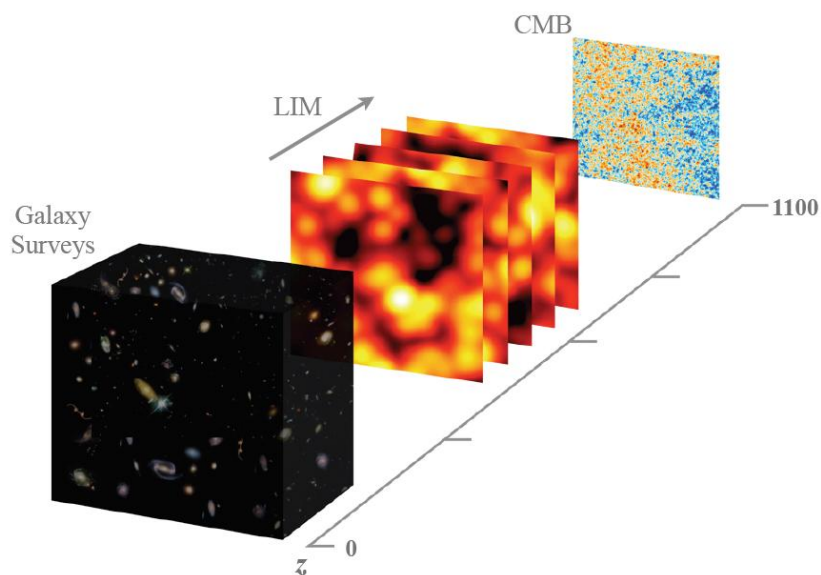




COLLÈGE
DE FRANCE
— 1530 —

Chaire Galaxies et Cosmologie

Cartes globales d'intensité



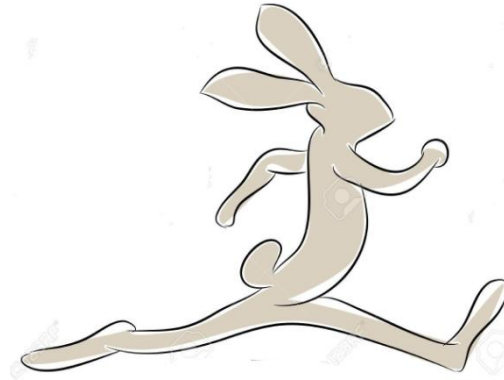
Françoise Combes



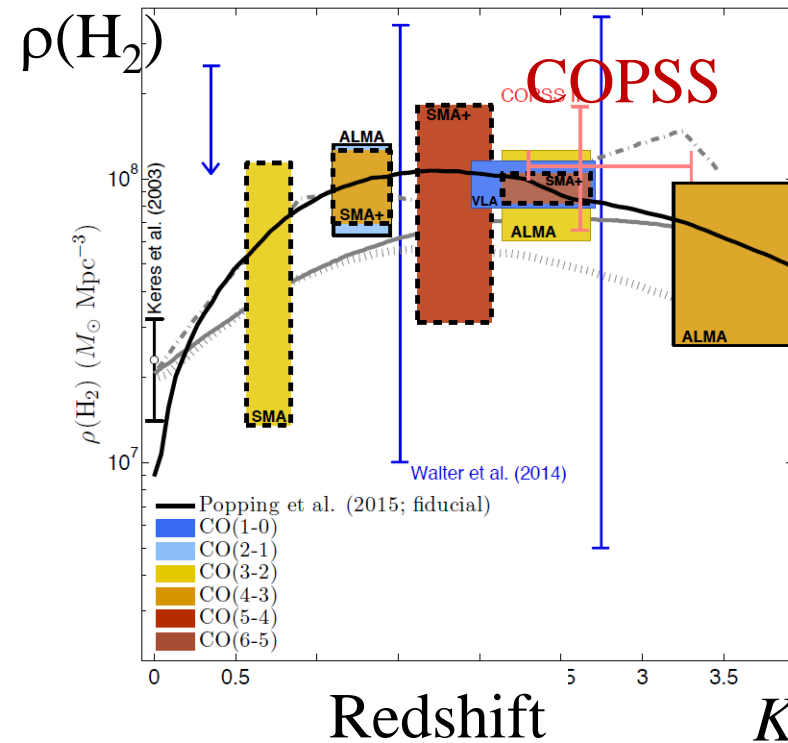
Cartes d'intensité: aller plus vite



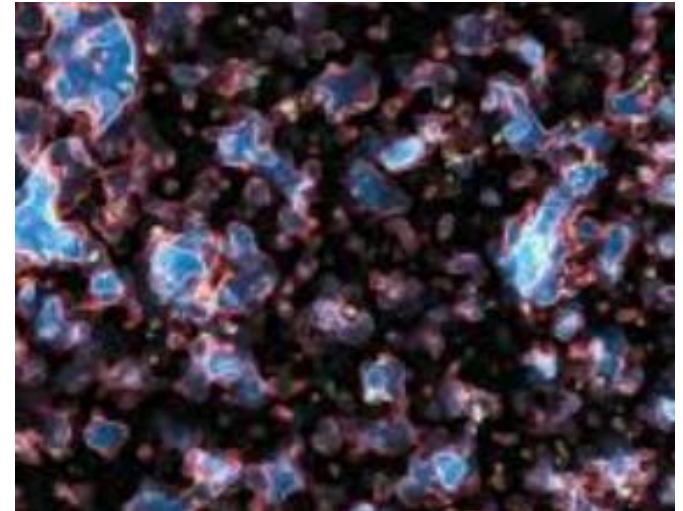
Galaxies une par une



Flux global par pixel



CO, CII, galaxies durant la réionisation



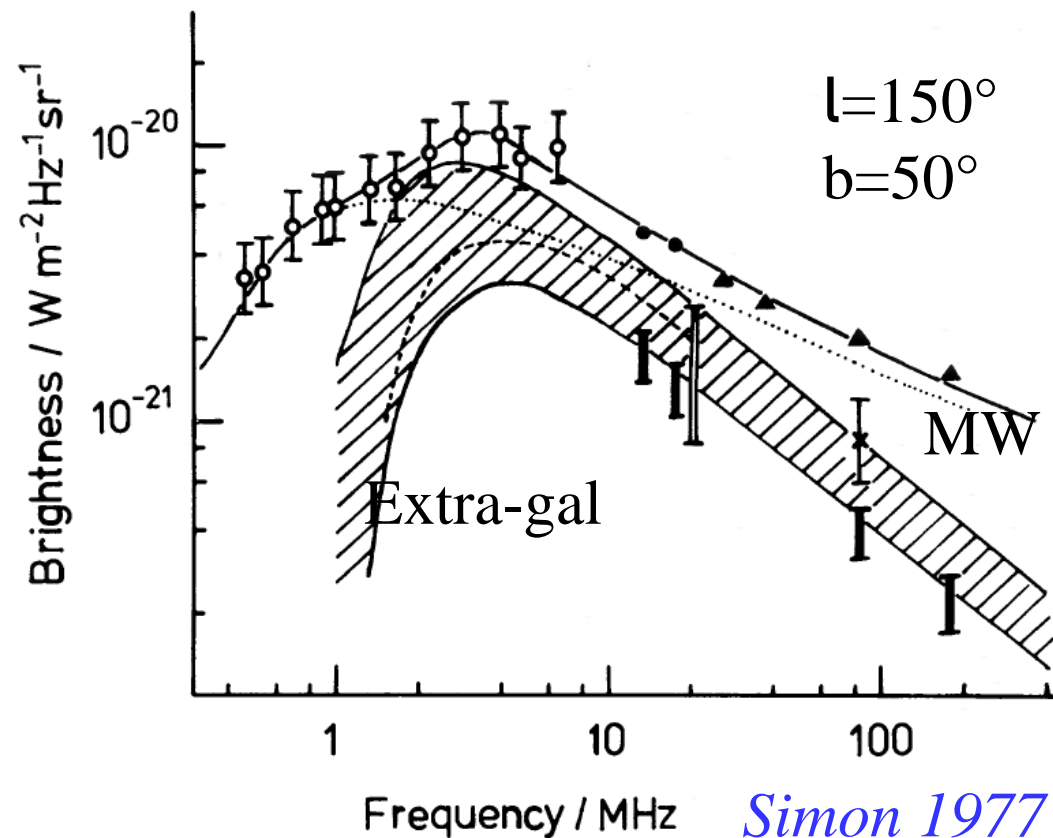
Historique

Les premières cartes globales: rayonnement continuum

--Observation par hasard du fond cosmologique microonde
Penzias & Wilson en 1965

--Observation des
radio-sources $S(\nu) \propto \nu^{-\alpha}$
 $\alpha=0.8$
0.5-10MHz, satellite RAE1
Emission synchrotron
Self-absorption à
basse fréquence

→ fond dû à des sources
faibles à z modéré



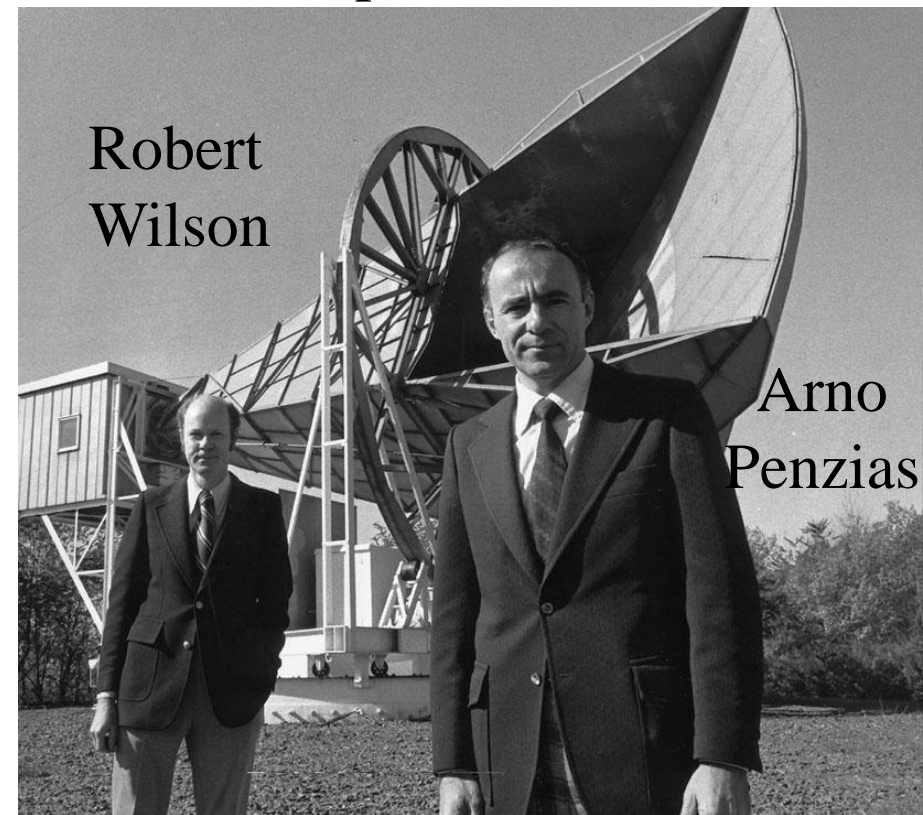
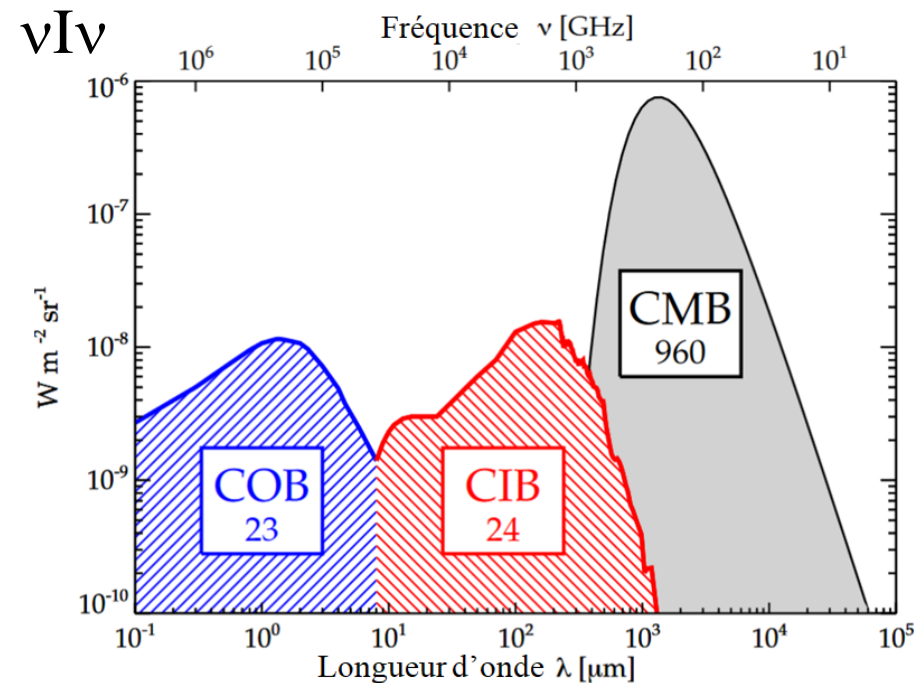
Le fonds microonde: domine les autres

L'émission de corps noir domine
Facilite la soustraction des
avant-plans

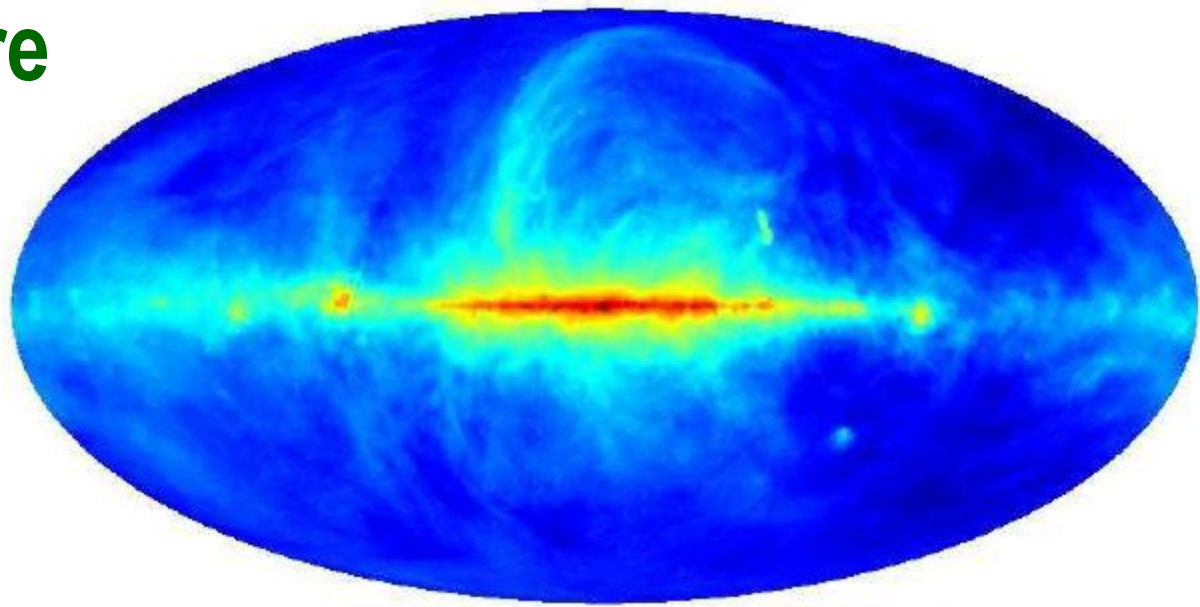
400ph/cm^3
 $10^{13} / \text{cm}^2/\text{s}$

T = 2,73K

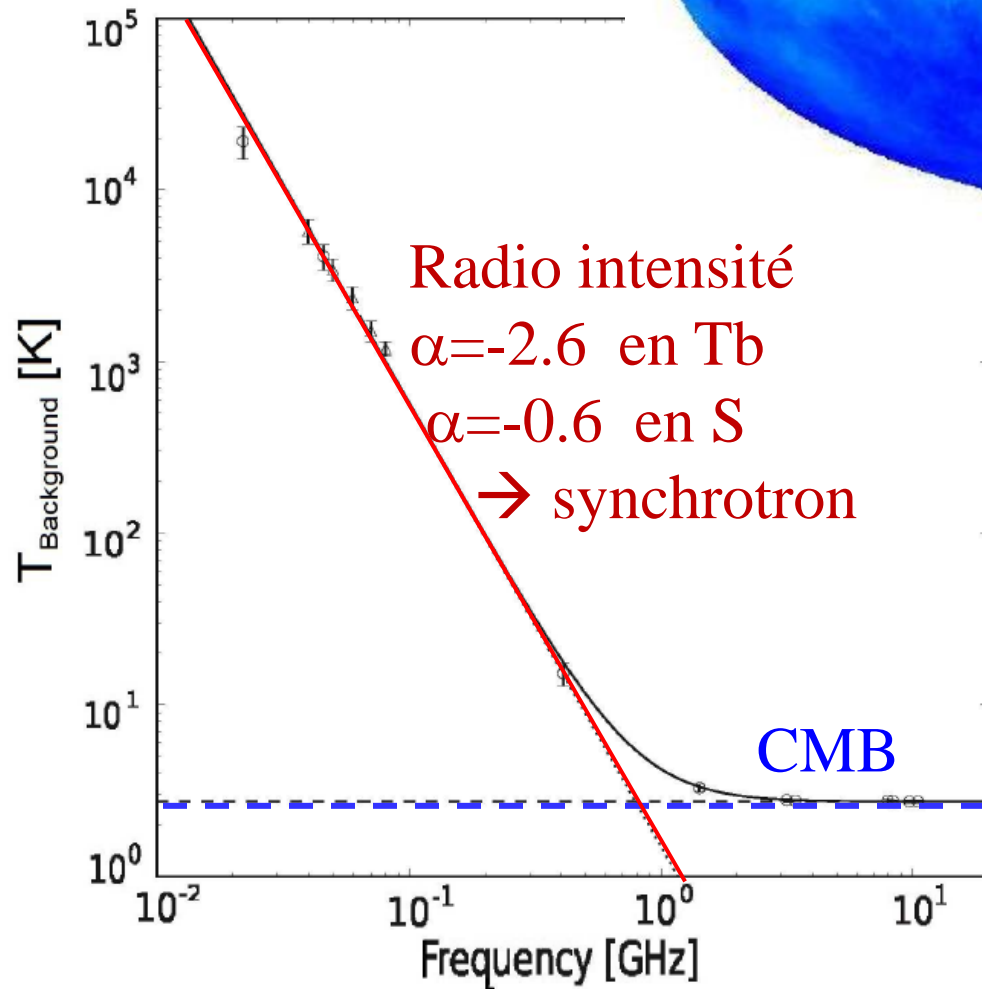
Découvert par hasard en 1965



Fond Radio encore mal connu



Haslam et al 82



Le fond radio obtenu par
des cartes basse résolution ($^{\circ}$)
est **5x supérieur** à ce qui est
attendu par intégration des
sources

Dowell & Taylor 2018

Singal 2019

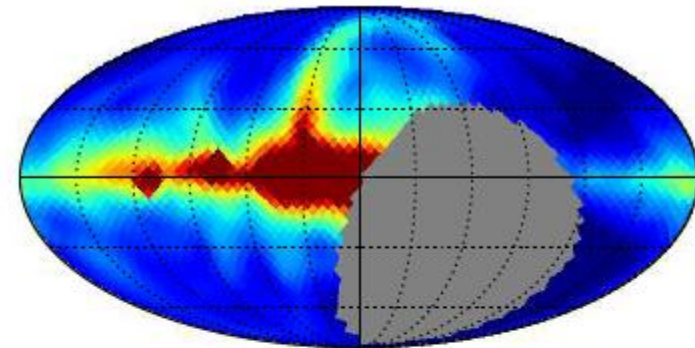
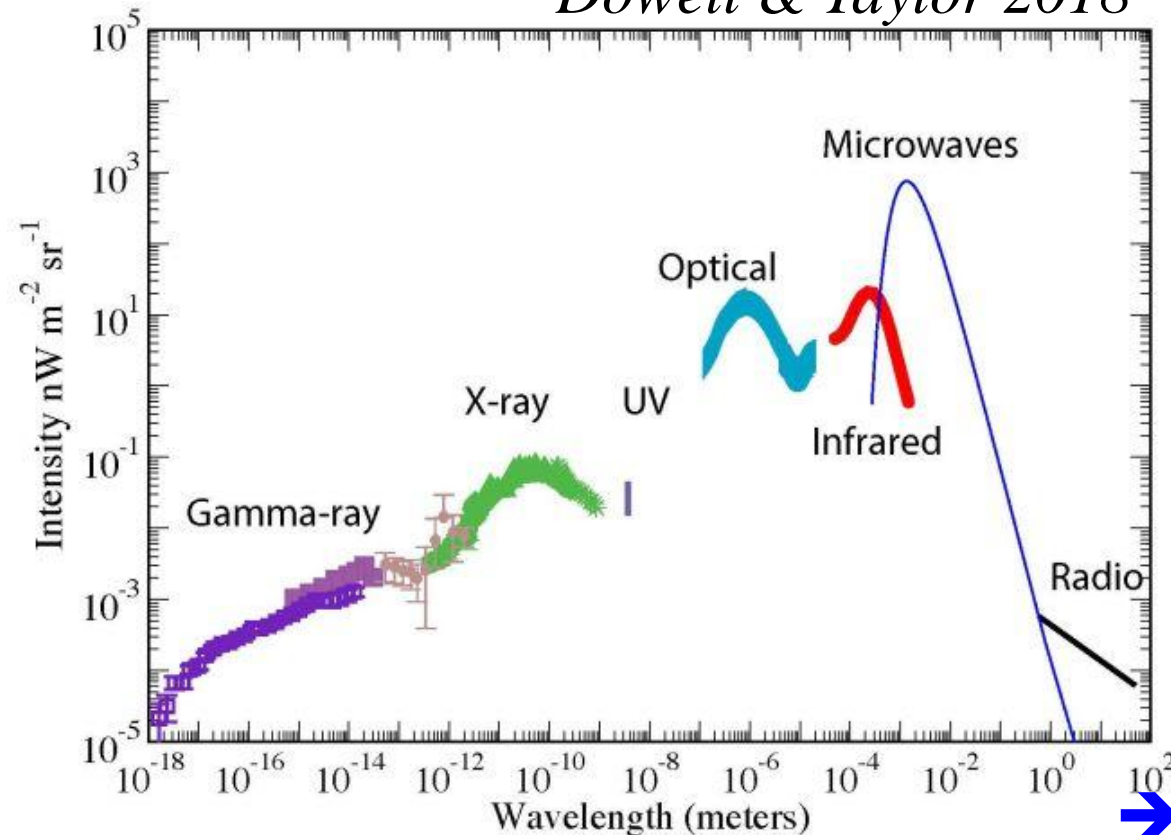
Recherches Stimulées par EDGES



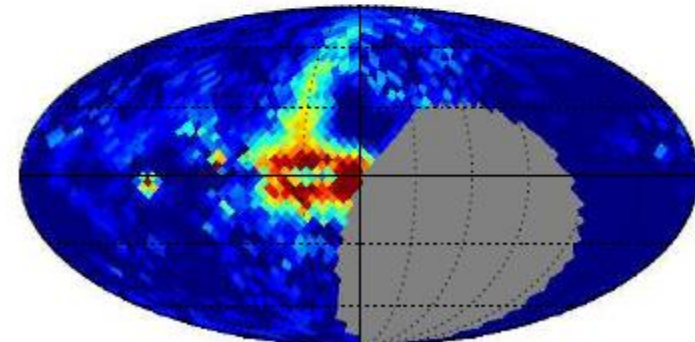
Fond radio: ballon Arcade 2

Le ballon a une bonne échelle de degré zéro
 Est-ce que l'excès d'émission est dû à une collection de sources ponctuelles non-résolues, ou bien à un vrai fond diffus?

Dowell & Taylor 2018

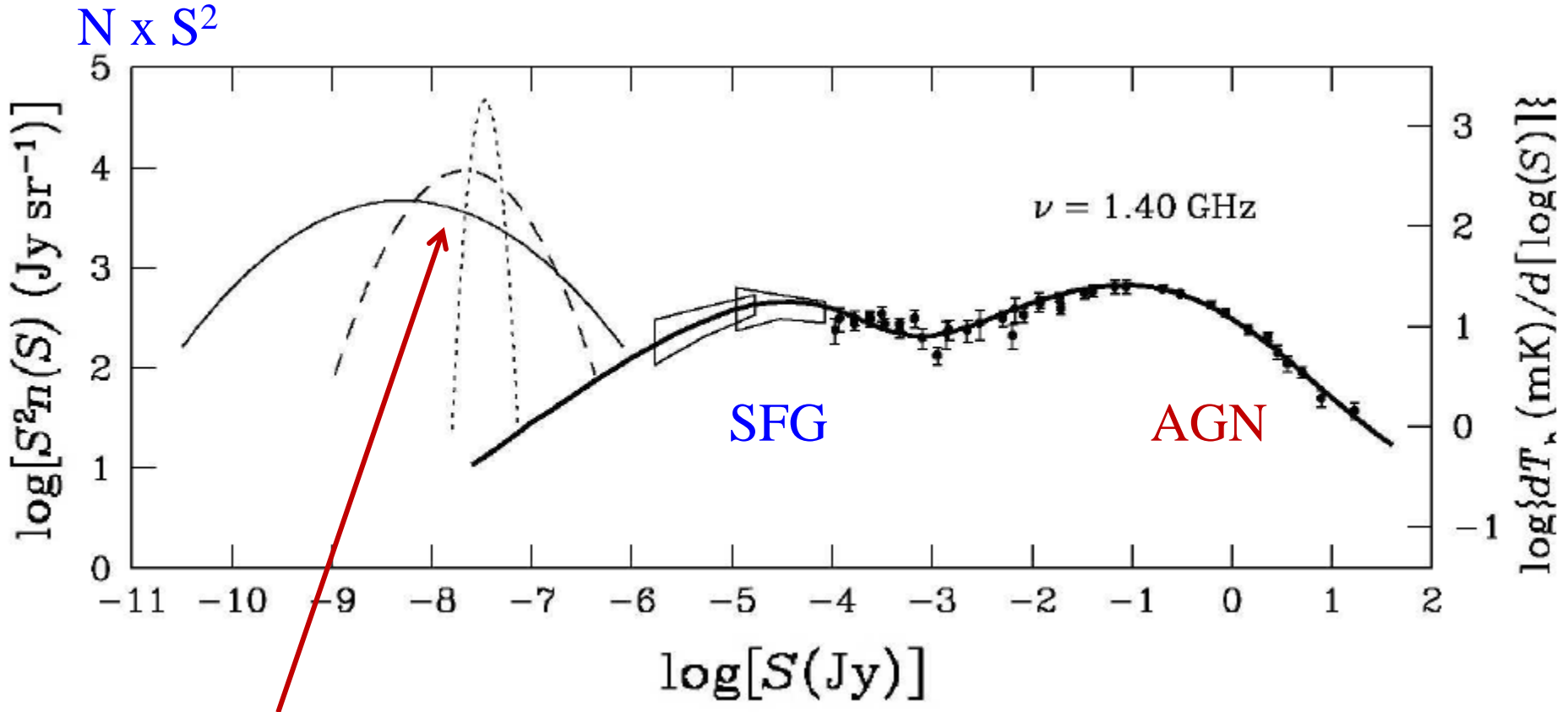


Fonds corrélé avec [CII]



→ Soustraction des avant-plan

Quelles sources de fond?



Sources possibles du fond (clustering différent des sources connues)

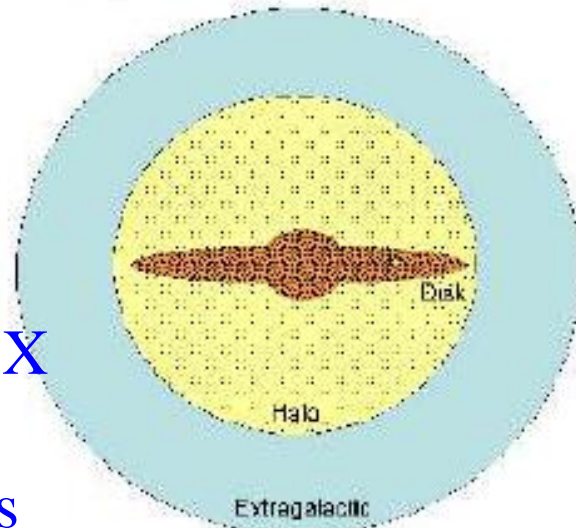
→ Il faudrait un nombre de sources énorme $> 6 \cdot 10^{4/2}$, à grand z

Etoiles de grande masse, quark nuggets (*pas de Radio-FIR*)

Annihilation de matière noire, filaments et galaxies? *Condon 2012*

Avec champ B très grand (pas de X, rayons cosmiques) *Singal 2019*

Origine des sources et problèmes



Le fond radio
pourrait être:

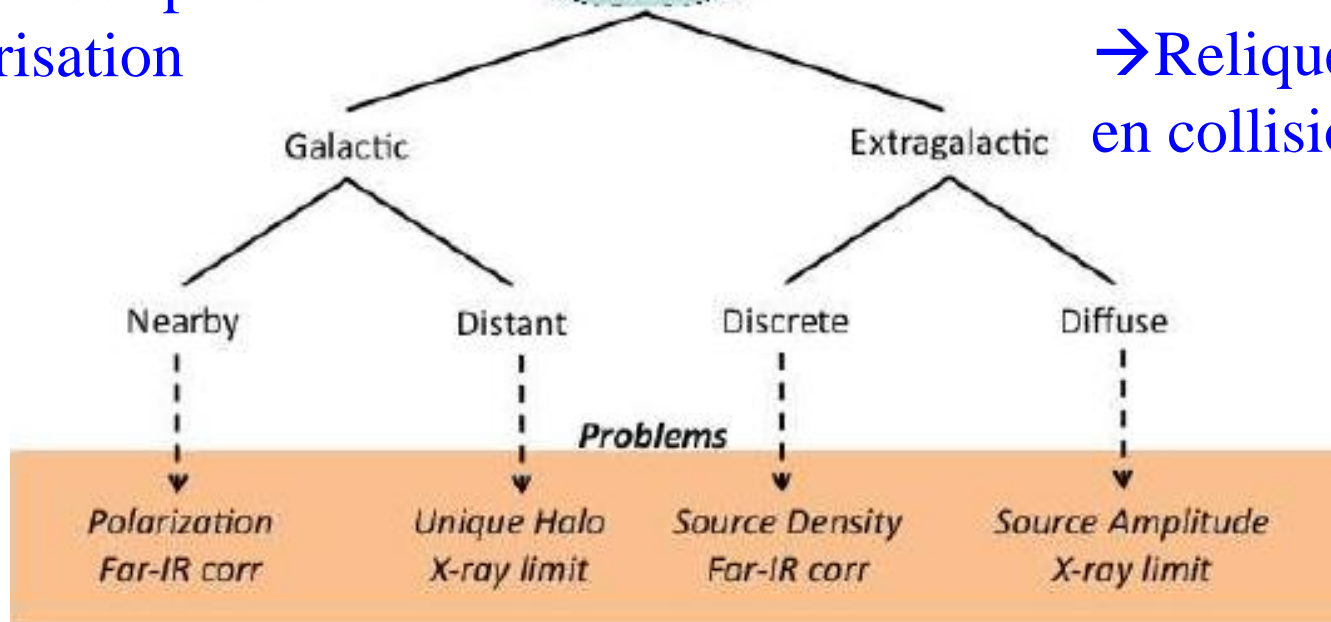
Pas des sources SF
→ Trop de CIB

→ Reliques dans les amas
en collision (trop de X)

Halo radio?

