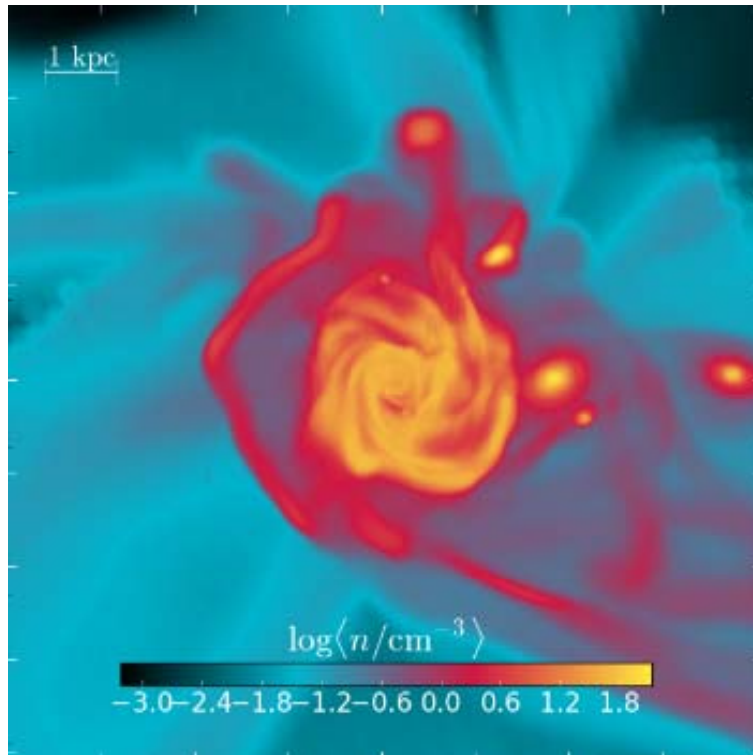




COLLÈGE
DE FRANCE
—1530—

Chaire Galaxies et Cosmologie

Les galaxies de $z=6$ à 12



Françoise Combes



Laboratoire d'Étude du Rayonnement et de la Matière en Astrophysique

Les diverses observations à grand z

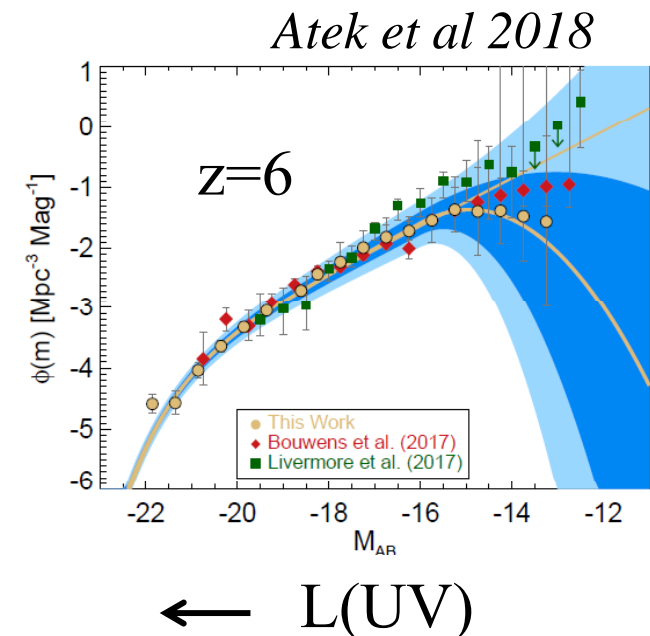
(1) Les **quasars** à grand z et leur émission $\text{Ly}\alpha$
(absorption, prairie et forêt)

(2) La technique de la cassure Lyman (**LBG**)
permet de tracer la fonction de luminosité versus z

(3) Les émetteurs $\text{Ly}\alpha$, **LAE**

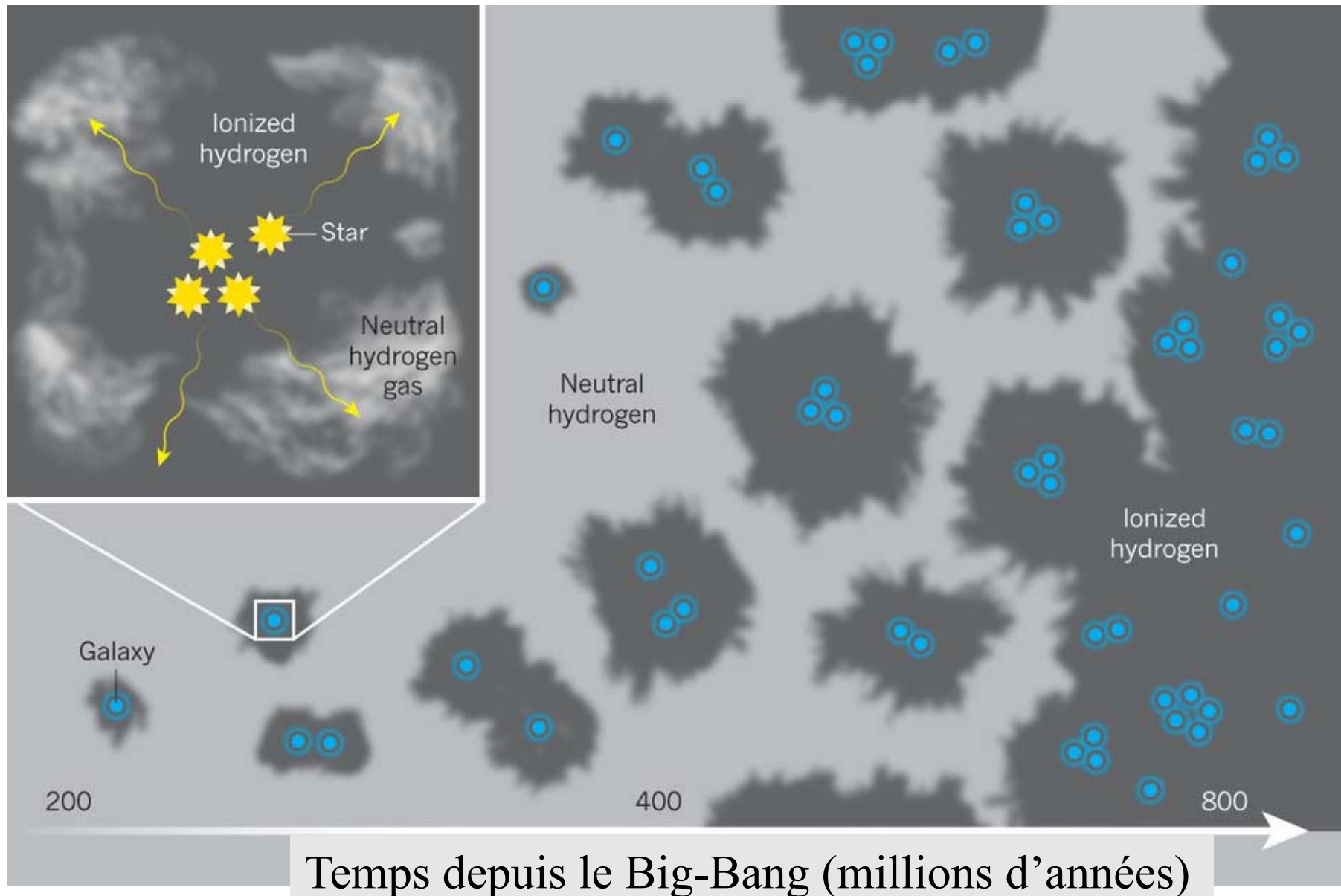
(4) **ALMA**: les raies de **CO**, **[CII]**

→ **A grand z: lentilles gravitationnelles**



Contribution de la formation d'étoiles à la réionisation?

Fraction d'échappement f_{esc} -- Etoiles PopIII -- Rôle des AGN



Première formation d'étoiles de l'Univers

Efficacité de formation d'étoiles?

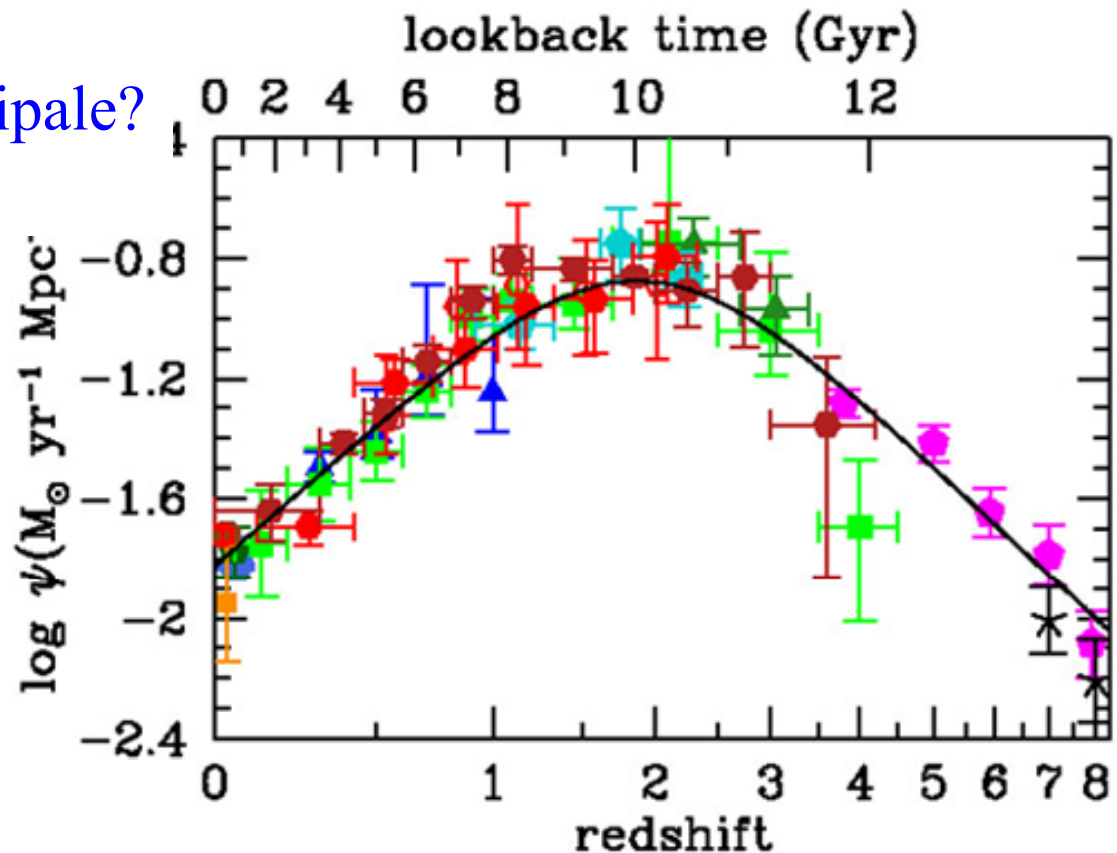
Fractions de gaz supérieures,
et faible $Z \rightarrow$ PopIII?

Starburst ou séquence principale?

Collisions de galaxies?

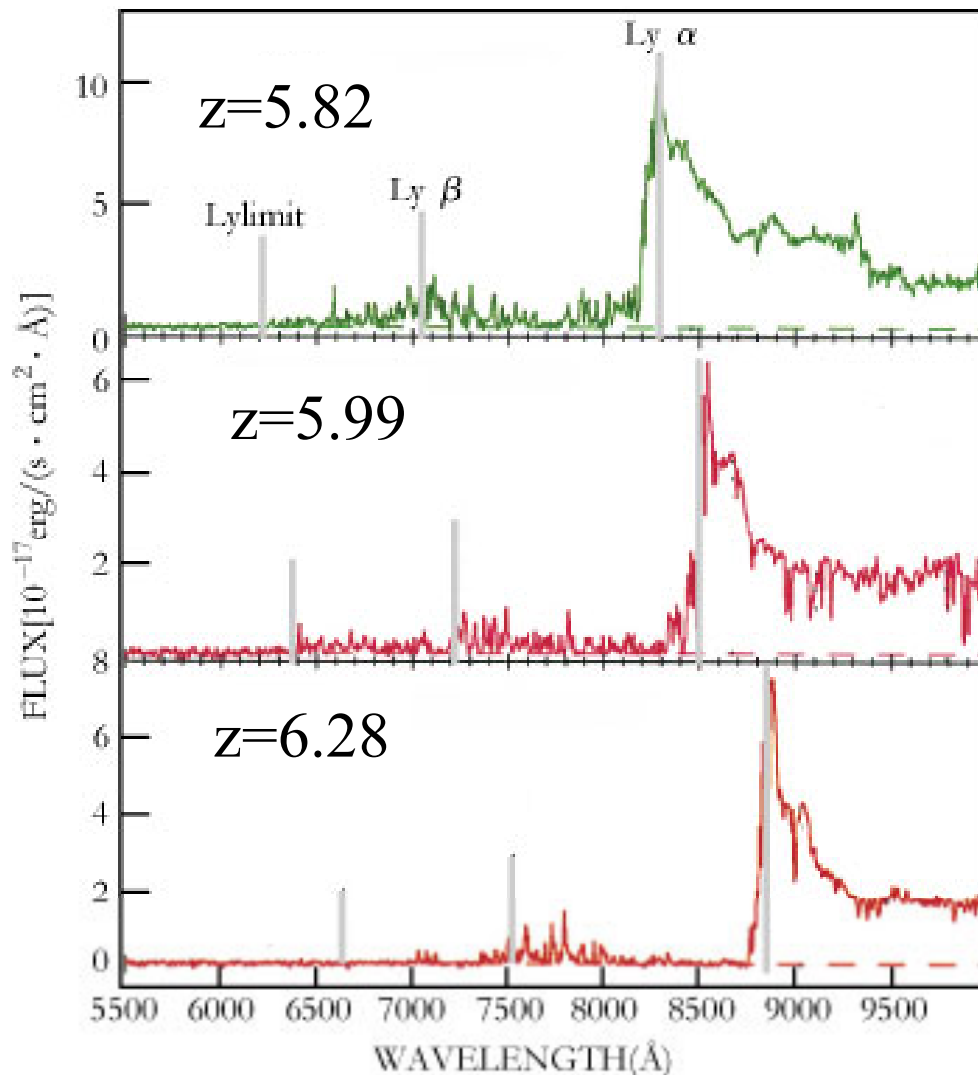
Densité de masse
stellaire

Age de l'Univers (10^9 ans)



Les quasars entre $z=6$ et 8

Leur émission Ly α permet de les détecter facilement

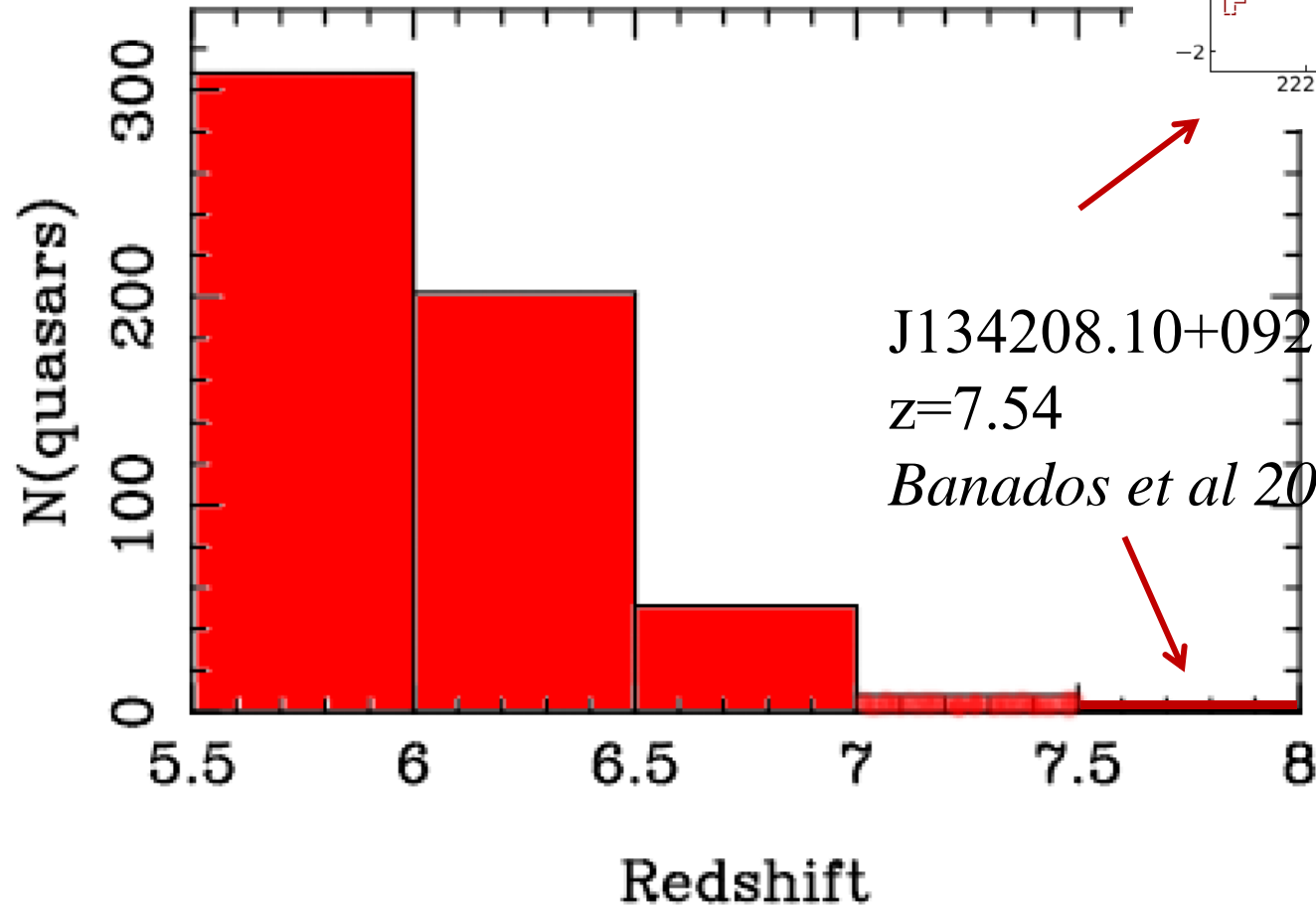


La détection du fossé de Gunn-Peterson dans le spectre des quasars à $z \sim 6$
→ Réionisation tardive et morcelée
(*Fan et al 2002*)

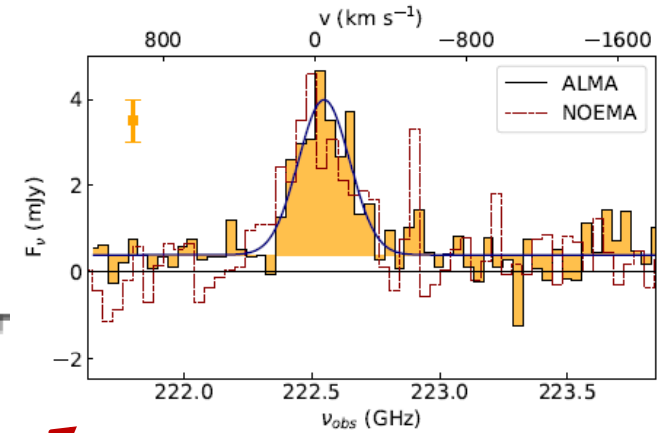
Les quasars puissants montrent des $M_{\text{BH}} \sim 10^{8-9} M_{\odot}$

→ Comment se forment-ils?

Nombre de quasars (+spectre)



J134208.10+092838.61
 $z=7.54$
Banados et al 2019



SDSS, PAN-STARRS, CFHQ, Subaru-SHELLQ, DES 2010-19

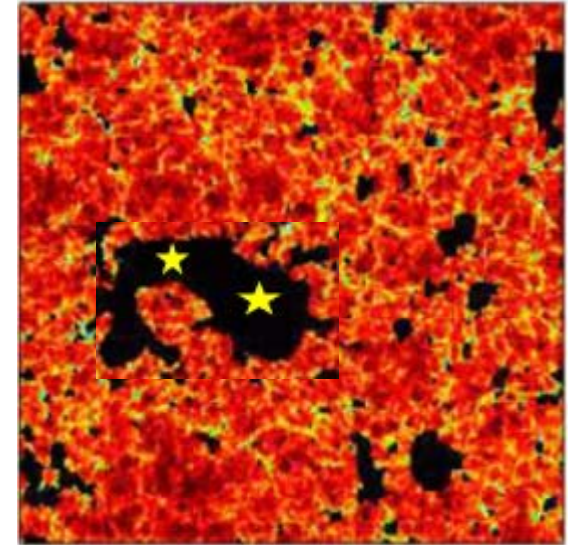
Effet de proximité des quasars

Les quasars puissants ionisent jusqu'à 80Mpc!

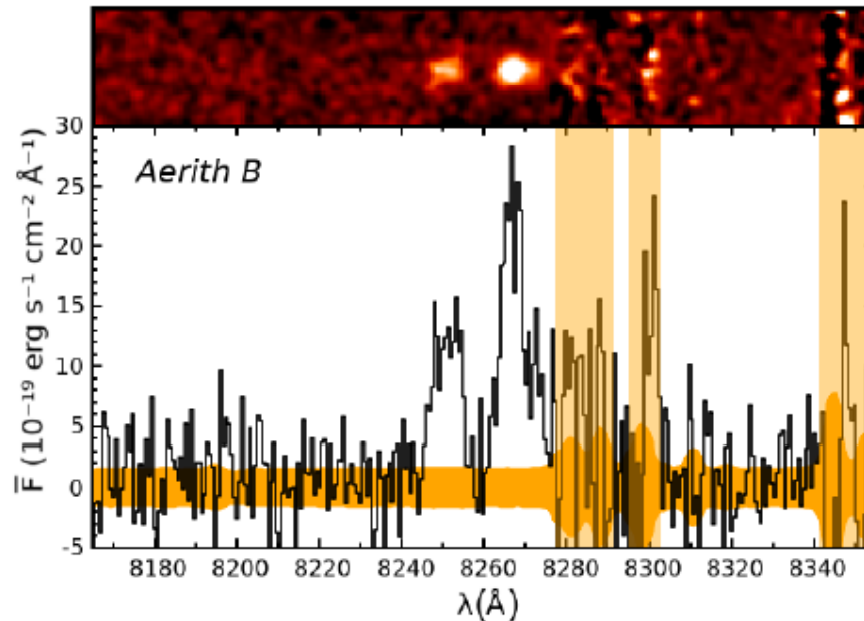
→ Permet la sortie des photons Ly α

Exemple de J0836+0054 à $z = 5.802$

3 LAE observés dans la bulle, derrière le QSO
à 300-800kpc



Détection directe de LyCont est très difficile à $z > 4$, et Ly α à $z > 5$
Parfois les photons sortent



3 sources de Ly α observées
Autour du QSO, A, B, C

B a un double pic

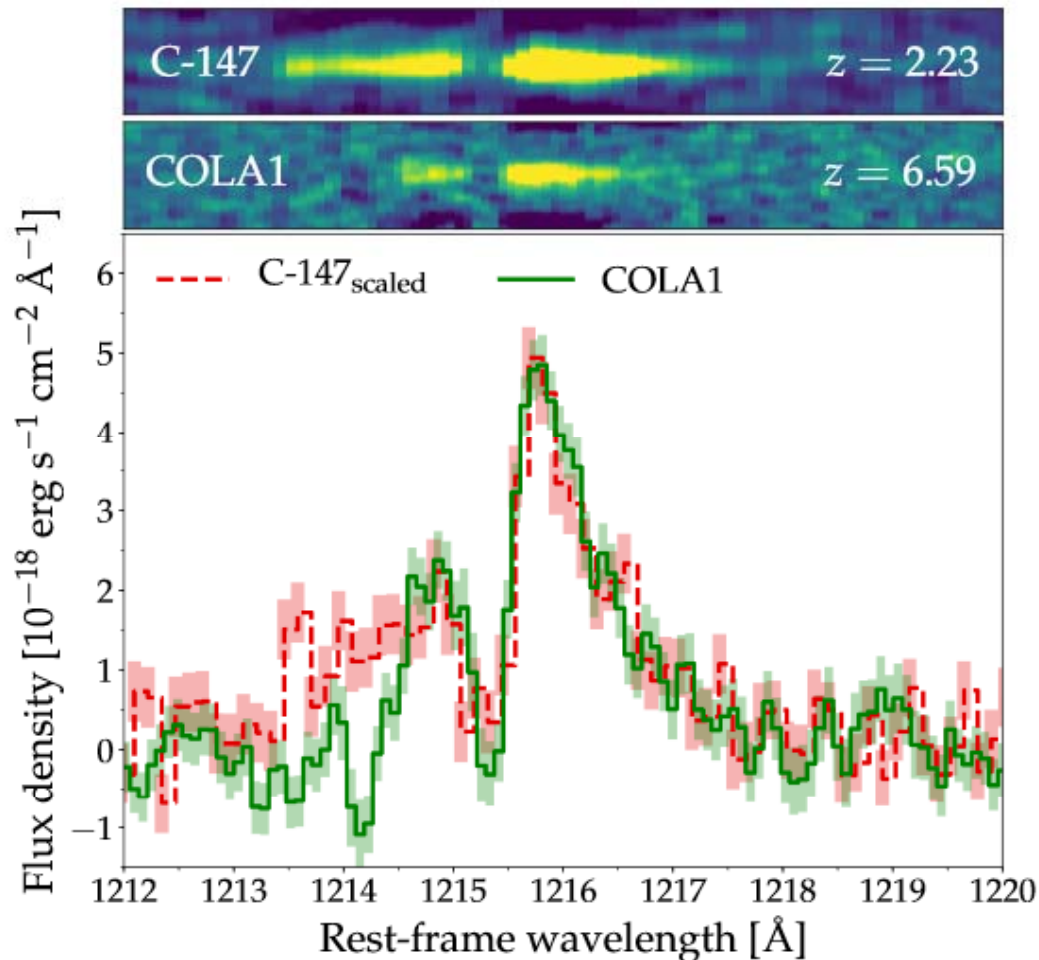
Bosman et al 2019

Raies Ly α à deux pics

Forts émetteurs LAE dans une bulle ionisée, ΔV faible

→ Grande fraction d'échappement en Ly α , $f_{\text{esc}} \sim 0.5-1$

Modèle de coquille en expansion $V \sim 80 \text{ km/s}$



Une coquille en expansion est nécessaire pour expliquer l'asymétrie entre les deux pics

