

Soutenance de thèse de Lilian Sanselme
20 septembre 2013

Cosmologie observationnelle avec le satellite *Planck*

Effets systématiques de l'instrument HFI
et étude de l'ionisation de l'Univers

Thèse effectuée au LPSC sous la direction de Cécile Renault



L'observation du ciel submillimétrique avec *Planck*

- Le satellite *Planck* et l'instrument HFI

- Traitement des données

- Cartes de *Planck*-HFI

Résultats de *Planck*

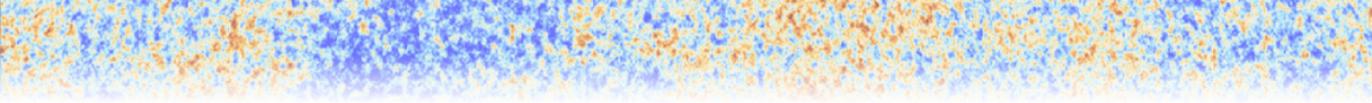
- La cosmologie à l'ère de *Planck*

Histoire de l'ionisation de l'Univers

- Histoire thermique

- Annihilation de matière noire lors de la recombinaison

- La Réionisation



L'observation du ciel submillimétrique avec *Planck*

Le satellite *Planck* et l'instrument HFI

Traitement des données

Cartes de *Planck*-HFI

Résultats de *Planck*

La cosmologie à l'ère de *Planck*

Histoire de l'ionisation de l'Univers

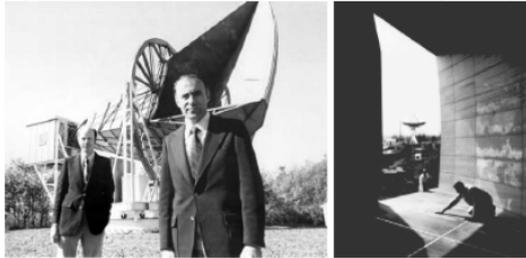
Histoire thermique

Annihilation de matière noire lors de la recombinaison

La Réionisation

Histoire du fond diffus cosmologique

Détection : Penzias et Wilson (1964)

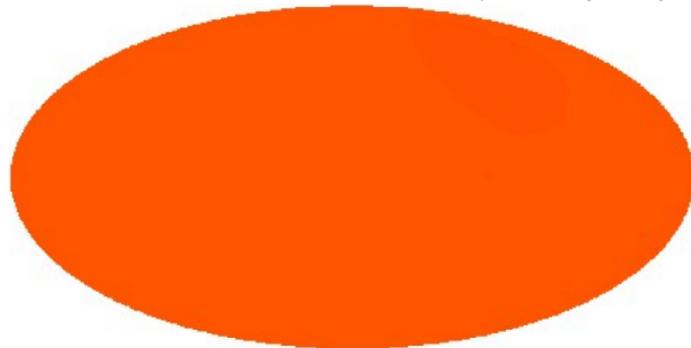
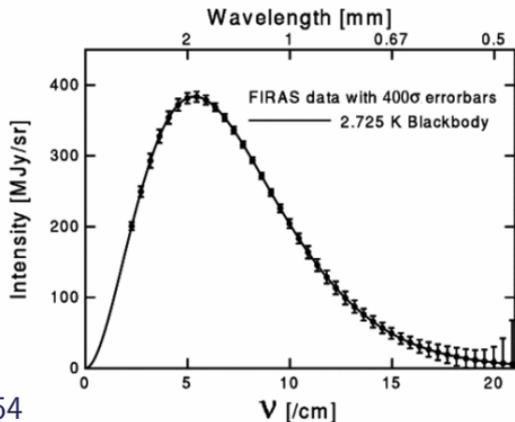


Bruit isotrope de température d'antenne ≈ 3 K.

Fond diffus cosmologique = CMB (*cosmic microwave background*)

Spectre de corps noir : COBE/FIRAS (1990)

Carte de la température : COBE/DMR (1992)



Monopole : $T \approx 2.725$ K

Histoire du fond diffus cosmologique

Détection : Penzias et Wilson (1964)

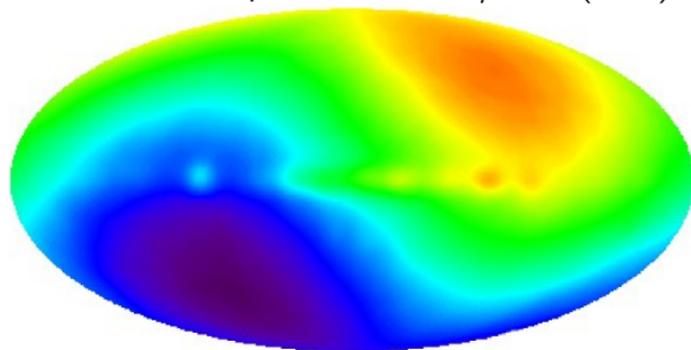
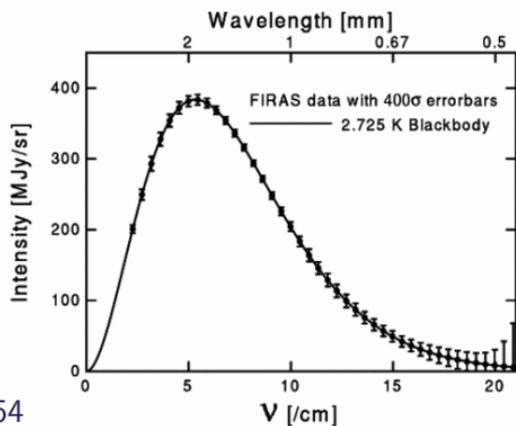


Bruit isotrope de température d'antenne ≈ 3 K.

Fond diffus cosmologique = CMB (*cosmic microwave background*)

Spectre de corps noir : COBE/FIRAS (1990)

Carte de la température : COBE/DMR (1992)



Dipôle : $\Delta T/T \approx 10^{-3}$

Histoire du fond diffus cosmologique

Détection : Penzias et Wilson (1964)

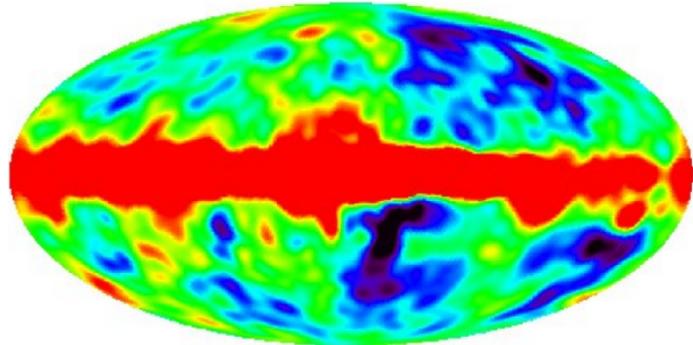
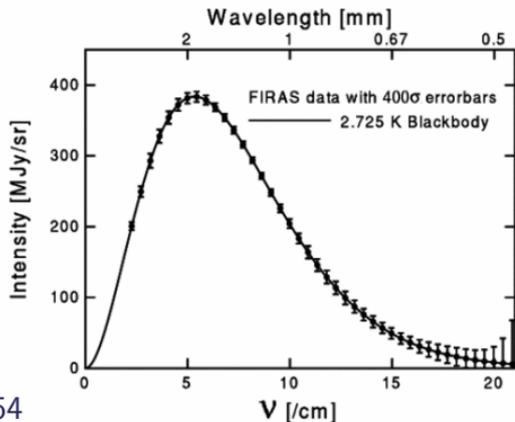


Bruit isotrope de température d'antenne ≈ 3 K.

Fond diffus cosmologique = CMB (*cosmic microwave background*)

Spectre de corps noir : COBE/FIRAS (1990)

Carte de la température : COBE/DMR (1992)



Fluctuations : $\Delta T/T \approx 10^{-5}$

De *COBE* à *Planck*

Patch de $10^\circ \times 10^\circ$ vu par *COBE*

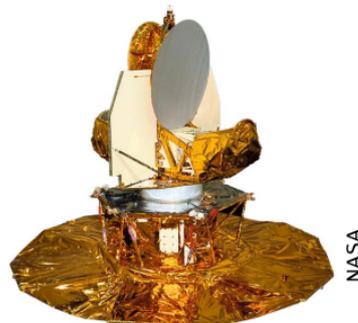
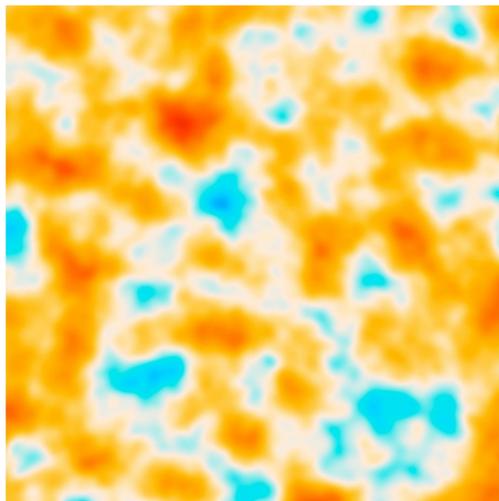


- *COBE* (NASA - 1989) : $\theta \approx 7^\circ$
- *WMAP* (NASA - 2001) : $\theta \approx 0.3^\circ$
- *Planck* (ESA - mai 2009) : $\theta \approx 0.1^\circ$
Mission nominale : 15 mois
HFI : 29 mois
LFI : 48 mois

Mesure ultime des anisotropies primaires en température,
mesure de la polarisation.

De *COBE* à *Planck*

Patch de $10^\circ \times 10^\circ$ vu par *WMAP*

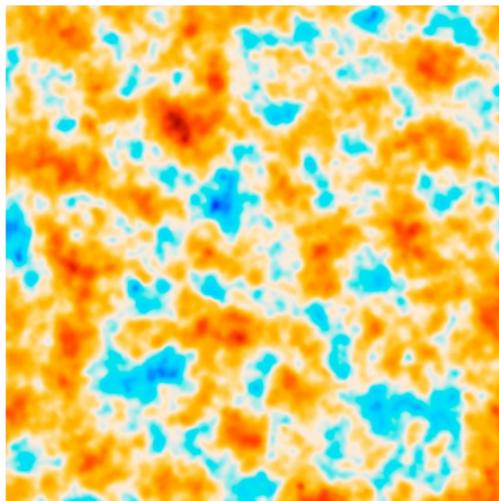


- *COBE* (NASA - 1989) : $\theta \approx 7^\circ$
- *WMAP* (NASA - 2001) : $\theta \approx 0.3^\circ$
- *Planck* (ESA - mai 2009) : $\theta \approx 0.1^\circ$
Mission nominale : 15 mois
HFI : 29 mois
LFI : 48 mois

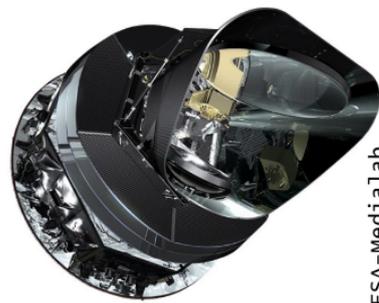
Mesure ultime des anisotropies primaires en température,
mesure de la polarisation.

De *COBE* à *Planck*

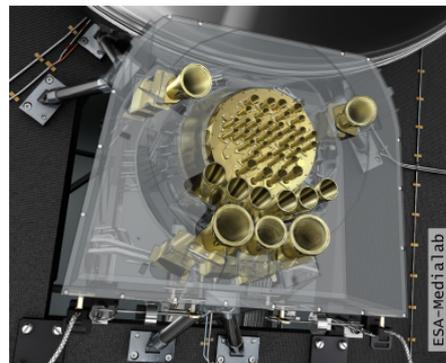
Patch de $10^\circ \times 10^\circ$ vu par *Planck*



- *COBE* (NASA - 1989) : $\theta \approx 7^\circ$
- *WMAP* (NASA - 2001) : $\theta \approx 0.3^\circ$
- *Planck* (ESA - mai 2009) : $\theta \approx 0.1^\circ$
Mission nominale : 15 mois
HFI : 29 mois
LFI : 48 mois



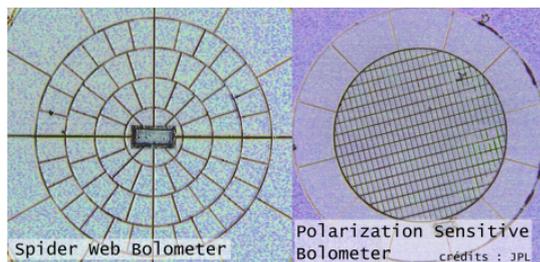
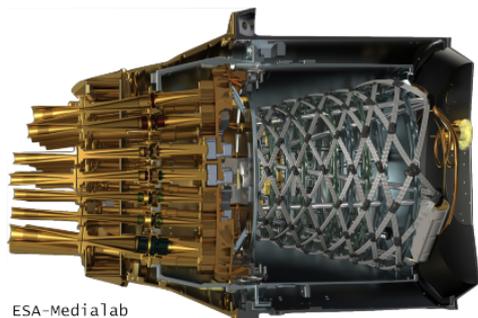
ESA-Media Lab



ESA-Media Lab

Mesure ultime des anisotropies primaires en température,
mesure de la polarisation.

L'instrument HFI



- Deux types de bolomètres
 - 20 SWB sensibles à l'intensité
 - 32 PSB sensibles à la polarisation
 - 2 bolomètres aveugles
- Cryogénie : 4 étages.
 - 385 K (panneau solaire) → 100 mK (HFI)
 - Refroidissement passif (ailettes),
 - Refroidissement actif (détentes, dilution),
 - Seule partie mobile du satellite : compresseur 4 K.
- Dix fois la sensibilité (en $\text{mK}\sqrt{s}$) de WMAP

Canal	$N_{\text{détecteurs}}$ (dont polarisés)	Résolution [Arcmin]
LFI		
30 GHz	4 (4)	32.65
44 GHz	6 (6)	27.92
70 GHz	12 (12)	13.01
HFI		
100 GHz	8 (8)	9.37
143 GHz	11 (8)	7.04
217 GHz	12 (8)	4.68
353 GHz	12 (8)	4.43
545 GHz	3	3.80
857 GHz	4	3.67

L'observation du ciel submillimétrique avec *Planck*

Le satellite *Planck* et l'instrument HFI

Traitement des données

Cartes de *Planck*-HFI

Résultats de *Planck*

La cosmologie à l'ère de *Planck*

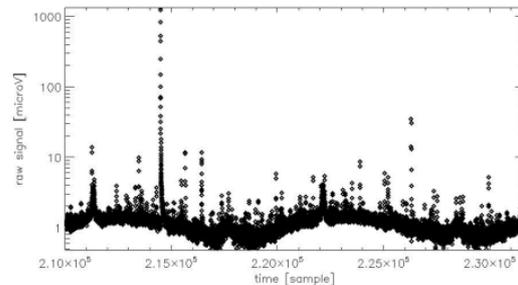
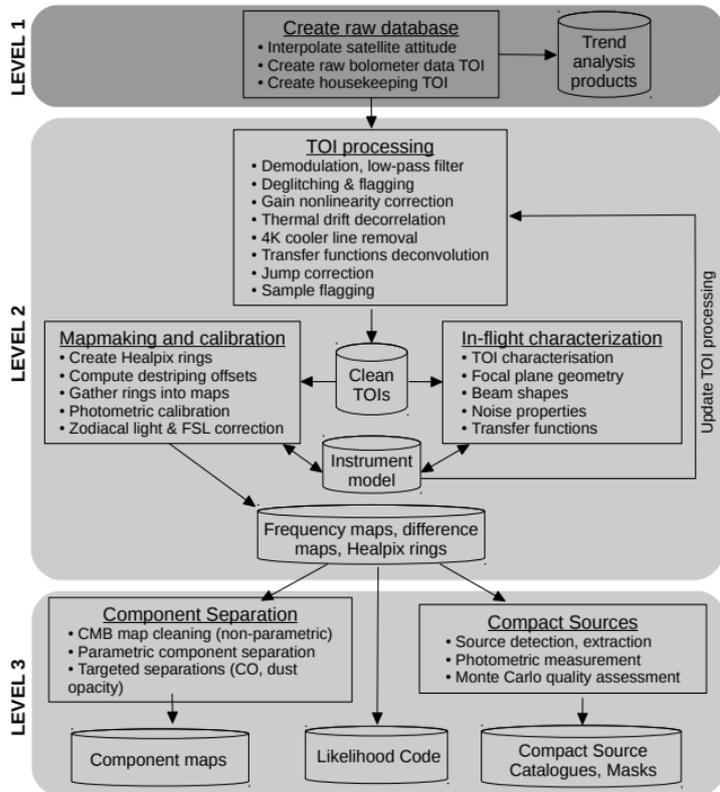
Histoire de l'ionisation de l'Univers

Histoire thermique

Annihilation de matière noire lors de la recombinaison

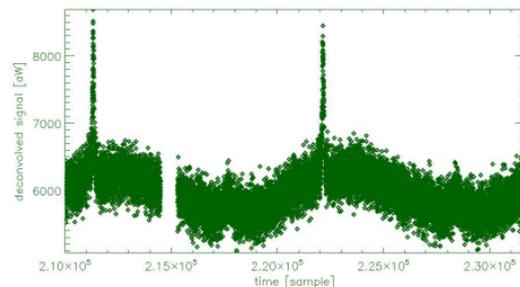
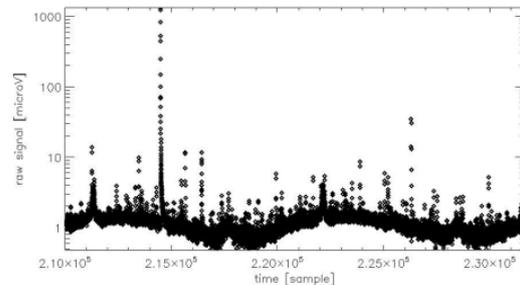
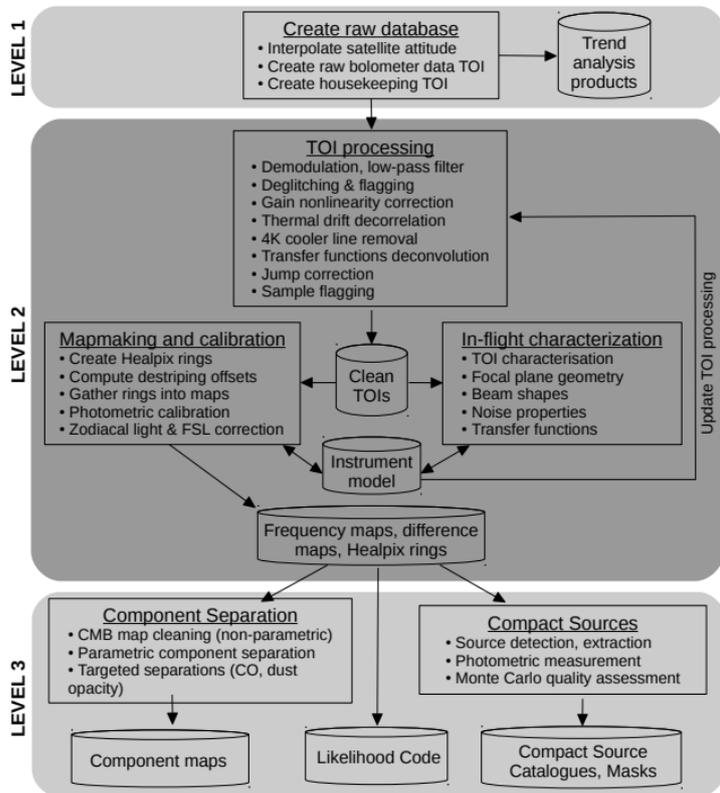
La Réionisation

Traitement des données



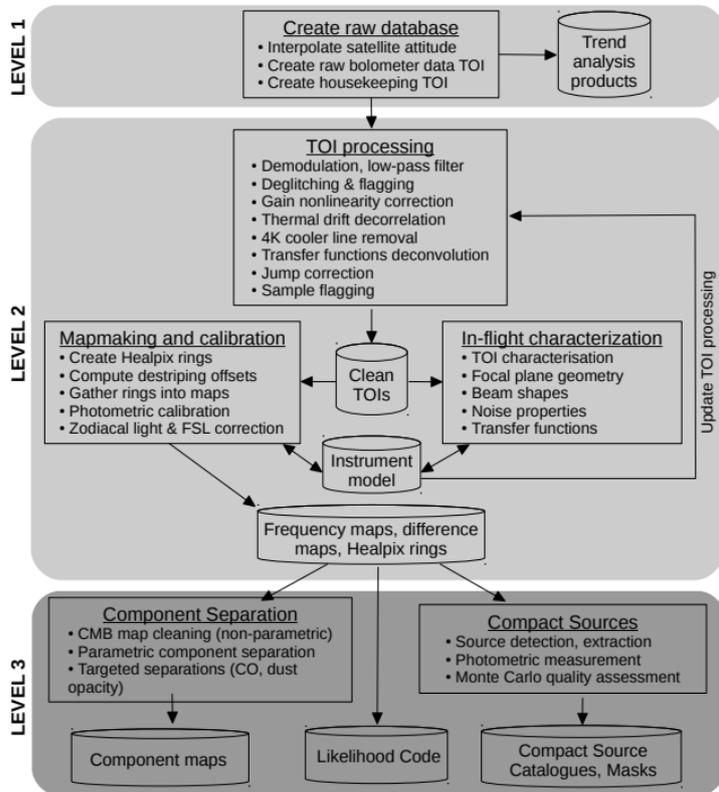
Source: *Planck* collaboration

Traitement des données



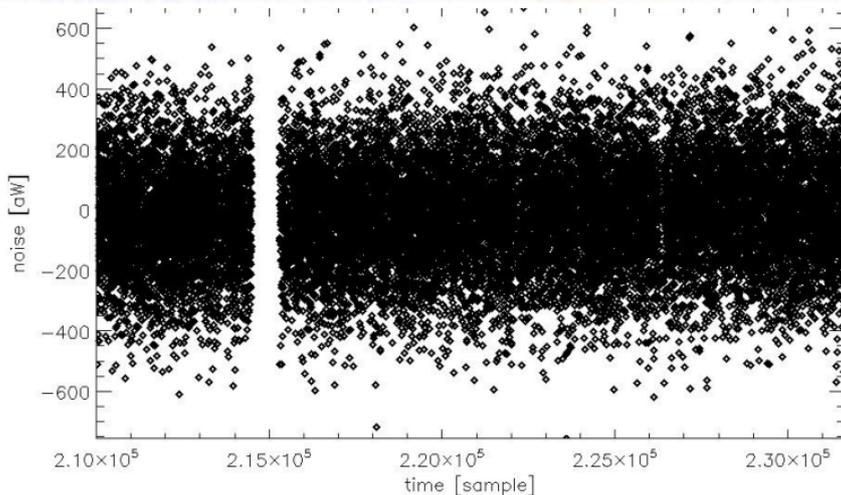
Source: *Planck* collaboration

Traitement des données



Source: *Planck* collaboration

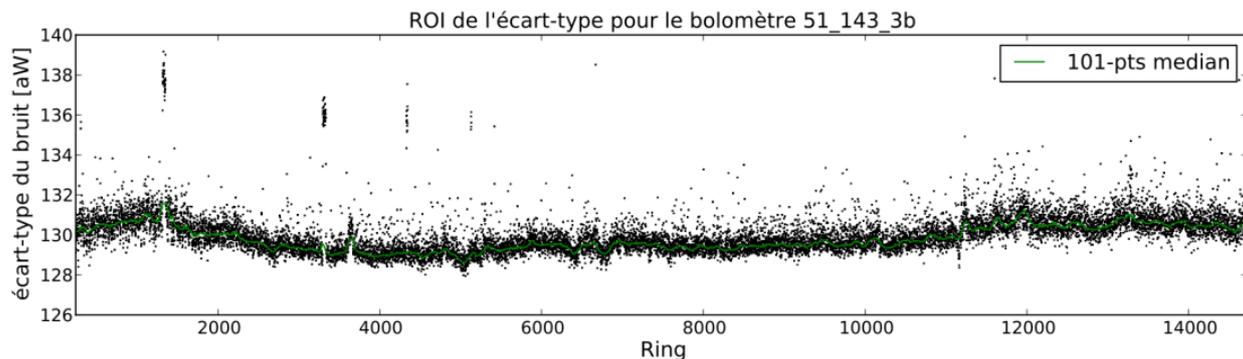
Construction de la TOI de bruit



- TOI \rightarrow 500 000 échantillons \mathbf{d} ; Ring (\approx carte du ciel à 1D) \rightarrow 10 822 éléments s .
- Projection du flux de données en temps sur le ring : $\mathbf{d} = \mathbf{A}s + \mathbf{N}$.
- Redondance $\Rightarrow \hat{\mathbf{s}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{N}^{-1} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{N} \mathbf{d}$.

