

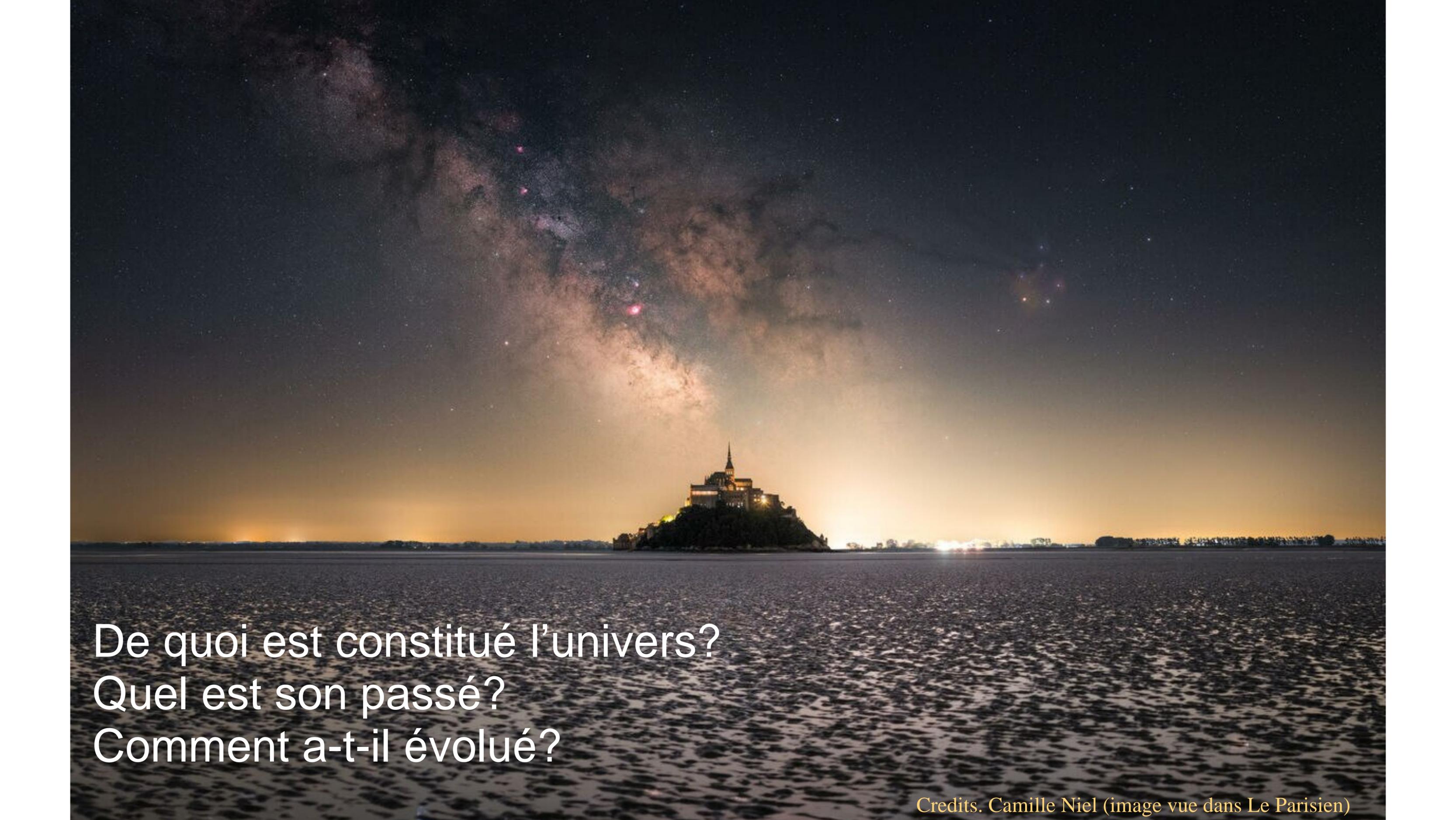
Déchiffrement du fond cosmologique: Comprendre l'histoire de l'univers

Nabila Aghanim

**Institut d'Astrophysique Spatiale
CNRS et Université Paris-Saclay**

L'univers observable et observé:

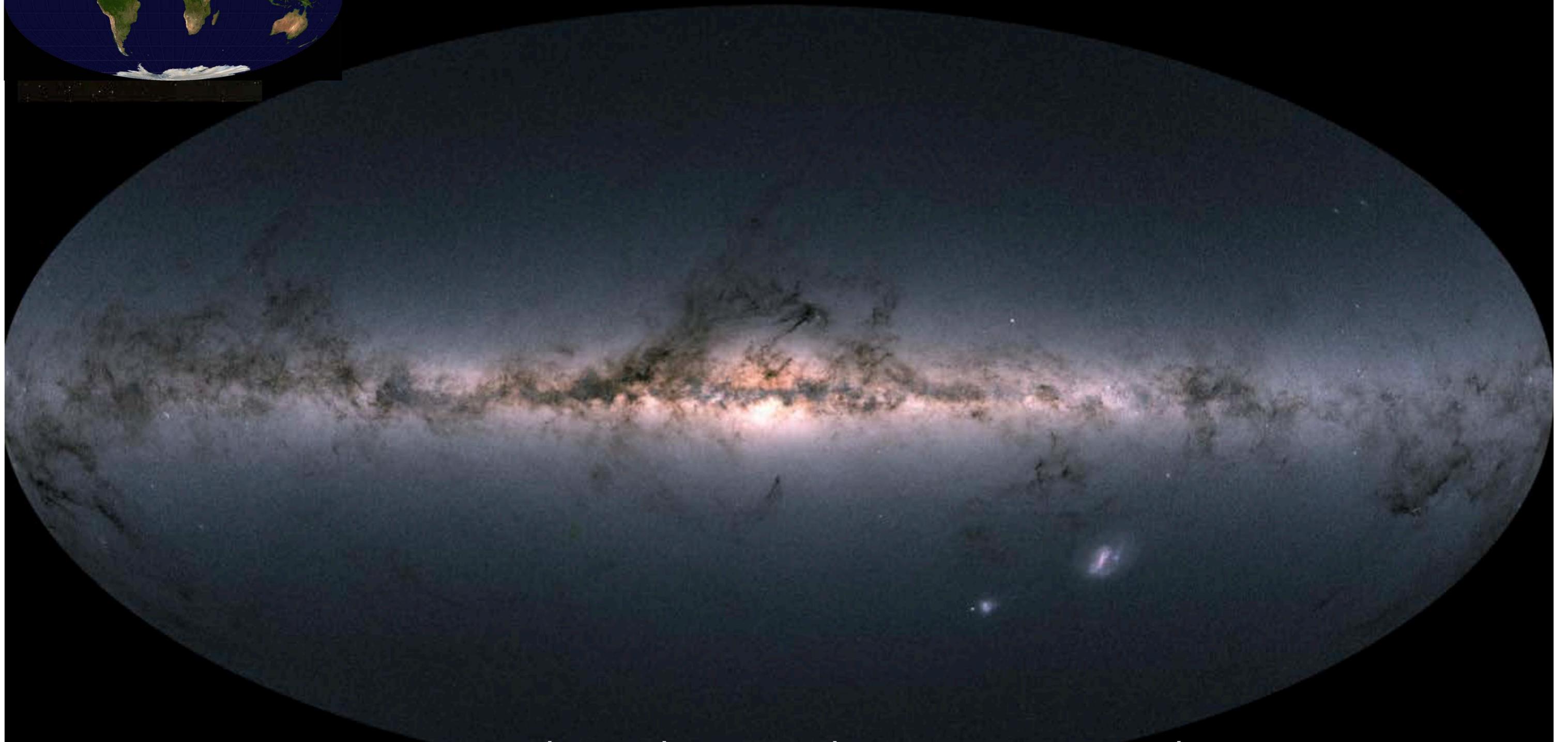
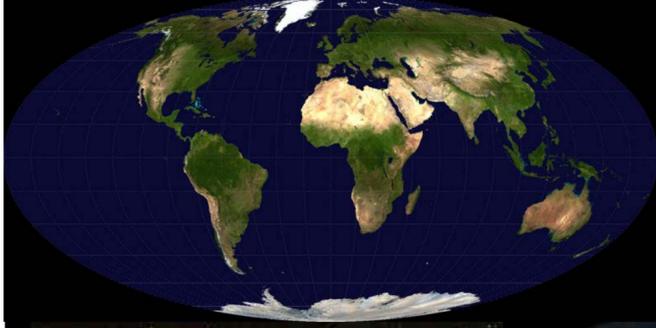
Point de départ
d'une archéologie cosmique

A night photograph showing the Milky Way galaxy arching across a dark sky. The galaxy's core is visible as a bright, glowing band of light, with various stars and nebulae scattered throughout. Below the sky, a large body of water reflects the light from the galaxy and the distant horizon. In the center of the horizon, a small island or peninsula is illuminated with warm, yellow lights, featuring a prominent church spire. The overall scene is serene and awe-inspiring, capturing the vastness of the universe and the beauty of a coastal night.

De quoi est constitué l'univers?
Quel est son passé?
Comment a-t-il évolué?

Credits. Camille Niel (image vue dans Le Parisien)

La Voie Lactée



~100 000 années lumière de diamètre et ~300 milliards d'étoiles

~2 milliards d'étoiles: leurs vitesses, masses, âges, ... pour reconstruire l'histoire de notre Galaxie

Des galaxies

qui s'éloignent les unes des autres
à cause de l'expansion

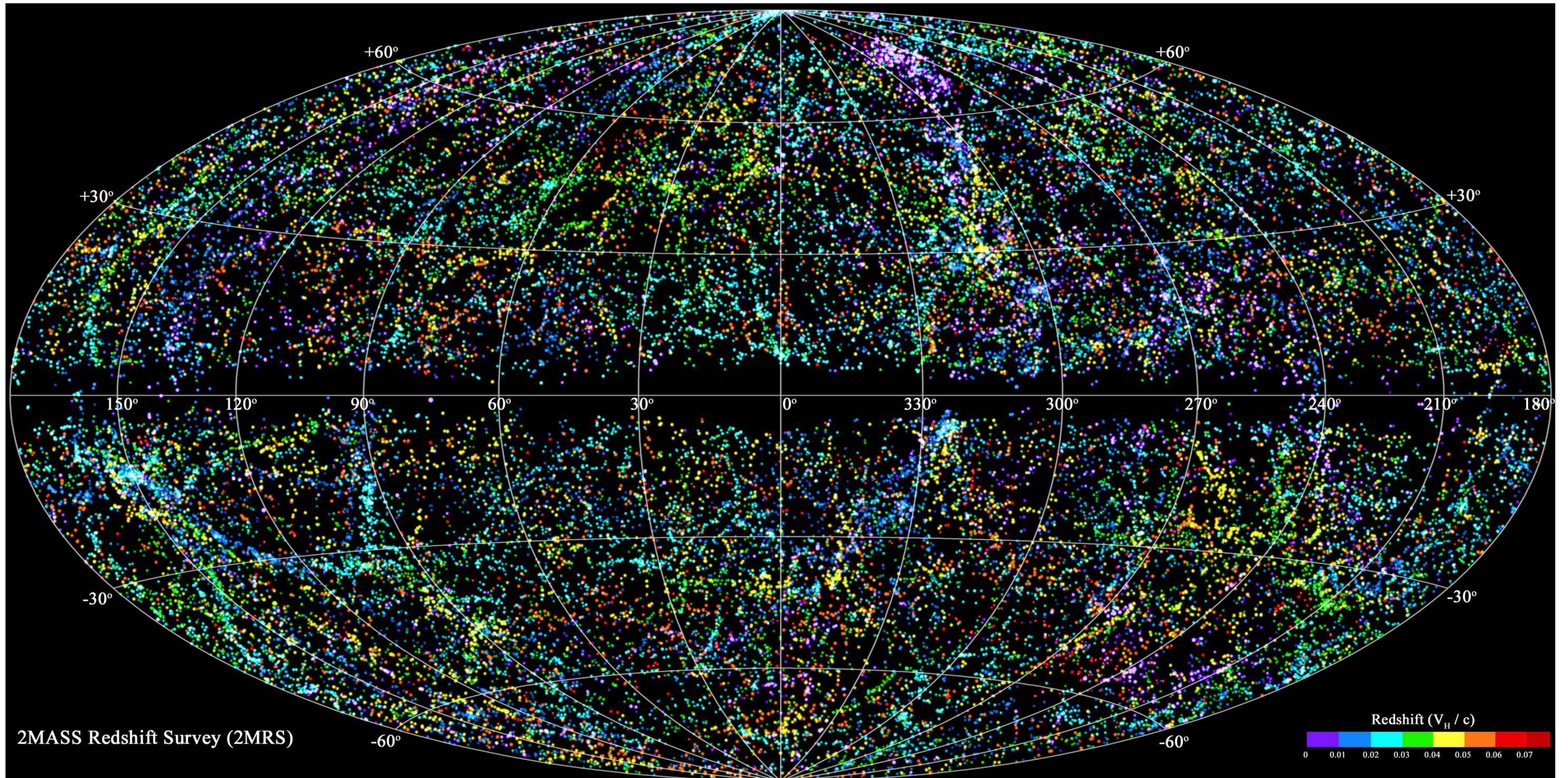
Des galaxies
qui

s'éloignent
d'autant plus
vite et

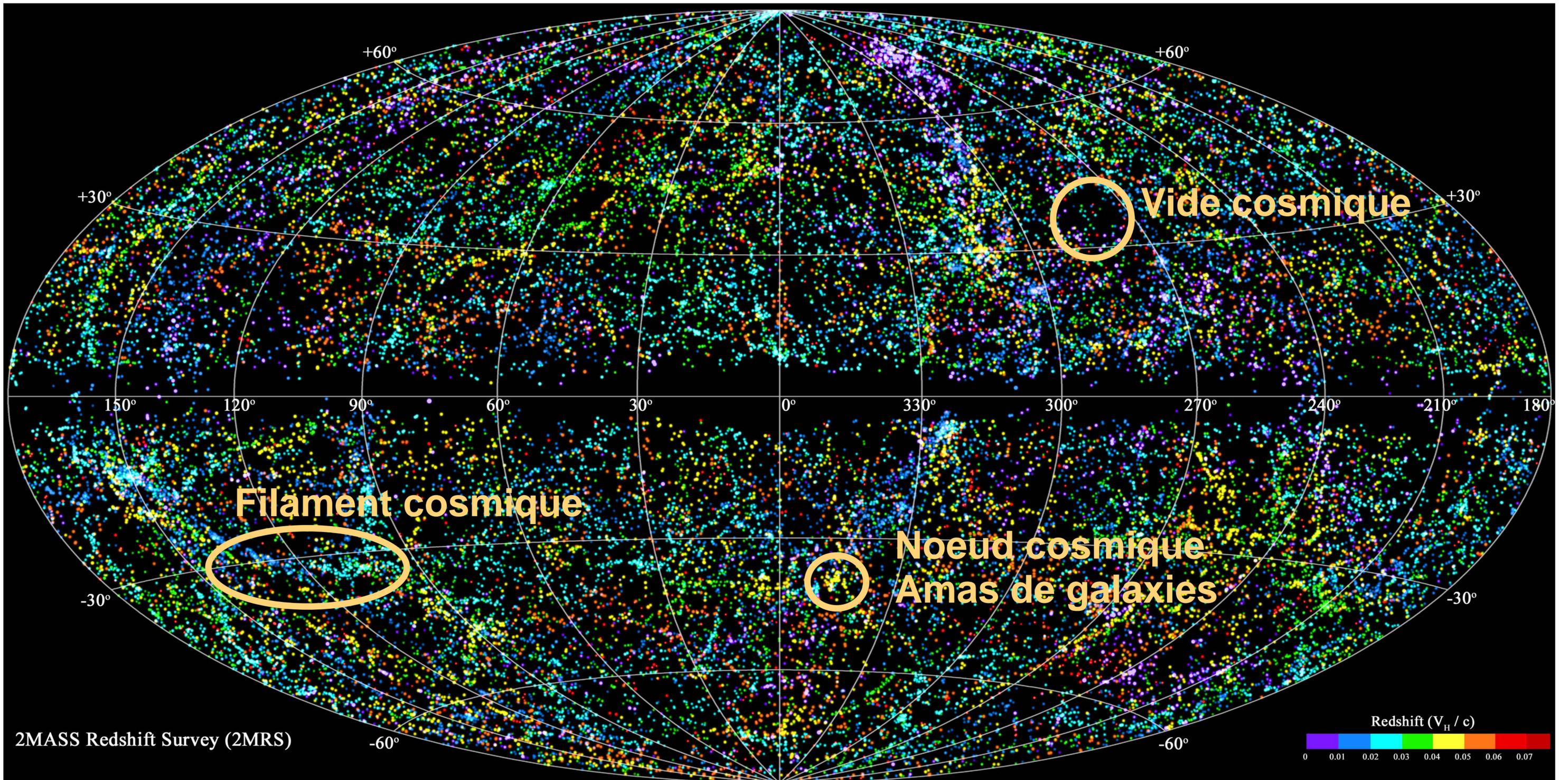
paraissent
d'autant plus
rouges

qu'elles sont
lointaines.