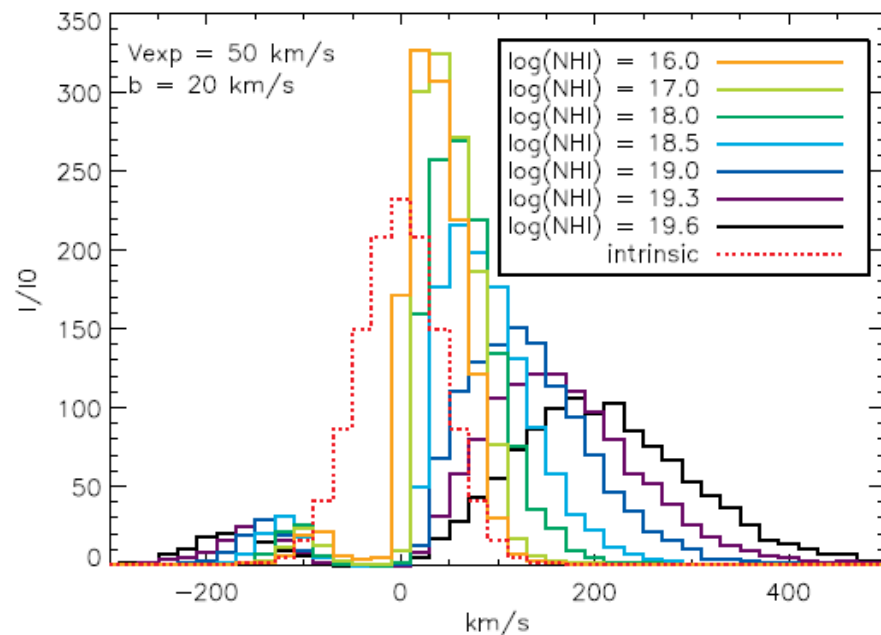
De même absorption sur la ligne de visée

Matthee et al 2018

Forme des raies Ly α

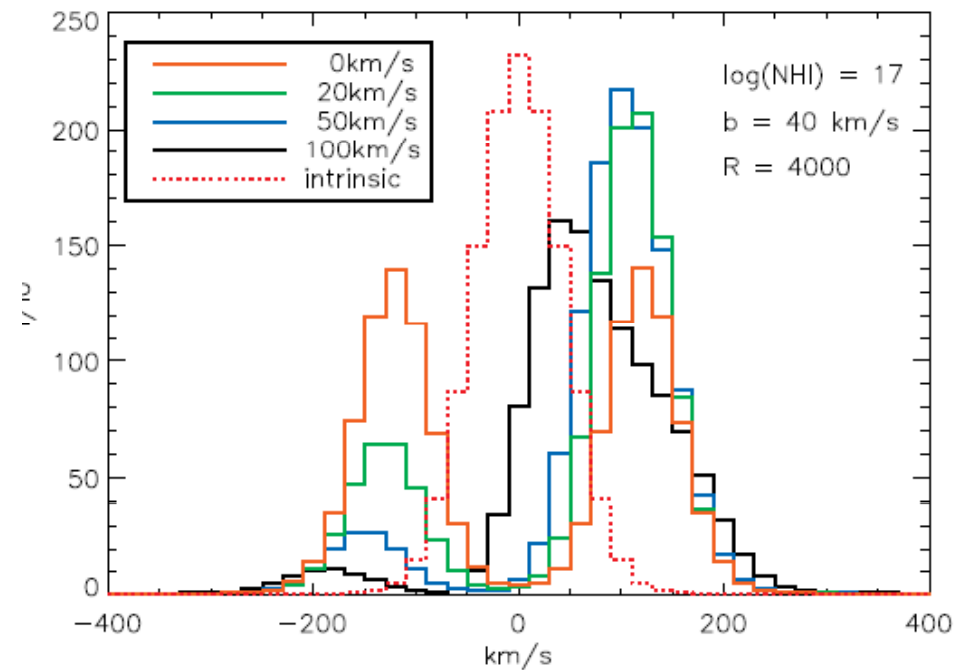
La forme de la raie donne à la fois la colonne densité d'hydrogène NHI
Et aussi la vitesse d'expansion (asymétrie)

→ ΔV anticorrélation avec la fraction d'échappement en LyCont fesc



$V_{exp} = 50$ km/s

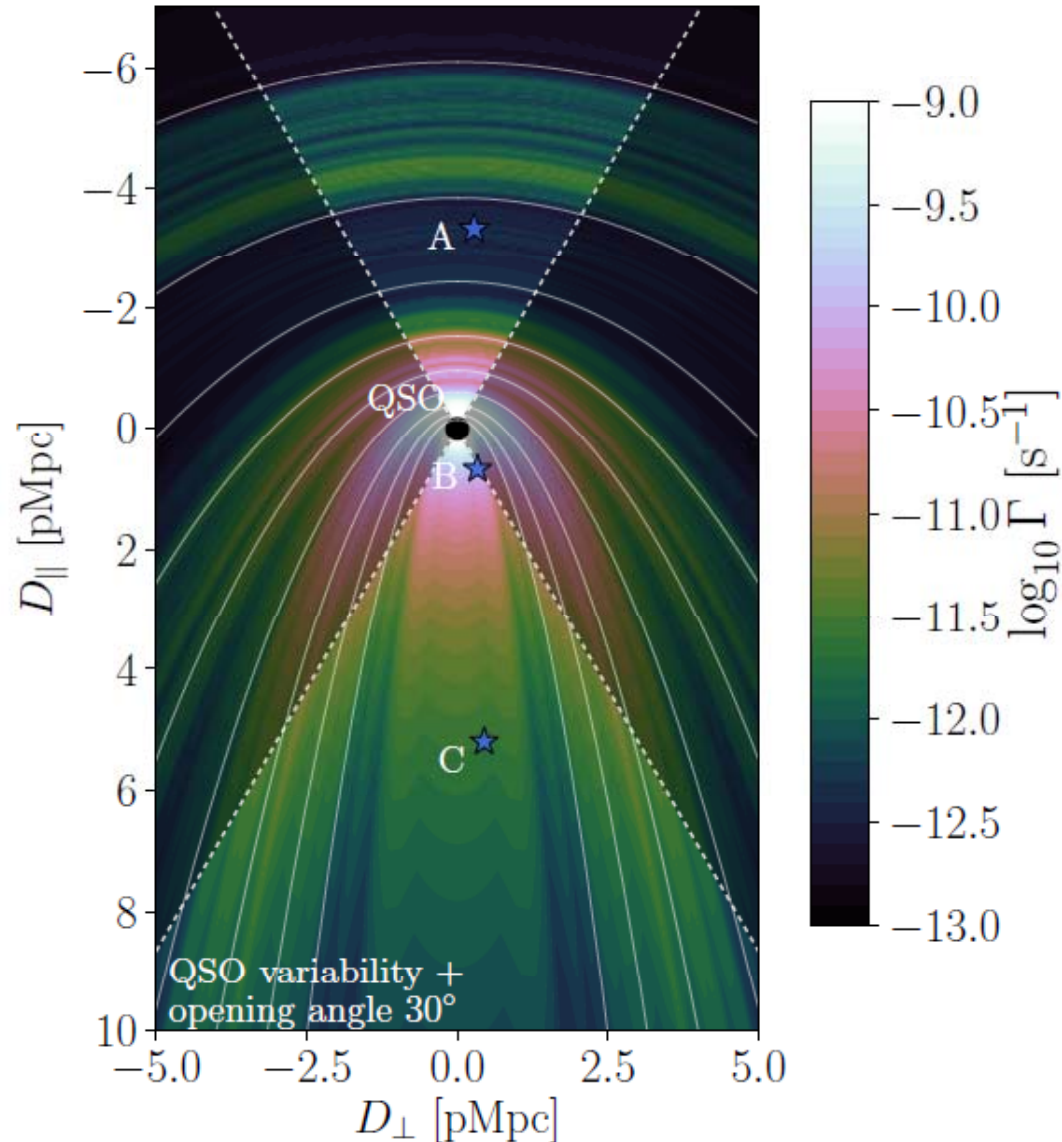
$N_{HI} = 10^{17}$ cm⁻²



Verhamme et al 2015

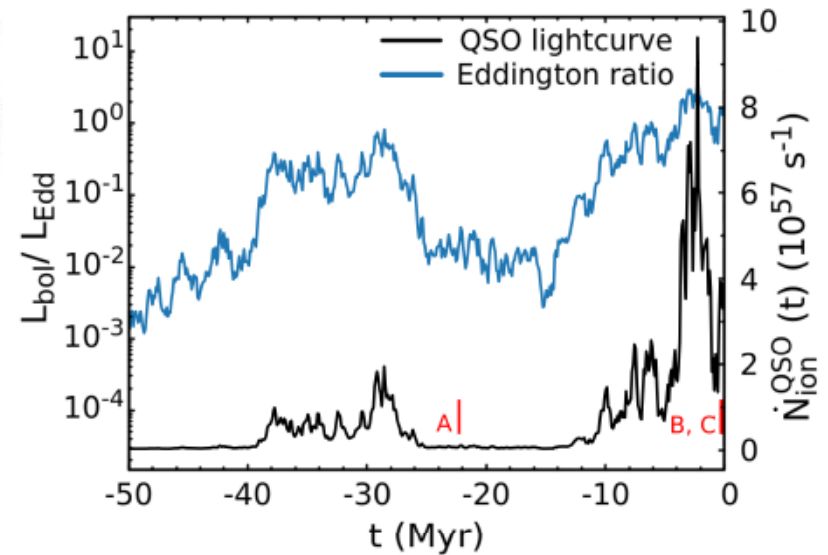
Ionisation autour des quasars

Synergie QSO-galaxies A, B, C



Possible de reconstruire l'histoire passée du QSO

Selon la puissance d'ionisation En A, B, C

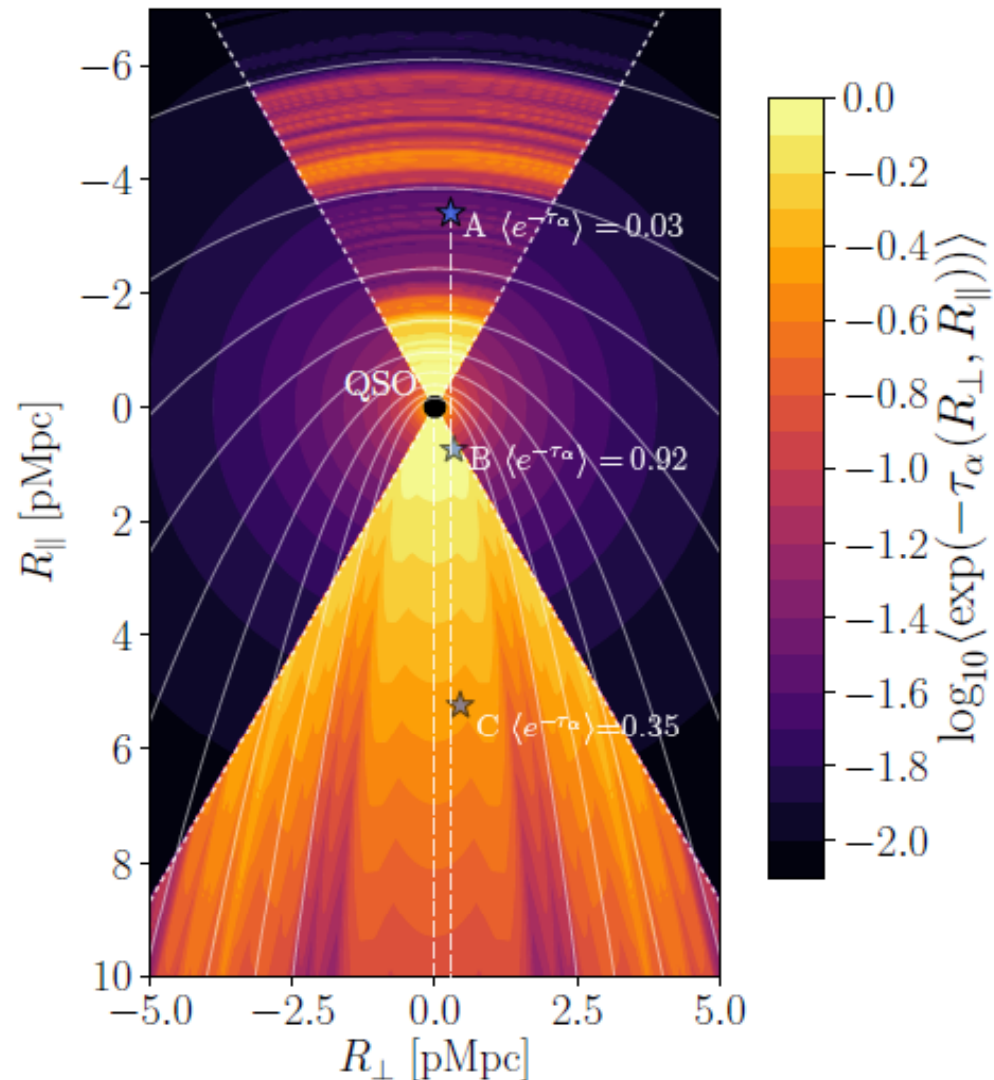


Bosman et al 2019

Opacité Ly α $\exp^{-\tau\alpha}$

B=Forme de la raie Ly α

→NH=10¹⁹cm⁻², v=16km/s, fesc 1%



C : extrémité de la zone de Proximité du QSO (13 Mpc)

Le quasar émet dans un cône d'ouverture 30°

C'est une forte radio source avec un jet vers l'observateur

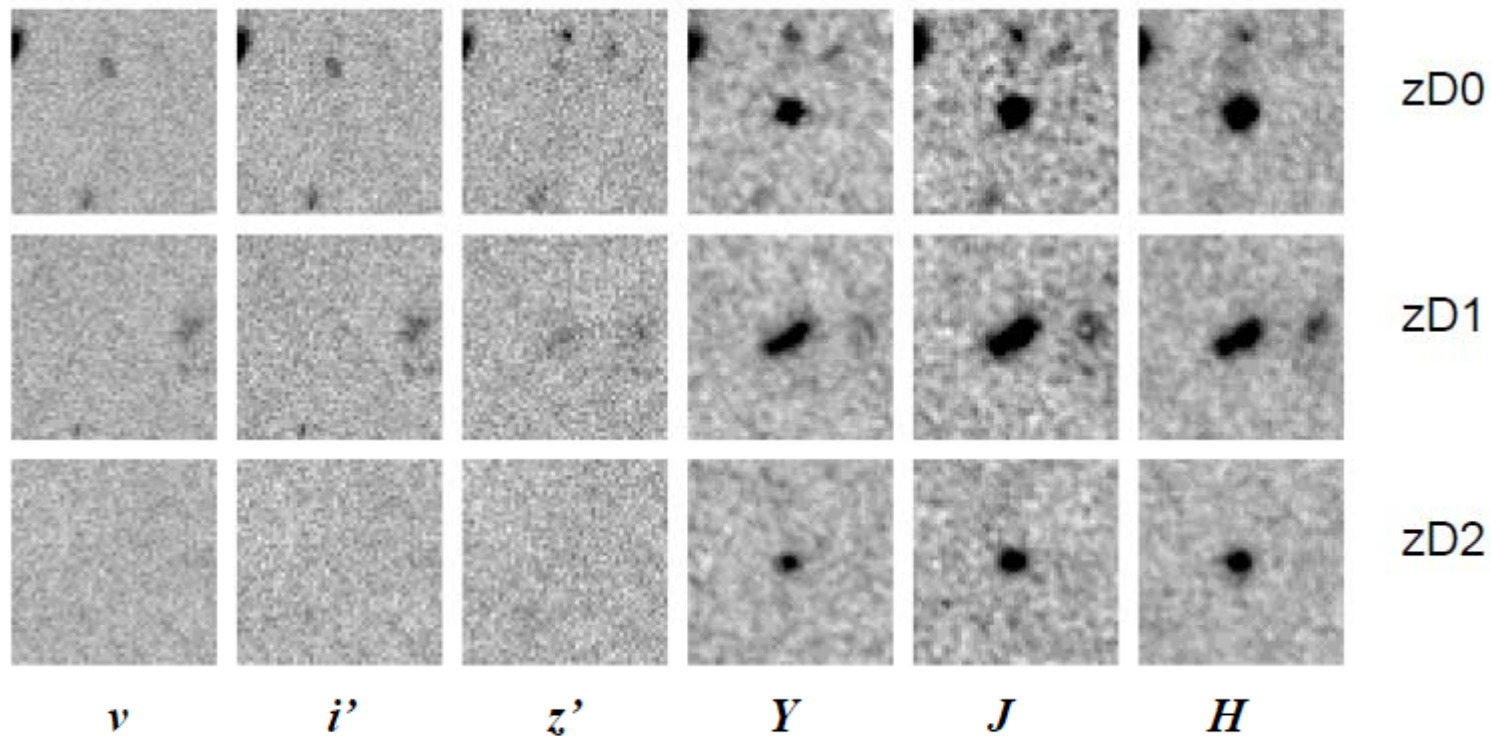
Contribution des galaxies à l'ionisation non dominante

Cycle de $\sim 10^7$ ans

Bosman et al 2019

Objets à cassure Lyman: « z-drop »

Pour identifier les galaxies à $z > 7$ parmi les milliers d'autres
Absorption du continuum par le milieu intergalactique



Bunker et al 2010

12 galaxies identifiées à $z > 7$
SFR $1.3 M_{\odot}/\text{an}$

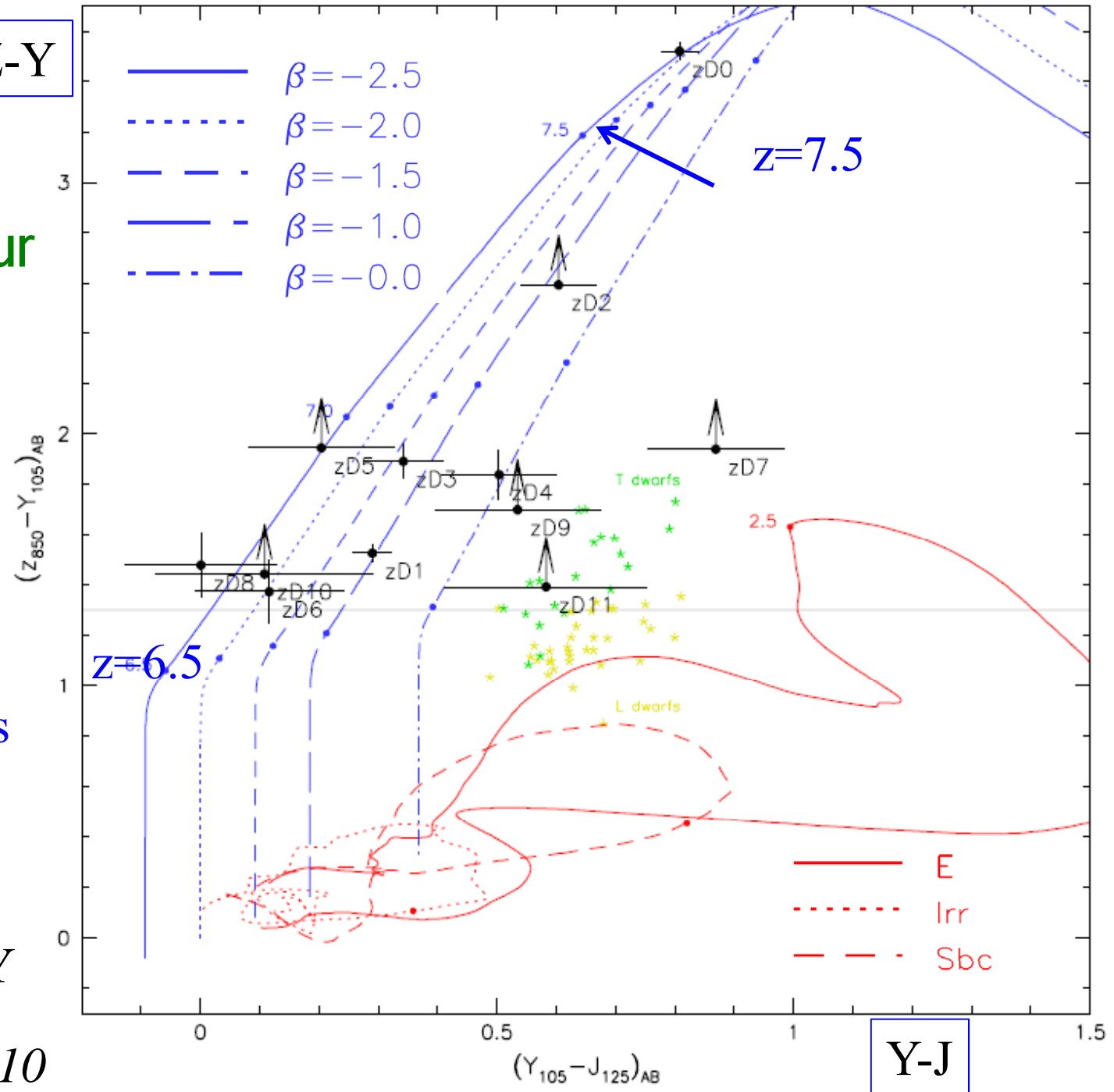
Z-Y

Diagramme Couleur-couleur

Pente UV du spectre
Flux $\propto \lambda^\beta$

Contaminations
Par étoiles naines
Jaune étoiles L
Vert Etoiles T

OBAFGKM LTY



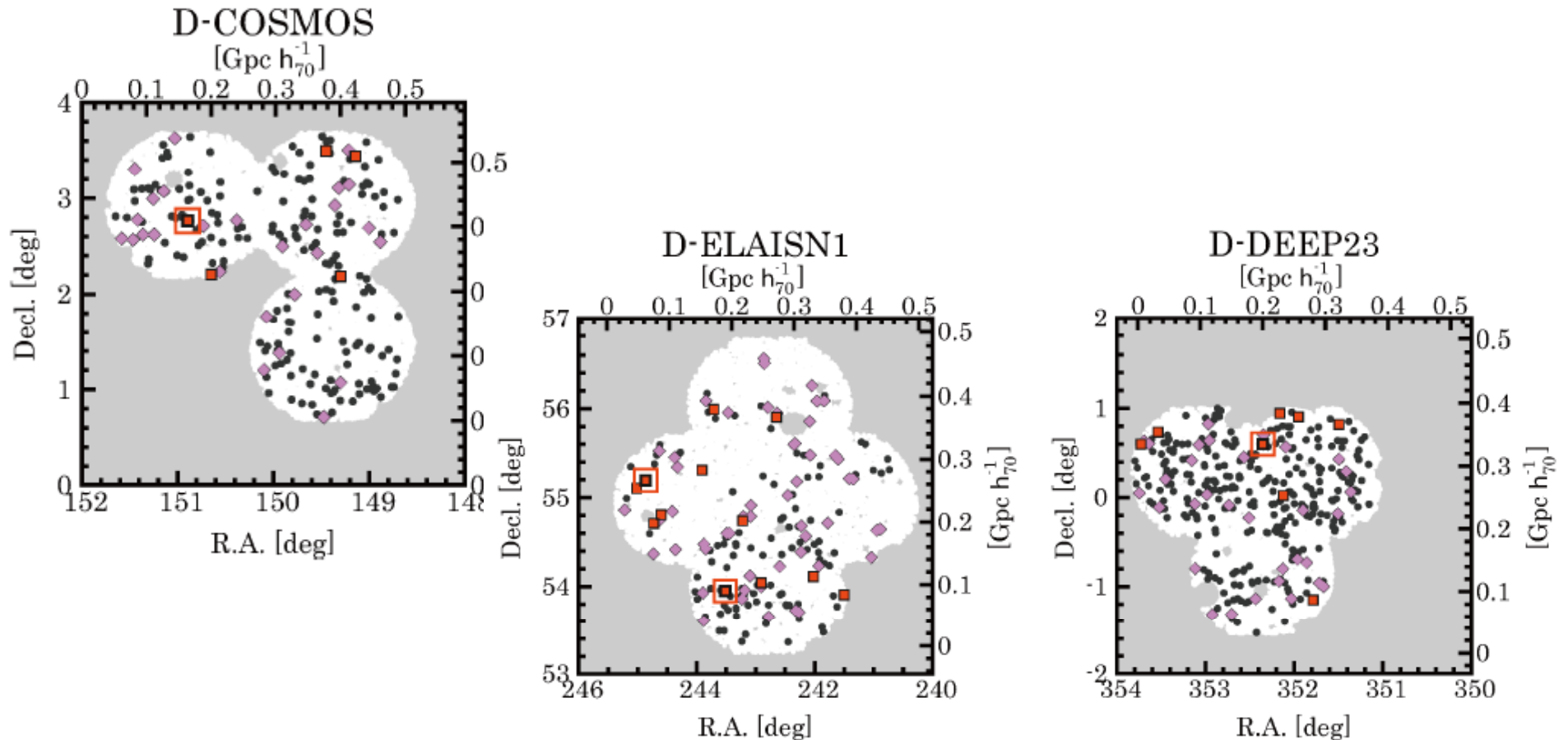
Bunker et al 2010

Découverte de 2000 émetteurs Ly α (LAE)

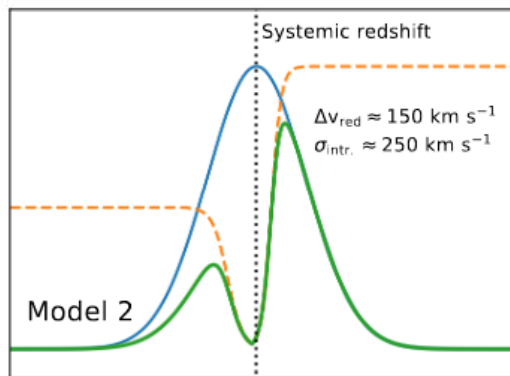
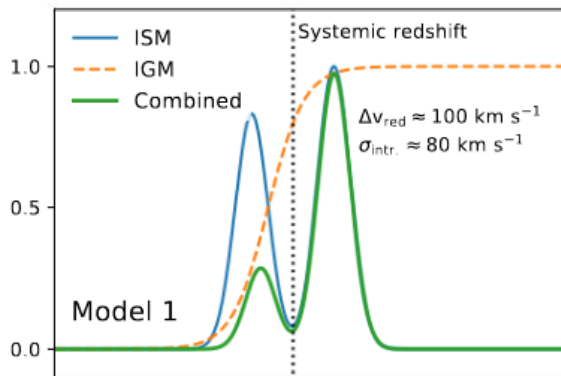
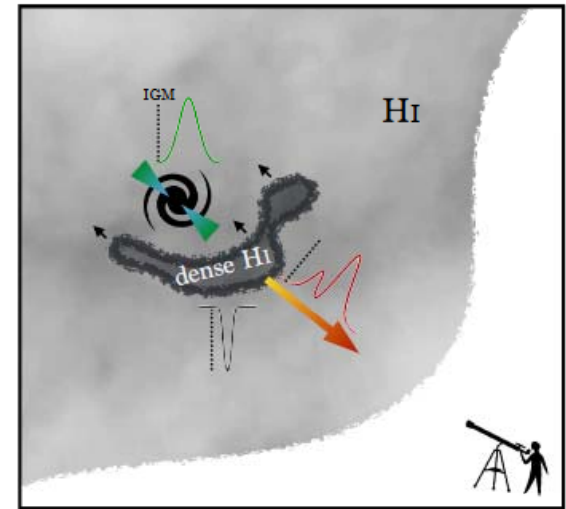
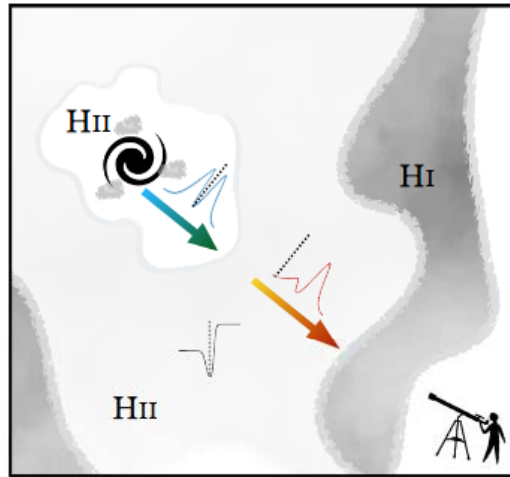
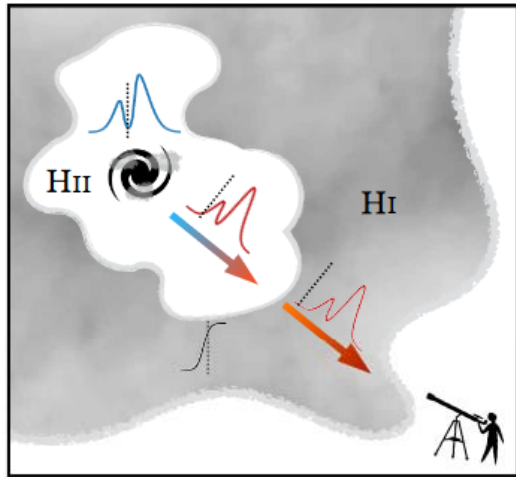
Observés sur le télescope Subaru $z=5.7 - 6.6$ (*Ouchi et al 2017*)

Biais de $b=4.1$, les LAE suivent les sur-densités, et sont rassemblés dans les poches ionisées (encore plus, car les photons s'échappent!)

