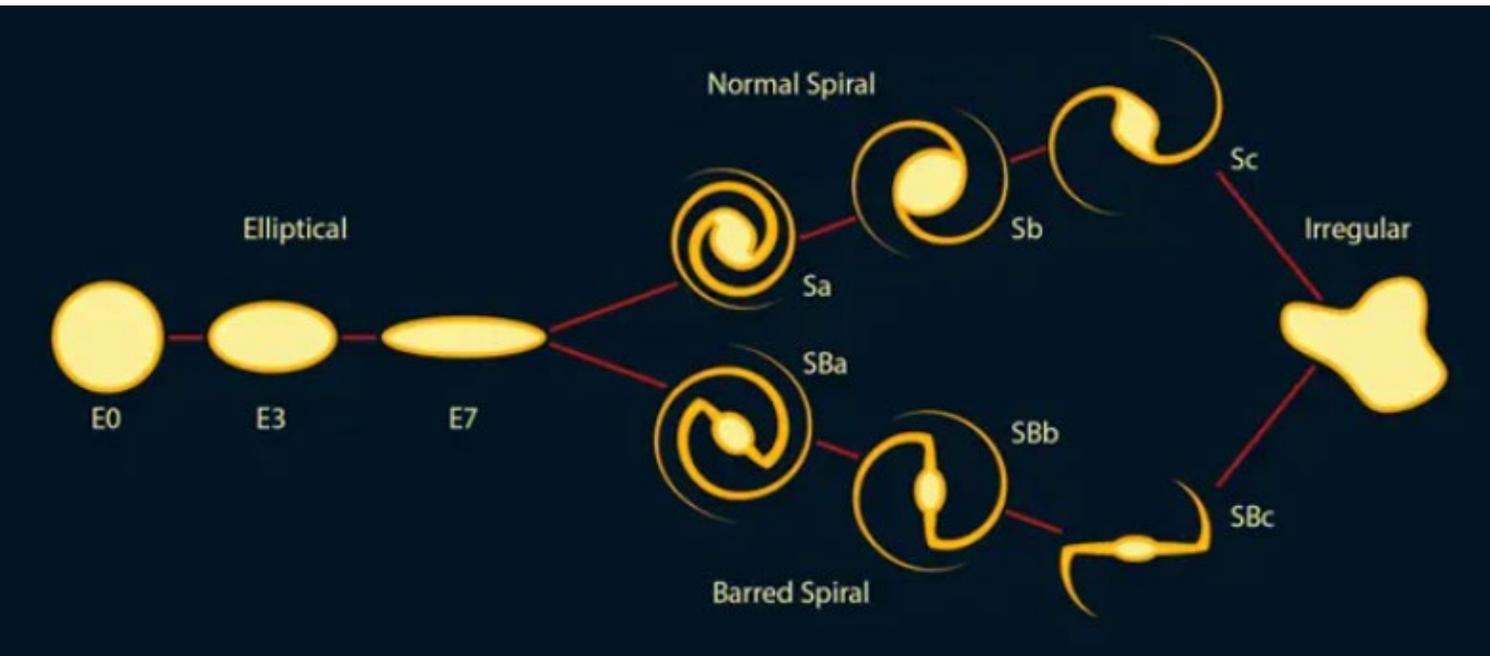




COLLÈGE
DE FRANCE
— 1530 —

Chaire Galaxies et Cosmologie

La naissance de la séquence de Hubble



Françoise Combes



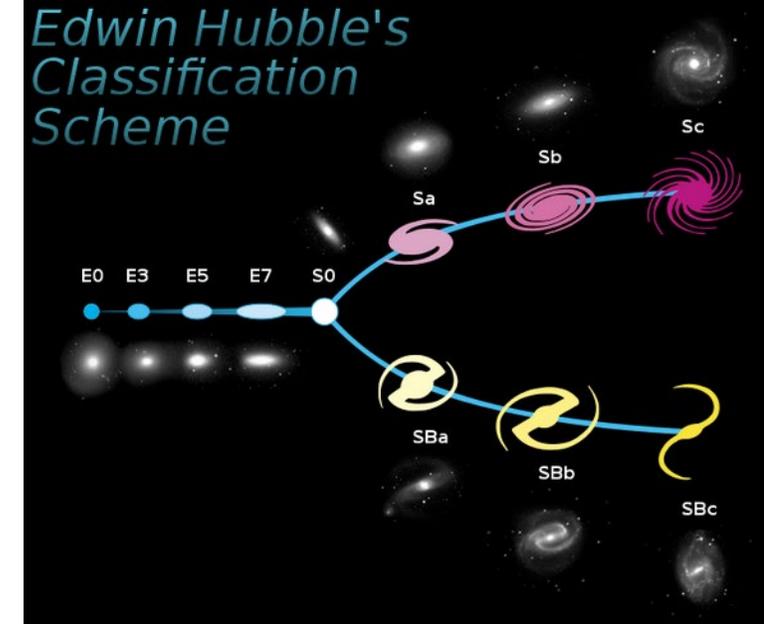
Laboratoire d'Étude du Rayonnement et de la Matière en Astrophysique

