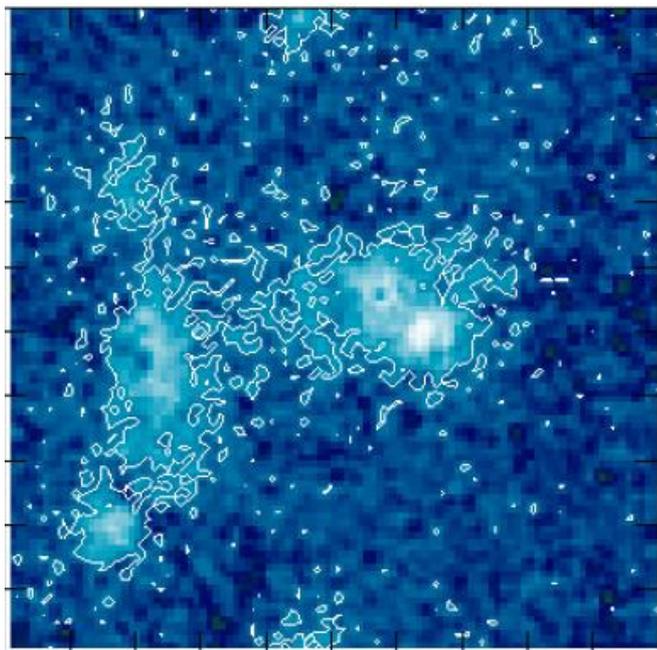




COLLÈGE
DE FRANCE
— 1530 —

Chaire Galaxies et Cosmologie

Observation du gaz atomique à 21cm

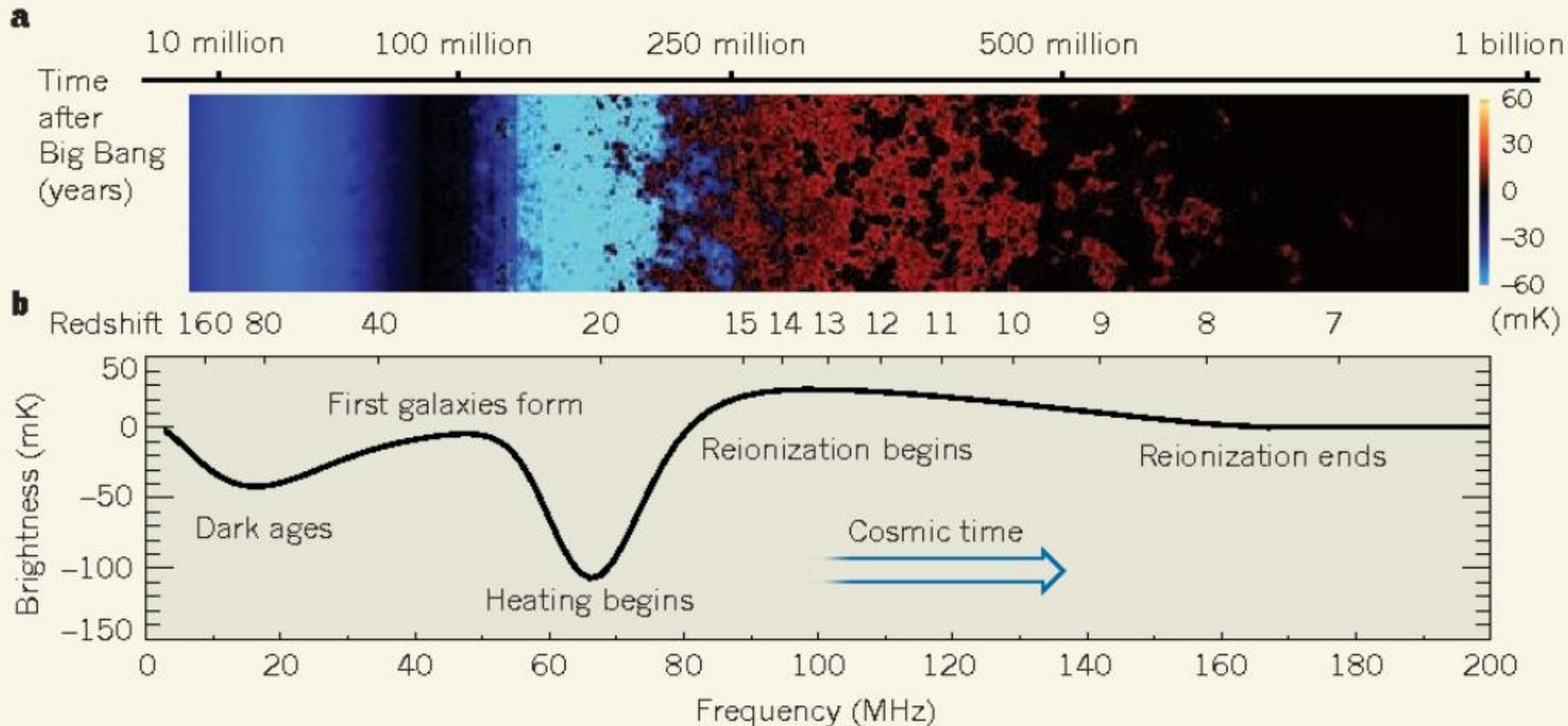


Françoise Combes



Prédictions des modèles

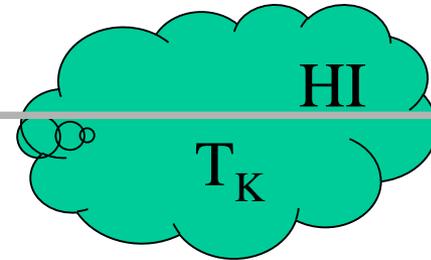
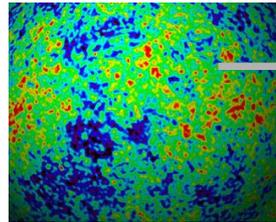
Plusieurs étapes: Aube cosmique, après l'âge sombre
Hydrogène plus froid que le fonds → absorption
Formation d'étoiles, chauffage → émission



Températures du gaz

Le fonds cosmologique (CMB) à T_γ

Aube cosmique

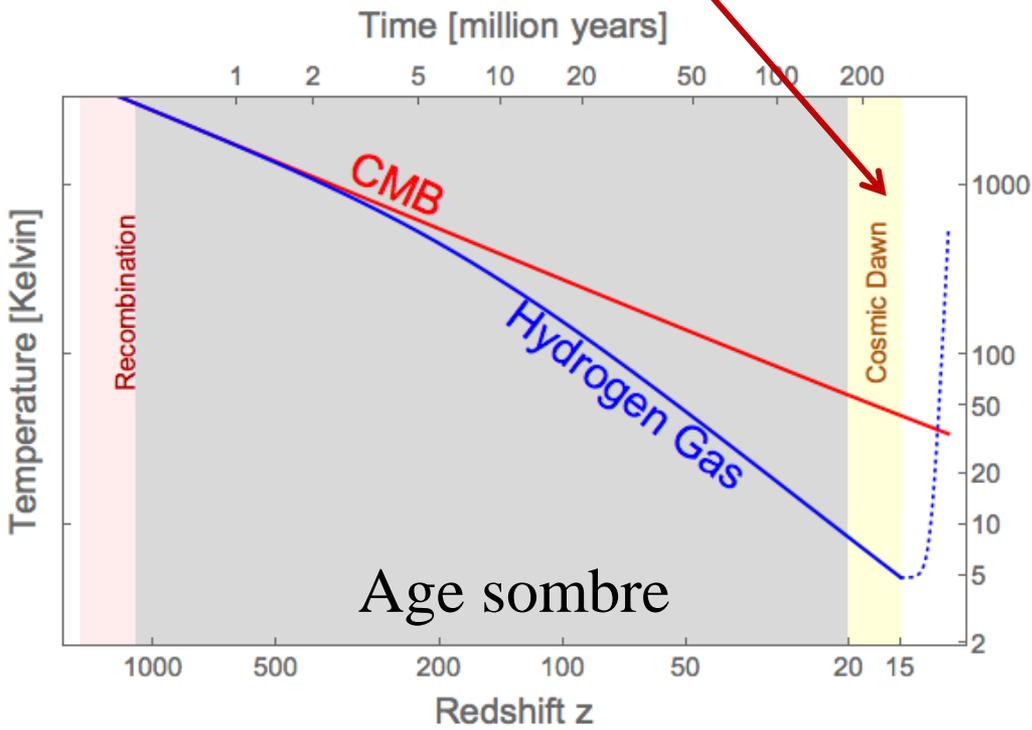


$z=13$

$f_{21\text{cm}}=1.4\text{ GHz}$

$z=0$

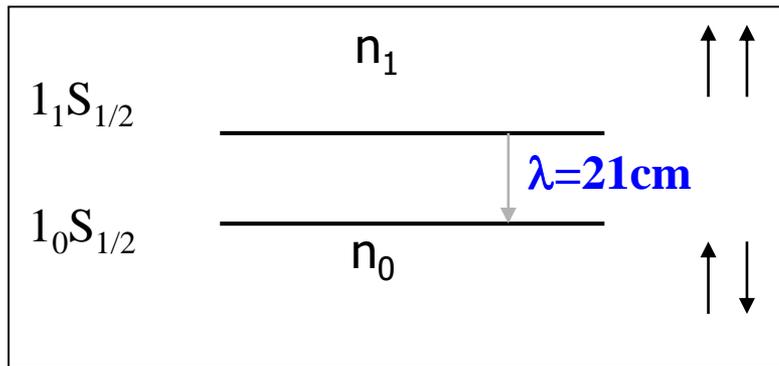
$f_{\text{obs}}=100\text{ MHz}$



Température cinétique T_K
 Température de spin T_S
 Température de brillance T_b

Température de spin T_s

- HI structure hyperfine $F=I+J$



$$I=1/2, J=1/2 \quad F=0,1$$

T_s est la température d'excitation des niveaux

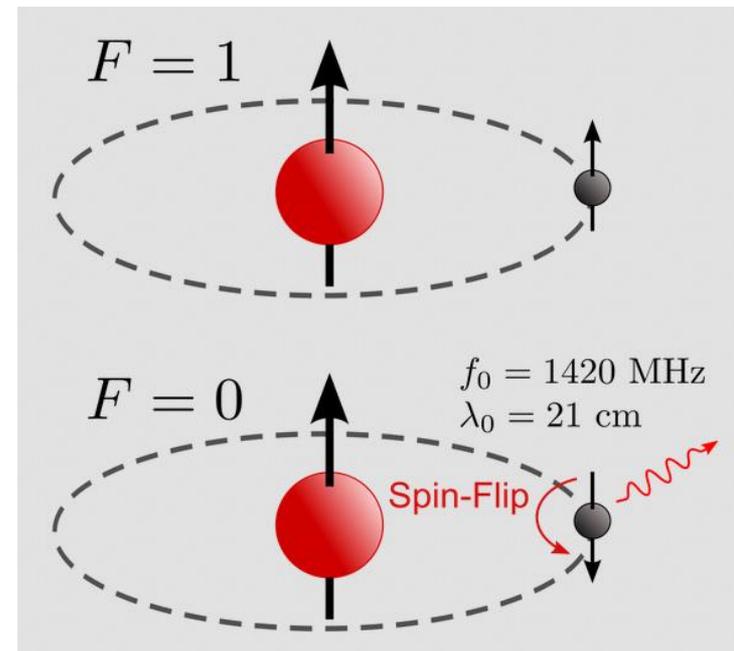
Rapports de populations

$$n_1/n_0 = 3 \exp(-h\nu_{21\text{cm}}/kT_s)$$

Le rayonnement de fonds $T_s = T_{\text{CMB}}$

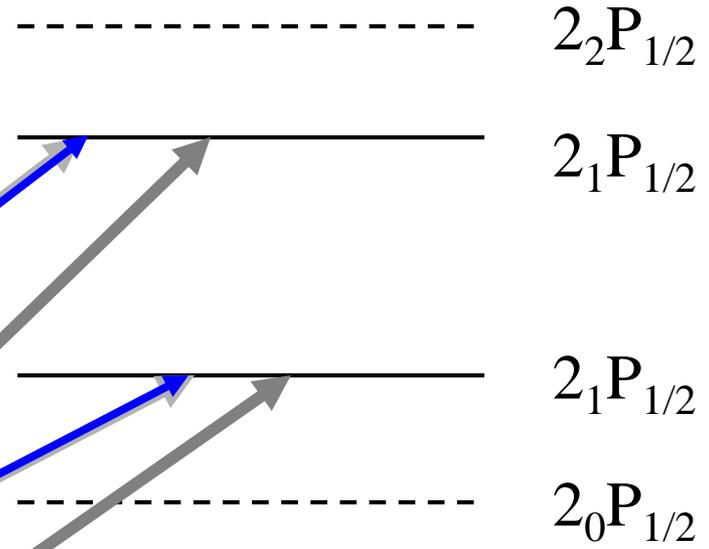
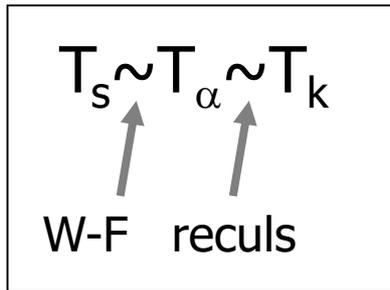
$T_s = T_{\text{kin}}$, si collisions

Ou bien, Ly α et effet Wouthuysen-Field



Effet Wouthuysen-Field

Le pompage par le rayonnement Ly α brasse les niveaux et revient à thermaliser les populations des niveaux de structure hyperfine de HI



Field 1959

Lyman α

Règles de Sélection:

$\Delta F = 0, 1$ (Sauf $F=0 \rightarrow F=0$)

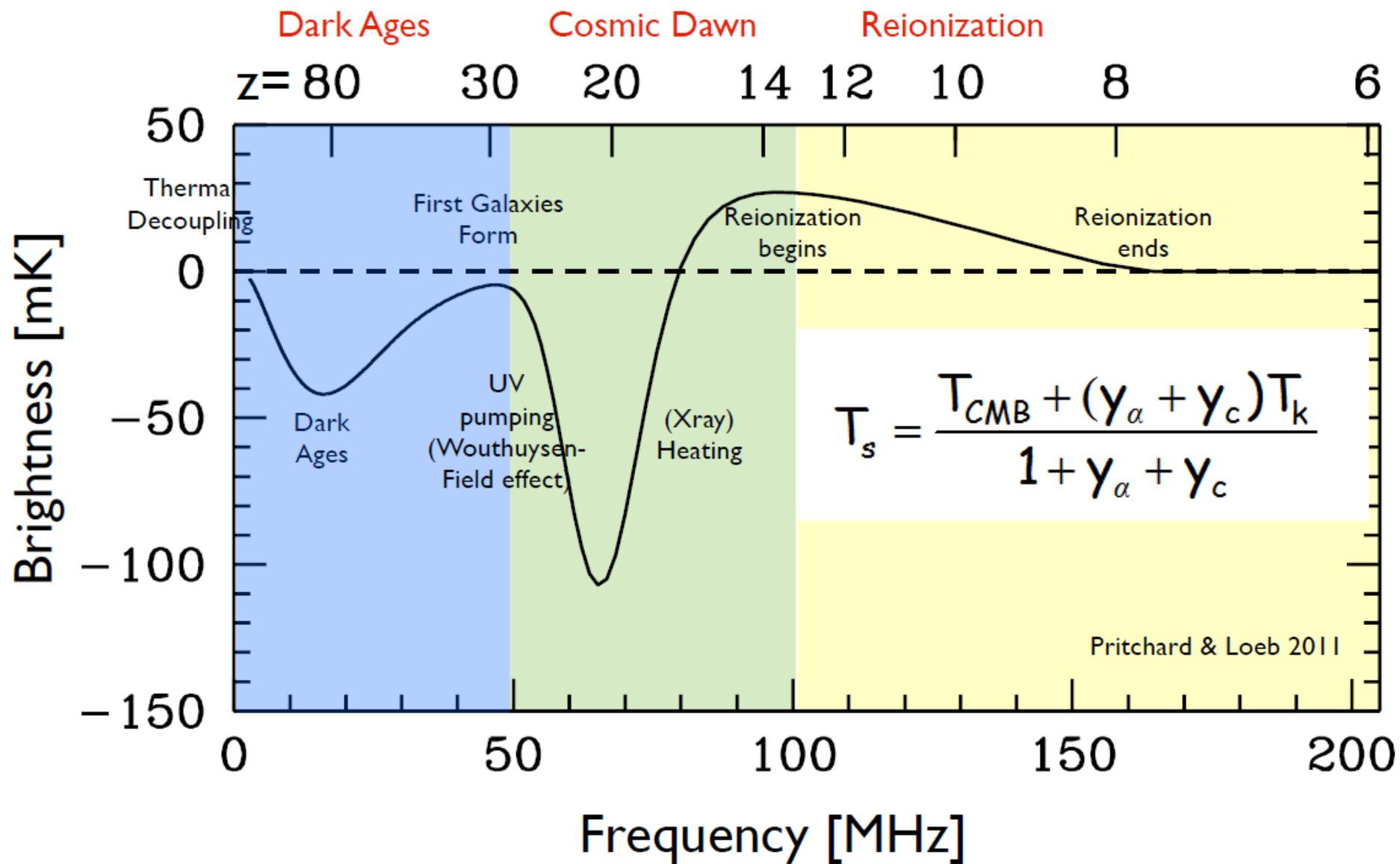
$n_F L_J$

$1_1 S_{1/2}$

$1_0 S_{1/2}$

$\lambda \sim 21 \text{ cm}$

$$T_b = T_{CMB} e^{-\tau} + T_s (1 - e^{-\tau}) \quad \Rightarrow \quad \delta T_b = T_b - T_{CMB} \approx \frac{T_s - T_{CMB}}{1+z} \tau$$



Chauffage par rayons X

Les noyaux actifs de galaxies, trous noirs super-massifs existent-ils en nombre suffisant?

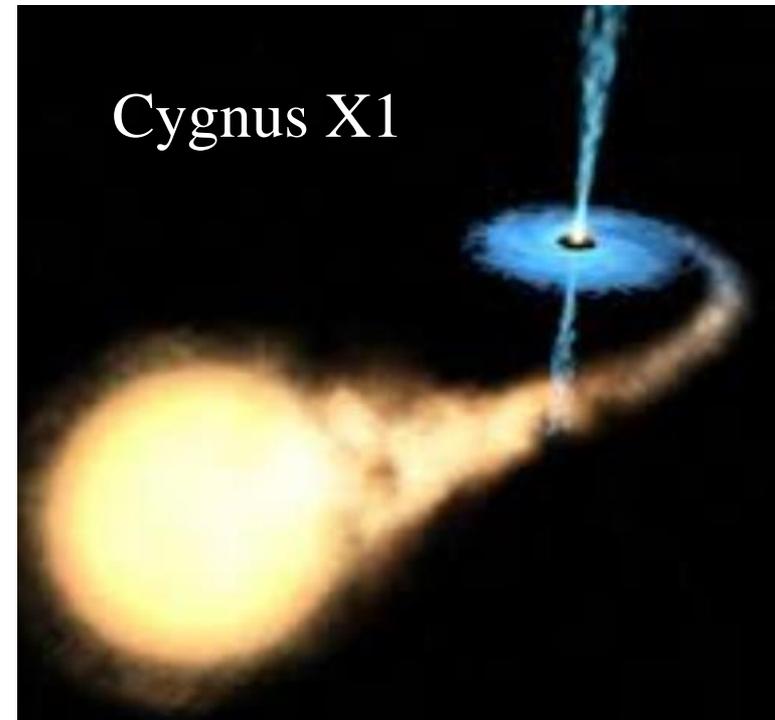
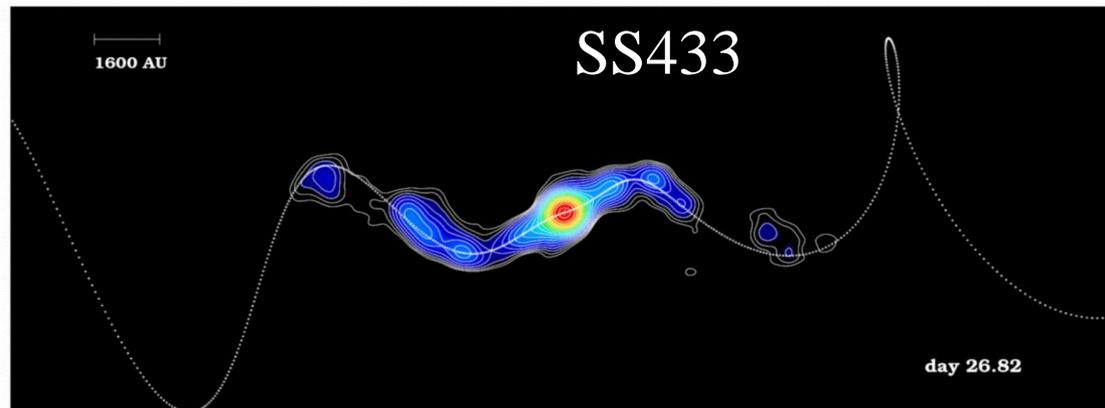
Quasars observés jusqu'à $z \sim 8$ (galaxies jusqu'à $z \sim 11$)

Il existe par contre de nombreuses binaires X

Ou micro-quasars, avec des rayons X durs

De même des étoiles massives, SNe

→ Rayons X

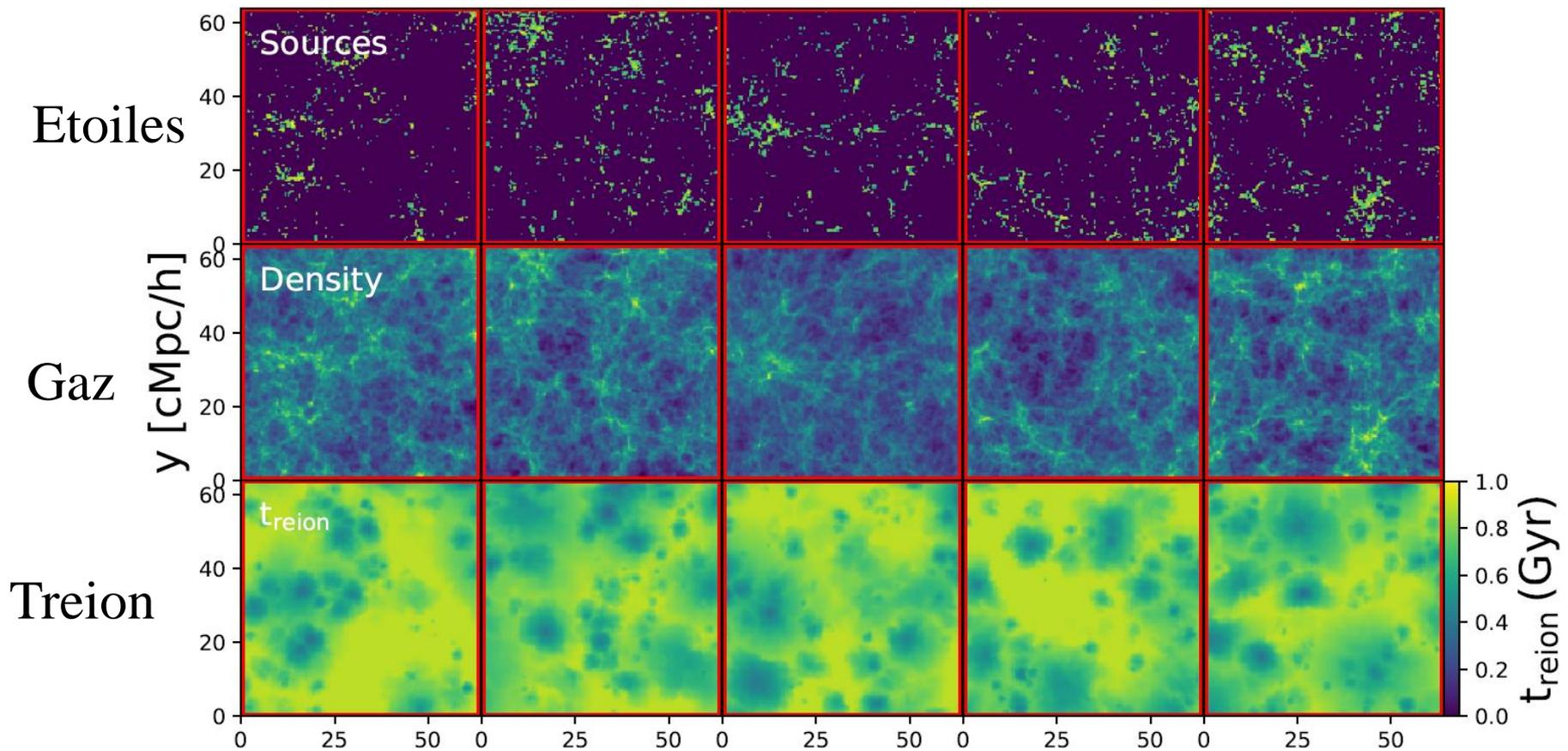


Simulations de la réionisation

Calculs d'une bibliothèque de modèles, et utilisation de l'IA

Apprentissage profond: permet d'inverser résultat- conditions initiales

→ En déduire l'histoire de la réionisation

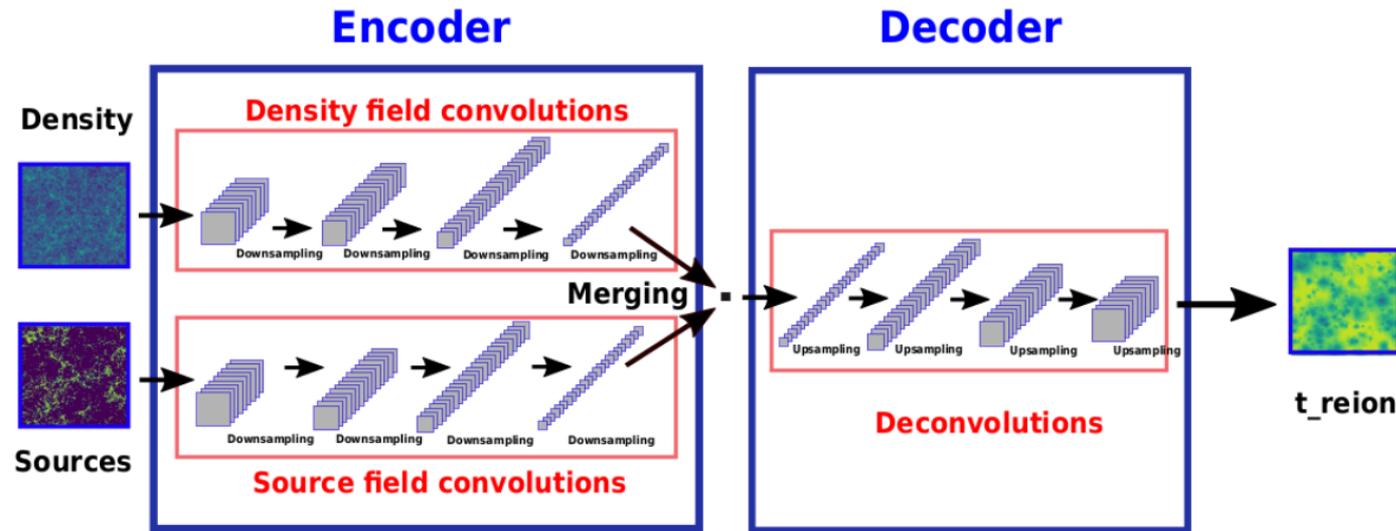


Chardin *et al* 2019

x [cMpc/h]

