



COLLÈGE
DE FRANCE
—1530—

Chaire Galaxies et Cosmologie

Les galaxies durant l'époque de la réionisation



Françoise Combes



Laboratoire d'Étude du Rayonnement et de la Matière en Astrophysique

Les principales questions

→ Taux de formation d'étoiles, et contribution à la réionisation?

Fraction de rayonnement UV qui s'échappe?

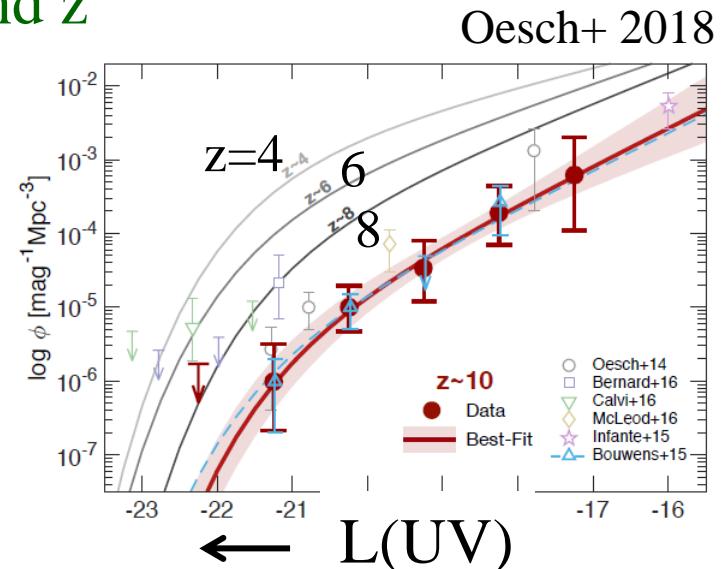
→ Propriété du gaz moléculaire pour former des étoiles

Accrétion de gaz, et expulsion par rétro-action?

→ Etoiles massives exceptionnelles et PopIII

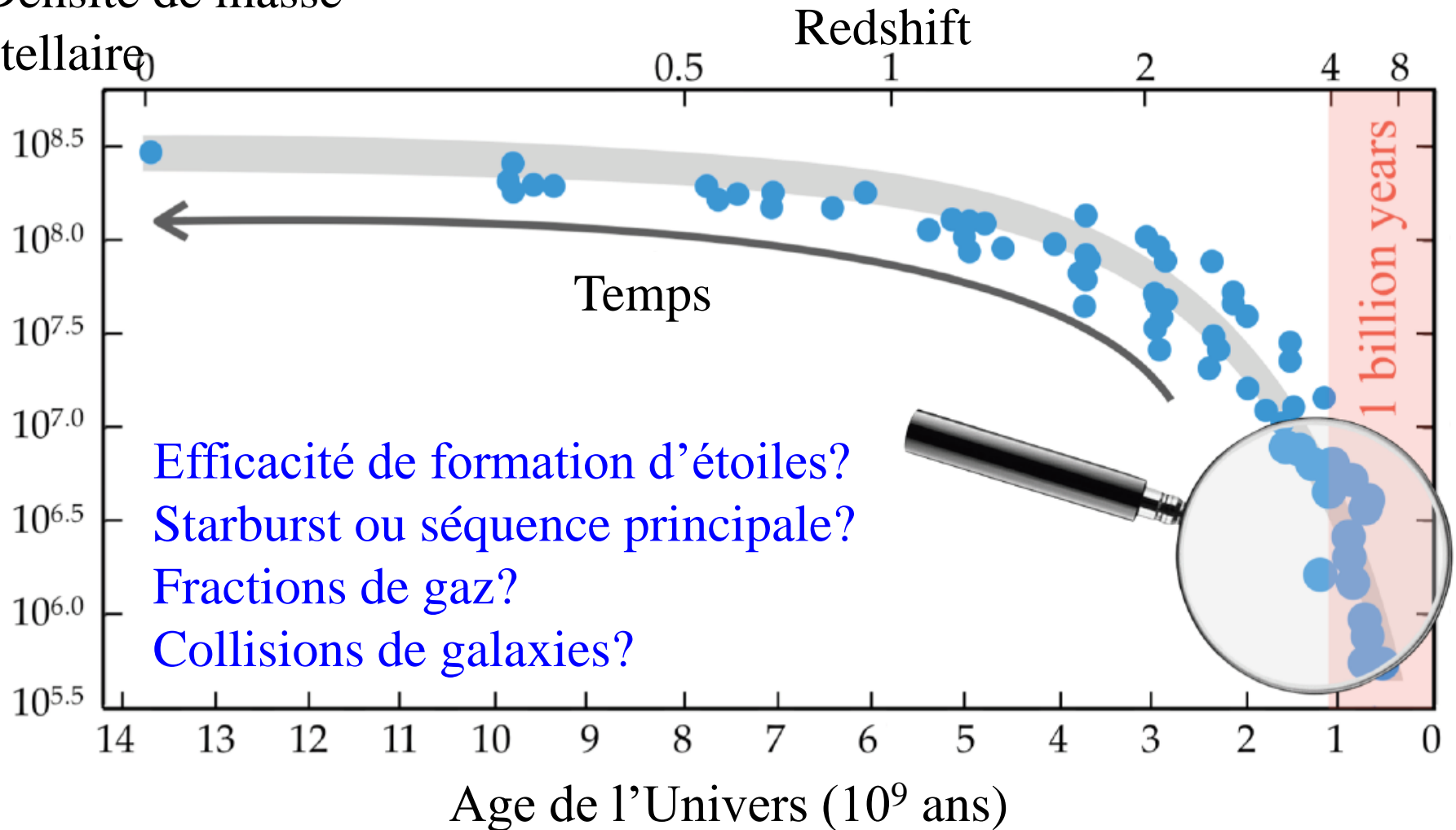
→ Dynamique et masse des galaxies à grand z

→ Rôle des trous noirs et noyaux actifs dans la réionisation



Formation d'étoiles de l'Univers jeune

Densité de masse
stellaire ρ_0



Où chercher les galaxies?

Les zones ionisées sont clairsemées au hasard

Taille caractéristique

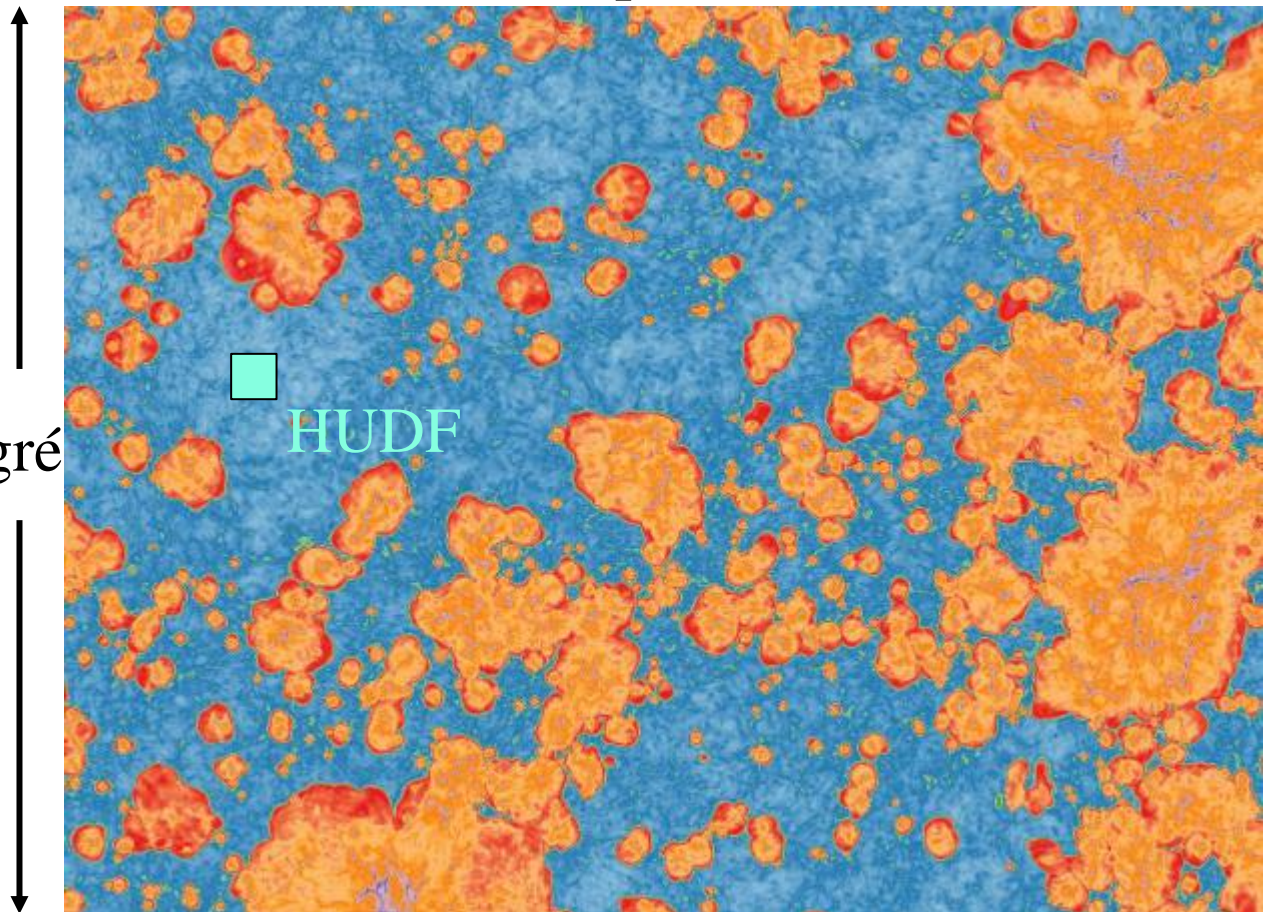
$\sim 30 \text{ Mpc}$ ($12'$)

Contrôlées par
les halos de matière
Noire

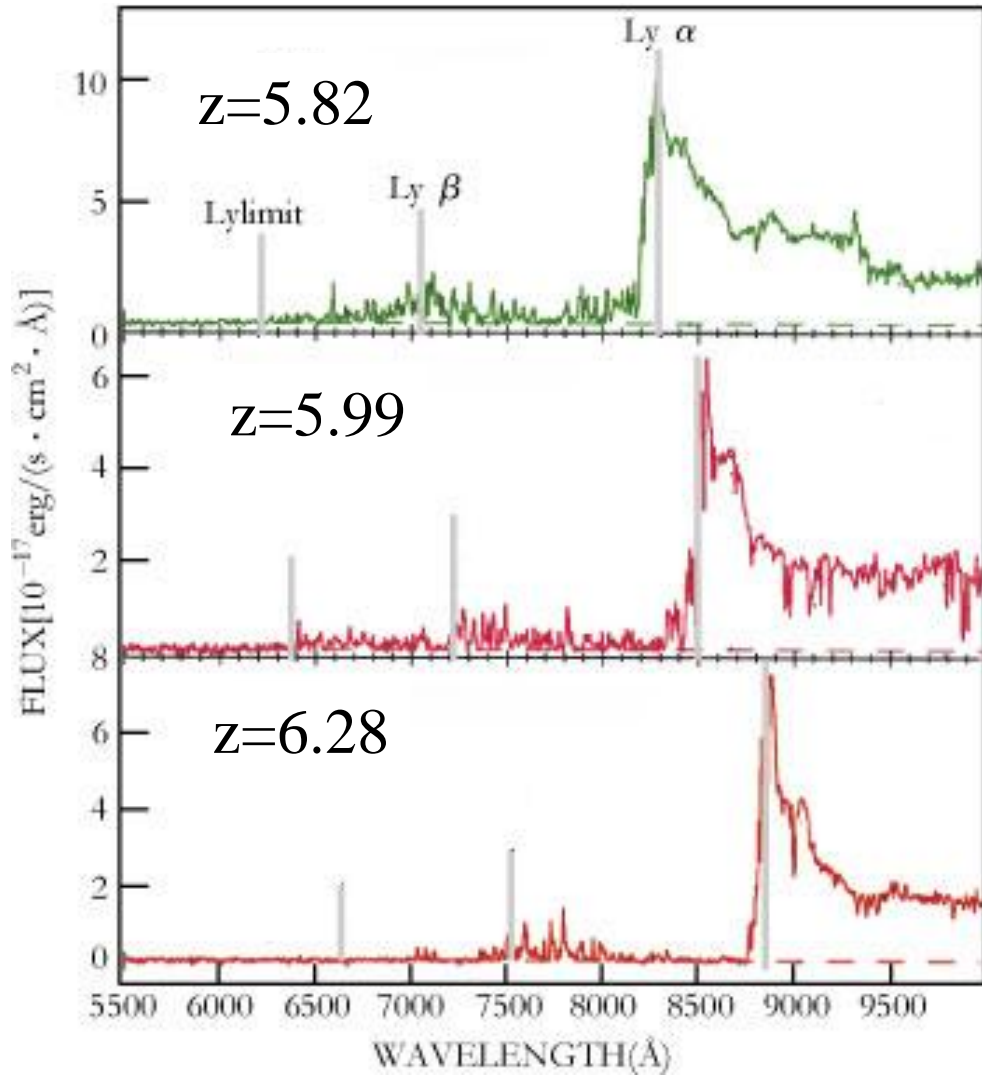
HUDF $\sim 3'$

CANDELS $\sim 20'$

$1^\circ \sim 150 \text{ cMpc}$ à $z=7$



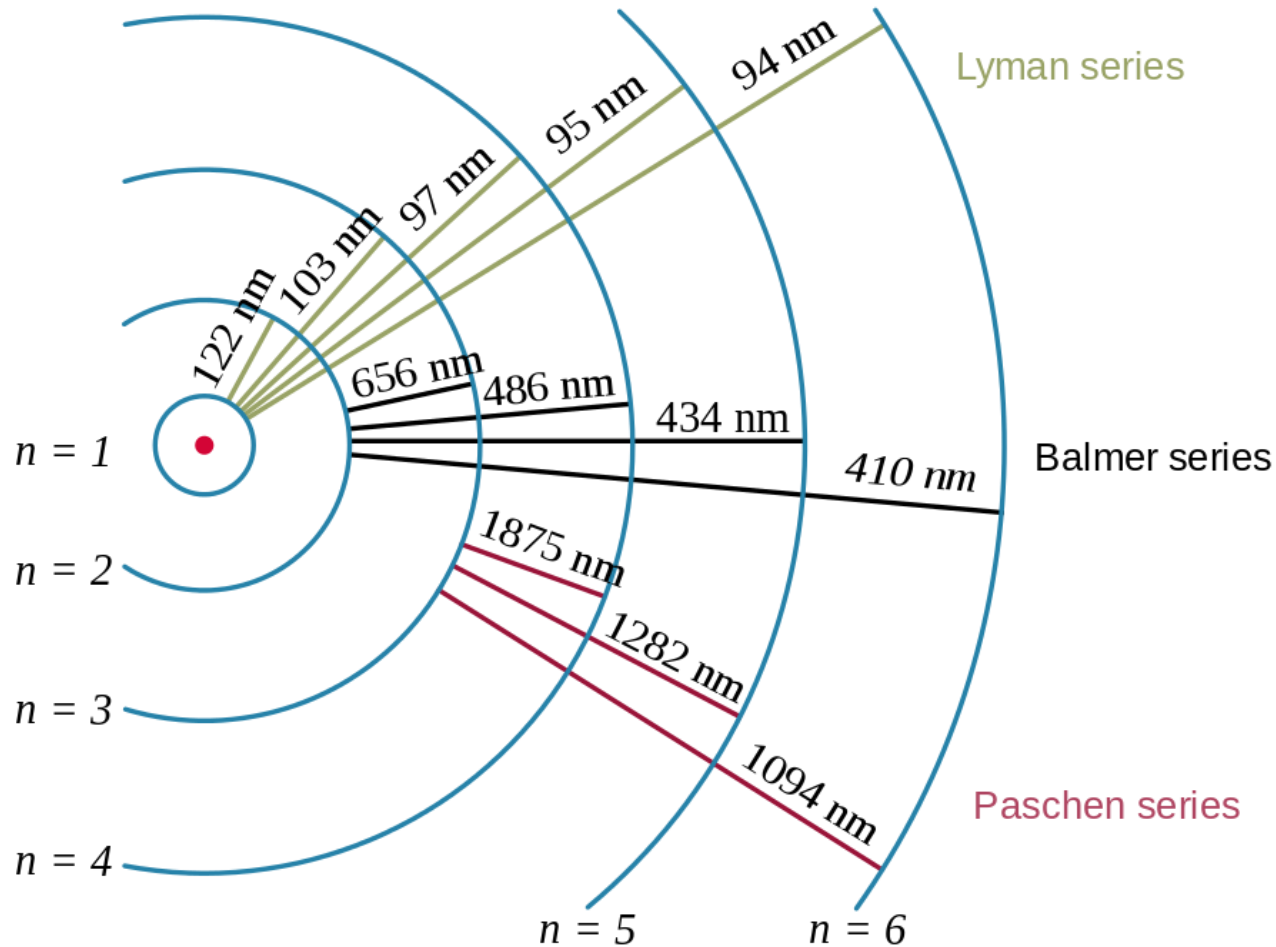
La réionisation arrive tard



La détection du fossé de Gunn-Peterson dans le spectre des quasars à $z \sim 6$ montre que la réionisation a lieu tardivement (Fan et al 2002)

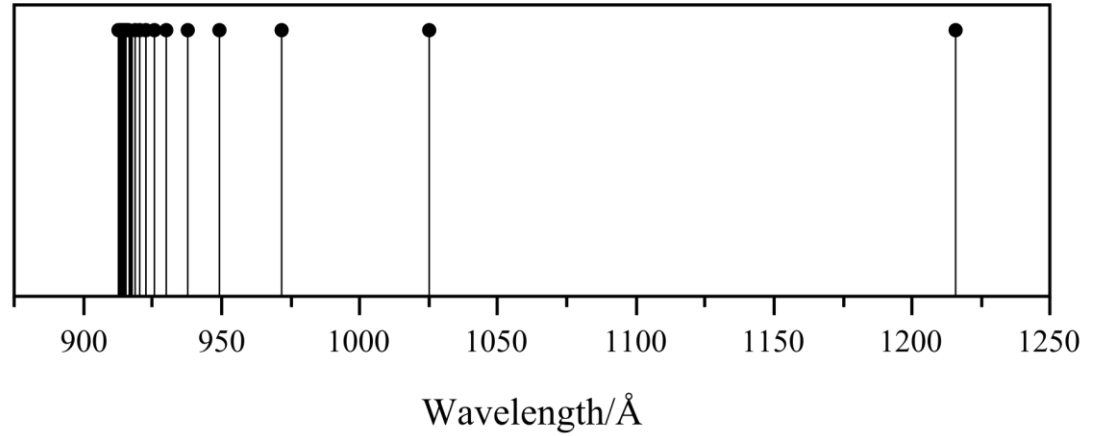
Confirmé par Planck
Et aussi la chute du nombre d'émetteurs Ly α (LAE) au-delà de $z \sim 7$

La série de Lyman de l'atome H

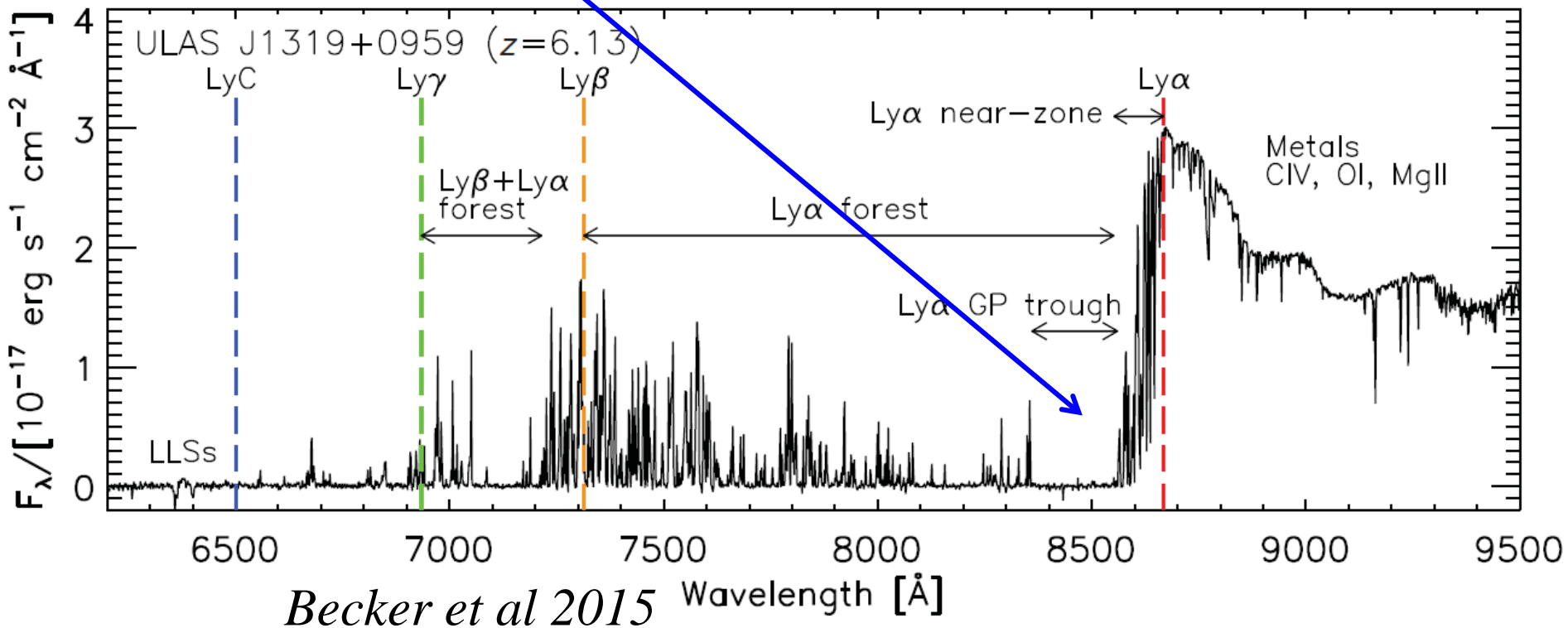


Forêt Lyman- α devant les quasars

Limit	...	Ly- γ	Ly- β	Lyman- α
912 Å		972 Å	1026 Å	1216 Å

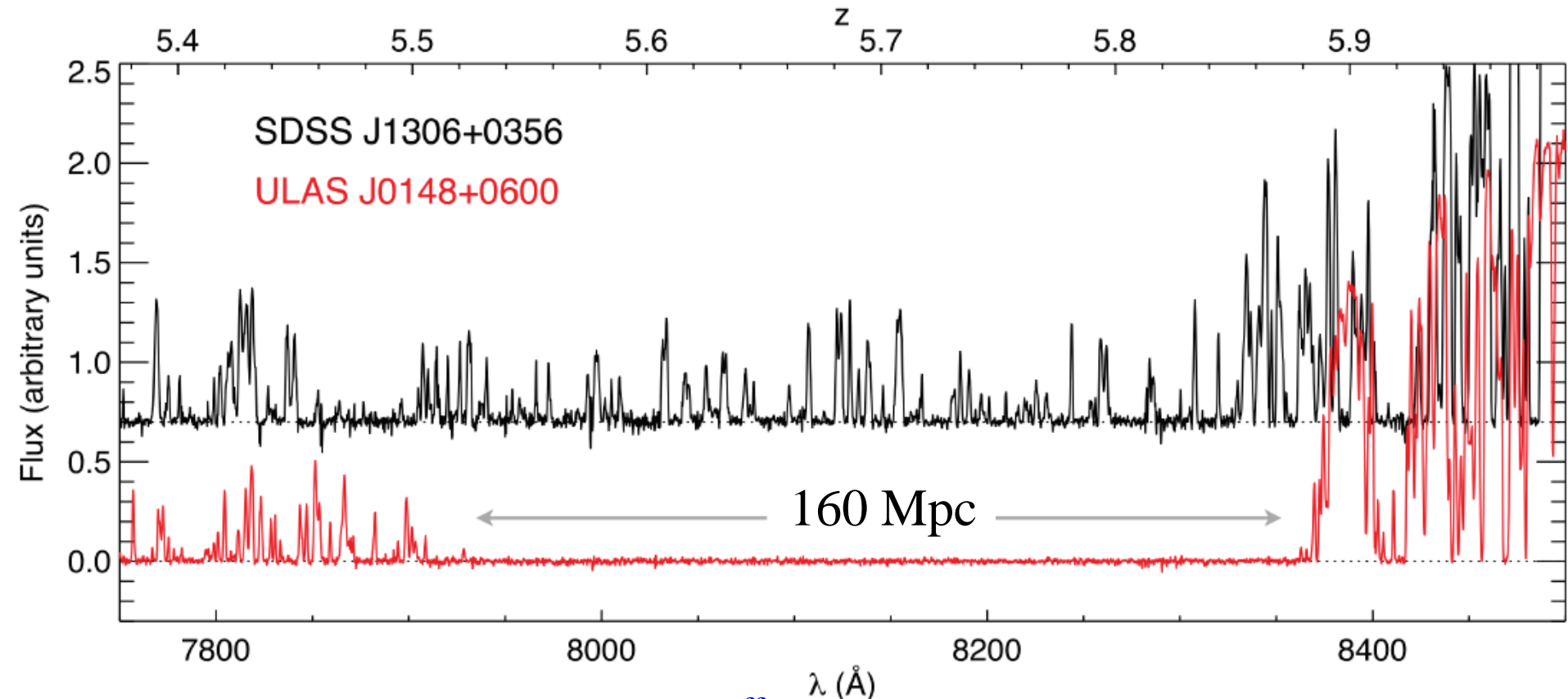


GP= le fossé de
Gunn-Peterson



Fluctuations spatiales/temporelles

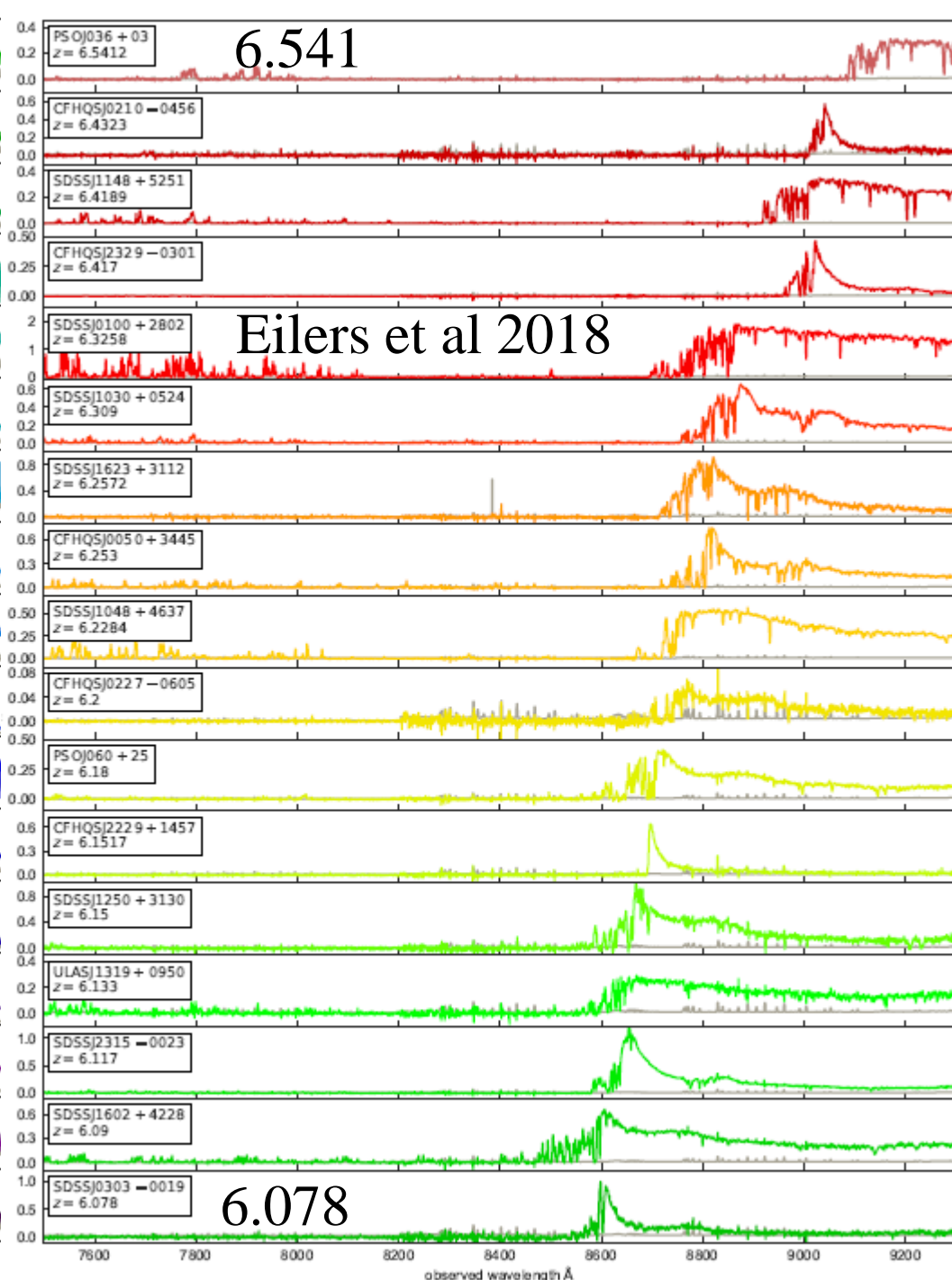
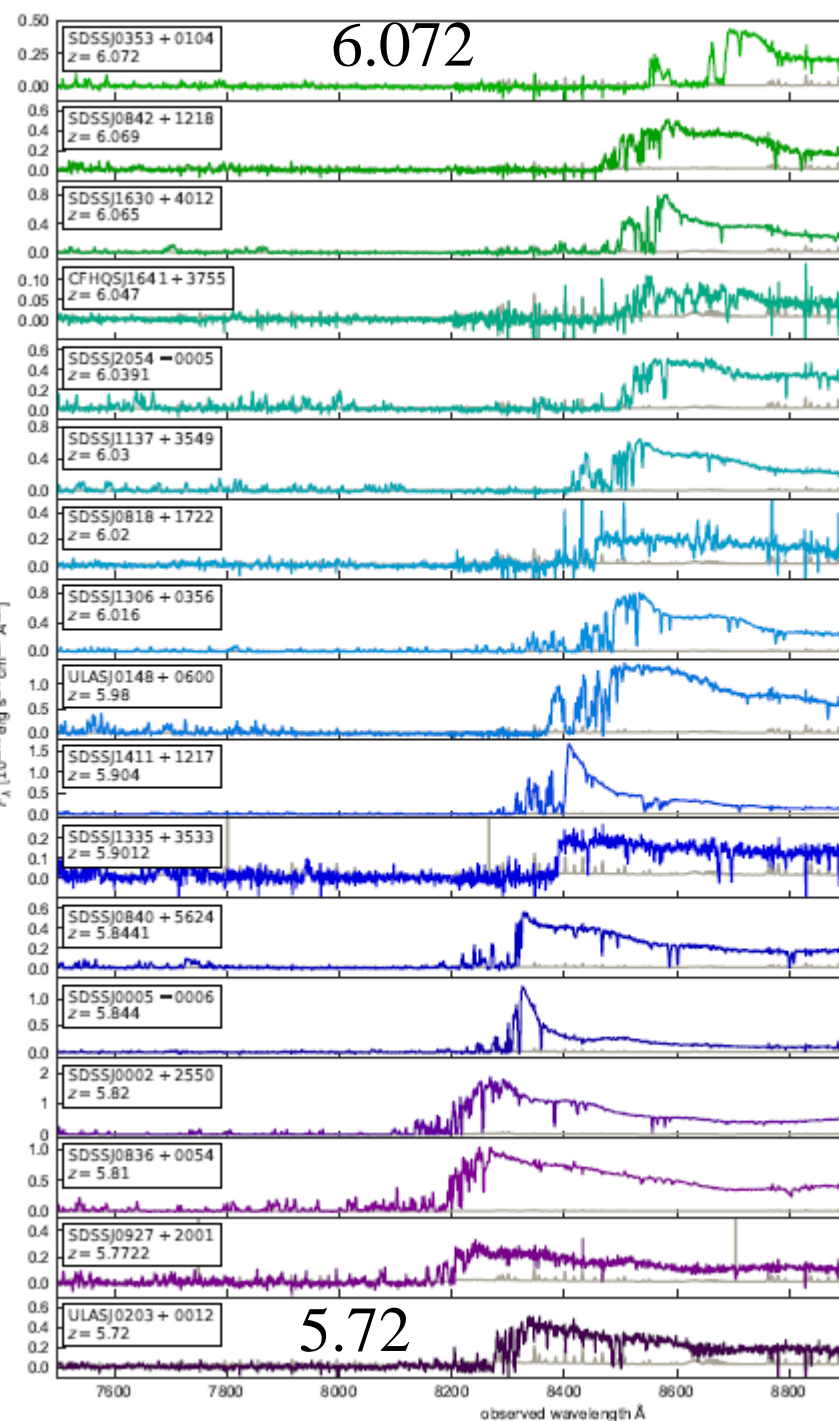
On peut lire l'histoire de la réionisation sur chaque ligne de visée
→ Très différente d'une ligne à une autre



