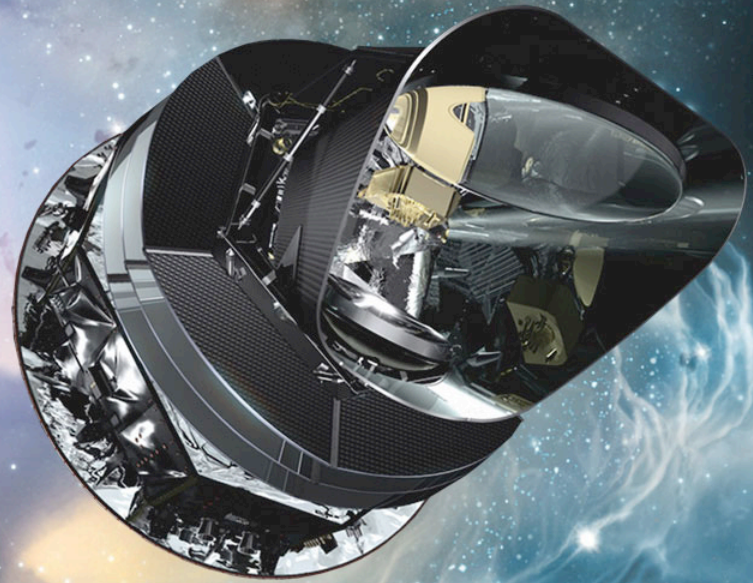


La mission PLANCK

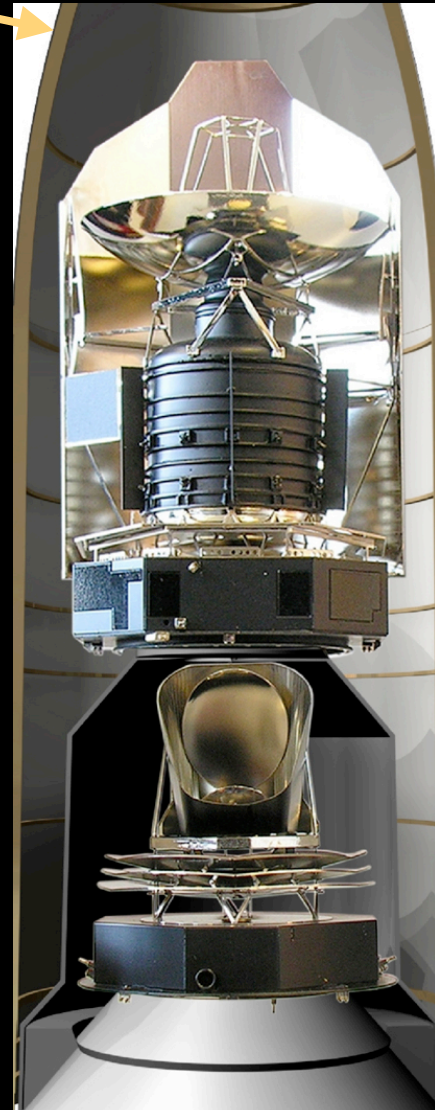
Premiers résultats cosmologiques

Cécile Renault

Laboratoire de Physique
Subatomique et de Cosmologie
Grenoble (rcecile@in2p3.fr)



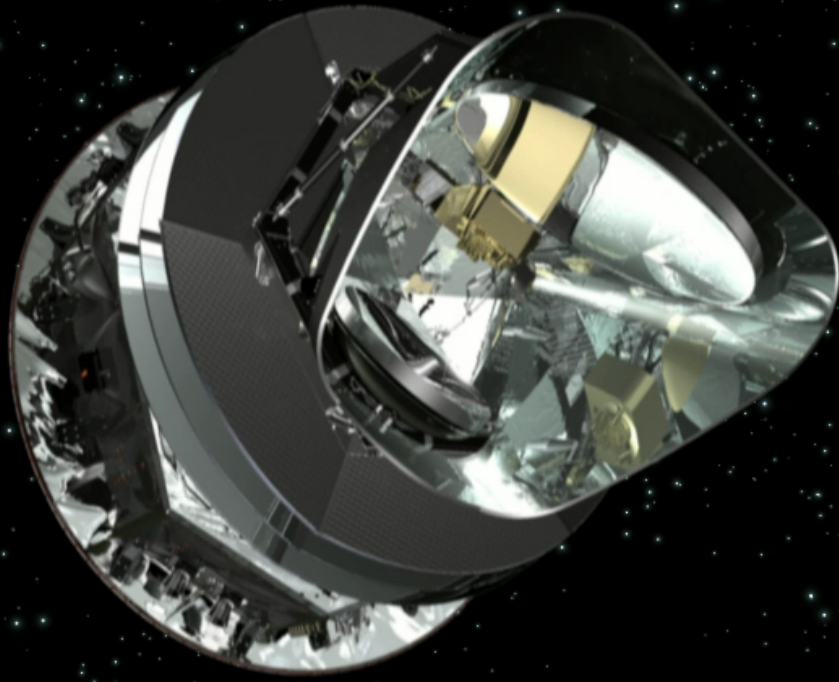
le 14 mai 2009,
après 16 années de
préparation



Herschel

Planck

Le satellite Planck



sensibilité de $2 \cdot 10^{-6} \Delta T / T$

mission ESA : premier satellite
européen dédié à l'étude du CMB

1m50 \varnothing télescope
→ Résolution jusqu'à 5'

2 instruments :

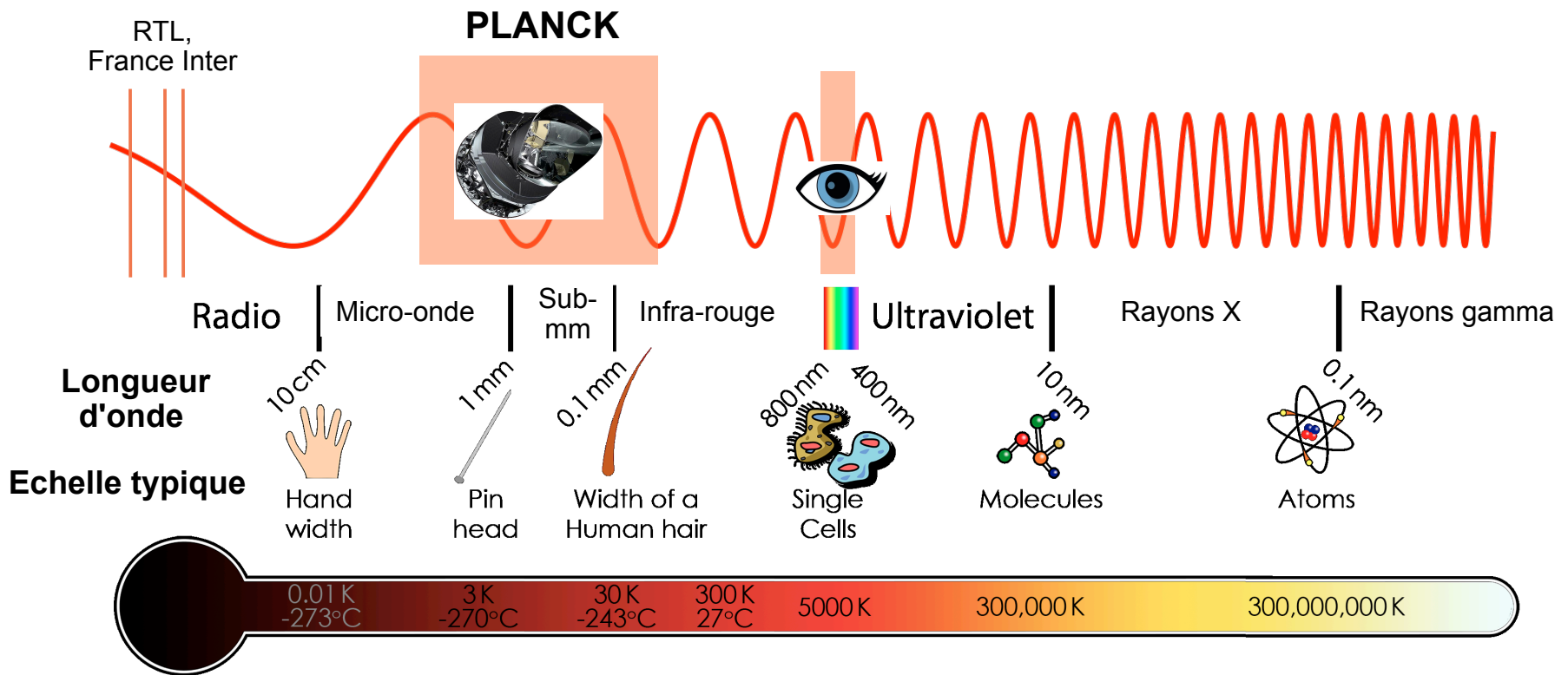
Low Frequency
Instrument

30 to 70 GHz @ 20 K
sous maîtrise d'oeuvre
italienne

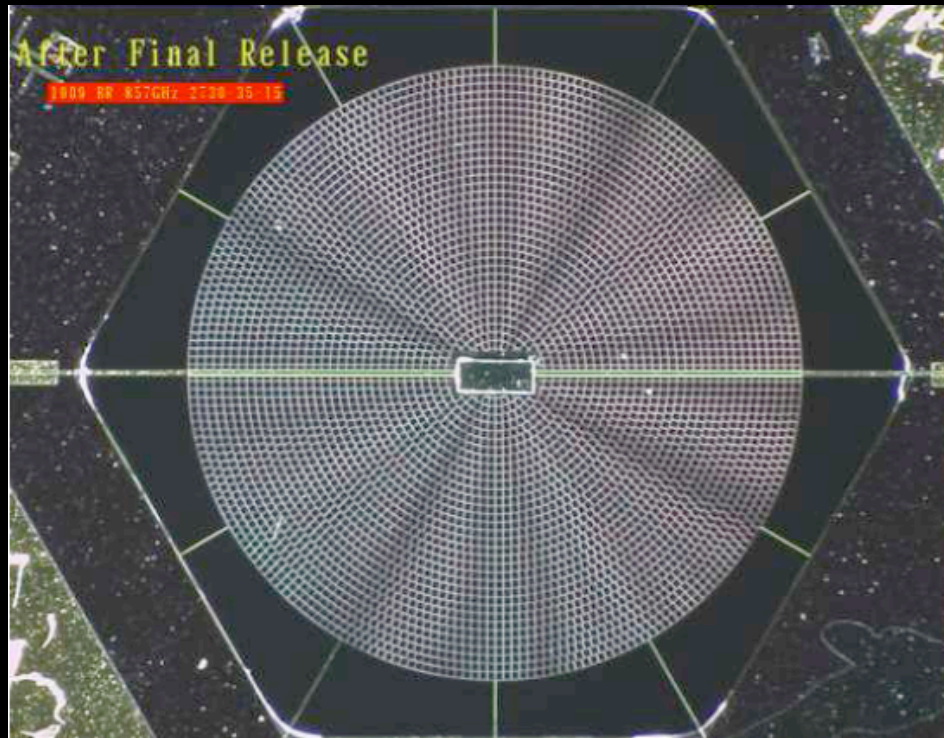
High Frequency
Instrument

100 to 857 GHz @ 0.1 K
sous maîtrise d'oeuvre
française

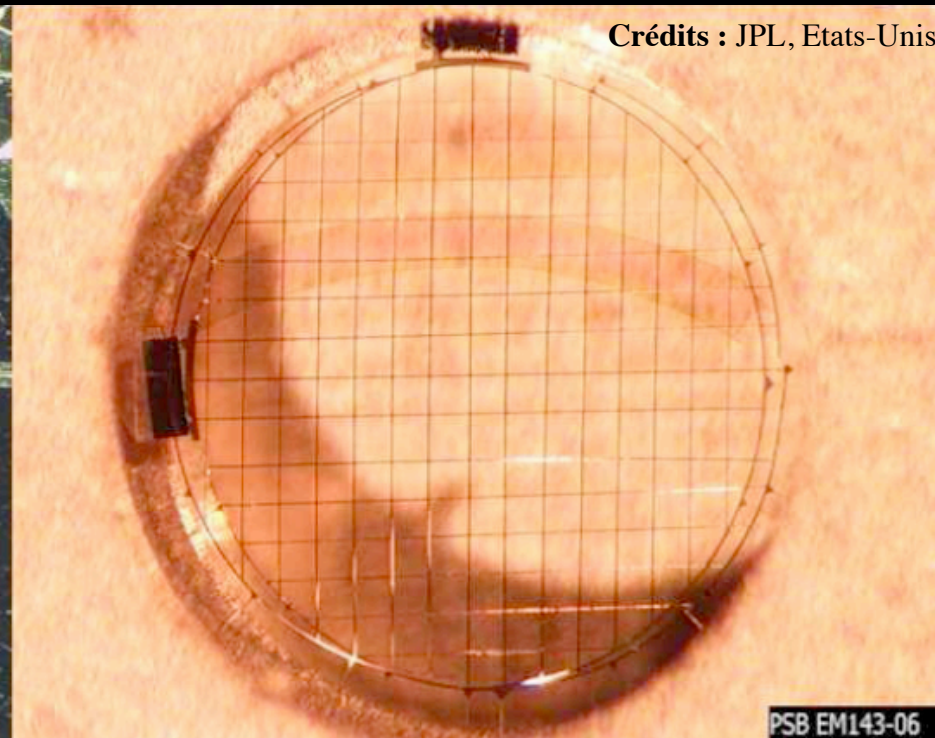
Le domaine submillimétrique



Détecteur = bolomètre

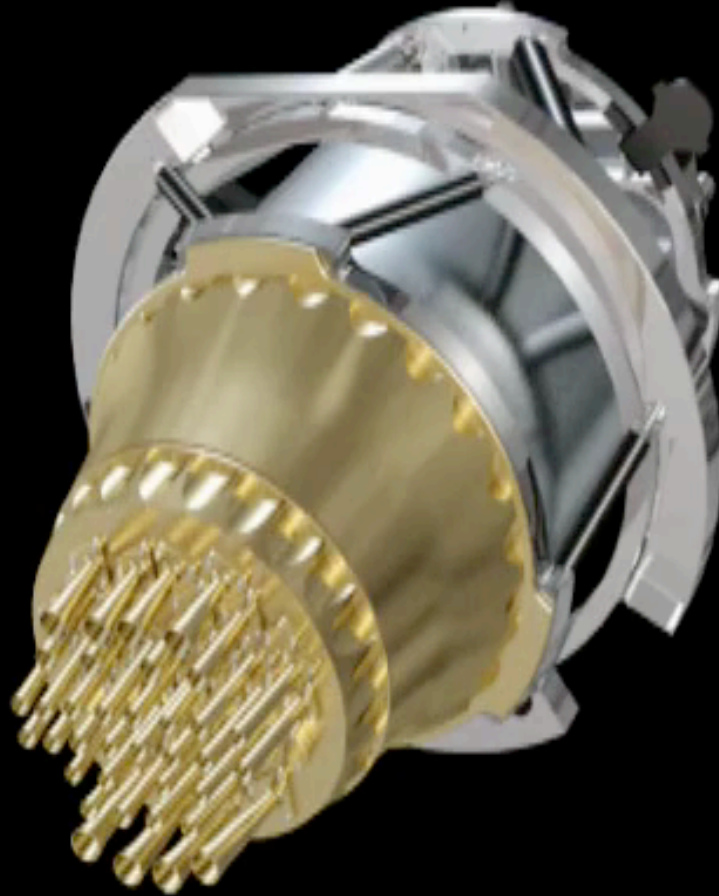


Bolomètre avec thermomètre au centre et grille en forme de toile d'araignée.
Ce détecteur est uniquement sensible à l'intensité du signal.



2 bolomètres avec thermomètre au bord et grille en forme de quadrillage superposés orthogonalement.
Ce détecteur est sensible à l'intensité et à la polarisation du signal : selon l'angle de polarisation du photon, il chauffera plutôt une grille ou l'autre.

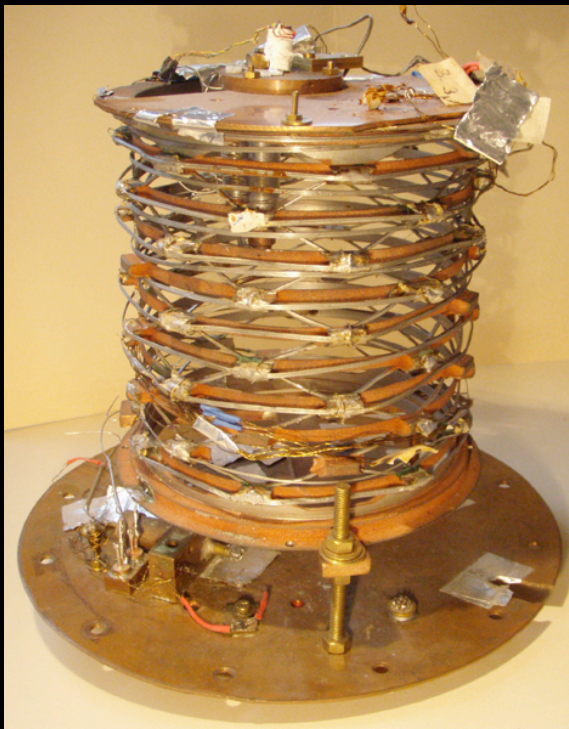
Le satellite Planck



Une forte implication régionale

- 3 laboratoires, 1 industriel
- 1995-2015 : instrumentation, analyse de données, astrophysique et cosmologie
- ~25 chercheurs, ingénieurs & techniciens

médaille de l'innovation du CNRS 2012



démonstrateur fait
au labo



modèle de vol
quelques années
plus tard



Planck, c'est qui ?

Un scientifique



Max Planck, 1899
Loi du corps noir

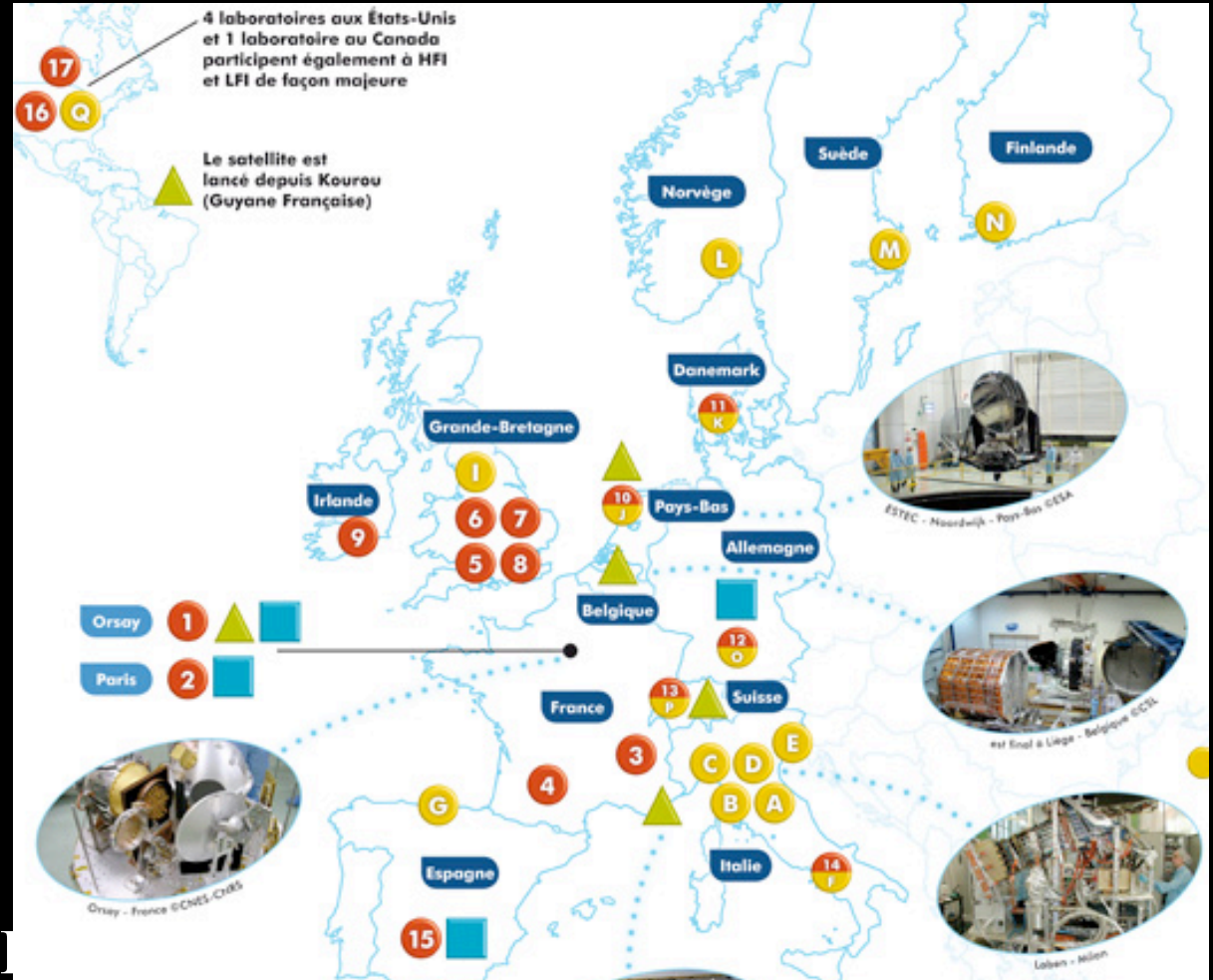
Un scientifique



Max Planck, 1899
Loi du corps noir

Planck, c'est qui ?