Lissage dans la 3^e dim

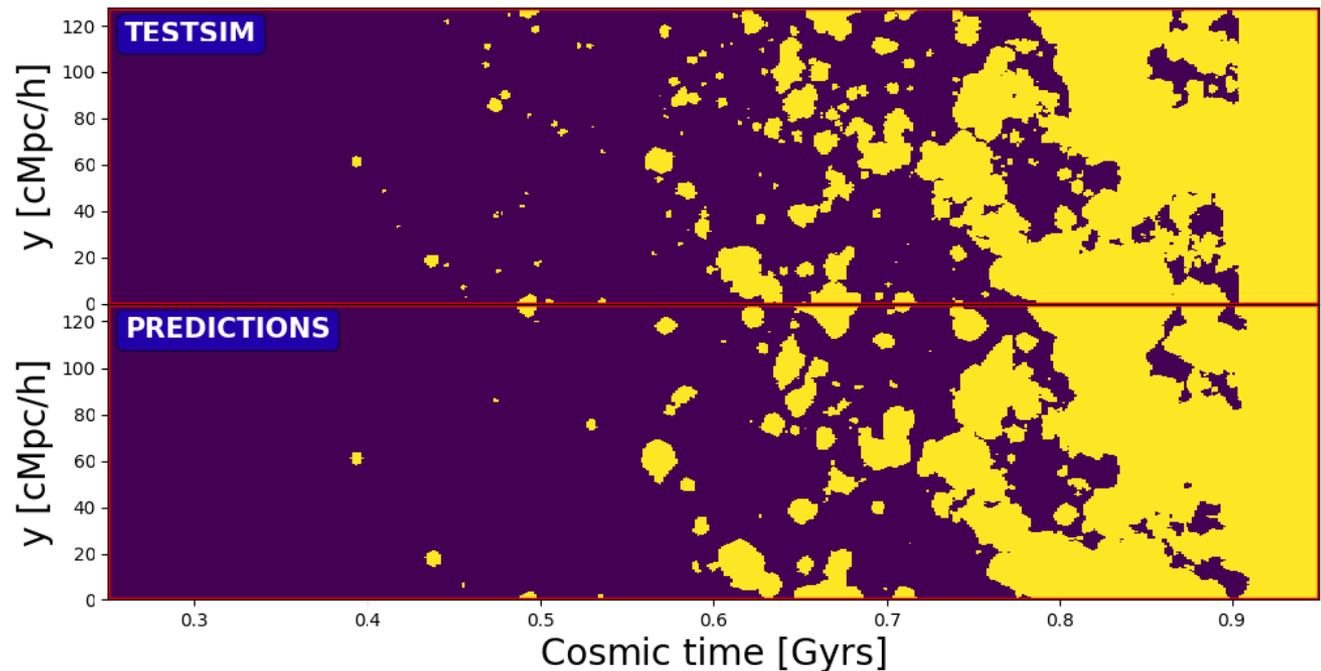
Tests sur la réionisation



Possible en 3D
mais demande une
énorme mémoire

Pas forcément
stable

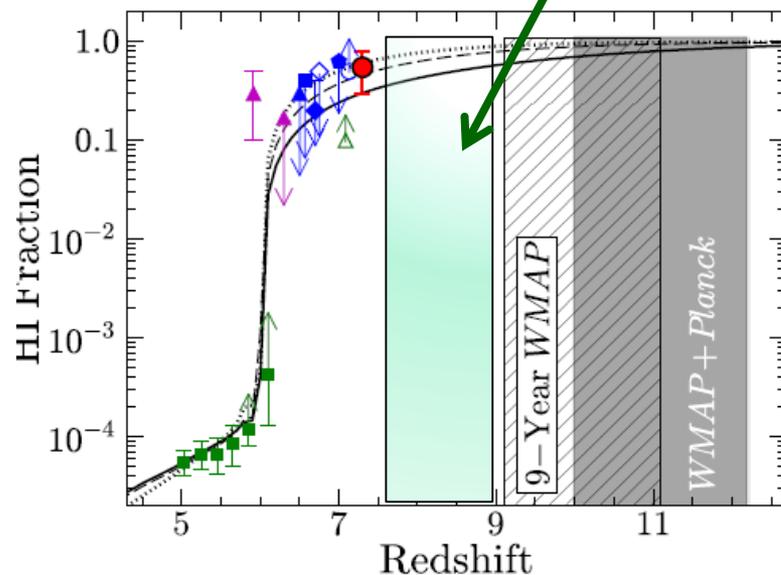
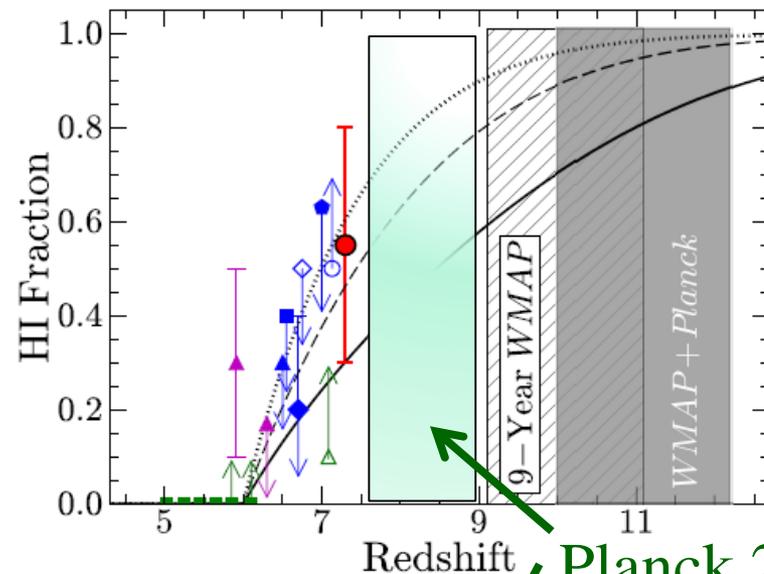
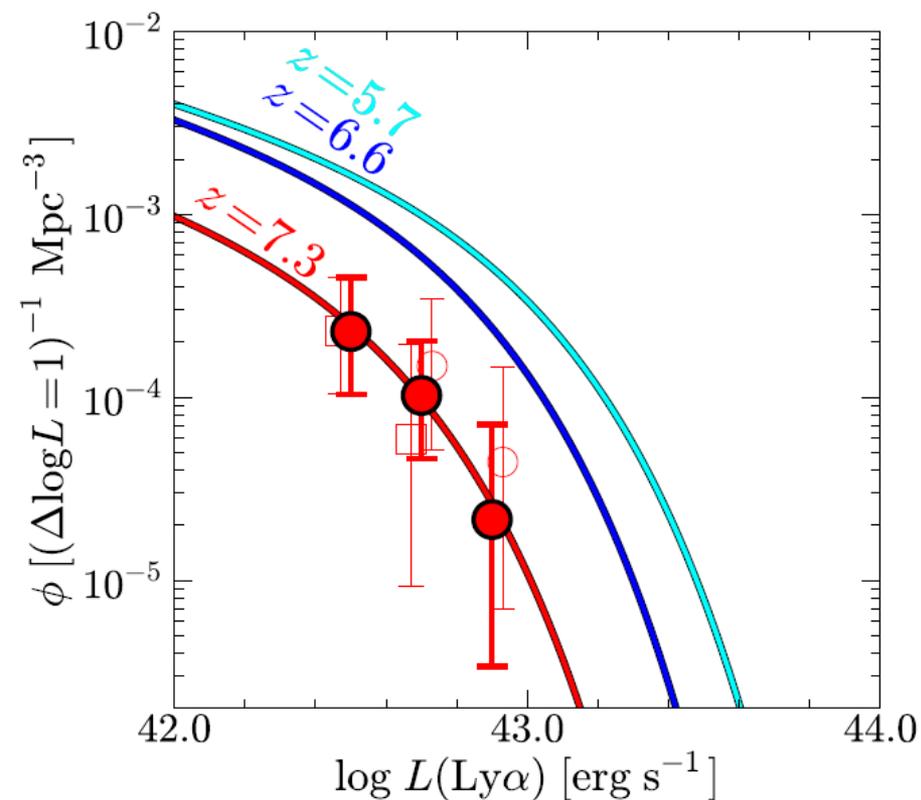
Chardin et al 2019



Indices optiques de la réionisation

Observations de la raie Ly α avec le télescope de 10m de Subaru Suprime-Cam, 70h Cosmos z=7.3

→ décroissance accélérée



Ouchi et al 2010 Konno et al 2014

Signaux 21cm attendus

Simulations rapides,
Semi-analytiques, avec des halos
noirs et des sources: QSO, étoiles

Tb



-100mK

-25mK

50mK

Redshift
8

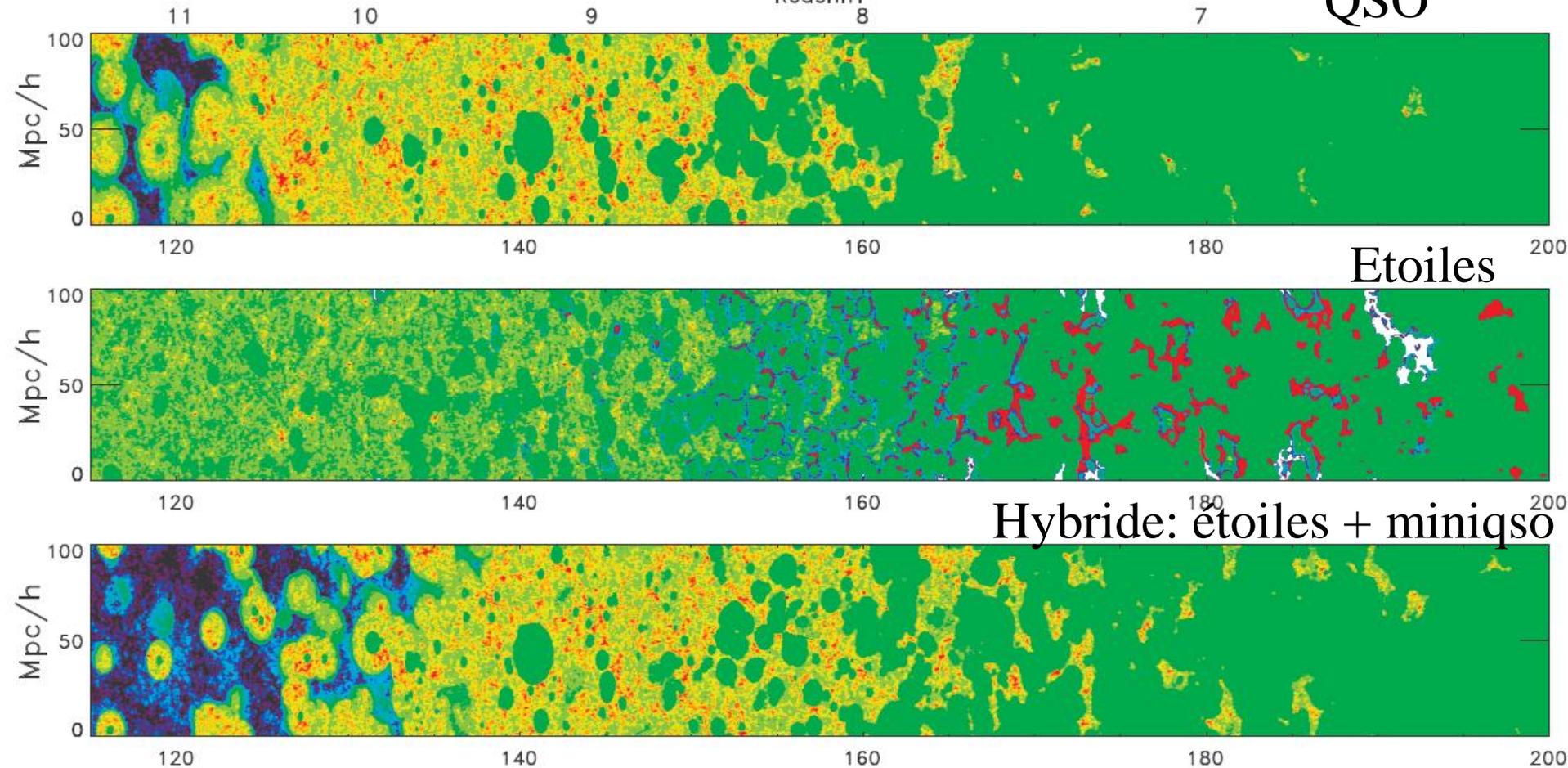
QSO

Etoiles

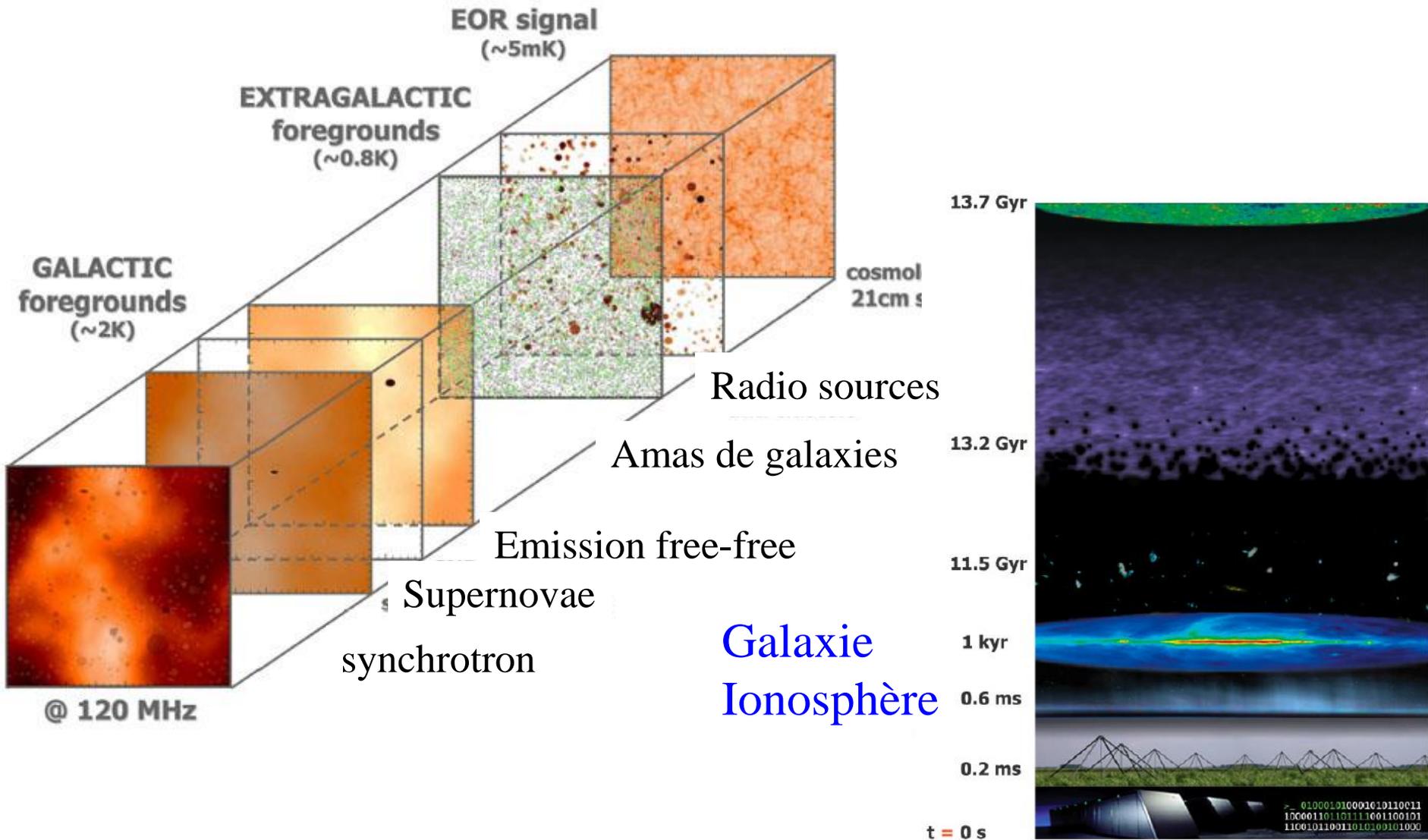
Hybride: étoiles + miniqso

Fréquence MHz

Thomas, Zaroubi et al 2009

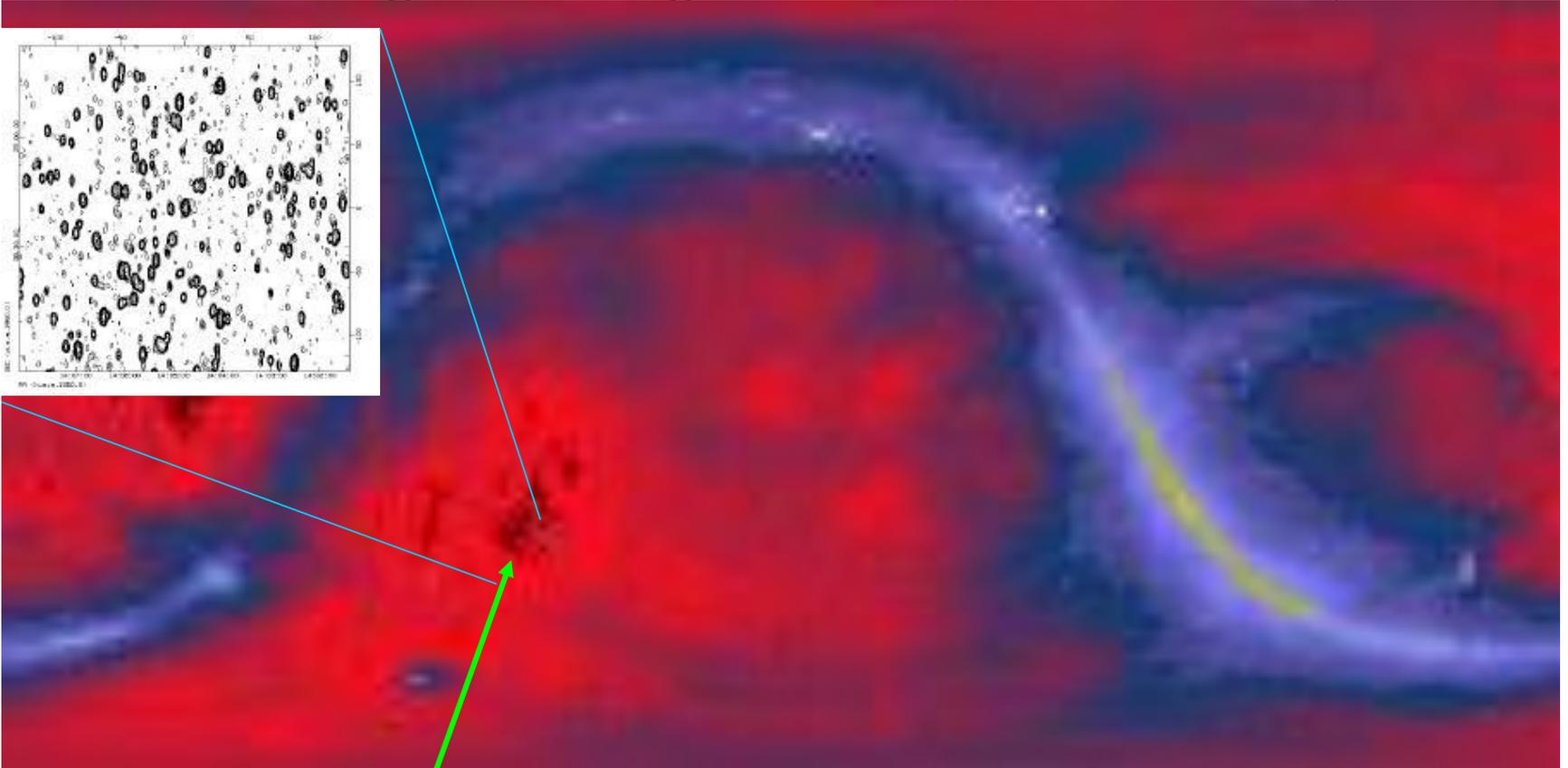


Problème des avant-plans



Avant-plan: le ciel à basse fréquence est confus

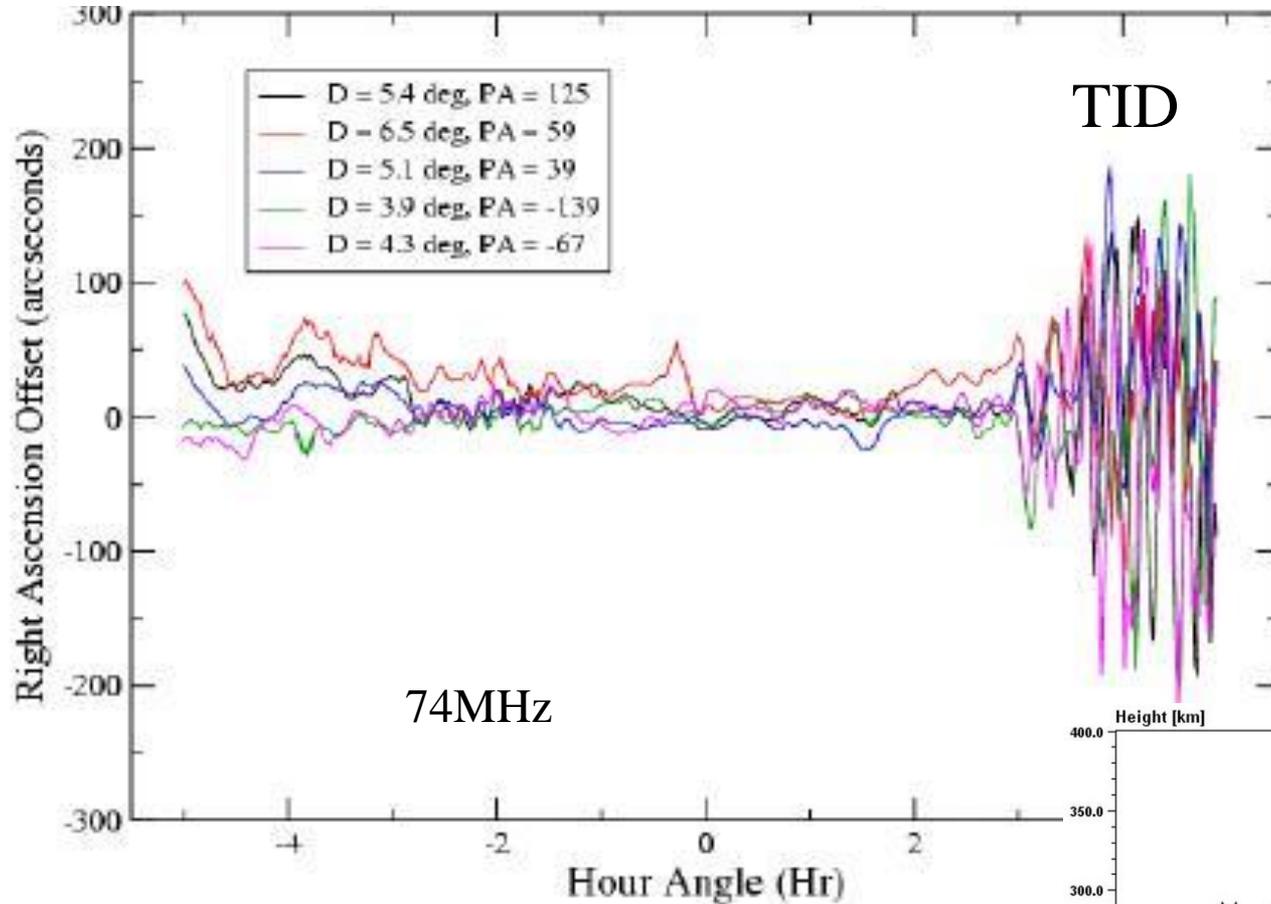
Image Effelsberg 408 MHz (*Haslam + 1982*)