$$\langle F \rangle = \exp^{-\tau_{\text{eff}}}$$

Becker et al 2015

Épaisseur optique efficace τ_{eff} , sur 50 cMpc/h



Reconstruction du spectre des QSO

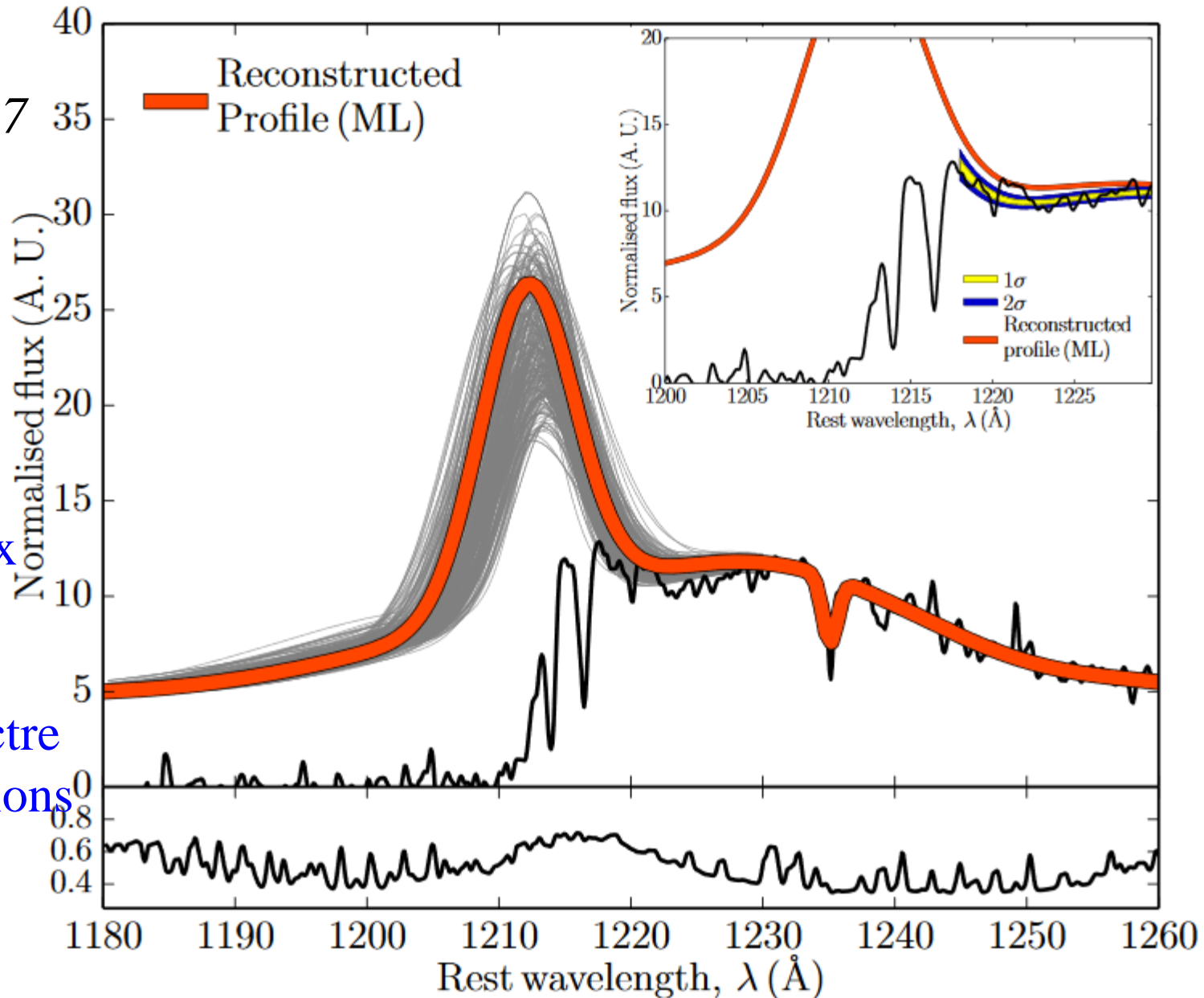
Greig et al 2017

$z=7.1$ QSO
J1120+0641

$x_{\text{HI}} = 0.4$

Probabilité max
de 300 essais

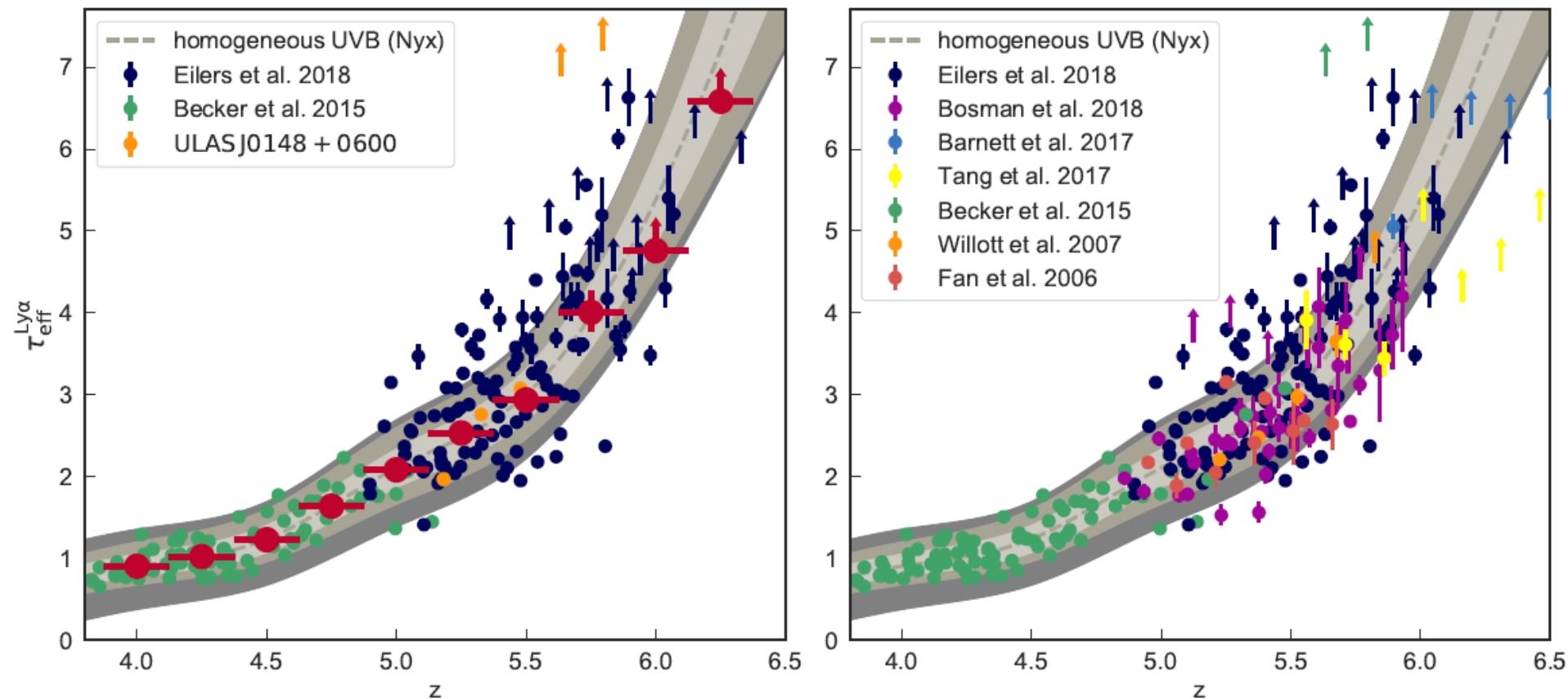
à partir du spectre
total + simulations



Epaisseur optique τ_{eff} croissante

Grande dispersion des mesures, qui montre les fluctuations spatiales et temporelles. En grisé léger le modèle (68%, 95%)

Grisé épais: 20% supplémentaire d'incertitude



Eilers et al 2018

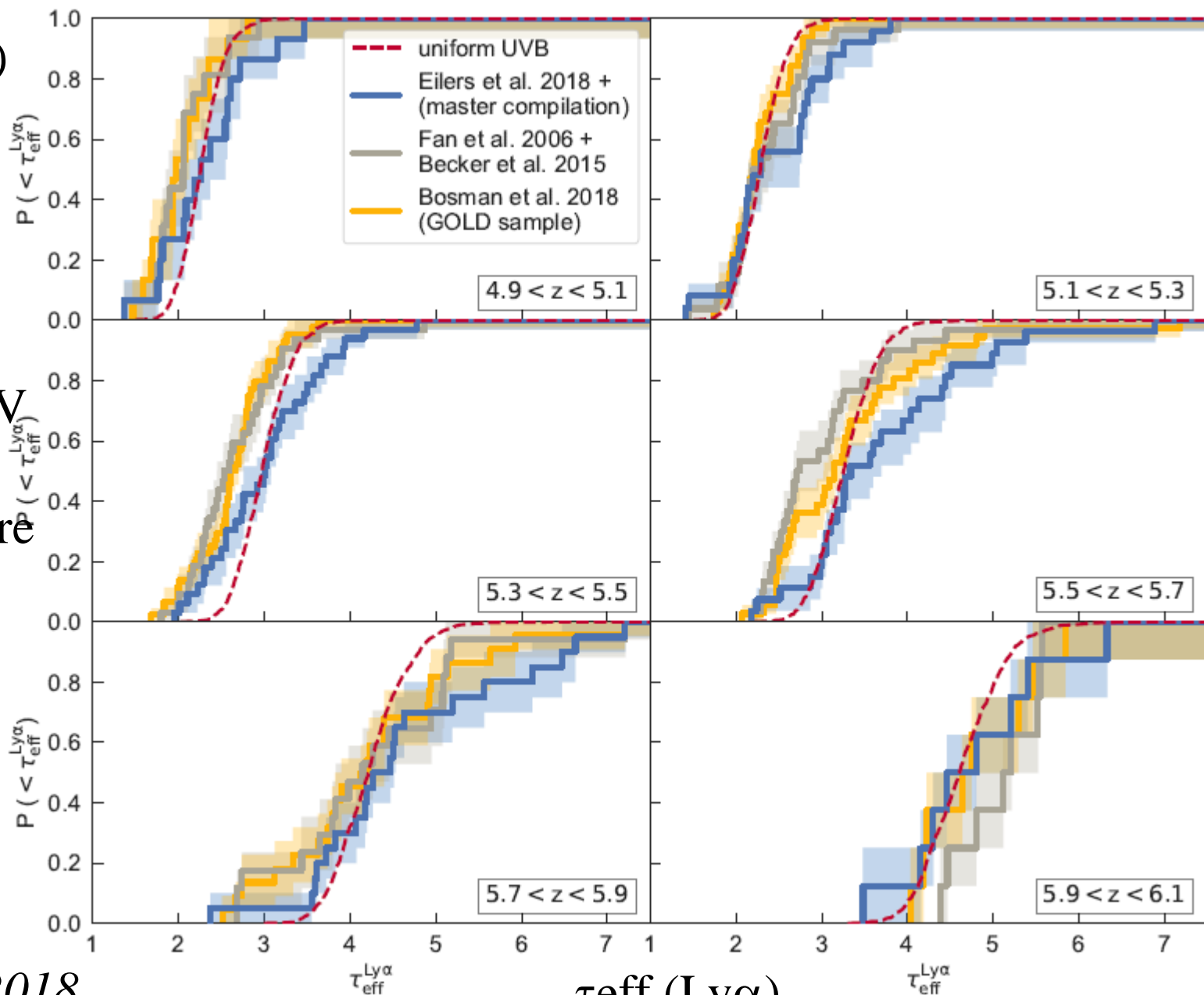
Simulations: UVB, Température

$P(<\tau_{\text{eff}})$

Simulations
recalibrées

Dépendent
du champ UV
et température

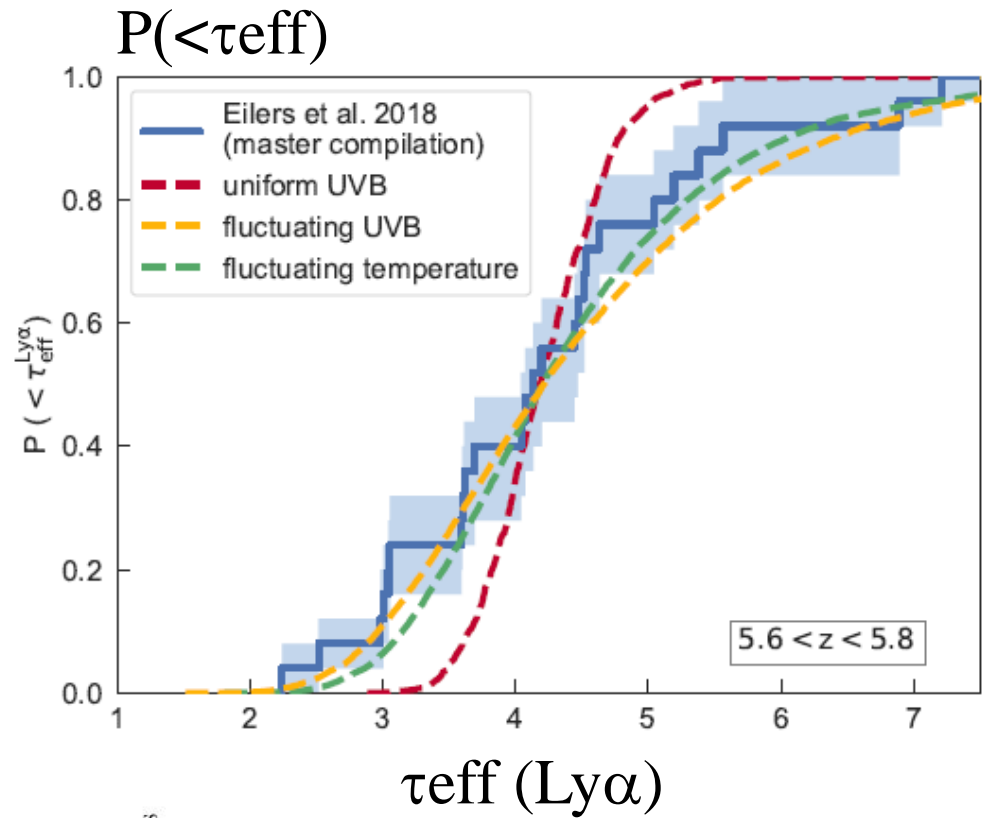
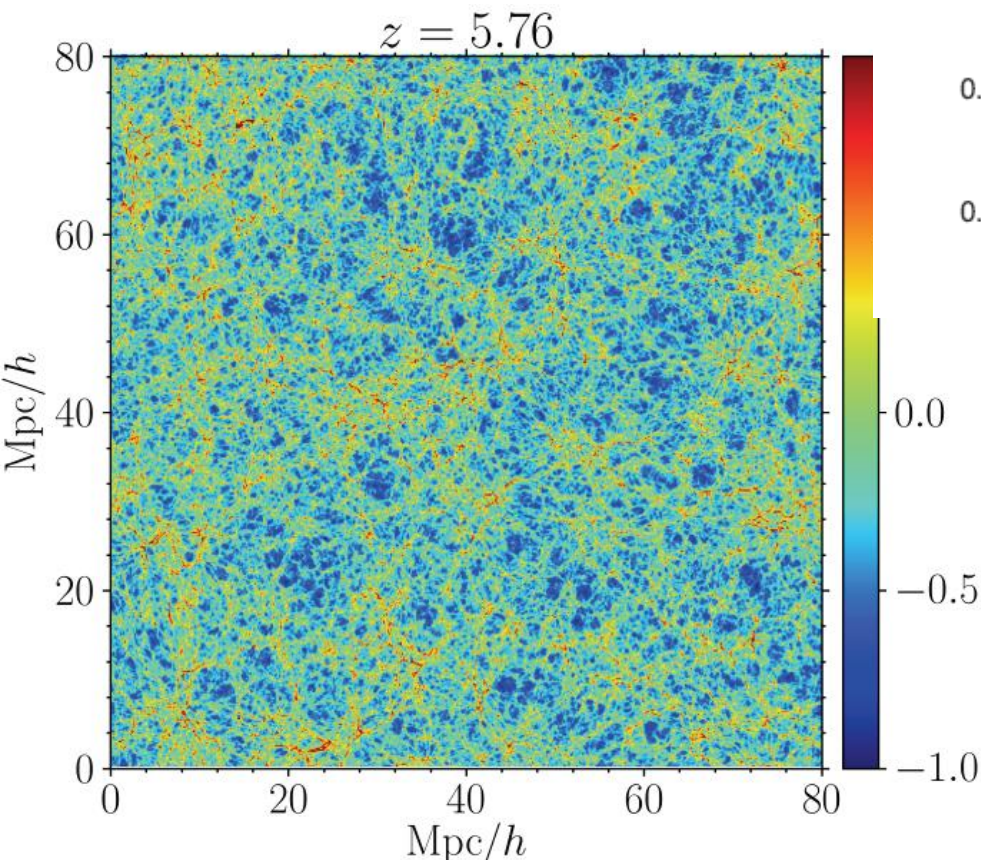
T froide si
réionisé tôt



Eilers et al 2018

Les fluctuations étalent la réionisation

Pour un champ UV uniforme,
→ réionisation brutale



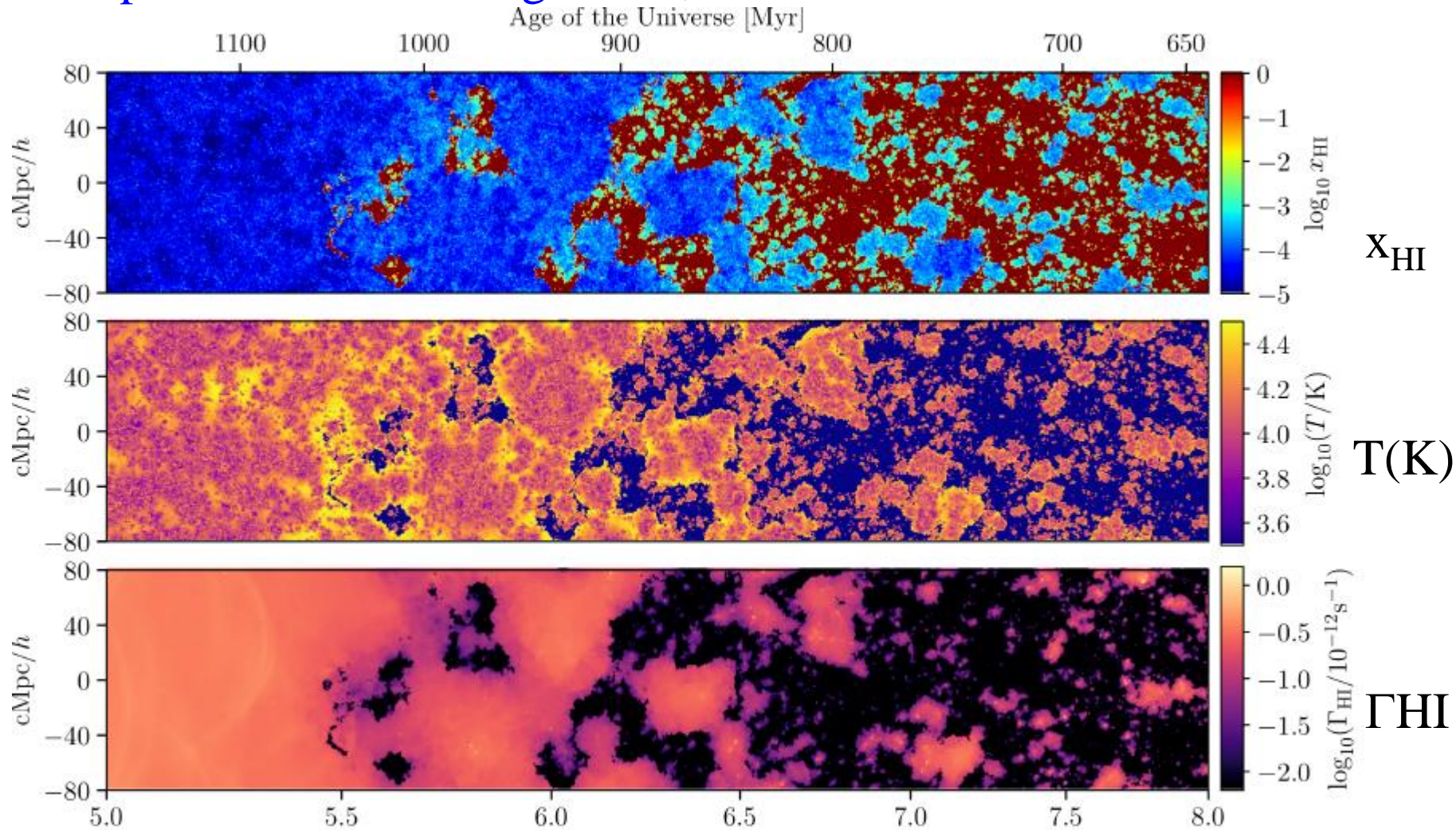
$\log_{10} \Delta_{\text{gas}}$

$$\tau \propto n_{\text{HI}} \propto \alpha(T) n_e N_{\text{HII}} / \Gamma_{\text{HI}} \\ \propto T^{-0.7} \delta^2 / \Gamma_{\text{HI}}$$

Γ_{HI} taux d'ionisation de HI

Réionisation retardée

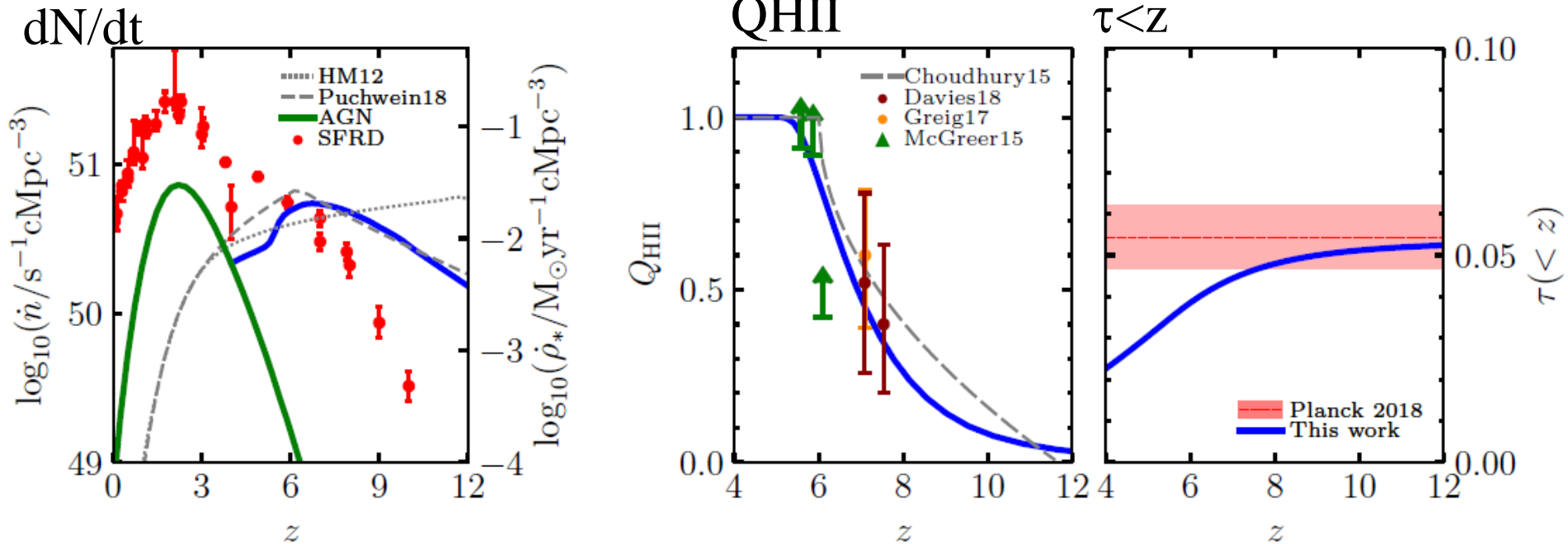
Réionisation à moitié à $z=7.5$ et terminée à $z=5.3$, avec des poches de HI assez grandes, devrait être visible en HI-21cm



Kulkarni et al 2019

SFR pour rendre compte des observations

Simulations, avec le taux de formation d'étoiles SFRD +AGN
Nécessaires pour rendre compte des Quasars (et forêt Ly α) et aussi
des émetteurs Ly α + épaisseur optique de Planck



Émissivité ionisante HM12 (Haardt & Madau 12), SFR Oesch 2014,18
Fraction ionisée Q_{HII} (à $z=7$, disparition des émetteurs Ly α)

Kulkarni et al 2019

Galaxies découvertes avec cassure Lyman

Comment sélectionner les galaxies très lointaines?

Champs profonds HUDF

>3000 galaxies/ '2

Technique photométrique
utilisant la cassure

Au-delà de 912 \AA : Absorption

HI sur la ligne de visée

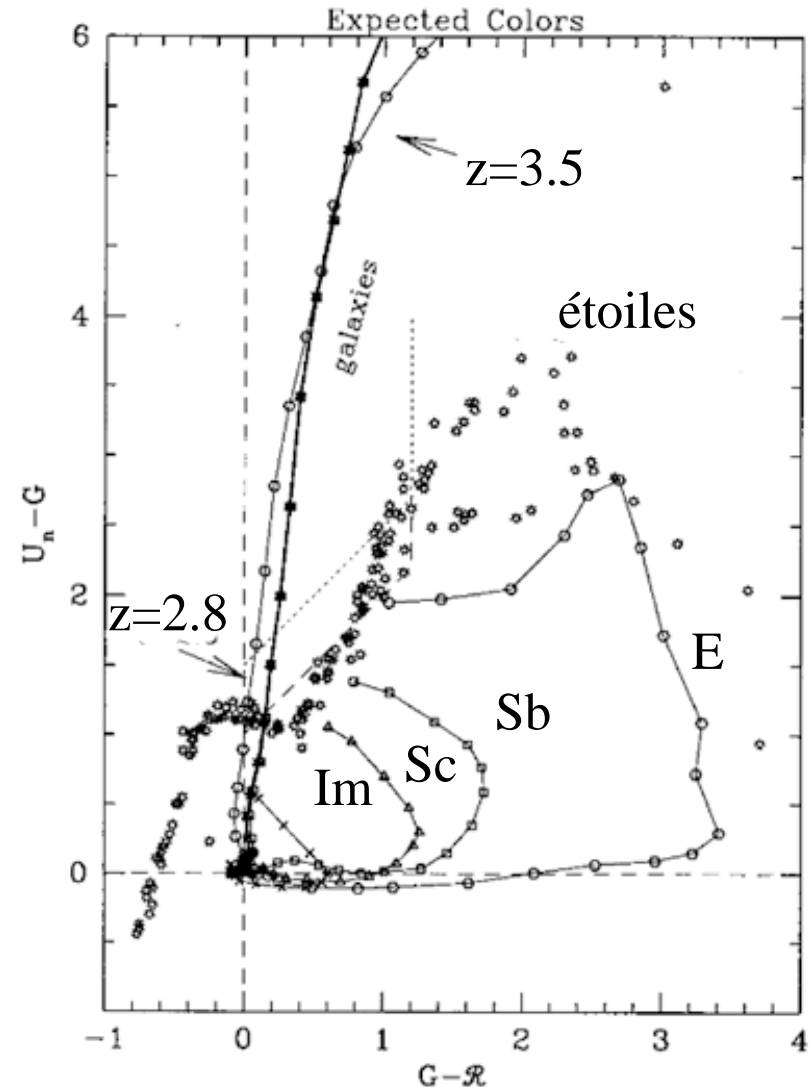
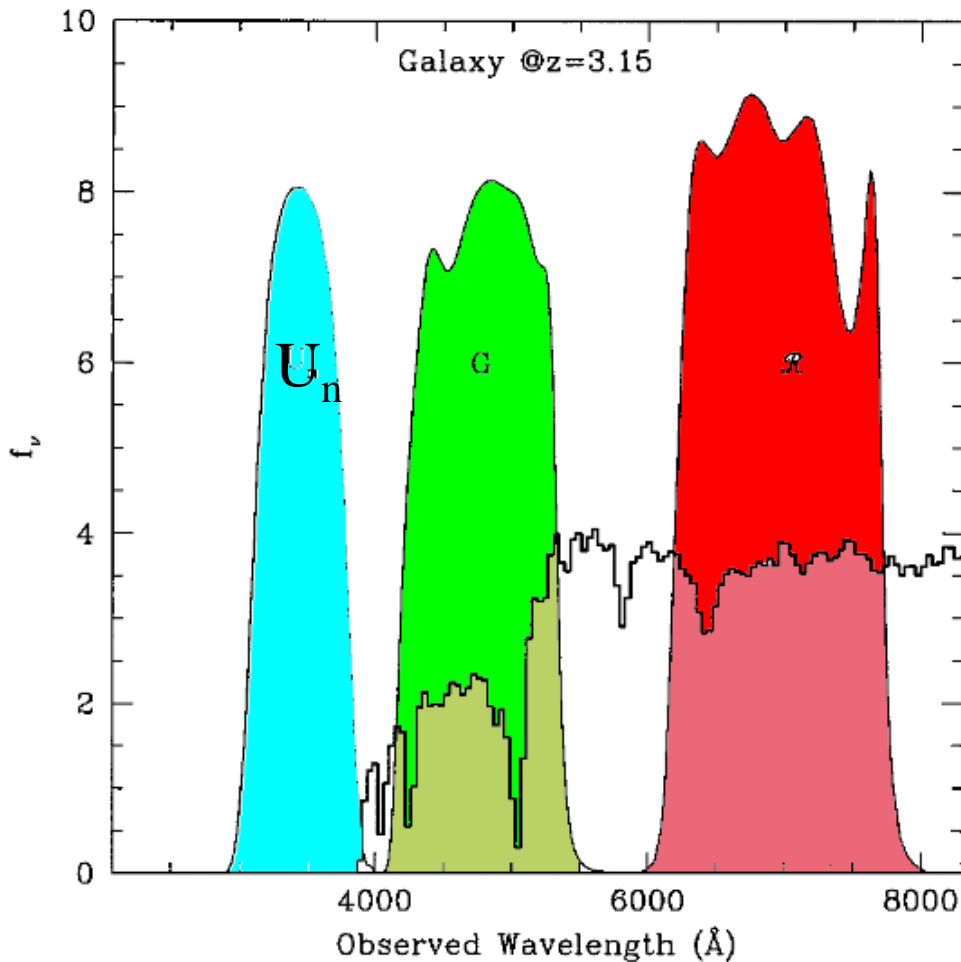
→ LBG « Lyman-break galaxies »