Plus de 500 chercheurs



+ de 70 laboratoires dont 9 français

Un scientifique

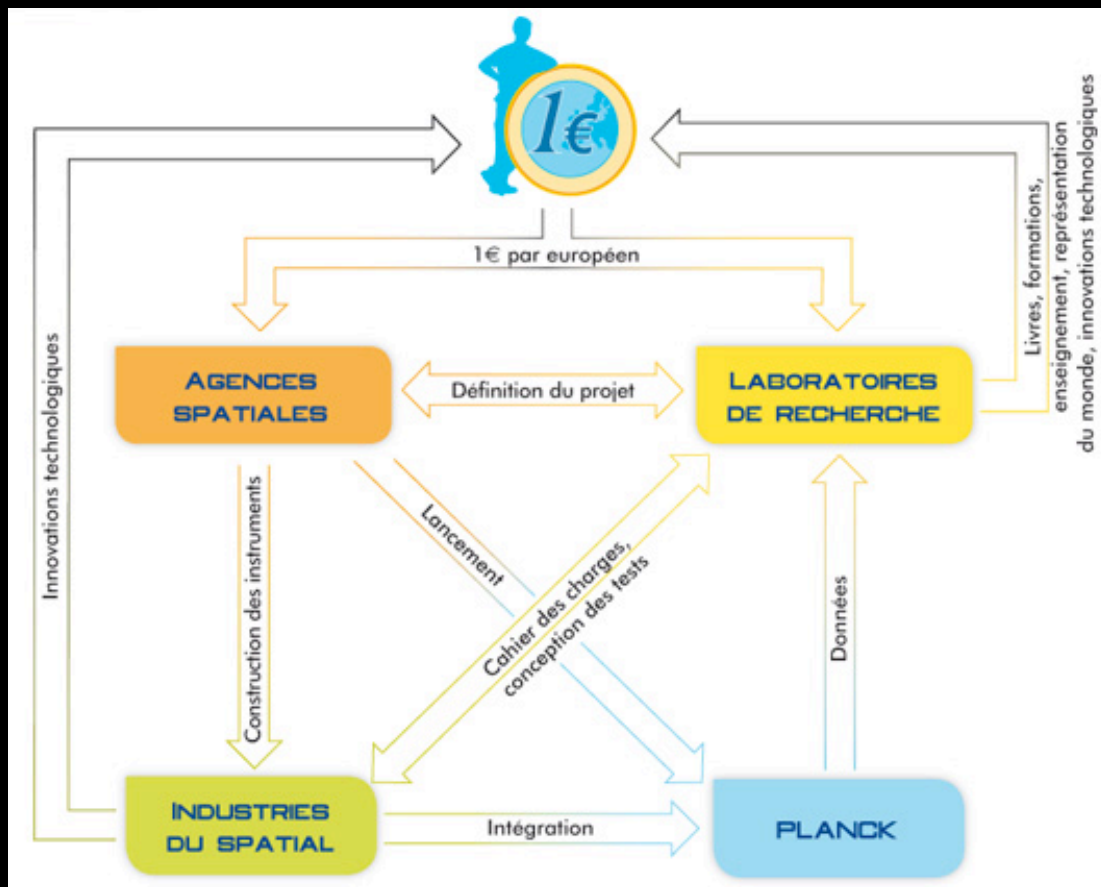


Planck, c'est qui ?

Plus de 500 chercheurs

4 laboratoires aux États-Unis
et 1 laboratoire au Canada
participent également à HFI
et LFI de façon majeure

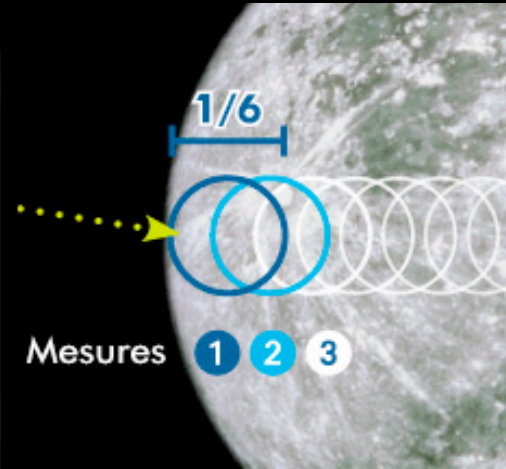
Des milliers de partenaires



ont 9 français

Planck, à 1.5 millions de km de la Terre, cartographie tout le ciel

Les différentes étapes de l'analyse des données



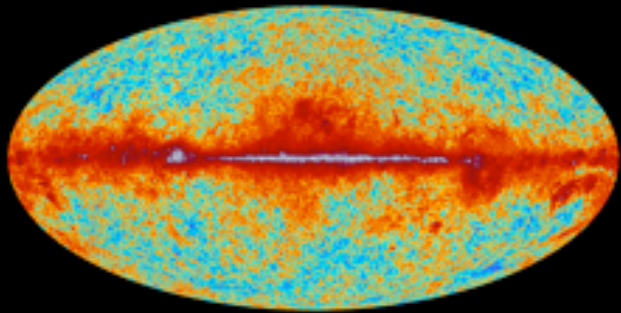
15 mois d'observation

2 ans d'analyse

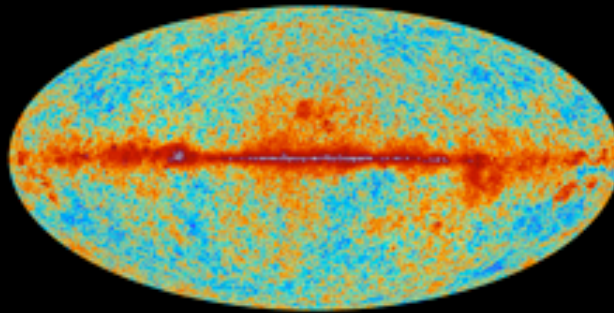
Résultats
21 mars 2013



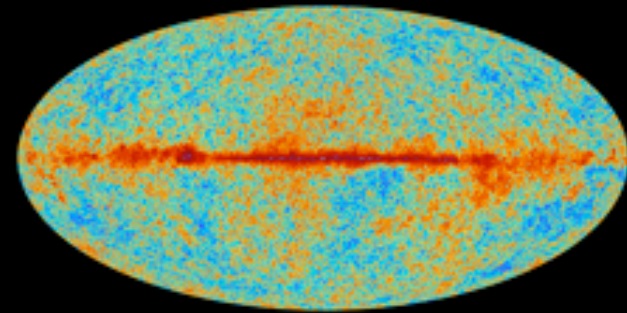
Le ciel vu par Planck



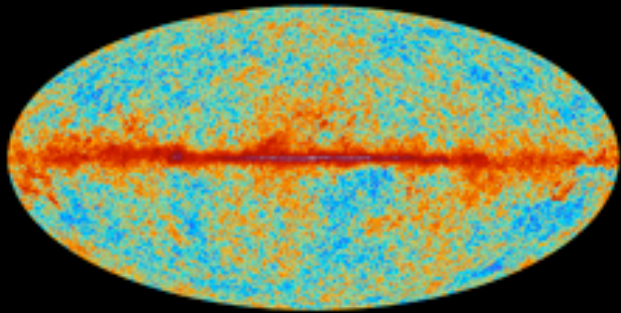
30 GHz



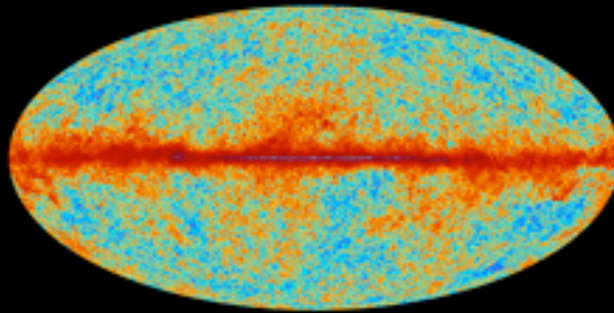
44 GHz



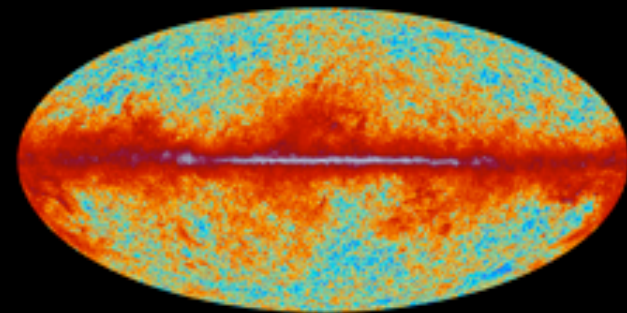
70 GHz



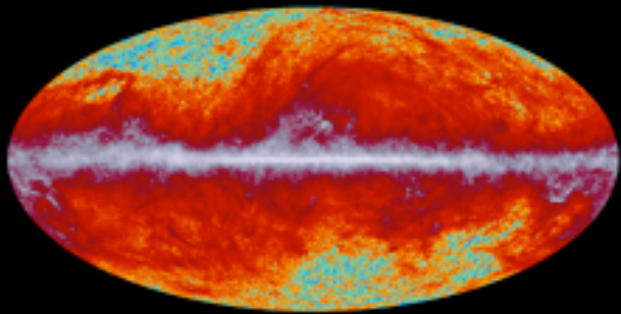
100 GHz



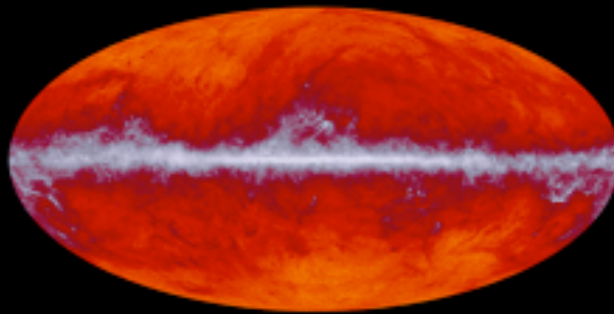
143 GHz



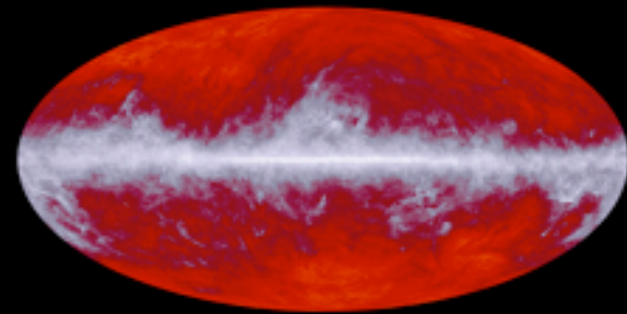
217 GHz



353 GHz



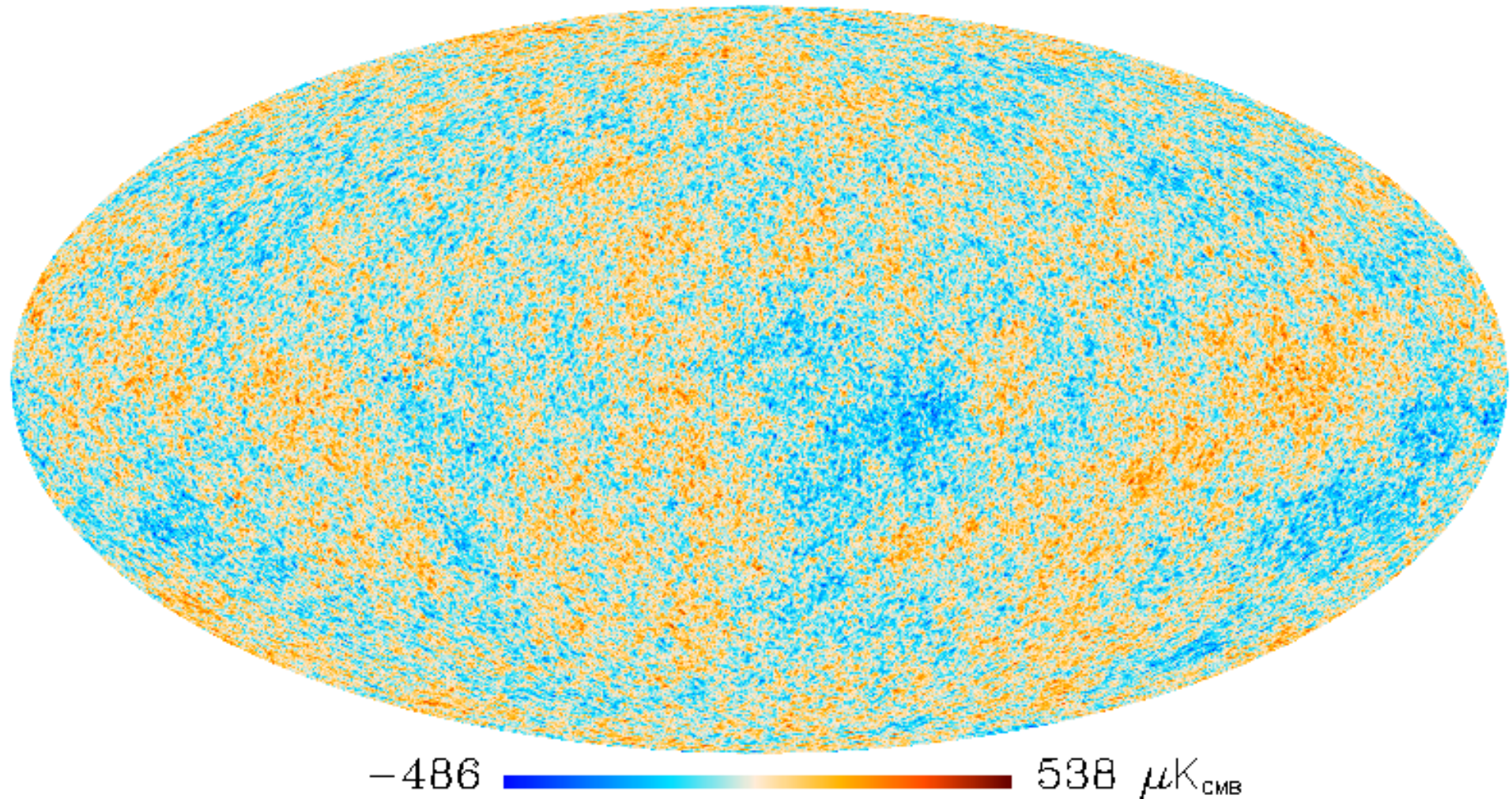
545 GHz



857 GHz

Séparation des composantes

Les anisotropies du rayonnement fossile



Carte des écarts par rapport à la valeur moyenne

Un millième de degré du plus chaud au plus froid

Sensibilité par pixel de quelques millionièmes de degré

Les anisotropies du rayonnement fossile

Ces cartes sont des mesures indépendantes de tout modèle cosmologique

−486  538 μK_{CMB}

Carte des écarts par rapport à la valeur moyenne

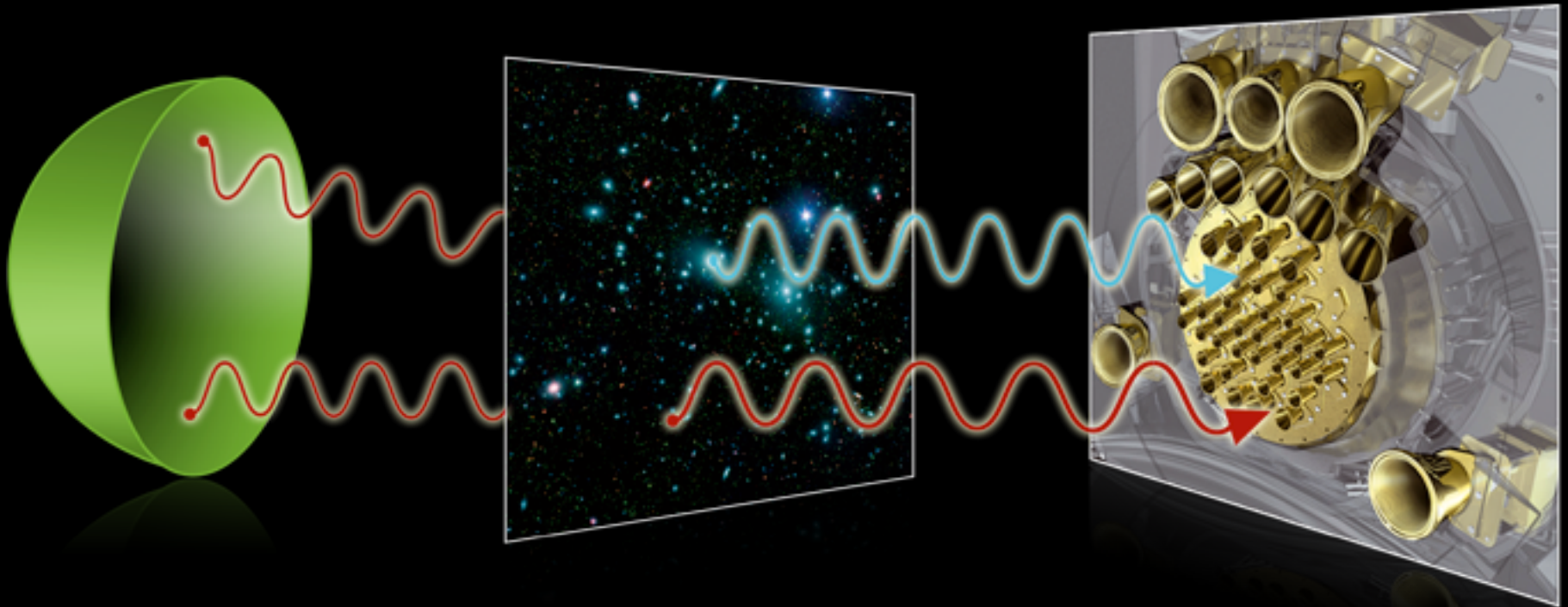
Un millième de degré du plus chaud au plus froid

Sensibilité par pixel de quelques millionièmes de degré

Le rayonnement fossile baigne l'univers

Correspond à une température de 2,7255 kelvin (COBE)

