

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.

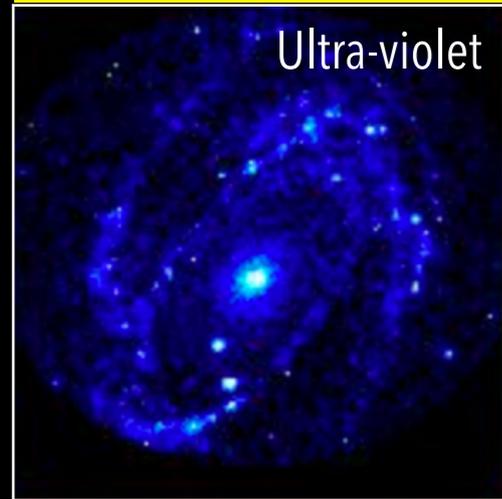


LE ZOO GALACTIQUE

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)

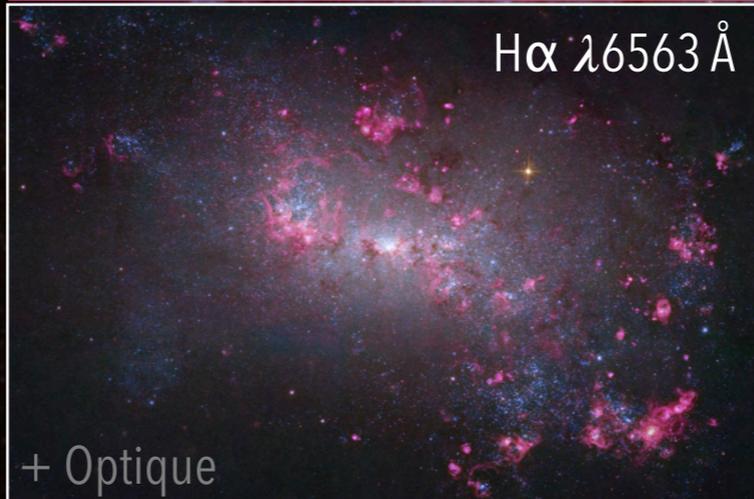


étoiles massives/jeunes

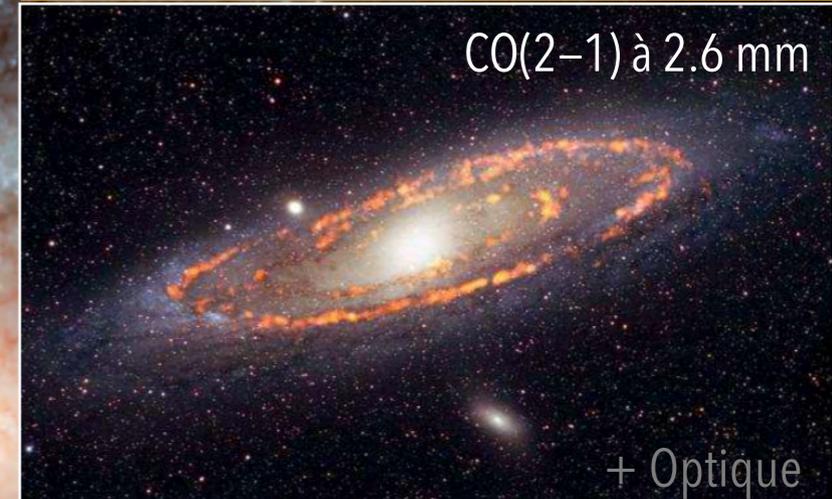


étoiles peu massives/vieilles

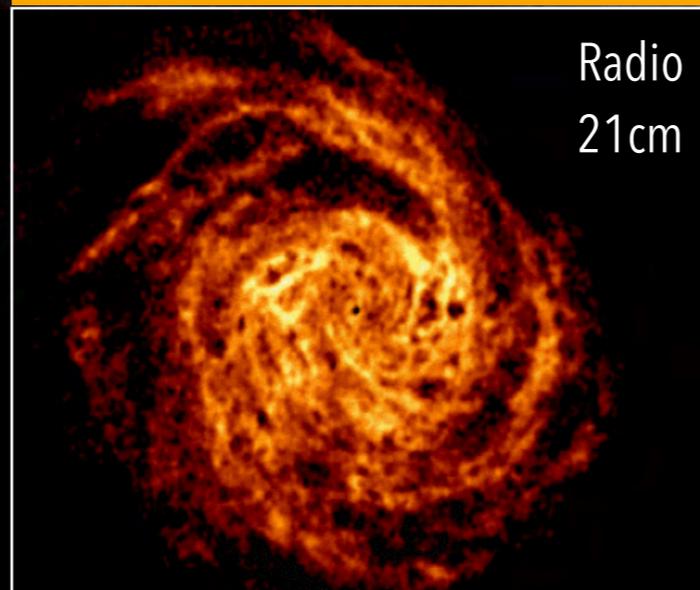
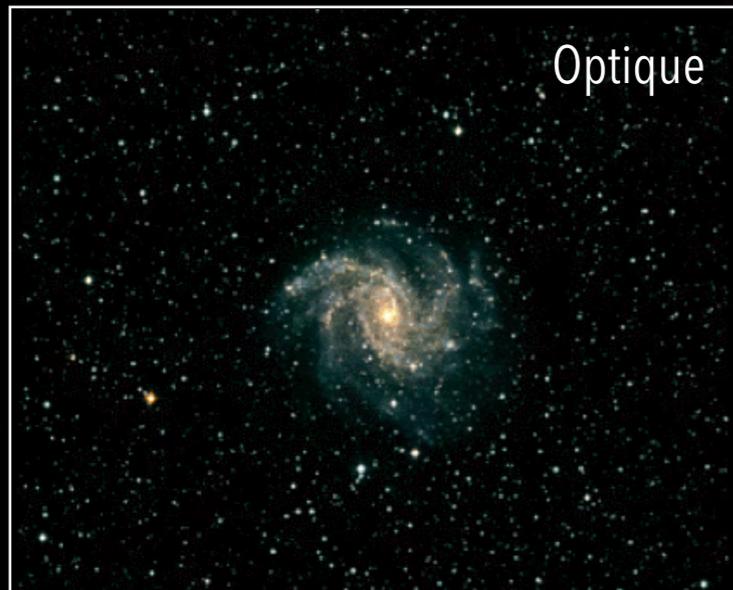
Gaz ionisé (HII)



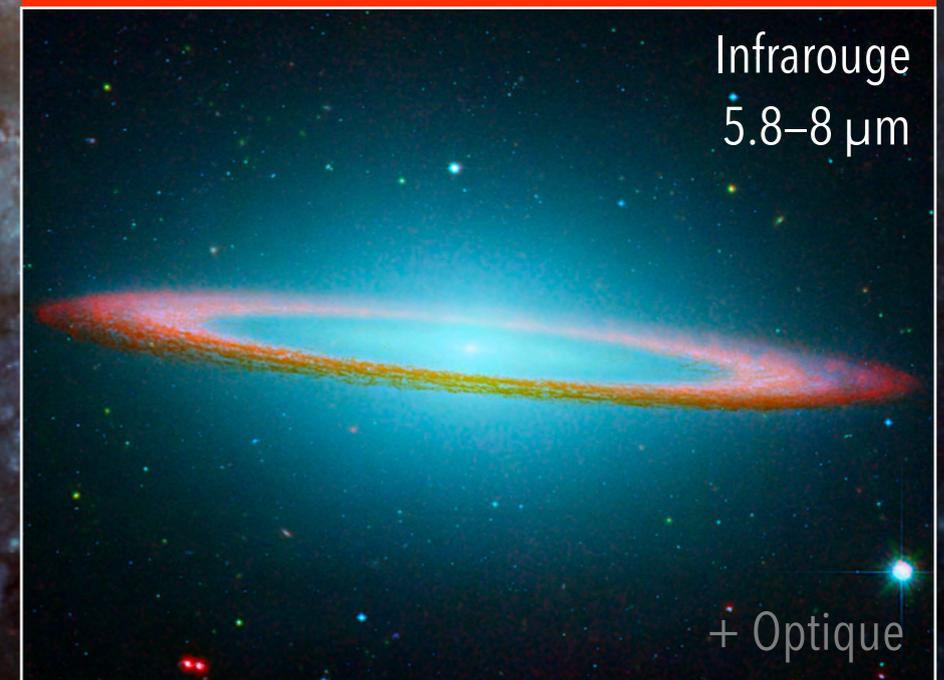
Gaz moléculaire (H₂)



Gaz atomique (HI)



Poussières

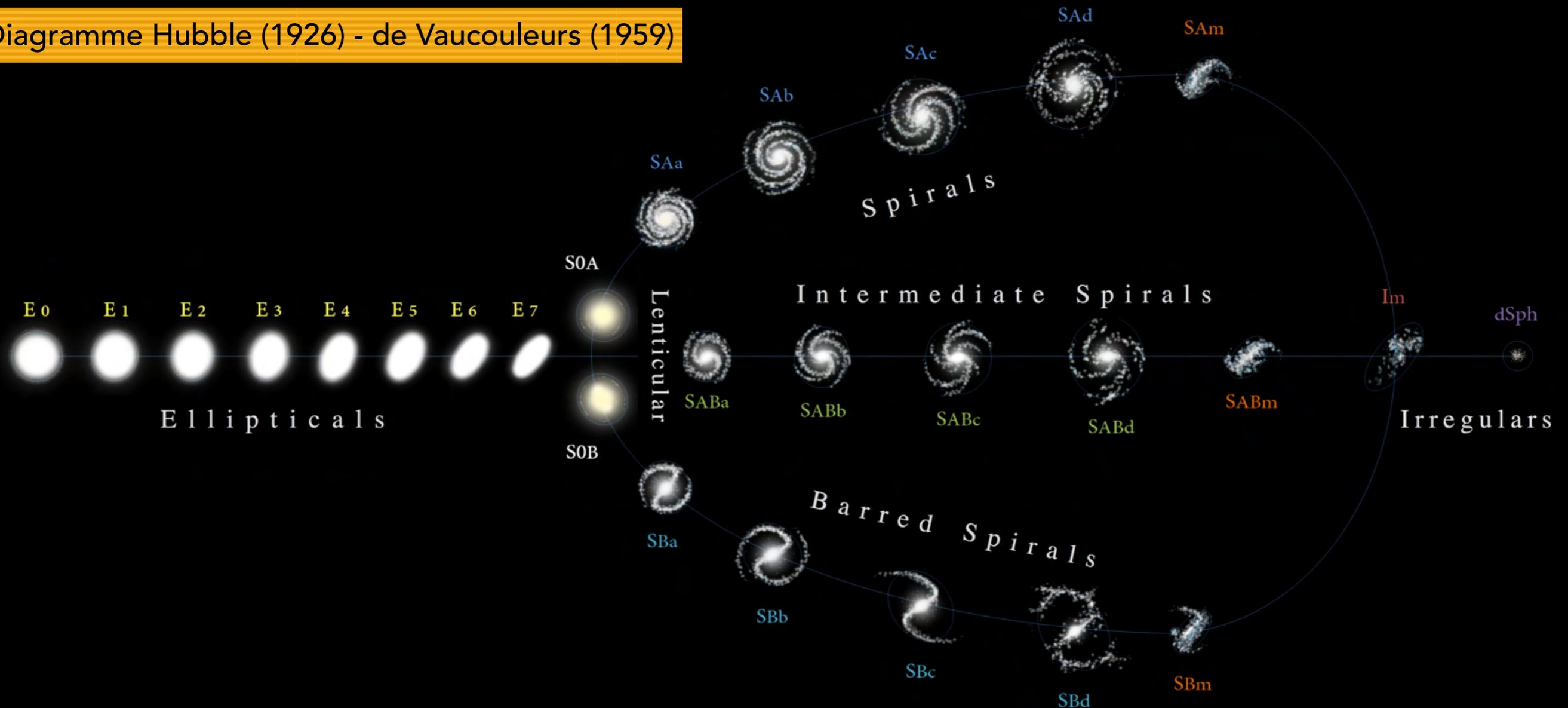


LE ZOO GALACTIQUE

LES GALAXIES SONT DES SYSTÈMES COMPLEXES

LEUR APPARENCE PRÉSENTE UNE VARIÉTÉ DE MORPHOLOGIES

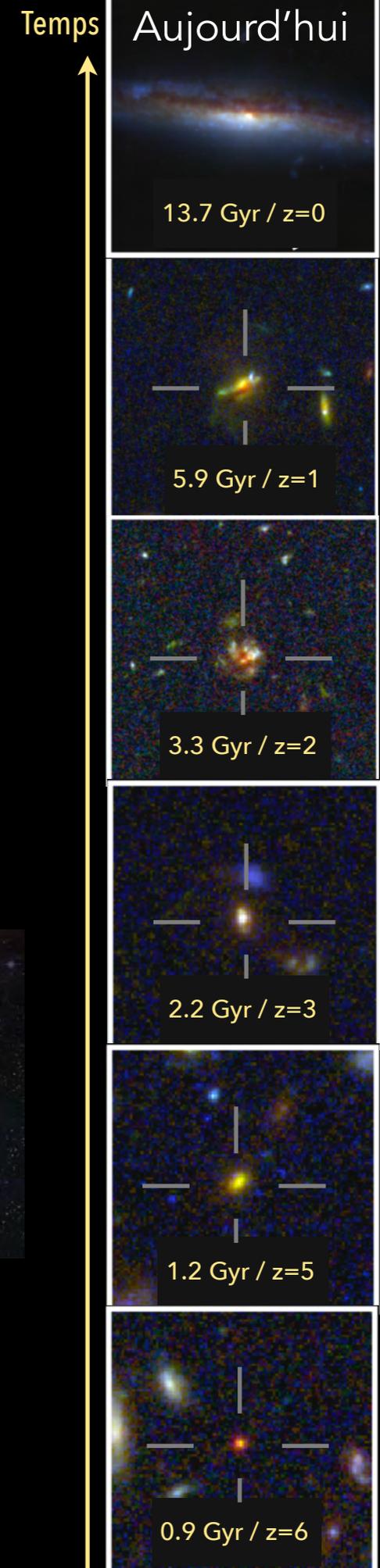
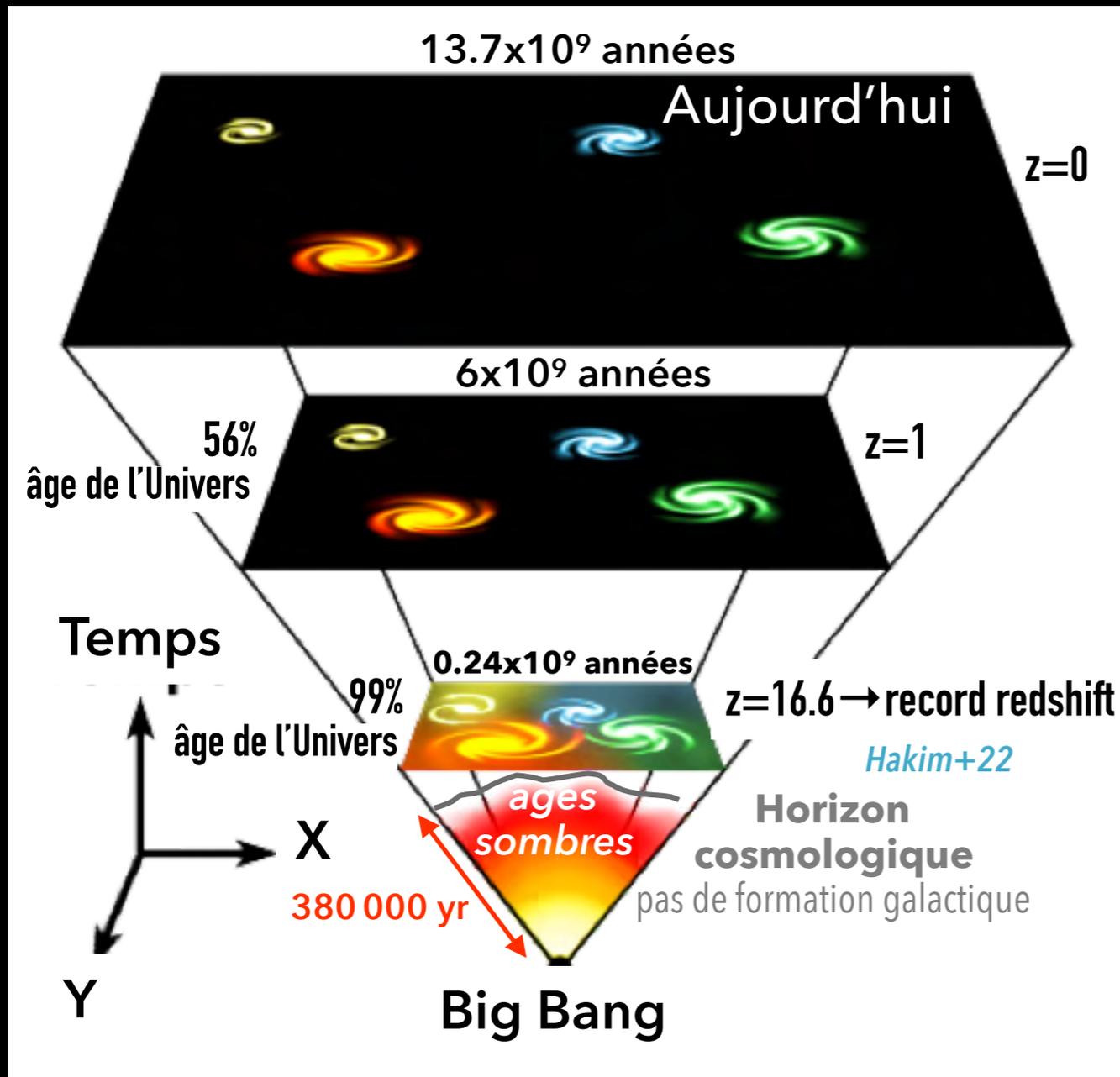
Diagramme Hubble (1926) - de Vaucouleurs (1959)



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**

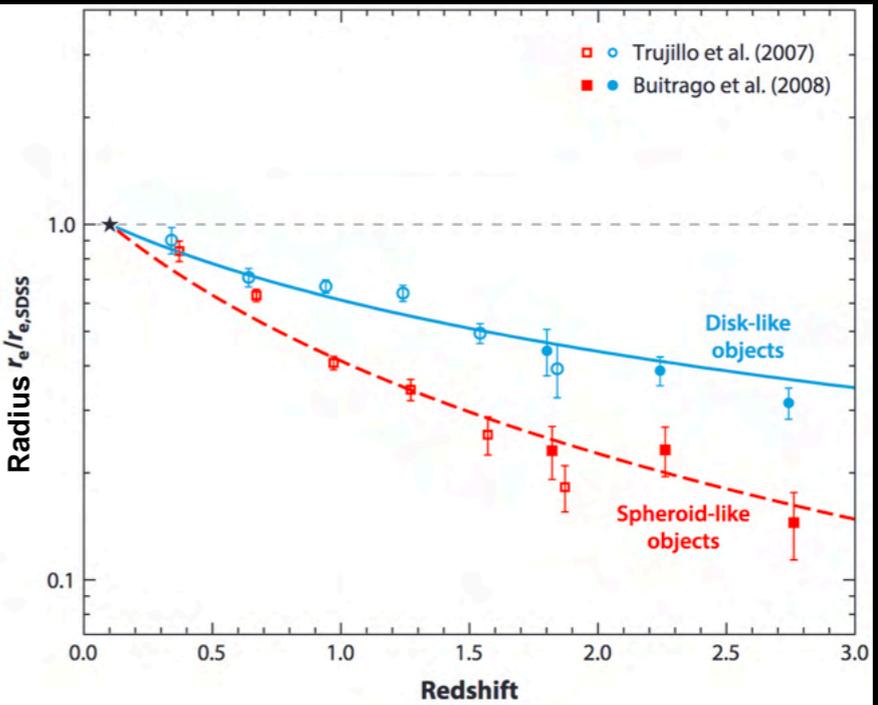
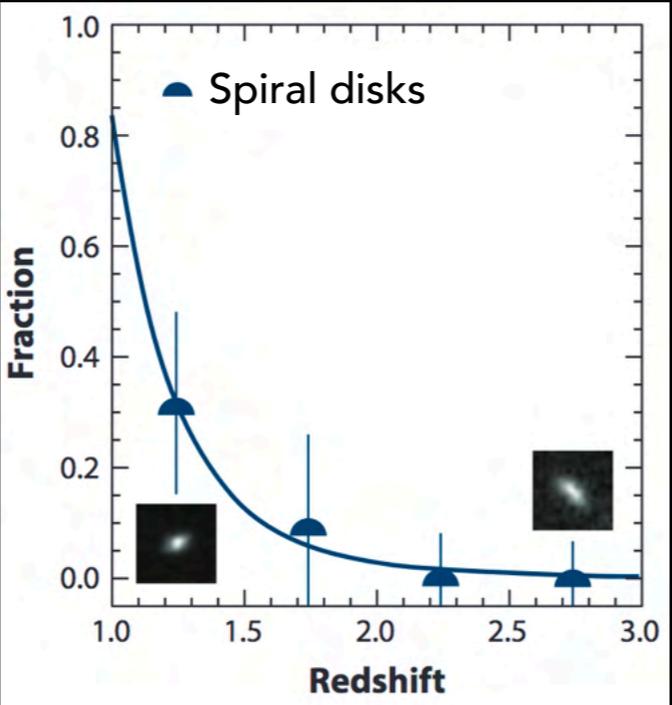
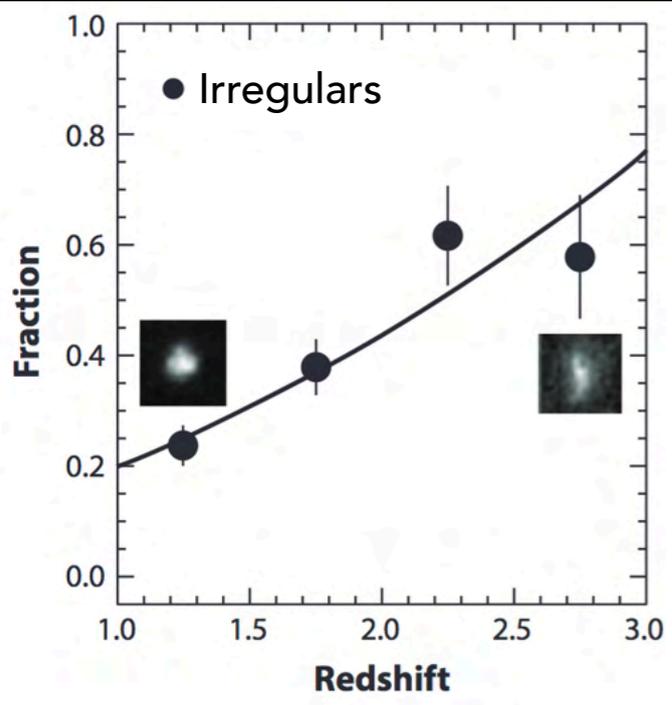
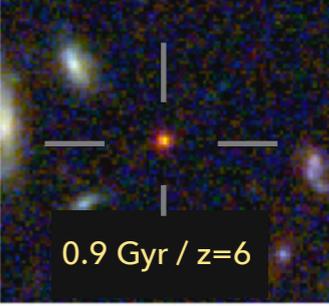
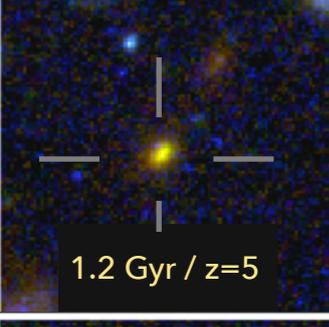
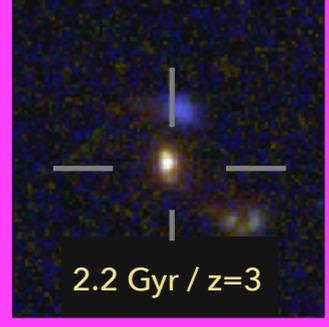
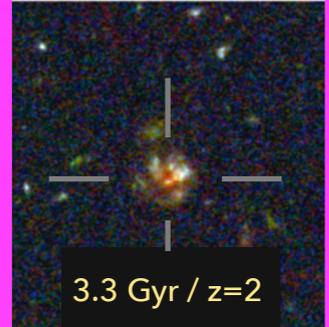
1 Morphologies perturbées

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



Mortlock+13; Conselice+14

Trujillo+07; Buitrago+08

ÉVOLUTION DES GALAXIES

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

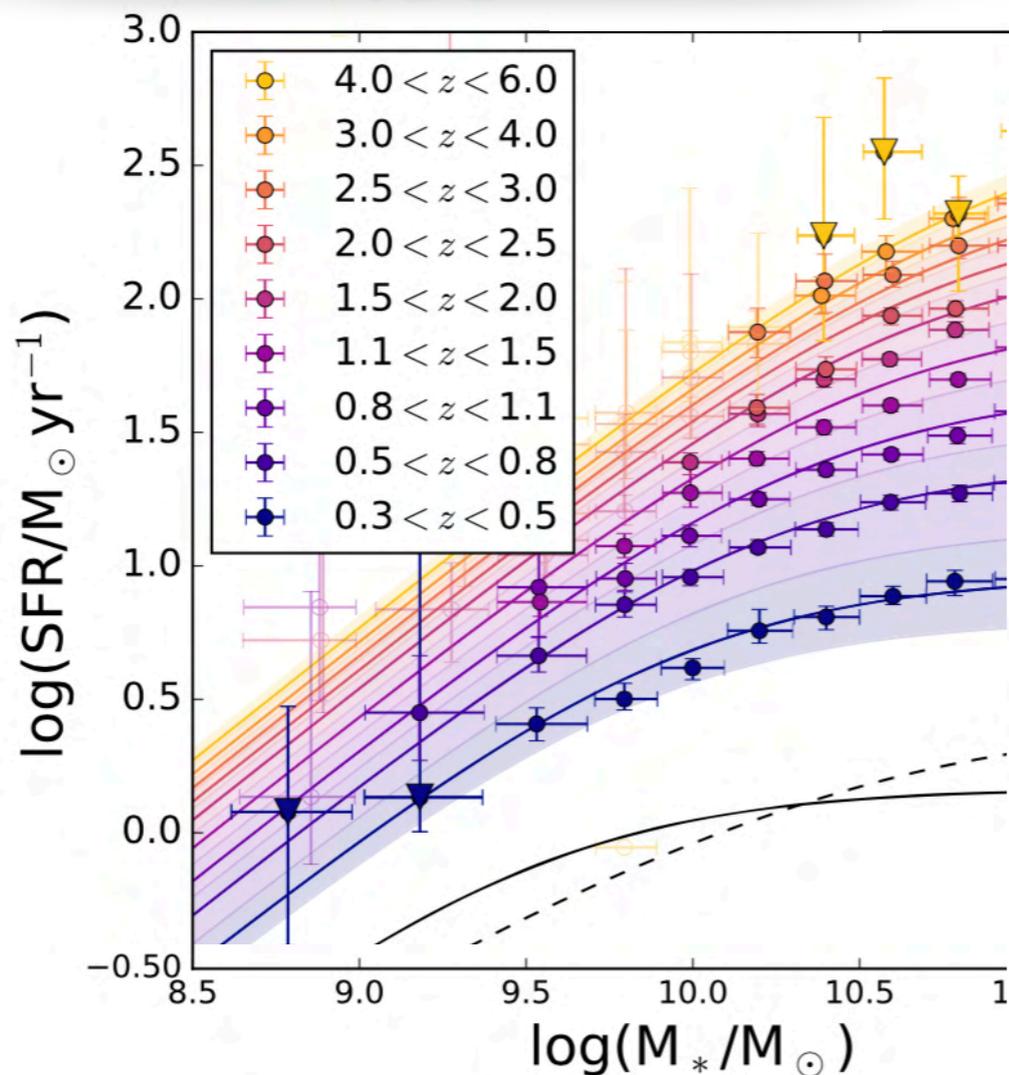
LES GALAXIES À HAUT z ONT **DES PROPRIÉTÉS DIFFÉRENTES**