Classifier pour comprendre la formation et l'évolution

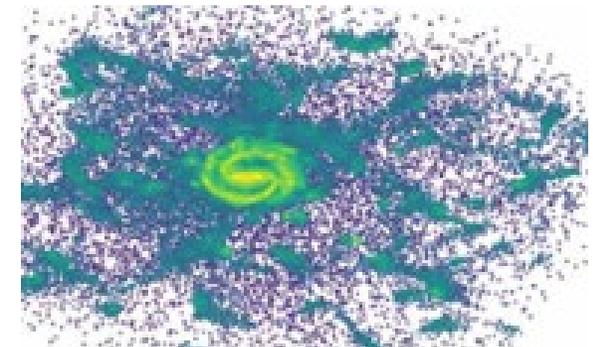
→ Séquence de Hubble, historique, encore utile aujourd'hui?
Evolution de la séquence, compléments de classification,
Autres systèmes plus automatiques

→ Dans quel régime de masse s'applique-t-elle et jusqu'à quel redshift? La révolution du JWST

→ Quelle évolution: dynamique de la formation des spirales, barres, sphéroides par fusion tôt dans l'Univers

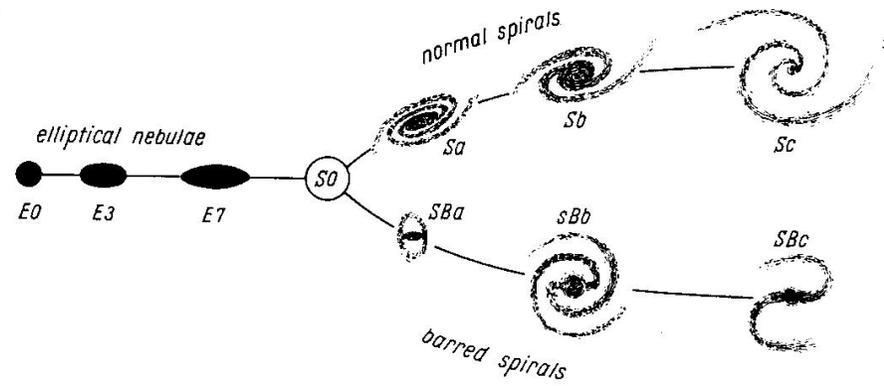


Première fois en 1936

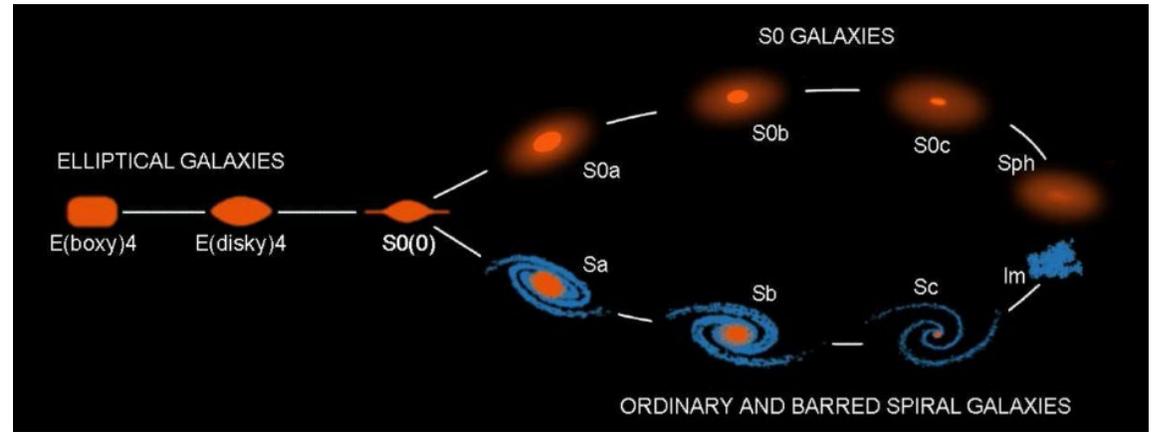


Simulation de la formation

Le Diapason (ou Tuning Fork)

