

Simulation de la formation des premières structures : application à l'Époque de Réionisation

Dominique Aubert



Plan du séminaire

- On désigne par **Réionisation** une des grandes **transitions** qu'a connu le cosmos au cours de son histoire. Elle correspond à la formation des premières galaxies.

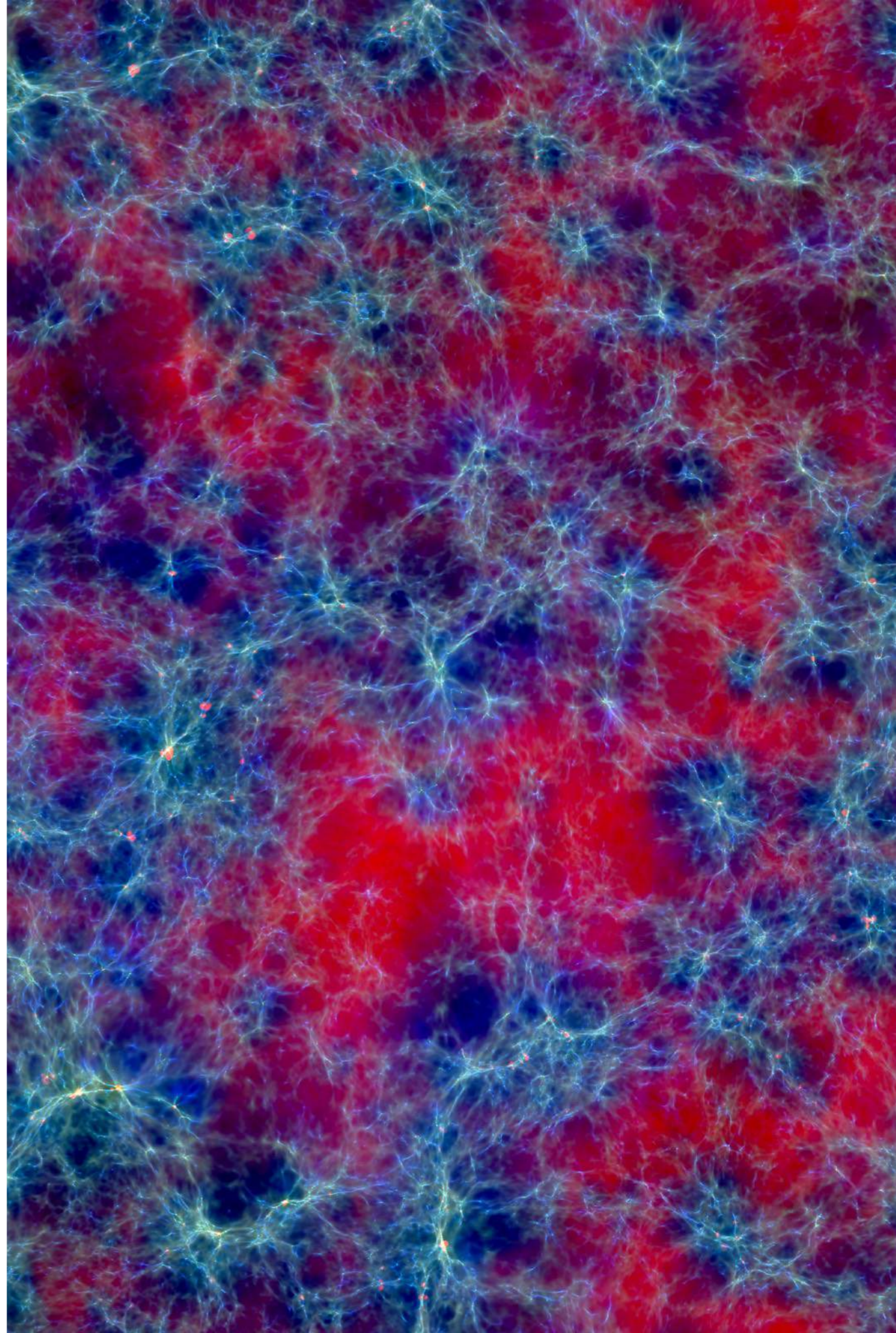
Qu'en sait-on et quels sont les enjeux de son étude ?

- La Réionisation pose des **défis importants** en termes de modélisation et de simulations numériques. Elle pousse à inclure de nouvelles physiques et à utiliser de nouveaux moyens de calculs.

Quels sont ces défis et nouveautés ?

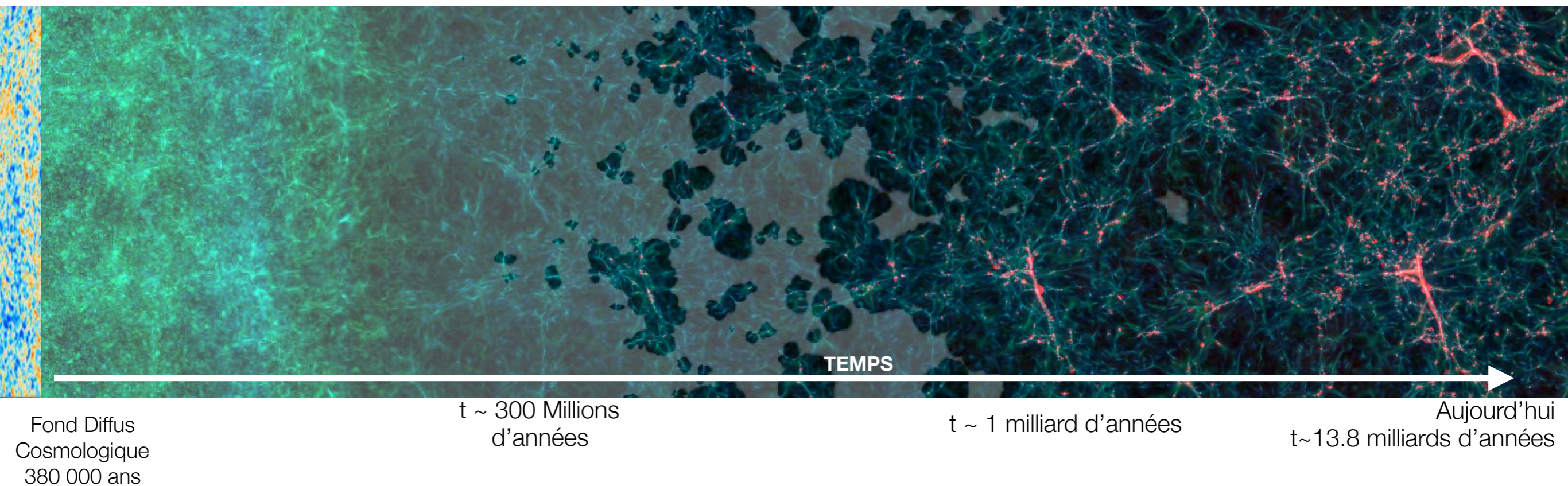
- Ces avancées méthodologiques ont permis de mieux comprendre cette époque et posent de nouvelles questions.

L'époque de Reionisation



La formation des grandes structures de l'Univers

Visu : N. Deparis

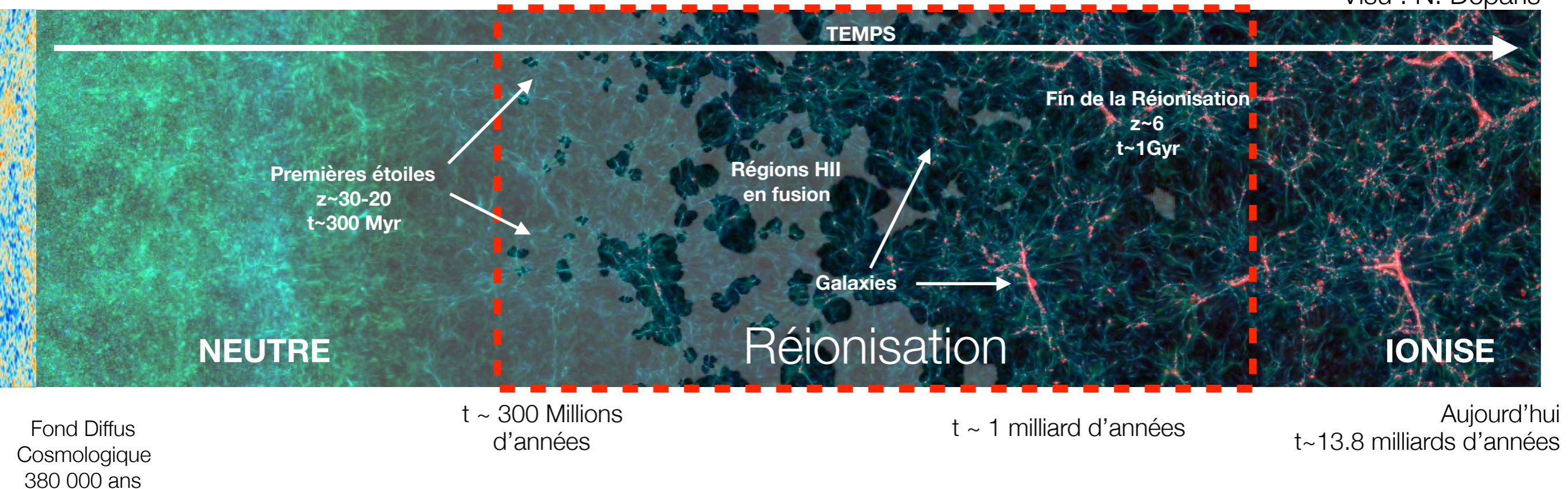


La **gravitation** pousse à l'apparition des **grandes structures** de l'Univers et conduit à la formation des **galaxies**.

En rouge les régions contenant des galaxies, en clair la distribution d'hydrogène neutre, en sombre celle de l'hydrogène ionisé.

L'époque de réionisation et la fin des âges sombres

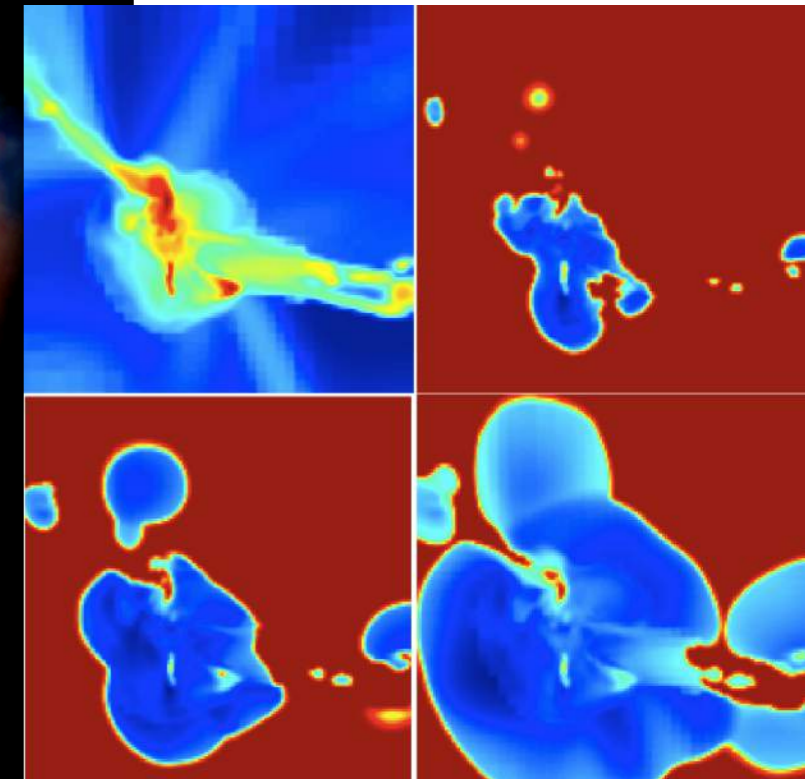
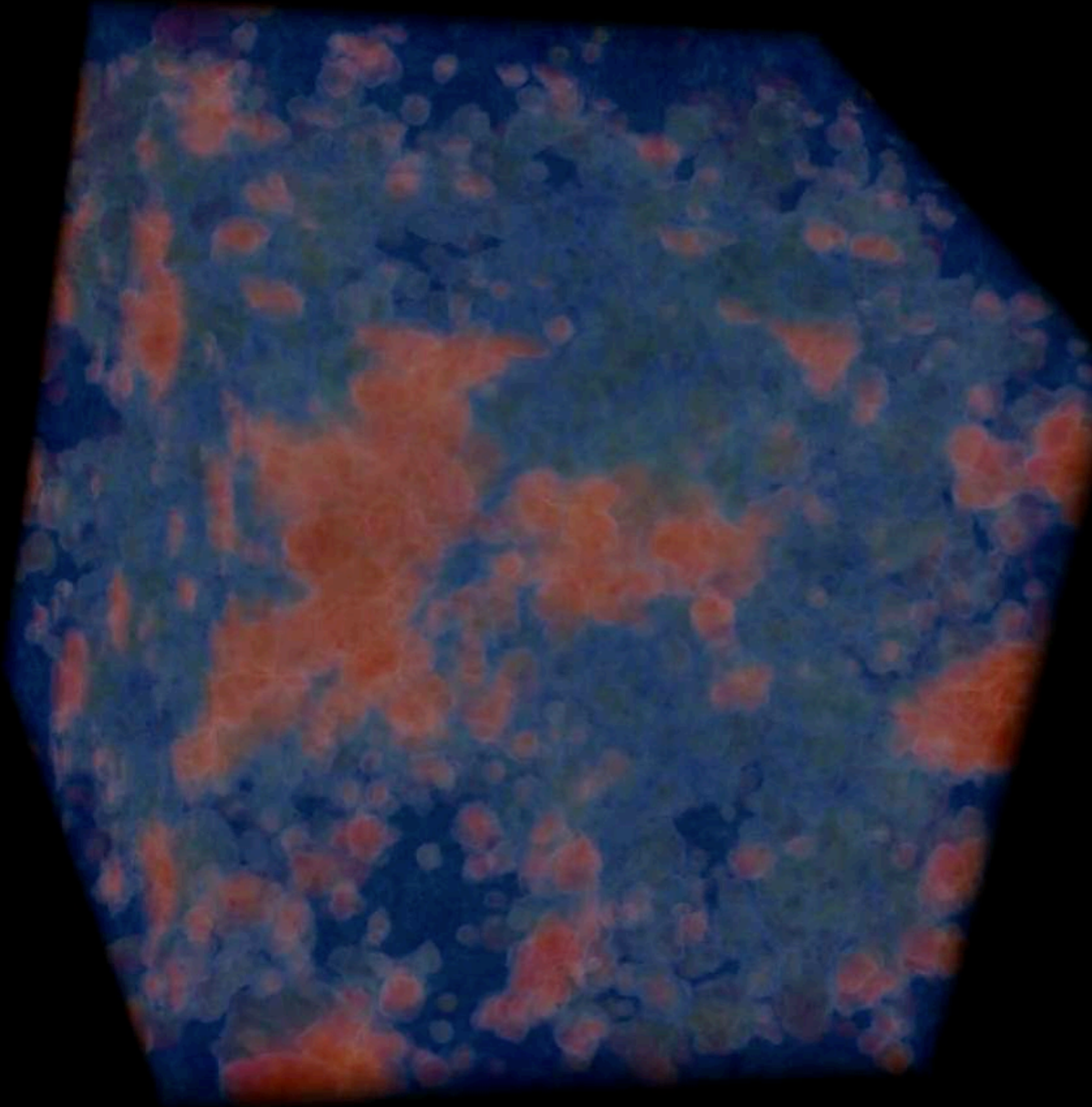
Visu : N. Deparis



Réionisation

- = terminée environ 1 Milliard d'années après le Big-Bang
- = régie par la **lumière** ionisante des première étoiles, dans les premières galaxies
- = laisse voir un réseau de régions ionisées, qui finissent par fusionner
- = laisse place à un Univers ionisé (environ 99.99% des atomes) et chaud (~10 000 K)

Bleu= neutre et froid -- Rouge = ionisé et chaud



Aubert & Teyssier 2010
Visu : D. Pommarède

ATHENA - Rayons X - 2028



cnes.fr

SKA - Radio - 2020+



Wild, M&G



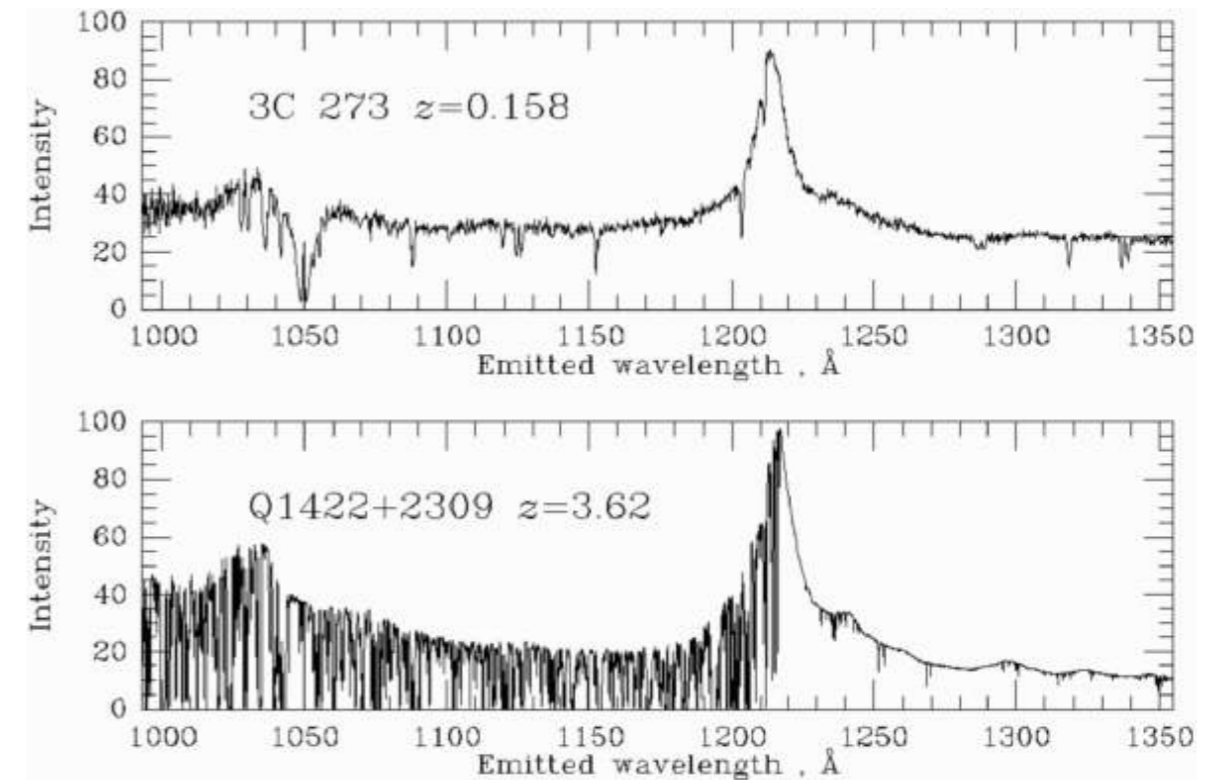
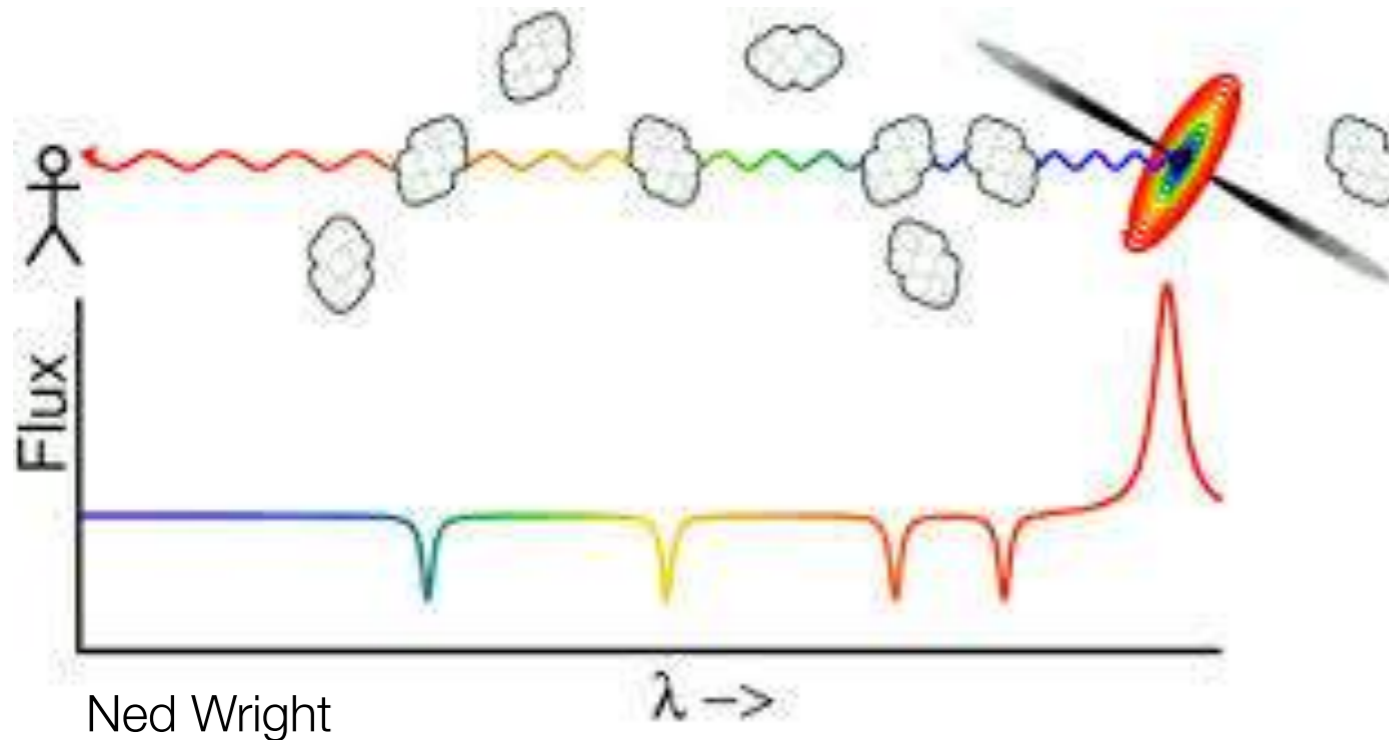
JWST - Infrarouge - 2020