Mesure de $x_{\text{HI}} = 0.15$ à $z=6.6$ dans les halos massifs

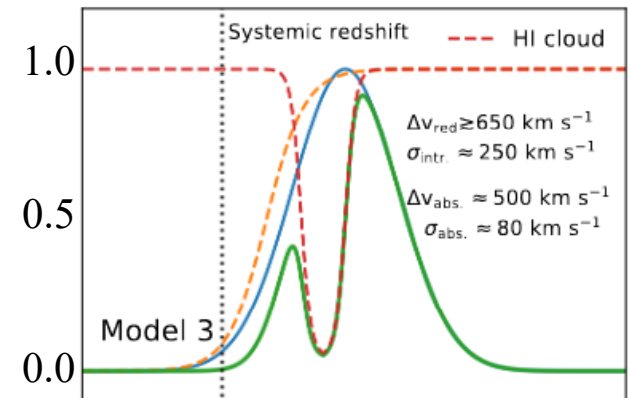


LAE forme des raies



$V \rightarrow$

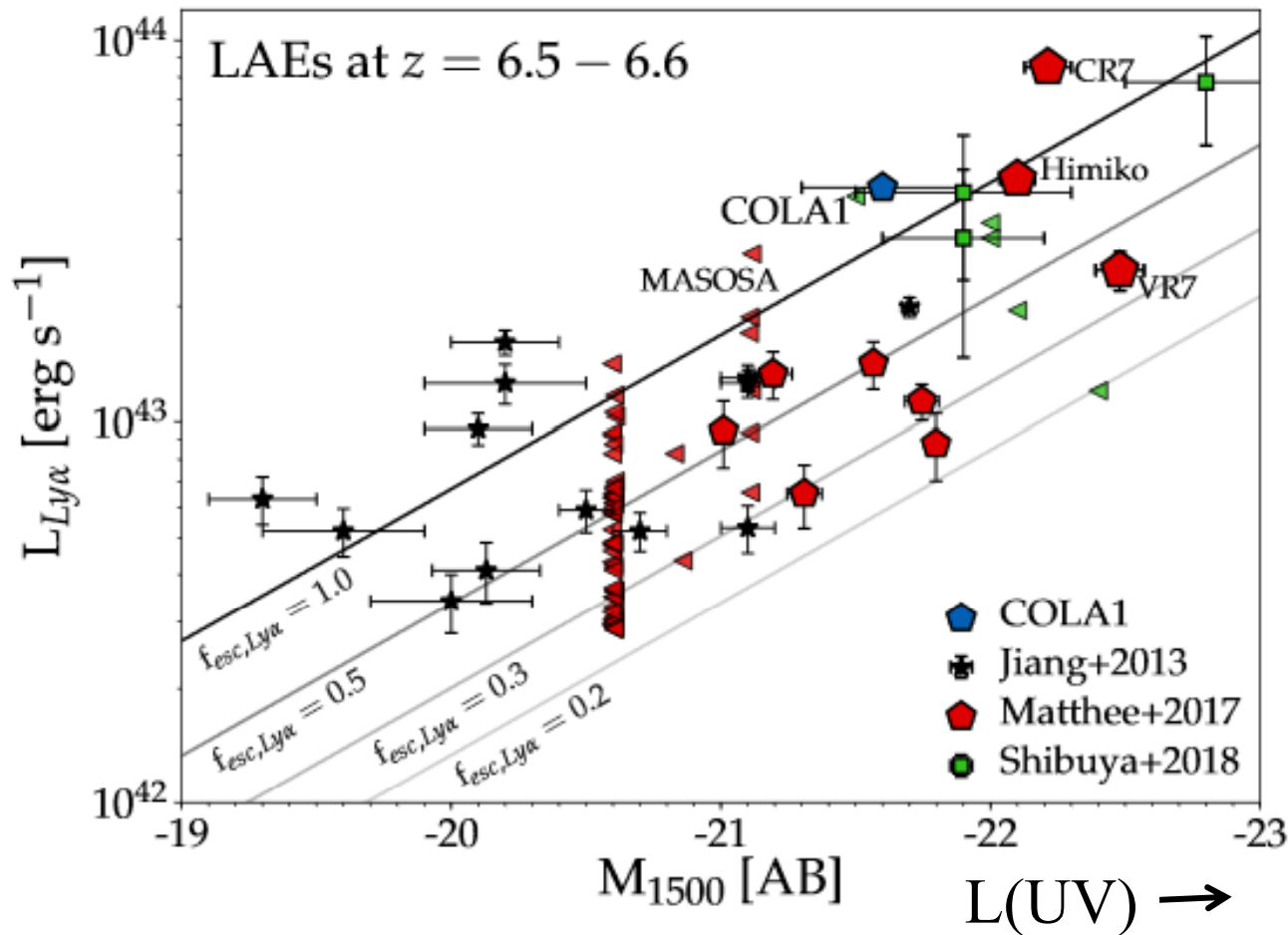
2 pics centrés sur la vitesse systémique



2 pics non centrés
Nuage HI en outflow
(décalé vers le bleu)

Matthee et al 2018

LAE $z=6.5$, f_{esc} variable = 0.2-1



Certaines sources
 $f_{esc} \sim 30\%$
 \rightarrow Sont capables
 d'ioniser
 significativement

f_{esc} selon un modèle
 IMF (Salpeter) et SFR cst (100Myr)

Matthee et al 2018

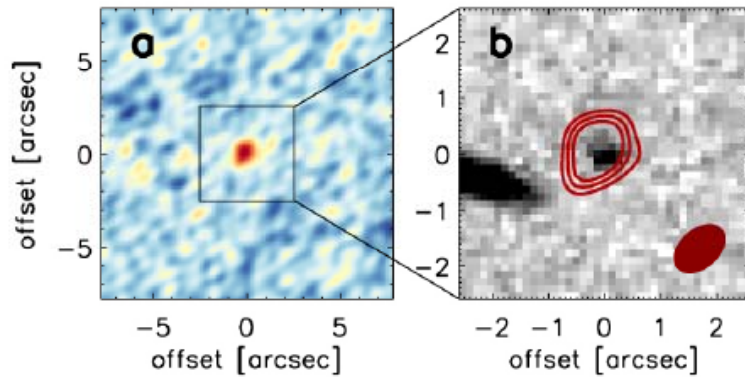


Détection par [CII] à grand z

Premières tentatives avec les galaxies Ly α infructueuses (Himiko)

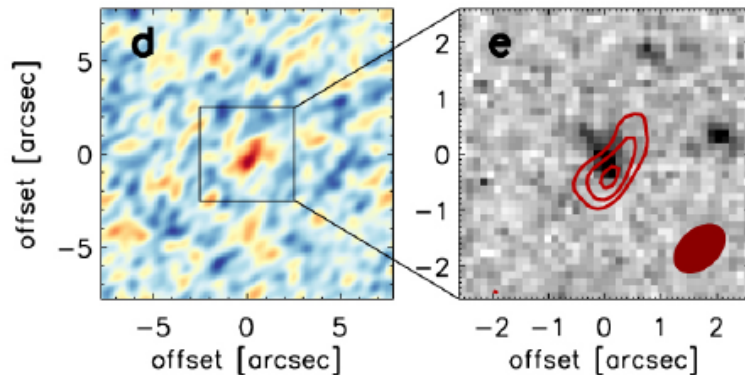
Galaxies sélectionnées en infrarouge \rightarrow $z=6.81-6.85$

Plus de poussière, de métallicité

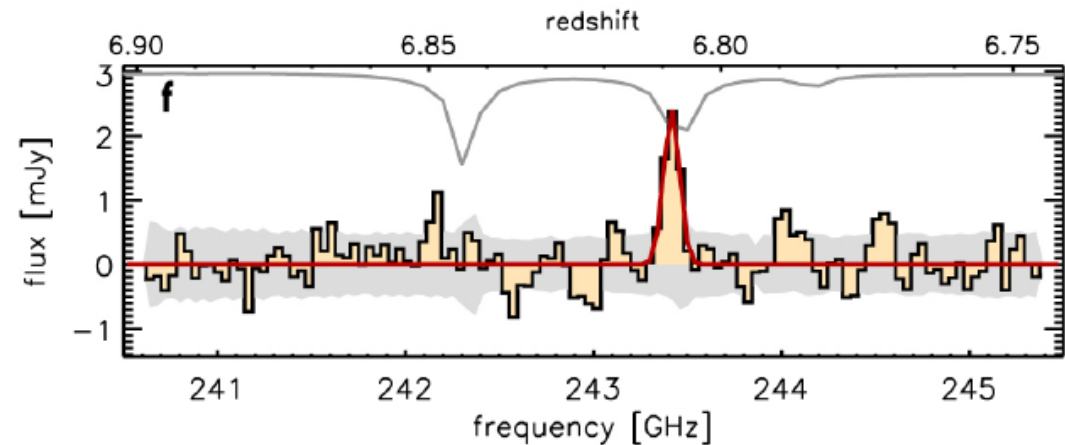
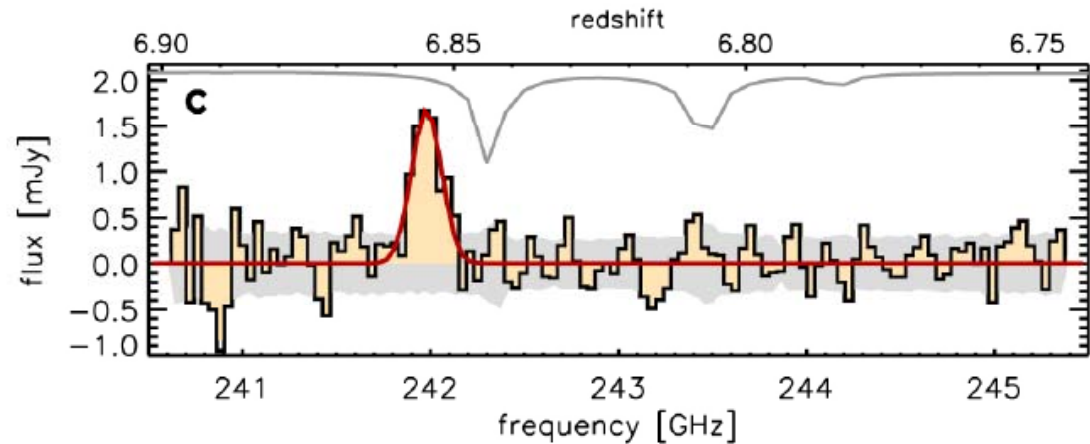


ALMA 240GHz

HST

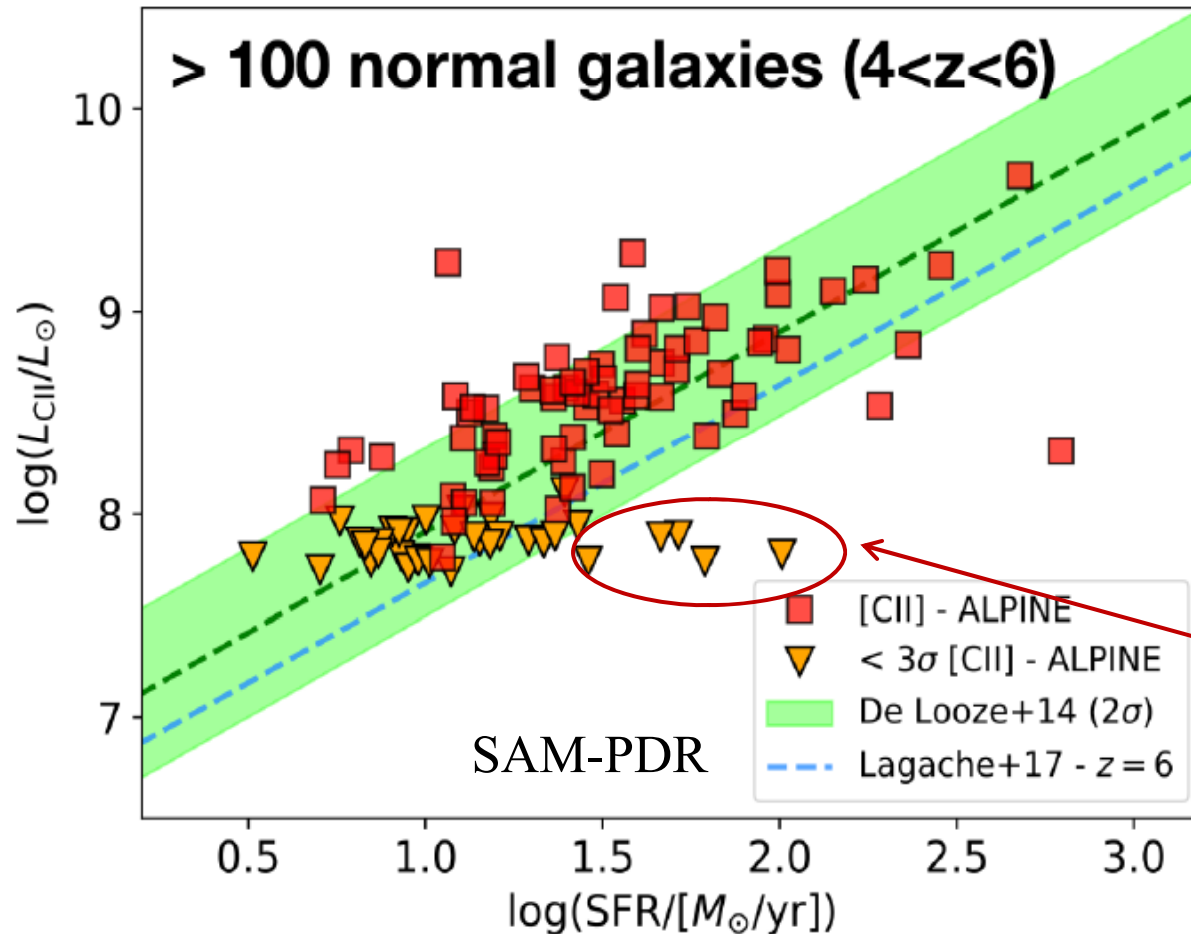


Lobe $\sim 1''$



Smit et al 2018

[CII]: Formation d'étoiles?



Observations ALMA
[CII] à $158\mu\text{m}$
décalées dans le mm

Relation [CII]-SFR
Plus bruitée
ISM plus complexe

Déficit de [CII]

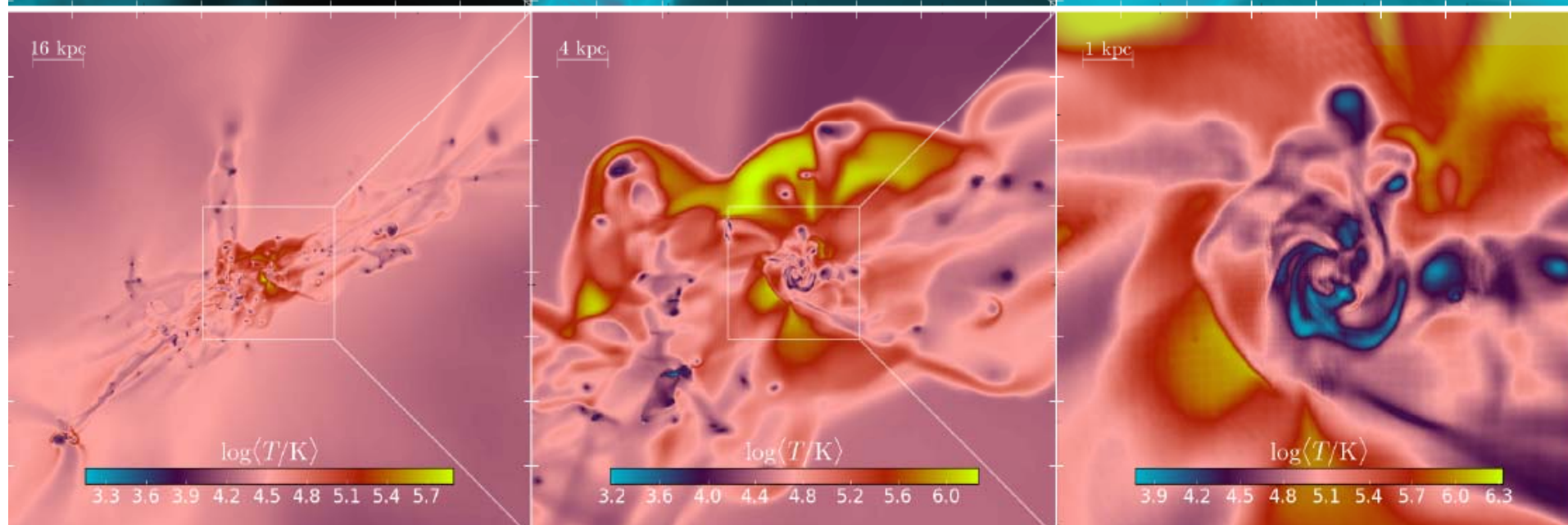
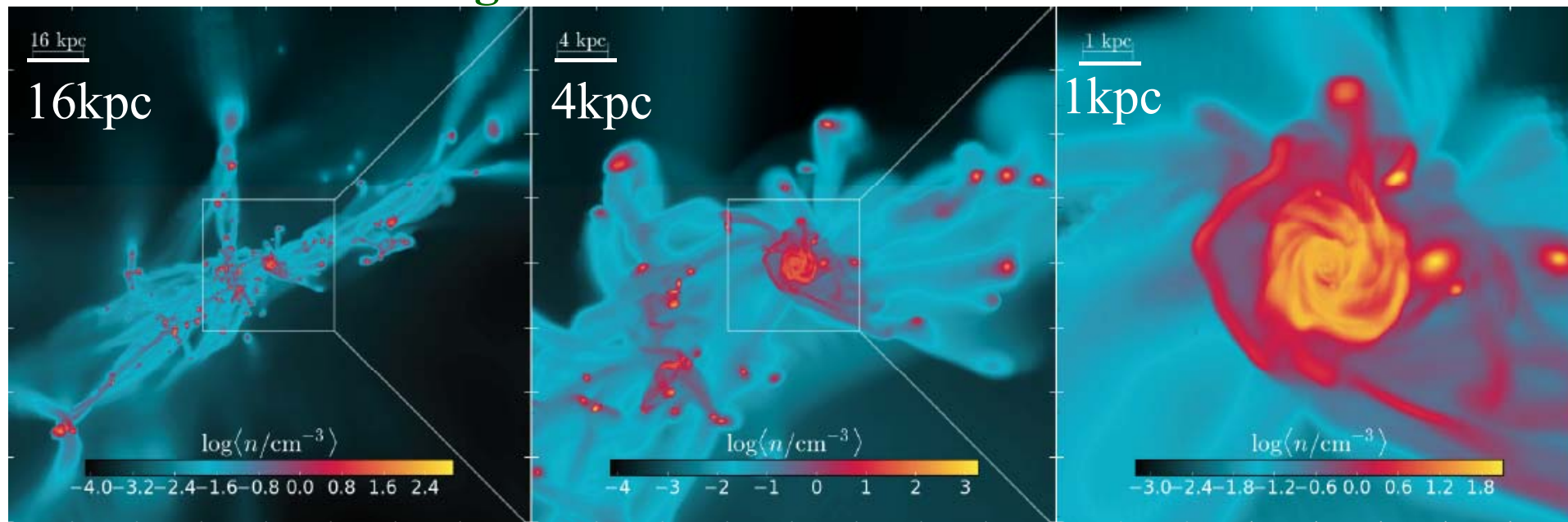
Dépend du champ de
radiation: **compact** ou
Étendu

Aussi Z, SN feedback

Schaerer et al 2020

Simulations de galaxies $z=6-12$

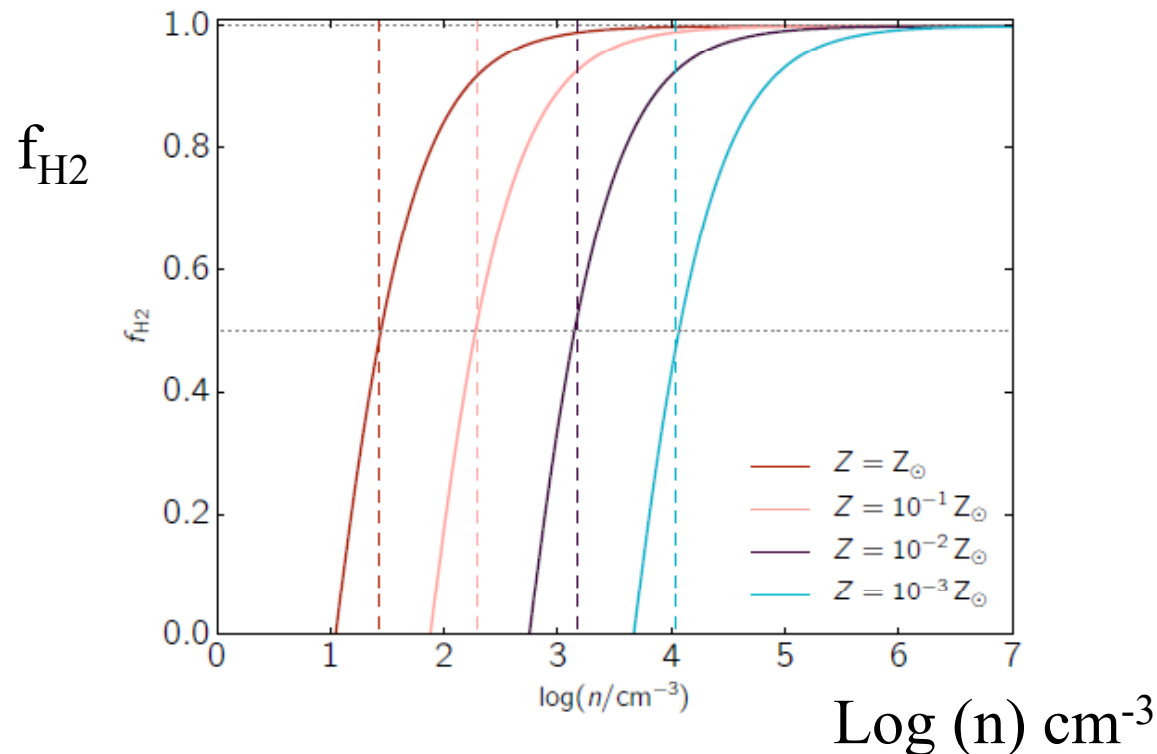
Densité



Température

Recettes et Ingrédients

- Zoom-in simulation à partir de filaments de matière noire
- Gaz dissipatif: chauffage et refroidissement (CMB inclus)
- Formation d'étoiles, instabilité de Jeans $t_{\text{ff}} \sim (G\rho)^{-1/2}$
Ou loi d'échelle de Kennicutt-Schmidt
- Feedback SN: cinétique, ou thermique
- Chimie du gaz: formation de H_2 , des métaux, poussière