② Taux de formation stellaire (SFR) élevé

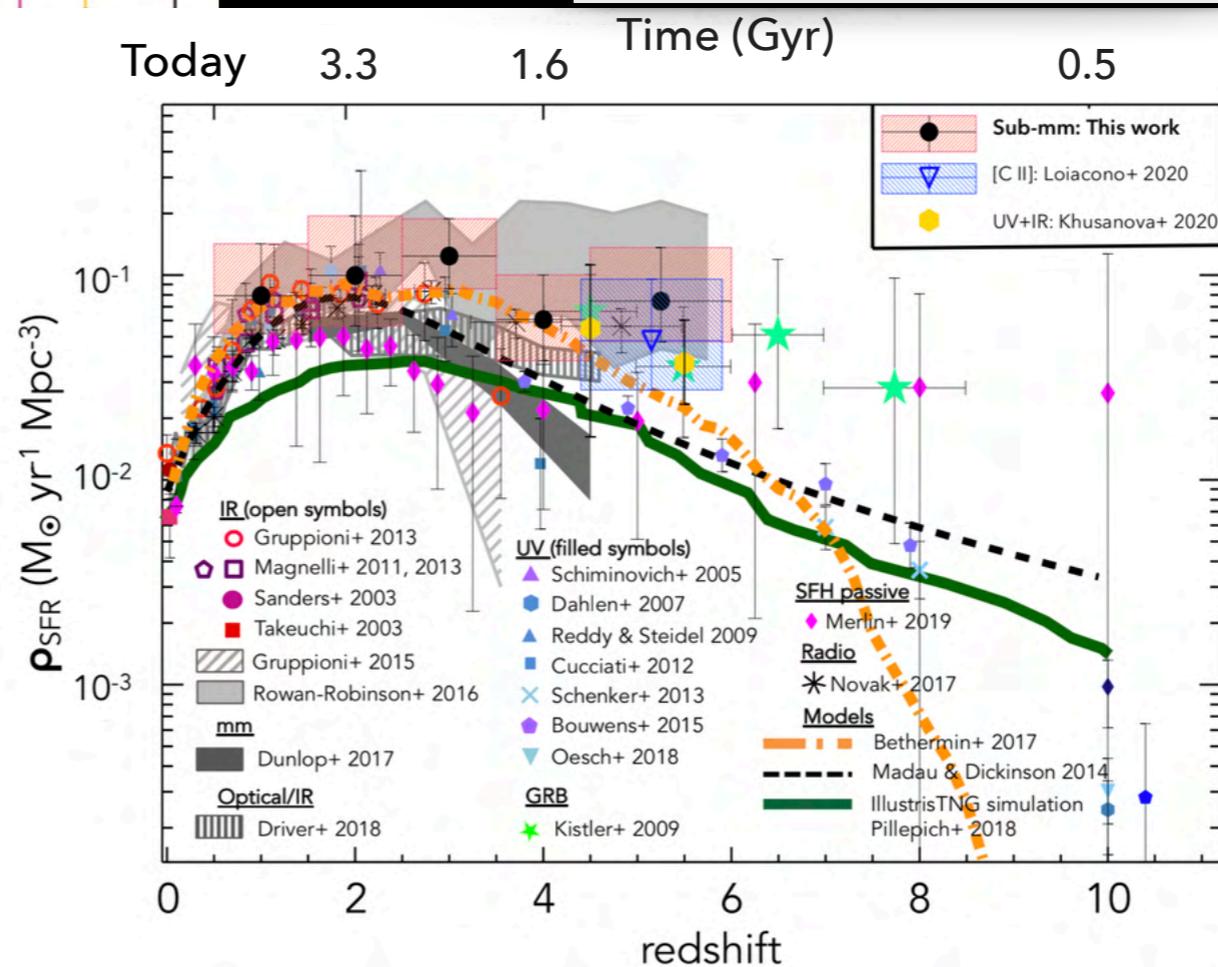
les galaxies à $z \sim 2$ forment plus d'étoiles qu'actuellement

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

Séquence principale des galaxies

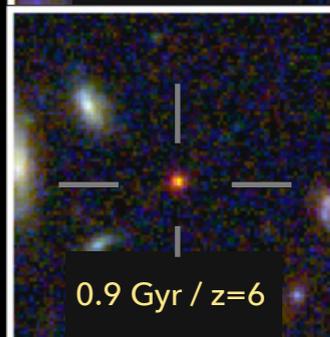
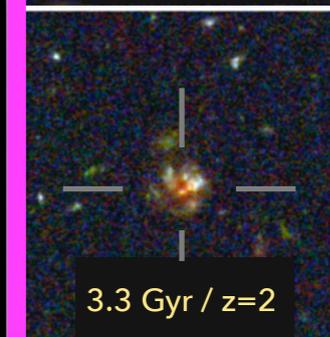


Densité cosmique de SFR



Temps

Aujourd'hui



Credit: NASA, ESA, and Hubble Legacy Team

Leslie+20

Gruppioni/w Dessauges-Zavadsky+20

ÉVOLUTION DES GALAXIES

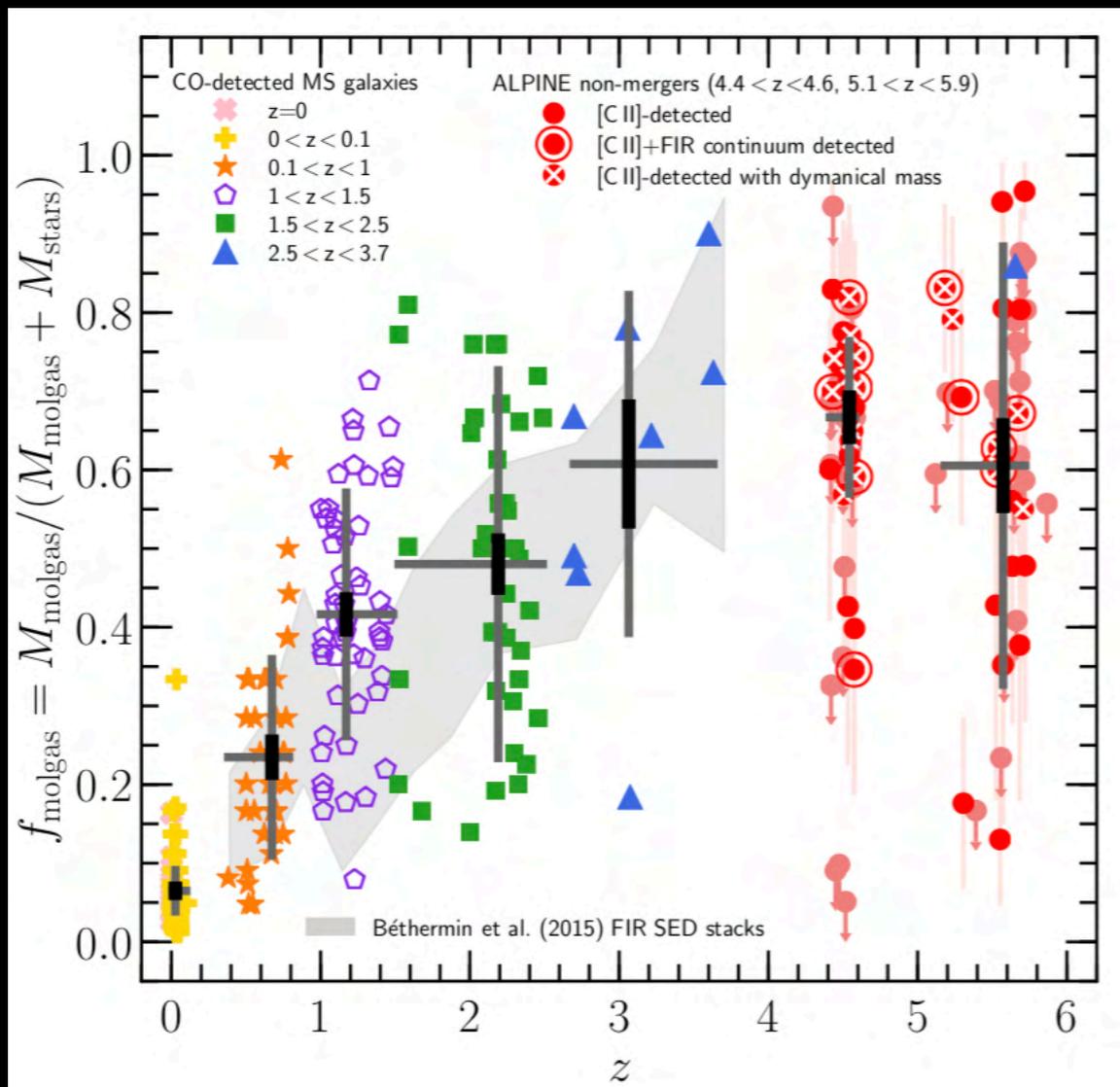
À RECONSTRUIRE À PARTIR D'OBSERVATIONS FAITES
À DIFFÉRENTES ÉPOQUES COSMIQUES

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

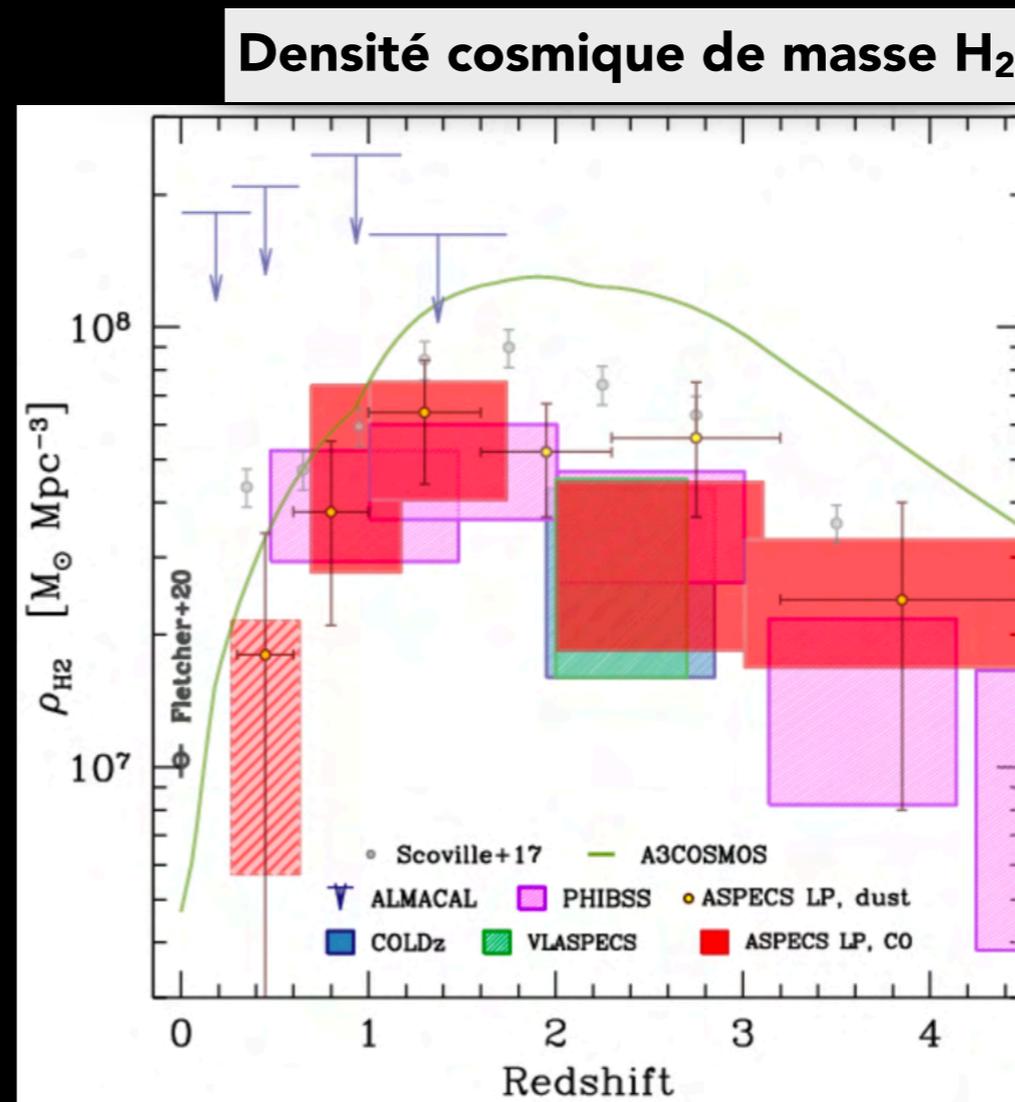
③ Masse moléculaire élevée

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.

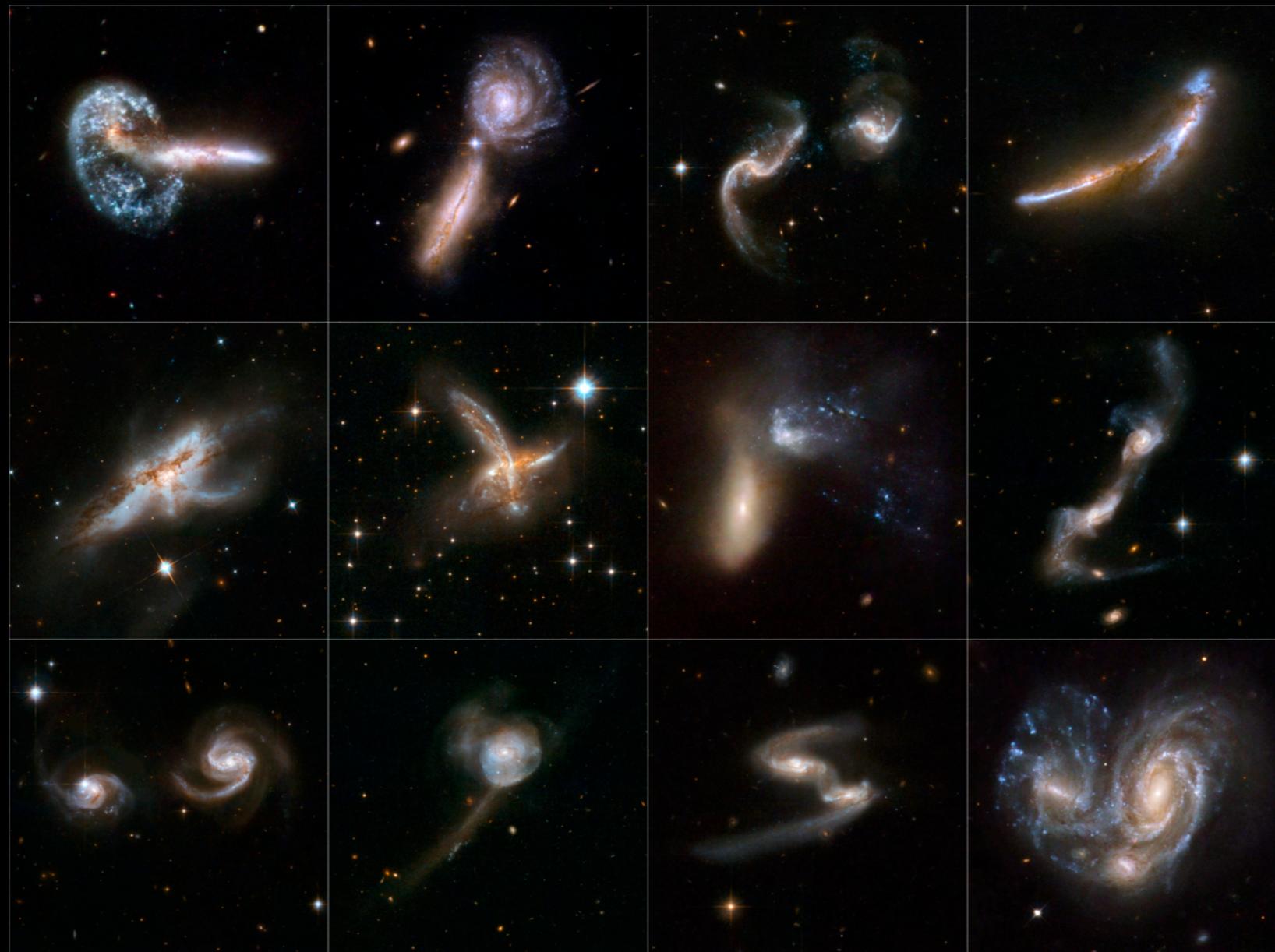
CE SONT **LES PILIERS FONDAMENTAUX** POUR COMPRENDRE L'ÉVOLUTION GALACTIQUE

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*)

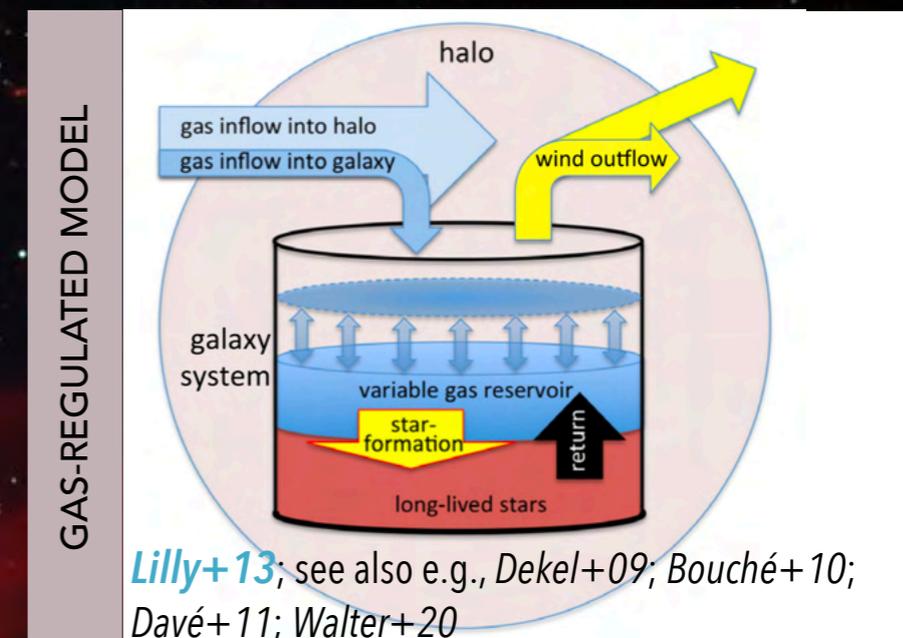


ÉVOLUTION DES GALAXIES

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?

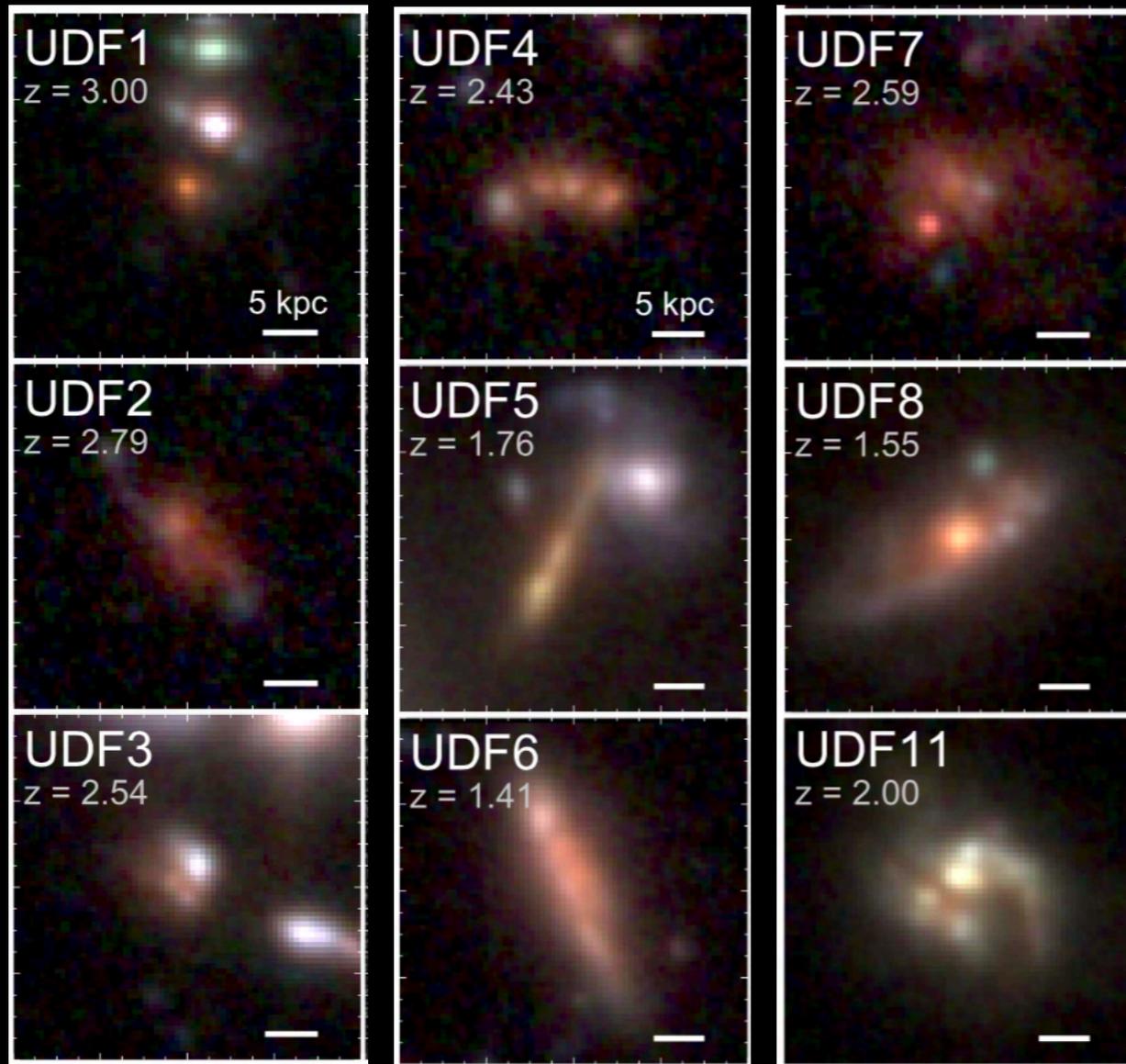
- ♦ **une augmentation du taux de galaxies en collision à haut redshift** pourrait induire des sursauts de formation stellaire dans les galaxies jusque-là passives (e.g., *Bluck+09; Hammer+09; Man+12*)
- ♦ **une accrétion élevée de gaz froid à partir du réseau cosmique** pourrait produire des hautes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

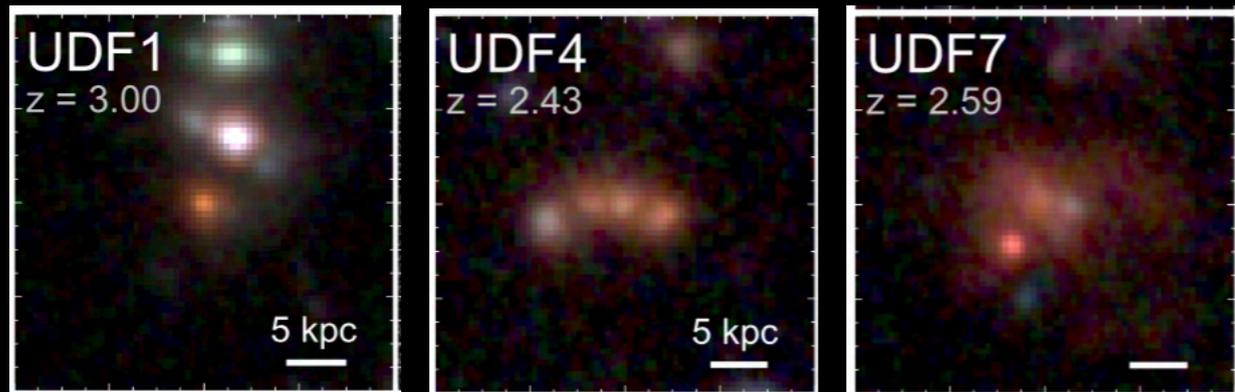
Ces *clumps* sont des régions de formation stellaire très brillantes.