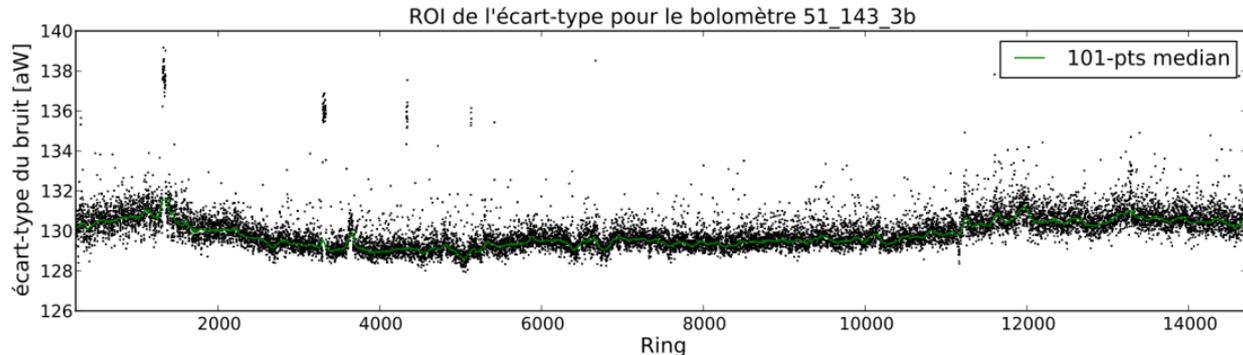
Les hypothèses de gaussianité et de stationnarité du bruit sont cruciales
 \Rightarrow caractérisation du bruit indispensable.

Caractériser le bruit au niveau du ring

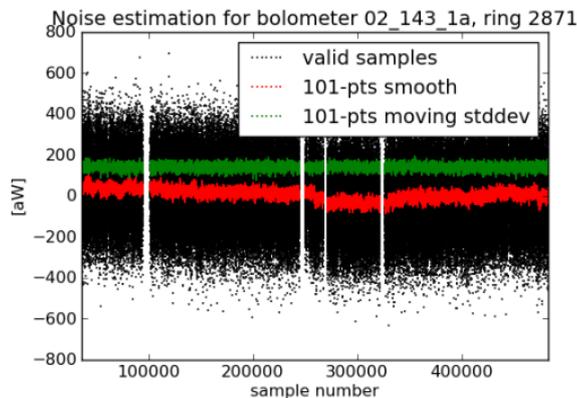


- Prise en compte des biais (Bessel, . . .)
- Non-stationarités
 - Problèmes dans ligne de base des TOI
 - saut isolé
 - accidents
 - dérive
 - Changement brutal des propriétés du bruit au sein de la TOI

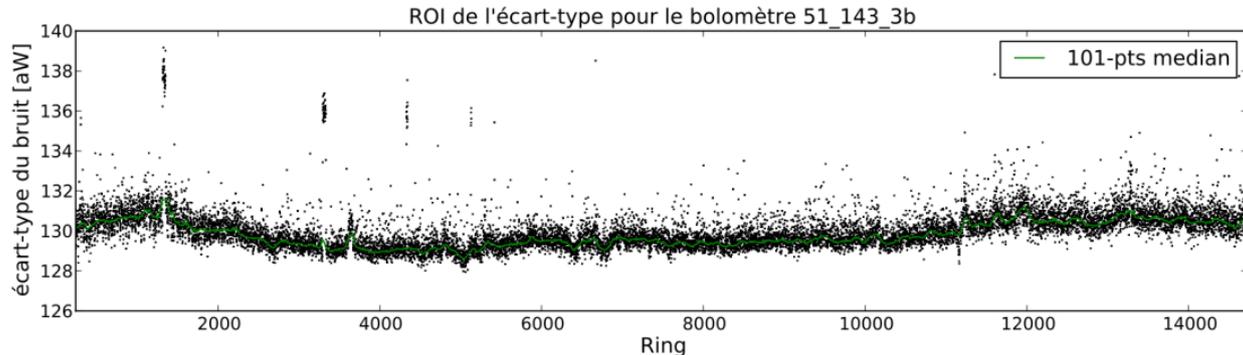
Caractériser le bruit au niveau du ring



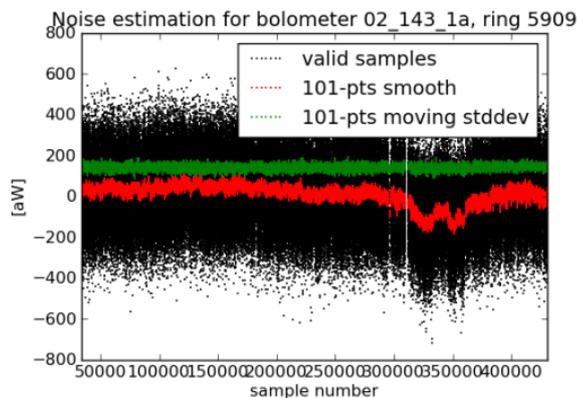
- Prise en compte des biais (Bessel, ...)
- Non-stationarités
 - Problèmes dans ligne de base des TOI
 - saut isolé
 - accidents
 - dérive
 - Changement brutal des propriétés du bruit au sein de la TOI



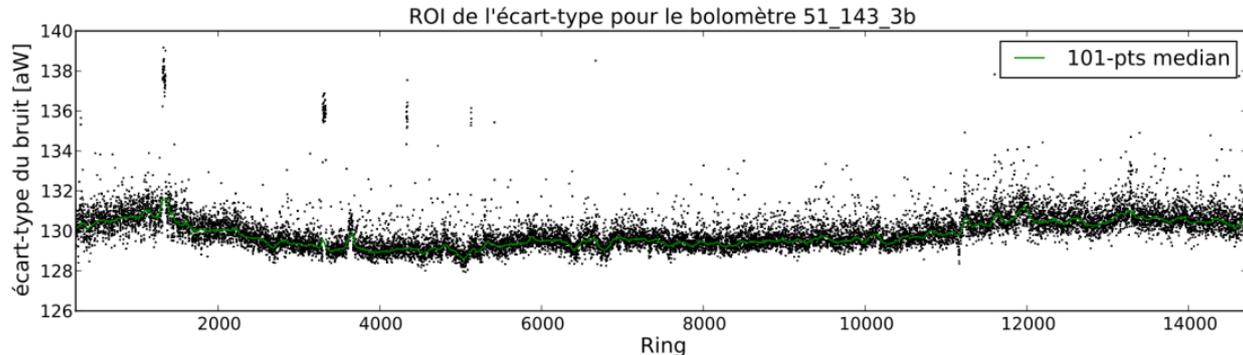
Caractériser le bruit au niveau du ring



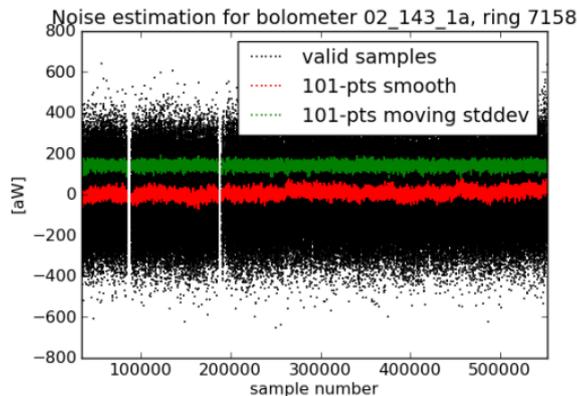
- Prise en compte des biais (Bessel, ...)
- Non-stationarités
 - Problèmes dans ligne de base des TOI
 - saut isolé
 - accidents
 - dérive
 - Changement brutal des propriétés du bruit au sein de la TOI



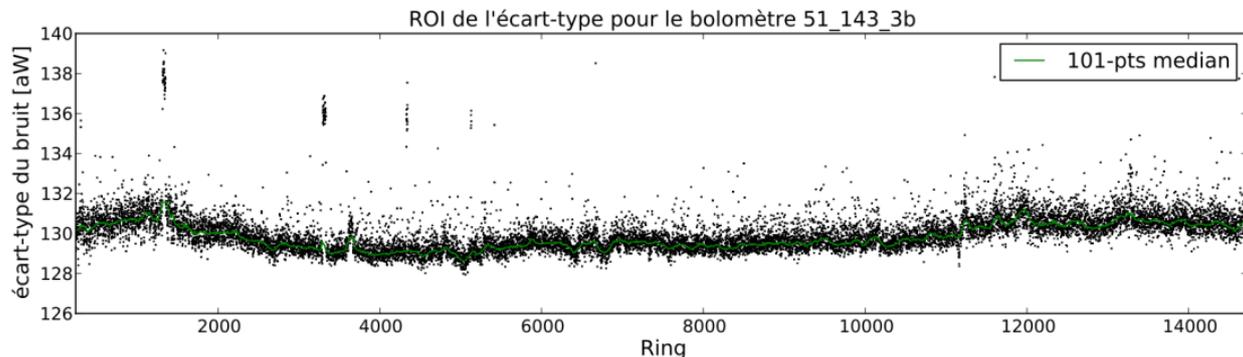
Caractériser le bruit au niveau du ring



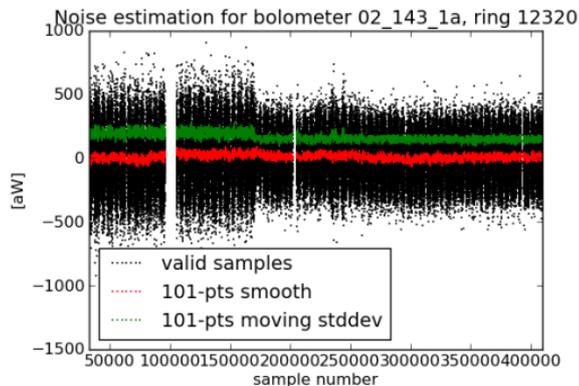
- Prise en compte des biais (Bessel, ...)
- Non-stationarités
 - Problèmes dans ligne de base des TOI
 - saut isolé
 - accidents
 - dérive
 - Changement brutal des propriétés du bruit au sein de la TOI



Caractériser le bruit au niveau du ring



- Prise en compte des biais (Bessel, ...)
- Non-stationarités
 - Problèmes dans ligne de base des TOI
 - saut isolé
 - accidents
 - dérive
 - Changement brutal des propriétés du bruit au sein de la TOI

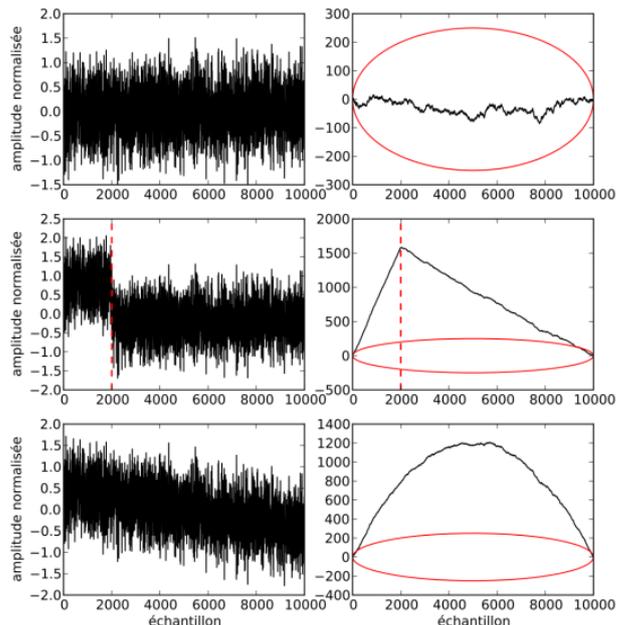


Algorithme de détection de sauts isolés dans la ligne de base

- \mathbf{b} : vecteur de N éléments d'une réalisation de $\mathcal{N}(0, \sigma_{\mathbf{b}})$.
- s : saut d'amplitude $a = X\sigma_{\mathbf{b}}$, de position $p = \alpha L$ et de moyenne nulle.

3 critères :

- **total cumulatif** : $t_n = \sum_{i=0}^n b_i$ se comporte différemment de $t_n = \sum_{i=0}^n s_i$.
- **préférence dérive/saut** : liées au bruit en $1/f$. Meilleur ajustement d'un saut au voisinage d'une dérive.
- **dérivée du bruit** : détection des pics dans la dérivée du bruit par un noyau de convolution.



⇒ on a accès à la position du saut, puis à l'amplitude.

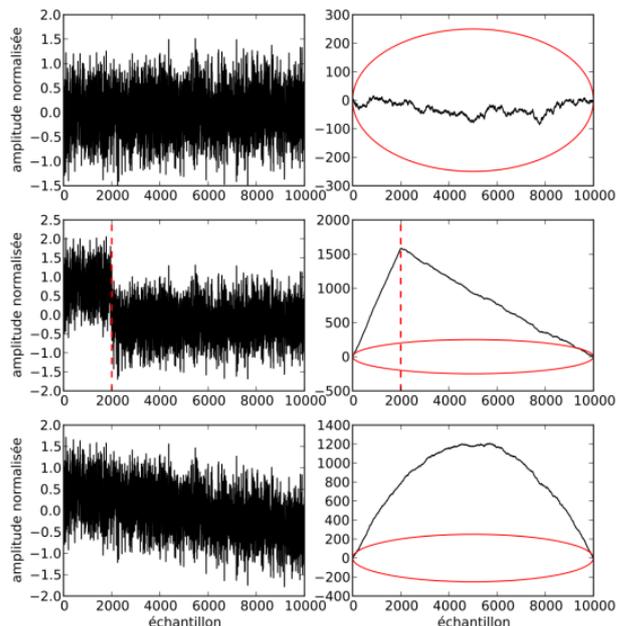
Détection → correction de la ligne de base.

Algorithme de détection de sauts isolés dans la ligne de base

- \mathbf{b} : vecteur de N éléments d'une réalisation de $\mathcal{N}(0, \sigma_{\mathbf{b}})$.
- s : saut d'amplitude $a = X\sigma_{\mathbf{b}}$, de position $p = \alpha L$ et de moyenne nulle.

3 critères :

- **total cumulatif** : $t_n = \sum_{i=0}^n b_i$ se comporte différemment de $t_n = \sum_{i=0}^n s_i$.
- **préférence dérive/saut** : liées au bruit en $1/f$. Meilleur ajustement d'un saut au voisinage d'une dérive.
- **dérivée du bruit** : détection des pics dans la dérivée du bruit par un noyau de convolution.



⇒ on a accès à la position du saut, puis à l'amplitude.

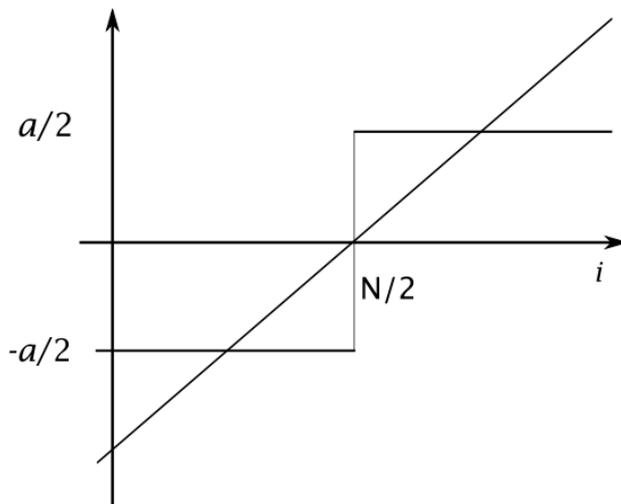
Détection → correction de la ligne de base.

Algorithme de détection de sauts isolés dans la ligne de base

- \mathbf{b} : vecteur de N éléments d'une réalisation de $\mathcal{N}(0, \sigma_{\mathbf{b}})$.
- s : saut d'amplitude $a = X\sigma_{\mathbf{b}}$, de position $p = \alpha L$ et de moyenne nulle.

3 critères :

- **total cumulatif** : $t_n = \sum_{i=0}^n b_i$ se comporte différemment de $t_n = \sum_{i=0}^n s_i$.
- **préférence dérive/saut** : liées au bruit en $1/f$. Meilleur ajustement d'un saut au voisinage d'une dérive.
- **dérivée du bruit** : détection des pics dans la dérivée du bruit par un noyau de convolution.



⇒ on a accès à la position du saut, puis à l'amplitude.

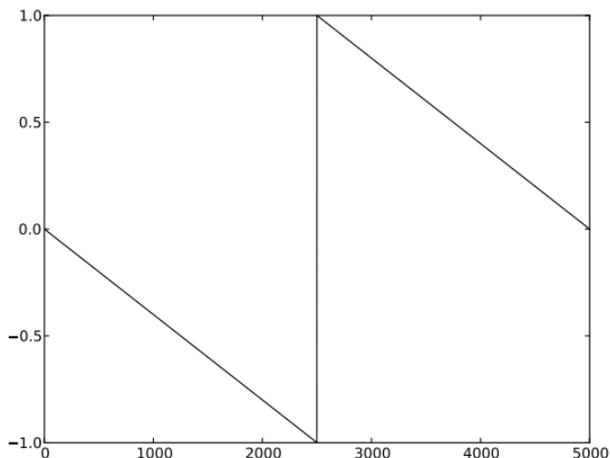
Détection → correction de la ligne de base.

Algorithme de détection de sauts isolés dans la ligne de base

- \mathbf{b} : vecteur de N éléments d'une réalisation de $\mathcal{N}(0, \sigma_{\mathbf{b}})$.
- s : saut d'amplitude $a = X\sigma_{\mathbf{b}}$, de position $p = \alpha L$ et de moyenne nulle.

3 critères :

- **total cumulatif** : $t_n = \sum_{i=0}^n b_i$ se comporte différemment de $t_n = \sum_{i=0}^n s_i$.
- **préférence dérive/saut** : liées au bruit en $1/f$. Meilleur ajustement d'un saut au voisinage d'une dérive.
- **dérivée du bruit** : détection des pics dans la dérivée du bruit par un noyau de convolution.



⇒ on a accès à la position du saut, puis à l'amplitude.

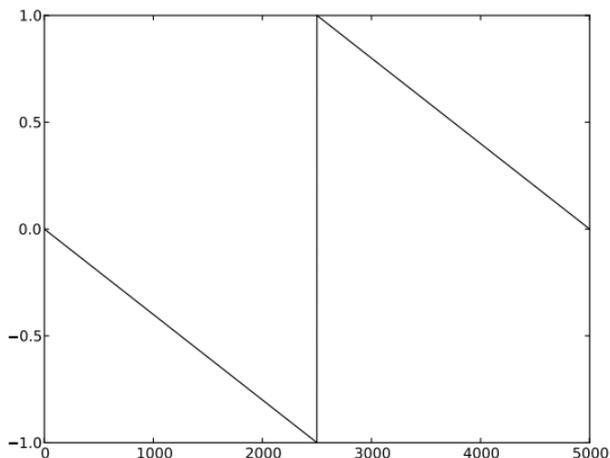
Détection → correction de la ligne de base.

Algorithme de détection de sauts isolés dans la ligne de base

- \mathbf{b} : vecteur de N éléments d'une réalisation de $\mathcal{N}(0, \sigma_{\mathbf{b}})$.
- s : saut d'amplitude $a = X\sigma_{\mathbf{b}}$, de position $p = \alpha L$ et de moyenne nulle.

3 critères :

- **total cumulatif** : $t_n = \sum_{i=0}^n b_i$ se comporte différemment de $t_n = \sum_{i=0}^n s_i$.
- **préférence dérive/saut** : liées au bruit en $1/f$. Meilleur ajustement d'un saut au voisinage d'une dérive.
- **dérivée du bruit** : détection des pics dans la dérivée du bruit par un noyau de convolution.

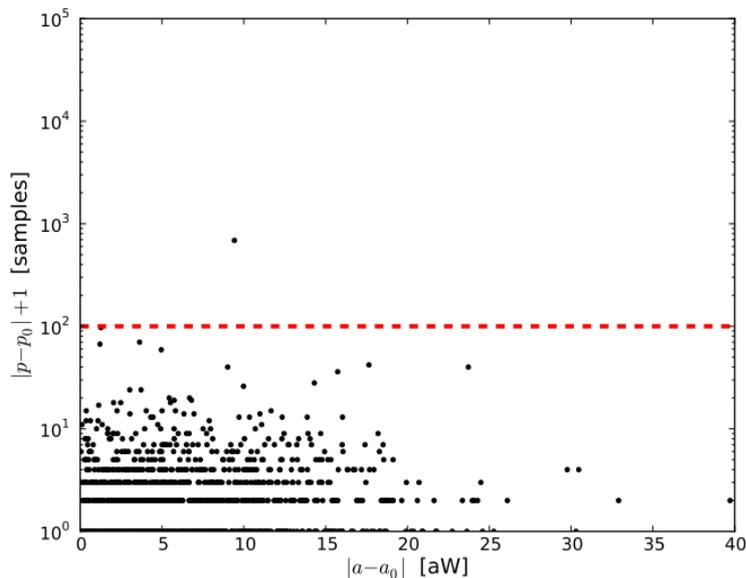


⇒ on a accès à la position du saut, puis à l'amplitude.

Détection → correction de la ligne de base.

Efficacité de la correction des sauts

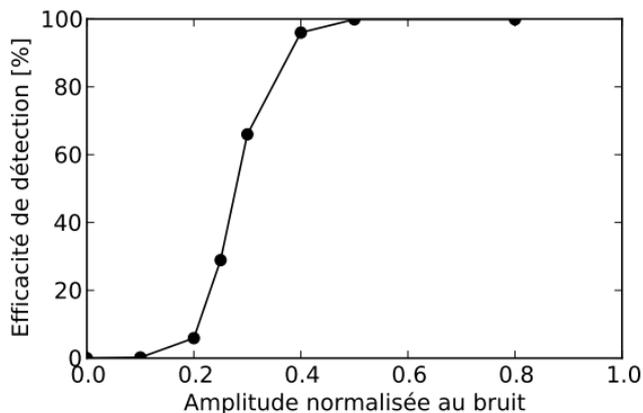
- Simulations de sauts dans des TOI de bruit, puis reconstruction par l'algorithme.
 - Position $p_0 \rightarrow p$
 - Amplitude $a_0 \rightarrow a$
- Résultats pour fréquence "CMB"
 $\sigma_b(143 \text{ GHz}) = 183 \pm 1 \text{ aW}$
Exemple pour les sauts à 1σ
- 99.9% des sauts retrouvés,
- $\sigma\left(\frac{a_r - a_0}{a_0}\right) \approx 3\%$,
- $\sigma(p_r - p_0) \approx 10$ échantillons.



Très bonne reconstruction des sauts pour les canaux CMB.

Résultats sur les sauts

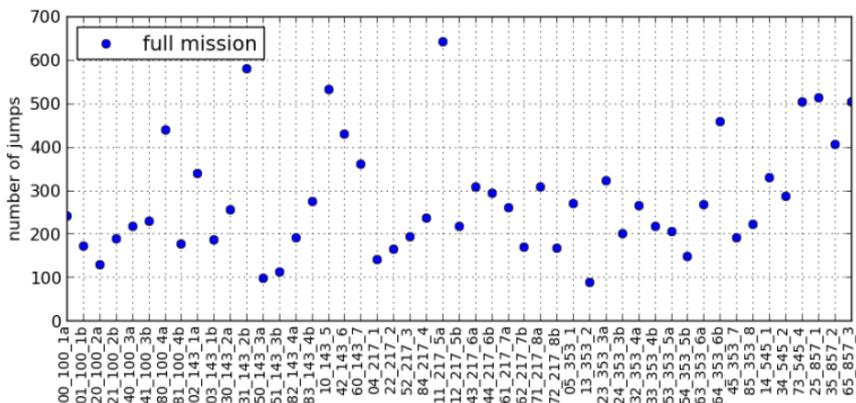
- Pour les bolomètres à 143 GHz, 95 % des sauts à 0.4σ détectés, 5 % à 0.2σ .
- En moyenne 260 corrections par bolomètre.
- Les sauts étaient responsables de pics dans les ROI d'écart-type :
$$\sigma_{\mathbf{b}+\mathbf{s}}^2 = \sigma_{\mathbf{b}}^2 (1 + \chi^2 \alpha (1 - \alpha)).$$



Amélioration de la stationnarité du bruit entre deux versions successives.

Résultats sur les sauts

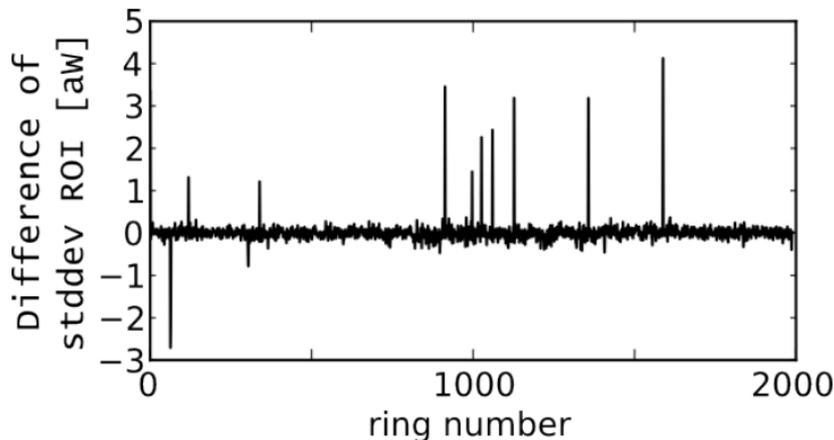
- Pour les bolomètres à 143 GHz, 95 % des sauts à 0.4σ détectés, 5 % à 0.2σ .
- En moyenne 260 corrections par bolomètre.
- Les sauts étaient responsables de pics dans les ROI d'écart-type :
 $\sigma_{b+s}^2 = \sigma_b^2 (1 + \chi^2 \alpha (1 - \alpha))$.



Amélioration de la stationnarité du bruit entre deux versions successives.