→ Trop de rayons X

→ Sources proches
polarisation



Notre galaxie serait exceptionnelle

Singal et al 2018

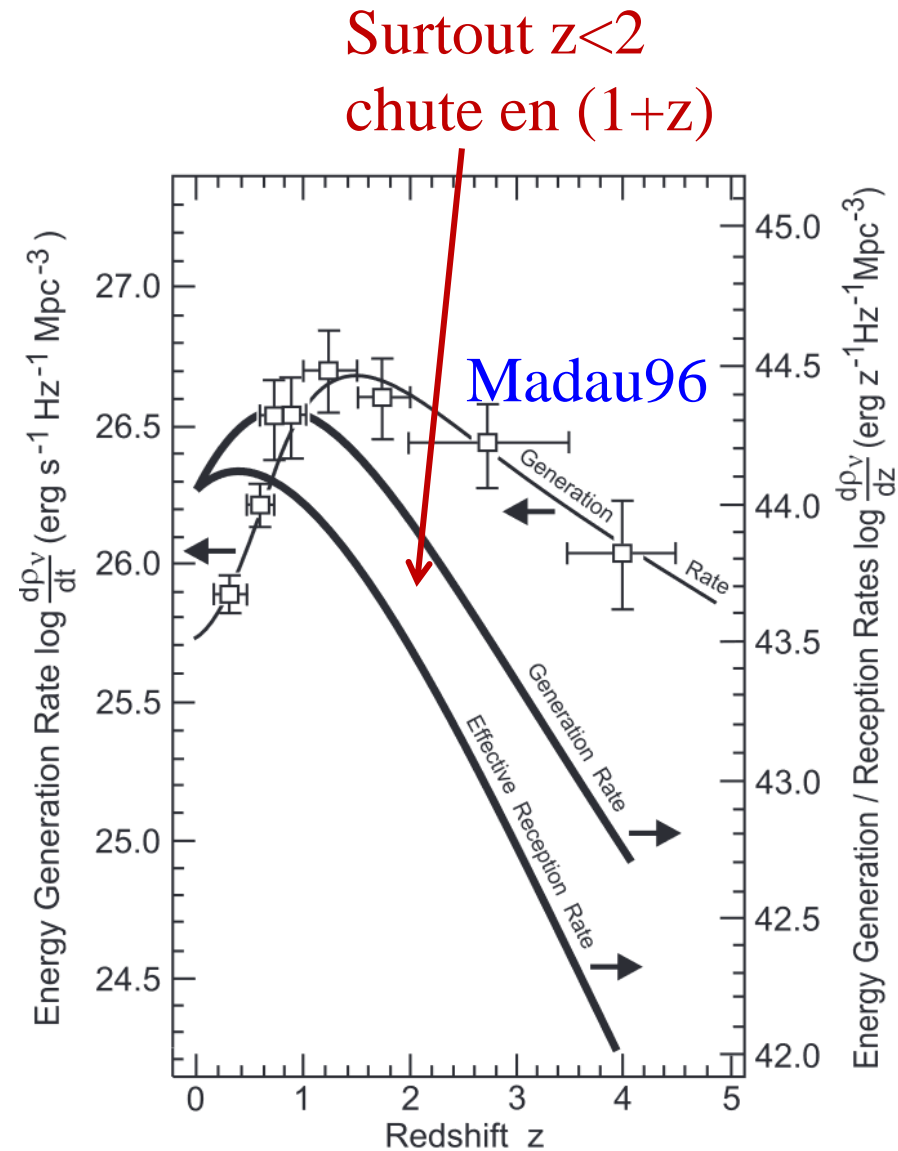
Fonds infrarouge

De nombreuses controverses avec satellites IRAS, ISO, Spitzer, Herschel, ..

Le fond infra-rouge est-il dû plutôt à des starbursts ou à des galaxies sur la séquence principale? Et à quel z ?

→ essentiellement $z < 2$, pic de formation cosmique

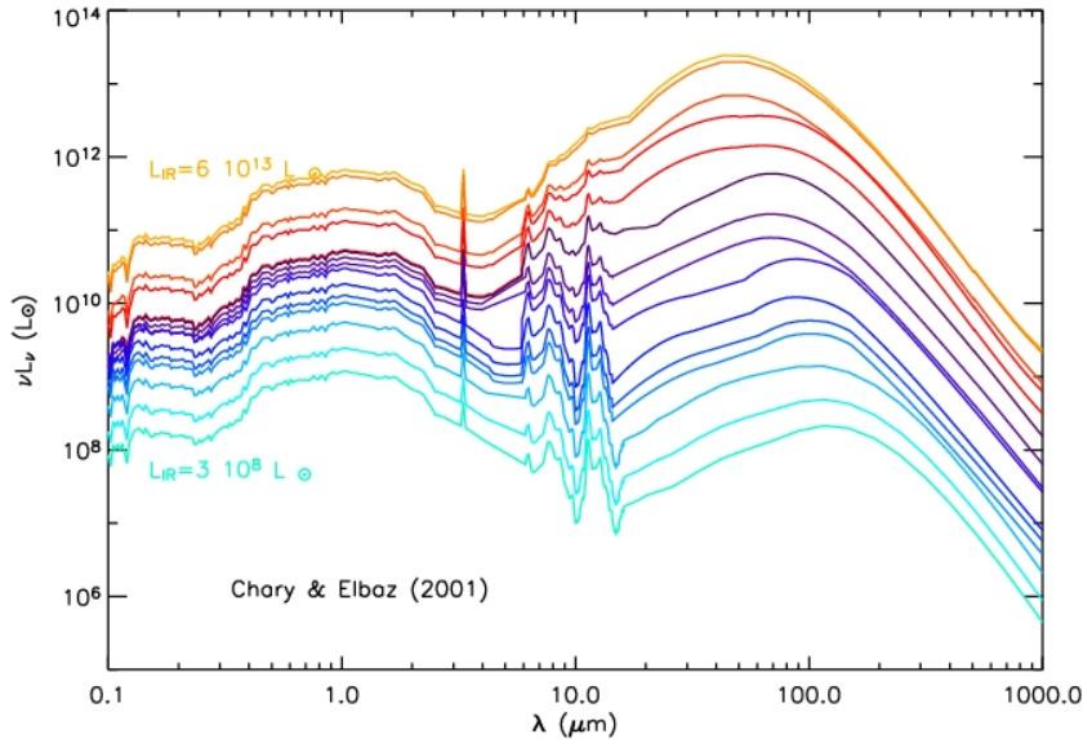
Starburst et séquence principale contribuent (70%, 30%)



Harwit 1999

Interprétation du fonds infrarouge

En sommant tous les spectres d'énergie à différent z
→ SFR obscurci par la poussière

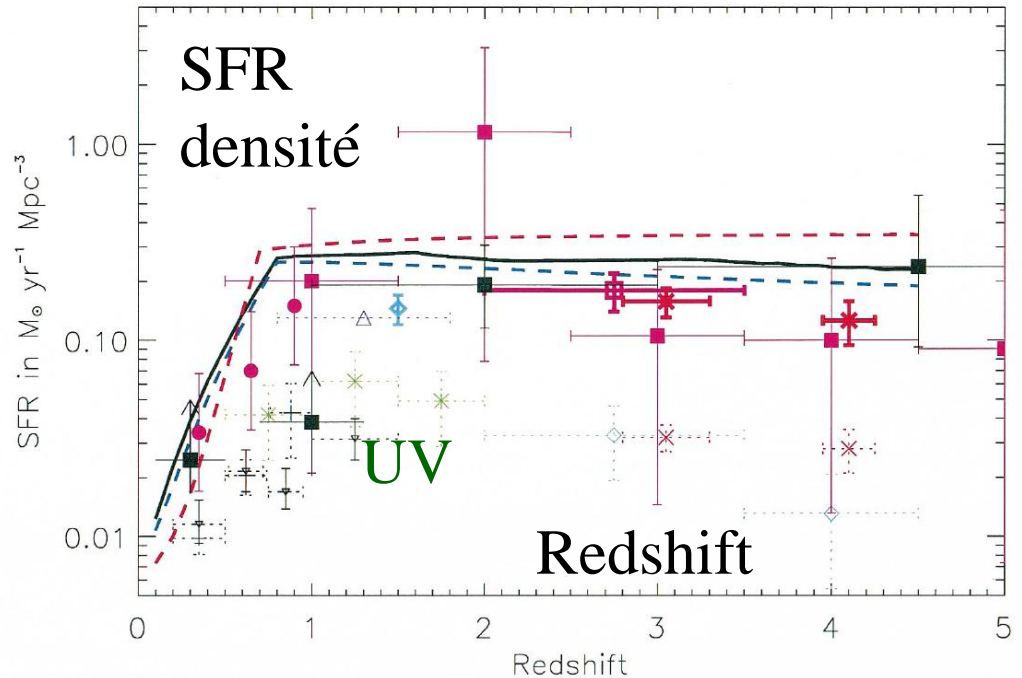


De $3 \cdot 10^8$ à $6 \cdot 10^{13} L_\odot$

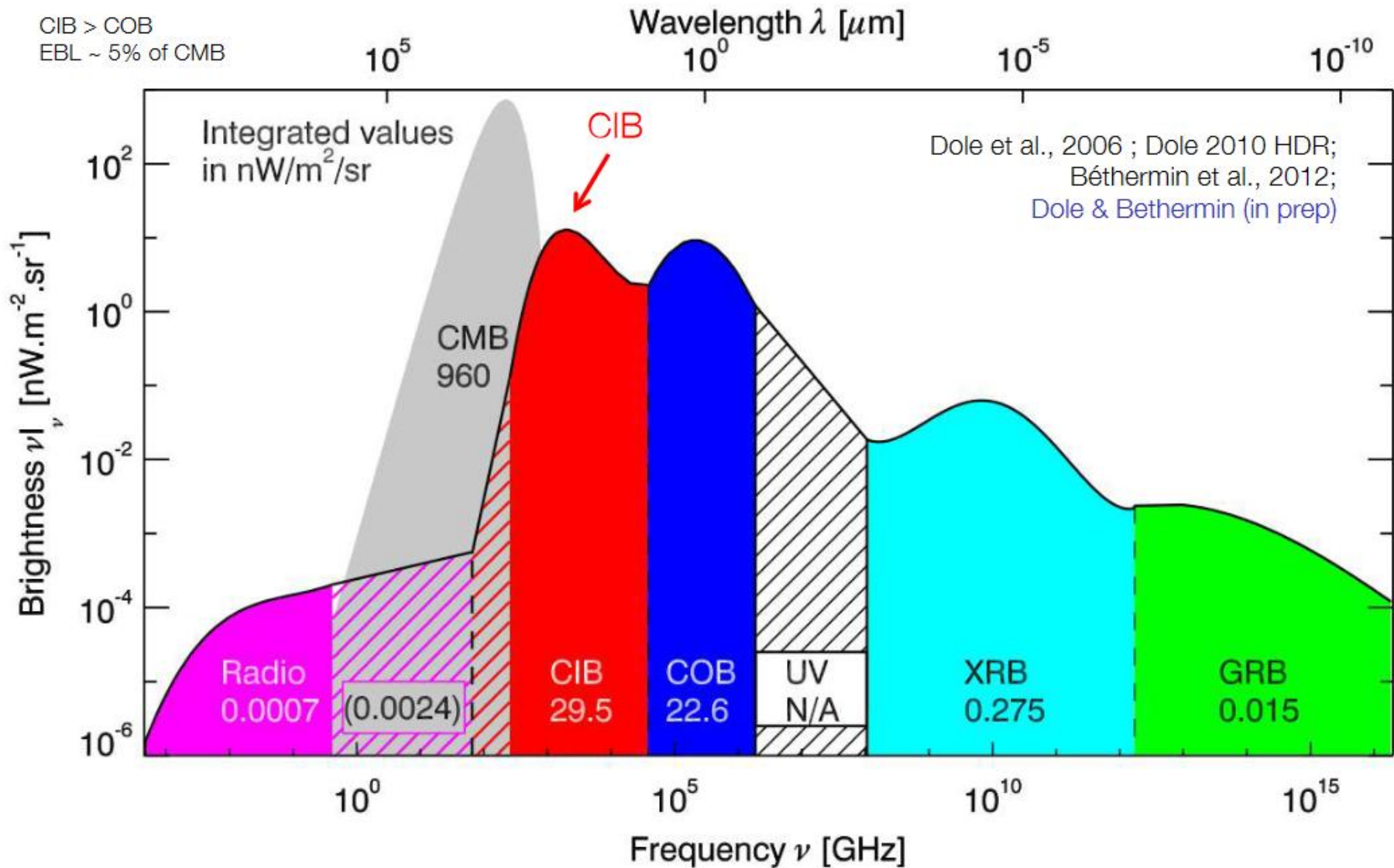
3 modèles:

- évolution en luminosité
- - - en densité
- - - densité+luminosité

Chary & Elbaz 2001

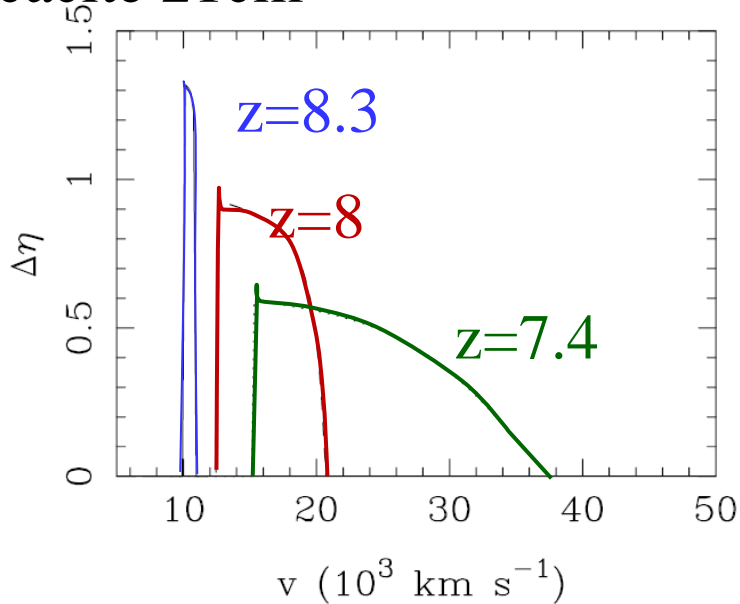


Toutes les fréquences



Historique pour les raies

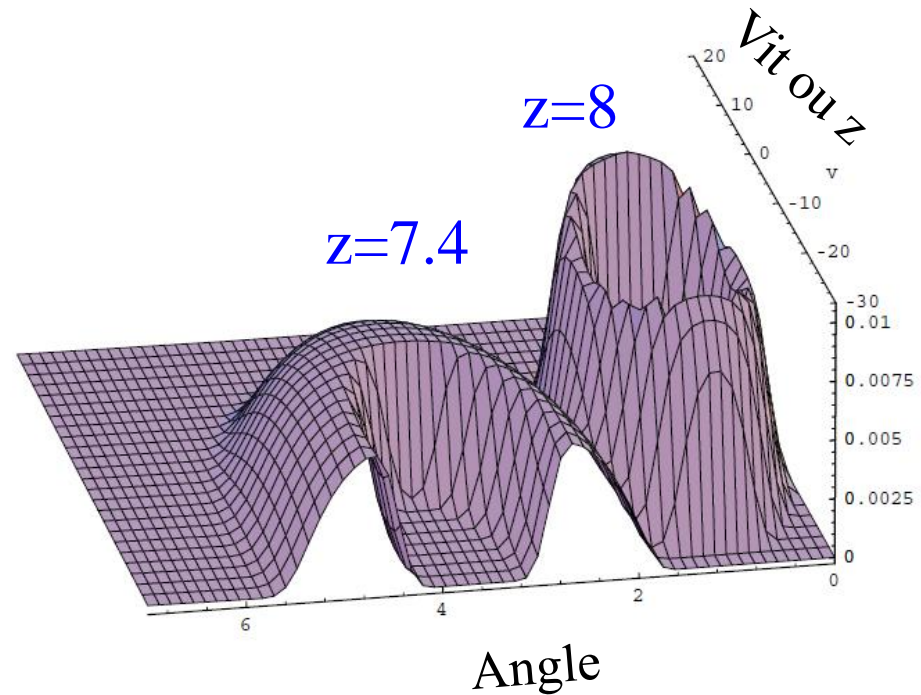
Efficacité 21cm



La raie à 21cm de HI, lors de la Réionisation: **tomographie**
Madau et al 1997

Un quasar s'allume à $z=8.7$, les photons $\text{Ly}\alpha$ excitent le gaz HI
Au centre: gaz ionisé \rightarrow bulle
HI chauffé par les rayons X

Bande de 20-30 000 km/s pour les détecter



2 quasars, $z=7.4$, $z=8$
distants de 2.5°

Première détection HI à $z=0.8$

L'enjeu à $z \sim 1$ est de détecter l'oscillation acoustique baryonique (BAO)

Uniquement statistique: échelle caractéristique des oscillations
(150Mpc horizon sonore)

But: déduire la loi de l'expansion $R(t)$, et donc la nature de l'énergie sombre

Pour la raie 21cm de HI, les télescopes actuels $z < 0.2$

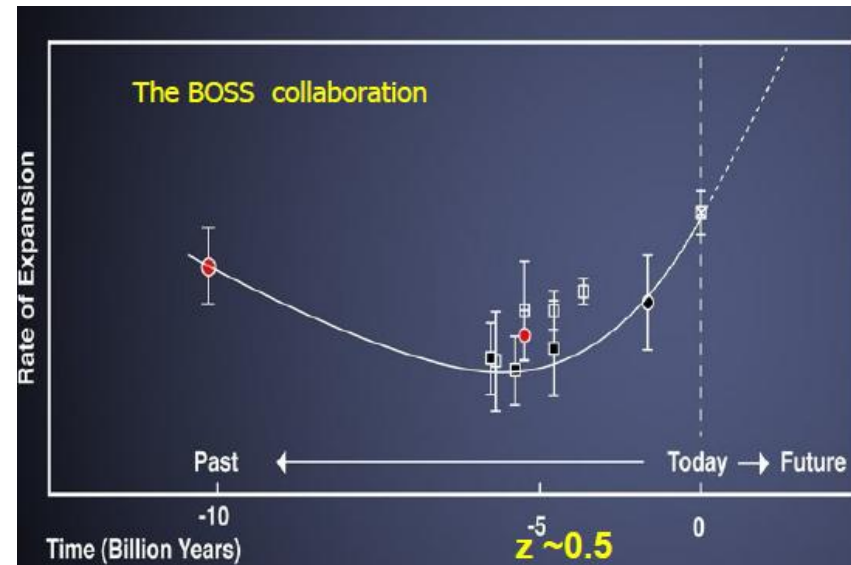
Observations globales $0.53 < z < 1.12$

Correspond aux distances comobiles

1 400 - 2 600 /h Mpc

Carte d'intensité HI, avec GBT

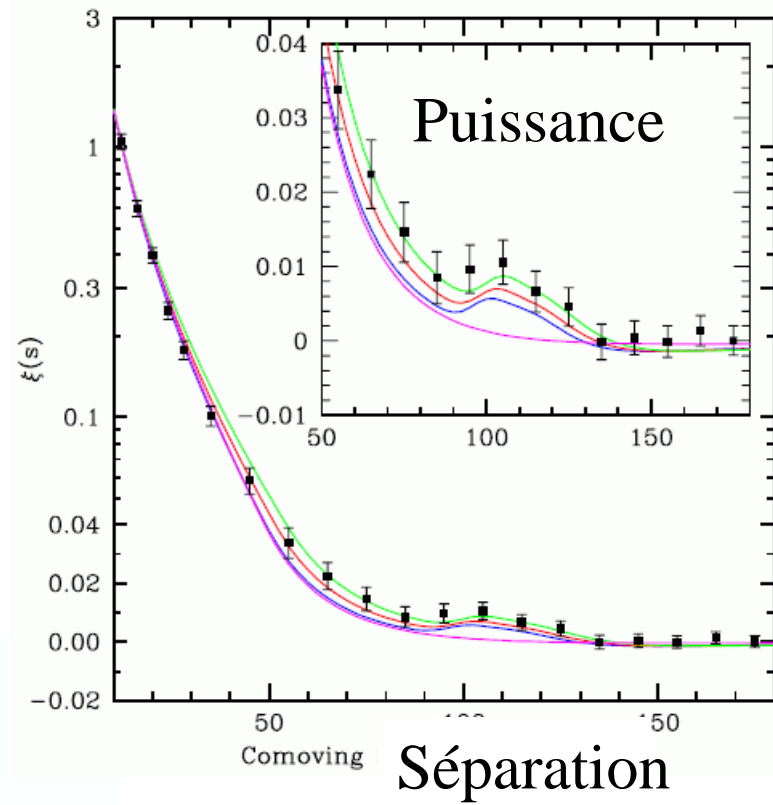
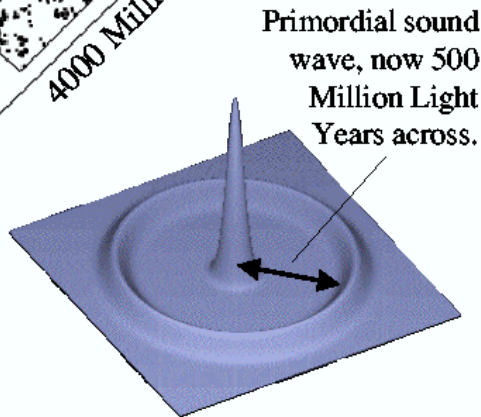
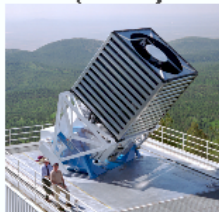
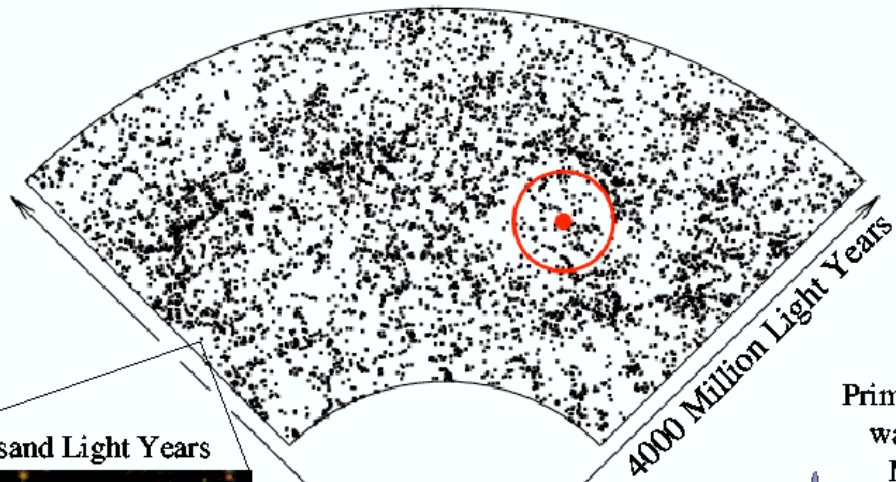
Chang, Pen et al 2010



Pic acoustique baryonique

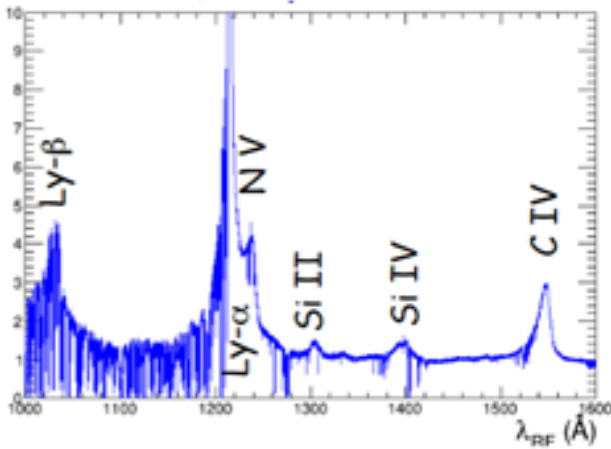
Ondes détectées aujourd'hui
dans la distribution des baryons

50 000 galaxies SDSS



Eisenstein et al 2005

Absorbants Ly α des QSO

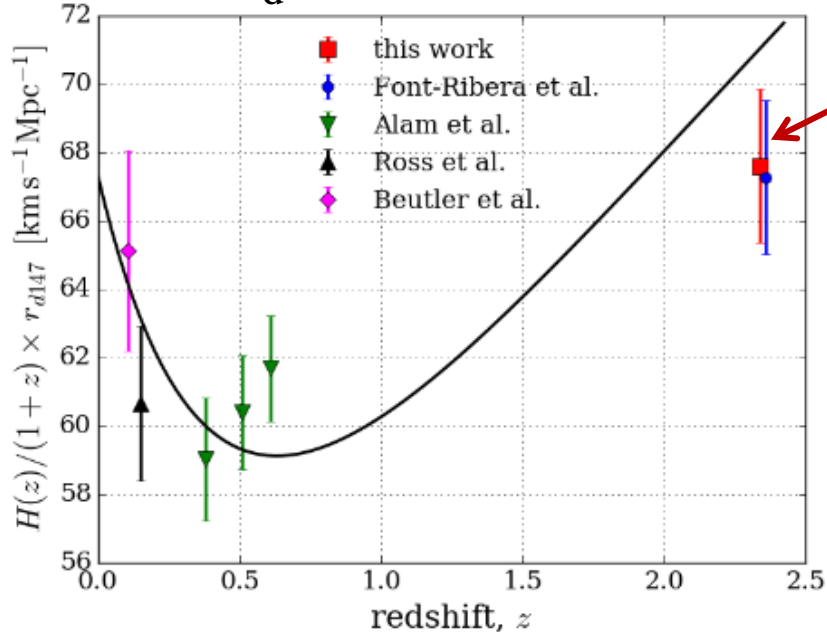


Absorption de Ly α à $z=2.3$

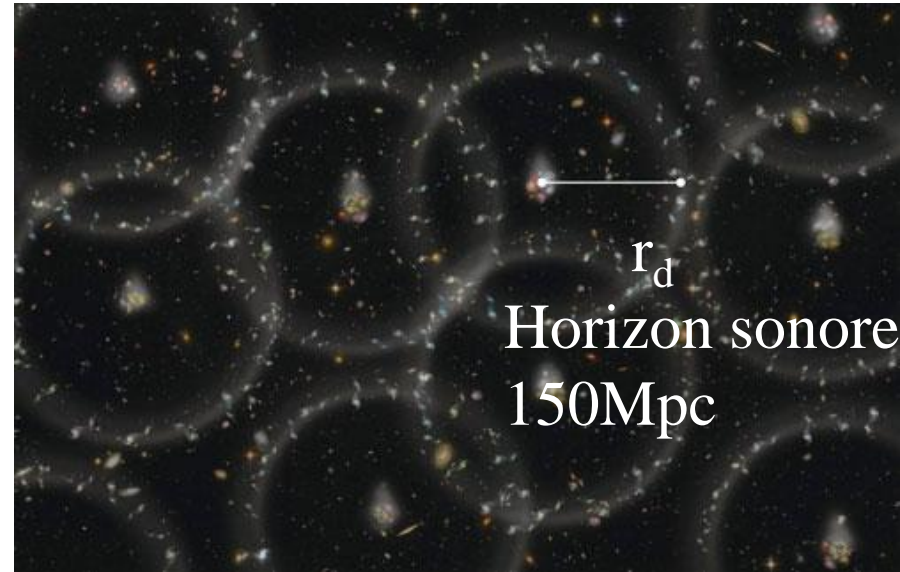
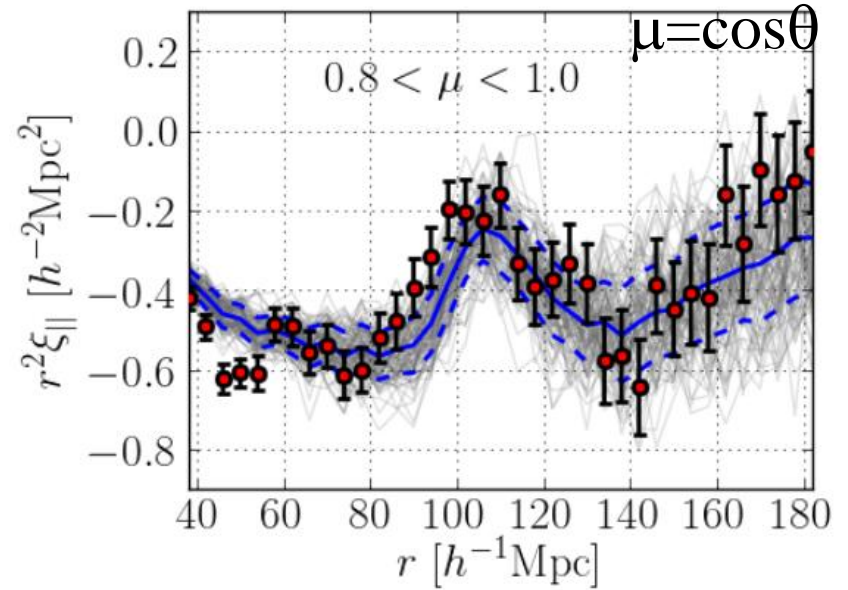
Delubac et al 2014 (1.610⁵ QSO)

Points rouges vs QSO simul (gris)

$H(z)/(1+z) r_d$



Bautista et al 2017



La raie H α , formation d'étoiles

Carte d'intensité (IM) au lieu de détecter les objets individuellement
On ne détecte qu'une moyenne, une fluctuation, un spectre de puissance

→ Détection de la globalité du signal, même venant d'objets trop faibles pour être détectés seuls

Information statistique sur l'énergie sortant dans la raie

Problème: confusion possible avec d'autres raies

H α : raie de recombinaison, gaz ionisé par des étoiles jeunes O, B

Galaxies individuelles: seulement les plus massives!

