

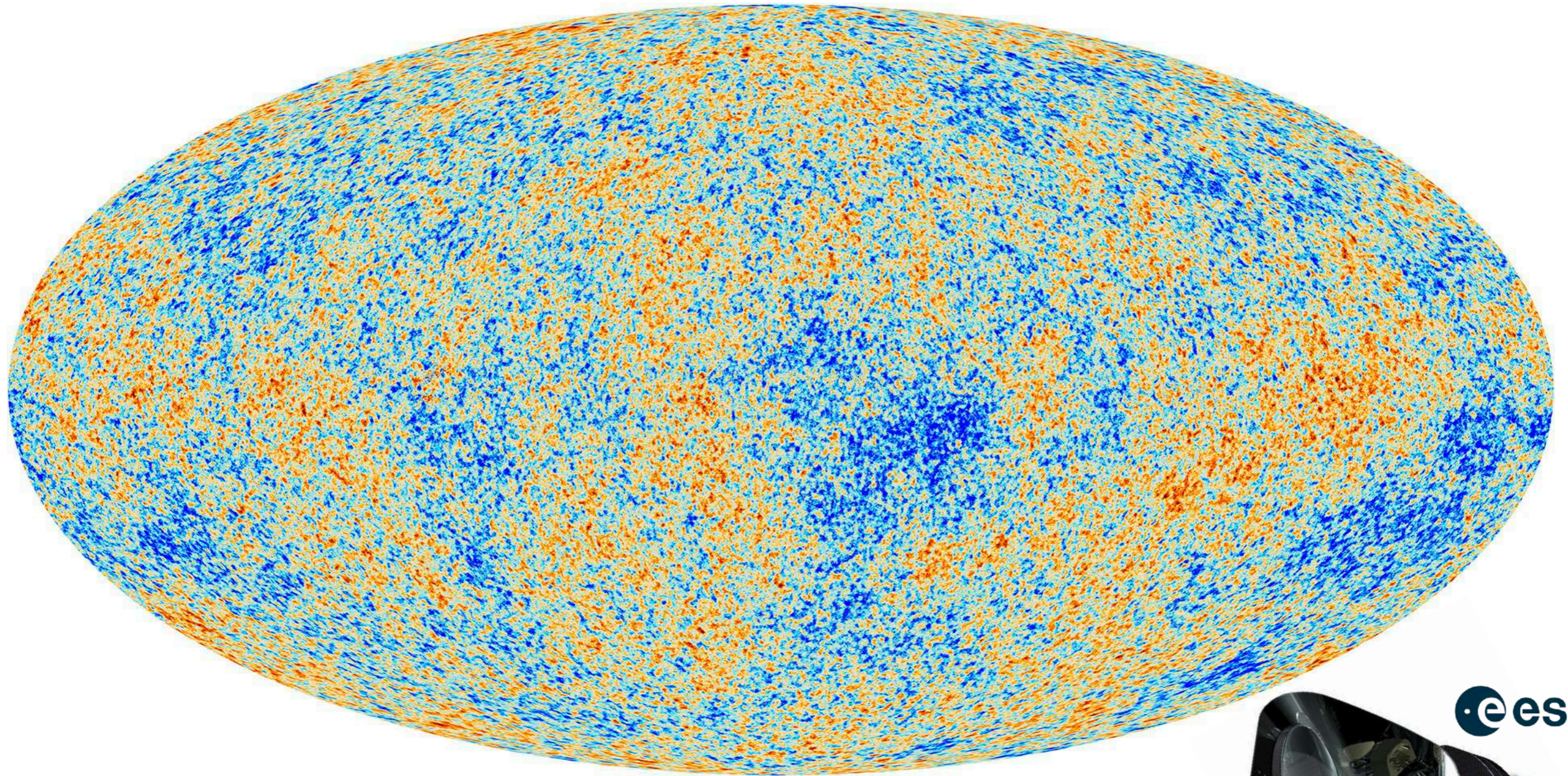
Observatoire **astronomique**

de Strasbourg | ObAS

Les galaxies de la séquence principale au cours du temps

Jonathan Freundlich

**Tout commence par un univers très homogène,
il y a 13.7 milliards d'années...**



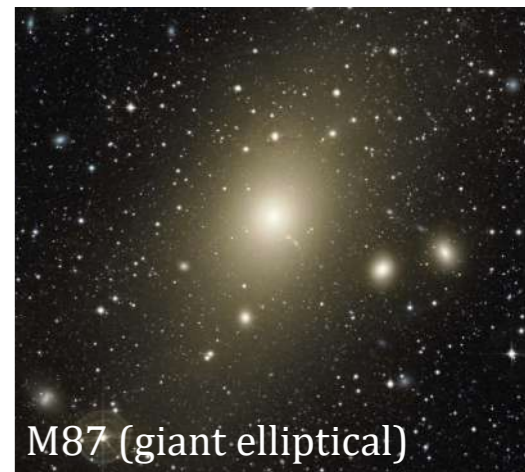
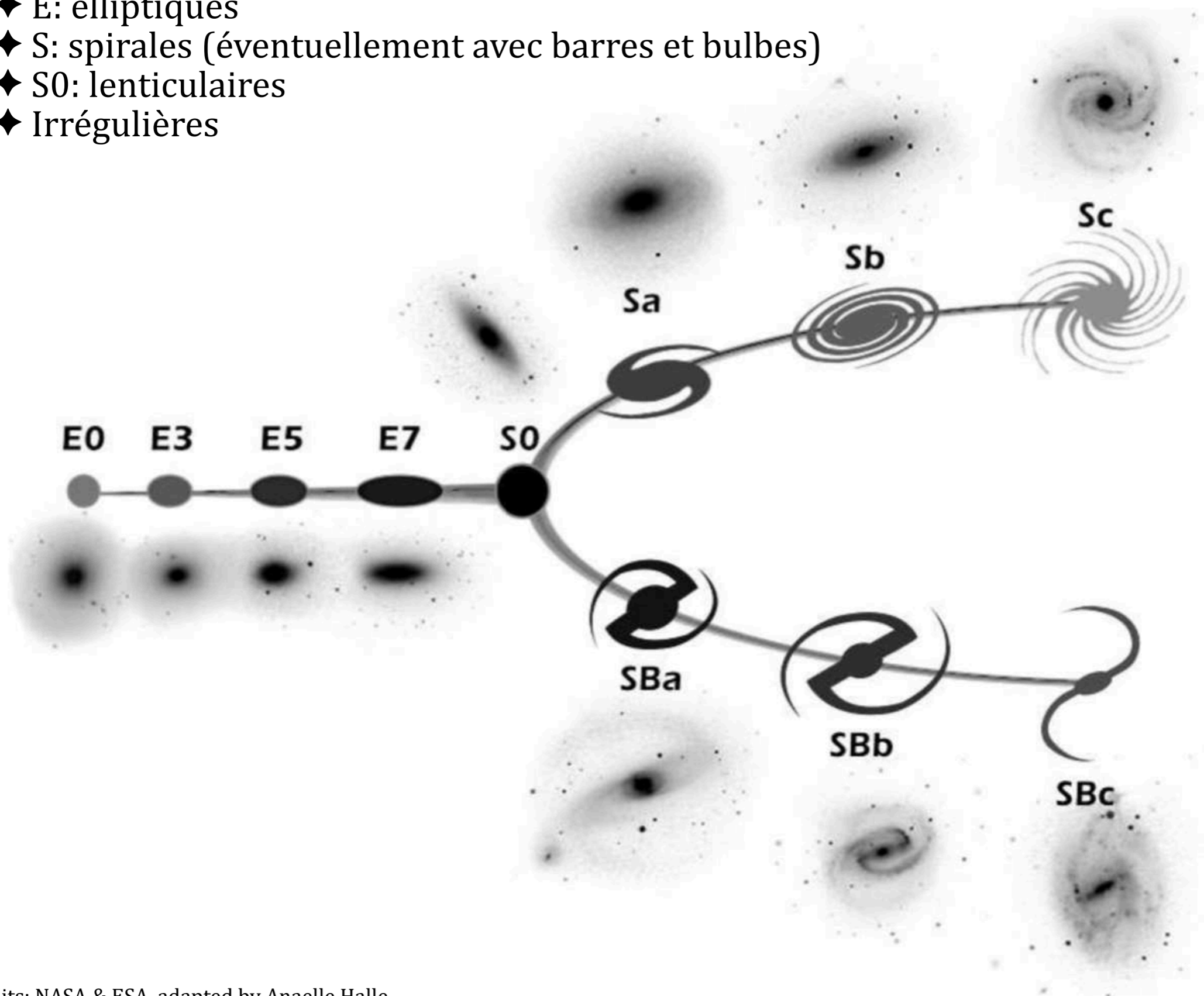
Télescope spatial Planck

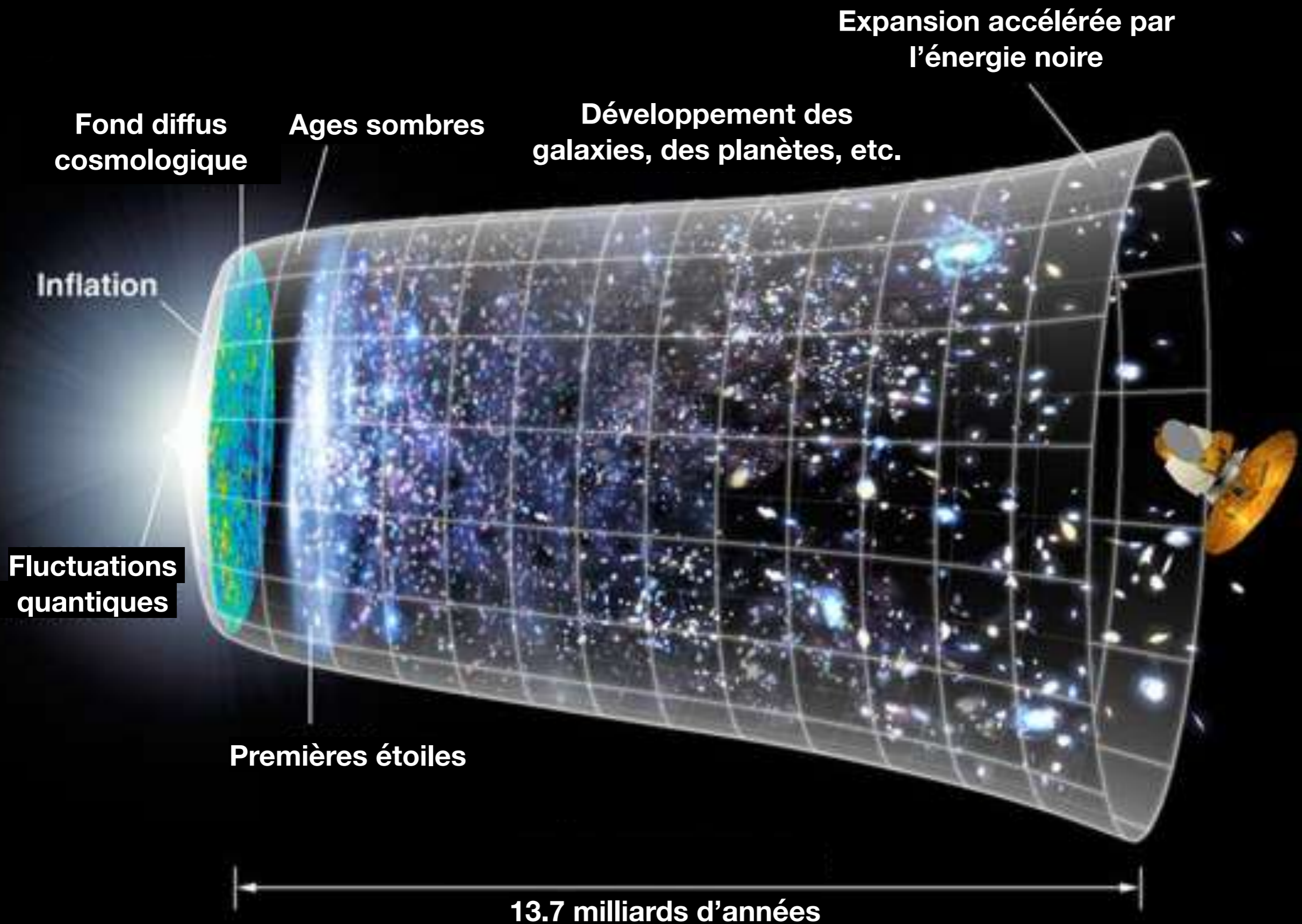
Inhomogénéités de l'ordre de $10^{-5} = 1/100\ 000$

...pour aboutir à une grande diversité de galaxies aujourd'hui

La séquence de Hubble

- ◆ E: elliptiques
- ◆ S: spirales (éventuellement avec barres et bulbes)
- ◆ S0: lenticulaires
- ◆ Irrégulières





La formation des étoiles

Les étoiles se forment dans des nuages de gaz moléculaires géants du milieu interstellaire

- ◆ Surtout composés d'hydrogène, avec des masses $\sim 10^5$ - $10^7 M_{\odot}$, des tailles de quelques dizaines de parsecs
- ◆ Effondrement gravitationnel, fragmentation en coeurs denses
- ◆ Réactions de fusion nucléaire et nucléosynthèse stellaire

(1 parsec = $3.09 \cdot 10^{16}$ m)



