



COLLÈGE  
DE FRANCE  
— 1530 —

*Chaire Galaxies et Cosmologie*

# Ré-ionisation: perspectives



SKA

**Françoise Combes**



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

# Futures observations

## Optique – Infrarouge:

Détecter les galaxies primordiales

Sources de réionisation

**JWST**

Infrarouge lointain: **SPICA**

Millimétrique: **ALMA**

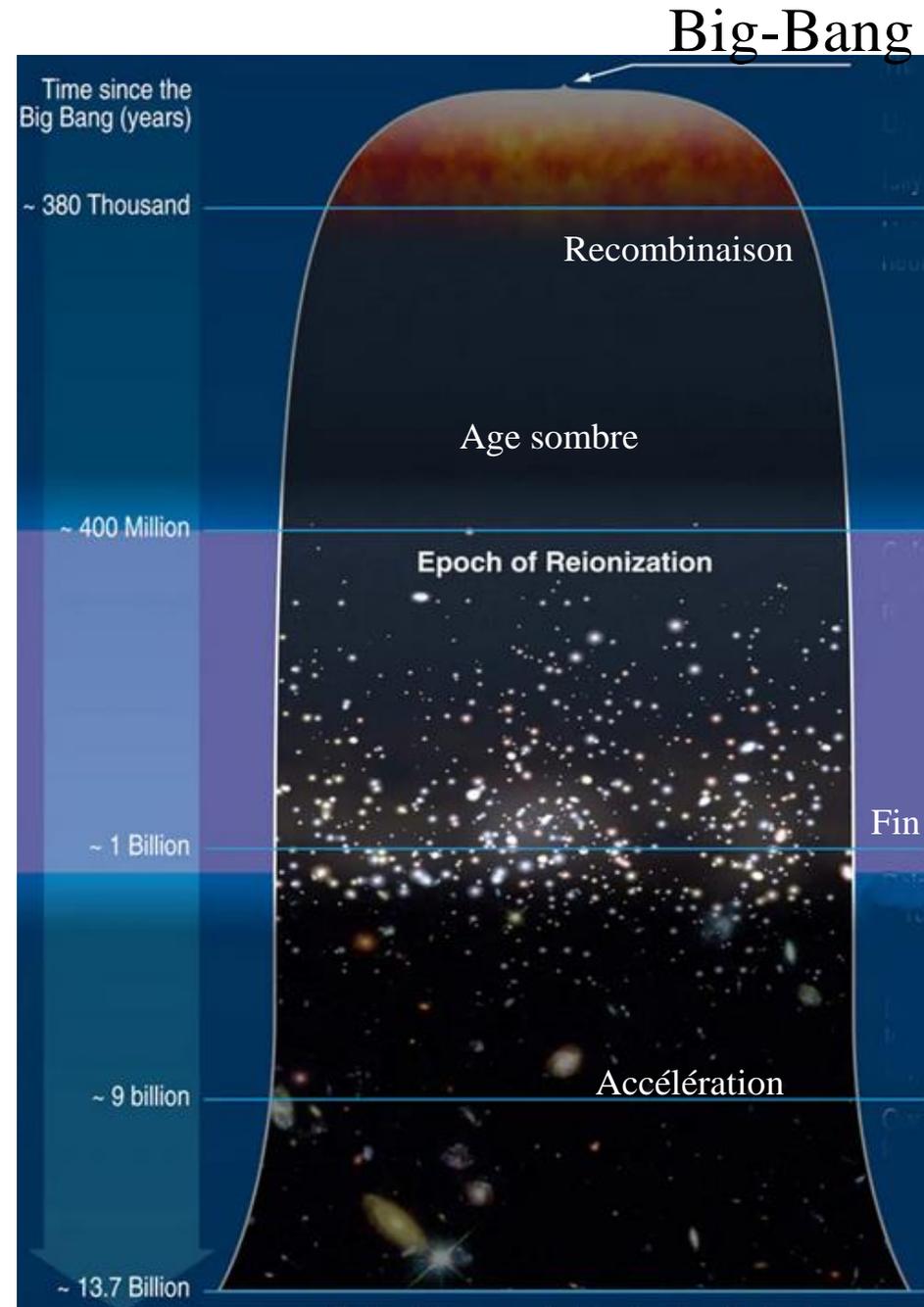
## Centimétrique-métrique:

Détecter le gaz atomique du

Milieu inter-galactique

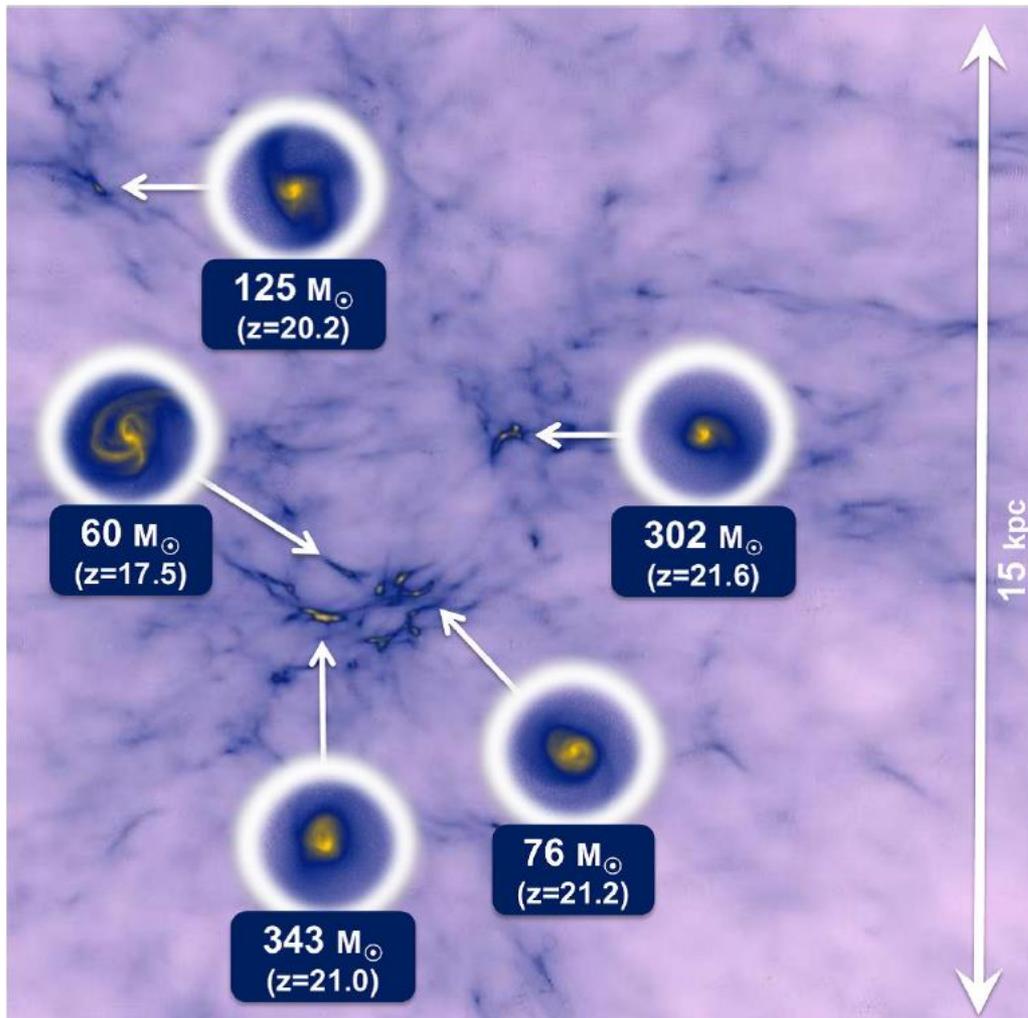
**Lofar-NenuFAR**

**SKA**



# Formation d'étoiles au début de l' Univers

Etoiles 10-1000M<sub>☉</sub> selon le taux d'accrétion



**Age sombre** z=200-30 ??  
Mission spatiale?

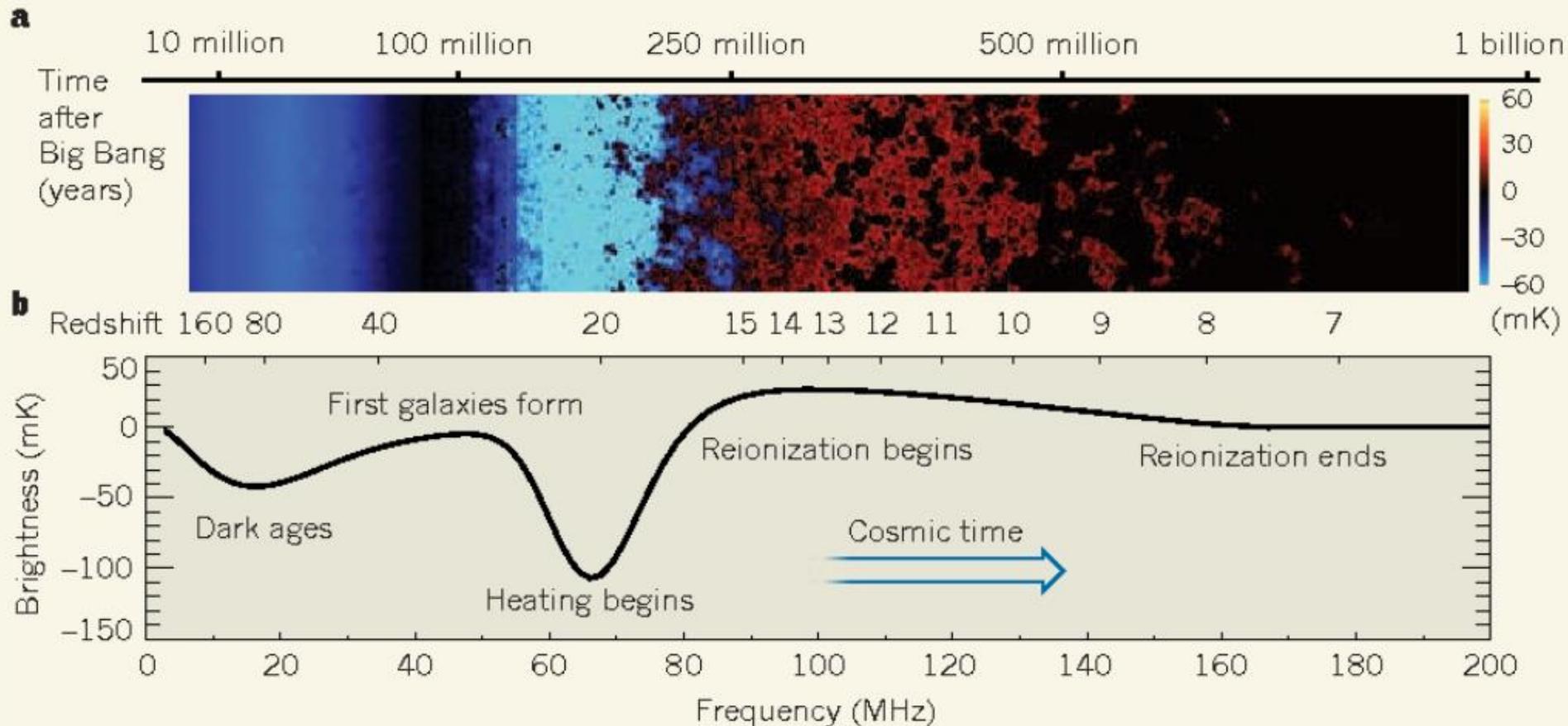
**Aube cosmique** z=30-15  
Premières étoiles, Tb(HI)  
Traceur de densité et Ts  
JWST Mars 2021

**EoR** z=15-6 Bulles autour  
des premières galaxies,  
Le milieu ionisé percole  
21cm LOFAR/NenuFAR/SKA  
Cross-corrélation avec Ly $\alpha$

*Hirano et al 2014*

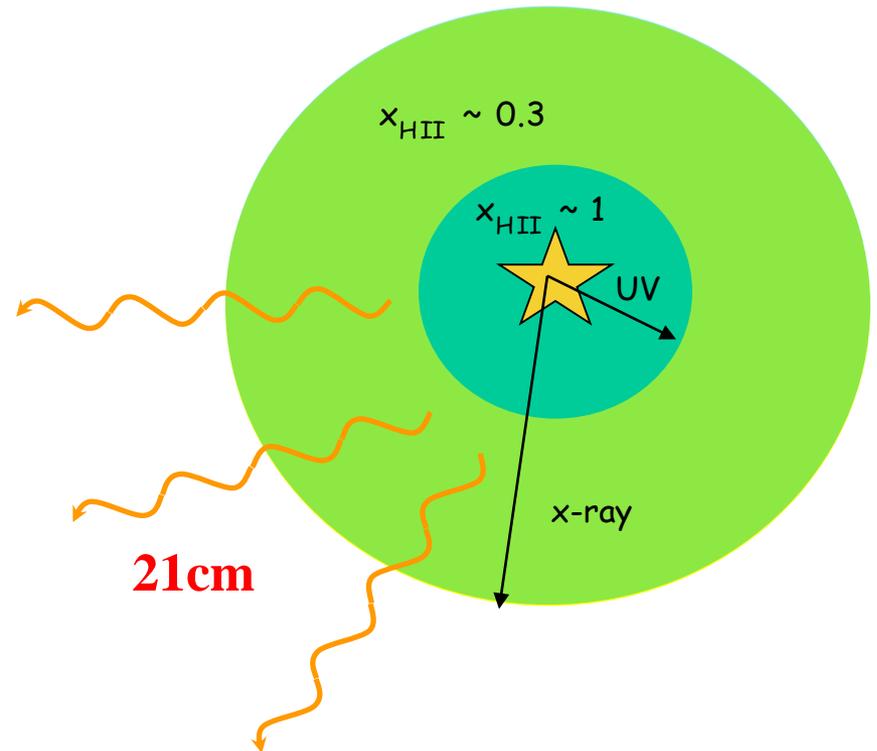
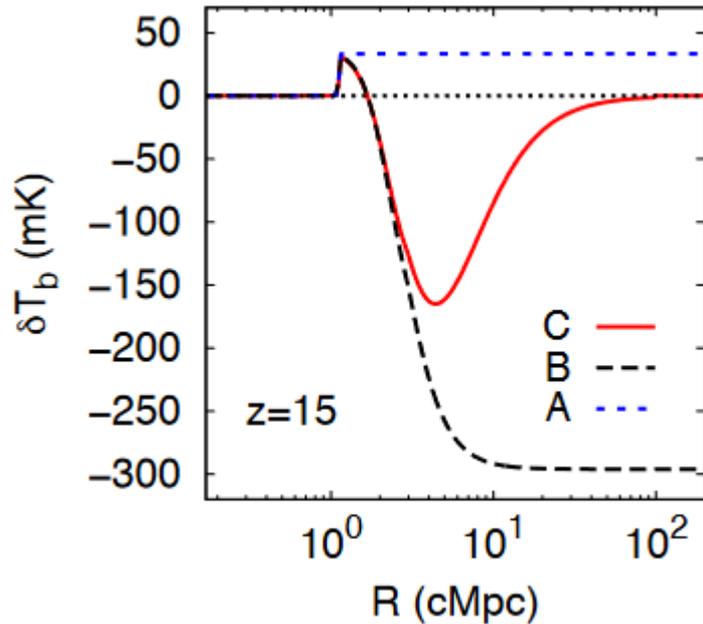
# Histoire HI de la réionisation

Plusieurs étapes: Aube cosmique, après l'âge sombre  
Hydrogène plus froid que le fonds → absorption  
Formation d'étoiles, chauffage → émission



# Chauffage par les rayons X

Rayons X émis par les restes de supernovae ou les mini-quasars



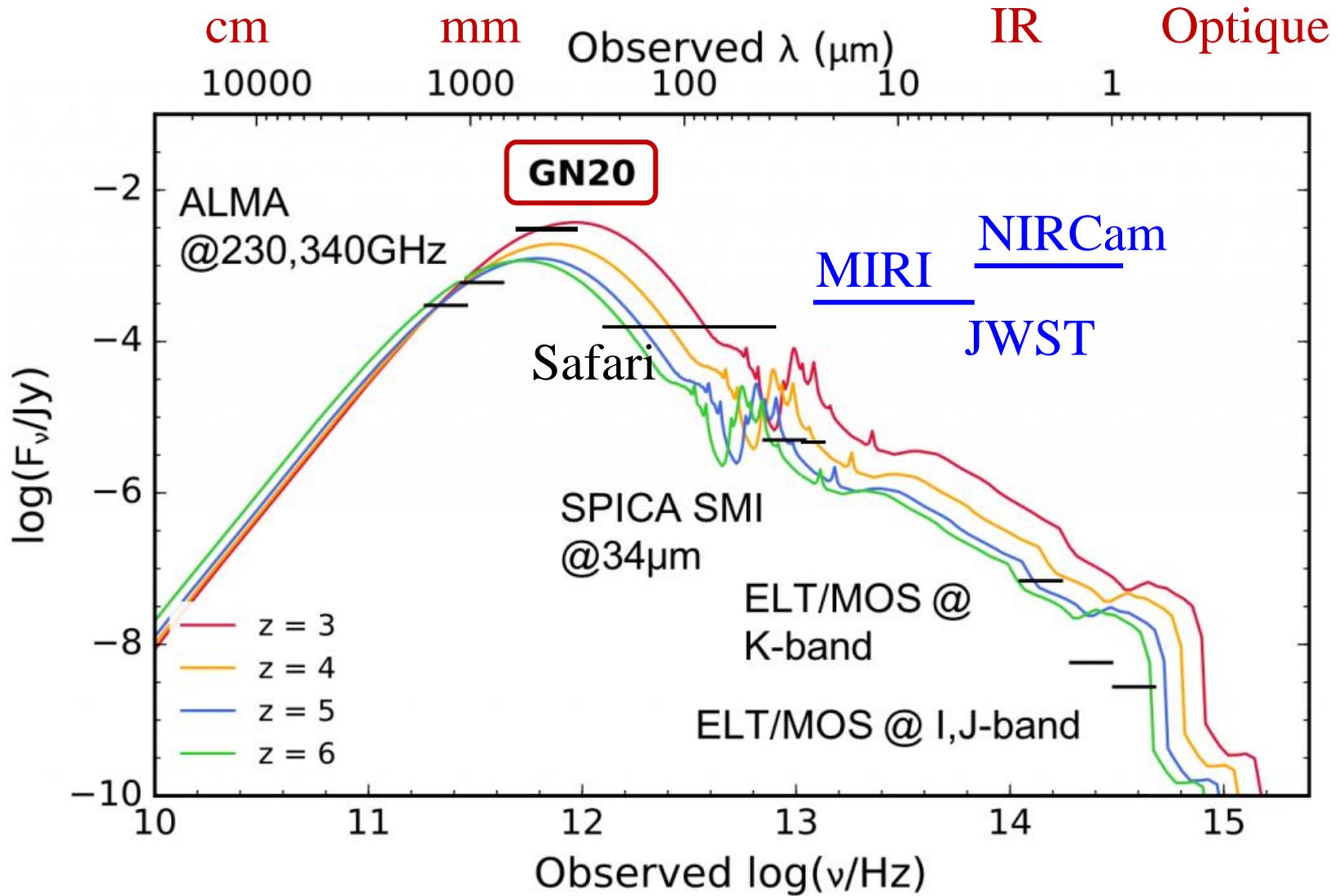
$$\sigma_{\text{HI}} = 6.3 \cdot 10^{-18} (h\nu/13.6\text{eV})^{-3} \text{ cm}^{-2}$$

$$\lambda(\text{X-ray}) \gg \lambda(\text{UV})$$

$$\sigma_{\text{HI}}(\text{X}) \ll \sigma_{\text{HI}}(\text{UV})$$

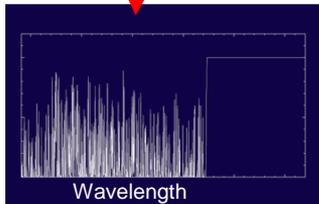
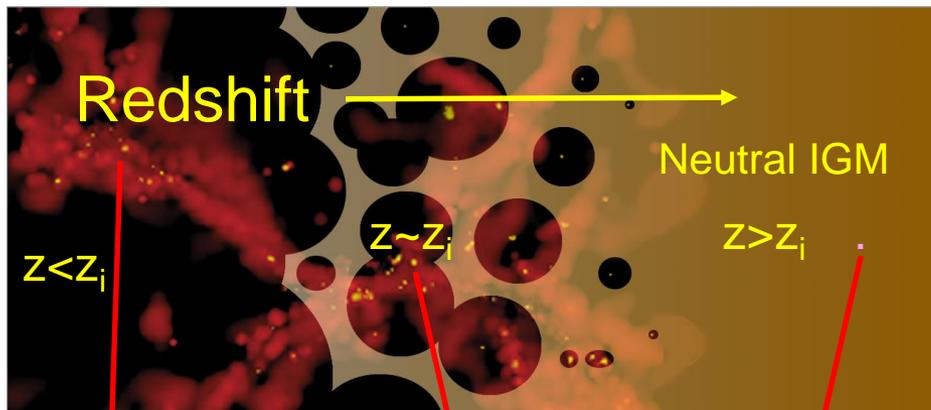
*Datta et al 2016*

# Quel telescope?

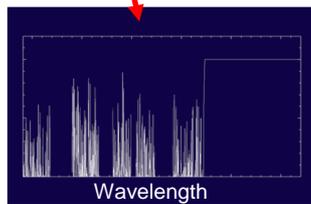


# Première lumière de l'Univers: JWST

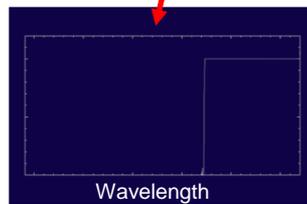
- Que sont les premières galaxies?
- Masses de leurs étoiles, PopIII?
- Sont-elles la cause de la reionisation?



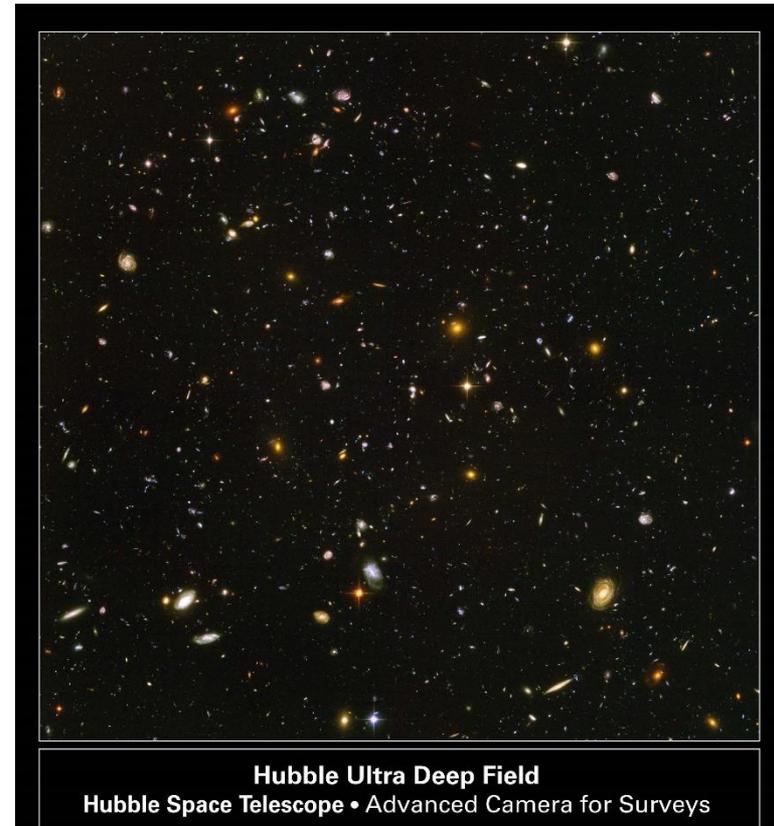
Lyman Forest  
Absorption



Patchy  
Absorption



Black Gunn-  
Peterson trough

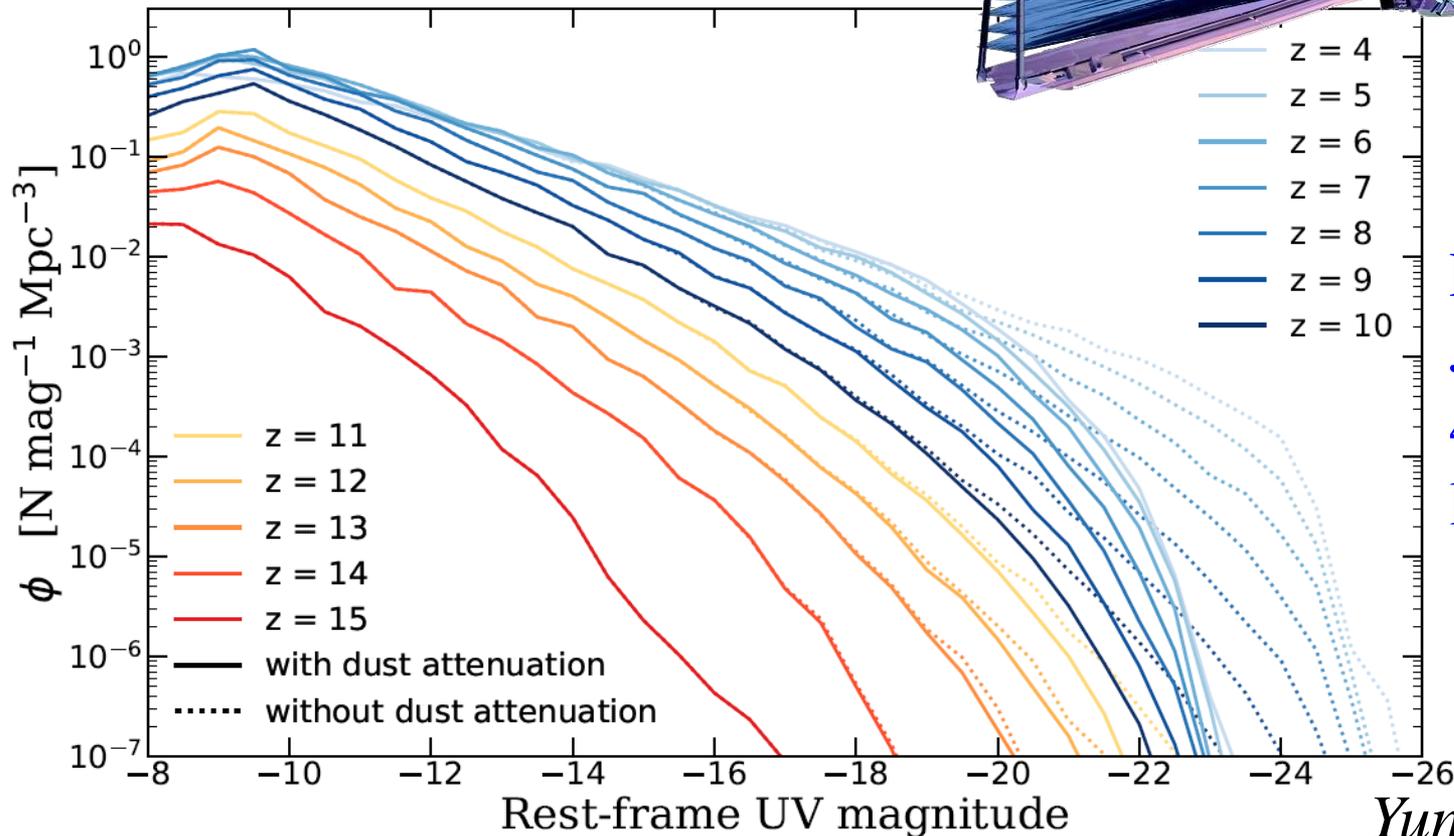
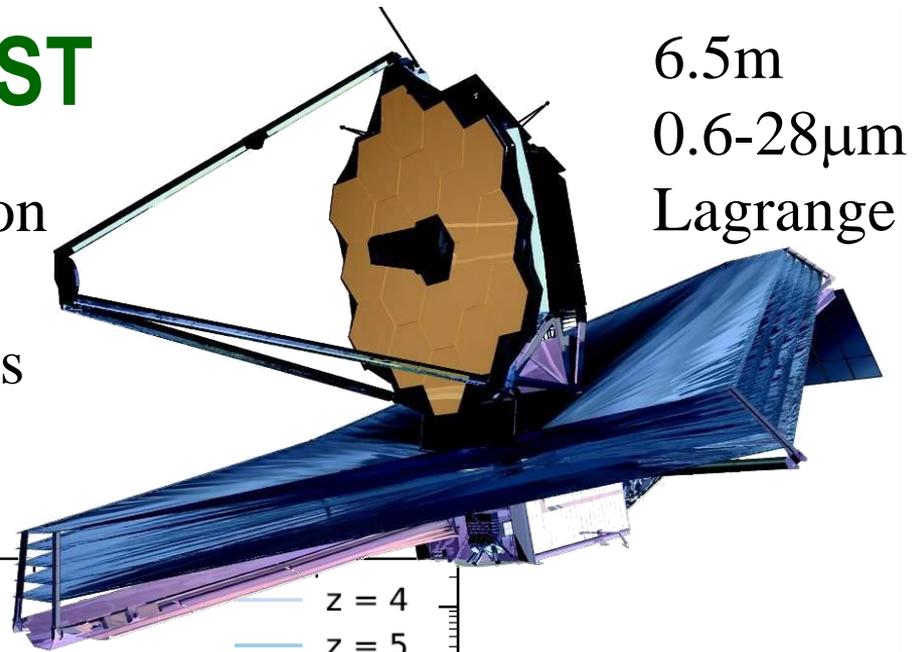