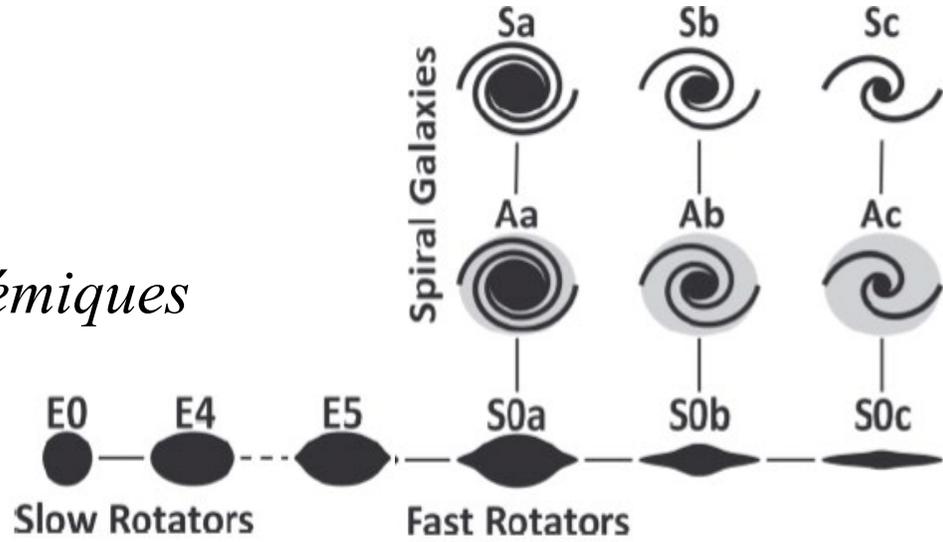


La Cuillère à café (Teaspoon)

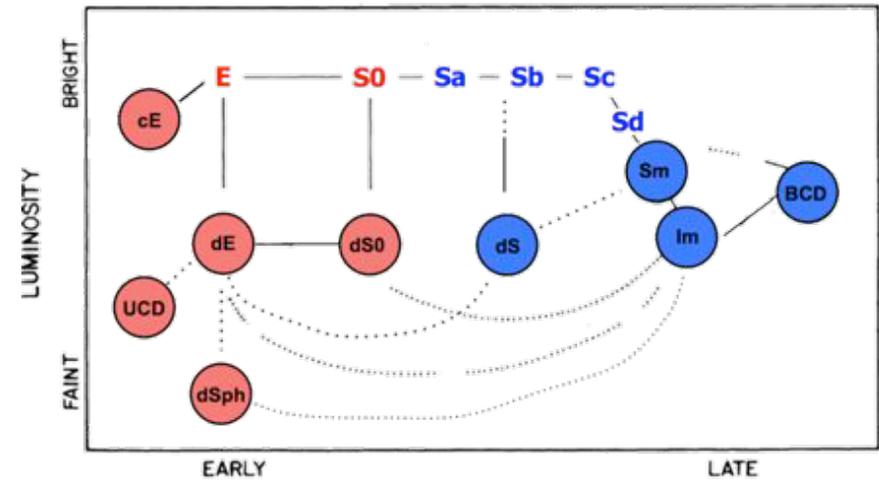


Le Couperet (The Cleaver)

Les Anémiques



Le Noeud de Vipères (The Rat's Nest)



