

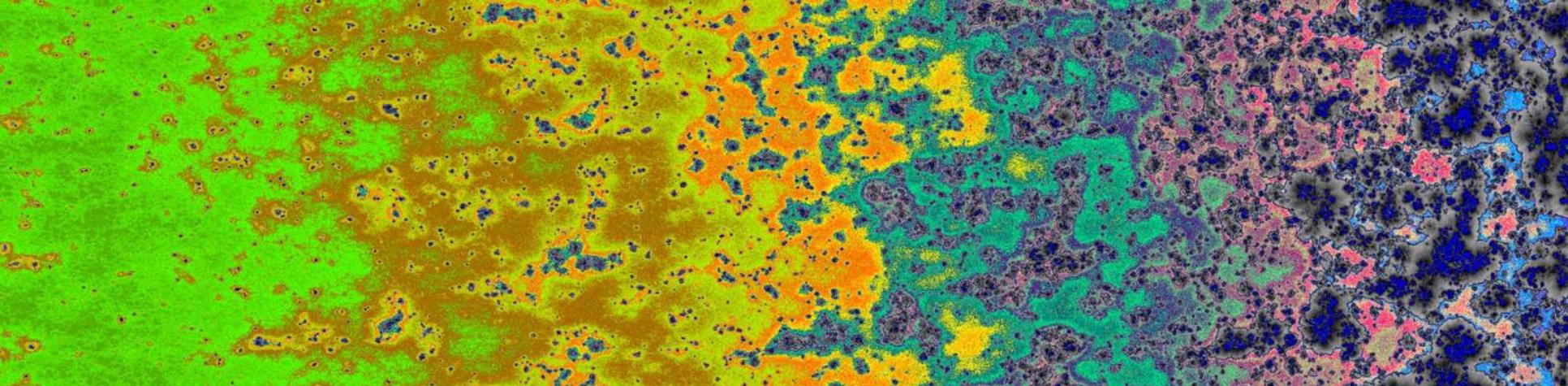
L'aube cosmique *in silico*

Simulations numériques de l'époque de la ré-ionisation

Benoît Semelin

(Sorbonne Université - Observatoire de Paris - LERMA)

2 Décembre 2019



Physique de la réionisation et du signal 21 cm

Le premier milliard d'années de l'univers

Premières étoiles,
premières galaxies:

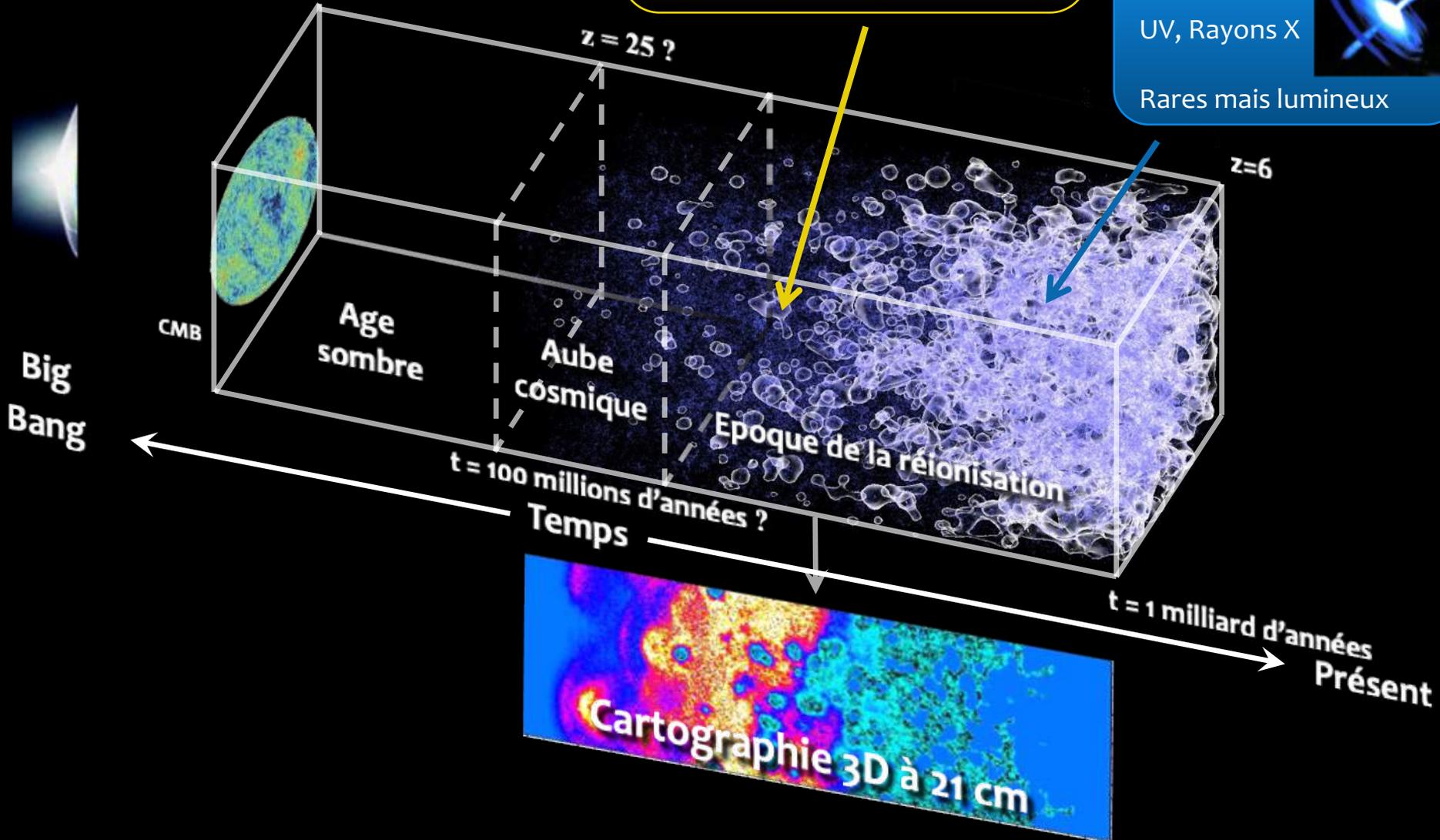


UV et rayons X

Quasars:
UV, Rayons X



Rares mais lumineux



Pourquoi des bulles ?

Les premières étoiles/galaxies créent des bulles chaudes et ionisées autour d'elles.

Des bulles qui grossissent peu à peu.

Deux quantités clés:

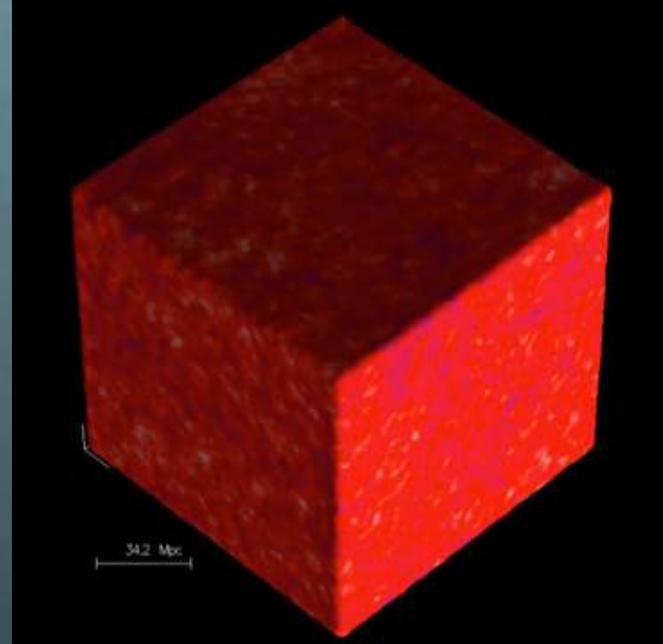
- “Libre parcours moyen” des photons ionisants dans le milieu intergalactique neutre

$$l = \frac{1}{\sigma(\nu)n_H} = 2. \left(\frac{E}{E_0} \right)^3 \left(\frac{10}{1+z} \right)^2 \text{ ckpc}$$

$l \sim 2 \text{ kpc}$ dans l'UV \ll distances entre galaxies \Rightarrow H neutre = “mur”

- L'hydrogen ionisé se recombine peu dans le milieu intergalactique

$$t_{\text{rec}} = \frac{1}{\alpha(T)n_H} = 240 \left(\frac{10}{1+z} \right)^3 \left(\frac{\bar{\rho}(z)}{\rho} \right)^3 \text{ Myr}$$

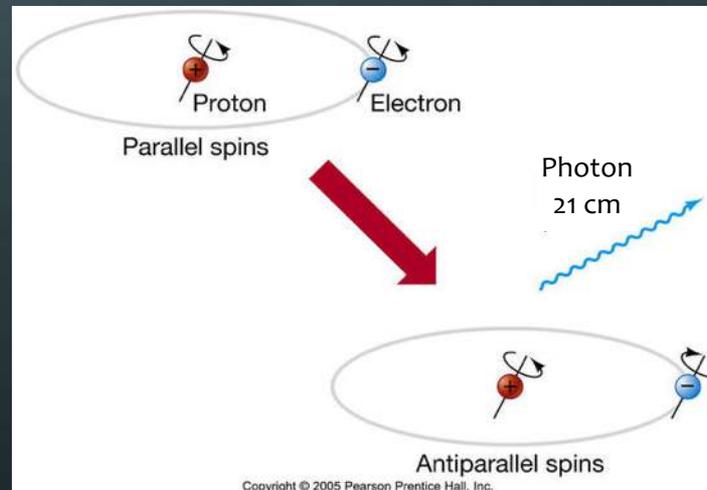


Le signal à 21 cm: une lumière très “froide”

Un photon « 21 cm » contient un million de fois moins d'énergie qu'un photon bleu.

Peut être émis dans des régions très froides de l'univers.

Emis par transition hyperfine de l'atome d'hydrogène :



Le signal à 21 cm

Intensité:

$$\delta T_B = 28 \text{ mK} \underbrace{\frac{\rho}{\bar{\rho}}}_{\text{cosmo}} \underbrace{x_{HI}}_{\text{astro}} \underbrace{\left(\frac{T_S - T_{CMB}}{T_S} \right)}_{\text{astro}} \underbrace{\left(1 + \frac{1}{H} \frac{dv}{dr} \right)^{-1}}_{\text{cosmo}}$$

Nb d'atomes émetteurs
intensité par atome

Pourquoi des mK ?

Température d'un corps noir qui émettrait avec la même intensité lumineuse à la fréquence considérée.

Sens de la température de spin T_S :

$$\frac{n_1}{n_0} = \frac{g_1}{g_0} \exp\left(-\frac{h\nu_{21}}{k_B T_S}\right)$$

Atomes surtout dans l'état hyperfin supérieur ($n_1 > n_0$)

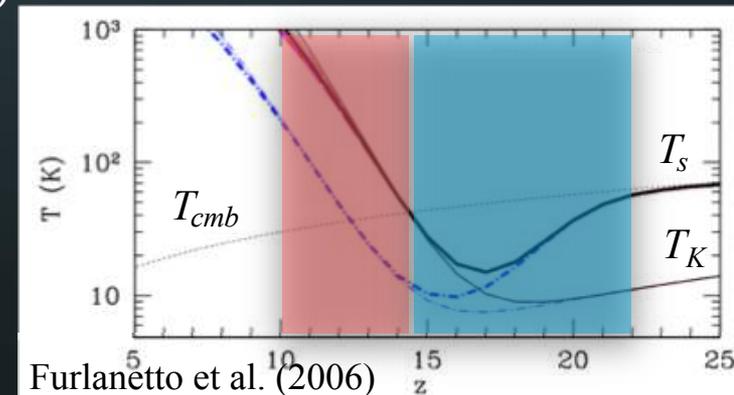
=> $T_S > T_{CMB}$

=> **émission** de photons 21 cm

Atomes surtout dans l'état hyperfin inférieur ($n_1 < n_0$)

=> $T_S < T_{CMB}$

=> **absorption** de photons 21 cm (du CMB)



Que vaut la température de spin ?

