

Simulations de l'Aube Cosmique & de l'époque de Réionisation

Dominique Aubert

Avec : P. Ocvirk, E. Thélie, J. Hiegel, J. Chardin, N. Gillet, N. Deparis, J. Lewis



Observatoire

astronomique

de Strasbourg | ObAS

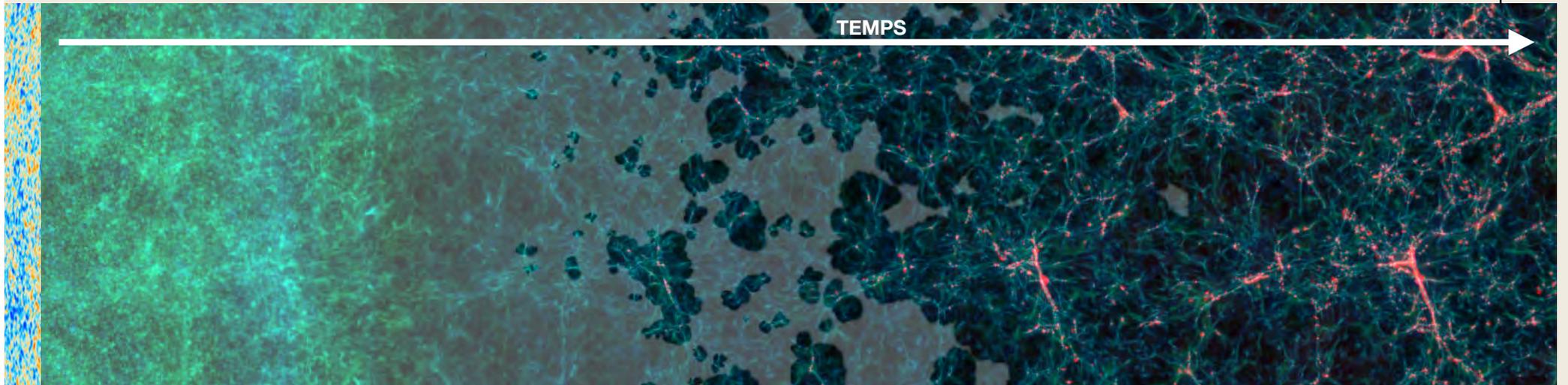
Université

de Strasbourg

Quelques éléments de contexte

Une transition dans l'Univers Jeune ($60 > z > 6$)

Visu : N. Deparis



Fond Diffus
Cosmologique
380 000 ans

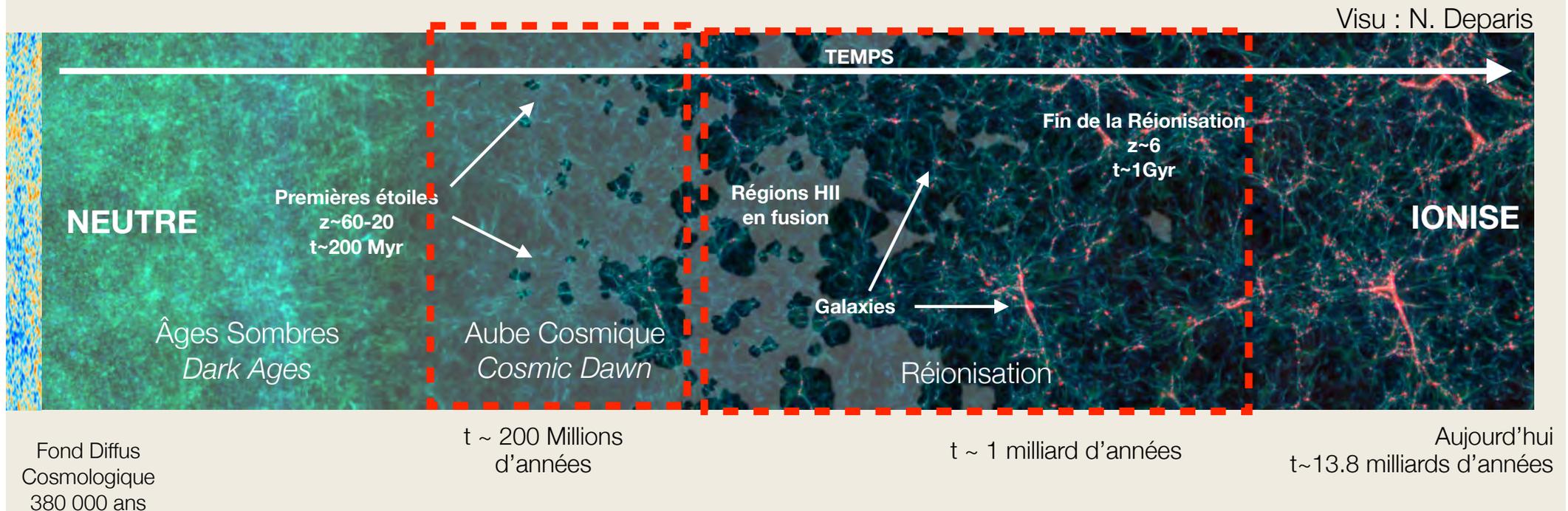
t ~ 200 Millions
d'années

t ~ 1 milliard d'années

Aujourd'hui
t ~ 13.8 milliards d'années

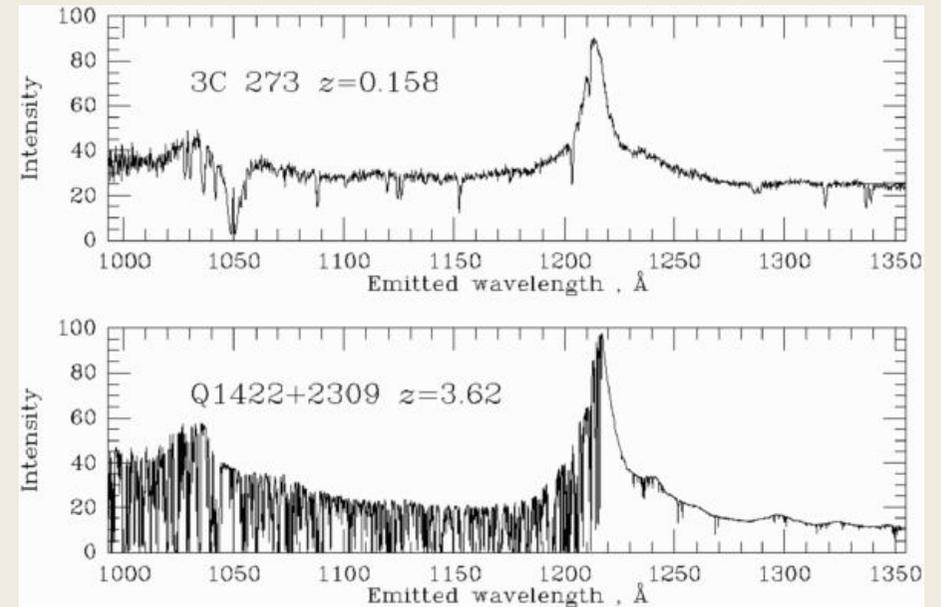
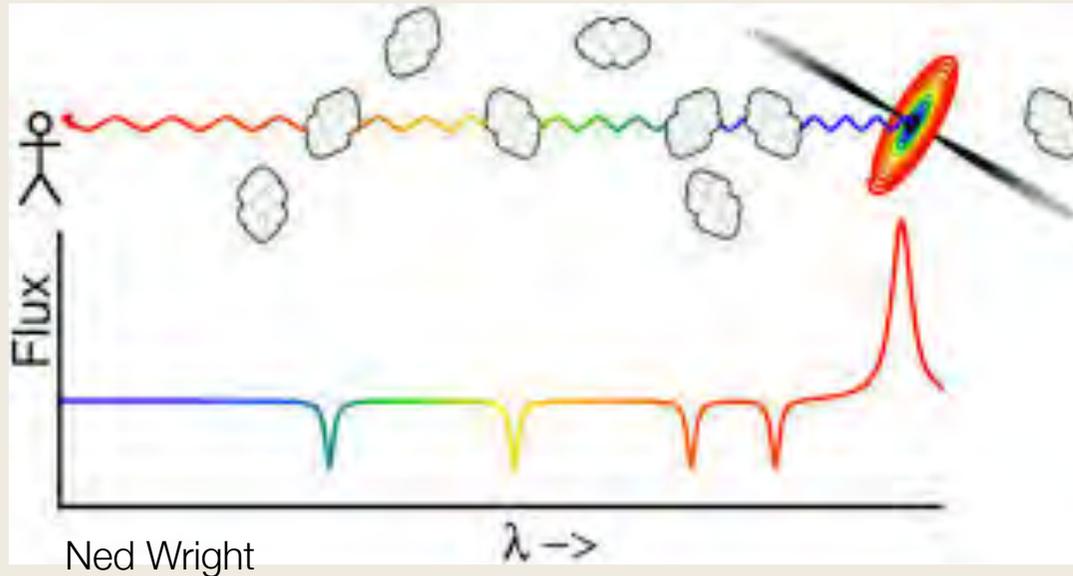
- **L'aube cosmique et la réionisation** sont régies par de nombreux aspects de la **mise en place** des grandes structures de l'Univers et des sources de lumières astrophysiques (dont les **toutes premières étoiles et noyaux actifs de galaxies (AGNs)**)

Une transition dans l'Univers Jeune ($60 > z > 6$)



- Cette époque nous intéresse car elle permet de voir la **naissance** des premiers objets astrophysiques, en particulier via leur influence sur le milieu inter-galactique
- La réionisation et l'aube cosmique sont des sortes de 'révélateurs' ou 'grossisseurs' aux échelles cosmologiques de ce qui se déroule aux échelles galactiques
- Par ailleurs l'émergence d'un fond UV ionisant et chauffant est un ingrédient indispensable de la formation des galaxies

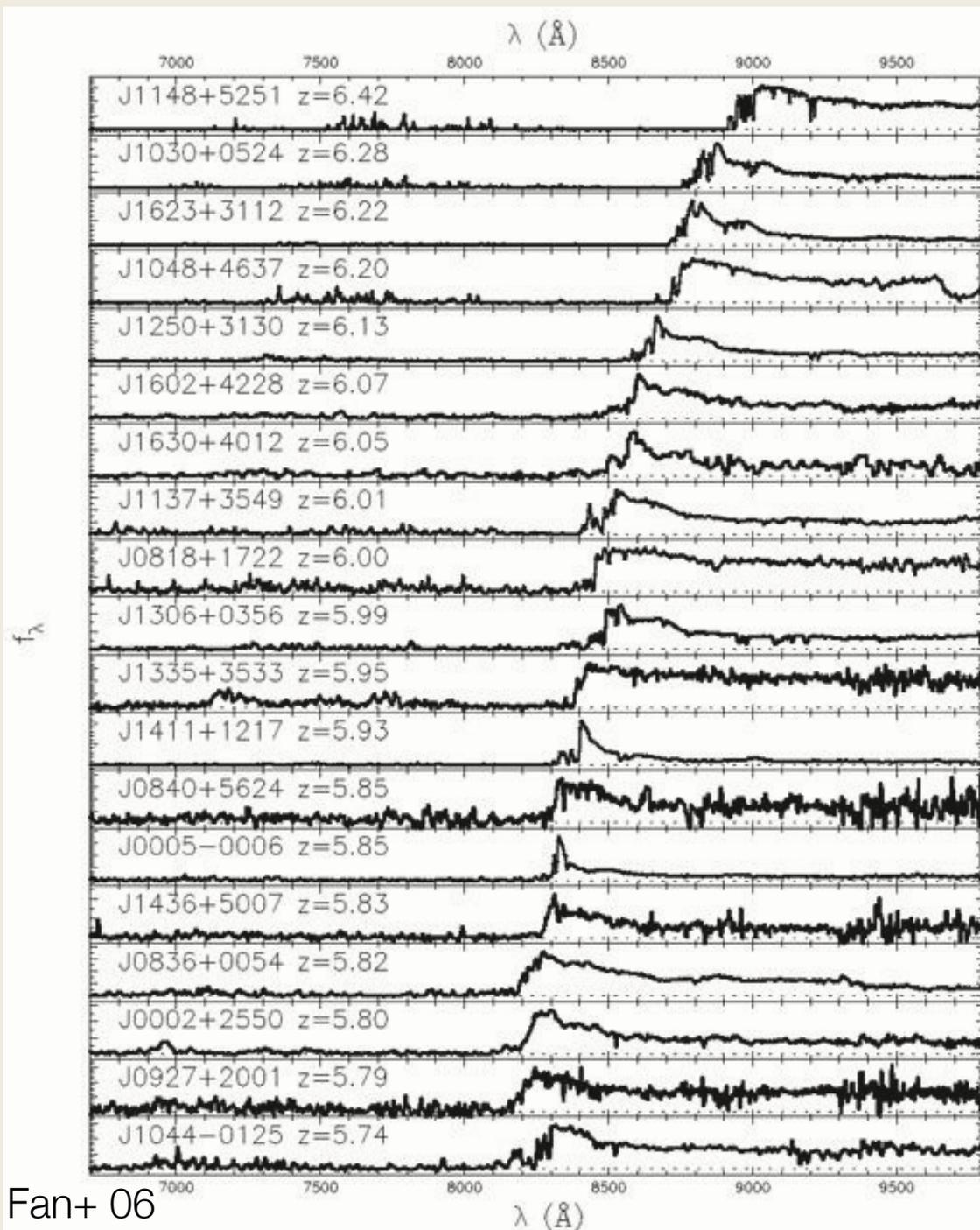
Le gaz diffus : Forêt Lyman-Alpha du milieu intergalactique



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 vers un phare distant (un quasar)



Fan+ 06

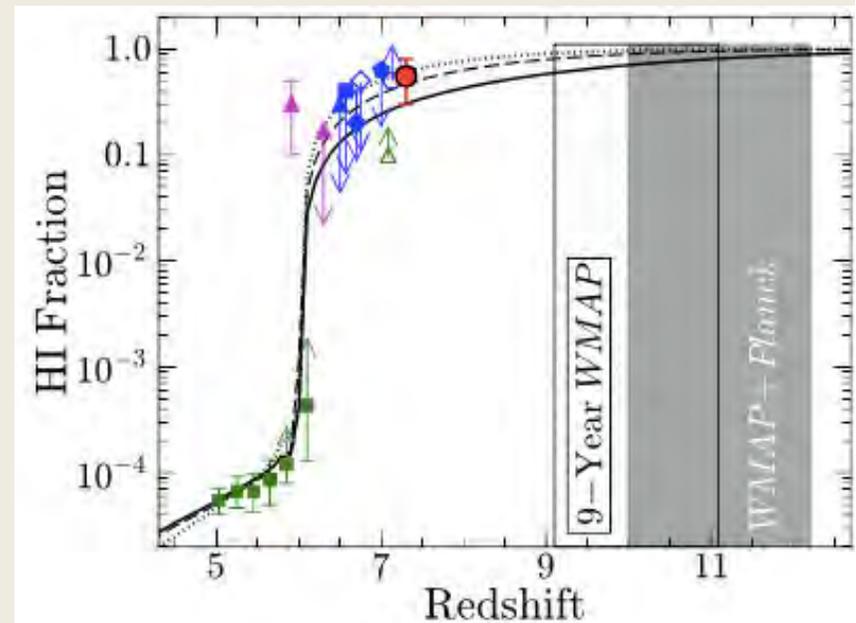
Plus les quasars sont distants plus l'absorption est saturée

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.

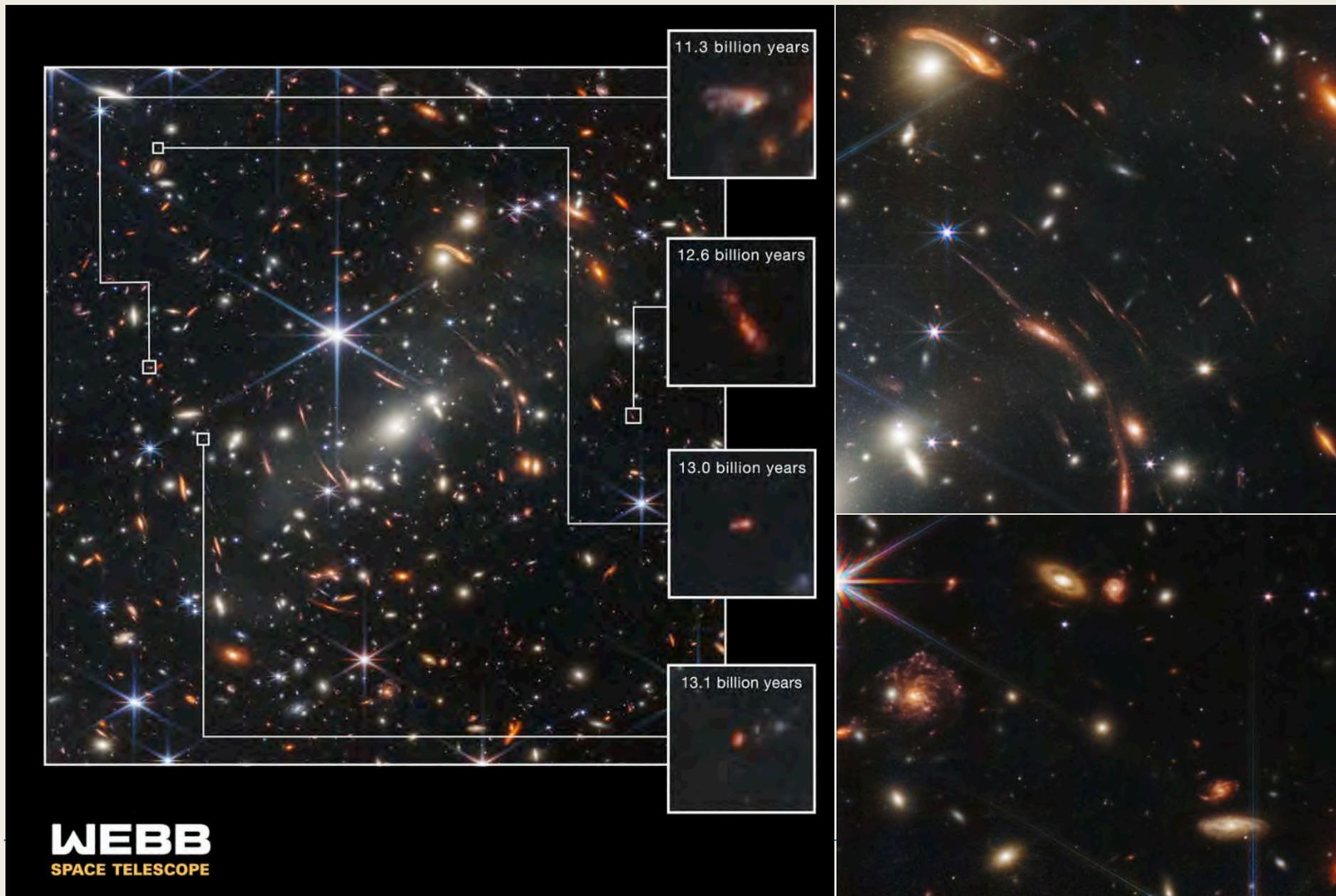
On retrouve de la transmission à partir de 1 milliard d'années après le Big-Bang, vers $z \sim 6$.