Résultats sur les sauts

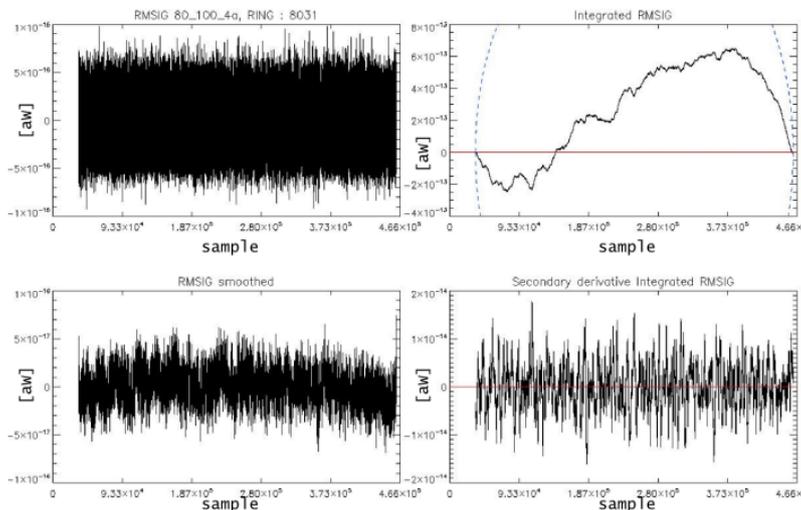
- Pour les bolomètres à 143 GHz, 95 % des sauts à 0.4σ détectés, 5 % à 0.2σ .
- En moyenne 260 corrections par bolomètre.
- Les sauts étaient responsables de pics dans les ROI d'écart-type :
$$\sigma_{\mathbf{b}+\mathbf{s}}^2 = \sigma_{\mathbf{b}}^2 (1 + X^2 \alpha (1 - \alpha)).$$



Amélioration de la stationnarité du bruit entre deux versions successives.

Random Telegraphic Signal

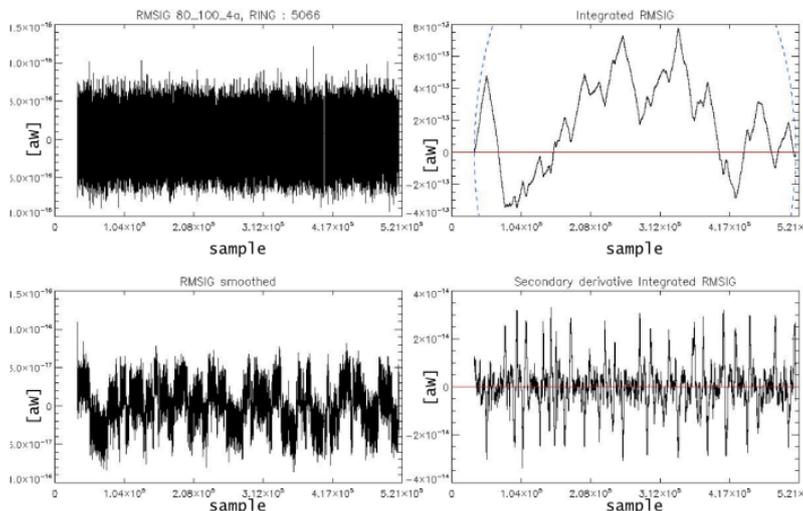
Bruit télégraphique : sauts fréquents de la ligne de base entre deux (ou trois) états.



- Critères sur le total cumulatif (et donc sur la préférence dérive/saut) non satisfaisants.
- Mais de nombreux pics dans la dérivée \Rightarrow augmentation de la kurtosis du vecteur de dérivée.

Random Telegraphic Signal

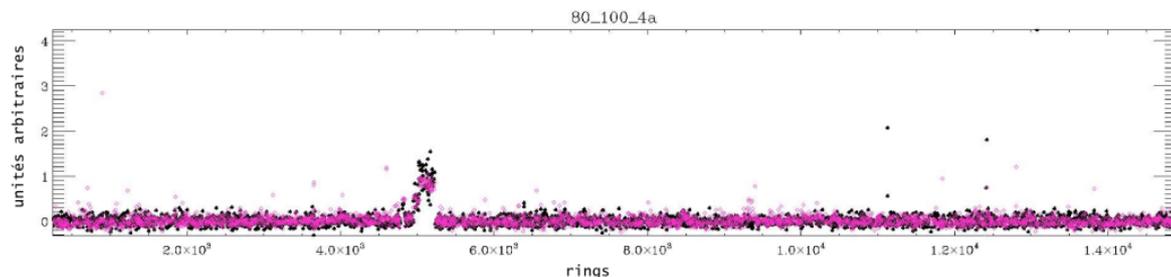
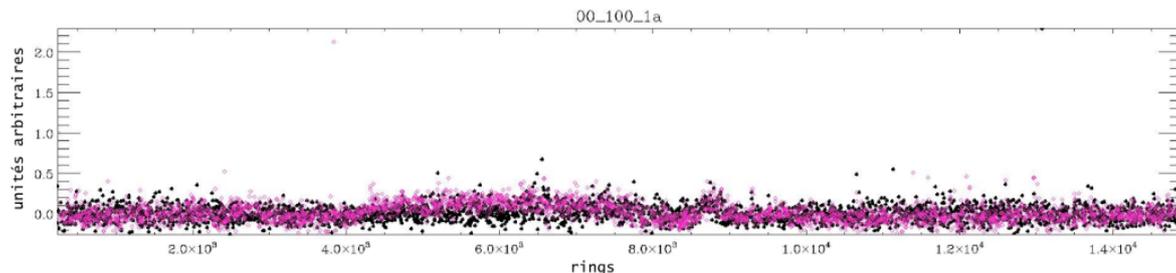
Bruit télégraphique : sauts fréquents de la ligne de base entre deux (ou trois) états.

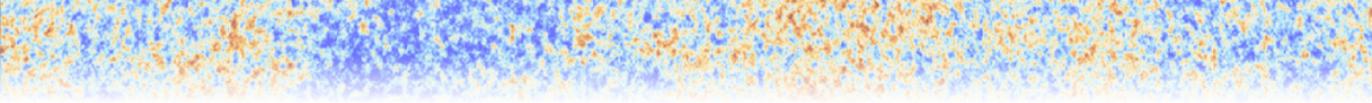


- Critères sur le total cumulatif (et donc sur la préférence dérive/saut) non satisfaisants.
- Mais de nombreux pics dans la dérivée \Rightarrow augmentation de la kurtosis du vecteur de dérivée.

Résultats RTS

- Deux bolomètres sont totalement exclus de l'analyse,
- 10 ont au moins une période de RTS de forte amplitude (plus de 0.5σ),
- 13 ont au moins une période de RTS de petite amplitude.
- Mêmes résultats qu'avec un test bayésien (algorithme de Viterbi, en magenta, notre algorithme en noir).





L'observation du ciel submillimétrique avec *Planck*

Le satellite *Planck* et l'instrument HFI

Traitement des données

Cartes de *Planck*-HFI

Résultats de *Planck*

La cosmologie à l'ère de *Planck*

Histoire de l'ionisation de l'Univers

Histoire thermique

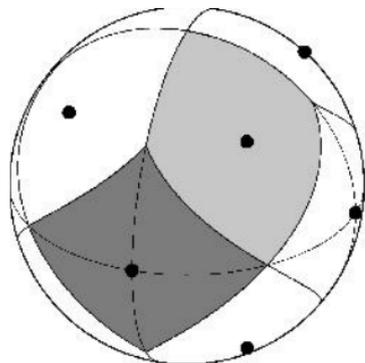
Annihilation de matière noire lors de la recombinaison

La Réionisation

Construction des cartes

HEALPix [Górski et al., 2005]

$$N_{\text{side}} = 1$$



Projection des données en temps sur la carte :

$$d_i = G \times \mathbf{A}_{ip} \cdot \mathbf{T}_p + \Gamma_{ir} \cdot \mathbf{o}_r + \mathbf{n}_i$$

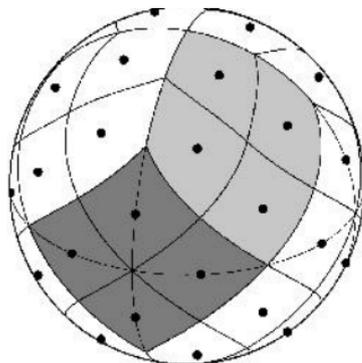
- $d_i \rightarrow$ mesure pour l'échantillon i ,
 - $G \rightarrow$ gain,
 - $\mathbf{A}_{ip} \rightarrow$ matrice de pointage échantillon $i \rightarrow$ pixel p ,
 - $\mathbf{T}_p \rightarrow$ température en un pixel p ,
 - $\Gamma_{ir} \rightarrow$ matrice déroulant chaque ring en échantillon,
 - $\mathbf{n}_i \rightarrow$ bruit blanc,
 - $\mathbf{o}_r \rightarrow$ niveau zéro du au bruit en $1/f$.
- Le TOI processing a enlevé les problèmes dont l'échelle de temps est inférieure à l'heure, restent des dérives. Correspond à des stries dans la carte.

Résolution matricielle aberrante s'il reste des problèmes dans un ring, impacte tous les rings qui passent par ce pixel.

Construction des cartes

HEALPix [Górski et al., 2005]

$$N_{\text{side}} = 2$$



Projection des données en temps sur la carte :

$$\mathbf{d}_i = G \times \mathbf{A}_{ip} \cdot \mathbf{T}_p + \Gamma_{ir} \cdot \mathbf{o}_r + \mathbf{n}_i$$

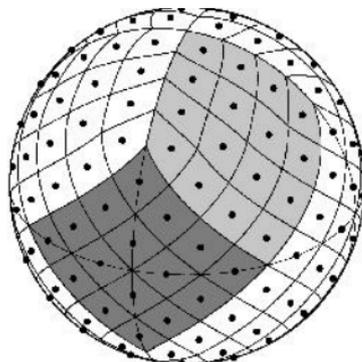
- $\mathbf{d}_i \rightarrow$ mesure pour l'échantillon i ,
 - $G \rightarrow$ gain,
 - $\mathbf{A}_{ip} \rightarrow$ matrice de pointage échantillon $i \rightarrow$ pixel p ,
 - $\mathbf{T}_p \rightarrow$ température en un pixel p ,
 - $\Gamma_{ir} \rightarrow$ matrice déroulant chaque ring en échantillon,
 - $\mathbf{n}_i \rightarrow$ bruit blanc,
 - $\mathbf{o}_r \rightarrow$ niveau zéro du au bruit en $1/f$.
- Le TOI processing a enlevé les problèmes dont l'échelle de temps est inférieure à l'heure, restent des dérives. Correspond à des stries dans la carte.

Résolution matricielle aberrante s'il reste des problèmes dans un ring, impacte tous les rings qui passent par ce pixel.

Construction des cartes

HEALPix [Górski et al., 2005]

$$N_{\text{side}} = 4$$



Projection des données en temps sur la carte :

$$d_i = G \times \mathbf{A}_{ip} \cdot \mathbf{T}_p + \Gamma_{ir} \cdot \mathbf{o}_r + \mathbf{n}_i$$

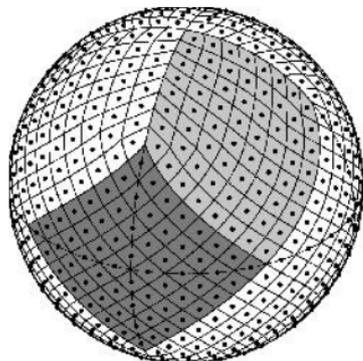
- $d_i \rightarrow$ mesure pour l'échantillon i ,
 - $G \rightarrow$ gain,
 - $\mathbf{A}_{ip} \rightarrow$ matrice de pointage échantillon $i \rightarrow$ pixel p ,
 - $\mathbf{T}_p \rightarrow$ température en un pixel p ,
 - $\Gamma_{ir} \rightarrow$ matrice déroulant chaque ring en échantillon,
 - $\mathbf{n}_i \rightarrow$ bruit blanc,
 - $\mathbf{o}_r \rightarrow$ niveau zéro du au bruit en $1/f$.
- Le TOI processing a enlevé les problèmes dont l'échelle de temps est inférieure à l'heure, restent des dérives. Correspond à des stries dans la carte.

Résolution matricielle aberrante s'il reste des problèmes dans un ring, impacte tous les rings qui passent par ce pixel.

Construction des cartes

HEALPix [Górski et al., 2005]

$$N_{\text{side}} = 8$$



Projection des données en temps sur la carte :

$$d_i = G \times \mathbf{A}_{ip} \cdot \mathbf{T}_p + \Gamma_{ir} \cdot \mathbf{o}_r + \mathbf{n}_i$$

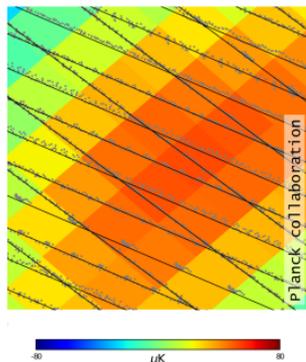
- $d_i \rightarrow$ mesure pour l'échantillon i ,
 - $G \rightarrow$ gain,
 - $\mathbf{A}_{ip} \rightarrow$ matrice de pointage échantillon $i \rightarrow$ pixel p ,
 - $\mathbf{T}_p \rightarrow$ température en un pixel p ,
 - $\Gamma_{ir} \rightarrow$ matrice déroulant chaque ring en échantillon,
 - $\mathbf{n}_i \rightarrow$ bruit blanc,
 - $\mathbf{o}_r \rightarrow$ niveau zéro du au bruit en $1/f$.
- Le TOI processing a enlevé les problèmes dont l'échelle de temps est inférieure à l'heure, restent des dérives. Correspond à des stries dans la carte.

Résolution matricielle aberrante s'il reste des problèmes dans un ring, impacte tous les rings qui passent par ce pixel.

Construction des cartes

HEALPix [Górski et al., 2005]

$$N_{\text{side}} = 2048 \leftrightarrow 1.7 \text{ arcmin}$$



Projection des données en temps sur la carte :

$$\mathbf{d}_i = G \times \mathbf{A}_{ip} \cdot \mathbf{T}_p + \Gamma_{ir} \cdot \mathbf{o}_r + \mathbf{n}_i$$

- $\mathbf{d}_i \rightarrow$ mesure pour l'échantillon i ,
 - $G \rightarrow$ gain,
 - $\mathbf{A}_{ip} \rightarrow$ matrice de pointage échantillon $i \rightarrow$ pixel p ,
 - $\mathbf{T}_p \rightarrow$ température en un pixel p ,
 - $\Gamma_{ir} \rightarrow$ matrice déroulant chaque ring en échantillon,
 - $\mathbf{n}_i \rightarrow$ bruit blanc,
 - $\mathbf{o}_r \rightarrow$ niveau zéro du au bruit en $1/f$.
- Le TOI processing a enlevé les problèmes dont l'échelle de temps est inférieure à l'heure, restent des dérives. Correspond à des stries dans la carte.

Résolution matricielle aberrante s'il reste des problèmes dans un ring, impacte tous les rings qui passent par ce pixel.

Optimisation des coupures pour rejeter un ring

- Pour chaque bolomètre, une ROI pour chaque statistique sur les TOI de bruit :
 - $|\text{moyenne} - \text{médiane}|$,
 - écart-type,
 - test de Kolmogorov-Smirnov.

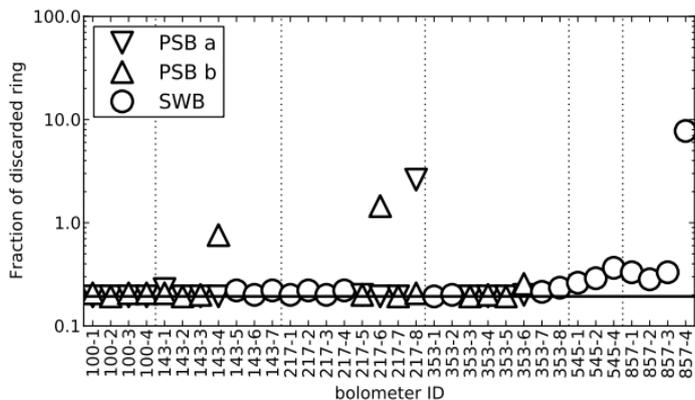
Autres critères (skewness, kurtosis, coefficients d'ondelettes, . . .) pas utilisés car redondants.

- Pour chacune de ces ROI $\tilde{\sigma}_{\text{ROI}} =$ écart-type de leur contenu tronqué à $5 \times \sigma_{\text{ROI}}$.
- Seuils fixés à $5 \times \tilde{\sigma}_{\text{ROI}}$: troncature nécessaire afin d'éviter les accidents sur certains rings extrêmement déviants, ce qui diminuerait notre capacité à rejeter des rings moyennement ou faiblement déviants.
- Rejet automatique des rings rejetés pour la moitié au moins des bolomètres.

Le nombre de critères est minimal, les coupures sont optimisées.

Amélioration de la statistique

- Les rings rejetés automatiquement pour tous les bolomètres le sont maintenant pour des raisons identifiées et irréductibles (manœuvre, éruption solaire, ...)
- Amélioration du TOI processing (en amont) et des coupures au fur et à mesure des versions, visible dans le nombre de rings rejetés



Moins de 1 % du temps est perdu par le rejet de rings (15 % au niveau des échantillons).

Toutes les autres données vont être projetées sur les cartes.
Seconde étape : validation de la sélection au niveau des cartes.

La sélection superclean, test de cohérence des données

S'assurer qu'il ne reste pas de problèmes dans la sélection de rings à projeter.

0. Rings normalement rejetés

1. Raies 4K

2. Correction de sauts

3. Augmentation du niveau de bruit

4. Bruit à deux niveaux

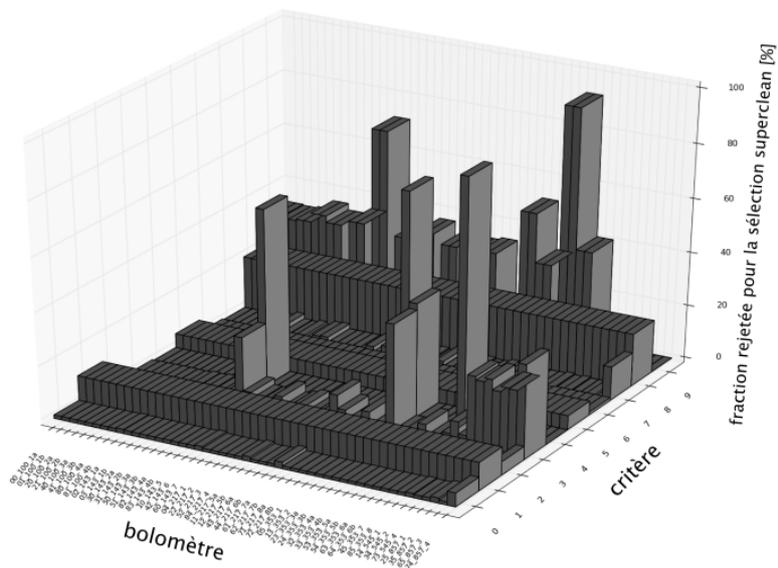
5. Temps d'intégration trop bas

6. Planètes

7. RTS de petite et moyenne intensité

8. Cinquième relevé

9. PSB : *Un OU est fait pour chaque paire de bolomètres PSB, de sorte qu'un ring écarté pour l'un le soit aussi pour l'autre.*



Grande disparité entre critères et entre bolomètres !

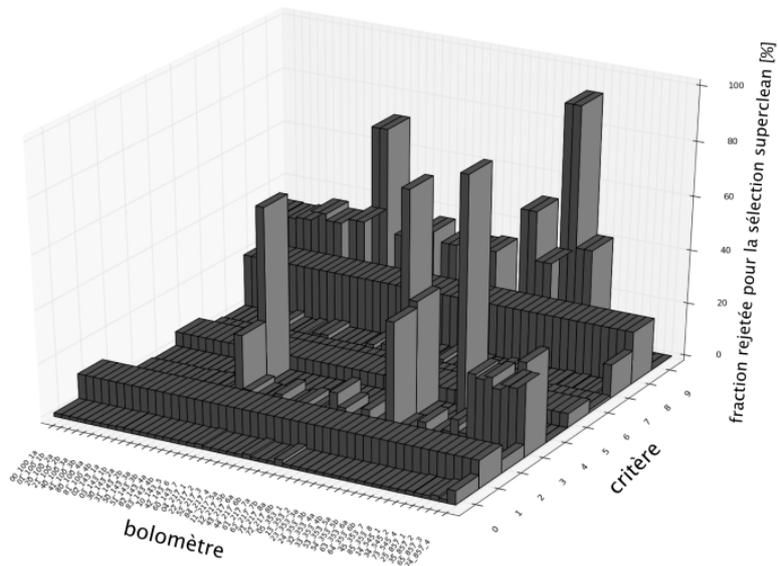
Pour la mission complète, 35 % des rings rejetés pour les bolomètres "CMB".

Construction de cartes avec la sélection superclean, à comparer aux cartes standards.

La sélection superclean, test de cohérence des données

S'assurer qu'il ne reste pas de problèmes dans la sélection de rings à projeter.

0. Rings normalement rejetés
1. Raies 4K
2. Correction de sauts
3. Augmentation du niveau de bruit
4. Bruit à deux niveaux
5. Temps d'intégration trop bas
6. Planètes
7. RTS de petite et moyenne intensité
8. Cinquième relevé
9. PSB : *Un OU est fait pour chaque paire de bolomètres PSB, de sorte qu'un ring écarté pour l'un le soit aussi pour l'autre.*



Grande disparité entre critères et entre bolomètres !

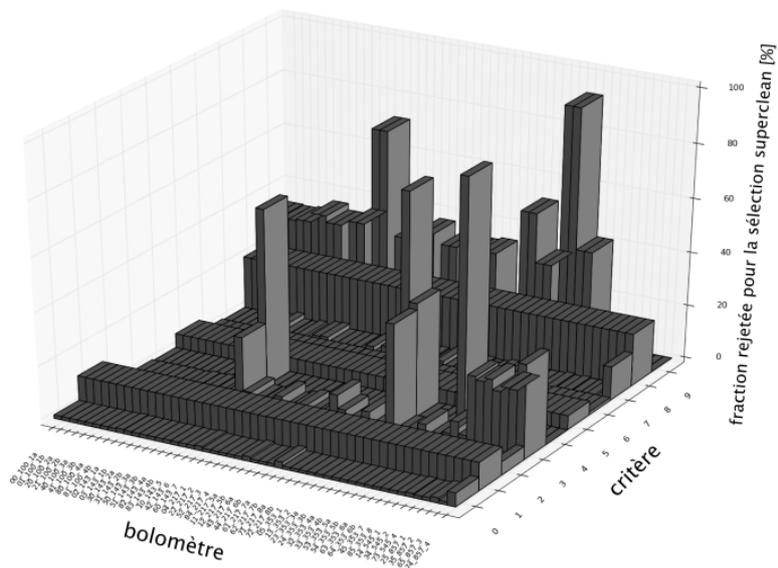
Pour la mission complète, 35 % des rings rejetés pour les bolomètres "CMB".

Construction de cartes avec la sélection superclean, à comparer aux cartes standards.

La sélection superclean, test de cohérence des données

S'assurer qu'il ne reste pas de problèmes dans la sélection de rings à projeter.

0. Rings normalement rejetés
1. Raies 4K
2. Correction de sauts
3. Augmentation du niveau de bruit
4. Bruit à deux niveaux
5. Temps d'intégration trop bas
6. Planètes
7. RTS de petite et moyenne intensité
8. Cinquième relevé
9. PSB : *Un OU est fait pour chaque paire de bolomètres PSB, de sorte qu'un ring écarté pour l'un le soit aussi pour l'autre.*



Grande disparité entre critères et entre bolomètres !

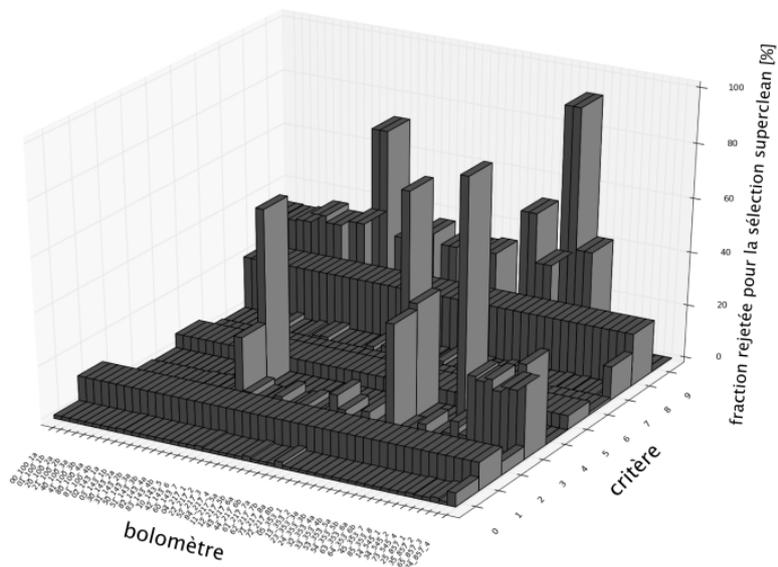
Pour la mission complète, 35 % des rings rejetés pour les bolomètres "CMB".

Construction de cartes avec la sélection superclean, à comparer aux cartes standards.

La sélection superclean, test de cohérence des données

S'assurer qu'il ne reste pas de problèmes dans la sélection de rings à projeter.