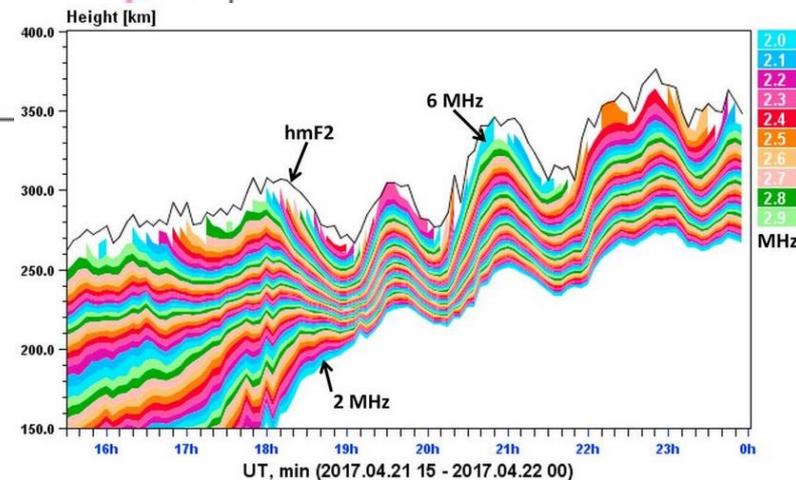
- Régions les plus froides: $T \sim 100 (\nu/200 \text{ MHz})^{-2.6} \text{ K}$
- 90% = avant-plan de la Voie lactée
- 10% = radio sources $\sim 1 \text{ source/deg}^2$ avec $S_{140} > 1 \text{ Jy}$

Ionosphère: la phase varie, contenu en électrons variable

Errance des sources dans le champ de Virgo



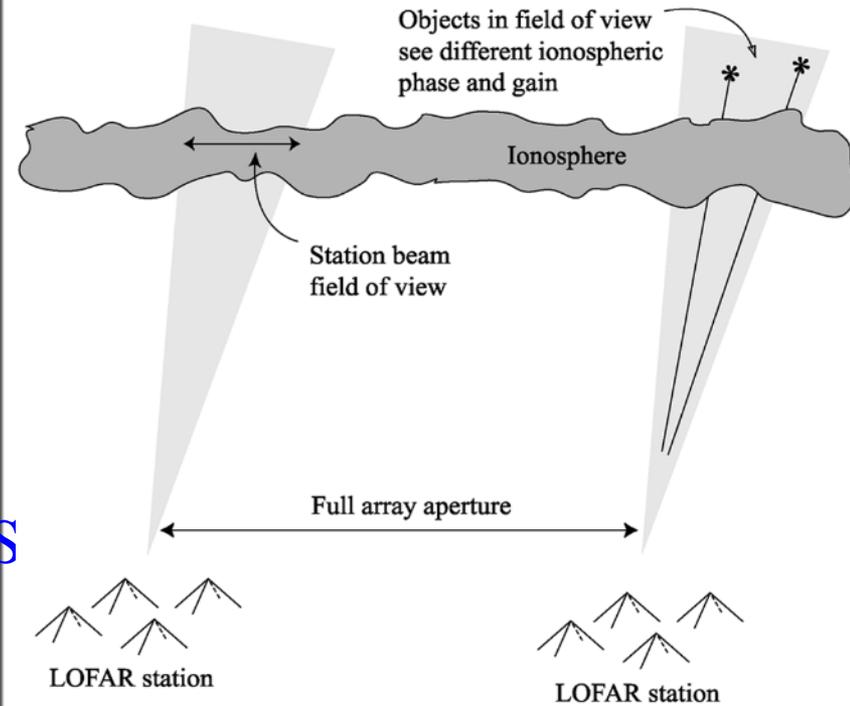
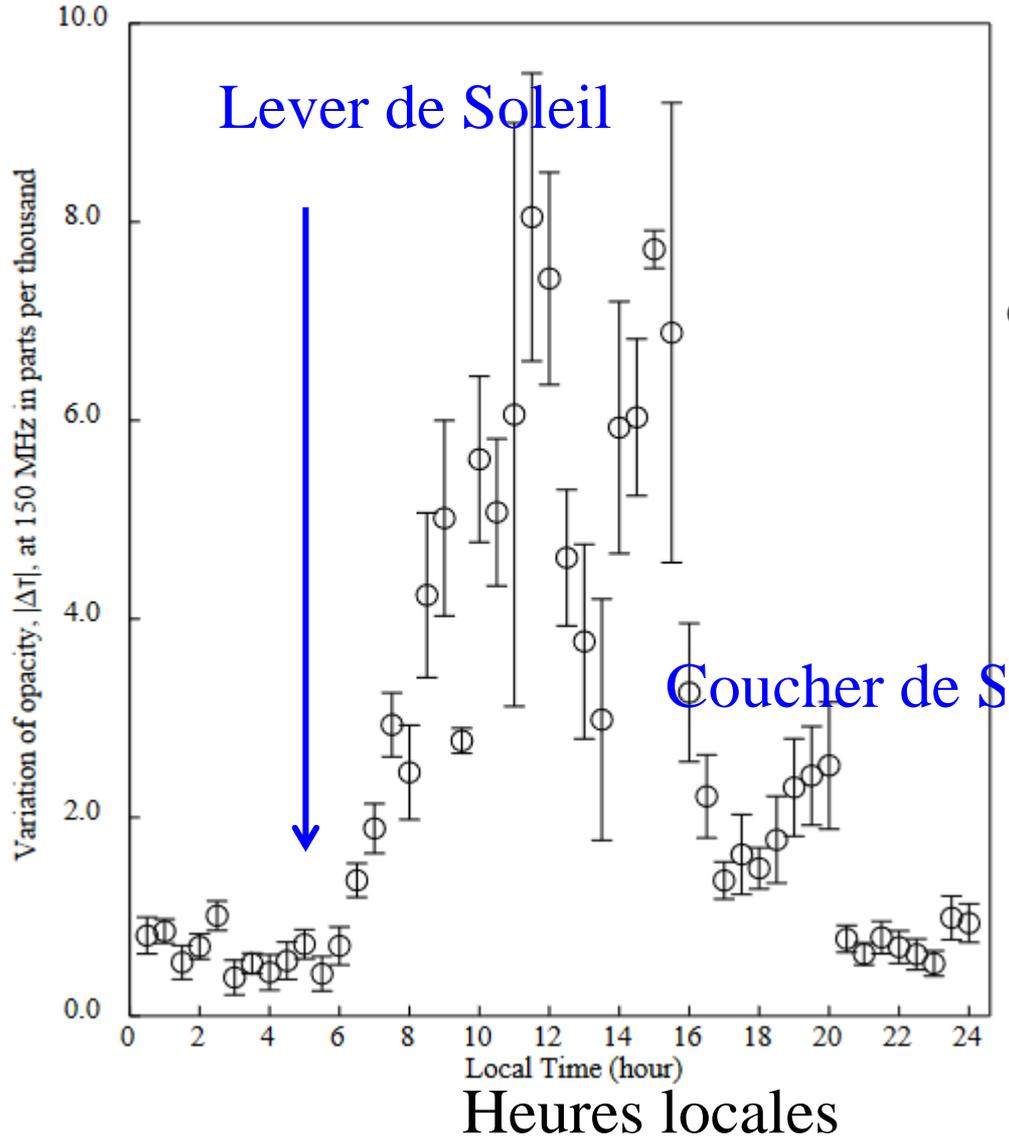
TID=Traveling
Ionospheric
Disturbanbce



- Isoplanétisme = $qq \text{ deg} = qq \text{ km}$
- Variation de la phase $\propto \lambda^2$

Perturbations de l'ionosphère

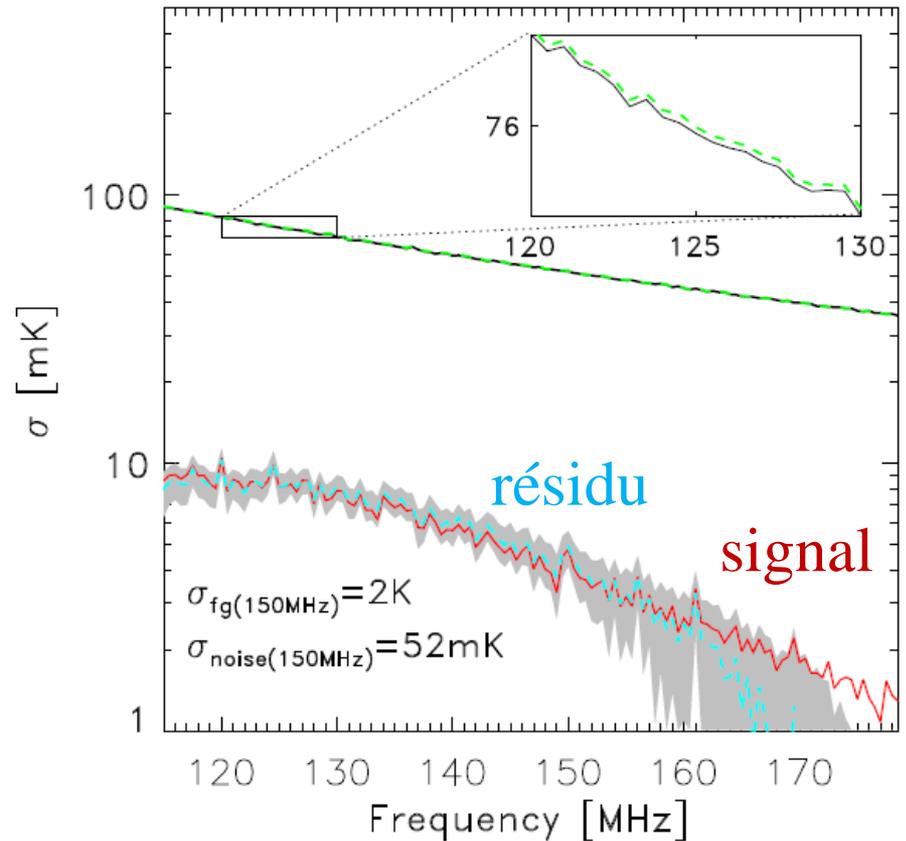
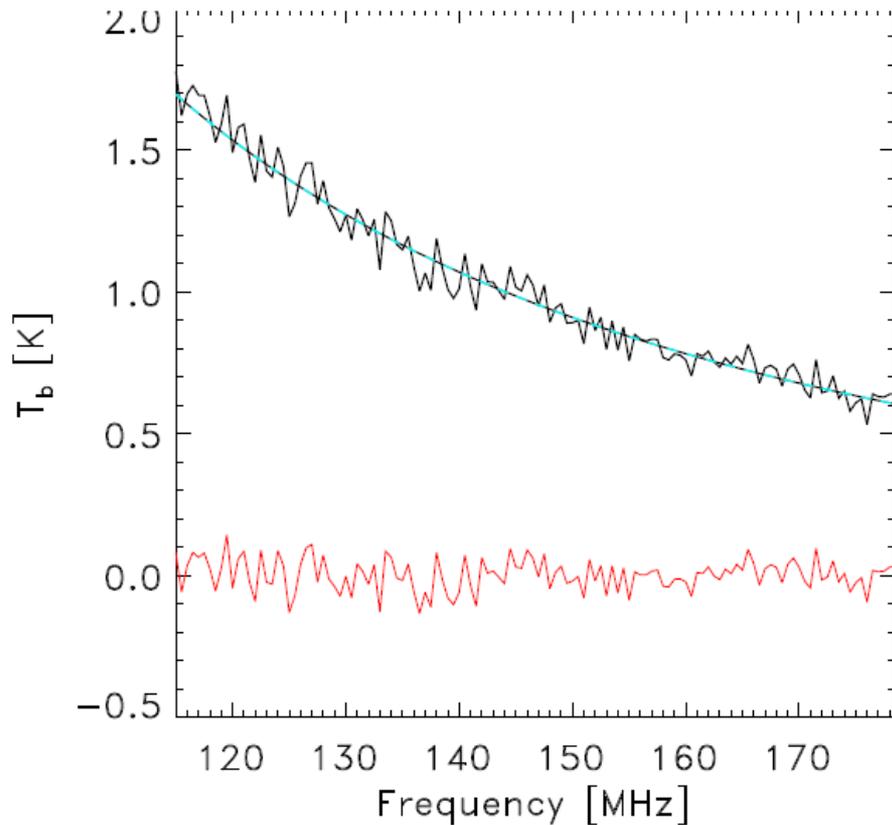
Opacité à 150MHz



Soustraction des avant-plans

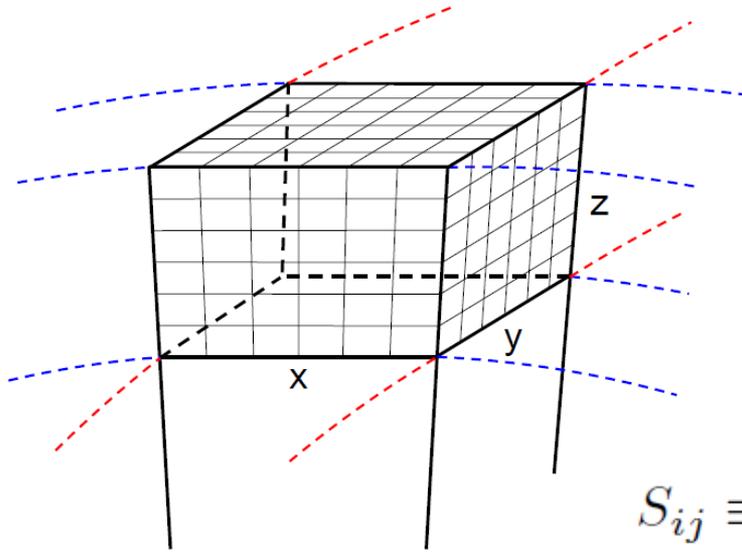
Calibration des sources et de leurs lobes secondaires associés

CygA et CasA dans le plan de la Galaxie polluent jusqu'au pôle Nord !



Spectre de Puissance $P(\mathbf{k})$

TF de la fonction de corrélation à 2 points

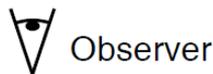


Hypothèse de la platitude

La dimension de la ligne-de visée n'est pas équivalente aux autres

$$S_{ij} \equiv \langle x_i x_j \rangle - \langle x_i \rangle \langle x_j \rangle = \int \tilde{\psi}_i(\mathbf{k}) \tilde{\psi}_j^*(\mathbf{k}) P(\mathbf{k}) \frac{d^3 k}{(2\pi)^3}$$

$$\tilde{\psi}_i(\mathbf{k}) \equiv \int e^{-i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}} \psi_i(\mathbf{r}) d^3 \mathbf{r}$$



Observer

Dillon et al 2013

On se sert des transformées de Fourier, et des fréquences spatiales

$$k_{\perp}^2 \equiv k_x^2 + k_y^2 \quad \mathbf{k} = 2\pi/\lambda$$

k_{\parallel} est la fréquence, et normalement devrait être lisse dans les avant-plans

Problèmes instrumentaux

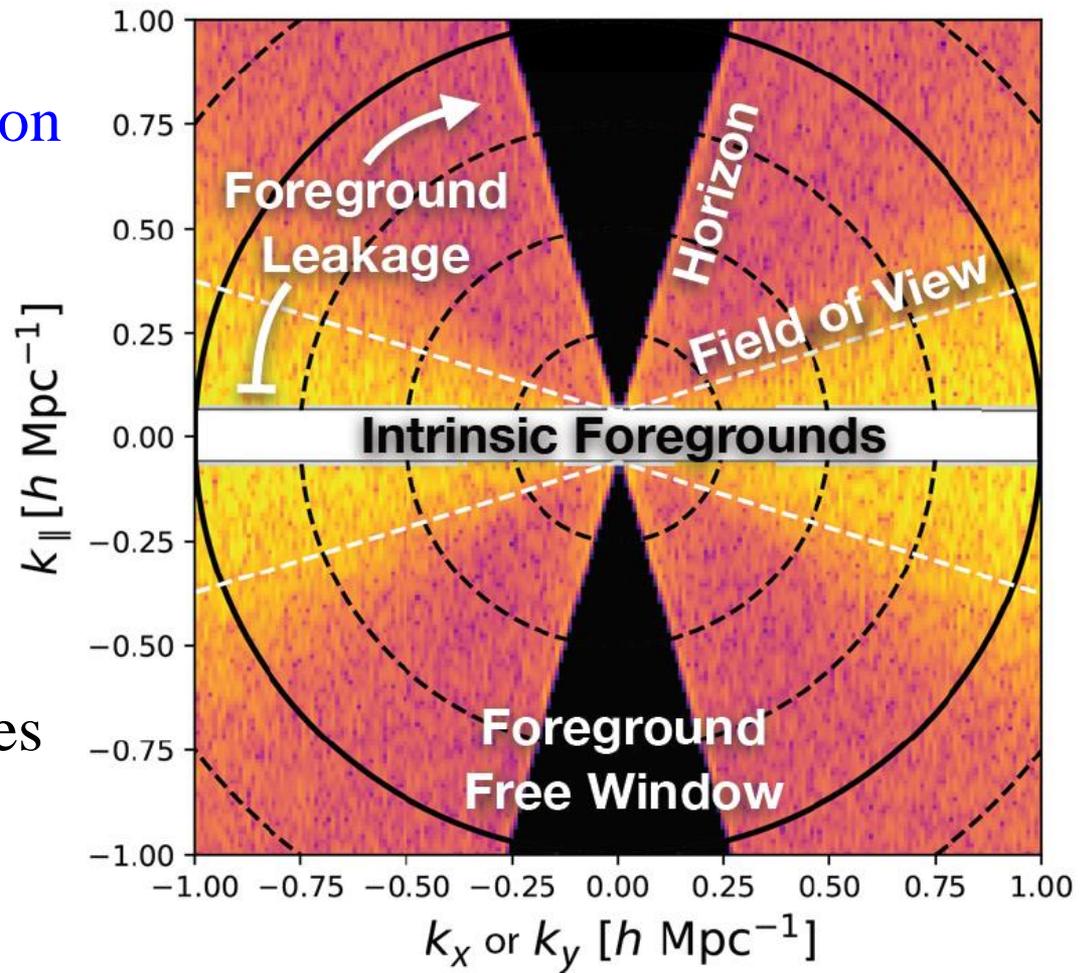
Les avant-plans sont 10 000 fois plus intenses que le signal
Il faut donc calibrer à 10^{-5} !

Normalement, les avant-plans sont lisses en fréquence, donc tombent dans les faibles k_{\parallel}

Mais en pratique, la calibration et la polarisation font rentrer des composantes bruitées dans les forts k_{\parallel}

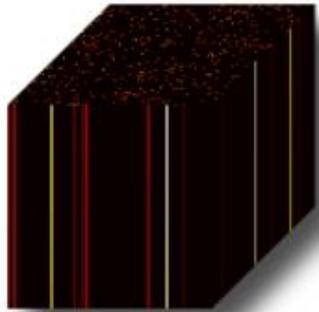
La fenêtre libre est très restreinte, vers les faibles k

➔ Besoin de bases compactes

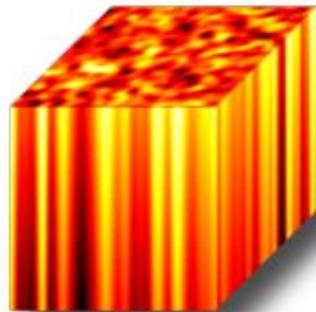


Contamination des avant-plans

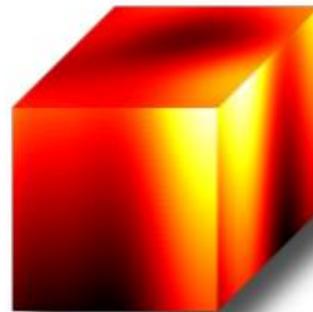
Resolved Point Sources



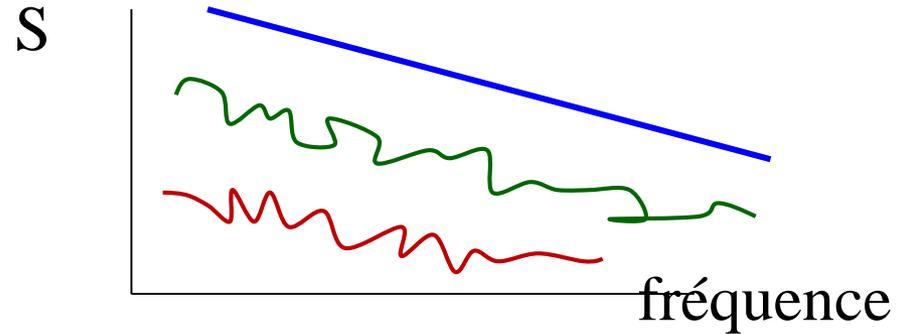
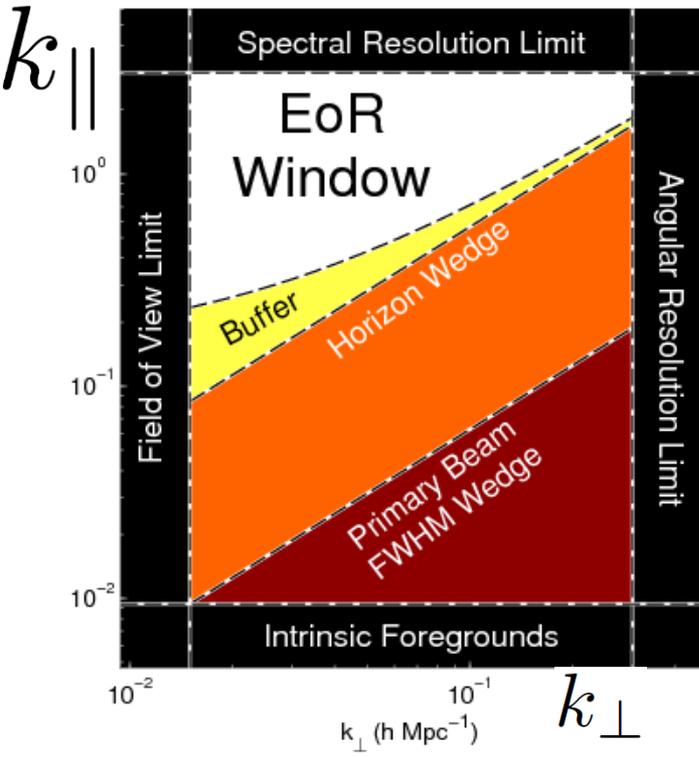
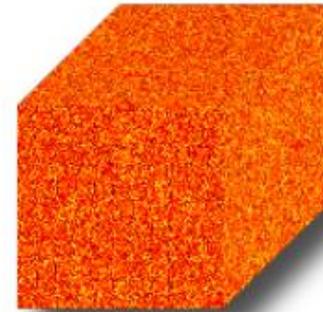
Unresolved Point Sources



Galactic Synchrotron



Detector Noise



La fenêtre est retreinte à cause d'échelles variables du bruit, des PSF variables, ou de la polarisation qui dépend la fréquence

EDGES: Experiment to Detect the Global EoR Signature



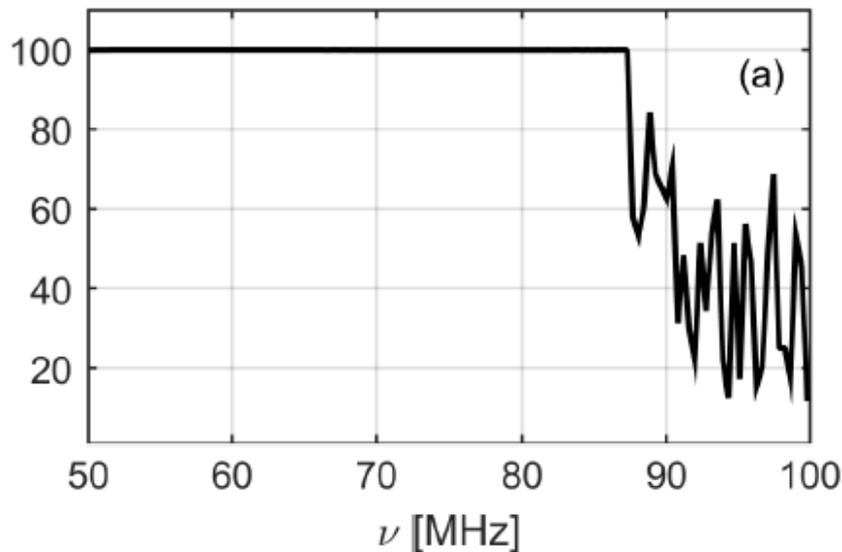
MIT → MRO Murchison Radio Observatory



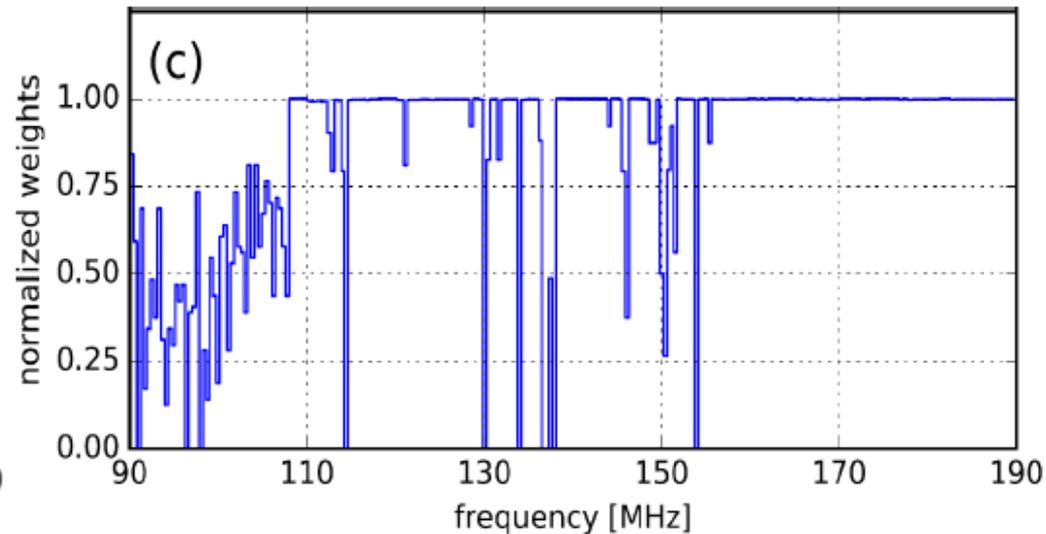
Interférences et occupation des bandes

MRO: Site assez protégé en radio-fréquence:
Complètement libre en dessous de 87.5 MHz

50-100MHz: Fréquence basse



90- 190MHz, Fréquence haute



Bande FM: 87.5 – 108 MHz

En dehors, il existe des interférences

RFI (Radio Frequency Interference)