2 instruments: **SPHEREx** et **CDIM**

Silva et al 2017

M51



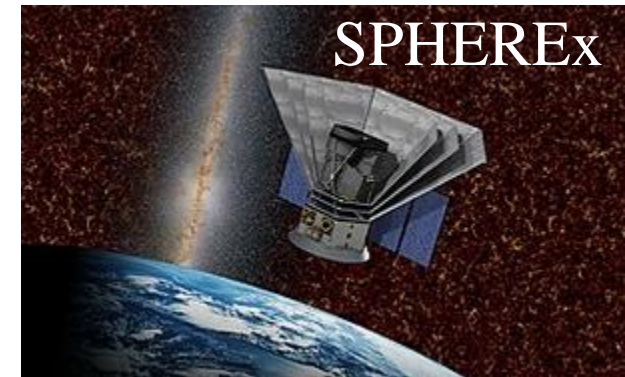
Instruments de tomographie

SPHEREx (*Spectro-Photometer for the History of the universe, Epoch of Reionization, and ices Explorer*)

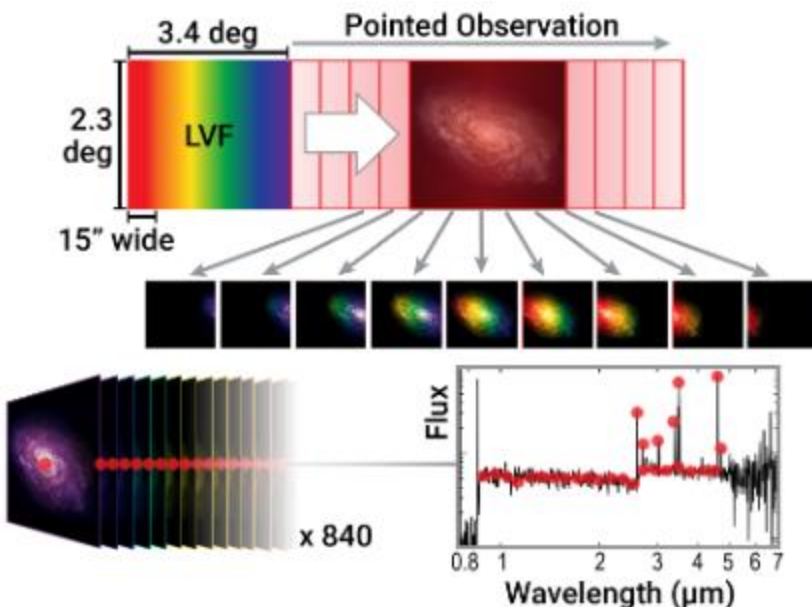
Proche infrarouge, H α , H β , [OIII], Ly α de $z=0.5$ à 5

Lancement par NASA en 2023

450 millions de galaxies



CDIM (Cosmic Dawn Intensity Mapper)



Spectroscopy 0.75 – 7.5 μm , $R=300$

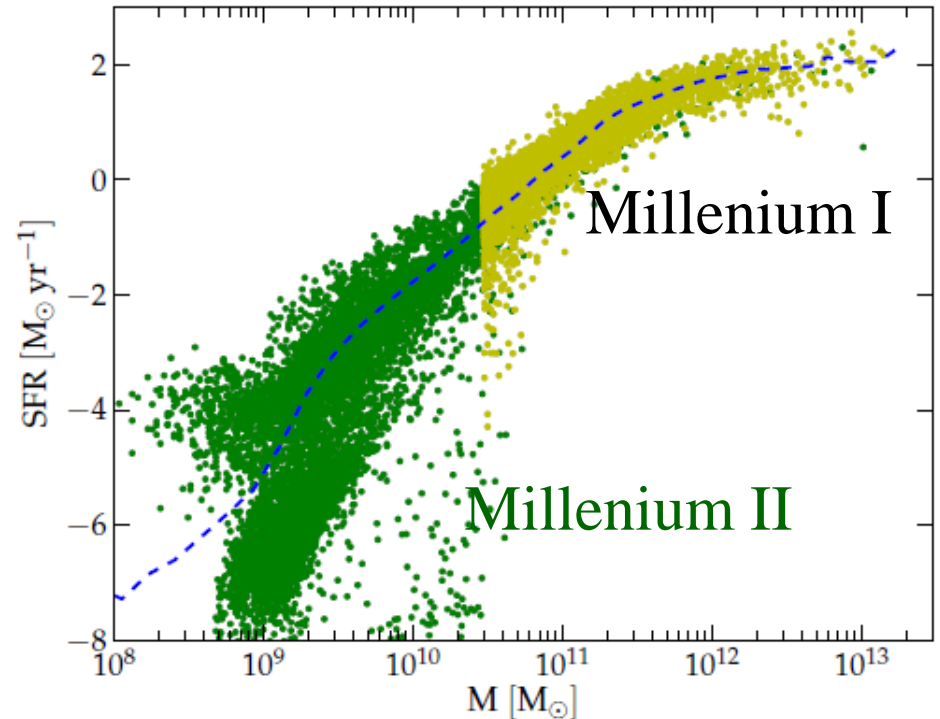
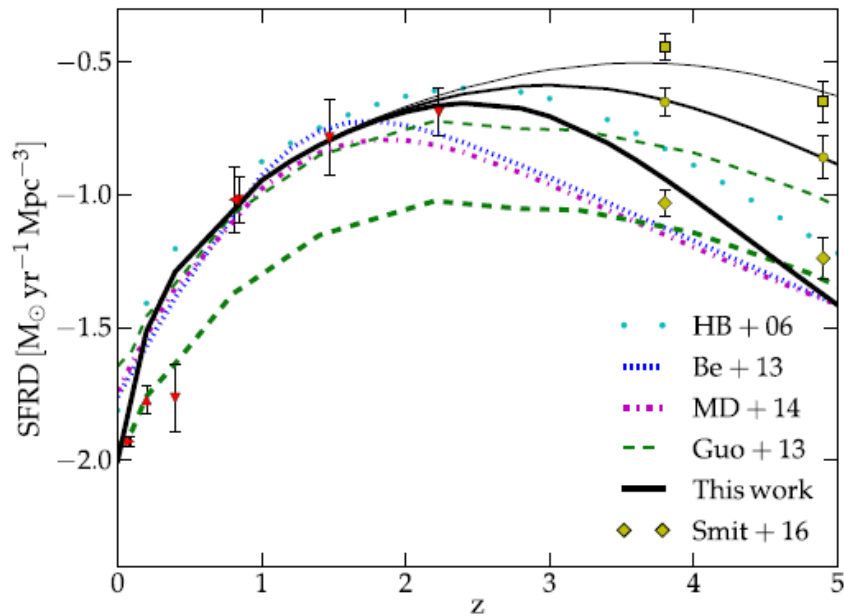
Complémentaires à Euclid et WFIRST qui n'auront pas d'instrument de carte d'intensité (« intensity mapping »)

Modèle de la tomographie $H\alpha$

Supposons une fraction d'échappement nulle $f_{\text{esc}}=0$
 $L_{H\alpha}$ est proportionnelle au taux de SF

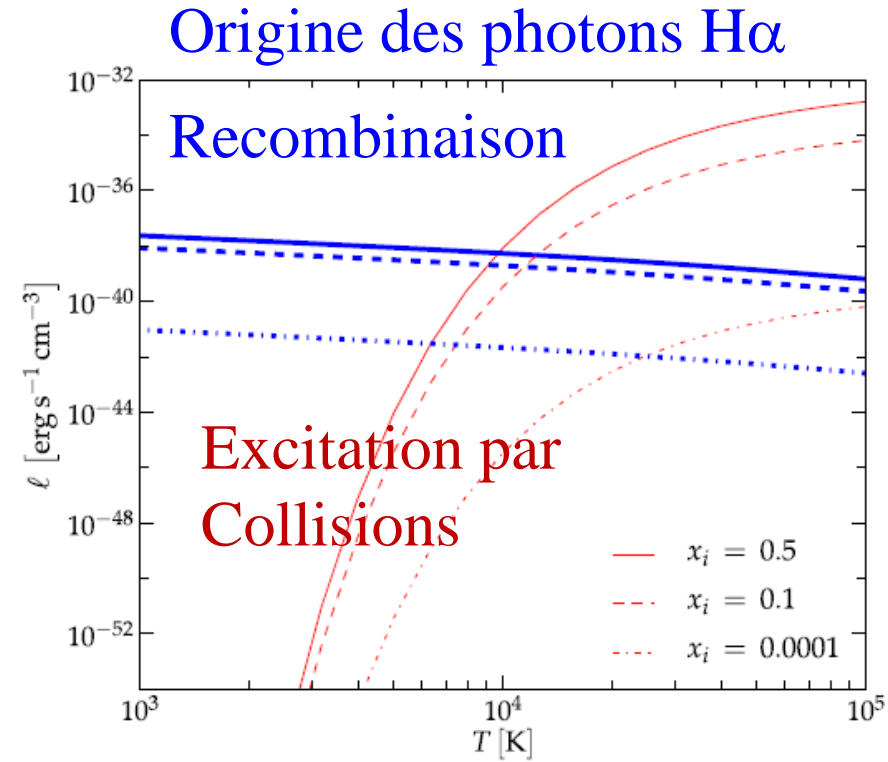
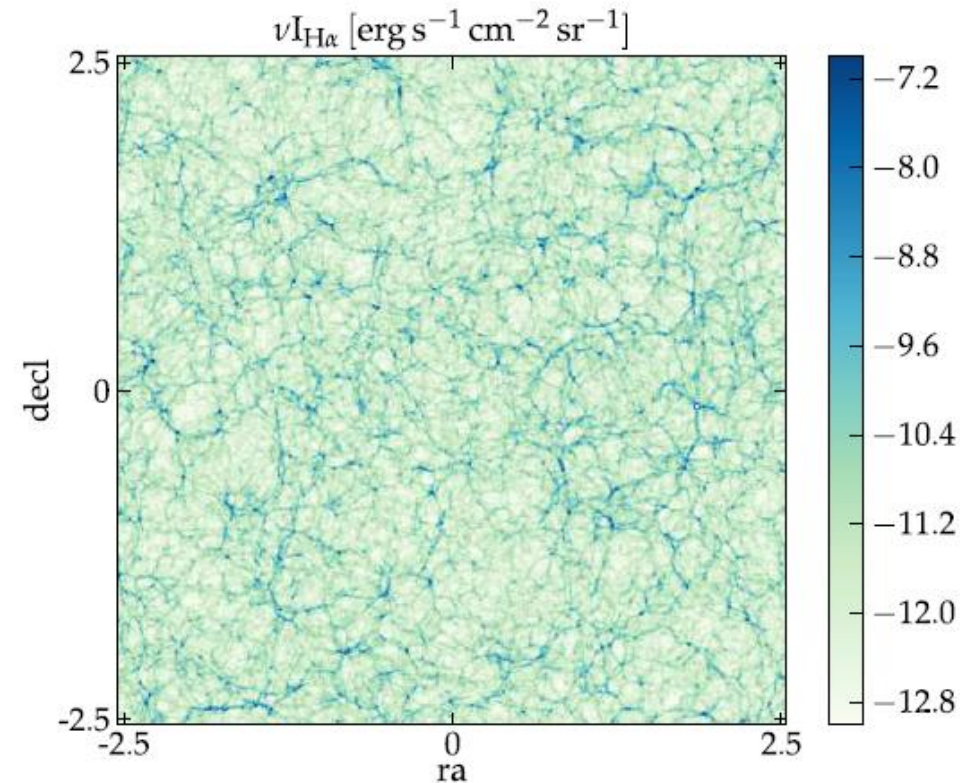
$z=2.2$

Les prévisions dépendent du modèle



Simulation des cartes $H\alpha$

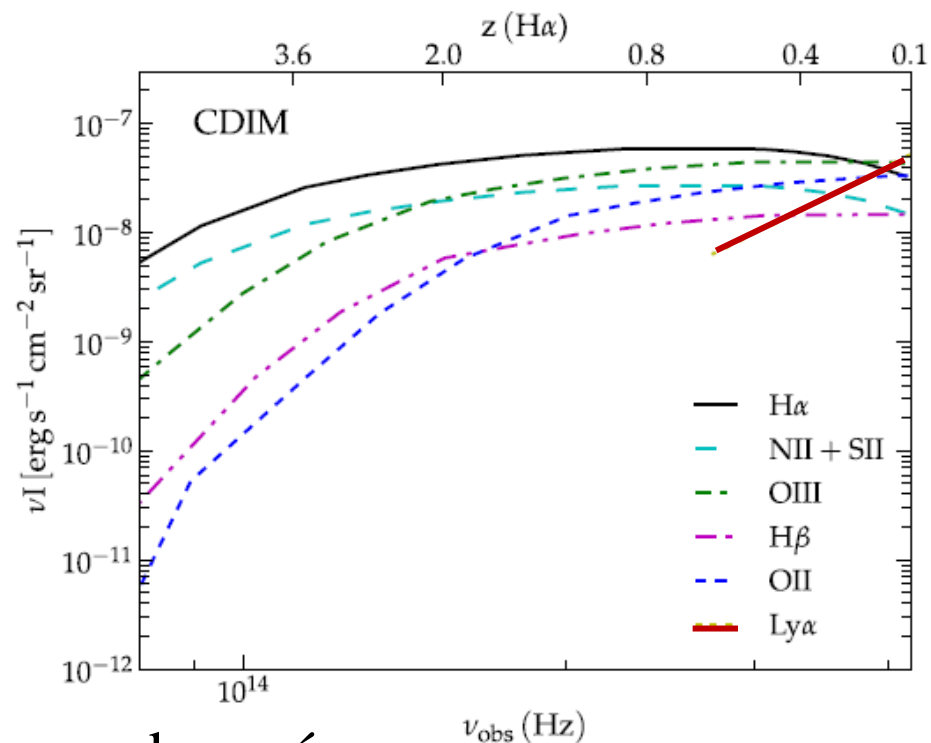
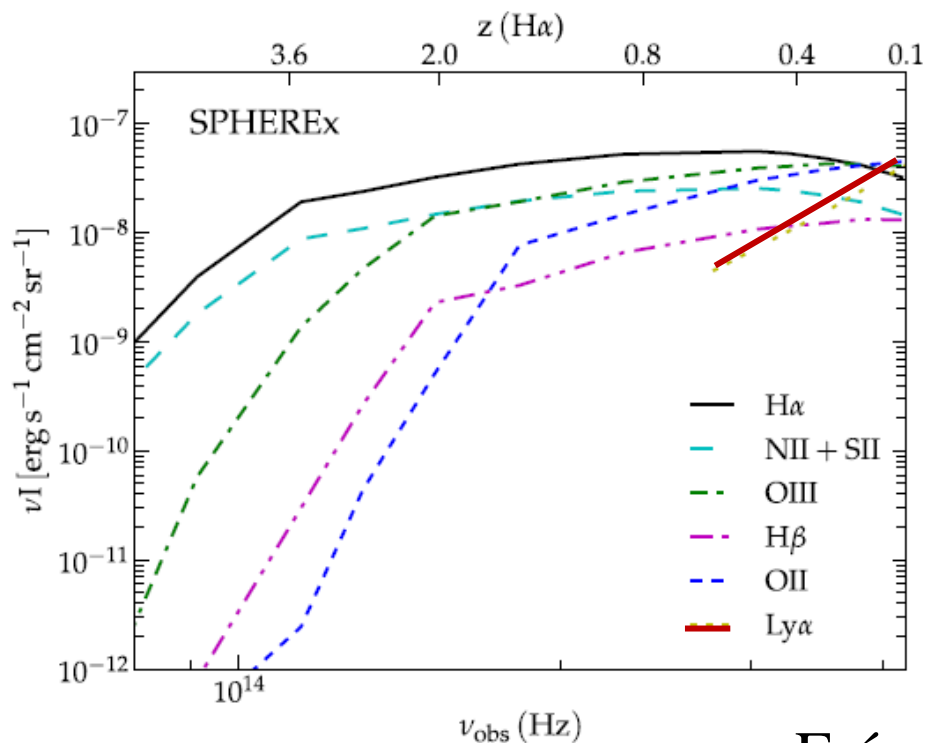
Le $H\alpha$ détecté viendra non seulement des galaxies, mais aussi du milieu intergalactique, des filaments



Silva et al 2017

Prédictions de signal

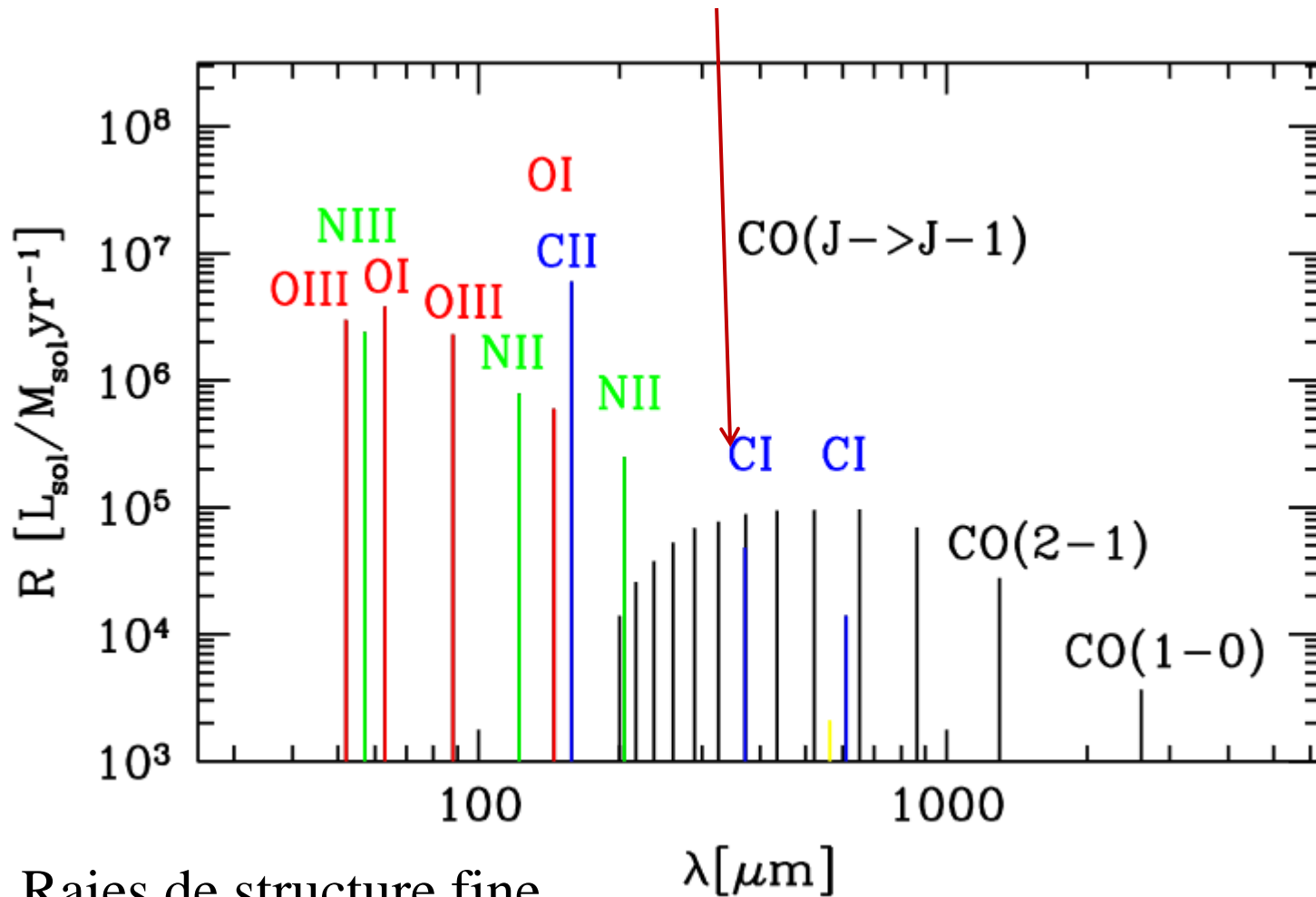
Différentes raies $H\alpha$, $H\beta$, $[NII] + [SII]$, $[OII]$, $[OIII]$, $Ly\alpha$



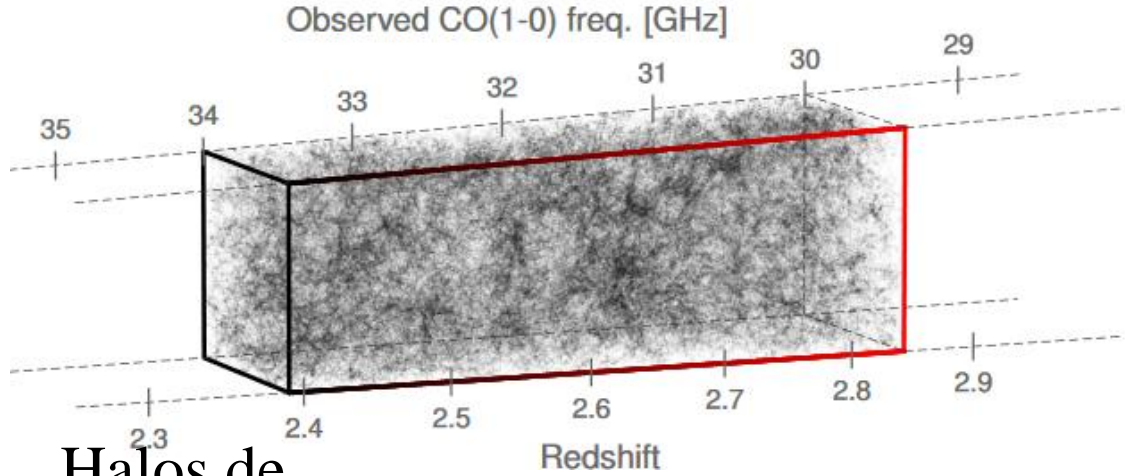
Fréquence observée

Les divers traceurs de SF

CO(7-6) et CI(2-1)



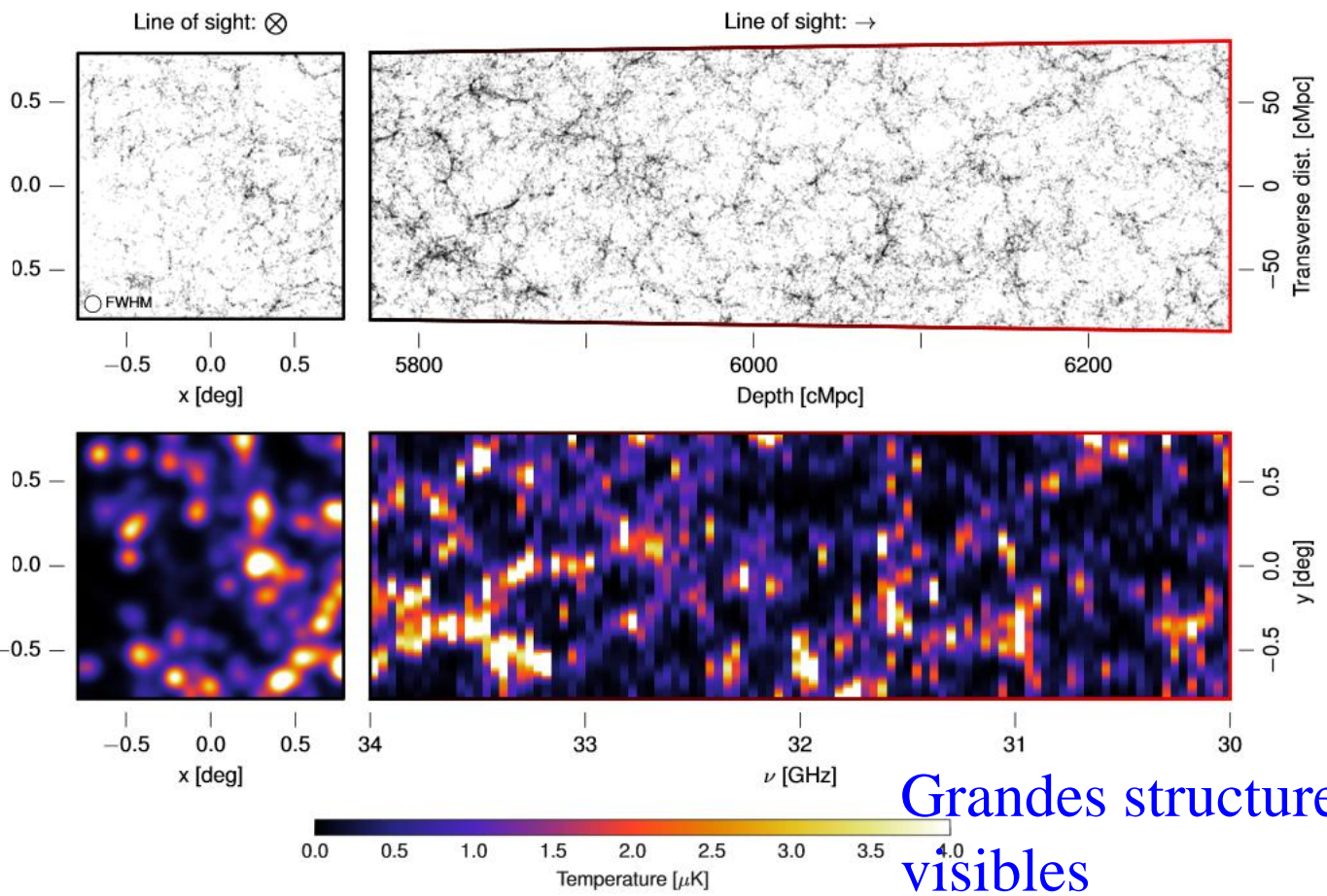
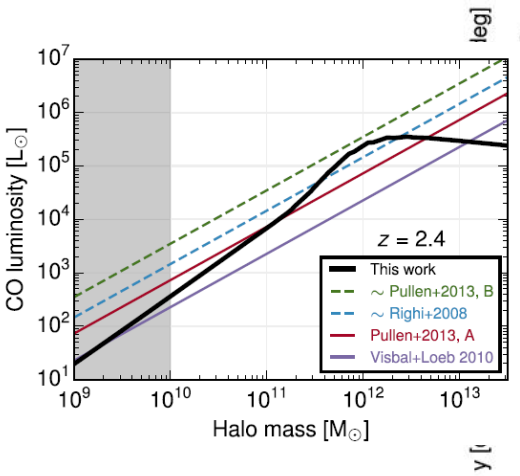
Raies de structure fine
FIR, refroidissants



Predictions for the CO(1-0) line at $z=2.4-2.8$
LIR-LCO, CO LF..

Li, Wechsler et al 2016

Halos de matière noire

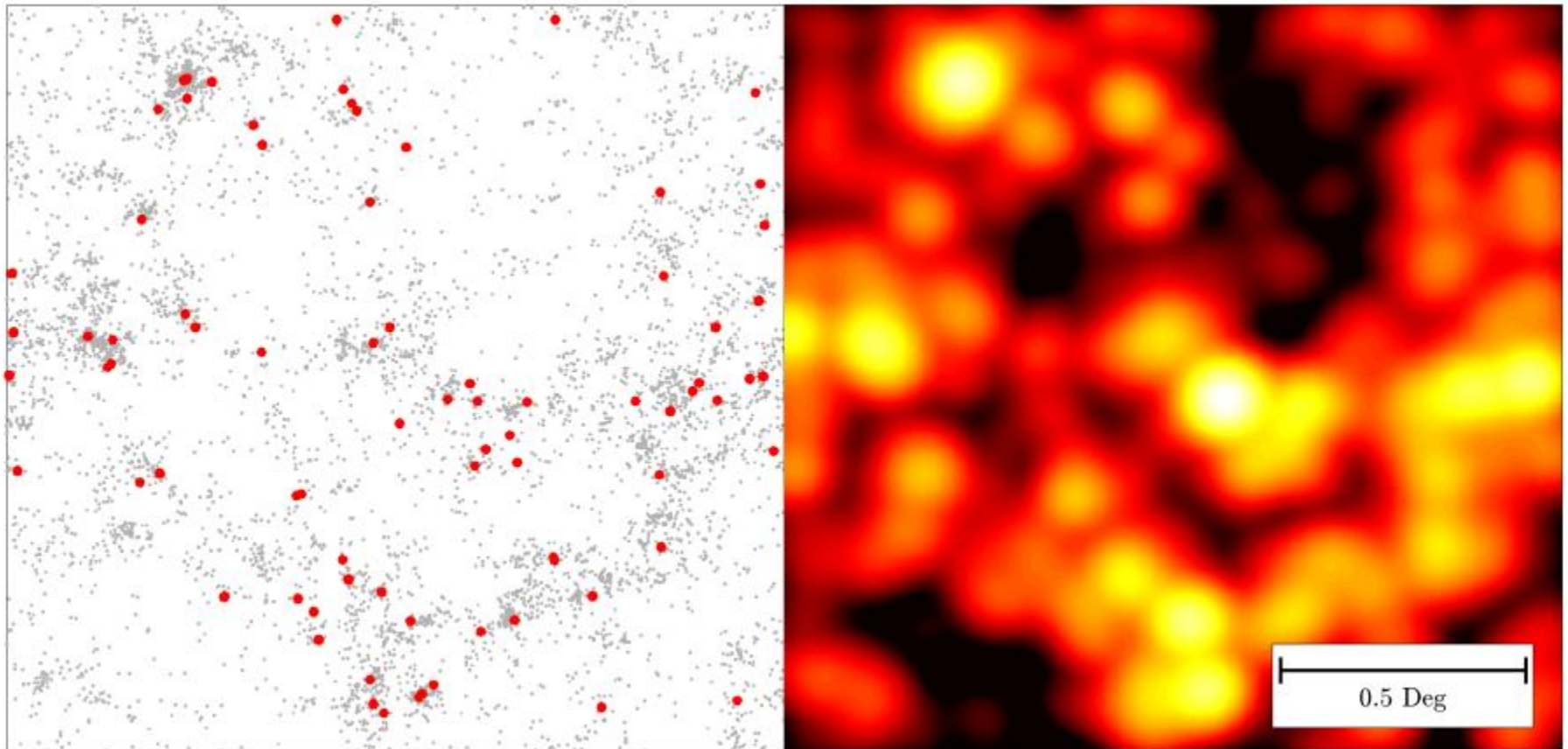


Prédiction Flux dans le cube

Grandes structures visibles

Le principe de la carte d'intensité

Vue d'ensemble – galaxies non résolues. Observer pendant 5000h



Champ de $2.5^{\circ 2}$ Les sources détectables individuellement avec un télescope radio (VLA) sont en rouge *Breysse et al 2016*
10 000 FOV à $z=2$

Utiliser les plus petits télescopes

Champ de vue plus grand (N plus grand pour une même surface)

Exemple, Owens Valley (Californie)

23 antennes de 10m, puis pour le survey SZ (Sunyaev-Zeldovich)

8 antennes de 3.5m (espacements courts)