Hubble Ultra Deep Field  
Hubble Space Telescope • Advanced Camera for Surveys

- NIR Ultra-profond (1.4 nJy)
- Spectres QSO: forêt Ly- $\alpha$
- Spectres galaxies: raies de Balmer ( $2 \times 10^{-19}$  ergs/cm<sup>2</sup>/sec)

# Perspectives avec JWST

Modèle semi-analytique de prédiction des galaxies et formation d'étoiles  
A grand  $z$ , les petites M forment plus d'étoiles qu'à  $z=0$  → photons LyC

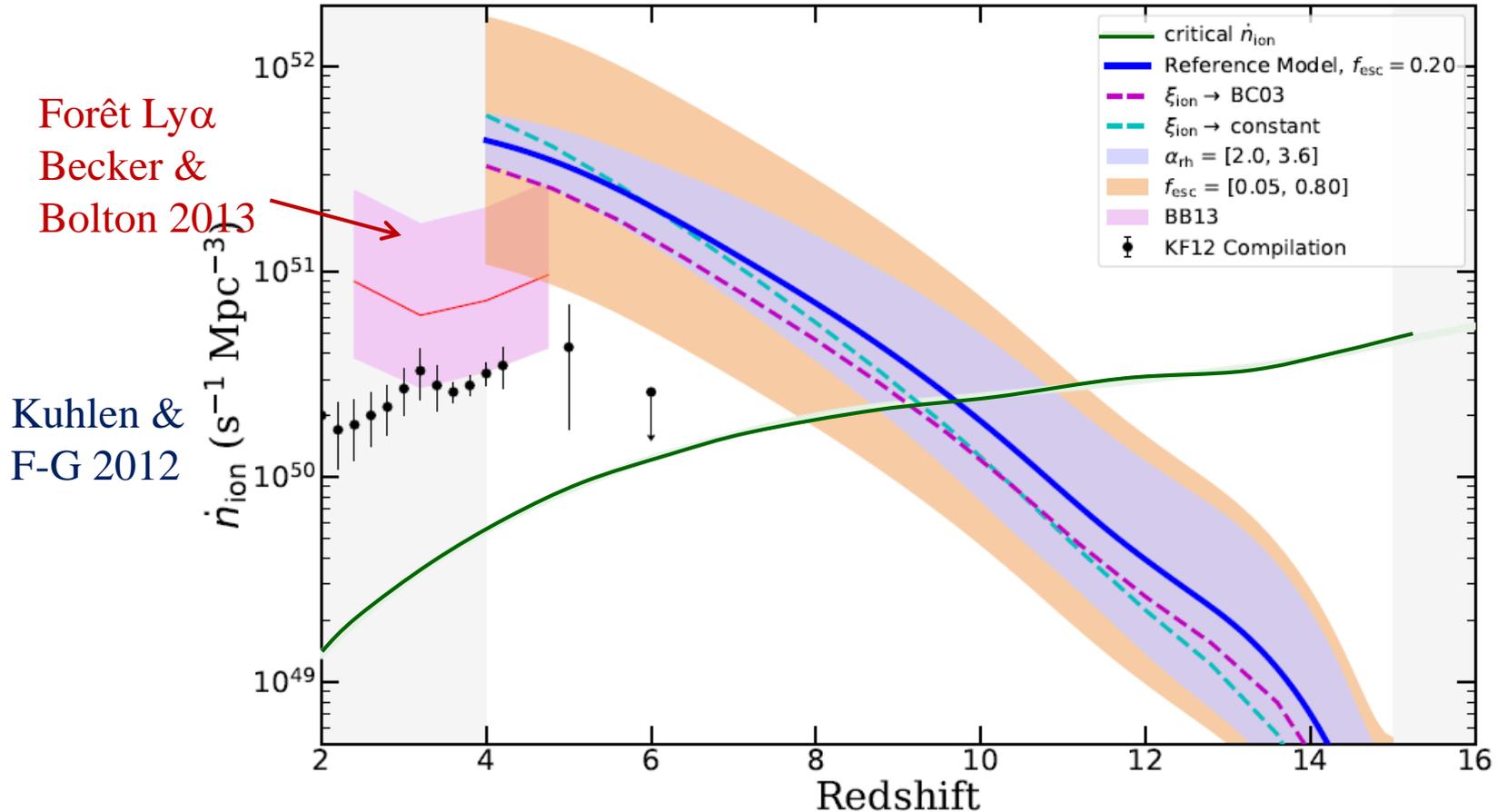


Les galaxies de JWST produiront 40-80% de la réionisation

*Yung et al 2020*

# Taux d'ionisation attendu

$dN/dt$ : Supposant  $f_{\text{esc}}=0.20$ , TDR  $\gamma=1.4$ , spectre  $\alpha=2$  des sources

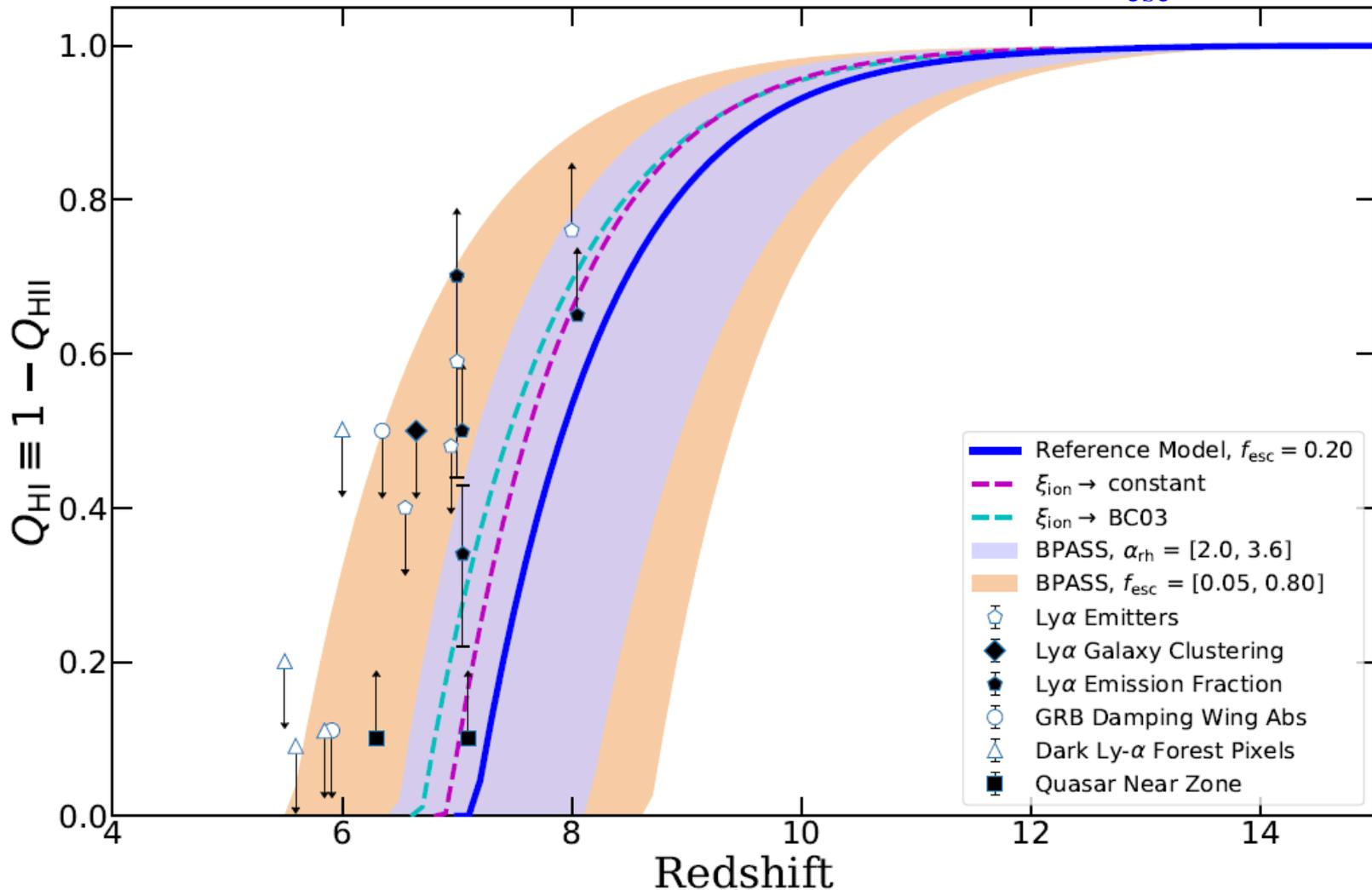


— Valeur critique pour garder l'Univers réionisé

# Fraction de neutres

Modèle de référence en tension avec les observations  $\rightarrow f_{\text{esc}}$  varie avec  $z$

- Feedback extrêmes
- $f_{\text{esc}}=0.05-0.8$
- $\log(\xi_{\text{ion}}) = 25.3$

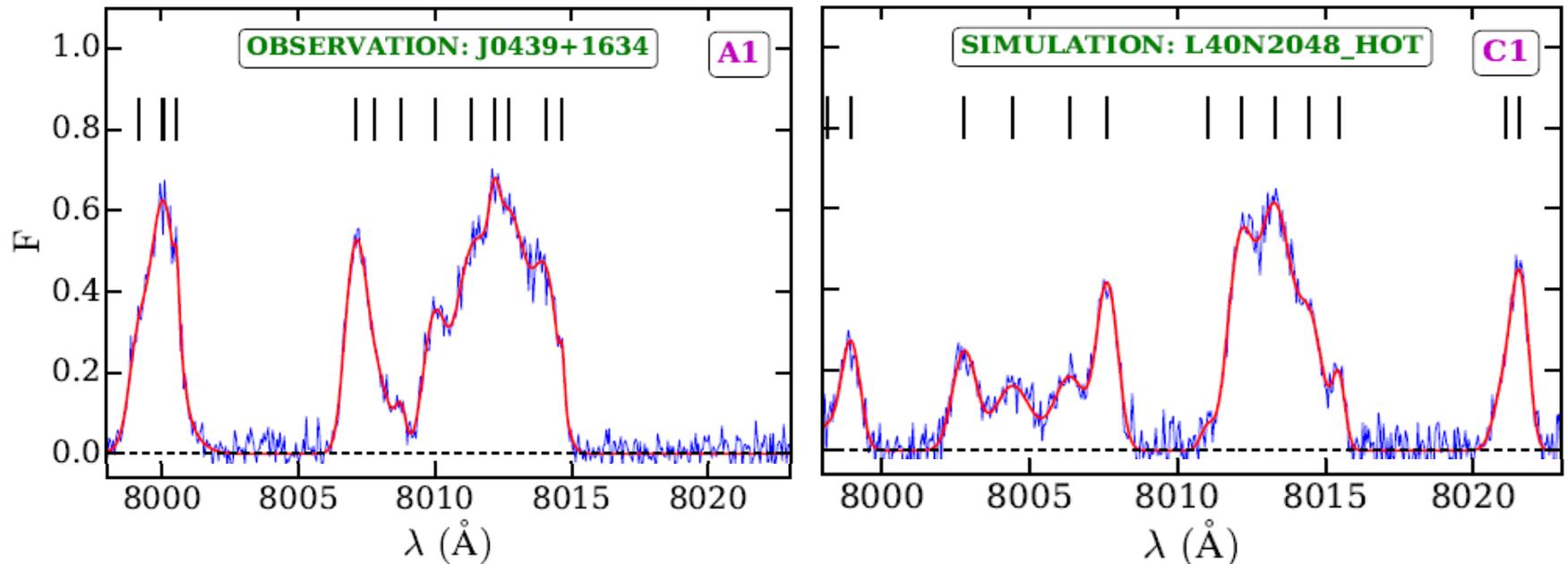




# Causes physiques des absorptions

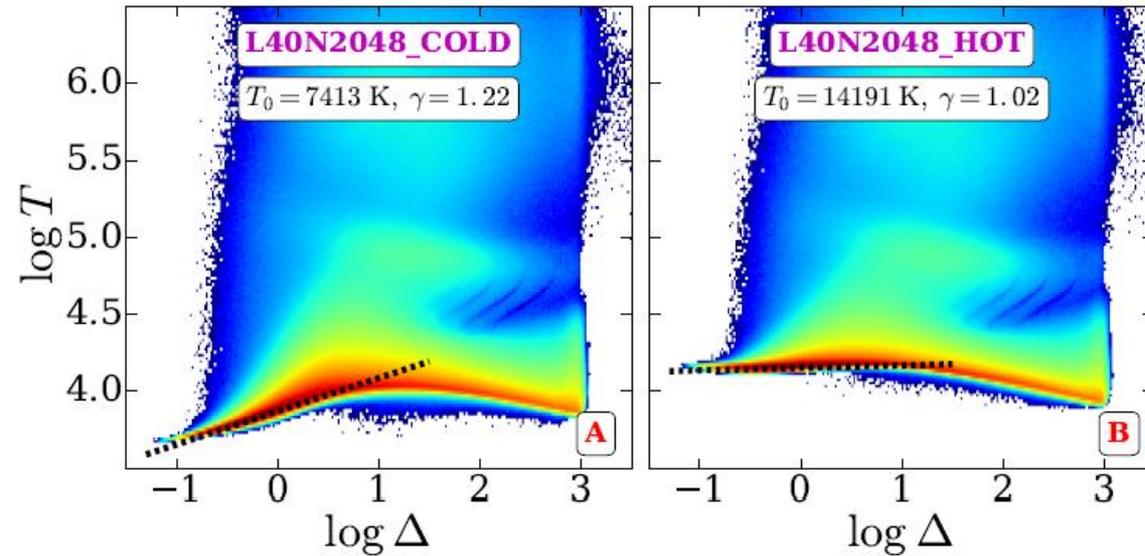
Sur-densité, Température, UVB ( $\Gamma$ ), Gradient de vitesse

Les simulations permettent de mieux inverser les observations



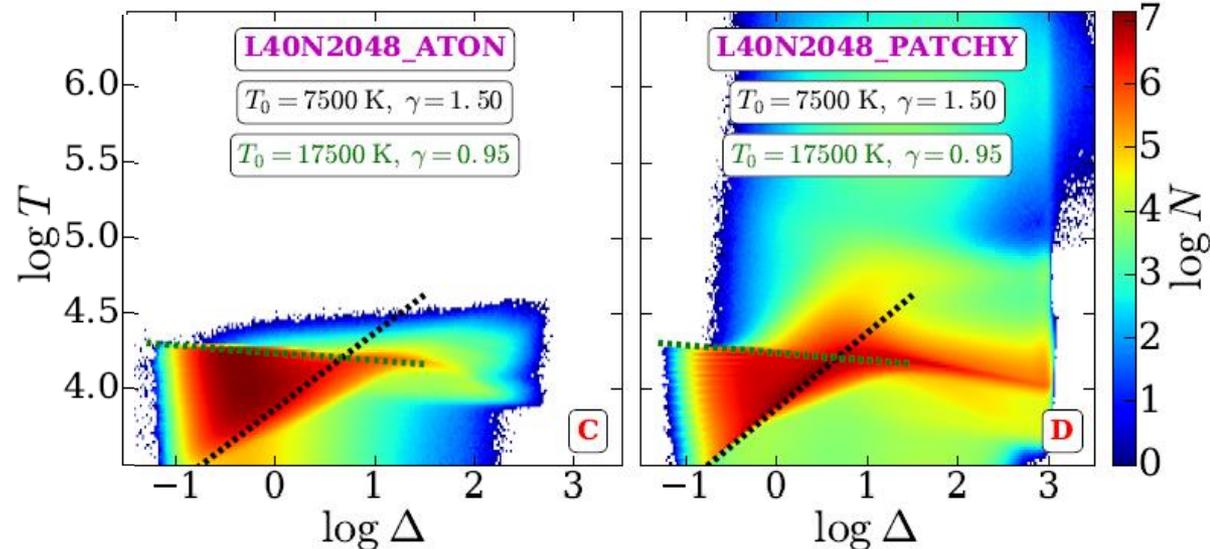
Relation entre sur-densité  $\Delta = \delta\rho/\rho$  et température,  
Loi d'échelle  $T \propto \rho^\gamma$  ou  $T \propto \Delta^{(\gamma-1)}$

# Température-densité



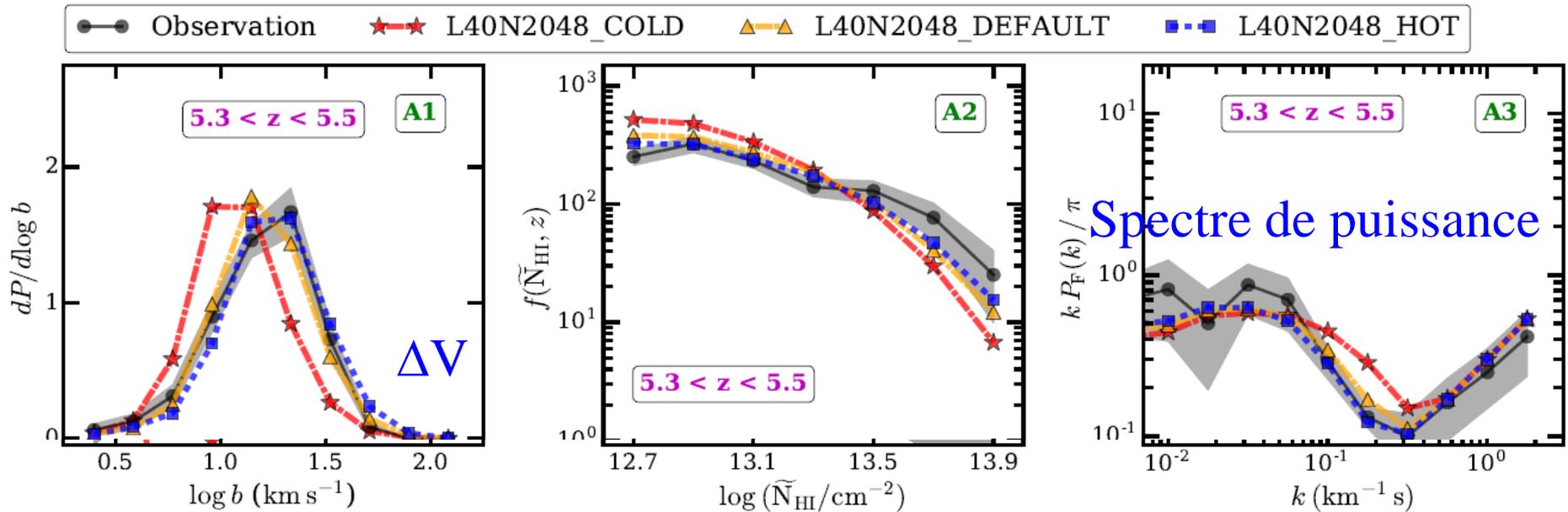
Gaz froid  $\gamma = 1.22$   
Gaz chaud  $\gamma = 1.92$

ATON= transfert de  
Rayonnement  
 $\gamma = 0.95 - 1.5$   
Gaz très inhomogène  
(Patchy)  $\gamma = 0.95 - 1.5$

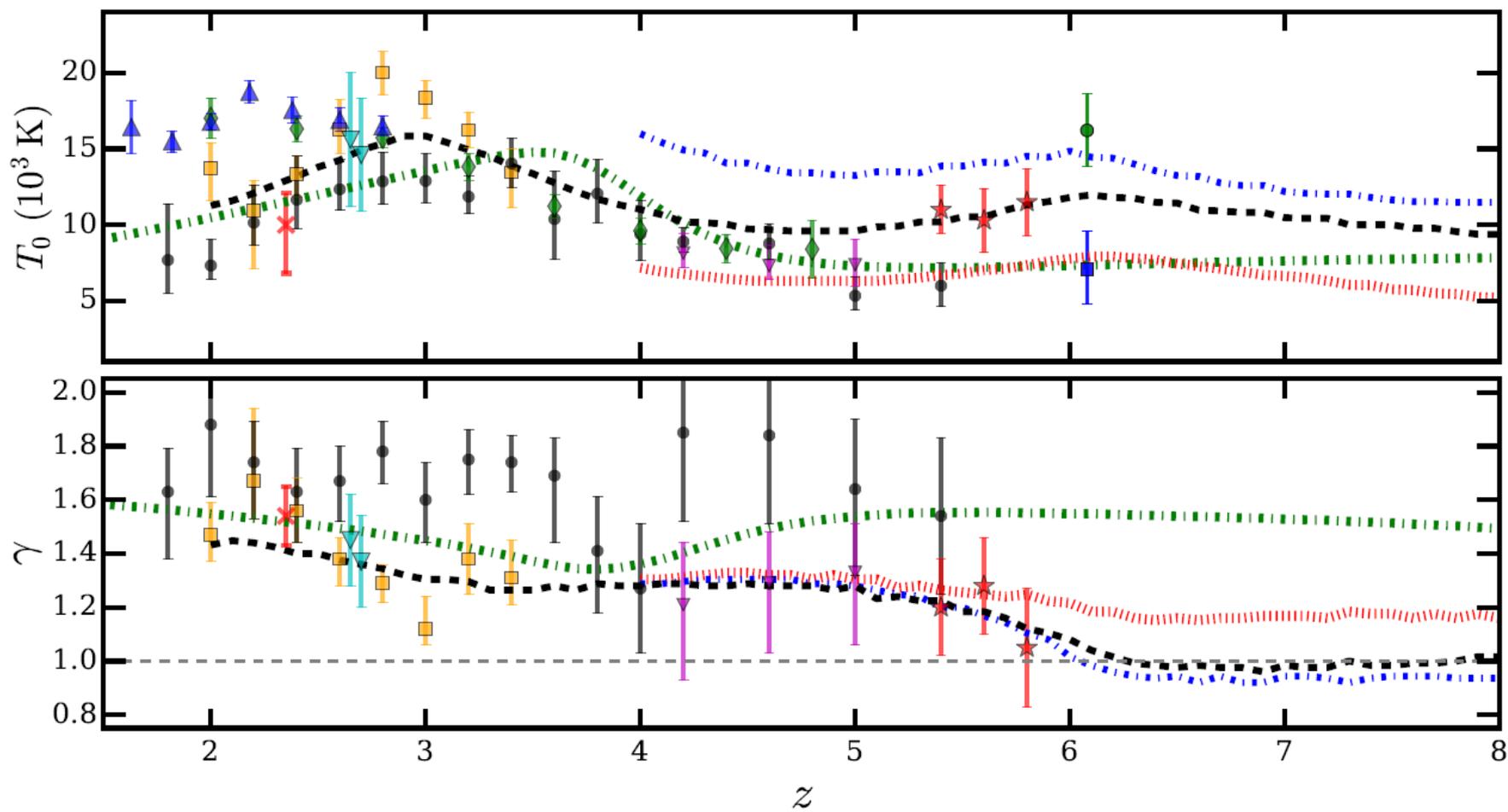
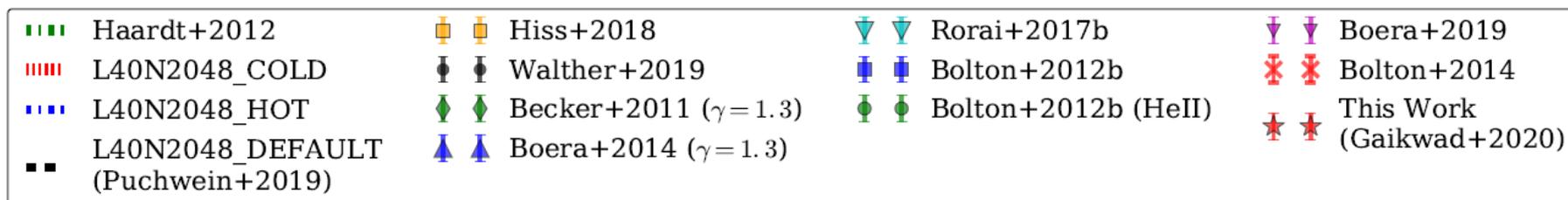


# Comparaison modèles-observations

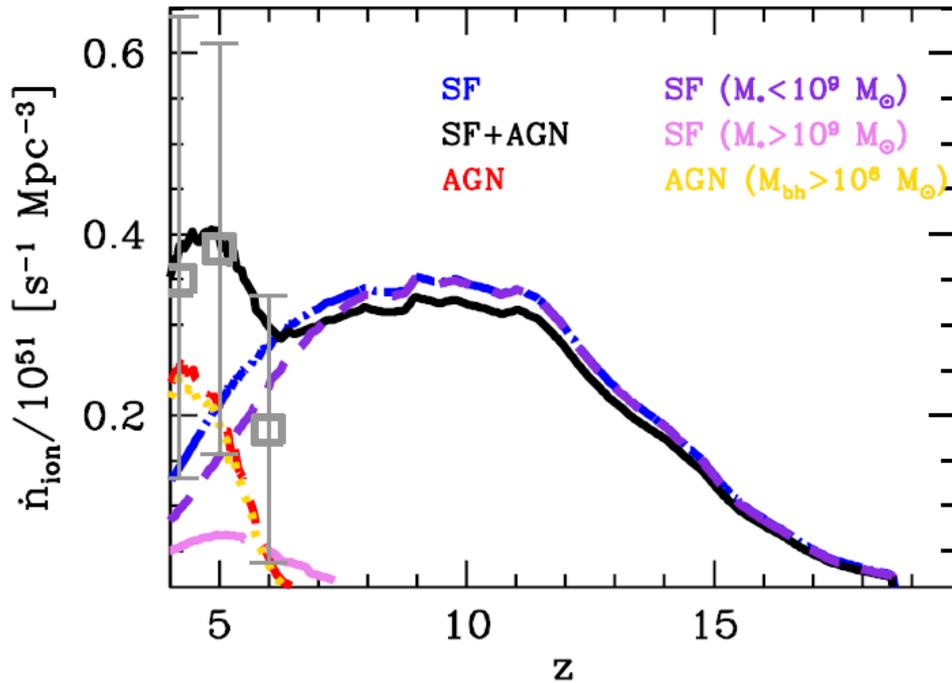
froid (rouge), intermédiaire (orange) et chaud (bleu)



