

Effet Sunyaev-Zeldovich

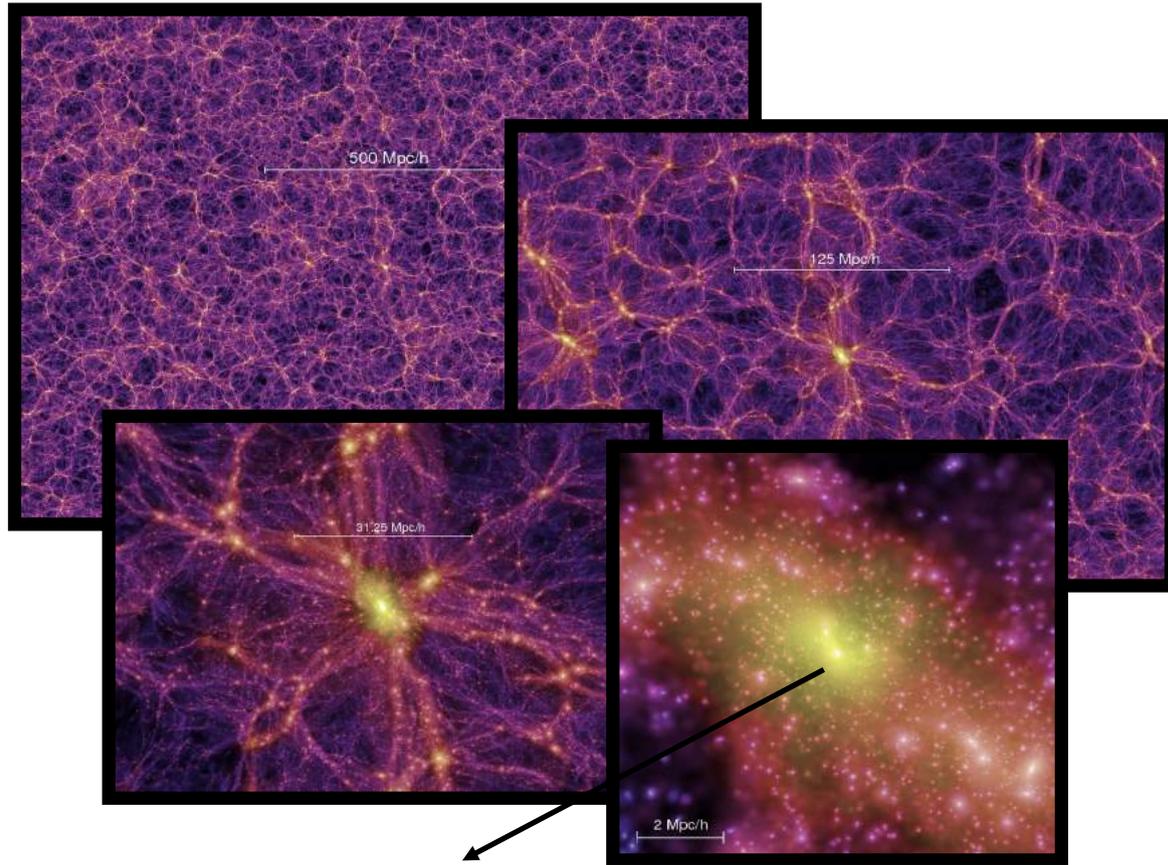
Nabila Aghanim
Institut d'Astrophysique Spatiale

Illust.: Douspis, Hurier, Aghanim, Nastasi, Data: Planck/ESA/SPT/ACT/Carma/AMBA

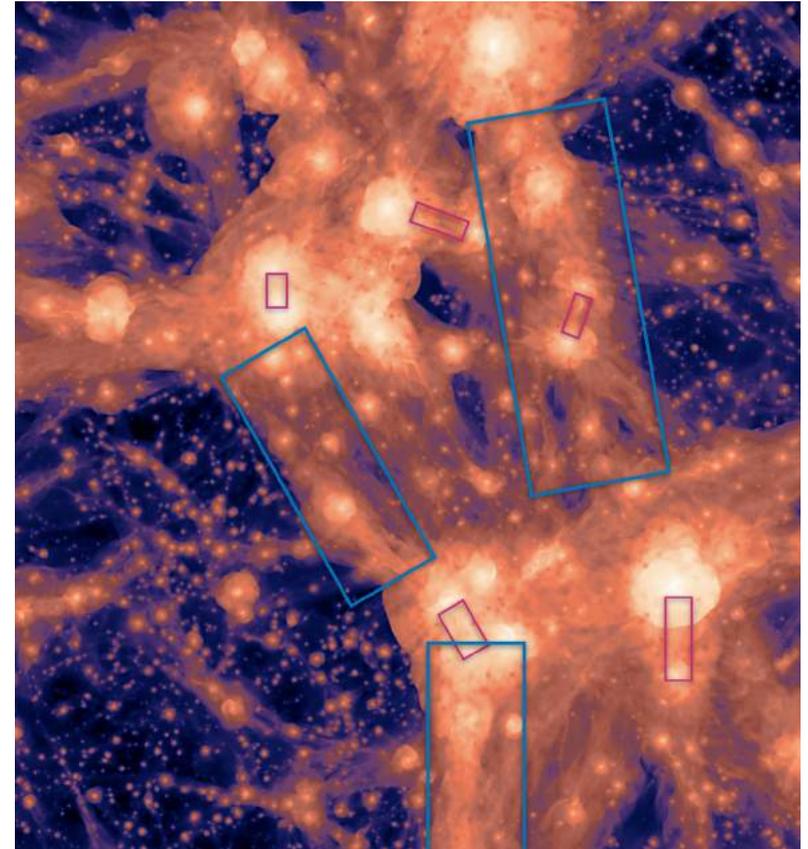


Grandes structures de l'univers

Springel et al. (2005)



Amas de galaxies = noeuds
@intersection des filaments



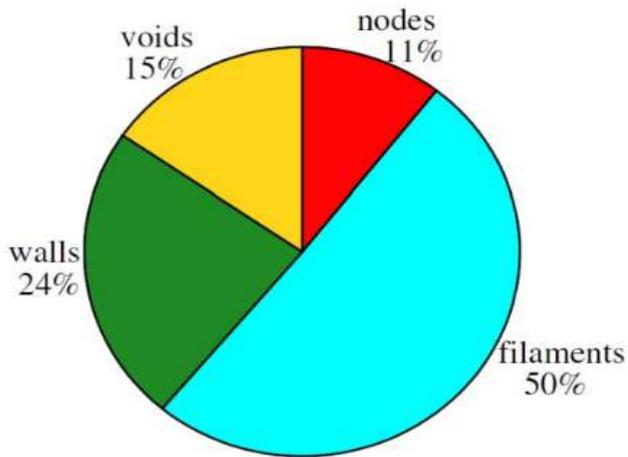
Courtesy F. Vazza

Filaments cosmiques &
Ponts entre amas (en
interaction)

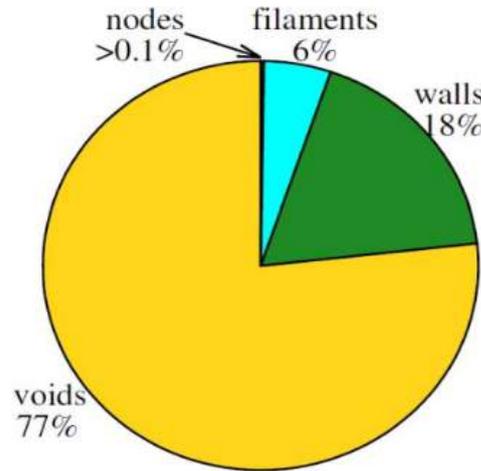
Éléments de la toile cosmique

Contenu en masse & volume

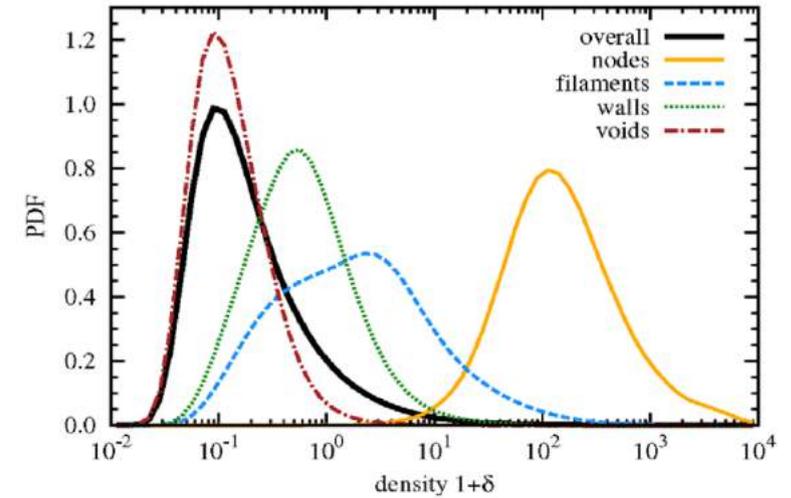
Mass fraction



Volume fraction

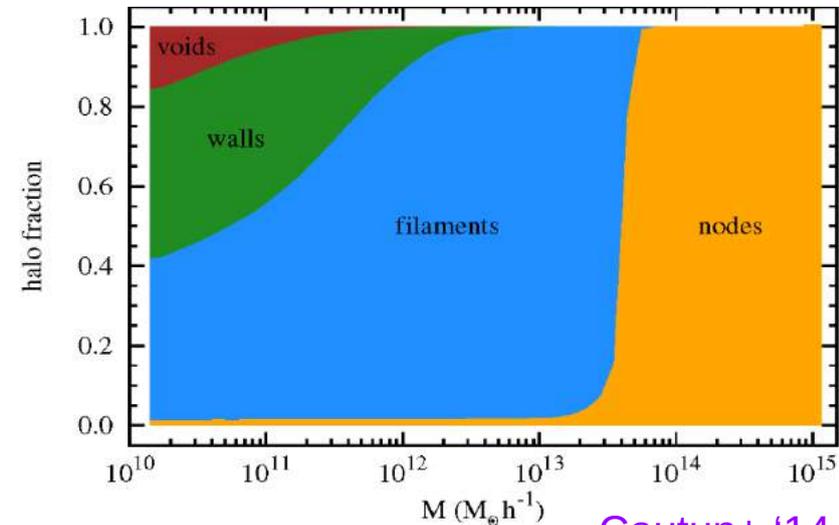


Distribution de densité



→ Différentes techniques de détection = différentes propriétés des éléments cosmiques

Halos dans la toile cosmique



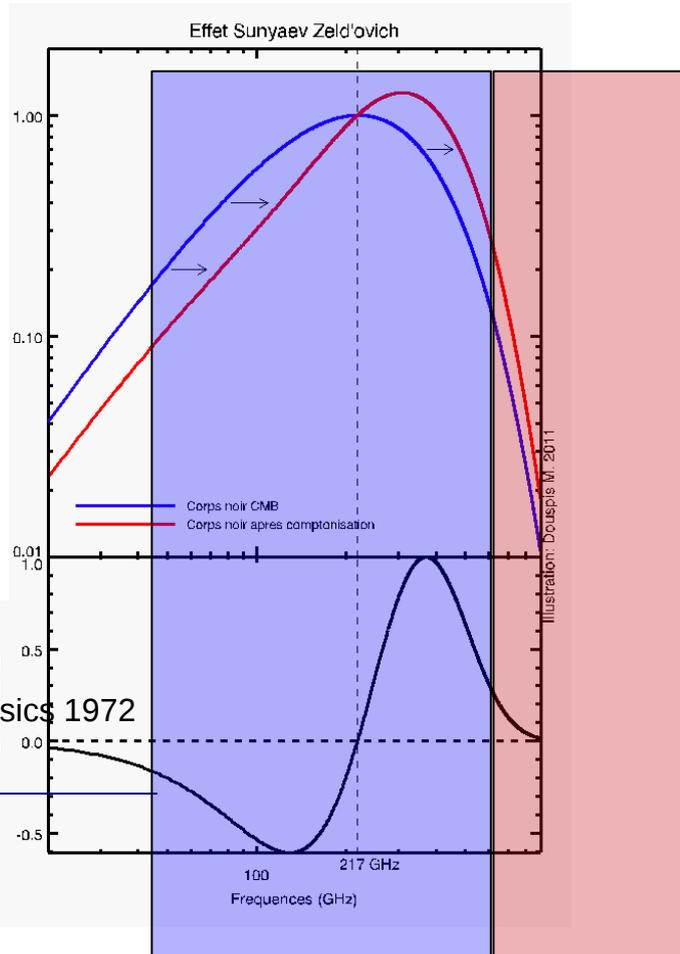
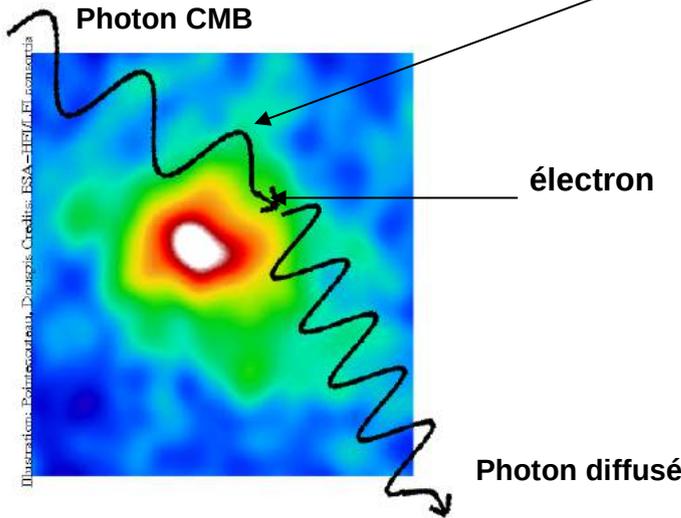
Effet Sunyaev-Zeldovich (SZ)

R. A. Sunyaev

Ya. B. Zeldovich



Gaz chaud et ionisé



$$y = \int \frac{k_B T_e n_e \sigma_T dl}{m_e c^2}$$

SZ, Comments on Astrophysics and Space Physics 1972

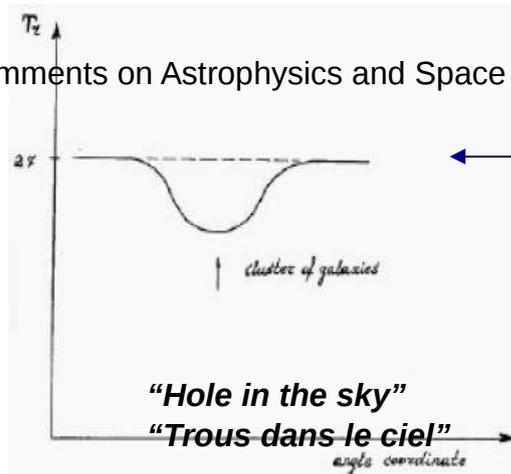
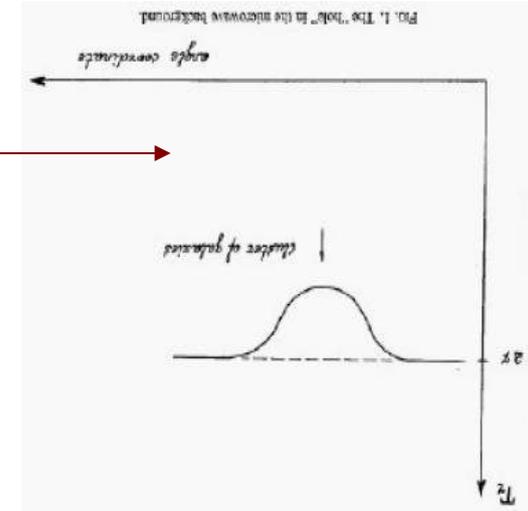
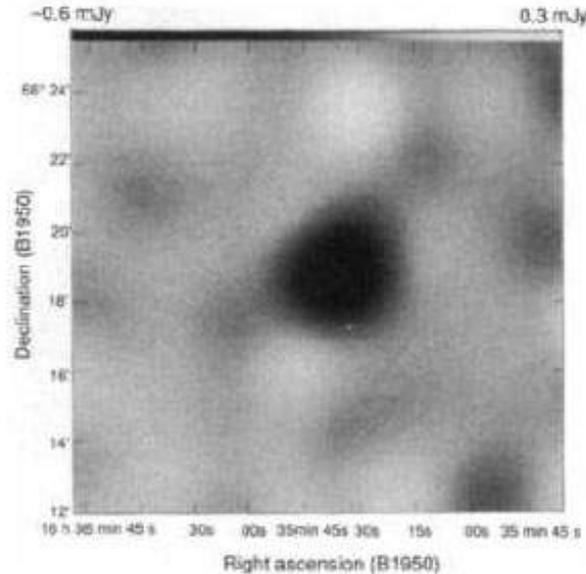


FIG. 1. The "hole" in the microwave background.