0. Rings normalement rejetés
1. Raies 4K
2. Correction de sauts
3. Augmentation du niveau de bruit
4. Bruit à deux niveaux
5. Temps d'intégration trop bas
6. Planètes
7. RTS de petite et moyenne intensité
8. Cinquième relevé
9. PSB : *Un OU est fait pour chaque paire de bolomètres PSB, de sorte qu'un ring écarté pour l'un le soit aussi pour l'autre.*



Grande disparité entre critères et entre bolomètres !

Pour la mission complète, 35 % des rings rejetés pour les bolomètres "CMB".

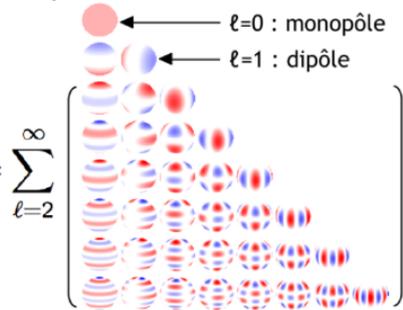
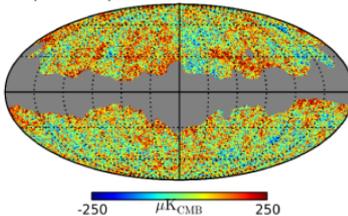
Construction de cartes avec la sélection superclean, à comparer aux cartes standards.

Des cartes aux spectres de puissance angulaire

Décomposition de la carte équivalente à une analyse de Fourier sur la sphère.

$$\frac{\Delta T}{T}(\theta, \varphi) = \sum_{\ell=0}^{+\infty} \sum_{m=-\ell}^{+\ell} a_{\ell,m} Y_{\ell,m}(\theta, \varphi) \Leftrightarrow$$

Map with Superclean selection at 143 GHz



- Spectre angulaire : processus stochastique : les $a_{\ell,m}$ sont des réalisations de moyenne nulle et d'écart-type C_ℓ .
- Toute l'information statistique est contenue dans ces coefficients.
- Estimateur :

$$\widehat{C}_\ell^{TT} = \frac{1}{2\ell+1} \sum_{m=-\ell}^{+\ell} |a_{\ell,m}^2|$$

- Variance cosmique : le nombre fini d' $a_{\ell,m}$ implique

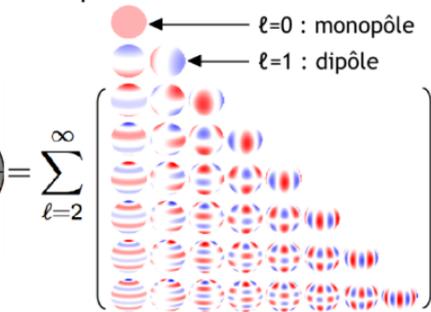
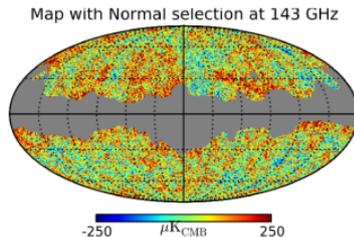
$$\text{Var}(\widehat{C}_\ell) = \frac{1}{2\ell+1} \widehat{C}_\ell^2$$

Nous n'avons qu'un univers observable à notre disposition !

Des cartes aux spectres de puissance angulaire

Décomposition de la carte équivalente à une analyse de Fourier sur la sphère.

$$\frac{\Delta T}{T}(\theta, \varphi) = \sum_{\ell=0}^{+\infty} \sum_{m=-\ell}^{+\ell} a_{\ell,m} Y_{\ell,m}(\theta, \varphi) \Leftrightarrow$$



- Spectre angulaire : processus stochastique : les $a_{\ell,m}$ sont des réalisations de moyenne nulle et d'écart-type C_ℓ .
- Toute l'information statistique est contenue dans ces coefficients.
- Estimateur :

$$\widehat{C}_\ell^{TT} = \frac{1}{2\ell + 1} \sum_{m=-\ell}^{+\ell} |a_{\ell,m}^2|$$

- Variance cosmique : le nombre fini d' $a_{\ell,m}$ implique

$$\text{Var}(\widehat{C}_\ell) = \frac{1}{2\ell + 1} \widehat{C}_\ell^2$$

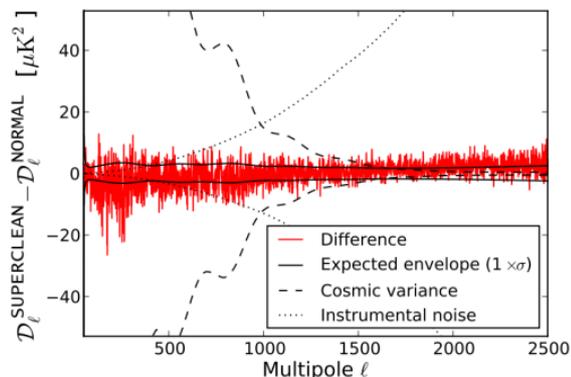
Nous n'avons qu'un univers observable à notre disposition !

Impact de la sélection superclean sur les spectres (1)

- Même ciel est observé par plusieurs sélections de données différentes : variance d'échantillonnage, pas de variance cosmique.

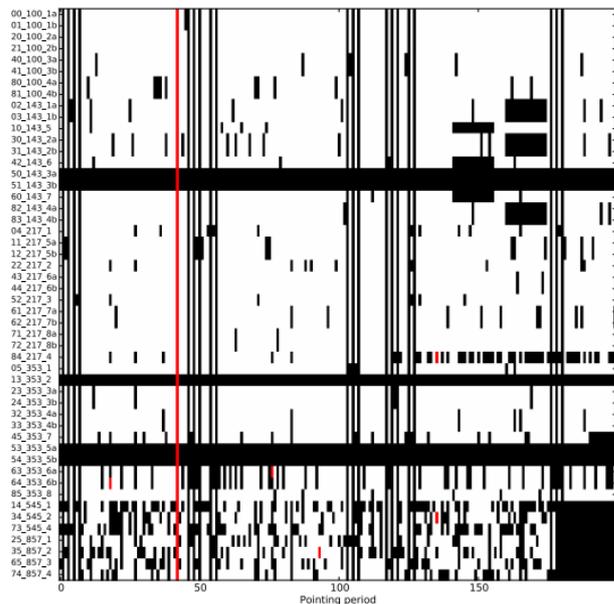
$$\sigma_{\text{expected}}^2 \left(C_\ell^S - C_\ell^T \right) = N_\ell \frac{2C_\ell^T \frac{1-g}{g} + N_\ell \frac{1-g^2}{g^2}}{f_{\text{sky}}(2\ell + 1)}$$

- Dérive de la moyenne
- Sous estimation de la variance



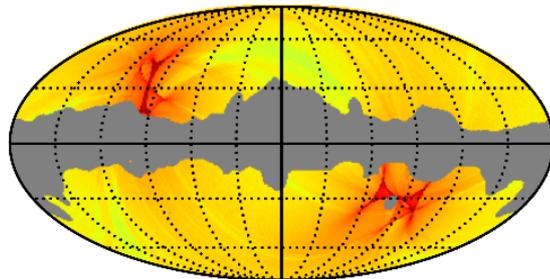
Impact de la sélection superclean sur les cartes

Rings rejetés adjacents :
stries sur la carte de nombre de coups

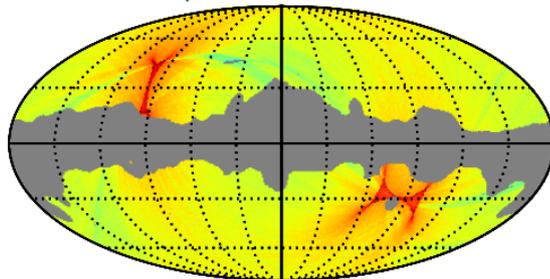


⇒ un coefficient $g = 65\%$ global pour toute la carte n'est pas suffisant.

Normal selection



1 nombre de coups 20000
Superclean selection



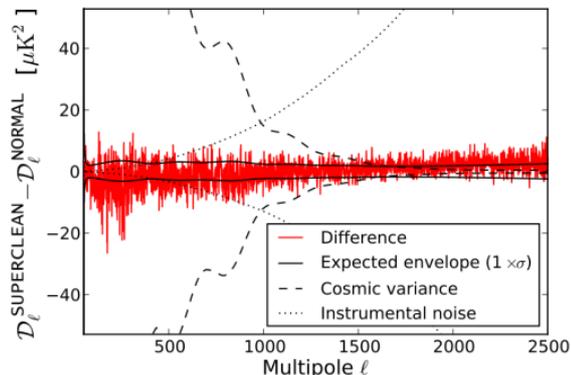
1 nombre de coups 20000

Impact de la sélection superclean sur les spectres (2)

- Même ciel est observé par plusieurs sélections de données différentes : variance d'échantillonnage, pas de variance cosmique.

$$\sigma_{\text{expected}}^2 (C_\ell^S - C_\ell^T) = N_\ell \frac{2C_\ell^T \frac{1-g}{g} + N_\ell \frac{1-g^2}{g^2}}{f_{\text{sky}}(2\ell + 1)}$$

- Dérive de la moyenne
- Sous estimation de la variance
- Même effet pour les tests de cohérence.



Effet négligeable face à la variance cosmique pour ces échelles angulaires.

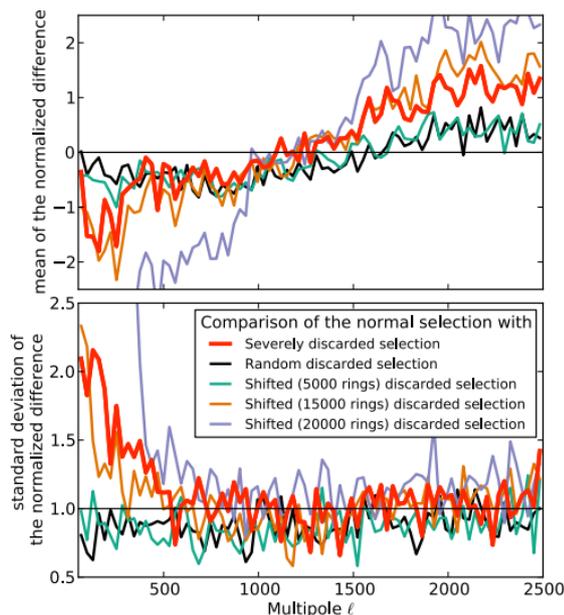
Les données projetées sur les cartes dans la sélection normale donnent des résultats similaires à la sélection superclean.

Impact de la sélection superclean sur les spectres (2)

- Même ciel est observé par plusieurs sélections de données différentes : variance d'échantillonnage, pas de variance cosmique.

$$\sigma_{expected}^2 (C_\ell^S - C_\ell^T) = N_\ell \frac{2C_\ell^T \frac{1-g}{g} + N_\ell \frac{1-g^2}{g^2}}{f_{sky}(2\ell + 1)}$$

- Dérive de la moyenne
- Sous estimation de la variance
- Même effet pour les tests de cohérence.

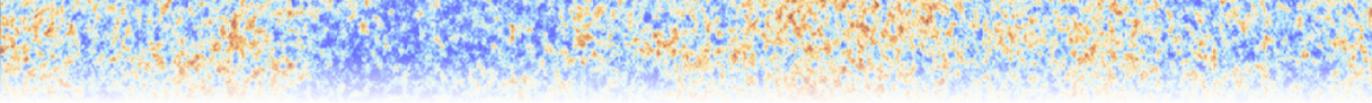


Effet négligeable face à la variance cosmique pour ces échelles angulaires.

Les données projetées sur les cartes dans la sélection normale donnent des résultats similaires à la sélection superclean.

- La qualité des données à projeter sur les cartes est fondamentale.
- L'étude de la stationnarité du bruit fait apparaître des problèmes de différents types :
 - certains sont corrigés (saut),
 - certains sont masqués (RTS important, non-stationnarité substantielle),
 - d'autres sont laissés, car ont une influence *a priori* négligeable (faibles dérives, RTS d'amplitude faible, . . .).
- Ce travail est interactif, itération avec la fabrication des cartes, le modèle de l'instrument, . . .
- Une étude a été faite sur la validité de cette sélection.

Les propriétés en terme de stationnarité et de gaussianité du signal "validé" sont satisfaisantes pour l'interprétation cosmologique des cartes.



L'observation du ciel submillimétrique avec *Planck*

Le satellite *Planck* et l'instrument HFI

Traitement des données

Cartes de *Planck*-HFI

Résultats de *Planck*

La cosmologie à l'ère de *Planck*

Histoire de l'ionisation de l'Univers

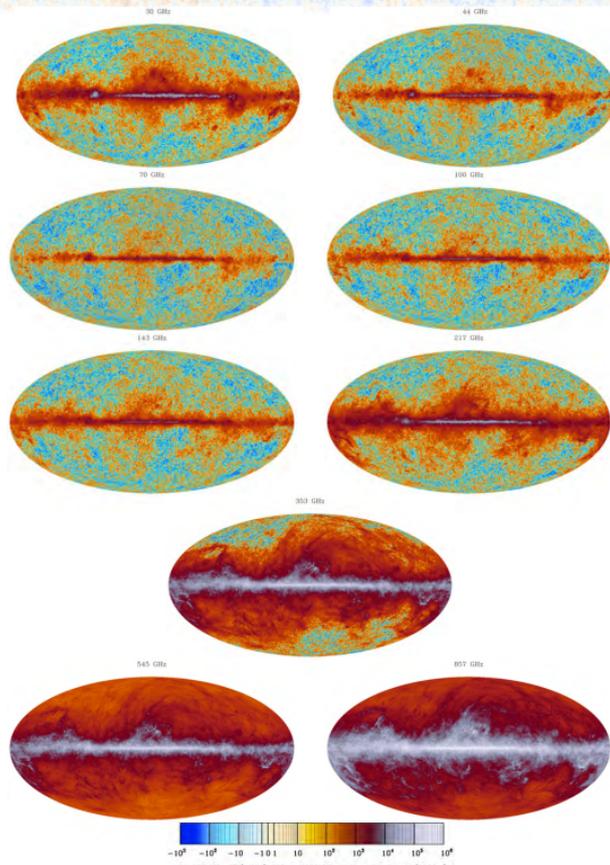
Histoire thermique

Annihilation de matière noire lors de la recombinaison

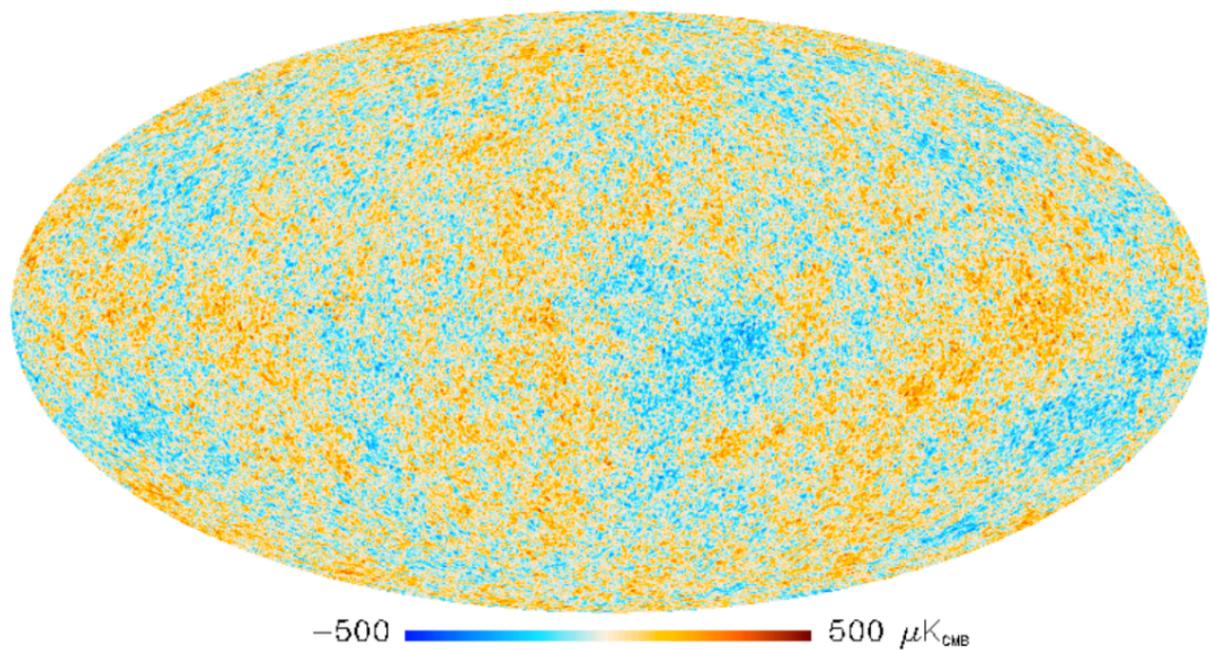
La Réionisation

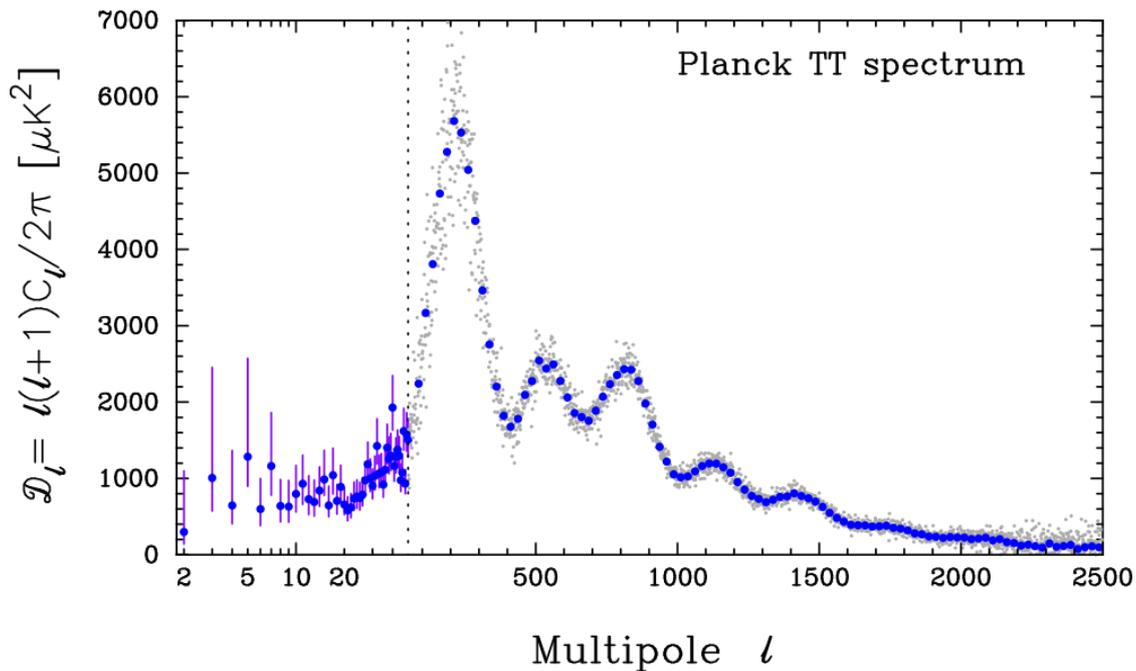
Les produits de la collaboration *Planck*

- *Planck* 2011
 - catalogue de sources compactes
 - catalogue de sources SZ
- *Planck* 2013
 - cartes aux neuf fréquences couvertes
 - cartes de bruit, masques, ...
 - cartes séparées des composantes : avant-plans galactiques, CMB
 - code de vraisemblance
 - catalogue de sources compactes
 - catalogue de sources SZ
- *Planck* 2014 → polarisation



Source: *Planck* collaboration





Tous les paramètres cosmologiques laissent une empreinte sur cette observable.

Cosmologie de l'Univers homogène et isotrope

Espace spatialement isotrope et homogène

métrique FLRW :
$$ds^2 = dt^2 - a^2(t)R_0^2 \left(\frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2 d\Omega^2 \right).$$

Combiné aux équations d'Einstein, cela donne les équations de Friedmann

$$H^2 \stackrel{\text{def}}{=} \left(\frac{\dot{a}}{a} \right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho - \frac{K}{a^2} + \Lambda/3,$$

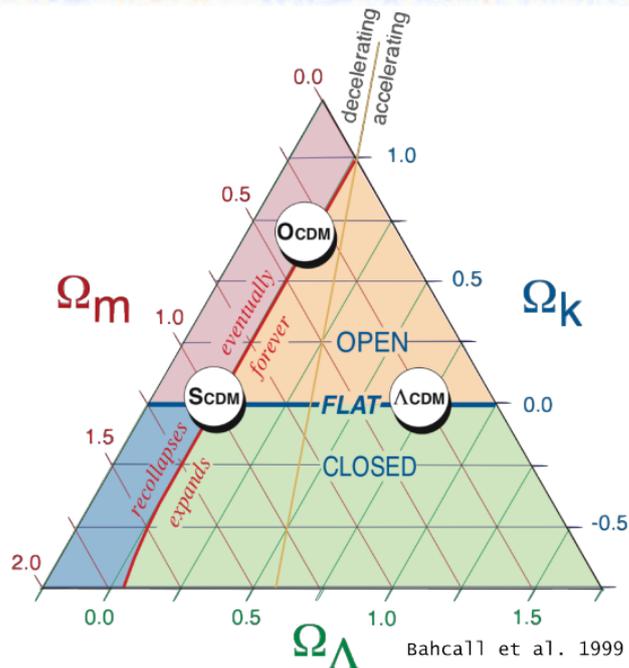
$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}(\rho + 3P) + \Lambda/3.$$

La conservation de la matière $\nabla_\mu T^{\mu\nu} = 0$ implique $\dot{\rho} + 3H(\rho + P) = 0$.

On définit $\omega = P/\rho$, l'équation d'état pour un constituant.

contenu énergétique total	Ω				
équations d'état différentes	$\overbrace{\hspace{10em}}$				
	Ω_m	Ω_r	Ω_Λ		
	$\omega = 0$	$\omega = 1/3$	$\omega = -1$		
espèces différentes	$\overbrace{\hspace{4em}}$		$\overbrace{\hspace{4em}}$		
	Ω_{cdm}	Ω_b	Ω_γ	Ω_ν	Ω_Λ

Un modèle de concordance



Supernovæ Diagramme de Hubble, accélération récente.

BAO Oscillations acoustiques des baryons résultant du découplage matière-rayonnement.

CMB Le fond diffus cosmologique.

valeurs pré-*Planck* (2012) :

$$\Omega_\Lambda = (72.8 \pm 1.5) \%$$

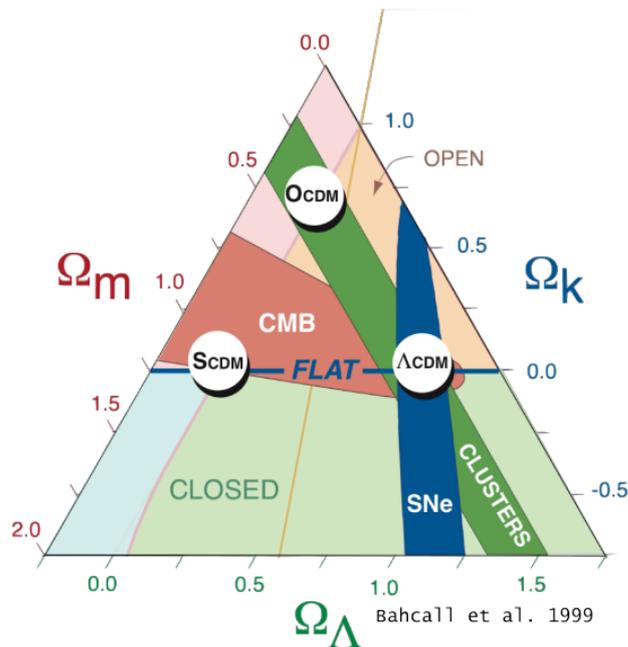
$$\Omega_{\text{cdm}} = (22.7 \pm 1.4) \%$$

$$\Omega_b = (4.56 \pm 0.16) \%$$

Planck a été conçu pour tester ce modèle :

- le valider et en déterminer les paramètres avec une précision du %,
- le mettre en défaut et identifier des signes de nouvelle physique.

Un modèle de concordance



Supernovæ Diagramme de Hubble, accélération récente.

BAO Oscillations acoustiques des baryons résultant du découplage matière-rayonnement.

CMB Le fond diffus cosmologique.

valeurs pré-*Planck* (2012) :

$$\Omega_\Lambda = (72.8 \pm 1.5) \%$$

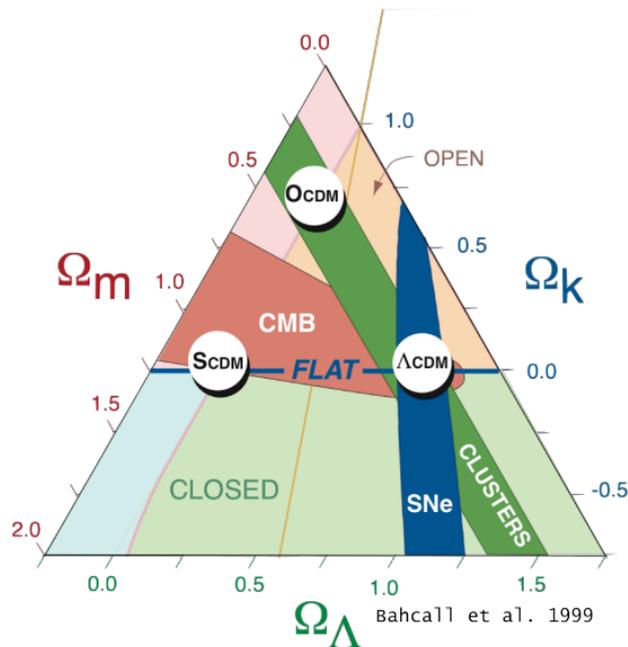
$$\Omega_{\text{cdm}} = (22.7 \pm 1.4) \%$$

$$\Omega_b = (4.56 \pm 0.16) \%$$

Planck a été conçu pour tester ce modèle :

- le valider et en déterminer les paramètres avec une précision du %,
- le mettre en défaut et identifier des signes de nouvelle physique.