hubble.stsci.edu

Ces époques lointaines (en temps et en espace) nous seront bientôt accessibles en détail.

Pour l'instant la seule chose dont on est à peu près sûr pour la Réionisation, c'est qu'elle a eu lieu environ 1 milliard d'années après le Big-Bang

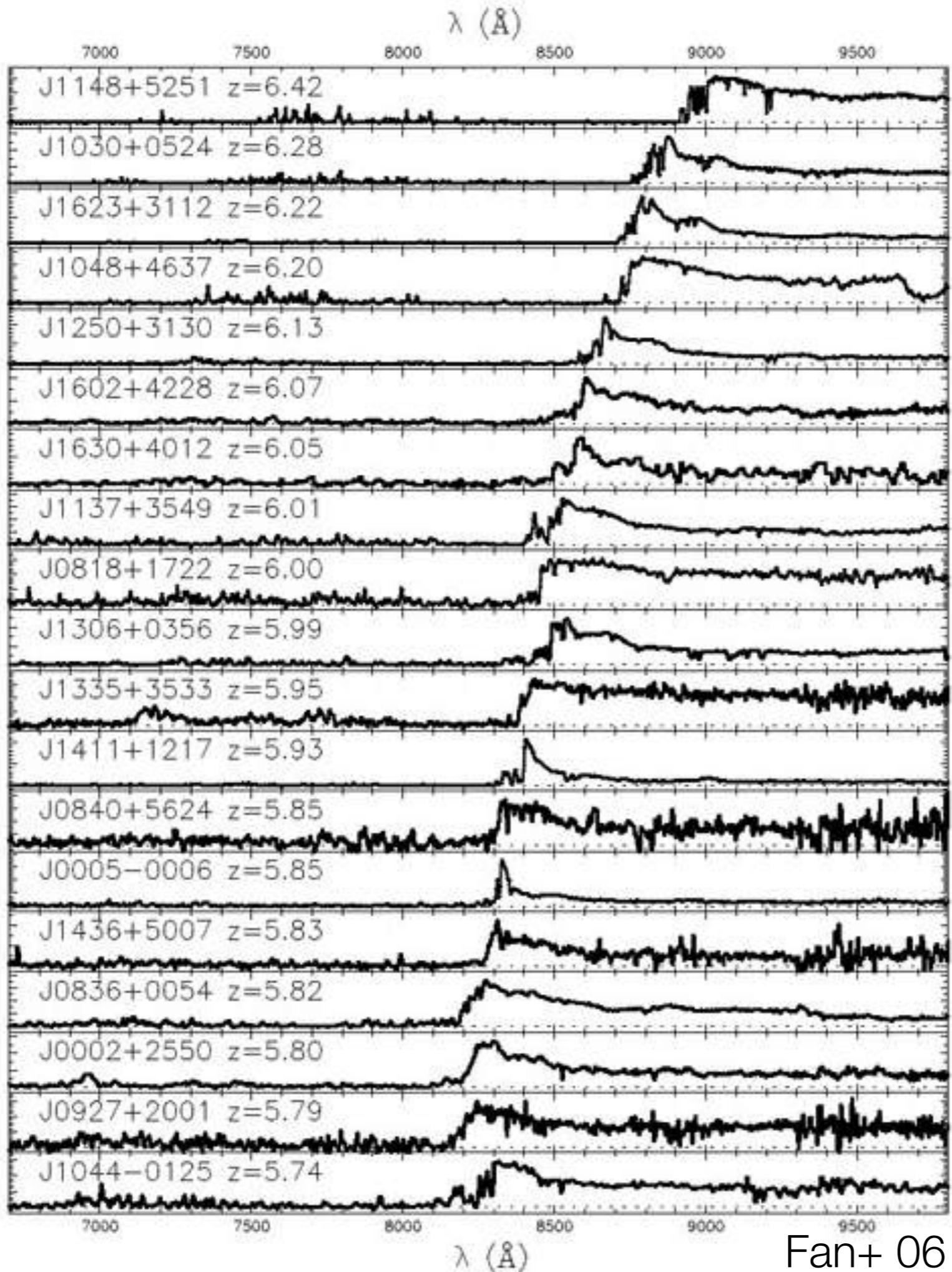
Forêt Lyman-Alpha



Bill Keel

Chaque absorbeur sur la ligne de visée , **qui possède encore de l'hydrogène neutre**, va laisser une raie d'absorption dans la partie bleue du spectre.

On peut par exemple reconstruire la distribution spatiale du gaz le long de la ligne de visée



Age de l'Univers

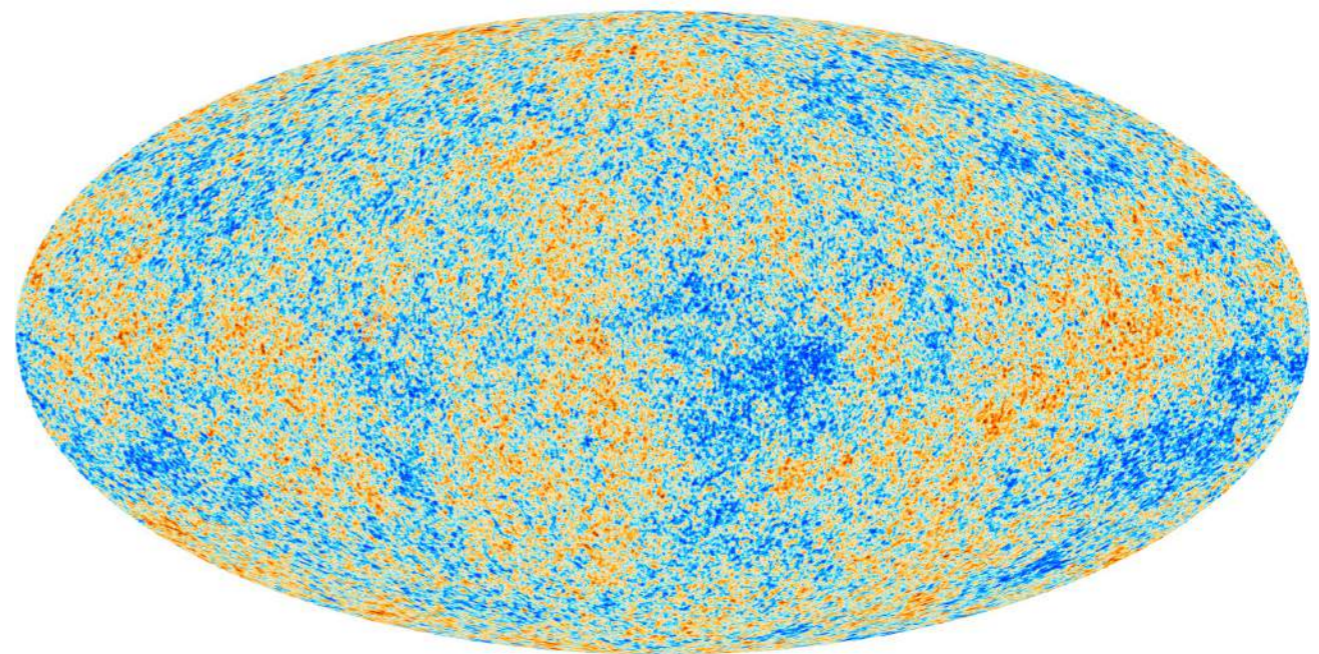
Distance

Plus les quasars sont distants plus l'absorption est saturée

Les quasars les plus distants sont entourés d'un continuum de gaz absorbant, avant la réionisation. Il n'y a plus de forêts mais de véritables **tunnels d'absorption.**

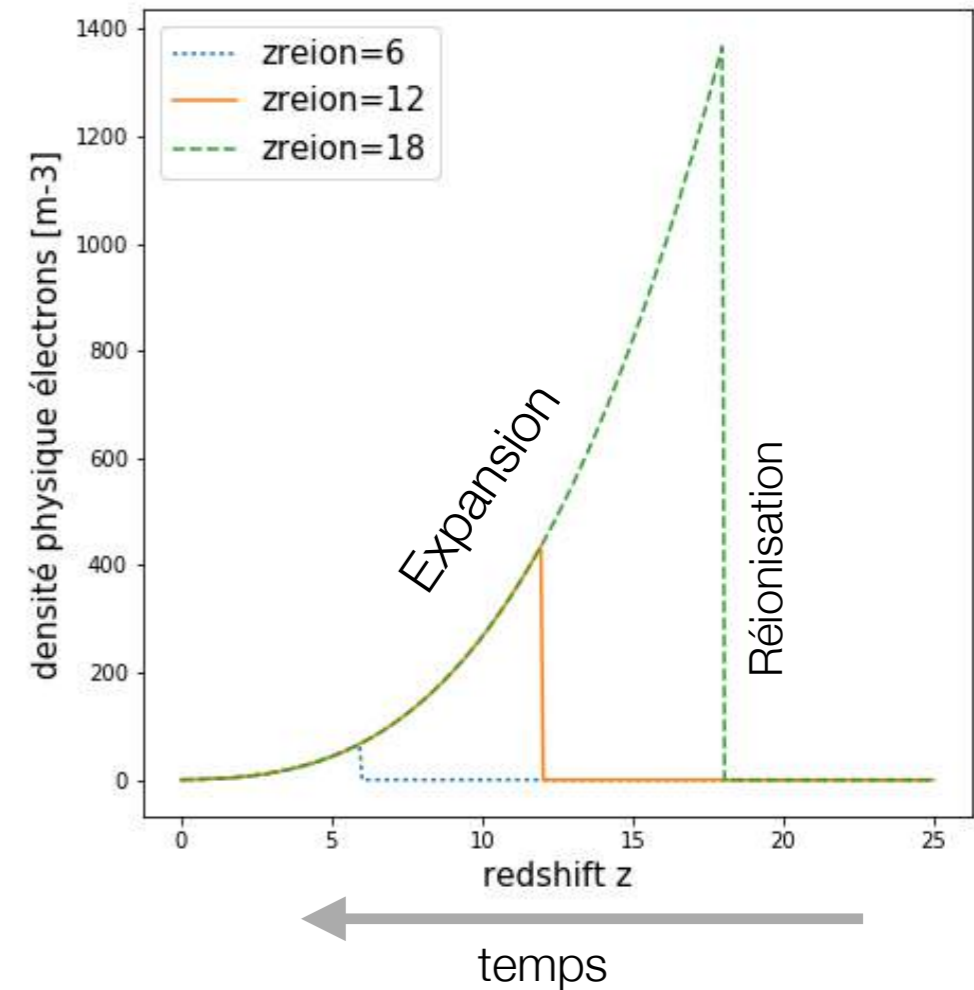
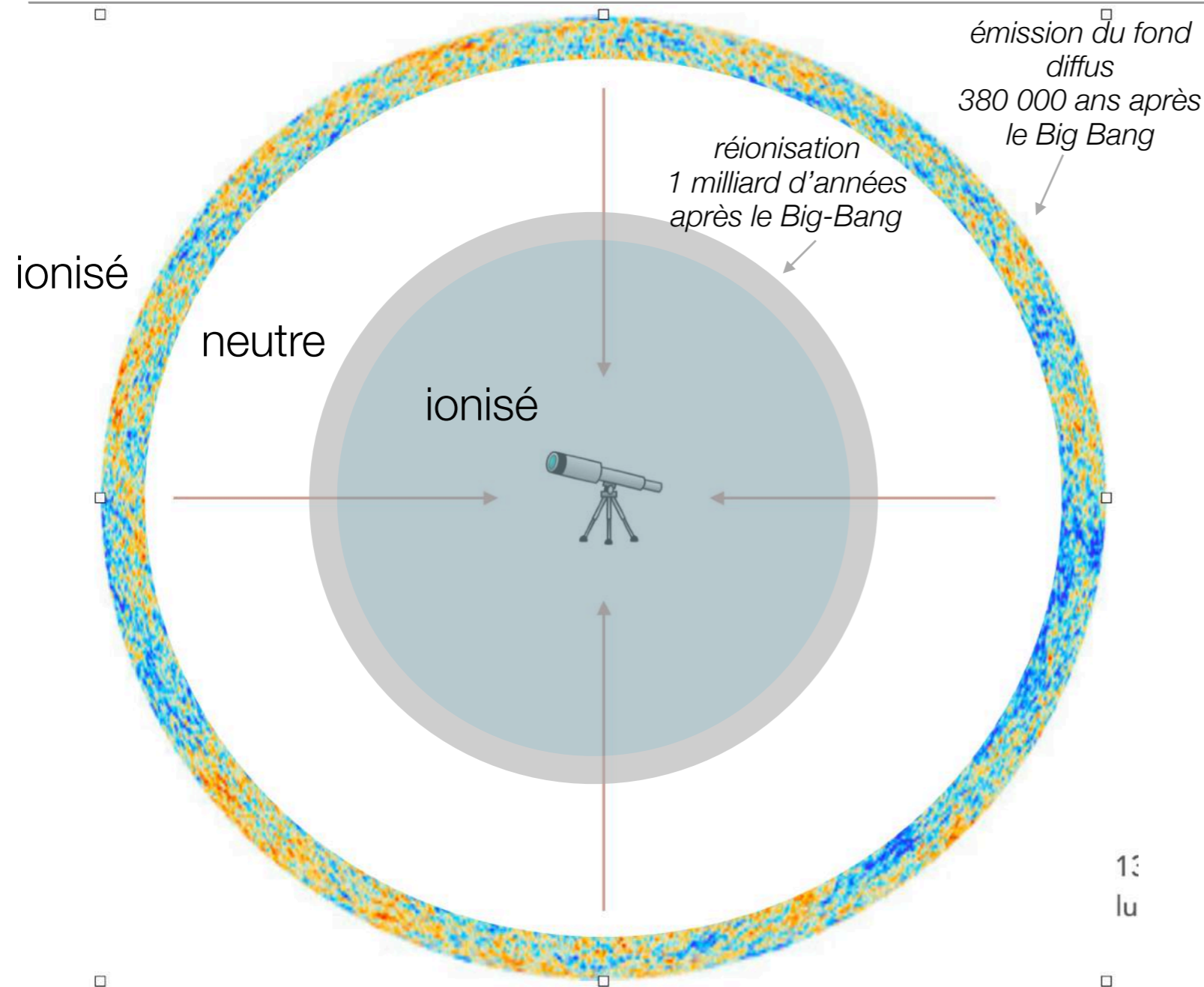
On retrouve de la transmission à partir de 1 milliard d'années après le Big-Bang. La réionisation a eu lieu à ce moment là.

La Réionisation selon Planck



La structure angulaire de la carte du rayonnement fossile permet de quantifier **le nombre de diffusions Thomson** des photons sur les électrons libérés lors de la réionisation.

Le fond diffus cosmologique et la réionisation

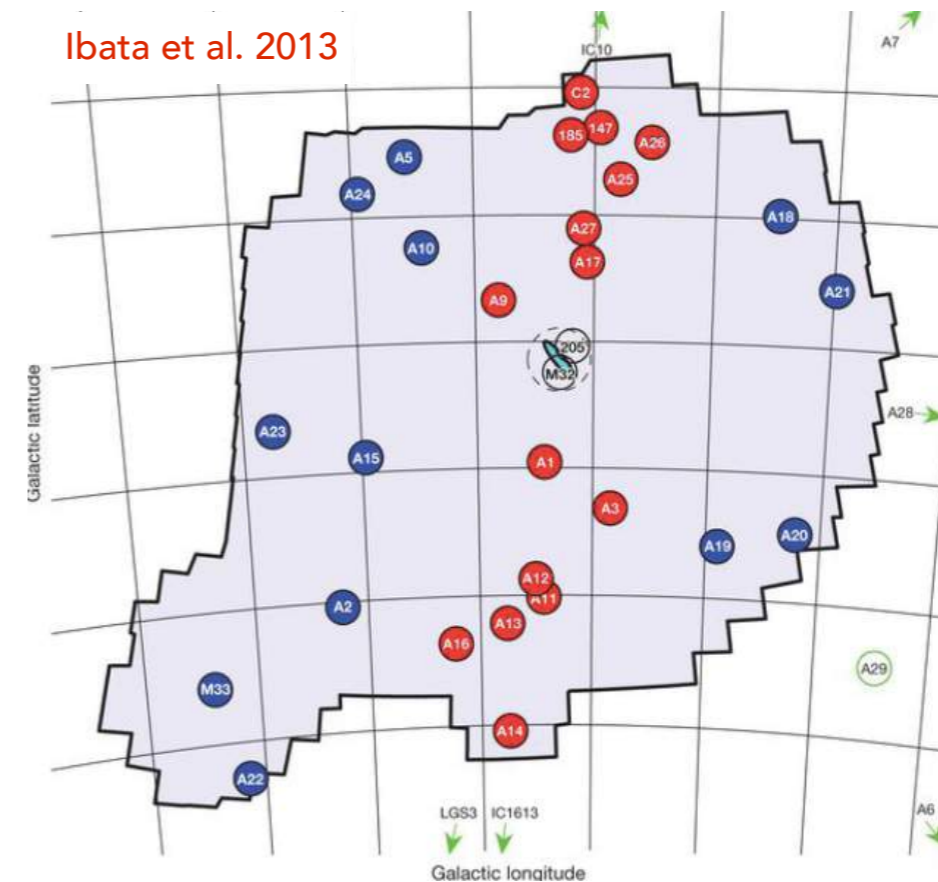


Aujourd'hui, les mesures du satellite Planck suggèrent une mi-réionisation à $z \sim 7.7$, compatible avec les mesures de la forêt Lyman-Alpha

Les fossiles de la réionisation dans l'Univers Local ?