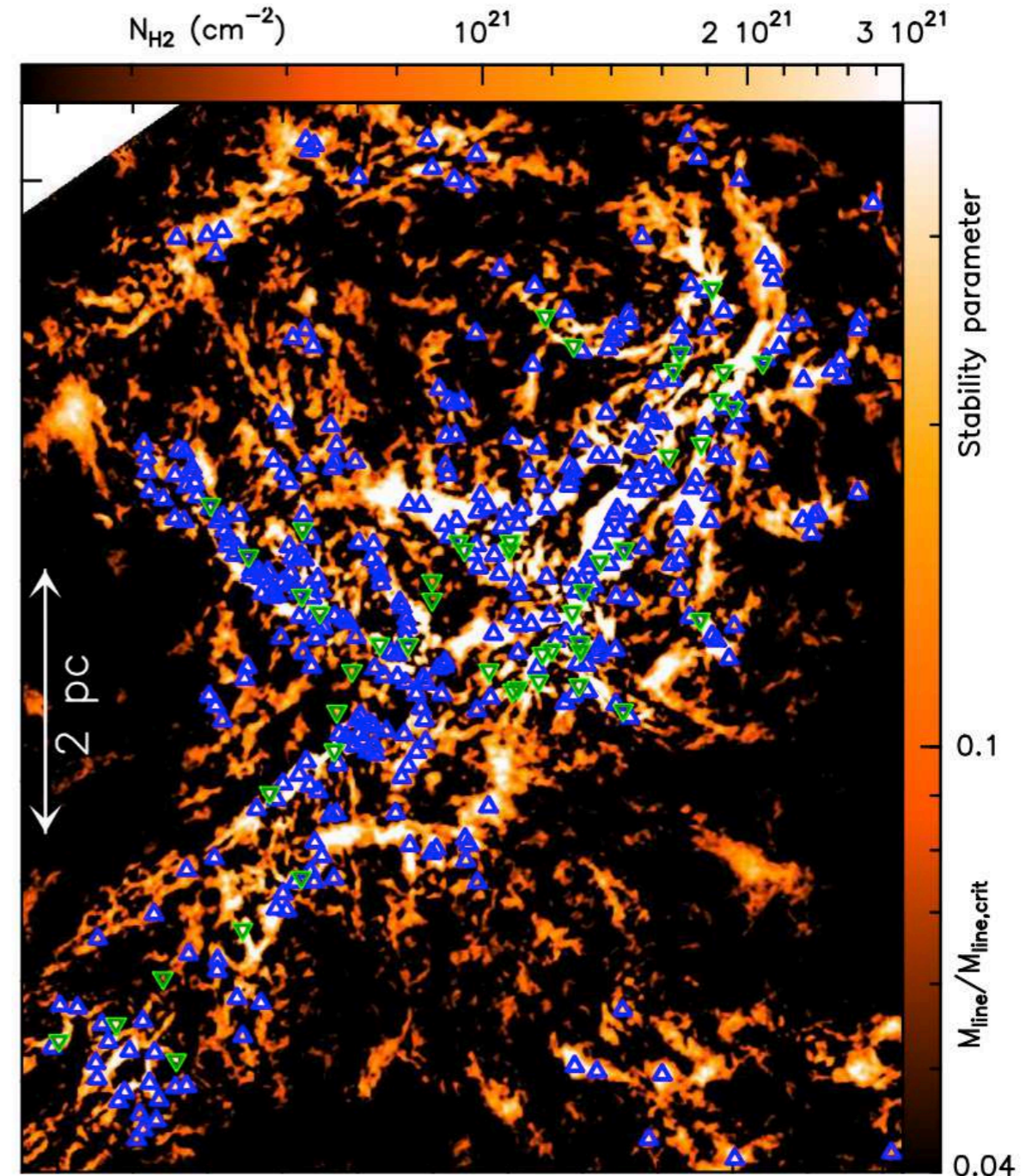
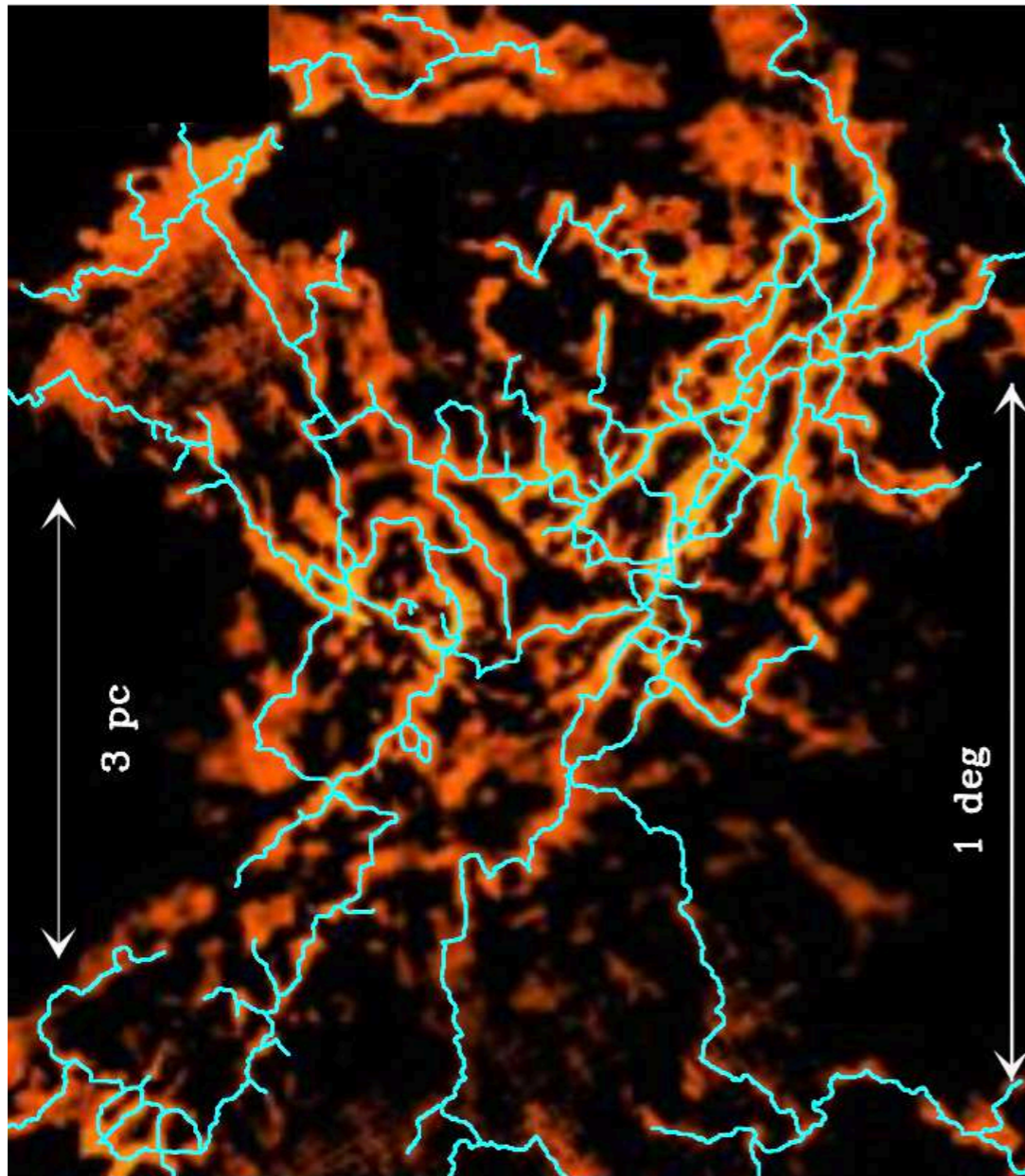
La nébuleuse d'Orion, une zone de formation d'étoiles (NASA)

La formation des étoiles

Les nuages moléculaires sont fragmentés en un réseau de structures filamentaires

- ◆ Milieu interstellaire turbulent, champs magnétiques, instabilités gravitationnelles
- ◆ Effondrement gravitationnel, fragmentation en coeurs denses
- ◆ La plupart (75%) des coeurs pré-stellaires se trouvent le long des filaments

(1 parsec = $3.09 \cdot 10^{16}$ m)