La réionisation a eu lieu à ce moment là.

Age de l'Univers



Les premières galaxies vues par JWST



Le signal radio à 21cm du gaz intergalactique

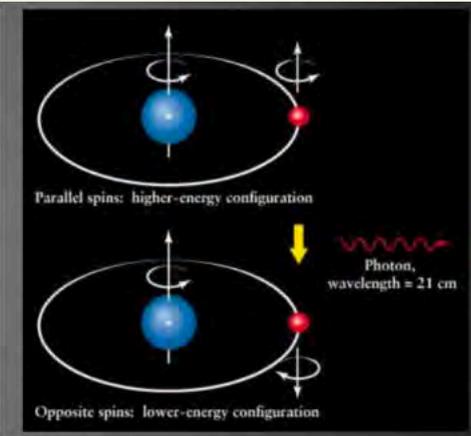


Artist Impression of dipole antenna – Swinburne Astronomy Productions/ICRAR/U. Cambridge/ASTRON.

$\lambda = 21 \text{ cm}$
 $\nu = 1420 \text{ MHz}$

$n = 1$

Spin Temperature
 $n_1/n_0 \equiv 3 \exp(-T_*/T_S)$,
 $T_* = 0.068 \text{ K}$



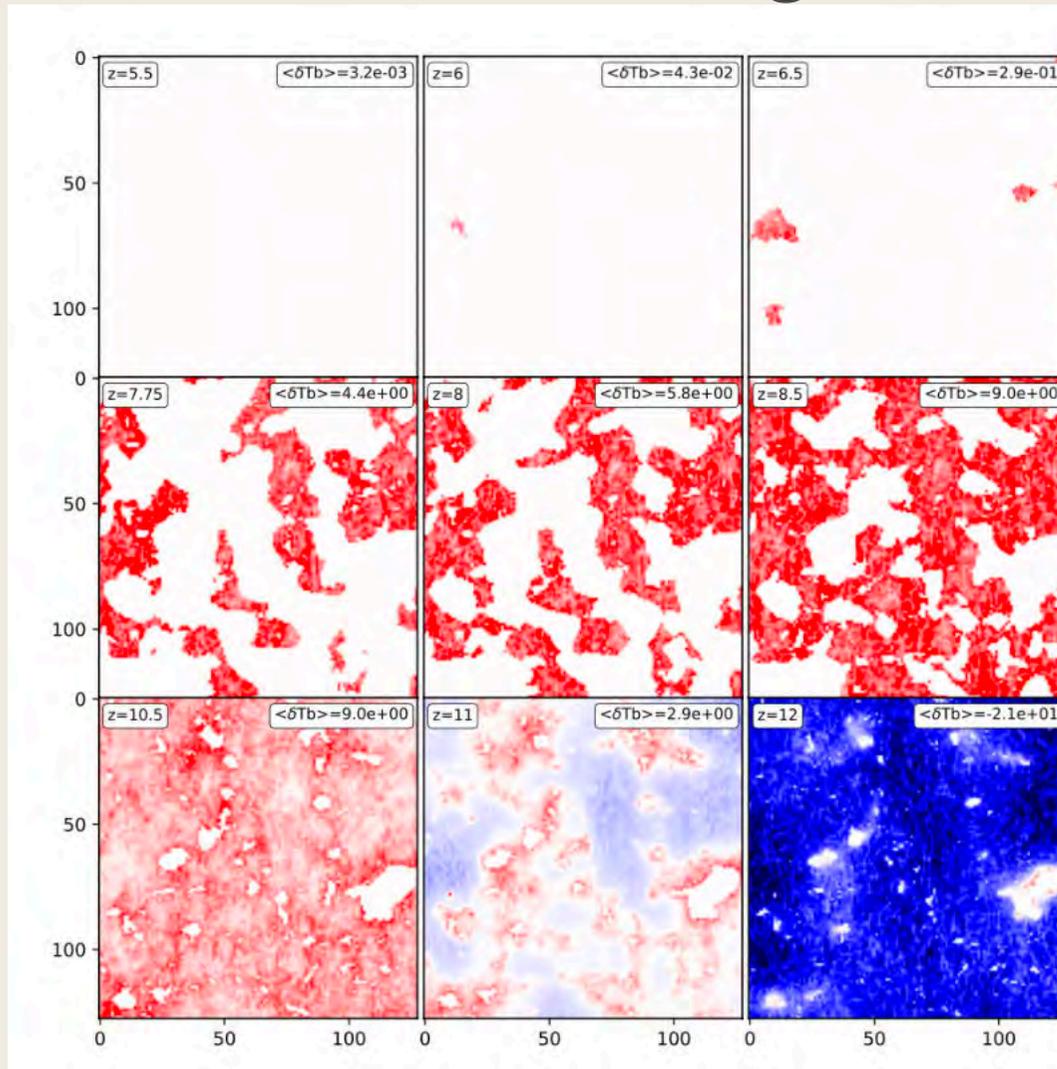
L'hydrogène cosmique du MIG produit un signal radio à 21cm/1420 MHz, qui sera détecté par SKA-Low dans la bande 50-250 MHz

Ce signal est modulé par :

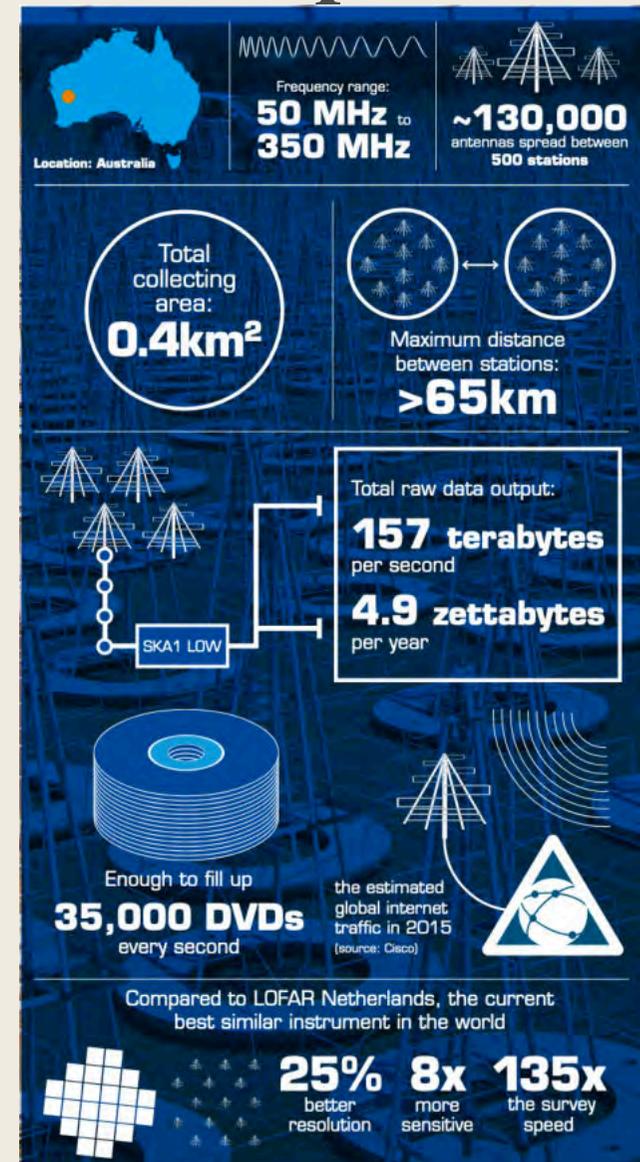
- l'état d'ionisation du gaz
- la densité, vitesse et température locale du gaz
- la cosmologie
- ... et l'évolution temporelle de toutes ces quantités

$$\delta T_b(\nu) \approx 27 \chi_{\text{HI}} (1 + \delta_{\text{nl}}) \left(\frac{H}{dv_r/dr + H} \right) \left(1 - \frac{T_\gamma}{T_S} \right) \left(\frac{1+z}{10} \frac{0.15}{\Omega_M h^2} \right)^{1/2} \left(\frac{\Omega_b h^2}{0.023} \right) \text{ mK}$$

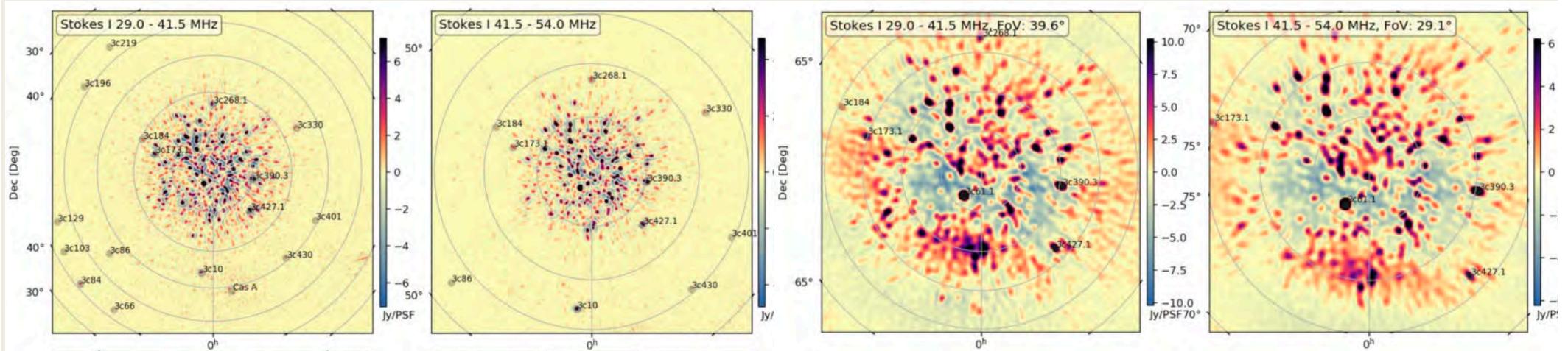
Histoire du signal à 21cm 'anisotrope'



Un des grands objectifs de l'instrument SKA est d'obtenir des cartes de signal radio.



Le 21cm de l'Univers Jeune : un défi pour l'observation et le traitement massif de données



Mertens 2020

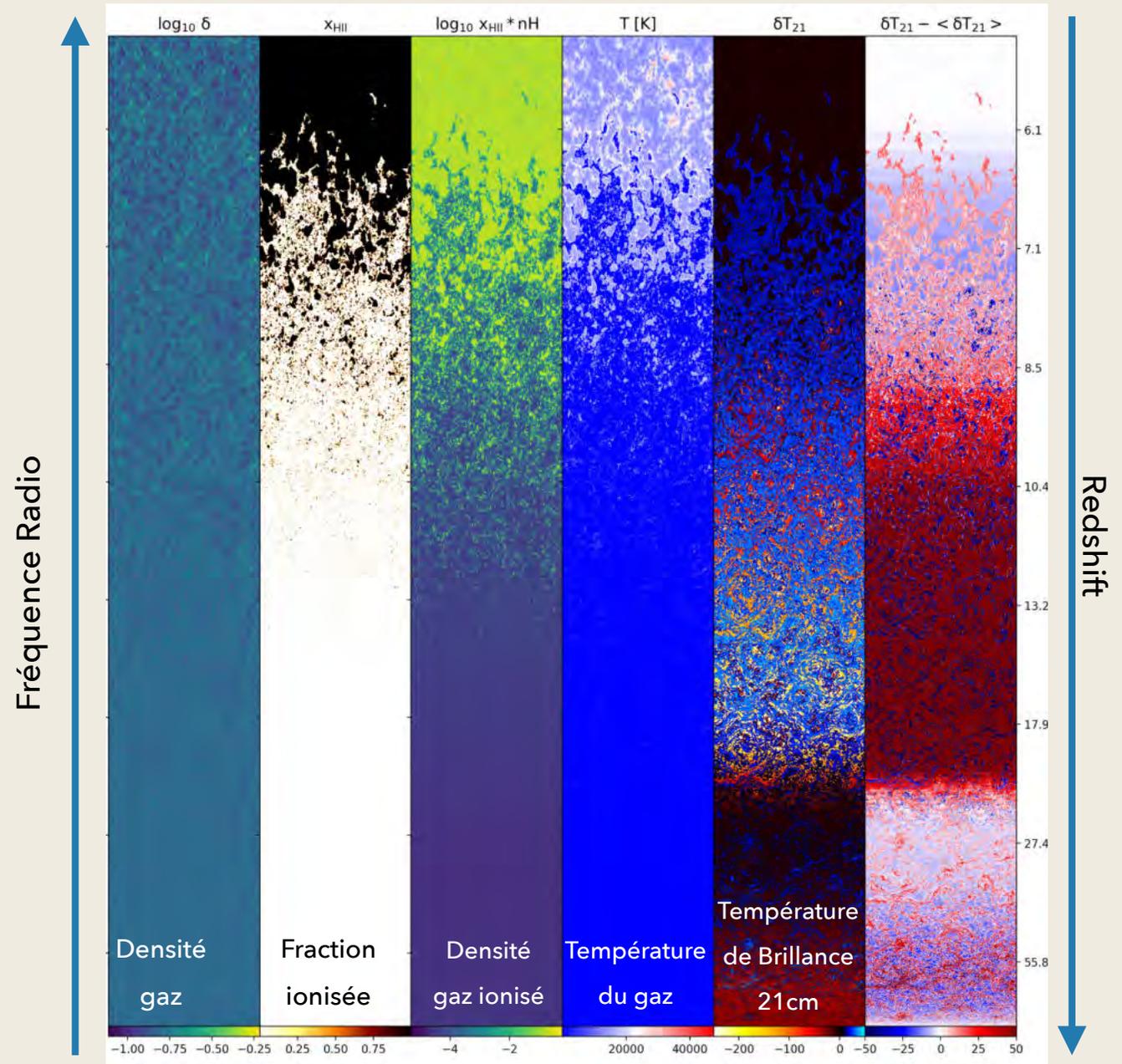


- Calibration/Effets instrumentaux
- Grand volumes de données
- Avant plans (~1000 x le signal)

Chronologie de l'Univers Jeune avec SKA-Low

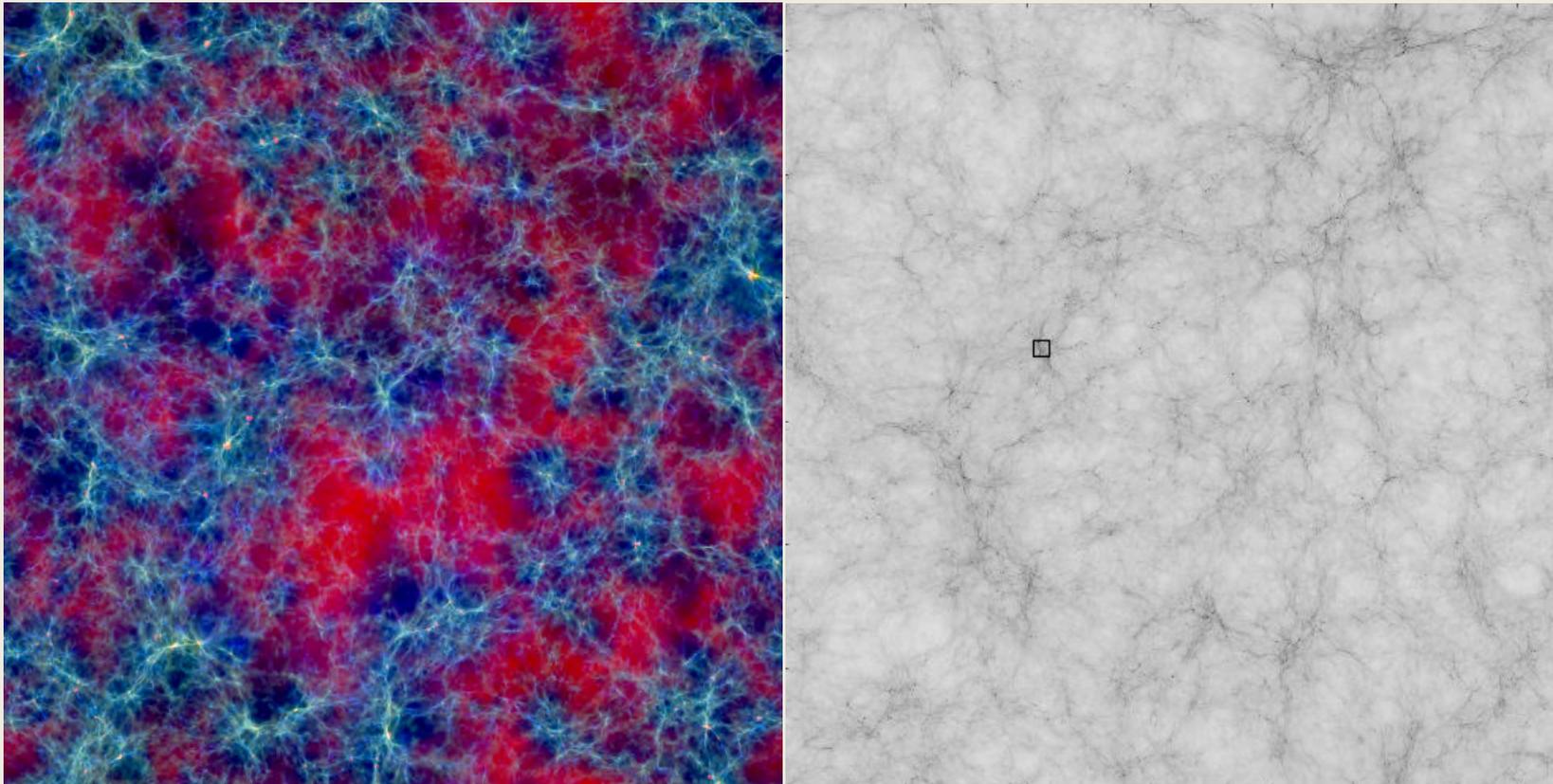
Un balayage en fréquence (et donc en redshift) va fournir l'évolution temporelle du signal radio, donnant accès au scénario de la percolation des régions ionisées et de la physique sous jacente.