EDGES-0: 2006



EDGES-1: 2009



Plusieurs expériences
Avec ou sans grille au sol
Dipôle orienté E-W, N-S

Avec différentes
adaptations impédance, etc

EDGES-2: 2016-19 Basse fréquence

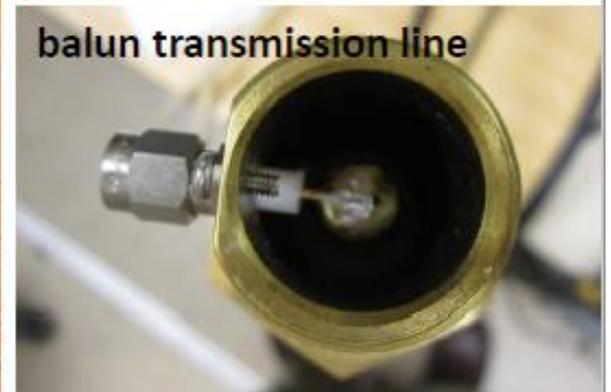
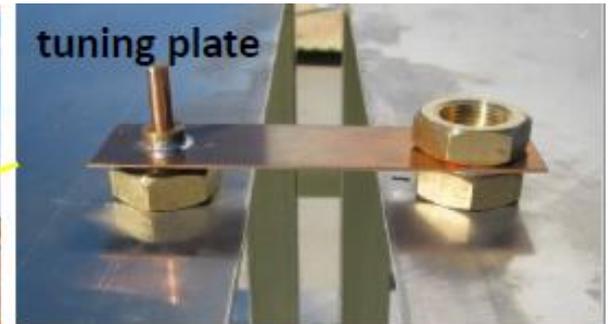


EDGES-2: 2016-19 Haute fréquence

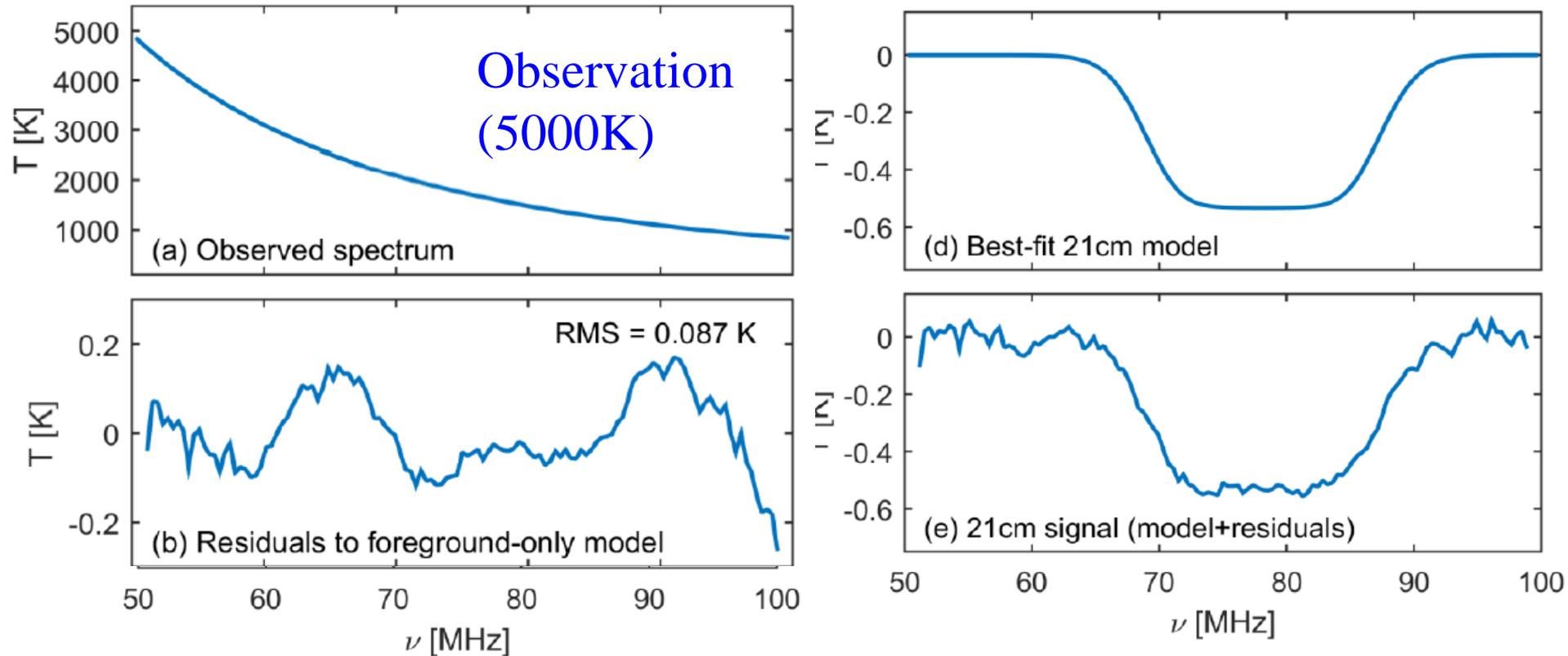


50-100MHz,
90-190MHz

EDGES-2: antenne et adaptateur



Résultats, détection publiée



Après soustraction
d'un polynome (0.2K)

Diverses vérifications

H1 – grille10x10

Heures S/N

528 30

H2 – grille30x30

428 52

H3 – recal receiver

64 13

H4 – NS

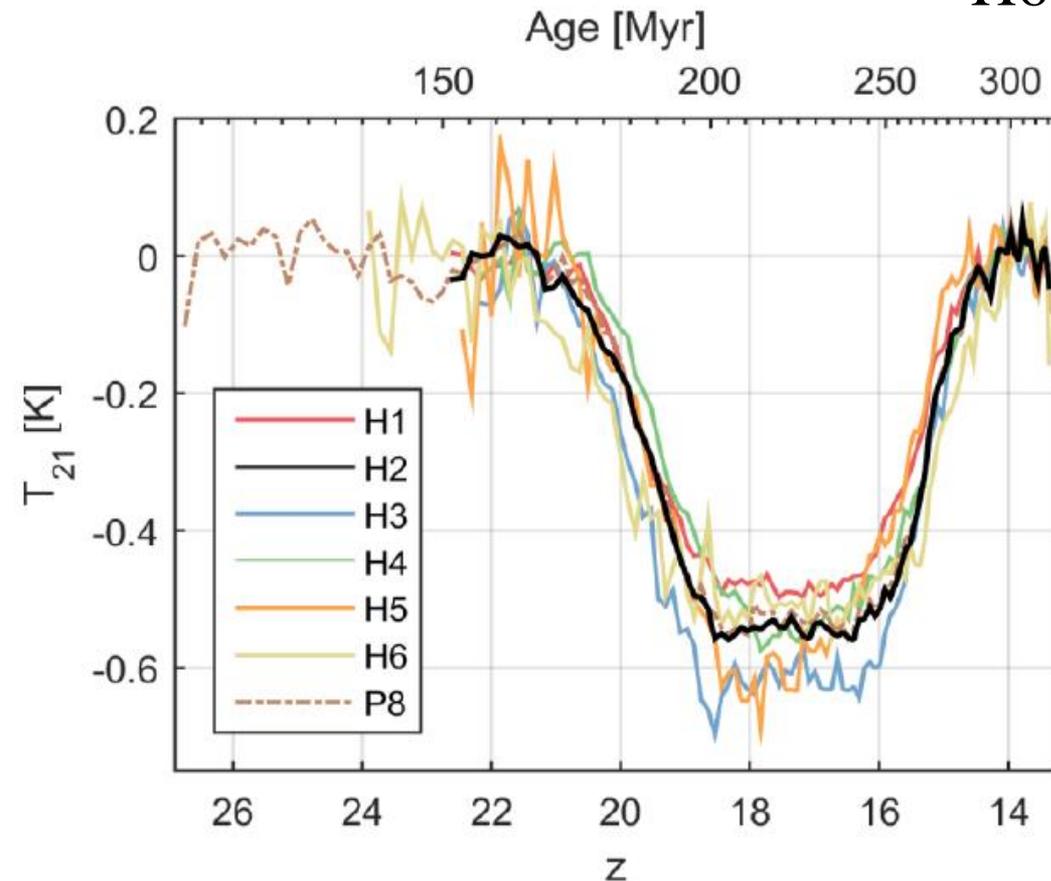
228 33

H5 – EW

68 19

H6 – EW no balun

27 15

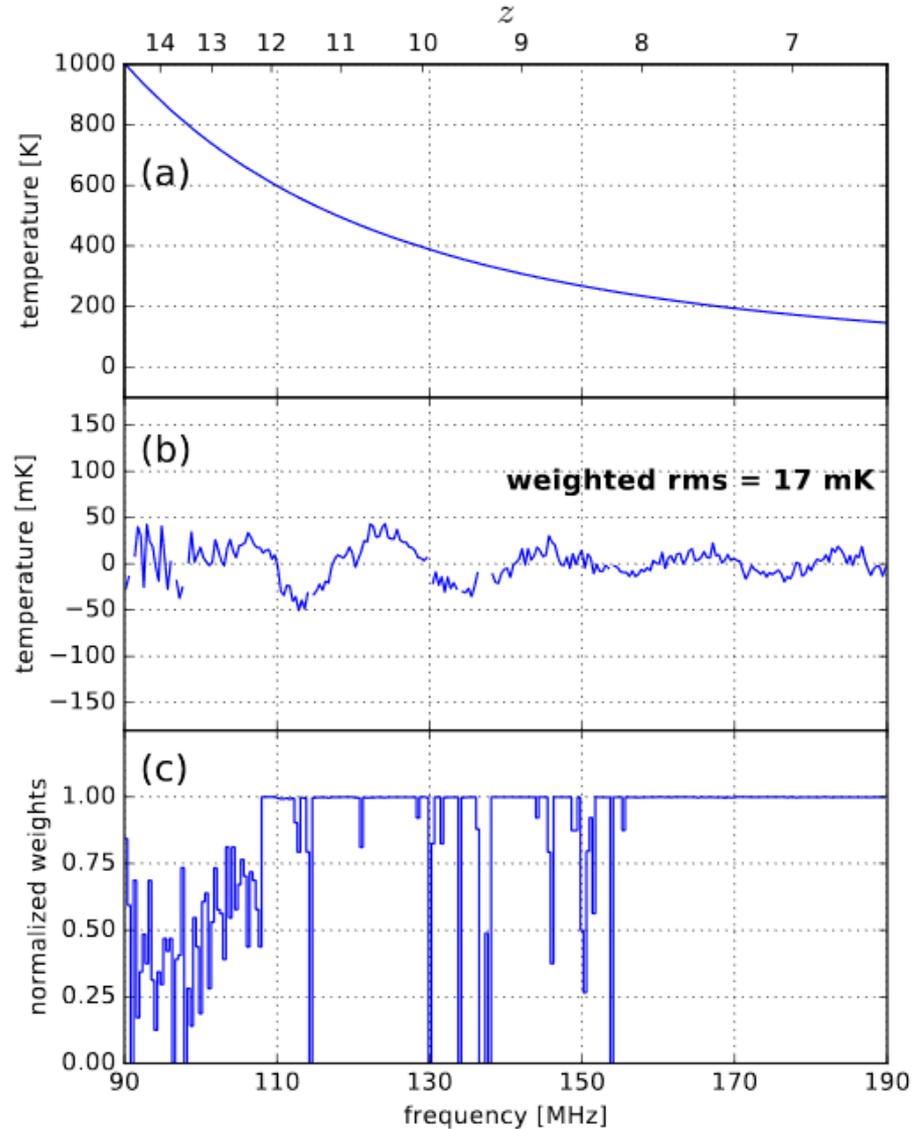
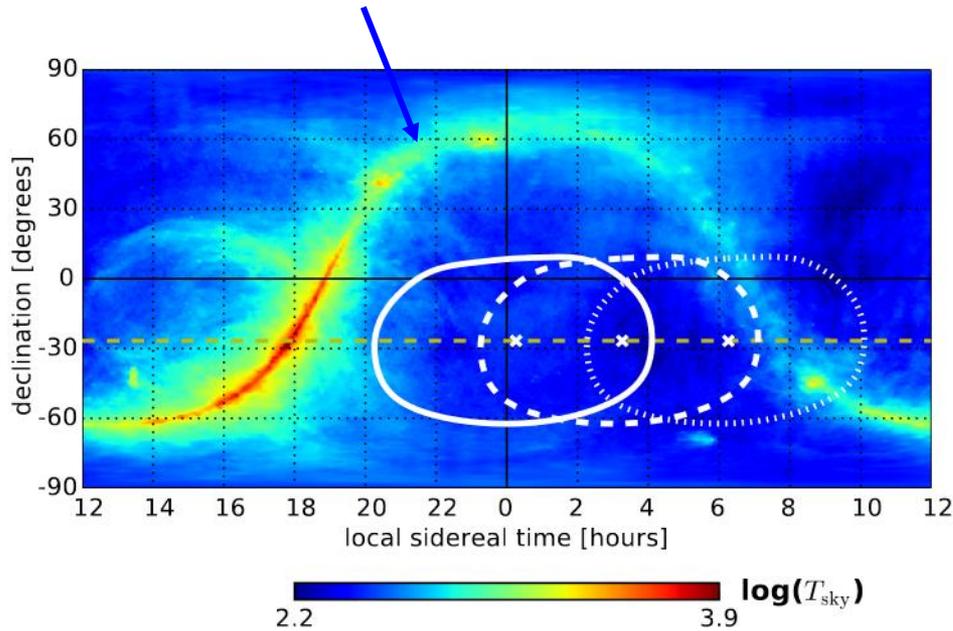


P8: autre modèle d'avant-plans

Balun: adaptation
d'impédance

EDGES: Haute fréquence

Voie Lactée

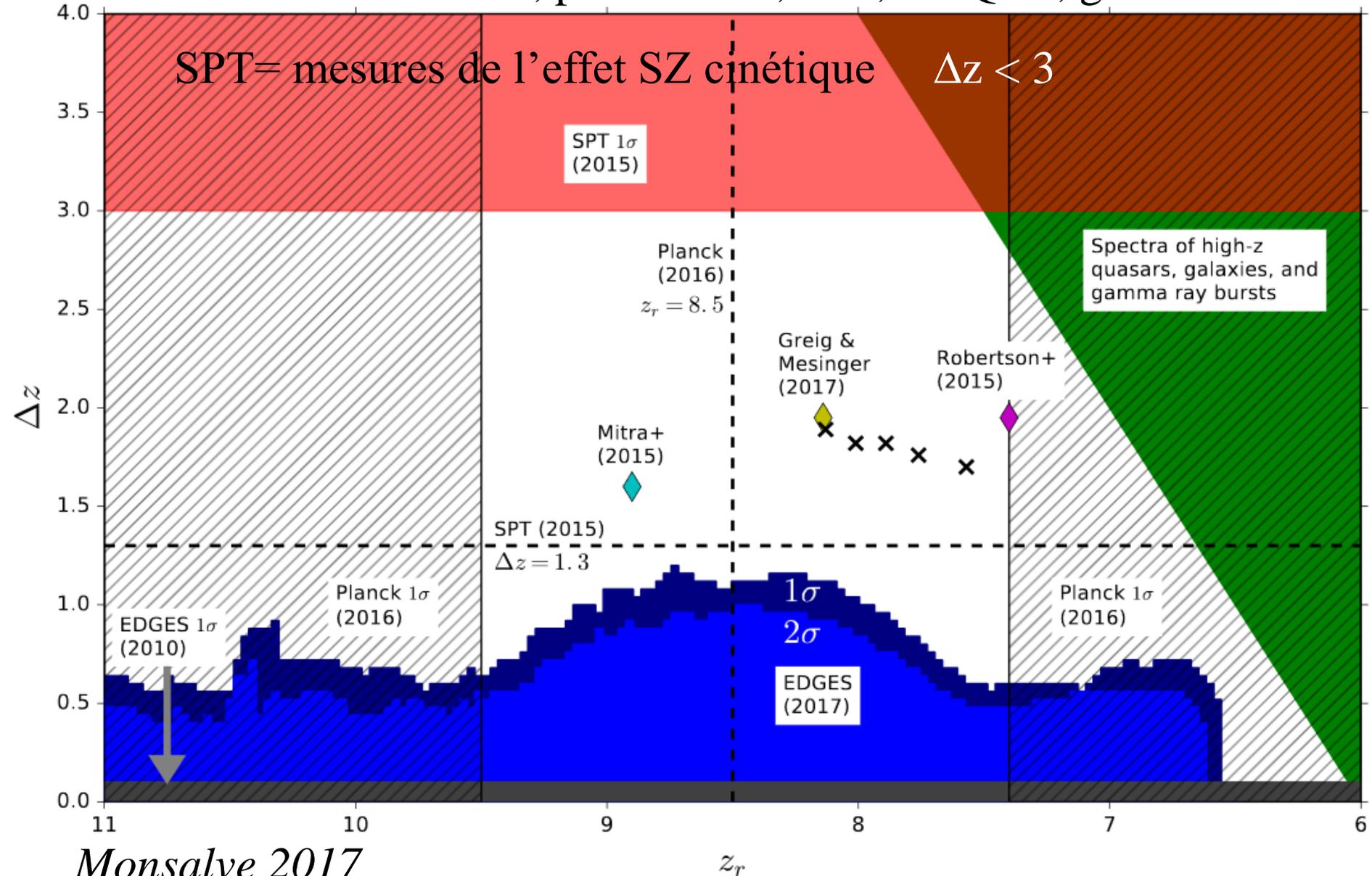


90-190 MHz, ou $6.5 < z < 14.8$

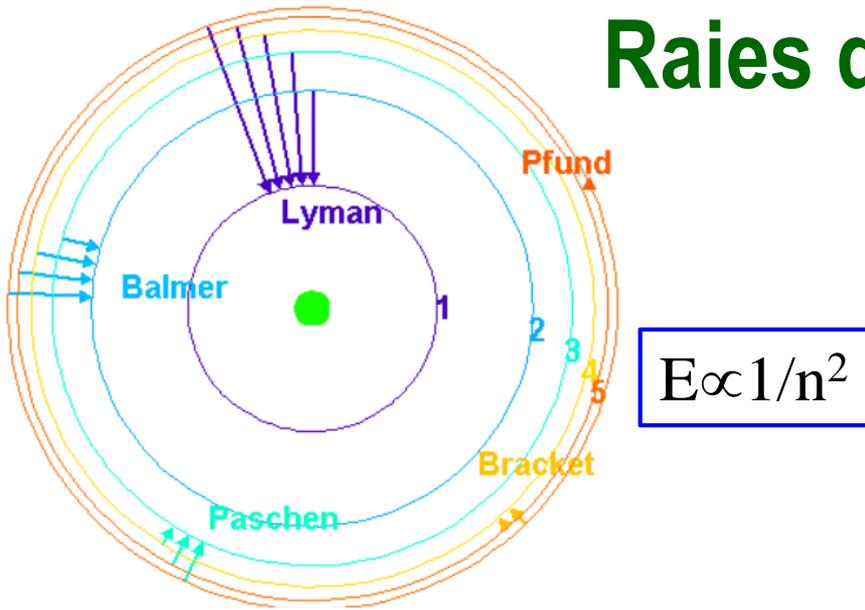
Vagues de la ligne de base de 20MHz
dus à des réflexions mal calibrées

Contraintes sur la durée: Δz doit être >1.3 (edges)

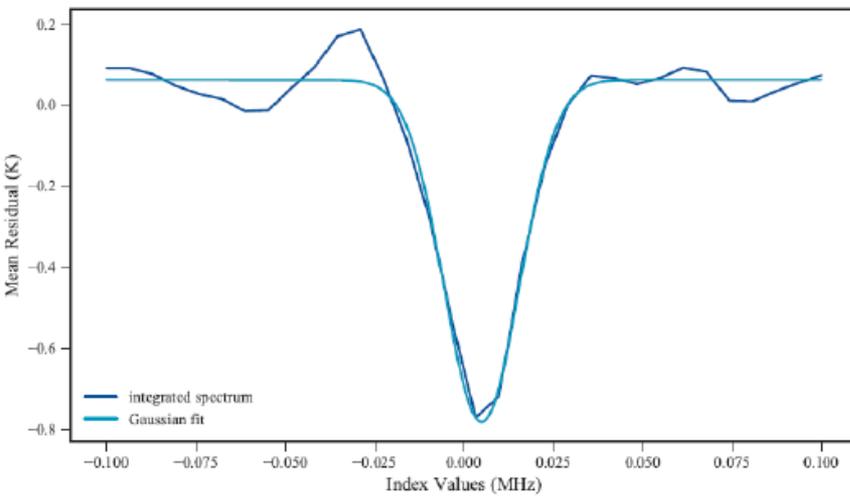
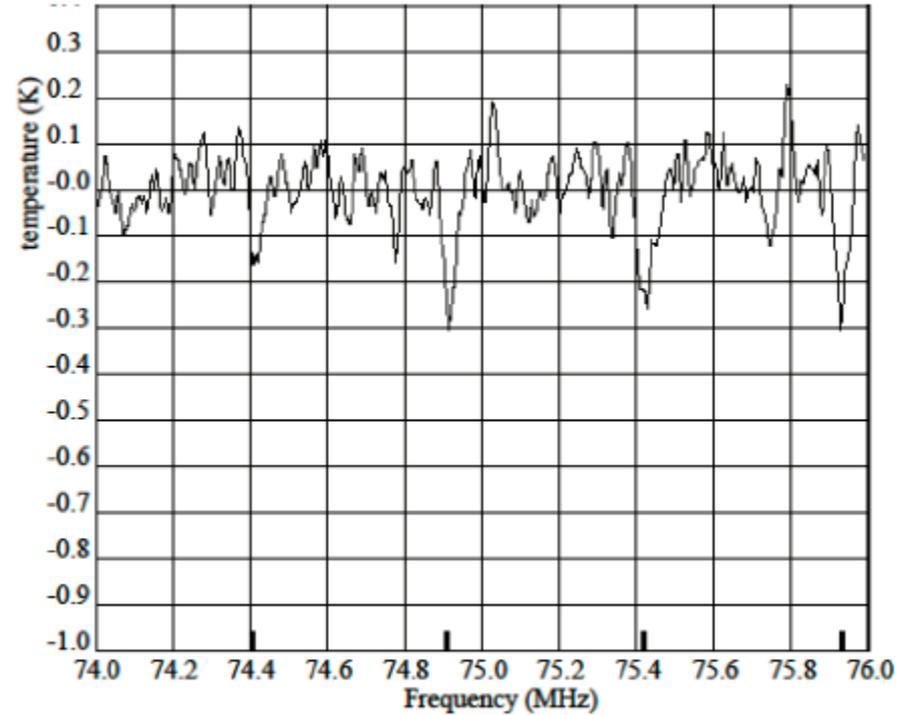
Diverses contraintes, par le CMB, SPT, les QSO, galaxies..