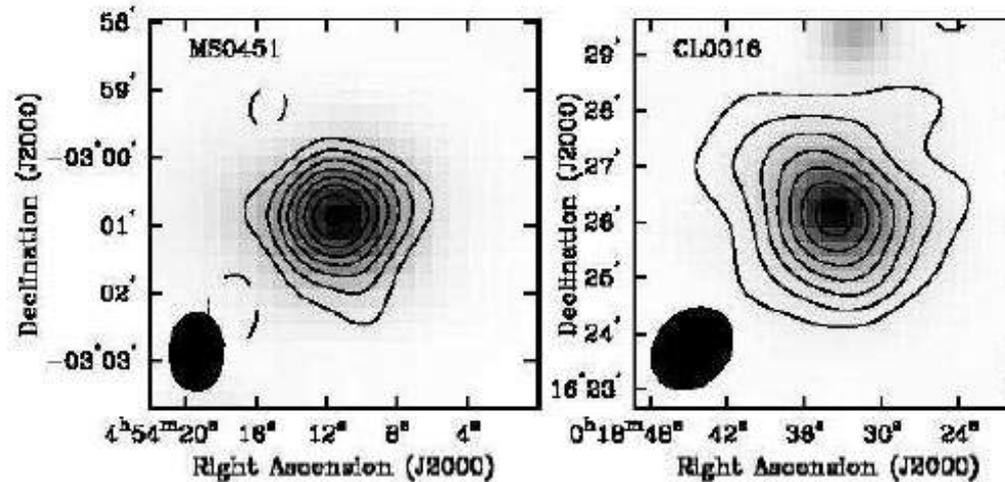


Observation & détection de l'effet Sunyaev-Zeldovich

Observation de l'effet SZ

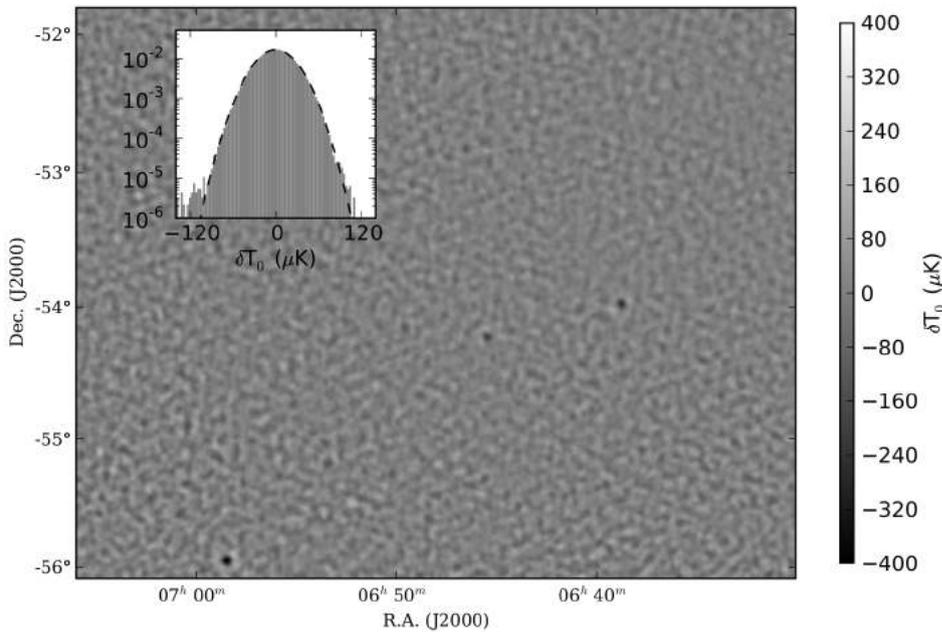


Jones et al 1993
Observation de l'amas de
galaxies A2218 au Ryle
téléscope

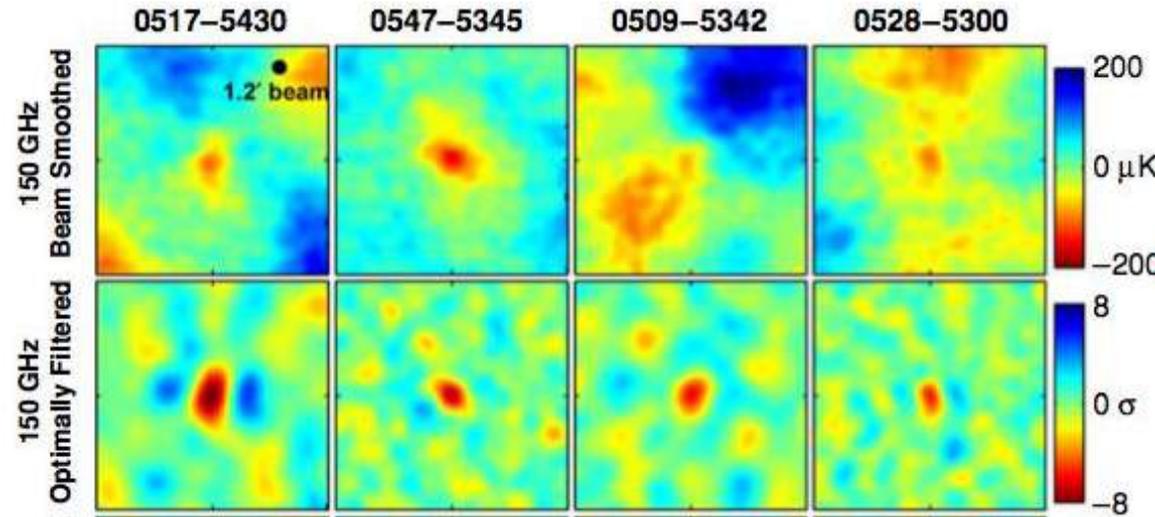


Observation de l'effet SZ

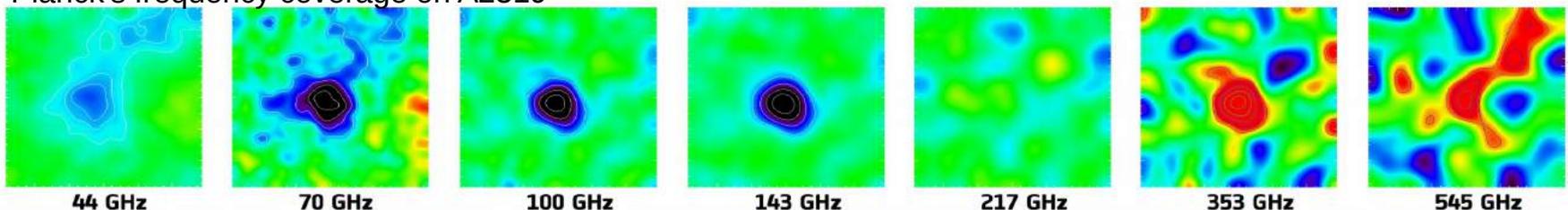
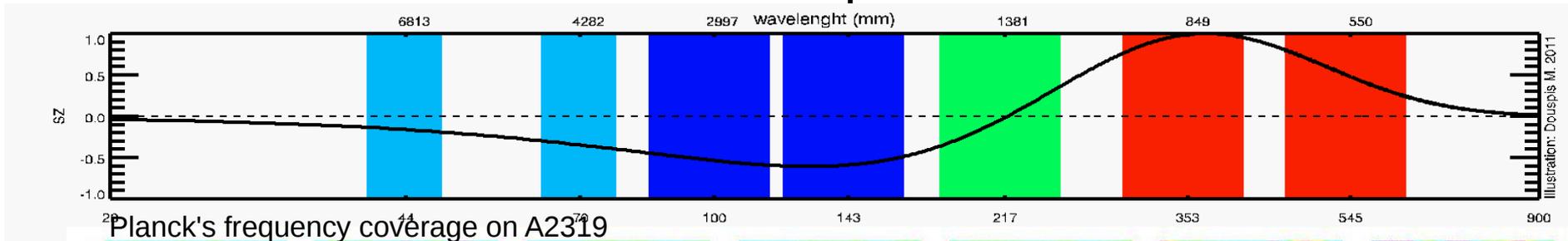
ACT (Marriage et al '10) [$\sim 1.4'$ @148GHz]



Première détection en aveugle avec SPT
(Staniszewski et al '09) SPT [$\sim 1.1'$ @150GHz]



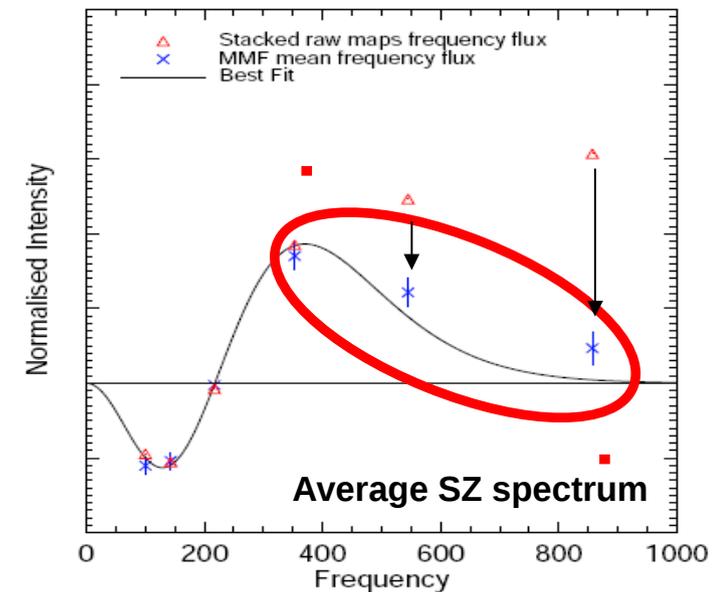
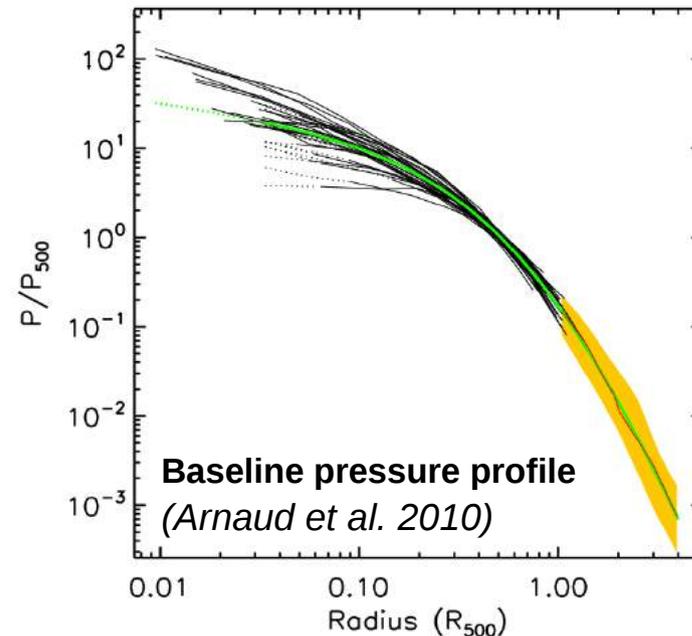
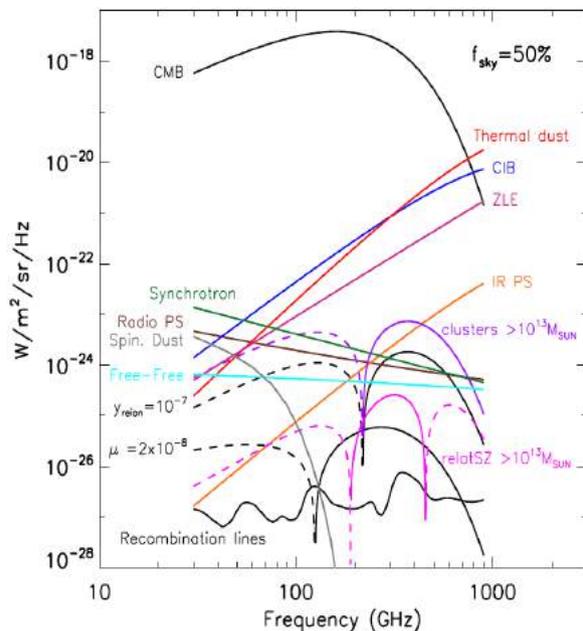
Couverture en fréquence de Planck



Détection de l'effet SZ des amas

Technique de détection adaptée (Matched Multi-Filter (*Melin et al. 2006, 2012*):

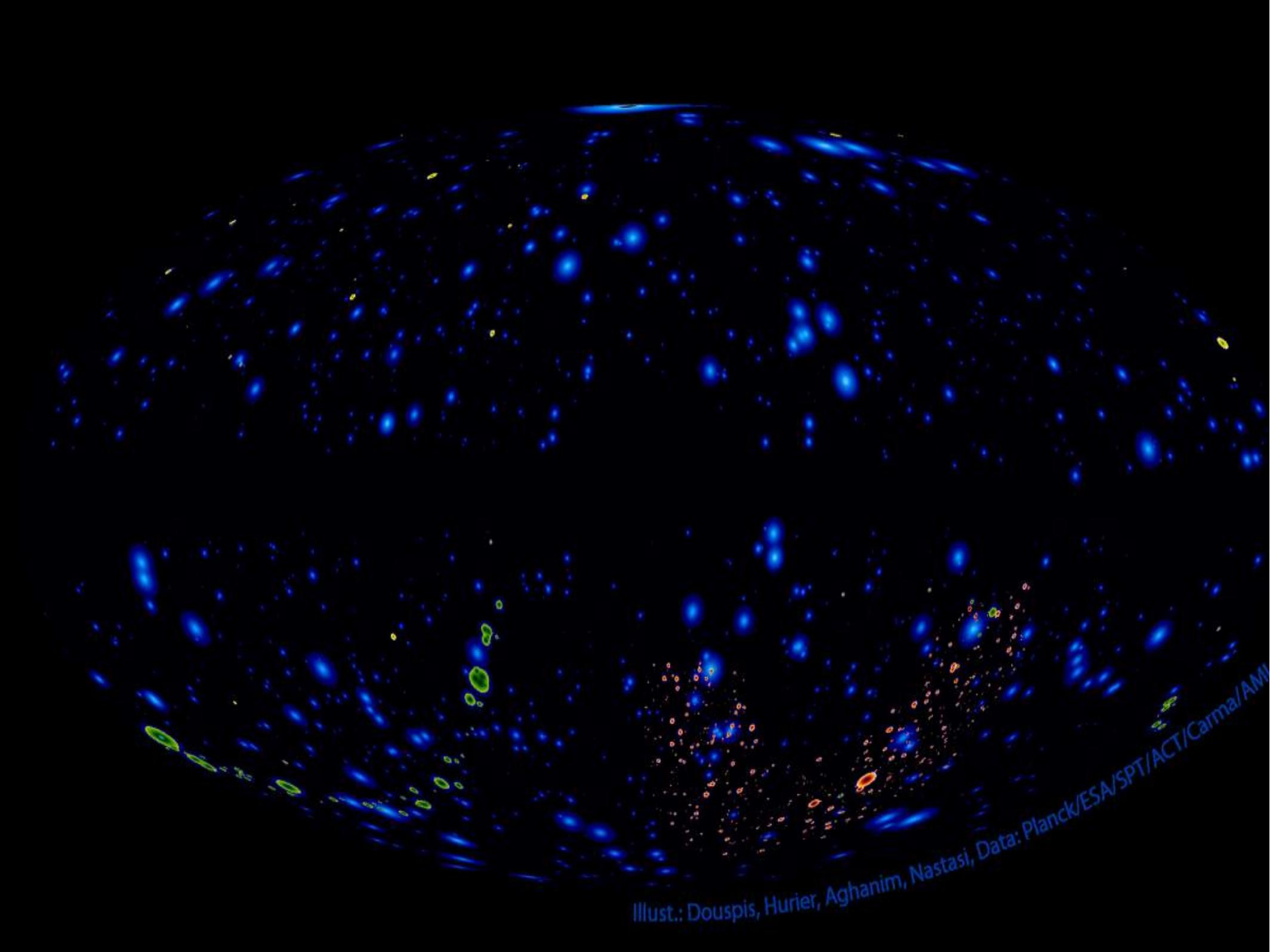
- Spectre connu → non-relativiste SZ
- Forme des amas connue → profil de pression (*Arnaud et al. 2010*)



Courtesy J. Delabrouille

Amas typiques → détectés à ~ 1 sigma par fréquence mais à 5 – 30 sigma en combinant les fréquences
→ SZ enhanced over noise

Trois catalogues: 2011, 2013, 2014
Base de données → **2690** sources SZ incl. **~ 1800** amas



Illust.: Douspis, Hurier, Aghanim, Nastasi, Data: Planck/ESA/SPT/ACT/Carma/AMBA

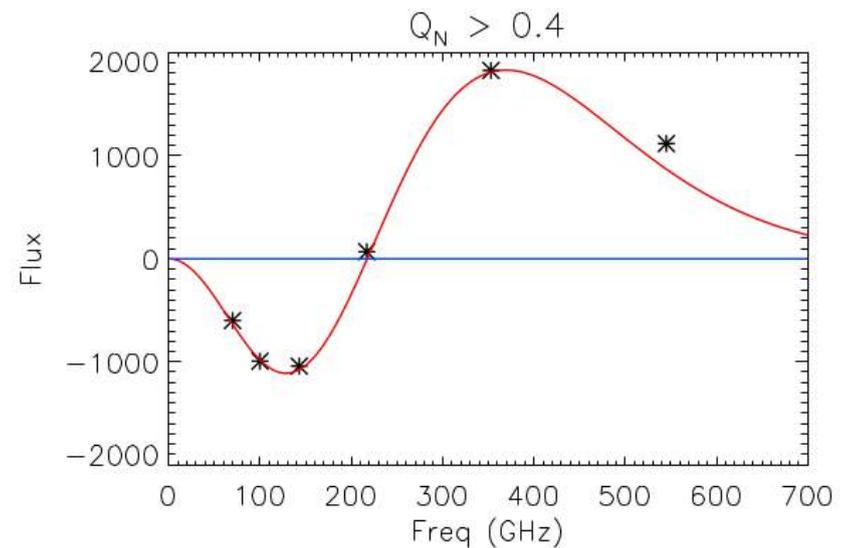
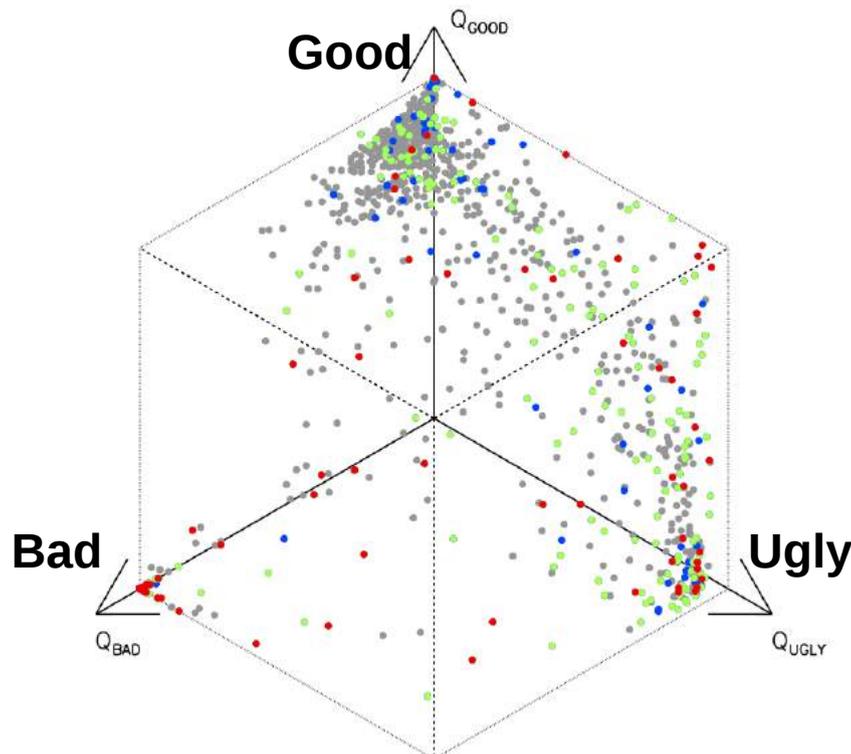
Validation statistique avec l'IA (Réseau de neurones, ANN)

Distinguer les “vraies” des “fausses” sources SZ induites par le bruit et la contamination

Entraînement d'un réseau de neurones:

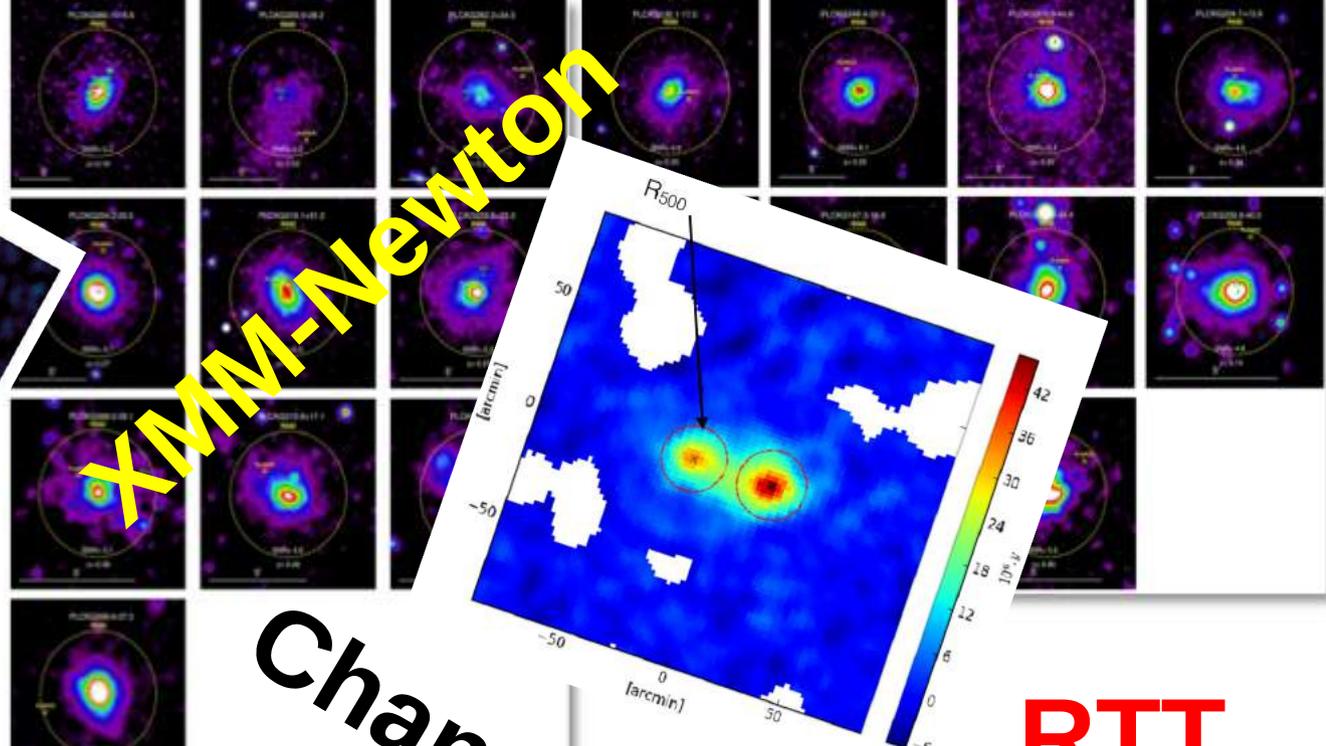
- positions des vrais amas → “vraies” sources SZ: good
- positions des galaxies IR/radio → “fausses” sources SZ dues aux galaxies d'avant-plan
- Positions aléatoires → “fausses” sources SZ dues au bruit de mesure