Un modèle de concordance



Supernovæ Diagramme de Hubble, accélération récente.

BAO Oscillations acoustiques des baryons résultant du découplage matière-rayonnement.

CMB Le fond diffus cosmologique.

valeurs pré-*Planck* (2012) :

$$\Omega_\Lambda = (72.8 \pm 1.5) \%$$

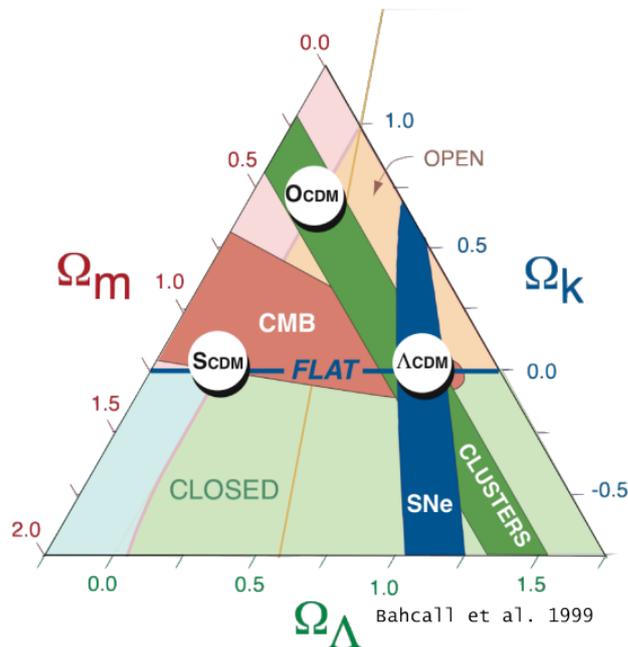
$$\Omega_{\text{cdm}} = (22.7 \pm 1.4) \%$$

$$\Omega_b = (4.56 \pm 0.16) \%$$

Planck a été conçu pour tester ce modèle :

- le valider et en déterminer les paramètres avec une précision du %,
- le mettre en défaut et identifier des signes de nouvelle physique.

Un modèle de concordance



Supernovæ Diagramme de Hubble, accélération récente.

BAO Oscillations acoustiques des baryons résultant du découplage matière-rayonnement.

CMB Le fond diffus cosmologique.

valeurs pré-*Planck* (2012) :

$$\Omega_\Lambda = (72.8 \pm 1.5) \%$$

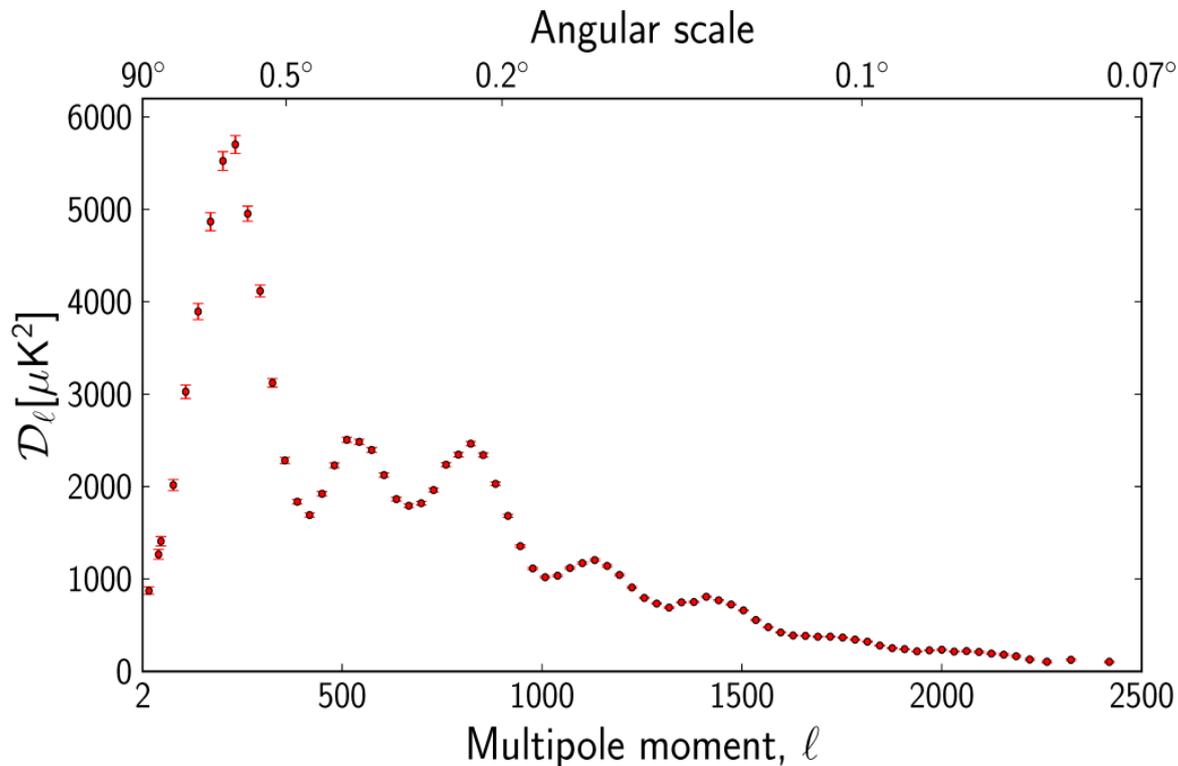
$$\Omega_{\text{cdm}} = (22.7 \pm 1.4) \%$$

$$\Omega_b = (4.56 \pm 0.16) \%$$

Planck a été conçu pour tester ce modèle :

- le valider et en déterminer les paramètres avec une précision du %,
- le mettre en défaut et identifier des signes de nouvelle physique.

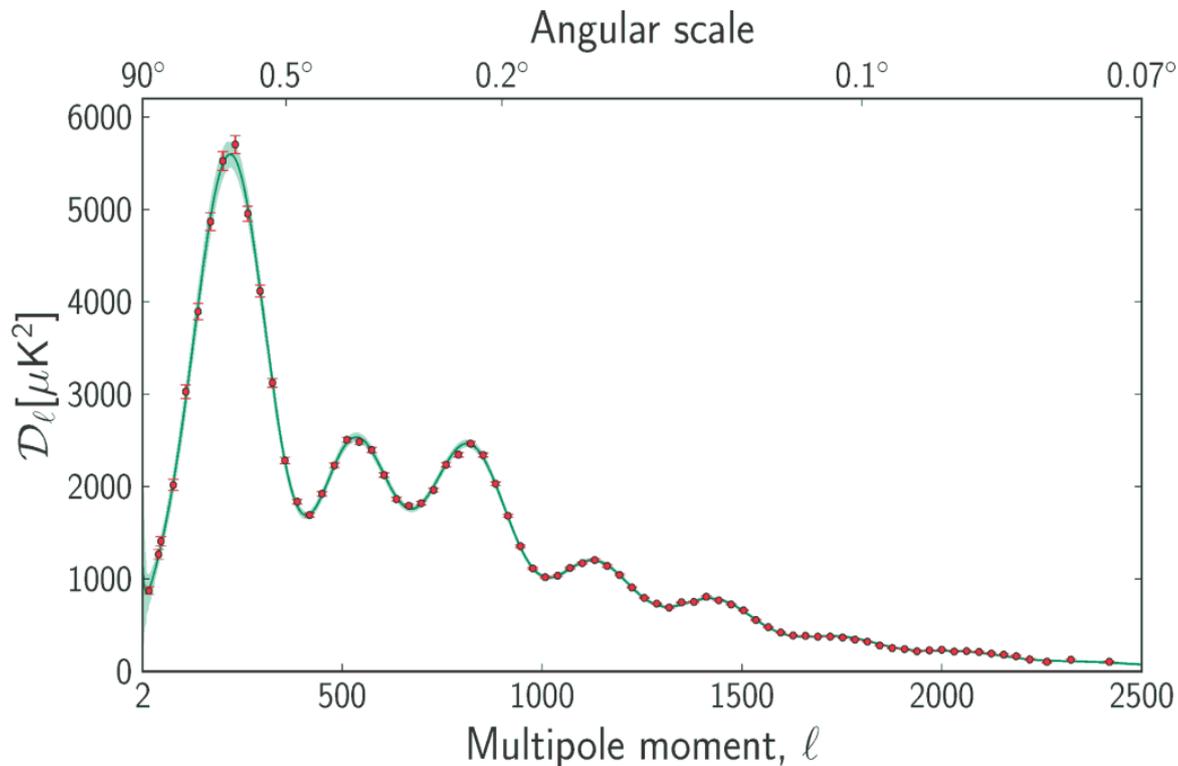
Confirmation du modèle de concordance par *Planck*



Données bien décrites par un modèle à six paramètres.

Source: *Planck* collaboration

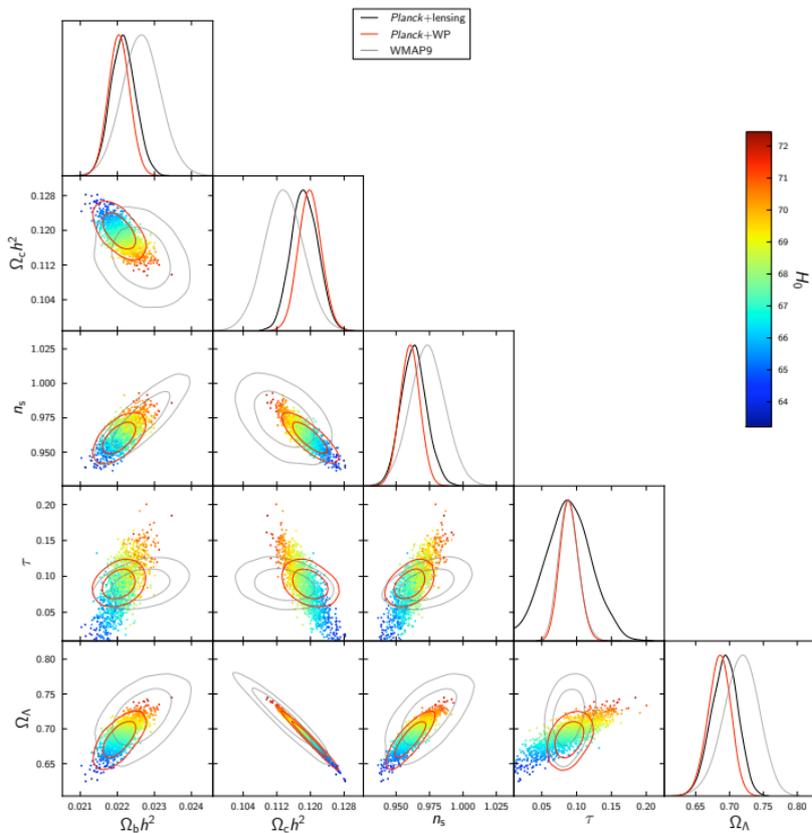
Confirmation du modèle de concordance par *Planck*



Données bien décrites par un modèle à six paramètres.

Source: *Planck* collaboration

Les paramètres du modèle Λ -CDM



Paramètres	<i>Planck</i> (CMB) limites à 68 %
$\Omega_b h^2$	0.02217 ± 0.00033
$\Omega_c h^2$	0.1186 ± 0.0031
$100\theta_{MC}$	1.04141 ± 0.00067
τ	0.089 ± 0.032
n_s	0.9635 ± 0.0094
$\ln(10^{10} A_s)$	3.085 ± 0.057
Ω_Λ	0.693 ± 0.019
Ω_m	0.307 ± 0.019
σ_8	0.823 ± 0.018
h	0.679 ± 0.015
$\Omega_m h^2$	0.1414 ± 0.0029
Y_P	0.24775 ± 0.00014
Age/Gyr	13.796 ± 0.058
z_{drag}	1059.43 ± 0.64
z_{eq}	3362 ± 69

$$\Omega_\Lambda = (69.3 \pm 1.9) \%$$

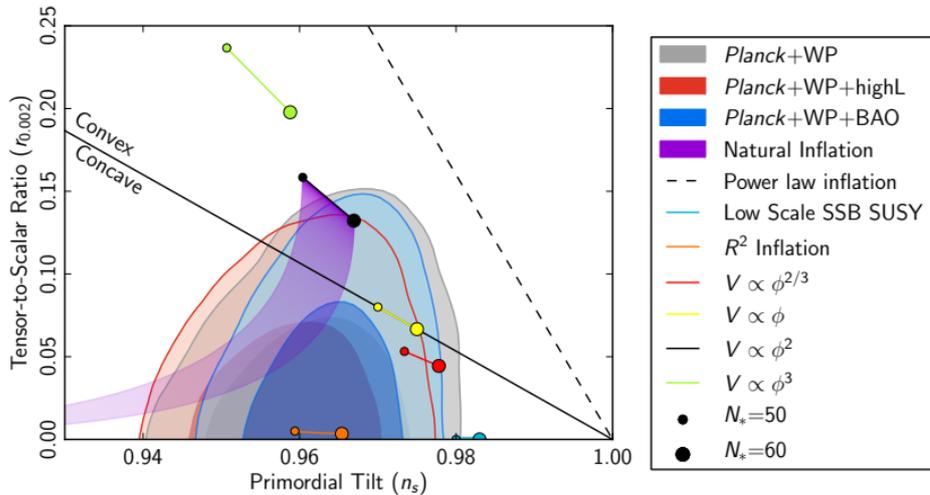
$$\Omega_{cdm} = (25.7 \pm 0.7) \%$$

$$\Omega_b = (4.8 \pm 0.1) \%$$

Source: *Planck* collaboration

Au delà du modèle Λ -CDM et du spectre

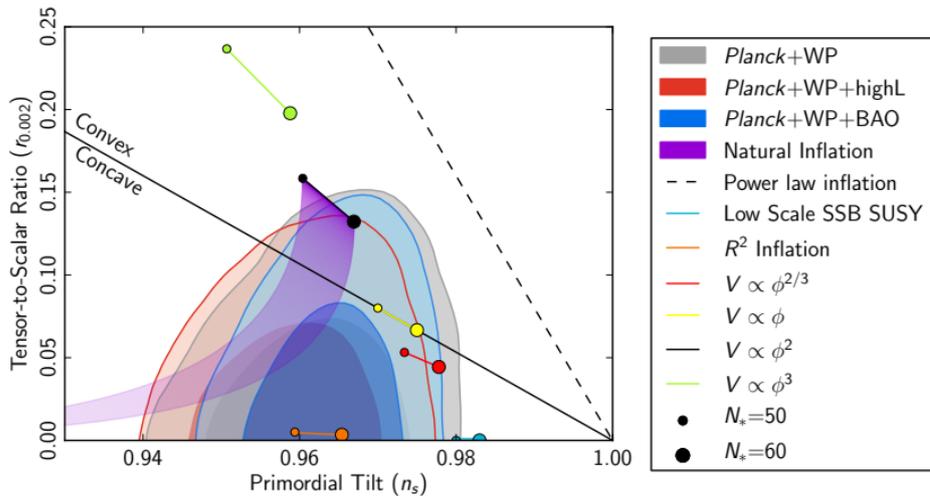
- Ajout de paramètres dans l'ajustement ($\Omega_K, N_{\text{eff}}, \sum m_\nu, Y_P, w \neq \text{const}, r$)



- Test de l'isotropie
- Recherche de non-gaussianité

Au delà du modèle Λ -CDM et du spectre

- Ajout de paramètres dans l'ajustement ($\Omega_K, N_{\text{eff}}, \sum m_\nu, Y_P, w \neq \text{const}, r$)

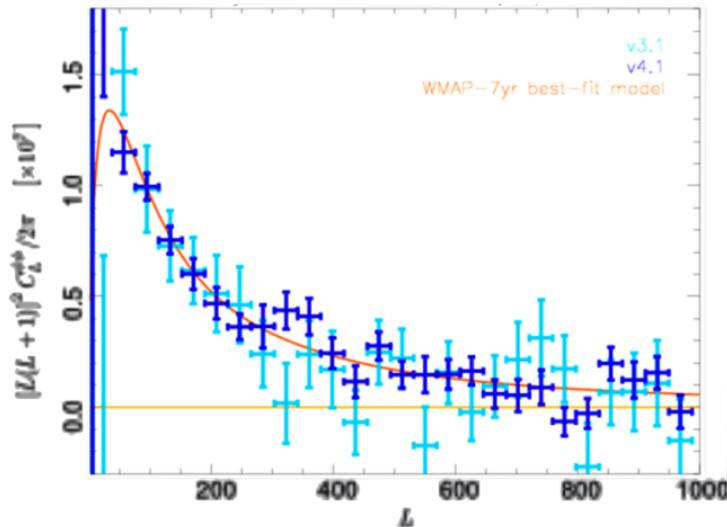


- Test de l'isotropie
- Recherche de non-gaussianité

Une non-gaussianité du modèle standard : l'effet de lentille

Déflexion de la lumière $T(\hat{n}) = \tilde{T}(\hat{n} + \nabla\phi(\hat{n}))$, où le potentiel de lentille $\phi(\hat{n})$ est défini par

$$\phi(\hat{n}) = -2 \int_0^{\chi_*} d\chi \frac{f_K(\chi_* - \chi)}{f_K(\chi_*)f_K(\chi)} \Psi(\chi\hat{n}; \eta_0 - \chi).$$



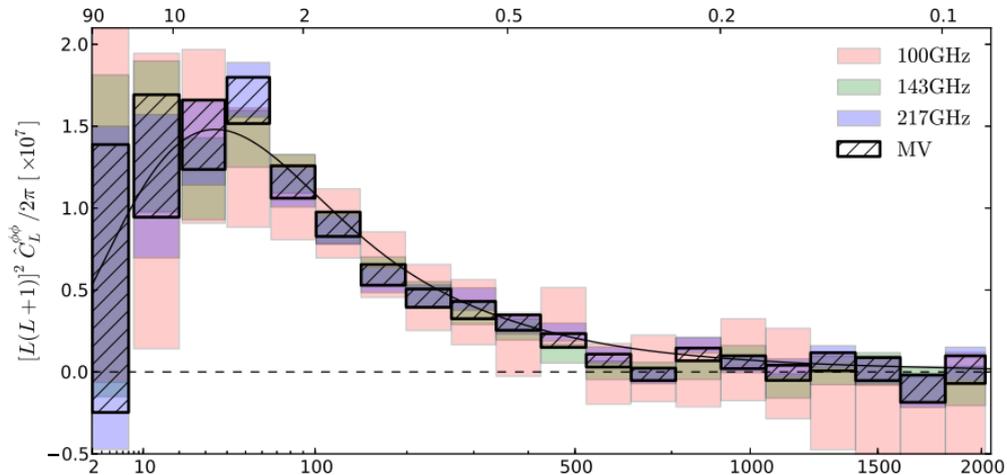
Impact du TOI processing pour la bonne reconstruction d'un effet aussi fin !

Source: *Planck* collaboration
(courtesy L.Perotto)

Une non-gaussianité du modèle standard : l'effet de lentille

Déflexion de la lumière $T(\hat{n}) = \tilde{T}(\hat{n} + \nabla\phi(\hat{n}))$, où le potentiel de lentille $\phi(\hat{n})$ est défini par

$$\phi(\hat{n}) = -2 \int_0^{\chi^*} d\chi \frac{f_K(\chi^* - \chi)}{f_K(\chi^*)f_K(\chi)} \Psi(\chi\hat{n}; \eta_0 - \chi).$$



Impact du TOI processing pour la bonne reconstruction d'un effet aussi fin !

L'observation du ciel submillimétrique avec *Planck*

Le satellite *Planck* et l'instrument HFI

Traitement des données

Cartes de *Planck*-HFI

Résultats de *Planck*

La cosmologie à l'ère de *Planck*

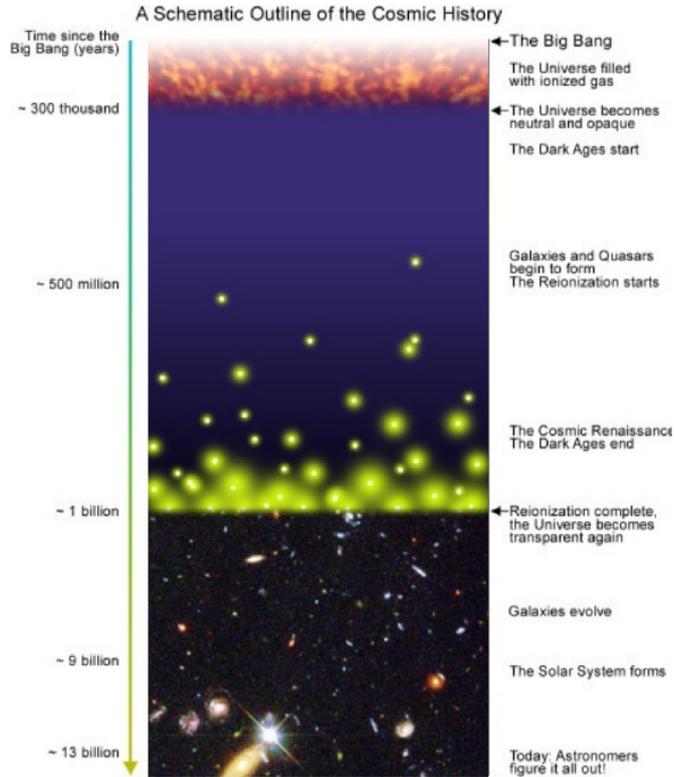
Histoire de l'ionisation de l'Univers

Histoire thermique

Annihilation de matière noire lors de la recombinaison

La Réionisation

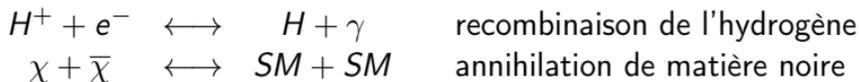
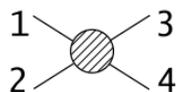
L'histoire thermique de l'Univers



S.G. Djorgovski et al. & Digital Media Center, Caltech

L'équation de Boltzmann

- Décrit l'évolution d'une population de particules soumises à des interactions, par exemple



$$\mathcal{L}[f] \stackrel{\text{def}}{=} a^{-3} \frac{d(na^3)}{dt} = \mathcal{C}[f]$$

Terme de collision \mathcal{C} : rend compte de la création et de la destruction des particules.

$$\mathcal{C}[f_1] = \frac{g_1 \cdots g_4}{(2\pi)^8} \int \frac{d^3\mathbf{p}_1}{2E_1} \cdots \frac{d^3\mathbf{p}_4}{2E_4} \delta^{(4)}(p_1 + p_2 - p_3 - p_4) |\mathcal{M}|^2 (f_3 f_4 - f_1 f_2),$$

- En notant $\Gamma = n_2 \langle \sigma v \rangle$ le taux de réaction, l'équation de Boltzmann devient

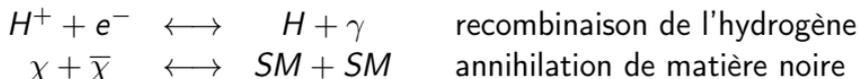
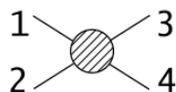
$$\frac{H}{\Gamma} \approx \left(\frac{n_3 n_4}{n_3 n_4} - \frac{n_1 n_2}{n_1 n_2} \right) \quad \text{où } n_i = e^{\mu_i/T} \bar{n}_i, \quad \text{avec } \bar{n}_i \stackrel{\text{def}}{=} n_i[\mu_i = 0]$$

- Si le taux d'expansion H est faible devant le taux de réaction Γ , l'équilibre chimique s'écrit

$$\frac{n_3 n_4}{n_3 n_4} = \frac{n_1 n_2}{n_1 n_2} \quad \text{équation de Saha.}$$

L'équation de Boltzmann

- Décrit l'évolution d'une population de particules soumises à des interactions, par exemple



$$\mathcal{L}[f] \stackrel{\text{def}}{=} a^{-3} \frac{d(na^3)}{dt} = \mathcal{C}[f]$$

Terme de collision \mathcal{C} : rend compte de la création et de la destruction des particules.

$$\mathcal{C}[f_1] = \frac{g_1 \cdots g_4}{(2\pi)^8} \int \frac{d^3\mathbf{p}_1}{2E_1} \cdots \frac{d^3\mathbf{p}_4}{2E_4} \delta^{(4)}(p_1 + p_2 - p_3 - p_4) |\mathcal{M}|^2 (f_3 f_4 - f_1 f_2),$$

- En notant $\Gamma = n_2 \langle \sigma v \rangle$ le taux de réaction, l'équation de Boltzmann devient

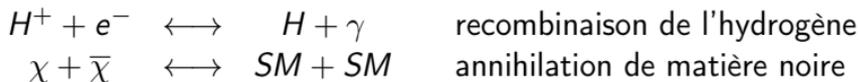
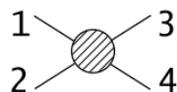
$$\frac{H}{\Gamma} \approx \left(\frac{n_3 n_4}{n_3 n_4} - \frac{n_1 n_2}{n_1 n_2} \right) \quad \text{où } n_i = e^{\mu_i/T} \bar{n}_i, \quad \text{avec } \bar{n}_i \stackrel{\text{def}}{=} n_i[\mu_i = 0]$$

- Si le taux d'expansion H est faible devant le taux de réaction Γ , l'équilibre chimique s'écrit

$$\frac{n_3 n_4}{n_3 n_4} = \frac{n_1 n_2}{n_1 n_2} \quad \text{équation de Saha.}$$

L'équation de Boltzmann

- Décrit l'évolution d'une population de particules soumises à des interactions, par exemple



$$\mathcal{L}[f] \stackrel{\text{def}}{=} a^{-3} \frac{d(na^3)}{dt} = \mathcal{C}[f]$$

Terme de collision \mathcal{C} : rend compte de la création et de la destruction des particules.

