

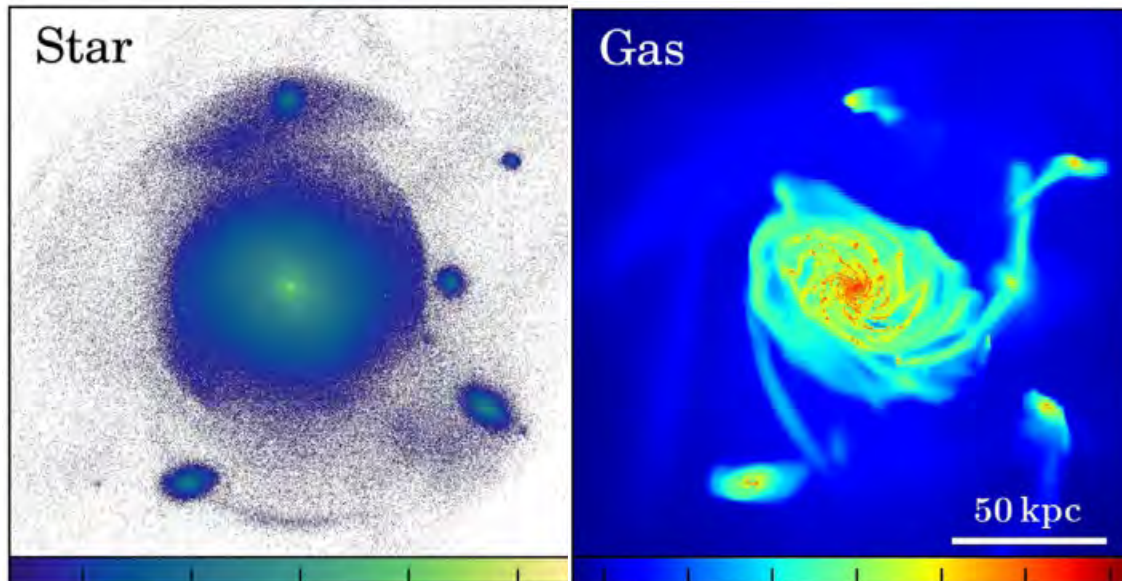


COLLÈGE
DE FRANCE
—1530—

Chaire Galaxies et Cosmologie

Origine des disques, des sphéroides Relations d'échelle

Simulations Horizon



Françoise Combes



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

Les grandes lignes

1- Galaxies à grand z: observations

Morphologies, Barres

Fraction de gaz et formation d'étoiles

2- Disques et sphéroides: simulations

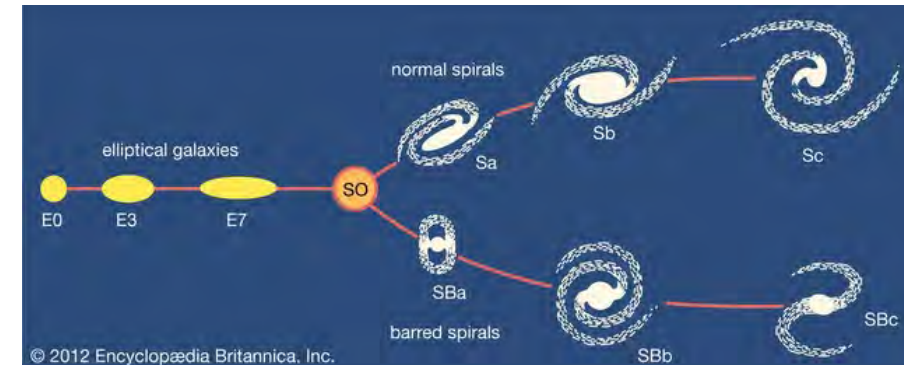
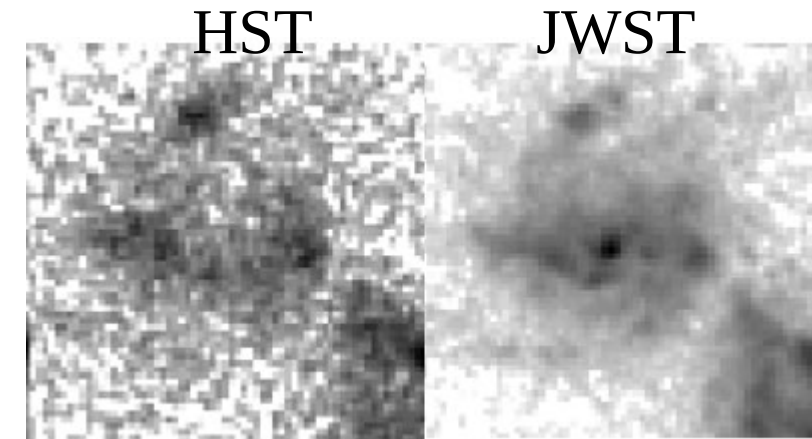
Comment atteindre la séquence de Hubble

Comment stopper la formation d'étoiles

3- Relations d'échelle -- Processus

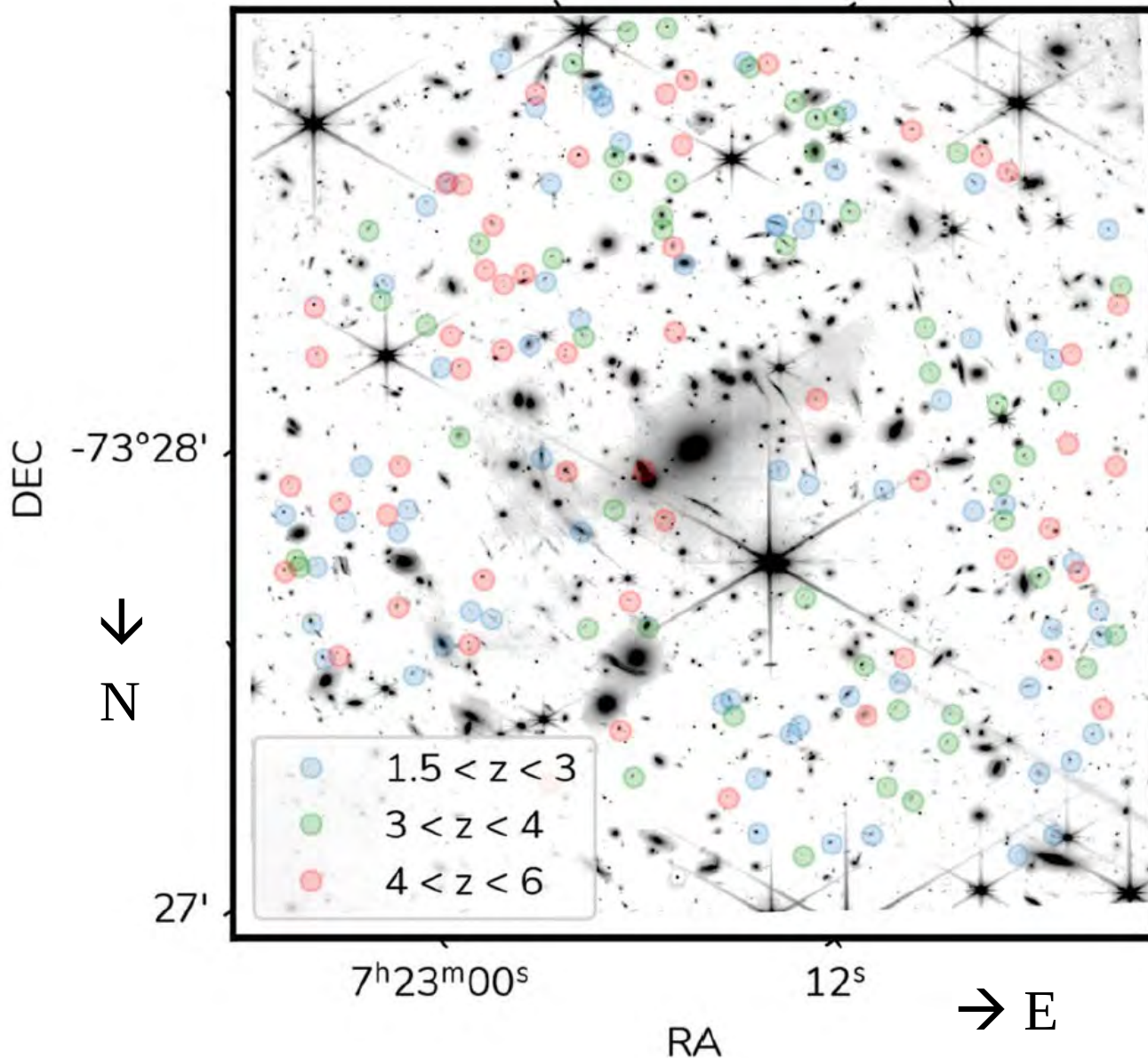
Formation des disques/sphéroides

Evolution séculaire, Fusions de galaxies



Images JWST: Identification des redshifts

SMACS 0723



4265 galaxies observées à $1.5 < z < 8$
20 fois plus que les études précédentes!

Surprise: le HST montraient des galaxies irrégulières, « clumpy » en morceaux

JWST montre des spirales, des disques jusqu'à $z=6$ (1 Gyr après le Big-Bang)

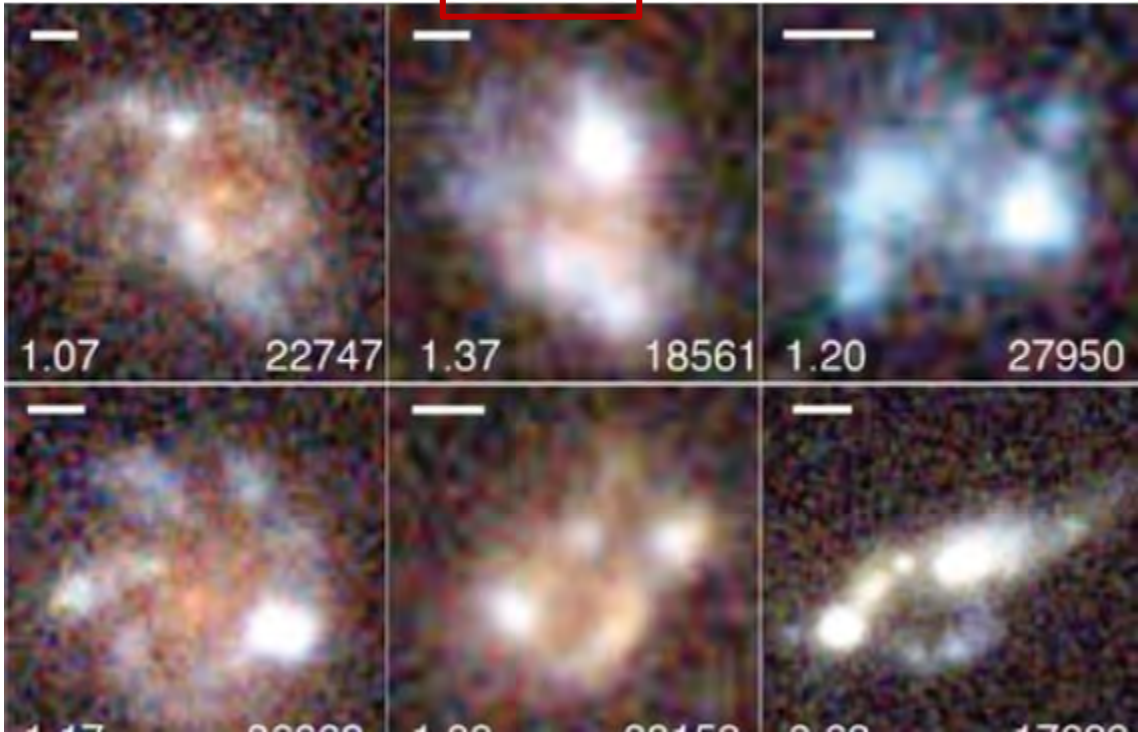
Ferreira et al 2022

Principales images de Hubble

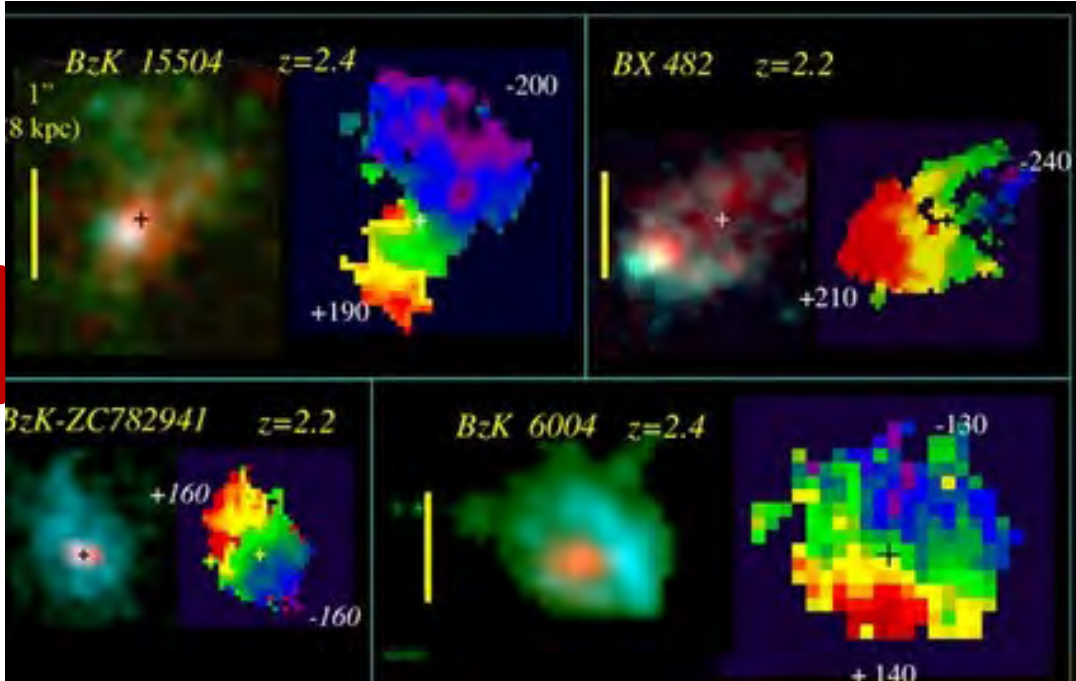


$z=0$

$z=1$



$z=2$

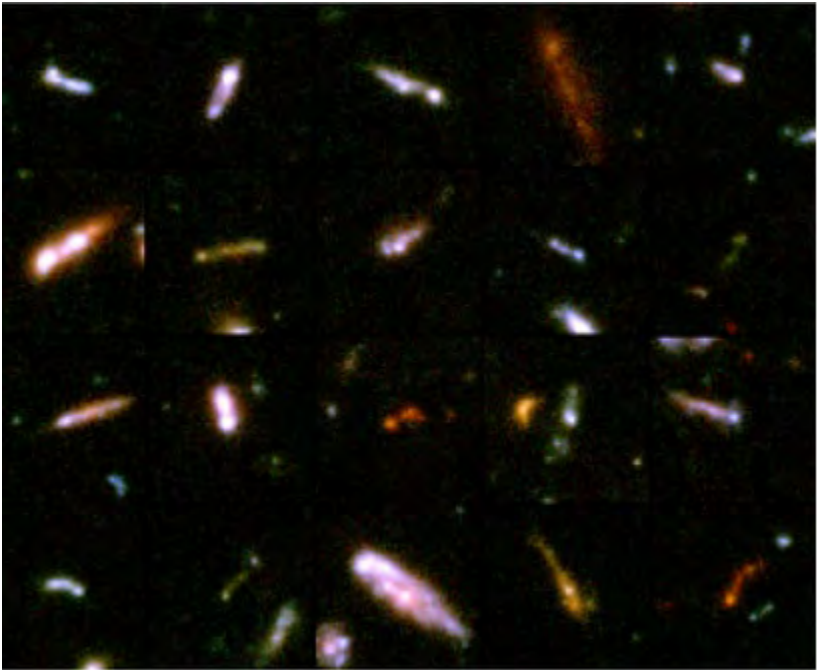


Genzel et al 2008

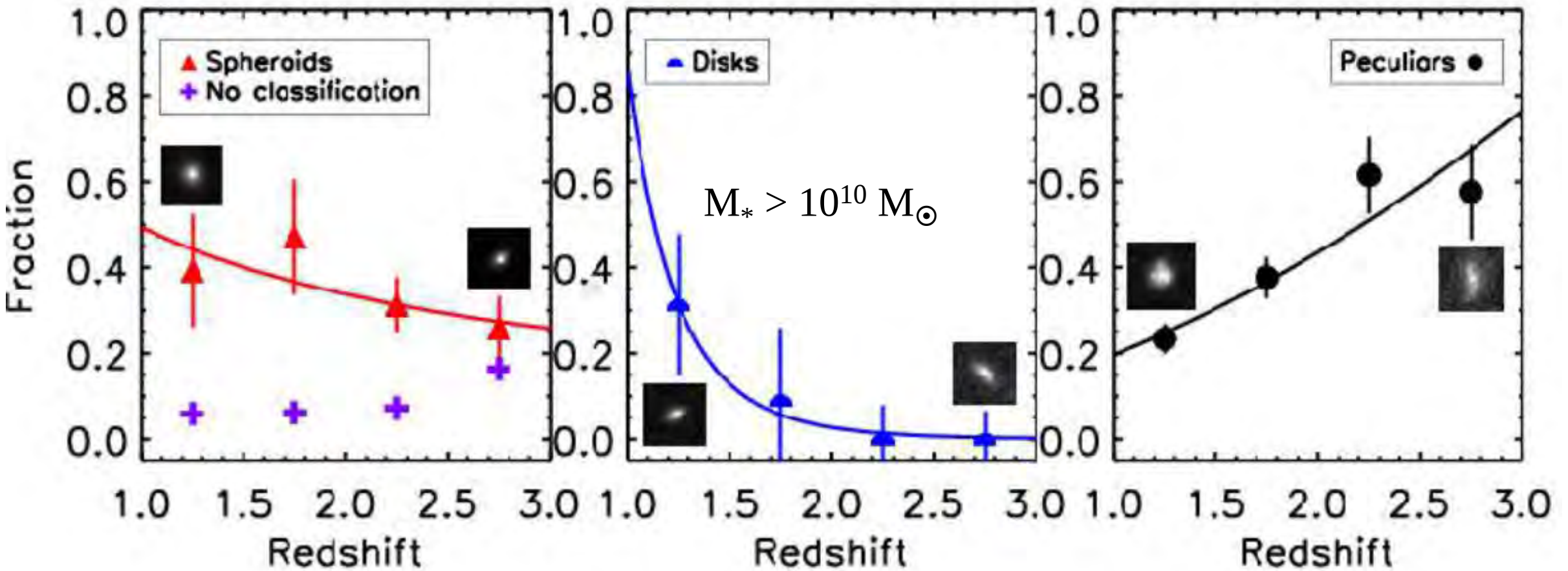
chain
Tadpole
(têtard)

$z=3$

HUDB
NASA/ESA



Fraction de disques, sphéroides, Peculiars, avant JWST

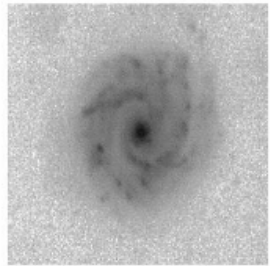


Downsizing:

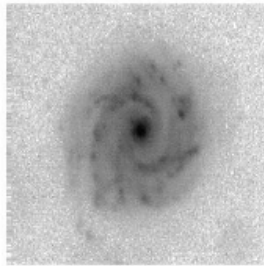
Ce sont les plus massives qui évoluent plus vite et forment la séquence de Hubble

Mortlock et al 2013

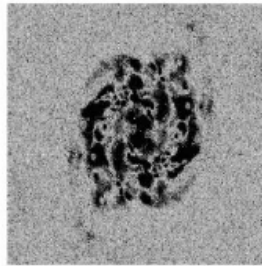
Classification automatique CAS



I



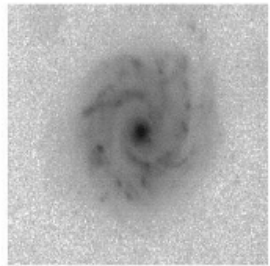
R



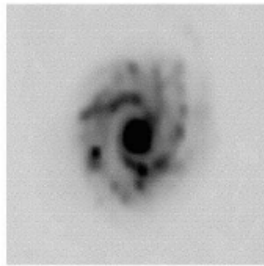
abs(I-R)

$$A = \frac{\text{abs}(I-R)}{I}$$

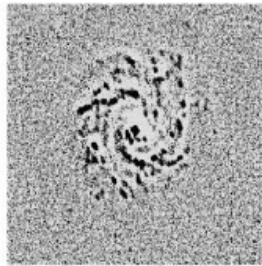
Asymétrie
R tournée de 180°



I



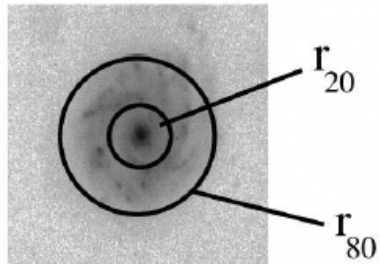
B



I-B

$$S = \frac{I-B}{I}$$

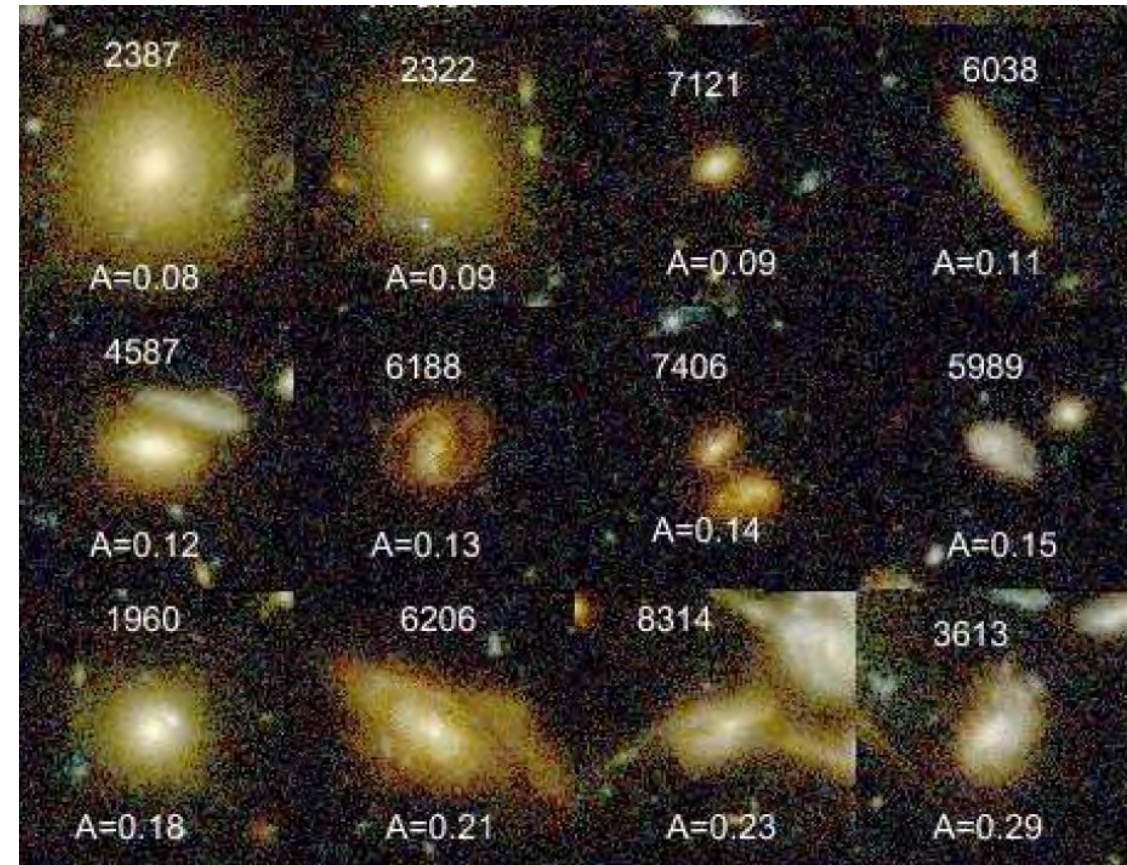
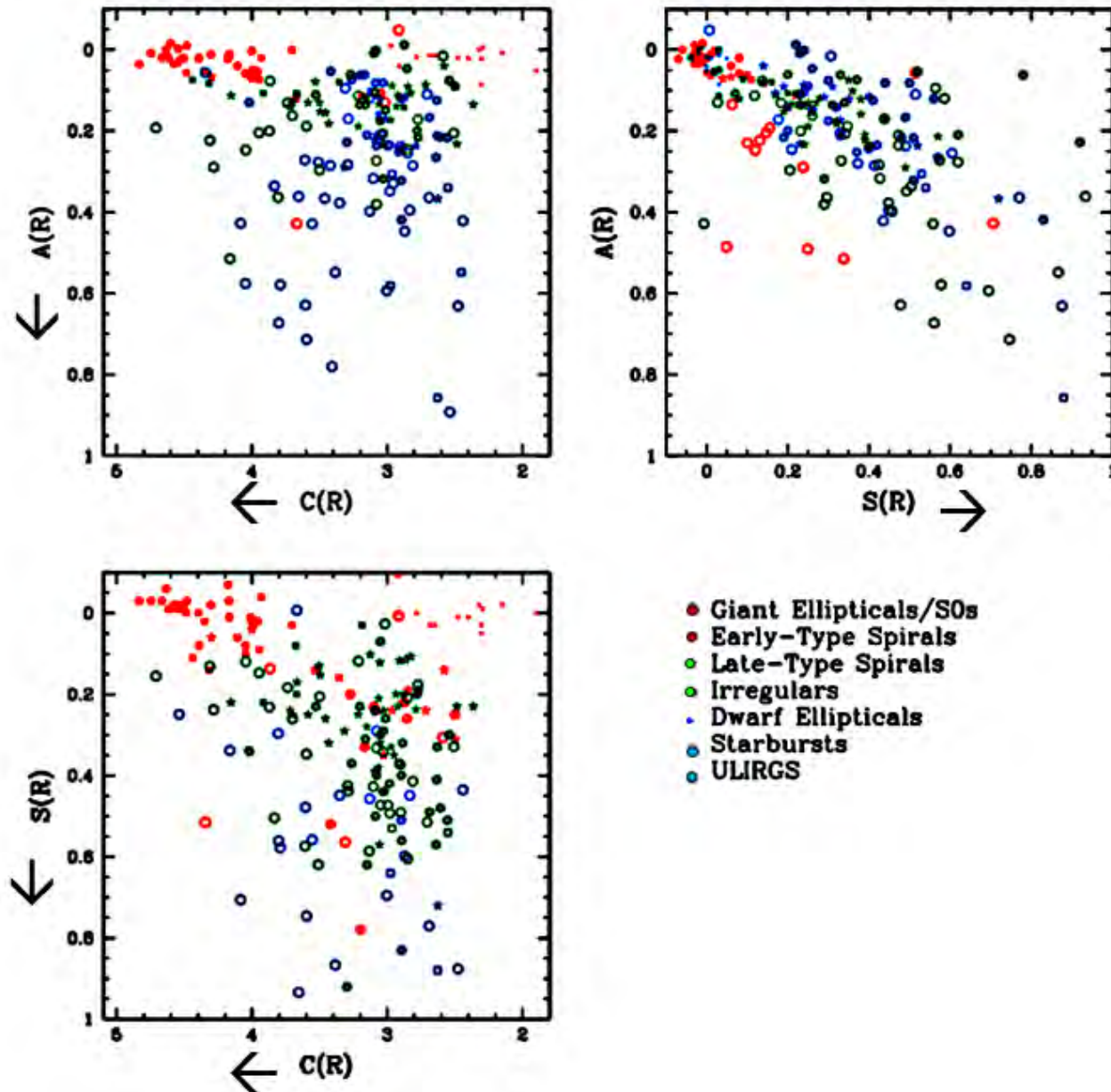
Granularité
B lissée (blurred)



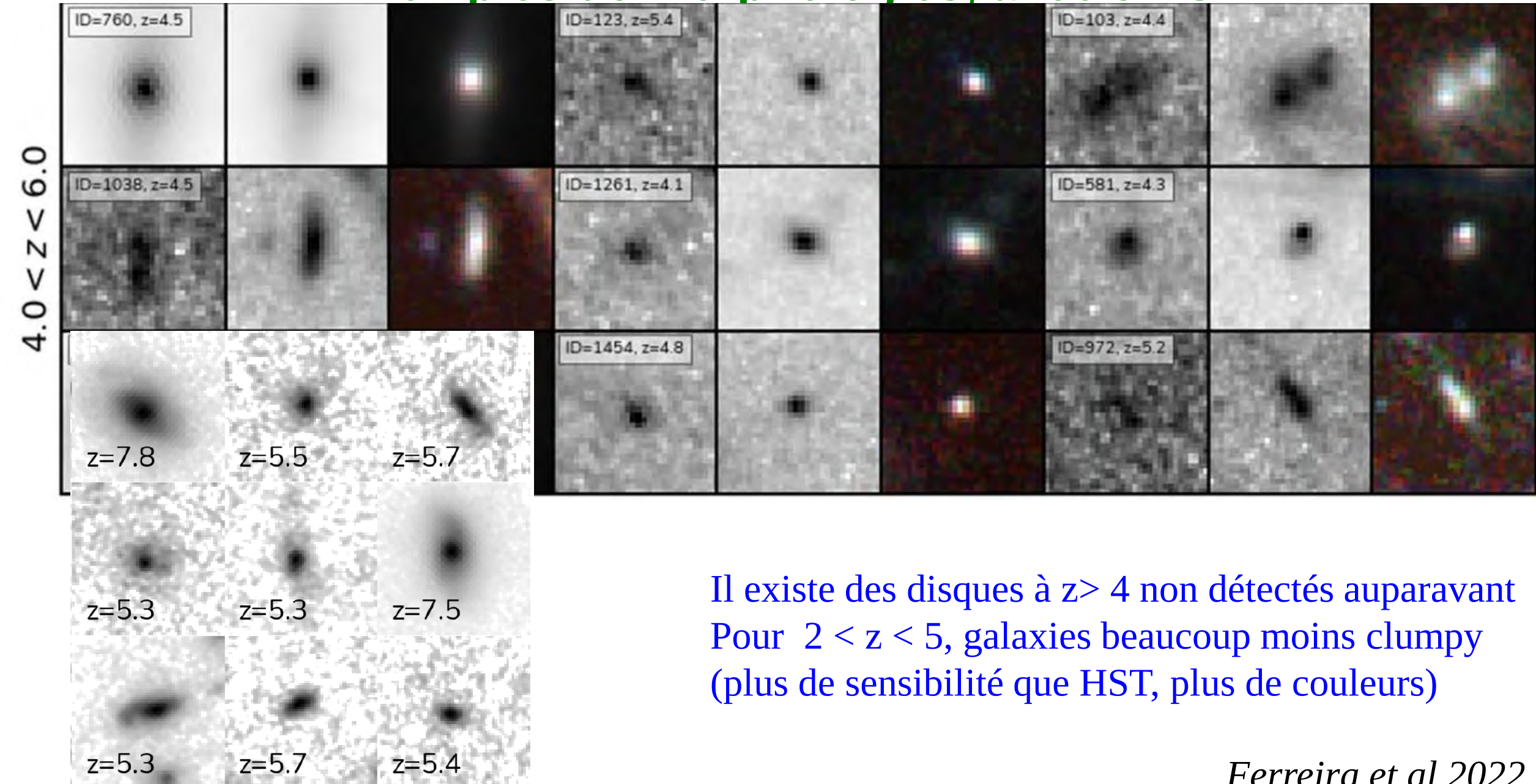
$$C = 5 \log\left(\frac{r_{80}}{r_{20}}\right)$$

Concentration

Correspondance CAS $\leftrightarrow$ type de Hubble

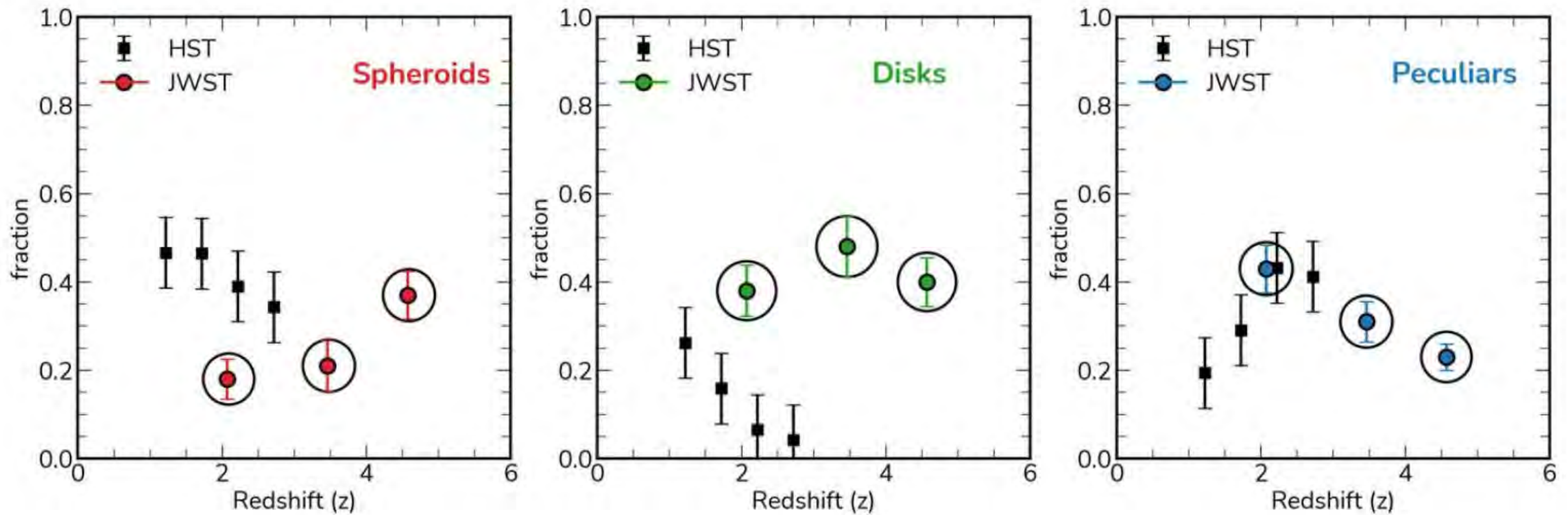


Exemples de morphologies, avec JWST



Il existe des disques à $z > 4$ non détectés auparavant
 Pour $2 < z < 5$, galaxies beaucoup moins clumpy
 (plus de sensibilité que HST, plus de couleurs)