Un effort important est consacré par la communauté pour se préparer à cette science, via l'utilisation de modèles et simulations numériques



Simulations & Modèles de l'Univers Jeune, « aujourd'hui »

Simulations cosmologiques de l'époque de réionisation et de l'aube cosmique



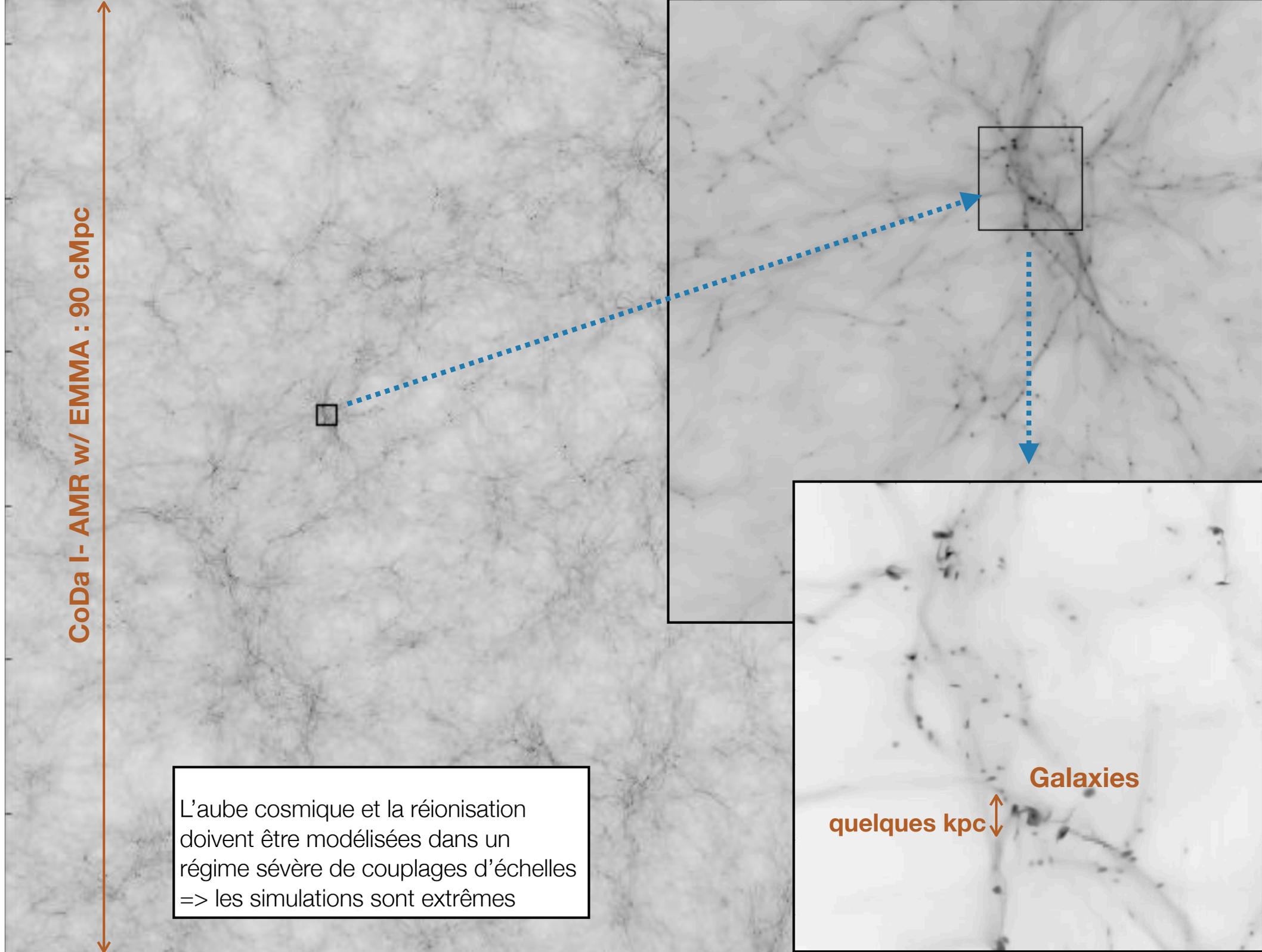
Nous disposons aujourd'hui de 40 ans d'expérience en simulations cosmologiques.

Ces codes sont capables de modéliser l'évolution de la matière et des ses propriétés sous l'effet de la gravitation, de l'hydrodynamique, de la MHD, tout en y incluant des modèles de formation et d'évolution stellaire, de noyaux actifs de galaxies, de chimie, etc. : **que faut-il de plus pour la réionisation ?**

CoDa I- AMR w/ EMMA : 90 cMpc

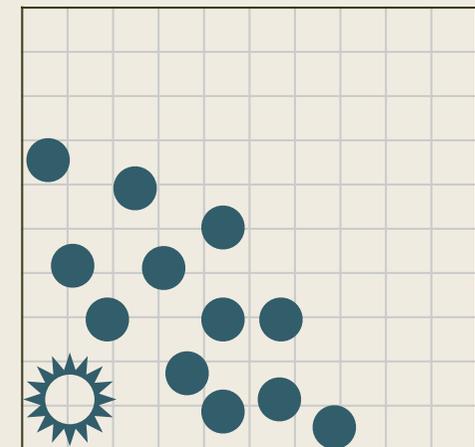
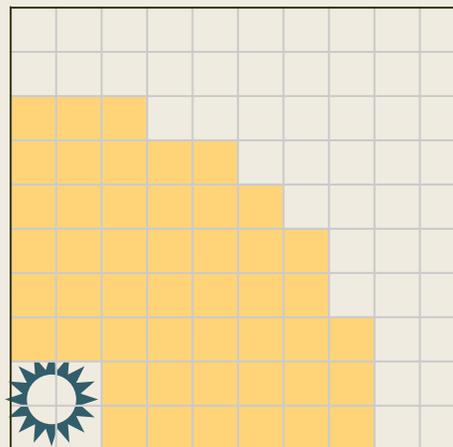
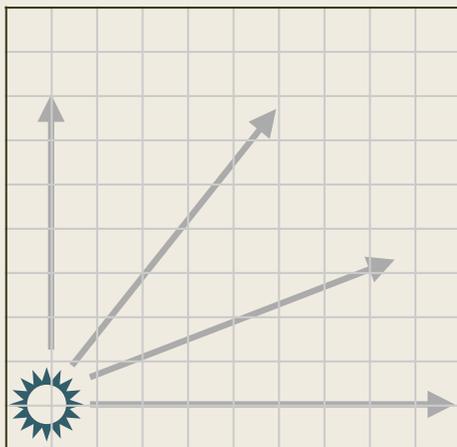
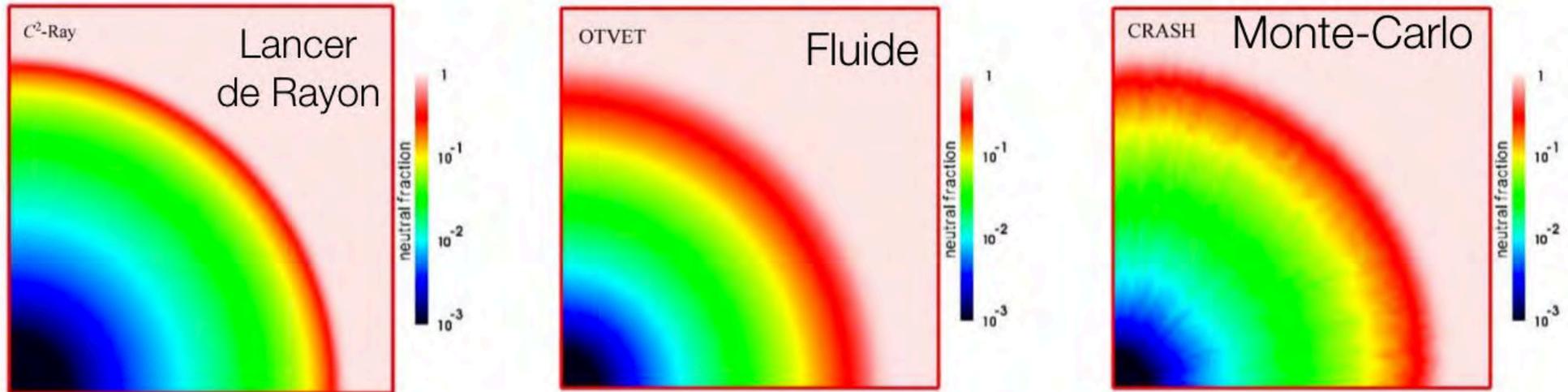
L'aube cosmique et la réionisation
doivent être modélisées dans un
régime sévère de couplages d'échelles
=> les simulations sont extrêmes

Galaxies
quelques kpc



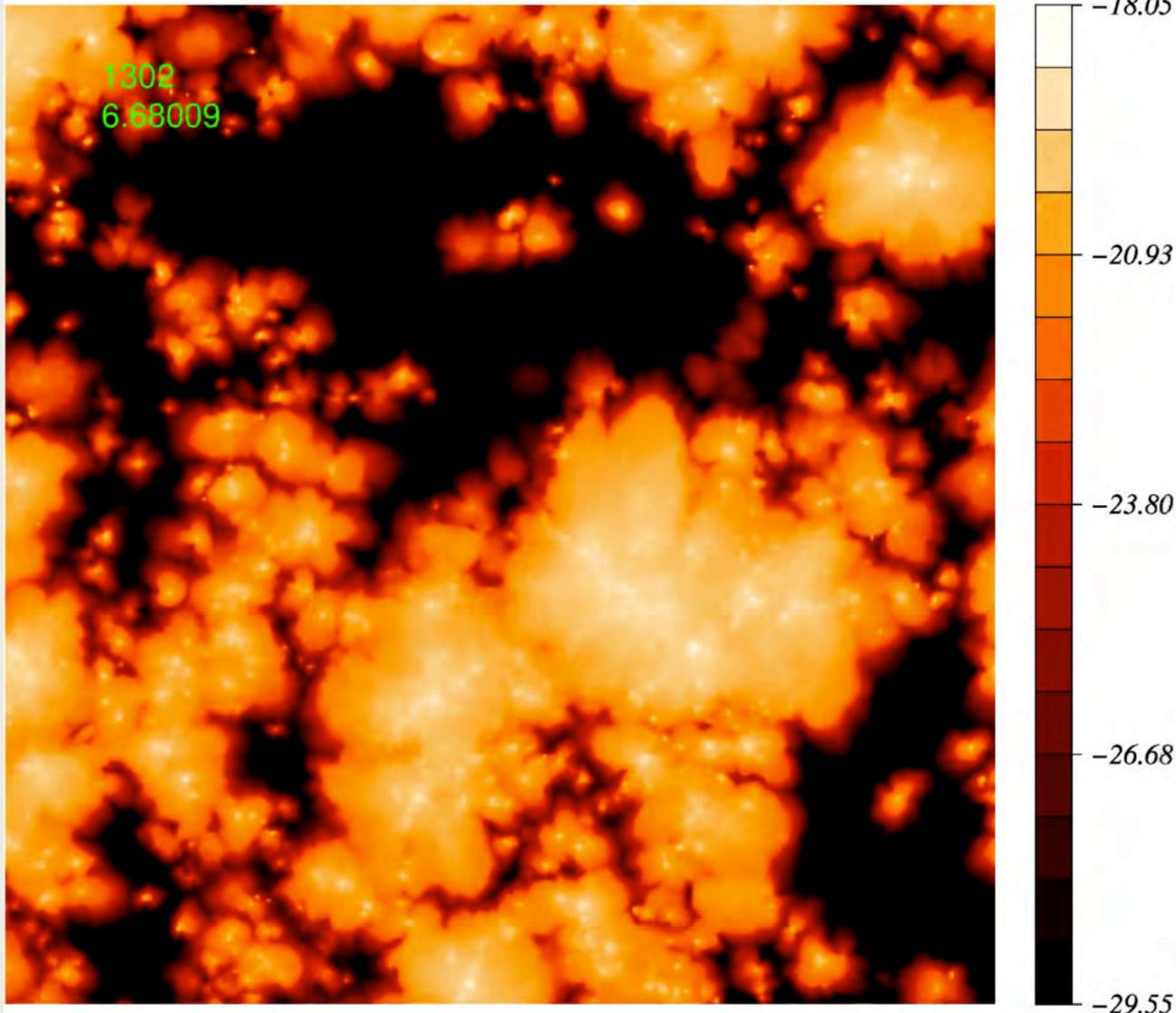
Propagation du Rayonnement

Iliev+ 2006



Les simulations de l'aube cosmique et la réionisation doivent inclure un nouvel ingrédient actif : la lumière. Elle se propage et interagit avec la matière (chauffage/ionisation) : on parle de **transfert radiatif**.

Transfert Radiatif au Moments



Une approche possible consiste à modéliser le rayonnement **comme un fluide**, qui « coule » depuis les sources de rayonnement et pouvant être absorbé par la matière.

Ce fluide particulier présente une **pression anisotrope** et qui dépend **du contenu local** en matière absorbante.

Cette méthode est **facile** à mettre en place, notamment en mettant à profit les méthodologies existantes pour la mécanique des fluides classiques.

Mais elle coûte cher...

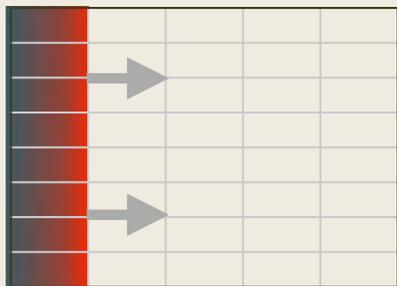
Contraintes numériques

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

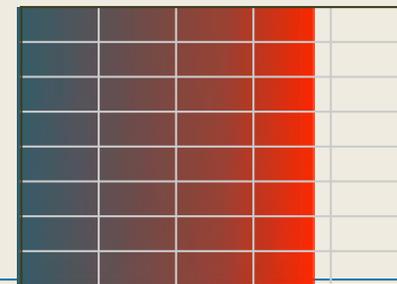
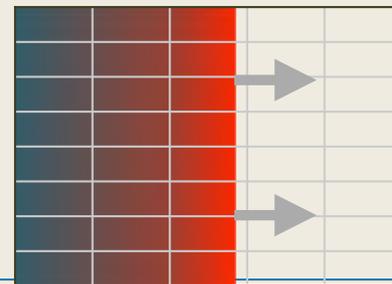
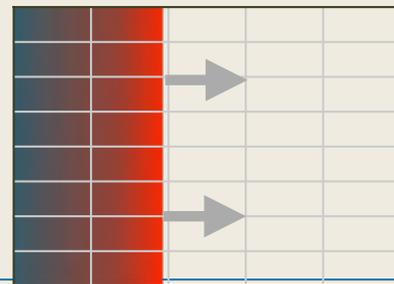
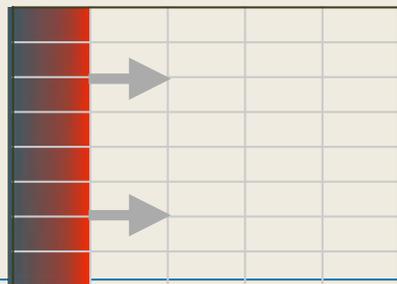
Un front radiatif peut se déplacer jusqu'à **plusieurs centaines de fois** plus rapidement qu'un choc gazeux
-> une simulation avec physique du rayonnement peut coûter jusqu'à 100 x plus cher en temps de calcul

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

Condition de Courant



Instable



Stable

Cartes Graphiques (GPUs)



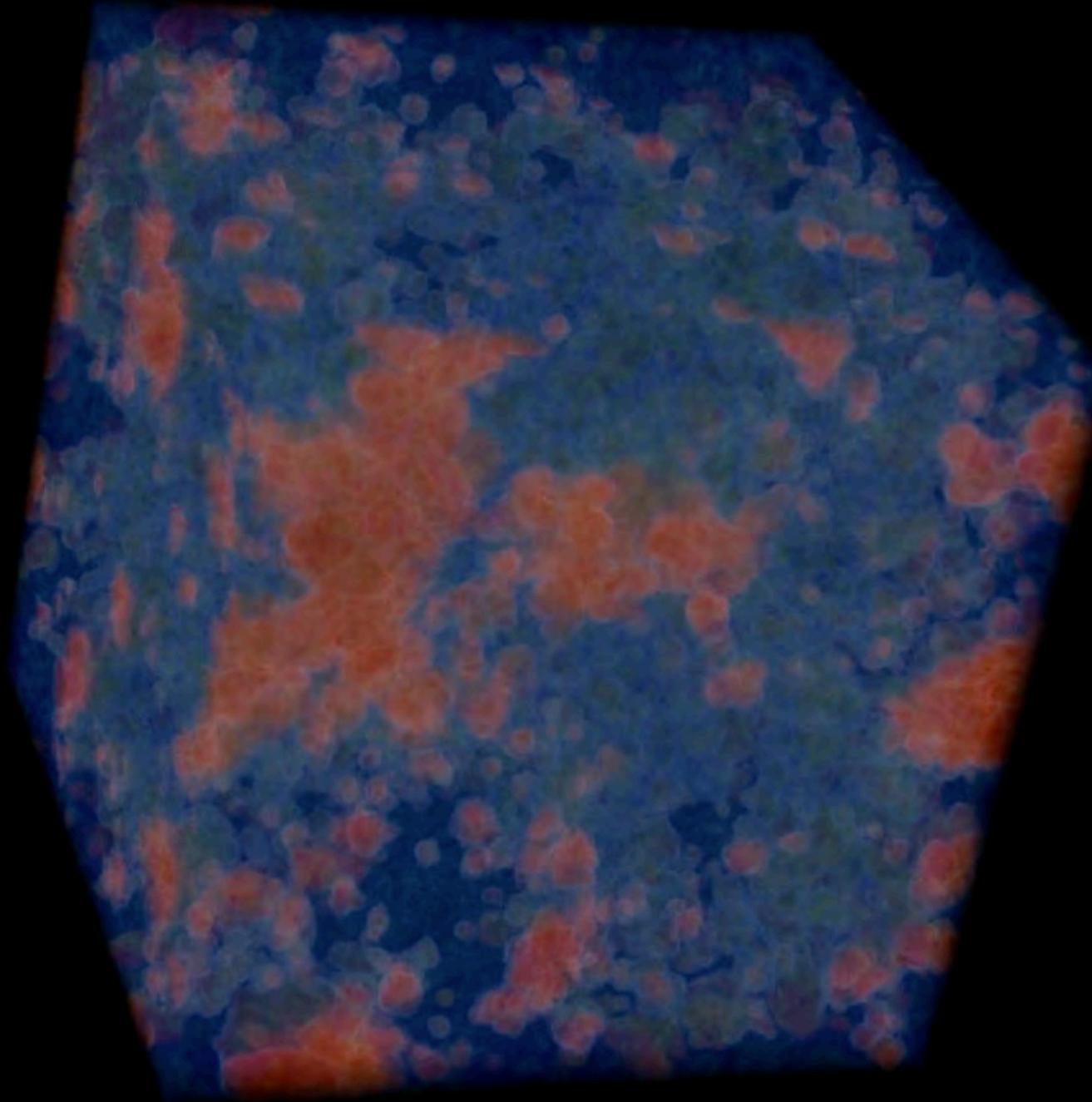
Les cartes graphiques sont des appareils 'grand public' dont les utilisations les plus connues sont :

- le jeu vidéo
- l'apprentissage pour les nouvelles méthodes d'intelligence artificielle à base de réseaux profonds
- le minage de crypto-monnaies ...