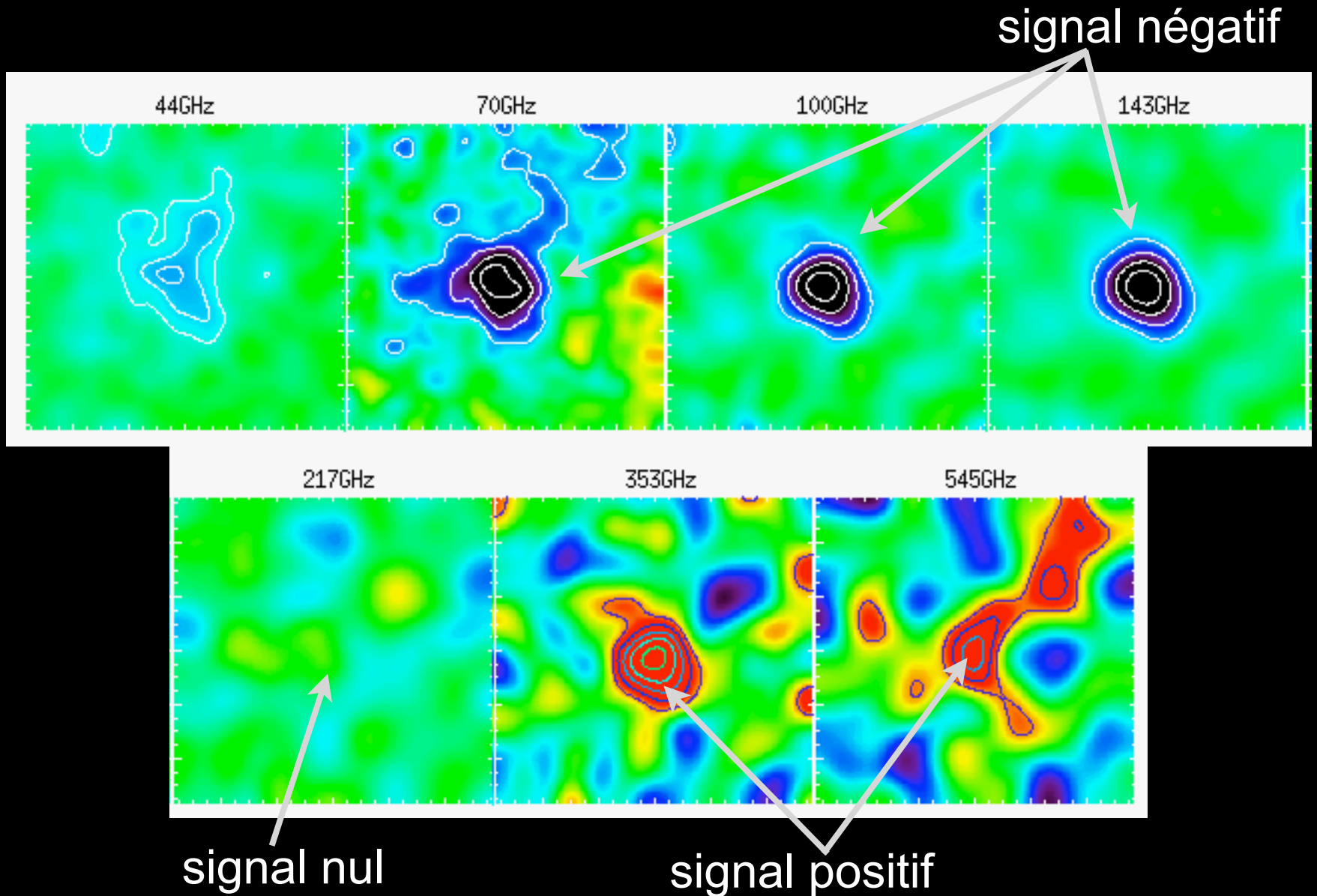
L'effet Sunyaev-Zeldovich



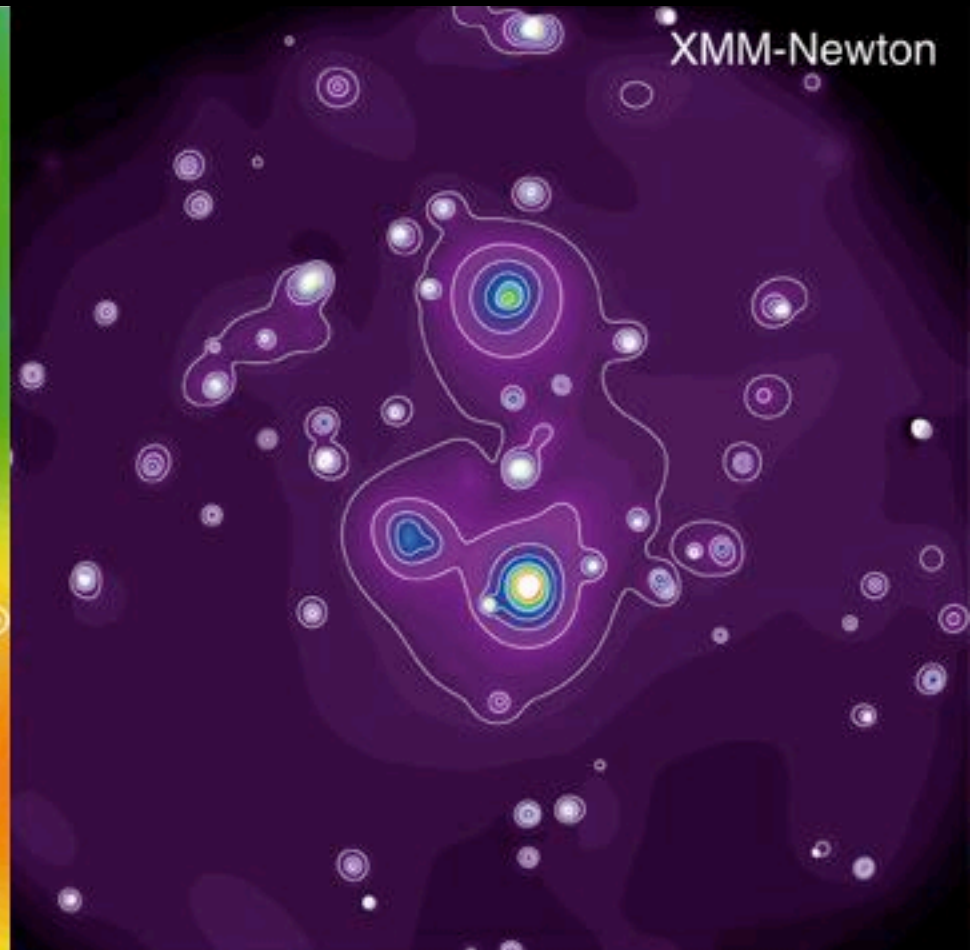
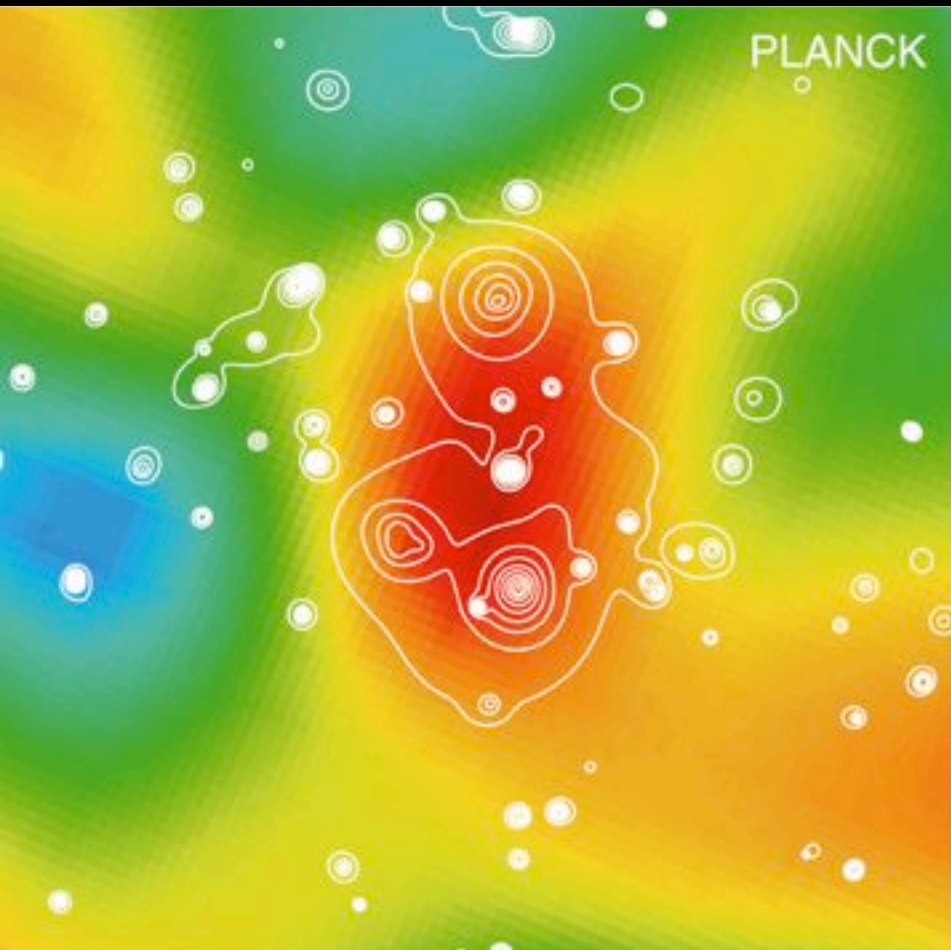
Les photons du rayonnement fossile diffusent sur le gaz chaud inter-amas et leur distribution en énergie est légèrement modifiée

- effet lié à la température et à la quantité d'électrons chauds
- indépendant de la distance des amas

Planck conçu pour voir l'effet SZ

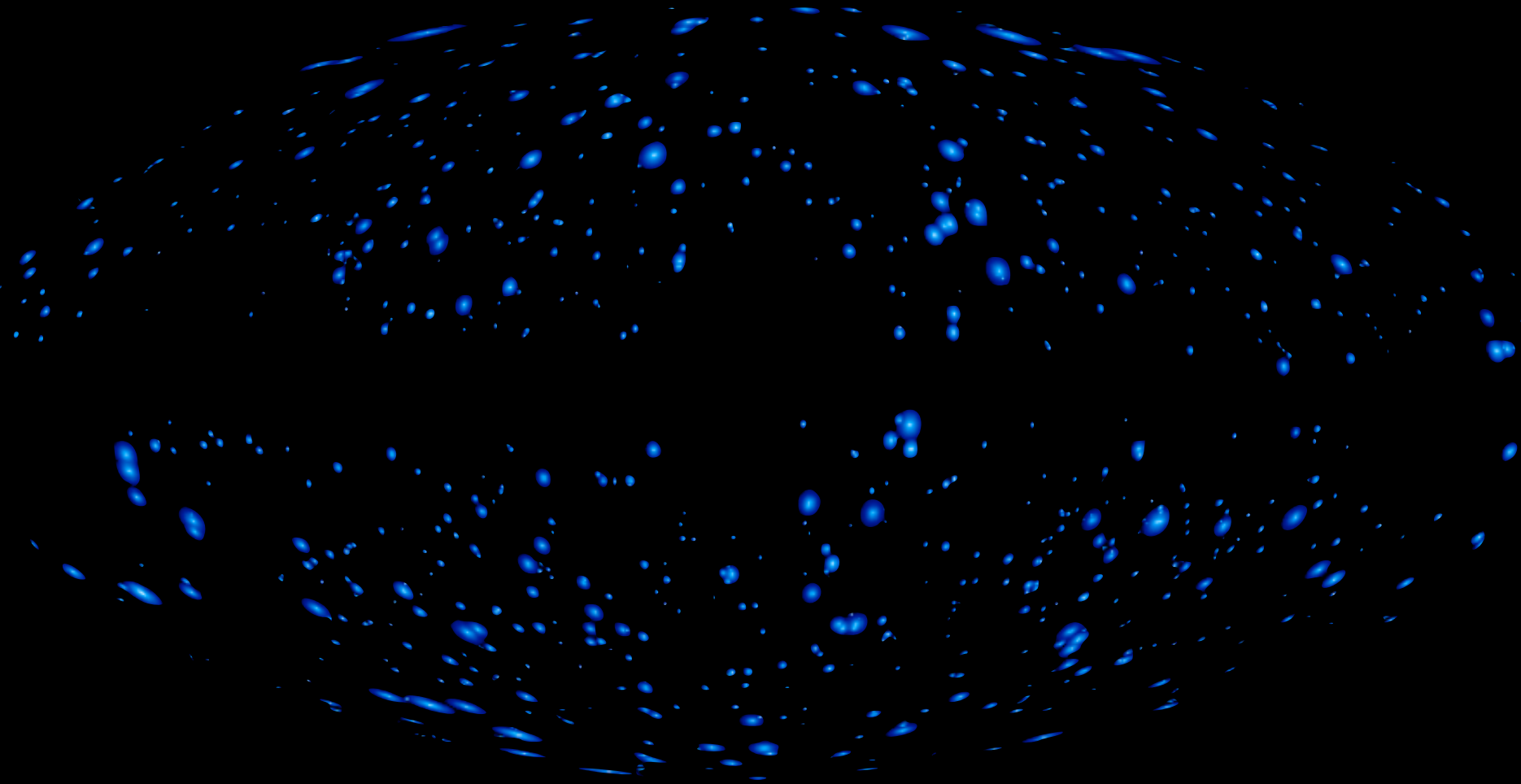


Complémentarité avec l'observatoire XMM-Newton



Observations complémentaires pour avoir la distance de l'objet

1227 amas et superamas (mars 2013)



- recherche sur 83.7% du ciel
- 683 amas connus + 178 amas découverts confirmés en X + 366 amas

Le rayonnement fossile

3 minutes

Électrons libres du plasma et photons
en interaction permanente :
Univers opaque et brûlant

Température > millions de degrés

pas d'image

380 000 ans

13,8 milliards d'années

Le rayonnement fossile

3 minutes

Électrons libres du plasma et photons
en interaction permanente :
Univers opaque et brûlant

Température > millions de degrés

pas d'image

Les électrons se lient aux protons
pour former les premiers atomes
d'hydrogène :
Univers transparent et chaud

380 000 ans

Température de milliers de degrés

image dans le visible

13,8 milliards d'années

Le rayonnement fossile

3 minutes

Électrons libres du plasma et photons
en interaction permanente :
Univers opaque et brûlant

Température > millions de degrés

pas d'image

Les électrons se lient aux protons
pour former les premiers atomes
d'hydrogène :

Univers transparent et chaud

Température de milliers de degrés

380 000 ans

image dans le visible

L'énergie des photons diminue dans
l'univers en expansion :

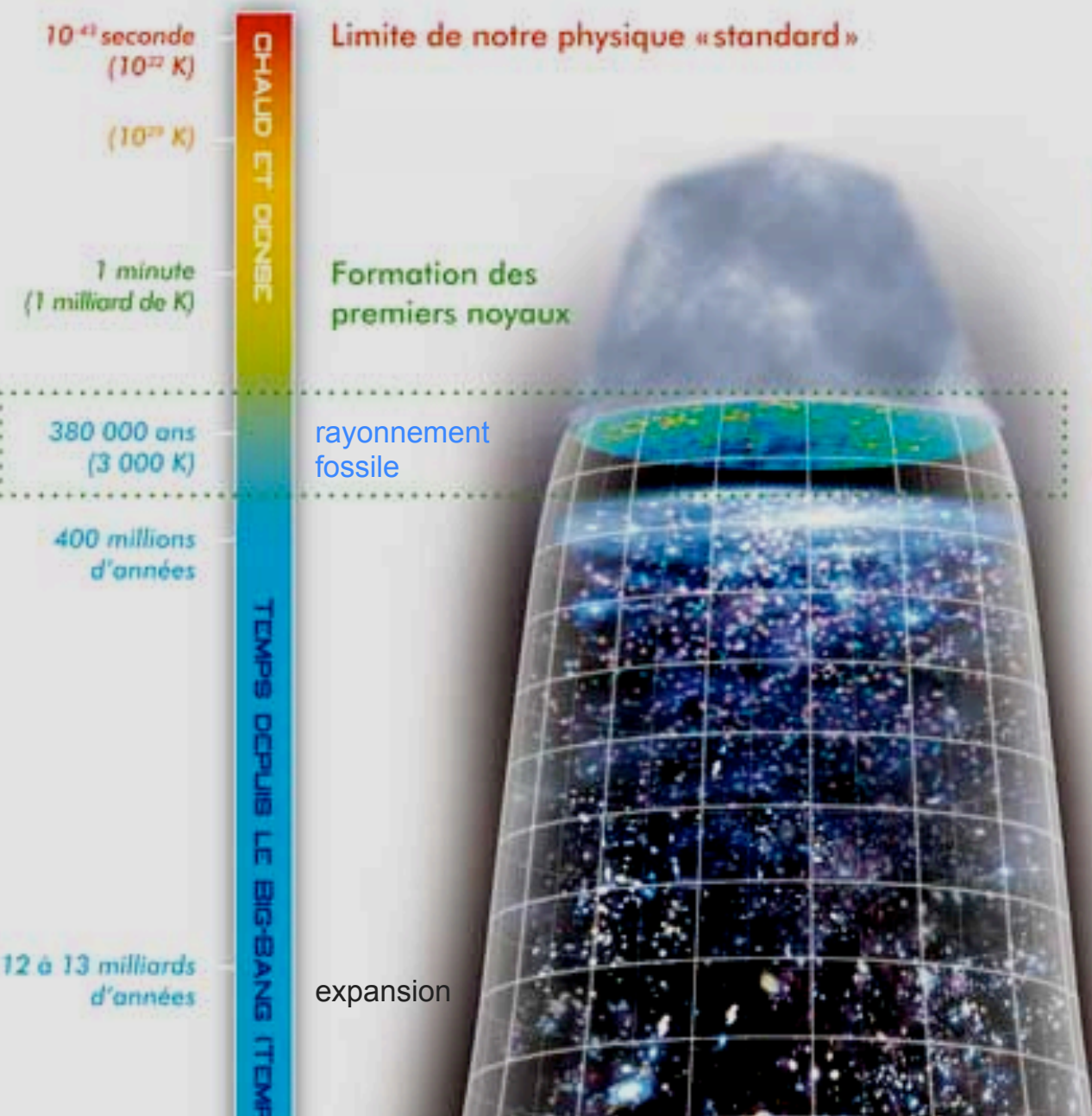
Univers transparent et froid

Température de quelques
degrés au-dessus du zéro
absolu (2.725 K aujourd'hui)

image dans le submillimétrique

13,8 milliards d'années

Le modèle du Big-Bang

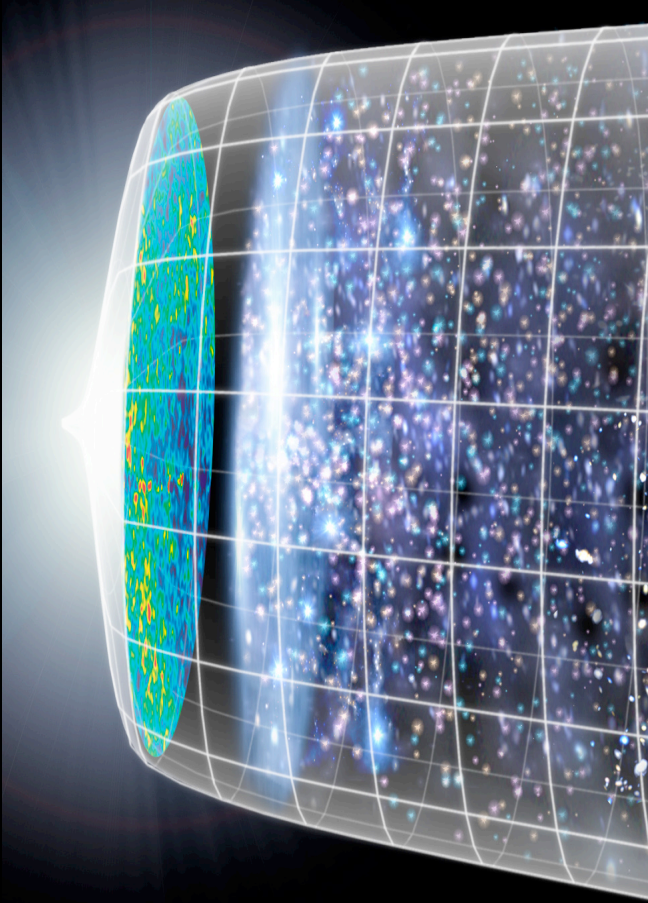


Etayé par de nombreuses, fiables et indépendantes observations : base parfaitement solide.

Cosmologie

- 2 hypothèses :
- même physique partout
 - Univers isotrope et homogène

Le modèle de concordance des années 2000



Modèle du Big-Bang

Univers en expansion régi par les lois de la Relativité Générale

+

Composition de l'Univers aujourd'hui

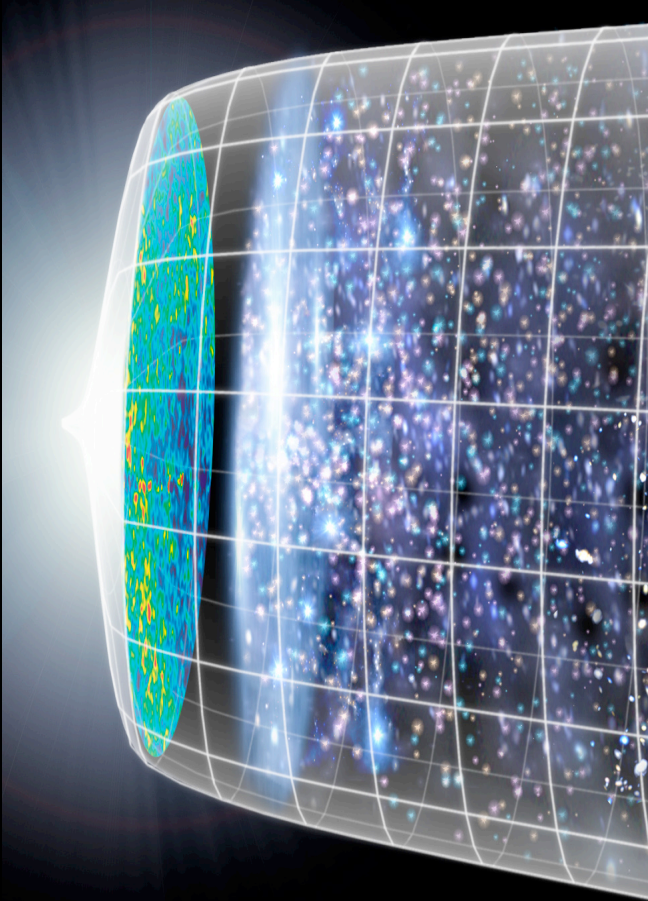
- négligeable : 3 neutrinos
- minoritaire : matière ordinaire
- majoritaire : matière noire froide
- constante cosmologique

+

Épisode d'inflation

Dilatation exponentielle de l'Univers « juste après » le Big-Bang

Le modèle de concordance des années 2000



Modèle du Big-Bang

Univers en expansion régi par les lois de la Relativité Générale

+

Composition de l'Univers aujourd'hui

- négligeable : 3 neutrinos
- minoritaire : matière ordinaire
- majoritaire : matière noire froide
- constante cosmologique

+

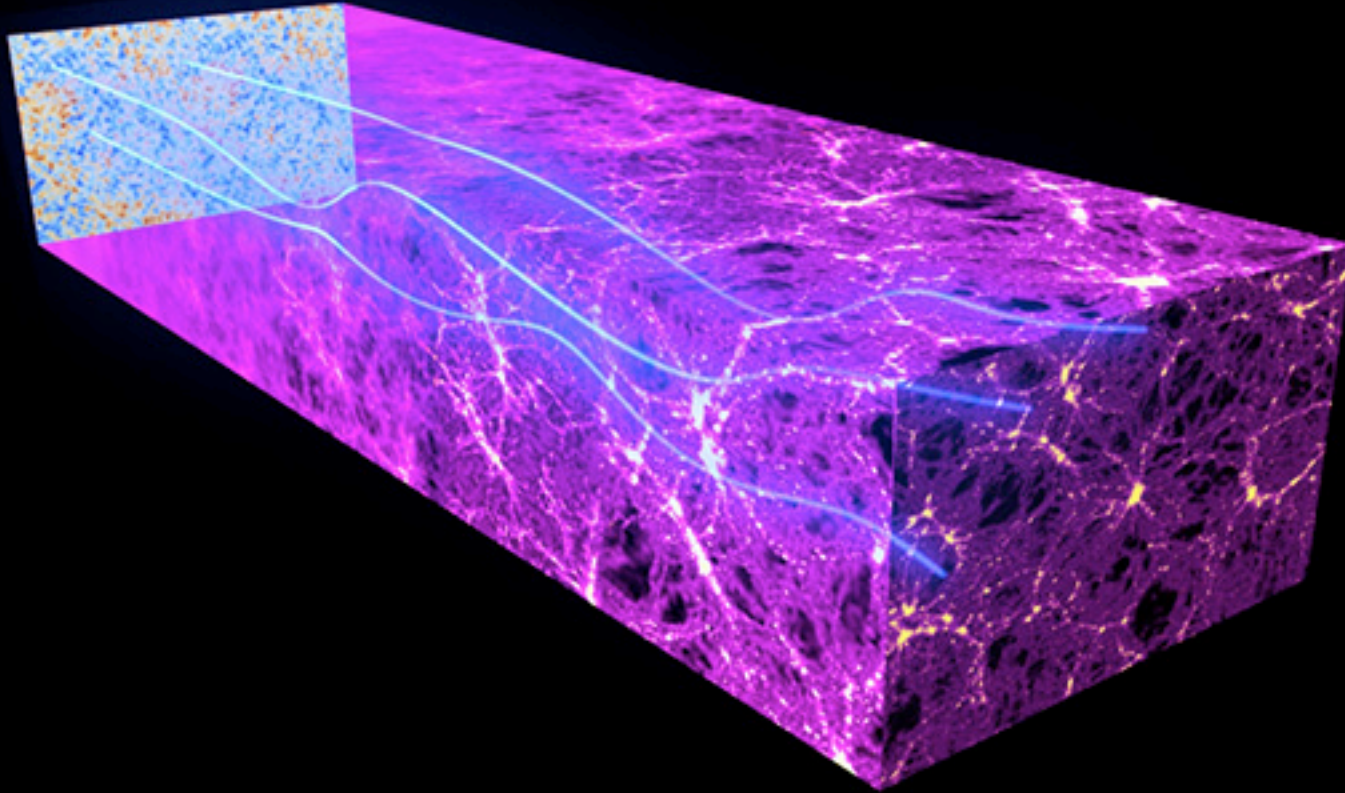
Épisode d'inflation

Dilatation exponentielle de l'Univers « juste après » le Big-Bang

Objectif de Planck : *tester ce modèle*

→ le mettre en défaut ou l'affiner en précisant le contenu (au %) et le modèle d'inflation