Meilleur modèle: chaud  $T=11\,000\text{ K}$ ,  $\gamma=1.2_{\pm 0.18}$   
Surtout largeur en vitesse des transmissions



# Prédictions de la formation d'étoiles (z)



Modèle semi-analytique:  
Arbre de fusion, avec trou noir  
stellaire et à effondrement direct

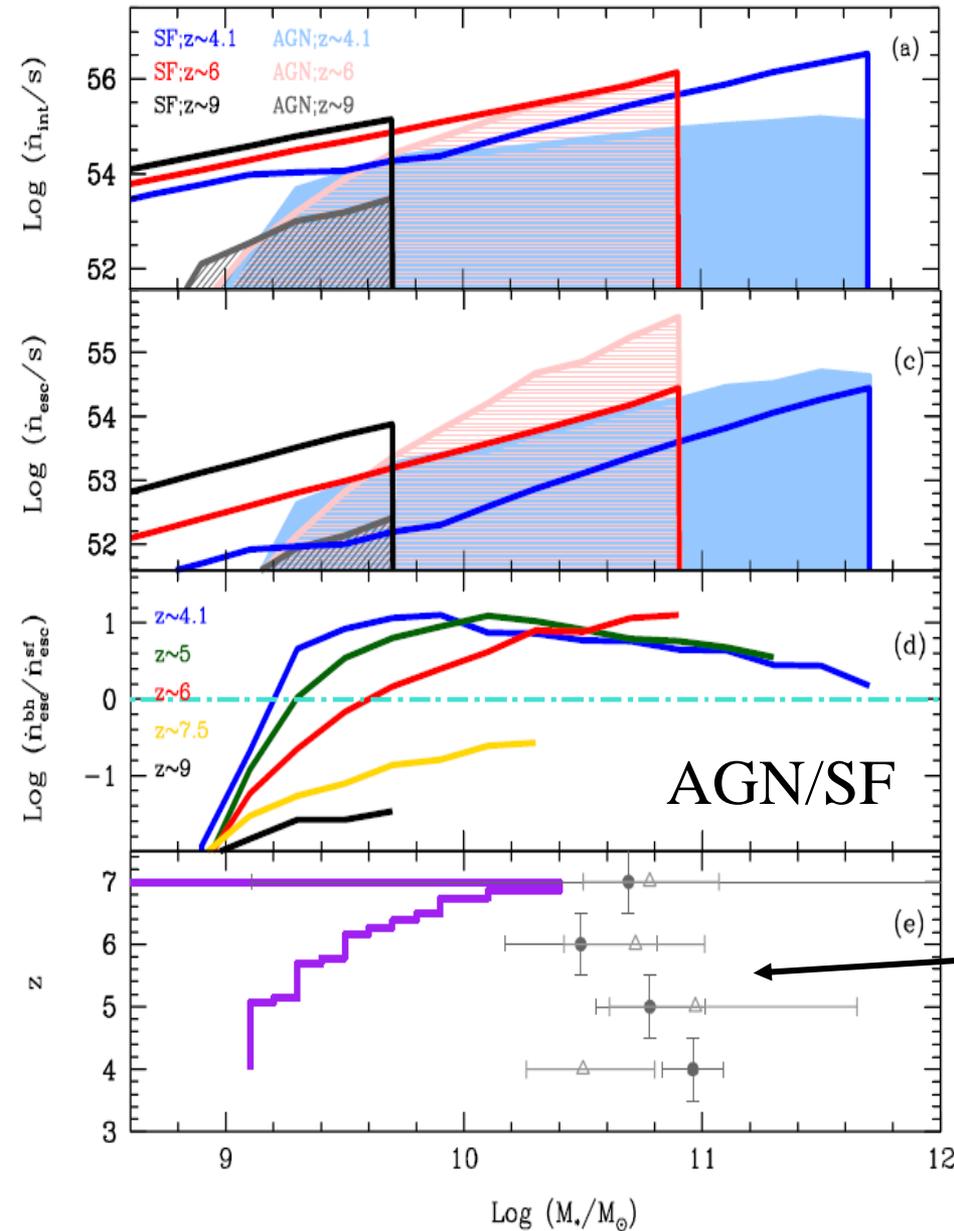
Alimentation dépendant de  $M_h$

→ A grand  $z$ , très peu d'AGN

Calcul de  $f_{\text{esc}}$  pour les AGN, basé sur l'observation des rayons X  
Pour les étoiles  $f_{\text{esc}} = f_0 (1+z)^\beta$   $\beta > 1$  calé sur les observations

**Contraintes:**  $\tau_e$  (CMB), LAE, forêt Ly $\alpha$ , UVB

# Photons qui s'échappent



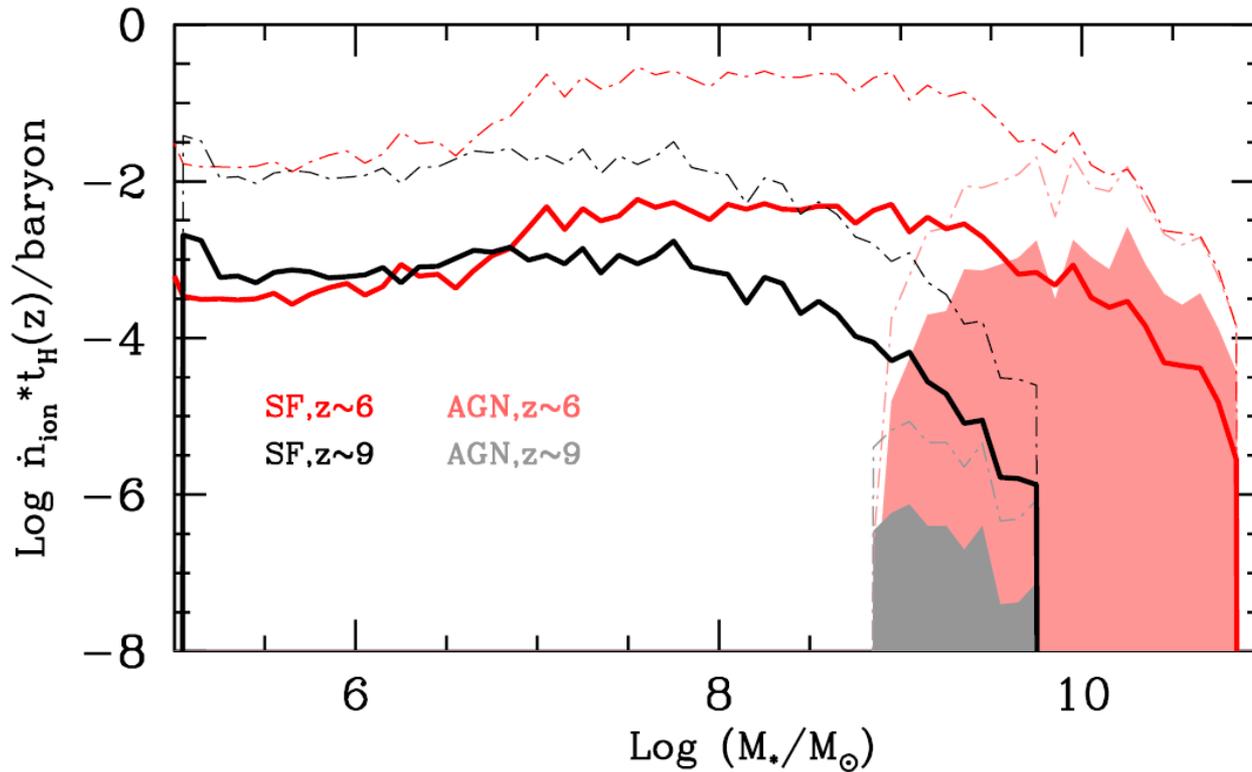
La production de photons ionisants croît avec la masse stellaire (SF et AGN)

La formation d'étoiles domine sur les AGN à tous les z

Mais  $f_{\text{esc}}$  est inférieure pour SF → les AGN ionisent plus à z~6 et pour les  $M_*$  intermédiaires

Coude  $M_c$  de la fonction de masse  $F(M) \propto M^{-\alpha} \exp^{-M/M_c}$

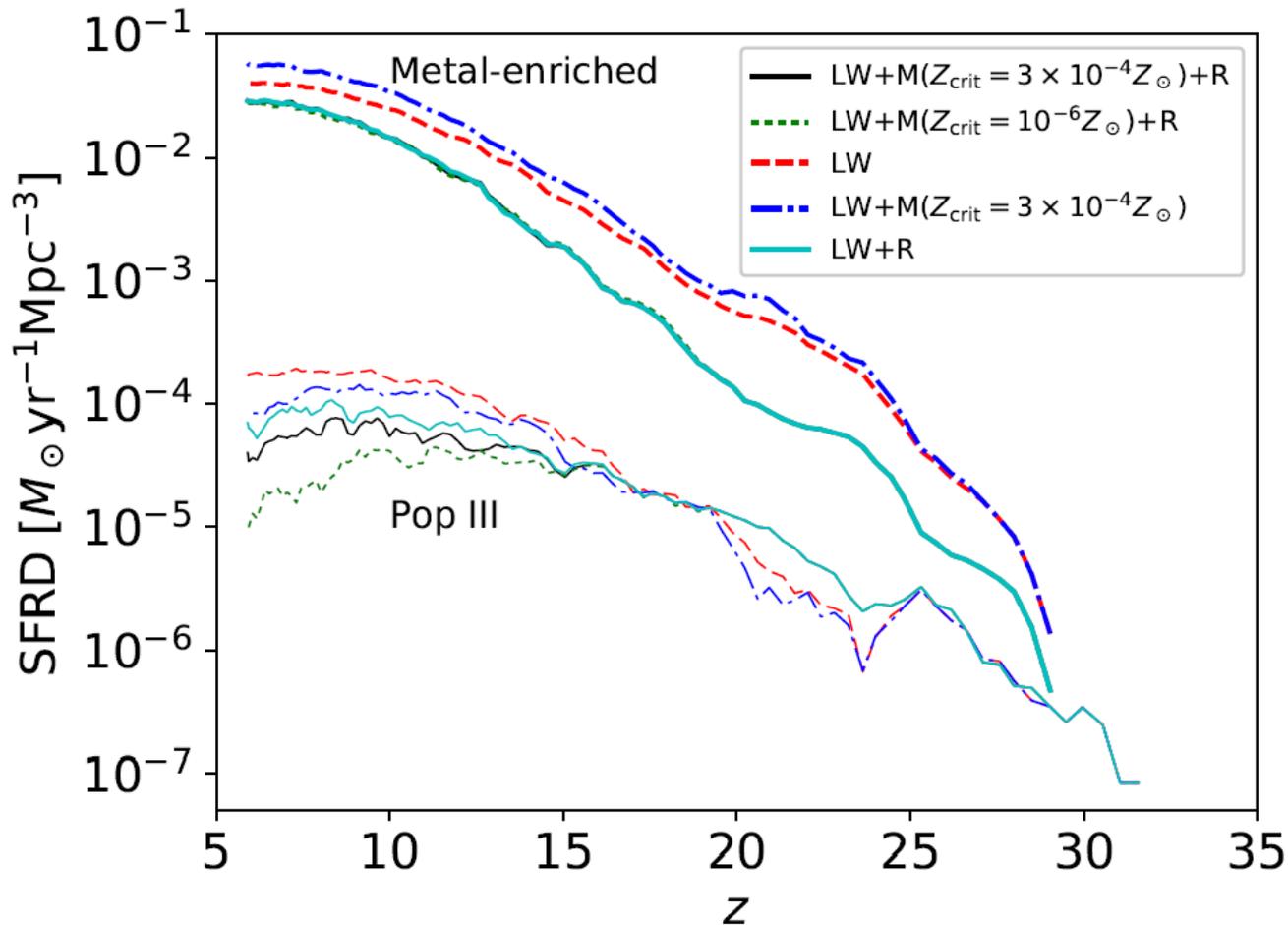
# Efficacité pour ioniser



JWST pourra  
confirmer ces  
prédictions

La contribution des AGN ne domine pas en général, mais il existe une époque ( $z=6$ ) où à grande masse, ils dominent  
Globalement la SF dans les petites masses  $< 10^9 M_{\odot}$  domine  
AGN= jusqu'à  $z=6$  1%, à  $z=4$  10-20% de toute la réionisation

# PopIII non dominantes



JWST pourra-t-il voir les PopIII?

Transfert Radiatif, bandes LW de  $\text{H}_2$ , dispersion des métaux  
La SF est retardée par le feedback, la réionisation inhomogène  
➔ Les métaux ont le temps de se disperser

# PopIII explosent en SN à production de paires

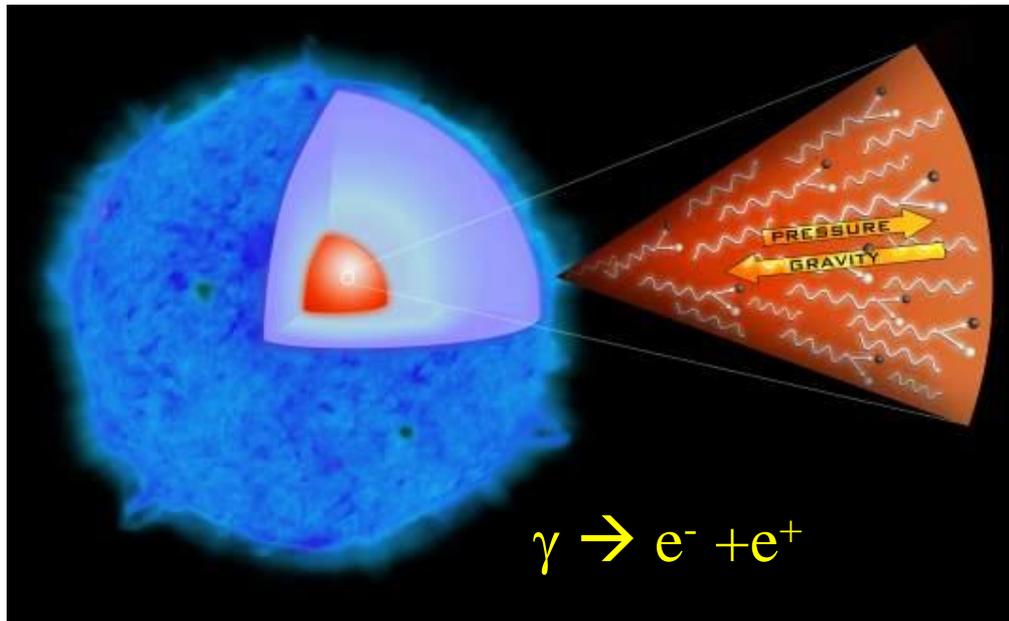
Pourrait être la première observation d'une instabilité de production de paires → mort d'une étoile très massive.

Equilibre entre pression lumineuse et gravité

Les rayons gamma produisent des paires électron / positron

→ Pression réduite

L'instabilité crée un effondrement incontrôlable



**PISN=Pair-Instability SN**

Surtout visible en NIR

Quques analogues proches détectées?

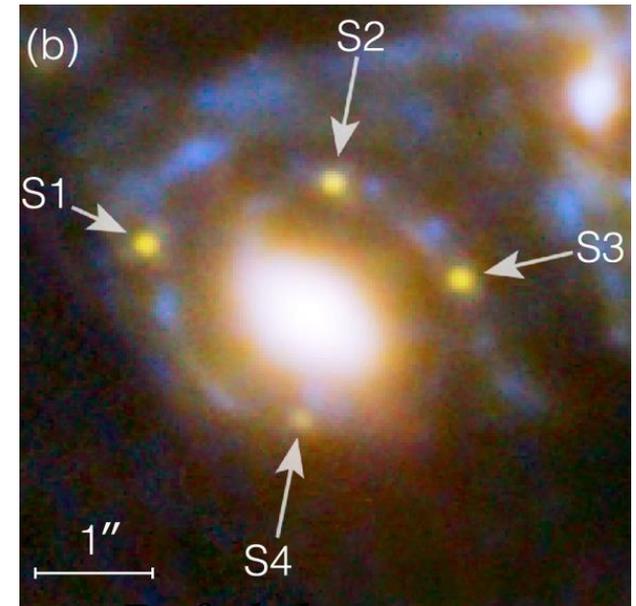
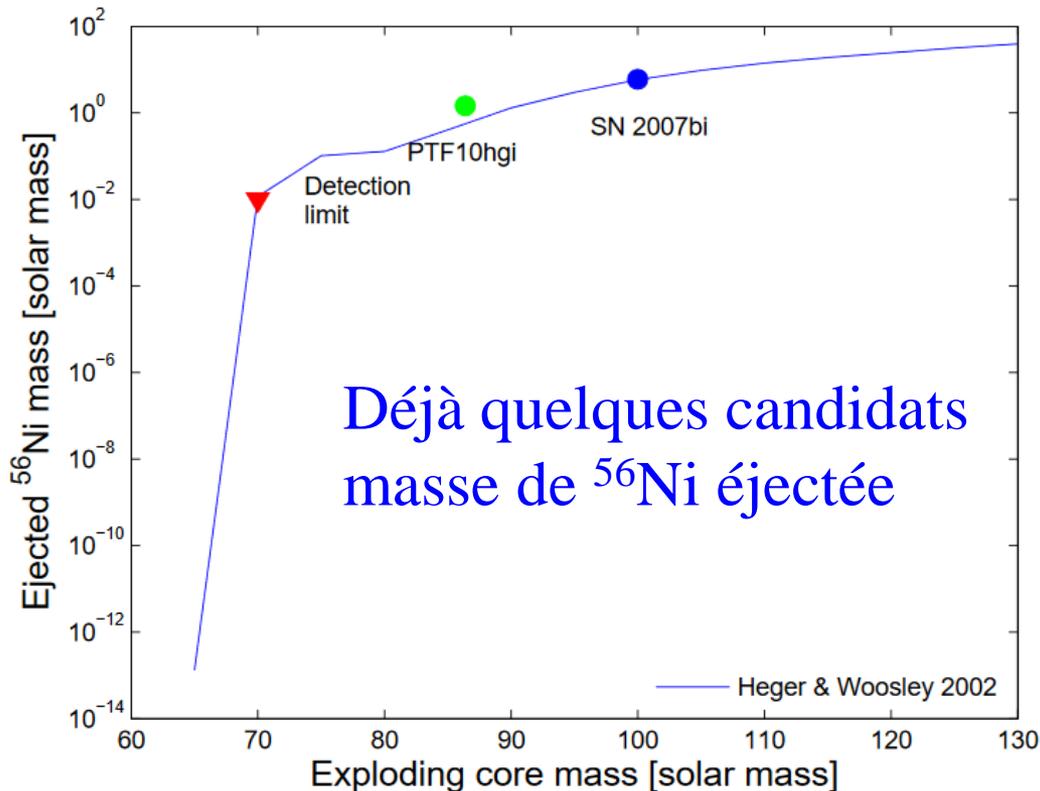
# Combien d'explosions de PISN?

En utilisant les lentilles gravitationnelles

Avec les futurs instruments, il sera possible de détecter

~15-20 PISN derrière les amas de galaxies proches à  $z > 5$

Et quelques unités jusqu'à  $z \sim 10$  (survey de  $1 \text{ deg}^2$ , 5 ans, Wong+19)

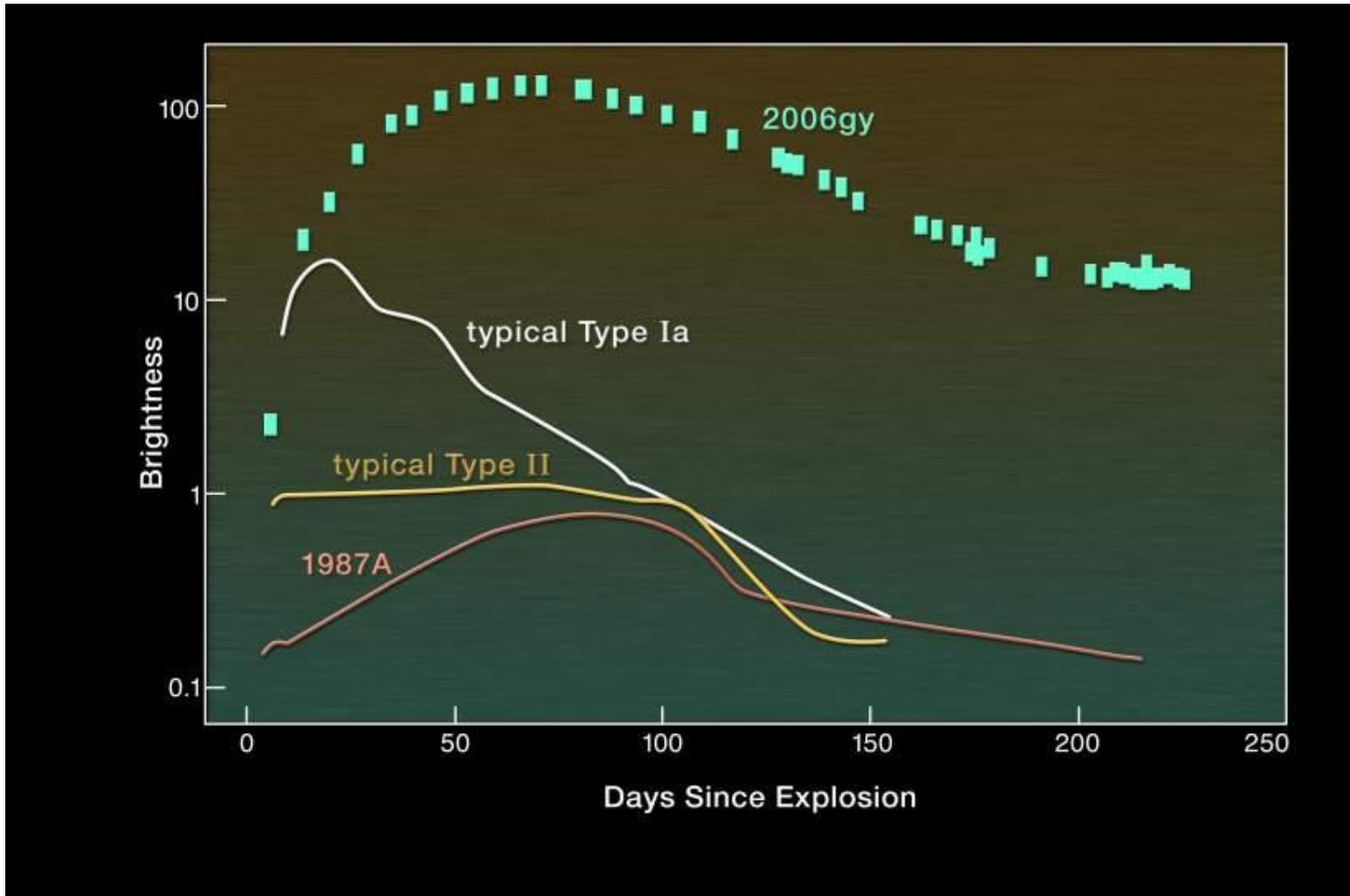


*Refsdal supernova*

*Gal-Yam 2012*

# Comparaison avec les autres supernovae

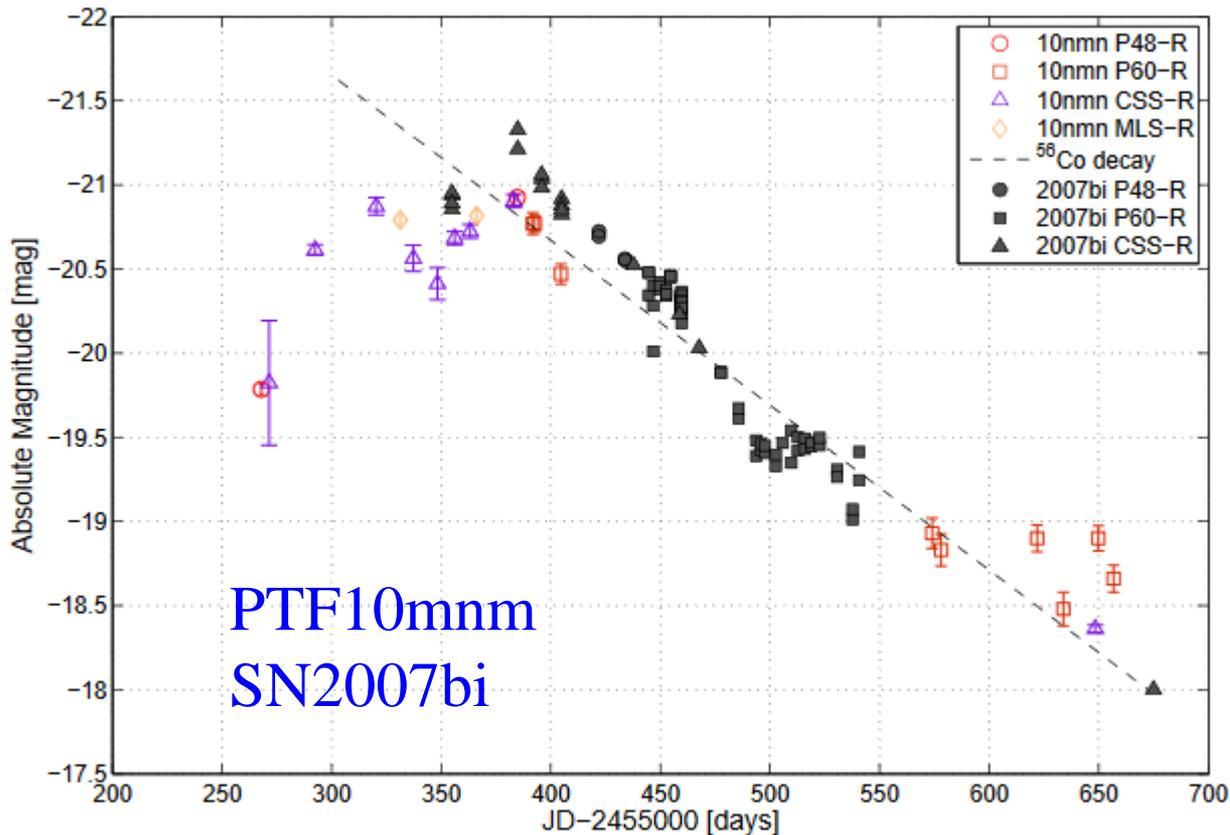
Plus d'énergie, plus de durée (1 an au lieu de 2-3 mois)



# Les plus massives connues

Courbe de lumière en  $\sim 360j$  (12 mois)  
100x puissance d'une SNII ordinaire

$$E_{\text{kin}} = 10^{53} \text{ergs}$$
$$E_{\text{lum}} > 10^{51} \text{ergs}$$