Critère de qualité pour chaque source SZ: $Q_N < 0.4$ → peu fiables (probablement fausses)



Moyenne du spectre des sources SZ fiables ($Q_N > 0.4$)

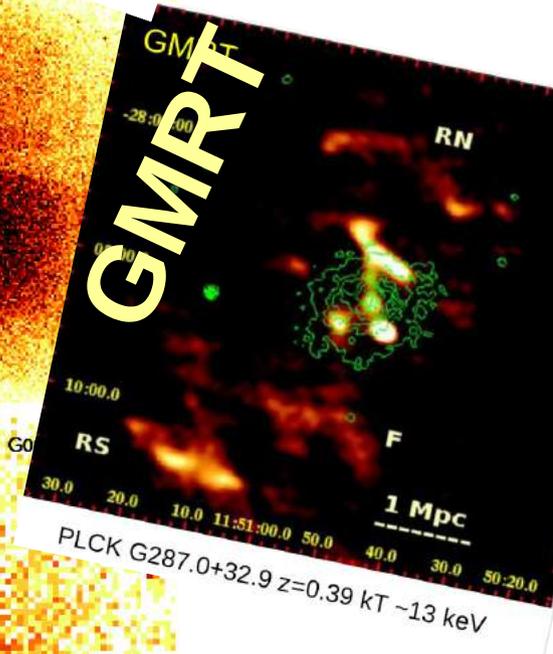
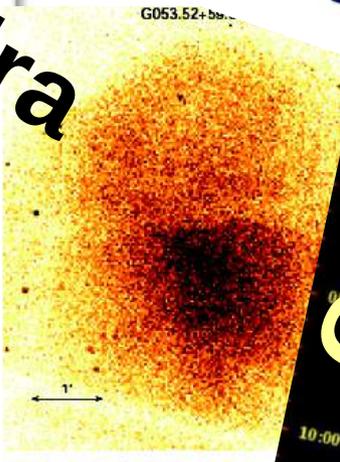
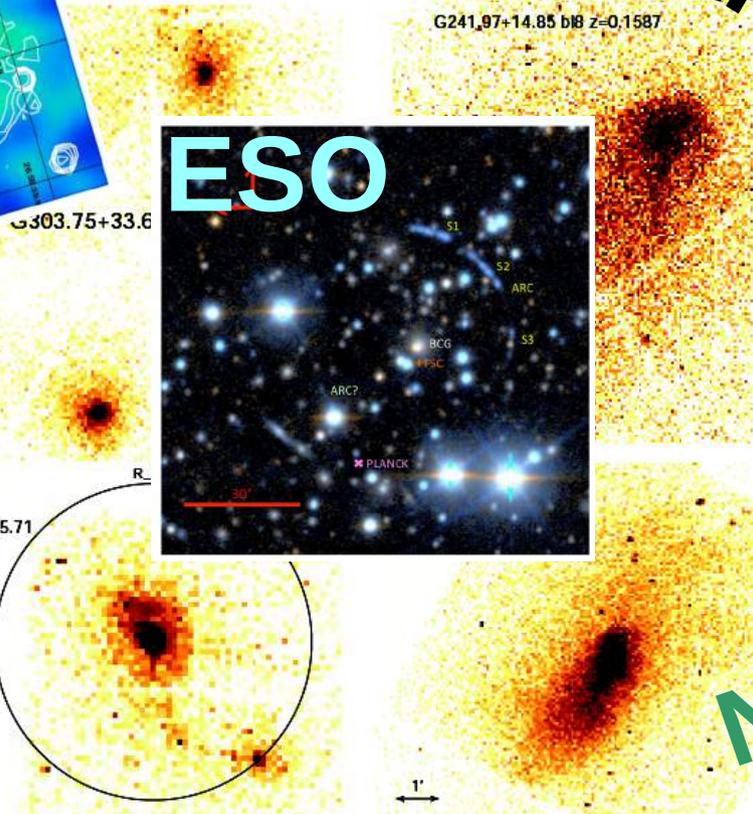
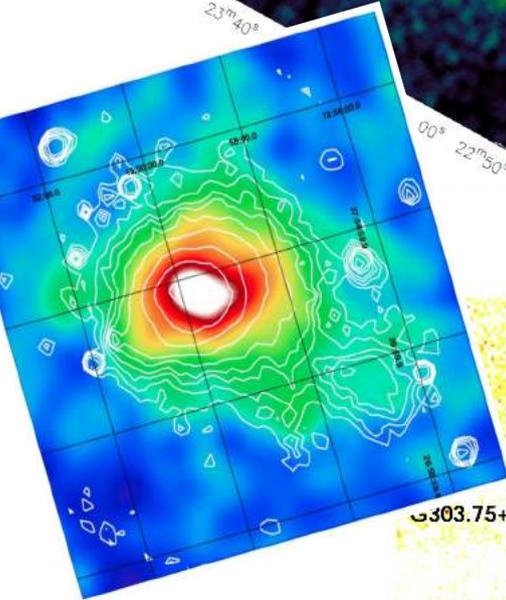
ATCA **AMI**



XMM-Newton

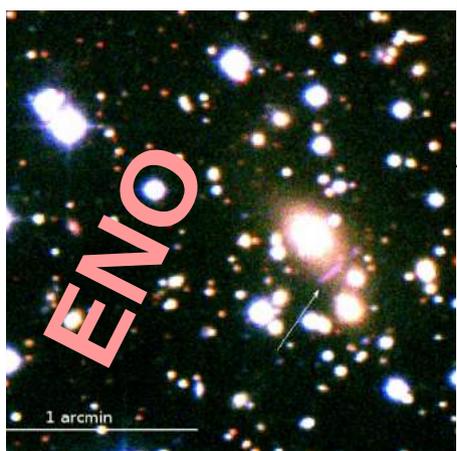
Chandra

RTT

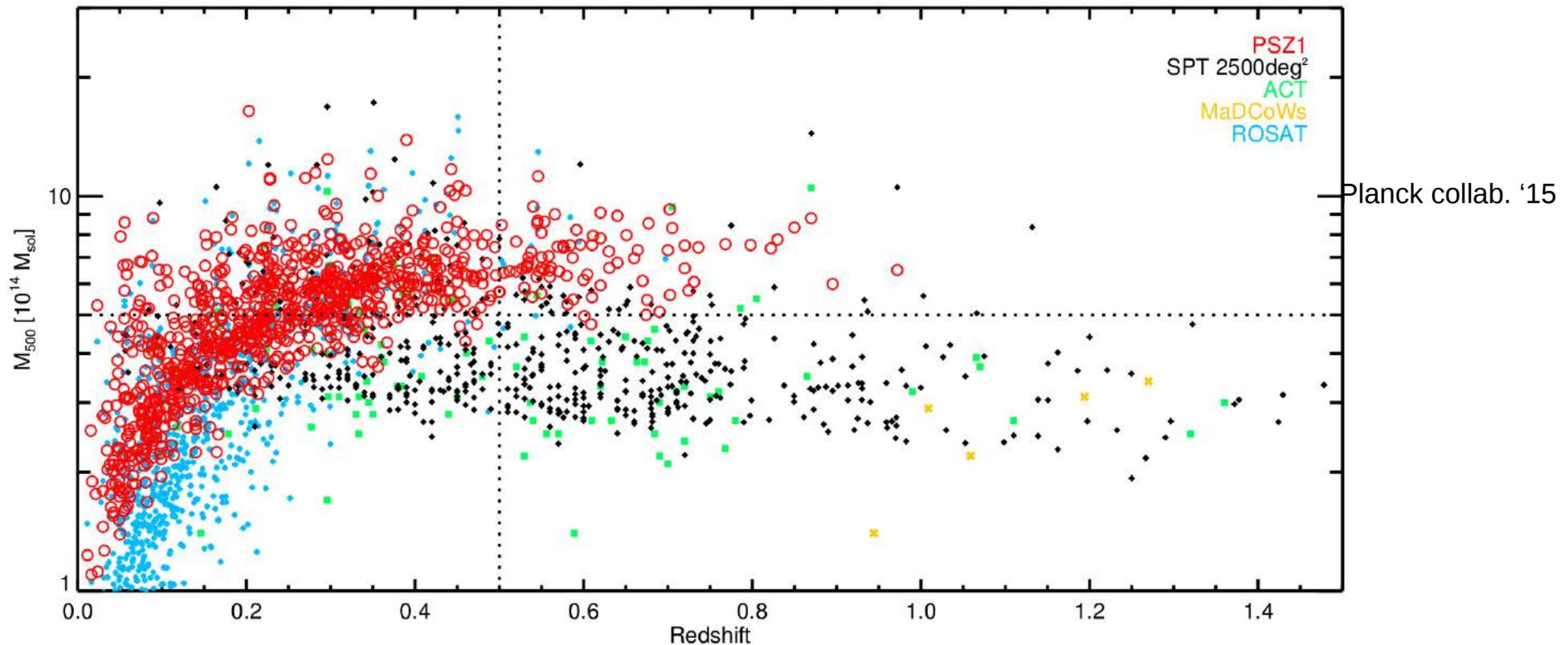


NOT

MPG2.2



Catalogue SZ: propriétés



Le plus grand catalogue d'amas massifs ($< 1.5 \times 10^{15} M_{\text{sun}}$)

$$z_{\text{med}} = 0.3 \ \& \ M_{\text{med}} = 4.3 \times 10^{14} M_{\text{sun}}$$

Distribution dans le plan M–z des amas Planck, autre SZ & X-ray
Planck permet de détecter les amas les plus massifs sur tout le ciel

Quelles sont les propriétés des amas détectés en SZ

Pratiquement tous les amas connus accessibles par Planck ont été détectés.

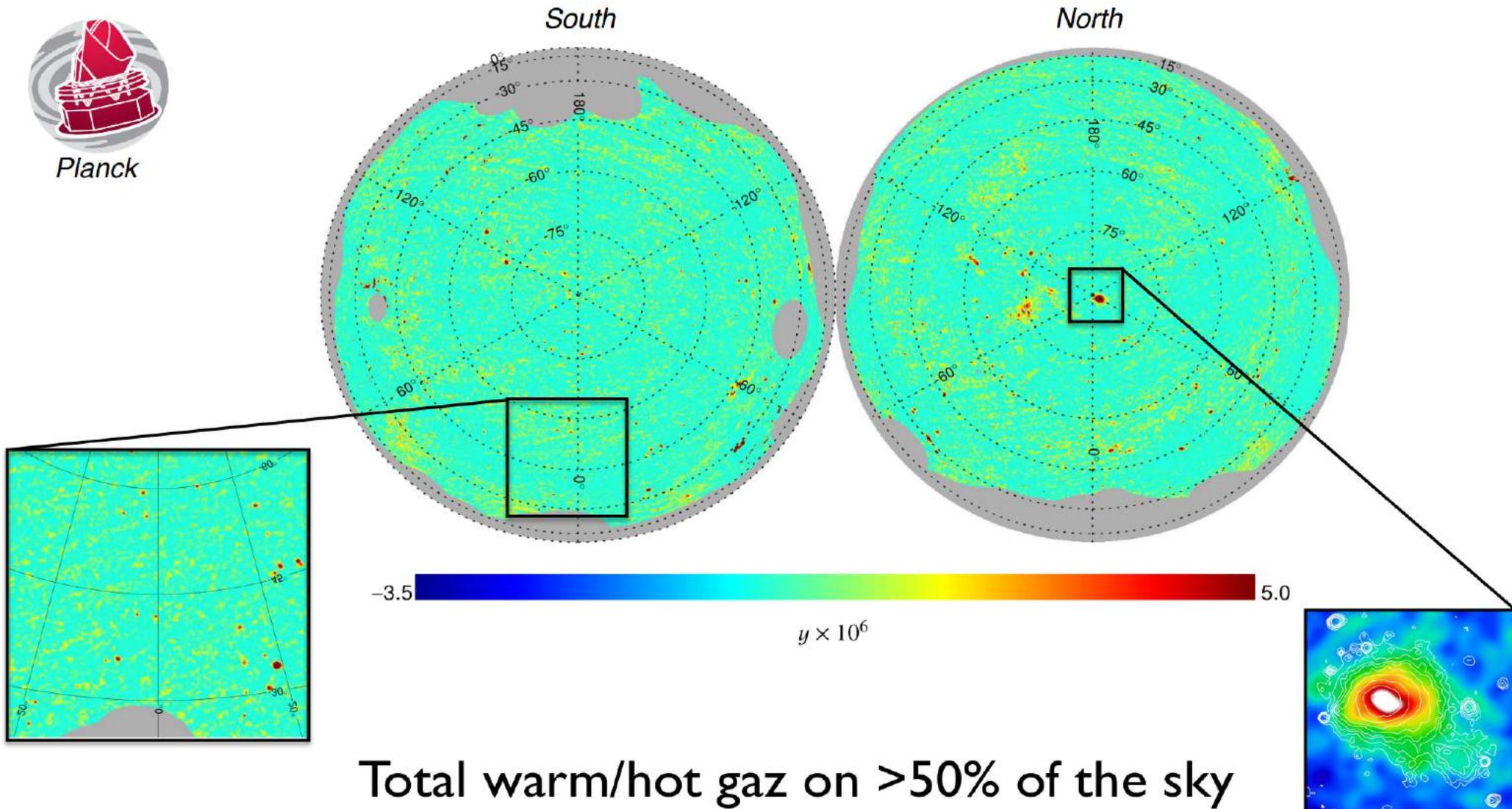
Planck a détecté des centaines de candidats la plus part sont de vrais amas

- Profils de densité sont moins **pentus que dans X-ray** → **amas sous-lumineux** par rapport a leurs masses
- Bon accord entre prédictions (X-ray) et mesures SZ de la pression du gaz
- Grande variété d'états dynamiques → 70% **morphologies perturbées** & 14% **systèmes multiples**
- Plus petite fraction (~30-40%) d'amas à coeurs froids que dans les catalogues X-ray
- 80% d'amas massifs hérgent un **radio halo** pour les catalogues SZ par rapport aux ~40% dans les catalogues X-ray

Nombreuses questions: Sélection? Effets physiques? Mesures SZ?

Détection de l'effet SZ tout-le-ciel

Séparation de composantes



Cosmologie avec l'effet SZ:

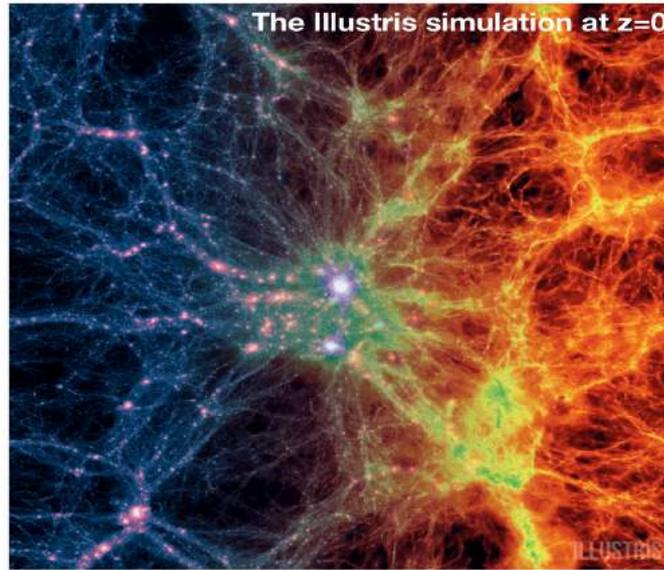
→ Distribution du gaz “chaud” dans
tout l'univers

A la recherche des baryons cachés
(manquants)