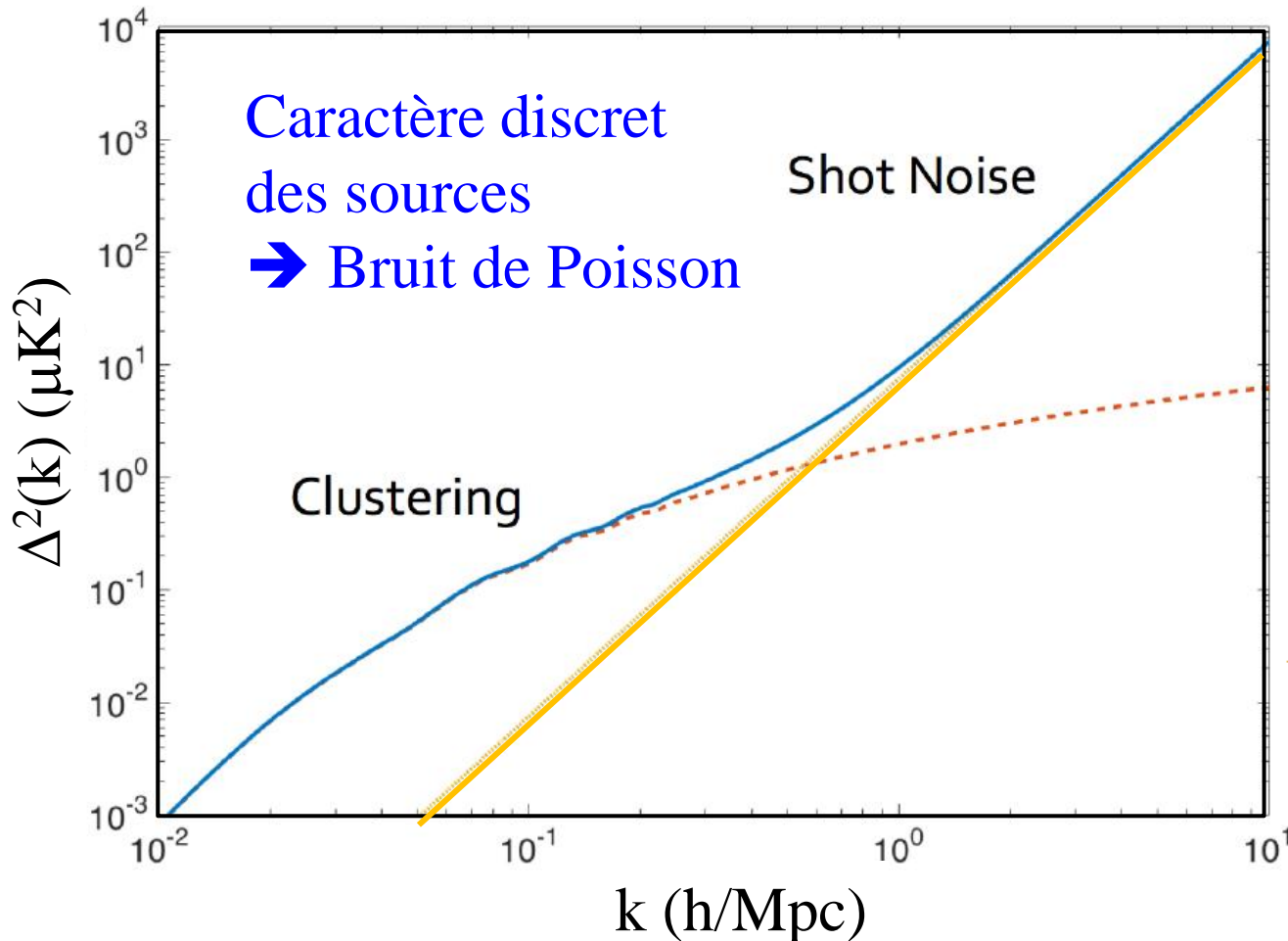
Tous munis de récepteurs à 1cm de longueur d'onde

→ CO à $z=2.8-3.2$

Calcul du spectre de puissance

En fonction des fréquences spatiales $k = 2\pi/\lambda$ unité Mpc^{-1}
 et $h=H/100 \text{ km/s/Mpc}$

$$P_k(z) = \langle I(z) \rangle^2 b^2(z) P_m(k, z) + P_{\text{shot}}(z)$$

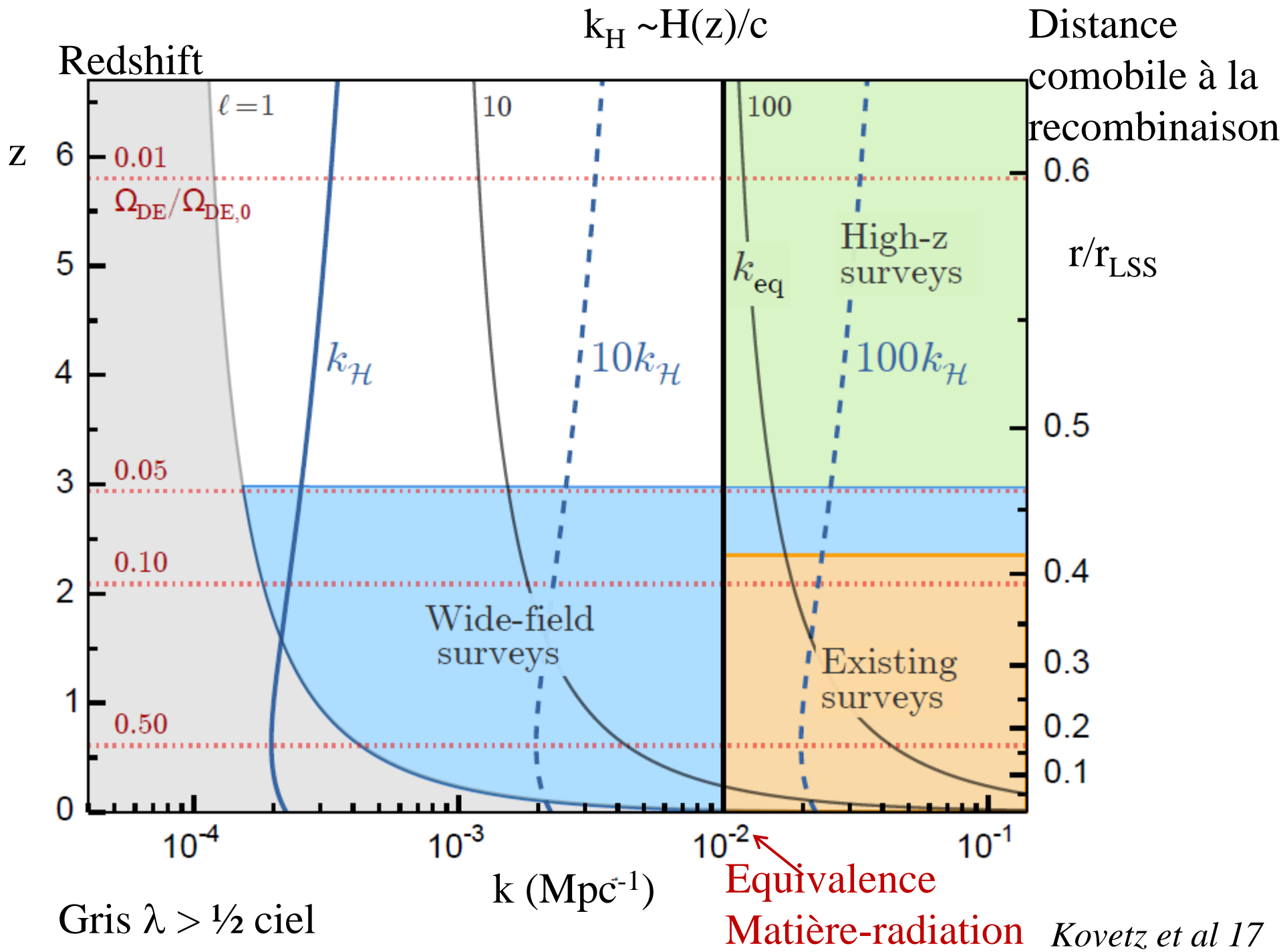


b = biais baryons
 sur matière noire

$$\langle I(z) \rangle \propto \int_0^{\infty} L \Phi(L, z) dL$$

$$P_{\text{shot}}(z) \propto \int_0^{\infty} L^2 \Phi(L, z) dL$$

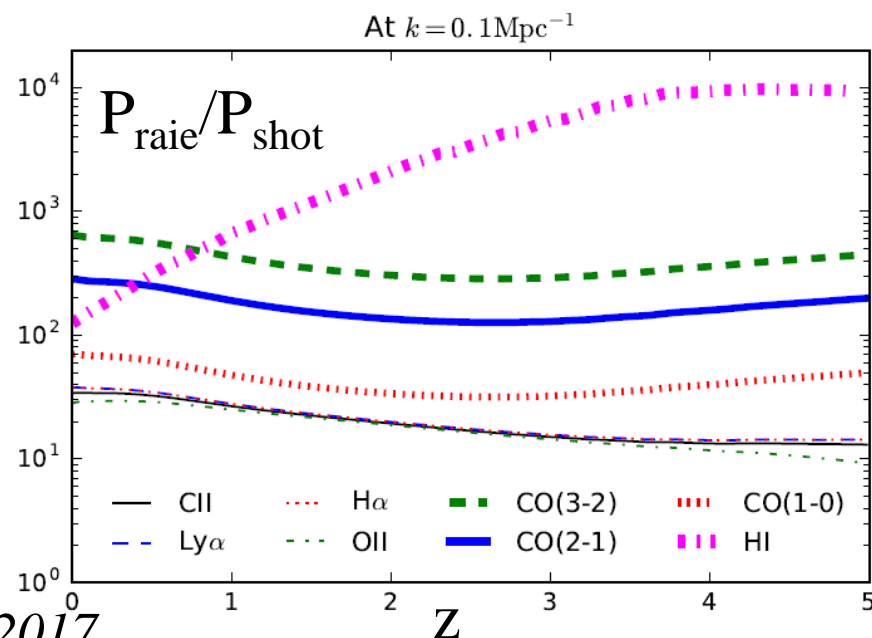
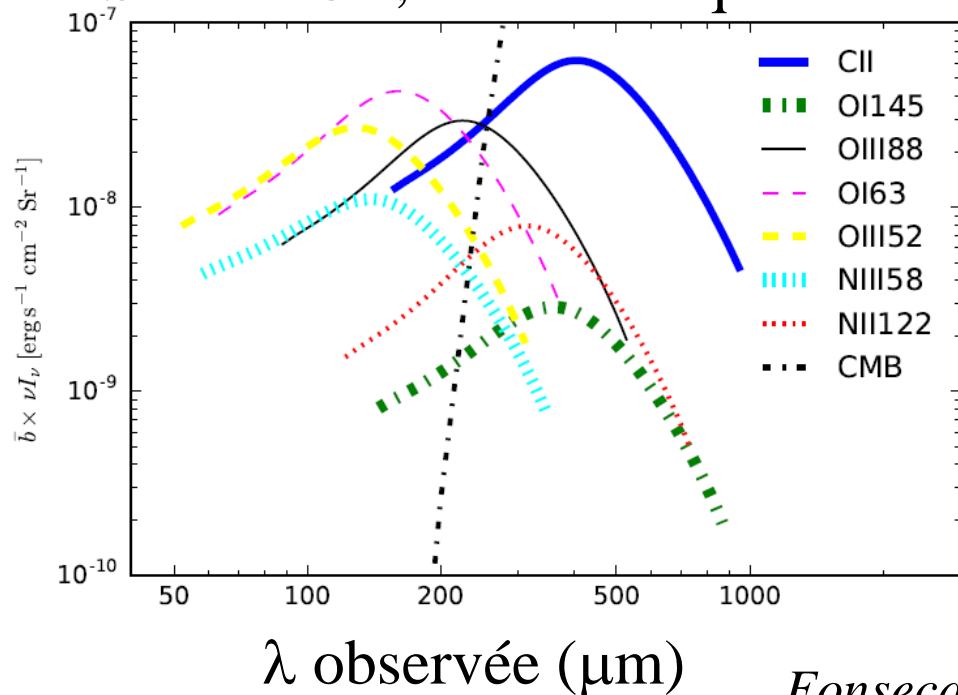
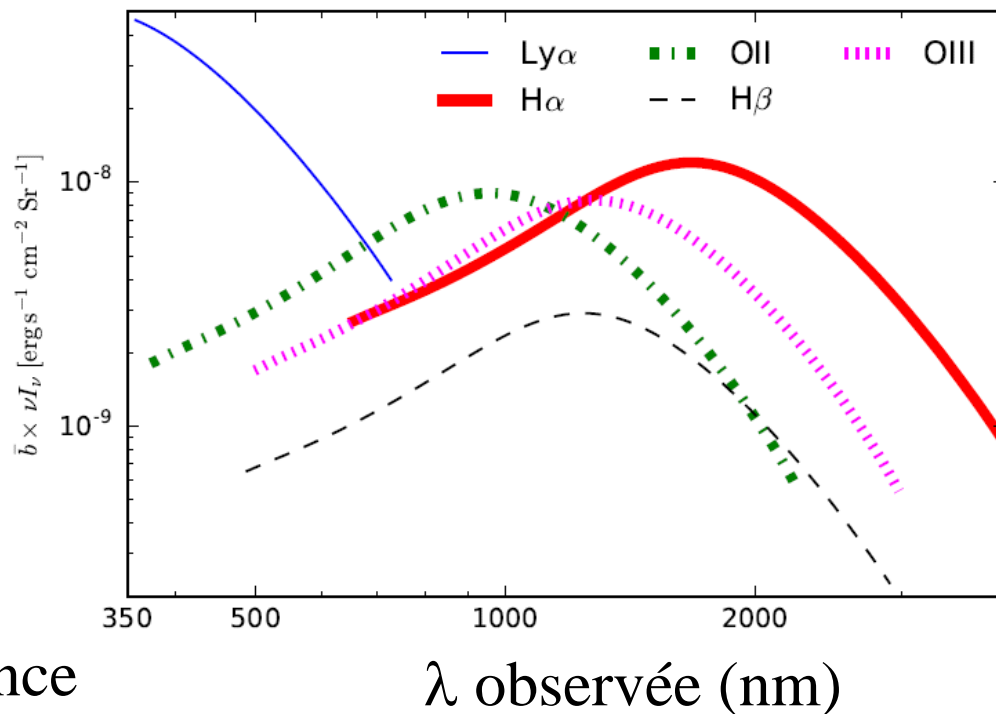
$$\Phi(L, z) \equiv dn(z)/dL$$



Diverses raies surveys futurs

En optique, Ly α proche
Mais surtout H α

En infrarouge lointain
Surtout CII, à basse fréquence

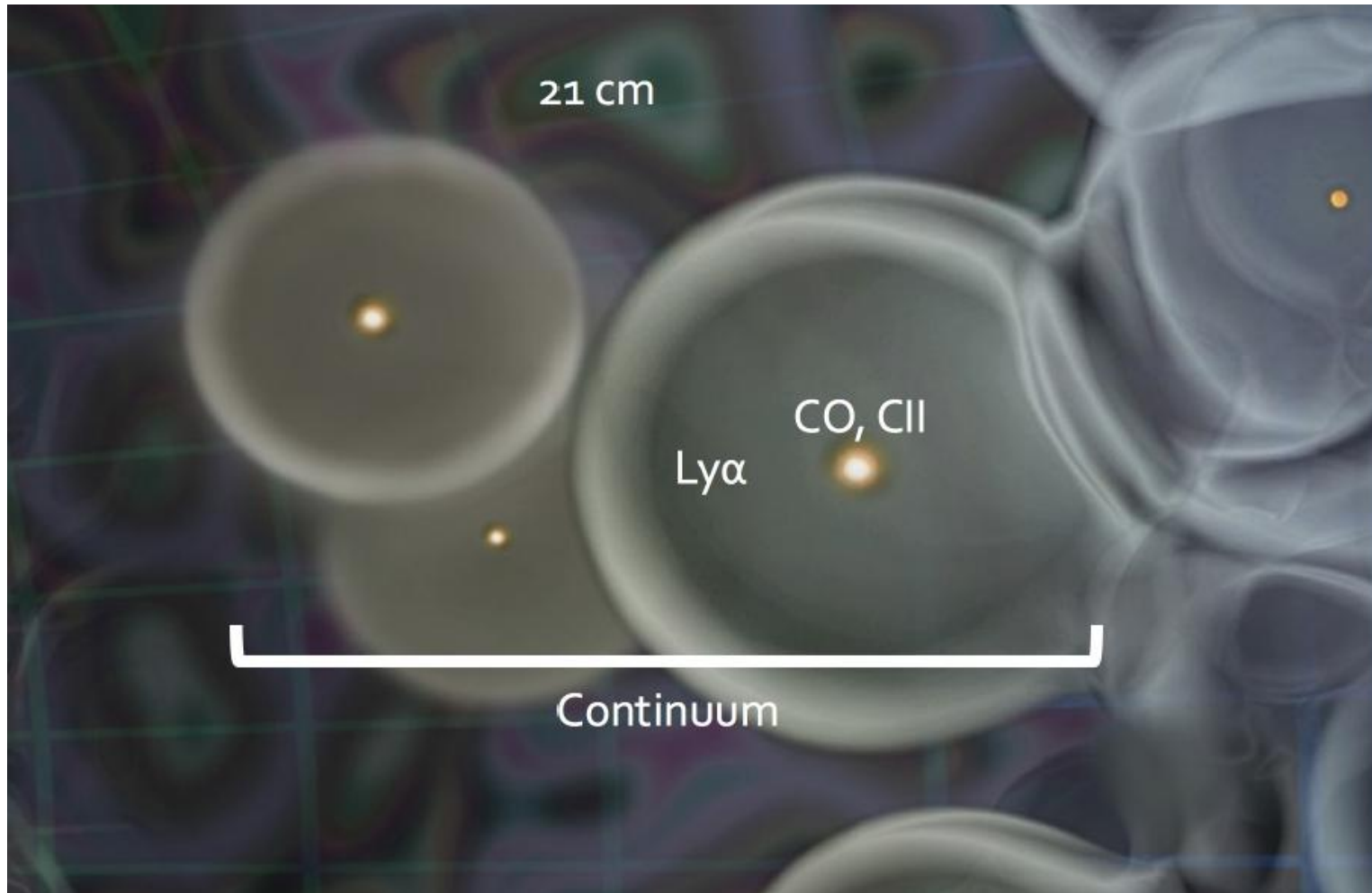


Cartes complémentaires dans l'EoR

Continuum= CIB, 21cm aux longueurs d'onde métriques

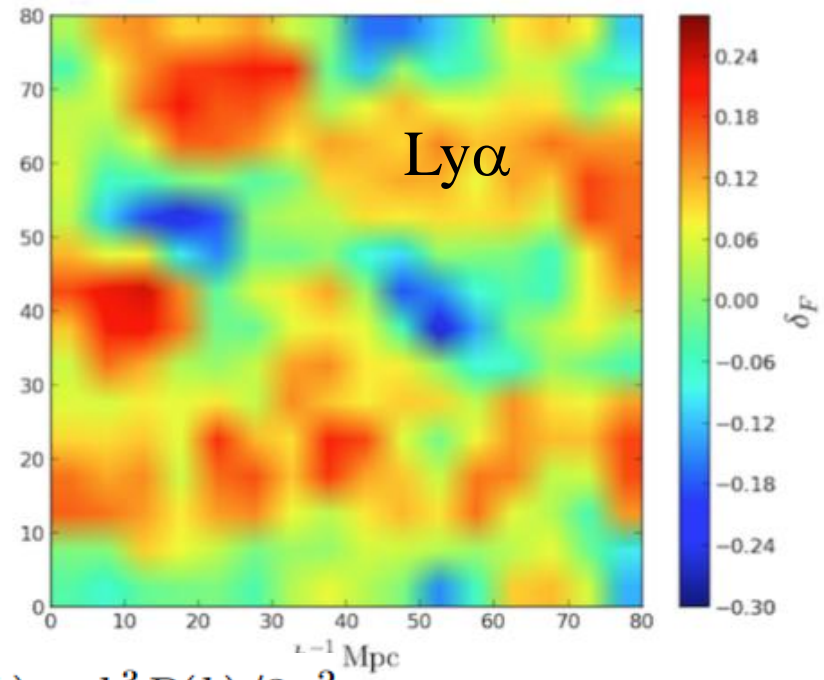
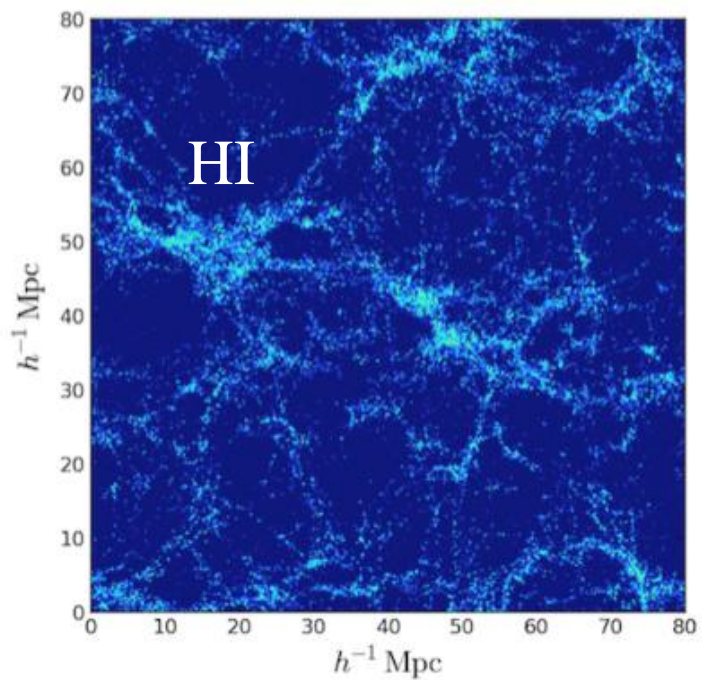
CO, CII: formation d'étoiles, Ly α extension

Les corrélations croisées devraient s'affranchir des biais/artefacts



P. Breysse

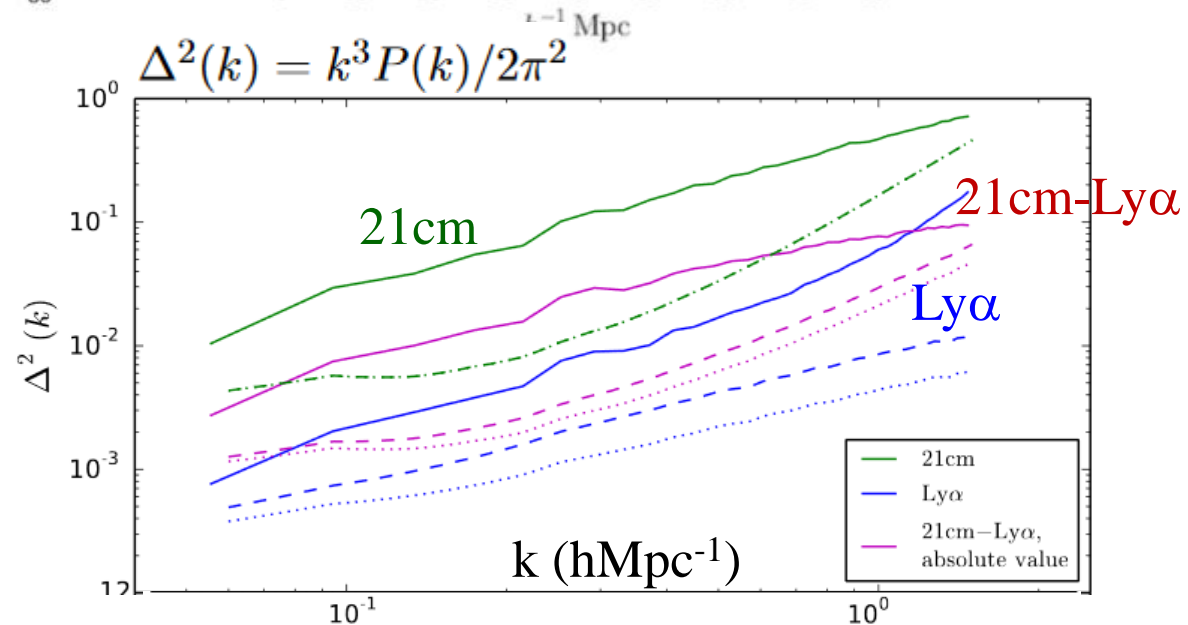
Prédictions simulées



Boîte de $10/h \text{ Mpc}$
(2048) $z=2.4$

(pointillés: erreurs de
SKA-mid, BOSS)

Carucci et al 2017



Premières détections HI $0.53 < z < 1.12$



Télescope GBT 800Mhz, lobe de 15' ~9 Mpc

En fréquence 2 Mpc Champ DEEP2 120 x 30'

10 000 galaxies en optique

Avant-plan: RFI polarisé, et synchrotron MW+galaxies

→ Fluctuations de 125mK (~1000 fois le signal) $S \sim 464_{\pm 277} \mu\text{K}$

Corrélation croisée avec DEEP2 positive $S \sim 157_{\pm 42} \mu\text{K}$ (4σ)

$\Omega_{\text{HI}} = (5.5_{\pm 1.5})10^{-4}(1/rb)$ à $z \sim 0.8$, r quantifie la corrélation entre 21 cm et l'optique, et b le biais de HI

Chang, Pen et al 2010

Une plus grande surface, avec GBT aussi, 190h

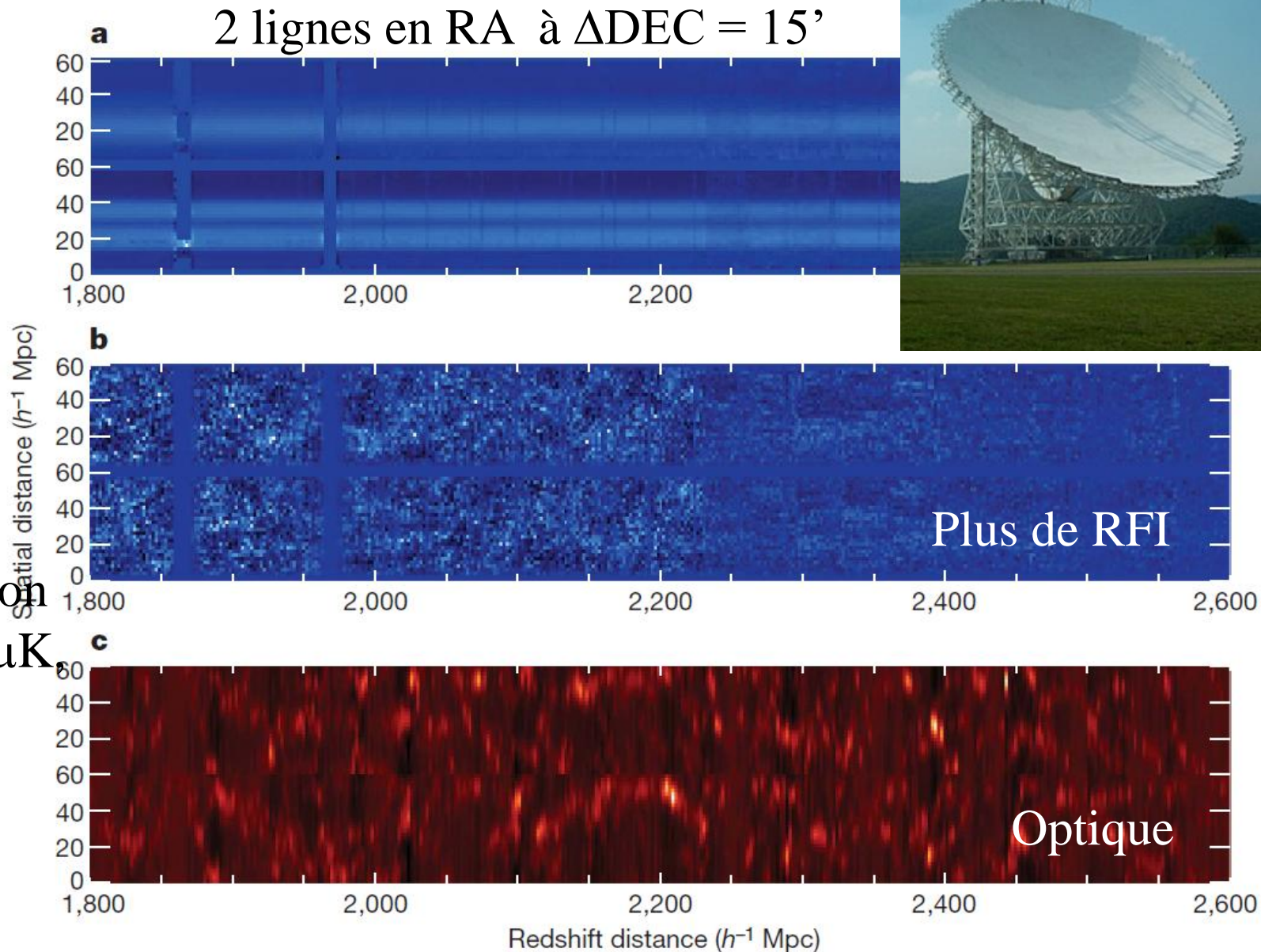
Masui et al (2013) $0.6 < z < 1$ $40^{\circ 2}$, corrélation avec WiggleZ

$\Omega_{\text{HI}} = (4.3_{\pm 0.7})10^{-4}(1/rb)$

Observations avec GBT (Green Bank-100m)
Lobe de 15' à $z \sim 0.8$ (800MHz) = 9/h Mpc



Résol en
fréquence
2/h Mpc
125 mK



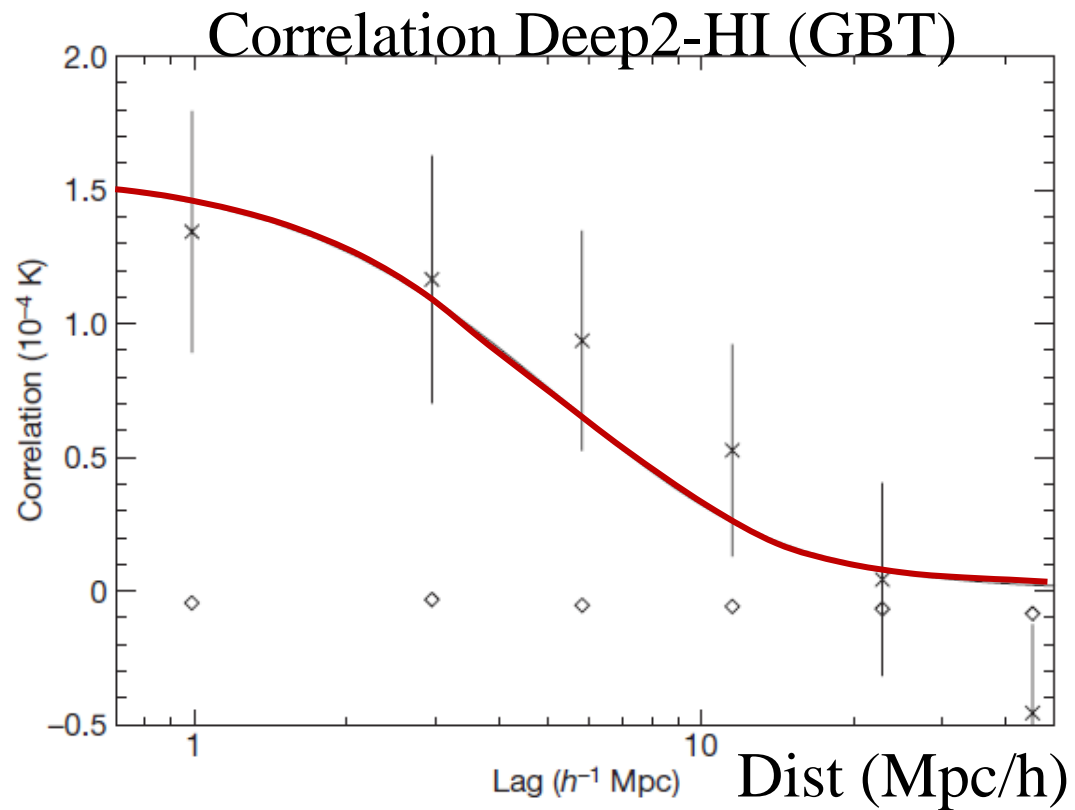
Après
Soustraction
 $464_{\pm 277} \mu\text{K}$

Soustraction des avant-plans

- Interférences terrestres + satellites RFI: en général polarisées
- Filtre en polarisation
- Il reste ensuite 125mK de bruit, qui contient les sources radio continuum = 1000 x le signal attendu!