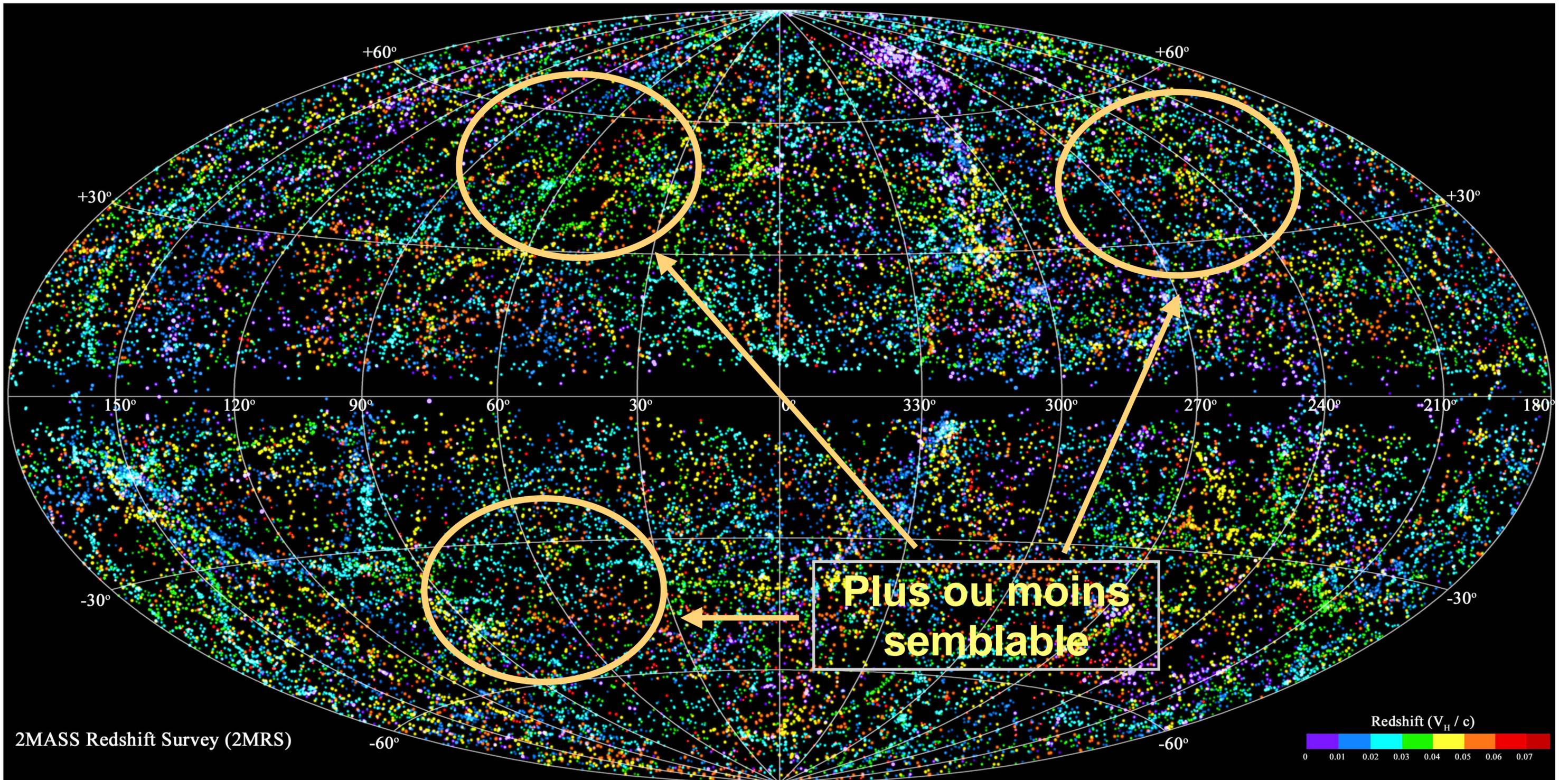
Cartographie des galaxies sur le ciel



Distribution localement en toile cosmique



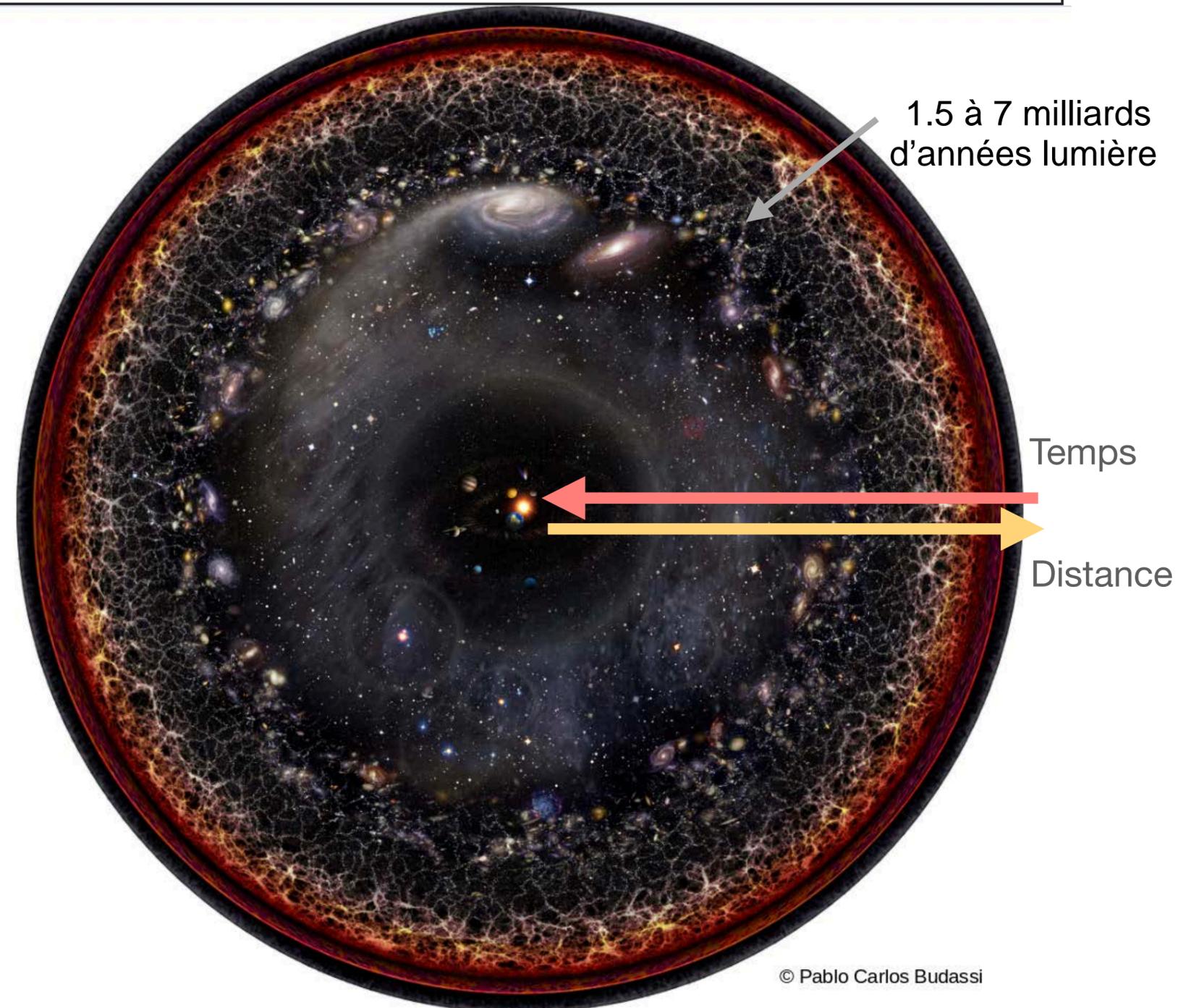
Distribution globalement homogène et isotrope



Voir loin dans l'univers c'est voir le passé

L'univers, du système solaire à la toile cosmique

... Car la lumière utilisée pour les observations astronomiques se déplace à une vitesse finie

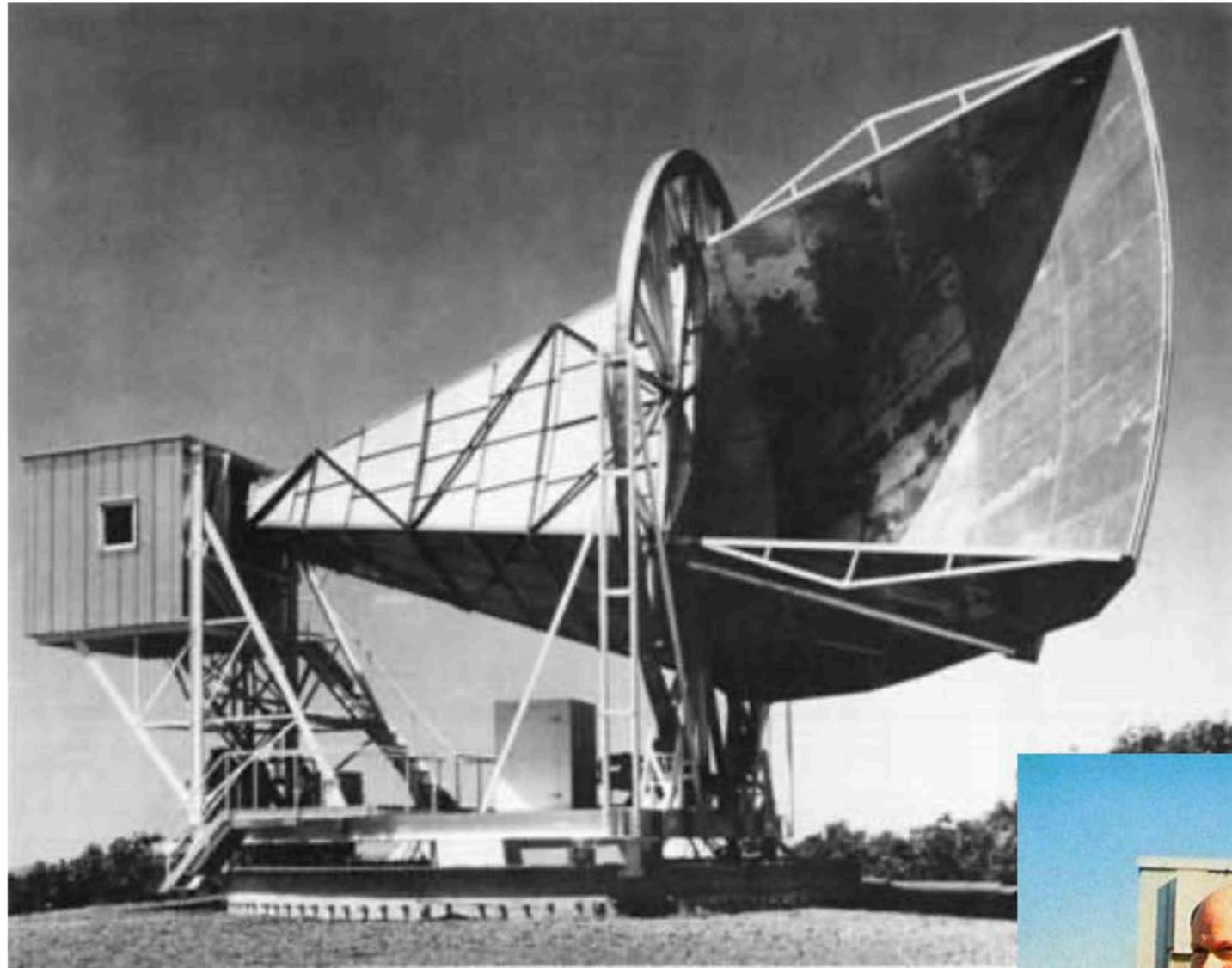


Le fond (diffus) cosmologique: FDC

L'expansion implique que l'univers était dense et chaud dans le passé

Un rayonnement reliquat à quelques degrés Kelvin doit exister

Découverte du fond cosmologique, 1965



Emission dans de domaine
micro-onde ($\sim 1\text{cm}$)

Première
détection !

Penzias & Wilson (1965)
Prix Nobel 1978

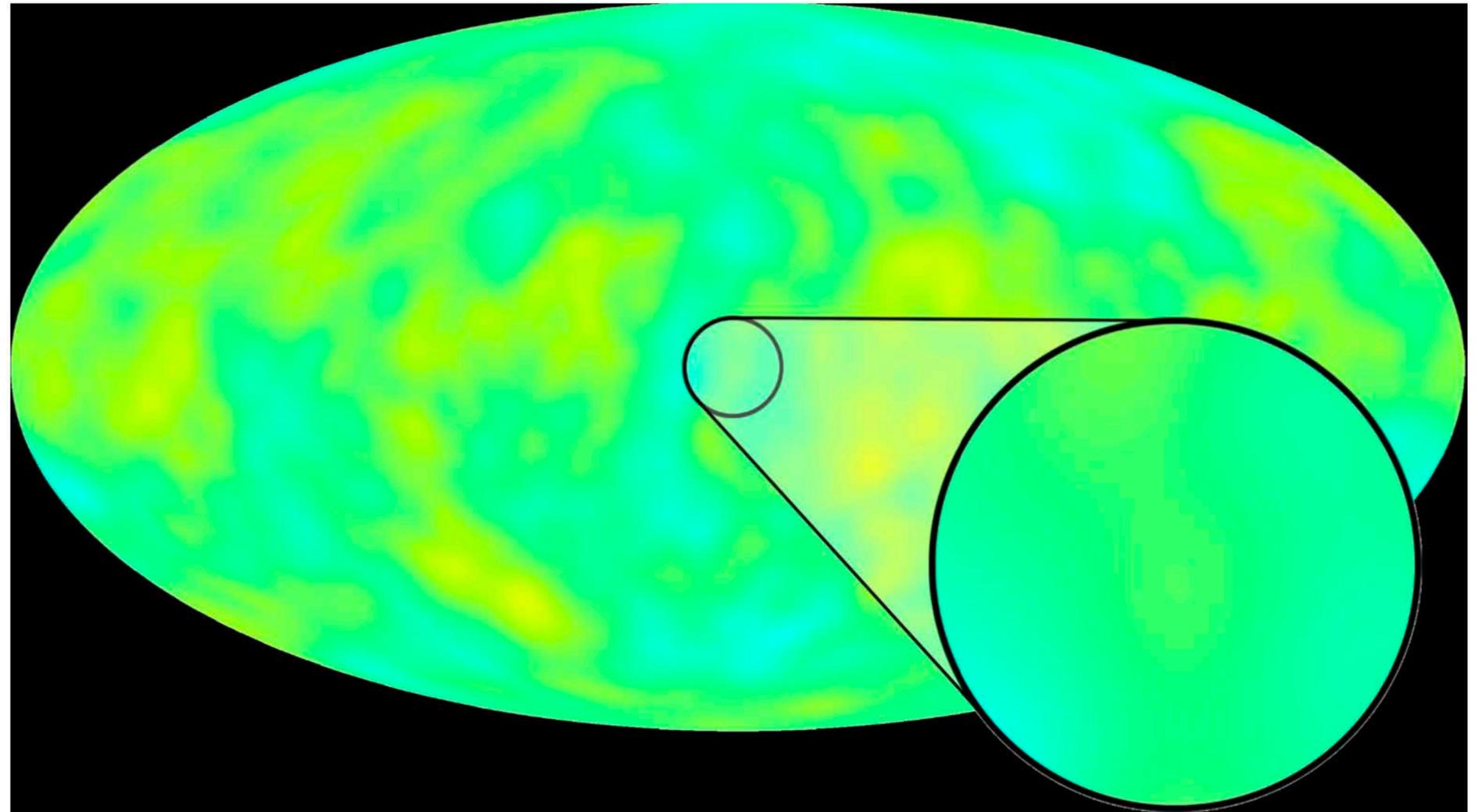
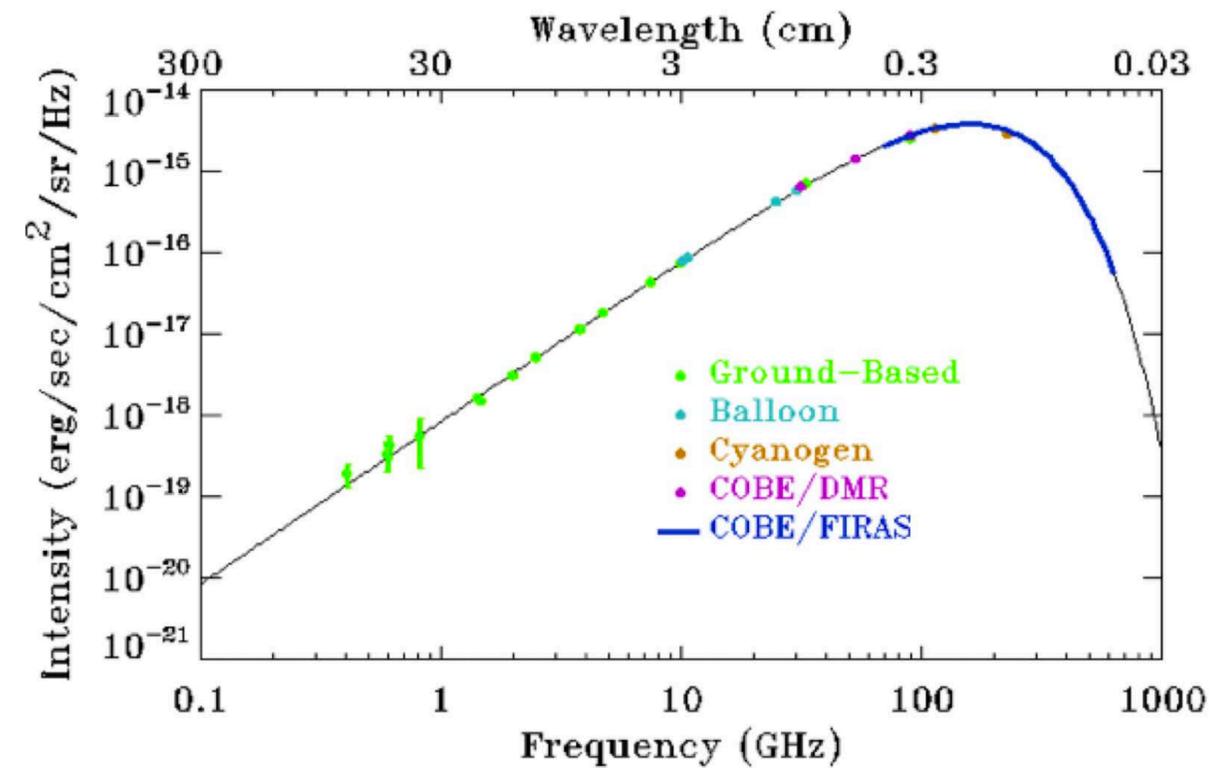