Une toile cosmique de galaxies

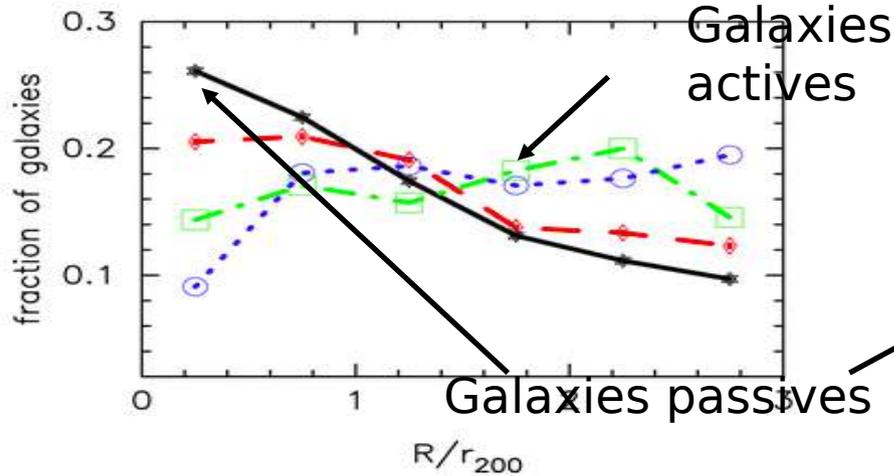
Matière
noire

Galaxies

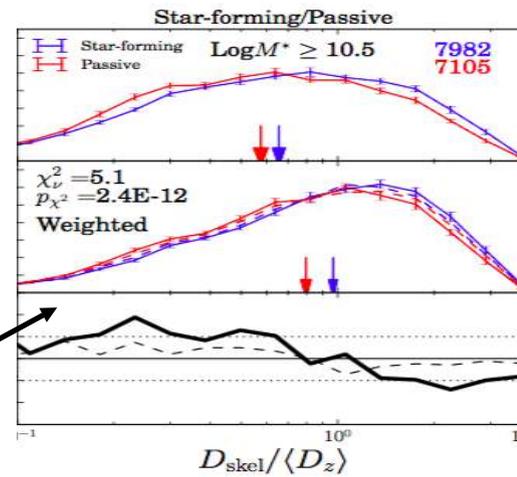


Toile cosmique: VIPERS,
Malavasi+ '17

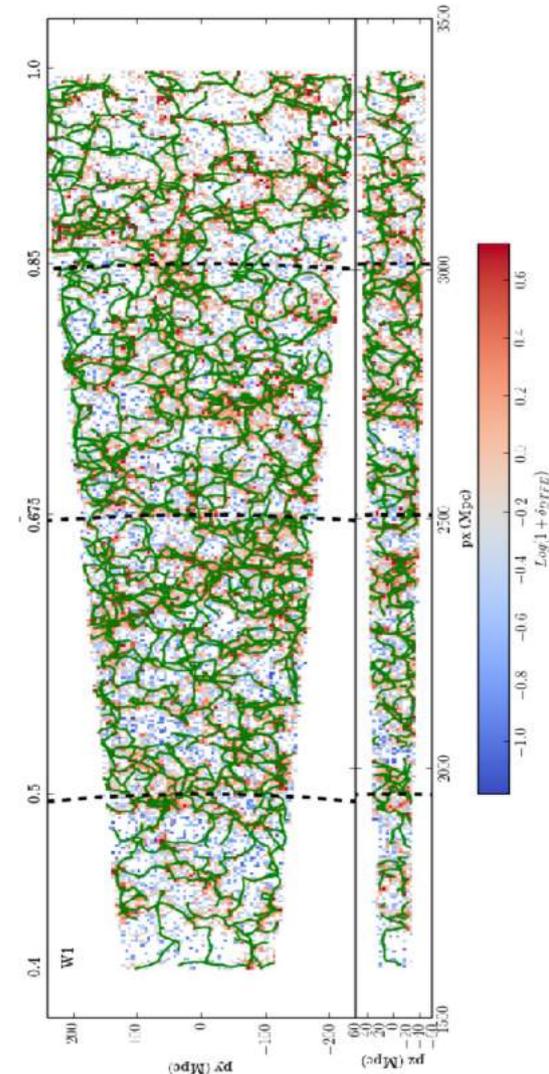
Galaxies dans les amas ... et filaments



Mahajan+ 09

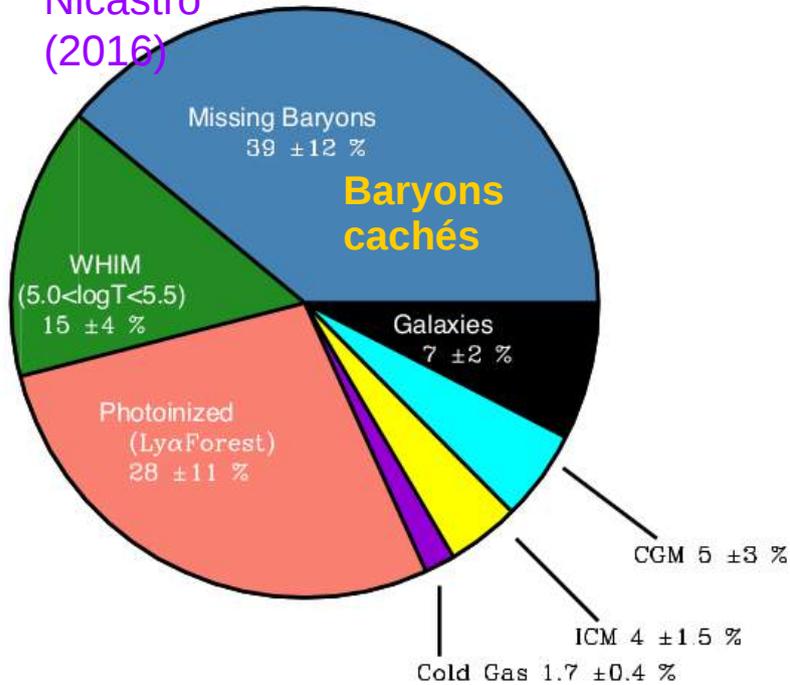


Malavasi+ '17



Une toile cosmique de gaz

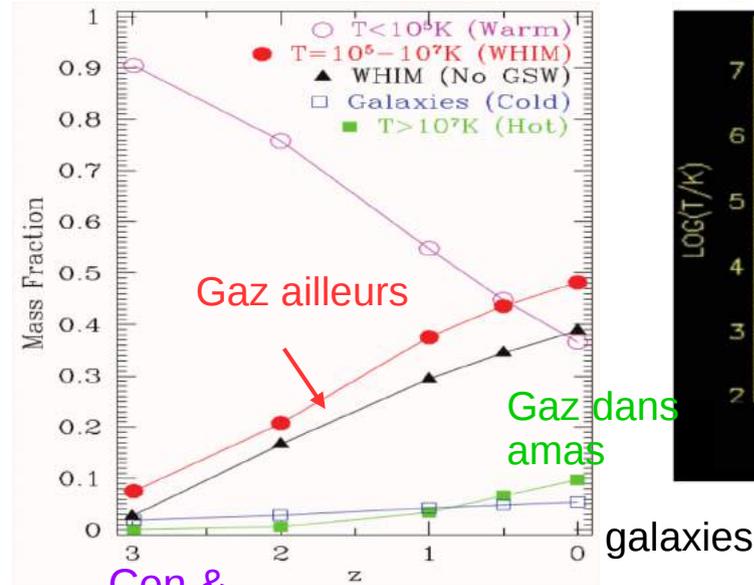
Nicastro
(2016)



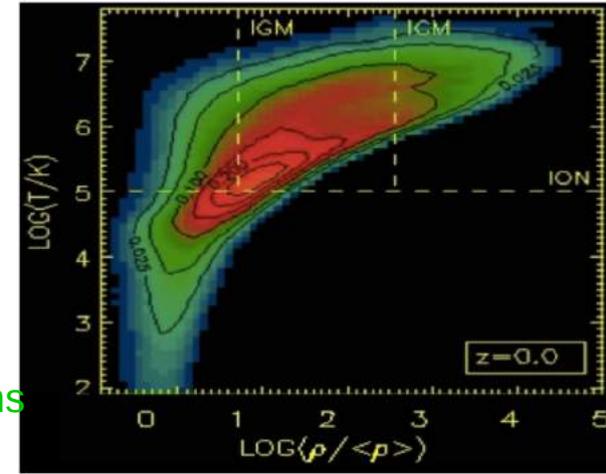
~40% des baryons prévus non-observés dans l'univers local

→

Sous forme de gaz ionisé
"chaud" ou d'objets faibles masses dans la toile cosmique



Cen &
Ostriker '06

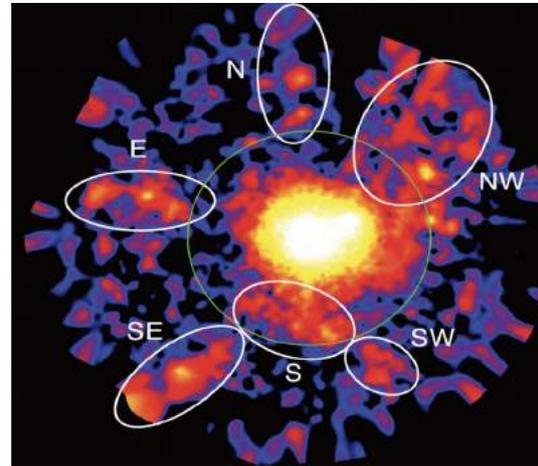
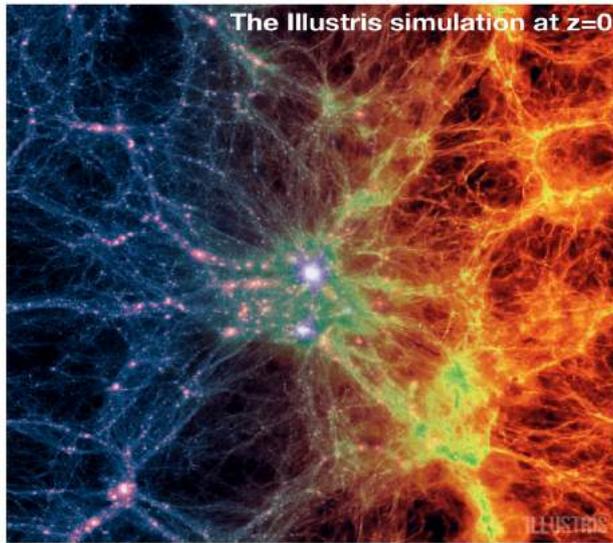


CLEF sim: Da Silva &
NA '04

Température/densité dans simulations hydrodynamiques indiquent de grandes fractions de baryons:

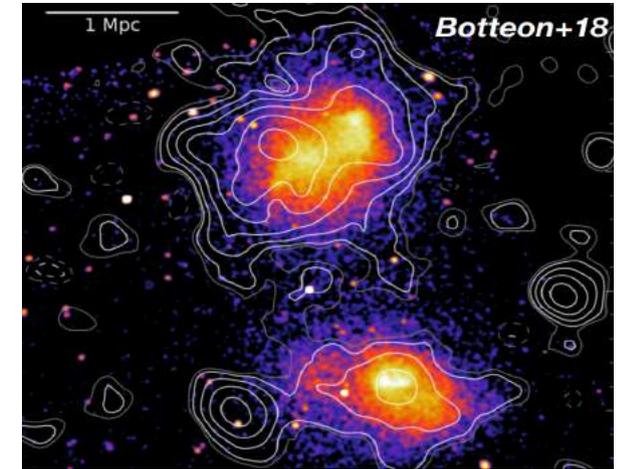
- dans la toile cosmique en dehors des objets liés
- avec des densités $\sim 10^{-4}$ - 10^{-2} densité cosmique moyenne
- température $10^5 - 10^7$ K → "Warm-Hot Intergalactic Medium" (WHIM)

Une toile cosmique de gaz



A2744

Eckert+ 15



A1758

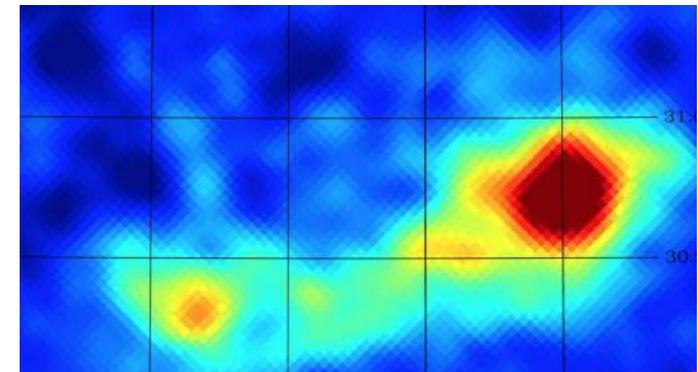
Filaments & Ponts sont détectés notamment en X-rays et SZ

Que sont ces filaments et ponts?

Quelle est la connection entre ponts et parties externes des amas?

Sont-ils fait de gaz intra-amas ou de WHIM?

Comment tracent-ils les processus non-thermiques, e.g. turbulence et/ou rayons cosmiques?



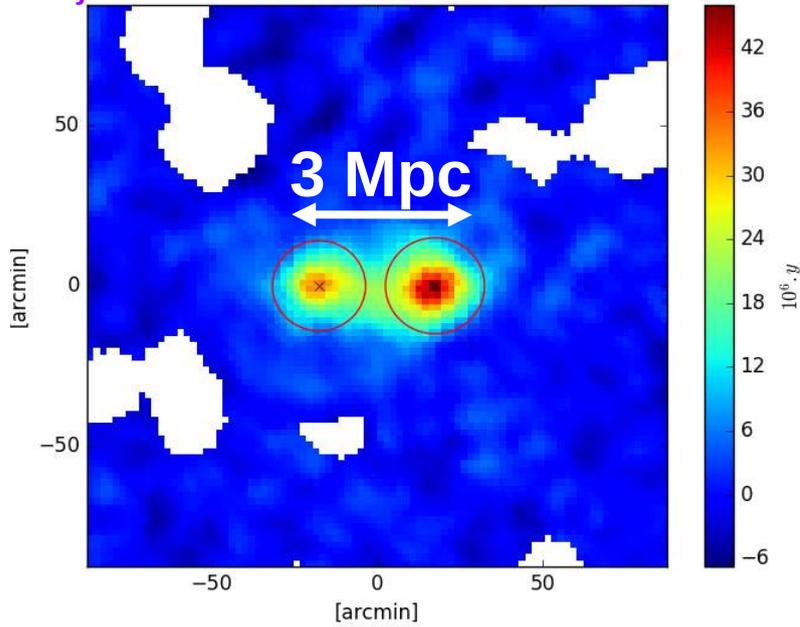
Superamas Shapley Planck collab. '13,'15

Ponts: Une paire exceptionnelle

A399-A401

Fujita et al. 1996
 Sakelliou et al. 2004
 Fujita et al. '08
 Planck collab. '13
 Akamatsu et al. '17
 Bonjean et al. '18

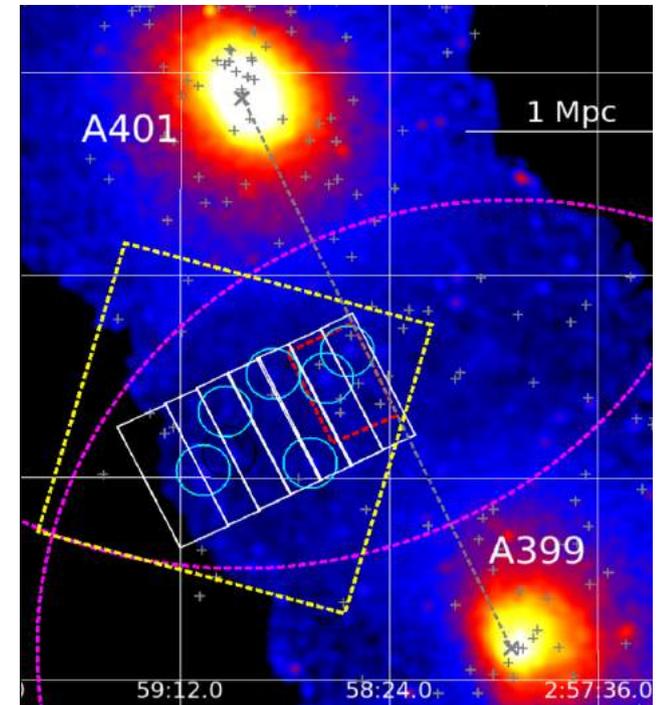
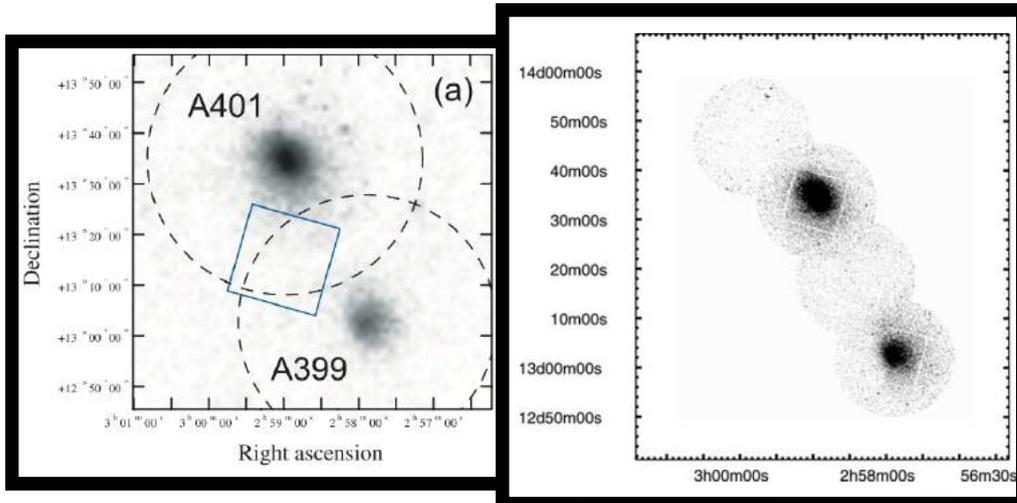
Bonjean+ '18



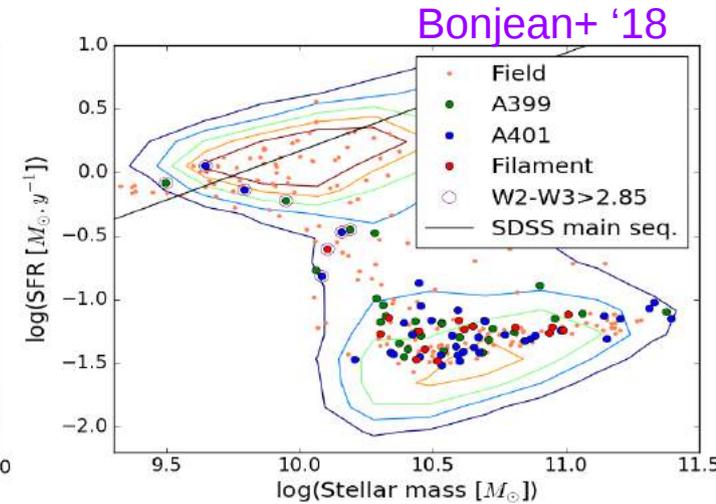
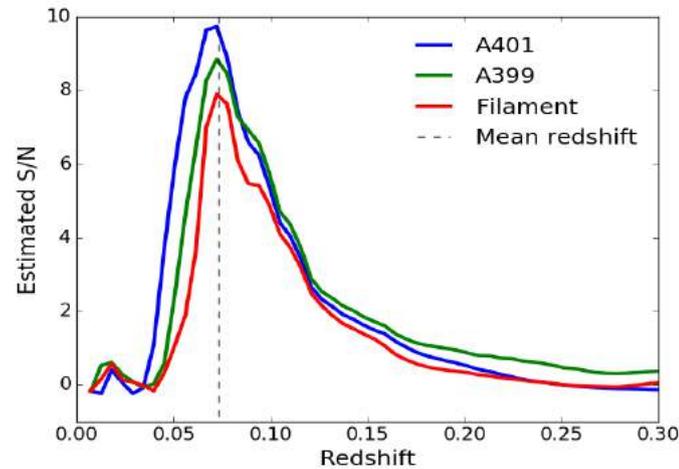
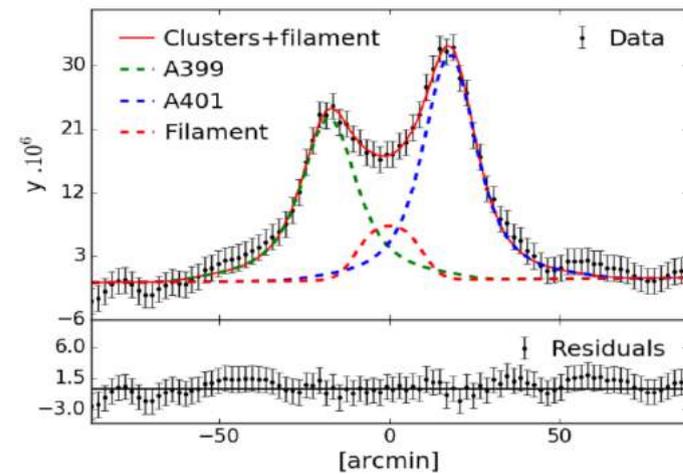
$z \sim 0.073$, in
 Planck
 $S/N_{\text{fil}} = 8.7$

Caractérisation détaillée de la
 matière entre les amas

Akamatsu+ '18



Ponts: Une paire exceptionnelle A399-A401



Géométrie $\sim 3\text{Mpc}$ long
 $\sim 1.1\text{Mpc}$ profondeur

Signal SZ de Planck

$$P_0 = (2.8 \pm 0.27) \times 10^{-3} \text{ keV cm}^{-3}$$

X-ray de SUZAKU:
 métallicité; écart température
 isotherme

$$T_e = 6.5 \pm 0.5 \text{ keV}$$

$$n_e = (4.3 \pm 0.7) \times 10^{-4} \text{ cm}^{-3}$$

Surdensité de galaxies $\rightarrow S/N_{\text{fil}} \sim 8$

Formation stellaire & masse stellaire calculées
 avec de l'IA

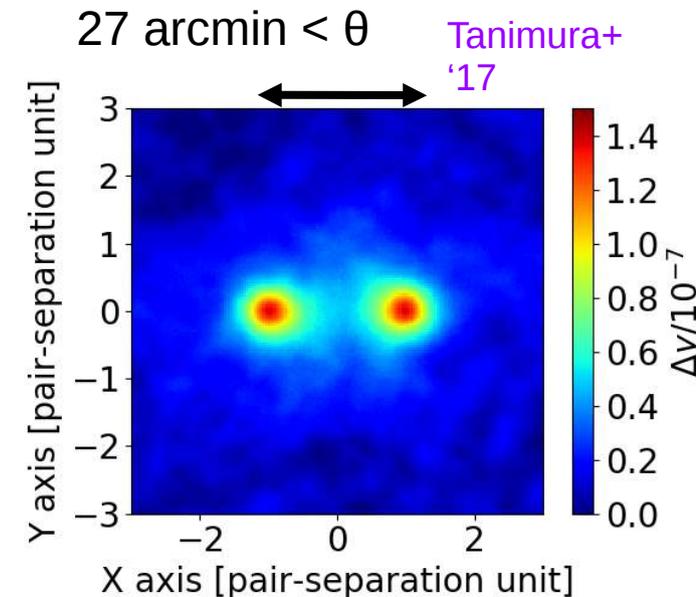
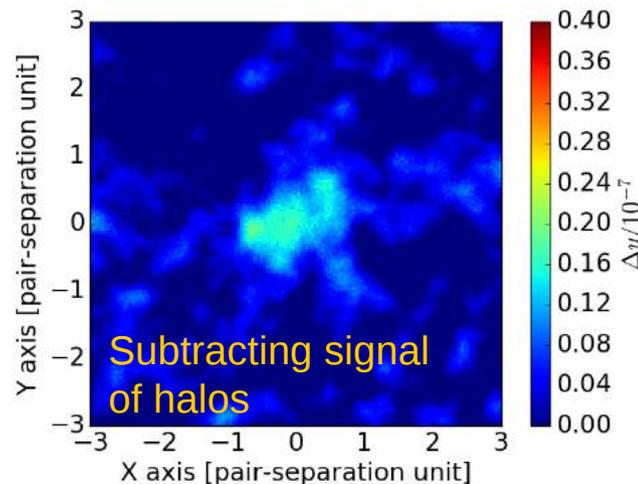
Pas de ségrégation \rightarrow Galaxies du pont et de
 l'amas sont passives

Simulations \rightarrow 50% des particules de gaz du
 pont proviennent des régions externes d'amas
 Choc perpendiculaire à l'axe de fusion? Choc
 d'accrétion de matière sur le pont?