PTF Palomar  
Transient Factory



ZTF Zwicky  
Transient Facility  
→ LSST Vera Rubin

# SPICA: télescope spatial infrarouge

**SAFARI:** spectro 35-230  $\mu\text{m}$  (3'' à 35 $\mu\text{m}$ )

**SMI:** spectro-photomètre 17-36 $\mu\text{m}$  Champ 12'x10'

**B-BOP**= B-fields with BOlometers and Polarizers 75-420 $\mu\text{m}$

Projet Japon-Europe  
2.5m refroidi à ~6K

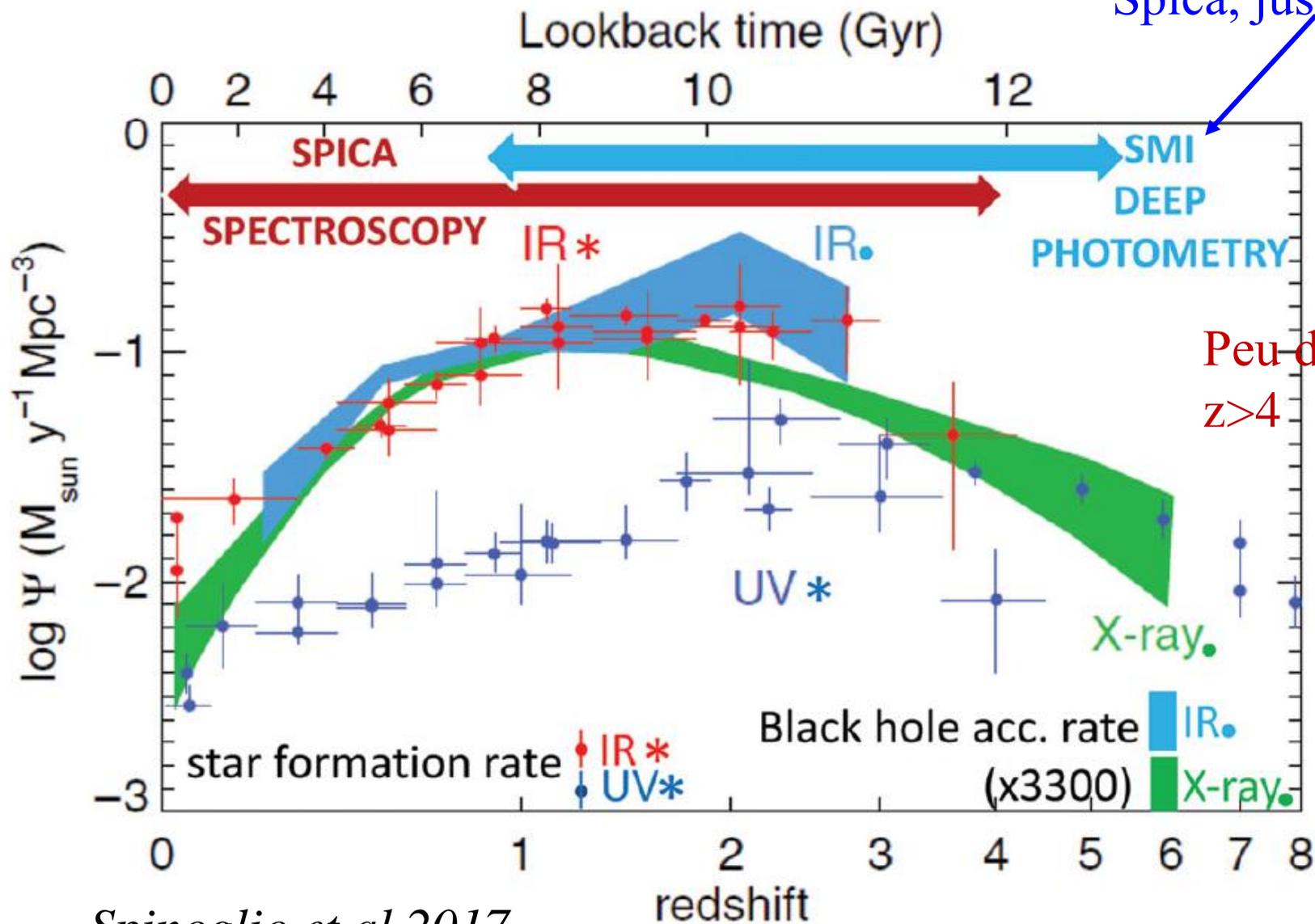
Res=300-28000

Plus grand champ de vue  
que JWST  
(0.6-28 $\mu\text{m}$ )



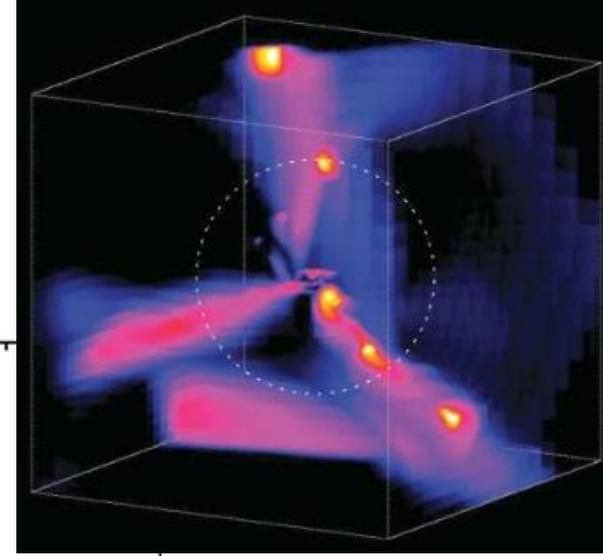
# Que va observer SPICA?

Photométrie avec Spica, jusqu'à  $z=6$

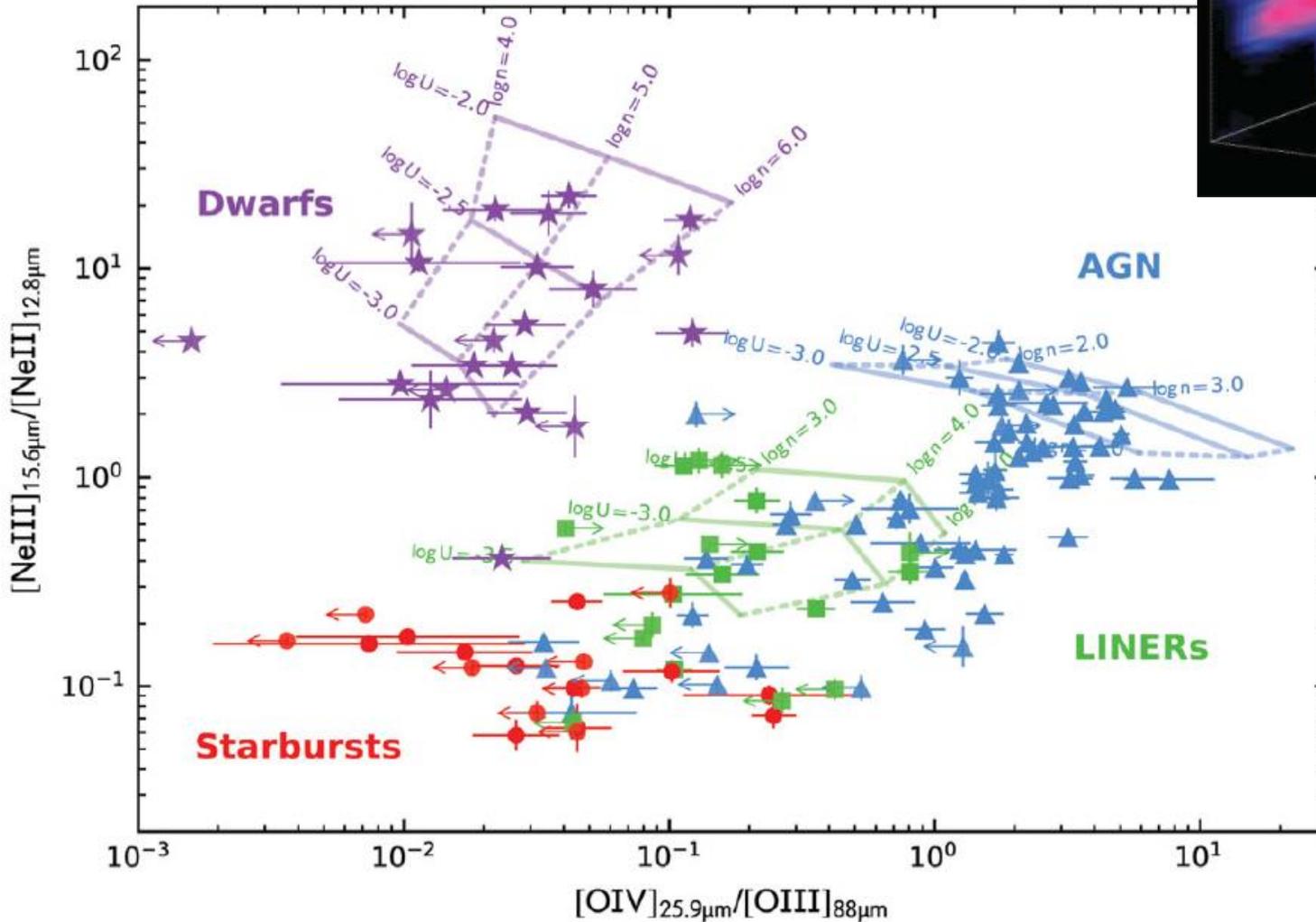


# Diagnostics de raies

Excitation des raies: AGN, starbursts



Gaz Circum-Galactique  
**CGM**

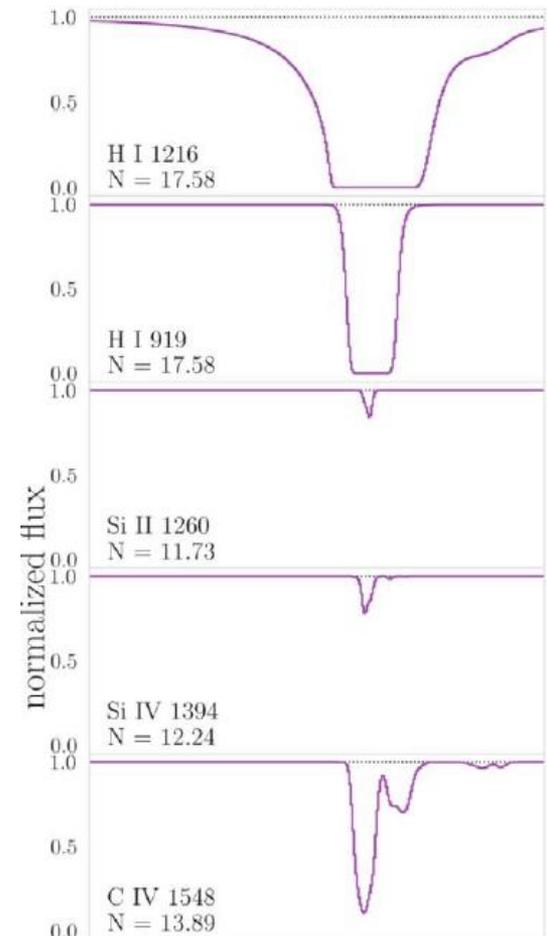
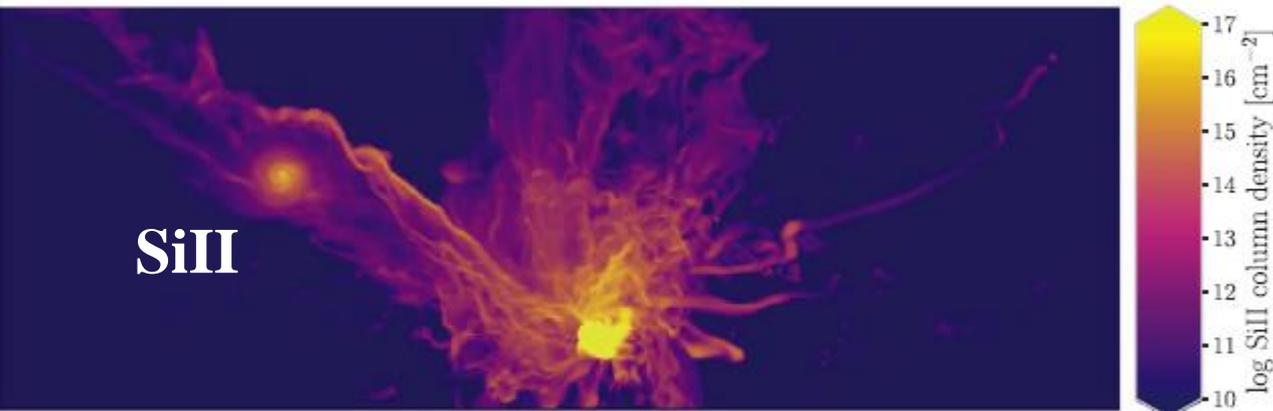


*Spinoglio et al 2017*

# Simulations du CGM

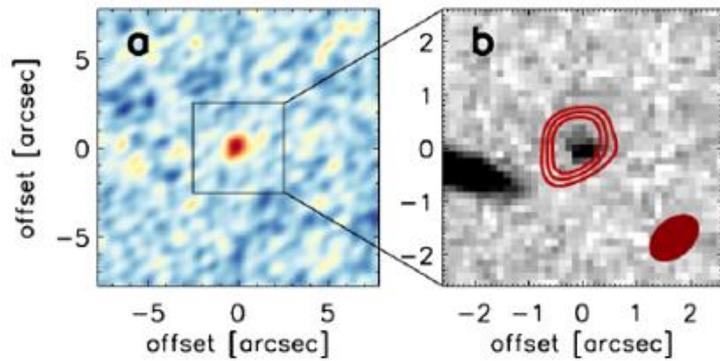
Noir/Bleu Ly-limit

Orange/rouge, DLA



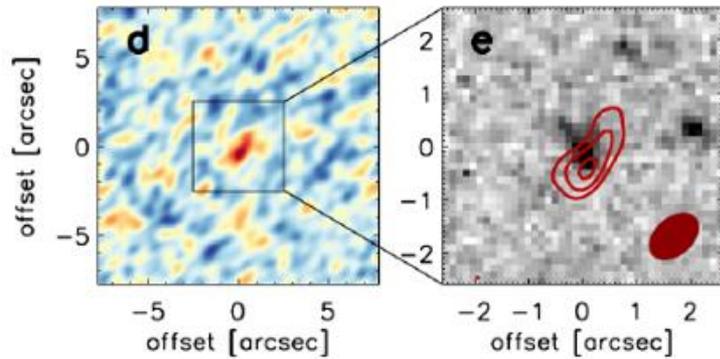
*Peeples et al 2019*

# Galaxies $z > 6$ avec ALMA

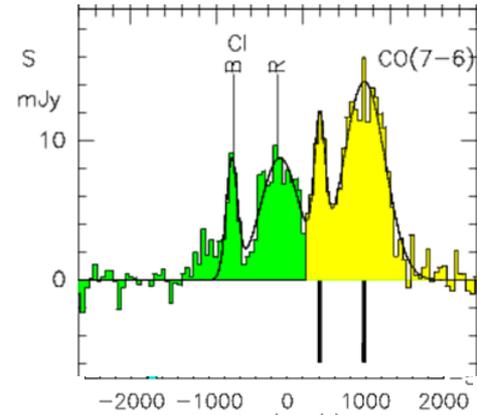


ALMA 240GHz

HST



Diverses raies de CO, CI..  
CO(7-6)  $\rightarrow$  2.6mm à  $z=6$   
Aussi CI(2-1)  
Raie de [CII] à  $158\mu\text{m}$   
 $\rightarrow$  1.1mm  $z=6$

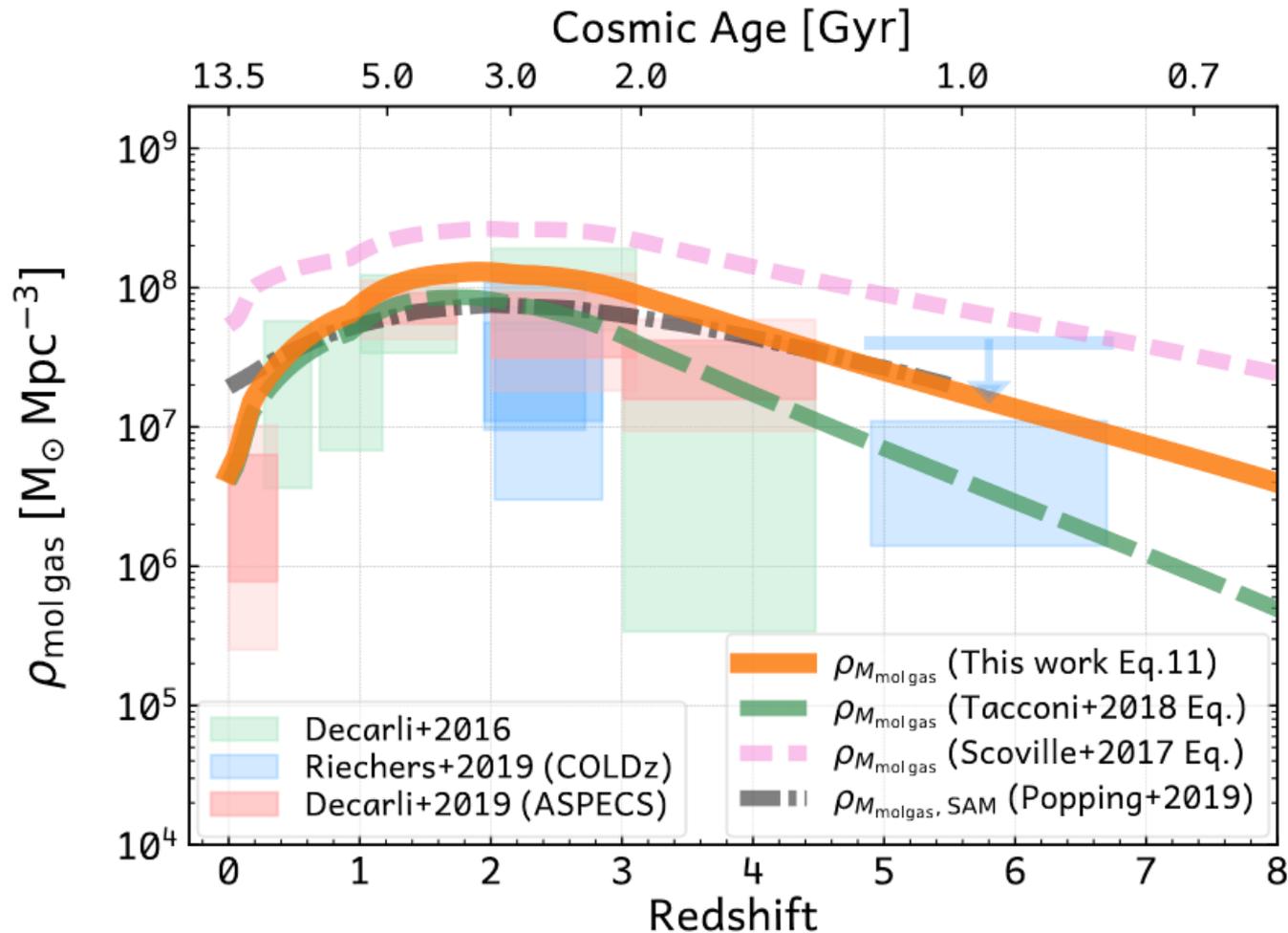


[CII] une des raies principales pour refroidir ISM



# Evolution cosmique de H<sub>2</sub>

Observations profondes de HDF-N, 3mm, *Decarli et al 2014, 16*  
A<sup>3</sup>Cosmos, compilation ALMA, *Liu et al 2019*



Liu 2019

Comparaison avec les modèles semi-analytiques (Popping 2019)

# Réionisation avec SKA

Aujourd'hui précurseurs  
LoFAR, NenuFAR, HERA  
MWA



SKA opérationnel à partir de 2028

**Comment l'Univers est ré-ionisé?**

Fin de l'âge sombre: aube cosmique



**Comment s'assemblent les structures?**

Formation et évolution des galaxies

Histoire de la formation d'étoiles



**Nature de l'énergie sombre**

# Re-déploiement 2015

Le coût de SKA ~1 milliard euros

En 2014, le Conseil de SKA  
met une limite à **650 Meuros**

- Retardant le SKA1-survey
- Reduisant SKA1-mid à 70%
- Reduisant SKA1-low à 50%

Nouvelle science: 2000 pages, 135 chapitres, publié en 2015

**Organisations de 13 pays sont membres**

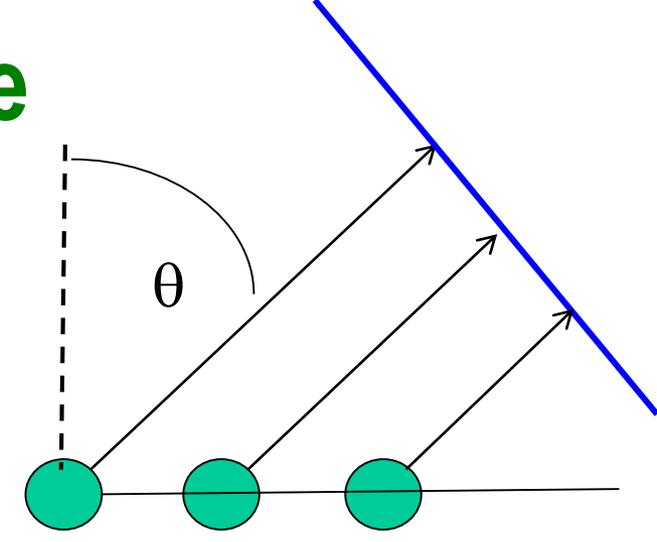
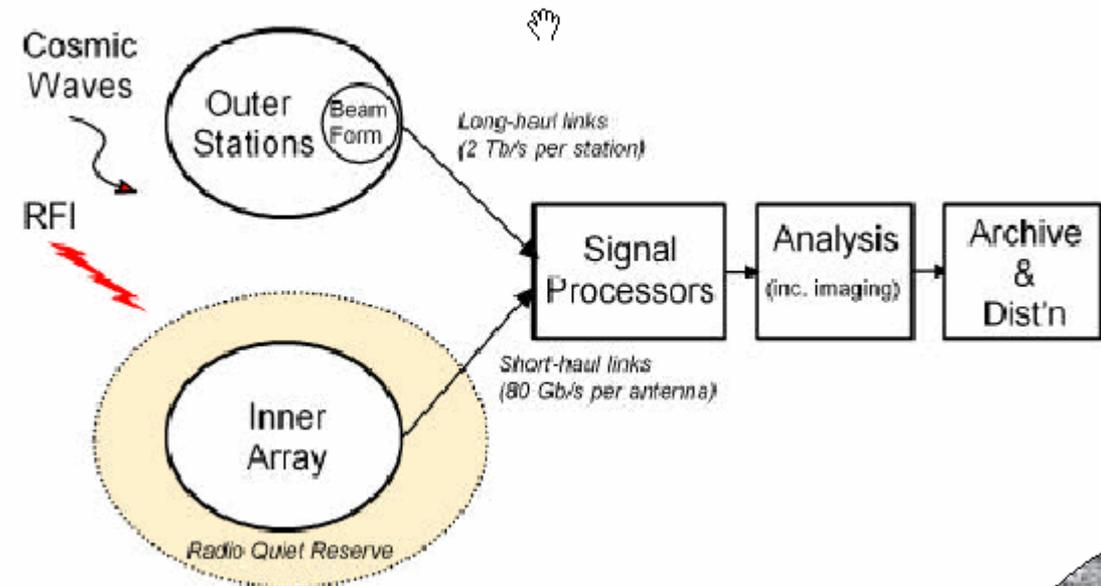
de SKAO – Australia, Canada, China, France, Germany, India, Italy,  
New Zealand, South Africa, Spain, Sweden, the Netherlands, UK  
**40% de la population mondiale!**



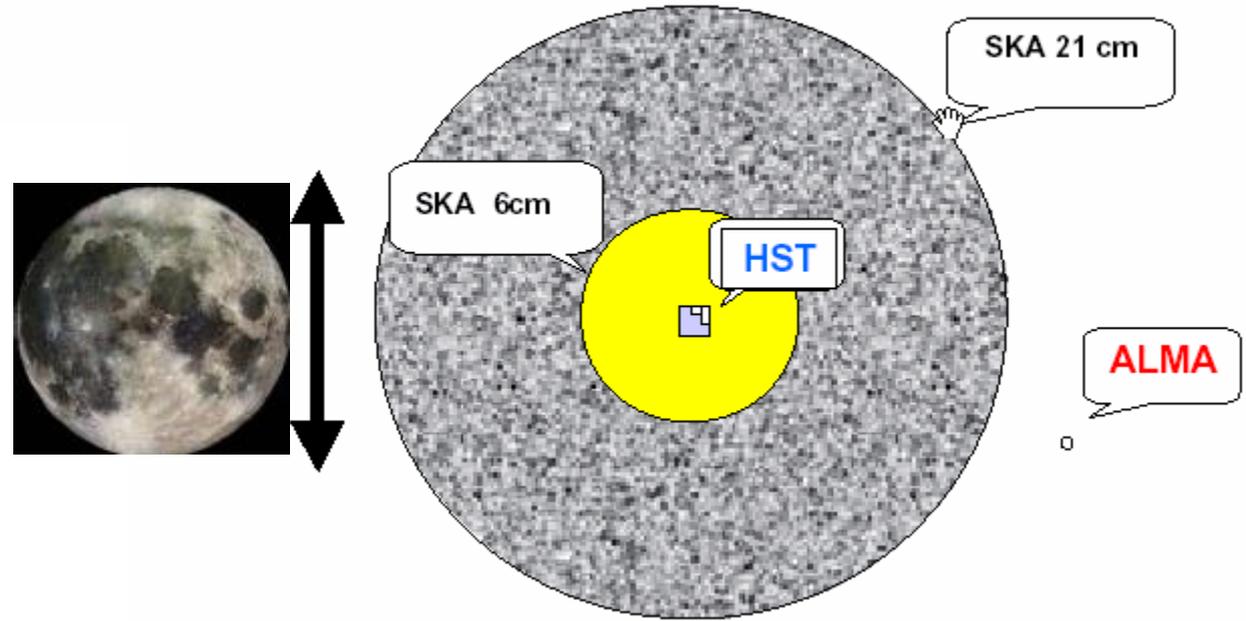
**2017: Départ sur de  
nouvelles bases**



# Champ de vue



Au moins 1 degré<sup>2</sup>  
But 50-100 degré<sup>2</sup>



# SKA1-Low

50-350 MHz ( $\Delta\nu = 300\text{MHz}$ )