Raies de Recombinaison Radio



C445 α C444 α C443 α C442 α



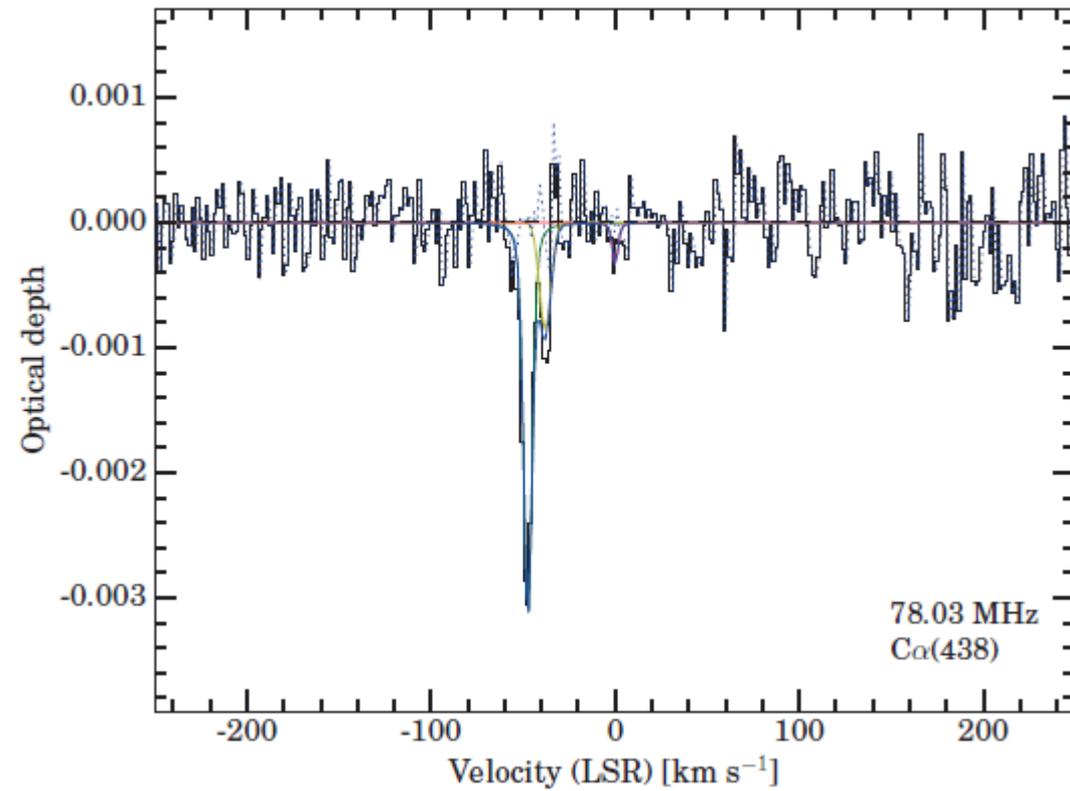
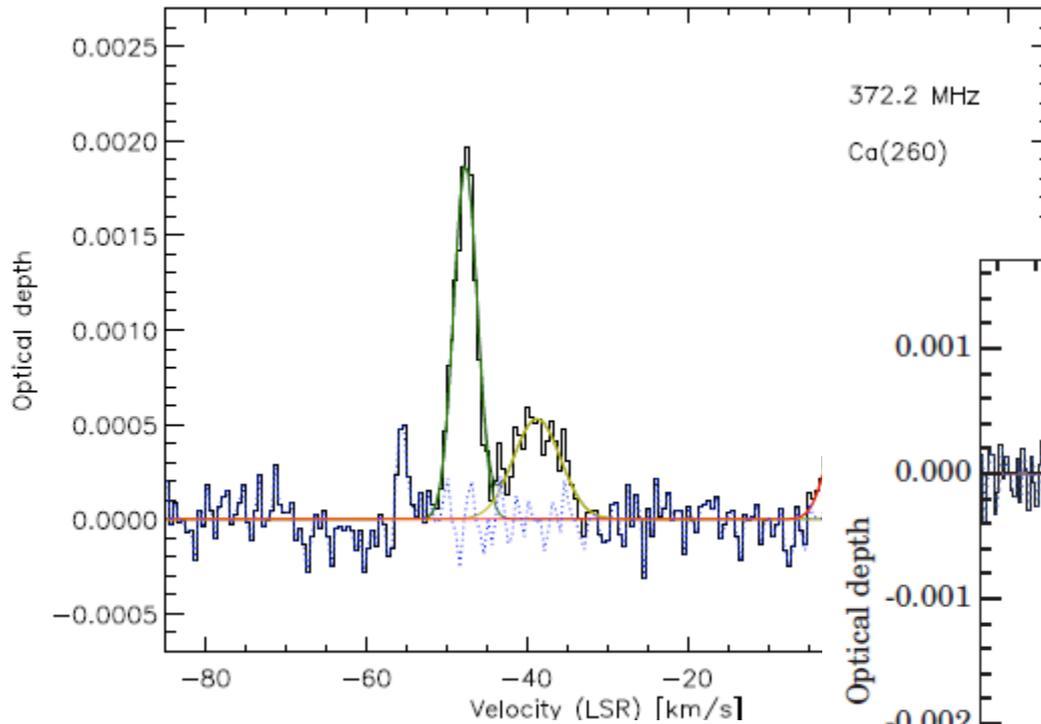
Raies de recombinaison du carbone n=442, 443, 444 et 445

85 raies de recombinaison sommées de 50 à 86 MHz

Raies de recombinaisons de C, direction CasA

Limite entre absorption et
émission 150 MHz

Absorption LOFAR 33-78 MHz

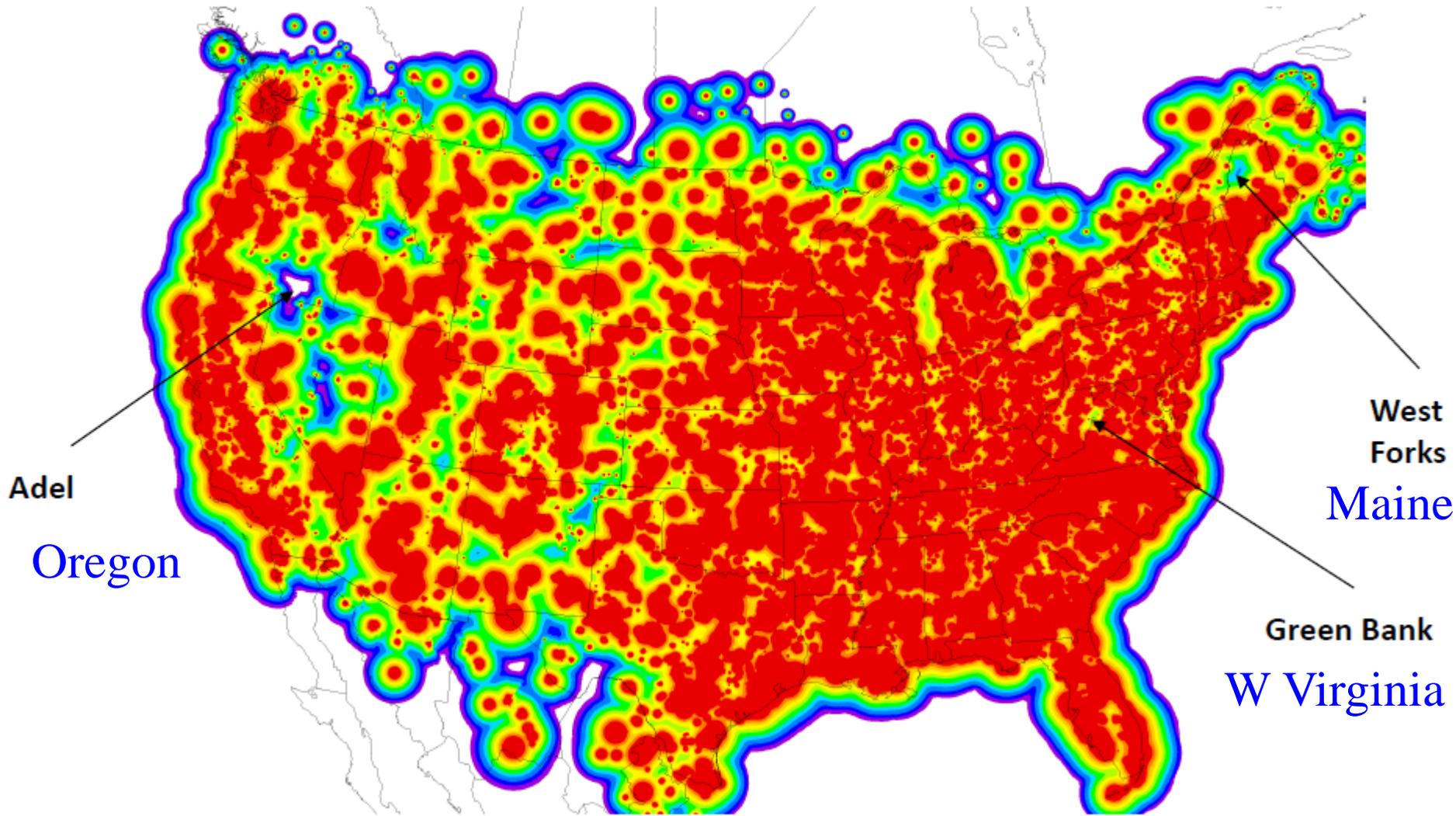


Émission WSRT 370 MHz

Permet d'avoir les densités et
températures du milieu diffus

$T \sim 75\text{K}$, $n_e \sim 0.02\text{ cm}^{-3}$

Autres sites silencieux, aux USA



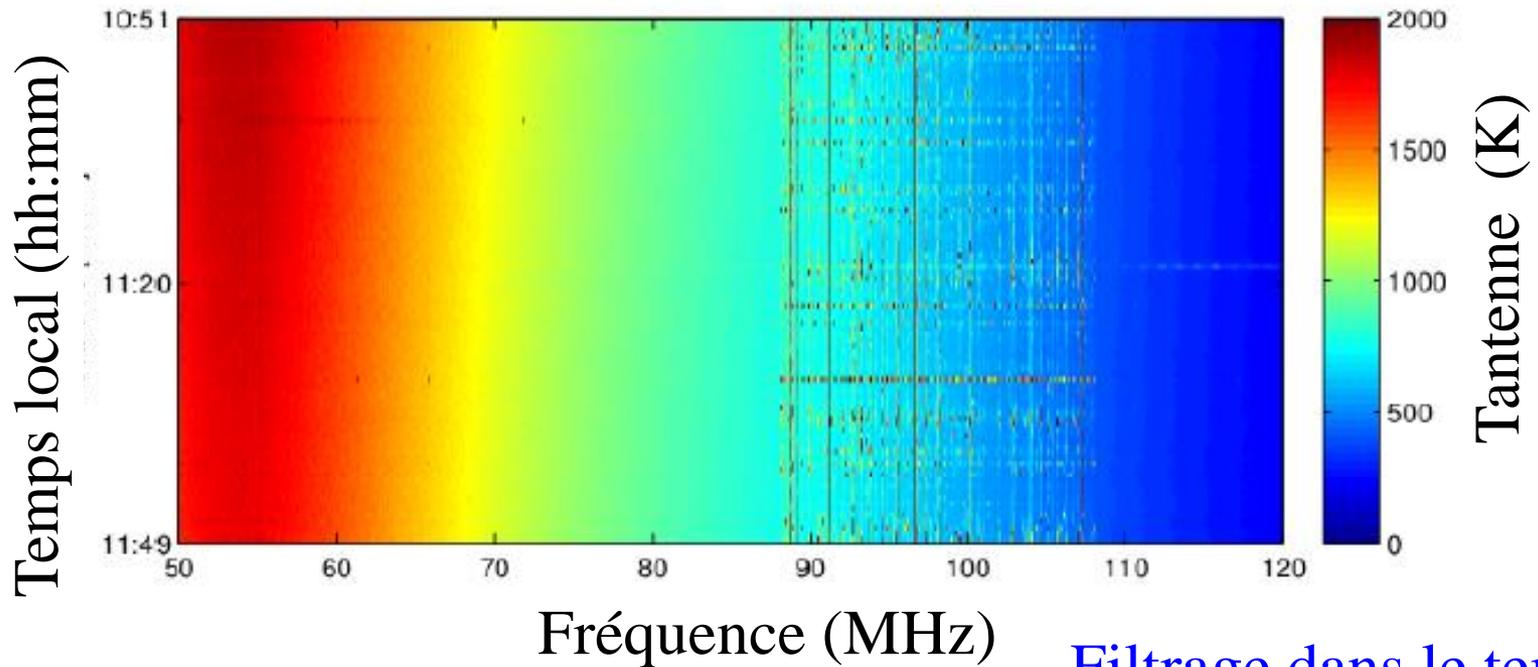
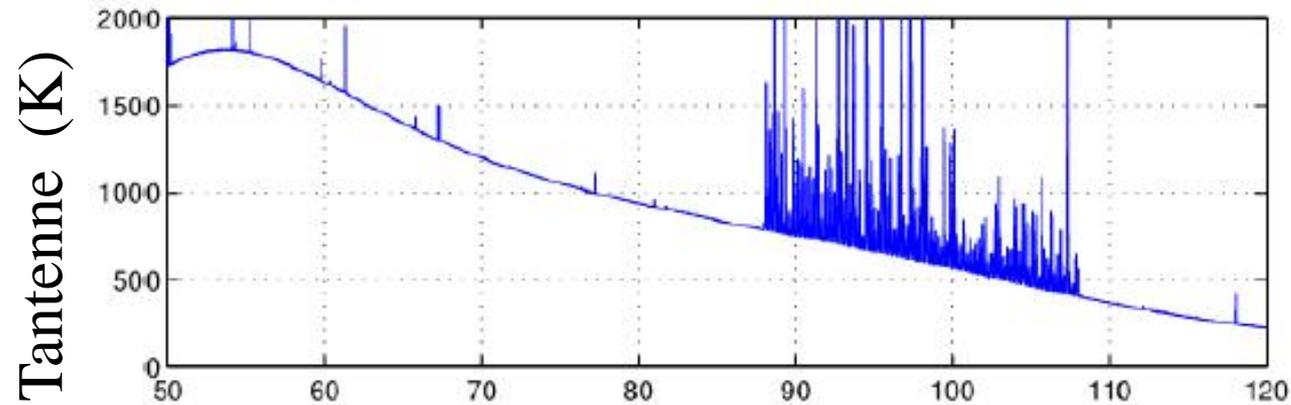
West Forks, Maine et Adel, Oregon, (Bande FM, radio-locator.com)
mieux que Green Bank (West Virginia)

EDGES-3 (Oregon)



Rogers & Barrett 2019

Suppression des RFI, de la bande FM

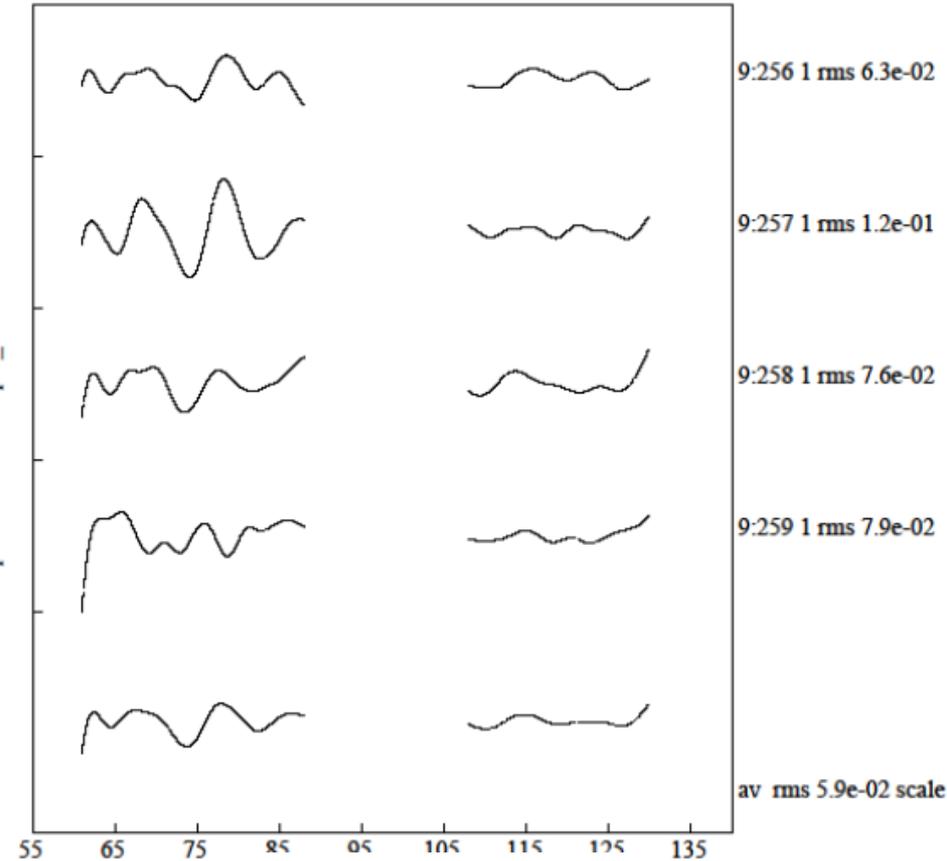
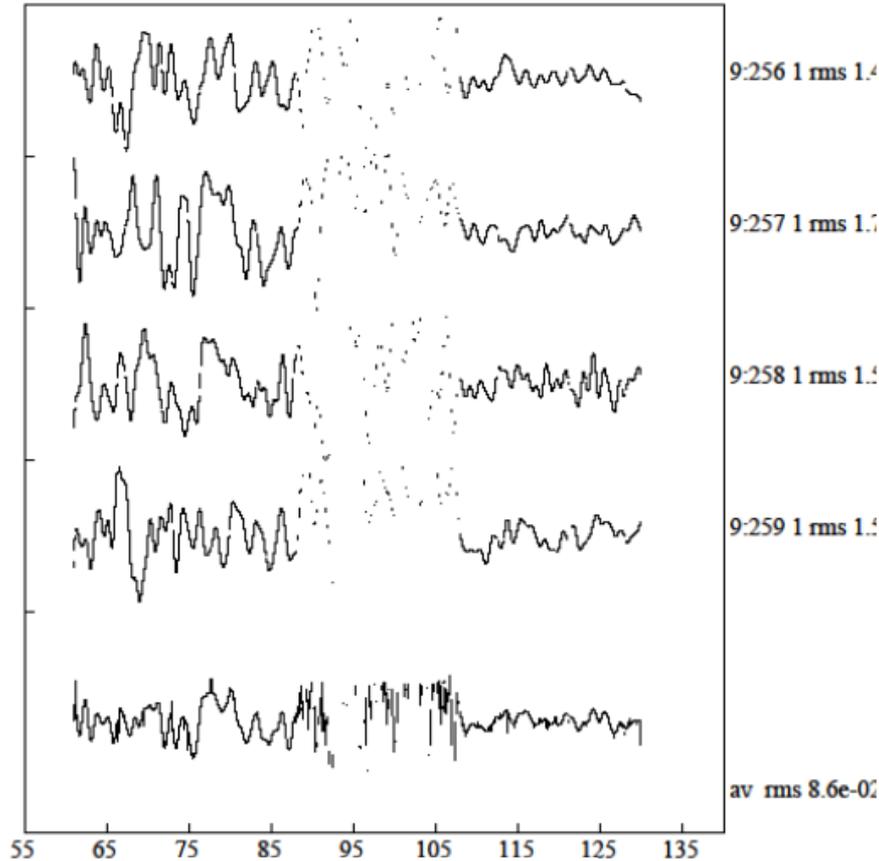


Filtrage dans le temps

Premiers résultats Oregon 60-130 MHz

rms 86 mK

rms 59 mK



Fréquence (MHz)

Fréquence (MHz)

Résolution 0.8 MHz

Résolution 3 MHz

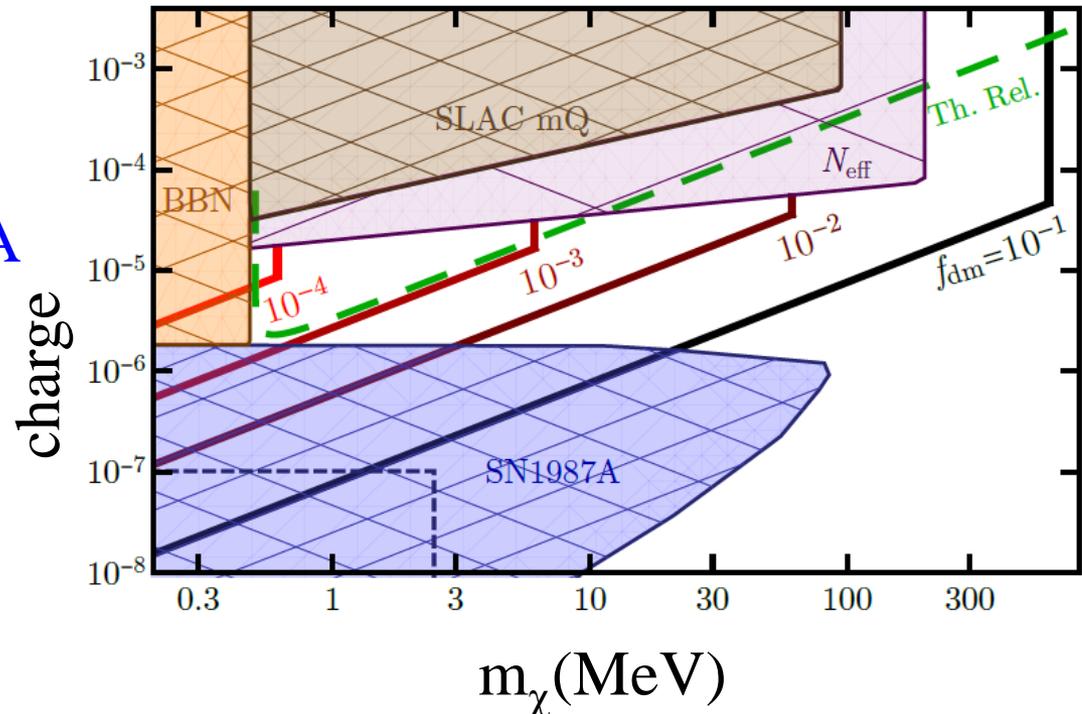
5 termes de polynomes soustraits (4 jours d'observation)

Comment expliquer le signal de EDGES?

L'amplitude de l'absorption (500mK) est bien plus grande qu'attendue
Il faudrait trouver un mécanisme pour refroidir le gaz!

→ Matière noire qui interagit avec la matière (Munoz & Loeb 2018)
Pour cela elle serait chargée, d'une **mini-charge** $10^{-6} e$, seulement
une partie $<1\%$ (sinon interaction avec le champ magnétique, etc..)
La matière noire froide,
refroidirait le gaz

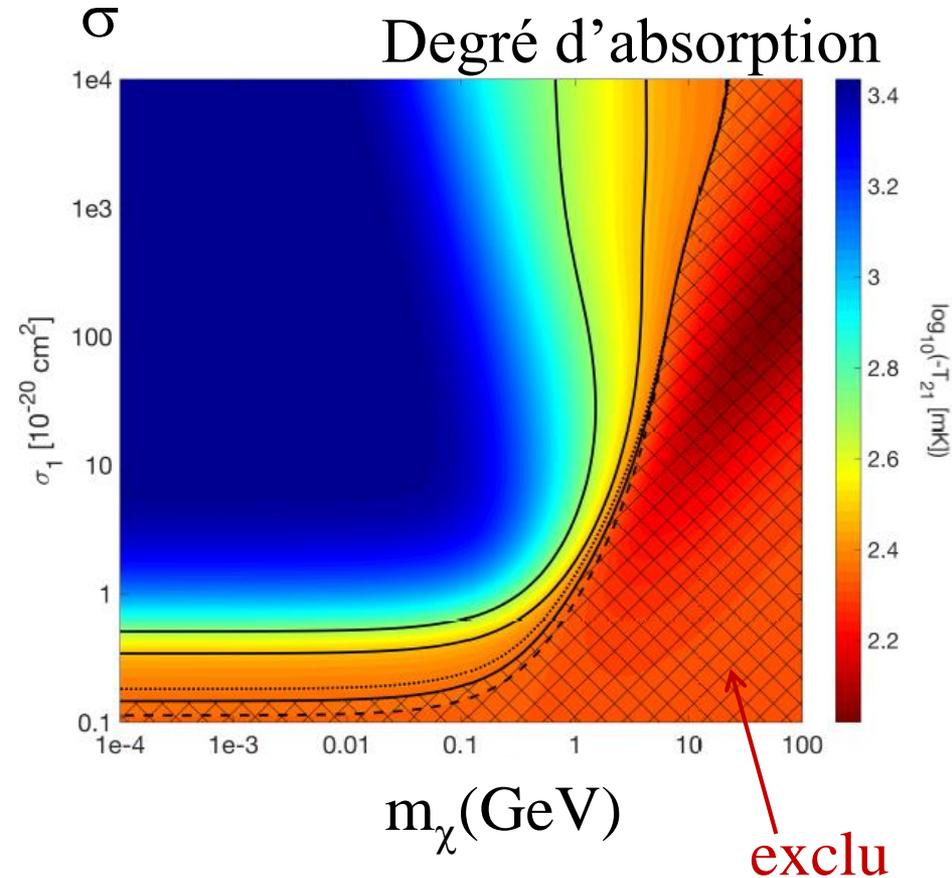
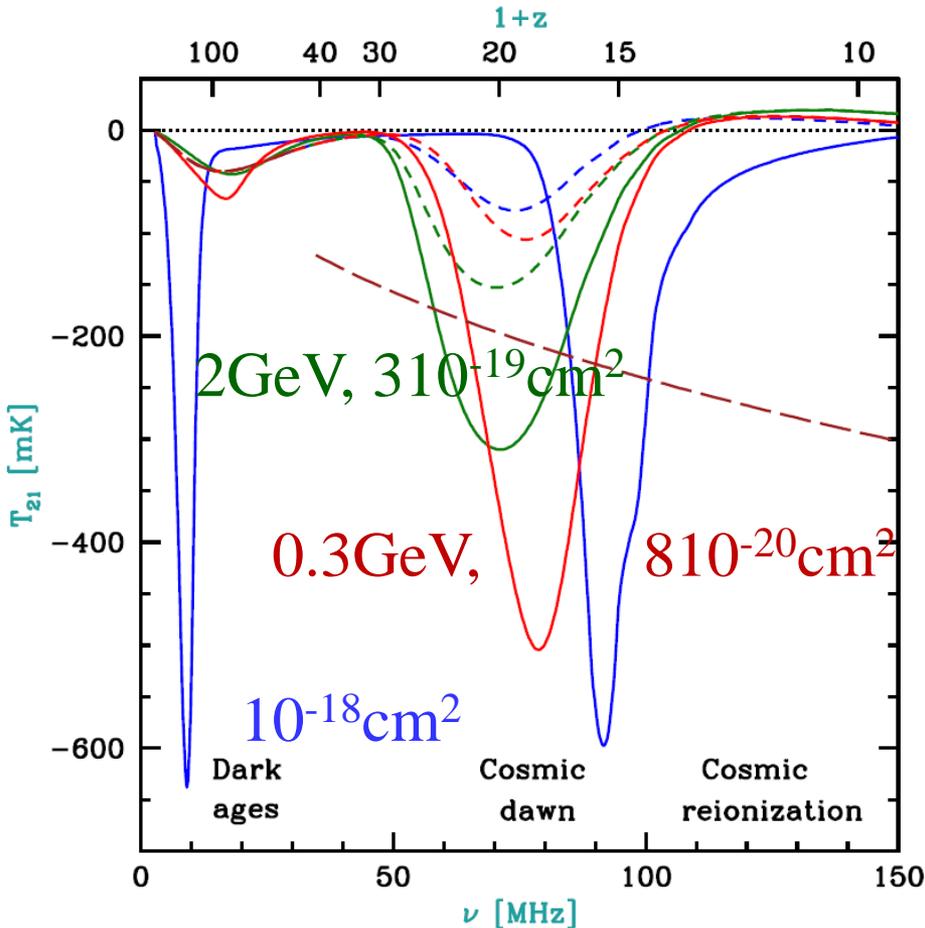
Contraintes sur la SN87A
le Big-bang, les
Photons noirs (N_{eff})
L'expérience mQ
du SLAC



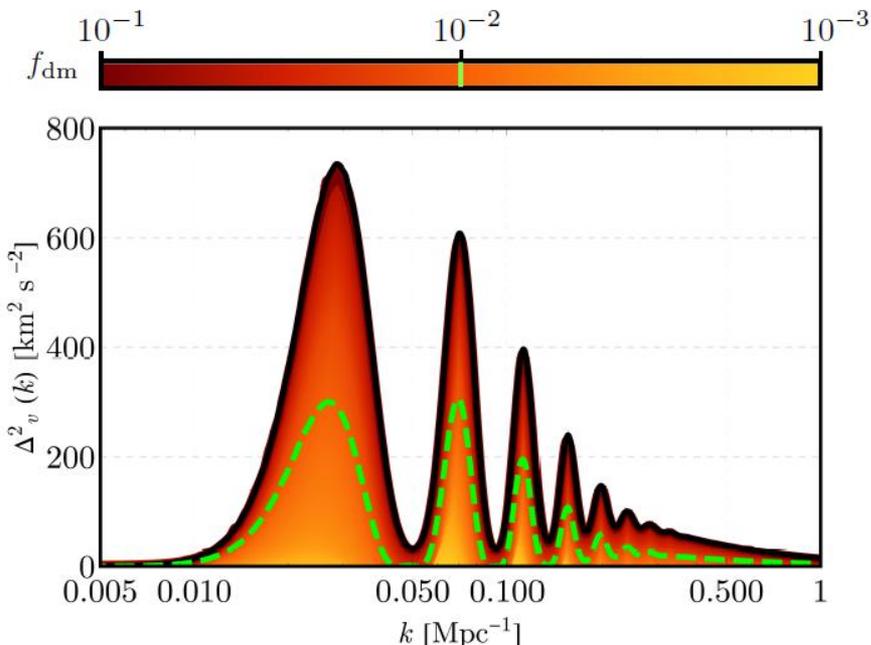
Interaction Baryons-DM

La matière noire froide, à $v \sim 1 \text{ km/s}$, pourrait refroidir le gaz s'il existait une interaction $\sigma = 10^{-21} \text{ cm}^2 \rightarrow$ énorme!