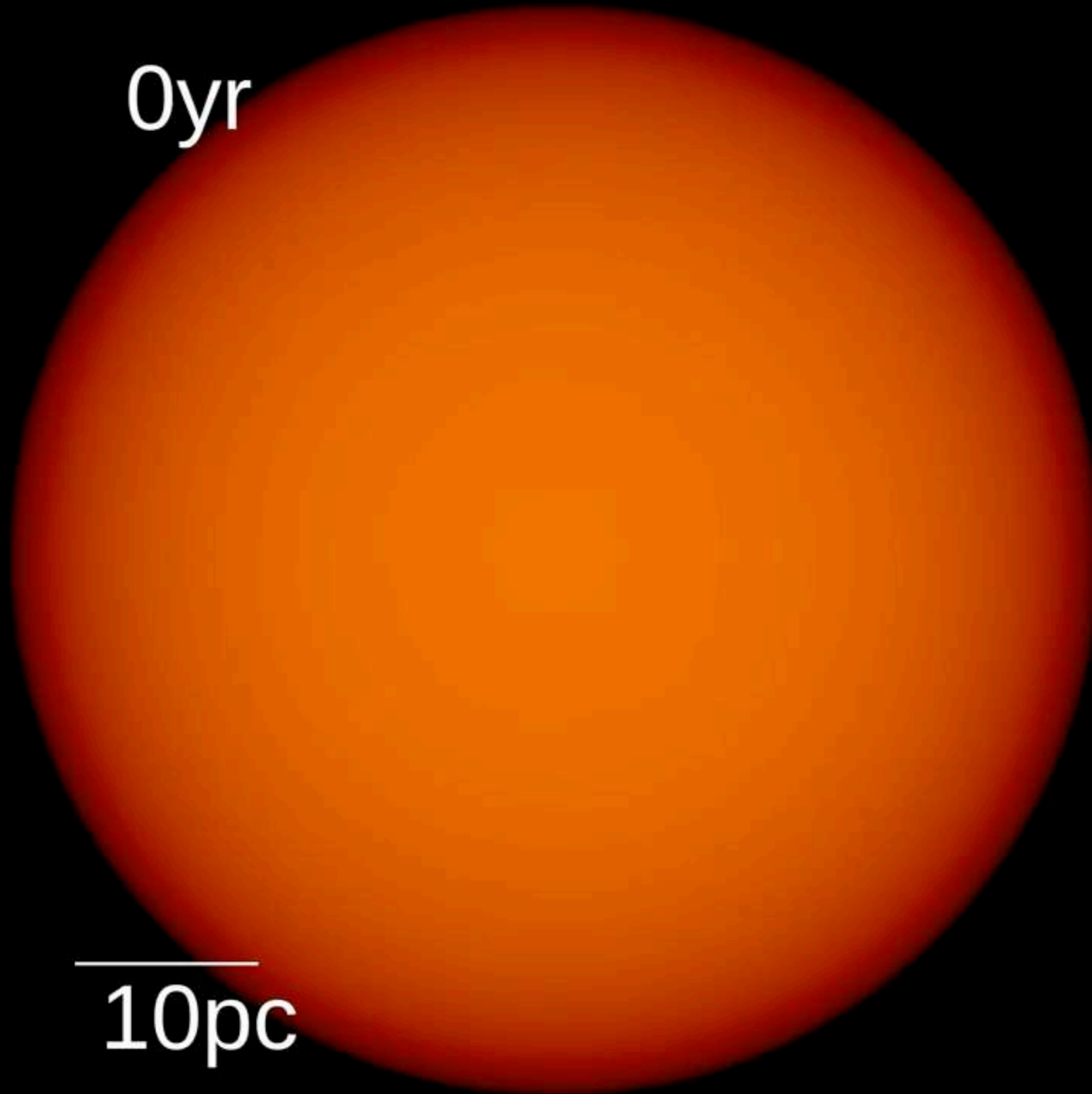


P. André & D. Arzoumanian, Konyves et al. (2015)

La formation des étoiles

0yr

10pc



L'évolution de la formation des étoiles

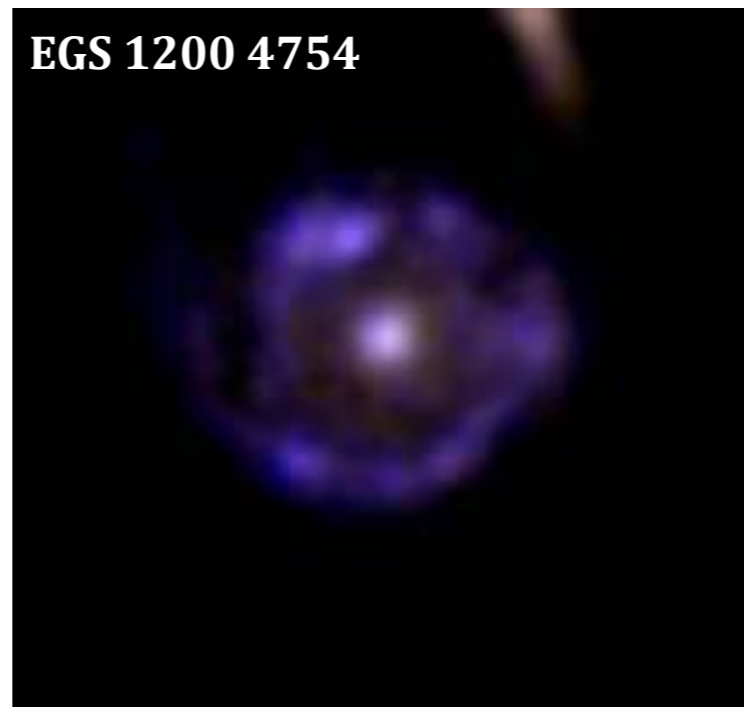
**Aujourd'hui
(redshift $z=0$)**

SFR $\sim 3 M_{\odot}/\text{year}$



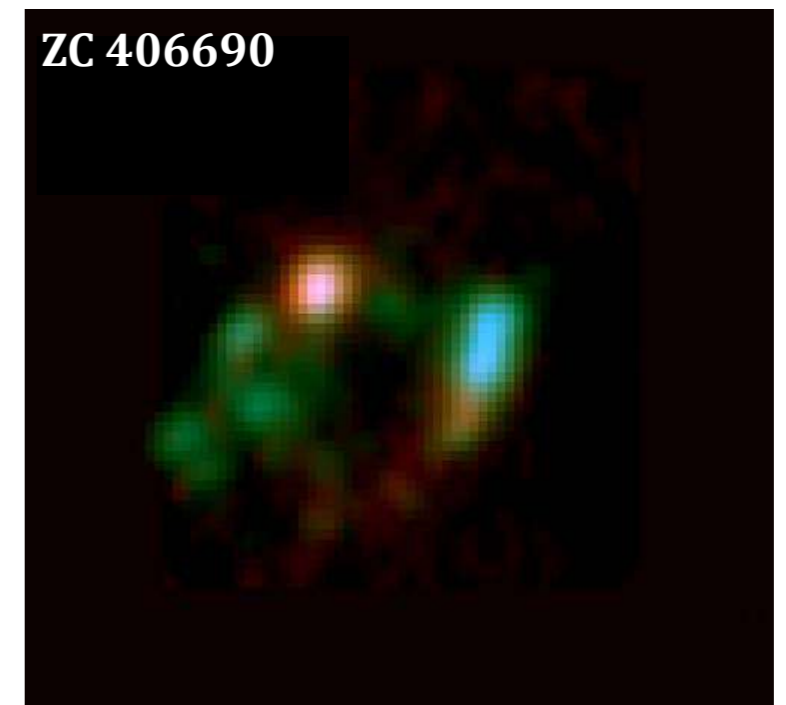
**Il y a 8 milliards d'années
($z=1$)**

SFR $\sim 50 M_{\odot}/\text{year}$



**Il y a 10 milliards d'années
($z=2$)**

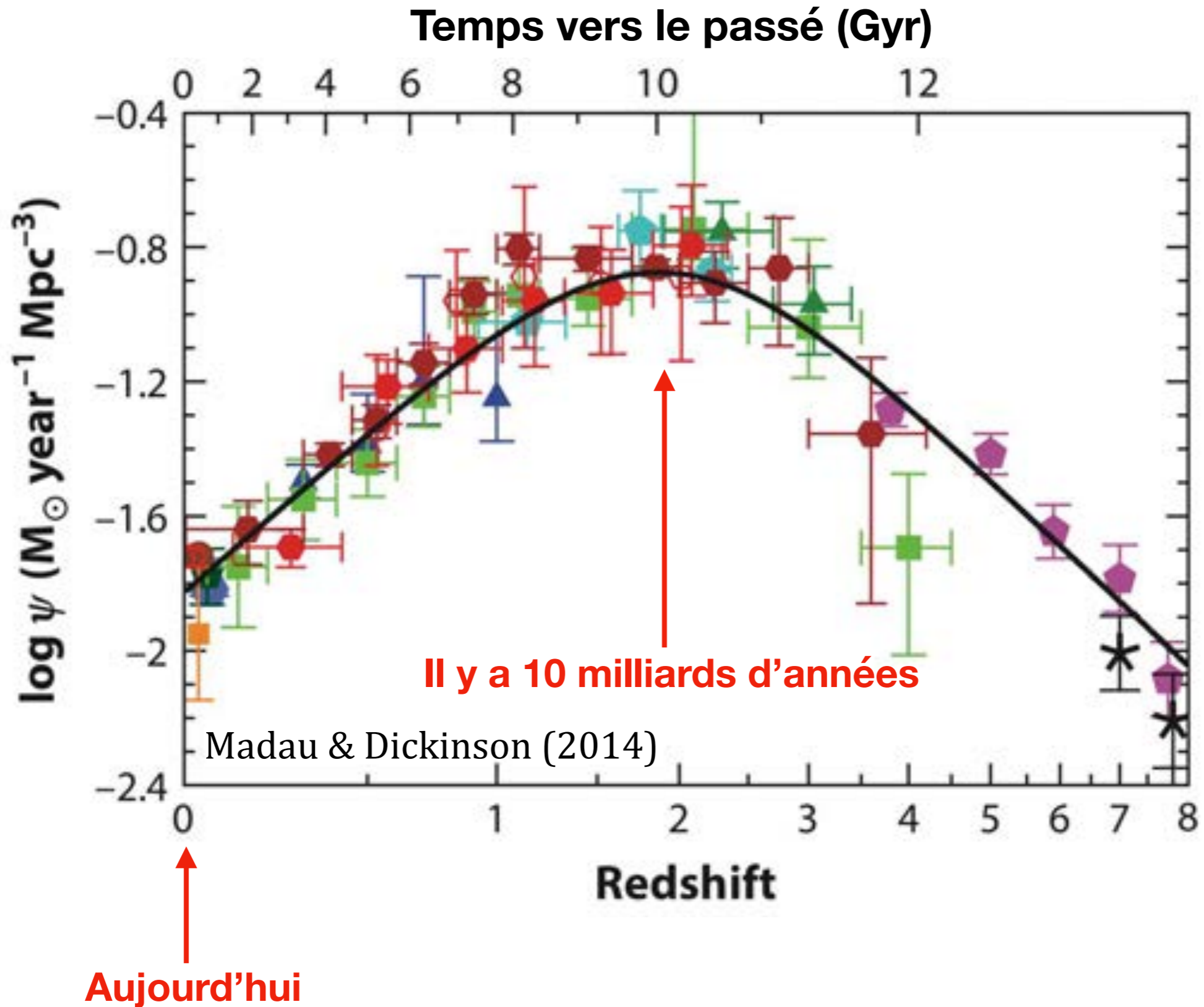
SFR $\sim 150 M_{\odot}/\text{year}$



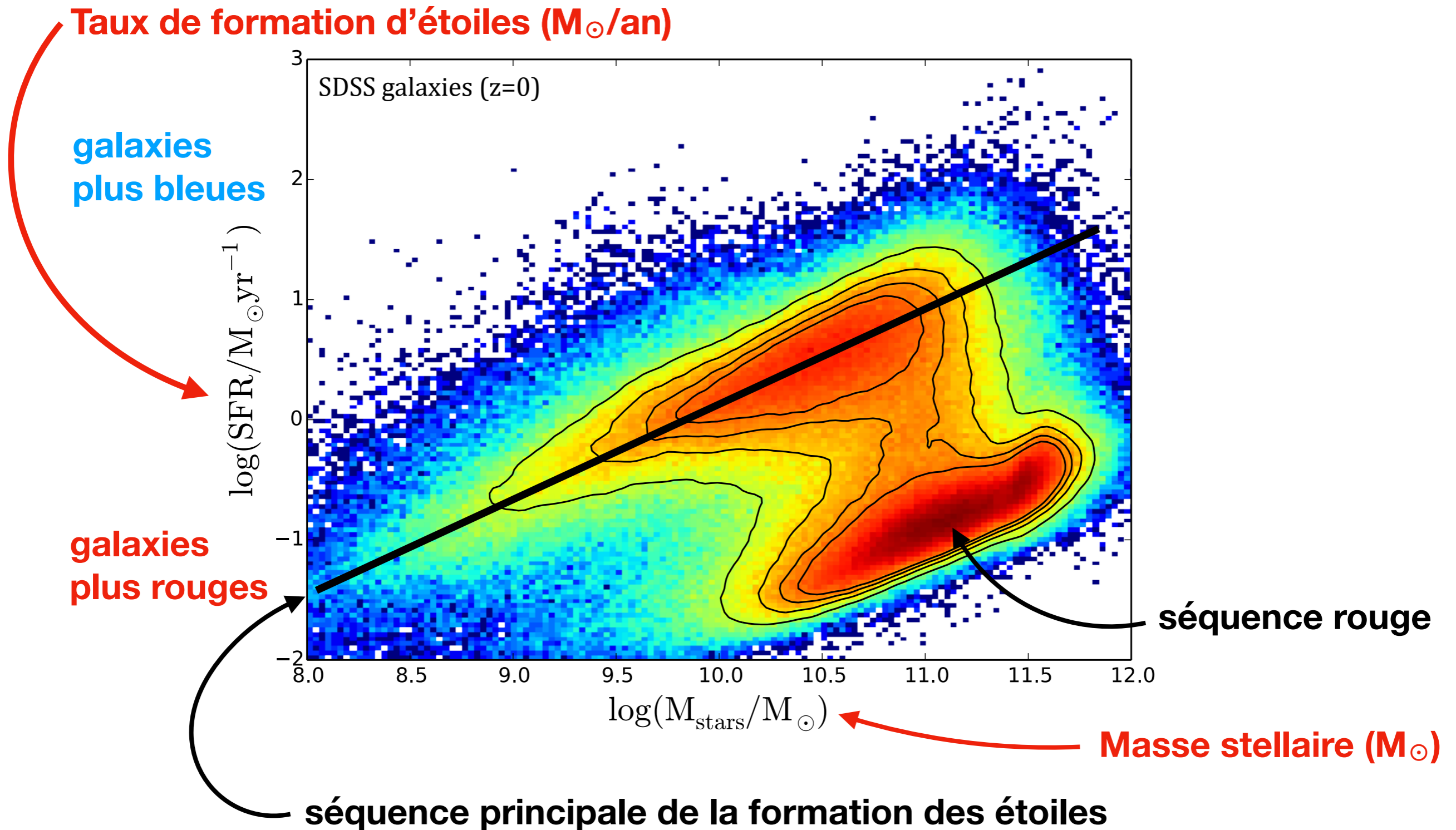
SFR : taux de formation d'étoiles (star formation rate)

L'évolution de la formation des étoiles

Densité du taux de formation d'étoiles (par Mpc^3)

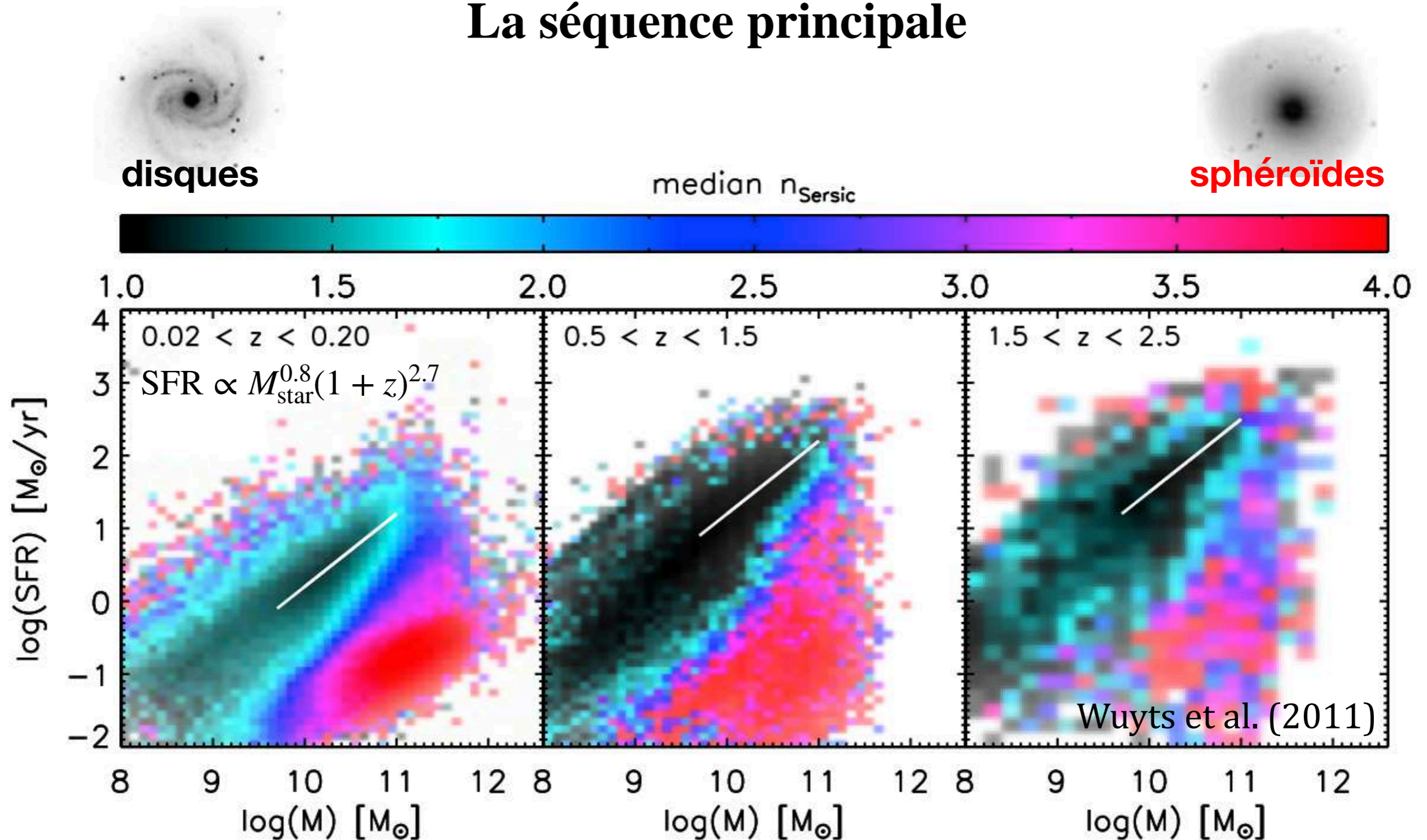


La séquence principale



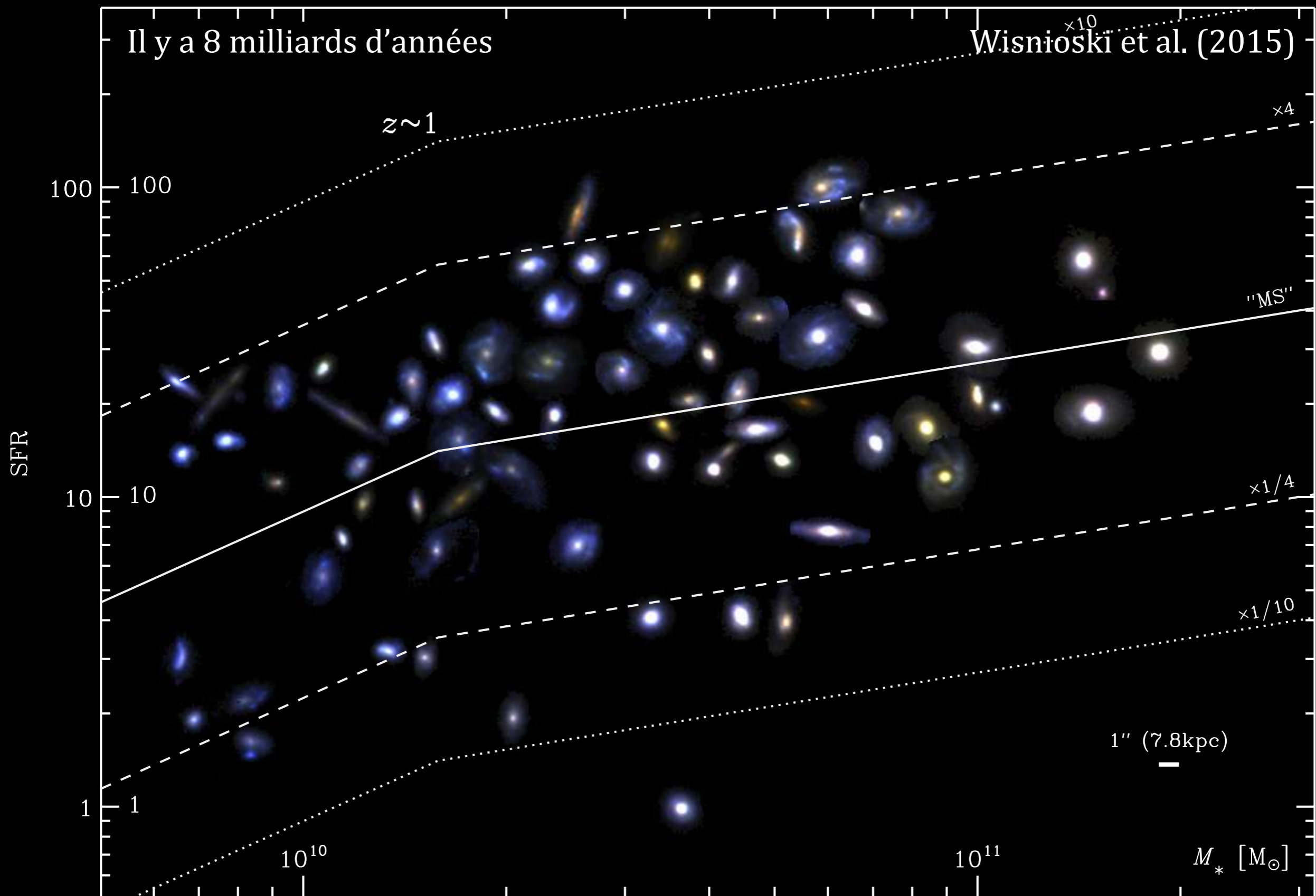
- ◆ Près de 90% de la formation des étoiles des 10 derniers milliards d'années, depuis $z \sim 2$
- ◆ Le SFR à sur la séquence principale a diminué d'un facteur ~ 20 depuis $z \sim 2$
- ◆ Faible dispersion : évolution due à des processus continues plutôt que des fusions violentes
- ◆ Peu de galaxies entre les deux séquences : passage vers la séquence rouge rapide

La séquence principale

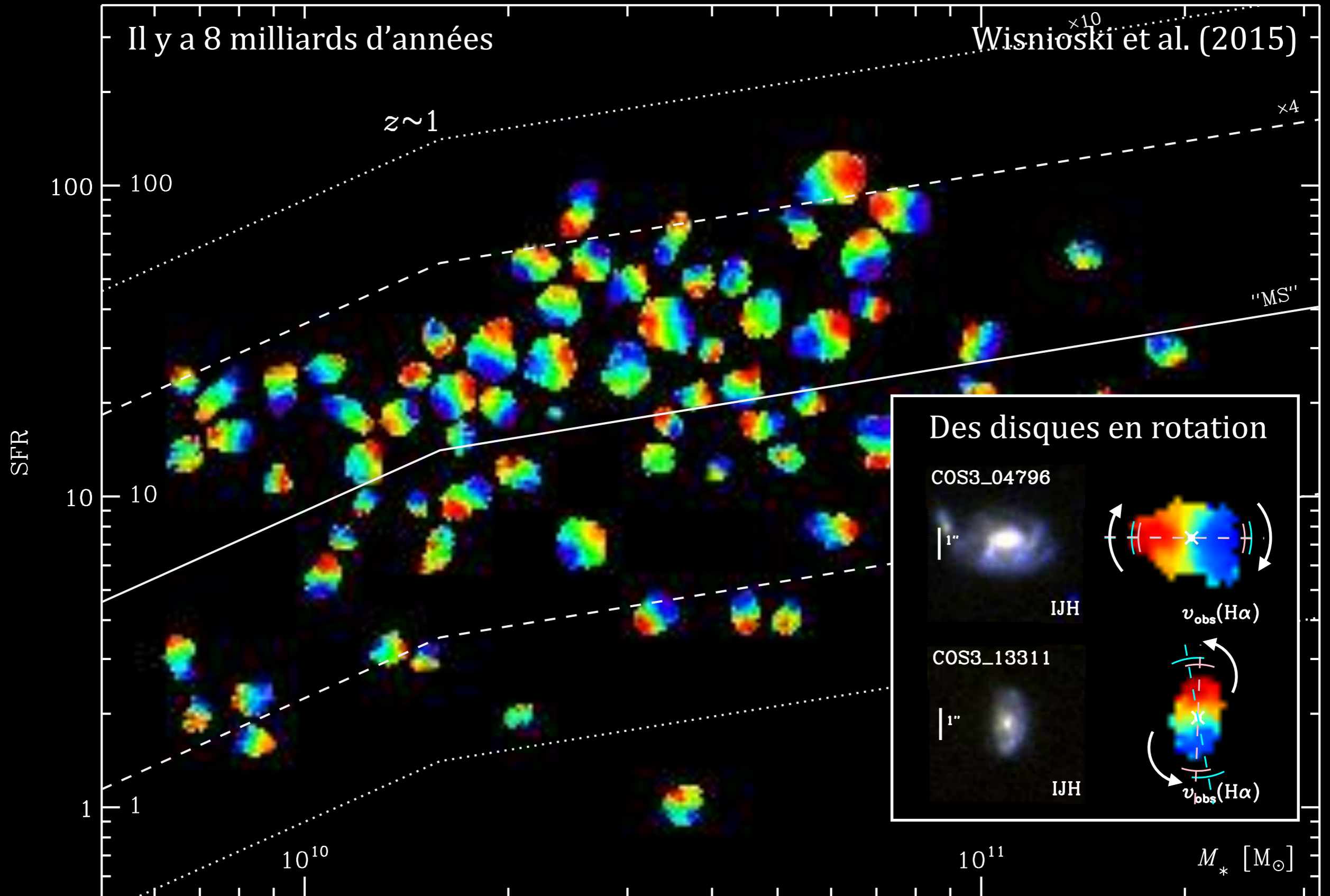


- ◆ Près de 90% de la formation des étoiles des 10 derniers milliards d'années, depuis $z \sim 2$
- ◆ Le SFR à sur la séquence principale a diminué d'un facteur ~ 20 depuis $z \sim 2$
- ◆ Faible dispersion : évolution due à des processus continues plutôt que des fusions violentes
- ◆ Peu de galaxies entre les deux séquences : passage vers la séquence rouge rapide