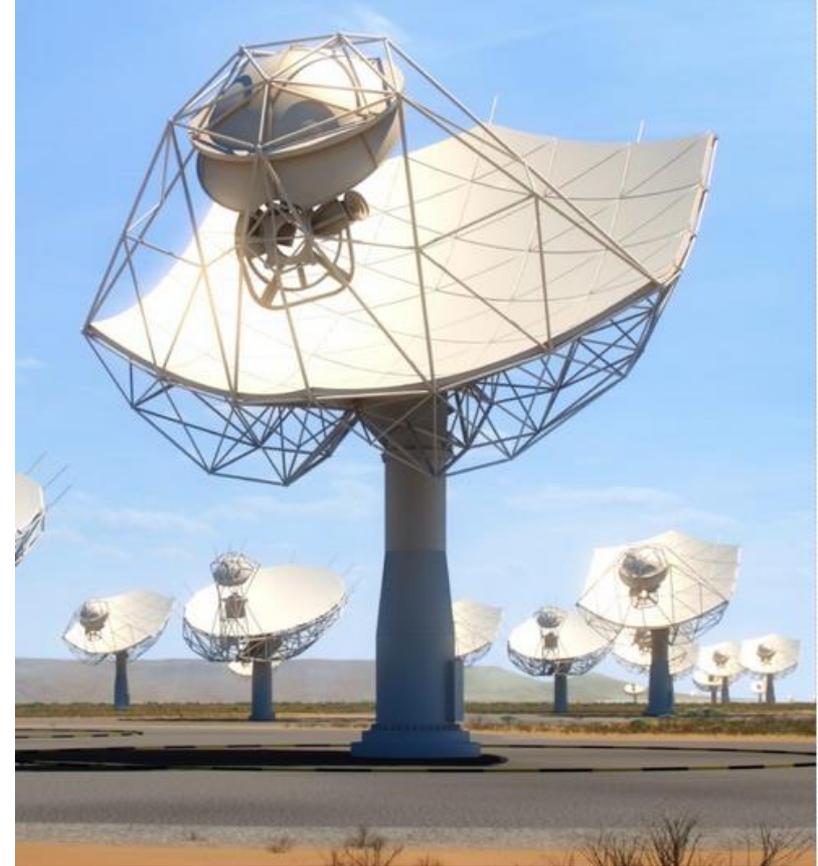
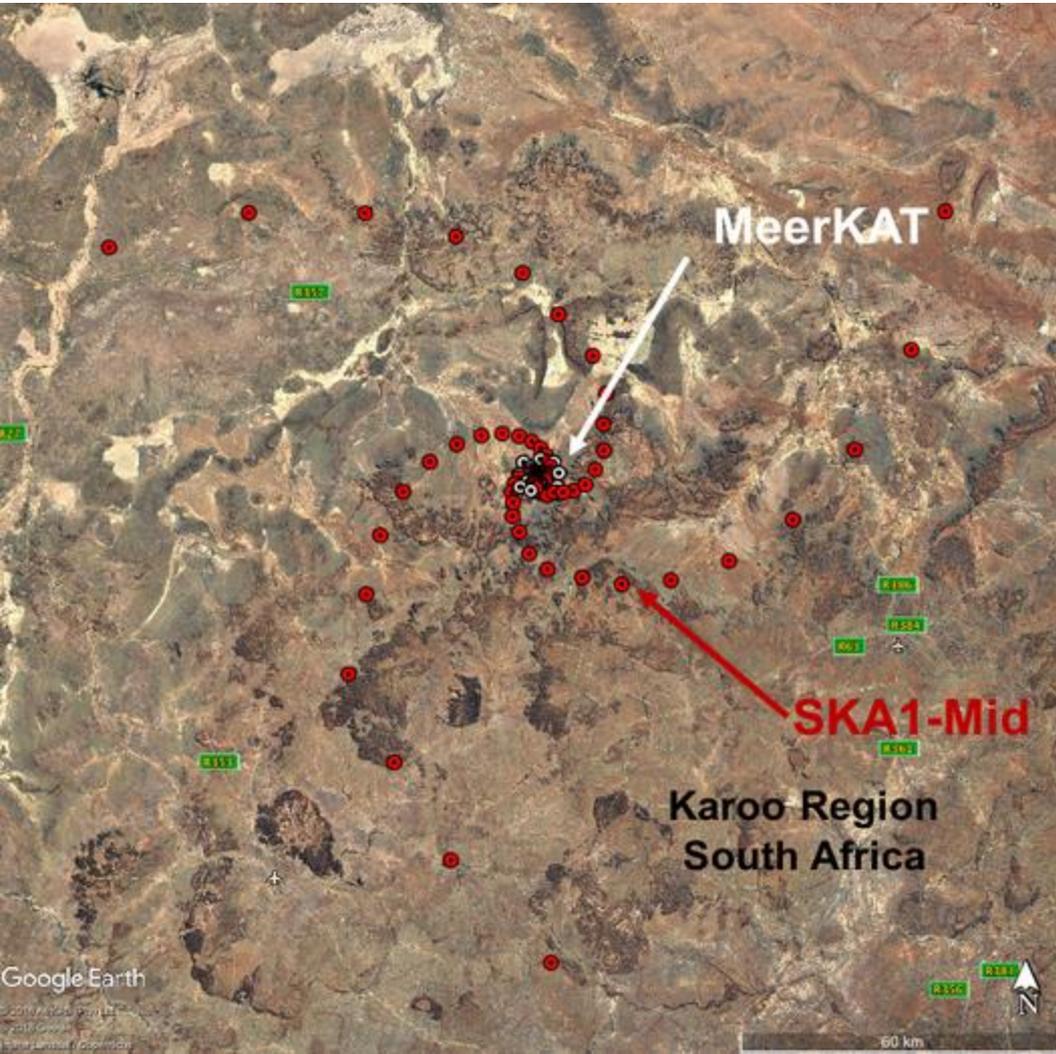


**SKA1 Low:** 130,000 dipoles,  
en 512 réseaux de 256 stations  
sur le site de Boolardy  
en **Australie de l'Ouest**  
50% dans un coeur de 1 km  
50% amas de 6 stations sur  
trois bras spiraux modifiés  
base maximum = 65 km.



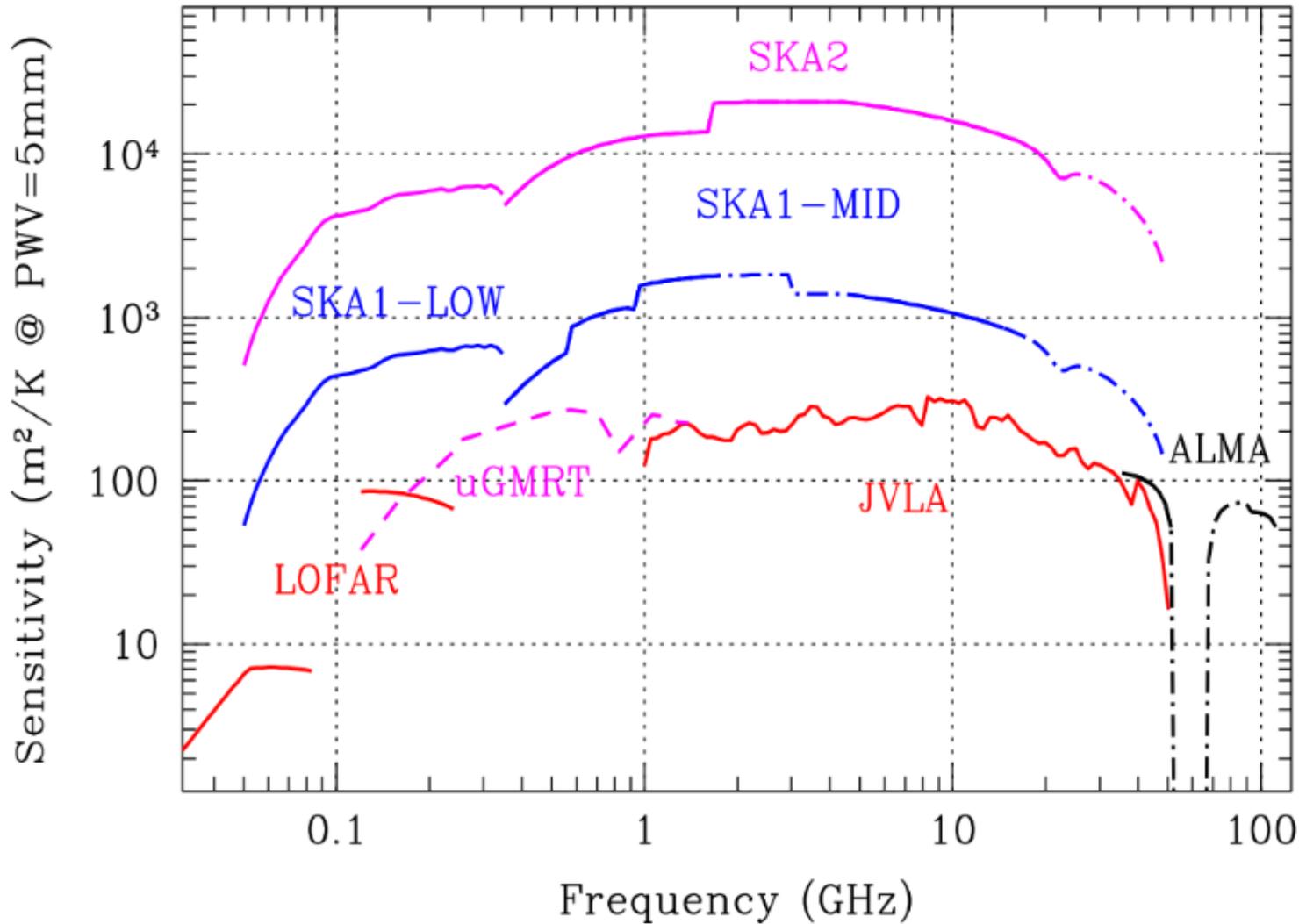
# SKA1-Mid

0.35 – 24 GHz (15–24 GHz 2<sup>ème</sup> phase)

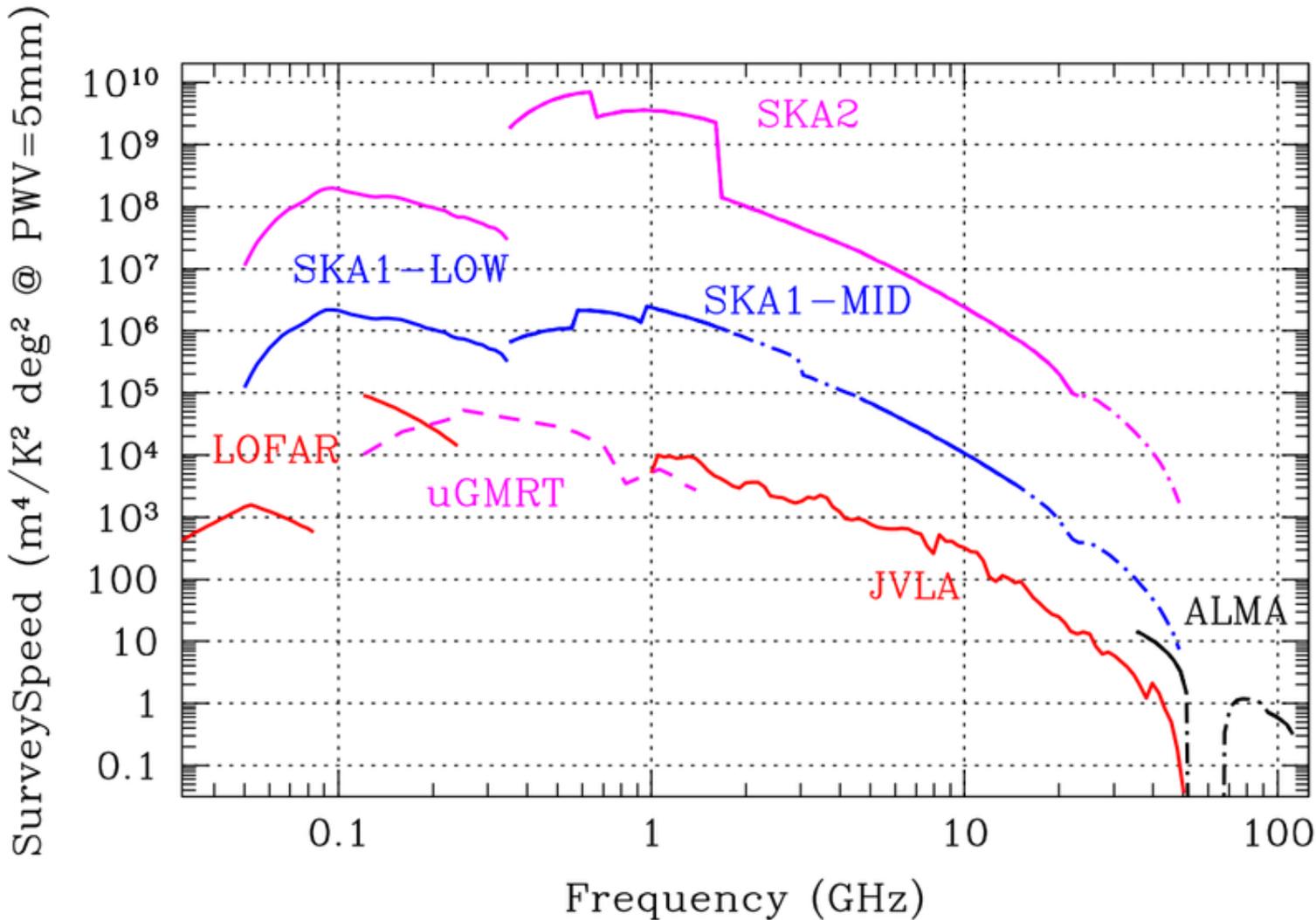


**SKA1-Mid:** 133 antennes x15m  
+64 x13.5m Meerkat  
Karoo site **en Afrique du Sud**  
50% dans coeur, aléatoirement  
distribuées dans 2 km  
3 spirales logarithmiques  
Base maximum = 150 km

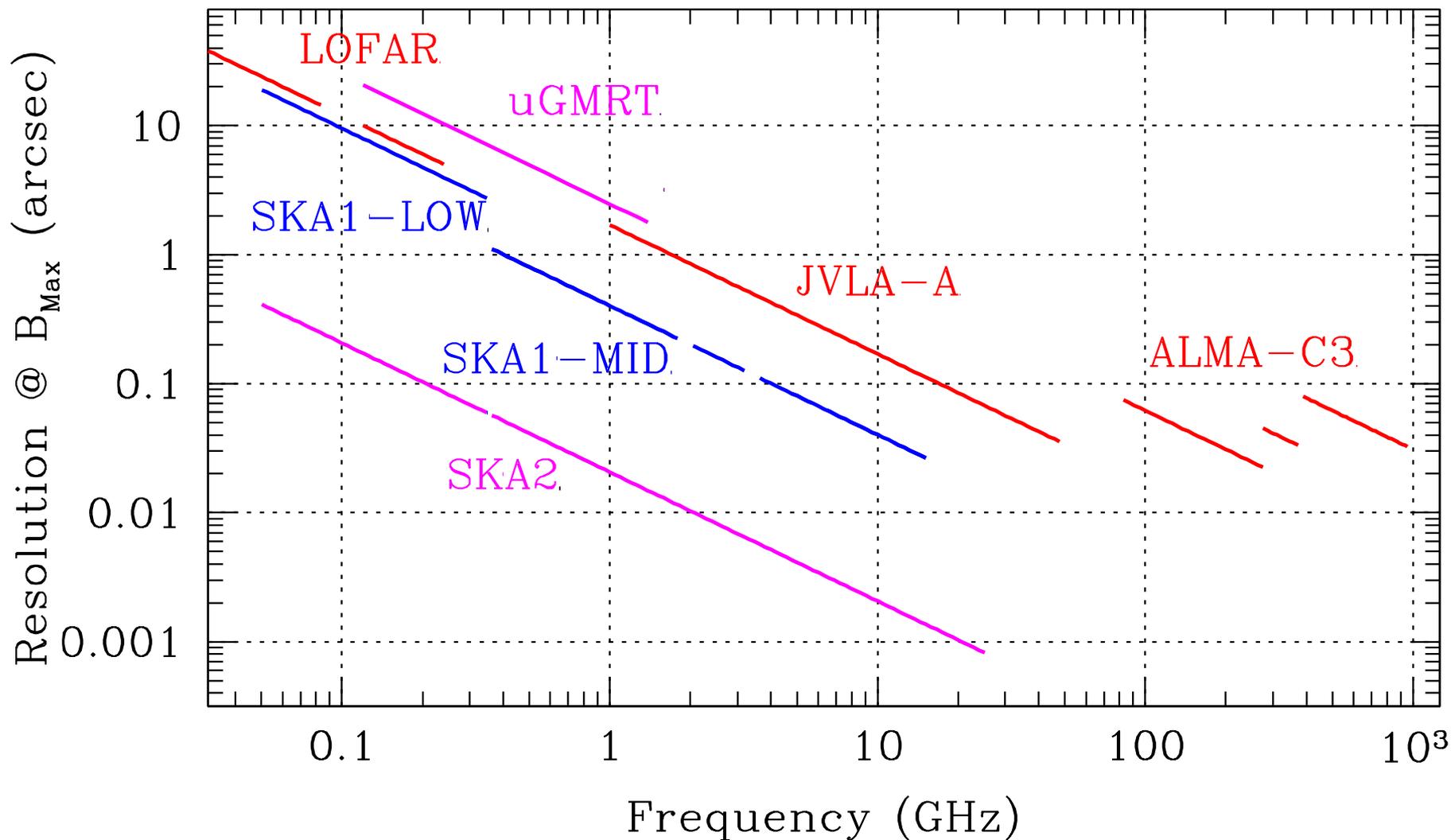
# Comparaison des sensibilités



# Comparaison des vitesses de survey



# Comparaison des résolutions



# Accélération de l'Univers: SNIa, CMB, BAO

Echantillon « Panthéon » 1048 SN

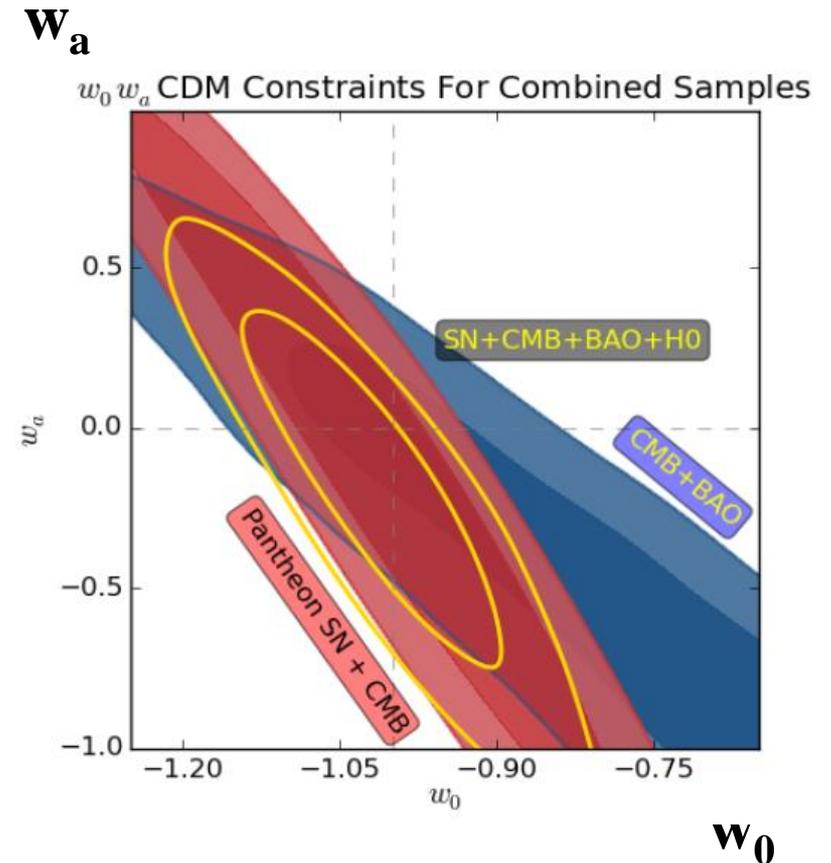
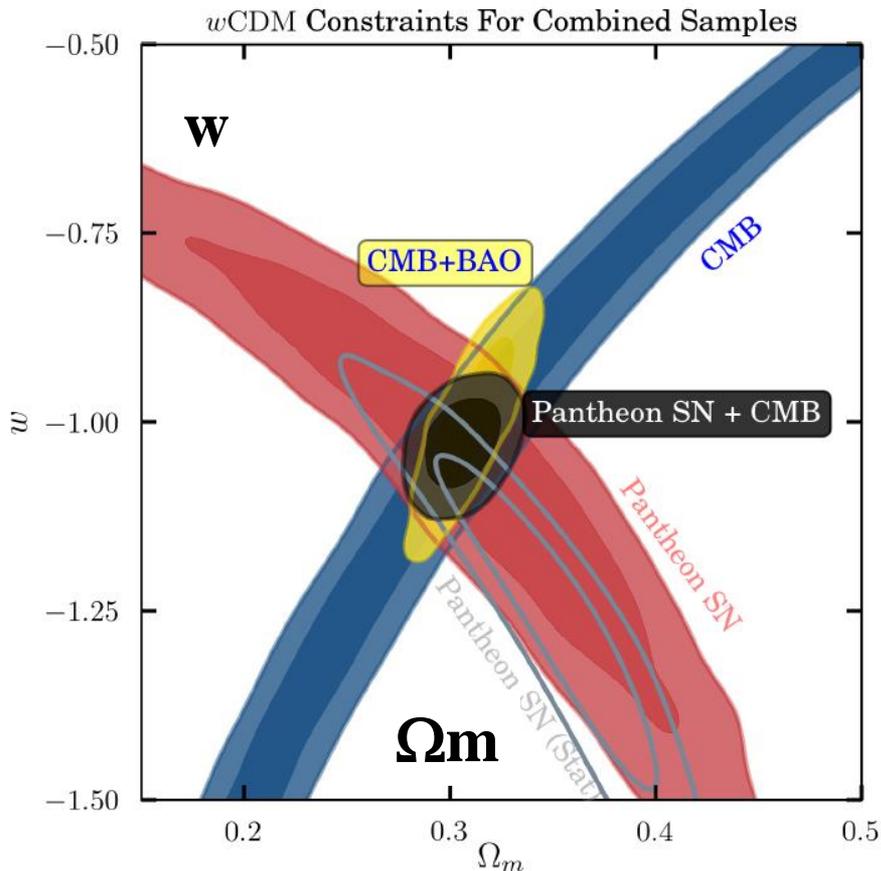
$0.01 < z < 2.3$

*Scolnic et al 2018*

$$P = w \rho \quad w(a) = w_0 + w_a (1-a)$$

avec  $a = 1/(1+z)$

$$\Omega_m = 0.307 \pm 0.012 \quad w = -1.026 \pm 0.041$$





# Energie noire: état actuel

**Modèle de concordance**, entre CMB, Supernovae Ia, Structures à grande échelle (LSS) (weak lensing, BAO= Baryonic Oscillations)

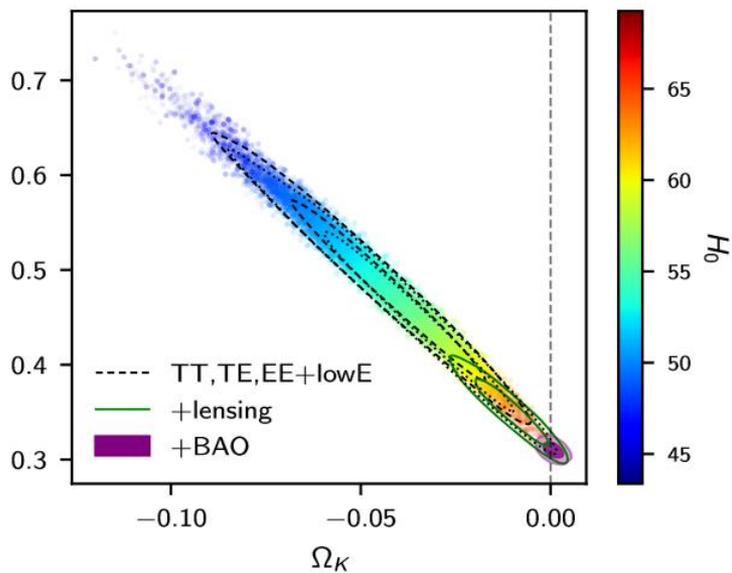
Planck 2019

$w_0 \sim -1$   
 $w_a \sim 0$

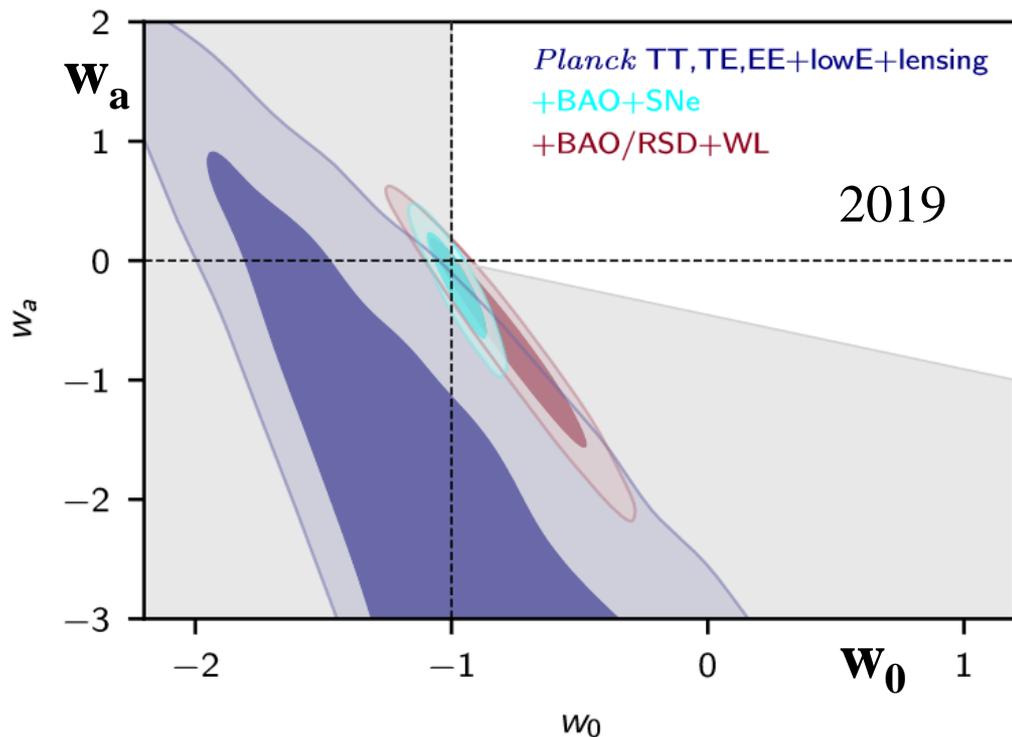
$$P = w \rho$$

$$w(a) = w_0 + w_a (1-a)$$

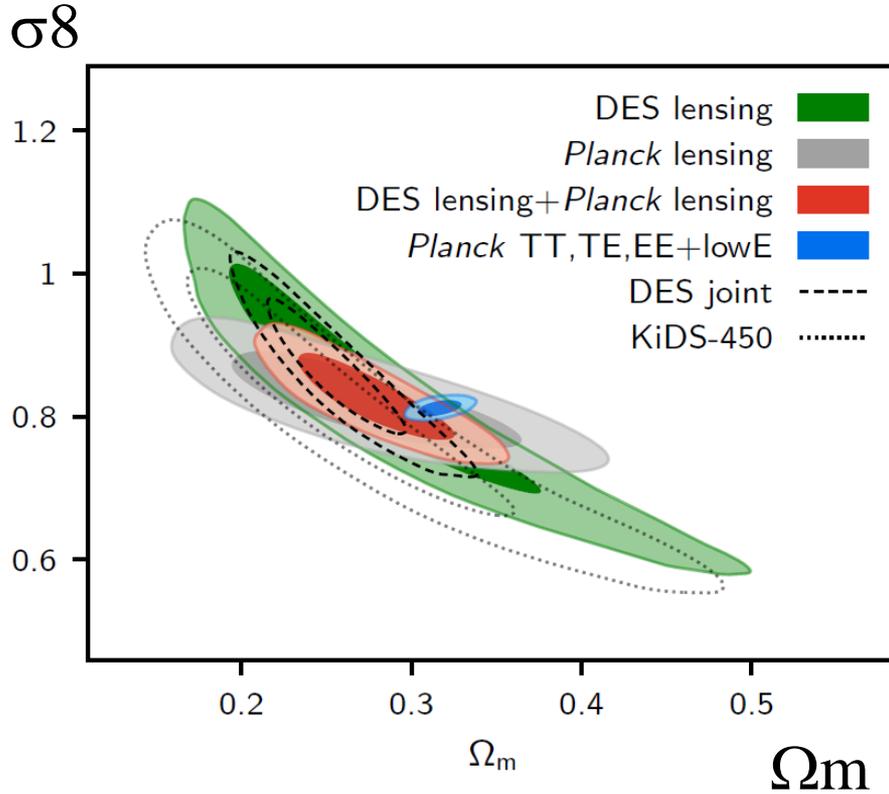
$\Omega_m$



$\Omega_K$



# Contraintes actuelles: Planck + surveys



BAO+SNIa  
 +DES, lensing  
 LSS

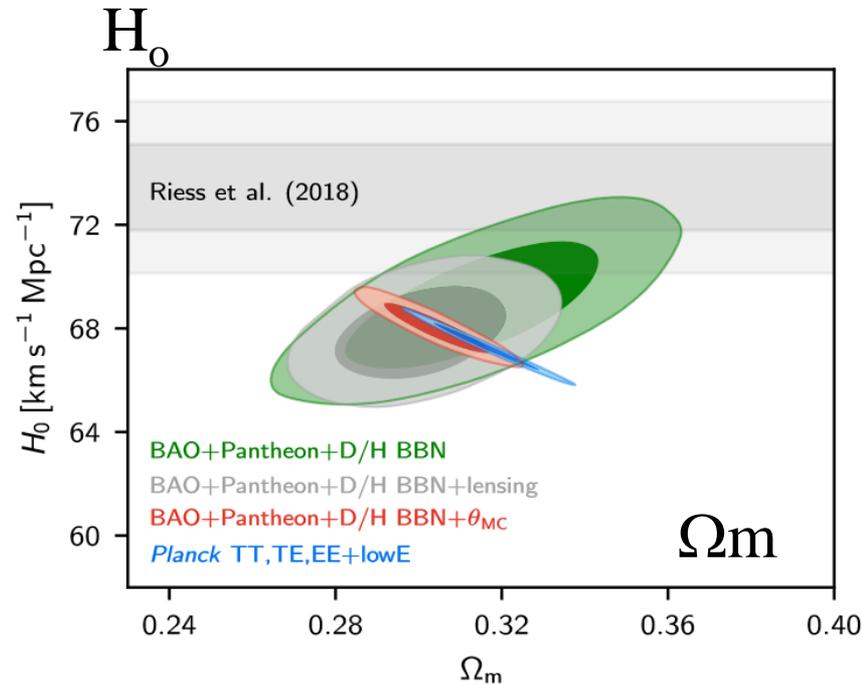
$A_{lens}$  anormal  $> 1$

Planck 2019

Tension sur  $H_0$

$H_0 = 74.03 \pm 1.42$  km/s/Mpc (Riess19)