(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)



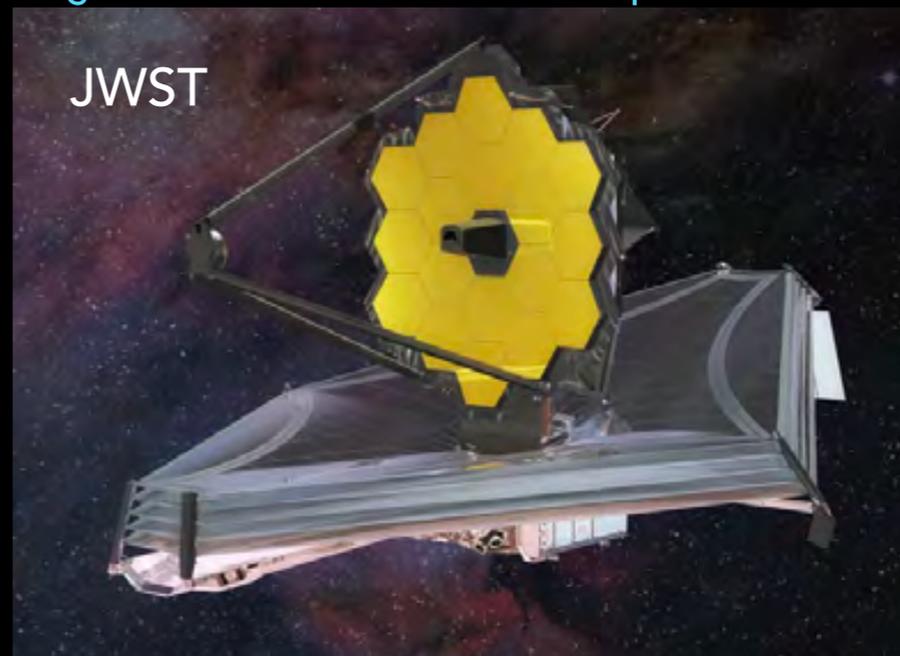
MORPHOLOGIE DES GALAXIES À HAUT REDSHIFT

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

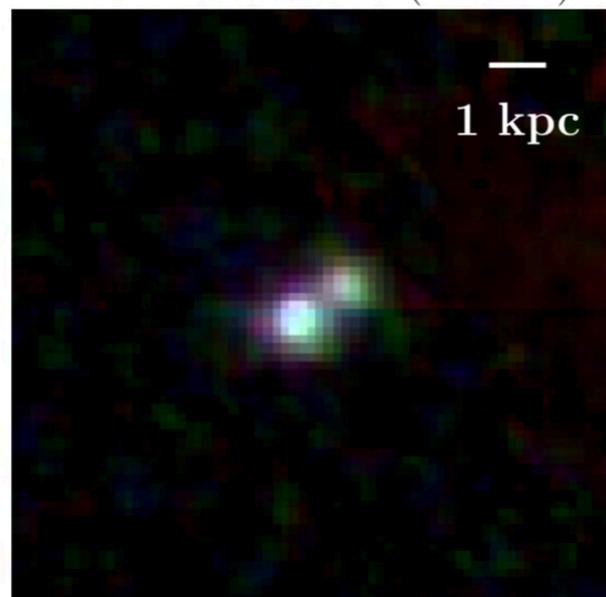
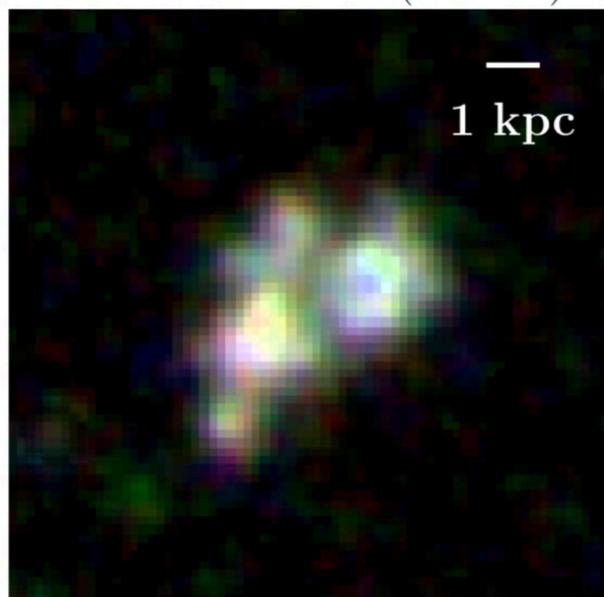


EGSI-9136950177 ($z=5.53$)

EGSZ-9314453285 ($z=6.27$)

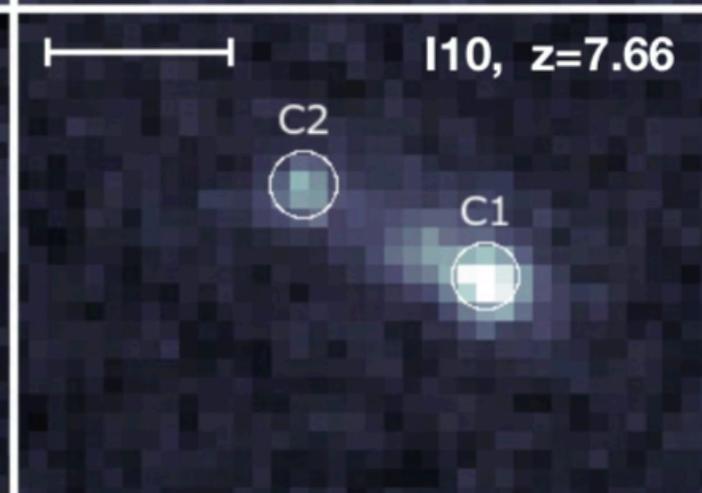
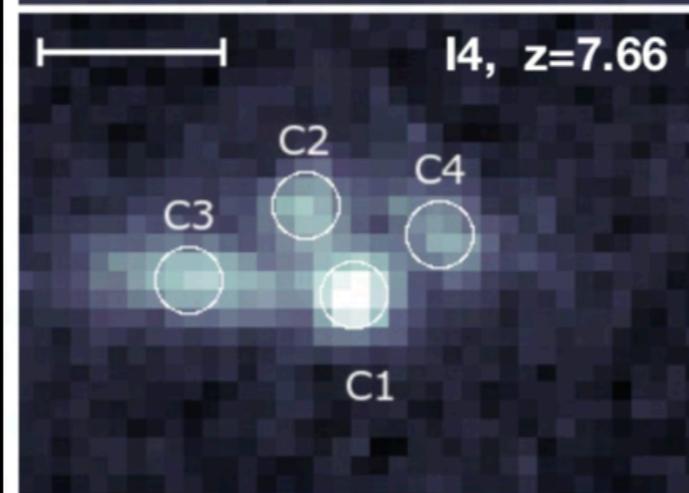
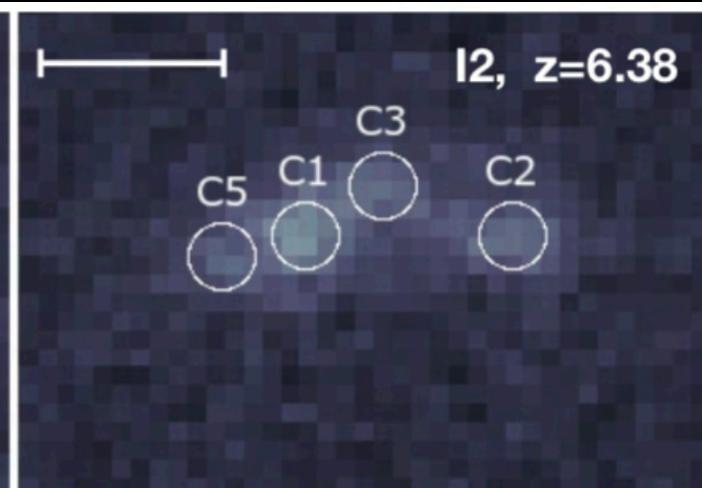
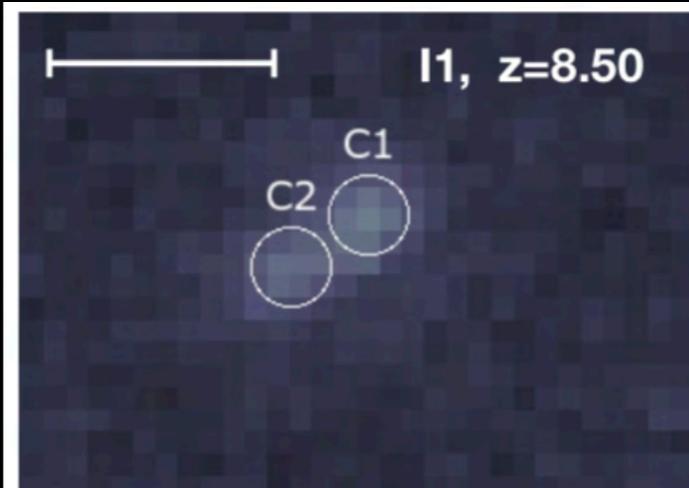


JWST data / Claeysens/w Dessauges-Zavadsky +22



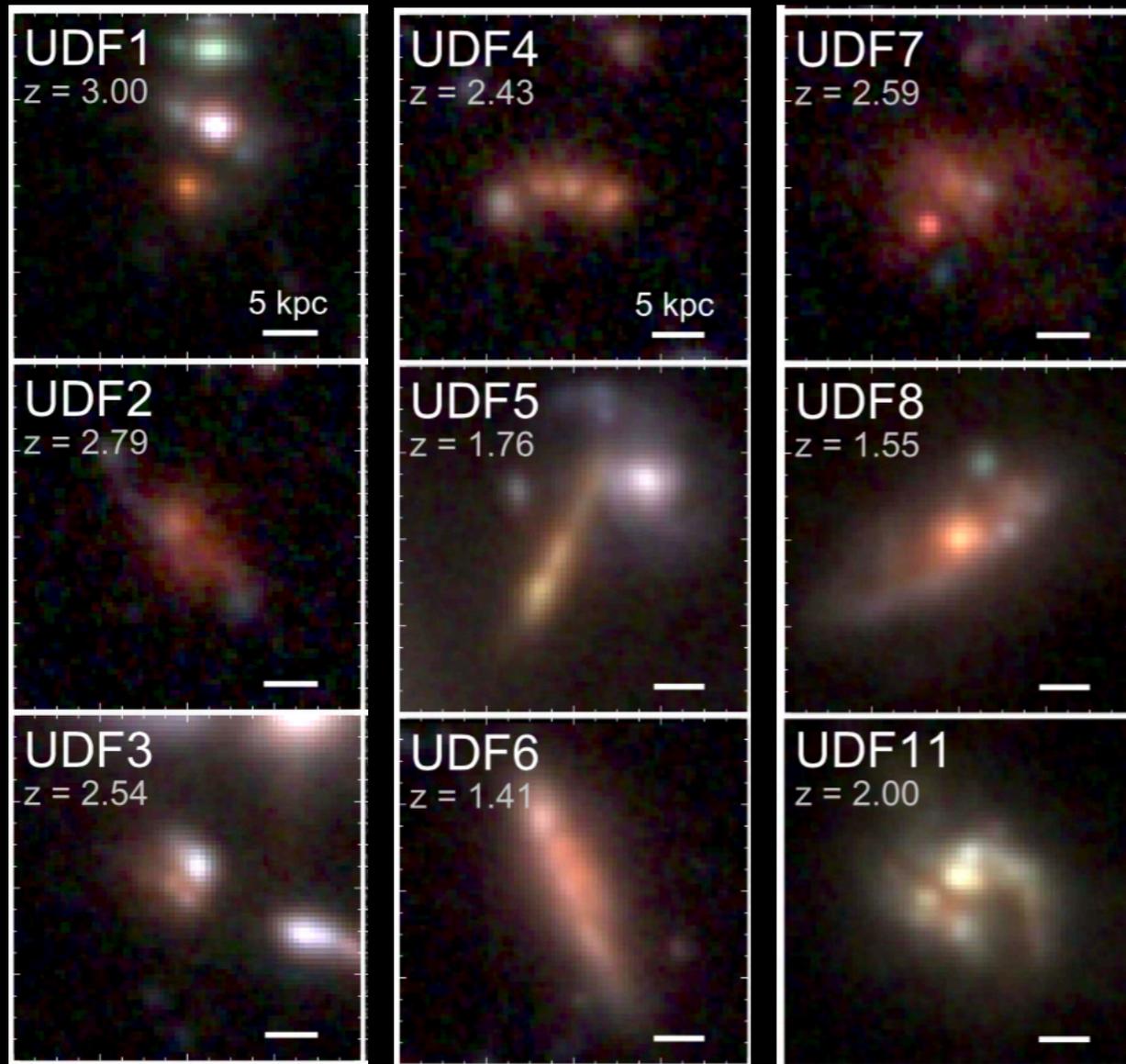
EGSZ-9338153359 ($z=6.31$)

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**

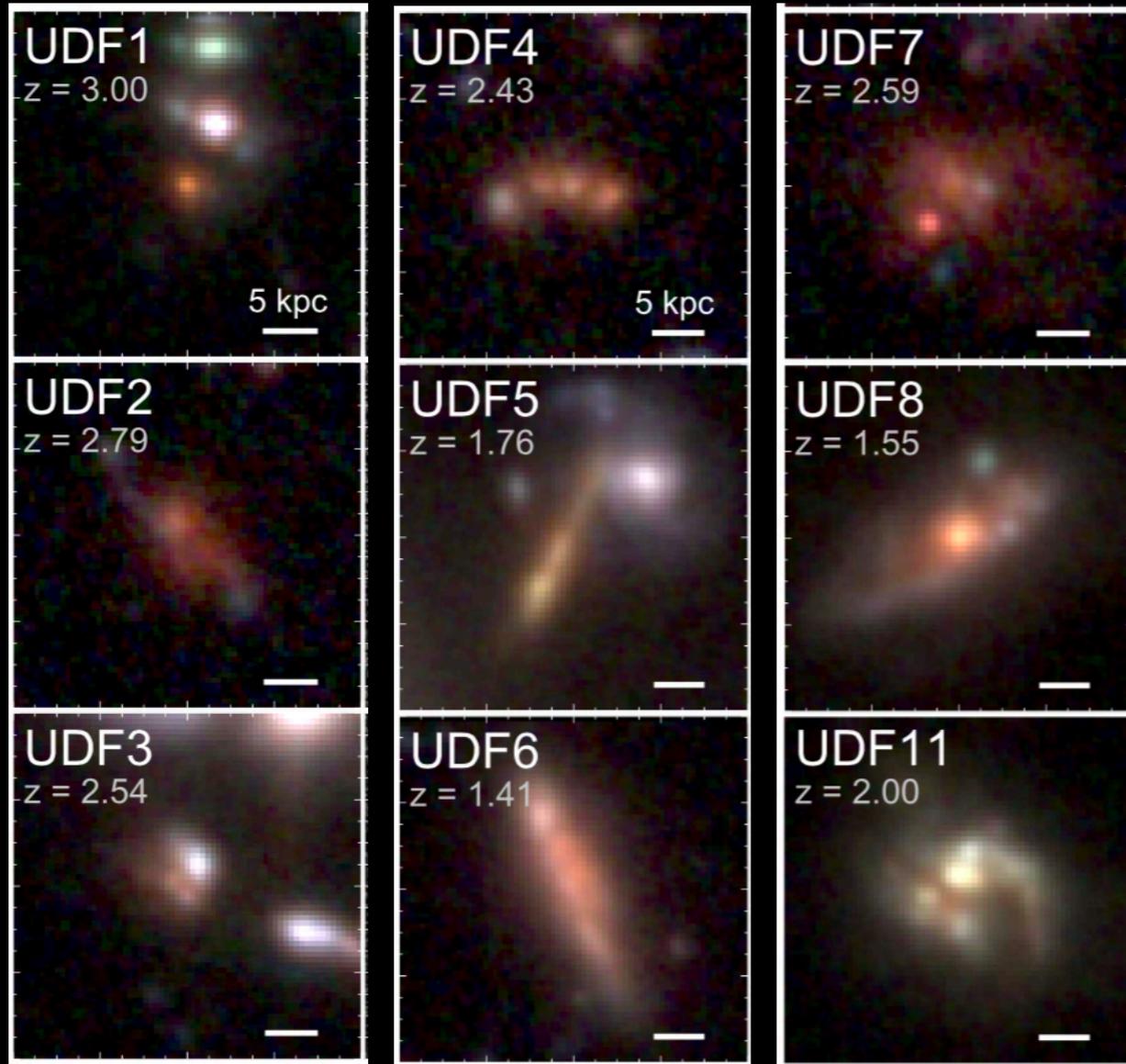
Le processus de formation stellaire est-il invariant au cours du temps cosmique à l'échelle des nuages moléculaires?

◆ **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

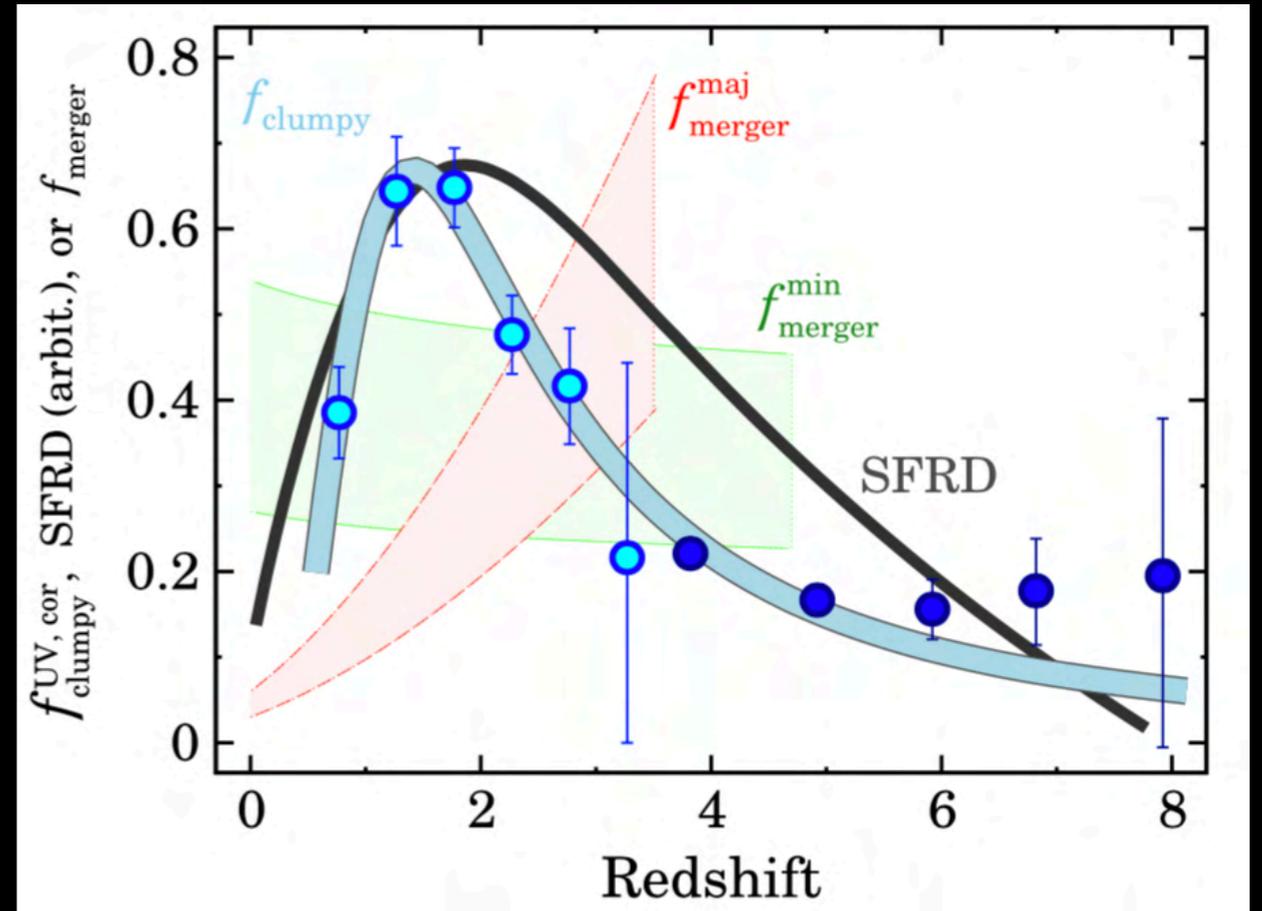
(e.g., *Shibuya+16; Elmegreen&Elmegreen06; Elmegreen+17; Dessauges-Zavadsky & Adamo18; Dessauges-Zavadsky+19,22*)

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

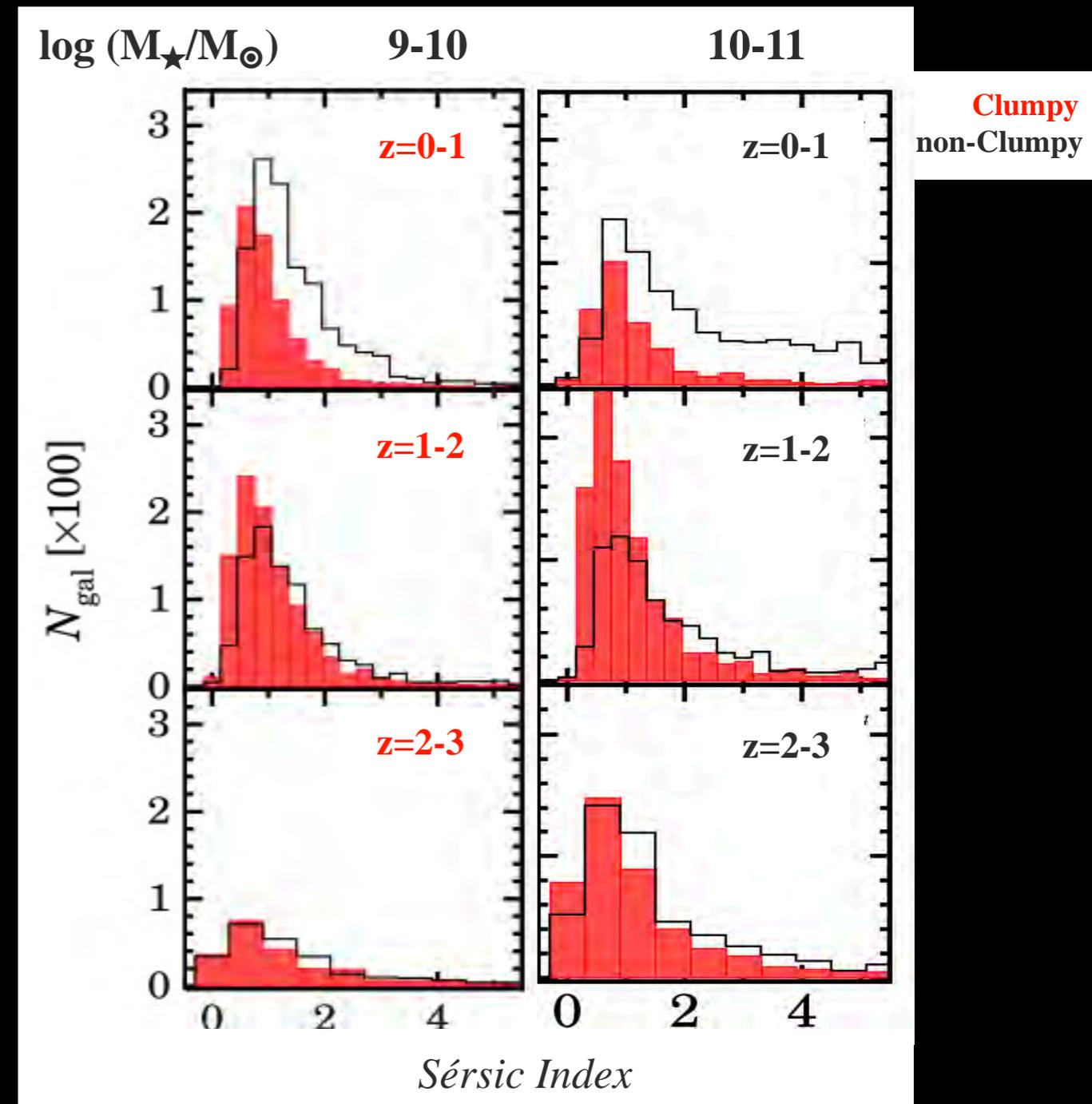
PRÉFÉRENCE POUR UNE ORIGINE 'IN SITU' DES CLUMPS

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 ~ 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.

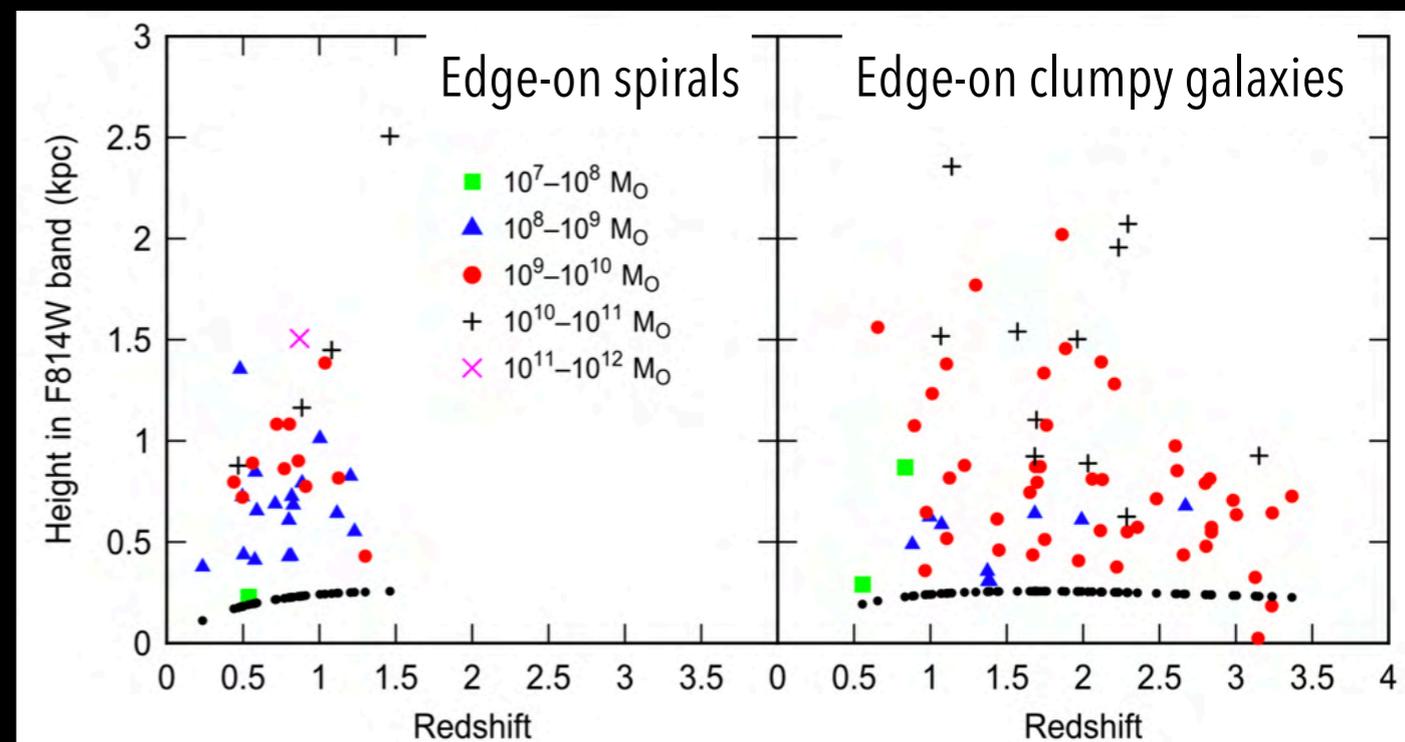
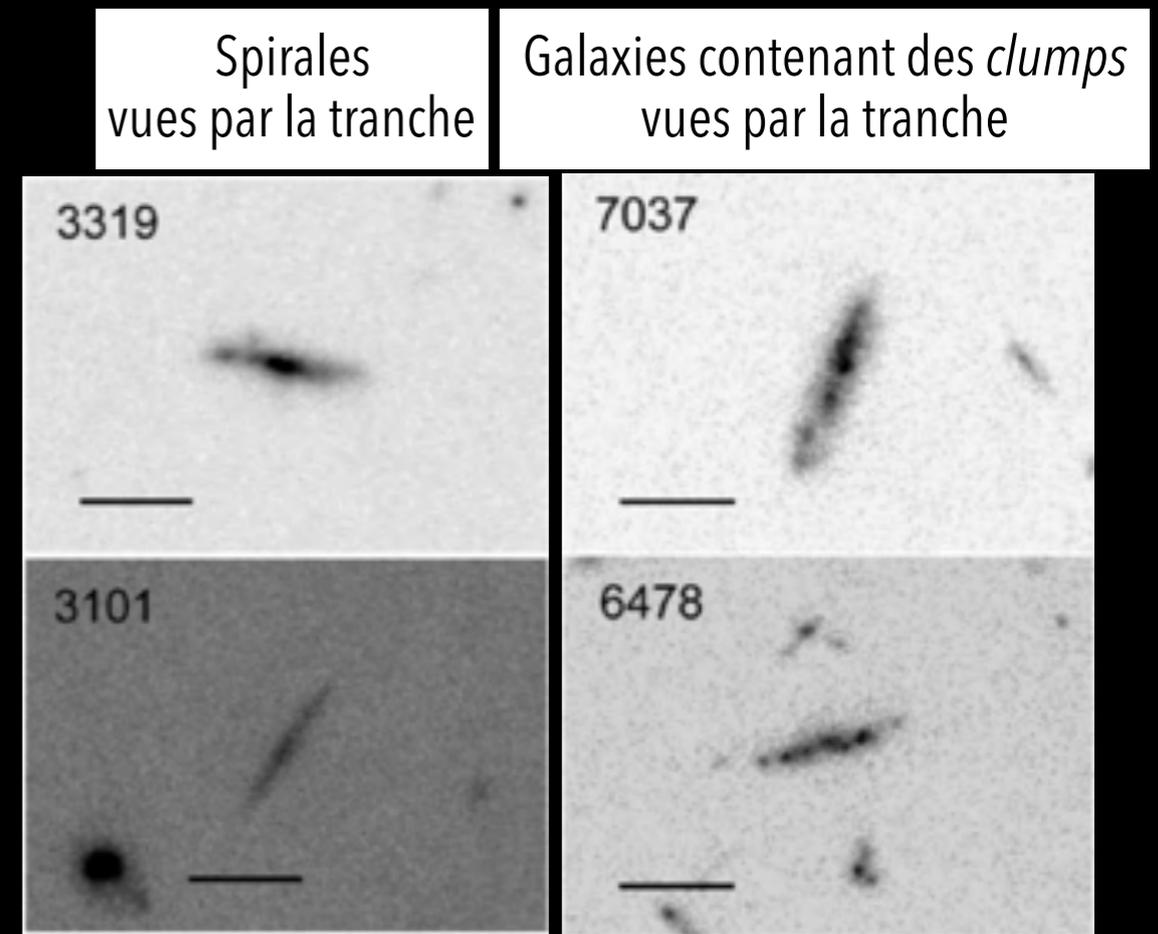
Shibuya+16; Lotz+11

