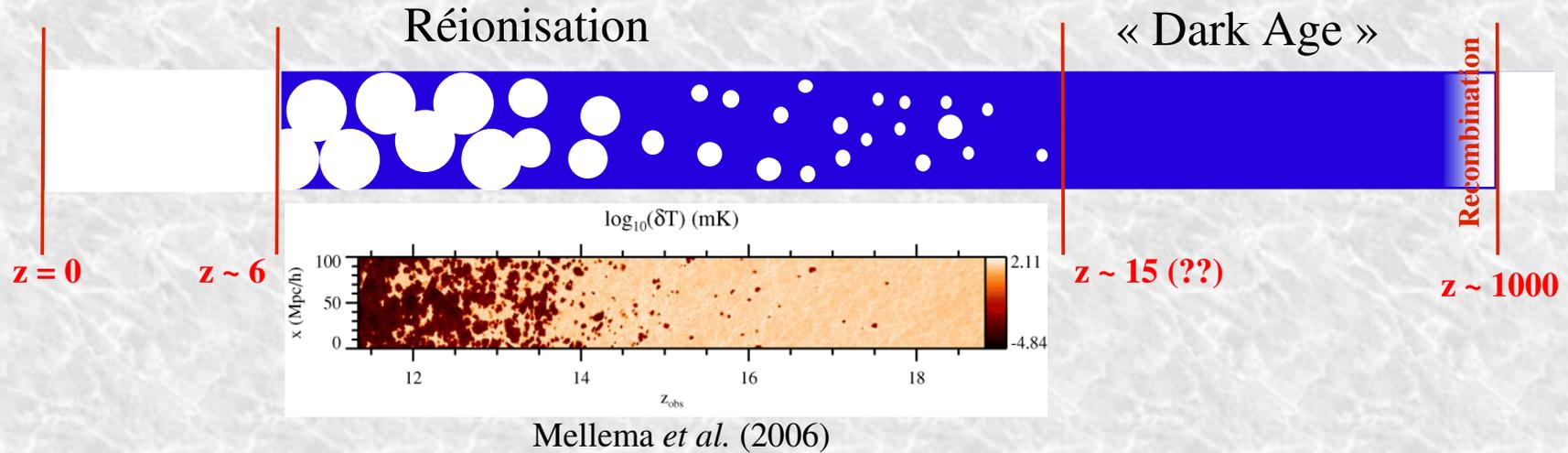


**Epoque de la réionisation:
simulations numériques de
l'émission à 21-cm.**

Octobre 2006

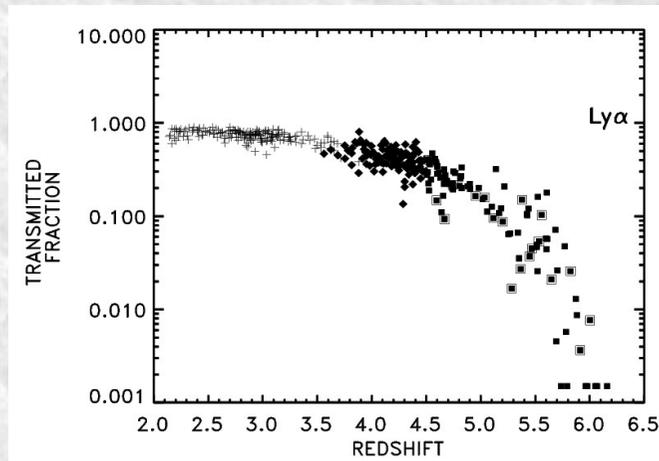
Benoît Semelin - LERMA

Epoque de la réionisation (EoR): quelques faits



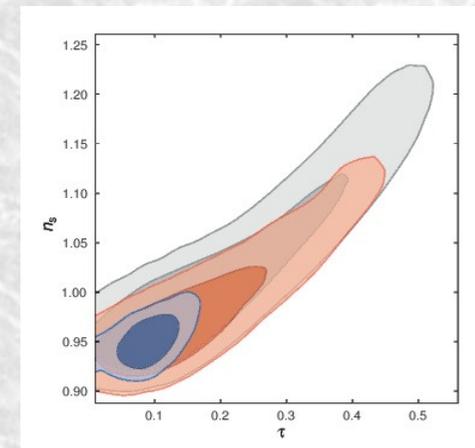
Contraintes sur le(s) redshift(s) de l'EoR:

Effet Gunn-Peterson



Fan *et al.* 2006

WMAP: épaisseur optique de la diffusion Thomson



Spergel *et al.* 2006

1 an:

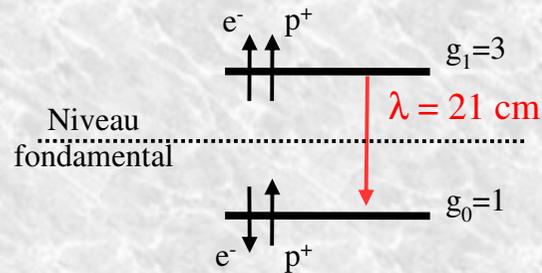
- $\tau \sim 0.17$
- $z_{\text{ion}} = 17 \pm 5$

3 ans:

- $\tau \sim 0.092$
- $z_{\text{ion}} \sim 10$

Le signal à 21 cm: physique de l'émission

Transition hyperfine de l'état fondamental de l'hydrogène atomique:



Population des niveaux hyperfins:

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{g_1}{g_2} \exp\left(-\frac{h\nu}{k_B T_S}\right) = 3 \exp\left(-\frac{T_*}{T_S}\right)$$

$$T_* = 0.068 \text{ K} \ll T_S$$

Valeur de la température de spin T_S : compétition de 3 mécanismes

- Diffusion des photons du CMB: couplage $T_S \rightarrow T_{\text{CMB}}$ en $3 \cdot 10^5 / (1+z)$ ans.
- Collision avec les autres atomes H: couplage $T_S \rightarrow T_K$, en régions denses ($\delta\rho/\rho > 30$ à $z=10$).
- Pompage par les photons Lyman-alpha (effet Wouthuysen-Field): couplage $T_S \rightarrow T_c \approx T_K$

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

avec $x_\alpha \propto J_\alpha$

J_α est le flux **local** de photons Lyman-alpha.

Le signal à 21 cm: intensité observée

Localement, l'intensité I_ν l'émission à 21 cm dépend de:

- T_S : la température de spin (donc T_K et J_α)
- δ : la sur-densité d'hydrogène
- $1-x_i$: la fraction d'hydrogène neutre

$$I_\nu \propto \nu^2 T_B$$
$$\delta T_B = T_B - T_{CMB} \propto (1 + \delta)(1 - x_i) \left(\frac{T_S - T_{CMB}}{T_S} \right)$$

⇒ Si $T_S < T_{CMB}$, signal vu en absorption sur le CMB.

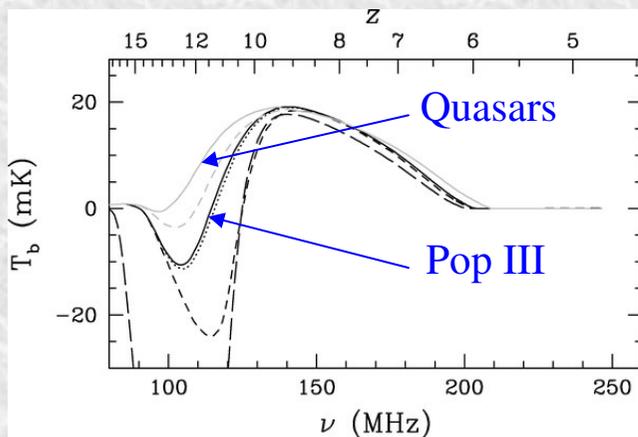
Si $T_S > T_{CMB}$ signal vu en émission.