Observation du fond cosmologique, 1992



Rayonnement de corps noir à
température moyenne
~2.7 Kelvin

Remarquable homogénéité et isotropie

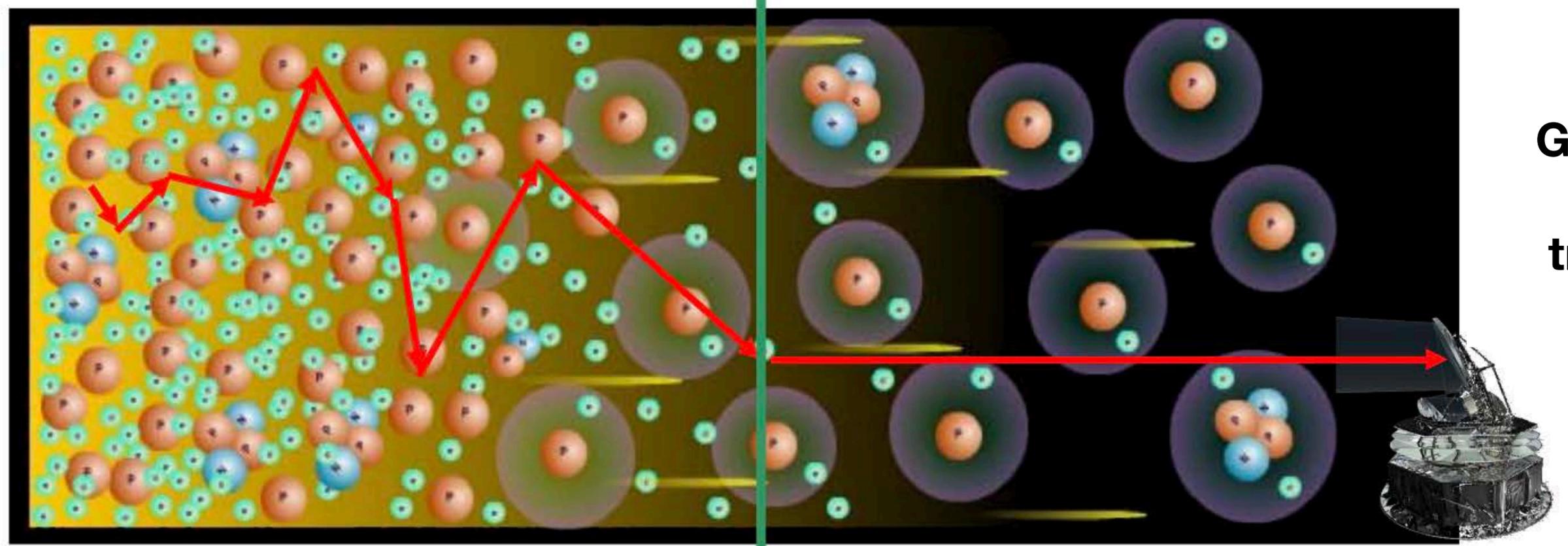


Variation de température 1/100,000
sur des zones ~100 fois la pleine lune

Le fond cosmologique en quelques mots

372 000 ans

expansion, temps, âge



Gaz ionisé =
Univers
opaque

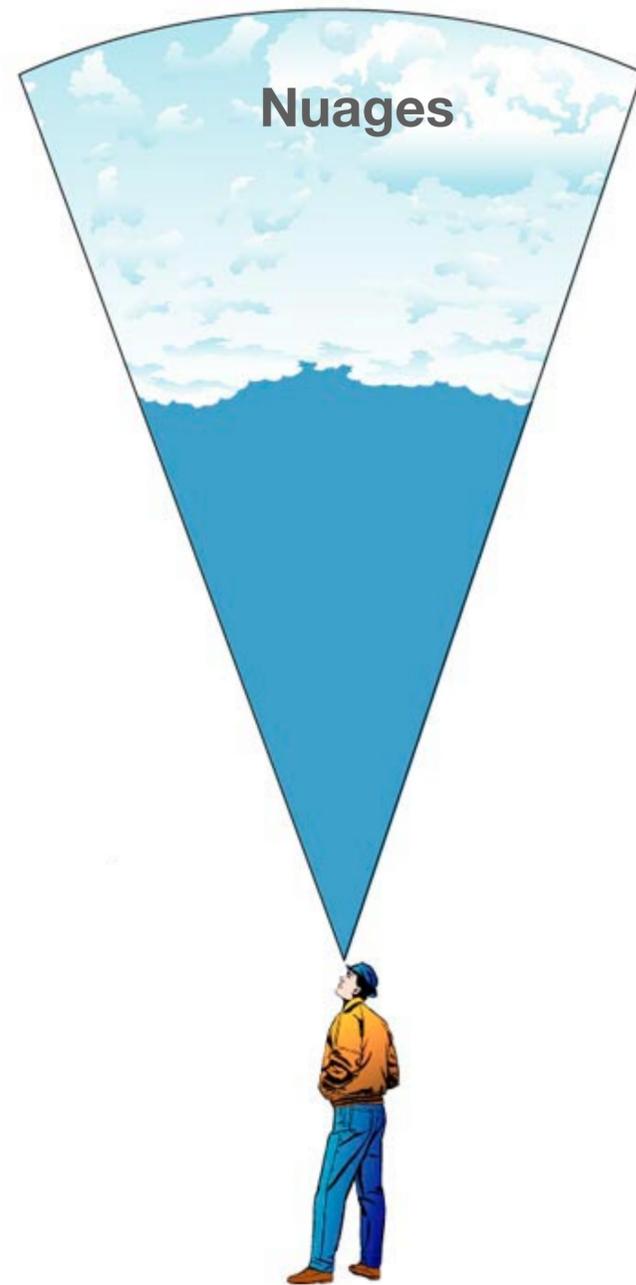
Gaz neutre =
Univers
transparent

densité, température

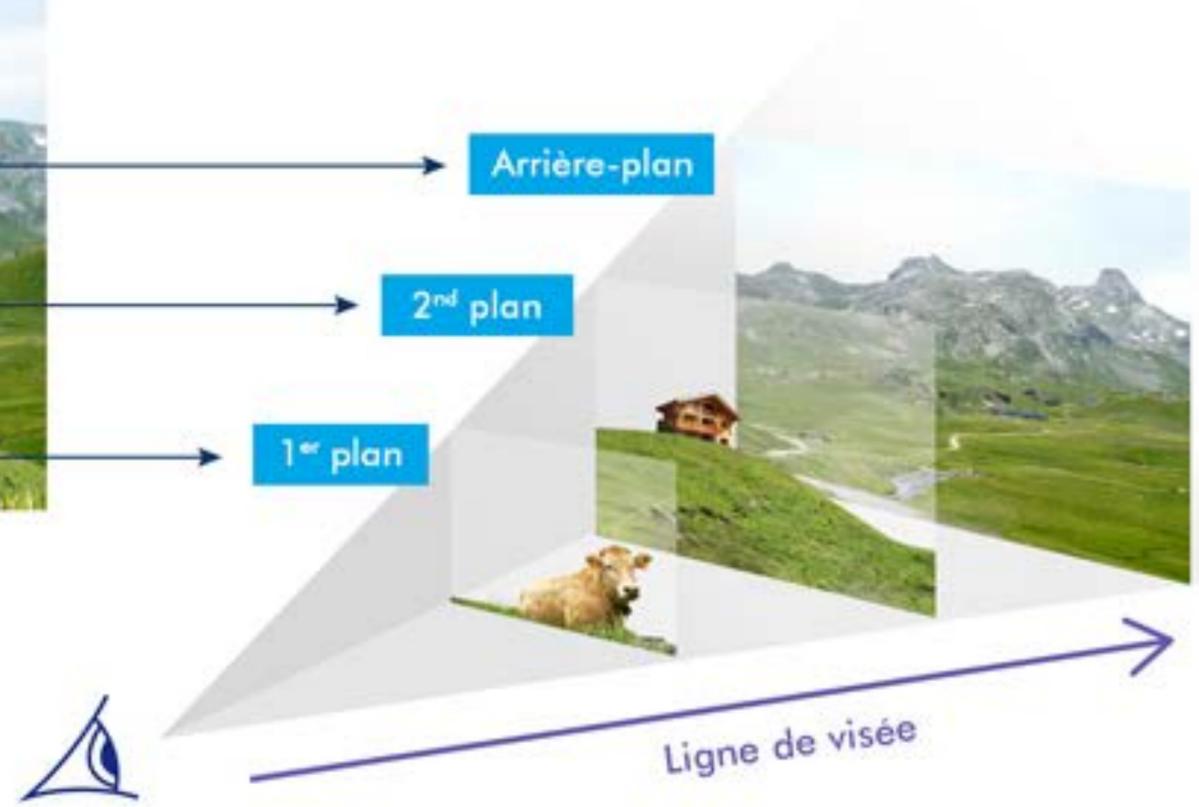
Rayonnement et matière
Couplés en équilibre thermique

Rayonnement et matière
Découplés

Fond cosmologique: surface de dernière diffusion



PAYSAGE TERRESTRE

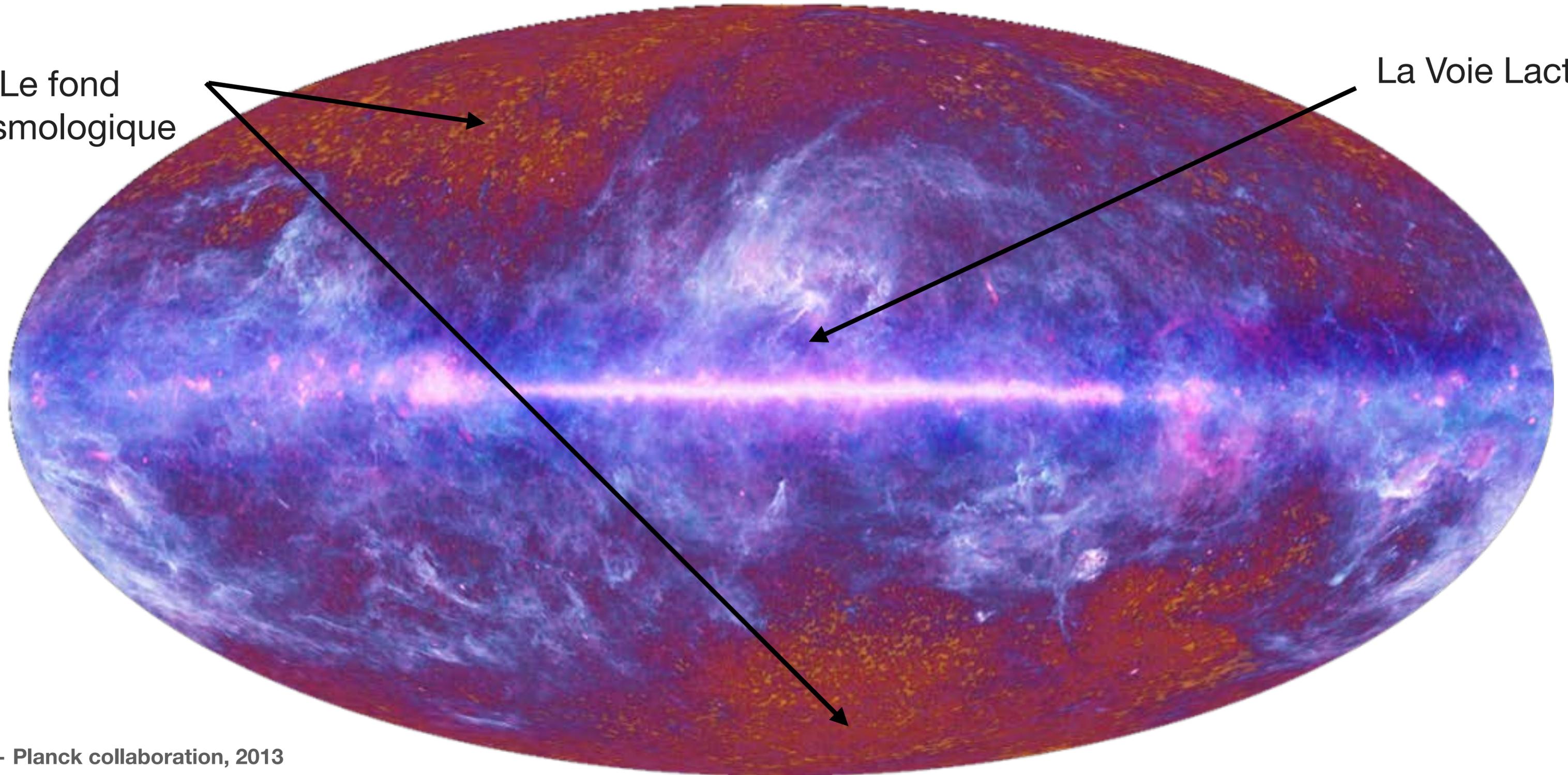


Les avant-plans cosmologiques

Le ciel vu par Planck

La Voie Lactée

Le fond
Cosmologique



Stratigraphie cosmique

La Voie Lactée

Les amas de galaxies

Les galaxies lointaines

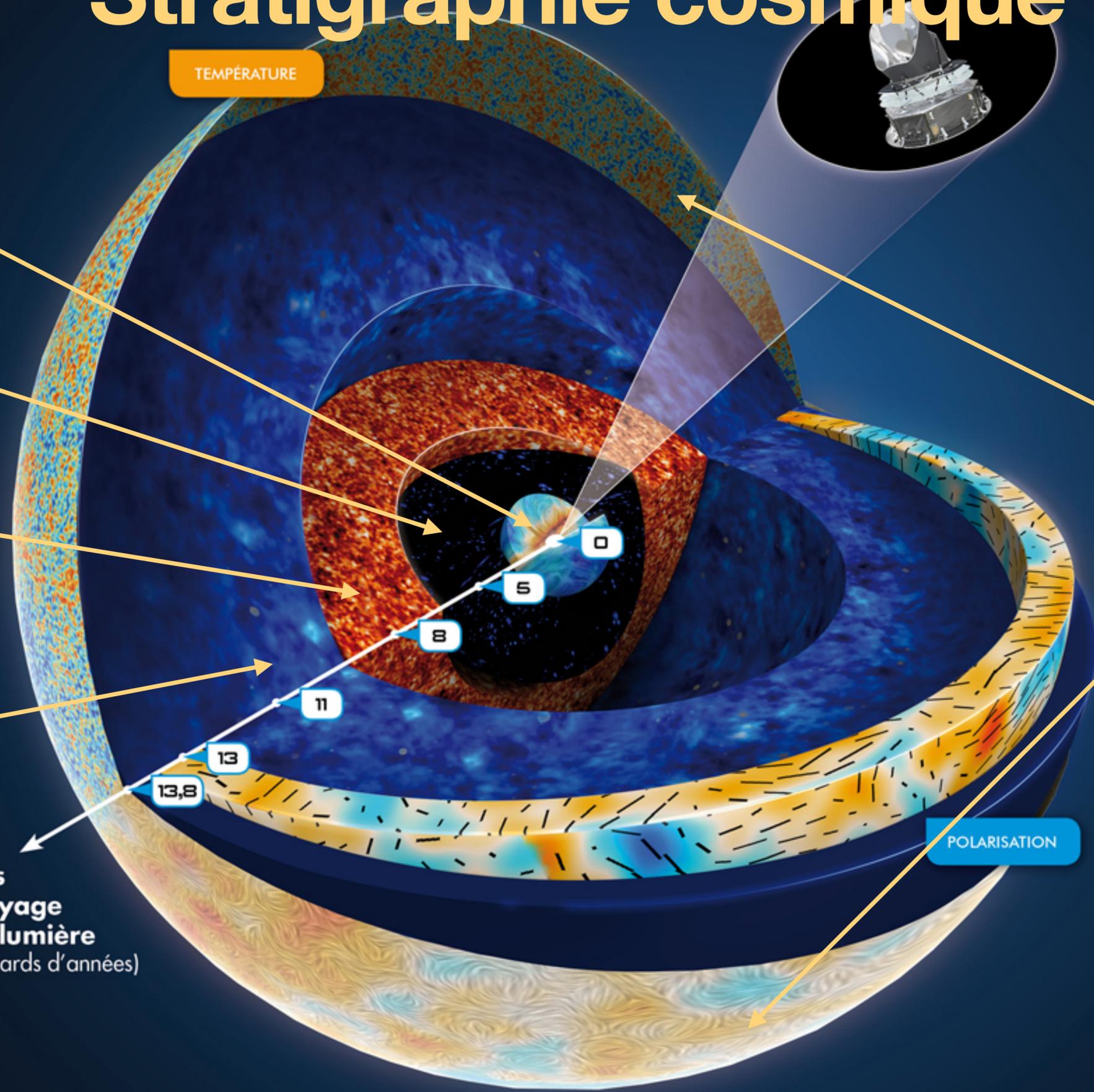
Déformation par la distribution de la matière