Trois processus en compétition:

$$\text{Spin temperature: } T_S^{-1} = \frac{T_{CMB}^{-1} + x_\alpha T_c^{-1} + x_{col} T_K^{-1}}{1 + x_\alpha + x_{col}}$$

Couplage à T_{CMB} :
via diffusion des photons CMB
échelle temps $\sim 300\,000$ ans

Couplage à $T_c \approx T_K$:
par pompage Ly- α

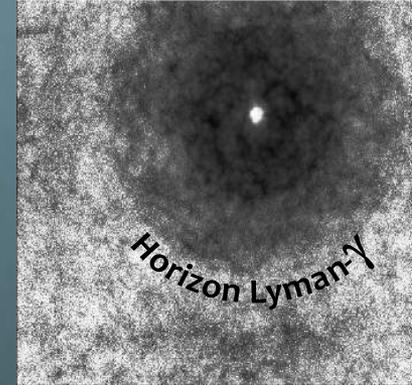
$$x_\alpha \sim J_\alpha$$

Couplage à T_K :
par collisions
Là où $\rho/\bar{\rho} \gg 1$

\Rightarrow Une quantité locale, complexe à calculer: $T_S = f(J_\alpha, T_K, \rho, x_{HI})$

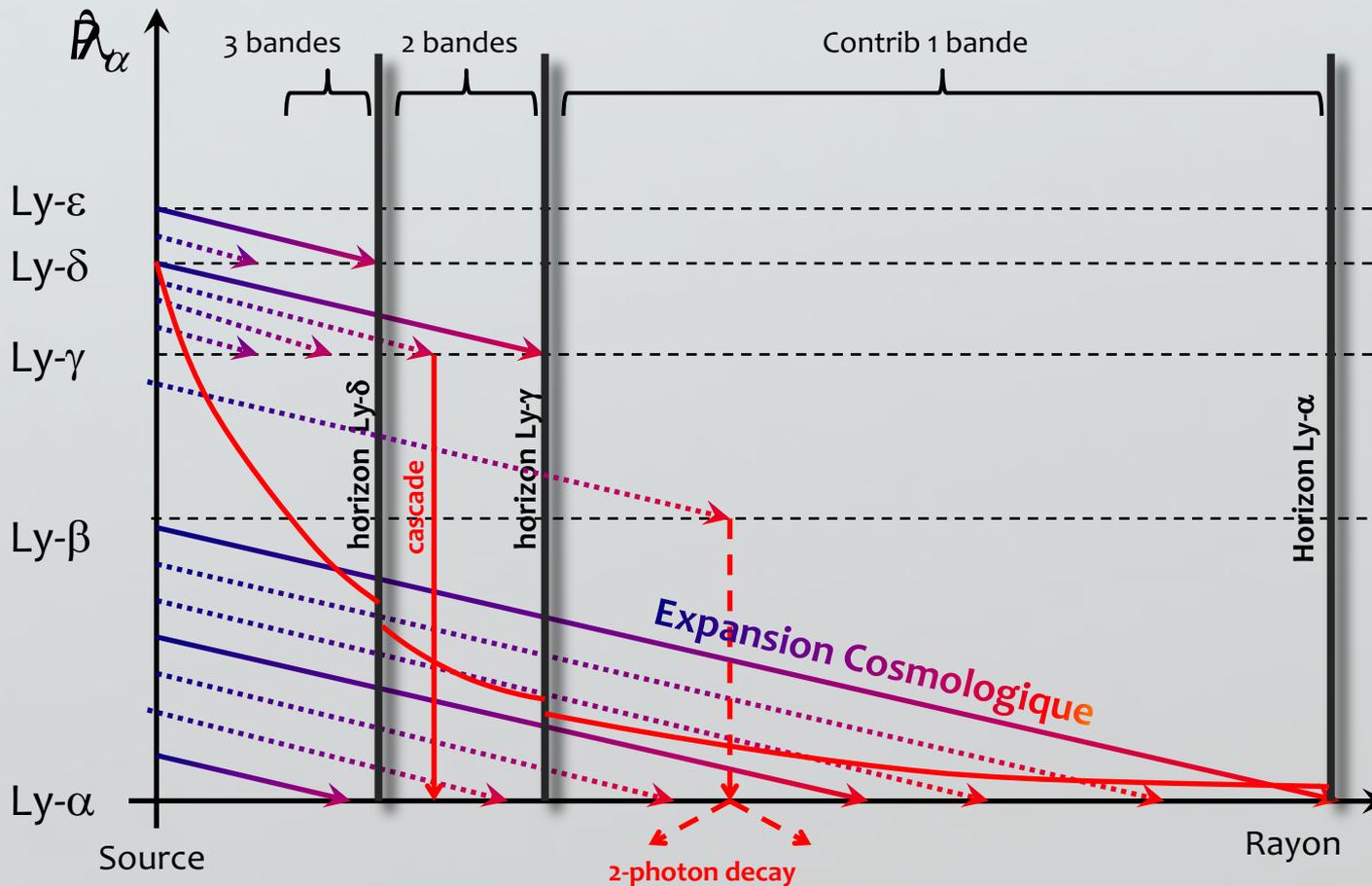
\Rightarrow Son effet sature aux grandes valeurs $\left(\frac{T_S - T_{CMB}}{T_S}\right) \Leftrightarrow$ une grande partie de l'EoR

Les délices de la physique de la température de spin



Vonlanthen et al. (2012)

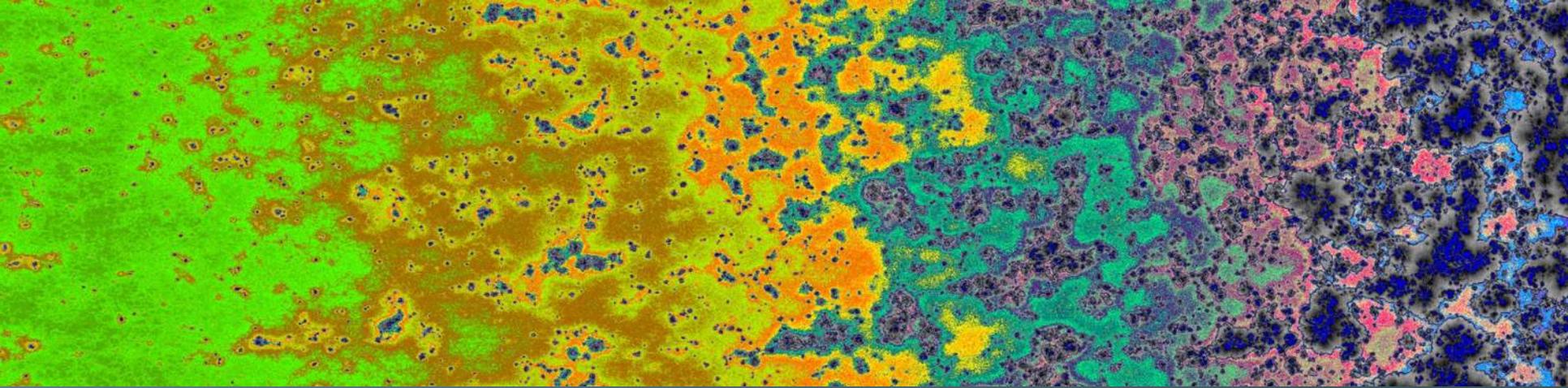
Régime pertinent: $\delta T_B \sim \delta T_S \sim \delta J_\alpha \Leftrightarrow$ aube cosmique



Une signature unique!

- Un mètre étalon
- Possible validation du signal

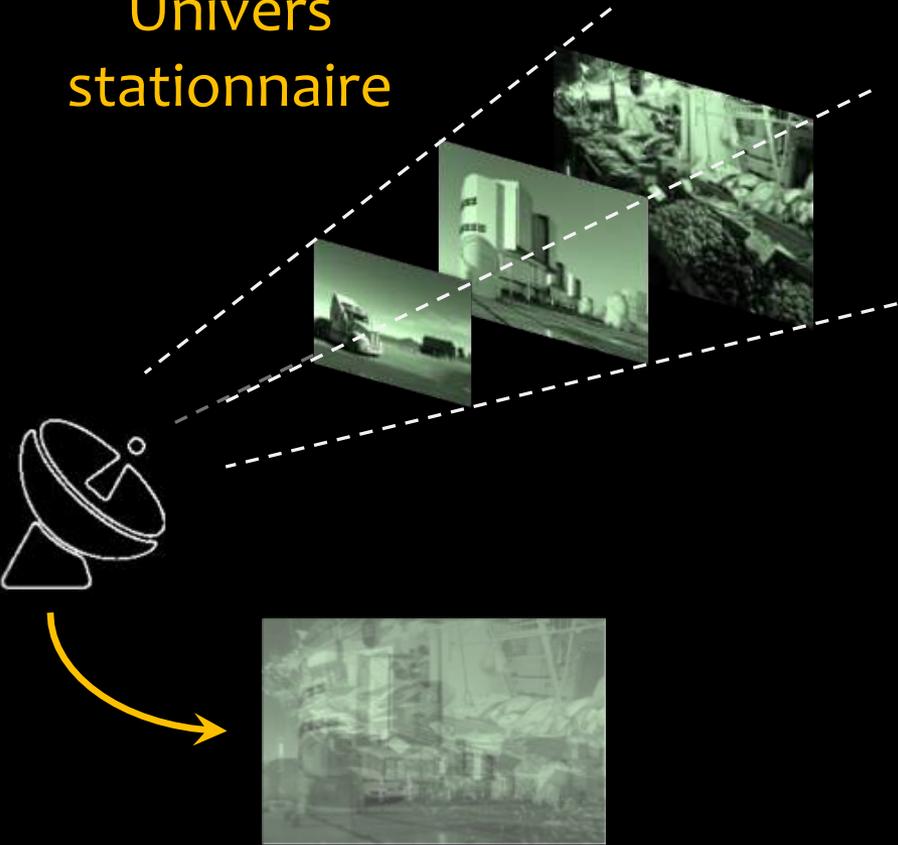
Difficile à observer, même avec SKA...



Observation
du signal 21 cm

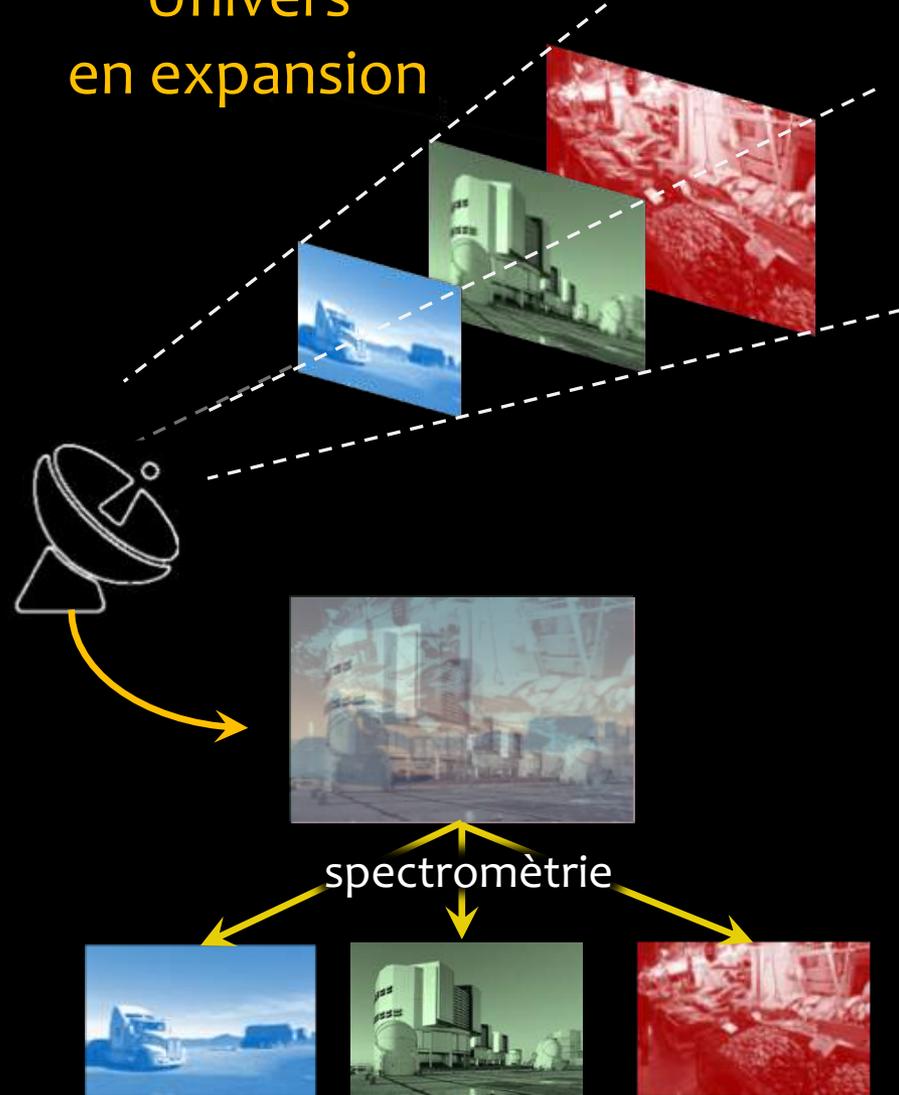
Tomographie d'une émission monochrome étendue

Univers stationnaire



Information irrécupérable !