Identification des morphologies

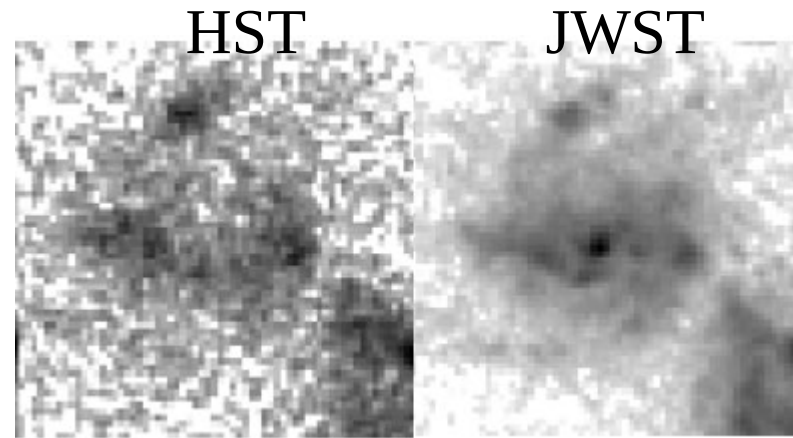


Les sphéroïdes croissent avec z , mais leur taille diminue

Plus de galaxies spirales à grand z

4265 galaxies observées
avec JWST à $1.5 < z < 8$

Les galaxies “clumpy”
par morceaux sont souvent dues
au filtre UV ou visible du HST



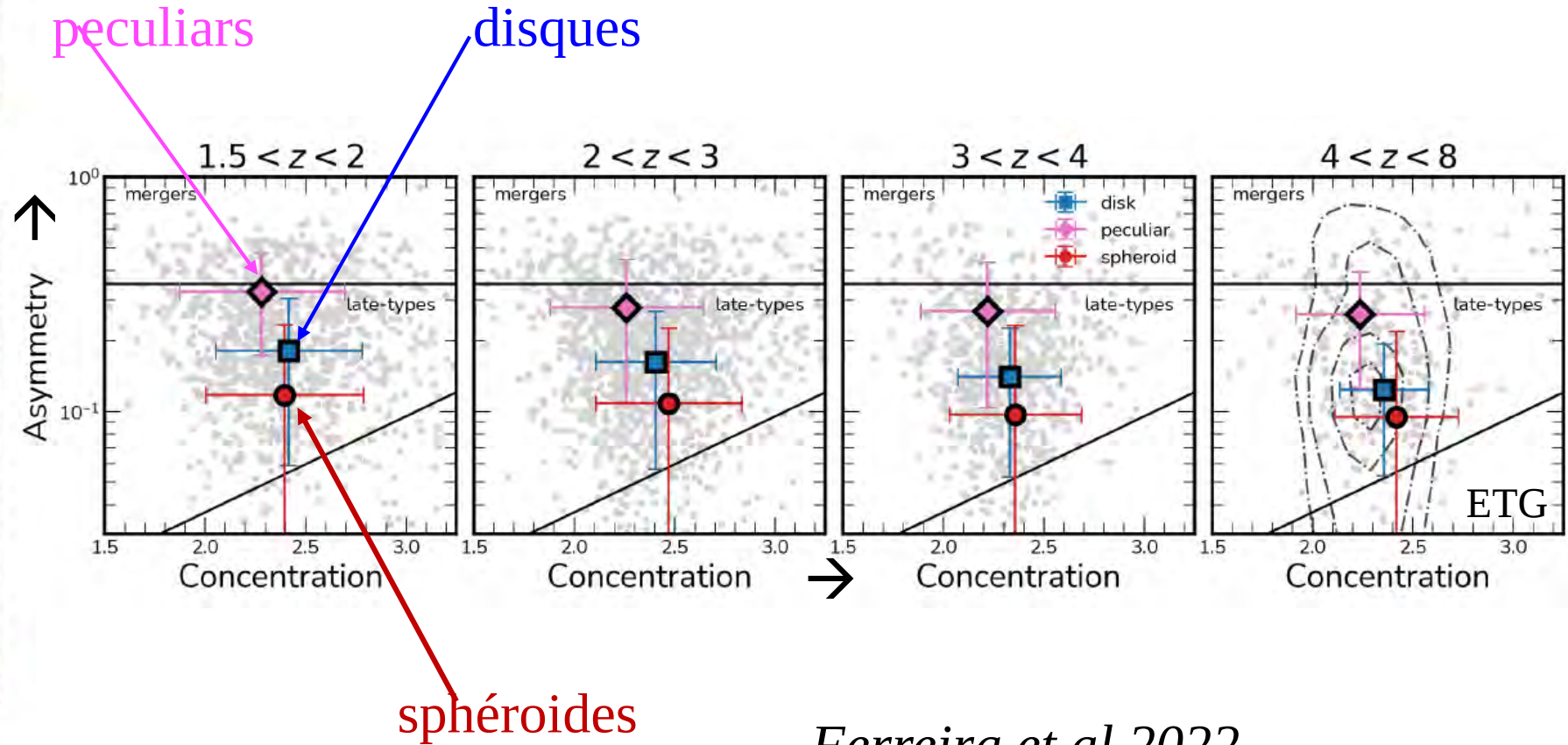
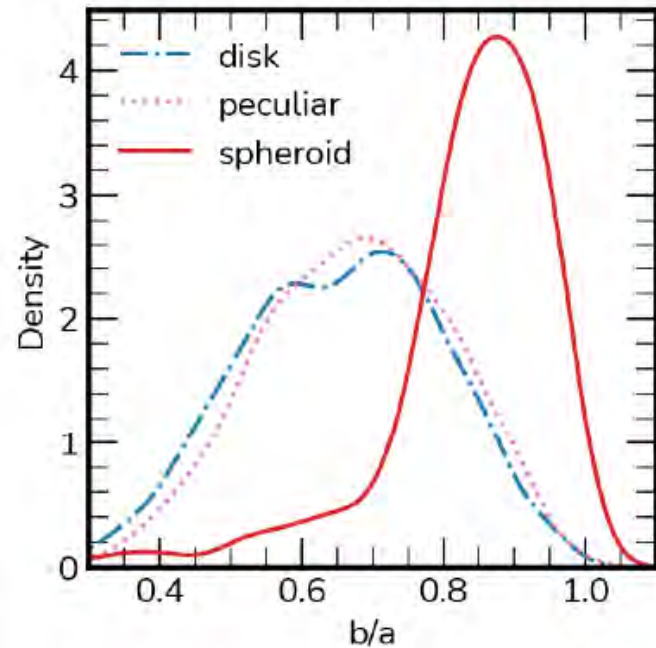
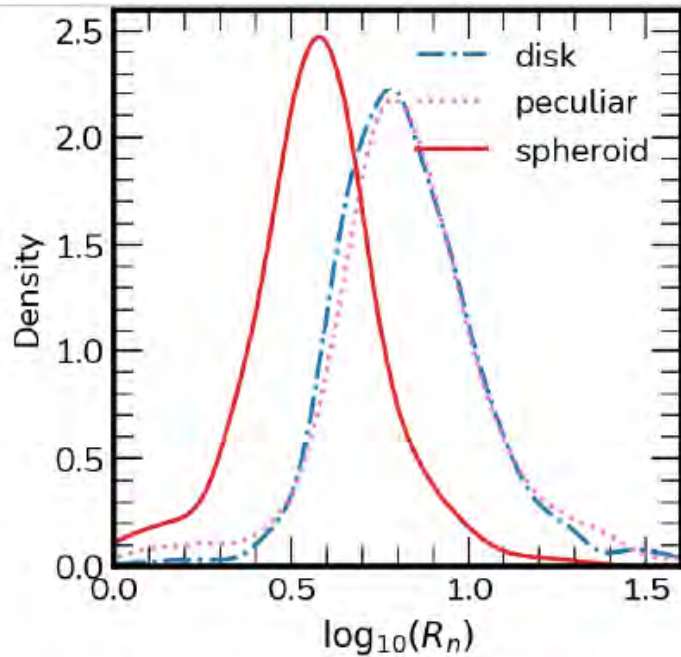
Finalement, les galaxies spirales dominant jusqu'à $z=6$ au moins
alors que l'on pensait que les irrégulières dominaient dès $z>3$

La sequence de Hubble était en place 1 Gyr après le Big-Bang

Classification CAS des galaxies à grand z

4265 galaxies

$1.5 < z < 8$

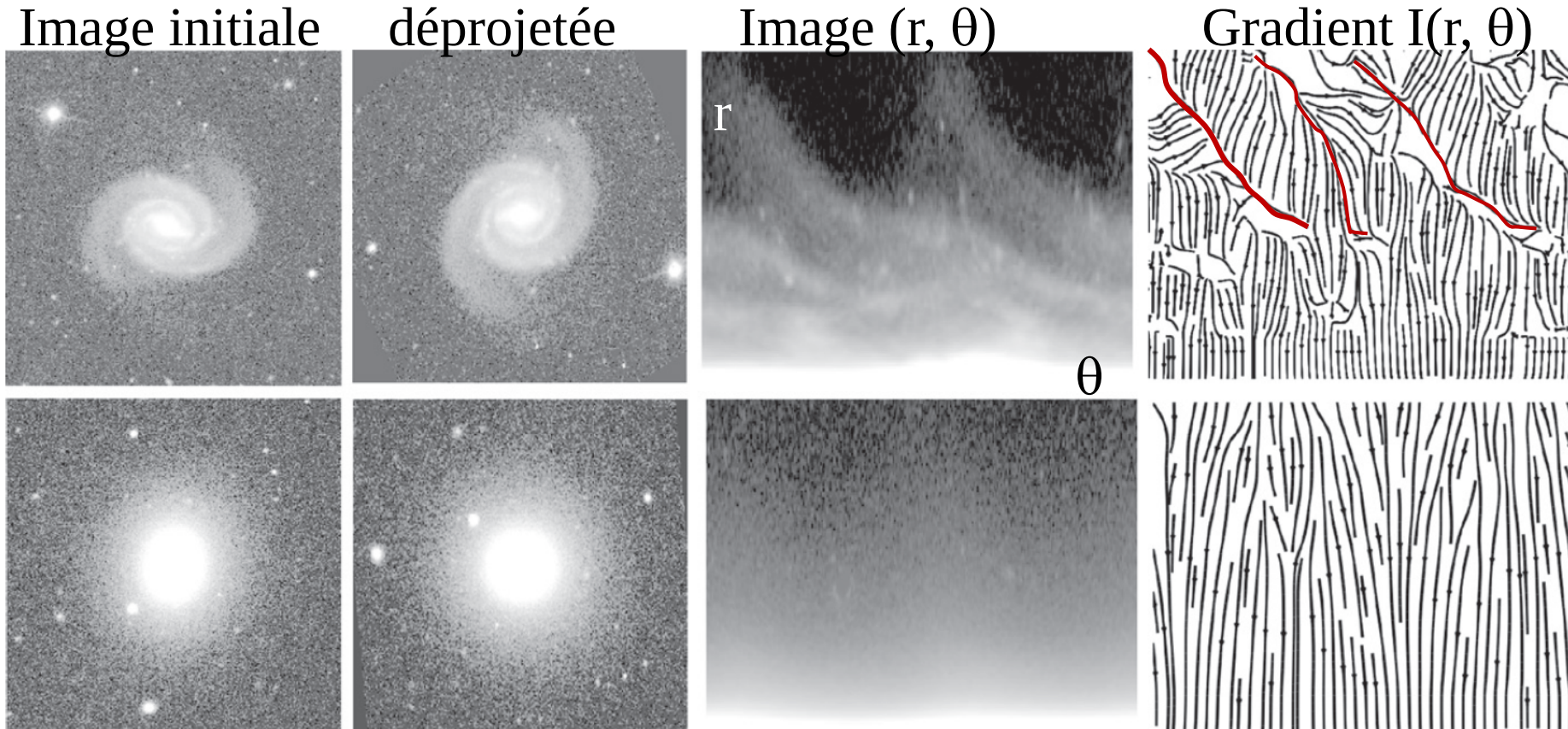


Ferreira et al 2022

Spiralité $\sigma\phi$ et entropie H

$H_{\max} \rightarrow$ tous les pixels égaux
 $H=0$, un seul pixel central

$H=H(I)/H_{\max}$
 $0 < H < 1$

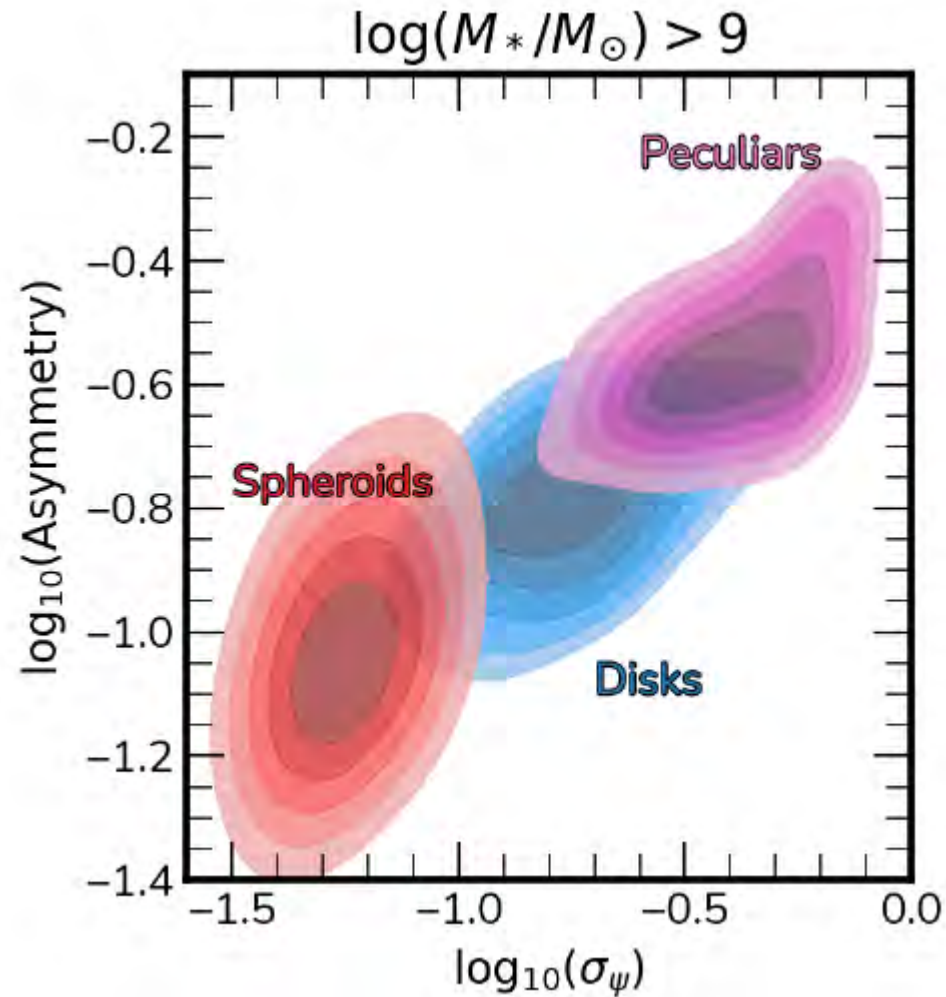


Ferrari et al 2015

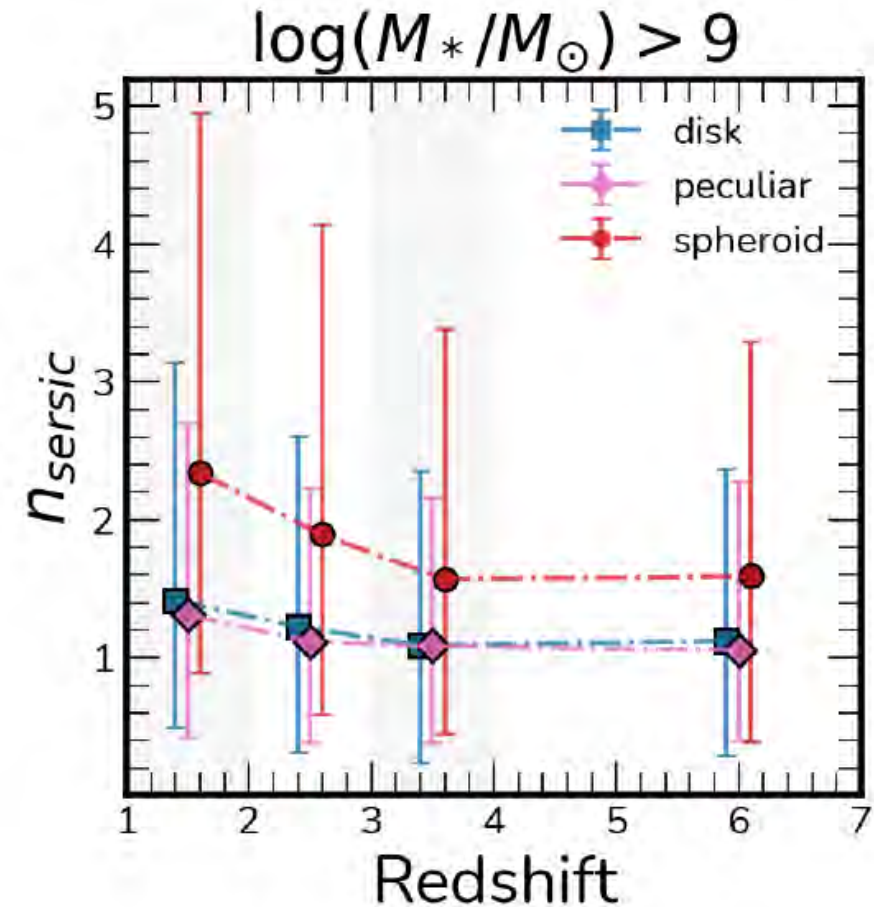
$$H(I) = -\sum_k^K p(I_k) \log[p(I_k)]$$

4265 galaxies observées
avec JWST à $1.5 < z < 8$

Plus de galaxies spirales à grand z



Indice de spirauté $\sigma\phi$

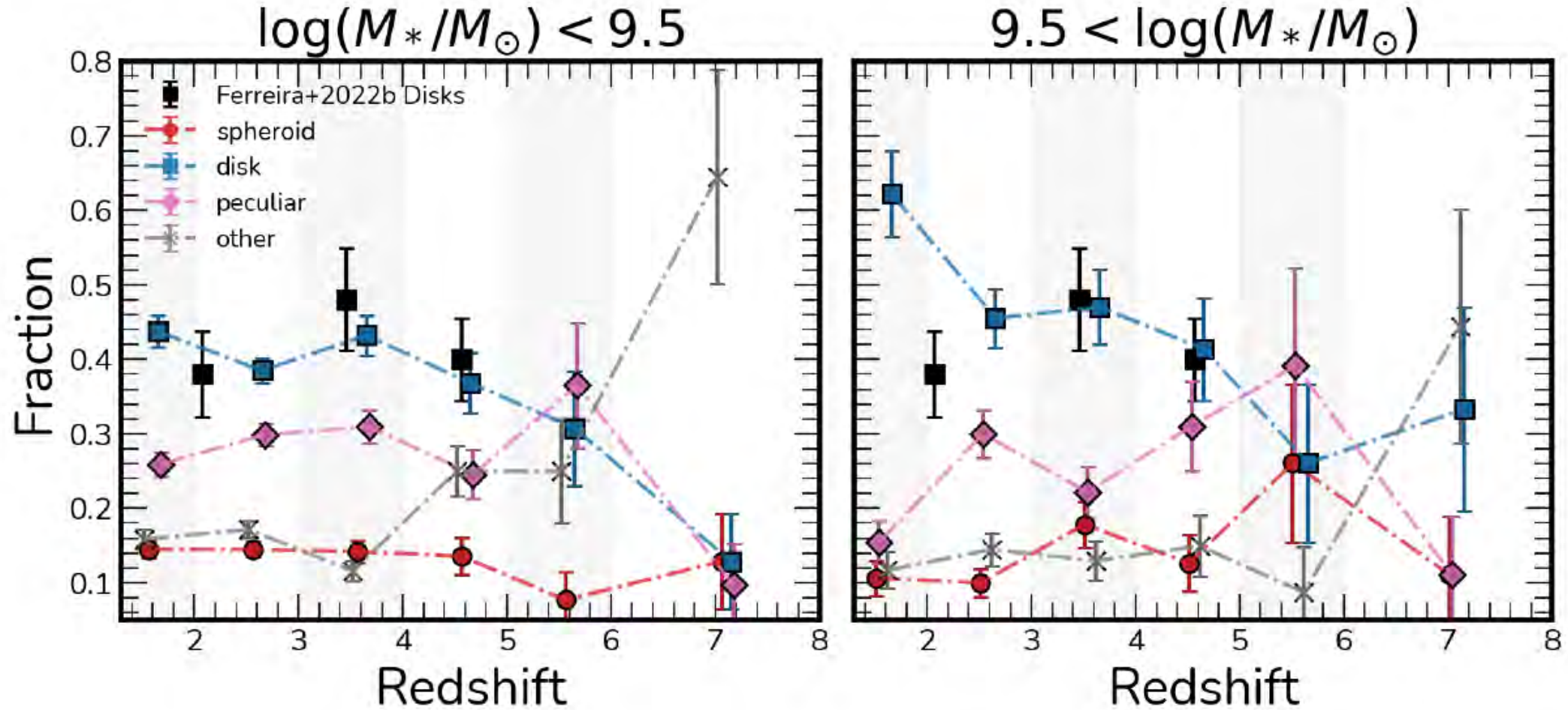


L'indice de Sersic ne suffit pas!

Ferreira et al 2022

4265 galaxies observées
avec JWST à $1.5 < z < 8$

Plus de disques à grand z

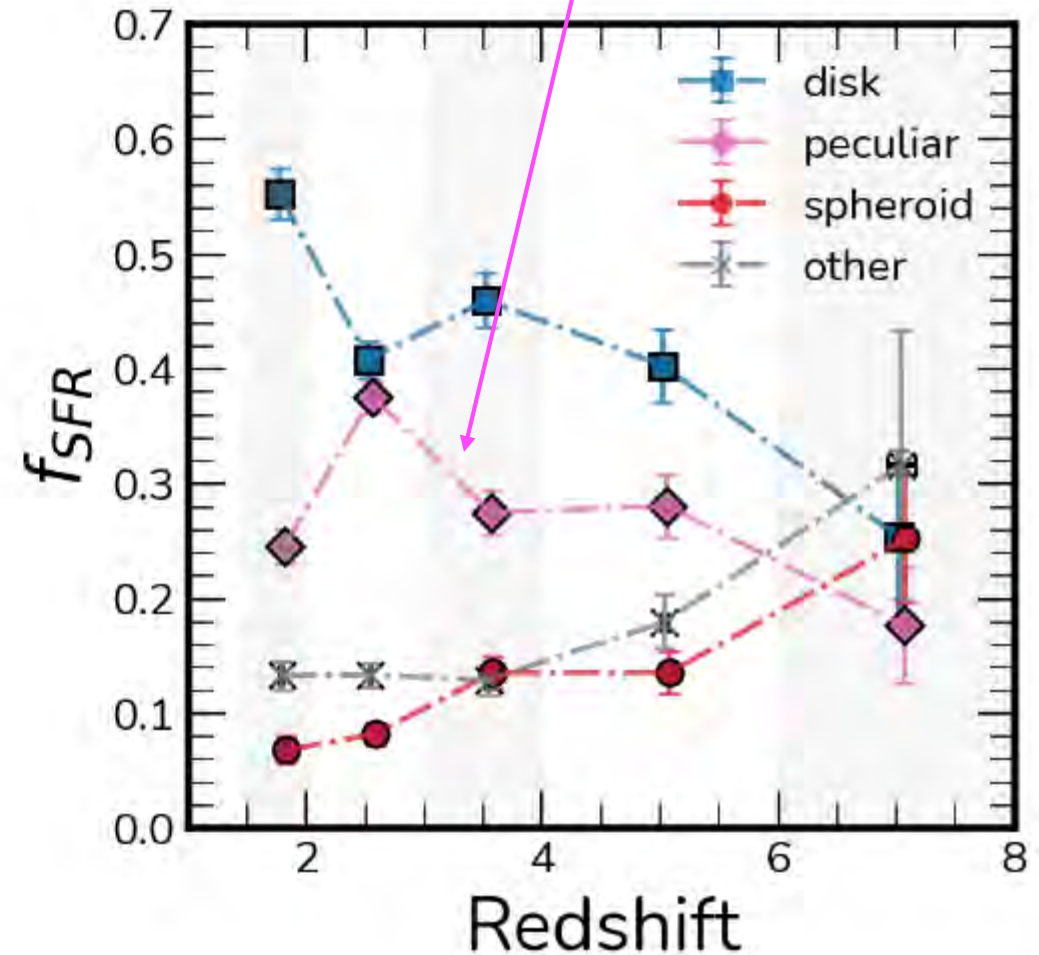
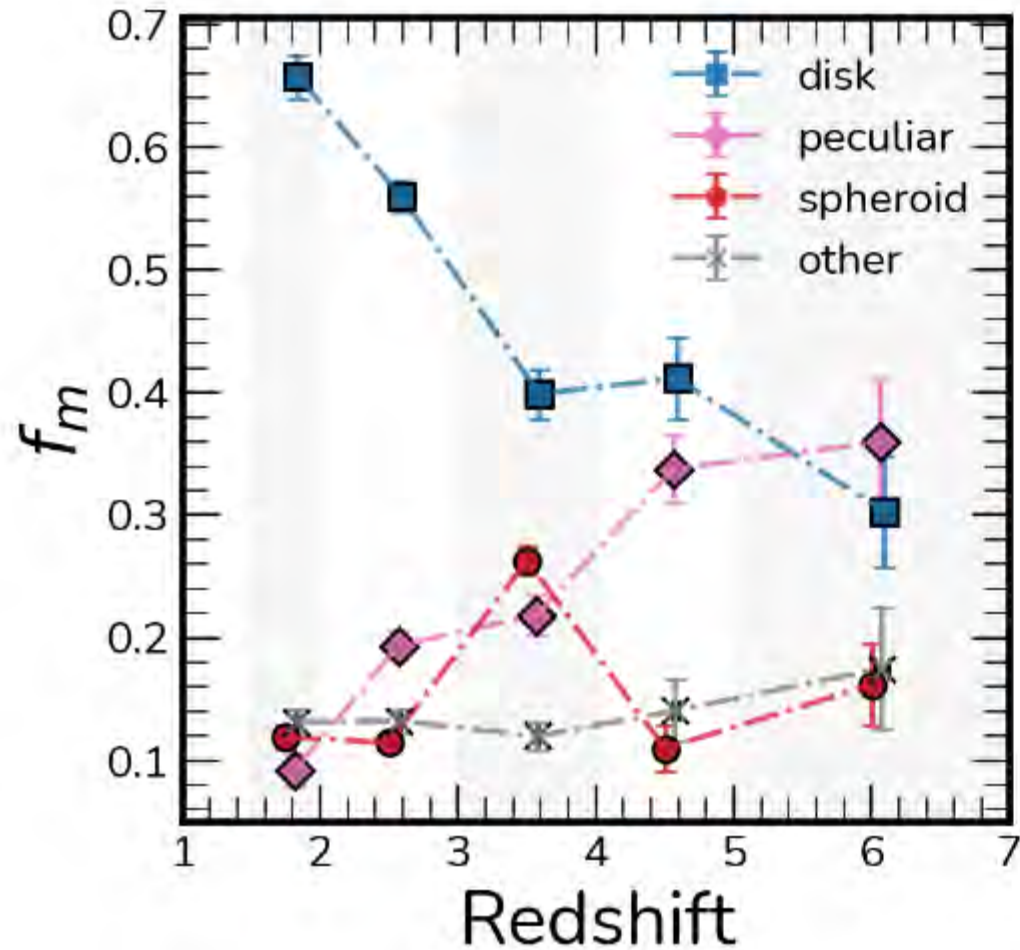


« other »: sources ponctuelles, ambiguës, inclassifiables

Ferreira et al 2022

Contribution à la masse et au SFR

galaxies à $1.5 < z < 8$



« other »: sources ponctuelles, ambiguës, inclassifiables

Ferreira et al 2022

Evolution de la séquence de Hubble

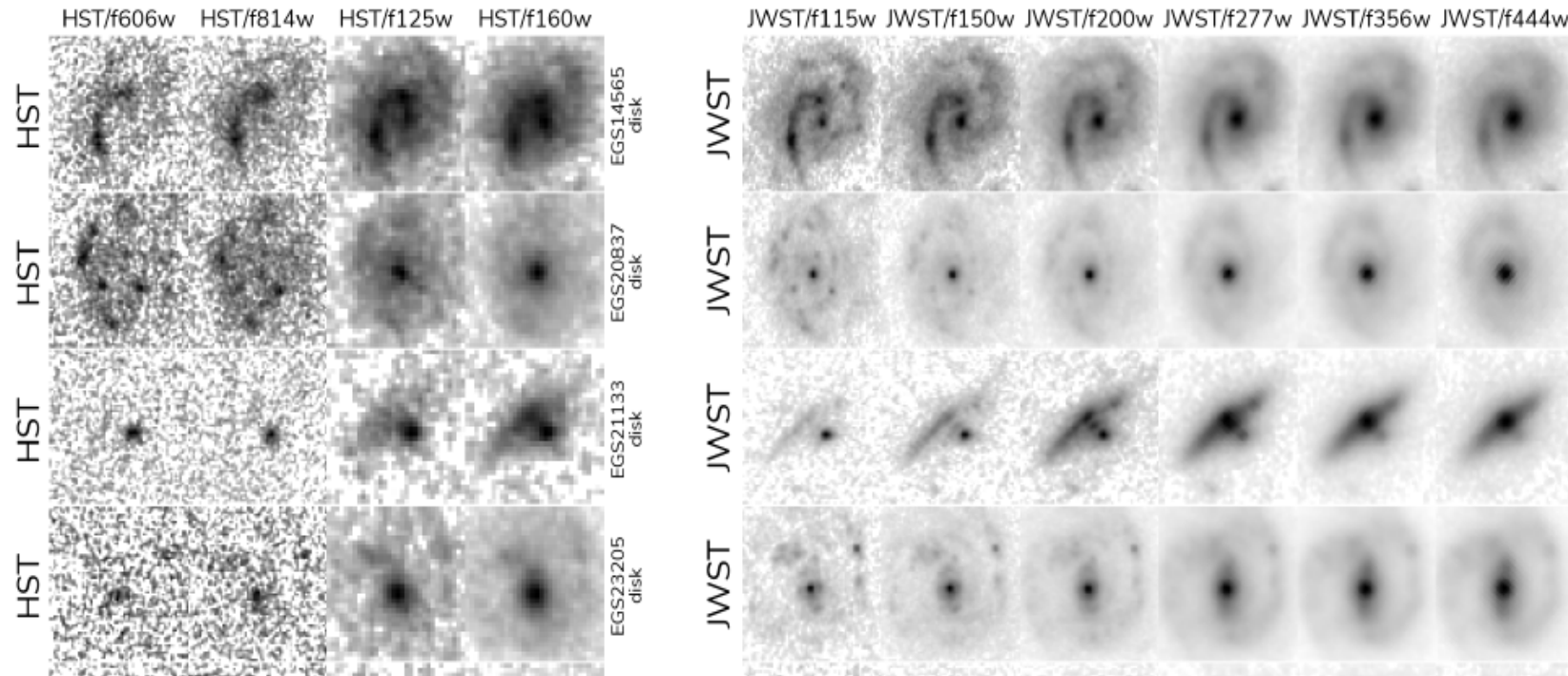
En remontant le temps, la séquence de Hubble disparaît peu à peu
Plus instable, plus de gaz → galaxies irrégulières, en grumeaux
Mais, lumière ultra-violette (UV), à cause du redshift

Le JWST voit V et NIR

→ barres, spirales jusqu'à $z=3-4$

4 galaxies, dans les bandes du
HST (à gauche) et celle du
JWST (à droite).

Ferreira et al 2022



Spirales barrées tôt dans l'Univers

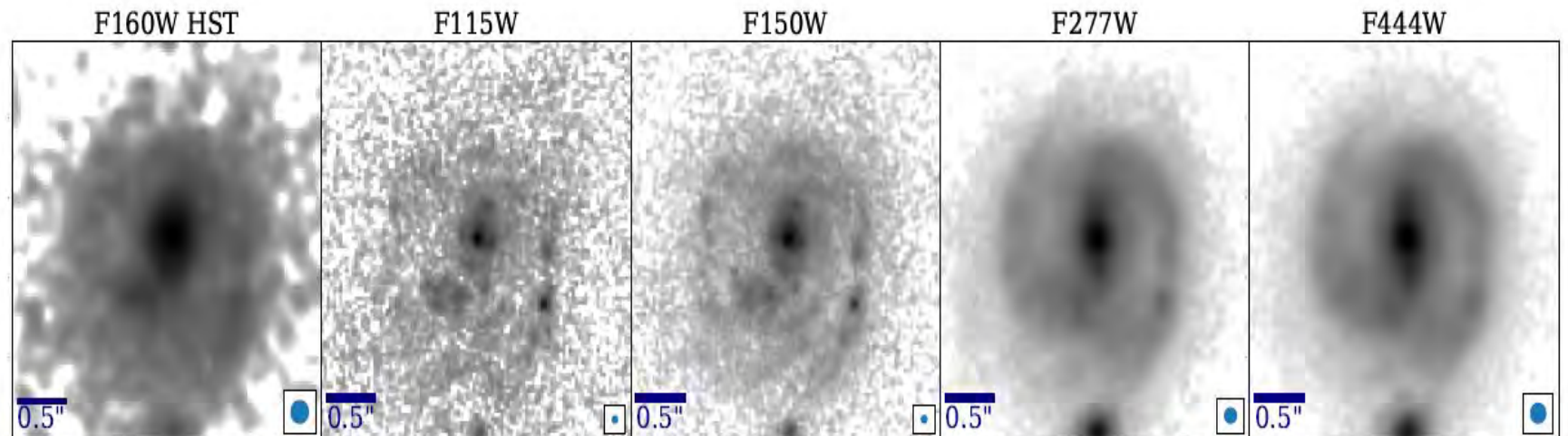
Impressionnants effets du changement de longueur d'onde
sur une galaxie barrée au redshift $z=2.136$

Gauche: Hubble (HST) à 1.6 micron

Droite: JWST NIRCам à 1.15, 1.5 2.77 et 4.44 micron.