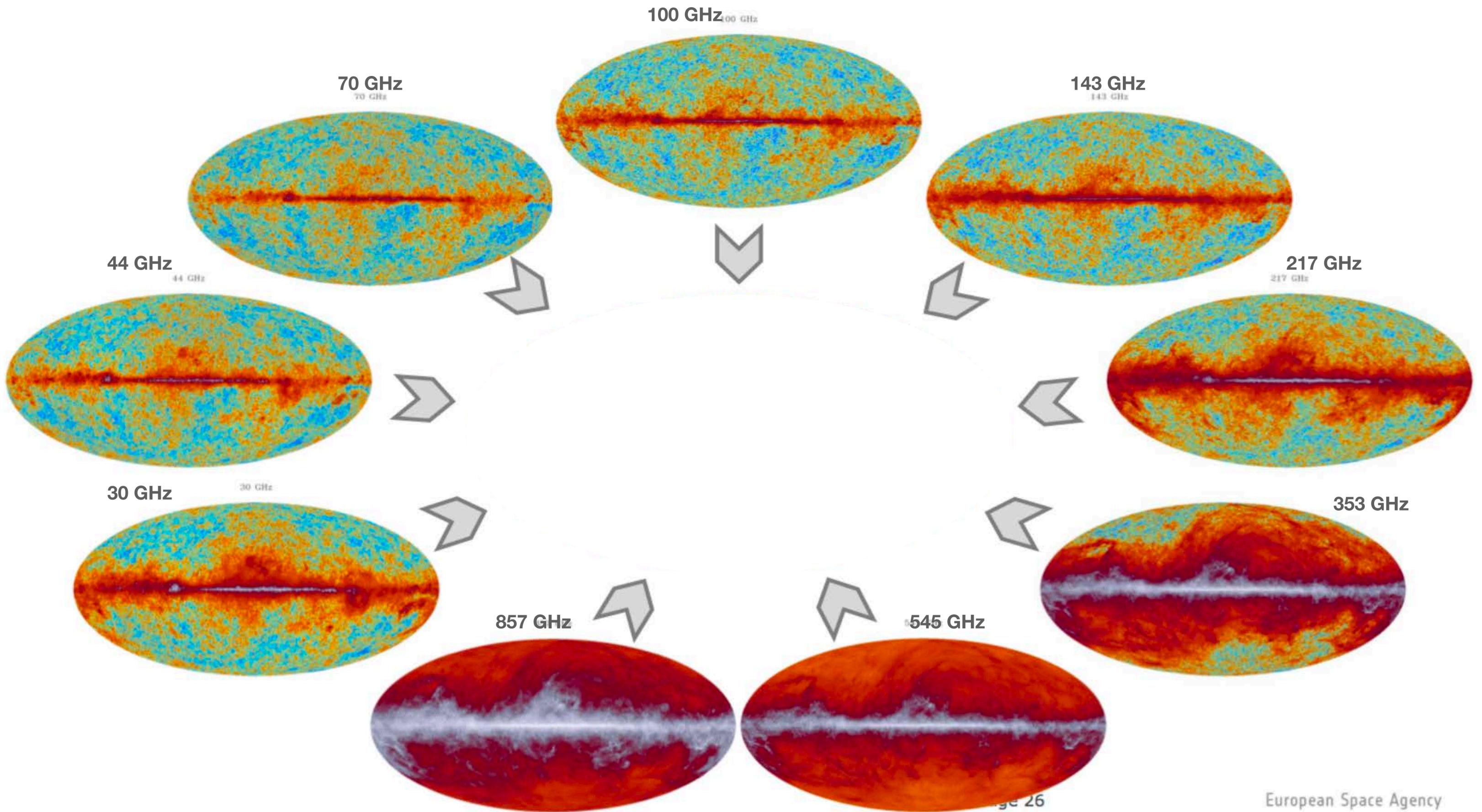
Temps de voyage de la lumière (en milliards d'années)