Univers en expansion

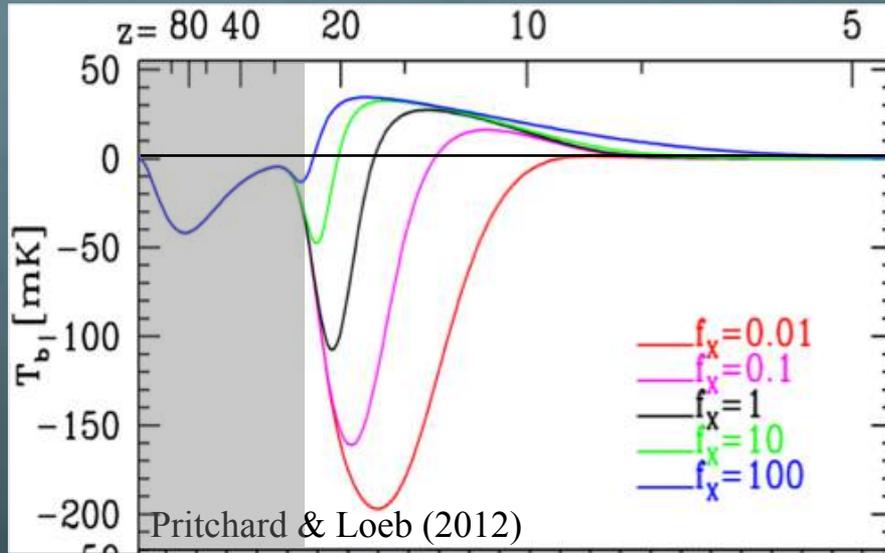


Observer le signal à 21 cm

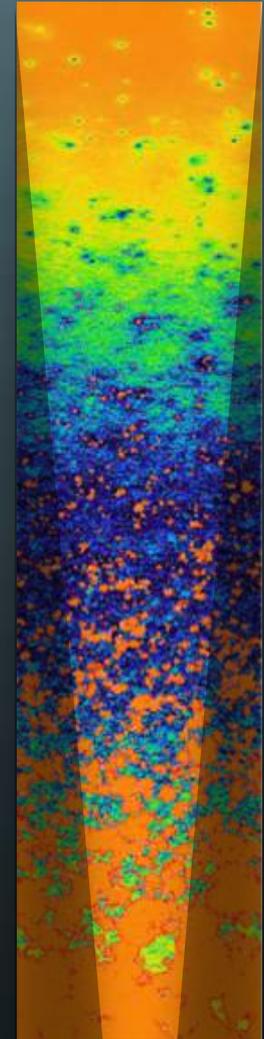
Signal moyen: $\langle \delta T_B \rangle_{sky}(z) \propto \langle x_{HI} \rangle_{sky} \langle 1 - T_{cmb} / T_s \rangle_{sky}$

Imagerie:

$$\delta T_B(\mathbf{x}, z)$$

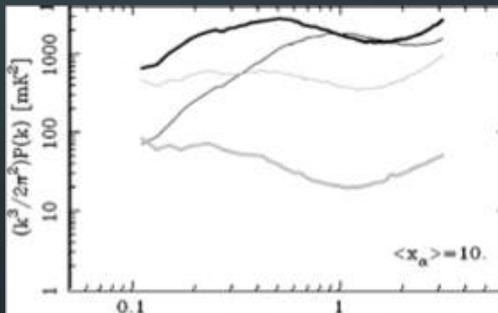


z / frequence / distance / temps
↑
angle →



Spectre de puissance 3D:

$$P_{\delta T_B}(k, z)$$



Toute l'info + phases aléatoires

Une détection du signal moyen par EDGES ?

(Bowman et al. 2018)

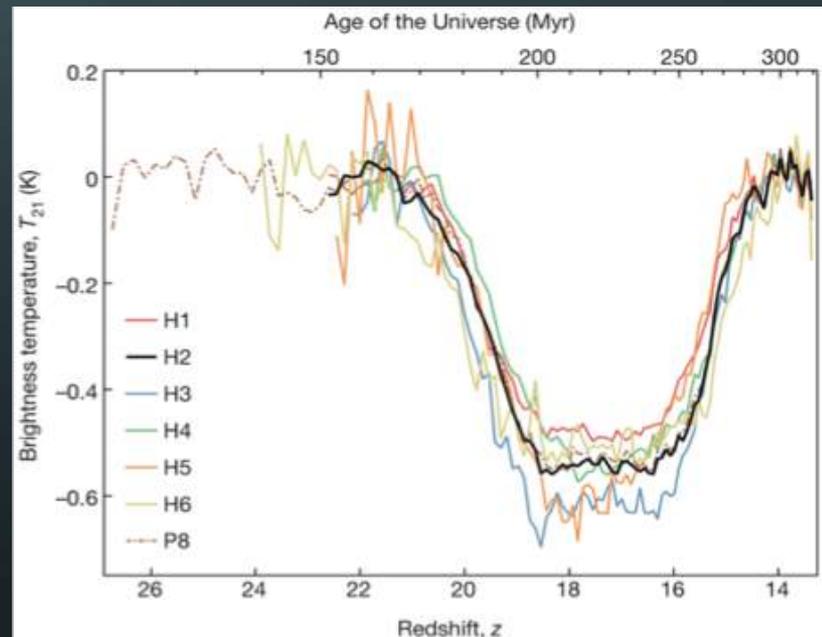
EDGES:

- Un dipôle unique (signal moyen)
- Sur le site de SKA, Australie
- Antenne basse fréquence (50-100 MHz)
- Antenne haute fréquence (90-200 MHz)
- > 100 h d'intégration

- Signal inattendu
- Signal extrait d'un fond 10^4 x plus fort!
- Avec un modèle à 5+4 paramètres

⇒ Questions sur la vraisemblance statistique de la détection.

⇒ Confirmation nécessaire!



Limites supérieures par interférométrie

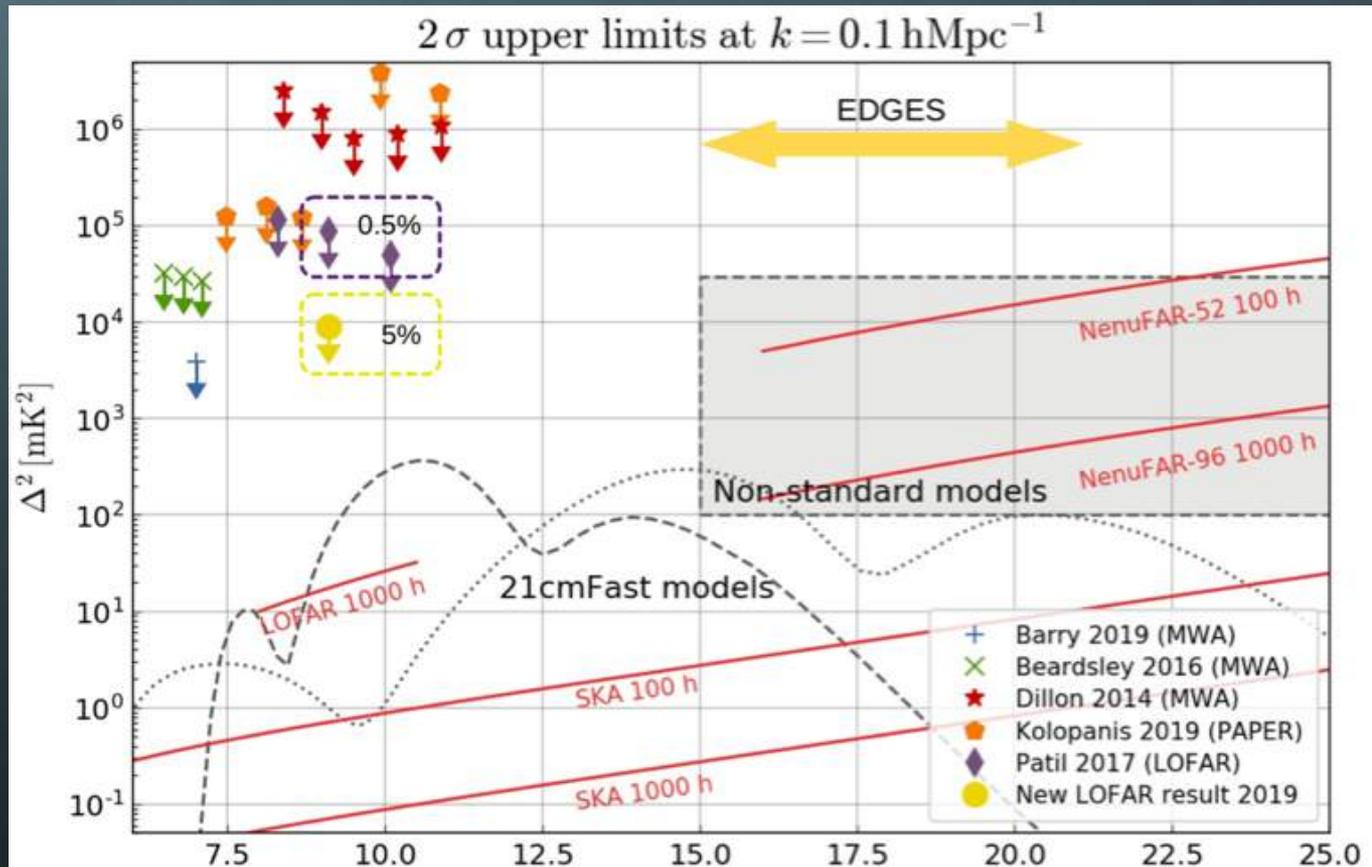
PAPER (Afrique du Sud)



MWA (Australie)



LOFAR (Pays-Bas)



La tomographie: l'un des objectifs principaux de SKA

D'après de « science book » de SKA:

- Le berceau de la vie
- Les Pulsars
- Magnetisme dans l'univers
- L'Hydrogen dans l'univers
- Phénomènes éphémères
- L'émission continue
- Cosmologie
- **Epoque de la réionisation**

Observer le signal 21cm décalé vers le rouge du MIG neutre pendant l'EOR:

50 - 200 MHz

=> SKA-Low



SKA –Low

Ouest de l'Australie

130 000 dipôles

Largeur de bande: 50-350 MHz

Sensibilité en imagerie: 1 mK à 5'