Dans le diagramme
Fréquence /position,
ces sources sont des raies
continues (lisses en
fréquence), avec la taille
du lobe de 15' du GBT

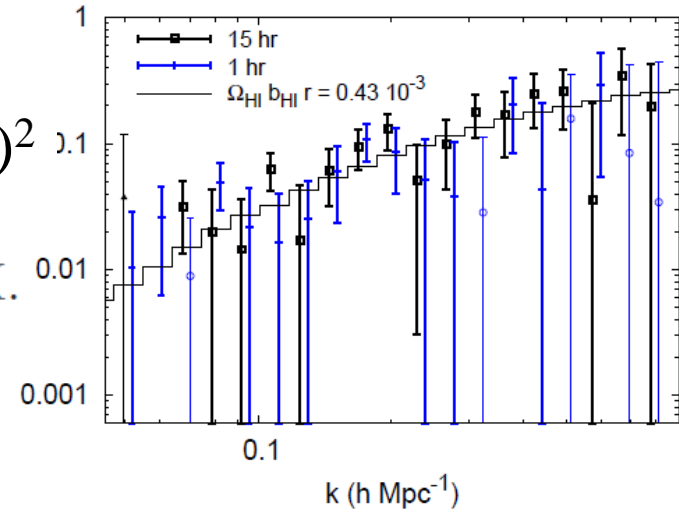
Chang, Pen et al 2010



Corrélation HI-optique

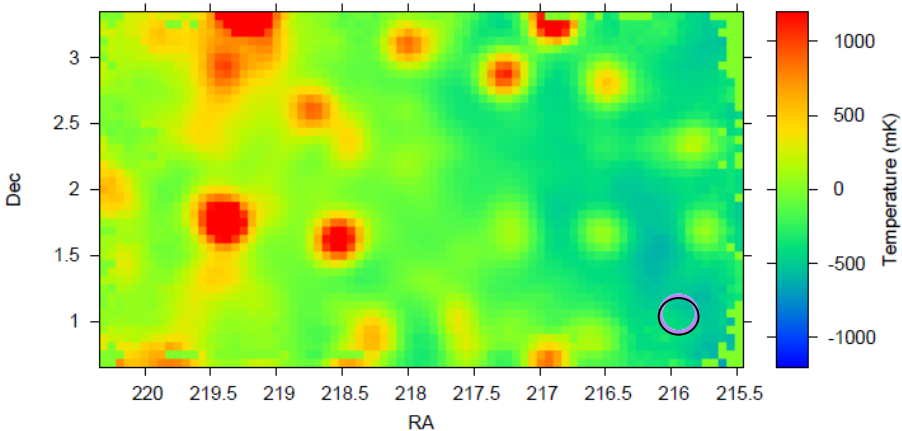
$$T_b = 0.29 \frac{\Omega_{\text{HI}}}{10^{-3}} \left(\frac{\Omega_m + (1+z)^{-3} \Omega_\Lambda}{0.37} \right)^{-\frac{1}{2}} \left(\frac{1+z}{1.8} \right)^{\frac{1}{2}} \text{ mK.}$$

$$\Delta(k)^2$$



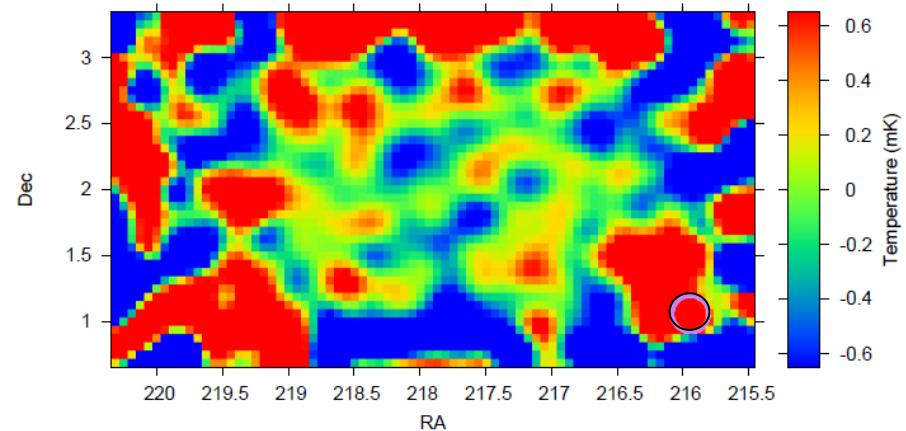
Ω_{HI} , Ω_m et Ω_Λ comobiles, calibrés à $z=0$

GBT 15hr field (800.4 MHz, $z = 0.775$)



Carte brute

GBT 15hr field, cleaned, beam convolved (800.4 MHz, $z = 0.775$)

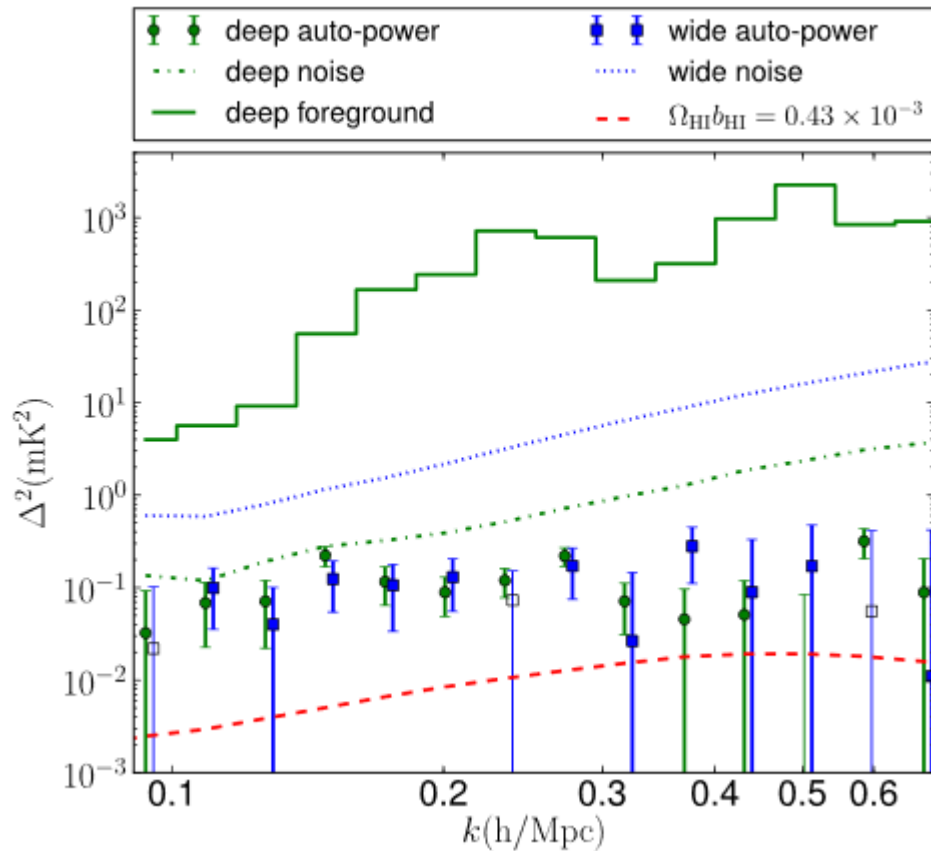


Après soustraction de 20 modes avant-plan

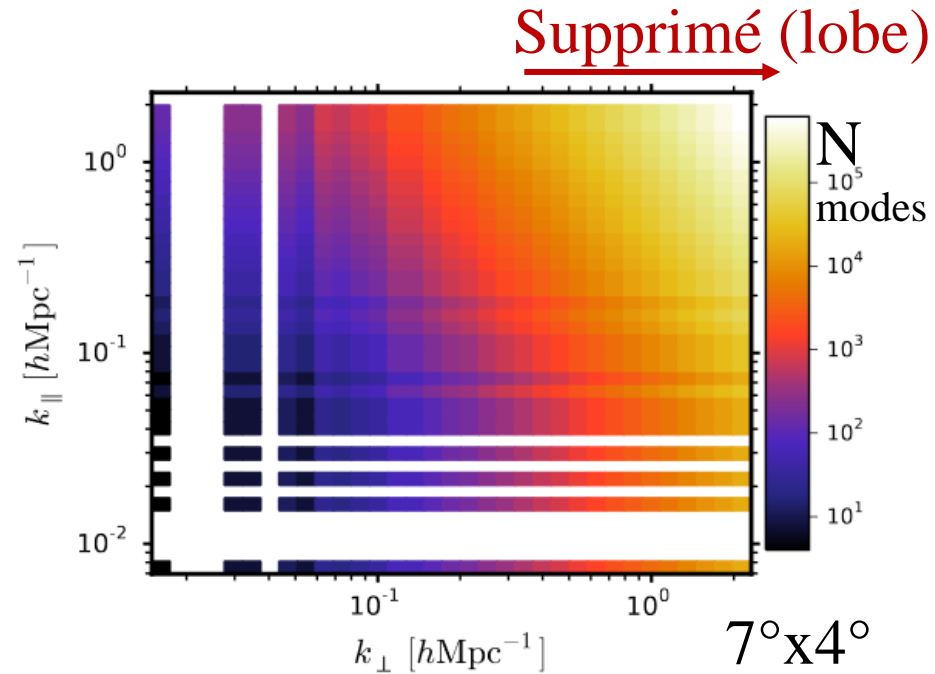
→ Corrélation avec l'optique de WiggleZ

Survey large et profond requis

Bruit semble thermique, mais l'auto corrélation HI n'est pas détectée
La propriété-clé des avant-plans n'est pas qu'ils sont spectralement lisses, mais plutôt qu'ils ont moins de degrés de liberté spectraux que le signal cosmologique.



Risque de supprimer le signal!



De fausses corrélations entre le signal et l'avant-plan produisent un biais supplémentaire

Switzer et al, 2013, 2015

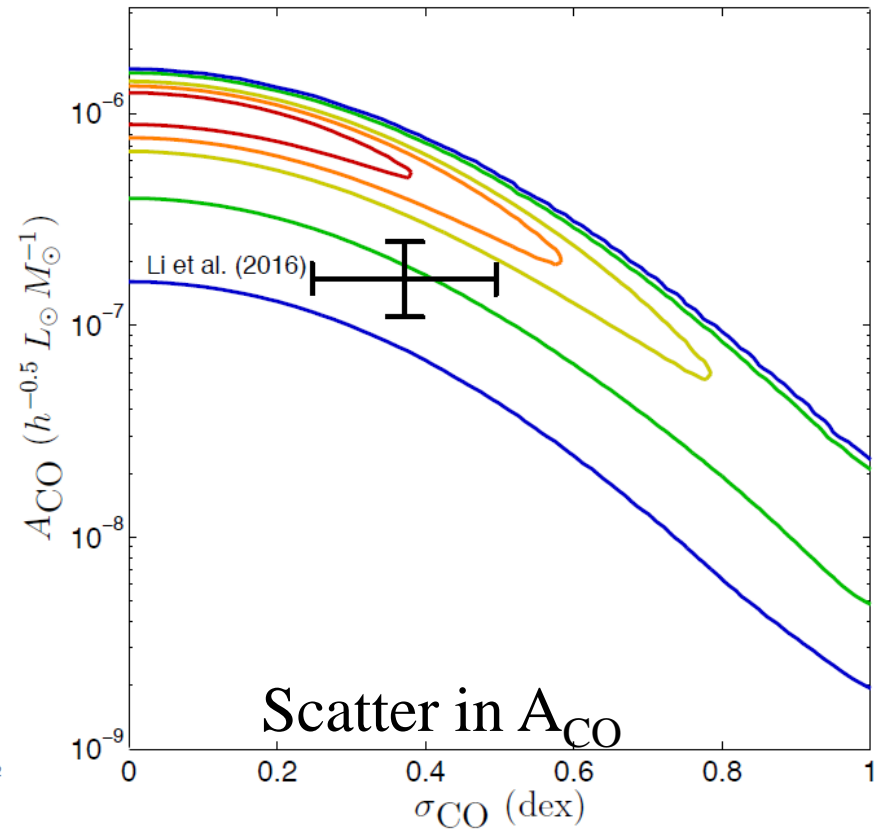
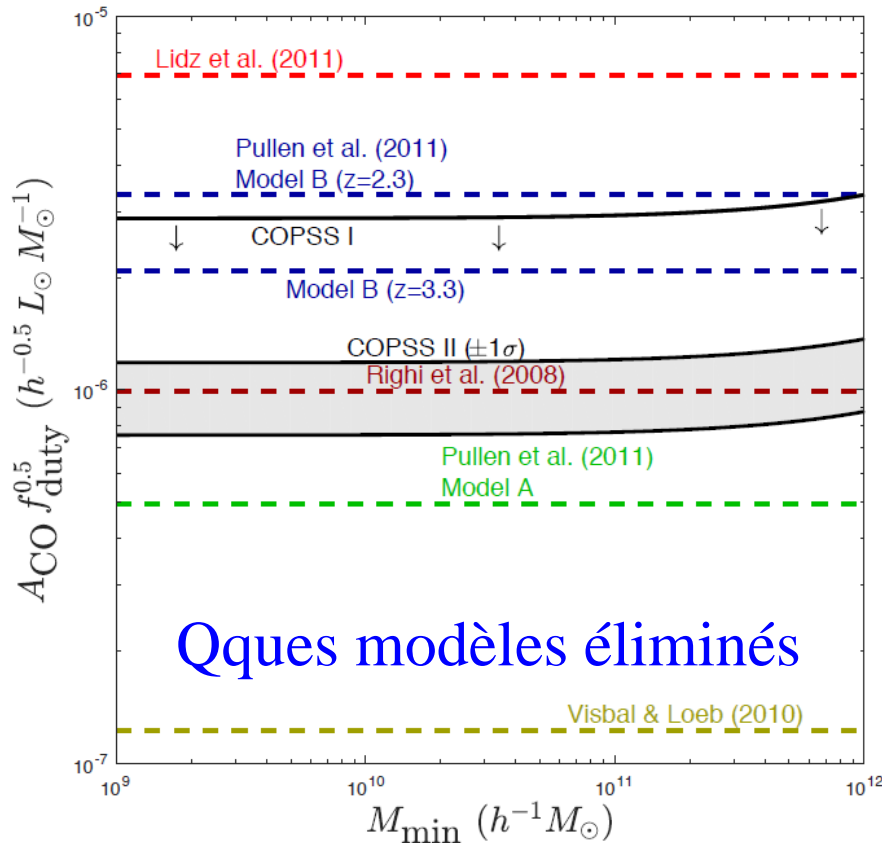
Surveys de la molécule CO

COPSS « CO Power Spectrum Survey », avec les antennes SZA
 19 champs, $0.7^{\circ 2}$, $z \sim 3$ Pour $M_h = 10^{12} M_{\odot}$, $f(H_2) \sim 5.5\%$

Détection tentative (3σ) ? *Keating et al 2016*

Modèles de Li et al 2016

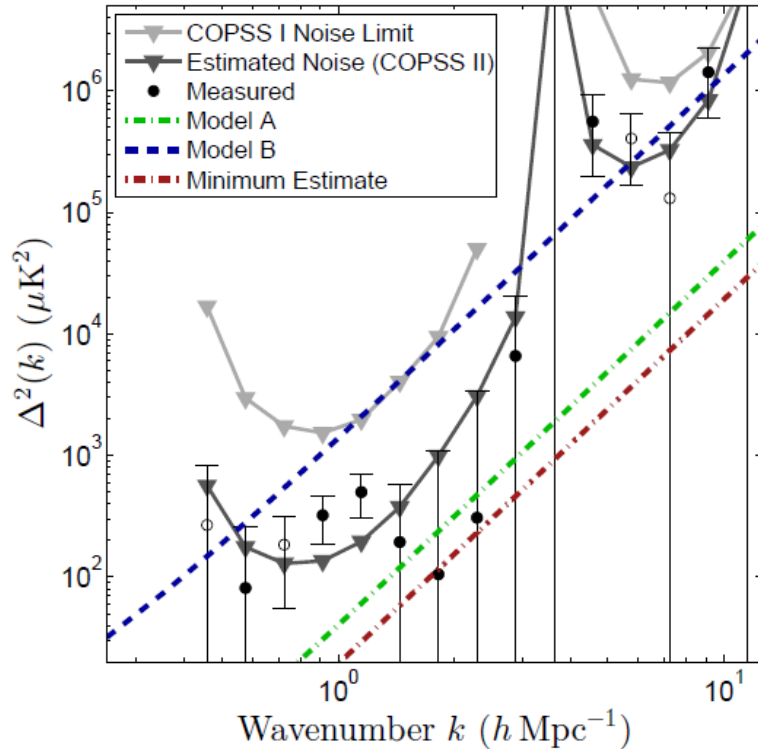
$$A_{CO} = L_{CO} / M_{halo}$$



$$\rho_{z \sim 3}(H_2) = 1.1^{+0.7}_{-0.4} \times 10^8 M_{\odot} \text{ Mpc}^{-3}$$

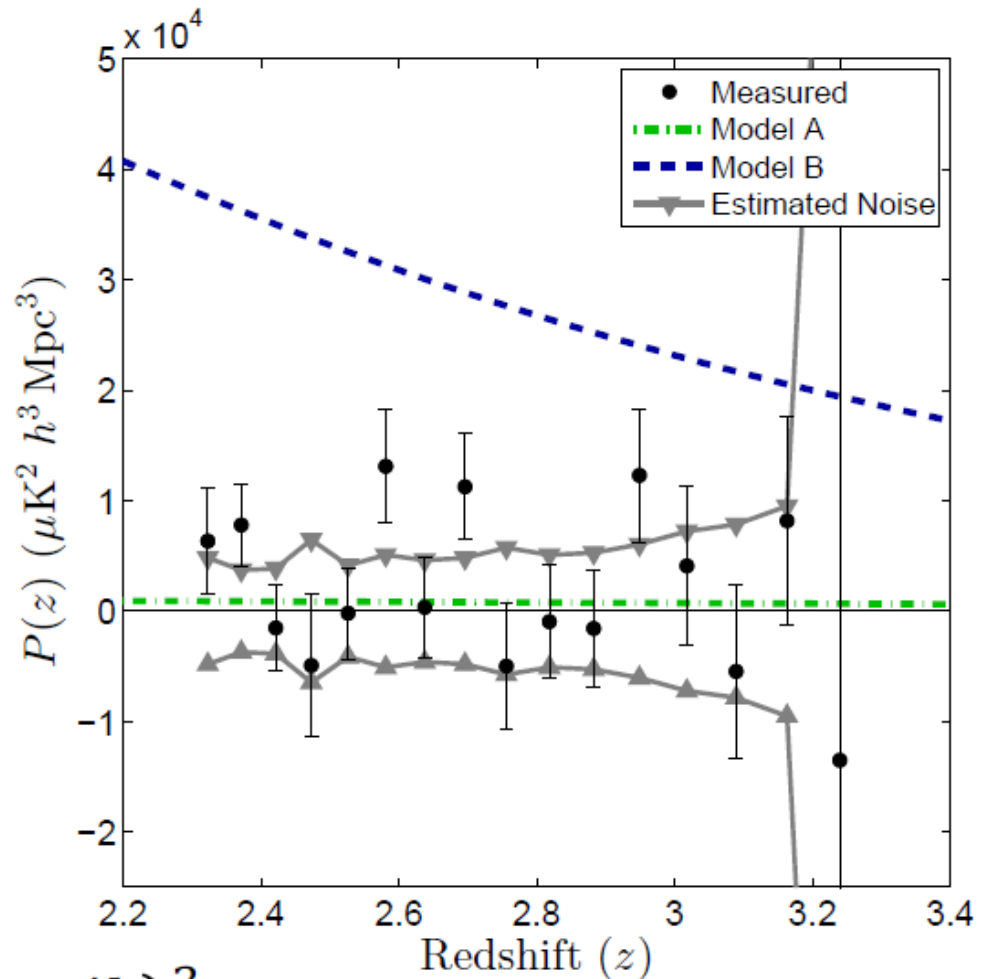
Tentative détection de P(z)

Négatif: symboles vides



Spectre de puissance de CO

Evolution avec le redshift



Keating et al 2016

$$P_{\text{CO}} = 3.0_{-1.3}^{+1.3} \times 10^3 \mu\text{K}^2 (\text{Mpc}/h)^3$$

Futures cartographies CII/CO

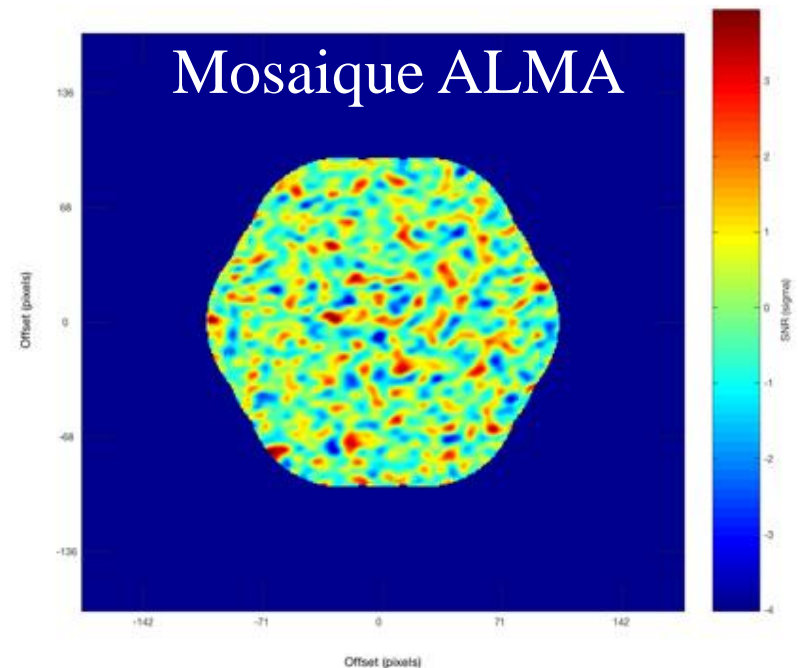


VLA (1cm) ACA/ALMA (3mm)
CO(1-0) +2-1 CO(2-1) à 7-6

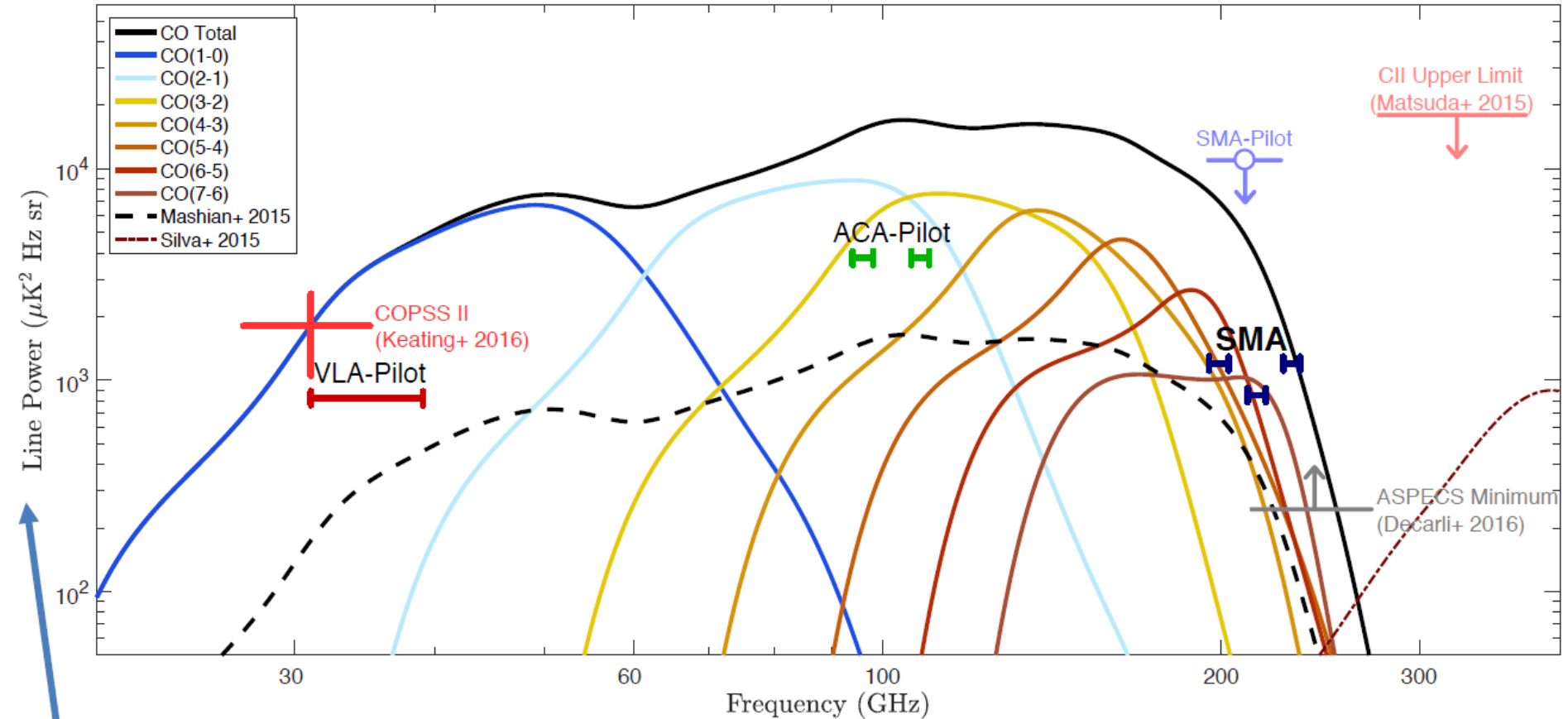
SMA (1mm)
CO(3-2) à CII

ALMA: déjà beaucoup de données
Mais gros problème de configurations

Toutes différentes, selon le projet



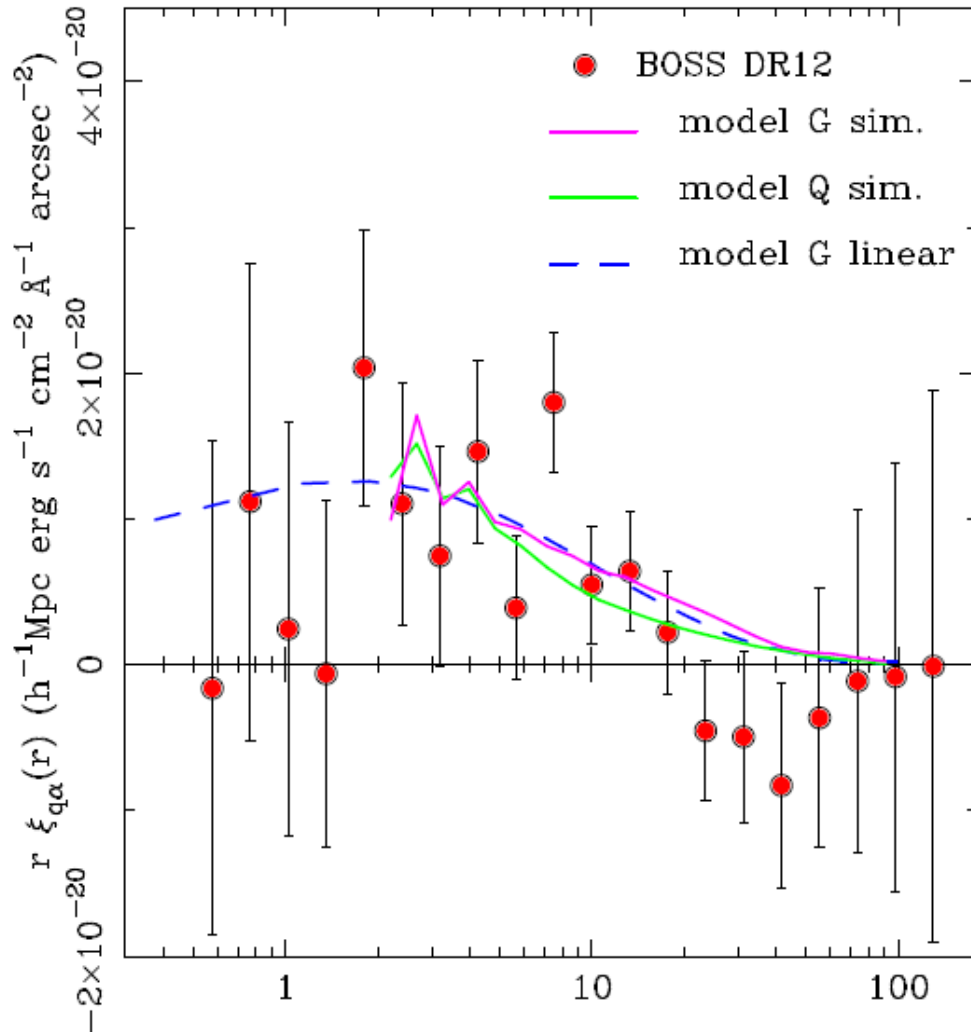
mmIME Millimeter Intensity Mapping Experiment



$$= P(k) / D_A^2 \tilde{y} = P(k) / X^2 Y$$

Cartes d'intensité Ly α – corrélation avec QSO

SDSS-BOSS z=2-3-5 Corrélation Ly α - Quasars



Corrélation proche
(1-15 Mpc/h) Ly α avec
quasars: dûe à la
réionization HeII, ou
bien des jets

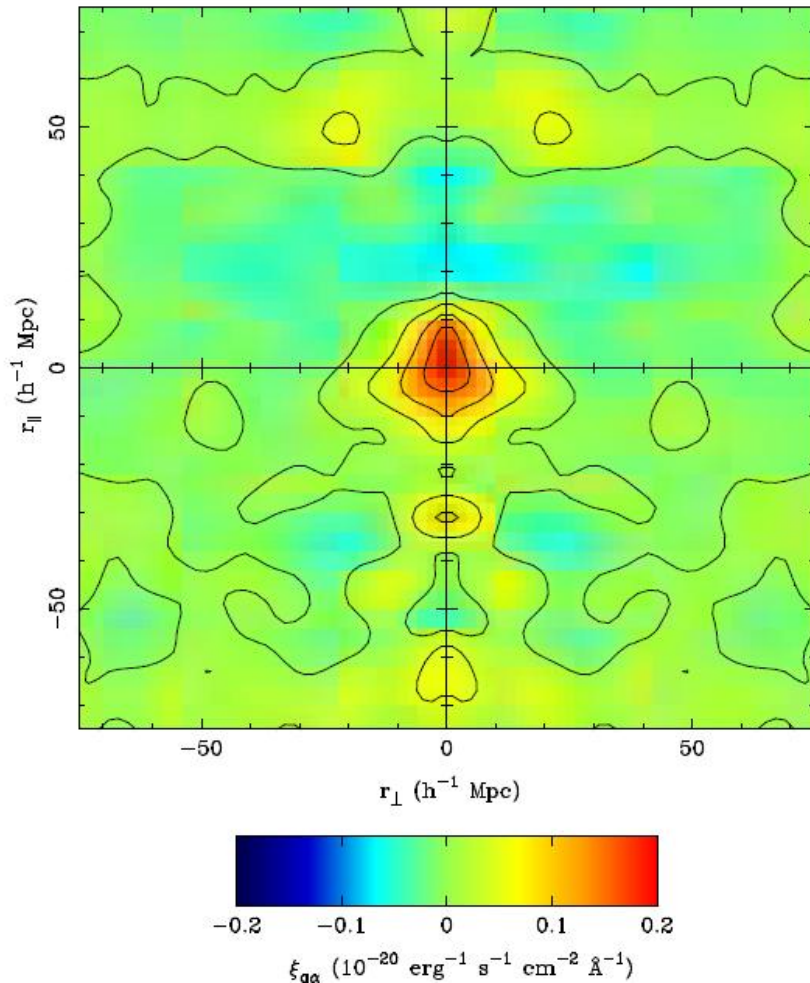
Mais pas de la formation
d'étoiles, car pas
de corrélation entre
émetteurs Ly α et
forêt Ly α