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

Shibuya+16

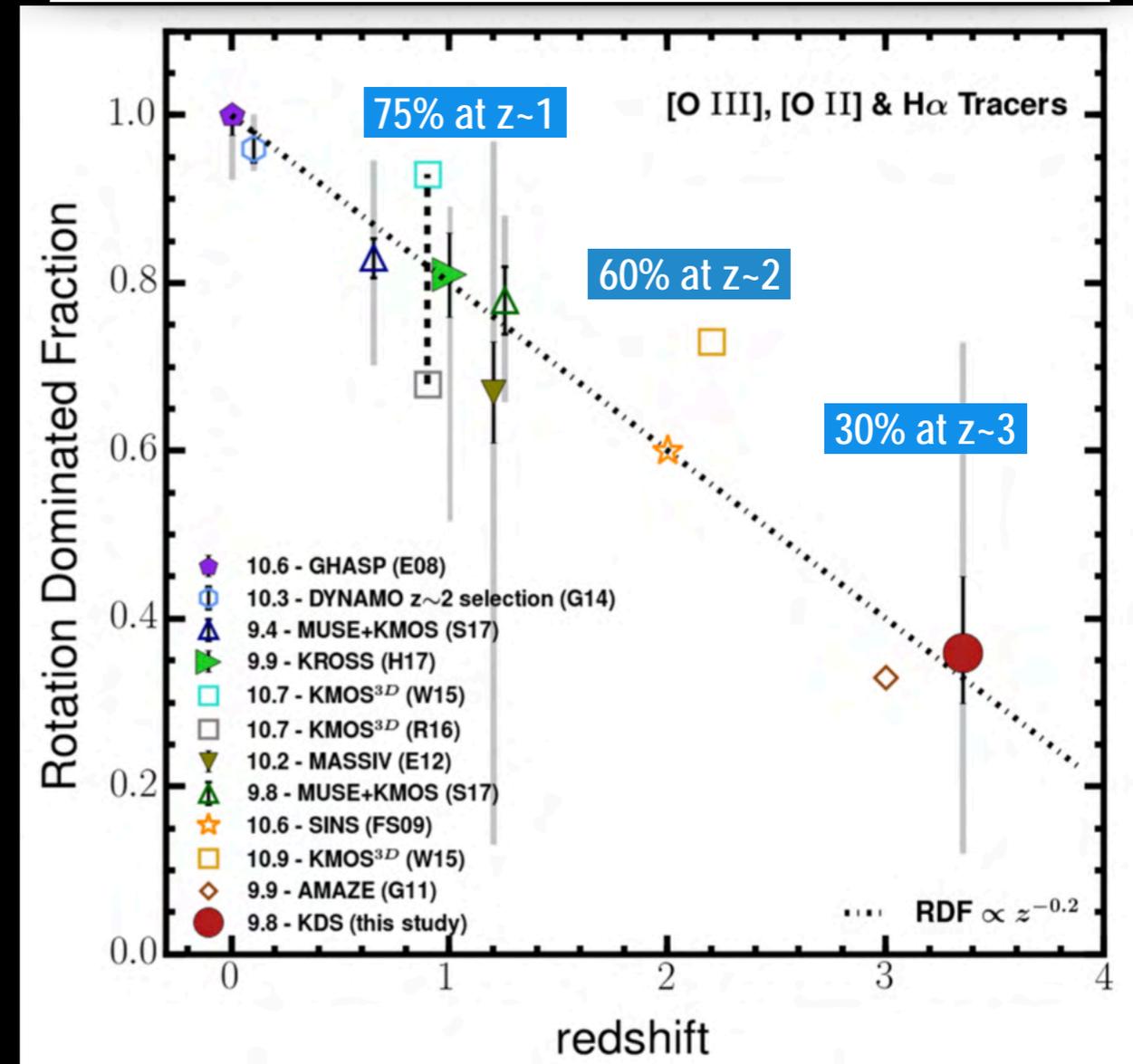
3. Les galaxies contenant des *clumps* vue par la tranche (*chain-galaxies*) ont **des disques d'épaisseur comparables** aux spirales sans *clumps* vues également par la tranche.

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

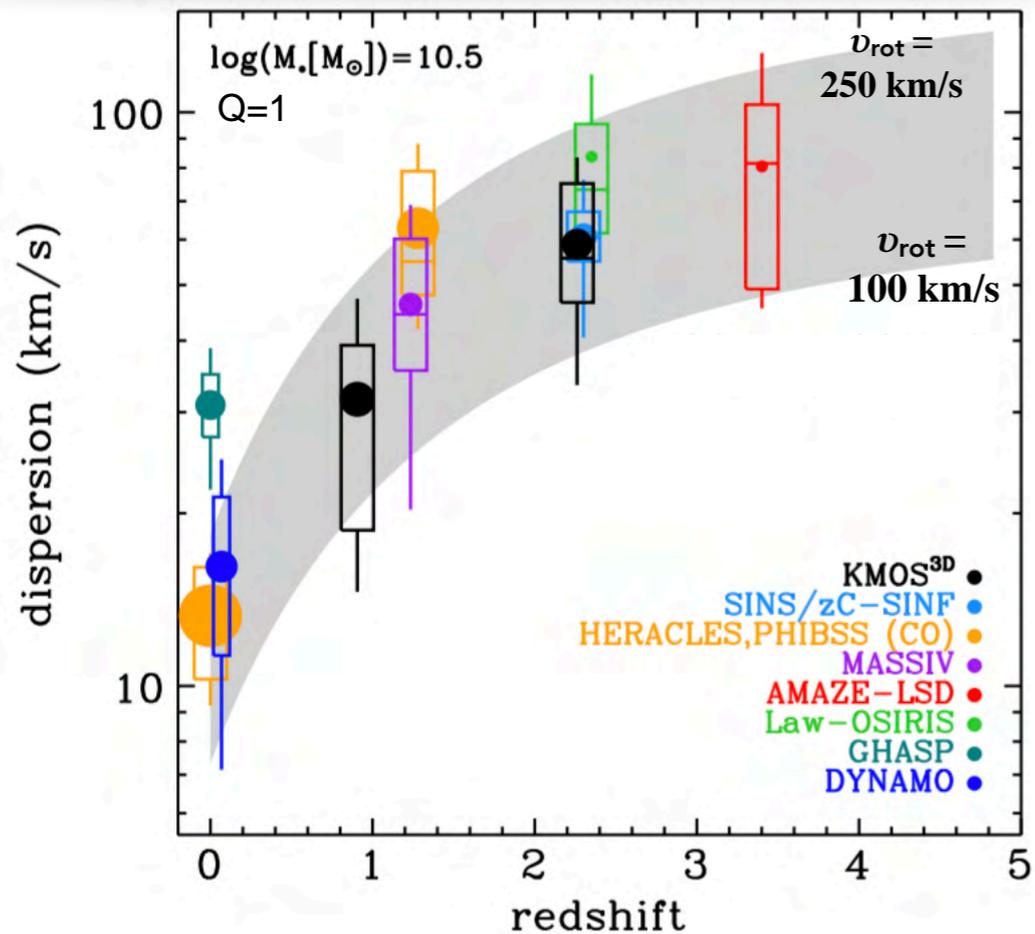
Fraction de galaxies dominées par la rotation



Turner+17

ROTATEURS À HAUT REDSHIFT

Hautement turbulents avec des grandes dispersions des vitesses



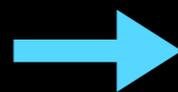
Wisnioski+15; Girard, Dessauges-Zavadsky+18a

Origine de la turbulence?

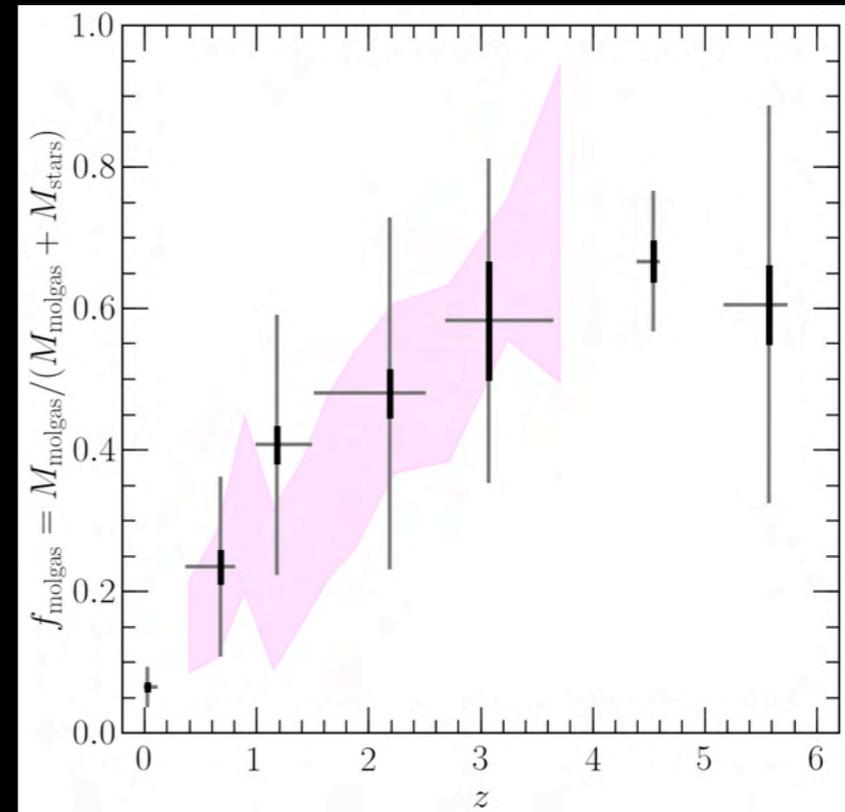
◆ feedback stellaire

◆ **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



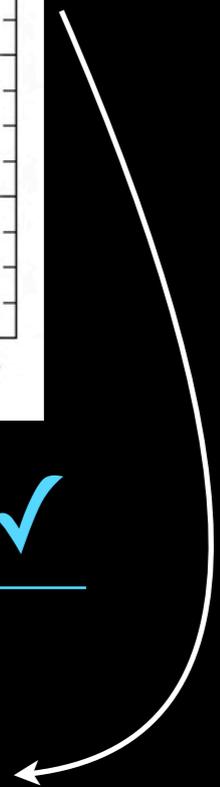
Turbulence gravitationnelle produite par l'accrétion de gaz



Selon le critère de stabilité de Toomre:

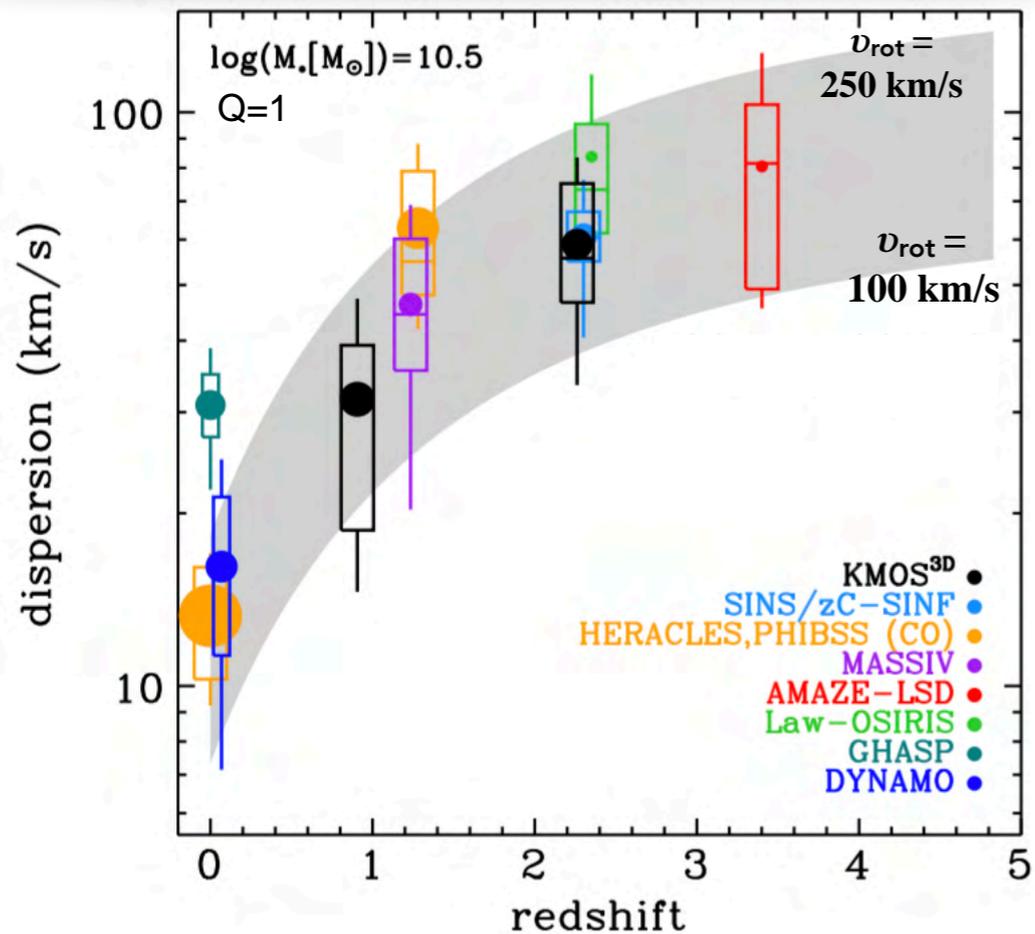
$$\sigma_0(z, M_\star) = \frac{v_{\text{rot}} f_{\text{gas}}(z, M_\star) Q_{\text{crit}}}{a}$$

où $a = \sqrt{2}$, v_{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

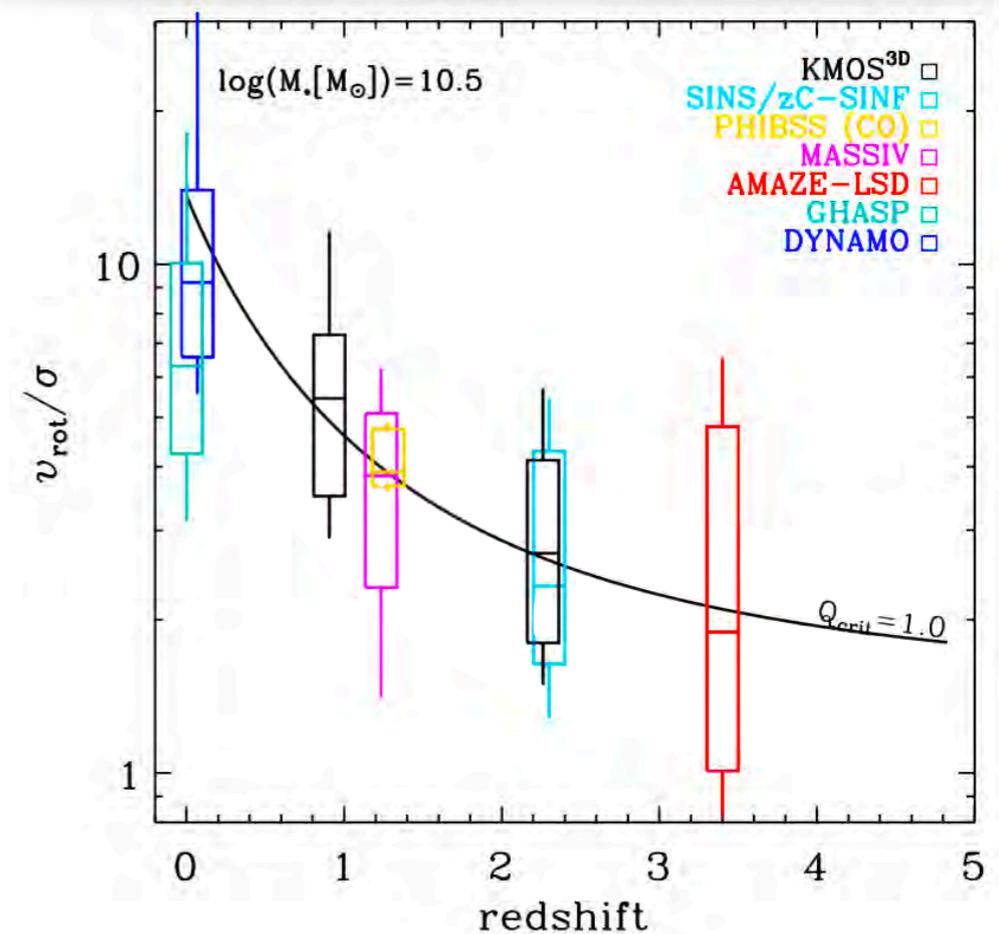
- ◆ **perturbations gravitationnelles** produites par p.e. des fractions de gaz moléculaire élevées / instabilité dans les disques galactiques produite par l'accrétion cosmique / collisions mineurs entre galaxies

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

Wisnioski+15; Krumholz & Burkhardt 16)

Marginalement stables

v_{rot}/σ_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

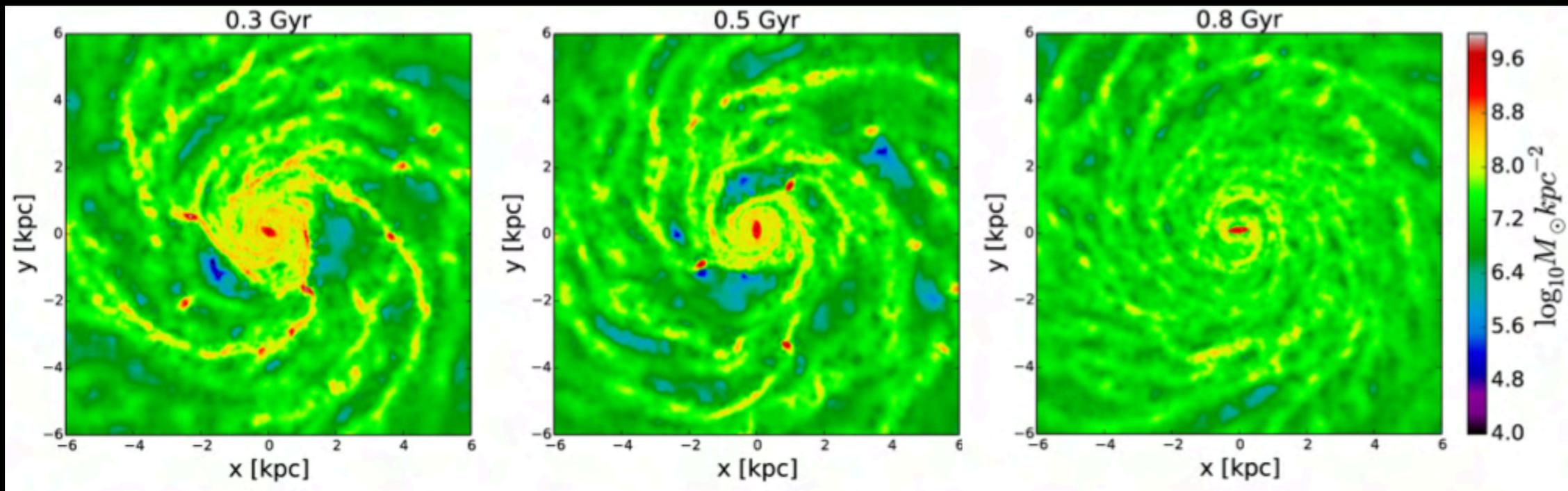
(e.g., Dekel+09; Ceverino+10; Bournaud+14; Tamburello, Mayer+15; Behrendt+16; Mandelker+17)

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 / 10⁴ M_⊙

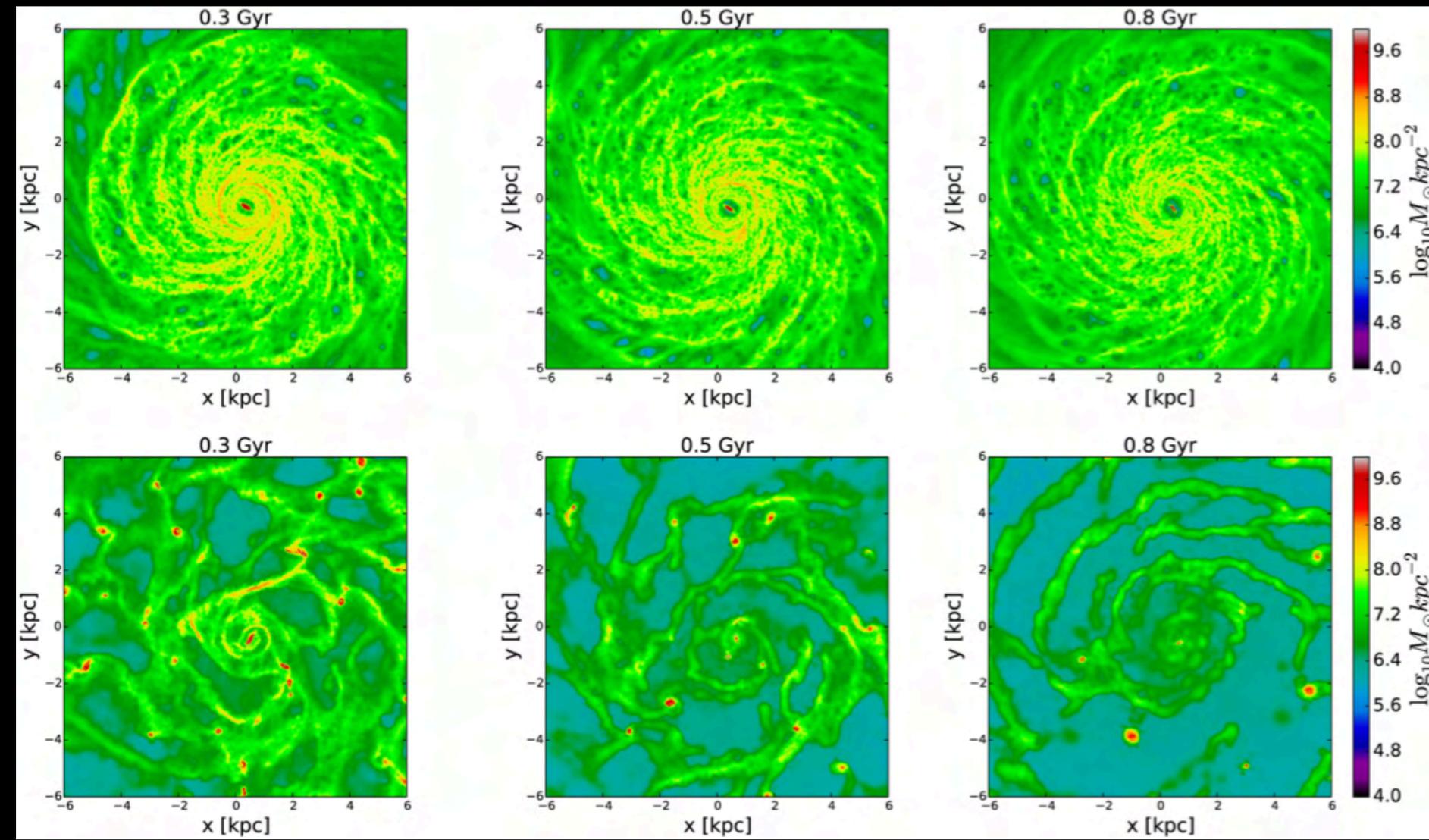
M_★ = 4 × 10¹⁰ M_⊙

v_{rot} = 200 km/s

f_{molgas} = 0.5

Tamburello+15

FRAGMENTATION DES DISQUES GALACTIQUES: PARAMÈTRES PHYSIQUES



Résolution des simulations :

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

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

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

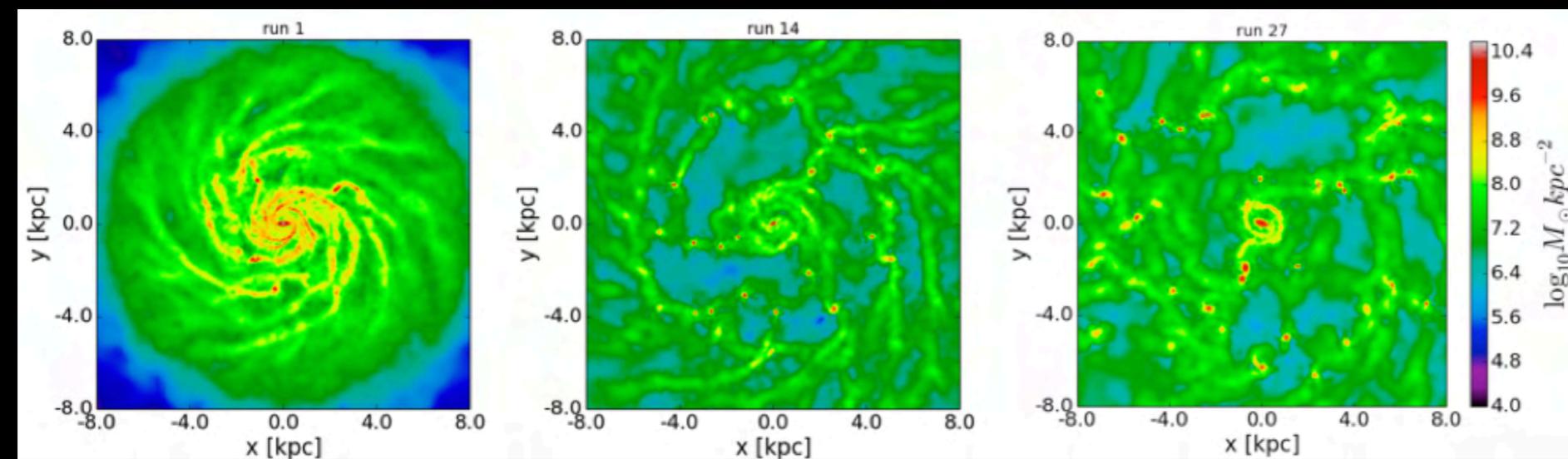
Fraction gazeuse = 30%

-> pas de *clumps*

Fraction gazeuse = 50%

-> la fragmentation augmente significativement avec la fraction gazeuse

Tamburello+15



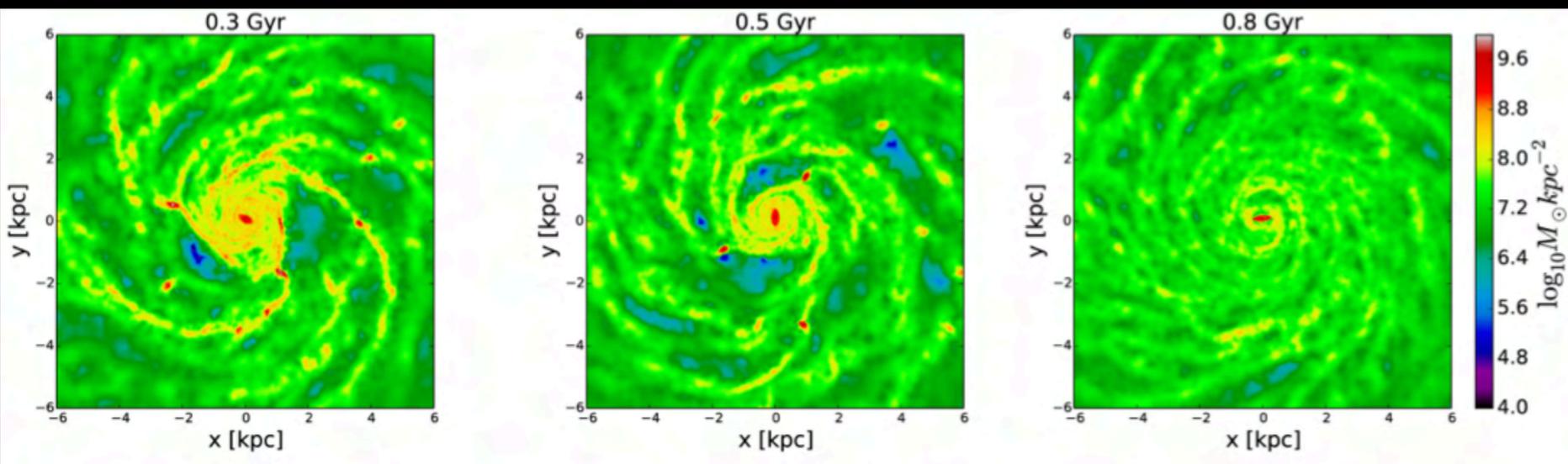
$M_{\star}(\text{disk}) = 1 \times 10^{10} M_{\odot}$ (left)