La photométrie suffit, permettant
des milliers de galaxies en
simultané



La technique de la cassure Lyman

Spectre typique d'une galaxie $z=3$



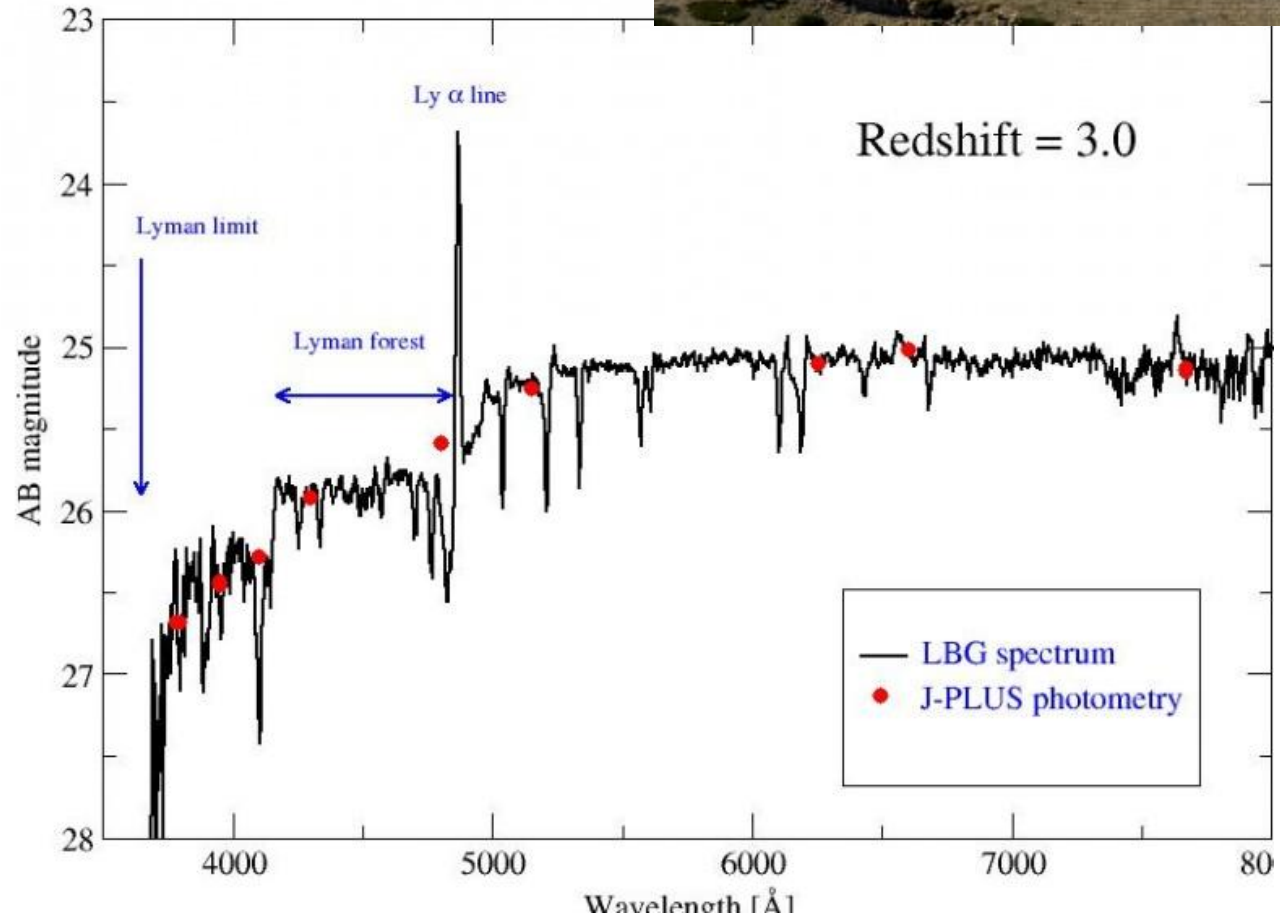
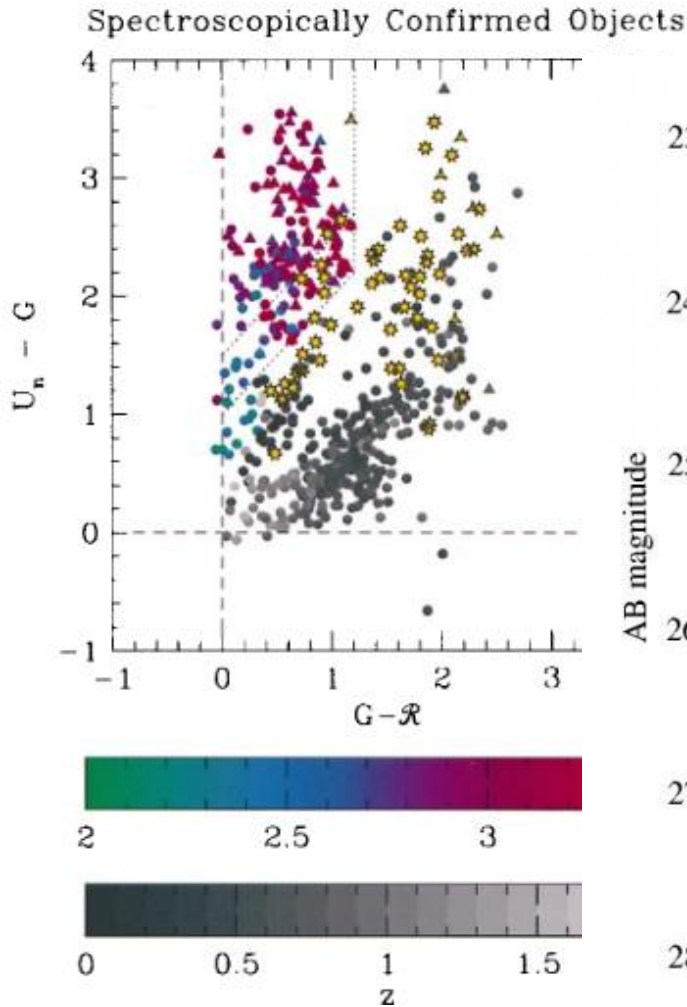
Steidel et al 1998



Grands programmes photométriques

J-Plus

2.6m
FOV 3°

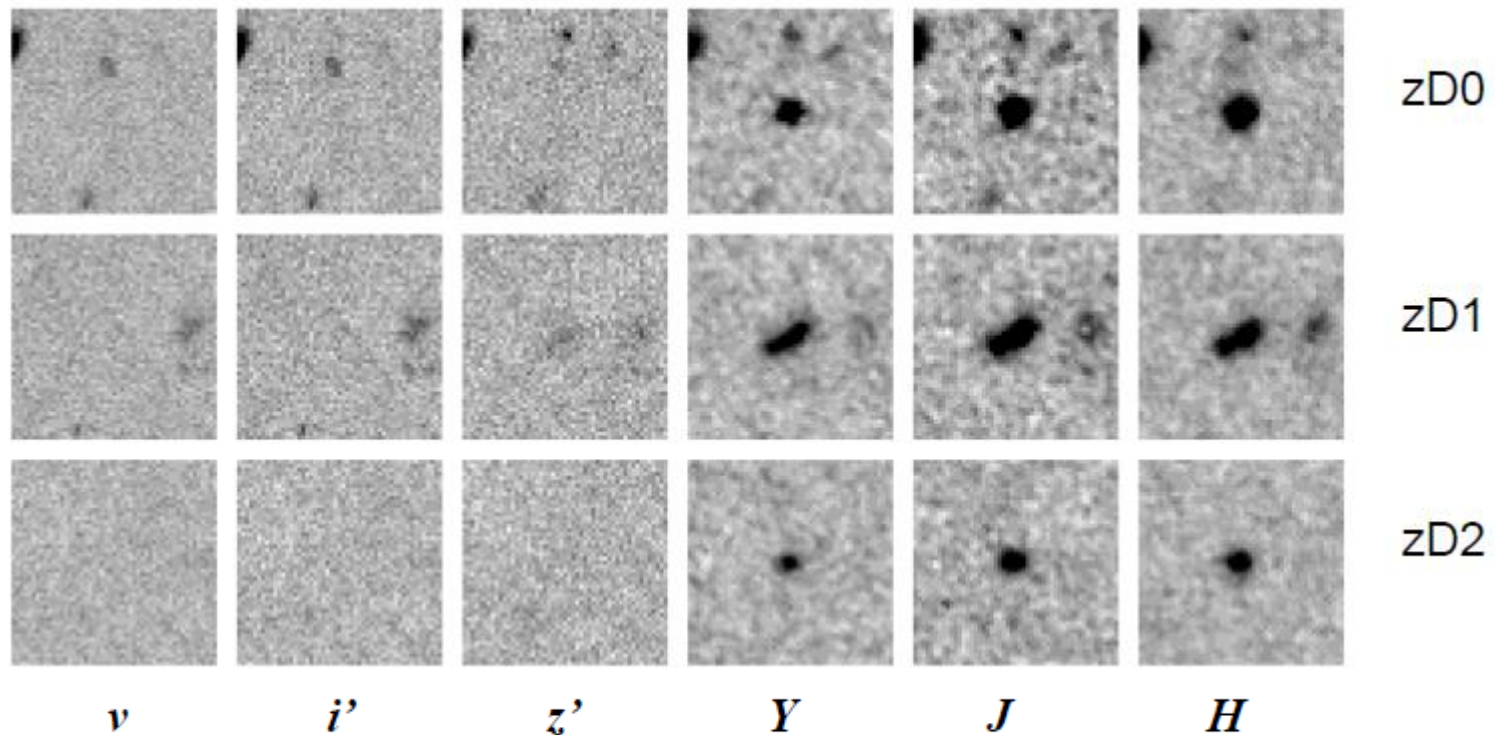


Steidel et al 1998

Selection des galaxies lointaines par leurs couleurs

Généralisation z-drop, J-drop, H-drop

Pour identifier les galaxies à $z > 7$ parmi les milliers d'autres
Généralisation de la technique Lyman break



12 galaxies identifiées à $z > 7$

SFR $1.3 M_{\odot}/\text{an}$

Bunker et al 2010

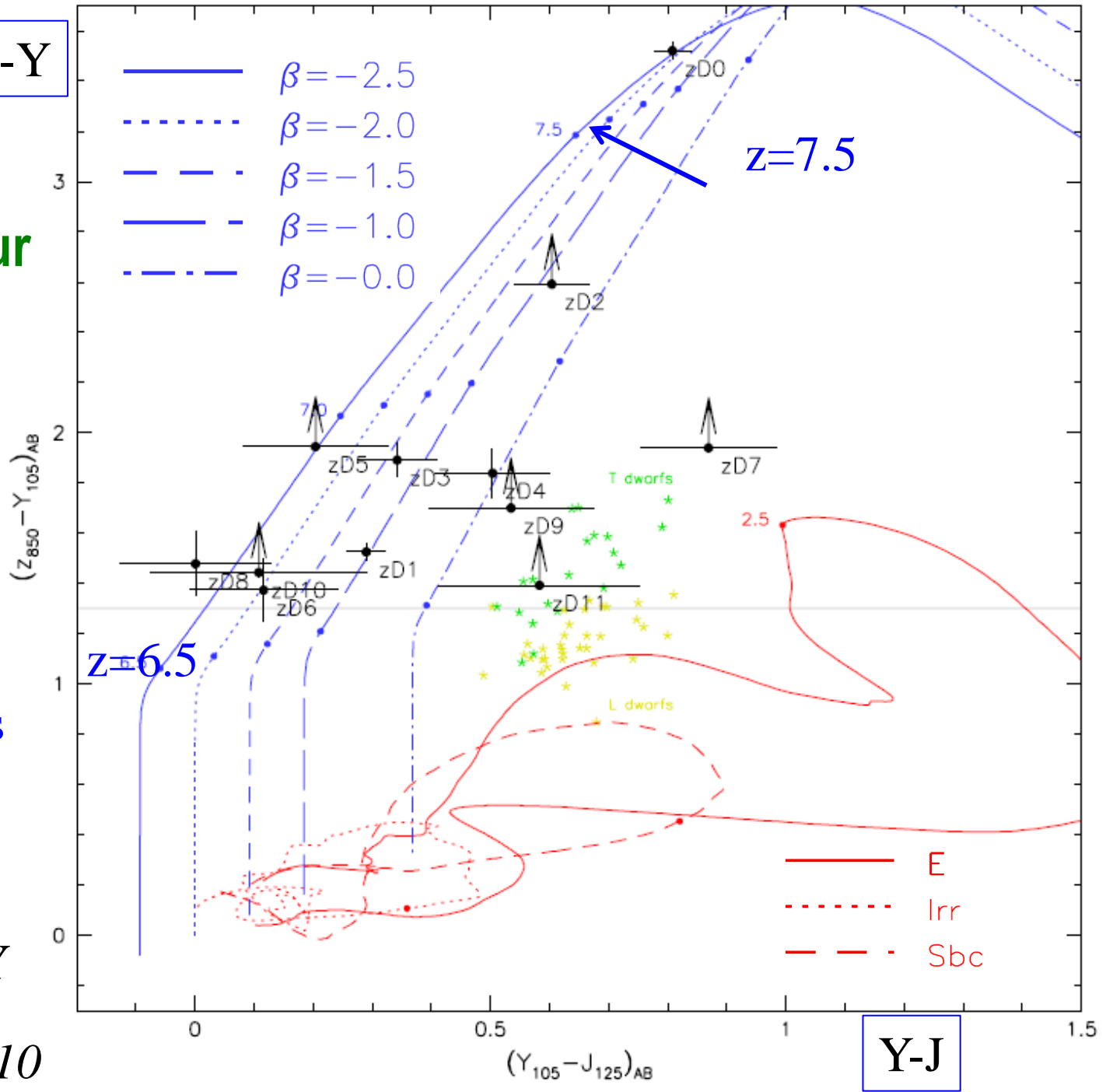
Z-Y

Diagramme Couleur-couleur

Pente UV du spectre
Flux $\propto \lambda^\beta$

Contaminations
Par étoiles naines
Jaune étoiles L
Vert Etoiles T

OBAFGKM LTY



Y-J

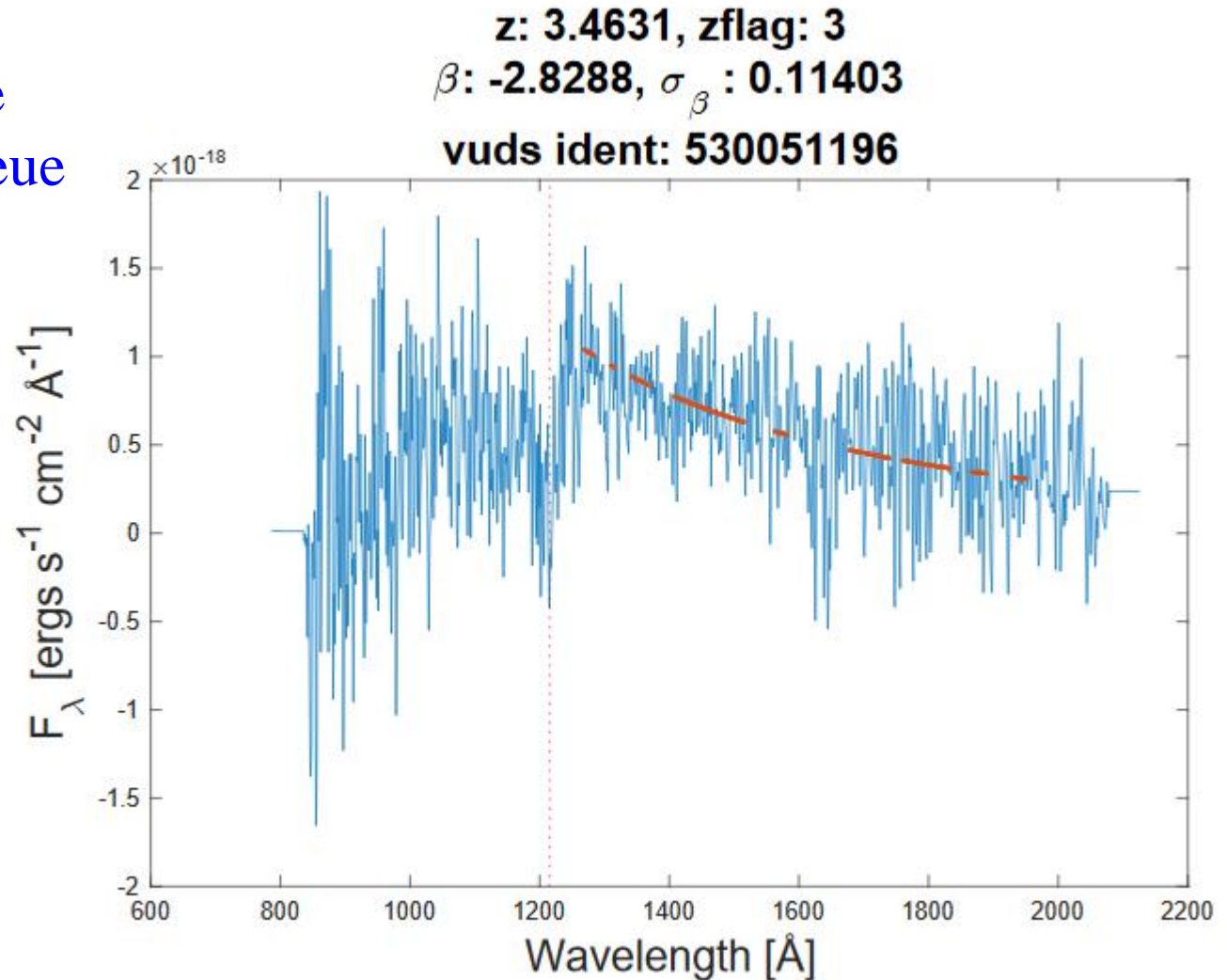
Définition de la pente β

Pente dans l'UV, entre 1260 et 2580Å

Plus la pente est forte
Plus la galaxie est bleue

Effet de la poussière
pour le rougissement

Flux $\propto \lambda^\beta$



Z-Y

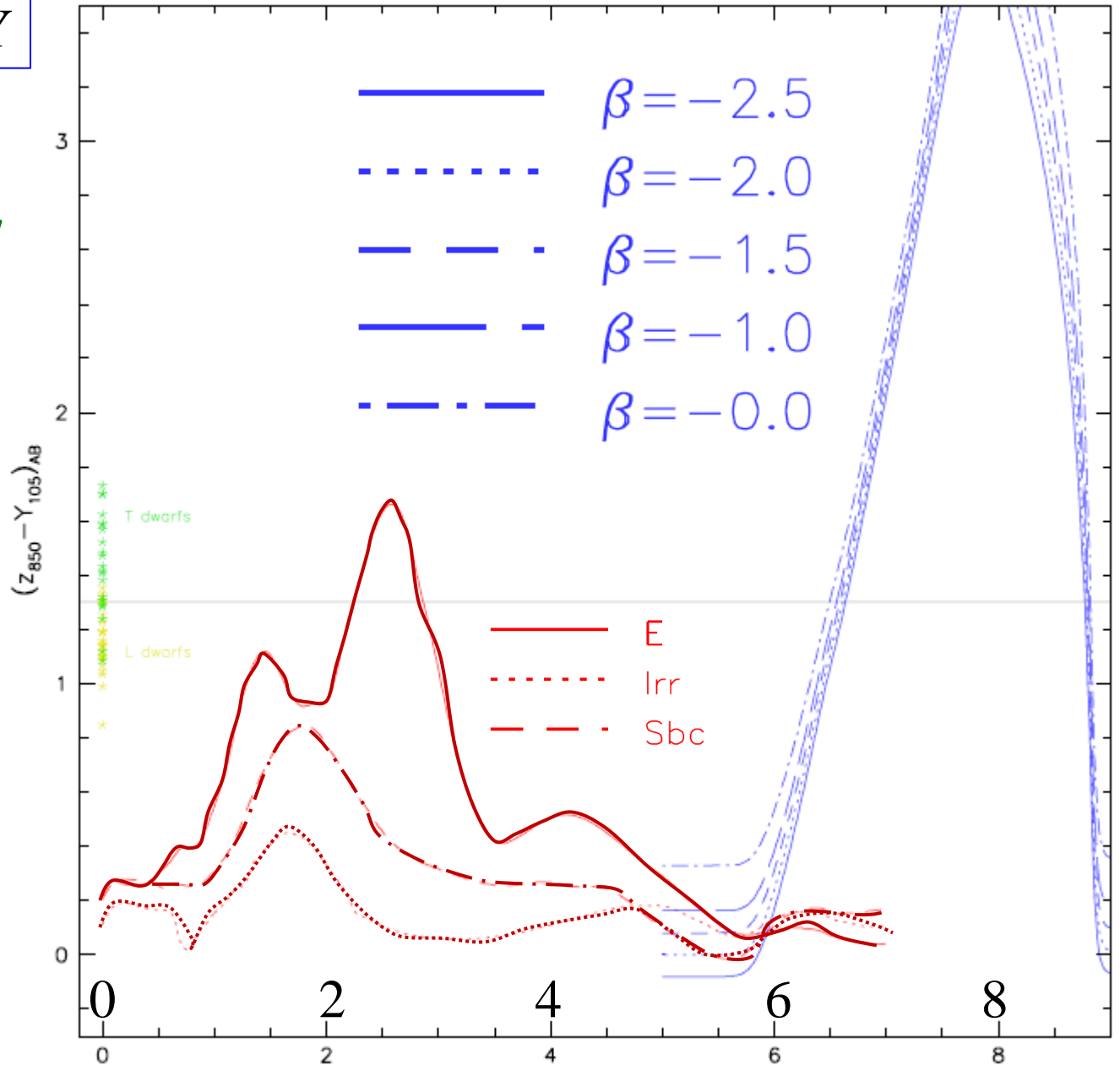
Diagramme Redshift-couleur

Pente UV du
spectre
 $\text{Flux} \propto \lambda^\beta$

Contaminations
Par étoiles naines

Jaune étoiles L

Vert Etoiles T



Résultats avec Hubble

Le taux de formation d'étoiles: $\text{SFR}(z=7) = \text{SFR}(z=3)/10$

Ces galaxies sont insuffisantes pour réioniser

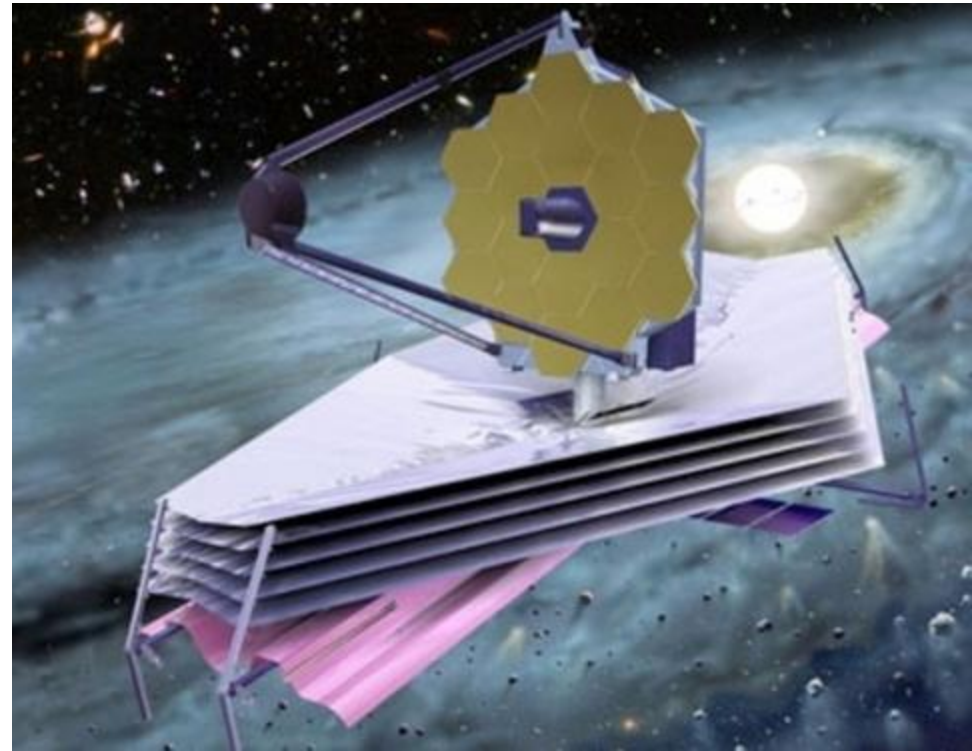
Sauf si fraction échappement $f_{\text{esc}} > 0.5$

Ou bien l'univers est plus homogène que les simulations

Ou encore étoiles PopIII, IMF biaisé vers les étoiles massives

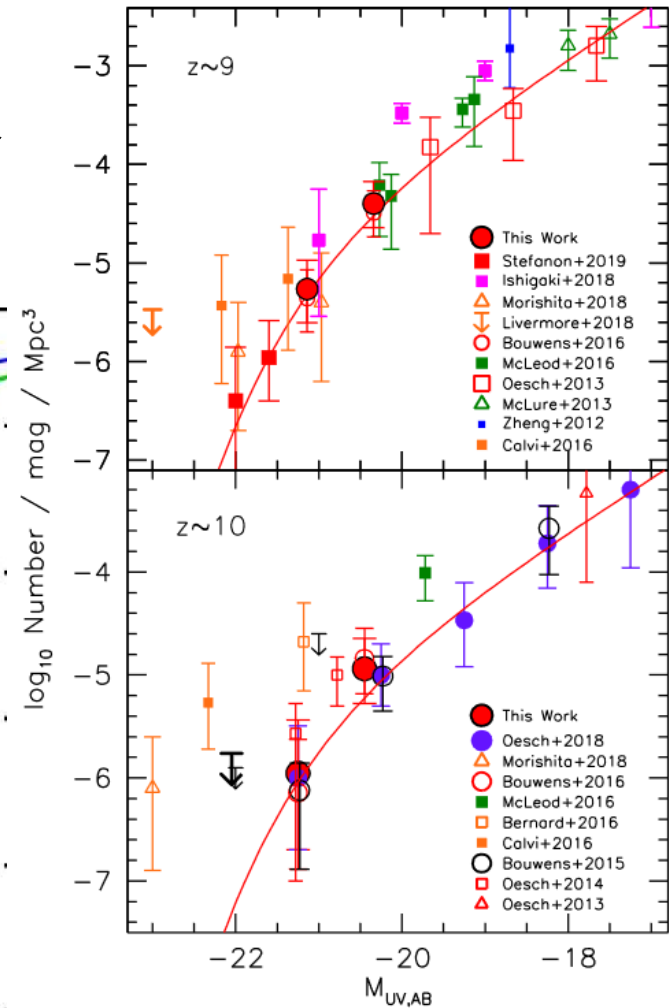
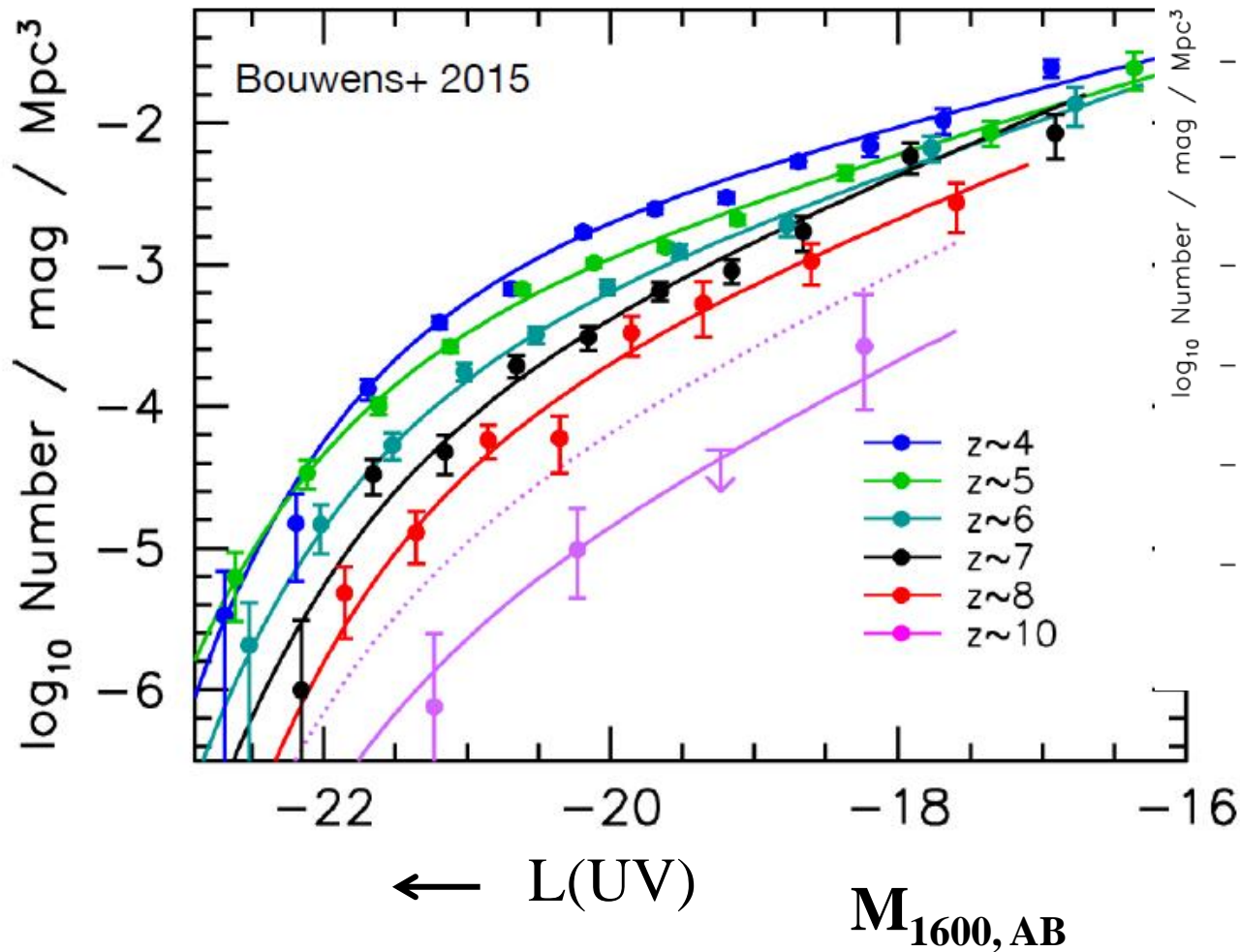
Ou alors l'ionisation provient
de galaxies encore plus petites

→ JWST (6.5m, 0.6-27 μm)
devrait être lancé en Mars 2021
par Ariane vers
L2, durée ~10ans des moteurs
Refroidi mécaniquement



Fonction de luminosité

Objets de plus en plus rares, quelle que soit la technique → JWST?