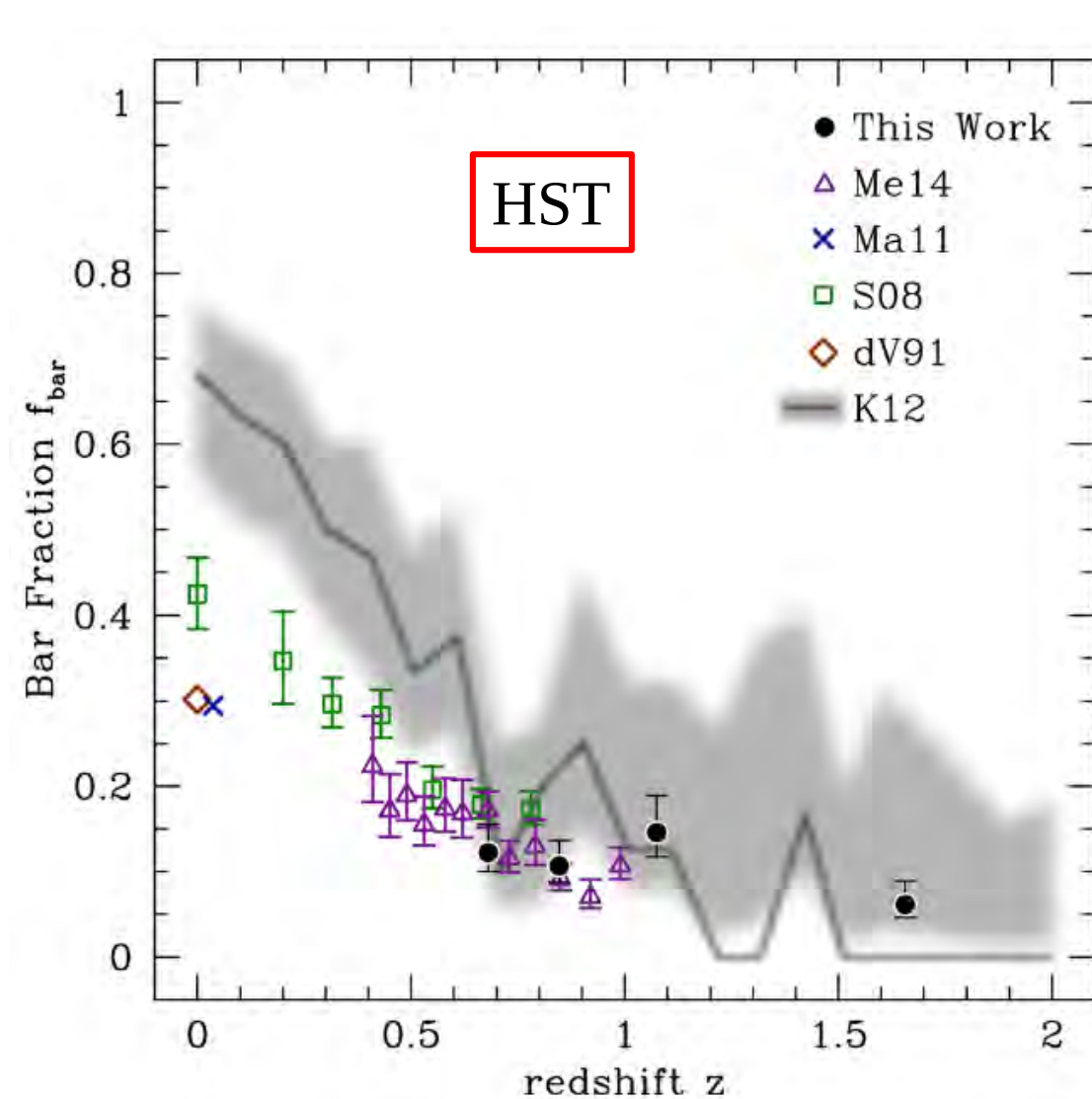
Le cercle bleu en bas à droite: résolution spatiale,
barre horizontale= $0.5''$

Images de $0.3'' \times 0.3''$

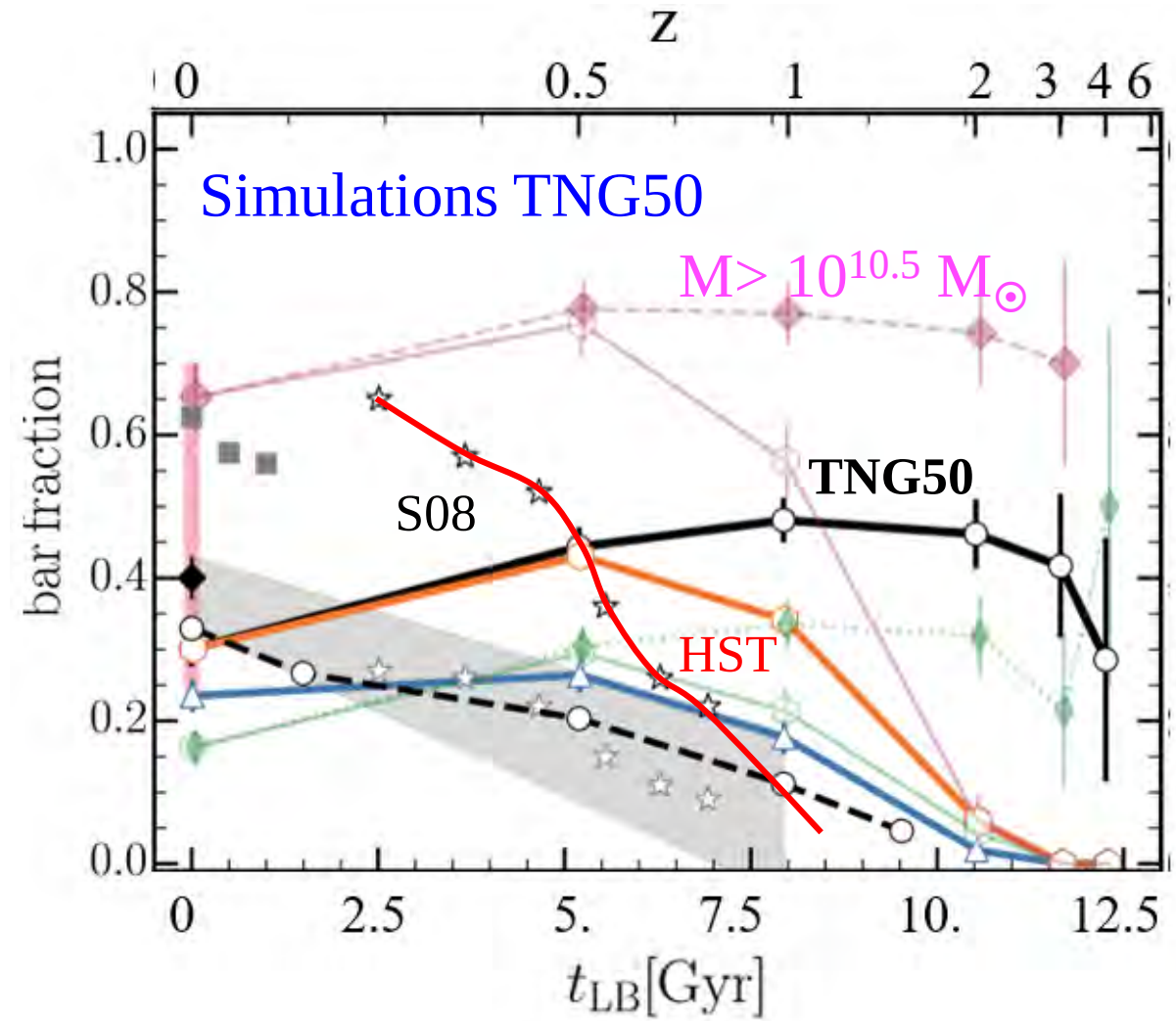


Guo, Jogee et al 2022

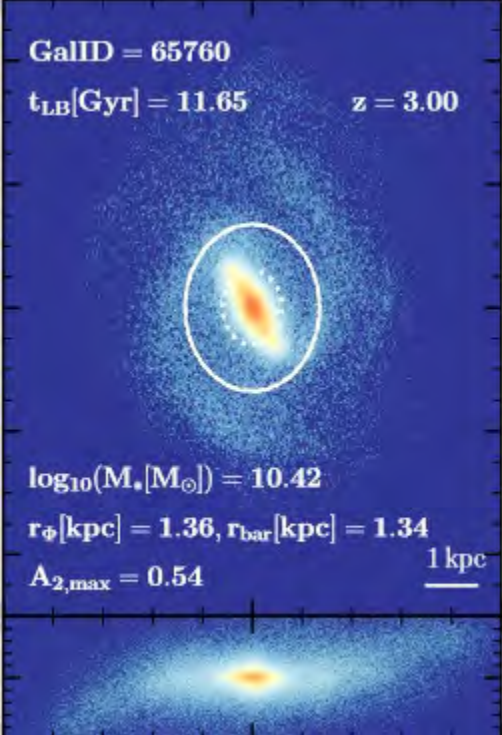
Fraction de galaxies barrées



Simmons et al 2014



Rosas-Guevara et al 2022



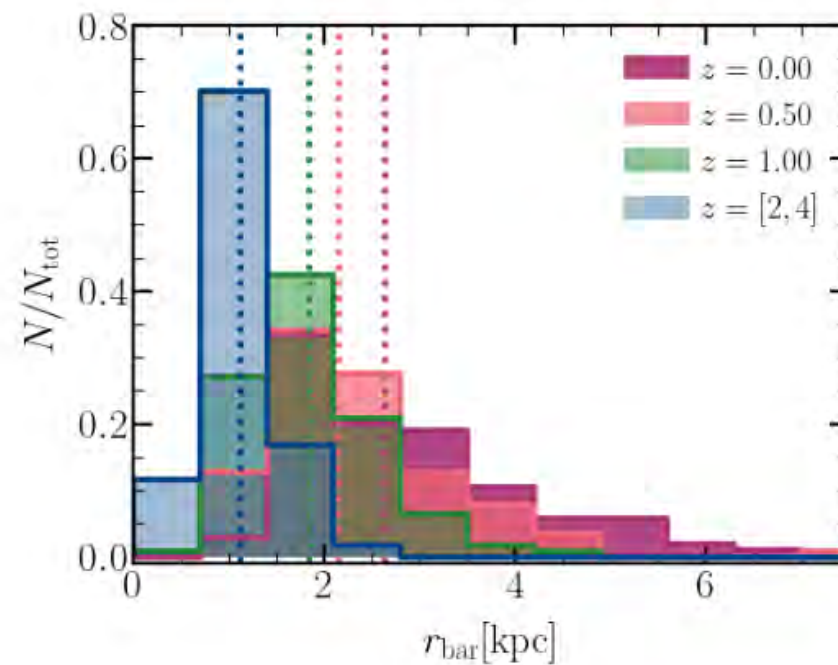
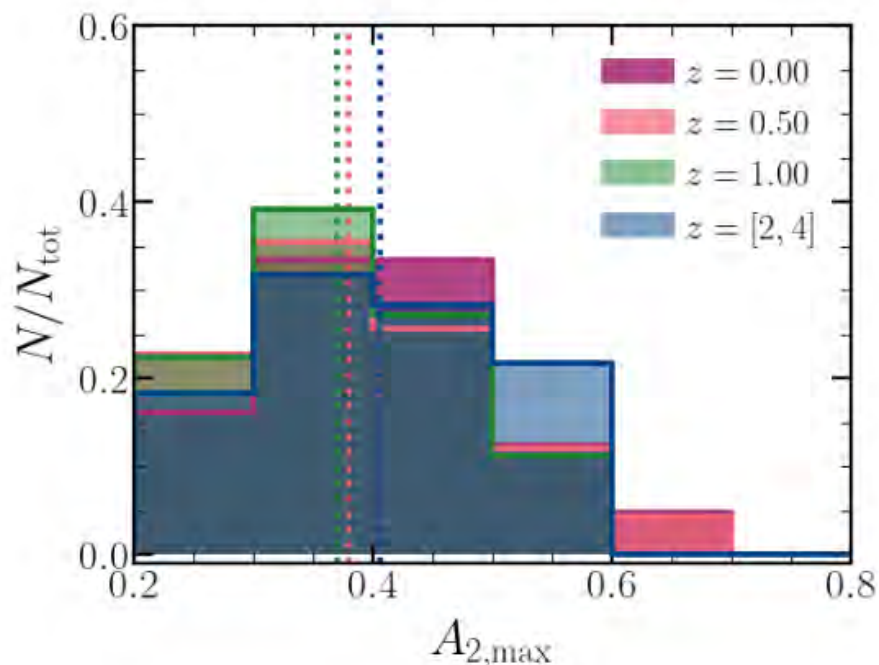
Galaxies barrées dans TNG50

Les barres commencent à se former à $z=4$ ($t=1.5$ Gyr)

Elles se renforcent et s'allongent comme les disques

→ Avec la résolution du HST, on ne les voit plus au-delà de $z=1$

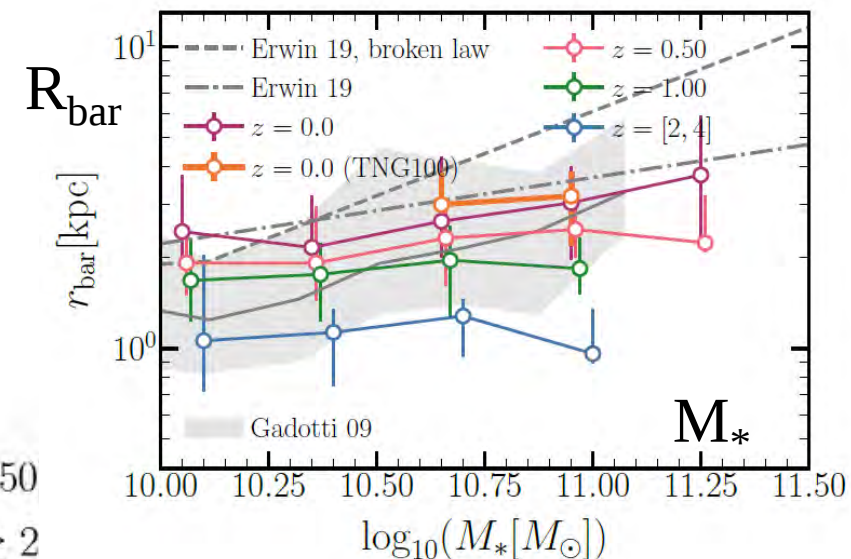
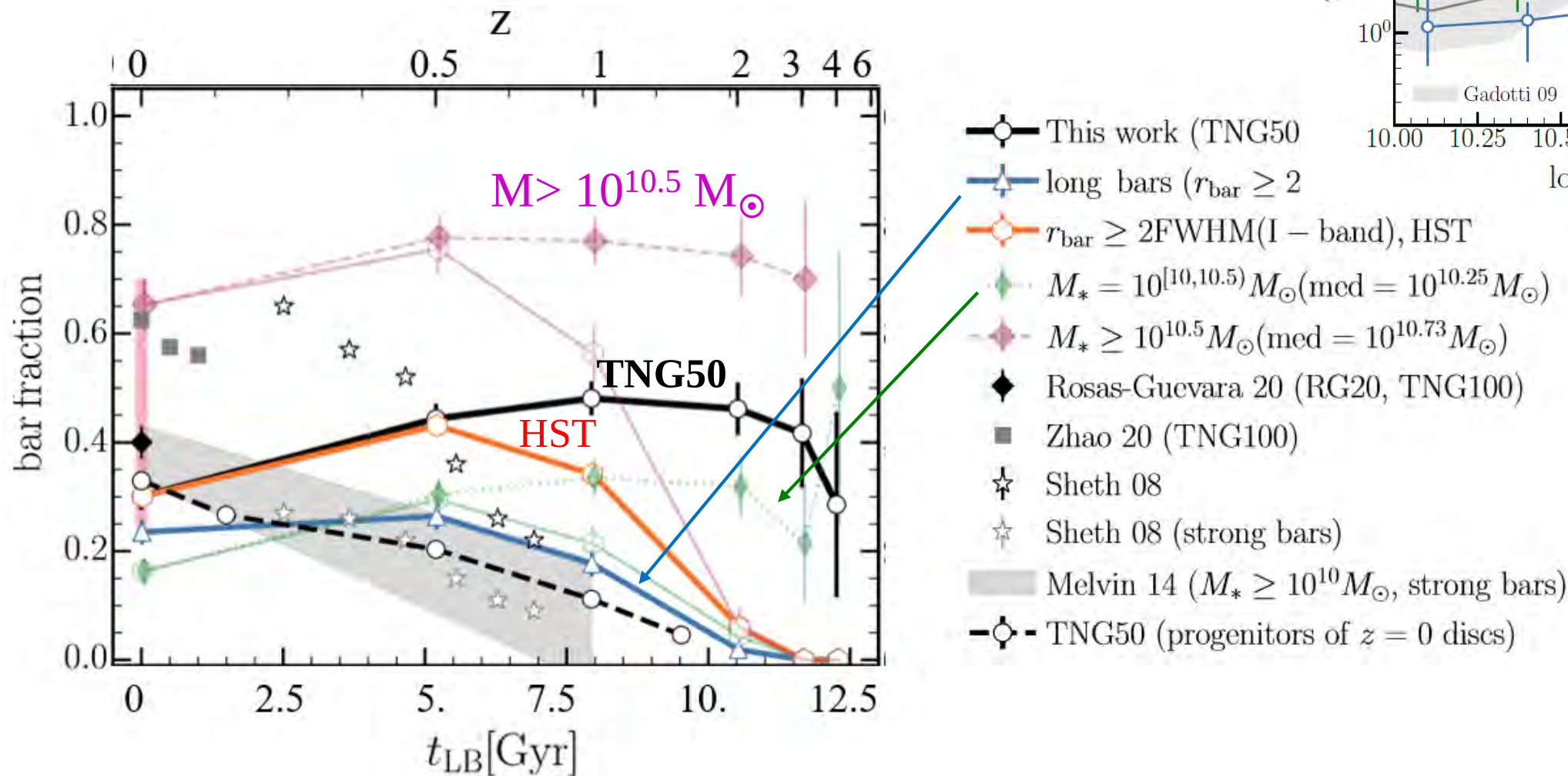
Les barres aident les disques à se former plus tôt



Pas d'évolution dans la force de la barre,
 mais dans son rayon

Fraction de barres en fonction du temps

Dépend de la masse (plus de barres à grande M)

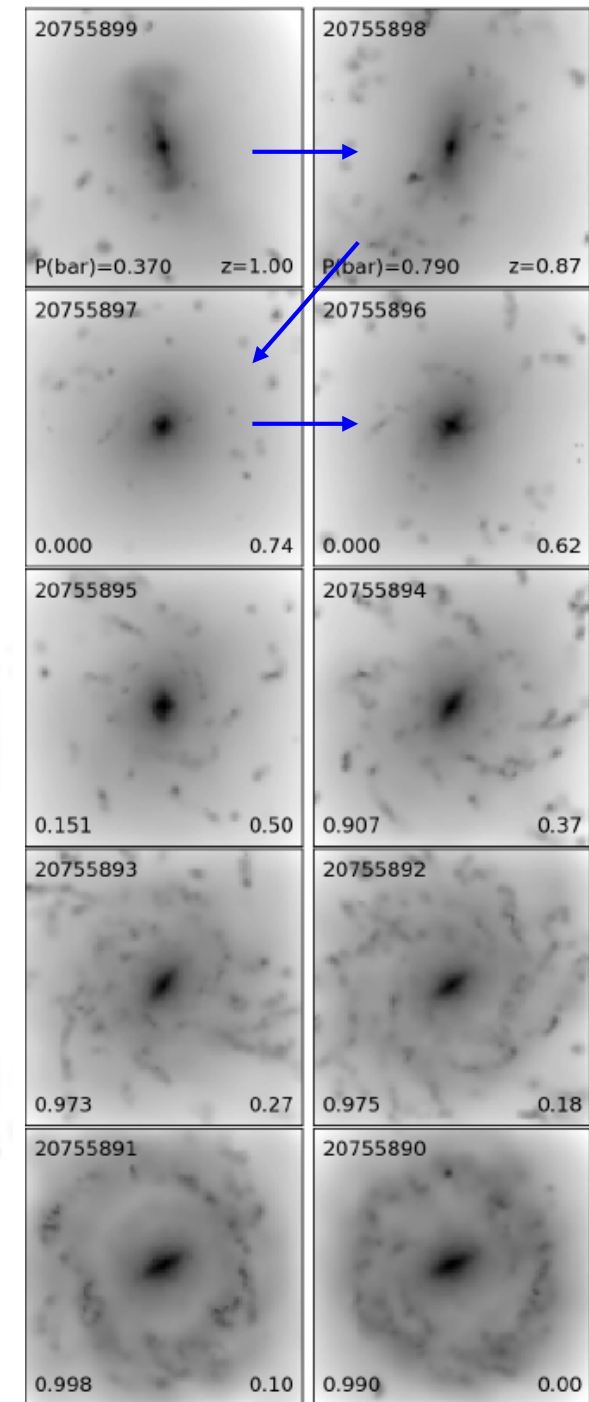
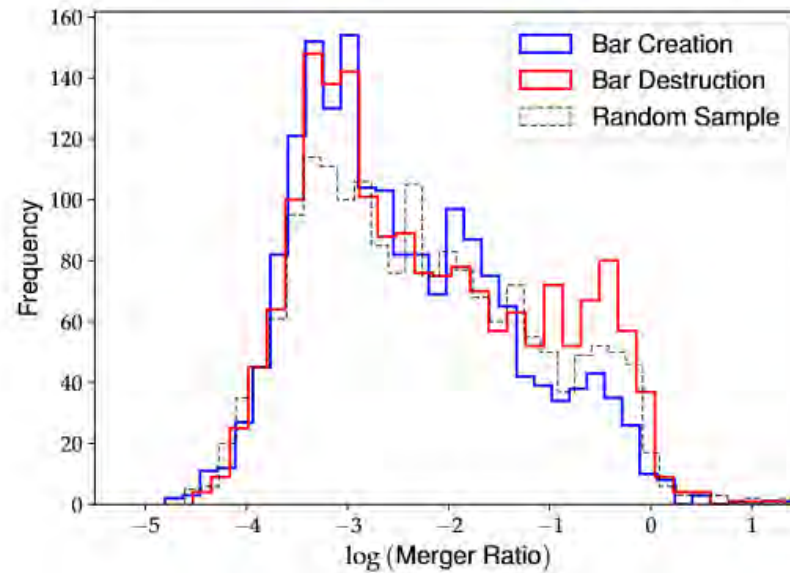
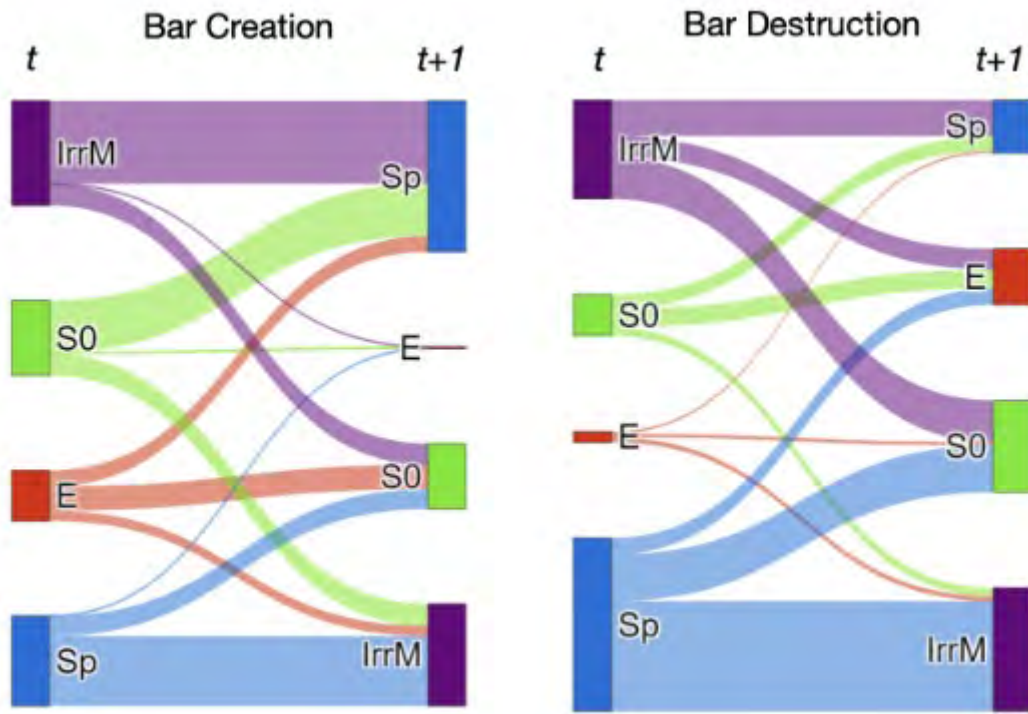


Création et destruction des barres (EAGLE)

CNN sur 35 000 images, → 4000 galaxies de la simulation

→ E, S0, Sp, Irr

Fraction de barres constante $z=0-0.5$, puis décroît. Plus de barres à faible $M < 10^{10.5} M_{\odot}$ Durée de vie moyenne 2.24 Gyr



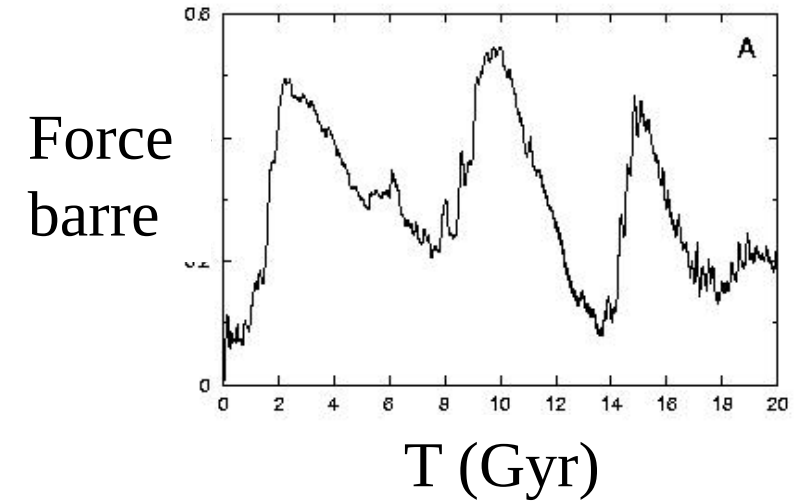
Cavanagh et al 2022

Rôle du gaz dans la destruction des barres

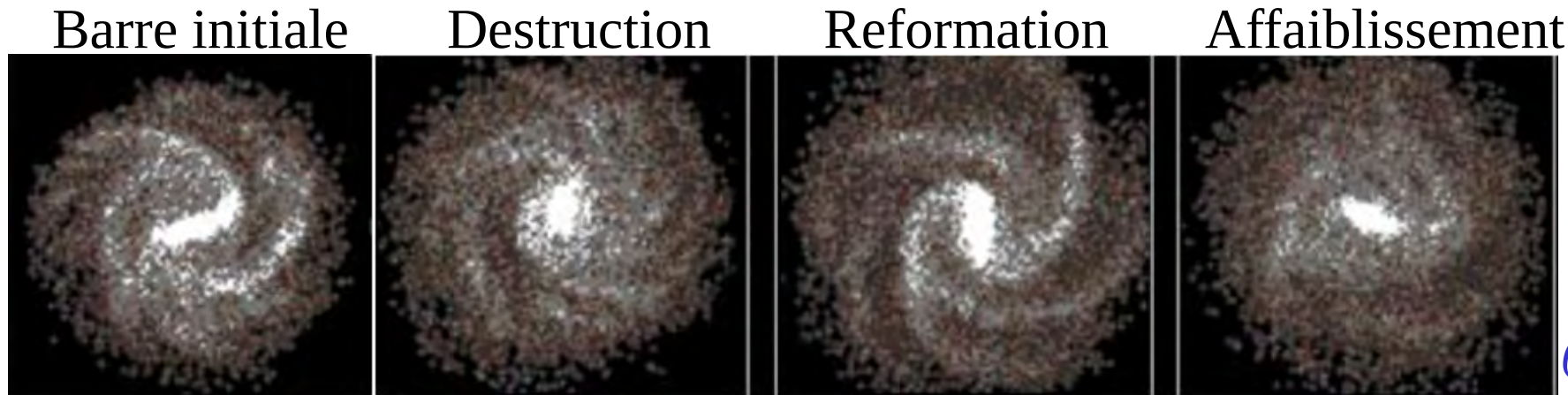
Le gaz est amené au centre par les couples de la barre
Le moment angulaire est **pris par la barre**

→ **Ceci détruit la barre**, car son moment est négatif à l'intérieur de la corotation

1-2% de chute de gaz suffit à détruire/affaiblir la barre

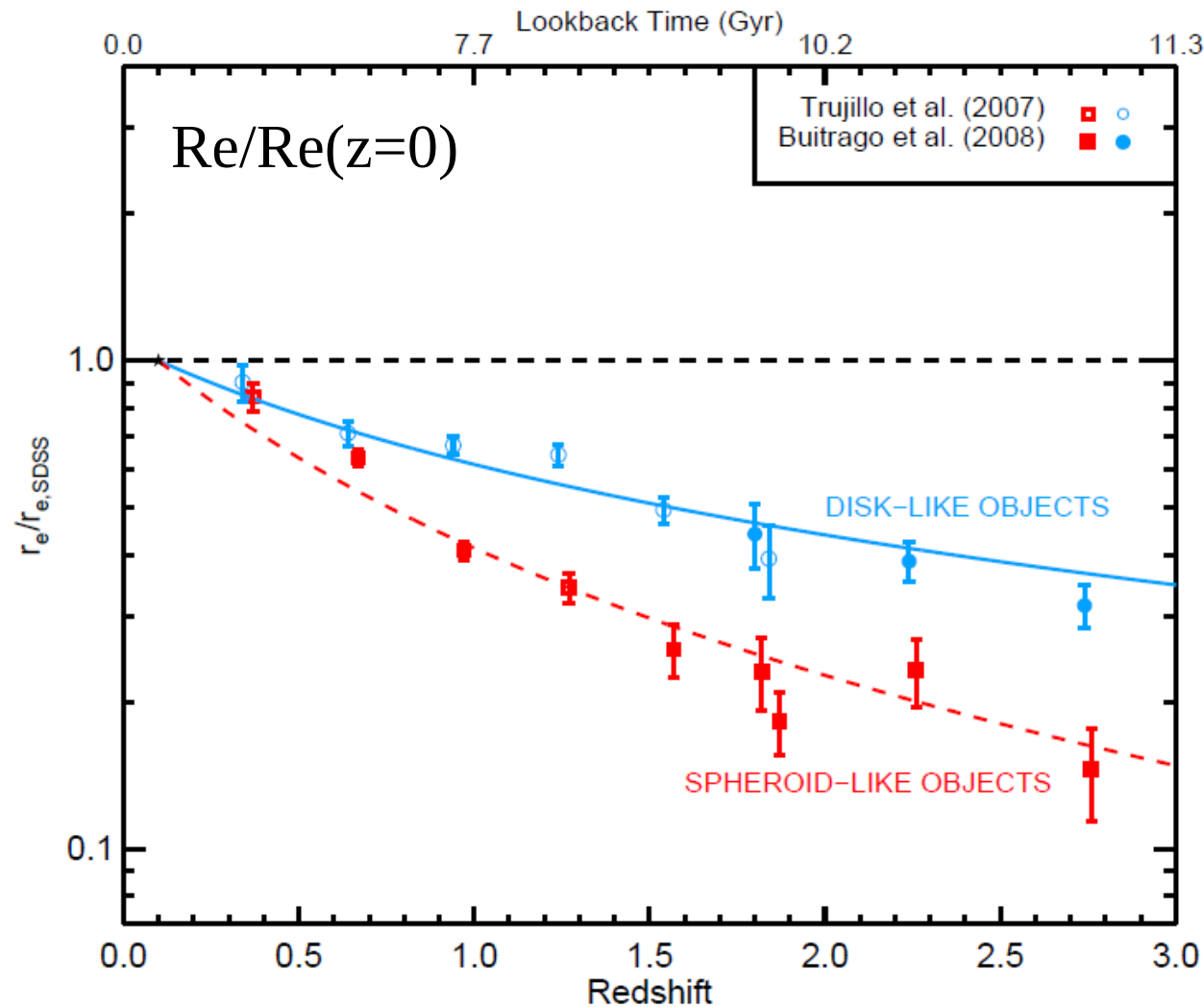


Une galaxie accrète du gaz
→ 2 ou 3 épisodes barrés



(Bournaud & Combes 2002)

