

# GALAXIES AMPLIFIÉES PAR LES LENTILLES GRAVITATIONNELLES

COMMENT COMPRENDRE LA FORMATION STELLAIRE  
DE L'ÉCHELLE GALACTIQUE AUX NUAGES MOLÉCULAIRES

Dr. Mirka Dessauges-Zavadsky

Département d'Astronomie  
Université de Genève (CH)

SMACS 0723

# LE ZOO GALACTIQUE

## LES GALAXIES SONT DES SYSTÈMES COMPLEXES

Composés **d'étoiles, de gaz, de métaux et de poussières**  
pris dans les mouvements de rotation  
à l'échelle galactique.

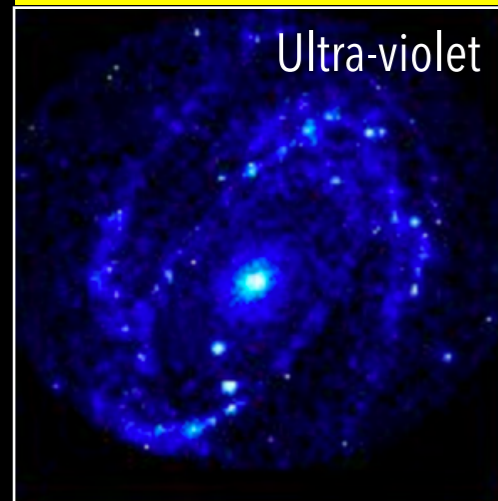


# LE ZOO GALACTIQUE

LES GALAXIES SONT DES SYSTÈMES COMPLEXES

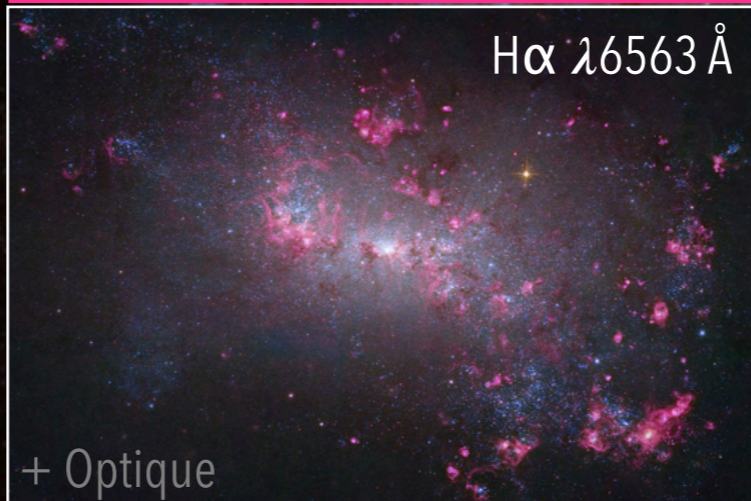
LEURS DIFFÉRENTES COMPOSANTES SONT RÉVÉLÉES À L'AIDE D'OBSERVATIONS MULTI-LONGUEURS D'ONDE

Étoiles (plusieurs millions à milliards)

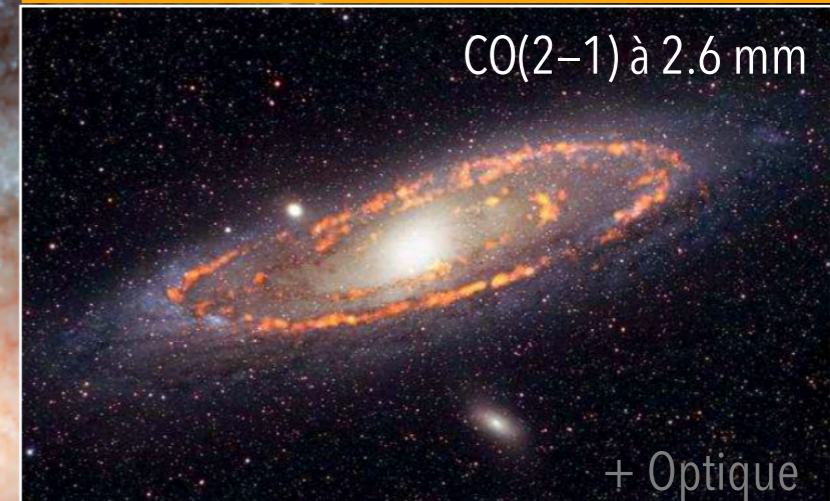


étoiles massives/jeunes étoiles peu massives/vieilles

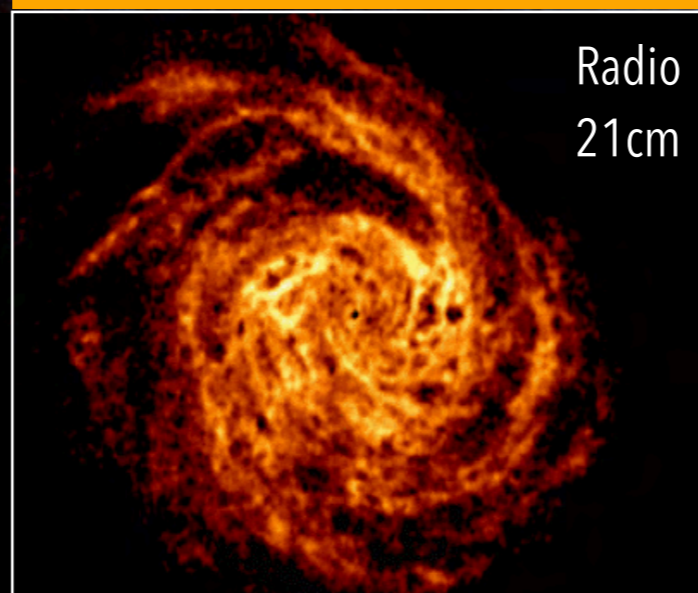
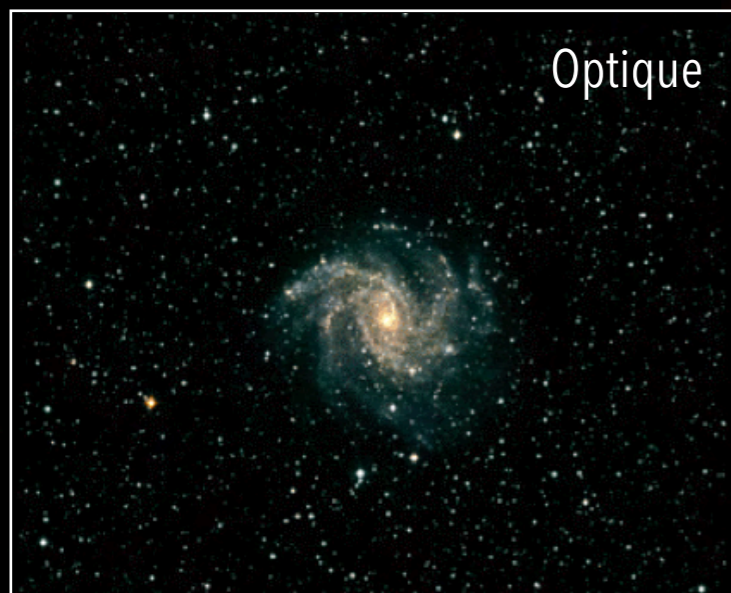
Gaz ionisé (HII)



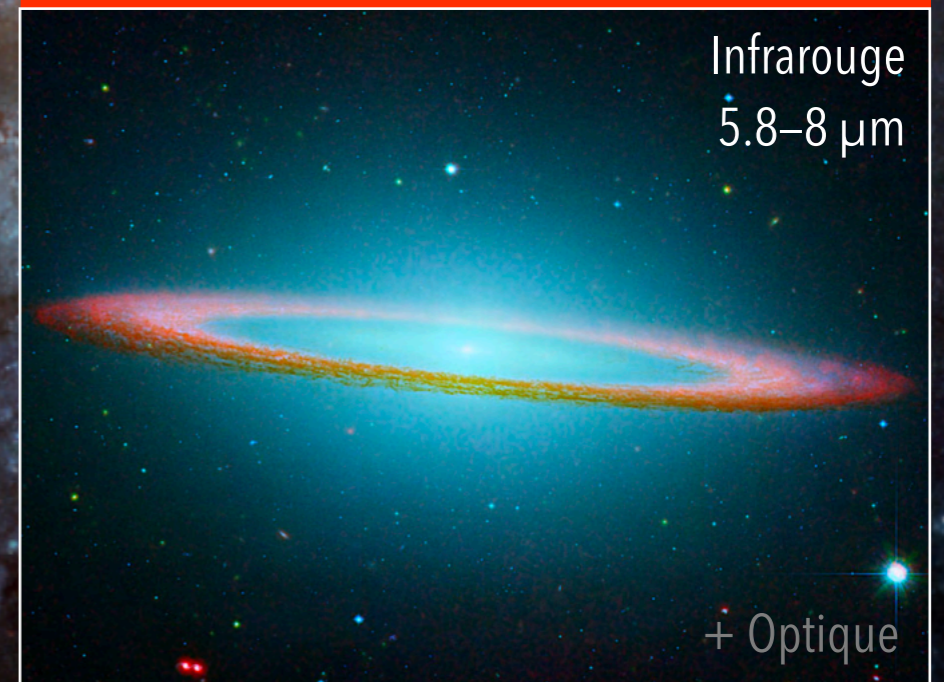
Gaz moléculaire (H<sub>2</sub>)



Gaz atomique (HI)



Poussières

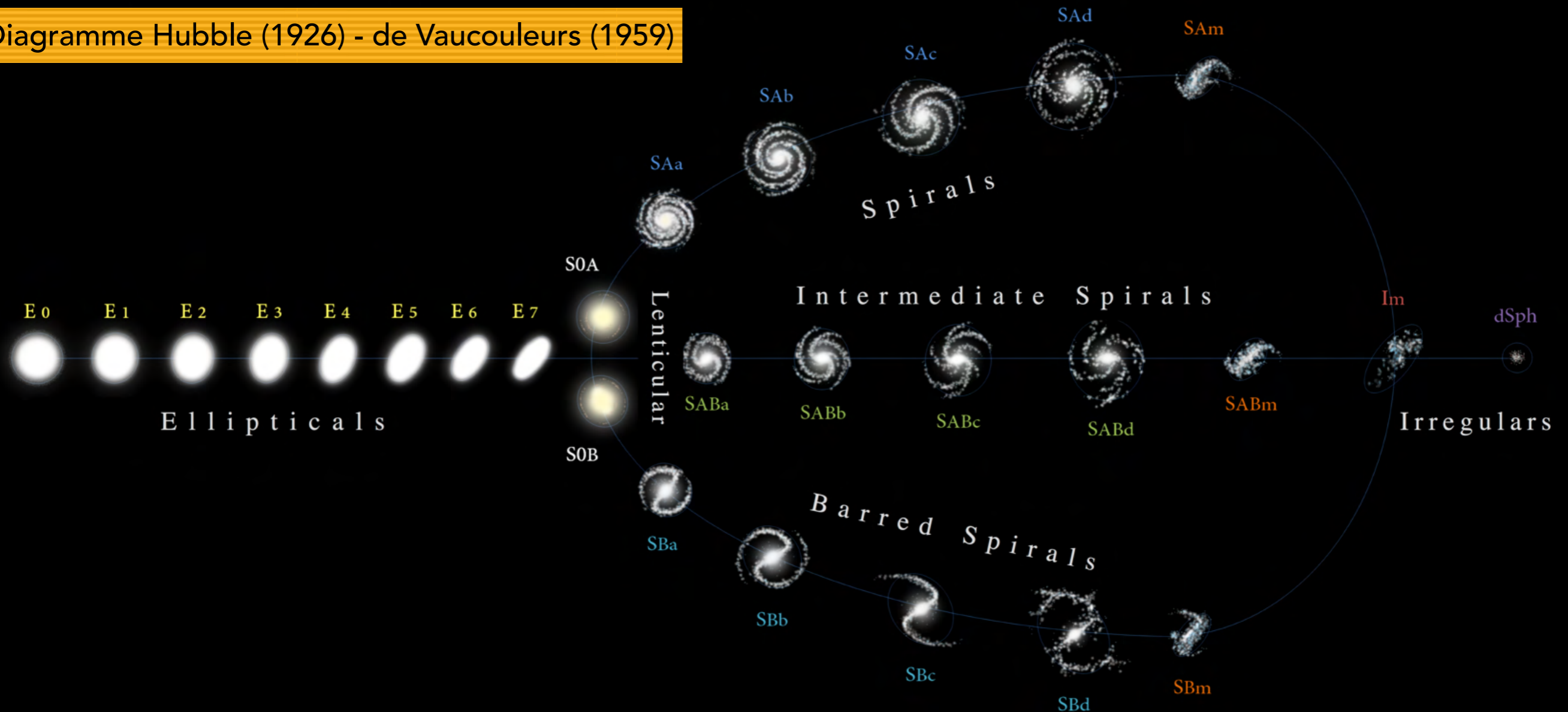


# LE ZOO GALACTIQUE

LES GALAXIES SONT DES SYSTÈMES COMPLEXES

LEUR APPARENCE PRÉSENTE UNE VARIÉTÉ DE MORPHOLOGIES

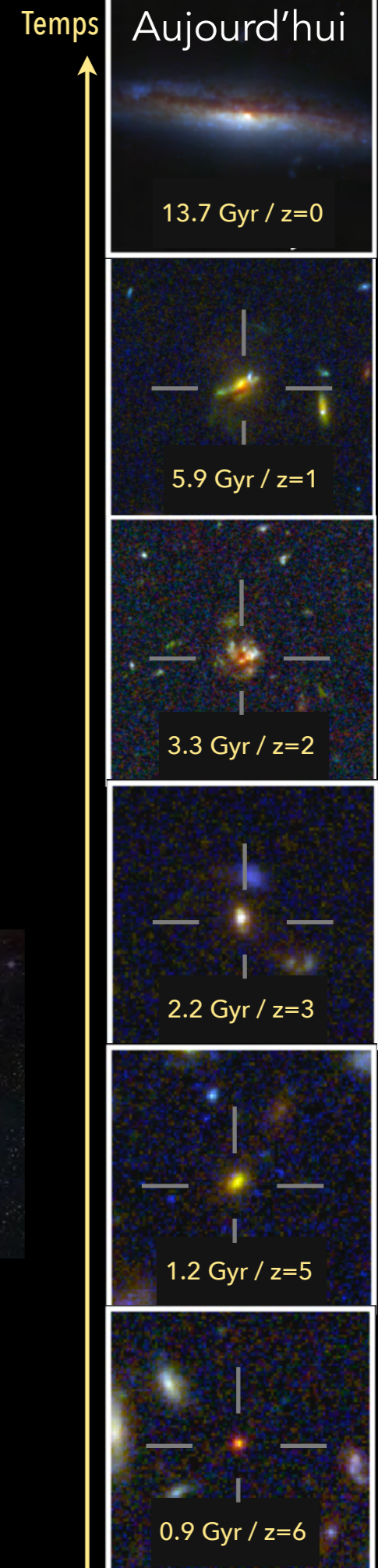
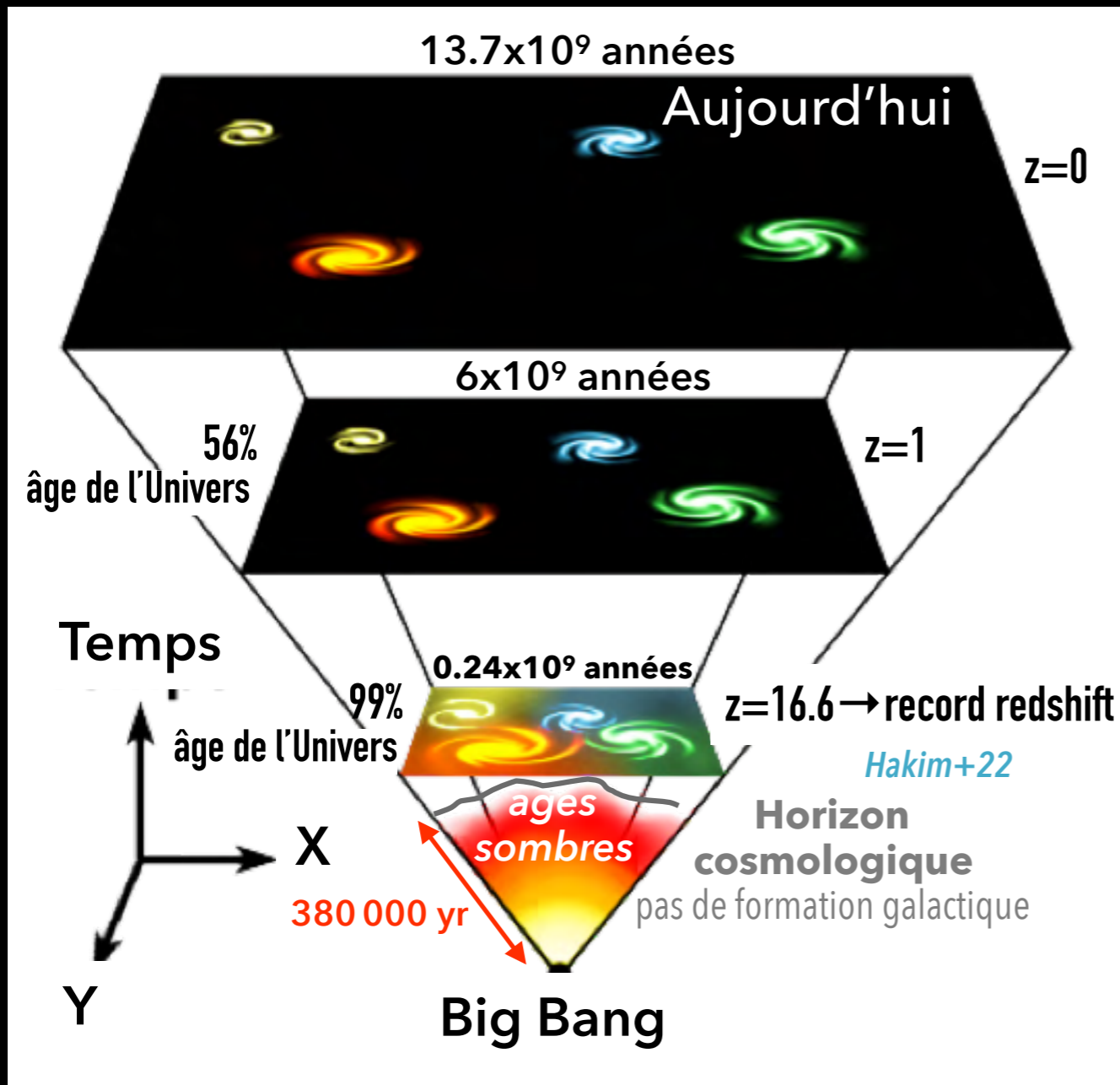
Diagramme Hubble (1926) - de Vaucouleurs (1959)



RÉSULTANT D'UNE SÉQUENCE ÉVOLUTIVE DES GALAXIES

# ÉVOLUTION DES GALAXIES

À RECONSTRUIRE À PARTIR D'OBSERVATIONS FAITES  
À DIFFÉRENTES ÉPOQUES COSMIQUES



LES GALAXIES DISTANTES (À HAUT REDSHIFT — z) ONT  
**DES PROPRIÉTÉS DIFFÉRENTES** DES GALAXIES PROCHES

# ÉVOLUTION DES GALAXIES

À RECONSTRUIRE À PARTIR D'OBSERVATIONS FAITES  
À DIFFÉRENTES ÉPOQUES COSMIQUES

LES GALAXIES À HAUT  $z$  ONT **DES PROPRIÉTÉS DIFFÉRENTES**

## 1 Morphologies perturbées

en particulier à  $z \sim 1-3$

(e.g., *Cowie+95; Elmegreen+05ab,07,13; Hammer+09; Delgado-Serrano+10; Guo+12,15*)

Temps

Aujourd'hui

13.7 Gyr /  $z=0$

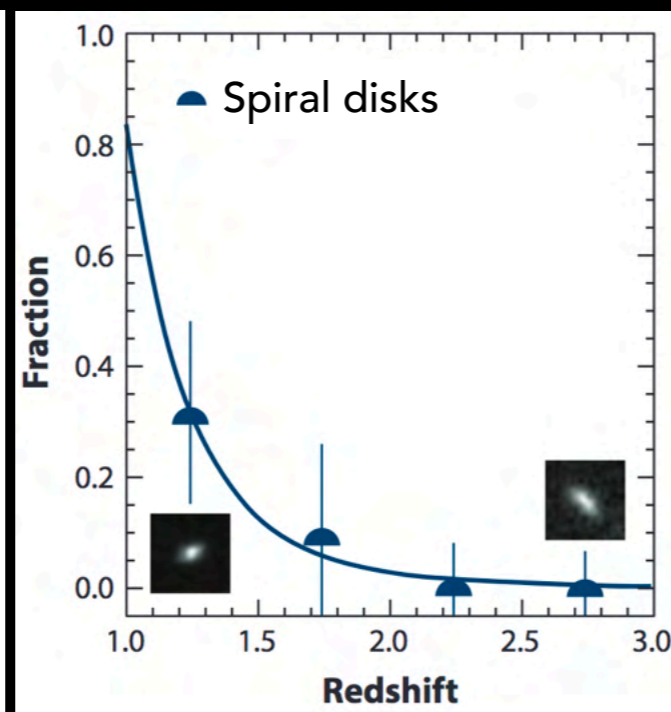
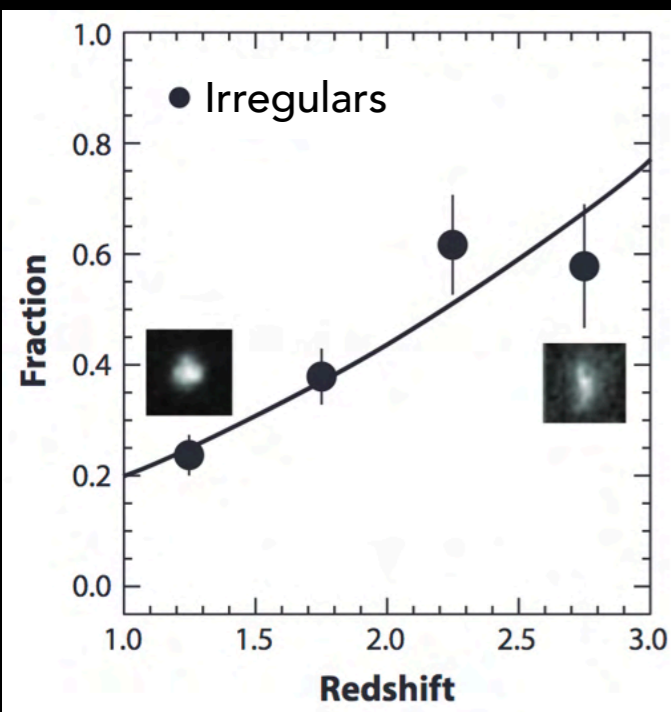
5.9 Gyr /  $z=1$

3.3 Gyr /  $z=2$

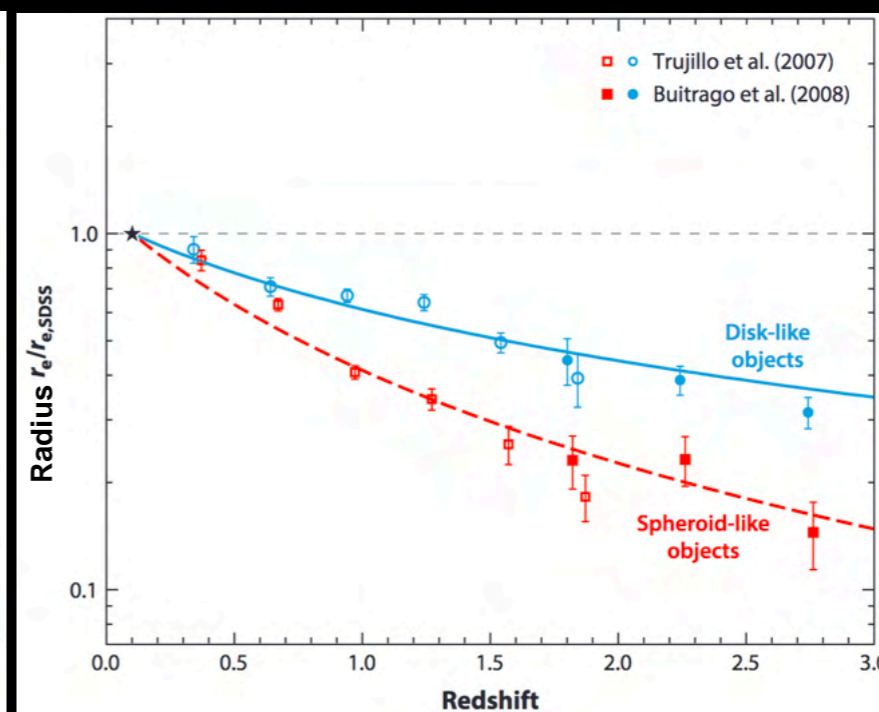
2.2 Gyr /  $z=3$

1.2 Gyr /  $z=5$

0.9 Gyr /  $z=6$



*Mortlock+13; Conselice+14*



*Trujillo+07; Buitrago+08*

# ÉVOLUTION DES GALAXIES

À RECONSTRUIRE À PARTIR D'OBSERVATIONS FAITES  
À DIFFÉRENTES ÉPOQUES COSMIQUES

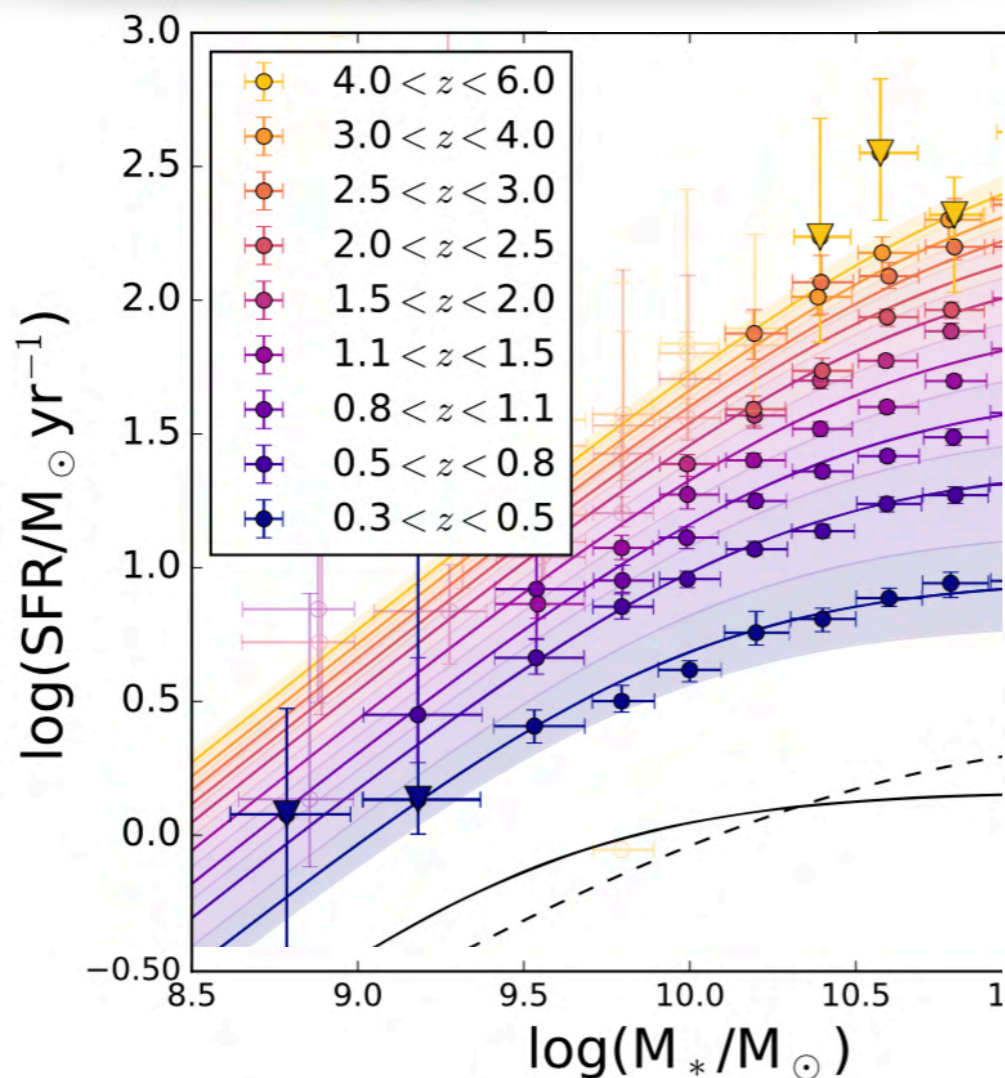
LES GALAXIES À HAUT  $z$  ONT **DES PROPRIÉTÉS DIFFÉRENTES**

## ② Taux de formation stellaire (SFR) élevé

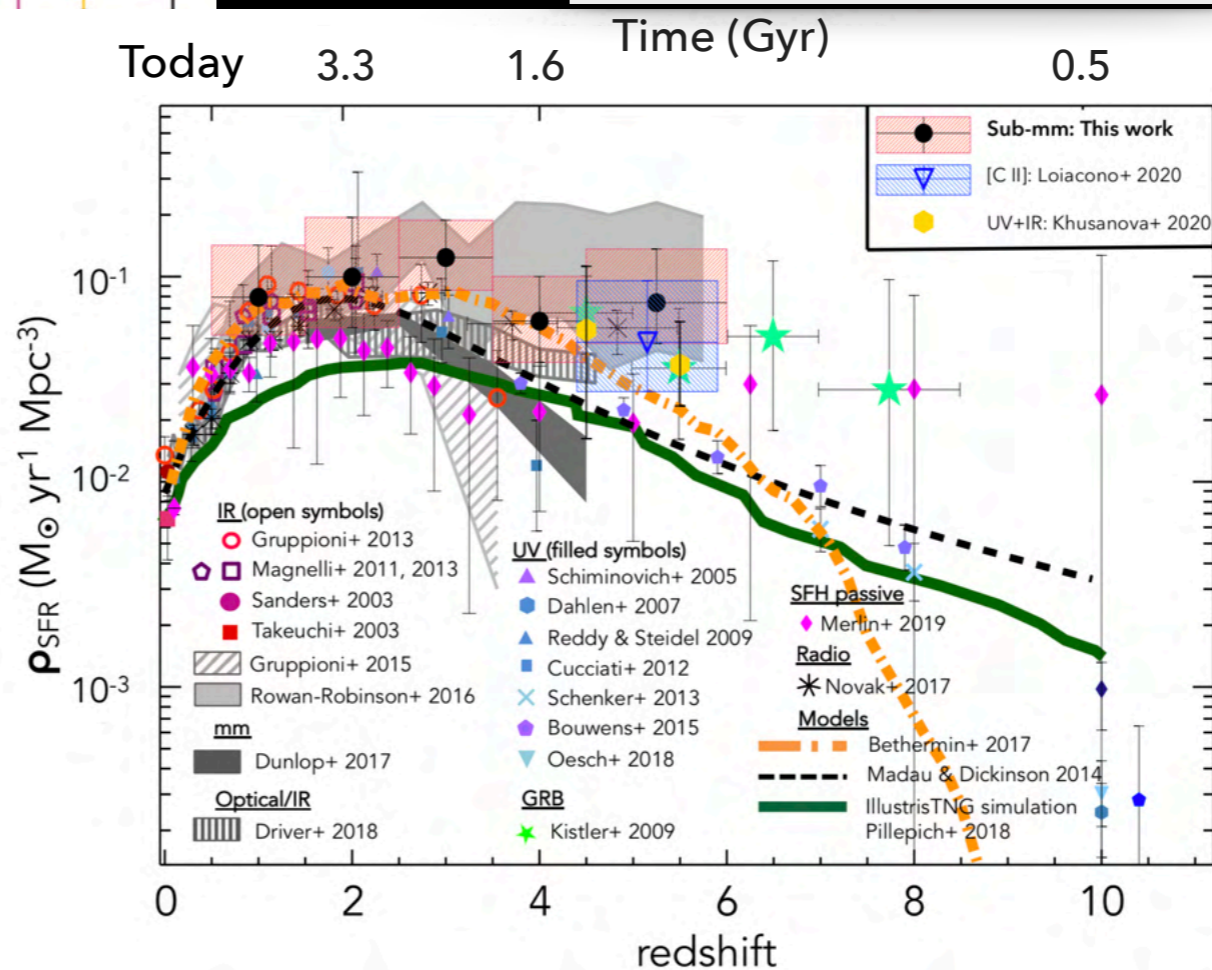
les galaxies à  $z \sim 2$  forment plus d'étoiles qu'actuellement