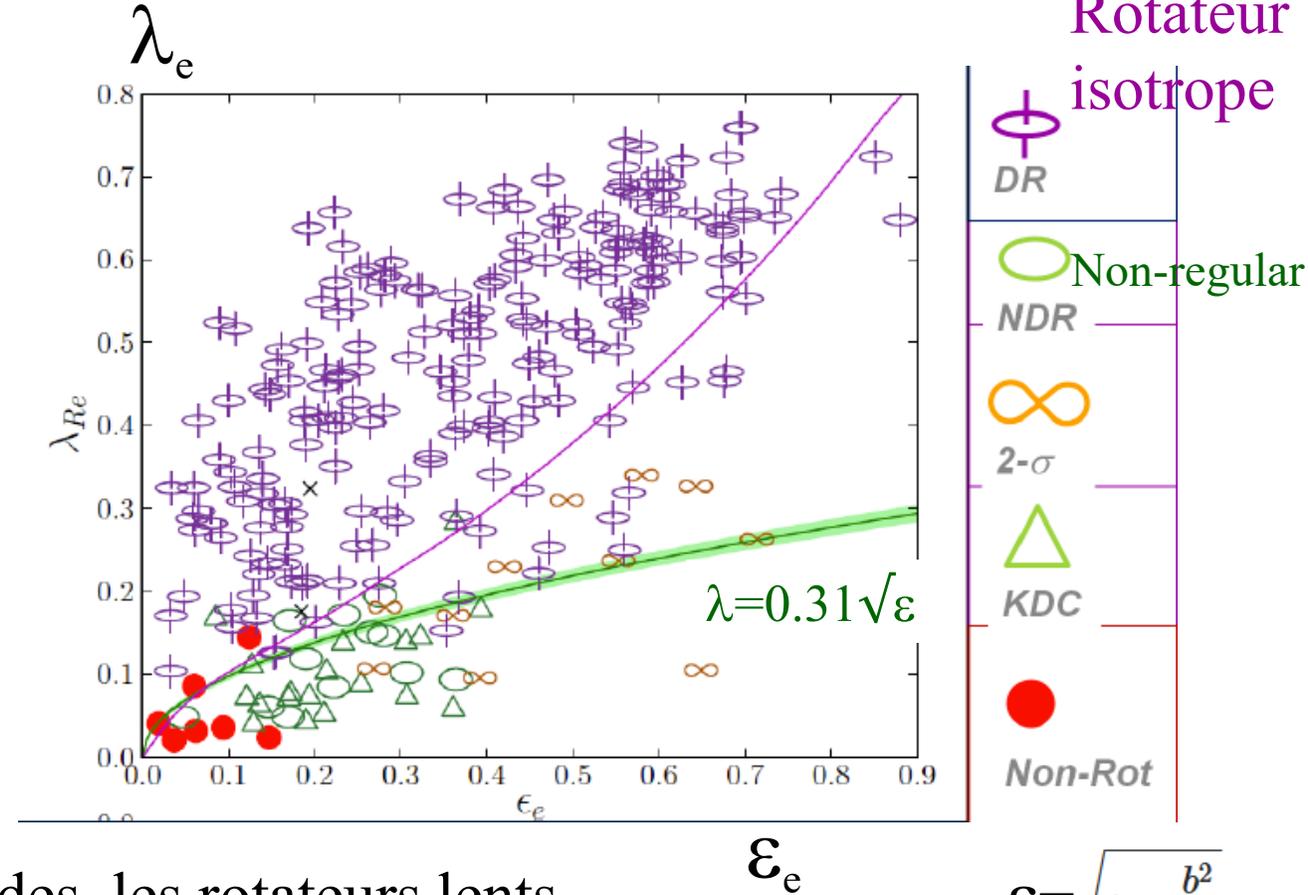
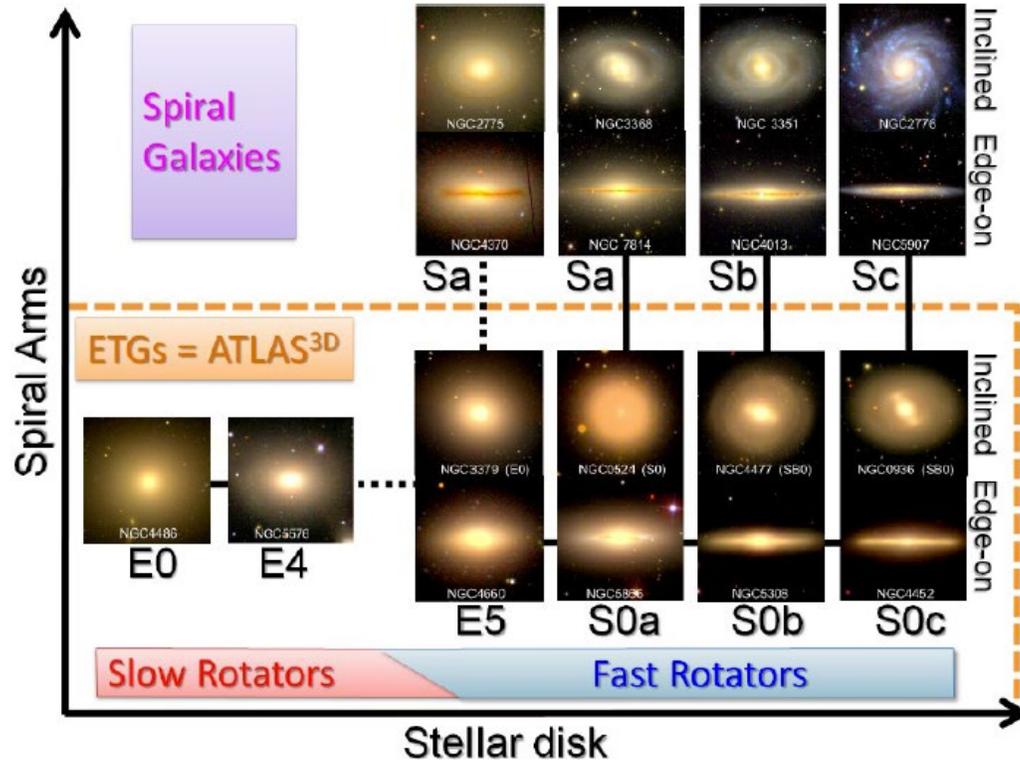
Galaxies naines