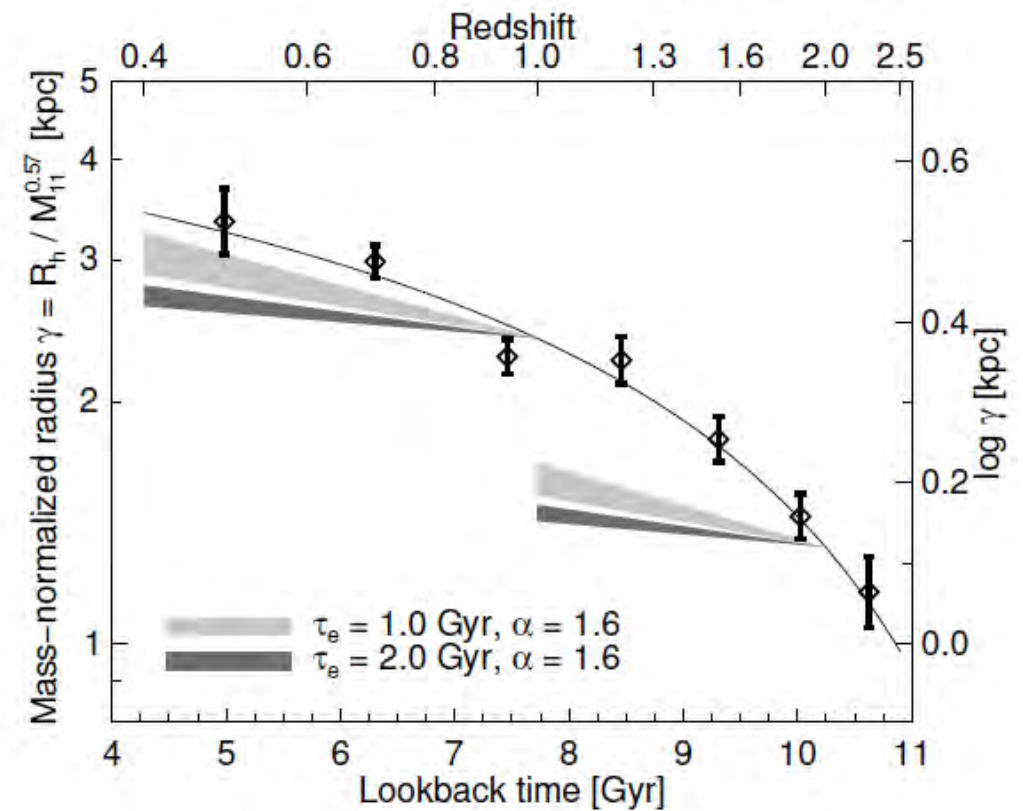
Evolution des tailles de galaxies



Buitrago et al 2008

Les sphéroides sont trop compacts à $z=2$

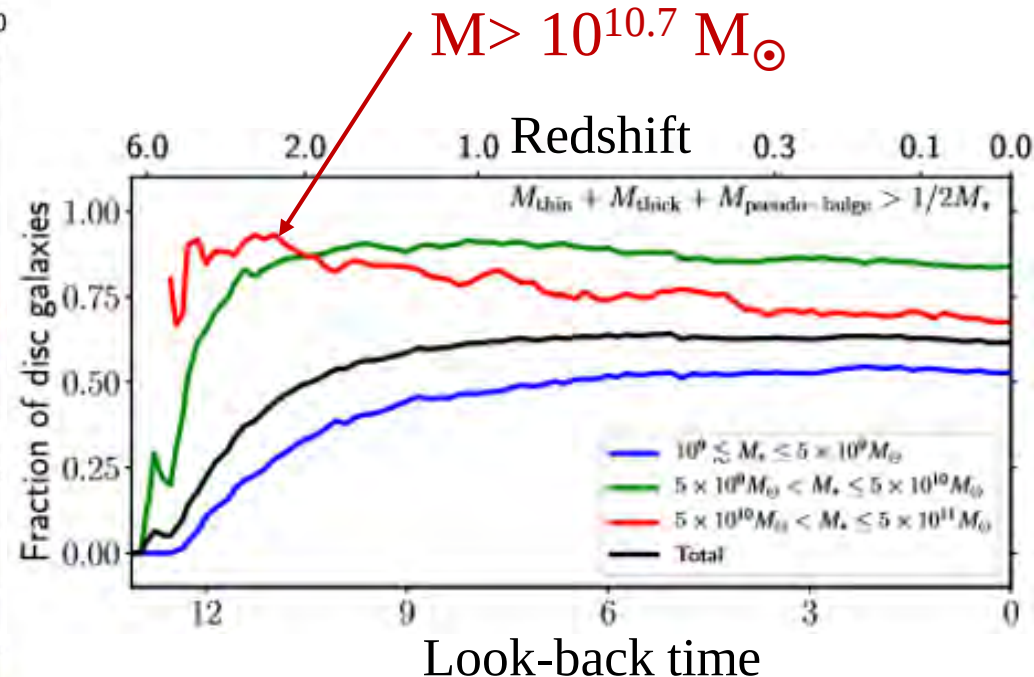
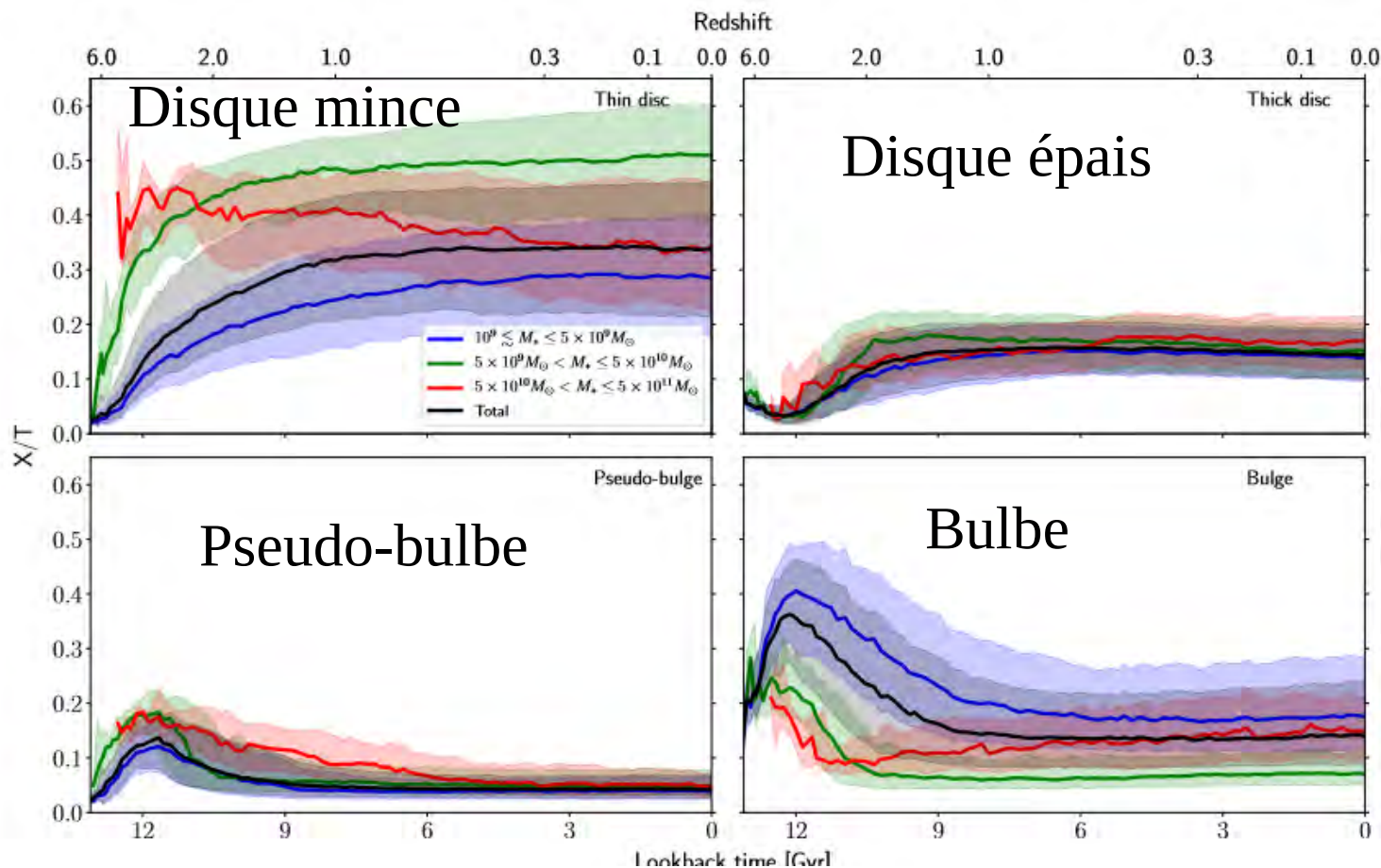
Fusions mineures à $z=1$,
mais problème à $z=2$
(Newman et al 2012)



Problème résolu avec d'autres populations de galaxies
« Progenitor bias »

Simulations TNG50 des disques de galaxies

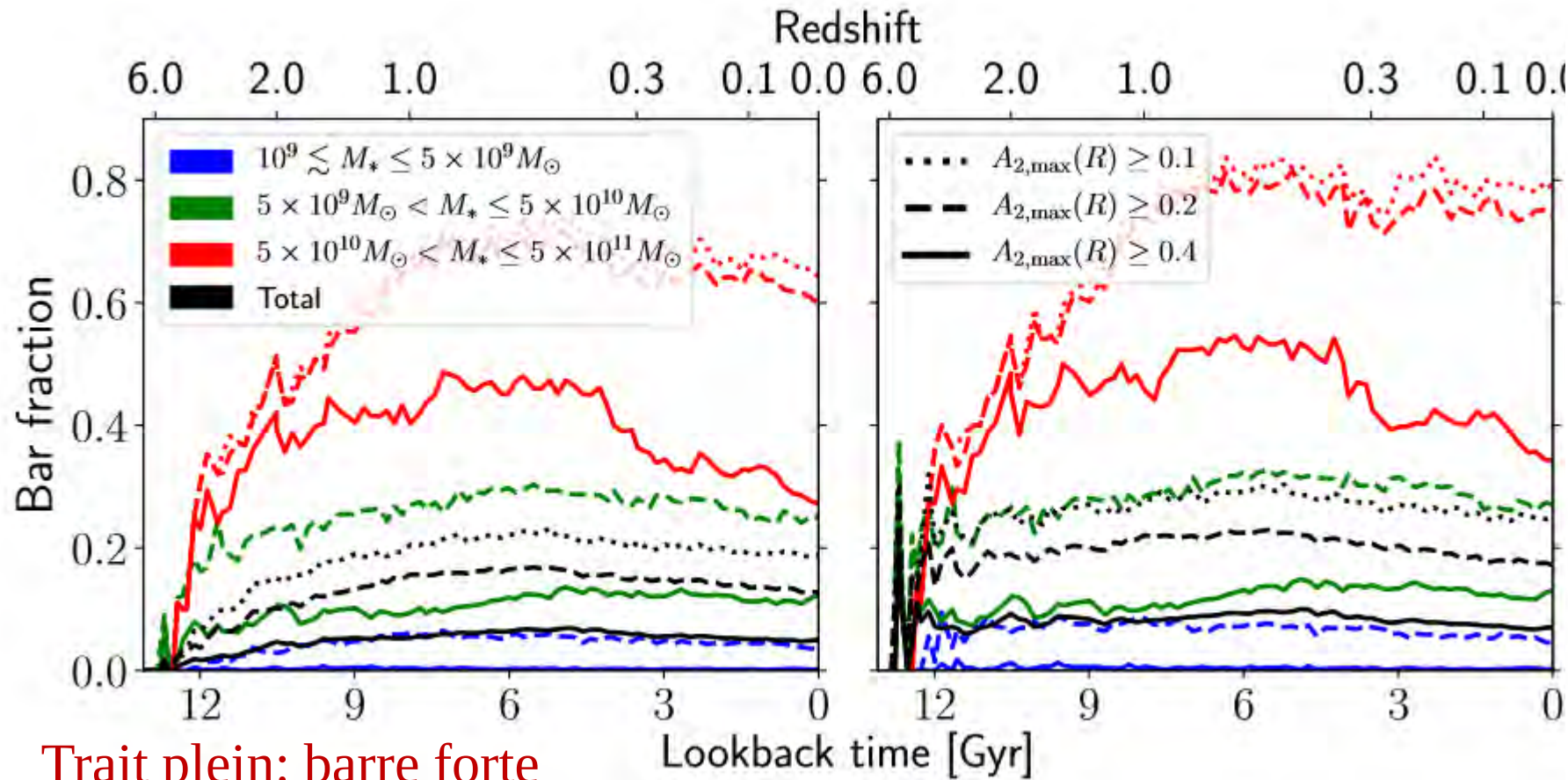
Les disques épais évoluent le plus vite -- dûs à la grande turbulence du gaz au départ



Les plus massives développent un sphéroïde par les fusions

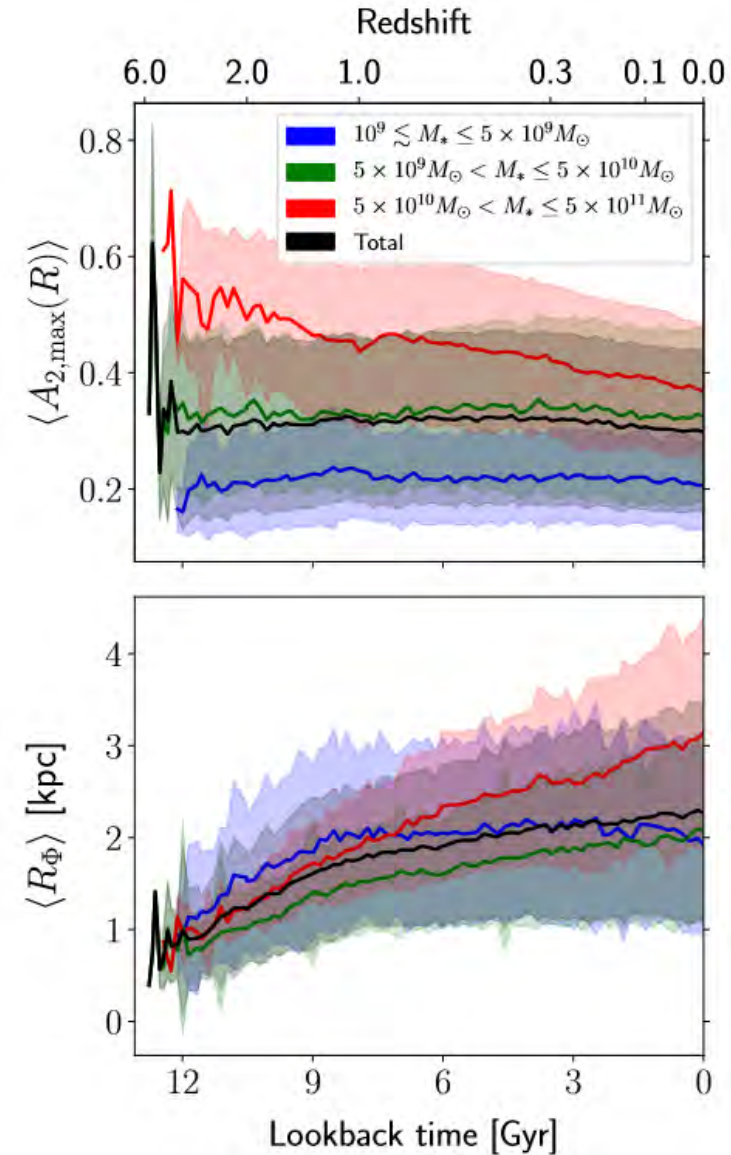
Fraction de galaxies barrées (simulations TNG50)

A $z=0$, la fraction de barres est la plus forte pour $M_* > 10^{10.5} M_\odot$



Trait plein: barre forte

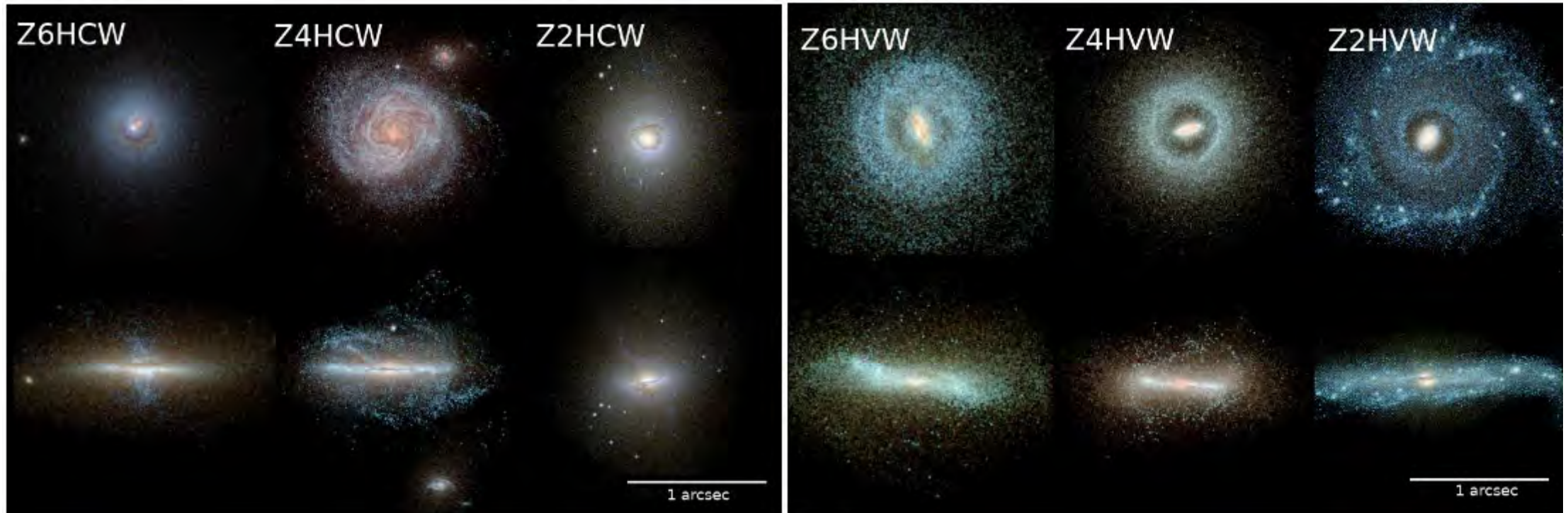
Pointillés: barre intermédiaire



Zana et al 2022

Simulations de la formation des galaxies à $z=6, 4, 2$

Tous les modèles ont des barres, même si $< 1\text{kpc}$ (invisibles avec JWST)

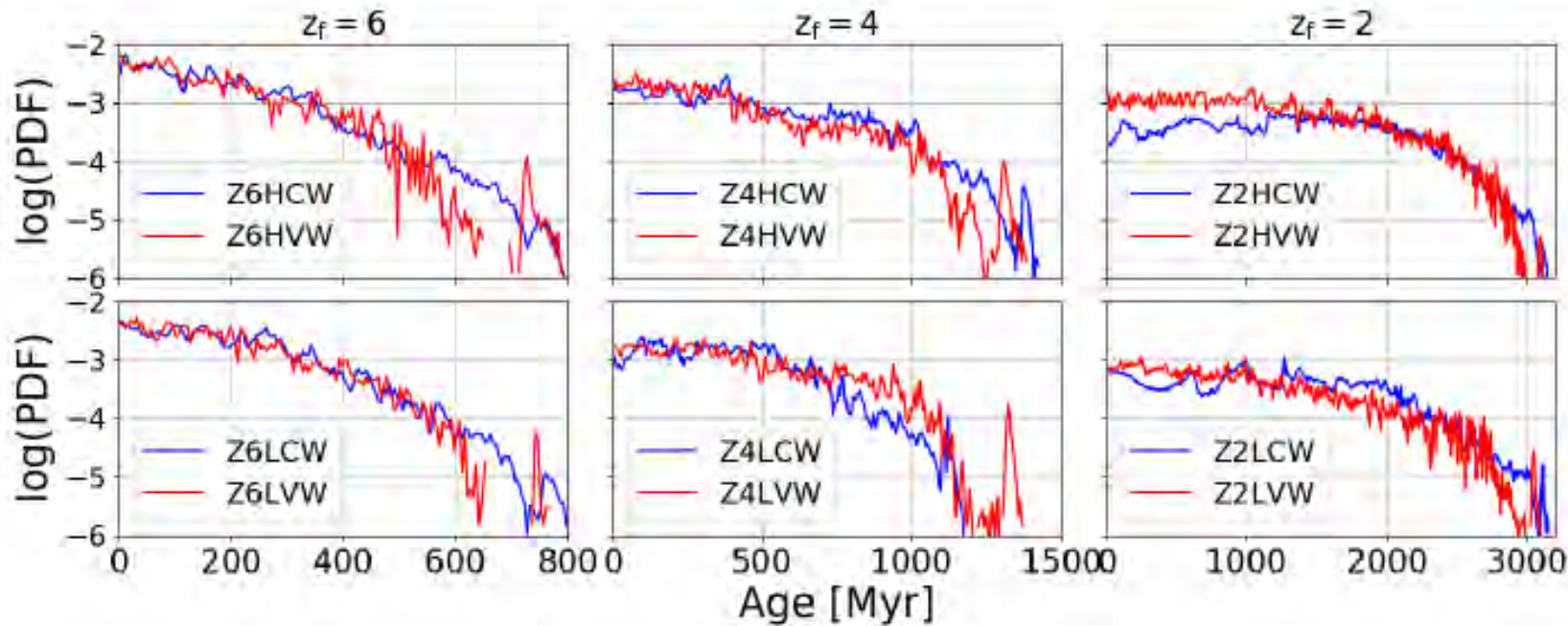
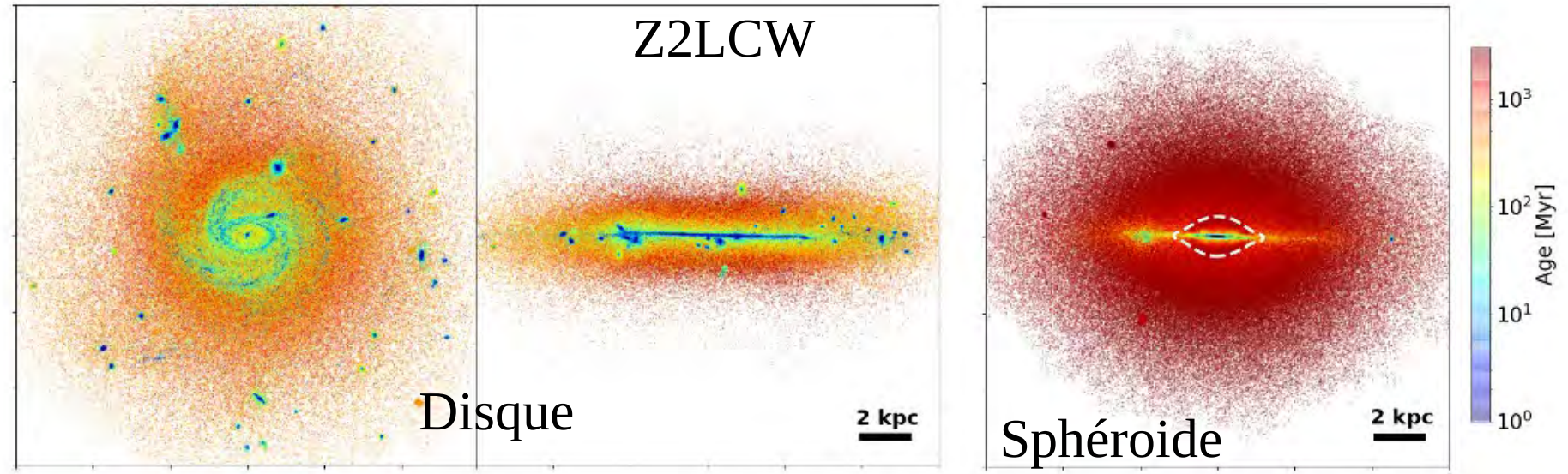


Feedback vent stellaire: CW Constant Wind, VW Variable Wind
Fraction de gaz supérieure avec VW

Bi, Shlosman, Romano-Diaz 2022

Ages des étoiles

Pic de SFR
entre $z=4$ et 2



CW Constant Wind,
VW Variable Wind

Processus physiques du « quenching »

Arrêt de la formation d'étoiles en

→ Coupant l'arrivée de gaz froid: **Lent (2-4 Gyr)**

Gravité du halo massif, Effets de l'environnement (étouffement des galaxies, balayage du gaz)

→ Ejectant le gaz présent: **Rapide (<~0.1 Gyr)**

Feedback des supernovae, des AGN (vents, jets)

→ Chauffant le gaz (transitoire) **Rapide**

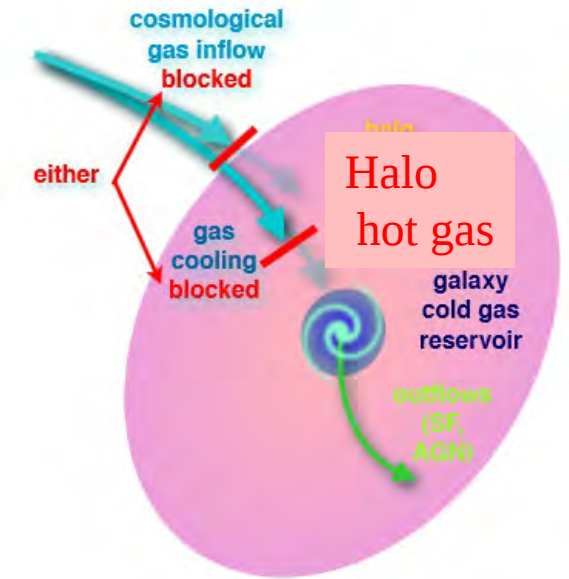
Turbulence par interactions de galaxies, starburst

Le gaz revient, se refroidit, après qqes 100Myr

→ Stabilisant le gaz: **Lent**

Formation bulbe massif, transformation morphologique

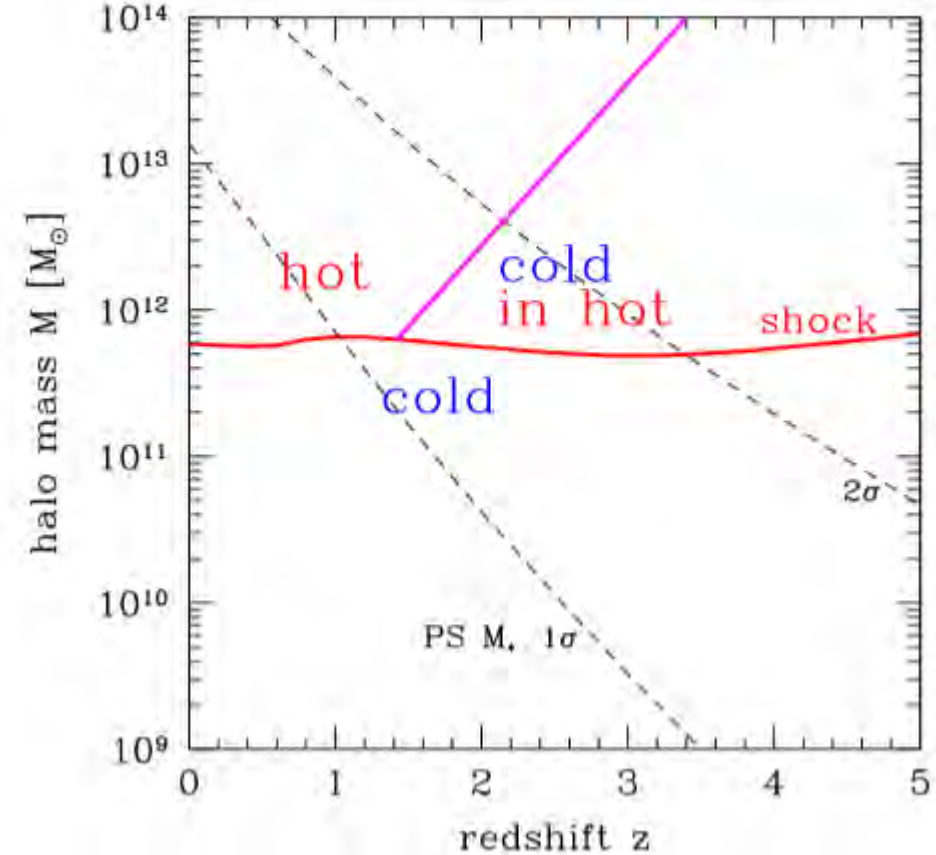
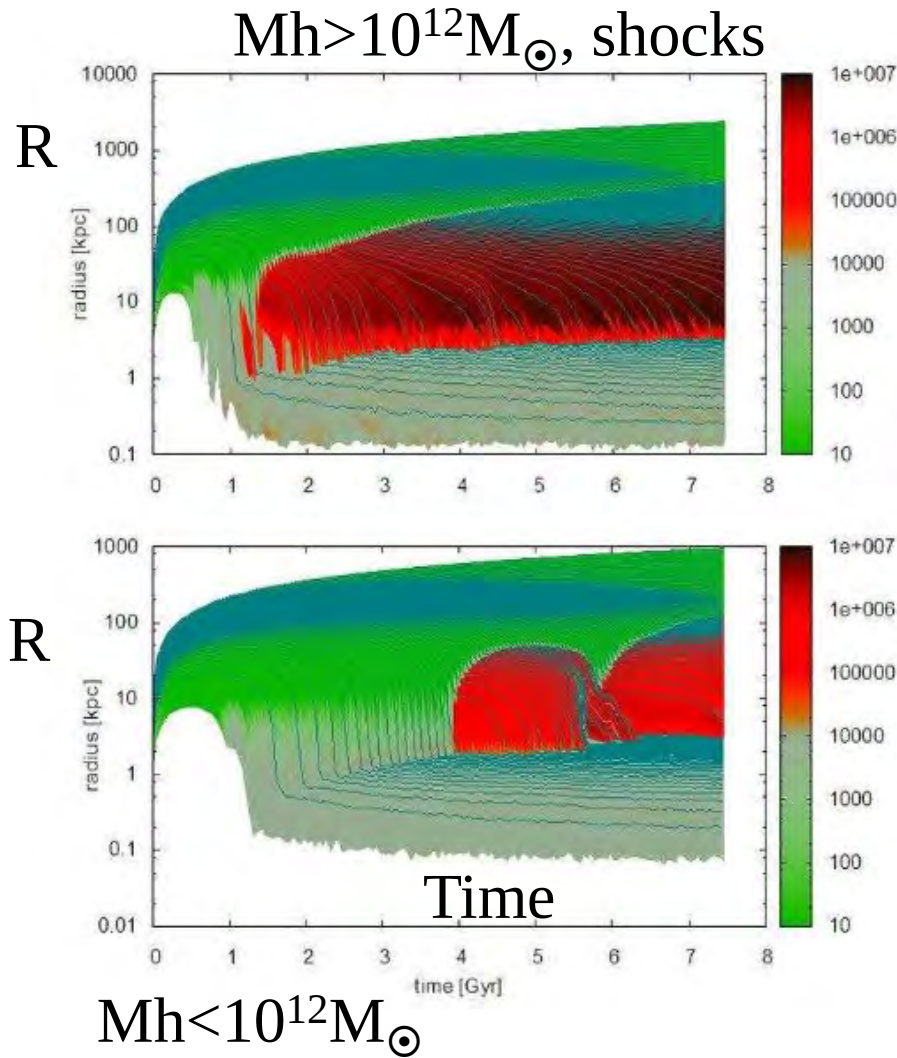
quenched LTG



Merger → ETG



Halo quenching



$$GM/R \sim v^2$$

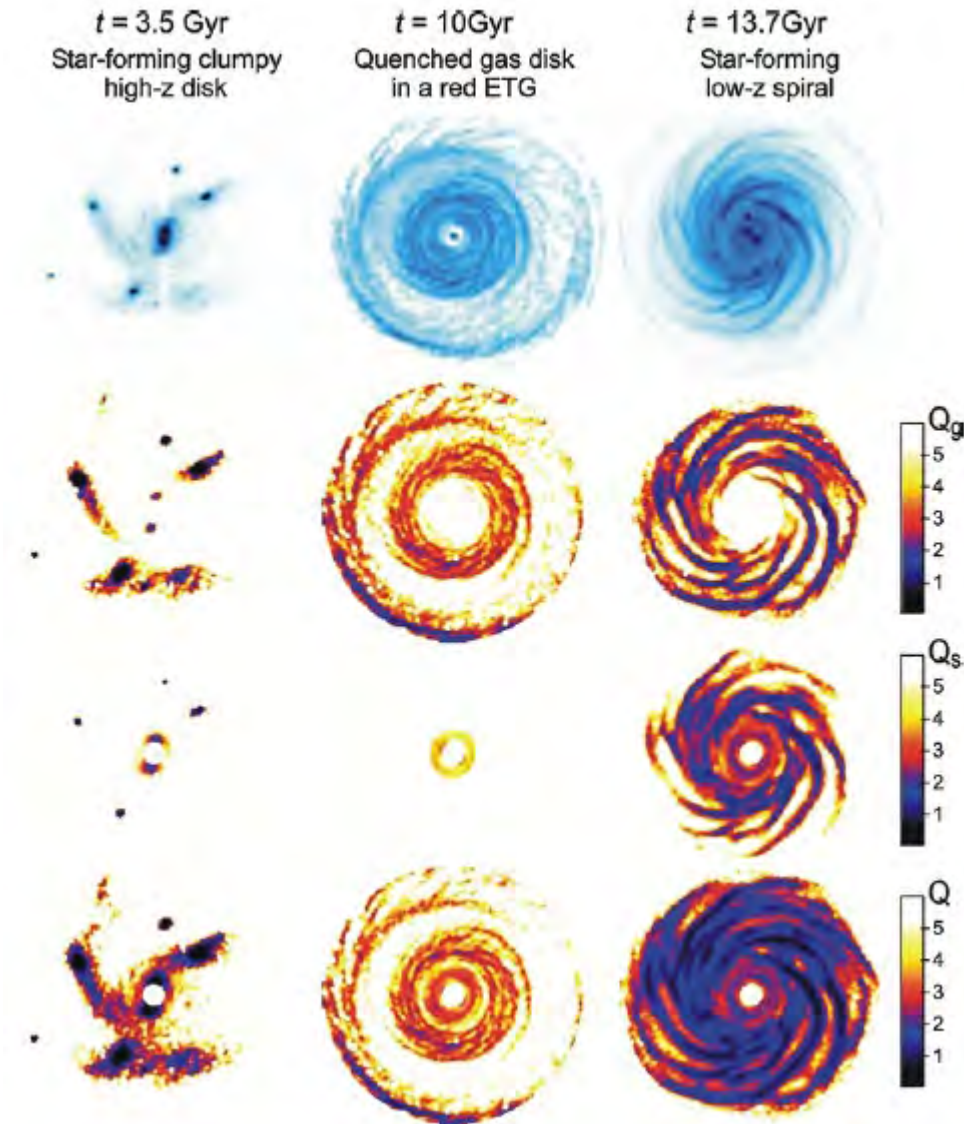
$$\propto kT$$

Dépend de la masse du halo (pas de M_*)

