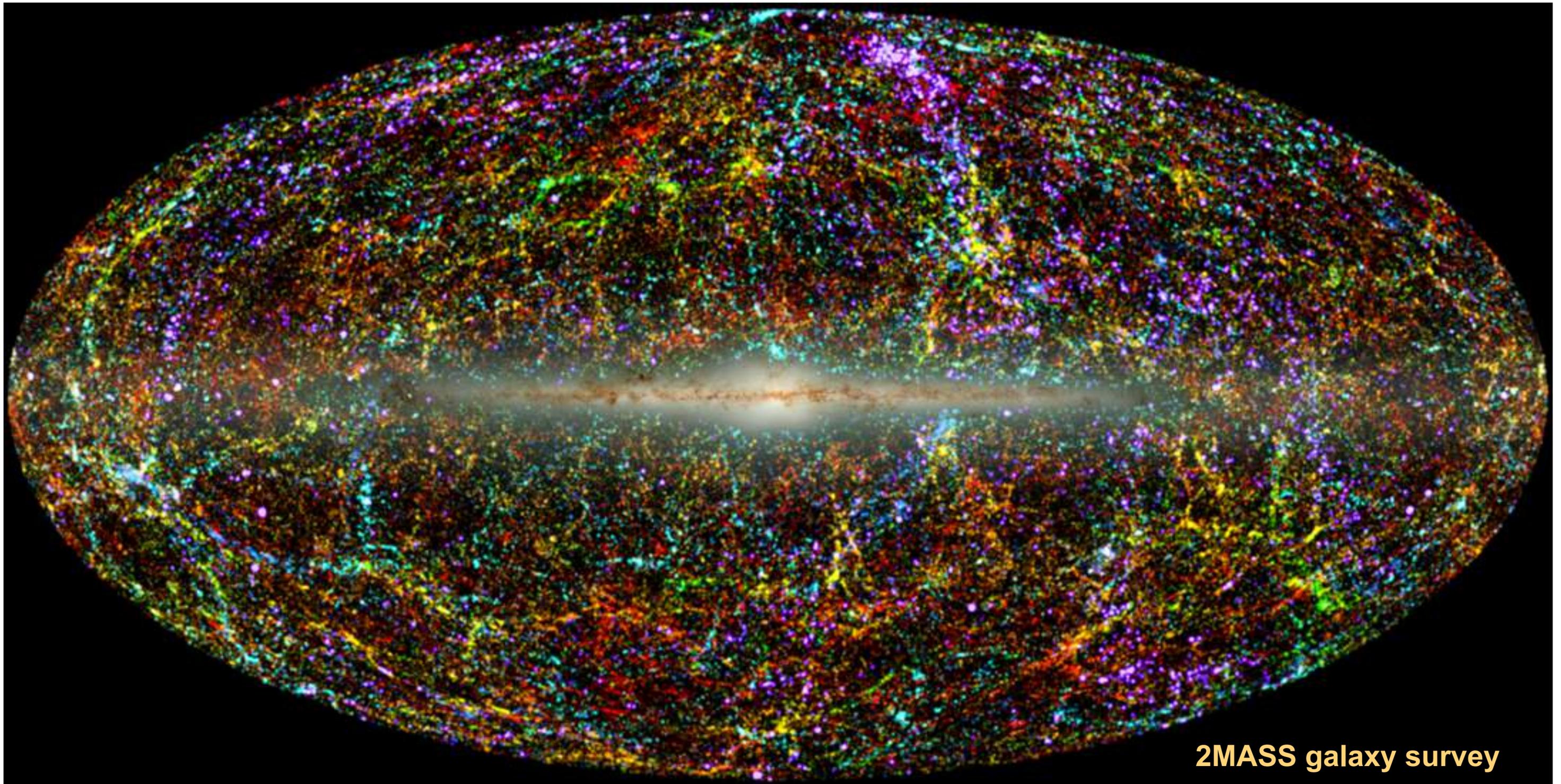


La distribution de la matière aux grandes échelles

Nabila Aghanim

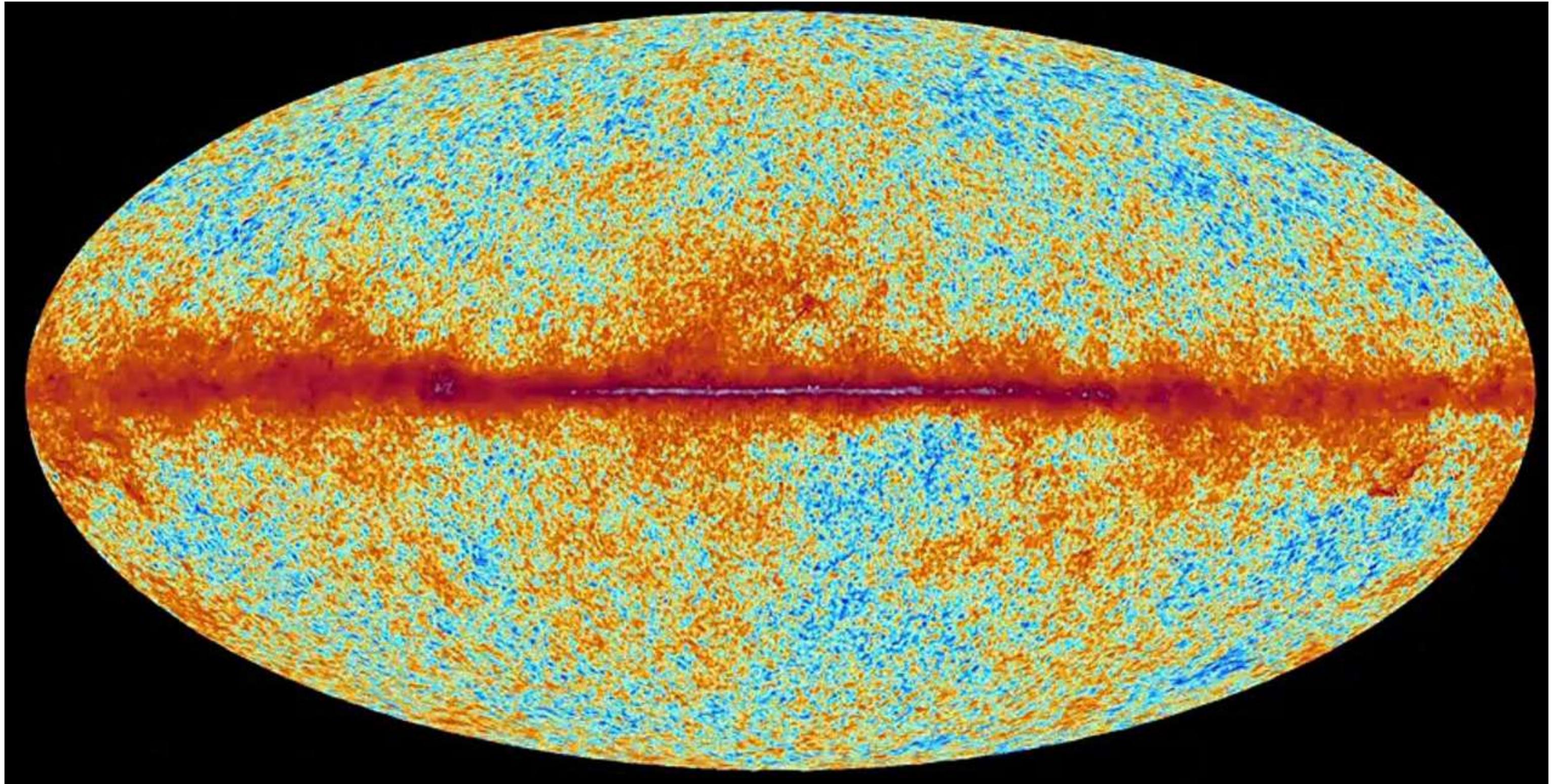
Institut d'Astrophysique Spatiale
CNRS/Université Paris Saclay

L'image de l'univers dans l'infrarouge

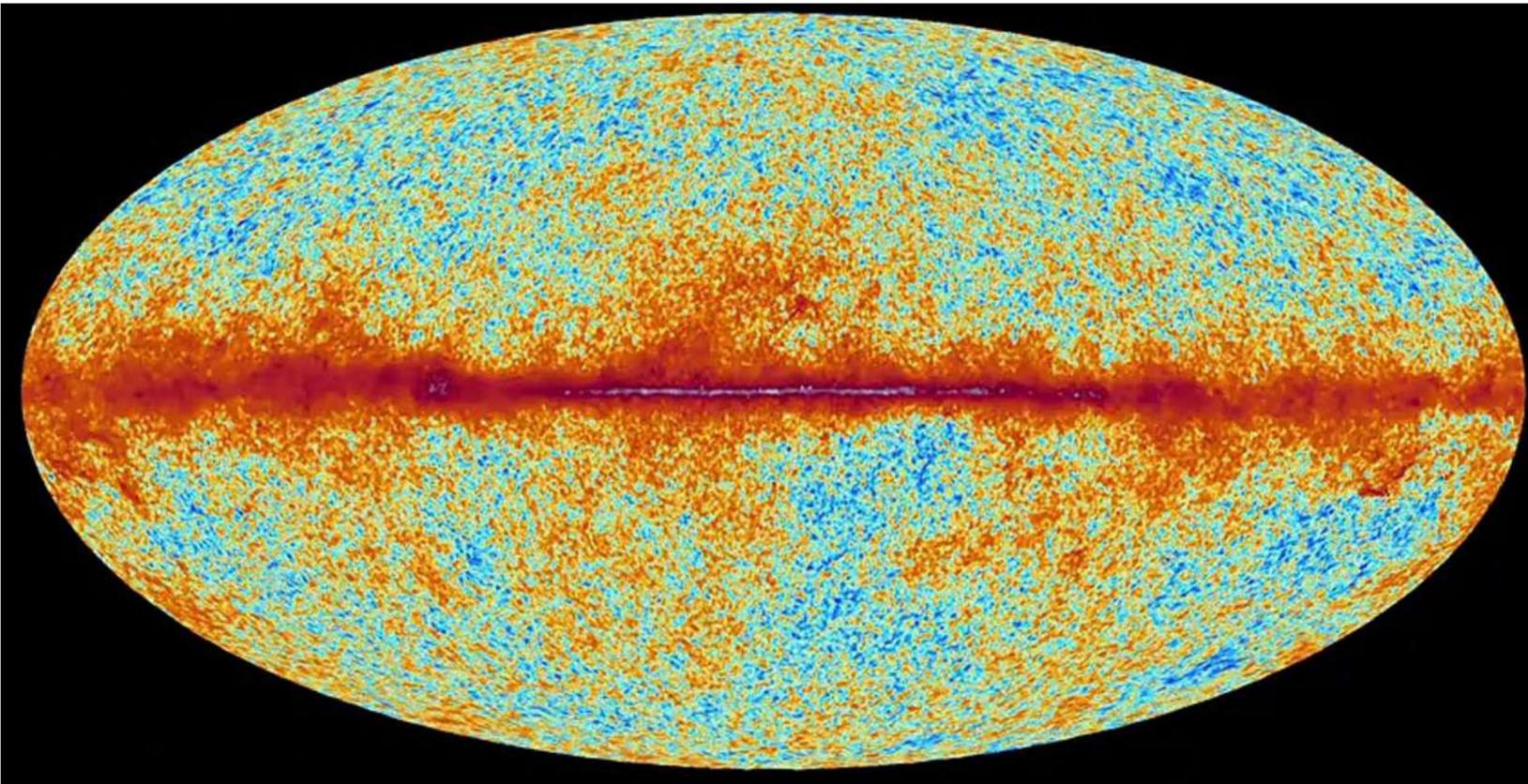


2MASS galaxy survey

L'image de l'univers dans le micro-onde

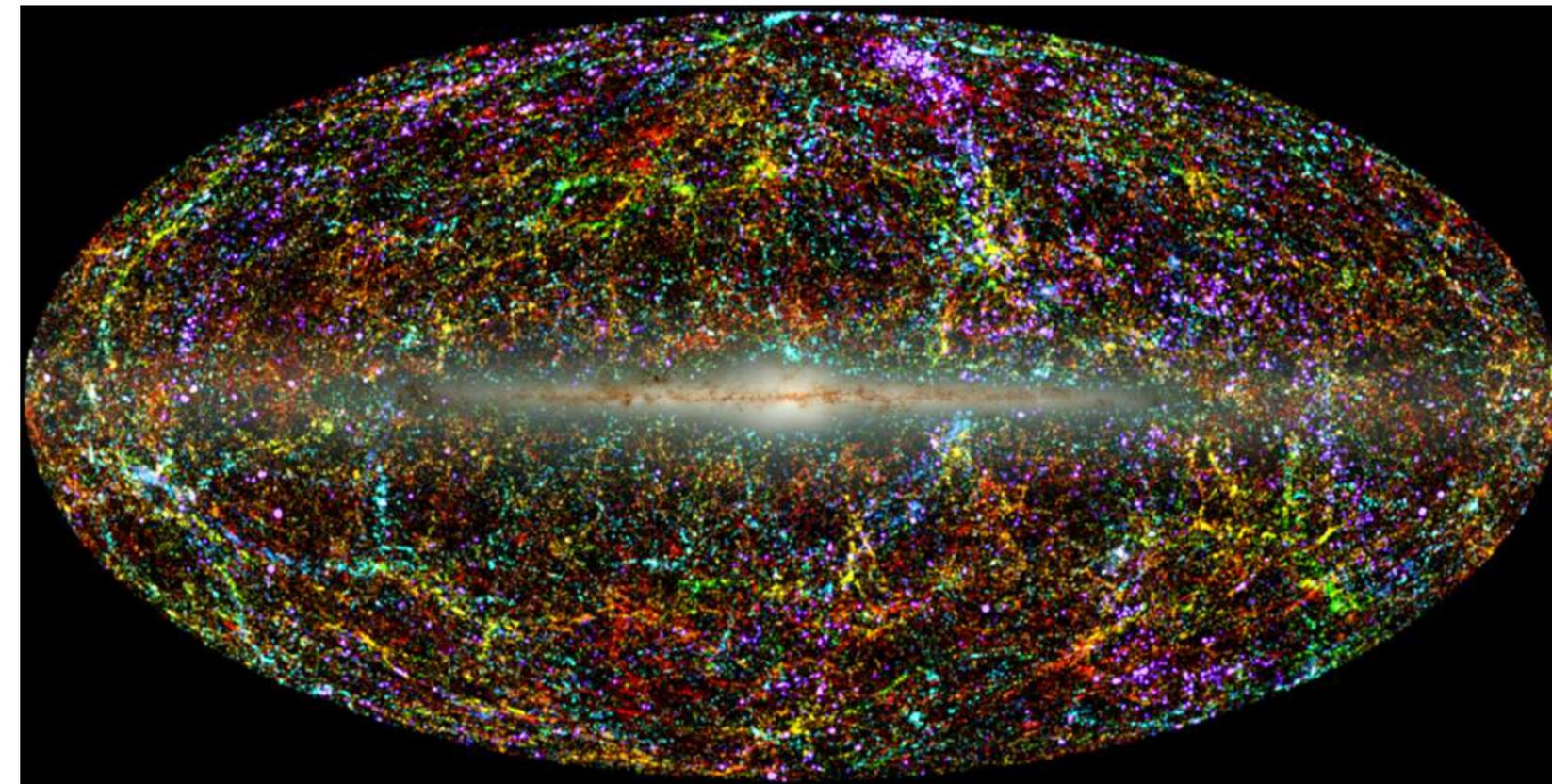


Deux images du même univers



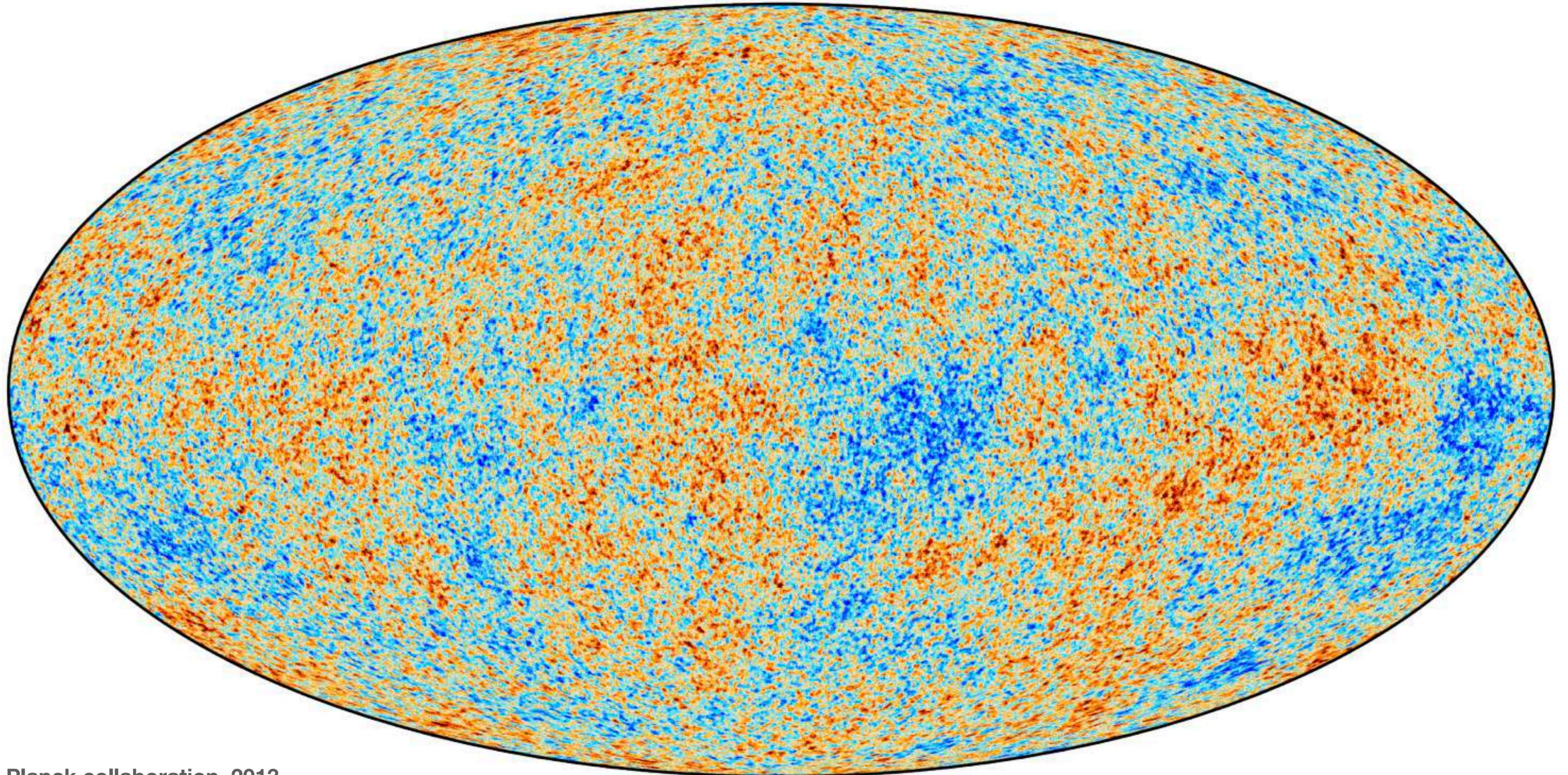
- Quels sont les constituants de l'univers?
- Comment se forment les structures cosmiques?
- Quelles sont les propriétés de la matière aux grandes échelles?

Que nous apprend la distribution de la matière sur le modèle cosmologique et sur les structures?

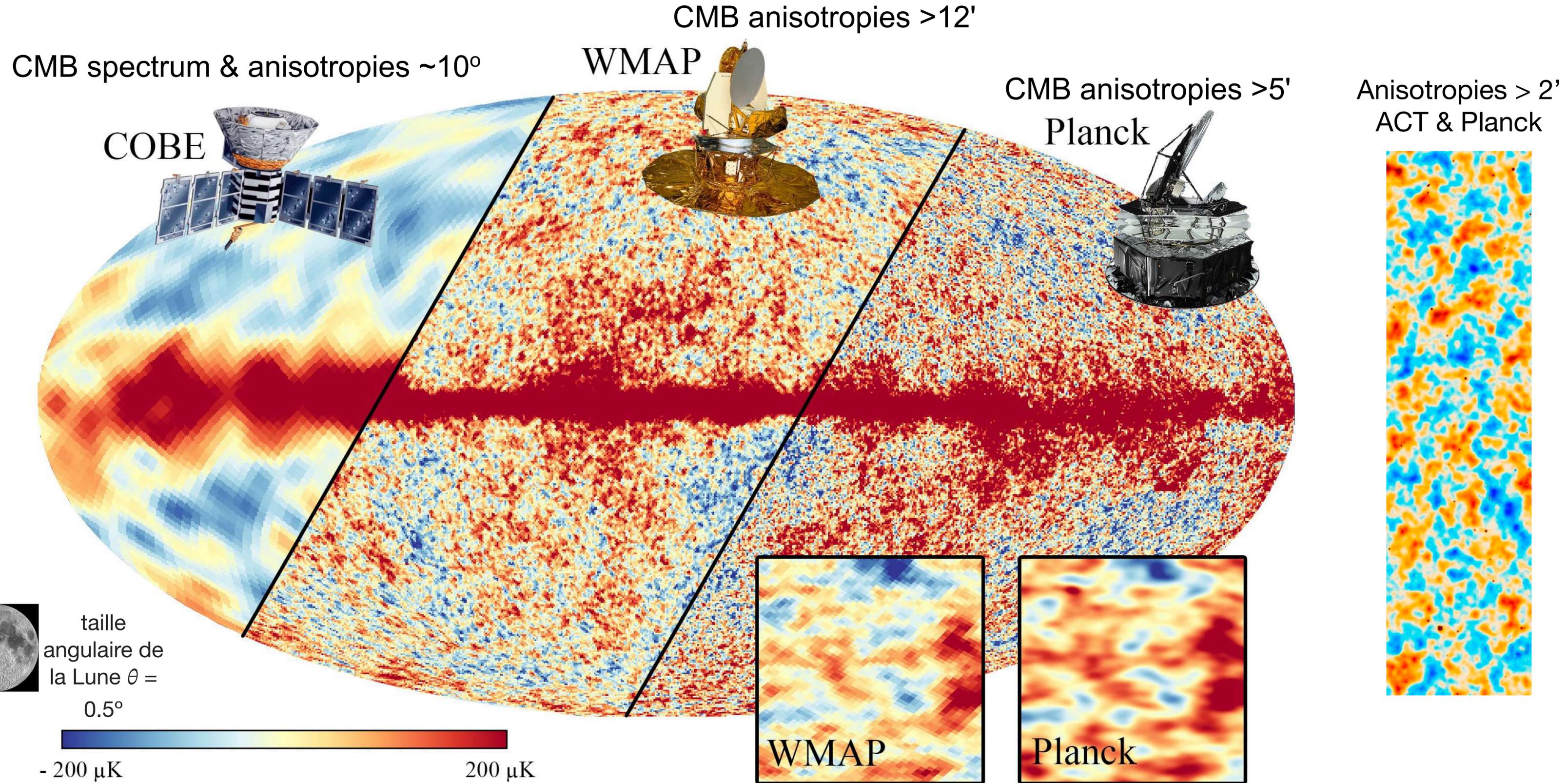


Première lumière de l'univers (FDC = CMB)

Voir présentation détaillée de Silvia Galli le 16 décembre



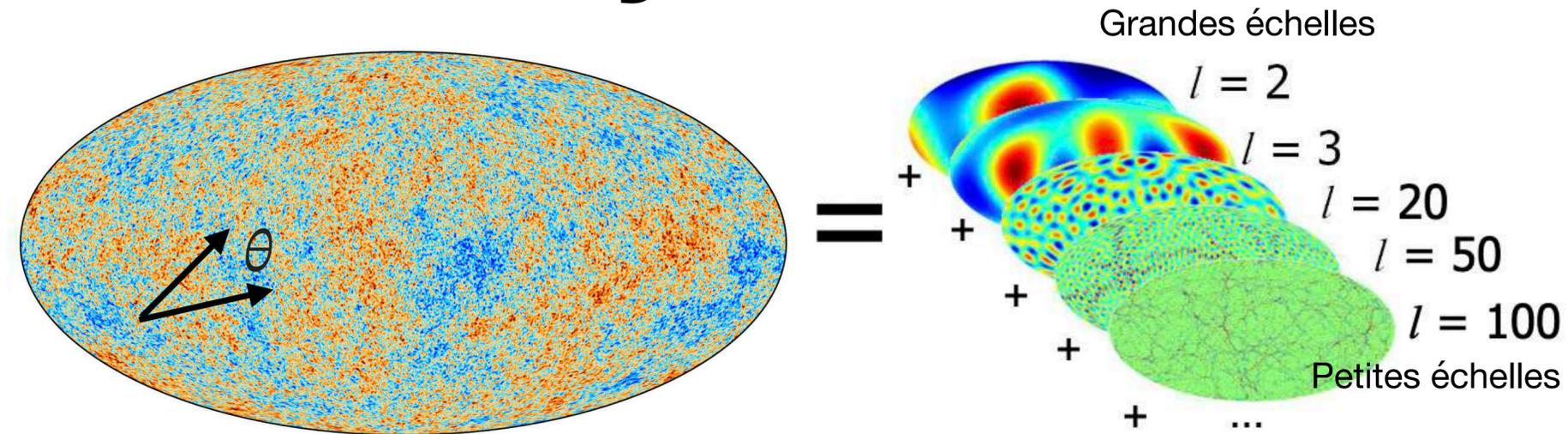
Le CMB à toutes les échelles angulaires



De l'image du CMB à son analyse

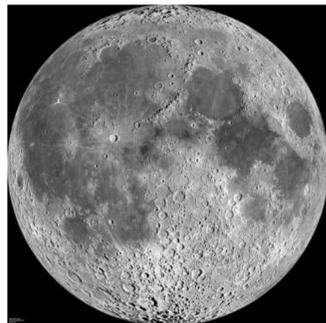
Anisotropies de temperature sont reliées aux perturbations de matière

Image sur la sphère décomposée en ses modes (échelles angulaires) → analyse en **harmoniques sphériques**

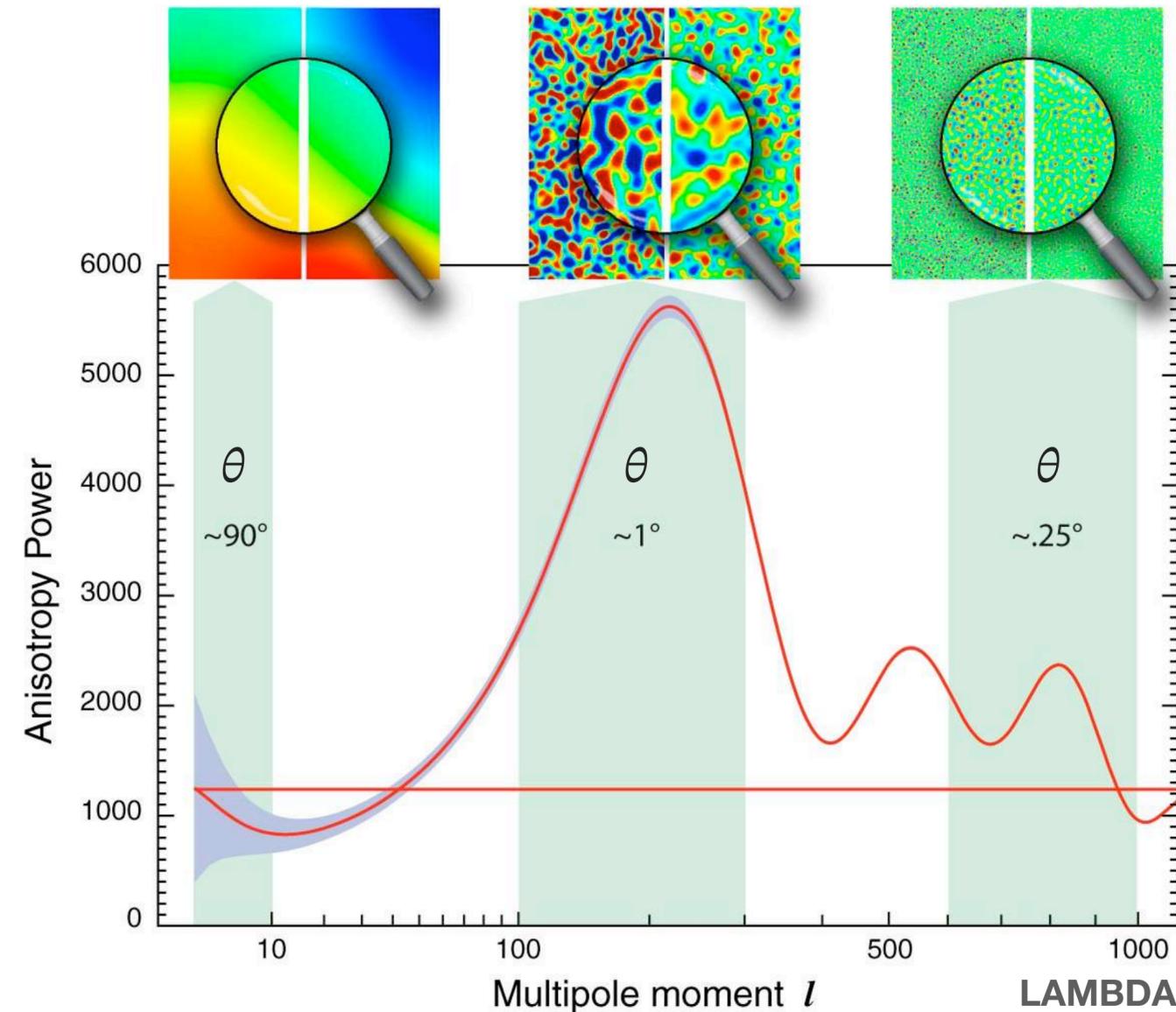


Spectre de puissance angulaire

Statistiques des anisotropies en fonction des modes (tailles angulaires θ sur le ciel)