La séquence principale



La séquence principale

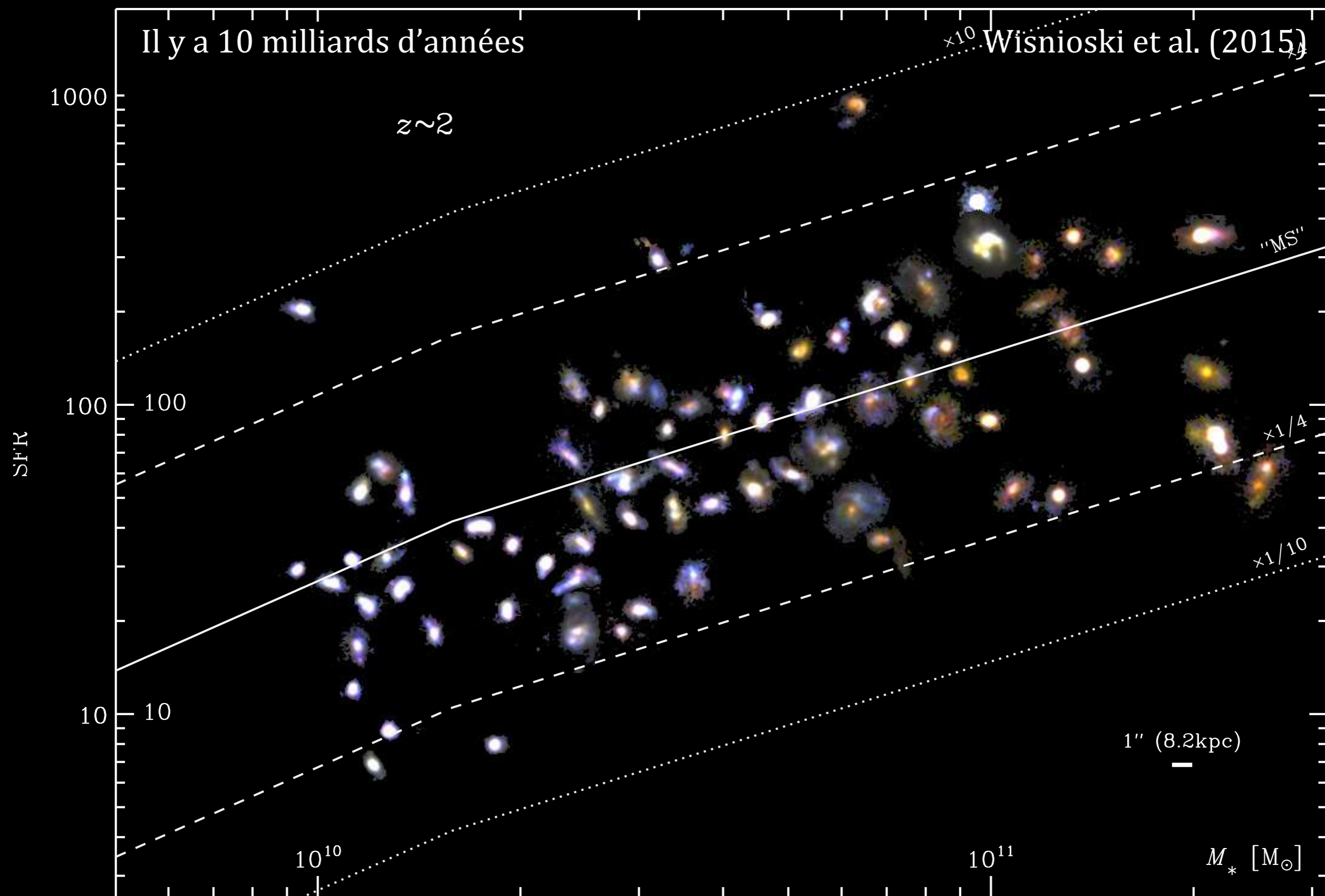


La séquence principale

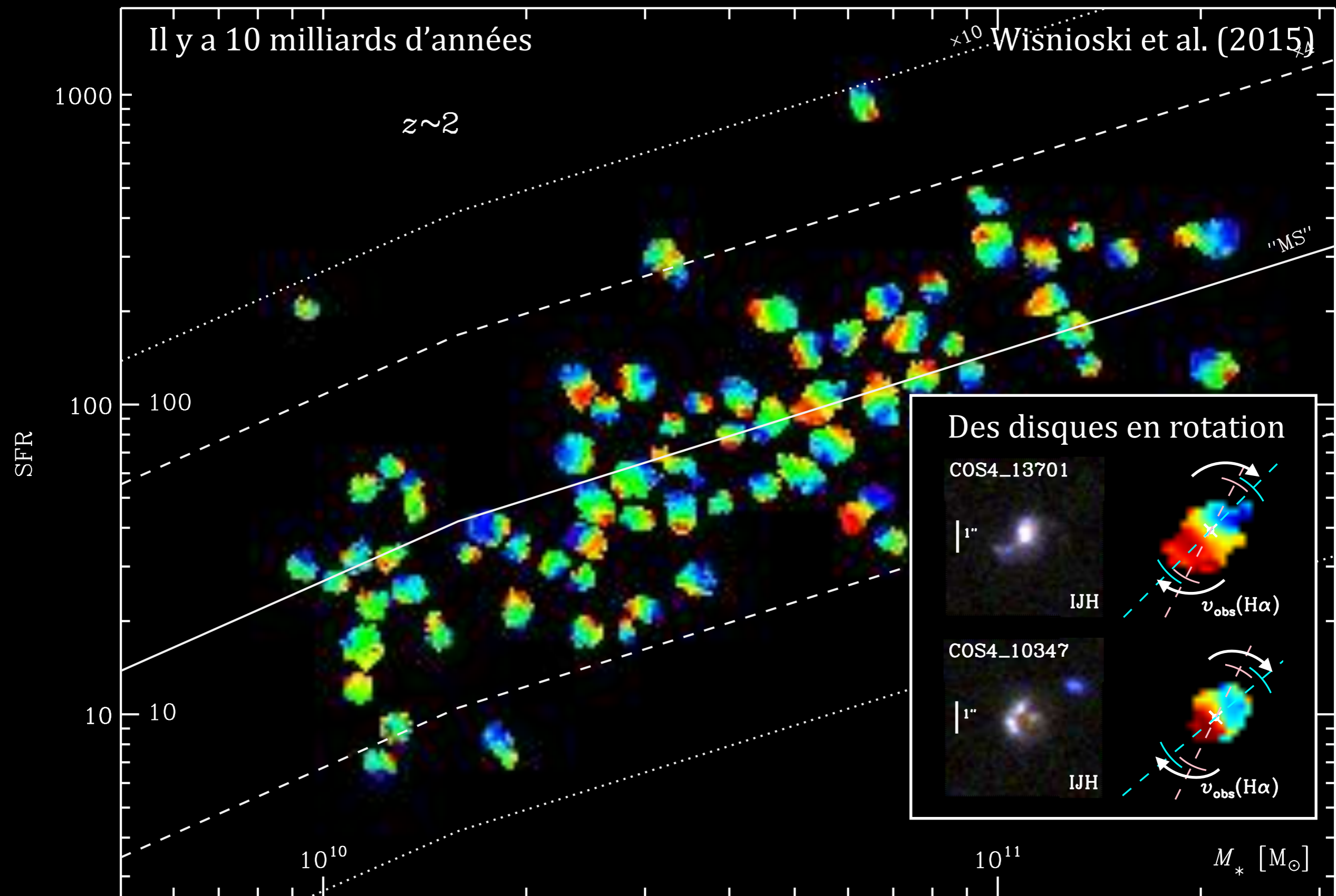
Il y a 10 milliards d'années

Wisnioski et al. (2015)

$z \sim 2$



La séquence principale

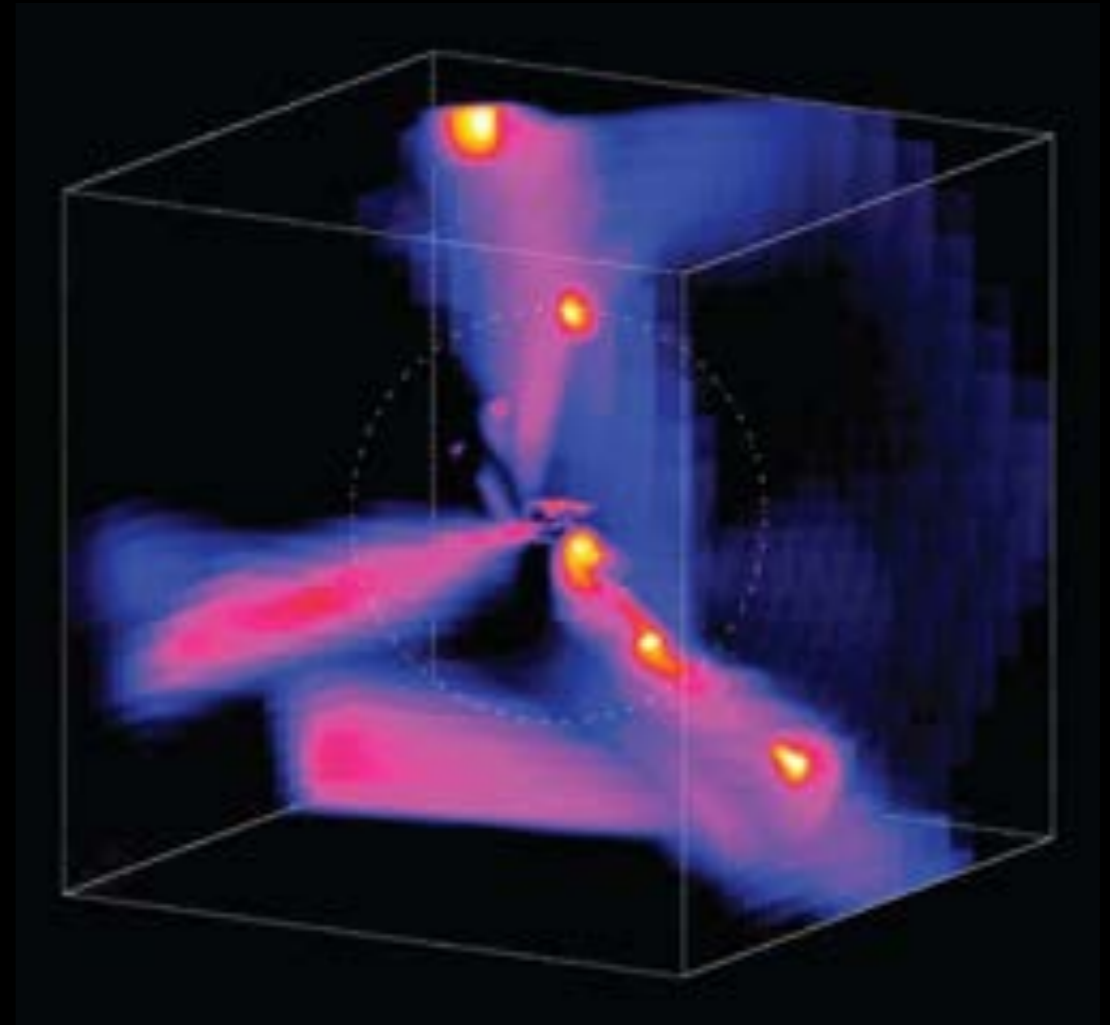


La croissance des galaxies

fusions



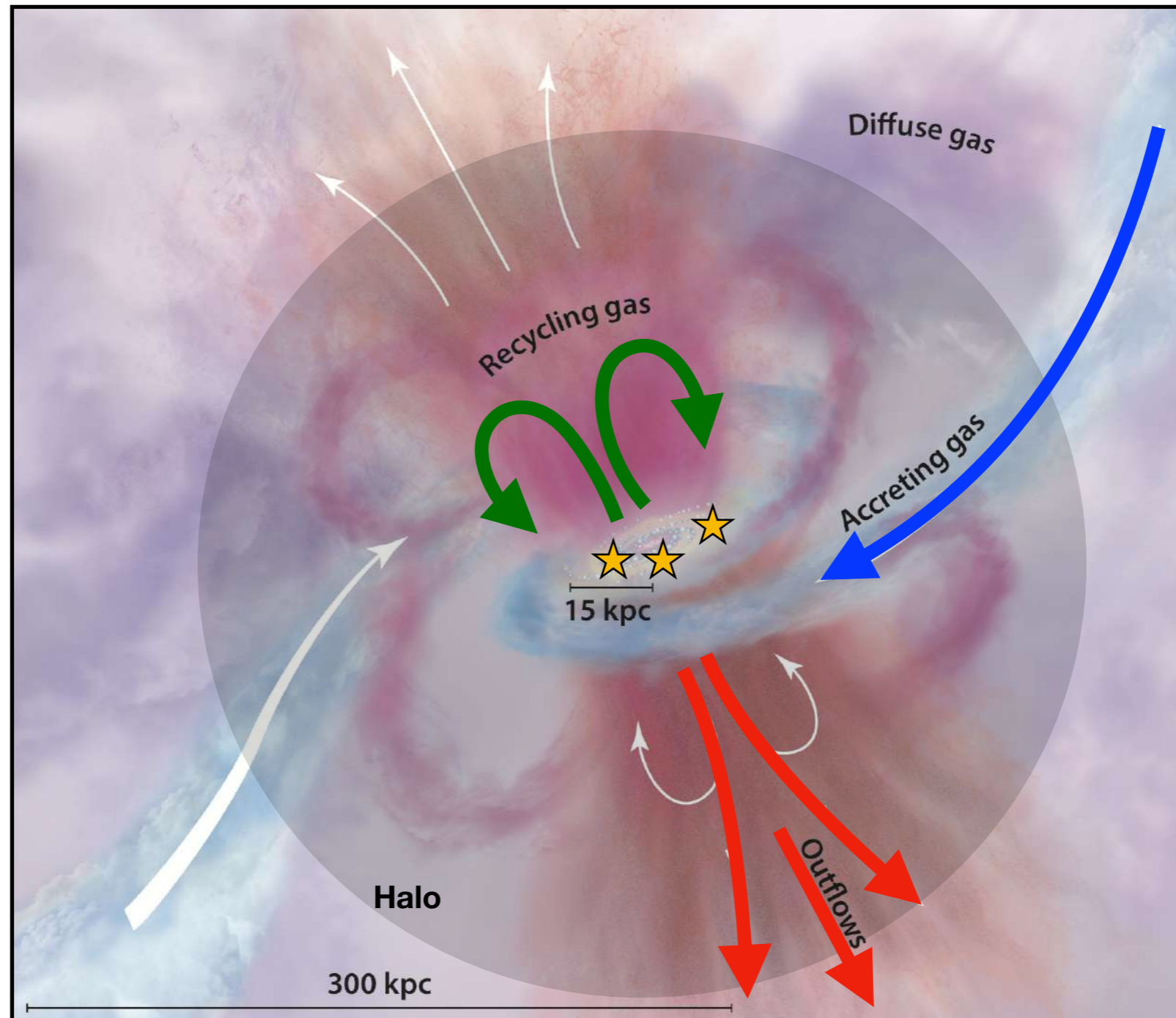
filaments de gaz



Dekel et al., dont Freundlich (2009)

Le gaz dans les galaxies

$$\dot{M}_{\text{gaz}} = \dot{M}_{\text{gaz,in}} - \dot{M}_{\star} - \eta \dot{M}_{\star} + R \dot{M}_{\star}$$