Differences % Planck 6.6 km/s/Mpc  
 $4.4\sigma$



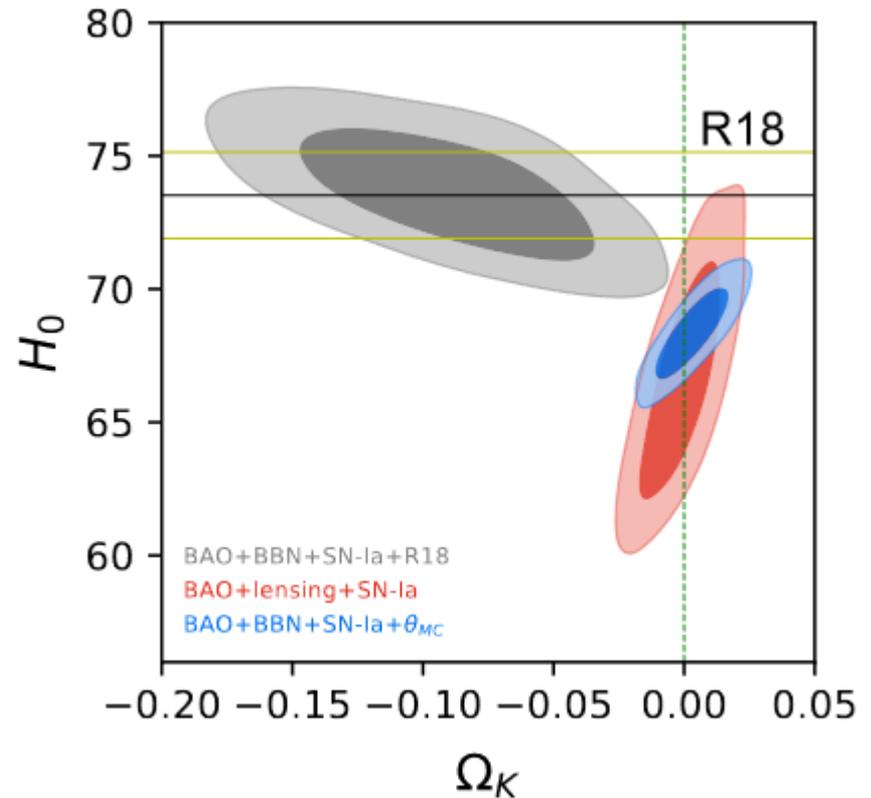
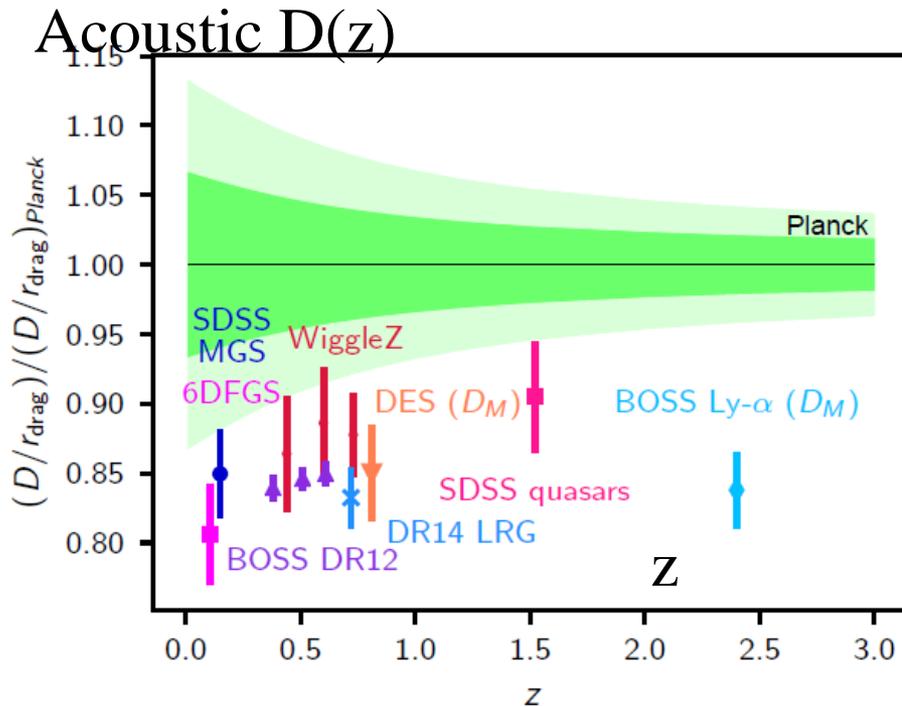
# Comment résoudre la tension $H_0$ , BAO

Faire varier la courbure?  $\rightarrow$  courbure positive

R18  
*Riess et al*  
2018

DE en interaction?

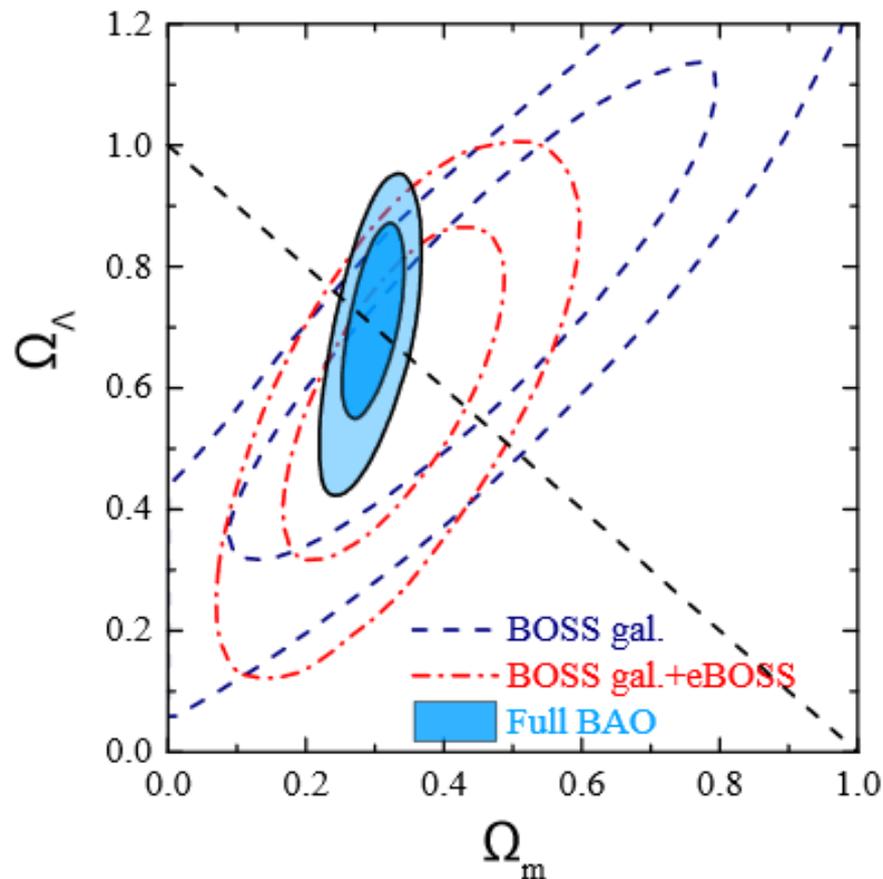
Un univers fermé?



Un grand nombre de paramètres ( $>6$ ) sont variés

*Di Valentino et al 2018, 2019*

# BAO $z=0.8-2.2$ des quasars e-BOSS (DR14 SDSS-IV)



147 000 quasars  
sur  $2040^\circ 2$

Compatible avec  $\Lambda$ CDM  
 $\Omega_m = 0.3, \Omega_\Lambda = 0.7$

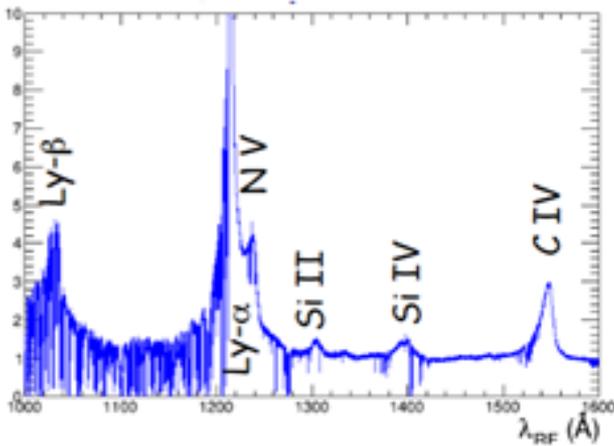
Les QSO sont de très bons  
traceurs!

Première détection  
BAO  $1 < z < 2$

*Ata et al 2018*

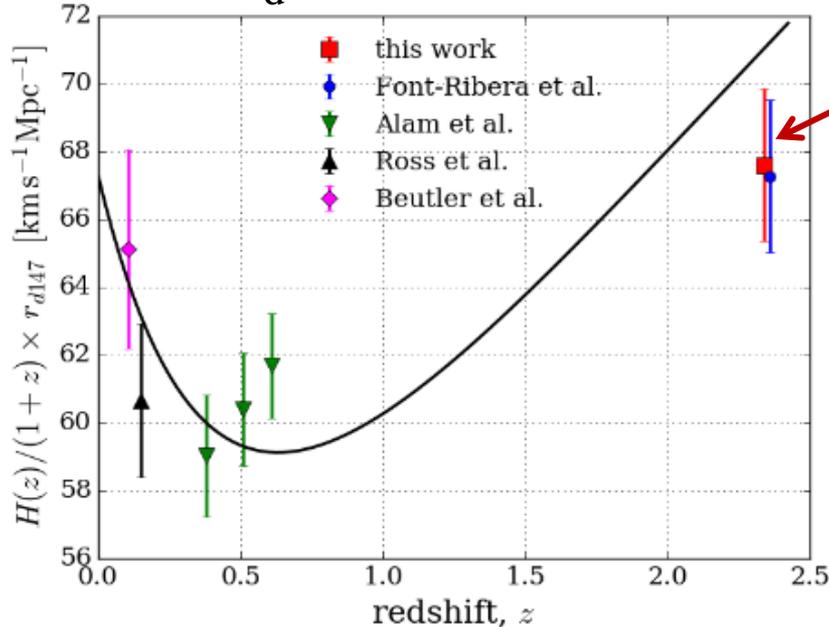
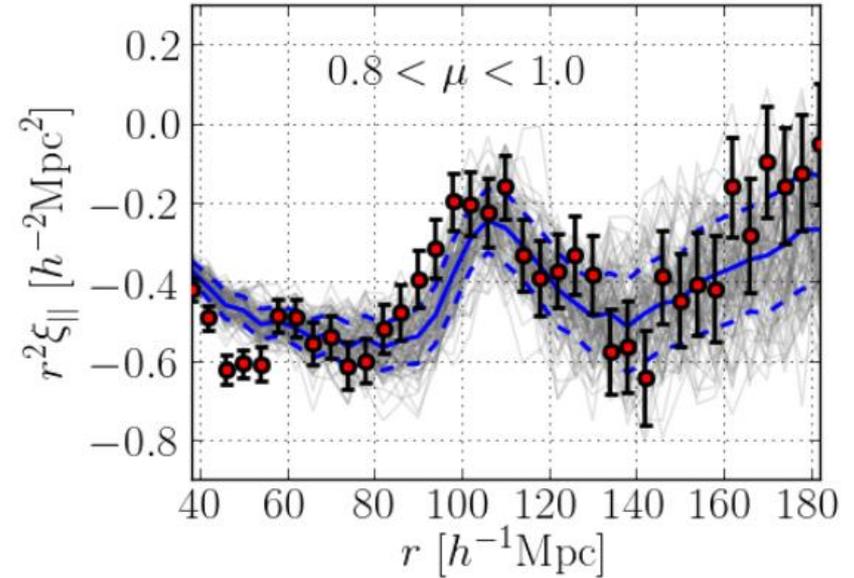
Full BAO: incluant  $\text{Ly}\alpha$

# Survey en absorption Ly $\alpha$

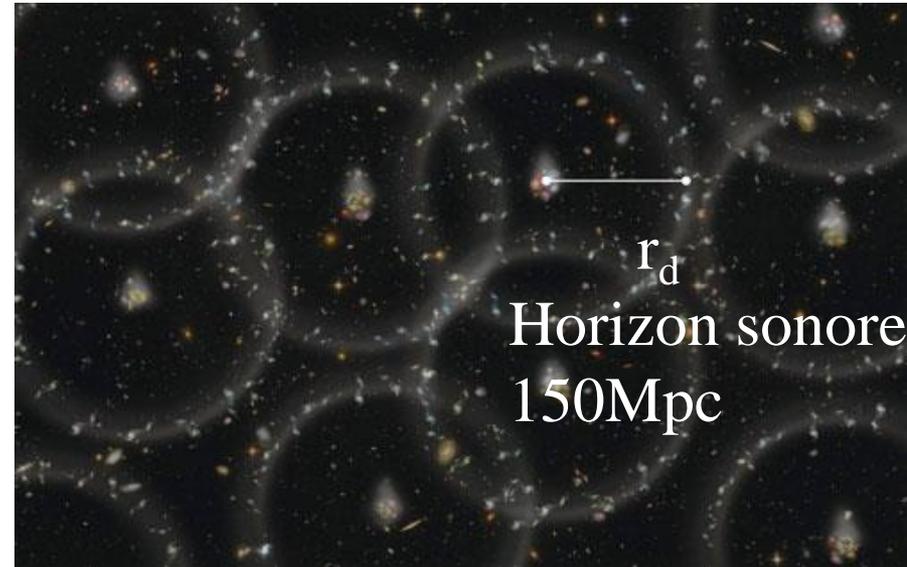


Absorption de la raie Ly $\alpha$  à  $z=2.3$   
*Delubac et al 2014*

Points rouges vs simul QSO (gris)  
 $H(z)/(1+z) r_d$



*Bautista et al 2017*



# Surveys HI pour BAO avec SKA-1

Tout le ciel:  $4 \cdot 10^6$  gal  $z=0.2$   $3\pi$  sr

Survey Grand-champ  $2 \cdot 10^6$  gal  $z=0.6$   $5000 \text{ deg}^2$

Survey champ profond  $4 \cdot 10^5$  gal  $z=0.8$   $50 \text{ deg}^2$

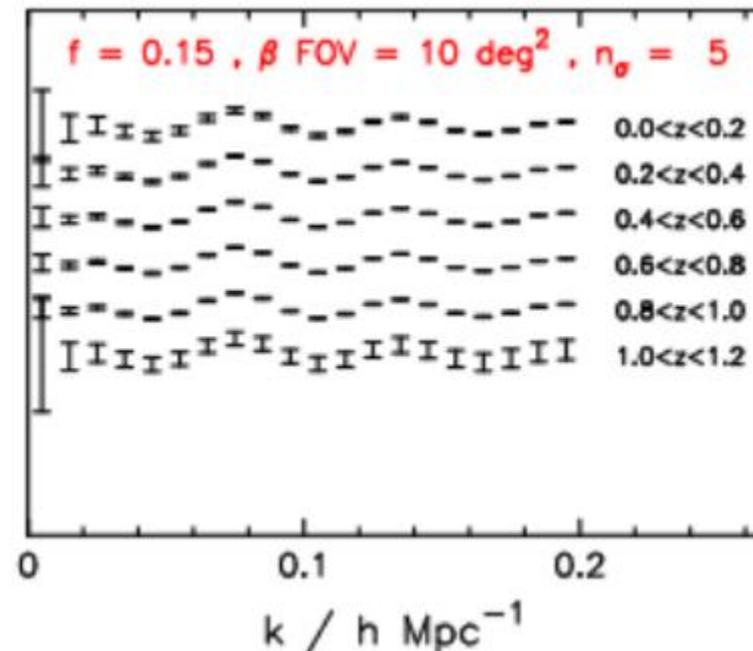
**Plus compétitif:** HI carte d'intensité  $30\,000 \text{ deg}^2$  jusqu'à  $z=3$

Large et profond, grand volumes,  $\sim$ Euclid

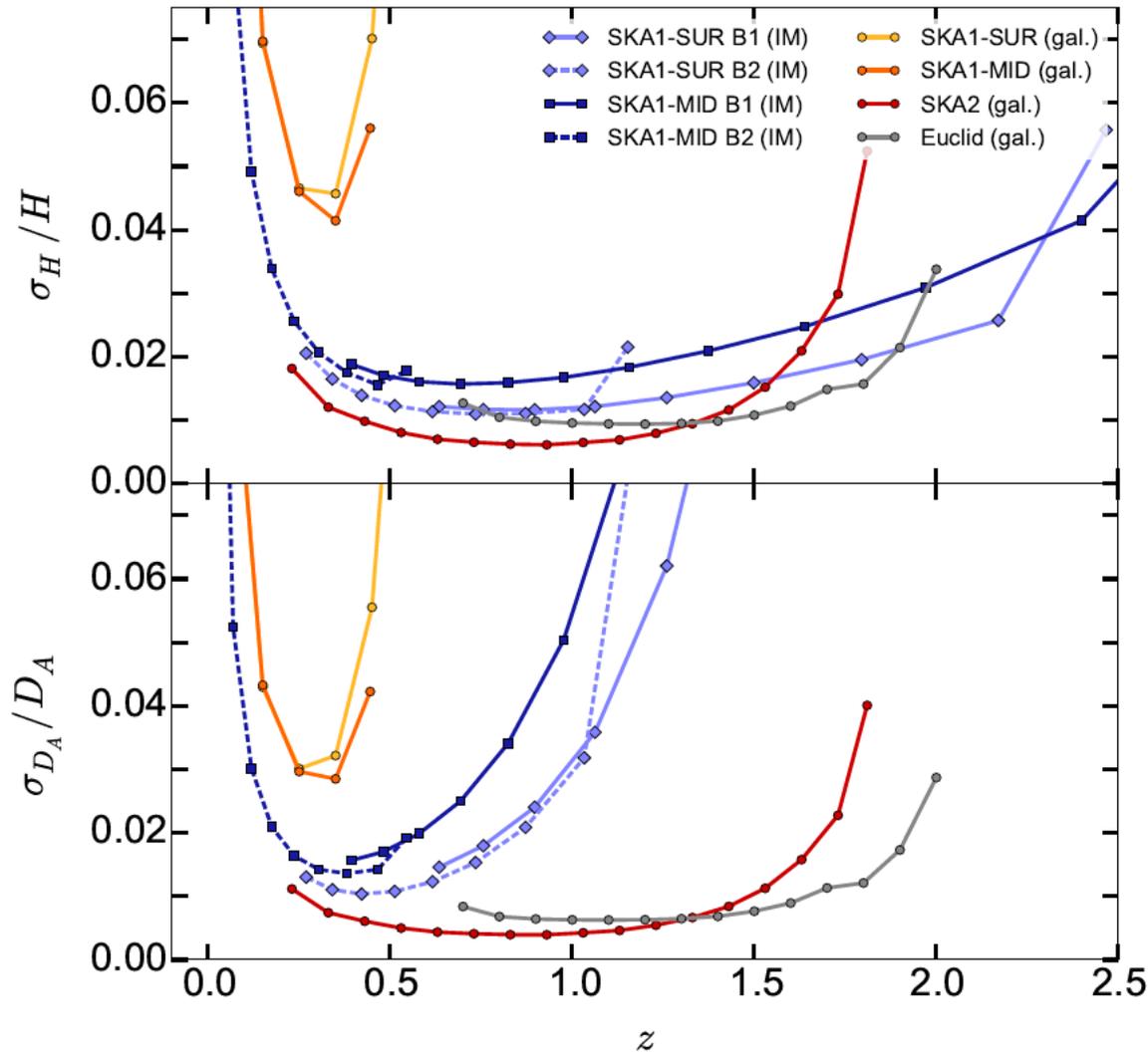
**SKA2** parviendra au meilleur échantillon  
1 milliards de galaxies en HI au total

**Cisaillement faible**

10 milliards de galaxies en continu radio



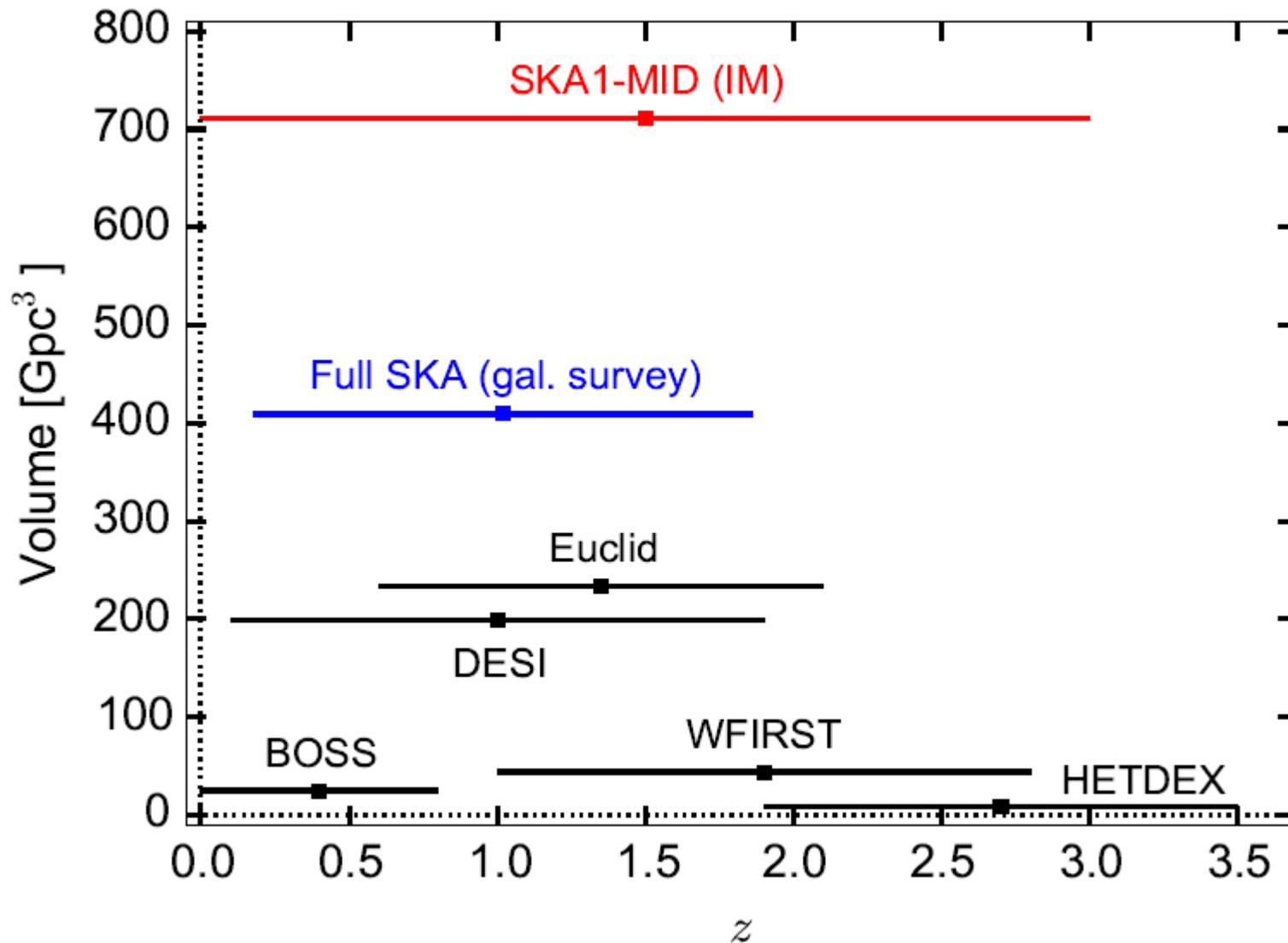
# BAO Radiales et transverses



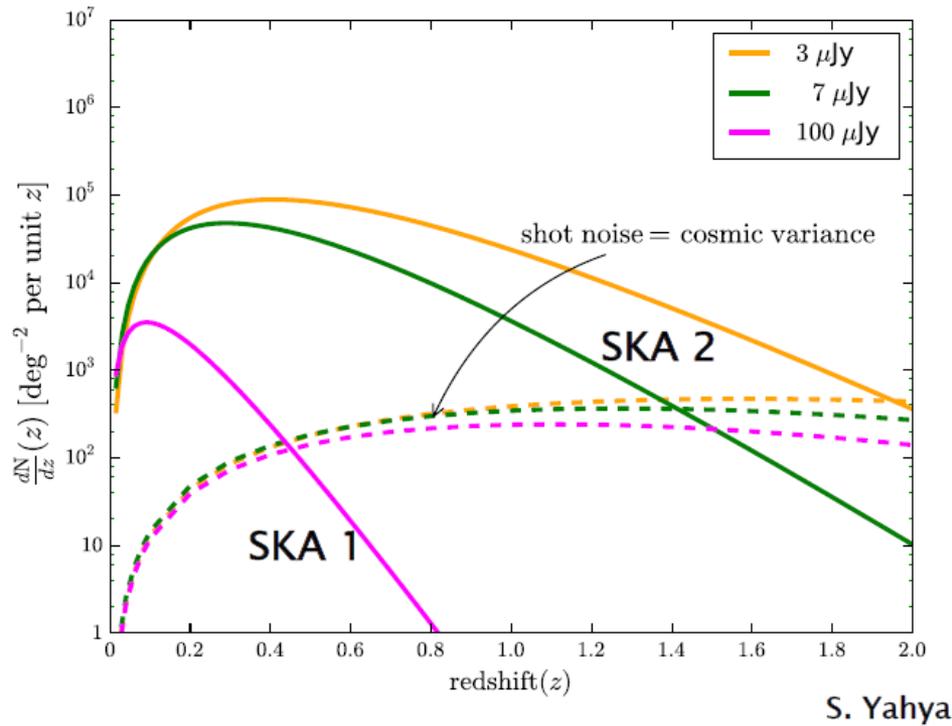
IM: HI Intensity mapping  
Gal: surveys galaxies HI