(e.g., Daddi+07; Rodighiero+11; Whitaker+14; Speagle+14; Schreiber+15; Tasca+15; Faisst+16,20; Leslie+20)

### Séquence principale des galaxies



### Densité cosmique de SFR



Temps

Aujourd'hui

13.7 Gyr /  $z=0$

5.9 Gyr /  $z=1$

3.3 Gyr /  $z=2$

2.2 Gyr /  $z=3$

1.2 Gyr /  $z=5$

0.9 Gyr /  $z=6$

# ÉVOLUTION DES GALAXIES

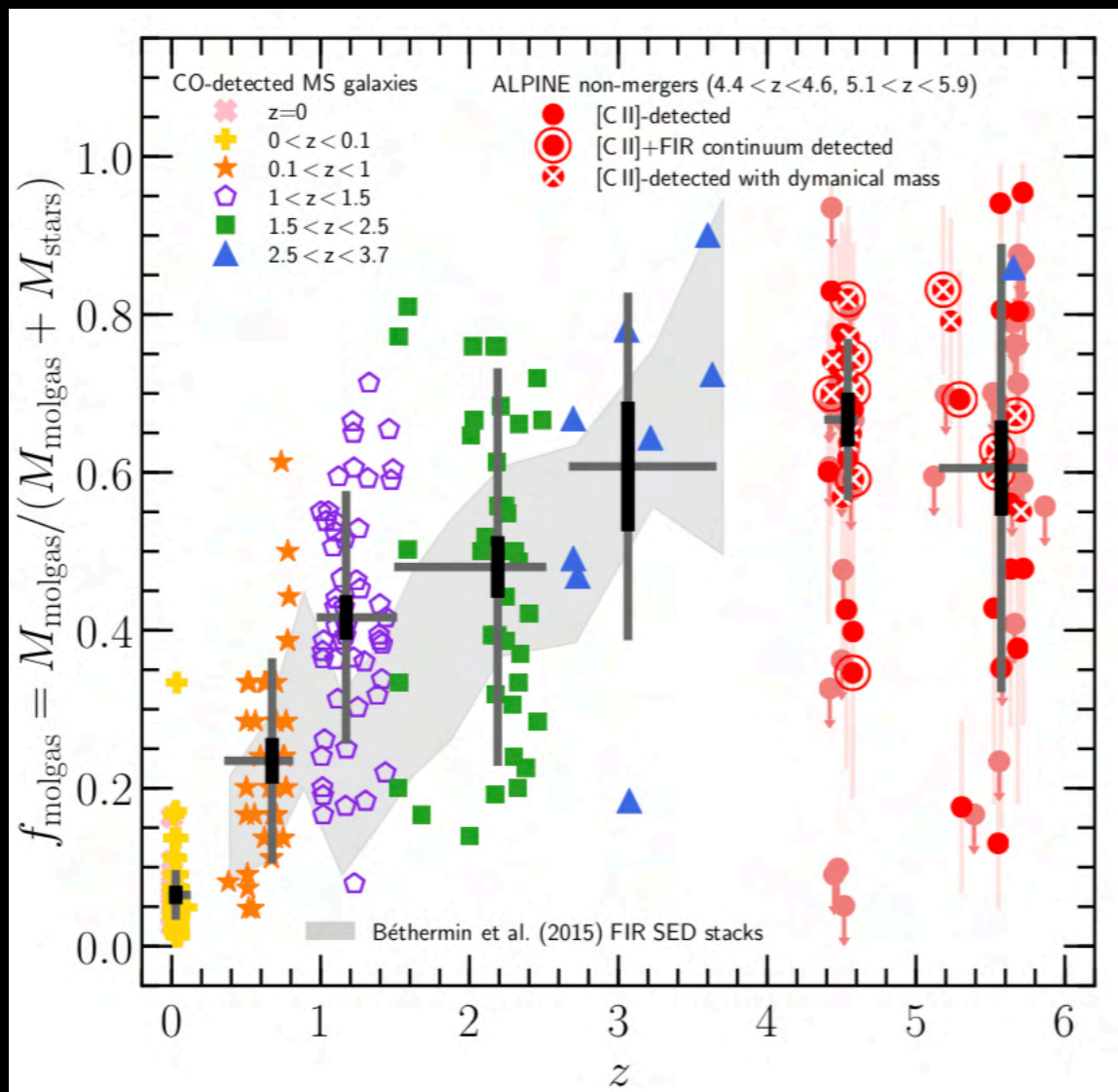
À RECONSTRUIRE À PARTIR D'OBSERVATIONS FAITES  
À DIFFÉRENTES ÉPOQUES COSMIQUES

LES GALAXIES À HAUT  $z$  ONT **DES PROPRIÉTÉS DIFFÉRENTES**

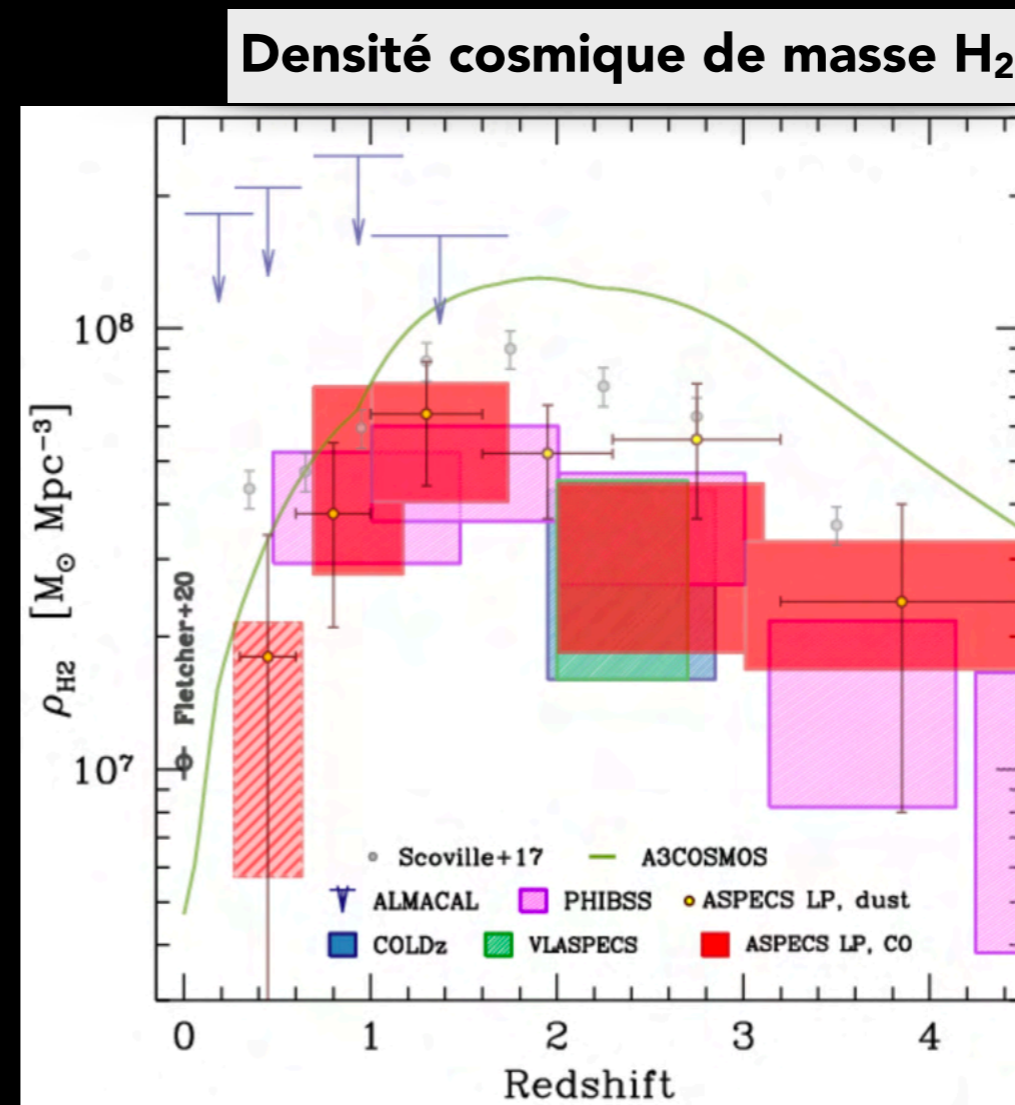
## ③ Masse moléculaire élevée

les galaxies à  $z \sim 2$  sont riches en gaz moléculaire  
suit l'évolution de la densité de SFR

(e.g., Daddi+10; Genzel+15; Tacconi+13,18,20; Saintonge+13,17; Dessauges-Zavadsky+15,20; Schinnerer+16; Liu+19)



Dessauges-Zavadsky+20



Decarli+19,20

Temps

Aujourd'hui

13.7 Gyr /  $z=0$

5.9 Gyr /  $z=1$

3.3 Gyr /  $z=2$

2.2 Gyr /  $z=3$

1.2 Gyr /  $z=5$

0.9 Gyr /  $z=6$



# ÉVOLUTION DES GALAXIES

À RECONSTRUIRE À PARTIR D'OBSERVATIONS FAITES  
À DIFFÉRENTES ÉPOQUES COSMIQUES

LES GALAXIES À HAUT  $z$  ONT **DES PROPRIÉTÉS DIFFÉRENTES**

3) Masse moléculaire élevée

→ Le gaz moléculaire froid est le carburant pour la formation stellaire.

2) Taux de formation stellaire (SFR) élevé

→ La SFR trace le processus de formation stellaire qui mène à l'édification de la masse stellaire et des métaux+poussières des galaxies. Elle induit également des jets (*outflows*) de gaz enrichi en éléments lourds.

1) Morphologies perturbées

→ Indiquent l'organisation phénoménologique de la matière baryonique à l'échelle galactique.

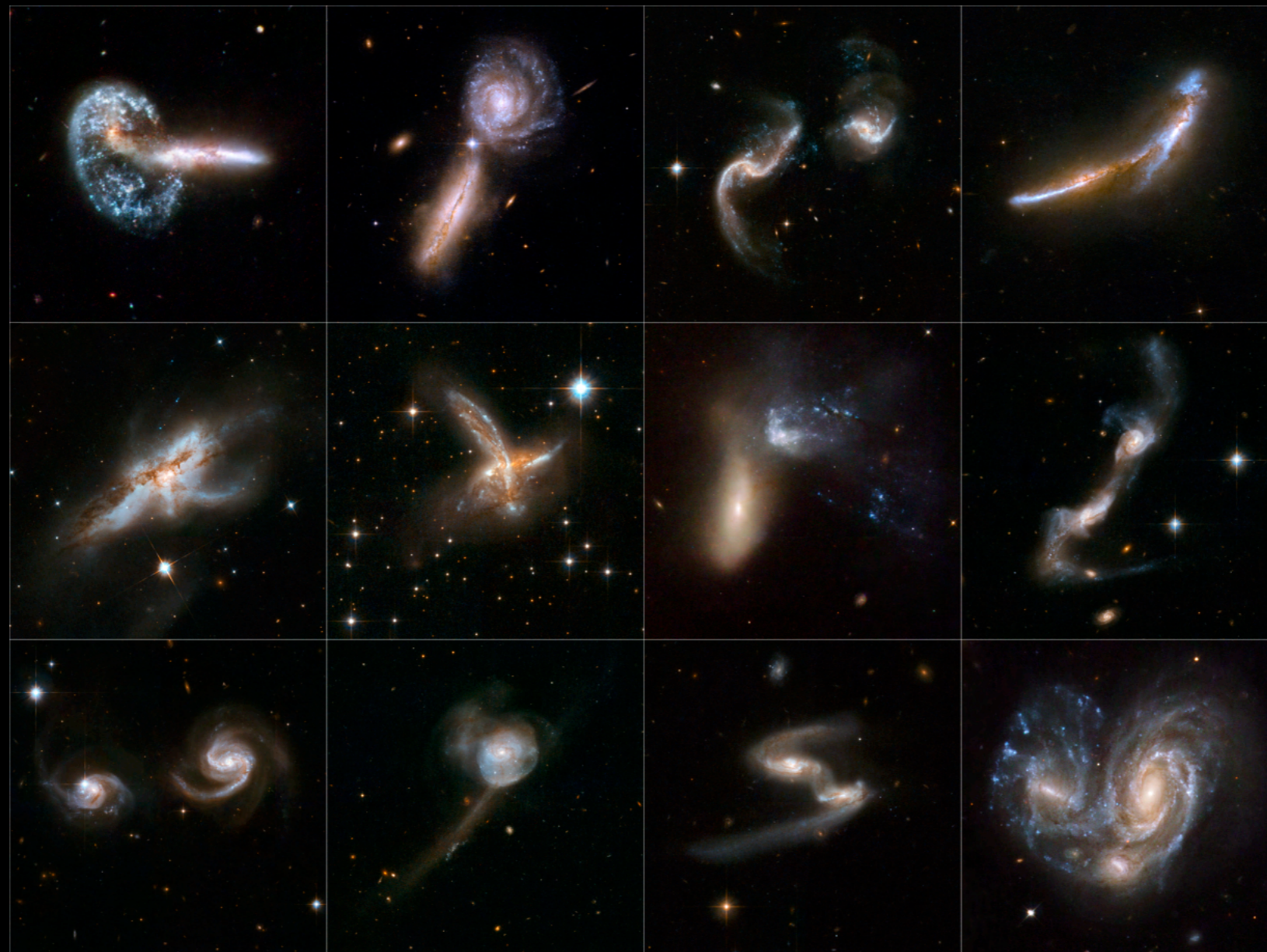
CE SONT **LES PILIERS FONDAMENTAUX** POUR COMPRENDRE L'ÉVOLUTION GALACTIQUE

# ÉVOLUTION DES GALAXIES

À RECONSTRUIRE À PARTIR D'OBSERVATIONS FAITES  
À DIFFÉRENTES ÉPOQUES COSMIQUES

Comment les galaxies se sont-elles assemblées pour acquérir leur grand réservoir de gaz et pour avoir de telles SFR élevées?

- ◆ **une augmentation du taux de galaxies en collision à haut redshift** pourrait induire des sursauts de formation stellaire dans les galaxies jusque-là passives (e.g., *Bluck+09; Hammer+09; Man+12*)

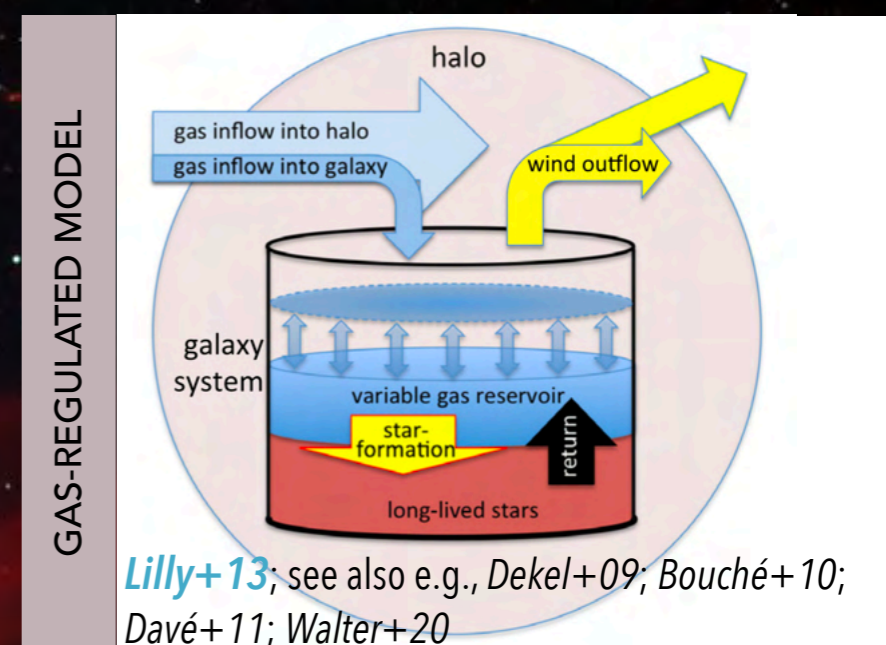


# ÉVOLUTION DES GALAXIES

À RECONSTRUIRE À PARTIR D'OBSERVATIONS FAITES  
À DIFFÉRENTES ÉPOQUES COSMIQUES

Comment les galaxies se sont-elles assemblées pour acquérir leur grand réservoir de gaz et pour avoir de telles SFR élevées?

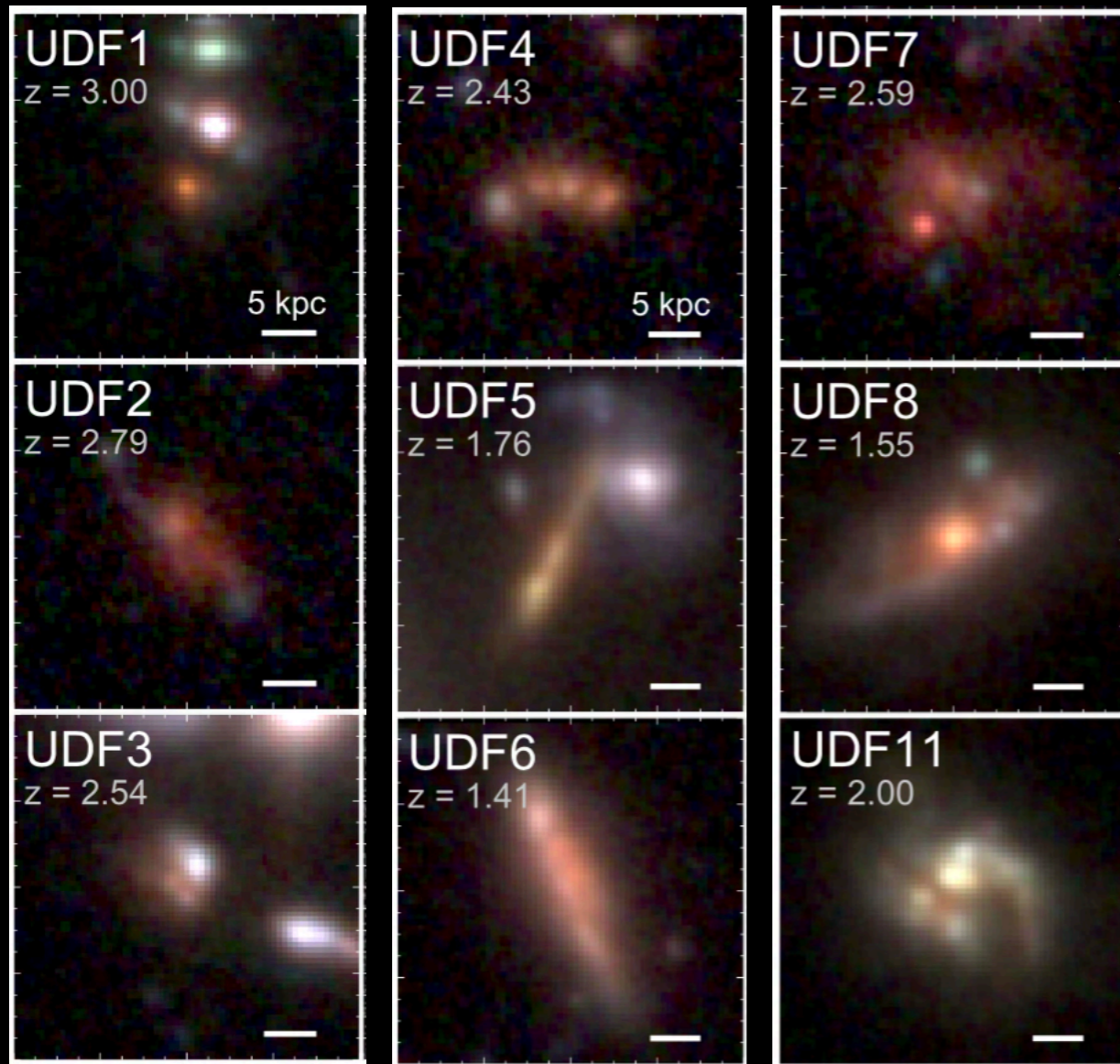
- ♦ **une augmentation du taux de galaxies en collision à haut redshift** pourrait induire des sursauts de formation stellaire dans les galaxies jusque-là passives (e.g., *Bluck+09; Hammer+09; Man+12*)
- ♦ **une accrétion élevée de gaz froid à partir du réseau cosmique** pourrait produire des hautes densités de gaz et induire plus de SFR (e.g., *Kereš+05; Dekel+09; Conselice+13*)



Les galaxies sont **en quasi-équilibre**: la formation stellaire étant **régulée** par le réservoir de gaz disponible, constamment réapprovisionné par l'accrétion cosmique, modulo d'éventuels *outflows* qui éjectent le gaz dans le milieu intergalactique.

# MORPHOLOGIE DES GALAXIES À HAUT REDSHIFT

Les *clumps* brillants dans l'UV sont omniprésents dans les galaxies à  $1 < z < 3$



HST data / Rujopakarn+16

Pour  $\sim 60\%$  des galaxies à  $z \sim 2$ , les images HST révèlent **des clumps brillants dans l'UV** qui sont imprimés sur la morphologie sous-jacente.

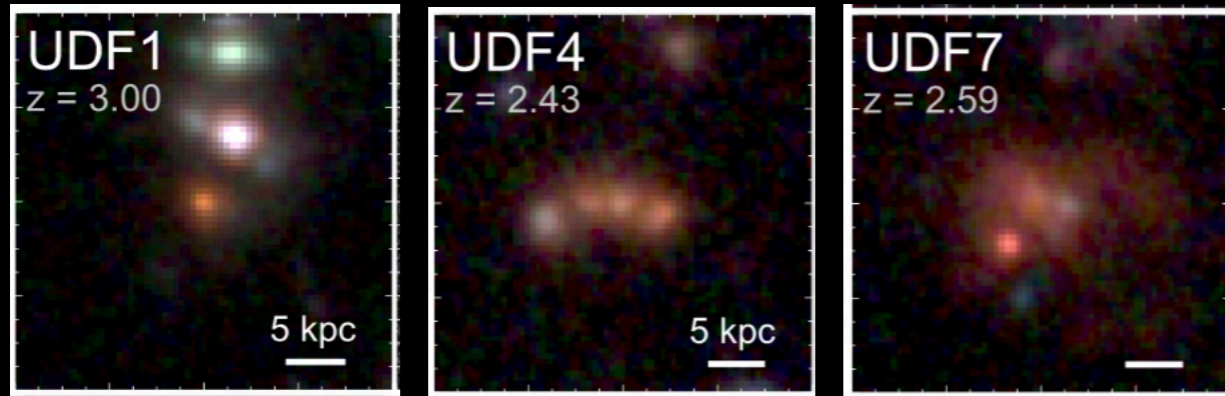
Ces *clumps* sont des régions de formation stellaire très brillantes.

(e.g., Cowie+95; Conselice+04; Elmegreen+05,07,09,13;  
Forster Schreiber+11; Soto+17; Guo+12,15,18; Zanella+19;  
Huertas-Company+20)



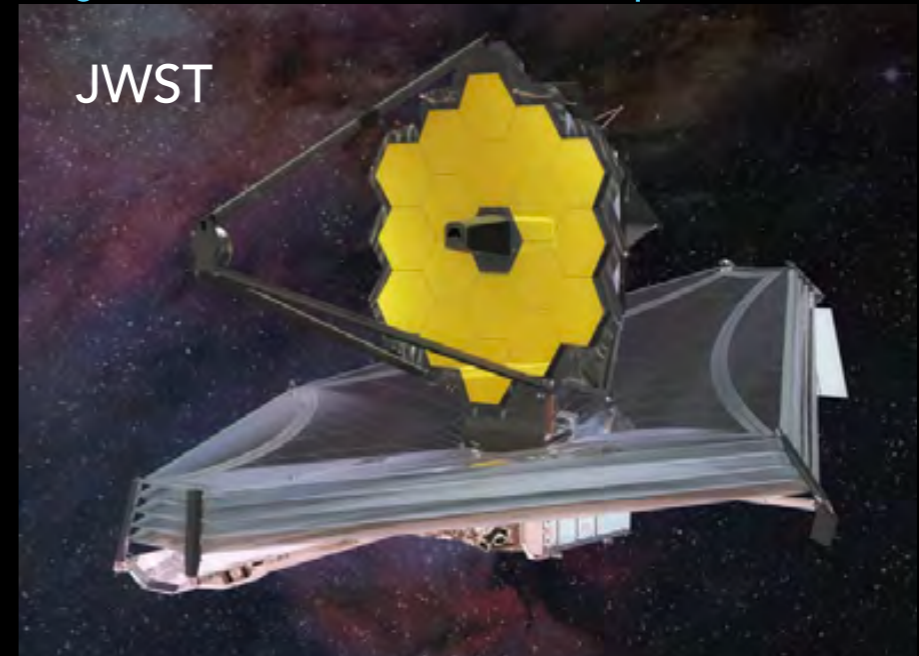
# MORPHOLOGIE DES GALAXIES À HAUT REDSHIFT

Les *clumps* brillants dans l'UV sont omniprésents dans les galaxies à  $1 < z < 3$  et également à des redshifts supérieurs

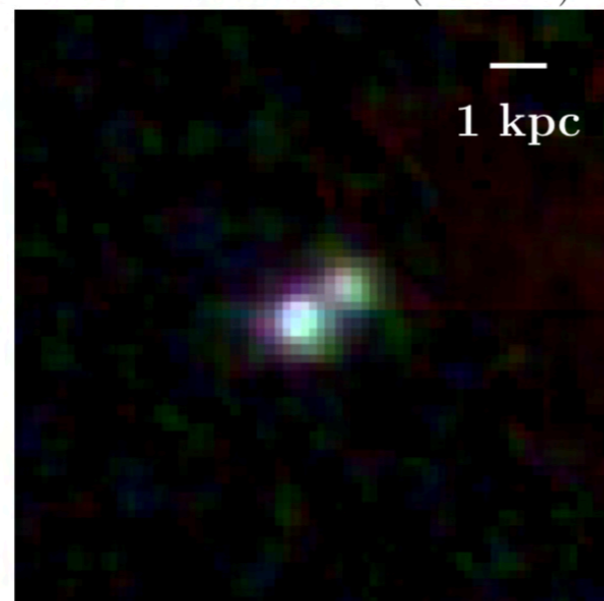
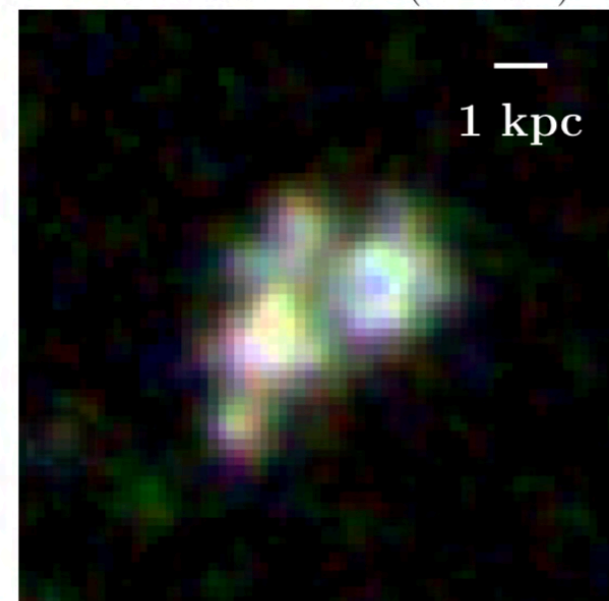


EGSI-9136950177 ( $z=5.53$ )

EGSZ-9314453285 ( $z=6.27$ )