Détecter l'aube cosmique avec NenuFAR

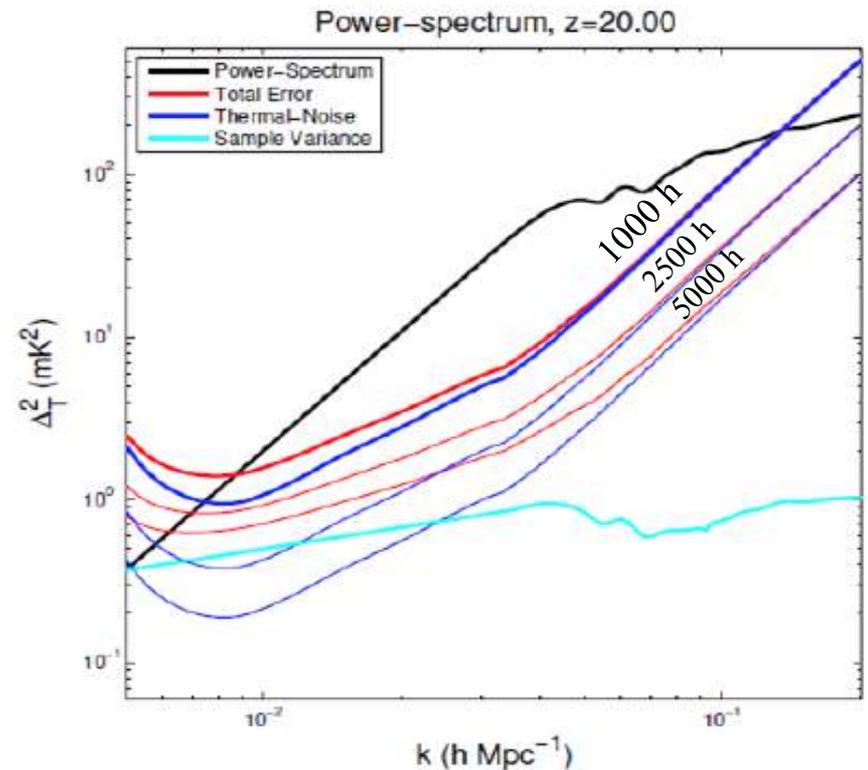
Un nouvel interféromètre radio à la Station radioastronomique de Nancay

- > 1900 antennes, 30-85 MHz
- > le plus sensible au monde pour l'aube cosmique

Programme d'observation lancé depuis Juin (1300 h)

Intensité du signal incertaine dans la bande de NenuFAR (30-85 MHz):

- modèle standard => détection possible.
- signal type EDGES => détection « facile »!



Détecter l'aube cosmique avec NenuFAR

Un nouvel interféromètre radio à la Station radioastronomique de Nancay

-> 1900 antennes, 30-85 MHz

-> le plus sensible au monde pour l'aube cosmique

Programme d'observation lancé depuis Juin (1300 h)

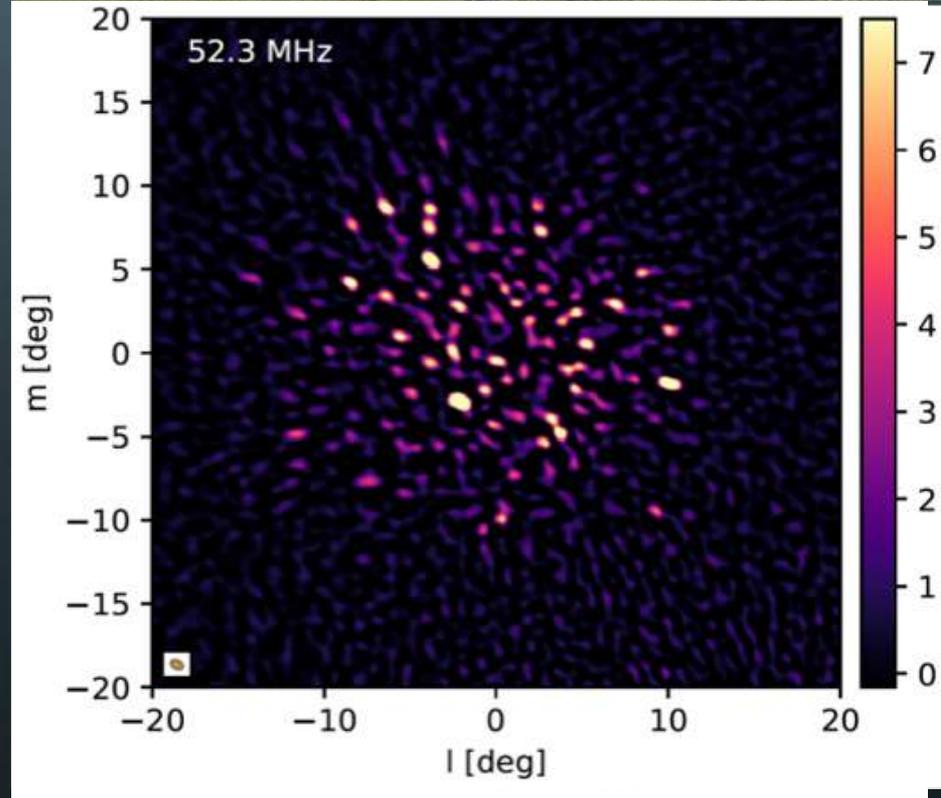
Intensité du signal incertaine dans la bande de NenuFAR (30-85 MHz):

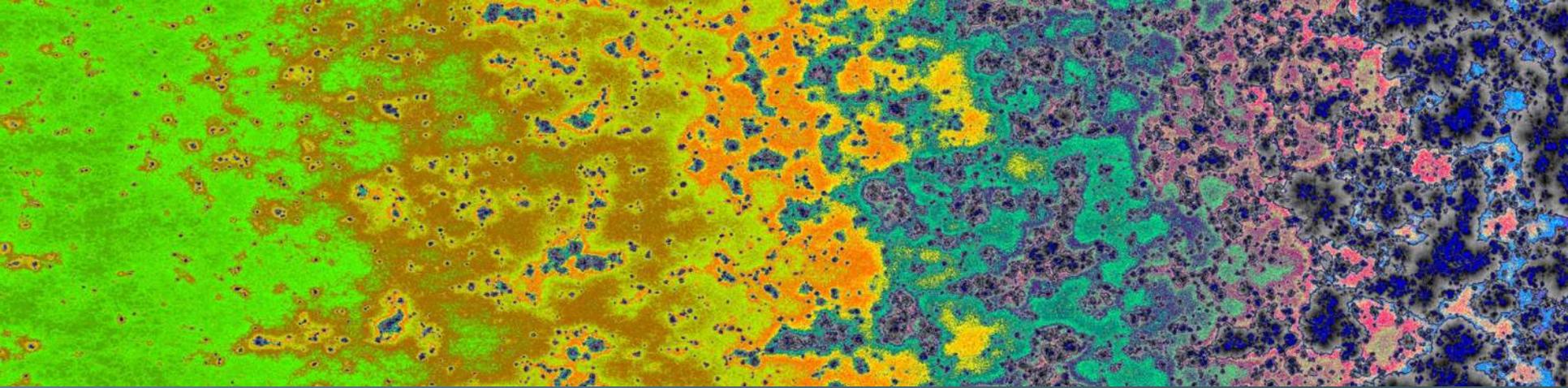
- modèle standard => détection possible.

- signal type EDGES => détection « facile »!

Première carte du pôle nord galactique par NENUFAR (Sept 2019)