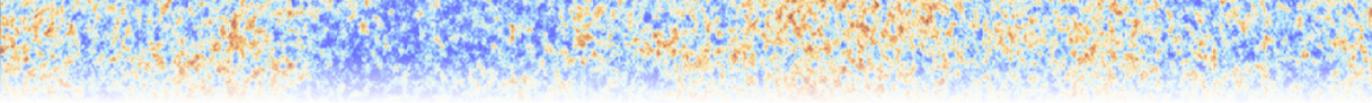
$$\mathcal{C}[f_1] = \frac{g_1 \cdots g_4}{(2\pi)^8} \int \frac{d^3 \mathbf{p}_1}{2E_1} \cdots \frac{d^3 \mathbf{p}_4}{2E_4} \delta^{(4)}(p_1 + p_2 - p_3 - p_4) |\mathcal{M}|^2 (f_3 f_4 - f_1 f_2),$$

- En notant $\Gamma = n_2 \langle \sigma v \rangle$ le taux de réaction, l'équation de Boltzmann devient

$$\frac{H}{\Gamma} \approx \left(\frac{n_3 n_4}{n_3 n_4} - \frac{n_1 n_2}{n_1 n_2} \right) \quad \text{où } n_i = e^{\mu_i/T} \bar{n}_i, \quad \text{avec } \bar{n}_i \stackrel{\text{def}}{=} n_i[\mu_i = 0]$$

- Si le taux d'expansion H est faible devant le taux de réaction Γ , l'équilibre chimique s'écrit

$$\frac{n_3 n_4}{n_3 n_4} = \frac{n_1 n_2}{n_1 n_2} \quad \text{équation de Saha.}$$



L'observation du ciel submillimétrique avec *Planck*

Le satellite *Planck* et l'instrument HFI

Traitement des données

Cartes de *Planck*-HFI

Résultats de *Planck*

La cosmologie à l'ère de *Planck*

Histoire de l'ionisation de l'Univers

Histoire thermique

Annihilation de matière noire lors de la recombinaison

La Réionisation

Recombinaison et découplage

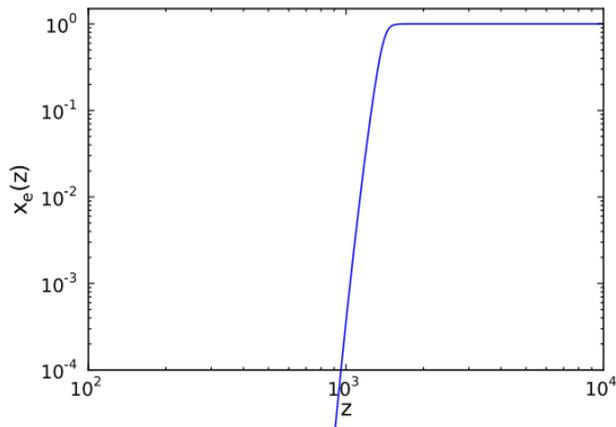
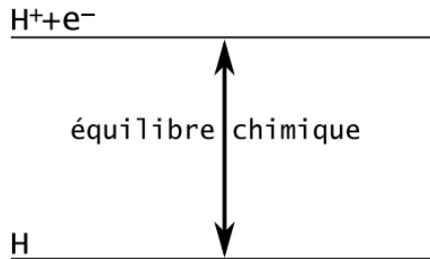
Recombinaison

- équation de Saha
- modèle TLA de Peebles
- contribution de l'hélium

Découplage

- opacité : $\dot{\tau}(\eta) = n_e(\eta)\sigma_T a(\eta)$, telle que $\mathbb{P}(\gamma + e)_{\eta, \eta+d\eta} = \dot{\tau}(\eta)d\eta$.
- épaisseur optique entre η_{init} et η_0 : $\tau(\eta_0) = \int_{\eta_{init}}^{\eta_0} \dot{\tau}(\eta)d\eta$, telle que le rapport des intensités $\frac{I_0}{I_{init}}$ soit $\exp(-\tau(\eta_0))$.
- fonction de visibilité :

$$g(\eta) = \dot{\tau}(\eta)\exp(-\tau(\eta))$$



Une modification de $x_e(z)$ implique une modification de g .

Recombinaison et découplage

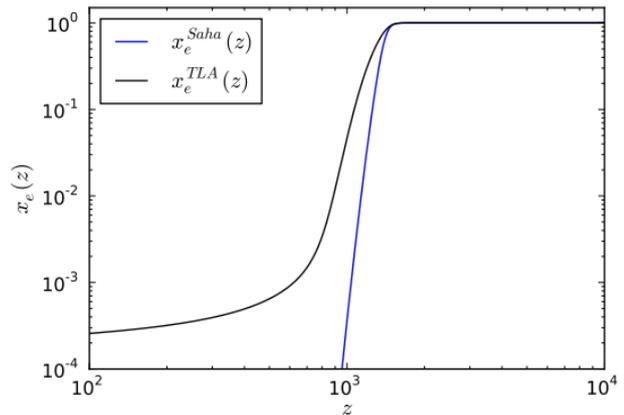
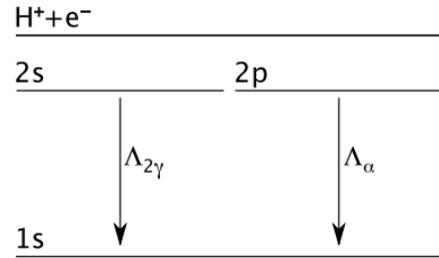
Recombinaison

- équation de Saha
- modèle TLA de Peebles
- contribution de l'hélium

Découplage

- opacité : $\dot{\tau}(\eta) = n_e(\eta)\sigma_T a(\eta)$, telle que $\mathbb{P}(\gamma + e)_{\eta, \eta+d\eta} = \dot{\tau}(\eta)d\eta$.
- épaisseur optique entre η_{init} et η_0 : $\tau(\eta_0) = \int_{\eta_{init}}^{\eta_0} \dot{\tau}(\eta)d\eta$, telle que le rapport des intensités $\frac{I_0}{I_{init}}$ soit $\exp(-\tau(\eta_0))$.
- fonction de visibilité :

$$g(\eta) = \dot{\tau}(\eta)\exp(-\tau(\eta))$$



Une modification de $x_e(z)$ implique une modification de g .

Recombinaison et découplage

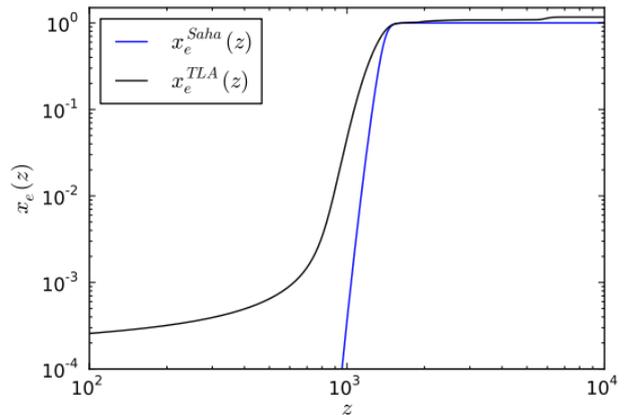
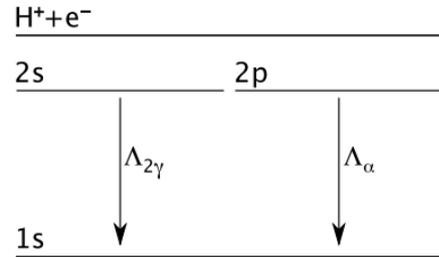
Recombinaison

- équation de Saha
- modèle TLA de Peebles
- contribution de l'hélium

Découplage

- opacité : $\dot{\tau}(\eta) = n_e(\eta)\sigma_T a(\eta)$, telle que $\mathbb{P}(\gamma + e)_{\eta, \eta+d\eta} = \dot{\tau}(\eta)d\eta$.
- épaisseur optique entre η_{init} et η_0 : $\tau(\eta_0) = \int_{\eta_{init}}^{\eta_0} \dot{\tau}(\eta)d\eta$, telle que le rapport des intensités $\frac{I_0}{I_{init}}$ soit $\exp(-\tau(\eta_0))$.
- fonction de visibilité :

$$g(\eta) = \dot{\tau}(\eta)\exp(-\tau(\eta))$$



Une modification de $x_e(z)$ implique une modification de g .

Recombinaison et découplage

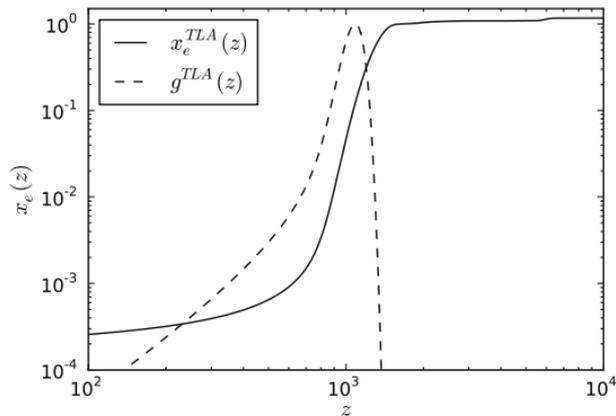
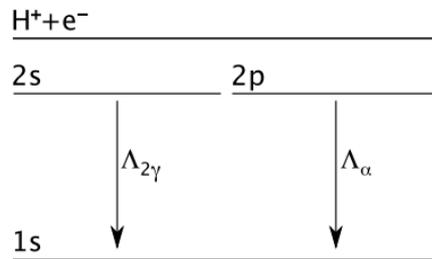
Recombinaison

- équation de Saha
- modèle TLA de Peebles
- contribution de l'hélium

Découplage

- opacité : $\dot{\tau}(\eta) = n_e(\eta)\sigma_T a(\eta)$, telle que $\mathbb{P}(\gamma + e)_{\eta, \eta+d\eta} = \dot{\tau}(\eta)d\eta$.
- épaisseur optique entre η_{init} et η_0 : $\tau(\eta_0) = \int_{\eta_{init}}^{\eta_0} \dot{\tau}(\eta)d\eta$, telle que le rapport des intensités $\frac{I_0}{I_{init}}$ soit $\exp(-\tau(\eta_0))$.
- fonction de visibilité :

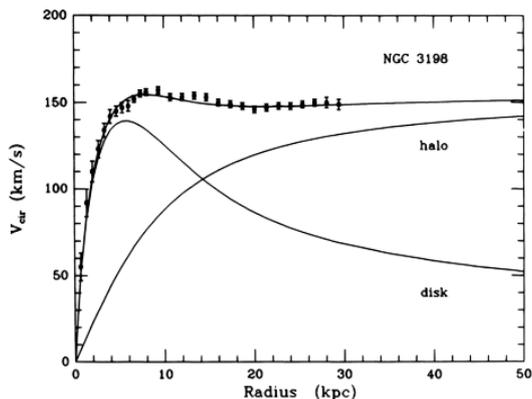
$$g(\eta) = \dot{\tau}(\eta)\exp(-\tau(\eta))$$



Une modification de $x_e(z)$ implique une modification de g .

Historiquement

- Comportement des objets virialisés.
- Kepler $\Rightarrow v(r) \propto \sqrt{M(r)/r}$
- Pour un point à l'extérieur de la partie lumineuse, $v(r) \propto cste \neq \sqrt{1/r}$

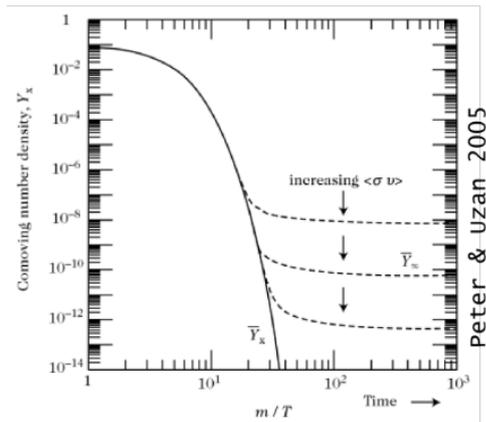


Le “miracle” des WIMP

- La résolution de l'équation de Boltzmann donne un “gel” de la densité comobile.

$$\Omega_{\text{cdm}} h^2 \approx \frac{0.1 \text{ pb} \cdot c}{\langle \sigma_{AV} \rangle}$$

- Pour $\Omega_{\text{cdm}} h^2$ du modèle standard, cela correspond à l'échelle de l'interaction faible $\langle \sigma v \rangle \approx 10^{-39} \text{ cm}^2$.



Peter & Uzan 2005

Recombinaison et matière noire

Paramétrisation de l'ajout d'énergie au milieu :

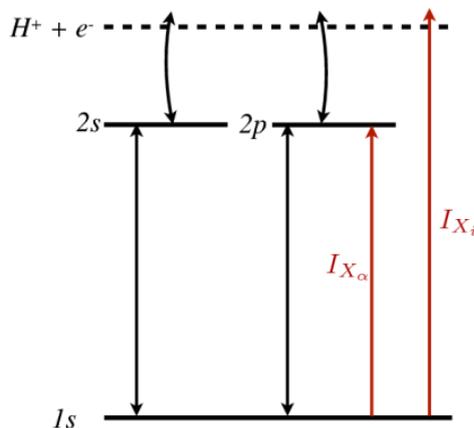
$$\begin{aligned}\frac{dE}{dVdt} &= E_{1\text{ ann}} \times dn_{\text{ann}}/dVdt \times f(z) \\ &= c^2 \Omega_{\text{cdm}}^2 \rho_{\text{crit}}^2 (1+z)^6 p_{\text{ann}}\end{aligned}$$

On a isolé du terme ne dépendant que de paramètres cosmologiques "traditionnels" un terme

$$p_{\text{ann}}(z) \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\langle \sigma v \rangle}{m_\chi} f(z) \approx 2 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ kg}^{-1}$$

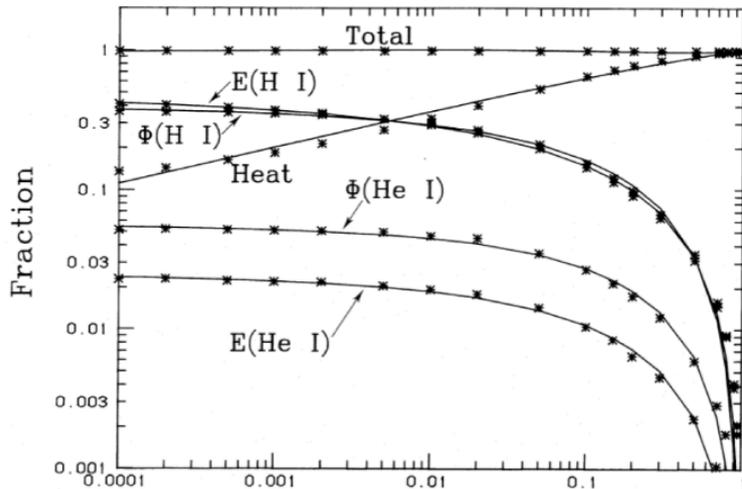
- une fraction χ_i de cette énergie est absorbée par ionisation,
- une fraction χ_α de cette énergie est absorbée par excitation,
- une fraction χ_h est dissipée en chaleur.

On a $\chi_i + \chi_\alpha + \chi_h = 1$.



Incertitudes sur $\chi_{i,\alpha,h}$

Les $\chi_{i,\alpha,h}$ dépendent de la fraction d'ionisation x_H .



Shull & van Steenberg 1985

X

Paramétrisation :

$$\chi_i(x_H) = \chi_i^0(1 - x_H)$$

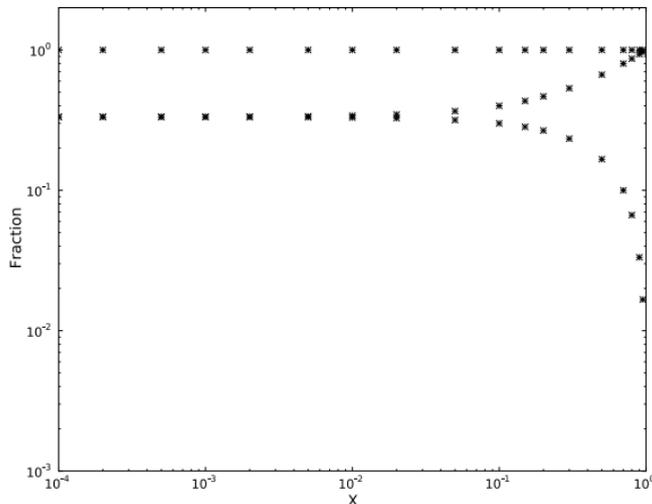
$$\chi_\alpha(x_H) = \chi_\alpha^0(1 - x_H)$$

$$\chi_h(x_H) = x_H(1 - \chi_h^0) + \chi_h^0$$

La littérature sur le CMB utilise
 $(\chi_i^0, \chi_\alpha^0, \chi_h^0) = (\frac{1}{3}, \frac{1}{3}, \frac{1}{3})$.

Incertitudes sur $\chi_{i,\alpha,h}$

Les $\chi_{i,\alpha,h}$ dépendent de la fraction d'ionisation x_H .



Paramétrisation :

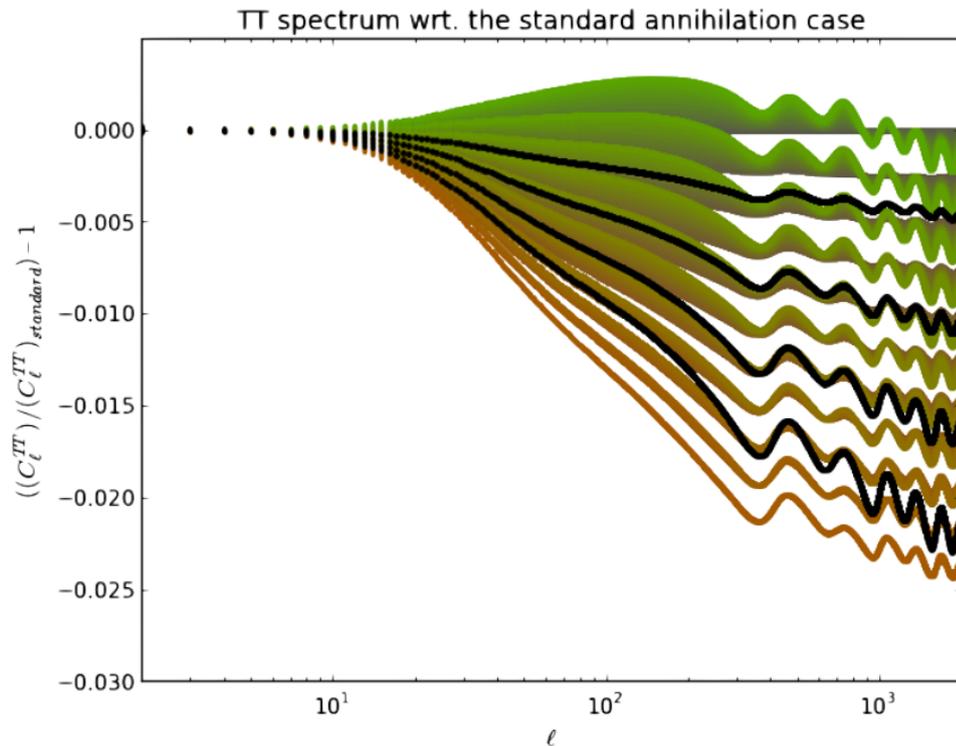
$$\chi_i(x_H) = \chi_i^0(1 - x_H)$$

$$\chi_\alpha(x_H) = \chi_\alpha^0(1 - x_H)$$

$$\chi_h(x_H) = x_H(1 - \chi_h^0) + \chi_h^0.$$

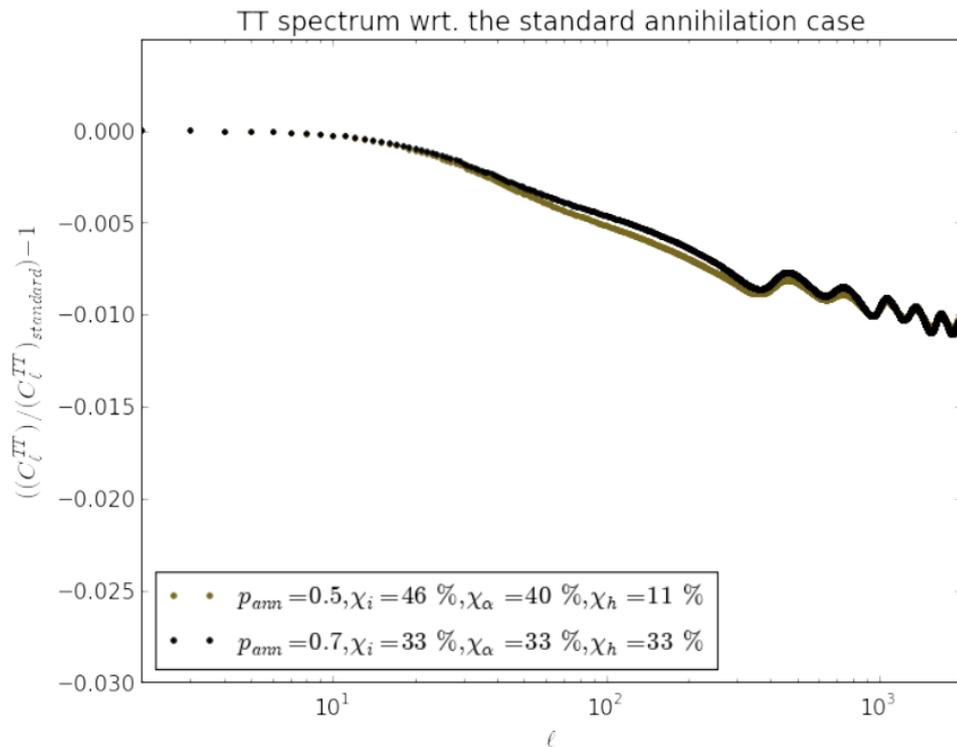
La littérature sur le CMB utilise
 $(\chi_i^0, \chi_\alpha^0, \chi_h^0) = (\frac{1}{3}, \frac{1}{3}, \frac{1}{3})$.

Risque de dégénérescence



Risque de dégénérescence entre p_{ann} et une mauvaise connaissance des $\chi_{i,\alpha,h}$.

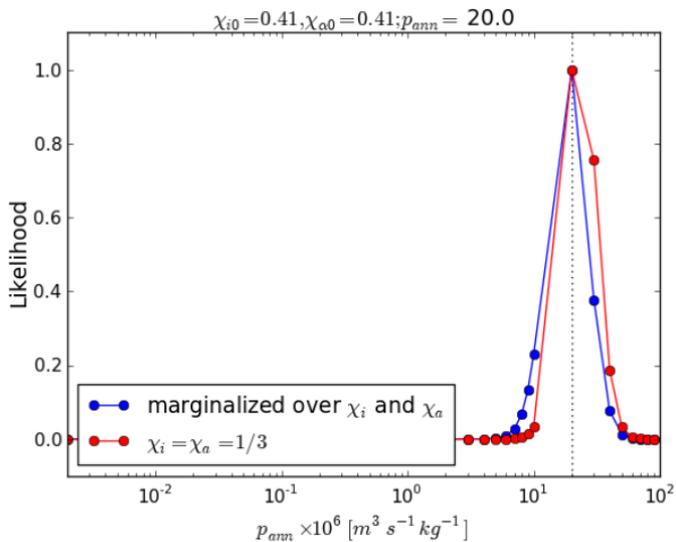
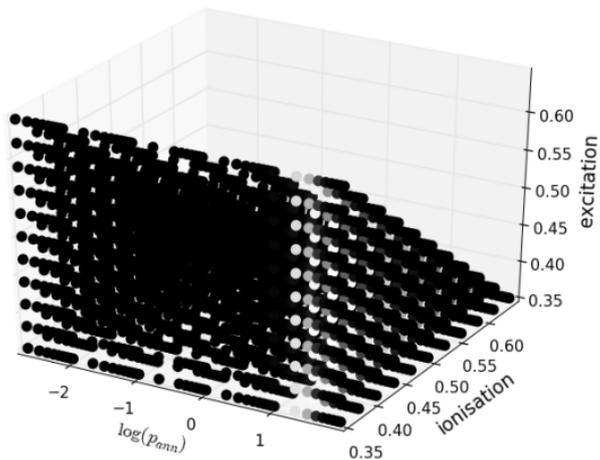
Risque de dégénérescence



Risque de dégénérescence entre p_{ann} et une mauvaise connaissance des $\chi_{i,\alpha,h}$.