Grebel

Van den Bergh

ATLAS-3D: « early-type galaxies » ou ETG

$$\lambda_R \equiv \frac{\langle R |V| \rangle}{\langle R \sqrt{V^2 + \sigma^2} \rangle}$$



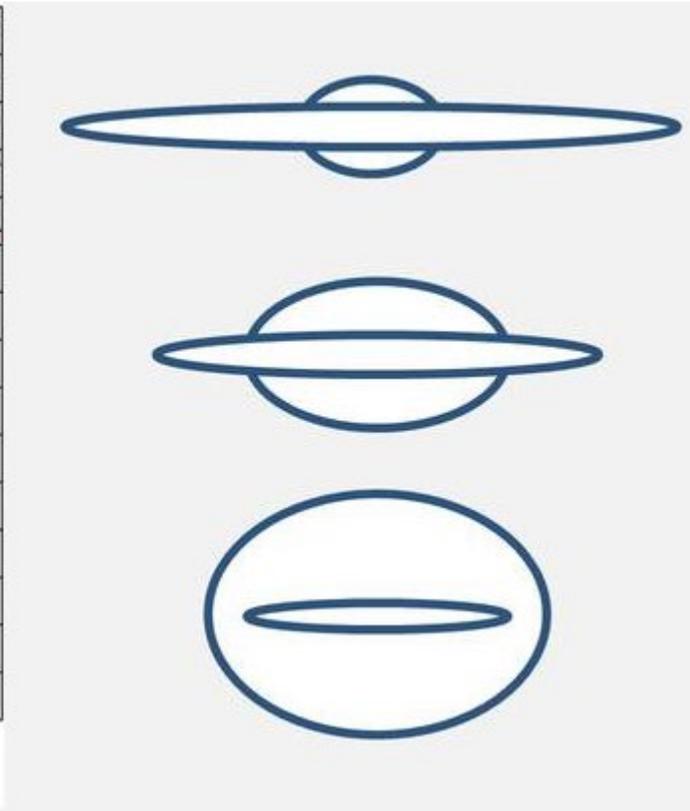
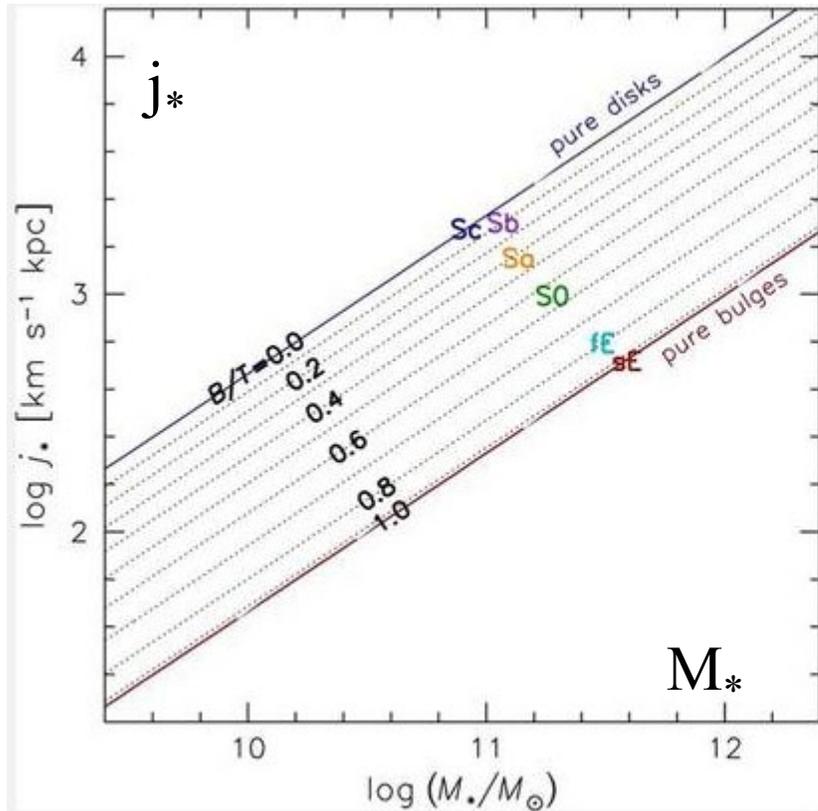
Environ 85% des ETG sont des rotateurs rapides, les rotateurs lents sont des elliptiques géantes, la plupart dans des amas de galaxies

