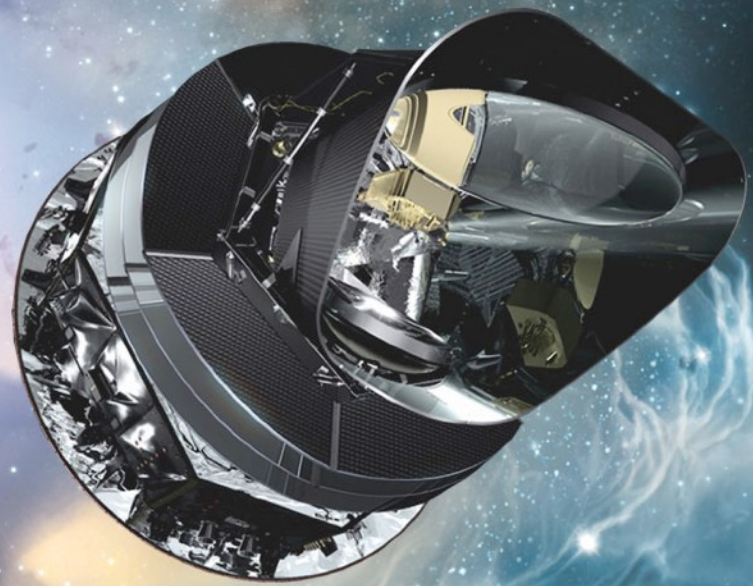


Les résultats cosmologiques de la mission PLANCK



Cécile Renault

Laboratoire de Physique
Subatomique et de Cosmologie

DAUTREPPE 2018

Dernières nouvelles de l'Univers
6 décembre 2018 2018

Cosmologie observationnelle

Histoire ?

Age, formation

Expansion infinie ou implosion

Origine des structures
(galaxies et amas de galaxies)

Contenu ?

Matière ordinaire,
rayonnements

Matière noire

Energie noire

Le modèle standard de la cosmologie

Modèle du Big-Bang

espace en expansion à partir d'un instant « initial » où l'Univers est arbitrairement dense et chaud. Lois de la relativité générale.

+

Épisode d'inflation

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

+

Composition de l'Univers (aujourd'hui)

- minoritaire : matière ordinaire
- important : matière noire froide
- dominant : énergie noire



Le modèle standard de la cosmologie

Modèle du Big-Bang

espace en expansion à partir d'un instant « initial » où l'Univers est arbitrairement dense et chaud. Lois de la relativité générale.

+

Épisode d'inflation

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

+

Composition de l'Univers (aujourd'hui)

- minoritaire : matière ordinaire
- important : matière noire froide
- dominant : énergie noire

Objectif des observations :

tester ce modèle

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



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

Température de milliers de degrés

380 000 ans

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 :

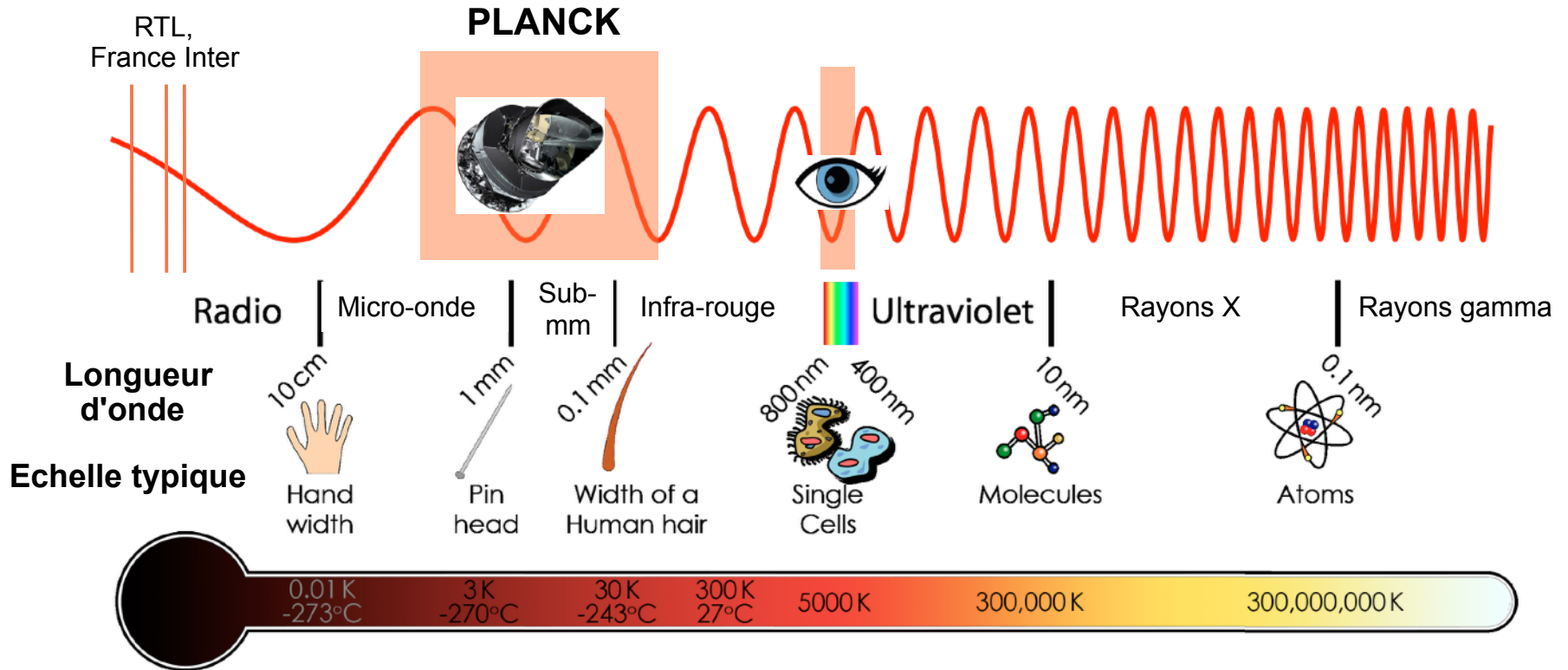
Univers transparent et froid

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

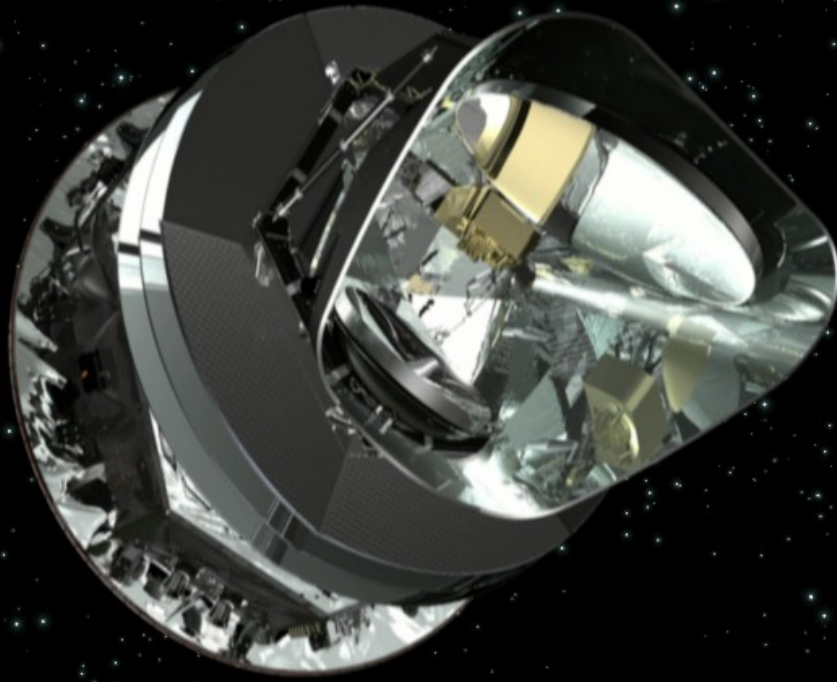
image dans le submillimétrique

13,8 milliards d'années

Le domaine submillimétrique



La mission Planck



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

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

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

2 instruments :

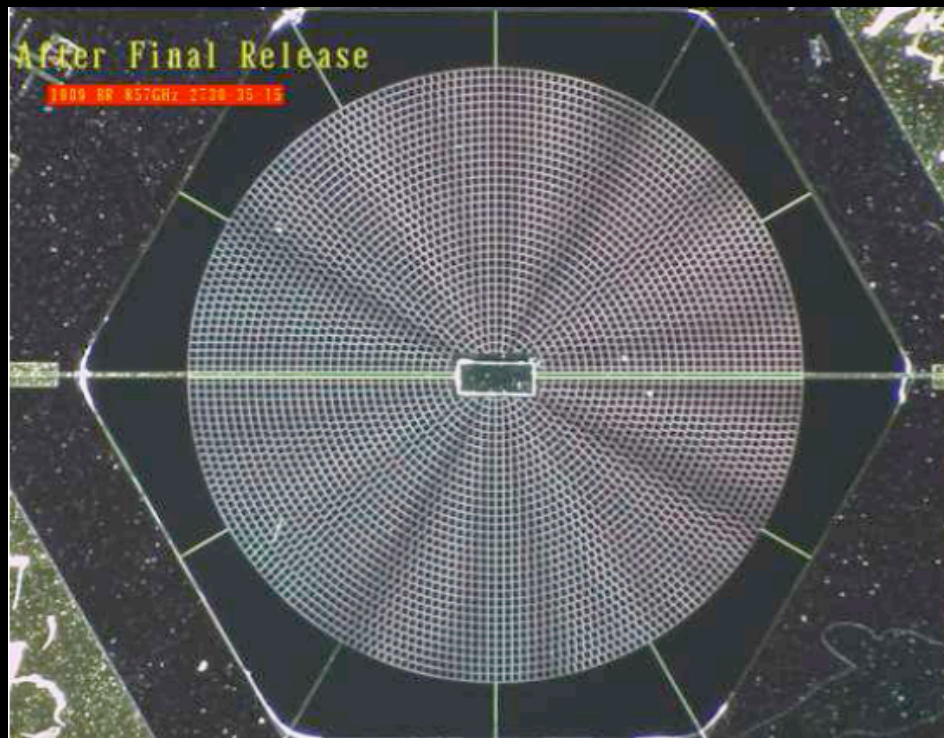
Low Frequency Instrument
30 to 70 GHz @ 20 K
sous maîtrise d'oeuvre italienne

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

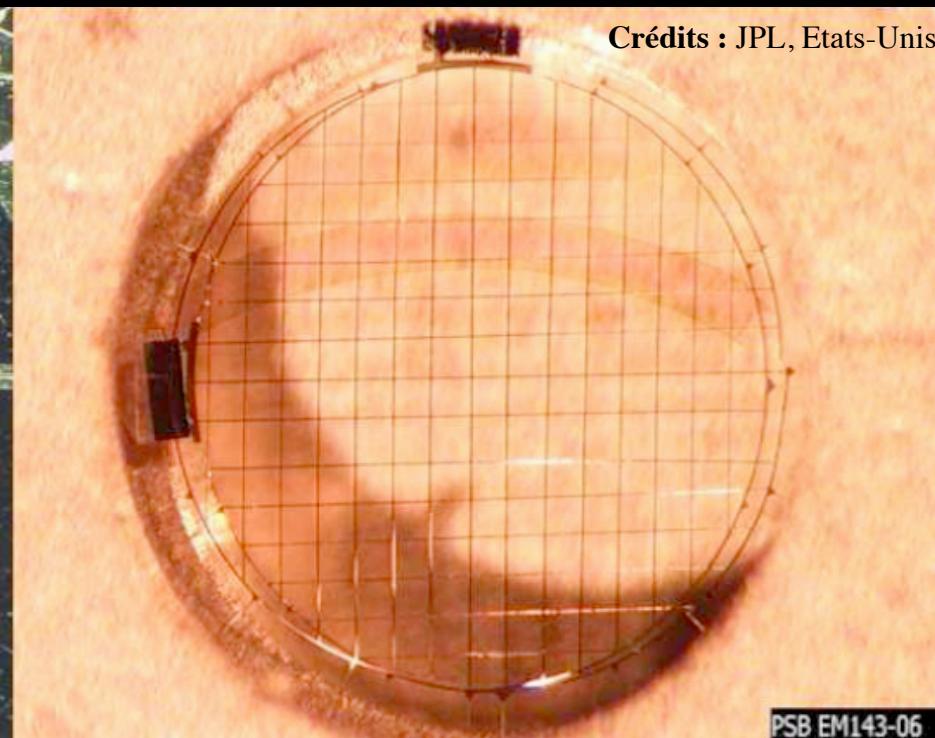
Lancement en 2009
depuis le port spatial de Kourou

Résultats cosmologiques
en 2013, 2015, 2018

Détecteur = bolomètre

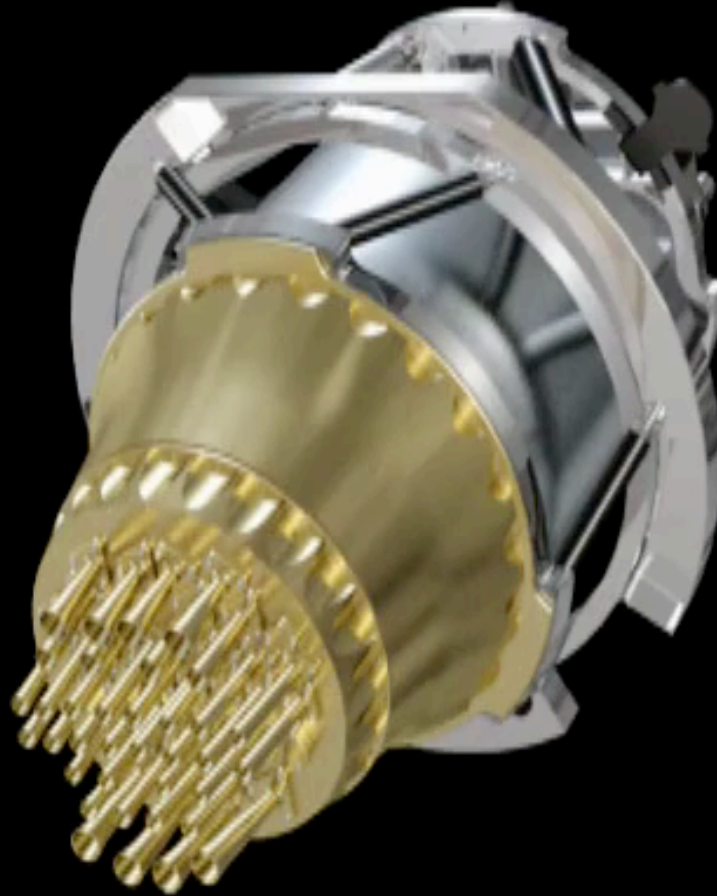


Bolomètre avec thermomètre au centre et grille en forme de toile d'araignée.
Ce détecteur est uniquement sensible à l'intensité du signal.

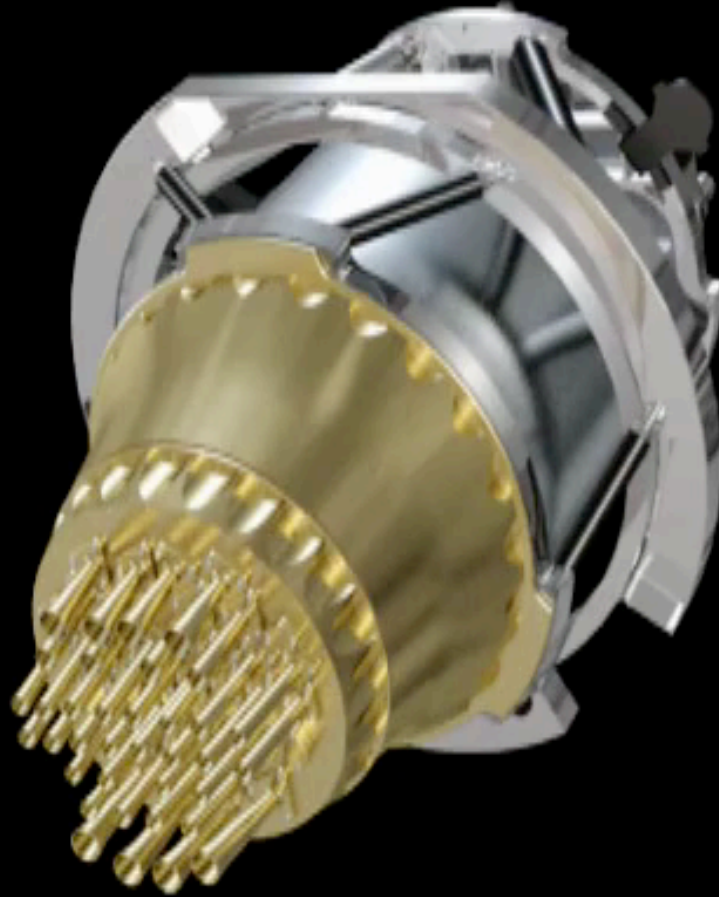


2 bolomètres avec thermomètre au bord et grille en forme de quadrillage superposés orthogonalement.
Ce détecteur est sensible à l'intensité et à la polarisation du signal : selon l'angle de polarisation du photon, il chauffera plutôt une grille ou l'autre.