(Barkana 2018) $m_\chi \sim 1 \text{ GeV}$



Importantes fluctuations prédites

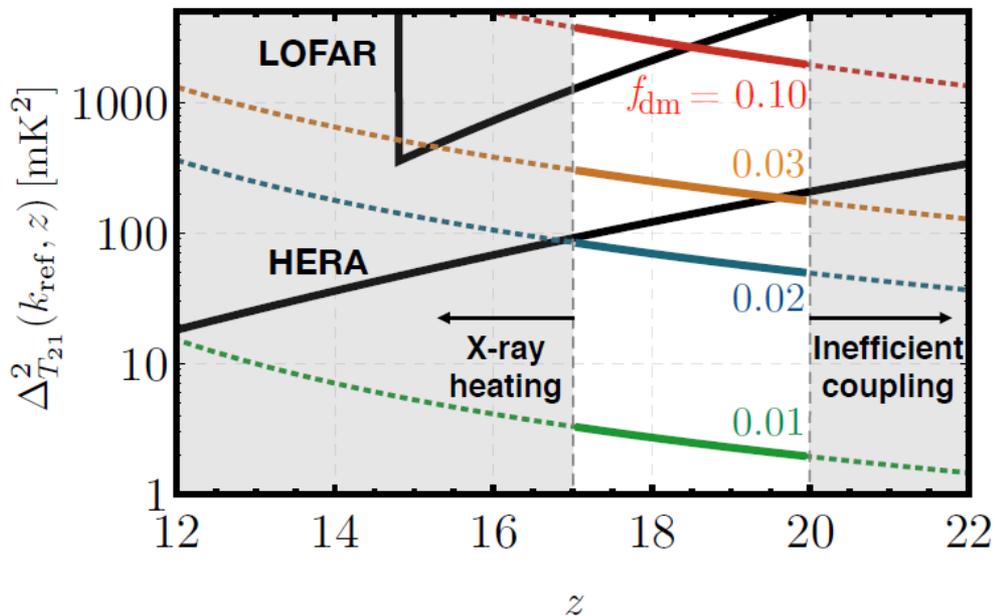


Vitesses relatives entre baryons et DM
 Différentes pour les DM chargées χ
 → Refroidissement des baryons $f(v)$

Charge $\propto f_{dm}^{-3/4}$

Fluctuations du gaz 21cm à $z=17$

Sensibilité de LOFAR et HERA
 après 1000h d'observations



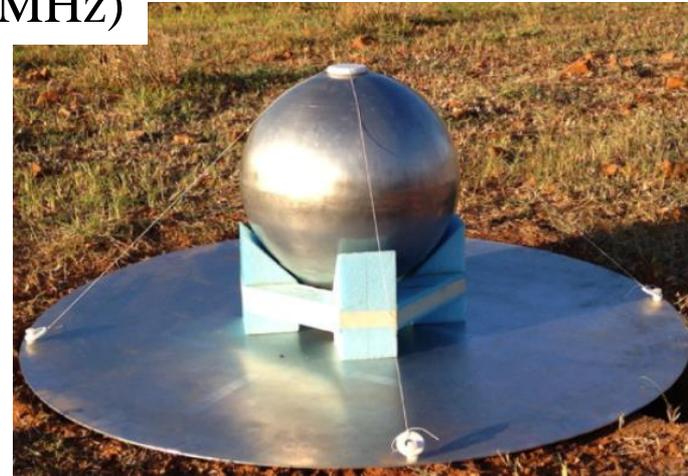
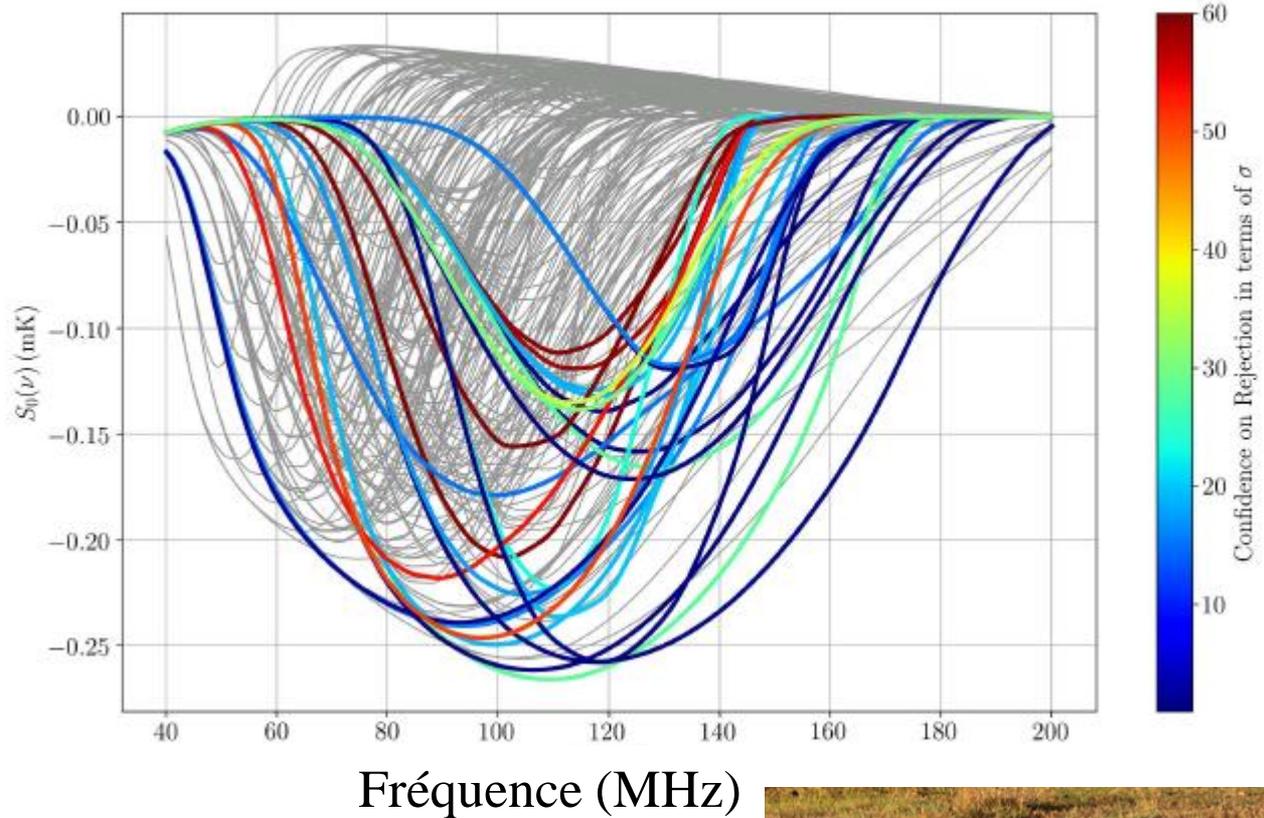
Munoz et al 2018

Un grand nombre de modèles

264 modèles
(Cohen et al 17)

En couleur:
Modèles rejetés par
SARAS 2
40-200 MHz

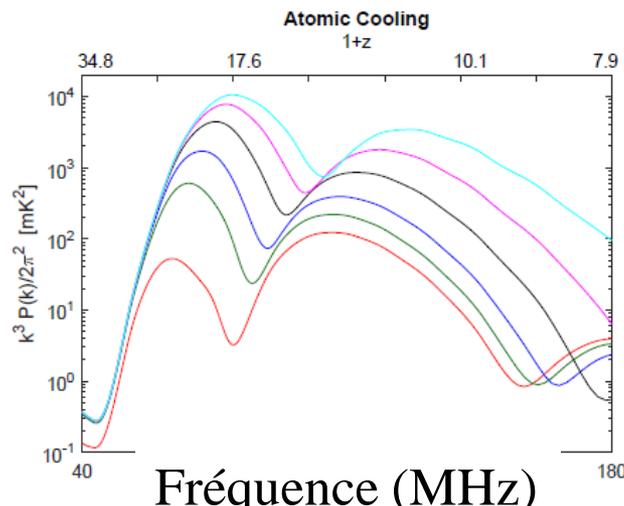
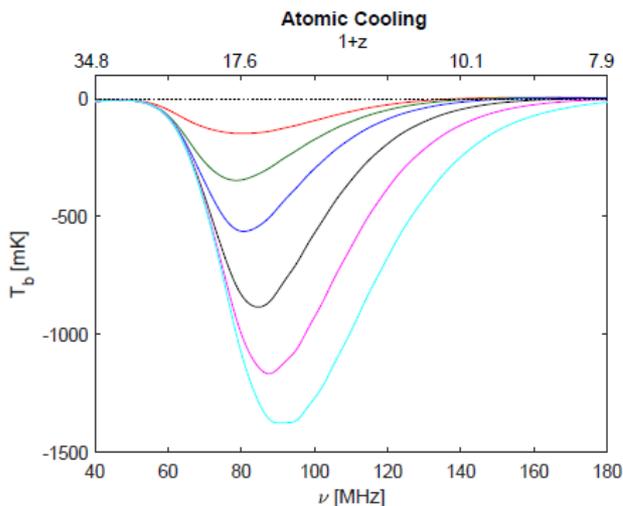
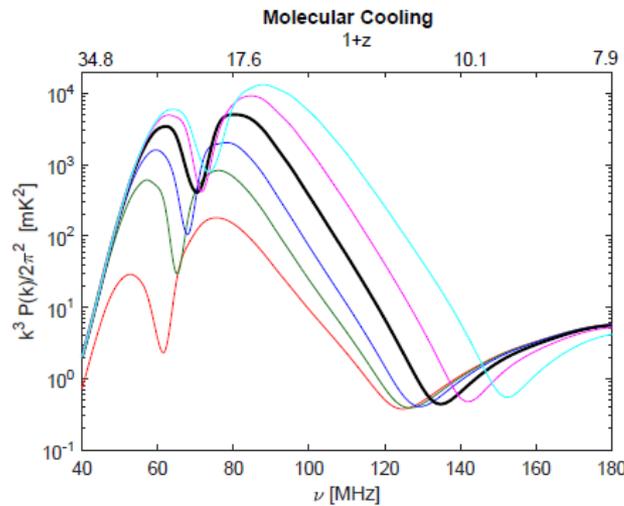
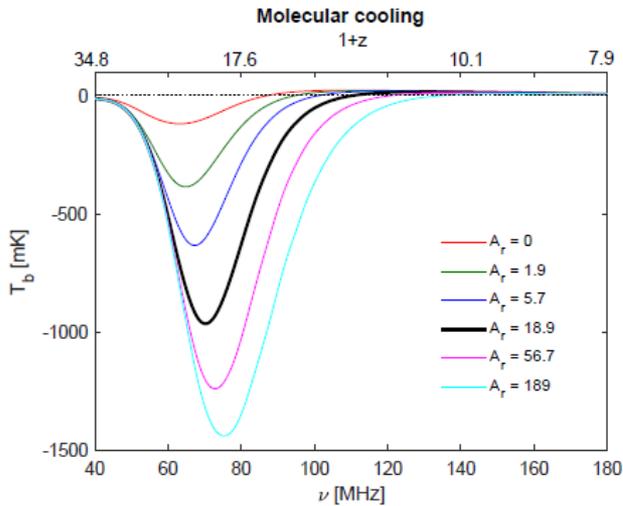
SARAS2 à
Timbaktu, Sud de l'Inde
63h Singh et al 2017



Ou bien un excès de fonds radio

Soit le gaz est plus froid, soit le fonds est plus chaud!

rayonnement synchrotron dû à la formation d'étoiles, ou bien aux AGN
 $z=17$, il faudrait doubler le fond CMB! (sources 10^3 plus efficaces..)



$A_z = 0$ pas de fonds
 $P(k)$ à $k=0.1 \text{ Mpc}^{-1}$

Contraintes sur les
halos $< 10^9 M_\odot$

43 articles sur
l'explication de
EDGES depuis
2018!

Fialkov & Barkana 19

Interféromètres: spectre de puissance



Low Frequency Array (LOFAR)

- Pays-Bas/Europe
- 10-90 MHz (LBA), 110-240 MHz (HBA)
- Stations de 24/48 tuiles (HBA), chacune avec 16 dipôles
- Résolution: arcsec
- Surface collectrice: $\sim 18,000 \text{ m}^2$ (pour EoR)



Murchison Widefield Array (MWA) Phase I et II

- Ouest de l'Australie
- 80-300 MHz
- 128-256 tuiles de 16 dipôles; distribuées au hasard (Phase I) et un sous-ensemble en grille hexagonale (Phase II)
- Résolution: arcmin
- Surface collectrice: 3000 m^2



Precision Array to Probe the Epoch of Reionization (PAPER)

- Afrique du Sud
- 100-200 MHz -- 128 antennes grille rectangulaire
- Résolution: pas d'image (~ 15 arcmin)
- Surface collectrice: 1000 m^2

Spectre de puissance



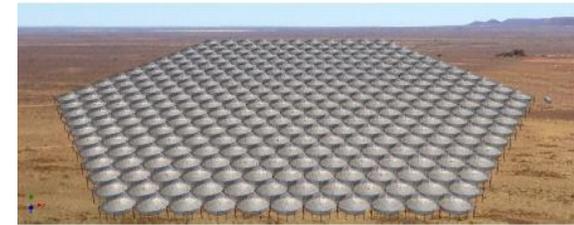
Owens Valley Radio Observatory-Long Wavelength Array (OVRO-LWA)

- Californie
- 33-88 MHz
- 256 dipoles sur 200 metres
- Résolution: ~10 arcmin
- Surface collectrice: >7500 m²



Hydrogen Epoch of Reionization Array (HERA)

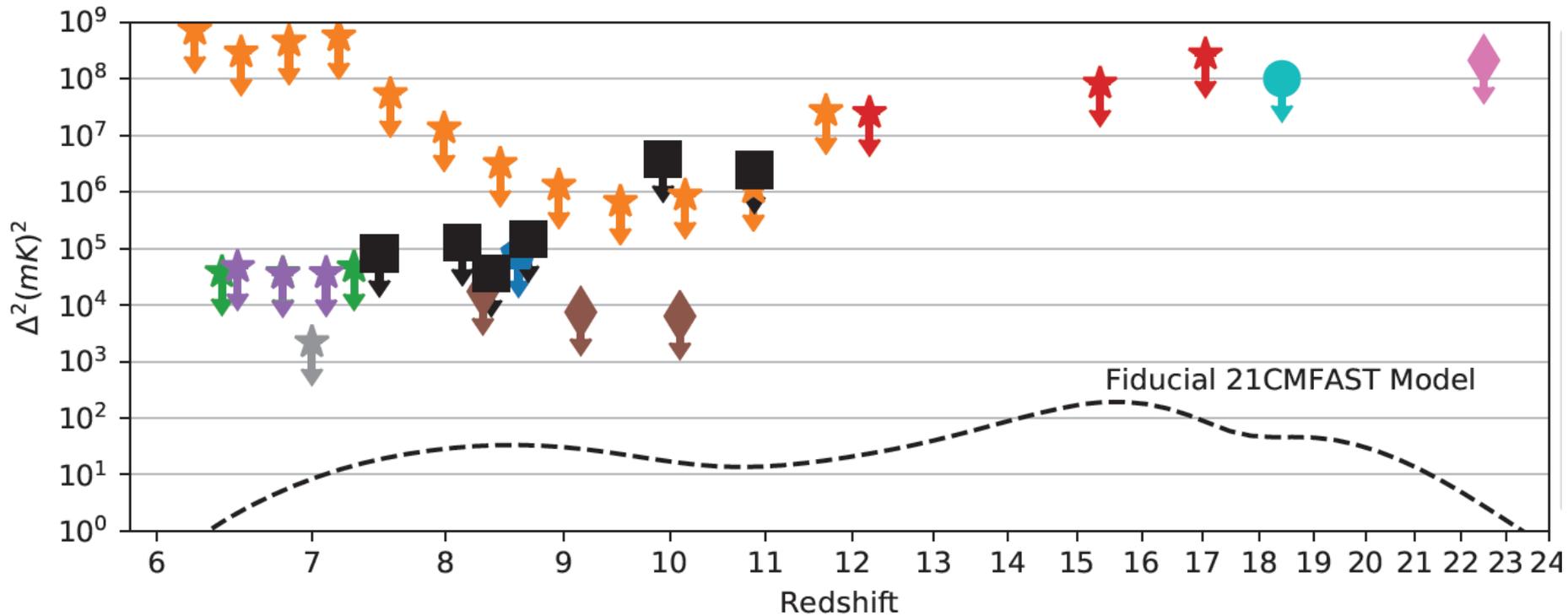
- Afrique du Sud
- 50-200 MHz
- 350 ant. de 14-m en grille hexagonale
- Résolution: arcmin
- Surface collectrice: 50,000 m²



Square Kilometer Array (SKA)

- Ouest de l'Australie
- 50-300 MHz
- Stations de 256 antennes large-bande
- Surface collectrice: 400,000 m²

Etat des lieux: limites supérieures



- Fiducial 21CMFAST Model (Mesinger et al. 2011)
- GMRT: Paciga et al. (2013)
- ★ MWA-32: Dillon et al. (2014)
- ★ MWA-128: Dillon et al. (2015)
- ★ MWA-128: Ewall-Wice et al. (2016)
- ★ MWA-128: Beardsley et al. (2016)
- ◆ LOFAR: Patil et al. (2017)
- ◆ LOFAR: Gehlot et al. (2018)
- OVRO-LWA: Eastwood et al. (2019)
- PAPER: Kolopanis et al. (in review)
- ★ MWA-128: Barry et al. (in review)

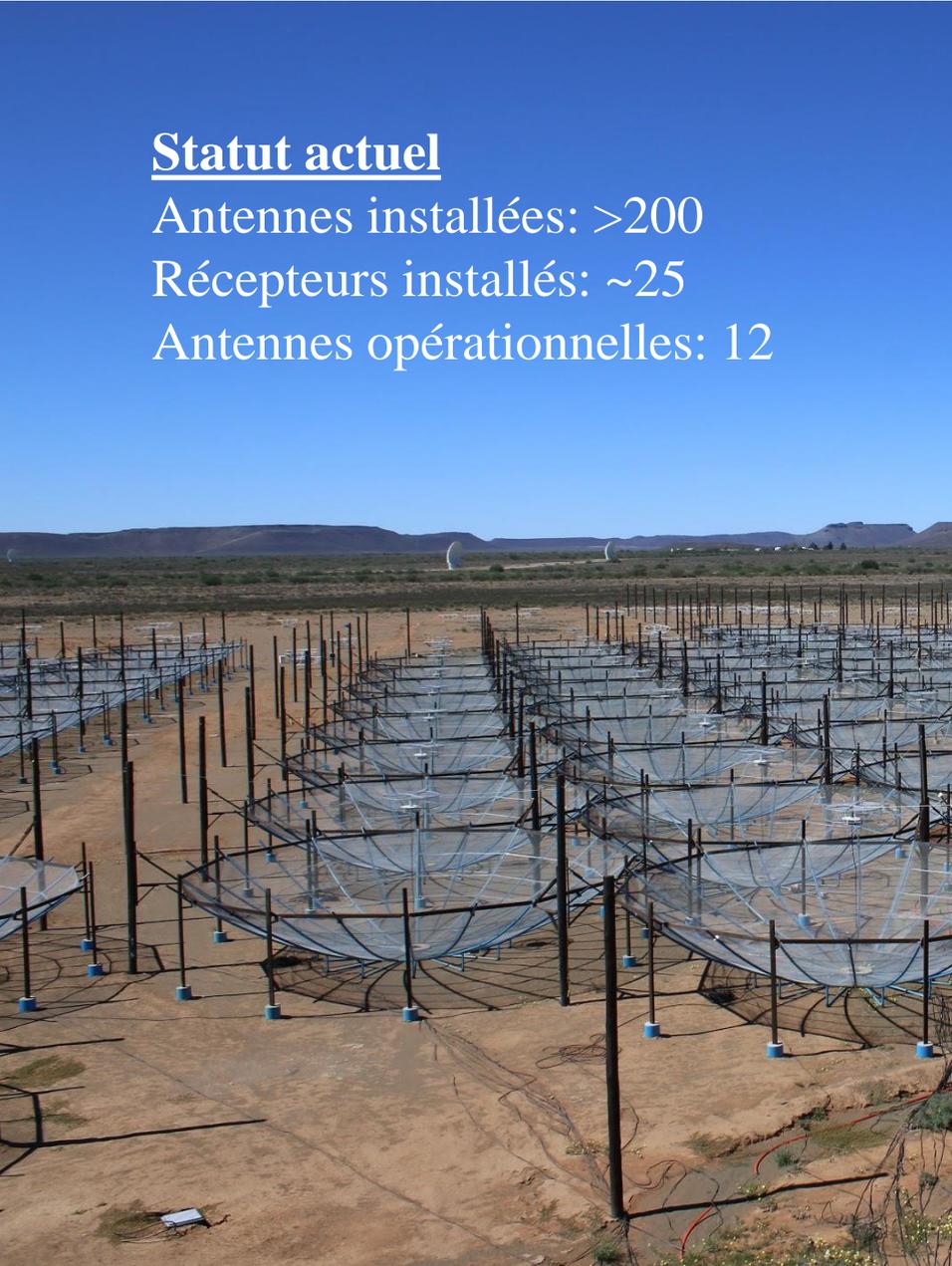
HERA: Hydrogen Epoch of Reionization Array

Statut actuel

Antennes installées: >200

Récepteurs installés: ~25

Antennes opérationnelles: 12



NenuFAR à Nançay

96 réseaux de 19 antennes
=1824 antennes



Nançay



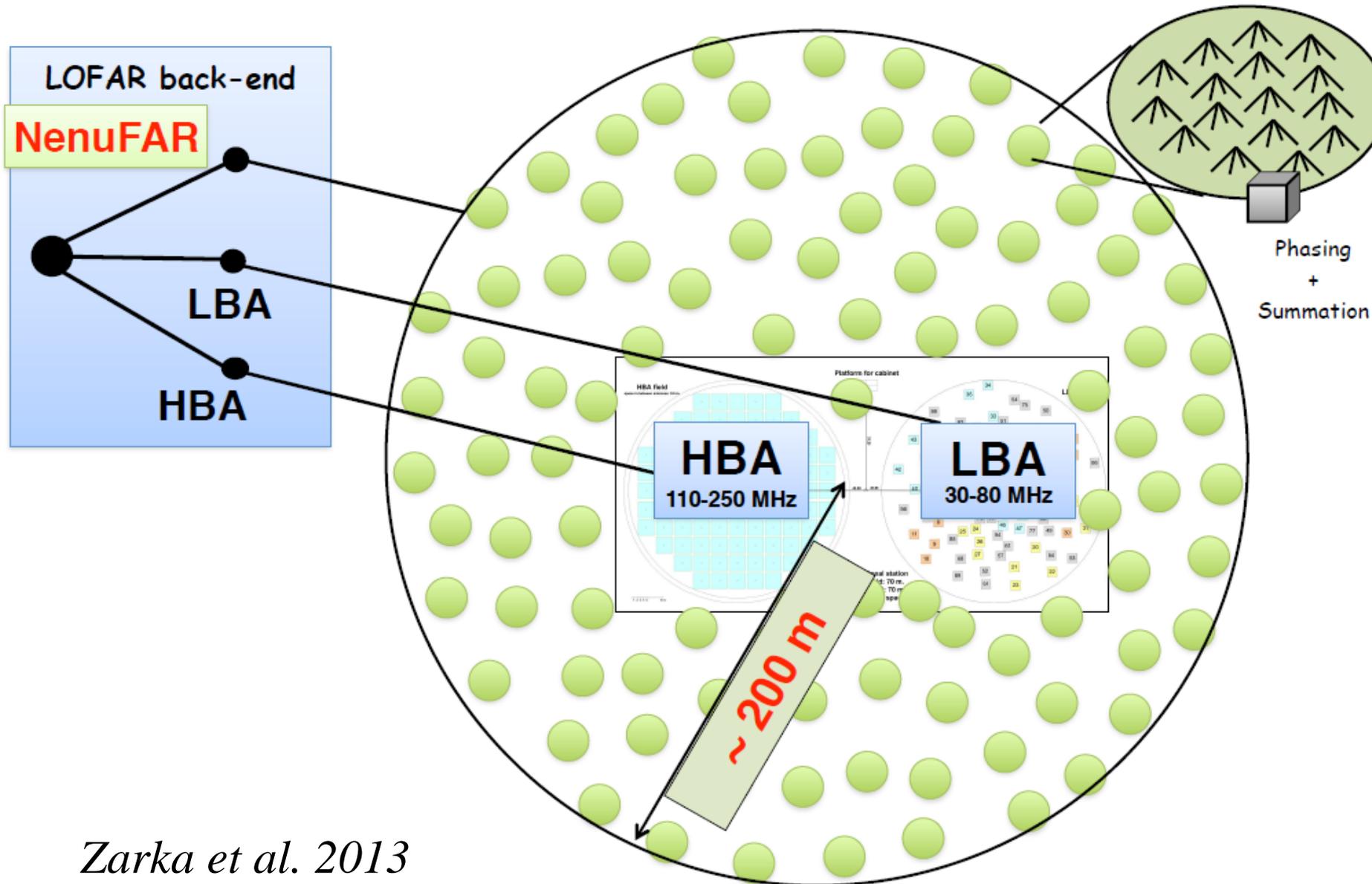
Nouvelle Extension à Nancay upgrade de LOFAR