Recette de formation
de H_2 en fonction
de la densité et
métallicité Z

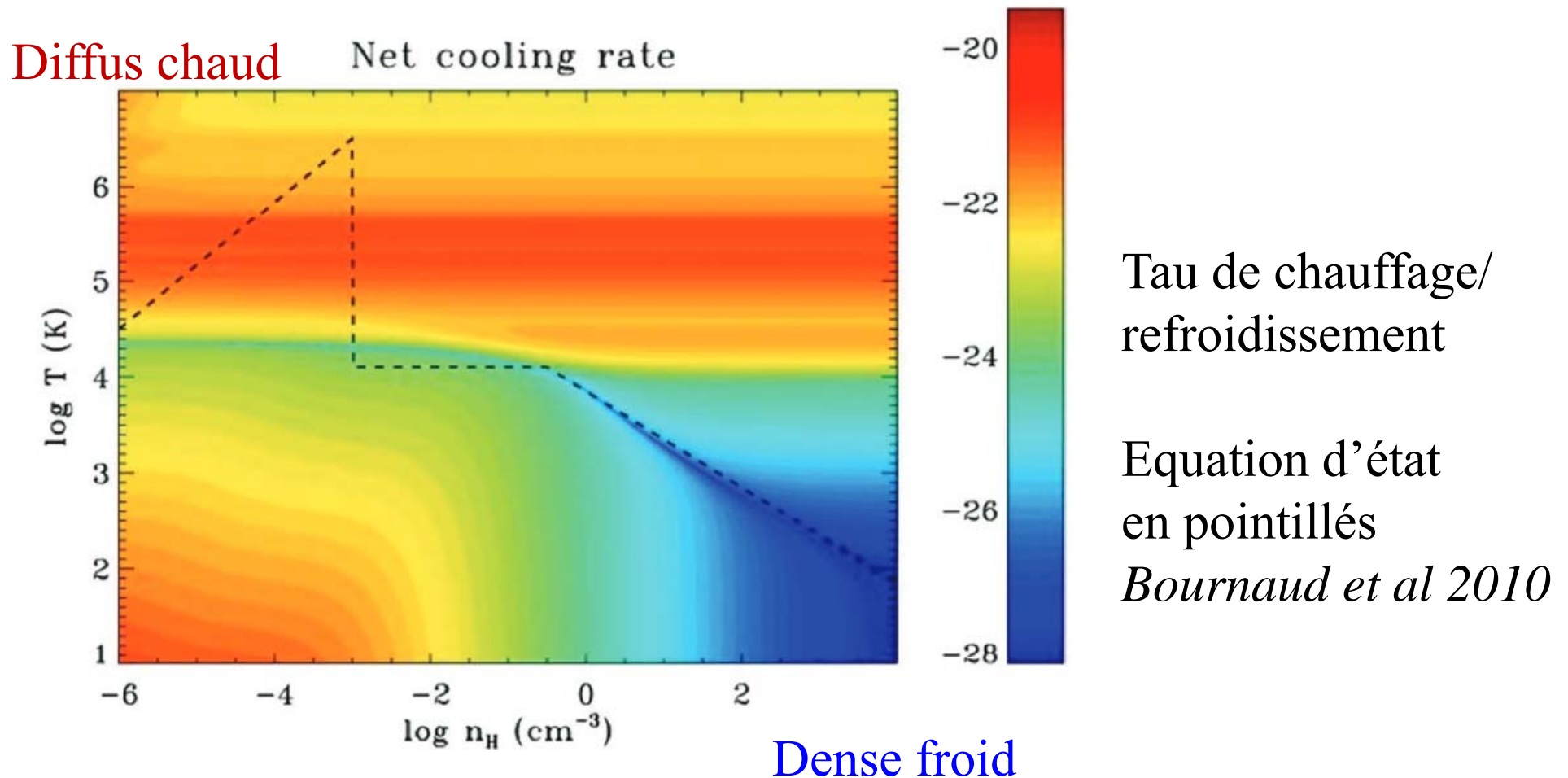
Equilibre

Krumholz et al 2009

Equation d'état du milieu

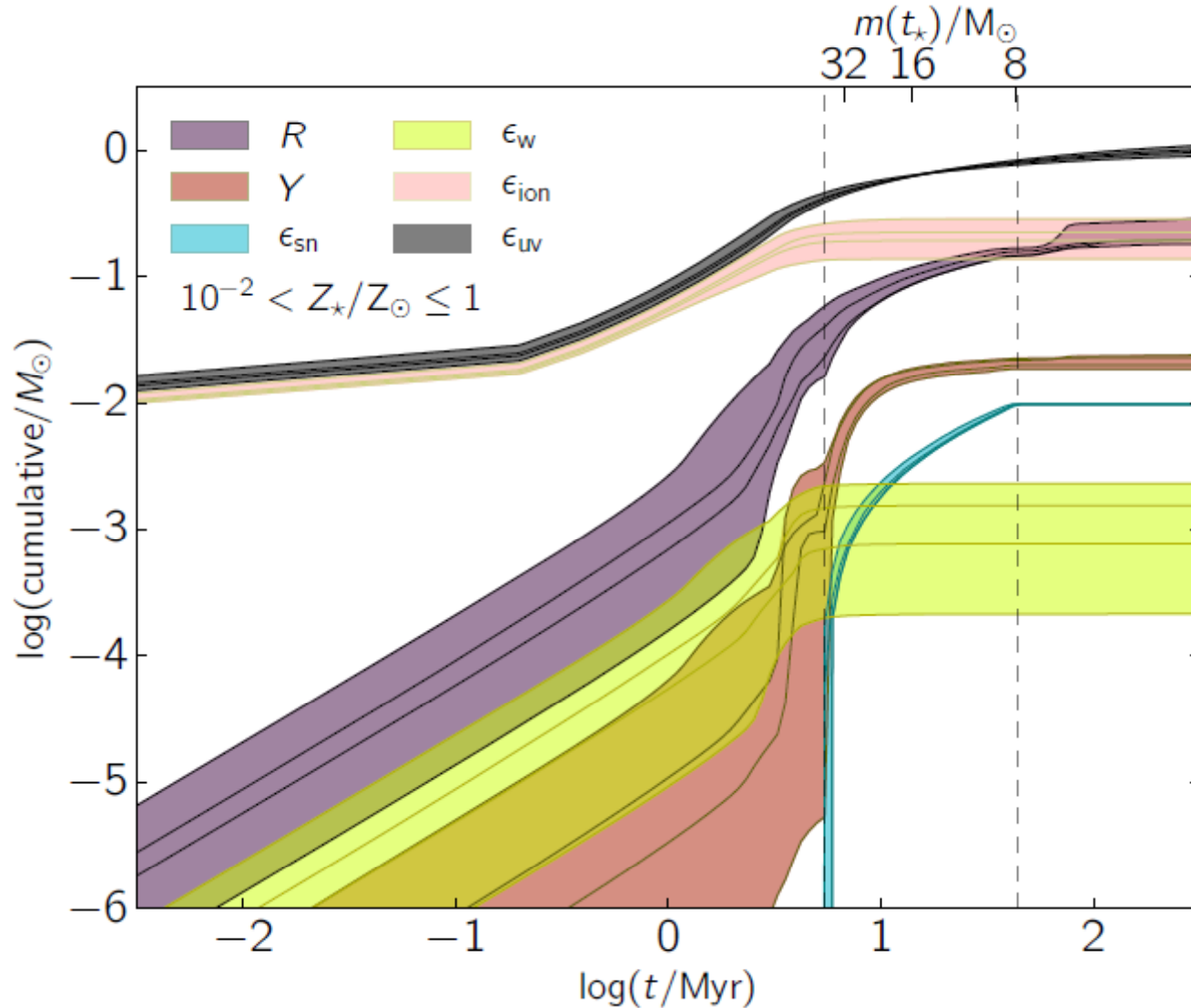
Effets artificiels dûs au manque de résolution:

Plancher de température (éviter que la masse de Jeans ne descende en dessous de la résolution)



Physique stellaire

Formation des éléments, et rejet dans le milieu interstellaire, en fonction du temps



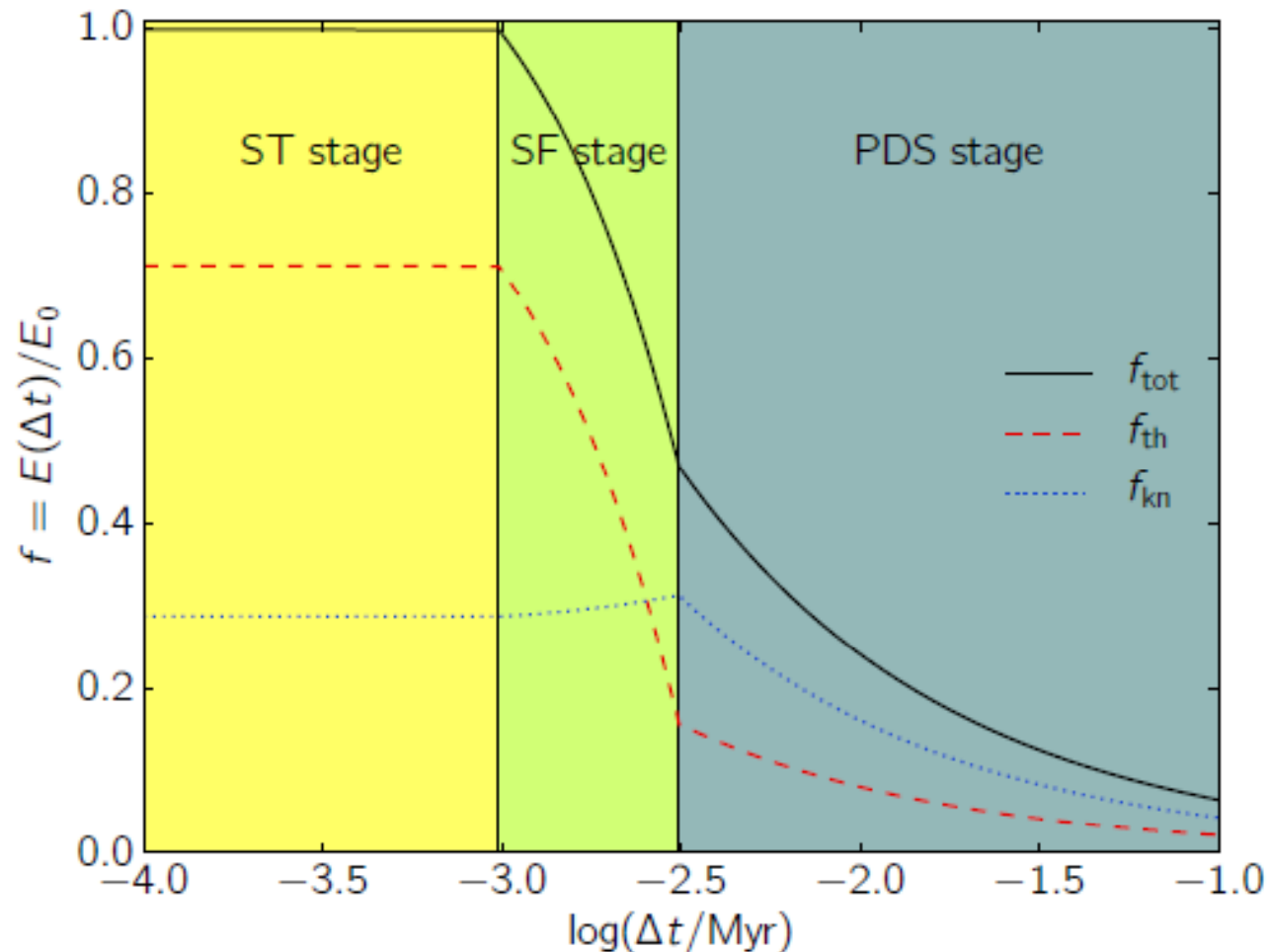
Rejet de masse R
Métaux Y
Energies SN
Vent, ionisation, UV
Par unité de M_{\odot}
Pallottini et al 2017

Feedback des supernovae

Plusieurs étapes pour rejeter l'énergie d'une explosion de SN

Fraction d'énergie en fonction du temps Δt ,

- ST= Sedov-Taylor (ST) conservation d'énergie



- shell formation (SF)
- pressure driven snowplow (PDS)

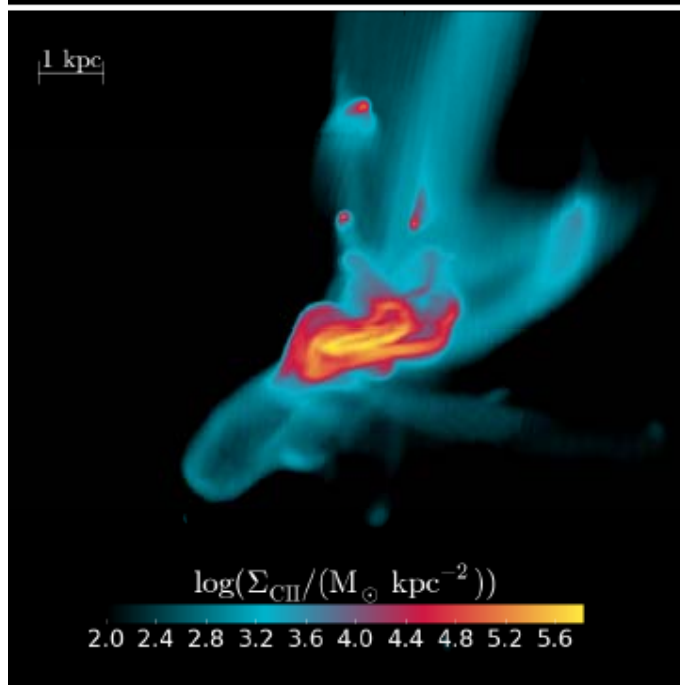
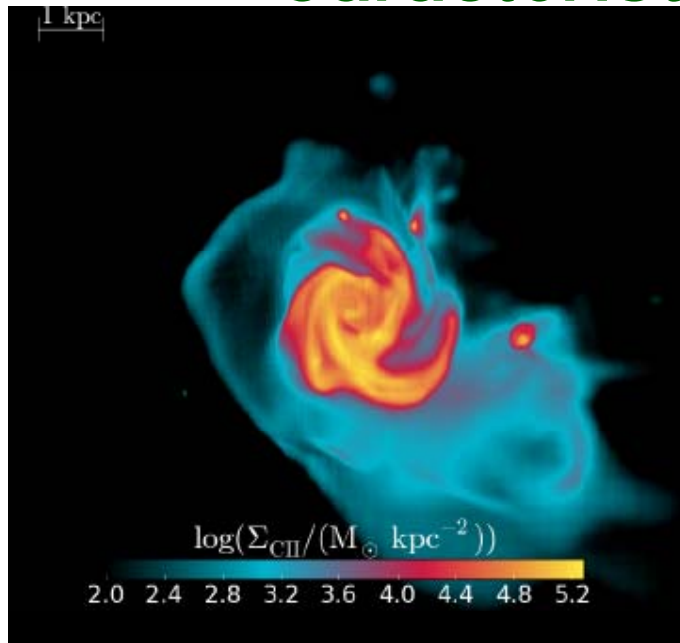
Pour $n=1 \text{ cm}^{-3}$
 $Z = 10^{-3} Z_{\odot}$

$$f_{\text{tot}} = f_{\text{thermique}} + f_{\text{cinétique}}$$

Pallottini et al 2017

$\Delta t \sim 10^{-2} \text{ Myr}$

Caractéristiques des galaxies à $z=6-8$



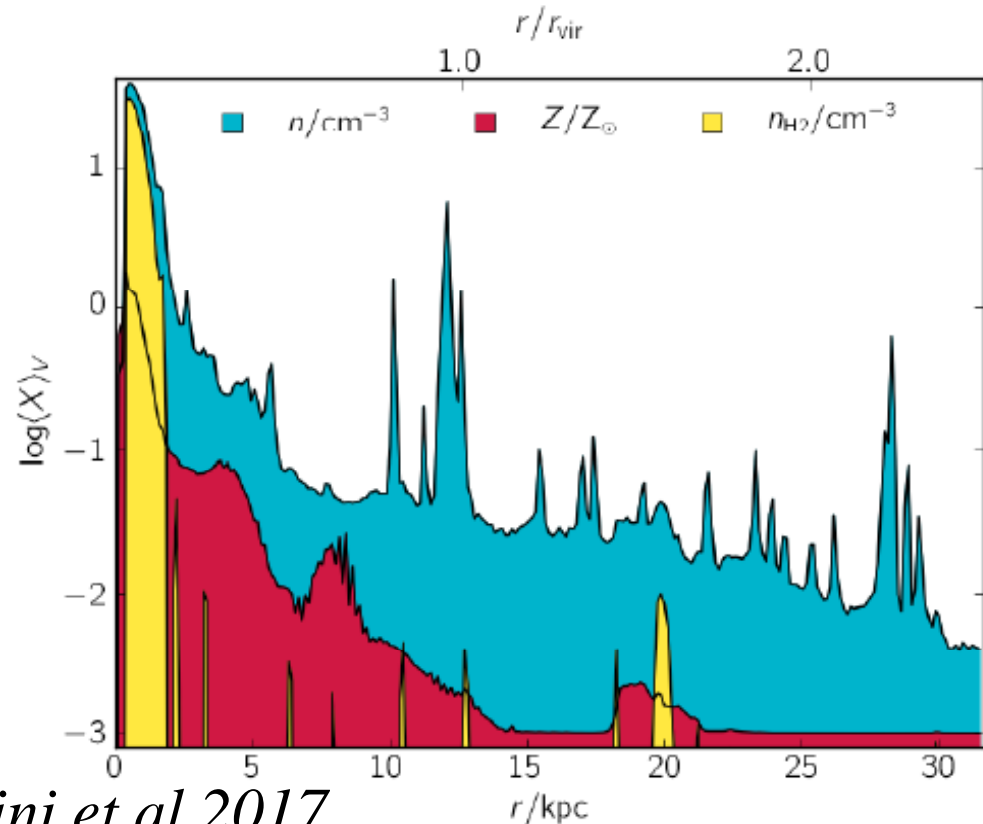
$$M_* = 1.6 \cdot 10^{10} M_{\odot}$$

$$M(\text{H}_2) = 3 \cdot 10^8 M_{\odot} \text{ (2\%)}$$

Disque $R_{\text{eff}} = 0.6 \text{ kpc}$, hauteur 200pc

$$L(\text{CII}) = 3 \cdot 10^7 L_{\odot} + \text{outflow}$$

Fusions fréquentes, $\text{SFR} \sim 20 M_{\odot}/\text{an}$



Pallottini et al 2017

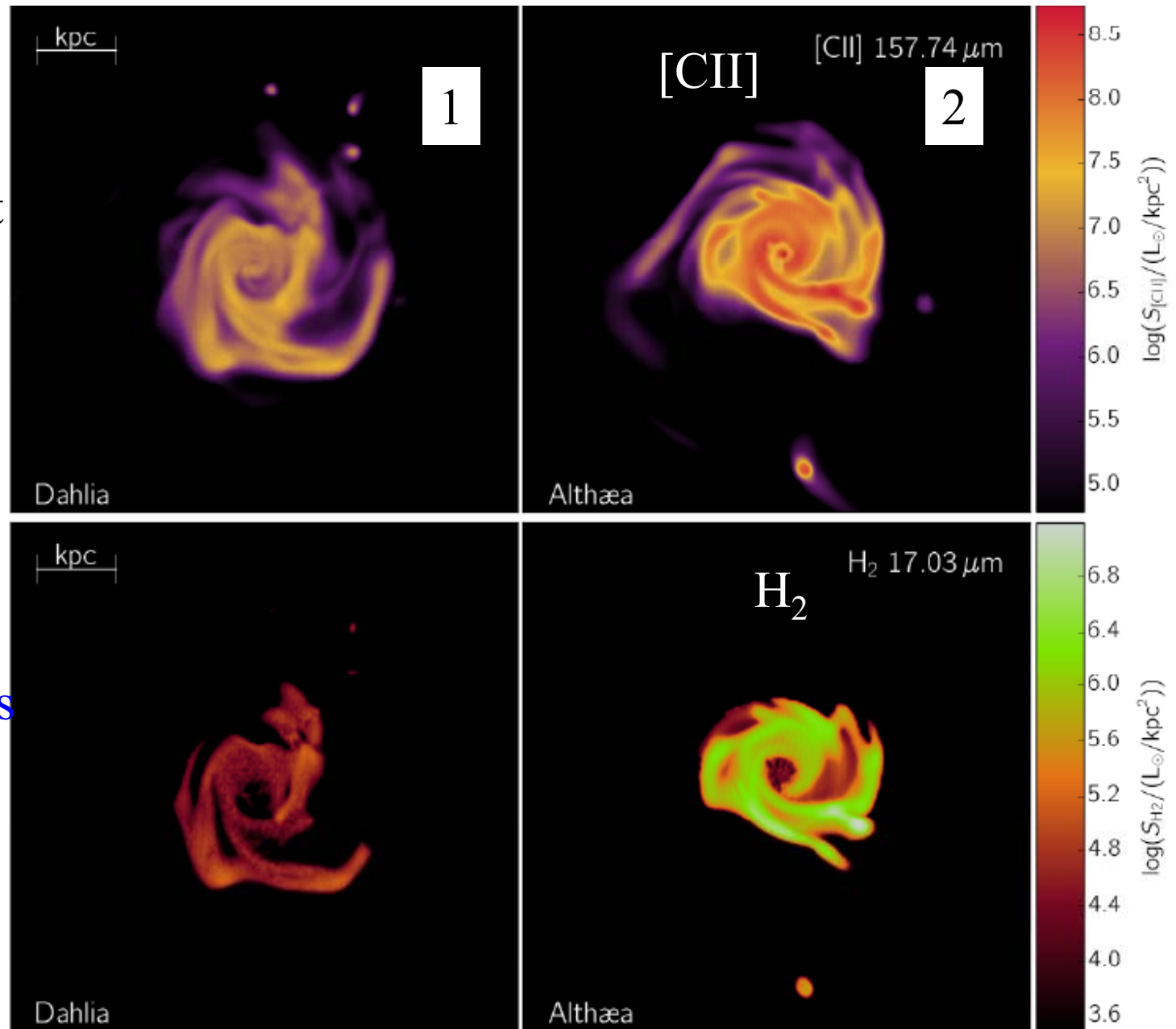
Les recettes
changent
significativement
les résultats

[2] $H \rightarrow H_2$ non
équilibre

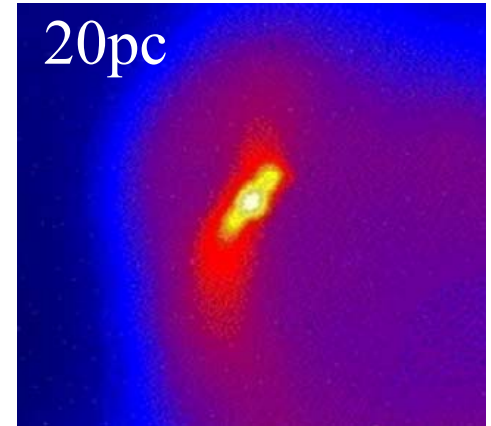
Plus de H_2 , [CII]

Plus de fragments
SFR, et feedback

Correspond aux
observations



Evaporation des petits halos



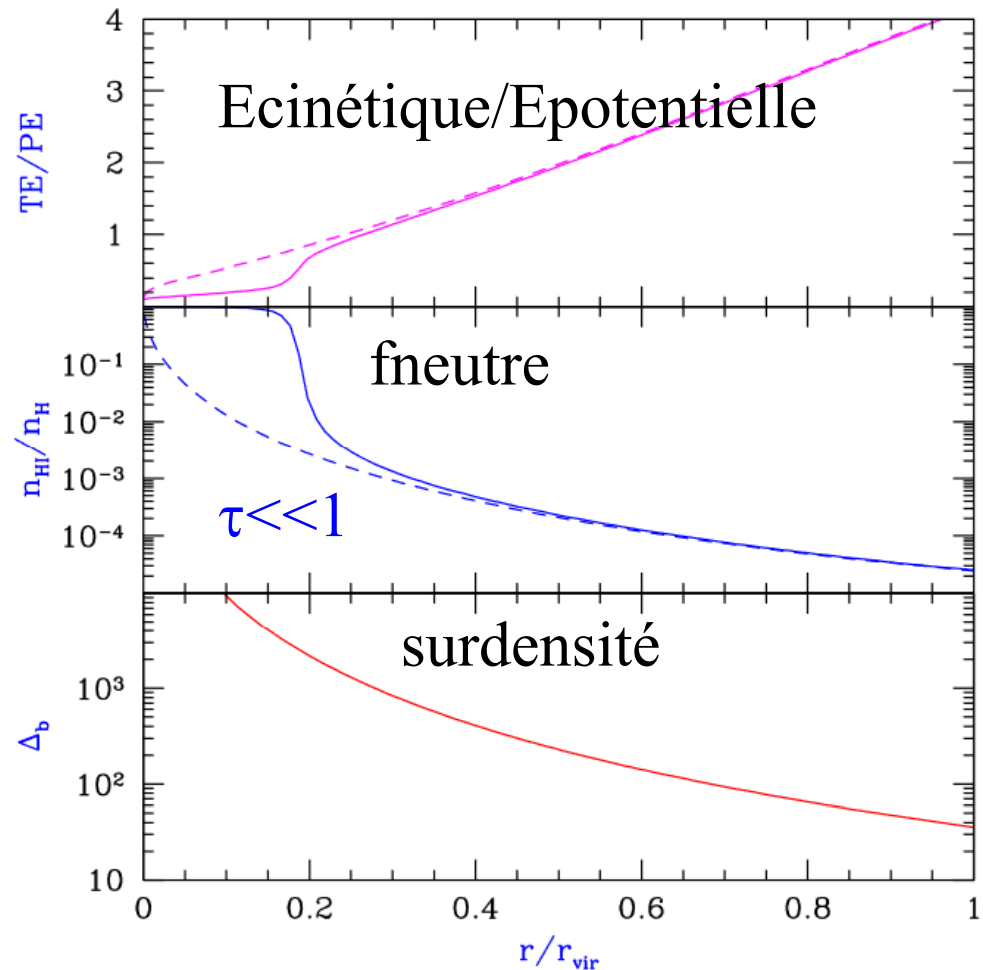
La ré-ionisation augmente le flux UV intergalactique,
et la température: 10^4K pour H

Le gaz des halos peu massifs ($T_{\text{viriel}} < 10^4\text{K}$)
peut être évaporé