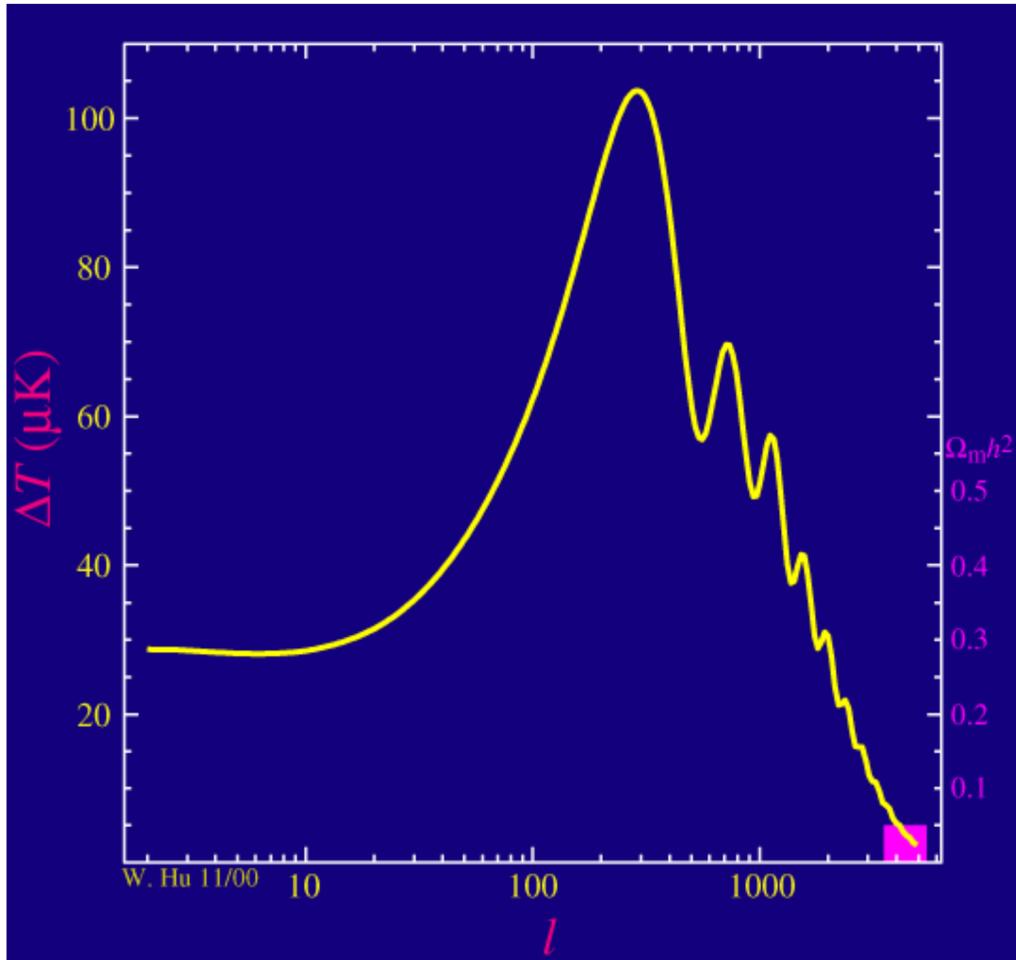
taille angulaire de la Lune $\theta = 0.5^\circ$



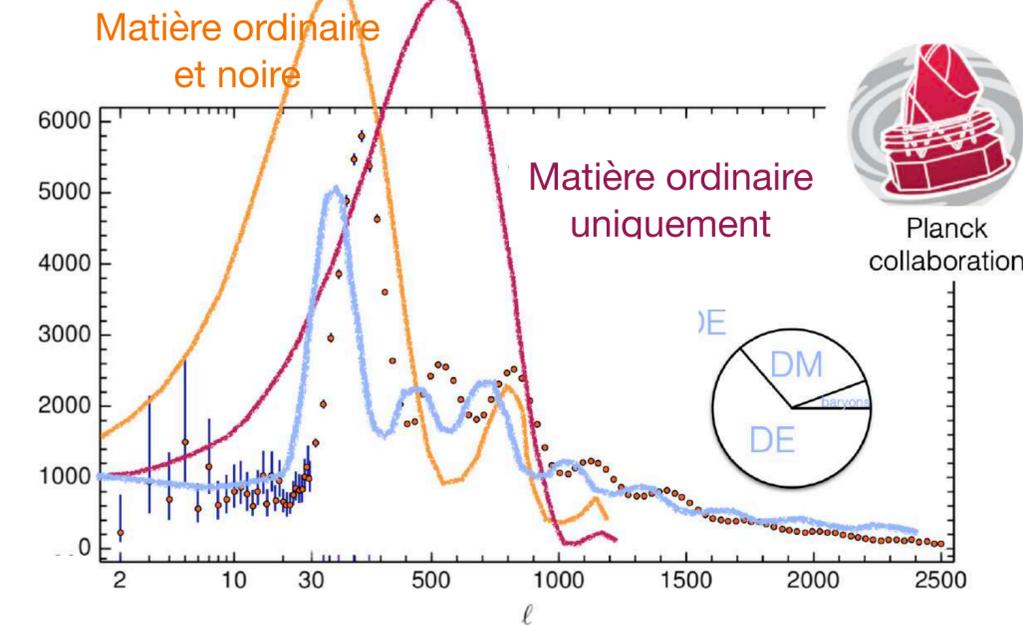
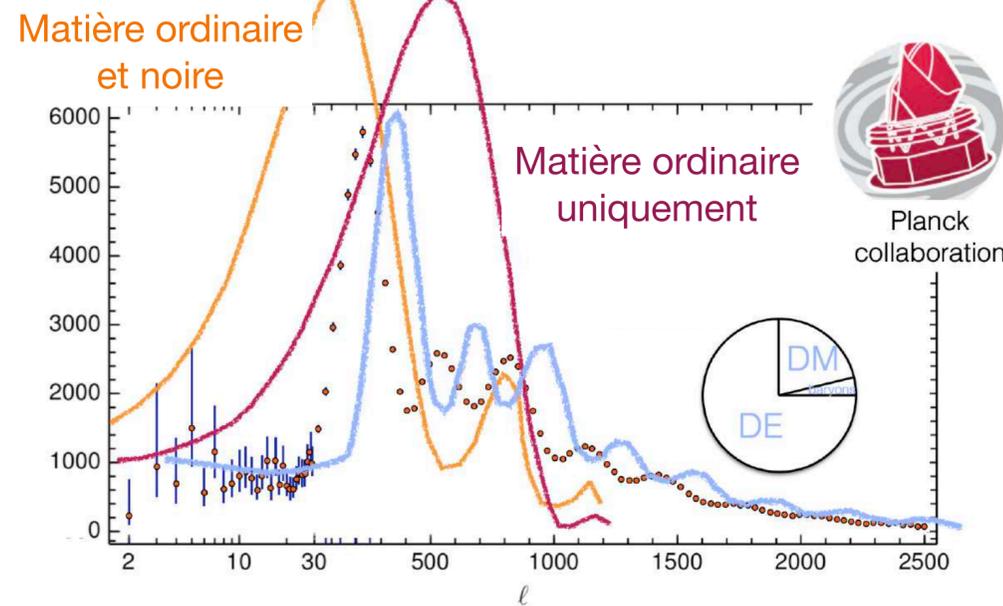
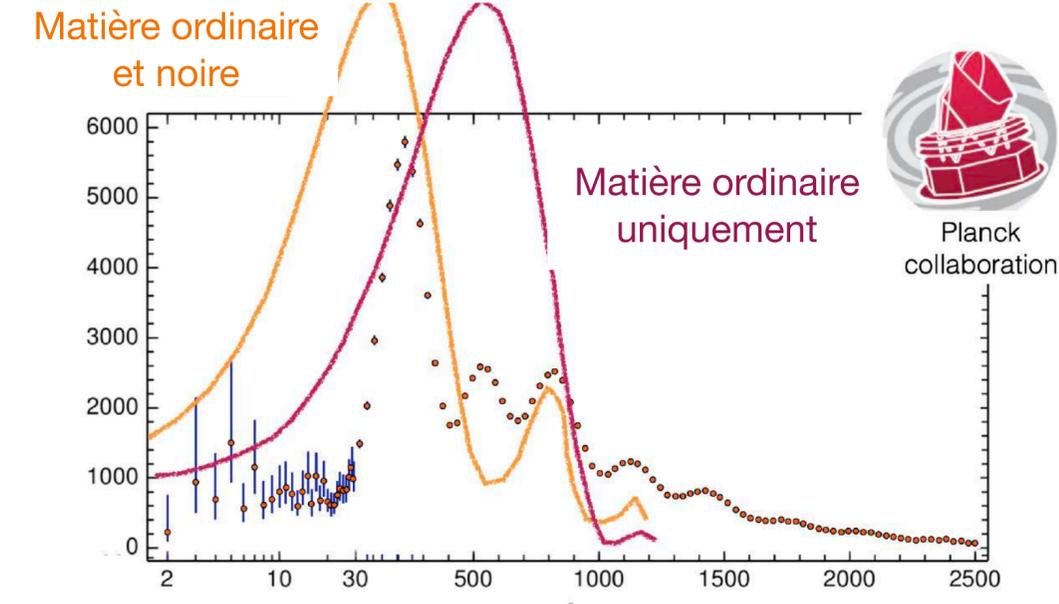
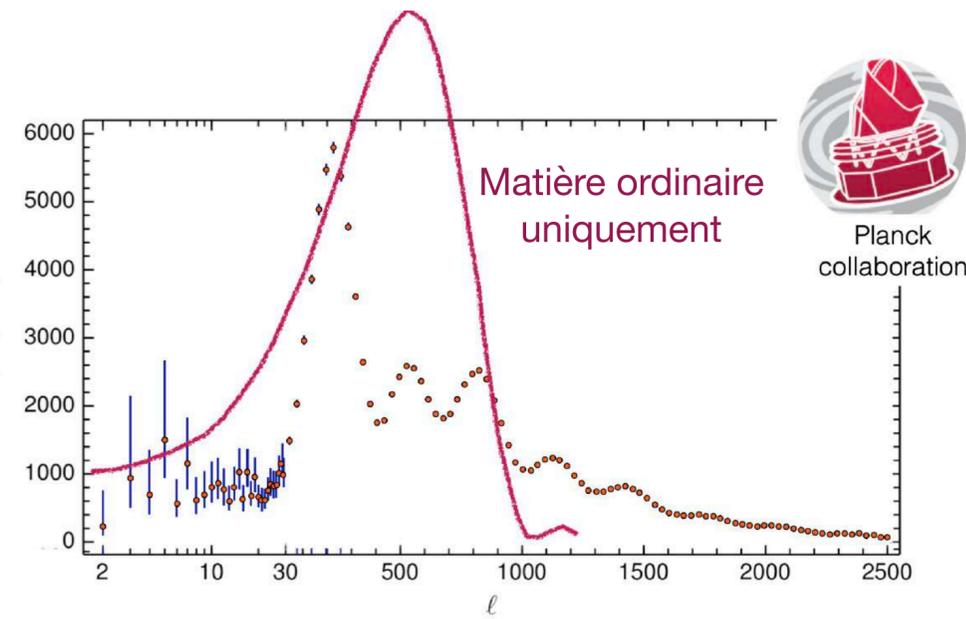
De l'image du CMB au contenu de l'univers

Comparer le spectre de puissance des anisotropies aux modèles théoriques → inférence Bayésienne (vraisemblance des paramètres un modèle étant données les mesures)

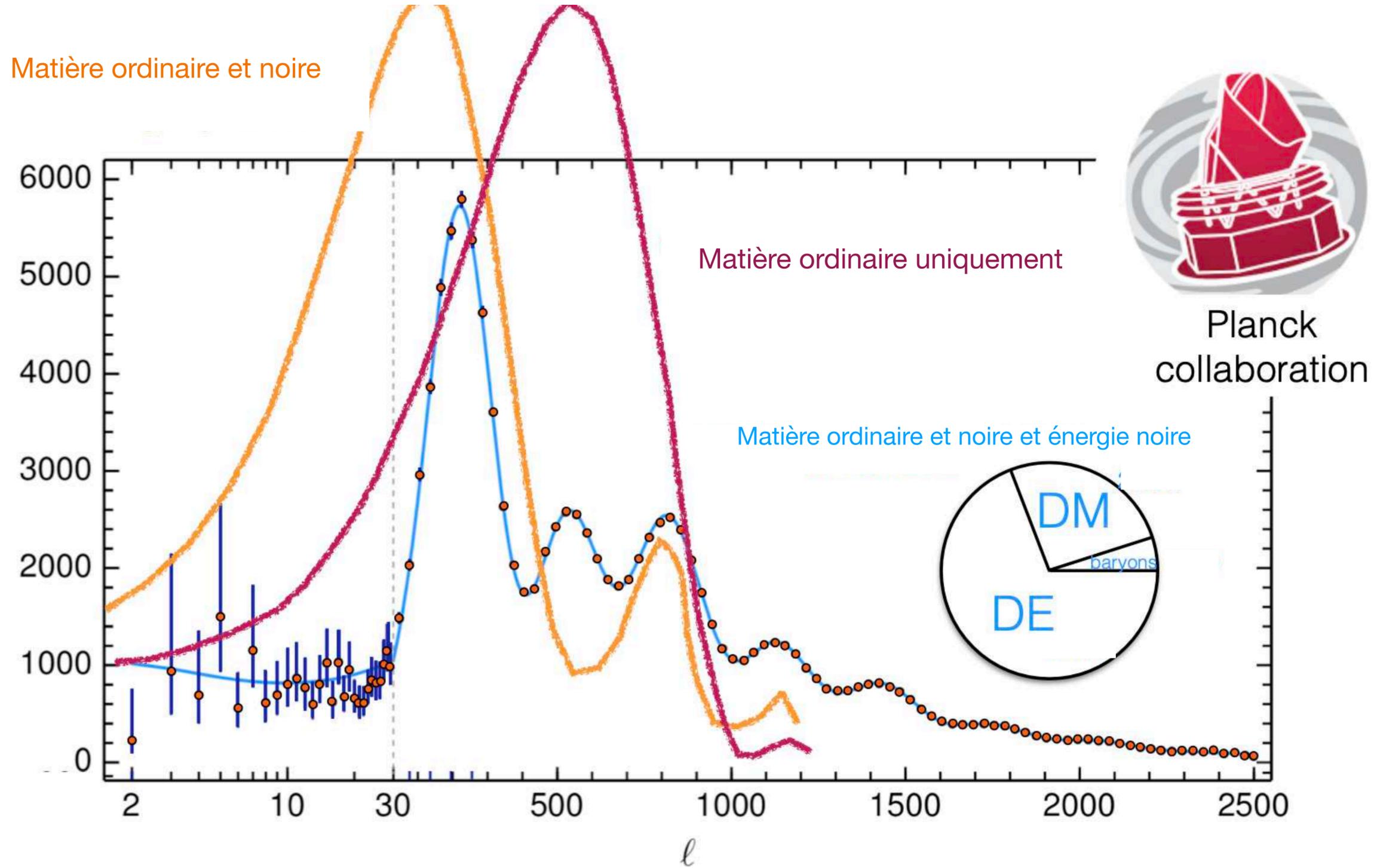
Exemple de variation en fonction de la quantité de matière totale



W. Hu, <https://background.uchicago.edu/~whu/>



Le contenu de l'univers

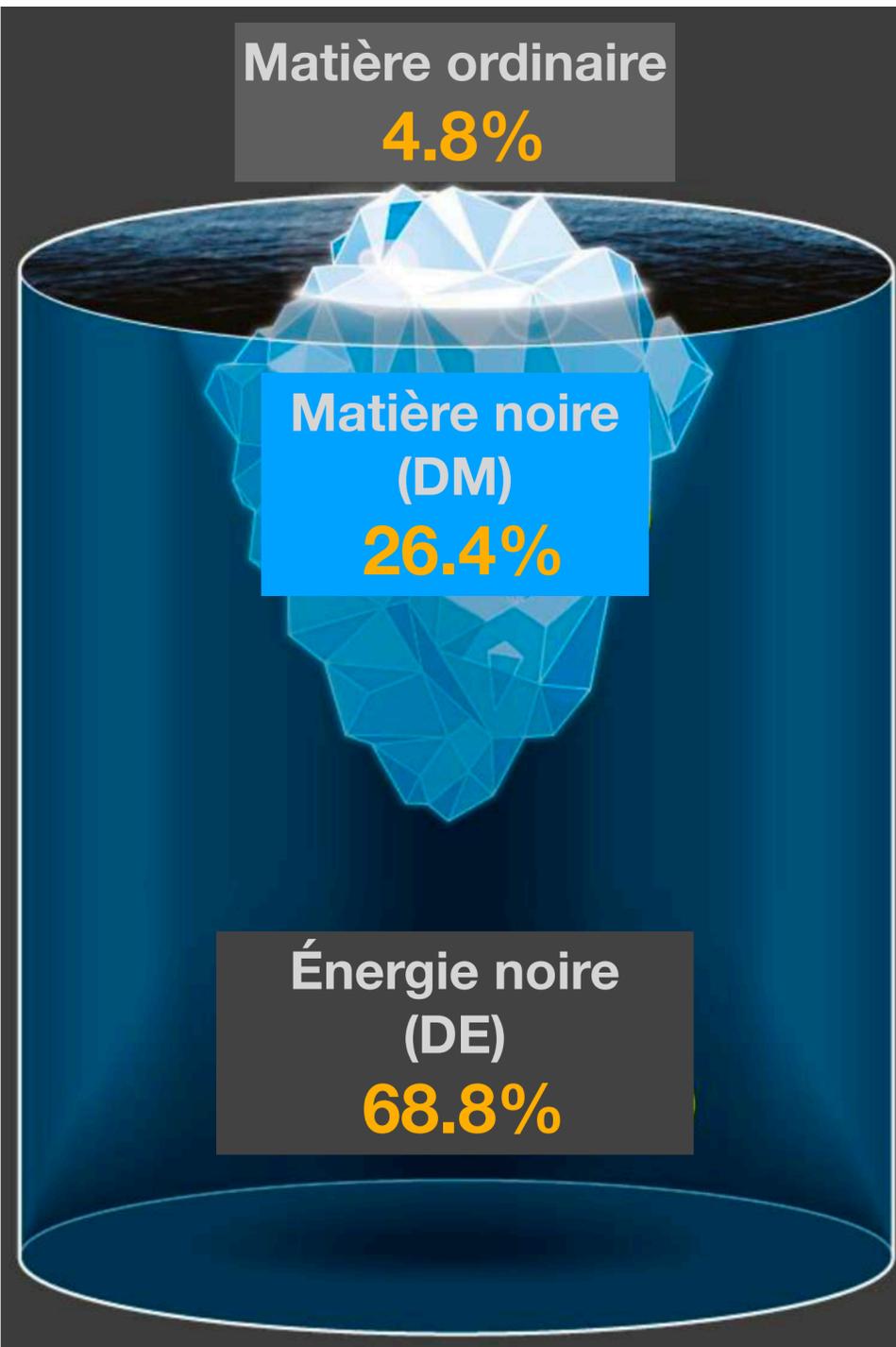


~5% de matière ordinaire (baryons)



Elle constitue

- atomes (hydrogène, helium, éléments lourds) et molécules
- étoiles, poussières et gaz dans/entre les galaxies → **Matière visible**



Amas globulaire NGC 6397

ESA — Image Euclid



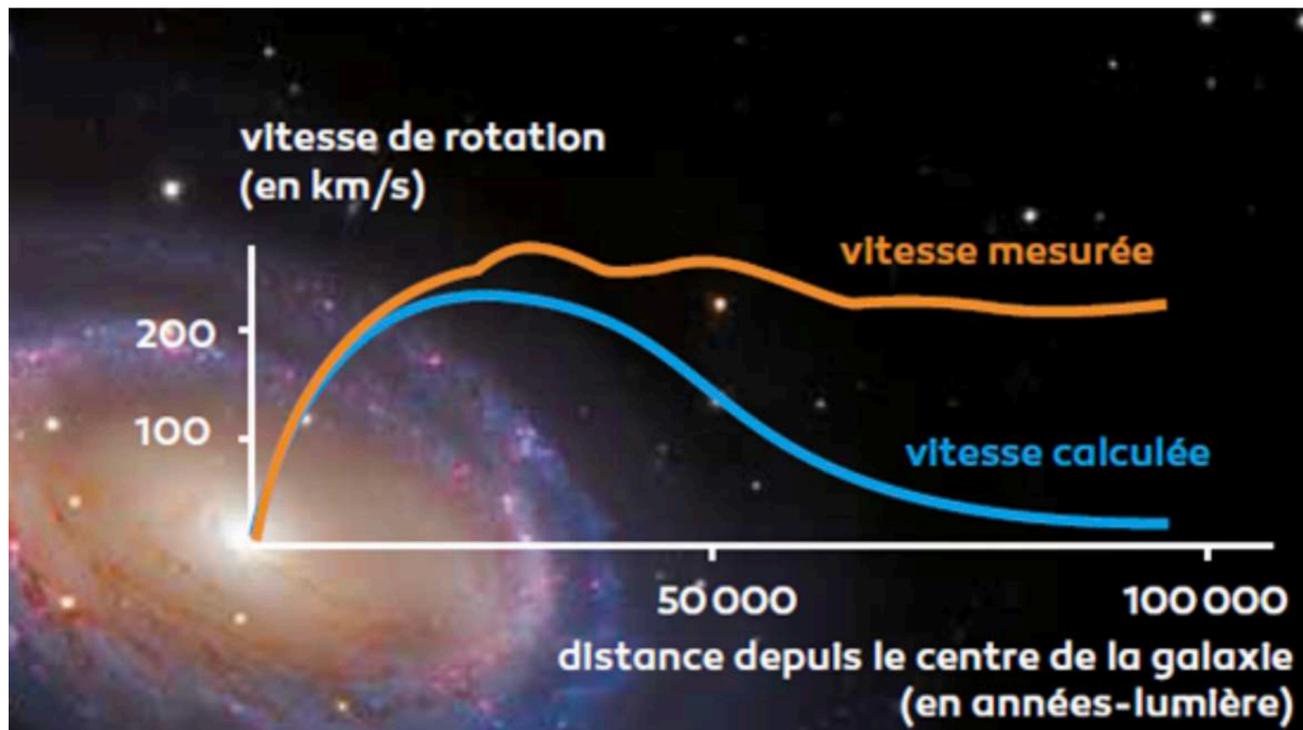
Amas de galaxies "bullet"

NASA — Image observatoire Chandra

~95% de constituants inconnus

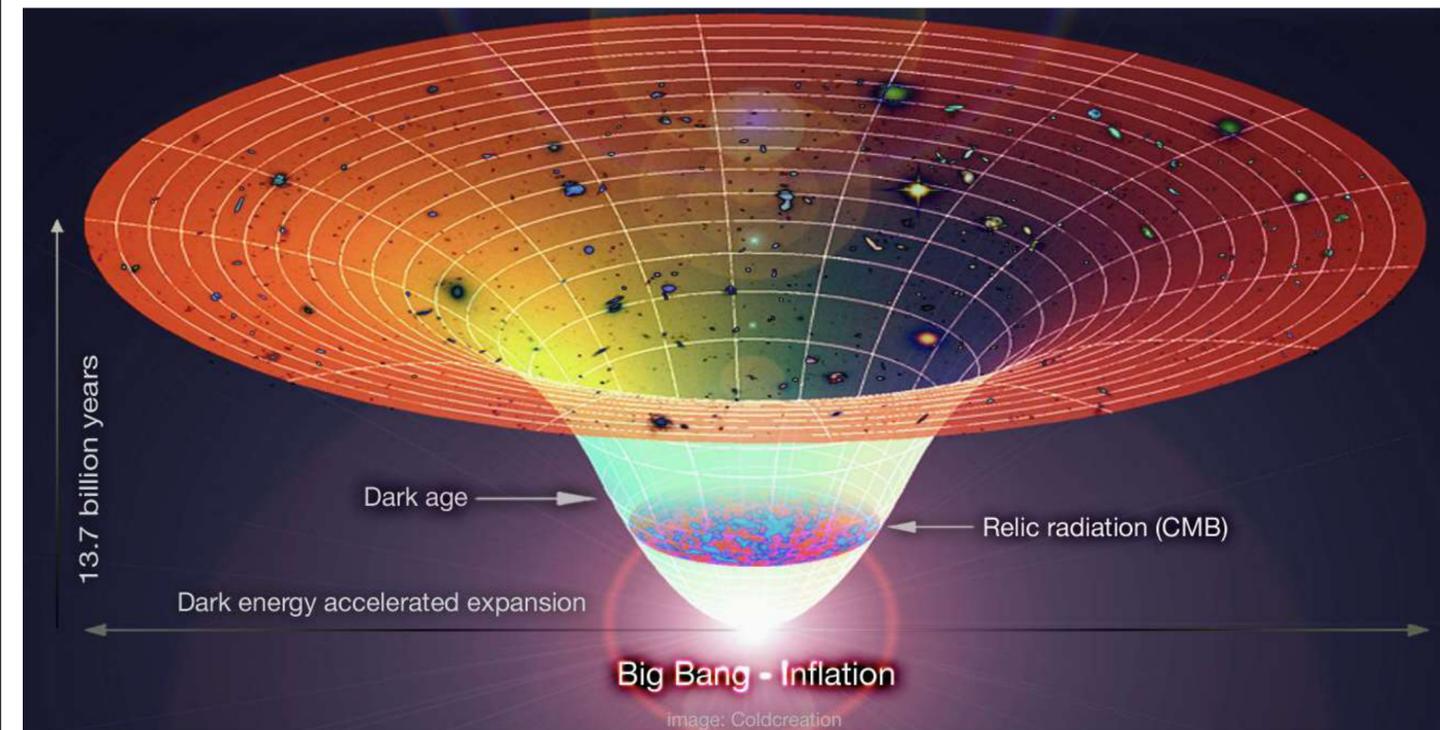
Matière noire (DM): ingrédient nécessaire pour rendre compte

- courbes de rotations des galaxies (vitesses orbitales des étoiles plus grandes que celles prédites),
- formation des galaxies,
- lentilles gravitationnelles,
- émission X du gaz des amas de galaxies, ...