=>



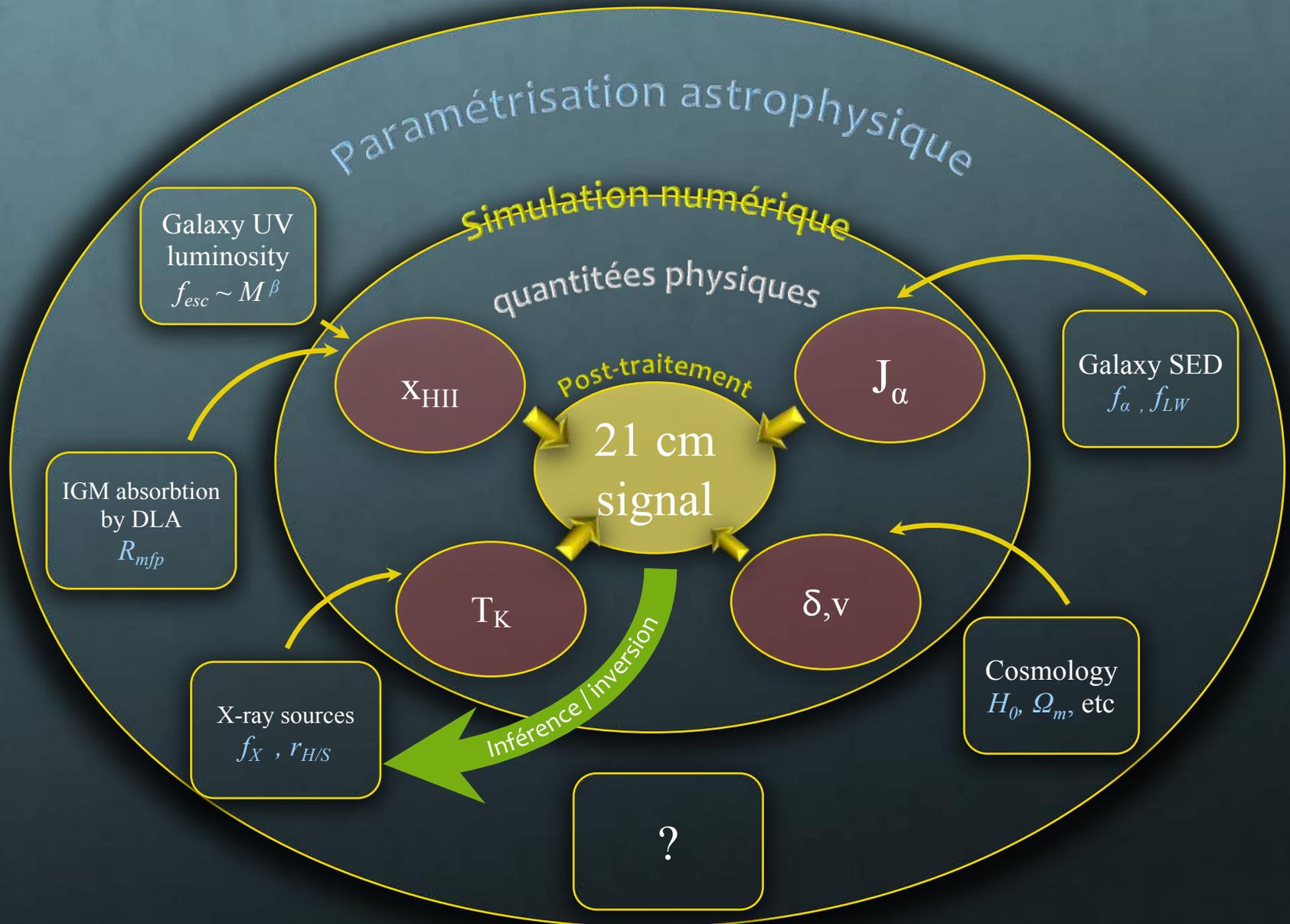


Simuler

l'époque de la réionisation

et le signal 21 cm

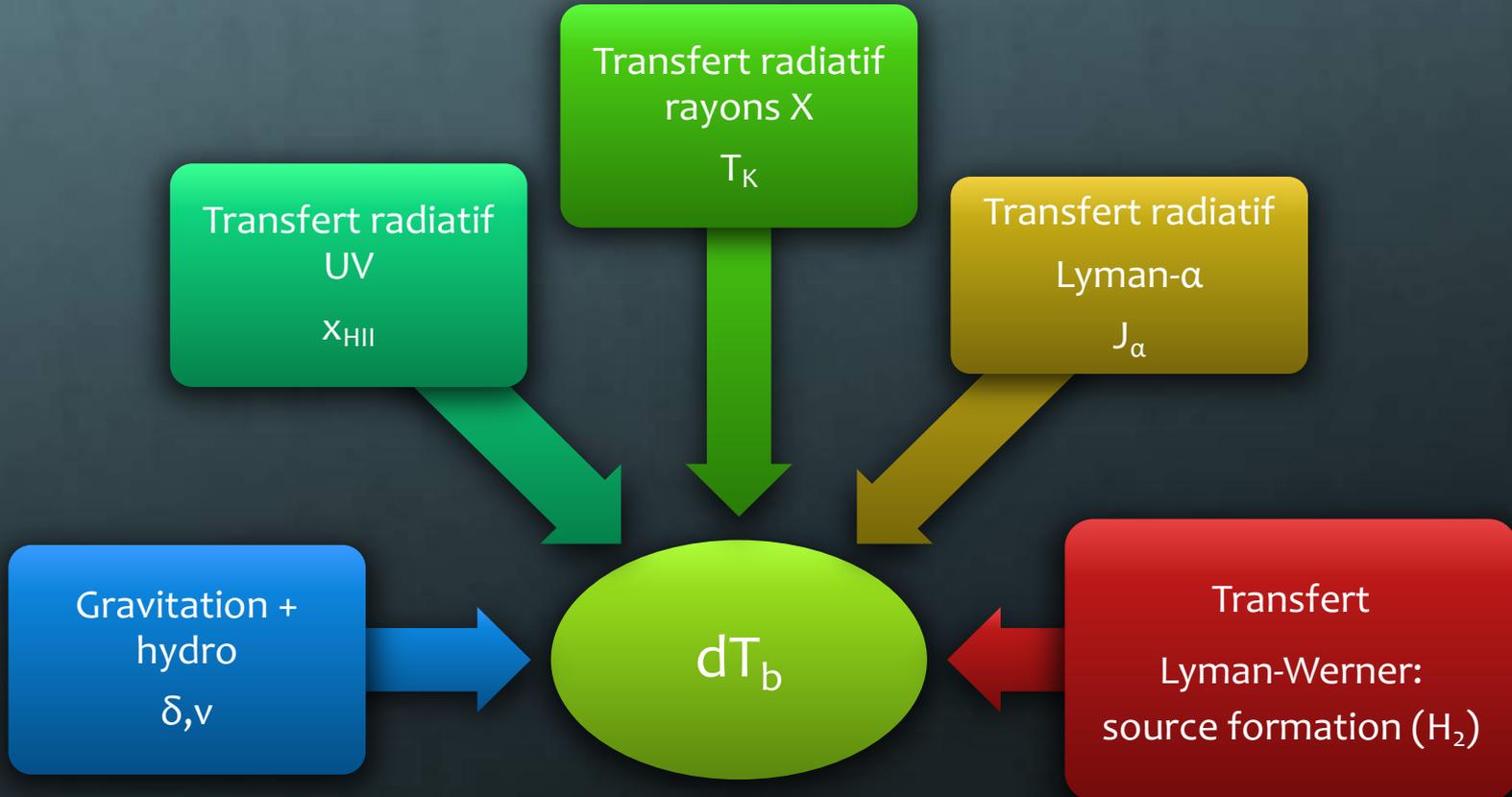
Pourquoi simuler le signal?



Comment simuler le signal ?

$$\delta T_B = 28 \text{ mK} \frac{\rho}{\bar{\rho}} x_{\text{HI}} \left(\frac{T_s - T_{\text{CMB}}}{T_s} \right) \left(1 + \frac{1}{H} \frac{dv}{dr} \right)^{-1}$$

$$T_S^{-1} = \frac{T_{\text{CMB}}^{-1} + x_c T_K^{-1} + x_\alpha T_K^{-1}}{1 + x_c + x_\alpha}$$



A-t-on les moyens de simuler le signal?

Simuler un volume représentatif (variance cosmique):

- Champ de densité représentatif: < 100 Mpc
- Champ d'ionisation représentatif: > 100 Mpc
- X-ray, Ly- α , LW: quelques 100 Mpc

Résolution suffisante pour les galaxies primordiales:

- Formation d'étoiles par refroidissement atomique: $> 10^8 M_{\odot}$
- Formation d'étoiles par refroidissement H_2 : $> 10^6 M_{\odot}$

10^{11} éléments
de résolution

10^{13} éléments
de résolution

Etat de l'art:

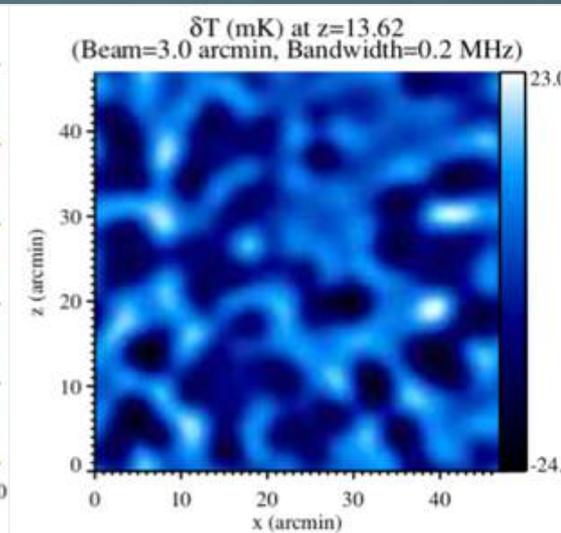
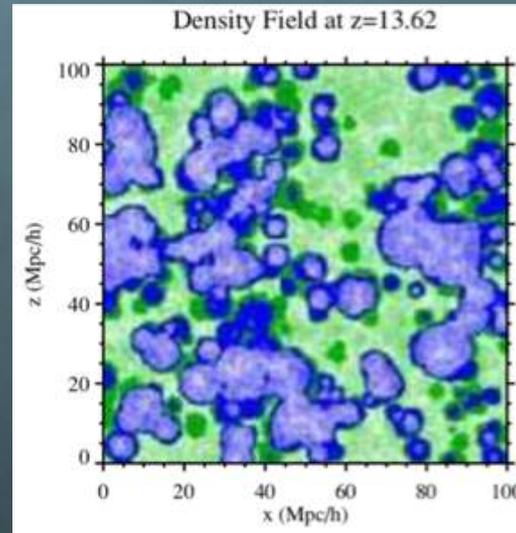
$10^{10} - 10^{11}$

Un coup d'œil dans le rétroviseur

Mellema et al. (2006):

une première simulation « solide »

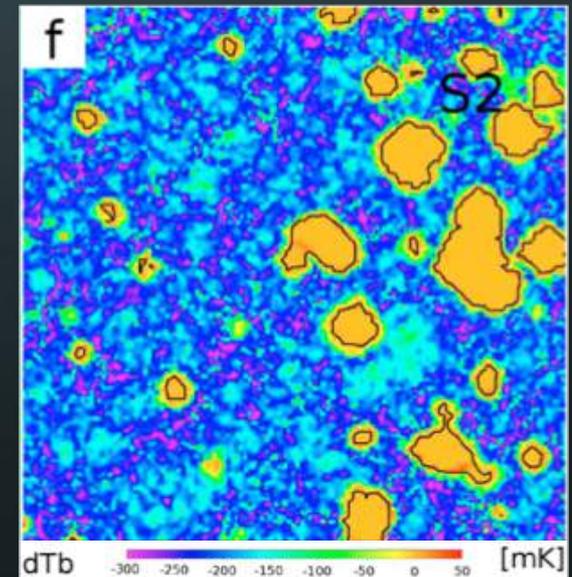
- 150^3 Mpc³
- 1600^3 particules (Dark matter)
- Pas d'hydrodynamique
- Transfert radiatif 400 kpc résol (UV)



Baek et al. (2009-2010):

Résolution modeste, physique riche

- 150^3 Mpc³
- 2×256^3 particules
- Hydrodynamique
- Transfert radiatif 300 kpc résol (UV, rayon X, Lyman-alpha)



Une question clé:

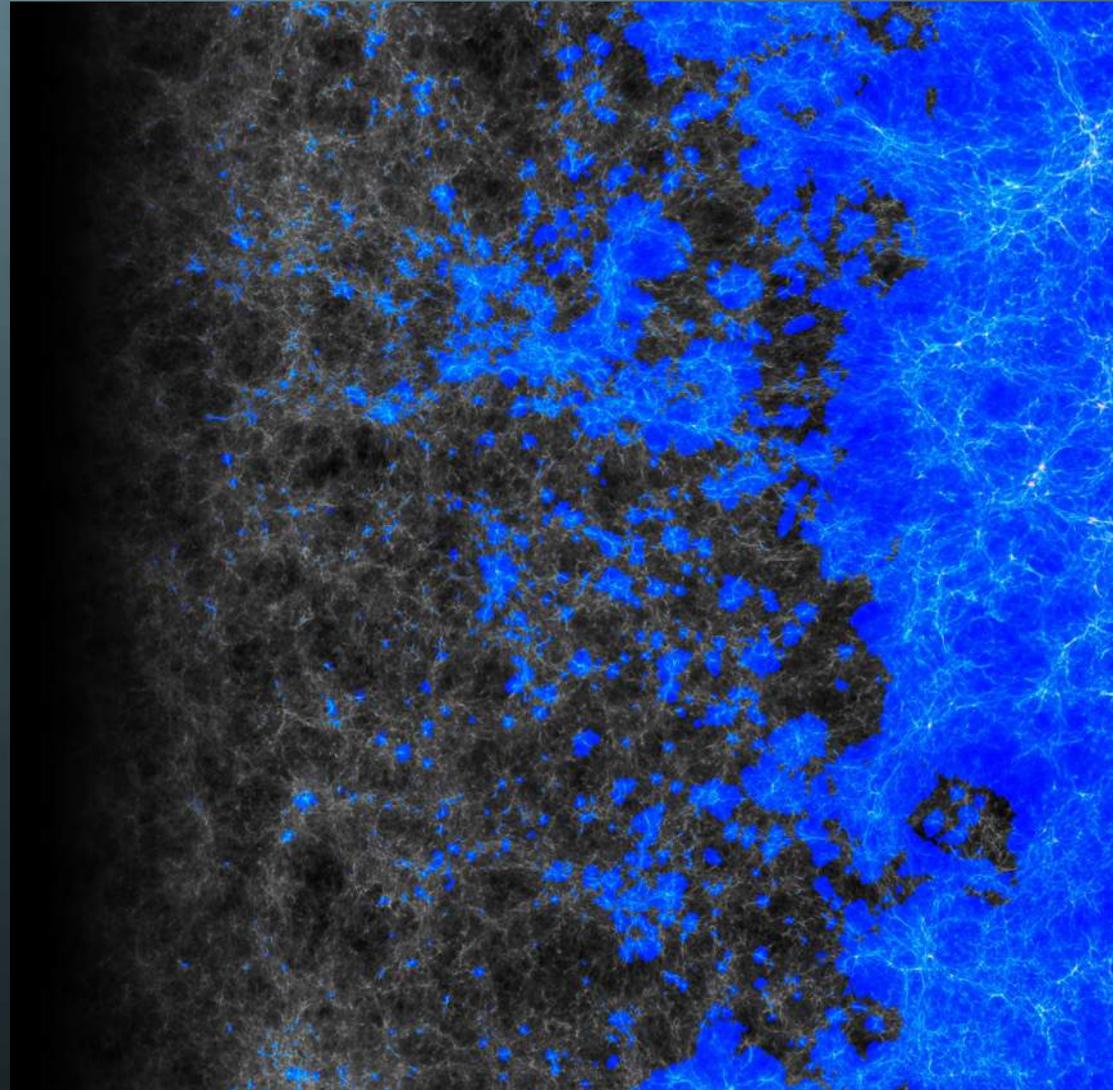
La rétroaction de la photoionisation sur la formation des galaxies

temps

Beaucoup de travaux!