→ **Solution du problème
des satellites manquants?**

Halos $V_{\text{cir}} < 20\text{km/s}$, avec flux
de gaz à cette vitesse

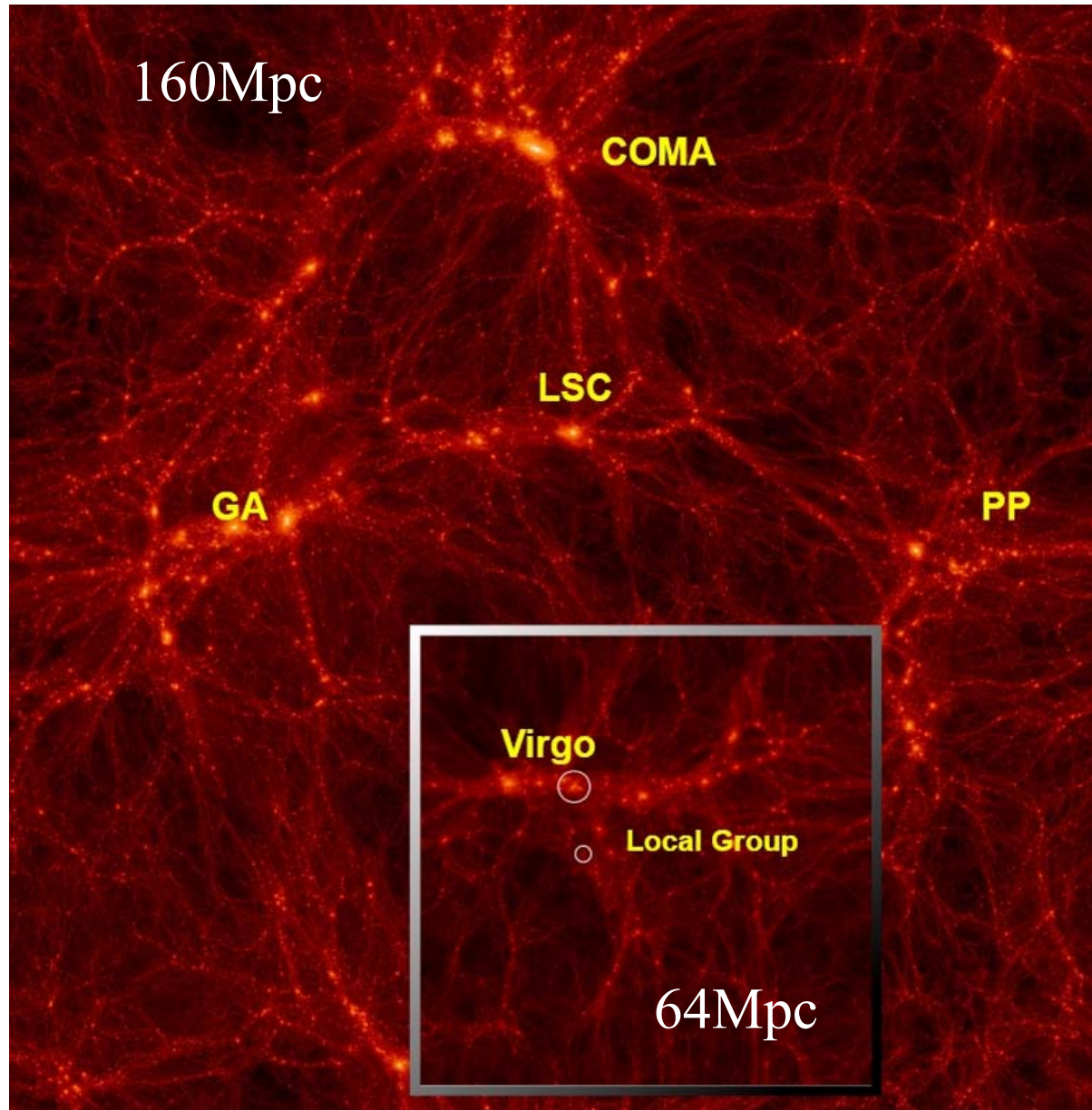
Le gaz restant piégé dans les
mini-halos serait à l'origine
des systèmes Ly α saturés (DLA)



Barkana & Loeb 1999

$z=40.999$

Simulations contraintes du groupe local



Les conditions initiales
Sont contraintes avec les
positions et vitesses
des galaxies locales

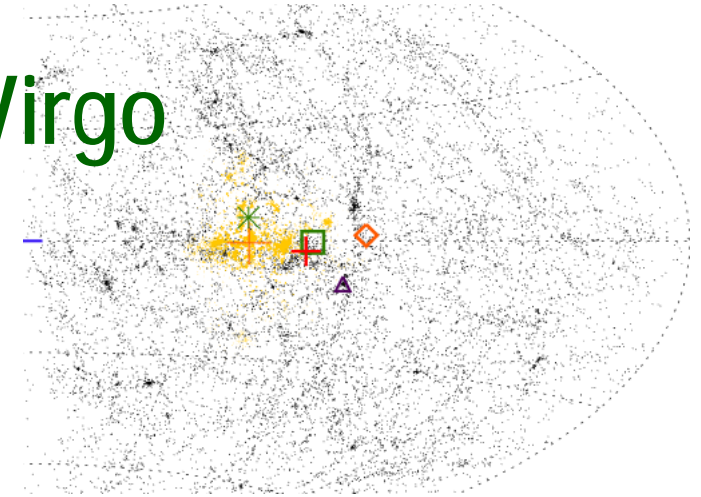
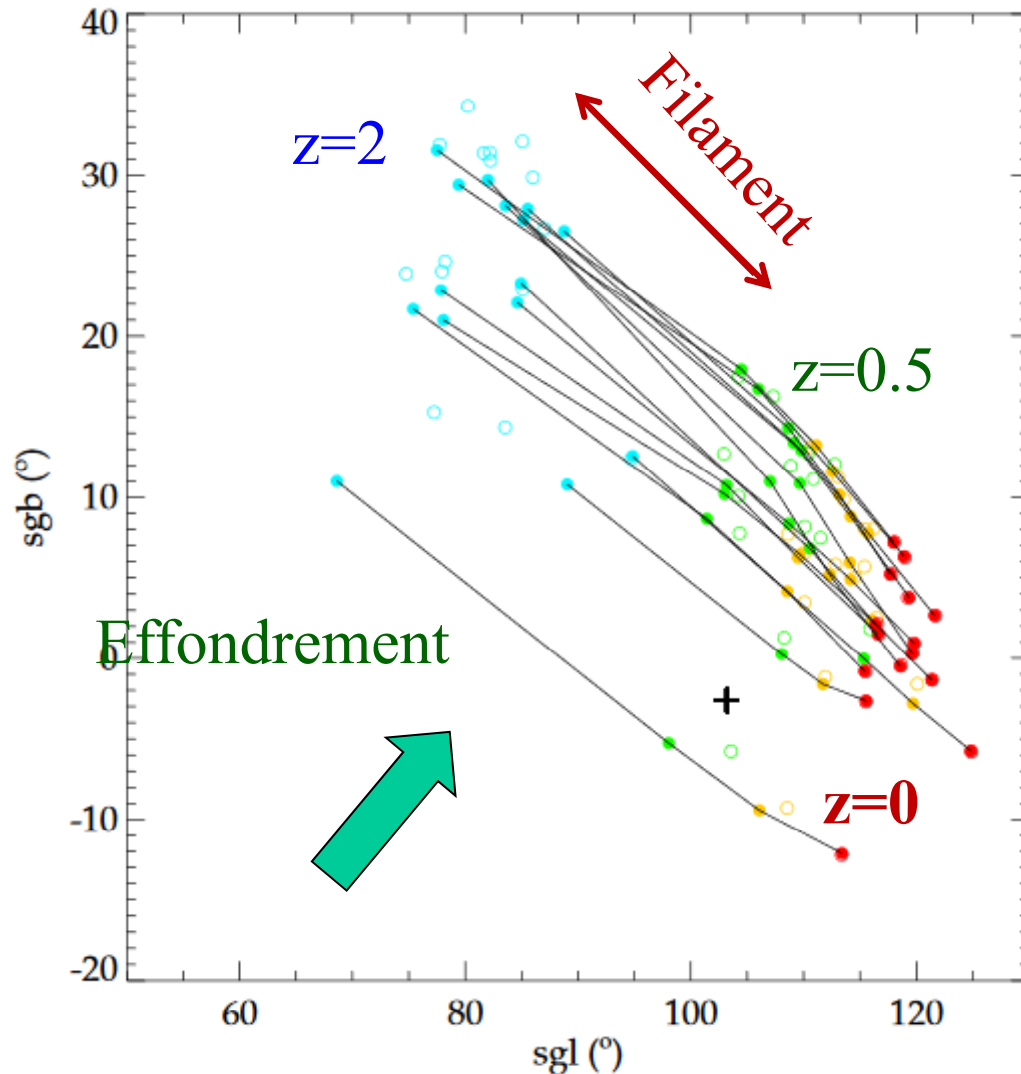
PP Perseus-Pisces

LSC Leo Supercluster

GA Great Attractor

Sorce et al 2016

Simulations de la formation de Virgo



Conditions initiales
contraintes par les
vitesses de
« Cosmic Flows » $2 \cdot 10^4$ gal

Boîte de 500Mpc
Lente accrétion durant les
7 derniers milliards
d'années
Directions perpendiculaires
à l'effondrement

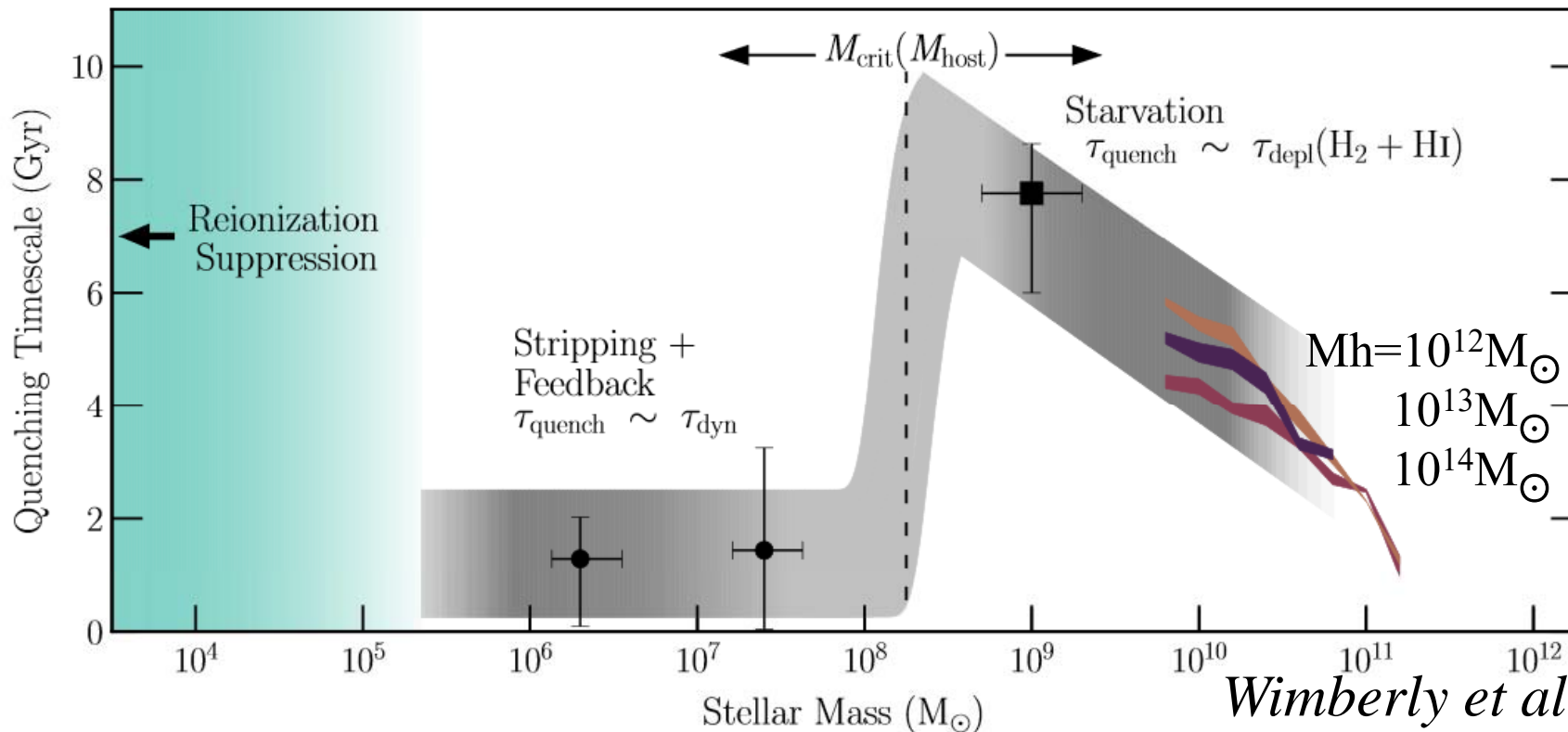
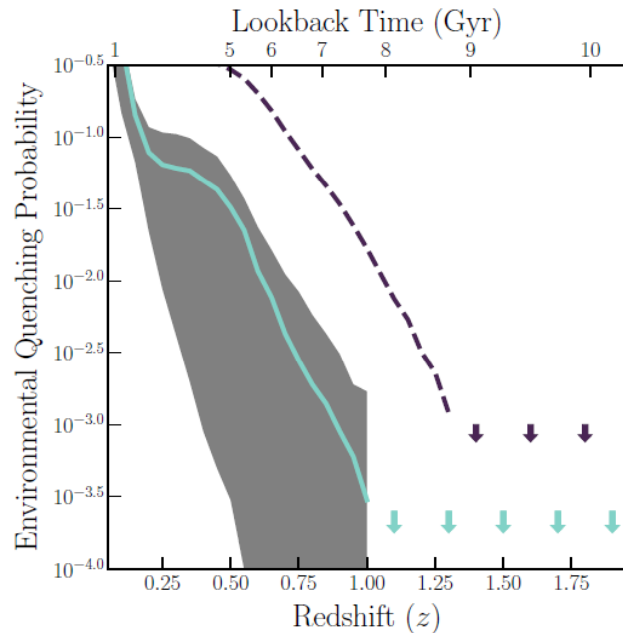
Sorce et al 2016

Suppression du SFR

Les galaxies naines au voisinage de la MW
Ont été accrétées après $z=1$

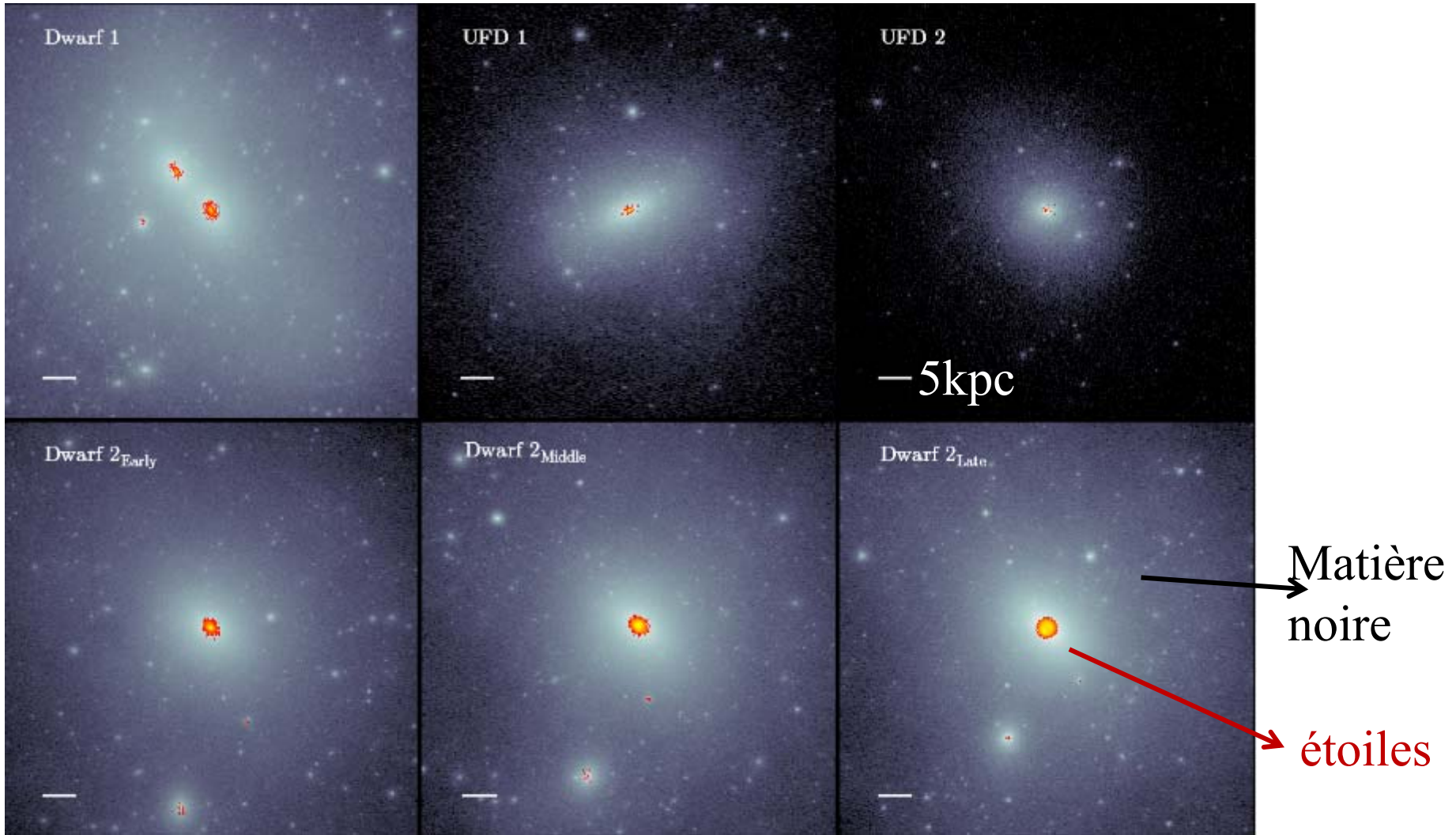
Leurs étoiles sont plus vieilles $z > 2$

→ La réionisation est en cause, seulement
pour $M_* < 10^5 M_\odot$



Wimberly et al 2017

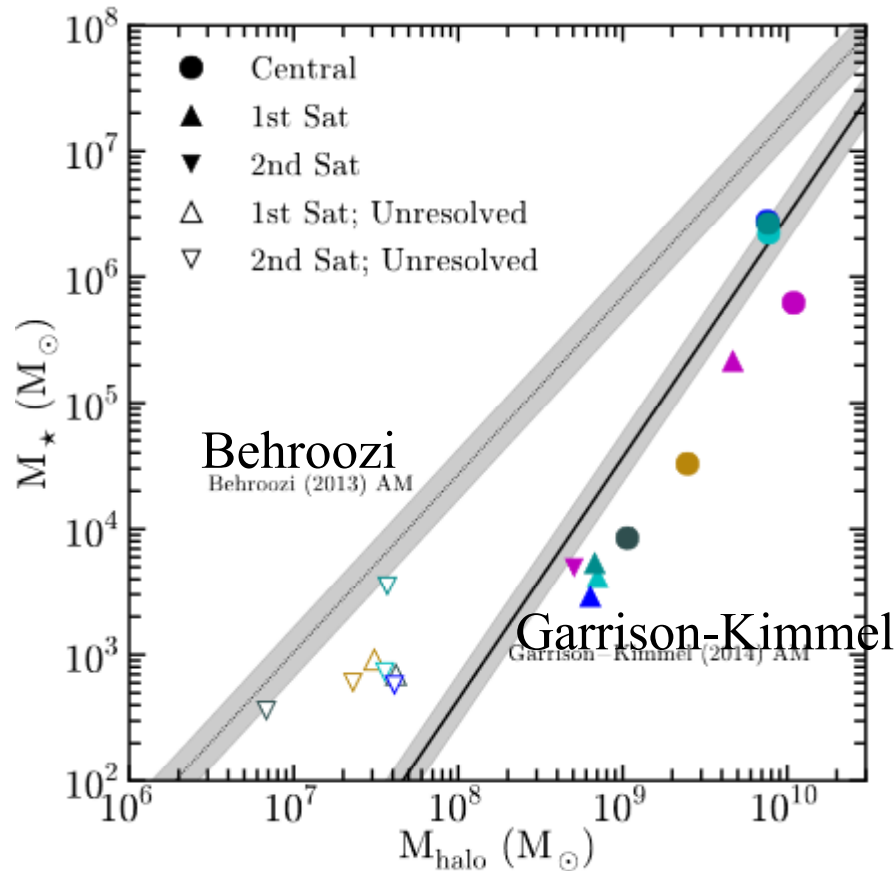
Limite pour SF stoppée par la réionisation $M_* < 3 \cdot 10^4 M_\odot$
Au-dessus de $M_{\text{halo}} = 5 \cdot 10^9 M_\odot$, les galaxies ont des satellites encore actifs



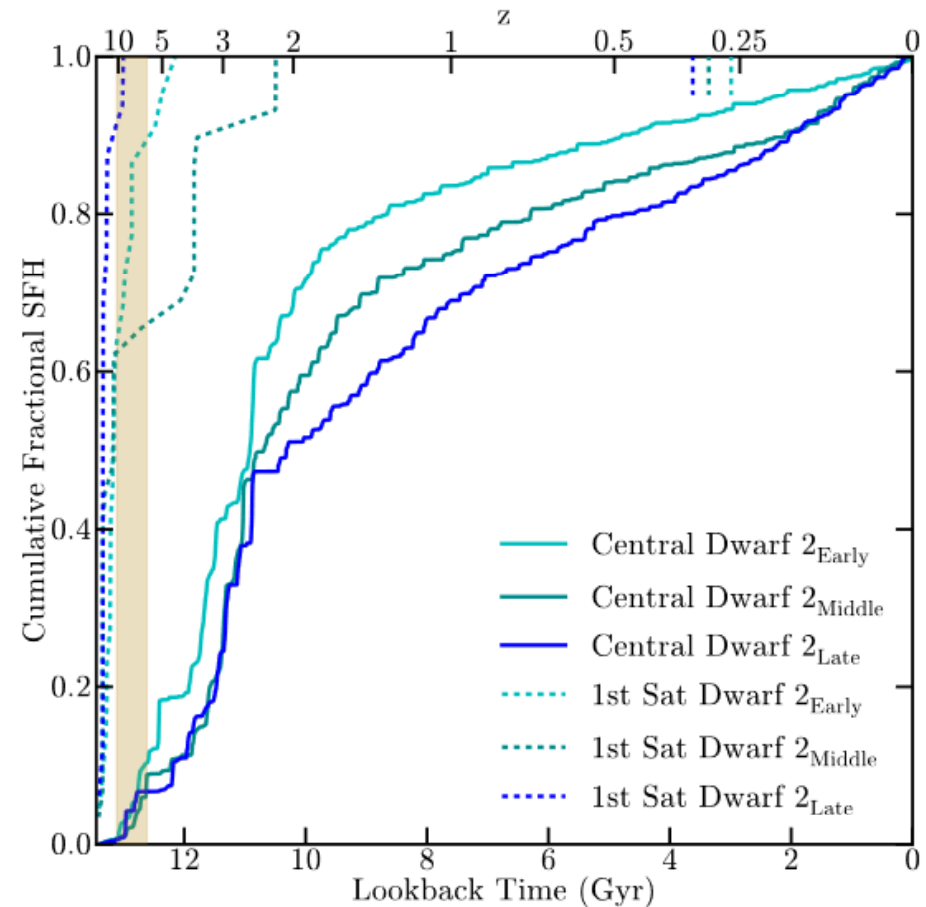
Wheeler et al 2015

Formation d'étoiles supprimée

Position des satellites simulés



Histoire de formation d'étoiles



Comparaison avec « Abundance Matching » AM

Wheeler et al 2015

Les premiers amas d'étoiles

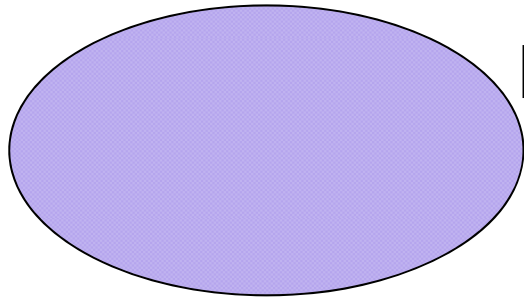
Fragmentation, et formation
de naines, (4 fois trop)

Moins de fragmentation, IMF correct

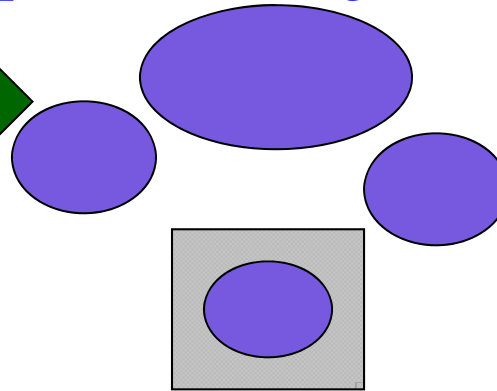
Bate
2009

Formation de la première étoile

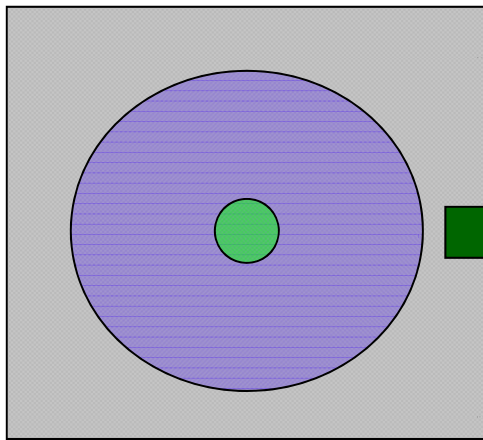
1. Effondrement du premier nuage



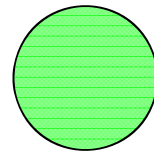
2- Fragmentation en plusieurs nuages



3-Formation proto-étoile



4. Accrète du gaz, et rejoint la séquence principale



Taux d'accrétion élevé

$$dM/dt = c_s^3/G \sim T^{3/2}$$

$$= 10^{-2.5} M_{\odot}/\text{yr}$$

pas de métaux ($T \sim 300\text{K}$)

→ temps de formation court ($10^{-6} M_{\odot}/\text{yr}$ à $z=0$)

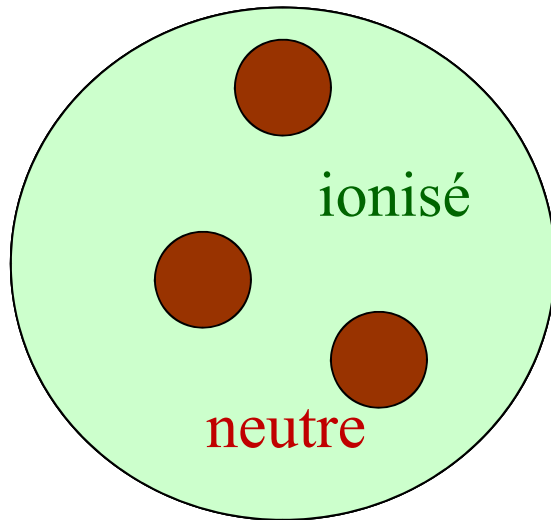
Faible opacité pas de poussière

→ faible pression de radiation (pas de feedback)

$$M_* = 100-1000 M_{\odot}$$

Etoiles de 2ème génération

Très rapidement



- Après la mort de la 1ère étoile, d'autres étoiles se forment dans la région HII fossile

*(Oh & Haiman 2004,
Nagakura et al 2005)*

Condition initiale différente

- Ionisation par les 1ères étoiles
- fluctuation de densité par les SN, ou régions HII