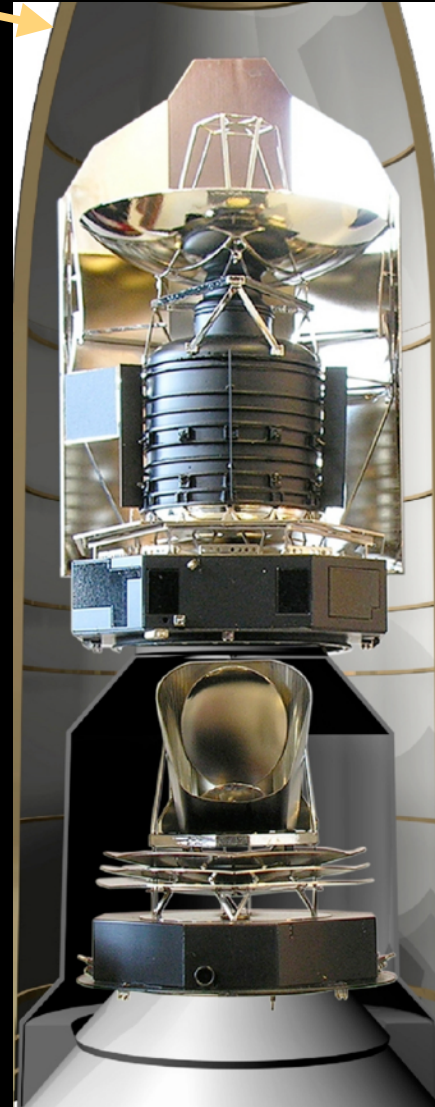
Le satellite Planck



Le satellite Planck



le 14 mai 2009,
après 16 années
de préparation



Herschel

Planck



**Séparation
de Planck**

Temps

+ 28,5 minutes

Altitude

1 723 km

Vitesse relative

33 923 km/h

3 mois pour être opérationnel

Un voyage de 1,5 millions de km

depuis le point de Lagrange L2
dans l'ombre de la Terre

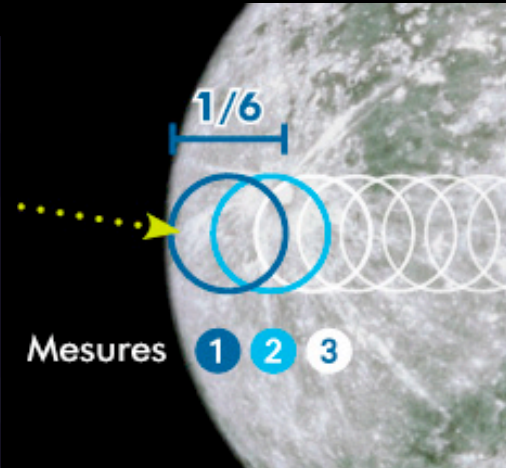


Refroidissement des instruments puis tests et réglages

Planck cartographie tout le ciel

Planck cartographie tout le ciel

Les différentes étapes de l'analyse des données



30 mois d'observation au total pour HFI

48 mois d'observation au total pour LFI



Planck, c'est qui ?

Un scientifique



Max Planck, 1899
Loi du corps noir

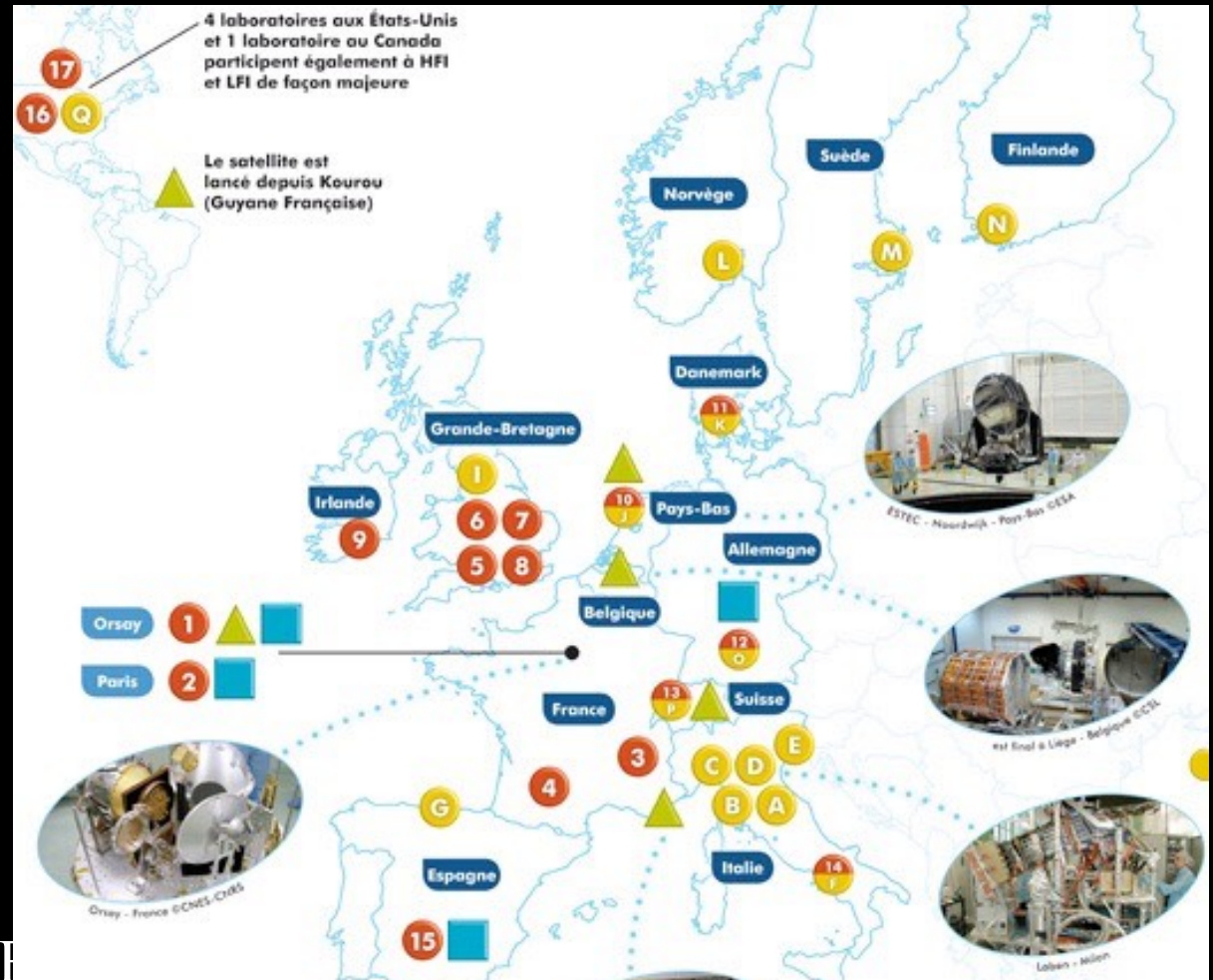
Un scientifique



Max Planck, 1899
Loi du corps noir

Planck, c'est qui ?

Plus de 500 chercheurs



+ de 70 laboratoires dont 9 français

Un scientifique

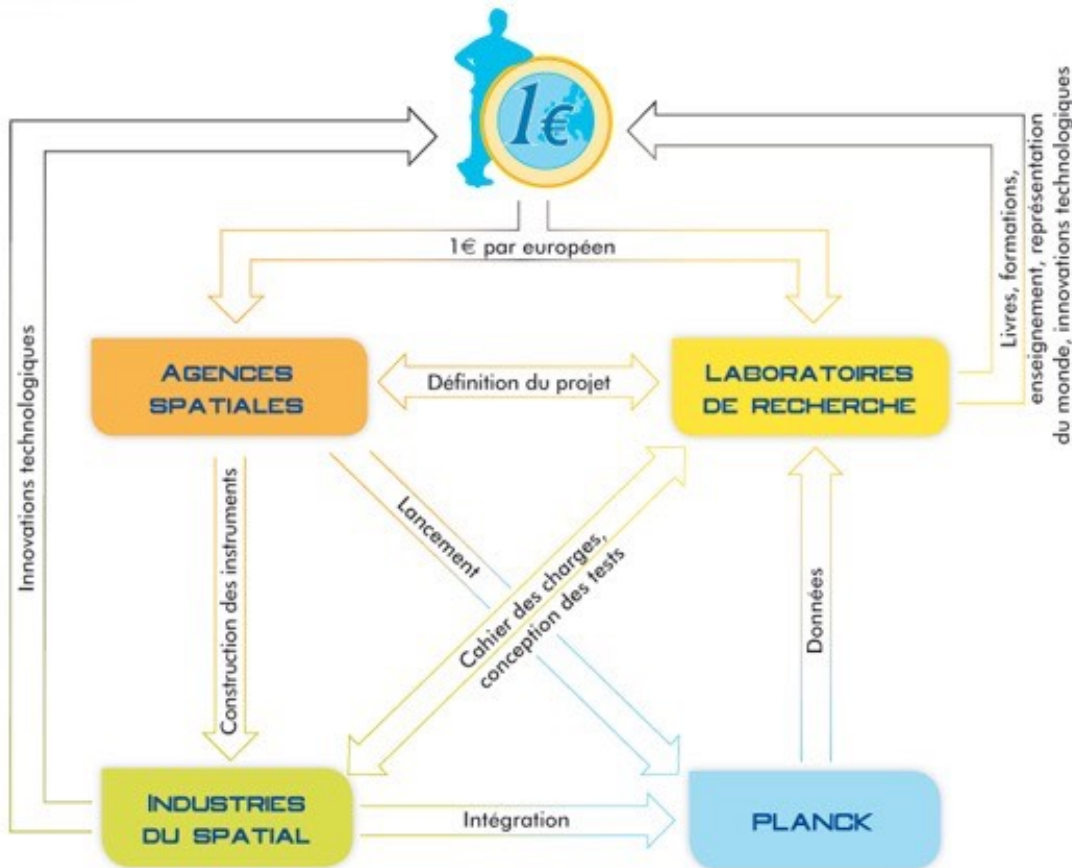


Planck, c'est qui ?

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

Une forte implication locale

- 3 laboratoires, 1 industriel
- 1995-2018 : instrumentation, analyse de données, astrophysique et cosmologie
- ~25 chercheurs, ingénieurs & techniciens