Croft et al 2018

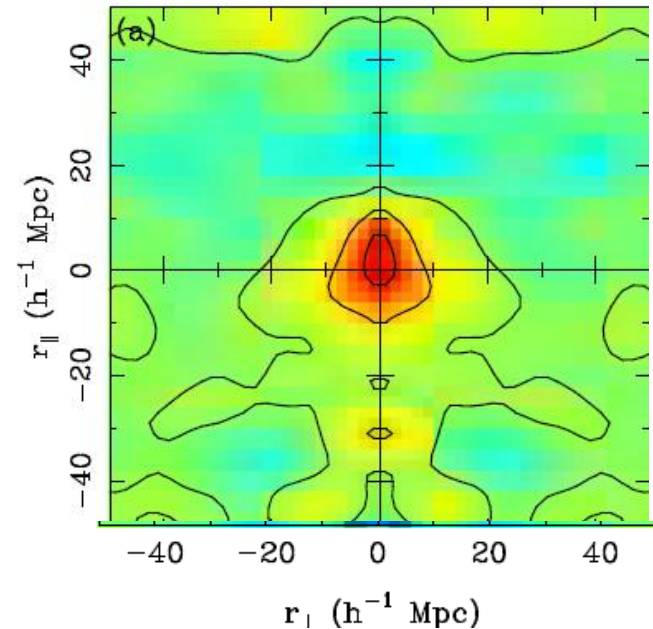
Corrélation et contamination

Possible contamination de lumière entre les fibres

Corrélation Q-Ly α



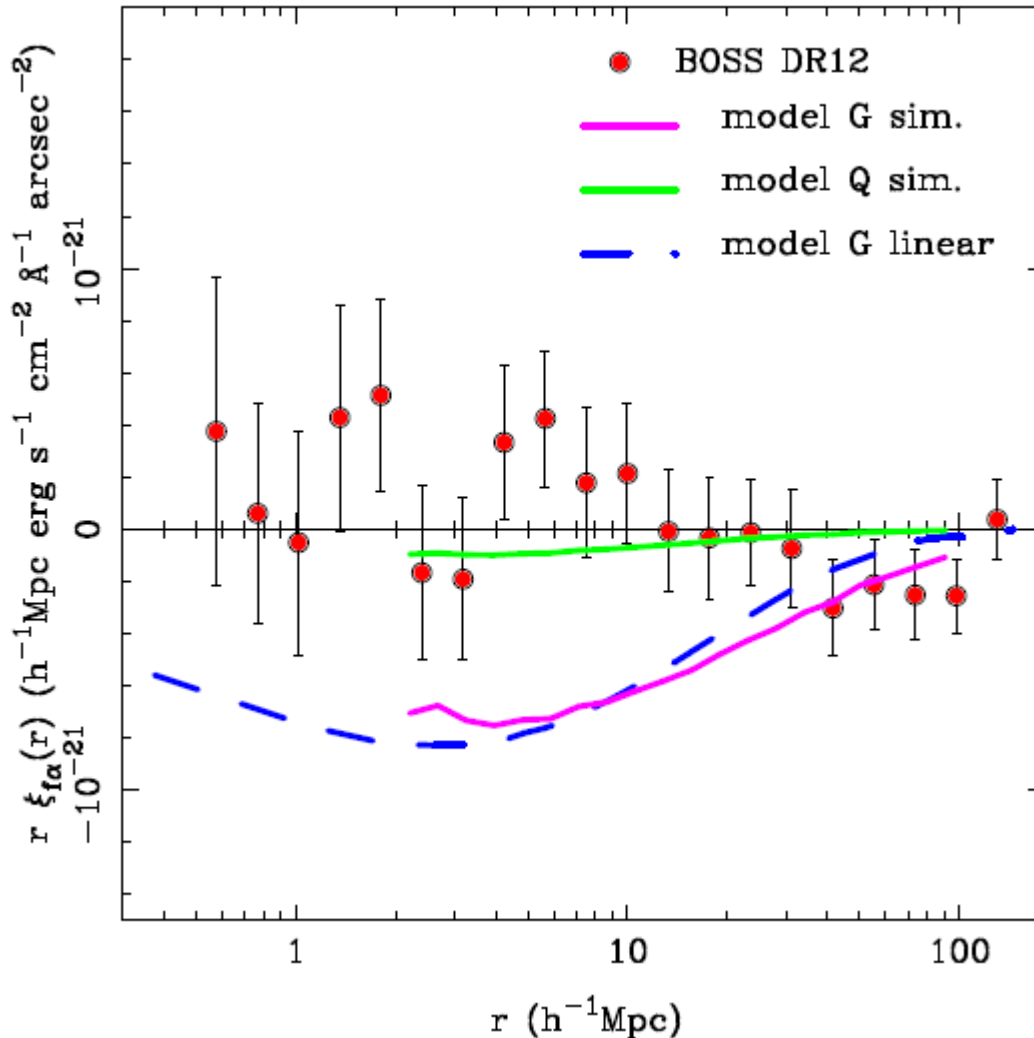
Soustraction des pixels proches



Proche pixel $\delta < 5$, et 75mpc/h
Pour prendre en compte le clustering des quasars

Pas de corrélation émission Ly α et forêt

SDSS-BOSS DR12



La corrélation Ly α
et quasars ne provient pas
d'un modèle où Ly α est
dû aux galaxies avec SF
(modèle G)

Mais plutôt à un modèle
où Ly α provient des quasars
(modèle Q)

MUSE découvre le gaz atomique froid illuminé par des quasars

Nébuleuses Ly- α géantes autour de **7 quasars brillants** à $3 < z < 4$

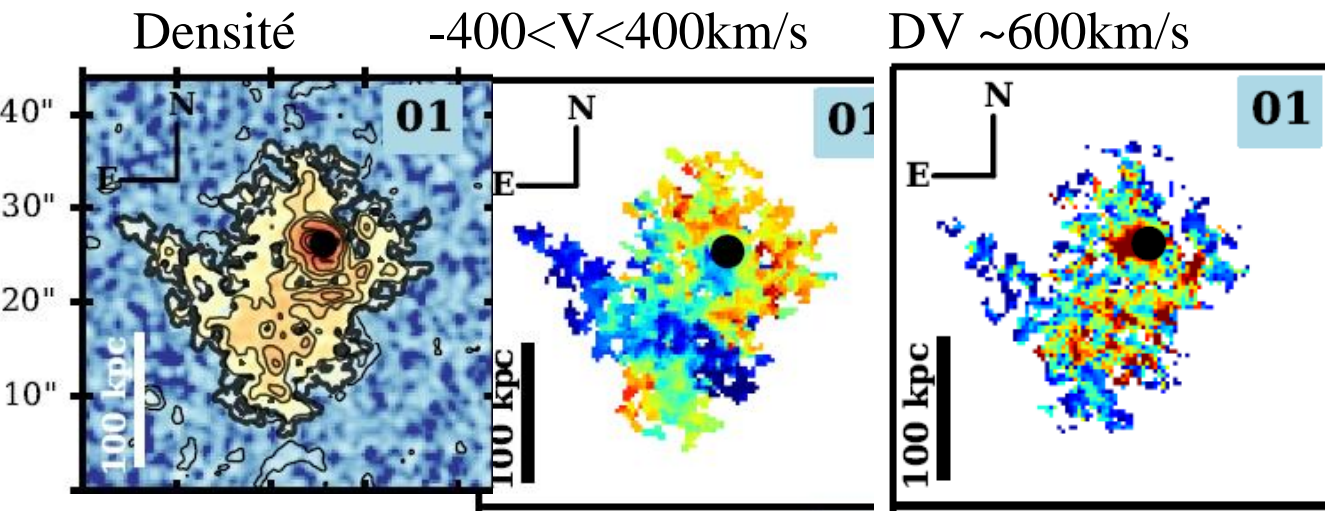
Tous les QSO ont des nébuleuses de 100-320kpc

Borisova et al 2016

→ **Semble universel,**

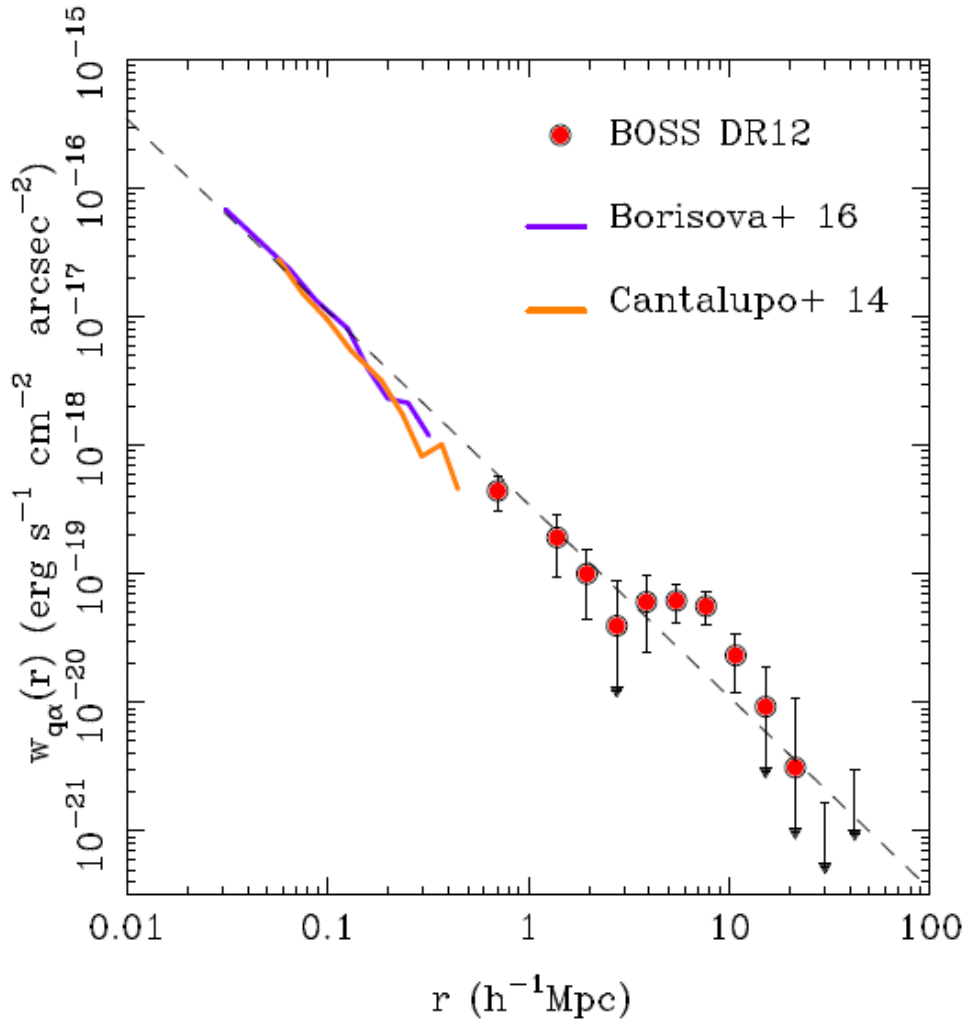
+ Raies d'absorption devant les QSO

→ 60% en volume de gaz dense et froid

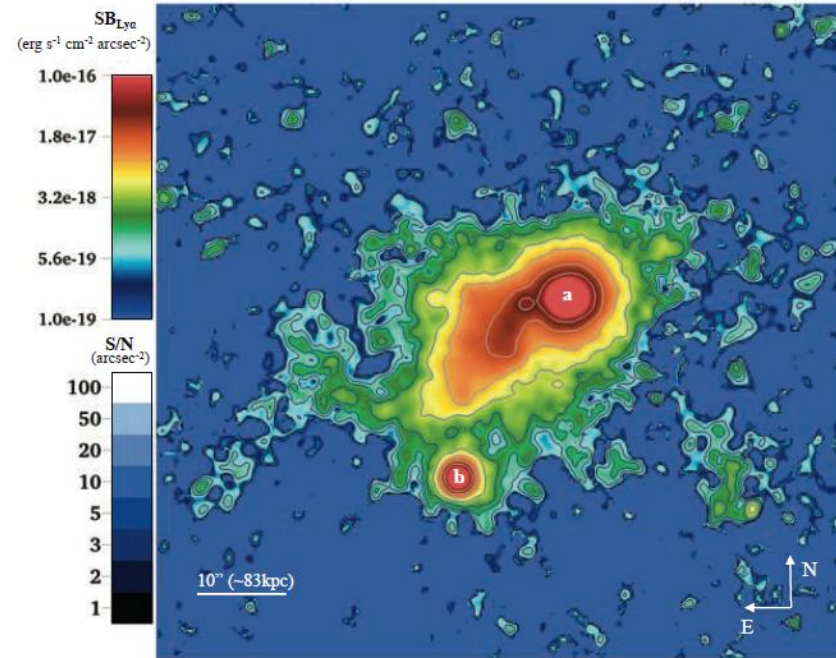


Borisova et al 2016

Croft et al 18



➔ “Slug nebula”,
Fluorescence du gaz
jusqu’à 500kpc
à $z=2$, filament de 10^{12}Mo
Cantalupo et al 2014

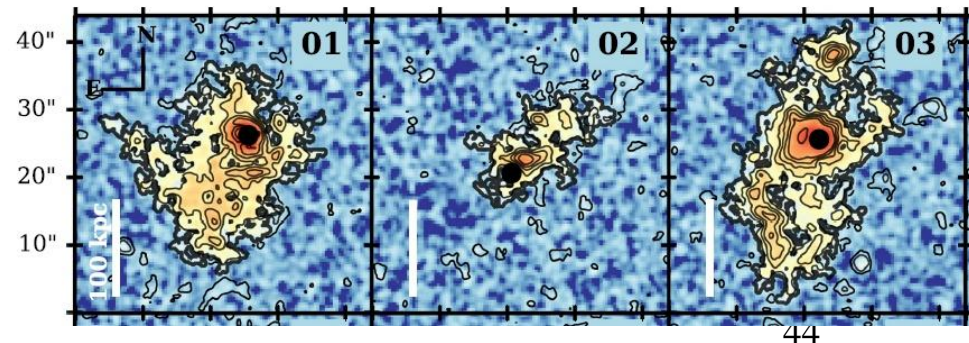
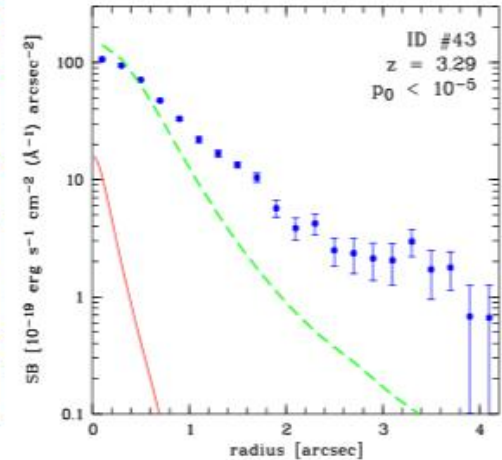
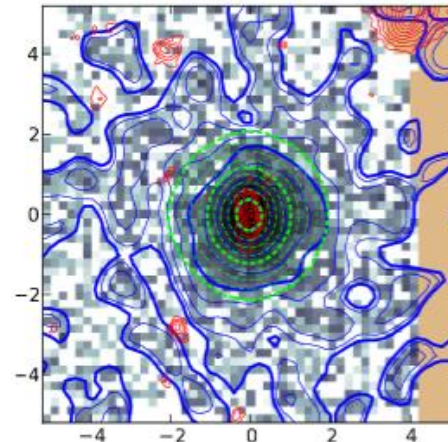
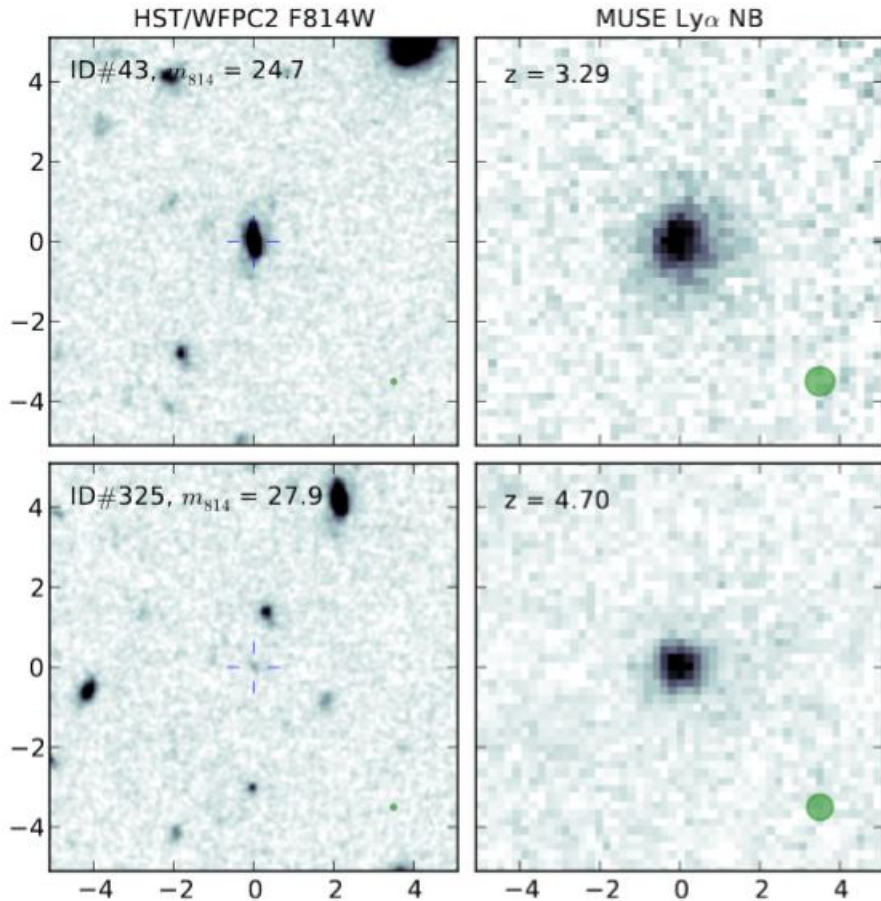


Halos Ly α autour des galaxies

Galaxies entre $3 < z < 6$ Ly α 5-15 x étendu que le continuum UV

Extension de plusieurs kpc

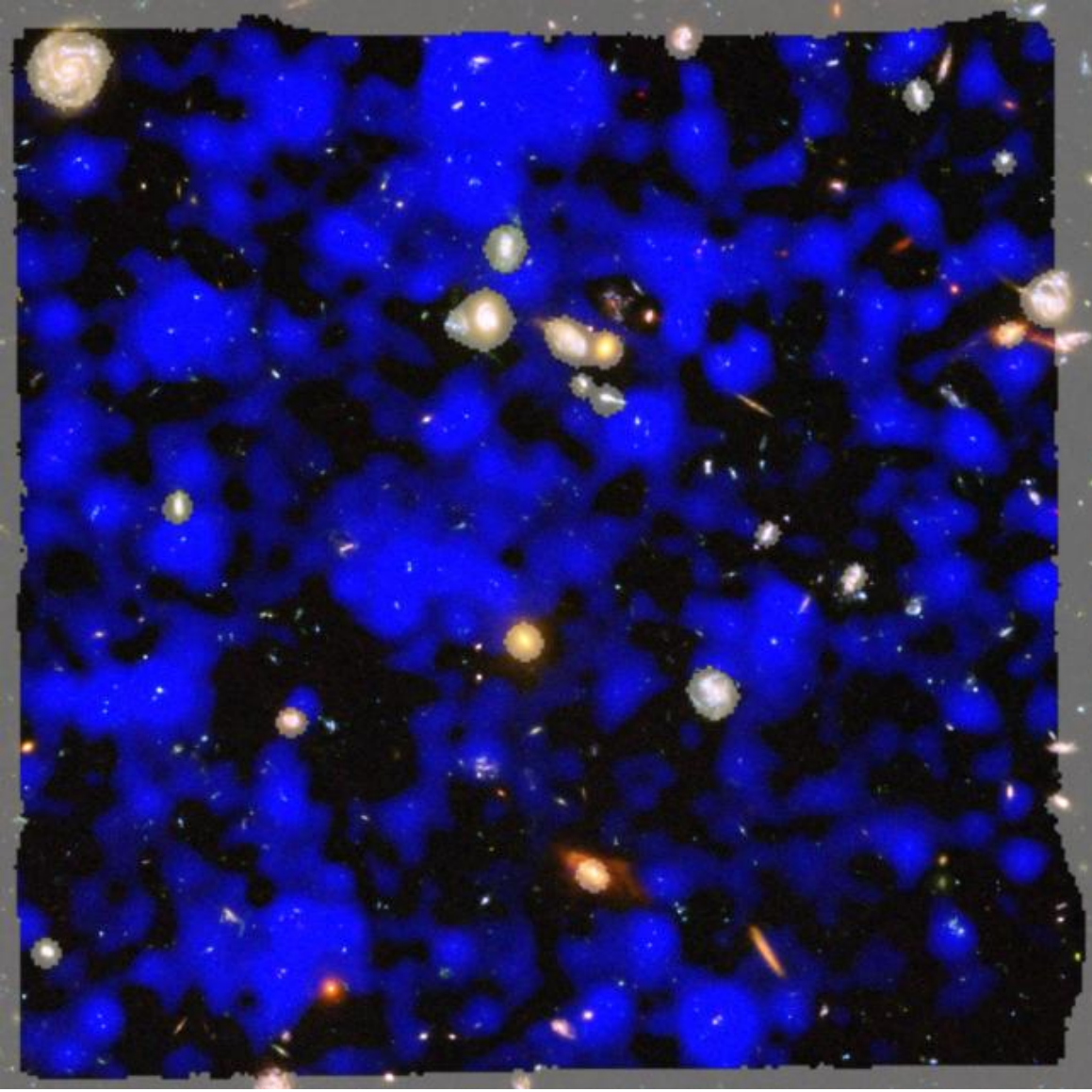
Milieu neutre en grande partie



Wisotzki et al 2016

Gaz circum-galactique

Field of 1' x 1'



HDF-Sud

270 LAE $3 < z < 6$

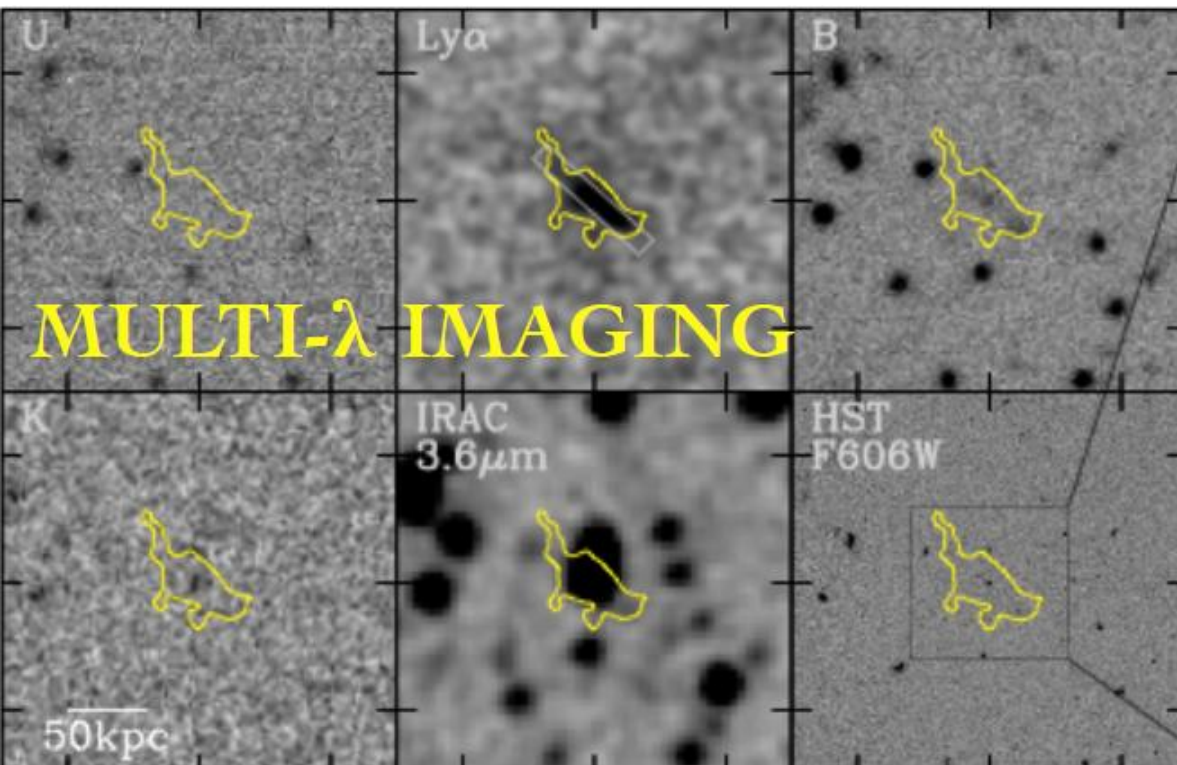
Grands réservoirs de gaz:
chute ou éjection

MUSE: extensions Ly α

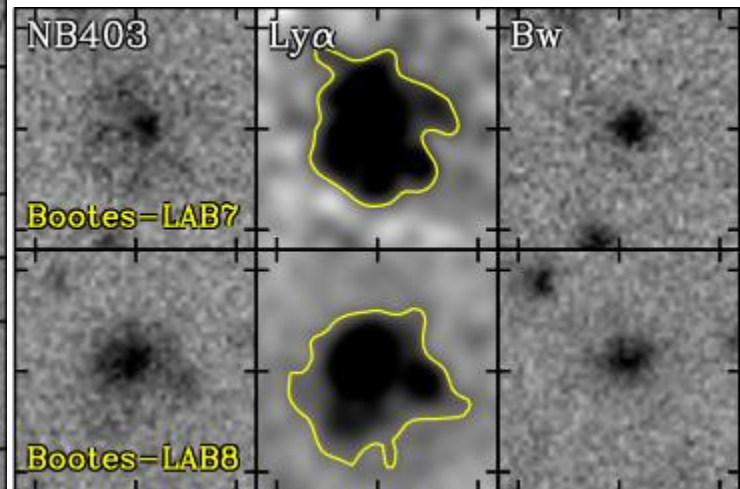
Aussi tracé par absorption
DLA, ou forêt Ly α

Wisotzki et al 2018

Blobs Ly- α : dynosaures à z=2-3



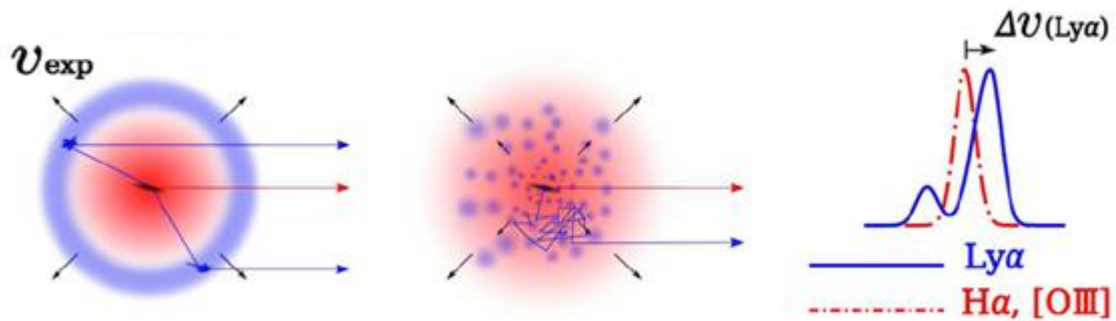
100-150kpc



Yang et al 2014

Badescu et al 2017

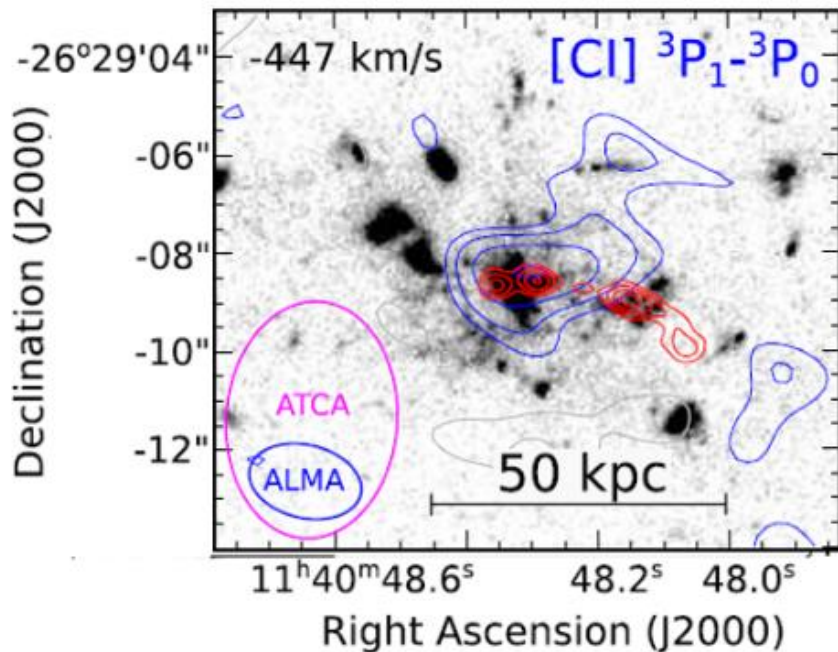
→ Surdensité de LAE



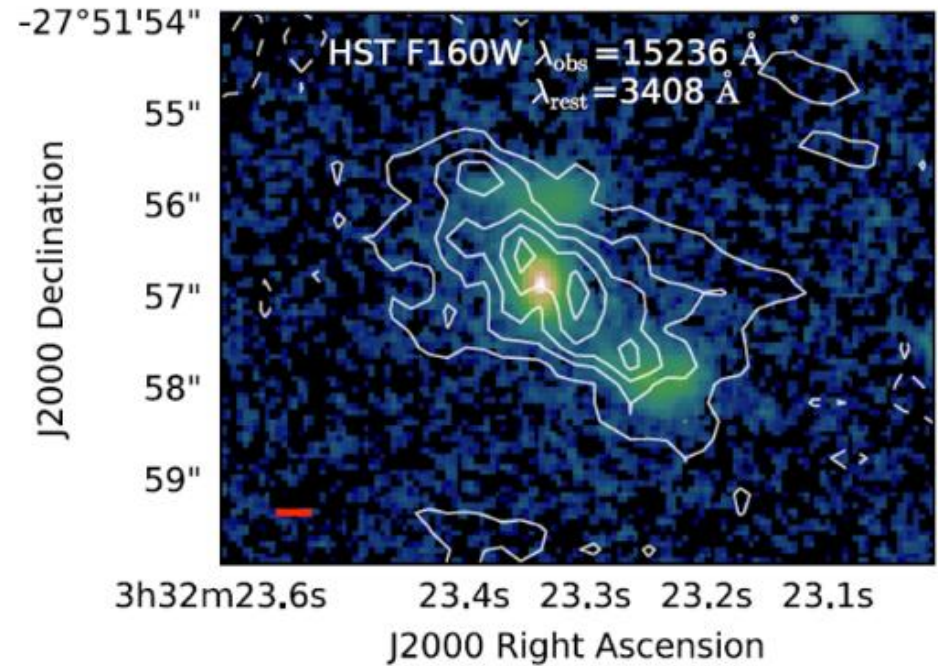
Ejection, absorp. bleue
 $\Delta V > 0$

Gaz froid étendu

Spiderweb (*Emons et al 18*)