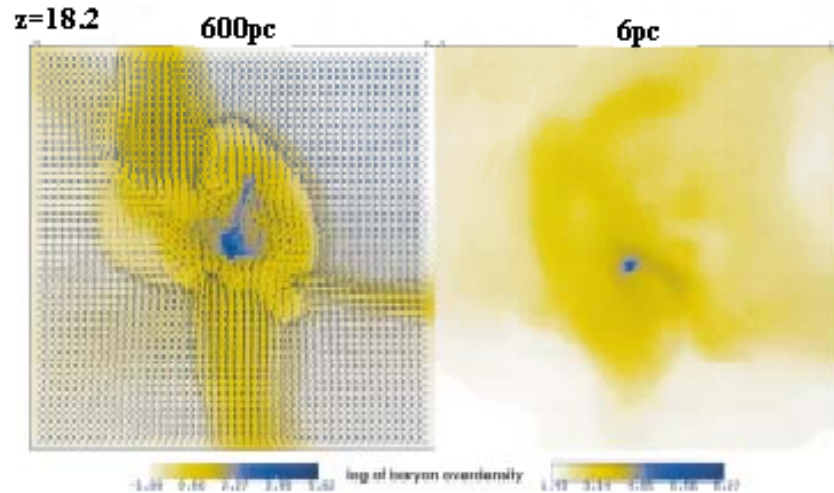
Environment Different

- Radiation externe (UV, Rayons Cosmiques)

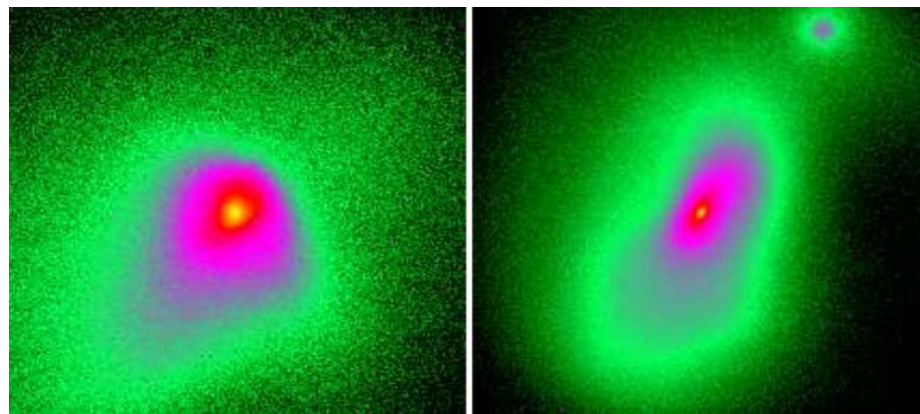
Composition Différente

- Métaux, Poussière
- **Un faible Z ($\sim 10^{-5}Z_{\text{sun}}$) suffit à induire la transition vers la formation d'étoiles moins massives**

Simulations 3D: formation des premières étoiles



Abel, Bryan & Norman 2002



23.5pc

0.5pc

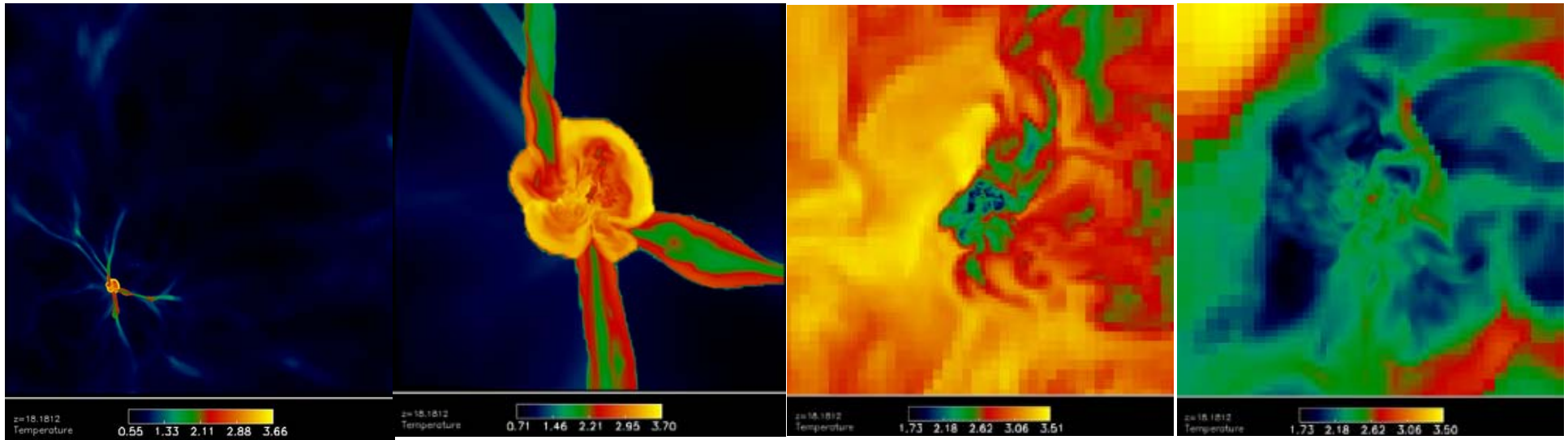
Bromm & Loeb 2004

- Les simulations 3D ont atteint $n > 10^{12} \text{cm}^{-3}$

Transfert radiatif requis pour atteindre $n \sim 10^{22} \text{cm}^{-3}$ dans les proto-étoiles

- Comparaison avec simulations 1D

$z=21.5$

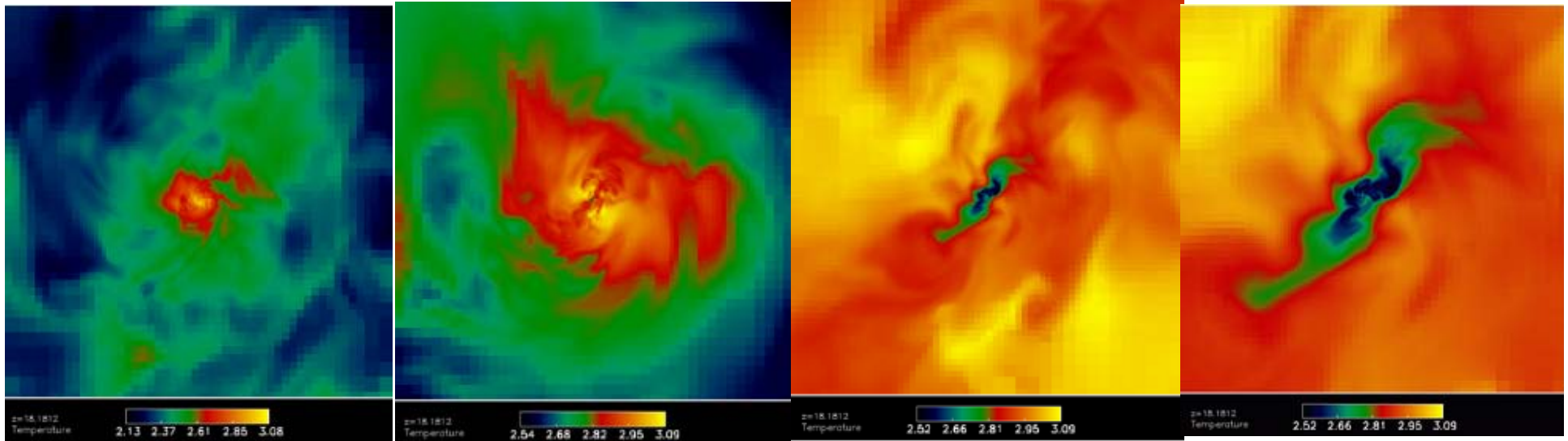


6kpc

600pc

60pc

6pc



0.6pc

0.06pc

6mpc

0.6mpc

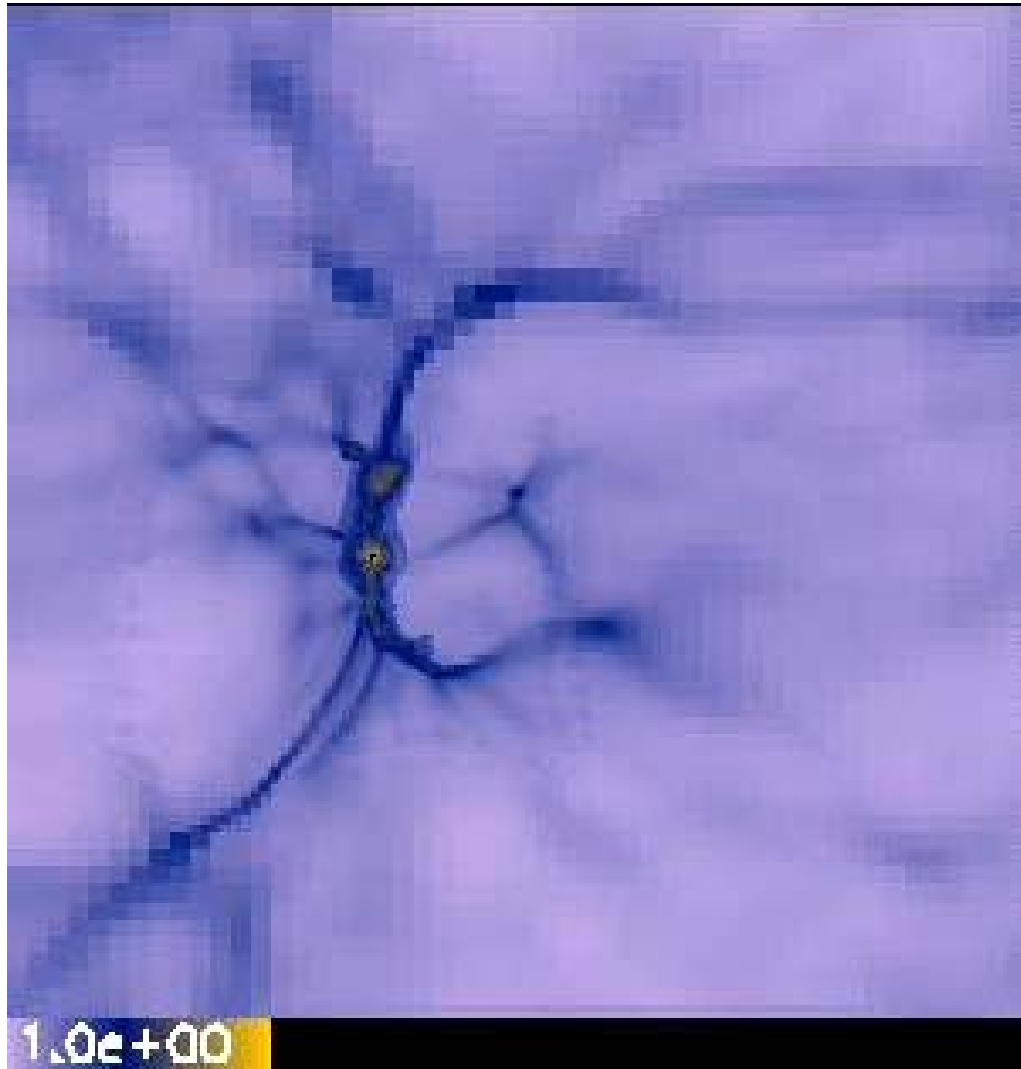
Couleur = $\log T$ entre 3 et 3000K

Abel et al 2002

120AU

Formation de la première étoile

De 6kpc à $z=20$ jusqu'à 100 AU à $z=18$

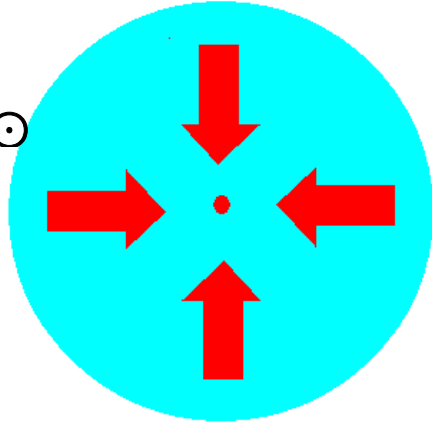


Zooms successifs
Grande dynamique
 $>10^{10}$

Abel et al 2002

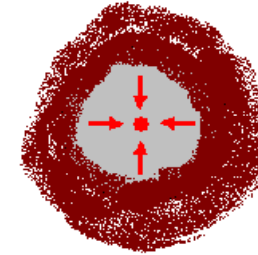
Formation étoiles Pop I vs Pop III

$T=10^5\text{K}$
 $L = 10^6 L_{\odot}$



Pop III coeur
 $M_{\text{core}} : 10^{-3}M_{\odot}$
 $M_{\text{frag}} : >10^3M_{\odot}$
 $dM/dt : 10^{-2}M_{\odot}$
Pas de poussière

Accrétion continue
Etoiles très massives
(100-1000 M_{\odot})



$T = 5 \cdot 10^3\text{K}$
 $L = 1 L_{\odot}$

Pop I coeur
 $M_{\text{core}} : 10^{-3}M_{\odot}$
 $M_{\text{frag}} : >0.1M_{\odot}$
 $dM/dt : 10^{-5}M_{\odot}$
Avec grains de poussière

Les étoiles massives (>10 M_{\odot})
se forment difficilement

Cas de l'émetteur Ly α CR7

CR7 « Cosmos Redshift 7 »

Un des plus puissants LAE à $z=6.6$ $L(\text{Ly}\alpha) = 10^{44}$ erg/s

(*Sobral et al 2015*) Pas de métaux

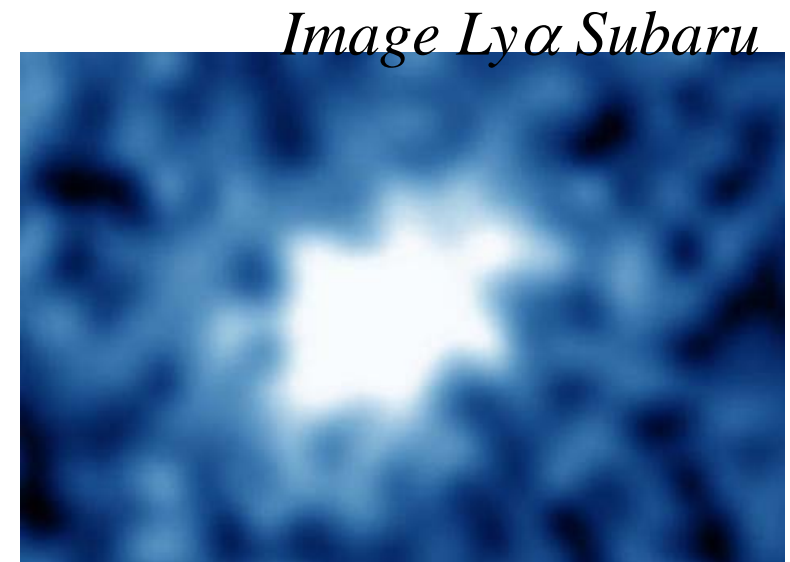
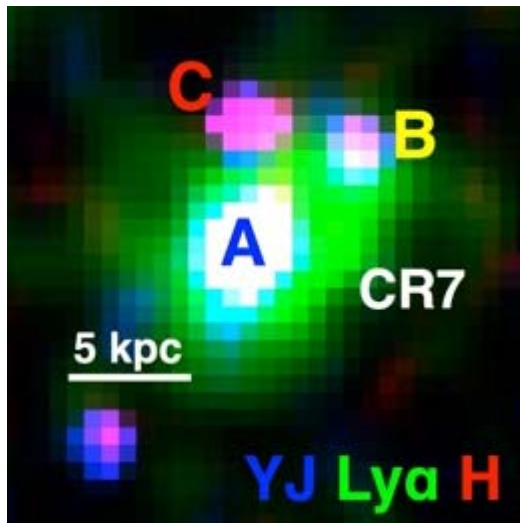
Fort rayonnement ionisant (HeII) → existence de PopIII?

Starburst, peut-être un trou noir à effondrement direct?

AGN? Pas de variabilité

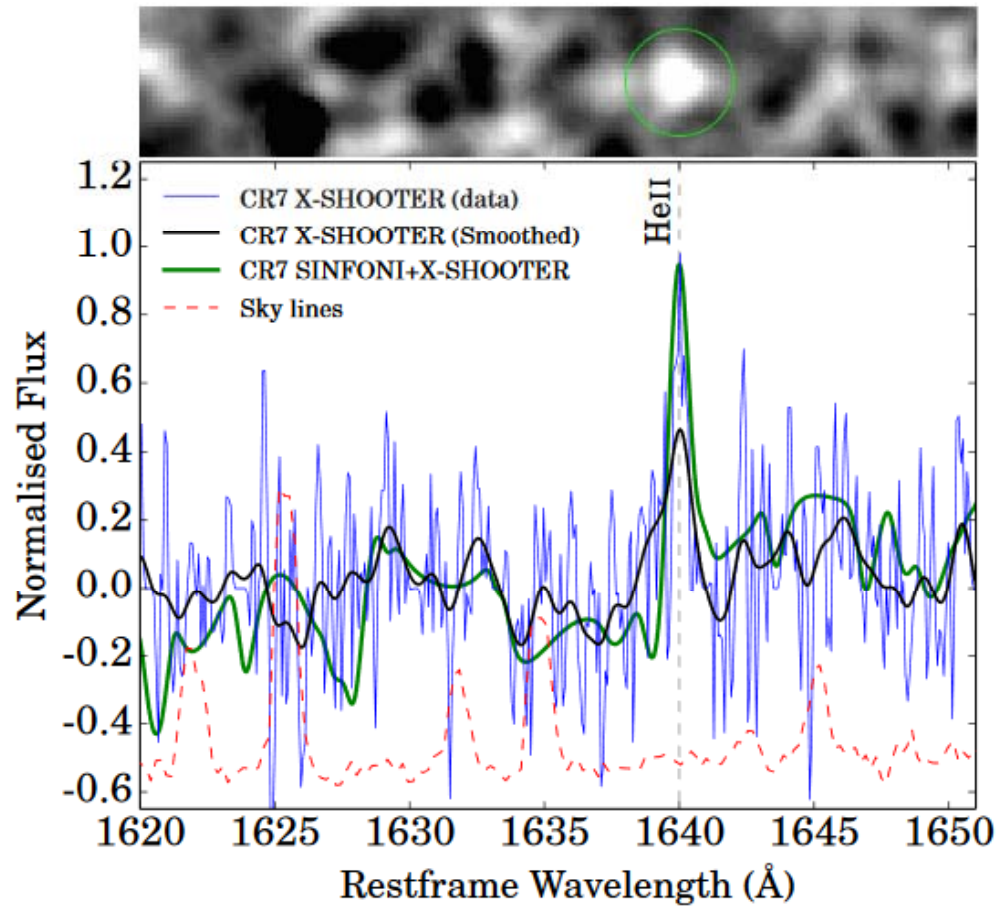
ALMA [CII] → formation d'étoiles, sans poussière

(*Matthee et al 2017*) **Formation d'une galaxie massive par fusion**

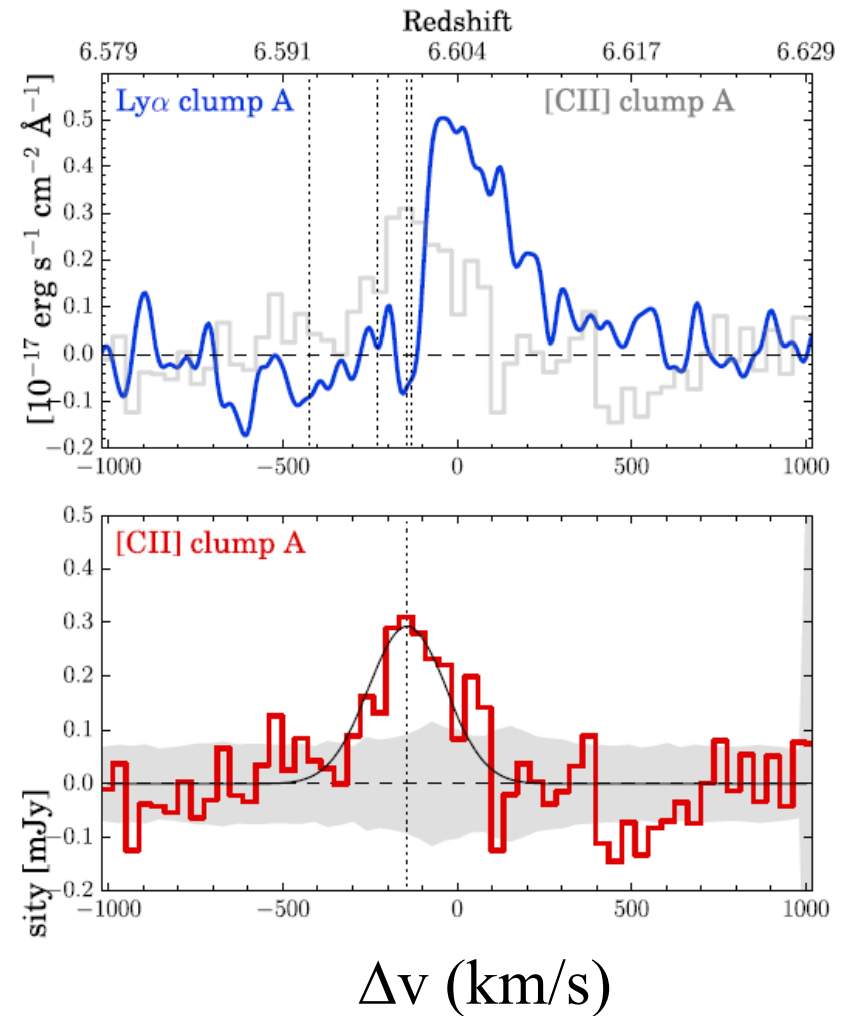


HeII et Ly α dans CR7

Raie HeII associée à B

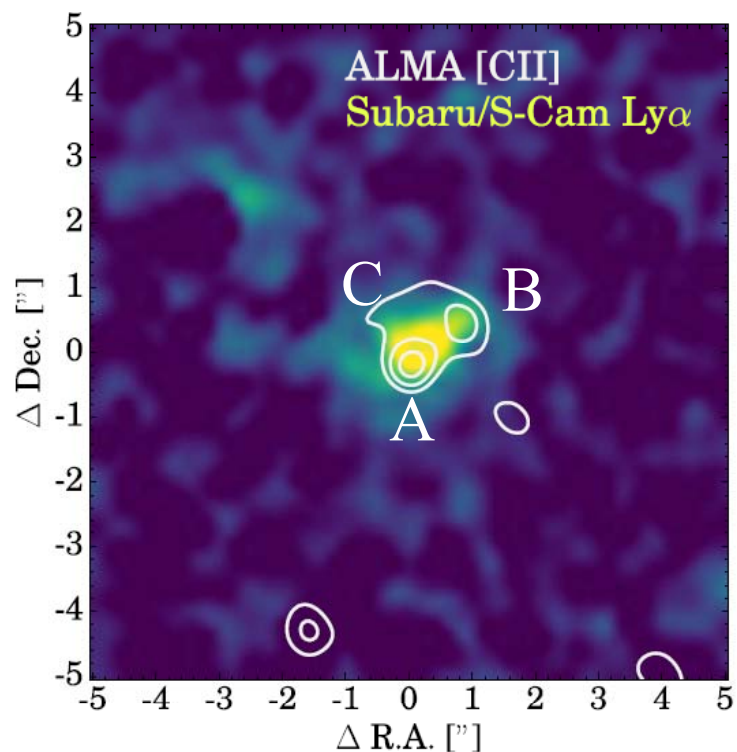


Sobral et al 2015, 2018

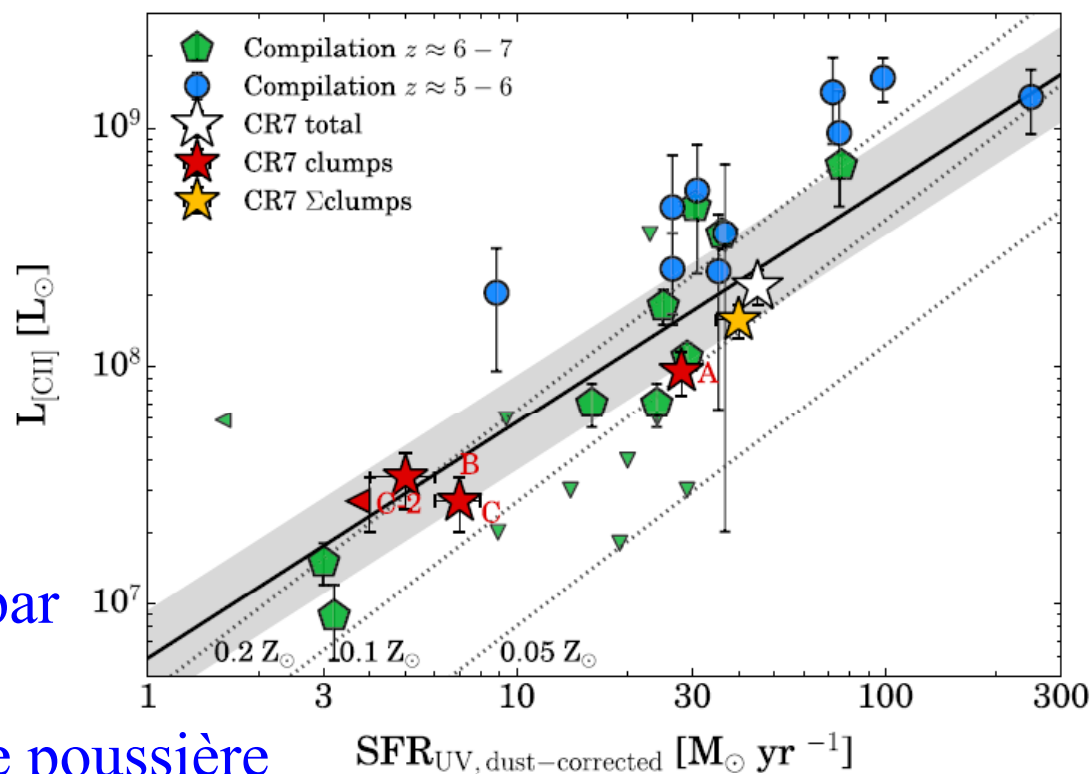


Matthee et al 2017

ALMA [CII] dans CR7



Les 3 clumps de [CII] correspondent à la formation stellaire: A $28M_{\odot}/\text{an}$
 $M_*(A)=4 \cdot 10^{10} M_{\odot}$