B1 basse fréquence  
B2 haute fréquence

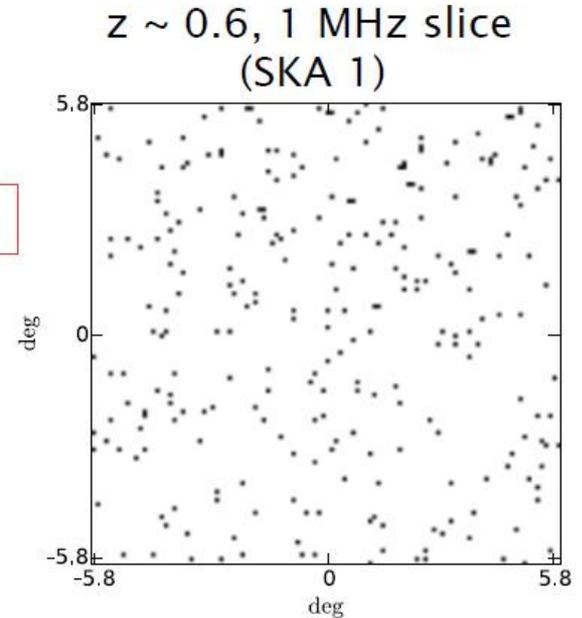
# Comparaison des volumes couverts



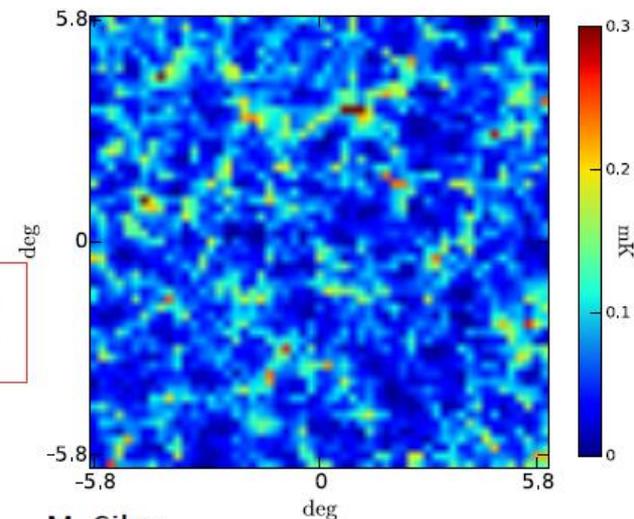
# Galaxies HI vs cartes d'intensité



Galaxies



Maps of intensity



Cartes d'intensité HI: principal problème les avant-plans, dus au continuum  
**1000 x le signal attendu**  
Pas si lisse en fréquence, mais moins de degrés de liberté *Switzer et al 2015*

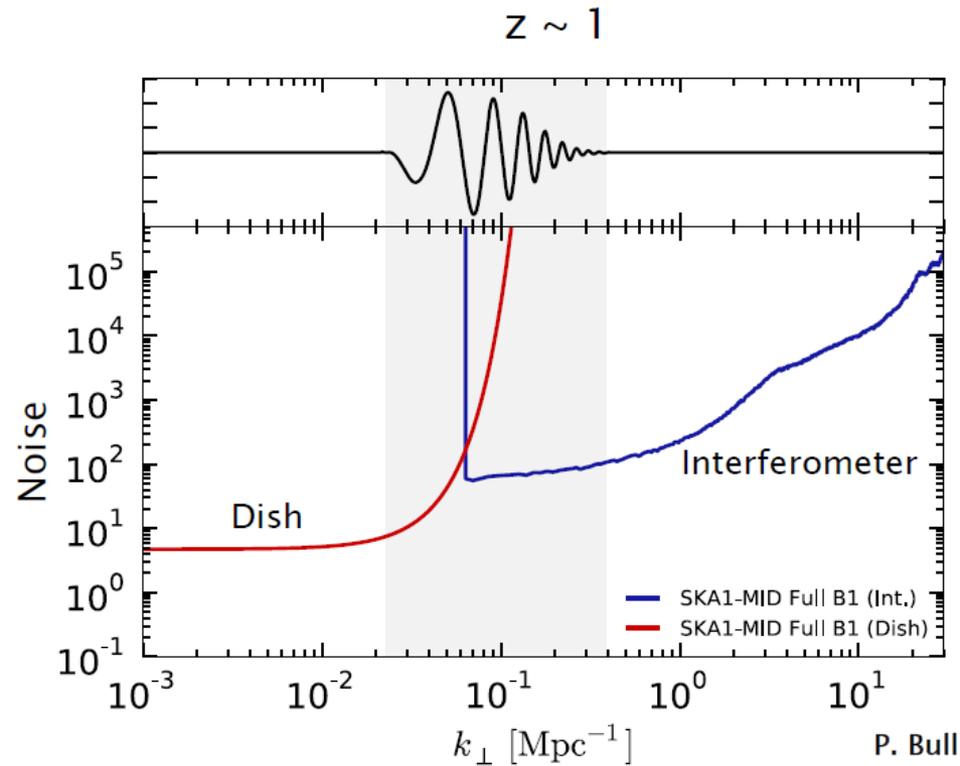
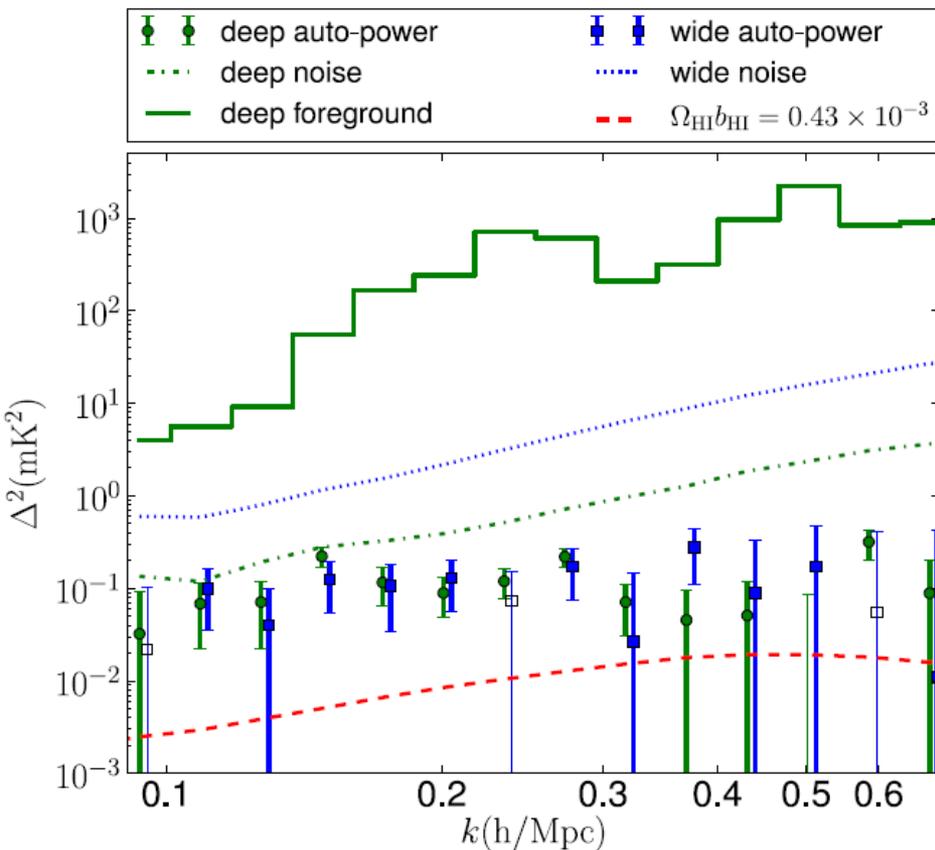
M. Silva

# Premiers résultats cartes intensité HI (GBT)

Pas assez de bases courtes

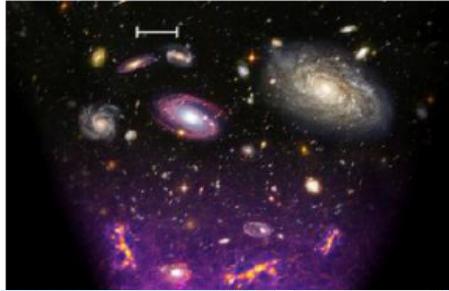
(BAO requiert 20m)

→ utiliser N antennes uniques  
(auto-corrélation)

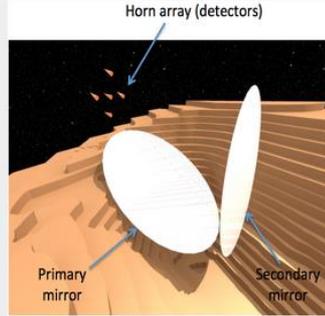


Switzer et al 2014

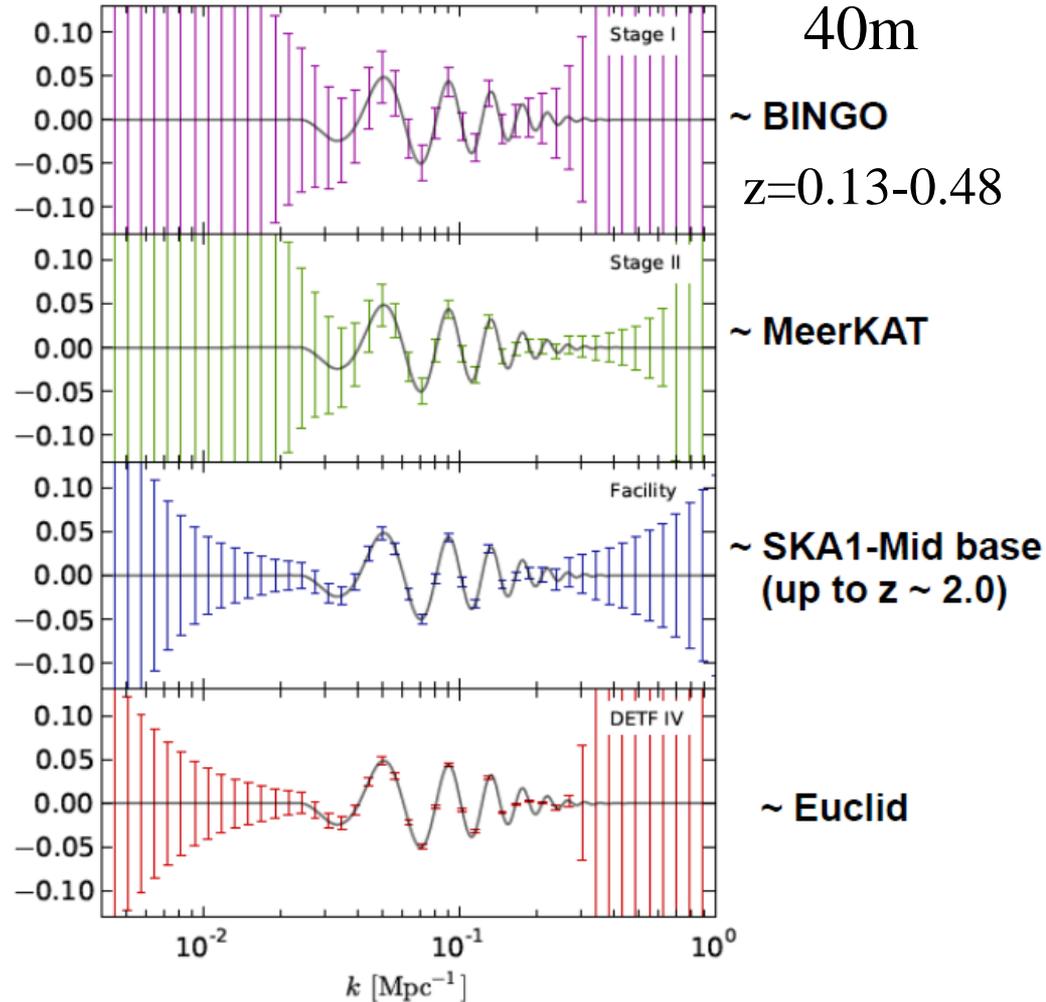
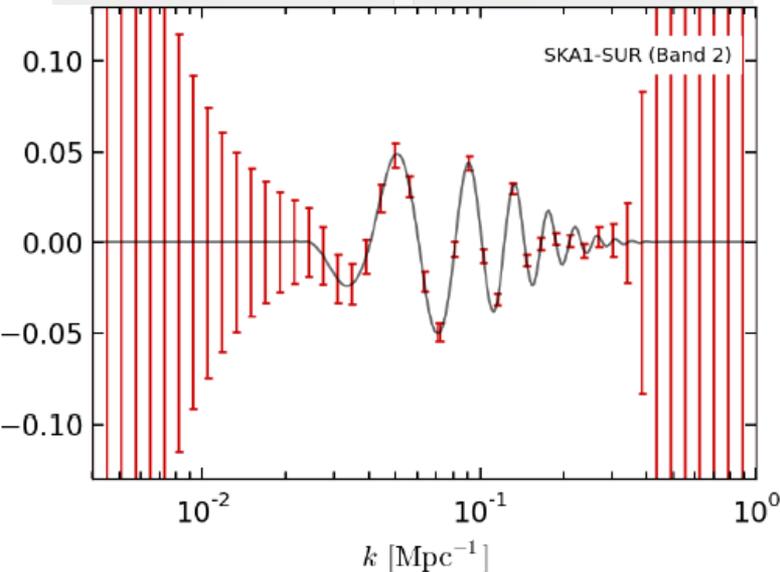
# BAO avec SKA1 cartes d'intensité



Quarry Castrillon



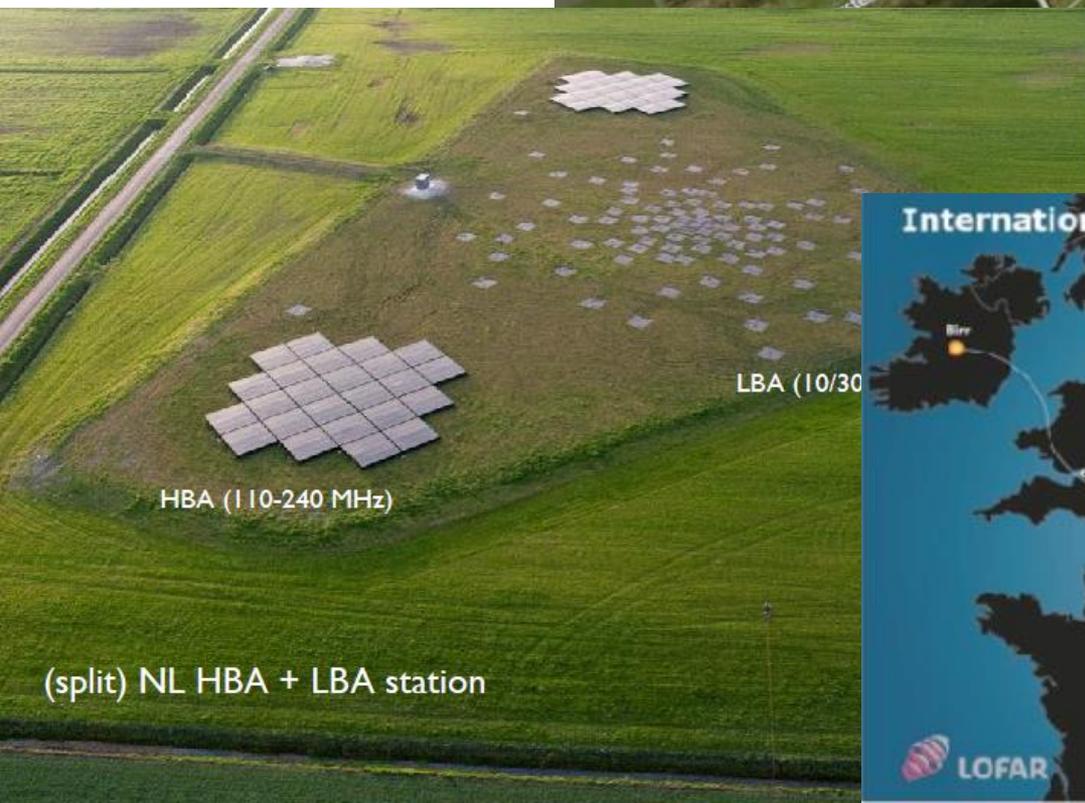
A 3D view of the BINGO telescope



# Stations LOFAR

HBA 110-240 MHz

LBA 10-80 MHz



# Image du Pole Nord Céleste (NCP)

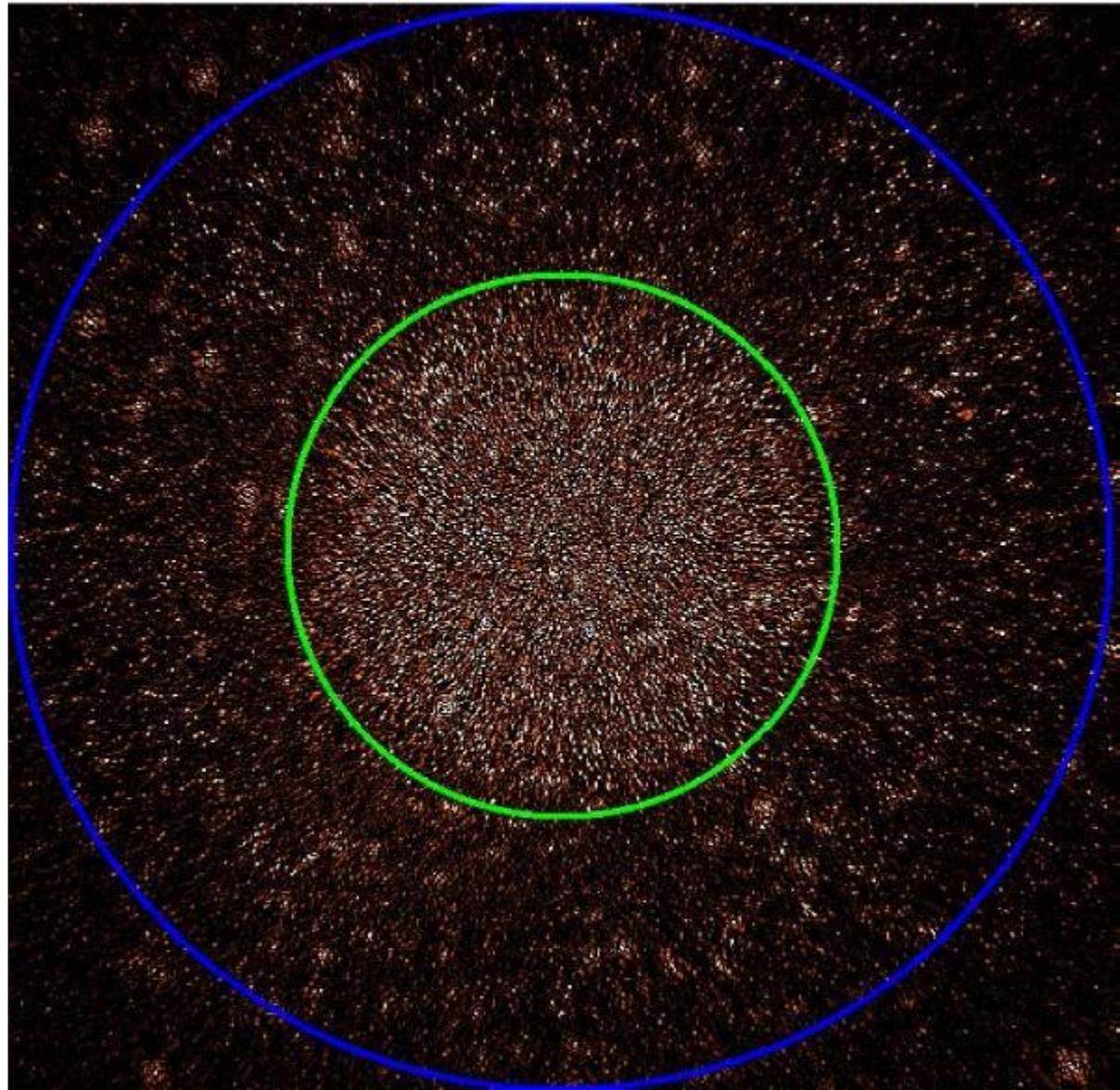
$\Delta\nu=60$  MHz, Champ  $20^\circ \times 20^\circ$  - Beam  $3'$

## Limite de la confusion

Residu après soustraction  
de 28,000 sources  
calibrées en 122 directions  
par station, par fréquence  
par  $\sim 20$  min integration  
*Ré-intégrées sur la carte*

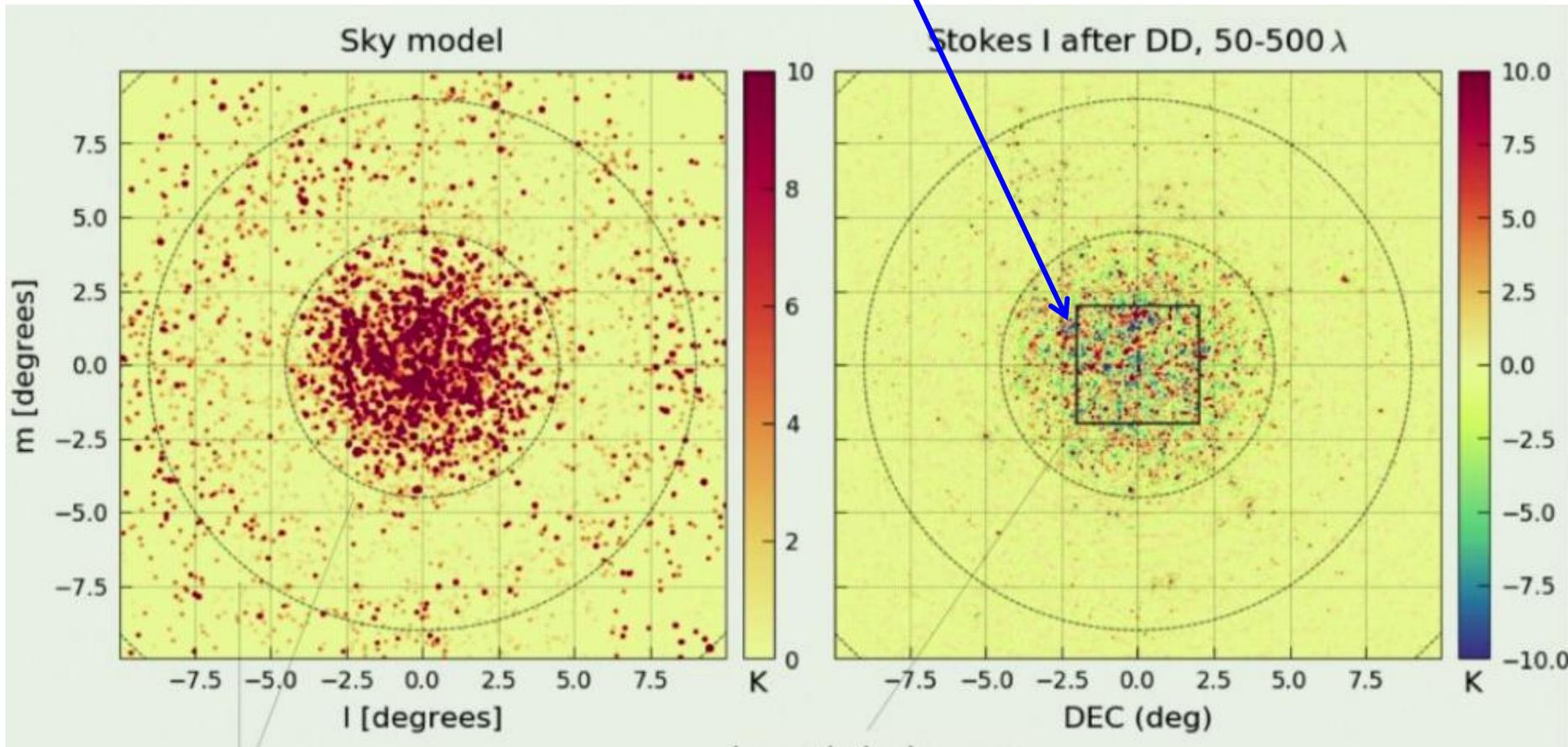
Espoir: que cette émission  
soit lisse en fréquence

*Image V.N. Pandey*



# Après calibration dépendant de la direction

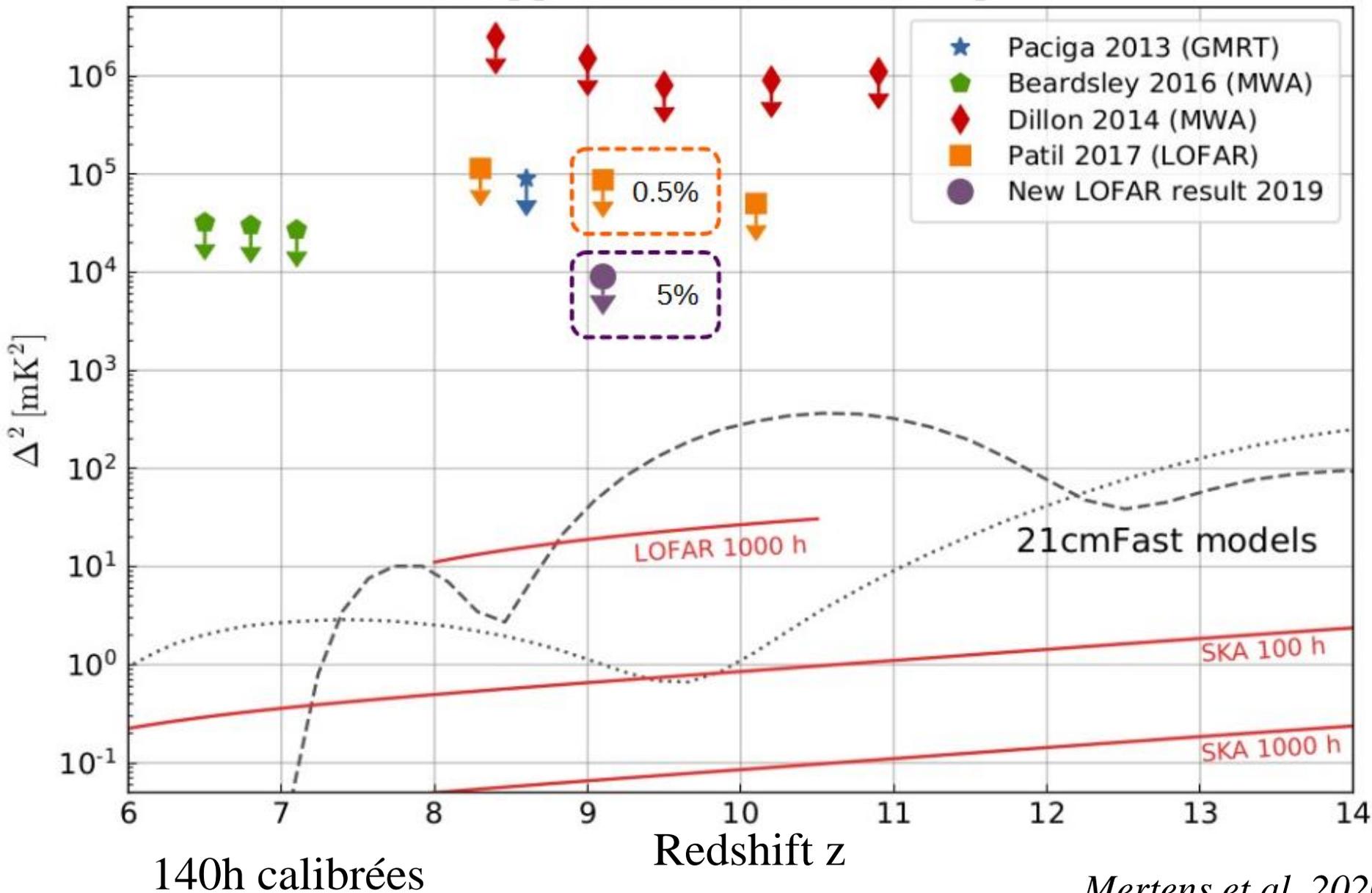
NCP, 140h, 134-146 MHz,  $z=9.1$  Zone  $4 \times 4^\circ$  pour regarder le signal