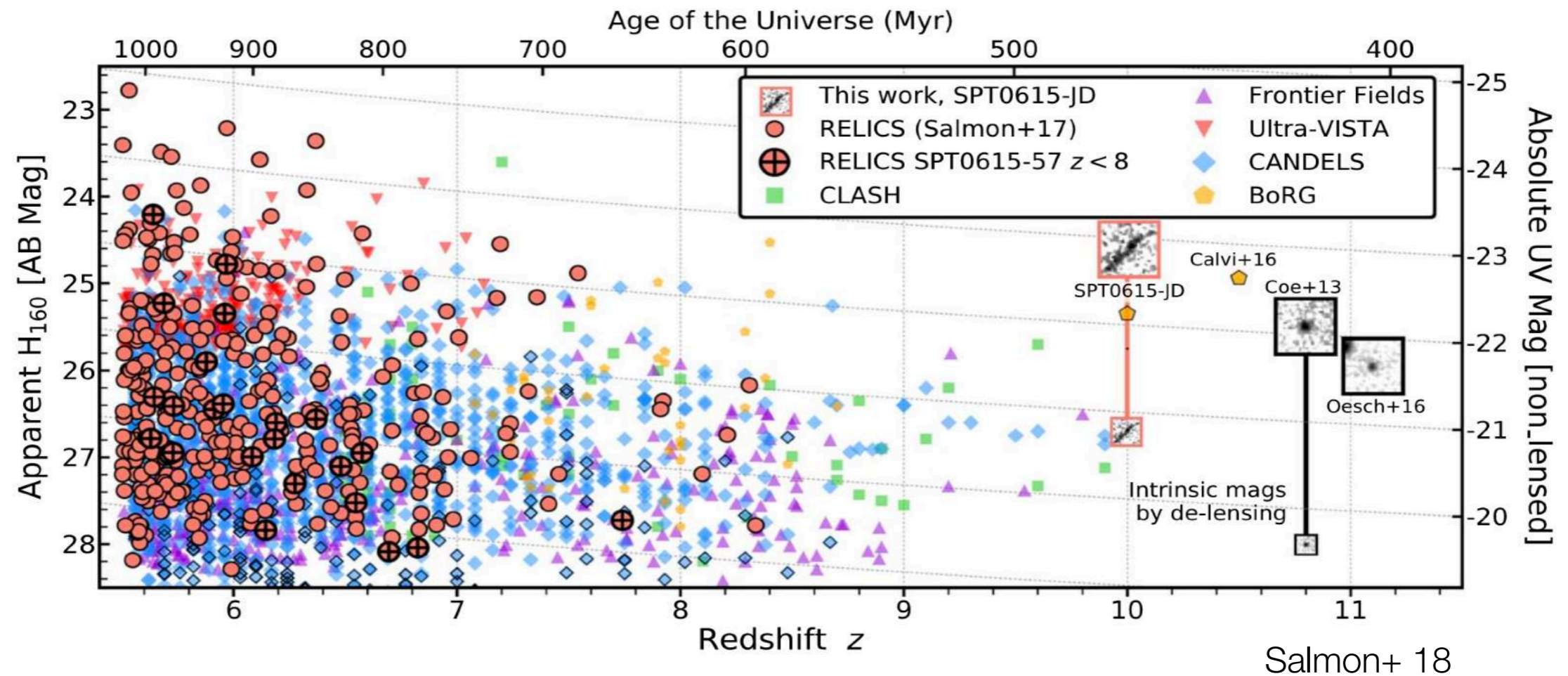
Les modèles prédisent des centaines de sous-structures de matière noire autour d'une grosse galaxies (Voie Lactée ou Andromède)



Les observations fournissent quelques dizaines d'objets visibles

Il faut trouver des mécanismes pour freiner la formation d'étoiles dans ces petites structures satellites : la réionisation, **en chauffant le gaz**, pourrait être la l'origine de cette **suppression de la formation stellaire**

Les sources de la réionisation ?



Quelles galaxies contribuent le plus au rayonnement qui produit la réionisation ?

Les massives/brillantes qui sont peu nombreuses ou les peu massives/faibles qui sont beaucoup plus nombreuses ?

Sont-elles suffisantes pour réioniser l'Univers ?

Quel est le rôle des quasars ?

Les grandes questions

Quelle Réionisation est produite par les premières galaxies ?

Géométrie, chronologie, etc.

Cosmologie

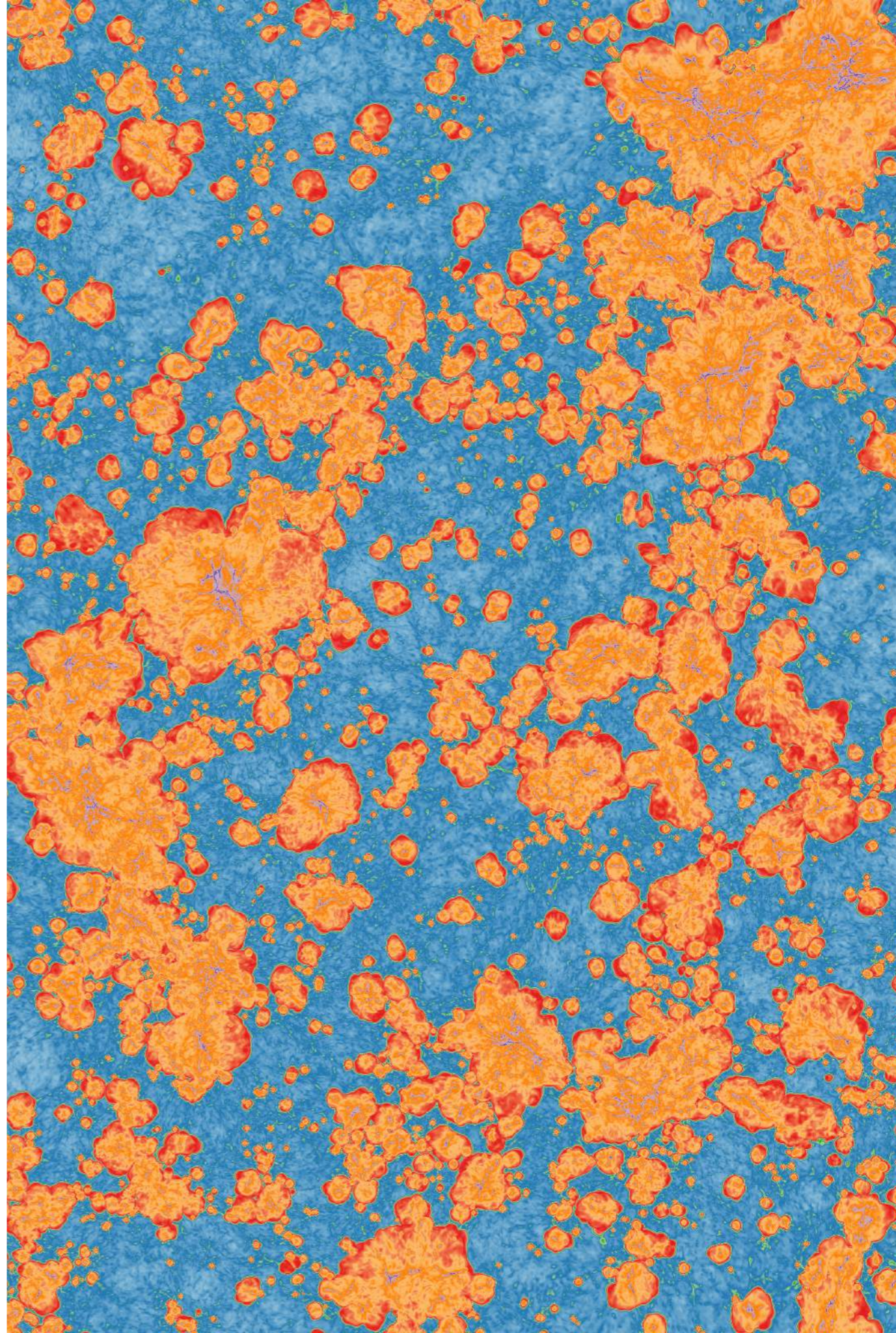
Quelles premières galaxies sont façonnées par la Réionisation ?

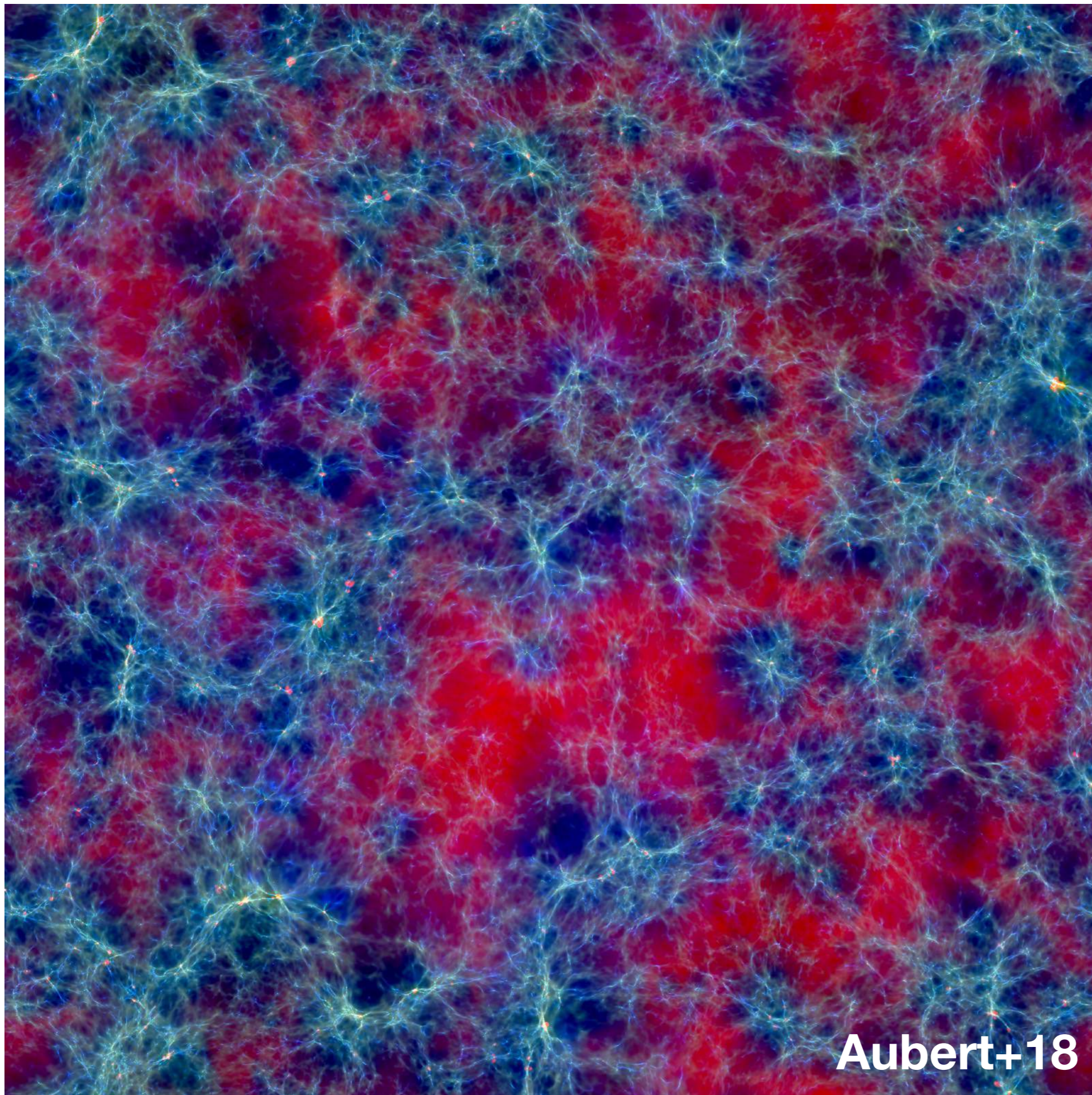
Contenu stellaire, en gaz, en métaux, noyaux actifs, etc.

Physique des Galaxies

*Problème compliqué dans un Univers jeune qui ne ressemble pas
beaucoup à celui que nous avons autour de nous*

Simulations numériques de l'Époque de Réionisation





CODA-I AMR

91 Mpc

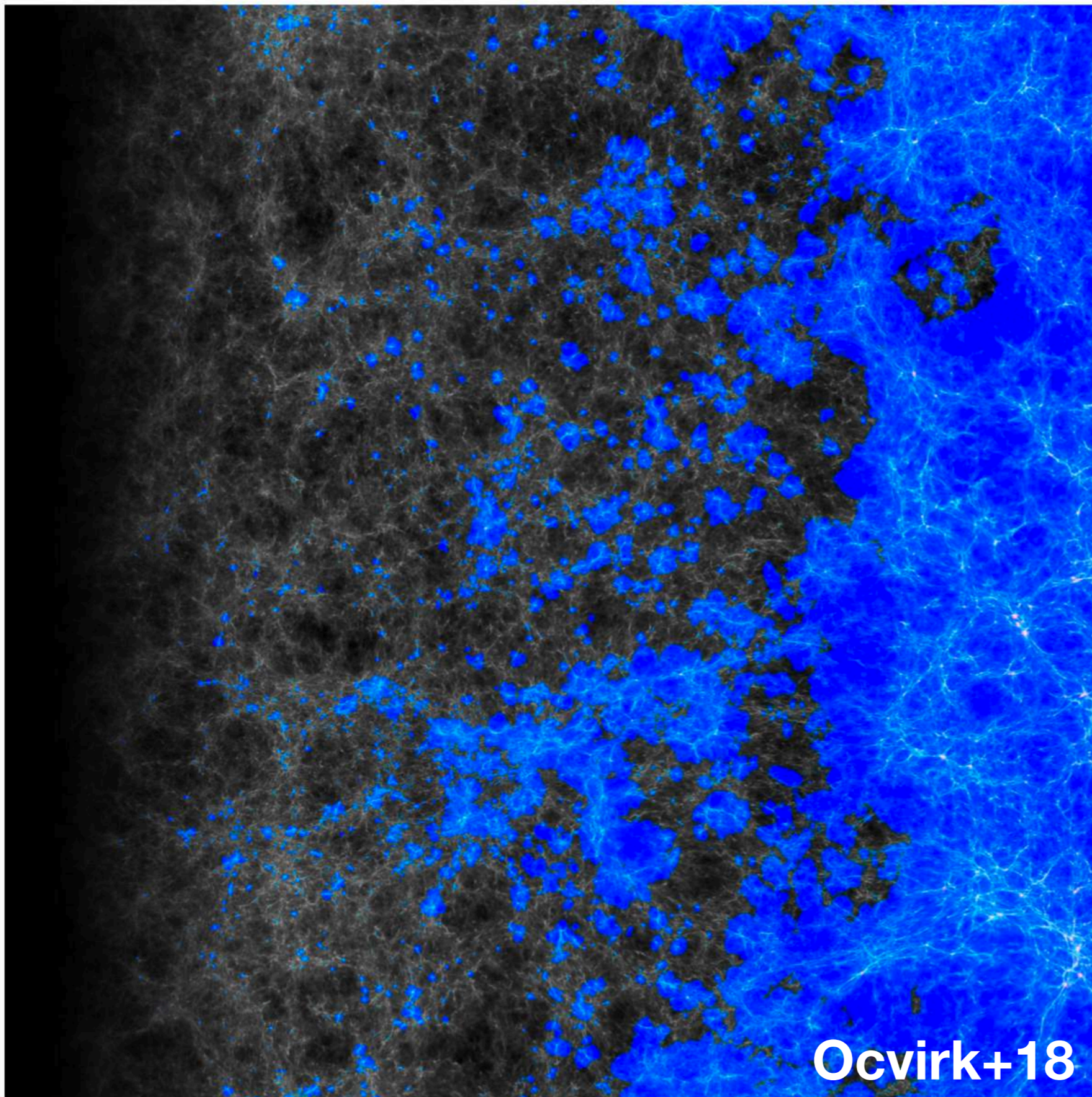
16 milliards
d'éléments de
resolution

32768 processeurs
+ 4096 GPUs sur
Titan(DOE/ORNL)
avec le code
d'hydrodynamique
radiative EMMA

20 millions d'heures
de calculs, 400 To
de données

Jan/Mar 2017

Aubert+18



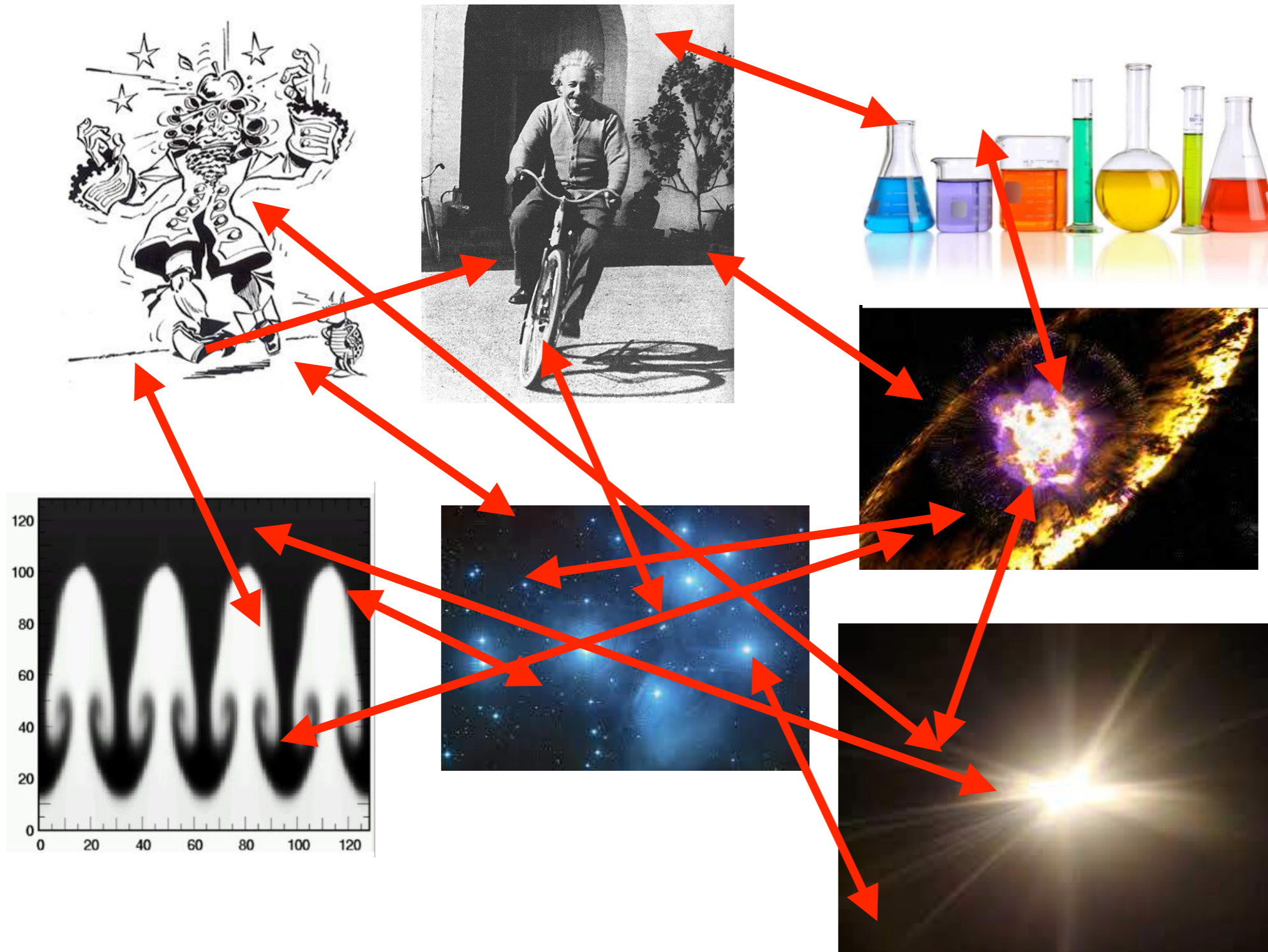
Coda I
(Ocvirk+ 16,
Dawoodbhoy+18)
& **Coda II**
(Ocvirk+18., sub.
Lewis+ in prep.)