Pas d'évidence d'excitation par un noyau actif AGN

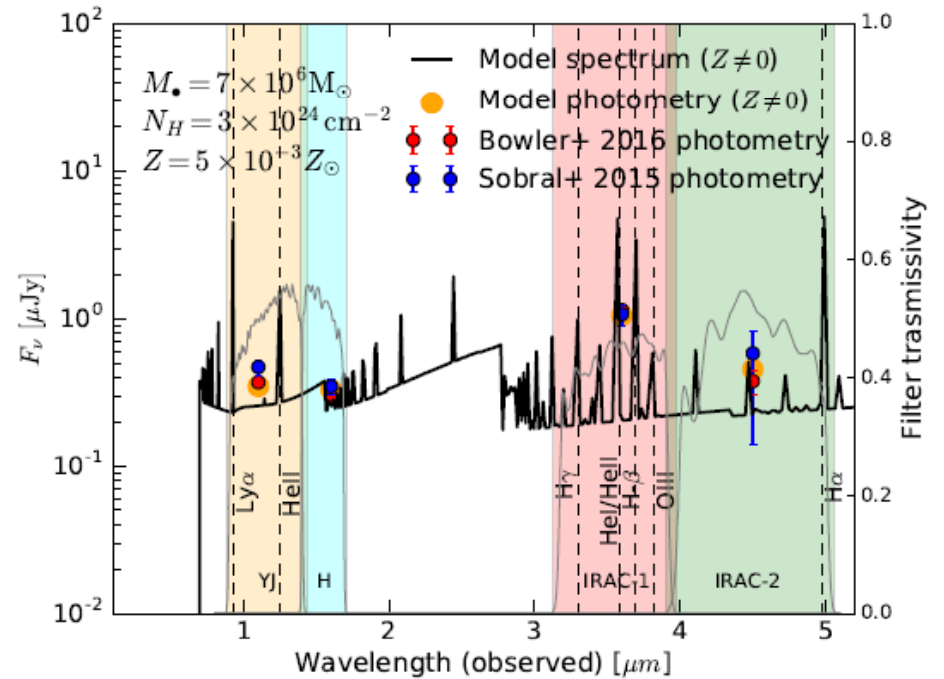
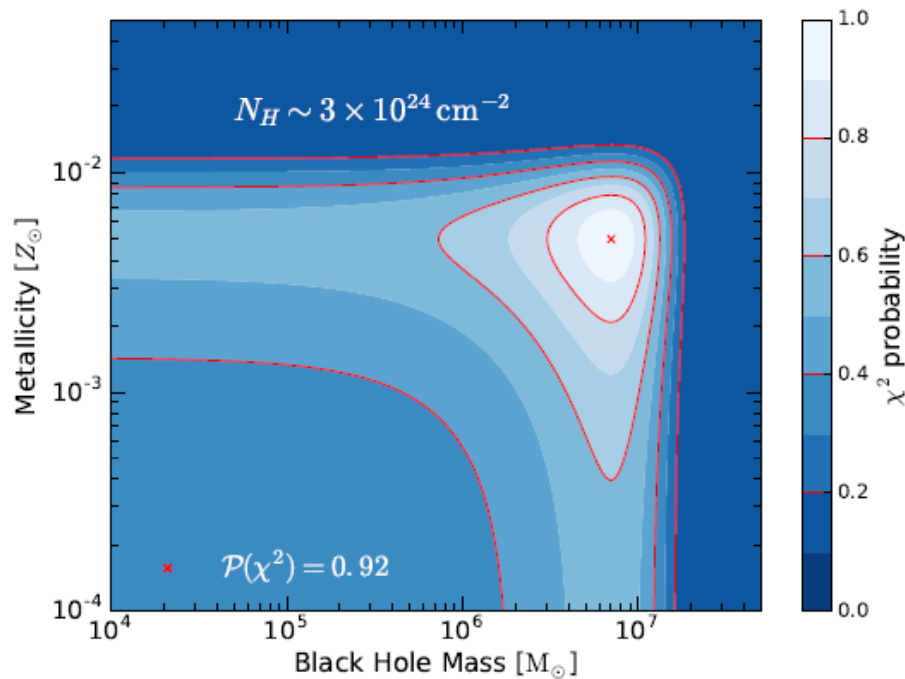
Abondance de C, mais pas de poussière (pas de continuum avec ALMA)

$0.1 < Z/Z_{\odot} < 0.2$

Matthee et al 2017

Simulations pour CR7

Transfert radiatif+hydro, avec un trou noir obscurci, « Compton-thick »
 $M_{\text{BH}} = 7 \cdot 10^6 M_{\odot}$ **Formation par effondrement direct?**



Plusieurs modèles, avec Z variable, ici $N_H = 3 \cdot 10^{24} \text{ cm}^{-2}$
 Meilleur fit $Z = 7 \cdot 10^{-3} Z_{\odot}$, reproduit raies de HeI/HeII

Lente croissance des trous noirs

Graine de $M_0=10-100M_\odot$ (après la formation de PopIII)

Croît ensuite avec une accrétion maximale d'Eddington, et une efficacité de $\varepsilon=10\%$ de rayonnement d'énergie

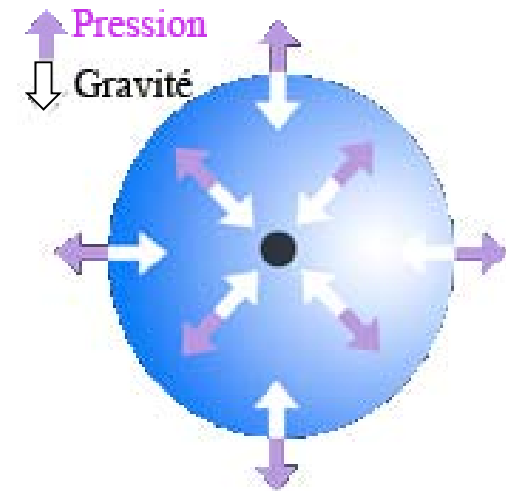
$$L_E = 3.3 \times 10^{12} L_\odot (M/10^8 M_\odot)$$

$$dM/dt = 2 M_\odot / \text{an} (M/10^8 M_\odot)$$

$$t_{\text{croiss}} = 0.45 \frac{\varepsilon}{(1-\varepsilon)} \text{Ln} (M_{\text{BH}}/M_0) \text{ Gyr}$$

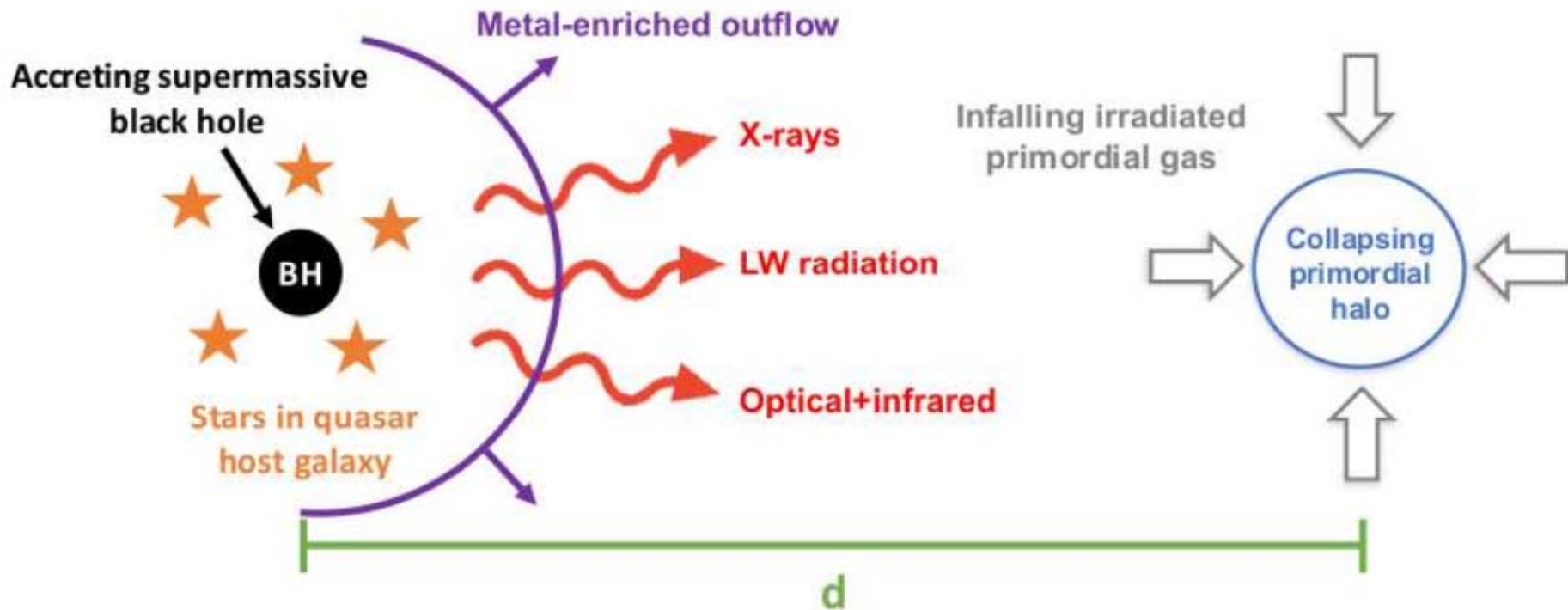
Si $M_{\text{BH}}=10^9 M_\odot$, $M_0=10^2 M_\odot$, il faut **> 800 Myr**,
i.e. >age de l'Univers à $z=7$

→ Il faudrait au moins $M_0=1000 M_\odot$

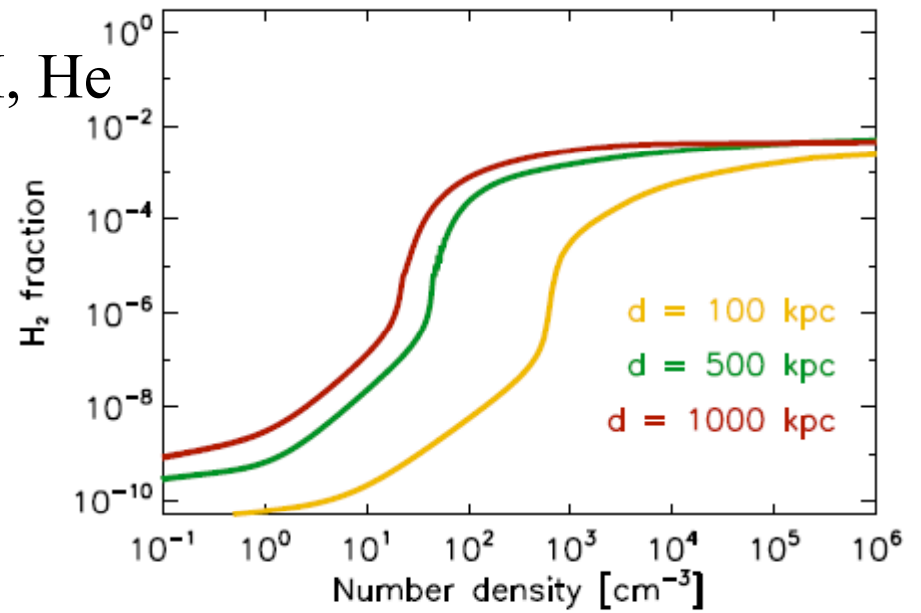
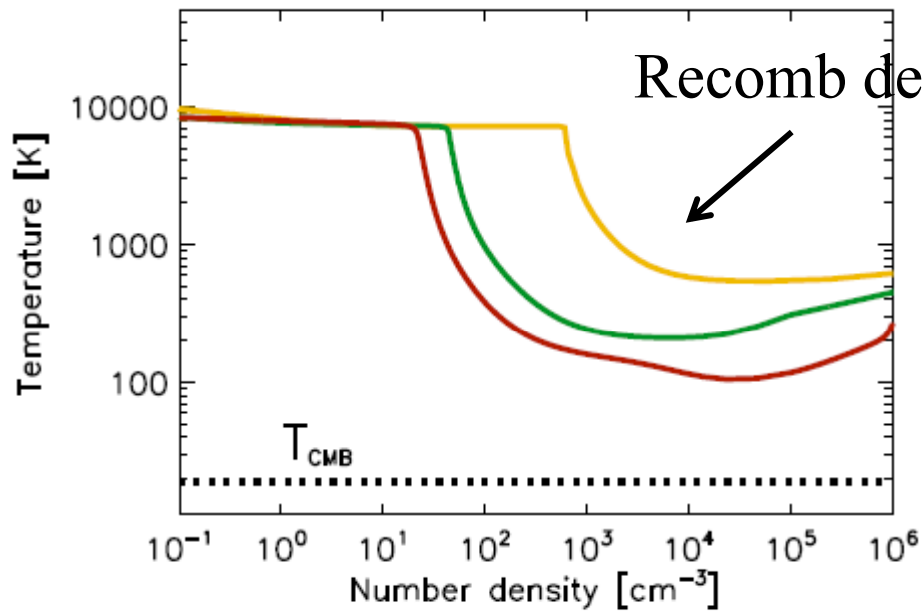


Formation des premiers trous noirs

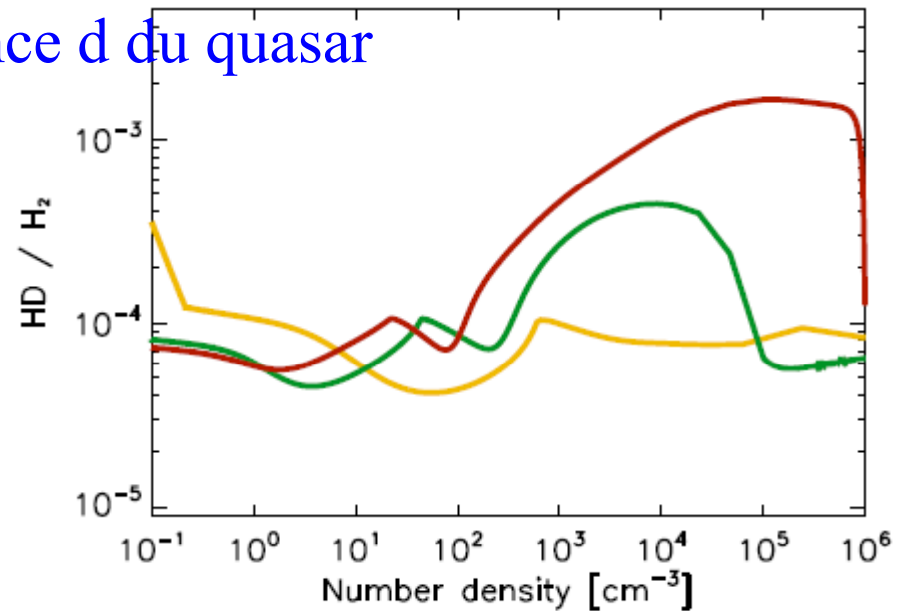
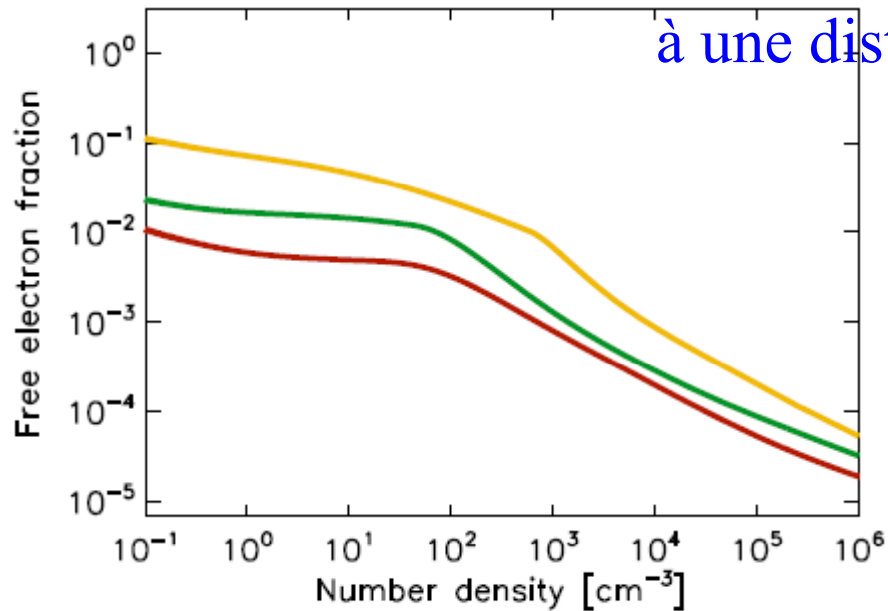
Les quasars chauffent et ionisent le gaz environnant
Supprime la formation d'étoiles si $M_{\text{halo}} < 10^{11} M_{\odot}$
→ Formation d'étoiles PopIII
Stérilise les galaxies naines



Johnson & Aykutaalp 2019



Evolution de l'effondrement
à une distance d du quasar



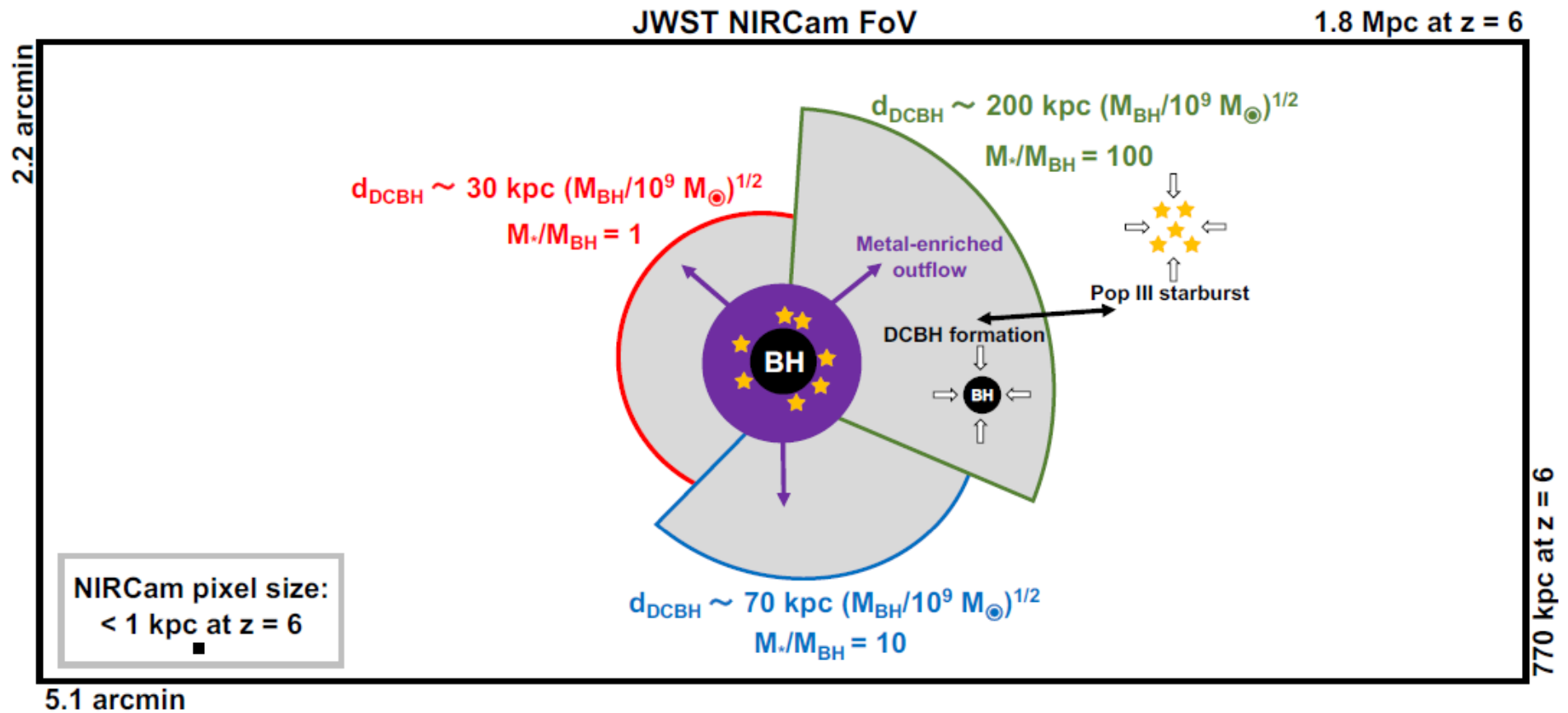
Quasar of $M_{\text{BH}} = 10^8 M_{\odot}$

Johnson & Aykutaalp 2019

Effondrement direct des trous noirs

Dans les halos voisins, le flux Lyman-Werner (LW) photoionise et empêche la formation de H_2 (stoppe le refroidissement)

→ Effondrement direct en trou noir



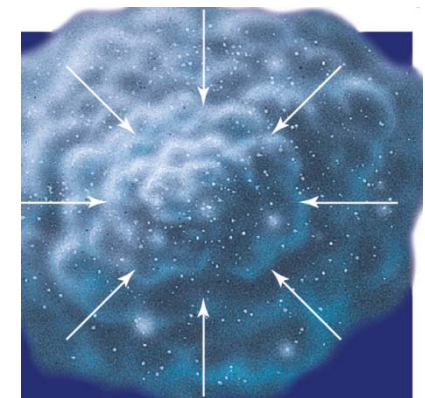
Johnson & Aykutaalp 2019

Comment former des trous noirs très tôt ?

- **Reste des super-étoiles Pop III**
 - Des étoiles super-massives, car sans métaux
 - $M_* \sim 10^3 M_\odot$, explosent en supernovae
 - $M_\bullet \sim 10^2 M_\odot$



- **Effondrement direct**
 - Nuages de gaz massifs et denses s'accumulent au centre
 - Effondrement en étoile supermassive qui ne s'arrête pas de croître, jusqu'à l'effondrement en trou noir
 - $M_* > 10^6 M_\odot$
 - $M_\bullet > 10^4 M_\odot$

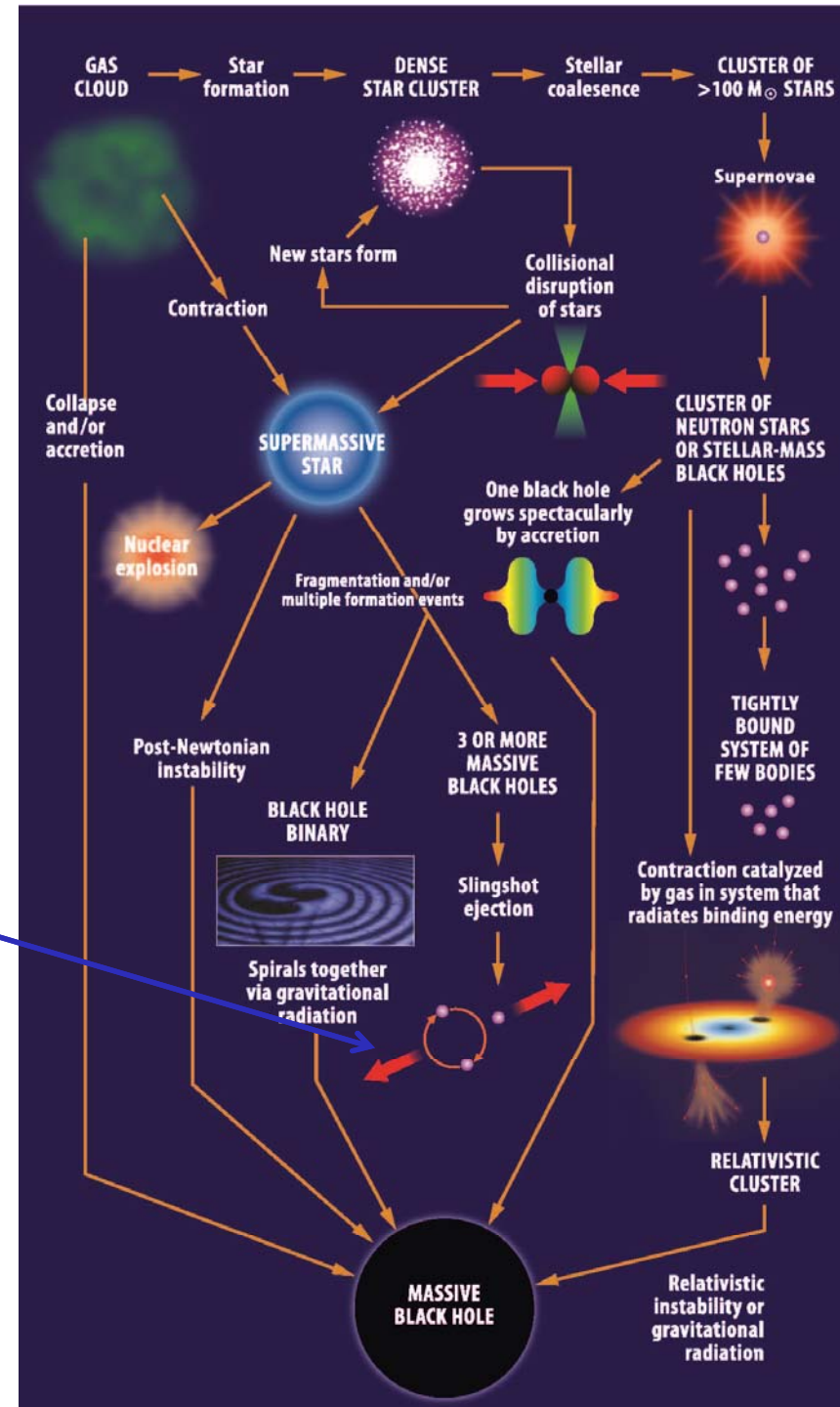


Mécanismes:

- étoiles supermassives
 - amas d'étoiles denses
- Begelman & Rees, 2010*

Croissance trop lente au
taux d'Eddington, si on part
de $100M_{\odot}$

Eviter l'effet de fronde
Ejection du 3ème trou noir

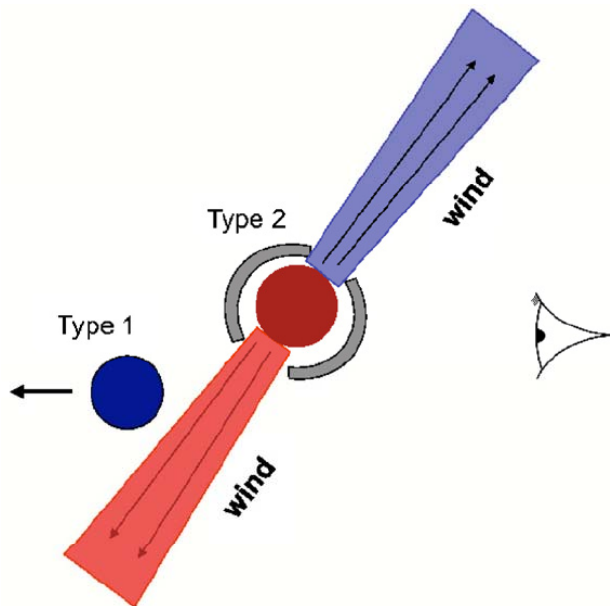


Effet de fronde: éjection d'un 3^{ème} TN

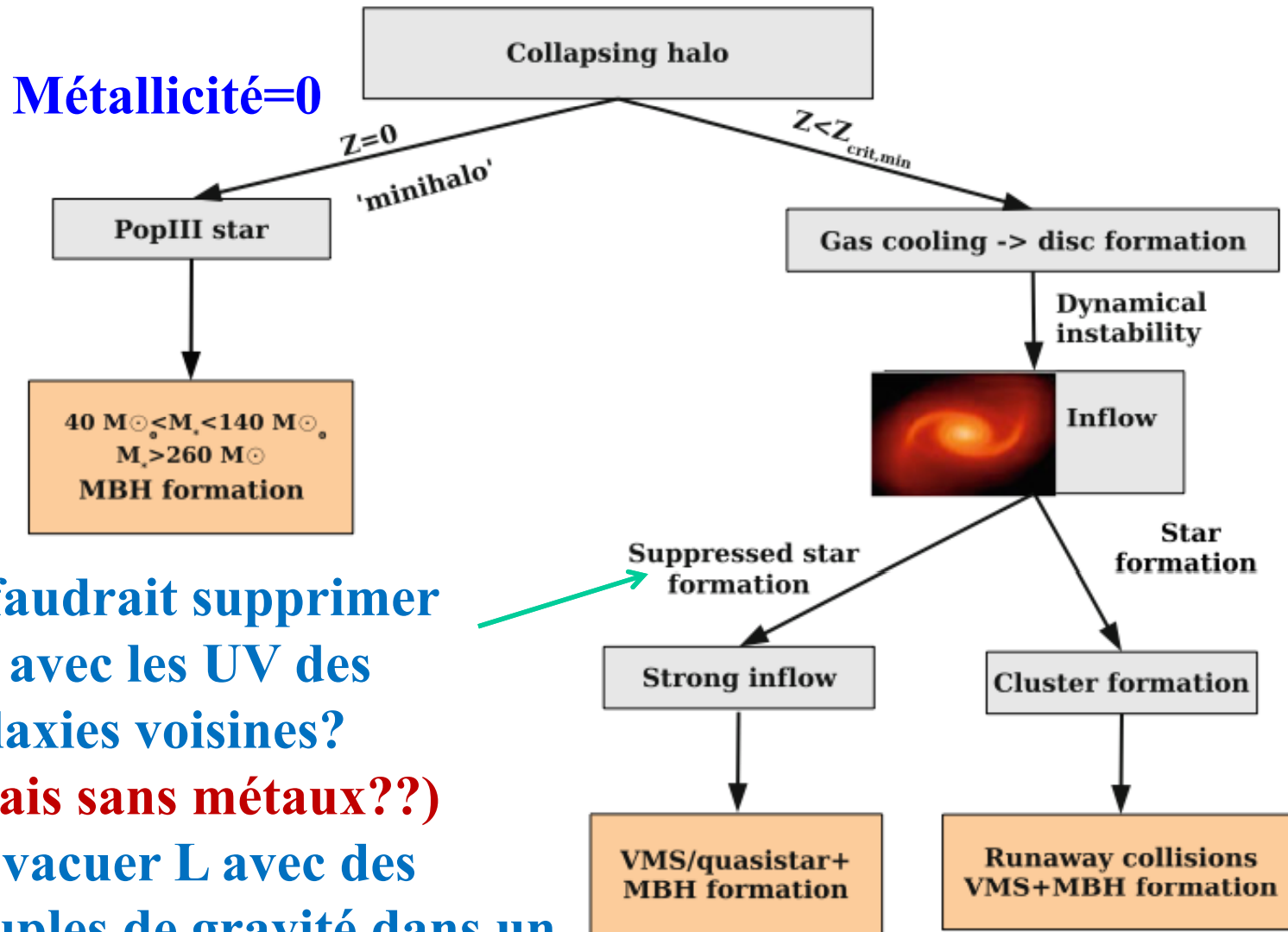
Un des TN (type 1) a une vitesse $\sim 1200 \text{ km/s}$ par rapport à la galaxie hôte
Type 2: absorption et émission de gaz ionisé, variabilité

Soit 3 trous noirs \rightarrow un éjecté, ou le reste de fusion d'un trou noir binaire peut reculer (après avoir émis des ondes gravitationnelles)

Civano et al 2010



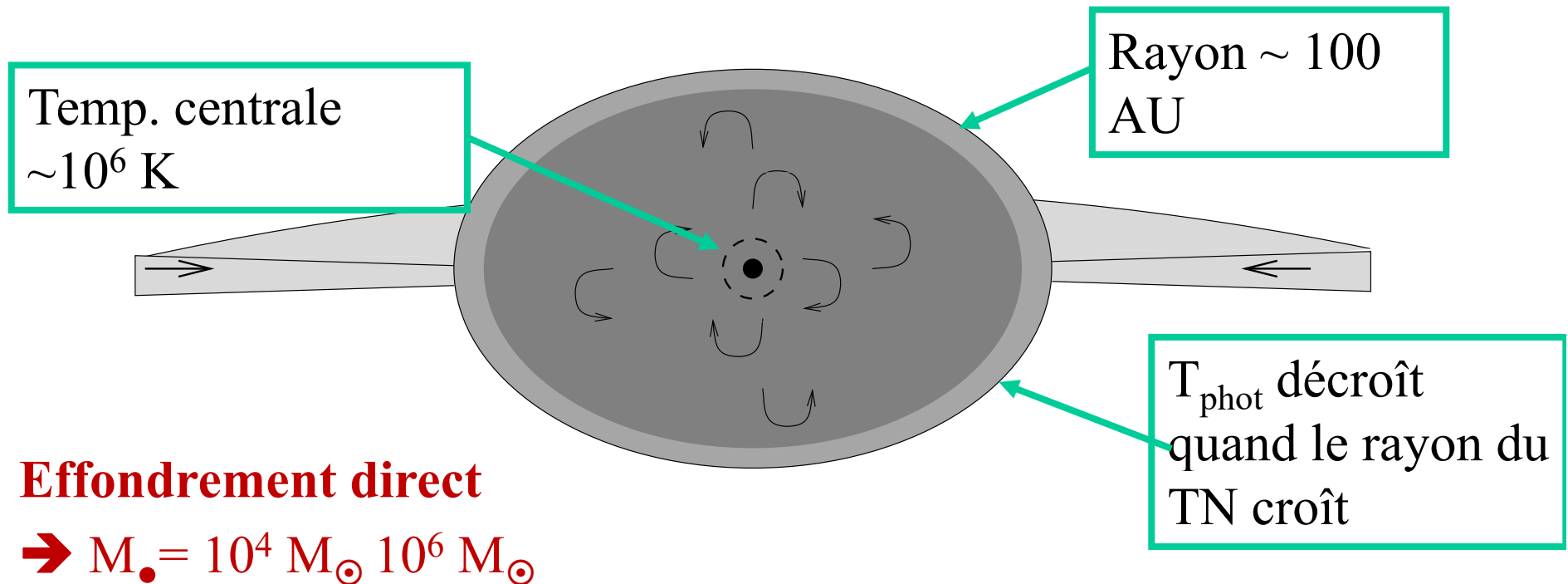
Formation des premières graines



Il faudrait supprimer H₂ avec les UV des galaxies voisines? (mais sans métaux??) +Evacuer L avec des couples de gravité dans un disque

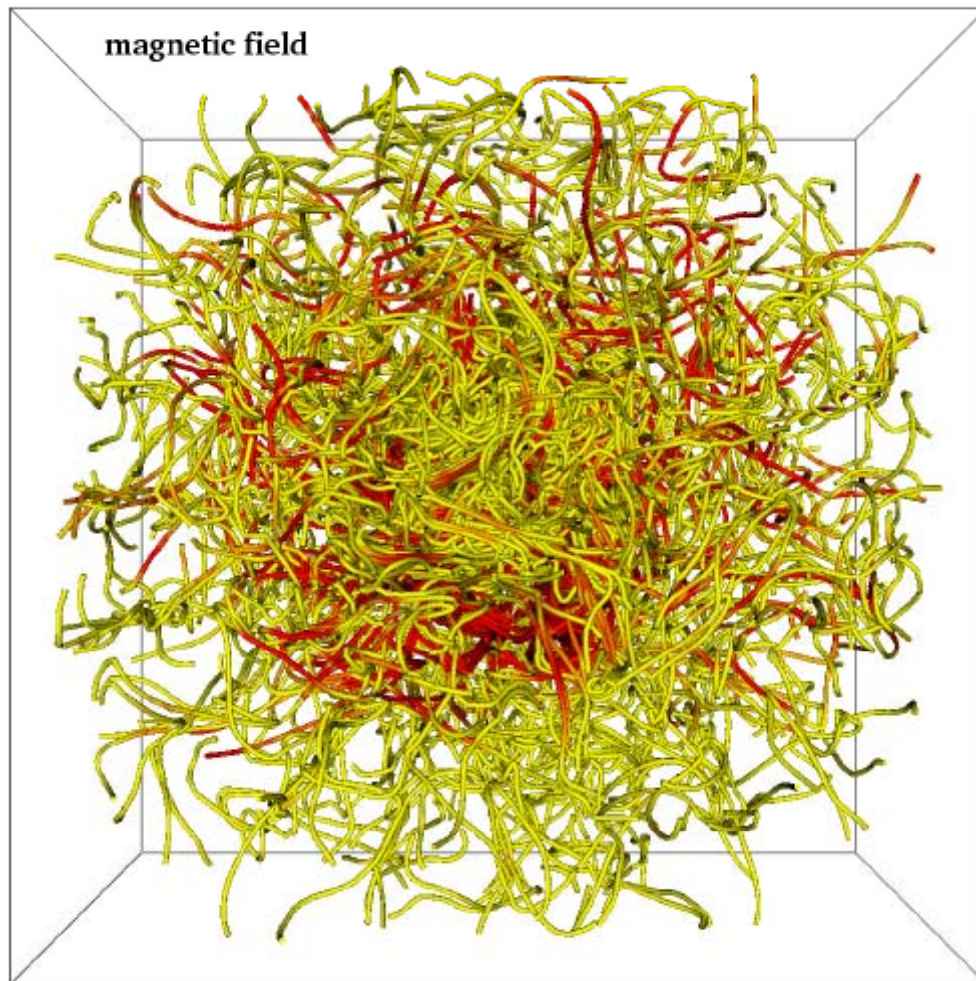
Formation d'une "QUASISTAR"

- Ressemble à une géante rouge
- Une enveloppe convective, soutenue par la pression
- Température photosphérique décroît avec la croissance du trou noir



Influence du champ magnétique

Champ B pourrait être assez fort dans le début de l'Univers
(inflation, batterie de Biermann, instabilités de plasma)



Turbulence forte,
Conduisant à de forts B
Par effet dynamo

Jaune $0.5\mu\text{G}$

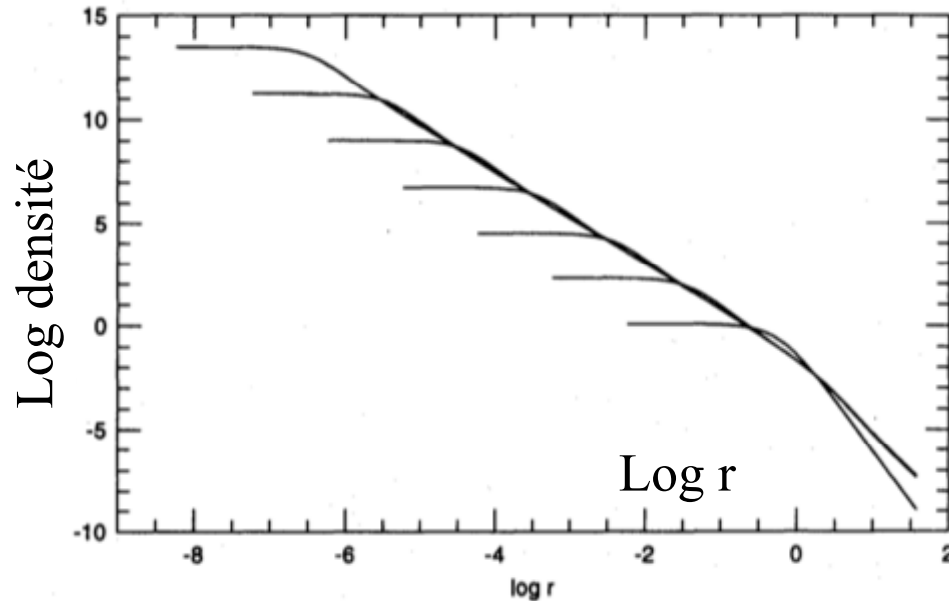
Rouge $1\mu\text{G}$

Empêche la fragmentation

→ Effondrement direct

Federrath et al 2011

Effondrement du cœur d'un amas globulaire



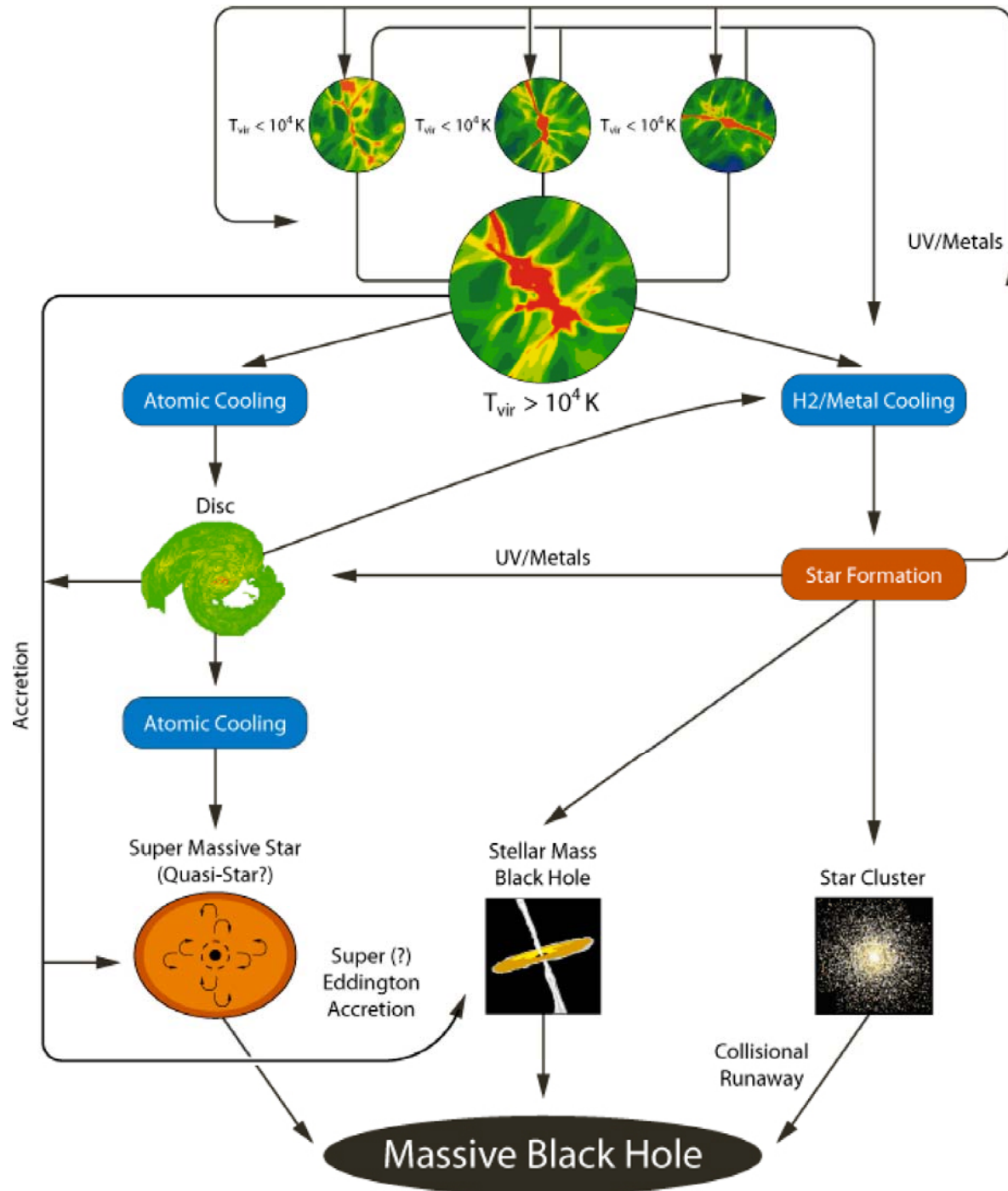
Relaxation à deux corps

$$t_{relax} = 0.34 \frac{\sigma^3}{G^2 m \rho \ln \Lambda}$$

Le transfert d'énergie du centre vers le bord produit l'effondrement du cœur, en $10 t_{relax}$

$$t_{relax} \approx \frac{0.8 \text{Gyr}}{\ln(0.1N)} \left(\frac{M_{cl}}{10^5 M_{\odot}} \right)^{1/2} \left(\frac{R_h}{1 \text{pc}} \right)^{3/2} \left(\frac{1 M_{\odot}}{m} \right)$$

Au centre, les collisions entre étoiles produisent un emballement, et la formation d'un trou noir



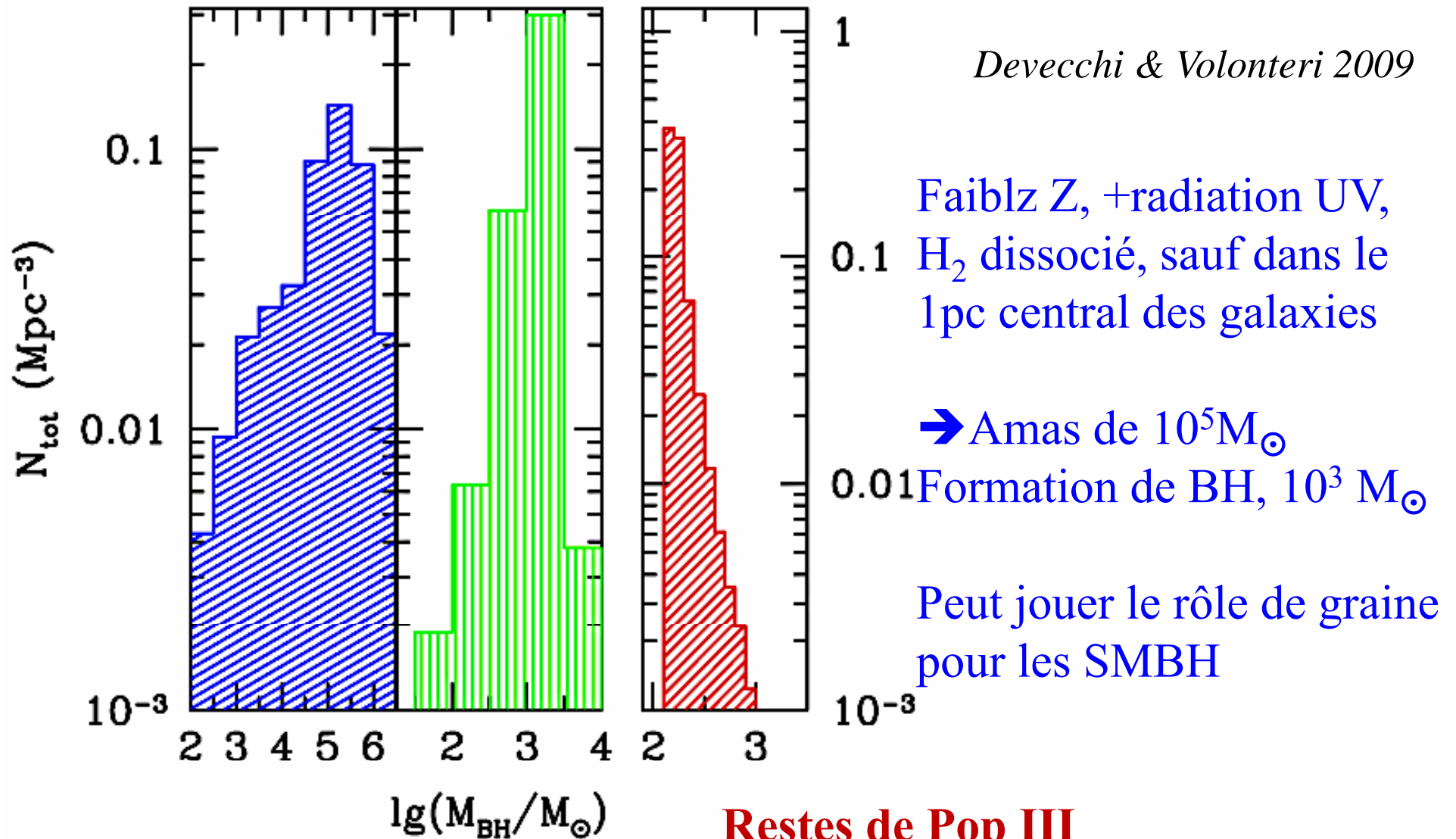
Résumé:

2/ 3 voies
possibles

Regan & Haehnelt 2009

Masses formées par les divers processus

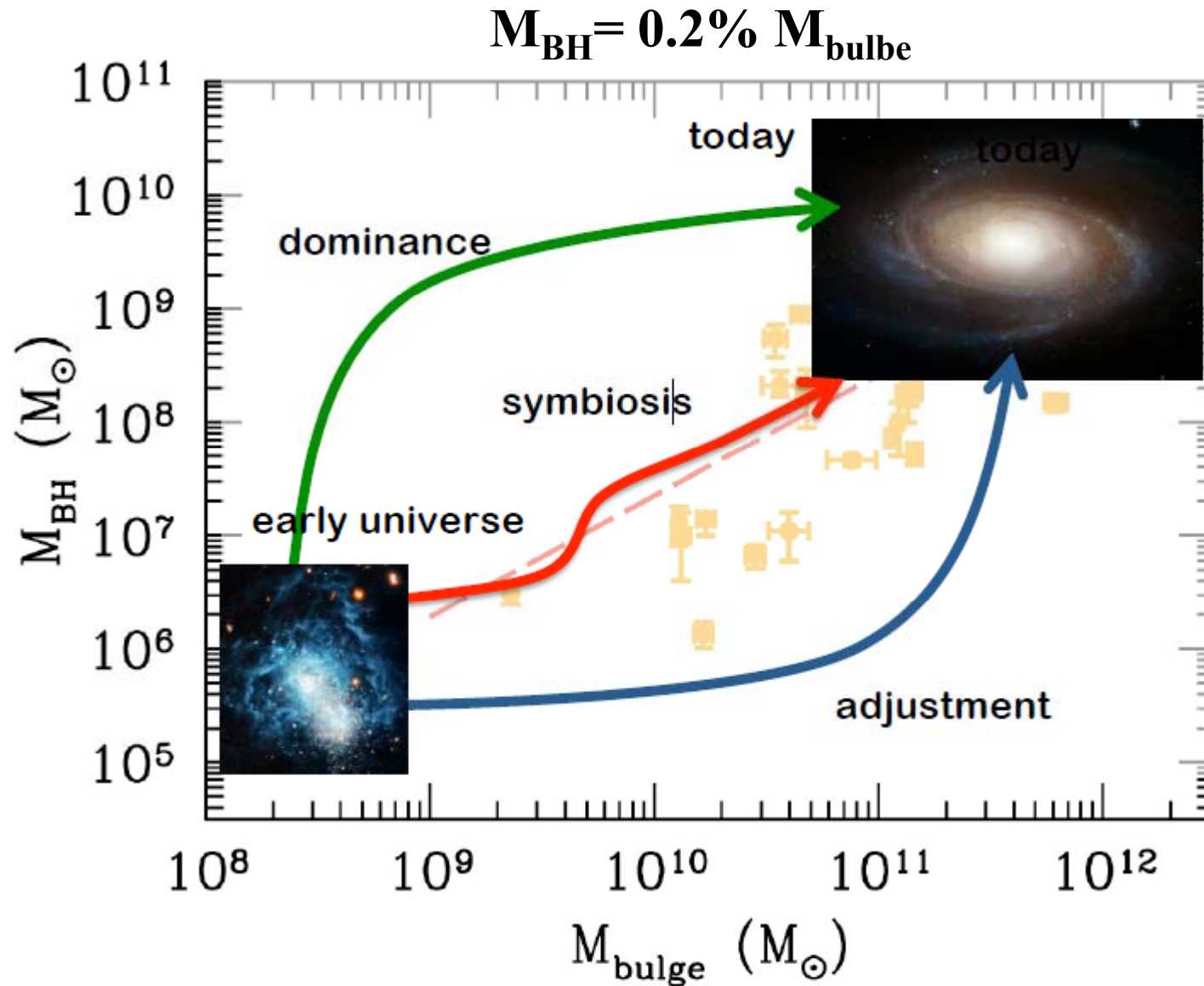
Amas d'étoiles



Effondrement direct

Restes de Pop III

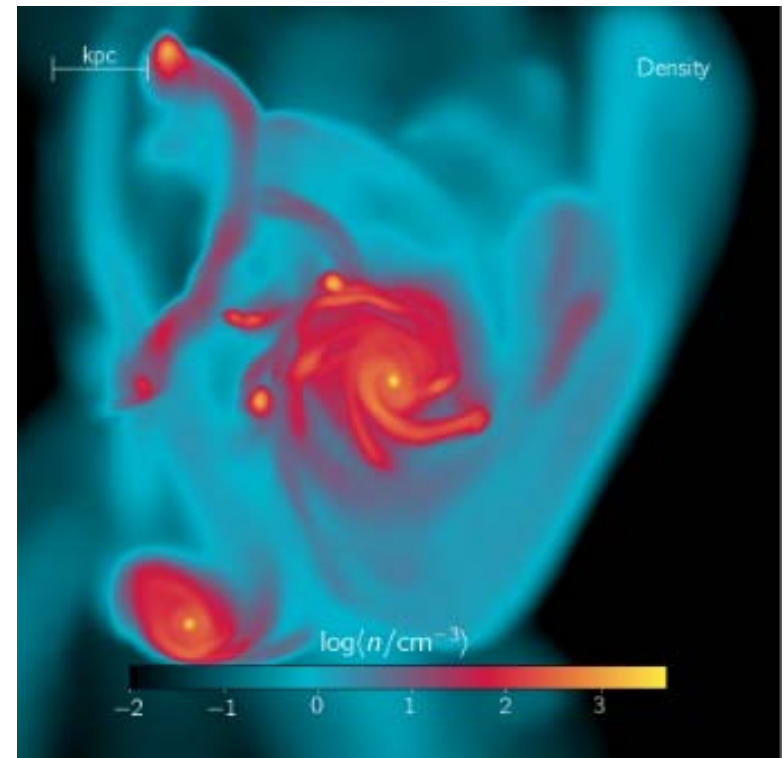
Co-évolution galaxies-trous noirs



Résumé

Les galaxies à l'époque de réionisation

Les simulations sont de plus en plus sophistiquées: formation de H_2 , C^+
Chimie, abondances, SF et feedback



Prédiction d'étoiles PopIII, rayonnement plus dur
De même les premiers trous noirs, **effondrement direct**

- Quasars entre $z=5$ et 8
- Emetteurs $Ly\alpha$, forme des raies → fesc
- ALMA [CII], [OIII], H_2
- Suppression de SF dans les naines, par réionisation