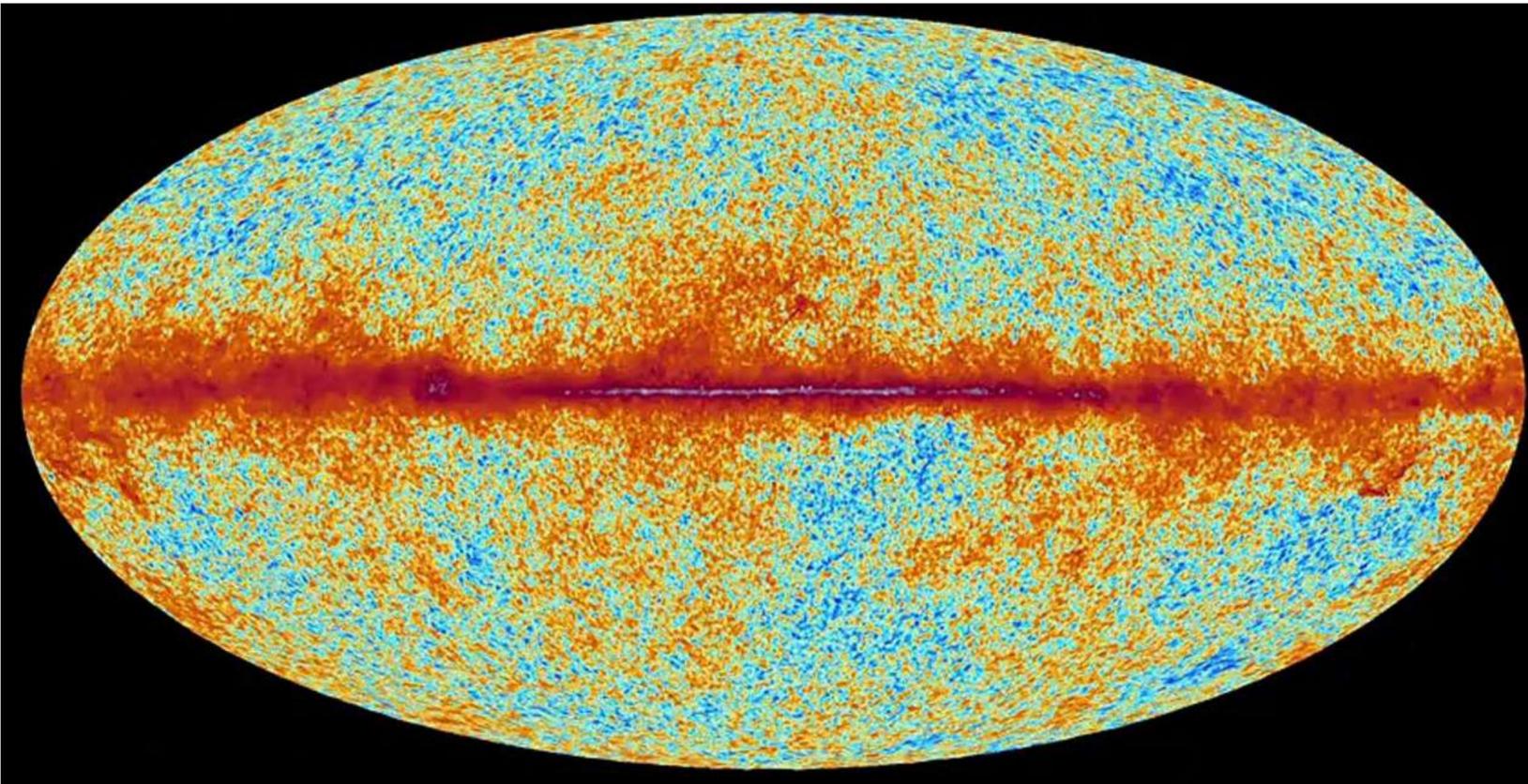


Énergie noire (DE): ingrédient nécessaire pour rendre compte

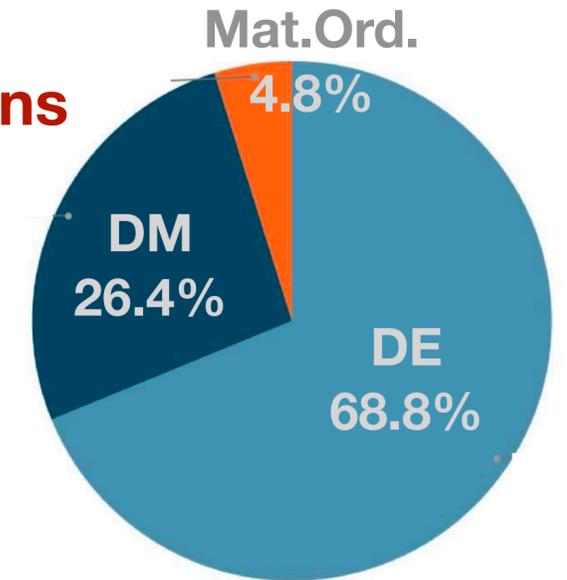
- accélération de l'expansion récente observées grace aux distances luminosité des Super Novae (SN)
- premier pic des oscillations acoustiques du CMB
- évolution temporelle de la croissance des structures, ...



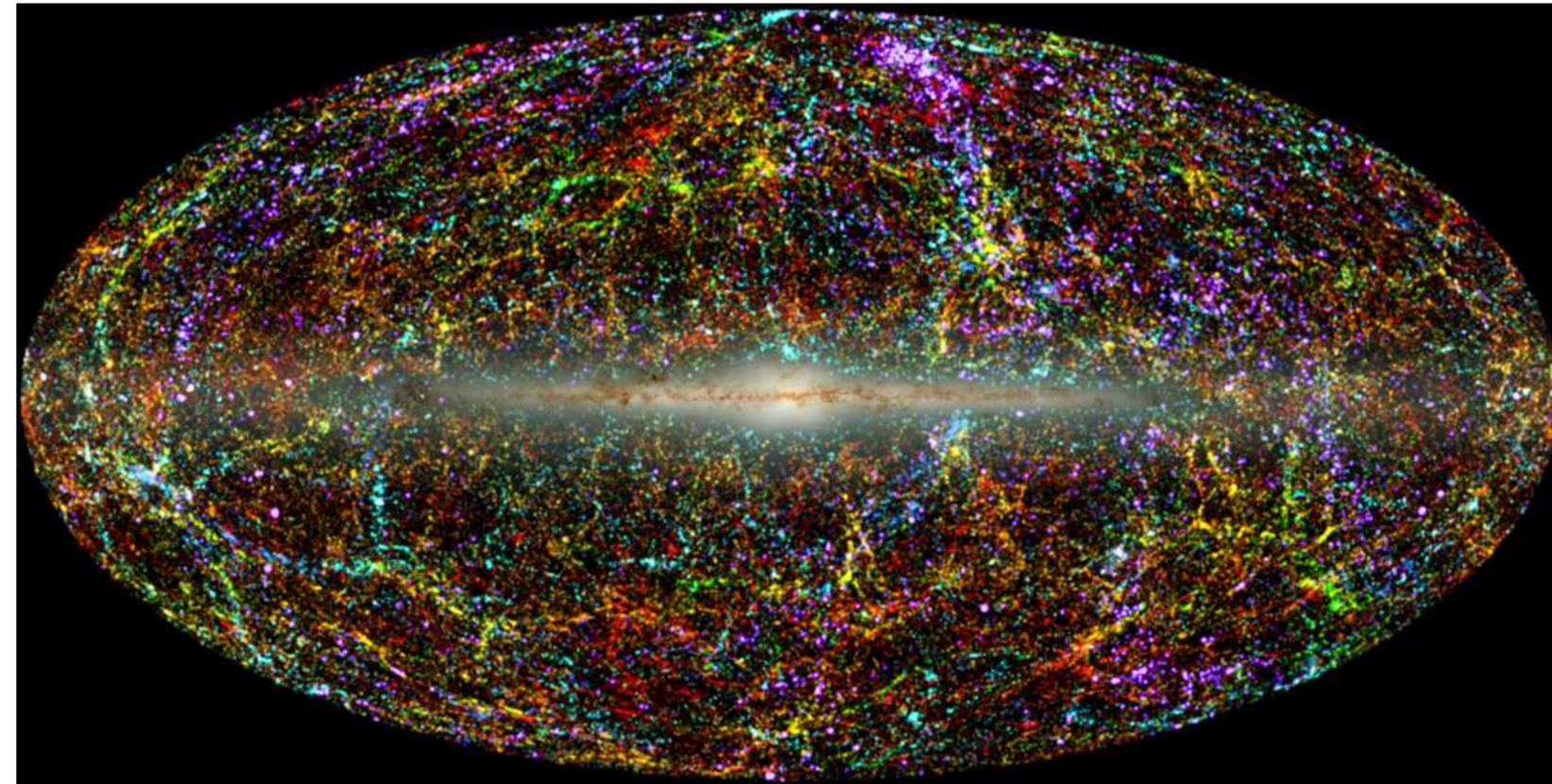
Deux images du même univers



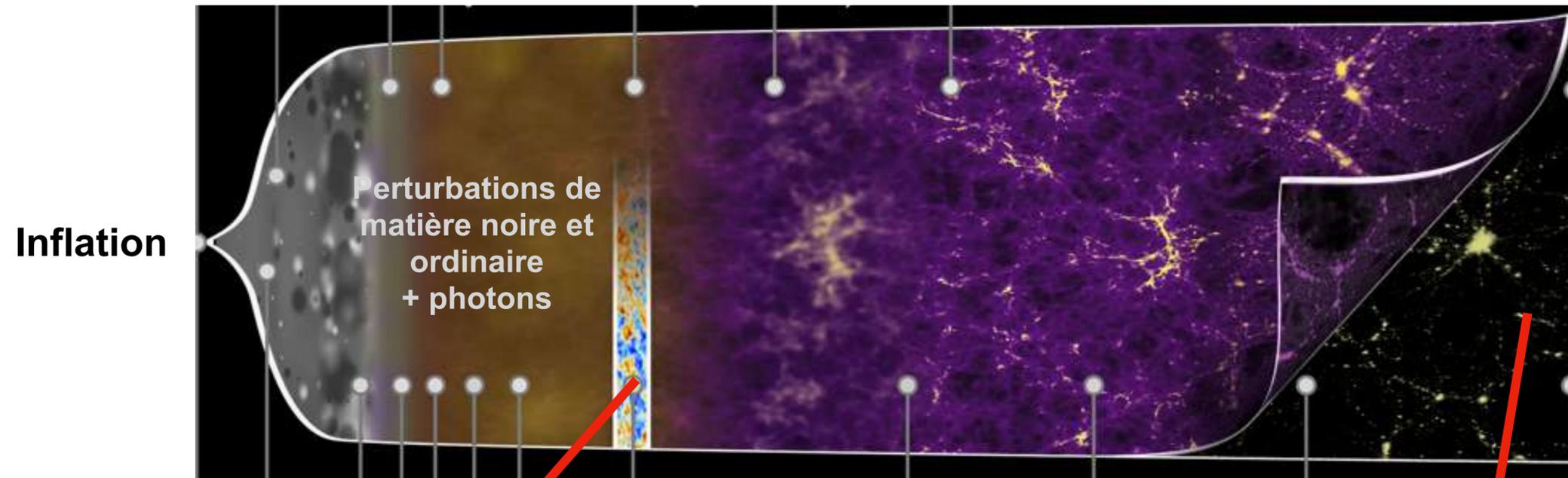
**Matière dans l'univers dans son ensemble
Trois constituants principaux**



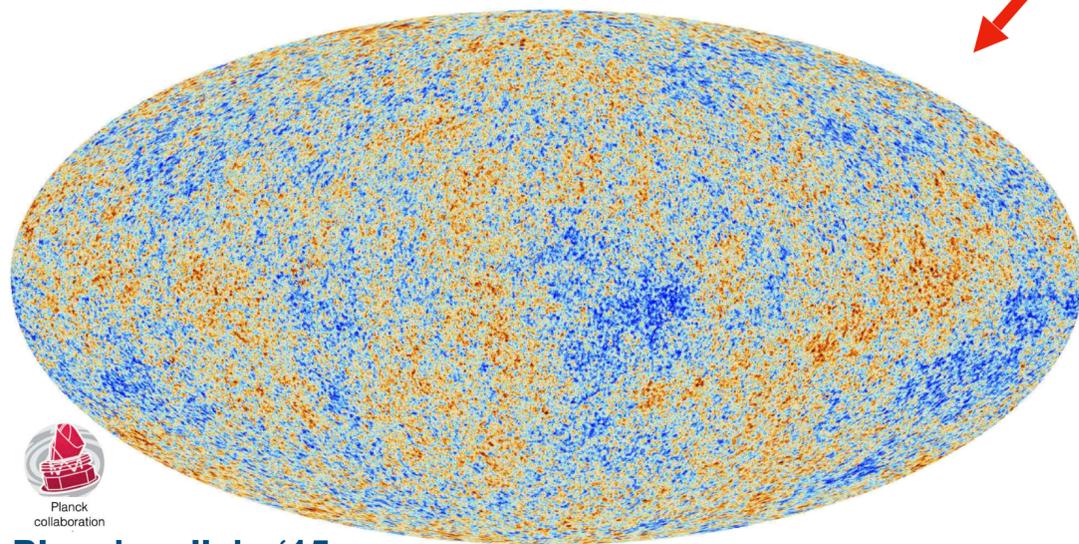
- Comment se forment les structures cosmiques?
- Quelles sont les propriétés de la matière aux grandes échelles?
- Que nous apprend la distribution de la matière sur le modèle cosmologique et sur les structures?



Comment les structures se forment-elles?



Croissance linéaire



Planck collab. '15

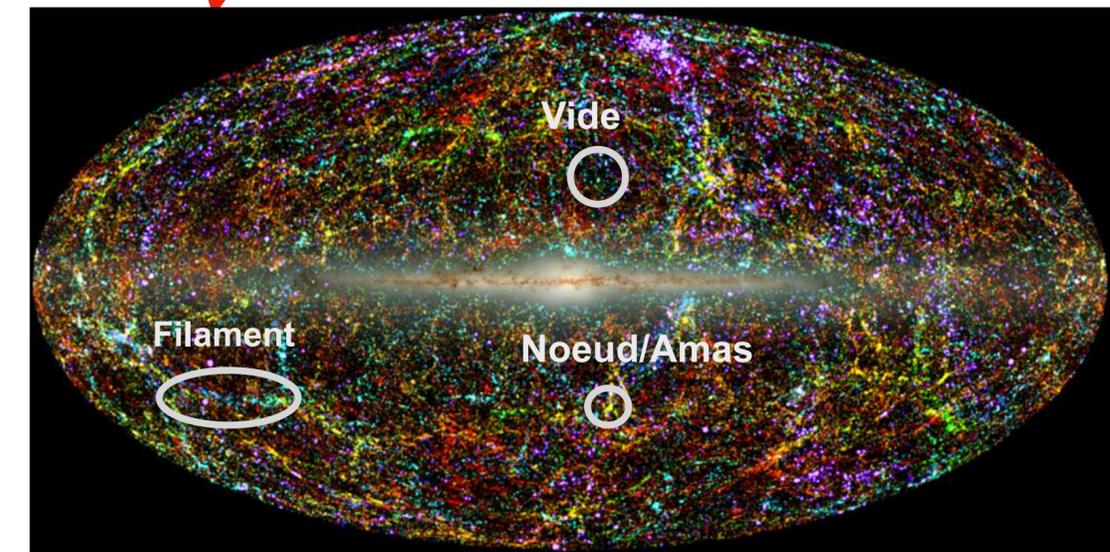
Univers primordial =
Anisotropies de température du CMB

Gravité



Evolution dans le temps

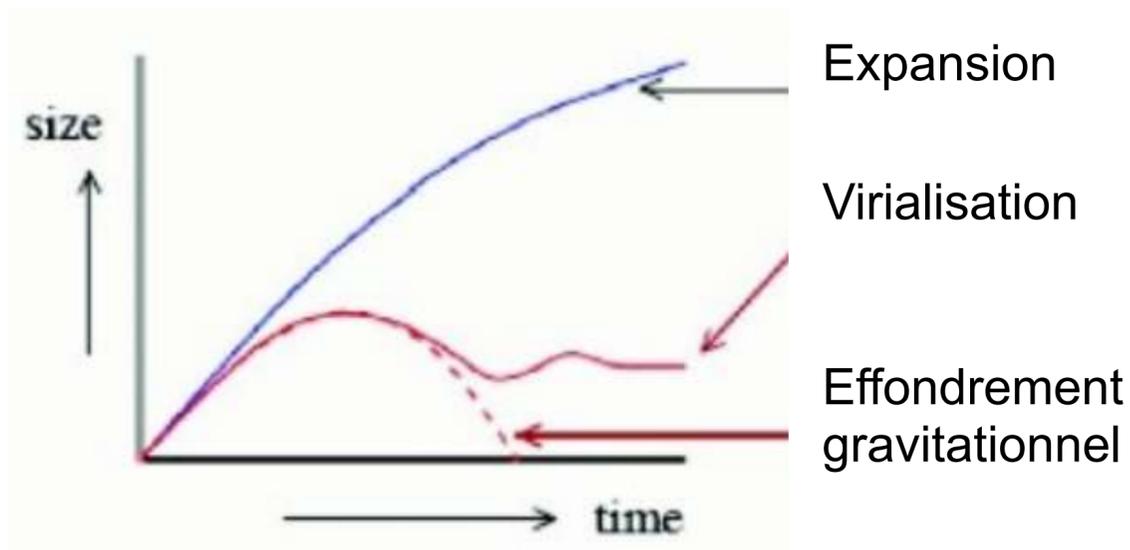
Croissance non-linéaire



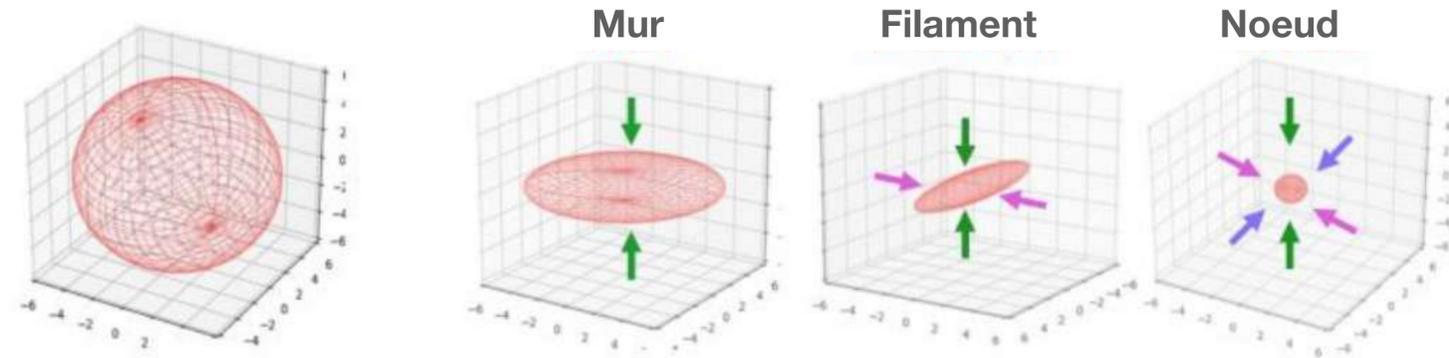
Univers tardif = Galaxies
distribuées en toile cosmique avec
des filaments, vides et noeuds

Comment les structures se forment-elles?

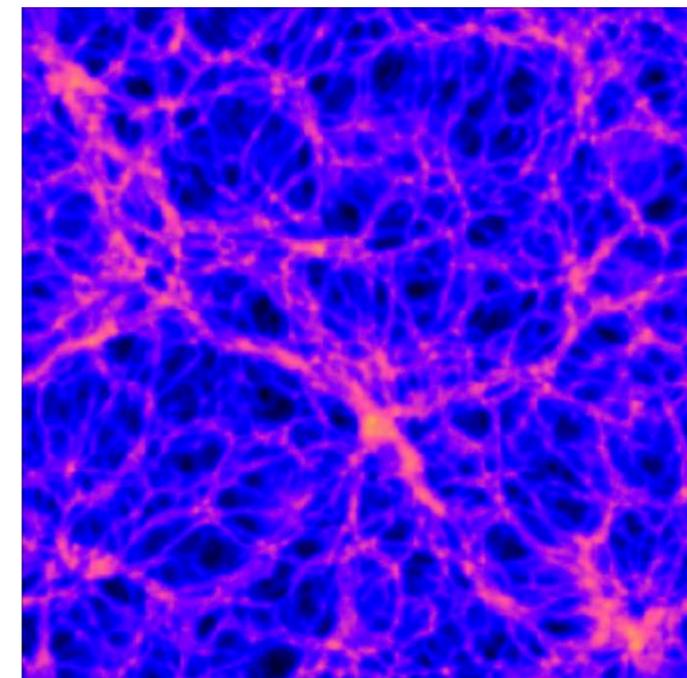
La gravité, en compétition avec l'expansion, fait croître les perturbations initiales et forme les objets virialisés



Modèle de Zel'dovich explique l'émergence de la toile cosmique par la formation de murs (entourant des vides), filaments et noeuds



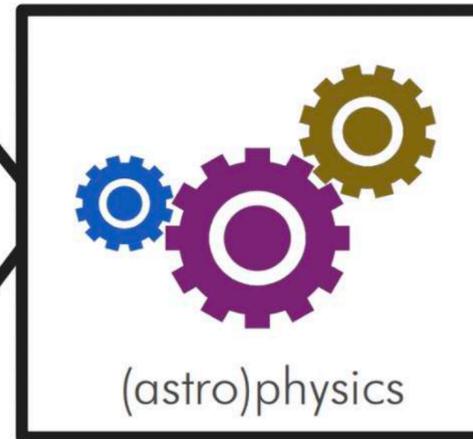
Aller au delà des modèles analytiques rendant compte du début ou de la fin de l'évolution des structures
→ Simulations numériques cosmologiques



Simuler la distribution de la matière

Ingrédients constituant l'Univers: matière noire et ordinaire, neutrinos, photons, énergie noire

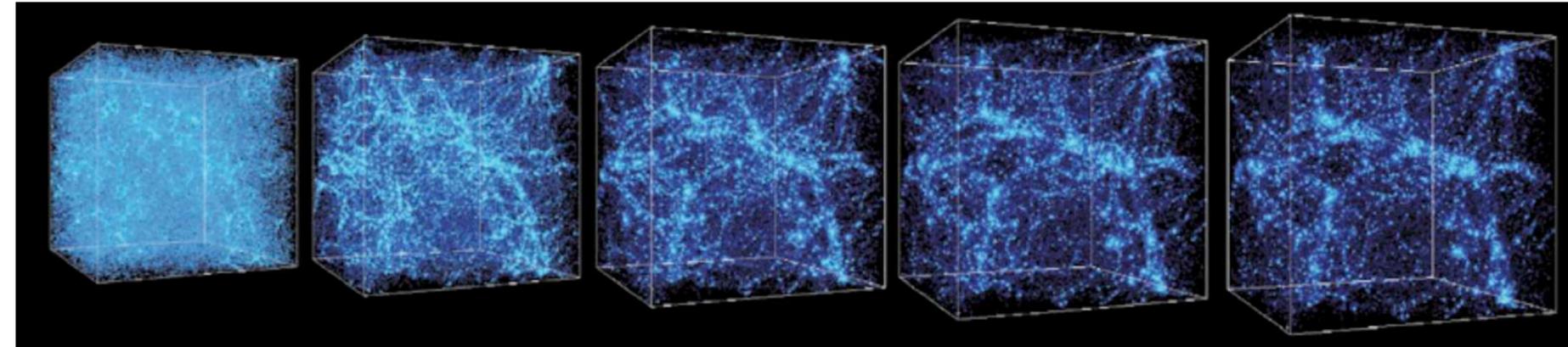
Simulation numérique



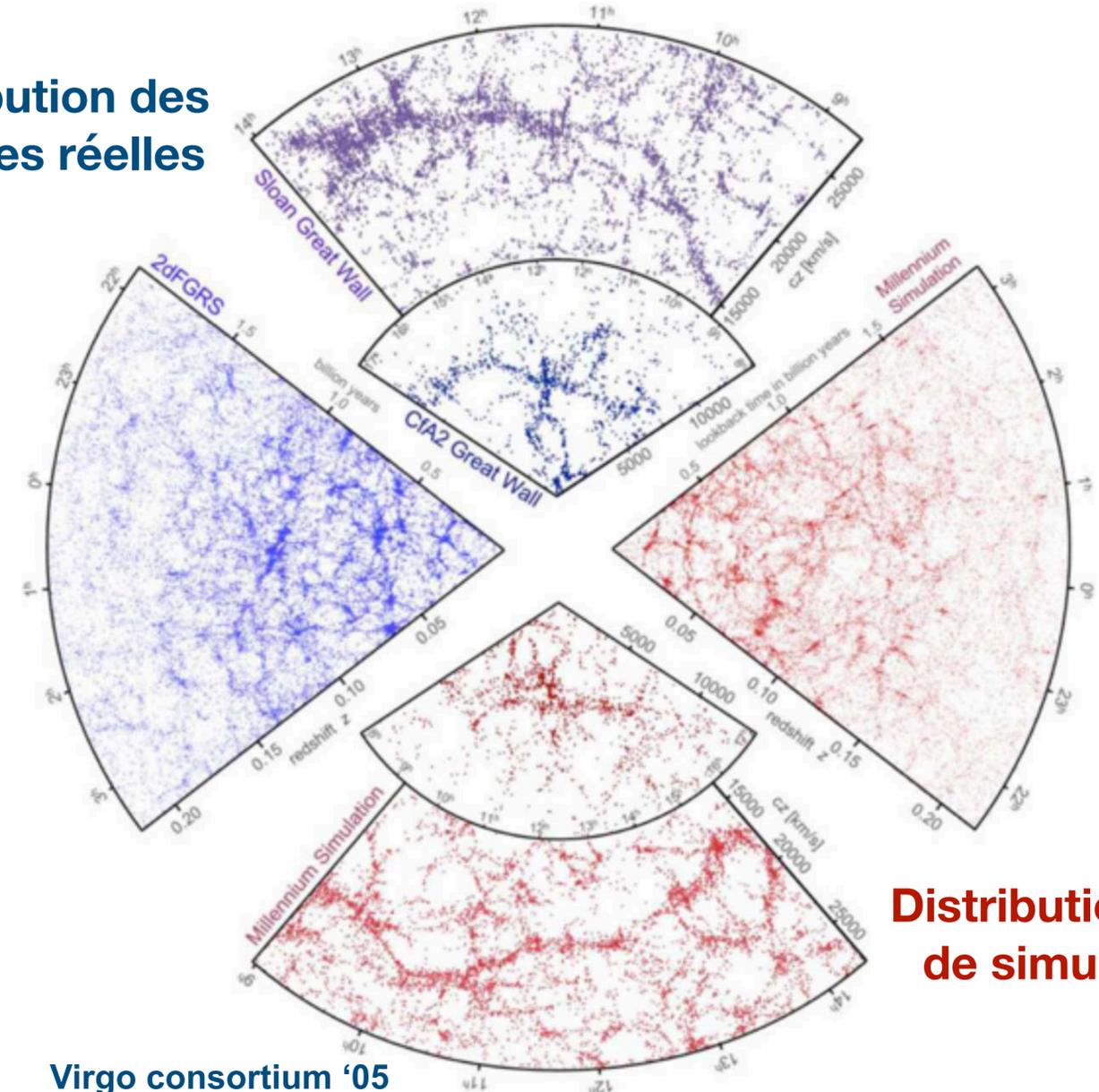
Perturbations initiales compatibles avec les résultats du CMB

Résoudre les équations régissant les lois physiques: gravité, expansion; mécanique des fluides, chauffage et refroidissement; chimie; ...