Ces applications ont notamment en commun une forte **intensité arithmétique** (au prix d'une perte de versatilité)... comme beaucoup de calculs scientifiques.



Bleu = Froid/Neutre Rouge = Chaud/Ionisé 128 cMpc/h / 1024³



Accélération d'un facteur
x40 du transfert radiatif

dans CUDATON (Aubert &
Teyssier 10, TR seulement)

&

EMMA (code
multiphysique avec GPUs
dans Gravité, Hydro & TR,
Aubert+ 15)

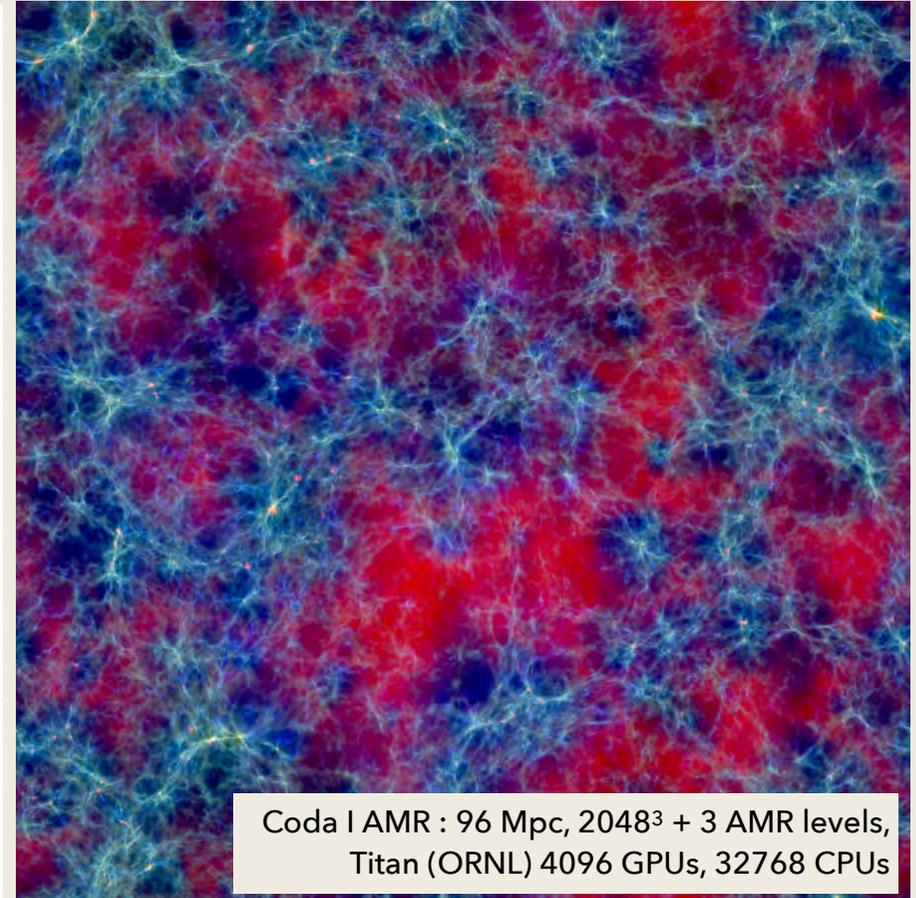
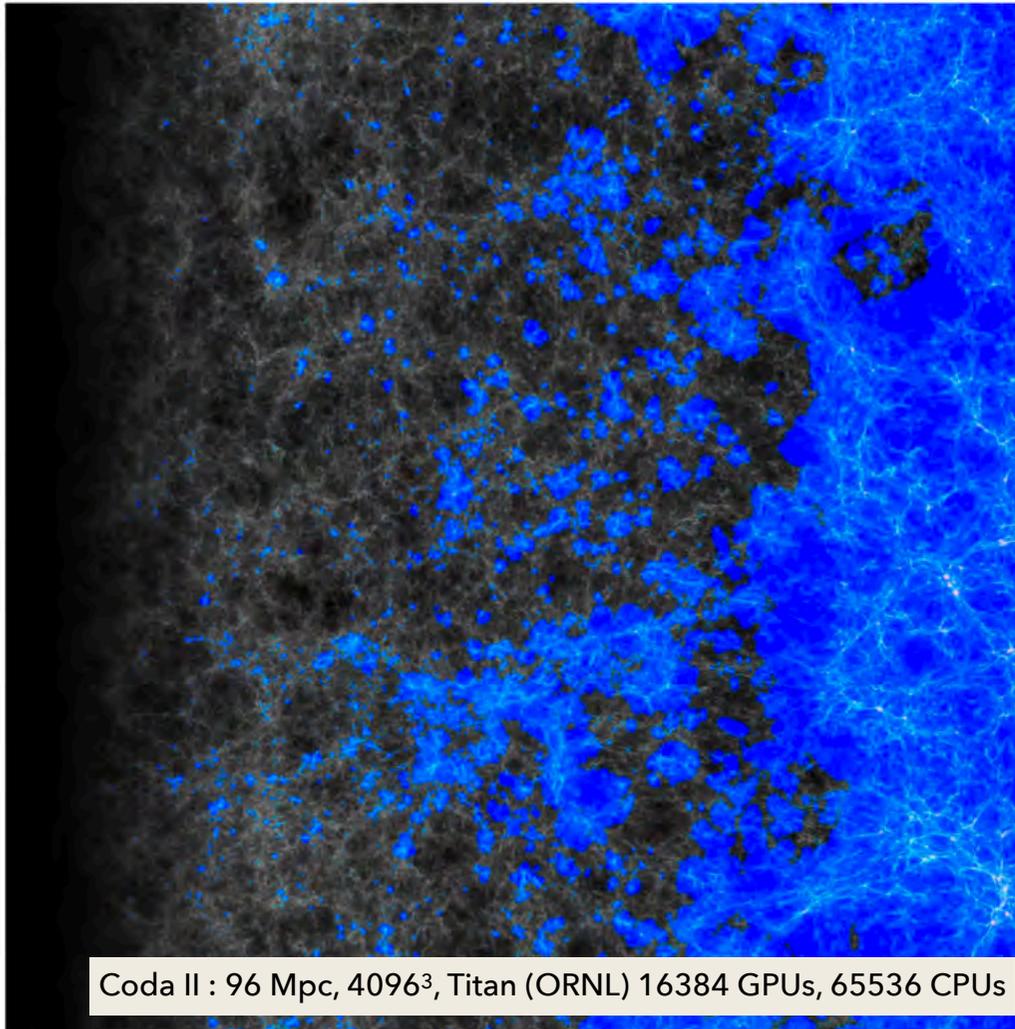
Titane (CCRT/CEA), 256 GPUs

Aubert & Teyssier 2010
Visu : D. Pommarède

Rank	System	Cores	Rmax (PFlop/s)	Rpeak (PFlop/s)	Power (kW)
1	Frontier - HPE Cray EX235a, AMD Optimized 3rd Generation EPYC 64C 2GHz, AMD Instinct MI250X, Slingshot-11, HPE DOE/SC/Dak Ridge National Laboratory United States	8,730,112	1,102.00	1,685.65	21,100
2	Supercomputer Fugaku - Supercomputer Fugaku, A64FX 48C 2.2GHz, Tofu interconnect II, Fujitsu RIKEN Center for Computational Science Japan	7,630,848	442.01	537.21	29,899
3	LUMI - HPE Cray EX235a, AMD Optimized 3rd Generation EPYC 64C 2GHz, AMD Instinct MI250X, Slingshot-11, HPE EuroHPC/CSC Finland	2,220,288	309.10	428.70	6,016
4	Leonardo - BullSequana XH2000, Xeon Platinum 8358 32C 2.6GHz, NVIDIA A100 SXM4 64 GB, Quad-rail NVIDIA HDR100 Infiniband, Atos EuroHPC/CINECA Italy	1,463,616	174.70	255.75	5,610
5	Summit - IBM Power System AC922, IBM POWER9 22C 3.07GHz, NVIDIA Volta GV100, Dual-rail Mellanox EDR Infiniband, IBM DOE/SC/Oak Ridge National Laboratory United States	2,414,592	148.60	200.79	10,096
6	Sierra - IBM Power System AC922, IBM POWER9 22C 3.1GHz, NVIDIA Volta GV100, Dual-rail Mellanox EDR Infiniband, IBM / NVIDIA / Mellanox DOE/NNSA/LLNL United States	1,572,480	94.64	125.71	7,438
7	Sunway TaihuLight - Sunway MPP, Sunway SW26010 260C 1.45GHz, Sunway, NRCPC National Supercomputing Center in Wuxi China	10,649,600	93.01	125.44	15,371
8	Perlmutter - HPE Cray EX235n, AMD EPYC 7763 64C 2.45GHz, NVIDIA A100 SXM4 40 GB, Slingshot-10, HPE DOE/SC/LBNL/NERSC United States	761,856	70.87	93.75	2,589
9	Selene - NVIDIA DGX A100, AMD EPYC 7742 64C 2.25GHz, NVIDIA A100, Mellanox HDR Infiniband, Nvidia NVIDIA Corporation United States	555,520	63.46	79.22	2,646
10	Tianhe-2A - TH-IVB-FEP Cluster, Intel Xeon E5-2692v2 12C 2.2GHz, TH Express-2, Matrix-2000, NUDT National Super Computer Center in Guangzhou China	4,981,760	61.44	100.68	18,482



Simulations Grandes échelles de la réionisation sur GPUs



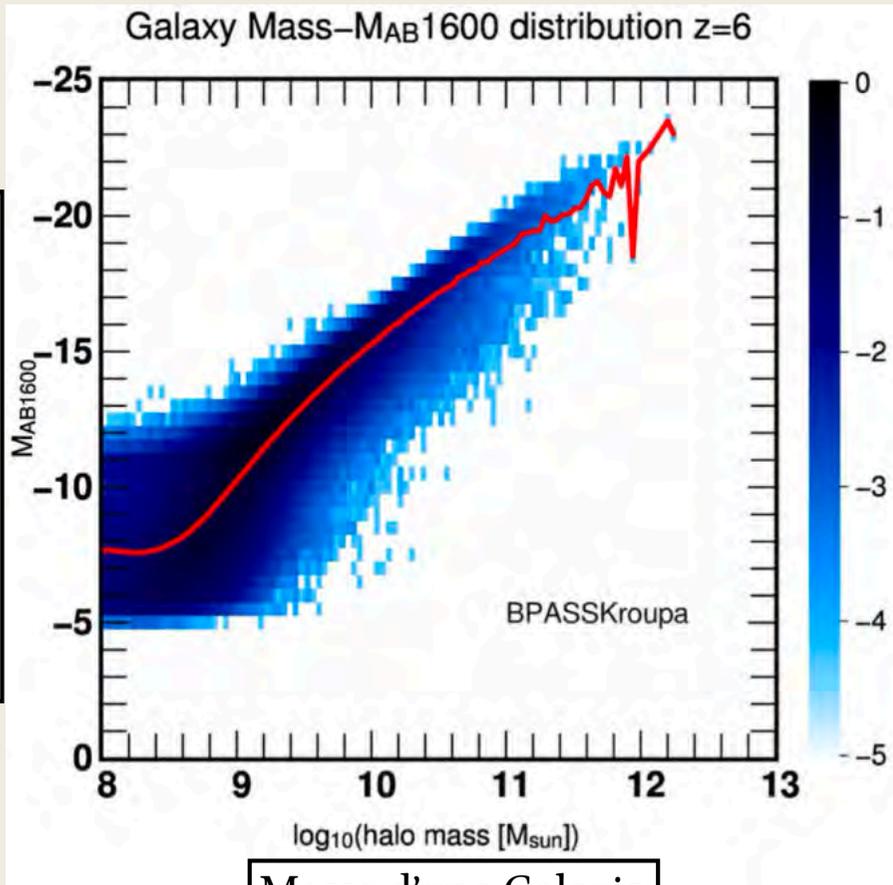
Simulations CODA (PI. Pierre Ocvirk, ObAS) avec RAMSES+CUDATON et EMMA. Résultats sur la suppression de la formation d'étoiles dans les premières galaxies, le budget de photon, l'histoire de réionisation des galaxies actuelles, etc.

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.

<https://coda-simulation.github.io/>

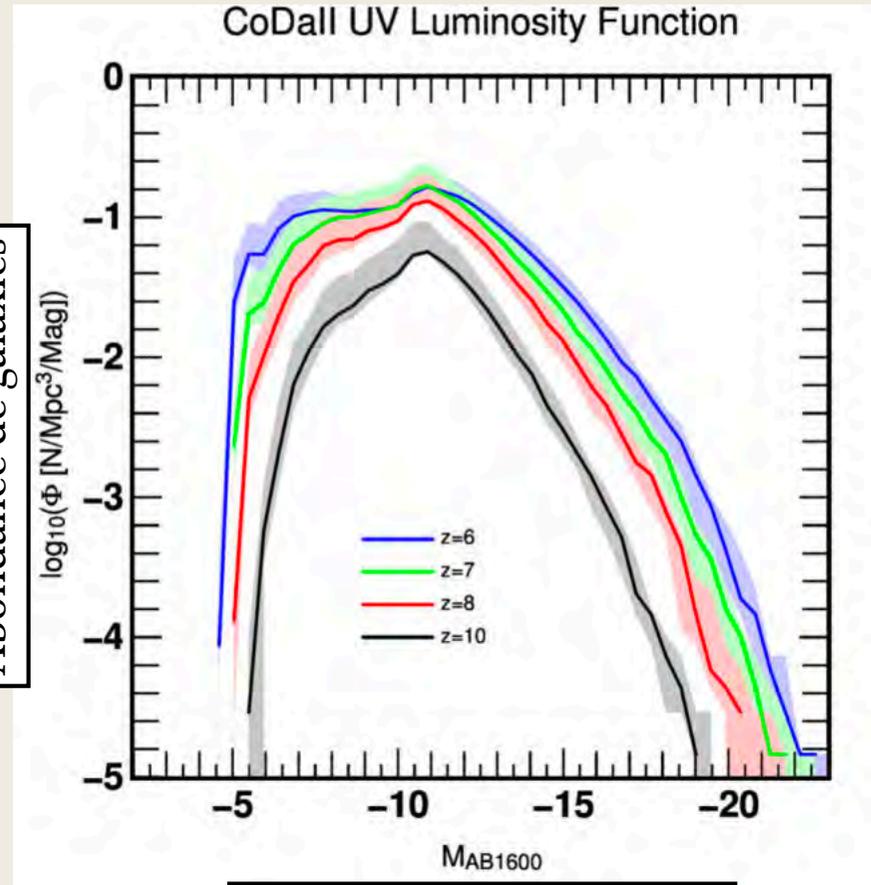
Populations de Galaxies dans l'Univers Jeune

Luminosité d'une Galaxie



Masse d'une Galaxie

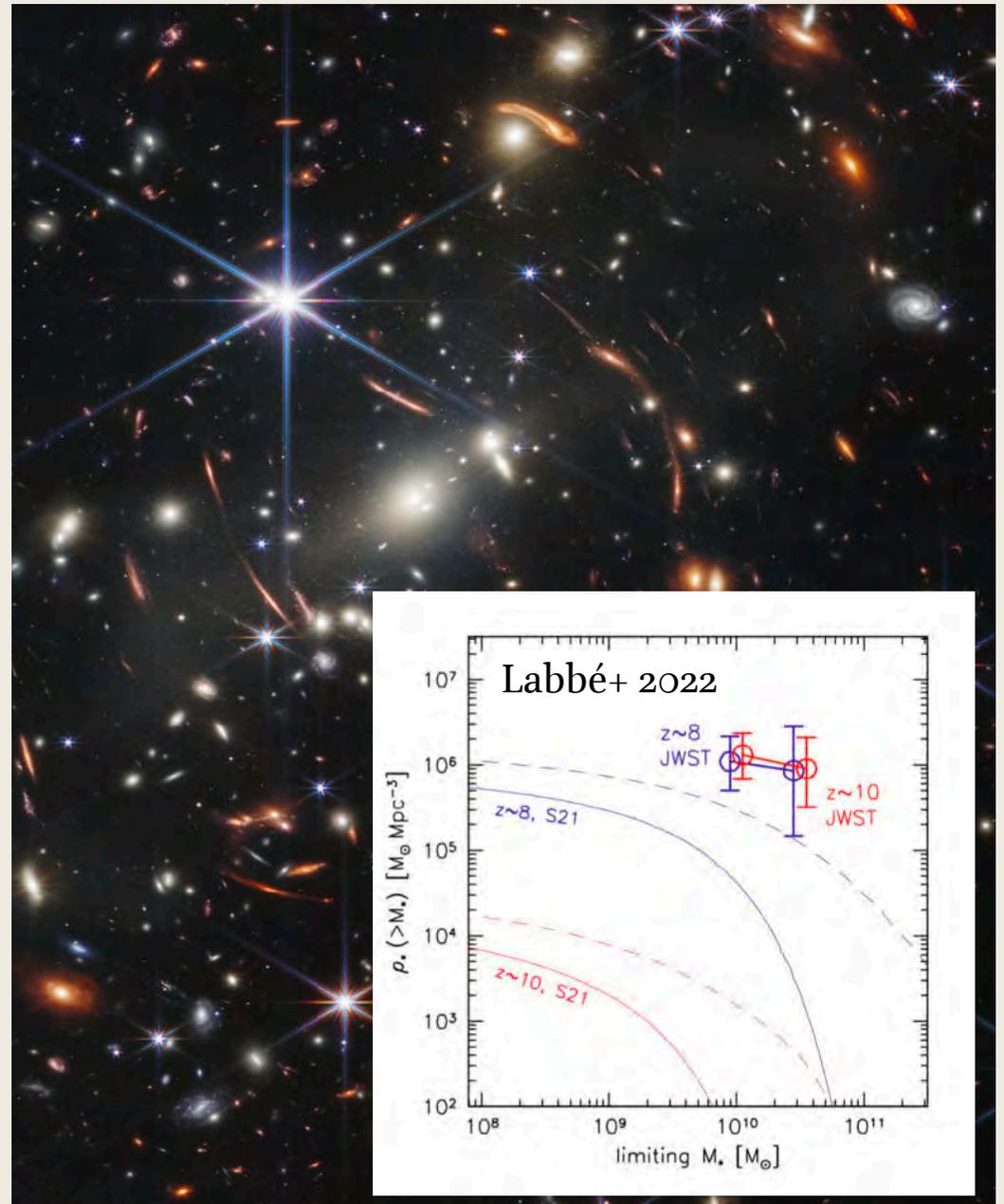
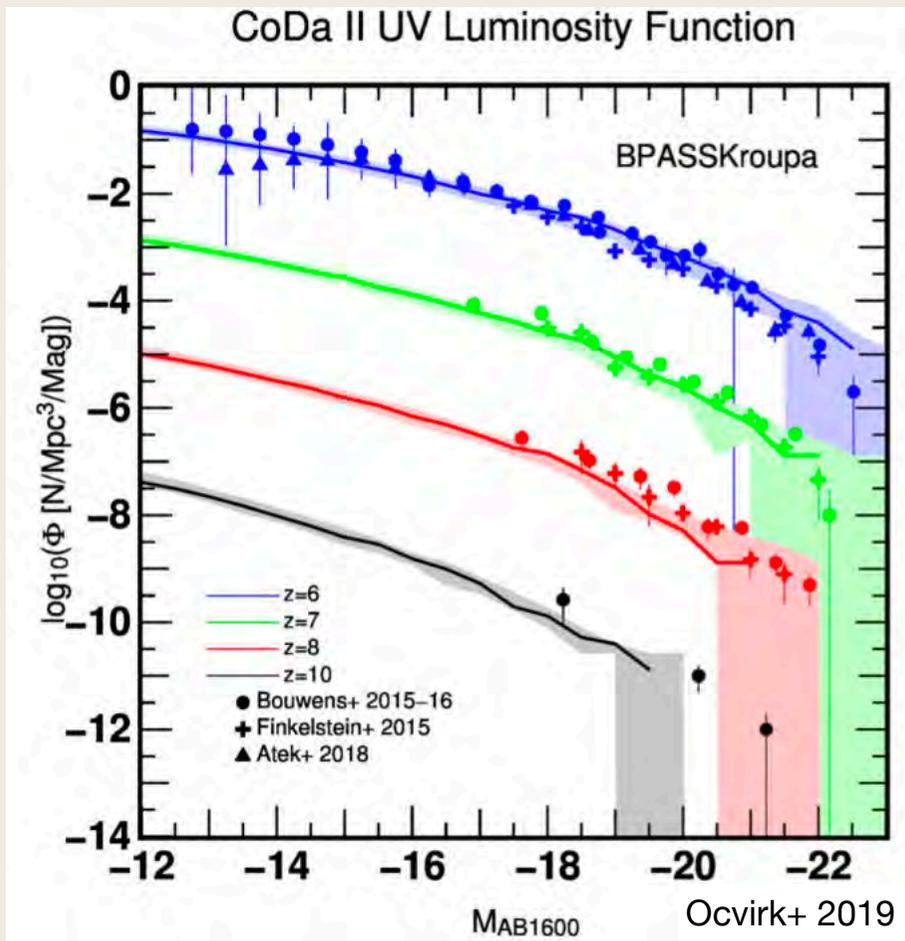
Abondance de galaxies