Emsellem et al 2011

KDC kinematically decoupled core

$$\epsilon = \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}}$$

Relation avec le moment angulaire



$$j_* = J/M = V_{\text{rot}} R \quad (\text{km/s kpc})$$

versus M_*

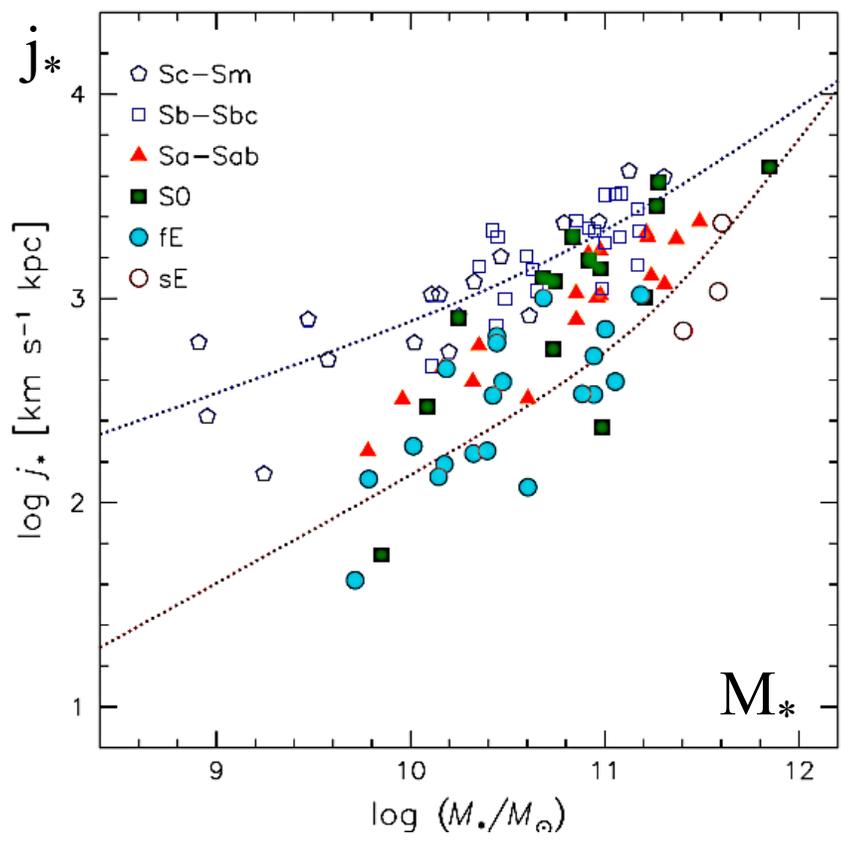
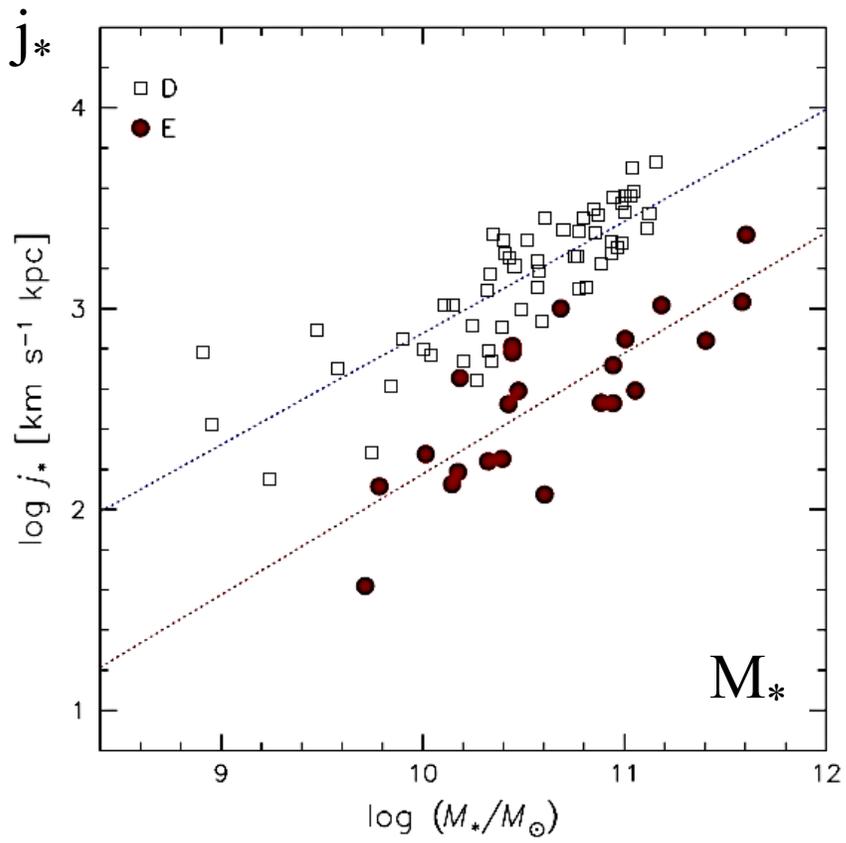
Pour les spirales,
Relation de Tully-Fisher
 $M \propto V^4$
Avec le Viriel $V^2 \propto M/R$

$$\rightarrow j = VR \propto M^{3/4} \sim M^{0.7}$$

Pour les E-gal ?
fE fast rotateurs
sE slow rotateurs

Une autre façon de reproduire la **séquence de Hubble**:
Le moment angulaire (*Fall, 2014*)