Code d'hydrodynamique
radiative RAMSES-CUDATON
70 milliards d'éléments de
résolution

40 millions d'heures de calcul
2 Poctets de données
sur Titan

Figure 1. Illustration of the reionization process within the CoDaII simulation. The figure spans the full 94 Mpc in x and y, and spans from redshift $z=150$ (left) to $z=5.8$ (right) along the x axis. It is made from the concatenation of vertical, 4-cells-wide stripes taken from a series of ~ 1020 high-frequency CoDaII outputs. The color encodes temperature on a blue to red scale: blue regions are photo-heated, while bright red regions correspond to regions heated by supernovae feedback and accretion shocks. Brightness indicates the gas density contrast.

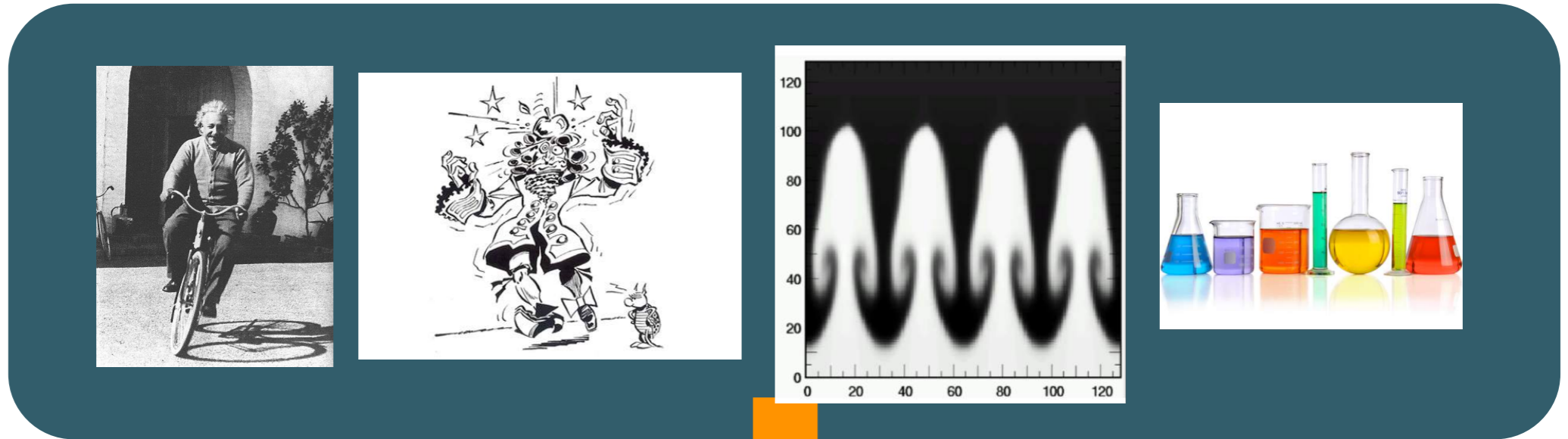
Des processus en jeu nombreux et couplés...



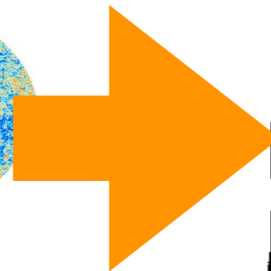
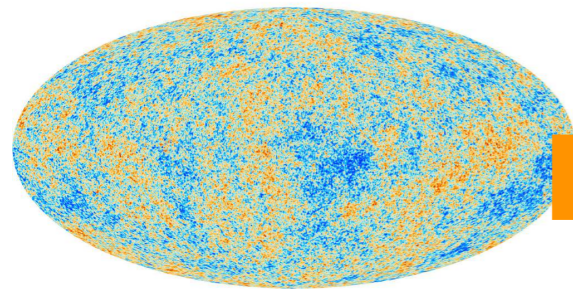
- Gravité
- Expansion de l'Univers
- Hydrodynamique
- Chimie
- Evolution Stellaire

- **Transfert Radiatif**

Lois de la Nature



Univers Primordial

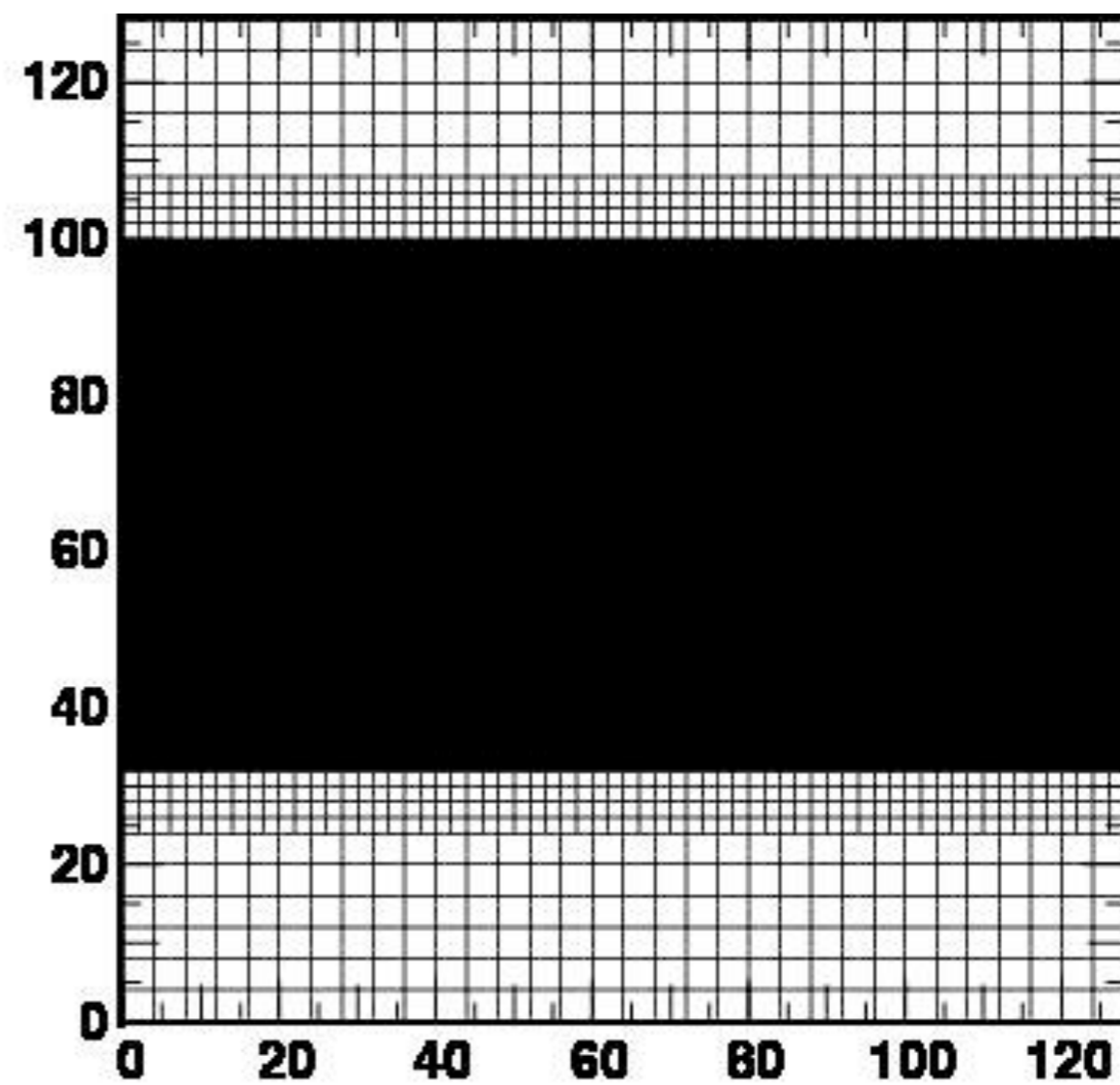
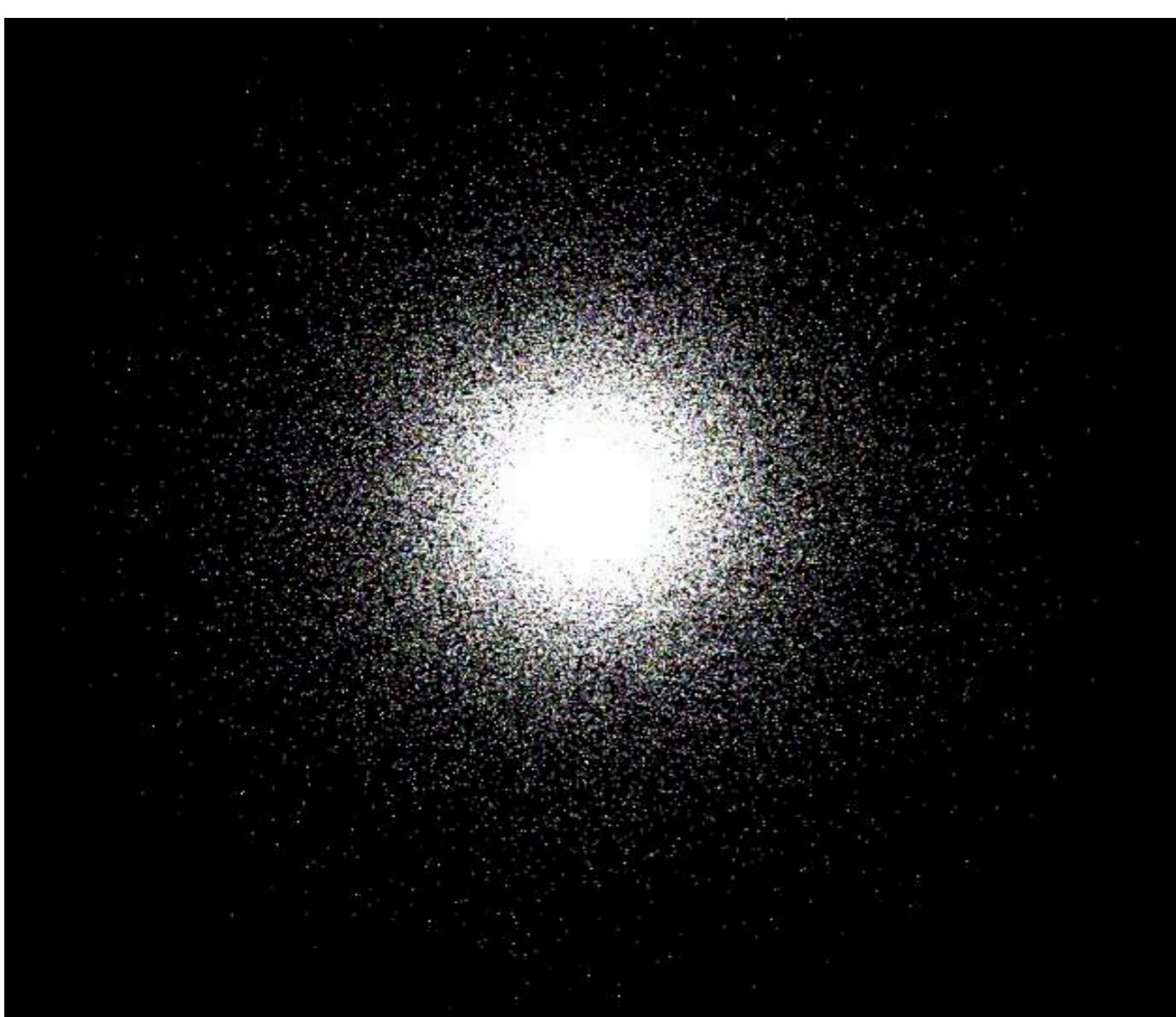


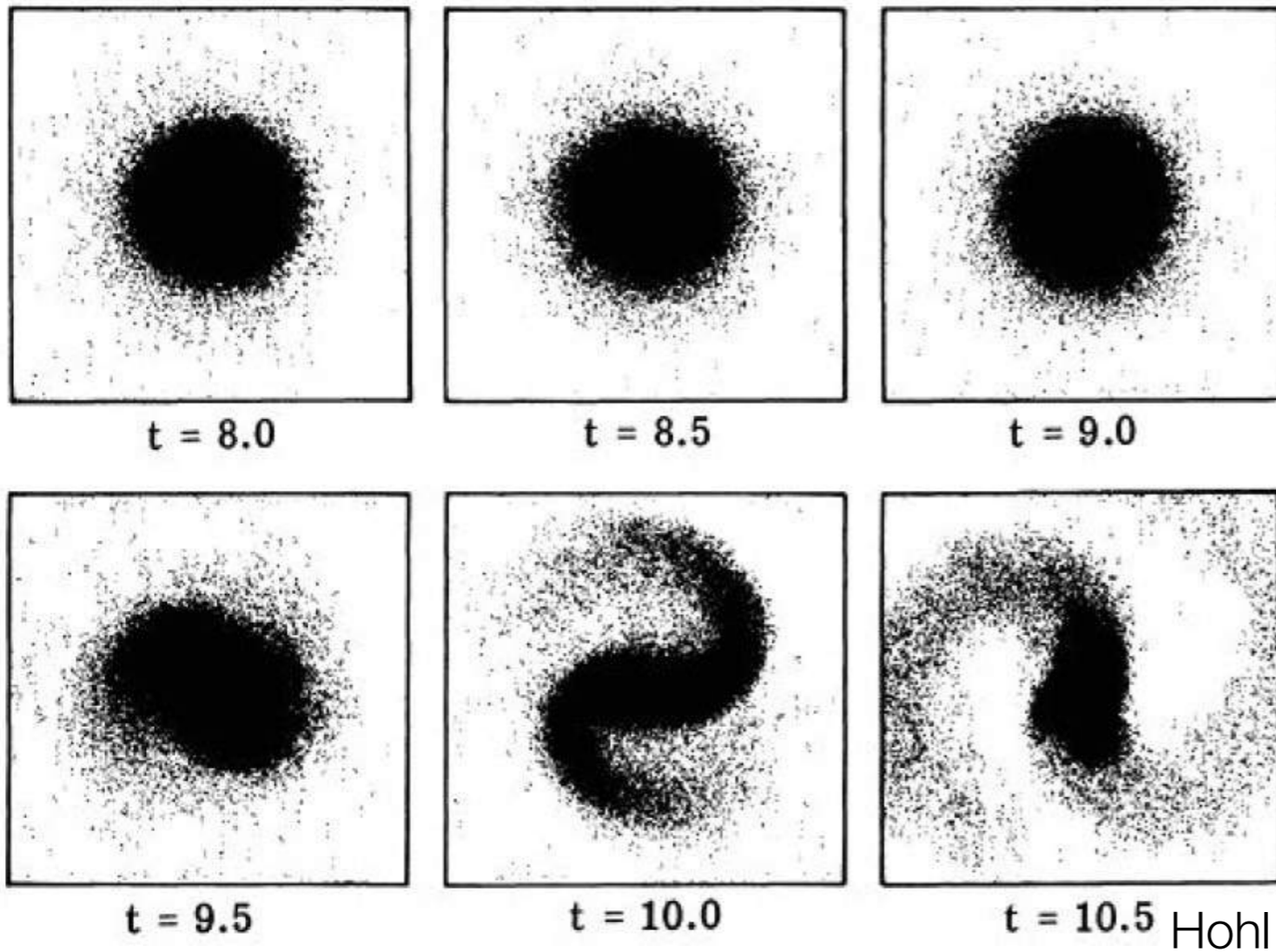
Calculateur



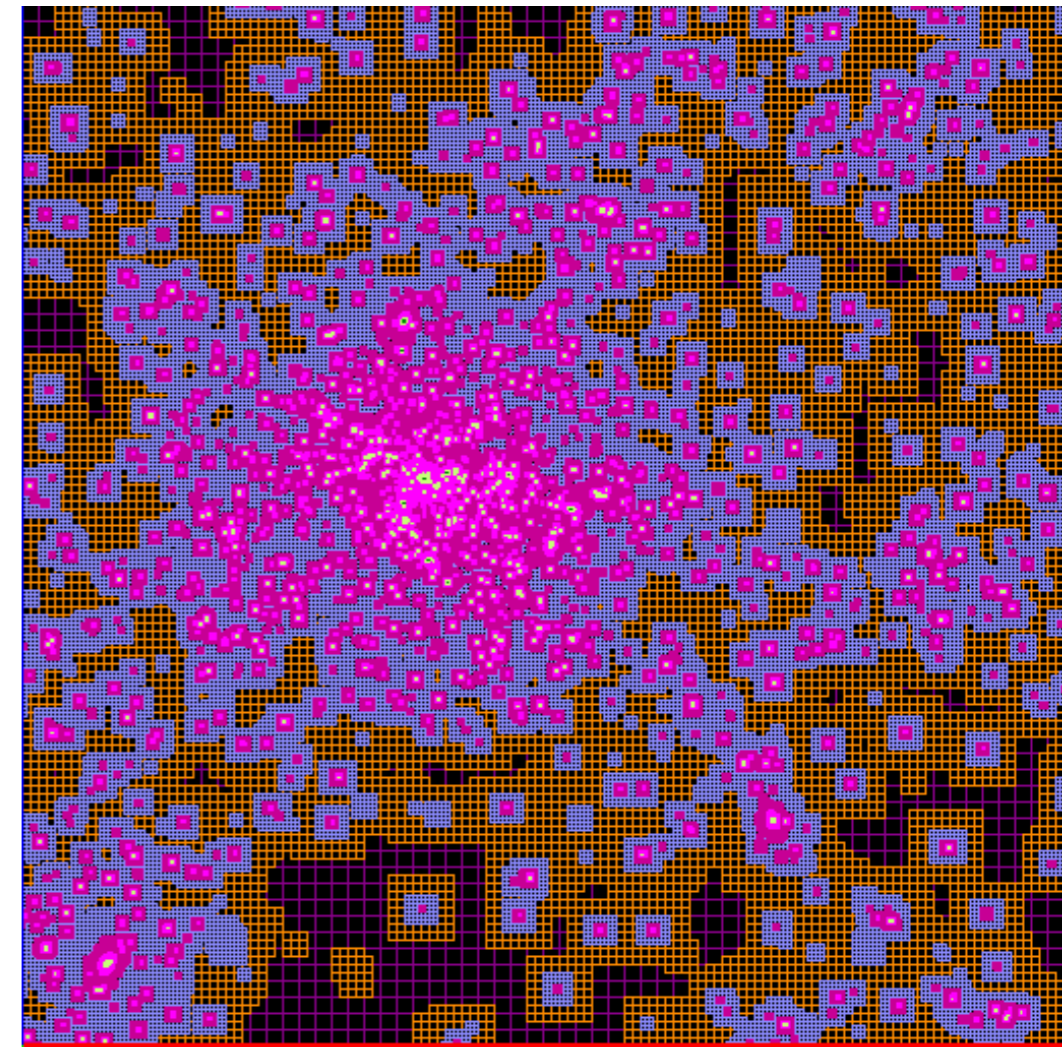
Avec les bonnes approximations
un ordinateur peut « simuler » le milliard
d'années de la Réionisation