Peut arrêter l'arrivée du gaz

Déjà pour les groupes → formation de sphéroides

Transformation morphologique, bulbe



Disques seuls sont plus instables

Les bulbes et condensations centrales
Stabilisent les disques

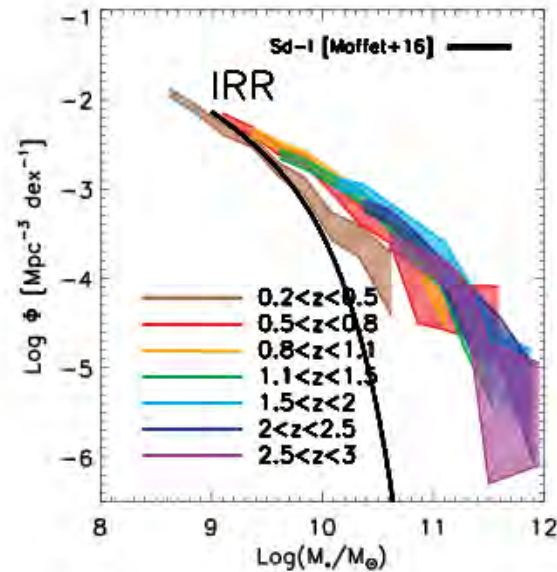
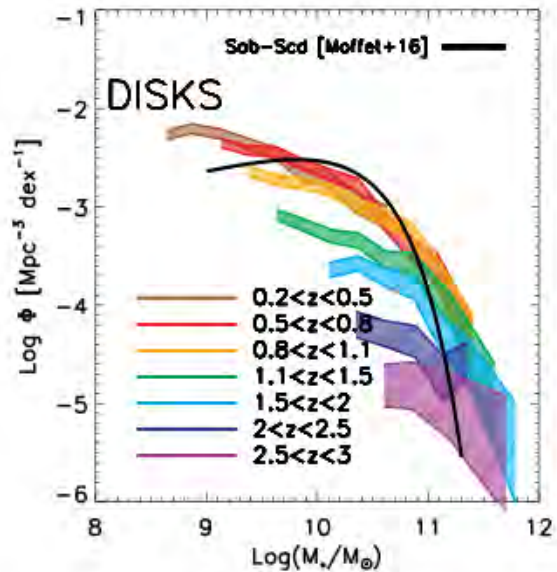
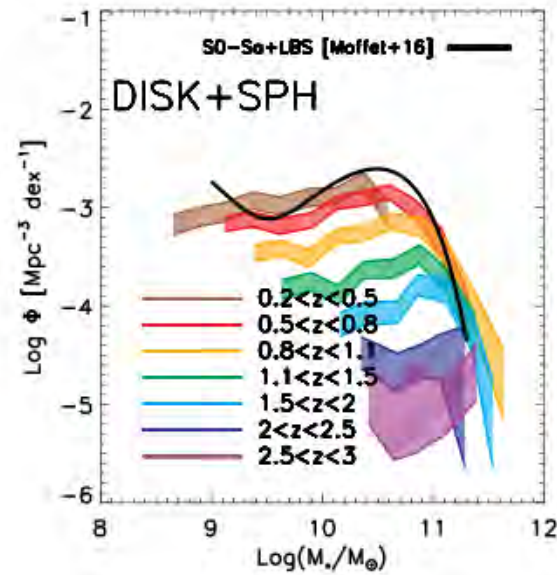
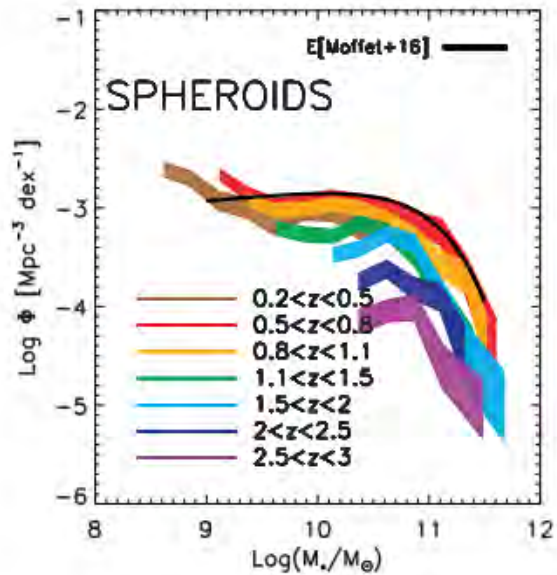
Paramètre de Toomre $Q = \sigma / \sigma_{\text{crit}}$

$\sigma_{\text{crit}} = 3.36 G\Sigma / \kappa$

Le bulbe fait croître κ , et Q
Stabilise avec σ et Σ constants

Martig et al 2009

Evolution des morphologies, avec HST



50 000 galaxies CANDELS
Machine learning

Croissance des systèmes DISK+SPH
autour de $z \sim 2$

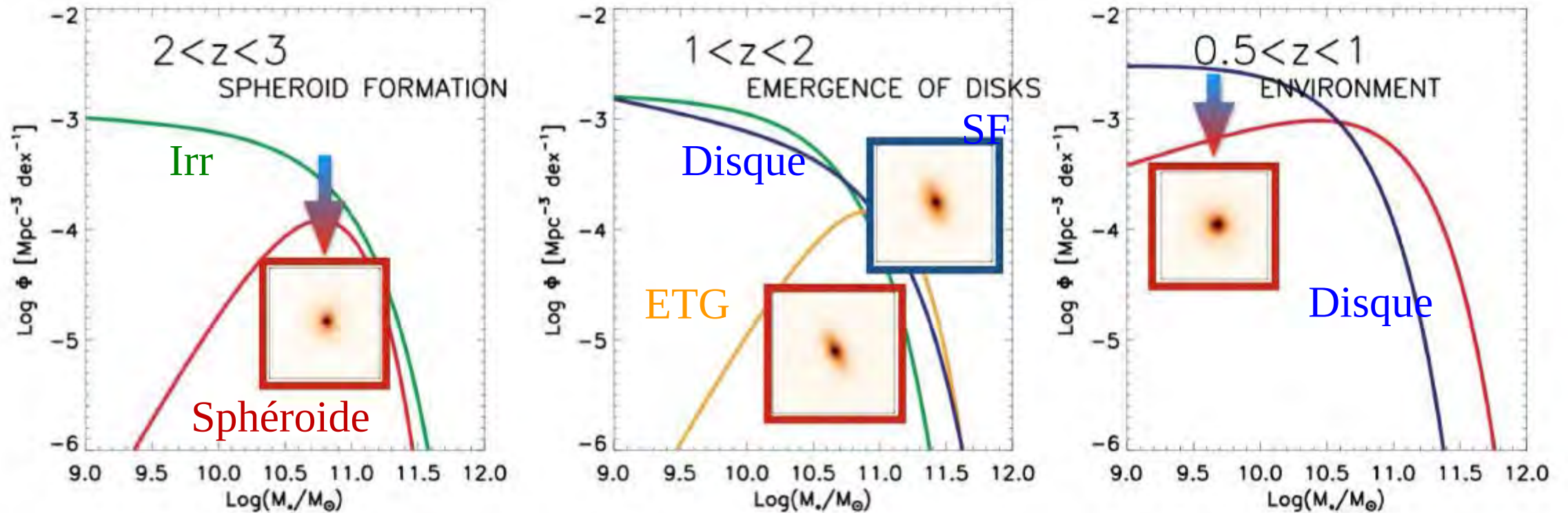
Pas de disque sans SF

→ Sphéroïde nécessaire pour stopper SF

La couleur rouge domine alors au centre
L'arrêt de SF progresse du centre au bord

Epoques de formation

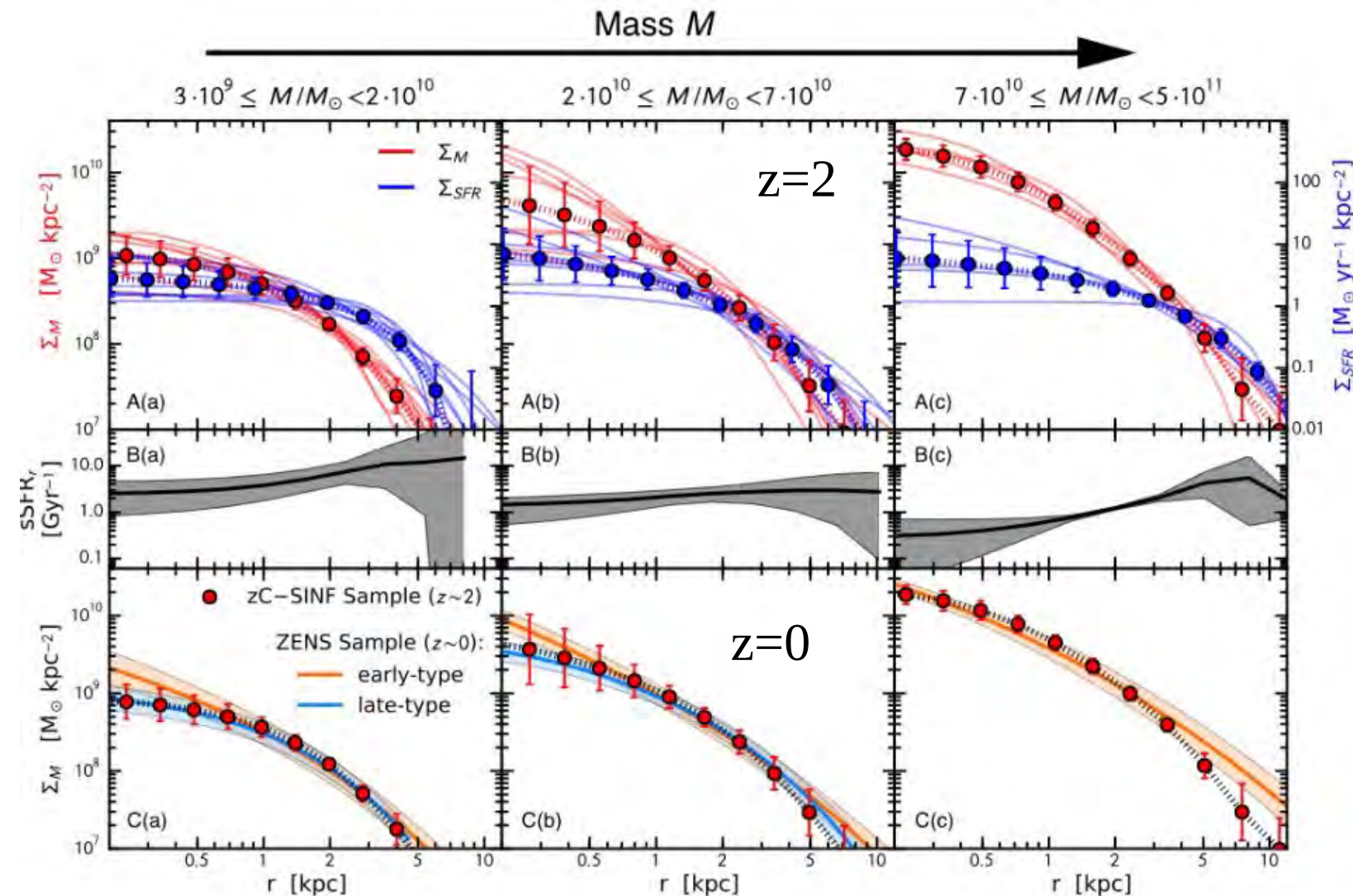
Encore trop de Irr à $z=3$ (HST) sans doute disques avec JWST



Entre $1 < z < 2$, quenching des disques en ETG
Reformation de disques par accretion de gaz

Huertas-Company et al 2016

Formation d'étoiles dans les disques à $z=2.2$



Curieusement, les profils des étoiles sont les mêmes

Alors que le Σ_{SFR} varie

→ Bulbes déjà en place!

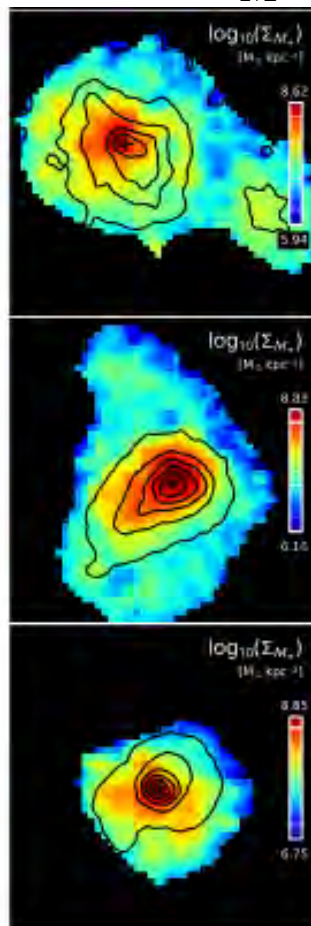
Images HST
3 Gyr après le Big-Bang

Formation d'étoiles dans les disques

HST-Hband



image Σ_{M^*}



Profil Σ_{M^*}

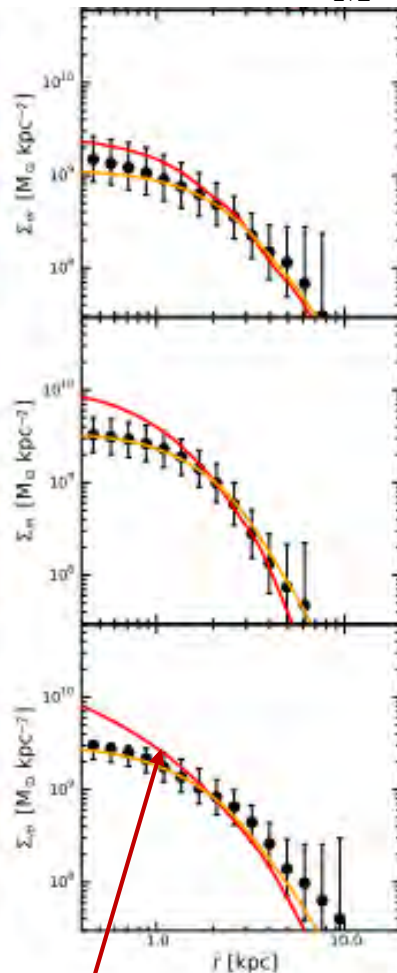
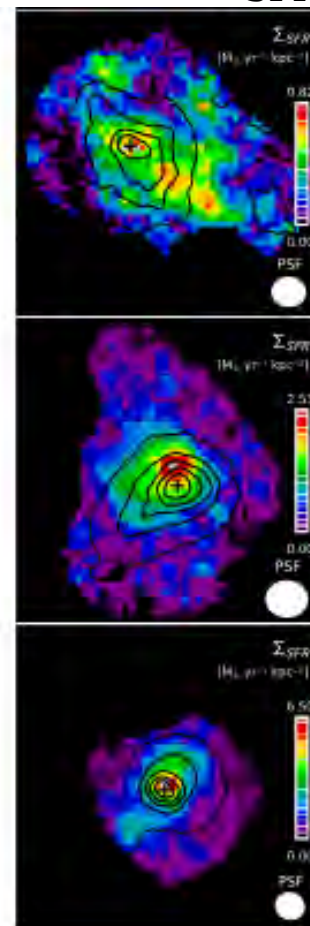
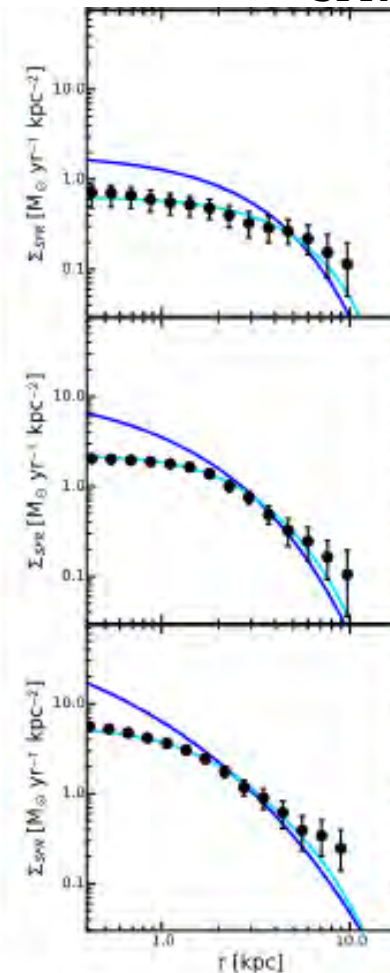


Image Σ_{SFR}



Profil Σ_{SFR}



$z=2.23$

$z=2.33$

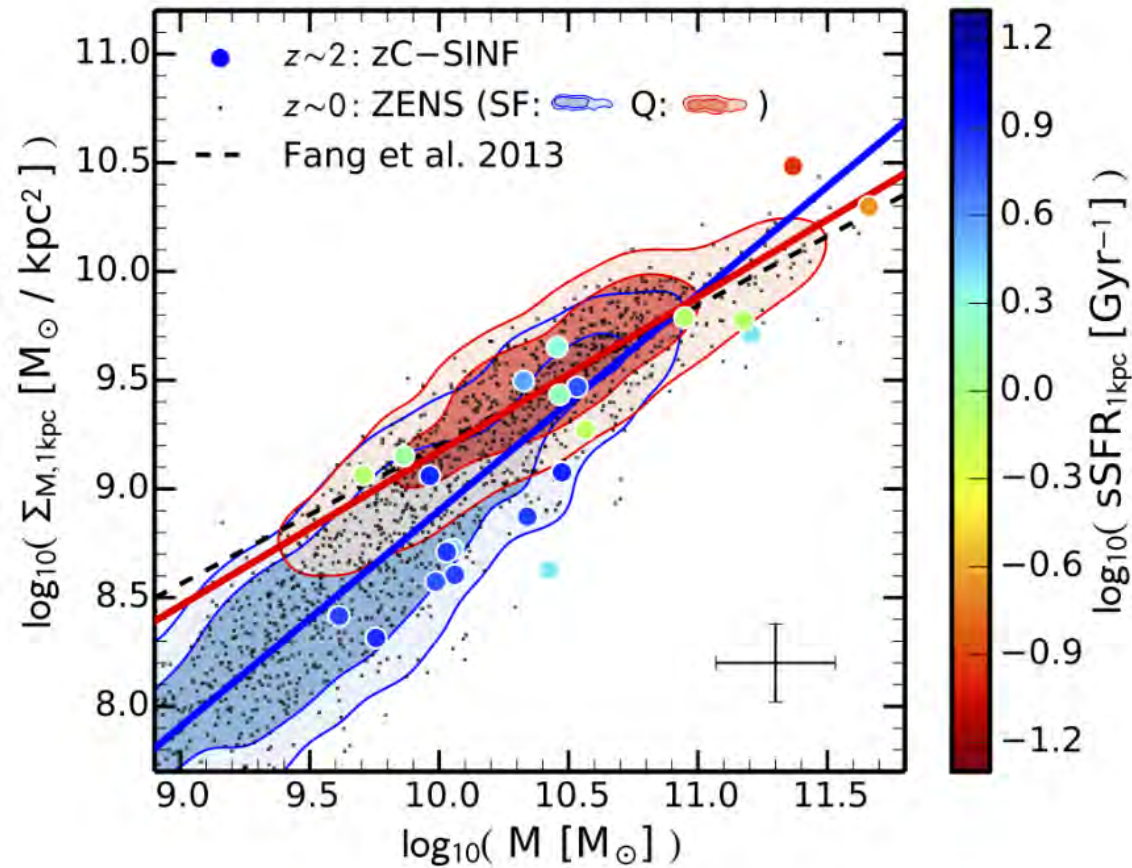
$z=2.39$

Corrigé de la PSF

Tacchella et al 2015

Arrêt de SF du centre au bord

Tacchella et al 2015



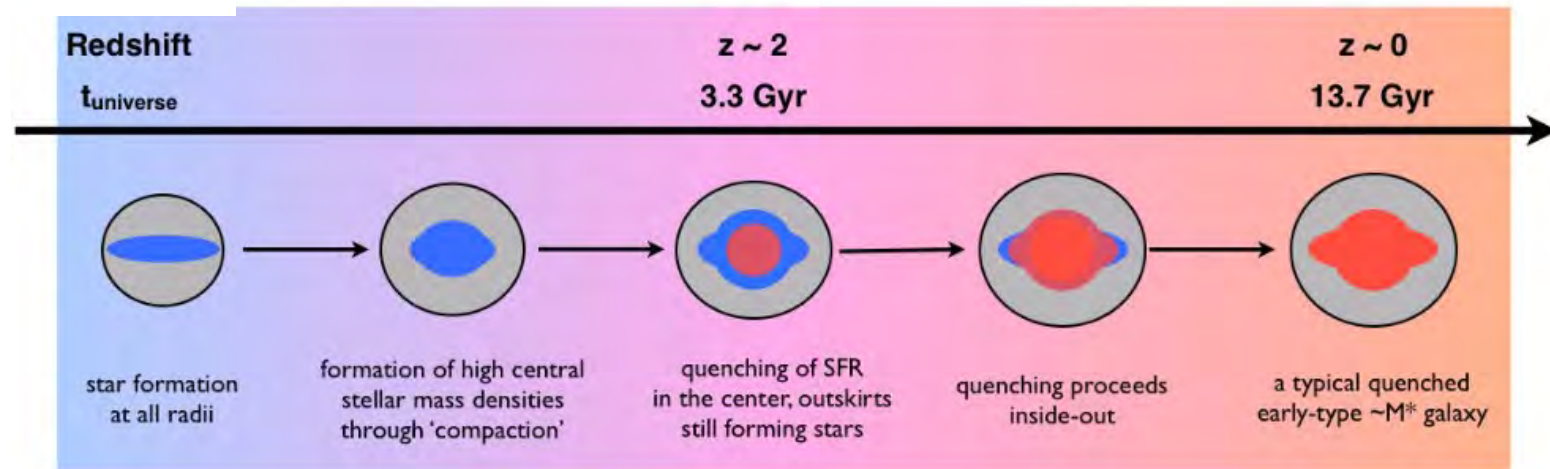
$\Sigma_{M^*}(1\text{kpc})$ quantifie la concentration

----- SDSS $z=0$ (Fang et al 2013)

$\Sigma_{M^*}(1\text{kpc}) \sim M$ $\Sigma_{M^*}(1\text{kpc}) \sim M^{0.7}$

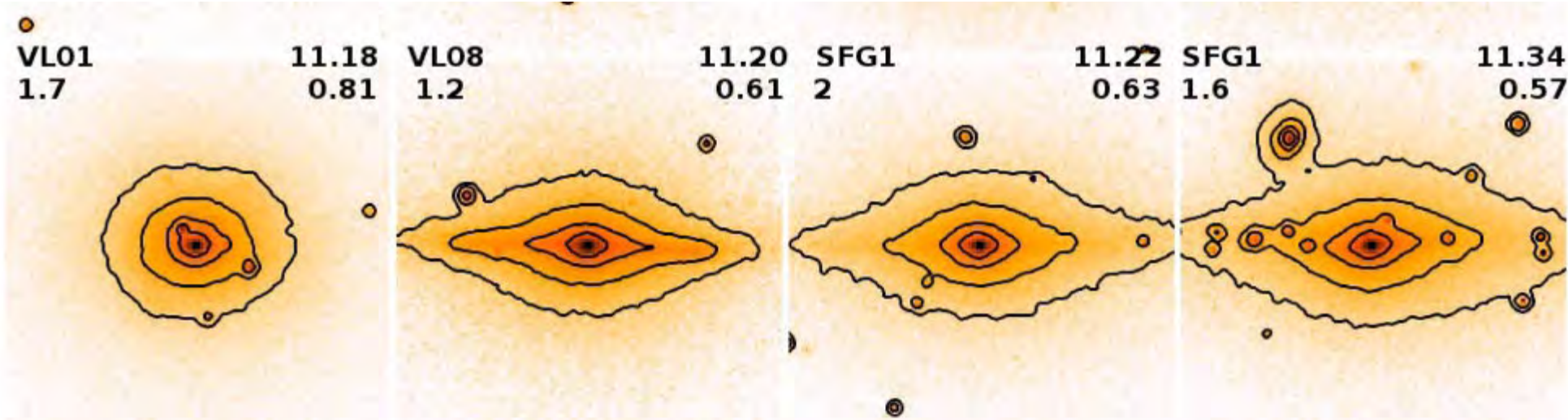
Les points $z=2.2$ suivent Σ_{M^*} (SF)

$s\text{SFR}(1\text{kpc})$ diminue avec M_*

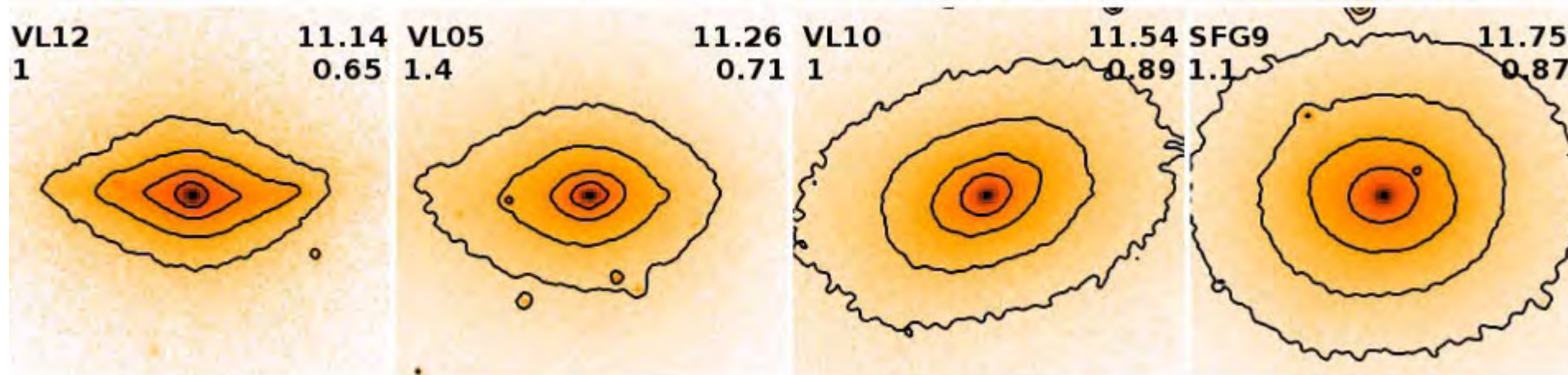


Formation des bulbes par compaction

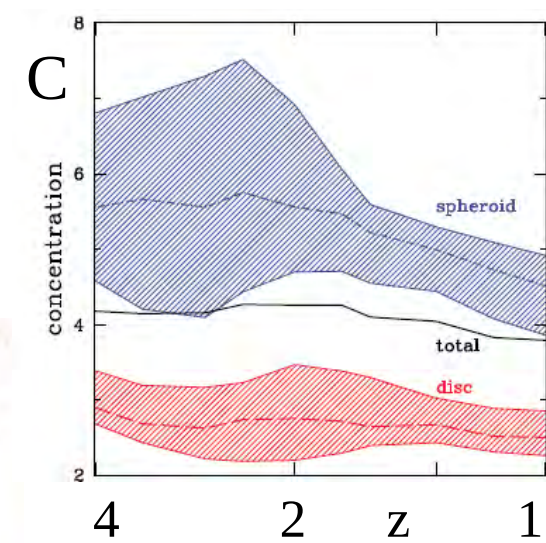
Deux canaux de formation: Instabilités violentes des disques, ou fusions



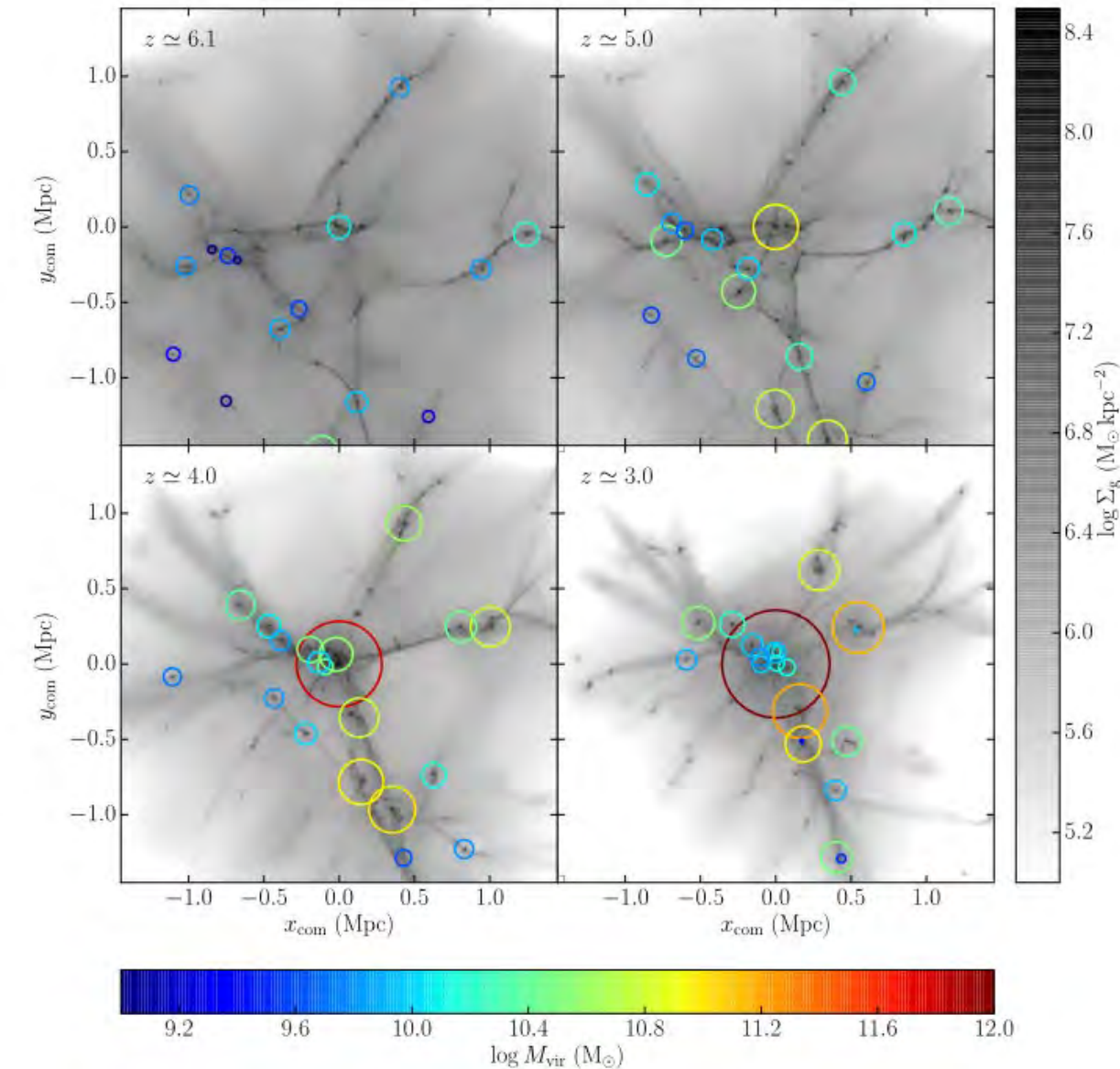
Instabilités
et accrétion



Fusions de
galaxies



La séquence de Hubble: simulation Argo

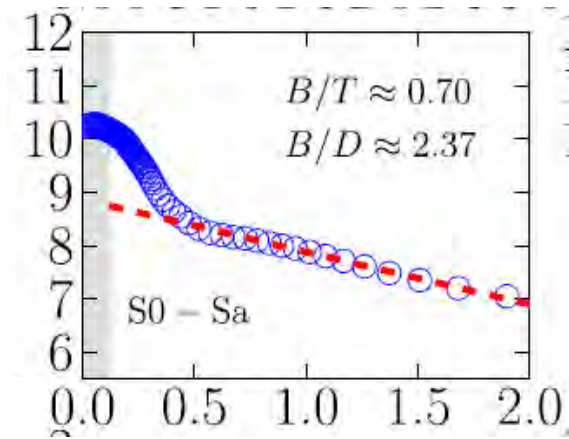


Simulation d'un halo correspondant à un groupe
Forme les galaxies $M=10^8\text{-}11 M_{\odot} \rightarrow z=3$

La séquence de Hubble est déjà en place

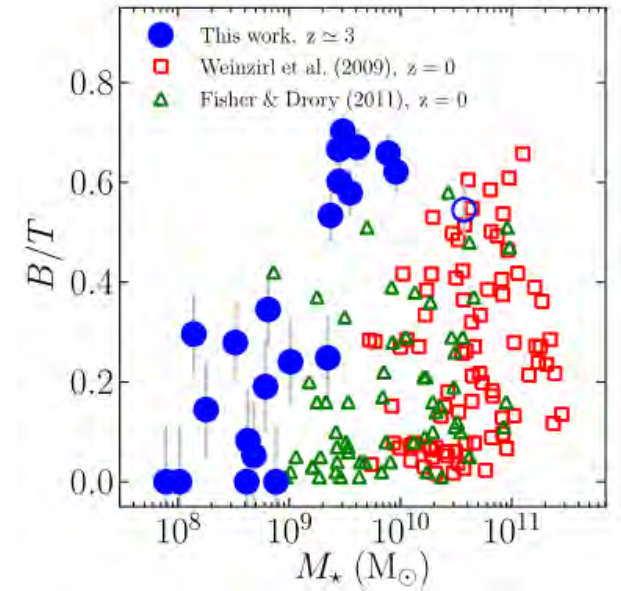
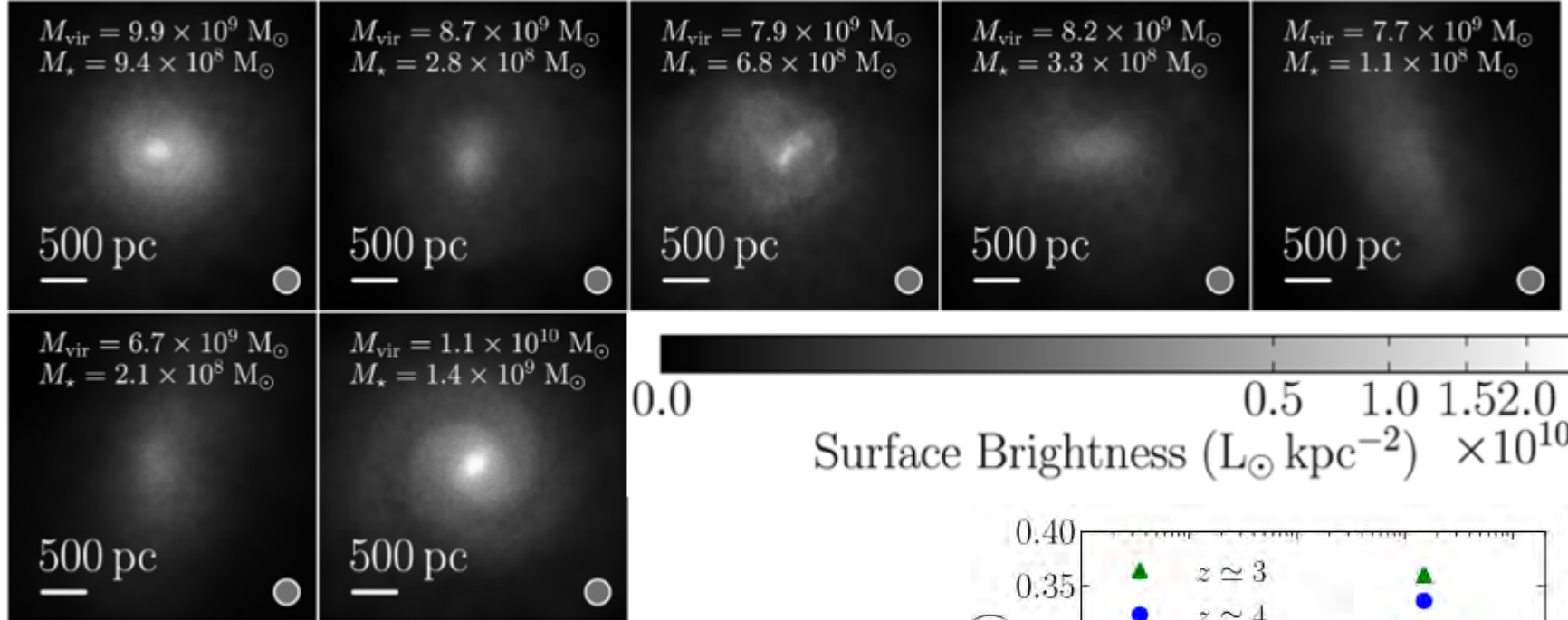
Bulbes et sphéroides par des fusions
Même processus qu'à $z=0$