Moment J_* versus M_*



Pour les elliptiques
le moment n'est pas
plus grand vers
l'extérieur

→ J perdu dans les fusions

Les bulbes sont
intermédiaires

$j_* = J/M \propto M^\alpha$ avec $\alpha = 0.7$,

Facteur 6 entre Sc et E

Prédictions des modèles

Dark matter

$$\lambda \equiv \frac{J|E|^{1/2}}{GM^{5/2}}$$

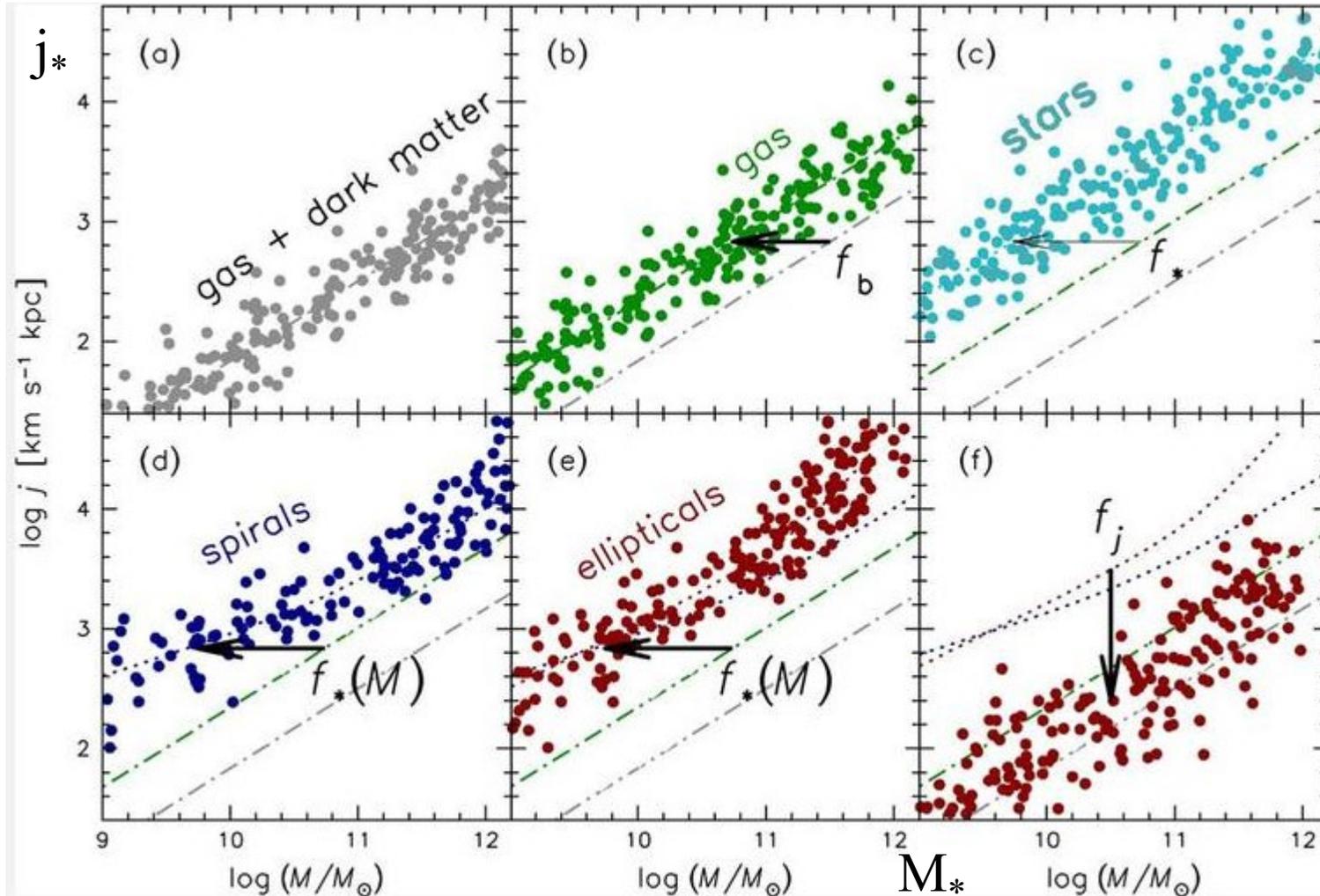