Résultats





Hohl



Teyssier

particules (Lagrangien)

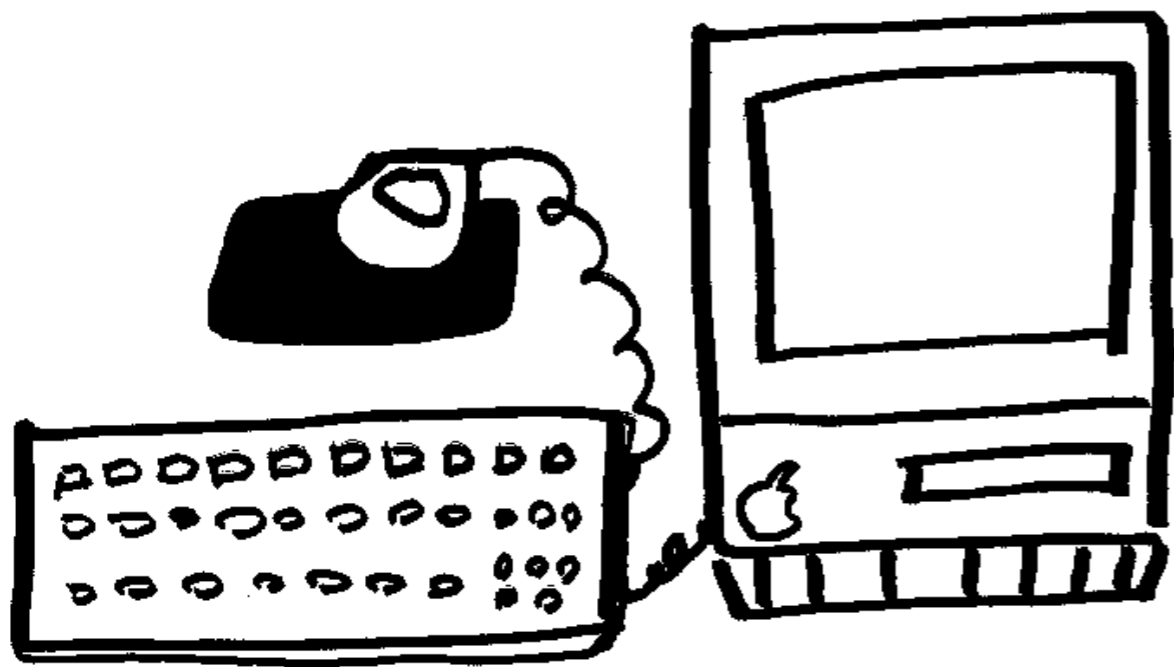
cellules (Eulérien)

Plus le nombre d'éléments de résolution est important meilleur est le traitement de la physique en jeu

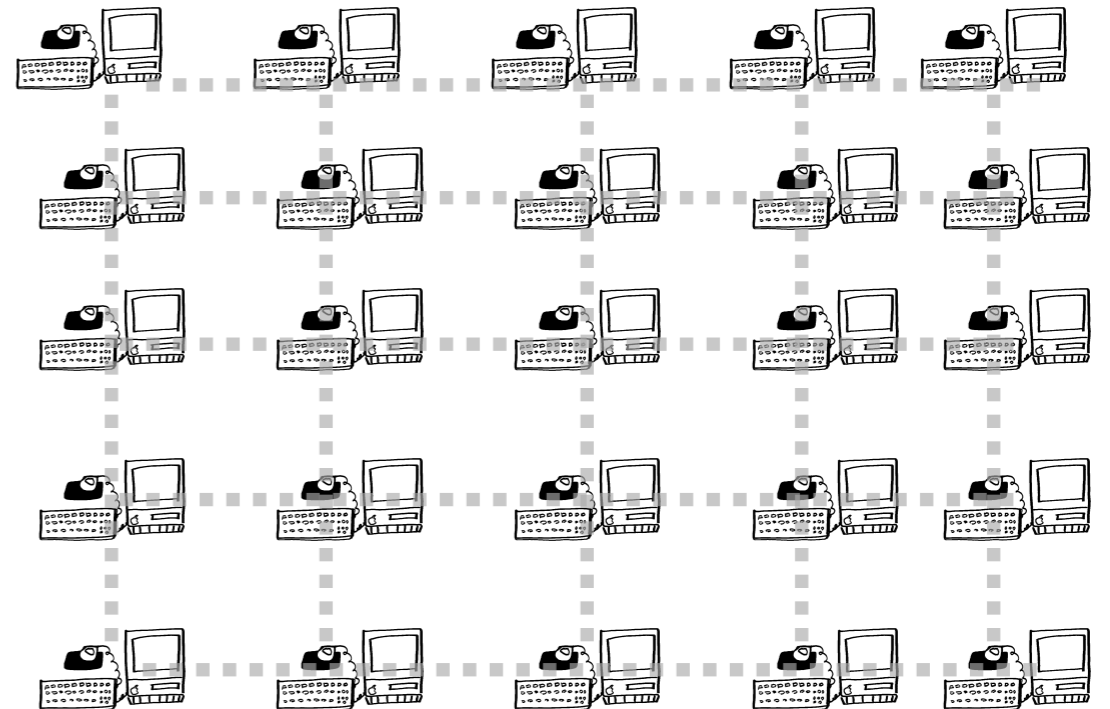
(mais ça coûte plus cher)

Calcul Parallèle

Comment traiter un gros problème ?



Avec un gros ordinateur



Avec pleins de petits
qui communiquent entre eux

CURIE - 90 000 coeurs + 300 GPUs



TITAN - 300 000 coeurs + 16 000 GPUs

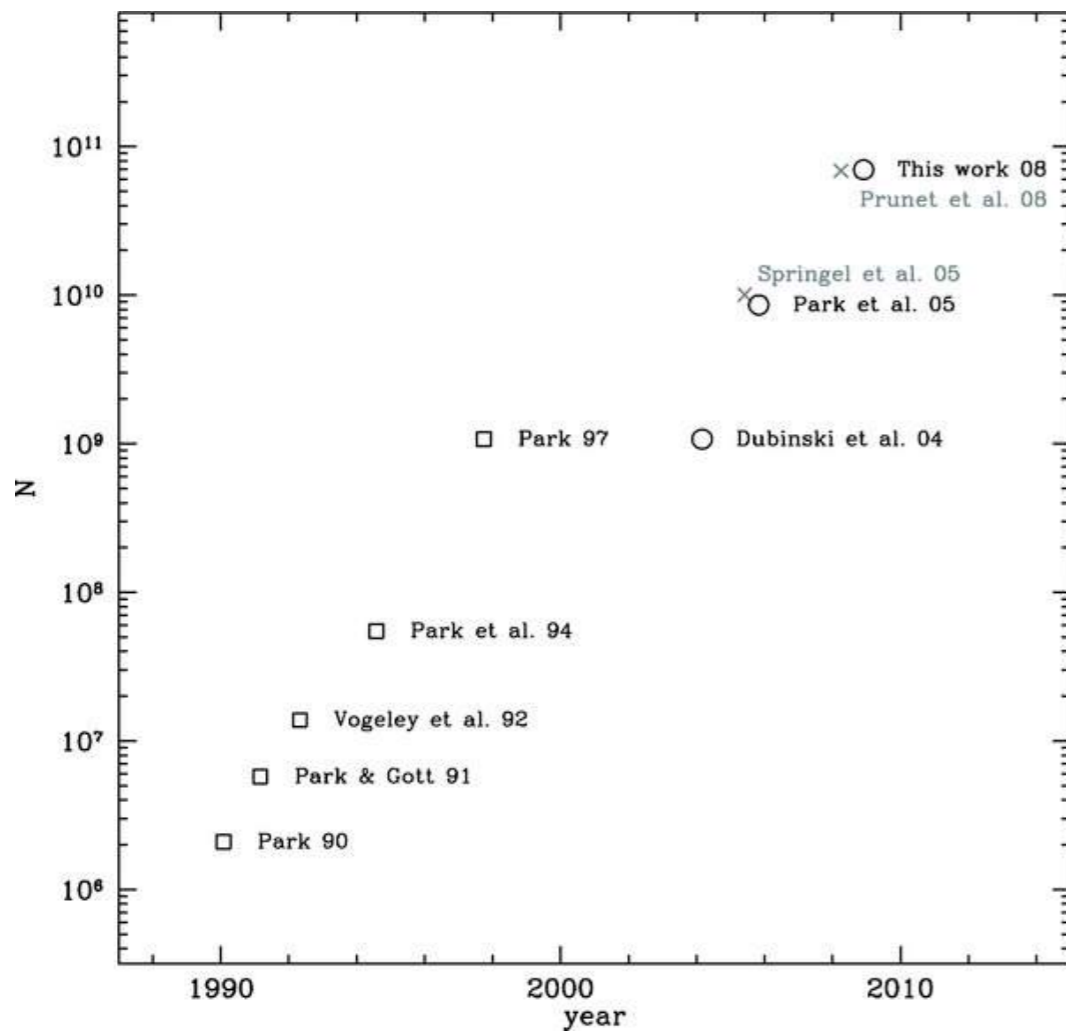


MARE NOSTRUM 45 000 coeurs

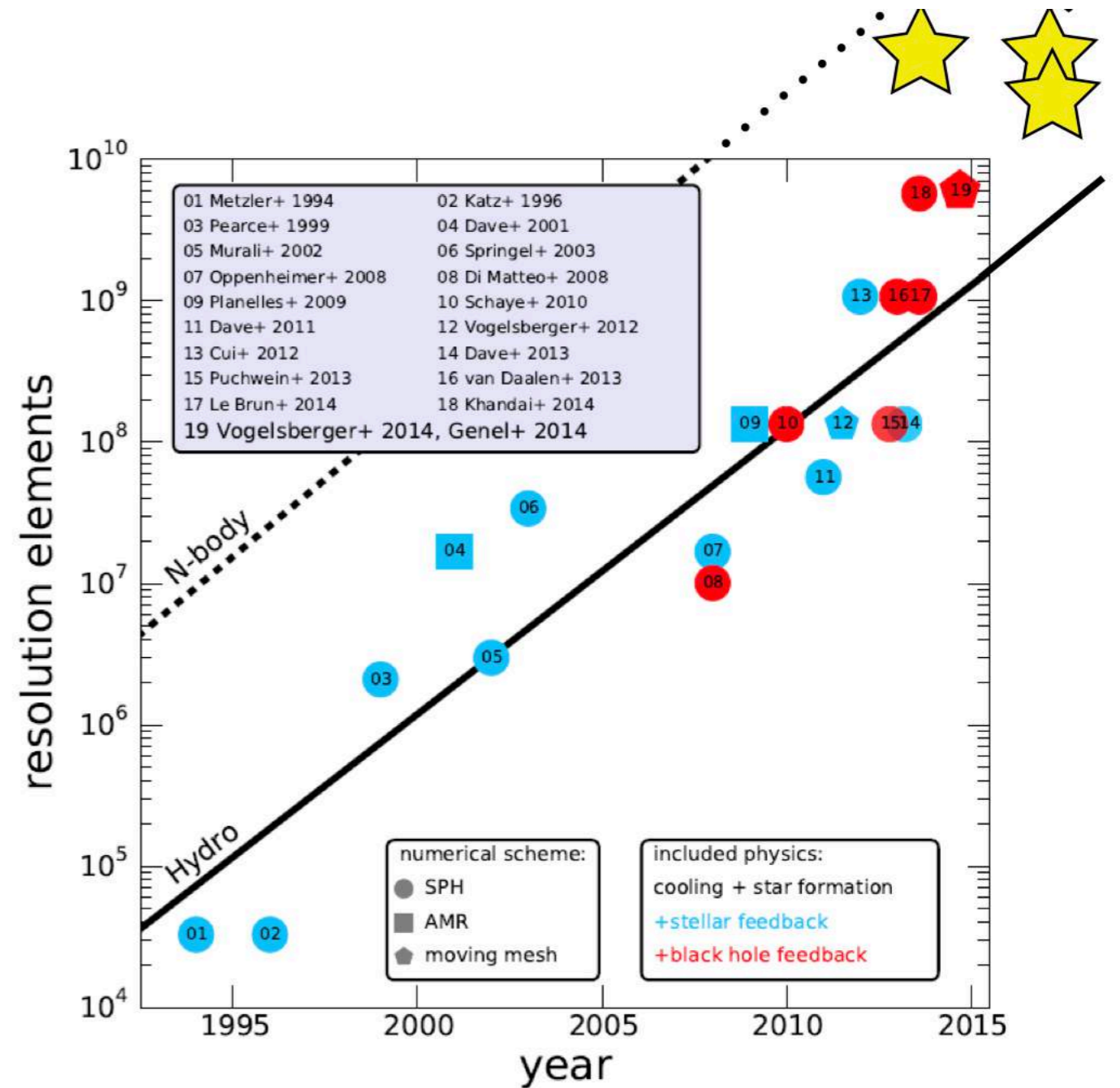


OCCIGEN 85 000 coeurs

La course à la performance



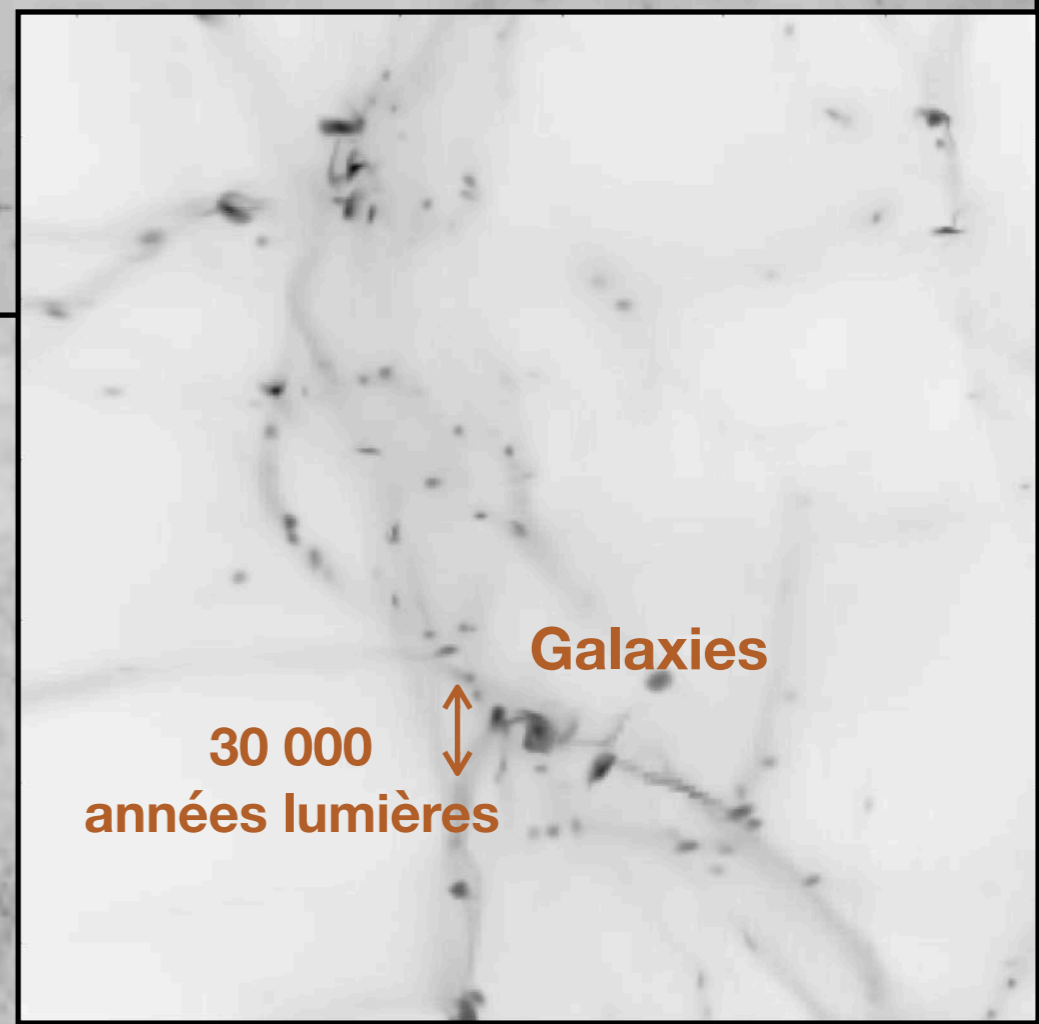
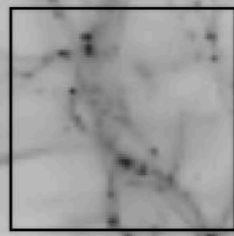
Park et al. 2008