Ponts/filaments: Statistique des paires

Empilement 260,000 paires de galaxies (6 - 10 Mpc/h): centres des amas ($0.05 < z < 0.40$, $M > 10^{11.3} M_{\text{sun}}$)

Signal SZ signal entre galaxies \rightarrow
 $y = 1.31 \times 10^{-8} (\sim 5.3\sigma)$



Accord avec simulations \rightarrow
 $y = (0.84 \pm 0.24) \times 10^{-8}$

Filaments cylindriques (rayon r_c); température (T_e); profil densité des simulations \rightarrow surdensité au centre $\delta \sim 3.2 \pm 0.6$

Empilement des masses des effet de lentilles gravitationnelles $\rightarrow \delta \sim 4$

Superamas: Statistiques

Empilement 689 superamas de Liivamägi+ '12 avec $z < 0.2$; rayon moyen $R_{sc} \sim 18 \text{ Mpc}/h$ (2.5 deg)

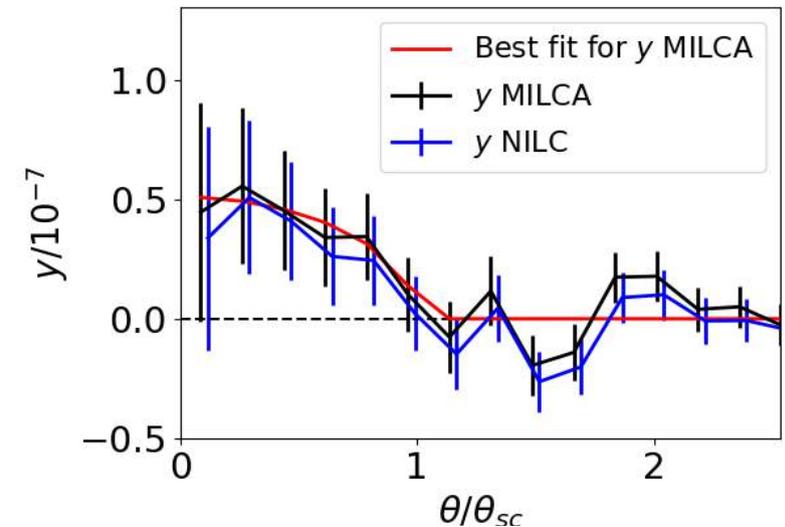
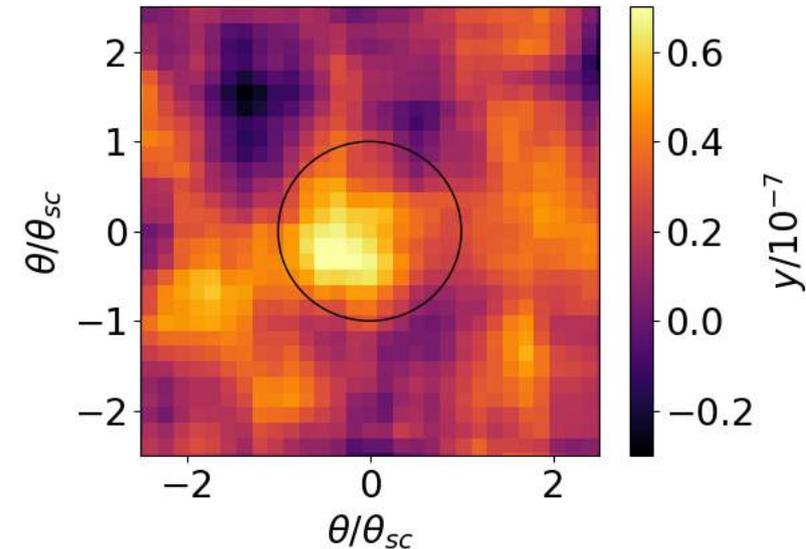
Amas $M > 10^{13} M_{\text{sun}}$ masques jusqu'à $3 \times R_{500}$

Signal SZ des baryons interamas dans les superamas: 2.5σ

Budget de baryons? Profil SZ moyen ajuste avec un modèle de gaz interamas isotherme et à densité constante

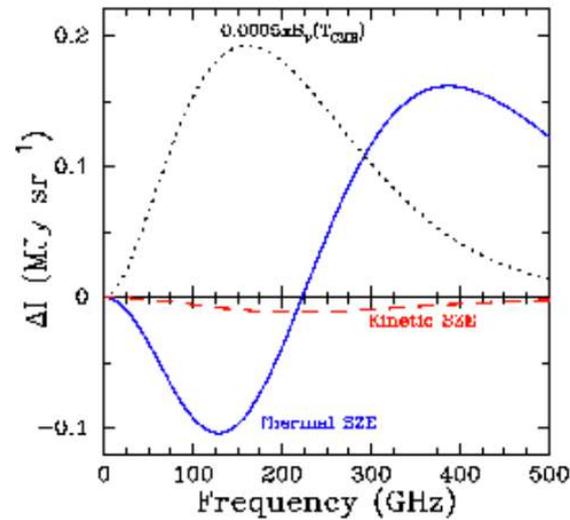
Gaz interamas dans les superamas pourrait rendre compte de $\sim 16 - 40\%$ des baryons cachés

→ La fourchette traduit les limites du modèle de gaz dans les superamas

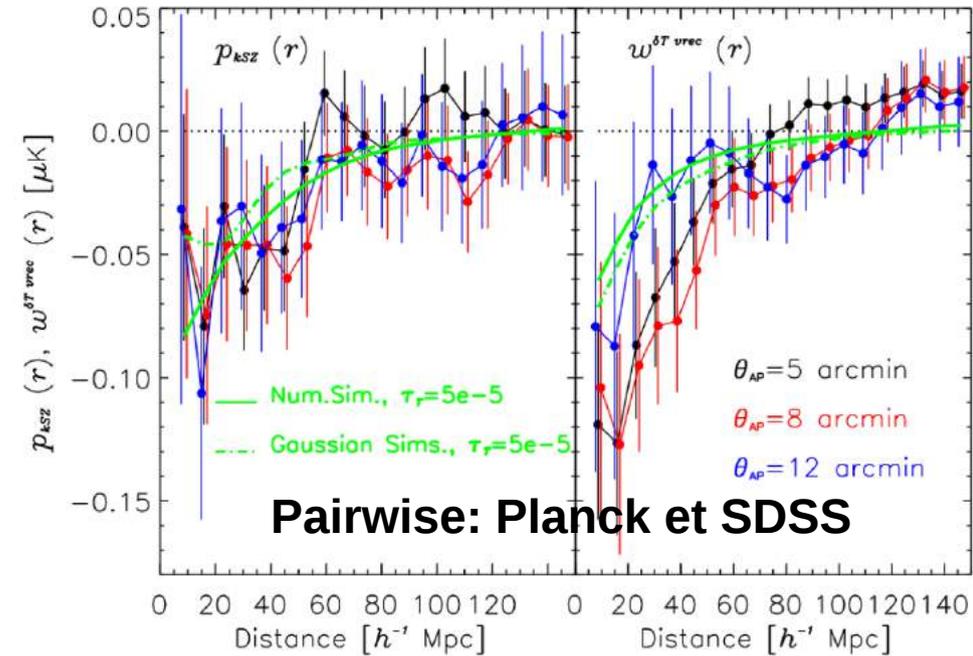


Gaz chaud avec l'effet SZ cinétique (kSZ)

Hernandez-Monteagudo et al. '15

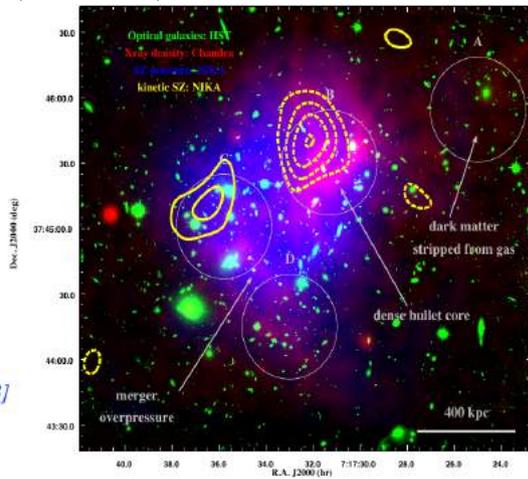


Effet Doppler des photons du CMB lié aux vitesses particulières des structures
 → Spectre de corps noir comme le CMB

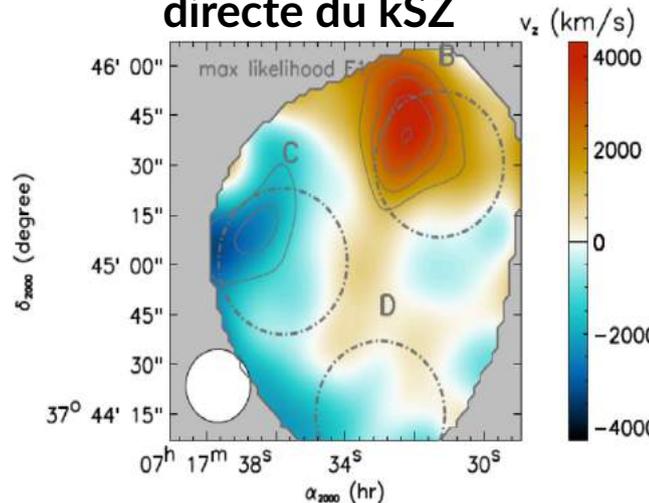


Pairwise: Planck et SDSS

Amas: MACS J0717-3745 ($z \sim 0.54$)

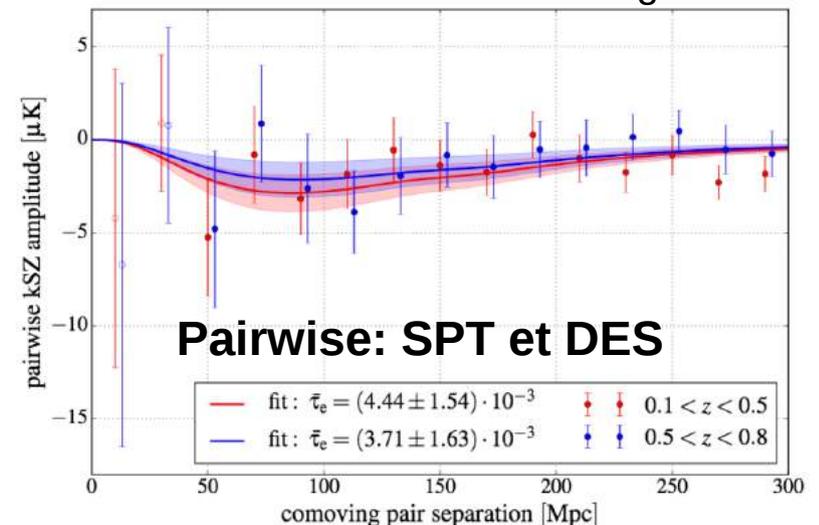


Première cartographie directe du kSZ



Adam & NIKA collab. '16

Soerge et al. '16



Pairwise: SPT et DES

Cosmologie avec l'effet SZ:

→ indépendant du redshift/distance

Tester l'expansion adiabatique de
l'univers avec les amas SZ

Tester l'expansion adiabatique: évolution de T_{CMB}

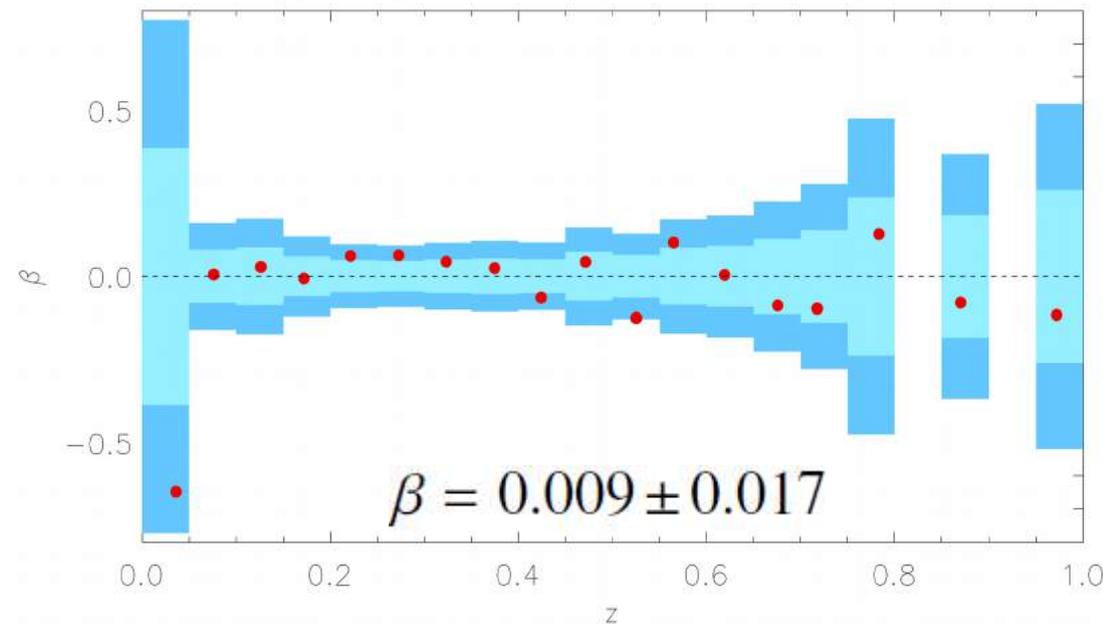
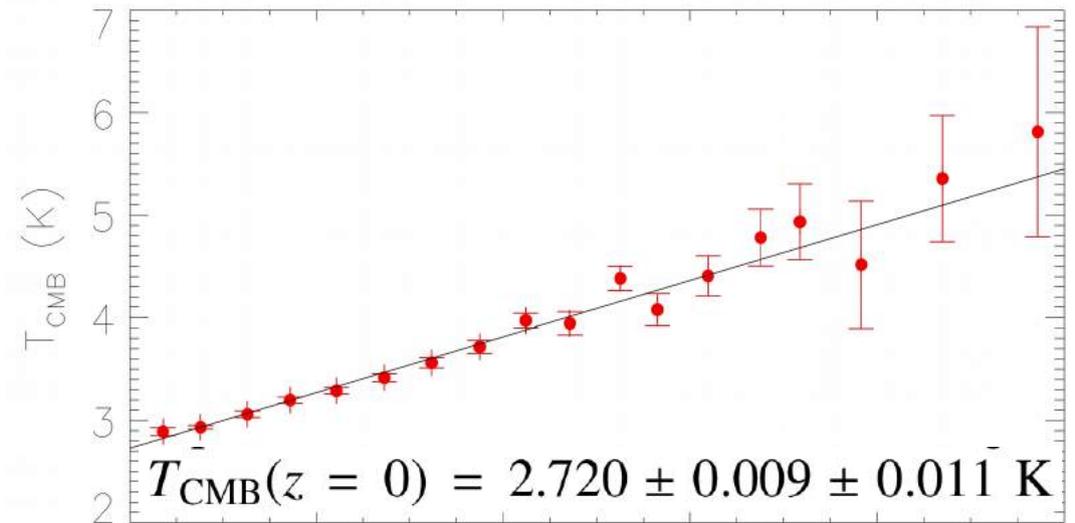
- Expansion adiabatique
Variation des constantes
fondamentales ou non-
conservation des photons (e.g.
décroissance de l'énergie noire)

$$T_{\text{CMB}}(z) = T_{\text{CMB}}(z = 0) (1 + z)^{1-\beta}$$

SZ (e.g. Rephaeli '95, Batistelli et al. '02) avec
un petit nombre d'amas
Planck: 813 amas ($z < 1$); 20
tranches

T_{CMB} tracée (non-ajustée) au cas
expansion adiabatique $T_0 = 2.726\text{K}$
Mesure de β

Hurier et al. '13



Tester l'expansion adiabatique: évolution de T_{CMB}

$\beta = 0.009 \pm 0.017$ 813 amas Planck
(Hurier et al. '13)

$\beta = 0.017 \pm 0.003$ 158 amas SPT
(Saro et al. '14)

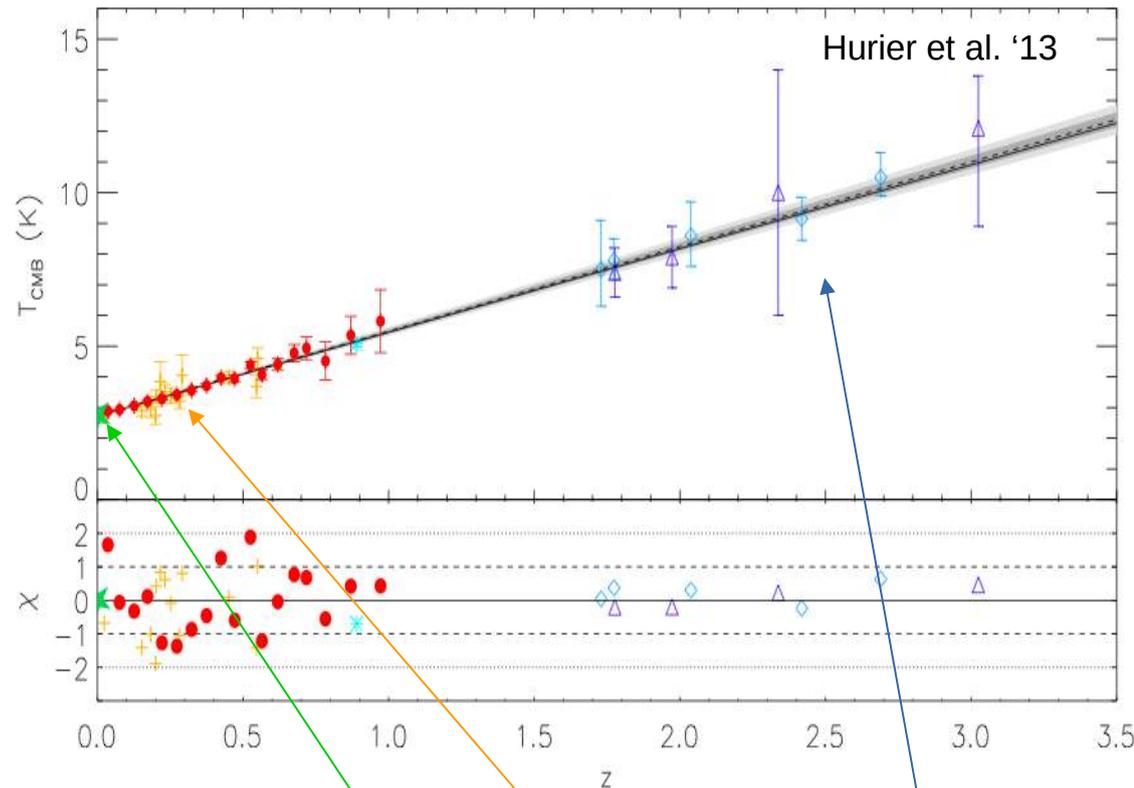
$\beta = 0.022 \pm 0.018$ 104 amas Planck
(Luzzi et al. '15)