Univers réaliste

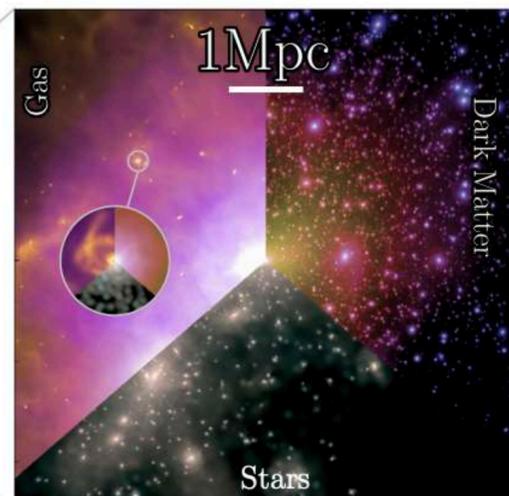
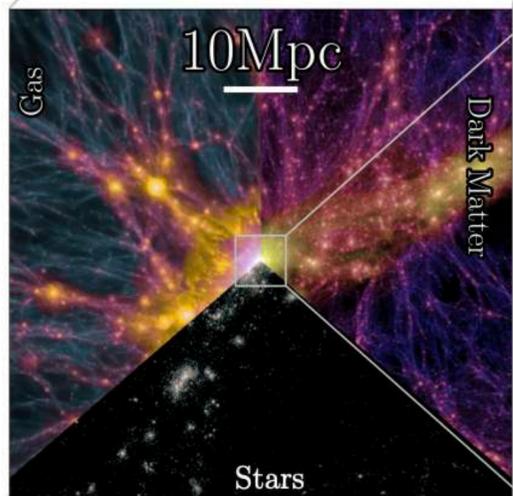
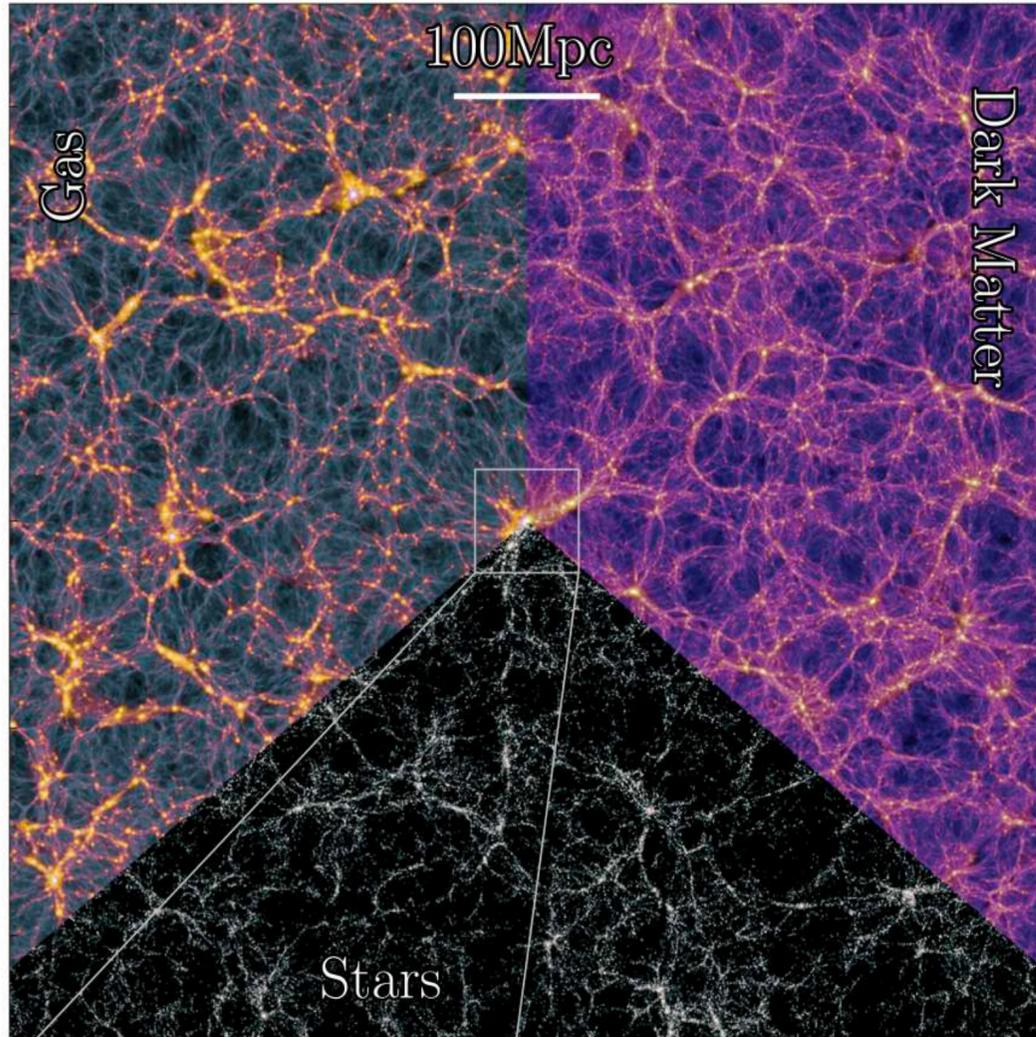


Distribution des galaxies réelles

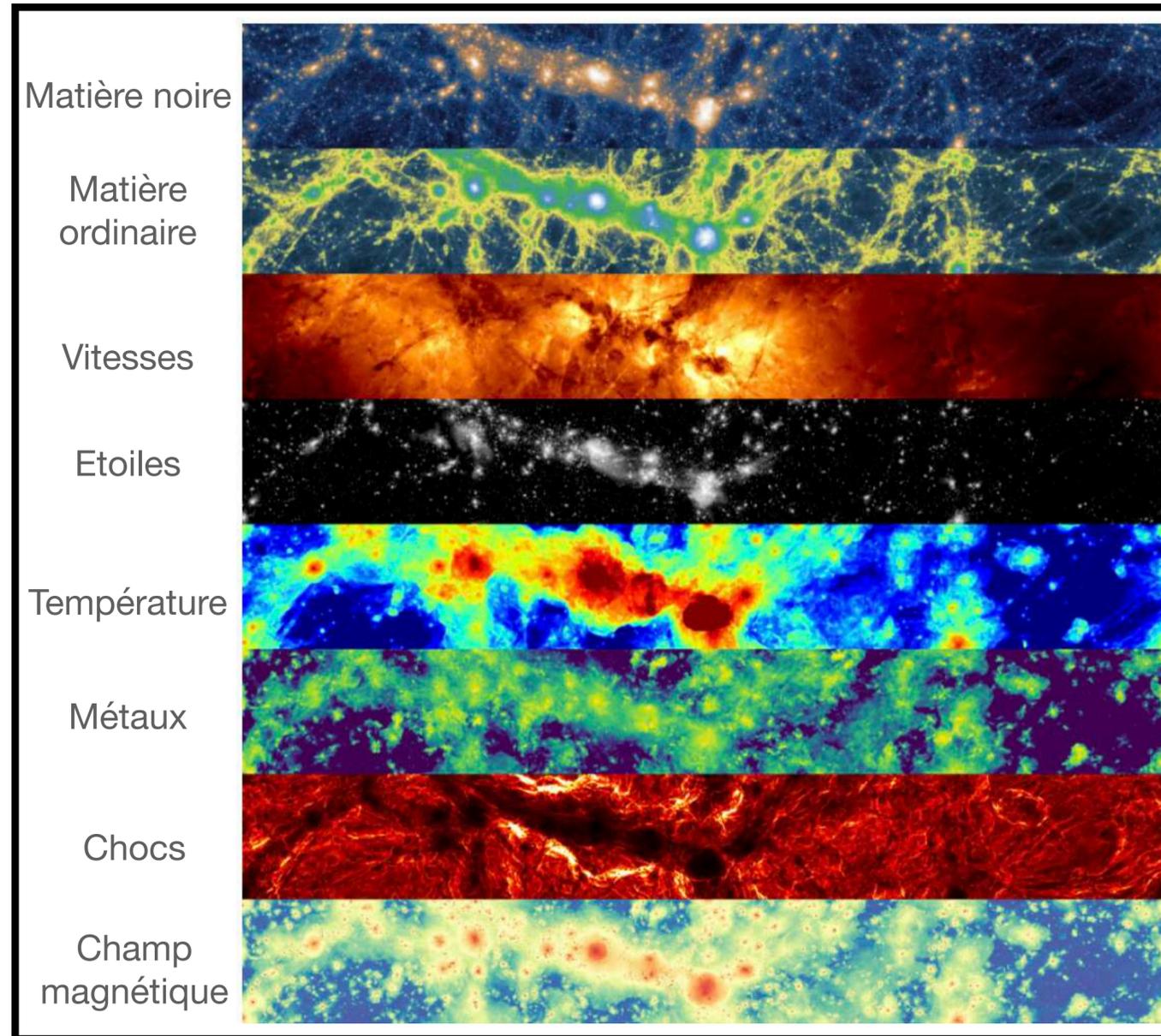


Distribution issue de simulations

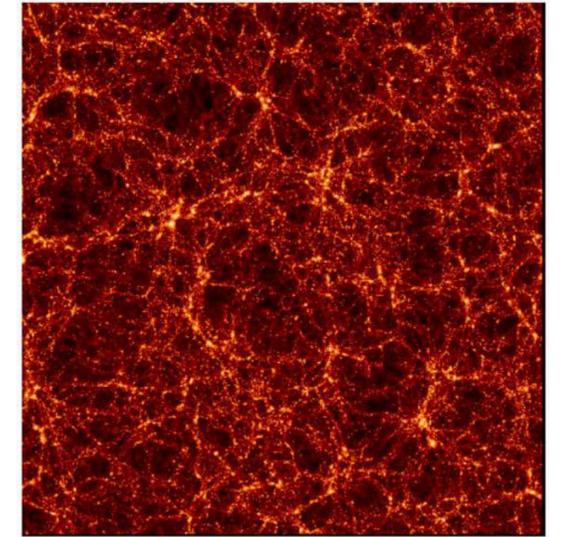
Simuler la distribution de la matière



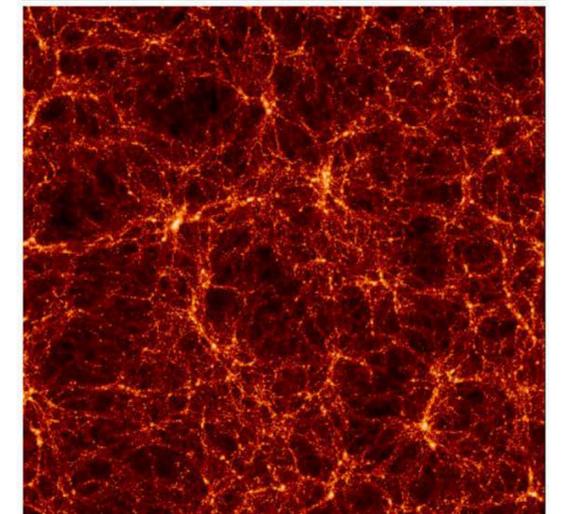
La matière dans tous ses états
et dans toutes les cosmologies



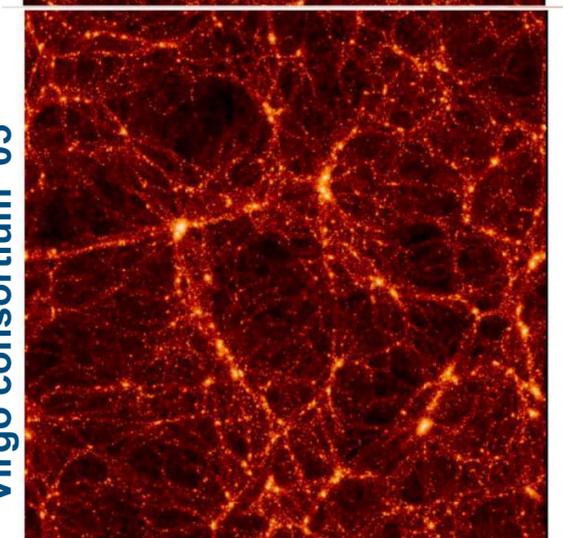
Illustris simulation



SCDM



rCDM

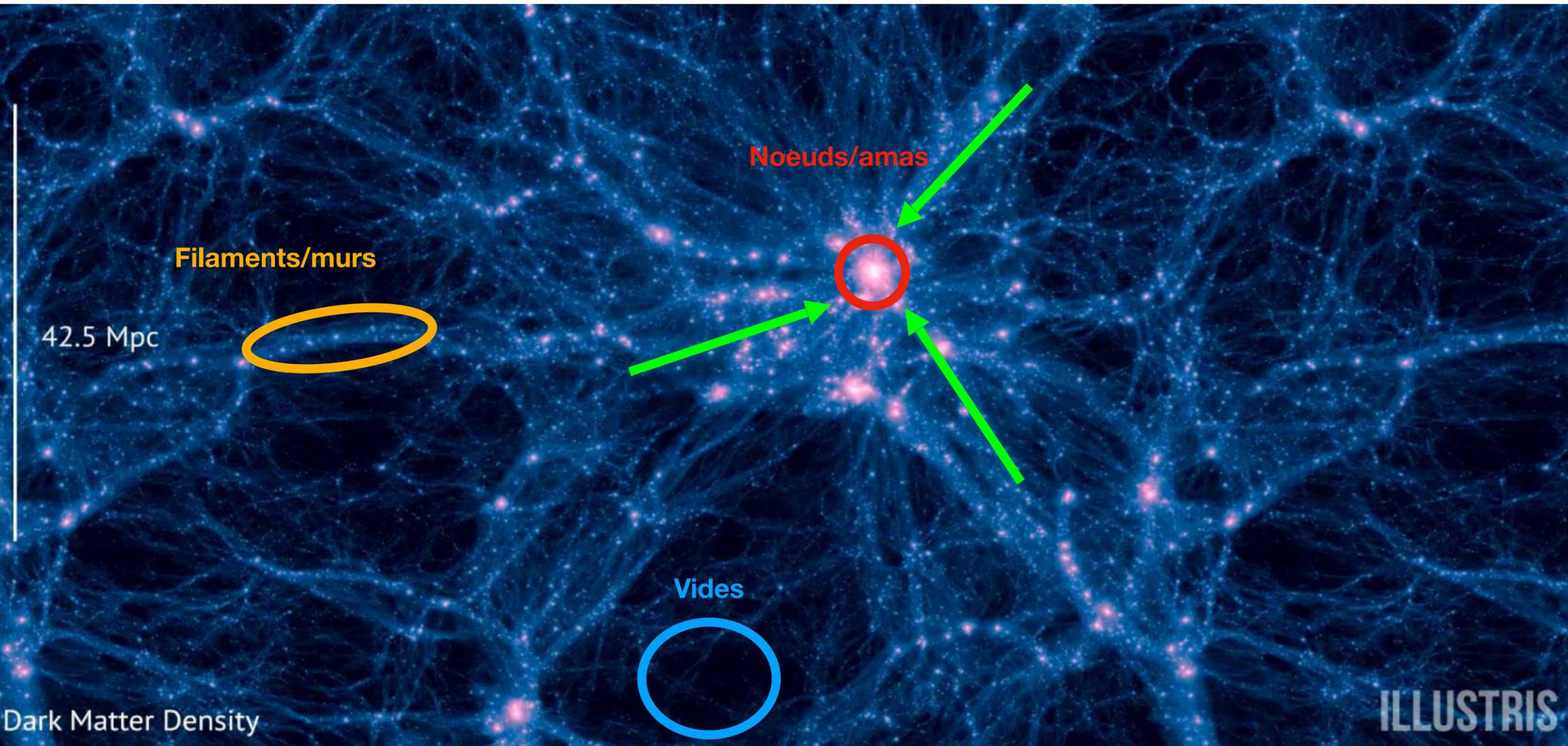


Λ CDM

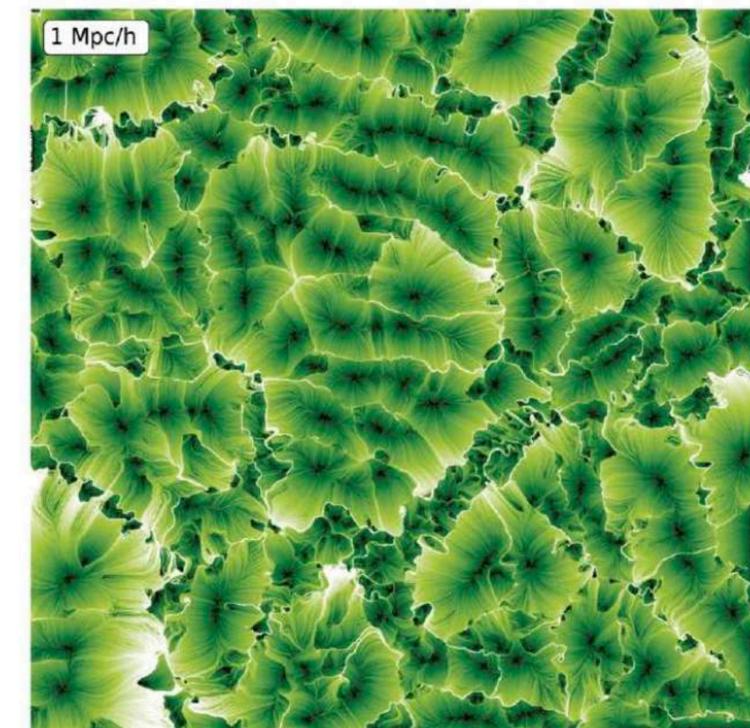
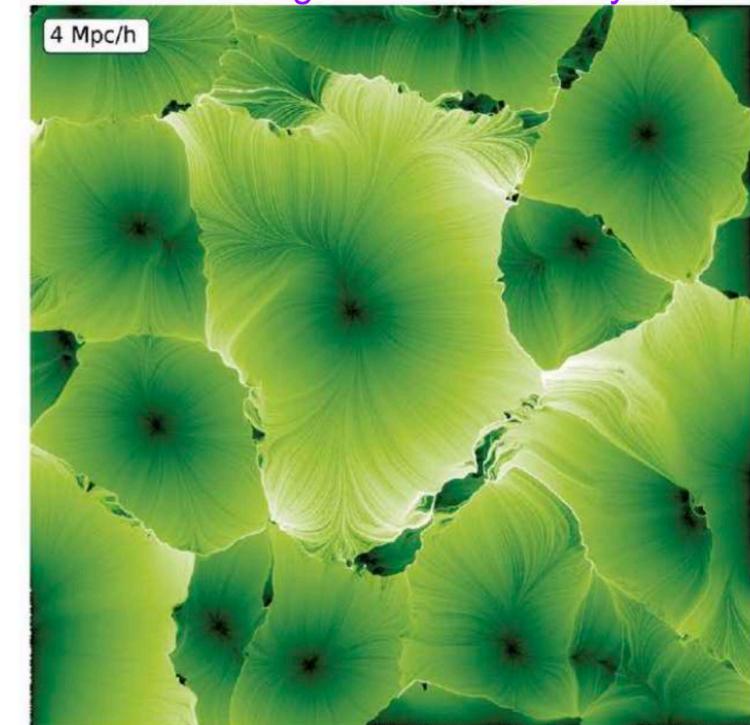
Virgo consortium '05

Distribution de la matière dans la toile

Voglesberger+ '14



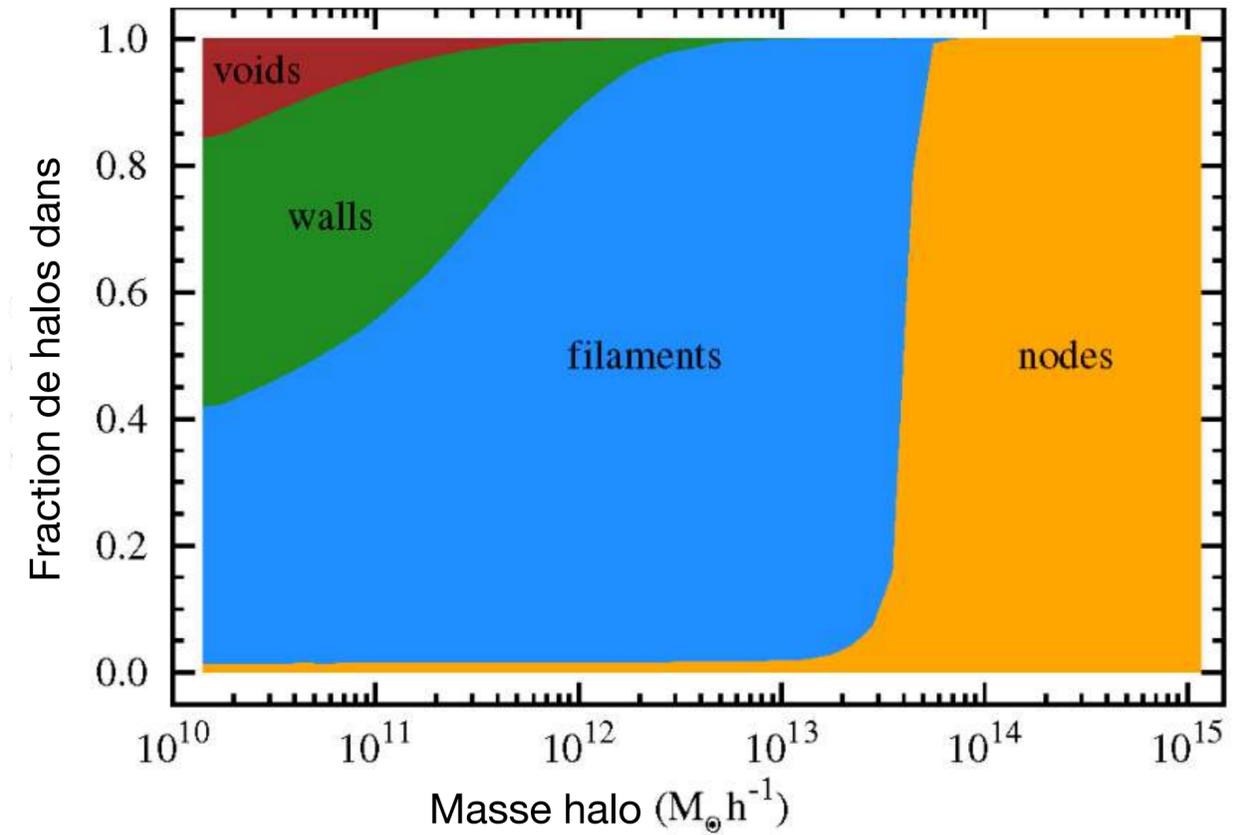
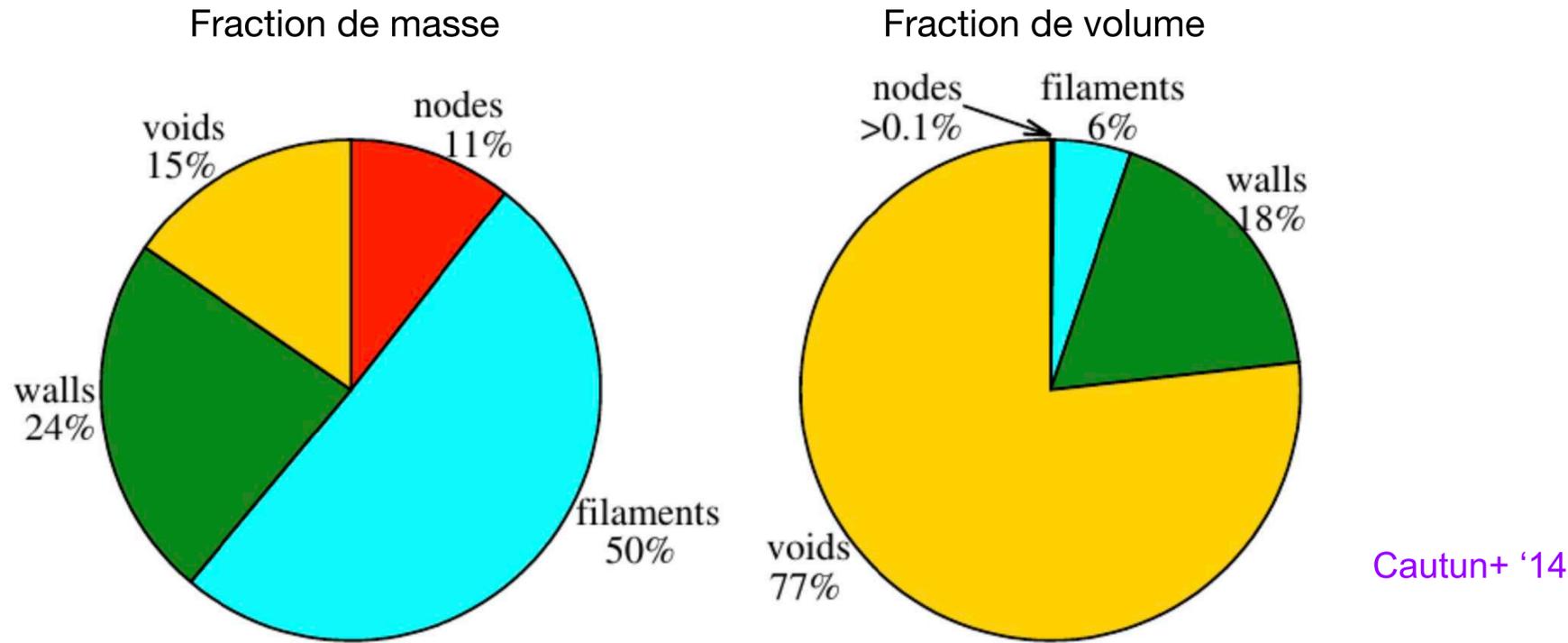
Aragon-Calvo & Szalay + '12



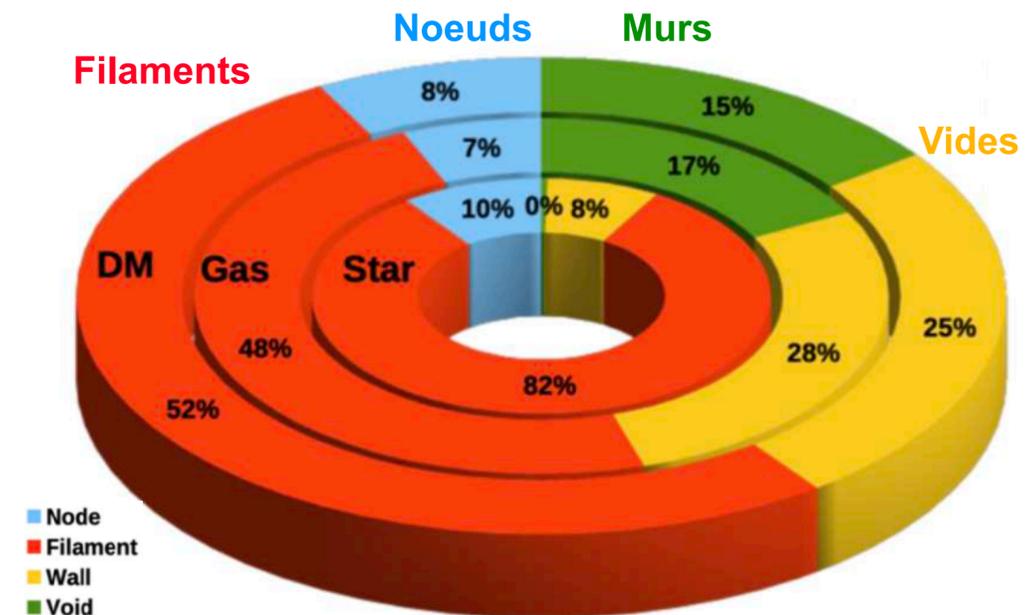
Distribution des vides

- Une toile cosmique de filaments, murs, vides, noeuds à toutes les échelles/tailles
- Des noeuds (sites des amas de galaxies) alimentés en matière via les filaments

Distribution de la matière dans la toile



- Volume dominé par les vides
- Moitié de la quantité de matière dans les filaments qui contiennent la majorité des halos et des étoiles (i.e. galaxies)
- Noeuds siège des halos les plus massifs, i.e les groupes et amas de galaxies

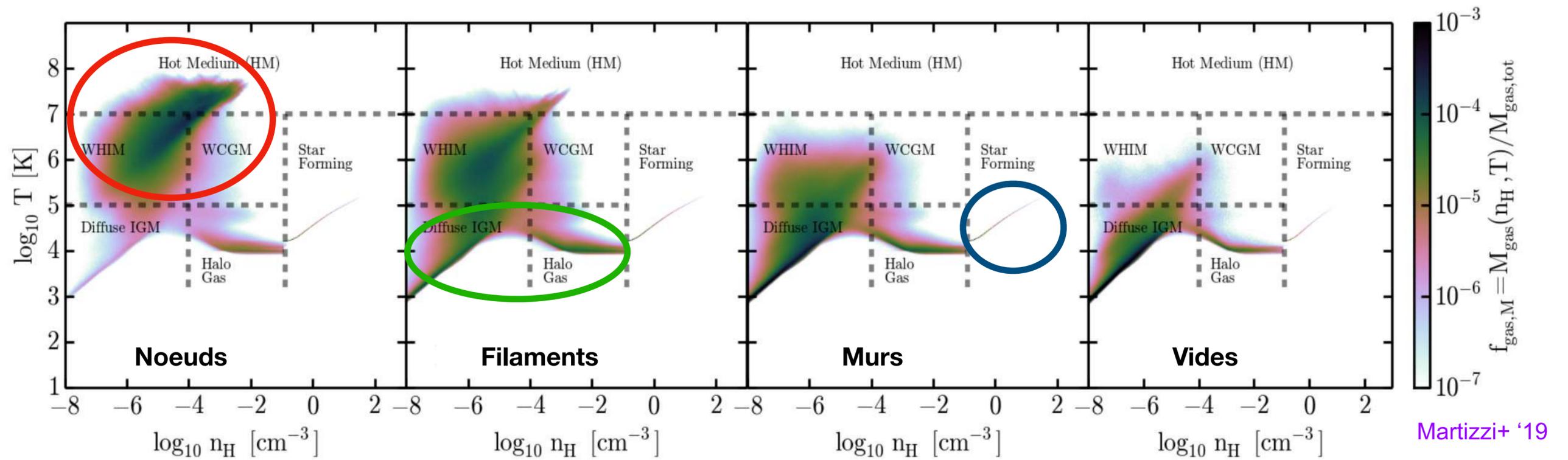


Propriétés et états de la matière dans la toile

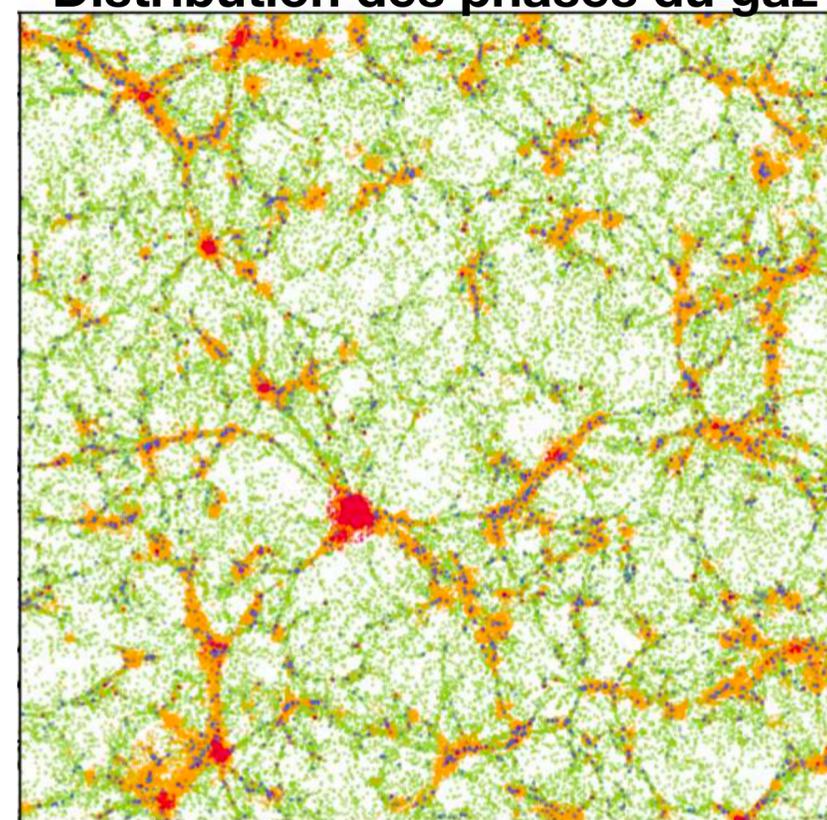
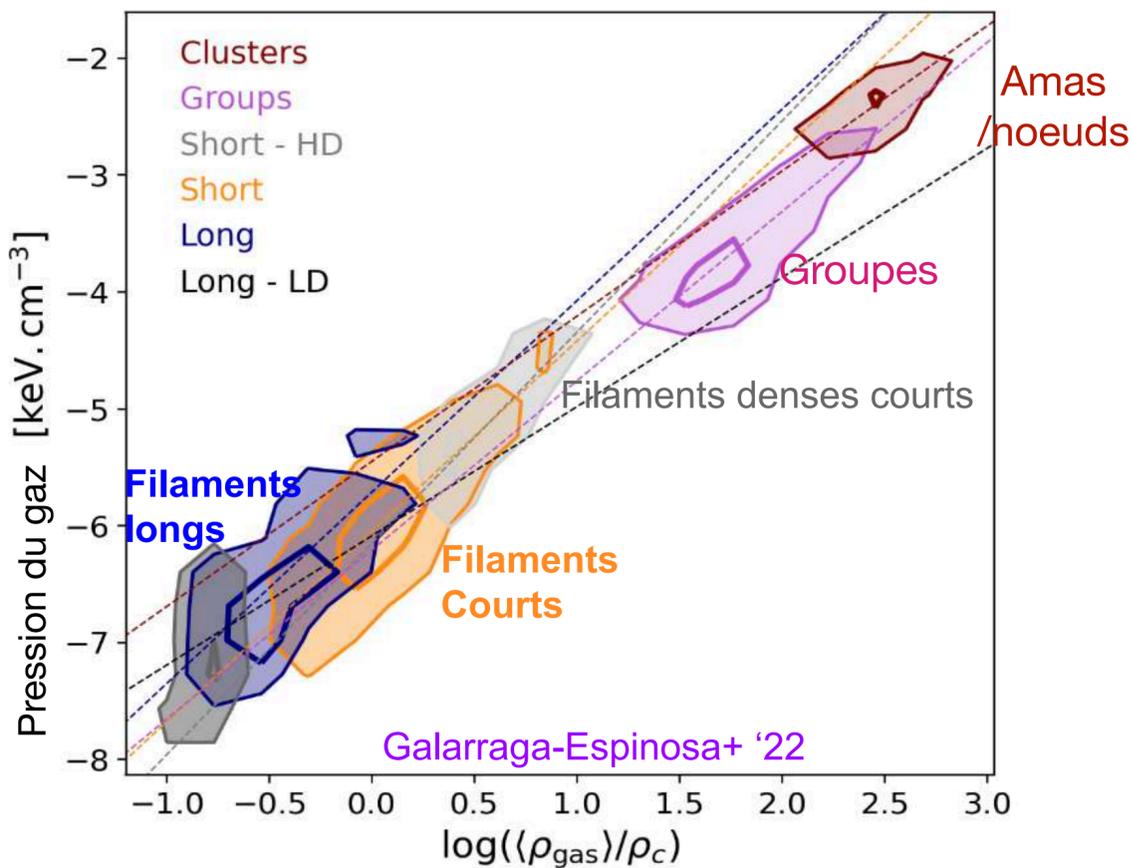
Gaz ionisé chaud ou tiède