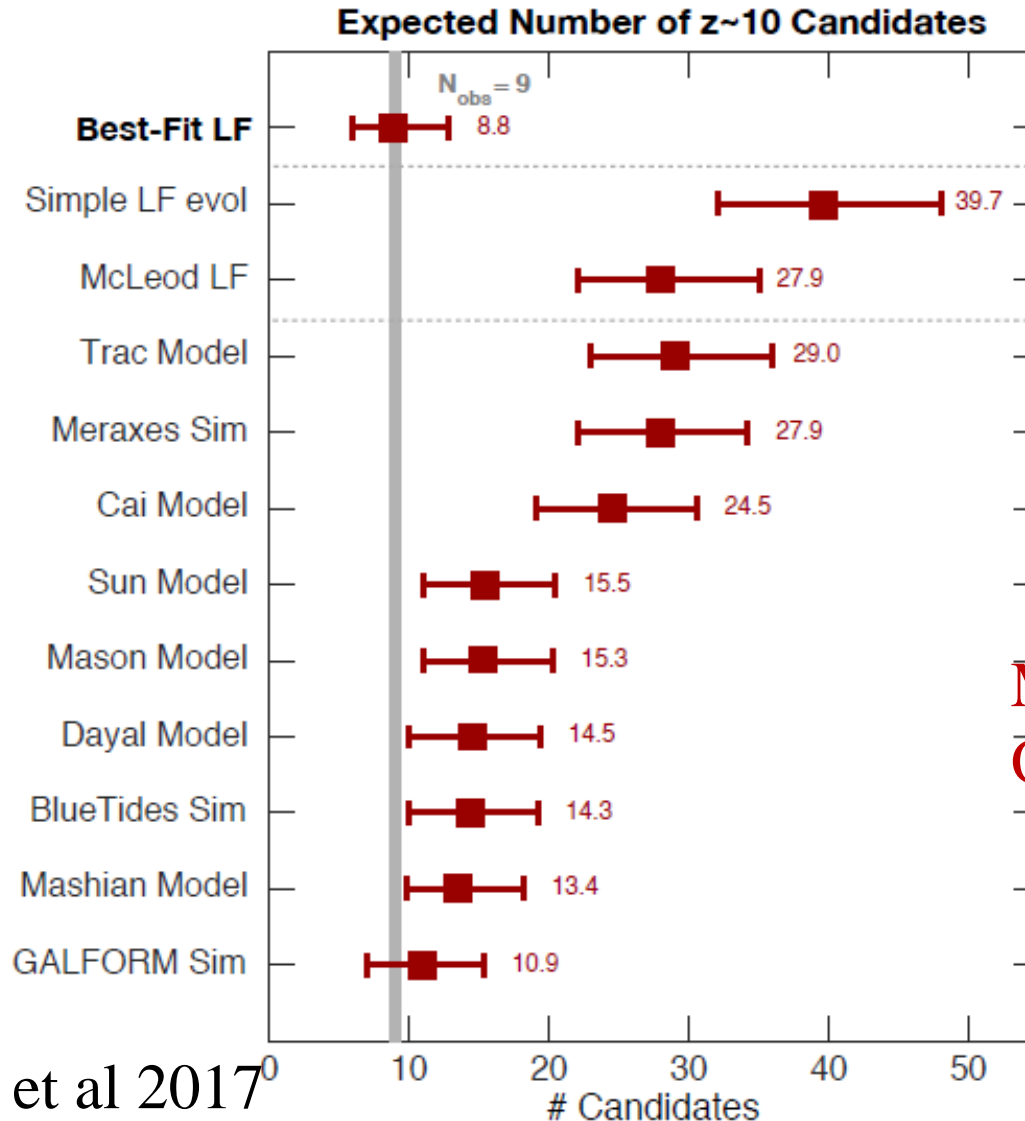


Recherche étendue
Cas incertains

Bouwens et al 2019

Déclin rapide des galaxies $z \sim 8-10$

Recensement tous champs HST, chute d'un facteur 10 entre $z=8$ et 10



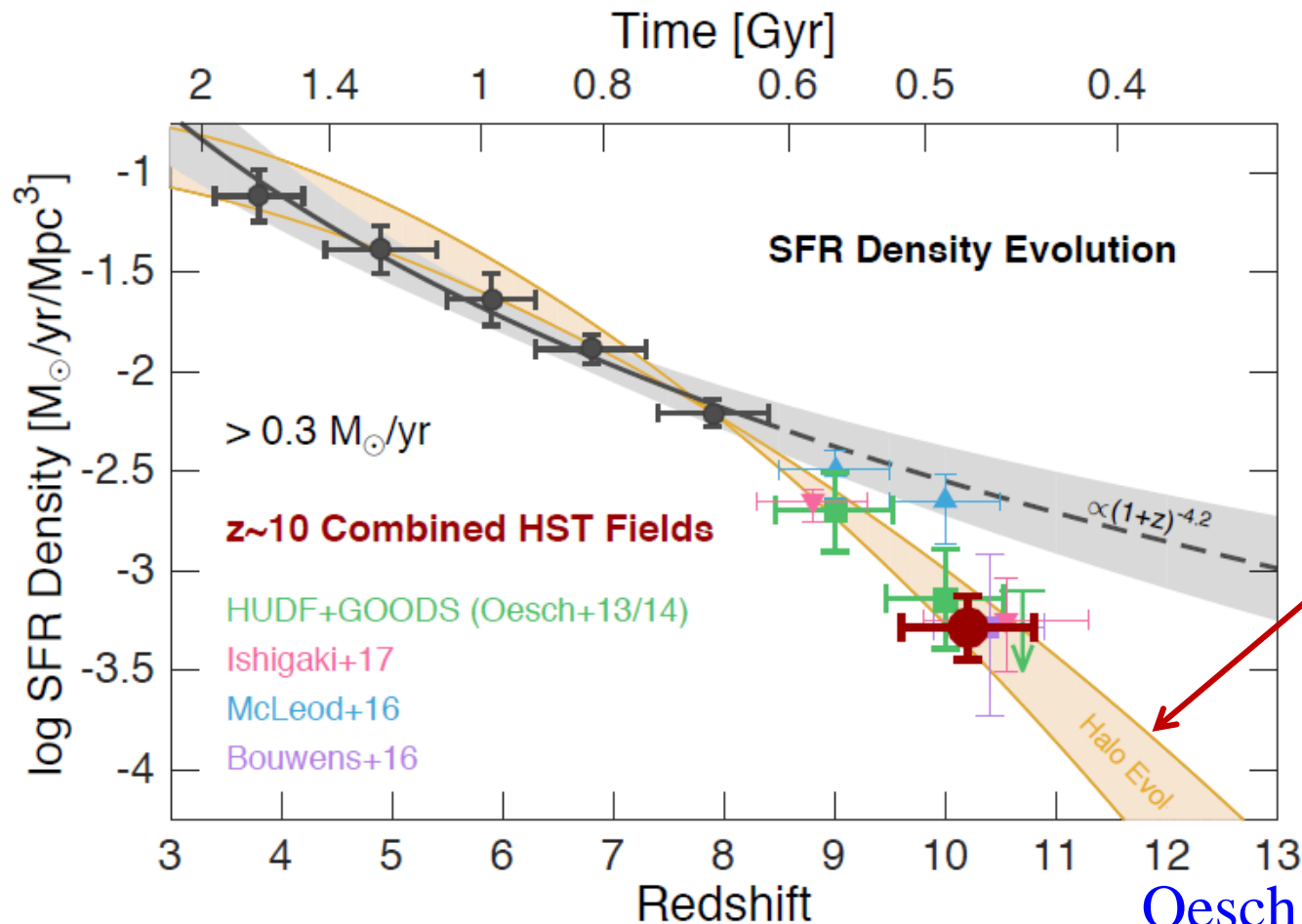
Extrapolation empirique
9 candidats identifiés
Seulement
Variance cosmique?

Modèles semi-analytiques
Ou simulations $N > 25$

Densité de formation d'étoiles

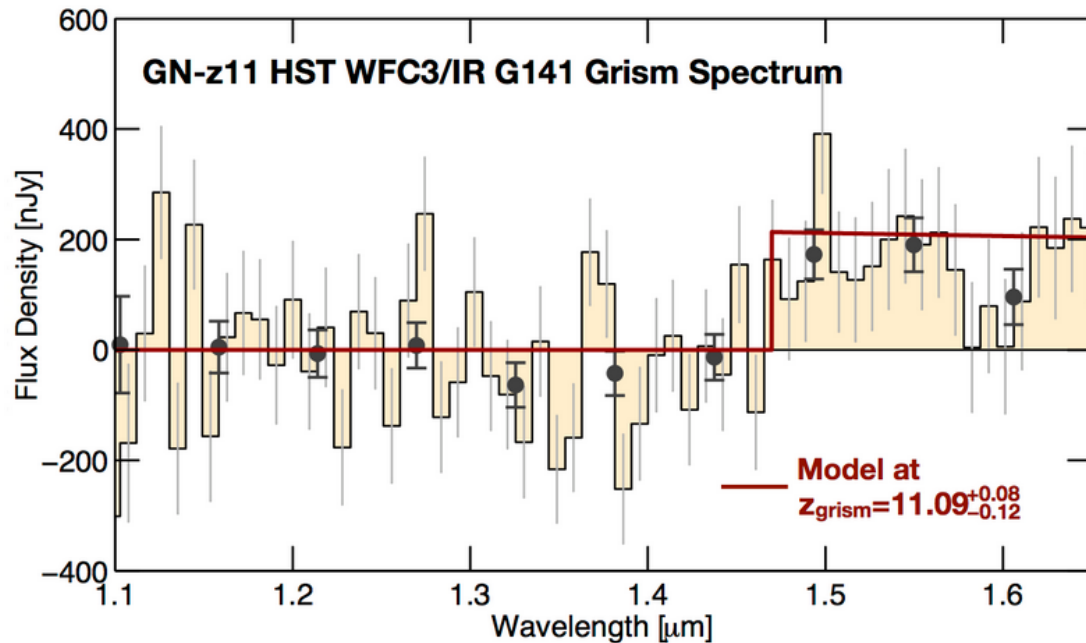
Dérivation de SFR, prenant en compte jusqu'à $MUV=-17$,
soit $SFR > 0.3 M_{\odot}/\text{yr}$, LBG, + détections ALMA

Pas de starburst \rightarrow coupure soudaine entre $z=8$ et 10



Objet surprenant à $z=11.1$

400Myr après le Big-Bang *Oesch et al 2016*



Masse $10^9 M_{\odot}$

Normalement il faudrait
10-100 plus de surface pour
détecter un objet
aussi brillant

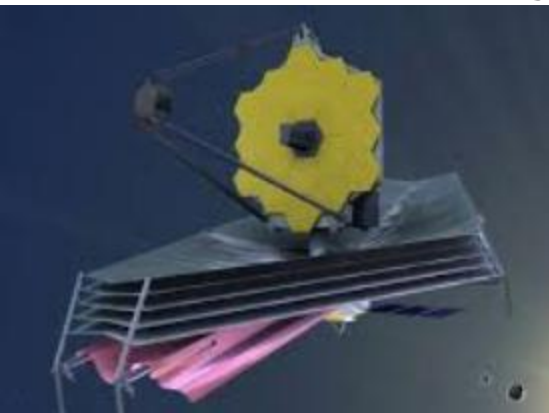
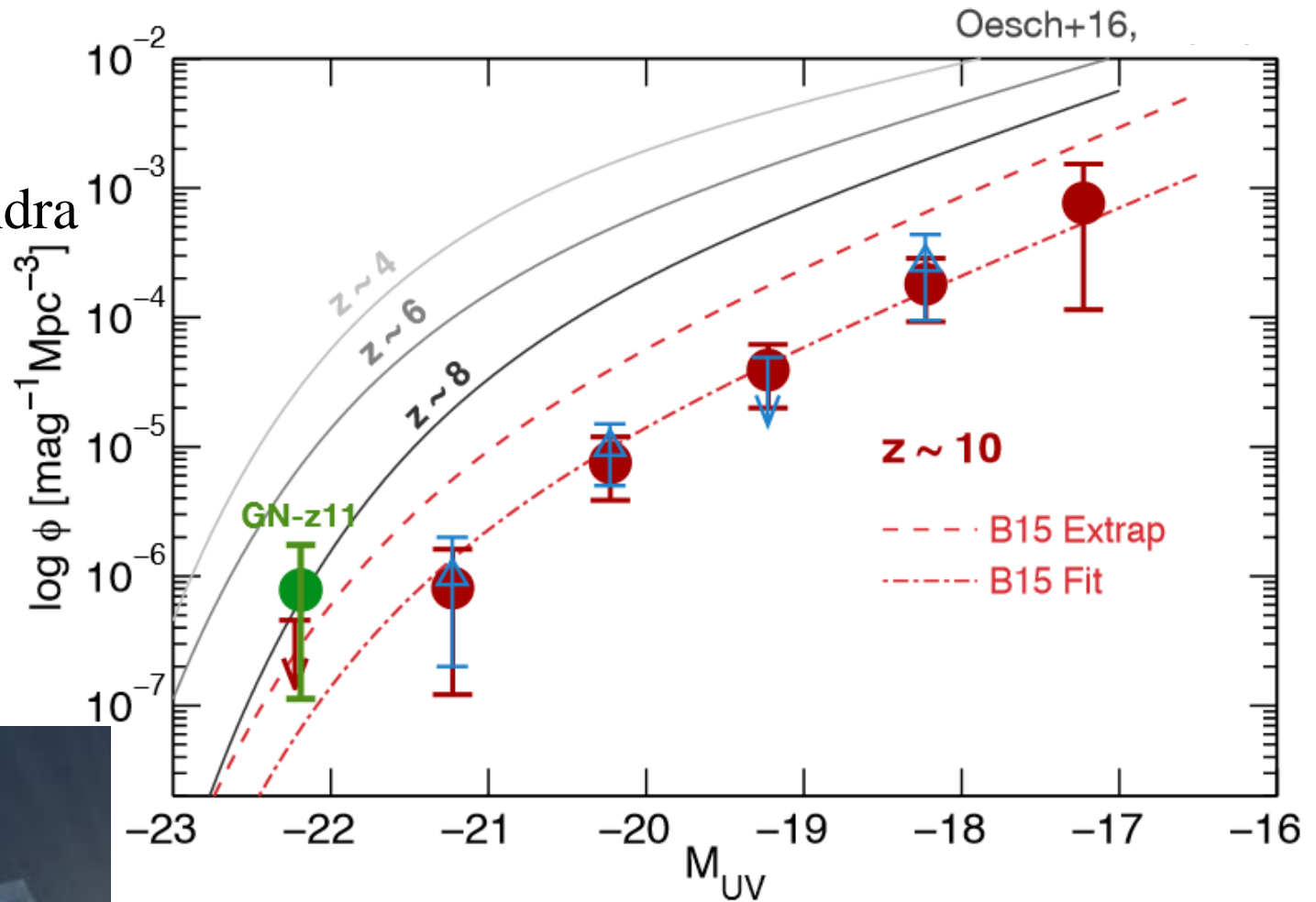
Le z-phot était de
10.2 (Labbé 2008)

L'objet le plus brillant à $z > 6$

Détecté dans un survey de $0.2^{\circ 2}$ seulement

Cet objet ferait une distorsion dans la fonction de luminosité

Le progrès attendra le JWST

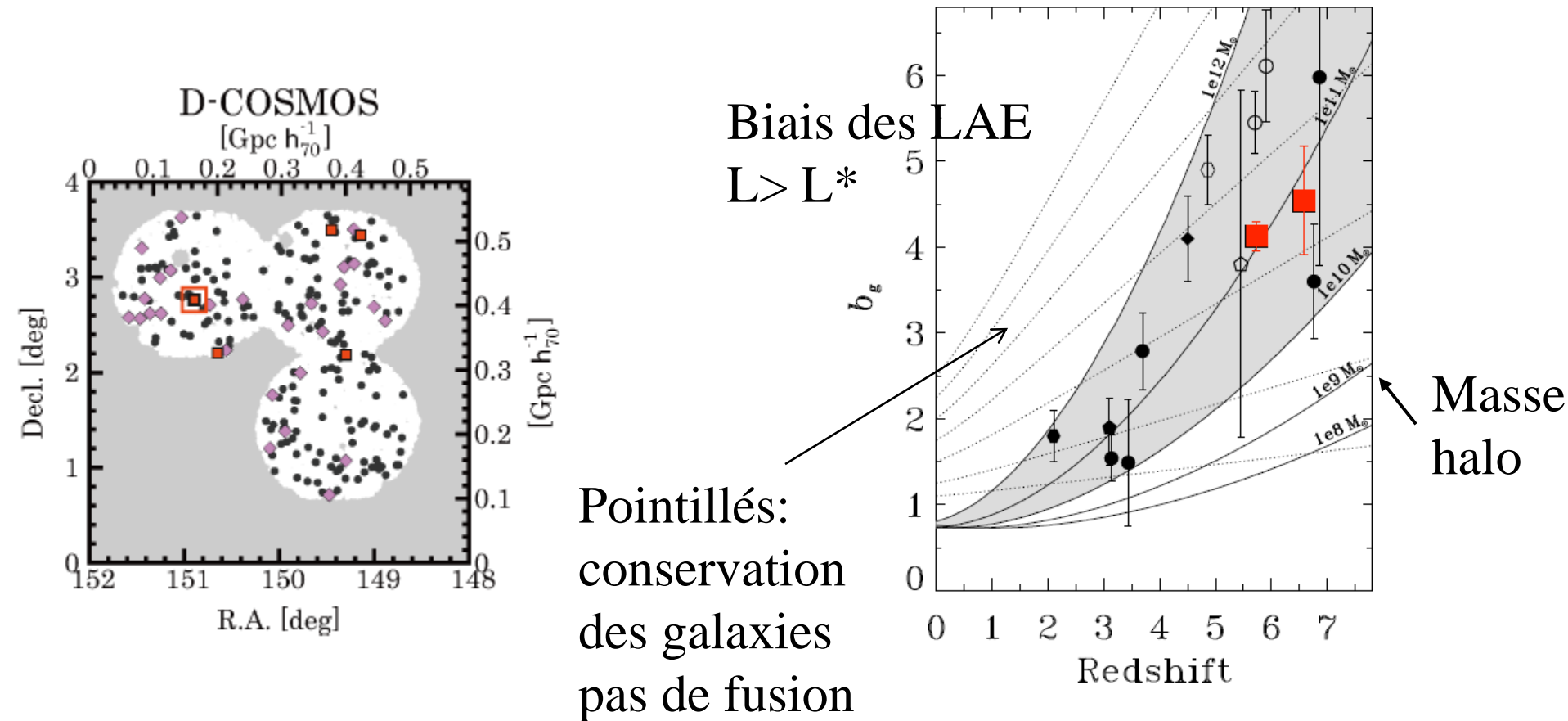


Statistiques sur 2000 émetteurs Ly α (LAE)

Projet sur le télescope Subaru $z=5.7 - 6.6$ (Ouchi et al 2017)

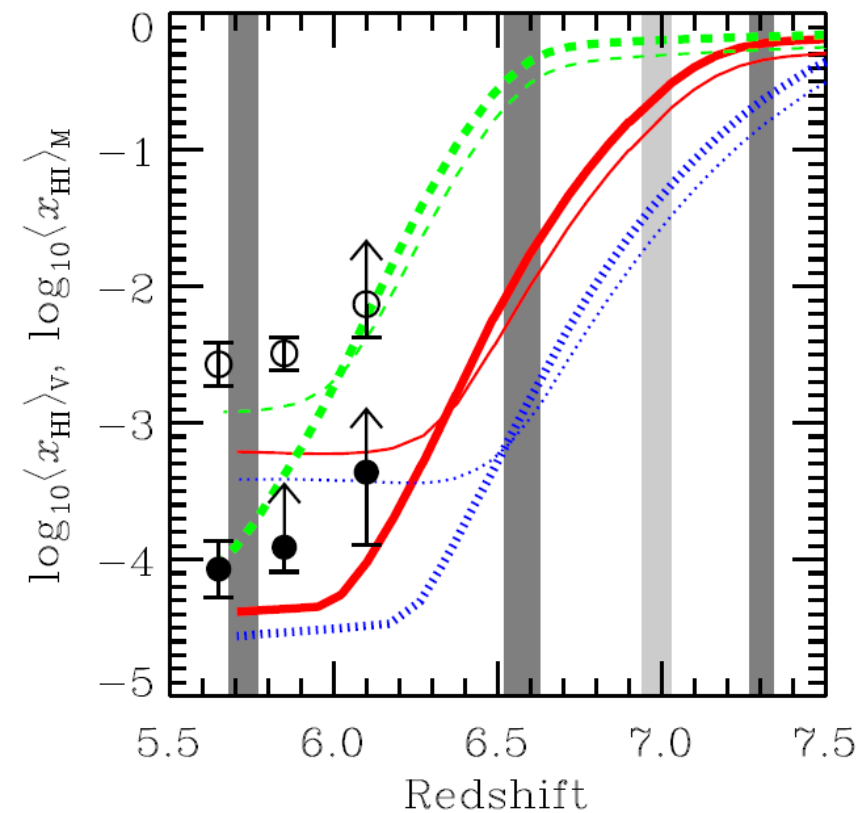
Biais de $b=4.1$, les LAE suivent les sur-densités, et sont rassemblés dans les poches ionisées (encore plus, car les photons s'échappent!)

Mesure de $x_{\text{HI}} = 0.15$ à $z=6.6$ dans les halos massifs



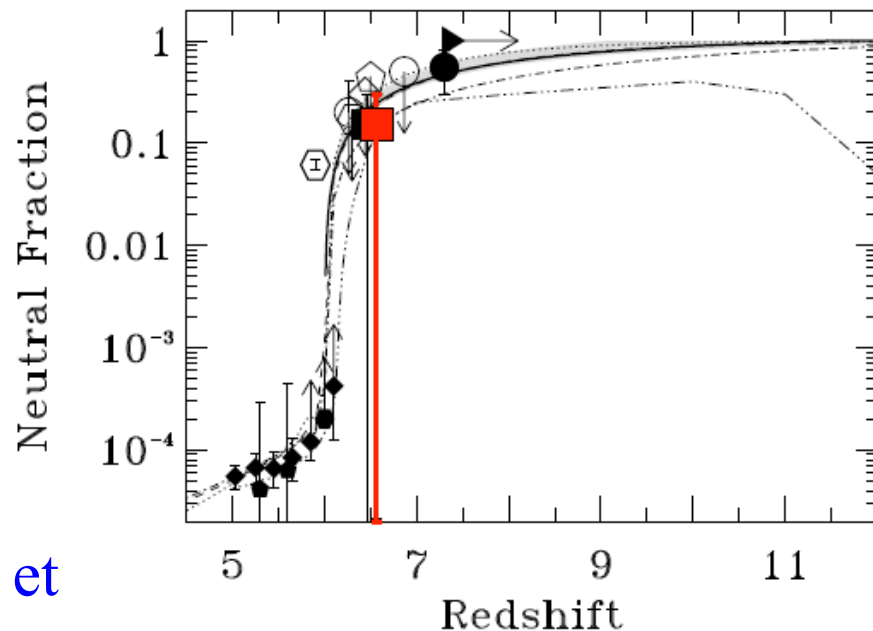
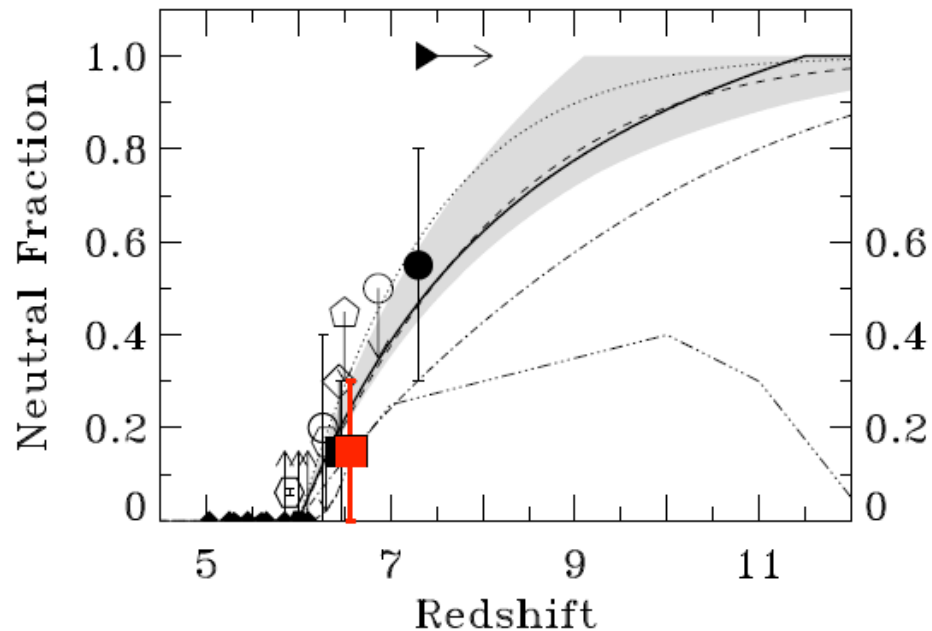
Ionisation vs redshift

3 modèles tôt, tard, moyen



Meilleur modèle $x_{\text{HI}} = 0.5$ à $z = 7.3$
Mais n'ajuste pas l'agglomération et
les surdensités des LAE

Inoue et al 2018



Ouchi et al 2017

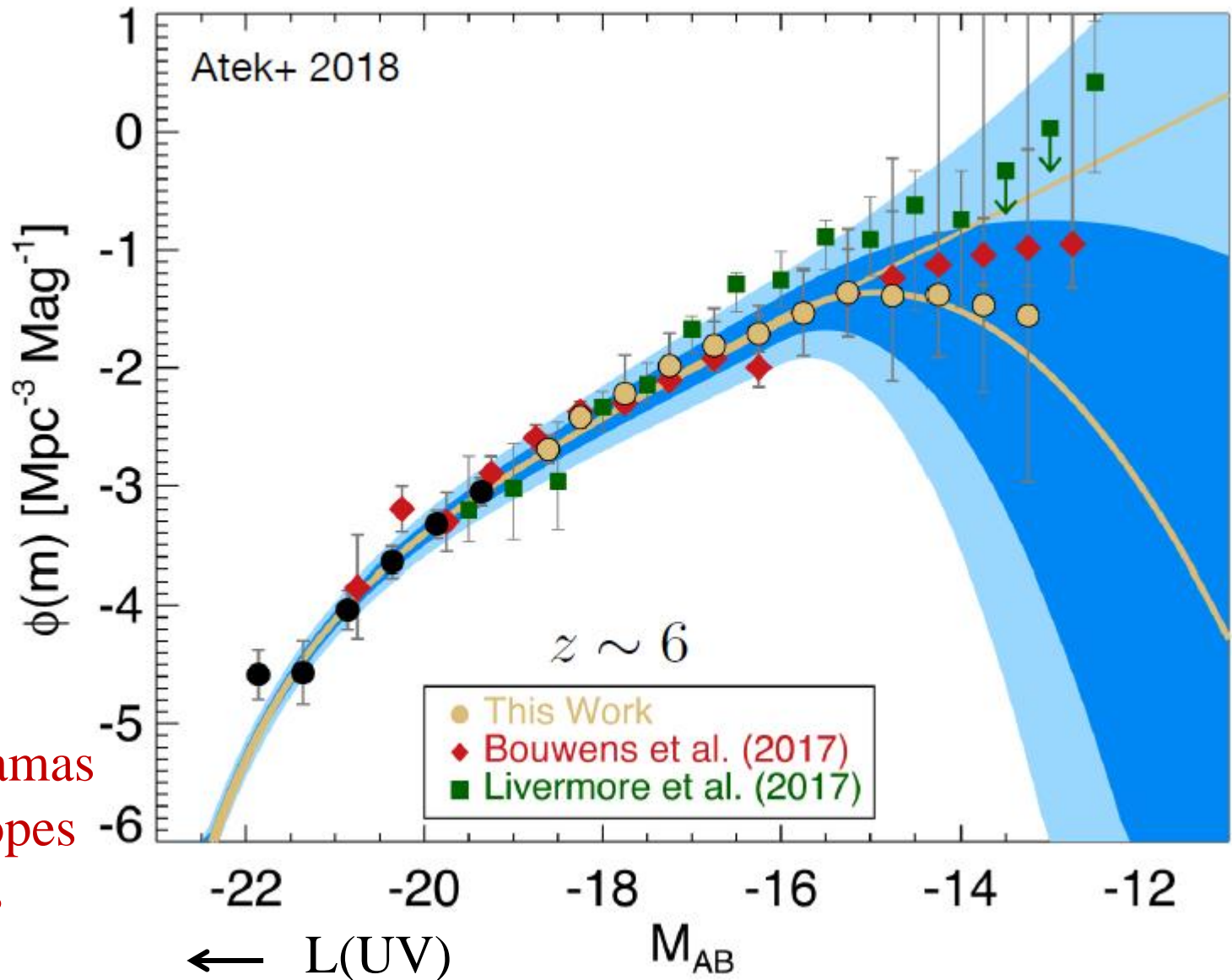
Diverses possibilités

Les faibles L
sont connues
à travers des
Lentilles à
grand μ

→ Grandes
Incertitudes

HFF Hubble
Frontier Fields

Les plus gros amas
comme télescopes
gravitationnels



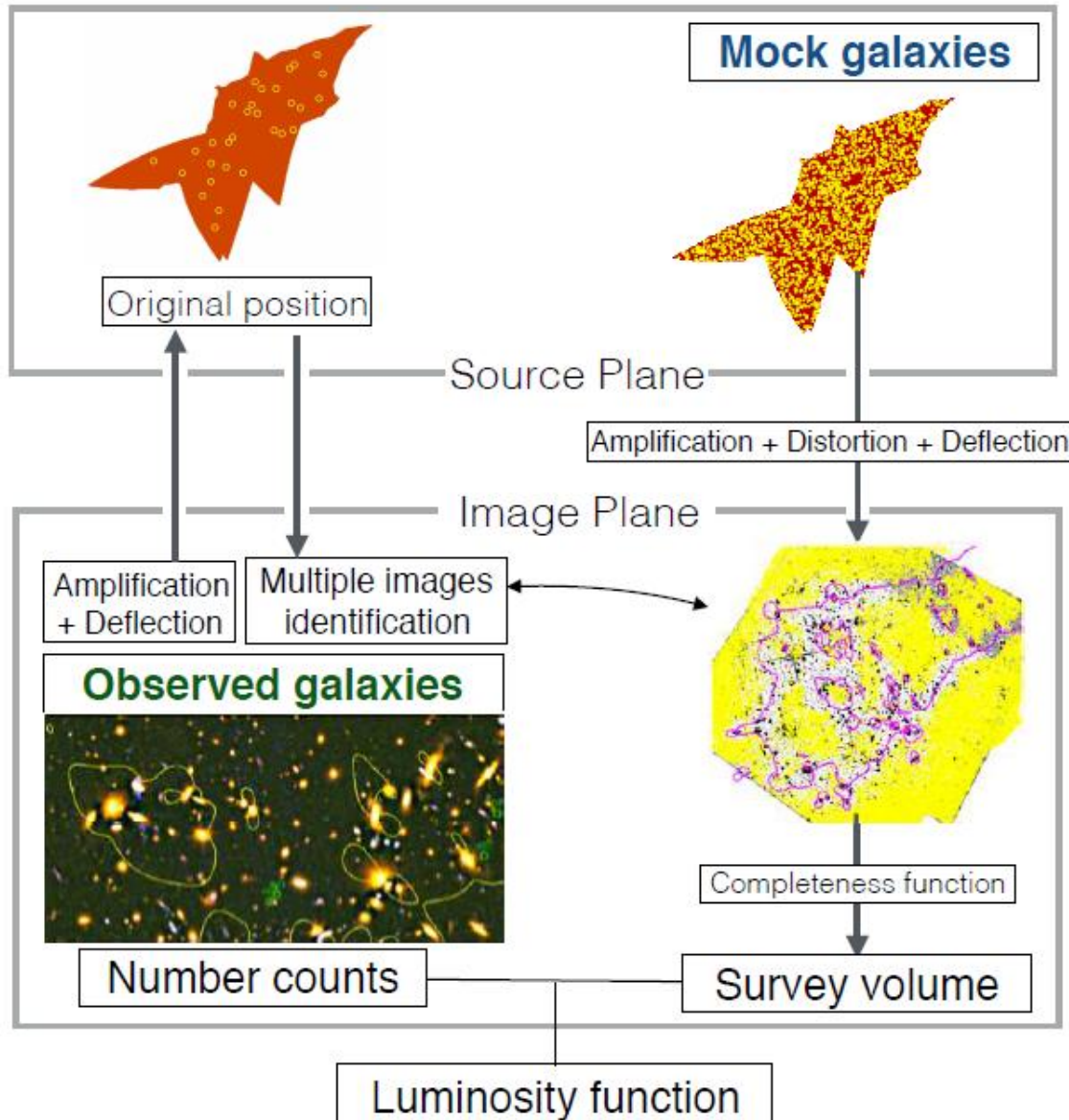
MACS J1149+2223, $z=0.55$ Croix d'Einstein d'une SN à $z=1.49$