Luminosité d'une Galaxie

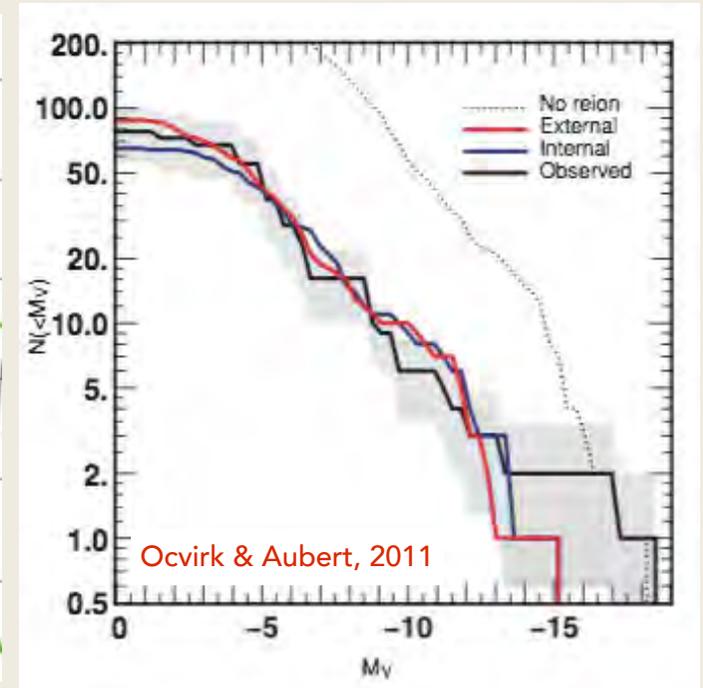
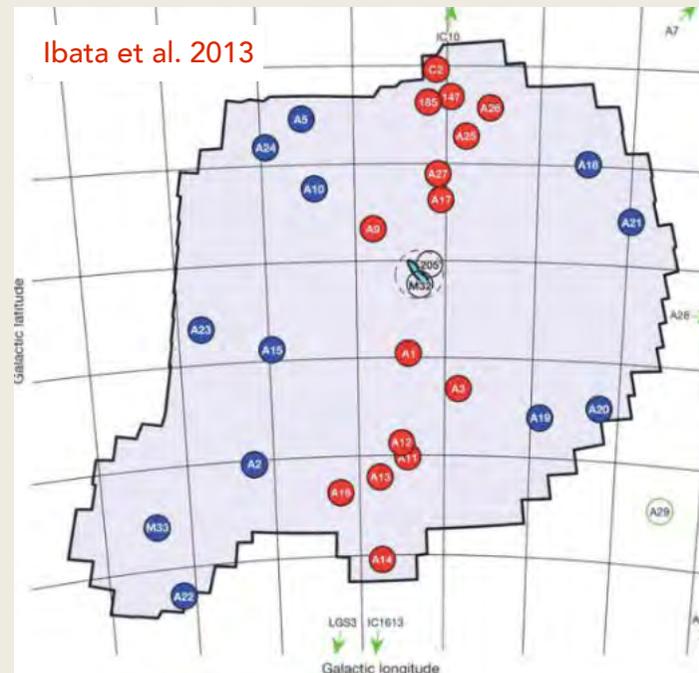
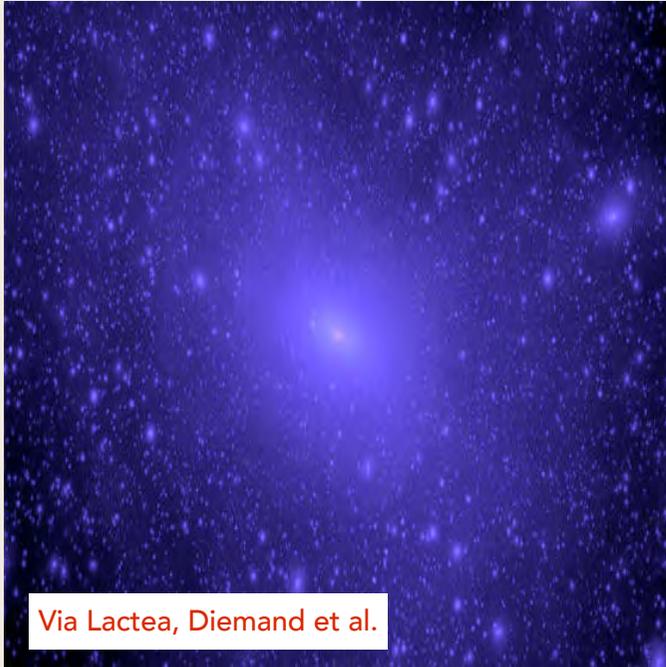
Ces simulations permettent par exemple de faire le census prédit des galaxies devant être observées par un instrument comme JWST. Elles permettent aussi d'anticiper comment les galaxies les moins massives vont être influencées par la réionisation.

Populations de Galaxies dans l'Univers Jeune



Les premiers résultats JWST ont été surprenants, avec des annonces de galaxies très brillantes des premiers instants, objets absents de nos modèles...

Impact sur les galaxies satellites du Groupe Local

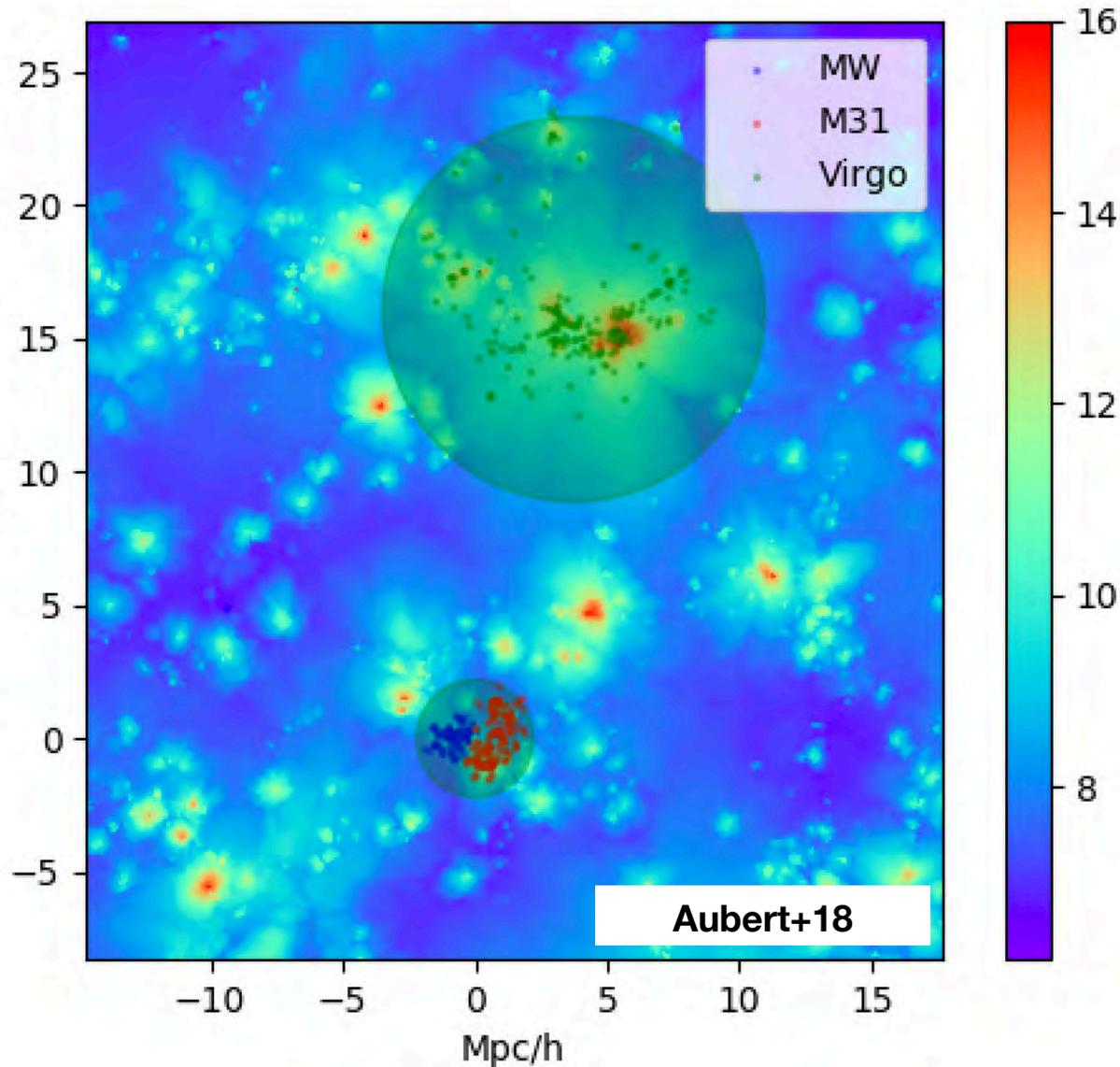


Modèles prédisent des centaines de satellites de DM

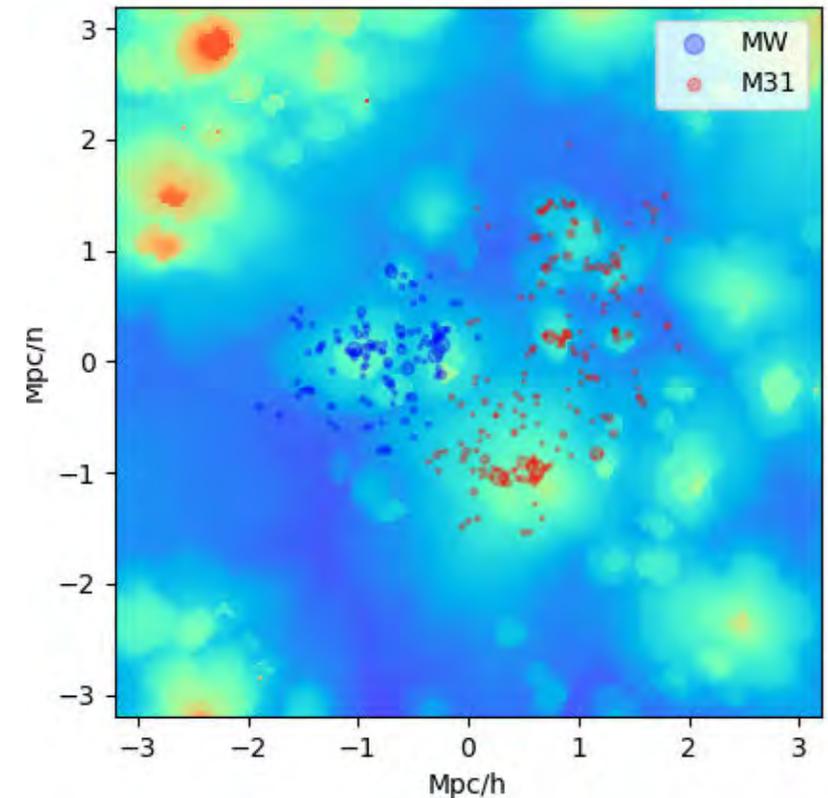
Les Observations montrent 10 fois moins d'objets

Les galaxies satellites sont des reliques de cet Univers jeune et font partie des « premières structures »
Le fond UV de la réionisation locale couperait la formation d'étoiles et offre une voie de résolution au problème des sous-structures.

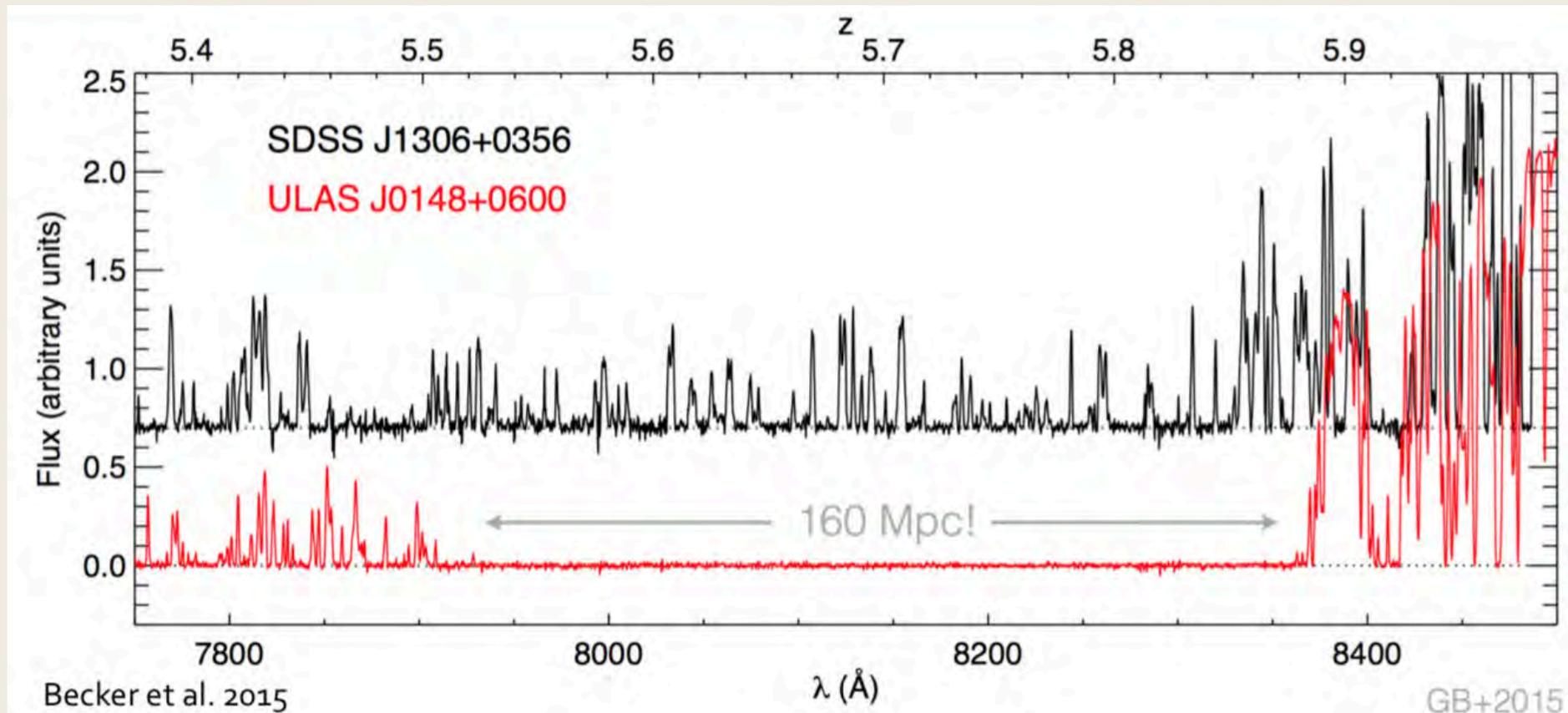
Les instants de réionisation de la Voie Lactée et la Galaxie D'Andromède



Nos simulations contiennent des analogues aux galaxies et amas locaux. Il semblerait que la Voie Lactée et Andromède ne se soient pas influencées l'une l'autre durant la réionisation.