(taken from illustris website) Ocvirk+18

300 millions d'années lumières

La Réionisation implique des couplages d'échelles extrêmes



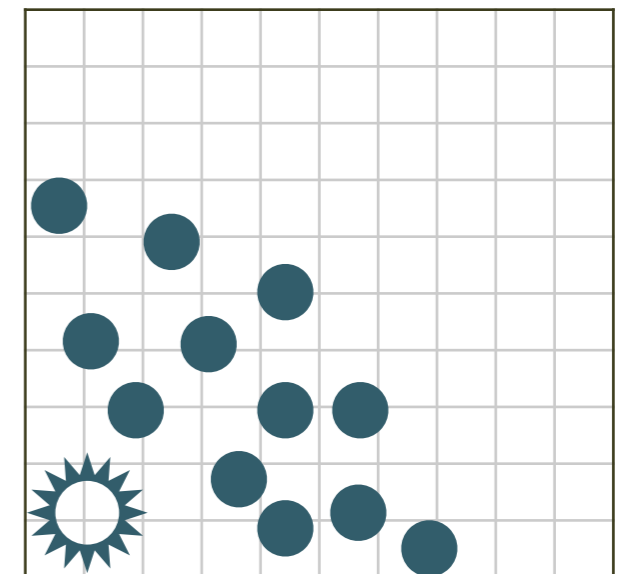
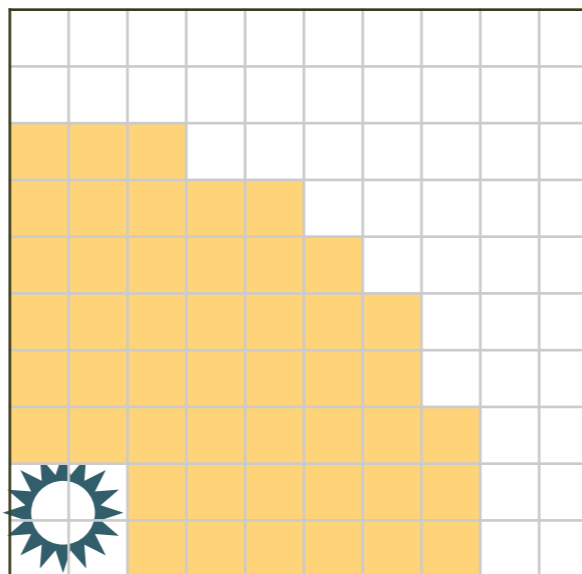
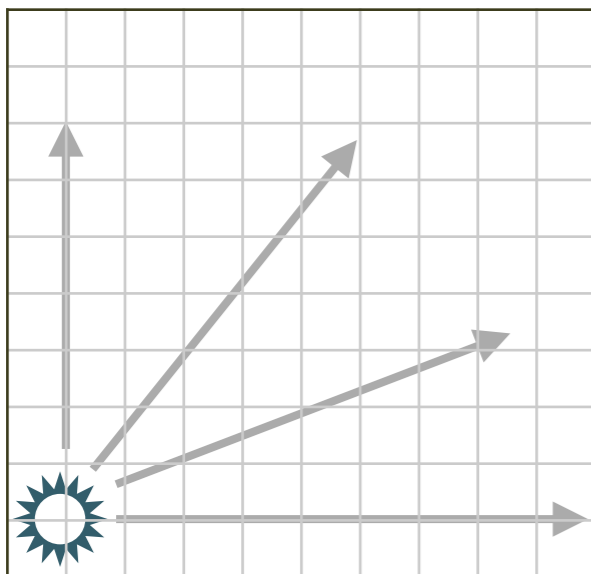
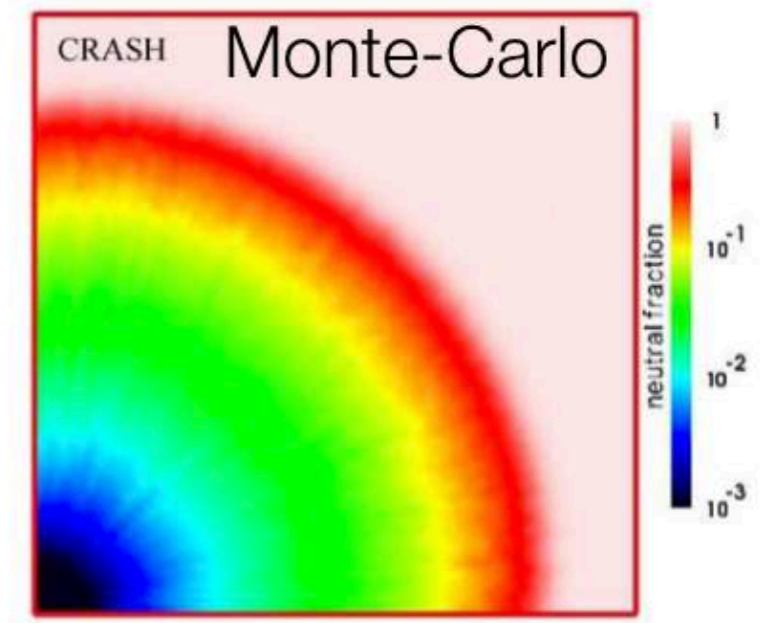
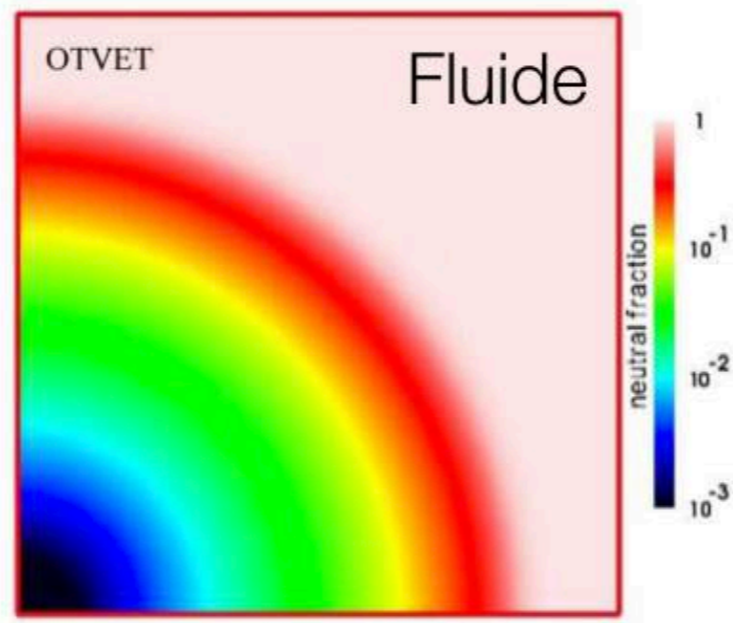
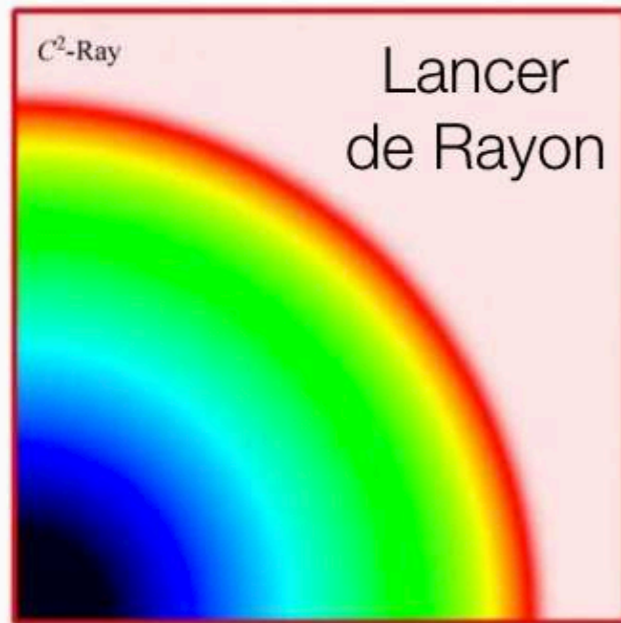
Galaxies

30 000
années lumières



Propagation du Rayonnement

Iliev+ 2006



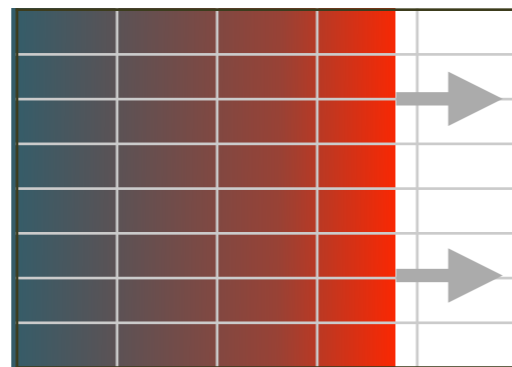
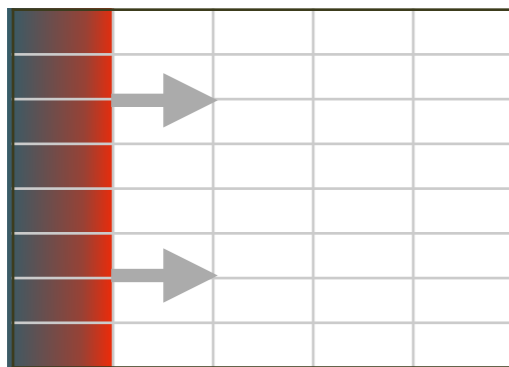
Temps caractéristiques

Il faut être capable de suivre la propagation d'un front lumineux qui peut se déplacer à la vitesse de la lumière

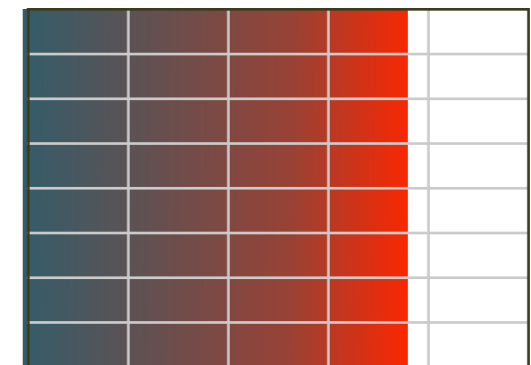
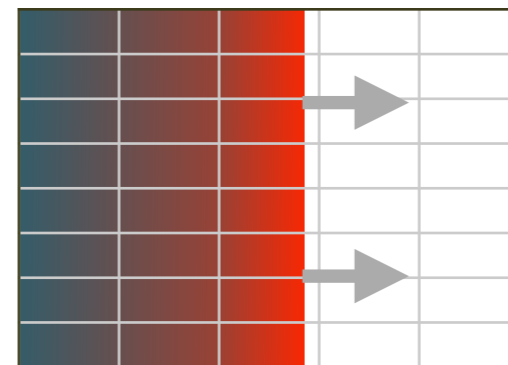
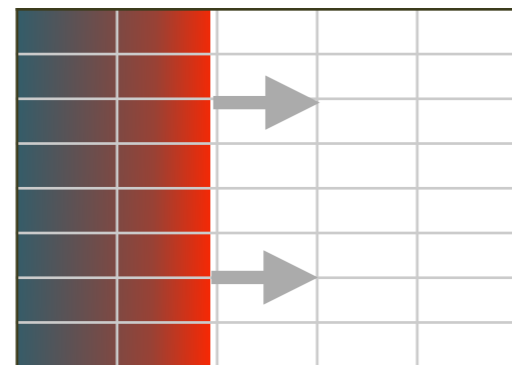
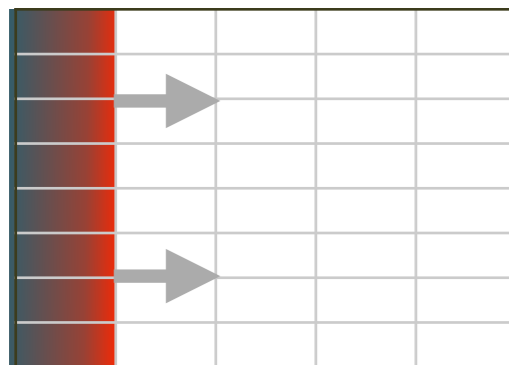
Un front radiatif peut se déplacer jusqu'à **plusieurs centaines de fois** plus rapidement qu'un choc gazeux
-> une simulation avec physique du rayonnement peut coûter jusqu'à 100 x plus cher en temps de calcul

$$\Delta t < \frac{\Delta x}{v}$$

Condition de Courant



Instable



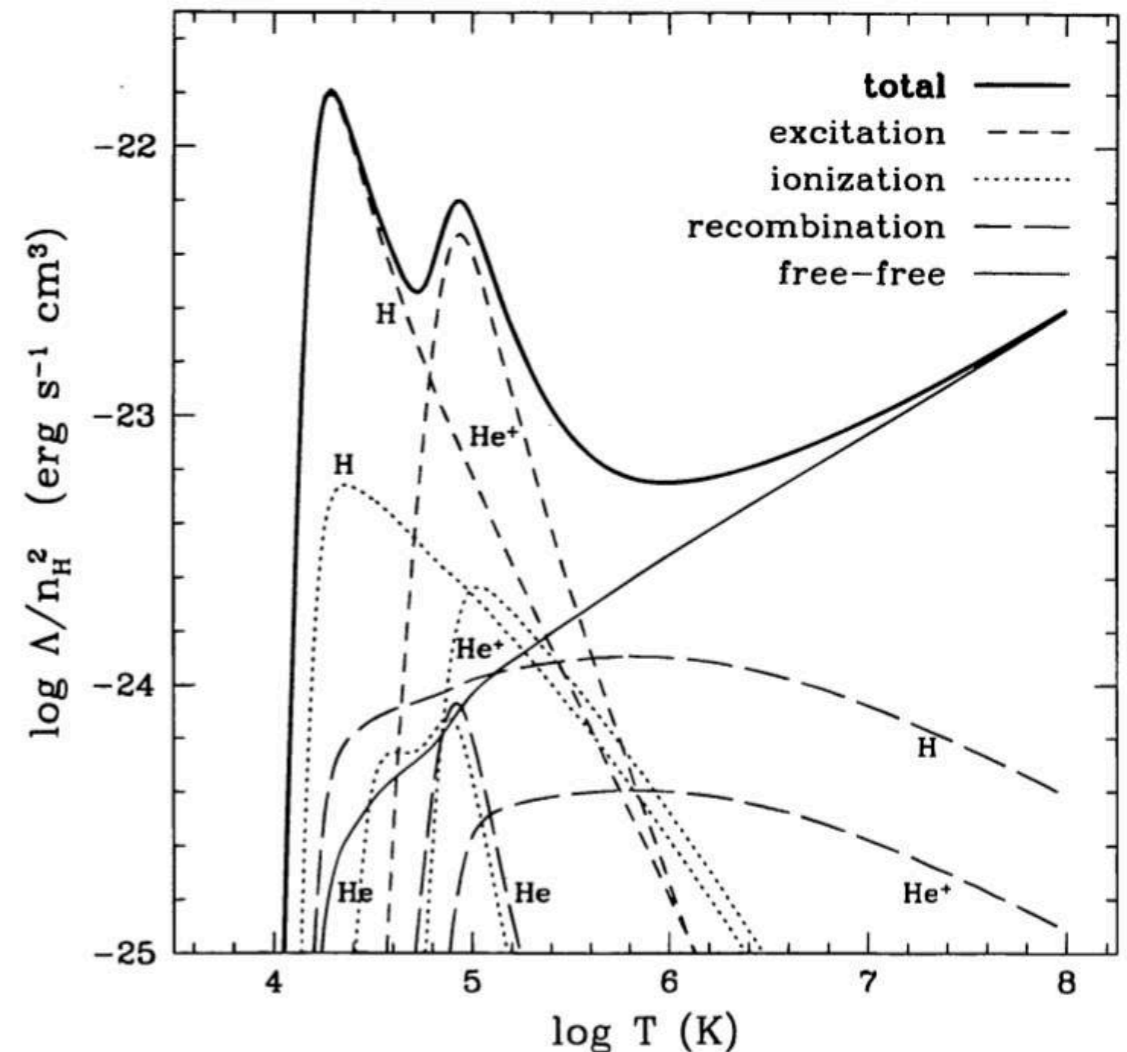
Stable

Thermo-chimie

$$\frac{dn_H}{dt} \overset{\text{Recombinaison}}{=} (\alpha_A(T)x^2 - \beta(T)x(1-x))n_0^2 \overset{\text{Ionisation Collisionelle}}{-} cn_H\sigma_N N \overset{\text{Photoionisation}}{+}$$

$$\frac{de}{dt} \overset{\text{Chauffage}}{=} cn_H \Sigma_E N - \Lambda(n_0, x, T) \overset{\text{Refroidissement}}{}$$

Non seulement les calculs sont nombreux, mais chaque calcul fait intervenir de la **thermo-chimie (ionisation, chauffage) hors-équilibre**, qui est très exigeante numériquement





Une physique rapide est
une physique **coûteuse** à modéliser

La lumière est **transmise et modifie la
matière** à 299 792 km/s

Le coût de cette modélisation est à priori
prohibitif

A Strasbourg, nous utilisons des cohortes
de **cartes graphiques (GPU)** pour
accélérer les calculs de transmission du
rayonnement de facteurs x80

Assassin's Creed Odyssey

Ces cartes graphiques sont pensées pour le rendu graphique qui implique un grand nombre de **tâches indépendantes** et **exigeantes**, devant être réalisées à **haute fréquence**