Gaz neutre dans et entre les galaxies

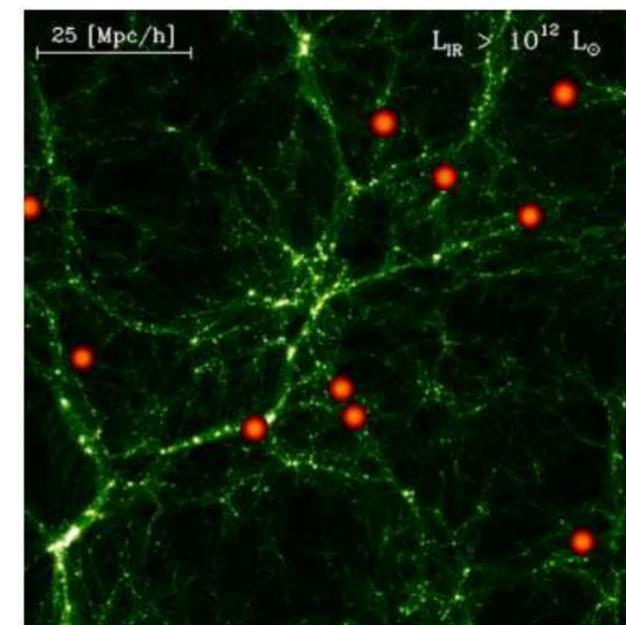
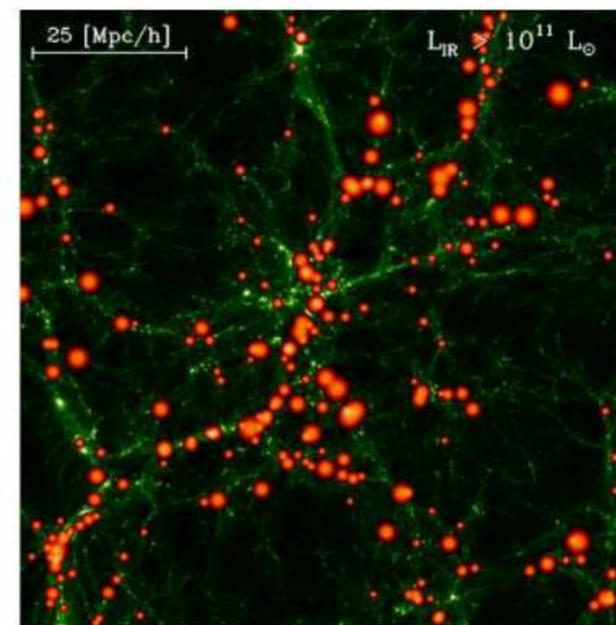
Etoiles dans les galaxies



Distribution des phases du gaz



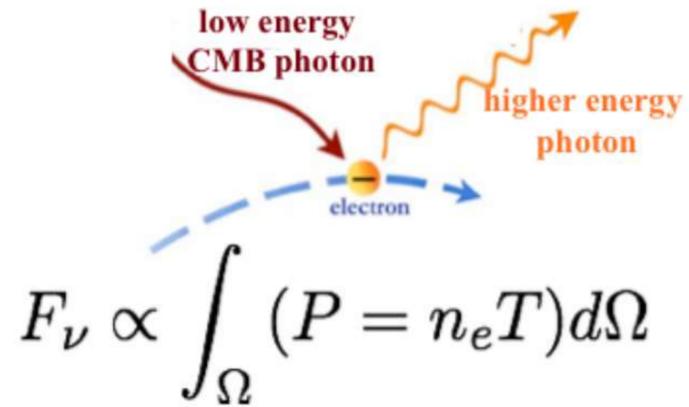
Distribution des galaxies (rouge) et DM (vert)



Courtesy Baugh

Traceurs de la distribution de matière

Compton inverse
 → Emission sub-mm, effet SZ

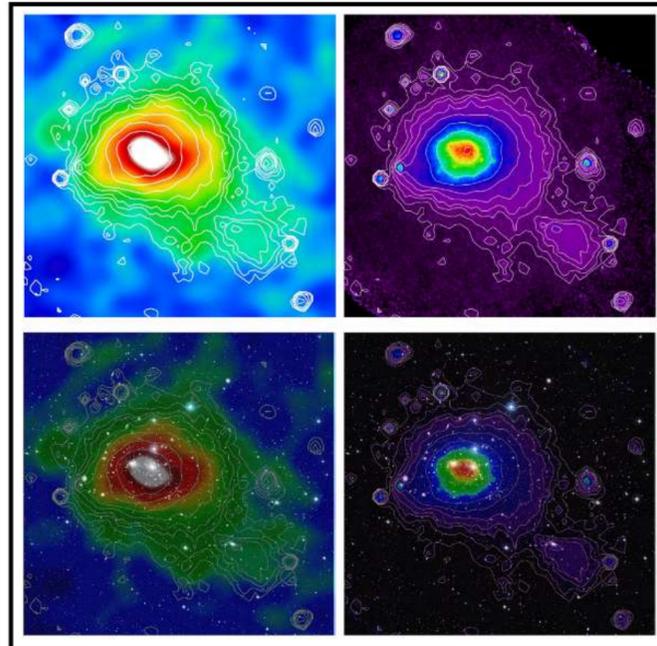


Nombre/densité de galaxies
 → Visible et IR

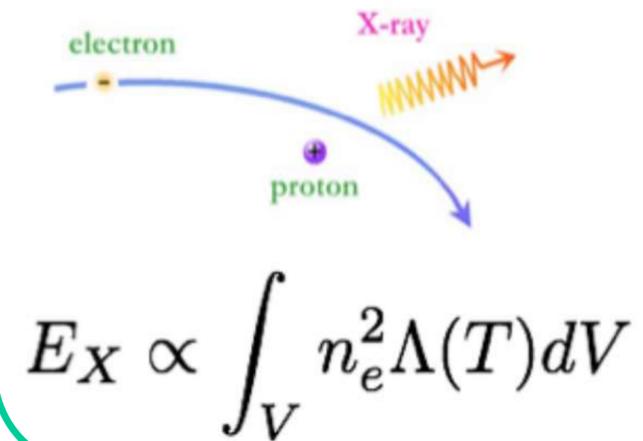
**Gaz neutre
 froid et dense**

**Gaz ionisé
 chaud/tiède**

Coma cluster

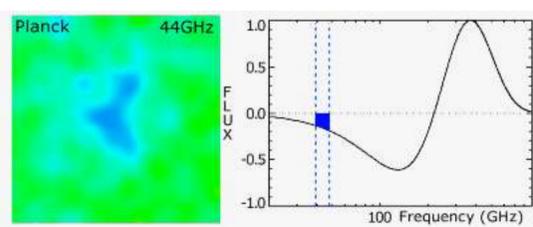


Bremsstrahlung
 → Emission rayons X



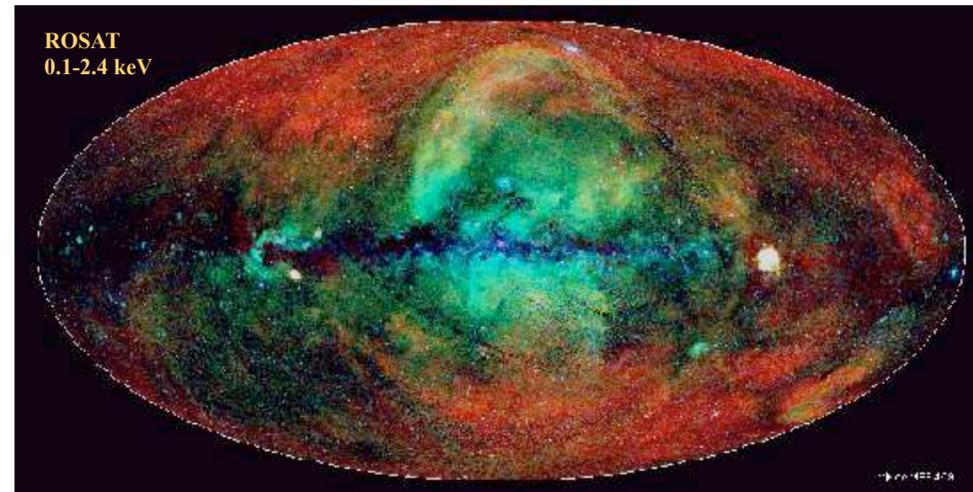
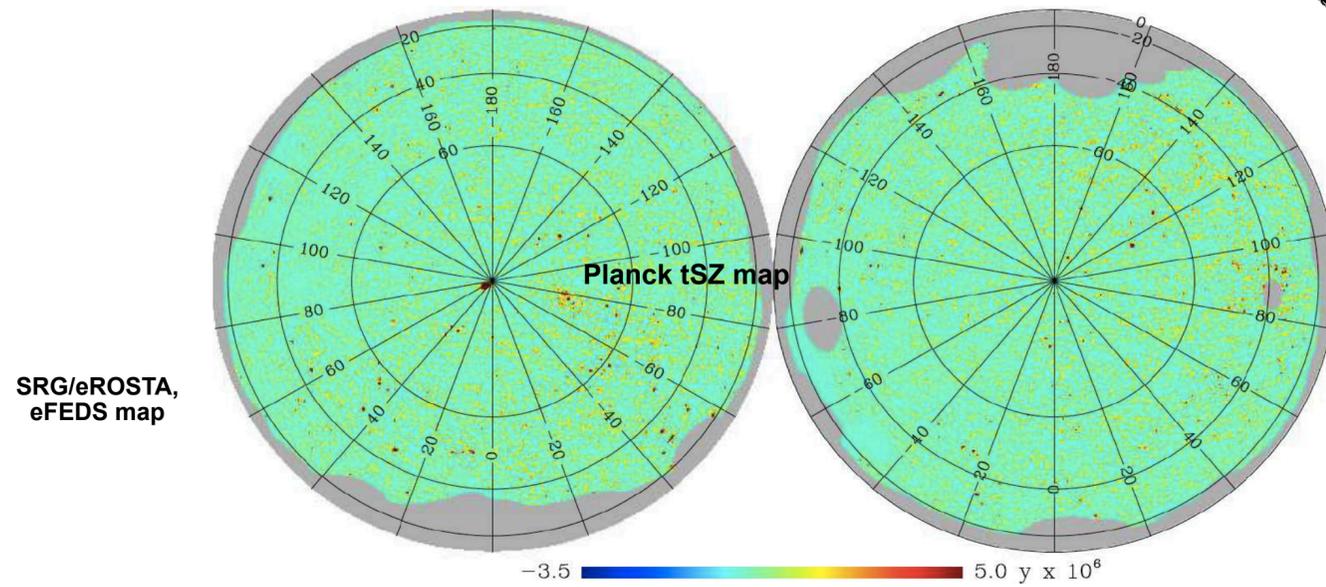
Lentilles gravitationnelles
 (Fortes et faibles)
 Vitesses des galaxies
 → Visible et IR

**Matière noire
 invisible directement**

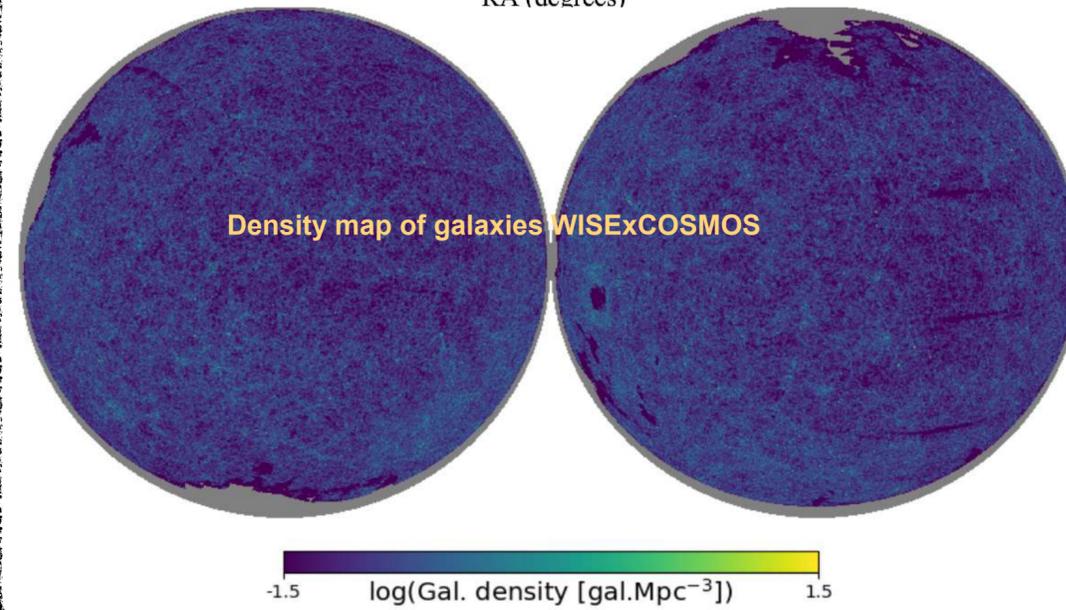
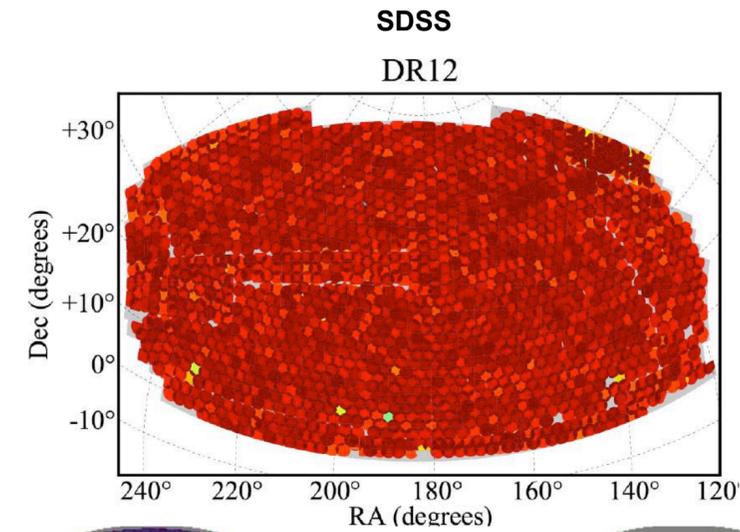


Observables de la distribution de matière

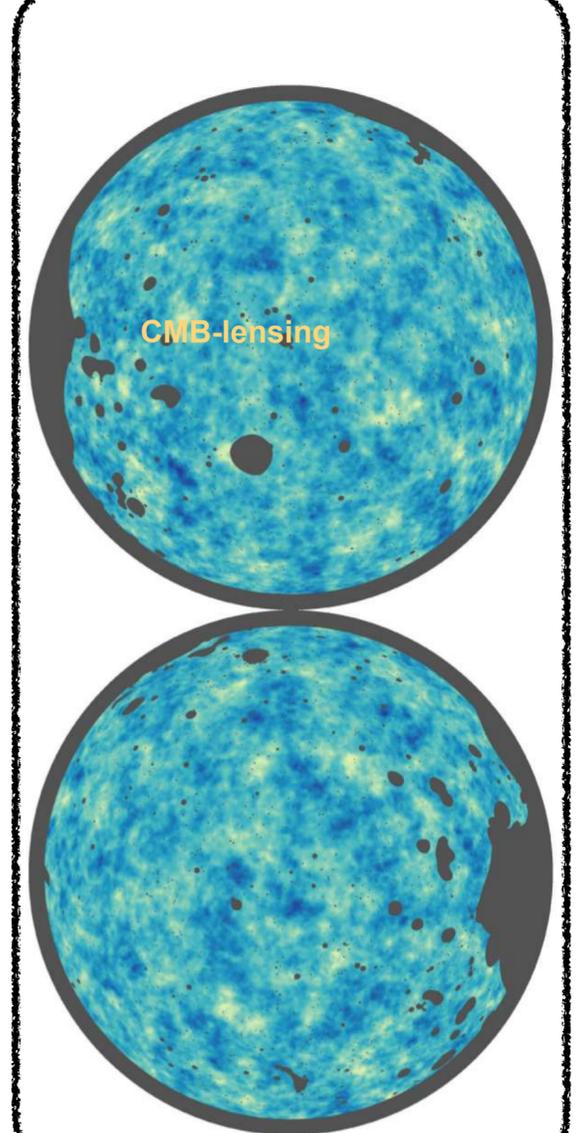
Gaz ionisé chaud/tiède
Rayons X et effet SZ



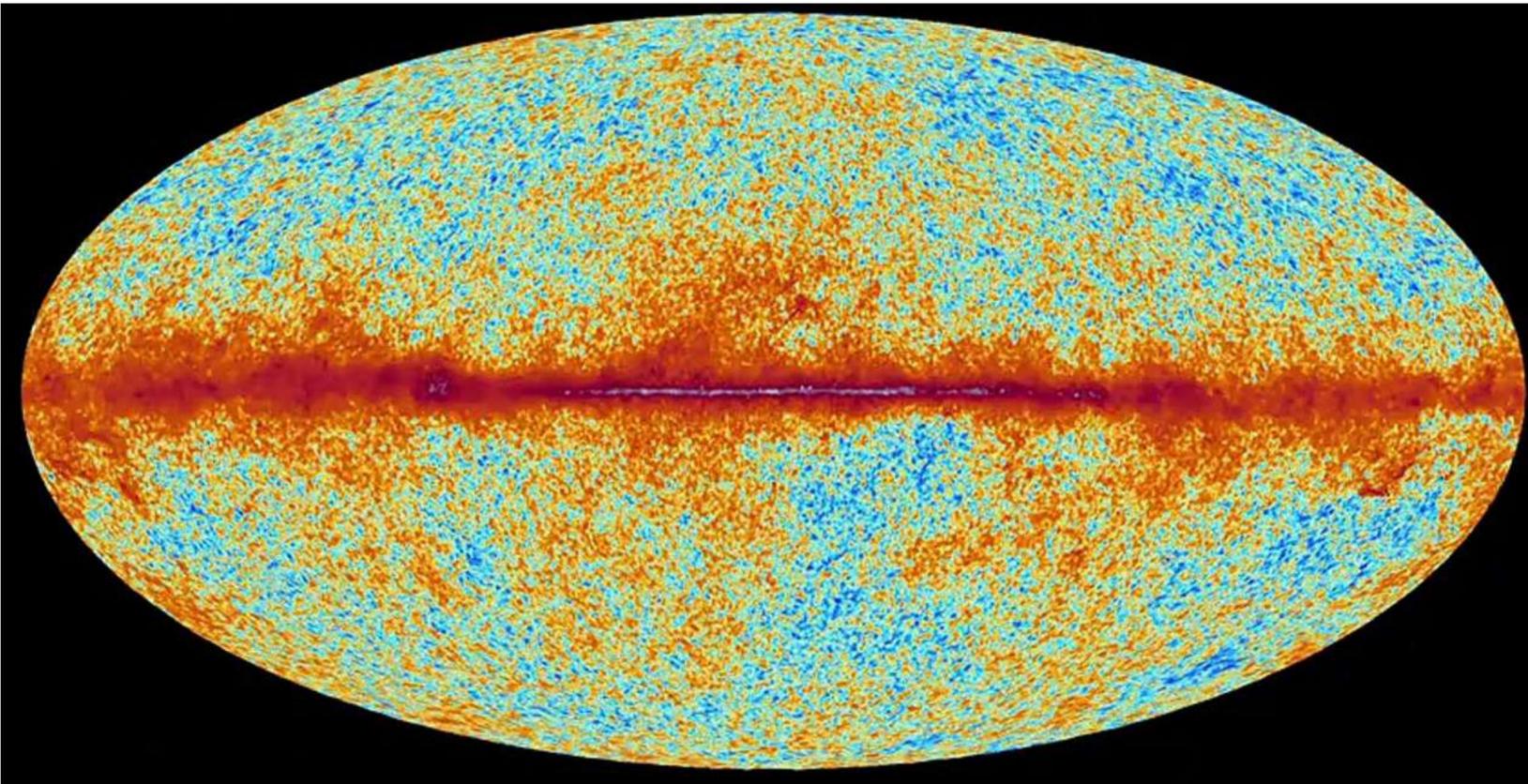
Galaxies
Relevés du ciel



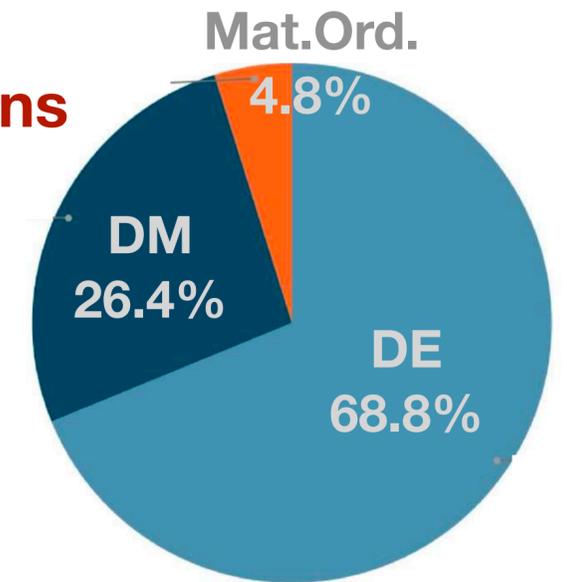
Matière noire
Lentille gravitationnelle



Deux images du même univers



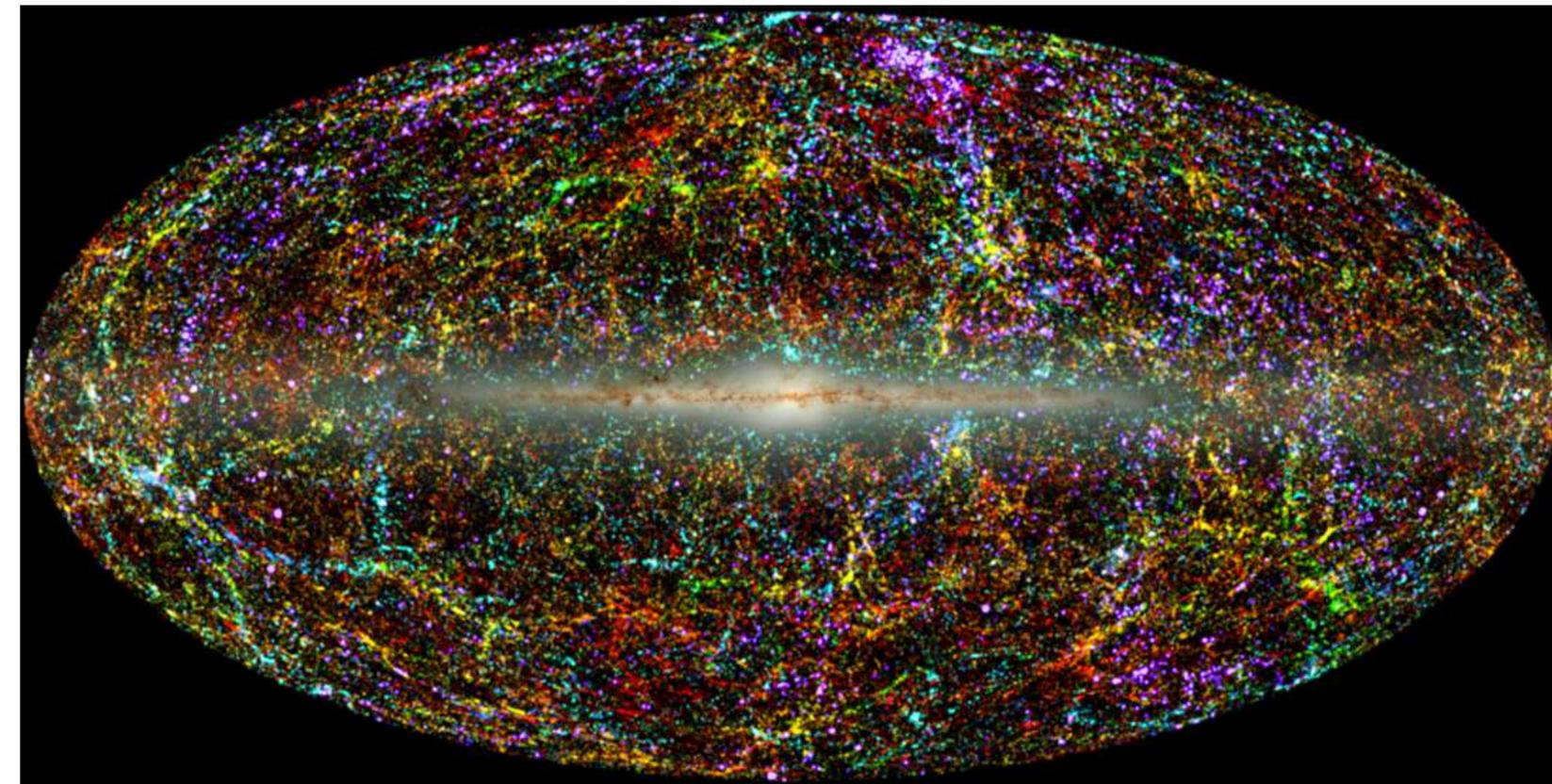
**Matière dans l'univers dans son ensemble
Trois constituants principaux**



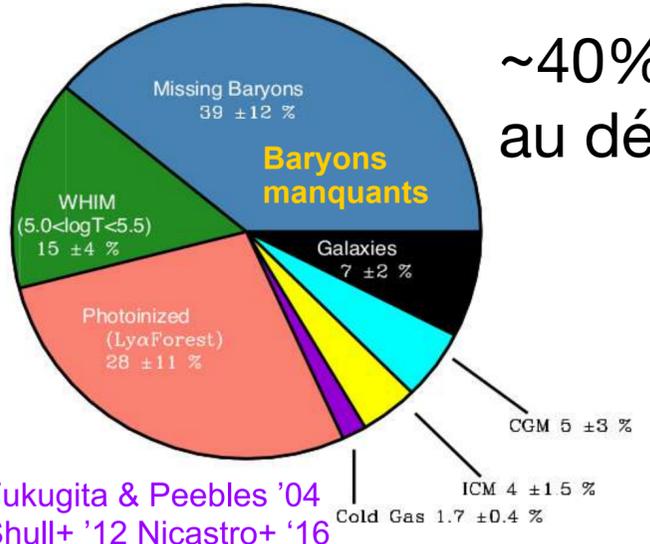
Distribution en une toile cosmique multi-échelle où la matière est principalement dans les filaments et noeuds tracée par le gaz chaud et les galaxies

Distribution de la matière aux grandes échelles pour répondre aux défis en astrophysique:

- Où trouver la matière ordinaire manquante?
- Comment mieux comprendre les modèles de formation des structures?