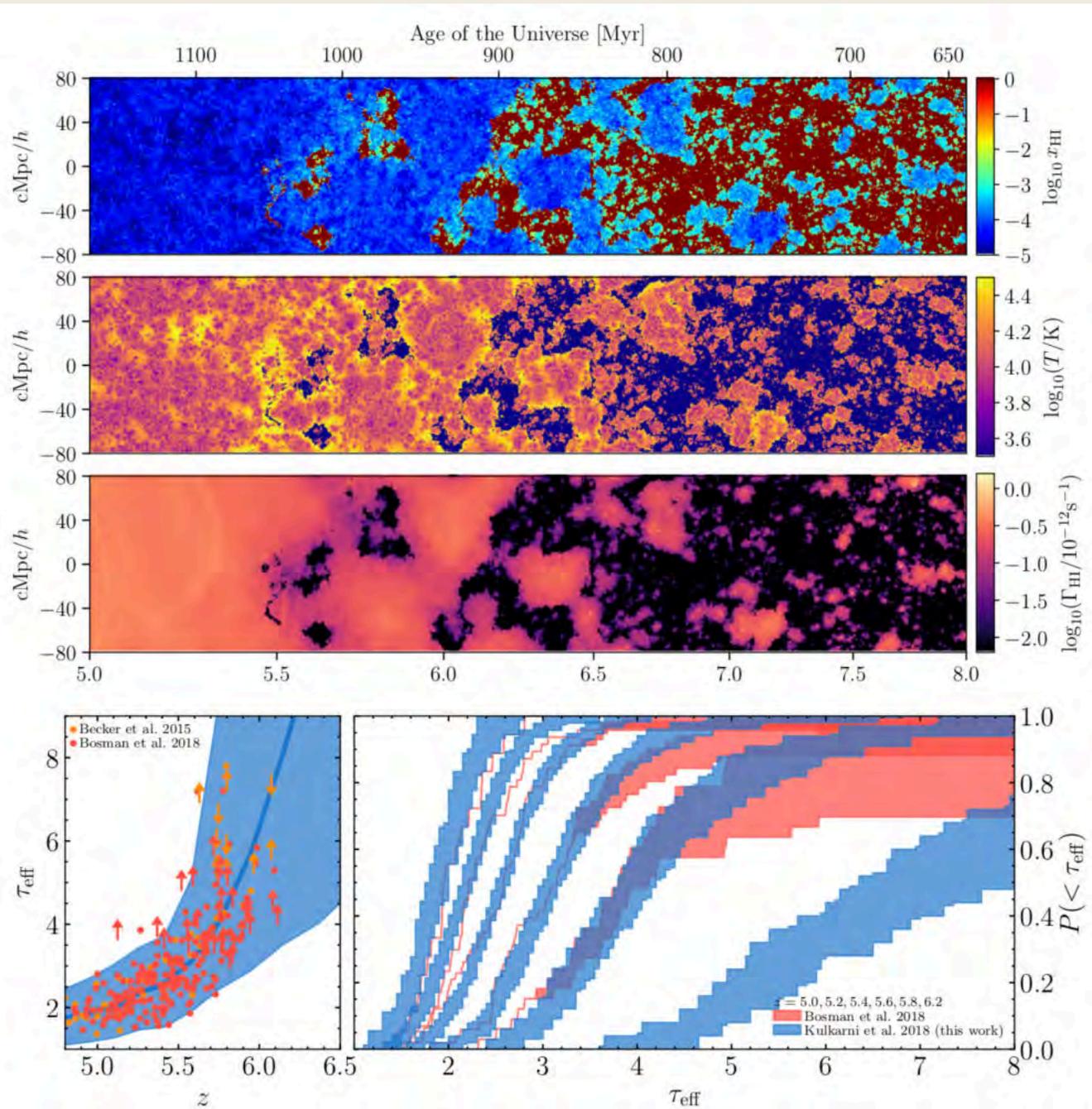


Un milieu intergalactique pas si réionisé que ça....



Post réionisation (ici $z \sim 5.5$) on a encore de vastes régions qui possèdent de l'hydrogène neutre. Dans les modèles/simulations cela pourrait s'expliquer par une réionisation plus longue que les modèles 'classique' : fin aux alentours de $z \sim 5$ [~ 1.2 Gyrs] (au lieu de plutôt 6 [~ 0.95 Gyrs]).

Une réionisation tardive ?

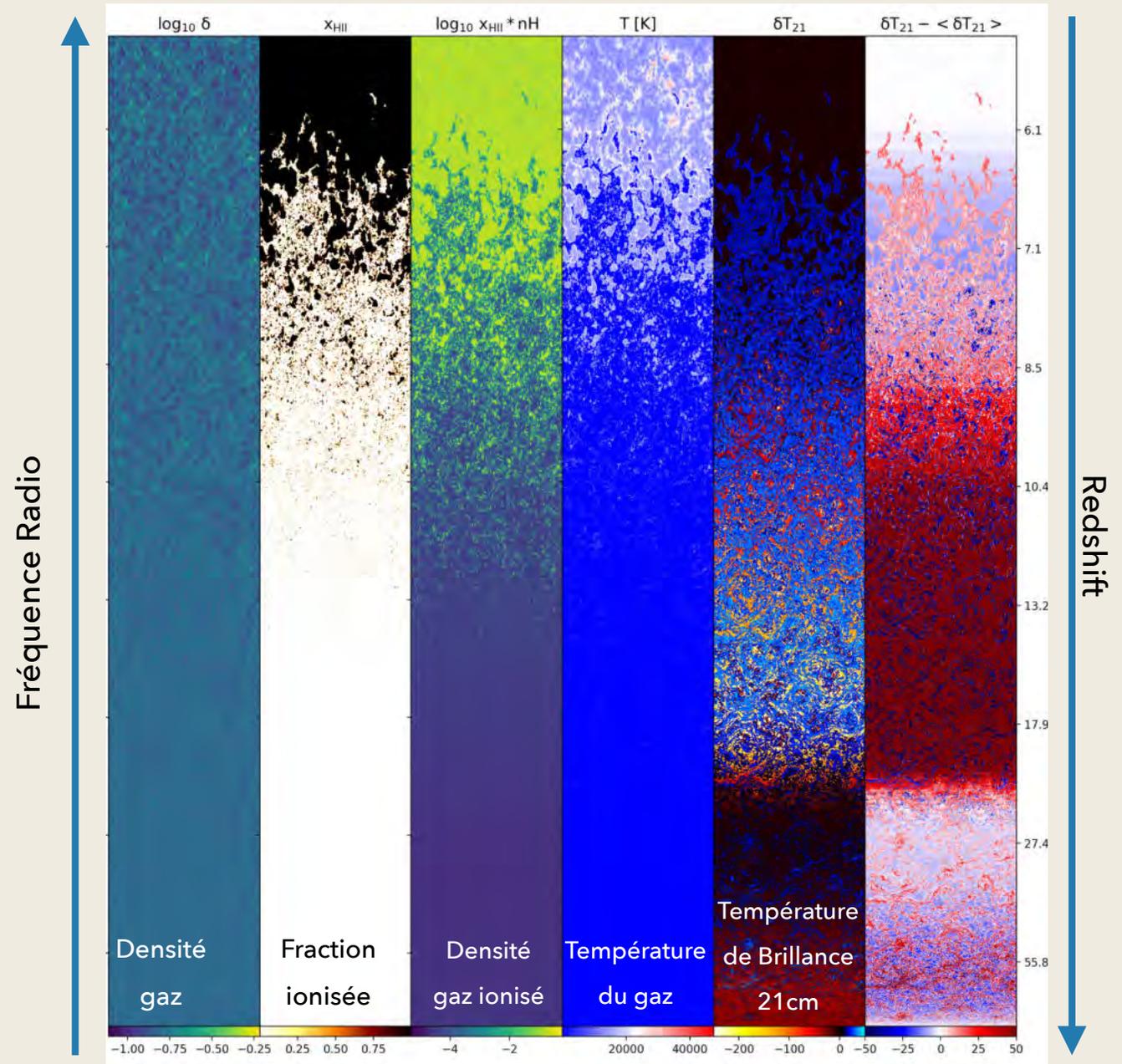


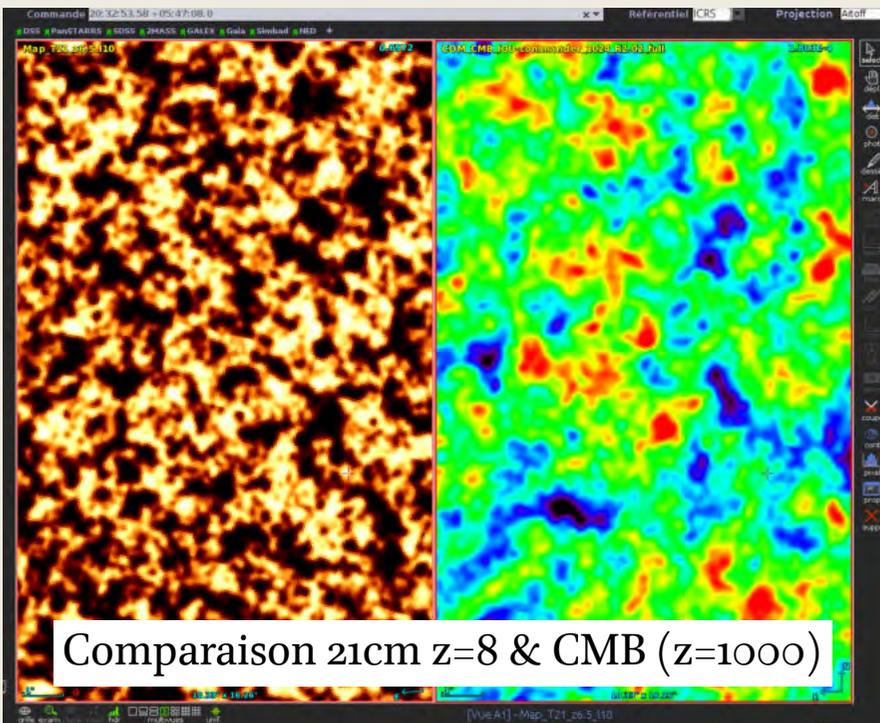
Le meilleur ajustement des données de la forêt Lyman-Alpha est obtenu avec un scénario de fin de réionisation tardive ($z \sim 5.5$)

Cette conclusion a été obtenue par comparaison avec un grand nombre de simulations, rendu possible grâce à l'accélération GPU

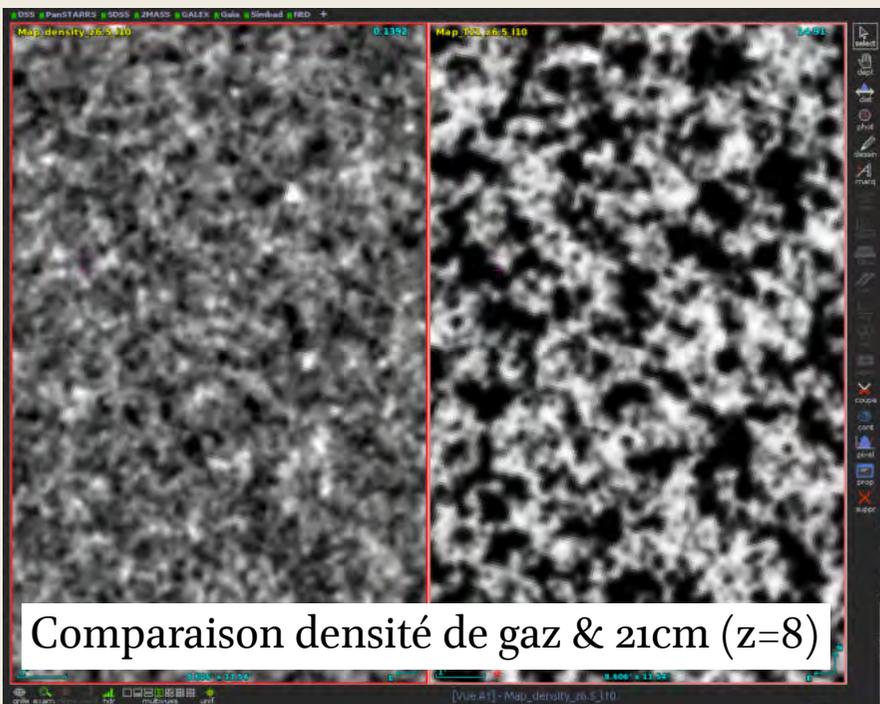
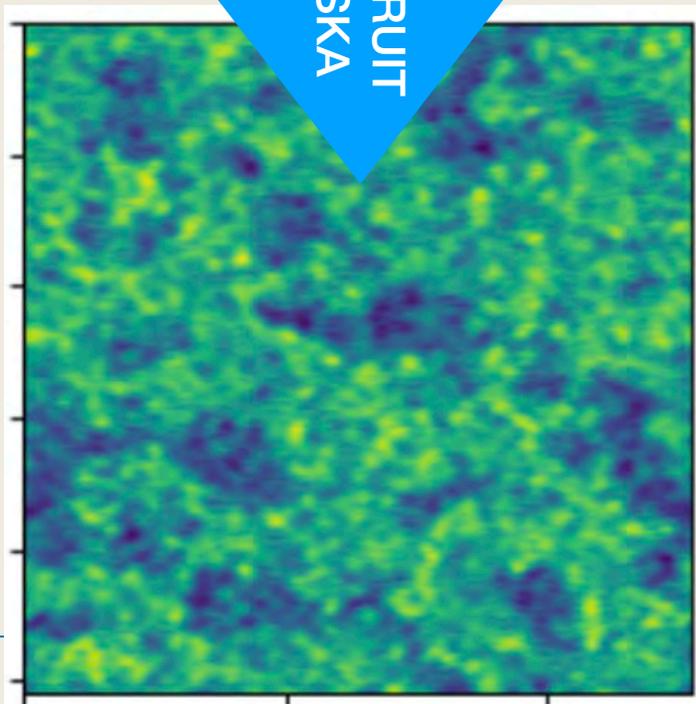
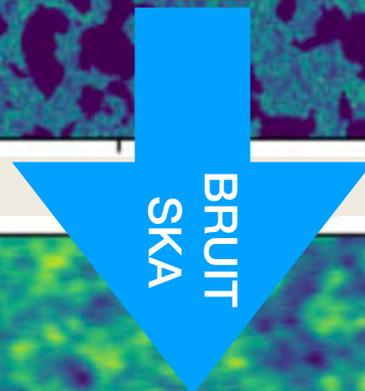
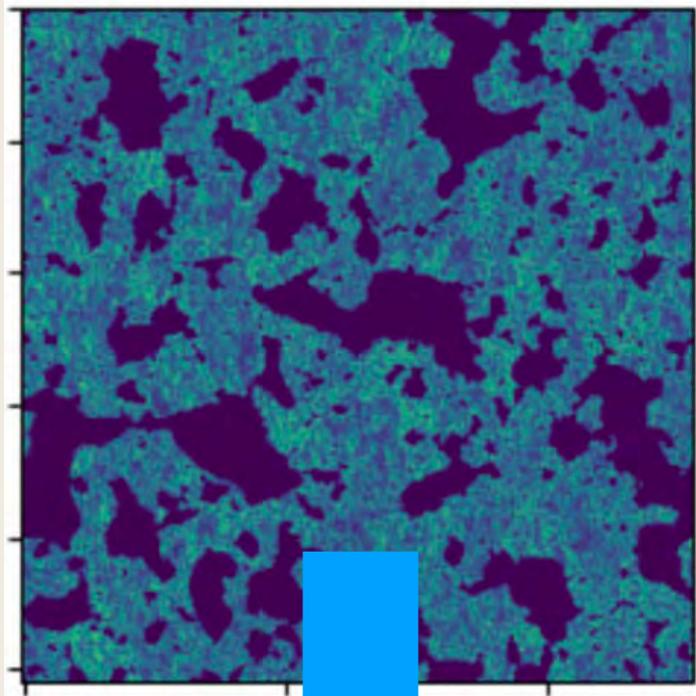
Un rôle utilitaire : prédiction du signal 21cm

Les simulations permettent également la prédiction de signal radio 21cm pour SKA et ses précurseurs, l'objectif étant d'interpréter cette chronologie du signal comme une chronologie des quantités physiques sous jacentes.



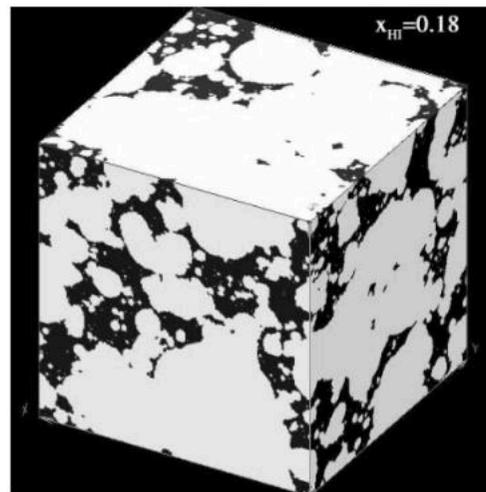
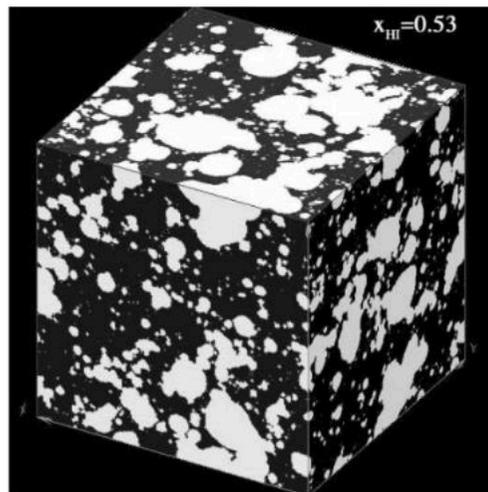
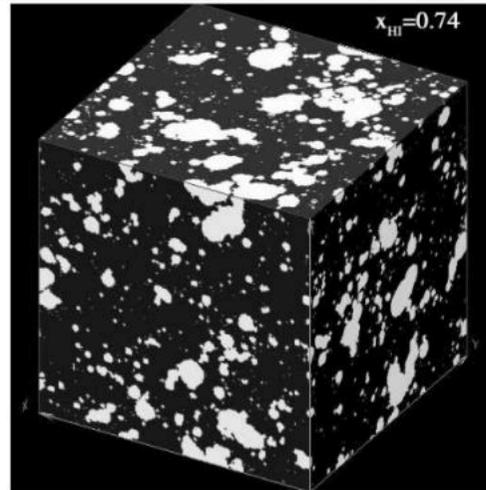
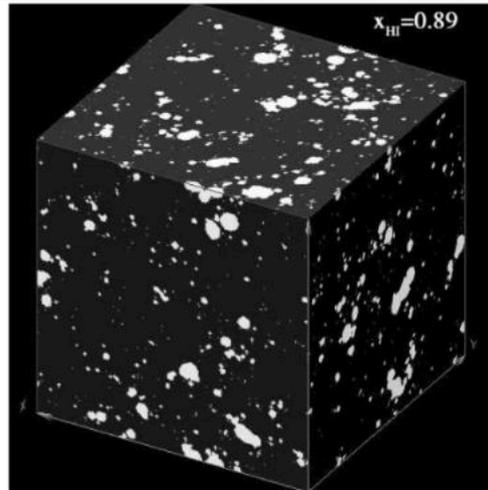