22 galaxies, morphologie
identifiée,
Courbe de rotation
Reliée à la morphologie

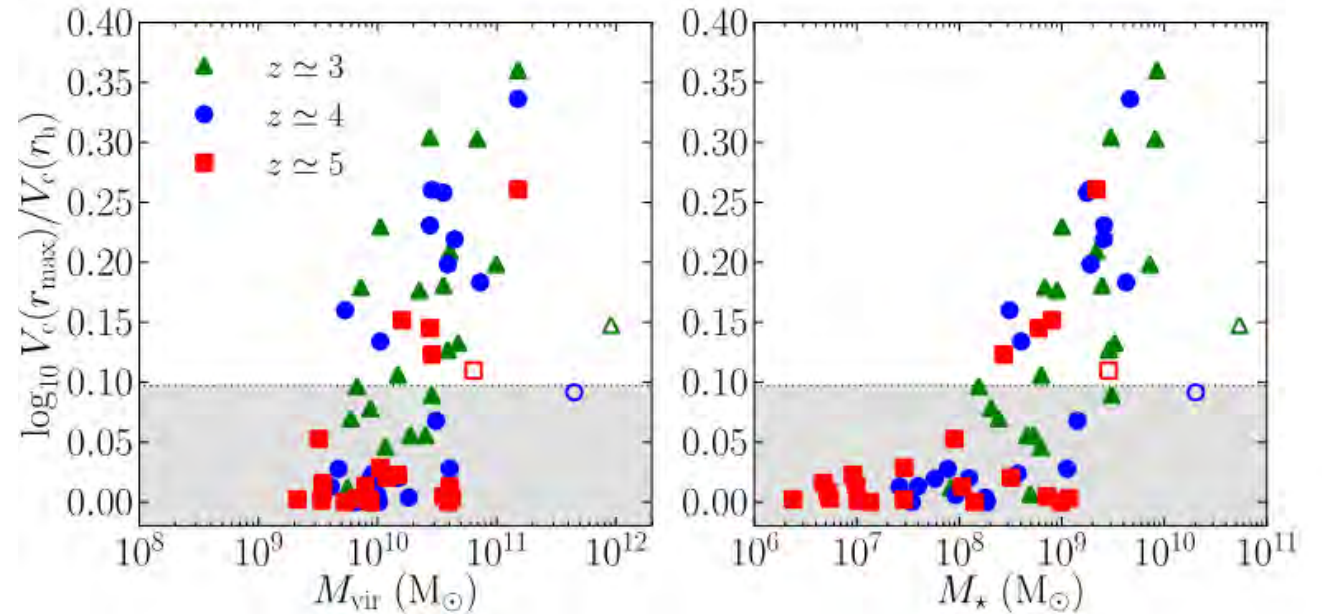


Fiacconi et al 2015

Simulation Argo



La rotation s'installe progressivement



Moment angulaire

Moment spécifique $j^* = J/M$ Disques Bulbes

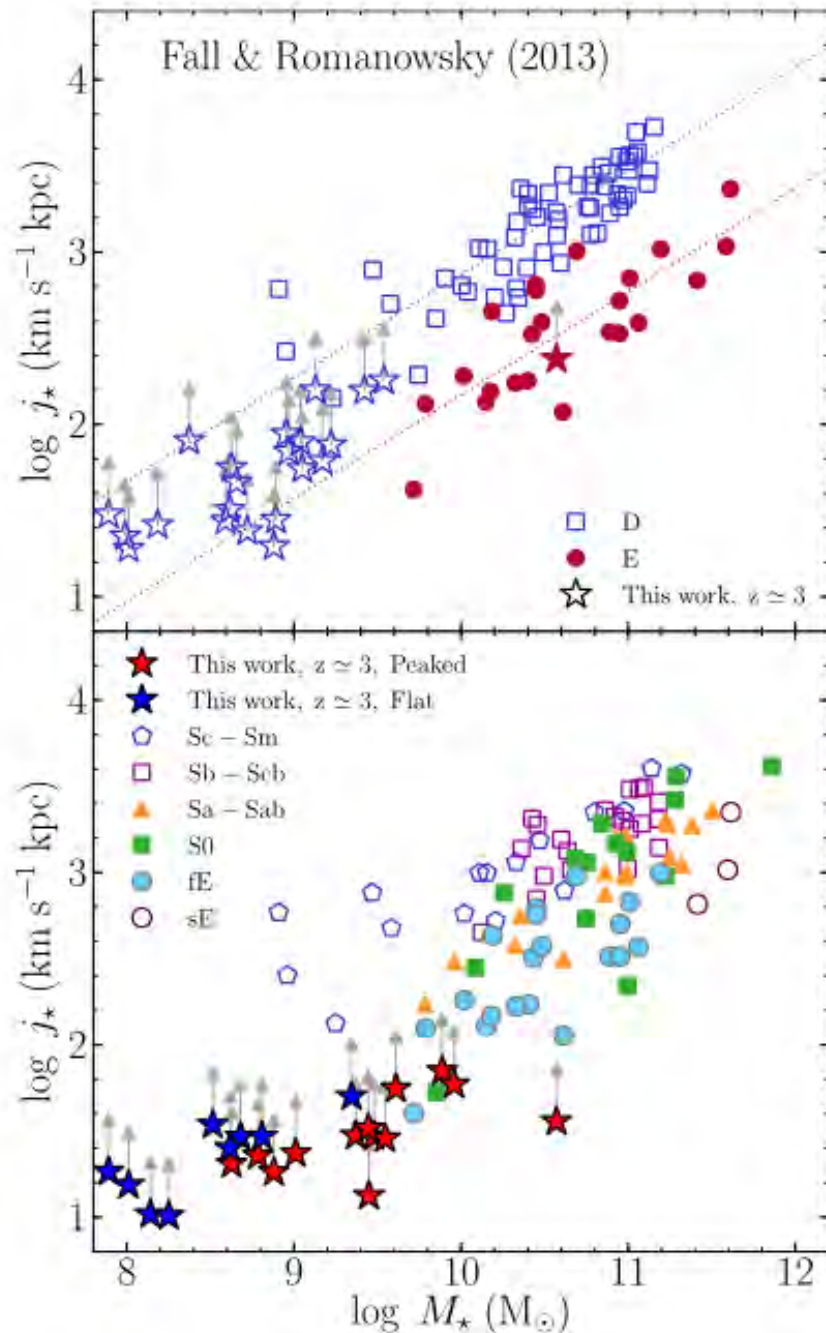
Gradient de sE, dE, Sa, Sb, Sc..
A $z=3$, encore assez peu de J^*

Selon la fraction de J gardée par le disque
Evolution estimée, quantifiée par des flèches

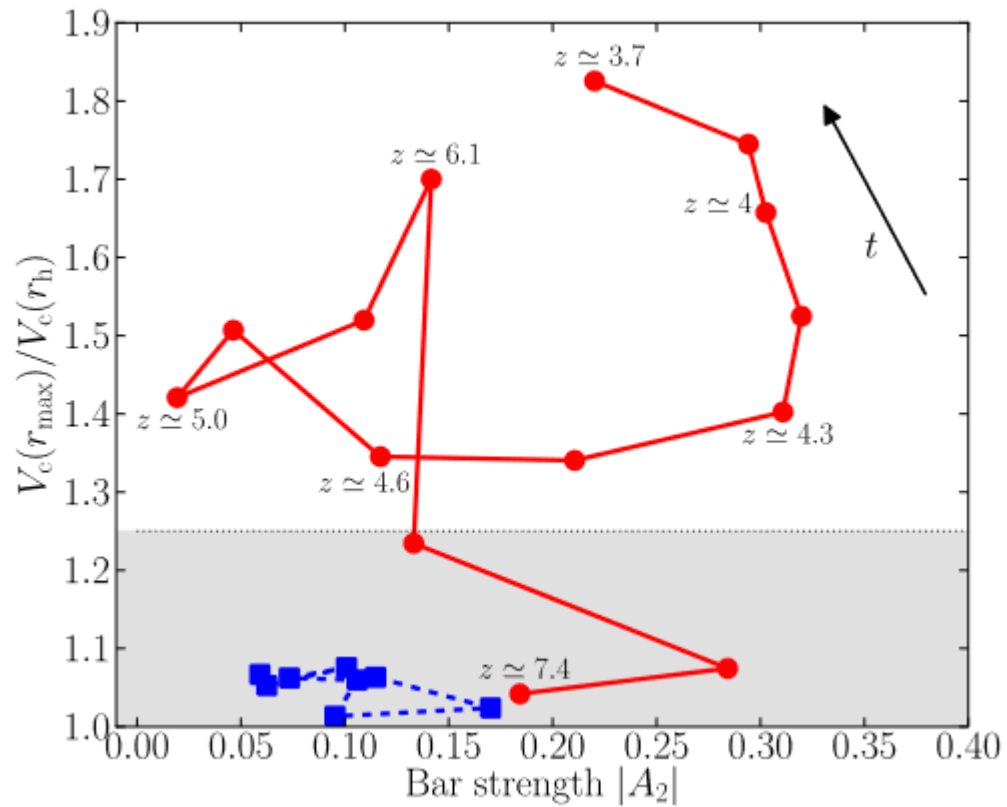
$$\left. \frac{j_{\star,d}(z=0)}{j_{\star,d}(z=3)} \right|_{M_\star} = \left(\frac{\Delta(z=0)}{\Delta(z=3)} \right)^{-1/6} \left(\frac{H(z=0)}{H(z=3)} \right)^{-1/3} \sim 2$$

Galaxies isolées: V_{rot} reste plat
En groupe, starburst $\rightarrow$ plus piquée

Fiacconi et al 2015



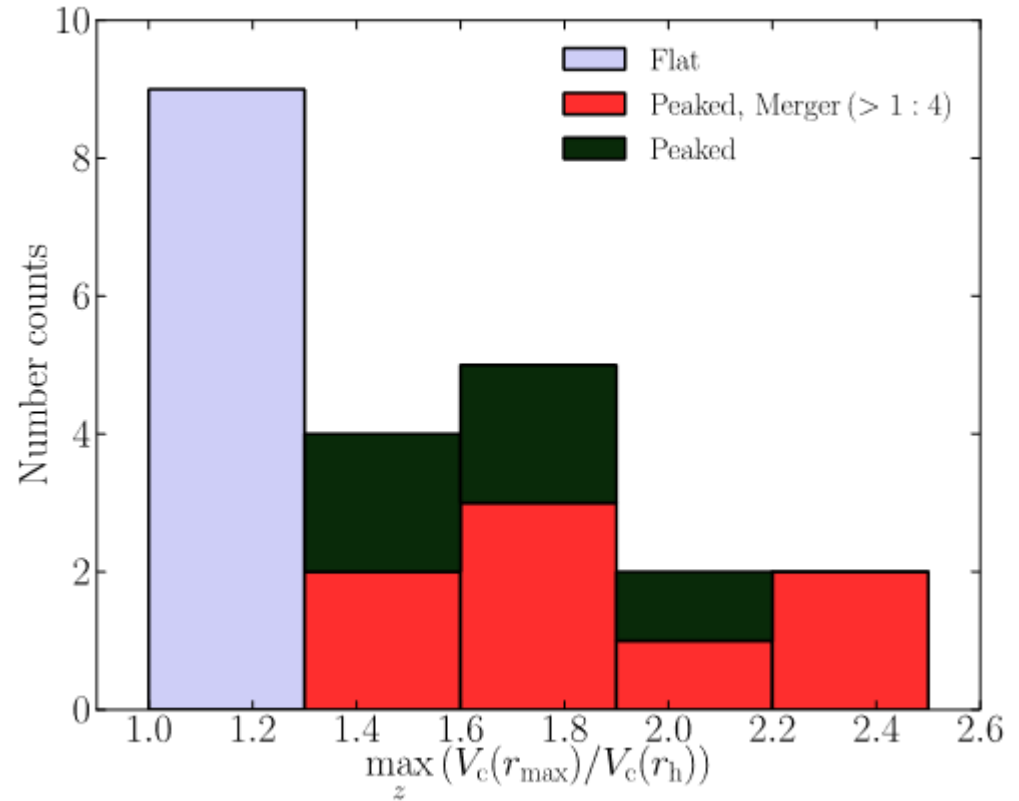
$V_c(r_{\max}) / V_c(r_h)$



Force de la barre

Marche au hasard de l'évolution de V_c
 Pic à 3.7 avec une fusion/starburst
 Entre temps, dépend de la barre, et évolution
 séculaire

Courbes de rotation



Le starburst forme des étoiles
 au centre, et V_{rot} augmente, avec B/T

Fiacconi et al 2015

Masse stellaire sur matière noire

Les galaxies obtenues dans les simulations sont bien au-dessus des prédictions du modèle Λ CDM

Abundance matching (Moster et al 2013)

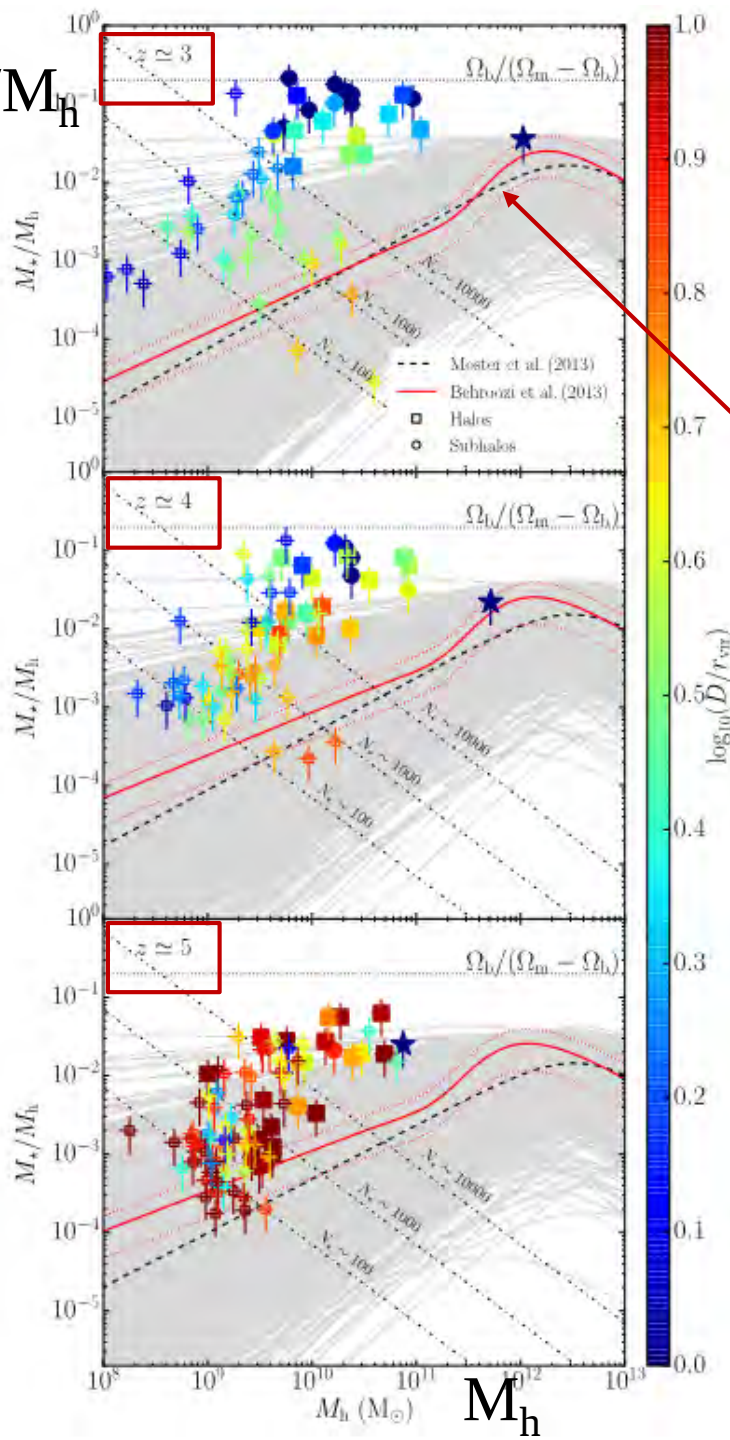
L'écart semble même croître avec le temps

Pas seulement insuffisance de feedback

→ Effet de l'environnement

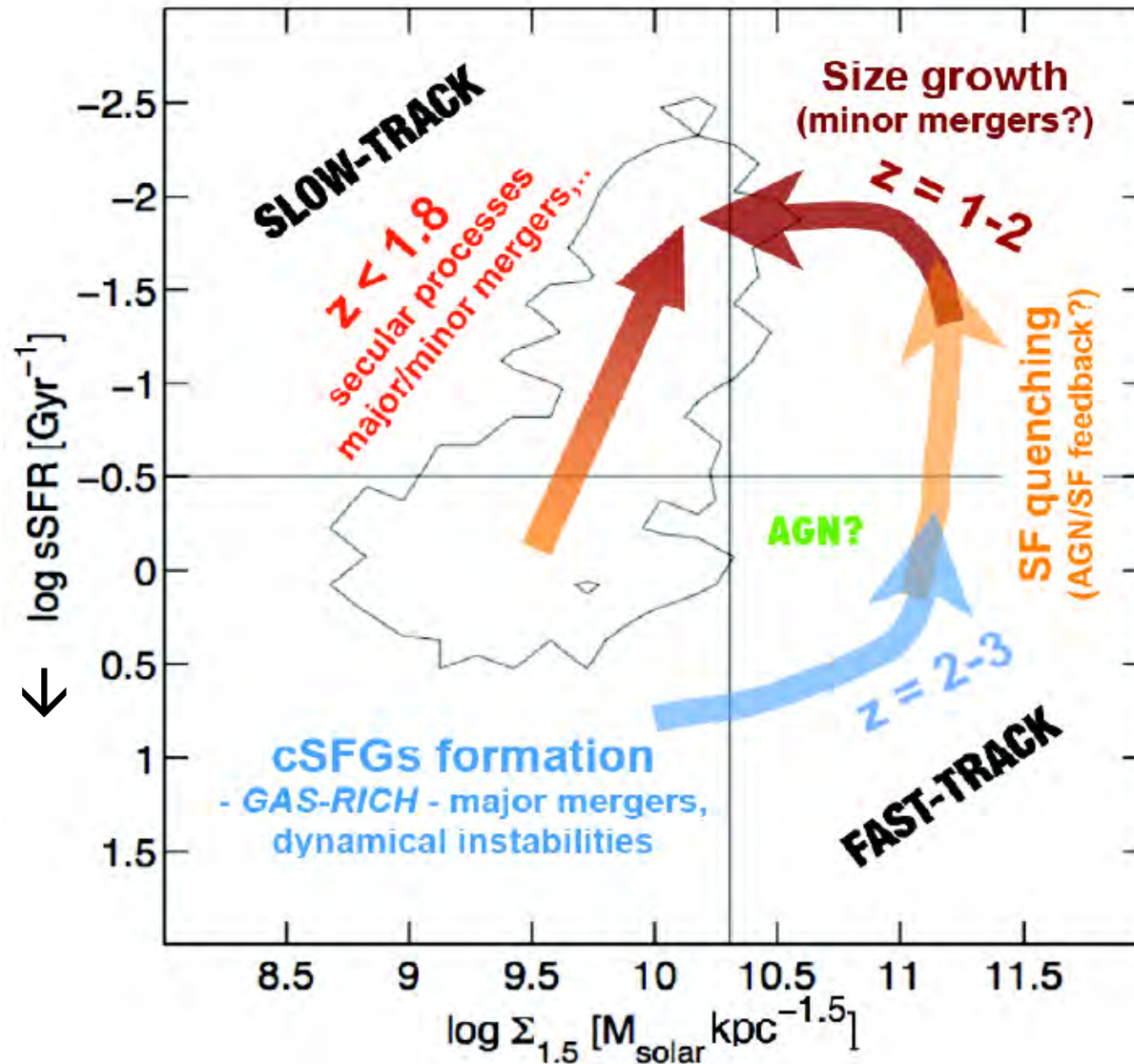
Cercles= satellites

Carrés= galaxies centrales



Fiacconi et al 2015

Scénarios possibles: lent et rapide



Concentration →

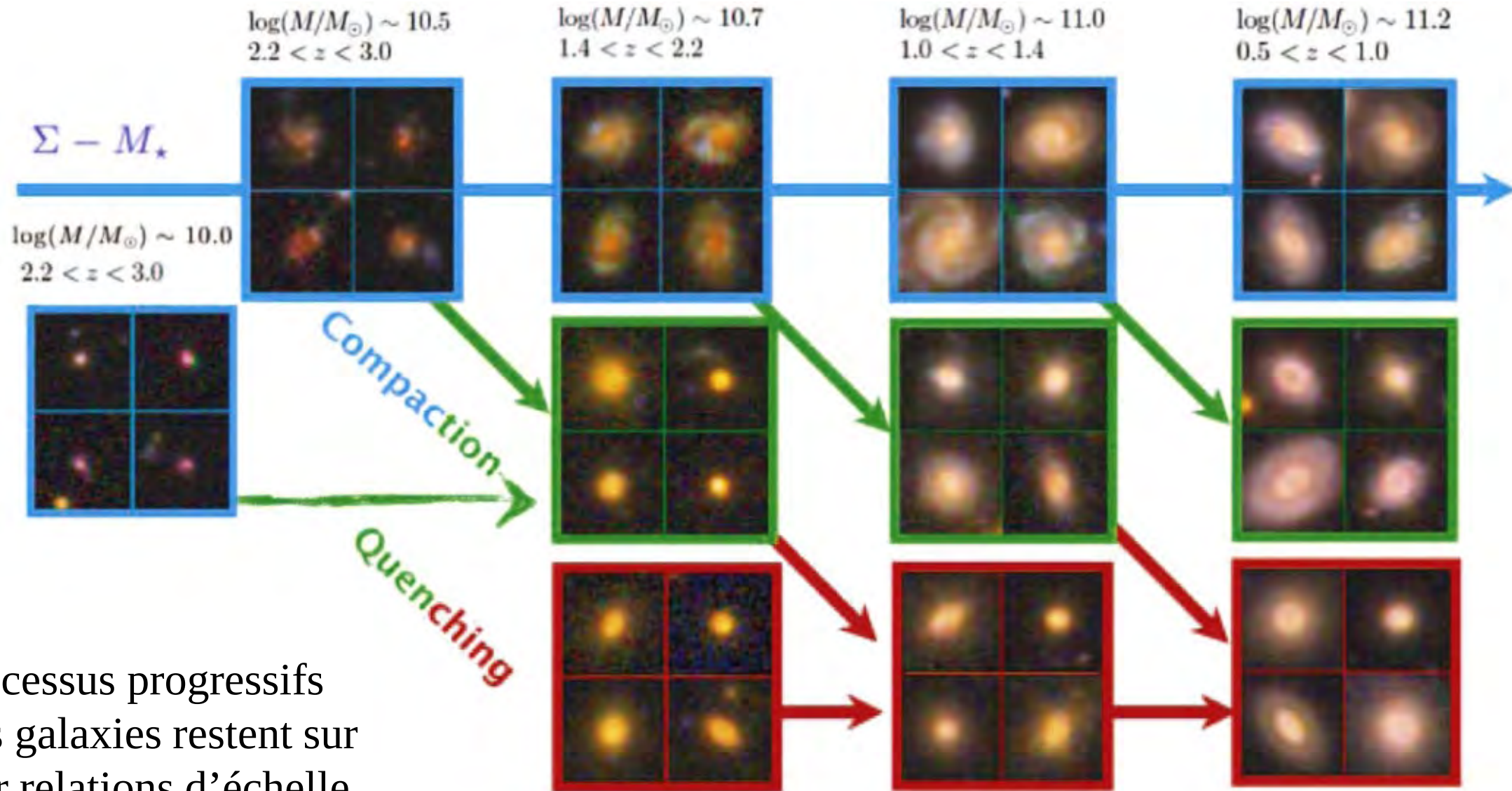
Deux pistes d'évolution et de formation de galaxies passives

(1) tôt ($z > 2$), galaxies où SF arrêtée
Rapidement → cSFGs
deviennent galaxies passives, et
croissant en taille

(2) Arrivée tardive ($z < 2$) où des
galaxies SF plus grandes forment
Des galaxies passives plus étendues
sans passer pas un état compact

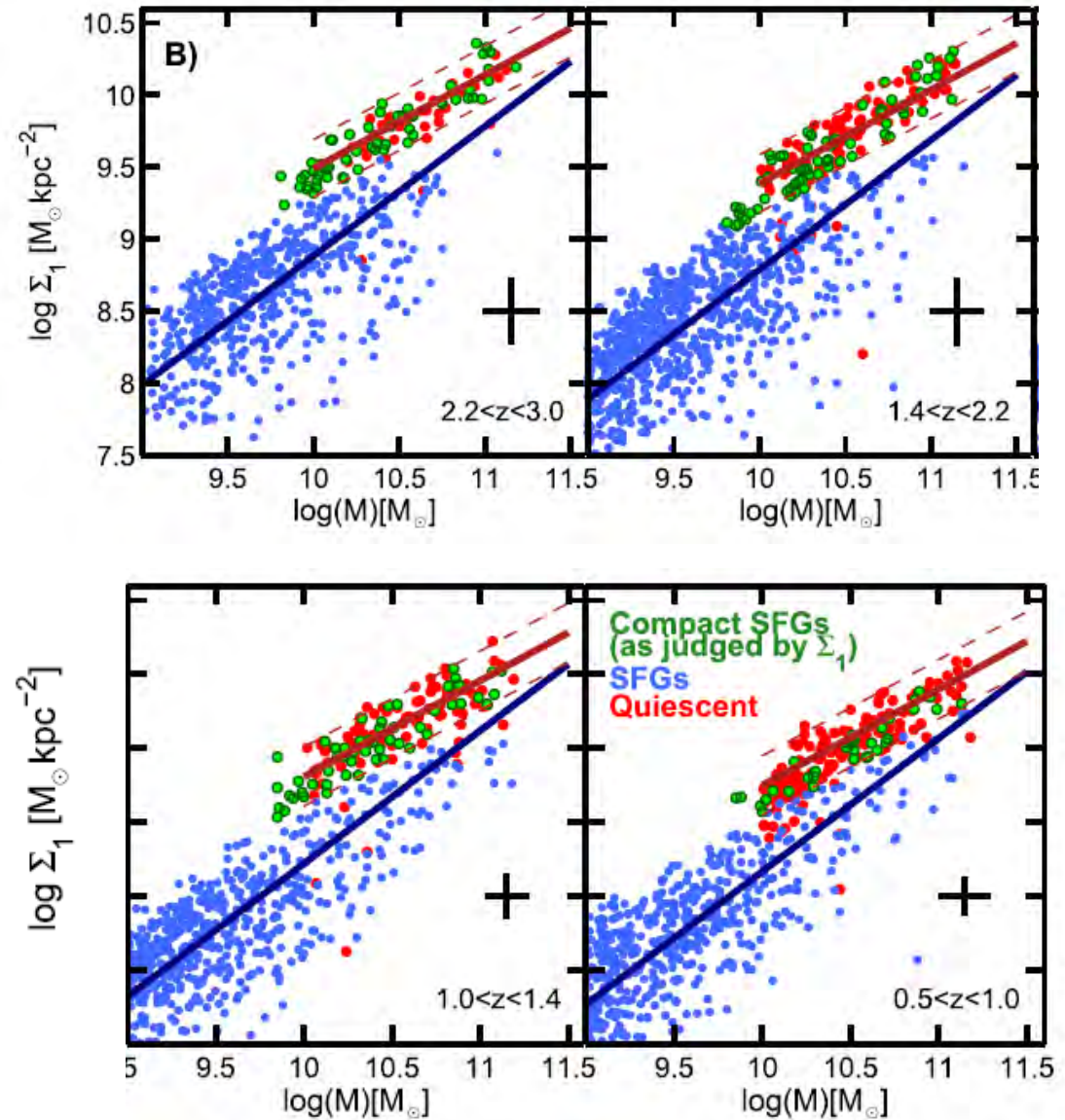
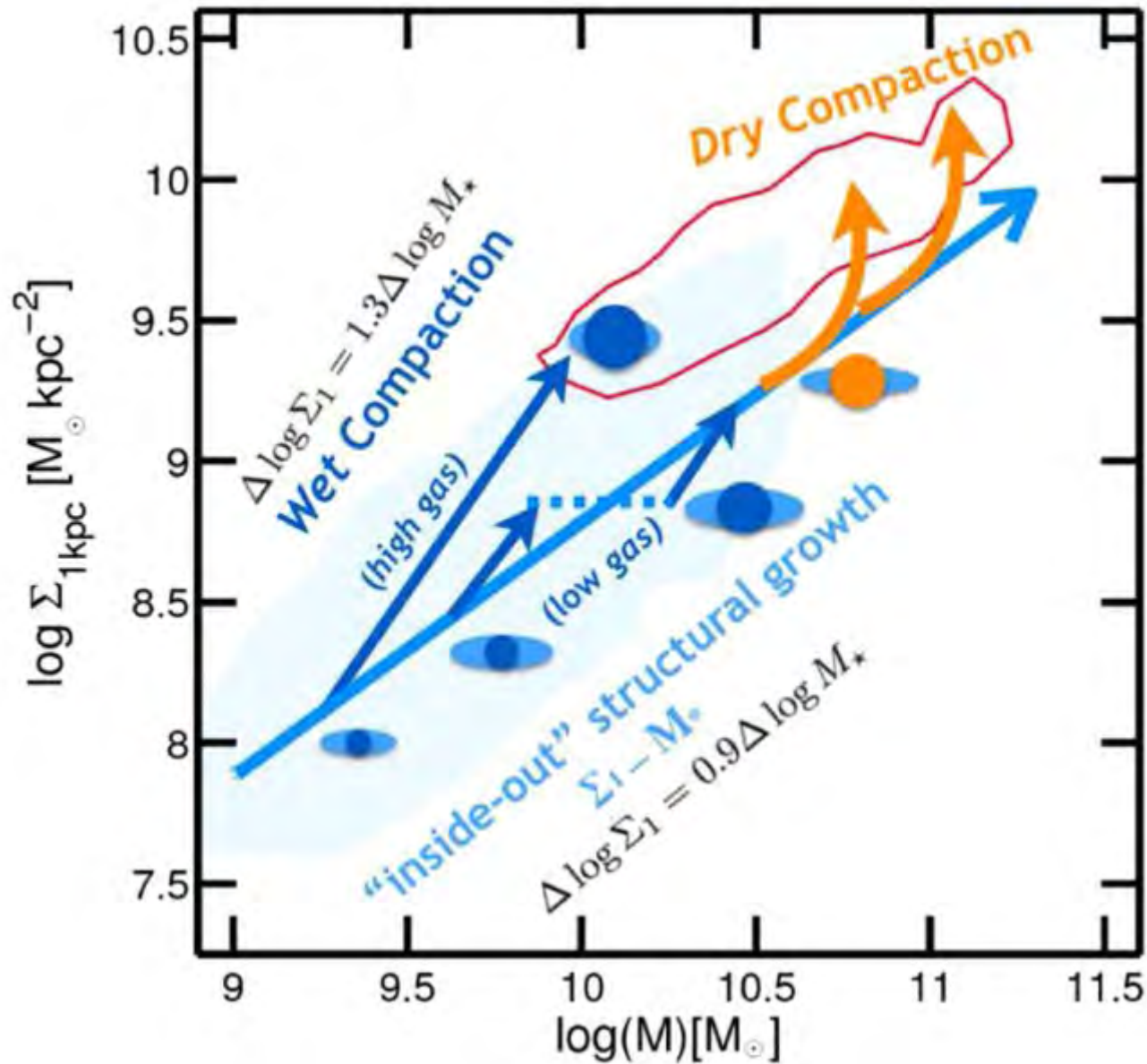
Barro et al 2013

Compaction



Processus progressifs
Les galaxies restent sur
leur relations d'échelle

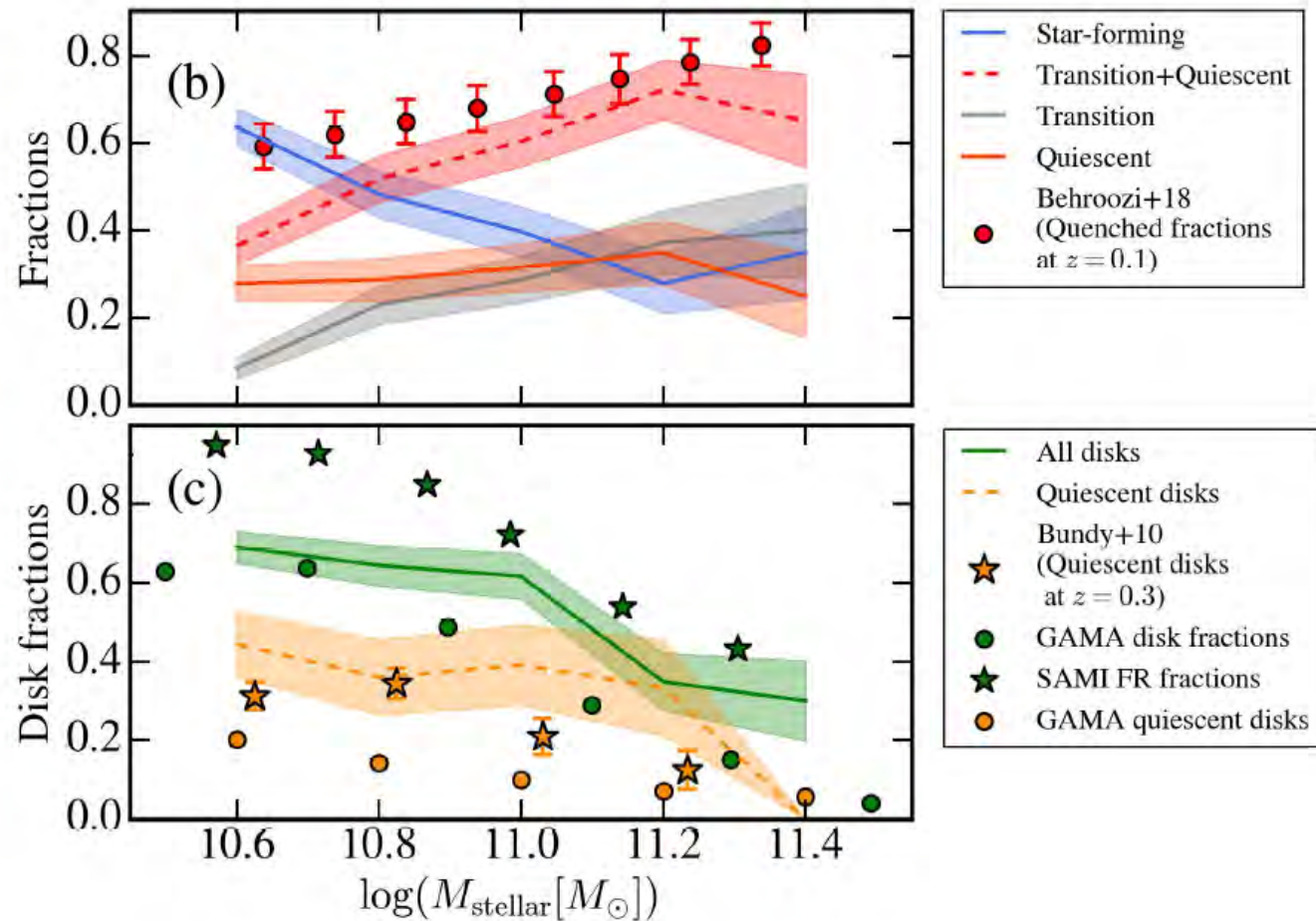
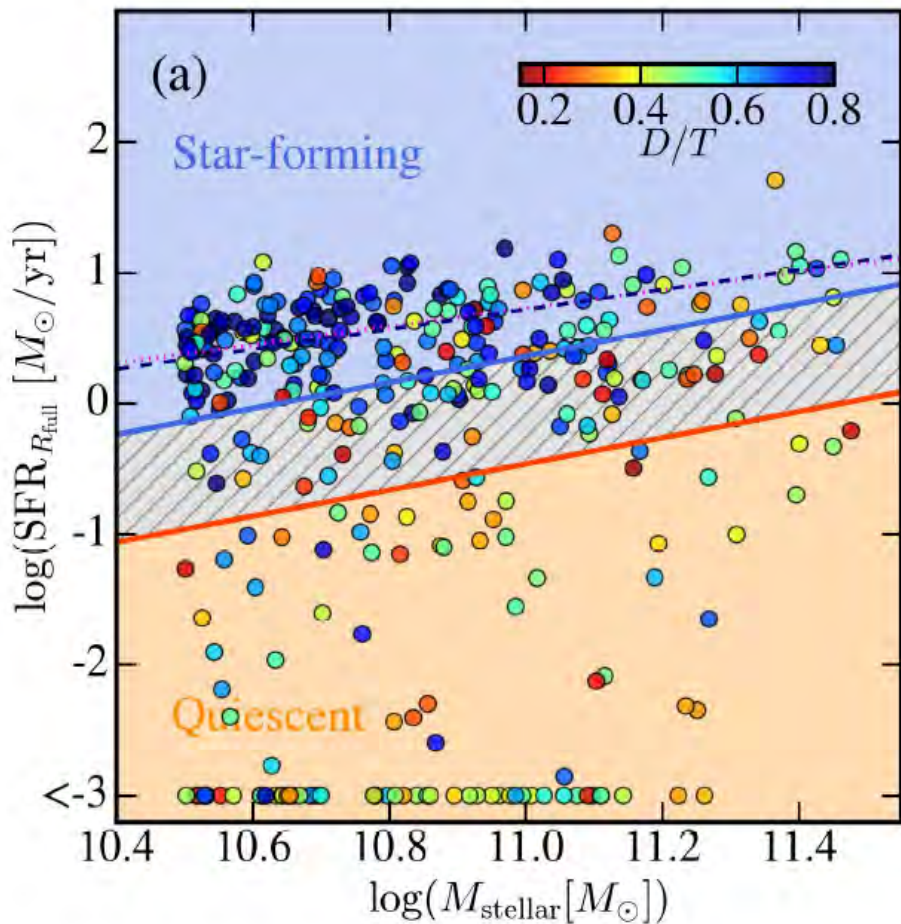
Evolution et arrêt de la formation d'étoiles



Barro et al 2017

Dry compaction through secular instabilities

Processus de quenching et transformation morphologique découplés?