$\mu=20$



Les galaxies les plus faibles proviennent de lentilles

Images multiples?
Rareté des sources près de ligne critique



Modélisation pour reconstruire les sources à partir des images

Biais de sélection

Rétablir le volume et en déduire la fonction de Luminosité

Atek et al 2018

Brillances de surface conservées, surfaces augmentées

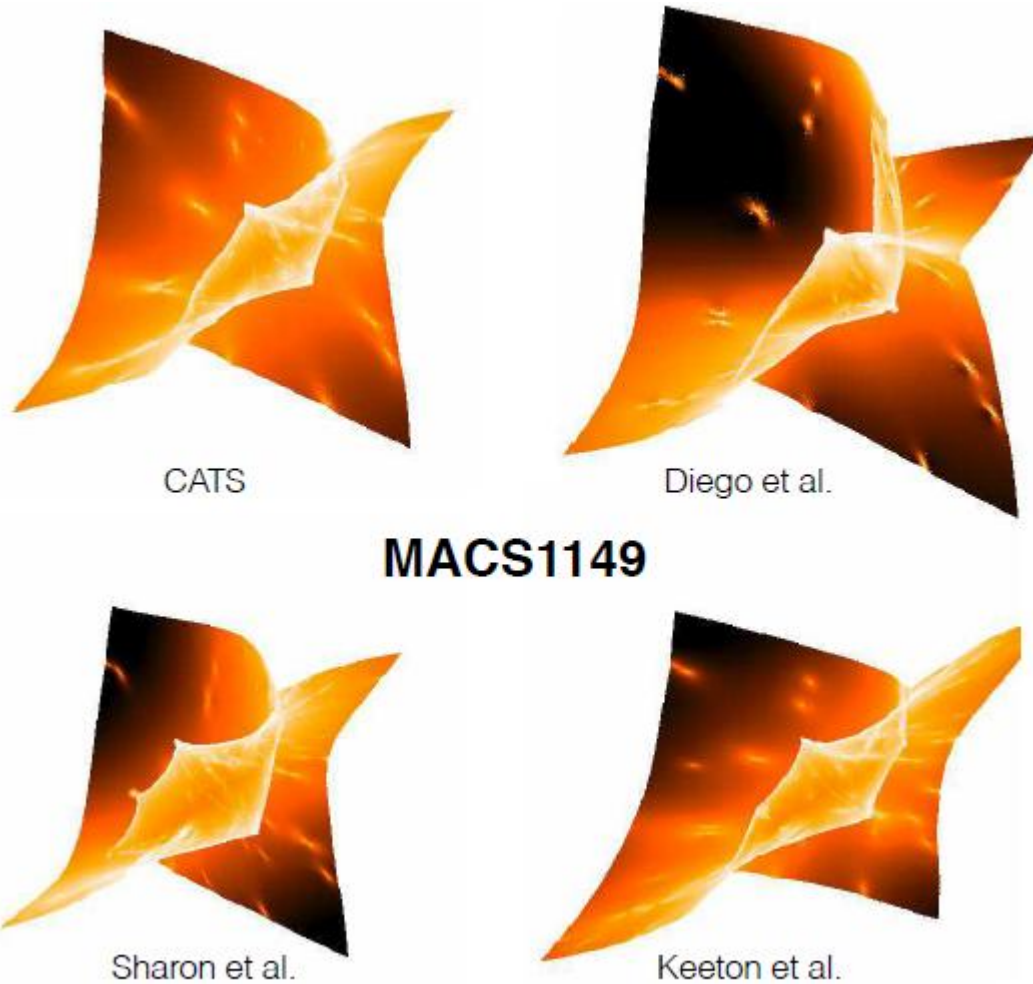


Image originale (sans lentille gravitationnelle)
Photo credit: Smithsonian Photo by Eric Long

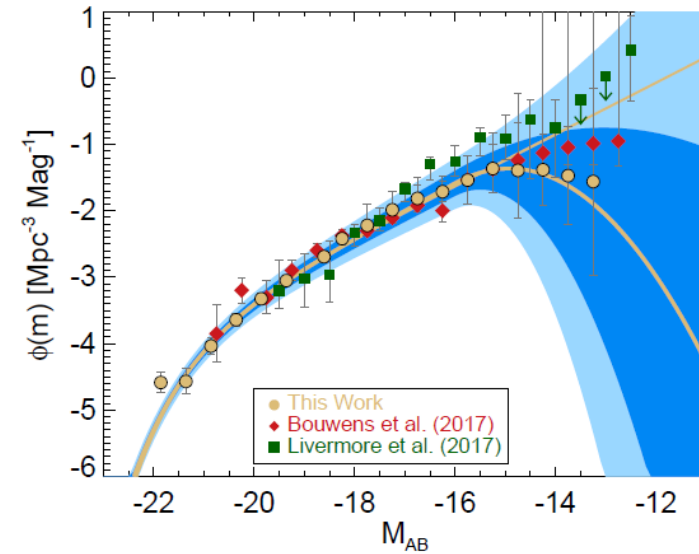
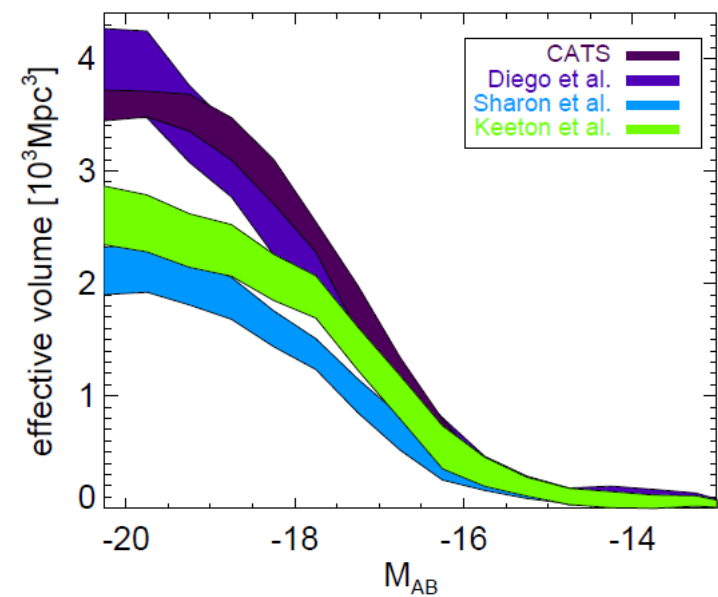
Même image vue lorsqu'une lentille gravitationnelle (ici un trou noir de la masse de Saturne au centre) s'interpose. Photo credit: Smithsonian Photo by Eric Long

Différents modèles

Le facteur d'amplification varie, mais aussi la surface considérée



4 modèles du plan source



Atek et al 2018

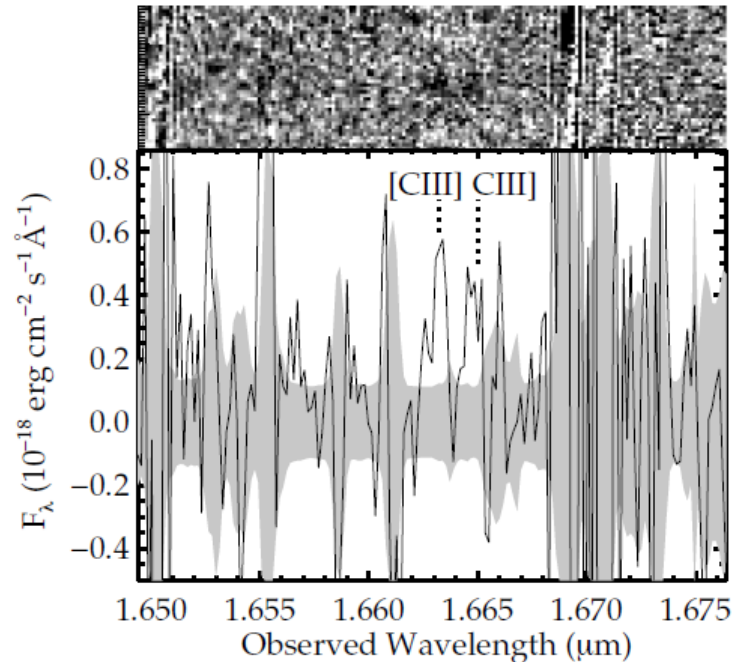
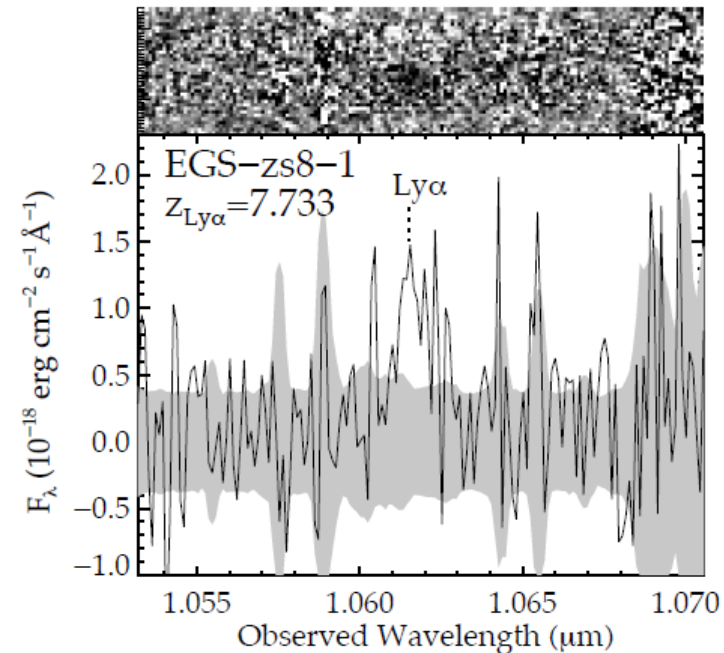
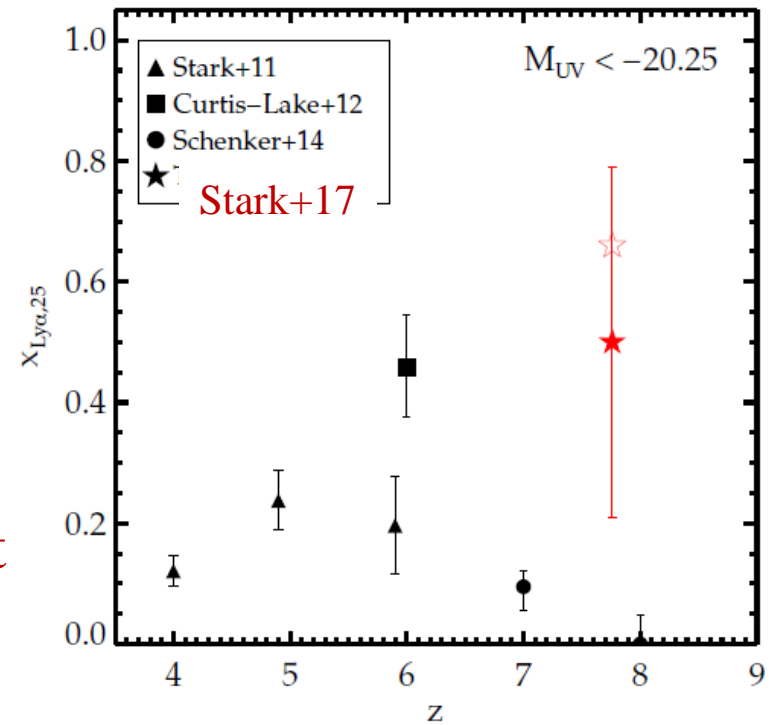
Spectre de 4 galaxies à $z \sim 7$

Le spectre reconstitué \rightarrow fraction xHI

Fraction d'émetteurs Ly α EW > 25Å
croît avec z

\rightarrow Seuls les émetteurs puissants subsistent

Stark et al 2017



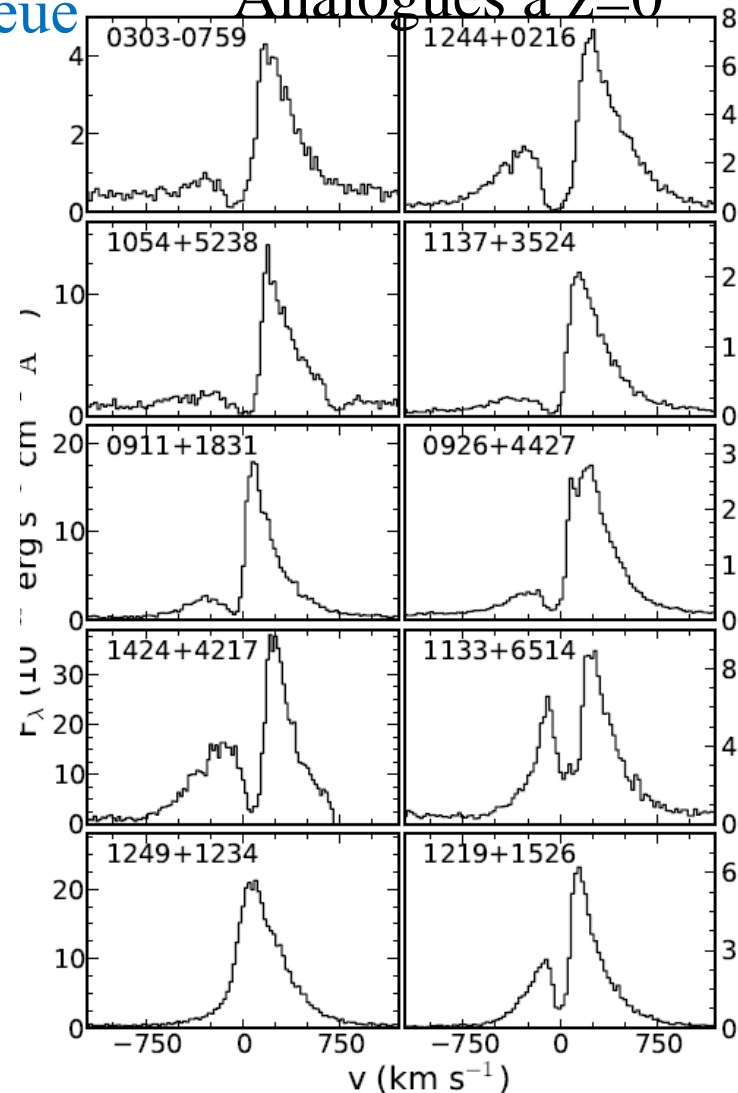
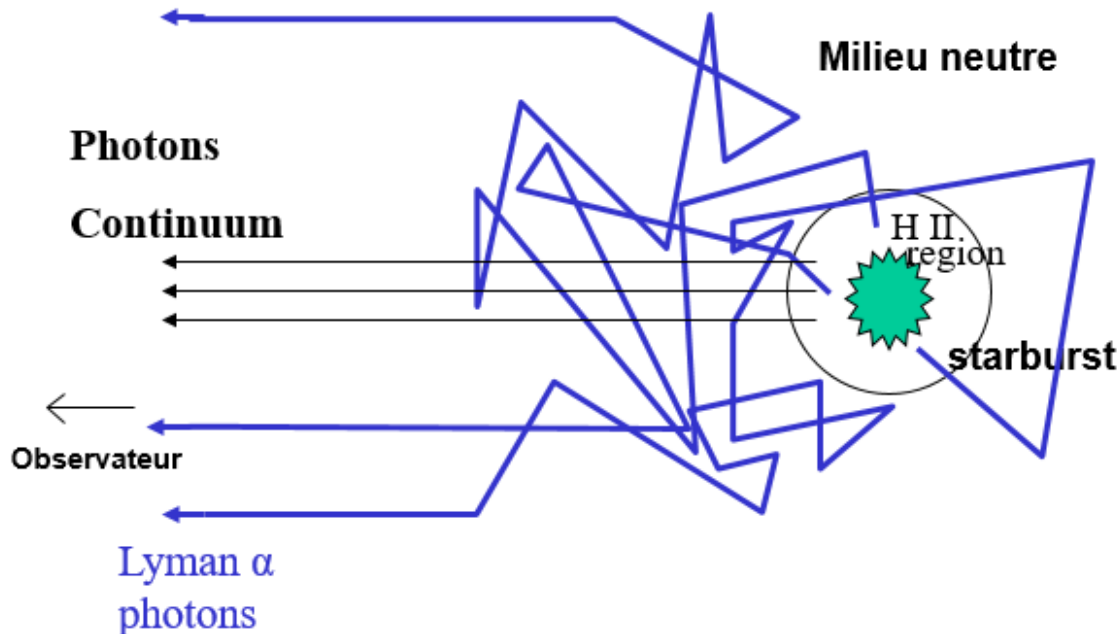
CIII] implique
faible Z

Diffusion résonante avant réionisation

La diffusion peut se produire N fois avec un faible Δv , Et après un grand nombre N le photon peut s'échapper.

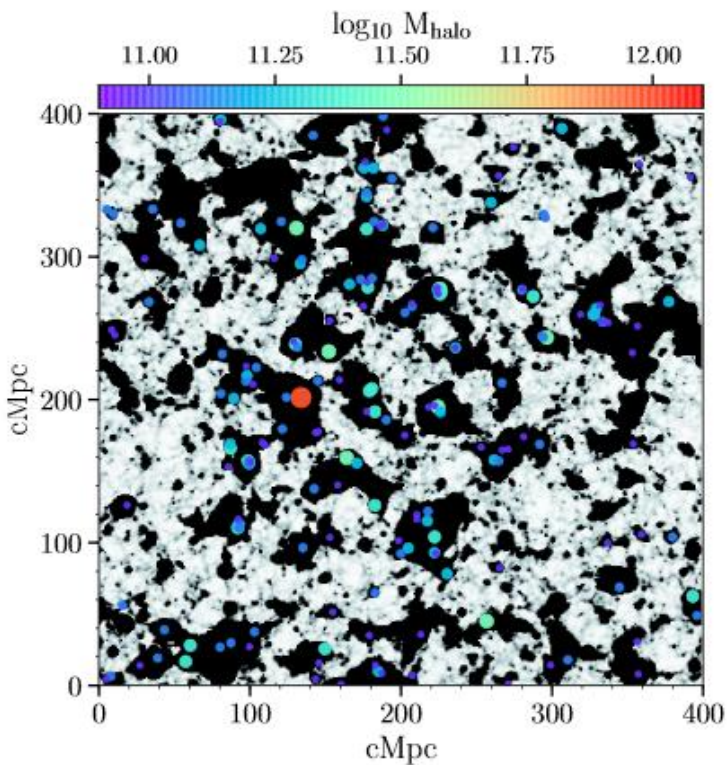
Absorption au centre ou dans l'aile bleue par des vents à haute vitesse

Henry et al 2015
Analogues à $z=0$

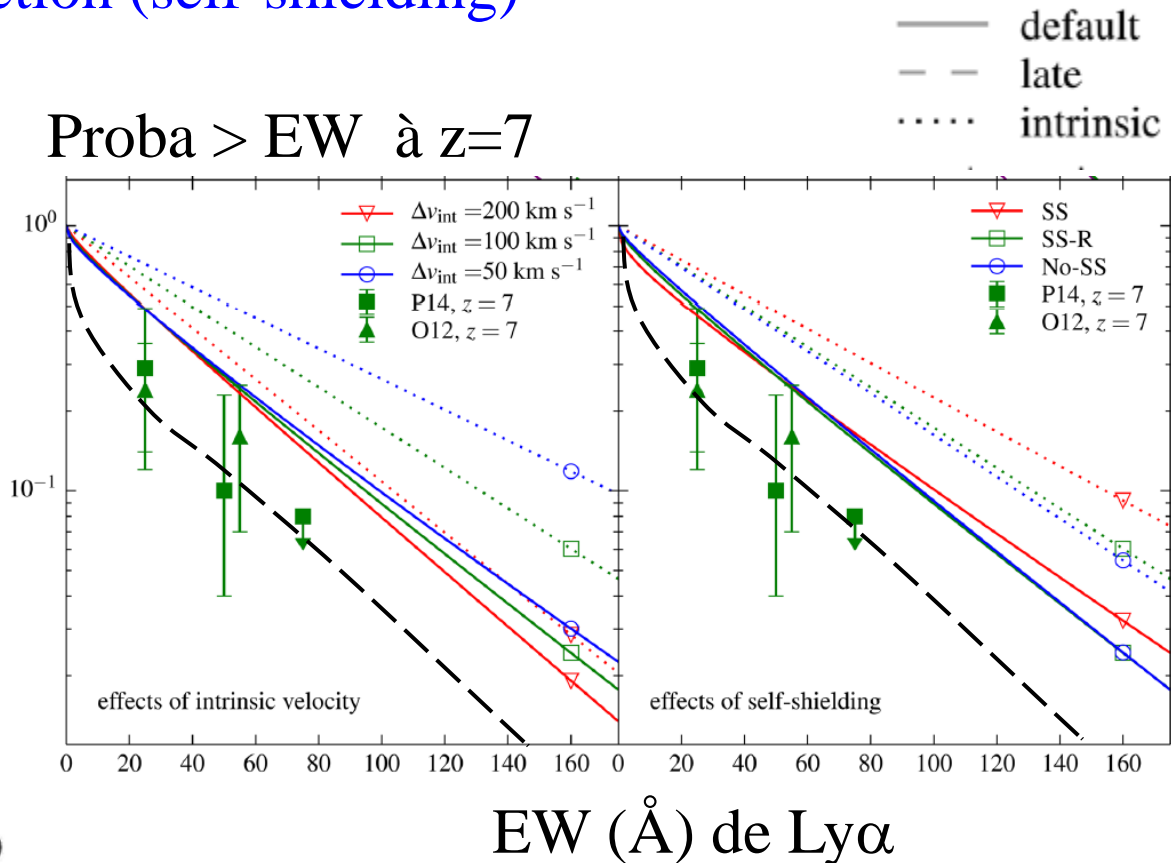


Les émetteurs sont dans des poches ionisées

La transmission du flux Ly α dépend de $\langle x_{\text{HI}} \rangle$ en volume, mais aussi de l'offset en vitesse, dû à la diffusion résonante
 Simuler aussi l'auto-protection (self-shielding)



Proba $>$ EW à $z=7$

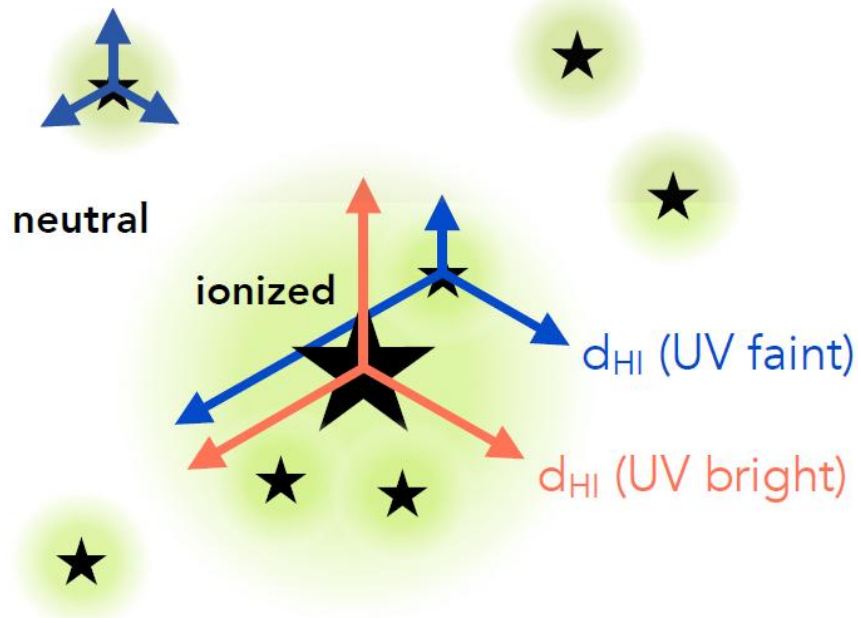


$x_{\text{HI}}=0.5$, ligne grisée

Davies et al 2018

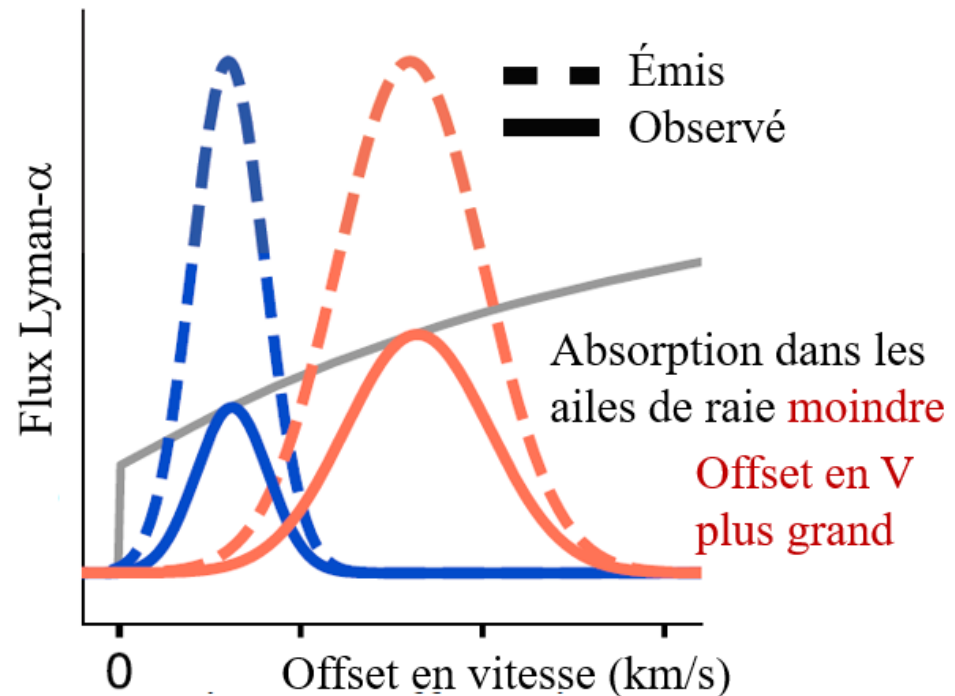
Choudhury et al 2015

Les galaxies massives, forts émetteurs de UV sont privilégiées



→ Offset en vitesses plus grand

Poches ionisées plus grandes,
Distance au HI neutre
 d_{HI} plus grande



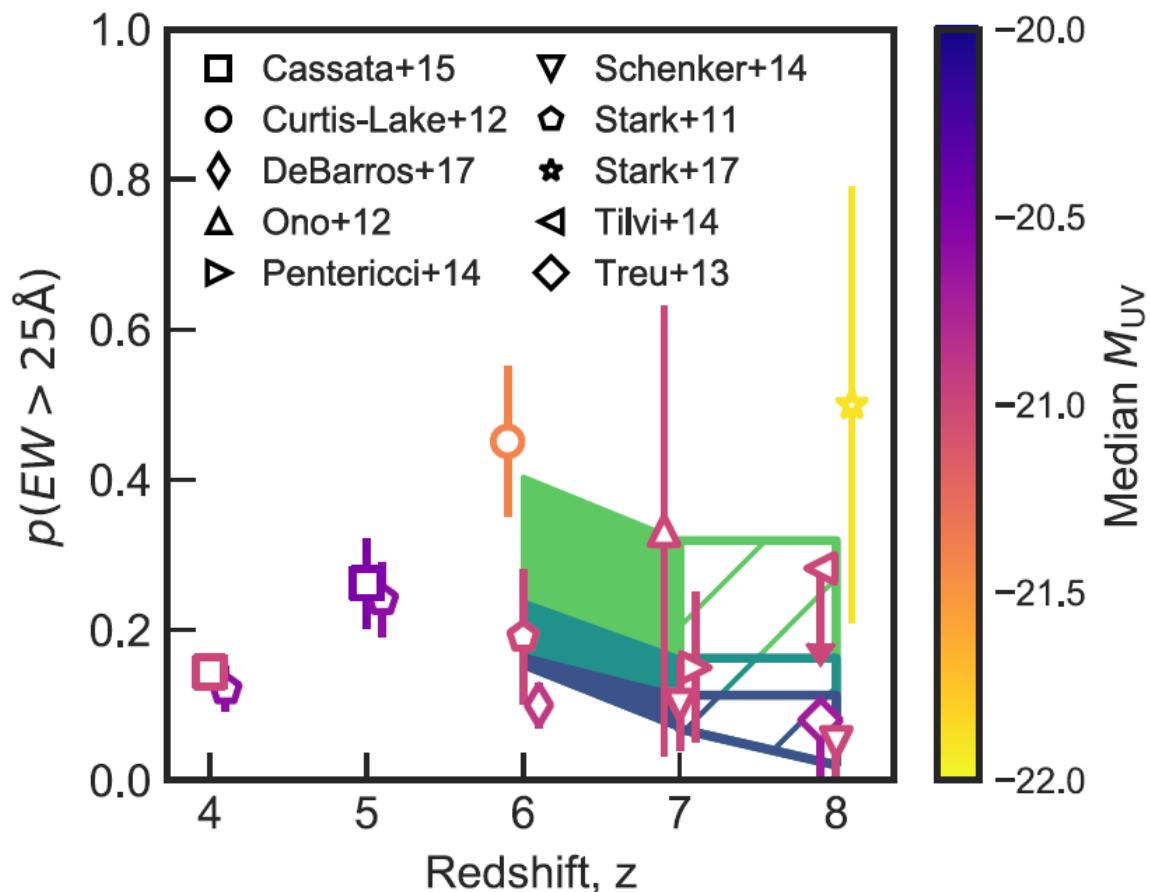
Les galaxies UV massives sont moins absorbées en Ly α