Ce qui s'est passé après 380 000 ans

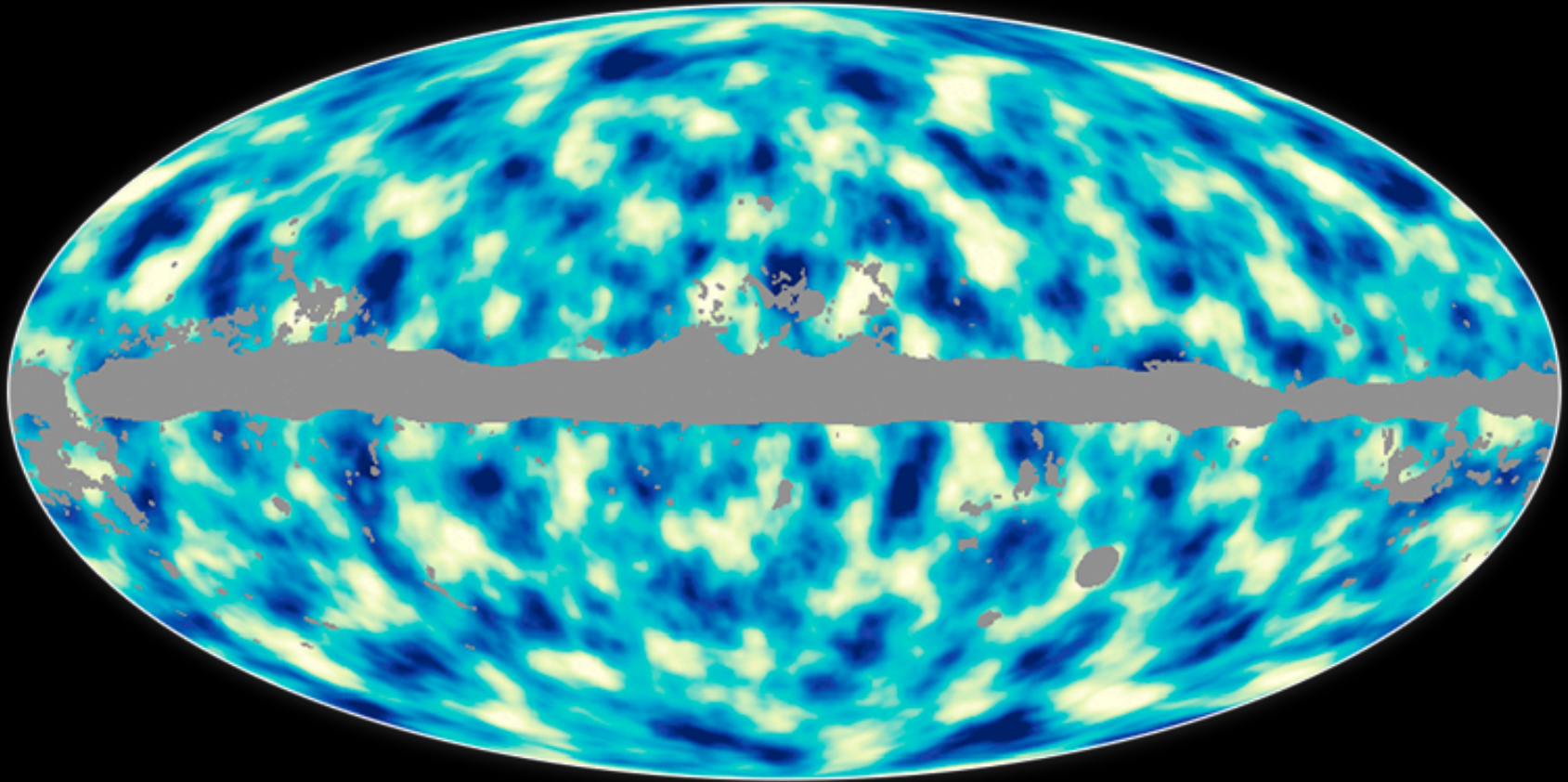


La masse présente entre le rayonnement fossile et nous va brouiller l'image.

→ il faut prendre en compte cet effet

→ il donne une **information sur la distribution de la masse 2-3 milliards d'années après** l'émission du rayonnement fossile

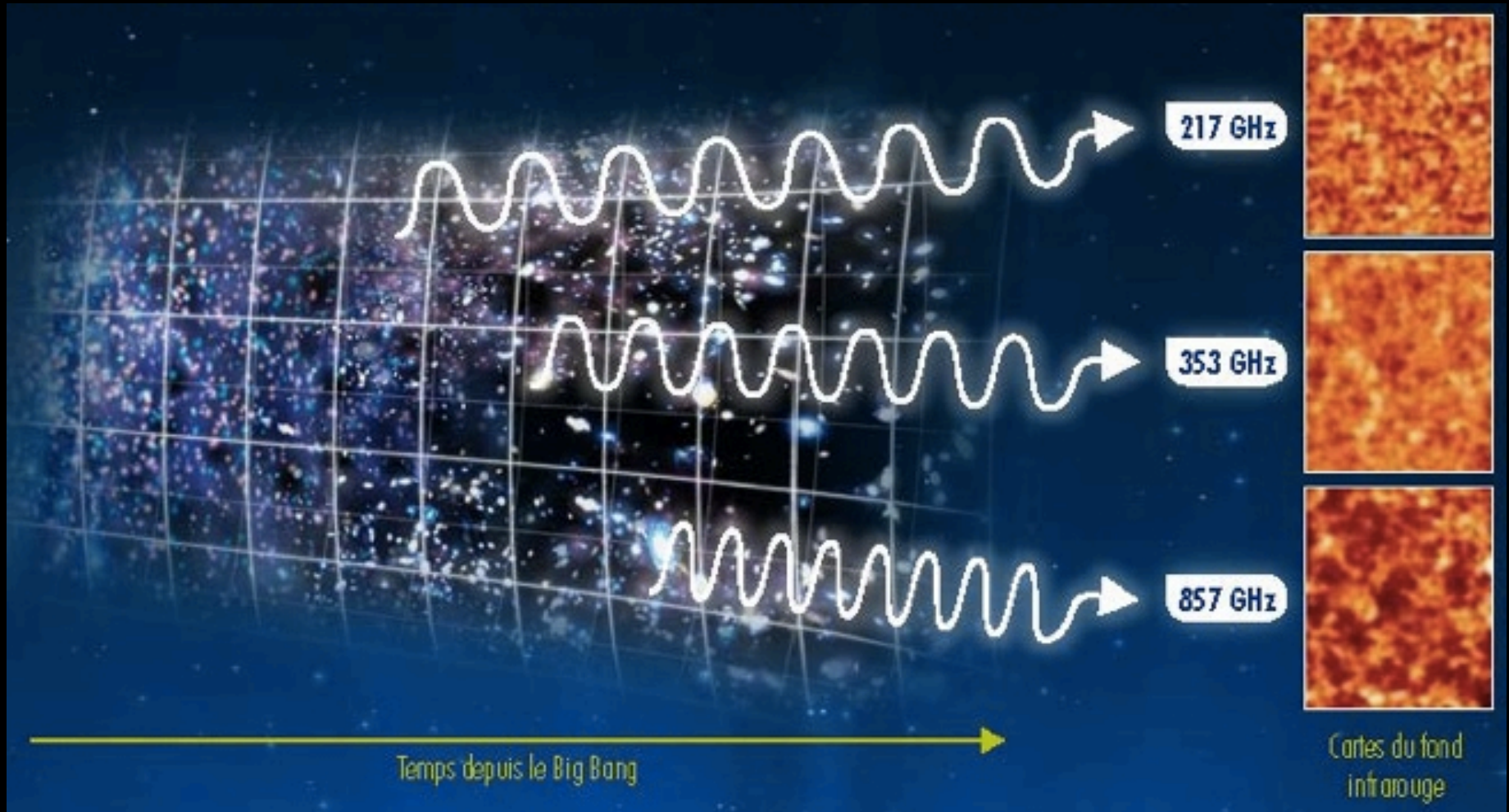
Carte de la distribution de masse intégrée sur la ligne de visée



Carte du potentiel gravitationnel issue de la déflexion moyenne subie par le rayonnement fossile

Rayonnement fossile par Planck =
image TRES PRECISE des structures 380 000 ans après le Big-Bang
+ image des structures quelques milliards d'années d'expansion et d'évolution plus tard

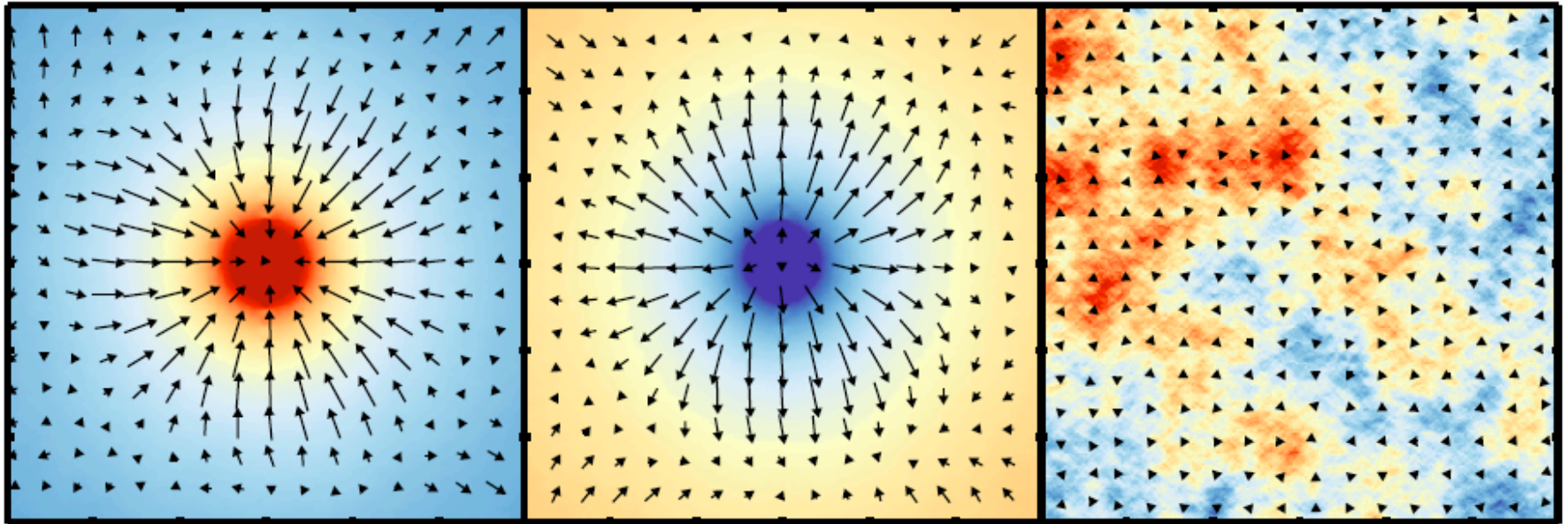
Structures du fond infrarouge



Projection de l'histoire de la formation des étoiles pendant 10 milliards d'années

Identification des sources

On compare la distribution de masse par effet de lentille gravitationnelle à la distribution de matière du fond diffus infrarouge.



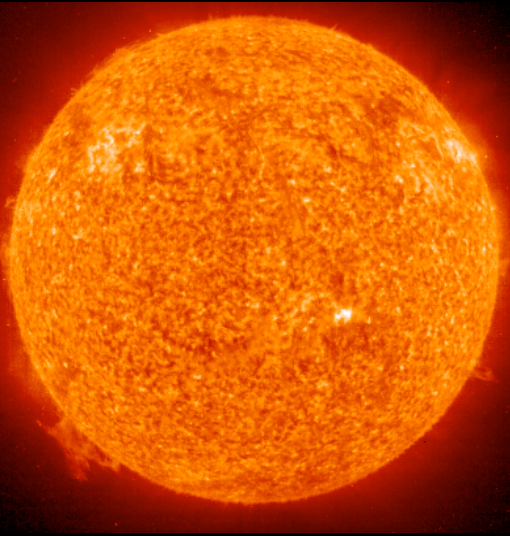
Les concentrations de galaxies focalisent la lumière du rayonnement fossile

Les “vides” dispersent la lumière du rayonnement fossile

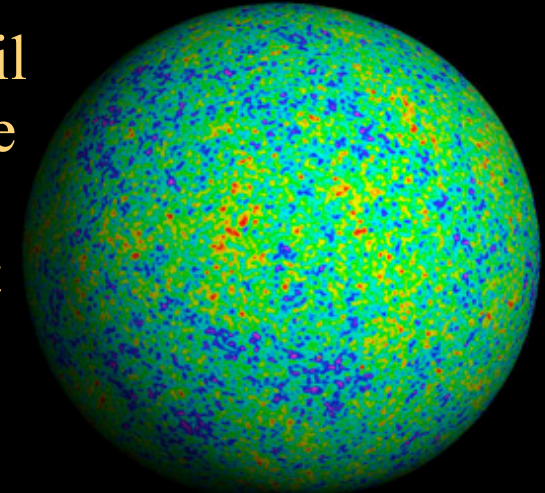
Pas de mouvement global là où il y a un niveau moyen de nombre de galaxies

distribution de masse représentative de la distribution des galaxies

Ce qui s'est passé avant 380 000 ans



De même que la surface du Soleil révèle ce qui se passe au cœur de l'étoile, le rayonnement fossile garde l'empreinte du contenu et de l'évolution de l'Univers depuis le Big-Bang



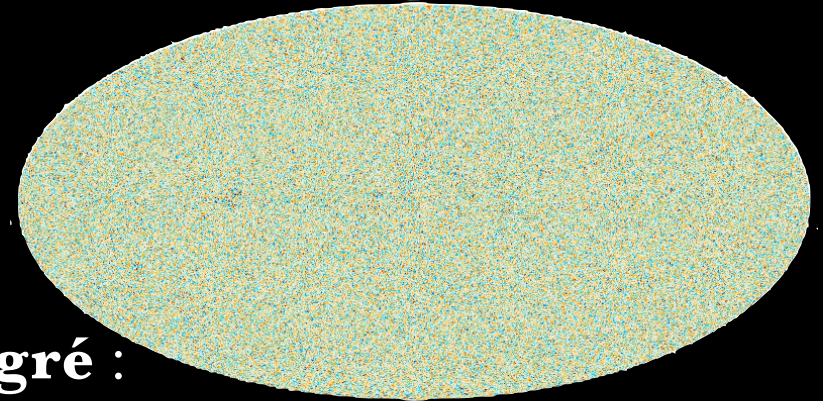
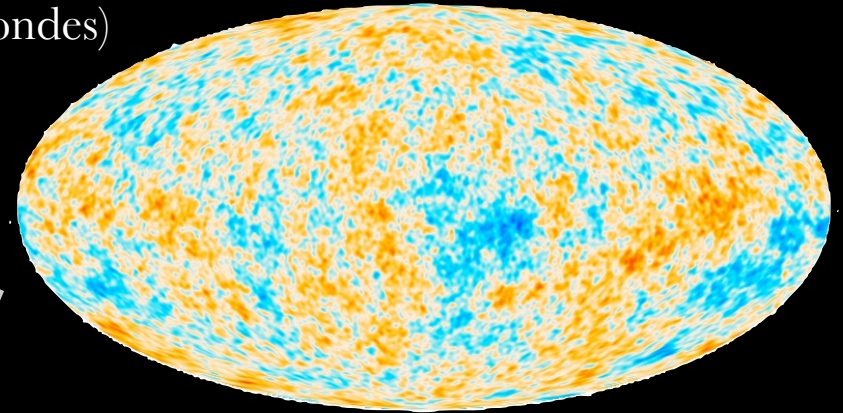
Tegmark

→ en étudiant *très précisément* les détails de ces inhomogénéités, on accède à une description précise des « **paramètres cosmologiques** » (géométrie de l'espace, vitesse d'expansion, quantité de matière ordinaire et de matière noire etc.)

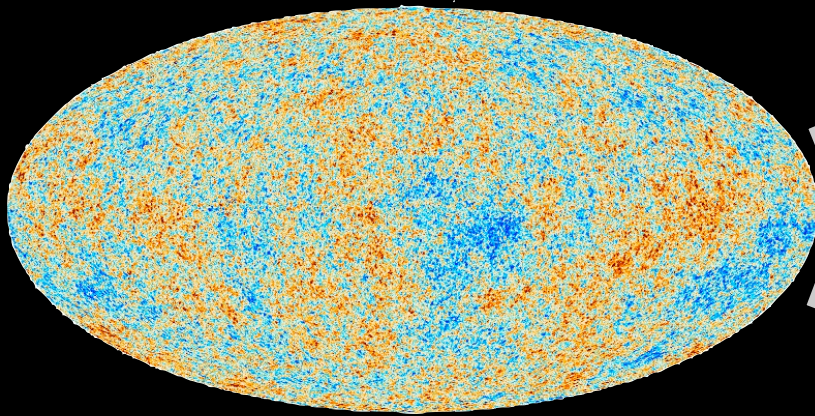
... d'où découlent toutes les informations (âge de l'Univers, contenu en énergie noire mais aussi masse totale de neutrinos par exemple)

Informations aux différentes échelles

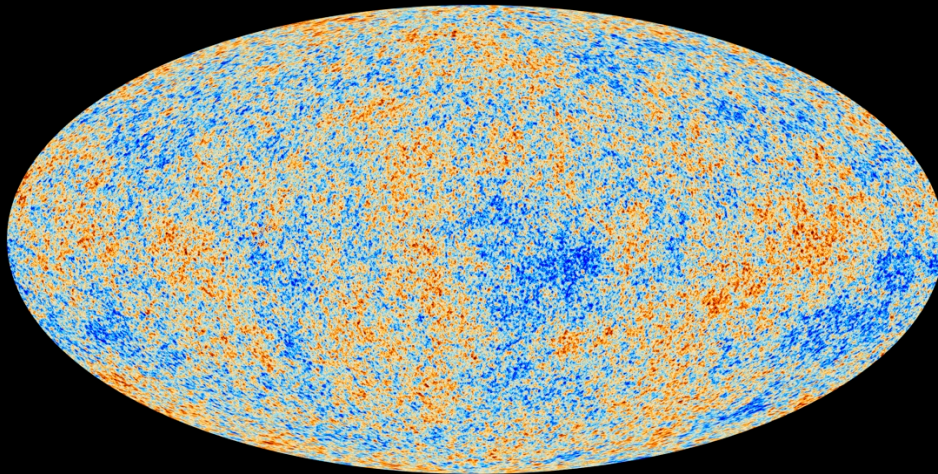
Echelles > 1 degré :
empreinte “originelle” des fluctuations quantiques
(Univers entre 10^{-30} et 10^{-12} secondes)



Echelles < 1 degré :
contenu de l'univers
(oscillations acoustiques dans un rayon $< ct$ à $t=380\,000$ ans soit ~ 150 Mpc aujourd'hui) + lentille gravitationnelle

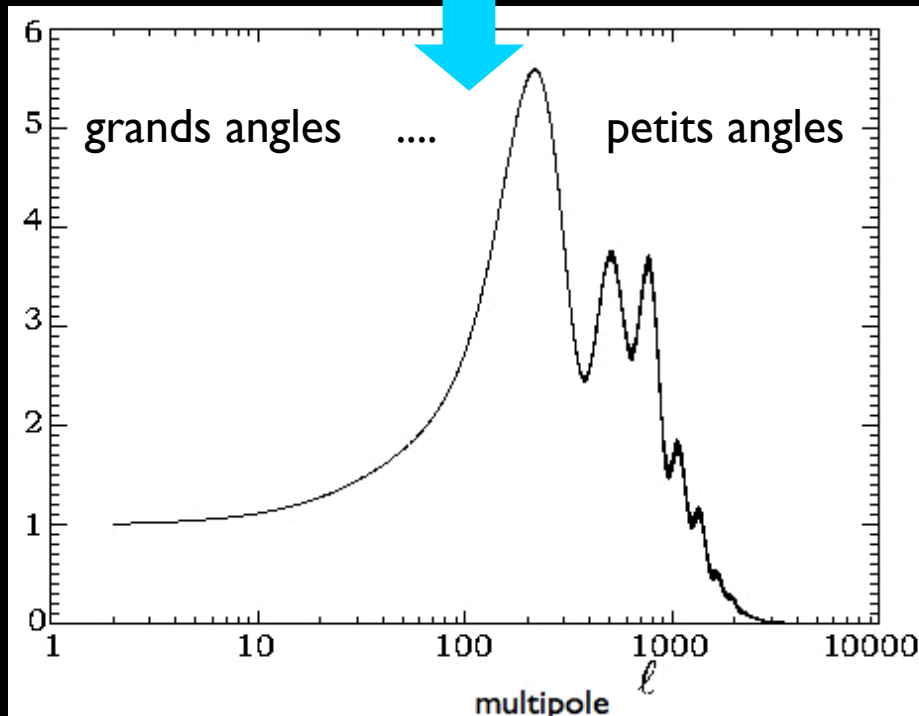


De la carte au spectre de puissance



hypothèse de “**gaussianité**” :
lien particulier entre taille et
amplitude des grumeaux