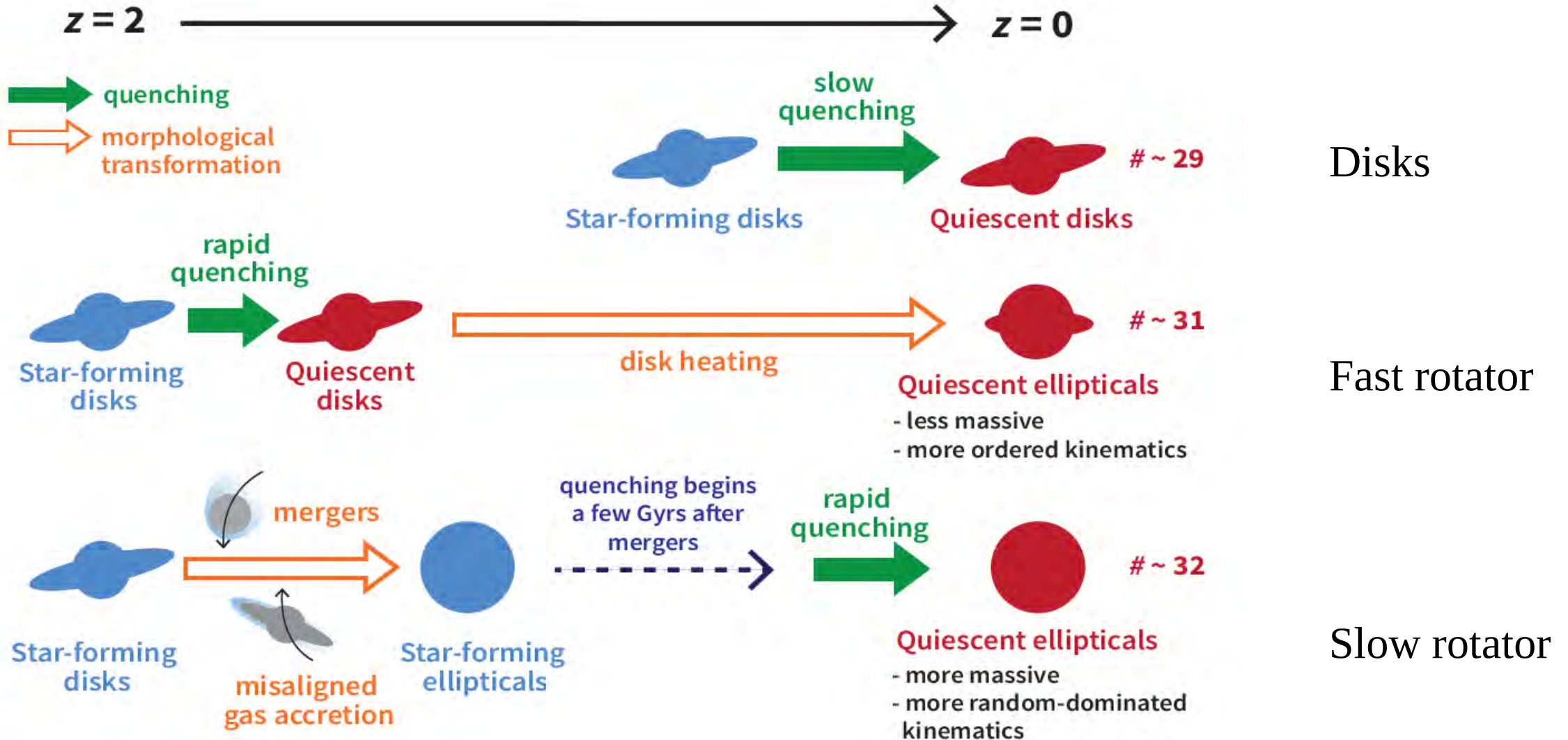


Simulations TNG50

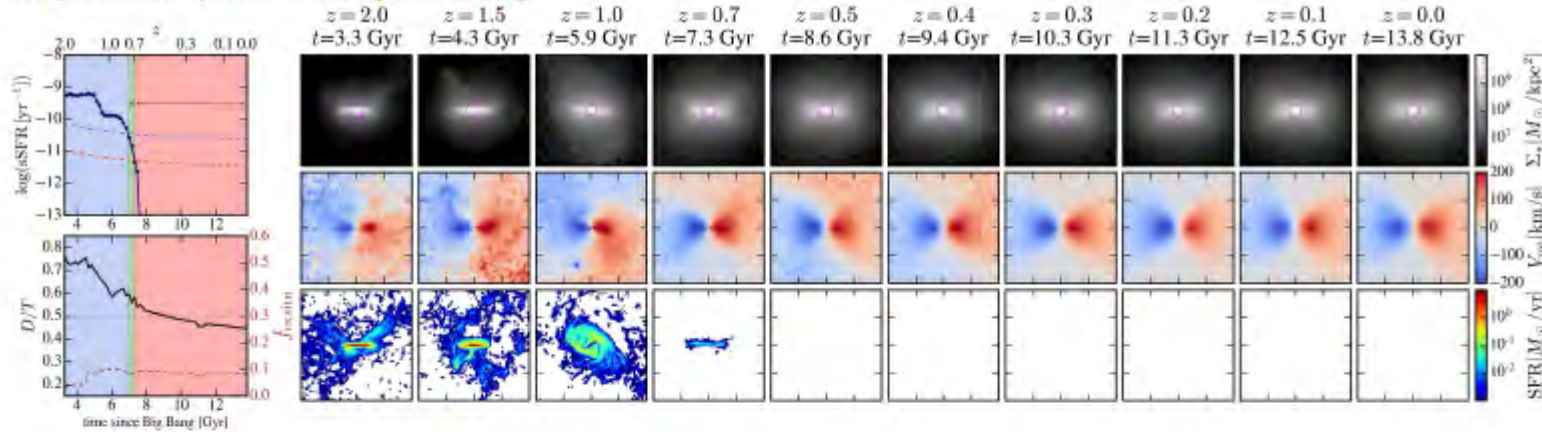
Park et al 2022

Quenching: -- satellites – manque de gas – AGN feedback
--Mass -- environnement

Disques quiescents, et sphéroides formant des étoiles



(a) Quiescent ellipticals formed by disk heating

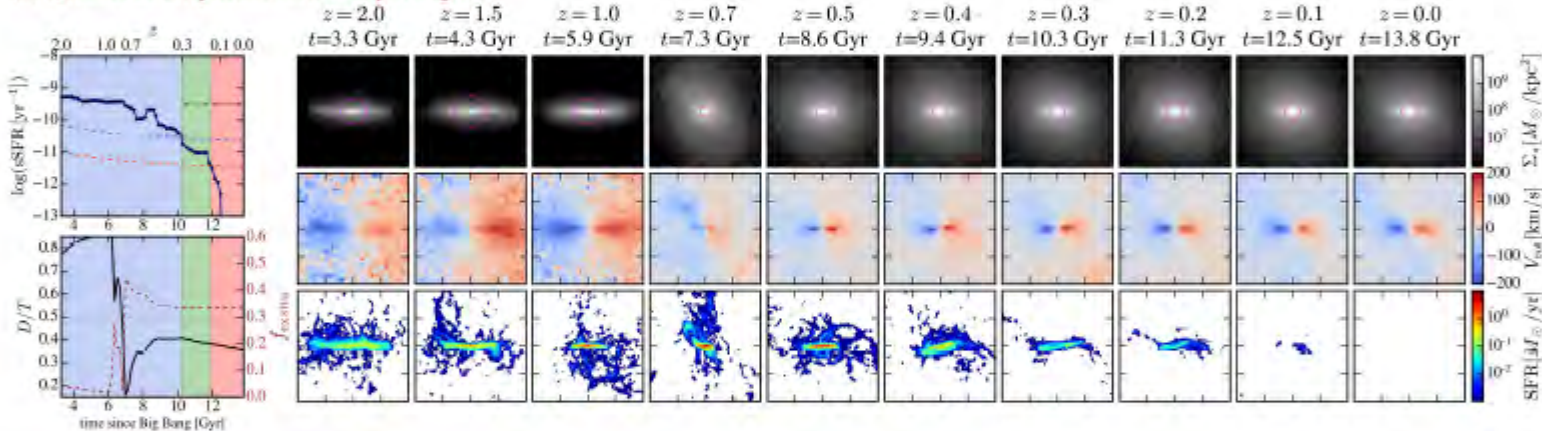


Processus

Chauffage du disque

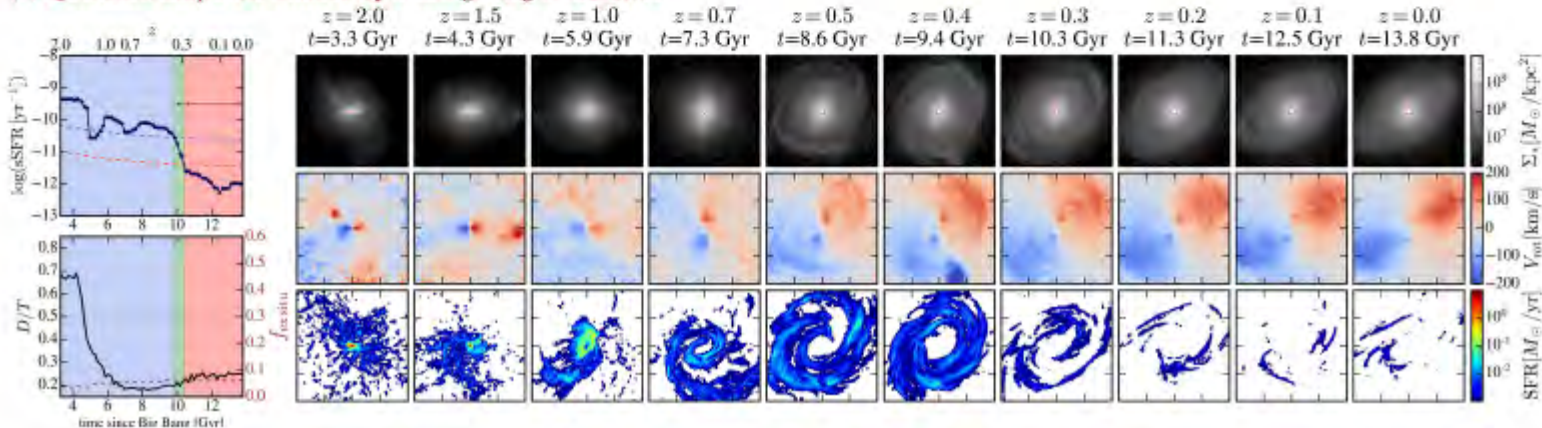
Provoquant sa disparition → E-gal

(b) Quiescent ellipticals formed by mergers



Fusion de galaxies et formation
d'un bulbe massif → E-gal

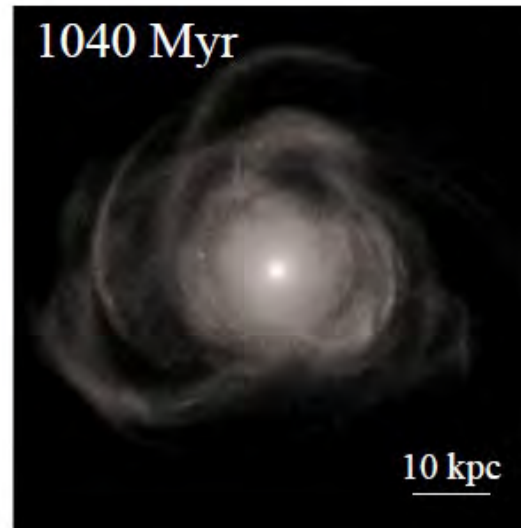
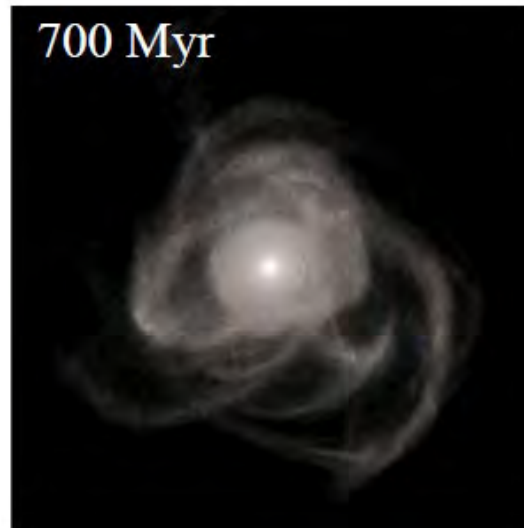
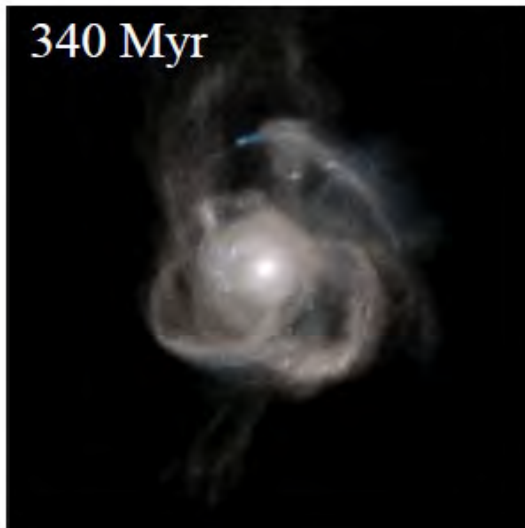
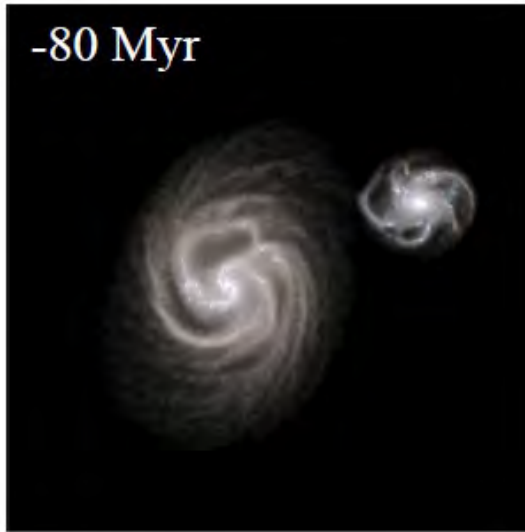
(c) Quiescent ellipticals formed by misaligned gas accretion



Accrétion de gaz misaligné--forme
un bulbe massif → E-gal
Moins concentré

Park et al 2022

Fusion et galaxies à coquilles



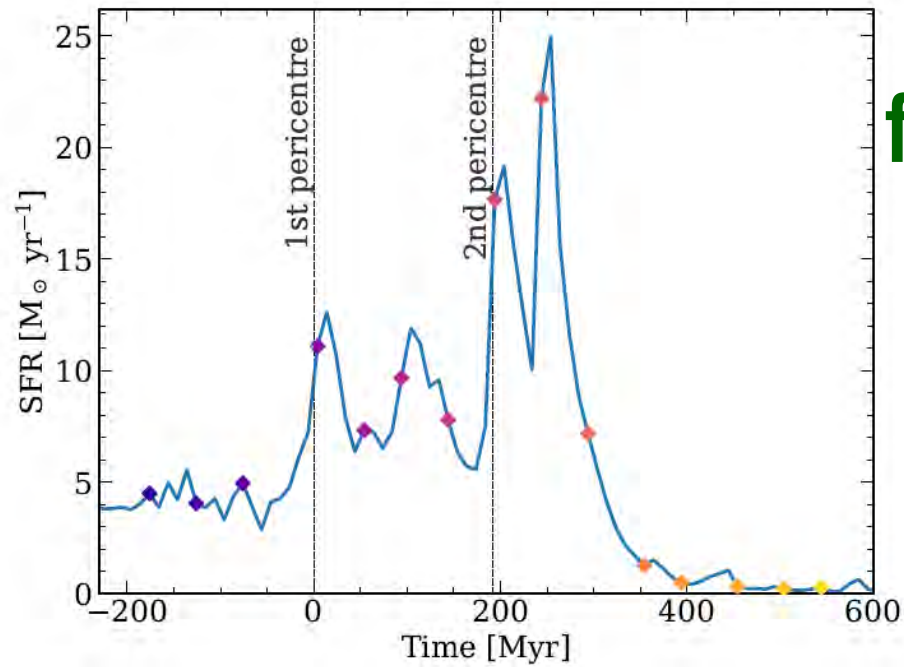
La fusion concentre le gaz au centre, ➔ formation d'étoiles

Les coquilles se forment
Après la coalescence,
Sans beaucoup de gaz
➔ Peu de formation d'étoiles

Seulement au centre

Petersson et al 2022

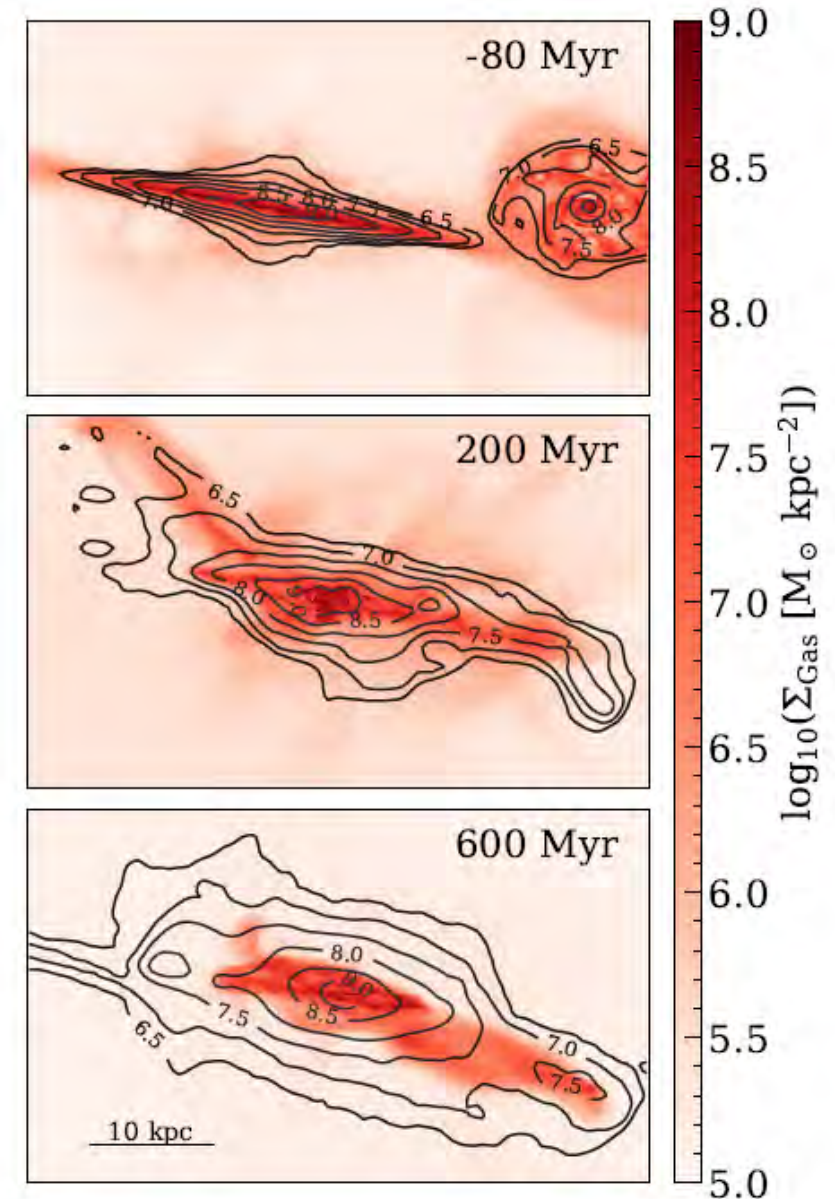
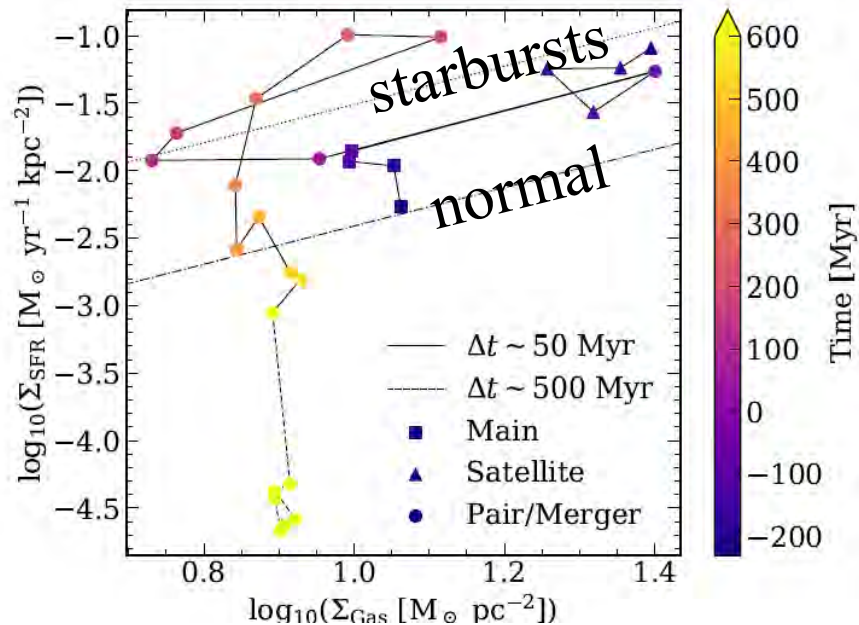
Histoire de la formation d'étoiles



Dans l'interaction, les étoiles sont chauffées, se diluent, et la force sur le gaz est moindre

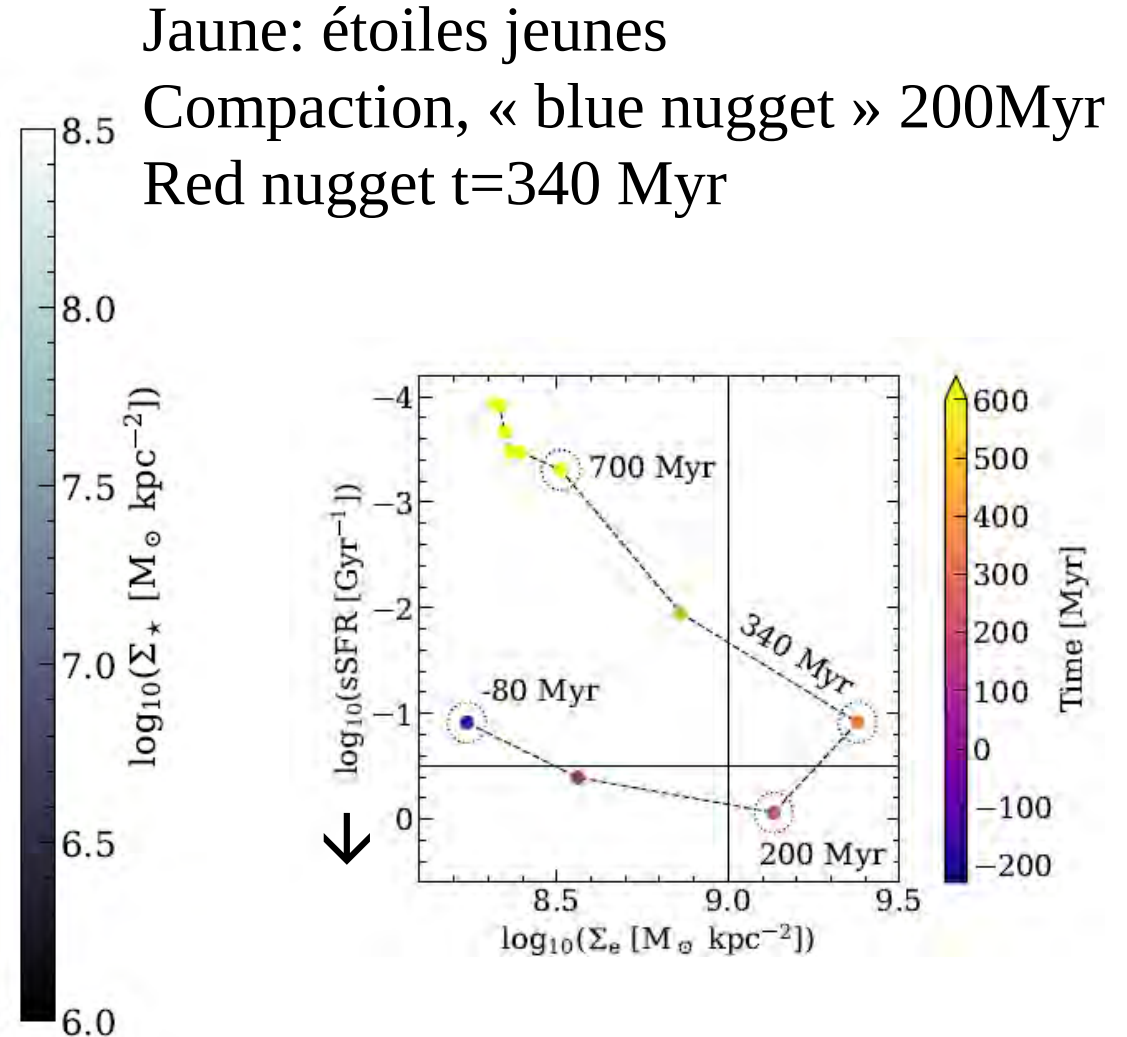
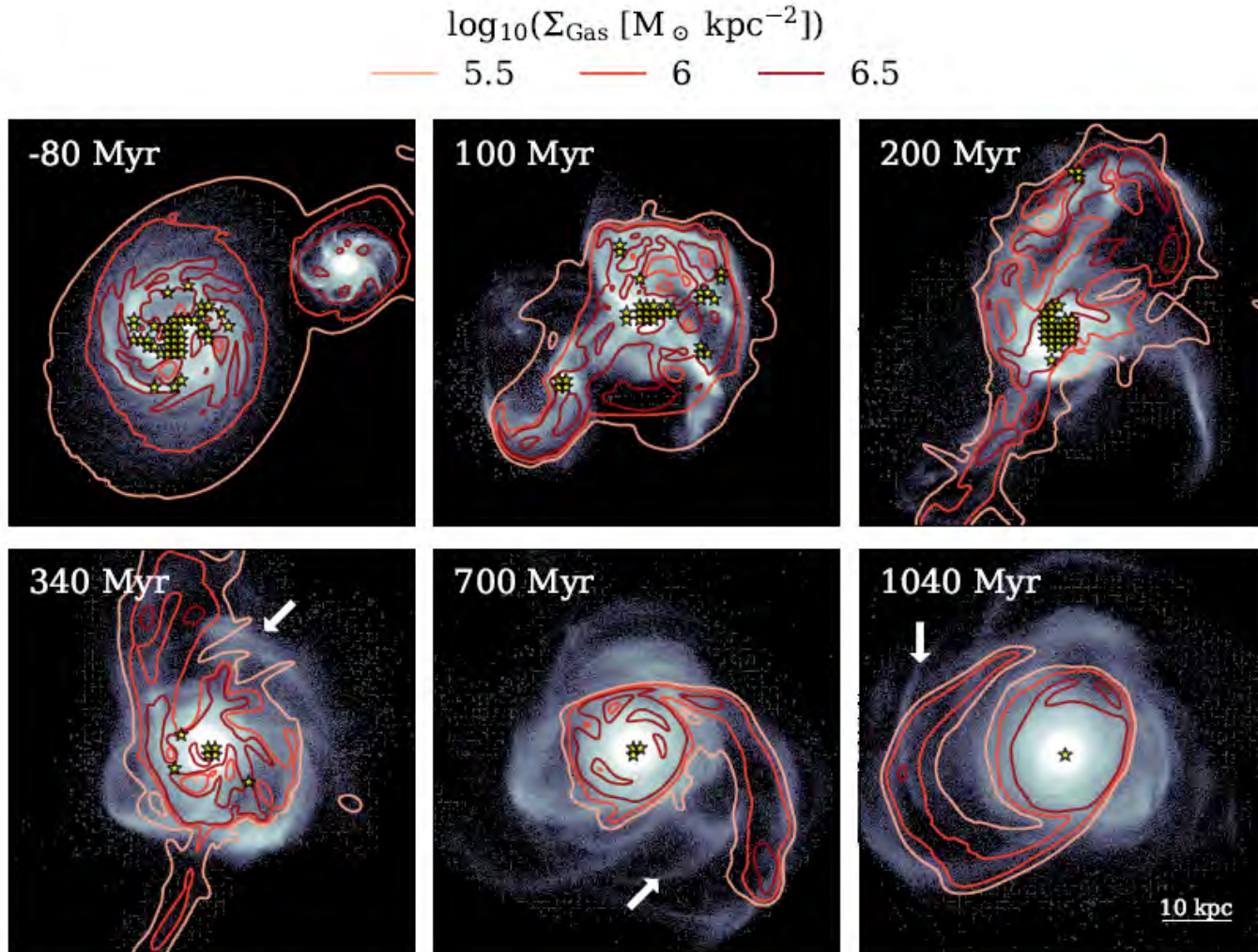
➔ Moins de SF