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

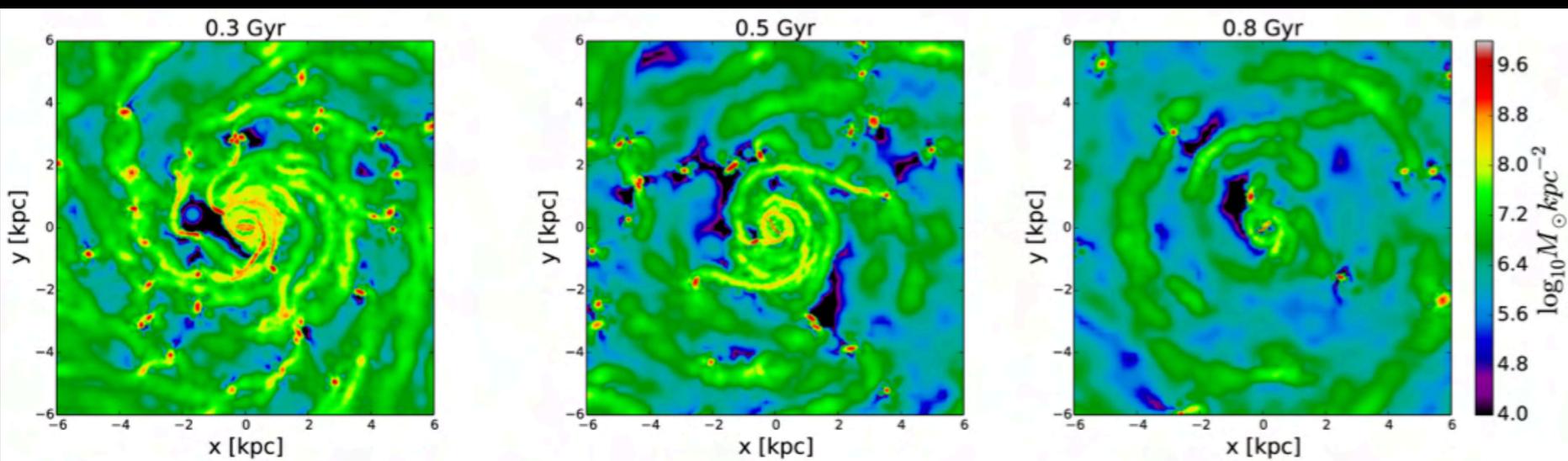
10 pc / $10^4 M_{\odot}$

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

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

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

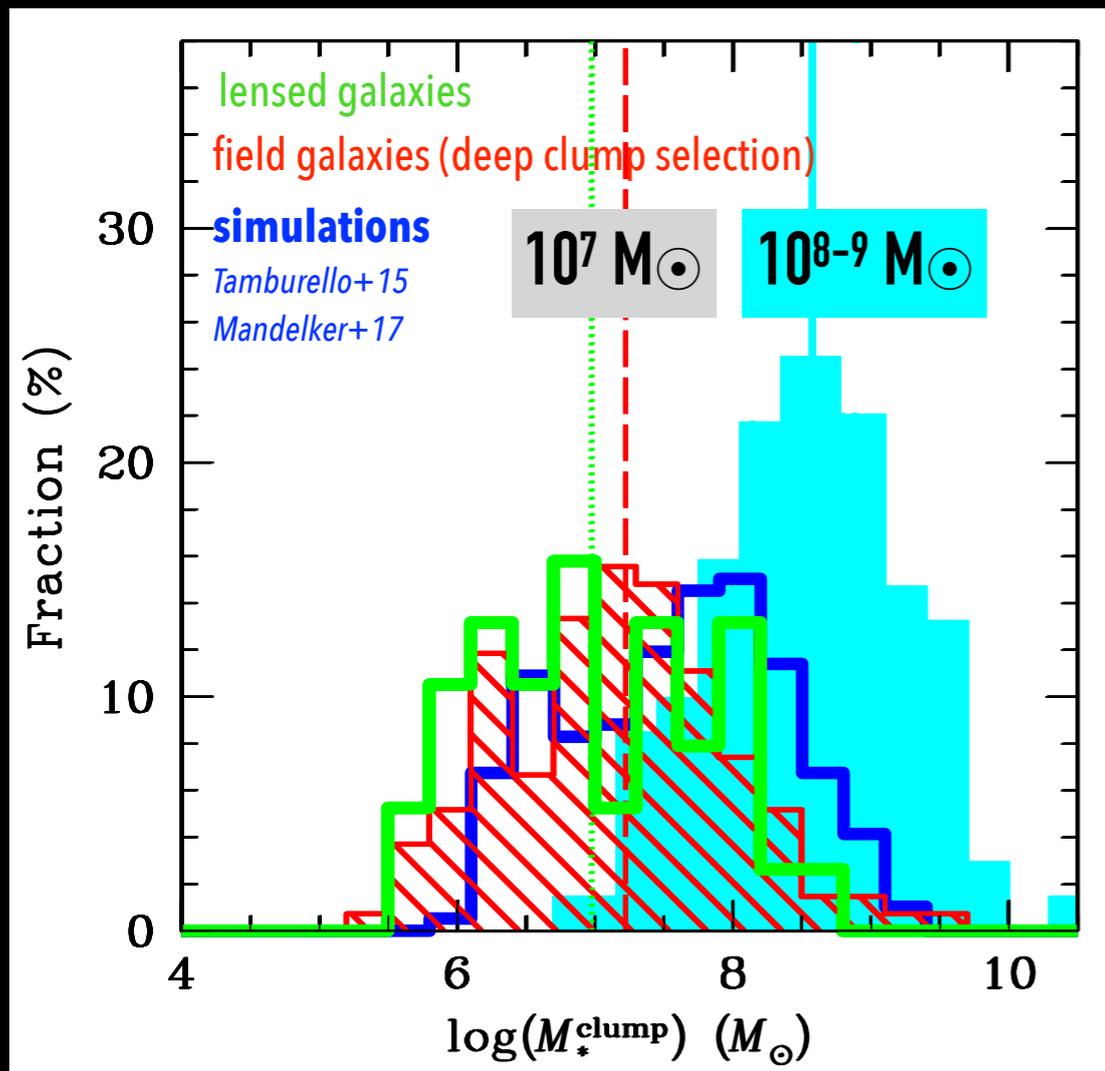
Forster Schreiber+11; Guo+12,18; Zanella+19

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



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

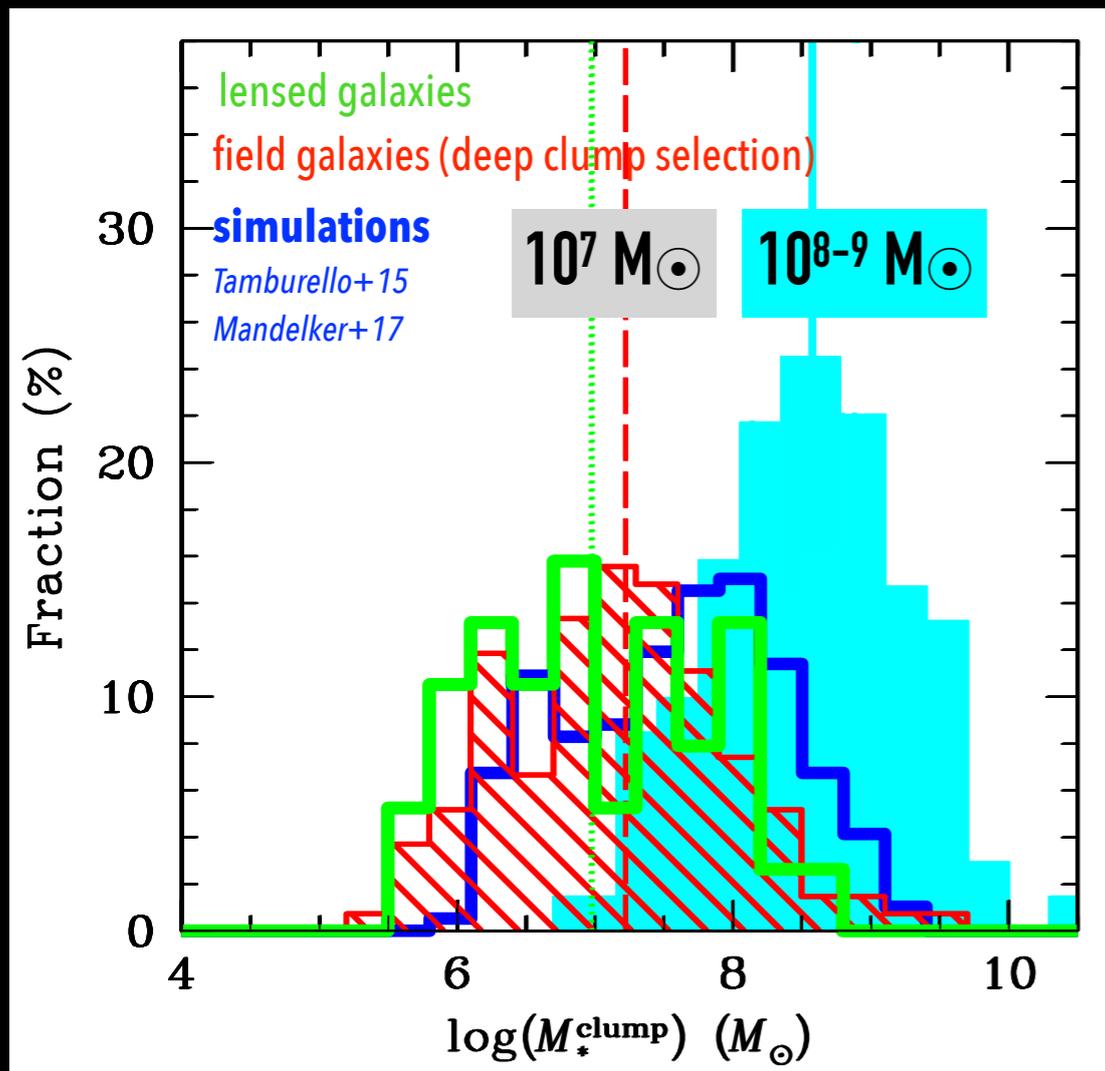
Forster Schreiber+11; Guo+12,18; Zanella+19

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

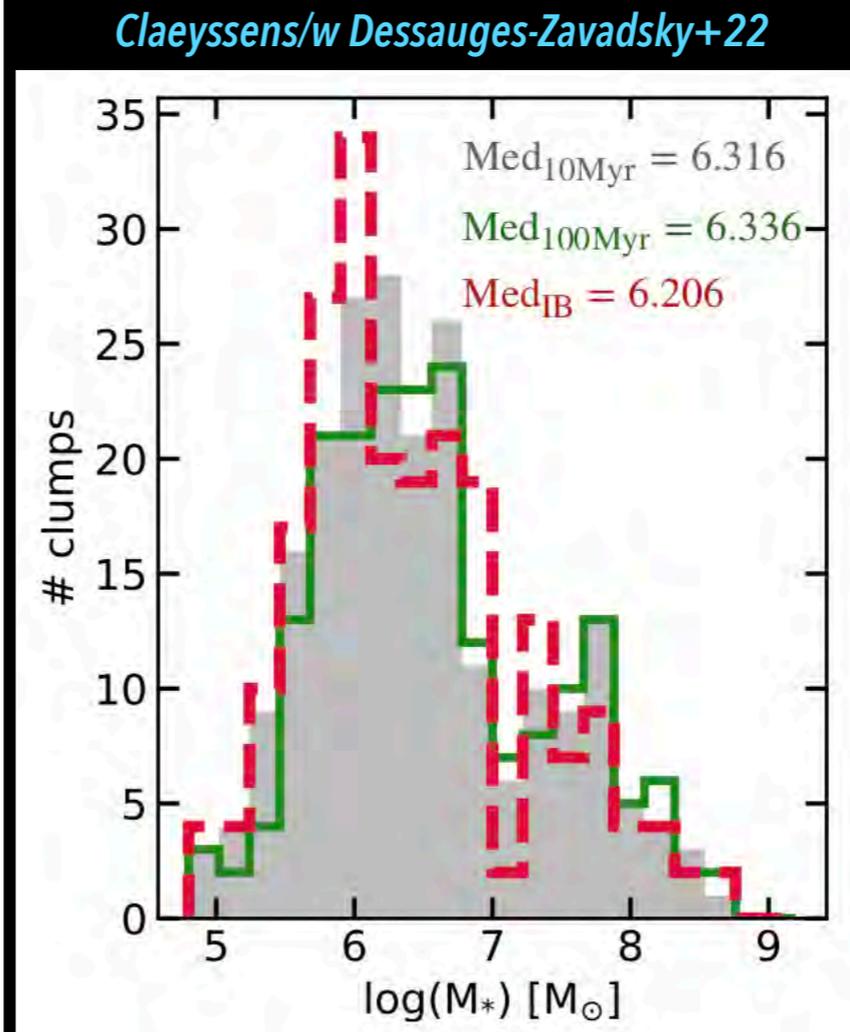
*Dessauges-Zavadsky+17;
Livermore+12; Adamo+13; Elmegreen+13;
Cava/w Dessauges-Zavadsky+18; Mestric+22;
Messa/w Dessauges-Zavadsky+22*

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



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

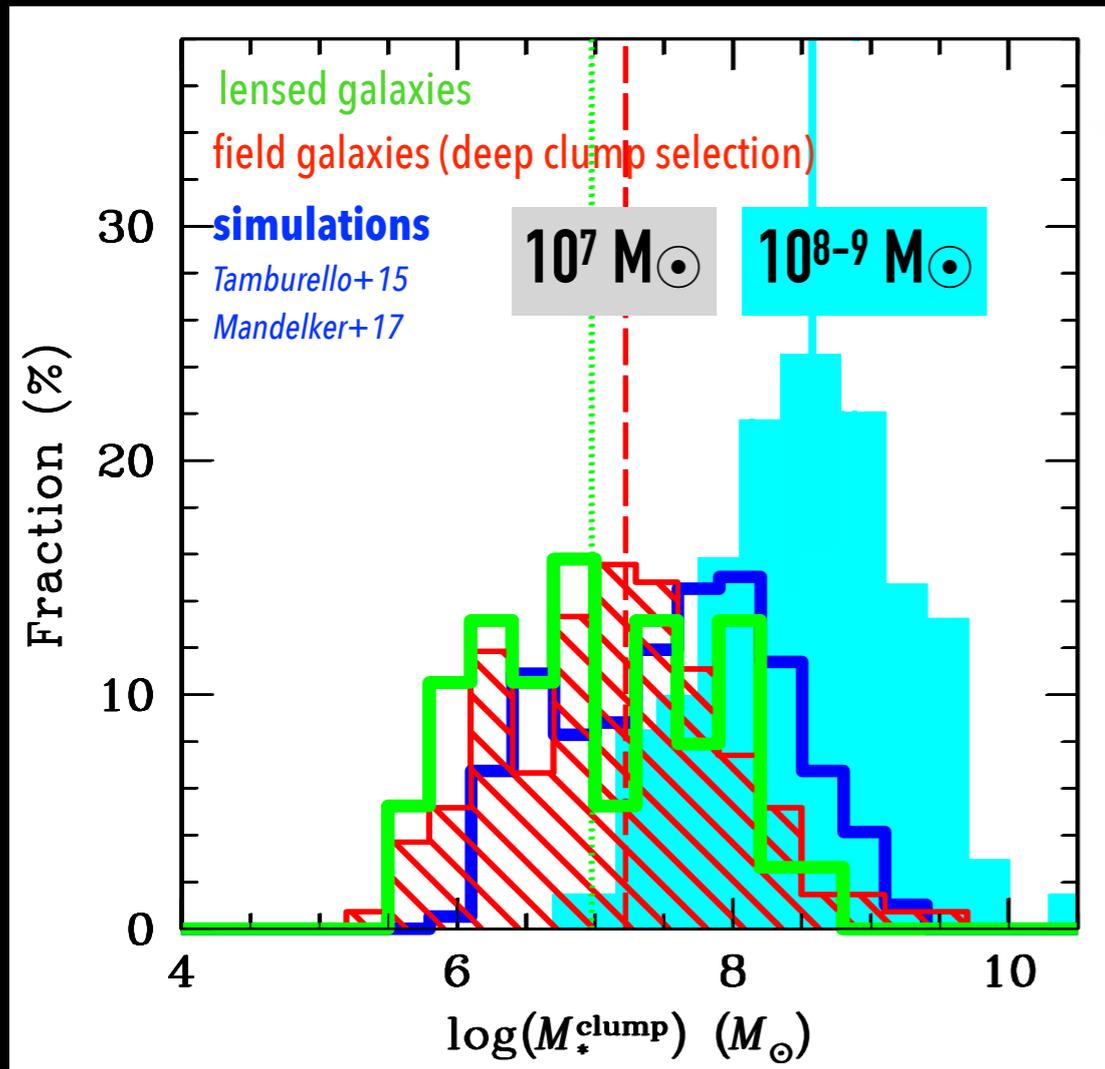
Forster Schreiber+11; Guo+12,18; Zanella+19

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*

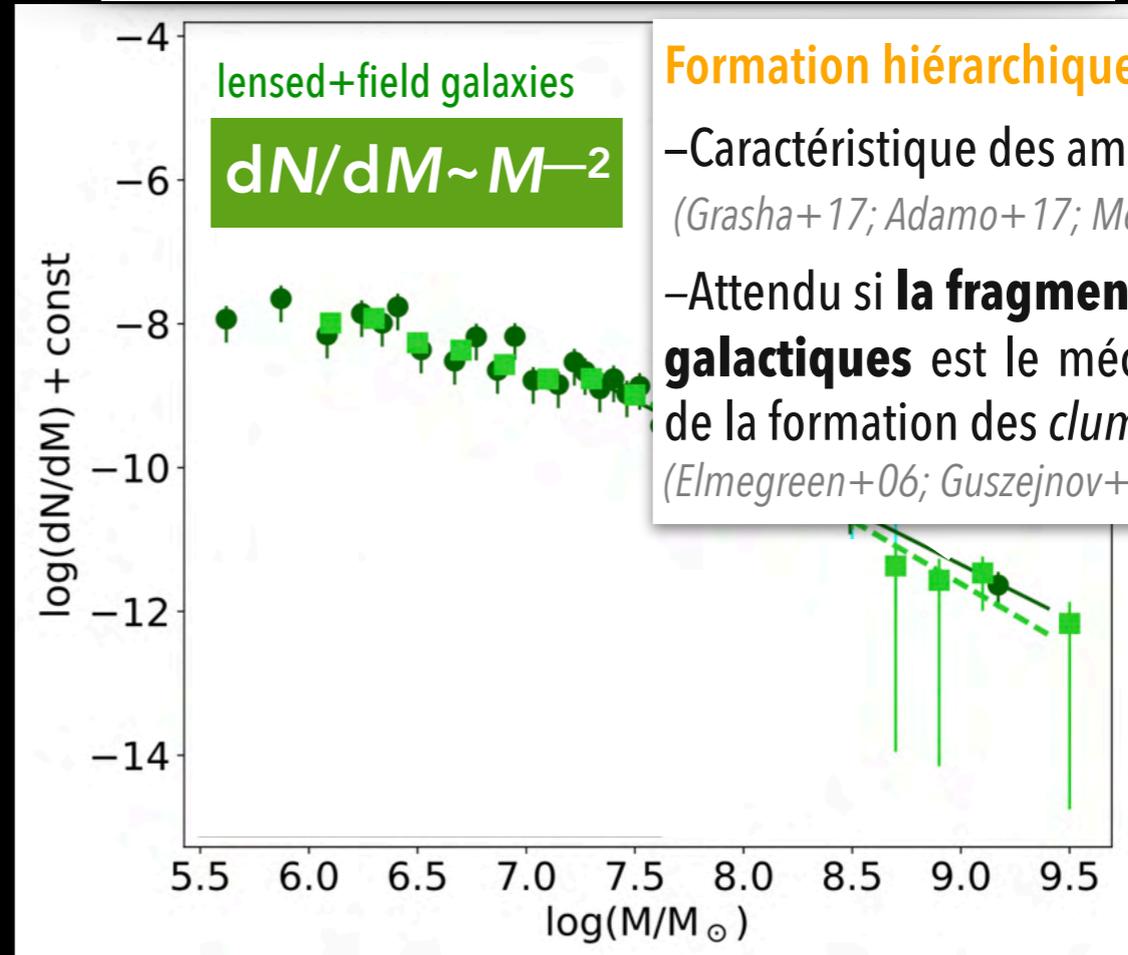
Effet de forte lentille gravitationnelle
permet d'atteindre des résolutions spatiales sous le kpc
→ pas de superposition de *clumps*

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

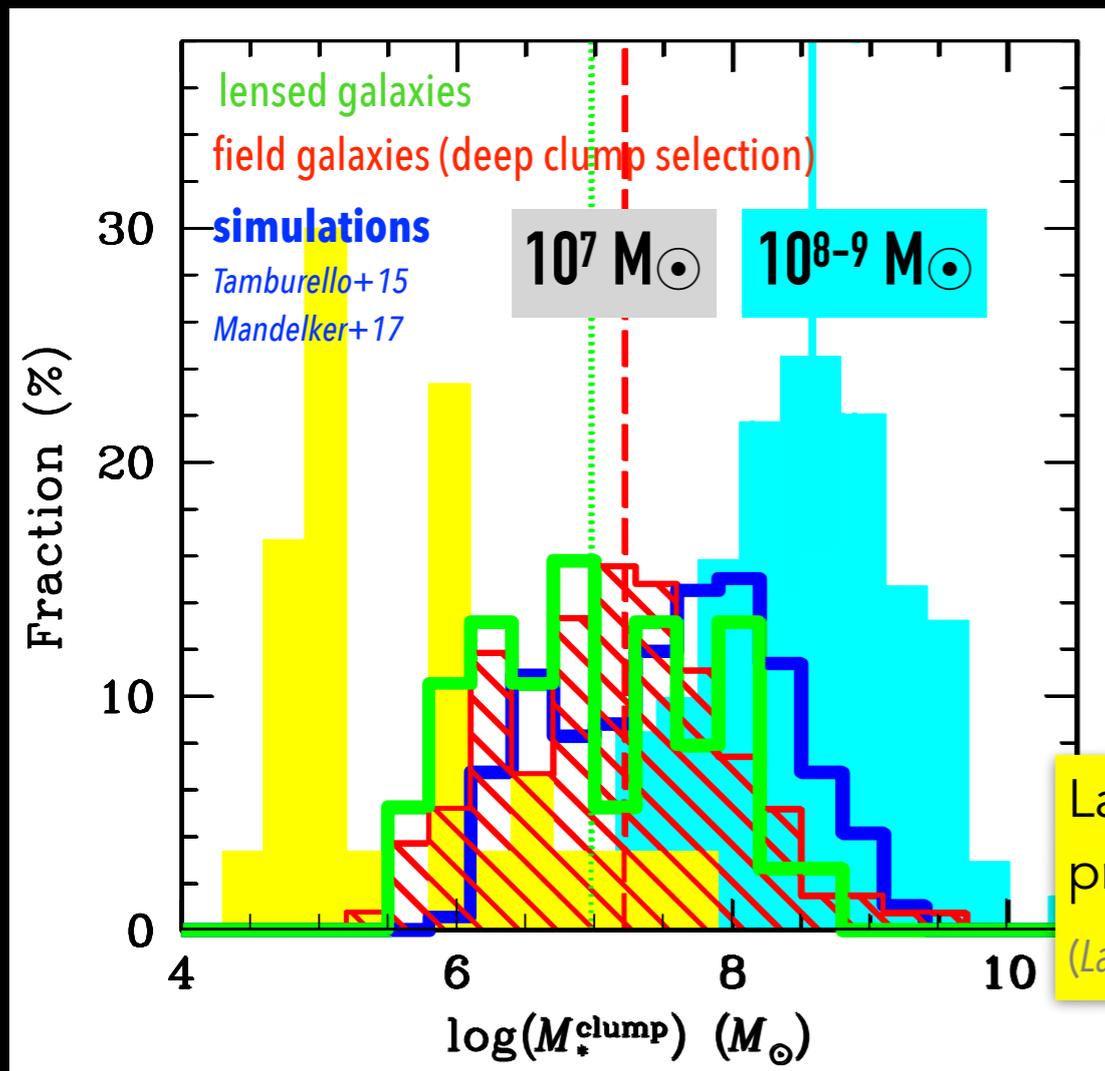
Forster Schreiber+11; Guo+12,18; Zanella+19

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*

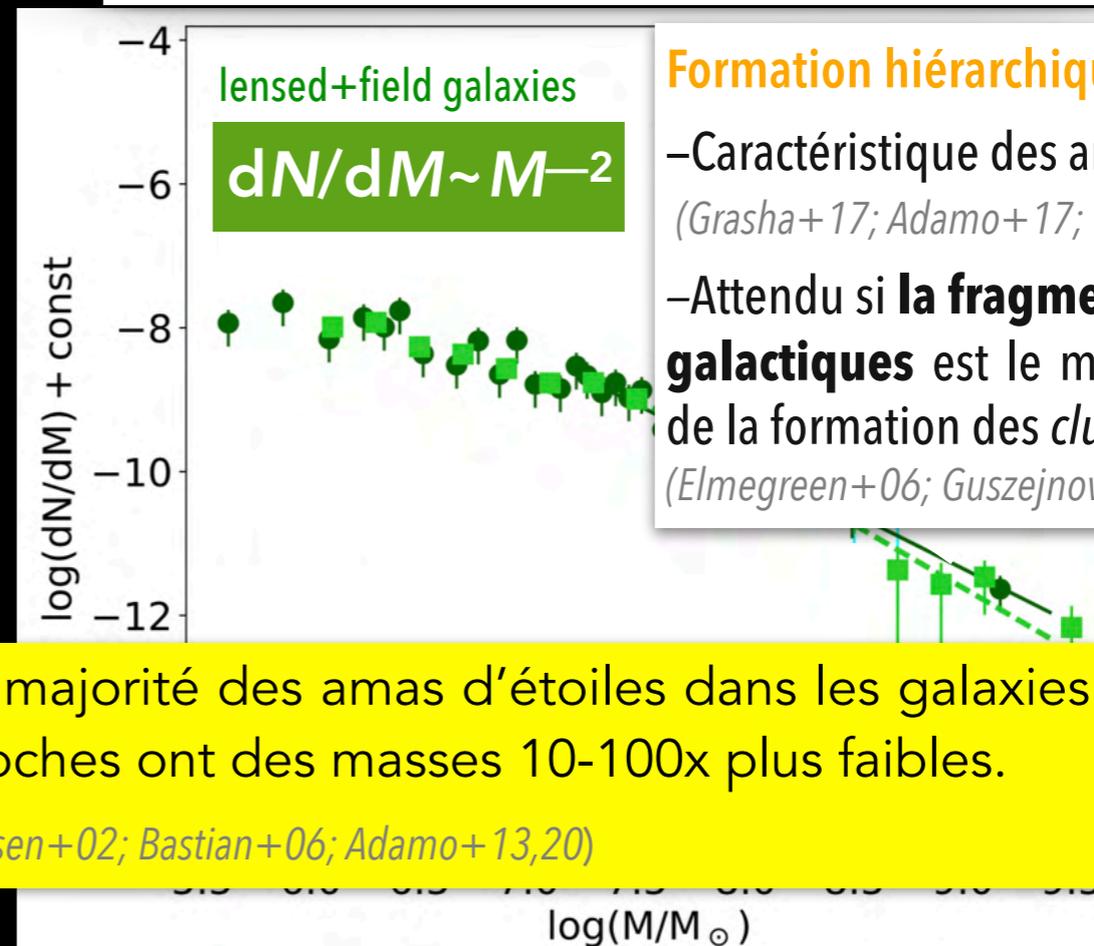
Effet de forte lentille gravitationnelle
permet d'atteindre des résolutions spatiales sous le kpc
→ pas de superposition de *clumps*