Comparaison 21cm $z=8$ & CMB ($z=1000$)



Comparaison densité de gaz & 21cm ($z=8$)

Modèles semi-analytiques

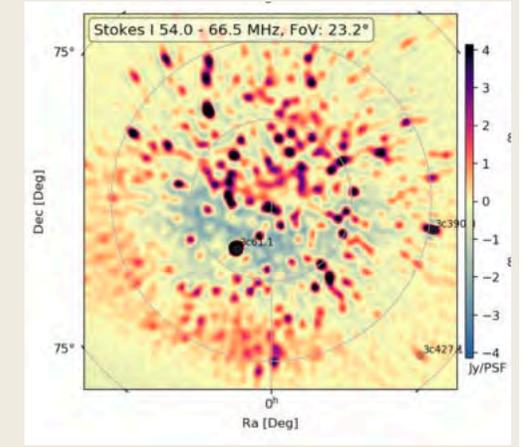
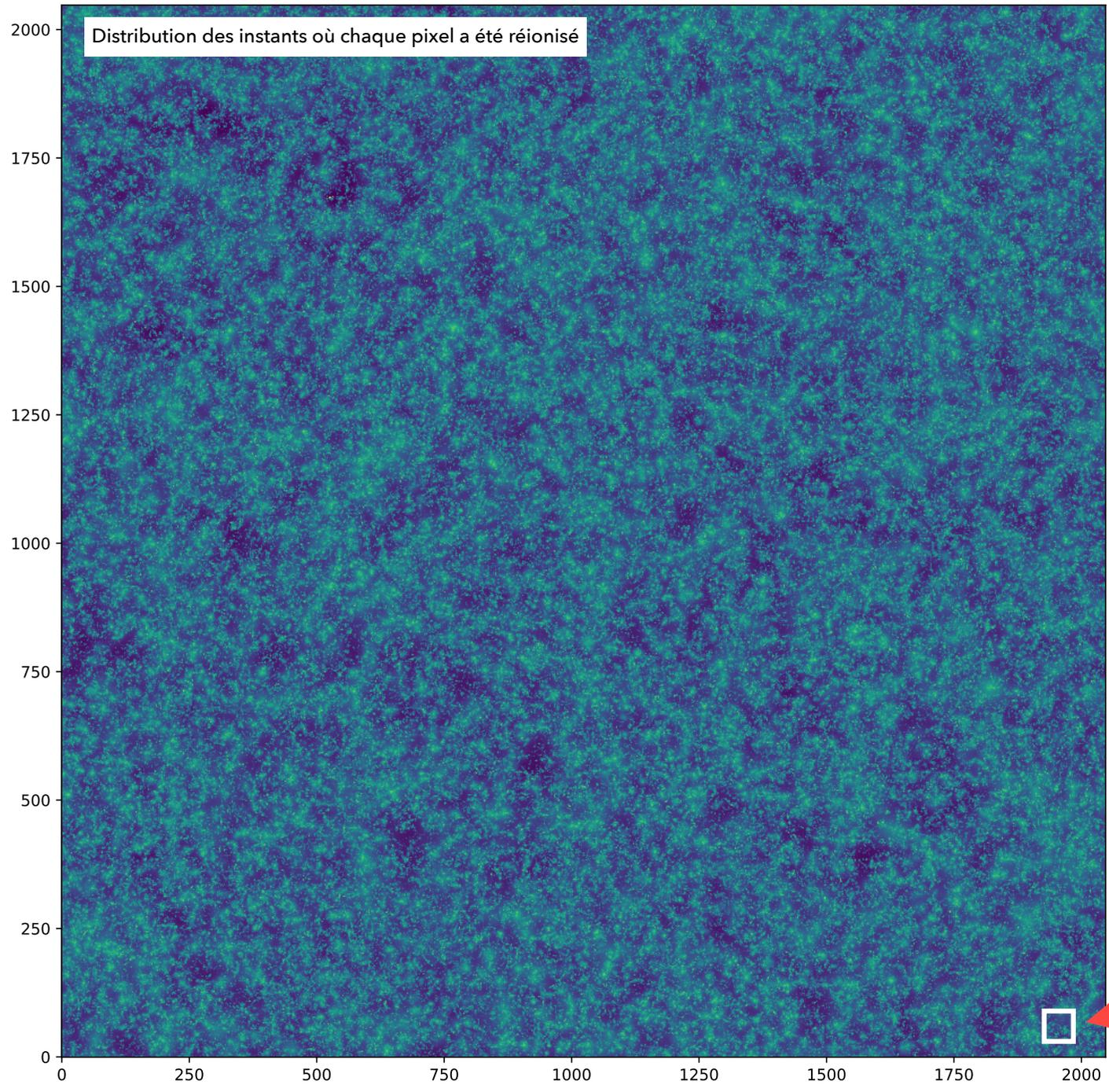


Il existe des alternatives aux simulations cosmologiques, nommées **modèles semi-analytiques**. Par exemple `21cmfast` (orig. Mesinger & Furlanetto 2007).

Ces codes reposent sur une **modélisation à plus gros grain et plus spécialisée**. Par exemple, en se contentant de quantifier la quantité de photons produits dans une région via une prescription analytique et calibrée du nombre de galaxies formées dans une région de densité donnée. Et en négligeant les effets de transferts radiatif complexe.

Ces modèles 'compensent' par une plus grande efficacité qui permet une exploration des paramètres et une prédiction du signal radio bien plus rapide que pour une simulation

Modélisation du futur ?



Champ de vue NenuFAR à $z=20 \sim 2$ Gpc (F. Mertens & NenuFAR CD KSP)

Les simus CoDa...
il faut changer
d'échelle et de
machines

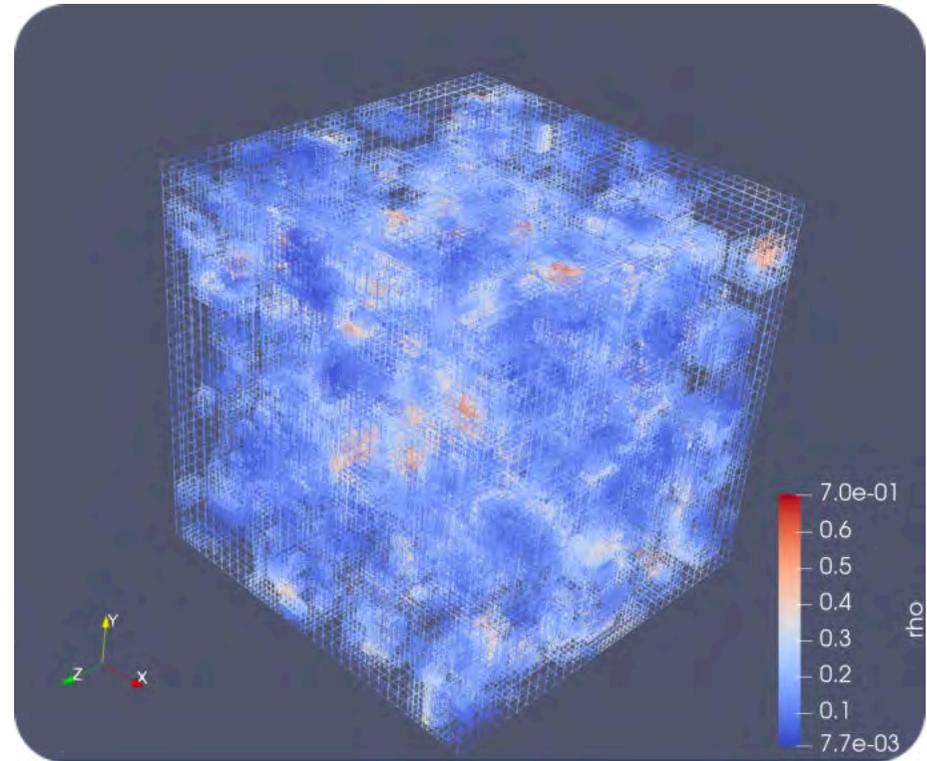
Rank	System	Cores	Rmax (PFlop/s)	Rpeak (PFlop/s)	Power (kW)
1	Frontier - HPE Cray EX235a, AMD Optimized 3rd Generation EPYC 64C 2GHz, AMD Instinct MI250X, Slingshot-11, HPE DOE/SC/Dak Ridge National Laboratory United States	8,730,112	1,102.00	1,685.65	21,100
2	Supercomputer Fugaku - Supercomputer Fugaku, A64FX 48C 2.2GHz, Tofu interconnect D, Fujitsu RIKEN Center for Computational Science Japan	7,630,848	442.01	537.21	29,899
3	LUMI - HPE Cray EX235a, AMD Optimized 3rd Generation EPYC 64C 2GHz, AMD Instinct MI250X, Slingshot-11, HPE EuroHPC/CSC Finland	2,220,288	309.10	428.70	6,016
4	Leonardo - BullSequana XH2000, Xeon Platinum 8358 32C 2.6GHz, NVIDIA A100 SXM4 64 GB, Quad-rail NVIDIA HDR100 Infiniband, Atos EuroHPC/CINECA Italy	1,463,616	174.70	255.75	5,610
5	Summit - IBM Power System AC922, IBM POWER9 22C 3.07GHz, NVIDIA Volta GV100, Dual-rail Mellanox EDR Infiniband, IBM DOE/SC/Dak Ridge National Laboratory United States	2,414,592	148.60	200.79	10,096
6	Sierra - IBM Power System AC922, IBM POWER9 22C 3.1GHz, NVIDIA Volta GV100, Dual-rail Mellanox EDR Infiniband, IBM / NVIDIA / Mellanox DOE/NNSA/LLNL United States	1,572,480	94.64	125.71	7,438
7	Sunway TaihuLight - Sunway MPP, Sunway SW26010 260C 1.45GHz, Sunway, NRCPC National Supercomputing Center in Wuxi China	10,649,600	93.01	125.44	15,371
8	Perlmutter - HPE Cray EX235n, AMD EPYC 7763 64C 2.45GHz, NVIDIA A100 SXM4 40 GB, Slingshot-10, HPE DOE/SC/LBNL/NERSC United States	761,856	70.87	93.75	2,589
9	Selene - NVIDIA DGX A100, AMD EPYC 7742 64C 2.25GHz, NVIDIA A100, Mellanox HDR Infiniband, Nvidia NVIDIA Corporation United States	555,520	63.46	79.22	2,646
10	Tianhe-2A - TH-IVB-FEP Cluster, Intel Xeon E5-2692v2 12C 2.2GHz, TH Express-2, Matrix-2000, NUDT National Super Computer Center in Guangzhou China	4,981,760	61.44	100.68	18,482



Dyablo

GINEA (Groupe d'investigation numérique pour l'exascale en astrophysique):

A.Durocher (CEA), B.Commercon (CRAL), B. Thooris(CEA), C. Cadiou (UCL), D. Chapon (CEA), Y. Dubois (IAP), D. Aubert (Obs. Strasbourg), F. Bournaud (CEA), J. Blaizot (CRAL), J. Fensch (CRAL), J. Rosdahl (CRAL), L. Michel-Dansac (CRAL), L. Strafella (CEA), M. Trebitsch (Groningen), M. Gonzalez (CEA), M. Delorme (CEA), O. Abramkina (IDRIS), P. Tremblin (CEA), P. Kestener (CEA), P. Ocvirk (Obs. Strasbourg), V. Reverdy (Annecy), Y. Rasera (Obs. Paris), J. Sorce (CRISTAL)

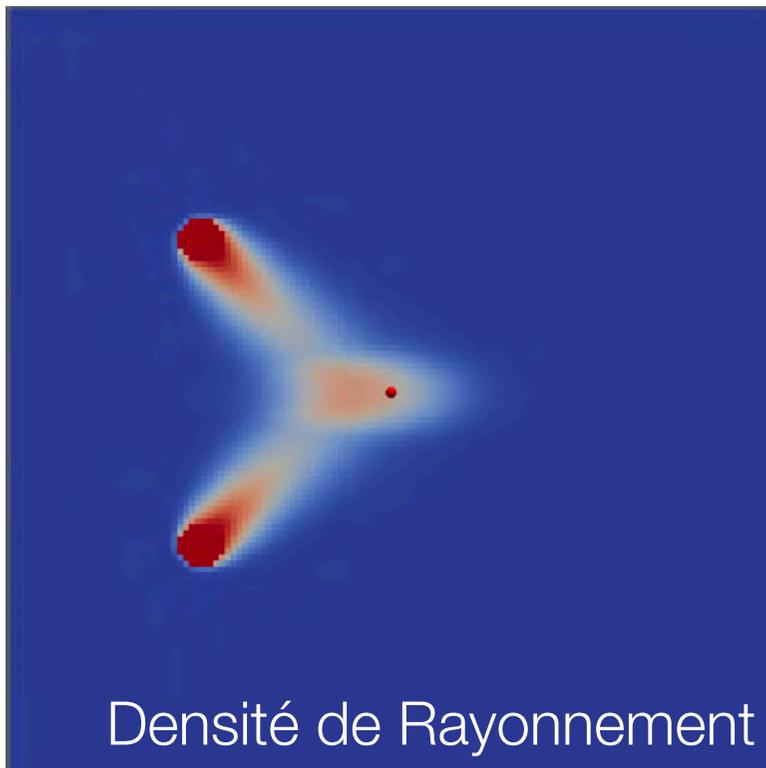


kokkos/kokkos

Kokkos C++ Performance Portability Programming
EcoSystem: The Programming Model - Parallel
Execution and Memory Abstraction

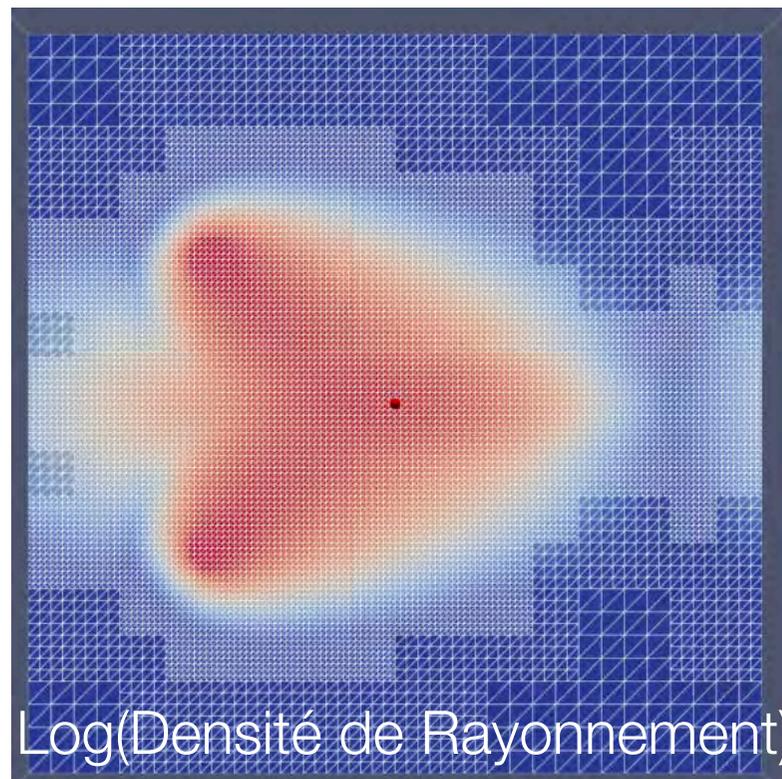
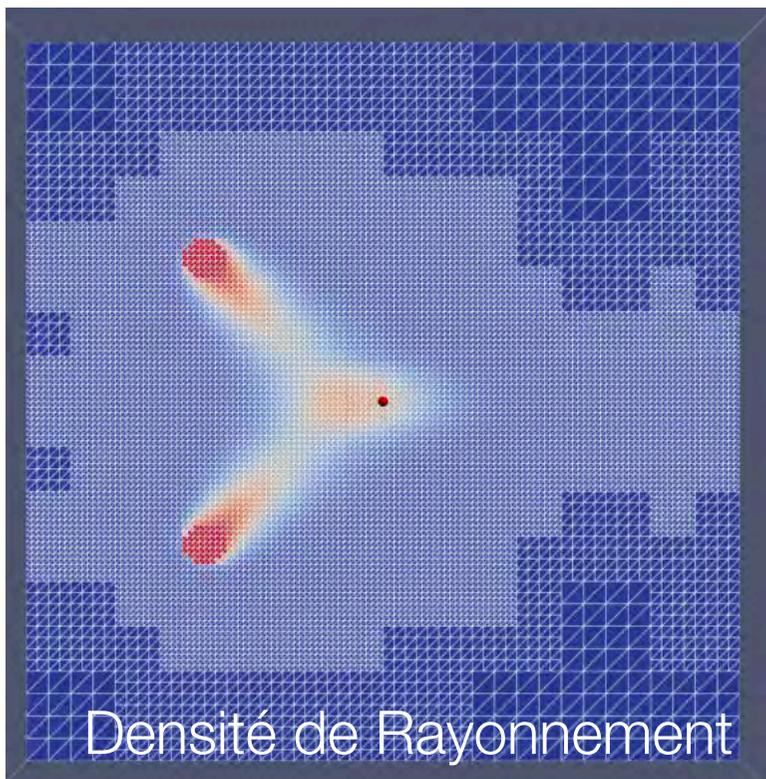


Nouveaux code pour infrastructures exascale : multi-architectures (GPUs), massivement parallèles, capable d'évolution matérielle, communautaire et collaboratif

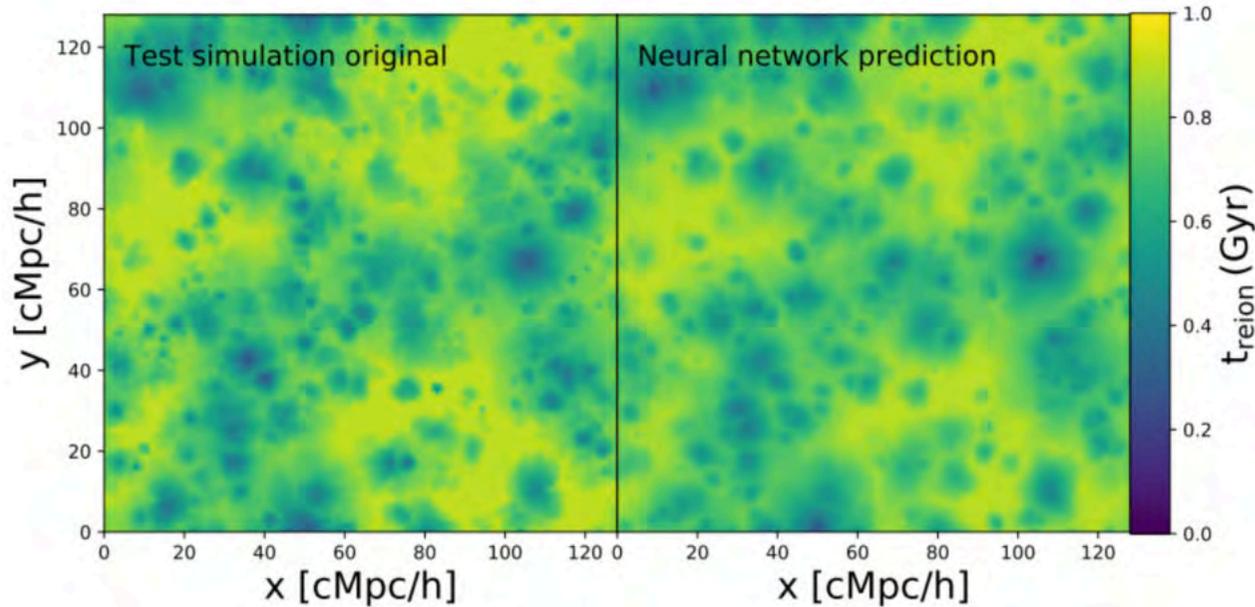


Transfert radiatif aux moments avec le problème à 2 faisceaux. Le traitement fluide fait que la lumière « choque ».