Impact sur les contraintes de ρ_{ann}

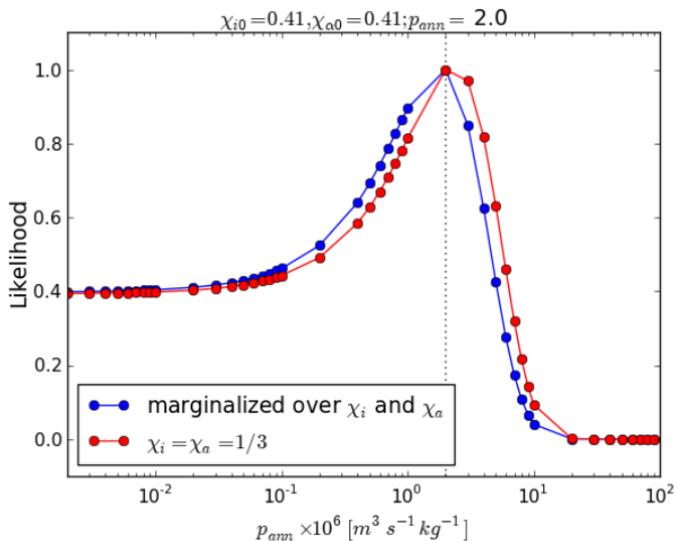
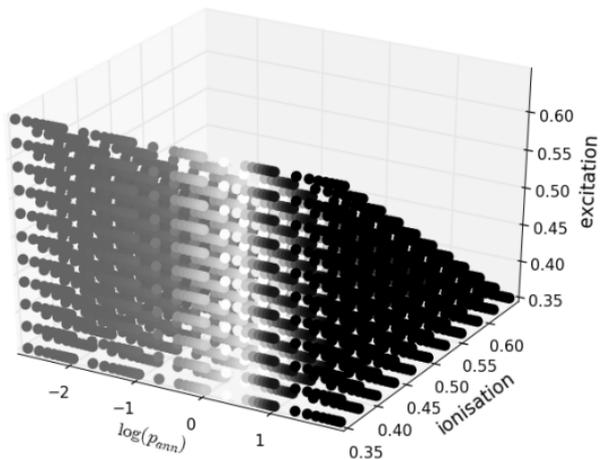
Cas $\rho_{ann} \gg \rho_{ann}^{WMAP}$



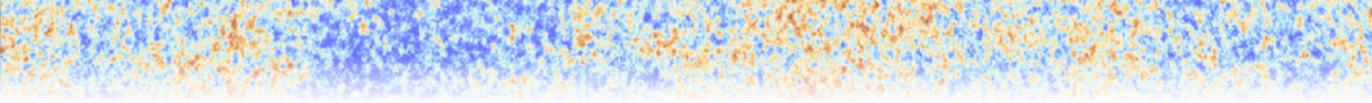
Pas de biais, pas de meilleure reconstruction

Impact sur les contraintes de ρ_{ann}

Cas $\rho_{ann} \approx \rho_{ann}^{WMAP}$



Pas de biais, uniquement une limite superieure



L'observation du ciel submillimétrique avec *Planck*

Le satellite *Planck* et l'instrument HFI

Traitement des données

Cartes de *Planck*-HFI

Résultats de *Planck*

La cosmologie à l'ère de *Planck*

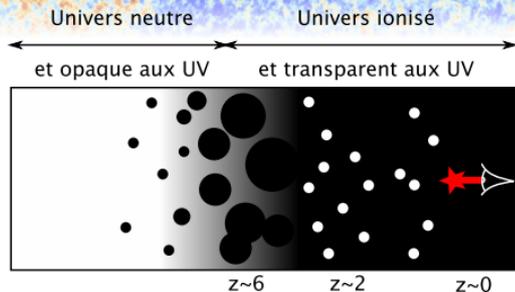
Histoire de l'ionisation de l'Univers

Histoire thermique

Annihilation de matière noire lors de la recombinaison

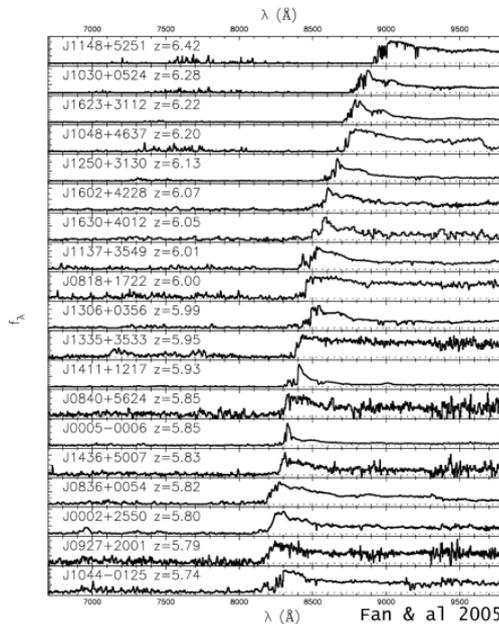
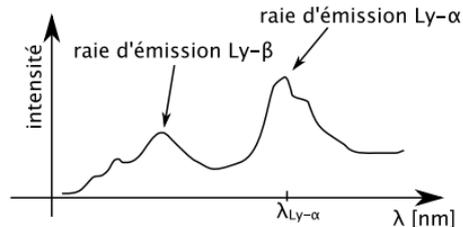
La Réionisation

L'effet Gunn-Peterson

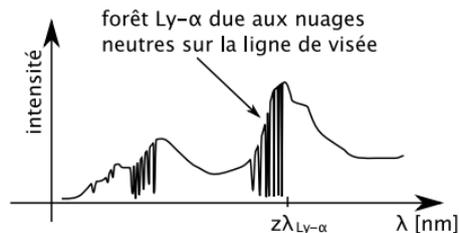
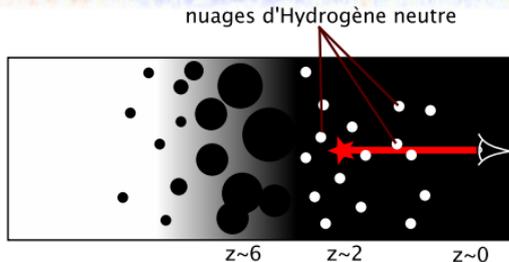


- L'hydrogène neutre absorbe les photons de fréquence $\lambda_{Ly\alpha} = 1216 \text{ \AA}$
- À bas z , des raies d'absorption correspondent à des nuages d'hydrogène neutre
- Autour de $z \approx 7$, le spectre est complètement absorbé.
- C'est l'absence de cet effet pour les bas z qui prouve la Réionisation.

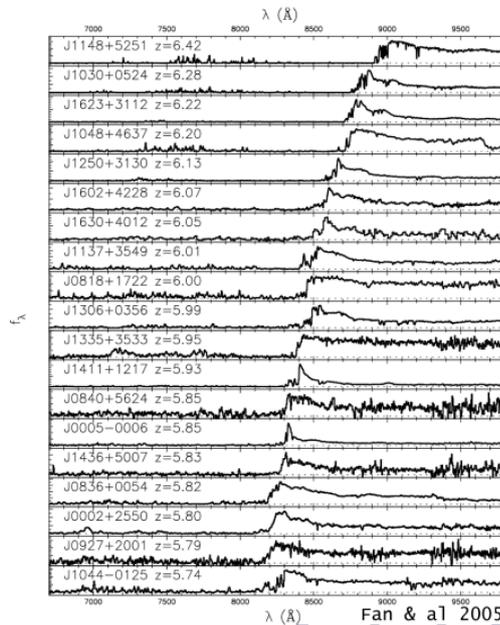
spectre d'un quasar



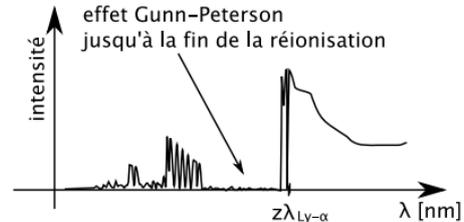
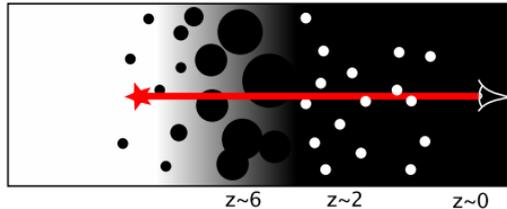
L'effet Gunn-Peterson



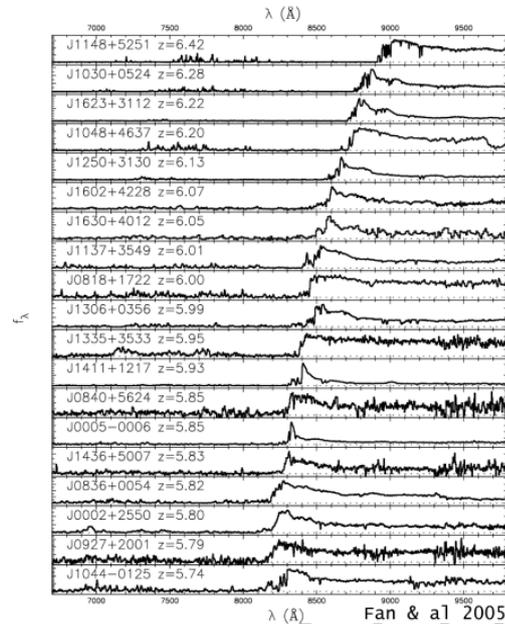
- L'hydrogène neutre absorbe les photons de fréquence $\lambda_{Ly\alpha} = 1216 \text{ \AA}$
- À bas z , des raies d'absorption correspondent à des nuages d'hydrogène neutre
- Autour de $z \approx 7$, le spectre est complètement absorbé.
- C'est l'absence de cet effet pour les bas z qui prouve la Réionisation.



L'effet Gunn-Peterson

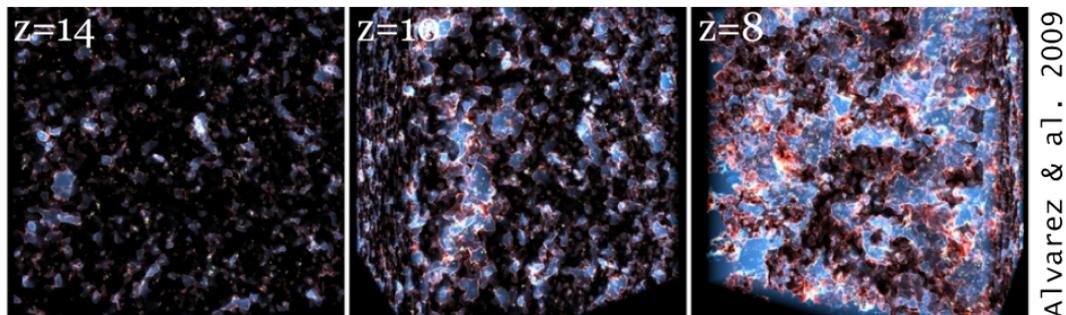


- L'hydrogène neutre absorbe les photons de fréquence $\lambda_{Ly\alpha} = 1216 \text{ \AA}$
- À bas z , des raies d'absorption correspondent à des nuages d'hydrogène neutre
- Autour de $z \approx 7$, le spectre est complètement absorbé.
- C'est l'absence de cet effet pour les bas z qui prouve la Réionisation.

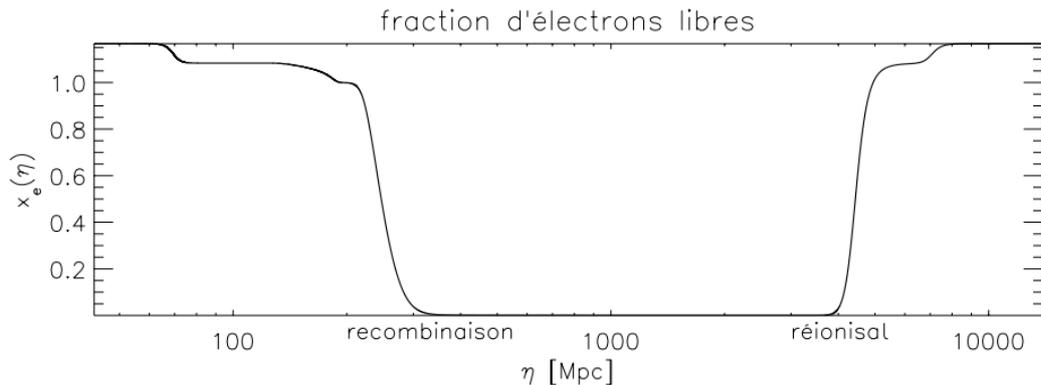


Scénario global

- 13.6 eV pour ioniser l'hydrogène vs plusieurs MeV relâchés par proton dans les étoiles.
- Modèles théoriques complexes : formation des structures, des étoiles, transfert radiatif, ...

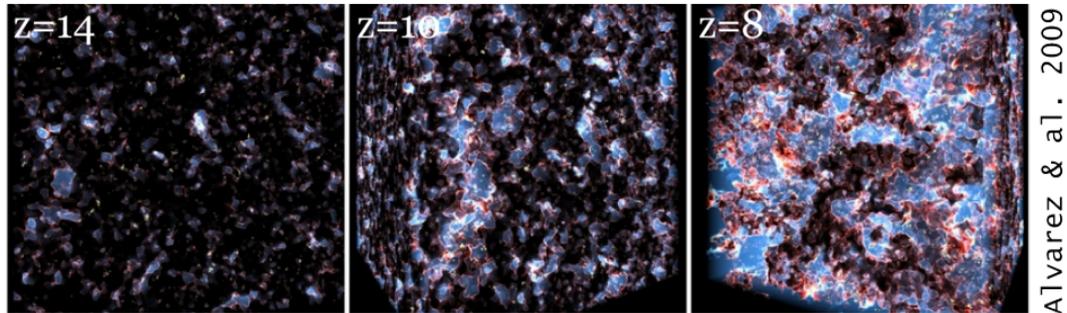


- Plusieurs candidats : étoiles de population III, trous noirs, ...

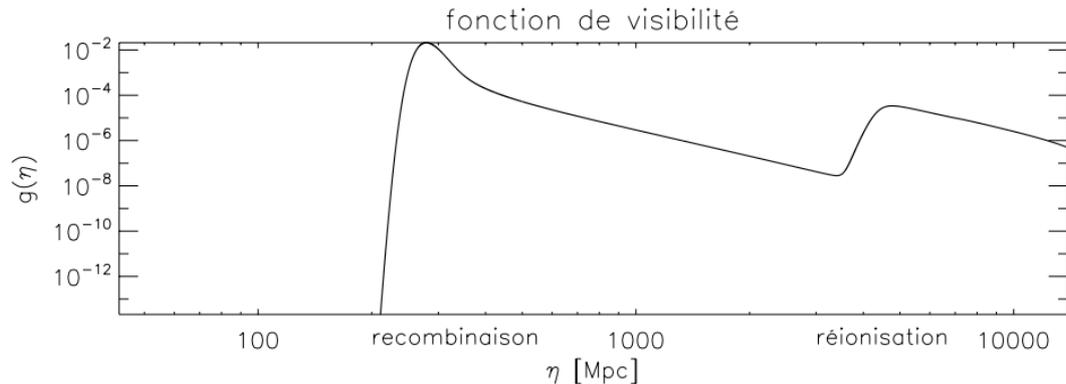


Scénario global

- 13.6 eV pour ioniser l'hydrogène vs plusieurs MeV relâchés par proton dans les étoiles.
- Modèles théoriques complexes : formation des structures, des étoiles, transfert radiatif, ...



- Plusieurs candidats : étoiles de population III, trous noirs, ...



Effet sur les photons du CMB

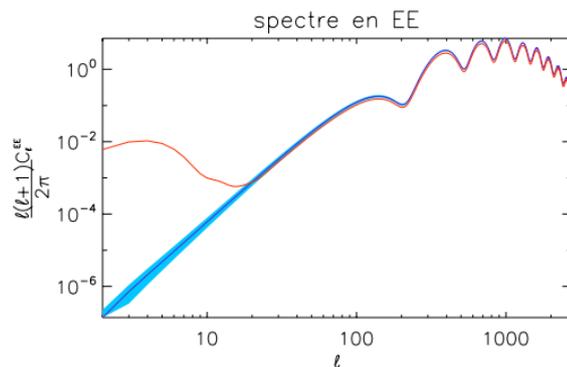
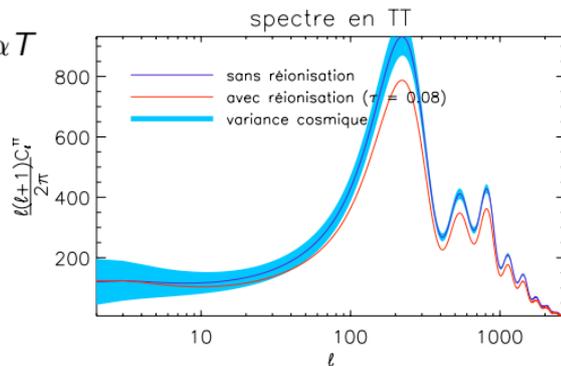
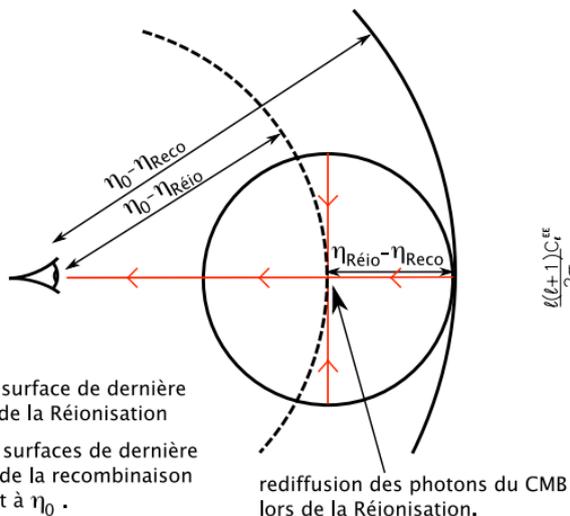
- Lissage des anisotropies primaires :

$$T + \Delta T \xrightarrow{\text{en moy.}} (T + \Delta T) - \alpha(T + \Delta T) + \alpha T$$

$$= T + e^{-\tau} \Delta T,$$

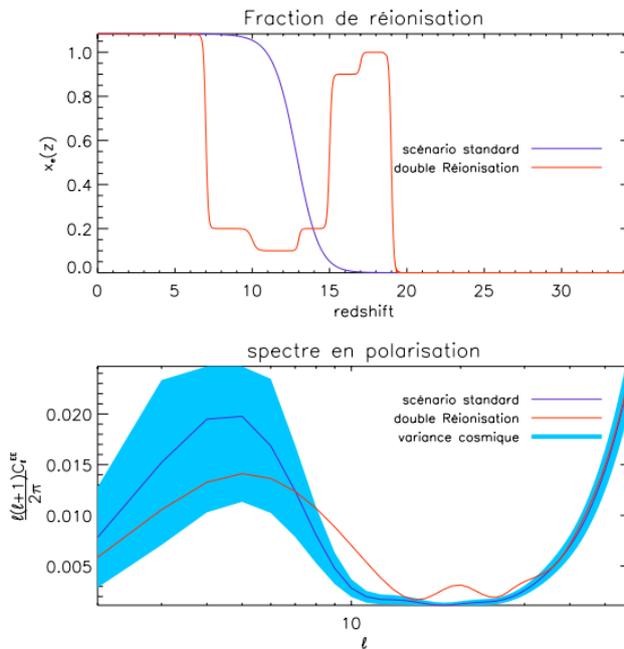
$$C_\ell \rightarrow C_\ell \exp(-2\tau)$$

- Ajout d'anisotropies secondaires aux basses échelles angulaires



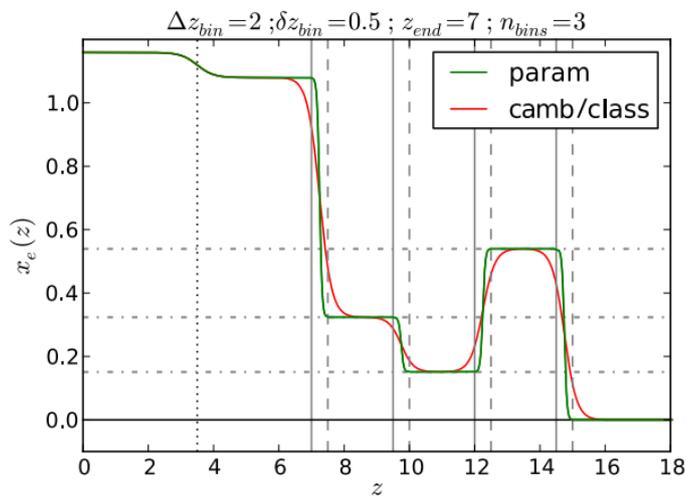
Au-delà de τ

Approche par plateaux (*Lewis et al. 2006*) : modèle-indépendante.



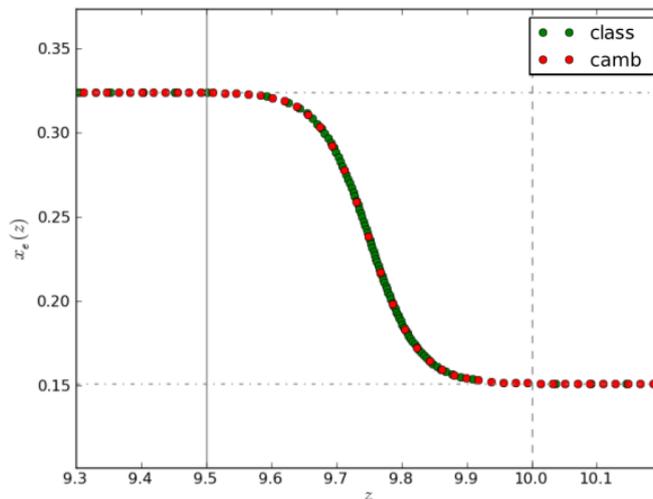
Il est en principe possible de discerner deux histoires $x_e(z)$ ayant une épaisseur optique différente.

Contrainte sur une histoire complexe



- choix d'une paramétrisation : $x(z) = x_i + \frac{1}{2} \left[1 + \frac{\tanh\left(\frac{2(z-z_i)/(z_{i+1}-z_i)-1}{\alpha}\right)}{\tanh(1/\alpha)} \right] \times \underbrace{(x_{i+1} - x_i)}_{\delta z_{bin}}$.
- camb (Fortran) et class (C) algorithmes de Boltzmann. Les pas sont gérés différemment
⇒ problèmes potentiels lors de transitions abruptes.

Contrainte sur une histoire complexe



- choix d'une paramétrisation : $x(z) = x_i + \frac{1}{2} \left[1 + \frac{\tanh\left(\frac{2(z-z_i)/(z_{i+1}-z_i)-1}{\alpha}\right)}{\tanh(1/\alpha)} \right] \times \underbrace{(x_{i+1} - x_i)}_{\delta z_{\text{bin}}}$.
- camb (Fortran) et class (C) algorithmes de Boltzmann. Les pas sont gérés différemment
⇒ problèmes potentiels lors de transitions abruptes.

Comparaison d'algorithmes

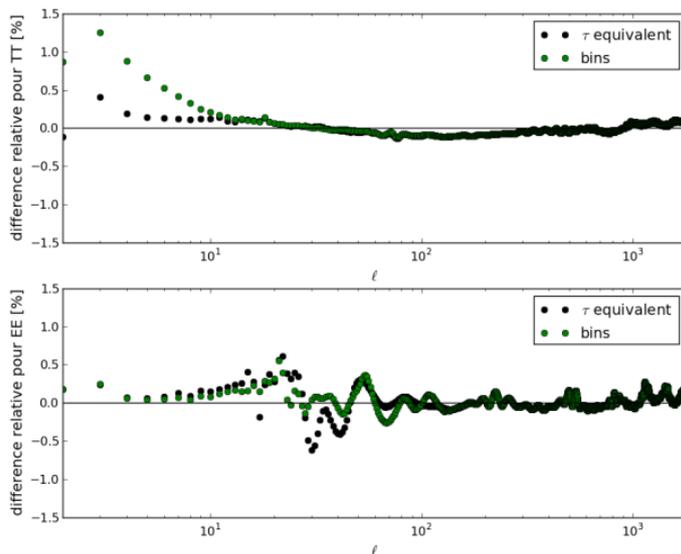
- Test de la robustesse de camb, utilisé par la collaboration *Planck*.
- Comparaison des différences relatives pour notre paramétrisation, et pour un τ équivalent avec $x_e(z)$ plus lisse.

- Les quantités

$$(C_{\ell, \text{CLASS}}^{TT} - C_{\ell, \text{CAMB}}^{TT}) / C_{\ell, \text{CLASS}}^{TT} \text{ et}$$

$$(C_{\ell, \text{CLASS}}^{EE} - C_{\ell, \text{CAMB}}^{EE}) / C_{\ell, \text{CLASS}}^{EE}$$

varient suffisamment peu pour cette paramétrisation.



Nous pouvons avoir confiance dans les outils standards pour cette étude.

- *Planck* s'inscrit dans le cadre de la cosmologie de précision : mesure des anisotropies en température limitée par la variance cosmique sur une large échelle angulaire.
- Qualité des instruments embarqués, mais aussi de l'analyse.
Mon travail au sein de la collaboration :
 - Caractérisation du bruit au niveau du ring,
 - Correction de certains problèmes, (sauts dans la ligne de base)
 - Choix des rings à projeter,
 - Test de cohérence, complémentaire aux simulations.
- Opportunité avec *Planck* de sonder de la physique au début de l'univers, par exemple l'ionisation de l'Univers :
 - annihilation de matière noire :
→ la reconstruction de p_{ann} ne dépend pas de notre méconnaissance des processus exacts
 - Réionisation :
→ la possibilité de reconstruire la fraction d'ionisation en fonction du temps.