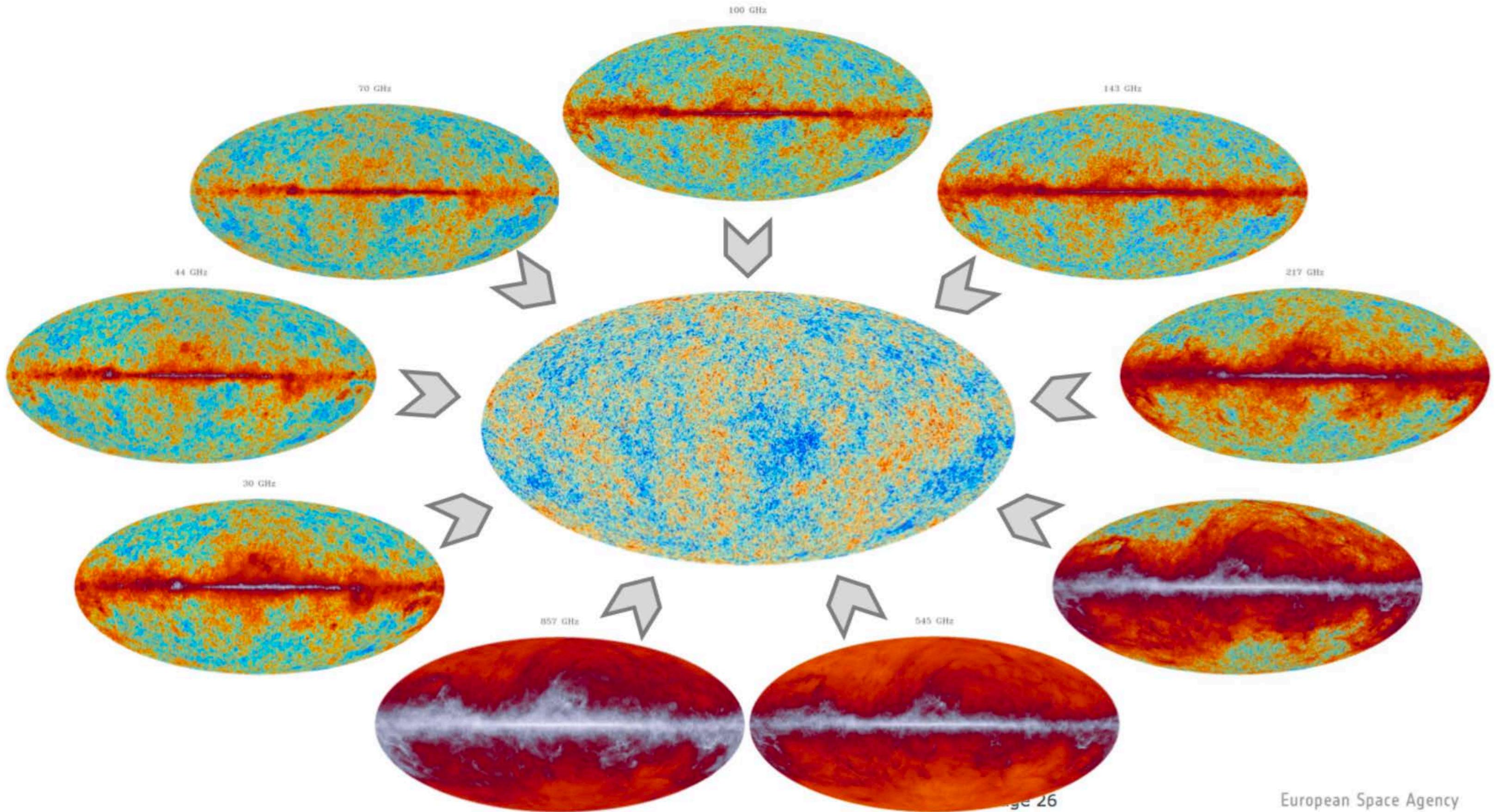
TEMPÉRATURE

POLARISATION

Fond cosmologique





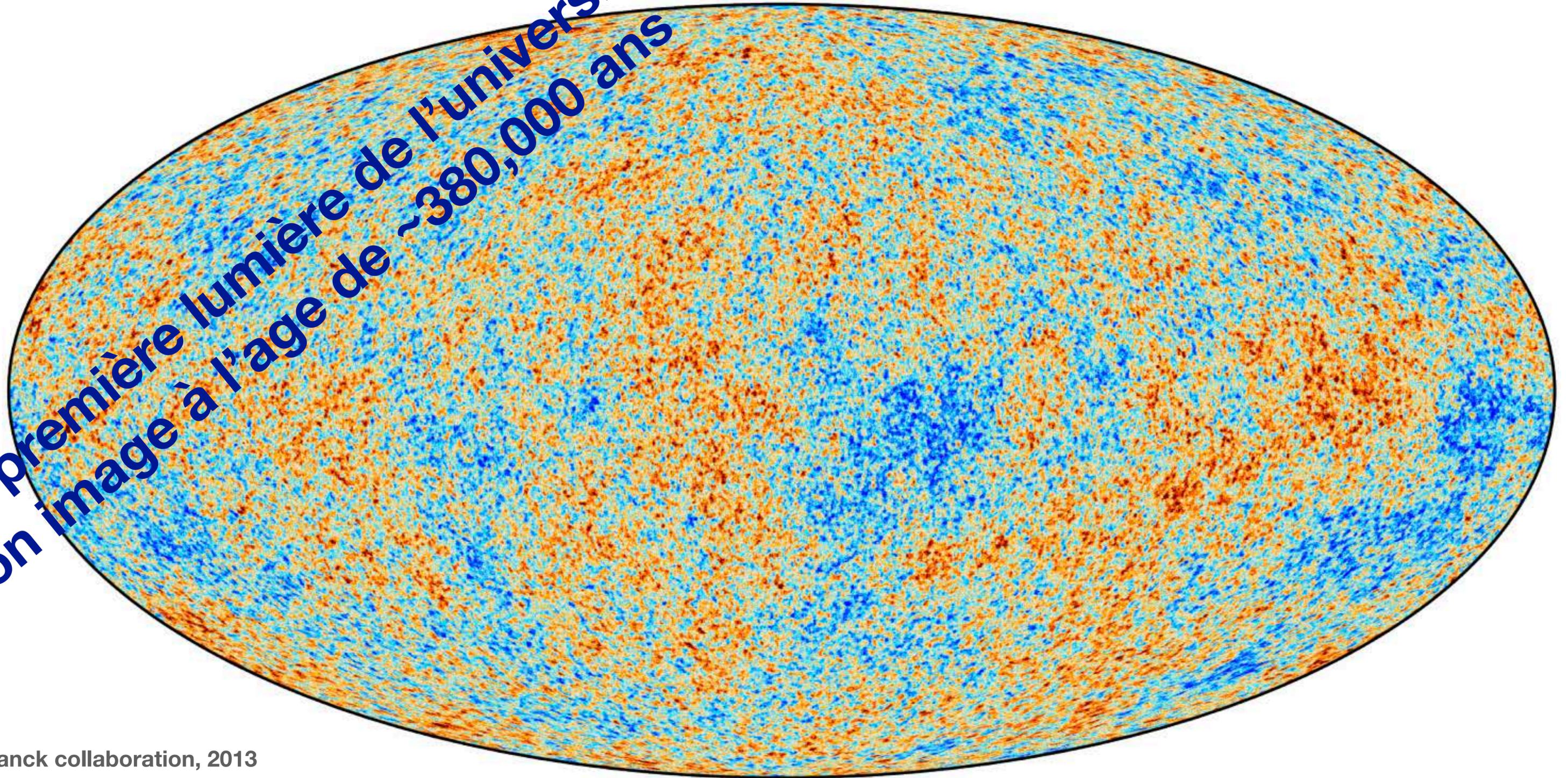


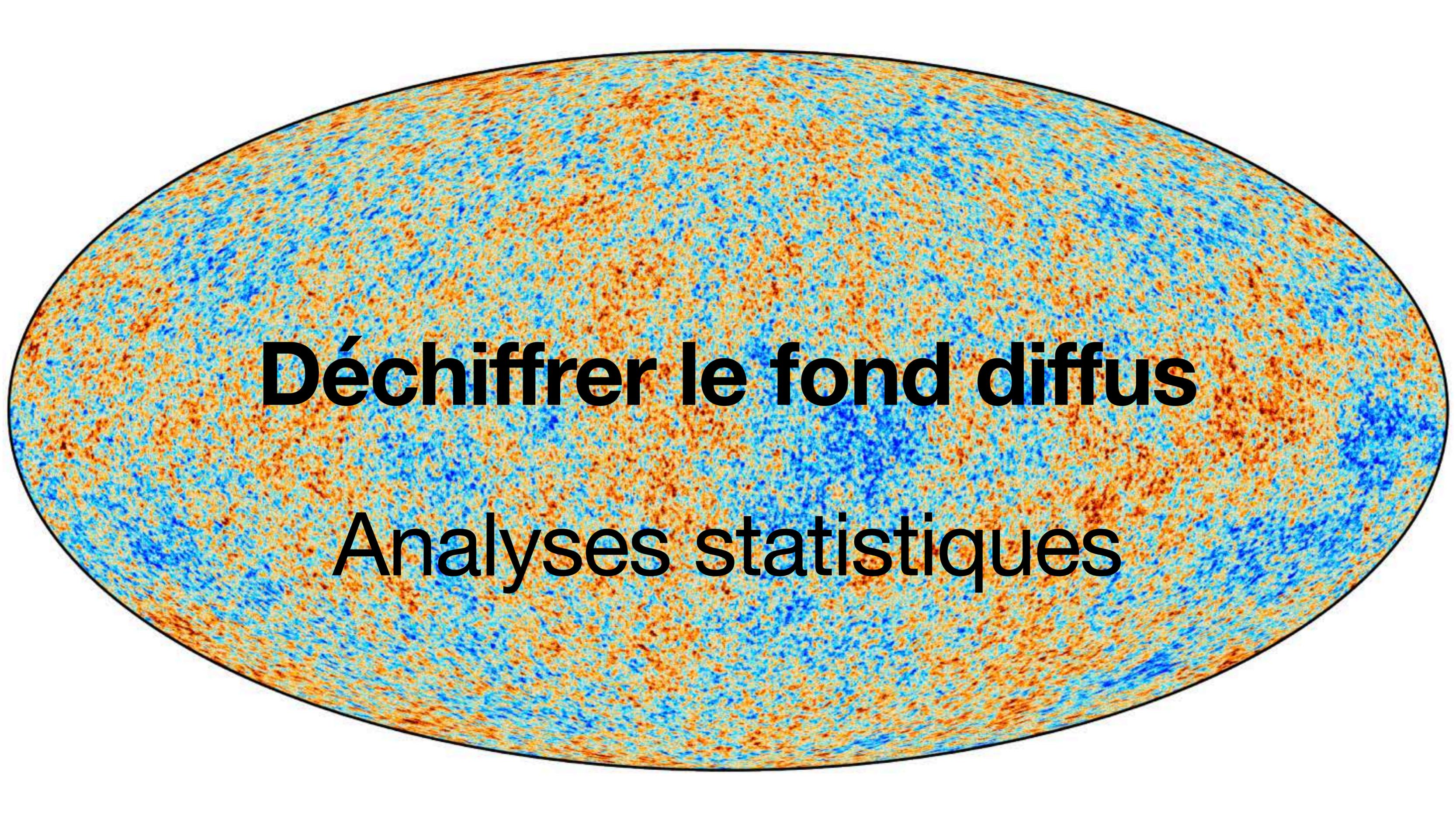


Planck
collaboration

Le fond cosmologique

La première lumière de l'univers:
son image à l'âge de $\sim 380,000$ ans

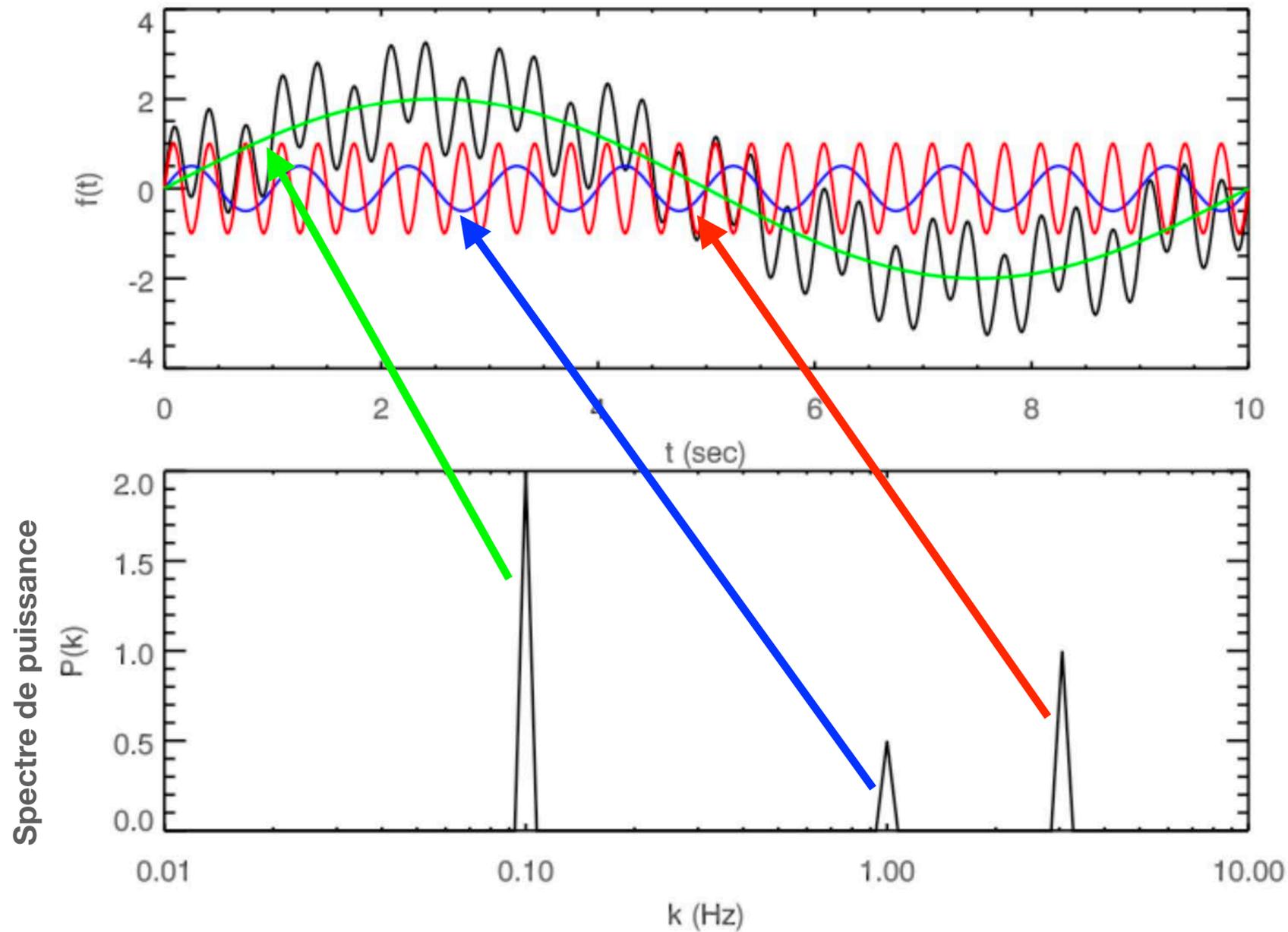




Déchiffrer le fond diffus

Analyses statistiques

Analyse du signal

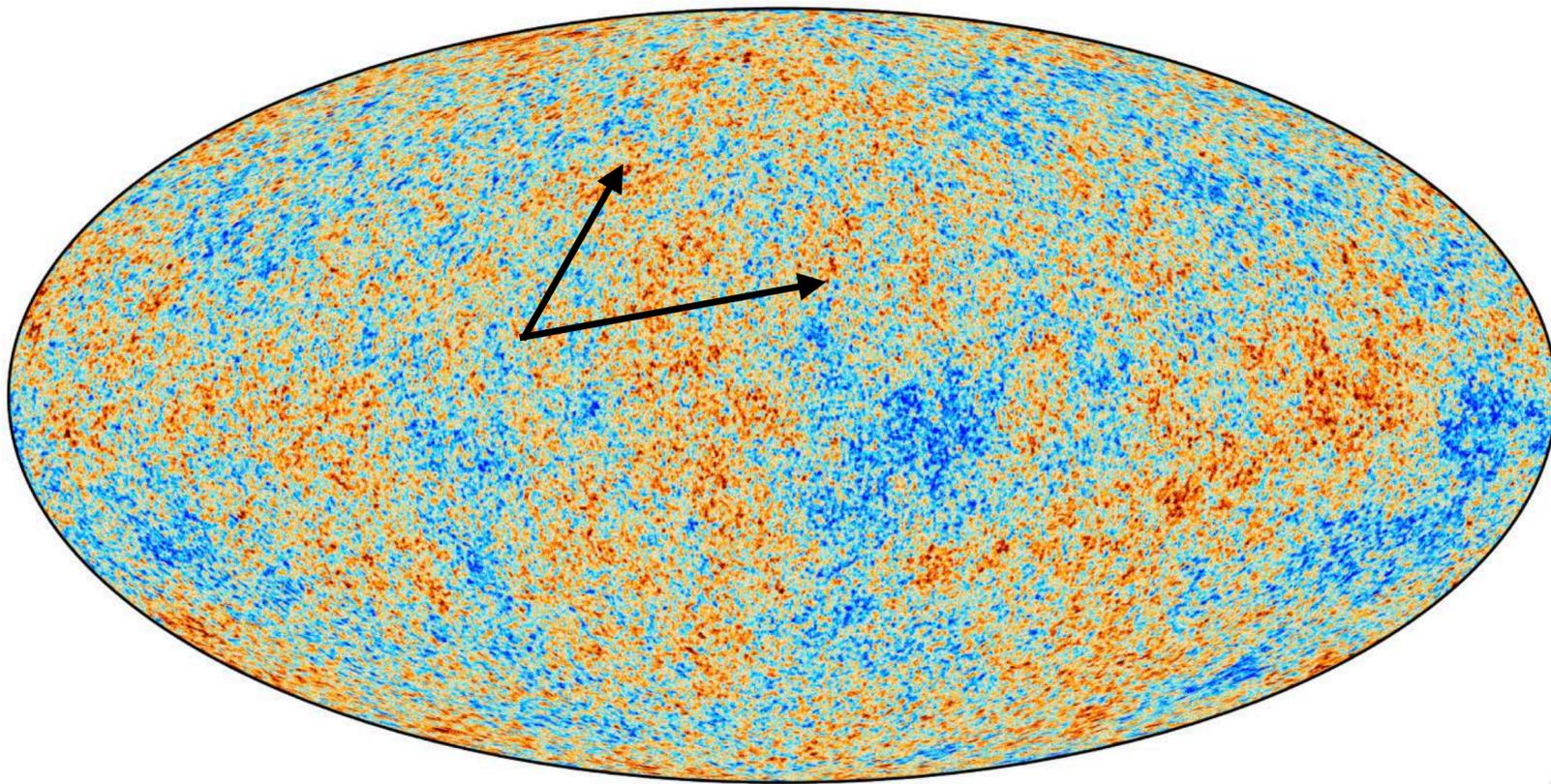


Analyse d'un signal total (noir) par sa décomposition en ses différents modes

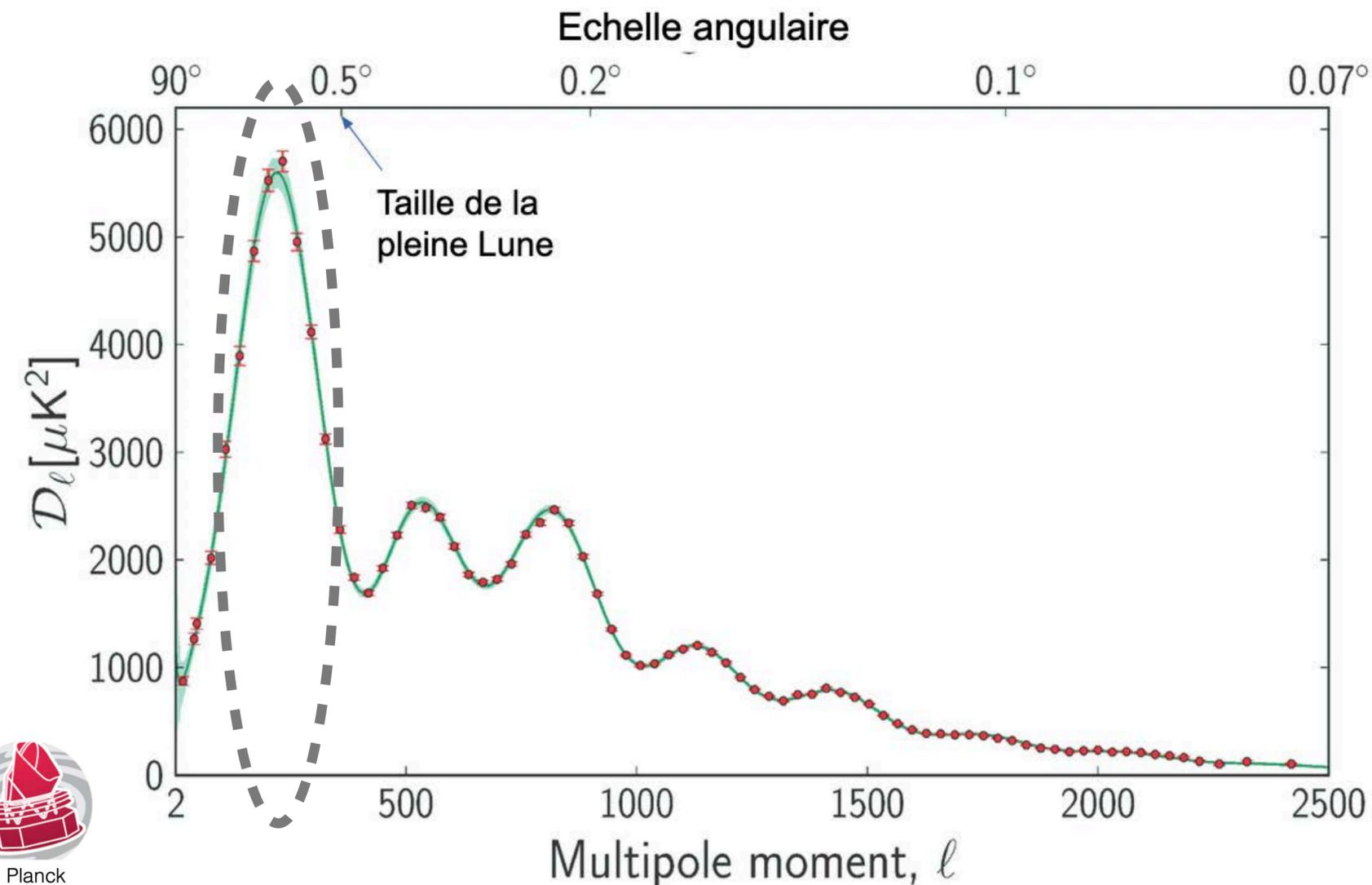
→ Analyse des modes de Fourier

Analyse des variations de température

Statistiques des taches (tailles, fréquences, écartements, ...) → Fréquence des taches en fonction de leur taille

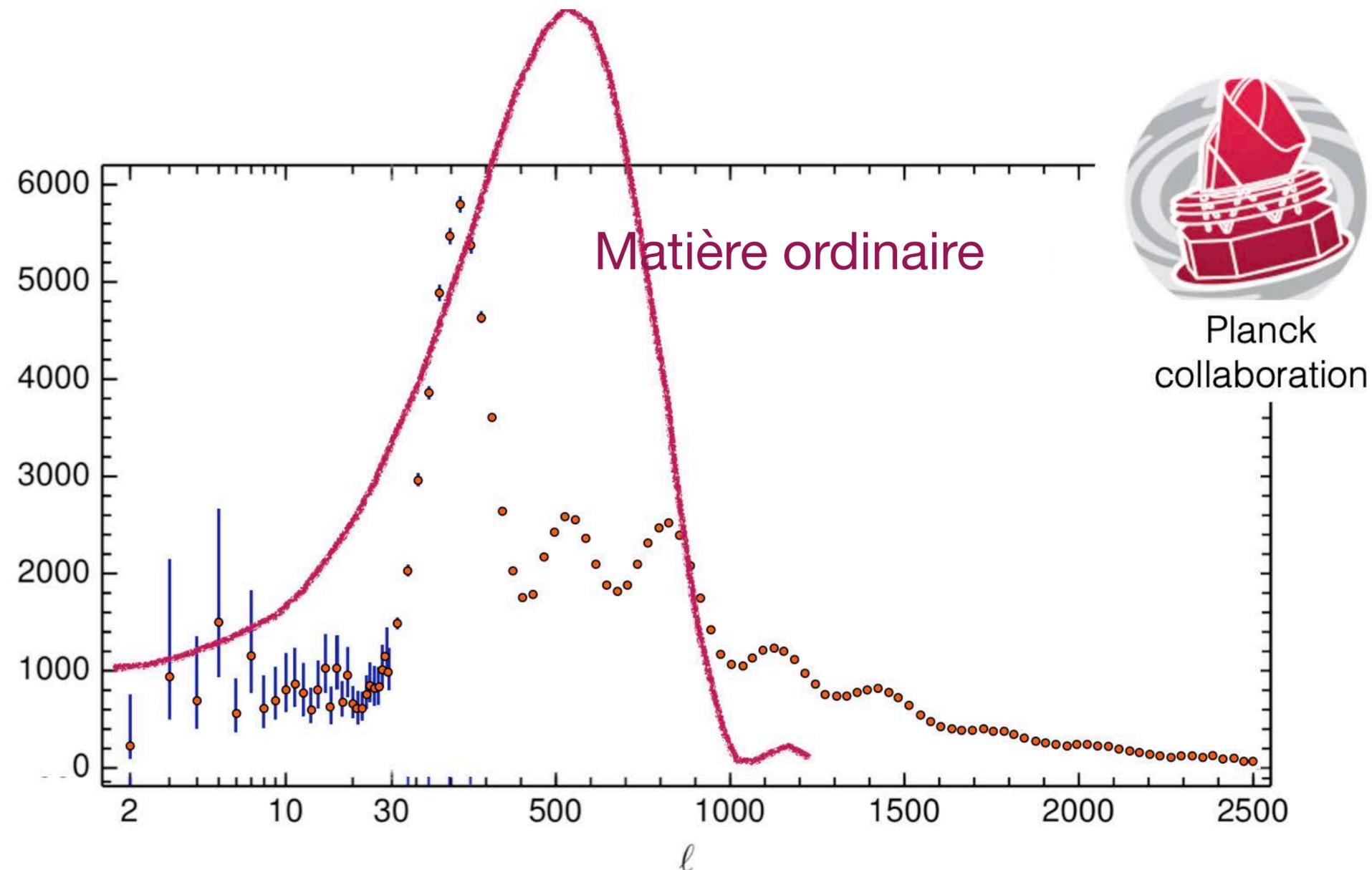


Spectre de puissance angulaire



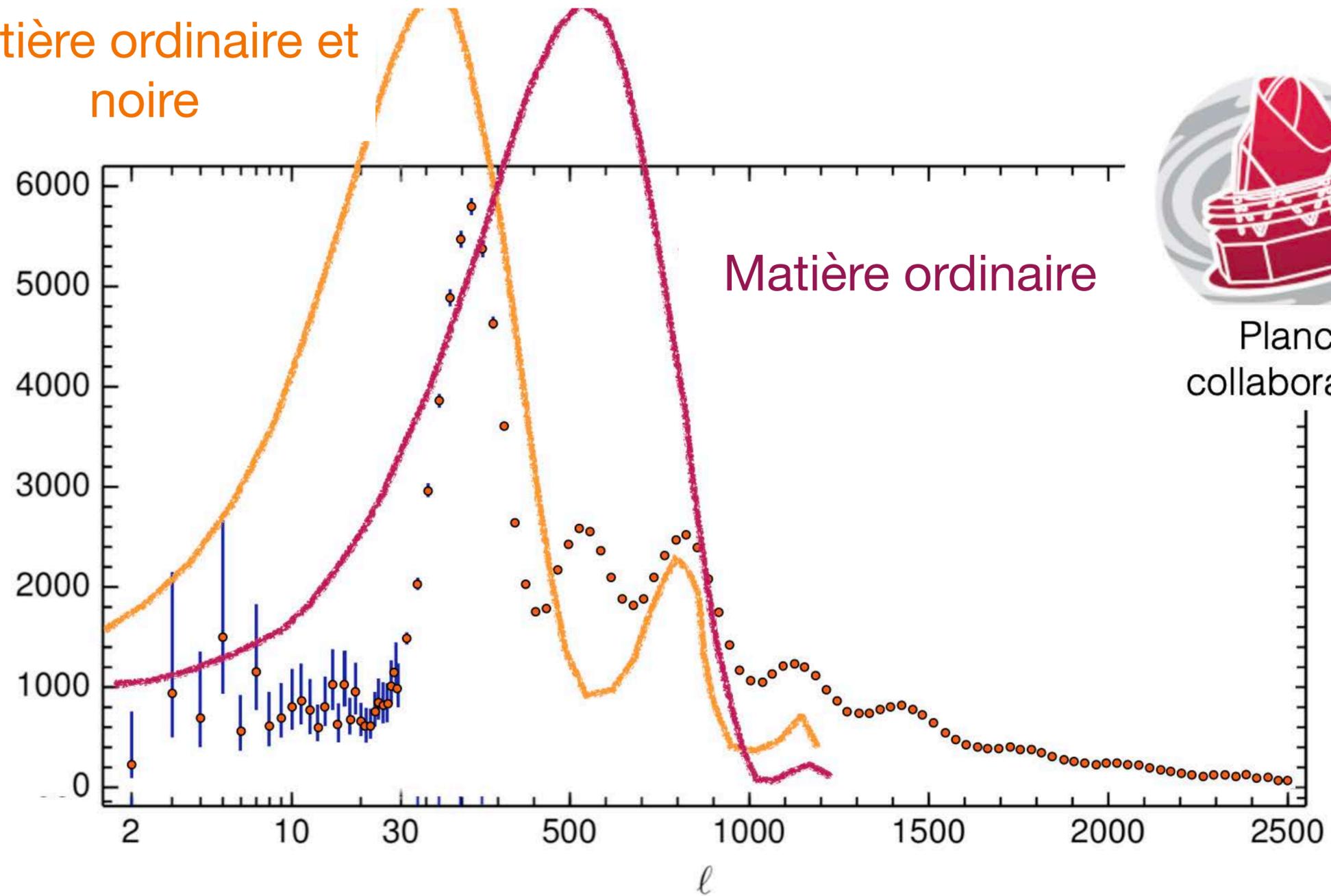
Analyse du FDC: de quoi l'univers est constitué?