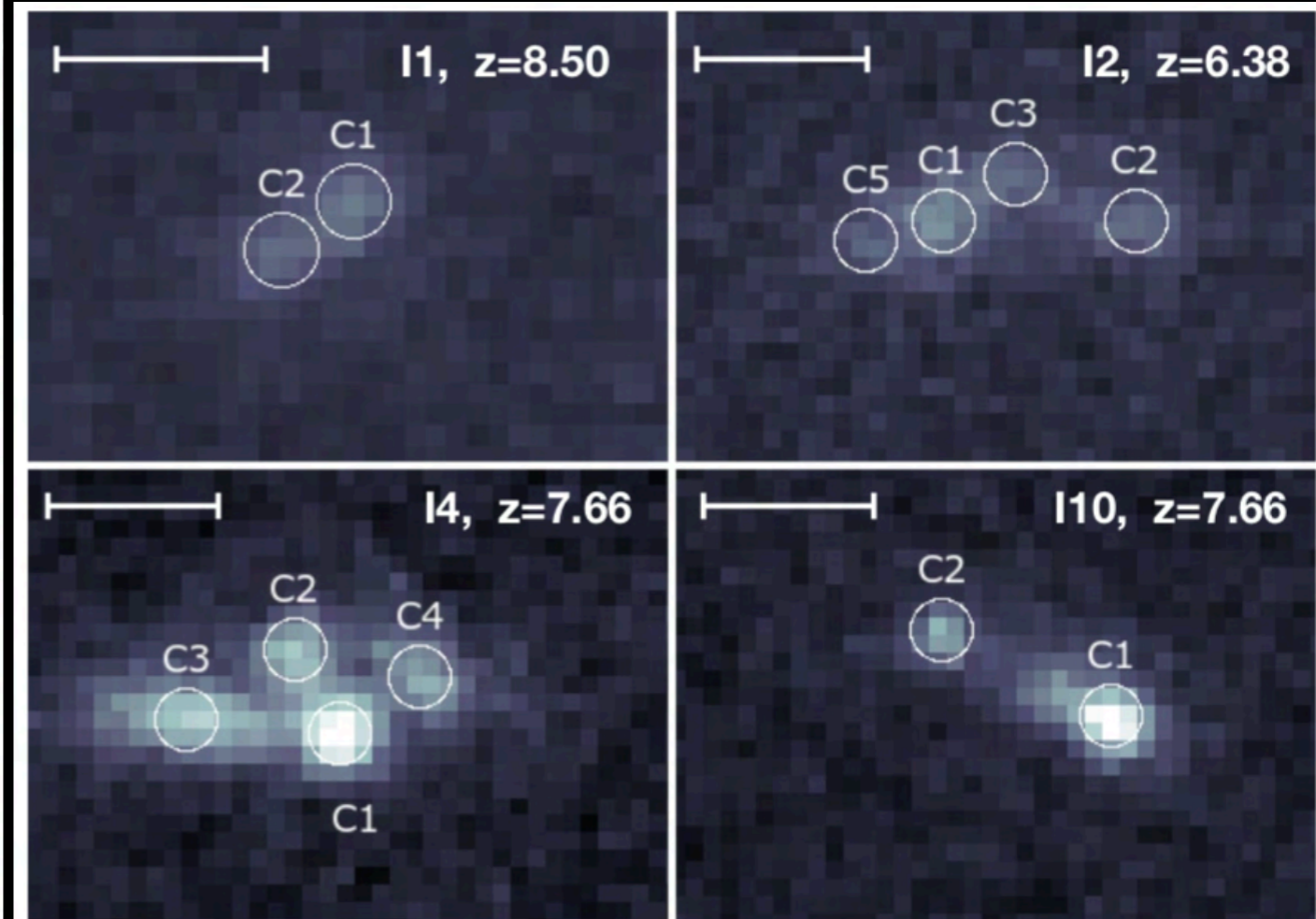
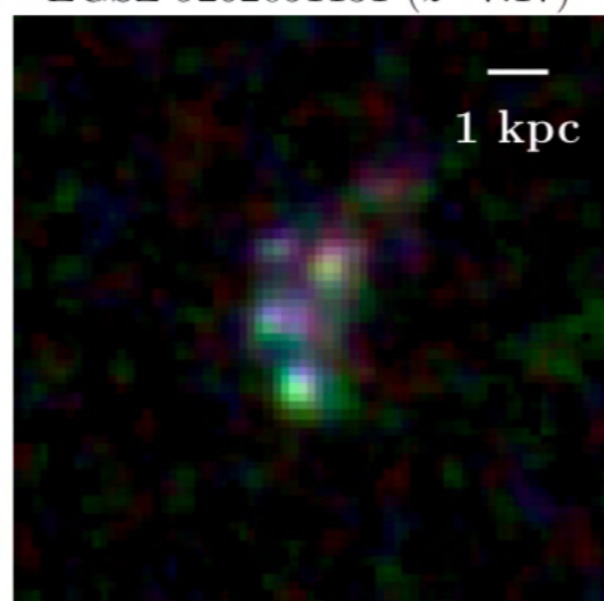
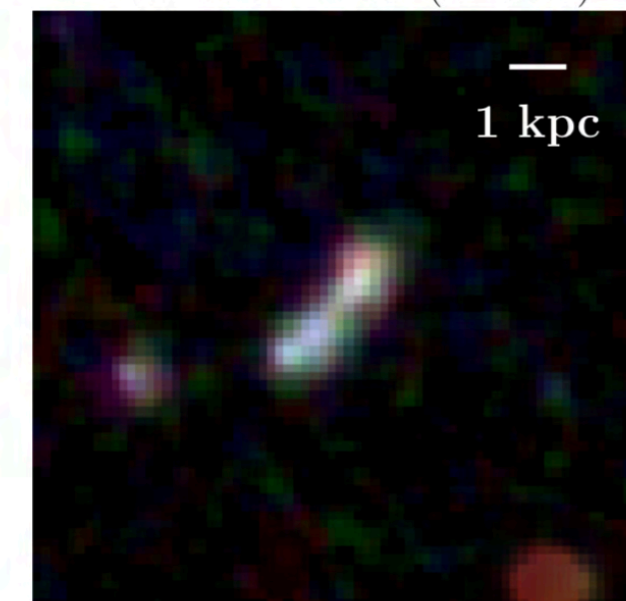


JWST data / Claeysens/w Dessauges-Zavadsky +22



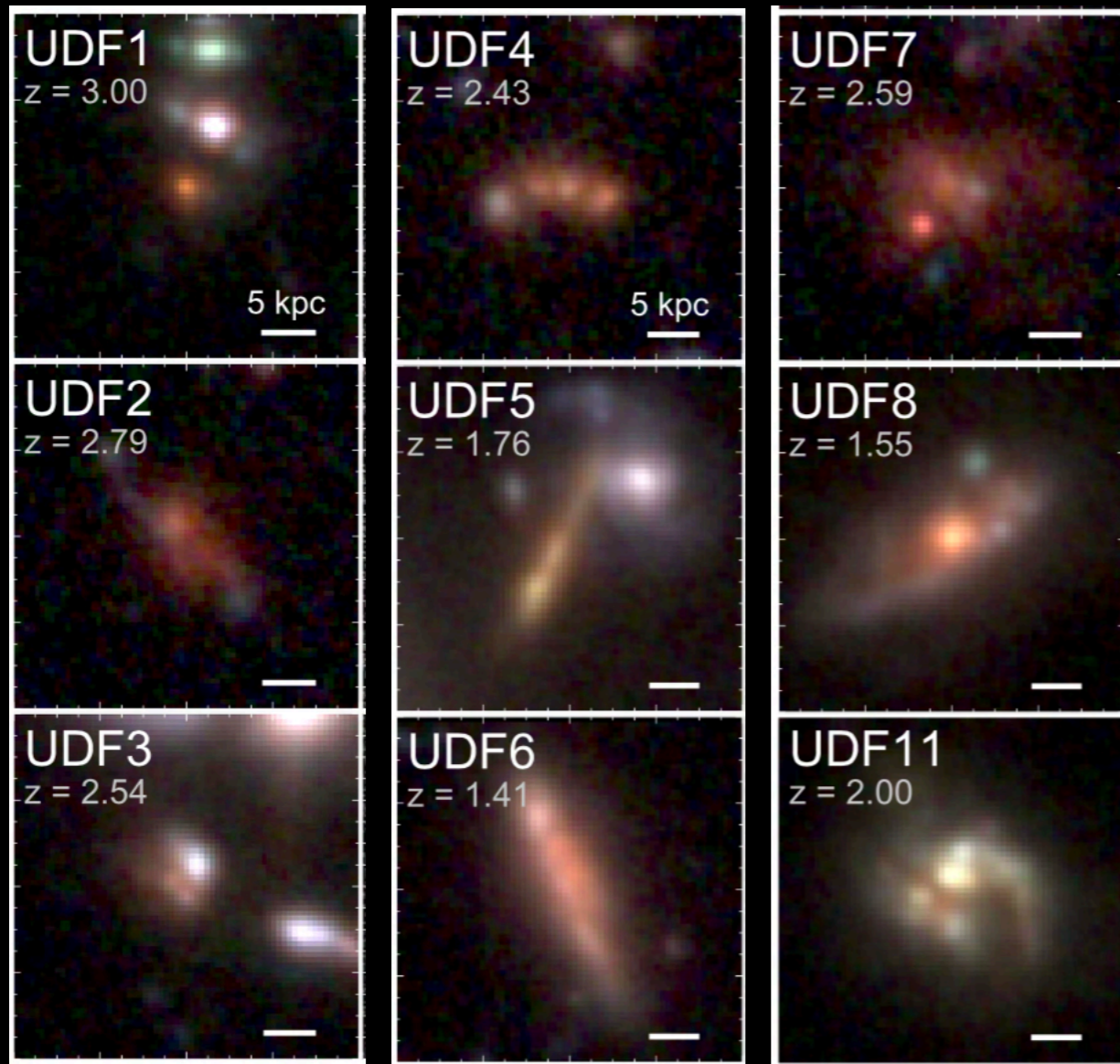
EGSZ-9338153359 ( $z=6.31$ )

EGSZ-9262051131 ( $z=7.17$ )



# MORPHOLOGIE DES GALAXIES À HAUT REDSHIFT

Les *clumps* brillants dans l'UV sont omniprésents dans les galaxies à  $1 < z < 3$



Rujopakarn+16

## POURQUOI L'ÉTUDE DES CLUMPS EST-ELLE IMPORTANTE?

◆ **Pour déterminer comment les galaxies ont assemblé leur masse (via des collisions entre galaxies ou un processus séculaire)**

Les *clumps* sont-ils des galaxies satellites accrétées suite à un événement de collision entre galaxies? Ou sont-ils formés 'in situ' dans les galaxies hôtes?

◆ **Pour comprendre le changement morphologique des galaxies**

Les *clumps* participent-ils à la formation du bulbe?

◆ **Pour contraindre le processus de formation stellaire dans les galaxies distantes**

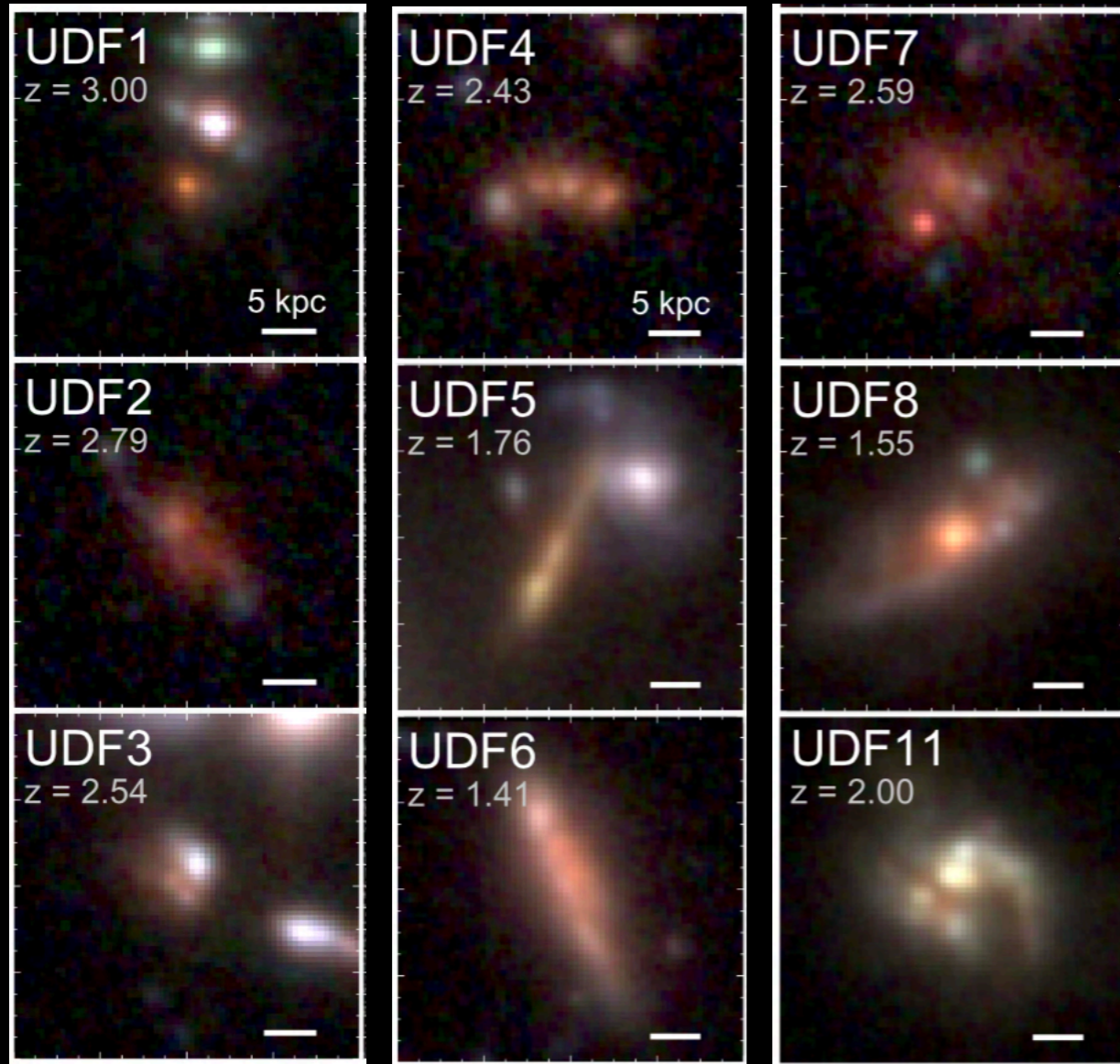
Le processus de formation stellaire est-il invariant au cours du temps cosmique à l'échelle des nuages moléculaires?

◆ **Pour évaluer le rôle et la force de la rétroaction (*feedback*) stellaire**

Les *clumps* contribuent-ils au *feedback* stellaire? Et éventuellement à la reionization de l'Univers?

# MORPHOLOGIE DES GALAXIES À HAUT REDSHIFT

Les *clumps* brillants dans l'UV sont omniprésents dans les galaxies à  $1 < z < 3$



*Rujopakarn+16*

Plusieurs observations supportent actuellement que

**LA PLUPART DES CLUMPS SONT FORMÉS 'IN SITU' DANS LES GALAXIES HÔTES**

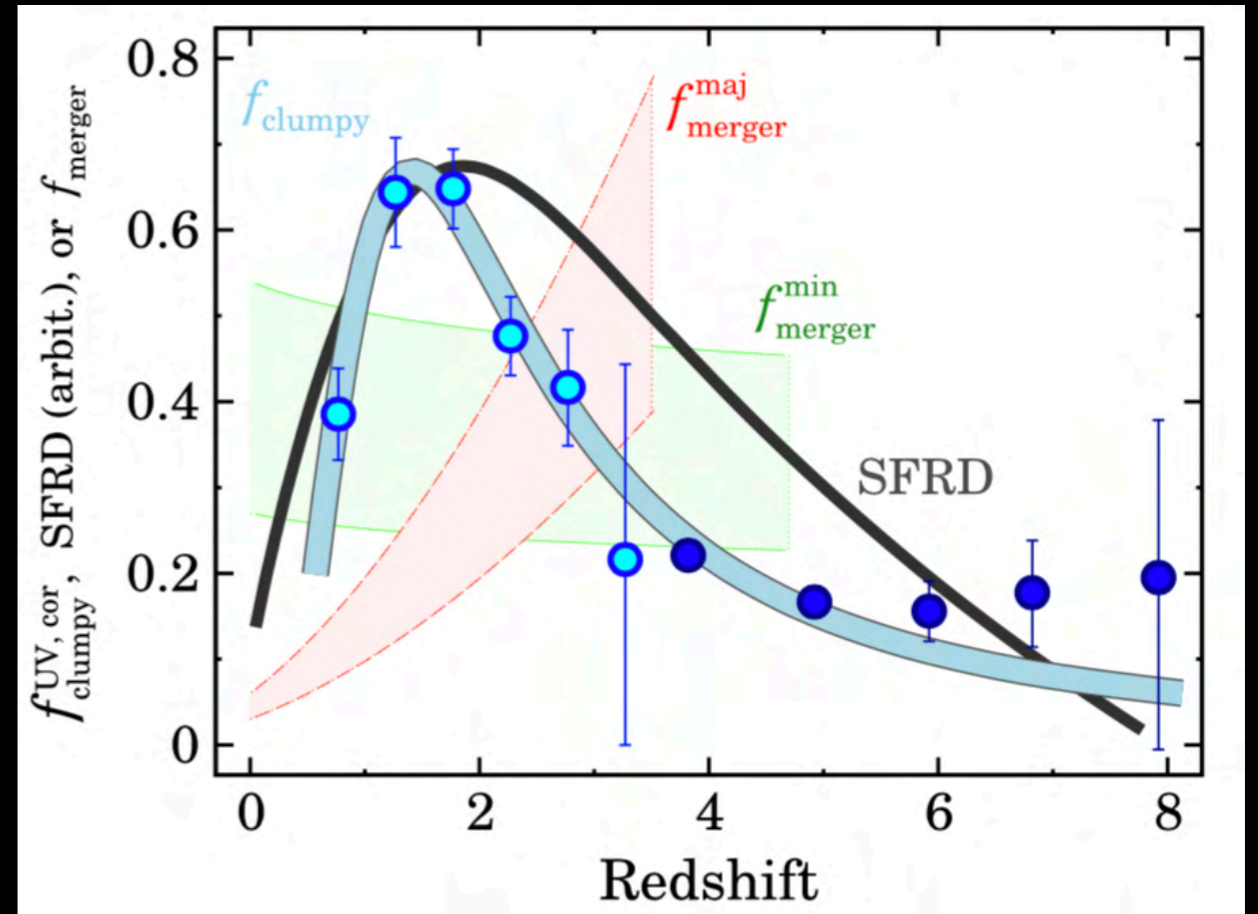
(e.g., *Shibuya+16; Elmegreen&Elmegreen06; Elmegreen+17; Dessauges-Zavadsky & Adamo18; Dessauges-Zavadsky+19,22*)

# PRÉFÉRENCE POUR UNE ORIGINE 'IN SITU' DES CLUMPS

1. L'évolution temporelle de la fraction des galaxies contenant des *clumps* **est en désaccord** avec celle des collisions mineurs et majeures entre galaxies.

*Shibuya+16; Lotz+11*

17 000 galaxies de l'héritage HST



*Shibuya+16; Lotz+11*



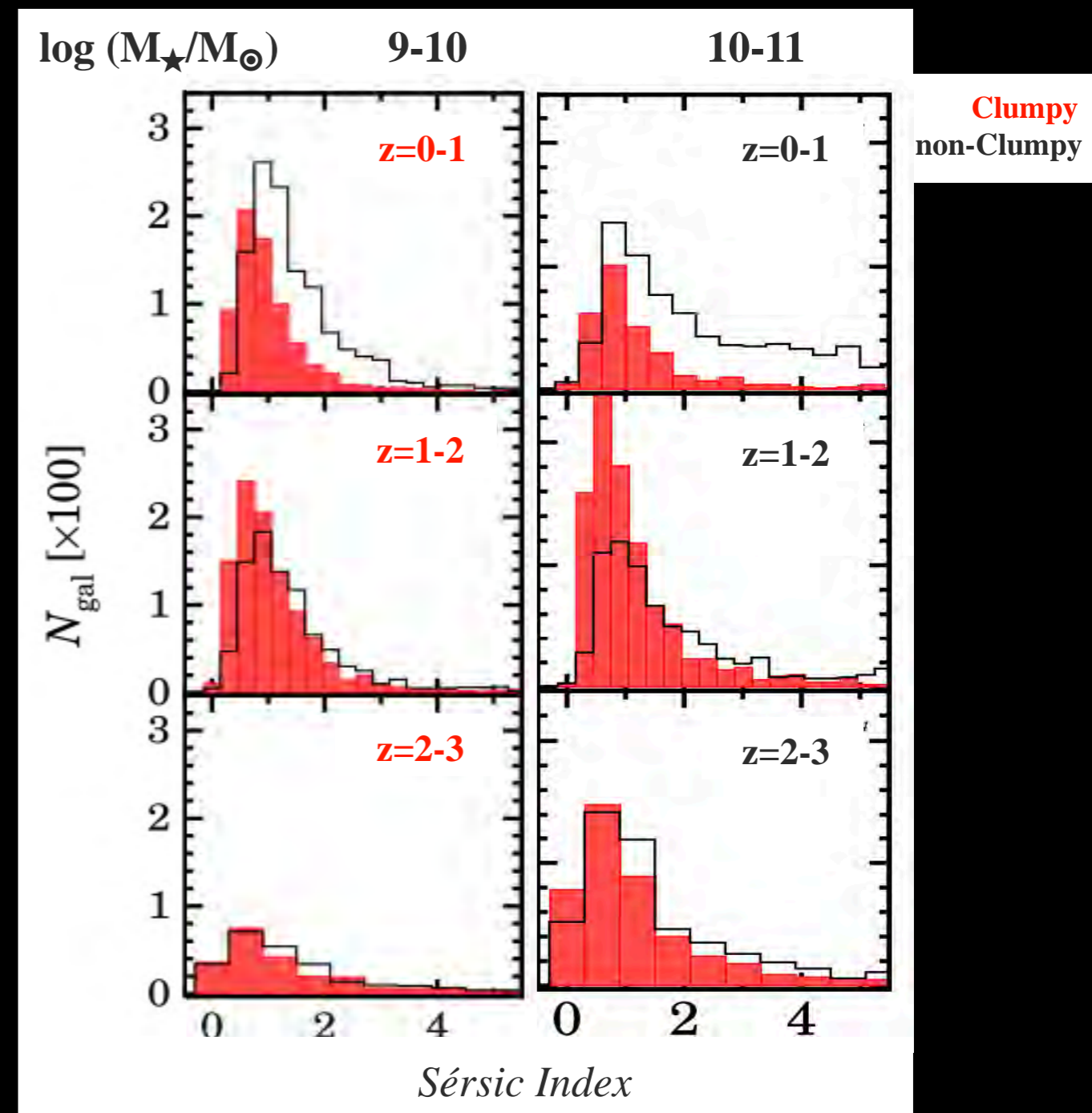
# PRÉFÉRENCE POUR UNE ORIGINE 'IN SITU' DES CLUMPS

1. L'évolution temporelle de la fraction des galaxies contenant des *clumps* est en désaccord avec celle des collisions mineurs et majeures entre galaxies.

*Shibuya+16; Lotz+11*

2. Les galaxies contenant des *clumps* sont caractérisées essentiellement par la présence d'un disque avec des indices Sérsic de  $\sim 1$ .

*Shibuya+16*



*Shibuya+16*

# PRÉFÉRENCE POUR UNE ORIGINE 'IN SITU' DES CLUMPS

1. L'évolution temporelle de la fraction des galaxies contenant des *clumps* **est en désaccord** avec celle des collisions mineurs et majeures entre galaxies.

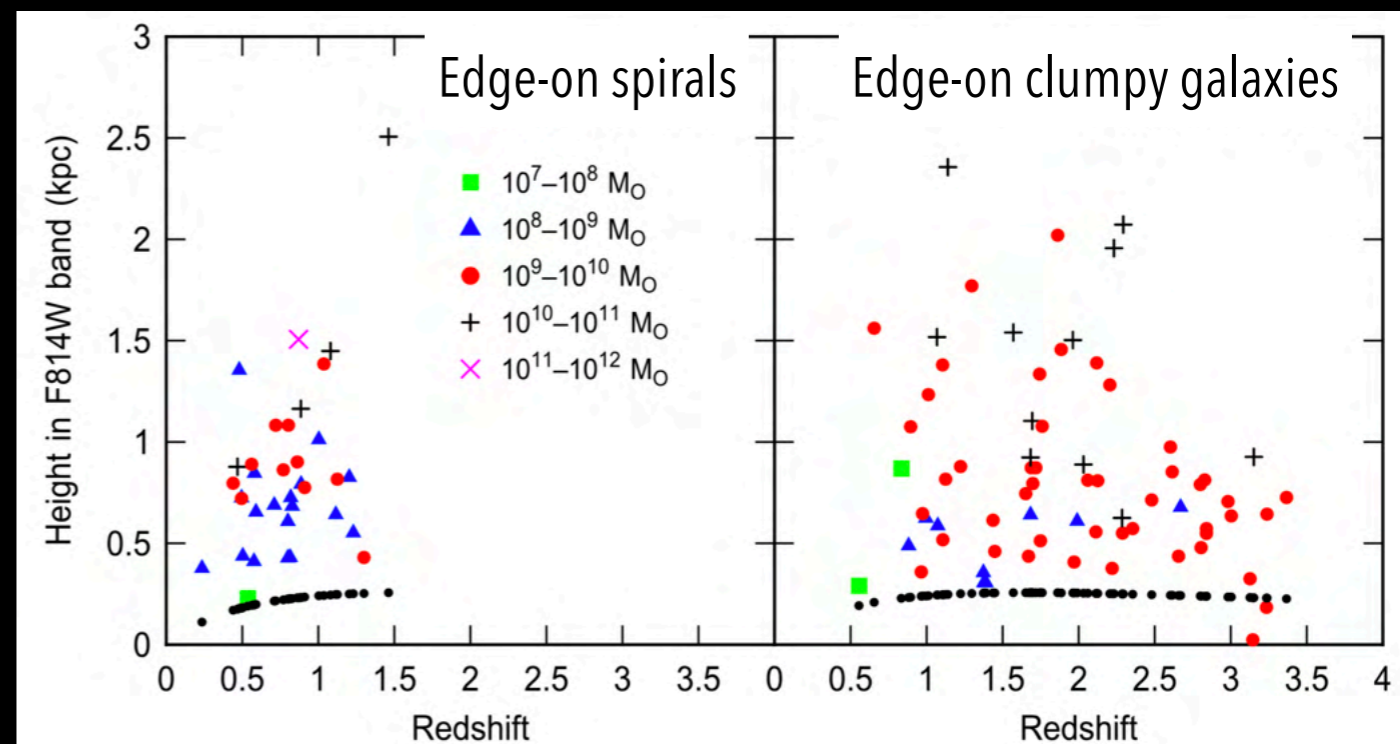
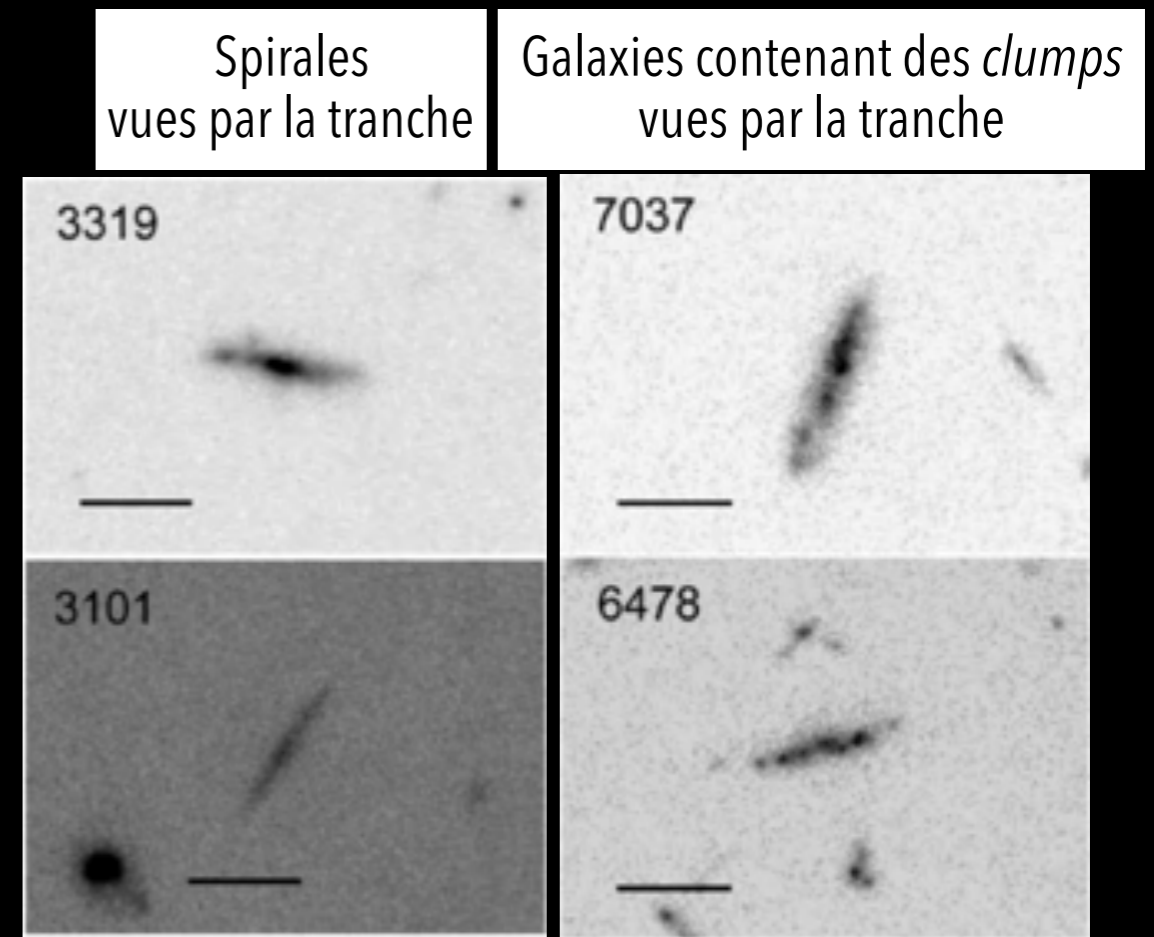
*Shibuya+16; Lotz+11*

2. Les galaxies contenant des *clumps* sont caractérisées **essentiellement par la présence d'un disque** avec des indices Sérsic de  $\sim 1$ .

*Shibuya+16*

3. Les galaxies contenant des *clumps* vue par la tranche (*chain-galaxies*) ont **des disques d'épaisseur comparables** aux spirales sans *clumps* vues également par la tranche.

*Elmegreen&Elmegreen06; Elmegreen+17*



*Elmegreen+17*

# PRÉFÉRENCE POUR UNE ORIGINE 'IN SITU' DES CLUMPS

1. L'évolution temporelle de la fraction des galaxies contenant des *clumps* **est en désaccord** avec celle des collisions mineurs et majeures entre galaxies.

*Shibuya+16; Lotz+11*

2. Les galaxies contenant des *clumps* sont caractérisées **essentiellement par la présence d'un disque** avec des indices Sérsic de  $\sim 1$ .

*Shibuya+16*

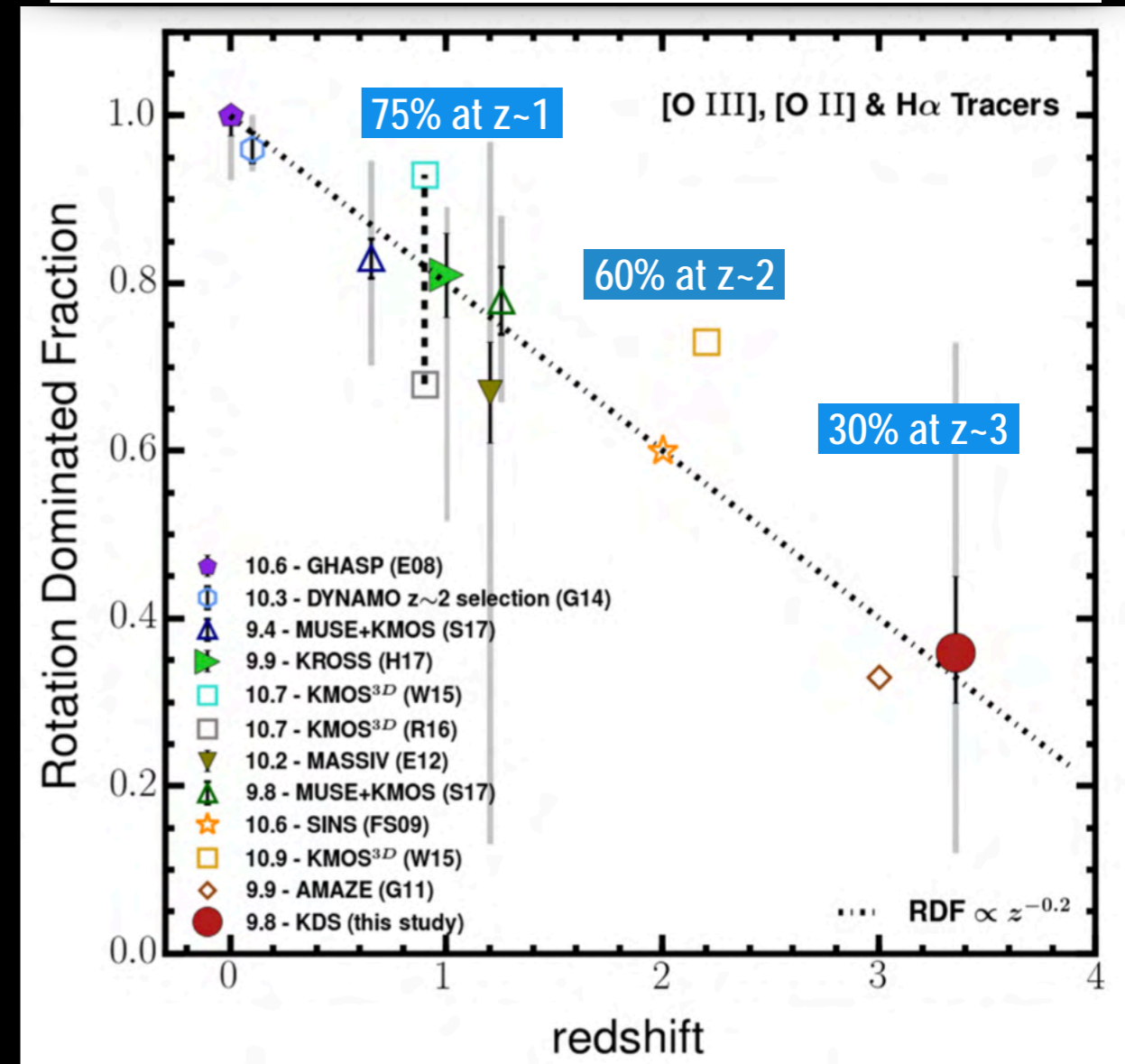
3. Les galaxies contenant des *clumps* vue par la tranche (*chain-galaxies*) ont **des disques d'épaisseur comparables** aux spirales sans *clumps* vues également par la tranche.