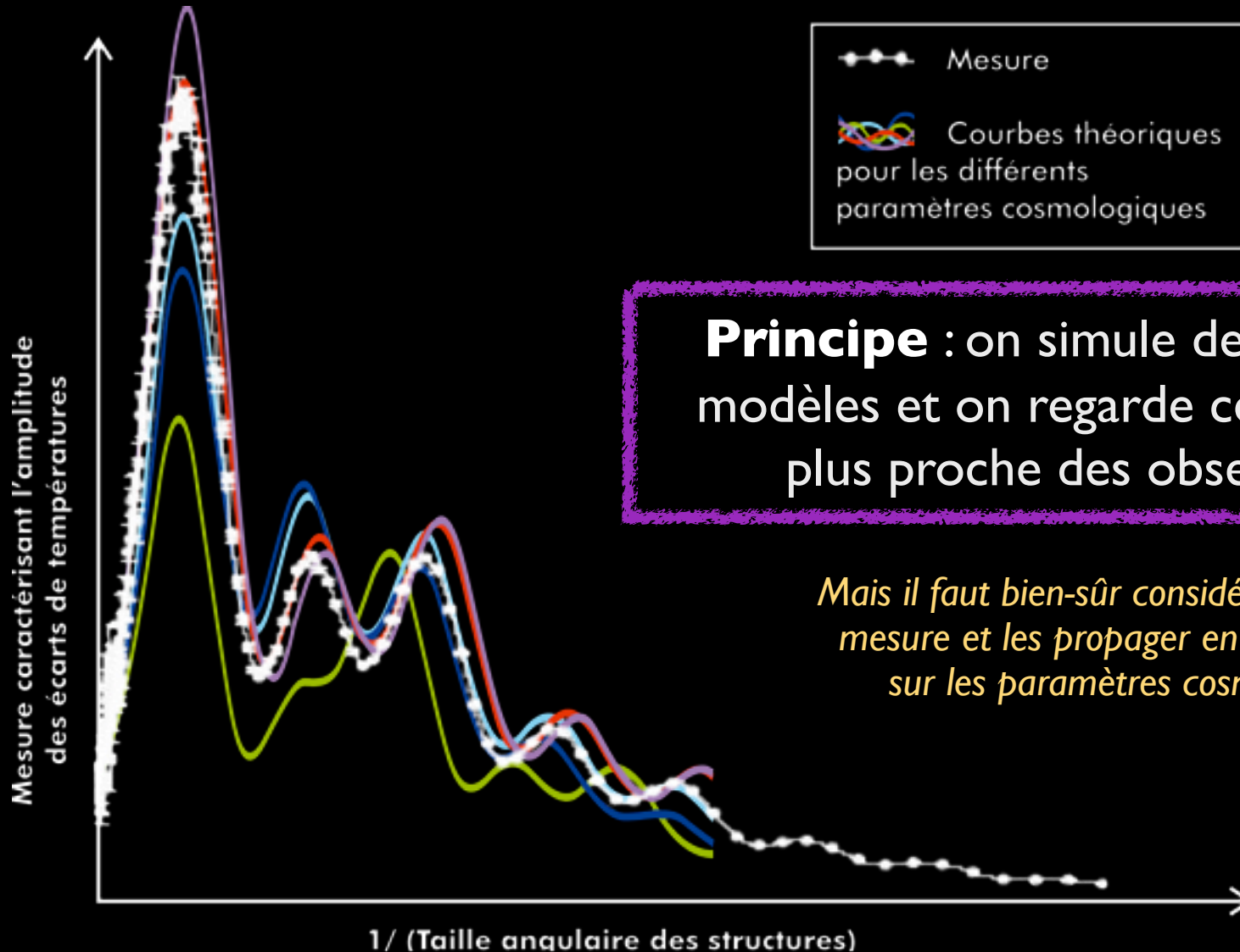
**Statistique de l'amplitude
des anisotropies en fonction
de leur taille**



⇒ *toutes les informations
statistiques contenues dans
la carte à 2 dimensions sont
contenues dans une courbe à
une dimension.*

Du spectre aux paramètres

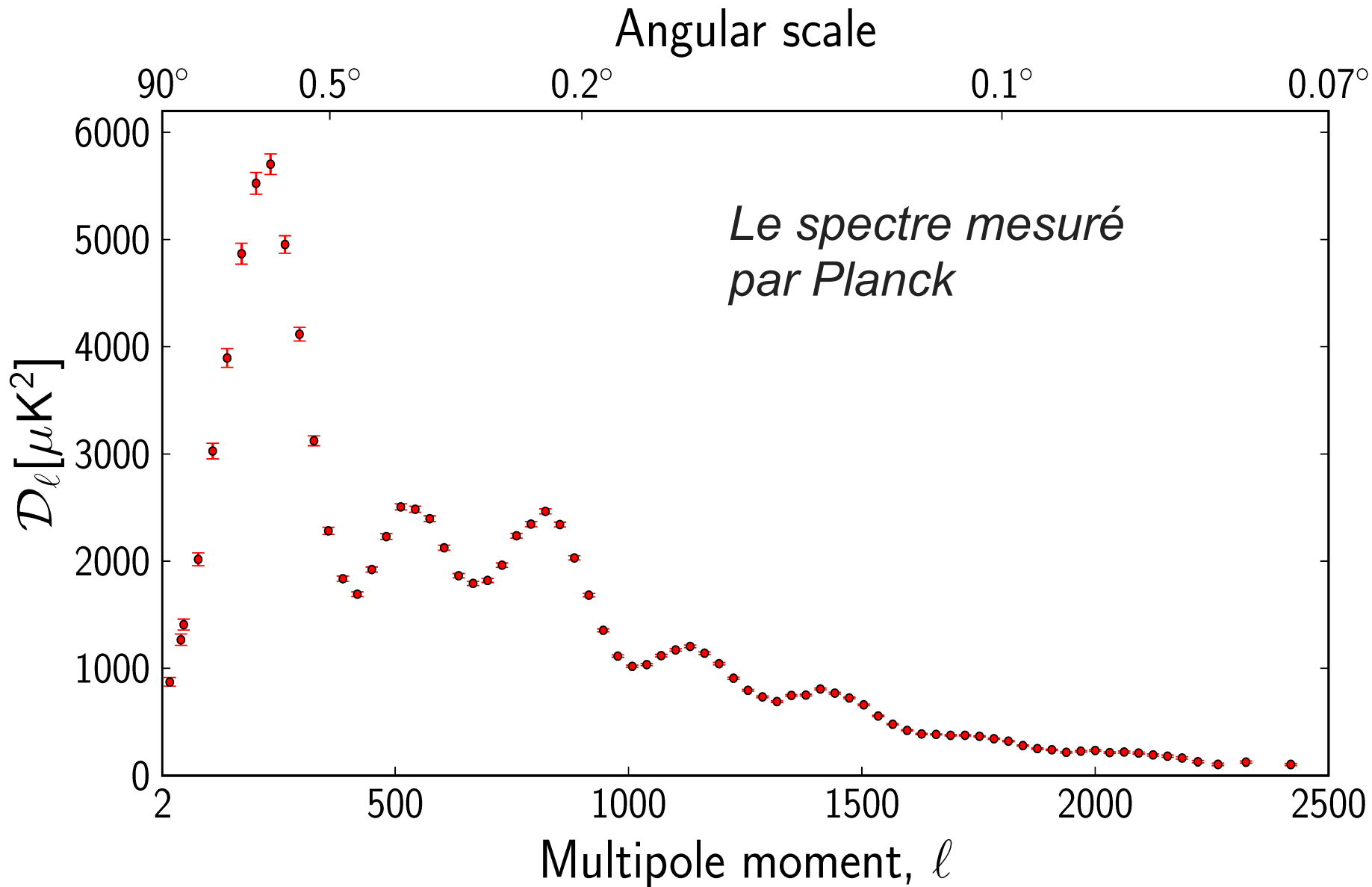
Paramètres cosmologiques = contenu, géométrie, fluctuations primordiales



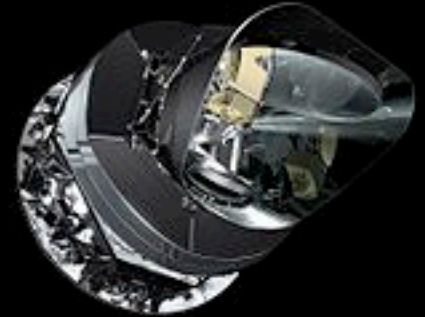
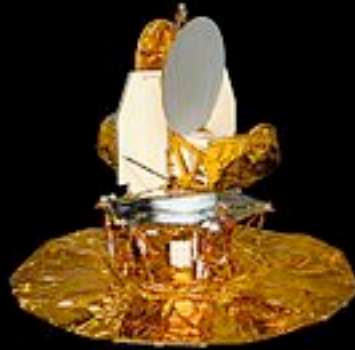
Principe : on simule des millions de modèles et on regarde celui qui est le plus proche des observations.

Mais il faut bien-sûr considérer les erreurs de mesure et les propager en terme d'erreurs sur les paramètres cosmologiques ...

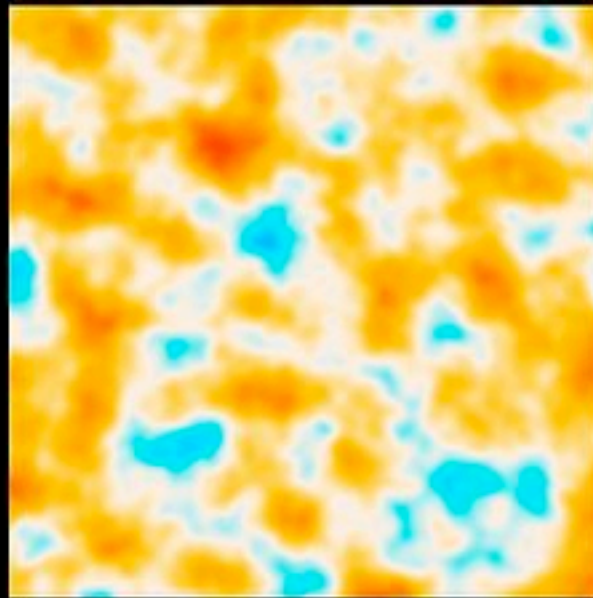
Le spectre en température



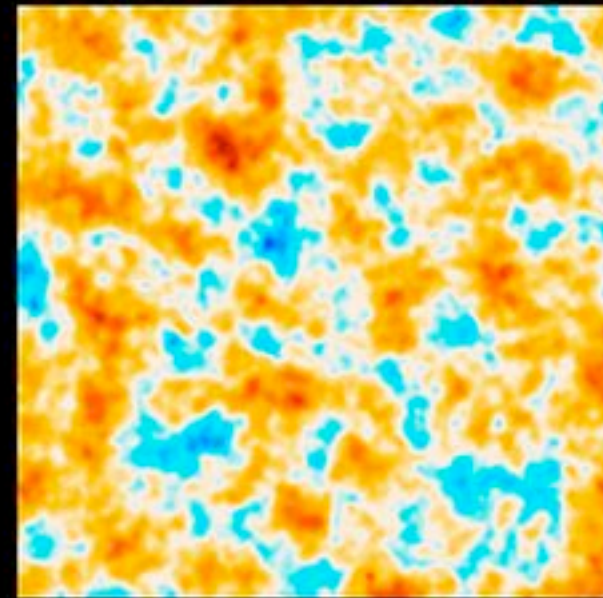
Fluctuations : de la découverte à l'étude fine



COBE

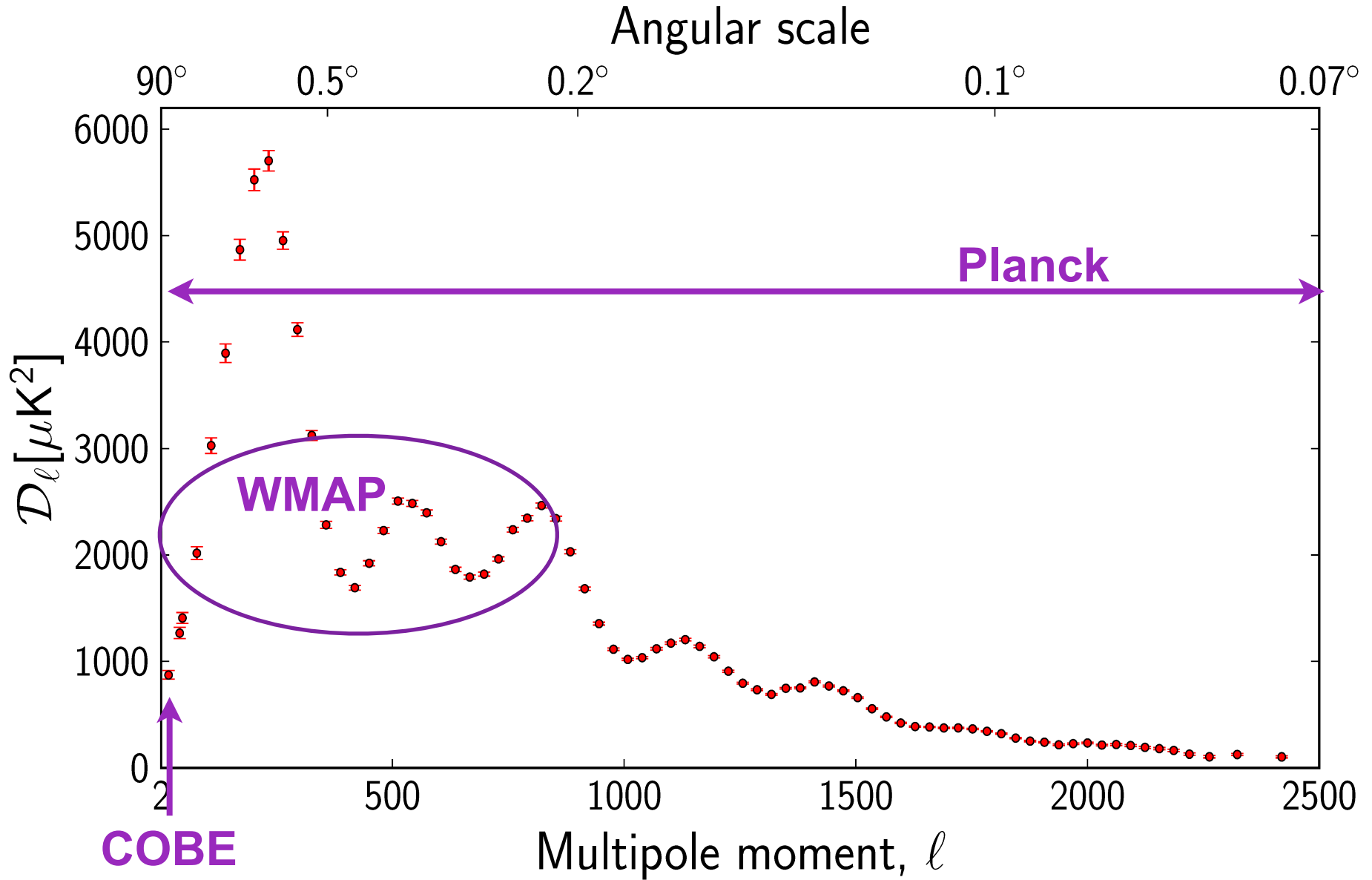


WMAP

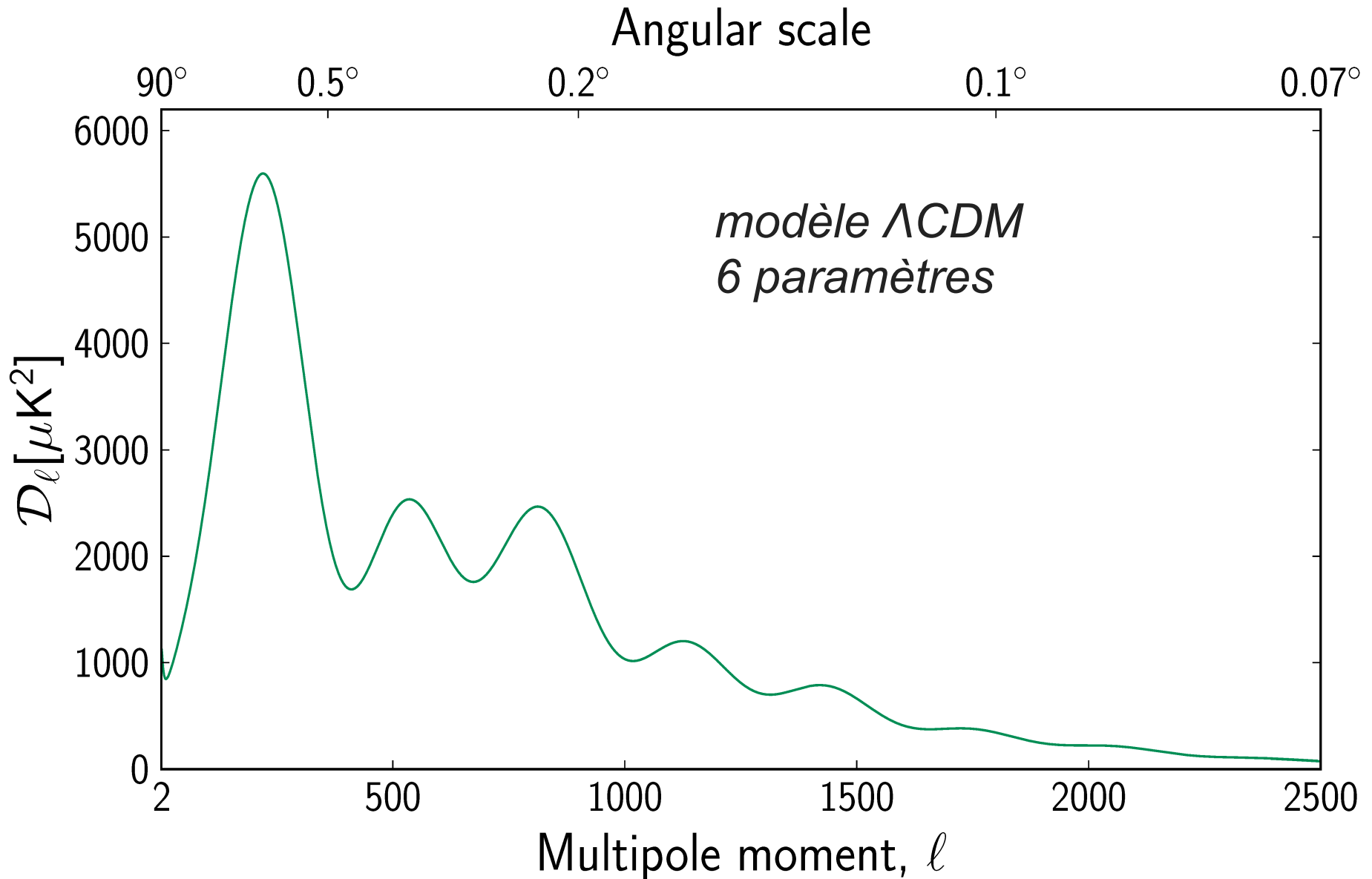


Planck

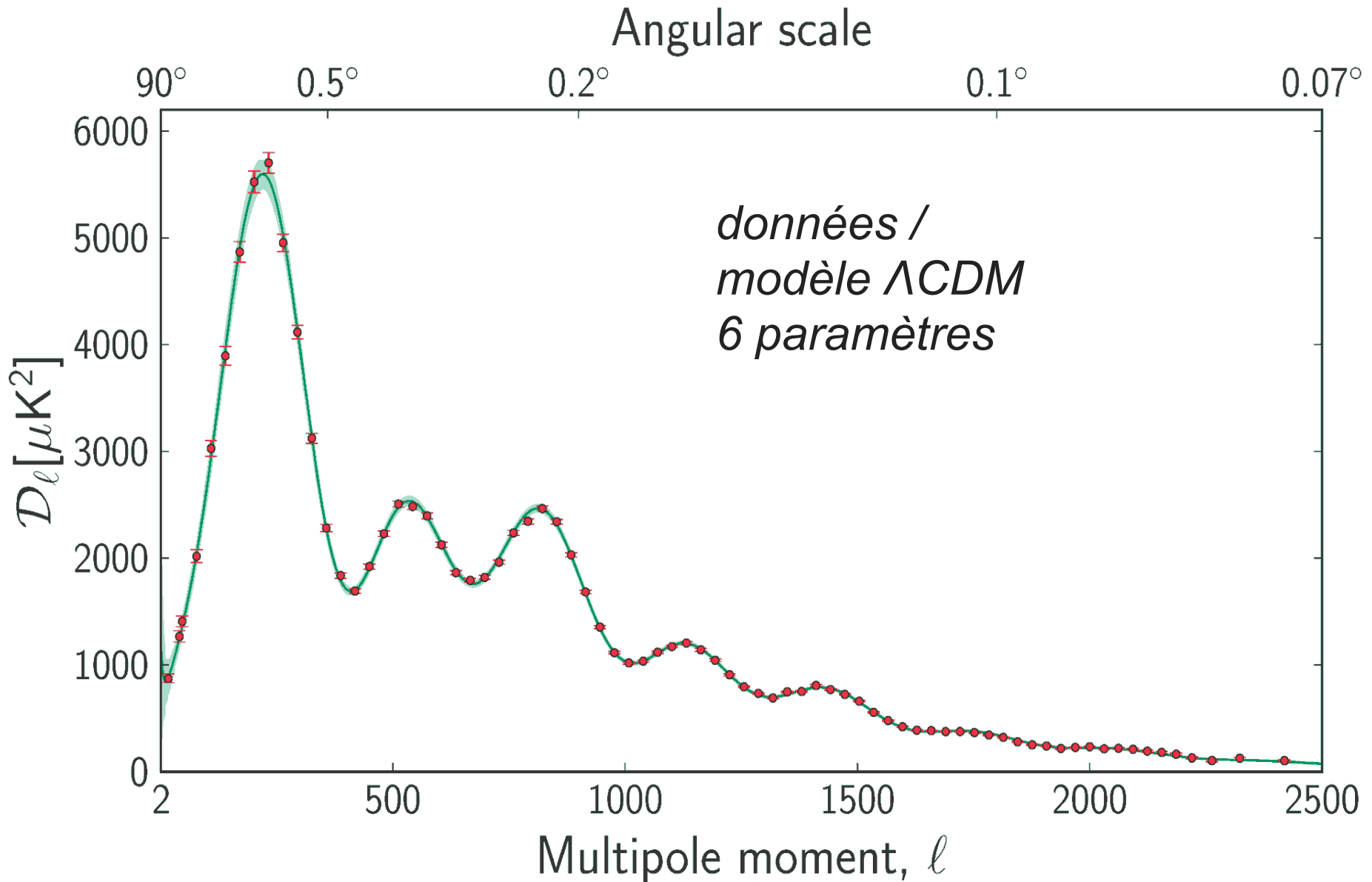
Le spectre en température



Le spectre en température



Un accord “parfait” !



Quels sont les paramètres du modèle Λ CDM ?