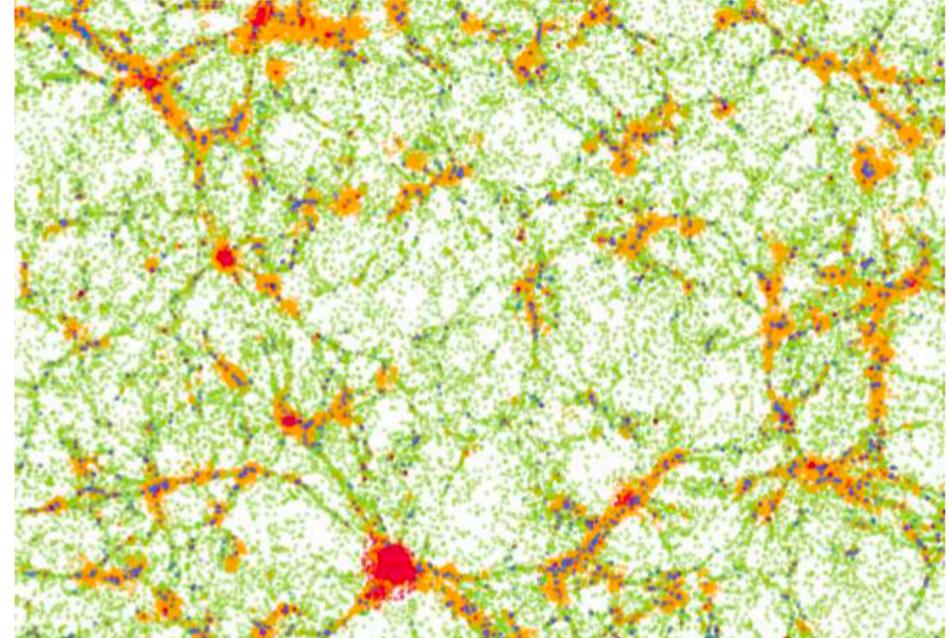


Matière ordinaire, manquante ou cachée ?

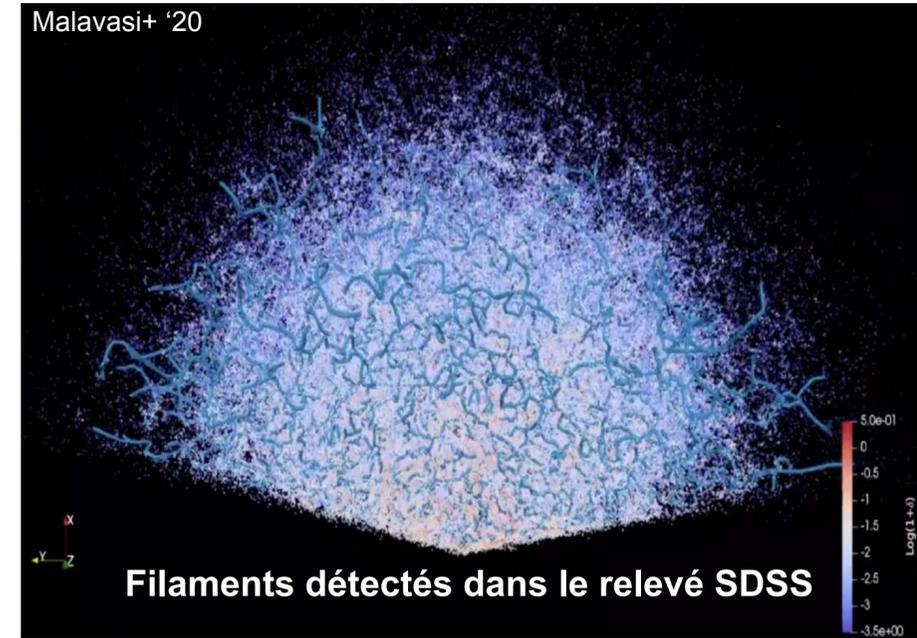


~40% matière ordinaire manque au décompte!

La recherche dans les plus longs filaments de la toile cosmique ?



Galarraga-Espinoza PhD '21



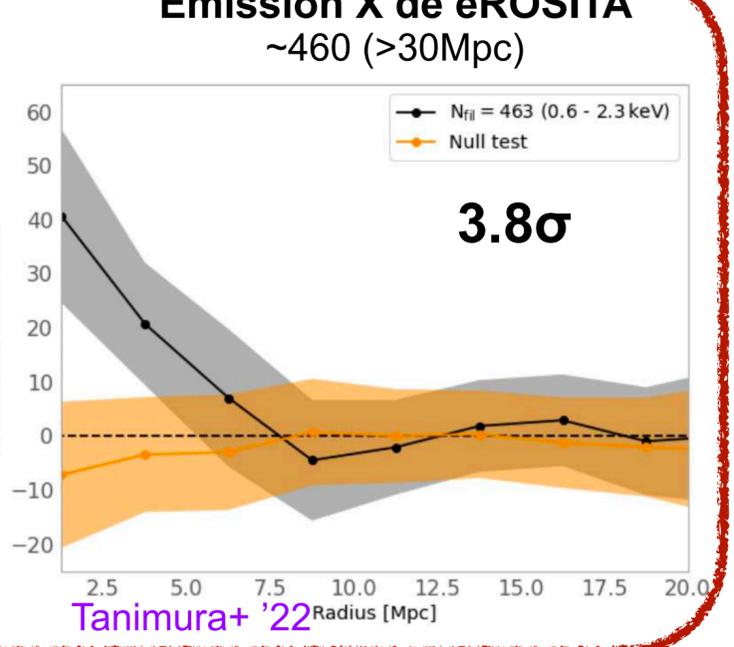
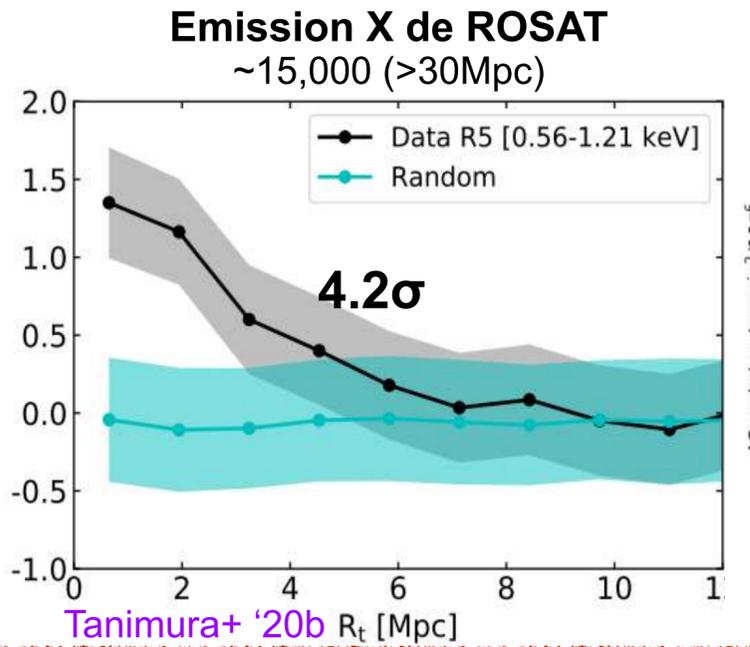
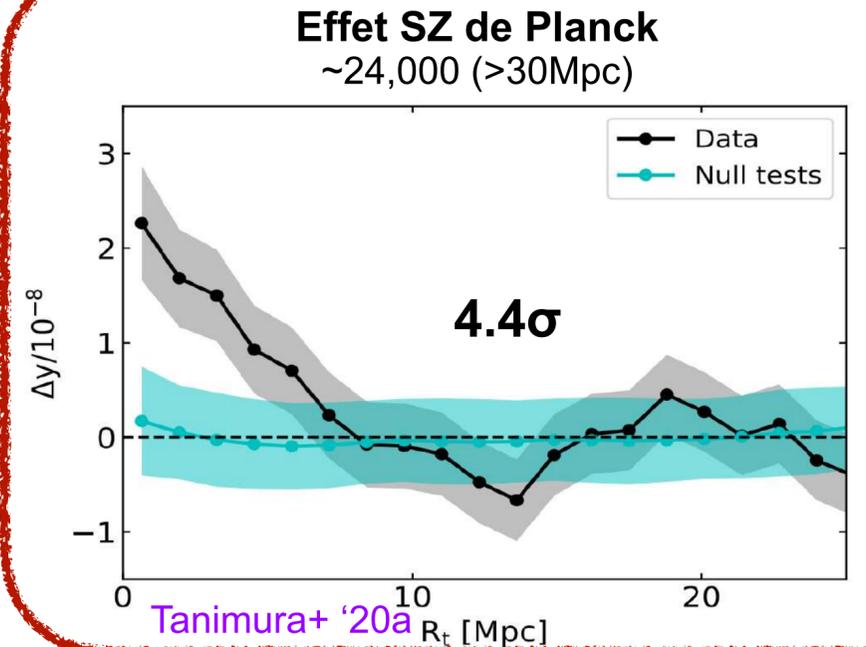
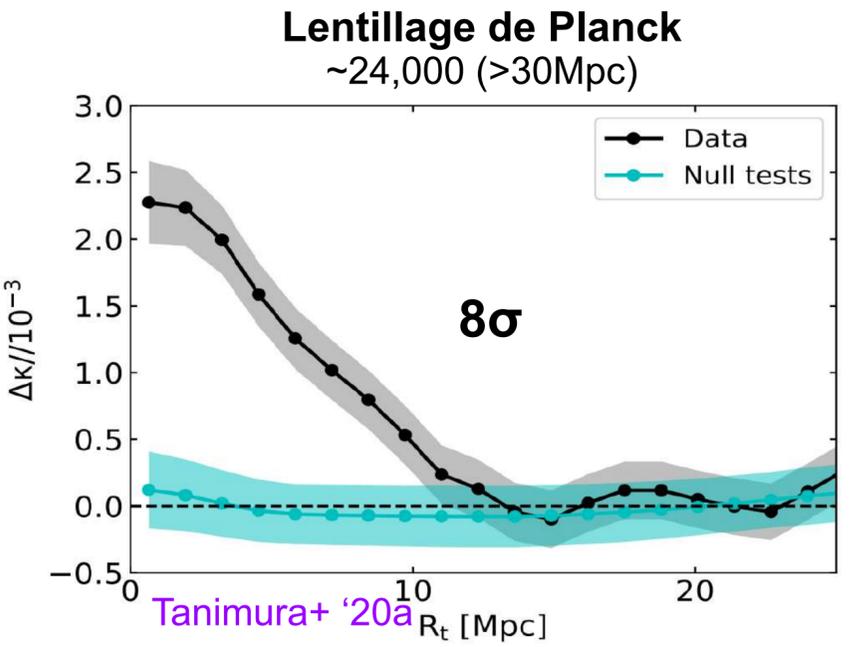
Malavasi+ '20

Filaments détectés dans le relevé SDSS

Fukugita & Peebles '04
Shull+ '12 Nicastro+ '16

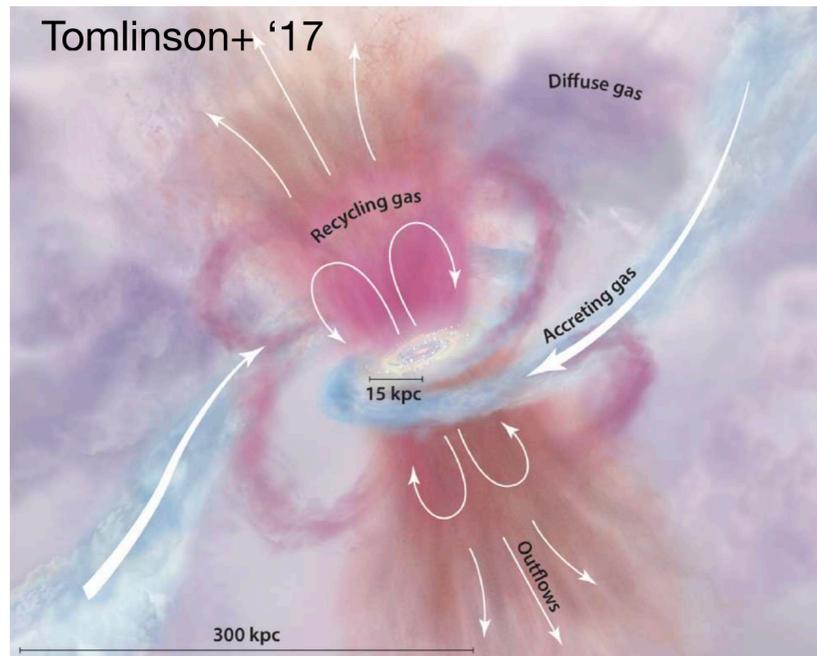
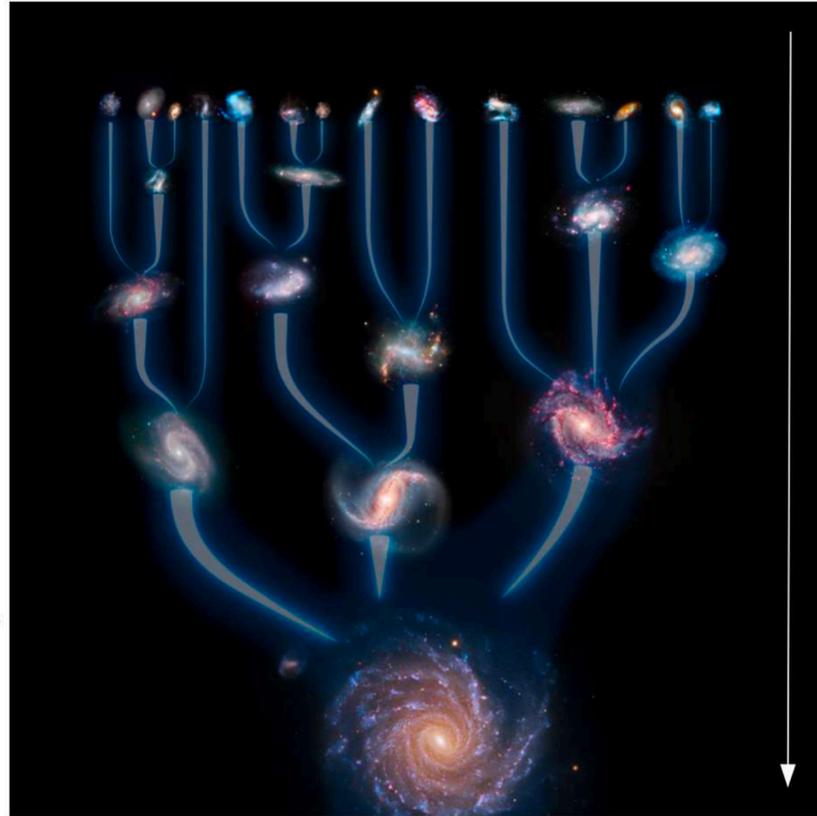
Mise en évidence de la matière ordinaire **CACHÉE** dans les filaments de la toile cosmique (propriétés moyennes: surdensités ~ 20 ; $T_{\text{Gaz}} \sim 2 \cdot 10^6$ K)

Et Bonjean+ '20;
Lokken+ '22, '24;
Zhang+ '24; ...

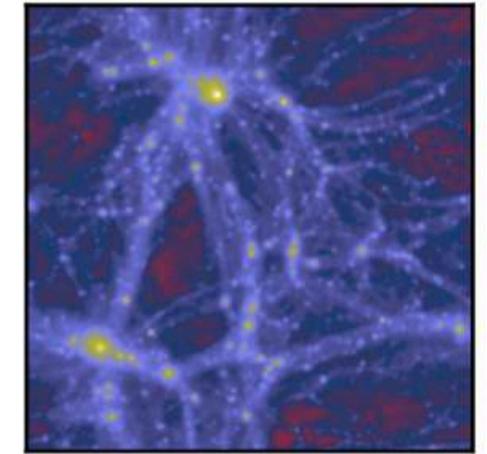
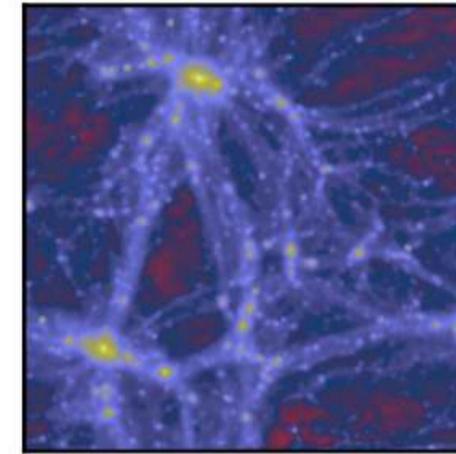
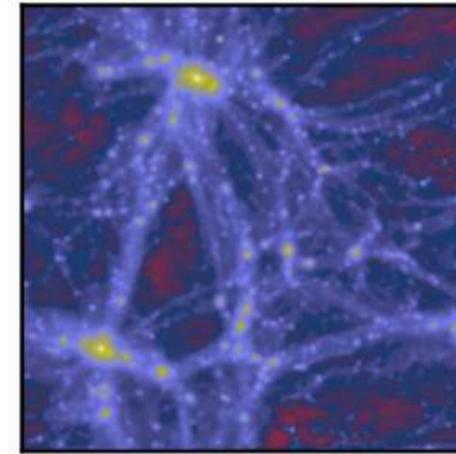
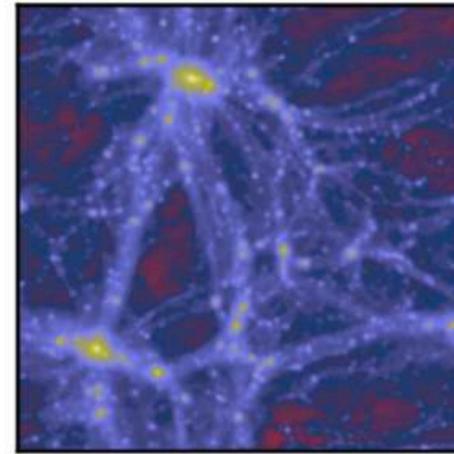


Former les galaxies distribue la matière ...

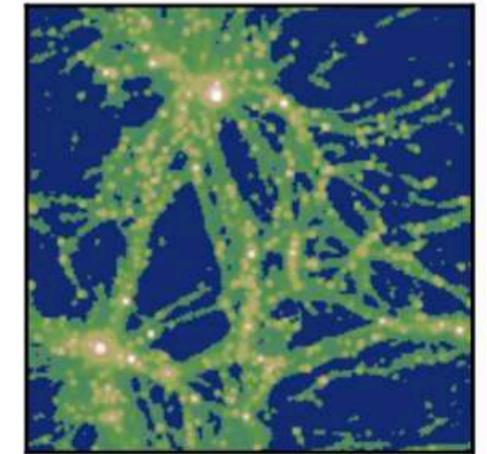
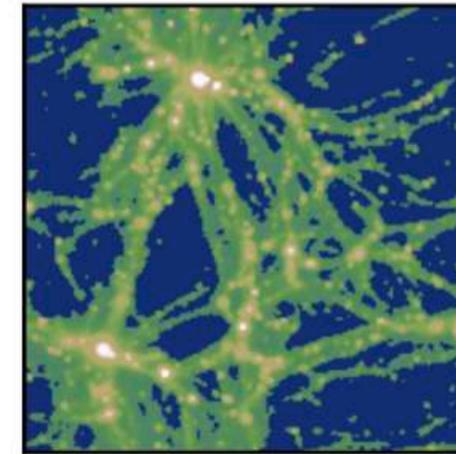
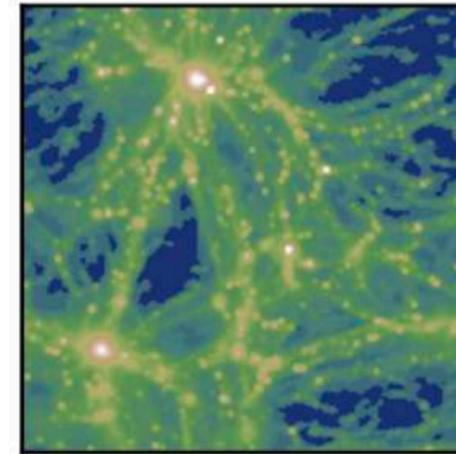
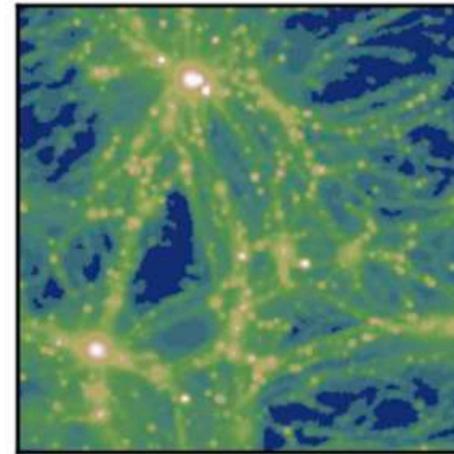
Crédit: ESO/L. Calçada



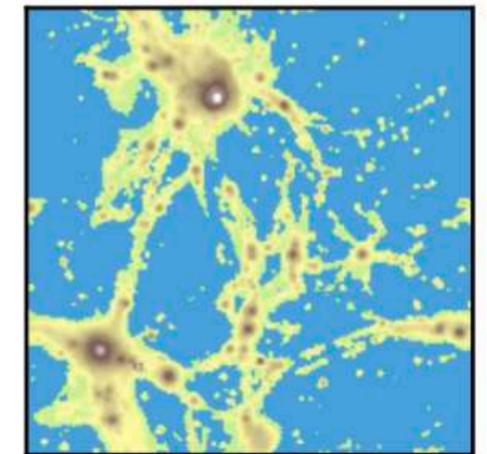
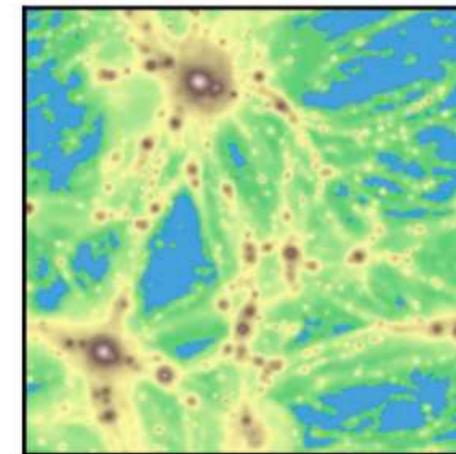
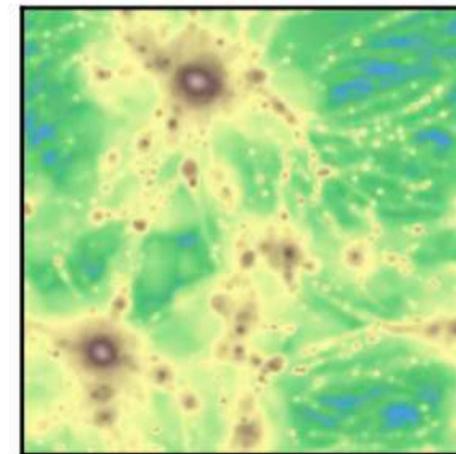
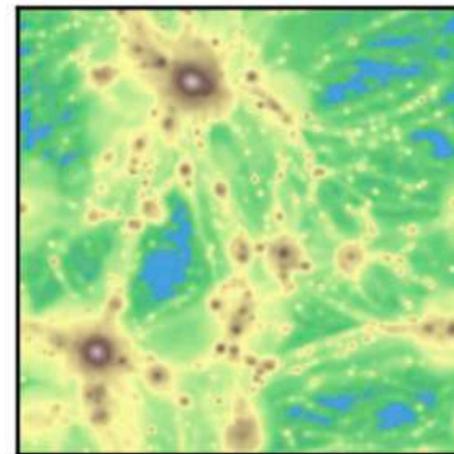
Matière noire



Emission X



Effet SZ



Référence (SN, AGN)