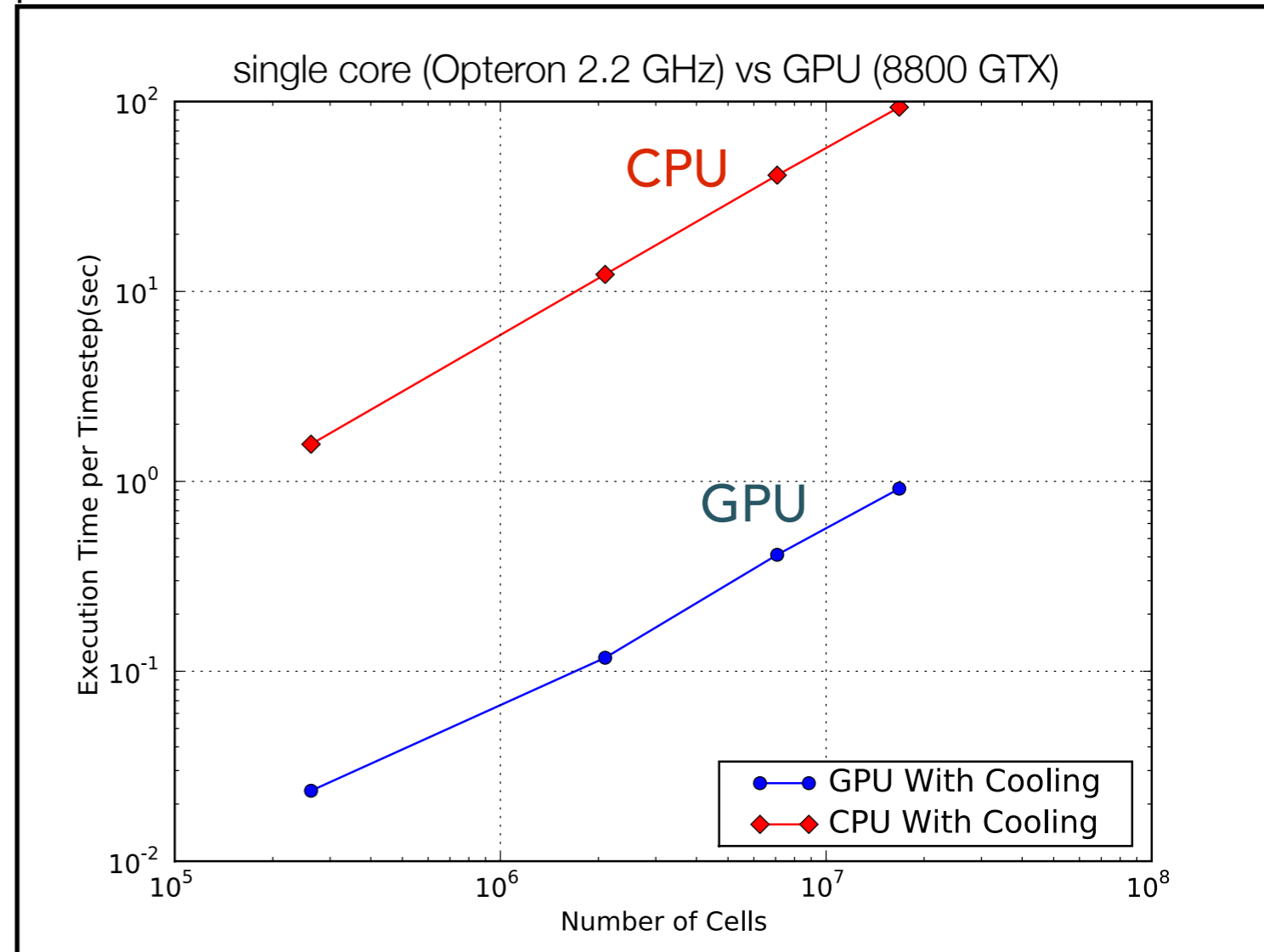
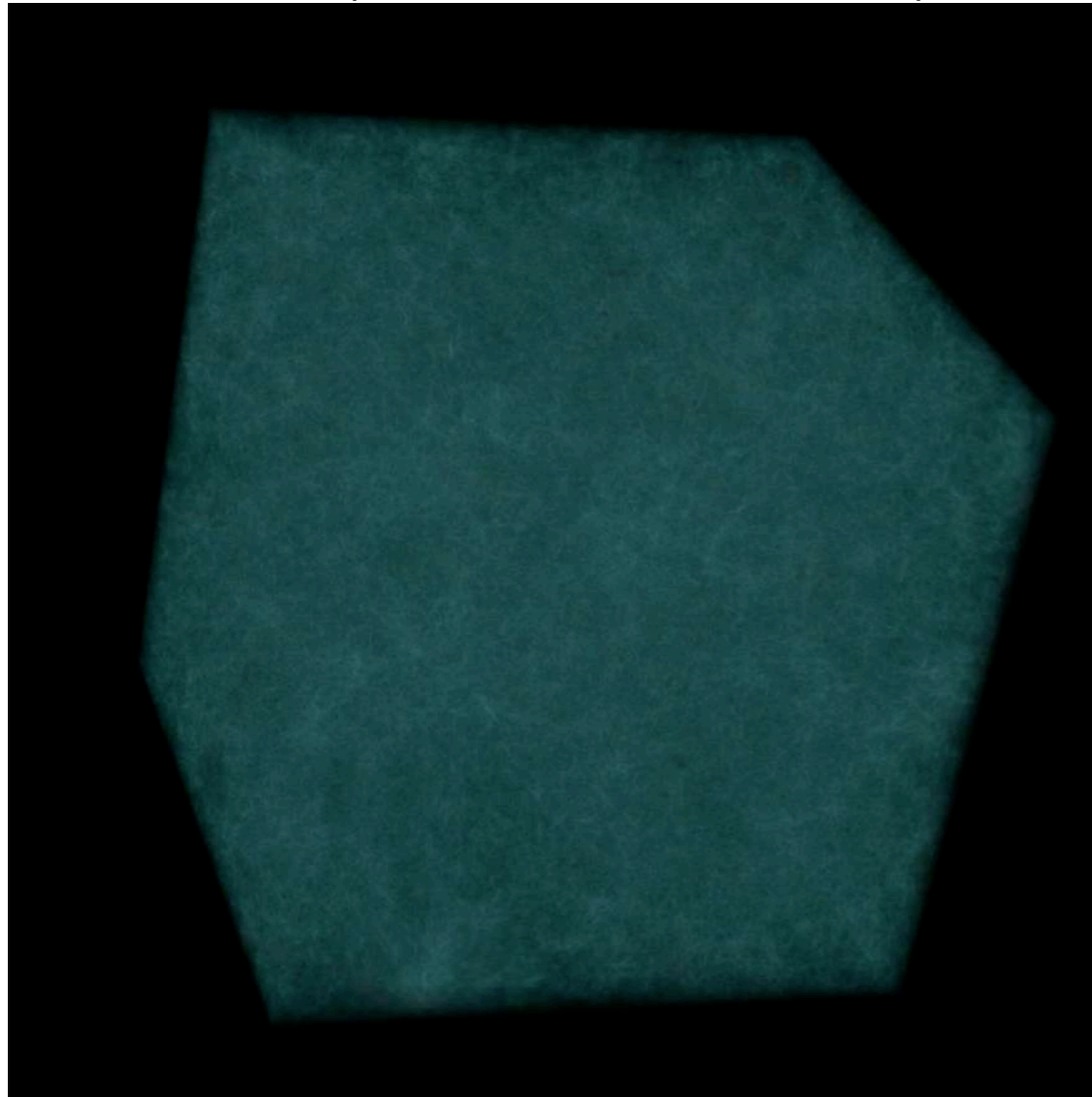
L'architecture des cartes graphiques diffère de celle des processeurs standards et est dédiée au calcul parallèle

Au passage ceci en fait l'outil de calcul de prédilection pour l'apprentissage supervisé des **réseaux de neurones** modernes

Post-Traitement Radiatif sur GPU

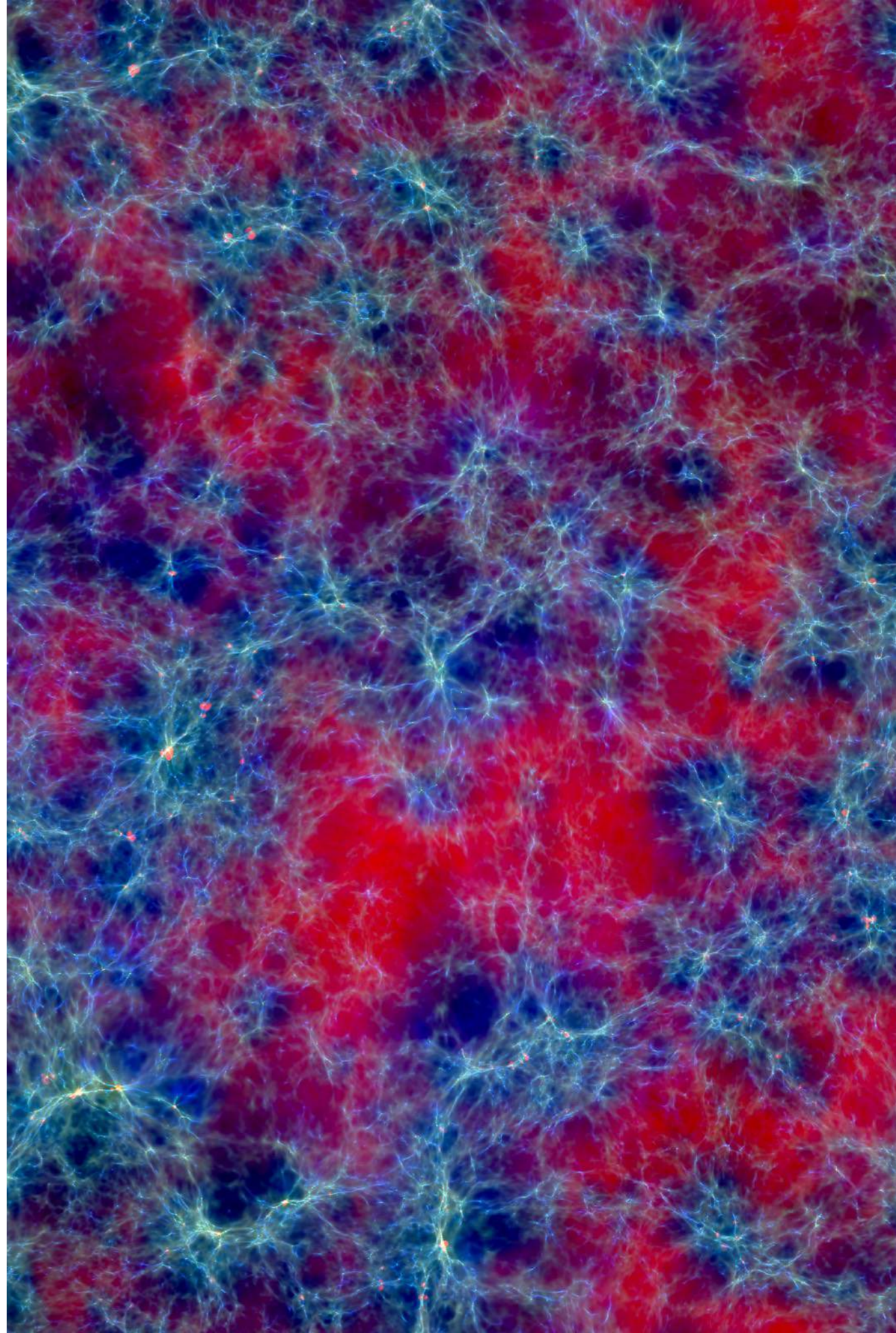
(Aubert & Teyssier 2010)

128 GPUs (Titane/ CEA /CCRT) 100 Mpc - 1024^3

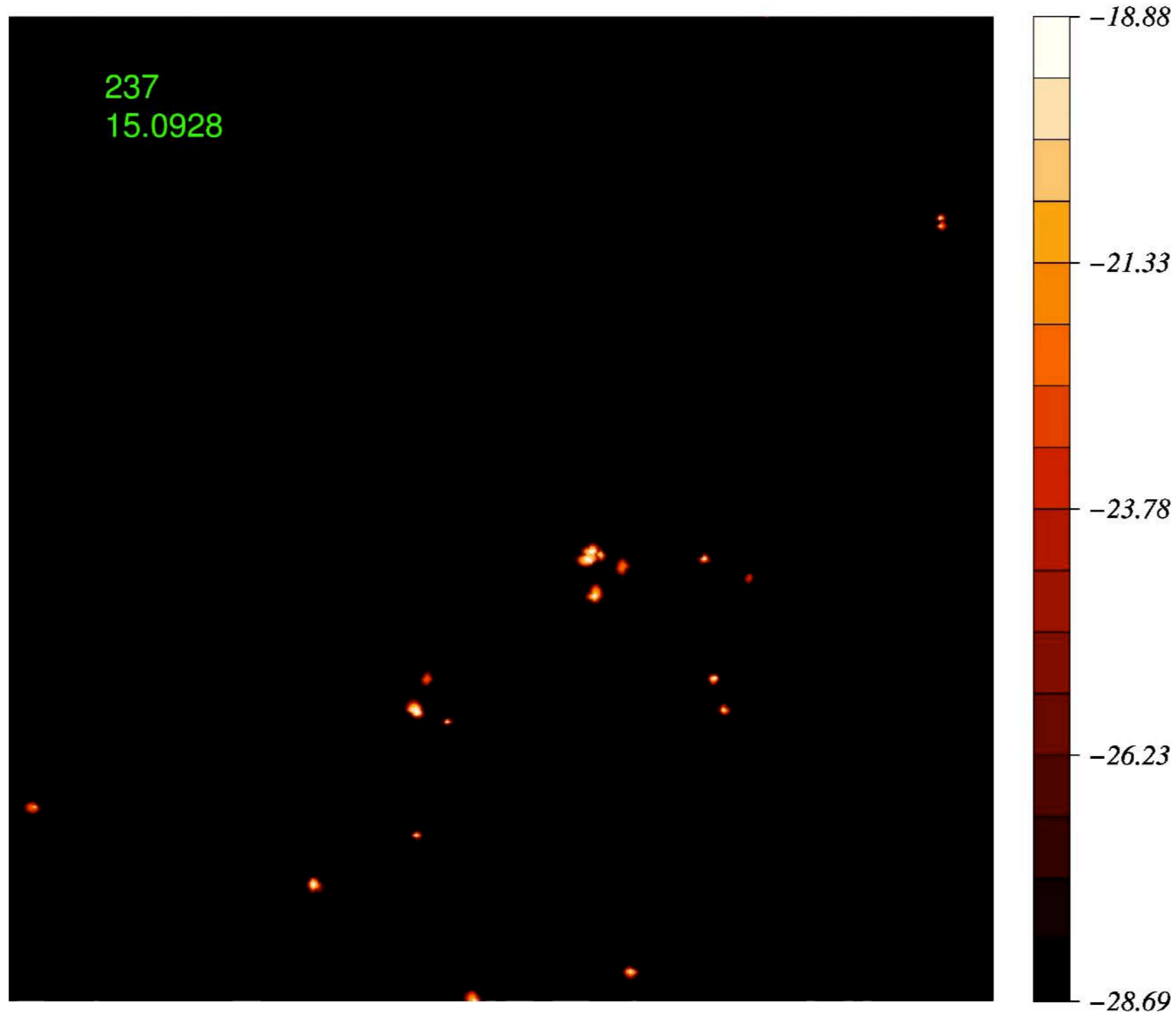


Accélération matérielle environ **x80** par rapport à un coeur de calcul CPU standard
Permet de faire de **grandes simulations** et de **grands nombres de réalisations**
Simulations CoDa : entre 4000 et 16 000 GPUs qui travaillent de concert

Quelques résultats



Influence sur la formation d'étoile

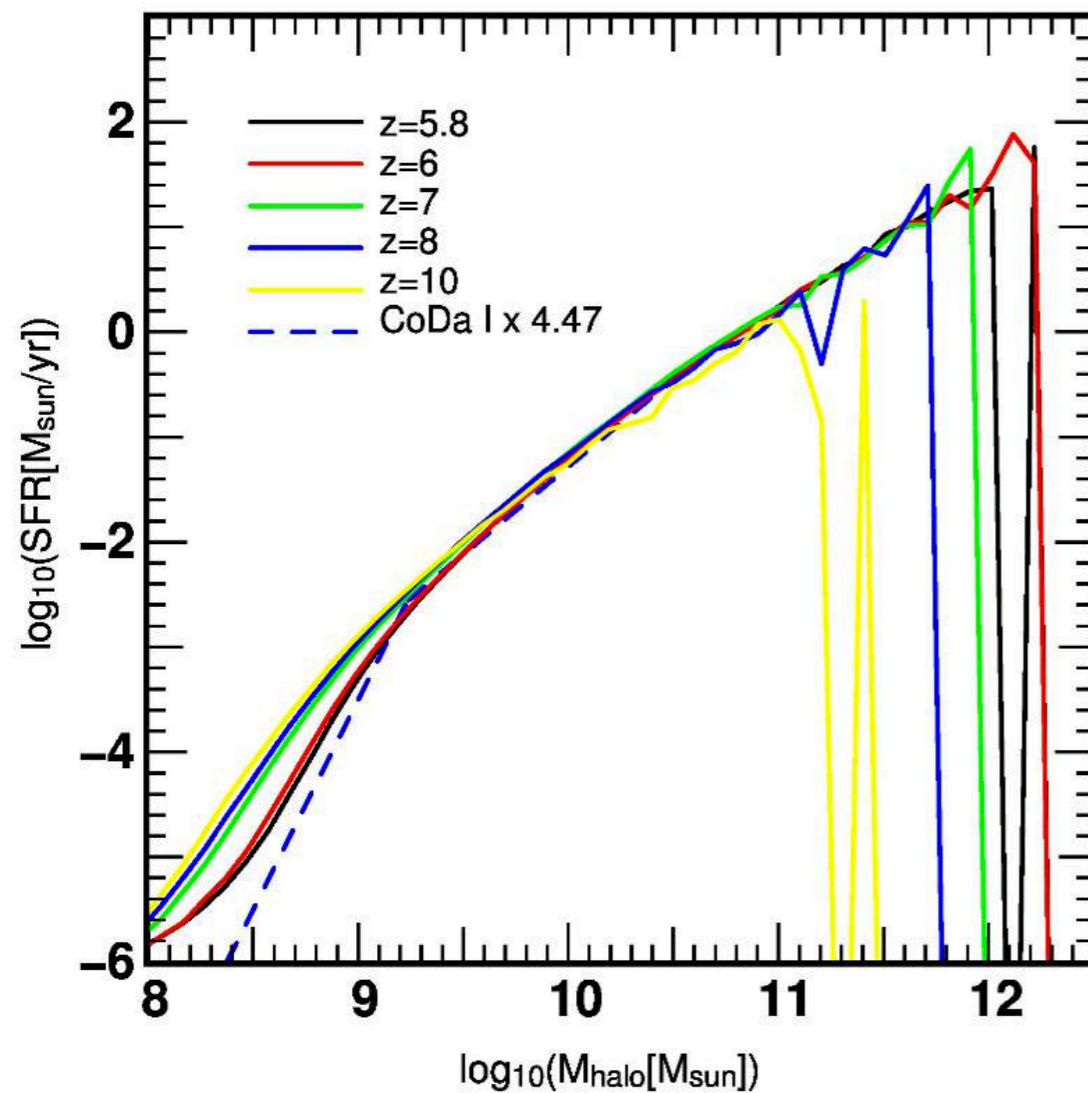


Le rayonnement de la Réionisation va chauffer le gaz
=> photo évaporation dans les petites galaxies
=> suppression de la formation d'étoiles

les étoiles « tuent » les étoiles de génération suivante

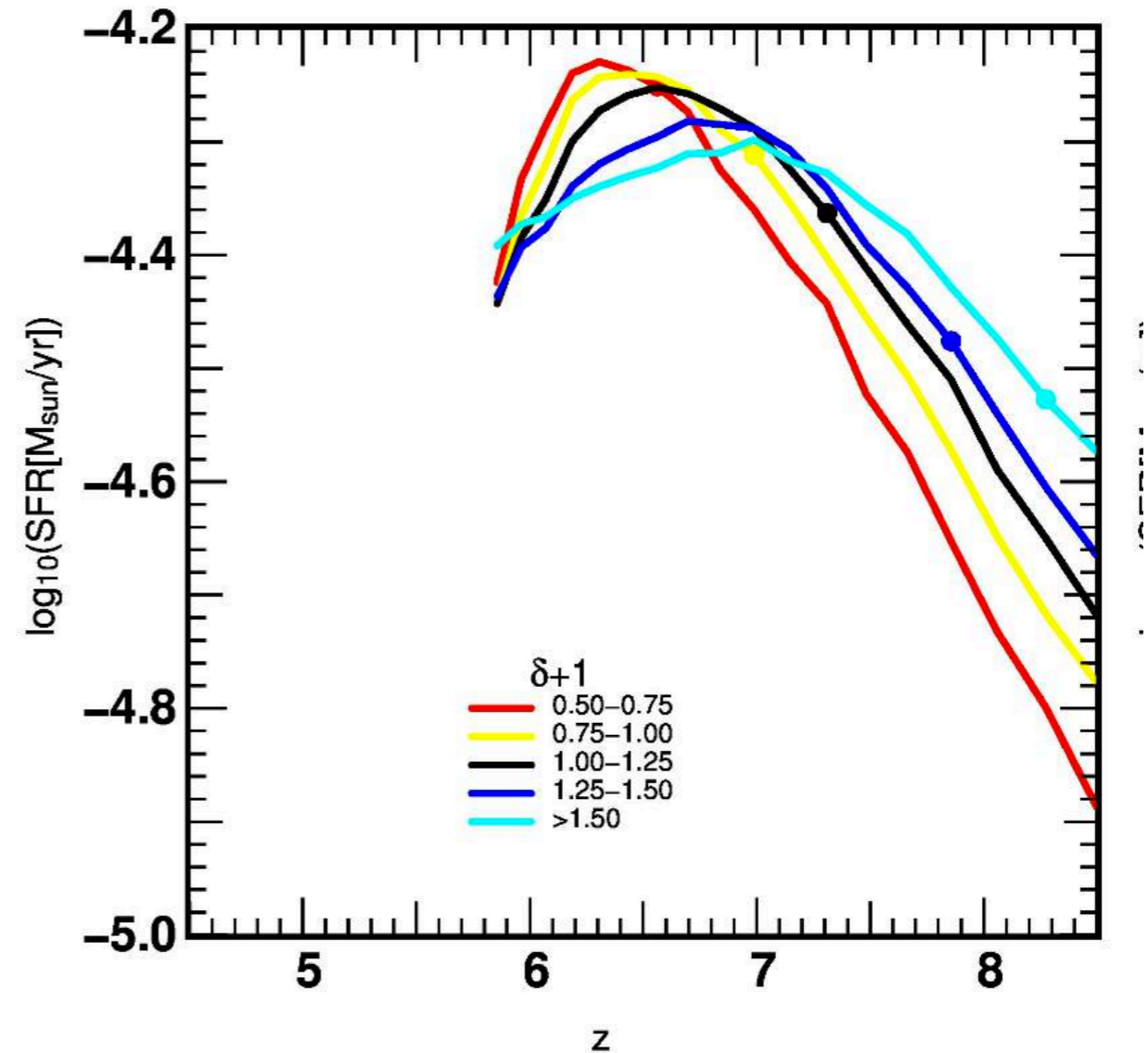
Suppression de la formation stellaire dans les petites galaxies