Un exemple: la simulation CODA
(Ocvirk et al., 2018)

- Code RAMES-CUDATON (GPU)
- Volume: 100^3 Mpc^3
- Résolution: 4096^3
- Hydrodynamique radiative



Une question clé:

La rétroaction de la photoionisation sur la formation des galaxies

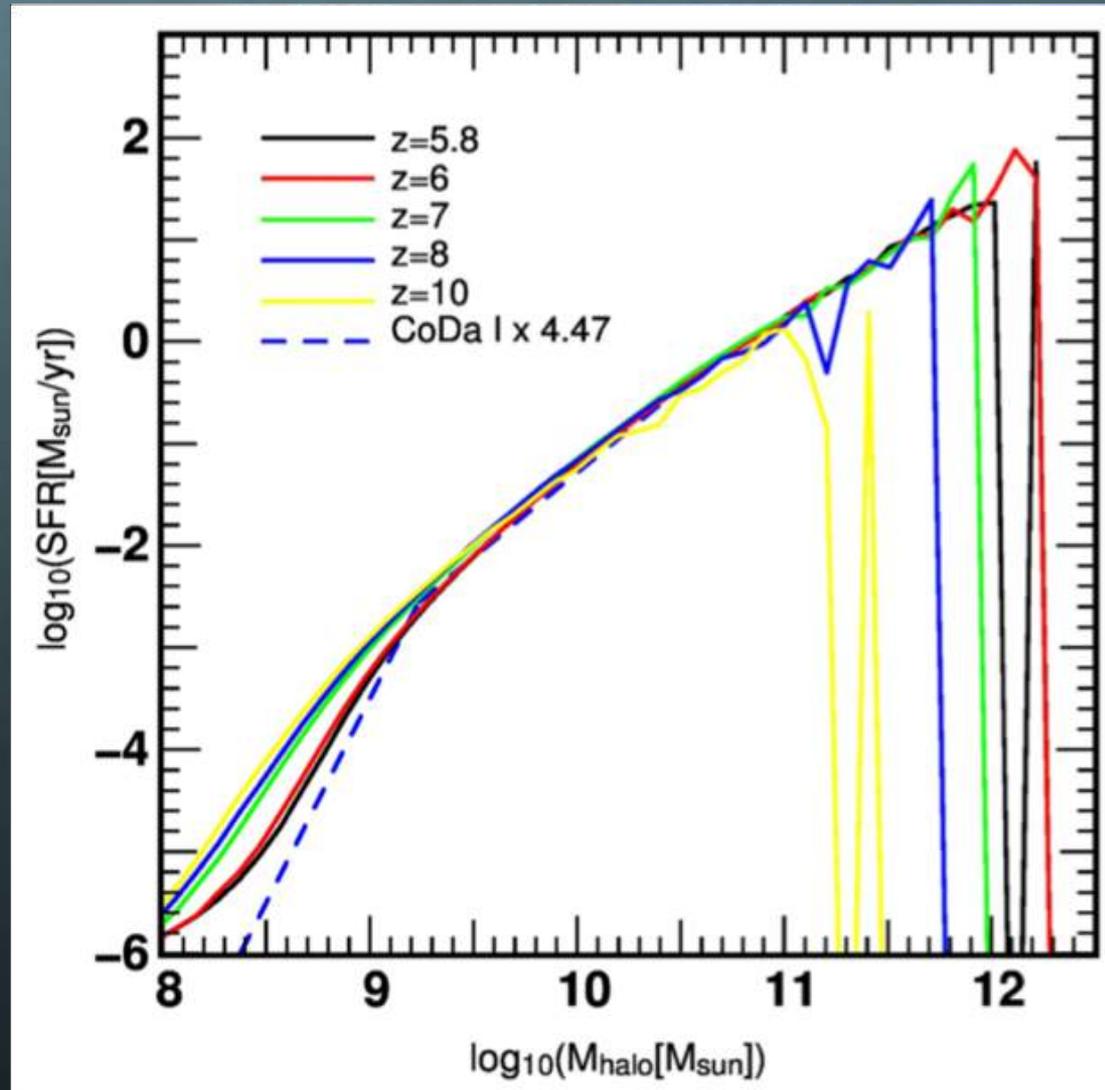
Beaucoup de travaux!

Un exemple: la simulation CODA
(Ocvirk et al., 2018)

- Code RAMES-CUDATON (GPU)
- Volume: 100^3 Mpc^3
- Résolution: 4096^3
- Hydrodynamique radiative

Le rayonnement ionisant
chauffe le gaz des galaxies

- ⇒ Augmentation de la pression
- ⇒ Photoevaporation si gravité insuffisante
- ⇒ Inhibition de la formation stellaire



Simuler le signal 21 cm: le code LICORICE

Le code LICORICE:

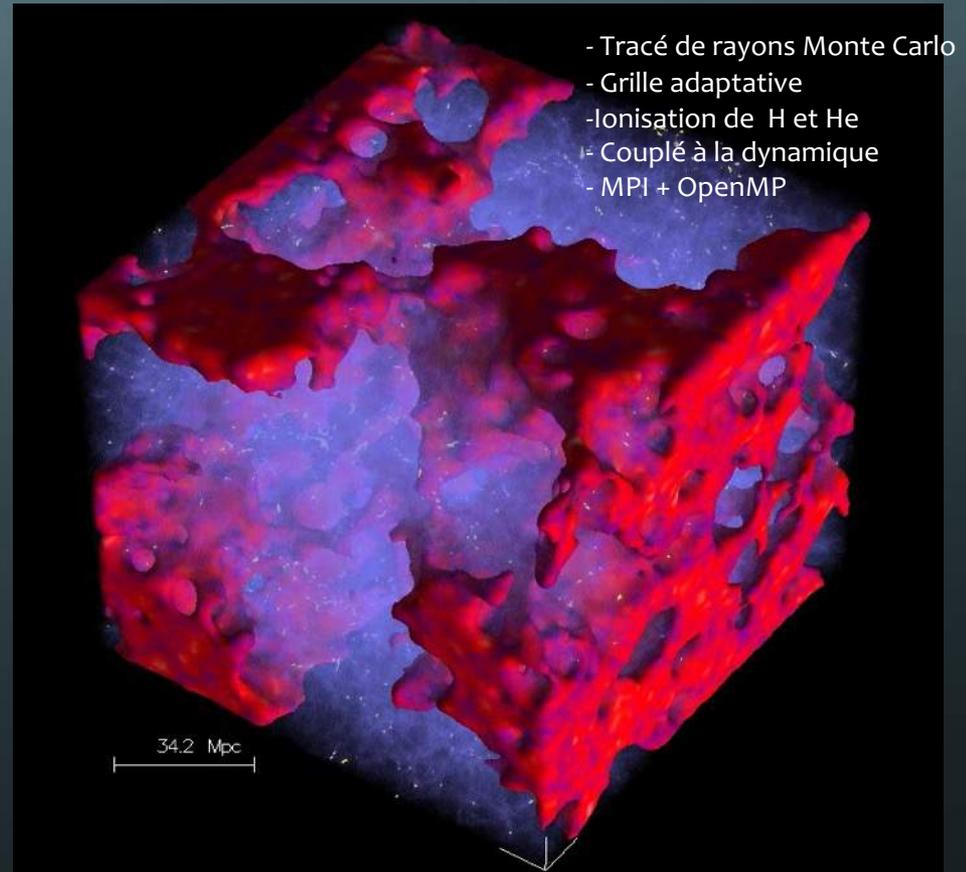
-Dynamique (grav + hydro): δ, v



Simuler le signal 21 cm: le code LICORICE

Le code LICORICE:

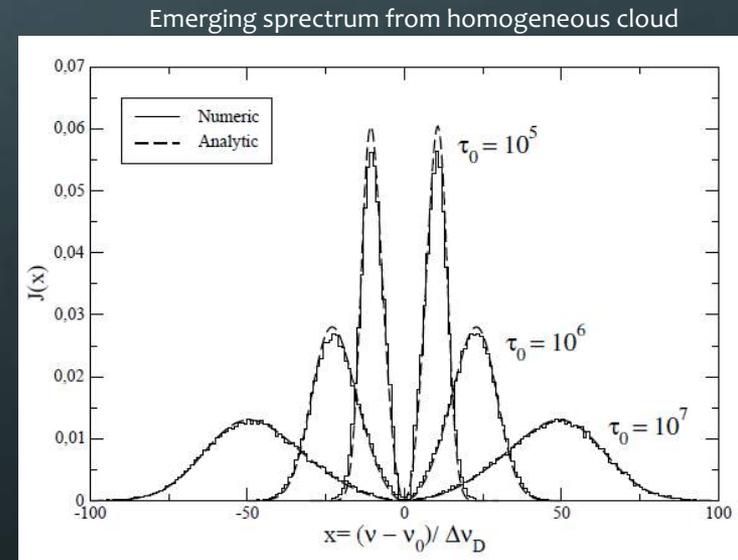
- Dynamique (grav + hydro): δ, v
- Transfer radiatif UV ionisant: x_{HII}
- Transfer radiatif rayons X: T_K



Simuler le signal 21 cm: le code LICORICE

Le code LICORICE:

- Dynamique (grav + hydro): δ, v
- Transfer radiatif UV ionisant: x_{HII}
- Transfer radiatif rayons X: T_K
- Transfer radiatif Lyman- α : J_α
- Pas de transfert LW (formation H_2)



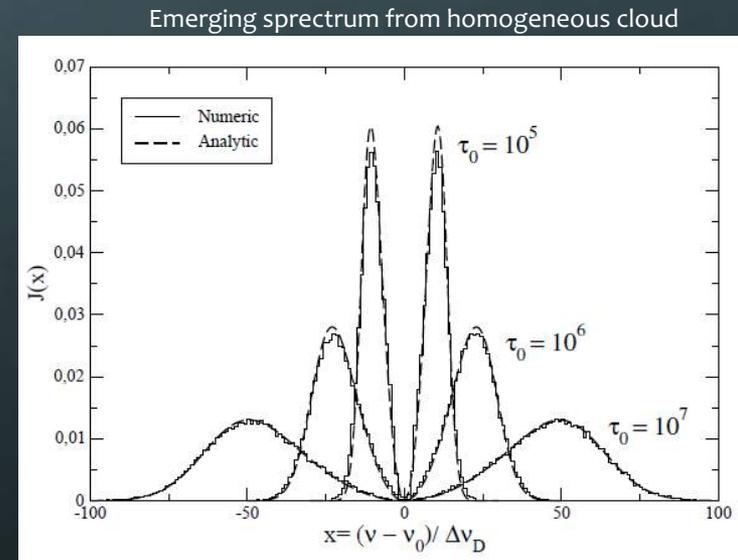
Simuler le signal 21 cm: le code LICORICE

Le code LICORICE:

- Dynamique (grav + hydro): δ, v
- Transfer radiatif UV ionisant: x_{HII}
- Transfer radiatif rayons X: T_K
- Transfer radiatif Lyman- α : J_α
- Pas de transfert LW (formation H_2)

Simulation de routine actuelle:

- 1024^3 particules
- 300 Mpc
- 10^5 heures CPU
- 4096 cœurs de calcul x 1 jour



Explorer l'espace des paramètres: la base de donnée 21SSD (Semelin et al. 2017)