Comparaison modèles et données en fonction des constituants de l'Univers



Analyse du FDC: de quoi l'Univers est-il constitué?

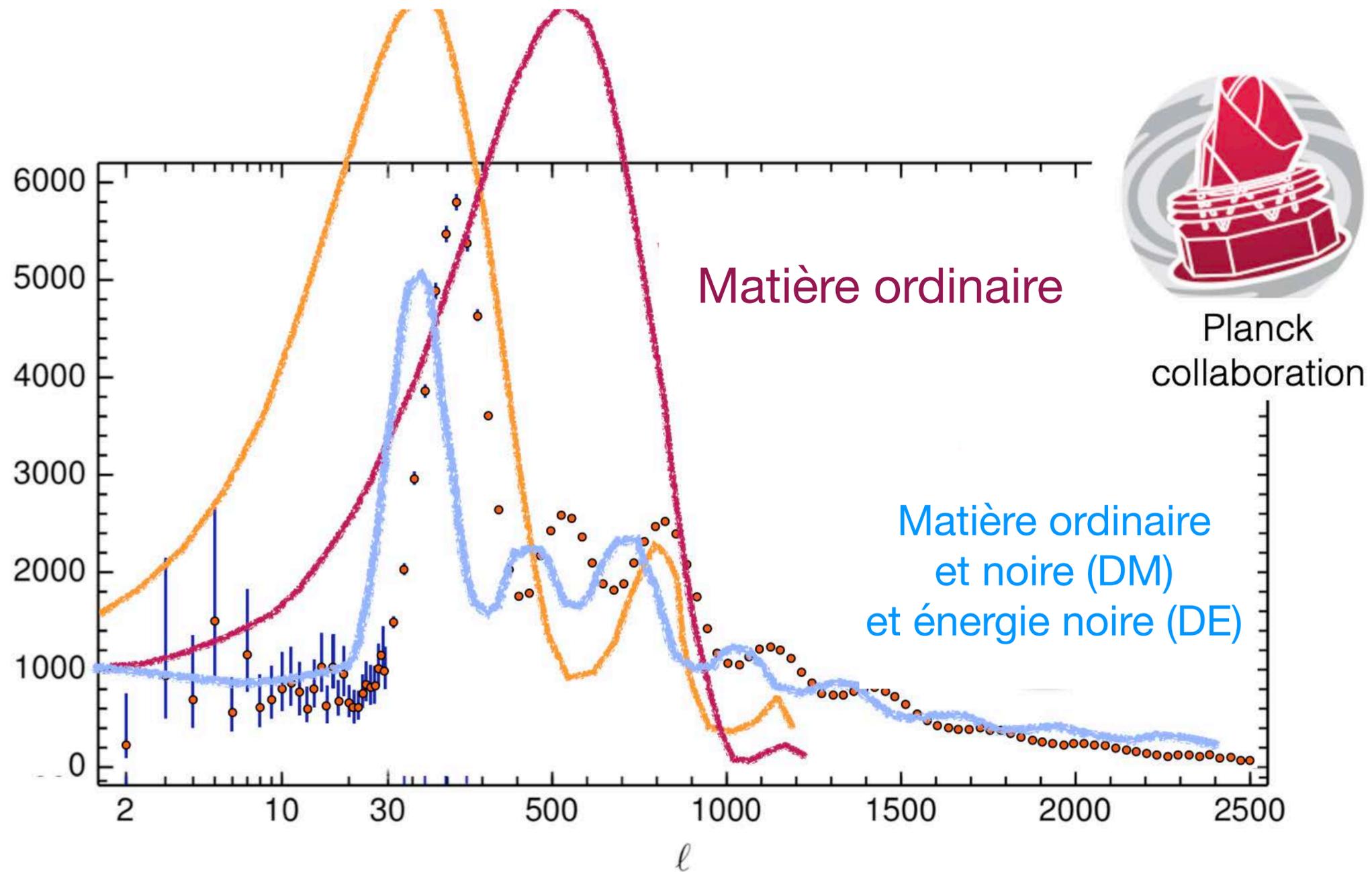
Matière ordinaire et
noire



Planck
collaboration

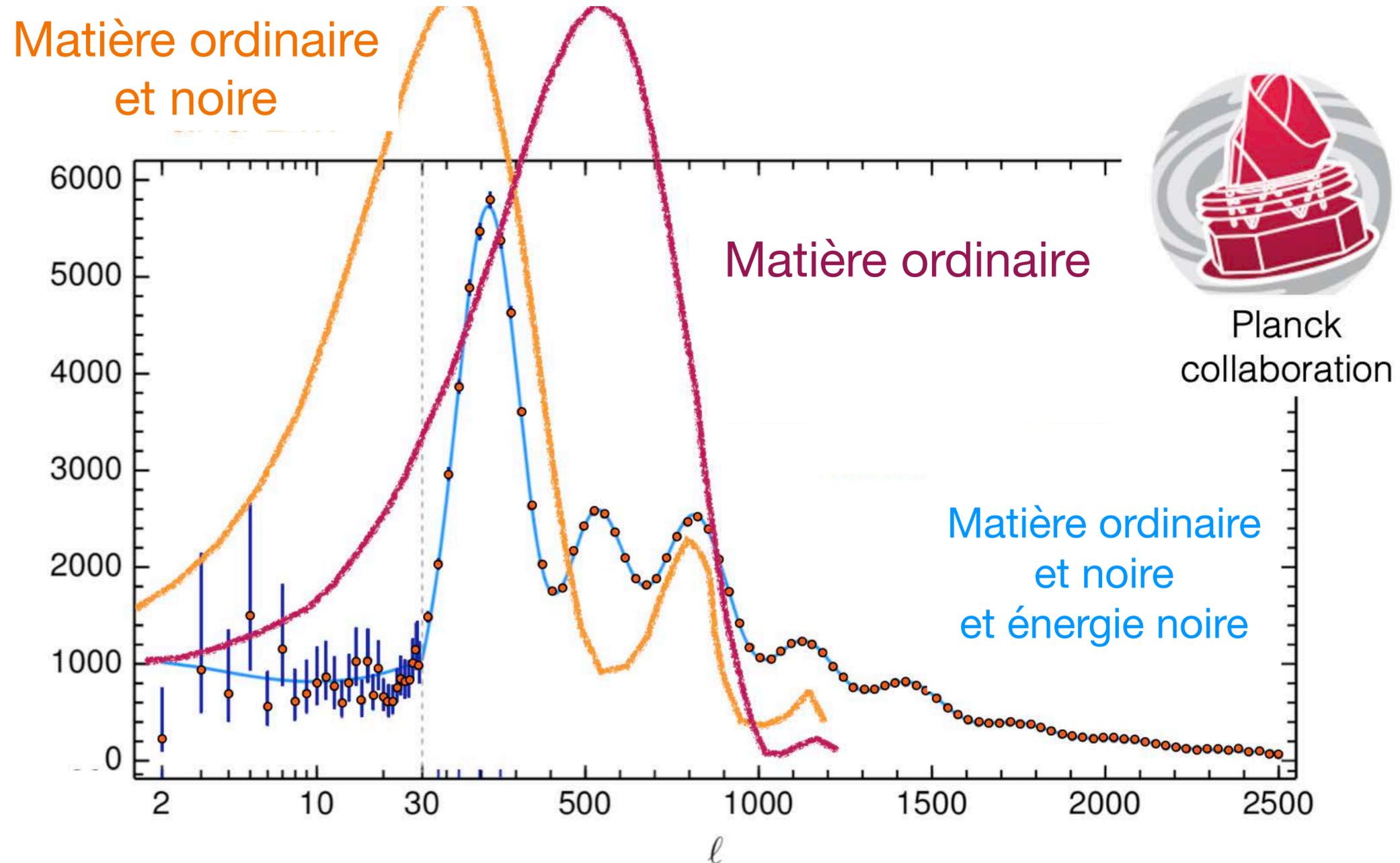
Analyse du FDC: de quoi l'Univers est-il constitué?

Matière ordinaire et
noire

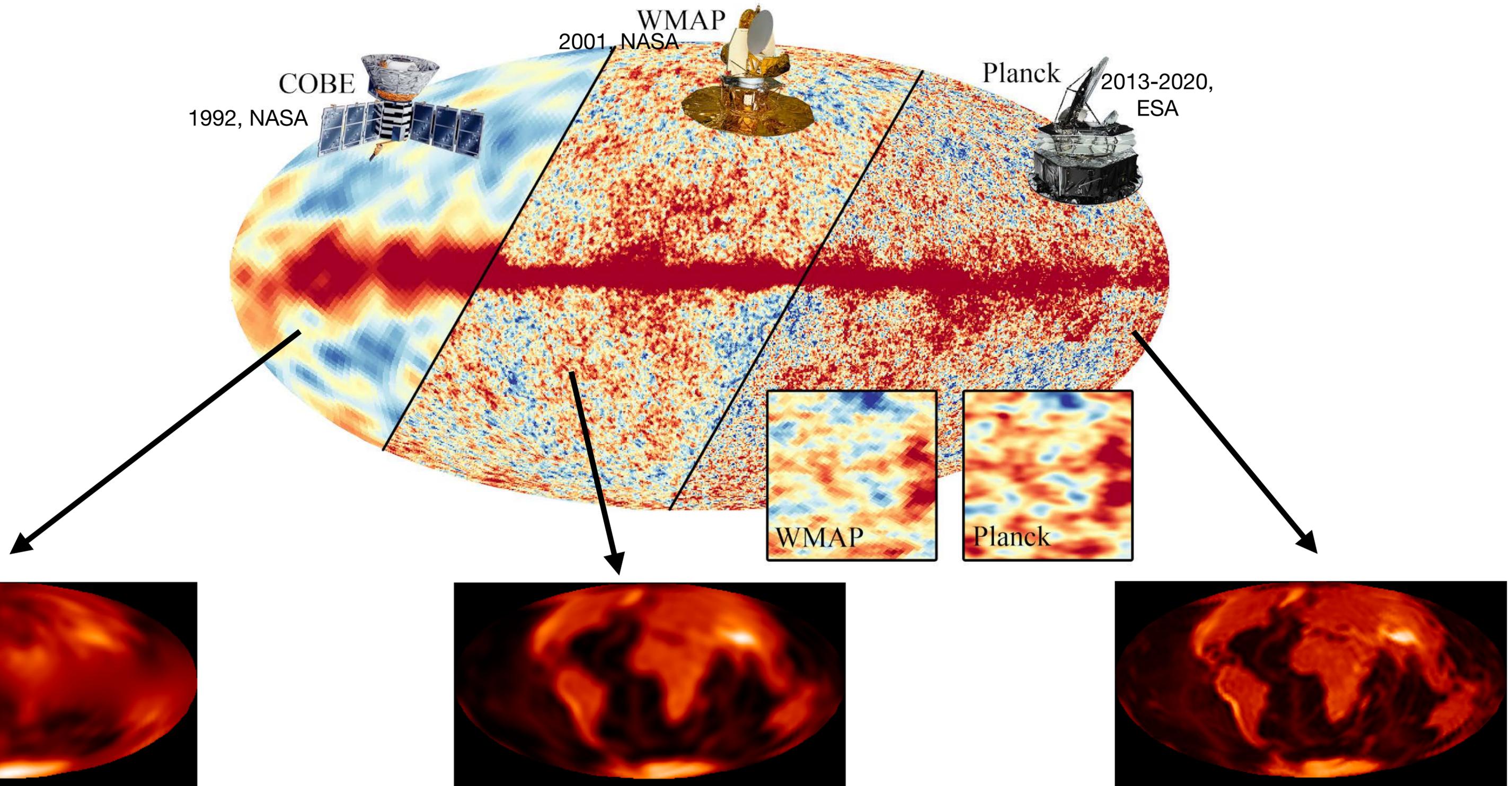


Analyse du FDC: de quoi l'Univers est-il constitué?

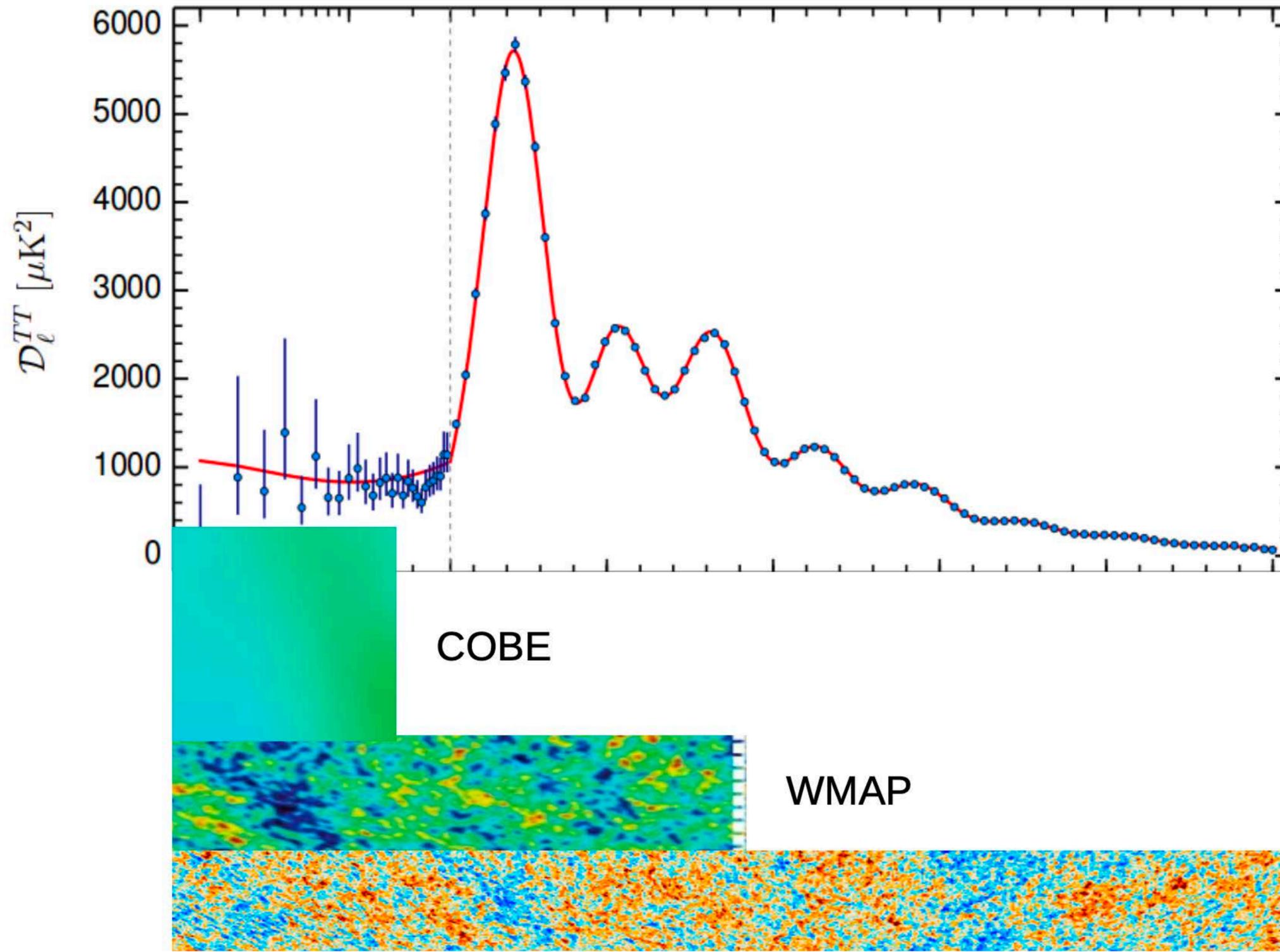
Fréquence des taches dépend de la composition de l'Univers, son âge, sa forme, ...
Accord entre modèle et données → Paramètres cosmologiques du modèle standard