Star formation rate CoDa II



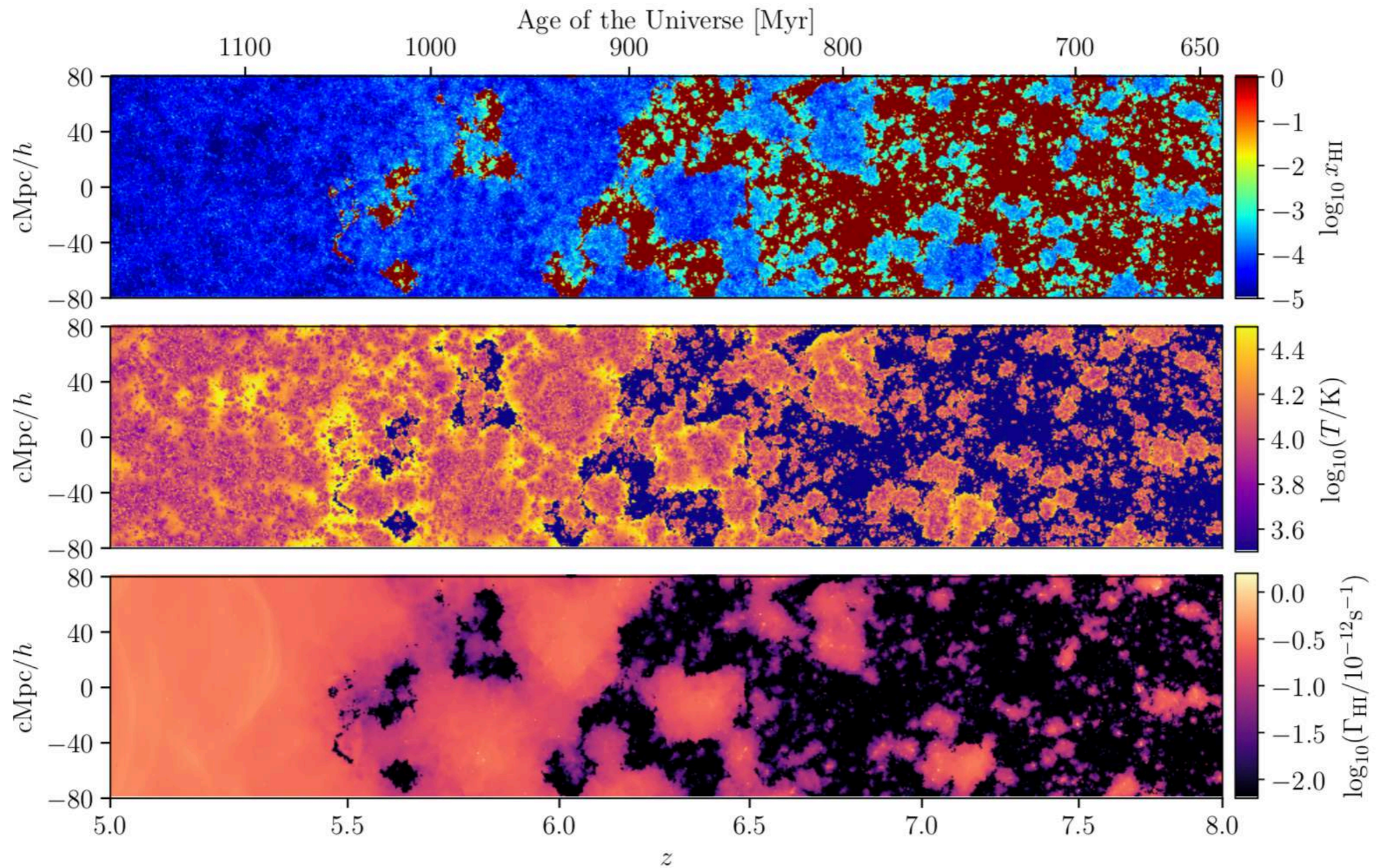
Après la réionisation on fabrique moins d'étoiles dans les petites galaxies

CoDa II

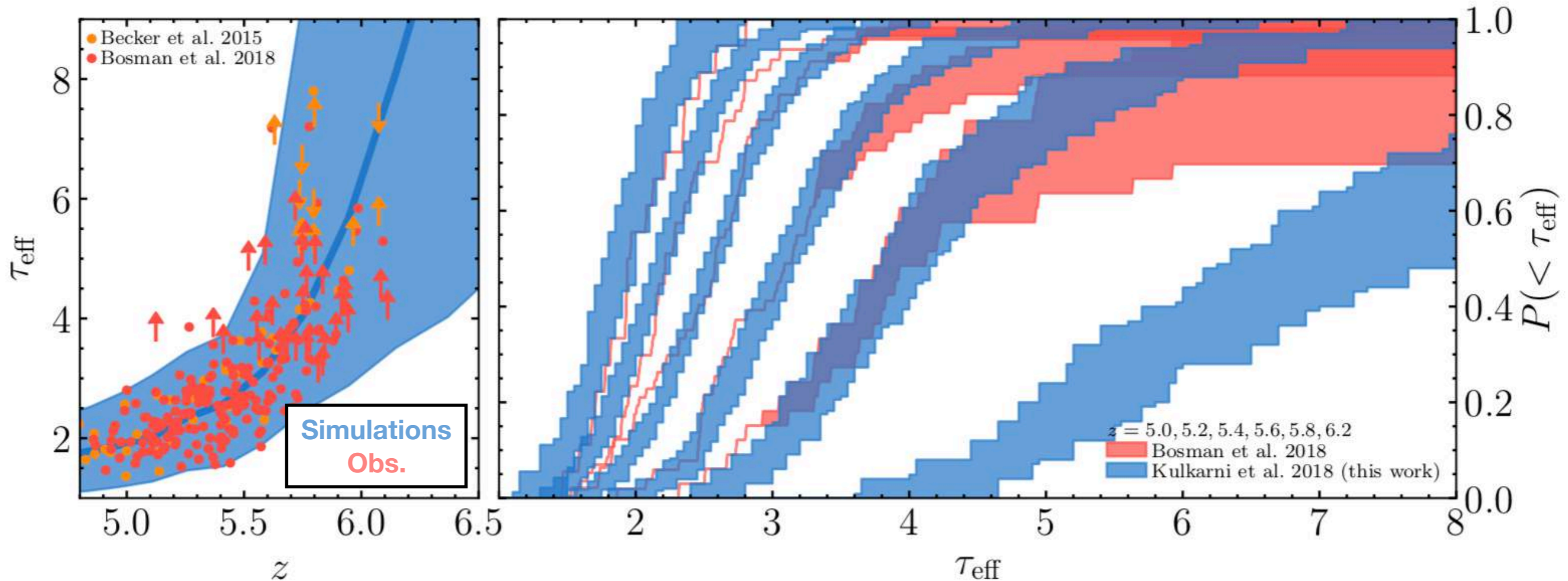


Cette suppression dépend de l'environnement

Une réionisation tardive ?

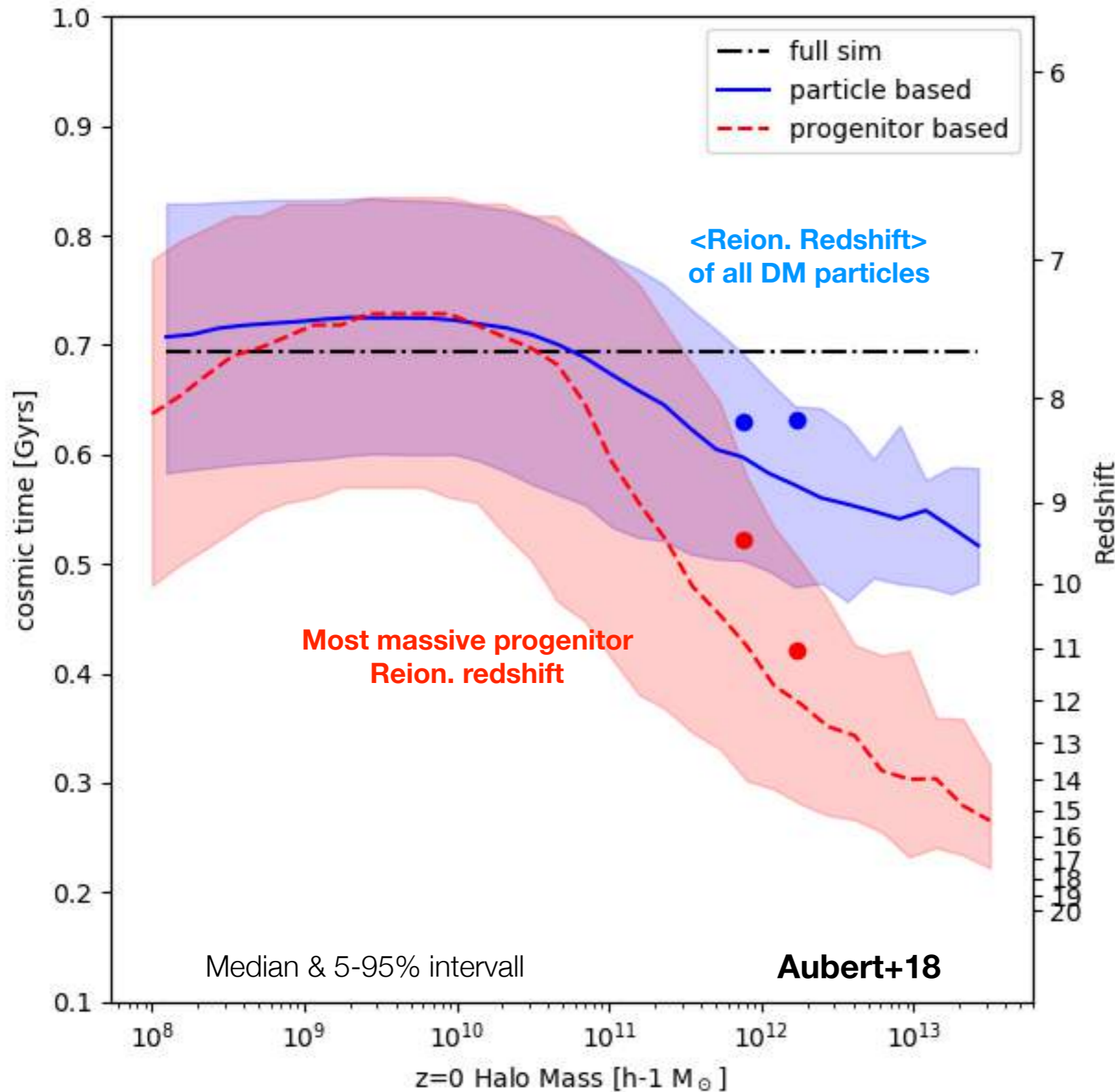


La forêt Lyman-Alpha préfère une réionisation tardive



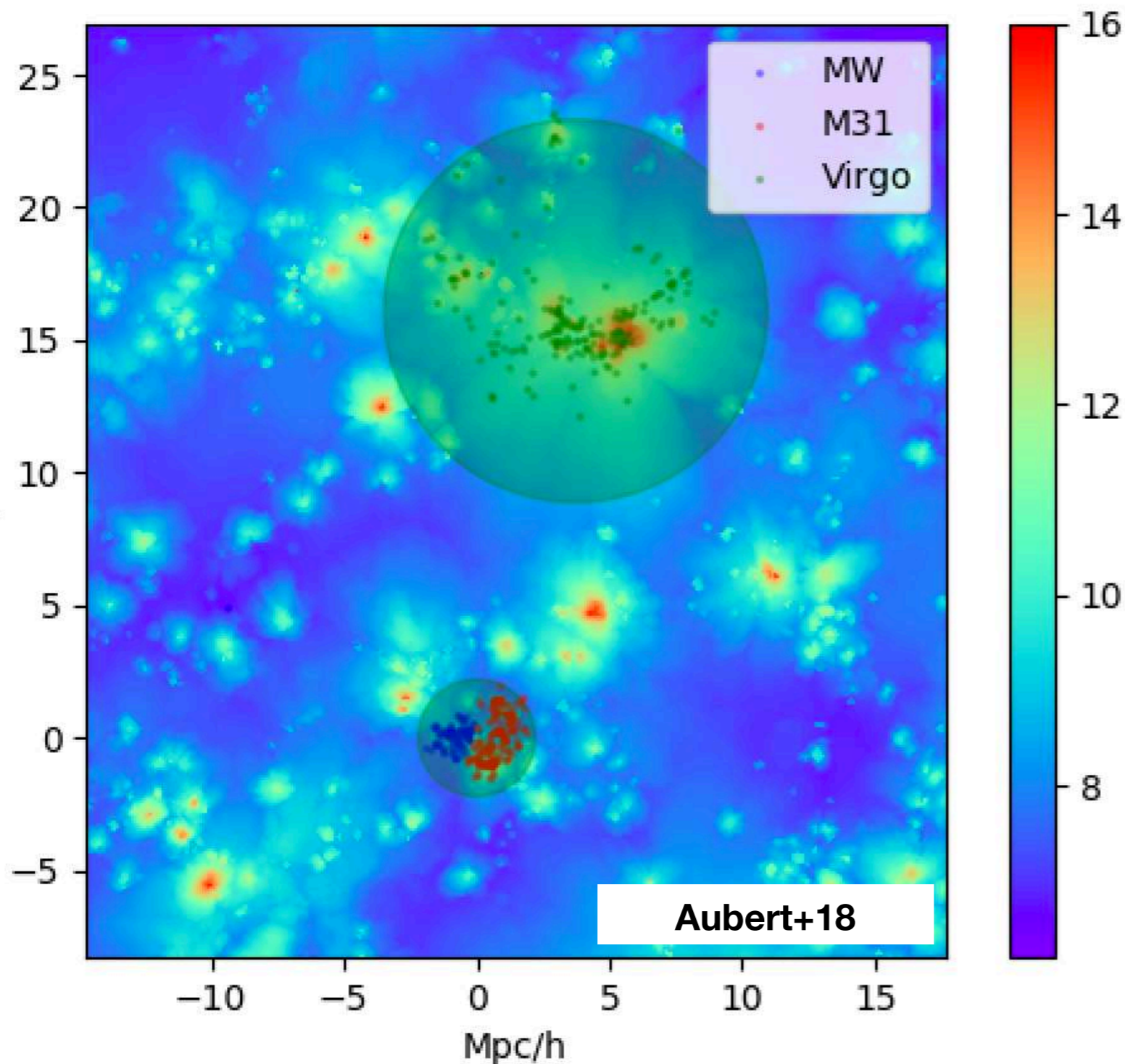
L'opacité observée de la forêt Lyman-Alpha et **sa diversité** sont bien mieux reproduites si on autorise une réionisation vers $z=5.3$

L'instant de réionisation des galaxies actuelles

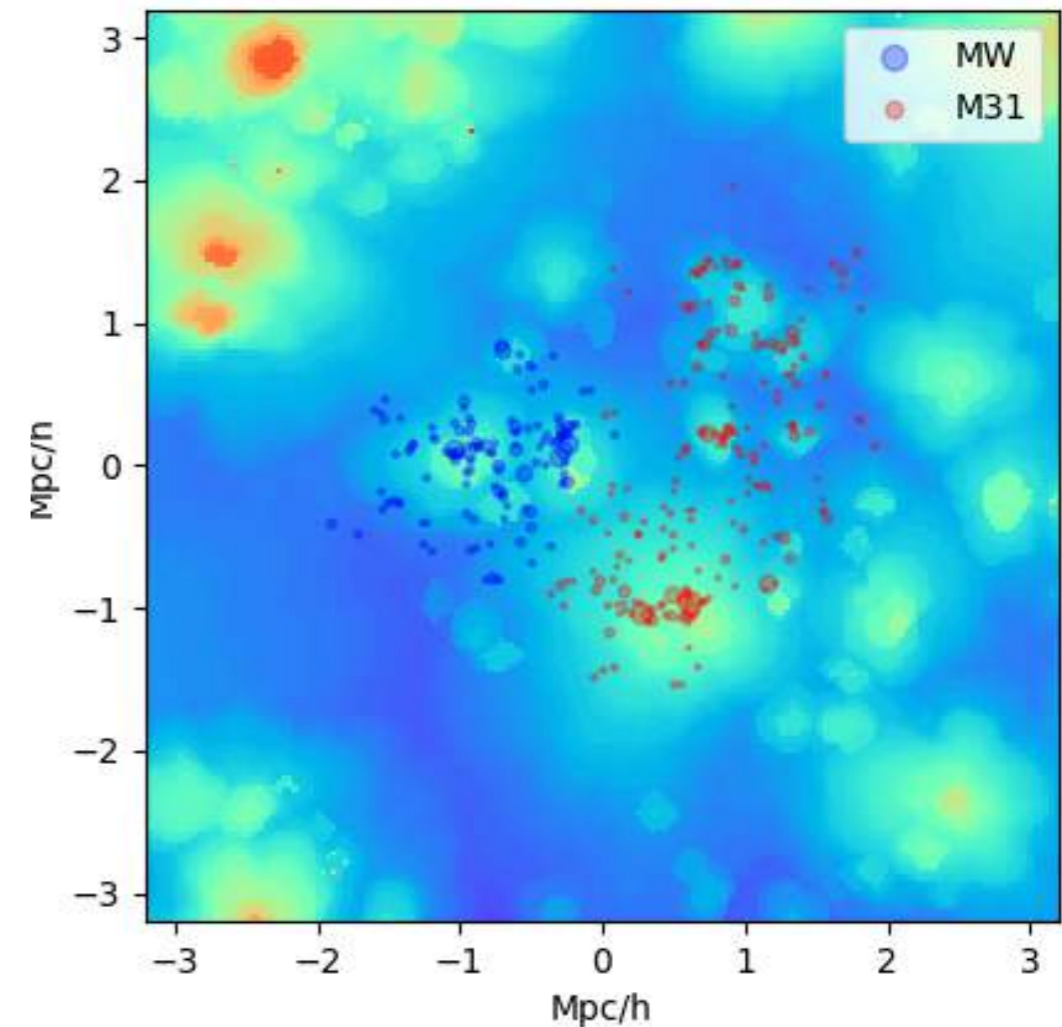


- Les galaxies actuelles massives se sont formées en premier et on été réionisées en premier
- Les galaxies peu massives actuellement ont été réionisées de l'extérieur, très tardivement
- Très grande variabilité

La Voie Lactée et La Galaxie D'Andromède



Nos simulations
contiennent
des analogues aux galaxies
et amas locaux



En résumé

- La réionisation est une étape essentielle pour le processus de formation des premières galaxies et pour la cosmologie
- Ses caractéristiques précises sont peu connues ce jour, mais cela va grandement changer au cours de la prochaine décennie
- En termes de simulations, le rôle crucial joué par le rayonnement et le couplage d'échelles très différentes pose des nouveaux défis
- Ces défis peuvent être affrontés avec de nouveaux moyens de calculs, comme les cartes graphiques, conformément aux évolutions actuelles du calcul haute performance

A suivre