*Elmegreen&Elmegreen06; Elmegreen+17*

4. La cinématique de la majorité des galaxies à  $z=1-3$  (galaxies contenant des *clumps* incluses) est dominée par **la rotation** bien qu'ayant des grandes dispersions des vitesses.

*Förster Schreiber+09; Wisnioski+15; Rodrigues+16; Swinbank+17; Turner+17; Simons+16,17; Girard/w Dessauges-Zavadsky+18ab*

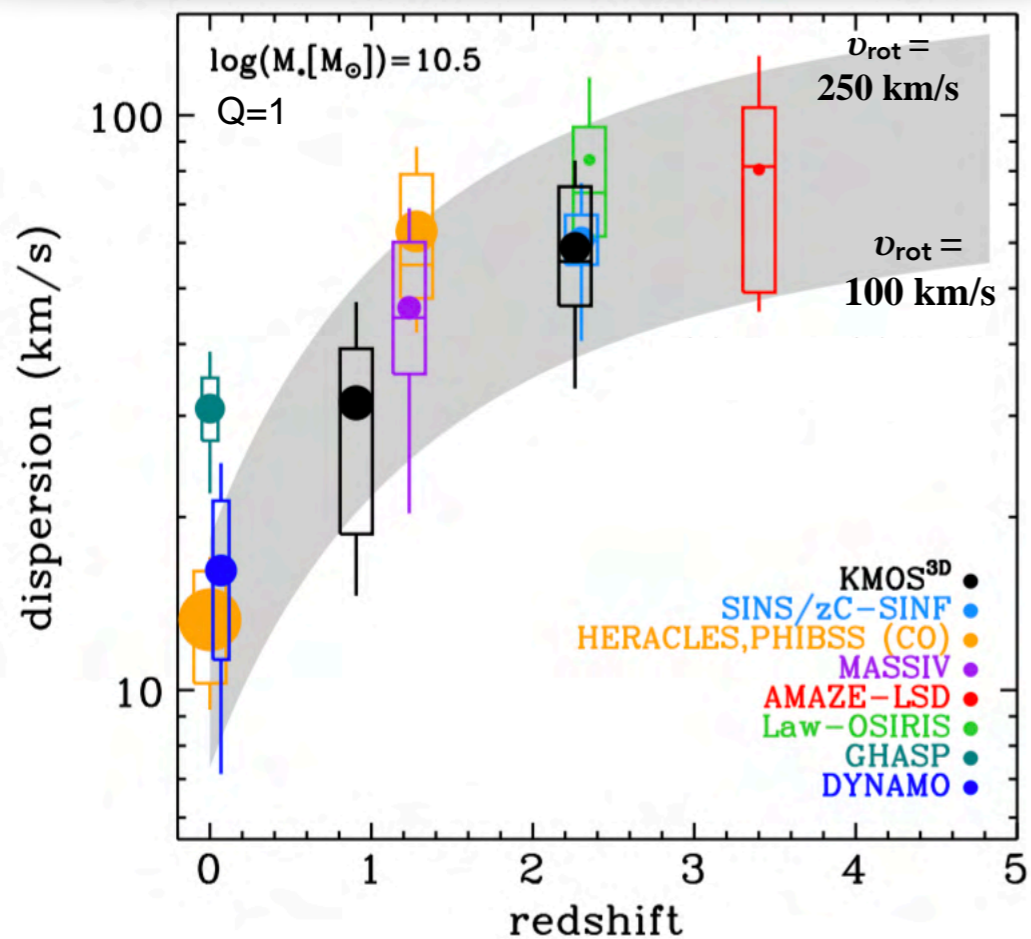
## Fraction de galaxies dominées par la rotation



*Turner+17*

# ROTATEURS À HAUT REDSHIFT

## Hautement turbulents avec des grandes dispersions des vitesses



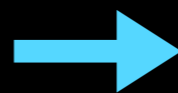
Wisnioski+15; Girard, Dessauges-Zavadsky+18a

## Origine de la turbulence?

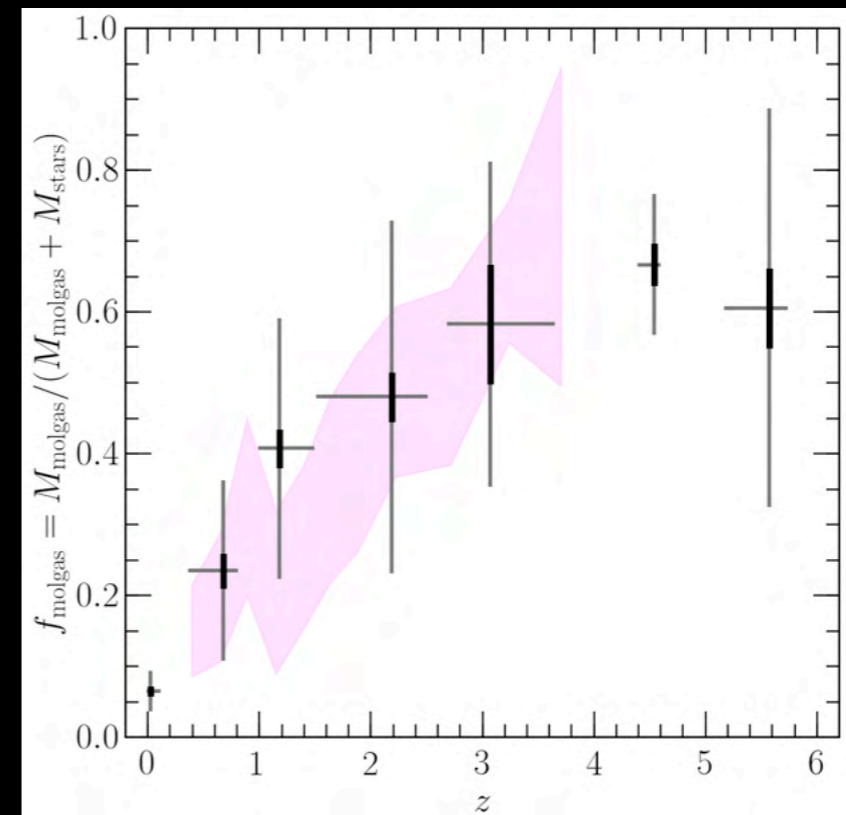
### ◆ feedback stellaire

◆ **perturbations gravitationnelles** produites par p.e. des fractions de gaz moléculaire élevées / instabilité dans les disques galactiques produite par l'accrétion cosmique / collisions mineurs entre galaxies

(e.g., Dekel+09; Ceverino+10; Bournaud+09,14; Wisnioski+15; Krumholz & Burkhardt 16)



Dessauges-Zavadsky+20



## Turbulence gravitationnelle produite par l'accrétion de gaz



Selon le critère de stabilité de Toomre:

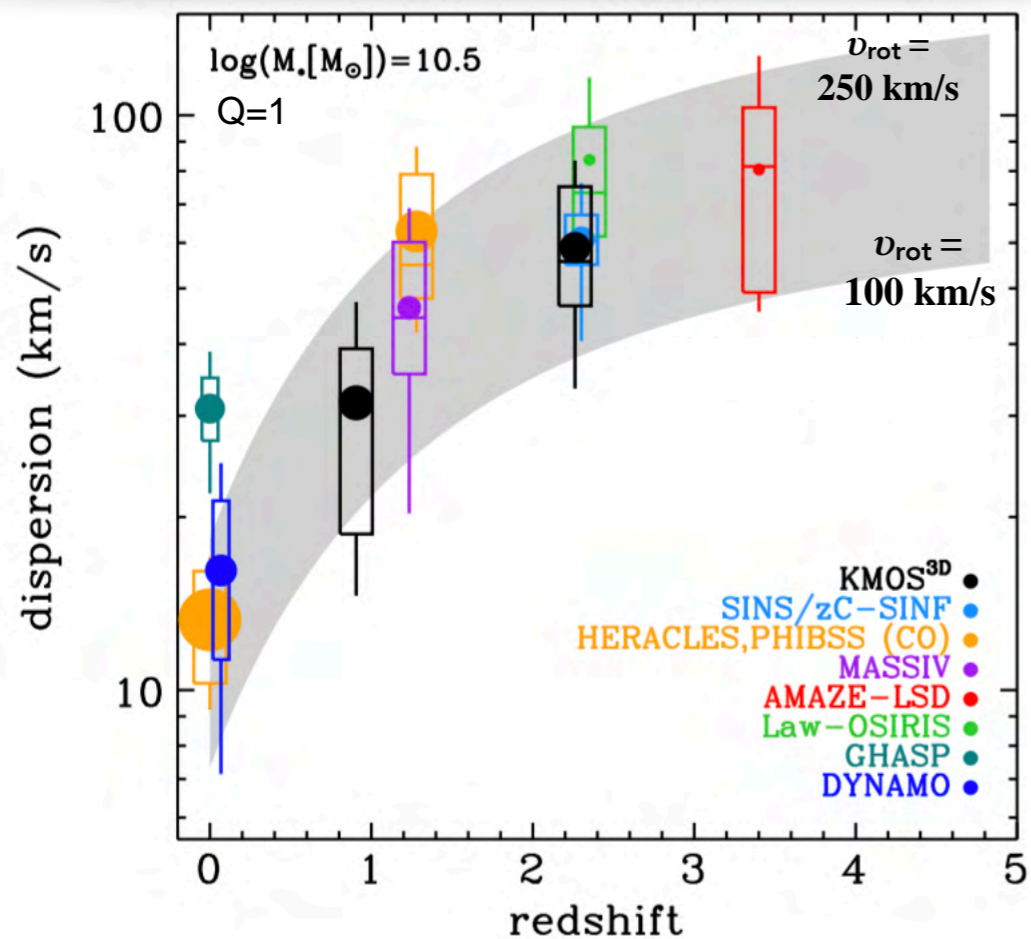
$$\sigma_0(z, M_\star) = \frac{v_{\text{rot}} f_{\text{gas}}(z, M_\star) Q_{\text{crit}}}{a}$$

où  $a = \sqrt{2}$ ,  $v_{\text{rot}}$  est la vitesse de rotation,  $f_{\text{gas}}(z, M_\star)$  est la fraction de gaz moléculaire, et  $Q_{\text{crit}} = 1$  le paramètre critique de Toomre pour un disque de gaz fin quasi-stable (Genzel+11)



# ROTATEURS À HAUT REDSHIFT

## Hautement turbulents avec des grandes dispersions des vitesses



Wisnioski+15; Girard, Dessauges-Zavadsky+18a

## Origine de la turbulence?

### ◆ feedback stellaire

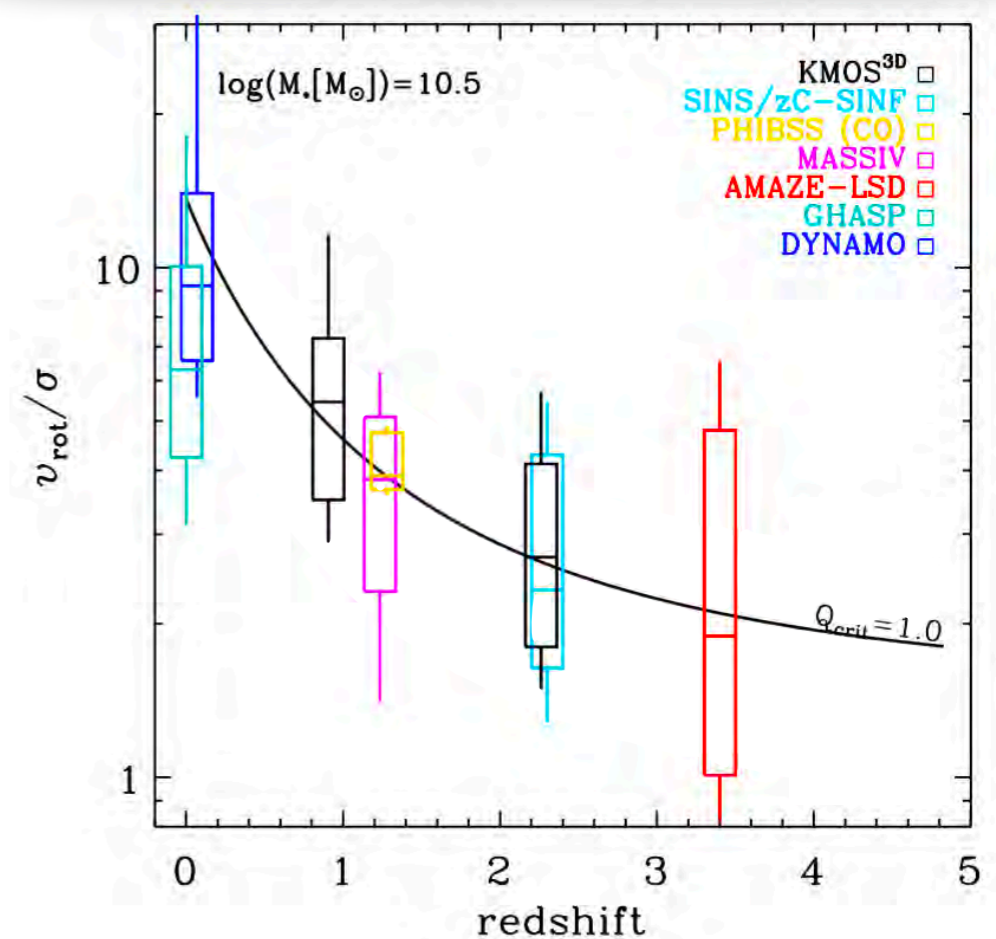
- ◆ **perturbations gravitationnelles** produites par p.e. des fractions de gaz moléculaire élevées / instabilité dans les disques galactiques produite par l'accrétion cosmique / collisions mineurs entre galaxies

(e.g., Dekel+09; Ceverino+10; Bournaud+09,14;

Wisnioski+15; Krumholz & Burkhardt 16)

## Marginalement stables

$v_{\text{rot}}/\sigma_0$  approchant 1 à haut z



Wisnioski+15

→ **Fragmentation** des disques galactiques à haut z?

impliquant la formation des nuages moléculaires massifs à partir desquels vont se former des complexes d'amas d'étoiles

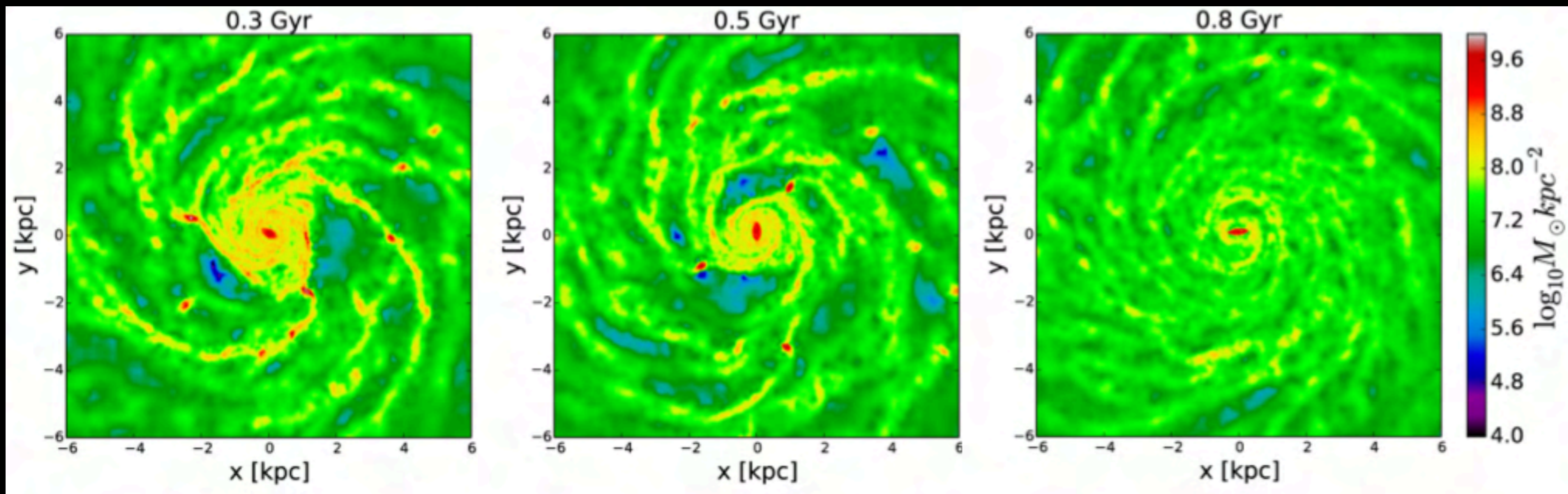
(e.g., Dekel+09; Ceverino+10; Bournaud+14; Tamburello, Mayer+15; Behrendt+16; Mandelker+17)

# PROCESSUS POSSIBLE POUR LA FORMATION DES CLUMPS: FRAGMENTATION DU DISQUE GALACTIQUE

## Sur la base de simulations numériques:

Les disques galactiques turbulents à haut  $z$  sont soumis à de violentes instabilités gravitationnelles, causées par d'intense accrétion de gaz froid, **ils se fragmentent pour former des nuages de gaz** qui, suite à leur effondrement, vont former les *clumps* d'étoiles que l'on observe.

*Dekel+09; Agertz+09; Bournaud+10,14; Ceverino+10,12; Tamburello+15; Behrendt+16,19; Mandelker+14,17; Oklopčić+17; Faure+21; Renaud+21; Fensch&Bournaud+21*



**Résolution des simulations :**

10 pc /  $10^4 M_{\odot}$

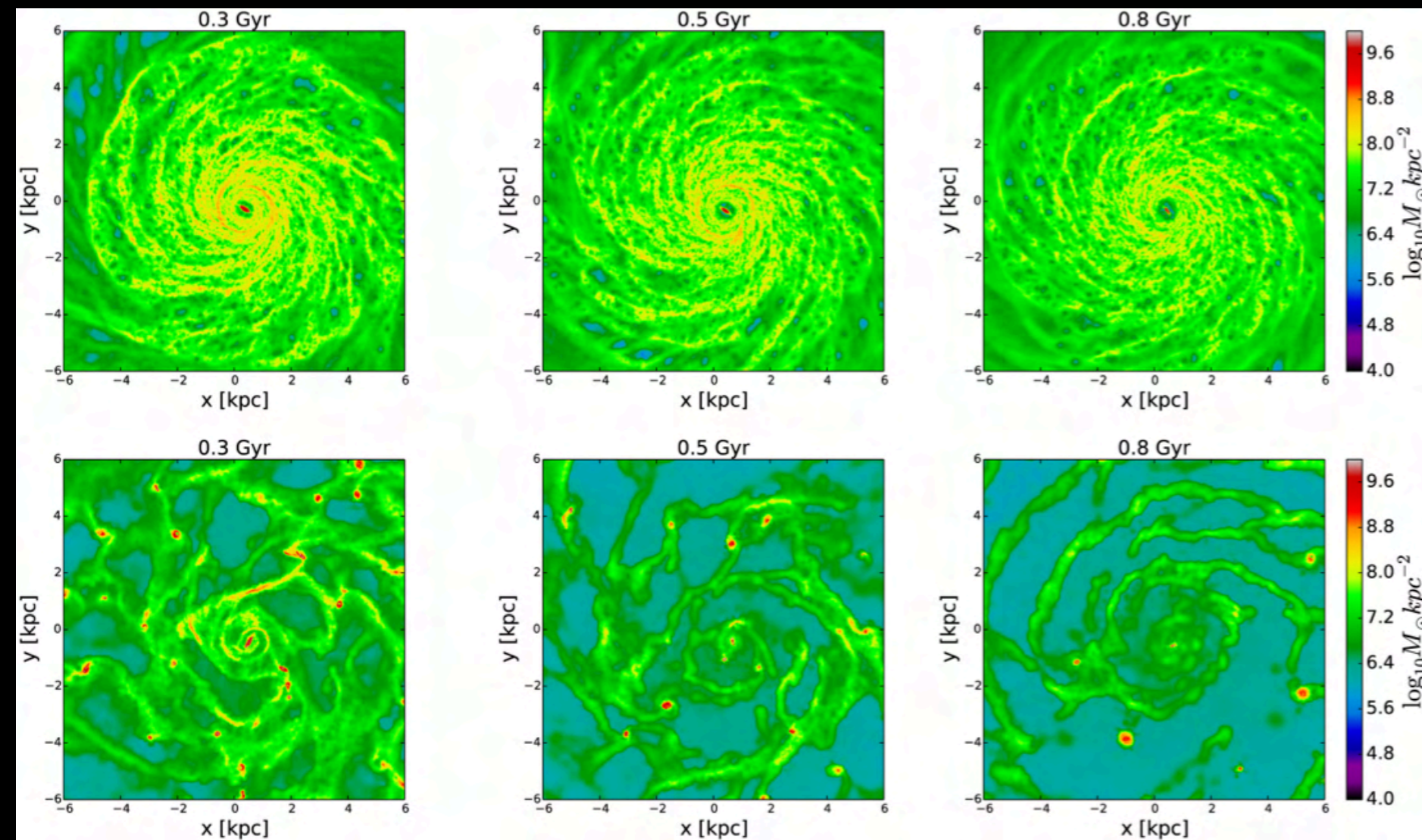
$M_{\star} = 4 \times 10^{10} M_{\odot}$

$v_{\text{rot}} = 200 \text{ km/s}$

$f_{\text{molgas}} = 0.5$

*Tamburello+15*

# FRAGMENTATION DES DISQUES GALACTIQUES: PARAMÈTRES PHYSIQUES



**Résolution des simulations :**

10 pc /  $10^4 M_{\odot}$

$M_{\star} = 4 \times 10^{10} M_{\odot}$

$v_{\text{rot}} = 200 \text{ km/s}$

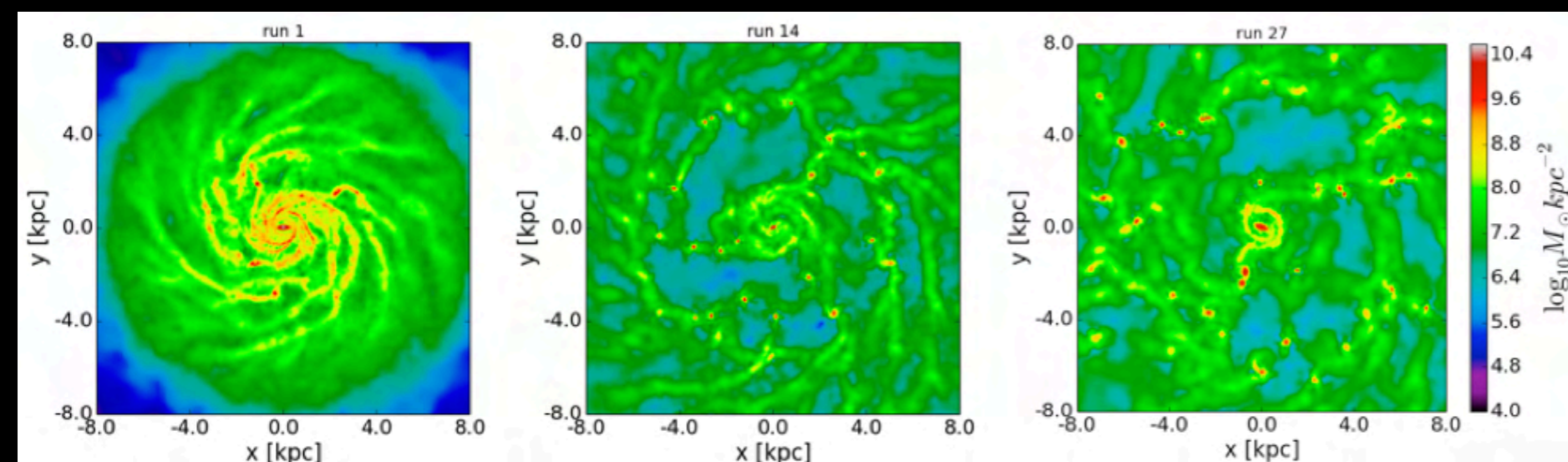
**Fraction gazeuse = 30%**

-> pas de *clumps*

**Fraction gazeuse = 50%**

-> la fragmentation augmente significativement avec la fraction gazeuse

*Tamburello+15*



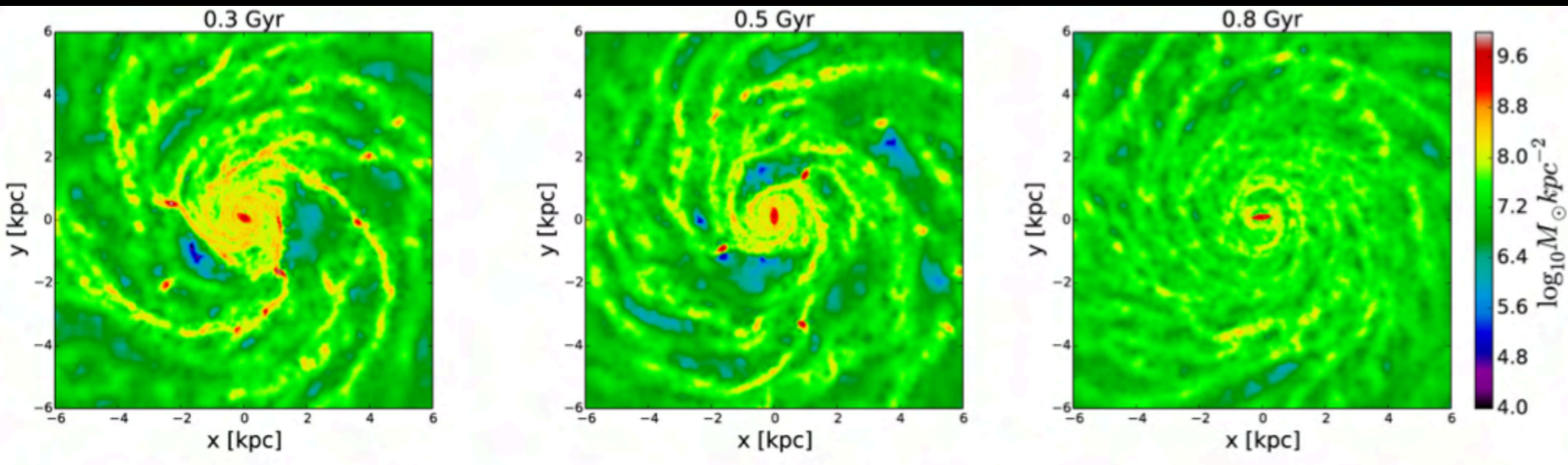
$M_{\star}(\text{disk}) = 1 \times 10^{10} M_{\odot}$  (left)

$M_{\star}(\text{disk}) = 4 \times 10^{10} M_{\odot}$  (middle)

$M_{\star}(\text{disk}) = 8 \times 10^{10} M_{\odot}$  (right)

-> la fragmentation augmente avec la masse stellaire

# FRAGMENTATION DES DISQUES GALACTIQUES: PARAMÈTRES PHYSIQUES



## Résolution des simulations :

10 pc /  $10^4 M_{\odot}$

$M_{\star} = 4 \times 10^{10} M_{\odot}$

$v_{\text{rot}} = 200 \text{ km/s}$

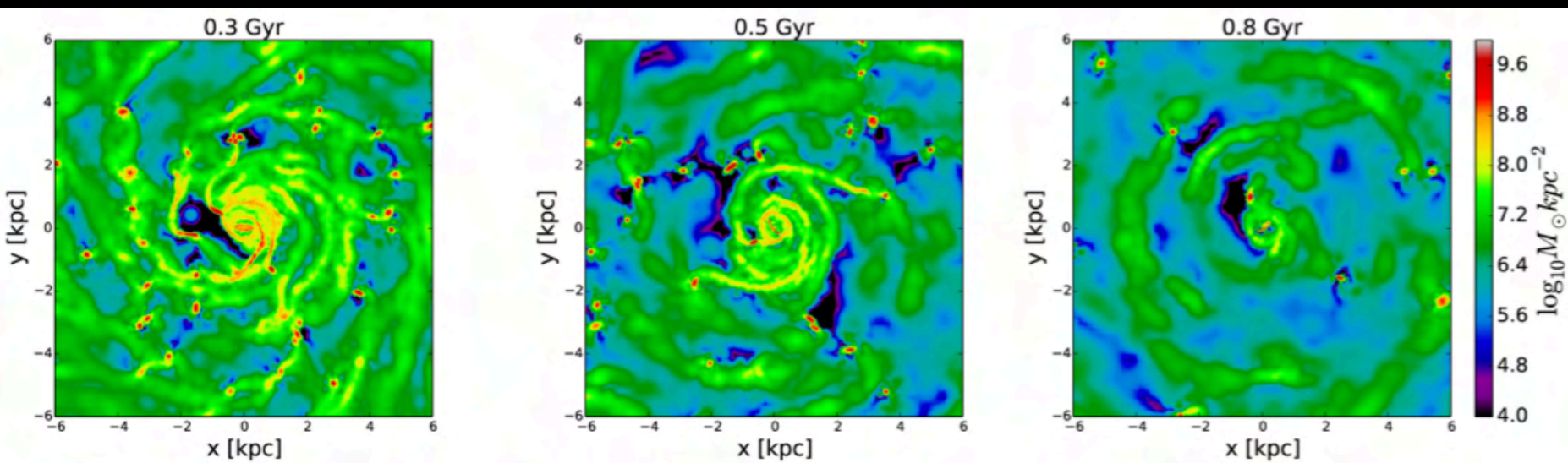
## **Blastwave feedback**

→ les *clumps* se forment et disparaissent après 500 Myr

## **No feedback**

→ le disque se fragmente complètement et les *clumps* se forment vigoureusement

*Tamburello+15, Mayer+16*



La durée de vie des *clumps* peut servir à contraindre la force du *feedback* galactique.



# PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DES CLUMPS

**Paradigme initial:** masse stellaire médiane de  $10^{8-9} M_{\odot}$  avec des tailles  $>1$  kpc

Forster Schreiber+11; Guo+12,18; Zanella+19

**Révision:** masses stellaires 10-100x plus faibles (médiane  $10^7 M_{\odot}$ ) avec des tailles  $<500$  pc

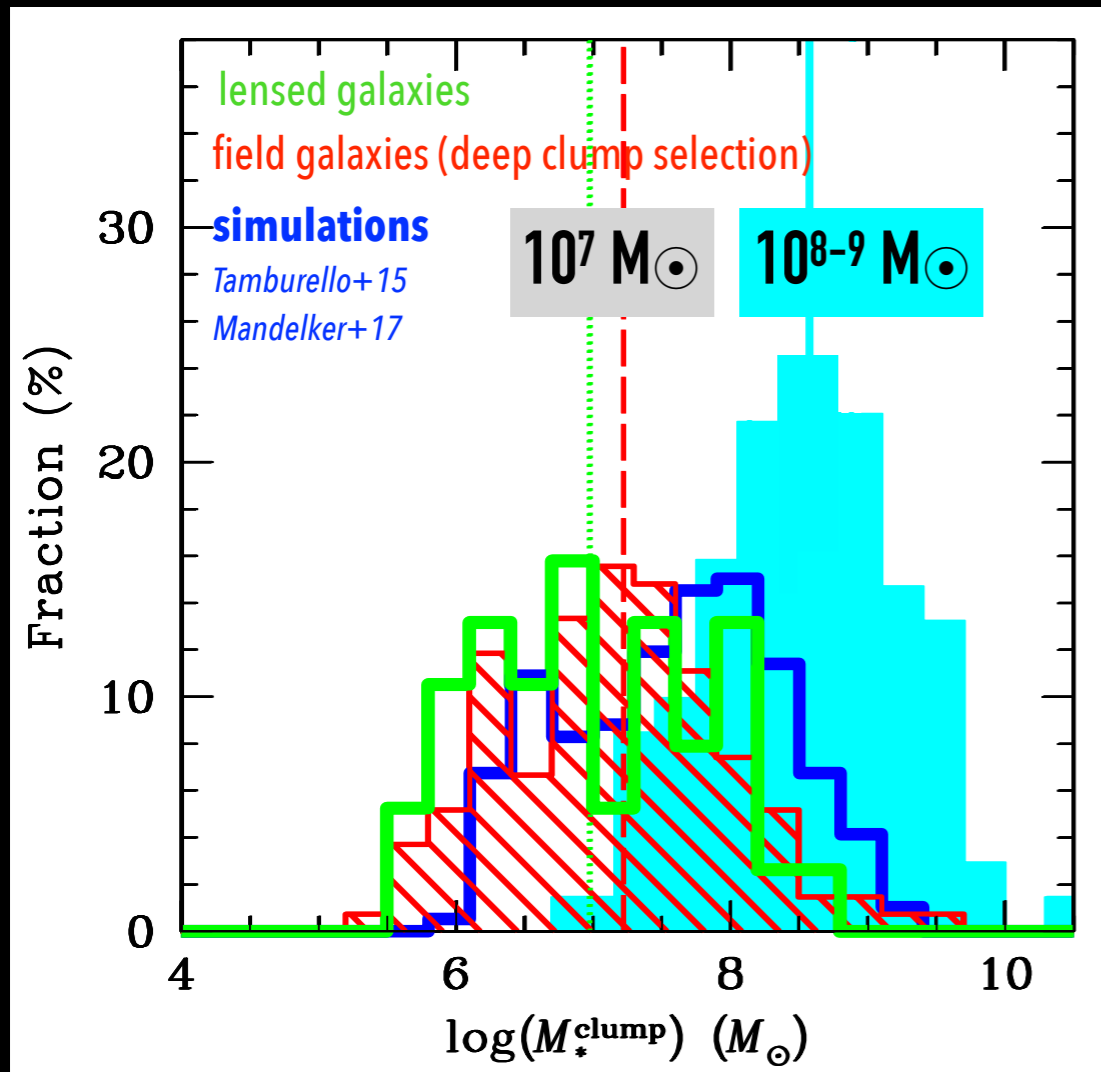
Dessauges-Zavadsky+17;  
Livermore+12; Adamo+13; Elmegreen+13;  
Cava/w Dessauges-Zavadsky+18; Mestric+22;  
Messa/w Dessauges-Zavadsky+22

**Effet de forte lentille gravitationnelle**  
permet d'atteindre des résolutions spatiales sous le kpc  
→ pas de superposition de *clumps*

**Sondage profond avec HST (Hubble Ultra Deep Field)**  
permet d'atteindre des très bonnes sensibilités  
→ pas de bias envers les *clumps* de faibles masses



HST



Les masses révisées des *clumps* sont en bon accord avec la distribution des *clumps* **prédite par la fragmentation des disques galactiques dans les simulations.**

(Tamburello+15; Mandelker+17)

# PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DES CLUMPS

**Paradigme initial:** masse stellaire médiane de  $10^{8-9} M_{\odot}$  avec des tailles  $>1$  kpc

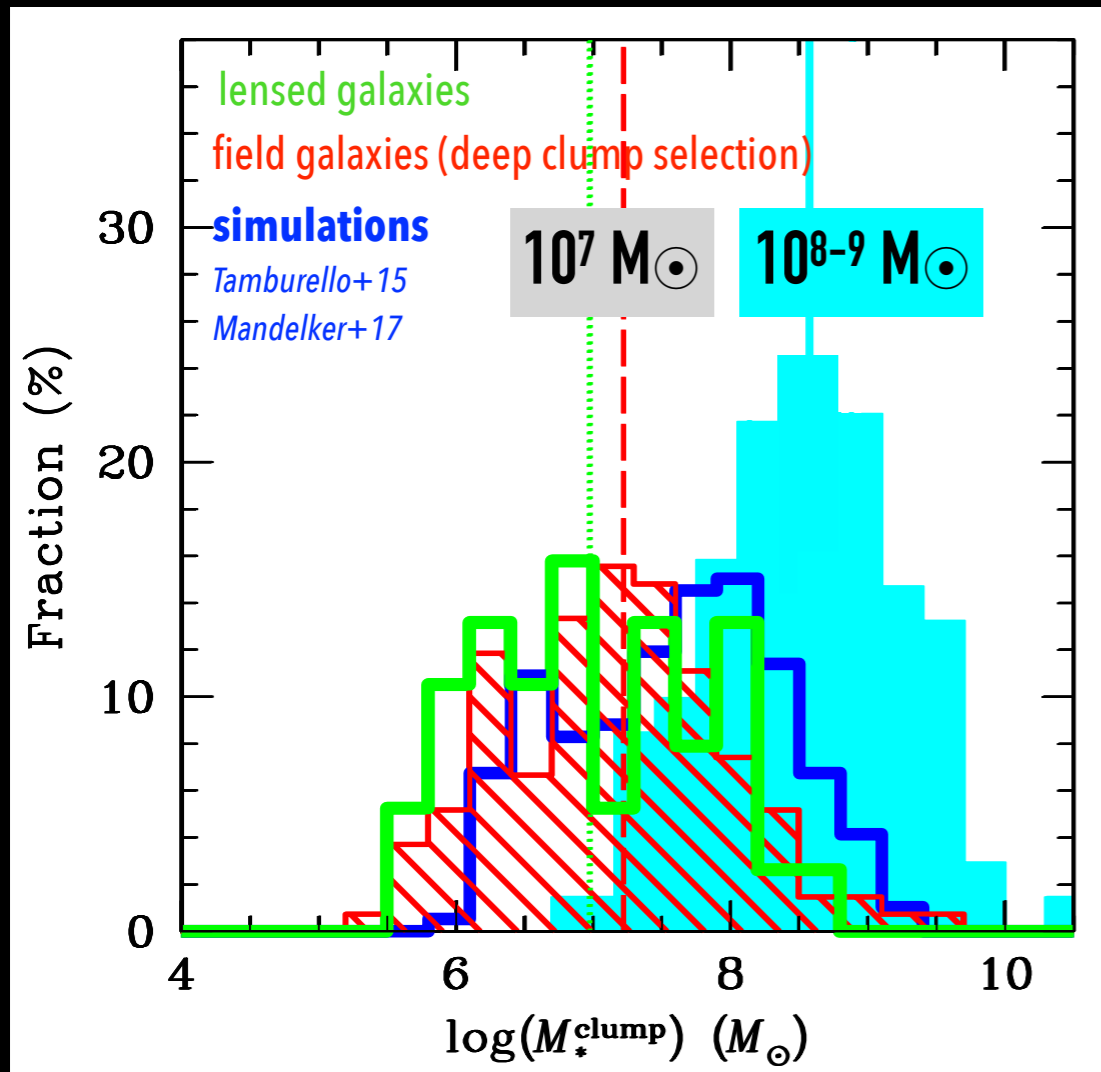
*Forster Schreiber+11; Guo+12,18; Zanella+19*

**Révision:** masses stellaires 10-100x plus faibles (médiane  $10^7 M_{\odot}$ ) avec des tailles  $<500$  pc

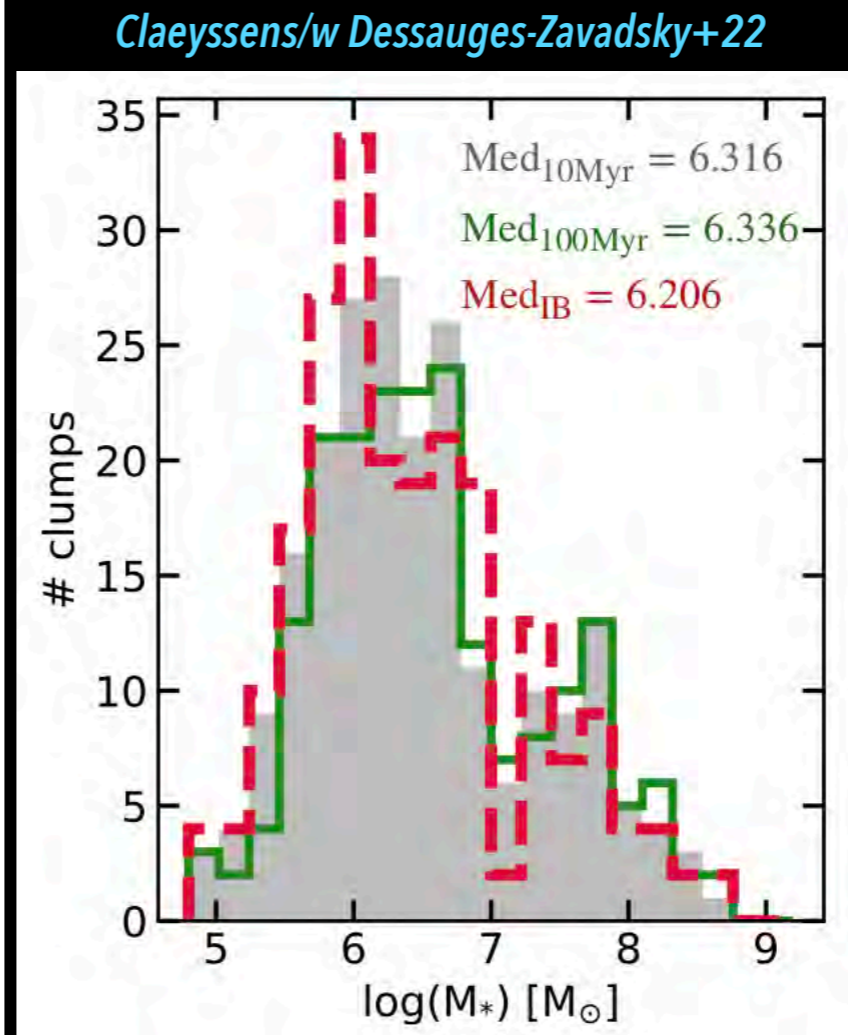
*Dessauges-Zavadsky+17;  
Livermore+12; Adamo+13; Elmegreen+13;  
Cava/w Dessauges-Zavadsky+18; Mestic+22;  
Messa/w Dessauges-Zavadsky+22*

**Effet de forte lentille gravitationnelle**  
permet d'atteindre des résolutions spatiales sous le kpc  
→ pas de superposition de *clumps*

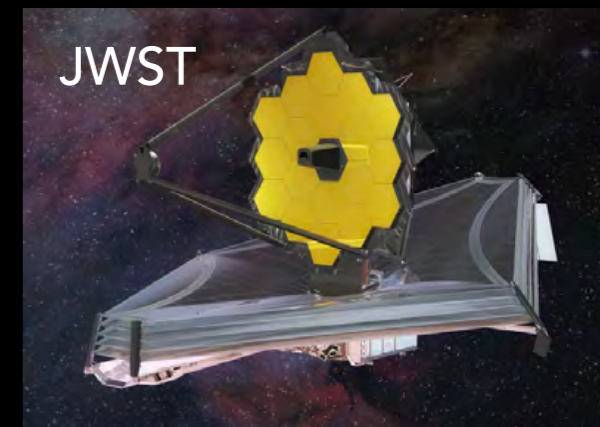
**Sondage profond avec HST (Hubble Ultra Deep Field)**  
permet d'atteindre des très bonnes sensibilités  
→ pas de bias envers les *clumps* de faibles masses



*Dessauges-Zavadsky+17*



*Claeyssens/w Dessauges-Zavadsky+22*



La médiane de la distribution des masses obtenue pour les *clumps* fortement magnifiés et détectés avec JWST descend à  $10^6 M_{\odot}$  !

# PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DES CLUMPS

**Paradigme initial:** masse stellaire médiane de  $10^{8-9} M_{\odot}$  avec des tailles  $>1$  kpc

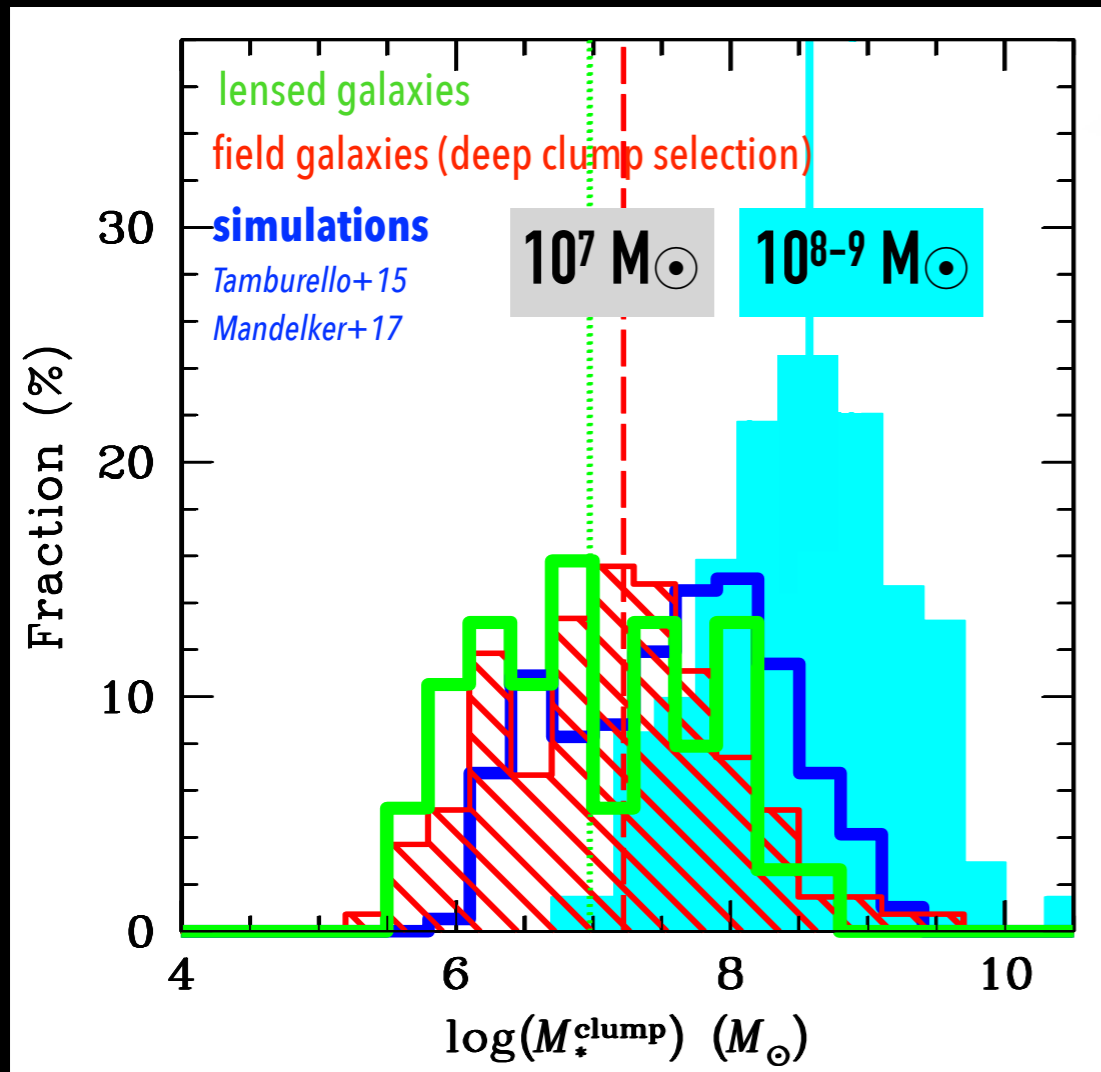
*Forster Schreiber+11; Guo+12,18; Zanella+19*

**Révision:** masses stellaires 10-100x plus faibles (médiane  $10^7 M_{\odot}$ ) avec des tailles  $<500$  pc

*Dessauges-Zavadsky+17;  
Livermore+12; Adamo+13; Elmegreen+13;  
Cava/w Dessauges-Zavadsky+18; Mestric+22;  
Messa/w Dessauges-Zavadsky+22*

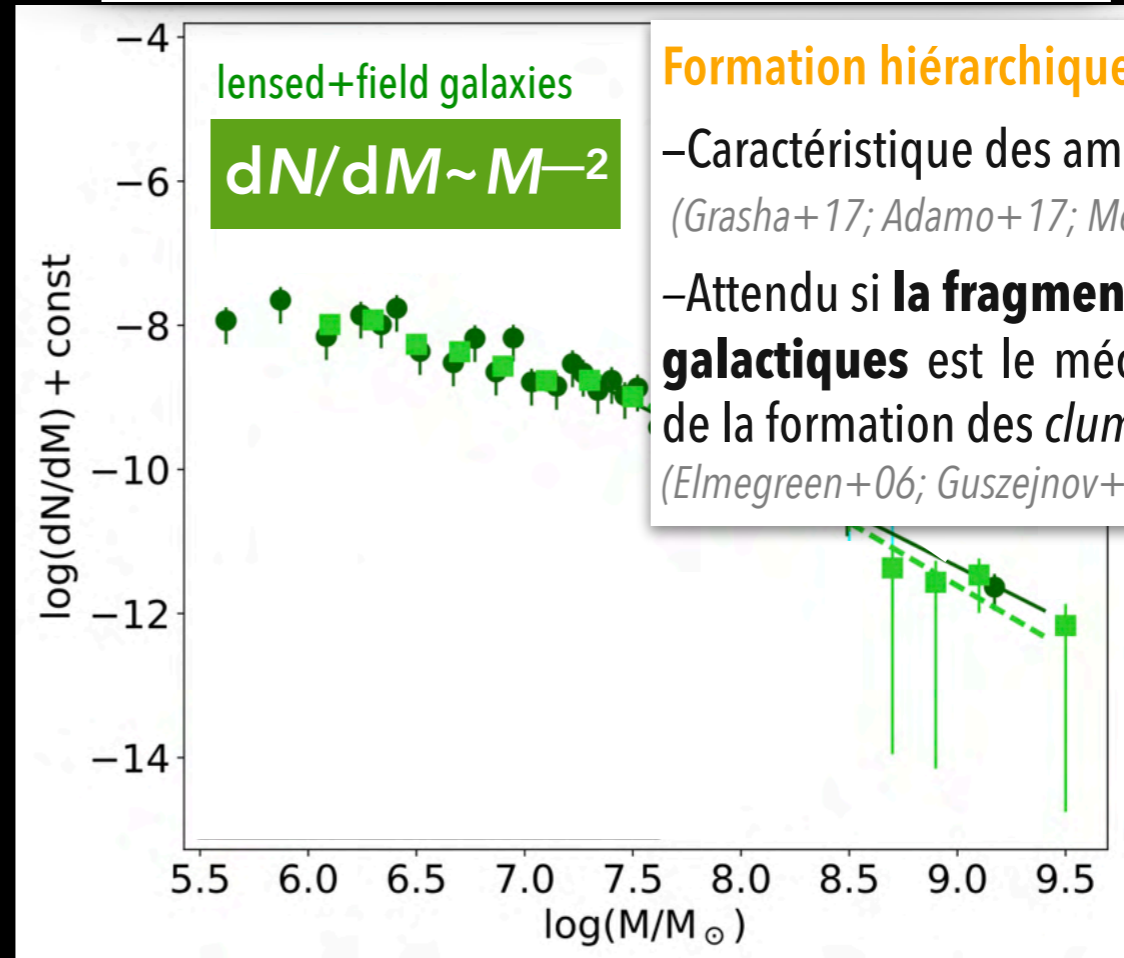
**Effet de forte lentille gravitationnelle**  
permet d'atteindre des résolutions spatiales sous le kpc  
→ pas de superposition de *clumps*

**Sondage profond avec HST (Hubble Ultra Deep Field)**  
permet d'atteindre des très bonnes sensibilités  
→ pas de bias envers les *clumps* de faibles masses



*Dessauges-Zavadsky+17*

## Function de masse des *clumps* à $1 < z < 3$



### Formation hiérarchique des amas d'étoiles

- Caractéristique des amas d'étoiles proches (*Grasha+17; Adamo+17; Messa+18*)
- Attendu si la **fragmentation des disques galactiques** est le mécanisme responsable de la formation des *clumps* (*Elmegreen+06; Guszejnov+18; Ma+20*)

*Dessauges-Zavadsky & Adamo 18 (see also Huertas-Company+20)*

# PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DES CLUMPS

**Paradigme initial:** masse stellaire médiane de  $10^{8-9} M_{\odot}$  avec des tailles  $>1$  kpc

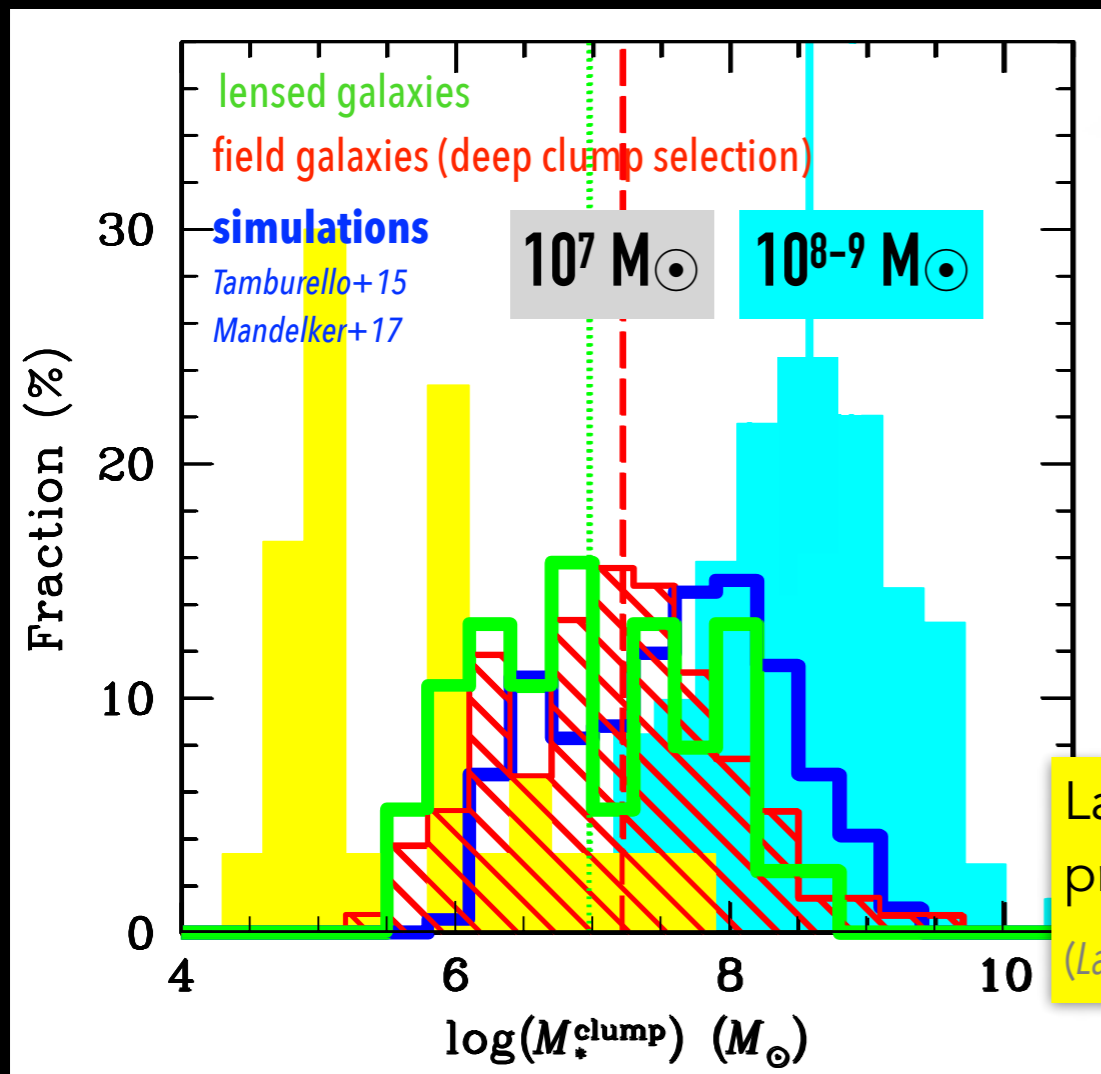
*Forster Schreiber+11; Guo+12,18; Zanella+19*

**Révision:** masses stellaires 10-100x plus faibles (médiane  $10^7 M_{\odot}$ ) avec des tailles  $<500$  pc

*Dessauges-Zavadsky+17;  
Livermore+12; Adamo+13; Elmegreen+13;  
Cava/w Dessauges-Zavadsky+18; Mestric+22;  
Messa/w Dessauges-Zavadsky+22*

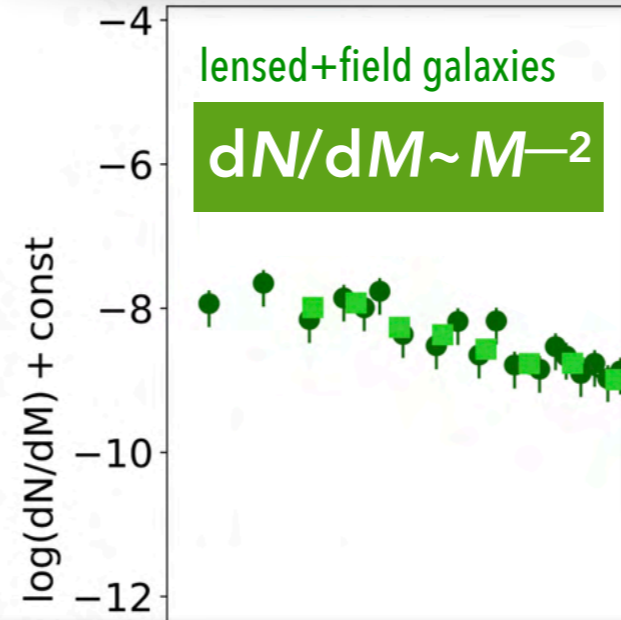
**Effet de forte lentille gravitationnelle**  
permet d'atteindre des résolutions spatiales sous le kpc  
→ pas de superposition de *clumps*

**Sondage profond avec HST (Hubble Ultra Deep Field)**  
permet d'atteindre des très bonnes sensibilités  
→ pas de bias envers les *clumps* de faibles masses



*Dessauges-Zavadsky+17*

## Function de masse des *clumps* à $1 < z < 3$



### Formation hiérarchique des amas d'étoiles

- Caractéristique des amas d'étoiles proches (*Grasha+17; Adamo+17; Messa+18*)
- Attendu si **la fragmentation des disques galactiques** est le mécanisme responsable de la formation des *clumps* (*Elmegreen+06; Guszejnov+18; Ma+20*)

La majorité des amas d'étoiles dans les galaxies proches ont des masses 10-100x plus faibles.