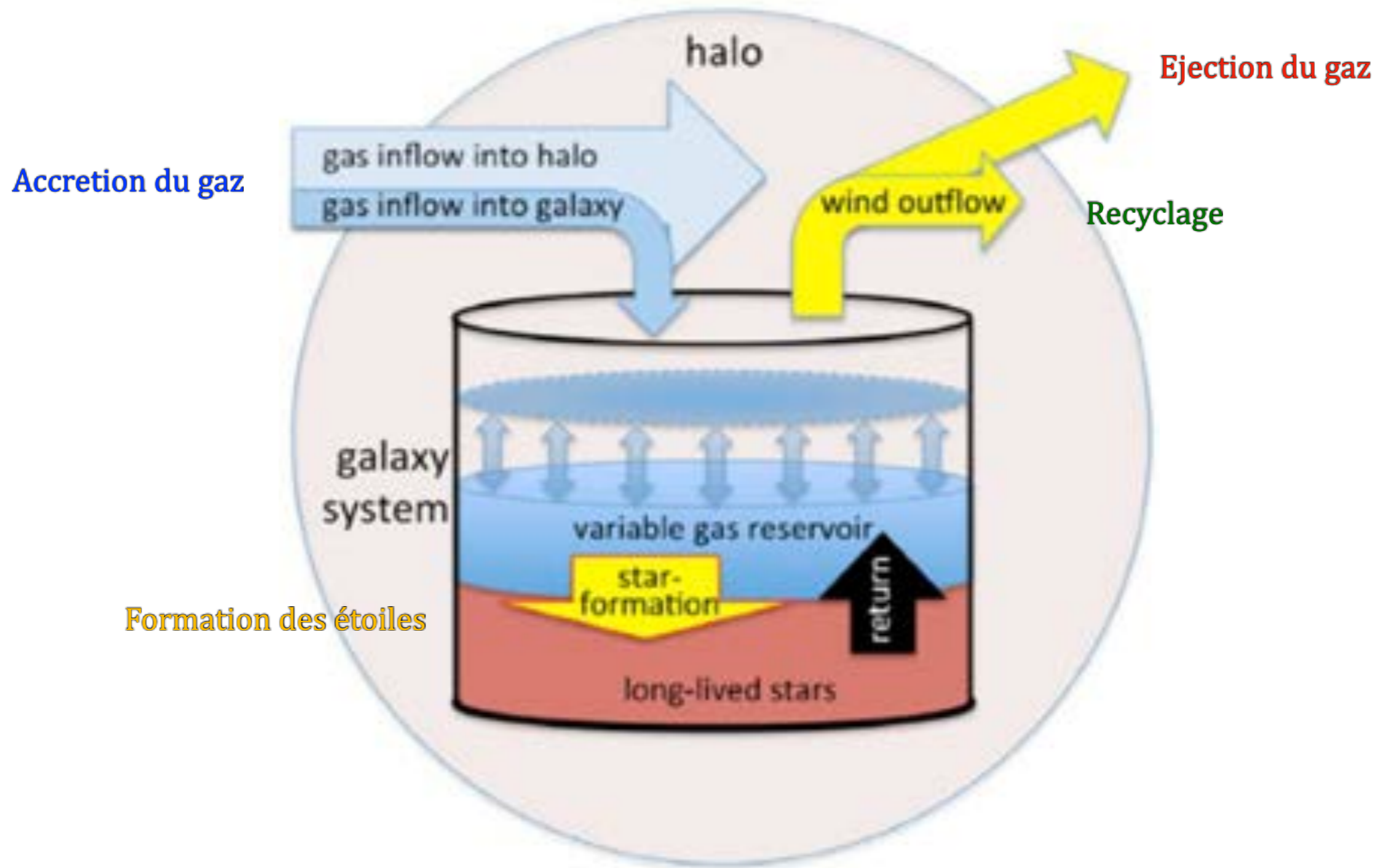


Accretion du gaz
Formation des étoiles
Ejection du gaz
Recyclage

Tumlinson, Peebles & Werk (2017)

Un modèle pour expliquer la séquence principale

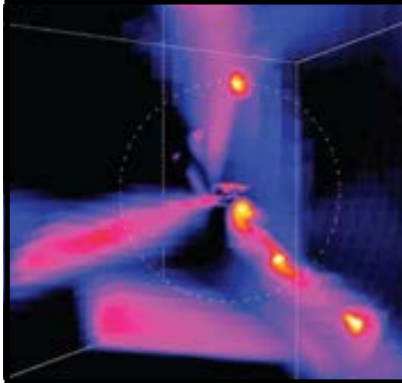
$$\dot{M}_{\text{gaz}} = \dot{M}_{\text{gaz,in}} - \dot{M}_{\star} - \eta\dot{M}_{\star} + R\dot{M}_{\star}$$



Lilly et al. (2013)

Un modèle pour expliquer la séquence principale

$$\dot{M}_{\text{gaz}} = \dot{M}_{\text{gaz,in}} - \dot{M}_{\star} - \eta\dot{M}_{\star} + R\dot{M}_{\star}$$



L'accrétion du gaz

$\dot{M}_{\text{gaz,in}}$ proportionnel à l'accrétion cosmologique (baryons et matière noire)

Seuils : pas d'accrétion quand le halo est trop petit ou trop grand

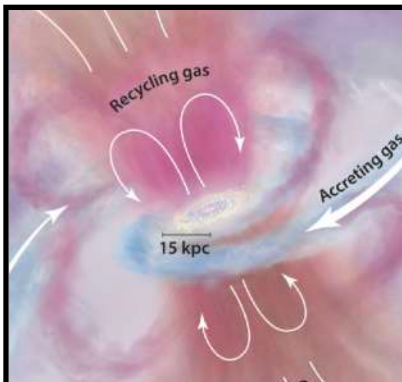
$\dot{M}_{\text{gaz,in}} \propto \epsilon_{\text{in}} f_b \dot{M}_{\text{halo}}$ avec $\dot{M}_{\text{halo}} \propto M_{\text{halo}}^{1.1} (1+z)^{2.2}$ (Neistein & Dekel 08)



La formation des étoiles

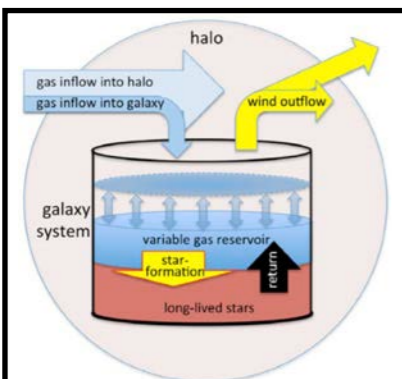
$\dot{M}_{\star} = \text{SFR}$ proportionnel à la quantité de gaz dans la galaxie

$\dot{M}_{\star} = \text{SFR} = \epsilon_{\text{SFR}} M_{\text{gas}} / t_{\text{ff}}$ avec $\epsilon_{\text{SFR}} \sim 0.02$
et $t_{\text{ff}} \propto (1+z)^{-1.5}$ le temps dynamique



Ejection et recyclage du gaz

$\eta\dot{M}_{\star}$ et $R\dot{M}_{\star}$ proportionnels au taux de formation d'étoiles



Equilibre de la quantité de gaz

$$\dot{M}_{\text{gaz}} = 0$$

$$\dot{M}_{\text{gaz}} = \dot{M}_{\text{gaz,in}} - \frac{\epsilon_{\text{SFR}}(1 + \eta - R)}{t_{\text{ff}}} M_{\text{gas}} = 0$$

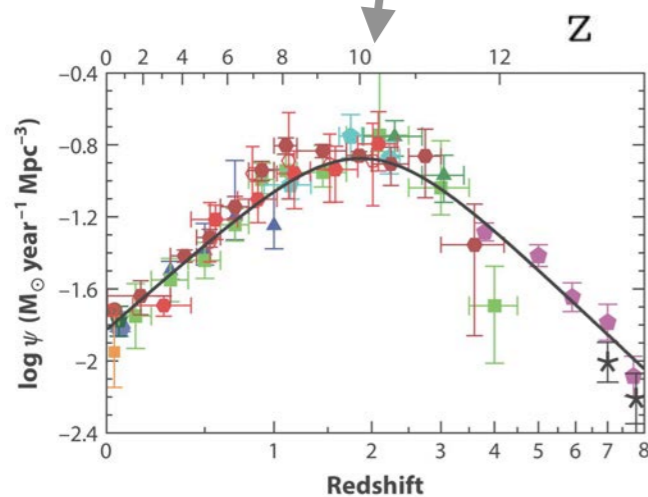
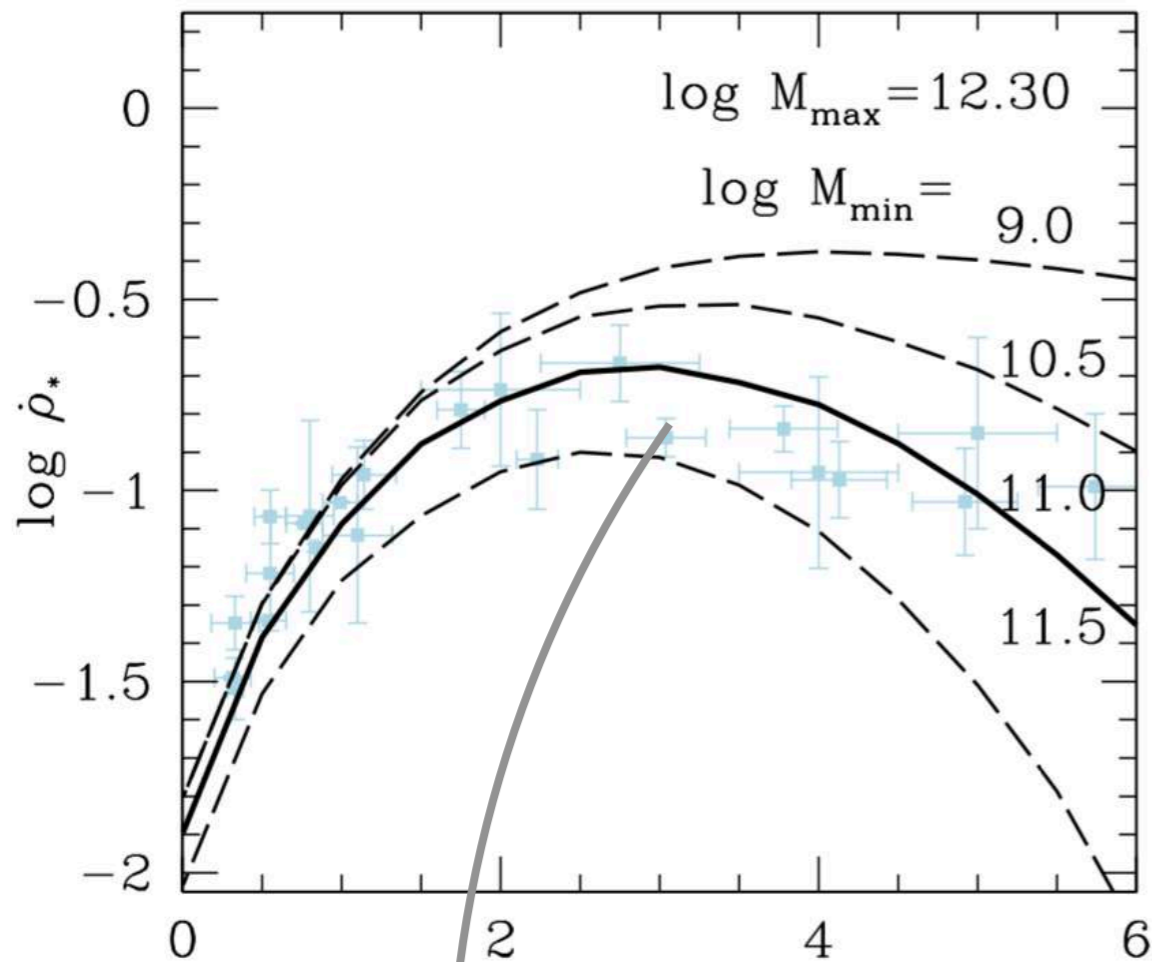
Bouché et al. (2010)

Un modèle pour expliquer la séquence principale

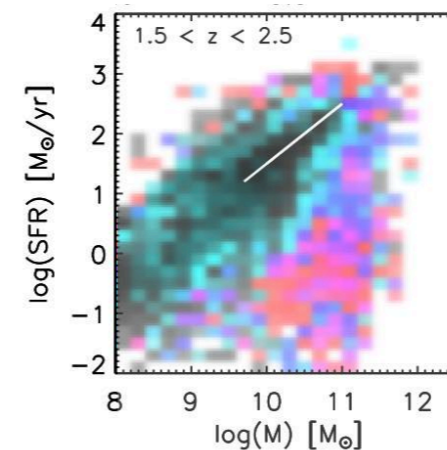
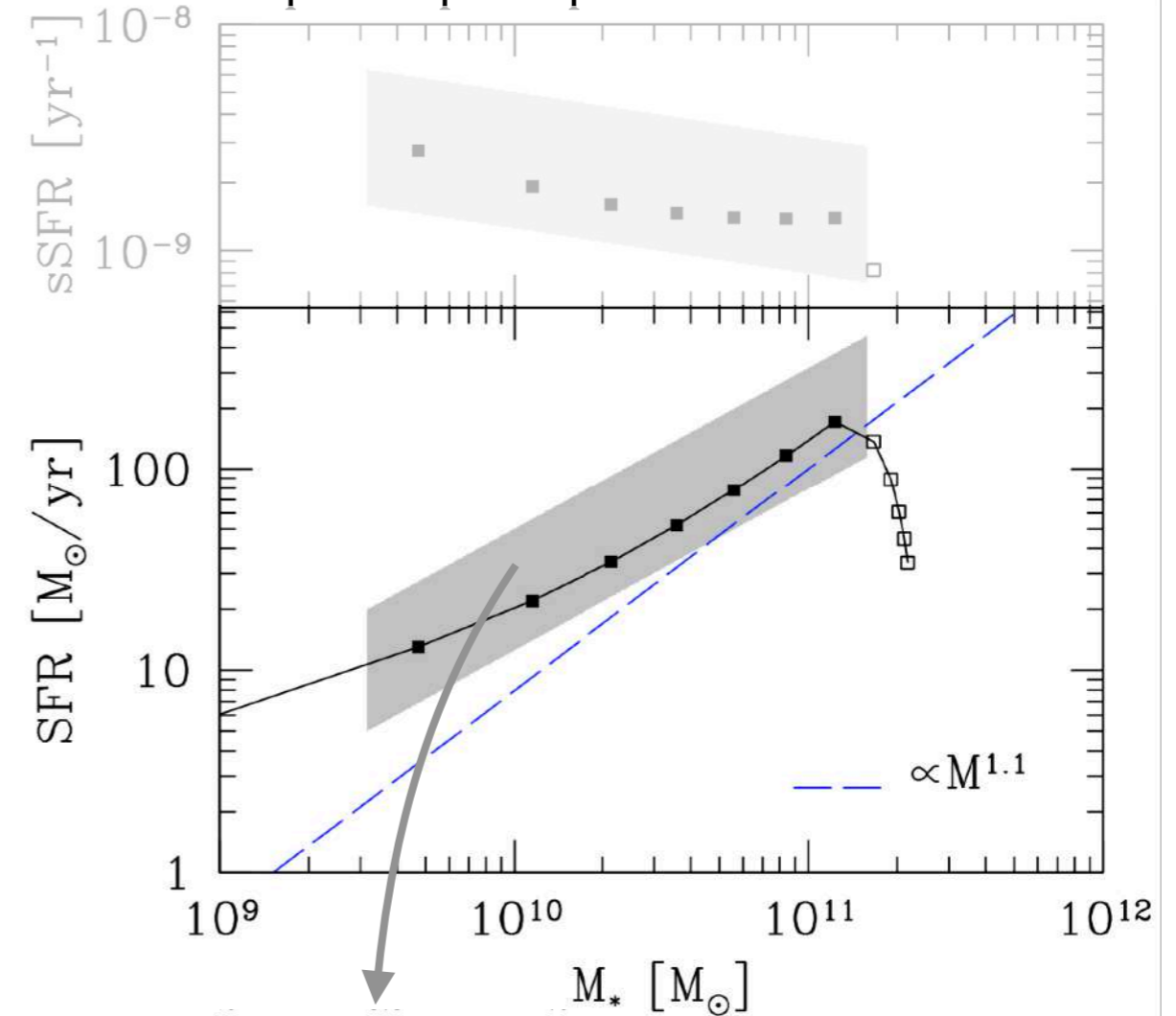
$$\dot{M}_{\text{gaz}} = \dot{M}_{\text{gaz,in}} - \dot{M}_{\star} - \eta \dot{M}_{\star} + R \dot{M}_{\star}$$

Des prédictions en accord avec les observations :

