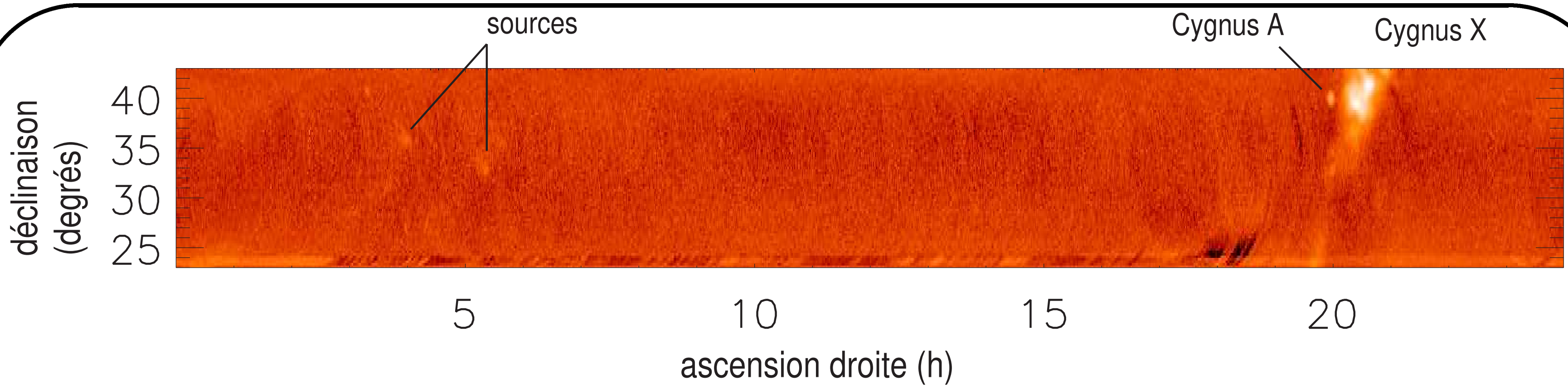
2. fabrication de la carte des résidus ; calcul du masque sur cette carte

3. nouvelle détermination des niveaux moyens et de la forme de l'effet systématique en utilisant le masque ;

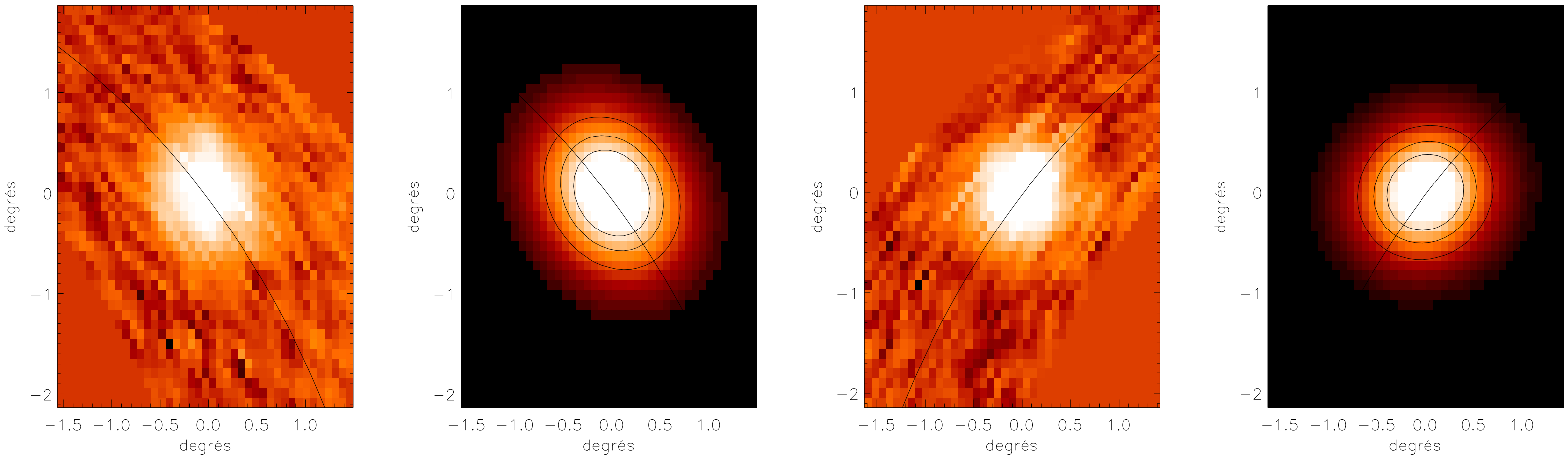
4. retour au point 1


200
150
100
50
0
indice d'échantillon
0
500
1000
1500
2000
2500
3000
indice de cercle


200
150
100
50
0
indice d'échantillon
0
500
1000
1500
2000
2500
3000
indice de cercle
0.008
0.006
0.004
0.002
0.000
−0.002



Détermination des lobes



Résultats et perspectives

- calibration sur Cygnus A : $S = 110.4^{+32.0}_{-24.8}$ Jy

$$\text{flux}(\text{K}) = \alpha \times \text{flux}(\text{ud})$$
$$\Downarrow$$
$$\boxed{\alpha = 22 \pm 6 \text{ K.ud}^{-1}}$$

- le bruit blanc a une rms de 880 ± 240 μK par lobe
- améliorer la calibration avec le dipôle
- en 100 jours et pour des pixels de 2 degrés carrés, on arrive aux fluctuations du CMB (~ 30 μK)
- polarisation : besoin de faire tourner le cryostat

Conclusions

1. la polarisation du CMB
   - sujet en pleine effervescence
   - mesurable avec Planck
   - effets à considérer :
     (a) effet des lobes polarisés non-symétriques
     (b) mouvement exact de Planck

2. connaissance des avant-plans polarisés
   - COSMOSOMAS
   - Archéops
   - bien d'autres encore . . .