Simulations d'hydro-radiative en résolution

1024^3

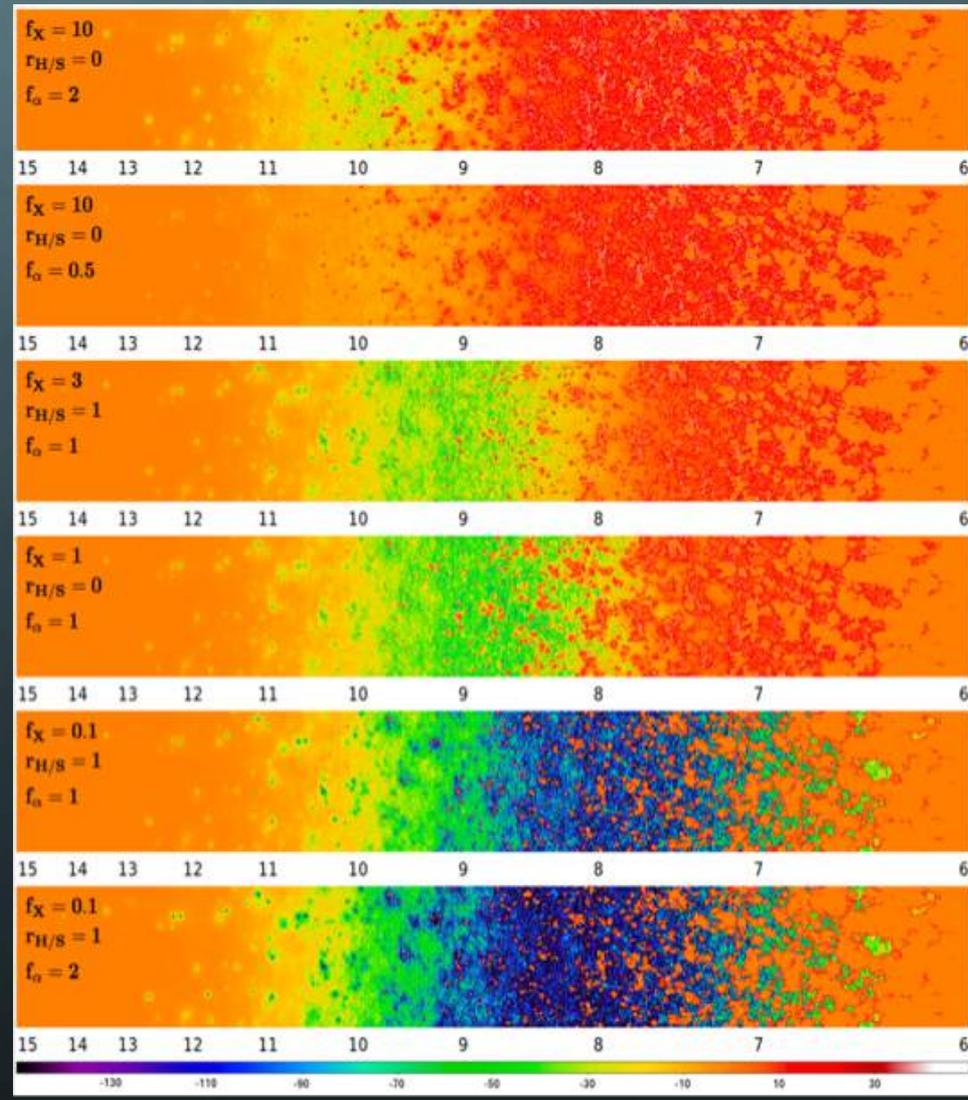
45 modèles dans un espace des paramètres 3D

Paramètres variés:

- Production globale des rayons X
- Fraction X-durs/X-mous
- Efficacité du pompage Lyman-alpha

⇒ Grande variété de signaux possibles

- Templates pour la préparation de SKA
- Echantillon d'apprentissage supervisé



Une simulation extrême

Un « grand challenge » du GENCI:

- Boite de 300 Mpc
- 10^{10} particules, galaxies $> 10^9 M_{\odot}$, résolution ~ 3 kpc
- 4×10^{12} photons
- UV + X dur (XRB) + X mous (AGN) + bande Lyman
- 5 Mh CPU. 4096 domaines MPI, 16384 coeurs.

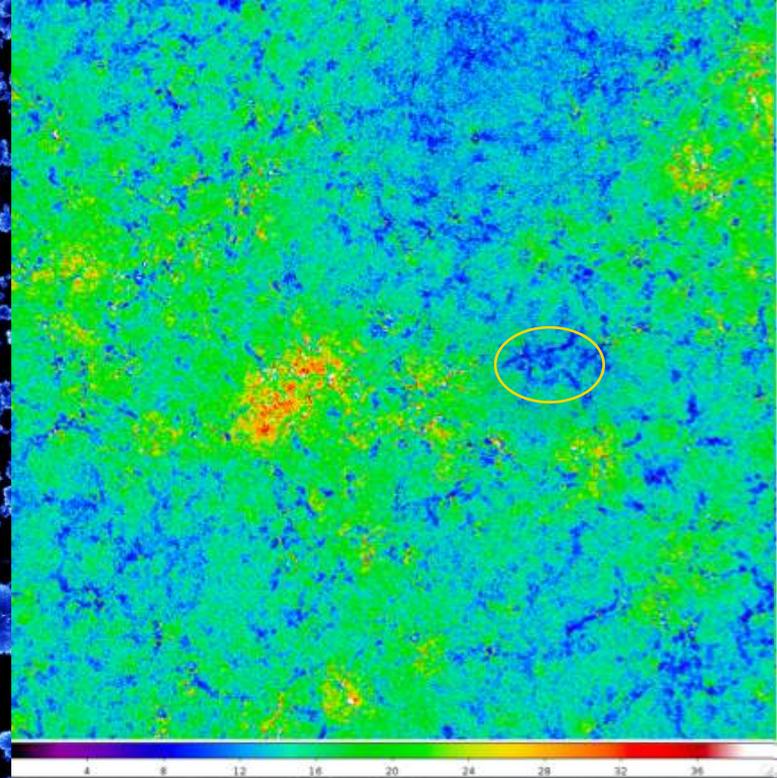
Une simulation extrême

Un « grand challenge » du GENCI:

- Boite de 300 Mpc
- 10^{10} particules, galaxies $> 10^9 M_{\odot}$, résolution ~ 3 kpc
- 4×10^{12} photons
- UV + X dur (XRB) + X mous (AGN) + bande Lyman
- 5 Mh CPU. 4096 domaines MPI, 16384 coeurs.

Encore en cours d'exploitation.

- Mise en évidence d'effets d'écrantage du flux Lyman- α => fluctuations de T_S => de dT_b



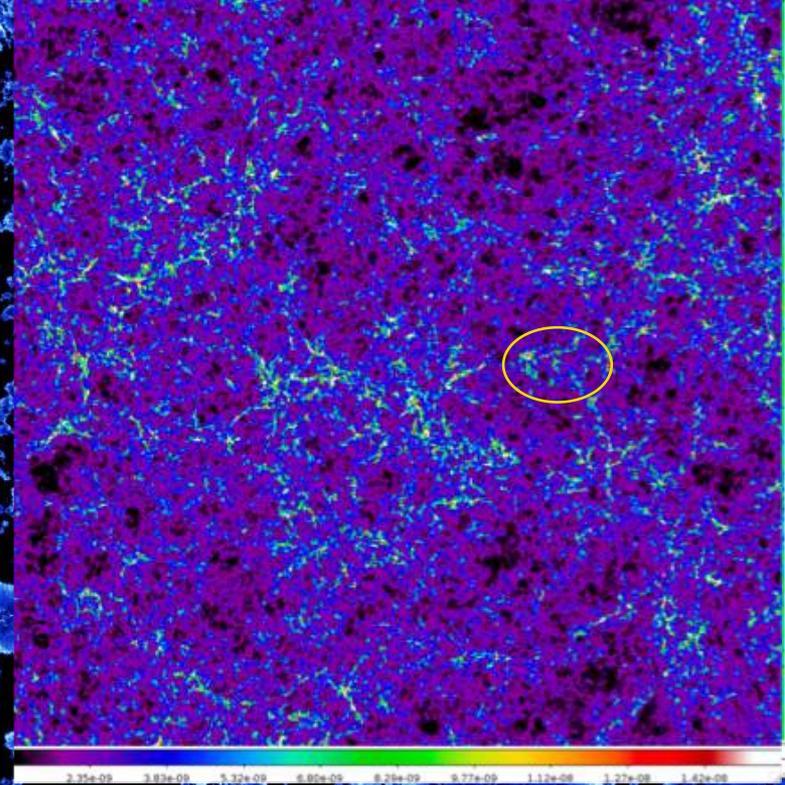
Une simulation extrême

Un « grand challenge » du GENCI:

- Boite de 300 Mpc
- 10^{10} particules, galaxies $> 10^9 M_{\odot}$, résolution ~ 3 kpc
- 4×10^{12} photons
- UV + X dur (XRB) + X mous (AGN) + bande Lyman
- 5 Mh CPU. 4096 domaines MPI, 16384 coeurs.

Encore en cours d'exploitation.

- Mise en évidence d'effets d'écrantage du flux Lyman- α => fluctuations de T_S => de dT_b



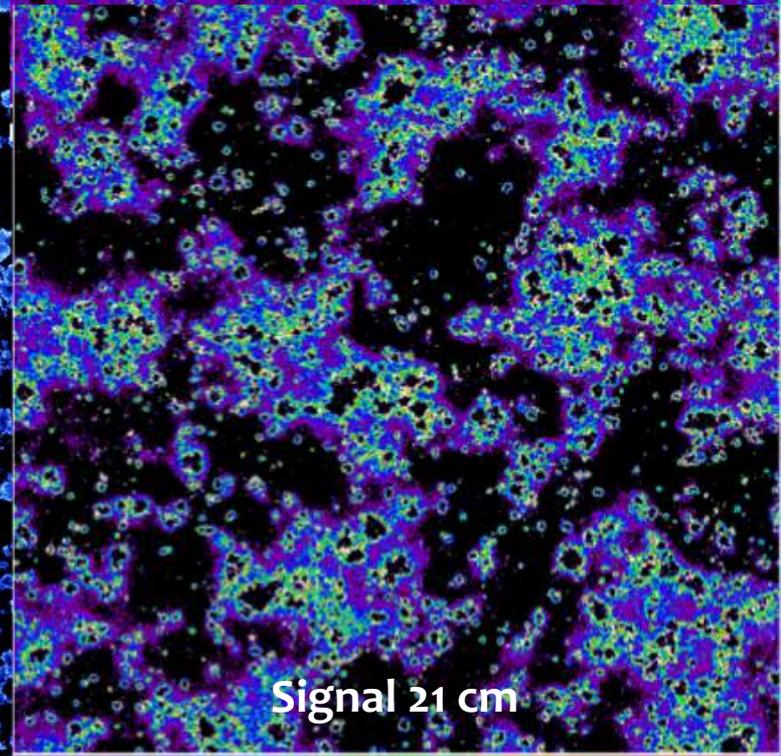
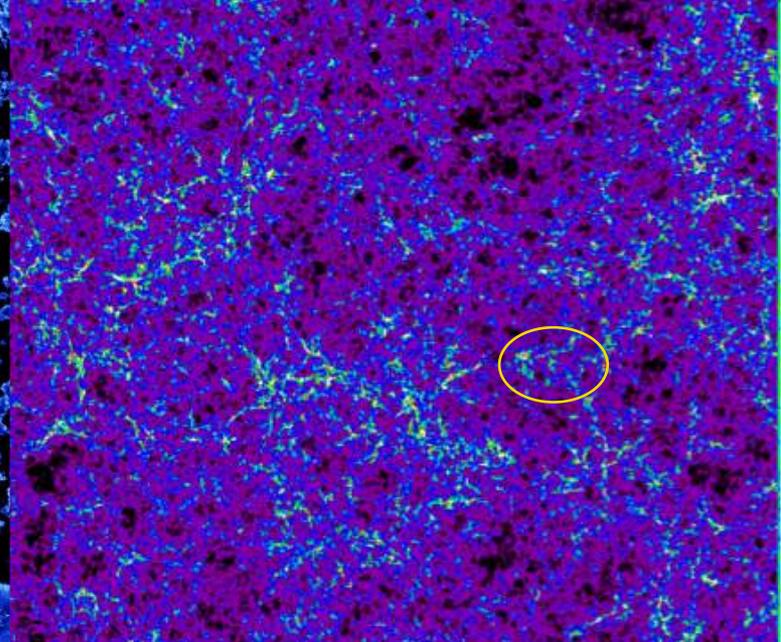
Une simulation extrême

Un « grand challenge » du GENCI:

- Boite de 300 Mpc
- 10^{10} particules, galaxies $> 10^9 M_{\odot}$, résolution ~ 3 kpc
- 4×10^{12} photons
- UV + X dur (XRB) + X mous (AGN) + bande Lyman
- 5 Mh CPU. 4096 domaines MPI, 16384 coeurs.

Encore en cours d'exploitation.

- Mise en évidence d'effets d'écrantage du flux Lyman- α => fluctuations de T_S => de dT_b
- Quantification des effets sur le signal 21 cm...