Prédiction des paramètres déterminant l'intensité: simulations requises

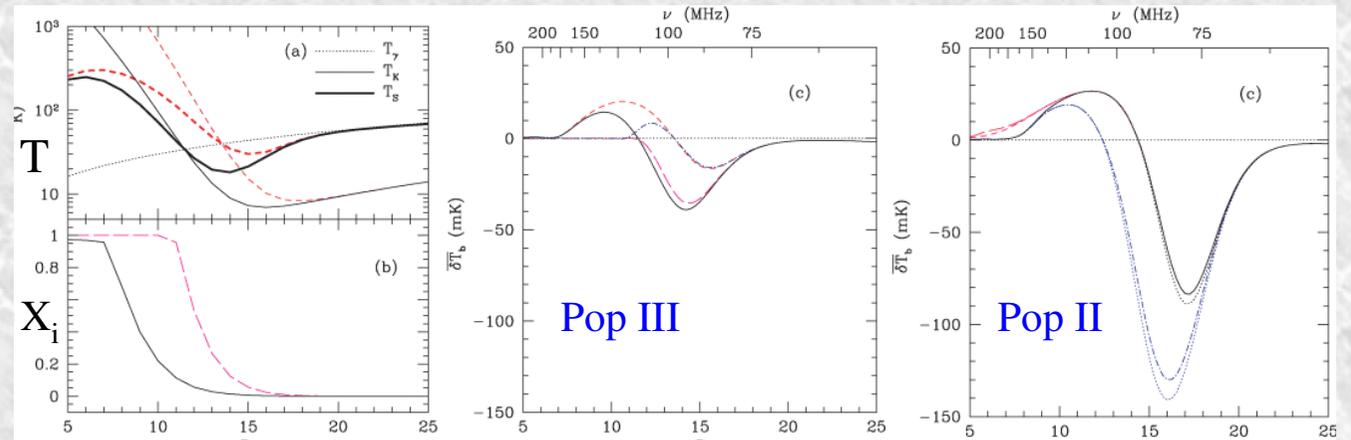
- δ : Dynamique (Matière Noire + Matière Baryonique)
- $1-x_i$: Dynamique + Formation Stellaire + Transfert Radiatif (continuum ionisant)
- T_S : Dynamique + Formation Stellaire + Transfert Radiatif (Continuum + **Lyman-alpha**)

Prédictions sur l'intensité moyenne du signal à 21 cm.

Moyenne des fluctuations de T_b sur le ciel, en fonction de z :



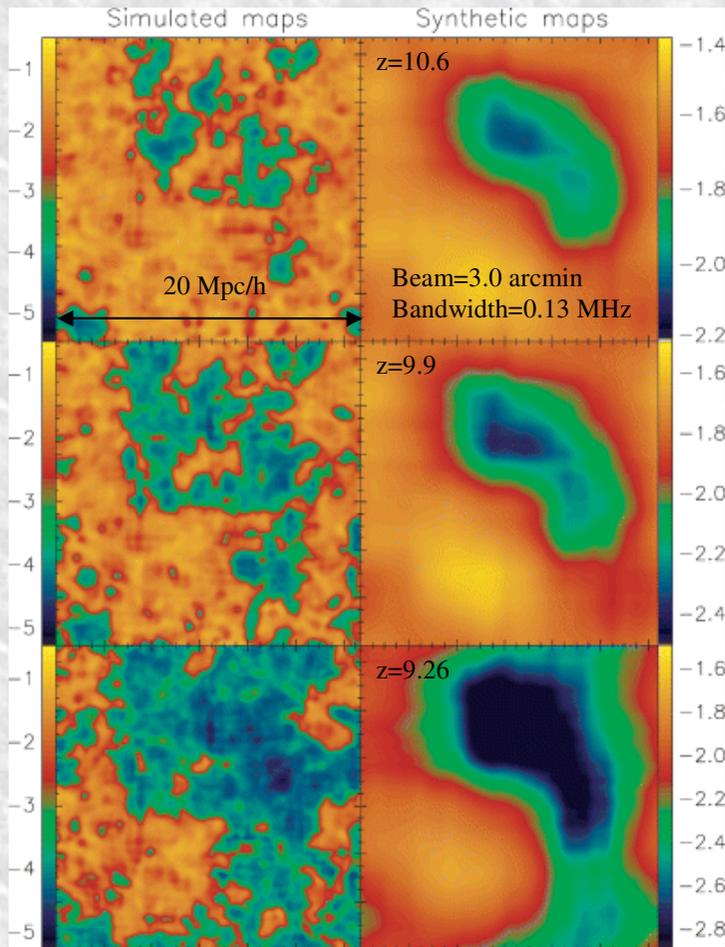
Gnedin & Shaver (2004): Simulations numériques



Furlanetto (2006): modèles semi-analytiques

- Intensité caractéristique du signal: **20 mK**
- $T_K < T_{\text{CMB}}$, signal en **absorption** (grand z).
- $T_K > T_{\text{CMB}}$, signal en **émission** (petit z).
- Forte influence du **type de sources** sur la phase en absorption (préchauffage de l'IGM).