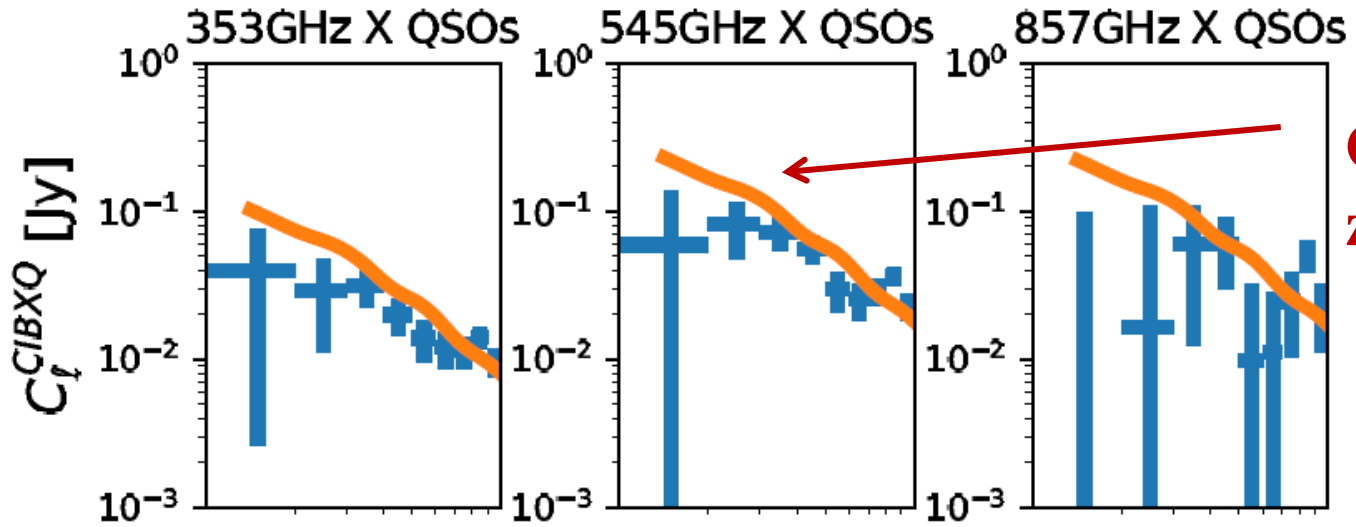
CANDELS-5001, (*Ginolfi et al 17*)



Contours CI avec ALMA
Contours rouges= cont radio

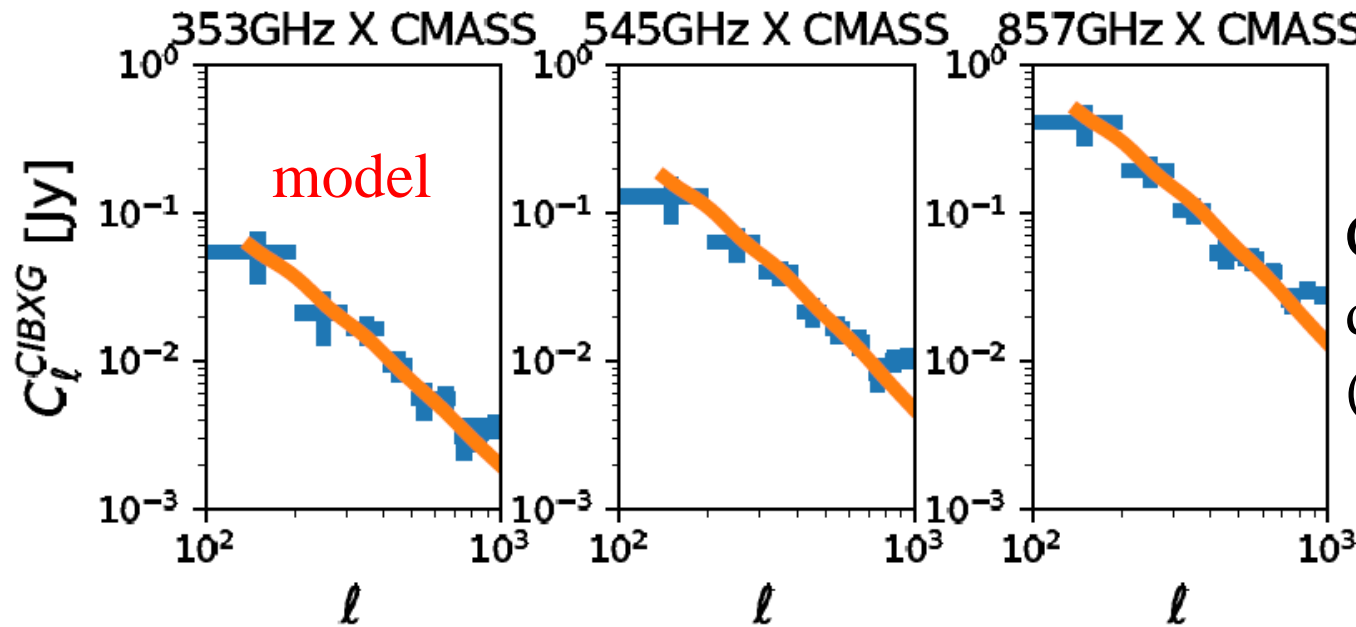
CO(4-3) sur HST
z=3.5 protocluster

[CII]: corrélation Planck-QSO, Planck-Galaxies



QSO (BOSS)
 $z=2-3.2 \rightarrow 545\text{GHz}$

5 autres digrammes
calibrent le CIB



$z=0.57$

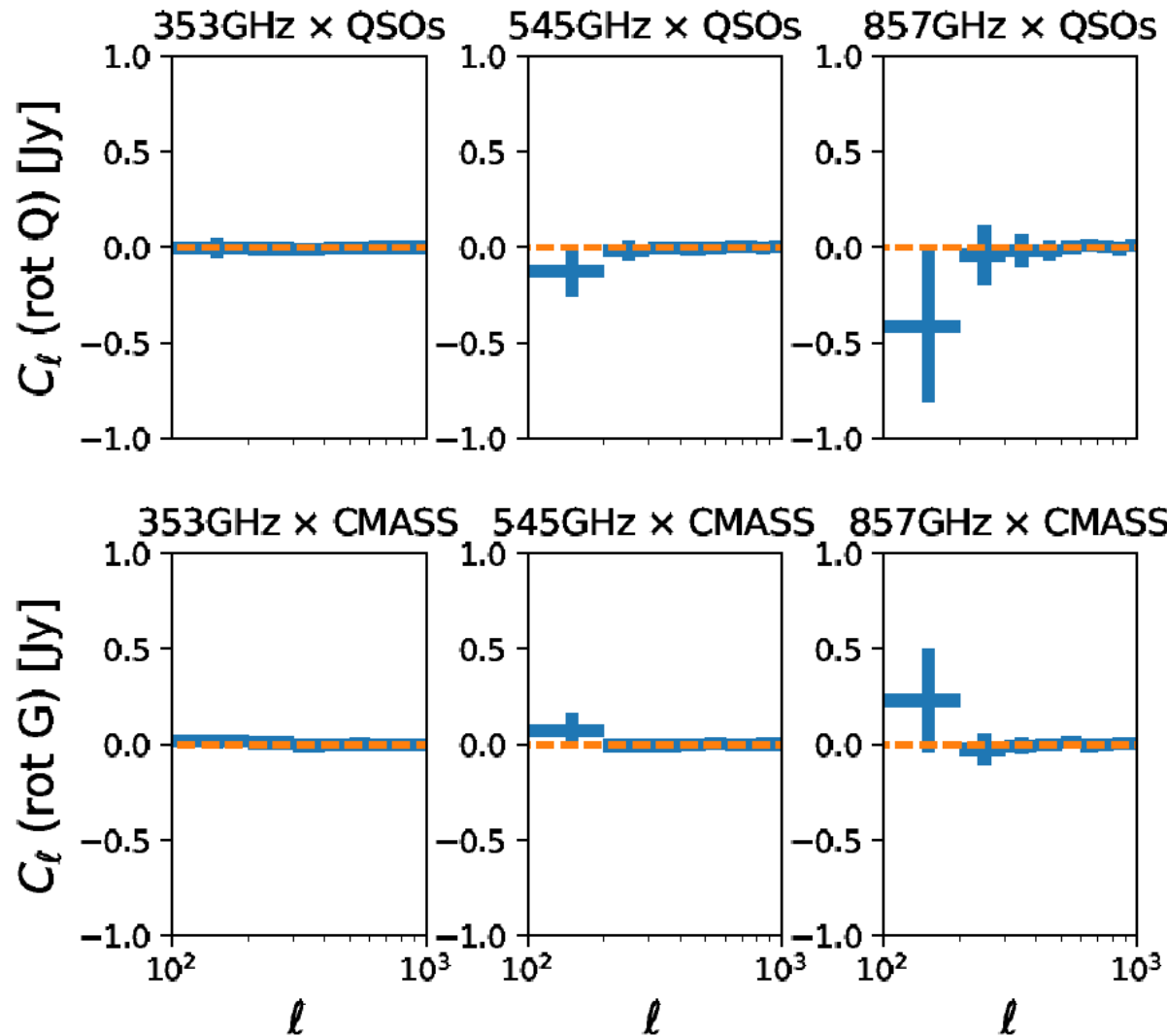
CMASS spectres
de galaxies SDSS-III
(BOSS)

Test avec rotation de 90°

Corrélation des cartes de Planck avec les cartes QSO et CMASS tournées de 90°

→ Compatible avec zéro

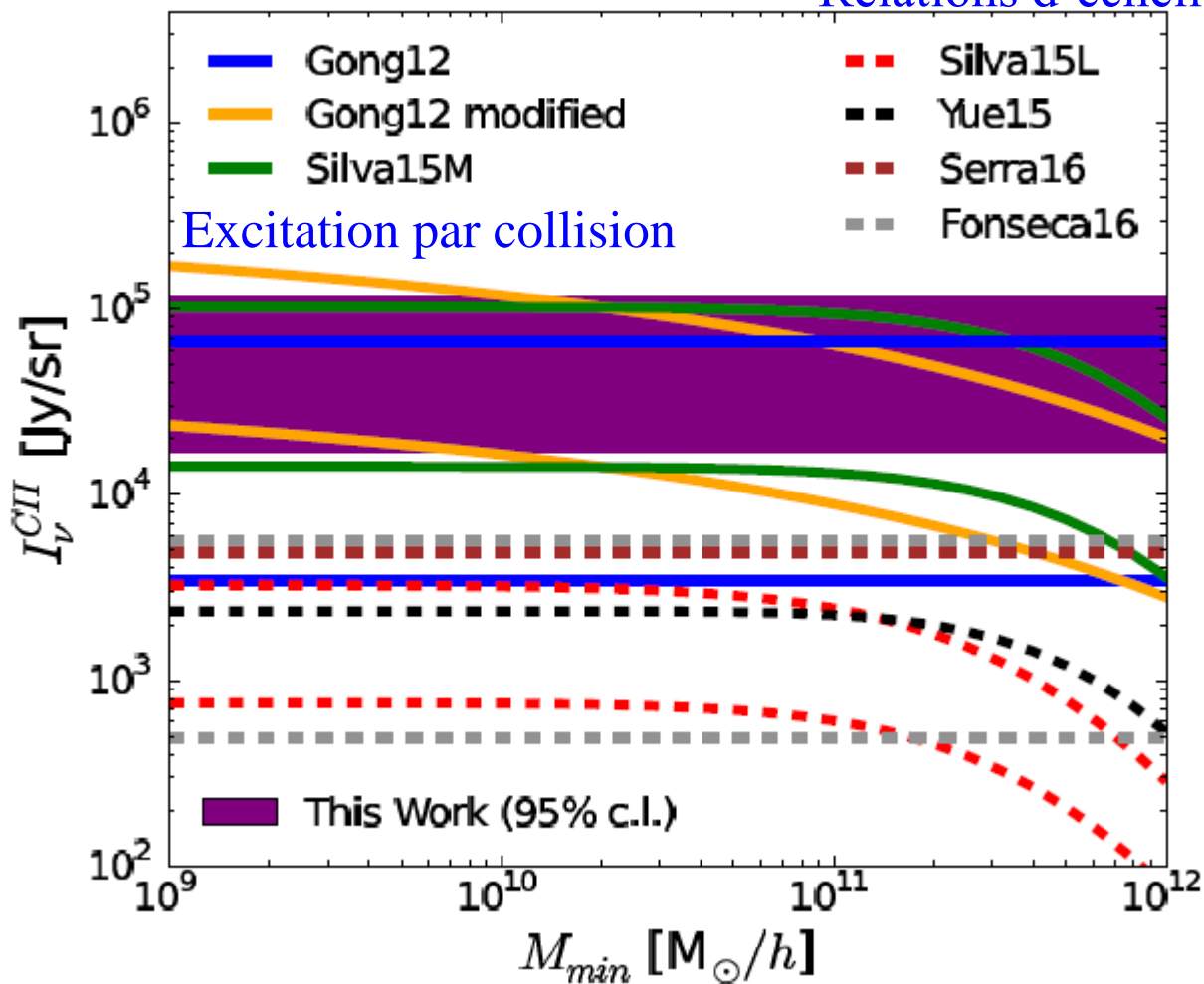
+ tests sur les avant-plans Extragal ou la Galaxie, etc



Carte d'intensité CII

[CII] 158 μ m ou \sim 1900 GHz à $z=2-3.5$, 545 GHz, visible dans Planck
 Corrélation avec SDSS-BOSS

Relations d'échelle



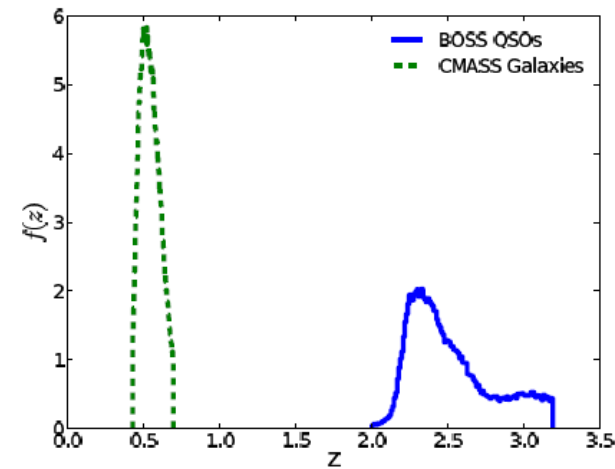
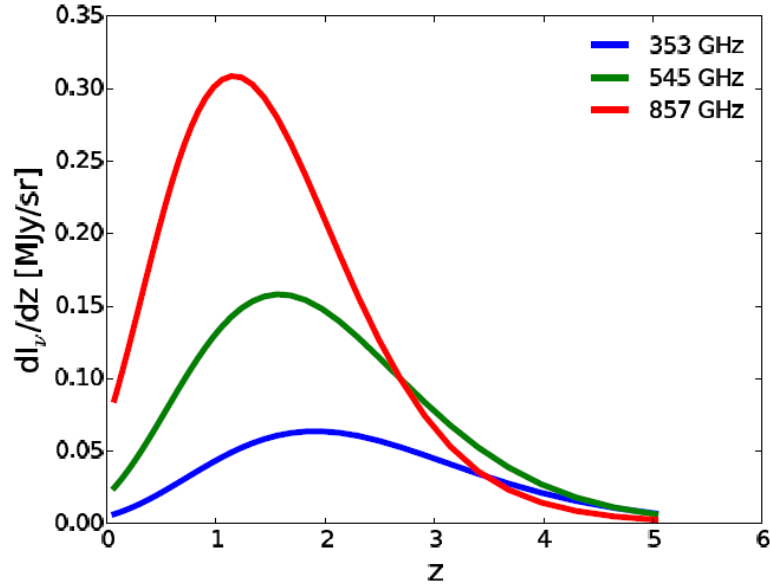
Confusion avec le continuum FIR?
 CIB

Modèle préféré
 [CII] provient de la collision avec les e-

Mais $< 3\sigma$ pour CII
 CIB ou SZ

Pullen et al 2018

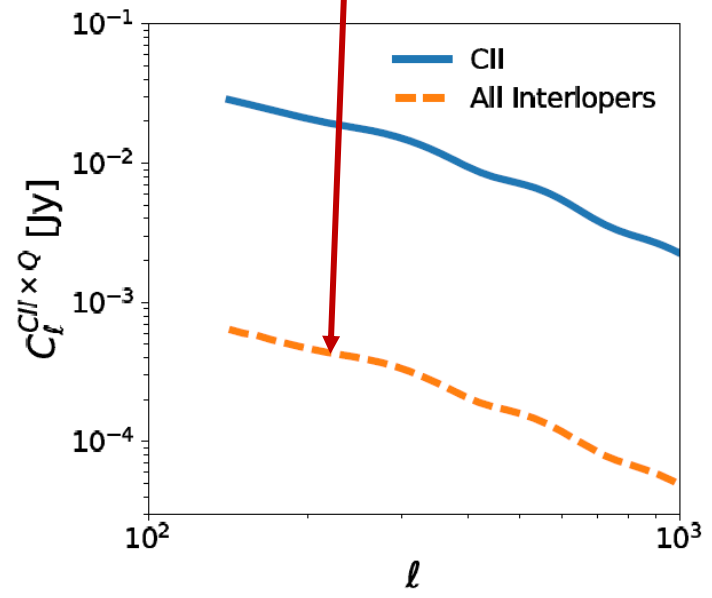
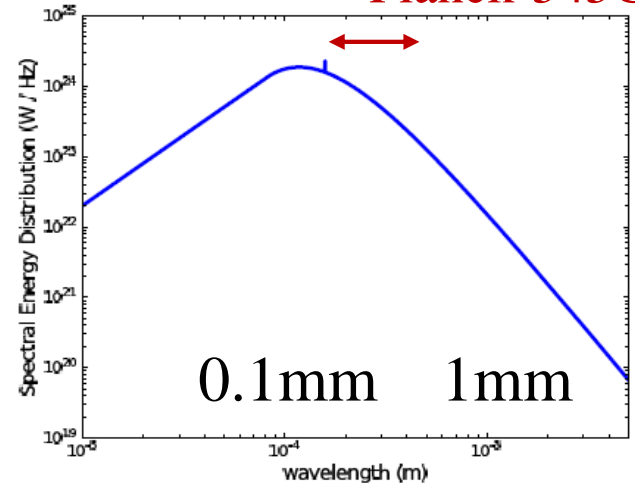
Continuum infra-rouge lointain (CIB)



Autres raies
 [OI]-145 μ m
 [OIII]-88 μ m
 [NII]-205 μ m
=intrus

Planck-545GHz

SED, z=2.5
 [CII] 0.5mm



La contamination est négligeable dans
 la corrélation [CII] - quasars

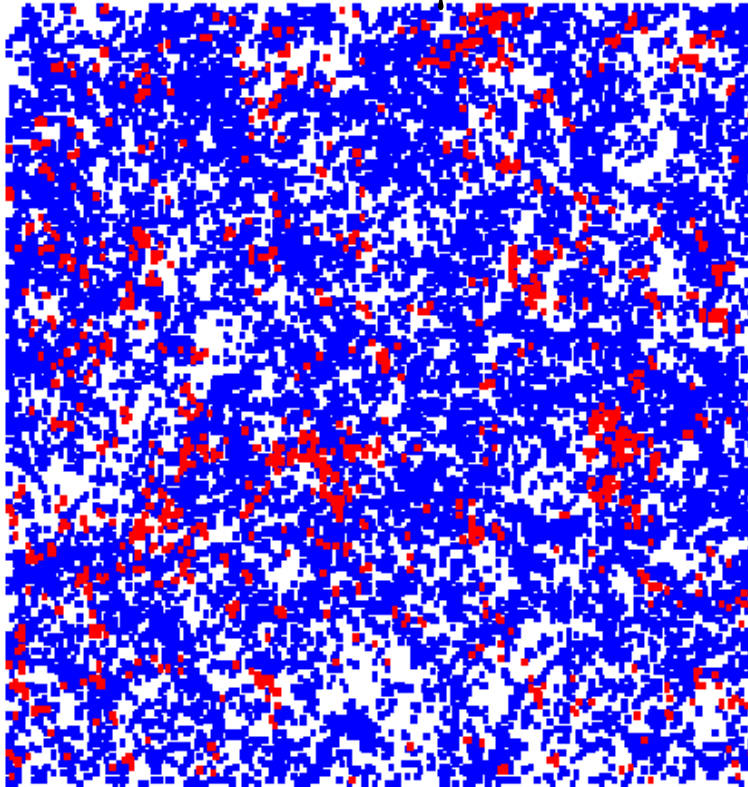
Corrélation croisée de plusieurs raies

Bleu: les intrus: [CII], [NII], CO...

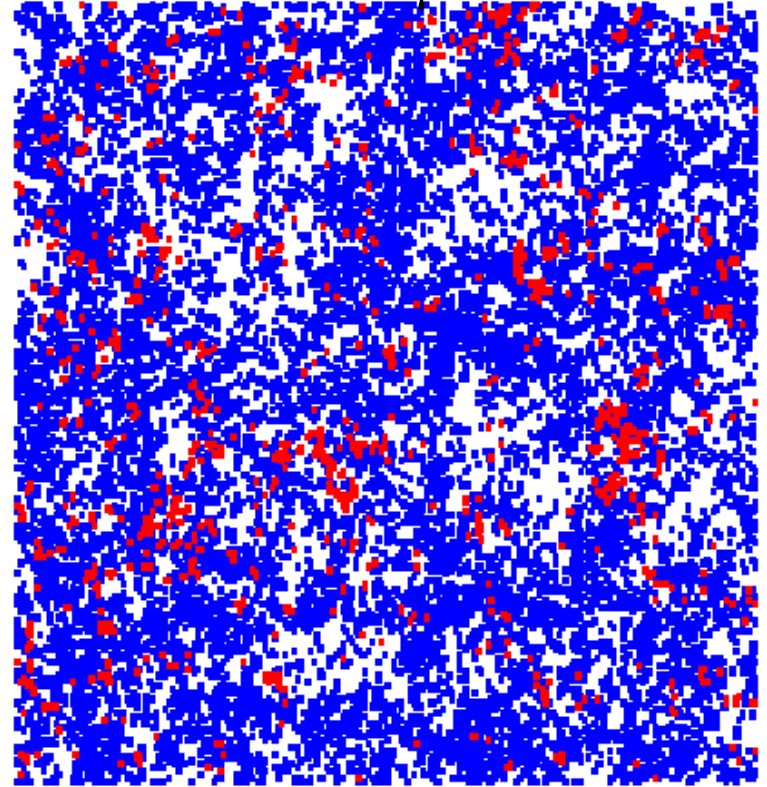
Rouge $> 200 \text{ Jy/str [OI]}-63\mu\text{m}$ $z=6$

$> 250 \text{ Jy/str [OIII]} - 52\mu\text{m}$

441 μm



364 μm



250x250 Mpc² $\Delta\nu/\nu = 10^{-3}$

Visbal et al 2011

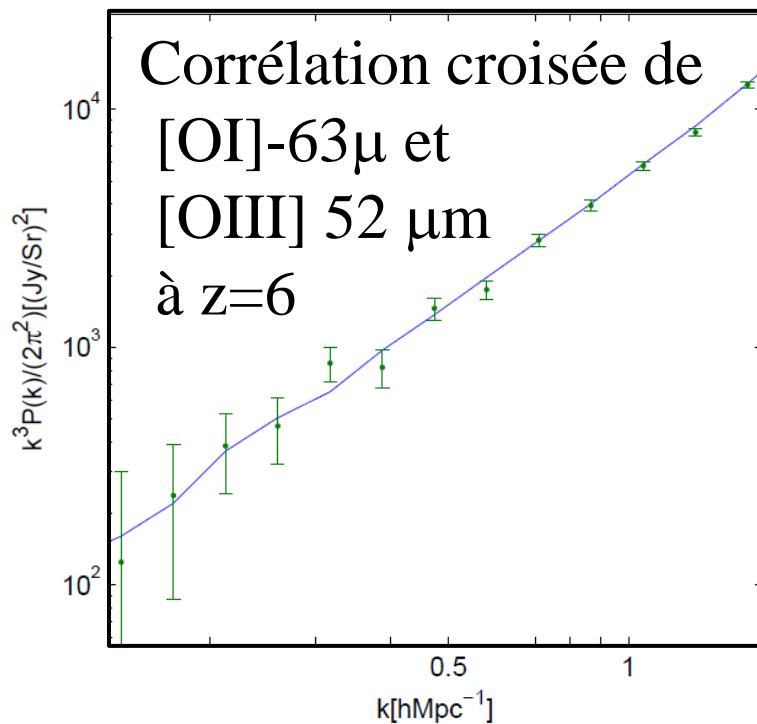
Contribution des intrus

Prévisions pour SPICA

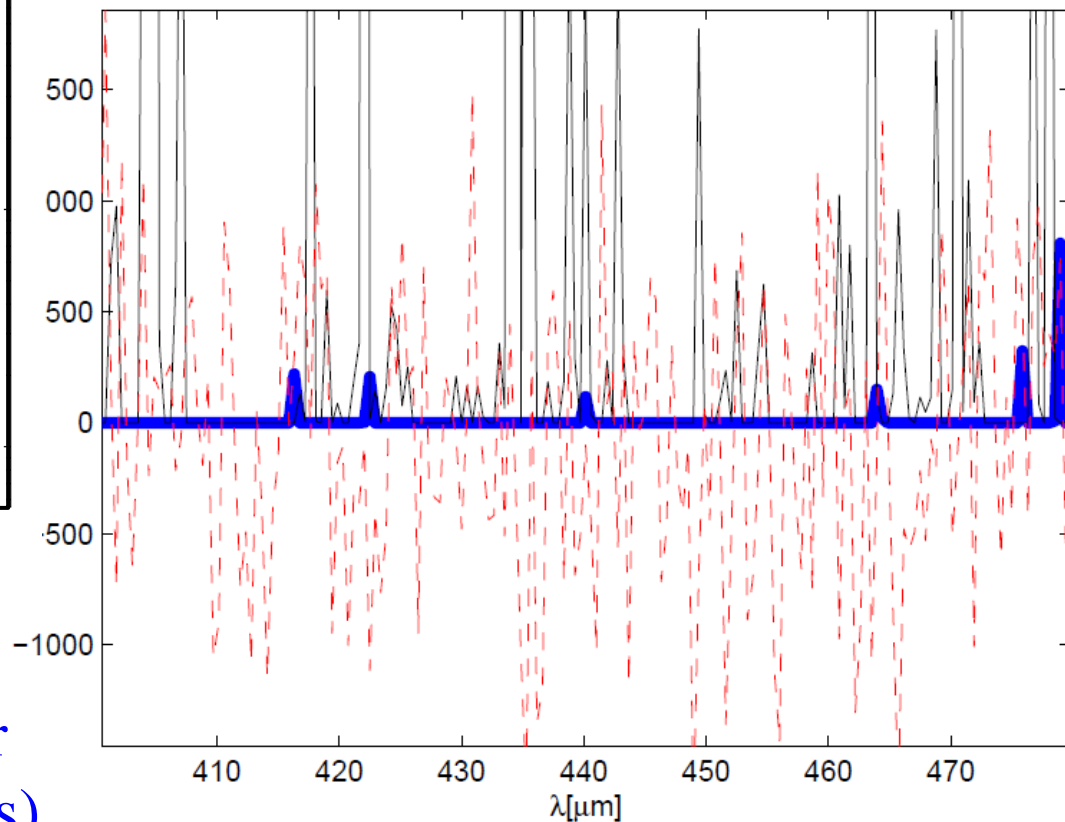
Avant-plan: plus fort que tout!