$\Omega_b h^2$	Densité de baryons aujourd'hui
$\Omega_C h^2$	Densité de matière noire froide aujourd'hui
Θ_{MC}	Taille angulaire apparente de l'horizon du son au moment du découplage matière-rayonnement

CONTENU

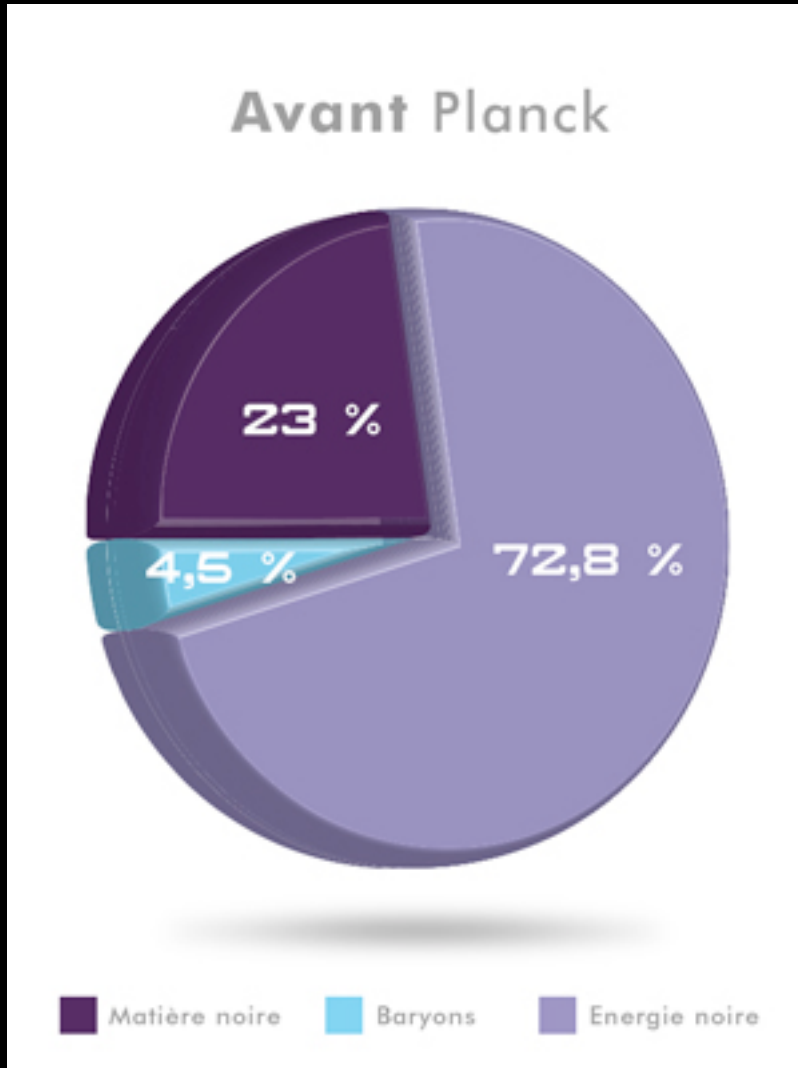
FLUCTUATIONS PRIMORDIALES

n_S	Indice spectral des perturbations adiabatiques primordiales (défini à l'échelle pivot de 0.05 Mpc^{-1})
A_S	Amplitude du spectre des perturbations adiabatiques primordiales (défini à l'échelle pivot de 0.05 Mpc^{-1})

τ	Épaisseur optique par diffusion Thomson due à la réionisation
--------	---

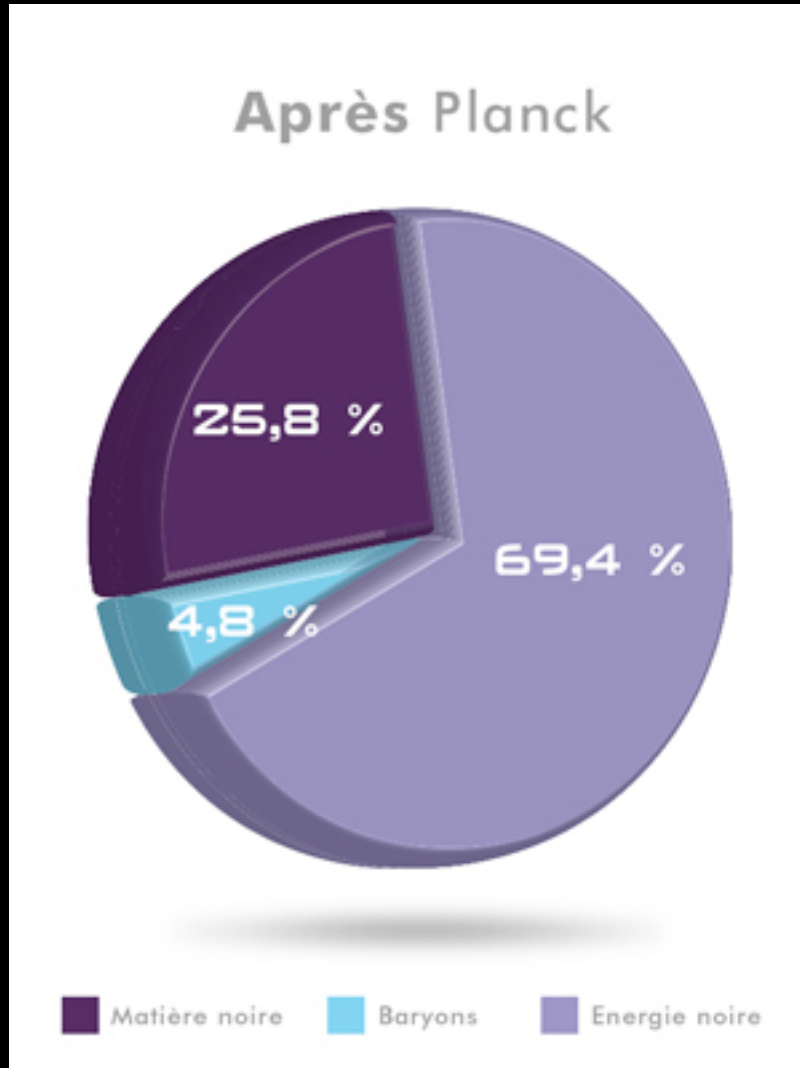
EVOLUTION

Contenu en matières de l'Univers aujourd'hui



hypothèse : pas de courbure, pas de neutrinos

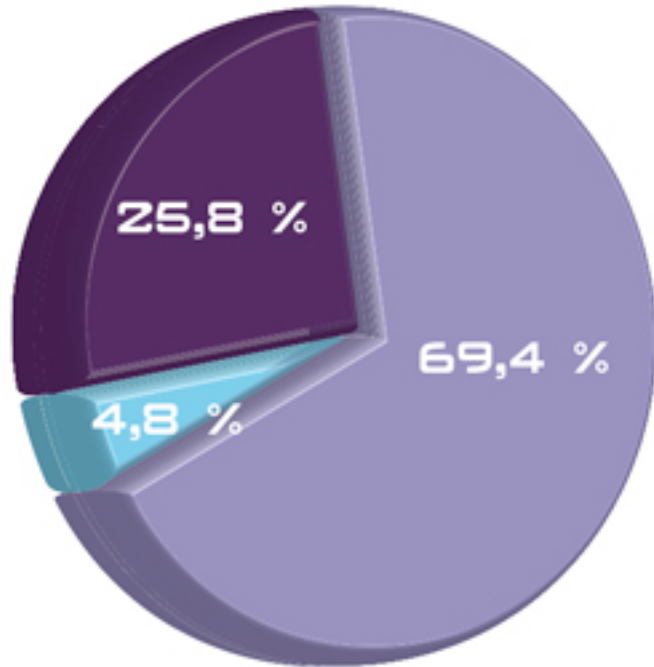
Contenu en matières de l'Univers aujourd'hui



hypothèse : pas de courbure, pas de neutrinos

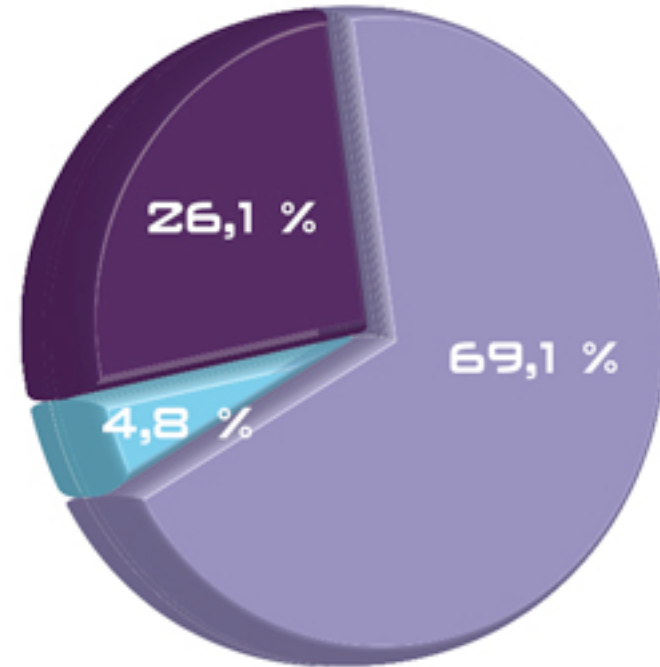
Contenu en matières de l'Univers aujourd'hui

Après Planck



■ Matière noire ■ Baryons ■ Energie noire

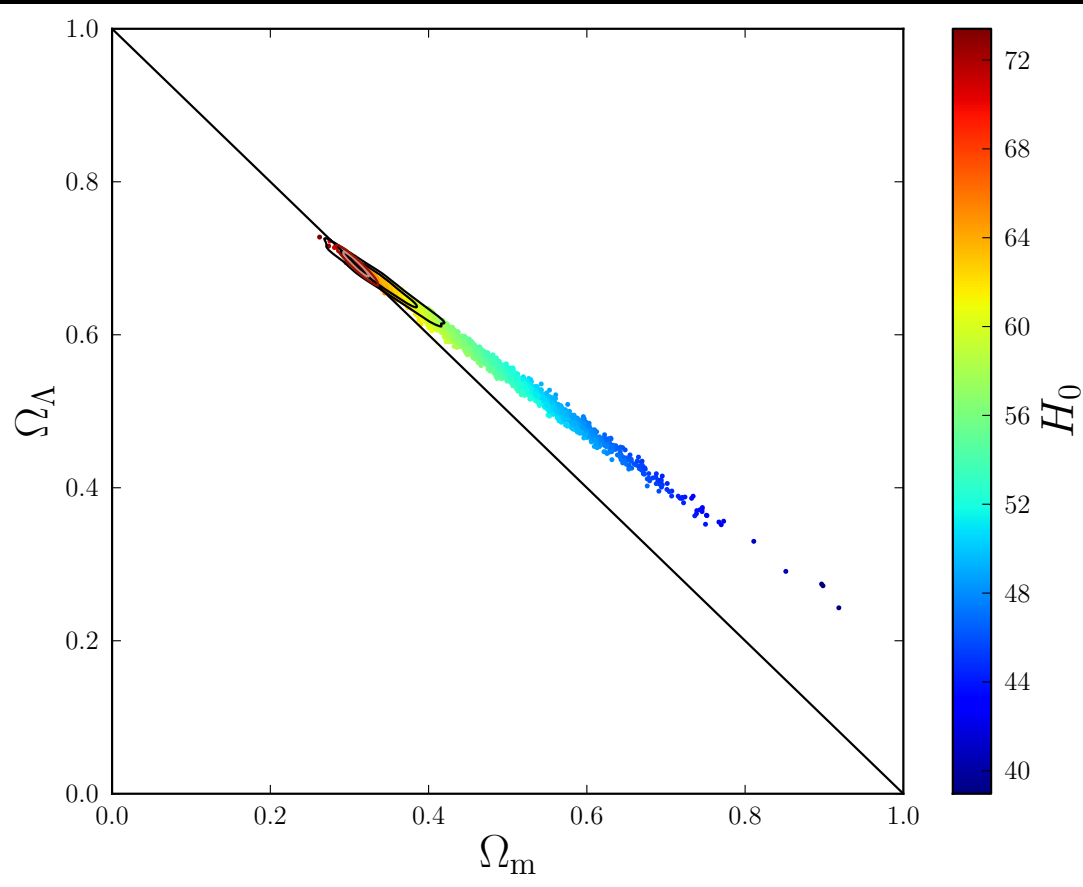
Avec BAO



■ Matière noire ■ Baryons ■ Energie noire

hypothèse : pas de courbure, pas de neutrinos

Vitesse d'expansion de l'Univers aujourd'hui

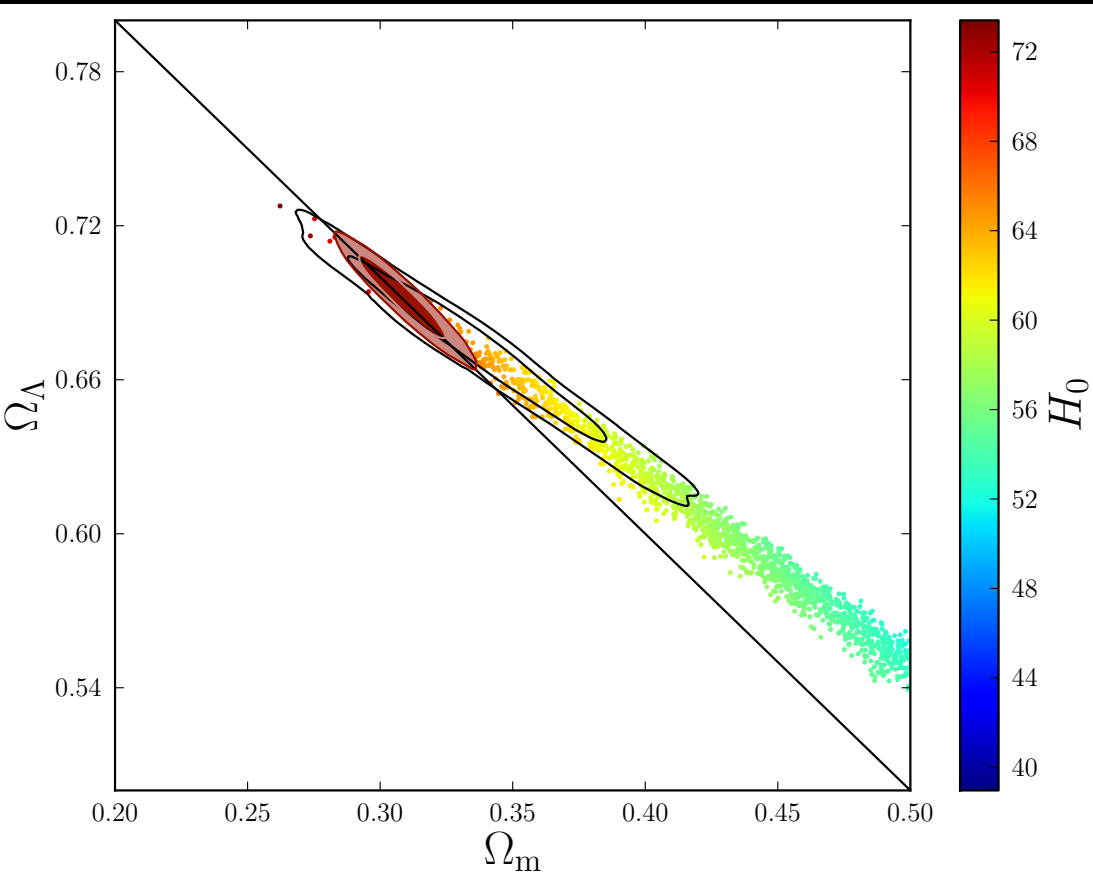


Lien très fort entre courbure de l'espace et expansion de l'Univers

Planck+BAO = **espace euclidien** + vitesse d'expansion modérée

-0.0074 < Ω_K < +0.0057 à 95 % de niveau de confiance

Vitesse d'expansion de l'Univers aujourd'hui

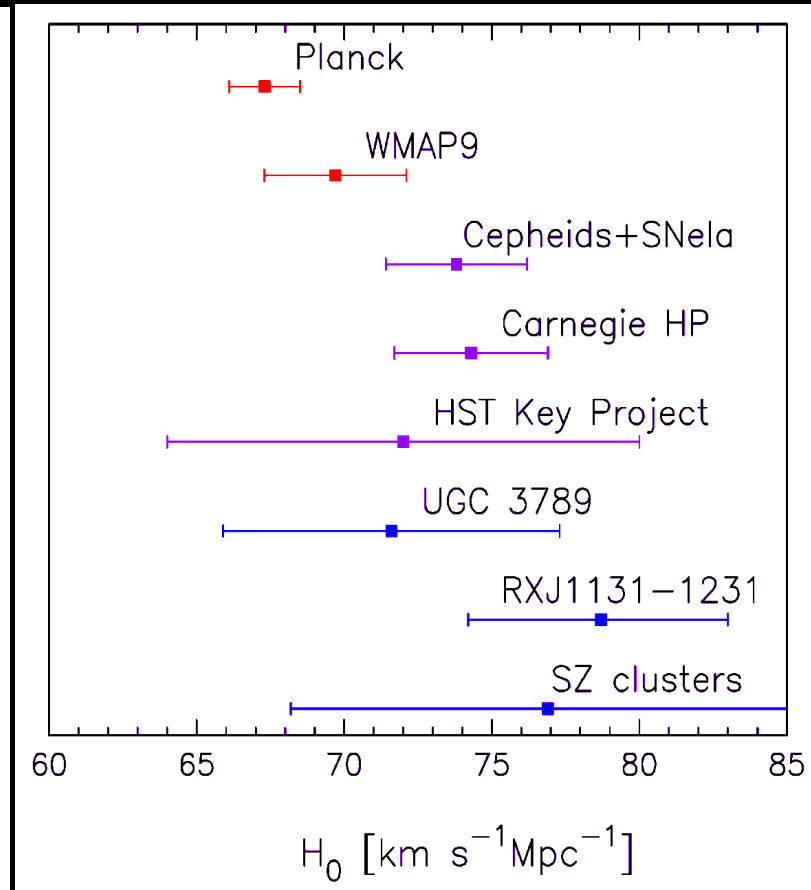
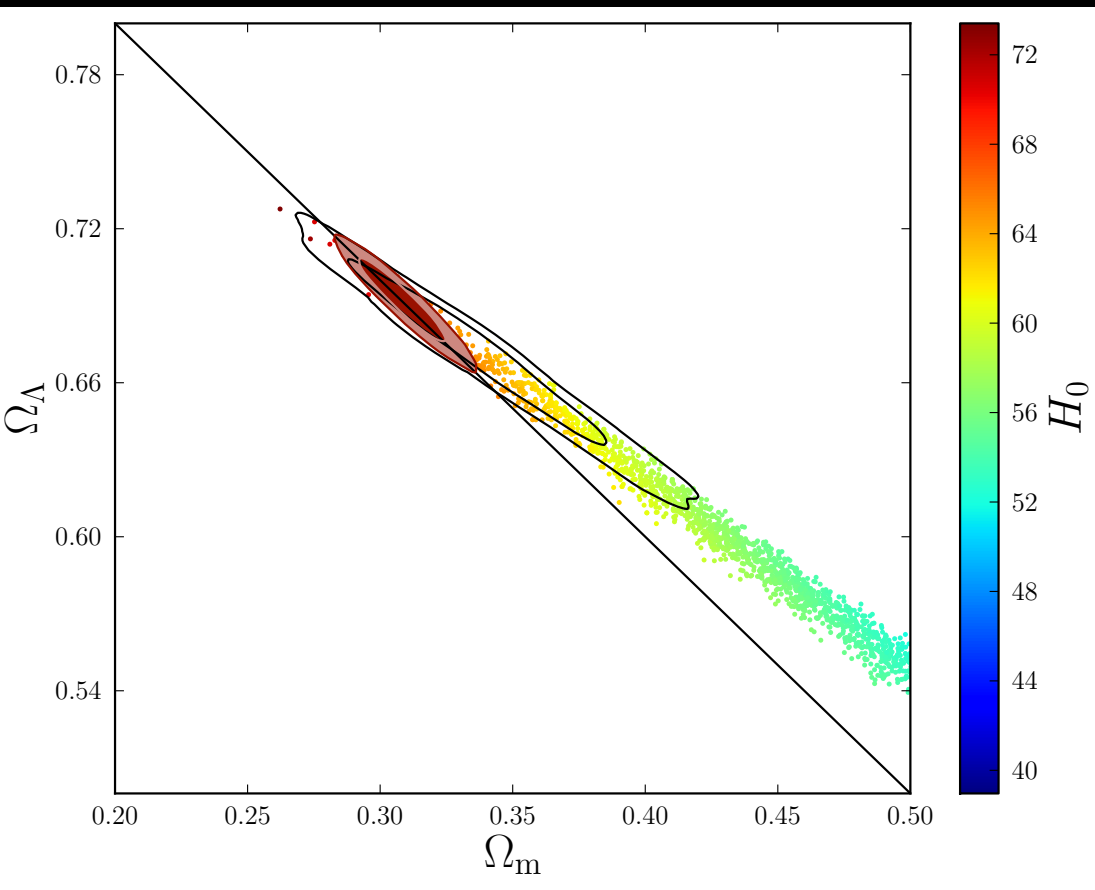


Lien très fort entre courbure de l'espace et expansion de l'Univers

Planck+BAO = **espace euclidien** + vitesse d'expansion modérée

-0.0074 < Ω_K < +0.0057 à 95 % de niveau de confiance

Vitesse d'expansion de l'Univers aujourd'hui



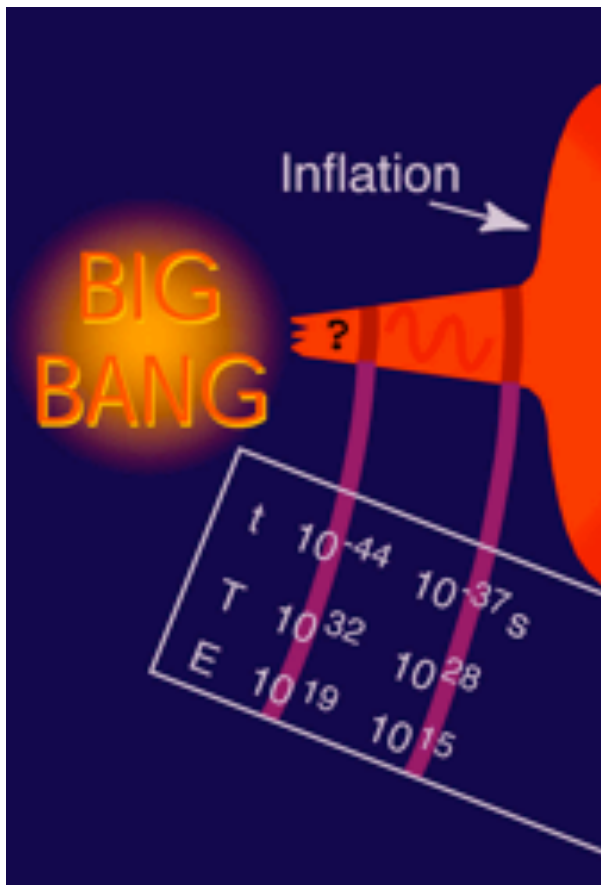
Lien très fort entre courbure de l'espace et expansion de l'Univers
Planck+BAO = **espace euclidien** + vitesse d'expansion modérée
 $-0.0074 < \Omega_K < +0.0057$ à 95 % de niveau de confiance

Après des années de mesures,
 H_0 est enfin connu au %
 $H_0 = 67.8 \pm 0.77 \text{ km.s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$

Le modèle d'inflation

Croissance gigantesque de l'univers juste après le Big-Bang

Avantage : 1 solution à 3 problèmes (Pourquoi l'espace est-il euclidien ? Pourquoi tout l'univers observable est à la même température ? D'où viennent les fluctuations macroscopiques présentes 400 000 ans après le Big-Bang ?)