Cartes simulées: exemples de résultats

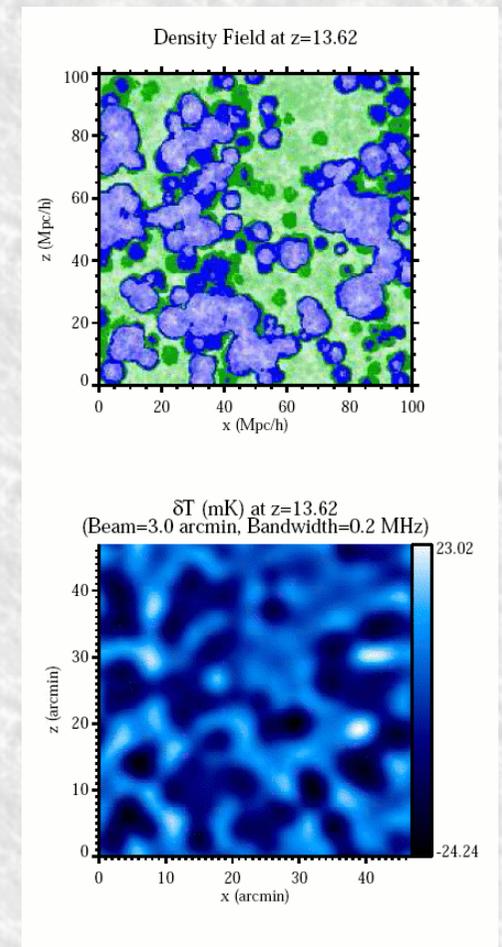


Valdés *et al.* (2006)

La taille de la boîte de simulation est cruciale:

De ~ 1 Mpc à ~ 100 Mpc suivant les auteurs.

- Petites boîtes: manque de statistique
- Grandes boîtes: "clumping" du gaz mal simulé (manque de résolution)
 \Rightarrow réionization + rapide.



Mellema *et al.* (2006)

Le signal à 21 cm *avant* le début de la réionisation.

Exemple: Kuhlen *et al.* (2006)

T_S couplée à T_K par les **collisions uniquement** (pas de sources, pas de pompage Lyman-alpha).

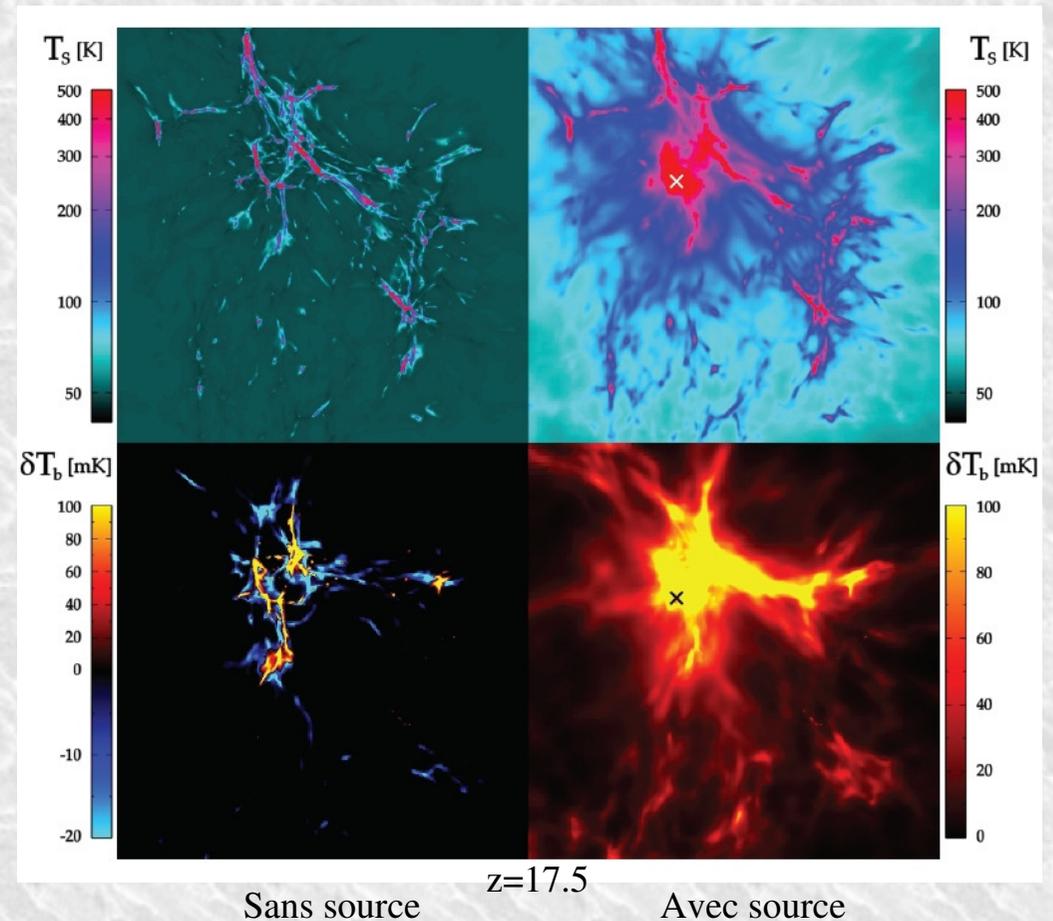
- Absence de sources:

$T_S \rightarrow T_K$ dans les régions denses uniquement

- › Surdensité moyenne: $T_K < T_{CMB} \Rightarrow$ absorption
- › Surdensité forte: $T_K > T_{CMB} \Rightarrow$ émission

- Avec sources de type quasar:

Préchauffage du gaz \Rightarrow émission



Etude similaire intéressante avec photons Lyman-alpha (flux non-homogène)

Projet “réionisation” au LERMA

•Cadre:

- SKADS: DS2-T1

Ciel simulé pour DS2-T2
(simulation instrument)
⇒ Optimiser le design de
SKA

- Horizon:

Simulations
numériques grandes structures
et galaxies.

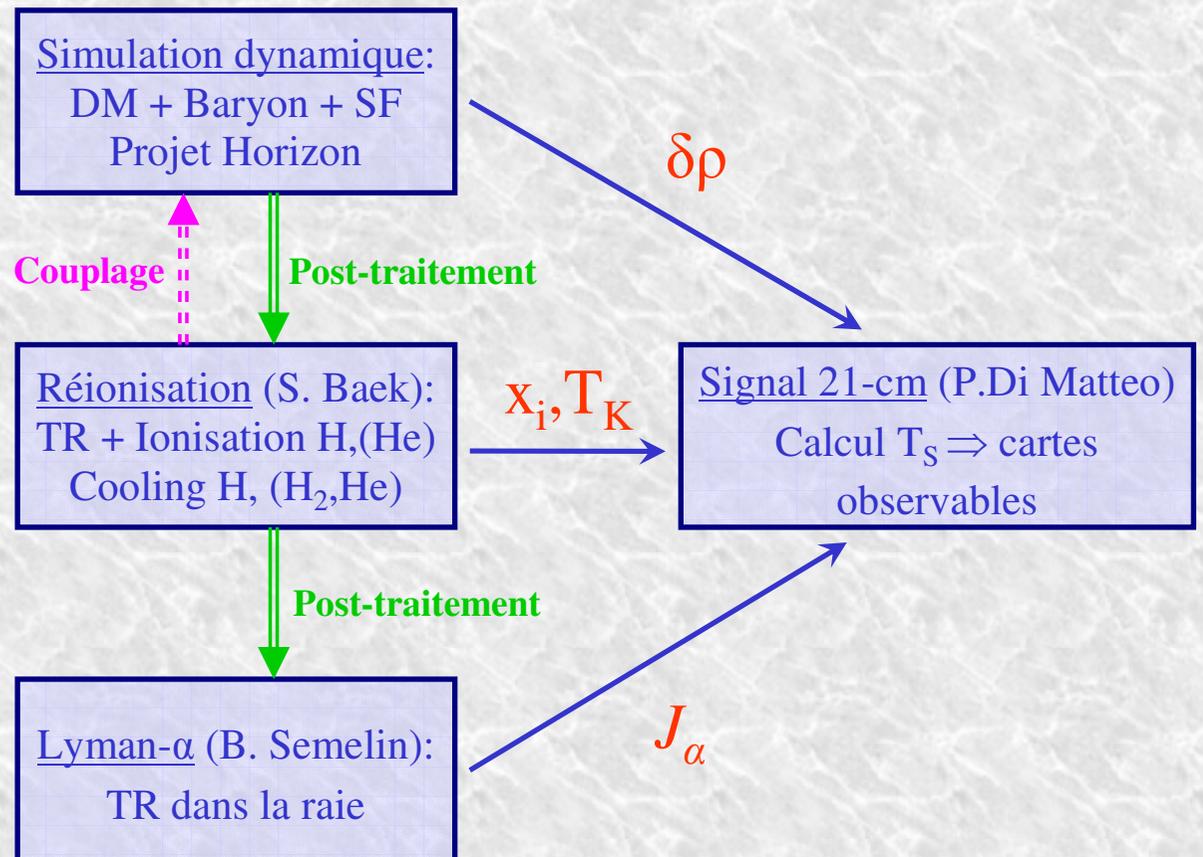
⇒ Banque de
données d’objets simulés en
libre accès.