+ contraintes des raies
atomiques/moléculaire $z > 1$

$\beta = 0.006 \pm 0.013$

Contraintes les plus fortes sur
l'écart à une loi linéaire

**Accord avec expansion
adiabatique**



SZ clusters
(Battistelli et al. '02,
Luzzi et al. '09)

COBE/FIRAS
(Fixen et al. '09)

Molecular species
(Mueller et al. '13,
Noterdaeme et al. '11)

Cosmologie avec l'effet SZ:

→ détection d'amas représentatifs
de la statistique de population

Mesure des paramètres
cosmologiques avec les amas SZ

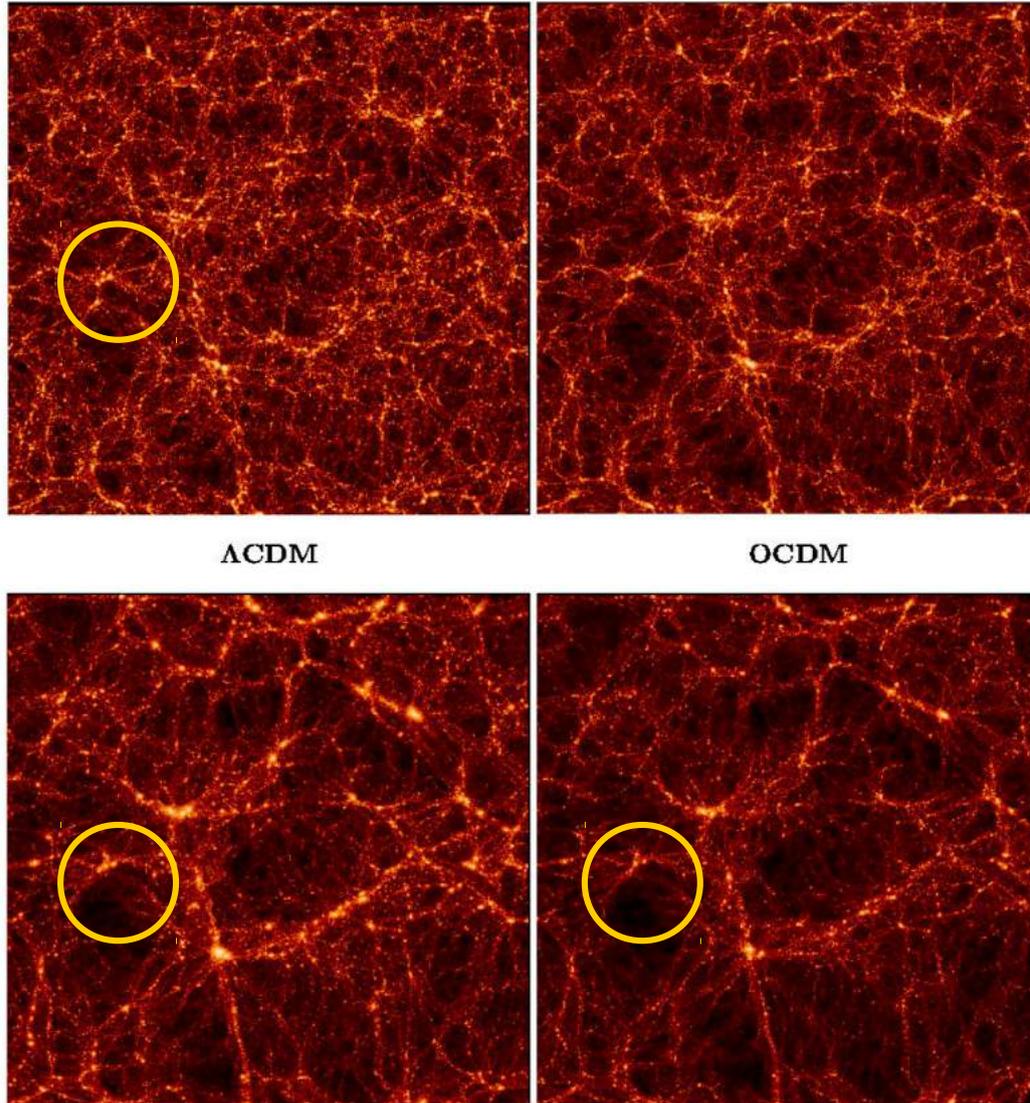
Paramètres cosmologiques avec l'abondance des amas

SCDM

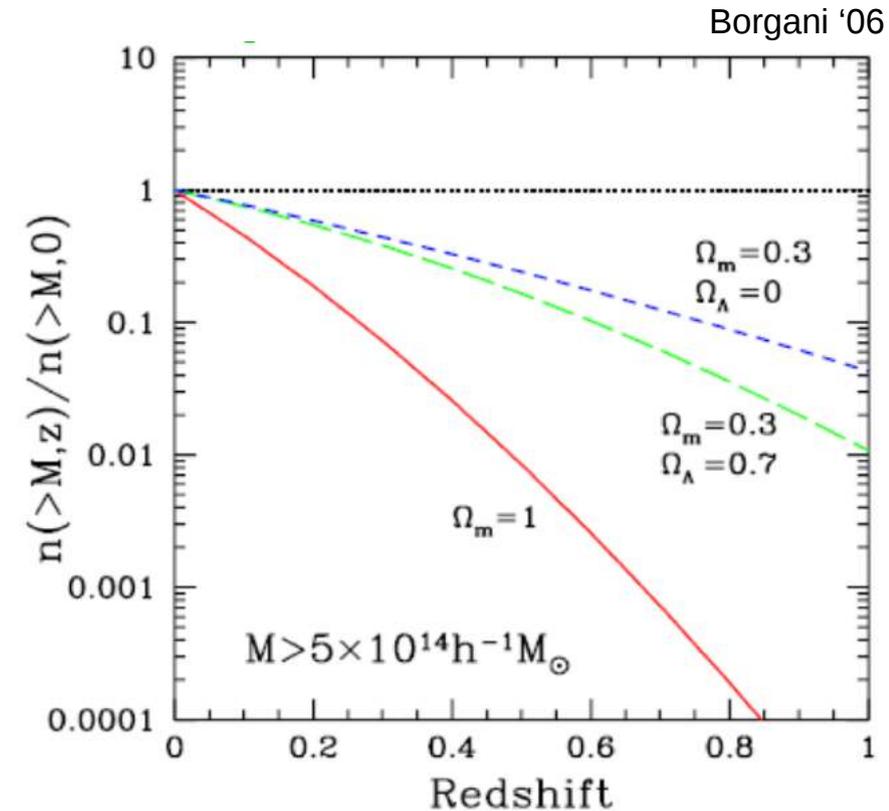
τ CDM

Λ CDM

OCDM



Virgo consortium



Abondance & évolution de la distribution en masse → fortes contraintes sur les paramètres cosmologiques : normalisation, dark matter, dark energy, neutrino, etc.

Paramètres cosmologiques avec l'abondance des amas

Comparer la distribution observée avec les prédictions des modèles cosmologiques

Vraisemblance: Probabilité de l'abondance observée étant donnée la prédiction de la théorie/modèle

$$\frac{dN}{dz} = \int d\Omega \int dM_{500} \hat{\chi}(z, M_{500}, l, b) \frac{dN}{dz dM_{500} d\Omega}$$

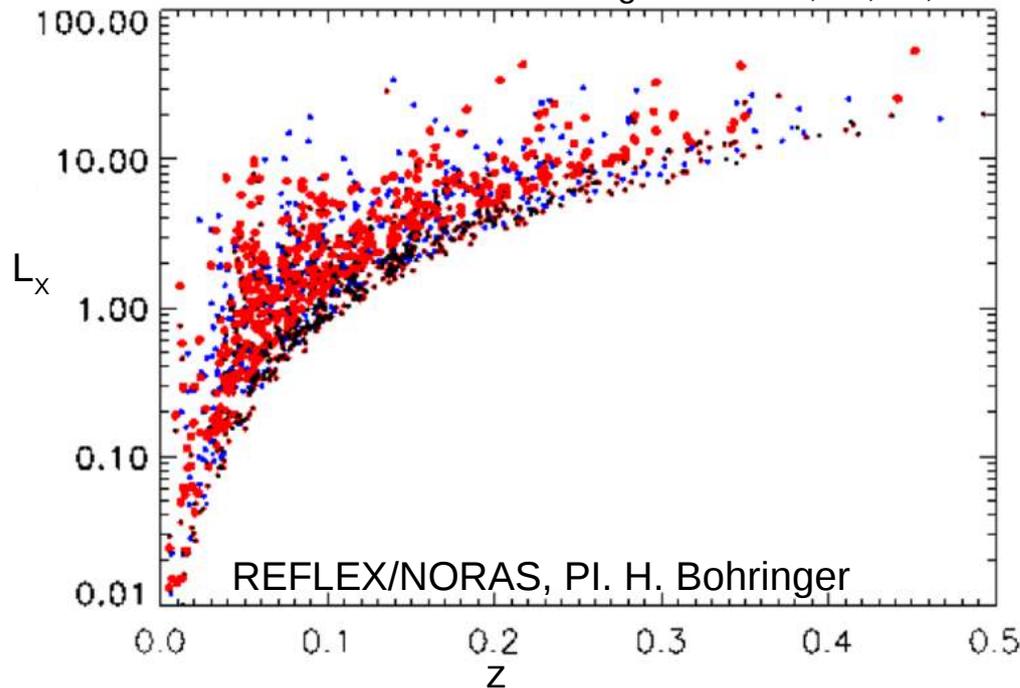
Fonction de masse théorique: nombre de DM (matière noire) halos à partir des simulations

Fonction de sélection de l'échantillon: construite des catalogues & des caractéristiques du relevé (bruit, couverture, etc.)

Relations d'échelle: reliant observable (SZ, X-ray, optique) et halo DM

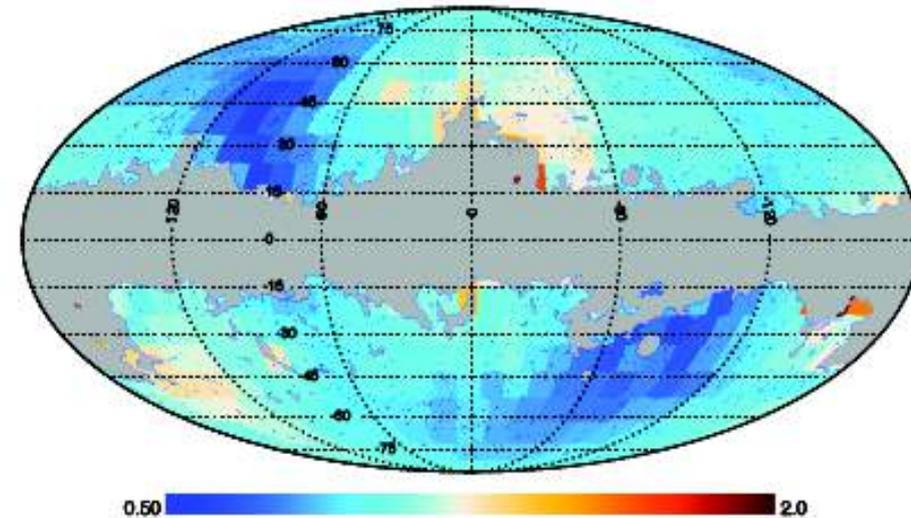
Paramètres cosmologiques avec l'abondance des amas: Sélection de l'échantillon

Bohringer et al. '00, 01, 04, 12



Sélection des amas en X-ray affectée par les effet de distance
Sur-représentation d'amas à coeur froid

Carte de bruit en terme de $2.4 \cdot 10^{-4}$ arcmin²



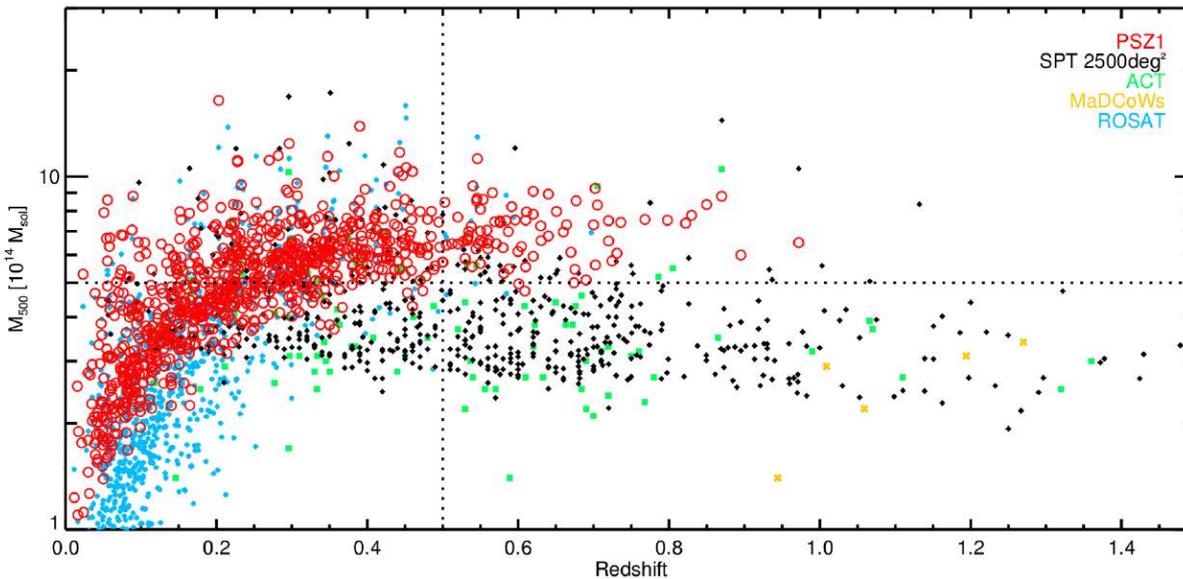
Planck collab. '14

Bruit inhomogène/échelle-dépendant → Structure du relevé dépend de la détection des amas taille du filtre & position sur le ciel

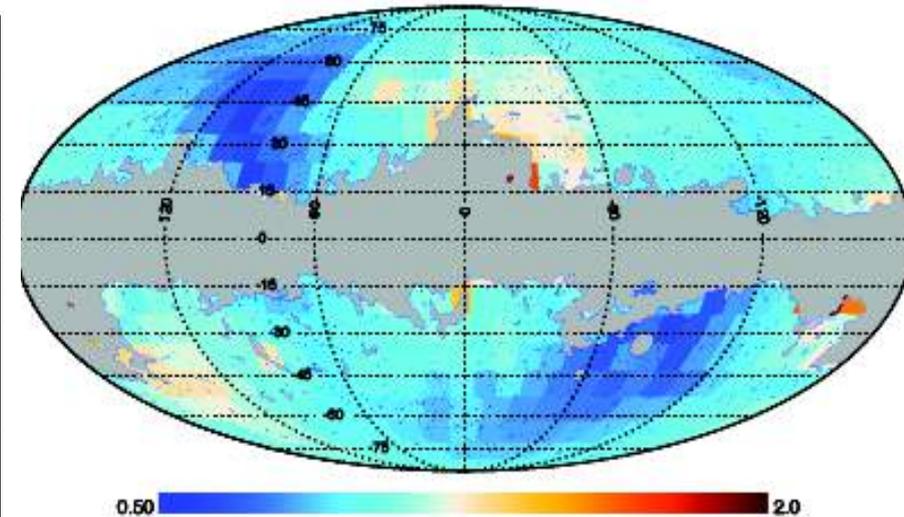
$$\chi_{\text{erf}}(Y_{500}, \theta_{500}, l, b) = \frac{1}{2} \left[1 + \text{erf} \left(\frac{Y_{500} - X \sigma_{Y_{500}}(\theta_{500}, l, b)}{\sqrt{2} \sigma_{Y_{500}}(\theta_{500}, l, b)} \right) \right]$$

Cosmological parameters with counts: Selection of the cosmology sample

Planck collab. '15



Carte de bruit en terme de $2.4 \cdot 10^{-4}$ arcmin²



Planck collab. '14

Sélection des amas en SZ non affectée par les effet de distance → Sélection sur la masse

Planck: Catalogue tout-ciel d'amas massifs → Moins sensibles aux modèles de gaz et plus sensibles au modèle cosmologique

Bruit inhomogène/échelle-dépendant → Structure du relevé dépend de la détection des amas taille du filtre & position sur le ciel

$$\chi_{\text{erf}}(Y_{500}, \theta_{500}, l, b) = \frac{1}{2} \left[1 + \text{erf} \left(\frac{Y_{500} - X \sigma_{Y_{500}}(\theta_{500}, l, b)}{\sqrt{2} \sigma_{Y_{500}}(\theta_{500}, l, b)} \right) \right]$$

Paramètres cosmologiques avec l'abondance des amas: Relations d'échelle

Physique complexe mais hypothèses simples pour calculer les masses :

- Equilibre hydrostatique
- Pas de pression relativiste, ni de champs magnétiques, etc

Pas de structures multiples en température

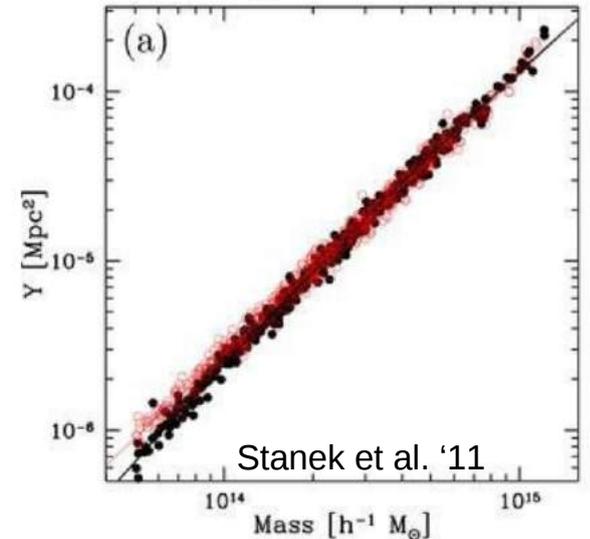
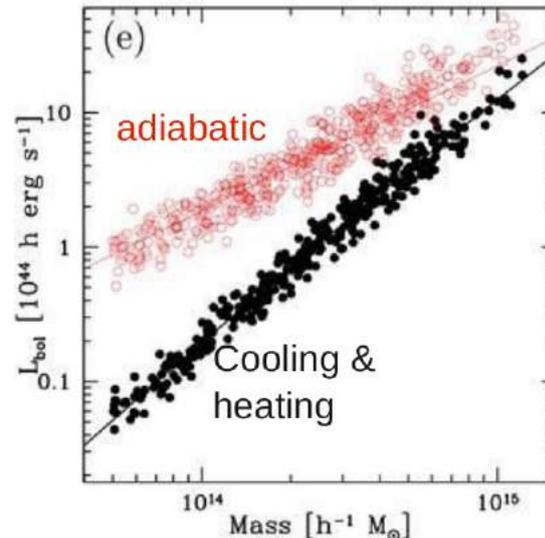
Mass	$\propto M_{gas}$	From X-rays
	$\propto T^{3/2}$	
	$\propto L_X^{3/4}$	
	$\propto L_{optical}$	From optical
	$\propto \sigma_{v,gal}^2$	
	$\propto Y_{SZE}^{3/5}$	From SZ

$$E_X \propto \int_V n_e^2 \Lambda(T) dV$$

$$F_\nu \propto \int_\Omega (P = n_e T) d\Omega$$

- X-rays: Plus forte dépendance des processus physiques
→ Dispersion de la relation L_X -M & biais

SZ: Faible dépendance → Faible dispersion de la relation Y_{SZ} -M
~non biaisé



Stanek et al. '11

Paramètres cosmologiques avec l'abondance des amas: Relations d'échelle

71 amas de galaxies Planck avec des données XMM-Newton re-normalisées avec des simulations