Évolution de la formation des étoiles



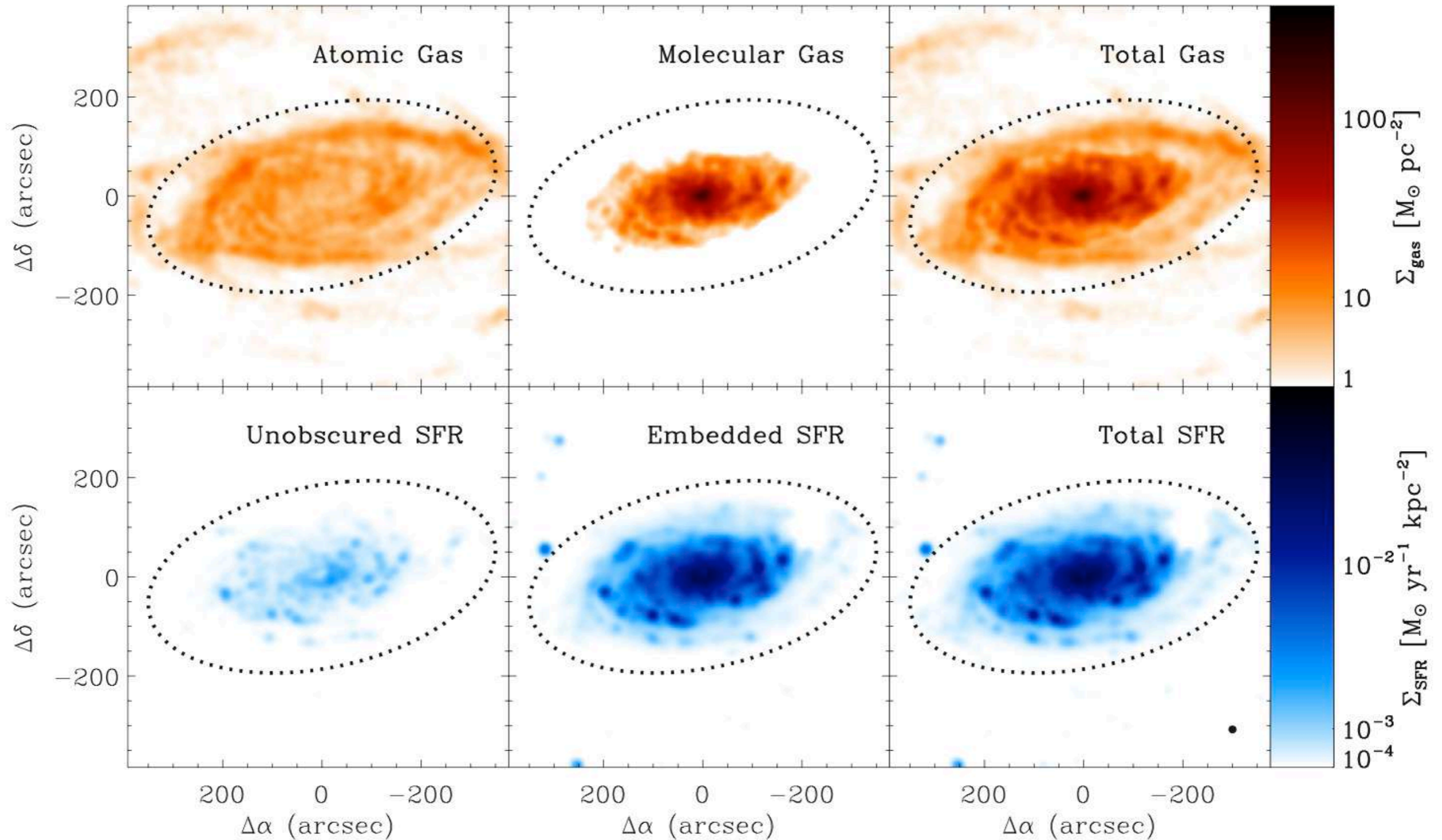
Séquence principale



Bouché et al. (2010)

Taux de formation d'étoiles et gaz moléculaire

NGC 5055

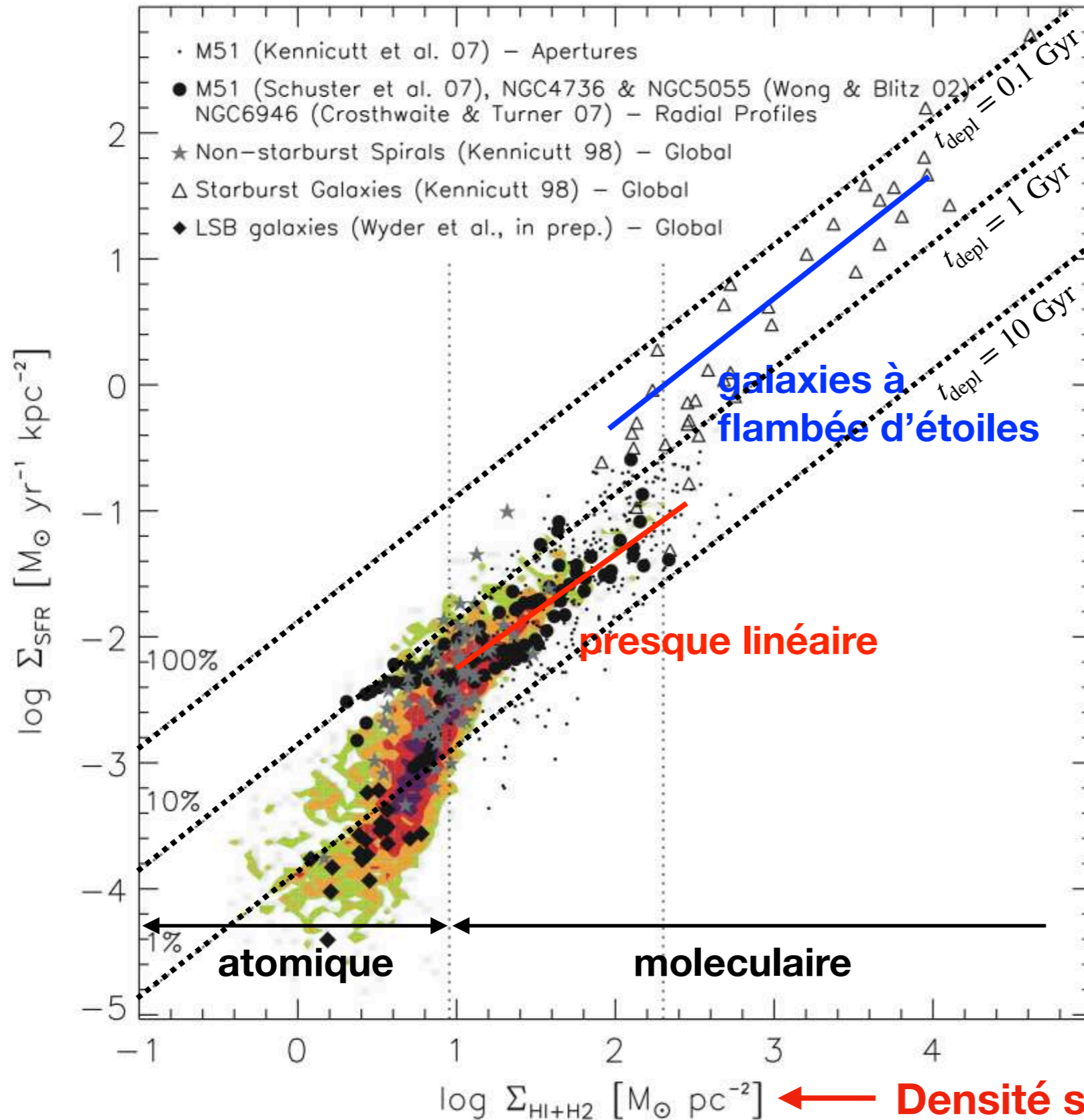


Leroy et al. (2008)

La relation de Schmidt-Kennicutt

Densité surfacique du taux de formation d'étoiles

Aujourd'hui ($z=0$)



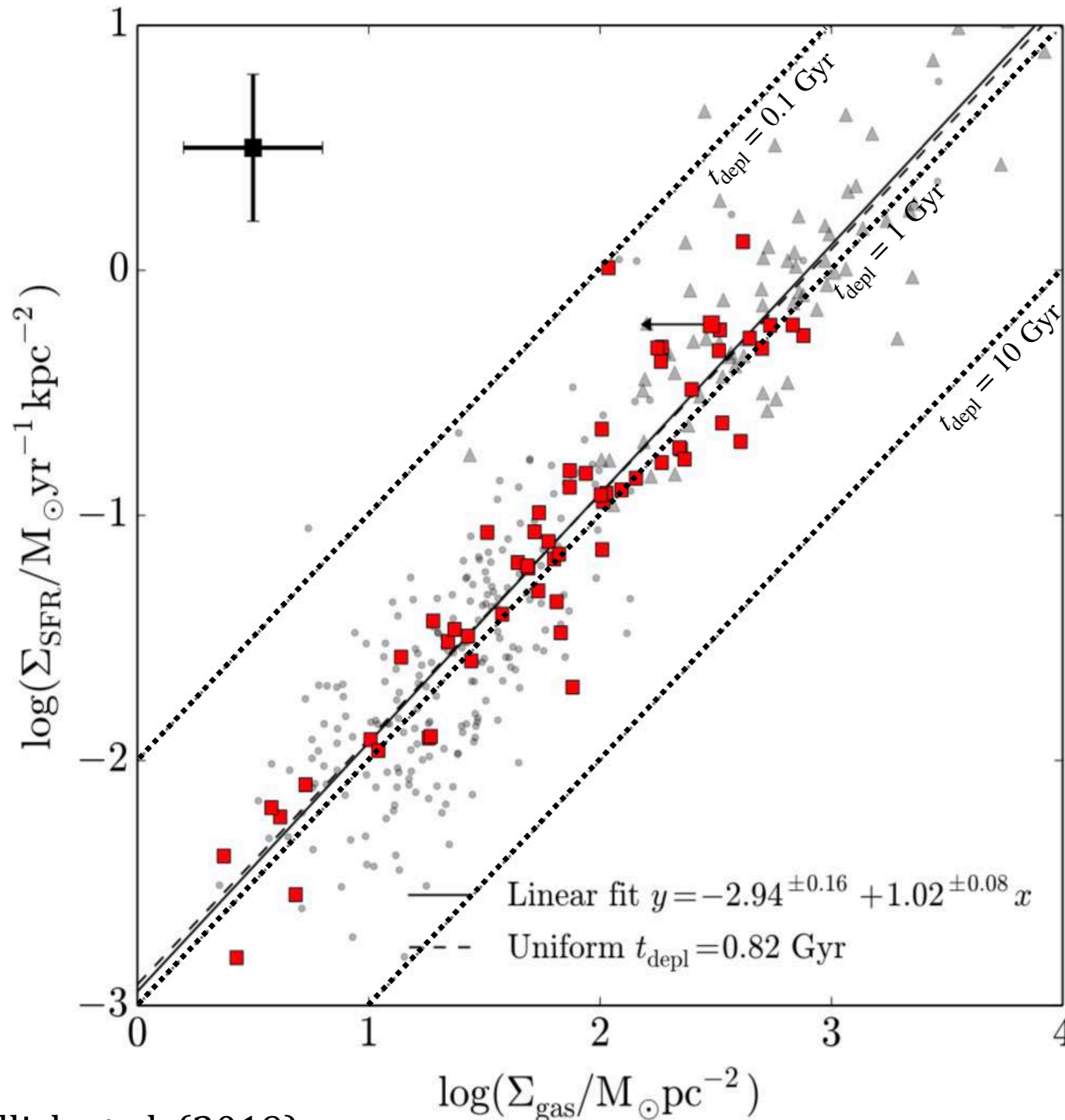
Temps de déplétion

$$t_{\text{depl}} = M_{\text{gas}} / \text{SFR}$$

temps de consommation du gaz à taux de formation d'étoiles constant

Densité surfacique du gaz

La relation de Schmidt-Kennicutt



A différentes époques
pour le gaz moléculaire

- $z=0$ (aujourd'hui)
- $z=0.5-0.8$ (il y a 5-7 Gyr)
- ▲ $z=1-2$ (il y a 8-10 Gyr)

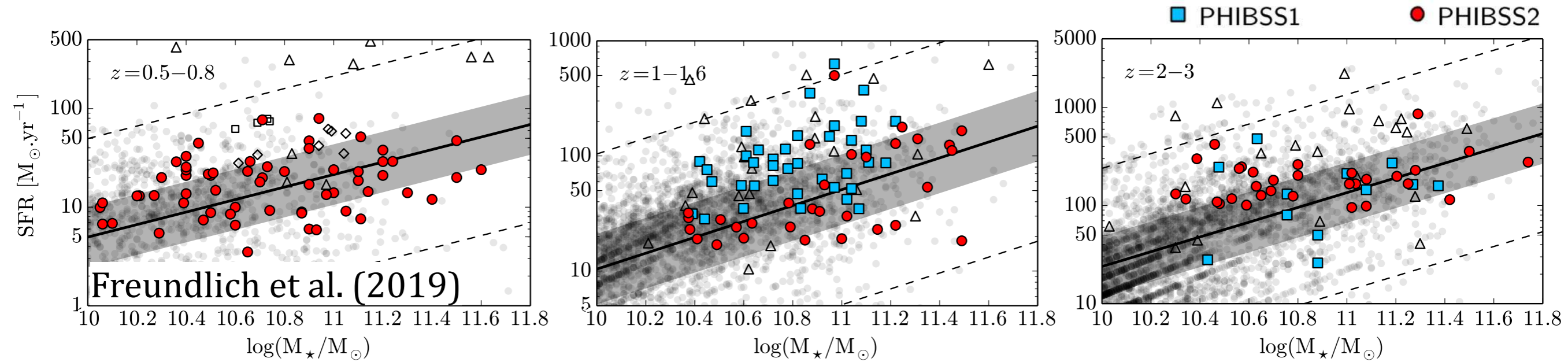
PHIBSS

t_{depl} évolue peu durant les 10
derniers milliards d'années

Les relevés PHIBSS de l'IRAM

IRAM Plateau de Bure High-z Blue Sequence CO Surveys

- ◆ Plus de **170 galaxies** de la séquence principale
- ◆ Observations du **gaz moléculaire** CO (monoxyde de carbone)
- ◆ Couvrent la **mise en place** ($z=2-3$), le **pic** ($z=1-1.6$) et la **diminution** ($z=0.5-0.8$) de la formation des étoiles

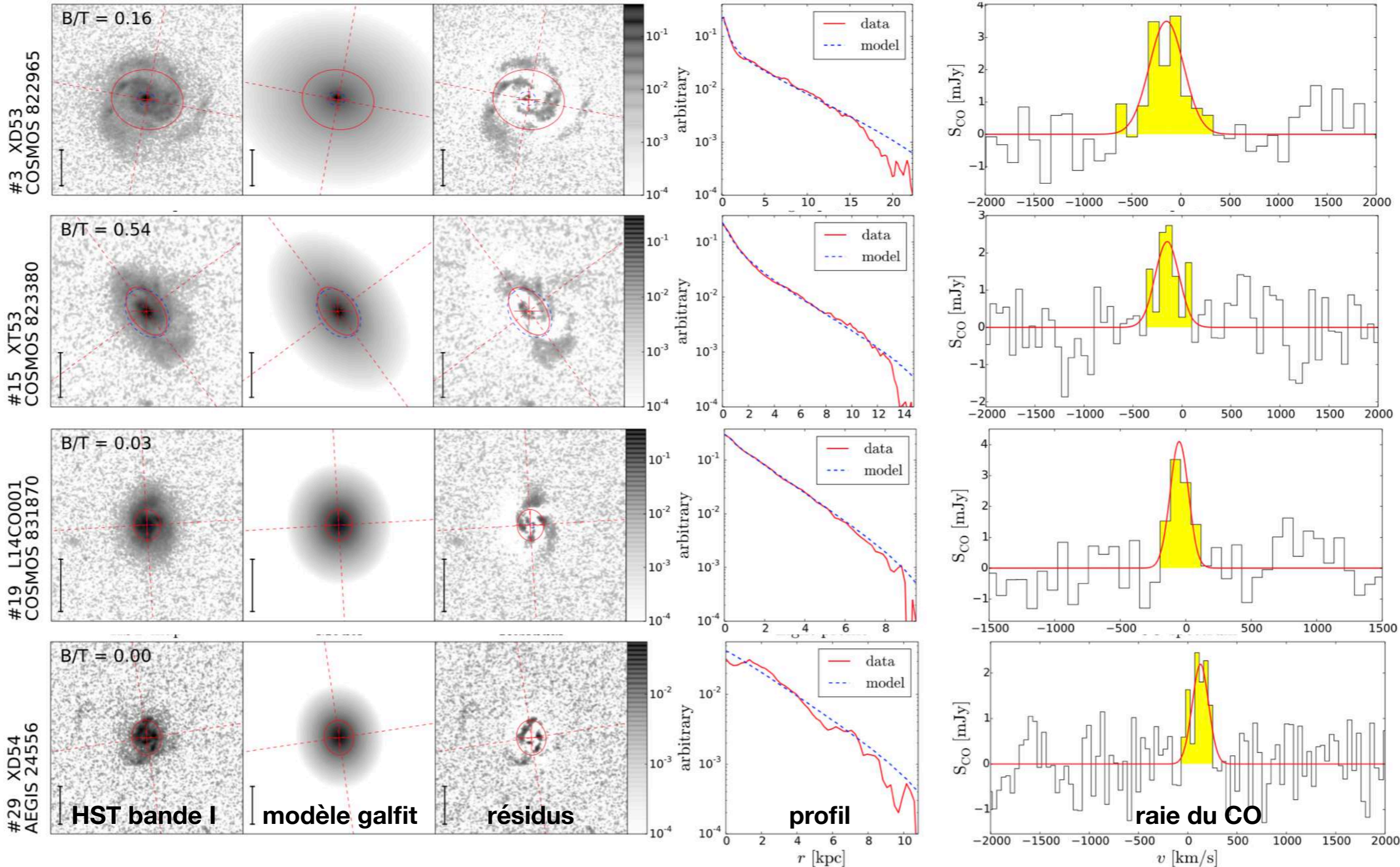


Tacconi et al. (2010, 2013, 2018), Genzel et al. (2010, 2012, 2013, 2015), Freundlich et al. (2013, 2019), Bolatto et al. (2015), Carleton et al. (2017)