Soustrait par des polynomes

Continuum = lisse



Bleu: raies recherchées Noir: intrus



Rouge: bruit récepteur

Corrélation croisée après avoir
supprimé les pixels-3D (voxels)
avec une grande fluctuation

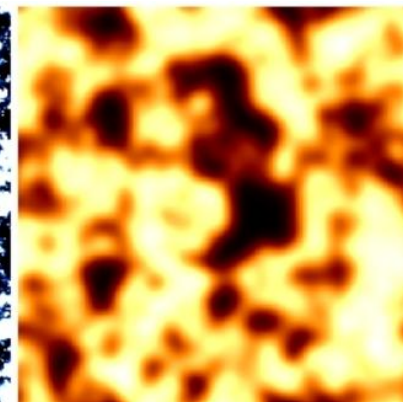
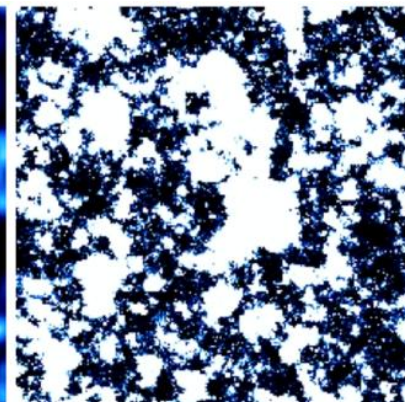
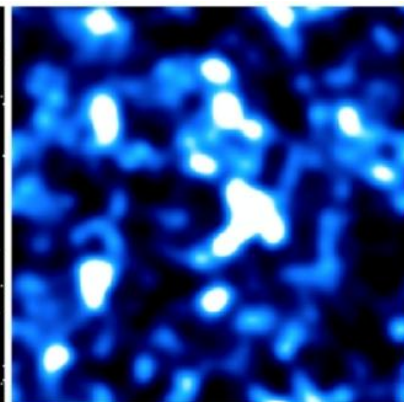
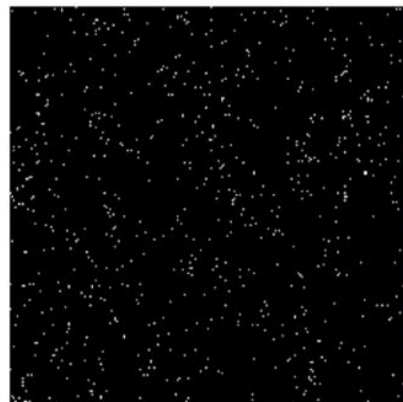
Visbal et al 2011

Galaxies

CO(2-1)

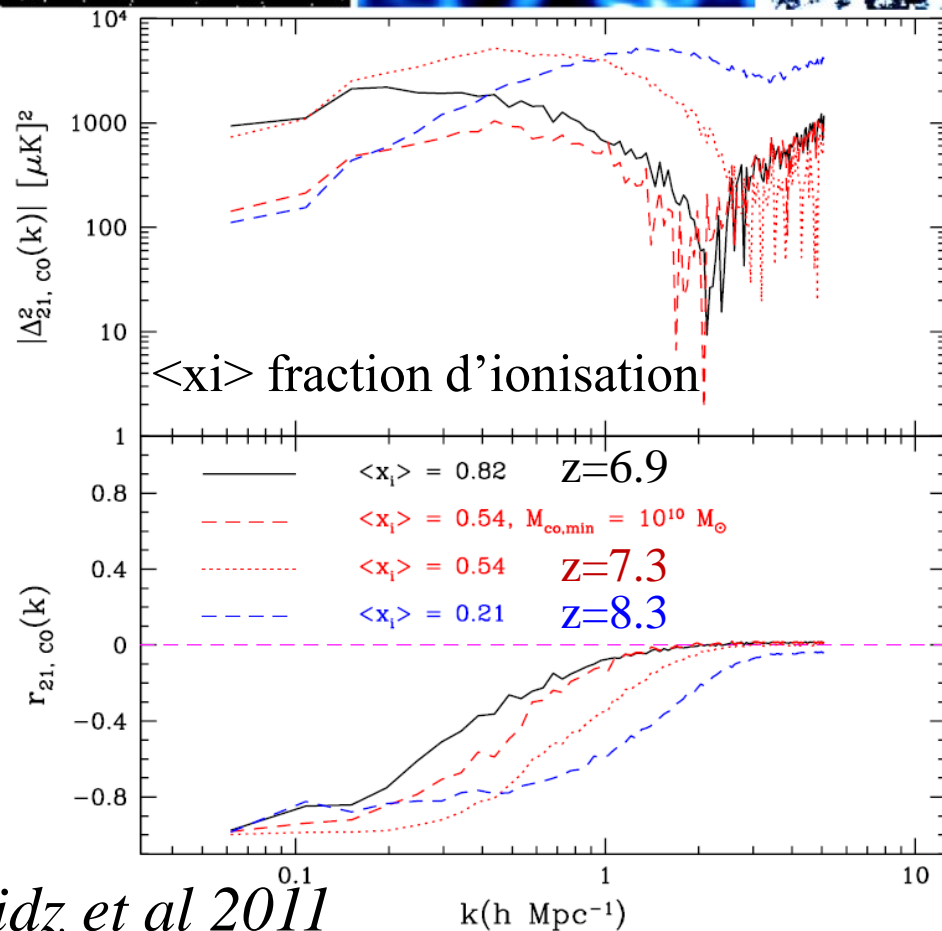
ionisation xi

HI-21cm



130Mpc/h

1degré

 Δz 35Mpc

Corrélation CO(2-1)-HI

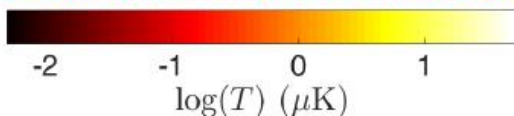
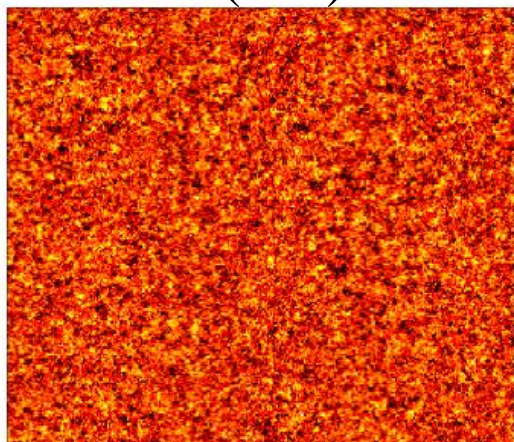
A grande échelle (petit k)
anti-corrélation

A petite échelle (grand k)
Décorrélation

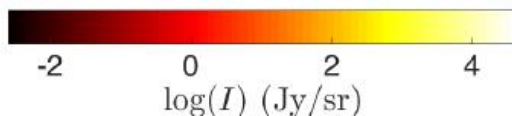
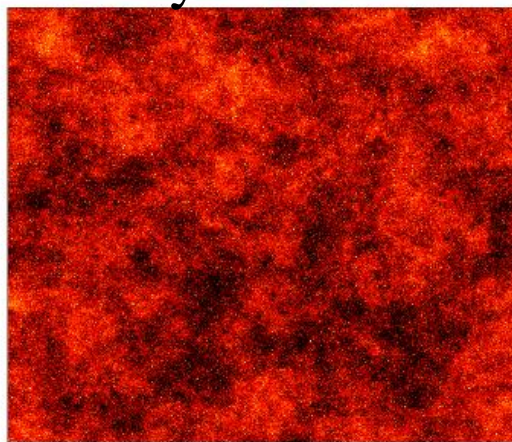
→ Renseigne sur la taille des
bulles ionisées

Les intrus plus ou moins importants

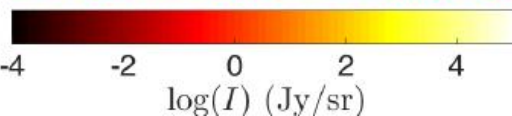
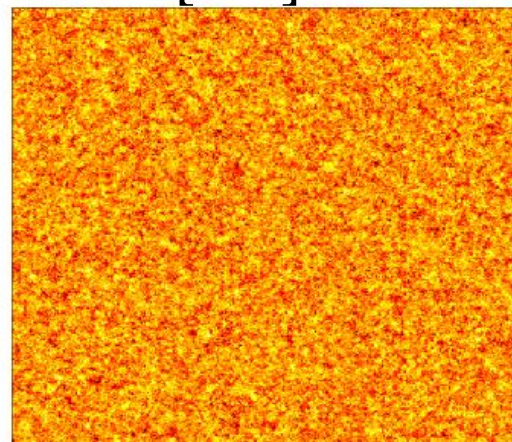
CO(1-0) z=3



Ly α z=7



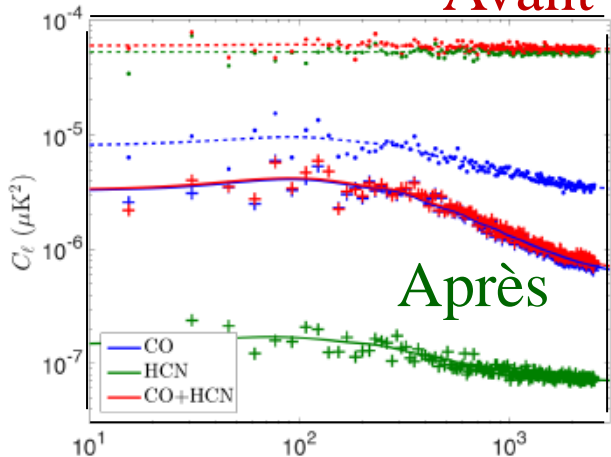
[CII] z=7



$C_e(\mu K)^2$

Avant

Après

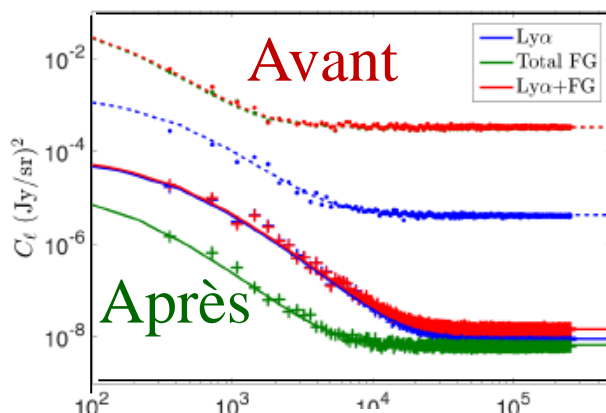


e

$C_e(\text{Jy/sr})^2$

Avant

Après

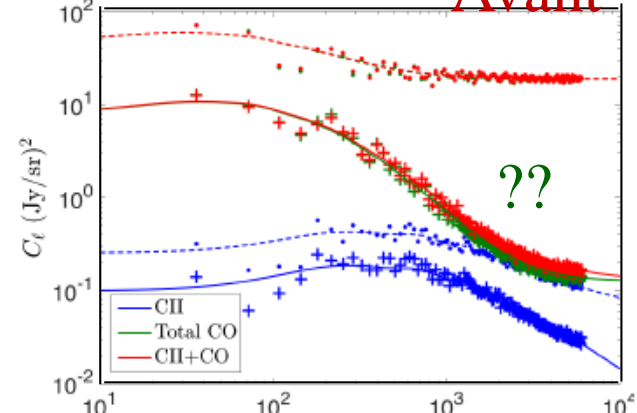


e

$C_e(\text{Jy/sr})^2$

Avant

??

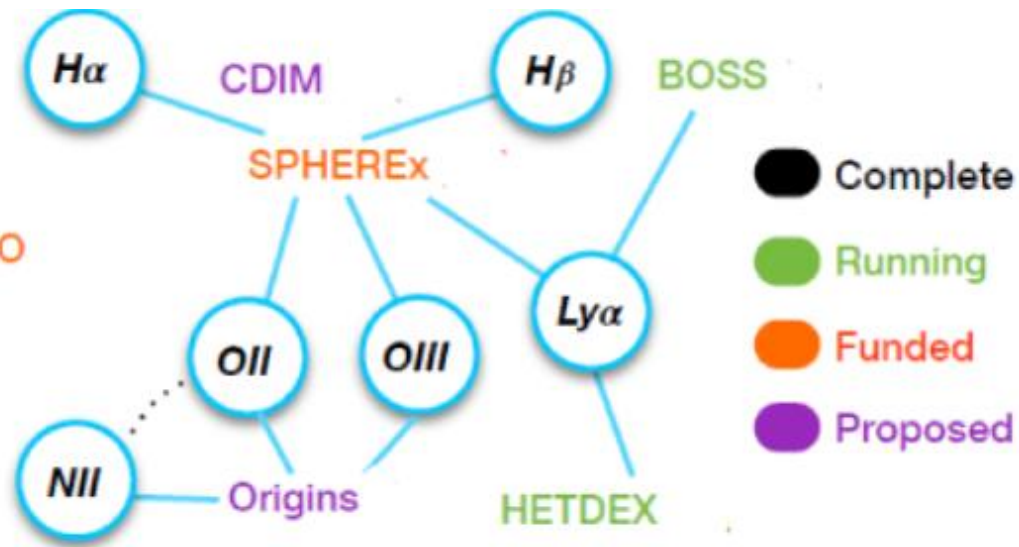
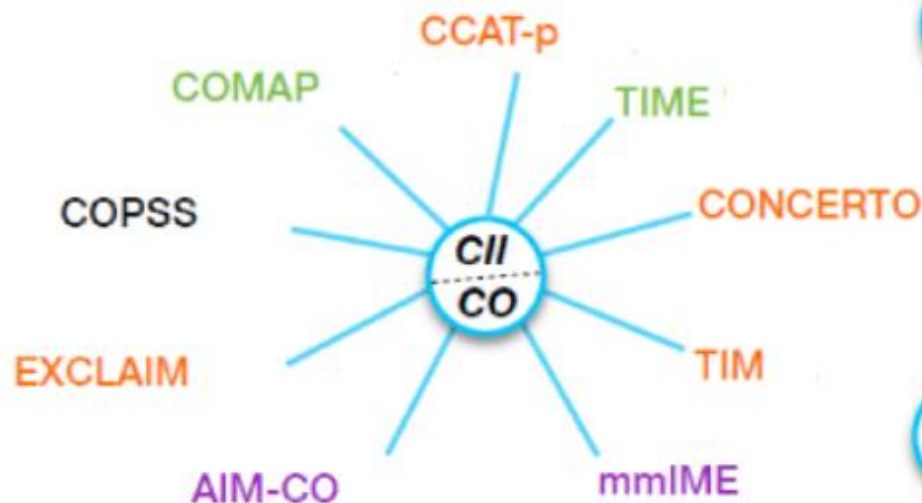
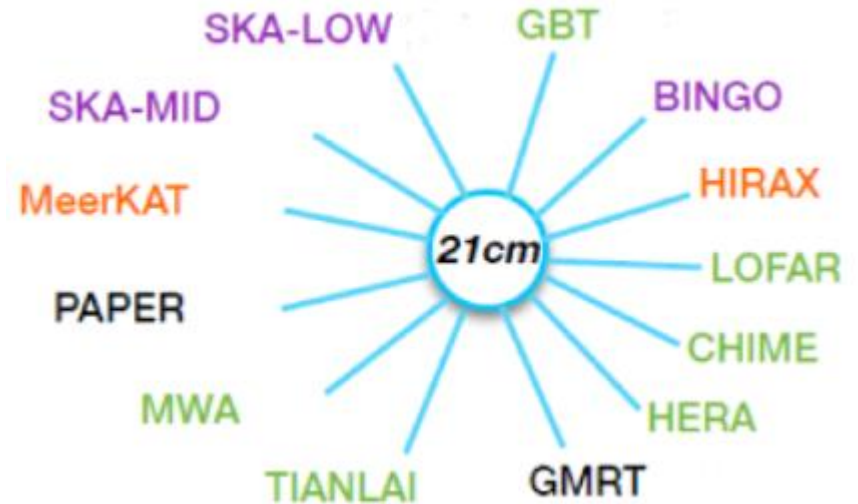


e

Suppression des voxels brillants

De multiples projets

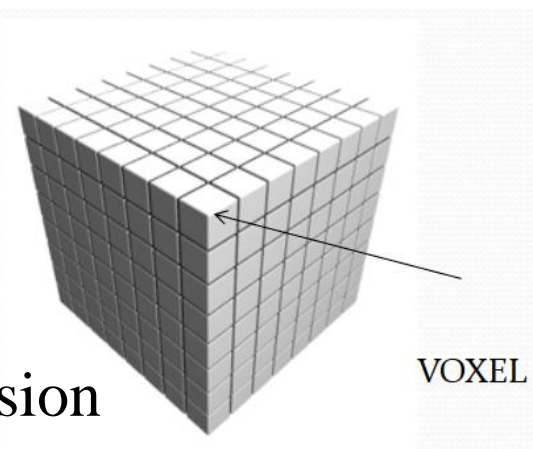
Cartographies globales et fonction de corrélation entre molécules, atomes émission optique, etc.



Stratégie optimale

Quand vaut-il mieux faire une carte globale,
ou bien un catalogue de sources individuelles?

« voxel » à 3D: pixel (x,y) + v dans la 3^{ème} dimension



Selon le nombre de sources N par voxel

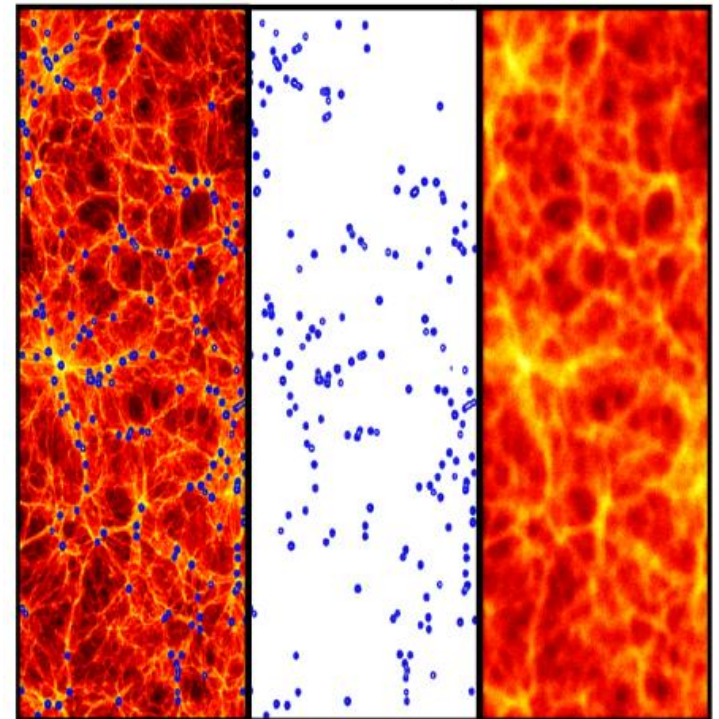
Taille différente: Haute résolution pour les catalogues

Soit ℓ luminosité d'une source

Le bruit $\sigma\ell$ de chaque voxel

Tout dépend de N et $\sigma\ell / \ell$

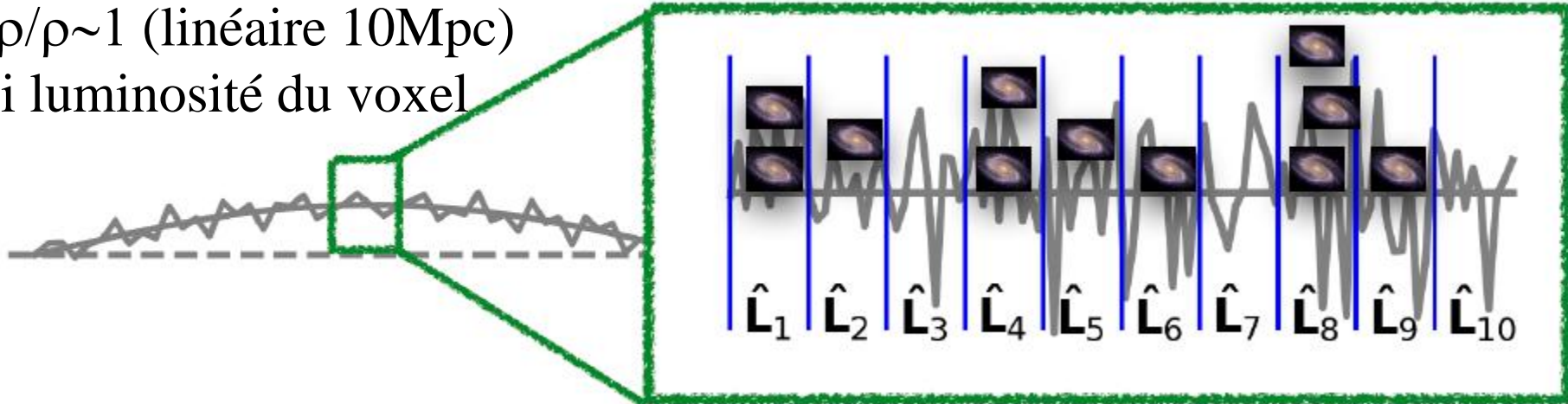
Cheng et al 2018



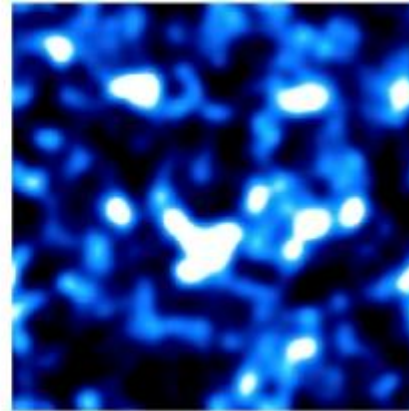
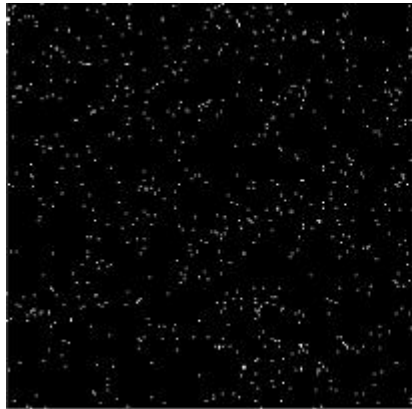
Rôle de la confusion et du bruit

$\delta\rho/\rho \sim 1$ (linéaire 10Mpc)

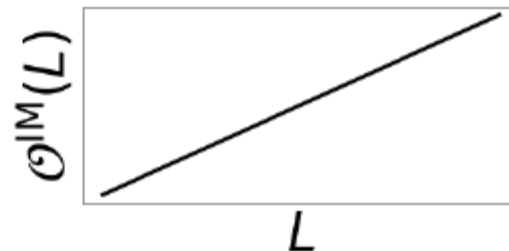
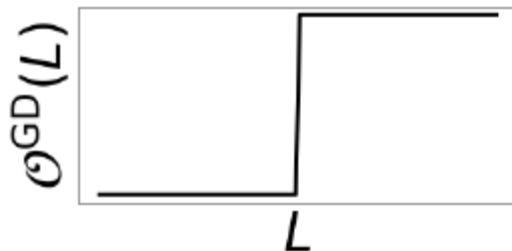
Li luminosité du voxel



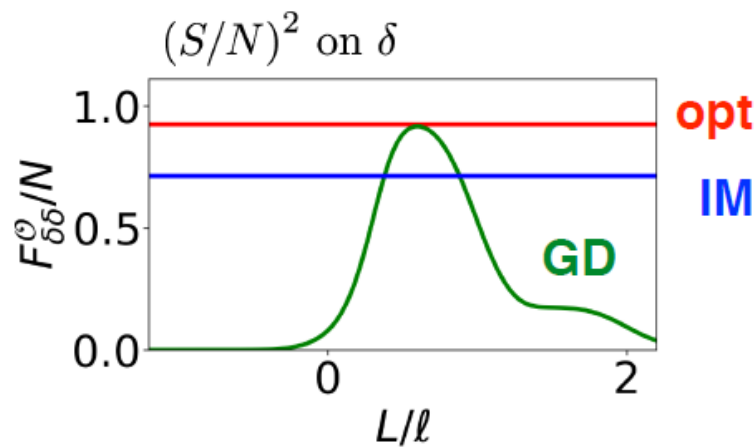
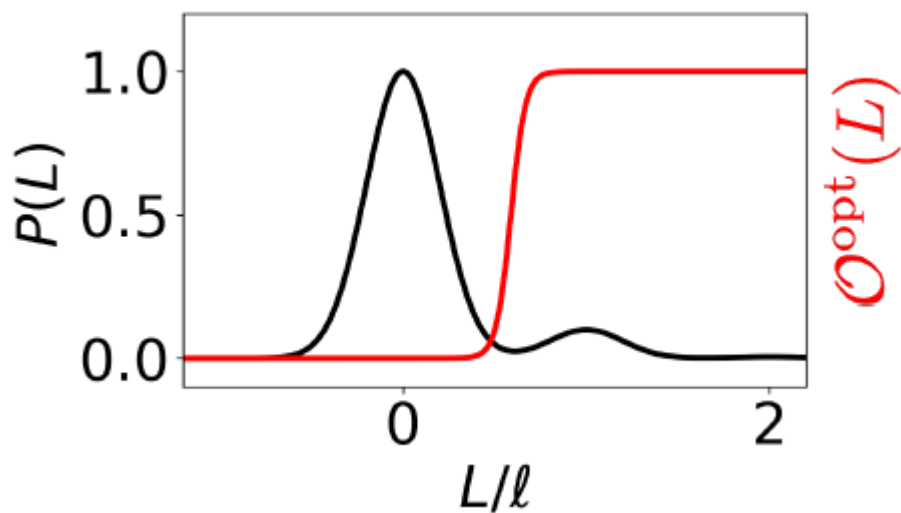
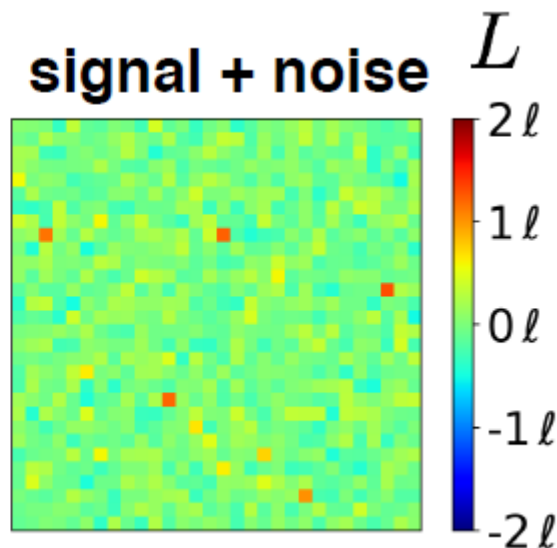
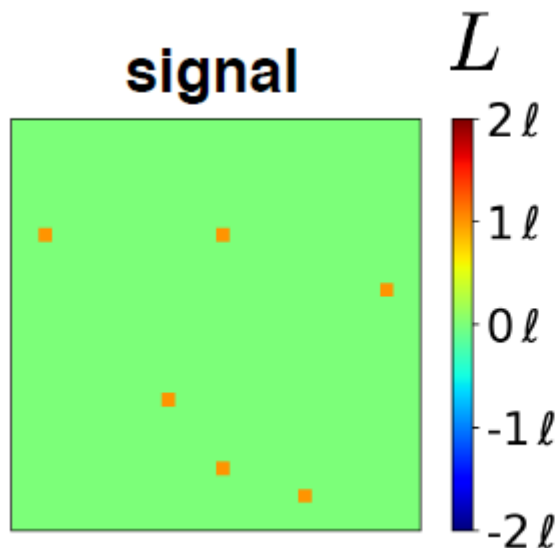
$N=0$ ou 1



$N \gg 1$

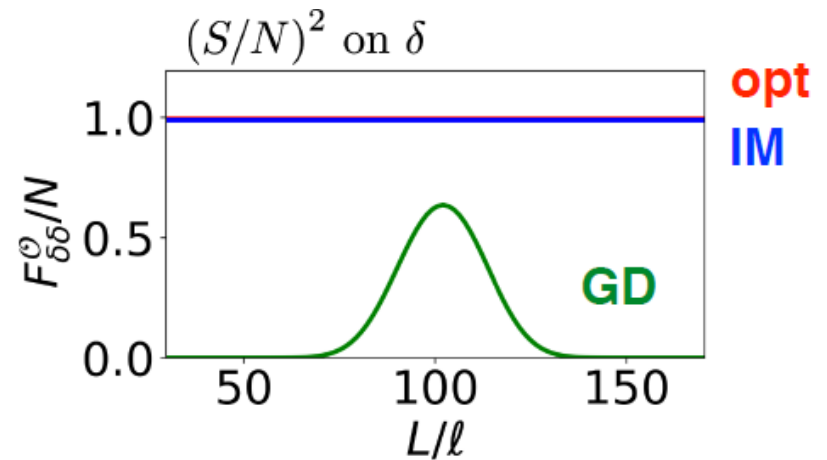
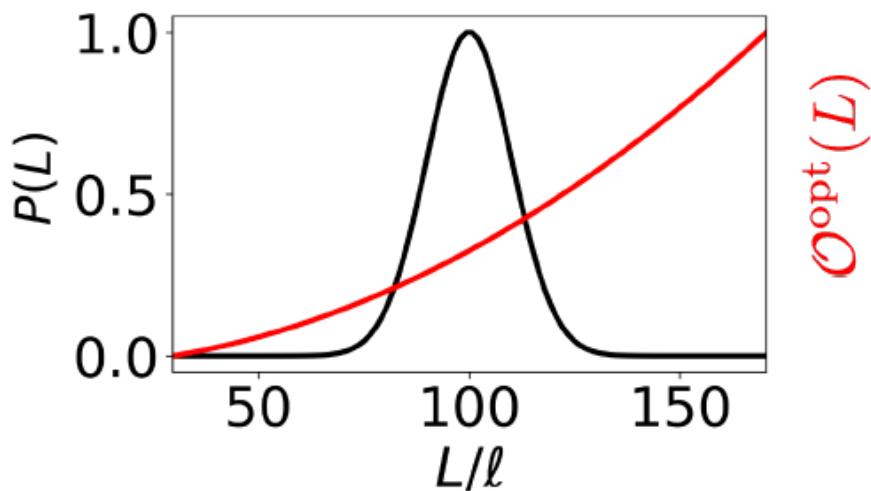
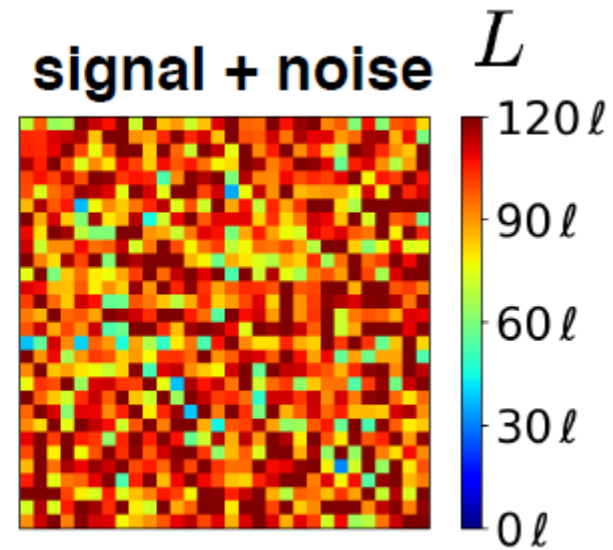
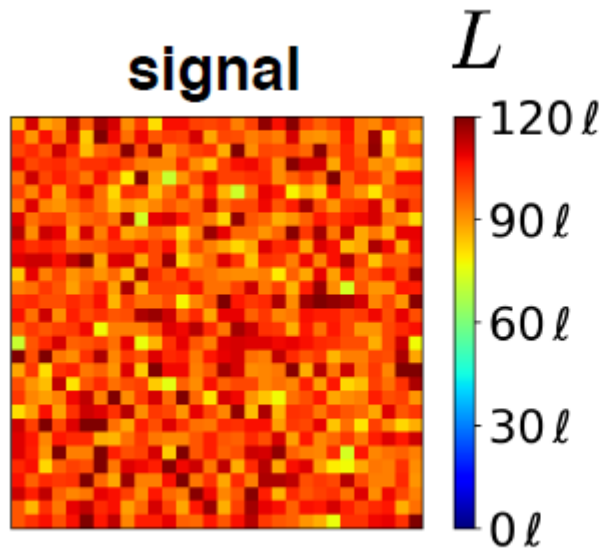


Pas de confusion $N \ll 1$, bruit faible $\sigma_\ell / \ell \ll 1$



Galaxy Detection (GD)

Grande confusion $N \gg 1$, bruit fort $\sigma_\ell / \ell \gg 1$



Intensity Mapping (IM)

Résumé

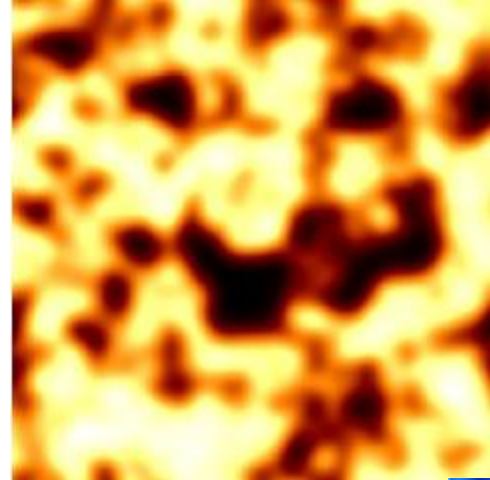
Les cartes d'intensité apportent une information complémentaire statistique aux surveys de sources

Avantages

- Lorsque $N \gg 1$ (confusion) et bruit $\sigma \gg 1$
- Observations plus rapides (faible résolution)

Inconvénients

- Soustraire les avant-plans
- Éliminer contamination, intrus
- Pas de physique des sources



Carte
d'intensité
HI , $z \sim 7$

et CO