20 ans d'observations spatiales du FDC



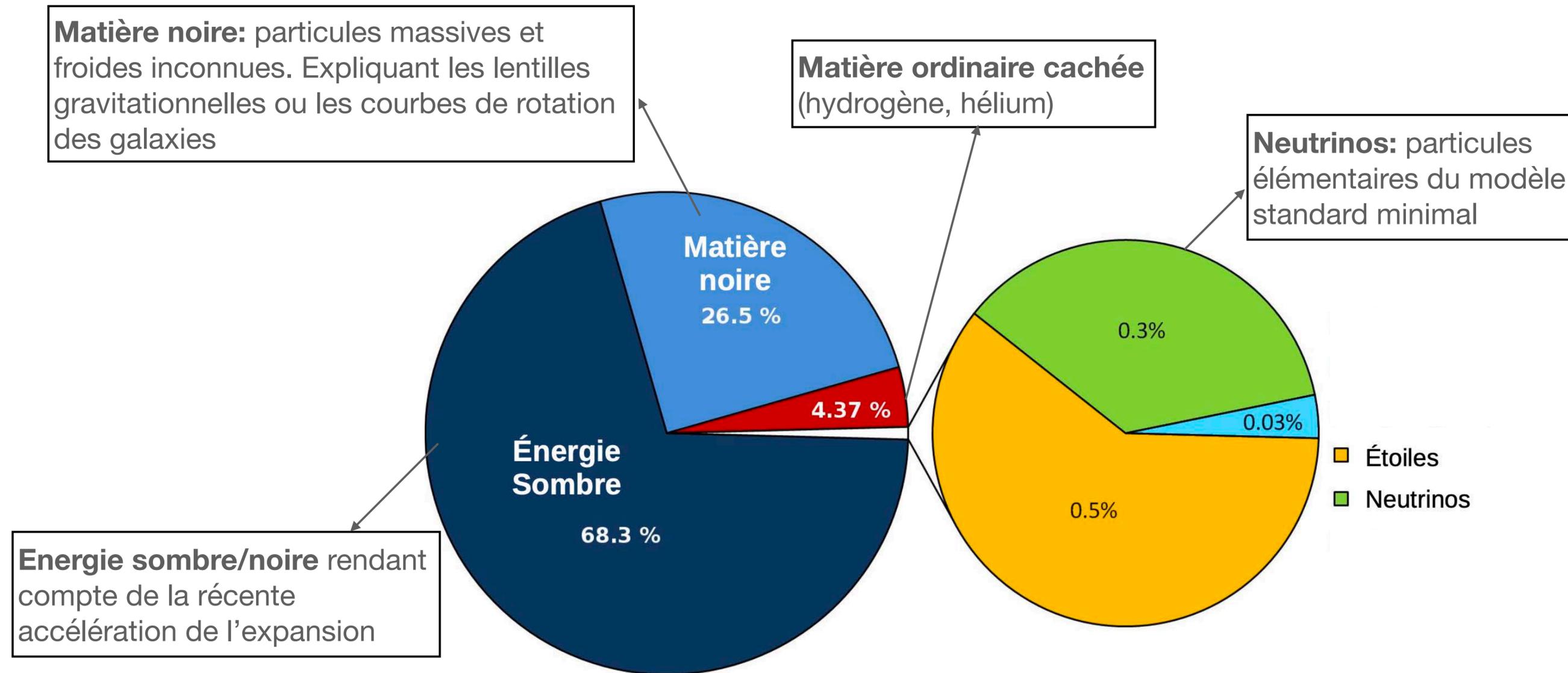
20 ans d'observations spatiales du FDC



Détails dans le spectre de puissance = Détails dans la cartographie du FDC

→ **19 pics et vallées** dans le spectre de puissance angulaire de *Planck*

...L'univers est constitué de ~95% d'inconnu



Comment a-t-il débuté?

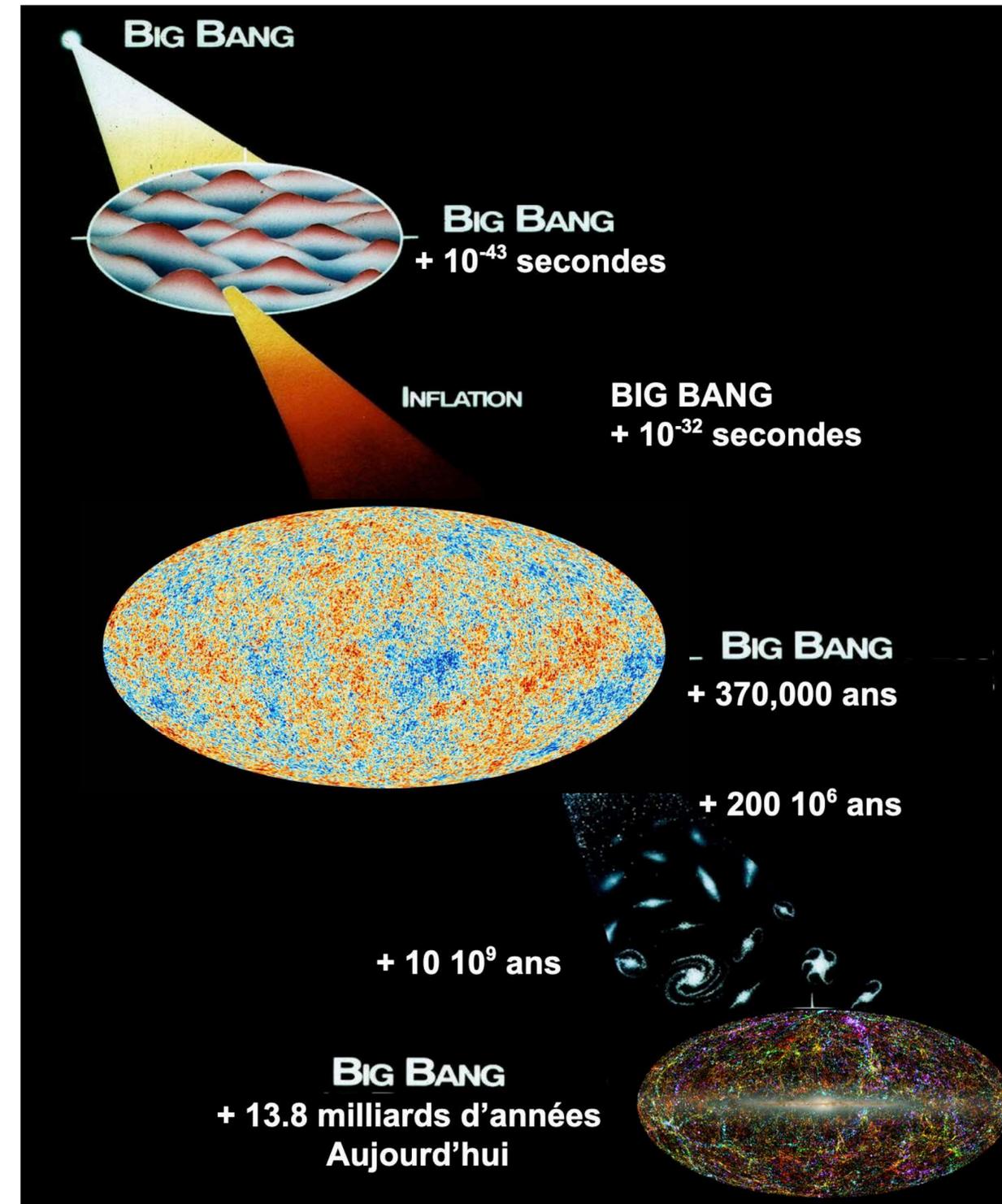
FDC: Fenêtre sur le début de l'univers

Big-bang [$\sim 10^{-40}$ s]: champ d'énergie produisant matière et rayonnement avec fluctuations dont "naissent" les galaxies

Phase d'inflation [$\sim 10^{-30}$ s]: expansion exponentielle (en 10^{-32} s facteur nécessaire pour passer de l'épaisseur d'un cheveu à une taille de 300 millions d'années lumière)

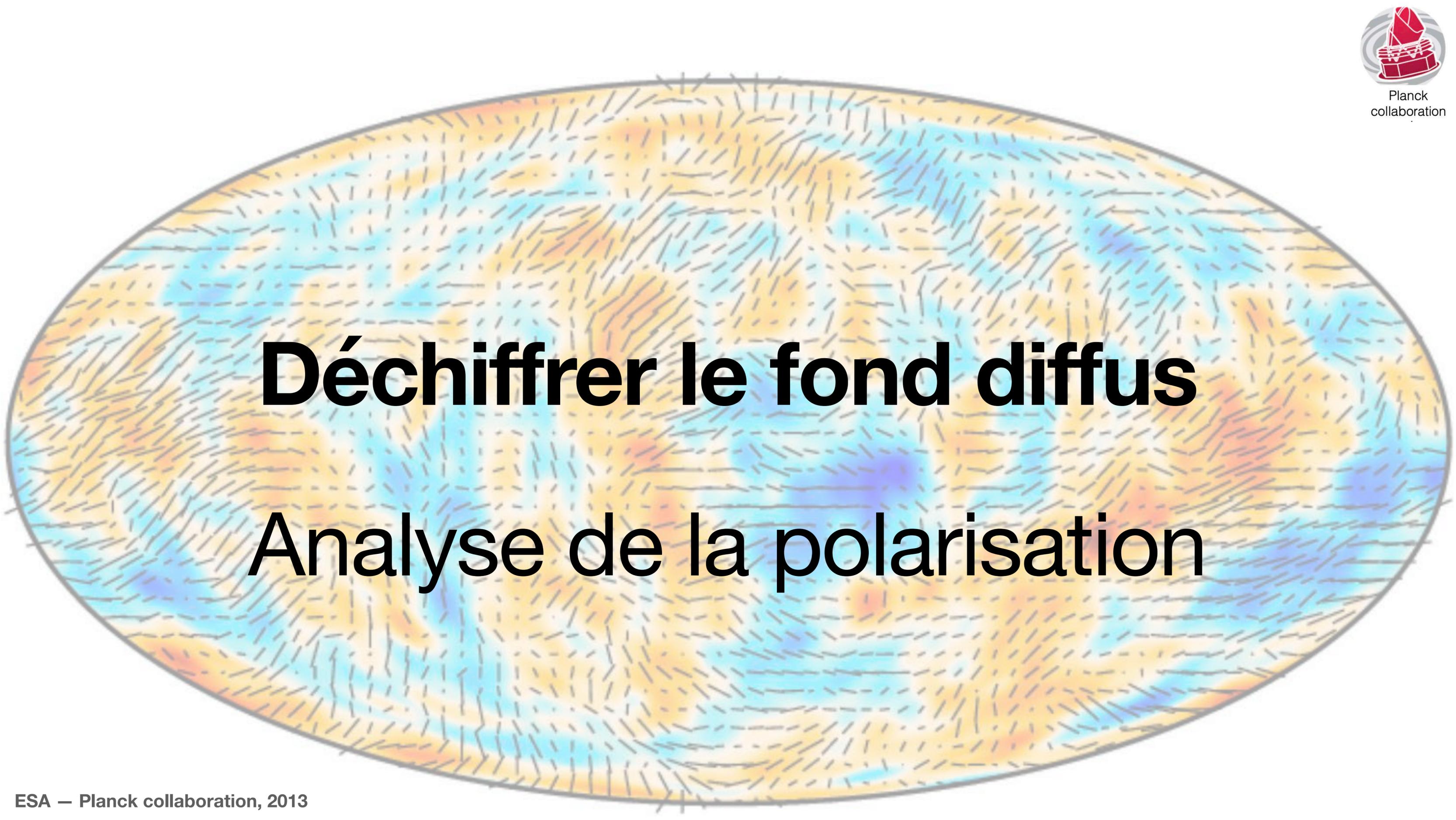
L'inflation simple prévoit:

- Géométrie euclidienne (Univers plat) ✓
- Fluctuations d'amplitudes égales à toutes les échelles angulaires ✓
- Distribution statistique normale (autant de sur-densités que de sous-densités) ✓
- Fond d'ondes gravitationnelles primordiales très basse fréquence ?





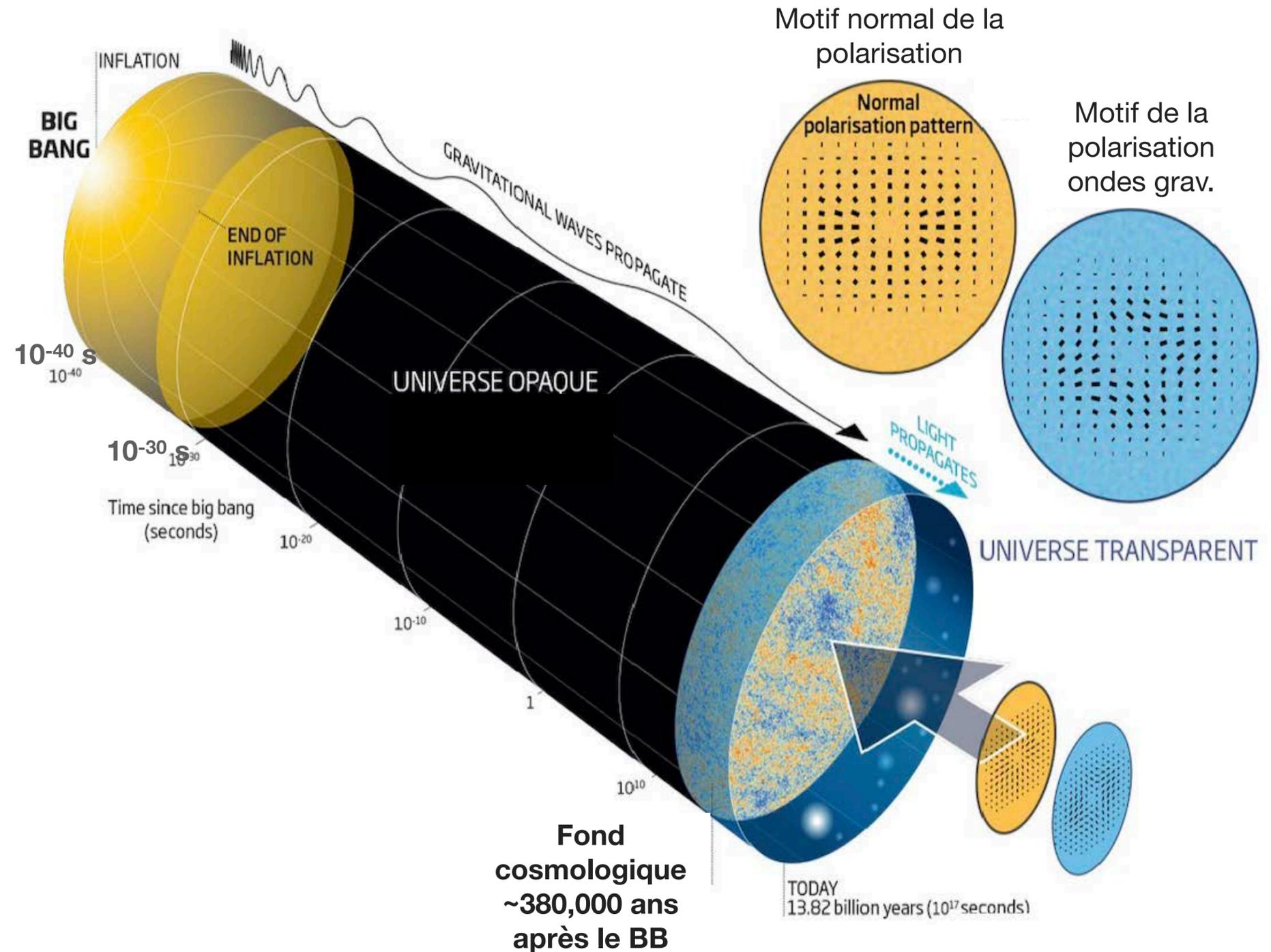
Planck
collaboration

A large, oval-shaped map of the Cosmic Microwave Background (CMB) showing polarization. The map is color-coded with a gradient from blue to orange, and overlaid with a dense field of small, black, short line segments representing the polarization vectors. The text is centered over the map.