Après le starburst de la fusion



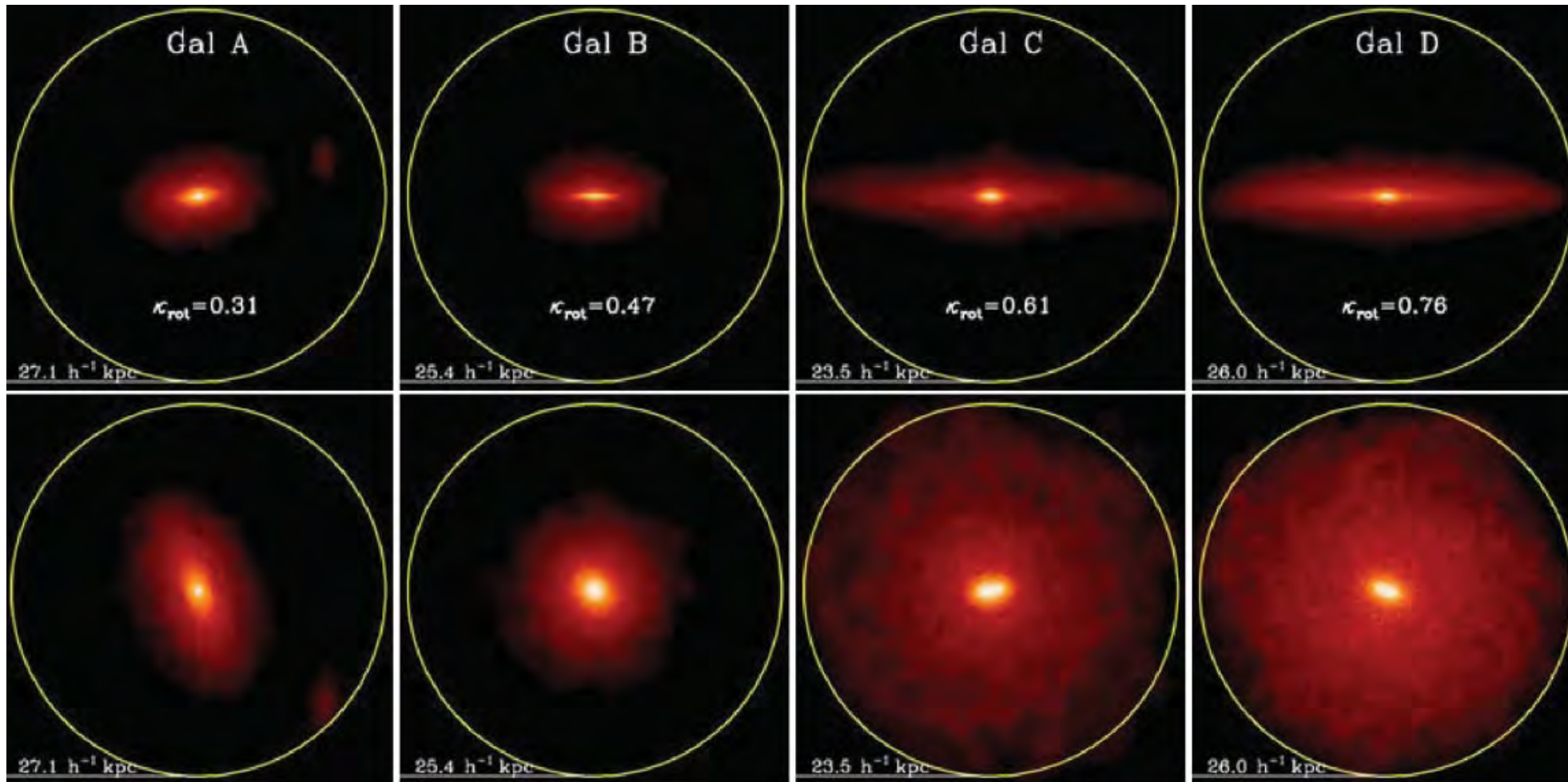
Petersson et al 2022

Gas et formation d'étoiles



Petersson et al 2022

Formation des sphéroïdes et disques



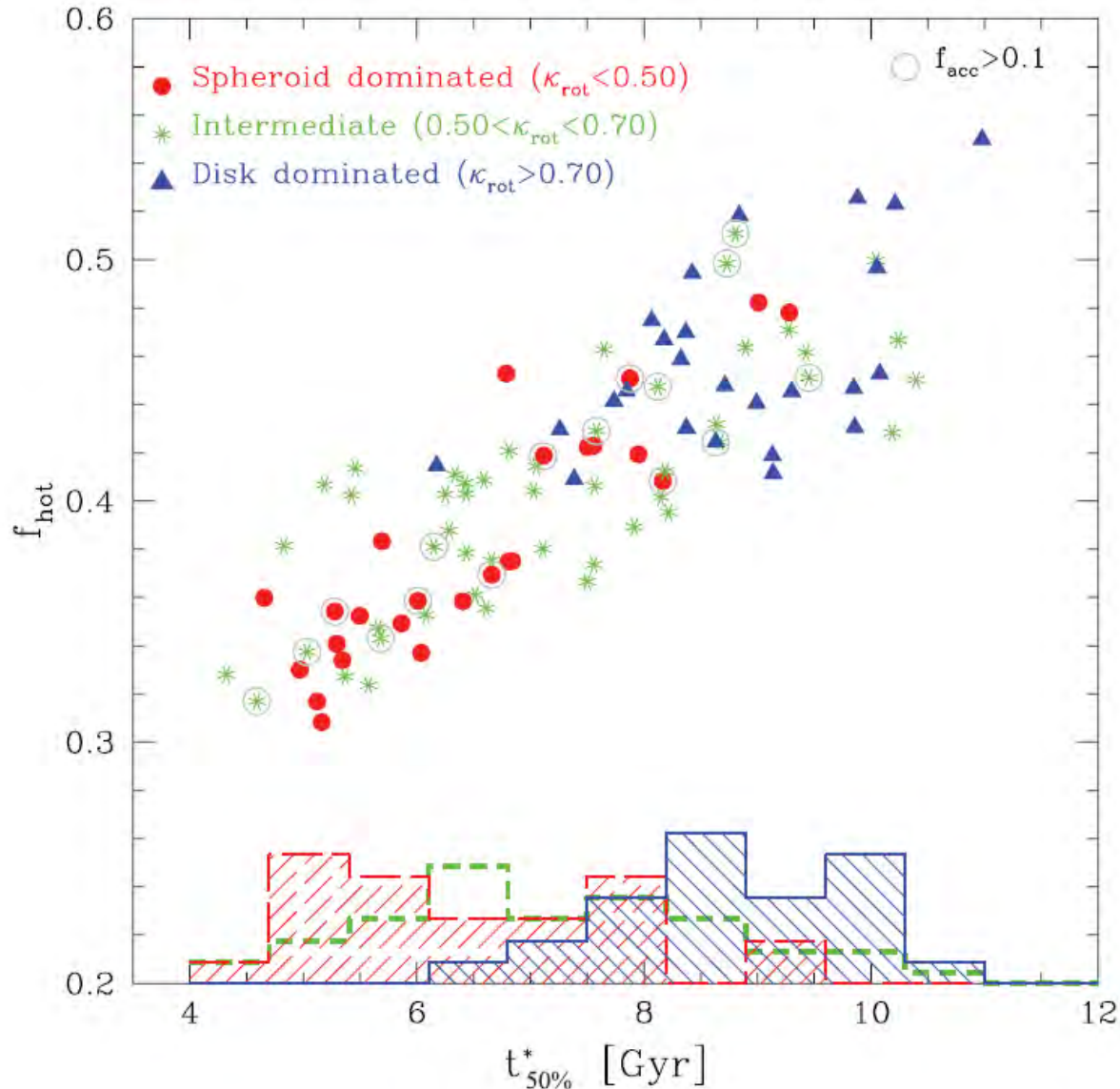
Pas lié à la forme
ou J du halo

Mais surtout à
L'alignement
des baryons

Une galaxie
accrète du gaz
froid non aligné
→ sphéroïde

Sphéroides et disques

f(SFR) issue de gaz chaud



Temps (SFR) médian

κ_{rot} fraction énergie cinétique ordonnée

Morphologie non liée au moment angulaire
des halos de matière noire

Mais plus à l'accrétion des baryons
Lorsqu'elle est alignée, avec un J cohérent
➔ Plus de disques

Accrétion du gaz chaud des halos

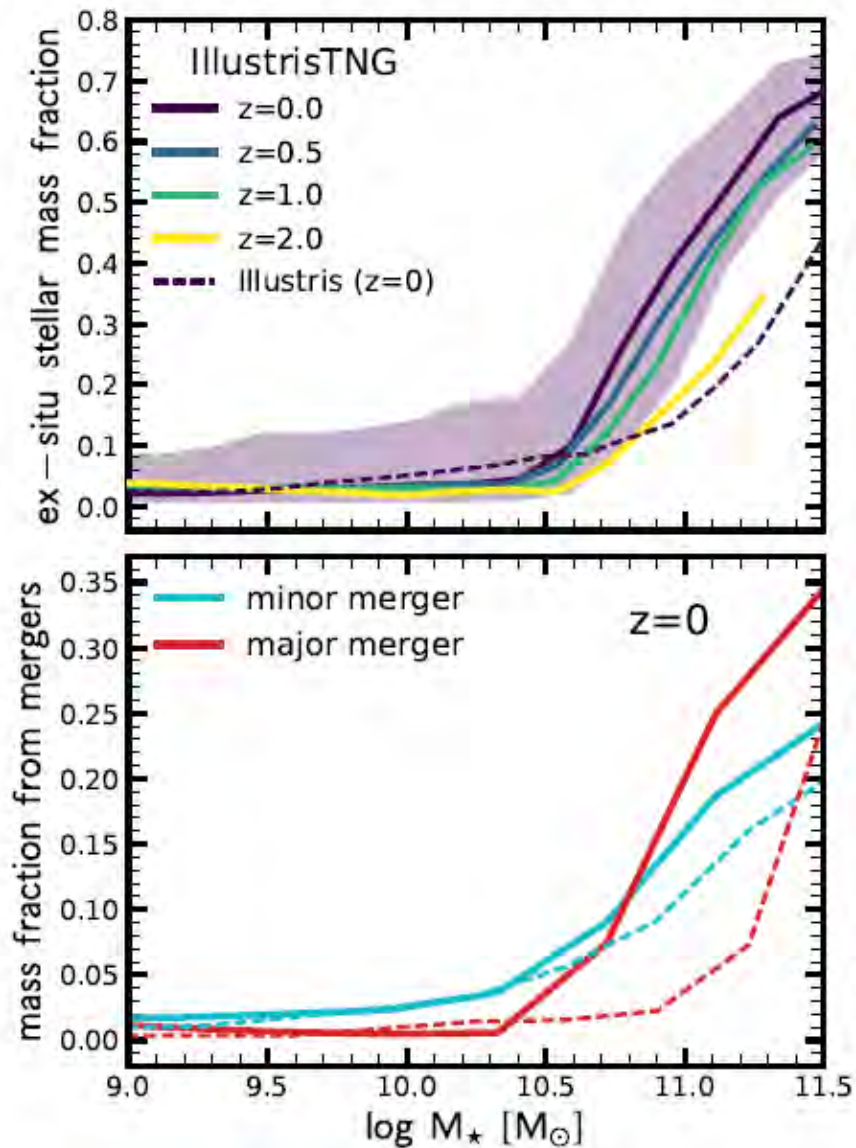
➔ Disques

Accrétion désordonnée de filaments

➔ sphéroides

Sales et al 2012

Assemblée de la masse par fusion



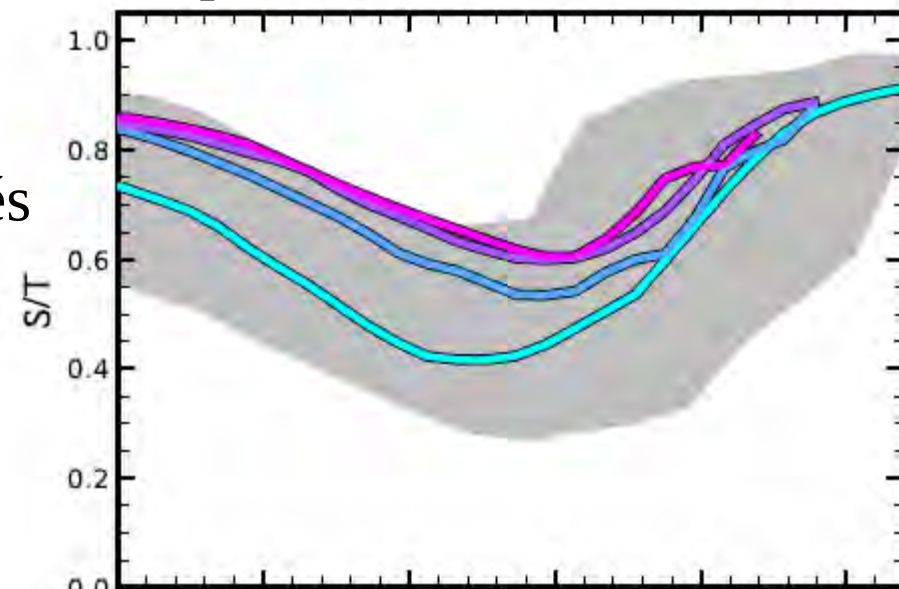
A faible et forte masse,
Mouvements désordonnés
dominant

M (intermédiaire)
→ rotation

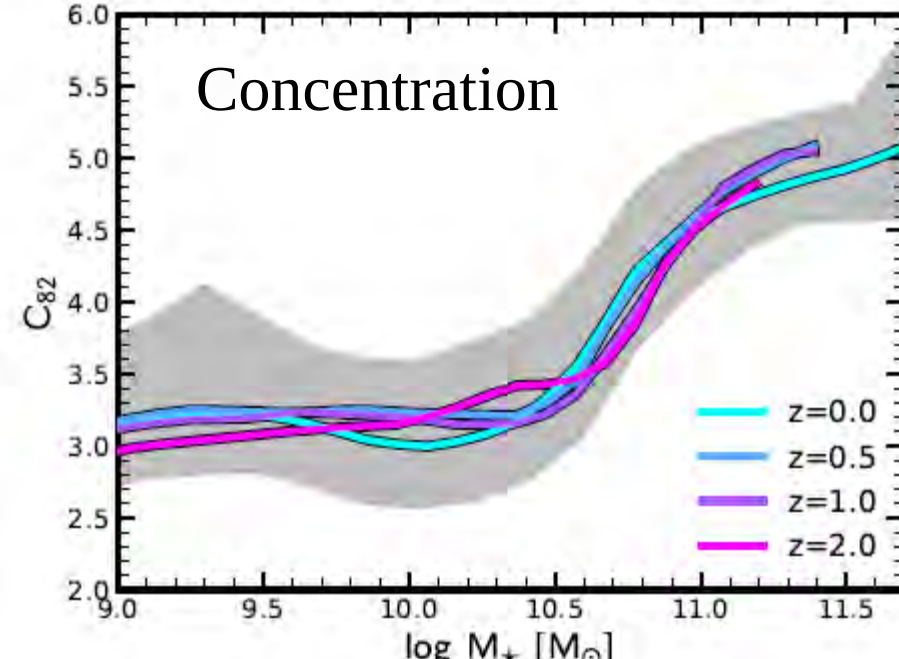
A forte masse,
Les fusions dominant

Tacchella et al 2019

Spheroid/Total

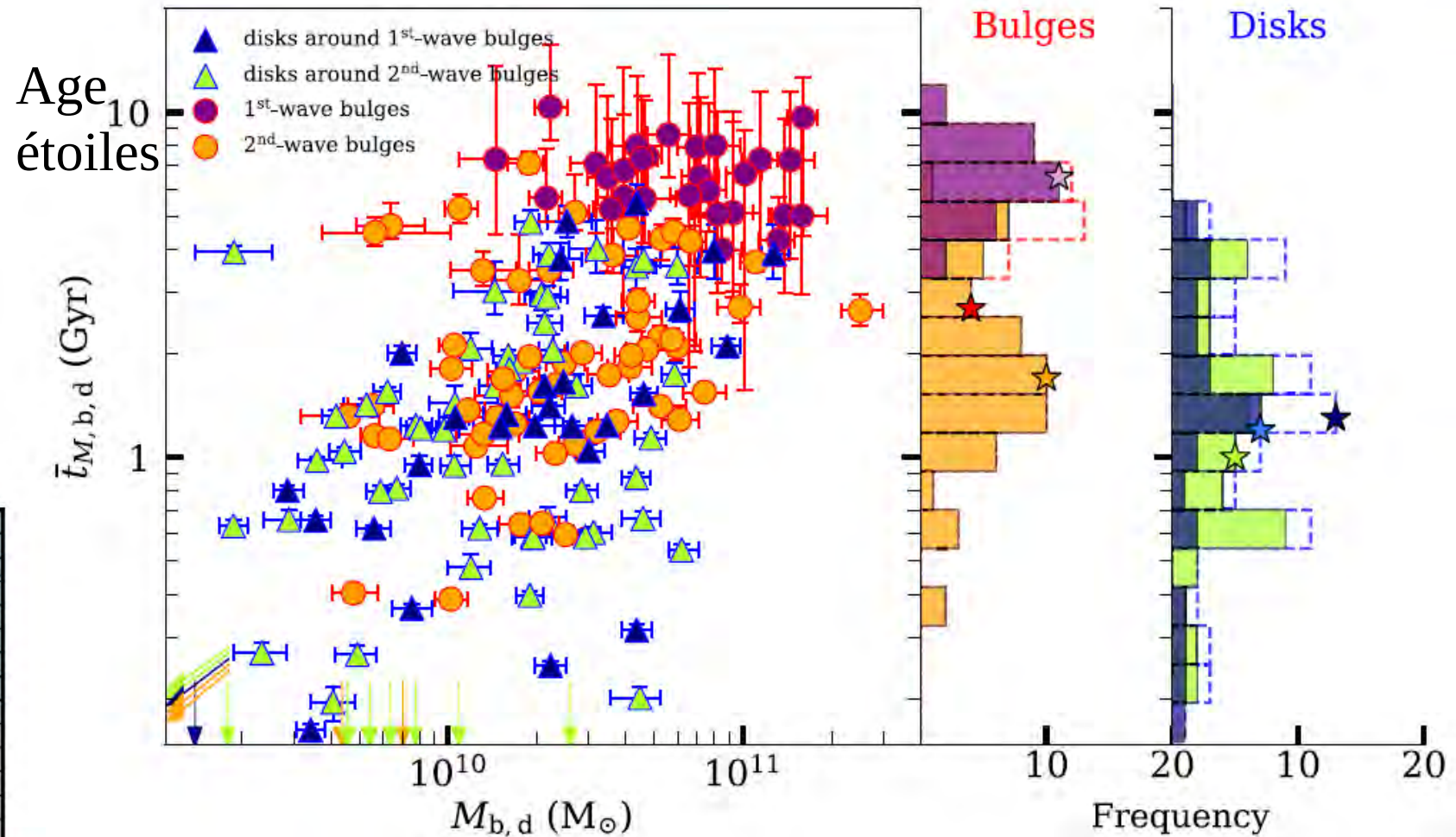
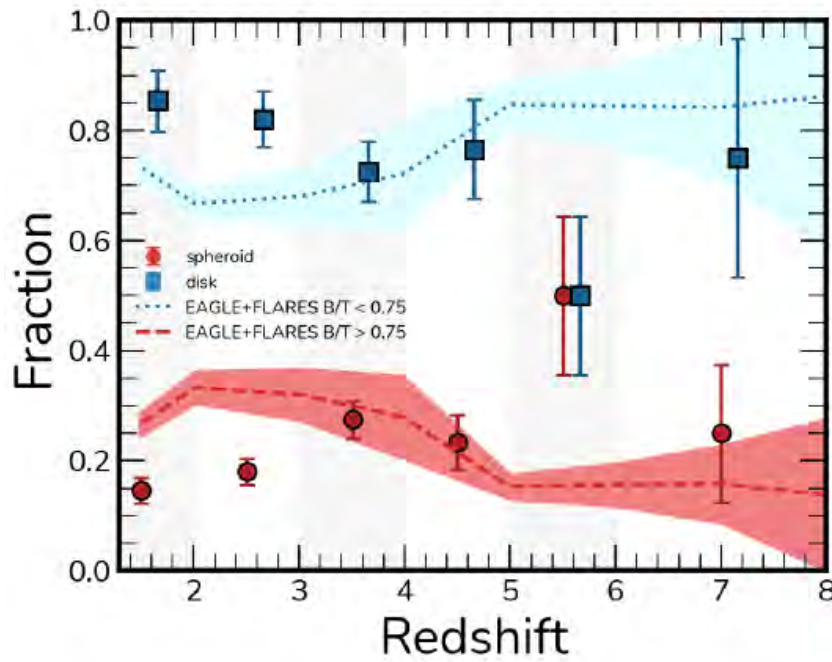


Concentration



Comparaison avec observations

Ferreira et al 2022



$0.14 < z < 1$ HST

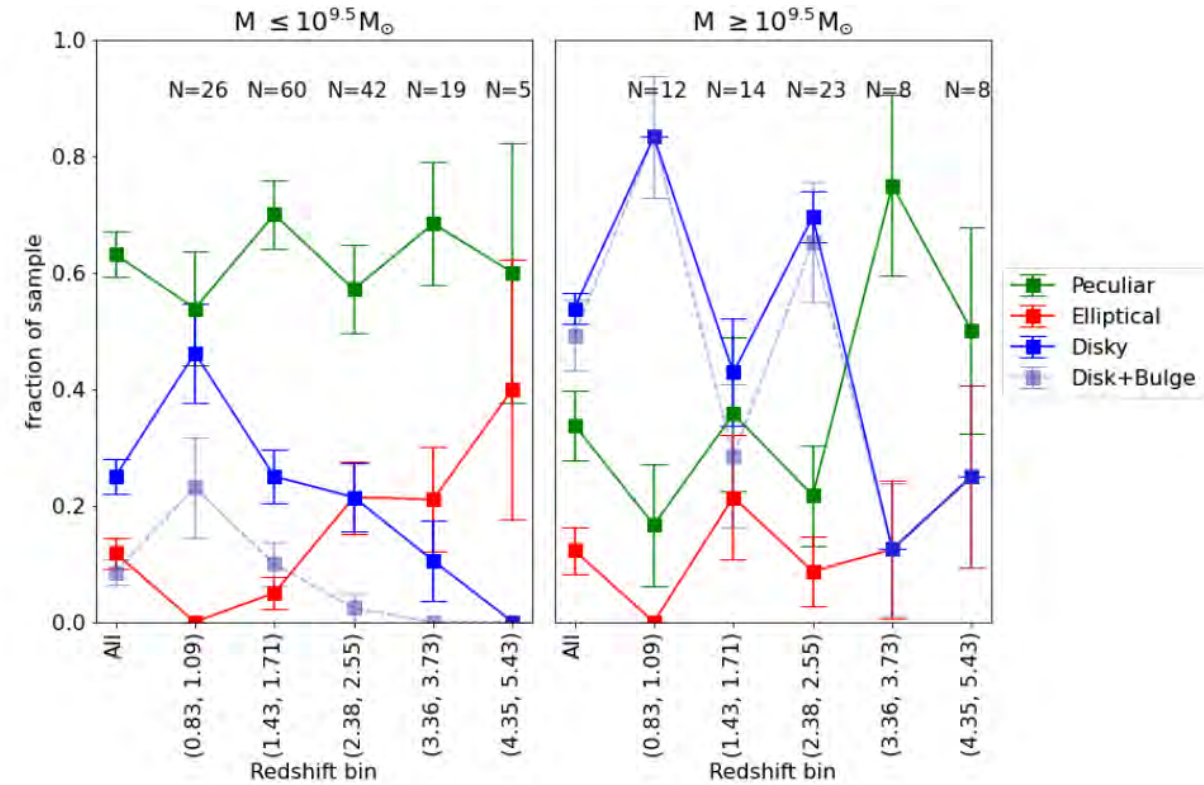
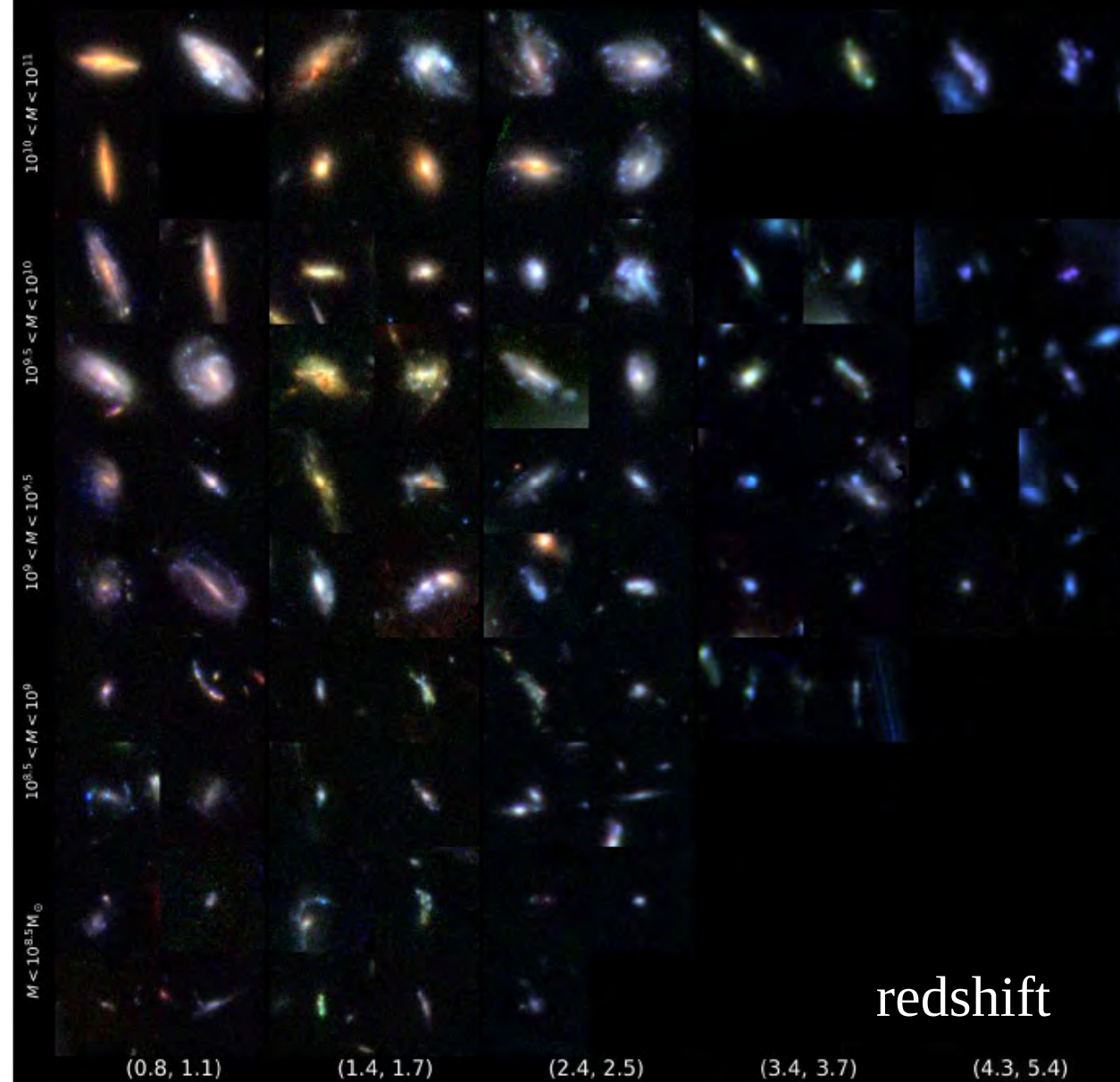
Les structures plus anciennes (bulbe ou disque) sont plus compactes -- Formation du centre au bord, 2 vagues

Costantin et al 2022

Mass



Sphéroïdes et disques $1 < z < 5$



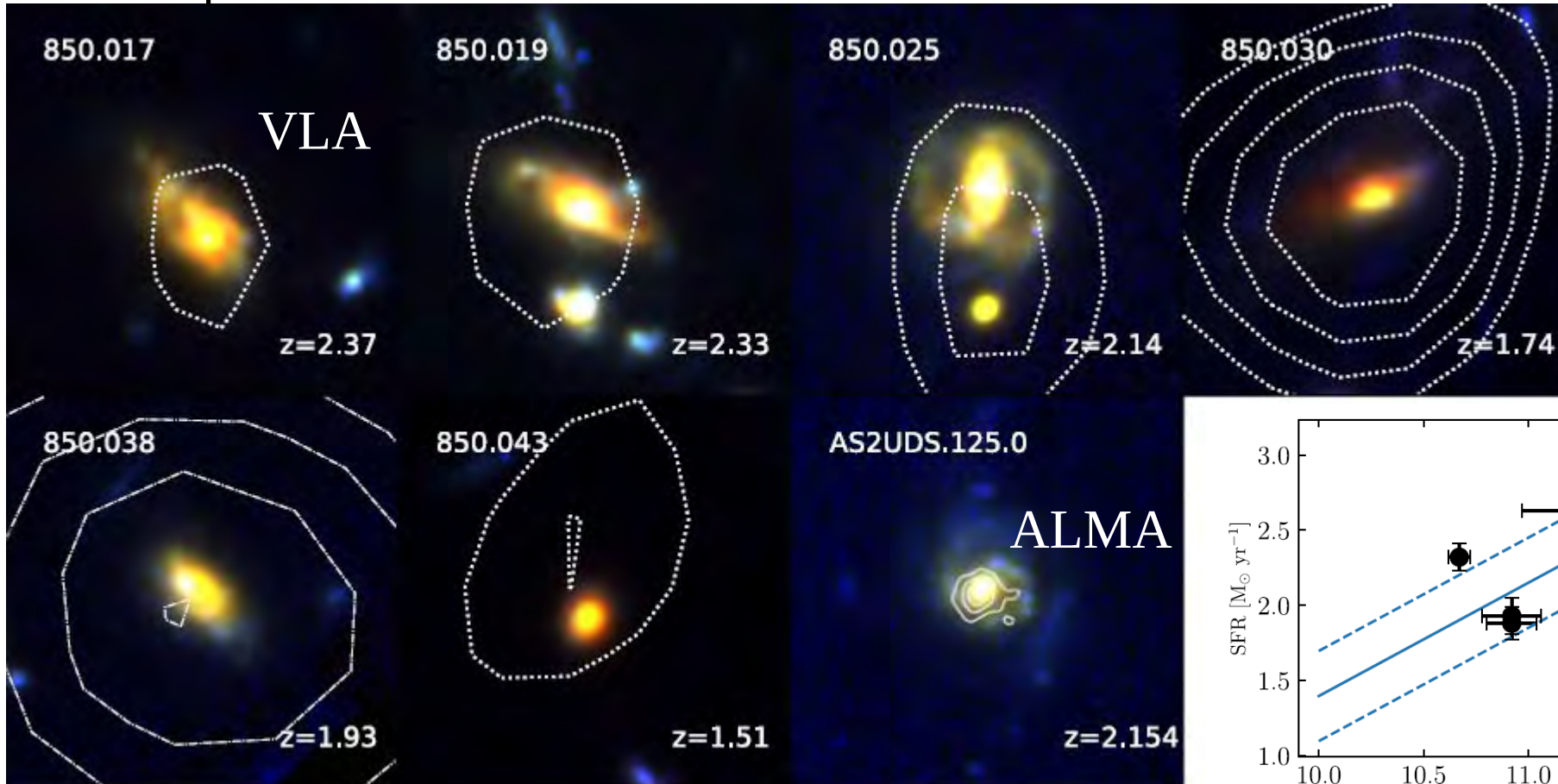
« Peculiar » lorsque JWST ne résoud pas

Jacobs et al 2022

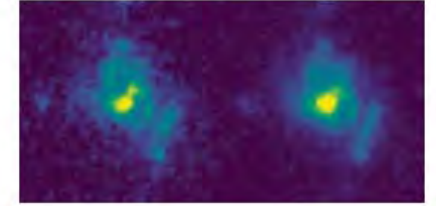
Formation d'étoiles à $z=2$

Galaxies sub-mm $z=2$, spirales, avec bulbe non-dominant, et signes d'interactions $\rightarrow$ starbursts

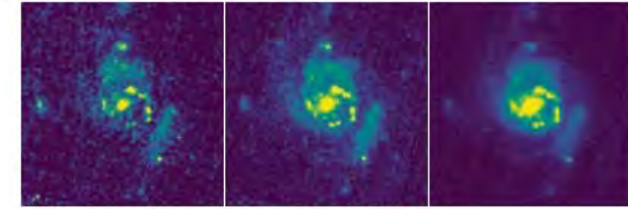
$\leftarrow$ 40kpc $\rightarrow$



Pre-JWST [HST / Spitzer]

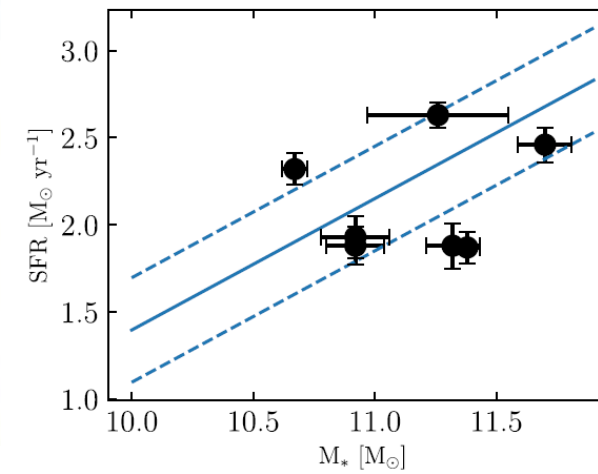


JWST NIRCcam



Spirales et barres

$R_{\text{bulbe}} \sim 0.7 \text{ kpc}$
Sersic $n=0.7$



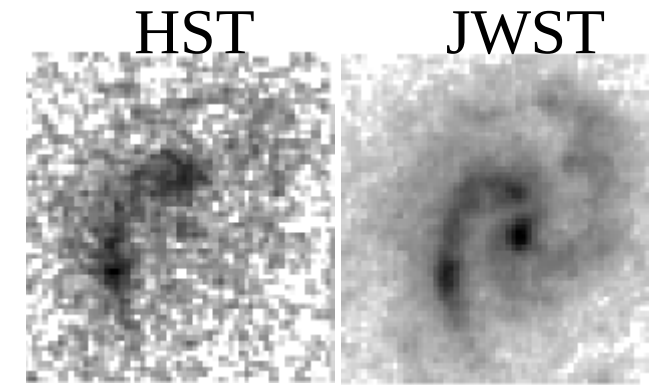
Chen et al
2022

Résumé

1- Galaxies à grand z : révolution du JWST

Morphologies régulières, disques

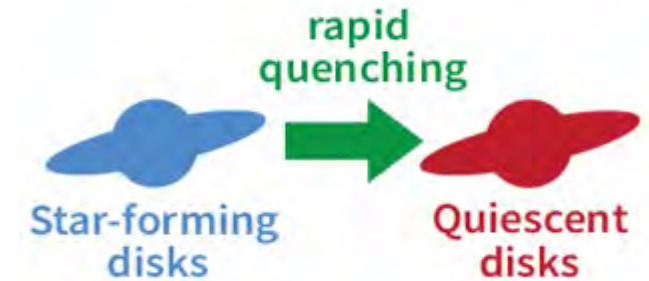
Evolution des barres



2- Disques et Sphéroides: simulations

La séquence de Hubble apparaît dès $z=6$

Arrêt de la formation d'étoiles?



3- Relations d'échelle -- Processus

Evolution des disques en sphéroides

Evolution séculaire, Fusions de galaxies