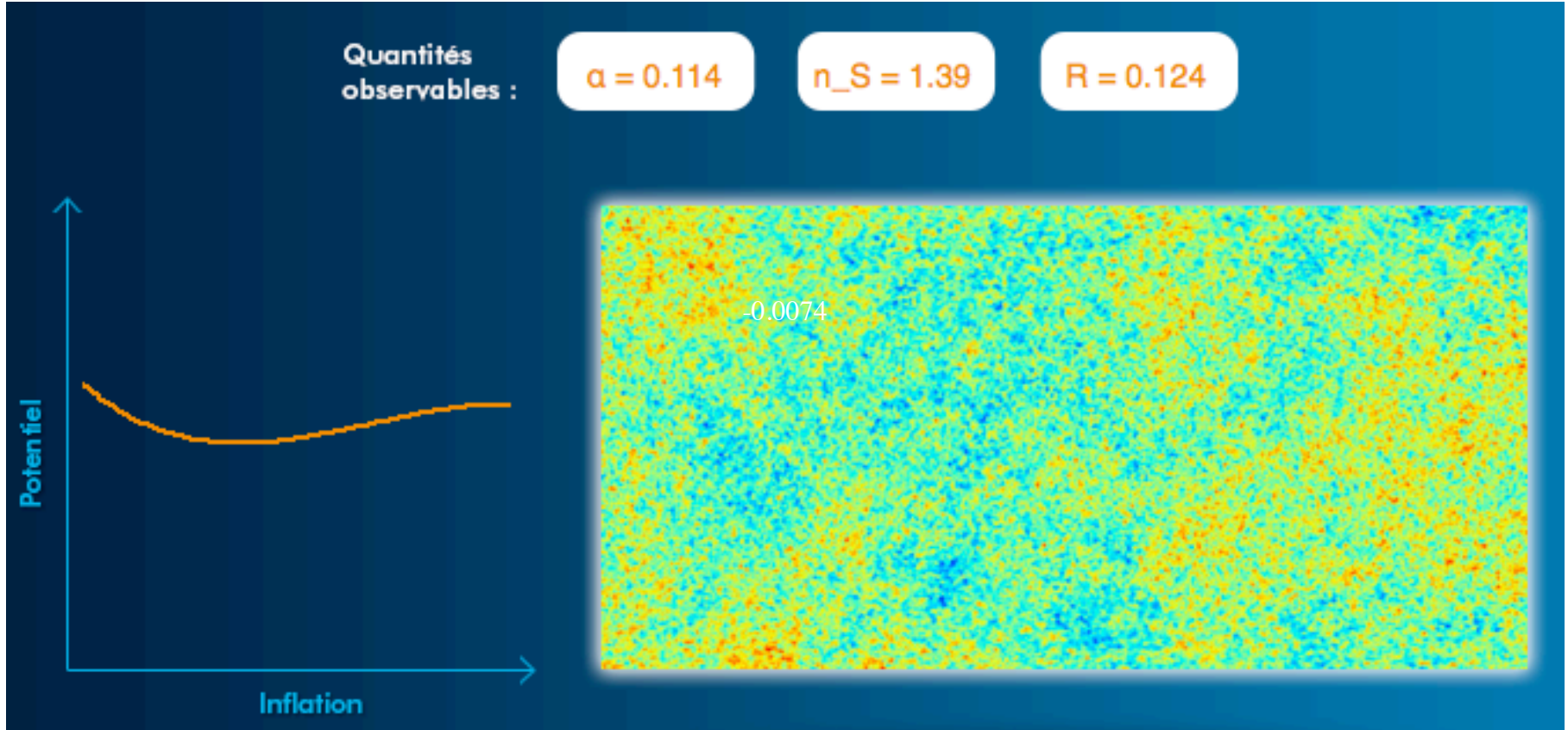


Les illustrations donnent une piètre idée de l'effet de l'inflation cosmique ...

L'inflation devrait avoir commencé au plus tôt 10^{-36} seconde après le Big-Bang et avoir fini au plus tard 10^{-30} seconde après le Big-Bang. Chaque dimension d'espace devrait avoir grandi d'un facteur au moins égal à 10^{26} , soit un volume multiplié par 10^{78} pendant l'ère inflationnaire ...

Le modèle d'inflation

Le potentiel que suit l'inflaton est relié à des observables dans le rayonnement fossile

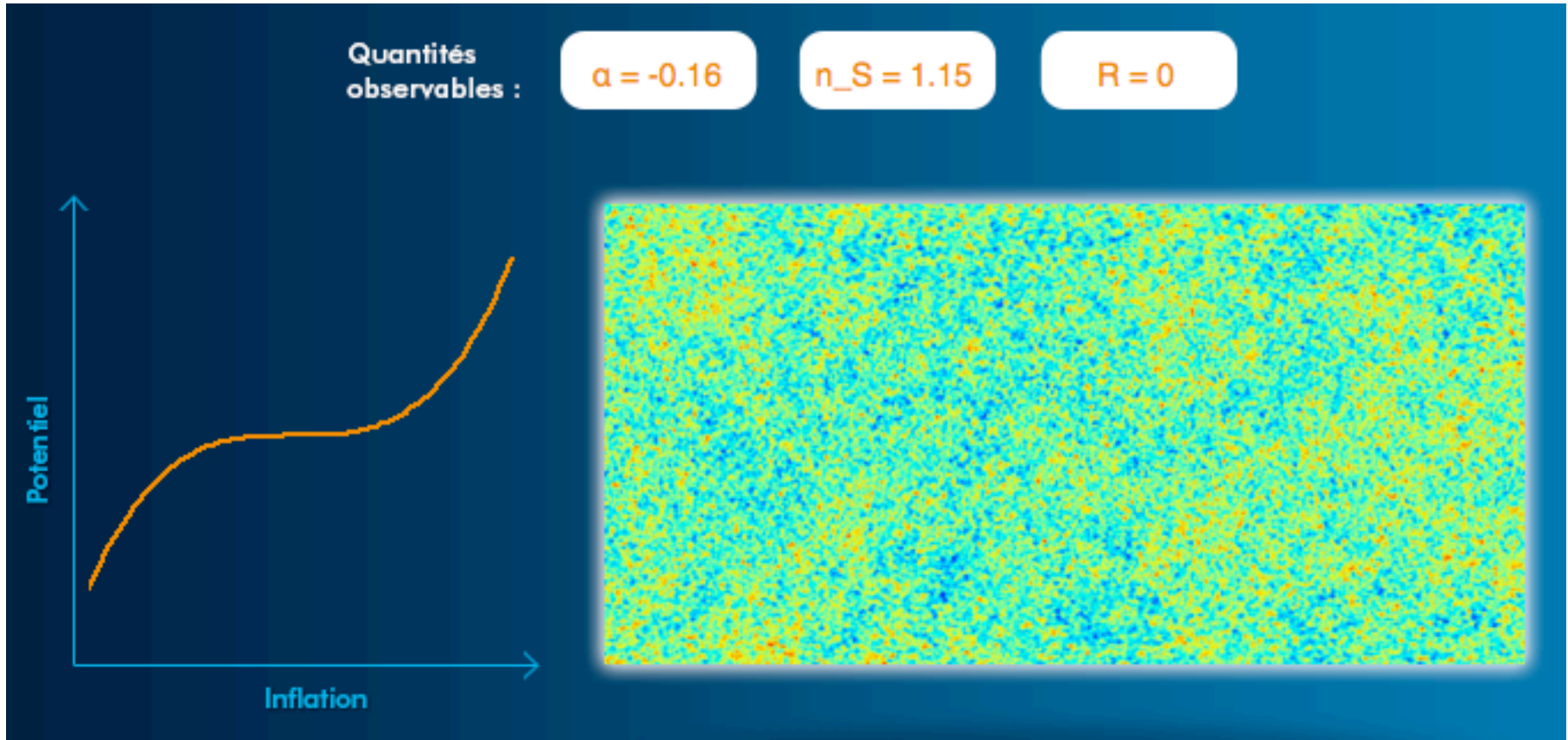


Simulations de cas “extrêmes” !

La carte contient l’empreinte de la physique $\sim 10^{-30}$ seconde après le Big-Bang.

Le modèle d'inflation

Le potentiel que suit l'inflaton est relié à des observables dans le rayonnement fossile

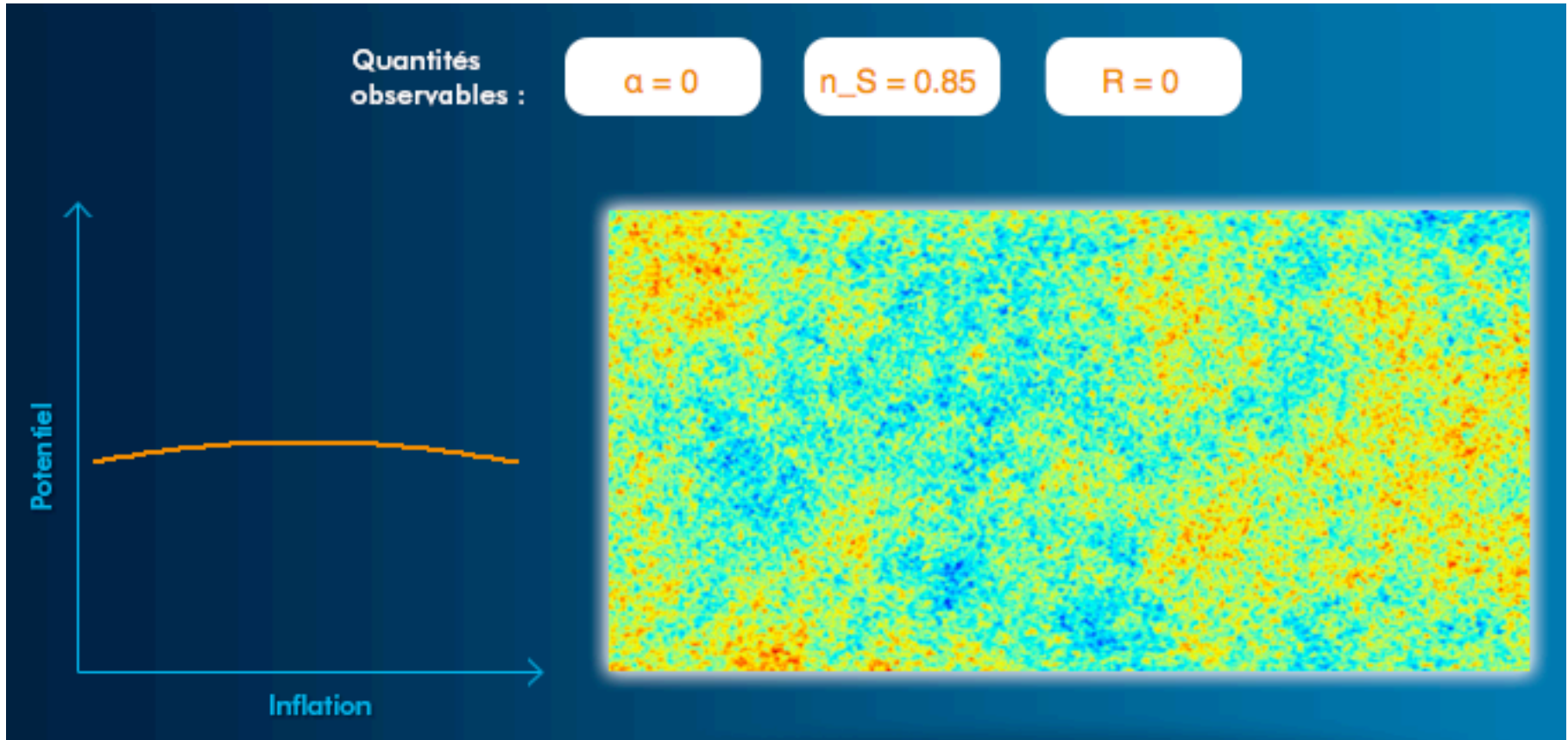


Simulations de cas “extrêmes” !

La carte contient l’empreinte de la physique $\sim 10^{-30}$ seconde après le Big-Bang.

Le modèle d'inflation

Le potentiel que suit l'inflaton est relié à des observables dans le rayonnement fossile

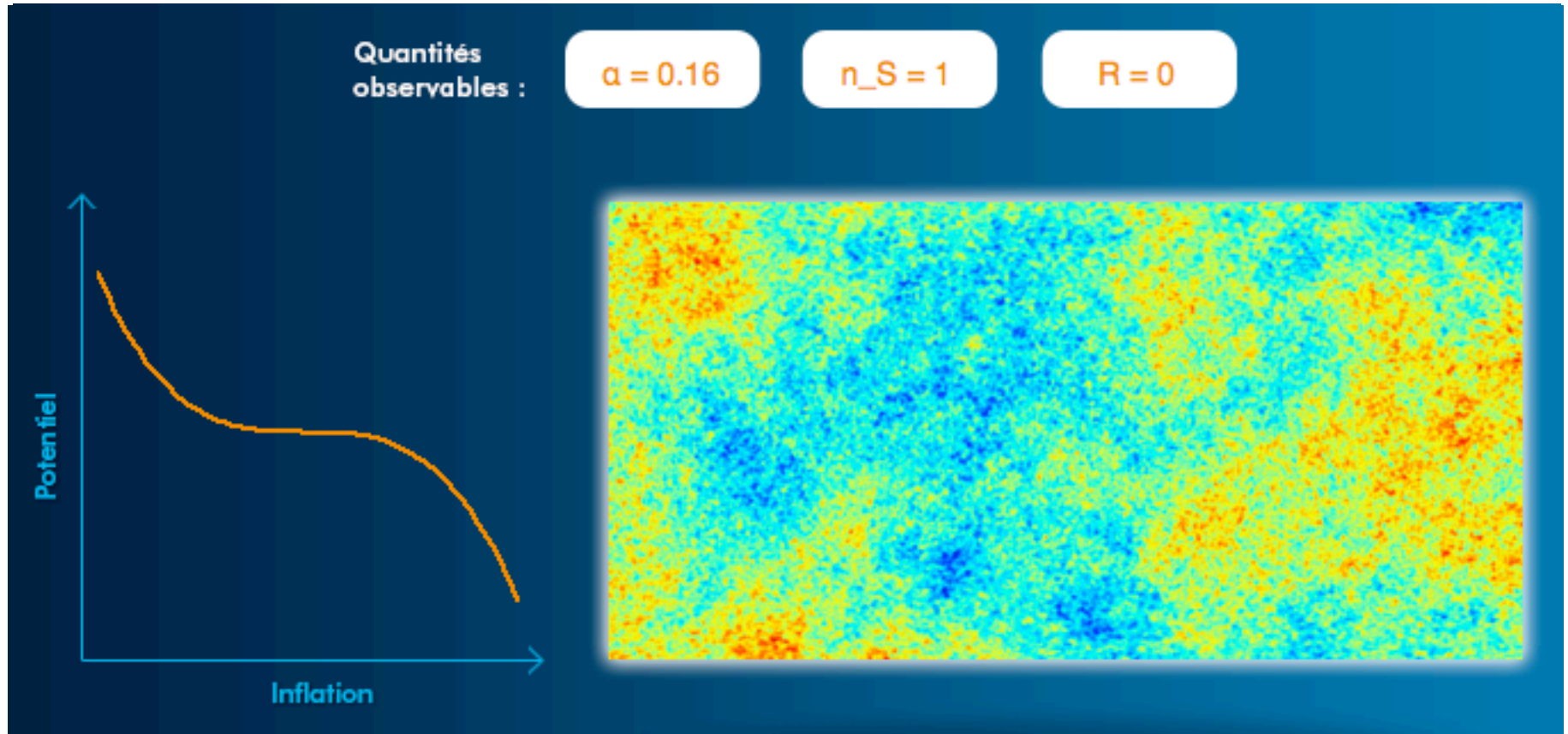


Simulations de cas “extrêmes” !

La carte contient l’empreinte de la physique $\sim 10^{-30}$ seconde après le Big-Bang.

Le modèle d'inflation

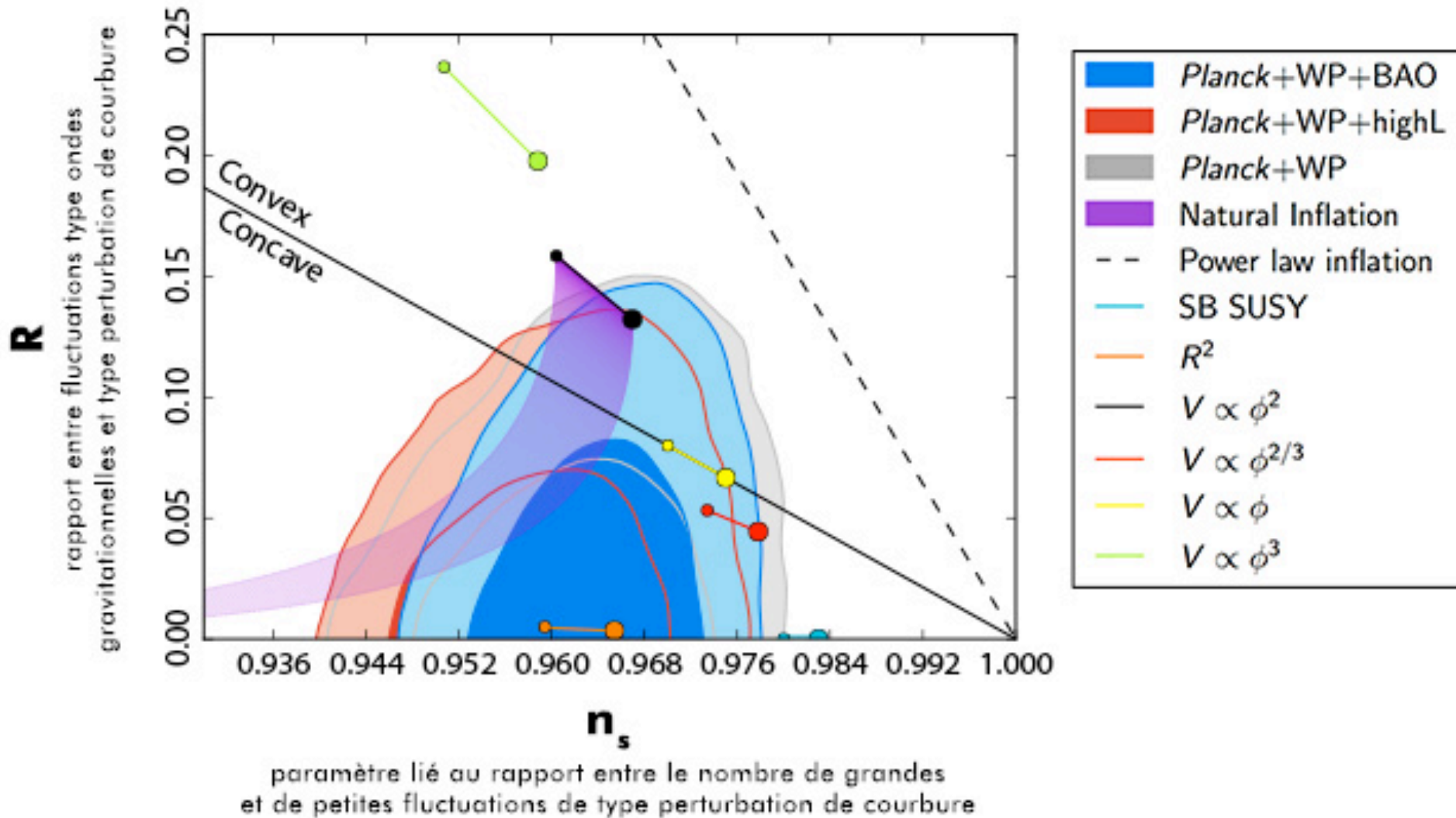
Le potentiel que suit l'inflaton est relié à des observables dans le rayonnement fossile



Simulations de cas “extrêmes” !

La carte contient l’empreinte de la physique $\sim 10^{-30}$ seconde après le Big-Bang.