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)

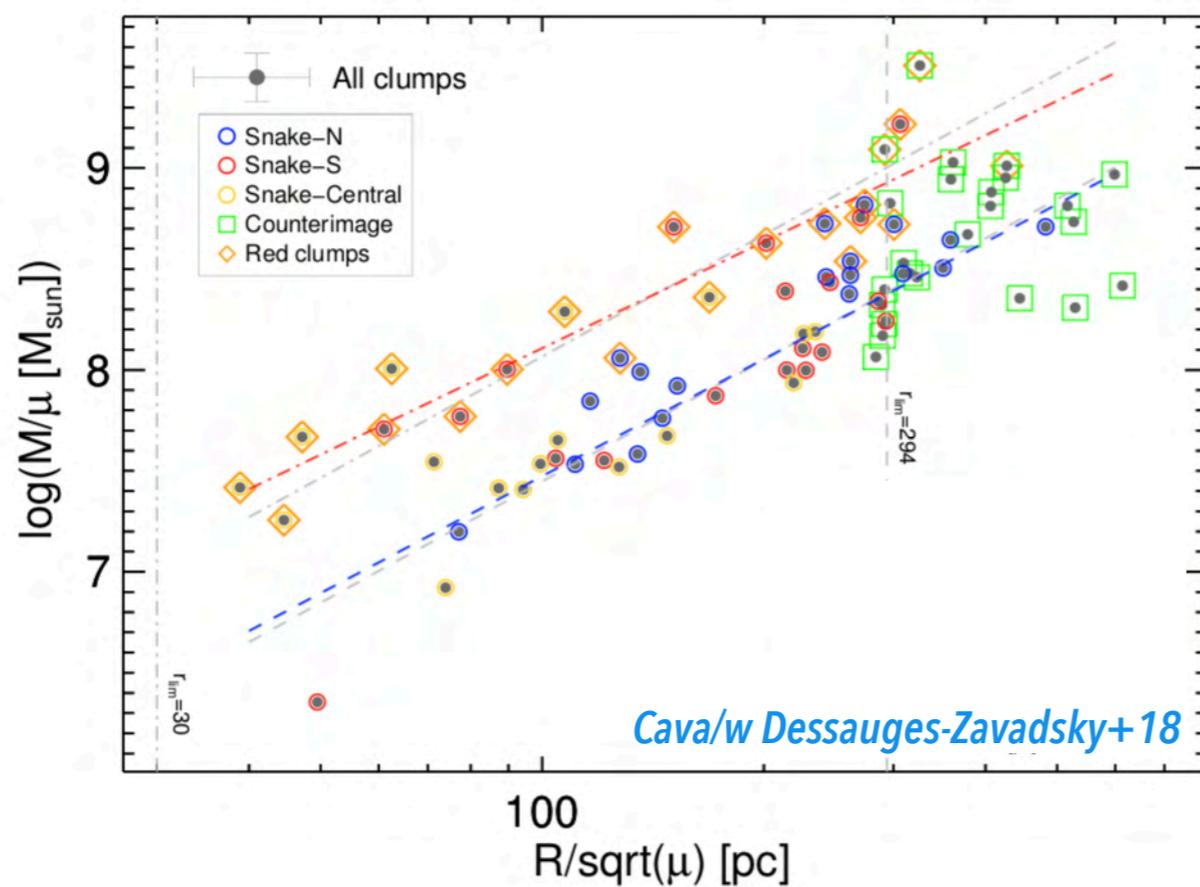
21 clumps détectés avec HST F390W

17 clumps détectés avec HST F390W



CLUMPS À HAUT z : AMAS D'ÉTOILES GÉANTS

Galaxie Cosmic Snake

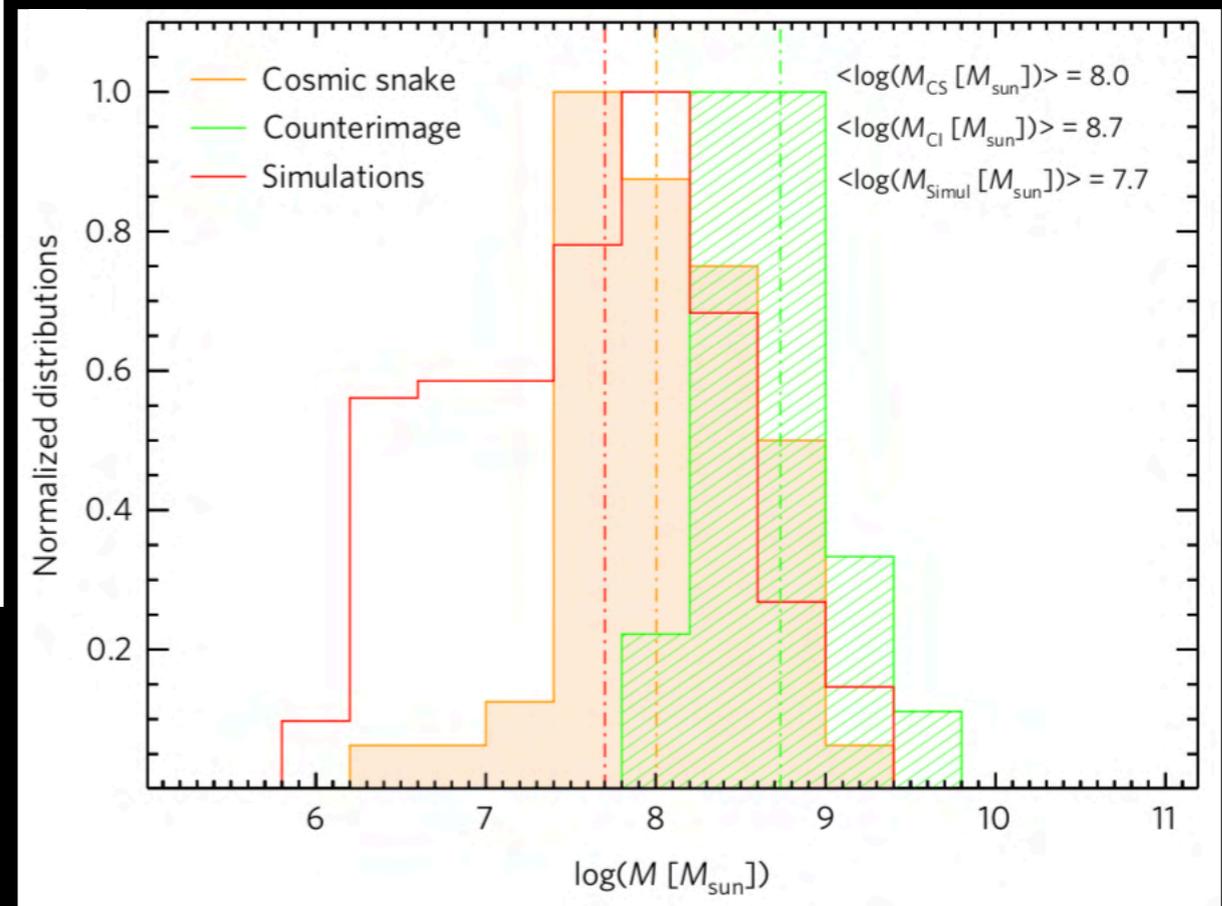


Taille des clumps

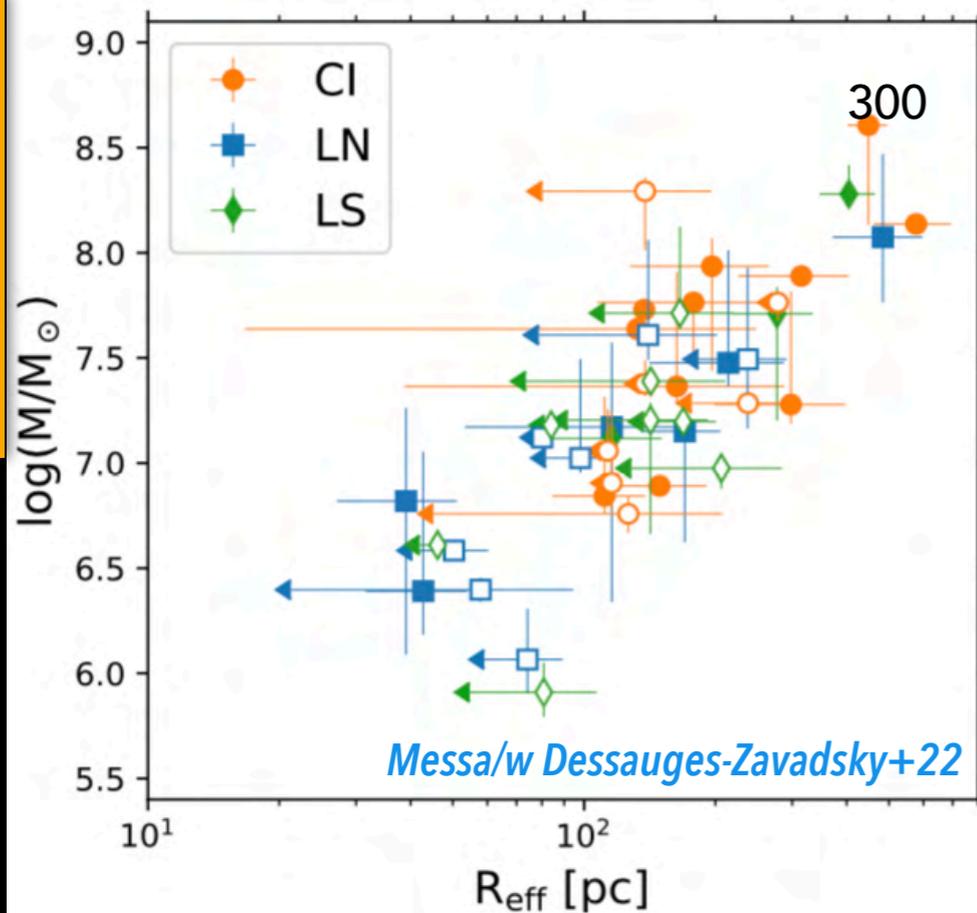
◆ entre 30 pc et 300 pc

Masse stellaire des clumps

◆ mediane $\sim 10^{7.5} M_{\odot}$

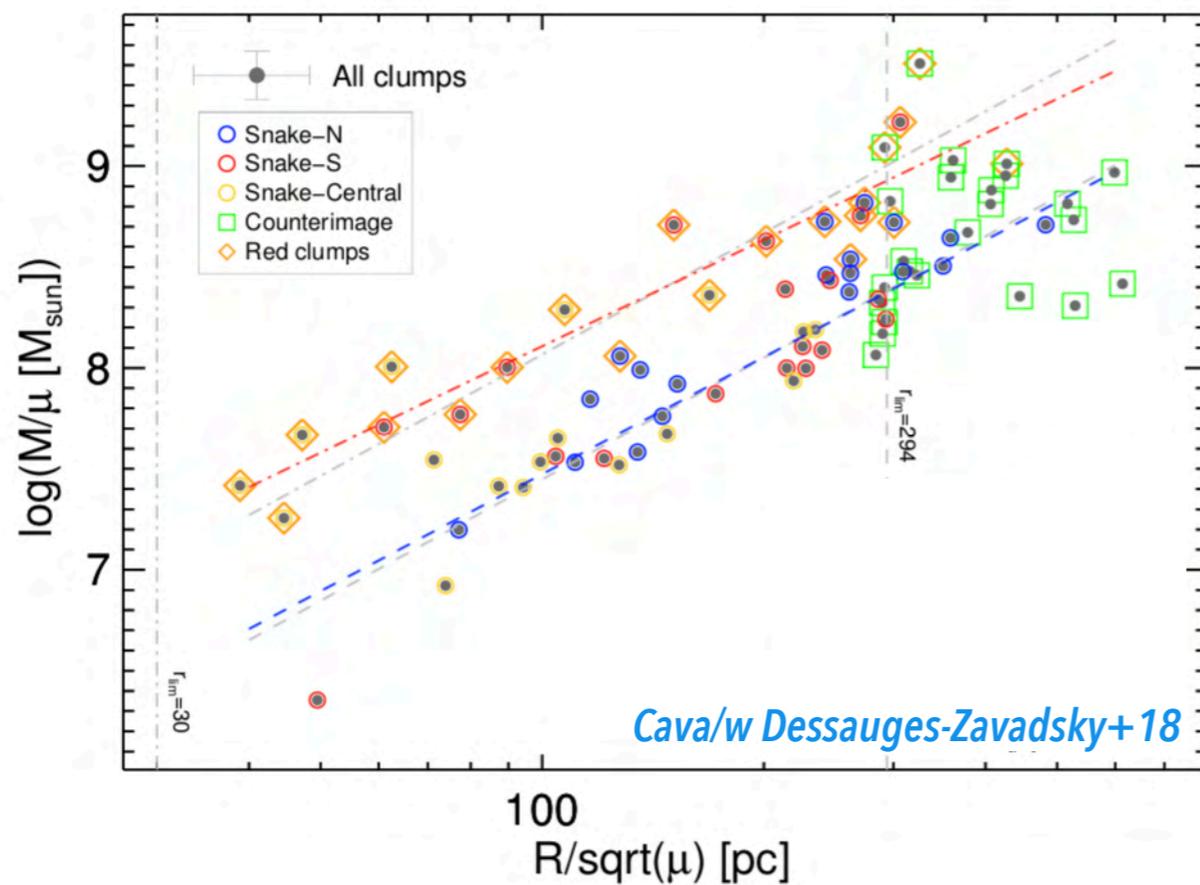


Galaxie A521-sys1



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*

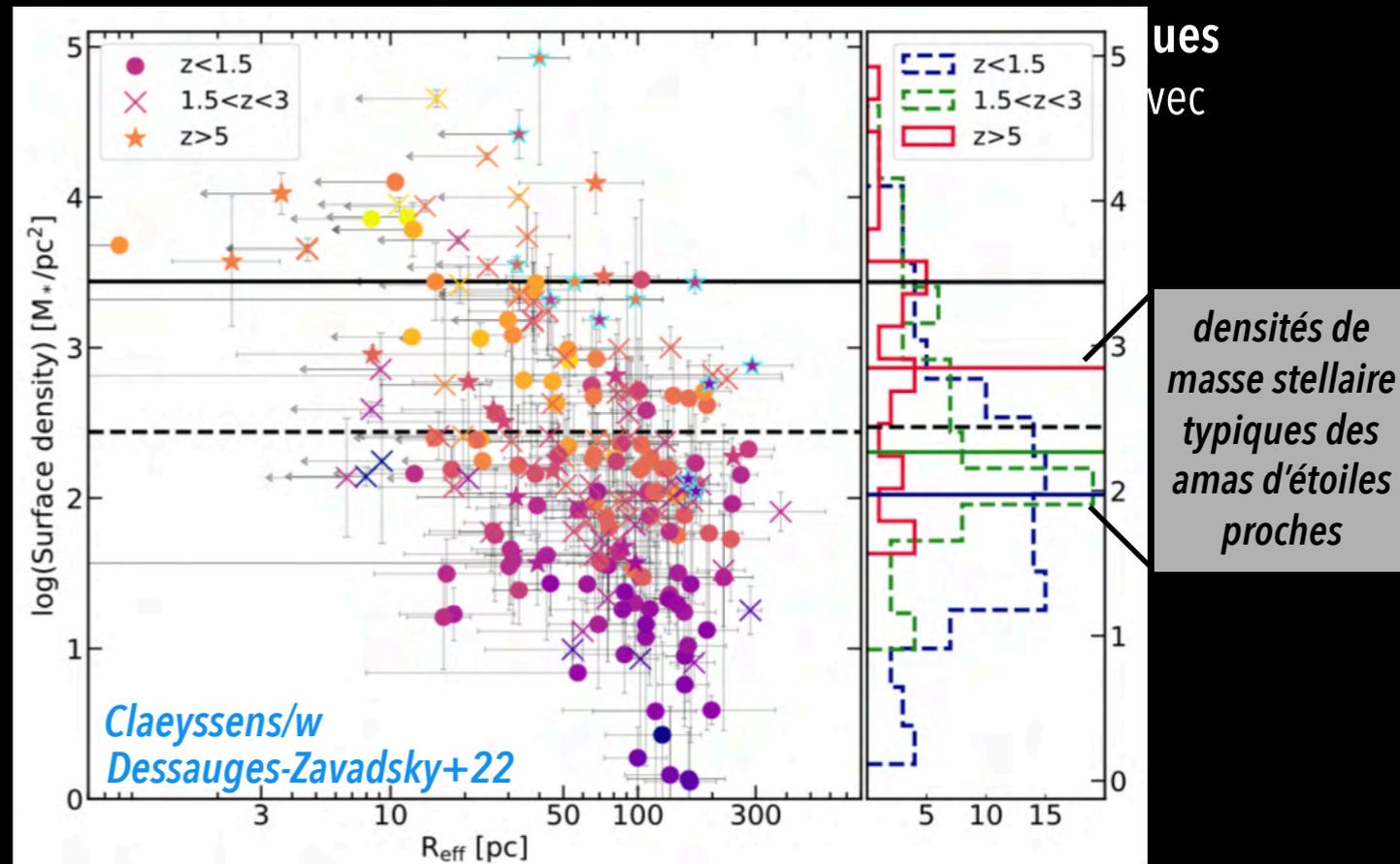
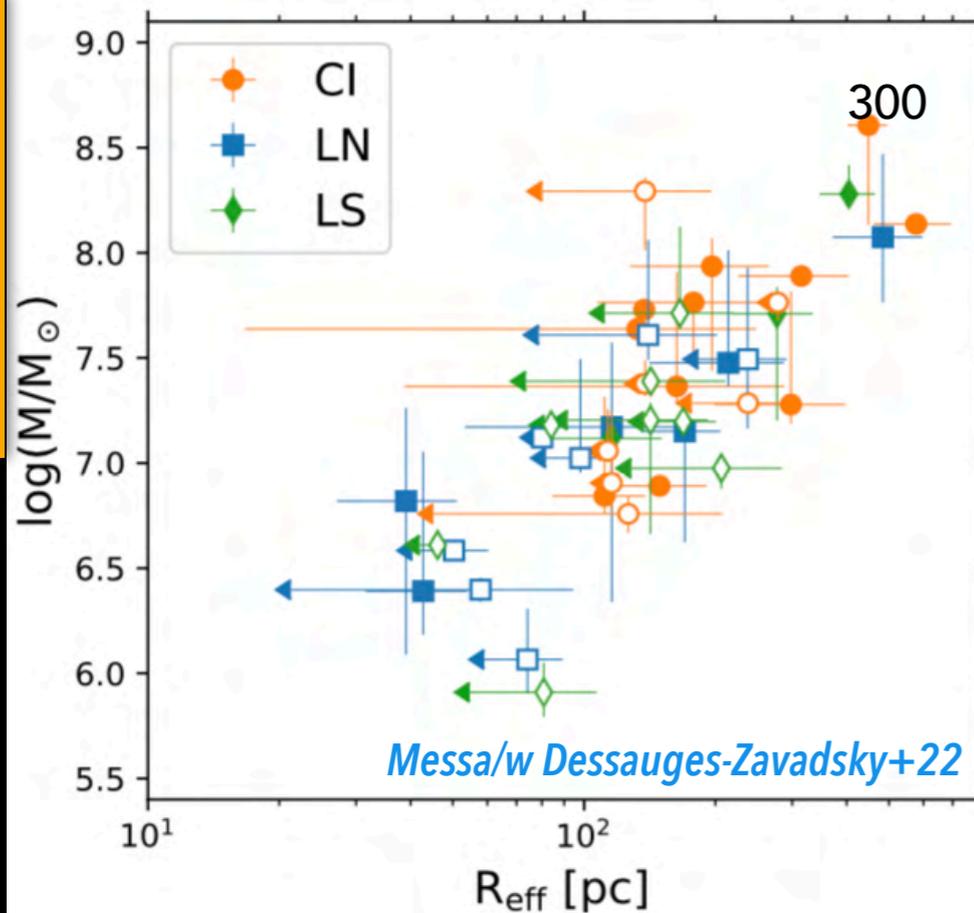
Âge des clumps