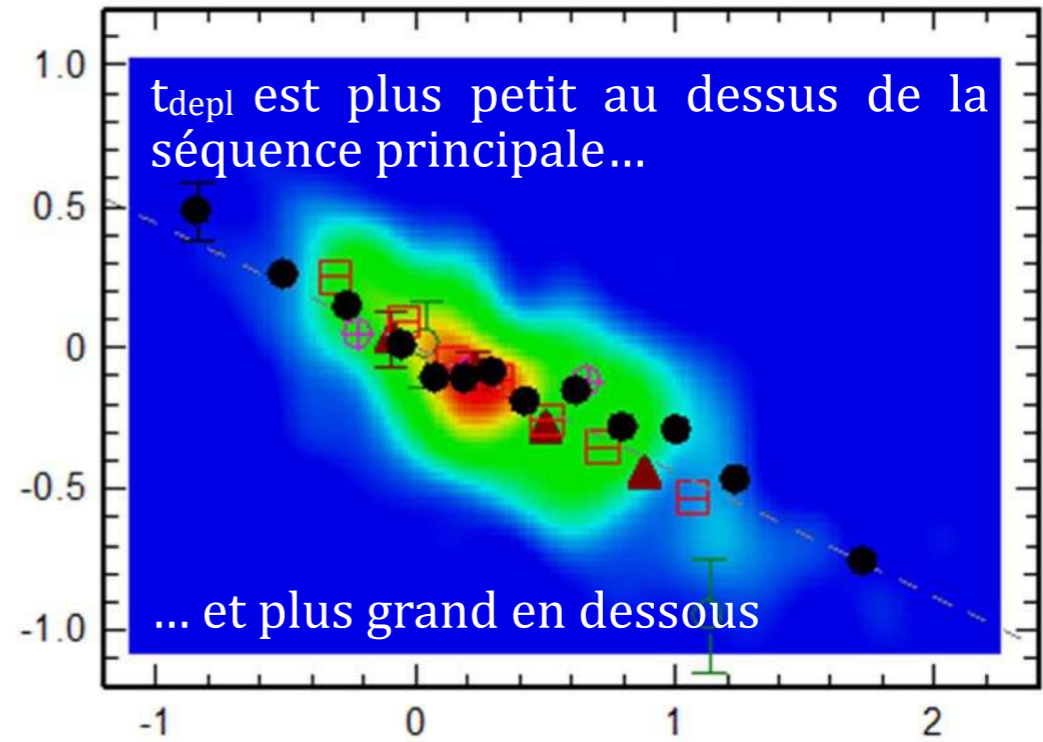
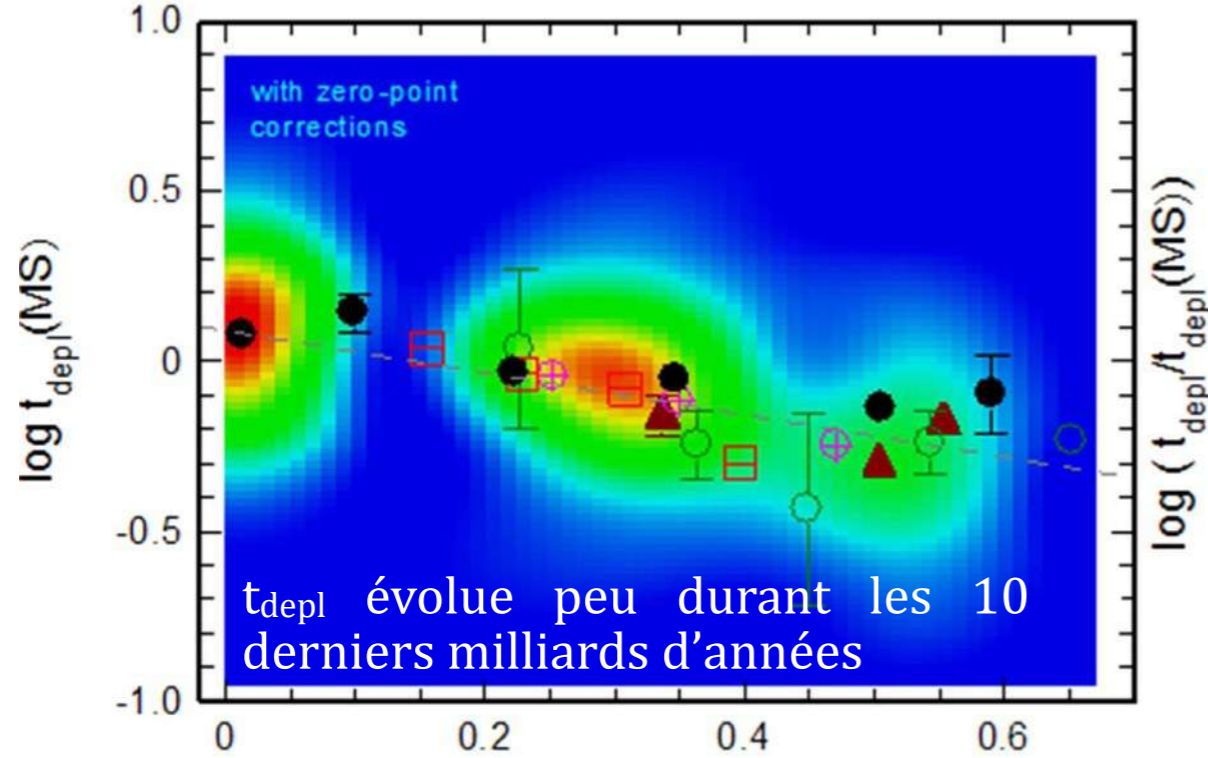
Les relevés PHIBSS de l'IRAM

IRAM Plateau de Bure High-z Blue Sequence CO Surveys

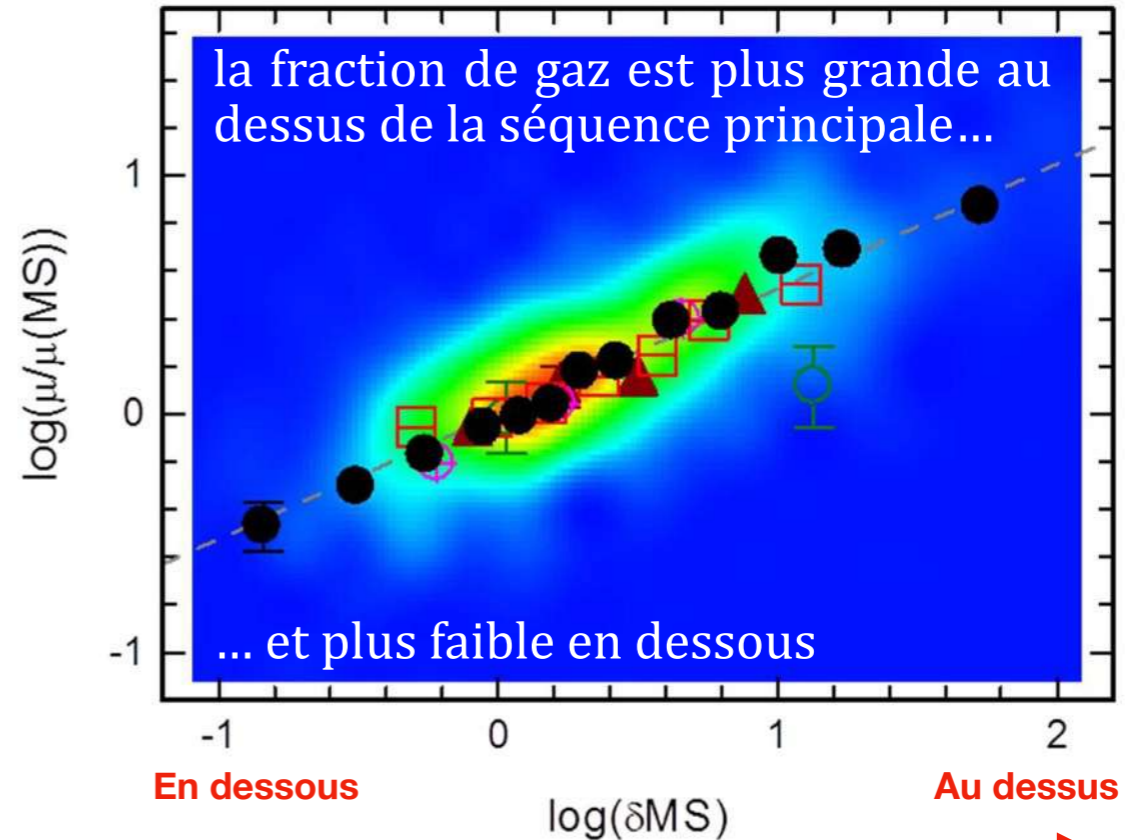
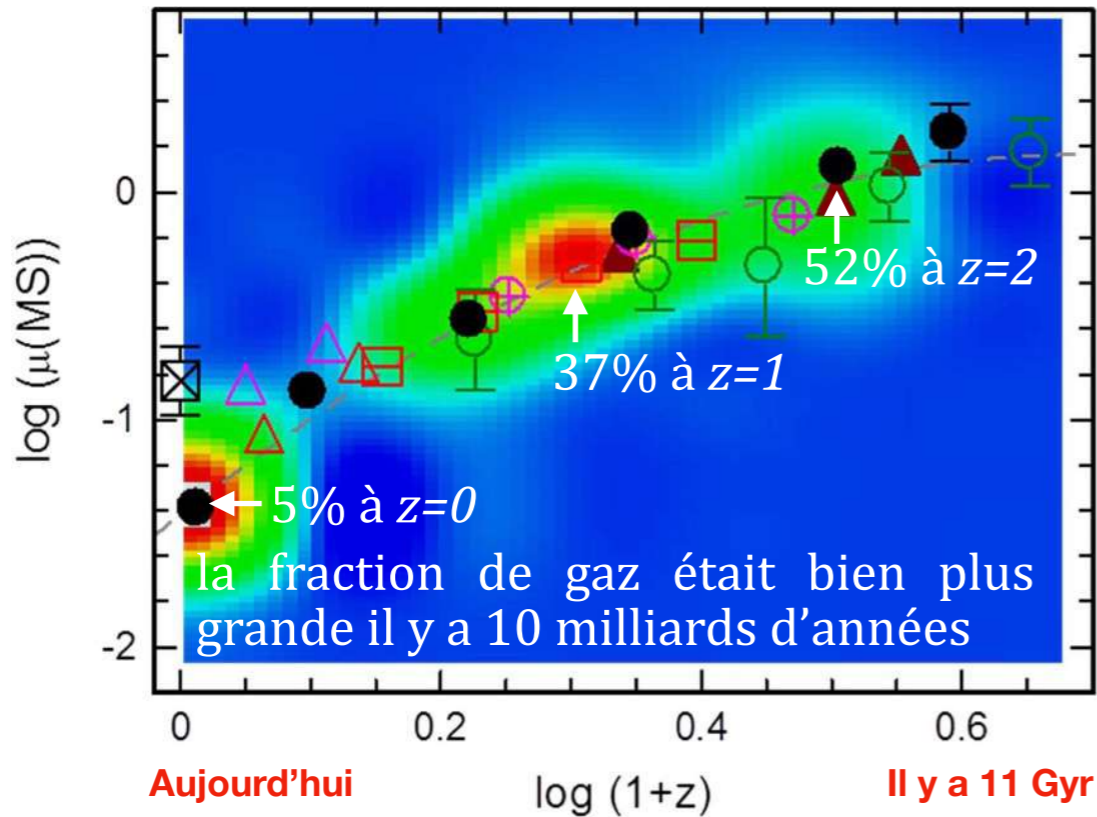


L'évolution de la quantité de gaz et du temps de déplétion

Temps de depletion



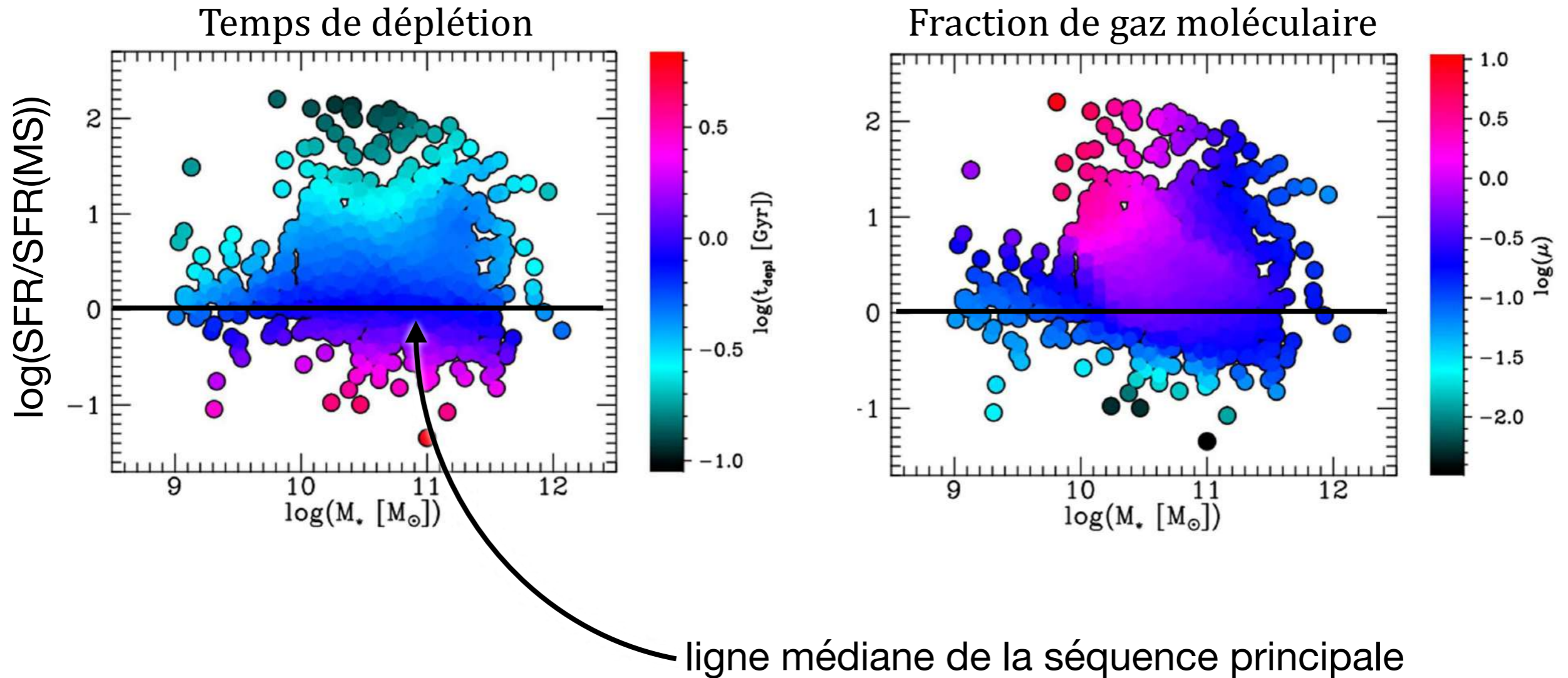
Fraction de gaz moléculaire



Temps

Position par rapport à la séquence principale

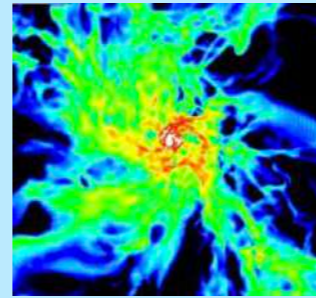
Gaz et temps de déplétion dans la séquence principale