$P(EW > 25\text{\AA})$ = probabilité de forte émission Ly α relative au continuum

En fonction de la couleur = magnitude

Paradoxalement, on détecte les galaxies plus massives à grand z , Car x_{HI} est plus élevé

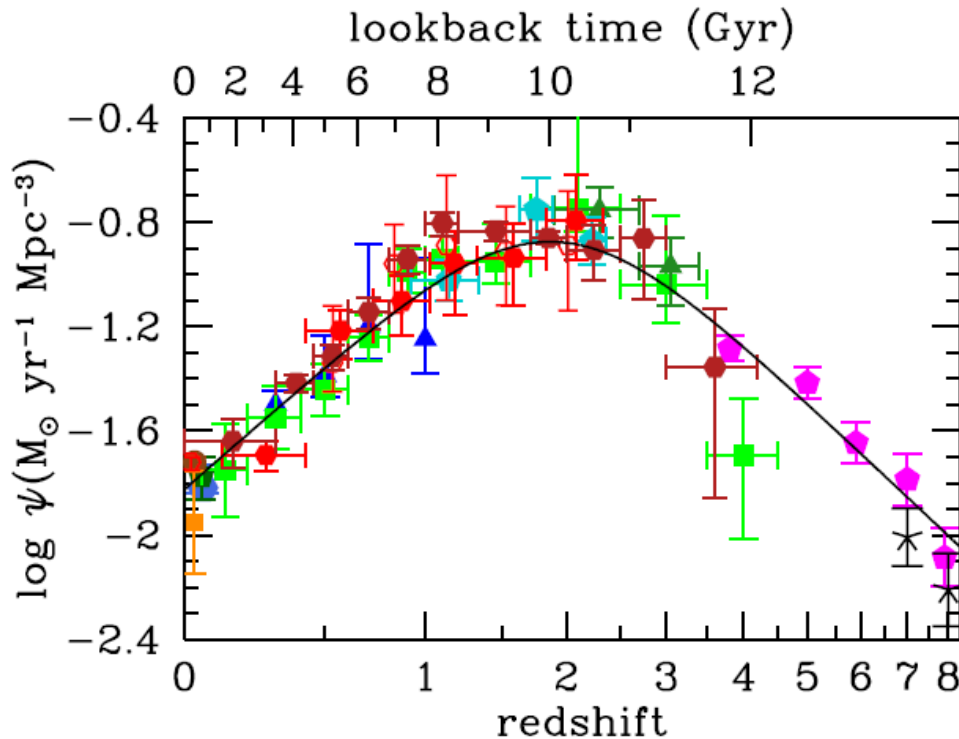
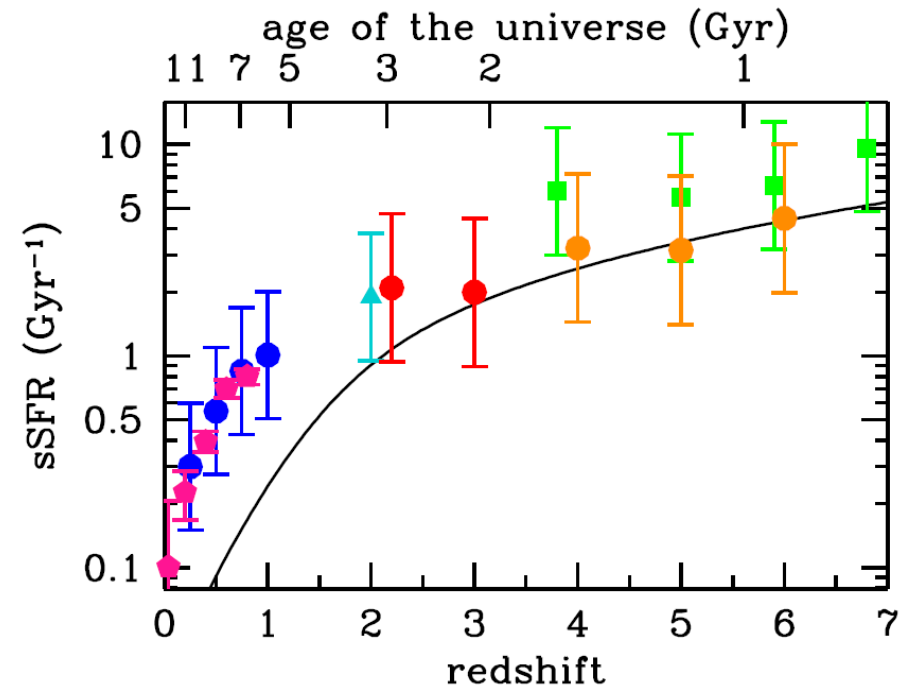
→ Détermination de $x_{\text{HI}} = 0.76$ à $z = 8$



Histoire cosmique de la formation d'étoiles

Fraction de gaz?

Efficacité de la formation?

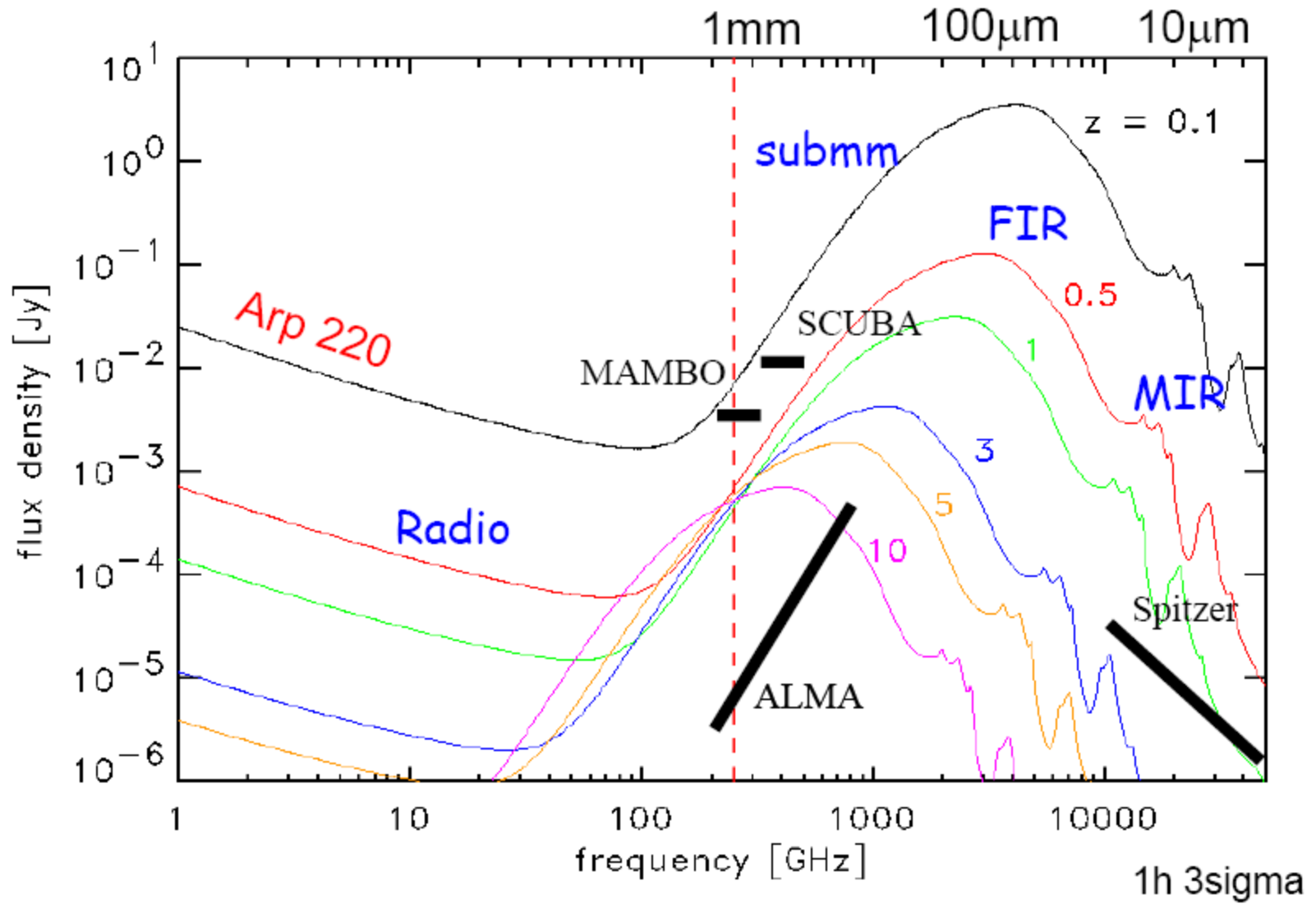


Specific SFR = **sSFR**
= SFR/M^*
 $M^* = 10^{9.4} - 10^{10} M_{\odot}$

Madau & Dickinson 2014

Avantage du domaine millimétrique à grand z

Correction K négative: exemple de Arp 220



Télescope gravitationnel

Les lentilles accroissent la taille d'une galaxie, en maintenant sa densité de surface

Le Boulet

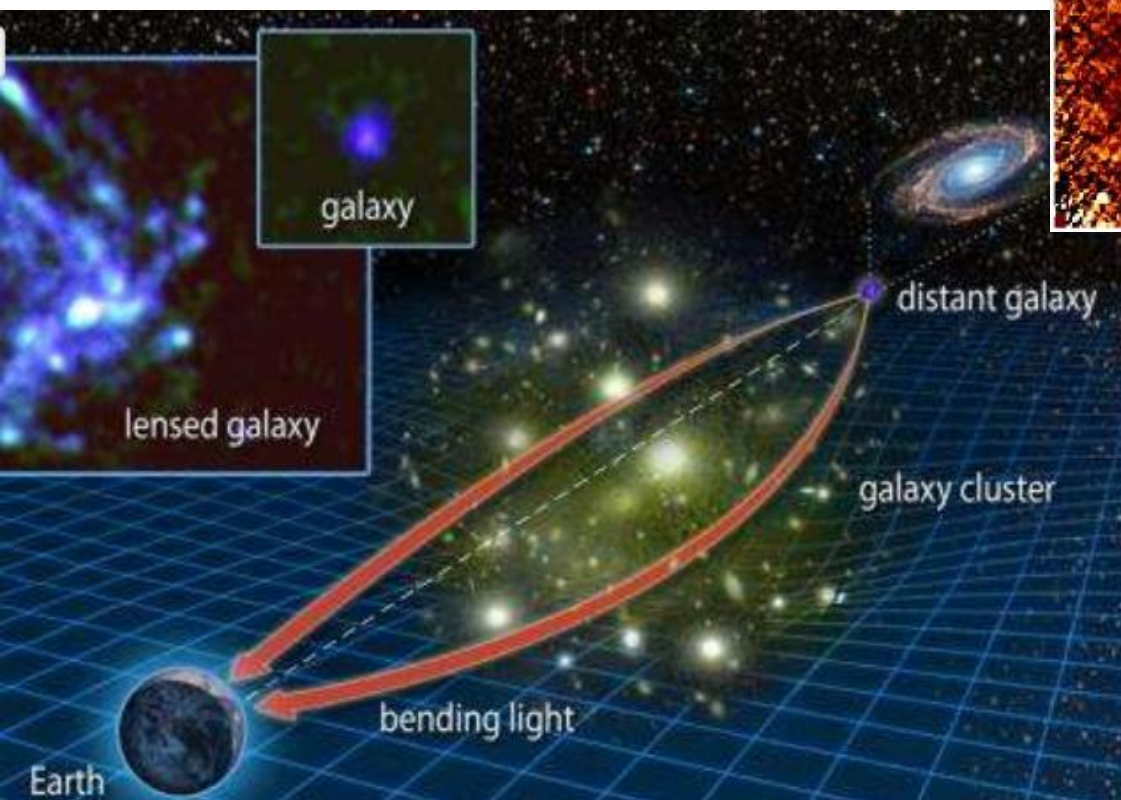
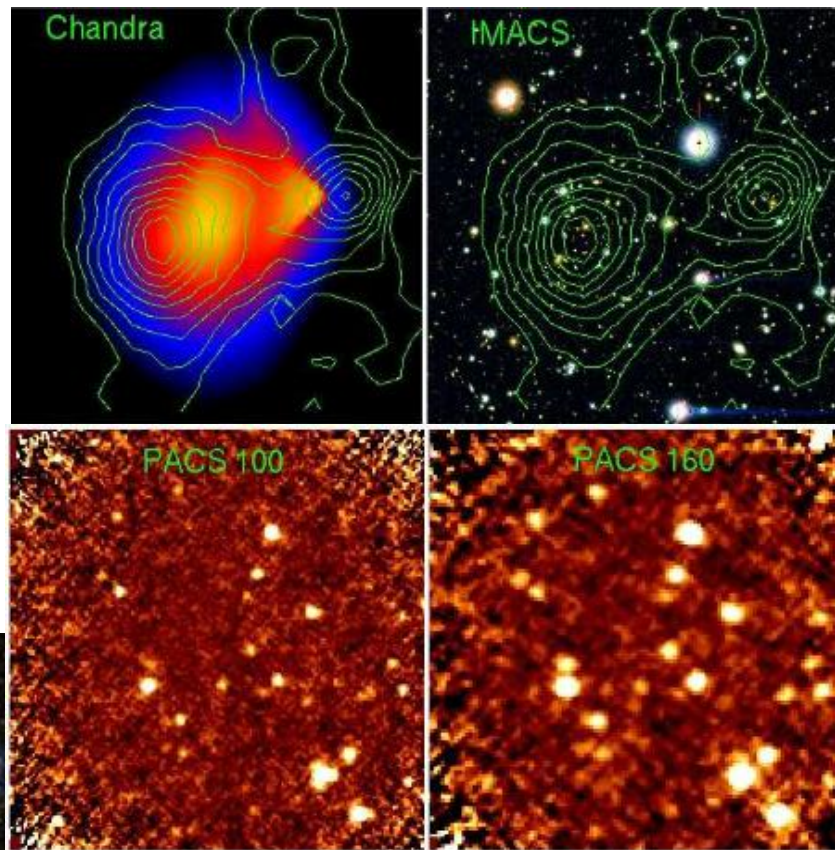


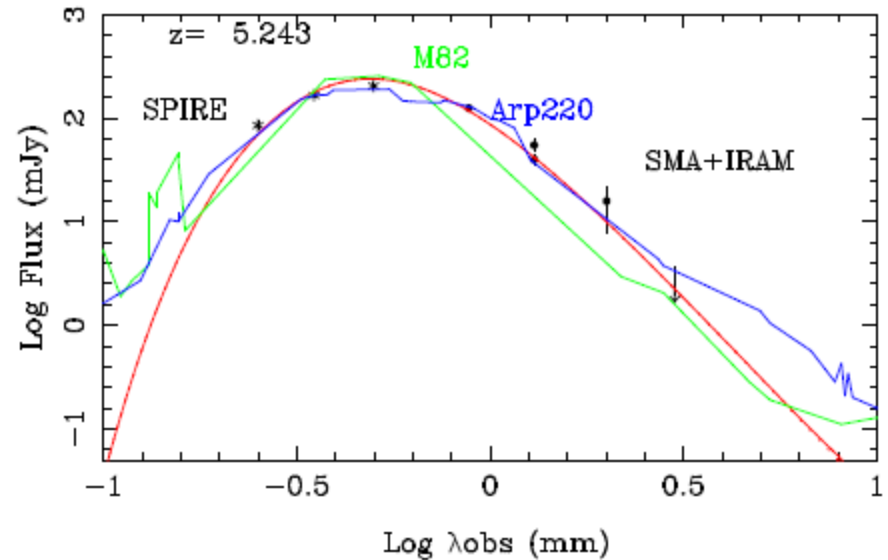
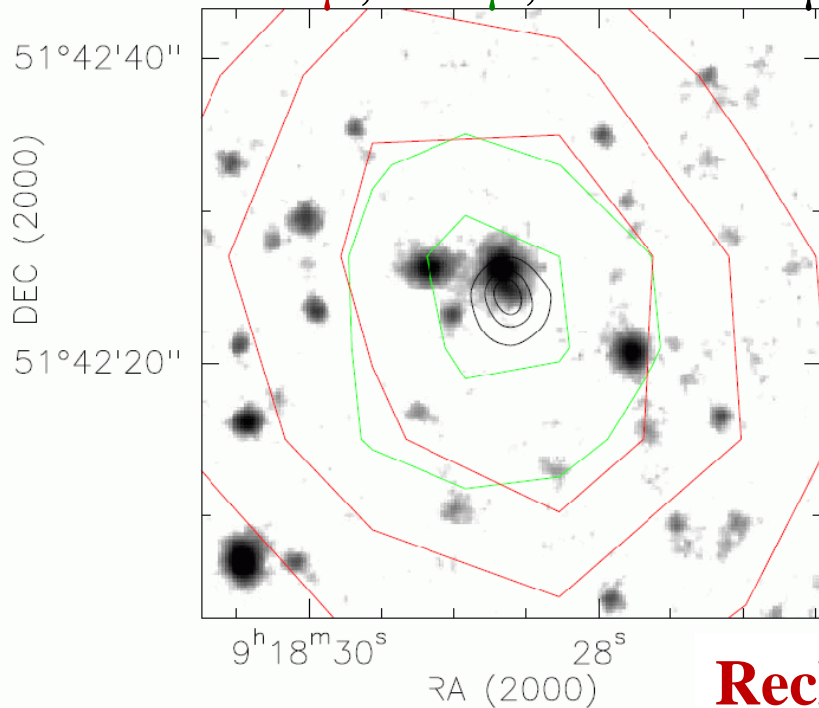
Image d'un amas en mm
→ seulement les galaxies
du fond seront vues

Filtrage des galaxies
de l'amas

Découverte avec Herschel

En utilisant les lentilles gravitationnelles
Herschel observe tous les amas proches

SPIRE 500 μ , 250 μ , SMA 850 μ



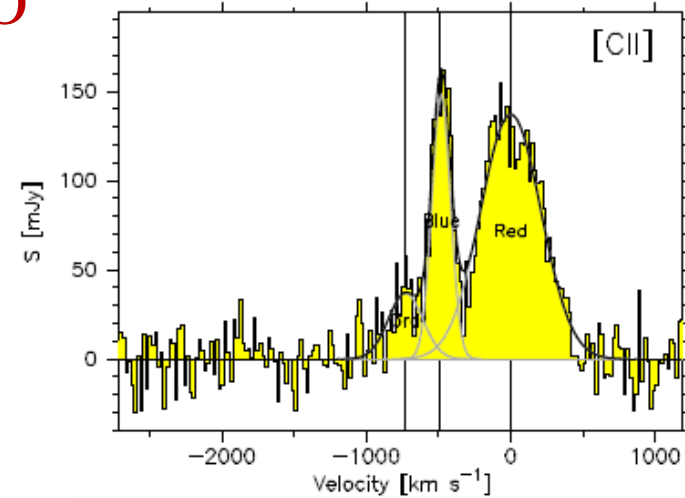
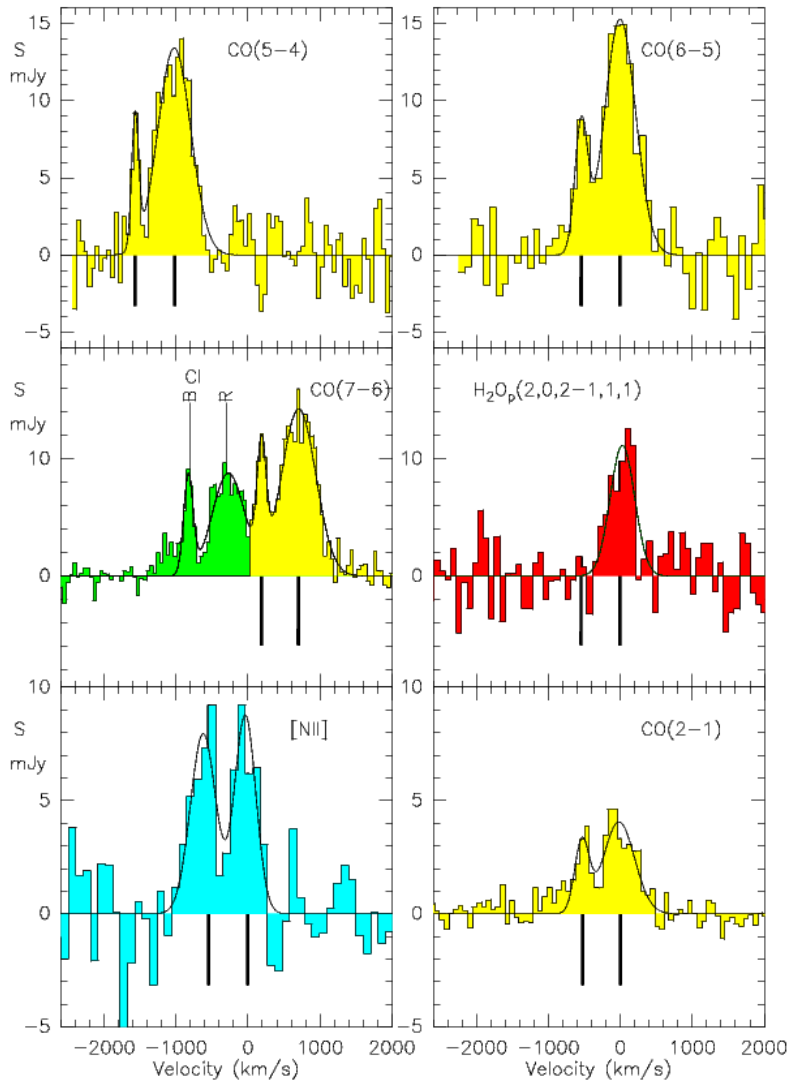
Recherche de raie CO avec IRAM-30m

Derrière Abell 773 à $z=0.22$, et derrière une galaxie à $z=0.63$,
→ lentille principale

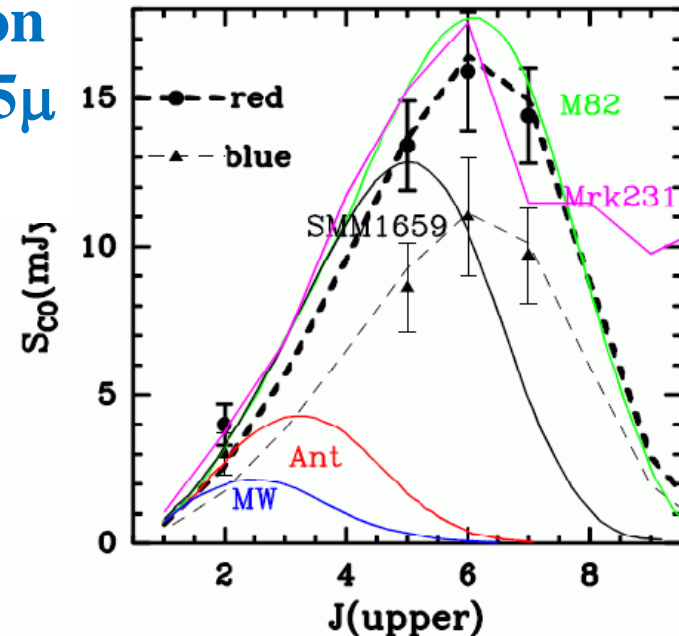
Combes et al 2012

Redshift découvert avec IRAM ($z=5.243$)

Plusieurs raies CO



1er détection
De [NII]205 μ
À grand z

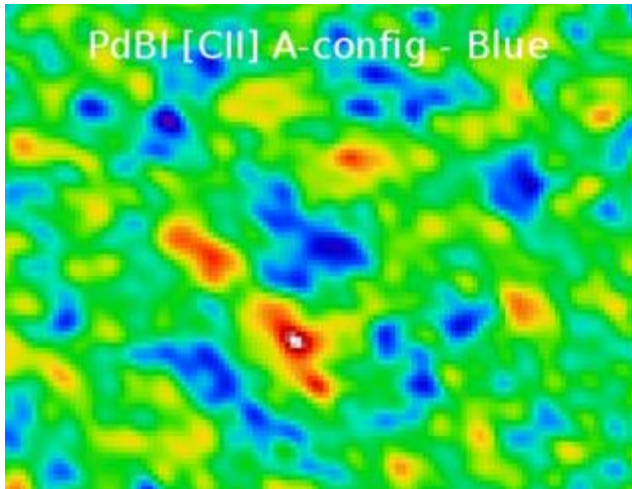


Amplification par un facteur ~ 11

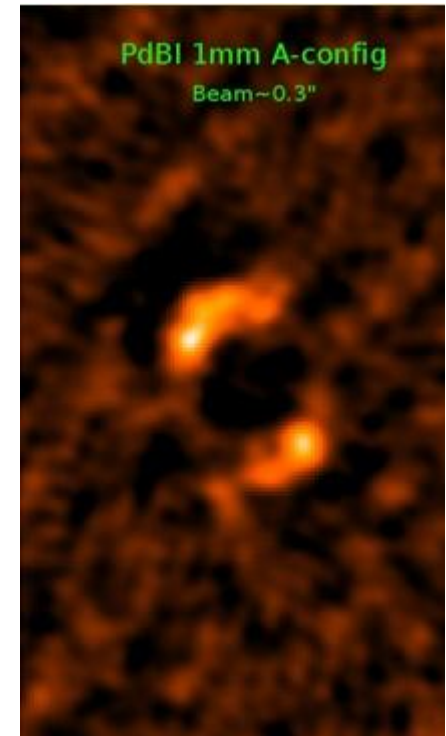
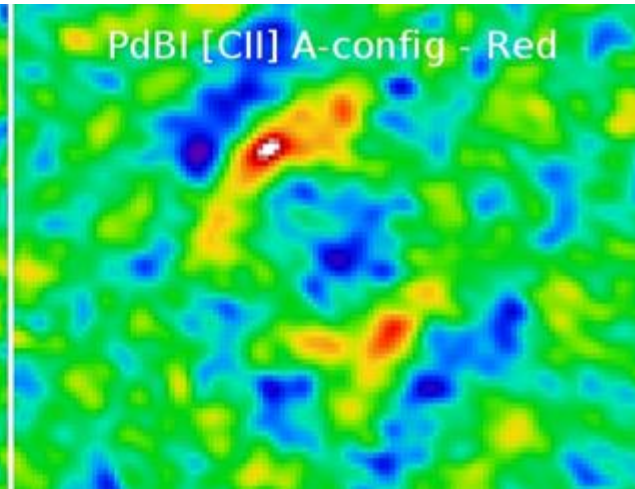
Une galaxie hyperlumineuse $L \sim 10^{13} L_{\odot}$, et $M_{\text{H}_2} \sim 6 \cdot 10^{10} M_{\odot}$,
Après correction de l'amplification