(*Larsen+02; Bastian+06; Adamo+13,20*)

*Dessauges-Zavadsky & Adamo 18 (see also Huertas-Company+20)*

# GALAXIES FORTEMENT MAGNIFIÉES — LABORATOIRES À HAUT $z$

Galaxie *Cosmic Snake* à  $z=1.036$

Galaxie *A521-sys1* à  $z=1.043$

galaxies typiques, dominées par la rotation

masse stellaire =  $4 \times 10^{10} M_{\odot}$  – SFR =  $30 M_{\odot}/\text{yr}$  – fraction de gaz moléculaire 25%    masse stellaire =  $7 \times 10^{10} M_{\odot}$  – SFR =  $26 M_{\odot}/\text{yr}$  – fraction de gaz moléculaire 16%

*Cava/w Dessauges-Zavadsky+18*

*Messa/w Dessauges-Zavadsky+22*

MACS1206-08

A521

Contre-image

magnification constante de 4  
résolution uniforme de 300 pc

Contre-image

magnification de 2–6  
résolution presque uniforme de 300 pc

**Arc *Cosmic Snake***

facteurs de magnification  $>50-200$   
précision du modèle de lentille  $<0.15''$

**taille physique**  
**30–70 pc** (HST PSF)

**Arc *A521-sys1***

facteurs de magnification  $>10-100$   
précision du modèle de lentille  $<0.08''$

**taille physique**  
**30–100 pc** (HST PSF)

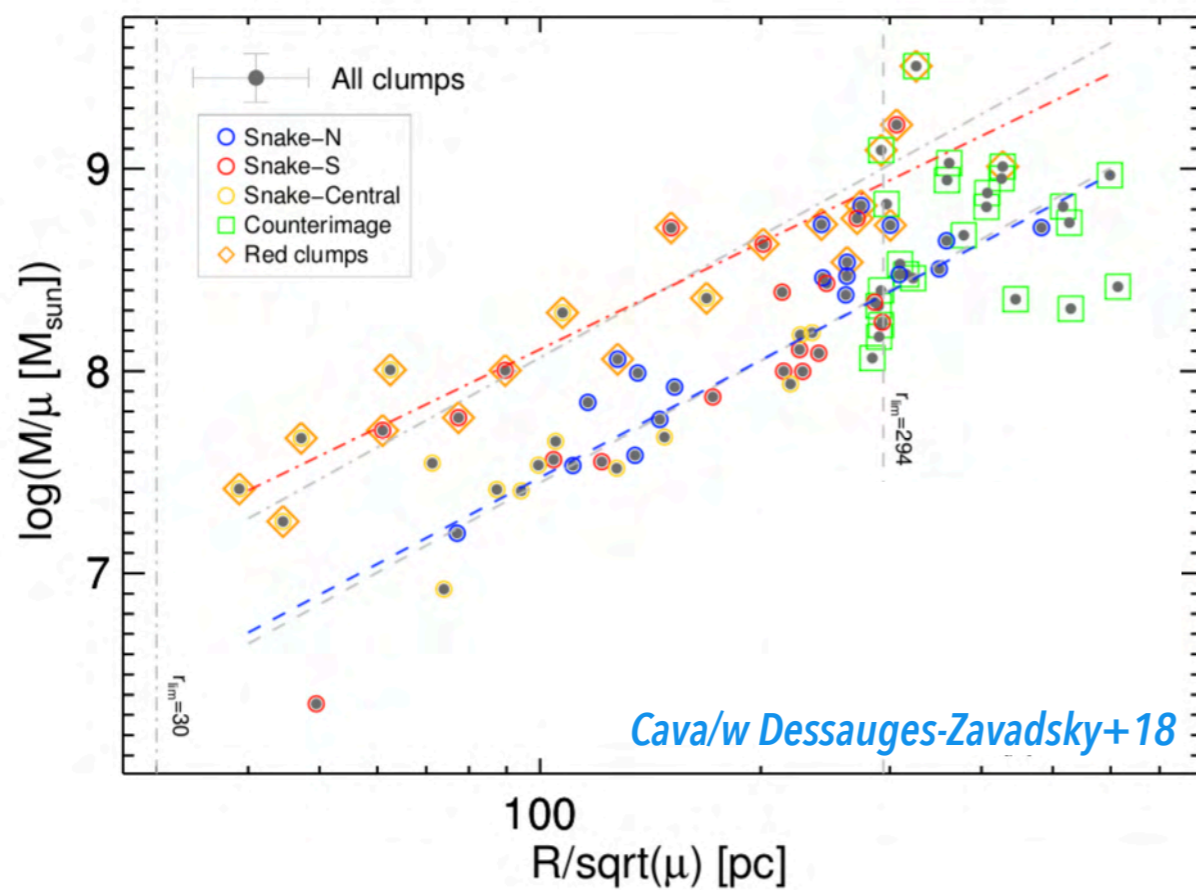
**21 clumps** détectés avec HST F390W

**17 clumps** détectés avec HST F390W



# CLUMPS À HAUT z : AMAS D'ÉTOILES GÉANTS

Galaxie Cosmic Snake

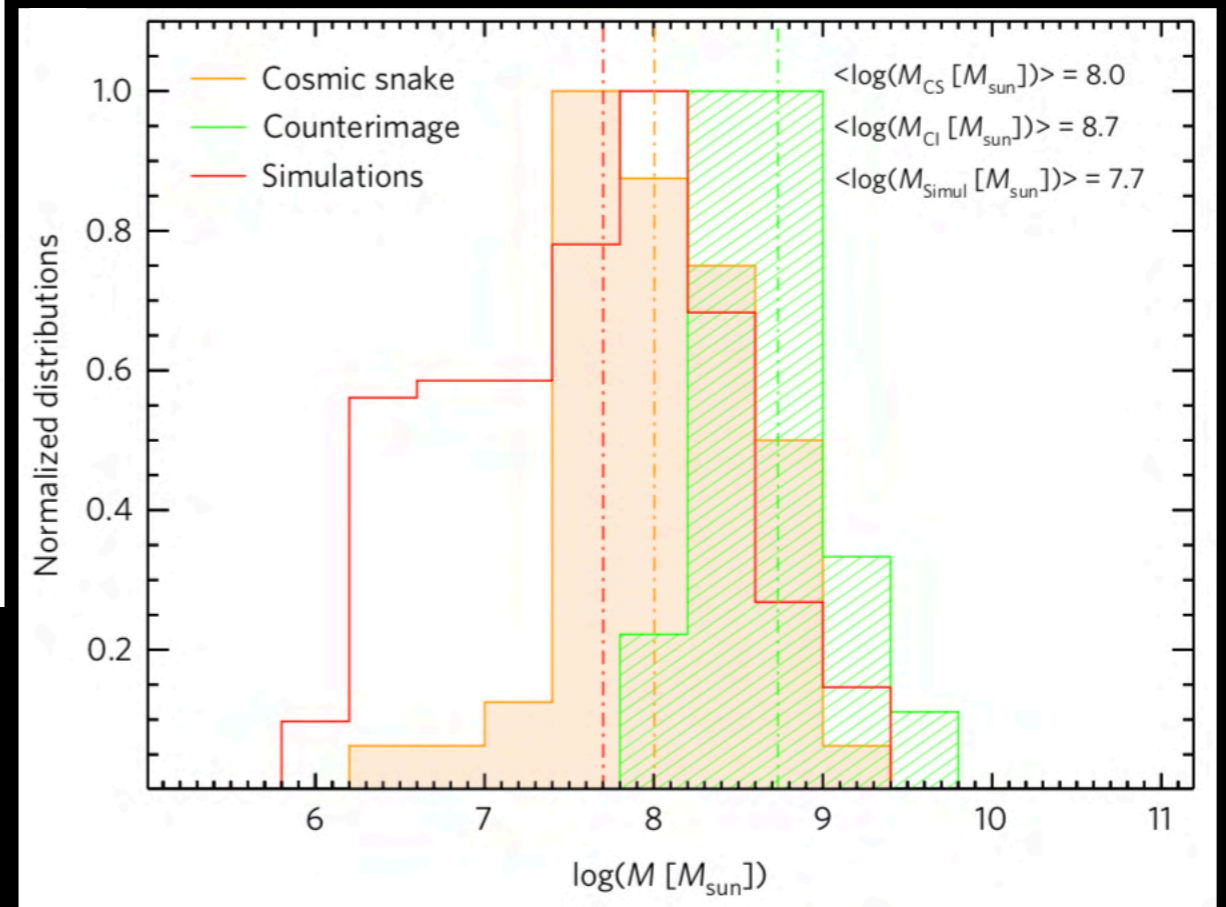


## Taille des clumps

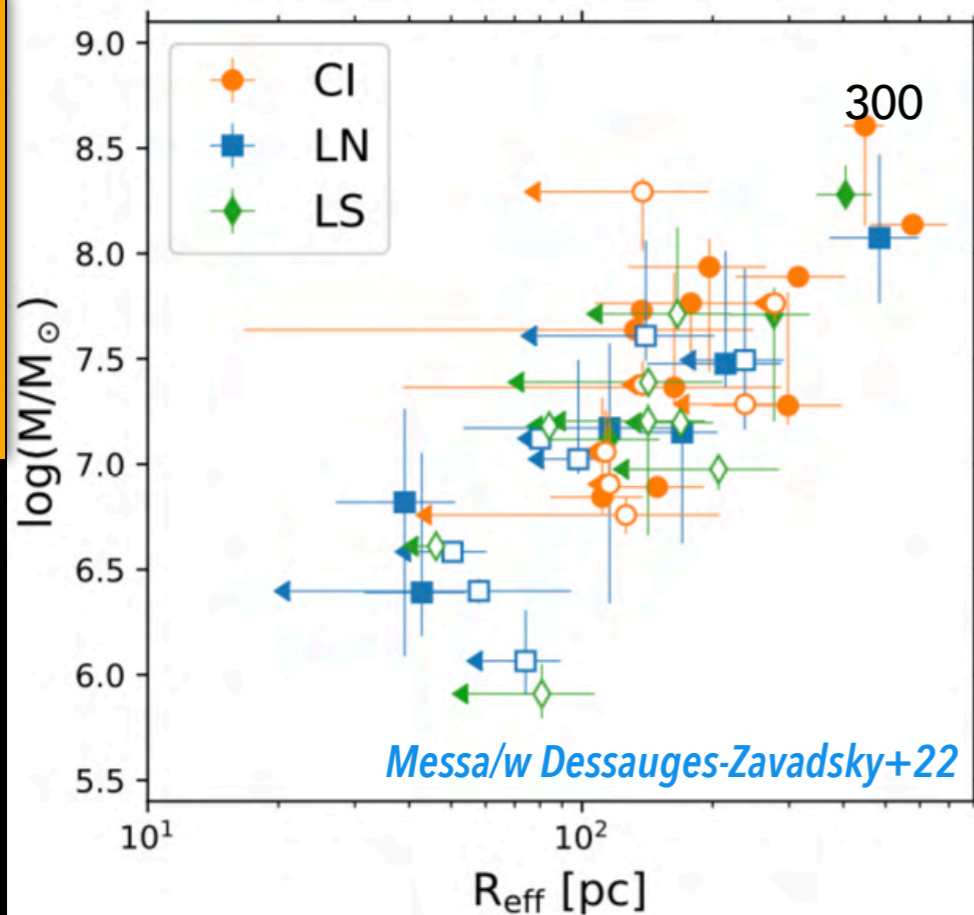
◆ entre 30 pc et 300 pc

## Masse stellaire des clumps

◆ mediane  $\sim 10^{7.5} M_{\odot}$

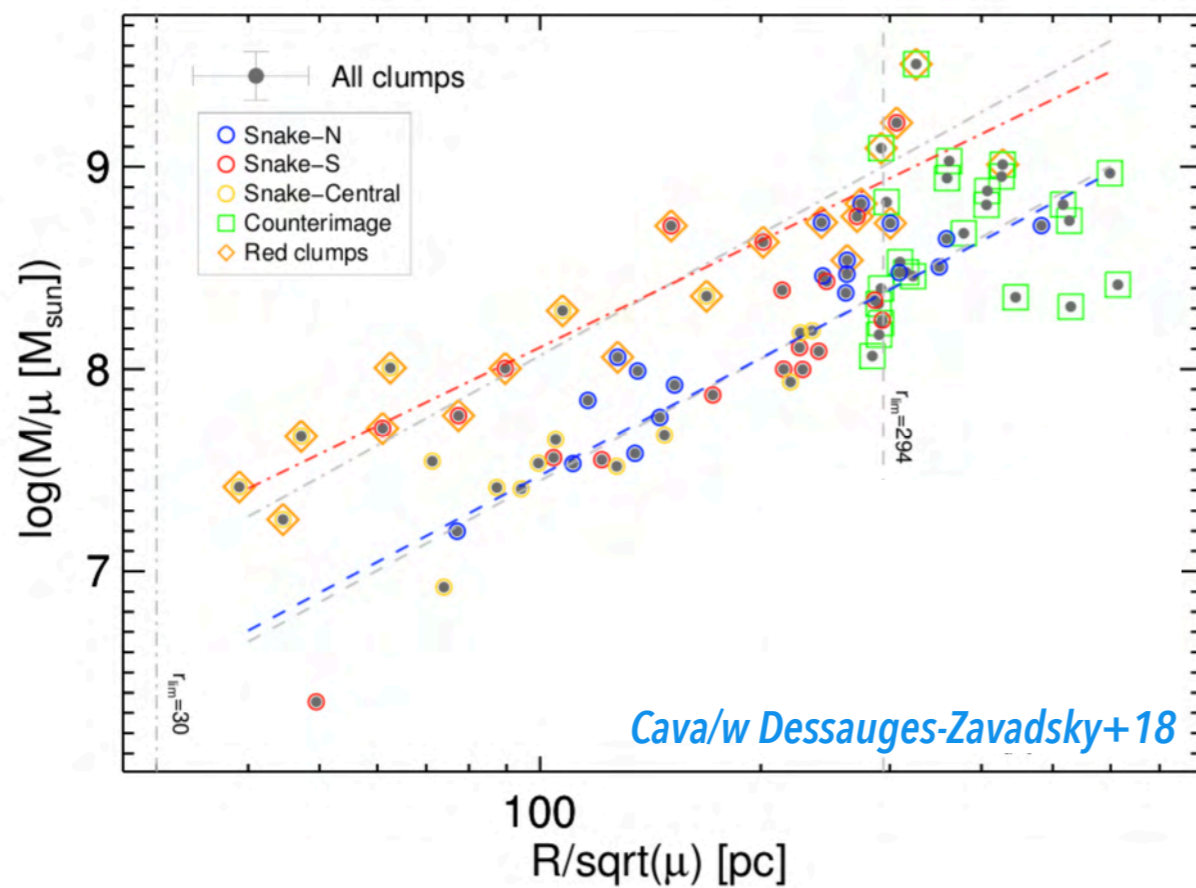


Galaxie A521-sys1



# CLUMPS À HAUT $z$ : AMAS D'ÉTOILES GÉANTS

Galaxie Cosmic Snake



## Taille des clumps

- entre 30 pc et 300 pc

## Masse stellaire des clumps

- mediane  $\sim 10^{7.5} M_{\odot}$
- les *clumps* contiennent 15% de la masse stellaire des galaxies hôte
- une fraction considérable (20%–50%) de la formation stellaire récente se passent dans les *clumps*

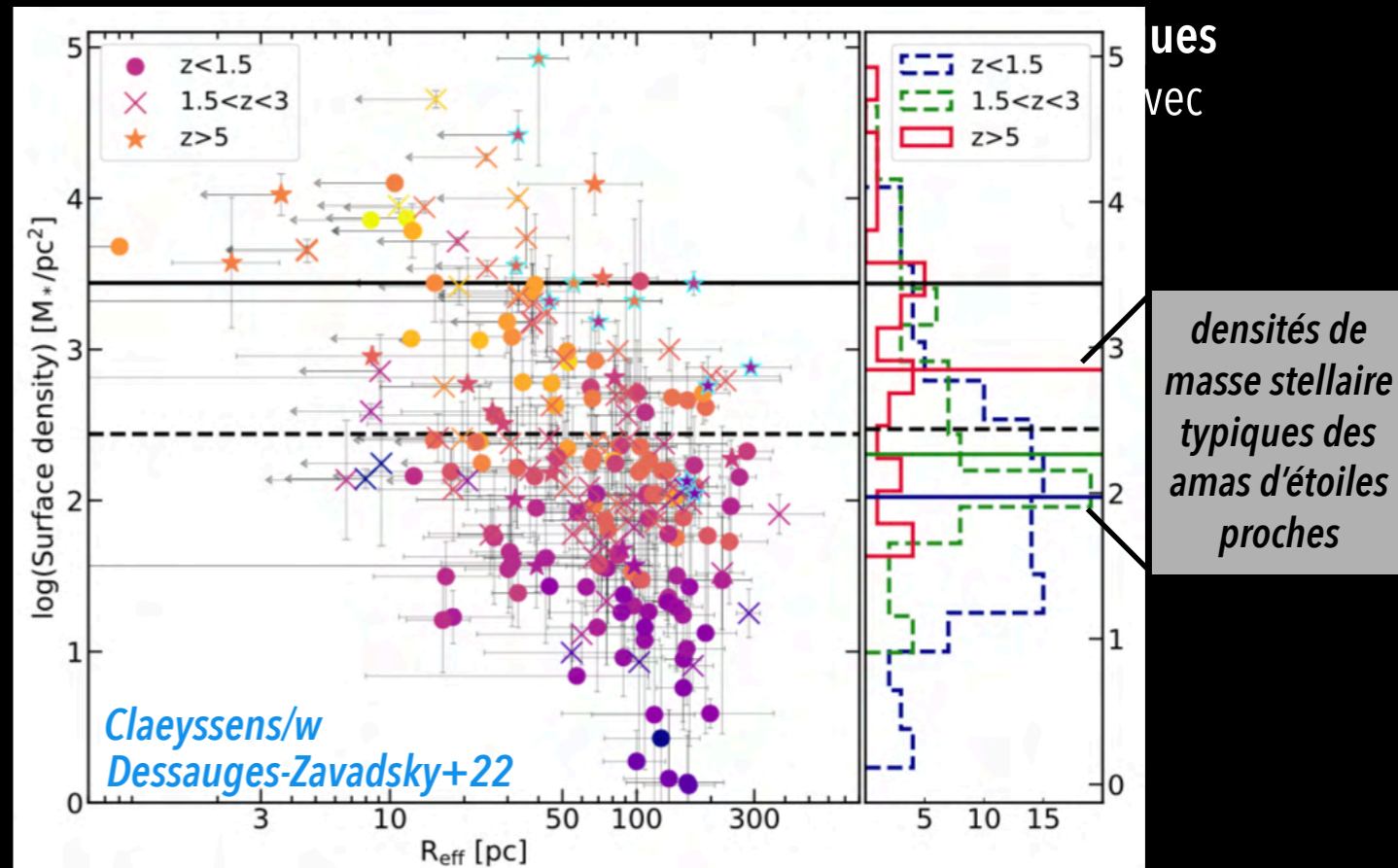
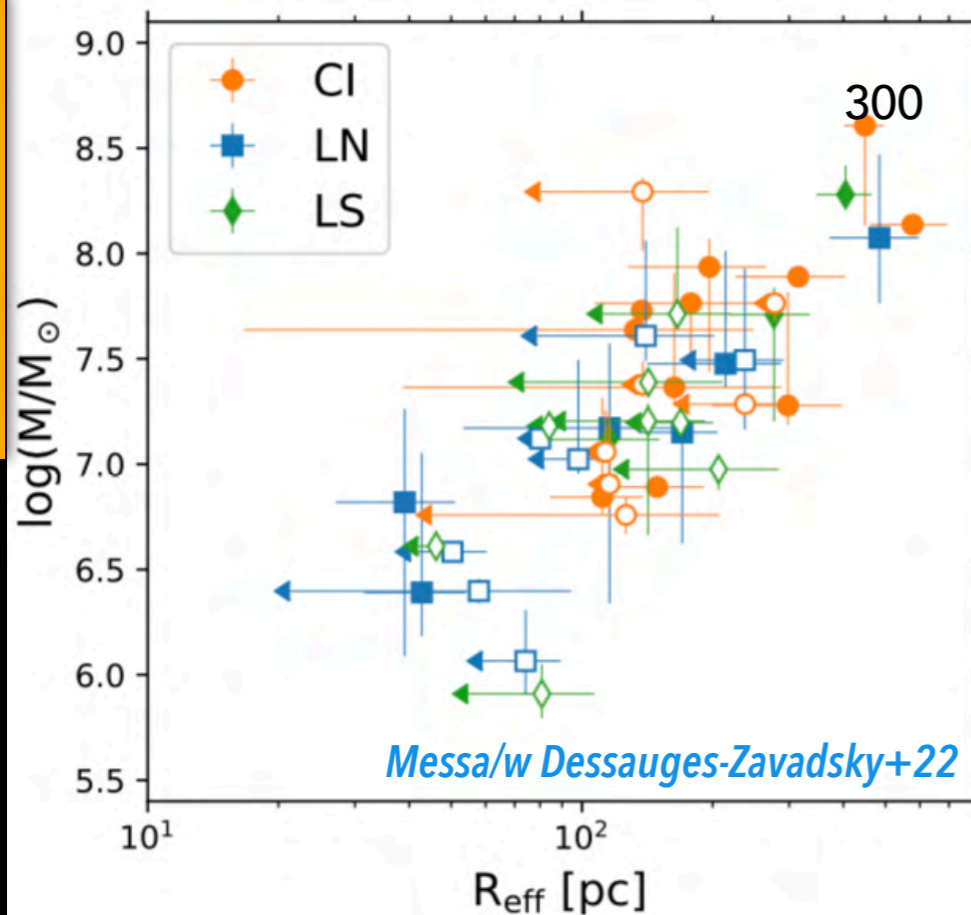
## Âge des clumps

- entre 10 et 200 millions d'années

## Densités surfacique de la masse des clumps

- de 100 à 10'000  $M_{\odot}/\text{yr}$

Galaxie A521-sys1



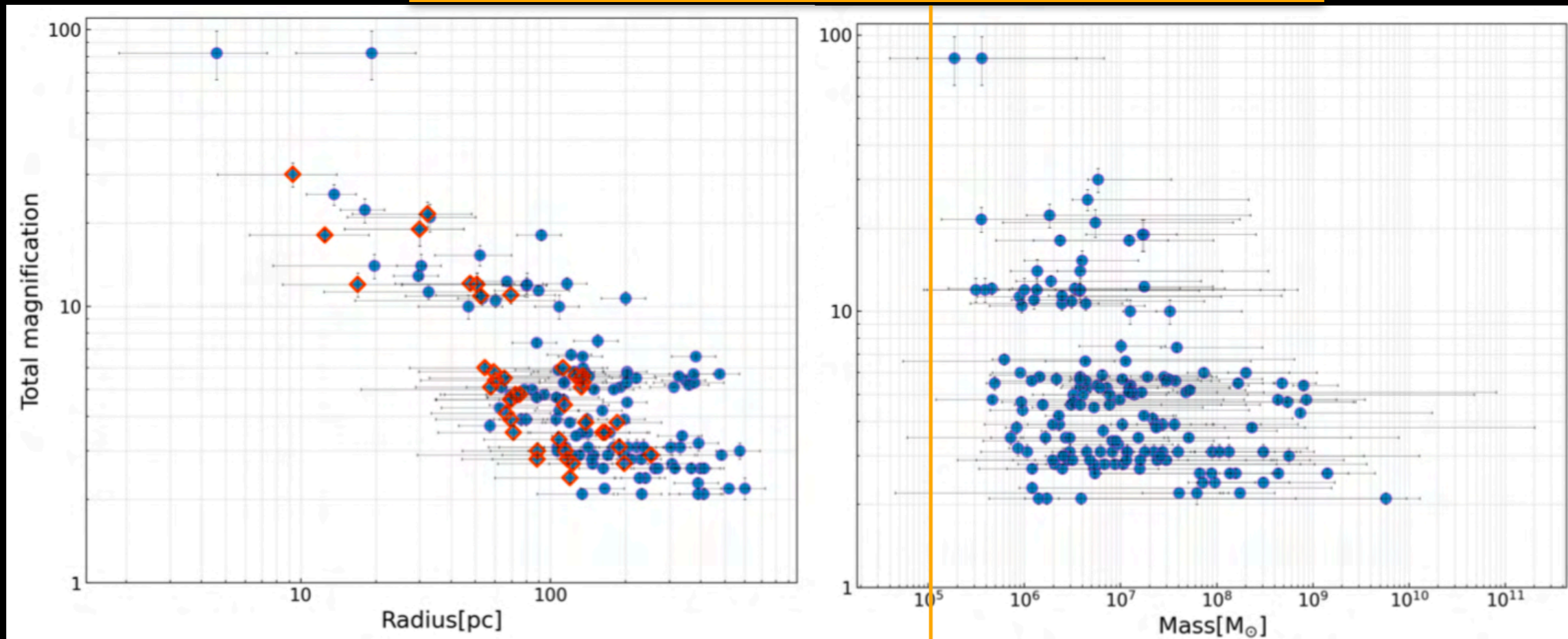
ues  
vec

densités de  
masse stellaire  
typiques des  
amas d'étoiles  
proches

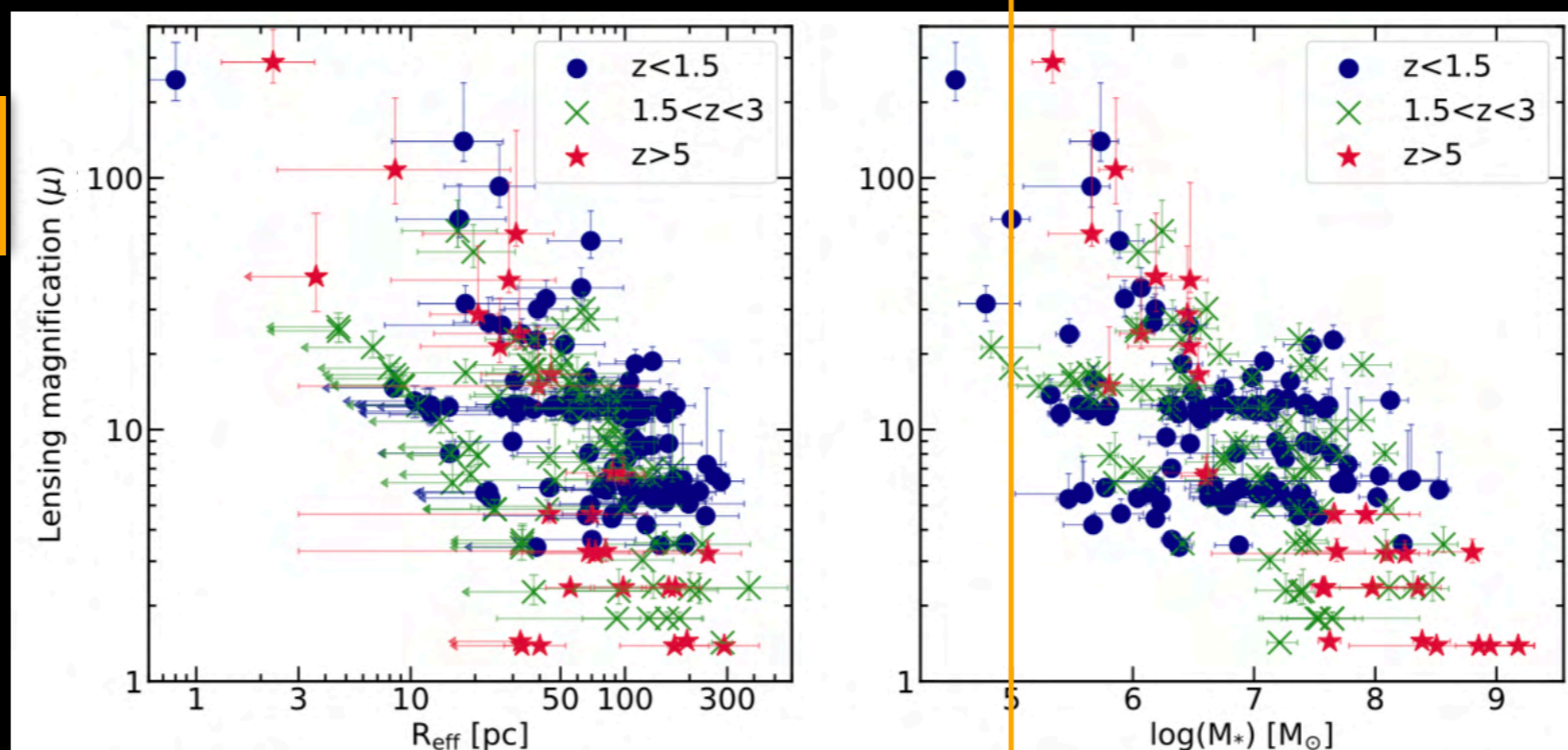
# CLUMPS À HAUT $z$ : AMAS D'ÉTOILES GÉANTS

166 clumps à  $z \sim 2-6.2$  (HST Frontier Field MACS 0416)

Mestric+22



225 clumps à  $z \sim 2-8.5$   
(JWST SMACS 0723)



Clayssens/w  
Dessauges-Zavadsky+22



# CLUMPS À HAUT $z$ : AMAS D'ÉTOILES GÉANTS

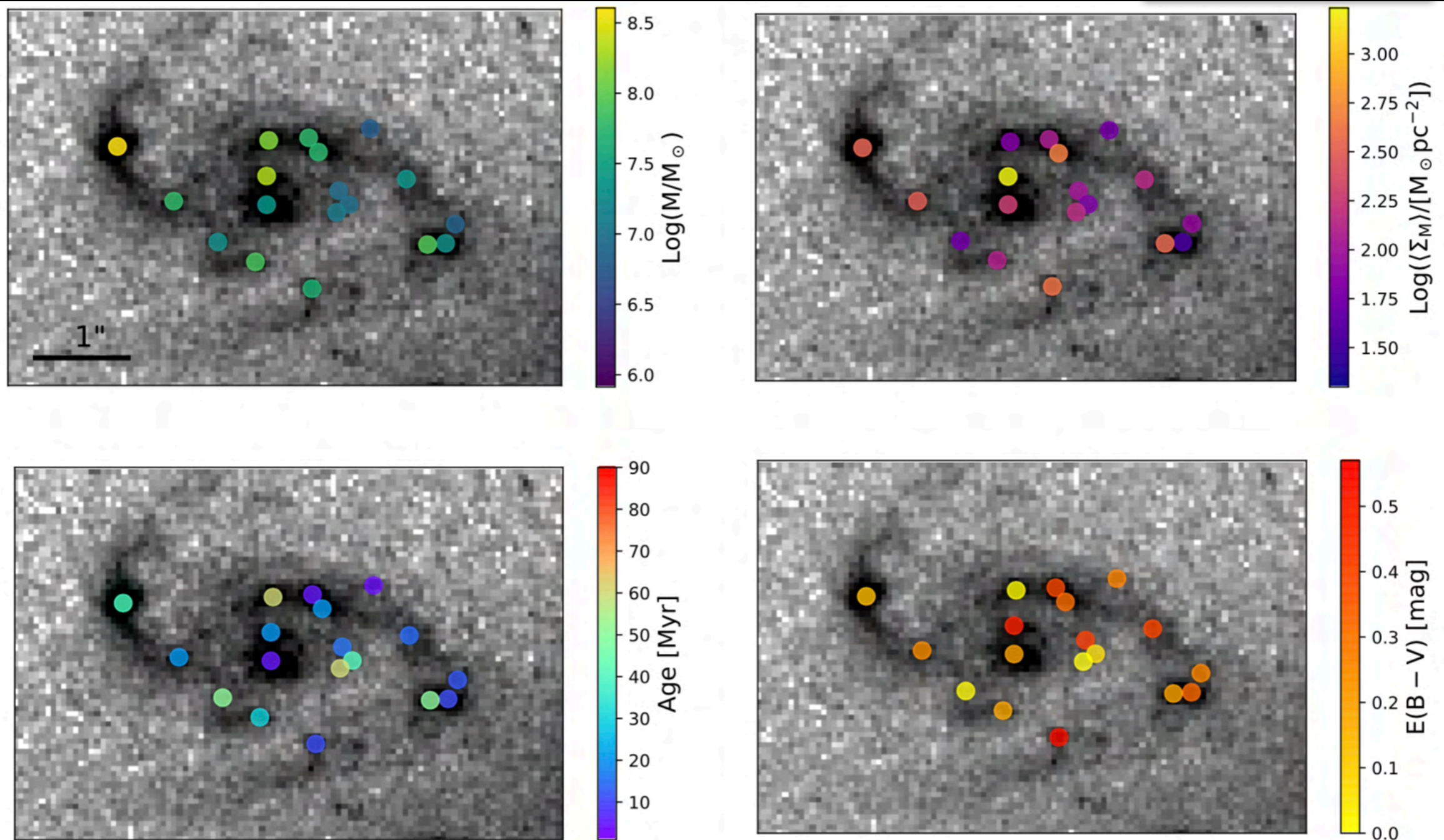
Galaxie *Cosmic Snake*

Dans le *Cosmic Snake*, les *clumps* les plus massifs et les plus denses sont proches du centre galactique. Ceux-ci sont aussi en moyenne les plus âgés.

*Cava/w Dessauges-Zavadsky+18*

Pas de tendance avec la distance au centre galactique

Galaxie *A521-sys1*



*Messa/w Dessauges-Zavadsky+22*

# POURQUOI L'ÉTUDE DES *CLUMPS* EST-ELLE IMPORTANTE?

## 1) Pour déterminer comment les galaxies ont assemblé leur masse (via des collisions entre galaxies ou un processus séculaire)

Les *clumps* sont-ils des galaxies satellites accrétées suite à un événement de collision entre galaxies? Ou sont-ils formés 'in situ' dans les galaxies hôtes?

- Les *clumps* sont formés 'in situ' dans les galaxies hôtes, et supportent donc le scénario d'évolution séculaire.
- Les *clumps* sont des amas d'étoiles géants avec des masses stellaires 10-100x plus élevées que les amas d'étoiles proches, mais avec des densités surfaciques de masse comparables, bien qu'étant 10x plus grands en taille.