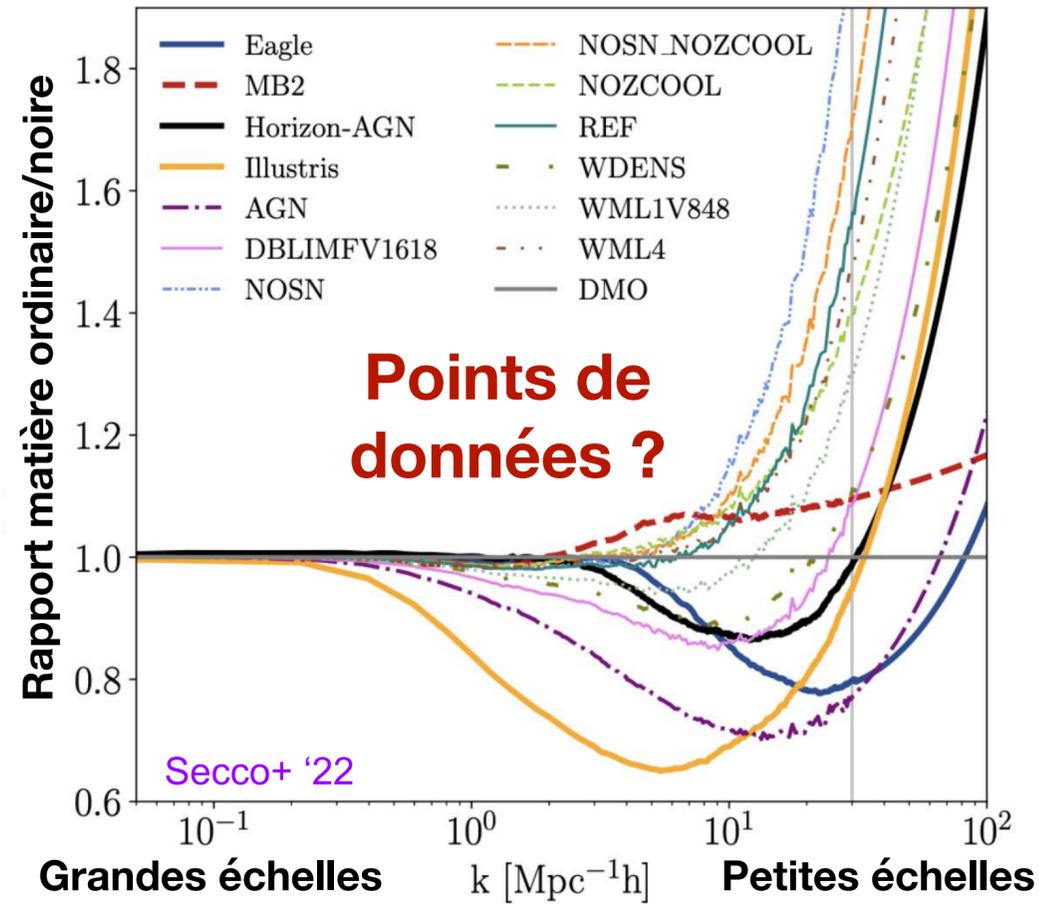
Forte activité AGN

Forte activité SN sans AGN

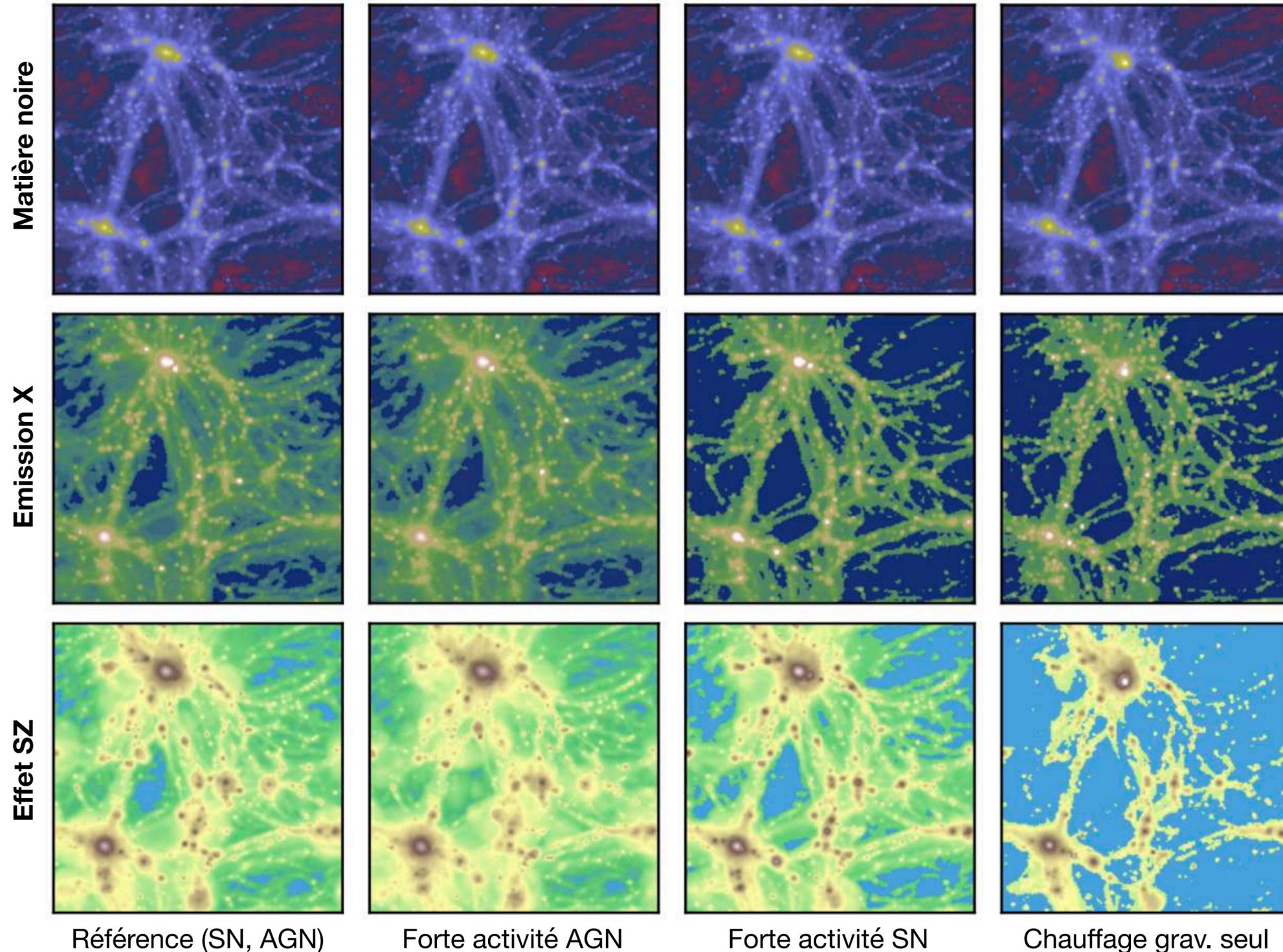
Chauffage grav. seul

Villaescusa-Navarro+ '21

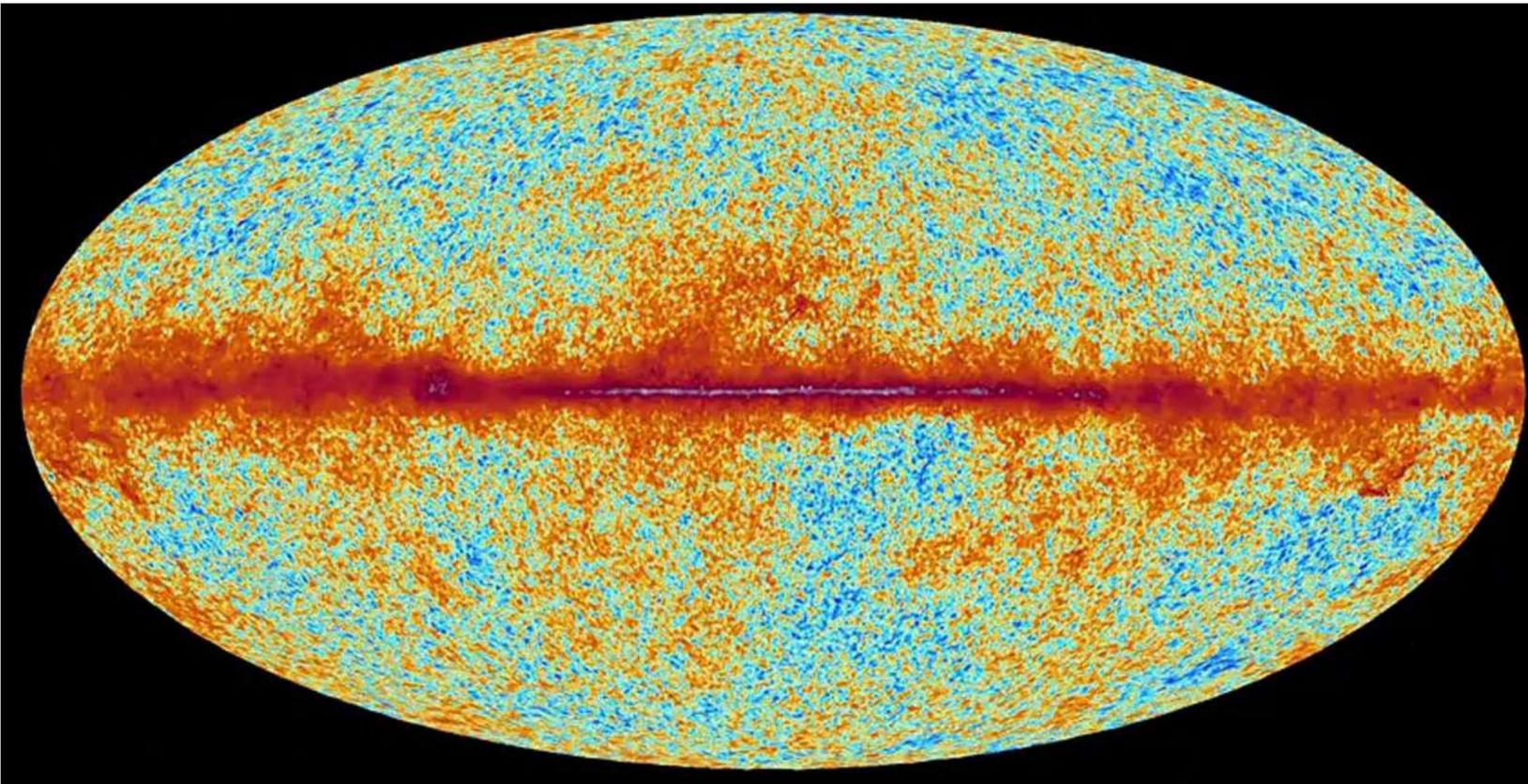
Distribution de la matière (gaz) incertaine



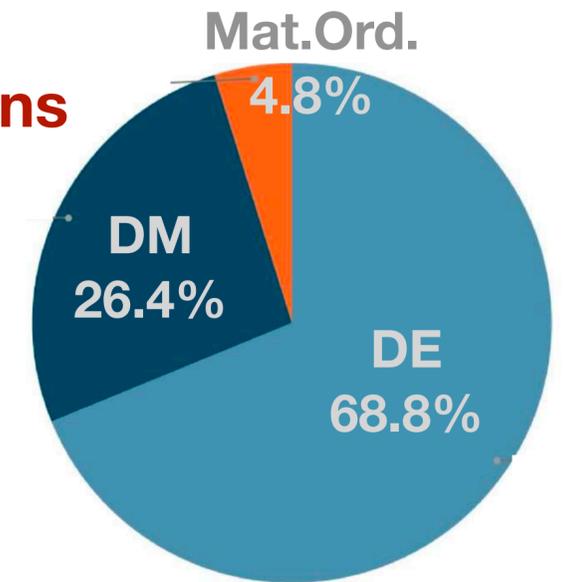
Observations de la distribution de la matière (émission X, effet SZ, ...) pour contraindre les modèles de formation des structures



Deux images du même univers



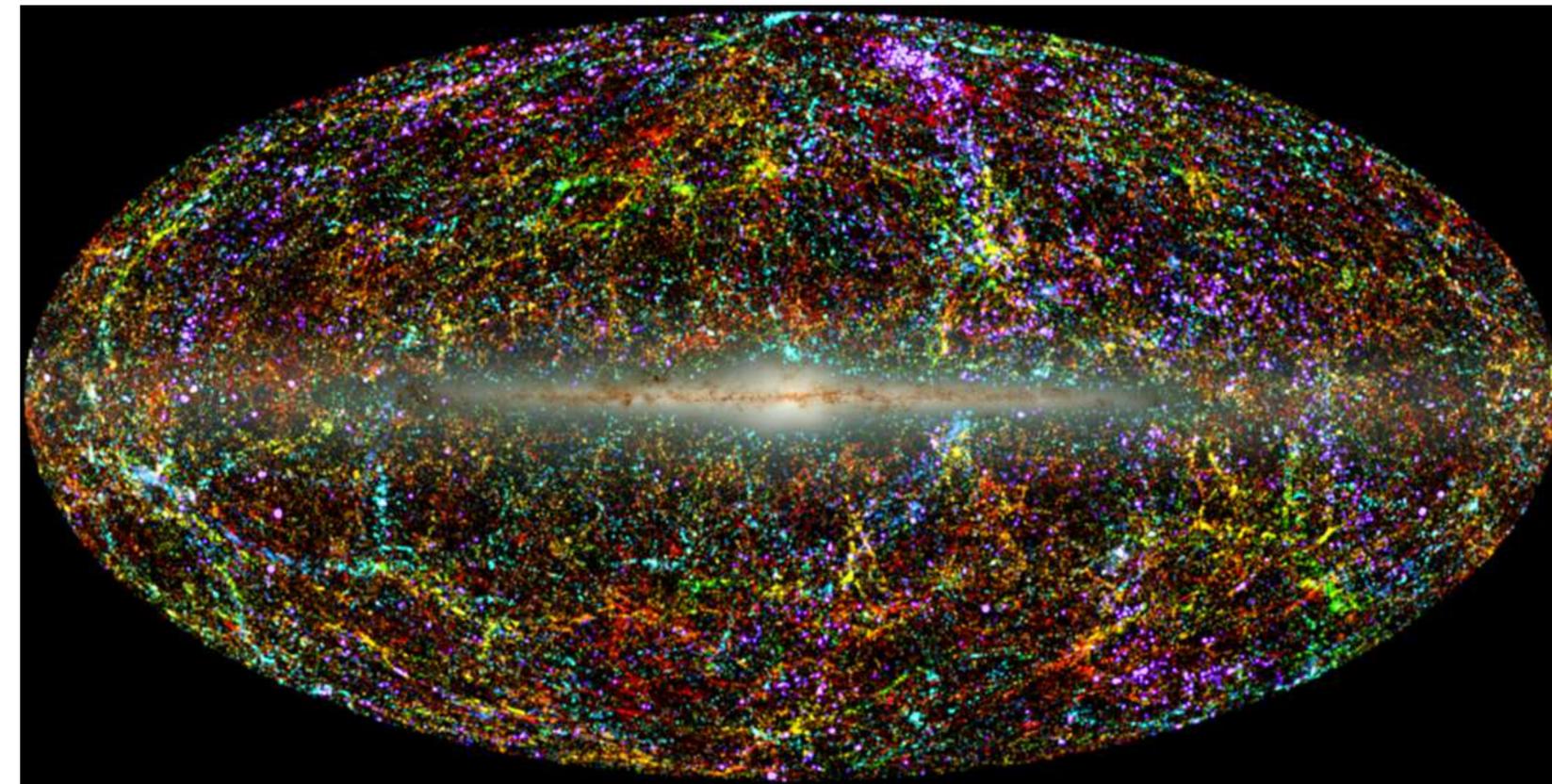
**Matière dans l'univers dans son ensemble
Trois constituants principaux**



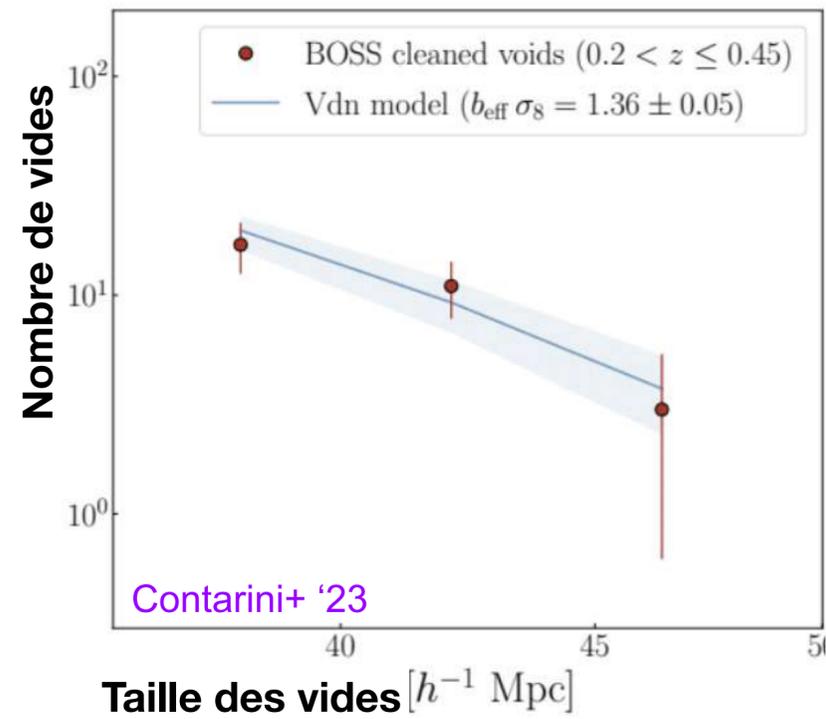
Distribution en une toile cosmique multi-échelle où la matière est principalement dans les filaments et noeuds tracée par le gaz chaud et les galaxies

Distribution de la matière aux grandes échelles pour répondre aux défis en cosmologie:

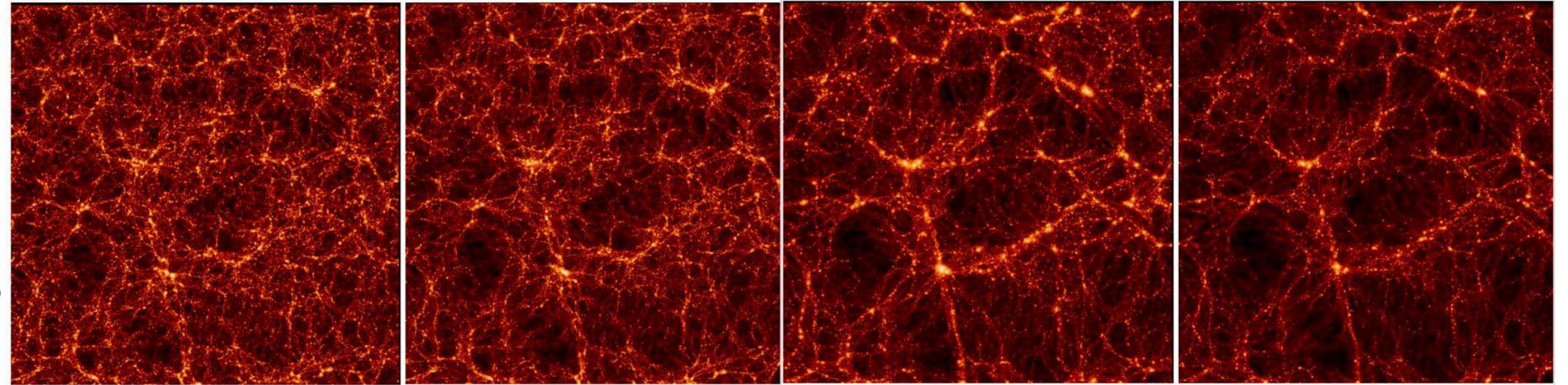
- Qu'est ce que l'énergie noire?
- Comment peser les neutrinos?
- Résoudre les tensions en cosmologie



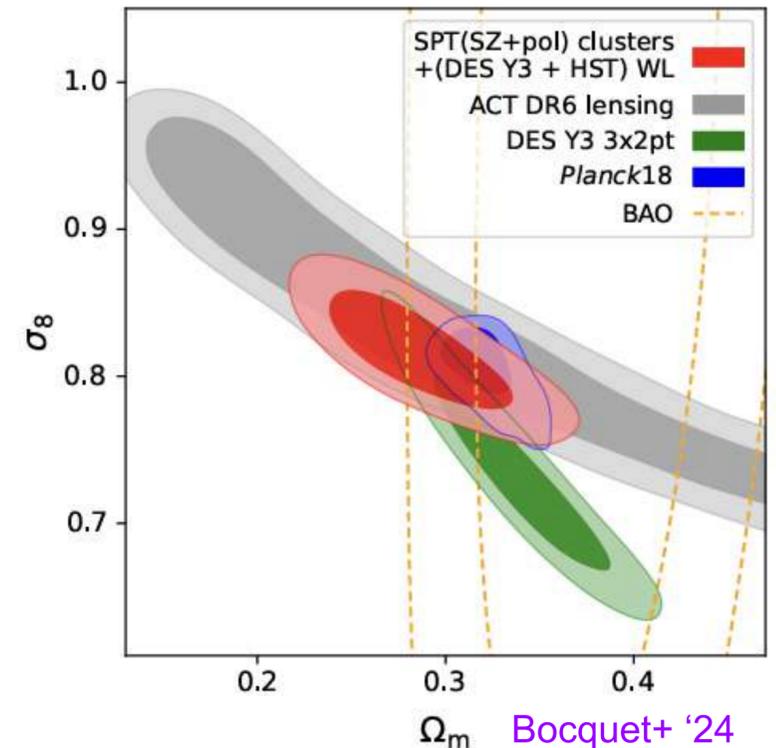
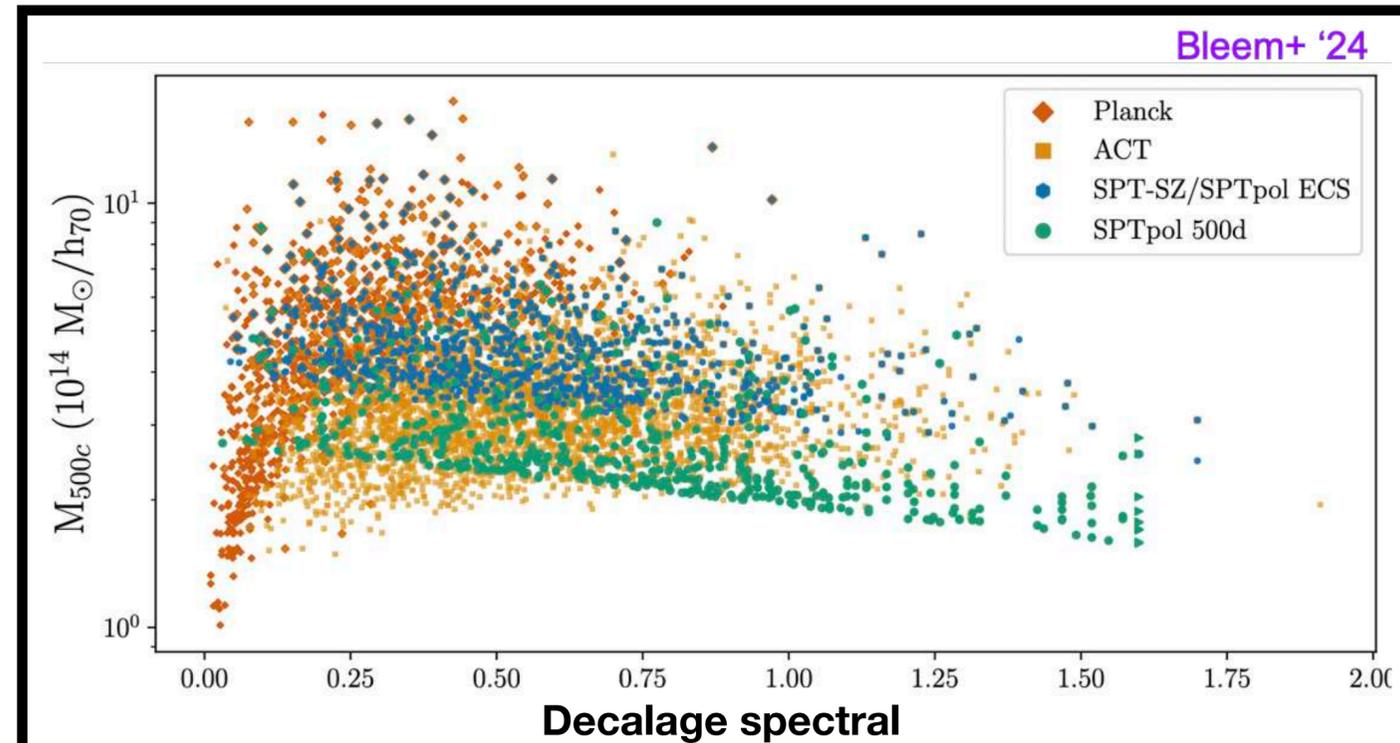
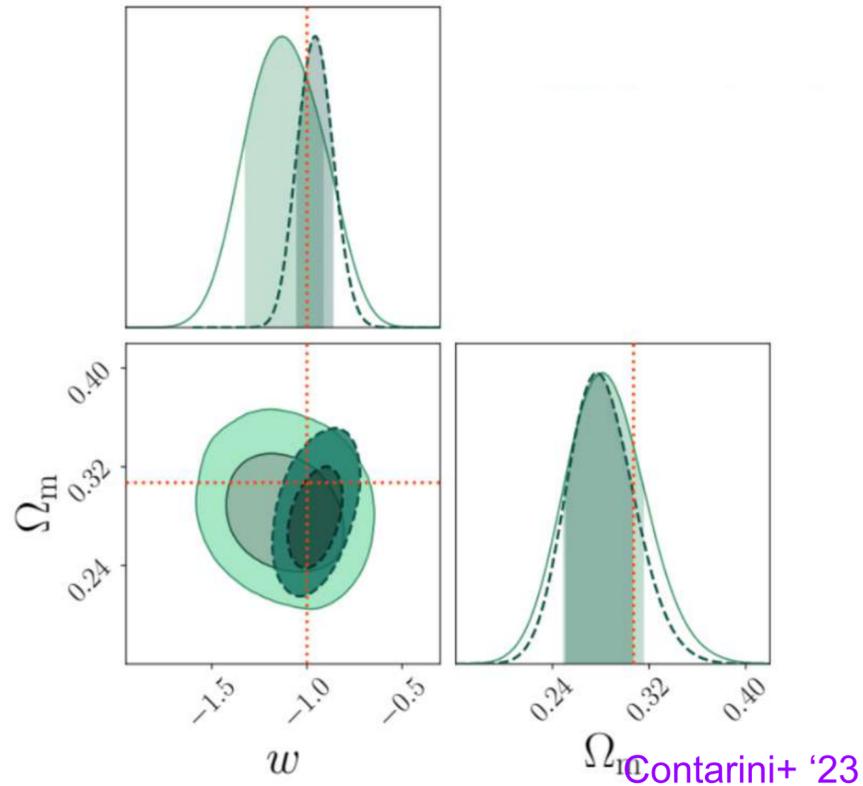
Cosmologie et distribution de la matière



Virgo consortium '05

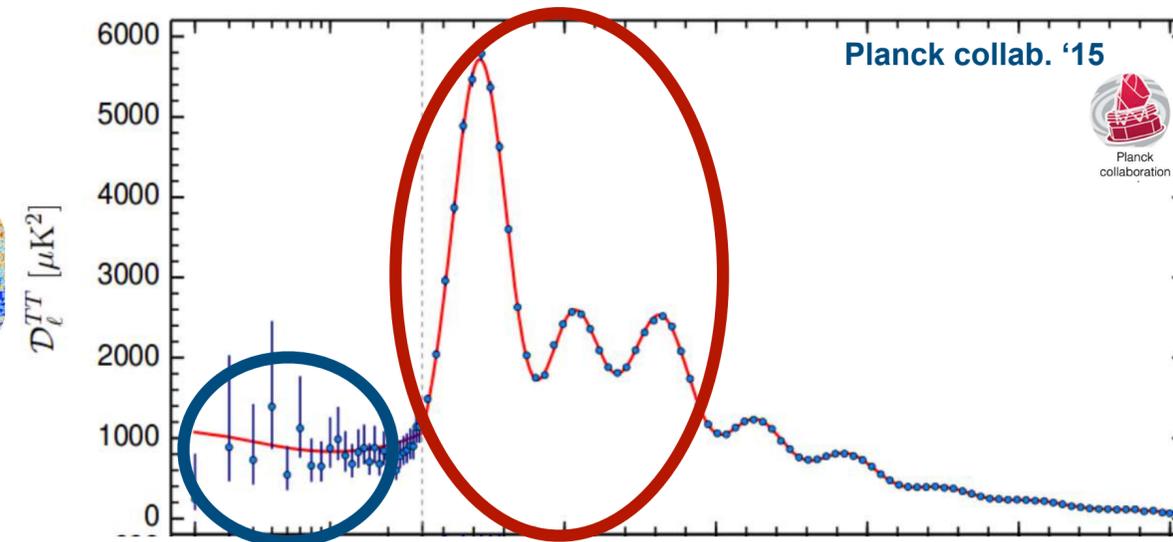
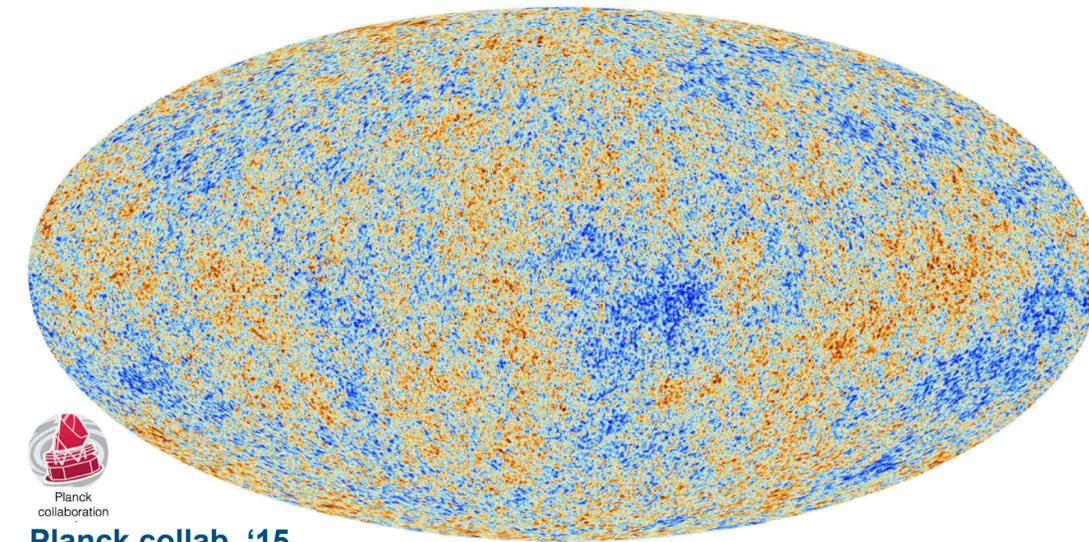


Des milliers d'amas et centaines de vides pour contraindre les paramètres du modèle cosmologique (énergie noire, DM, ...)