•Equipe:

F. Combes et B.

Semelin

•Projet:



Simulations dynamiques

Conditions initiales Horizon:

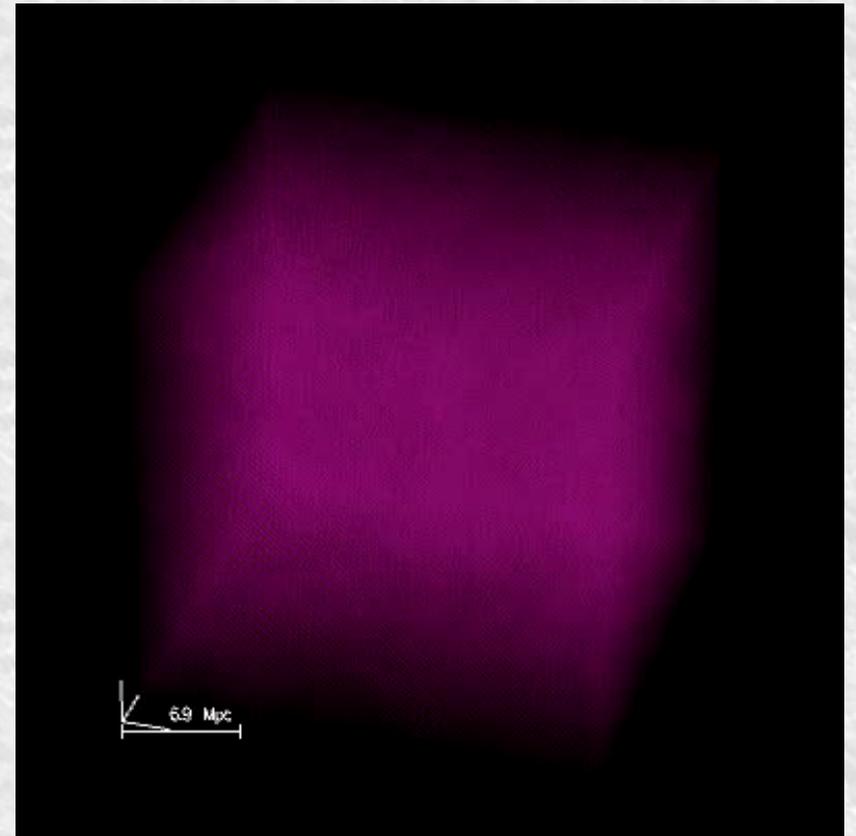
- .20 h^{-1} Mpc et 100 h^{-1} Mpc
- .Cosmologie WMAP 3 ans.
- .128³ à 4096³

Simulations réalisées:

- .RAMSES: 100 h^{-1} Mpc, 1024³, DM+baryon
- « Multizoom »: 20 h^{-1} Mpc, 128³, DM+baryon
 - faible CPU \Rightarrow paramètres ajustables...
 - sorties tout les 10^7 ans.

Simulation à venir (sous peu!):

- .Gadget (Y. Revaz): 20 h^{-1} Mpc, 256³ ou 512³, DM+baryon.



Simulations de réionisation (S. Baek)

Caractéristiques du code de T-R:

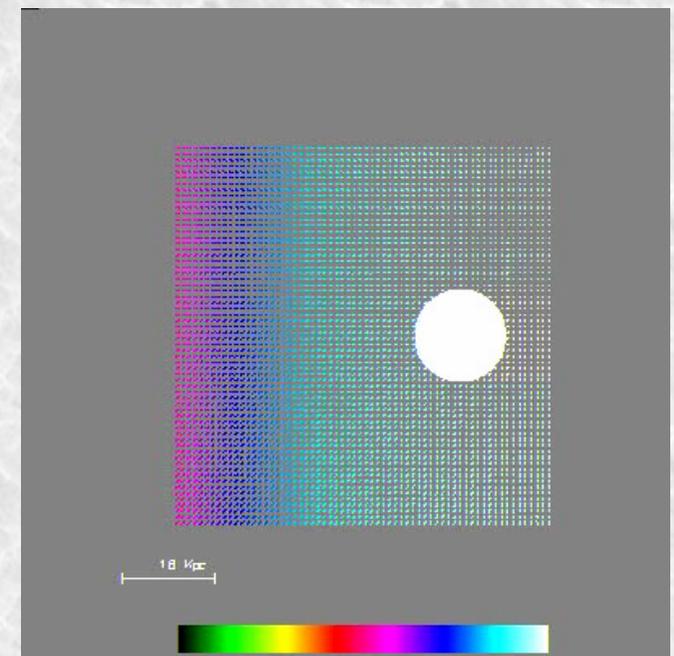
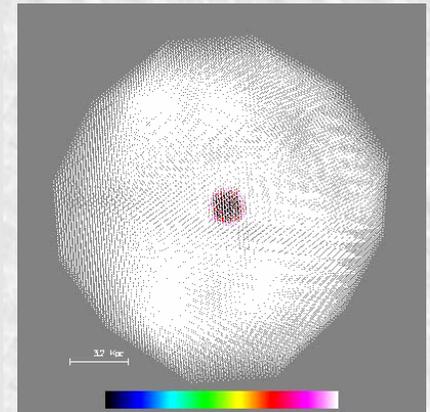
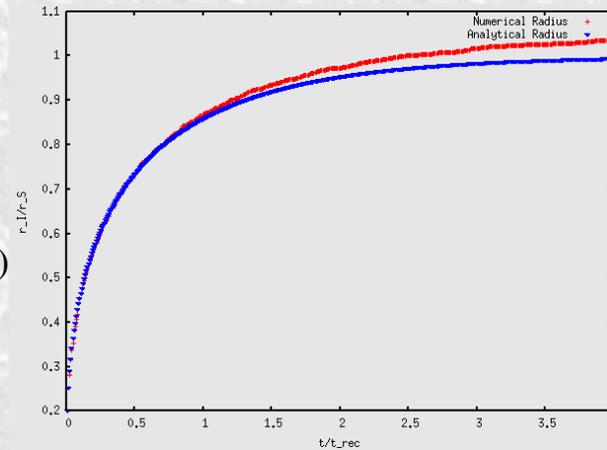
- Monte Carlo: direction, τ , v (continuum)
- Grille adaptative: basée sur ρ
- Physico-chimie: H, H⁺ (à venir He, He⁺, He²⁺, H₂...)
- Parallélisé: OpenMP

Tests de validation (cf Iliev *et al.* 2006):

- Sphère de Stromgren: ionisation
- Sphère de Stromgren; ionisation + température
- « Shadowing »

Travail en cours:

- Calibration du SFR dans simu 128³.
- Choix IMF stellaire \Rightarrow spectre des sources
- Réionisation jusqu'à $z=6$ sur 128³.



Simulations du fond Lyman-alpha

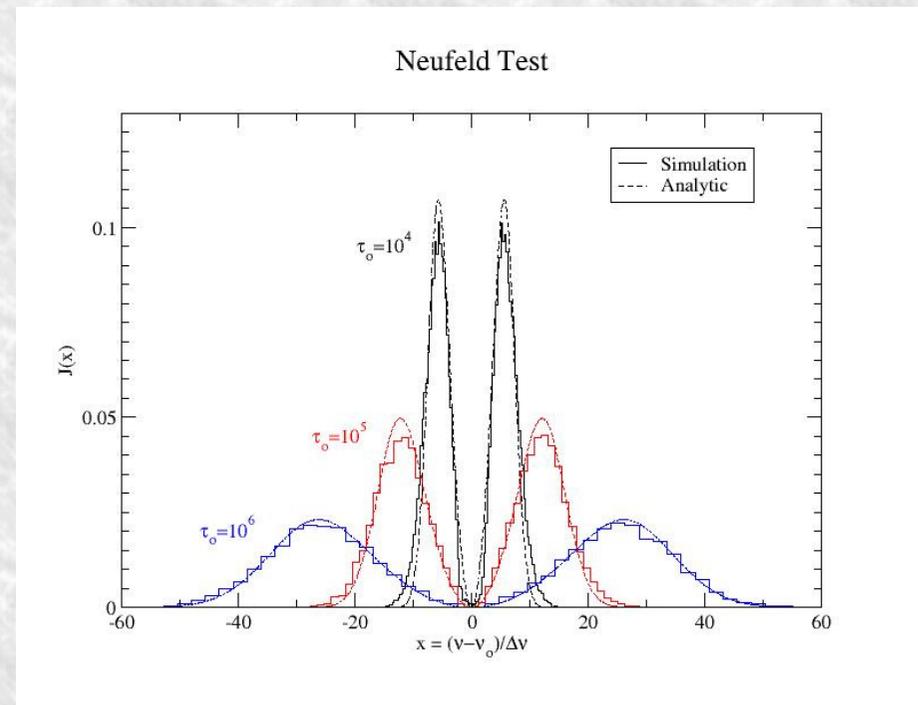
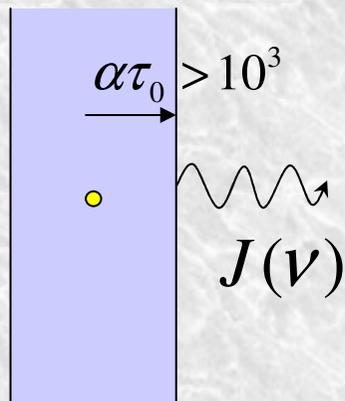
Motivation:

- Calcul de J_α sans simplifications.
- Fluctuations supplémentaires du signal 21 cm (Barkana & Loeb 2005)

Transfert radiatif Lyman- α :

- Méthode Monte-Carlo sur grille adaptative.
- Transfert dans la raie: diffusion résonante + Doppler.
- Très grands $\tau \Rightarrow$ CPU élevé
 \Rightarrow méthodes d'accélération.

Test de validation: (Neufeld 1990)
tranche homogène, source monochromatique



Observation du signal à 21 cm avec SKA et LOFAR ?

SKA (et LOFAR) permettront de faire une **tomographie** (cartes à différents redshifts) de l'émission 21 cm de l'hydrogène neutre.

Propriétés attendues pour le signal:

- En absorption ou en émission.
- Fluctuations moyennes de $T_b \sim 20$ mK
- Structures de 1° à 0.1 arcsec.

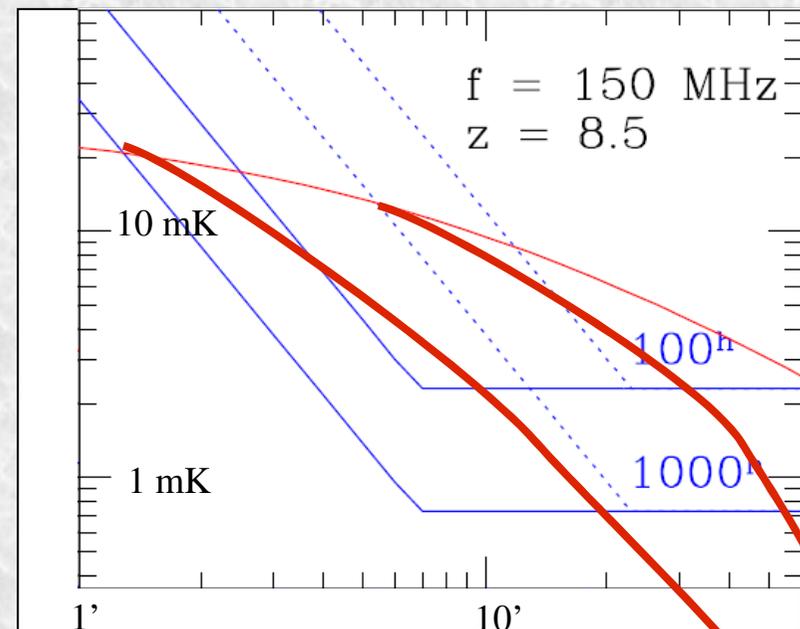
Objectifs avec SKA et LOFAR:

Détection du signal global

- LOFAR: $6 < z < 20$
- SKA: $z < 13$ (23)

Analyse de la structure spatiale

- LOFAR: $6'$ i.e. taille des amas
- SKA: $1'$.



Furlanetto et al. 2004

Le problème des avant-plans

- Avant-plans 100 à 1000 plus brillants que le signal à 21 cm:

- Radio-halos (synchrotron)
- Radio-relics (synchrotron)
- Radio-galaxies
- Emission du MIS.

- Soustraction des avant-plans:

Combinaison de:

- Analyse du signal
- Modélisation des sources
- Simulations (connaissance du signal)