Continuum à 300GHz $\sim 1\text{mm}$, ou 160μ dans le référentiel au repos, avec
Les interféromètres SMA et IRAM \rightarrow Anneau d'Einstein

composante bleue



composante rouge



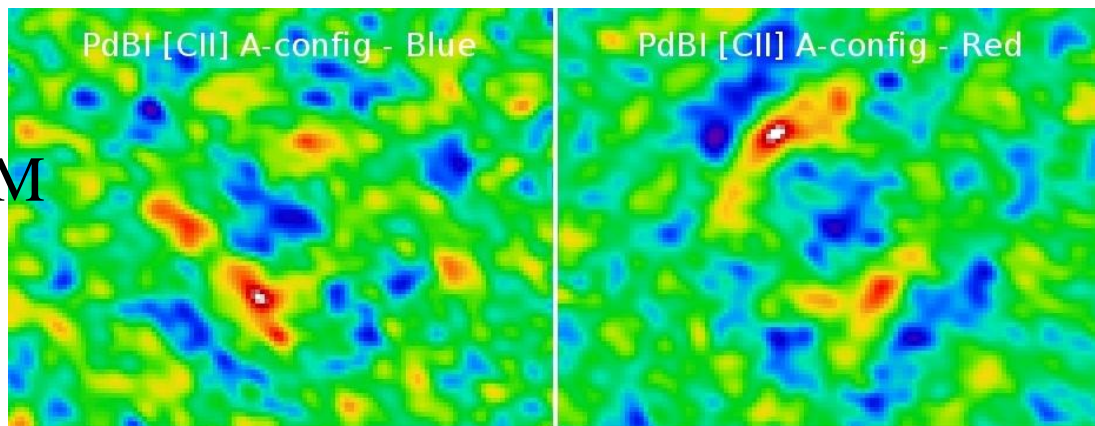
IRAM et SMA: raie de [CII] 158 μm

Modèle de lentille, comparé aux observations continuum

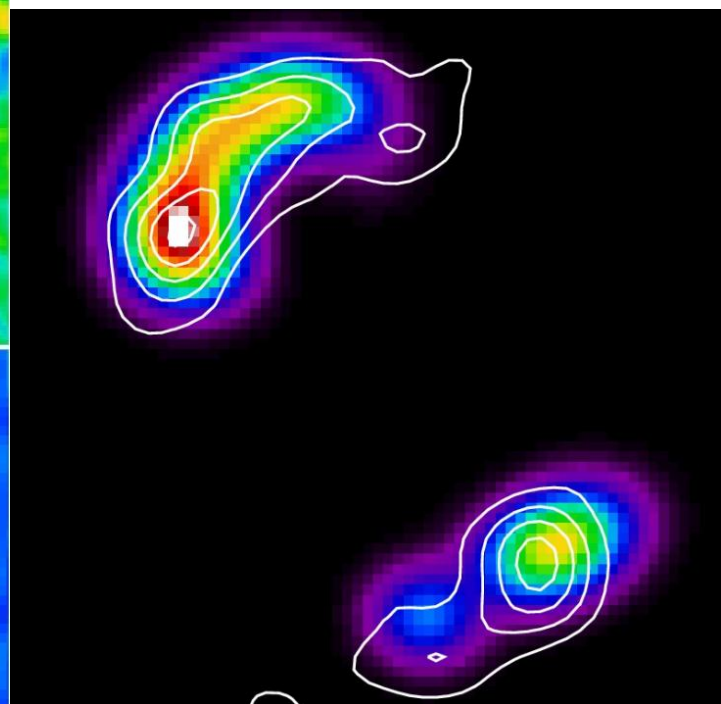
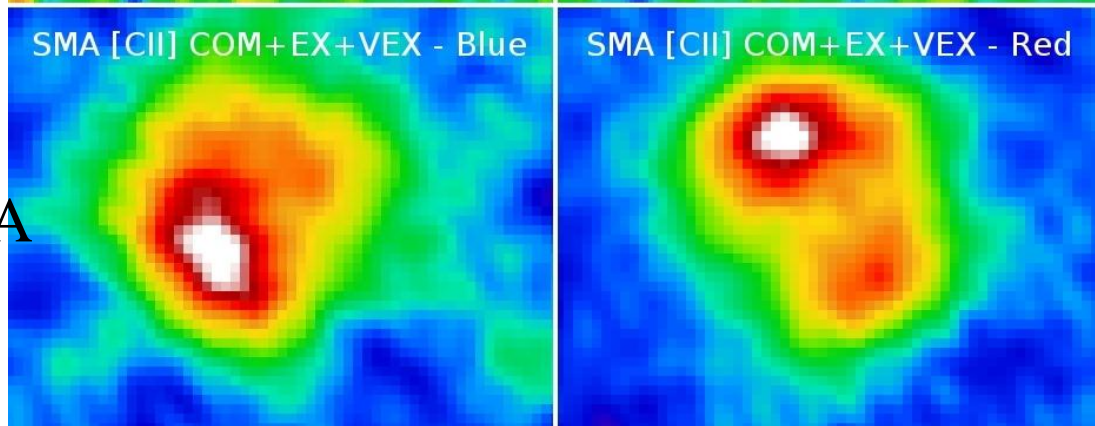
composante bleue

composante rouge

IRAM



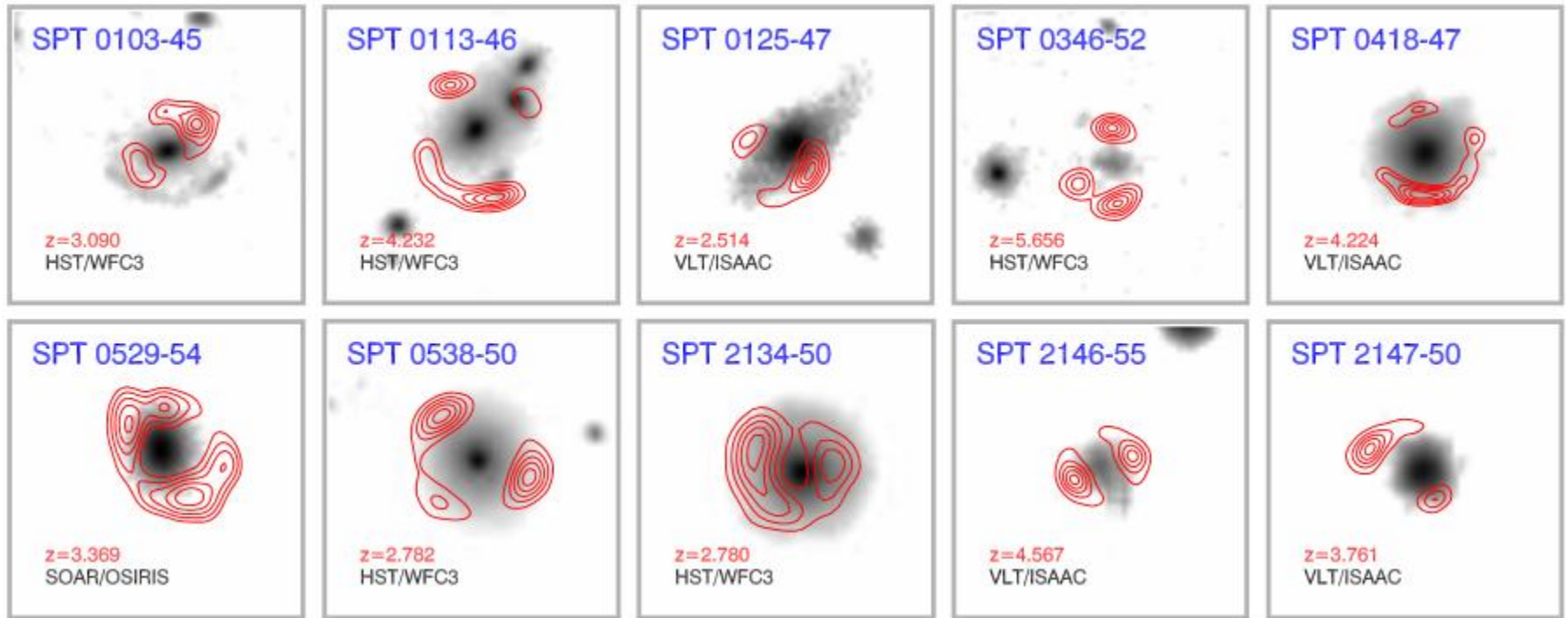
SMA



-0.073 -0.01 0.053 0.12 0.18 0.24 0.31 0.37 0.43

Boone et al 2013

Recherches avec ALMA



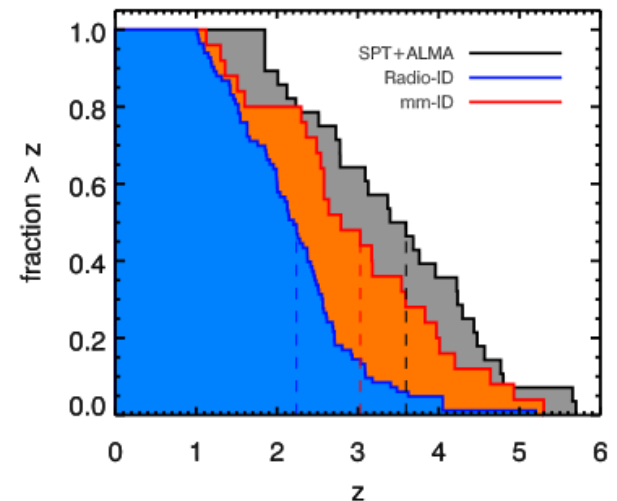
En gris: NIR avec HST, VLT, SOAR

Vieira et al 2013 (23/26 detected)

10 $z > 4$

Rouge=ALMA contours 870 μm , 2min, 0.5''

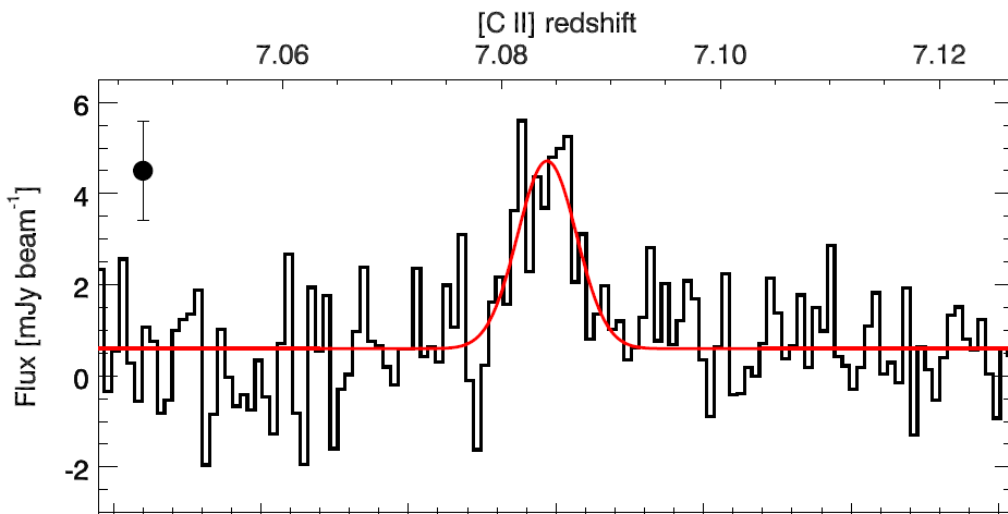
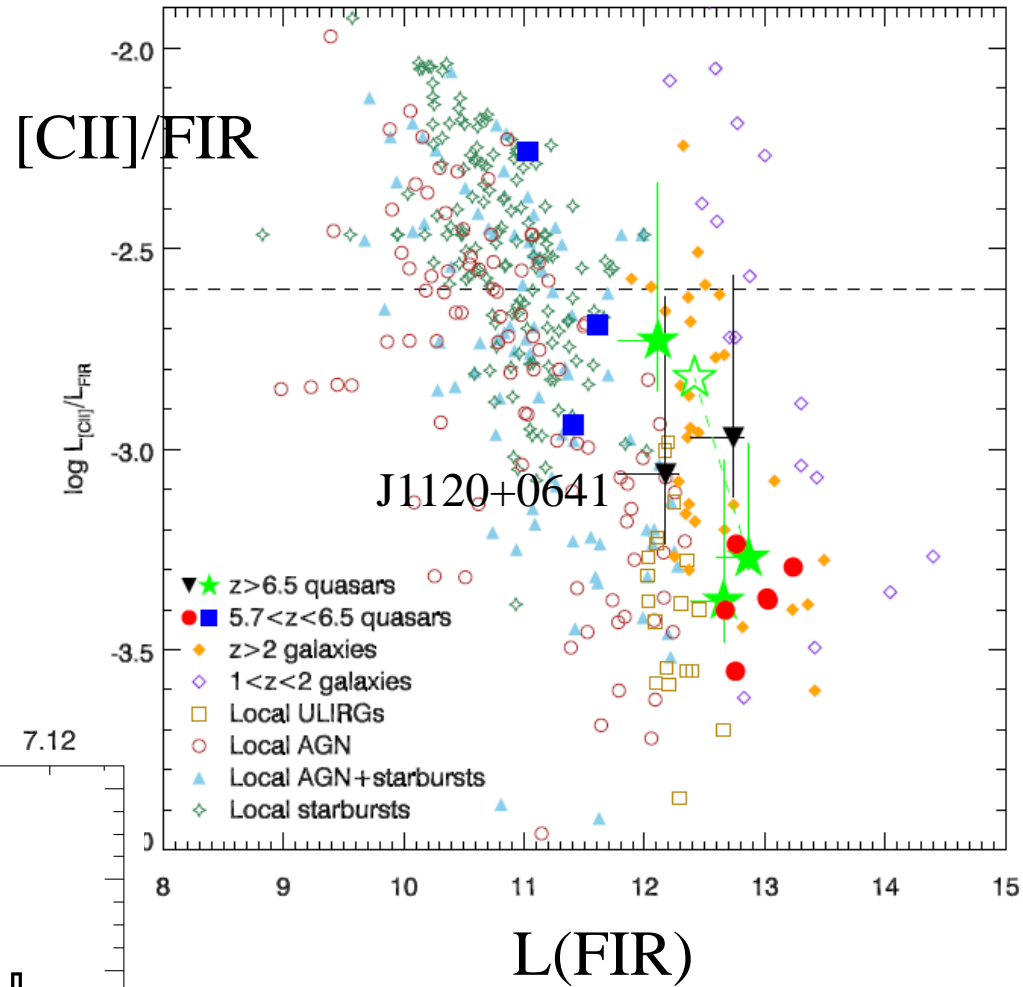
Redshifts à partir des spectres ALMA



Quasar à $z=7.1$: J1120+0641

Venemans et al 2012, 16
C+ observations IRAM,
Source ponctuelle à 1.3mm

SFR $\sim 160\text{-}440 M_{\odot}/\text{yr}$
[CII] plus faible qu'attendu

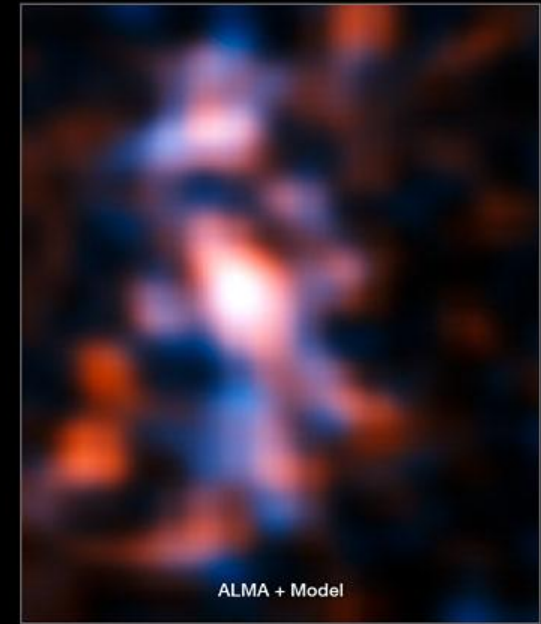
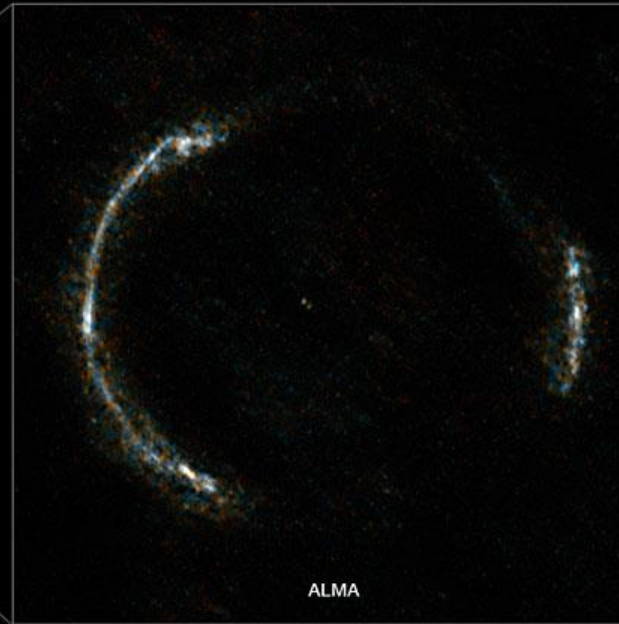
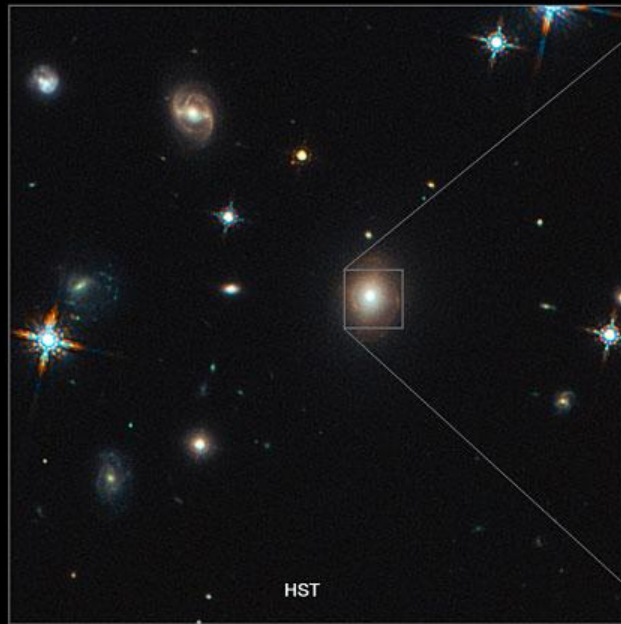




SDP.81, at $z=3.042$

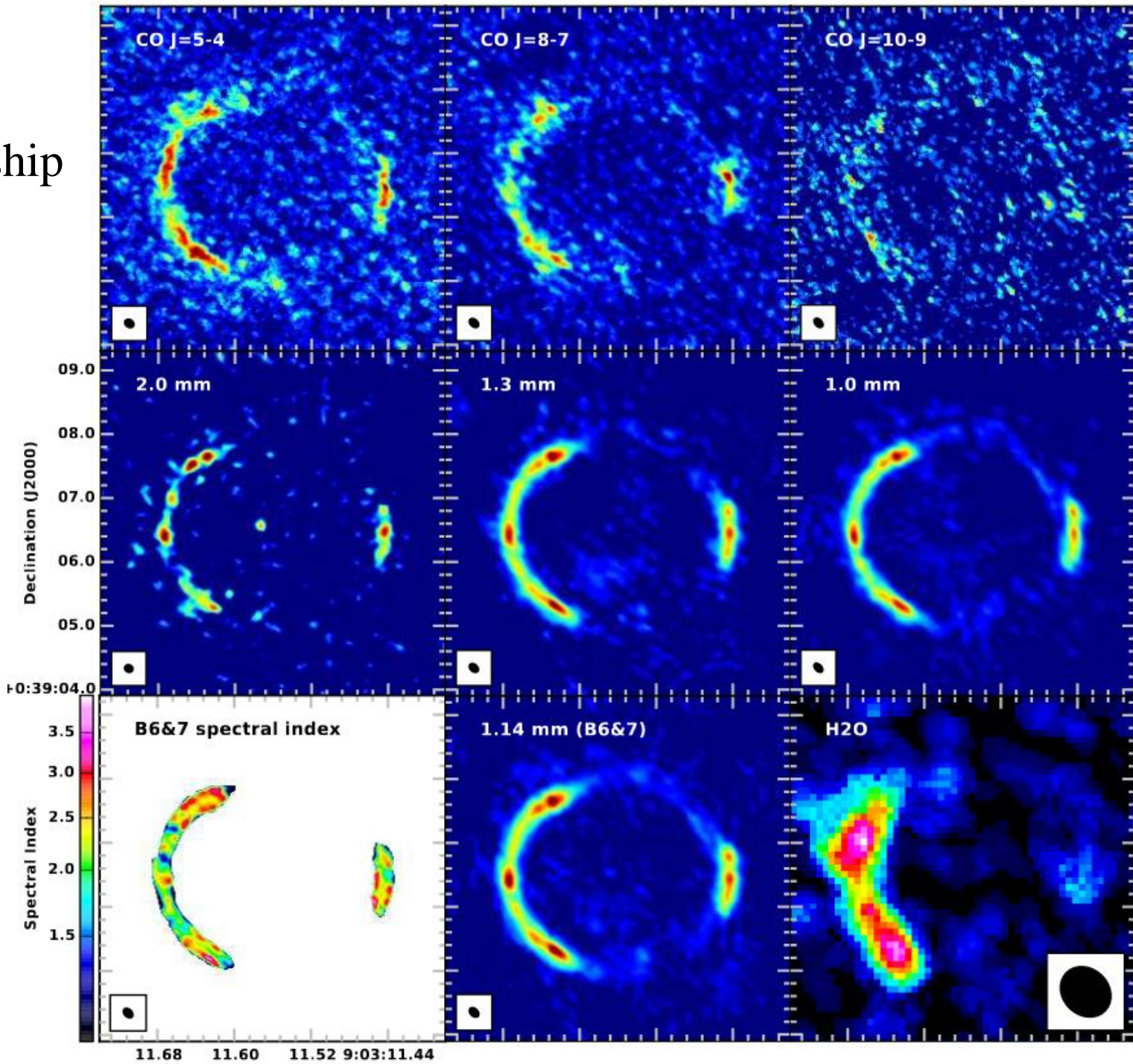
Longues bases \rightarrow 30mas de résolution

Correspond à 50-100pc pour la galaxie à $z=3$ (gain x 3-4 dû à lentille)



Masse dans 1.5kpc, $3 \cdot 10^{10} M_{\odot}$, presque entièrement du gaz!
5 groupes différents ont publié sur cet objet! 9 articles

ALMA
Partnership
2015



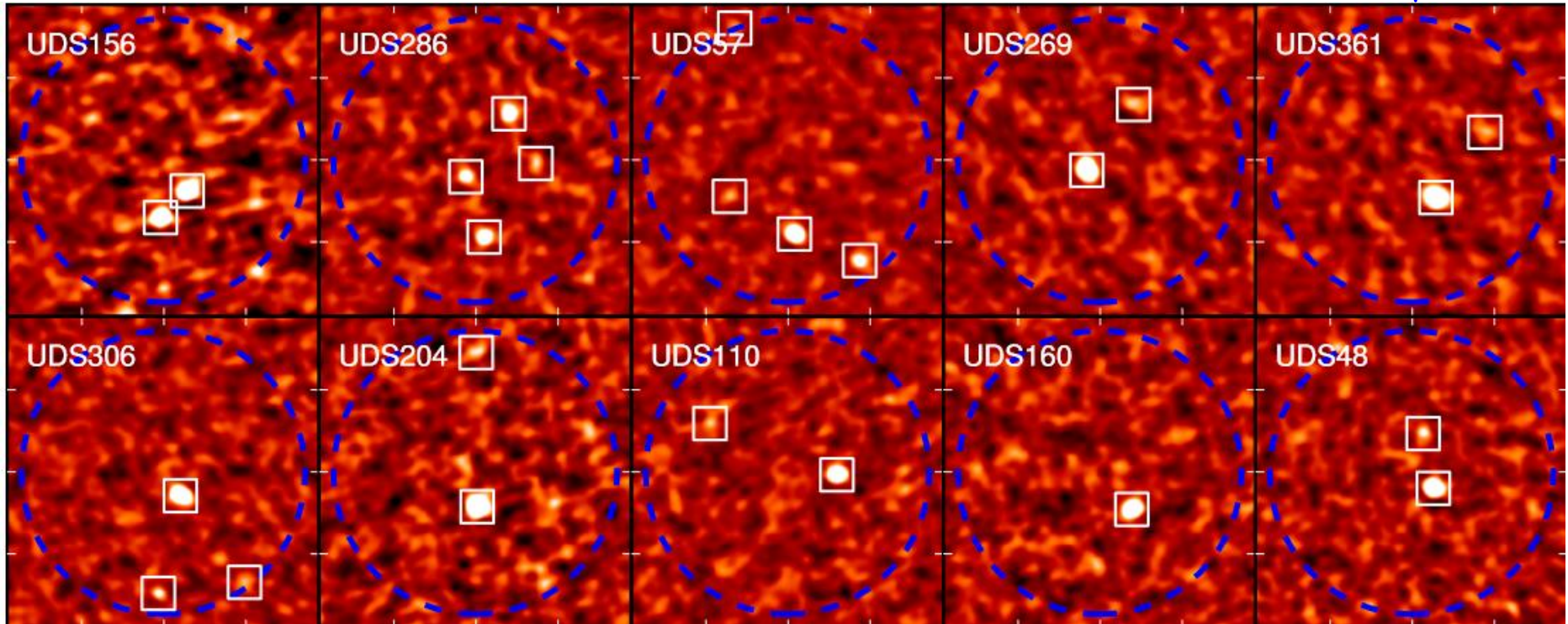
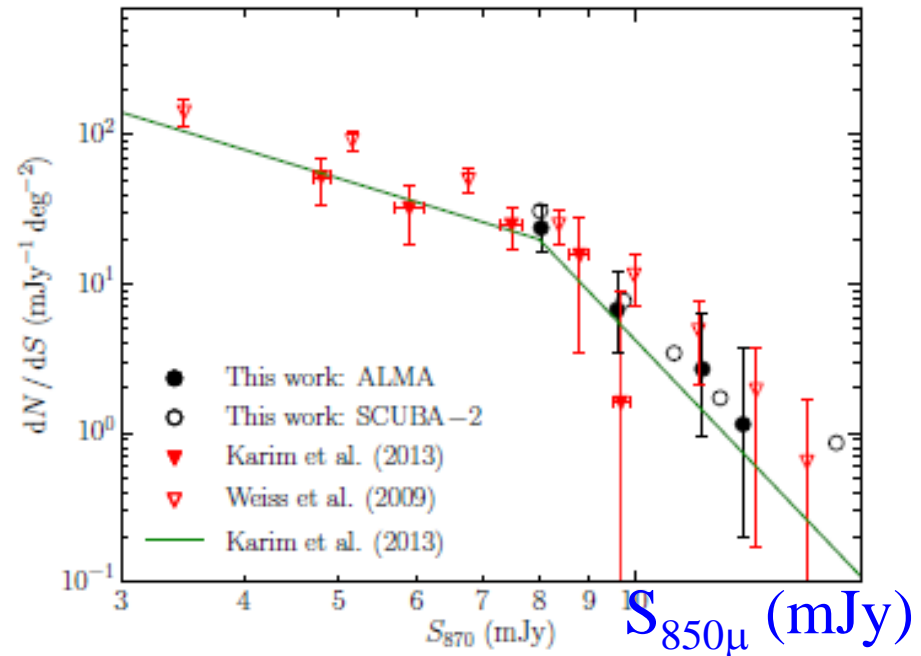
Comptages de sources

Comptage des galaxies submm

Coupure à $S(850\mu) \sim 7$ mJy

(*Simpson et al 2015*)

+ 60% Multiplicité (interactions)

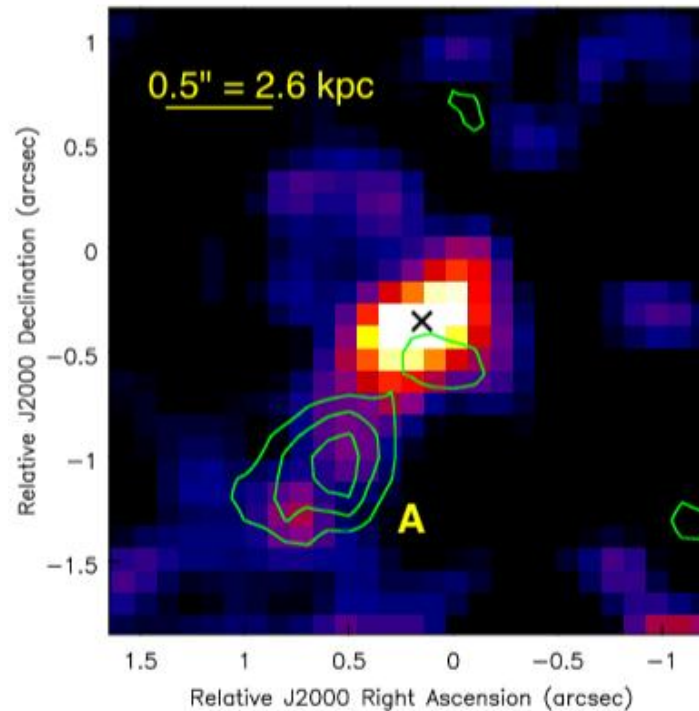
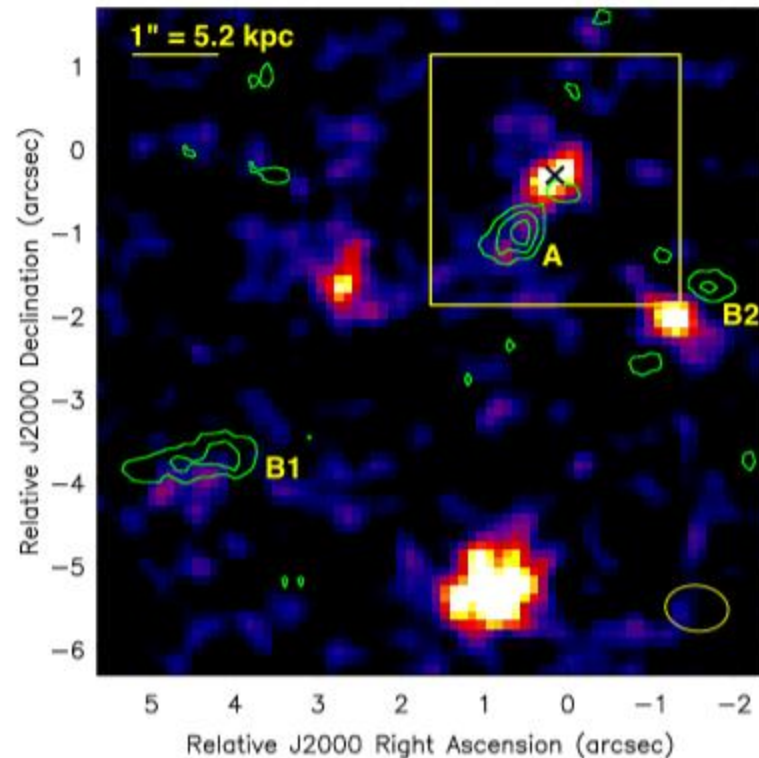


Galaxies pendant la réionisation



Raie CII dans les galaxies LBG à $z=6.8-7.1$, avec ALMA (1.3mm)

SFR = 5-15 M_{\odot}/yr



Contours CII
Offset par
Rapport à
l'optique
 $\text{Ly}\alpha/\text{UV}$
de 4kpc
Feedback?
Pas de FIR
faible Z?