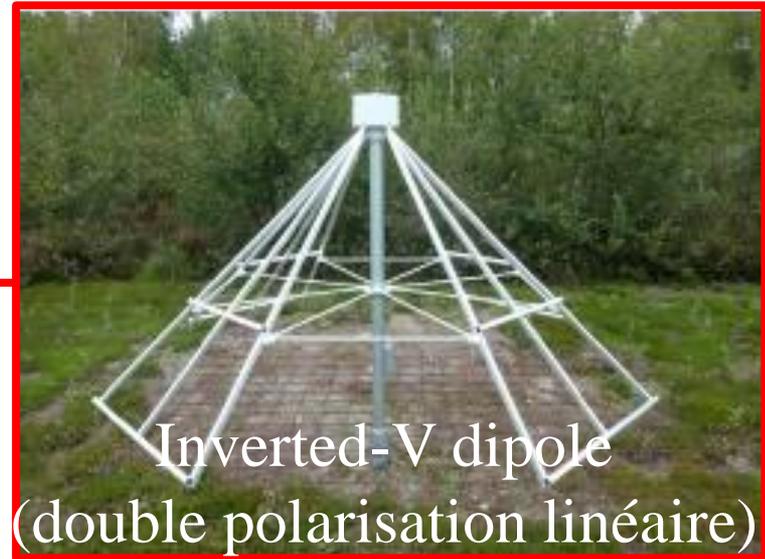
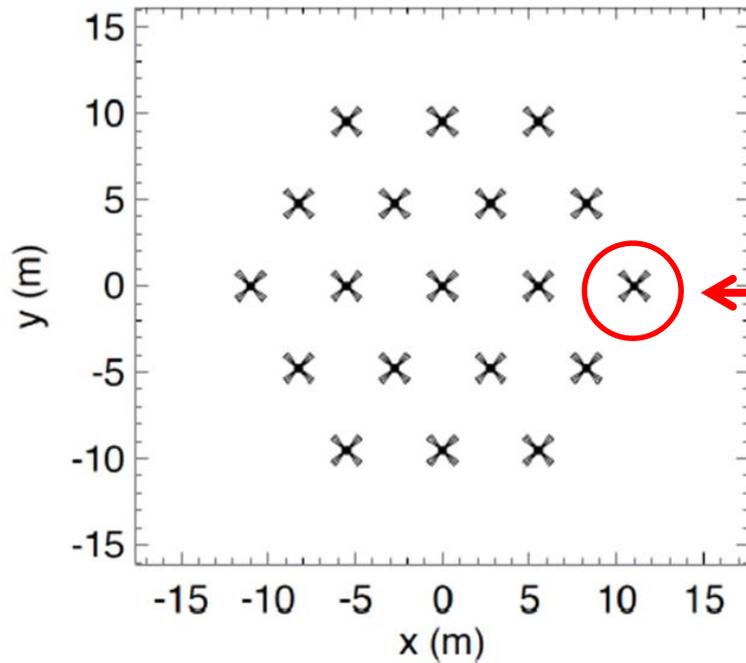
NenuFAR

*New Extension In Nancay
Upgrading LOFAR*

The NenuFAR concept : giant local phased array + interferometer

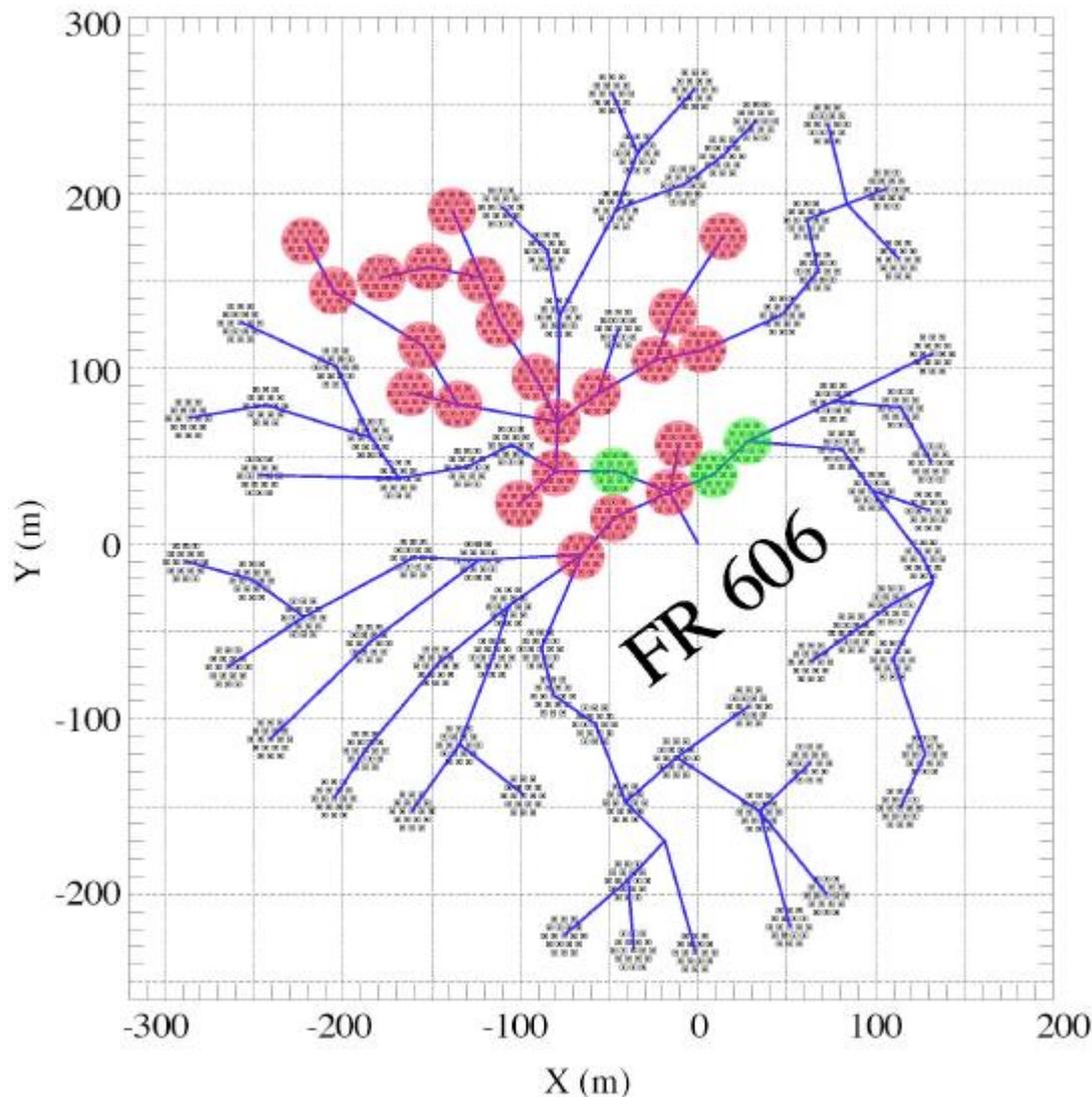


LOFAR Super Station = „NenuFAR“



19 antennes par mini réseau = LF tuile





En vert: les 3 premiers
mini-réseaux, test pour

- Gain des antennes
- Sensibilité aux RFI

NenuFAR total

96 mini-réseaux

$96 \times 19 = 1824$ antennes

80% construit, Inauguré le
3 Octobre 2019

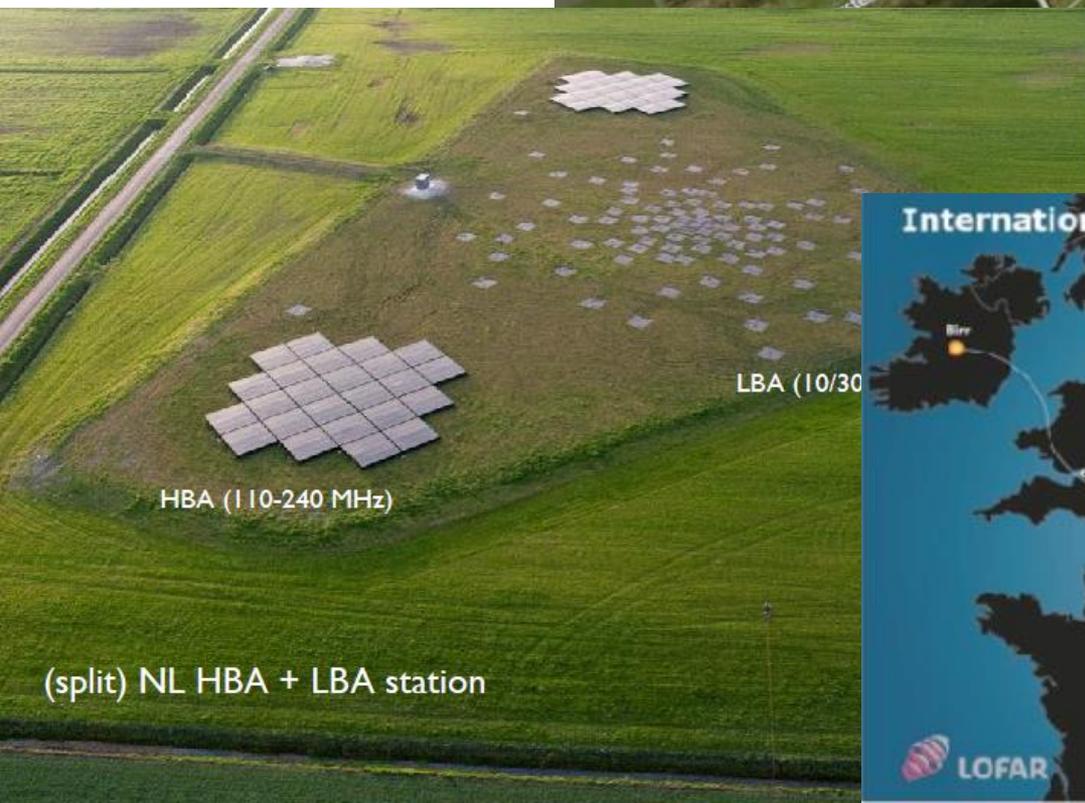
Distribution des mini-réseaux de NenuFAR
autour de la station LOFAR FR606
de Nançay

Girard et al., 2014

Stations LOFAR

HBA 110-240 MHz

LBA 10-80 MHz



LBA (10/30)

HBA (110-240 MHz)

(split) NL HBA + LBA station



Image du Pole Nord Céleste (NCP)

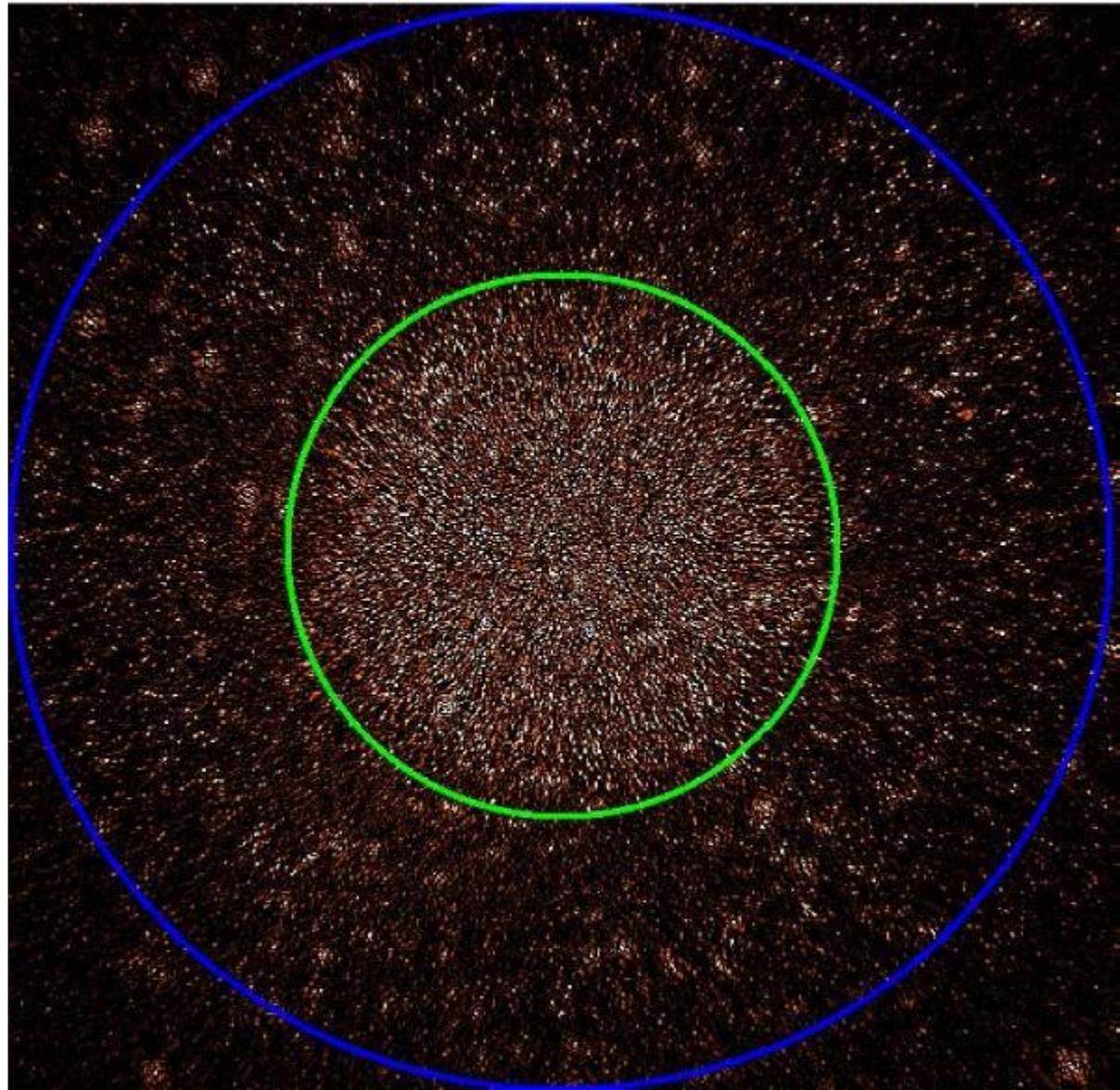
$\Delta\nu=60$ MHz, Champ $20^\circ \times 20^\circ$ - Beam $3'$

Limite de la confusion

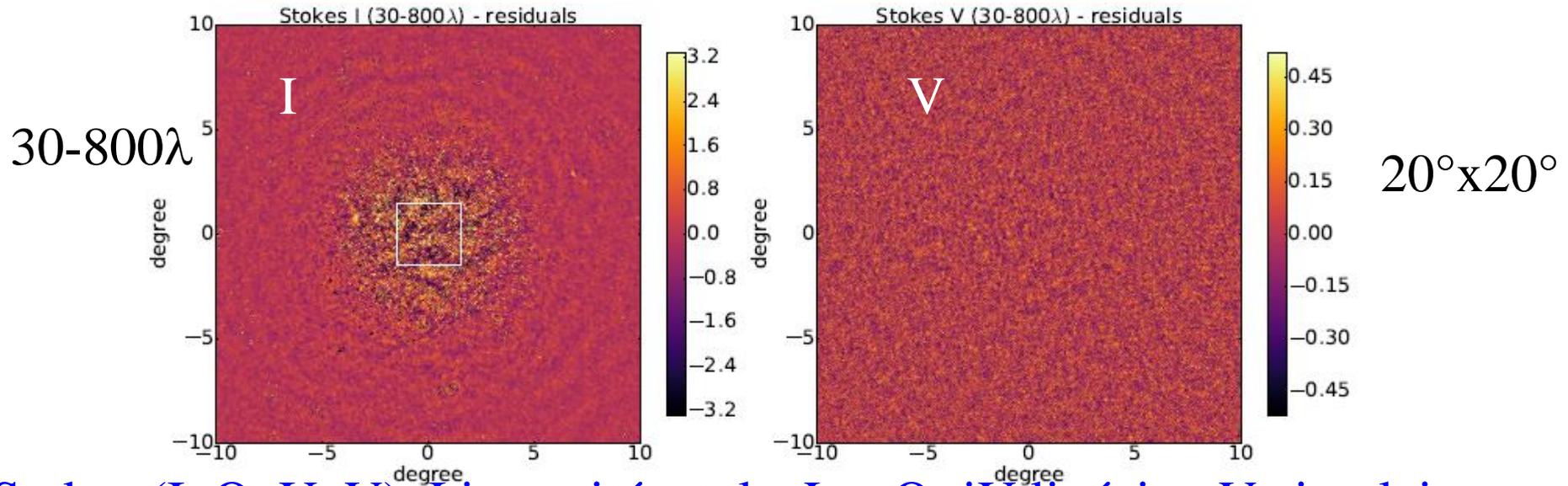
Residu après soustraction
de 28,000 sources
calibrées en 122 directions
par station, par fréquence
par ~ 20 min integration
Ré-intégrées sur la carte

Espoir: que cette émission
soit lisse en fréquence

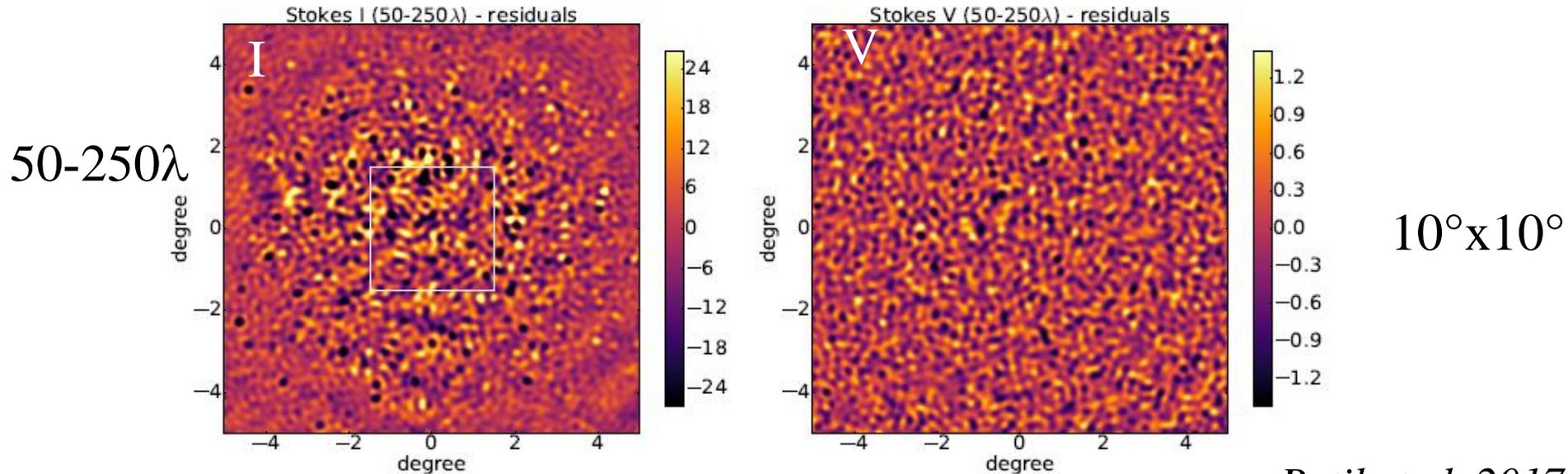
Image V.N. Pandey



Après soustraction des avant-plans, résidus en I, mais pas en V



Stokes (I, Q, U, V) I intensité totale, $L = Q+iU$ linéaire, V circulaire



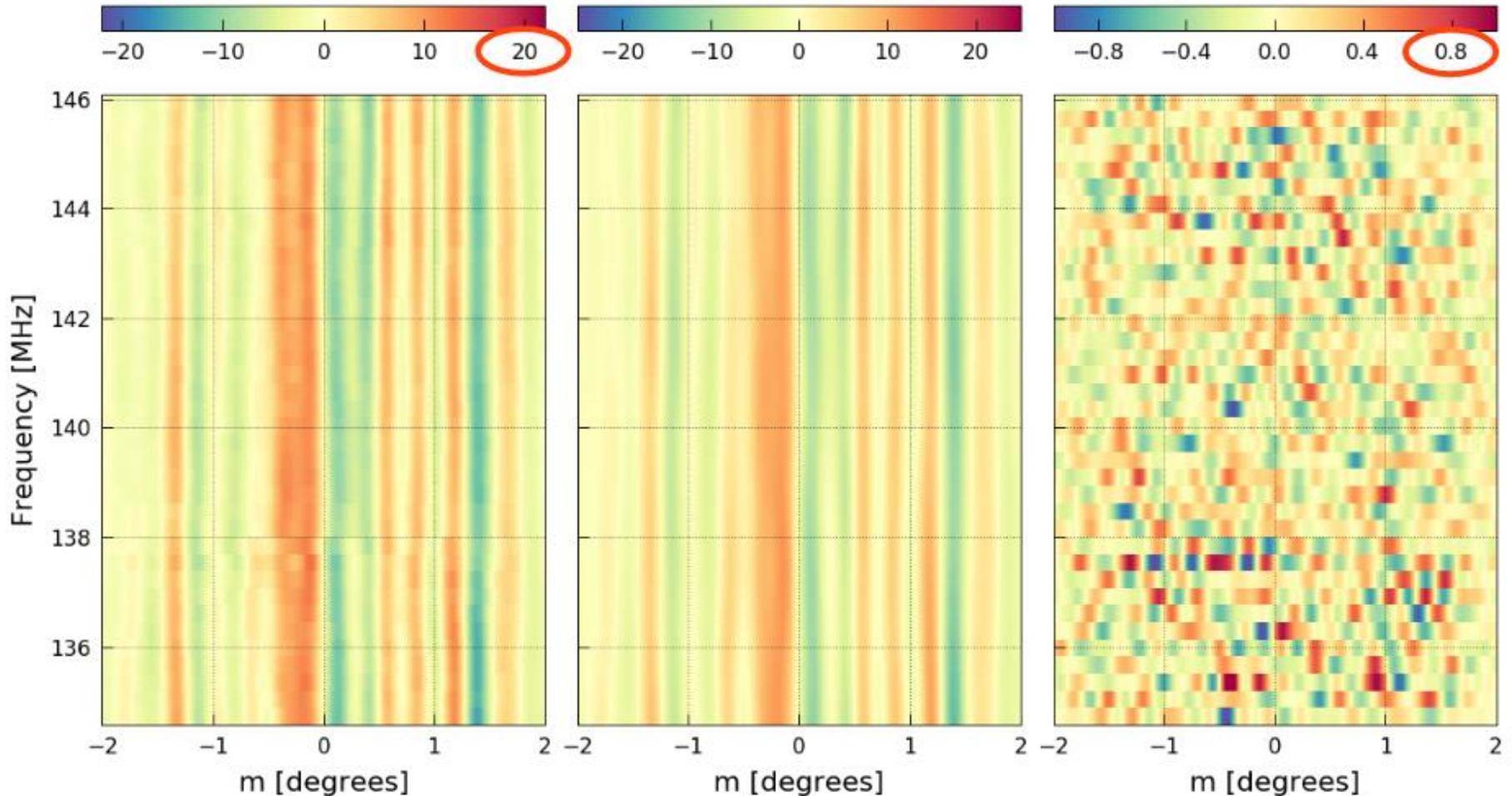
Correction des avant-plans lisses

GPR: Gaussian Process Regression

Before GPR

GPR fit

After GPR



Champ NCP, 140 h, 134-146 MHz, $z \sim 9.1$

Mertens et al. 2019

Problèmes rémanents

Après soustraction et traitement, il reste une variance, supérieure au bruit attendu

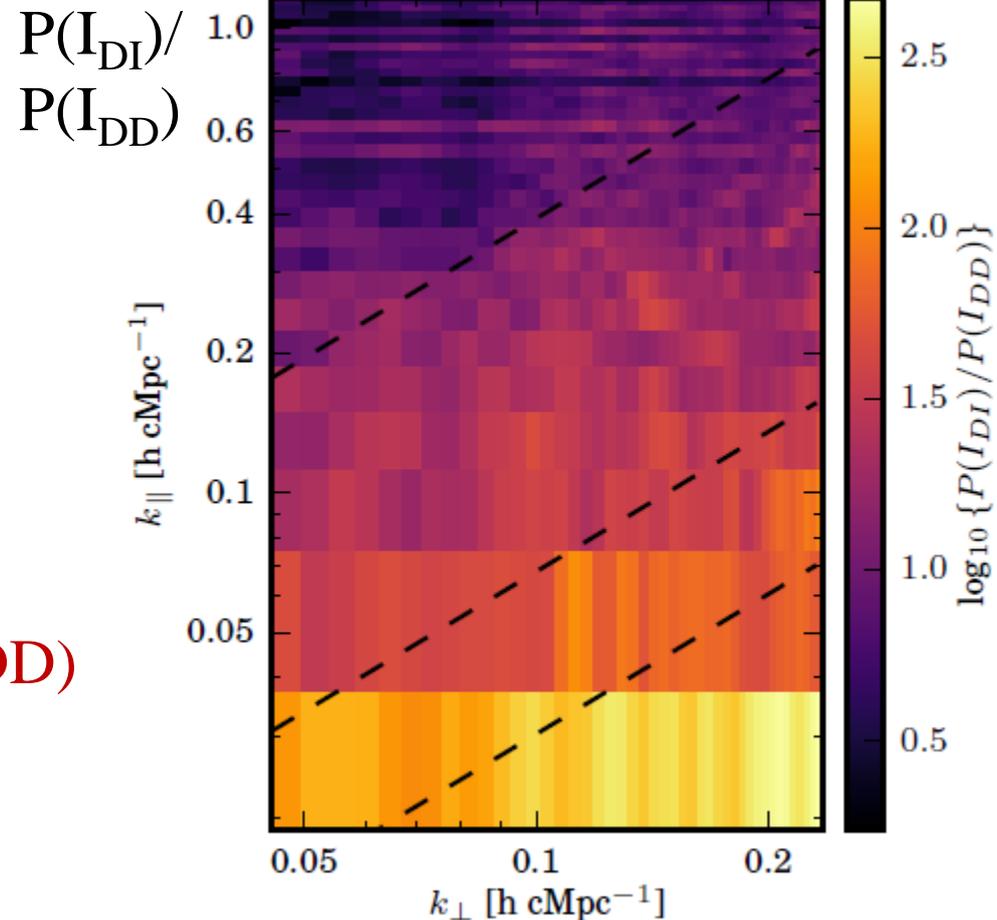
→ diminue en optimisant la calibration du gain en fonction de la direction et de la fréquence et en complétant les sources