Déchiffrer le fond diffus

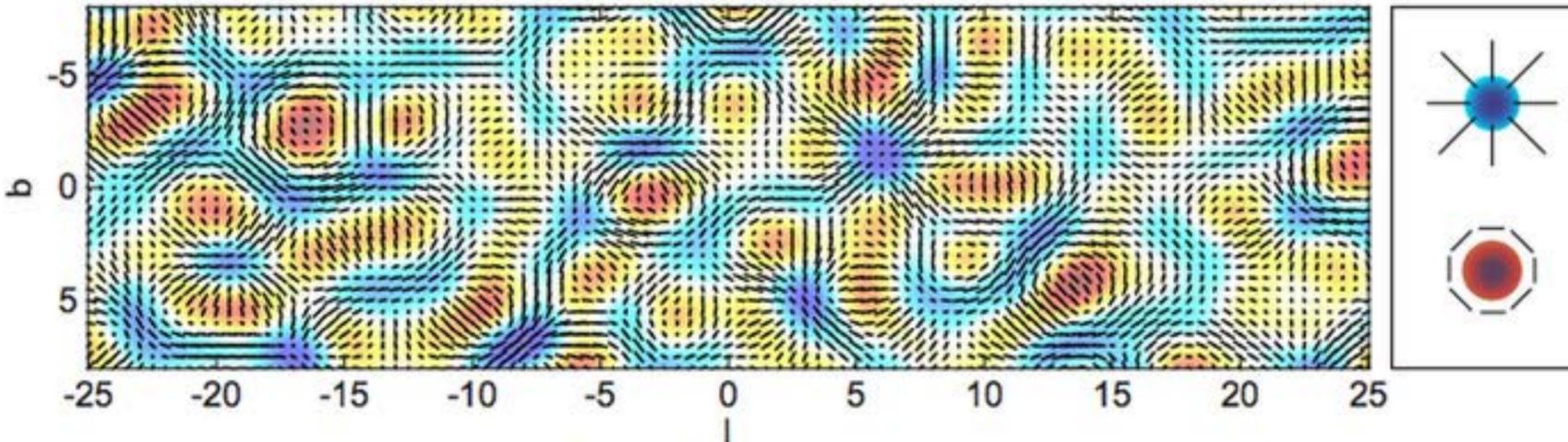
Analyse de la polarisation

Une nouvelle vision du FDC: Polarisation



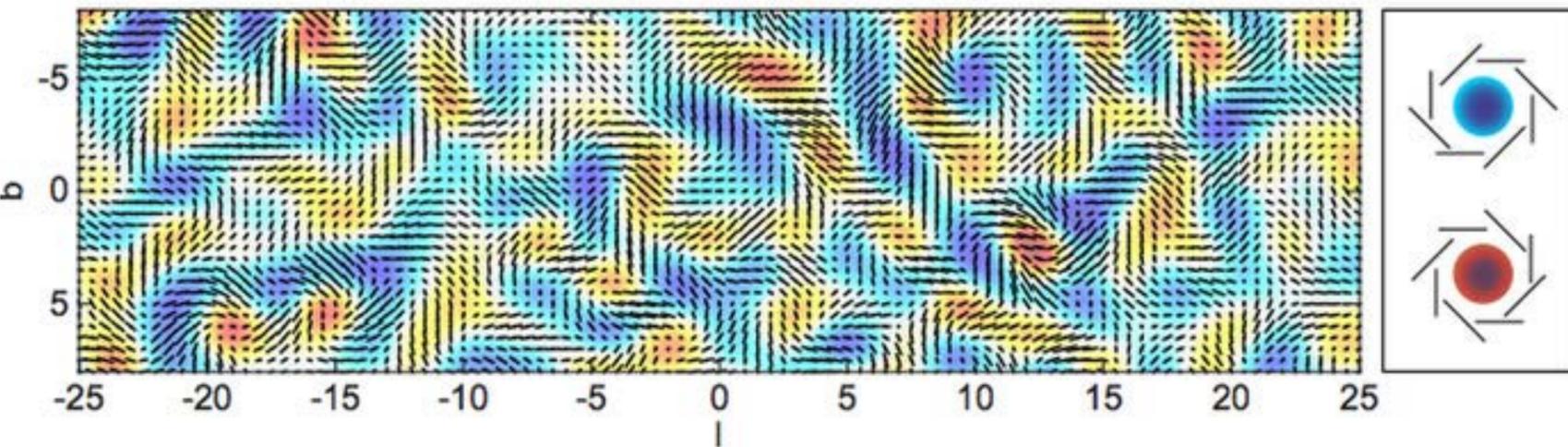
Polarisation: Fenêtre sur l'univers primordial

E-mode Polarization



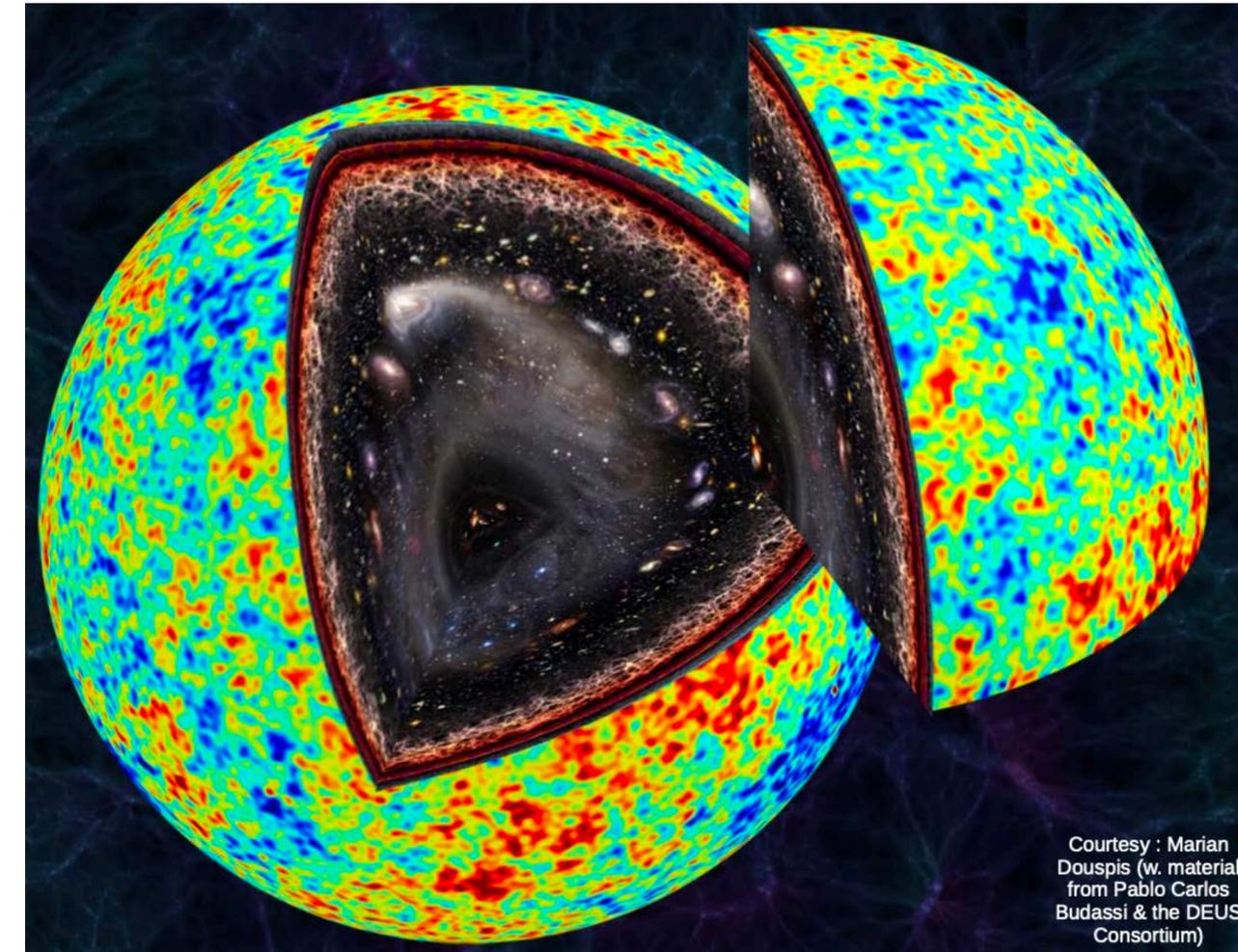
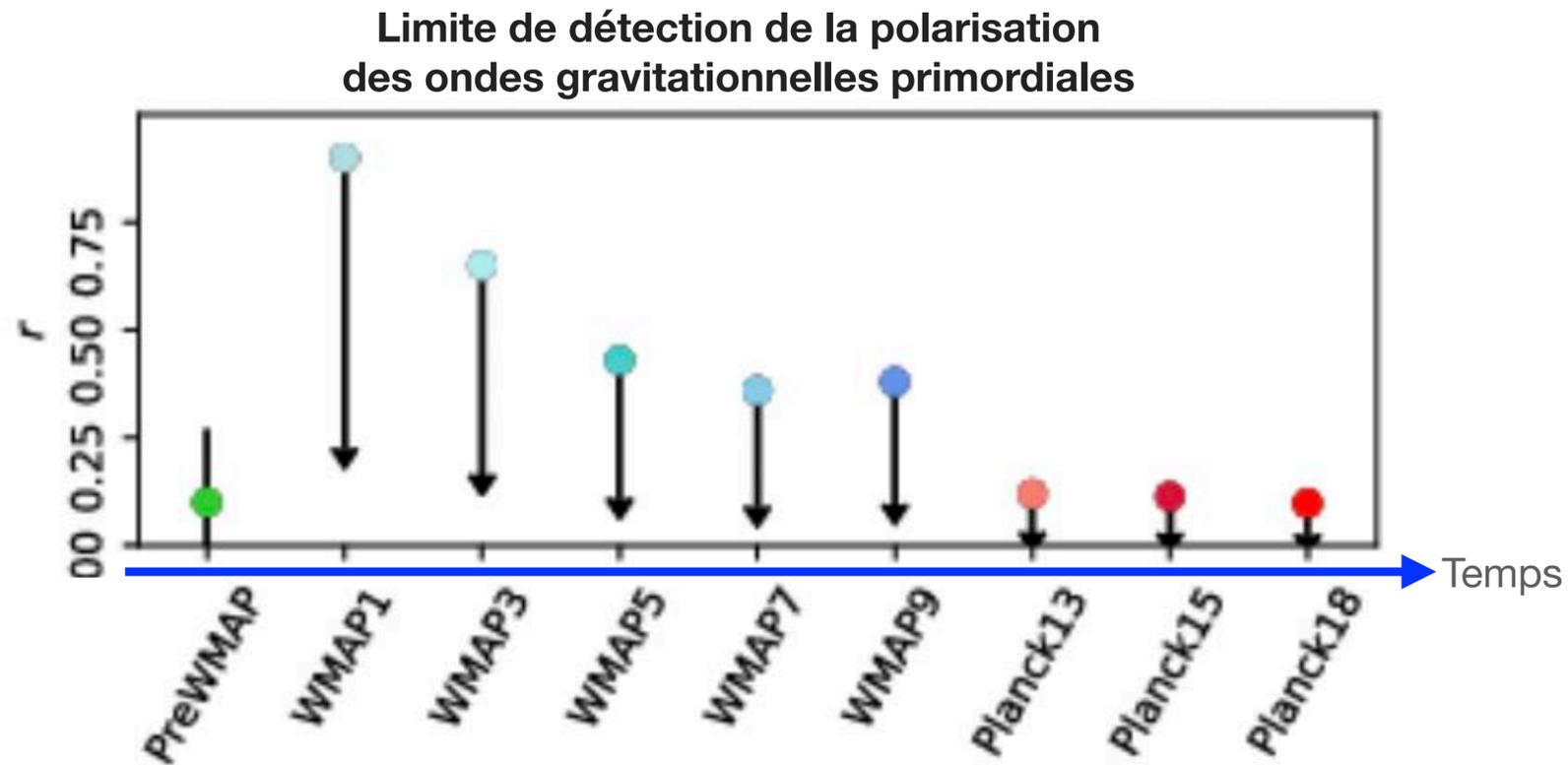
Polarisation (modes E) → neutrinos générés
~1s après le big-bang (nombres, masse)

B-mode Polarization



Polarisation (modes B) → fond d'ondes
gravitationnelles primordiales $\sim 10^{-30}$ s après
de big-bang (inflation processus physique
aux énergies $\sim 10^{12}$ fois LHC)

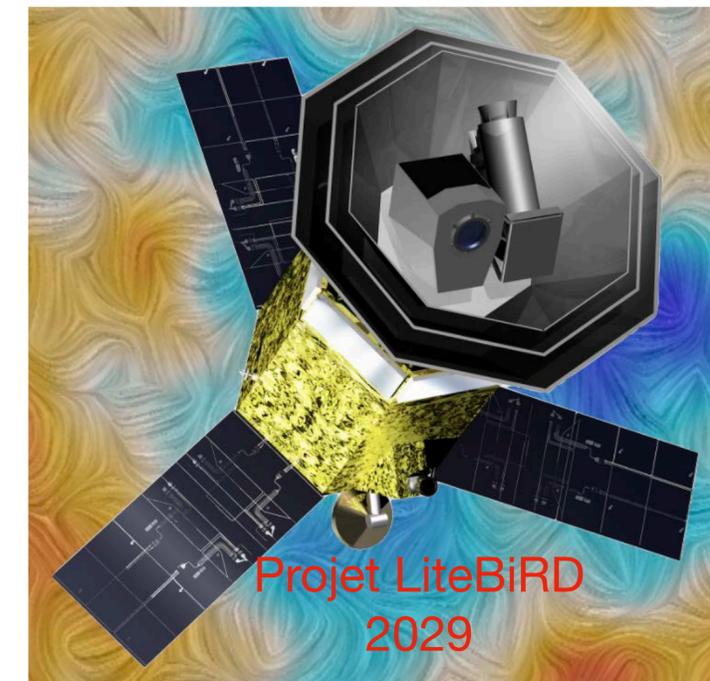
Aux origines de l'univers

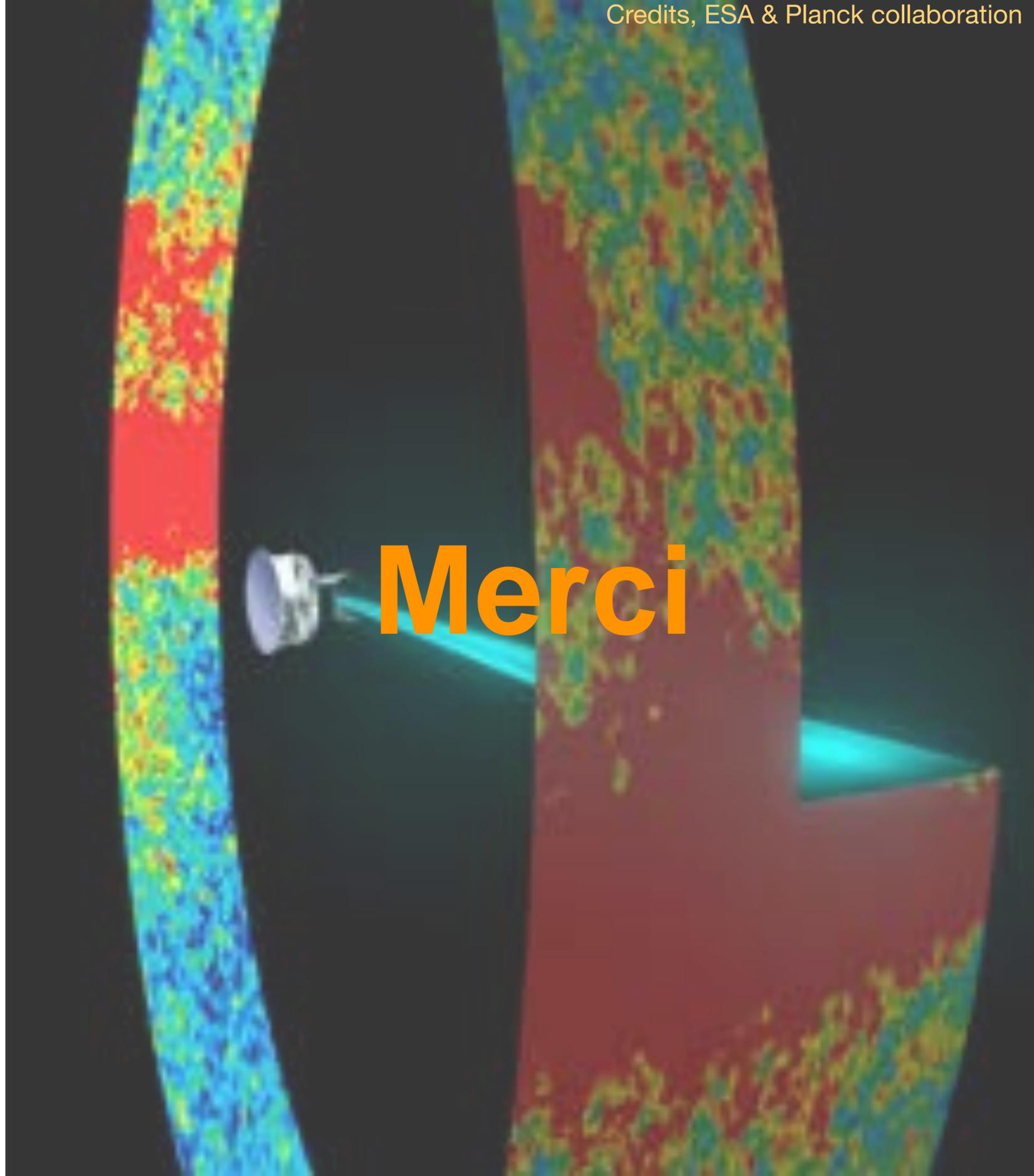


Polarisation mode B: Nouvelle frontière pour comprendre l'origine de l'univers et le "moteur" de l'inflation cosmique

Nouveaux défis technologiques, méthodologiques, scientifiques

Quête observationnelle internationale avec un programme ambitieux de télescopes et de satellites





Merci