médaille de l'innovation du CNRS 2012



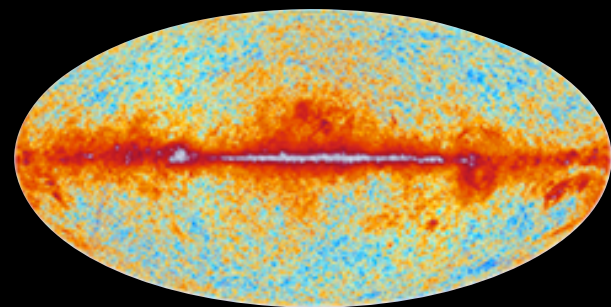
démonstrateur fait
au labo



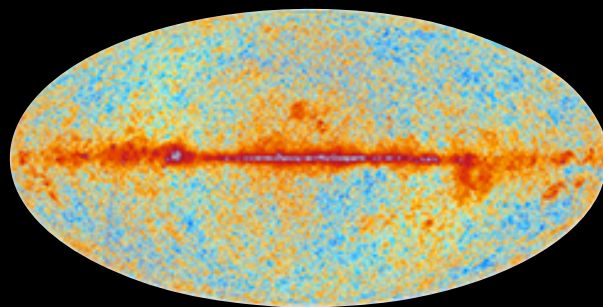
modèle de vol
quelques années
plus tard



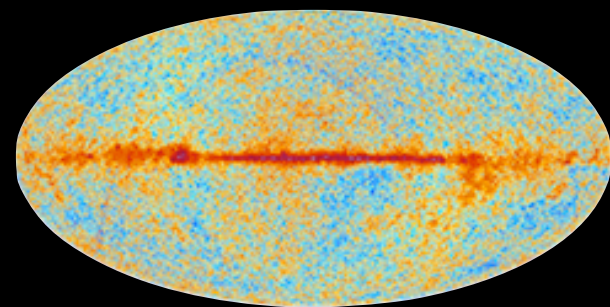
Le ciel vu par Planck



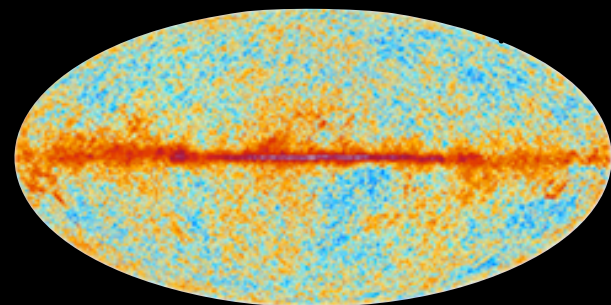
30 GHz



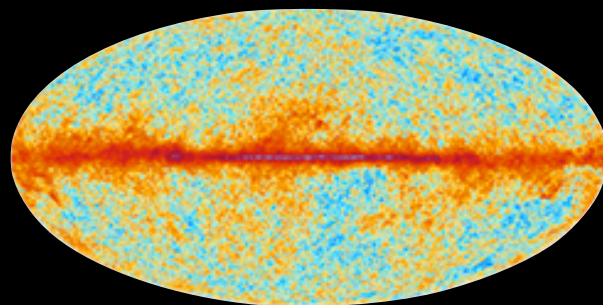
44 GHz



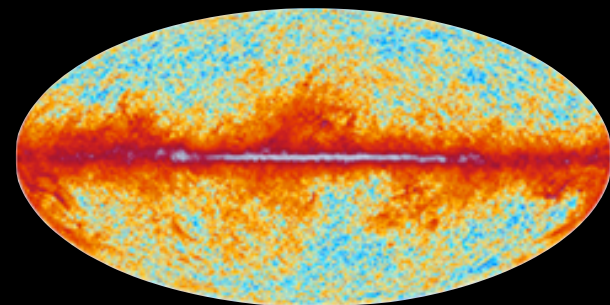
70 GHz



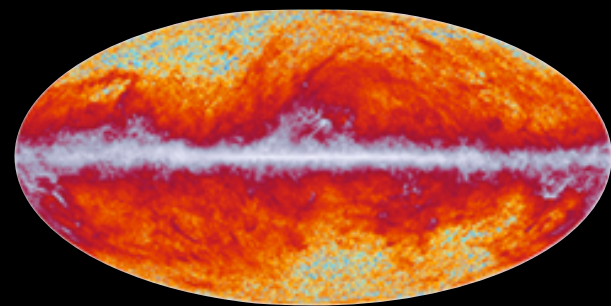
100 GHz



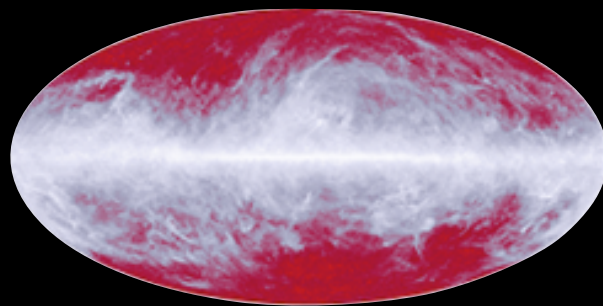
143 GHz



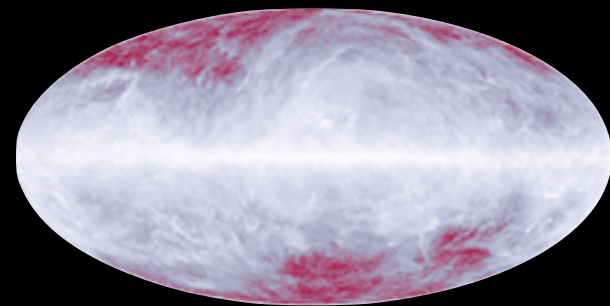
217 GHz



353 GHz

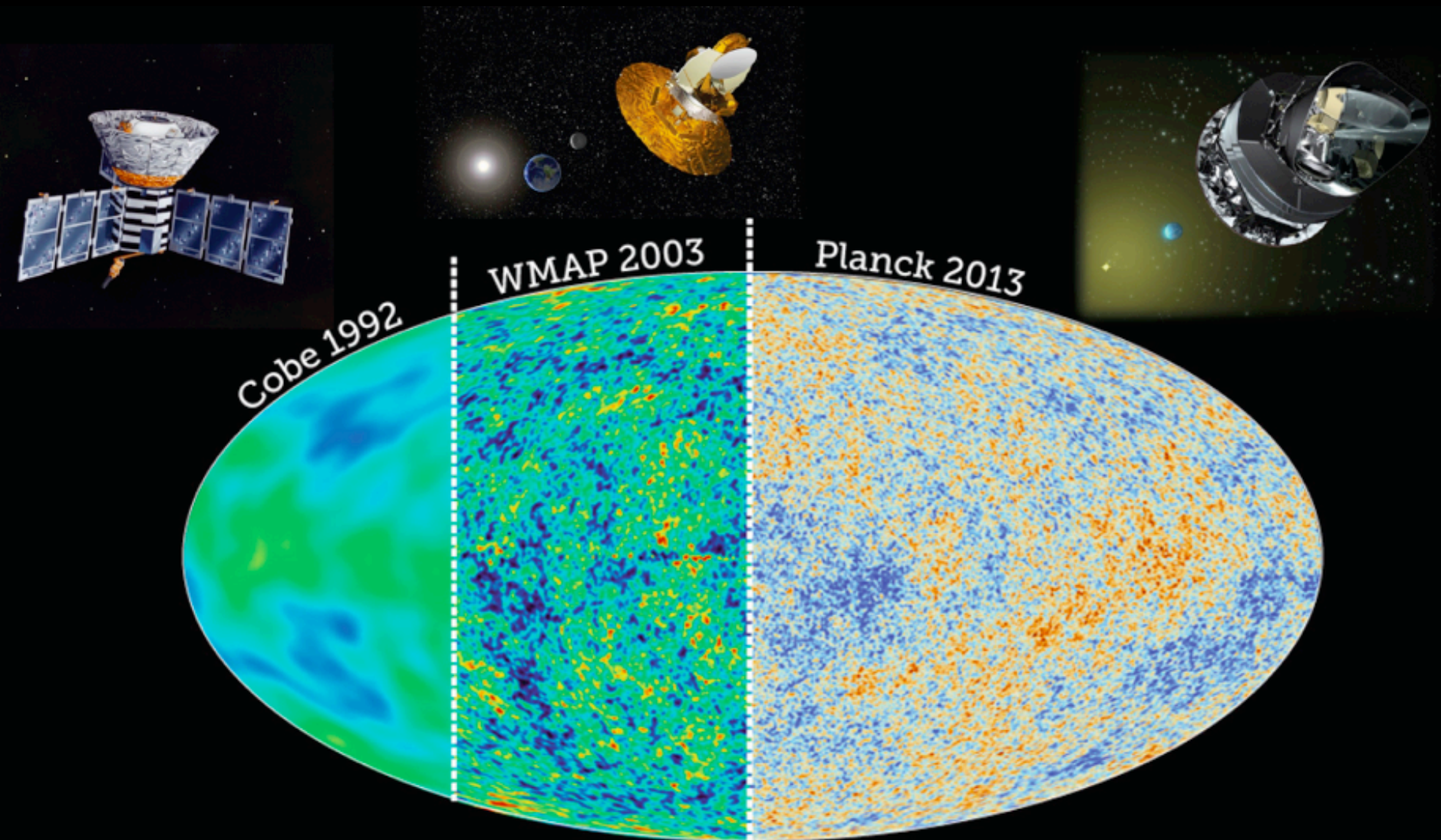


545 GHz

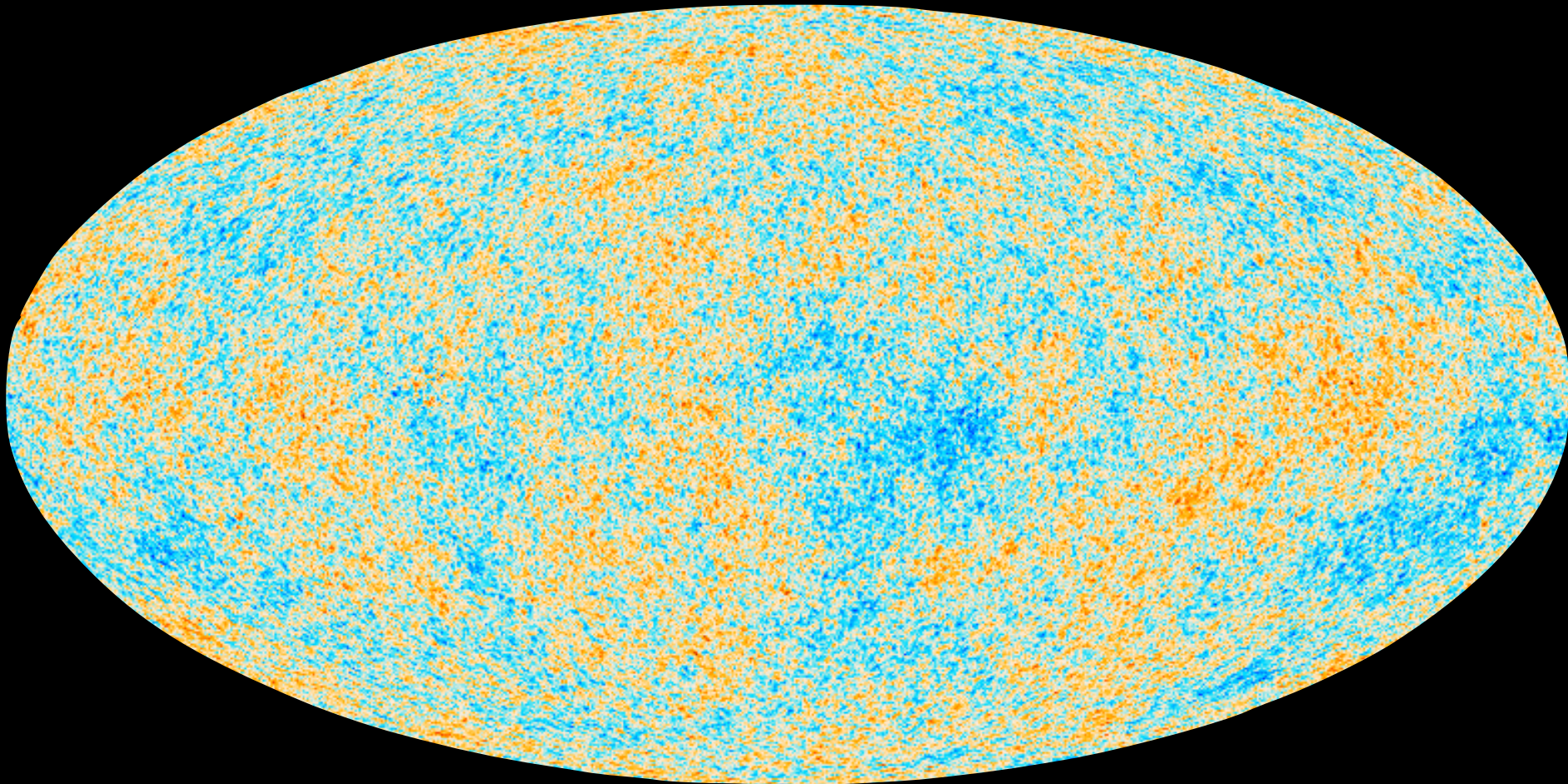


857 GHz

Fluctuations : de la découverte à l'étude fine



Les anisotropies du rayonnement fossile



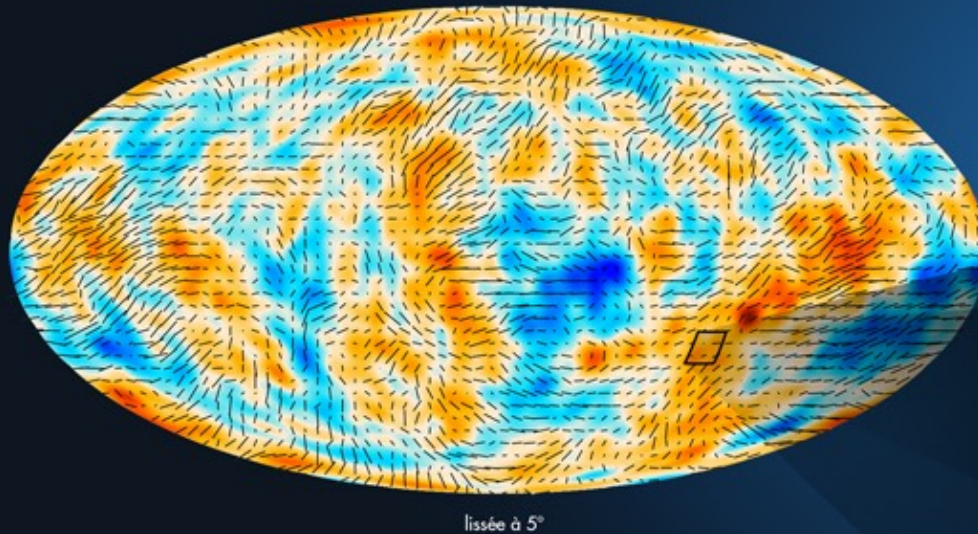
Carte des écarts par rapport à la valeur moyenne de 2,7255 kelvin (COBE)

Un millièmè de degré du plus chaud au plus froid

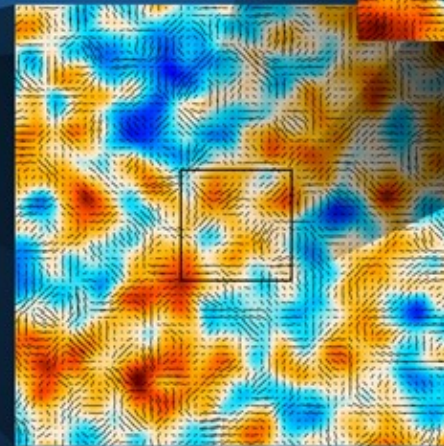
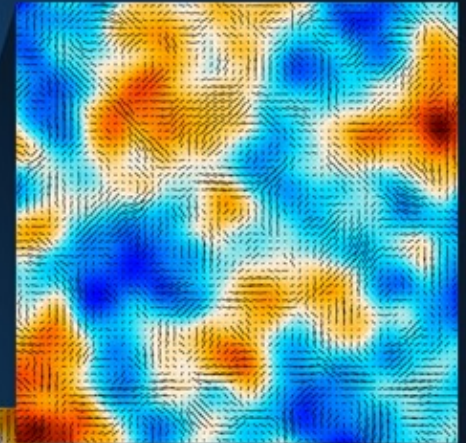
Sensibilité par pixel d'1/20 de pleine Lune de quelques millièmèes de degré

Polarisation du rayonnement fossile

CARTE DES FLUCTUATIONS DU RAYONNEMENT FOSSILE

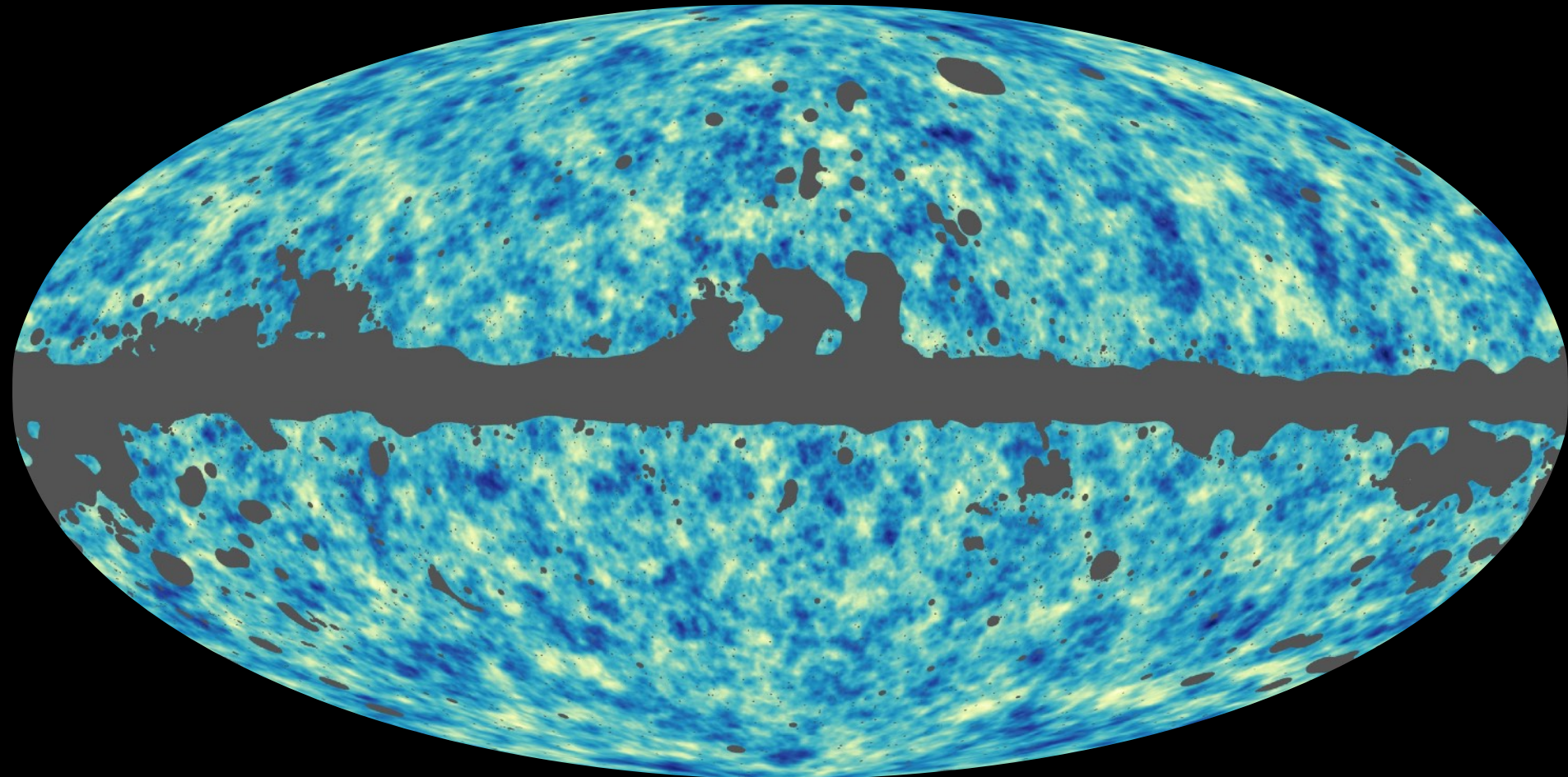


Autour de 2,7 Kelvin en température (couleurs) et en polarisation (traits noirs)



T et E : informations indépendantes disponibles sur tout le ciel
(besoin de masquer environ 20 à 35 % du ciel pour faire de la cosmologie)

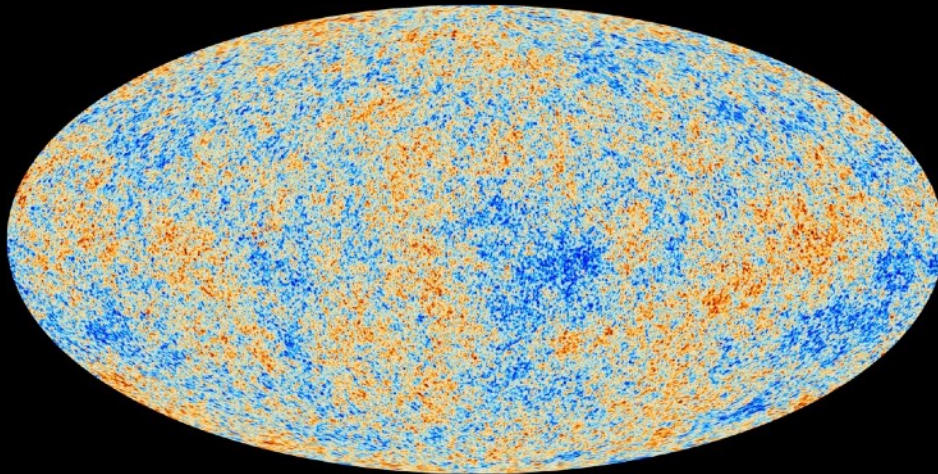
Carte de la distribution de masse intégrée sur la ligne de visée



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

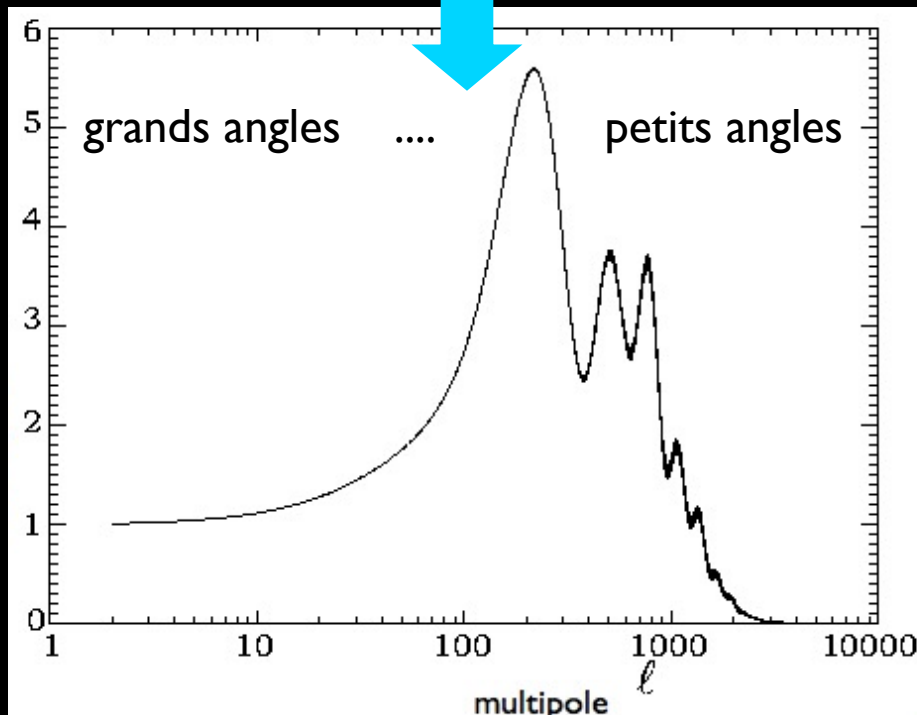
Rayonnement fossile par Planck =
image TRES PRECISE des structures 380 000 ans après le Big-Bang
+ image des structures quelques milliards d'années d'expansion et d'évolution plus tard

De la carte au spectre de puissance



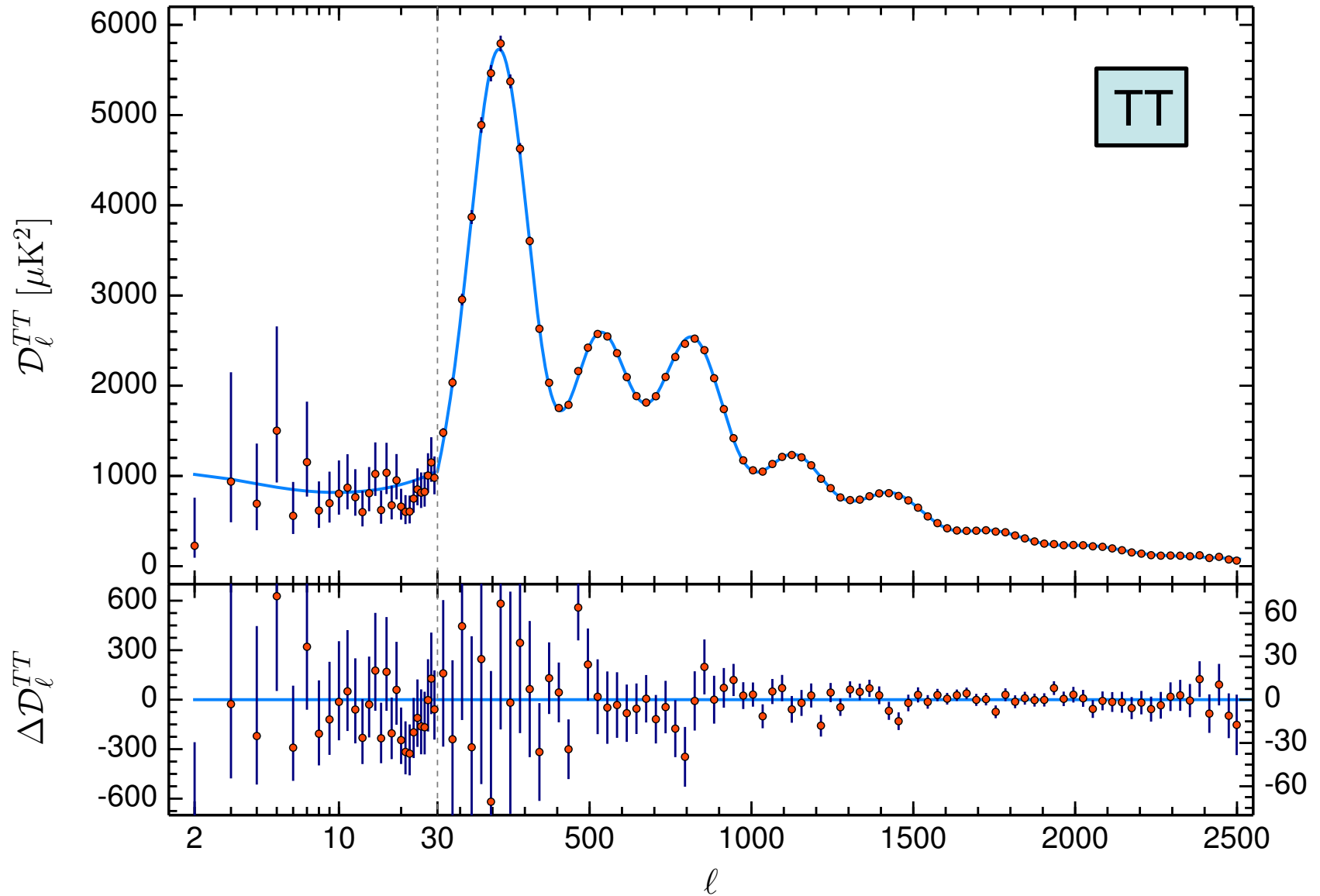
hypothèse de **gaussianité** :
lien entre taille et amplitude
des grumeaux