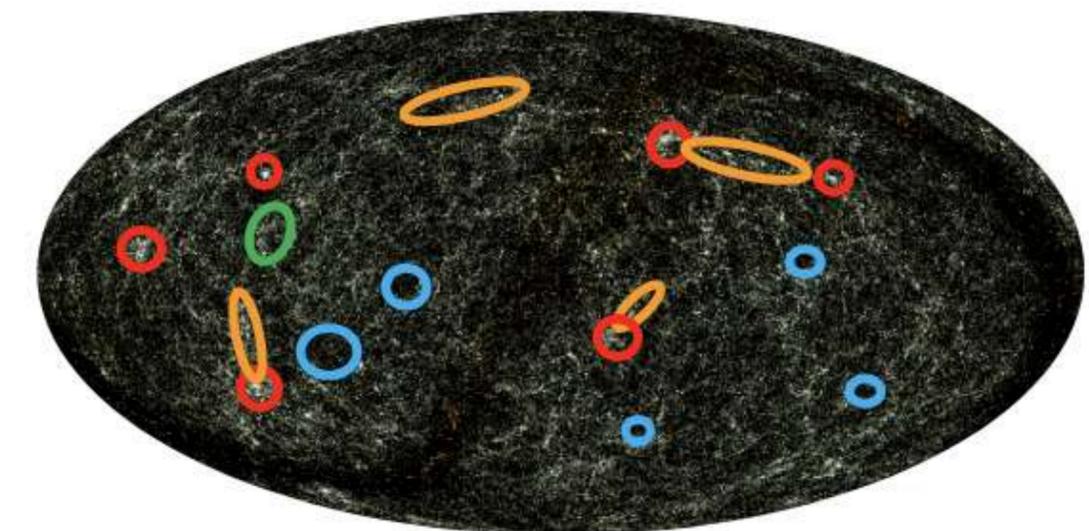


Cosmologie et distribution de la matière

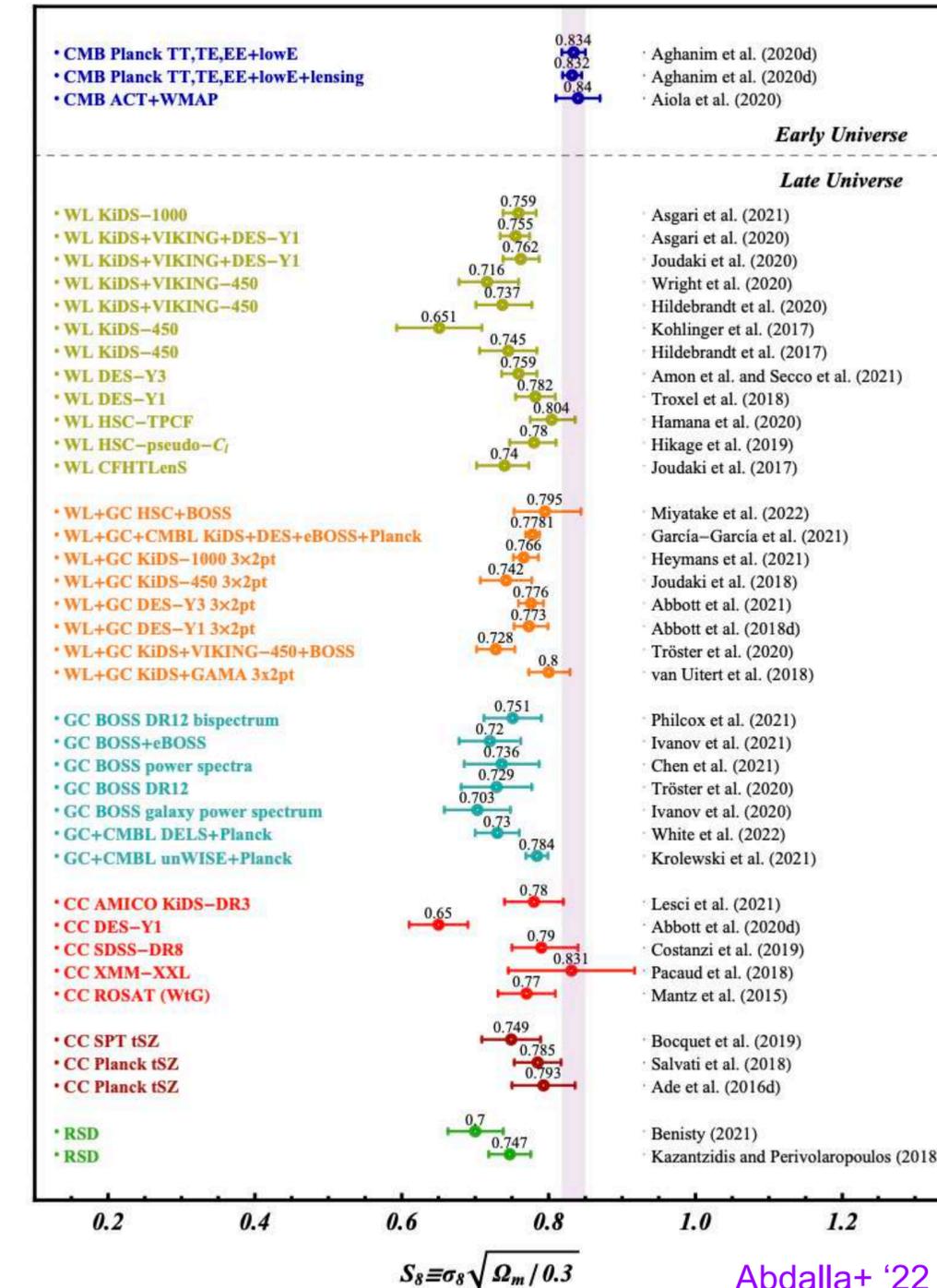
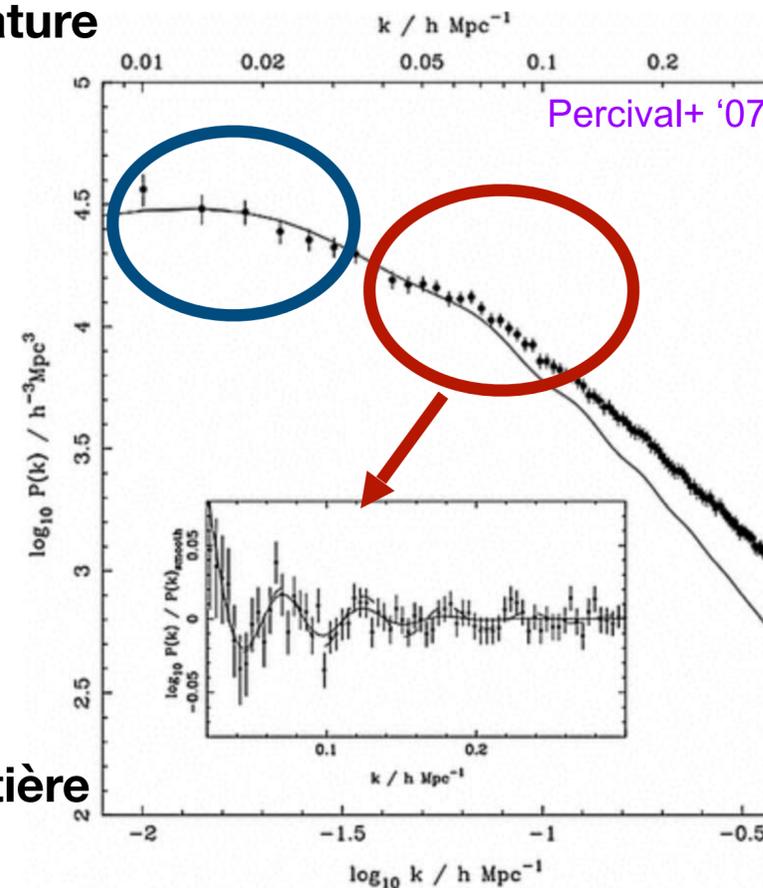
Degré d'agrégation de la matière?



Spectre de puissance des anisotropies de température



Spectre de puissance de la matière

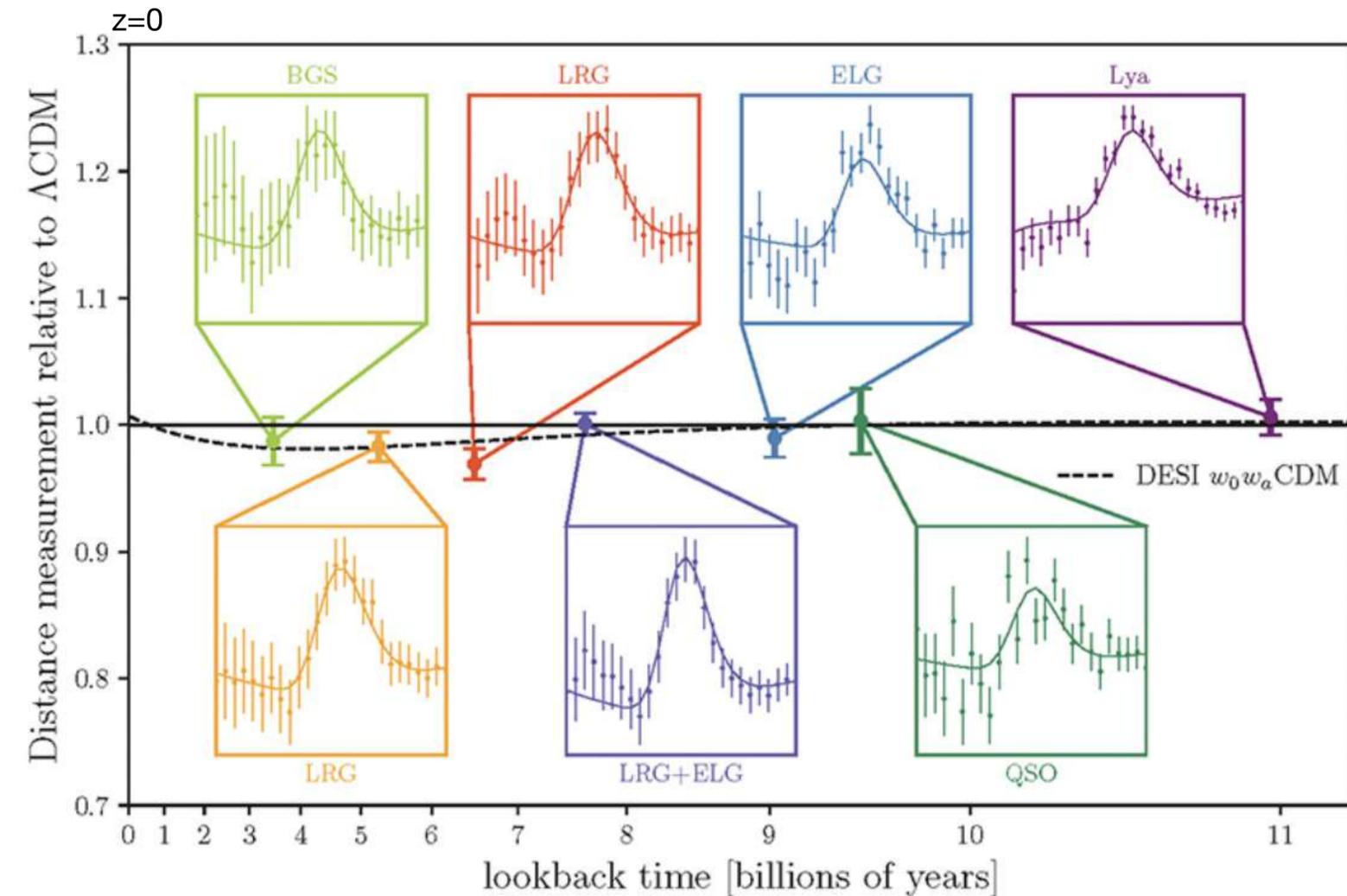


Cosmologie et distribution de la matière

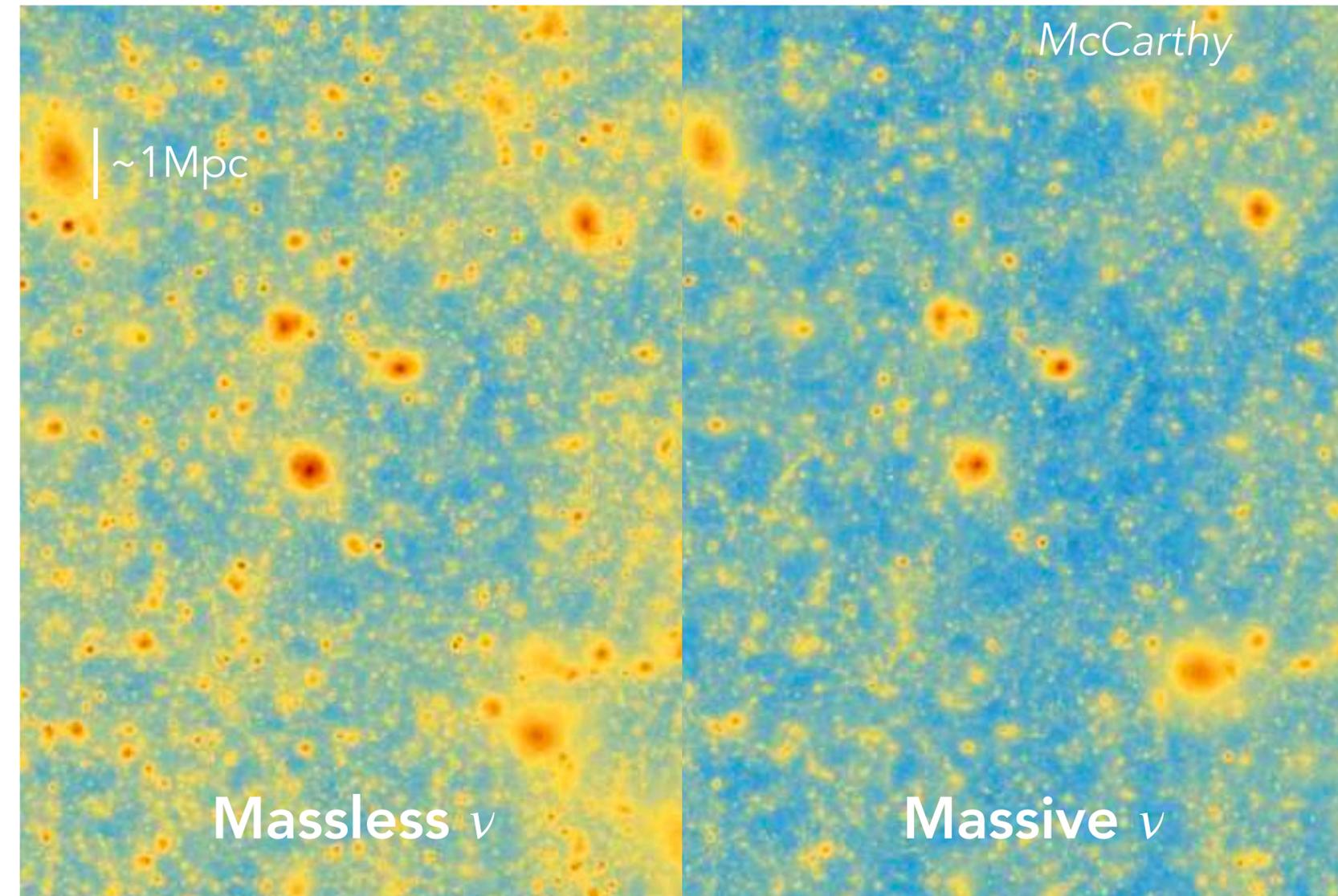
Distribution de la matière des grandes aux plus petites échelles
→ Au delà du modèle cosmologique le plus simple

Expansion sur $11 \cdot 10^9$ ans à 0.5% → Évolution de DE?

Neutrinos (0.5% de la matière) en affectent la distribution



Credits de Mattia/DESI Collab.

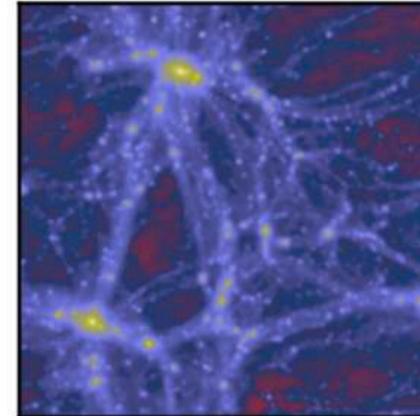


Cosmologie et distribution de la matière

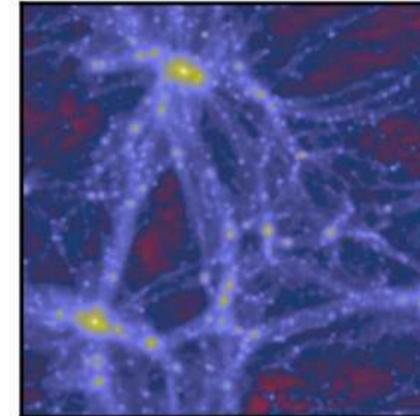


Défis: comprendre l'influence de la formation des galaxies sur la distribution de la matière (impact des baryons)

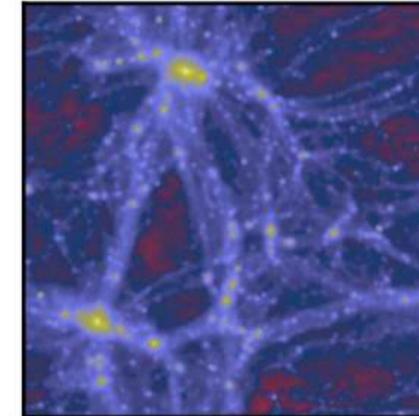
Matière noire



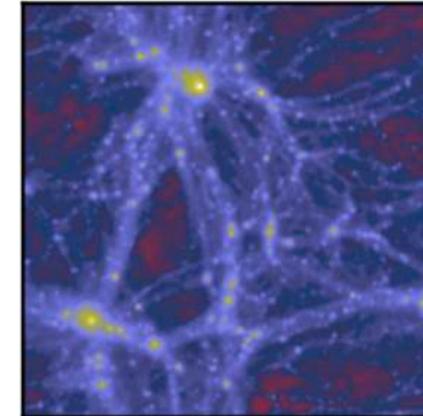
Référence (SN, AGN)



Forte activité AGN



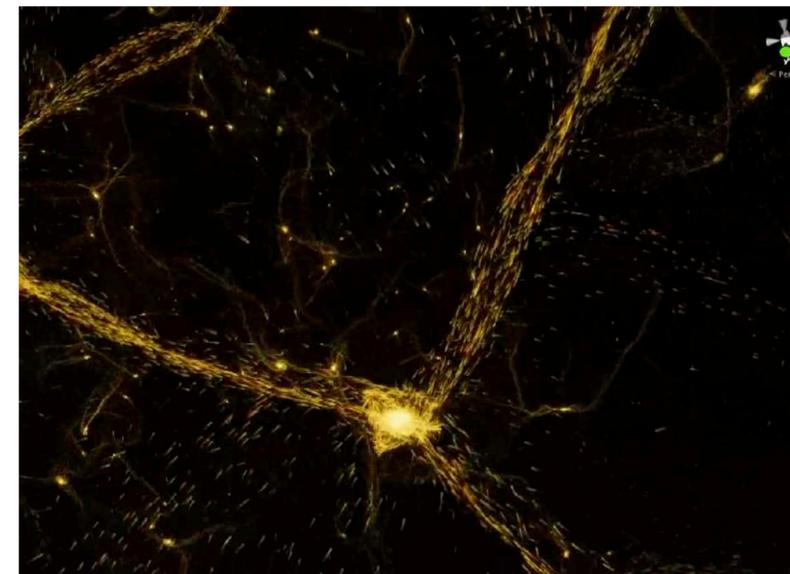
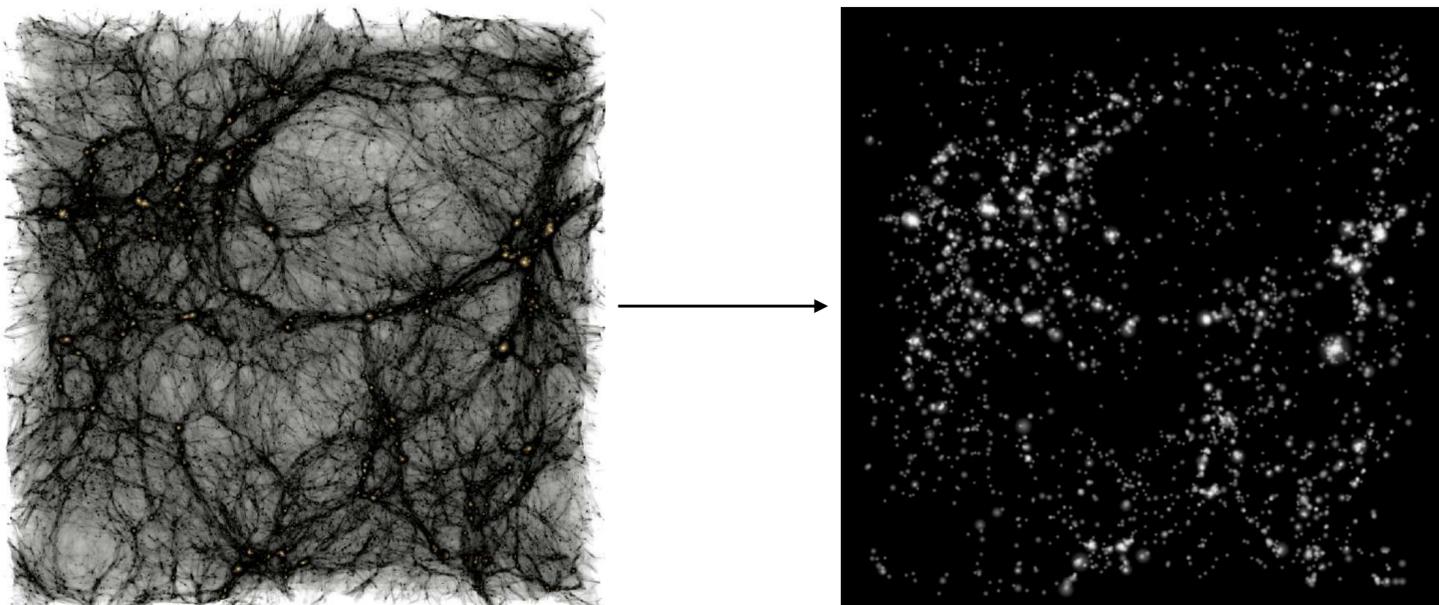
Forte activité SN



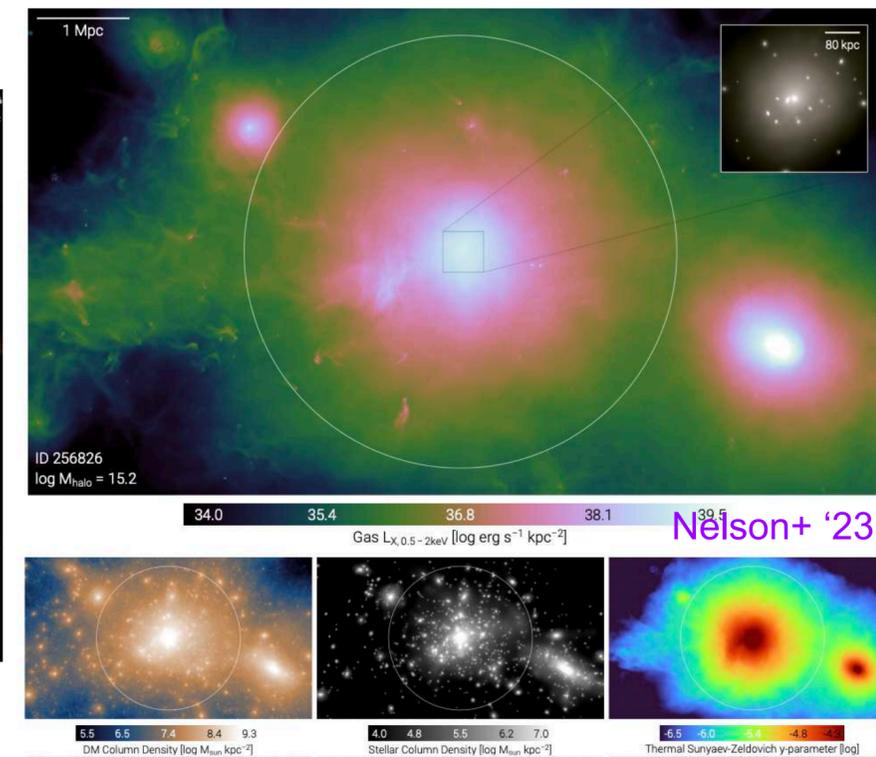
Chauffage grav. seul

Défis: relier la lumière des galaxies à la distribution de matière (bias)

Défis: comprendre la formation des groupes/amas de galaxies pour mieux les peser et les utiliser pour la cosmologie

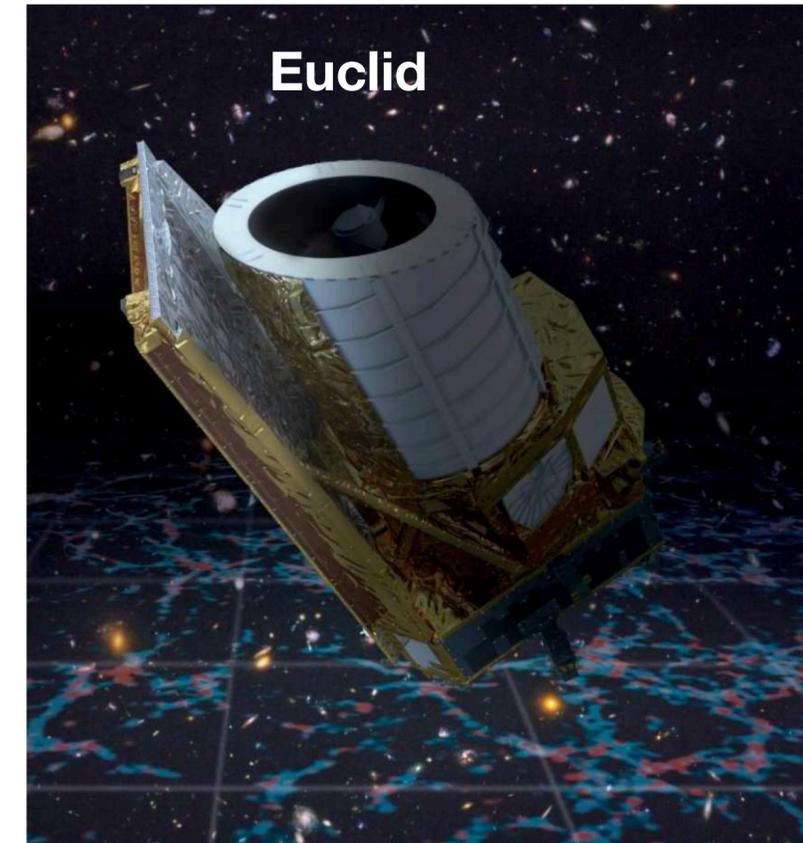
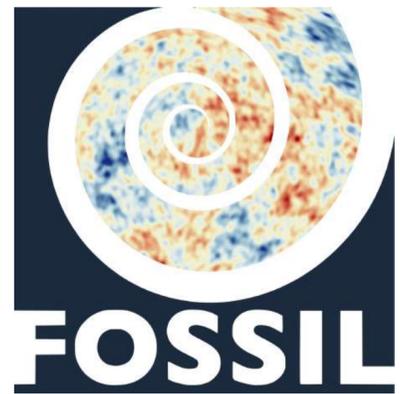


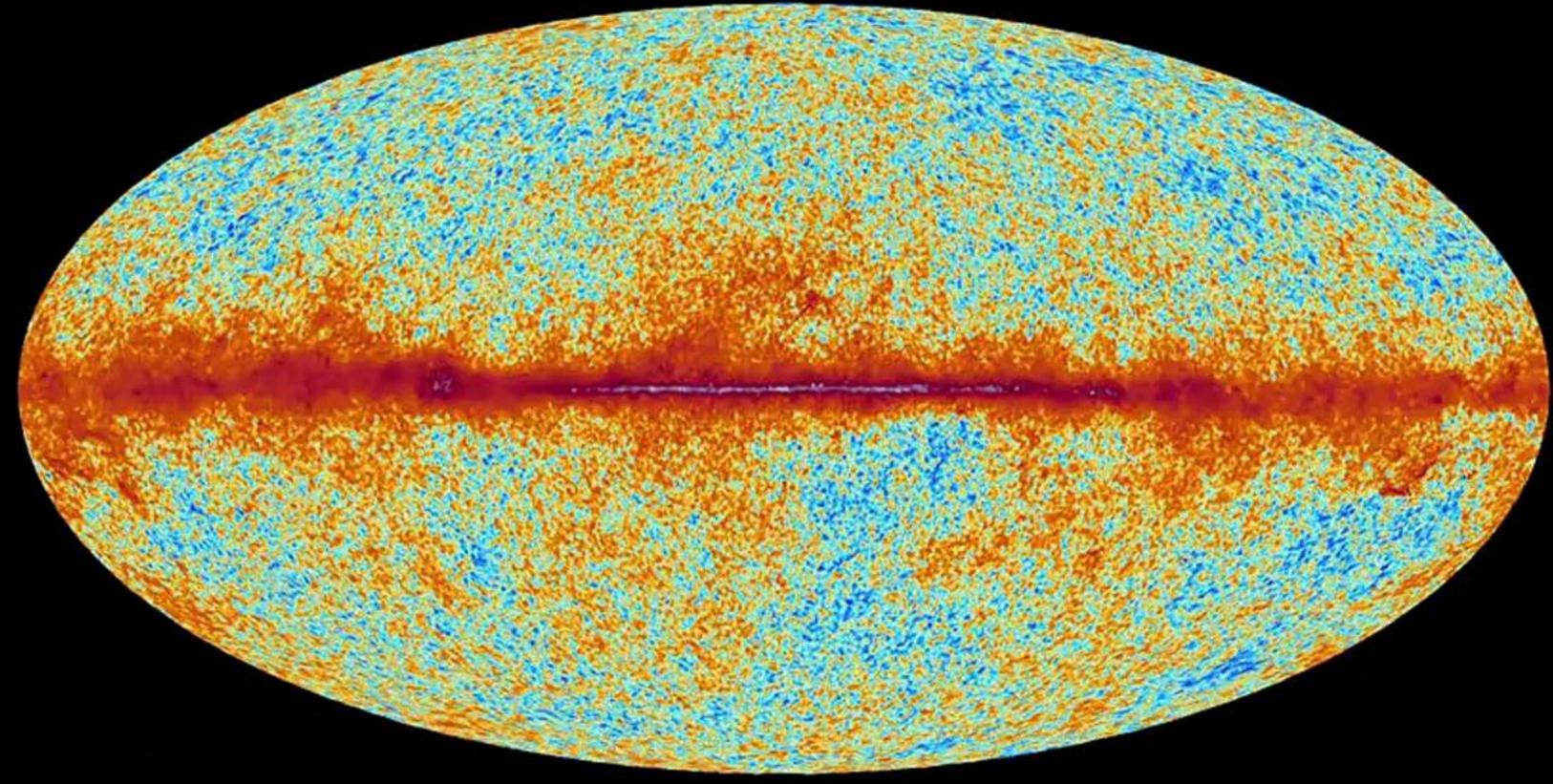
Credits M. Aragon Calvo



Cosmologie et distribution de la matière

Défis: Obtenir, réduire et contrôler des données multi-telescopes et multi-longueurs d'onde





MERCI