- Résultats 2014 incluant la polarisation
→ article devrait être dédié à la Réionisation.
- L'étude du CMB depuis le sol ou en ballon (SPT, QUBIC, ...) → les anisotropies secondaires créées par la Réionisation sont visibles à ces échelles.
- L'étude du CMB à très long terme (eg PRISM)
 - Relevé de tout le ciel : polarisation à bas ℓ
 - Spectrométrie : aller au-delà de FIRAS
- Une nouvelle perspective : la raie à 21 cm (SKA, LOFAR)
→ Systématiques extrêmement nombreuses et difficiles à estimer.
→ Réionisation : accès à une "tomographie de l'hydrogène neutre dans l'Univers"

L'étude des Âges sombres devient un objectif majeur de la Cosmologie.

Backup slides



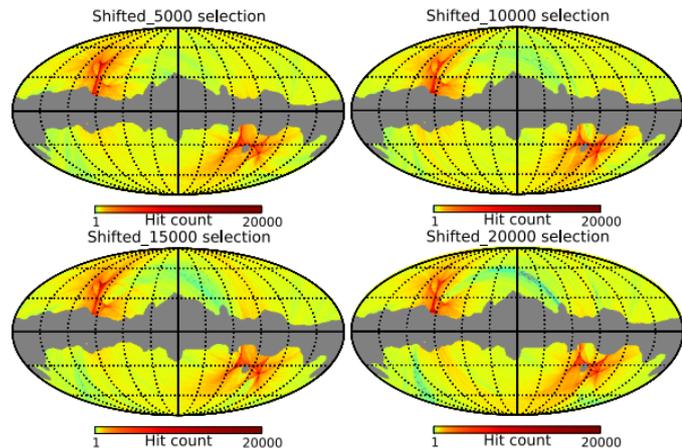
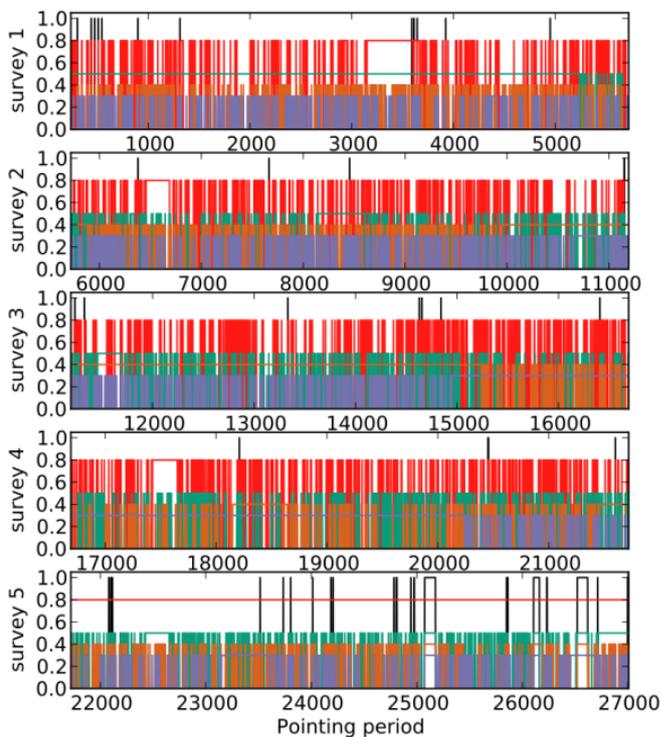
planck

LPSC
Grenoble



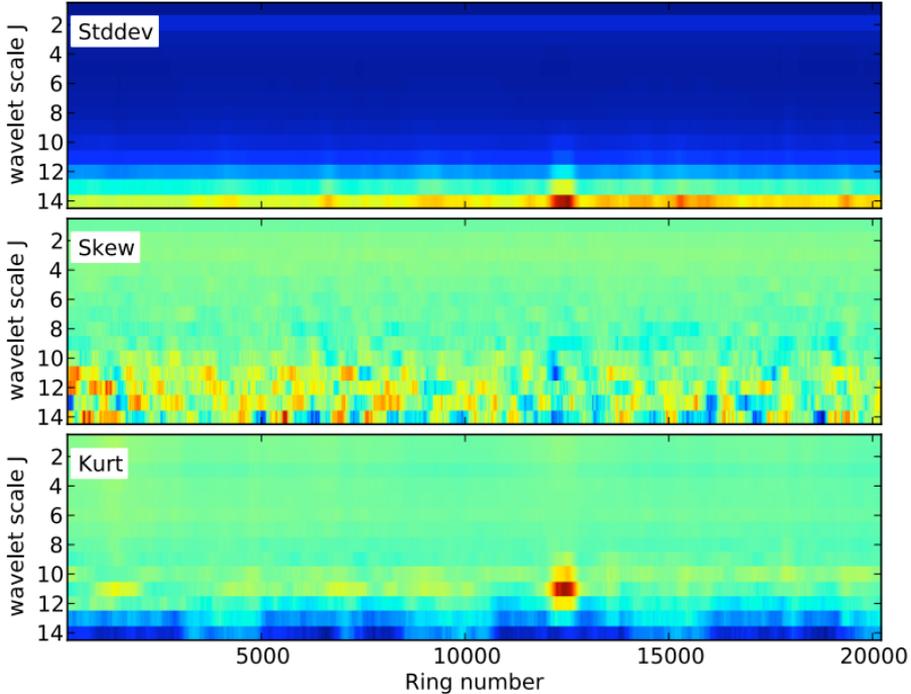
HFI PLANCK

Deux tests de cohérence : random et shifted



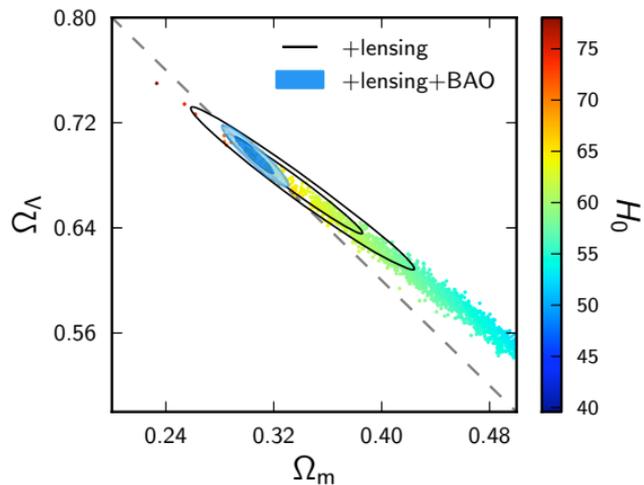
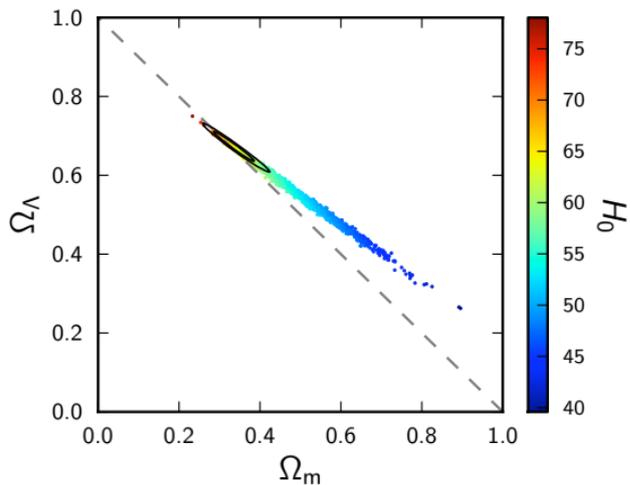
- random : carte avec sélection de rings aléatoire % superclean (même nombre de rings rejetés)
- shifted : carte avec sélection de rings décalée % superclean

Analyse par ondelettes



Au delà du modèle standard : ajout de paramètres

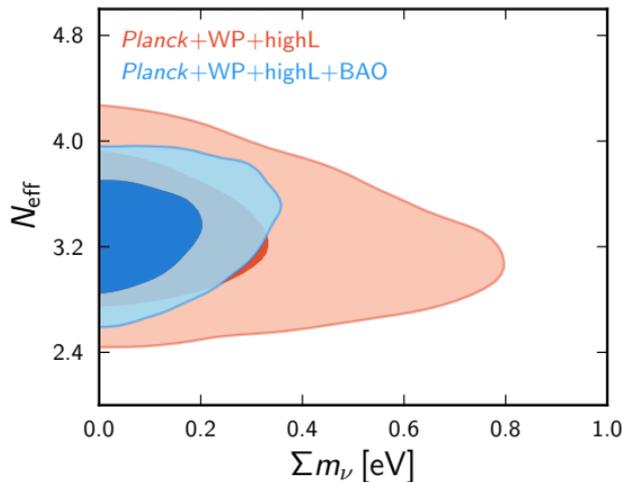
- Ω_K : la platitude de l'Univers
- N_{eff} et $\sum m_\nu$: les neutrinos
- Y_P : la nucléosynthèse primordiale
- Energie noire
- Les paramètres de l'Univers primordial et les contraintes sur l'inflation



Source: *Planck* collaboration

Au delà du modèle standard : ajout de paramètres

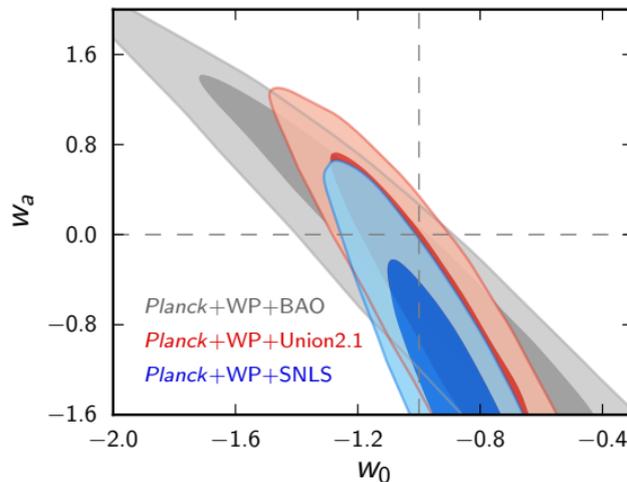
- Ω_K : la platitude de l'Univers
- N_{eff} et $\sum m_\nu$: les neutrinos
- Y_P : la nucléosynthèse primordiale
- Energie noire
- Les paramètres de l'Univers primordial et les contraintes sur l'inflation



Source: *Planck* collaboration

Au delà du modèle standard : ajout de paramètres

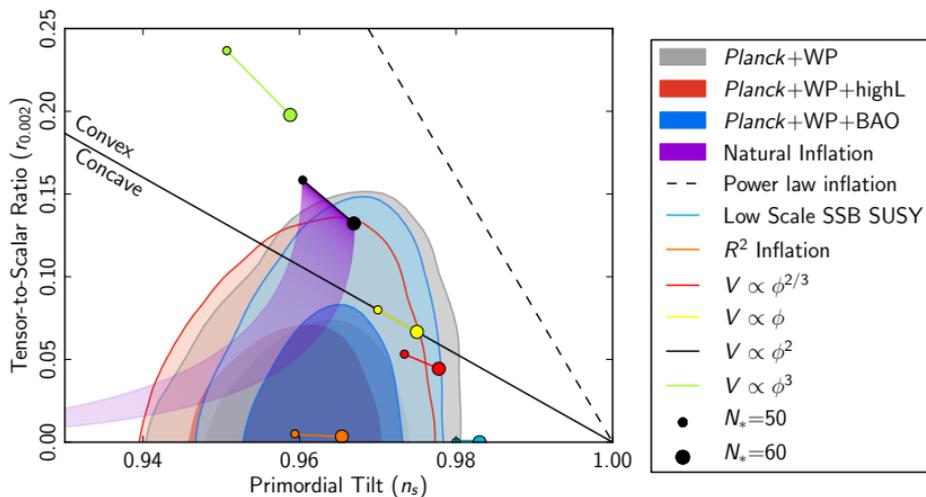
- Ω_K : la platitude de l'Univers
- N_{eff} et $\sum m_\nu$: les neutrinos
- Y_P : la nucléosynthèse primordiale
- Energie noire
- Les paramètres de l'Univers primordial et les contraintes sur l'inflation



Source: *Planck* collaboration

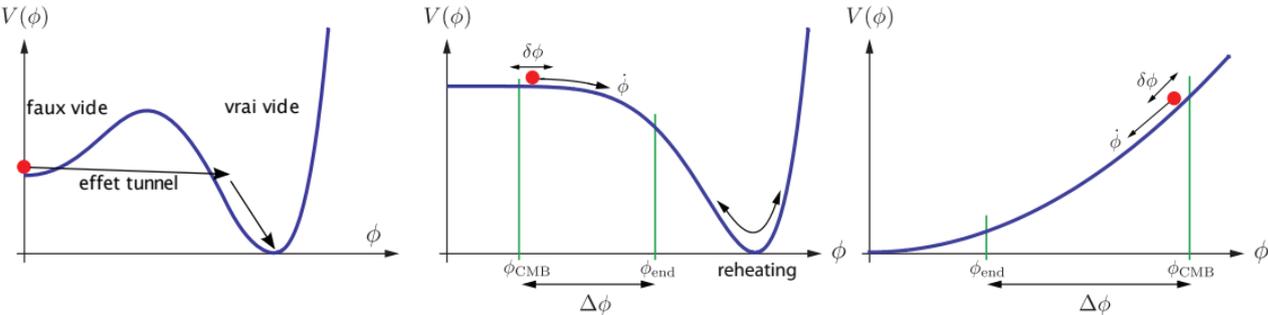
Au delà du modèle standard : ajout de paramètres

- Ω_K : la platitude de l'Univers
- N_{eff} et $\sum m_\nu$: les neutrinos
- Y_P : la nucléosynthèse primordiale
- Energie noire
- Les paramètres de l'Univers primordial et les contraintes sur l'inflation



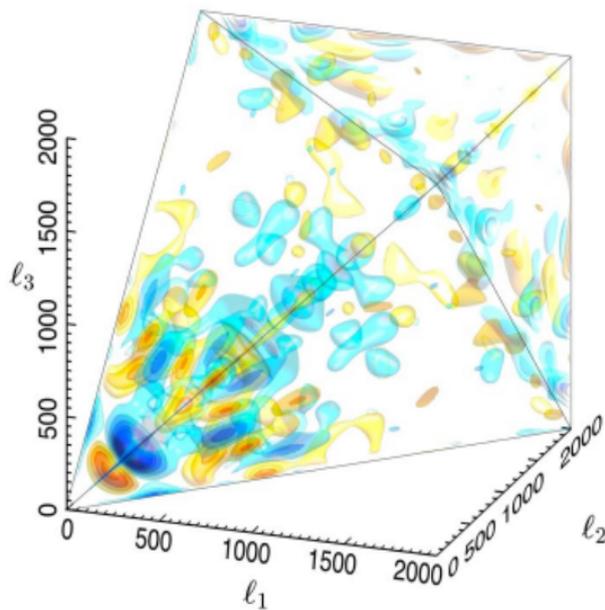
Source: *Planck* collaboration

L'inflation



Au delà du modèle standard : test des hypothèses

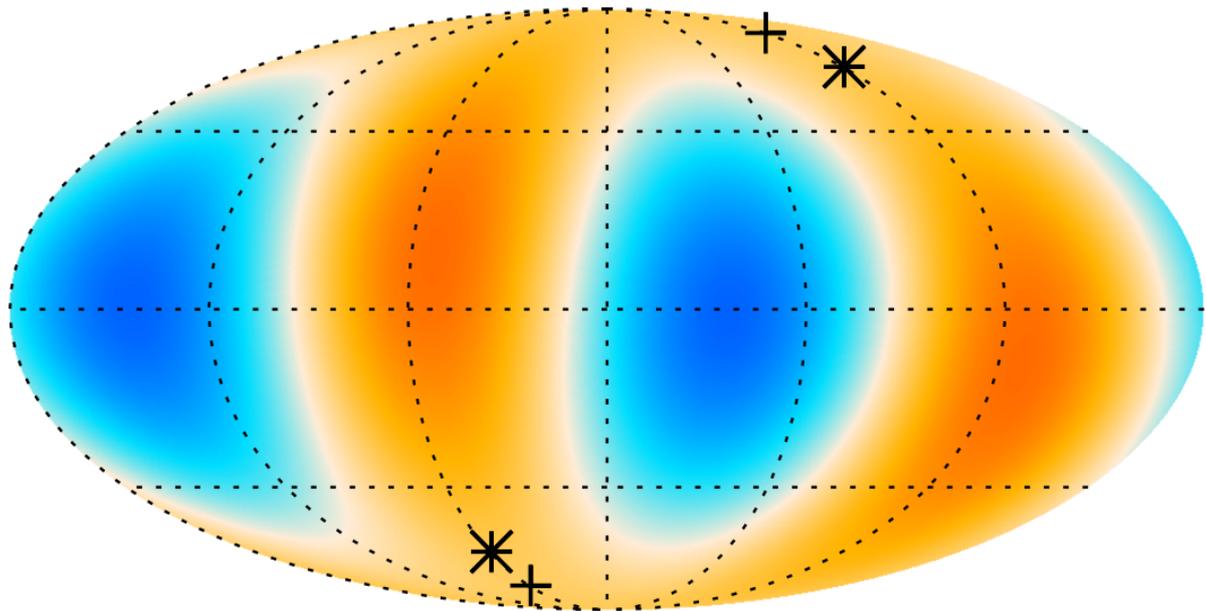
- **Non gaussianité** \Rightarrow limite supérieure contraignante sur le niveau de non-gaussianité
- "anomalies" WMAP
 - alignement quadrupôle-octopole
 - déficit de puissance à bas- ℓ
 - point froid
 - asymétrie Nord/Sud



Source: *Planck* collaboration

Au delà du modèle standard : test des hypothèses

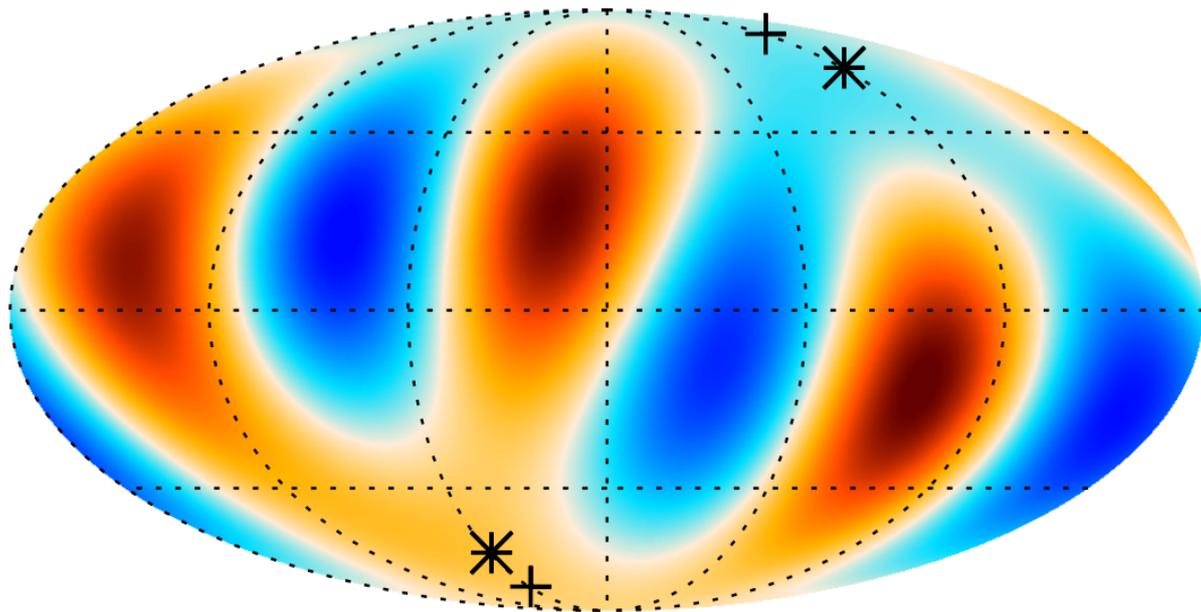
- Non gaussianité \Rightarrow limite supérieure contraignante sur le niveau de non-gaussianité
- "anomalies" WMAP
 - alignement quadrupôle-octopole
 - déficit de puissance à bas- ℓ
 - point froid
 - asymétrie Nord/Sud



Source: *Planck* collaboration

Au delà du modèle standard : test des hypothèses

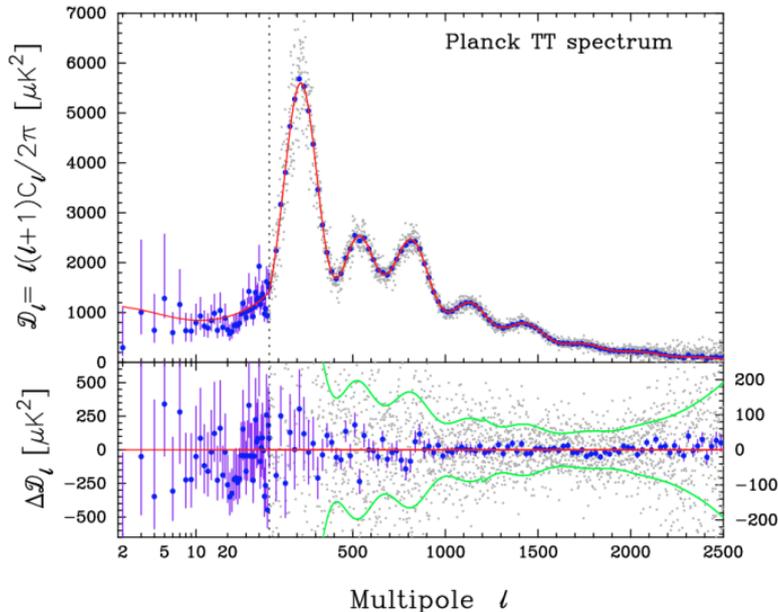
- Non gaussianité \Rightarrow limite supérieure contraignante sur le niveau de non-gaussianité
- "anomalies" WMAP
 - alignement quadrupôle-octopole
 - déficit de puissance à bas- ℓ
 - point froid
 - asymetrie Nord/Sud



Source: *Planck* collaboration

Au delà du modèle standard : test des hypothèses

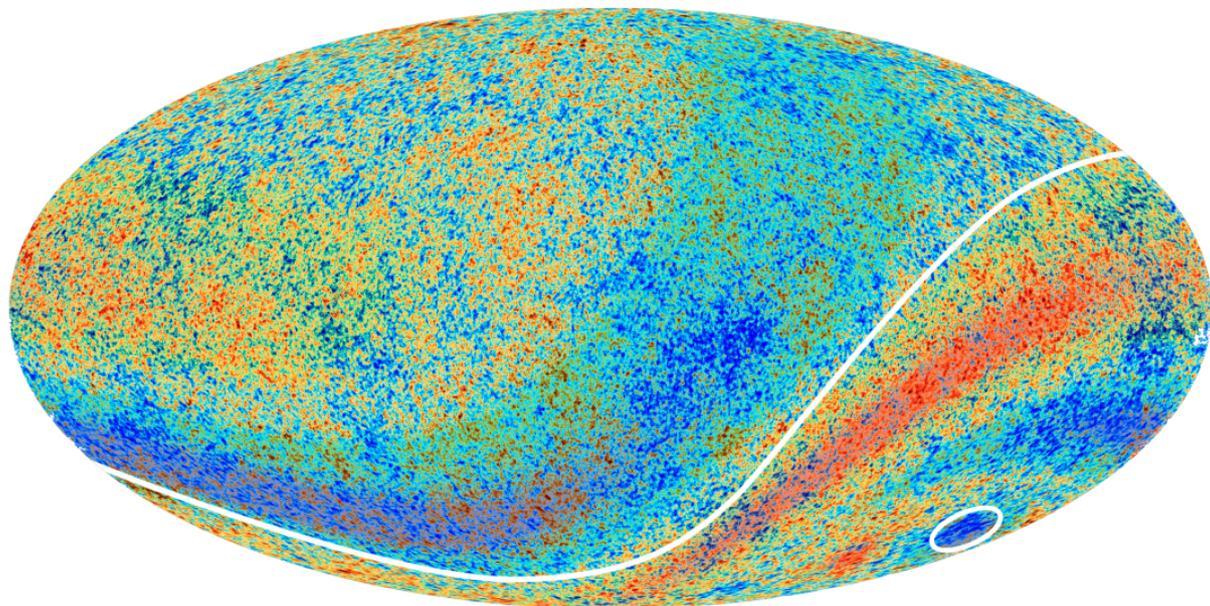
- Non gaussianité \Rightarrow limite supérieure contraignante sur le niveau de non-gaussianité
- "anomalies" WMAP
 - alignement quadrupôle-octopole
 - déficit de puissance à bas- ℓ
 - point froid
 - asymétrie Nord/Sud



Source: *Planck* collaboration

Au delà du modèle standard : test des hypothèses

- Non gaussianité \Rightarrow limite supérieure contraignante sur le niveau de non-gaussianité
- "anomalies" WMAP
 - alignement quadrupôle-octopole
 - déficit de puissance à bas- ℓ
 - point froid
 - asymétrie Nord/Sud



Source: *Planck* collaboration