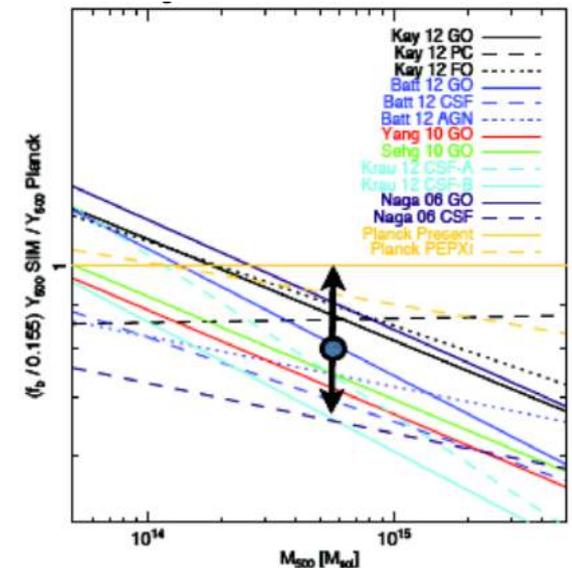
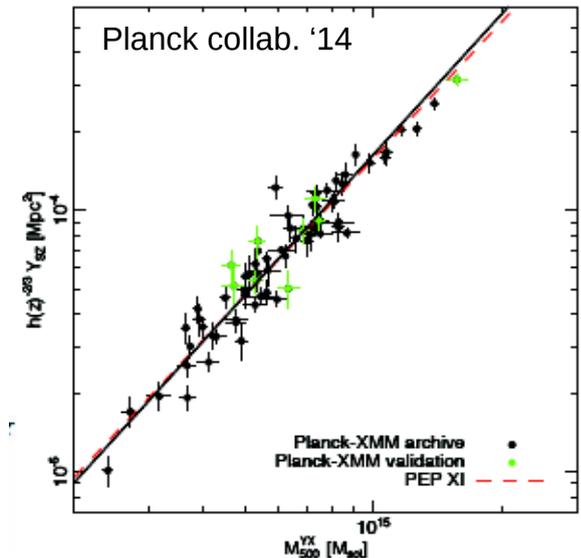
Y_{sz} mesure par Planck & Y_x avec données X-rays

$$[Y_x \rightarrow M \text{ and } Y \rightarrow Y \quad 1 \rightarrow Y - M] \\ E^{-\beta}(z) \left[\frac{D_A^2(z) \bar{Y}_{500}}{10^{-4} \text{ Mpc}^2} \right] = Y_* \left[\frac{h}{0.7} \right]^{-2+\alpha} \left[\frac{(1-b) M_{500}}{6 \times 10^{14} M_{sol}} \right]^\alpha$$

$(1 - b) = 0.8$ in $[0.7 - 1.0]$

b: rapport hydro/masse vraie

SZ – X scaling relation



Paramètres cosmologiques avec l'abondance des amas: Relations d'échelle

Lentilles faibles et masse issues de Y_x comparés

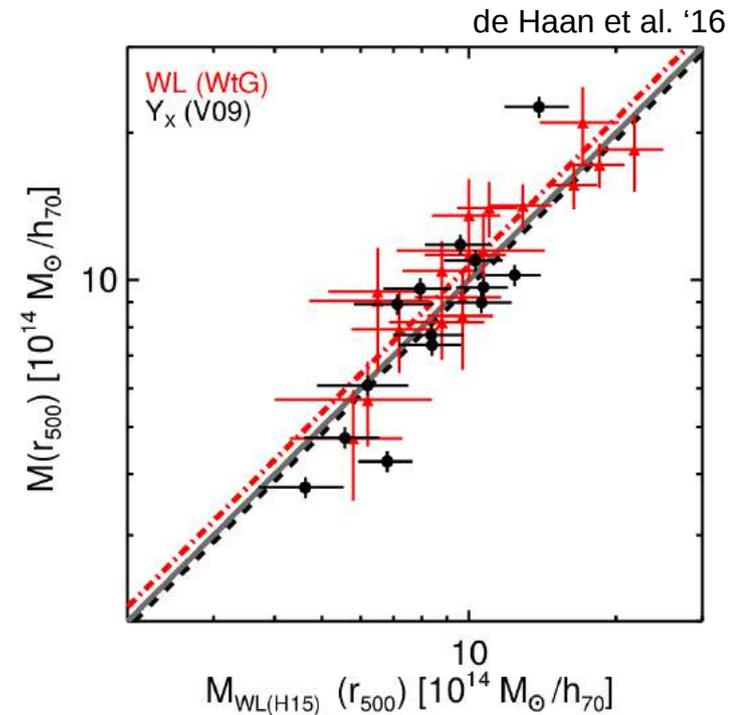
Y_x avec X-ray issues de Chandra (Vikhlinin et al. '09)

$[Y_x \rightarrow M_x \text{ et } Y_x \rightarrow Y_{SZ}] \rightarrow Y_{SZ} - M_x$

$$Y_{SZ} \propto M^{YX} = (1 - b)M_{WL} \quad \text{b: rapport hydro/vraie masse}$$

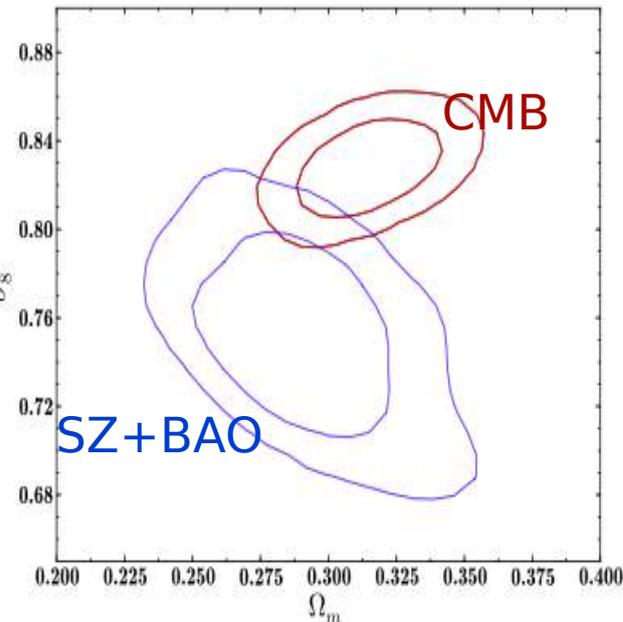
Relations d'échelle issues de l'effet de lentilles

- WtG $\rightarrow (1-b) \sim 0.68$ (von der Linden et al. '14)
- PSZ2LenS $\rightarrow (1-b) \sim 0.76$ (Sereno et al. '17)
- CCCP $\rightarrow (1-b) \sim 0.78$ (Hoekstra et al. '15)
- CMB-lensing $\rightarrow (1-b) \sim 1$ (Planck collab. '16)



Paramètres cosmologiques avec l'abondance des amas: Amas SZ

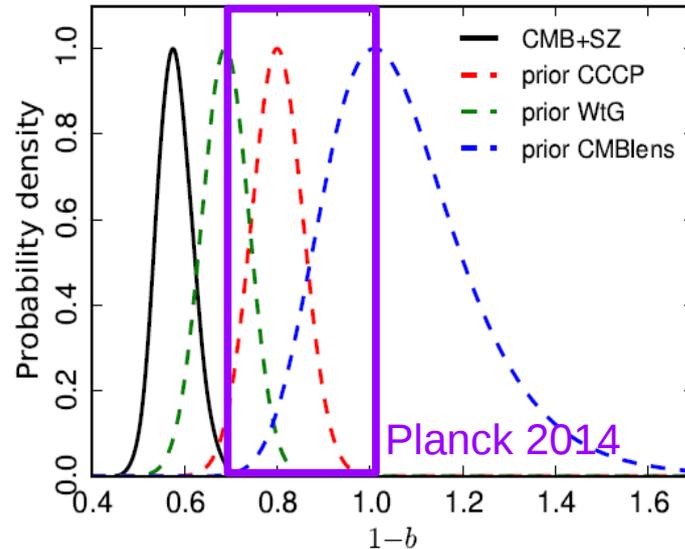
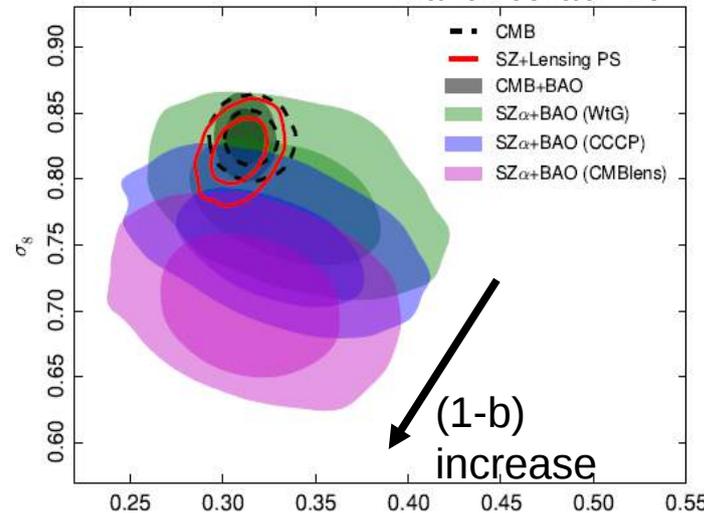
Planck collab. '14



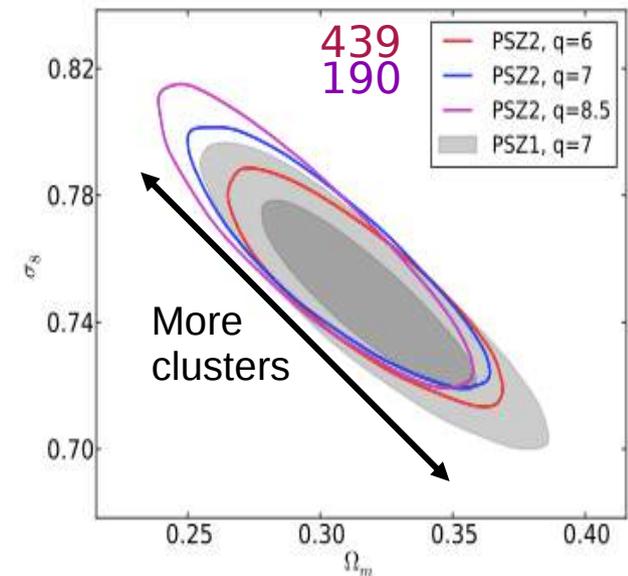
Planck 2014:
 Petit échantillon (189 amas @S/N≥7)
 Relation au X-rays

Désaccord de $\sim 3\sigma$ entre CMB et abondance SZ

Planck collab. '16



Planck collab. '16



Planck 2016:
 Grand échantillon (439 amas @S/N≥6)
 Relation due à l'effet de lentilles

→ Désaccord persiste
 → Valeur CMB: $(1-b) \sim 0.58$

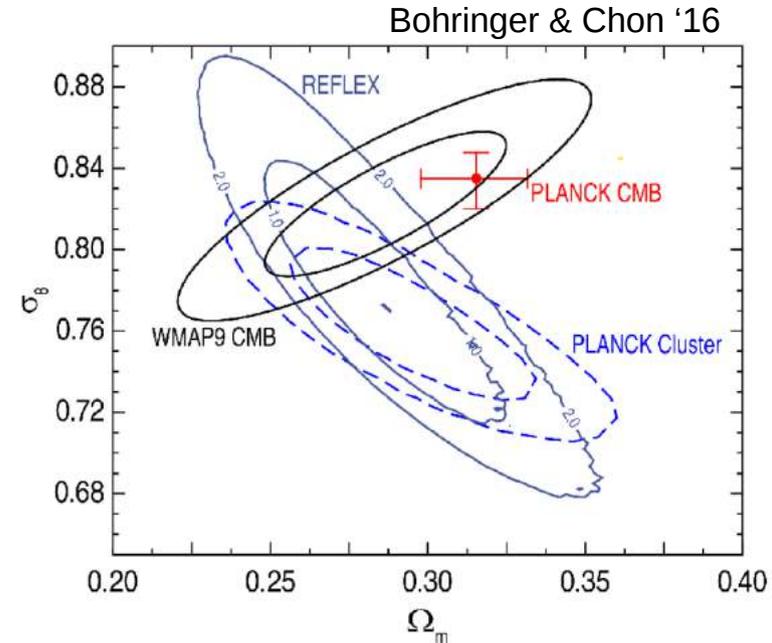
Paramètres cosmologiques avec les amas X-rays et l'effet de lentille

Contraintes sur σ_8 - Ω_m de la fonction de luminosité en X-ray

Accord avec les amas SZ (Planck Collab. '16)

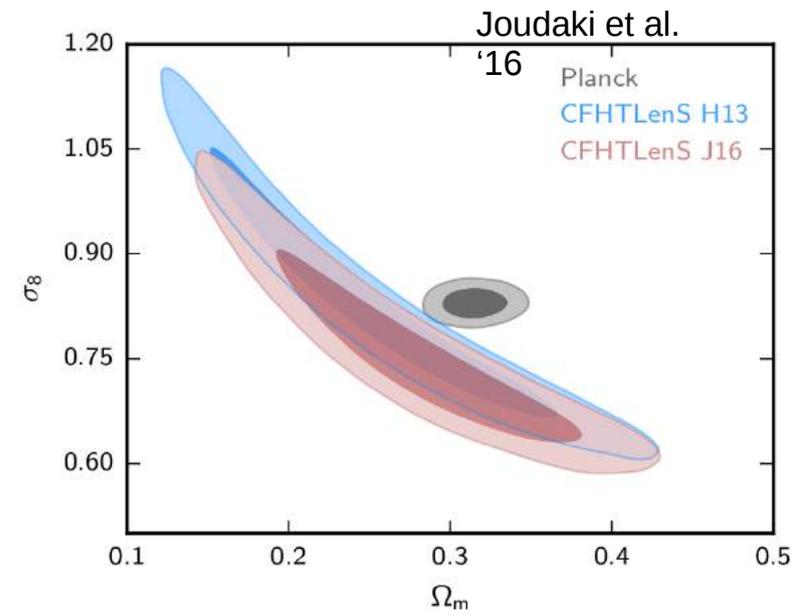
→ Désaccord avec le CMB:

- avec une sélection différente des amas
- avec un domaine de redshift différent



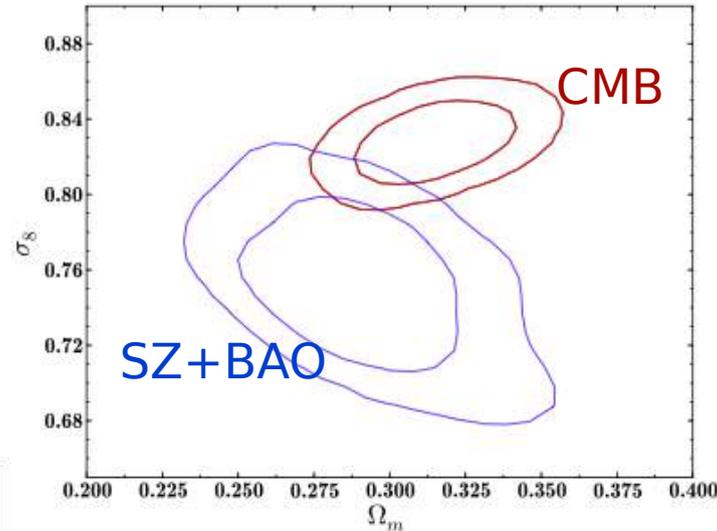
Contraintes sur σ_8 - Ω_m depuis l'effet de lentille des galaxies (Heymans et al. '13, Joudaki et al. '16)

→ Désaccord avec le CMB de $\sim 2\sigma$



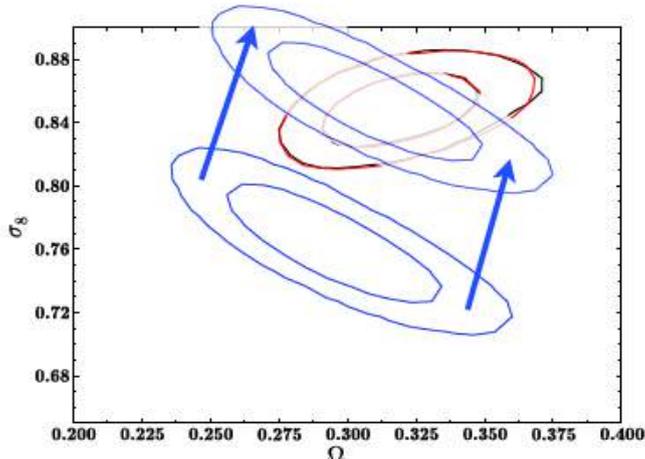
Désaccord entre SZ et CMB?

Planck collab. 2014

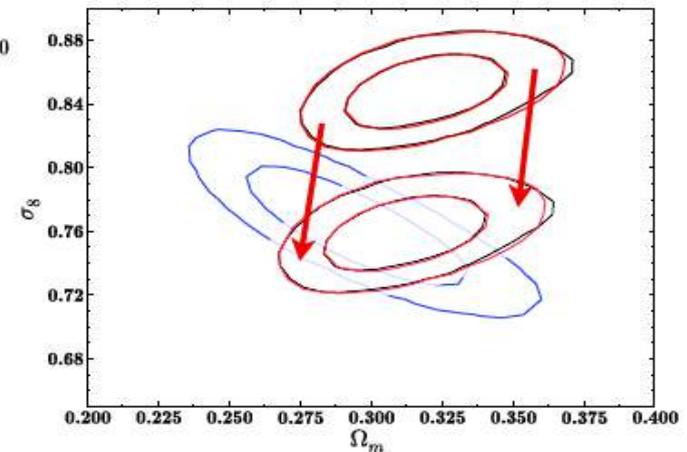


Valeurs hautes de Ω_m, σ_8
Planck 2014 et 2016 du CMB

Haut σ_8 des amas



Bas σ_8 du CMB

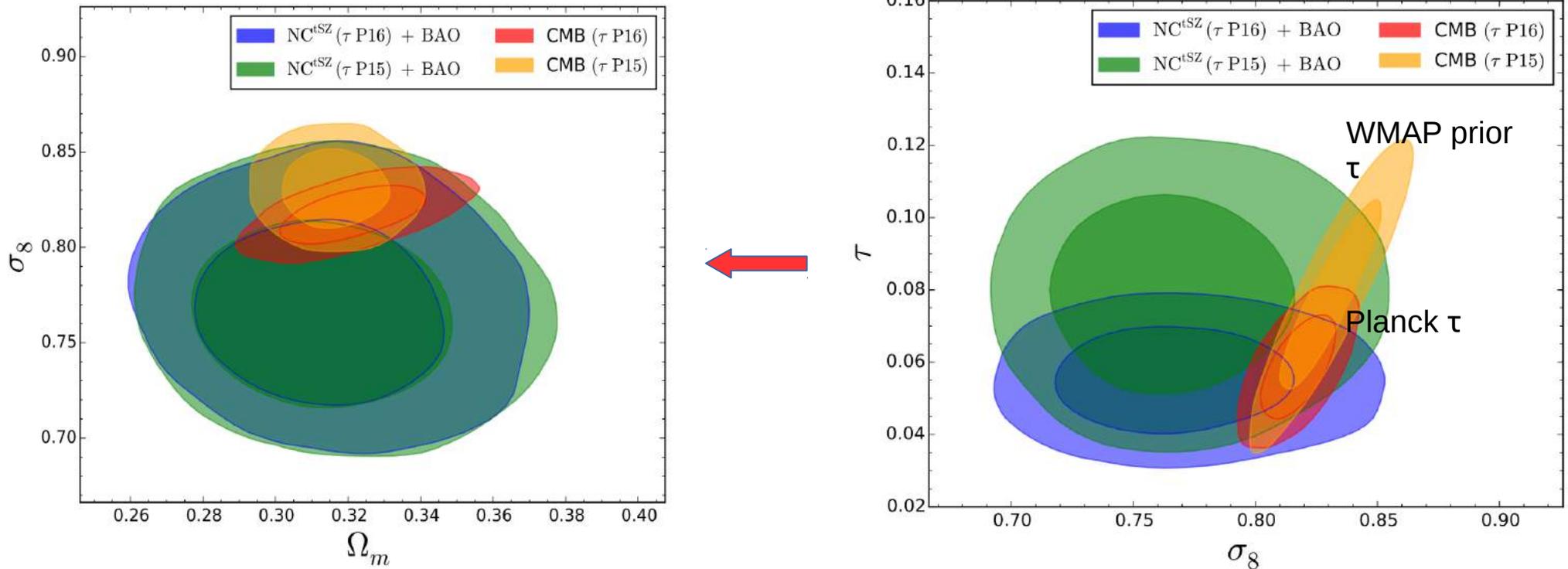


- Masses fausses d'un facteur 2
- Amas non-observés à bas z
- Relations d'échelle différentes

- Variation du spectre initial
- Présence de neutrinos

Paramètres cosmologiques avec les amas SZ: dernières nouvelles

Salvati et al. '18.