(1) le bruit des lobes secondaires résiduels

(2) effets non linéaires

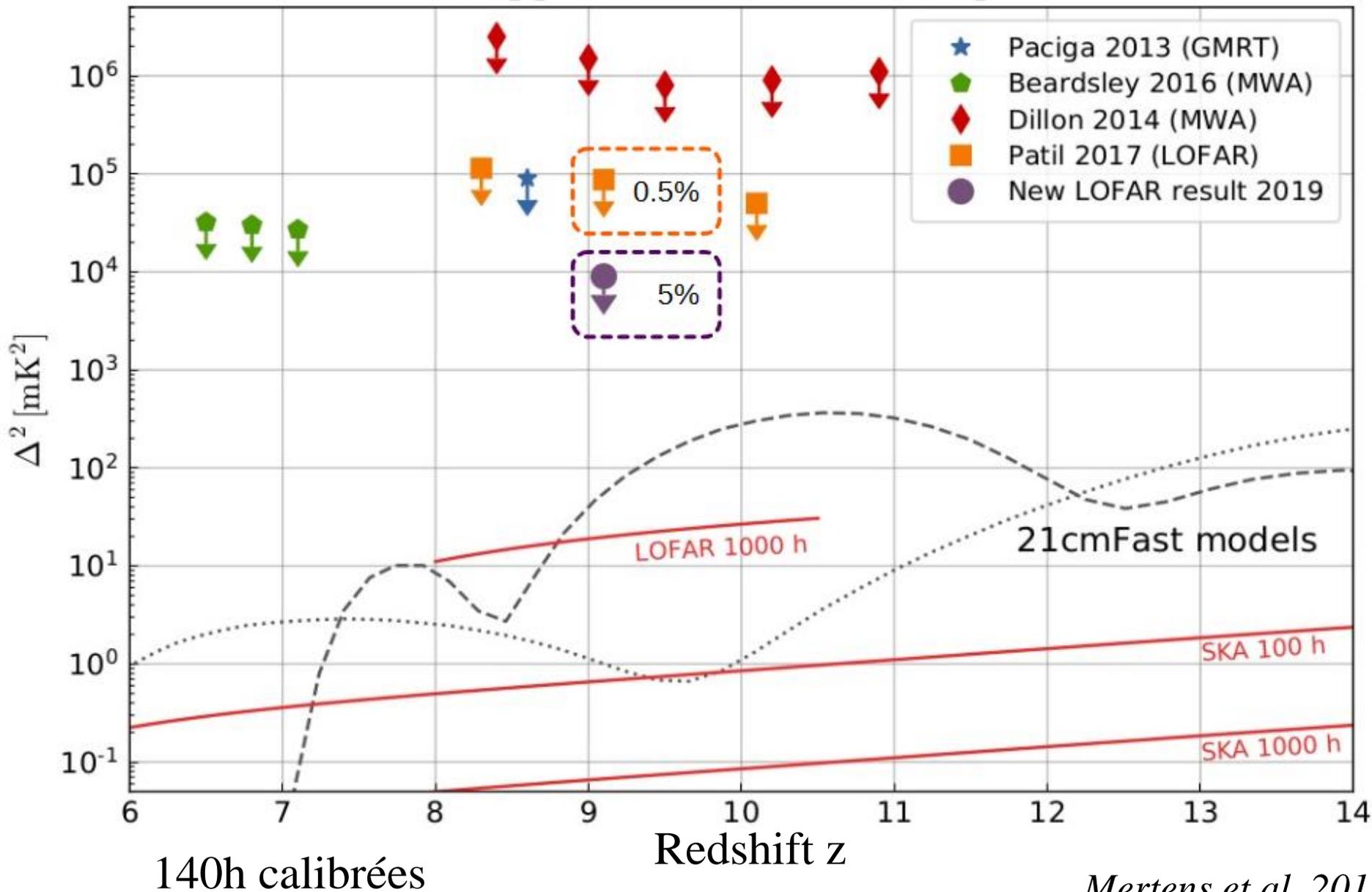
(3) erreurs de gain induites par le bruit et l'ionosphère

Gain dépendant de la direction (DD)
peut supprimer le signal??



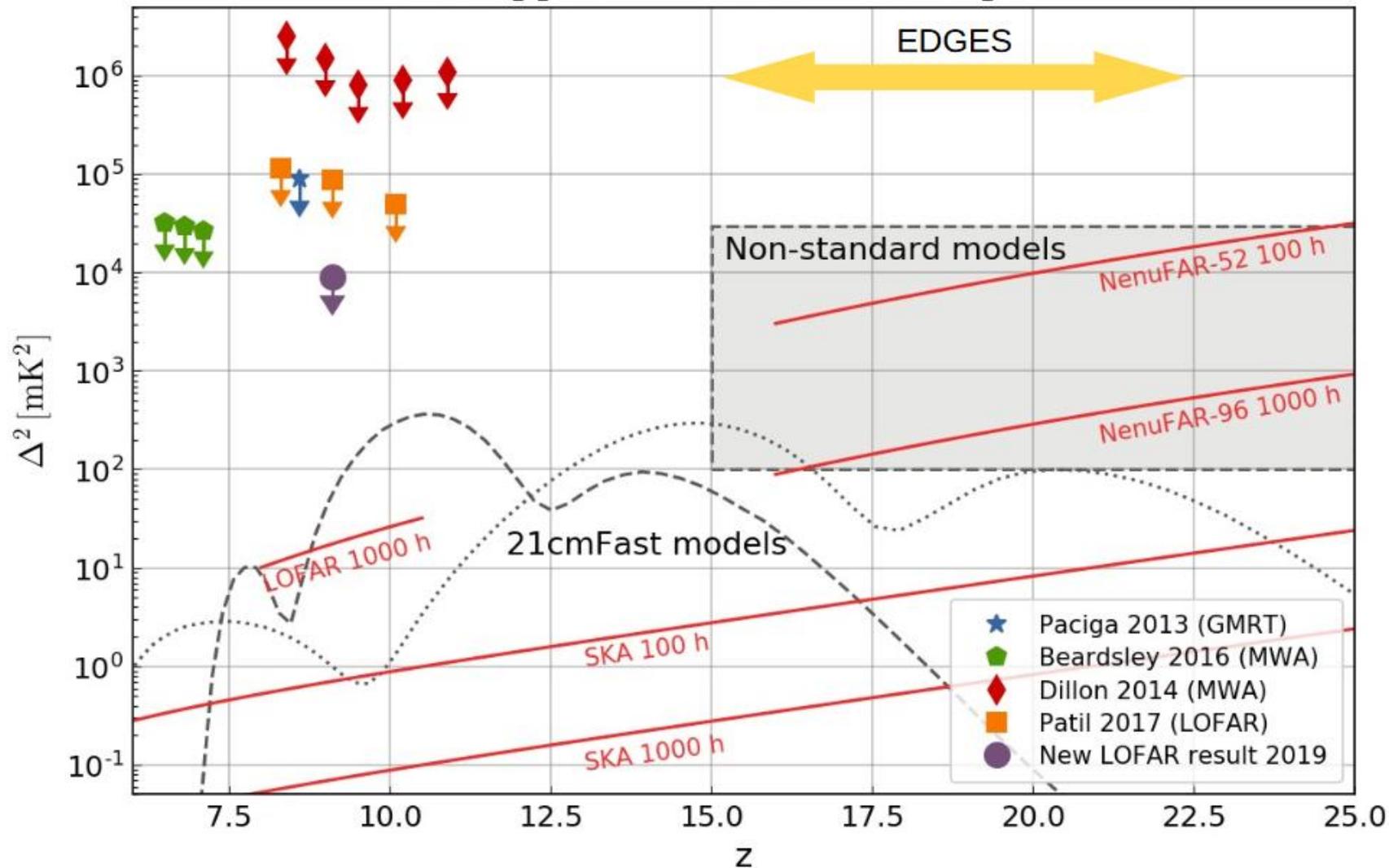
LOFAR limites supérieures (5% des data)

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



Perspectives

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



Comparaison réseaux-antennes uniques

Antennes uniques: signal global (v uniquement)

Plus faciles à construire, moins couteux

Difficile de soustraire les avant-plans

Oscillations de ligne de base, atmosphère, ionosphère

EDGES, SARAS, LEDA, BIGHORNS, NCLE, DARE, ...



Interféromètres: spectres de puissance (espace et fréquence)

Signal= corrélation croisée entre les antennes

pas de problème de ligne de base

Artefacts dûs à la disposition des antennes

Source ponctuelle: lobes de réseaux,
lobes secondaires

LOFAR, MWA, PAPER, GMRT, LEDA, NenuFar, HERA, SKA



Antennes uniques: signal global



Experiment to Detect the Global EoR Signature (EDGES)

- Ouest de l'Australie
- 50-200 MHz: 3 bandes low, middle, high
- Dipole à polarisation unique



Large-Aperture Experiment to Detect the Dark Ages (LEDA)

- Owens Valley, Californie
- 33-88 MHz
- Antennes LWA à double polarisation
- Au sein de la station OVRO-LWA



Shaped Antenna measurement of the background Radio Spectrum (SARAS 2)

- Inde (multiple sites)
- 50-200 MHz, 2 bandes low et high
- Antenne monopole à simple polarisation

Signal global



SCI-HI et PRIZM

- Mexique et Ile Marion (entre Afrique du Sud et Antarctique)
- Dipôles double-polarisation
- Exploration des interférences extrêmement-basses
- *Voytek et al. 2014, Philip et al. 2019*

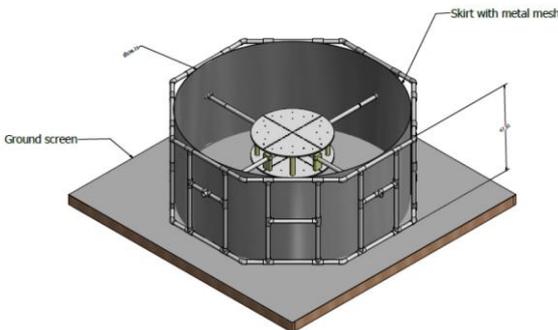


BIGHORNS

- Ouest de l'Australie
- Antenne conique Log-period (polarisation circulaire)
- Instrument démonstrateur et ionosphere
- *Sokolowski et al. 2015*

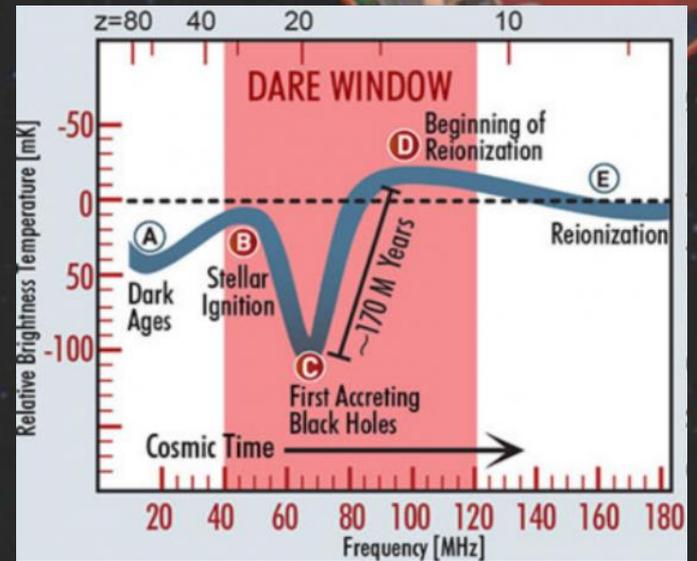
Cosmic Twilight Polarimeter (CTP)

- Virginie, USA
- Dipôles à double polarisation
- Pathfinder pour démontrer la polarisation induite par les avant-plans, problèmes de gain
- *Nahn et al. 2018*



Mission dans l'espace: face cachée de la Lune

DARE= Dark Ages Radio Explorer



NCLE: Netherlands Chinese Low frequency Explorer

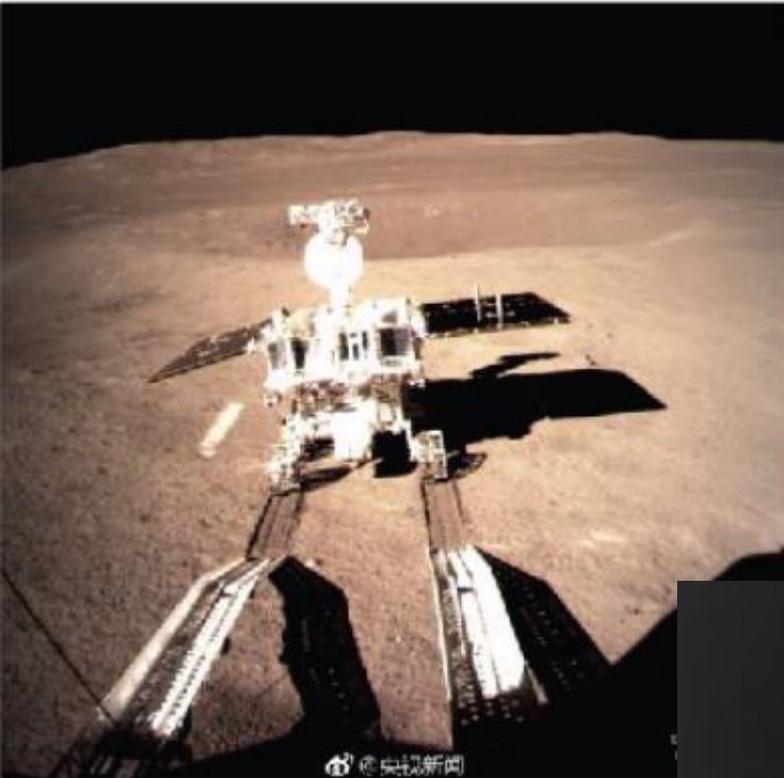


Une expérience radio basse fréquence sur la Lune!

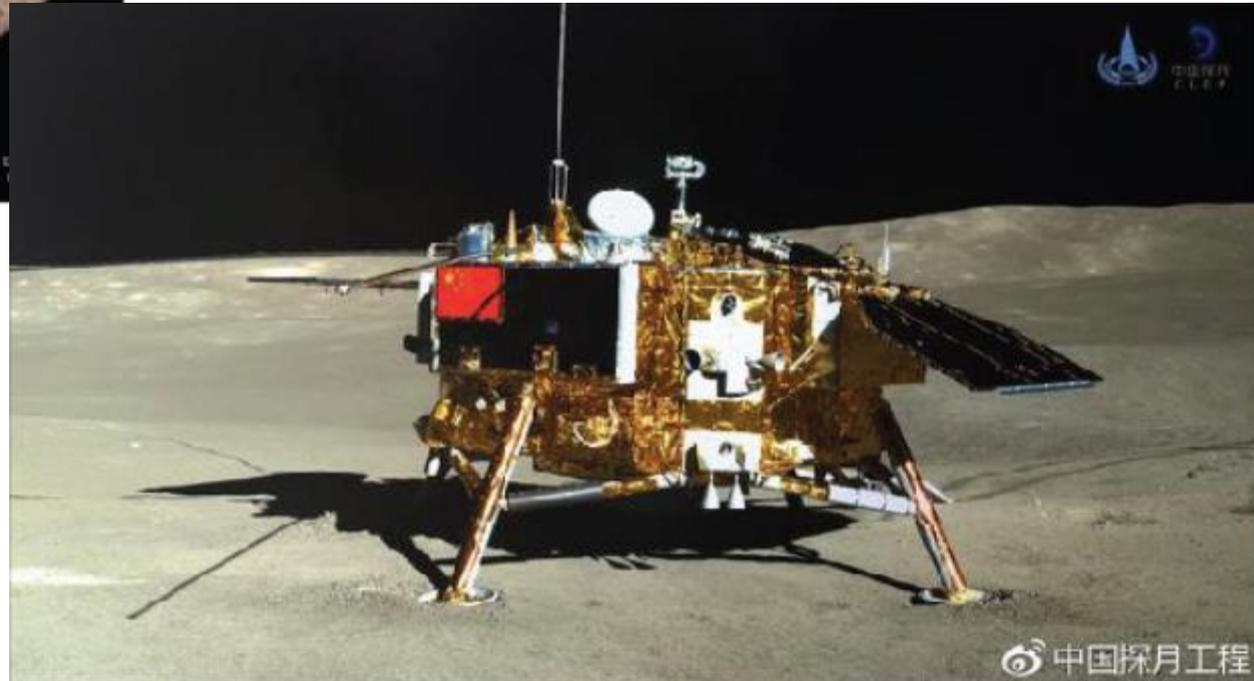
Sur la face cachée de la Lune

Lancement en Décembre 2018
Déploiement Janvier 2019

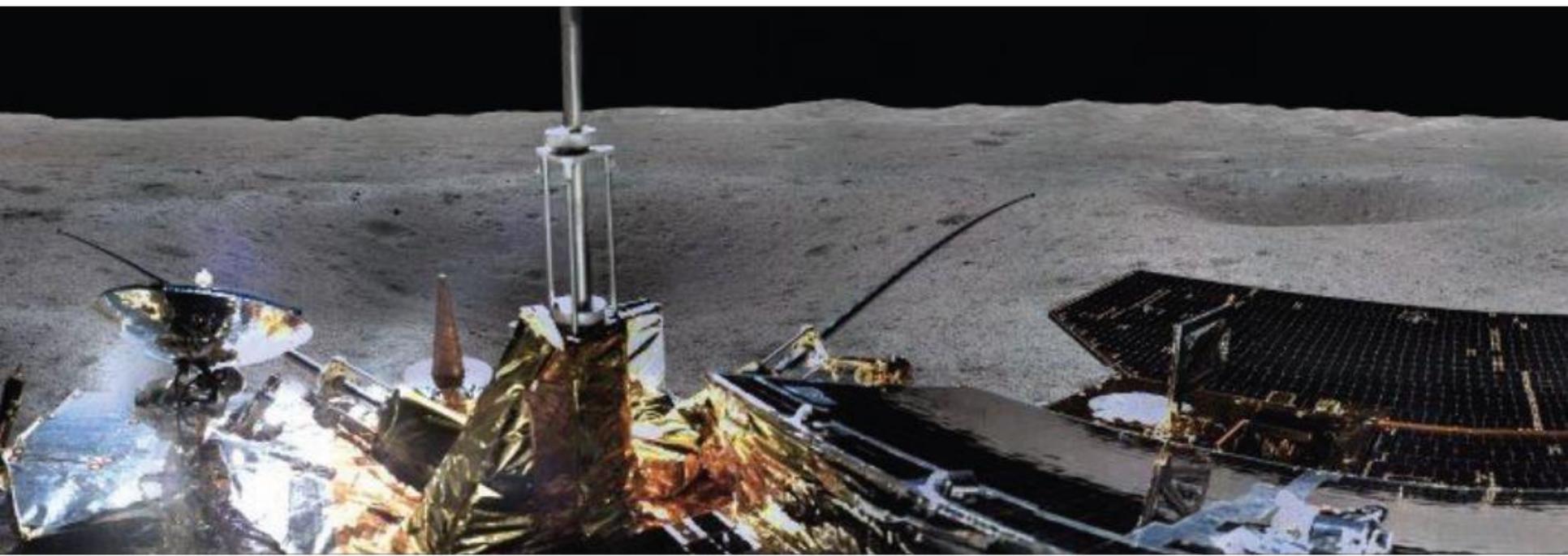
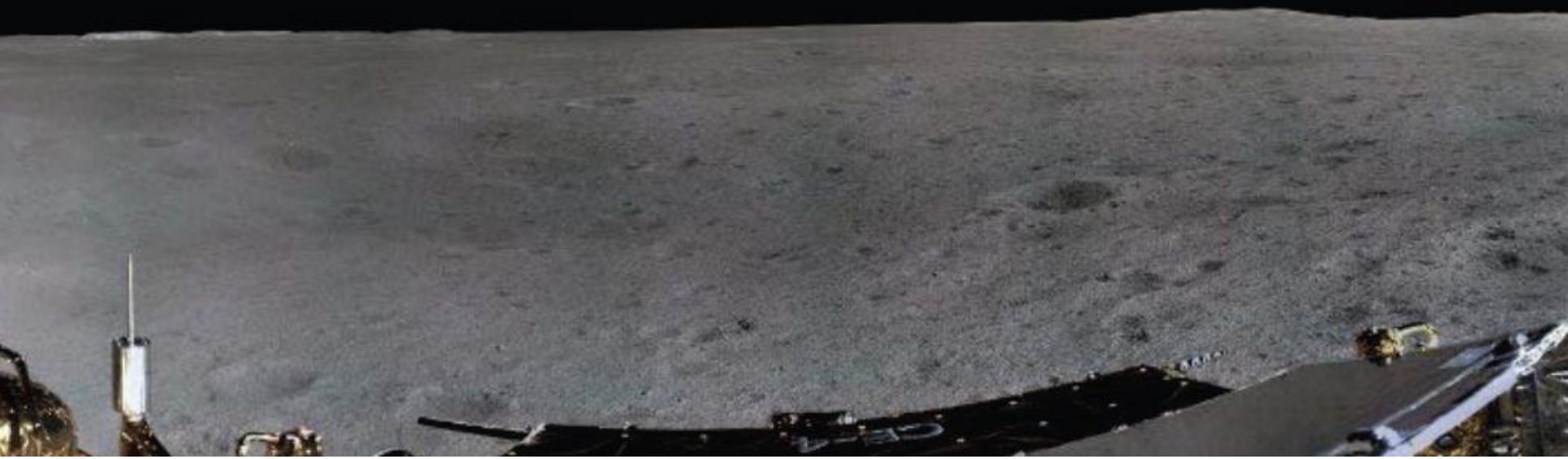
Tripole basse fréquence sur le module
Chang'e 4 Lander (plateforme
d'atterrissage)



Rover Yutu-2

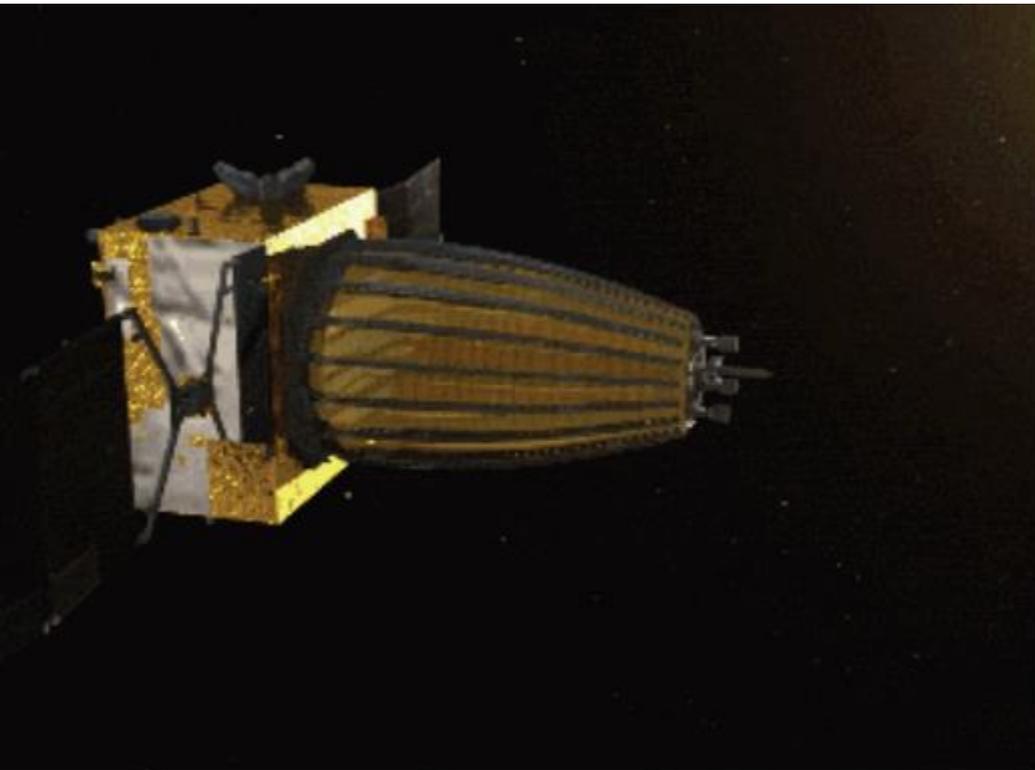


Vues réelles sur place!



Satellite pour envoyer les data

Antenne satellite de Queqiao, avec vue de la Lune et la Terre dans le fond (au point de Lagrange L2 du système Terre-Lune)



Les observations commencent avec des tripôles repliés, puis peu à peu ils se déploient à 1.5m, puis 5m (1-3 ans)

Résumé

Le signal à 21cm EoR est précieux
Age sombre, Aube cosmique, EoR
Le premier Gyr de l'Univers



Actuellement:

- ? Détection EDGES de 0.5 K à $z=17$?
- LOFAR limite supérieure (basée sur ~5% des data):
 $\Delta^2 < (100 \text{ mK})^2$ pour $k=0.1 \text{ cMpc}^{-1}$, $z \sim 9$
- Dans le futur, exploitation de 100% des data
- Essai de confirmation avec signal global (SARS2, etc..)
- Résultats de NenuFAR
- SKA