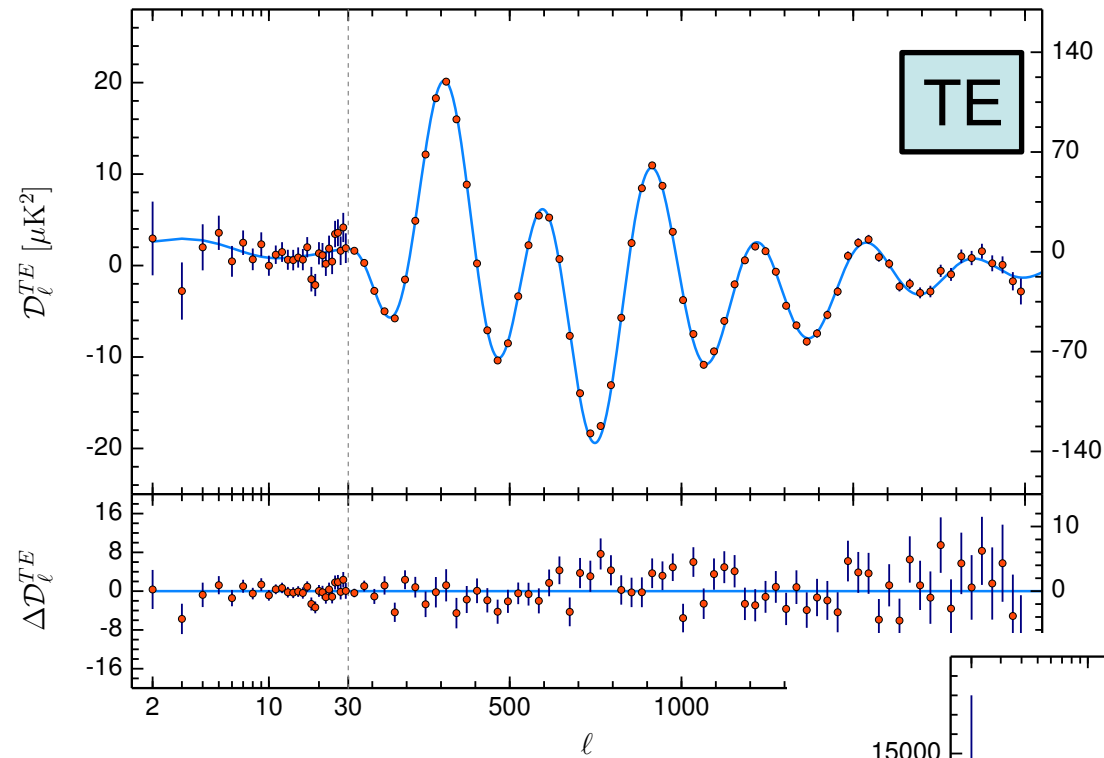
**Statistique de l'amplitude
des anisotropies en fonction
de leur taille**



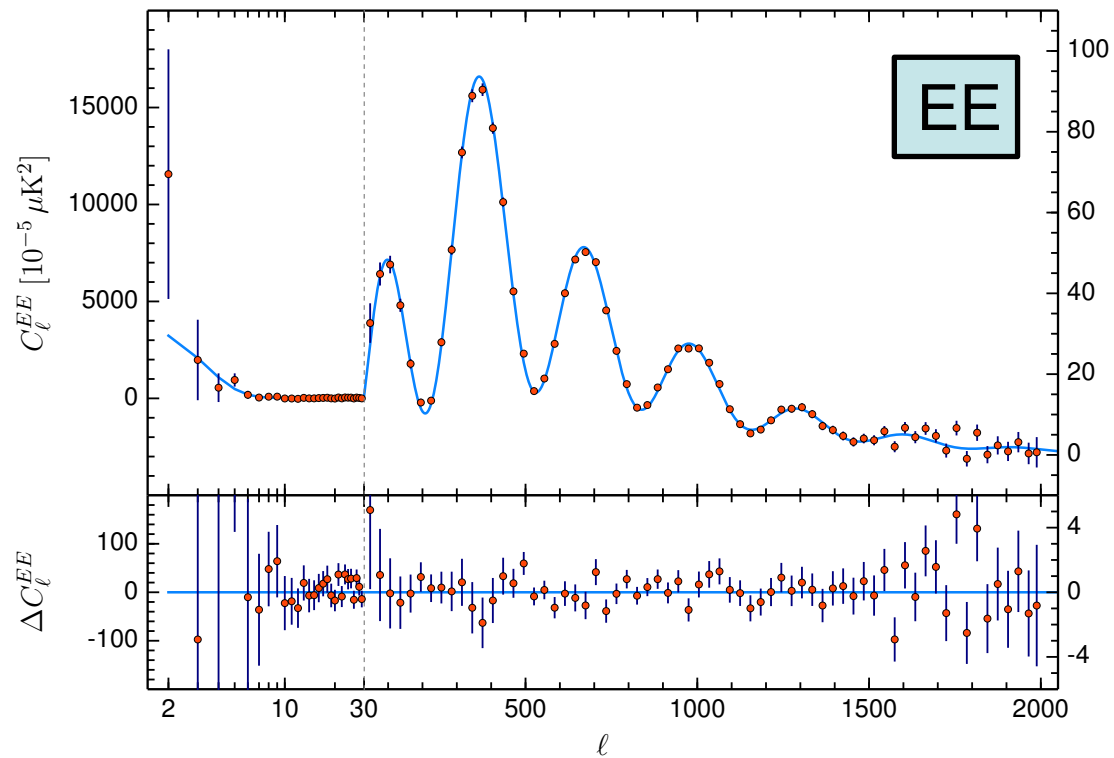
⇒ *toutes les informations
statistiques contenues dans
la carte à 2 dimensions sont
contenues dans une courbe à
une dimension.*

Le spectre en température en 2018

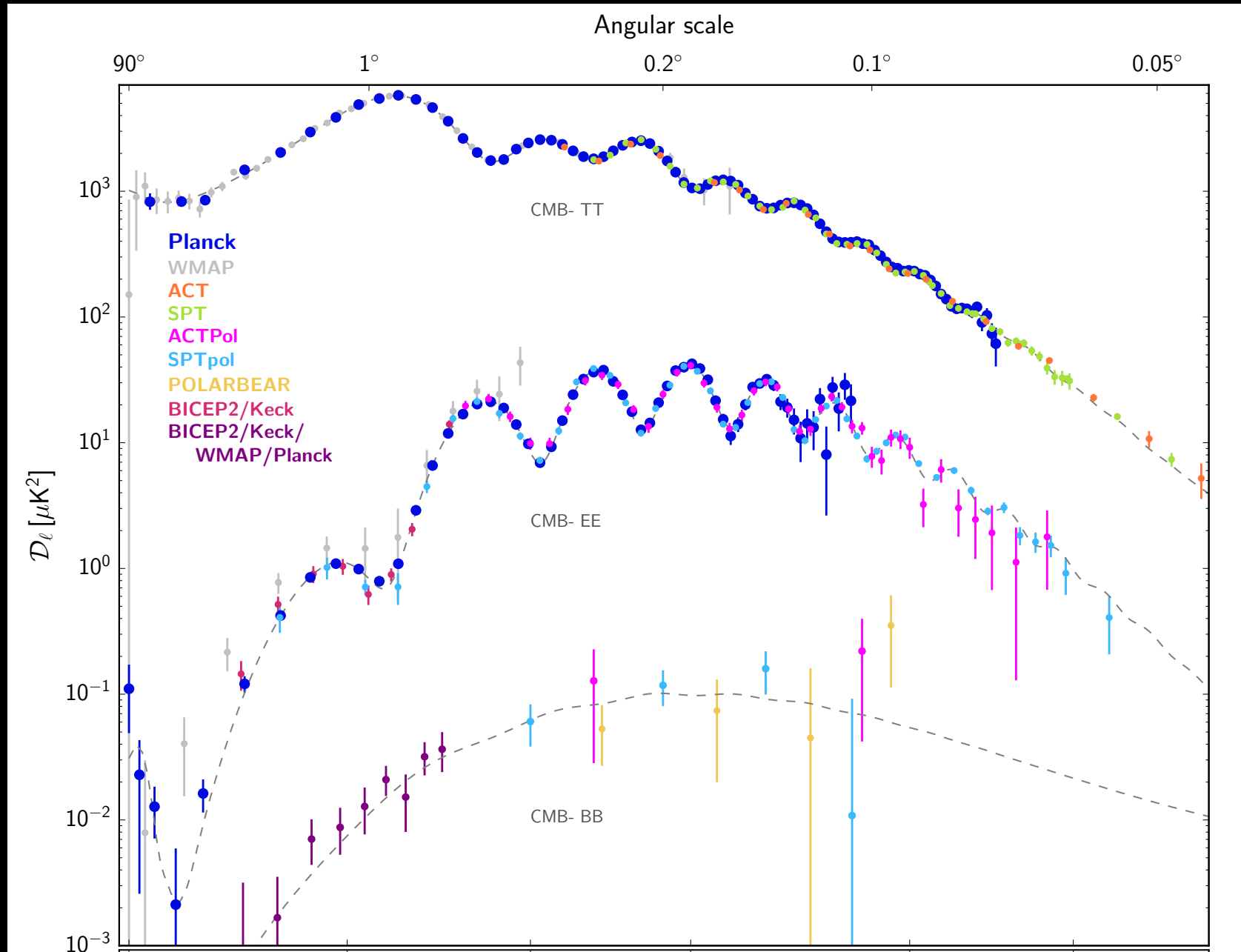




Le spectre en polarisation scalaire



Planck et les autres mesures

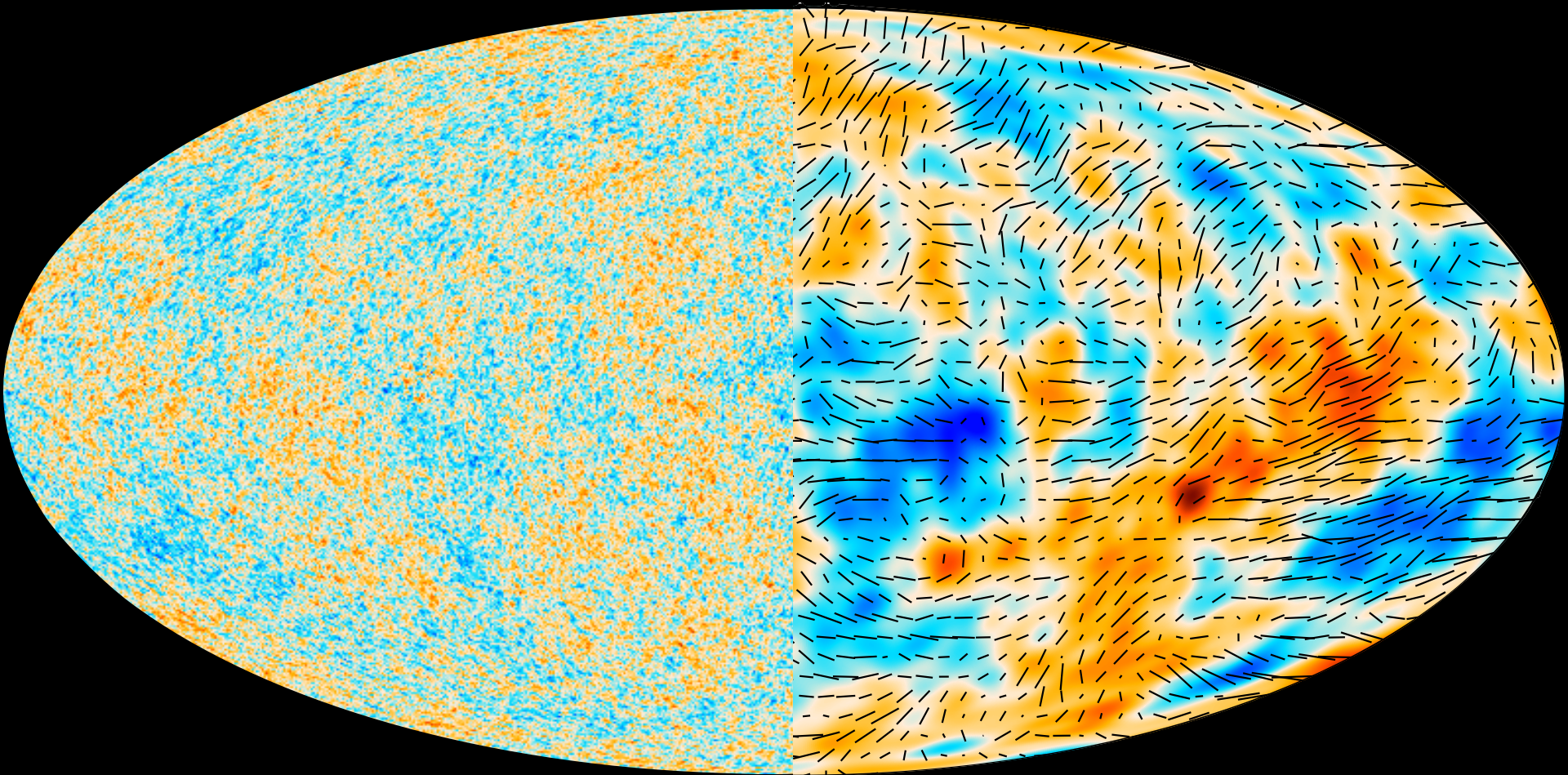


Ces cartes et spectres sont des mesures
essentiellement indépendantes
de tout modèle cosmologique

Ces cartes et spectres sont des mesures
essentiellement indépendantes
de tout modèle cosmologique

On les interprète
dans le cadre du modèle standard de la
cosmologie et de certaines de ses extensions

La matière 380 000 ans après le Big-Bang



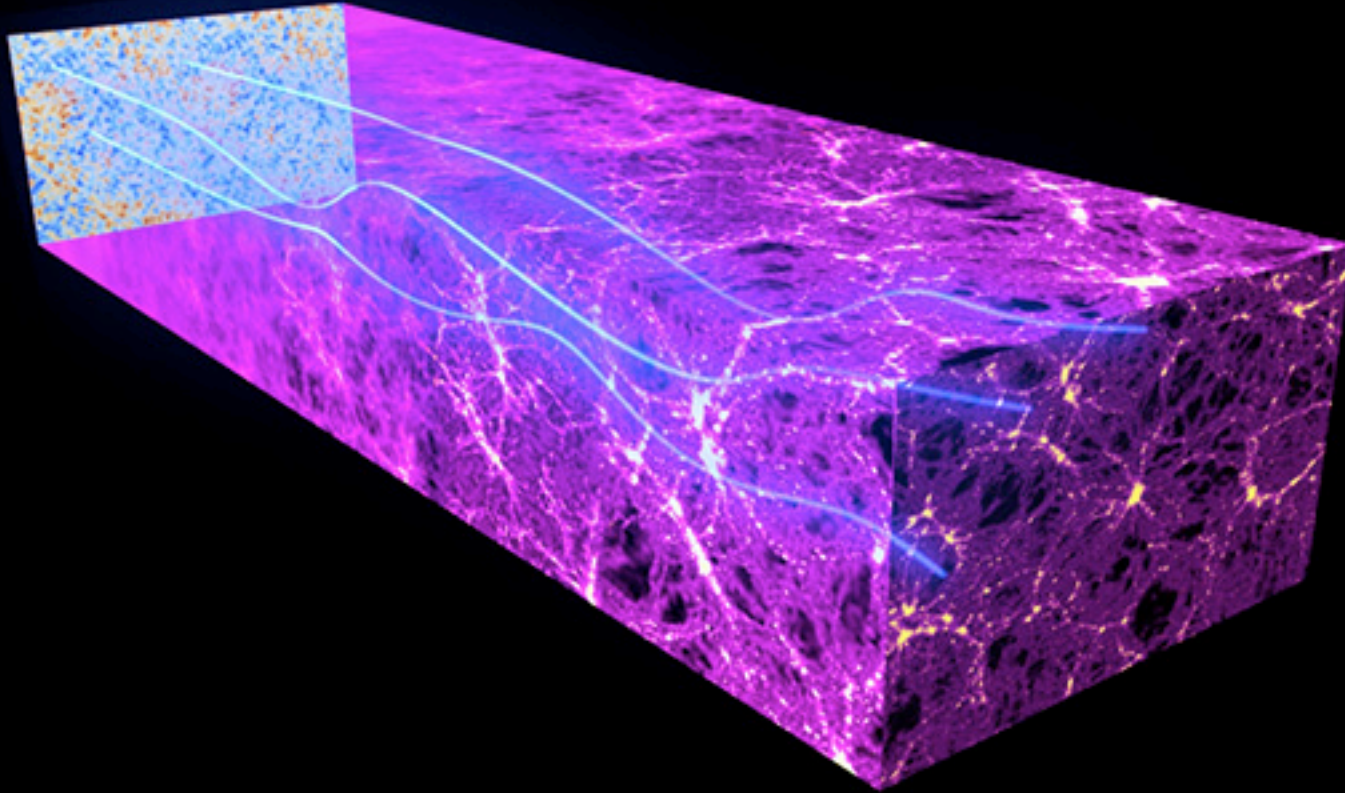
Où est la matière :

Les points froids (bleus) tracent les sur-densités et les points chauds (rouges) tracent les sous-densités

Comment bouge la matière :

La polarisation scalaire est produite par les mouvements de la matière qui tombe vers les sur-densités ou fuit les sous-densités

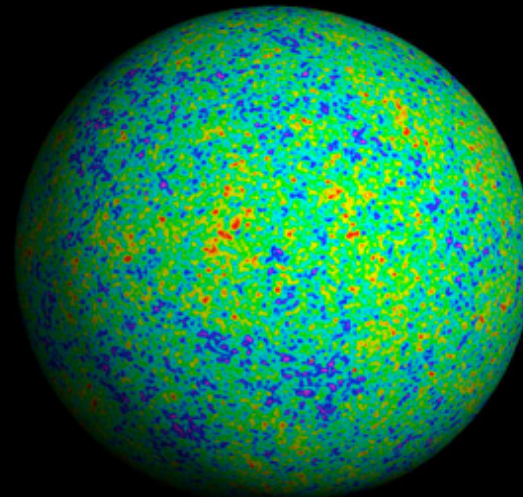
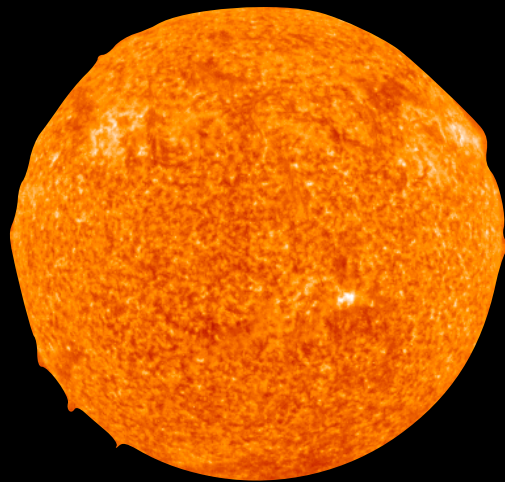
Ce qui s'est passé après *380 000 ans*



La masse présente entre le rayonnement fossile et nous va brouiller l'image.
→ il donne une **information sur la distribution de la masse 2-3 milliards d'années après l'émission du rayonnement fossile**

Ce qui s'est passé avant 380 000 ans

Rayonnement fossile = LA plus vieille image du cosmos qui soit accessible mais ...