On cherche à améliorer cela, par exemple en décrivant de façon plus complexe la pression de ce « fluide » lumineux.

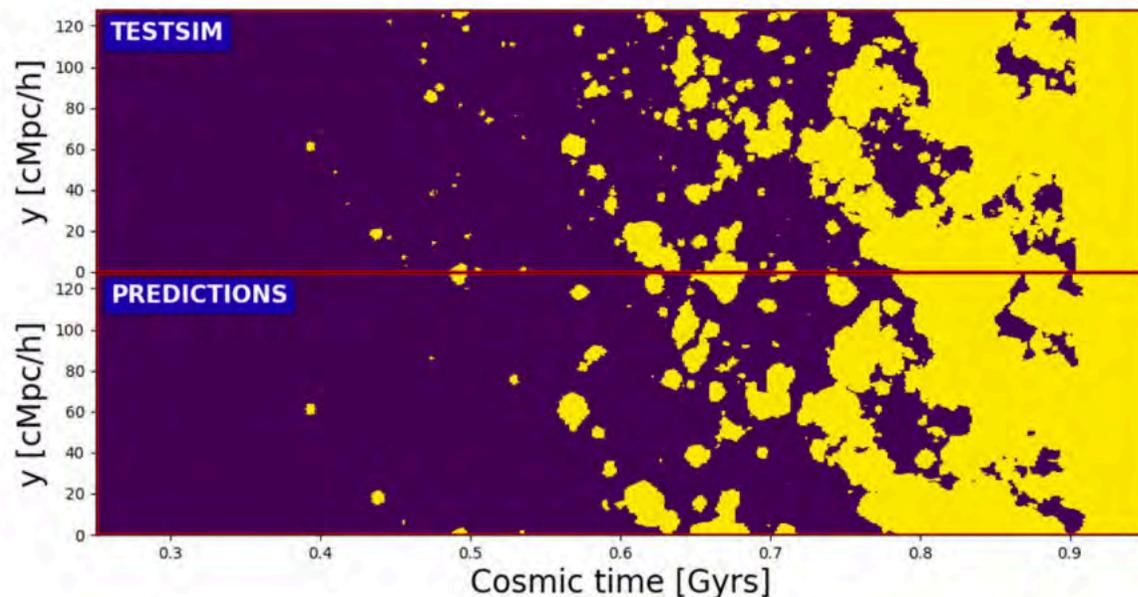


Emuler les simulations par l'intelligence artificielle et les réseaux de neurones profonds.



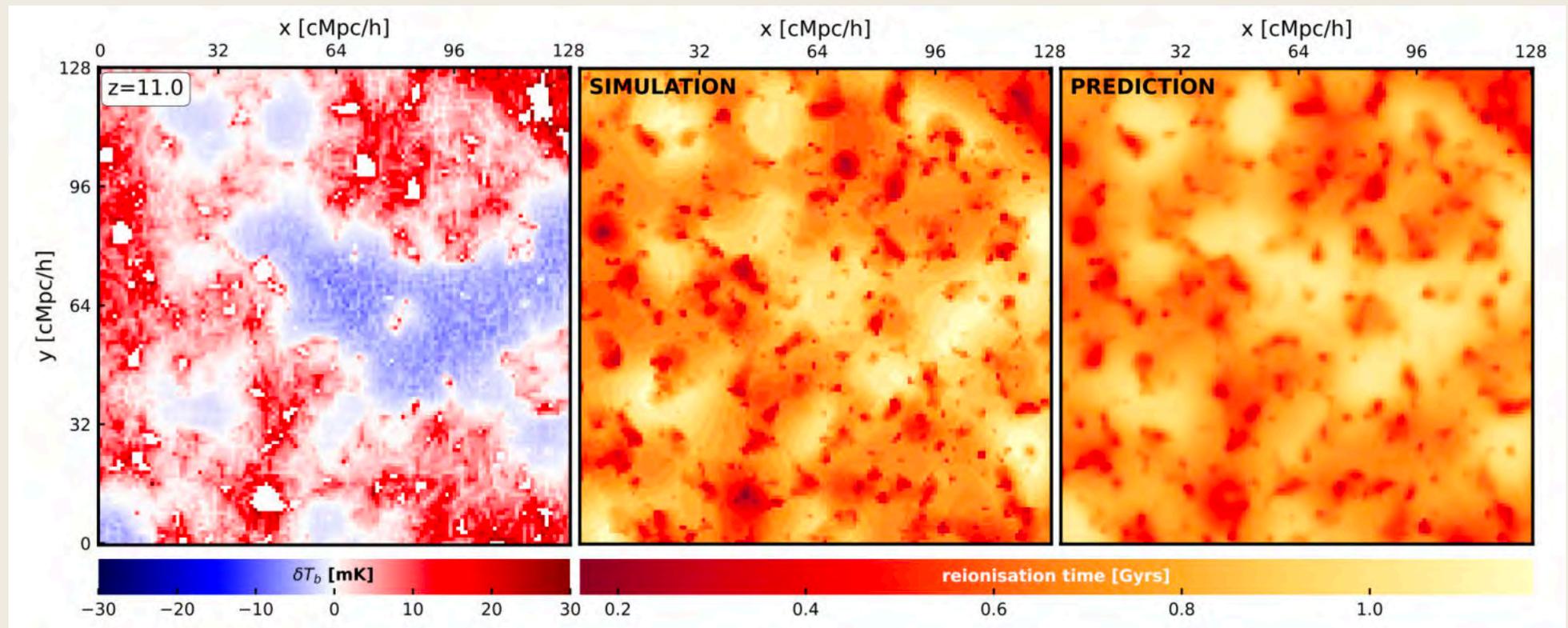
En entrainant des réseaux sur un grand nombre de simulations, nous parvenons à faire reproduire l'évolution de la réionisation par des réseaux profonds (dits de convolutions). Les temps de calculs des prédictions sont quasi instantanés.

Convergence de simulations produites sur GPU avec les apprentissages des réseaux également sur GPU (Jean-Zay IDRIS)



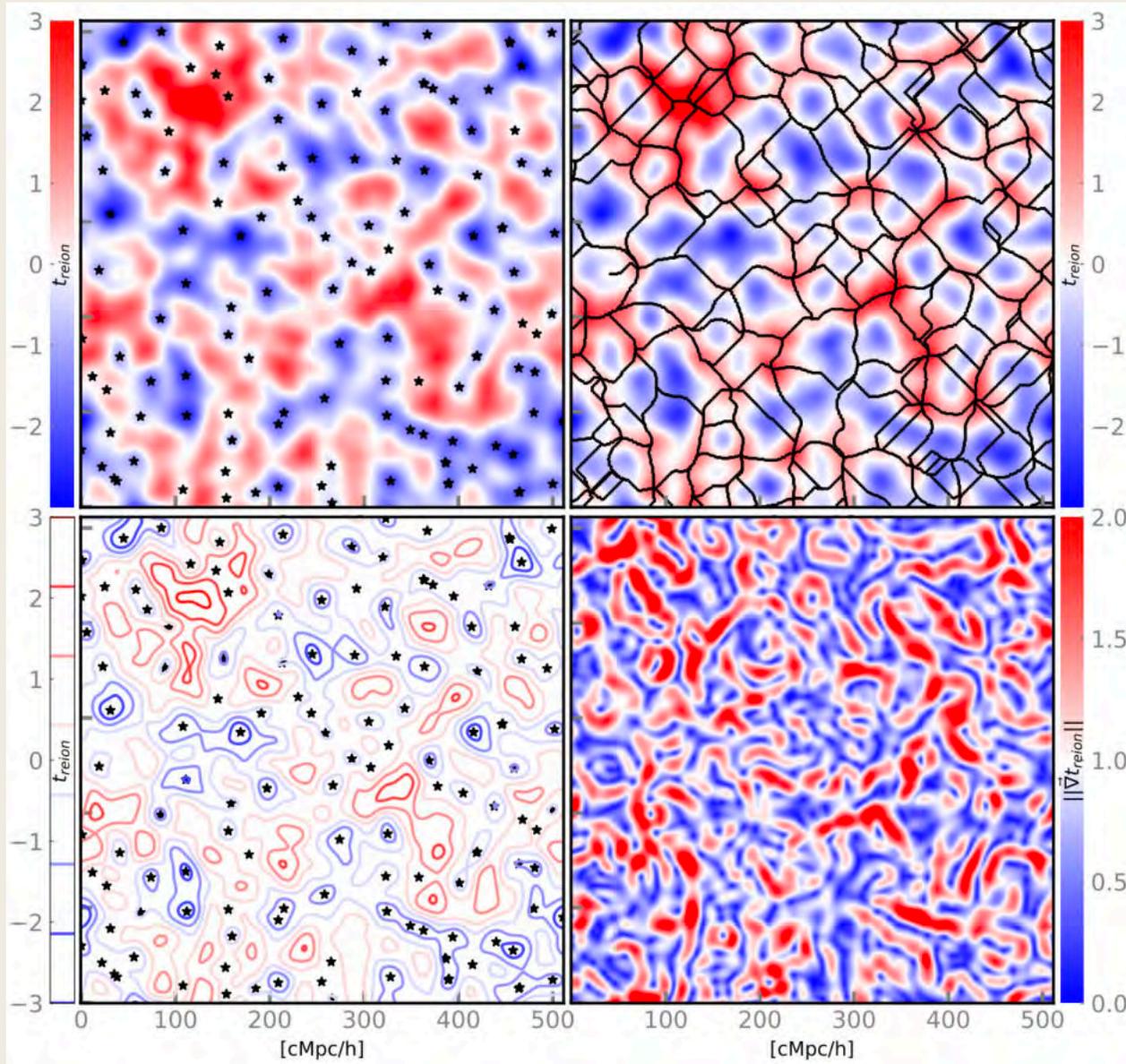
Reconstruction de l'histoire de reionisation à partir du signal radio, via l'intelligence artificielle

Réseau profond



A partir d'un grand nombre de simulations, on peut faire interpréter une observation 21cm en terme de carte d'instant de réionisations. On reconstruit le passé et on extrapole le futur d'une observation à une époque donnée. On accède ainsi à l'histoire de réionisation sur le plan du ciel.

Topologie de instants de réionisation

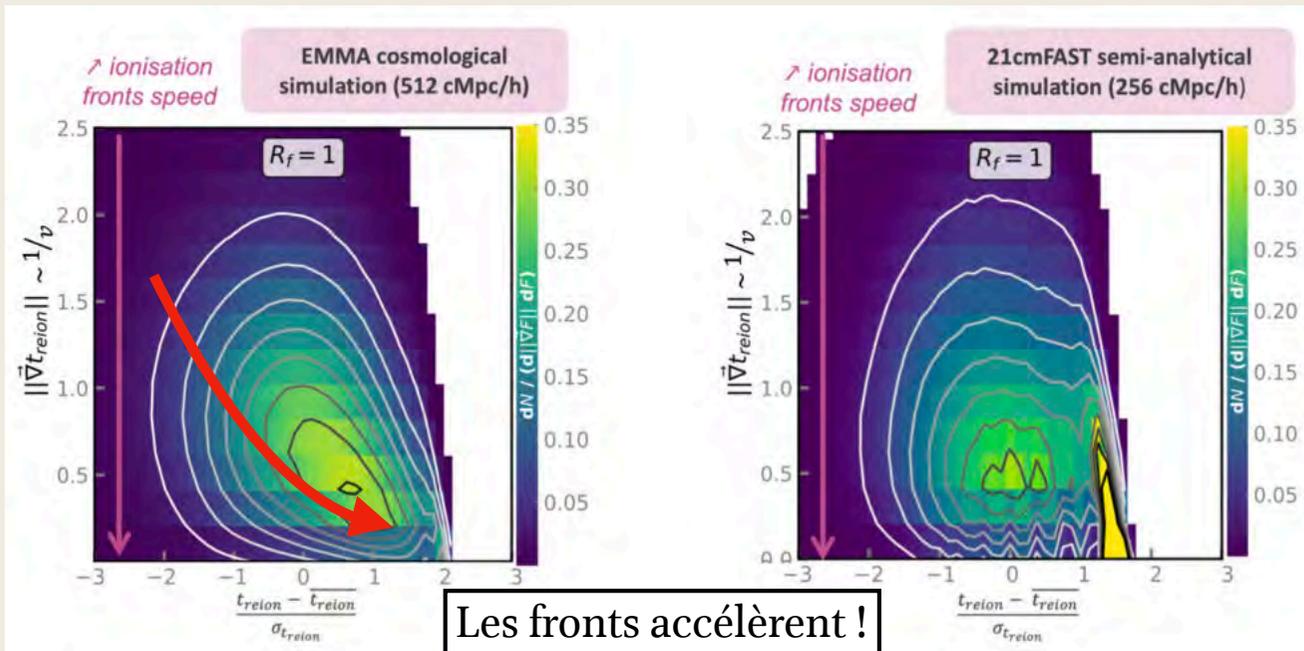


Il semblerait que ce champ d'instant de réionisation, au moins à grande échelle soit proche d'un **champ aléatoire gaussien**, comme par exemple le fond diffus cosmologique.

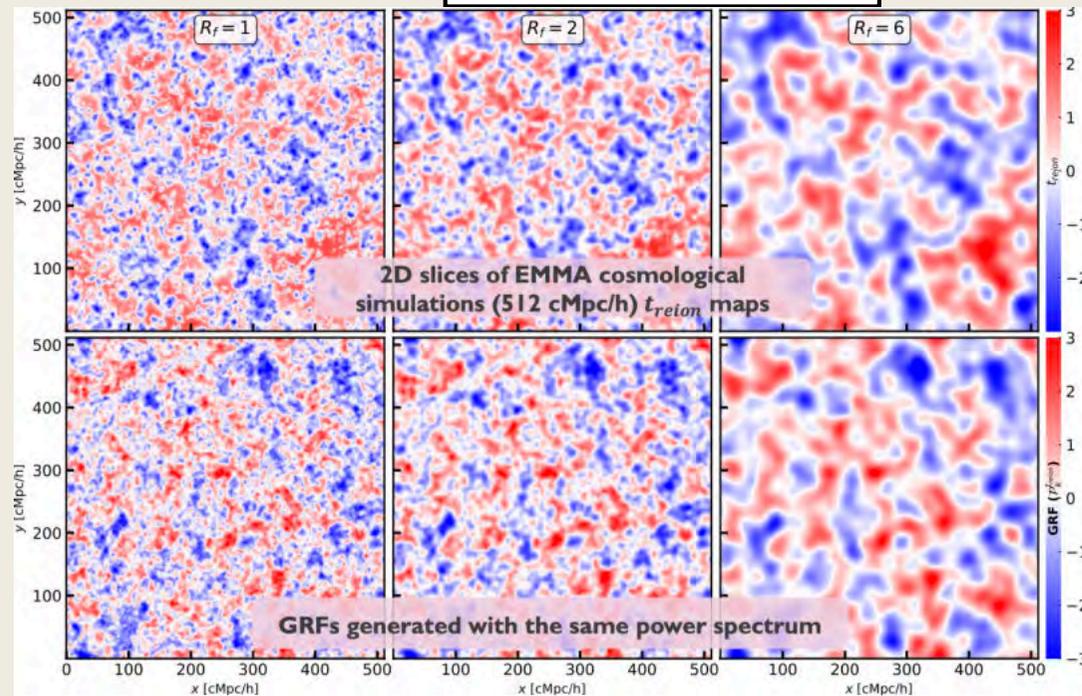
Cela ouvre la possibilité de l'étudier grâce aux **outils de topologie** de ce type de champs, outils par exemple appliqué pour étudier les grandes structures de l'Univers.

A partir d'une connaissance statistique minimale, appelée **spectre de puissance**, on peut par exemple prédire la statistique des **extrema** de ce champ (correspondant aux sources de la réionisation), des **gradients** (correspondant à la vitesse des fronts d'ionisation), du **squelette** (les lieux de percolation) ou des **isocontours** (les bulles ionisées).

Topologie de la réionisation



Les modèles semi-analytiques surévaluent la propagation du rayonnement en fin de réionisation, avec des vitesses de front infinies en fin de réionisation



D'un point de vue topologique, nos simulations donnent une distribution des temps de réionisation dans l'espace très similaires à un champ aléatoire gaussien, qui lui peut se générer de façon instantanée... peut-être un nouveau type de modèles semi-analytiques ?

Pour finir

- L'étude de la réionisation et de l'aube cosmique entre dans une nouvelle ère, grâce à l'avènement de nouvelles données venant de nouveaux instruments, dont JWST et SKA
- Cette nouvelle ère s'accompagne de développement théoriques importants pour interpréter ces nouvelles données, notamment via l'utilisation de simulations numériques
- Toutefois ces époques imposent des contraintes fortes, en termes de couplages d'échelles et de modèles physiques.
- Ces contraintes nous poussent également à développer de nouvelles voies et de nouvelles méthodes pour comprendre cette astrophysique. Ces nouvelles voies ont
 - Nouveaux matériels, dont les accélérateurs graphiques GPUs
 - Nouvelles façons de créer du code en astrophysique
 - La convergence de plus en plus forte avec les nouvelles méthodes d'intelligence artificielle
 - La mise en place de nouveau cadre théorique (temps de réionisation, topologie) pour interpréter ces données

La carte de voeux de l'IDRIS 2021, centre de calcul du CNRS, présentant nos travaux, remise au goût du jour pour 2023 (crédit : J. Chardin)