- entre 10 et 200 millions d'années

Densités surfacique de la masse des clumps

- de 100 à 10'000 M_{\odot}/yr

Galaxie A521-sys1



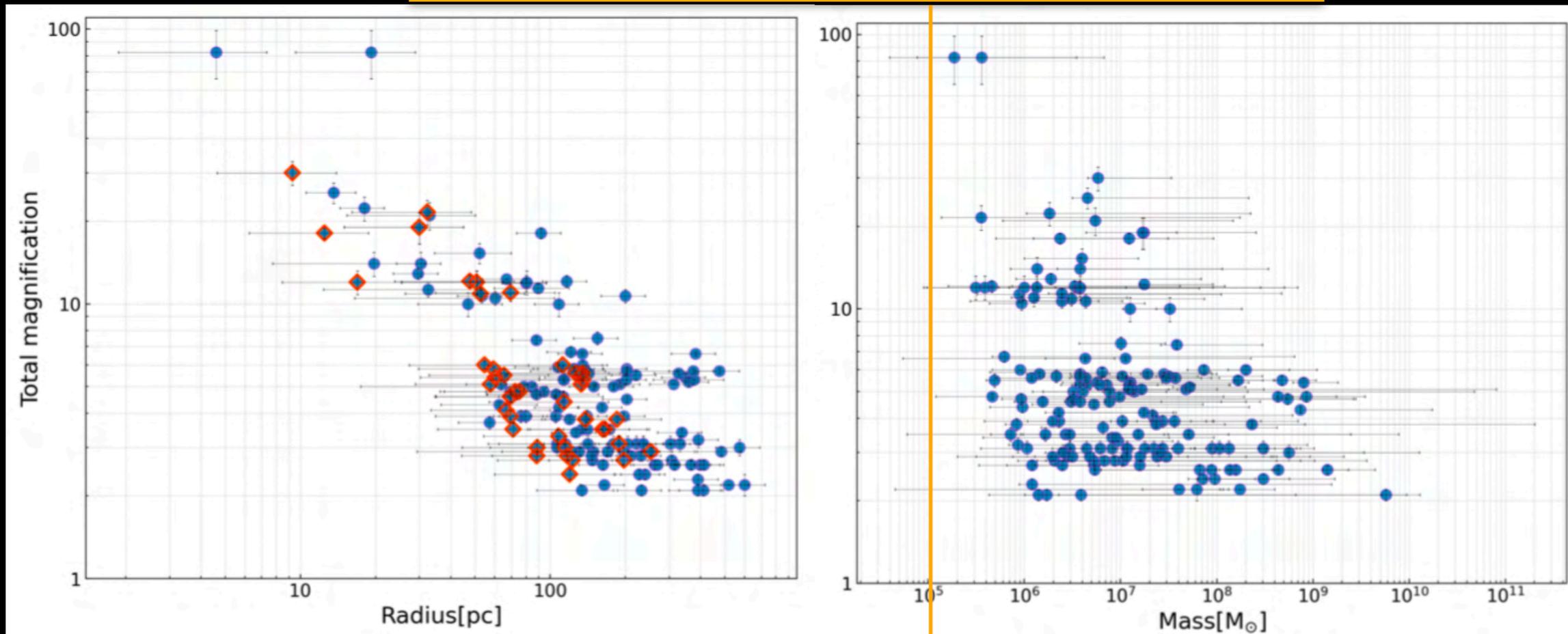
ues
vec

densités de
masse stellaire
typiques des
amas d'étoiles
proches

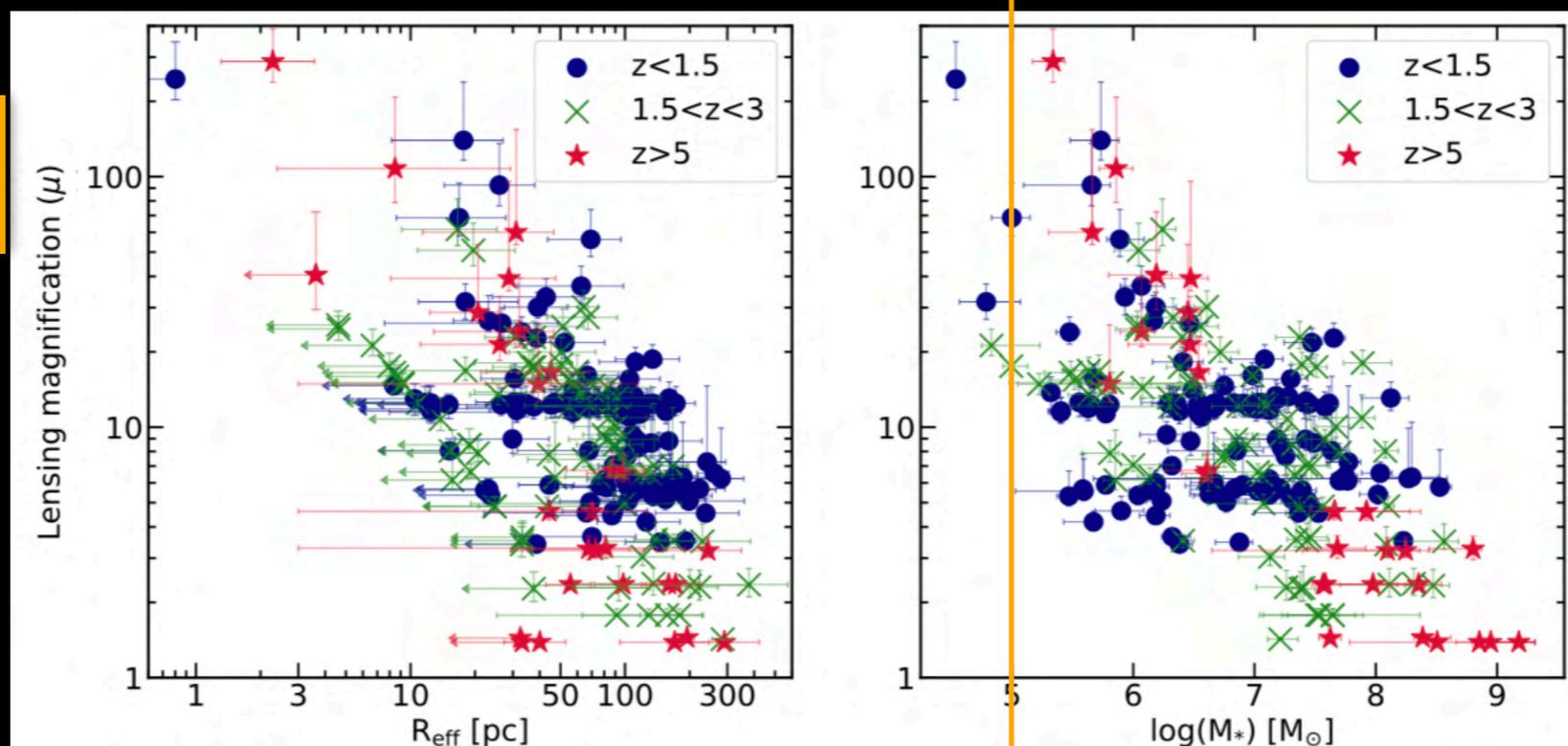
CLUMPS À HAUT z : AMAS D'ÉTOILES GÉANTS

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

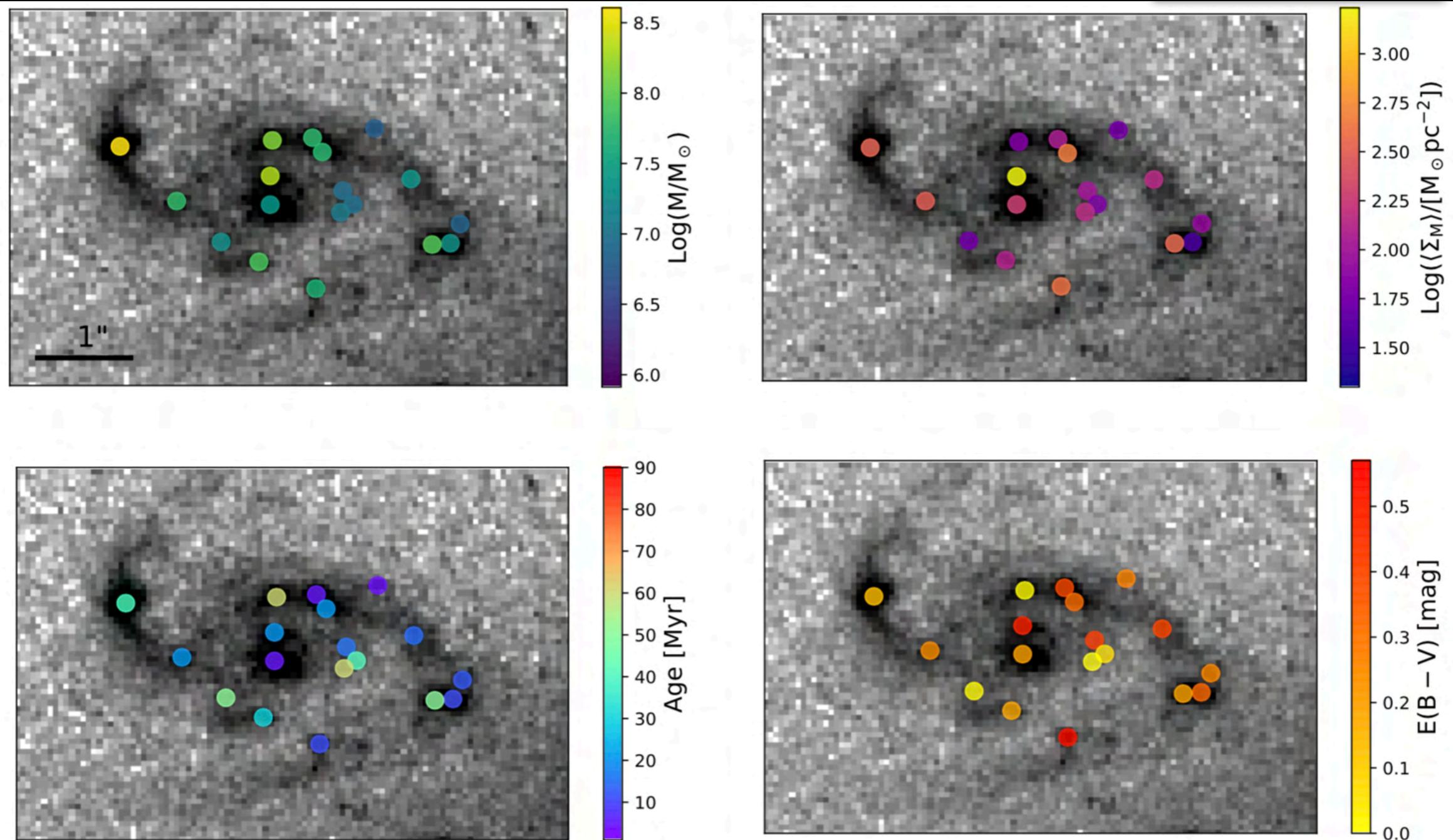
Galaxie *Cosmic Snake*

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.

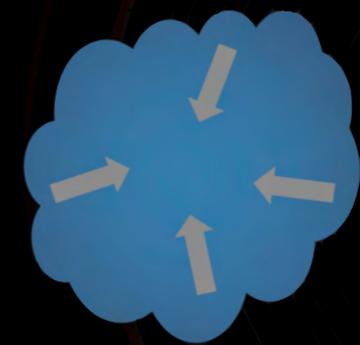
DÉTECTE-T-ON LES NUAGES MOLÉCULAIRES QUI ONT DONNÉ NAISSANCE AUX CLUMPS À HAUT REDSHIFT?



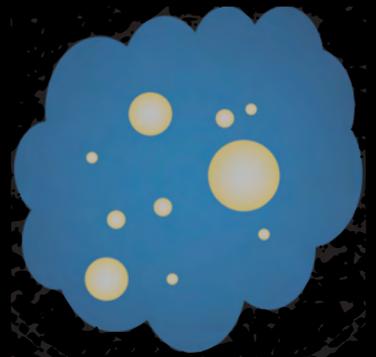
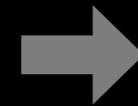
NGC 602

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:

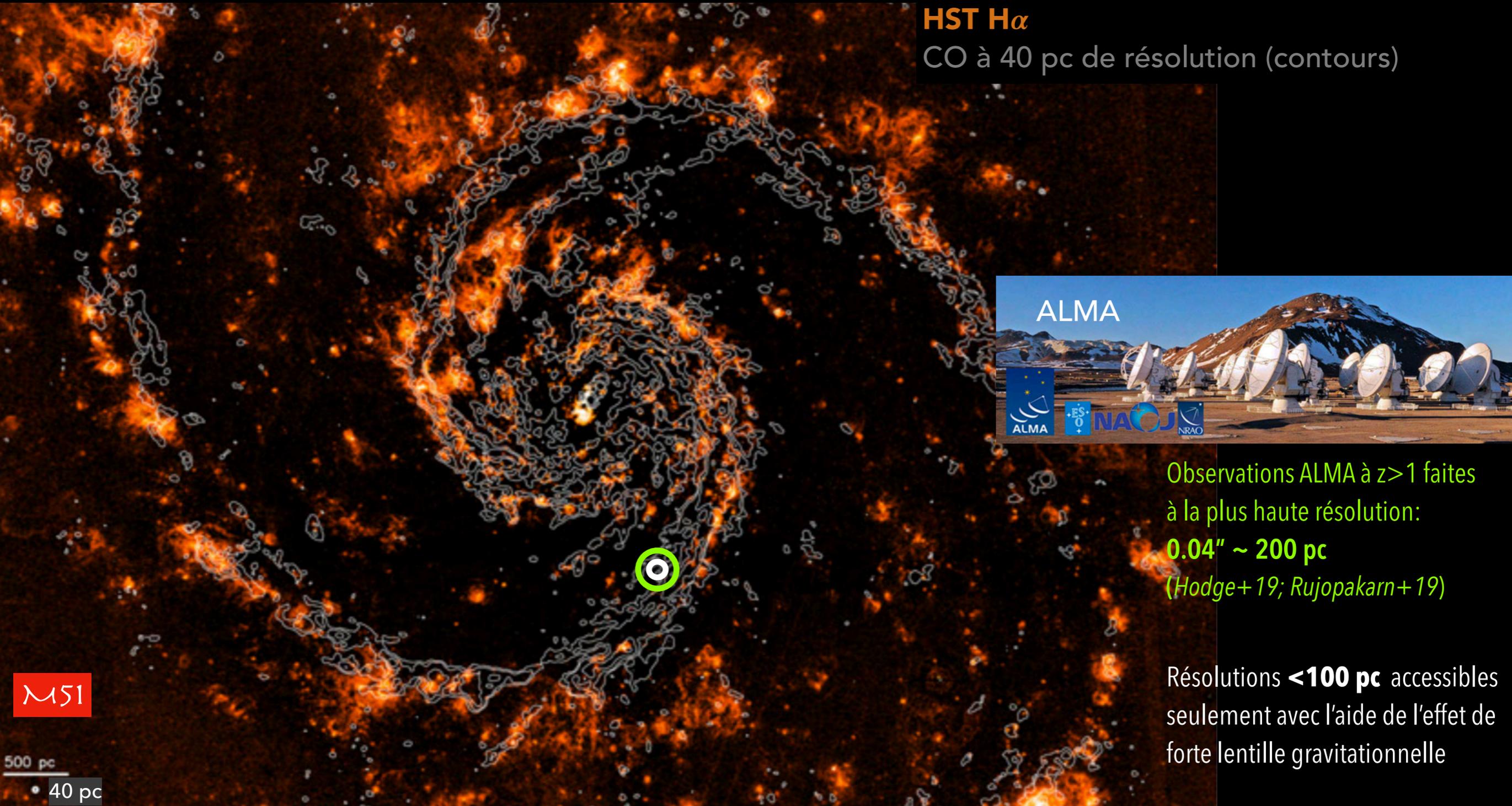
Masse moléculaire = $10^4 - 10^7 M_{\odot}$

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 α

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)

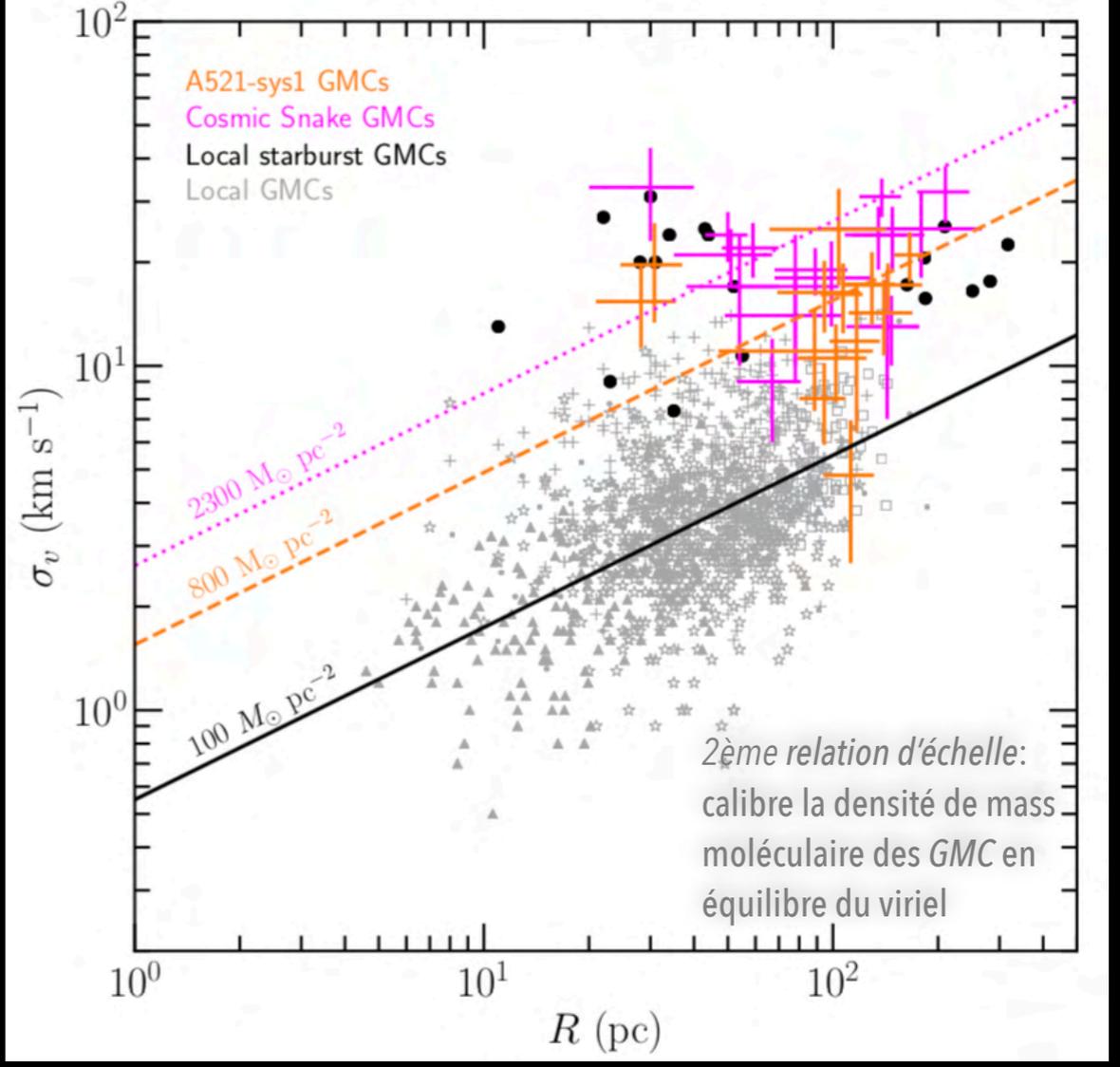
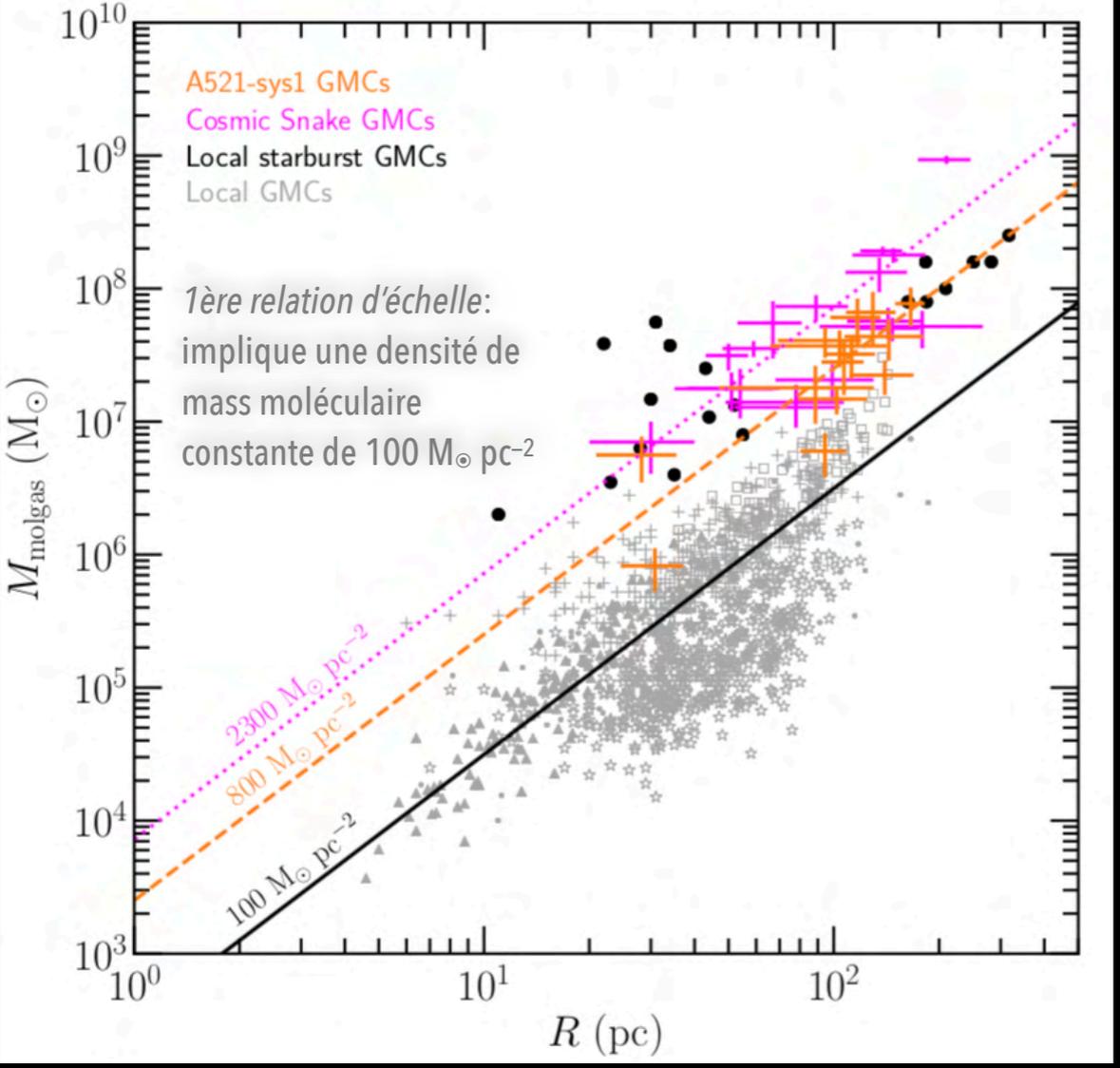
Résolutions **<100 pc** accessibles seulement avec l'aide de l'effet de forte lentille gravitationnelle

Schinnerer+13

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

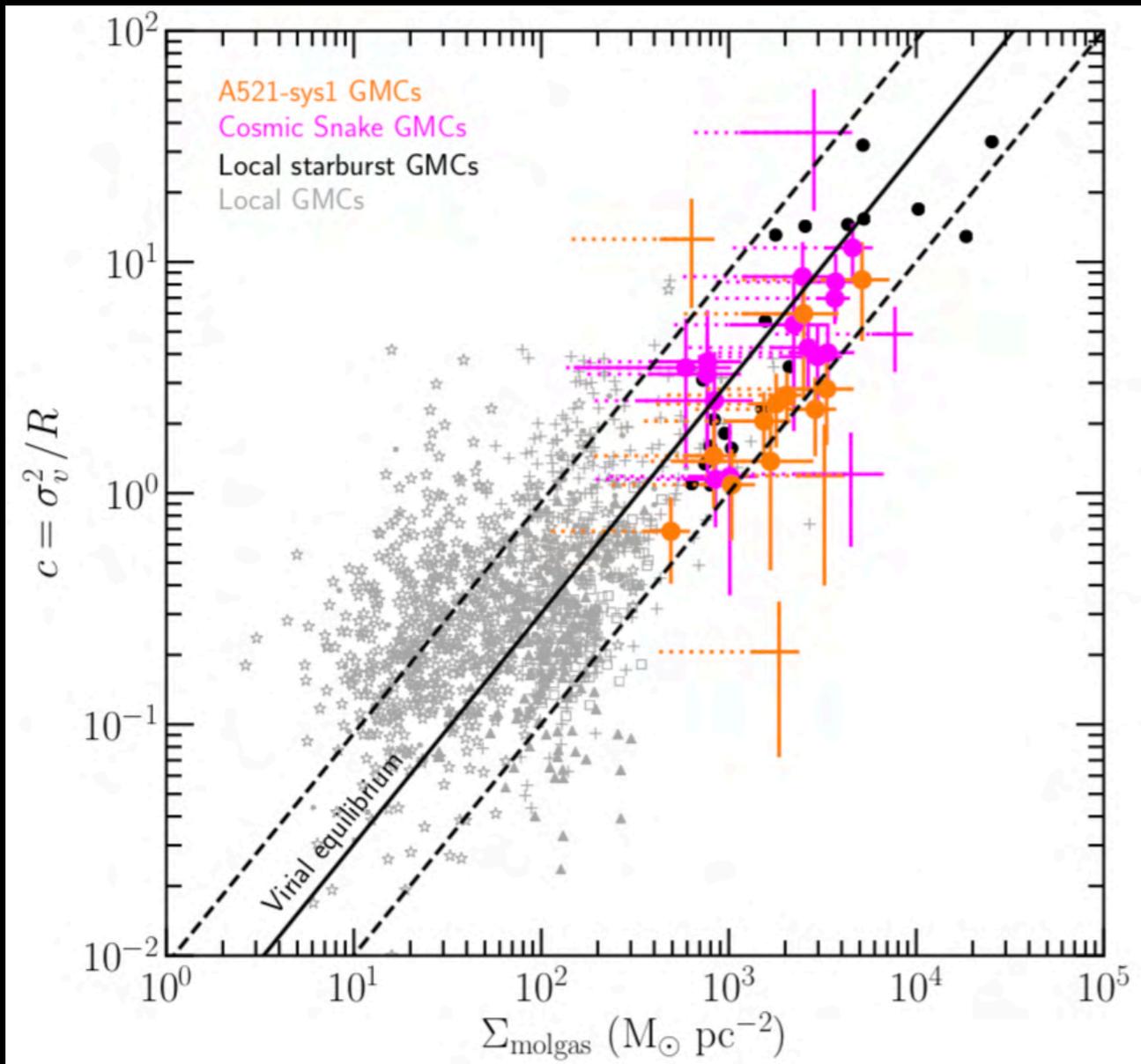
Les GMC à $z=1$ sont décalés des relations de Larson, car étant différents des GMC proches

- ◆ 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 ($2 \times$ 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_2

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

$\alpha_{\text{CO}} = 4.36$ — Voie Lactée

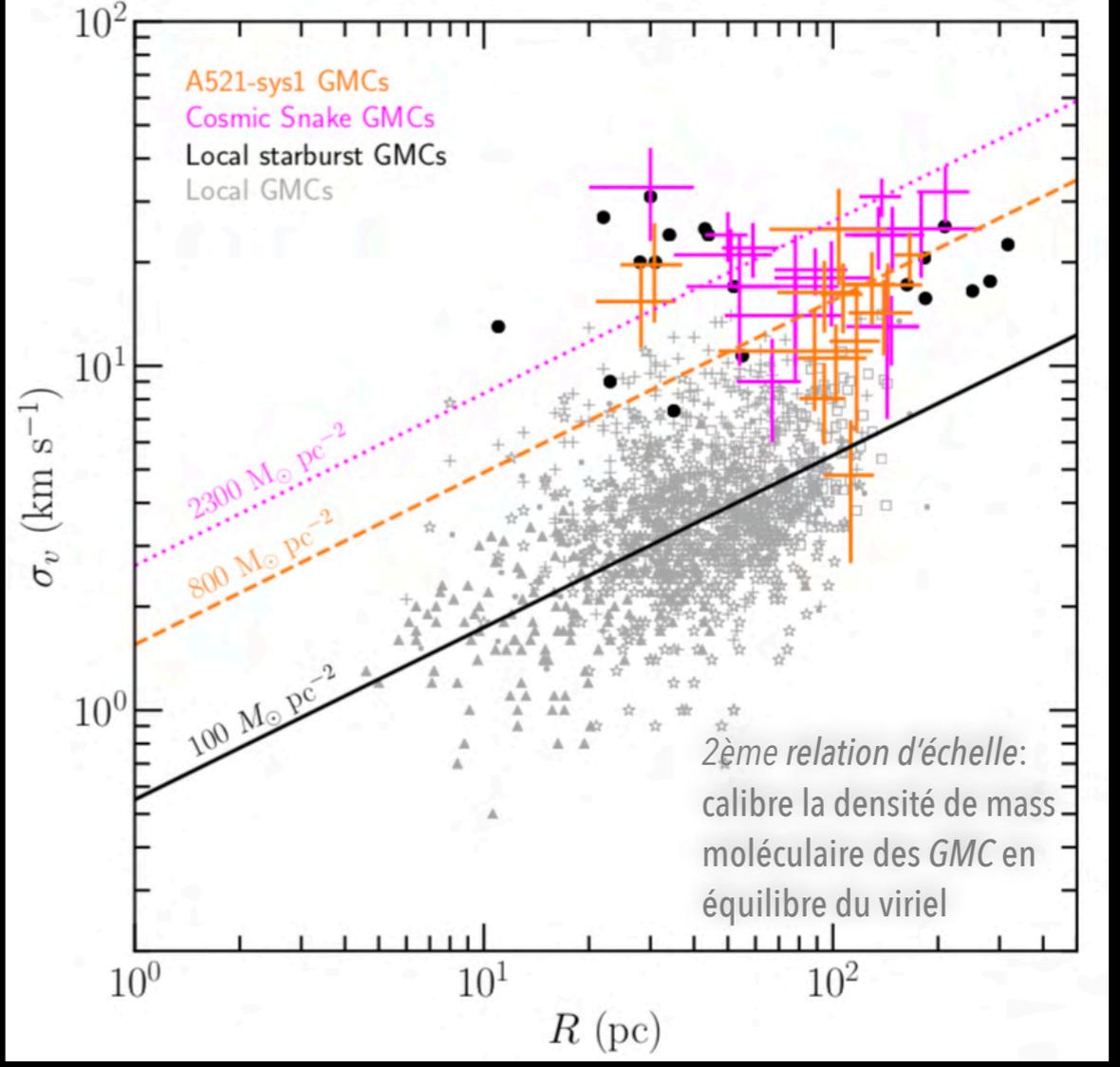
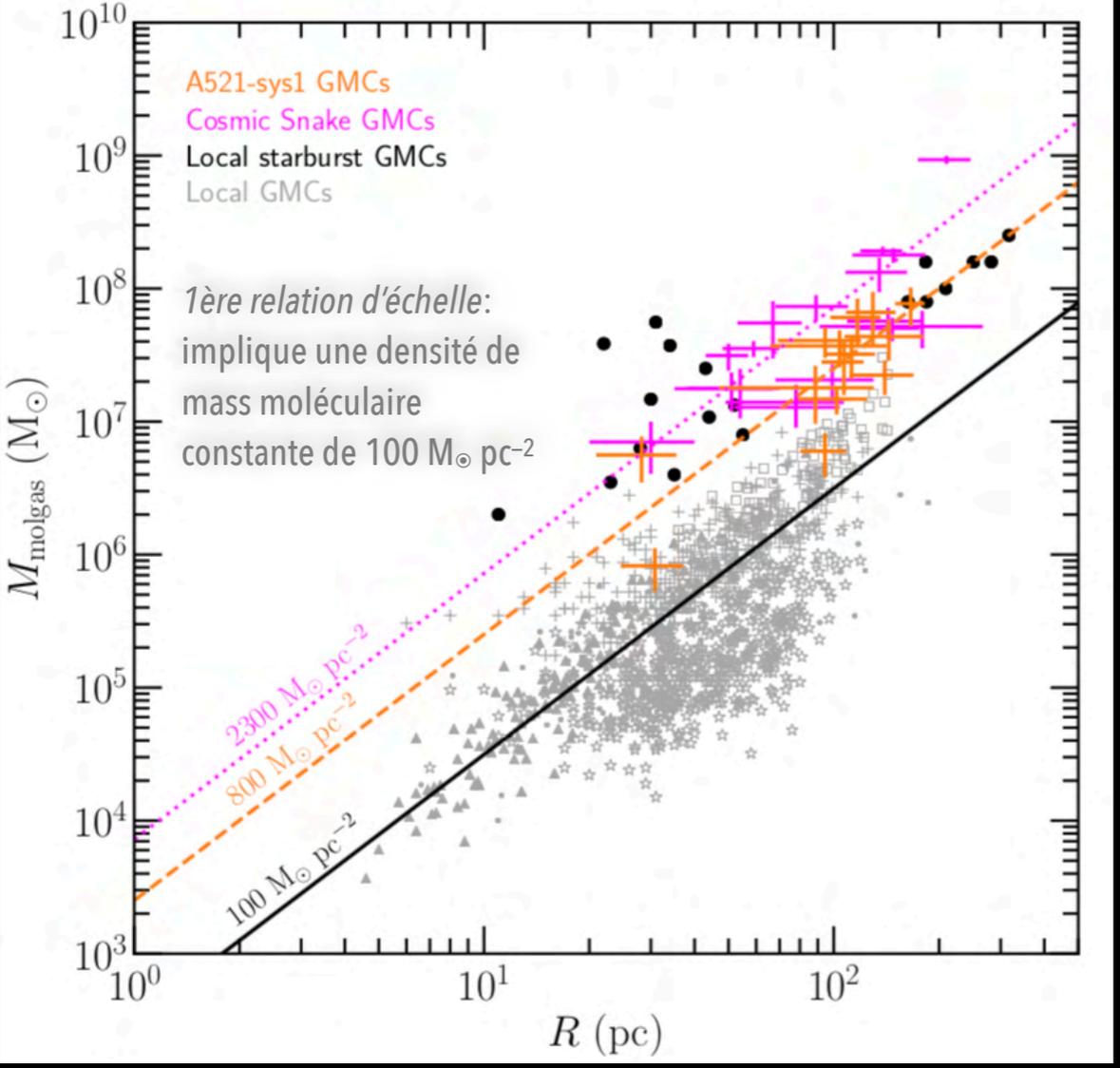
Dessauges-Zavadsky+19,22