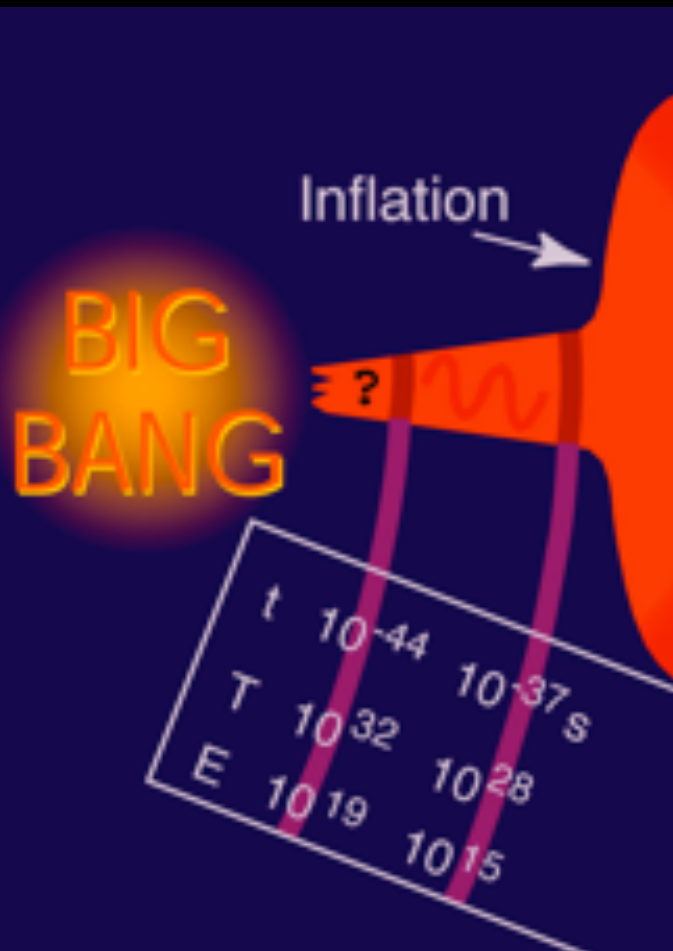


Tegmark

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

Le modèle d'inflation

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



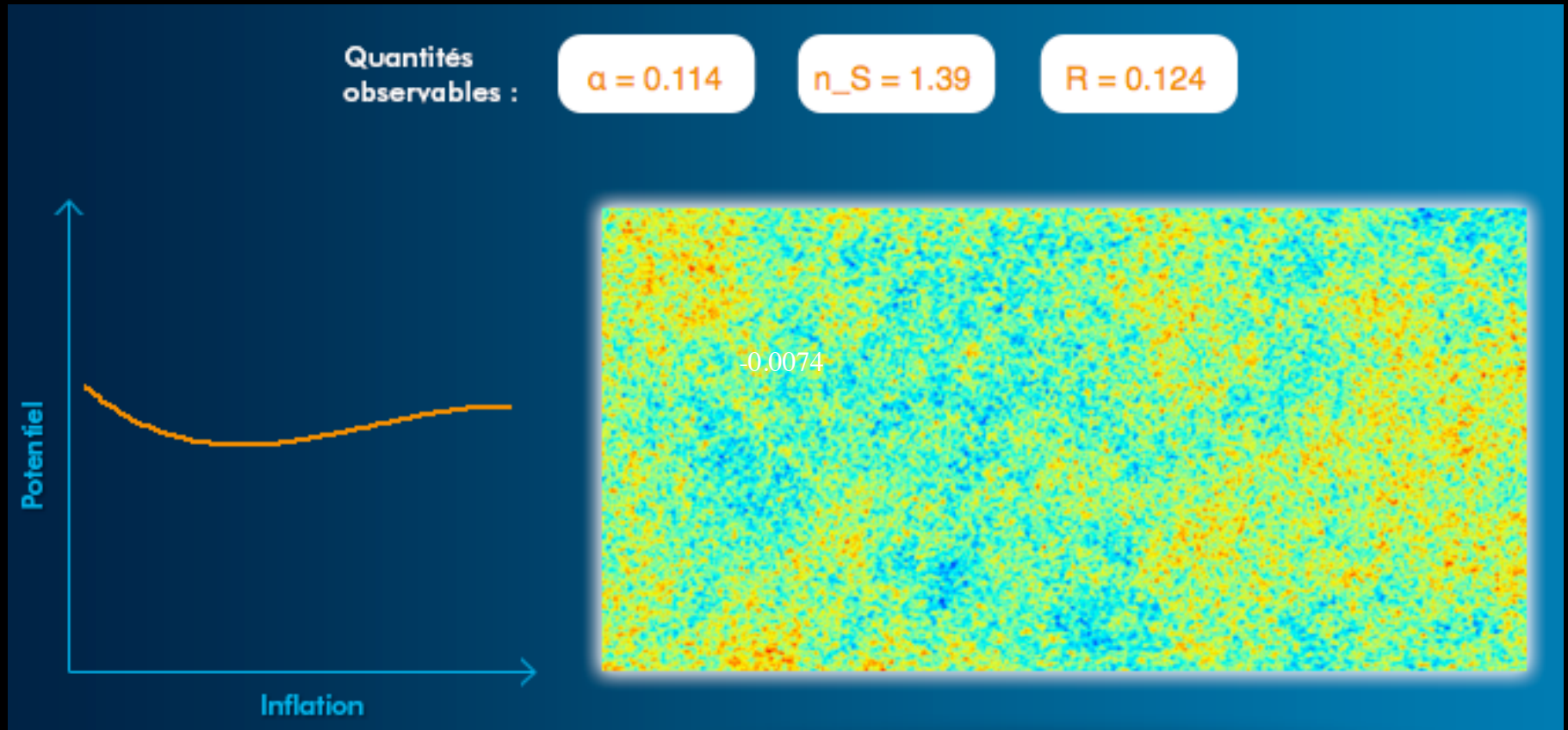
Les illustrations donnent une piètre idée de l'effet de l'inflation cosmique ...

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 ...

épaisseur d'un cheveu → diamètre de la Galaxie

Le modèle d'inflation

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

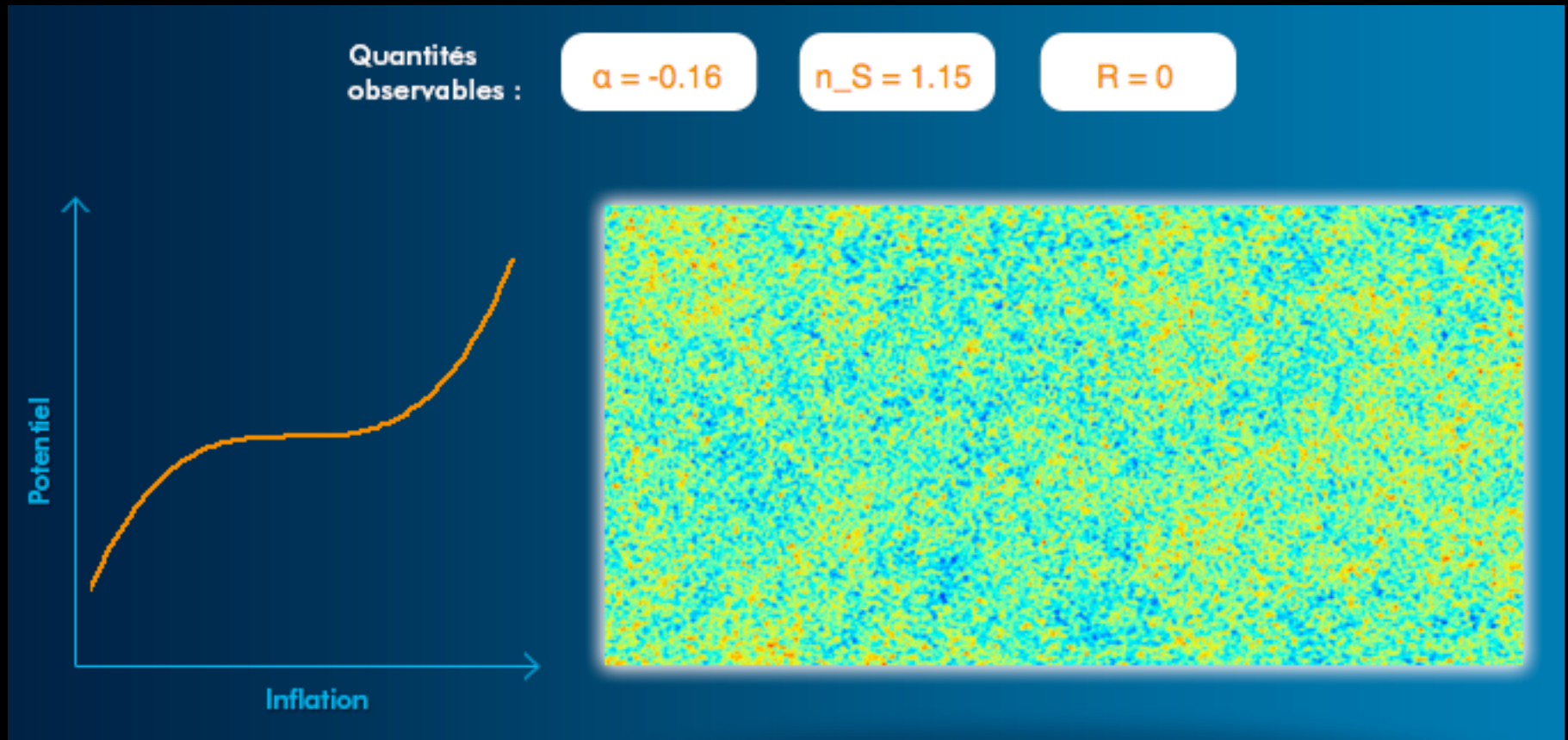


Simulations de cas “extrêmes” !

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

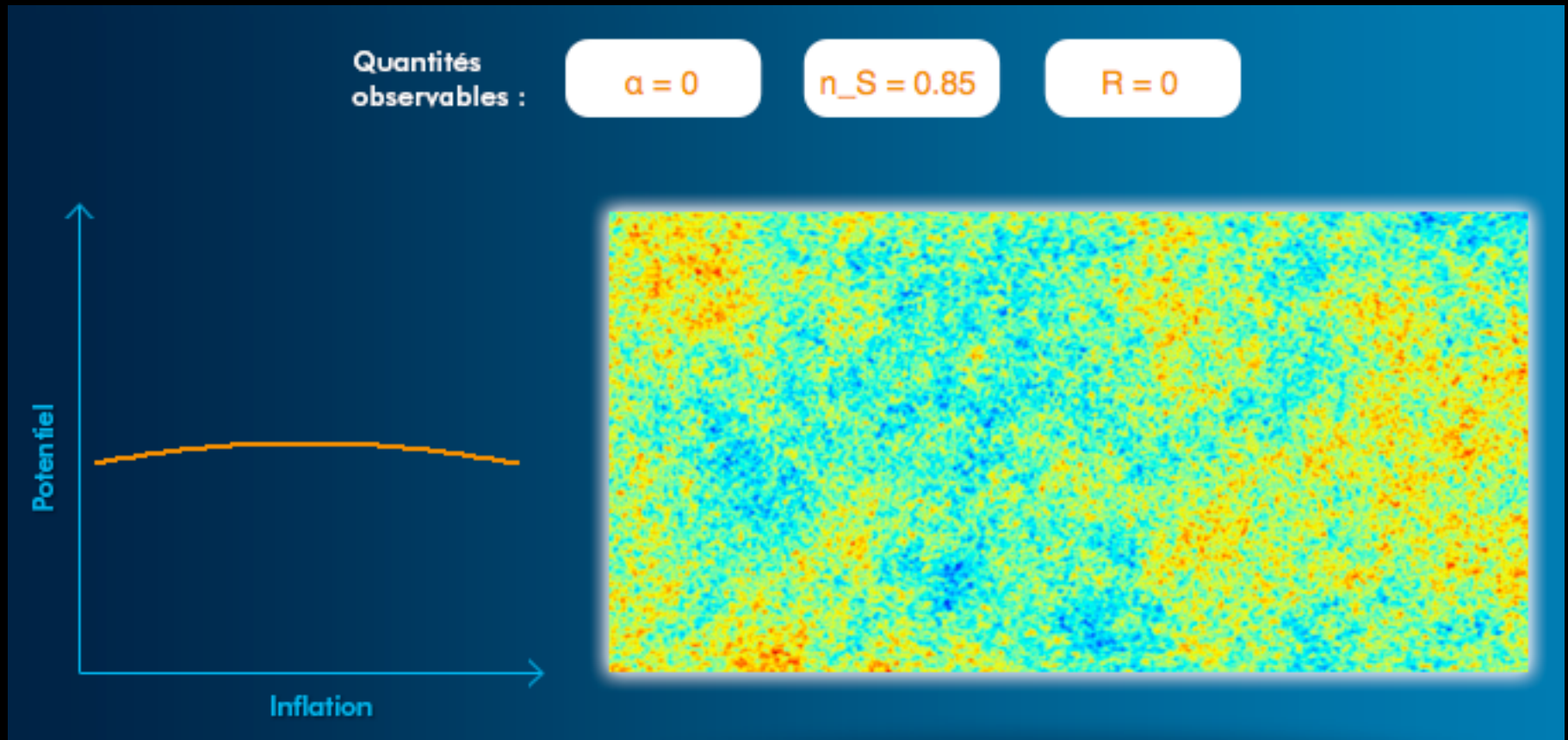


Simulations de cas “extrêmes” !

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

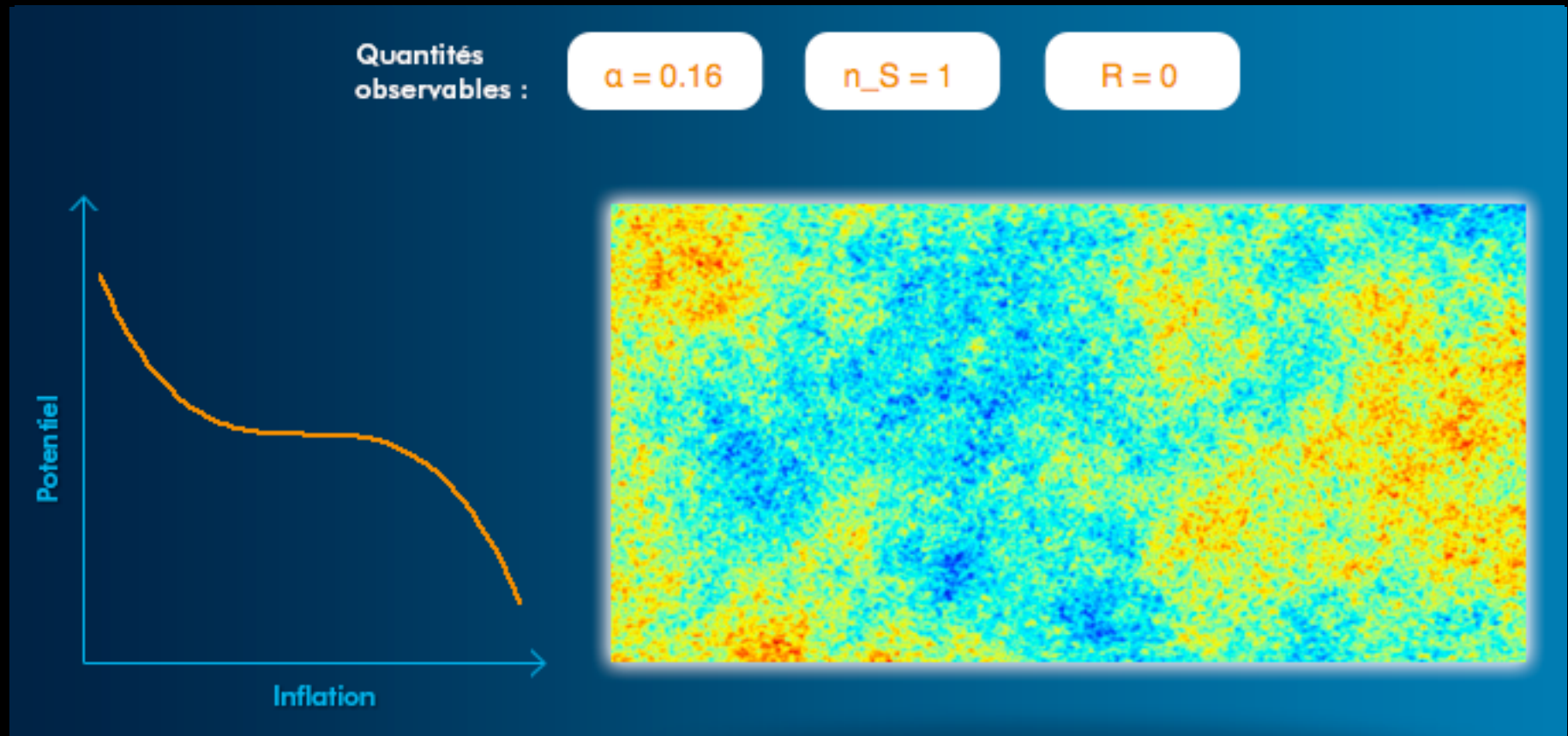


Simulations de cas "extrêmes" !

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.

Quels sont ces paramètres du modèle Λ CDM ?