Interpretation en termes de contraction/consommation/réapprovisionnement du gaz

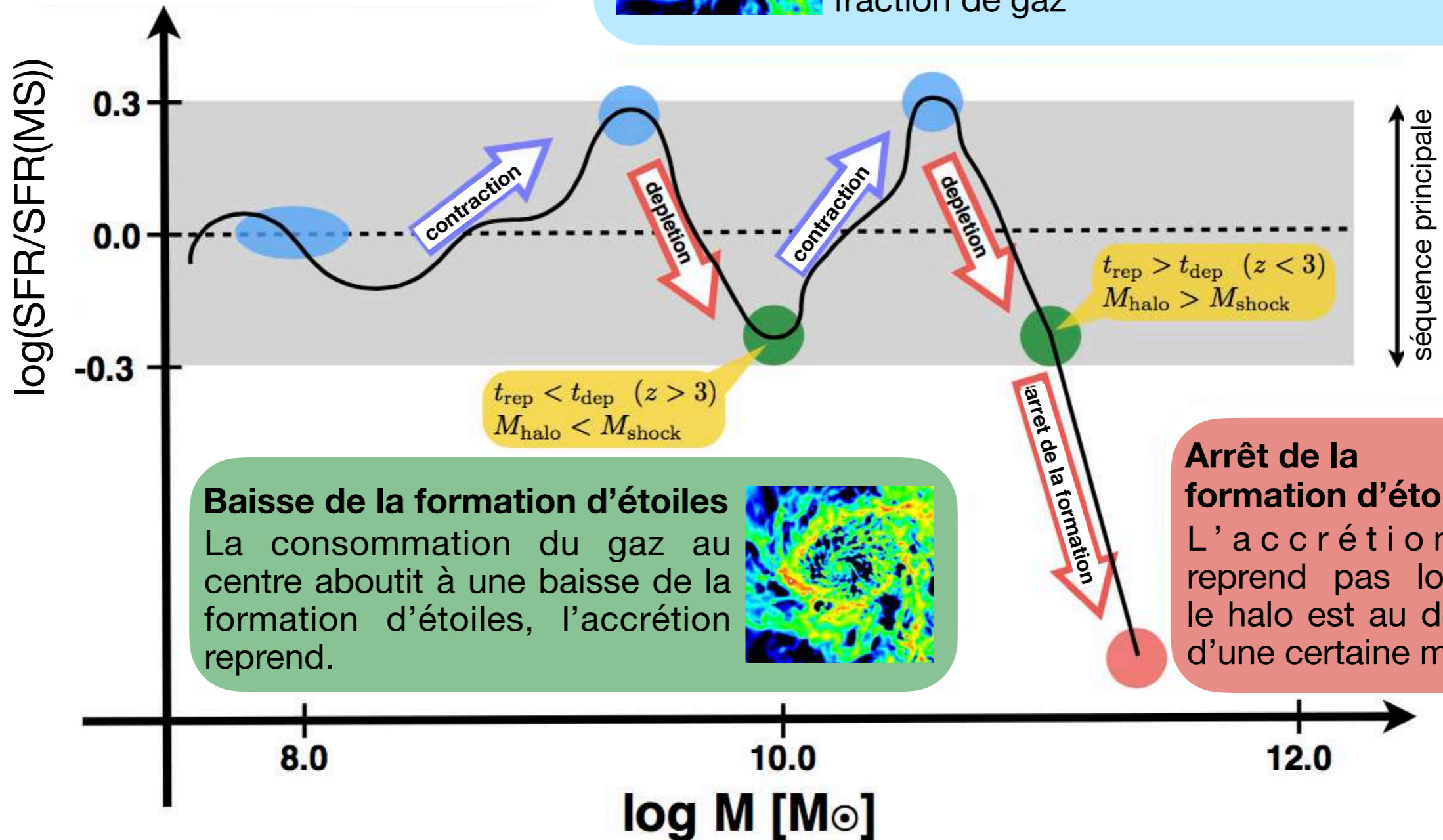
Contraction du gaz

Due à un fort apport en gaz ou à une fusion (majeure ou mineure)



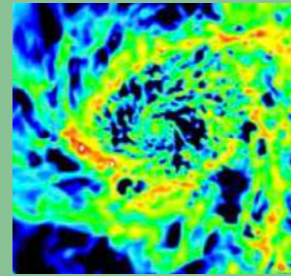
Blue Nugget

Gaz concentré au centre de la galaxie, augmentation du taux de formation d'étoiles, faible temps de déplétion, grande fraction de gaz



Baisse de la formation d'étoiles

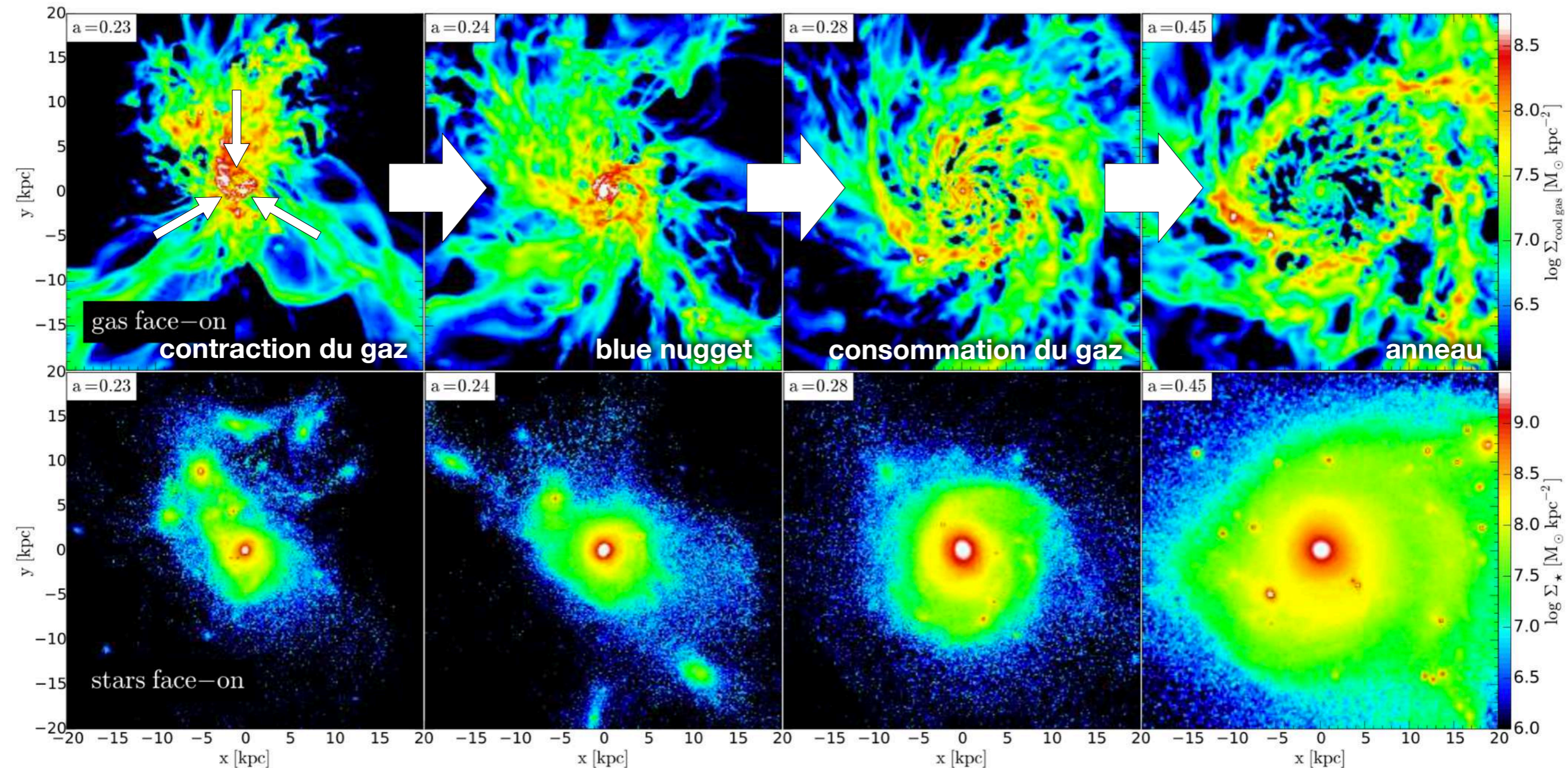
La consommation du gaz au centre aboutit à une baisse de la formation d'étoiles, l'accrétion reprend.



Arrêt de la formation d'étoiles

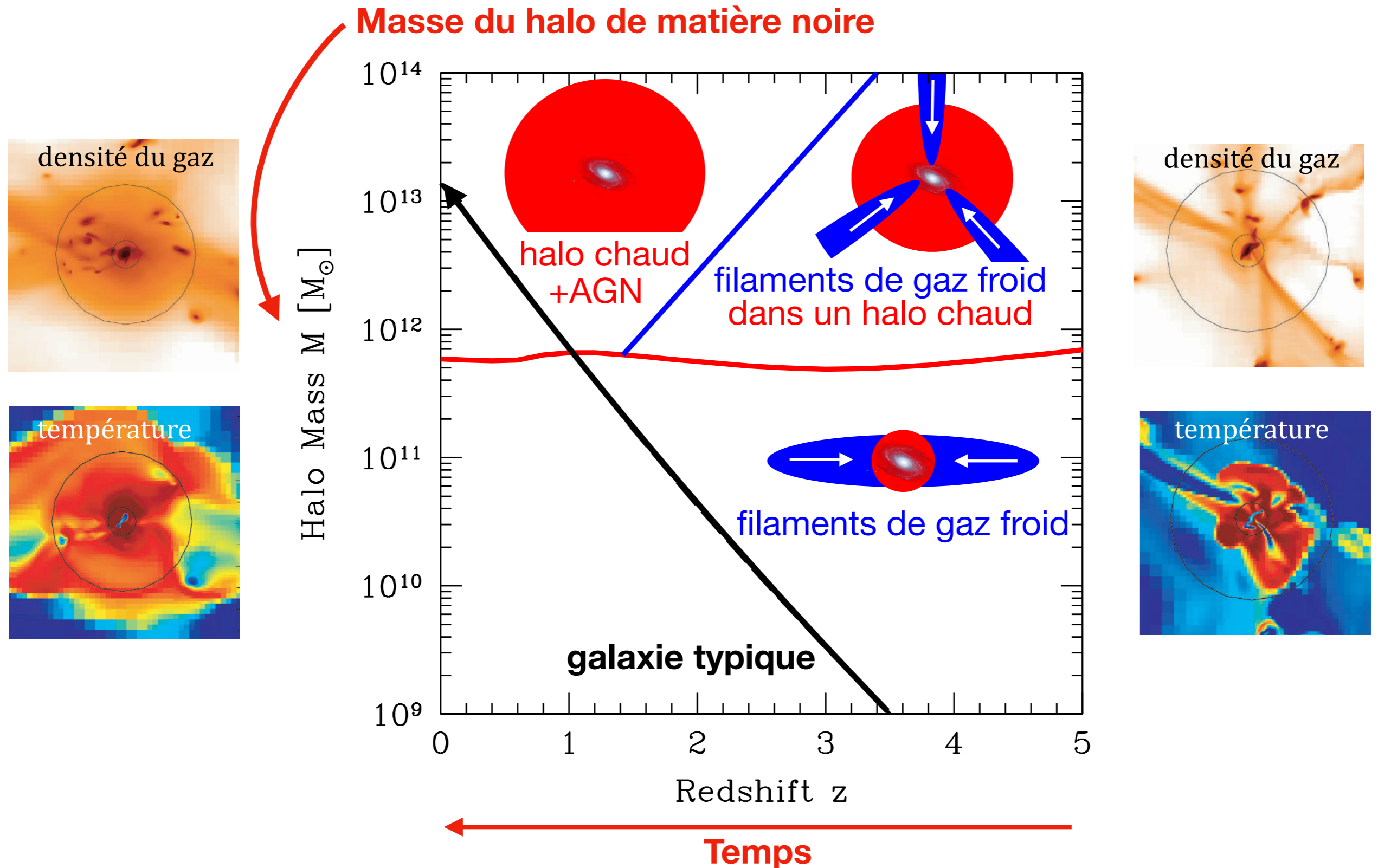
L'accrétion ne reprend pas lorsque le halo est au dessus d'une certaine masse

Interpretation en termes de contraction/consommation/ réapprovisionnement du gaz

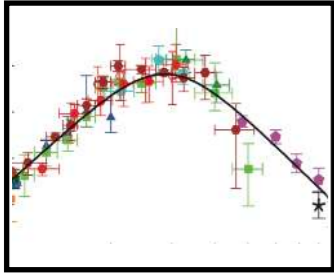


Simulations cosmologiques VELA (Ceverino et al. 2014)

L'arrêt de la formation des étoiles au dessus d'une certaine masse

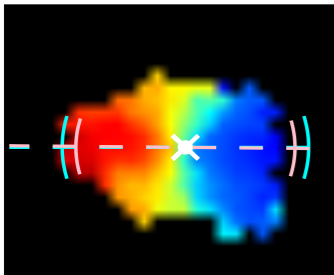
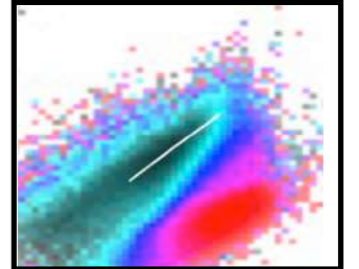


Conclusion



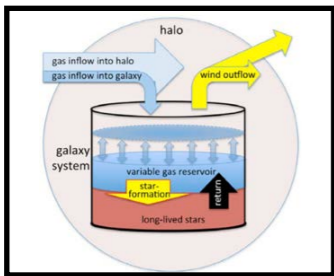
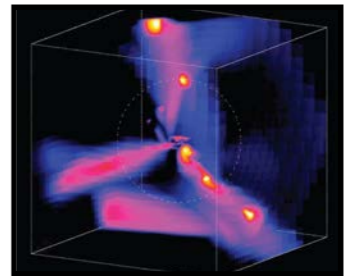
La formation des étoiles connaît un **pic** il y a 10 milliards d'années

La plus grande partie des étoiles (90%) se forme dans les galaxies de la **séquence principale**



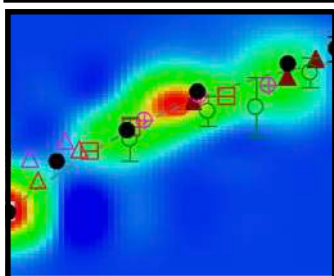
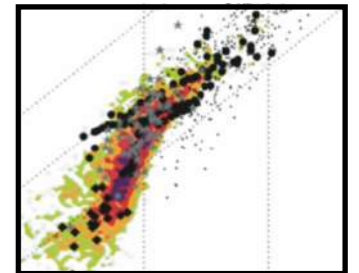
Les galaxies de la séquence principale sont pour la plupart des **disques en rotation**

La formation des étoiles dans la séquence principale implique un **apport régulier en gaz** le long de filaments de gaz froid



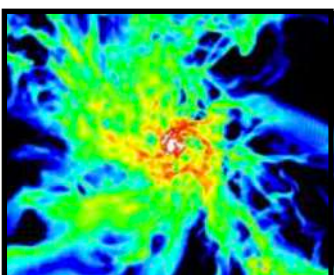
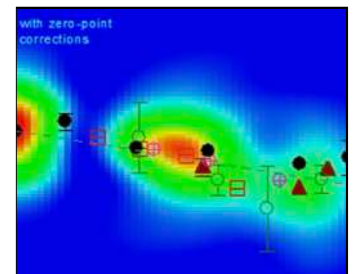
On peut expliquer la séquence principale par un **modèle d'équilibre du gaz**, à partir duquel se forment les étoiles

Le taux de formation d'étoiles est proportionnel à la masse de **gaz moléculaire**



L'évolution du taux de formation d'étoiles dans la séquence principale suit celle de la **fraction de gaz moléculaire**

L'**efficacité de la formation** des étoiles n'est que légèrement plus importante il y a 10 milliards d'années



Les galaxies de la séquence principale pourraient passer par des **cycles de contraction, consommation et réapprovisionnement** en gaz