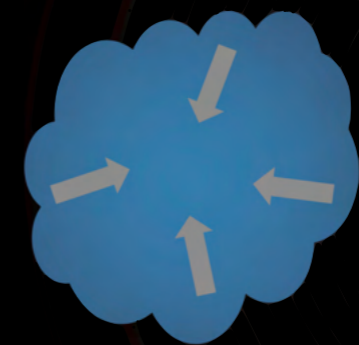
# DÉTECTE-T-ON LES NUAGES MOLÉCULAIRES QUI ONT DONNÉ NAISSANCE AUX CLUMPS À HAUT REDSHIFT?



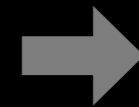
NGC 602

**Les étoiles se forment en amas à partir des nuages moléculaires géants (GMC)**

*R. C. Levy cartoon*



**compression du GMC**



**formation de l'amas d'étoiles**

**GMC typiques proches:**

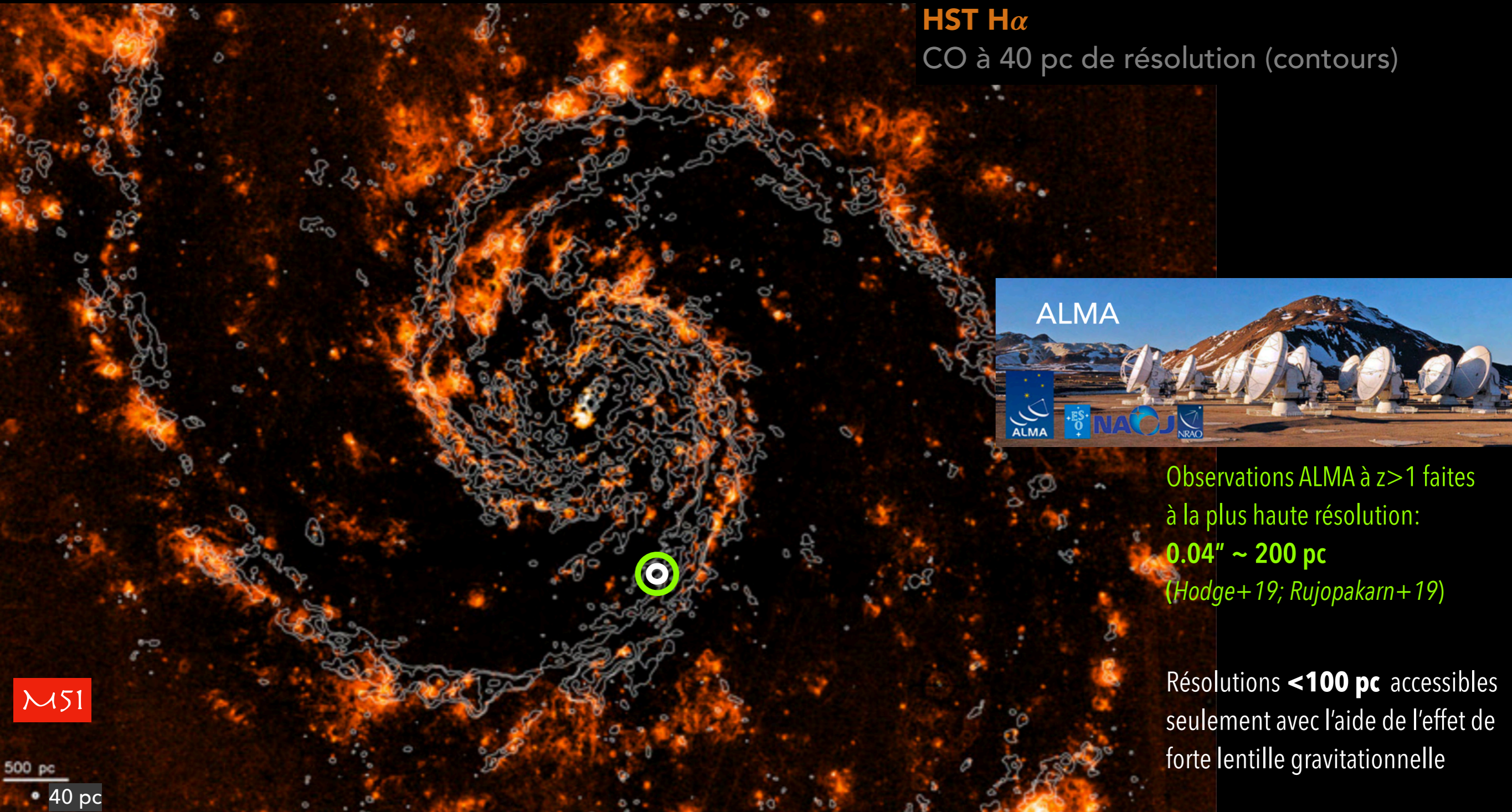
**Masse moléculaire =  $10^4 - 10^7 M_{\odot}$**

**taille = 5 - 100 pc**

*Bolatto+08; Heyer+09;  
Donovan Meyer+13;  
Columbo+14; Corbelli17;  
Sun+18,20*

# DÉTECTE-T-ON LES NUAGES MOLÉCULAIRES QUI ONT DONNÉ NAISSANCE AUX CLUMPS À HAUT REDSHIFT?

LES GMC TYPIQUES PROCHES SONT DIFFICILES À DÉTECTER À  $z > 1$ !



**HST H $\alpha$**

CO à 40 pc de résolution (contours)

ALMA



Observations ALMA à  $z > 1$  faites à la plus haute résolution:

**0.04" ~ 200 pc**

(Hodge+19; Rujopakarn+19)

Résolutions **<100 pc** accessibles seulement avec l'aide de l'effet de forte lentille gravitationnelle

Schinnerer+13

# GALAXIES FORTEMENT MAGNIFIÉES — LABORATOIRES À HAUT $z$

Galaxie *Cosmic Snake* à  $z=1.036$

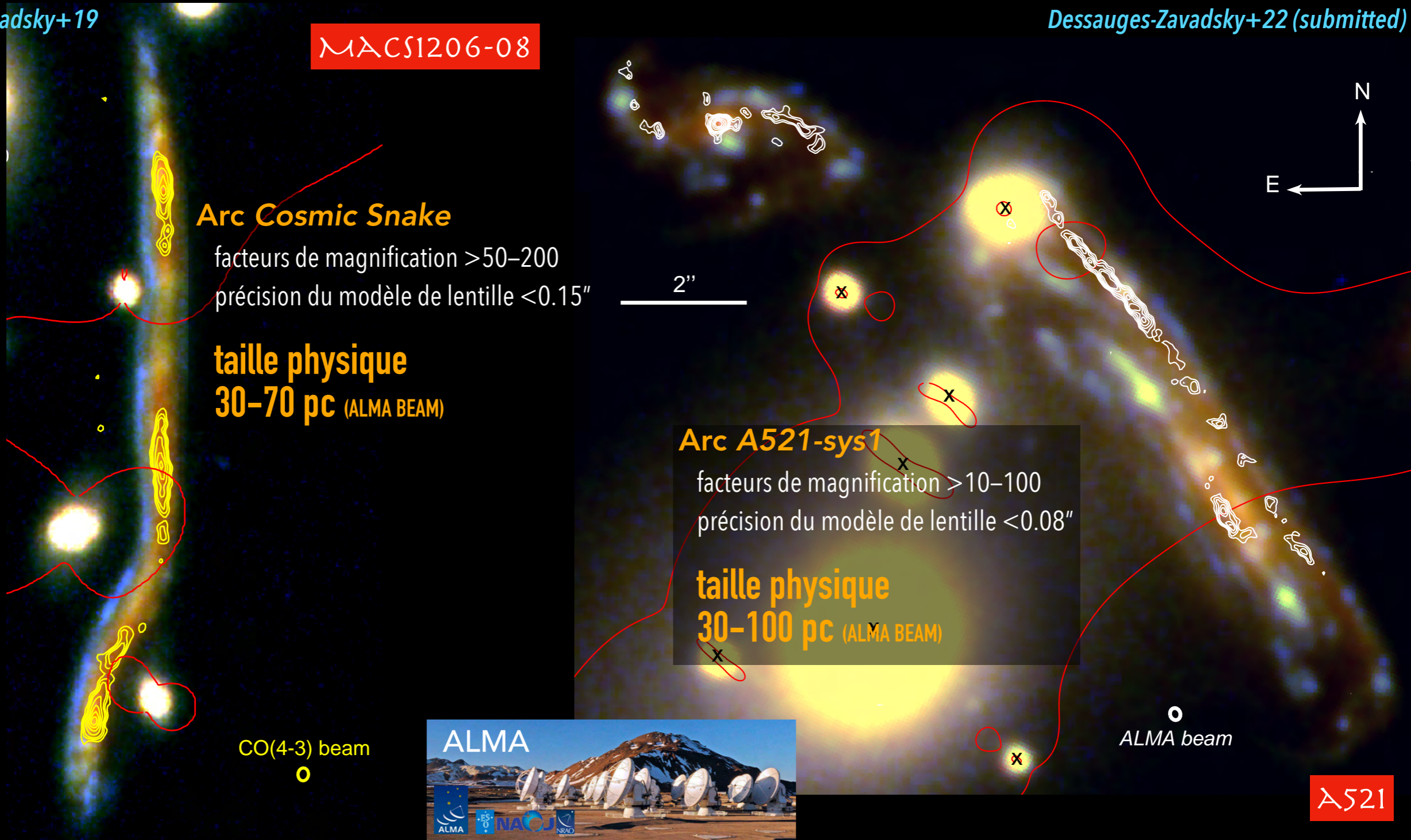
Galaxie *A521-sys1* à  $z=1.043$

galaxies typiques, dominées par la rotation

masse stellaire =  $4 \times 10^{10} M_{\odot}$  – SFR =  $30 M_{\odot}/\text{yr}$  – fraction de gaz moléculaire 25%    masse stellaire =  $7 \times 10^{10} M_{\odot}$  – SFR =  $26 M_{\odot}/\text{yr}$  – fraction de gaz moléculaire 16%

Dessauges-Zavadsky+19

Dessauges-Zavadsky+22 (submitted)



A521

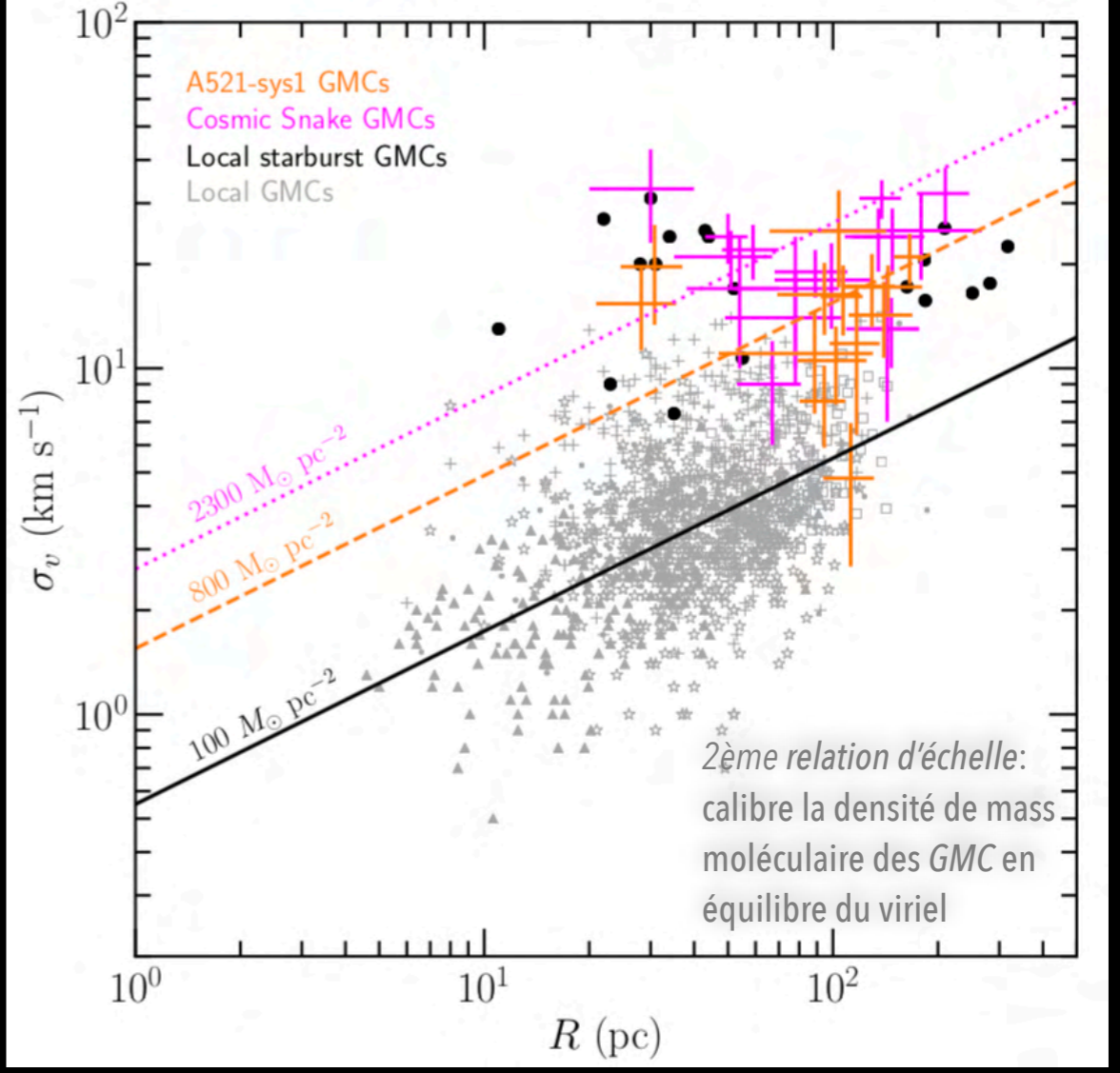
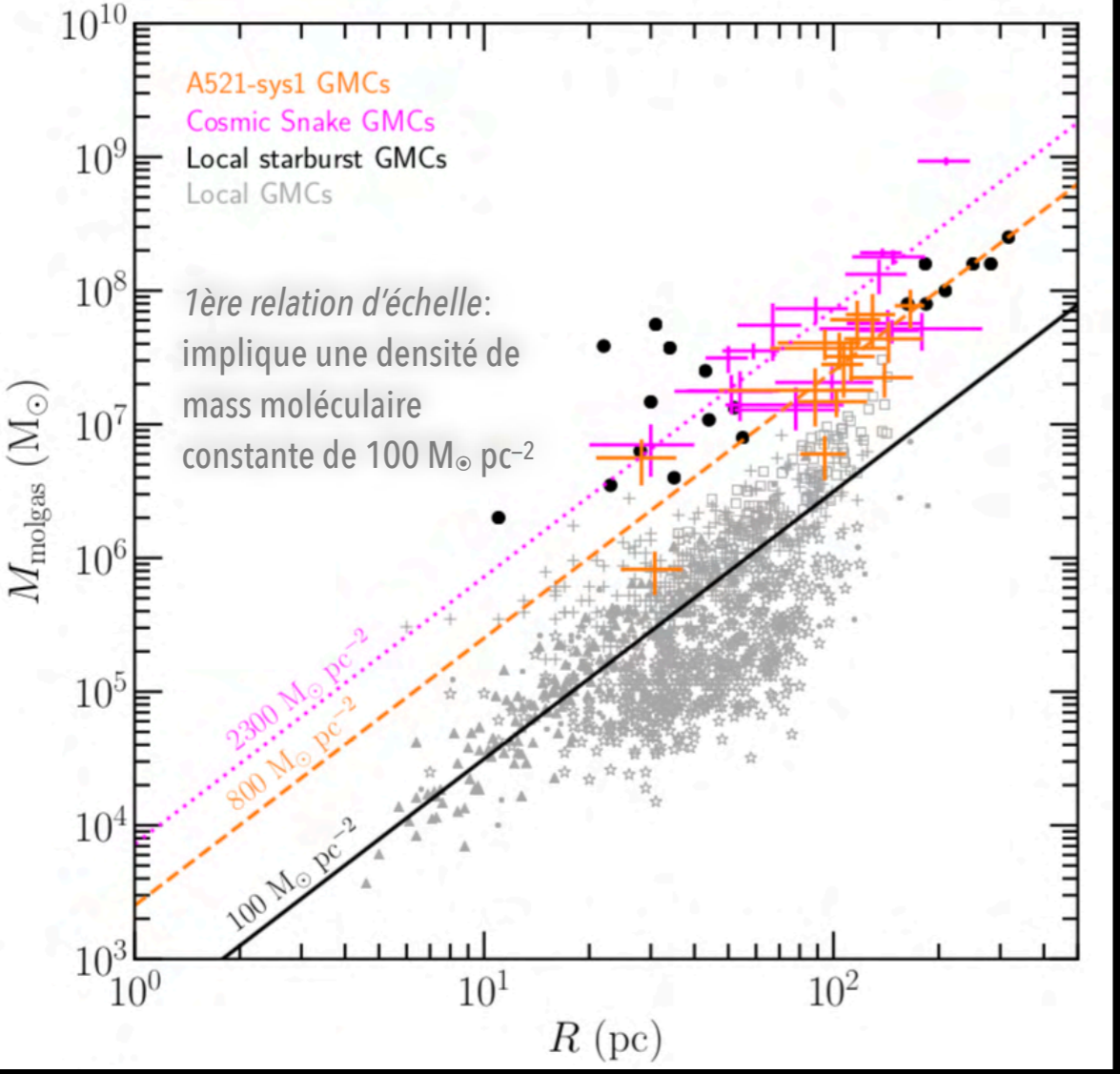
17 GMC détectés avec ALMA en CO(4–3)

14 GMC détectés avec ALMA en CO(4–3)

# PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DES NUAGES MOLÉCULAIRES À HAUT $z$

## RELATIONS D'ÉCHELLE DE LARSON – Référence pour les GMC proches

(e.g., Larson81; Bolatto+08,13; Heyer+09; Donovan Meyer+13; Colombo+14; Corbelli+17)



Dessauges-Zavadsky+19,22

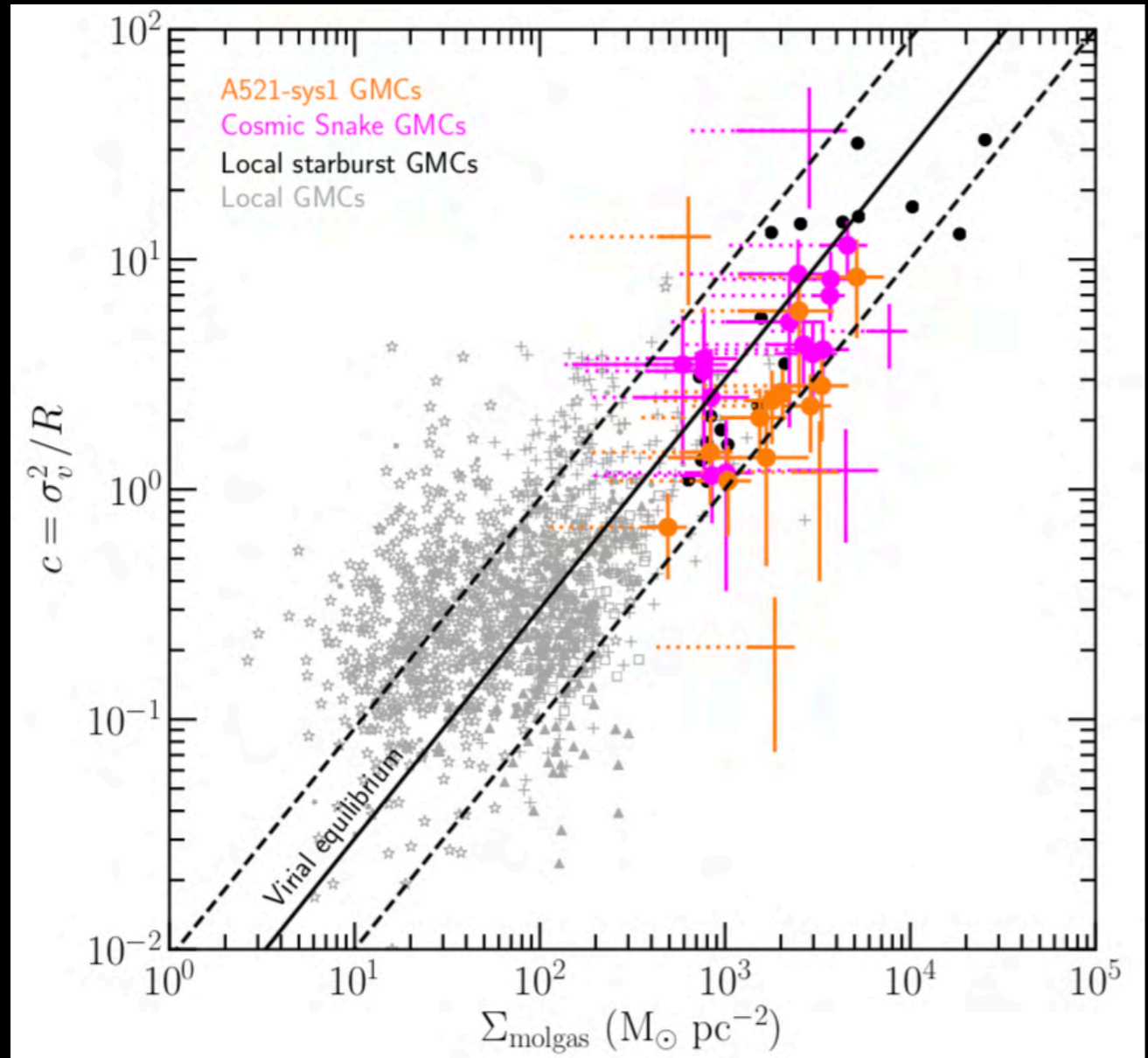
Les GMC à  $z=1$  sont décalés des relations de Larson, car étant différents des GMC proches

- ◆ masses moléculaires plus élevées (d'un facteur 100)
- ◆ densités surfaciques de la masse plus grandes (d'un facteur 10)
- ◆ dispersions des vitesses internes plus larges

mais restant gravitationnellement liés en équilibre du viriel (2 x énergie cinétique = énergie potentielle)

# PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DES NUAGES MOLÉCULAIRES À HAUT $z$

## EST-CE QUE LES GMC À HAUT REDSHIFT SONT EN ÉQUILIBRE DU VIRIEL?



Une manière facile d'évaluer si **les GMC sont en équilibre du viriel** est de tracer leur coefficient  $c$ , taille–dispersion des vitesses, qui suit une relation affine de pente 1 avec la densité surfacique de la masse moléculaire.

*Bolatto+08; Heyer+09; Leroy+15; Sun+18*

### Galaxie Cosmic Snake

14 GMC sur 17 sont gravitationnellement liés

### Galaxie A521

11 GMC sur 14 sont gravitationnellement liés

indépendamment du facteur de conversion CO-to-H<sub>2</sub>

$\alpha_{CO} = 1$  — galaxies à sursauts de formation stellaire

$\alpha_{CO} = 4.36$  — Voie Lactée

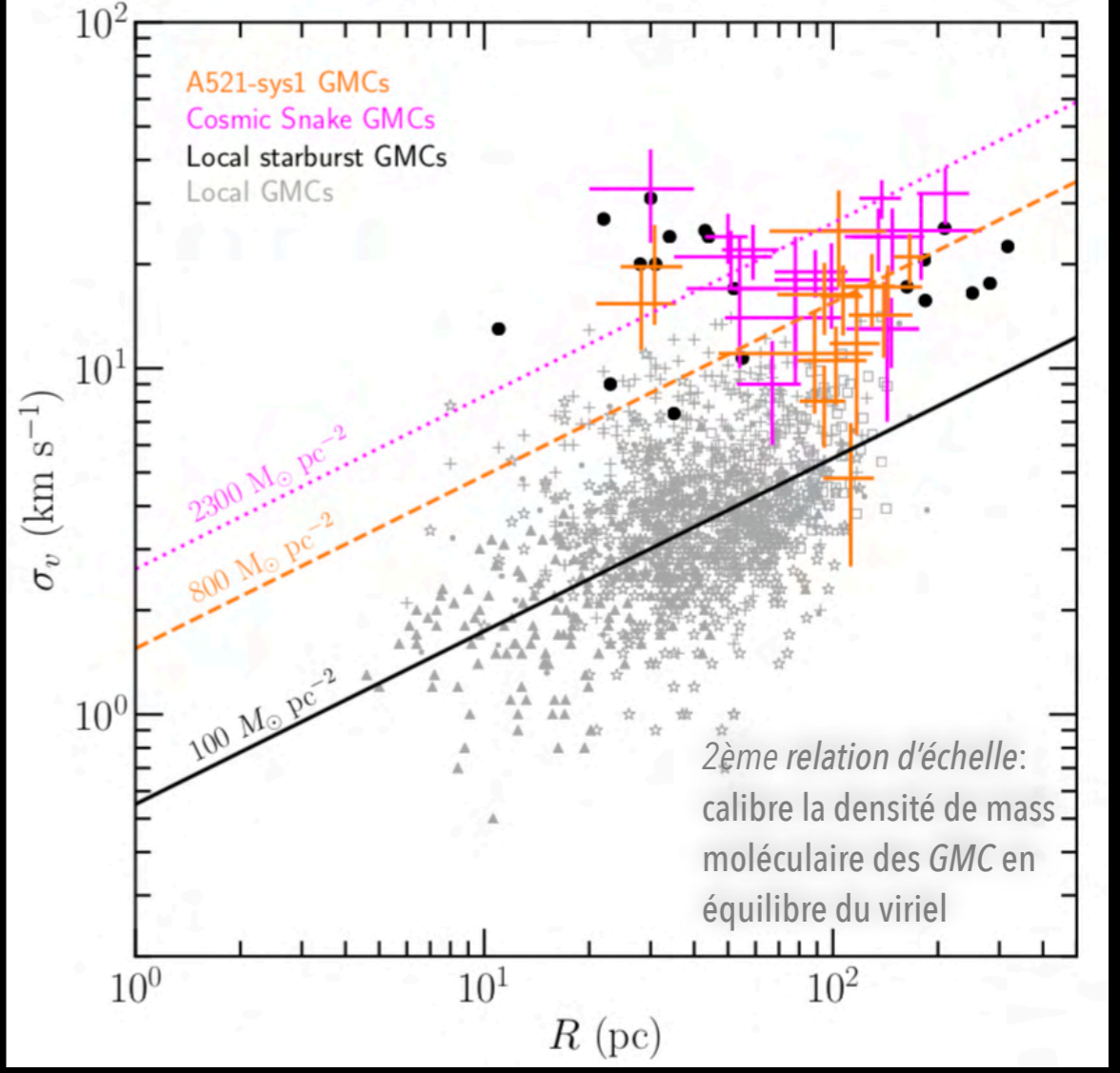
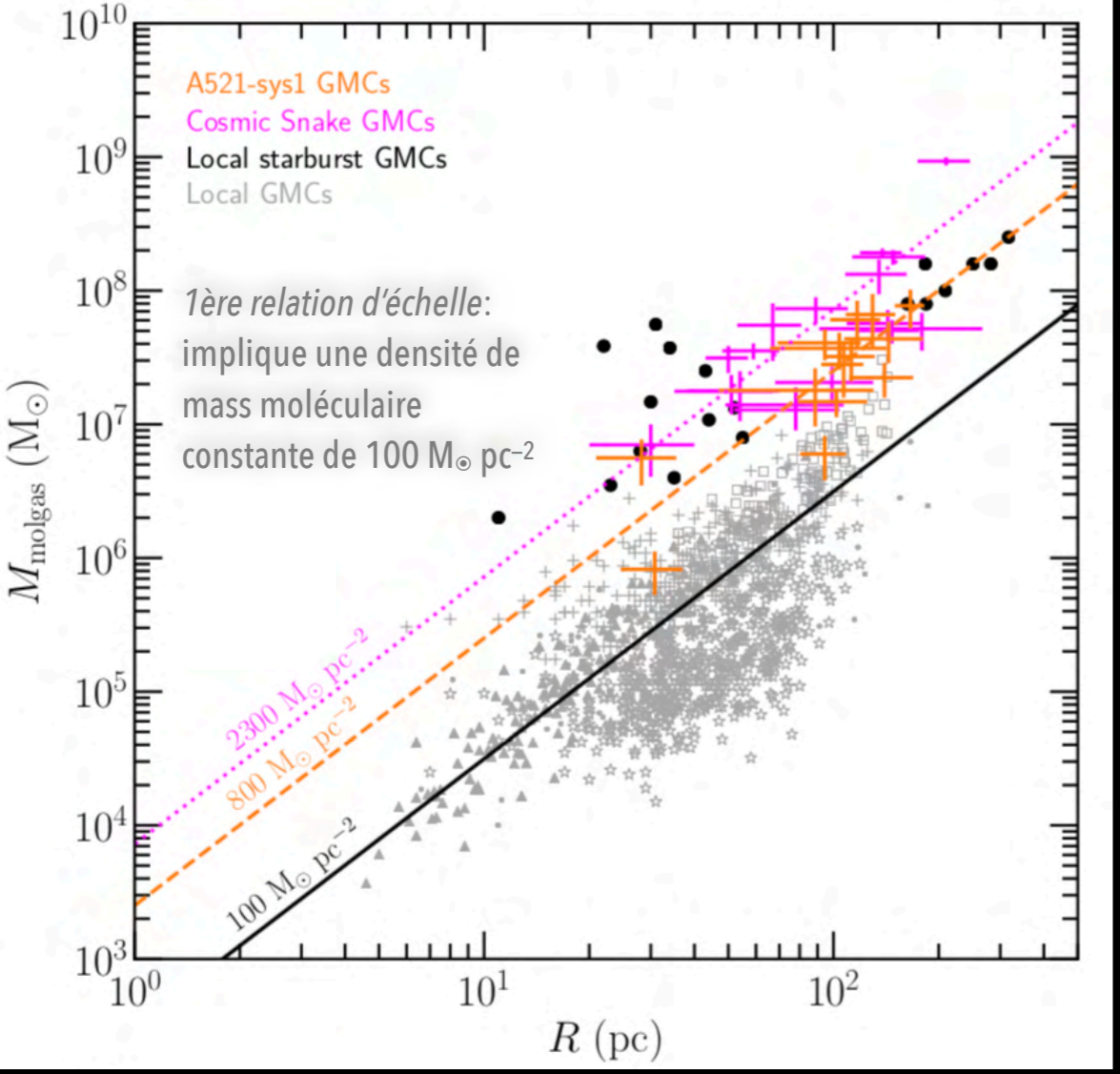
*Dessauges-Zavadsky+19,22*

**Dans une limite de 2 à 3** de la relation de pente 1, les GMC sont considérés **en équilibre du viriel**, étant donné que  $\pm 0.4$  dex est l'erreur typique sur les mesures dans cet espace des paramètres.

# PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DES NUAGES MOLÉCULAIRES À HAUT $z$

## RELATIONS D'ÉCHELLE DE LARSON – Référence pour les GMC proches

(e.g., Larson81; Bolatto+08,13; Heyer+09; Donovan Meyer+13; Colombo+14; Corbelli+17)



Dessauges-Zavadsky+19,22

Les GMC à  $z=1$  sont décalés des relations de Larson, car étant différents des GMC proches

- ◆ masses moléculaires plus élevées (d'un facteur 100)
- ◆ densités surfaciques de la masse plus grandes (d'un facteur 10)
- ◆ dispersions des vitesses internes plus larges

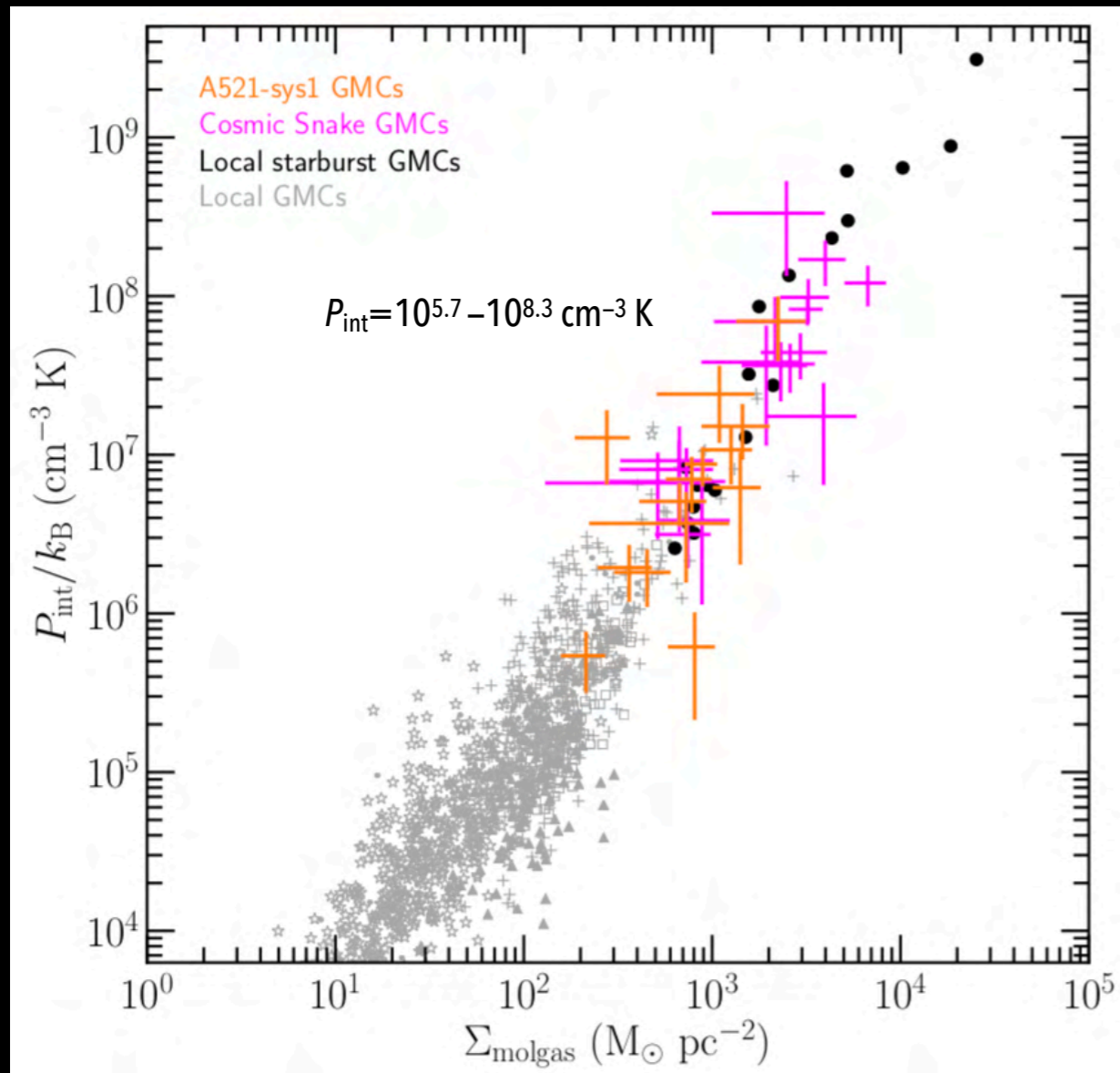
mais restant gravitationnellement liés en équilibre du viriel (2 x énergie cinétique = énergie potentielle)

Leurs propriétés ressemblent à celles des GMC que l'on trouve dans les galaxies proches en collision et à sursauts de formation stellaire (Wei+12; Leroy+15; Sun+18,20)

→ L'environnement ambiant des galaxies affecte les propriétés physiques des GMC.



# L'ENVIRONNEMENT CONDITIONNE LES PROPRIÉTÉS DES GMC



Dessauges-Zavadsky+19,22

Les dispersion des vitesses internes mesurées pour les GMC à  $z=1$  reflètent **une pression cinétique interne élevée**:

$$\frac{P_{\text{int}}}{k} = \rho_g \sigma_v^2$$

en accord avec la pression hydrostatique 1000x plus forte mesurée dans les disques galactiques à  $z=1$  ( $\sim 10^{7.2-7.7} \text{ cm}^{-3} \text{K}$ ) par rapport au disque de la Voie Lactée. (Elmegreen 89)

À leur formation, les GMC ajustent leurs propriétés (turbulence, pression, densité) aux conditions ambiantes du milieu interstellaire (propre à chaque galaxie) afin d'assurer leur survie.

See also Hughes+13; Faesi+18; Schruba+19; Sun+18,20

→ Les conditions ambiantes du milieu interstellaire des galaxies à haut  $z$  expliquent pourquoi les GMC dans ces galaxies sont si massifs et si denses et, par conséquent, pourquoi ils forment des amas d'étoiles (*clumps*) massifs.

# EFFICACITÉ DE FORMATION STELLAIRE DES GMC À HAUT $z$

La formation stellaire à l'échelle des nuages moléculaires est-elle invariante au cours du temps cosmique?

## GMC et clumps d'étoiles à $z=1$

identifiés à des résolutions spatiales comparables

Efficacité de formation stellaire

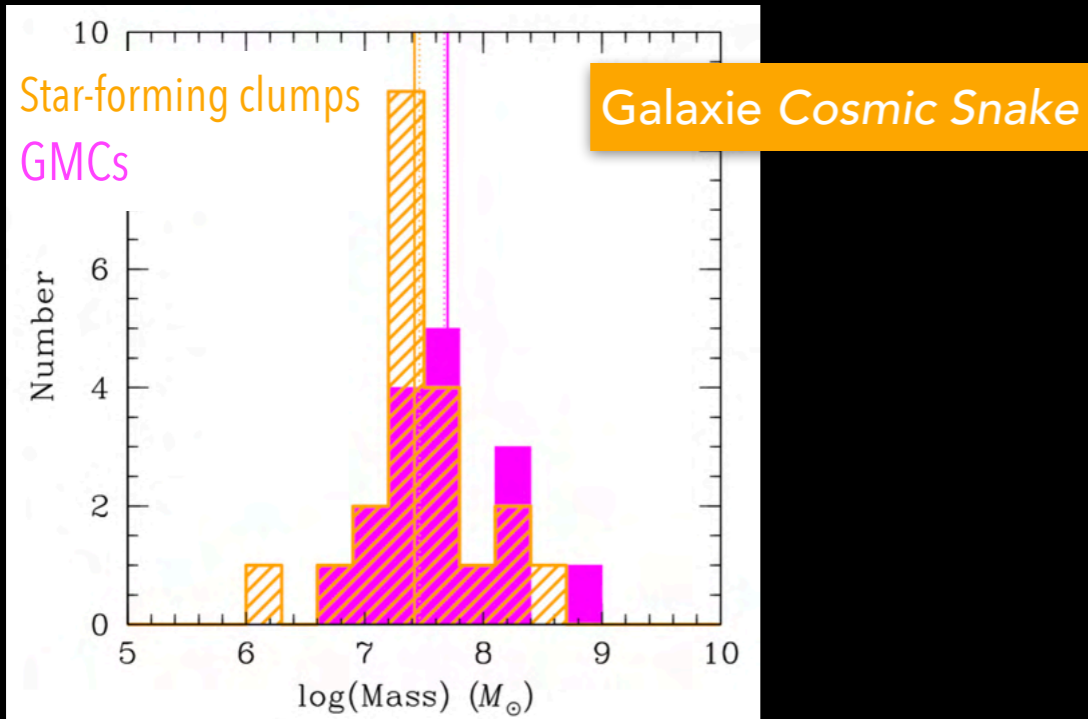
$$\epsilon_{\text{obs}} = \frac{M_{\star, \text{young}}}{M_{\star, \text{young}} + M_{\text{molecular}}} \quad \text{Evans+09}$$

### Hypothèse:

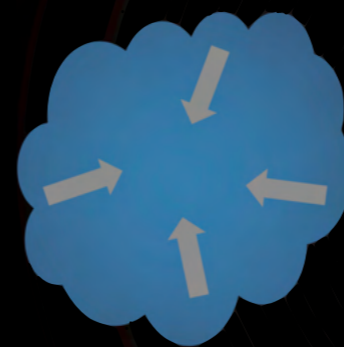
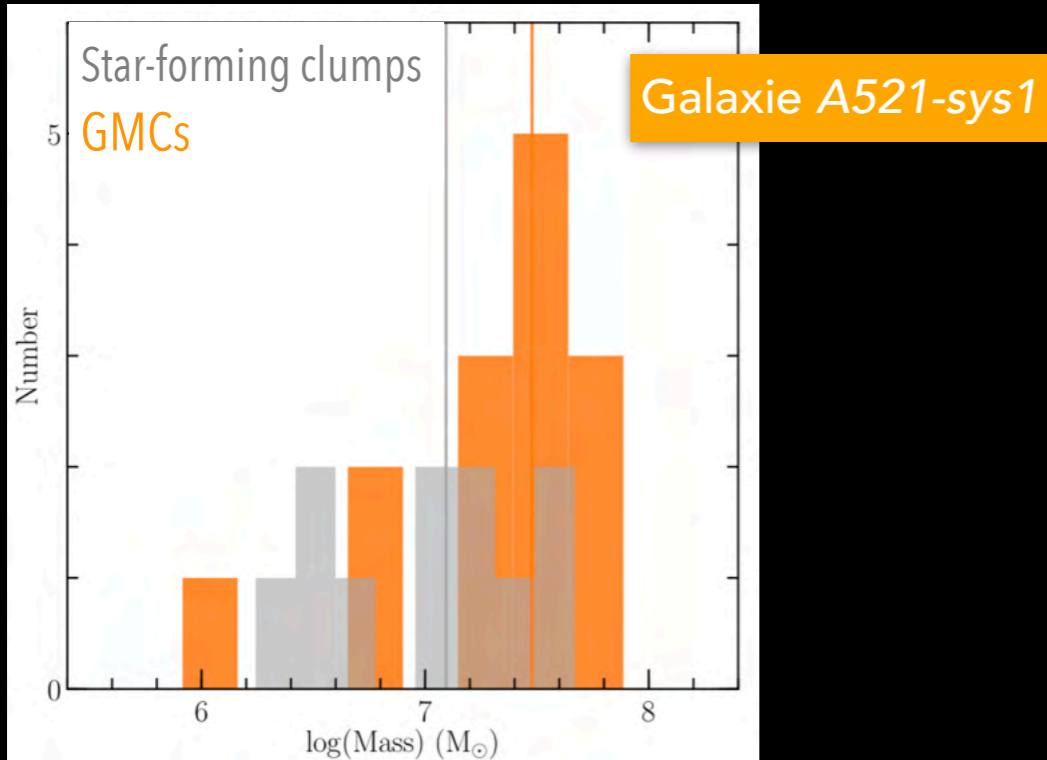
les GMC identifiés sont représentatifs des nuages moléculaires où se sont formés les *clumps* brillants dans l'UV que l'on observe

→ les GMC à  $z=1$  ont une efficacité de formation stellaire de  $\sim 30\%$  (valeurs pour les GMC des galaxies proches  $< 6\%$ )

Dessauges-Zavadsky+19

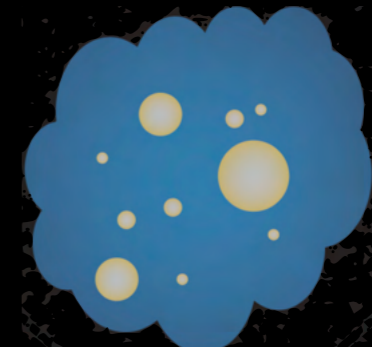


Dessauges-Zavadsky+22



**GMC hautement supersonique**

Nombre de Mach 10x plus élevé que pour les GMC proches



Une turbulence supersonique accrue dans le GMC implique-t-elle **une plus grande efficacité de formation d'amas d'étoiles?**

McKee & Ostriker+07; Brunt+09

# EFFICACITÉ DE FORMATION STELLAIRE DES GMC À HAUT z

La formation stellaire à l'échelle des nuages moléculaires est-elle invariante au cours du temps cosmique?

## GMC et clumps d'étoiles à z=1

identifiés à des résolutions spatiales comparables

## Efficacité de formation stellaire

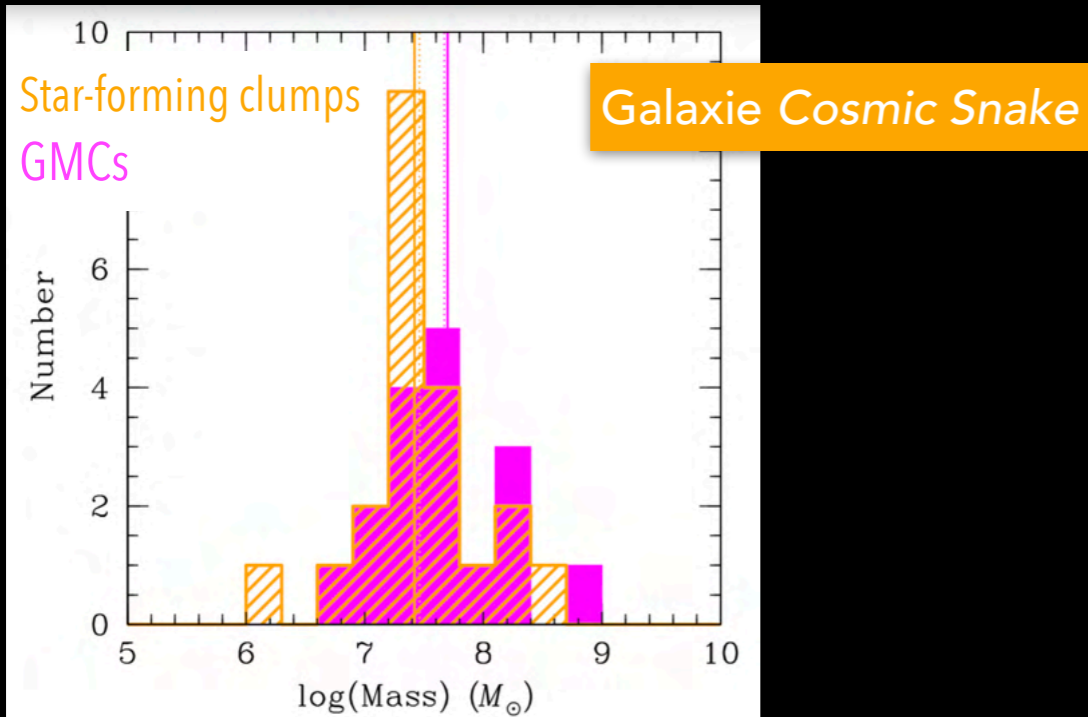
$$\epsilon_{\text{obs}} = \frac{M_{\star, \text{young}}}{M_{\star, \text{young}} + M_{\text{molecular}}} \quad \text{Evans+09}$$

## Hypothèse:

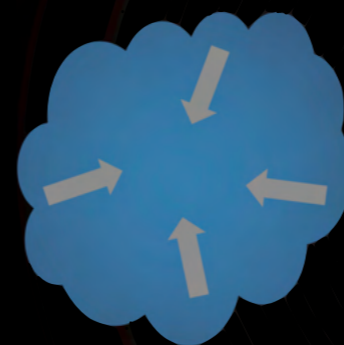
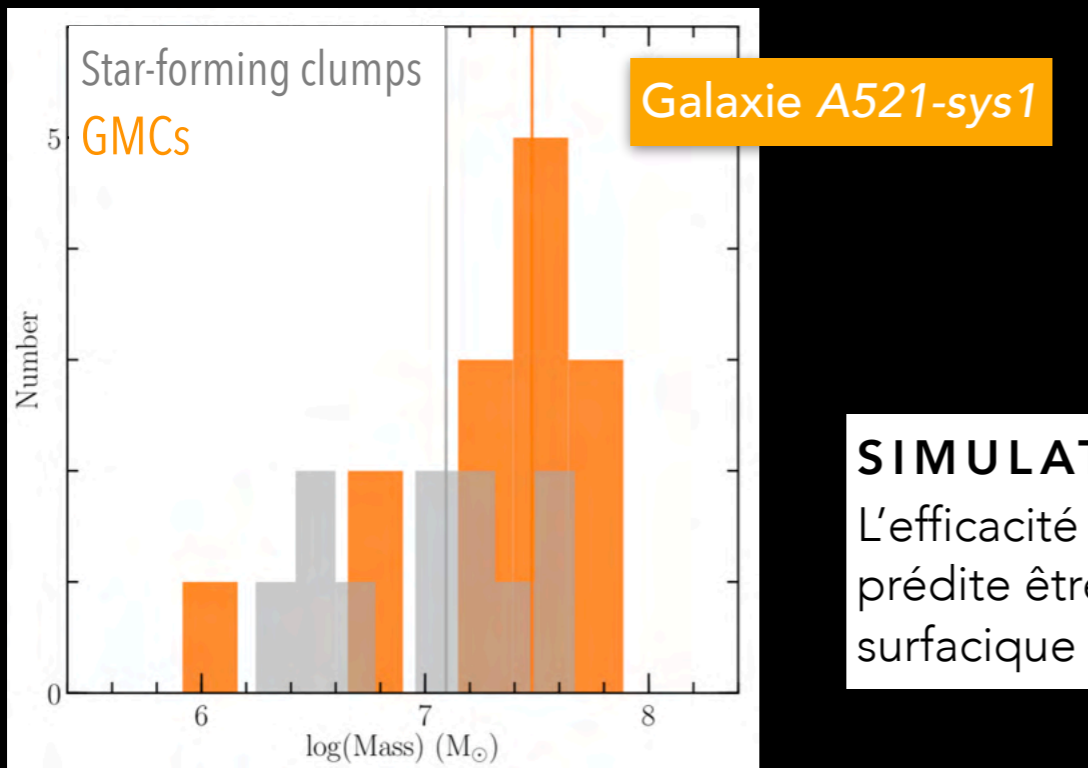
les GMC identifiés sont représentatifs des nuages moléculaires où se sont formés les clumps brillants dans l'UV que l'on observe

→ les GMC à z=1 ont une efficacité de formation stellaire de ~30% (valeurs pour les GMC des galaxies proches <6%)

Dessauges-Zavadsky+19

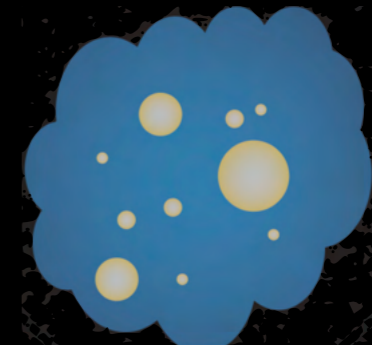


Dessauges-Zavadsky+22



**GMC hautement supersonique**

Nombre de Mach 10x plus élevé que pour les GMC proches

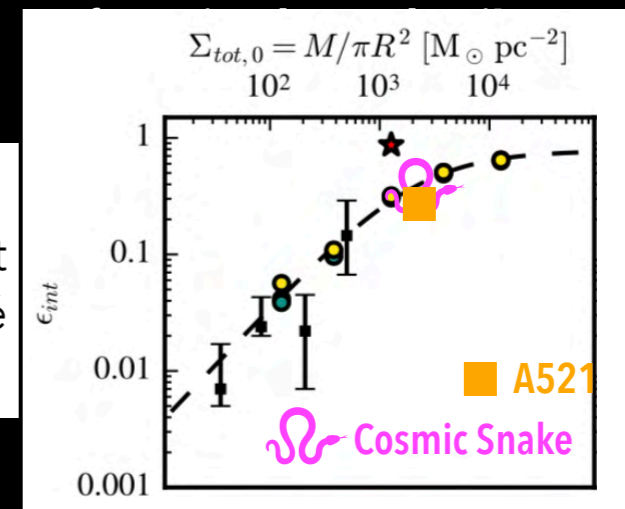


Une turbulence supersonique accrue dans le GMC implique-t-elle **une plus grande efficacité de**

McKee & Ostriker+07; Brunt+09

## SIMULATIONS NUMÉRIQUES

L'efficacité de formation stellaire est prédite être proportionnelle à la densité surfacique de la masse moléculaire.



Grudic+18,21

# EFFICACITÉ DE FORMATION STELLAIRE DES GMC À HAUT $z$

La formation stellaire à l'échelle des nuages moléculaires est-elle invariante au cours du temps cosmique?

## GMC et clumps d'étoiles à $z=1$

identifiés à des résolutions spatiales comparables

## Efficacité de formation stellaire

$$\epsilon_{\text{obs}} = \frac{M_{\star, \text{young}}}{M_{\star, \text{young}} + M_{\text{molecular}}} \quad \text{Evans+09}$$

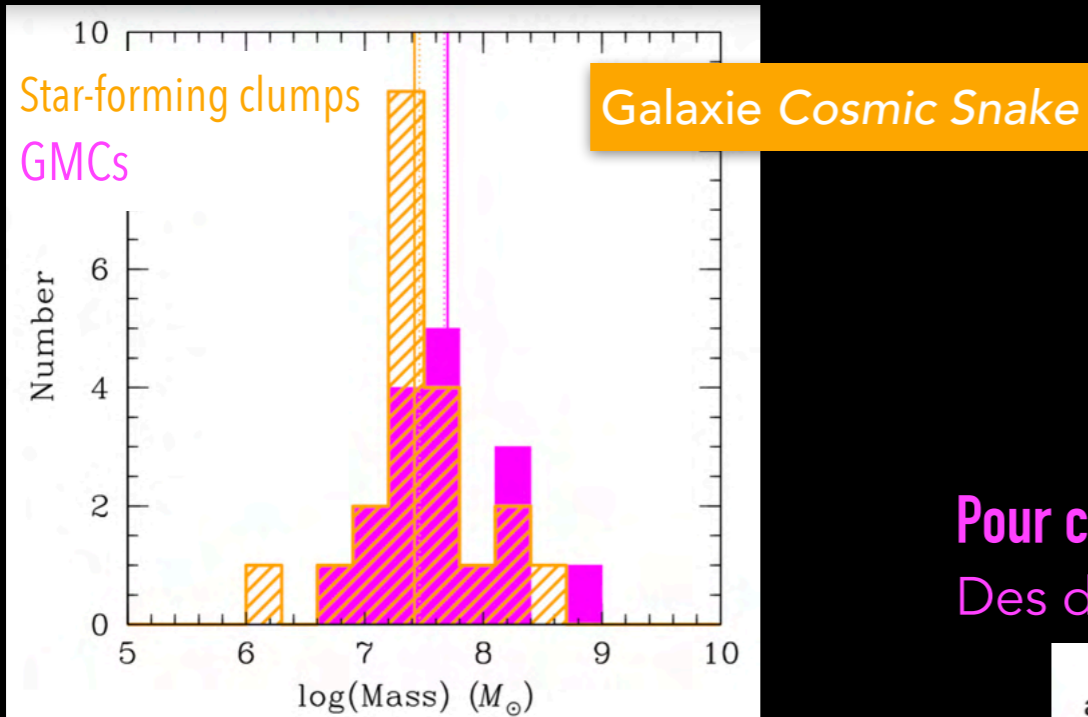
## Hypothèse:

les GMC identifiés sont représentatifs des nuages moléculaires où se sont formés les clumps brillants dans l'UV que l'on observe

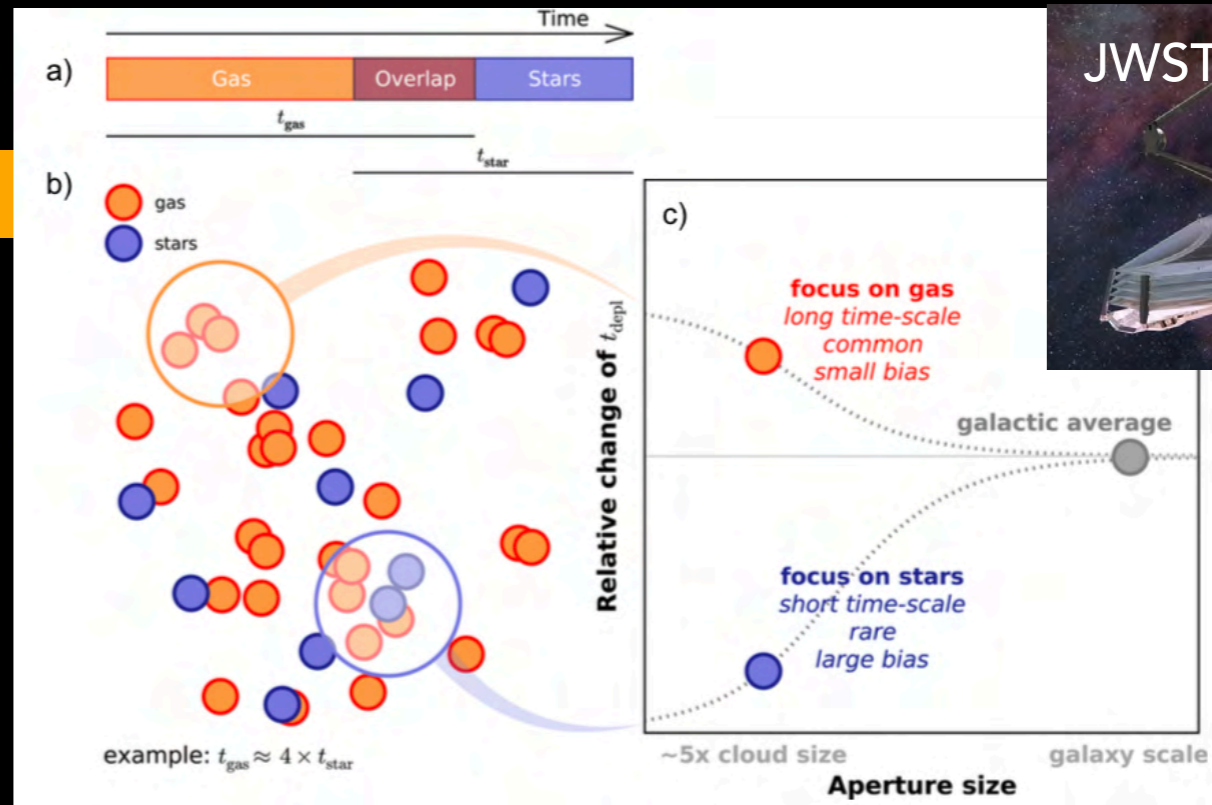
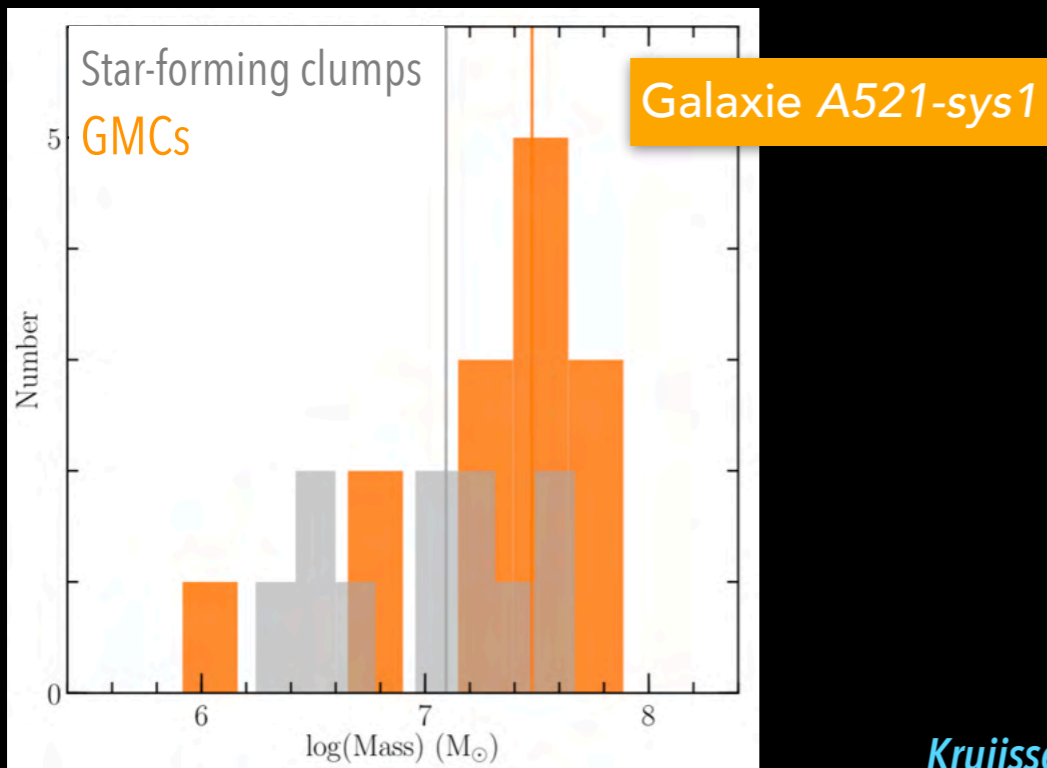
→ les GMC à  $z=1$  ont une efficacité de formation stellaire de  $\sim 30\%$  (valeurs pour les GMC des galaxies proches  $< 6\%$ )

Pour confirmer la grande efficacité de formation stellaire dans les GMC à  $z=1$ : Des données JWST H $\alpha$  pour le Cosmic Snake sont en route...

Dessauges-Zavadsky+19



Dessauges-Zavadsky+22



# POURQUOI L'ÉTUDE DES *CLUMPS* EST-ELLE IMPORTANTE?

## 1) Pour déterminer comment les galaxies ont assemblé leur masse (via des collisions entre galaxies ou un processus séculaire)

Les *clumps* sont-ils des galaxies satellites accrétées suite à un événement de collision entre galaxies? Ou sont-ils formés 'in situ' dans les galaxies hôtes?

- Les *clumps* sont formés 'in situ' dans les galaxies hôtes, et supportent donc le scénario d'évolution séculaire.
- Les *clumps* sont des amas d'étoiles géants avec des masses stellaires 10-100x plus élevées que les amas d'étoiles proches, mais avec des densités surfaciques de masse comparables, bien qu'étant 10x plus grands en taille.

## 2) Pour comprendre le processus de formation stellaire dans les galaxies distantes

Le processus de formation stellaire est-il invariant au cours du temps cosmique à l'échelle des nuages moléculaires?

- Des *GMC* massifs/denses sont détectés à haut  $z$ , dont la formation semble être reliée aux conditions ambiantes du milieu interstellaire des galaxies distantes (forte pression hydrostatique, turbulence, densité).
- Une efficacité de formation stellaire élevée ( $\sim 30\%$ ) est mesurée dans les *GMC* à  $z=1$ , suggérant que le processus de formation stellaire change au cours du temps cosmique et pourrait être à l'origine des SFR élevées des galaxies distantes.