Ω_b	Densité de baryons aujourd'hui
Ω_{CDM}	Densité de matière noire froide aujourd'hui
H_0	Vitesse d'expansion de l'espace aujourd'hui

**CONTENU et
DYNAMIQUE**

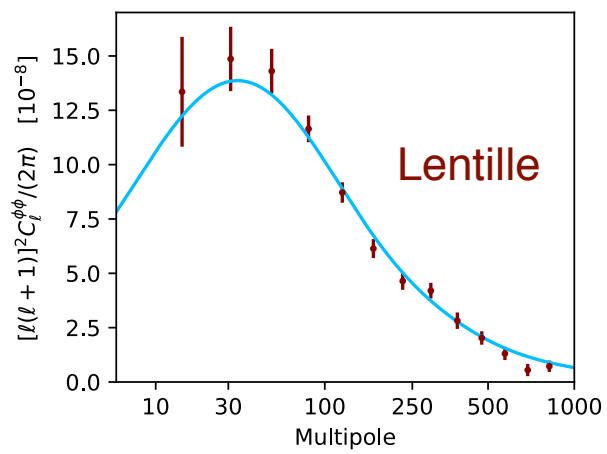
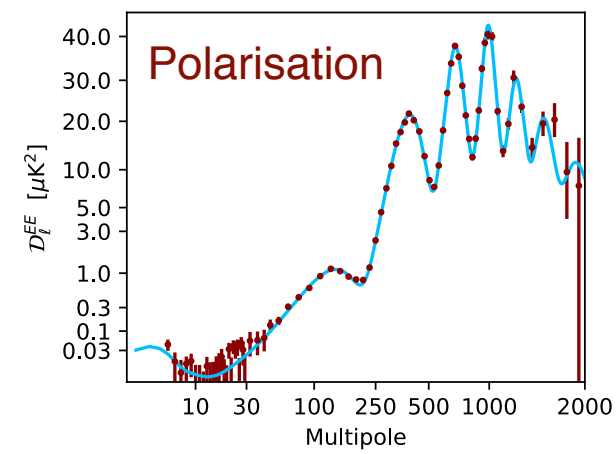
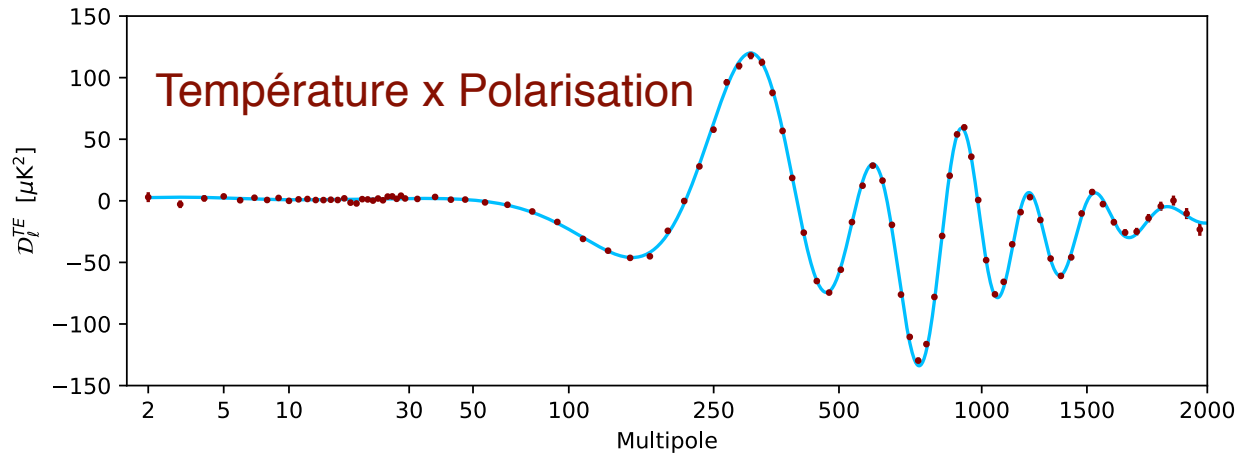
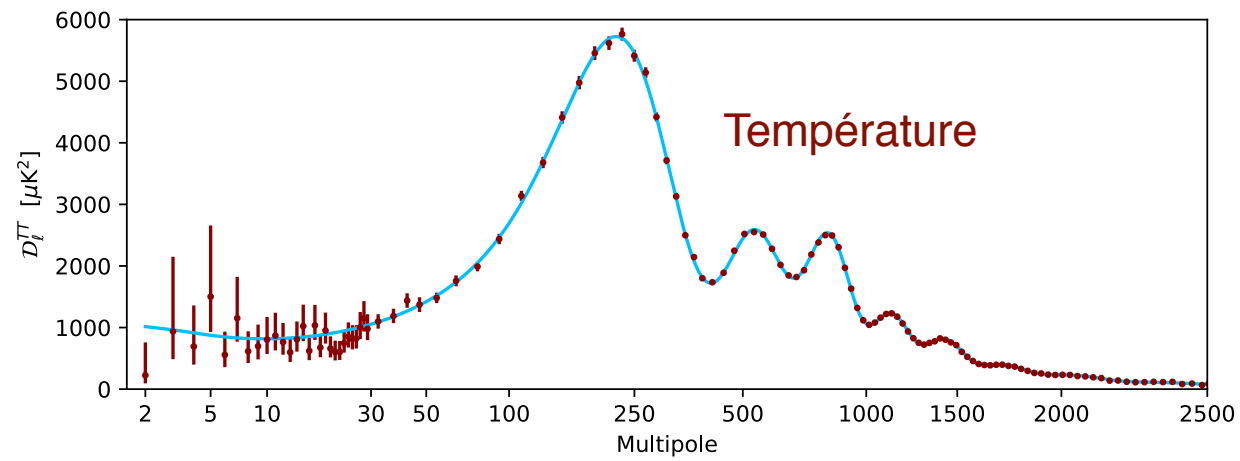
$$\Omega_\Lambda = 1 - \Omega_b - \Omega_{\text{CDM}}$$

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
--------	---

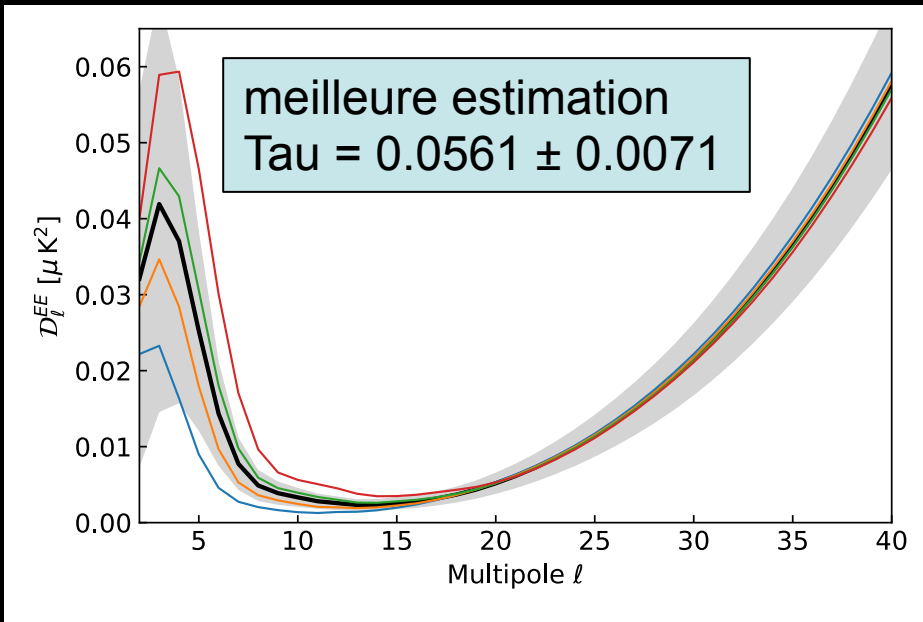
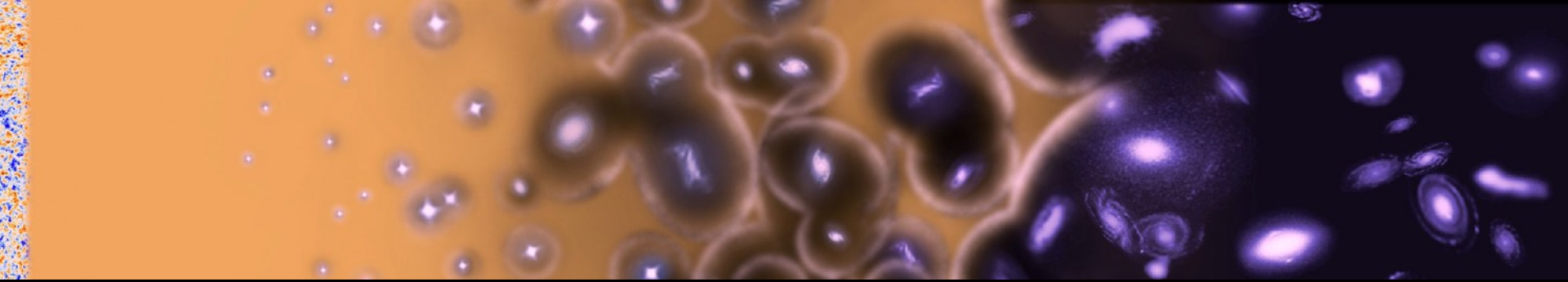
EVOLUTION



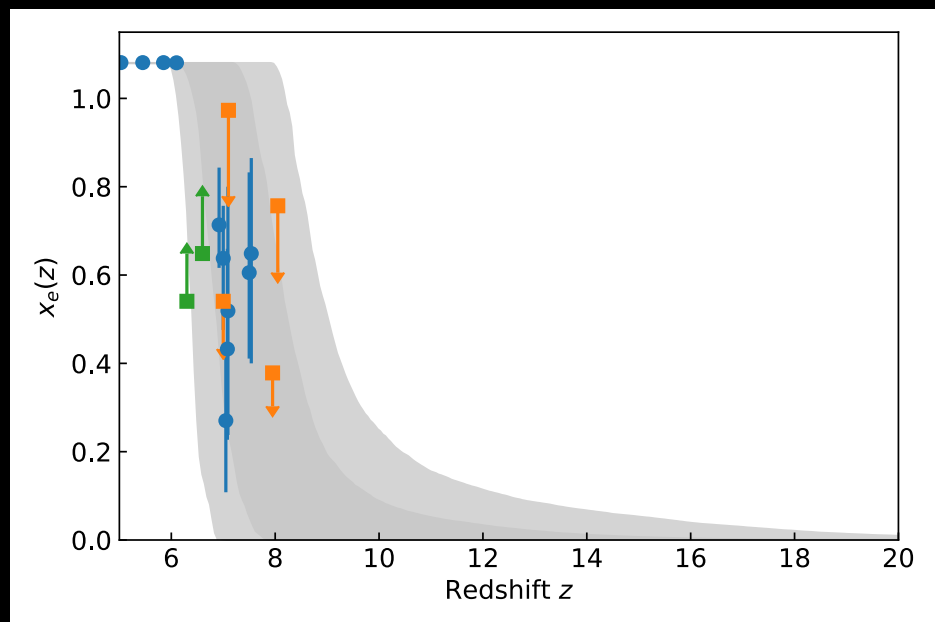
Meilleur ajustement
 du modèle standard
 de la cosmologie
 (6 paramètres)
 commun aux 4
 spectres

→ robustesse du
 modèle

La réionisation



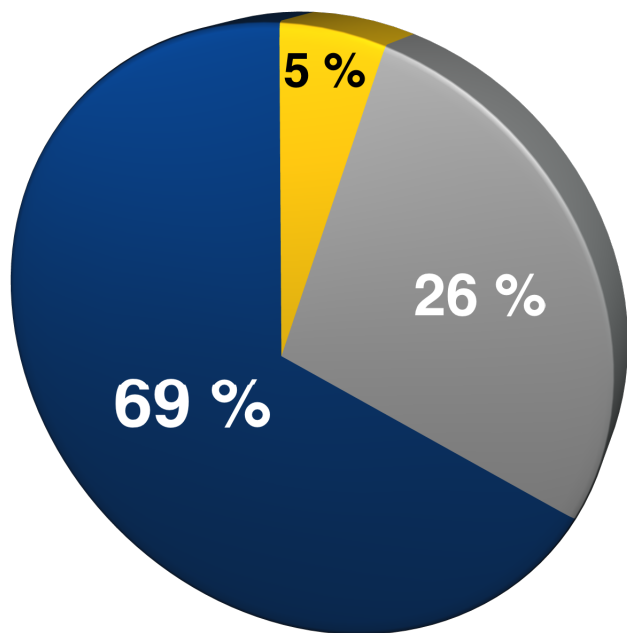
épaisseurs optiques de 0.04 à 0.07 (par pas de 0.01)



Contraintes limitées sur l'histoire de la réionisation ...

De quoi est fait notre univers ?

- matière baryonique
- matière noire
- énergie noire



Aujourd'hui

Matière baryonique et rayonnement interagissent pendant 380 000 ans (pression de radiation / gravité) + gravité avec la matière noire

→ pics acoustiques dont les hauteurs relatives sont directement liées aux quantités respectives de matière noire et baryonique

meilleures estimations Planck+BAO

$$\Omega_m = 0.3111 \pm 0.0056 \text{ (matières)}$$

$$\Omega_\Lambda = 0.6889 \pm 0.0056$$

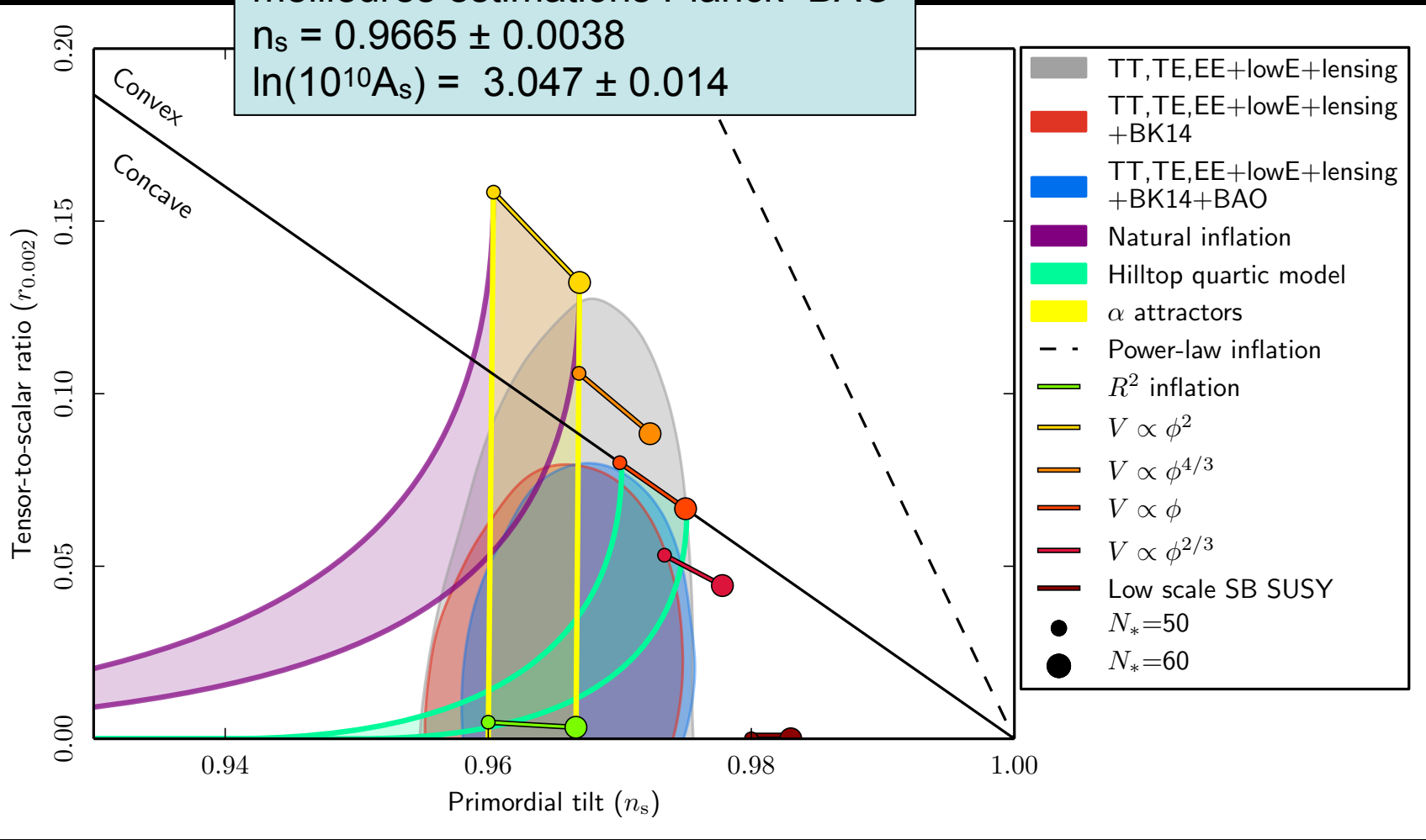
$$H_0 = 67.66 \pm 0.42 \text{ km/s/Mpc}$$