Dans une limite de 2 à 3 de la relation de pente 1, les GMC sont considérés **en équilibre du viriel**, étant donné que ± 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

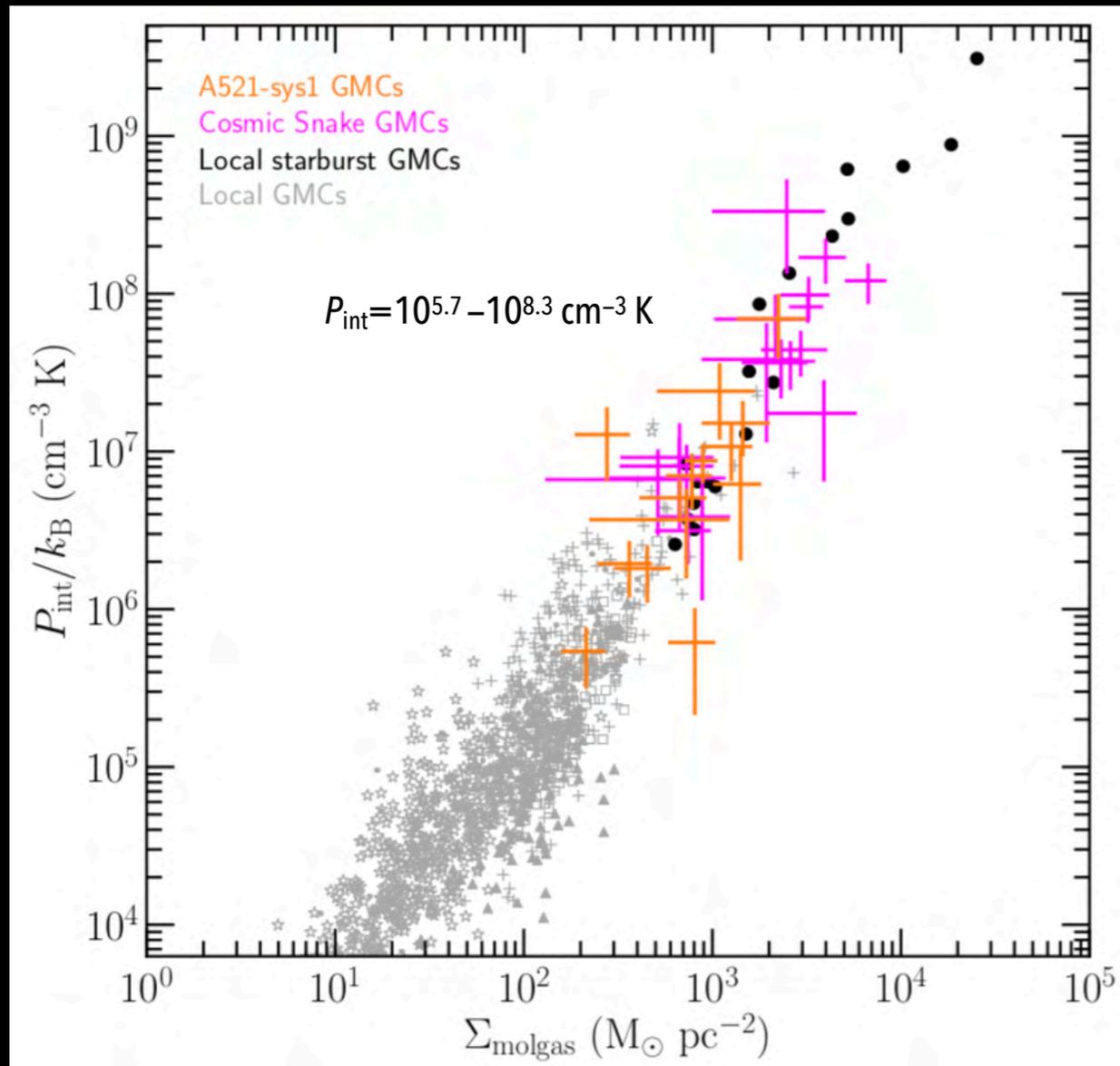
- ◆ masses moléculaires plus élevées (d'un facteur 100)
- ◆ densités surfaciques de la masse plus grandes (d'un facteur 10)
- ◆ dispersions des vitesses internes plus larges

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

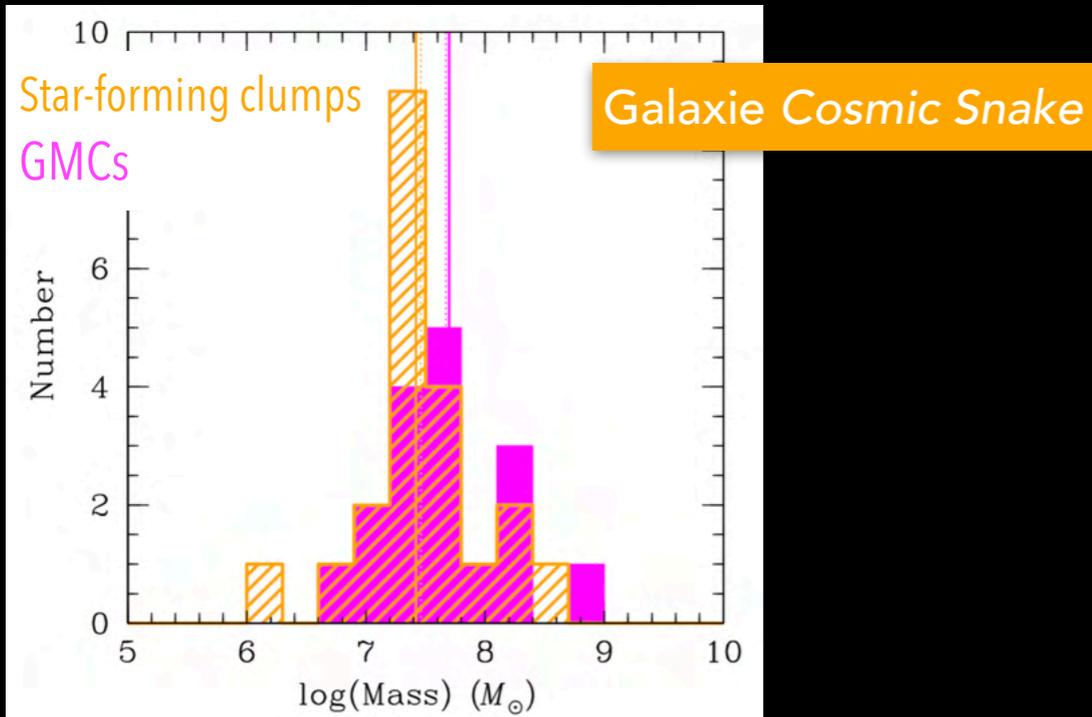
$$\epsilon_{\text{obs}} = \frac{M_{\star, \text{young}}}{M_{\star, \text{young}} + M_{\text{molecular}}} \quad \text{Evans+09}$$

Hypothèse:

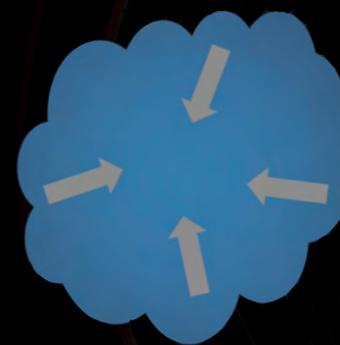
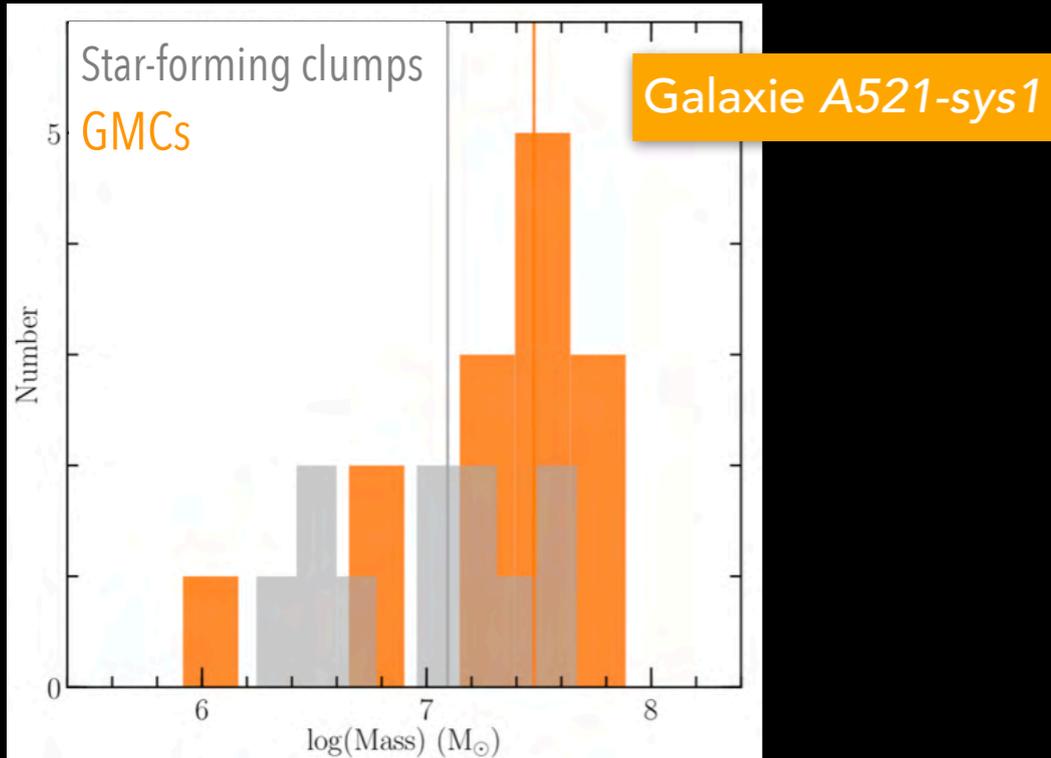
les GMC identifiés sont représentatifs des nuages moléculaires où se sont formés les *clumps* brillants dans l'UV que l'on observe

→ 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

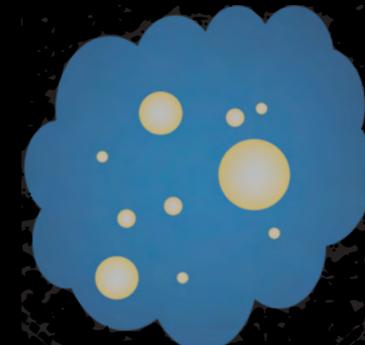
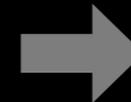


Dessauges-Zavadsky+22



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

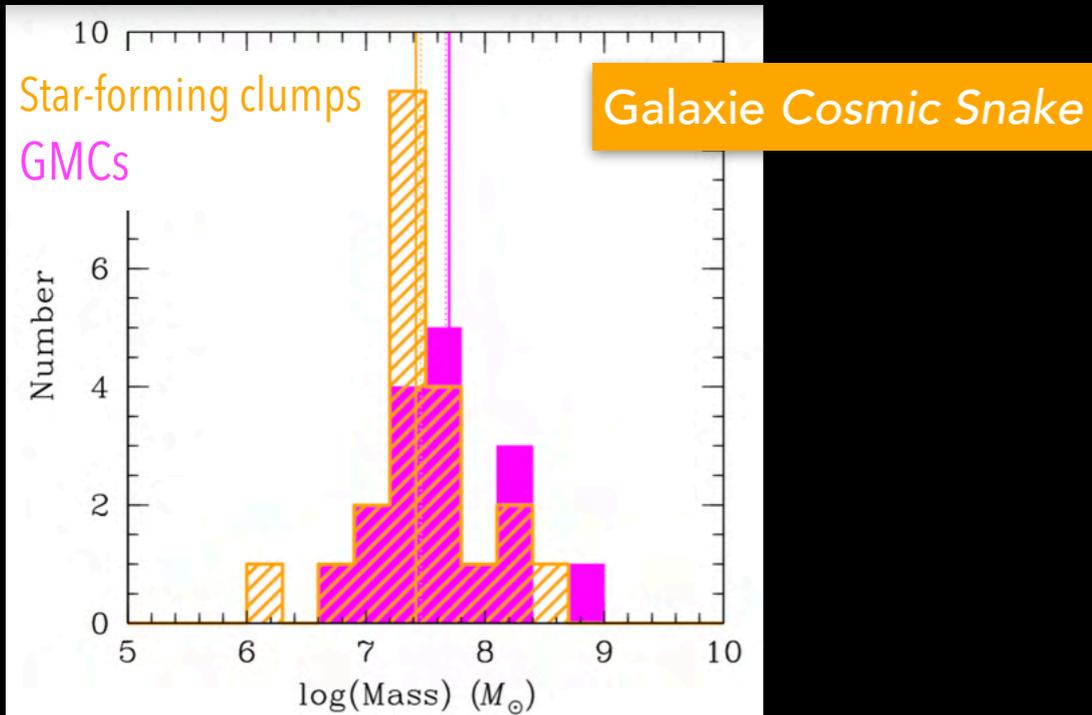
$$\epsilon_{\text{obs}} = \frac{M_{\star, \text{young}}}{M_{\star, \text{young}} + M_{\text{molecular}}} \quad \text{Evans+09}$$

Hypothèse:

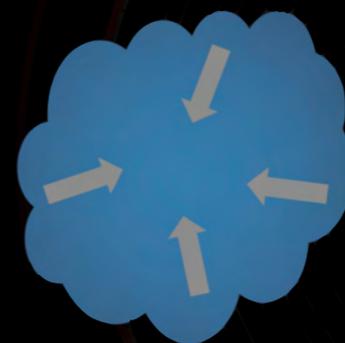
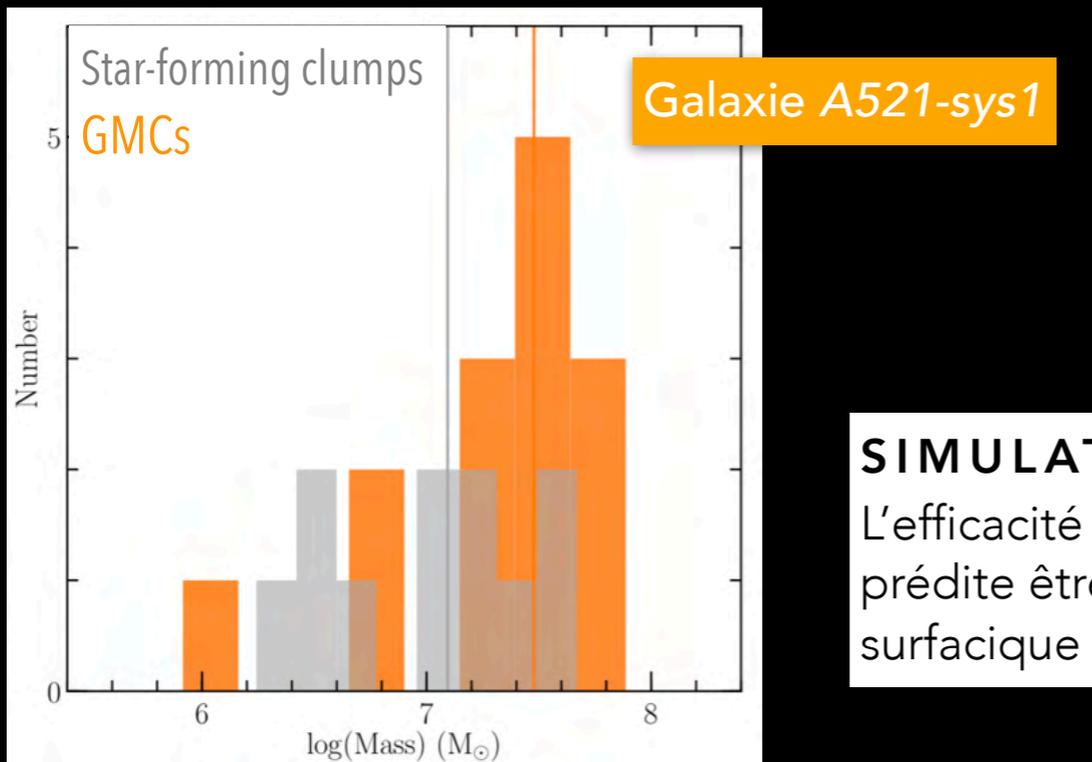
les GMC identifiés sont représentatifs des nuages moléculaires où se sont formés les *clumps* brillants dans l'UV que l'on observe

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

Dessauges-Zavadsky+19

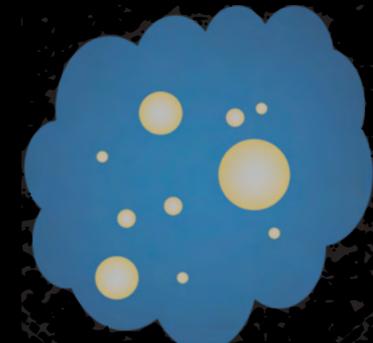


Dessauges-Zavadsky+22



GMC hautement supersonique

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

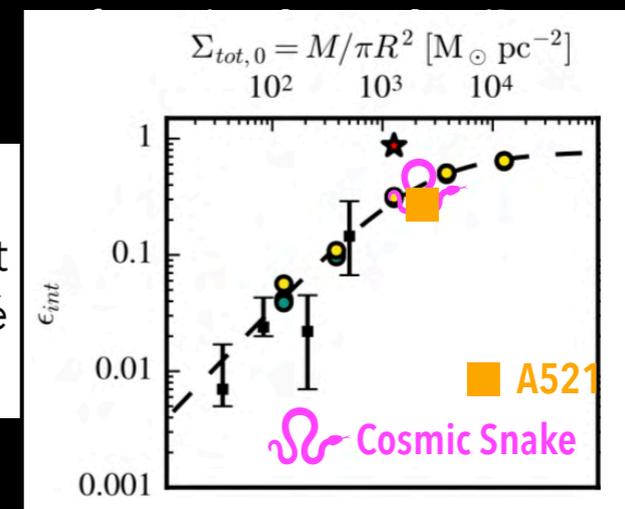


Une turbulence supersonique accrue dans le GMC implique-t-elle **une plus grande efficacité de**

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

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

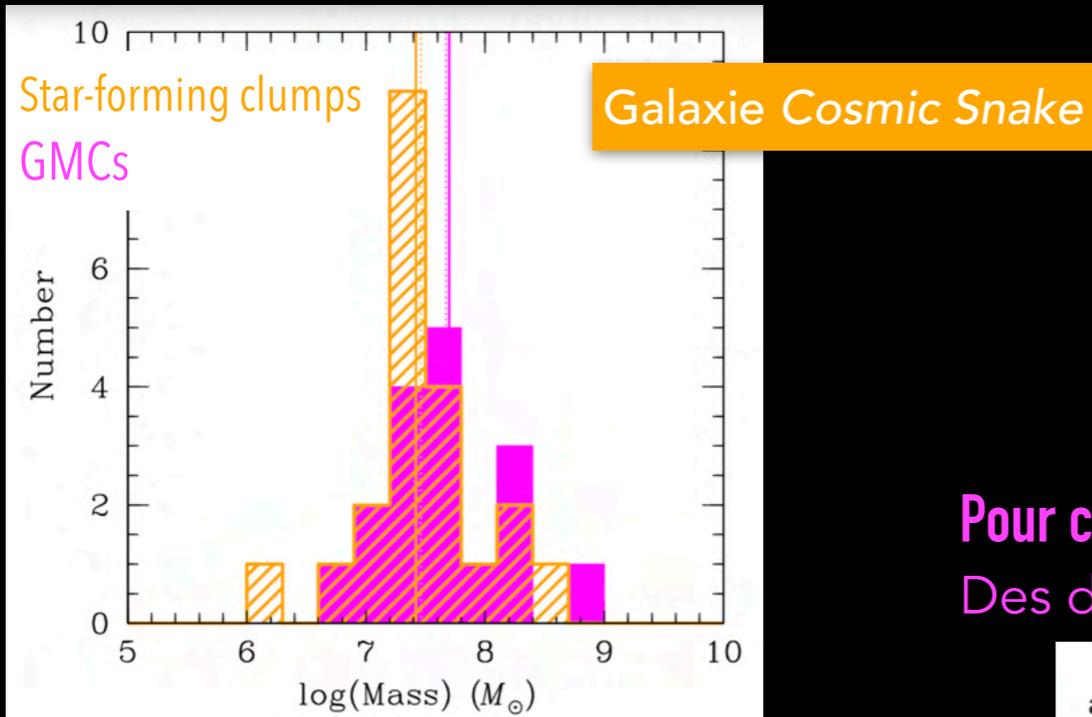
Hypothèse:

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

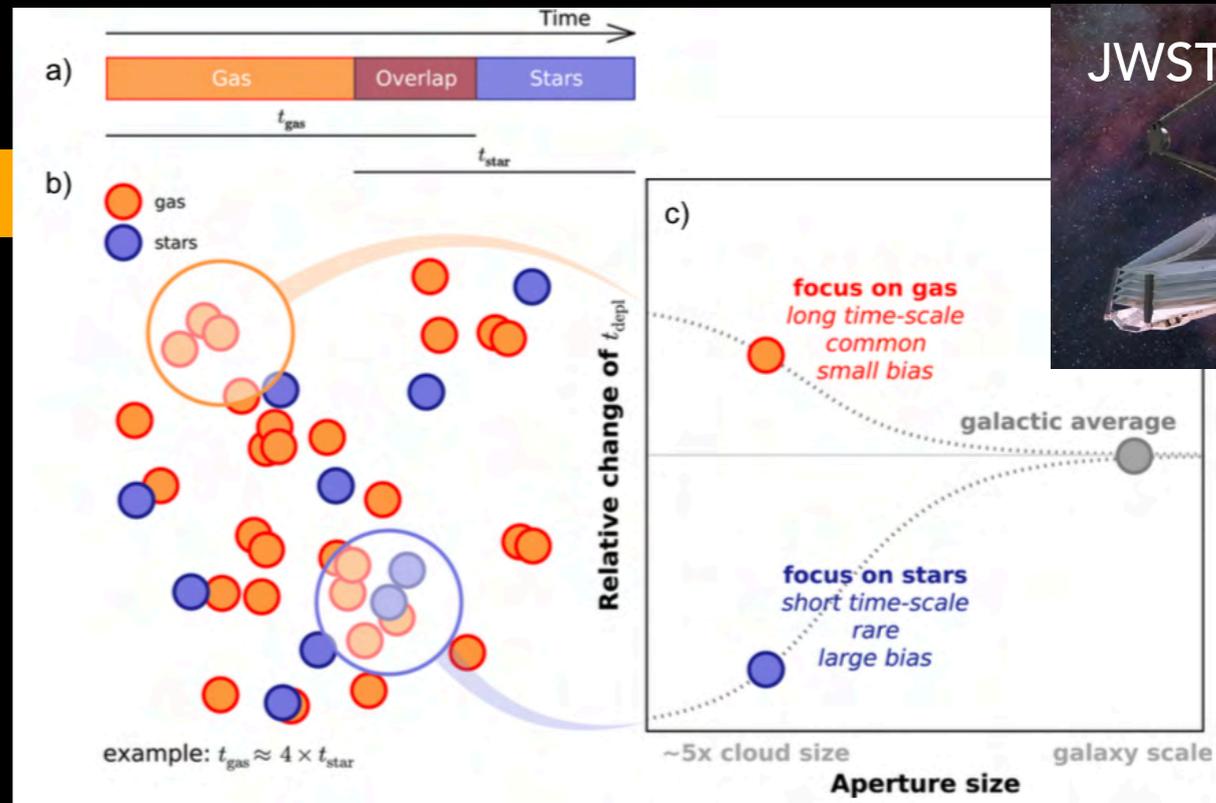
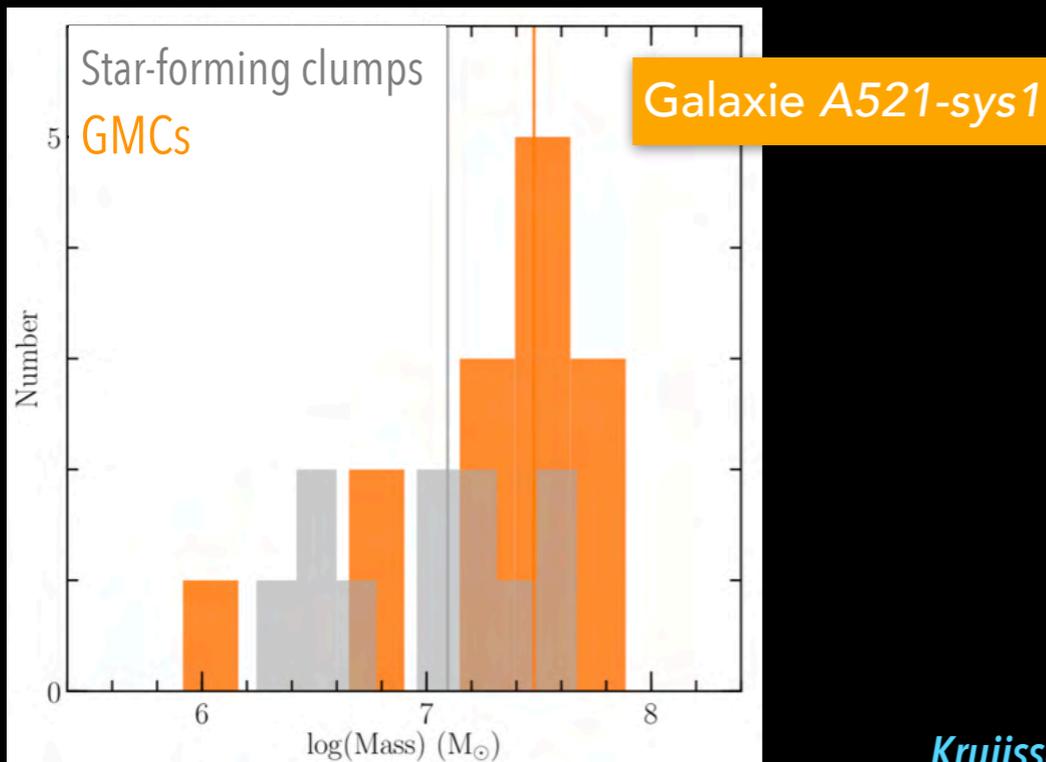
→ les GMC à $z=1$ ont une efficacité de formation stellaire de $\sim 30\%$ (valeurs pour les GMC des galaxies proches $< 6\%$)

Pour confirmer la grande efficacité de formation stellaire dans les GMC à $z=1$: Des données JWST H α 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.