Echantillon d'amas SZ inchangé (Planck collab. '16) & A priori sur la masse depuis le projet CCCP lentille $(1-b)=0.78$ → SZ contraintes inchangées

Du prior WMAP au τ de Planck-HFI polarisation bas-l → $\tau = 0.055$ (Planck collab. '16)

Désaccord entre CMB et amas SZ réduit de $\sim 2.4 \sigma$ à $\sim 1.5 \sigma$ sur σ_8

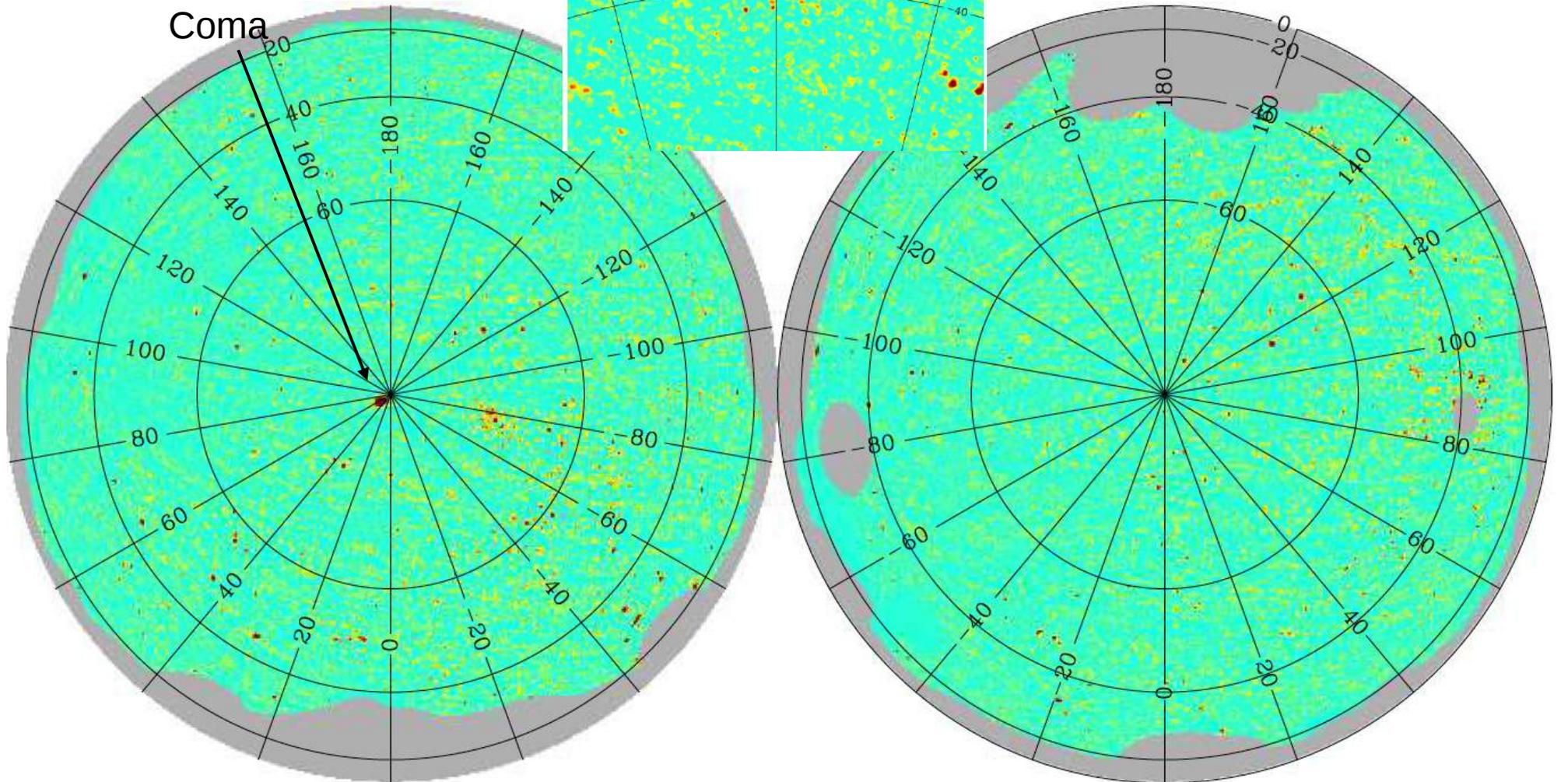
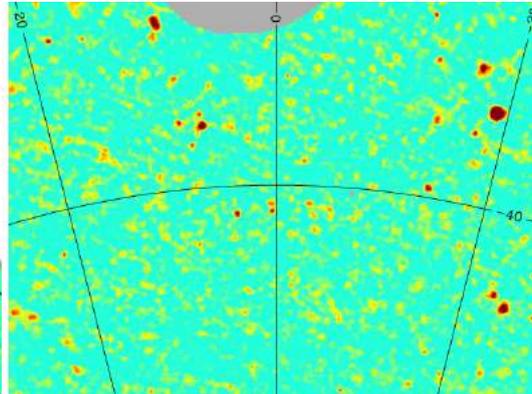
Biais sur la masse demeure: le CMB préfère des amas légers!!!

Cosmologie avec l'effet SZ:

→ quantité de gaz chaud/tiède sur tout le ciel

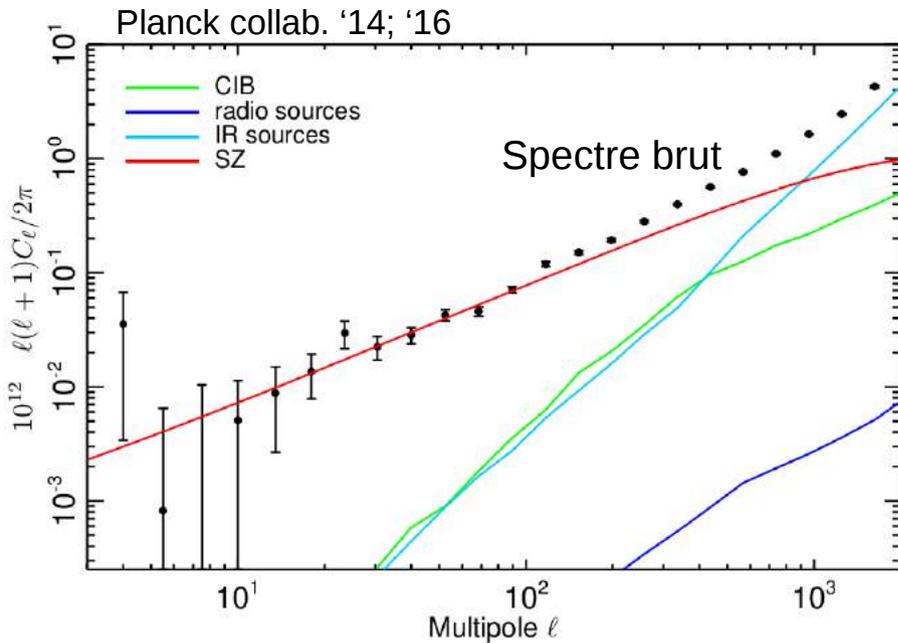
Mesure des paramètres cosmologiques avec la carte SZ

Que nous dit la carte SZ sur l'Univers?



-3.5  5.0 $\times 10^6$ Planck collaboration '14, '16

Paramètres cosmologiques avec la carte SZ de Planck



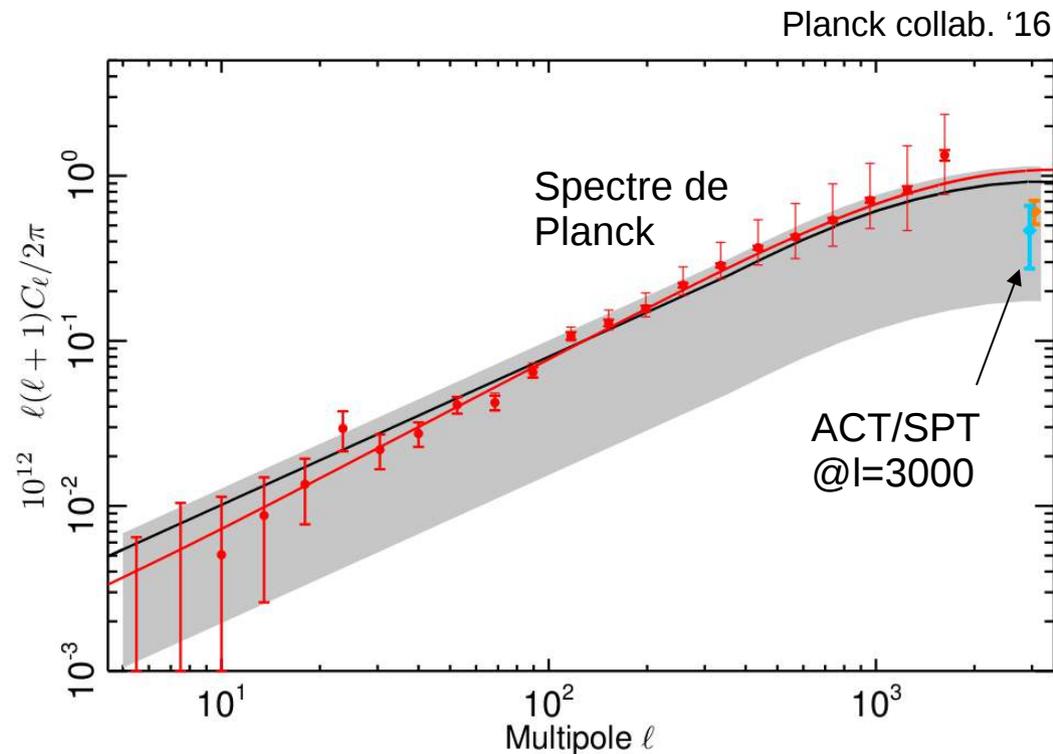
Amas résolus ~ signal attendu dans la carte SZ

$$C_\ell^{model} = C_\ell^{SZ} + C_\ell^{cib} + C_\ell^{PS}$$

$$C_\ell^{SZ} = C_\ell^{SZ}(\Omega_M, \sigma_8)$$

Spectre tSZ de 3 deg. à 10'

Vraisemblance des paramètres cosmologiques & amplitude des contributions de points sources

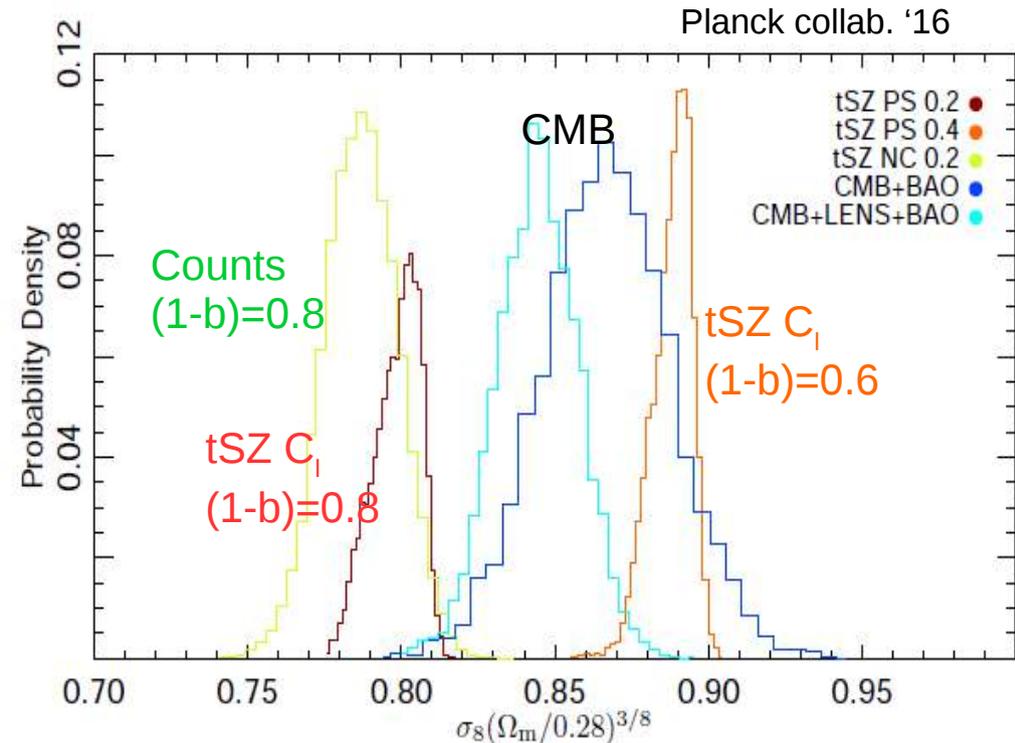


Paramètres cosmologiques avec la carte SZ de Planck

Spectre de puissance

$$(1 - b) = 0.8 \rightarrow \sigma_8(\Omega_m/0.28)^{3/8} = 0.80^{+0.01}_{-0.03}$$

$$(1 - b) = 0.6 \rightarrow \sigma_8(\Omega_m/0.28)^{3/8} = 0.90^{+0.01}_{-0.03}$$

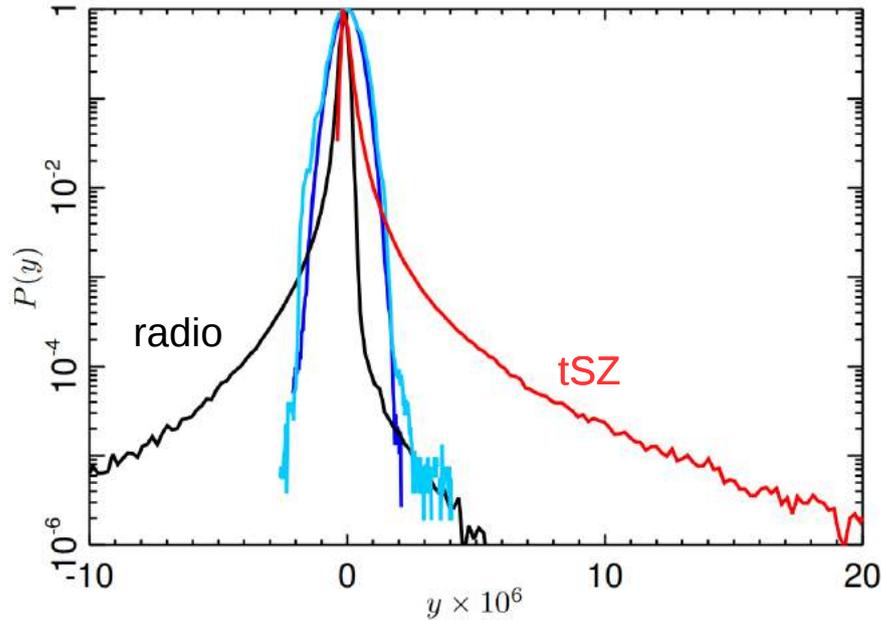


Distribution des vraisemblances tSZ et CMB

Contraintes similaires sur σ_8 avec la corrélation des cartes SZ et X-ray (Hurier et al. '14)

Cosmological parameters with SZ map from Planck

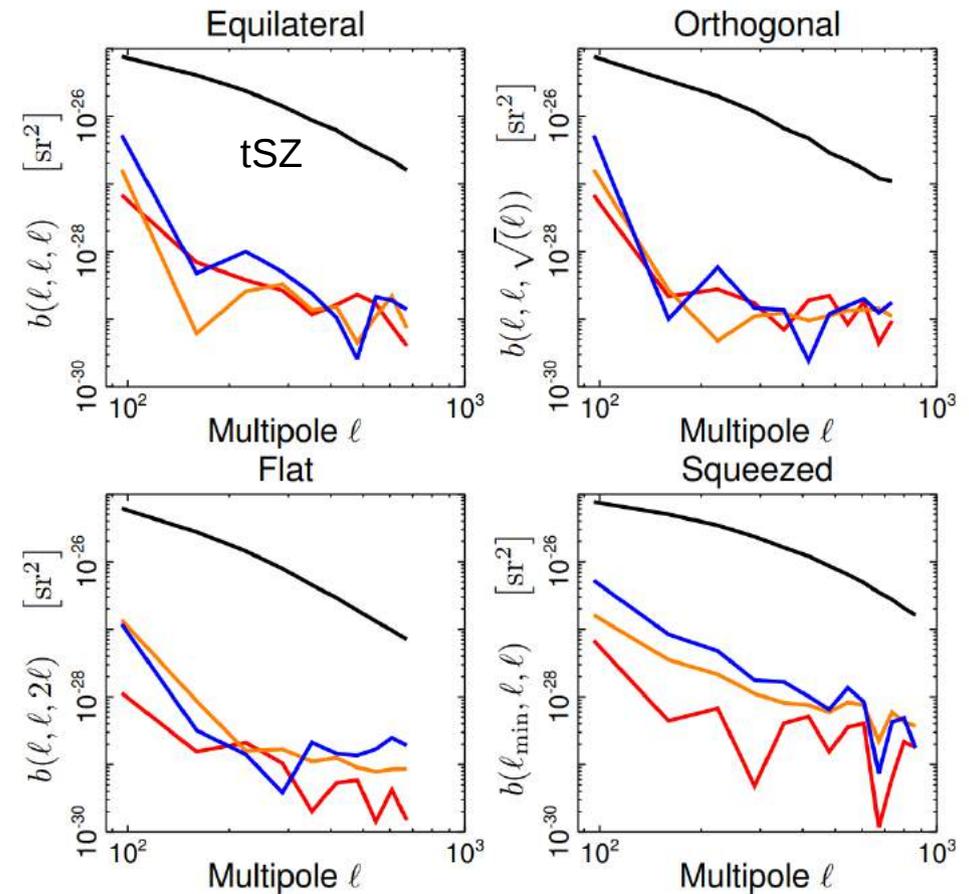
Planck collab. '14; '16



Distribution des pixels

Analyse statistique de l'ensemble du signal SZ signal & ordres supérieures cohérente avec le spectre de puissance

$$\rightarrow \sigma_8 = 0.74 \pm 0.04$$



Analyse du bispectre

Conclusions

- Plusieurs “observatoires” SZ depuis Planck: NIKA2; relevés CMB au sol des U.S.A (ACT(& avatars), SPT (& avatars), etc.)
- Catalogue tout le ciel unique de Planck avec les amas les plus massifs → les plus rares & les plus exceptionnels
- Des centaines de nouveaux amas détectés en SZ
- Carte du ciel quasi-complète du signal SZ → relations d'échelle, profils de pression, recherche des baryons cachés
- Etudes détaillées sur la formation et la physique des amas par une approche multi-longueur d'onde radio/X-ray/lentilles/SZ haute résolution → fusions/interactions, périphéries d'amas, pression thermique/non-thermique
- Cosmologie avec des amas sélectionnés en SZ montre les limitations dues à la physique des amas → Calibration/biais en masse doit atteindre ~% alors qu'actuellement ~20%