Les fluctuations primordiales



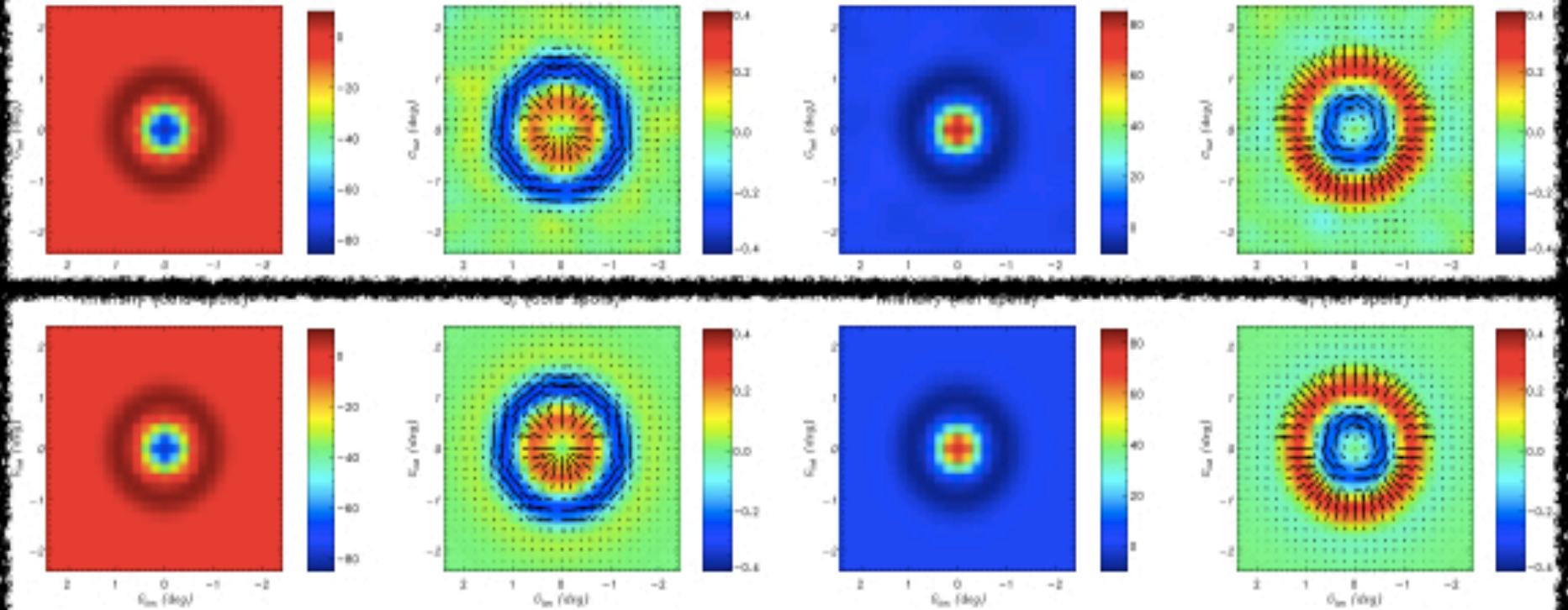
Modèle naïf : spectre dit “invariant d’échelle” ($n_s = 1$)

Prédiction de l’inflation : $n_s < 1$ → **Planck le prouve**

Nombreuses familles de modèles d’inflation → **Planck commence le tri**

Un avant-goût de la polarisation

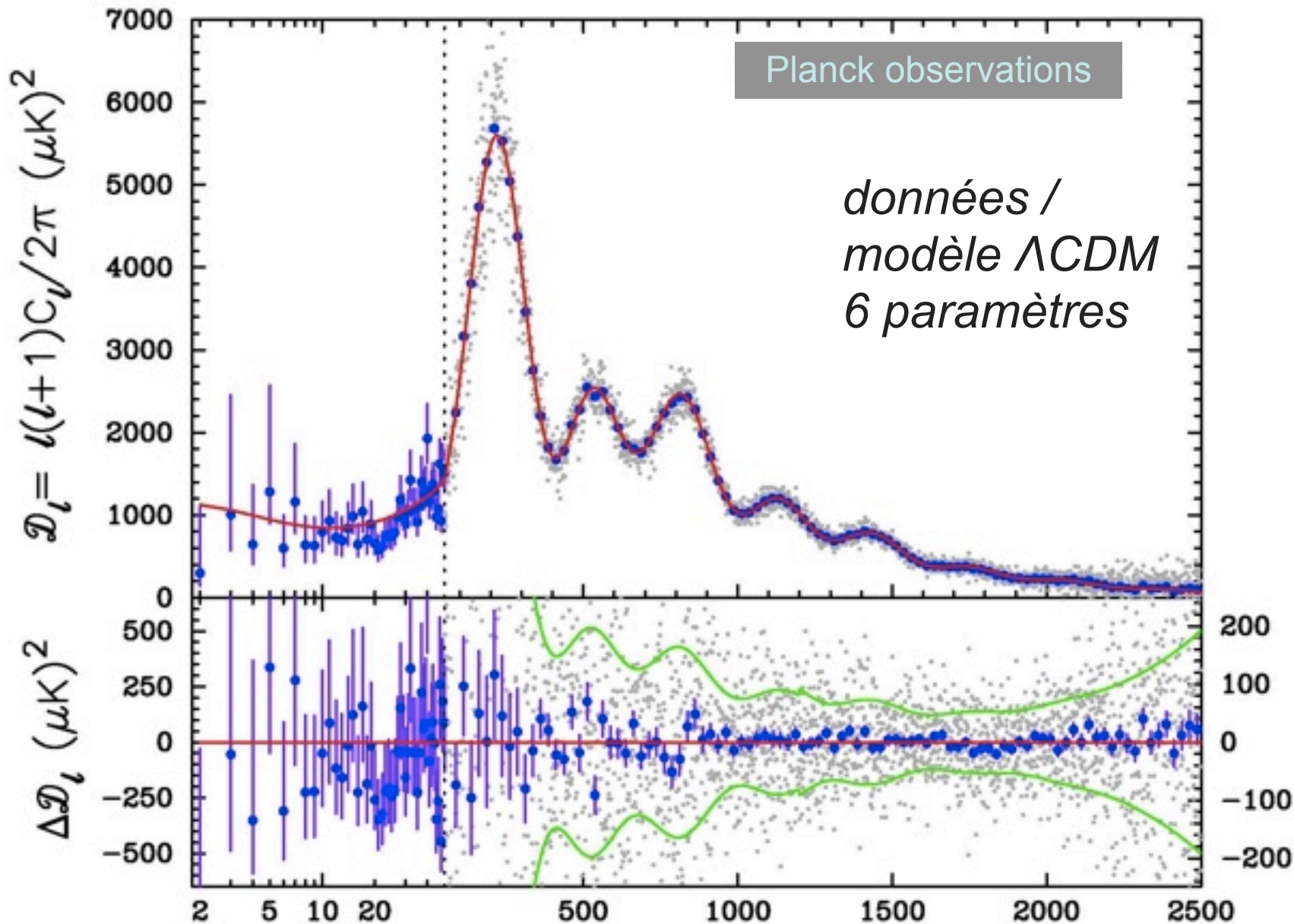
Observations faites par la collaboration Planck



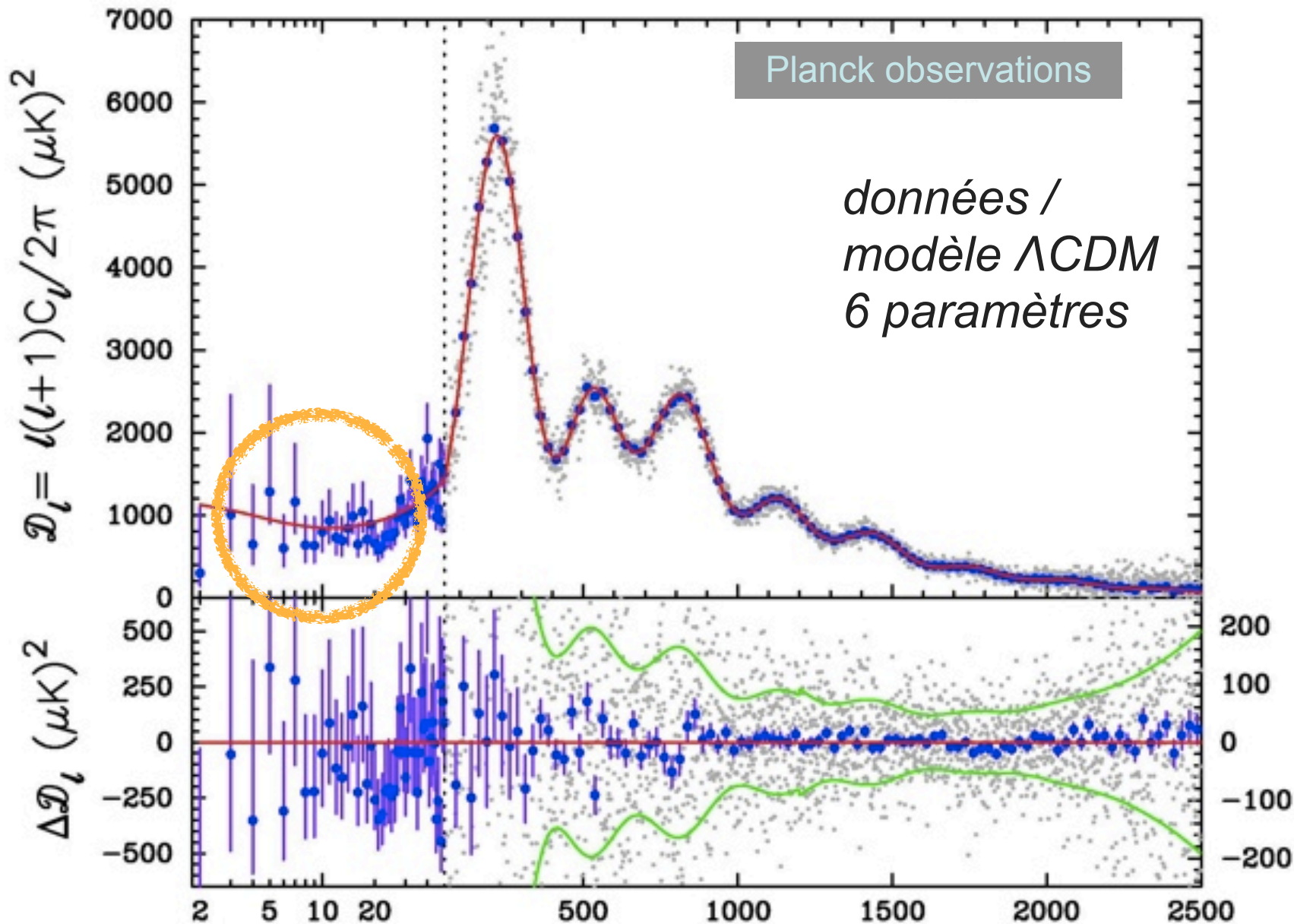
Simulations dans le cadre du meilleur modèle de notre univers

Prochaine épisode en 2014 ...

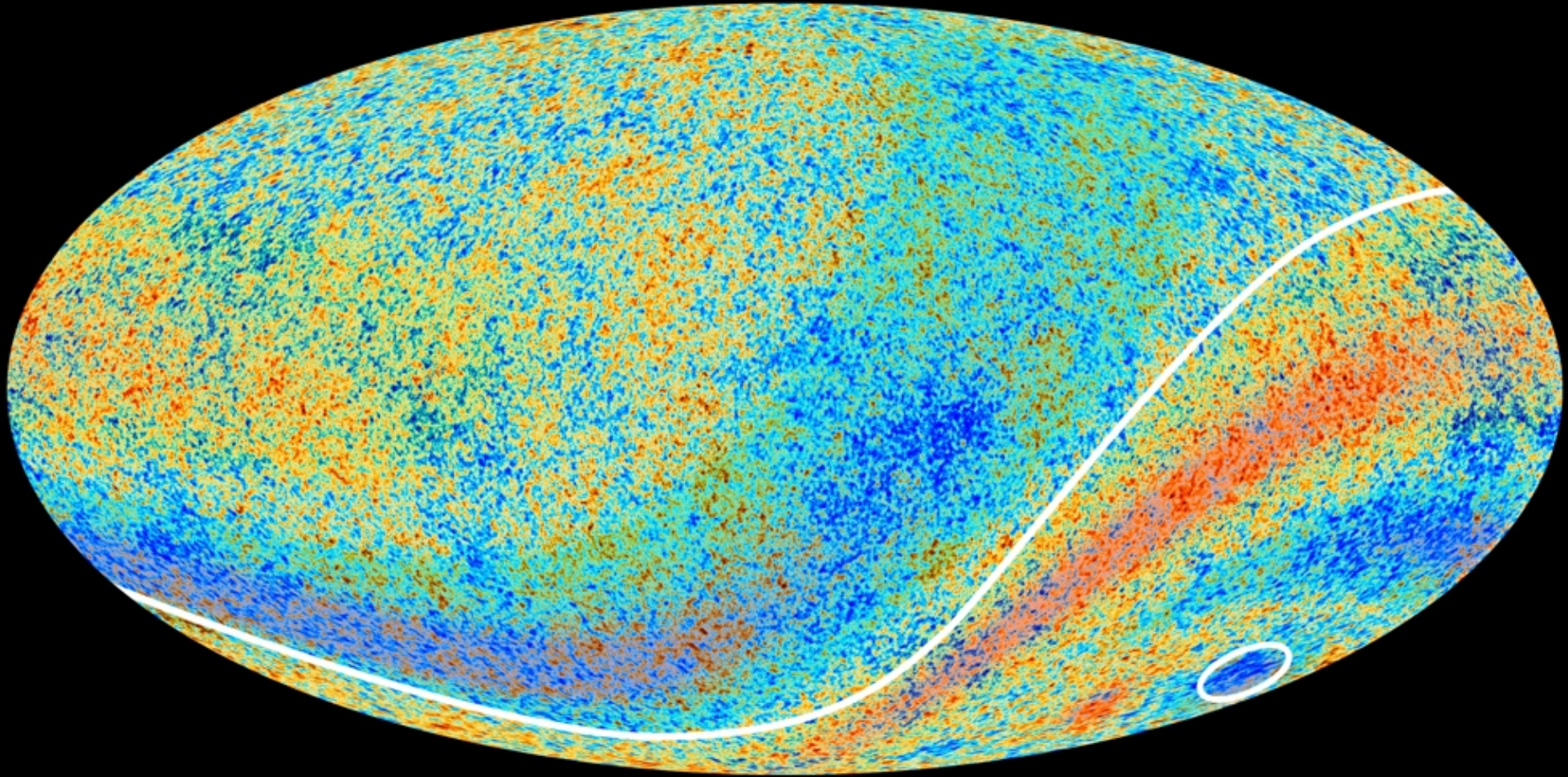
Un accord “presque parfait” ...



Un accord “presque parfait” ...

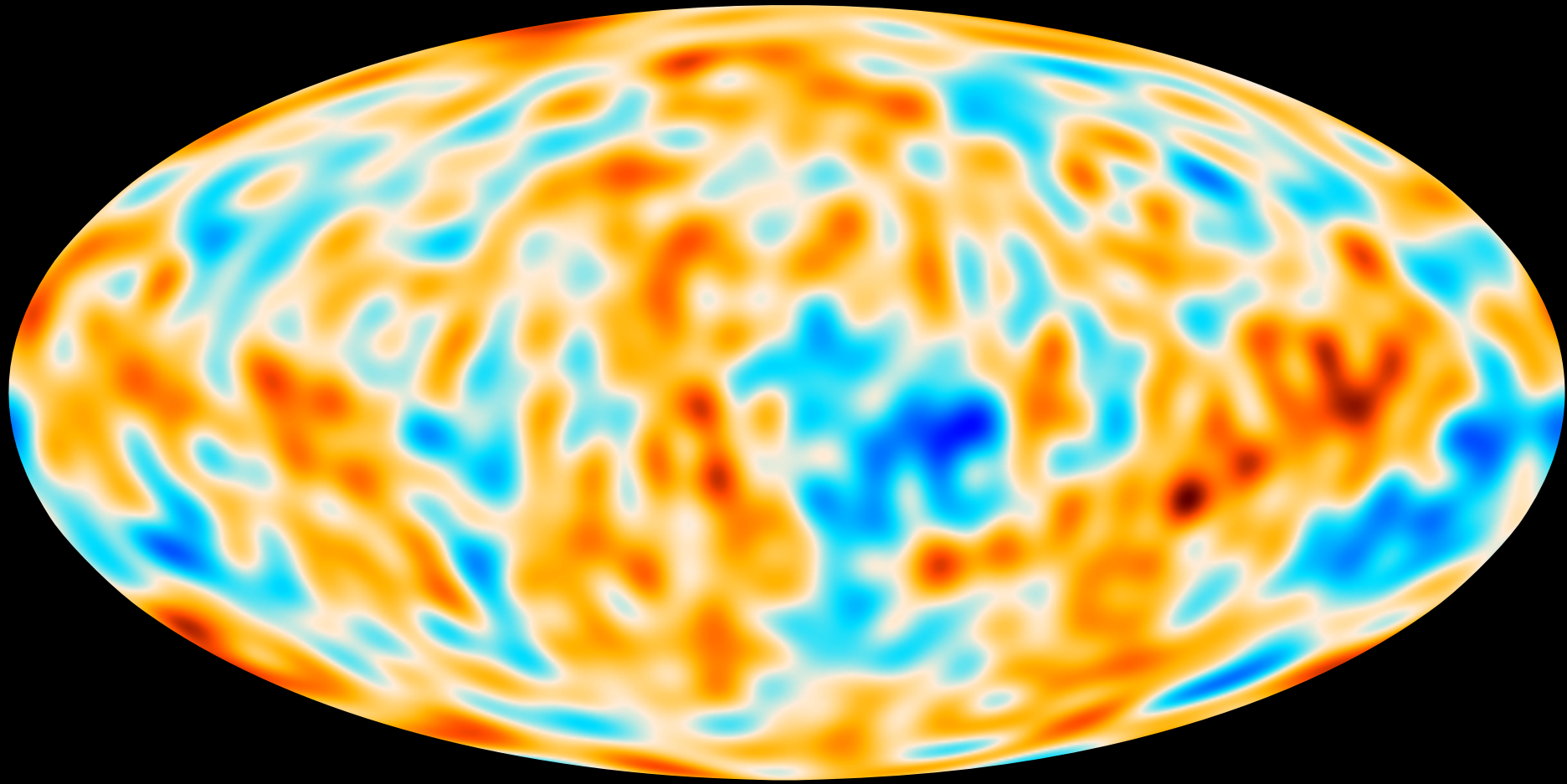


Univers de Bianchi : univers homogène mais non isotrope



Reproduit bien les grandes échelles ... mais avec des paramètres cosmologiques incompatibles avec "tout le reste"

Ce qui pourrait manquer

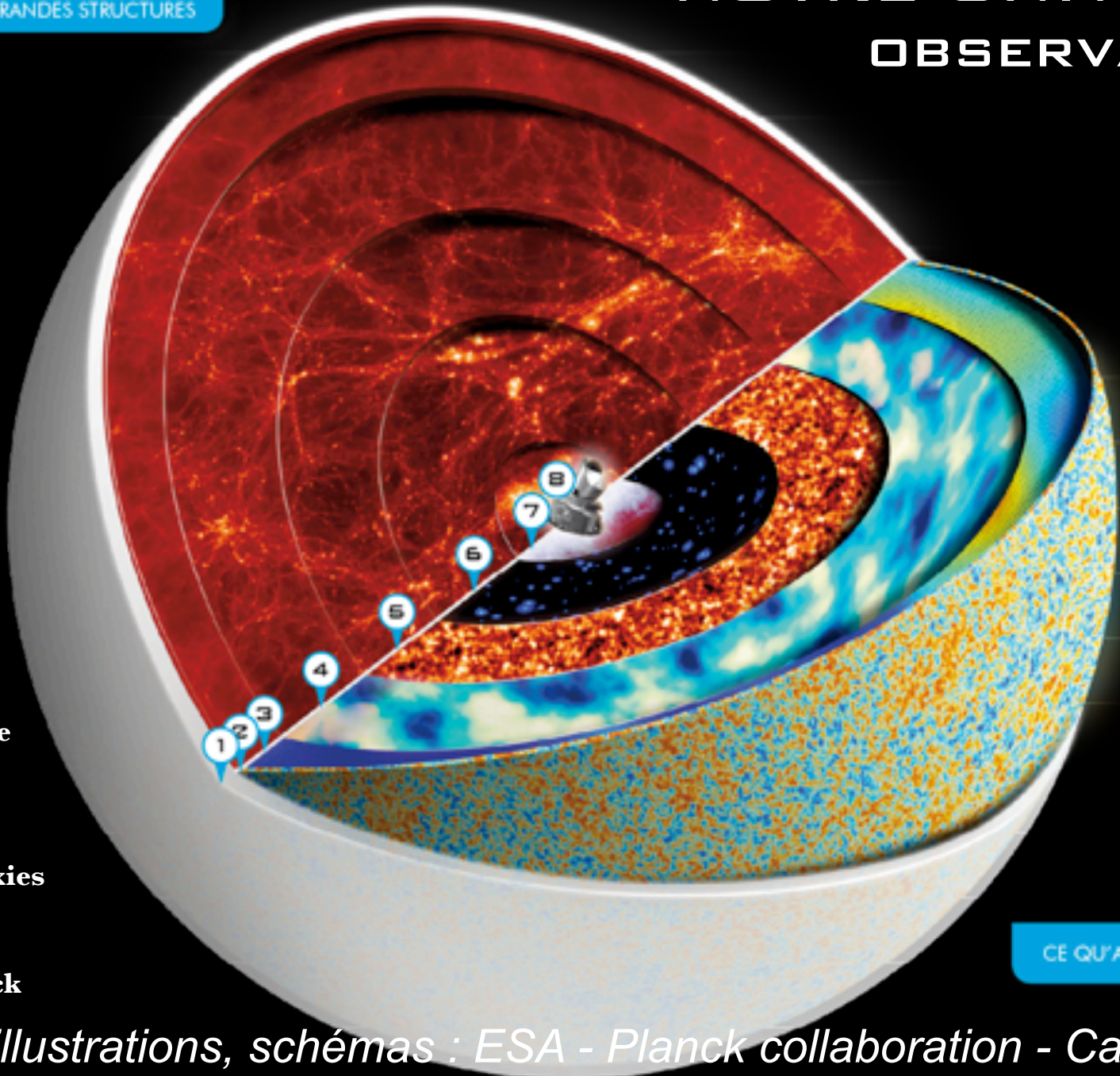


-9,3 μK ————— +8,0 μK

Accord WMAP,
LFI, HFI

Différence entre ce que l'on observe et ce qu'on attend d'après le modèle, dans le cas "moyen".
"Pas de chance" ou précieux indice ?

- (1) Big-Bang
- (2) Rayonnement fossile
- (3) Réionisation
- (4) Matières noire et ordinaire
- (5) Poussières
- (6) Amas de galaxies
- (7) Notre Galaxie
- (8) Satellite Planck



CE QU'À VU PLANCK