**Difficulté: soustraire les avant-plans, confus**

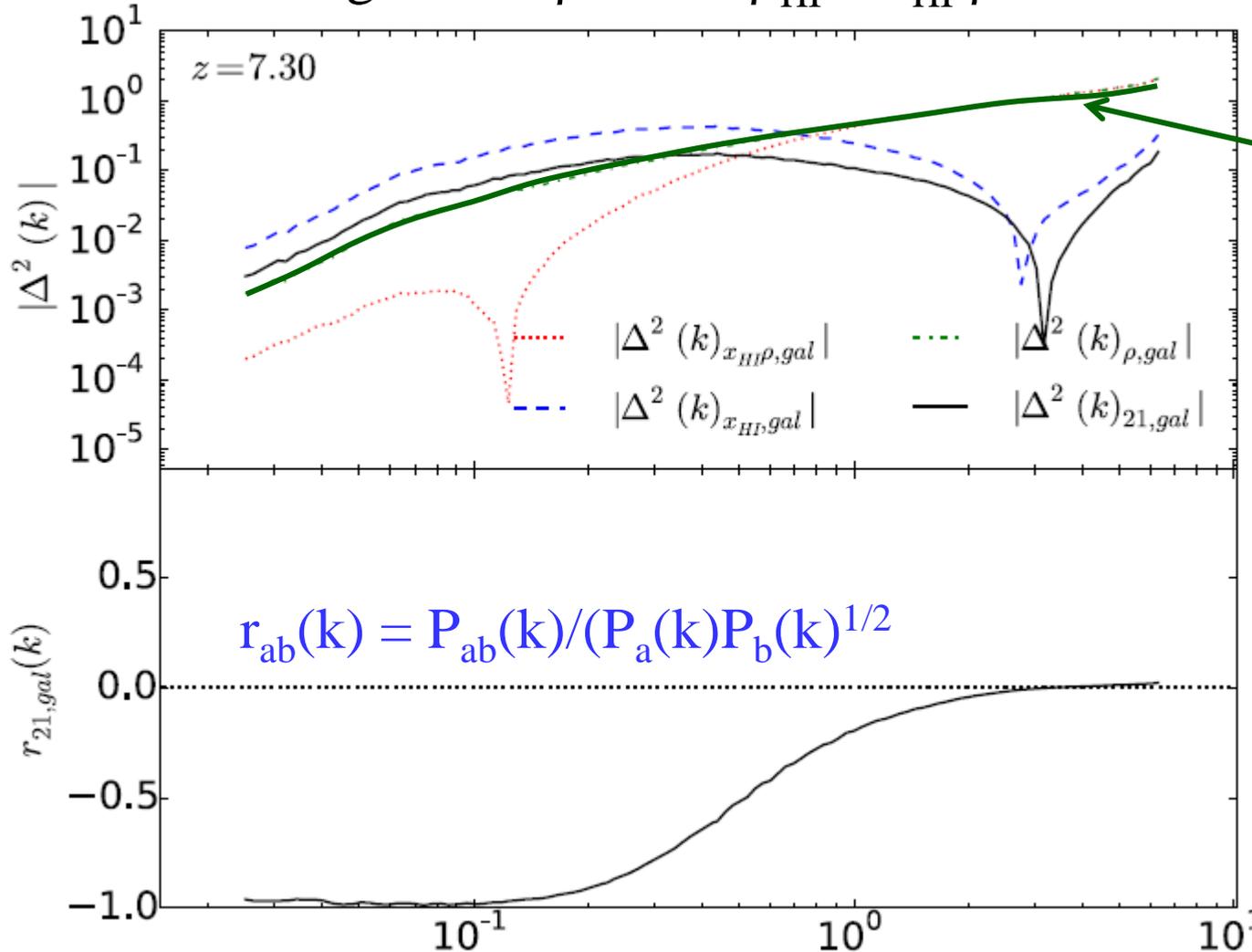
# LOFAR limites supérieures (5% des data)

$2\sigma$  upper limits at  $k = 0.1 \text{ hMpc}^{-1}$



# Corrélation croisée 21cm Ly $\alpha$

3D théorique (simulations) décomposition en 3 termes, 21cm,  $x_{\text{HI}}$ ,  
densité des galaxies  $\rho$   $\rho_{\text{HI}} = x_{\text{HI}} \rho$



$\Delta^2 \rho_{\text{gal}}$  galaxies  
corrélées avec  $\rho$

$\Delta^2_{x_{\text{HI}}\rho_{\text{gal}}}$   $\rho_{\text{HI}}$ -galaxie  
Négatif, grd échelle

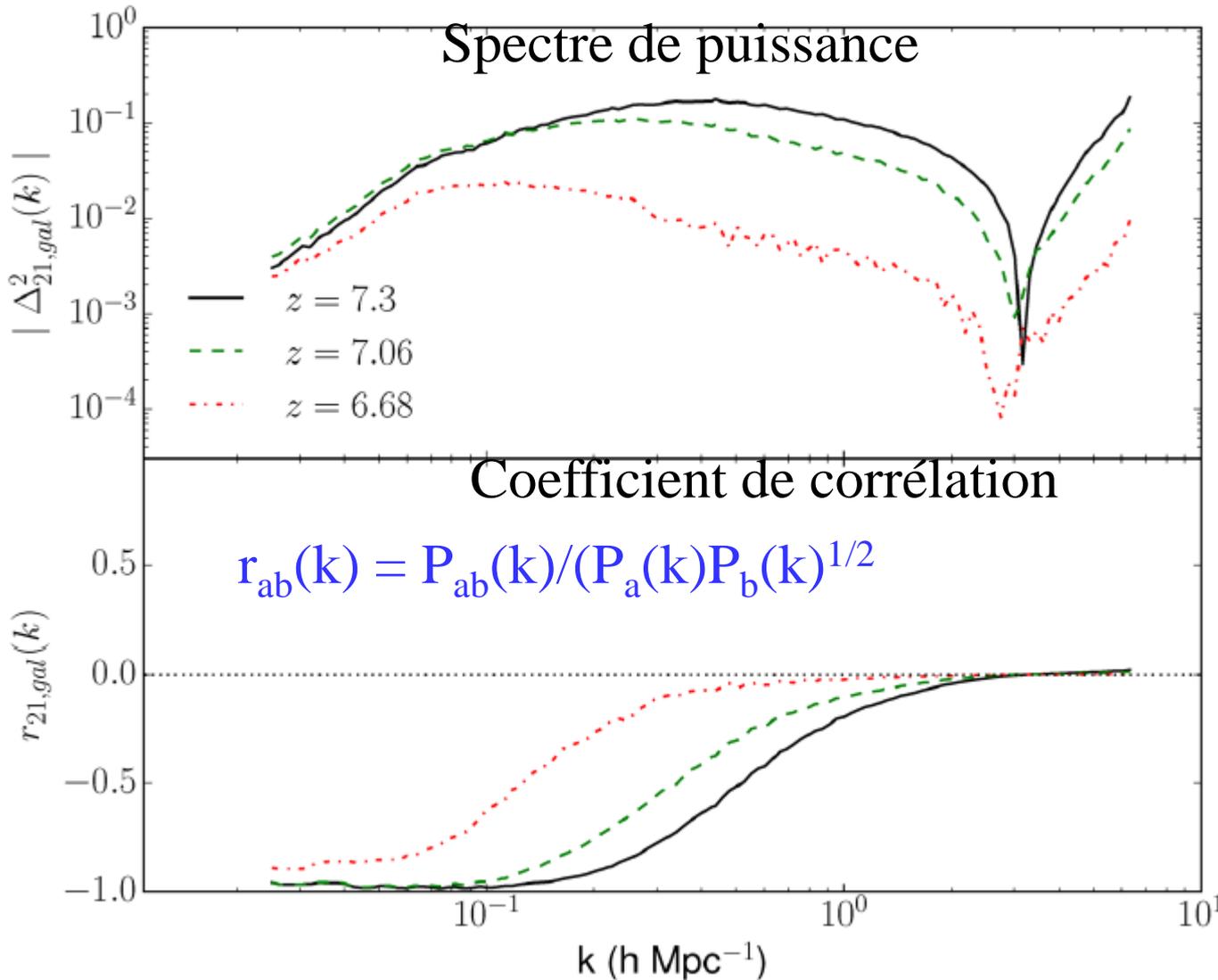
$\Delta^2_{x_{\text{HI}}\text{gal}}$   $x_{\text{HI}}$ -galaxies  
Négatif, petites  
échelles

$$\Delta^2_{ab}(k) = k^3 P_{ab}(k) / 2\pi^2$$

$k$  (h Mpc $^{-1}$ )

Lidz +2009, Vrbanec +2016

# Corrélation croisée 3D, vs redshift



For  $M_h > 10^{10} M_\odot$

$3 \cdot 10^6$  gal  $z=6.68$

$2.3 \cdot 10^6$  gal  $z=7.06$

$1.9 \cdot 10^6$  gal  $z=7.3$

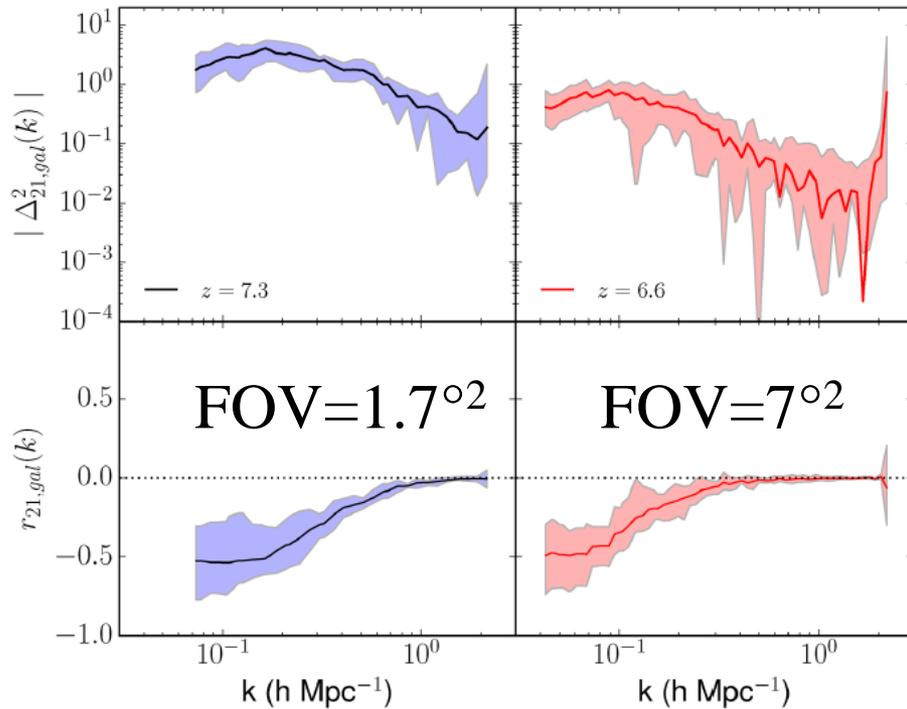
Amplitude décroît  
avec le temps

Echelle critique  
va vers les gdes  
Tailles

➔ Moins de HI  
Bulles croissent

$$\Delta_{ab}^2(k) = k^3 P_{ab}(k) / 2\pi^2$$

# Prédiction 2D des observations

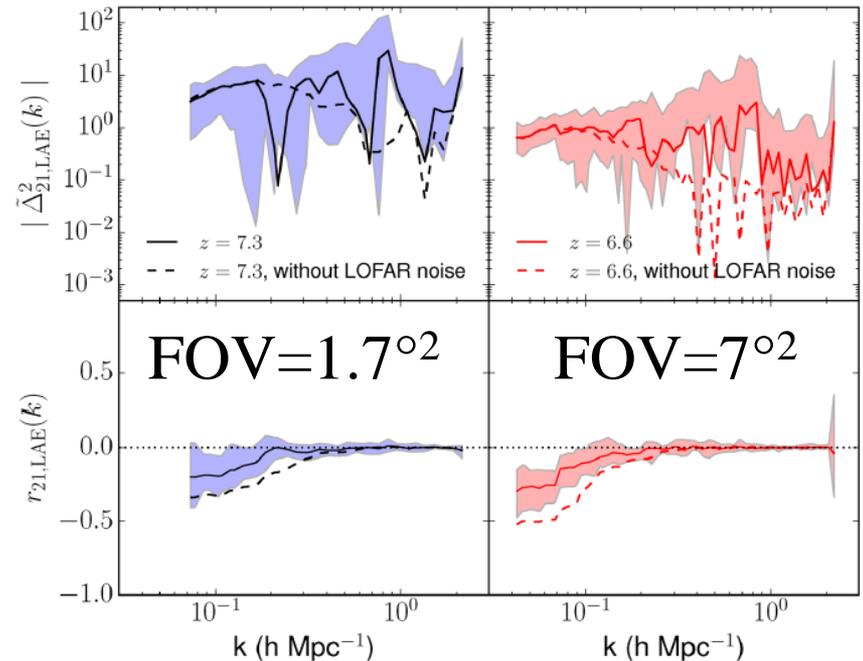


Cross-corrélation avec galaxies  
(pas de pondération de Tb)

10 essais de simulations  
pour donner le scatter

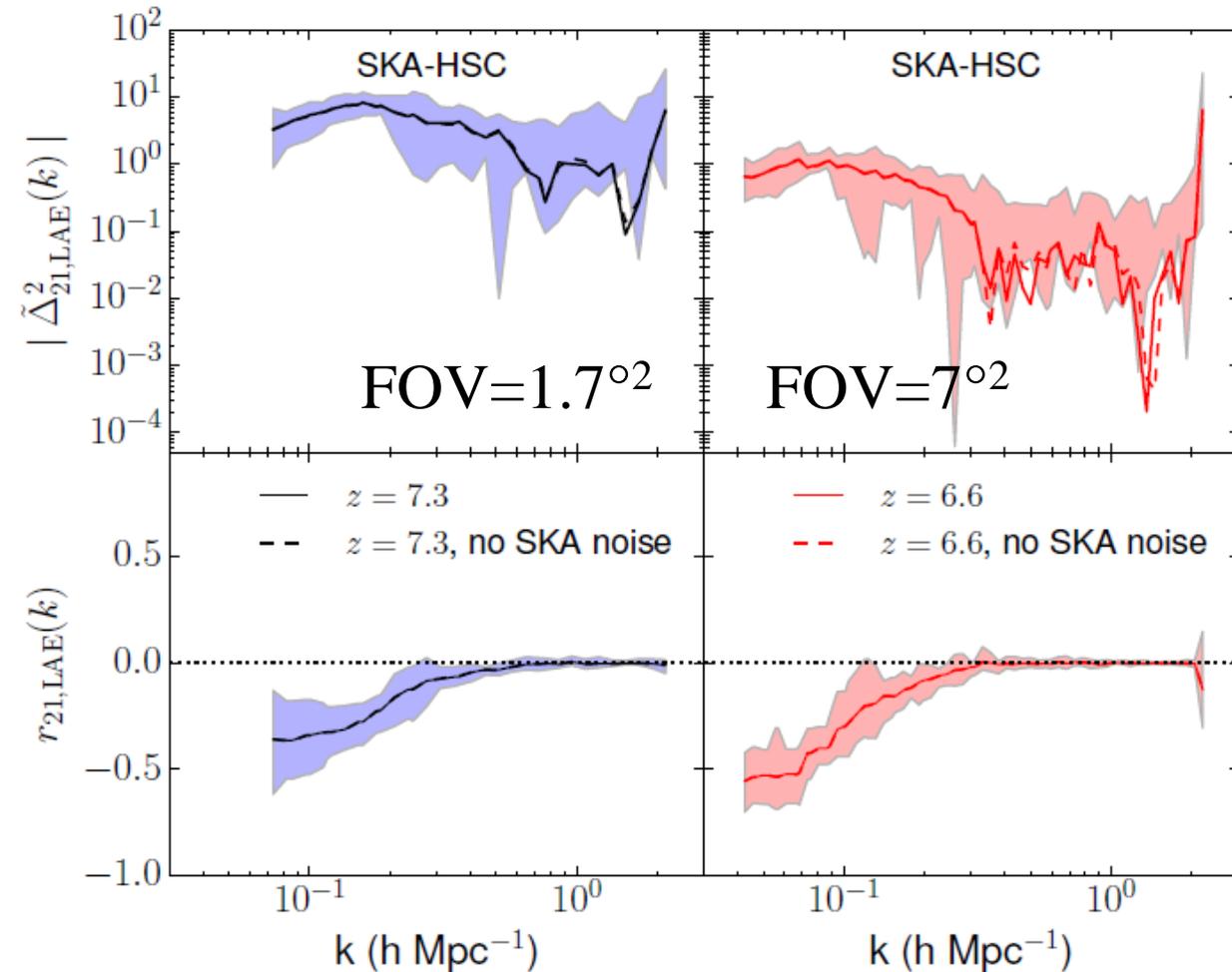
LAE choisies dans les  
simulations  $EW > 20 \text{ \AA}$

Cross-corrélation avec LAE



# Prédictions avec SKA

Cross-corrélation avec LAE, détectées avec Subaru-HSC



Simulations avec  
transfer radiatif  
HSC échelles 10-60Mpc

Bruit de SKA1-low  
négligeable

Uniquement celui ds  
LAE!

Dans le futur: WFIRST  
Bruit négligeable  
900 LAE par  $^\circ{}^2$

# Nouvelle Extension à Nancay upgrade de LOFAR



NenuFAR

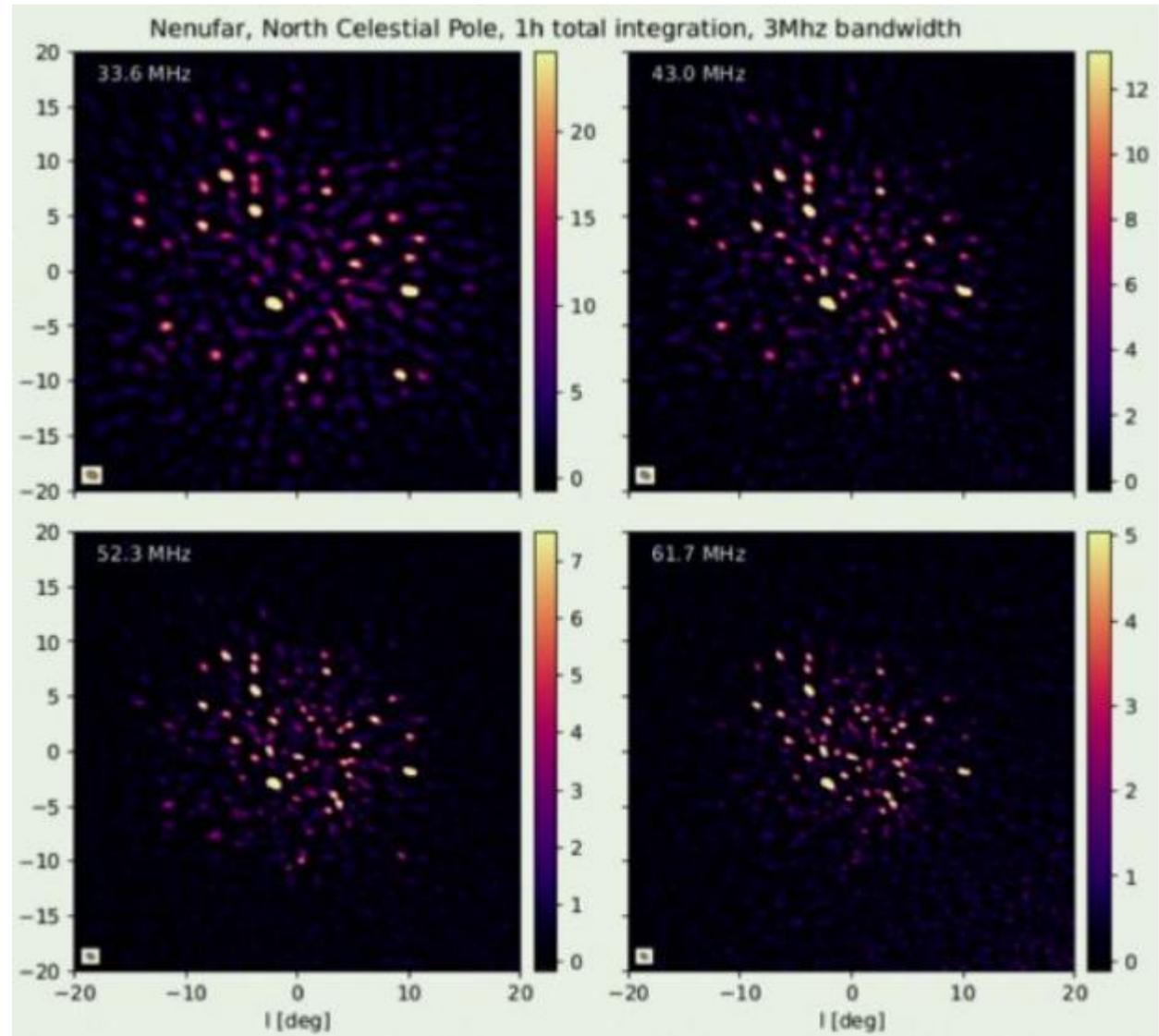
*New Extension In Nancay  
Upgrading LOFAR*

# Premières observations

96 stations de 19 antennes = 1824

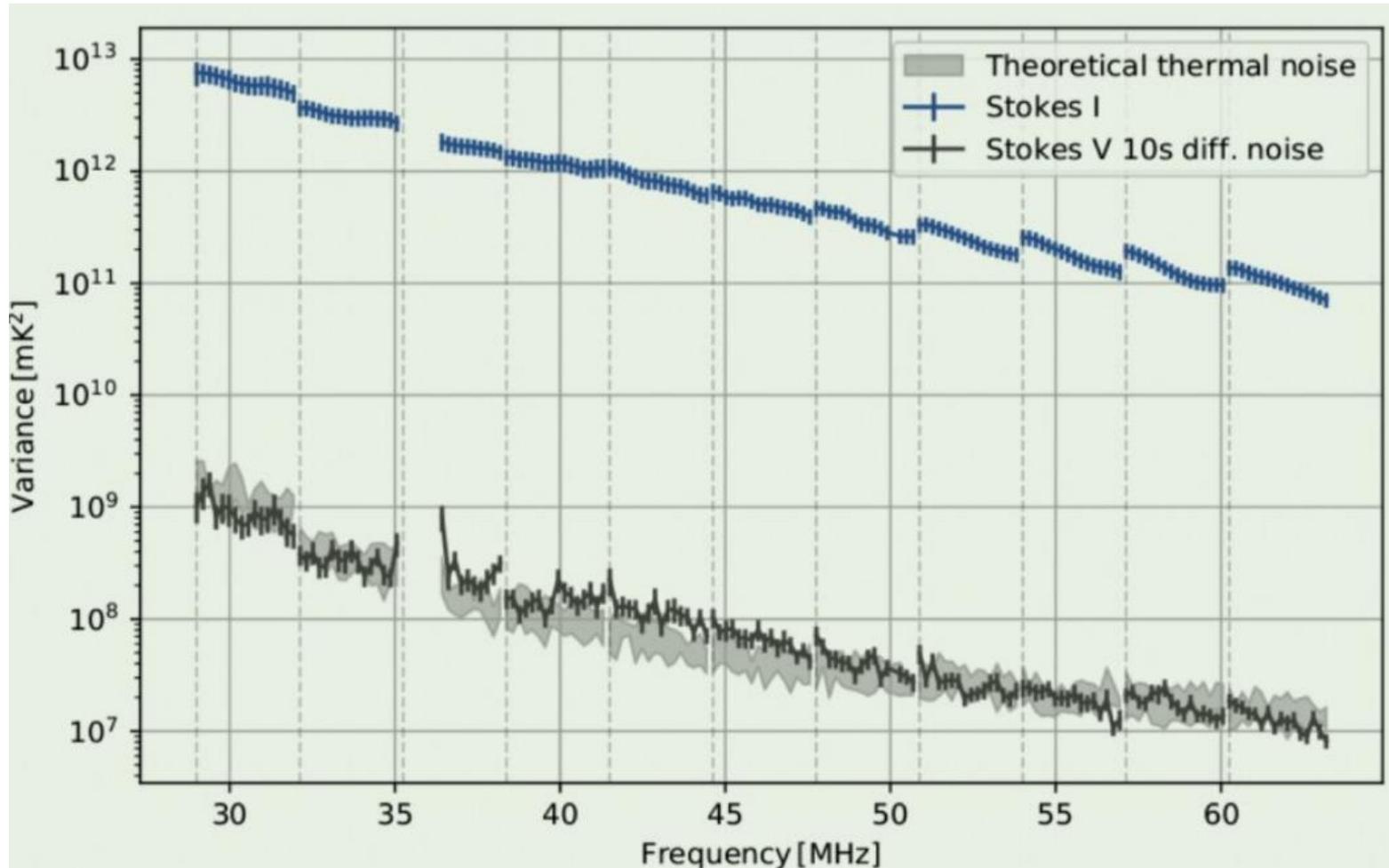
Depuis Juillet 2019  
330h observées sur  
le NCP en test  
30-85MHz

2020: 1000h  
30-85MHz  
z=46-15  
Aube cosmique  
Corrélateur complet



# Premiers résultats

Grands espoirs sur la plus grande surface à ces fréquences  
Infirmité ou confirmation d'un signal à 78 MHz??



Spectre brut

# Résumé

**Premier milliard d'années:  
galaxies JWST, SPICA, ALMA  
Absorbants (QSO, GRB)**

**Le signal à 21cm est essentiel  
pour découvrir le premier Gyr  
de l'Univers:  
Age sombre, Aube cosmique, EoR,**

**Dans le futur:**

- Exploitation de 100% des data de LOFAR et précurseurs
- Résultats de NenuFAR
- SKA1- MID
- **SKA**