Contraintes sur l'inflation

meilleures estimations Planck+BAO

$$n_s = 0.9665 \pm 0.0038$$

$$\ln(10^{10}A_s) = 3.047 \pm 0.014$$



quand (≡ énergie)

combien de temps

Planck a éliminé ~ 1/3
des modèles d'inflation

Inflation robuste, modèles simples favorisés

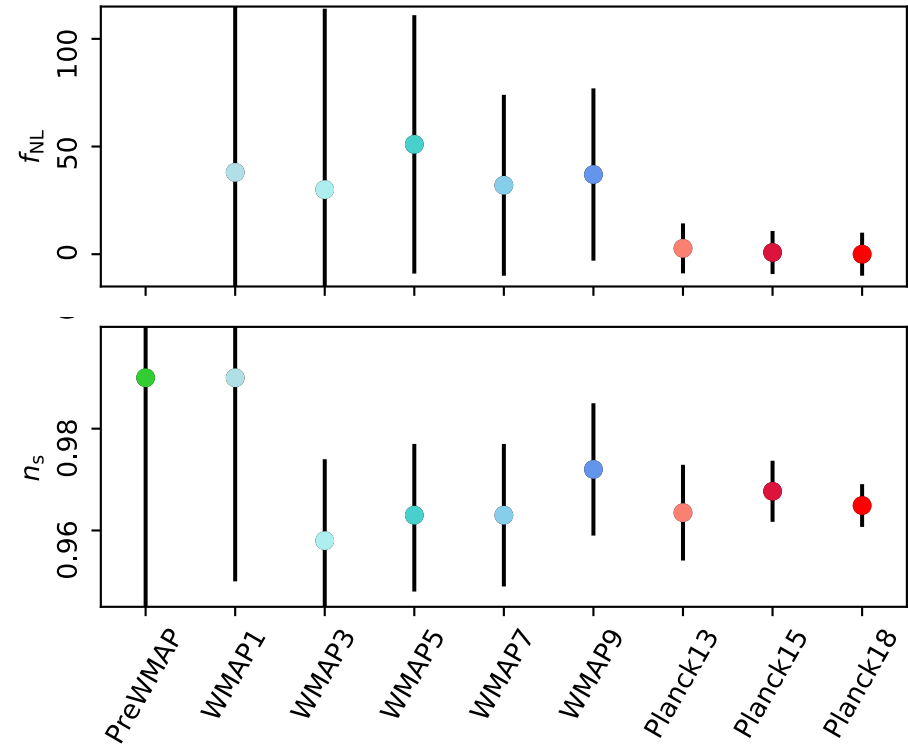
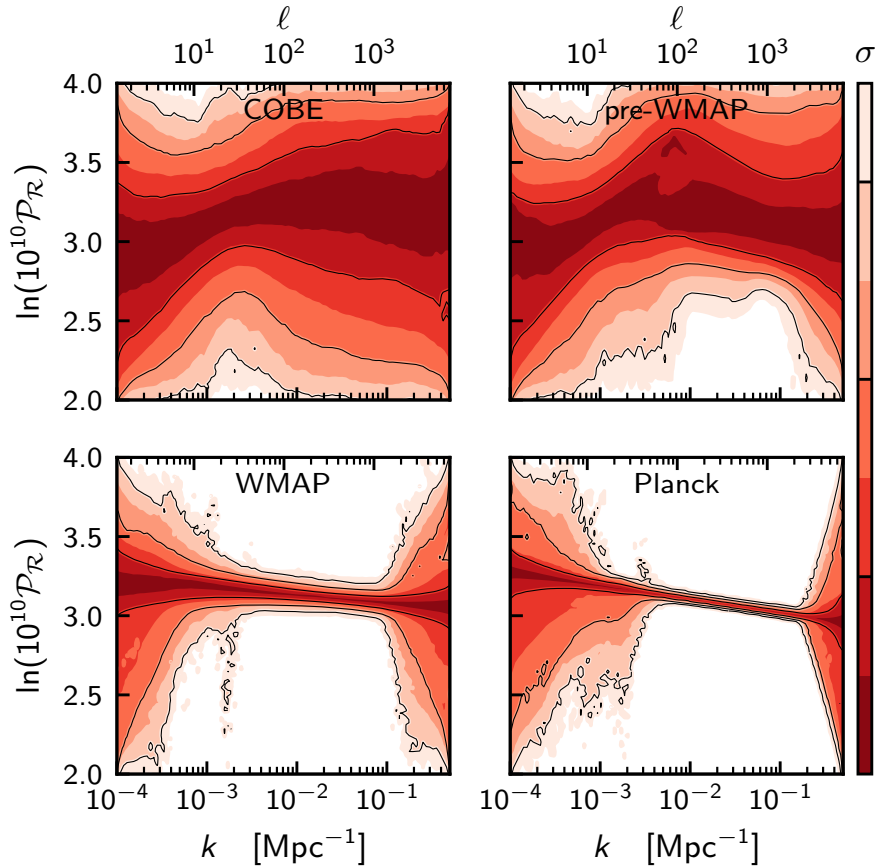
Le modèle le plus simple d'inflation est mis à l'épreuve de multiples façons :

Prédiction	Valeur attendue	Mesure ou limite supérieure
un univers avec un espace euclidien (c'est-à-dire plat)	$\Omega_K \approx 0$	$\Omega_K = 0.0007 \pm 0.0019$
un spectre des fluctuations primordiales \sim invariant d'échelle, très légèrement rouge	$n_s \approx 1$	$n_s = 0.967 \pm 0.004$
qui est presque une loi de puissance	$dn/d \ln k \approx 0$	$dn/d \ln k = -0.0042 \pm 0.0067$
dominé par les perturbations scalaires	$r_{0.002} \approx 0$	$r_{0.002} < 0.07$
ces perturbations étant gaussiennes	$f_{NL} \approx 0$	$f_{NL} = 2.5 \pm 5.7$
et adiabatiques	$\alpha_{-1} \approx 0$	$\alpha_{-1} = 0.00013 \pm 0.00037$
avec une quantité négligeable de défauts topologiques	$f \approx 0$	$f < 0.01$

—> *les hypothèses sont testées ... et vérifiées*

On caractérise le spectre de puissance des inhomogénéités $\sim 10^{-30}$ secondes après le BB

Pas une révolution mais de gros progrès dans l'univers primordial

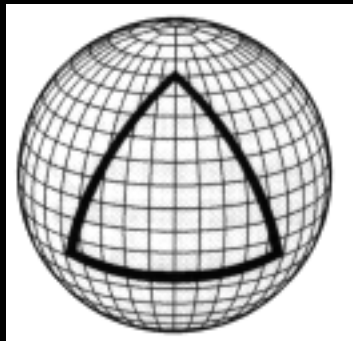


Inflation bien ancrée

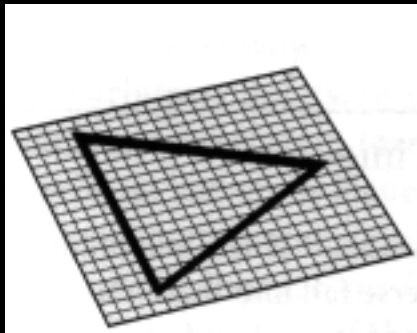
Anomalies aux plus grandes échelles
peu significatives

Géométrie et vitesse d'expansion de l'espace

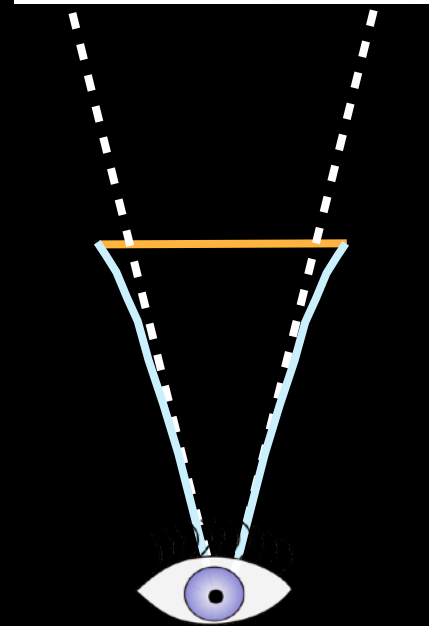
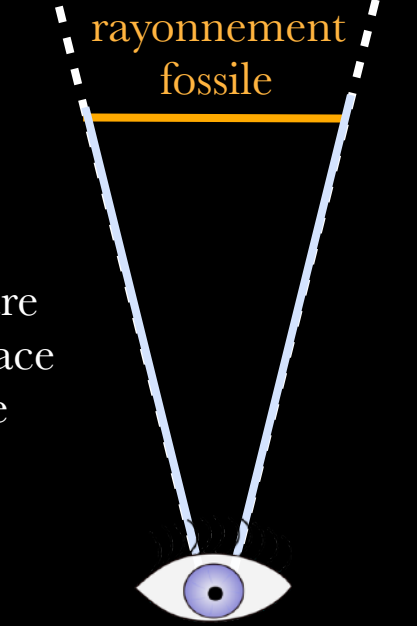
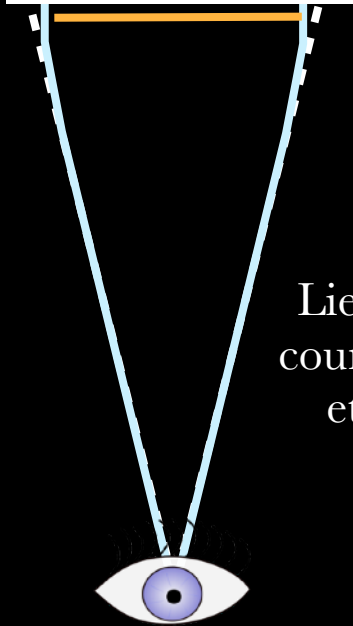
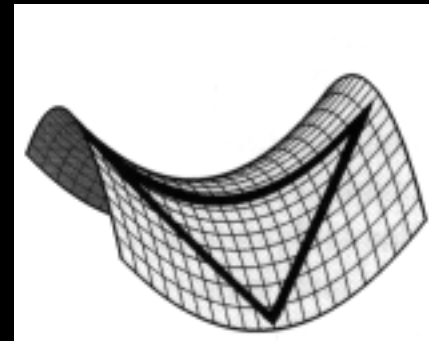
Fermé : Courbure positive



Plat : Courbure nulle



Ouvert : Courbure négative

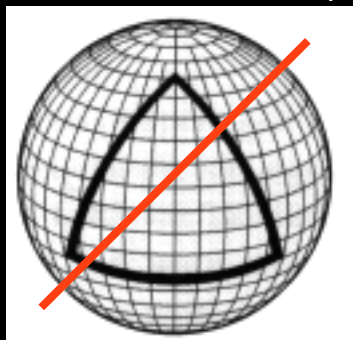


Lien très fort entre courbure de l'espace et expansion de l'Univers

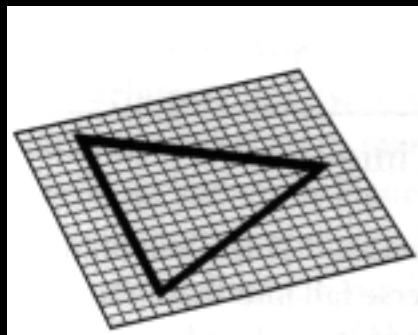
$$\Omega_K = -0.037 \quad \pm 0.034 \text{ Planck (CMB) 2018}$$

Géométrie et vitesse d'expansion de l'espace

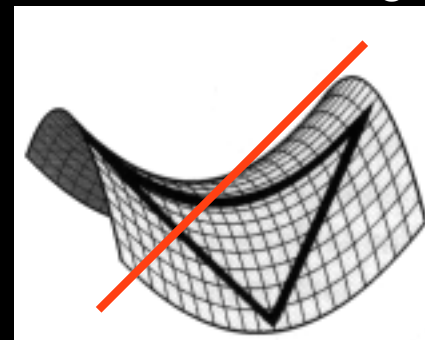
Fermé : Courbure positive



Plat : Courbure nulle



Ouvert : Courbure négative



masse
(lentille)

rayonnement
fossile

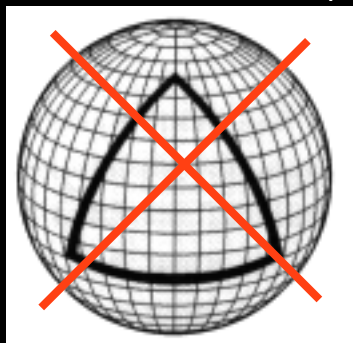
Lien très fort entre
courbure de l'espace
et expansion de
l'Univers

$$\Omega_K = -0.037 \quad +/- \quad 0.034 \quad \text{Planck (CMB) 2018}$$

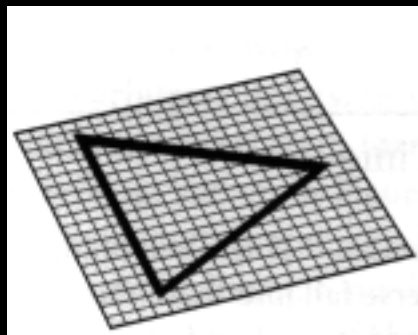
$$\Omega_K = -0.011 \quad +/- \quad 0.013 \quad \text{Planck (CMB + lentille) 2018}$$

Géométrie et vitesse d'expansion de l'espace

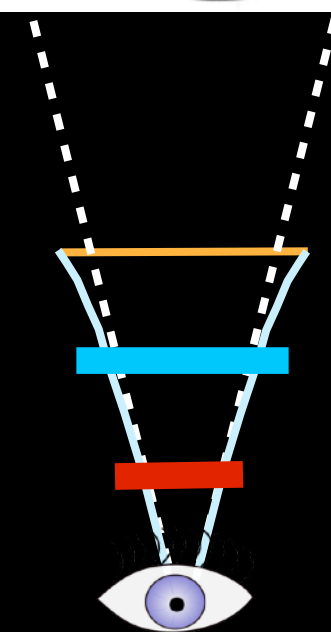
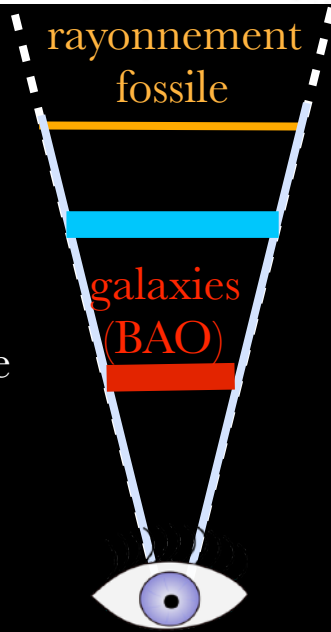
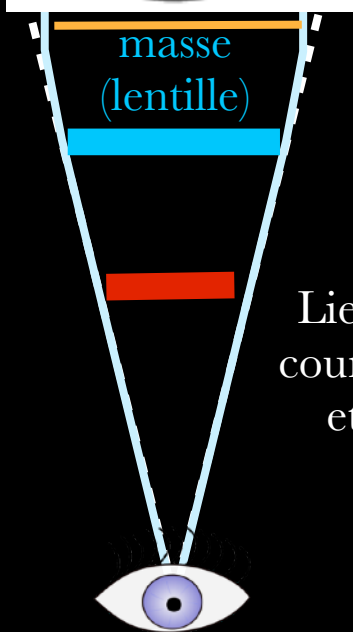
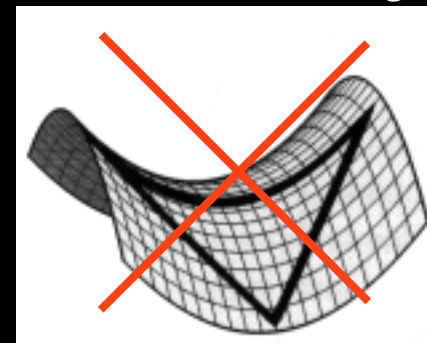
Fermé : Courbure positive



Plat : Courbure nulle



Ouvert : Courbure négative



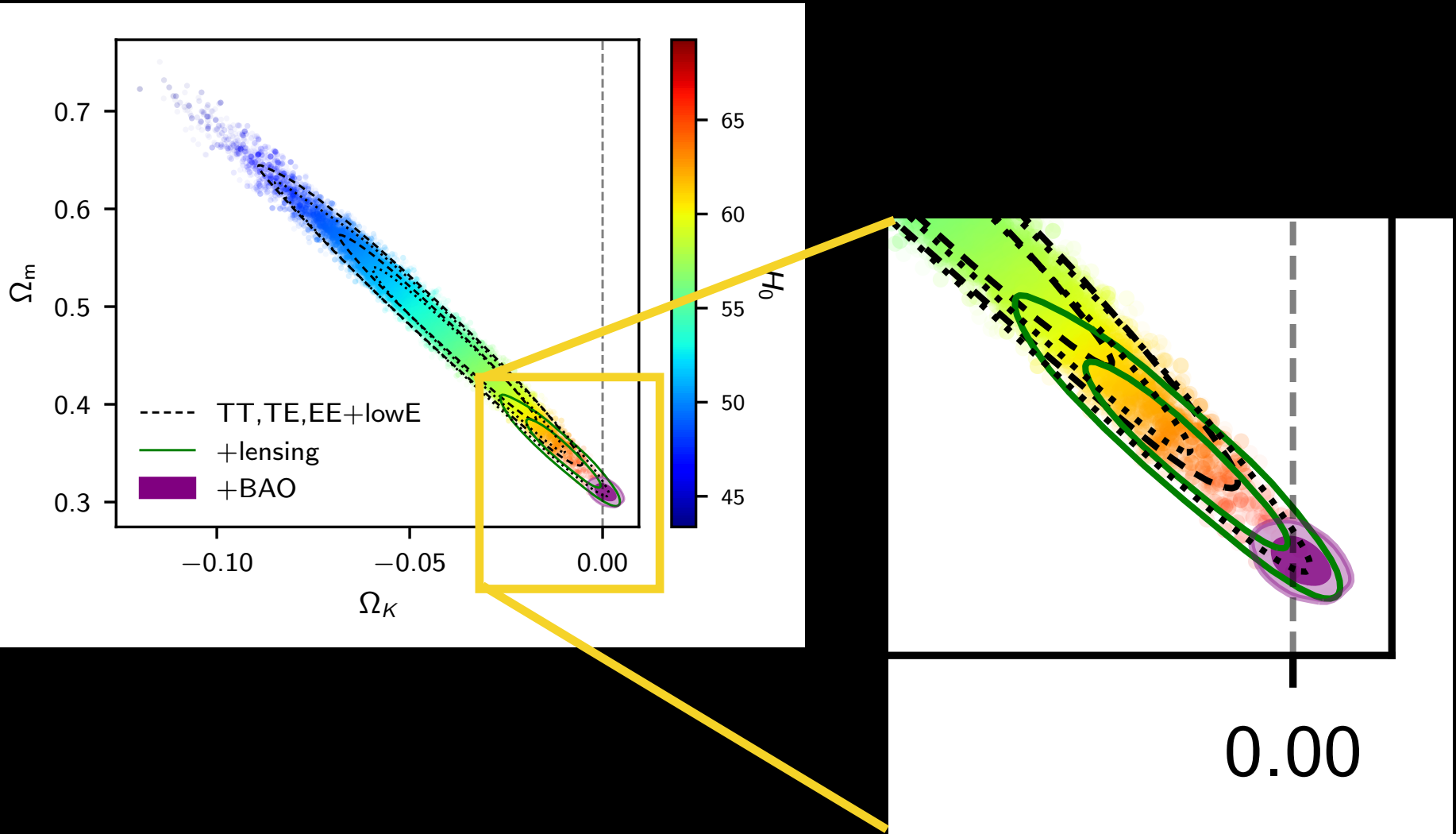
Lien très fort entre courbure de l'espace et expansion de l'Univers

$$\Omega_K = -0.037 \quad +/- \quad 0.034 \quad \text{Planck (CMB) 2018}$$

$$\Omega_K = -0.011 \quad +/- \quad 0.013 \quad \text{Planck (CMB + lentille) 2018}$$