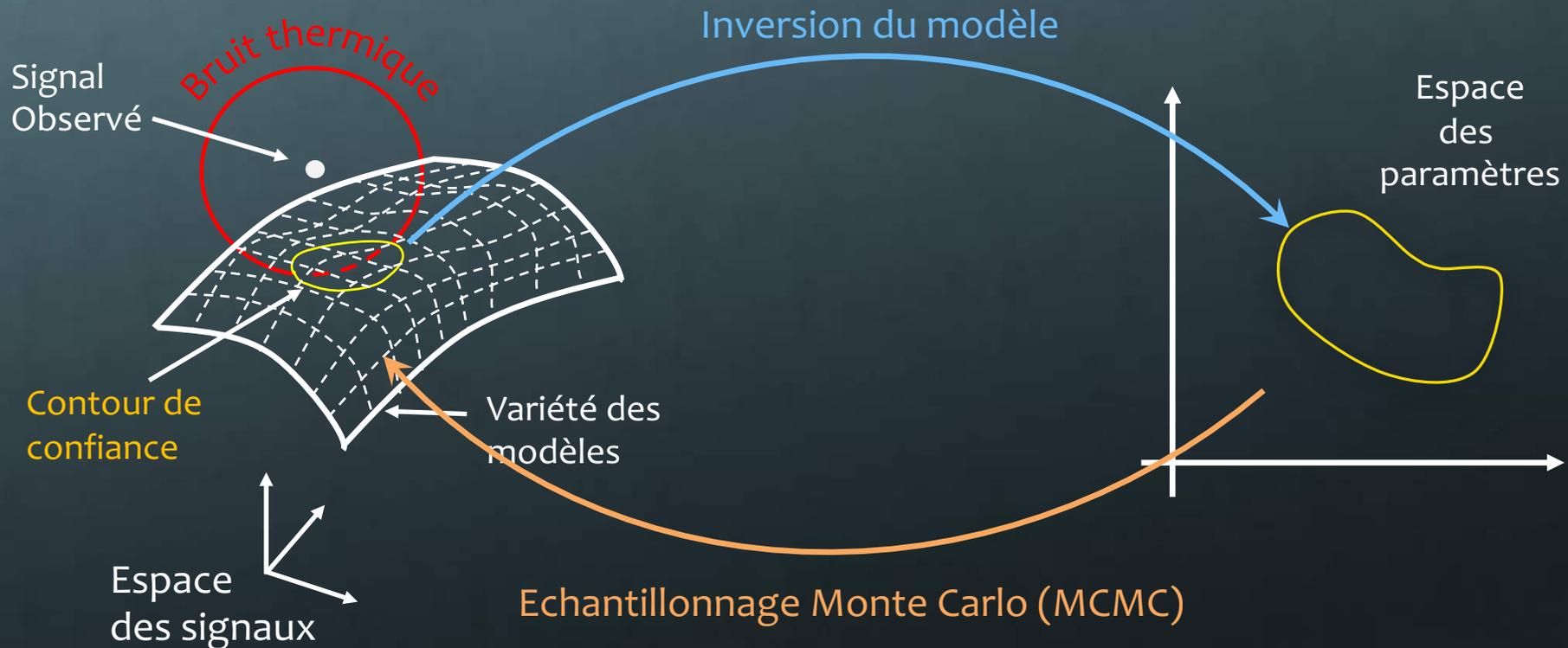


Signal 21 cm

L'inférence Bayésienne: une vue géométrique

Modèle « jouet »:

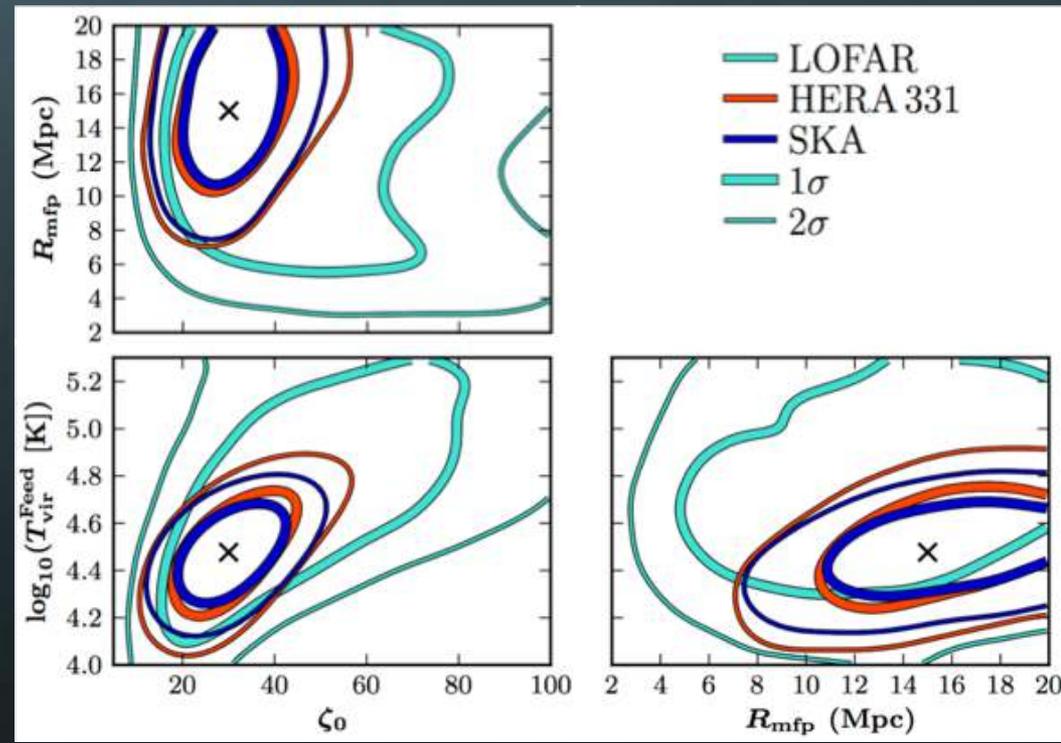
- Un signal à 3 valeurs
- Un modèle à 2 paramètres



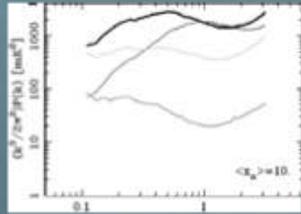
Inférence Bayésienne pour le signal 21 cm (Greig & Mesinger 2015)

- 21cmFast: code semi numérique pour modéliser le signal 21 cm.
 - Rapide mais approximatif
 - 3 secondes pour une simulation 128^3 sur 1 CPU
- Espace à 3 paramètres (f_{esc} , R_{mfp} , T_{vir})
- Exploration par MCMC + spectre de puissance comme signal

⇒ Contours de confiance sur les paramètres inférés pour un “mock signal”



Inversion du modèle par apprentissage machine (Doussot et al., 2019)



Signal



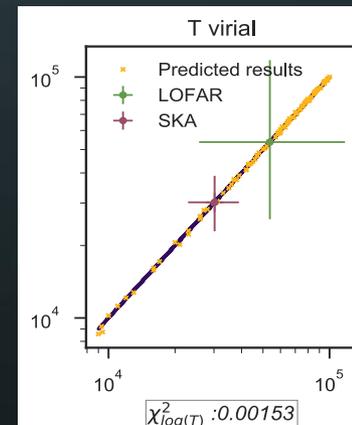
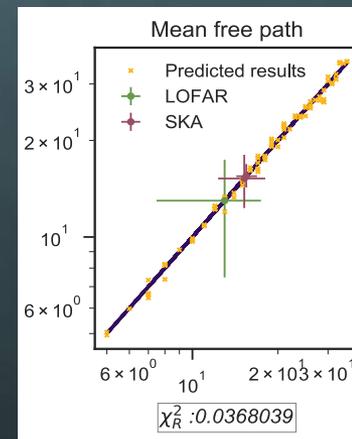
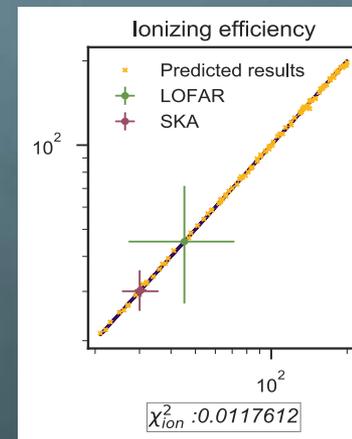
Valeur des
paramètres

Echantillon d'apprentissage:

- Signal à 120 valeurs
- **2400 signaux**, échantillonnant un espace de parametre 3D
- Prise en compte du **bruit thermique**

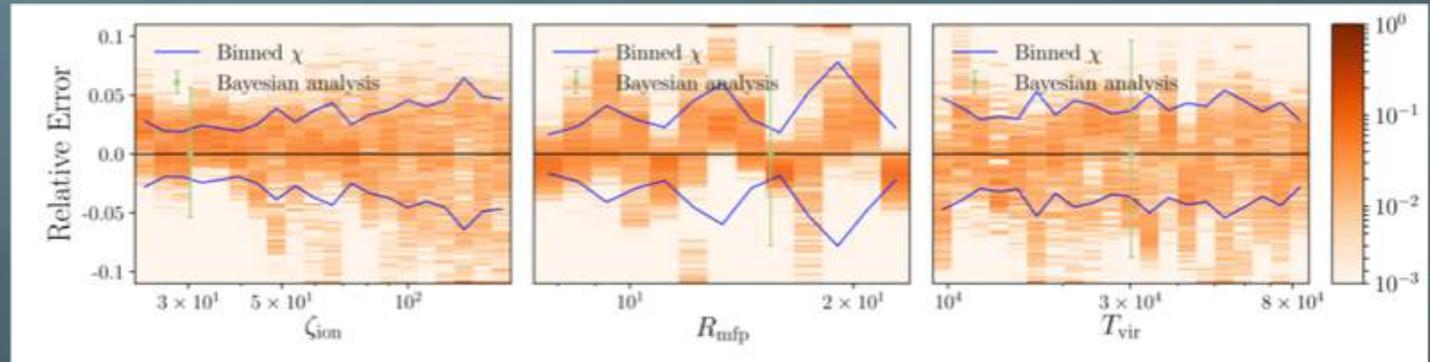
Algorithmes:

- Réseaux de neurone (une seule couche cachée)
- Régression à noyau « ridge »

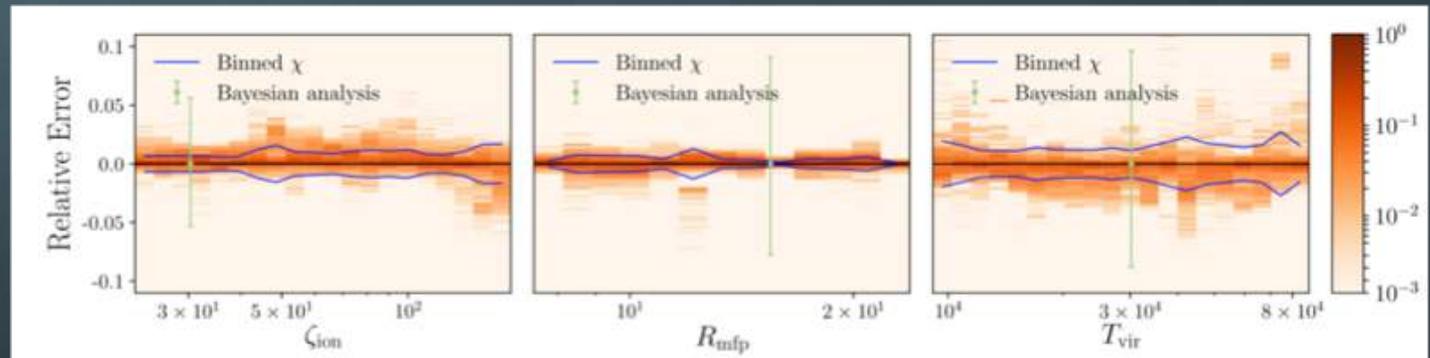


Inversion du modèle: en incluant le bruit thermique

Réseau de neurone



Regression à Noyau « ridge »



Doussot et al, 2019

Conclusions

- Le signal 21-cm pourrait avoir un impact similaire au CMB sur l'astro/cosmo.
- Le défi observationnel est énorme.
- La modélisation numérique est la clé pour extraire de l'information du signal observé.
- Il faut explorer de nouveaux algorithmes d'inférence des paramètres astrophysiques.