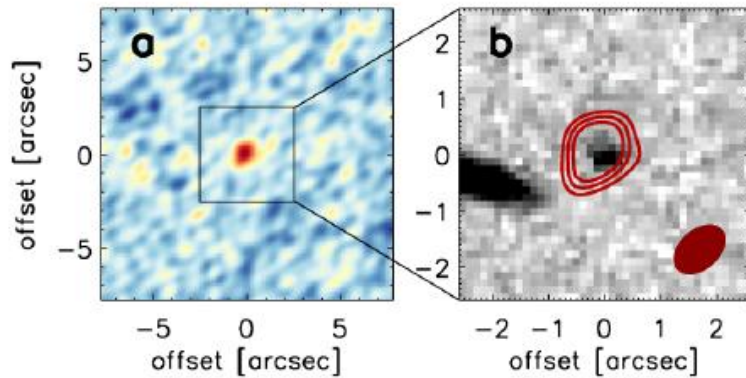
Maiolino et al 2015

Détection par [CII] à grand z

Premières tentatives avec les galaxies Ly α infructueuses (Himiko)

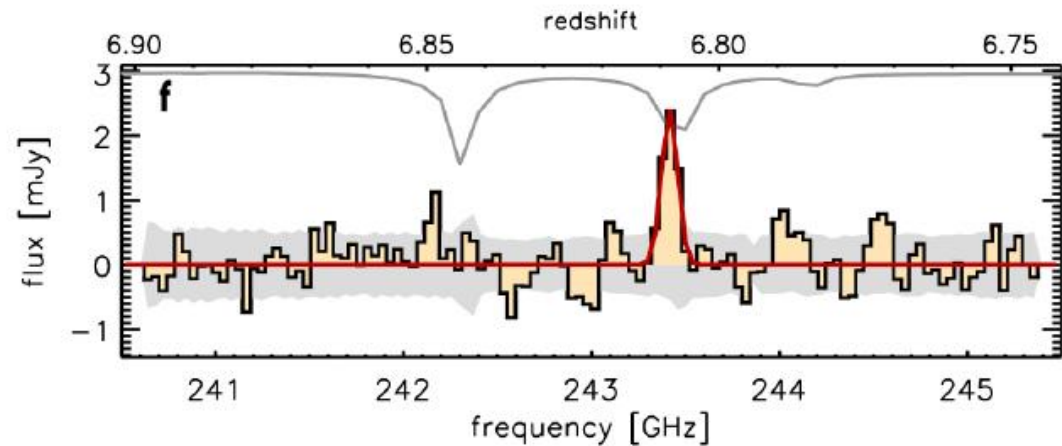
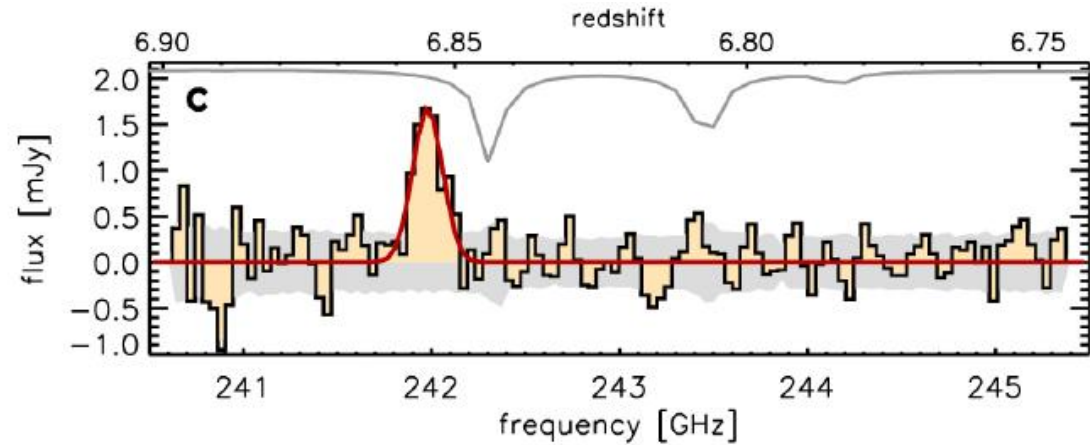
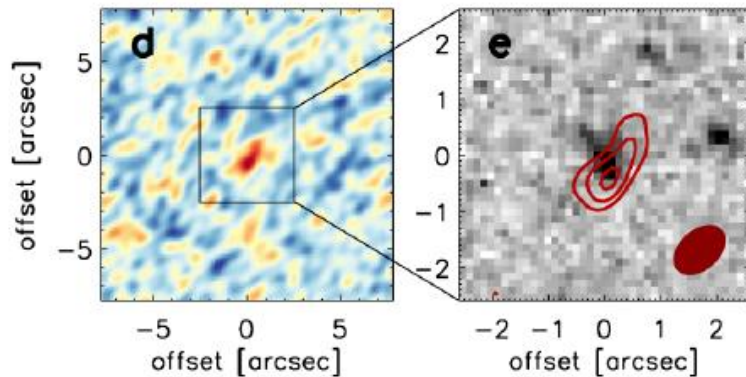
Galaxies sélectionnées en infrarouge $\rightarrow z=6.81-6.85$

Plus de poussière, de métallicité



ALMA 240GHz

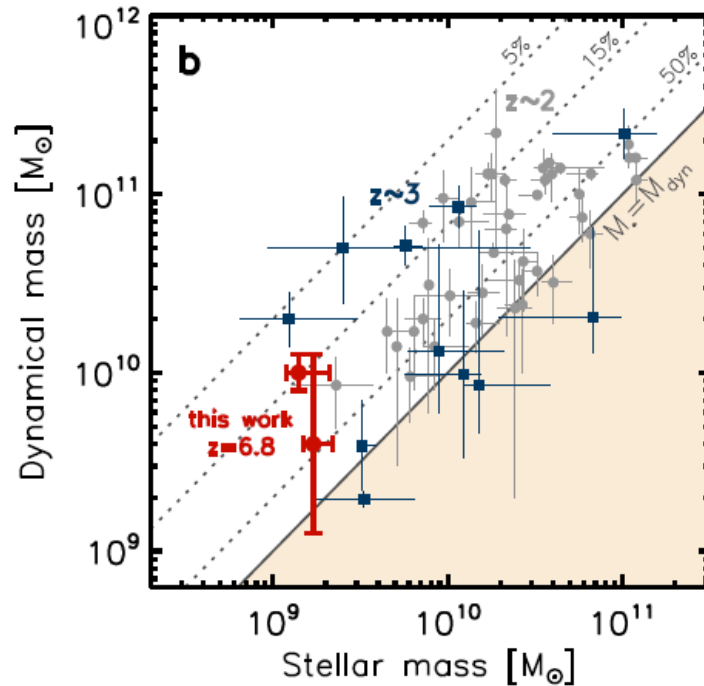
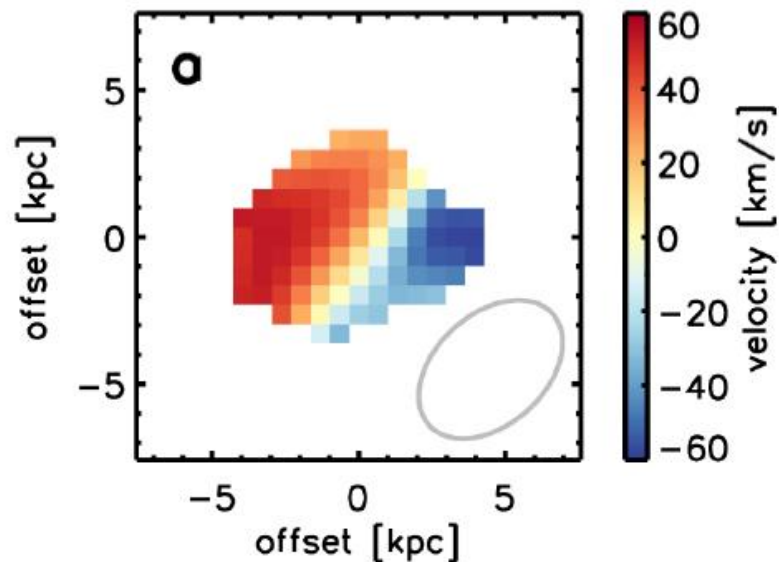
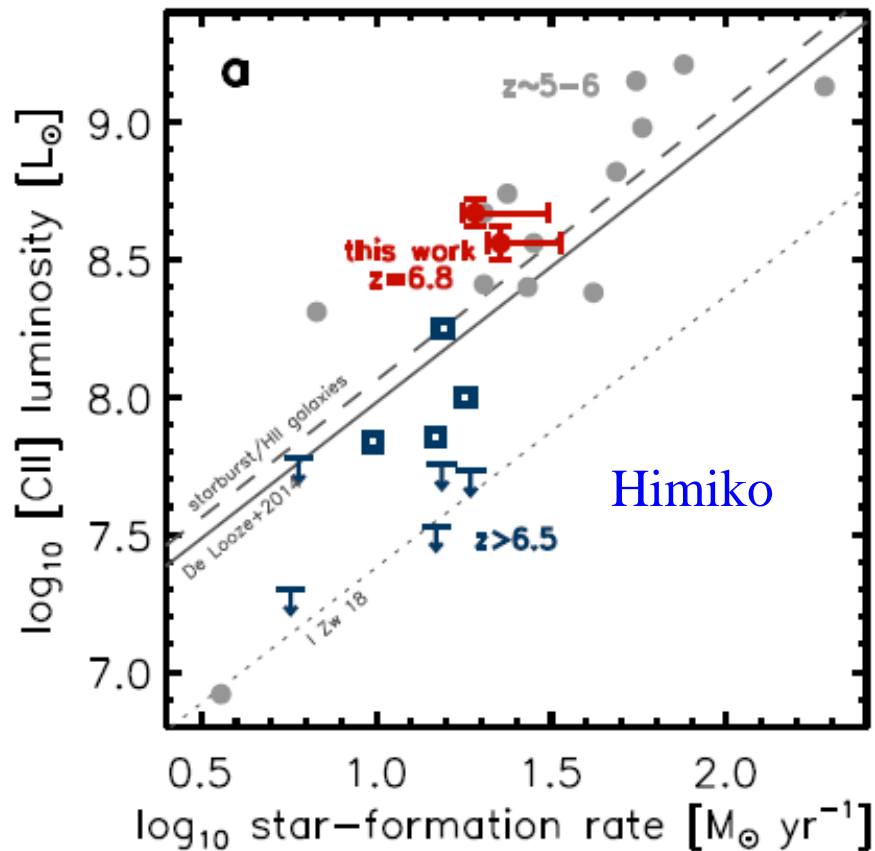
HST



Lobe $\sim 1''$

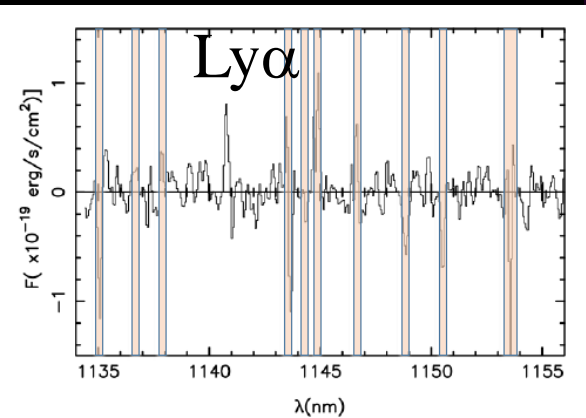
Dynamique et formation d'étoiles

Masse dynamique dans 2kpc, très incertaine

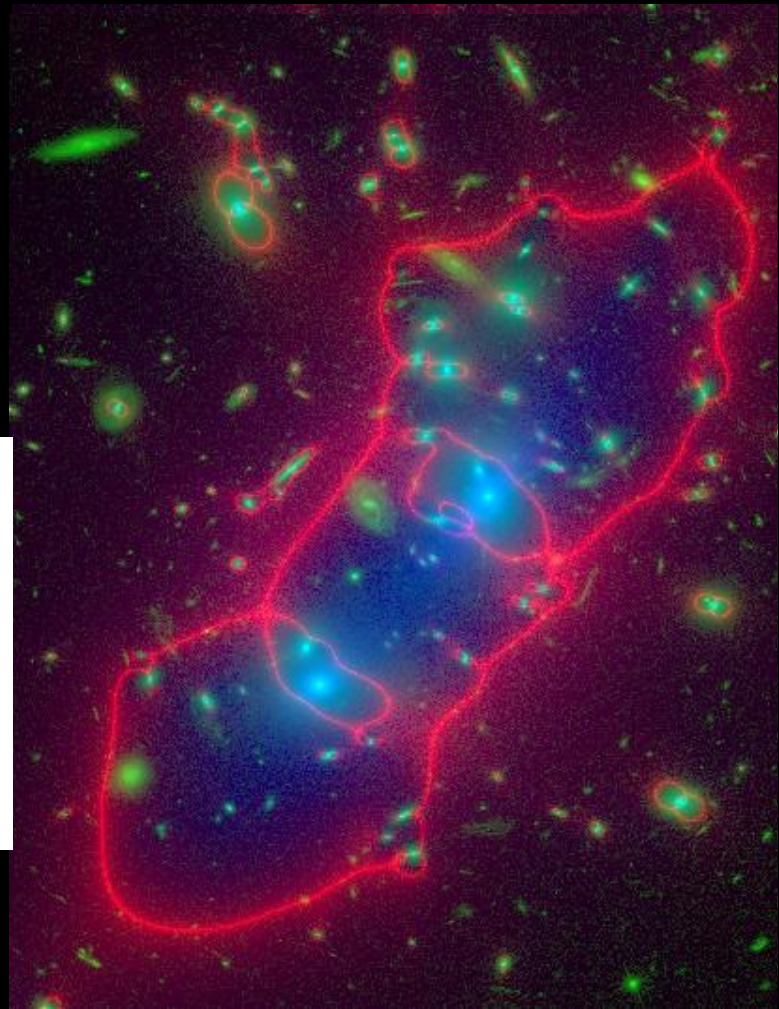


Lentille Gravitationnelle –HST-FF

Laporte et al 2017
 $\mu \sim 2$

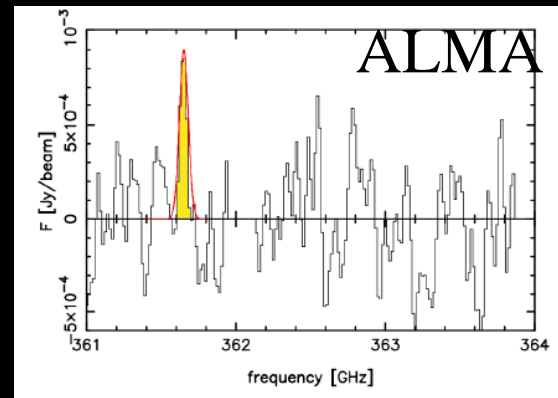


X-shooter



ALMA détection
 $z=8.38$
 $M_* = 2 \cdot 10^9 M_\odot$
 $M_d = 6 \cdot 10^6 M_\odot$
 $\text{SFR} = 20 M_\odot/\text{yr}$

[OIII] à 364 GHz

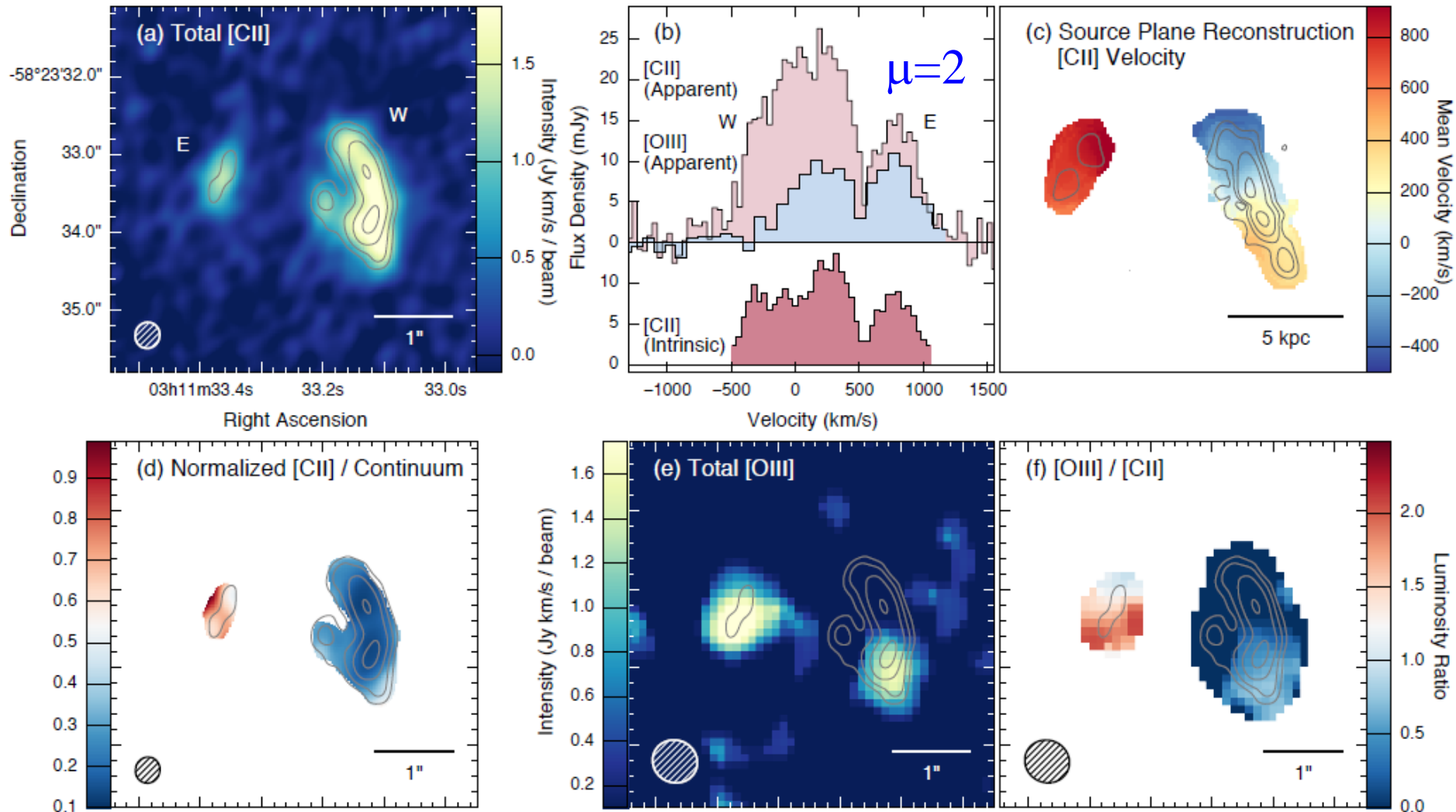


Carte d'amplification pour Abell 2744

[OIII]88 μm

Détection d'une fusion de deux galaxies à $z=6.9$

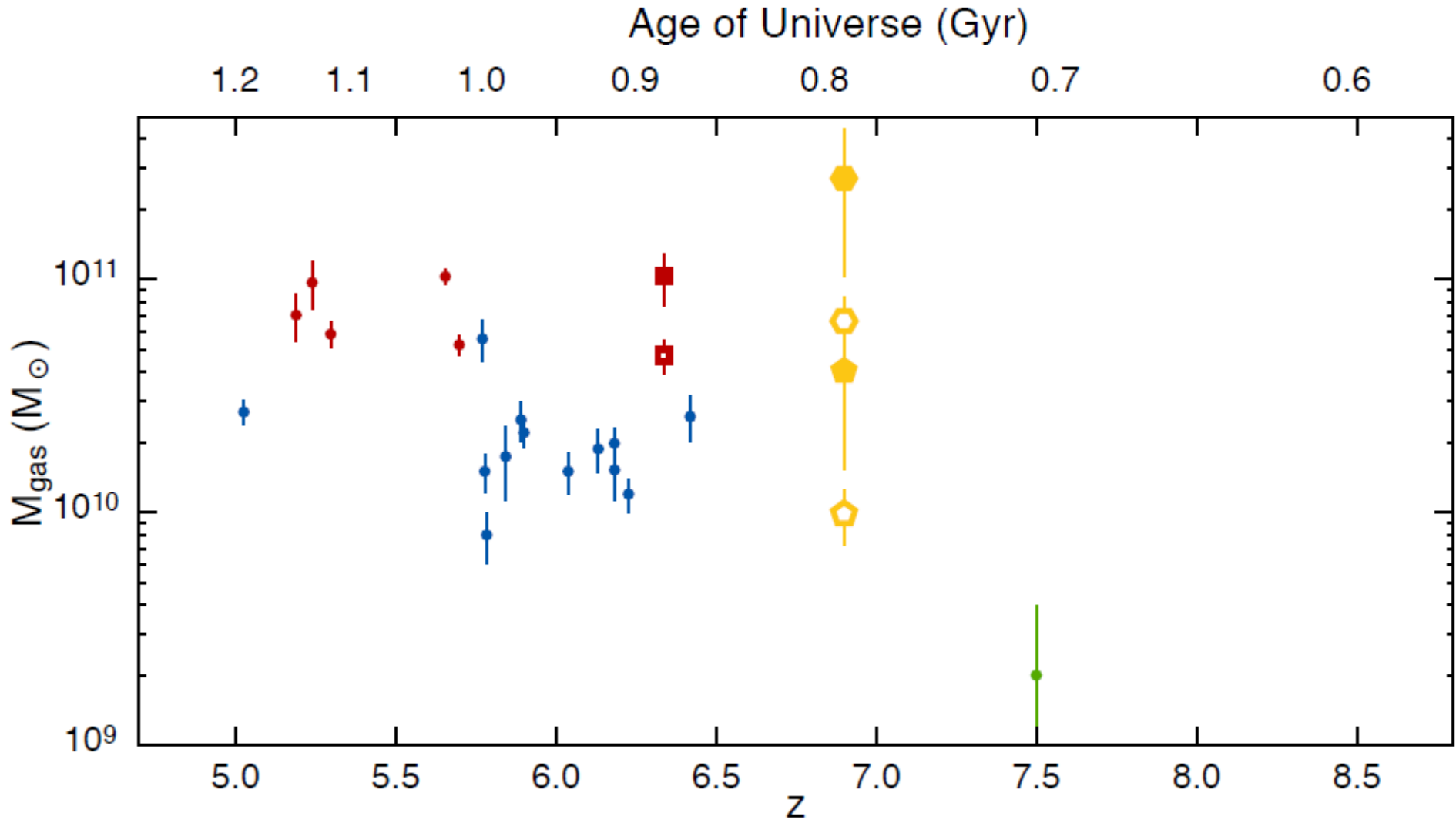
$\text{SFR}=2900 M_{\odot}/\text{yr}$ $M_{\text{gaz}} = 2.7 \cdot 10^{11} M_{\odot}$ $M_{\text{halo}} = 4 \cdot 10^{11} M_{\odot}$



SPT survey, suivi avec ALMA – $D_{12}= 8\text{kpc}$

Marrone et al 2017

Evolution du gaz moléculaire

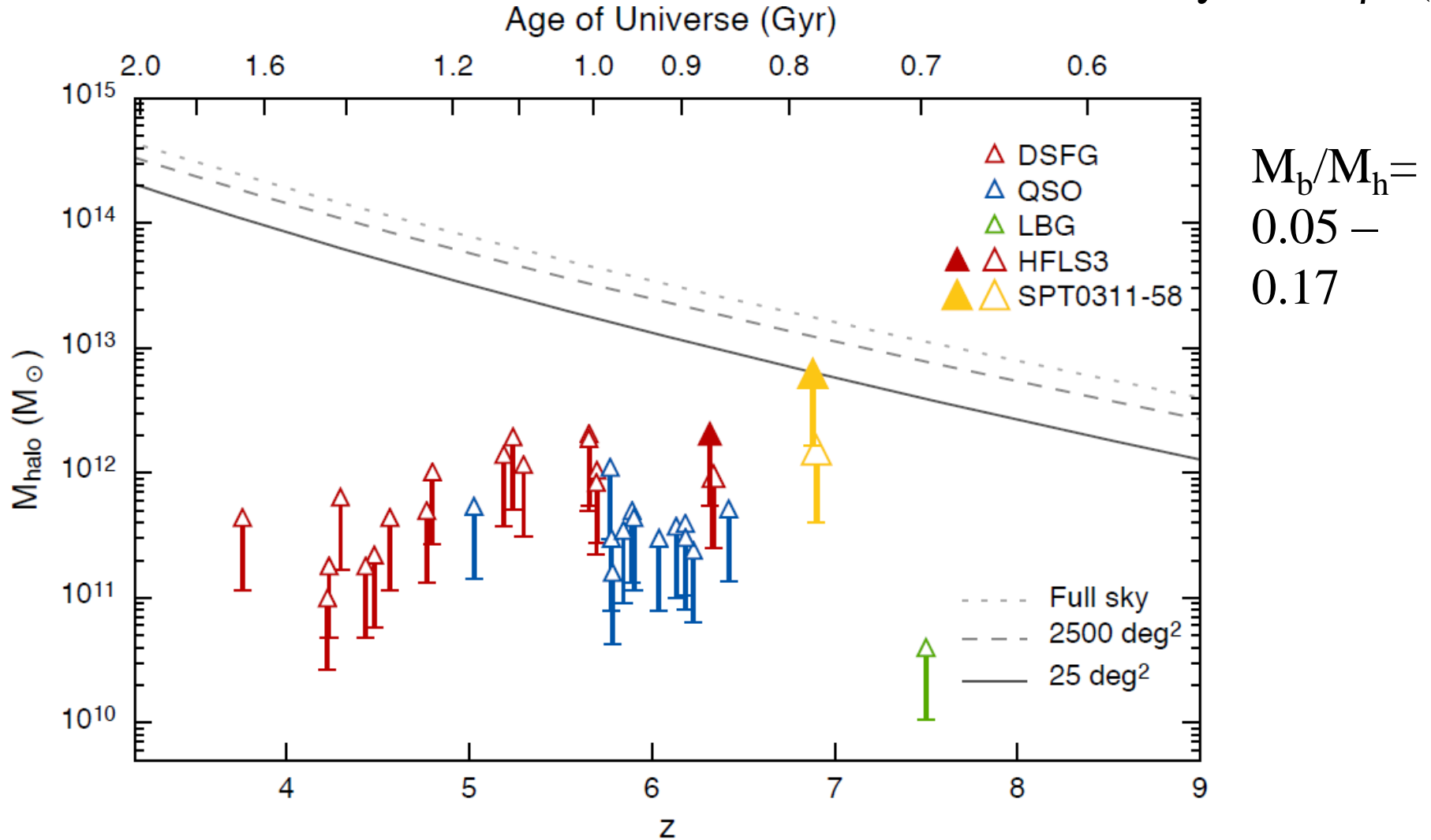


Compagnon: 10 fois moins massif
[OIII] 88 μm /[CII]158 μm croît à faible Z

Evolution des masses de halos

$\delta\rho/\rho = 200$

Densité moyenne $\langle\rho\rangle(z)$



SPT survey = 10% du ciel

Marrone et al 2017

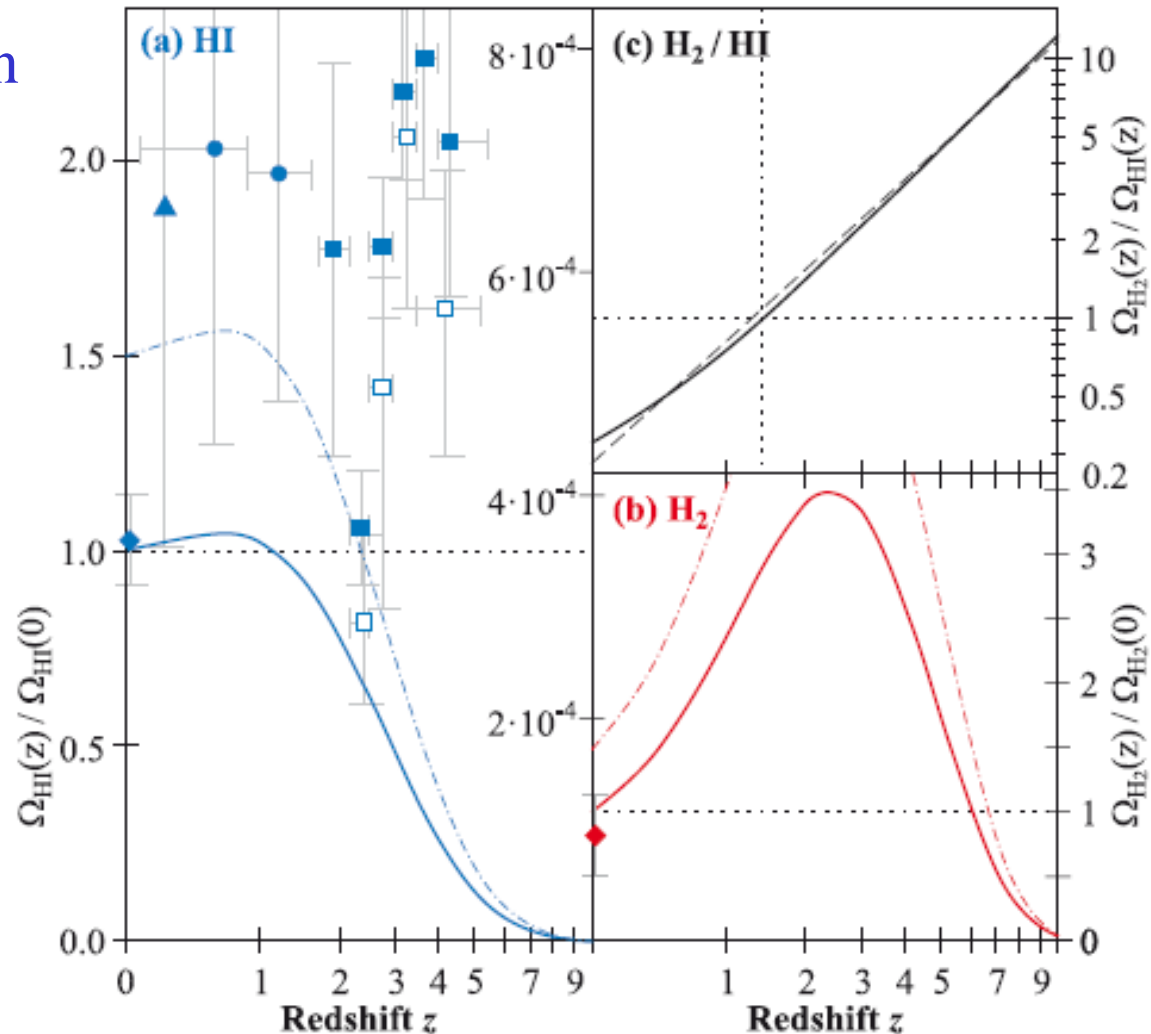
Evolution cosmique de H₂/HI

L'évolution de HI est déduite des absorbants DLA, à forte densité de colonne
« Damped Lyman Alpha » (absorption saturée)

Modèle basé sur la pression
pour H₂

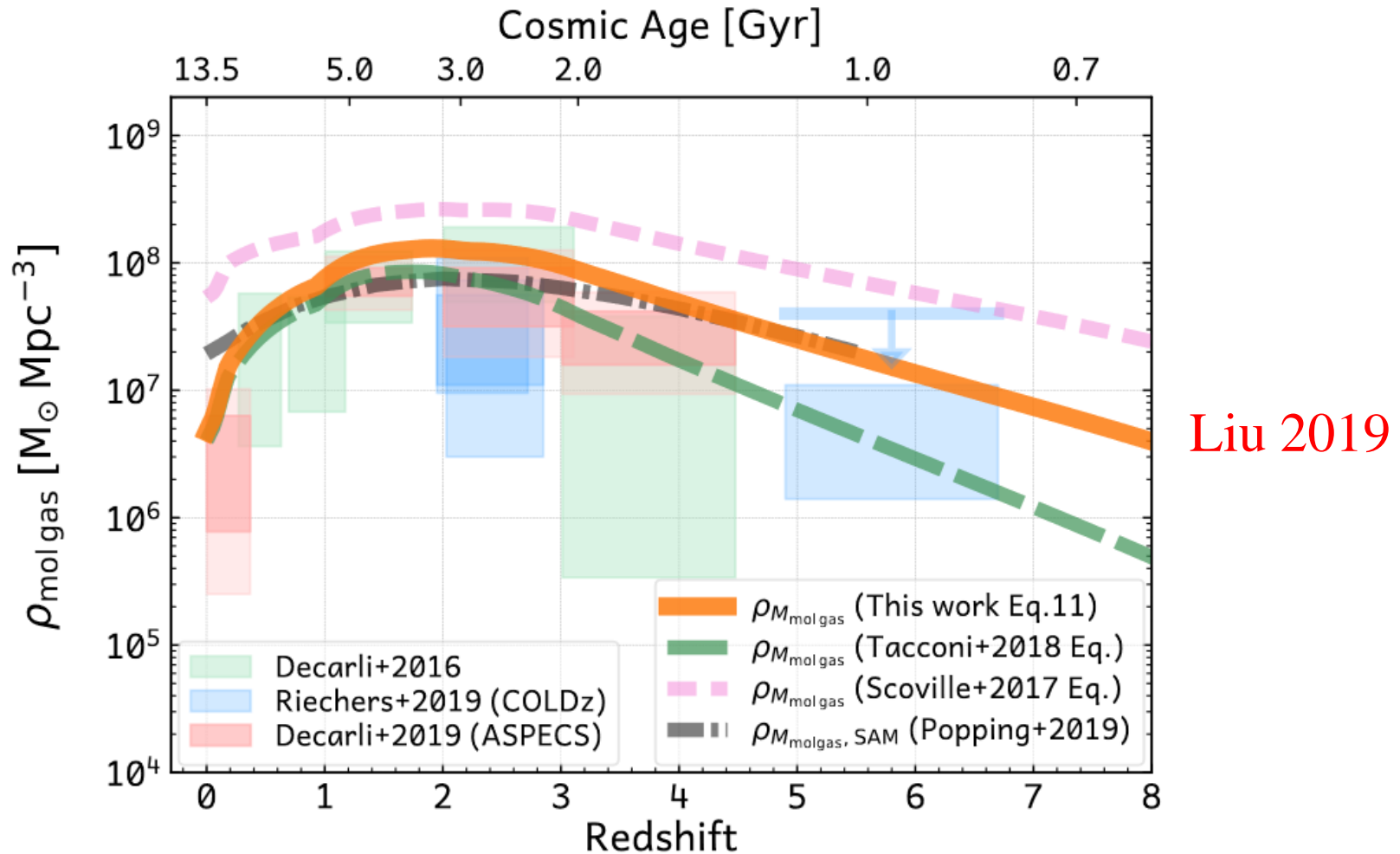
Simulations à partir d'un
Catalogue de galaxies du
Millenium, + SAM

$$\text{H}_2/\text{HI} \sim (1+z)^{1.6}$$



Evolution cosmique de H₂

Decarli et al 2014, 16: Observations profondes de HDF-N, 3mm
Liu et al 2019, A³Cosmos, automatic mining in ALMA archive



Comparaison avec les modèles semi-analytiques (Popping 2019)

Résumé

Plusieurs méthodes permettent d'explorer les galaxies pendant la réionisation

- Les quasars et leur émission $\text{Ly}\alpha$ (fossé de Gunn-Peterson, prairie et forêt $\text{Ly}\alpha$)
 - La technique de la cassure Lyman (LBG) permet de tracer la fonction de luminosité versus z
 - Les émetteurs $\text{Ly}\alpha$, LAE
 - ALMA: les raies de CO, [CII]
 - Réionisation tardive: $x_{\text{HI}}=0.5$ à $z=7.5$, 0 à $z=5.3$
- Incertitude sur la capacité des galaxies de réioniser (nombre incertain, lentilles gravitationnelles)