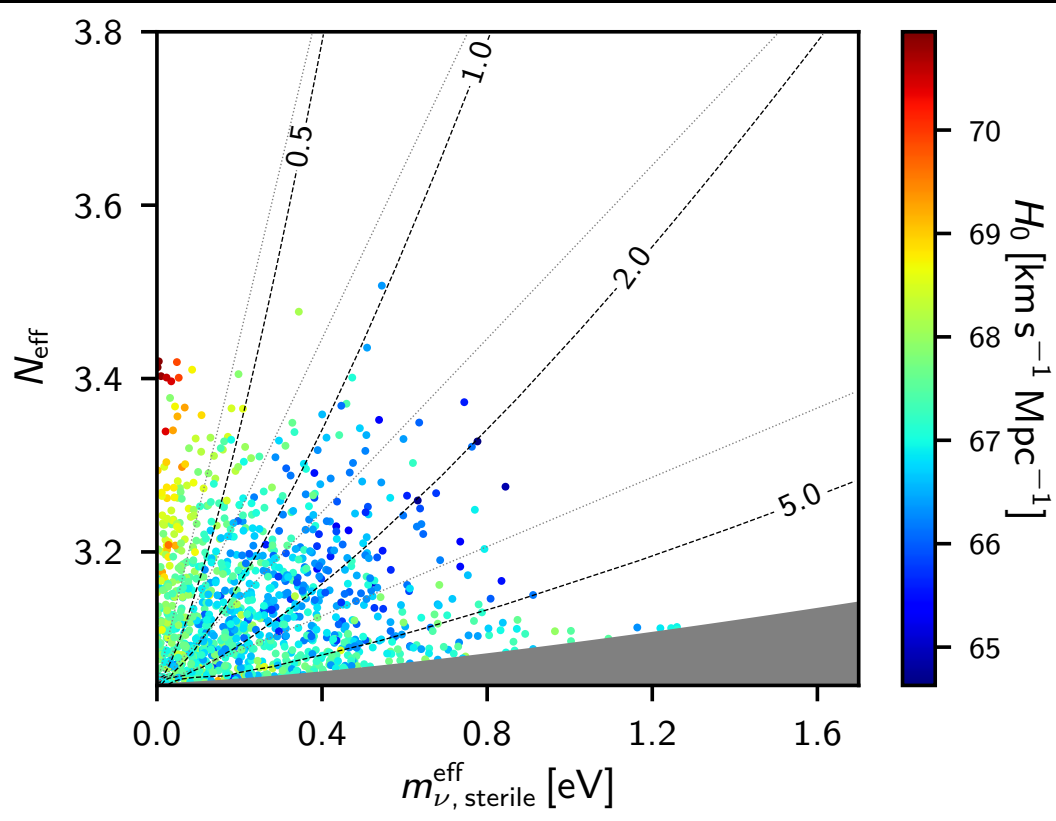
$$\Omega_K = -0.0005 \quad +/- \quad 0.0040 \quad \text{Planck (CMB + lentille) 2018 + BAO}$$

Géométrie et vitesse d'expansion de l'espace



*Planck+BAO = **espace euclidien** + vitesse d'expansion modérée de 67.66 ± 0.42 km/s/Mpc*

Neutrinos & grandes structures



Le nombre effectif de neutrinos est relié aux échanges neutrinos/photons (thermalisation partielle ou complète, neutrino stérile ...)

Plus le neutrino est massif, plus il sort rapidement du régime relativiste, plus il se comporte rapidement comme de la matière noire “froide”.

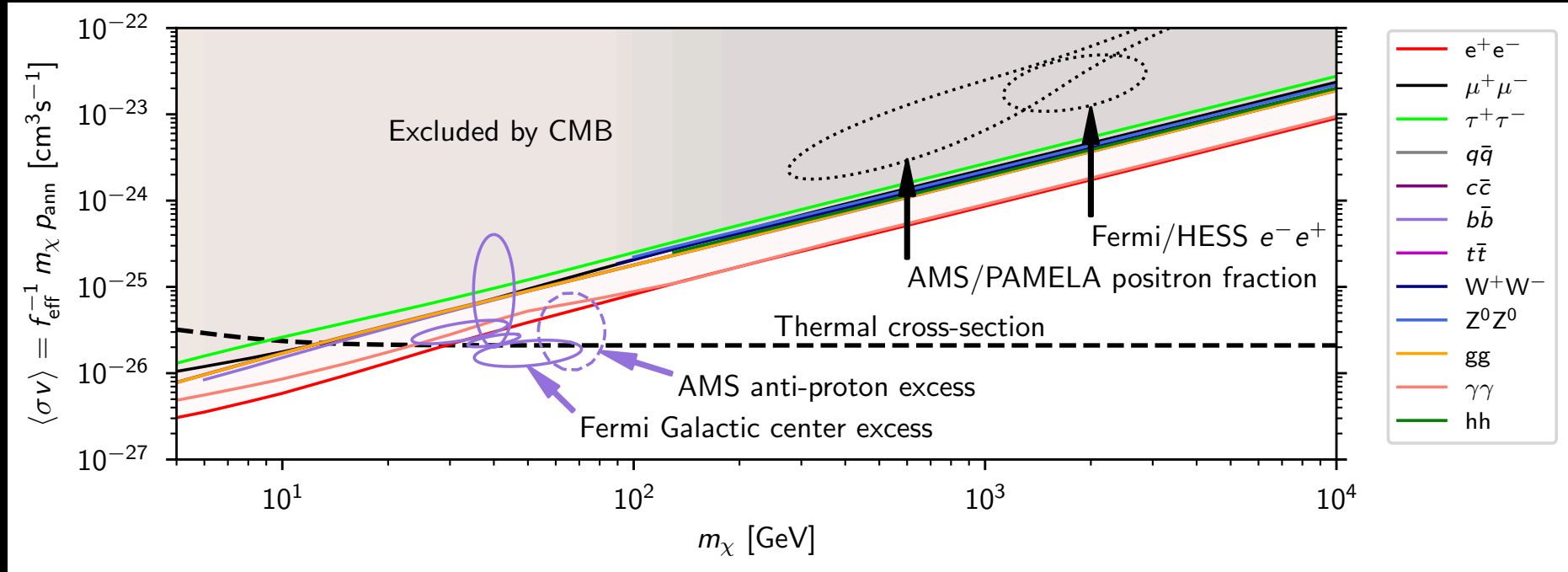
meilleures estimations

Σm_ν [eV] < 0.24 [Planck] ; < 0.12 [Planck+BAO] (fiduciel = 0.06 eV)

$N_{\text{eff}} = 2.89 \pm 0.38$ [Planck] ; $= 2.99 \pm 0.34$ [Planck+BAO] (fiduciel = 3.046)

Matière noire

Hypothèse dans le modèle de base : particule stable



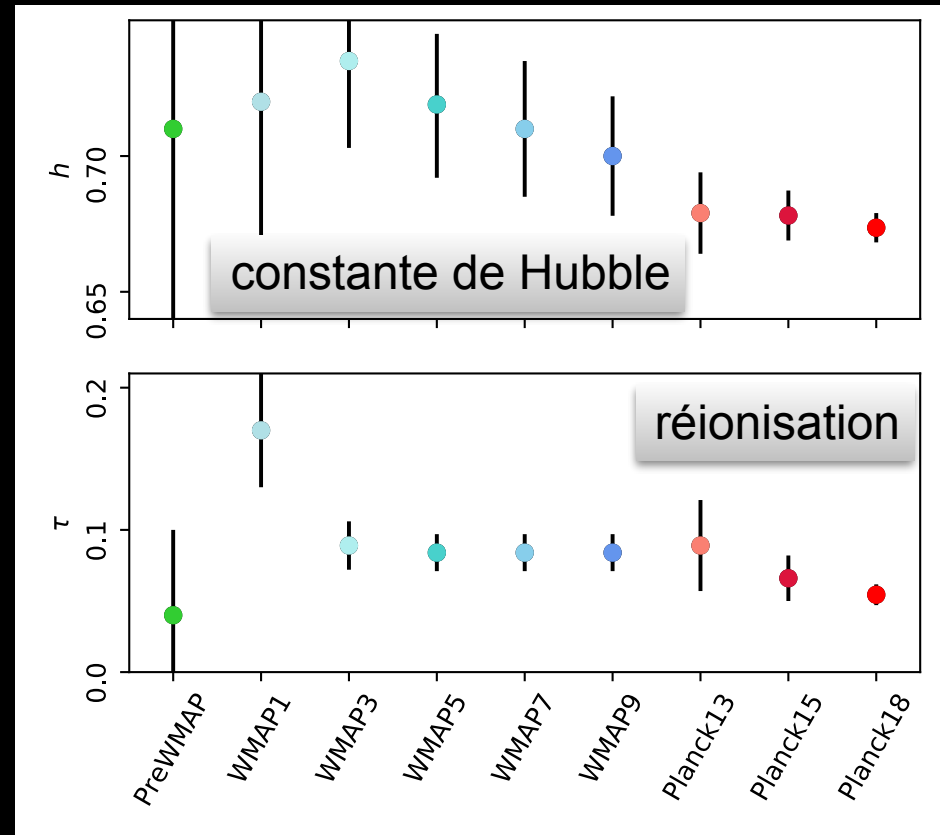
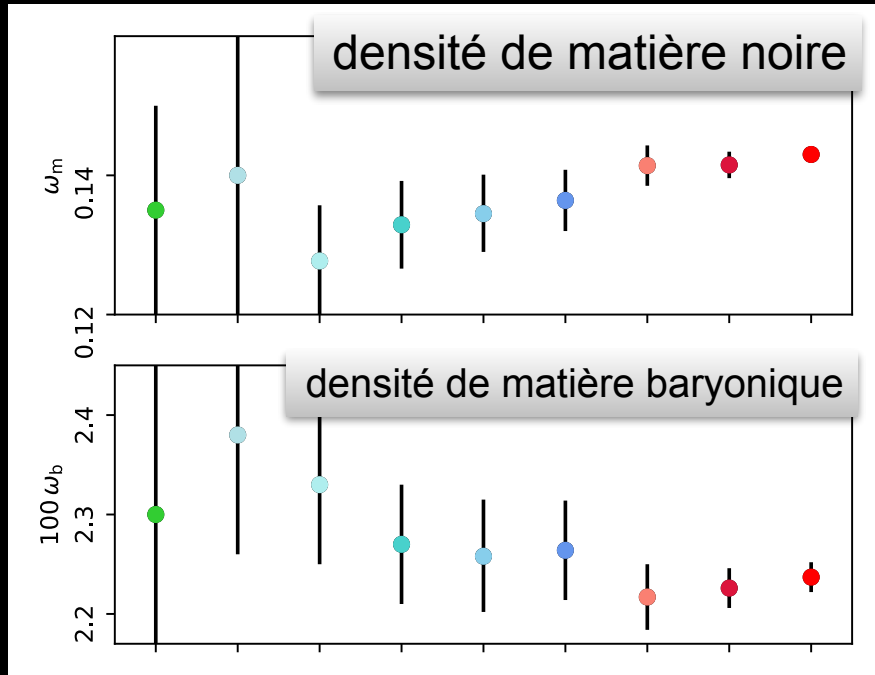
Si la matière noire s'annihile, elle dépose de l'énergie dans le milieu \rightarrow impact sur l'équilibre matière-rayonnement.

Pointillés : interprétation du signal gamma ou rayons cosmiques dans un modèle très exotique

Pleins et tiretés : interprétation d'excès de photons ou rayons cosmiques, avec un signal fortement dépendant des hypothèses de propagation notamment

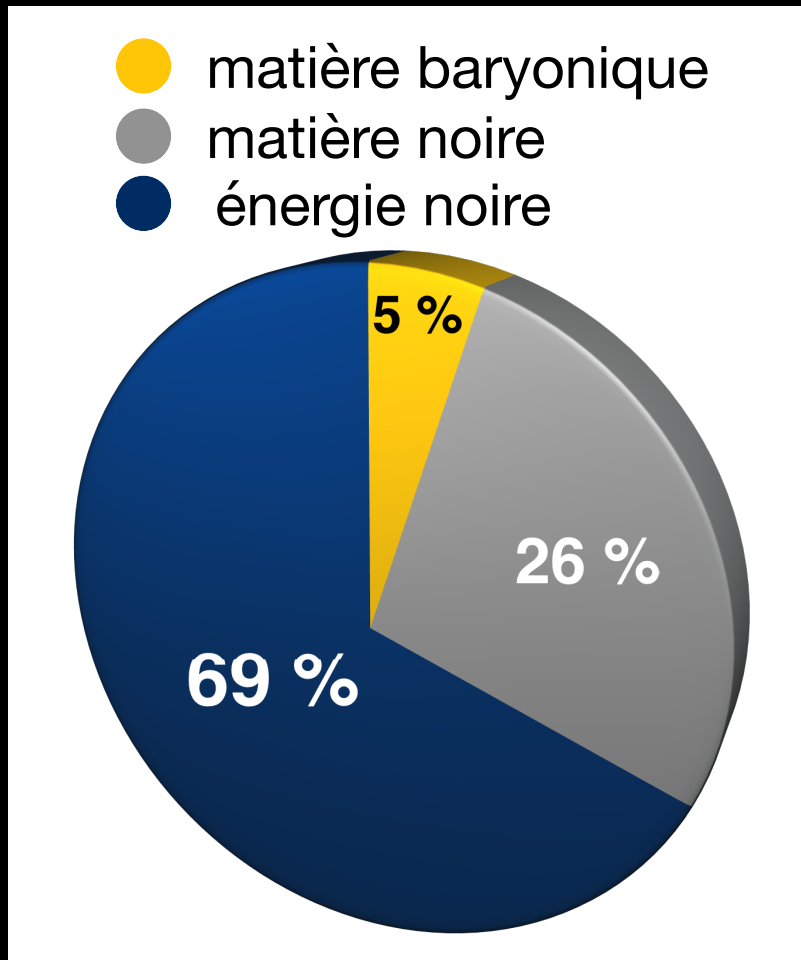
\rightarrow collaboration LAPP/LAPTh/LPSC pour mieux comprendre, donc mieux interpréter.

Pas une révolution mais de gros progrès aussi dans l'univers évolué



Sensibilité + résolution angulaire + polarisation + lentille gravitationnelle

De quoi est vraiment fait notre univers ?



Matière noire

Quelle est sa nature ?

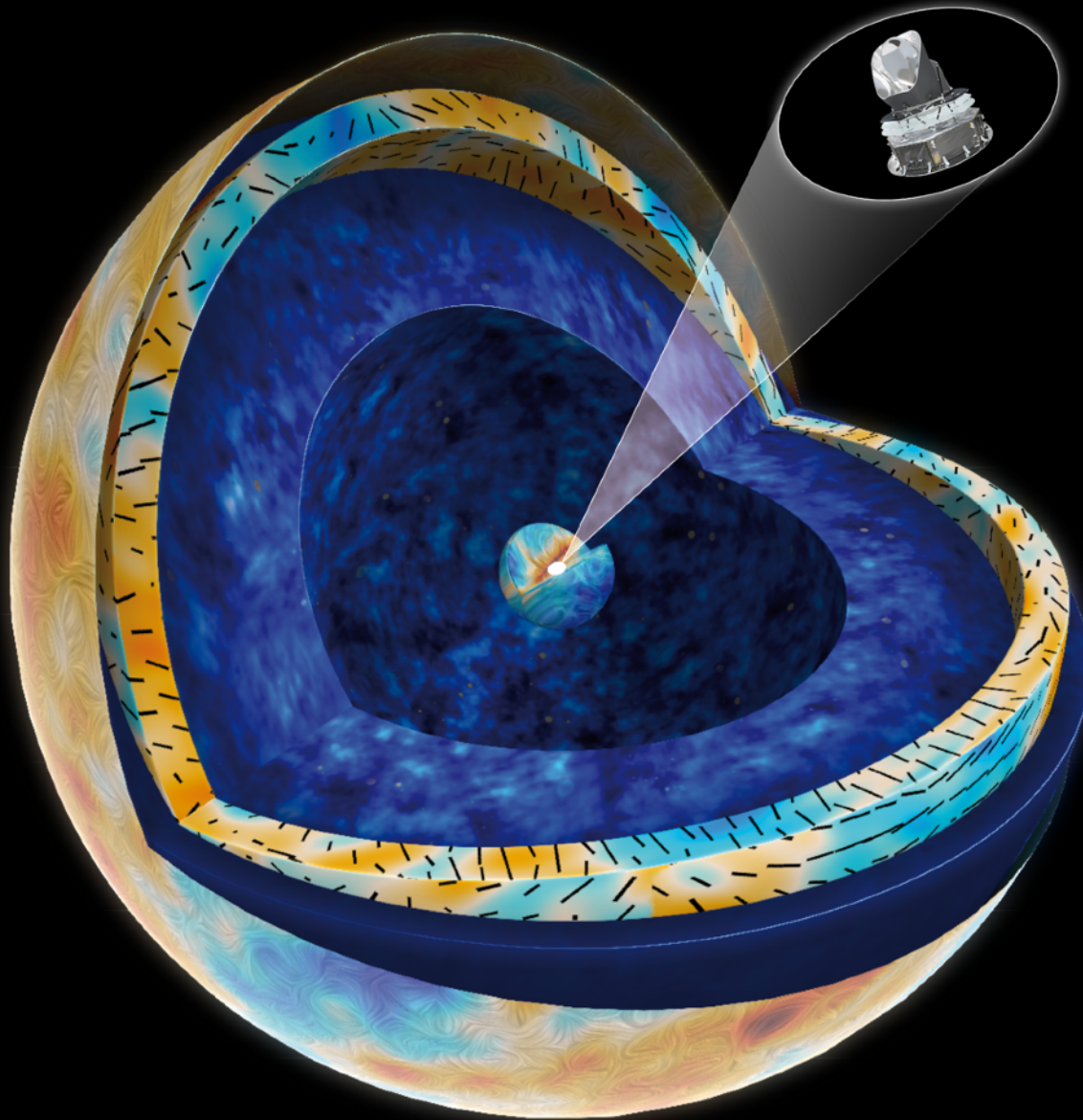
Interagit-elle un tout petit peu avec la matière ? S'annihile-t-elle ? Comment est-elle structurée (homogène ou grumeleuse) ?

- en tout cas ça semble insoluble par une modification de la gravité.

Énergie noire

Simple constante de la Relativité générale ou plus compliquée ? Propriété de l'espace ou contenu non identifié ? Evolution au cours du temps ?

Il faut poursuivre la cartographie de notre univers observable



On a la carte précise
380 000 ans après le
Big-Bang

Suivons l'évolution
des galaxies et amas
de galaxies entre 3 et
13.8 milliards
d'années après le
Big-Bang