$$\langle \lambda \rangle = 0.35$$

$$j_* \propto M^{2/3} \text{ (couples de marée)}$$

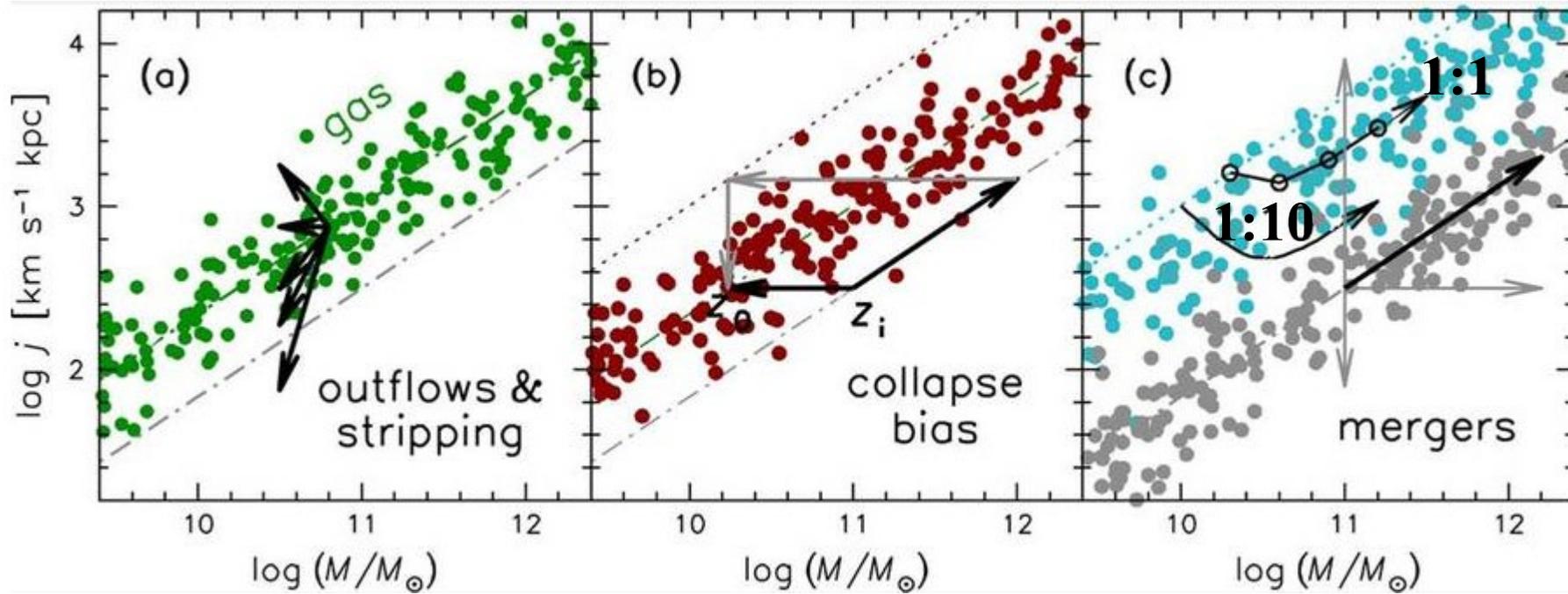
Puis gaz $f_b=17\%$
 étoiles $f_*=0.1$

Effet de la perte de
 moment f_j

$f_j = 0.8$ pour galaxies Sc
 $f_j = 0.1$ pour galaxies E



Autres processus

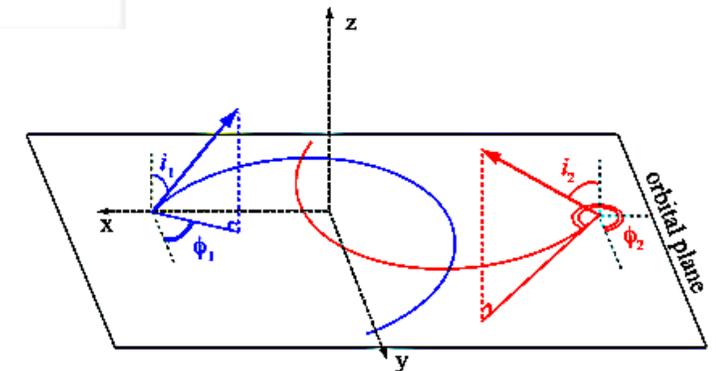


Gain par moment orbital

Perte par cancellation

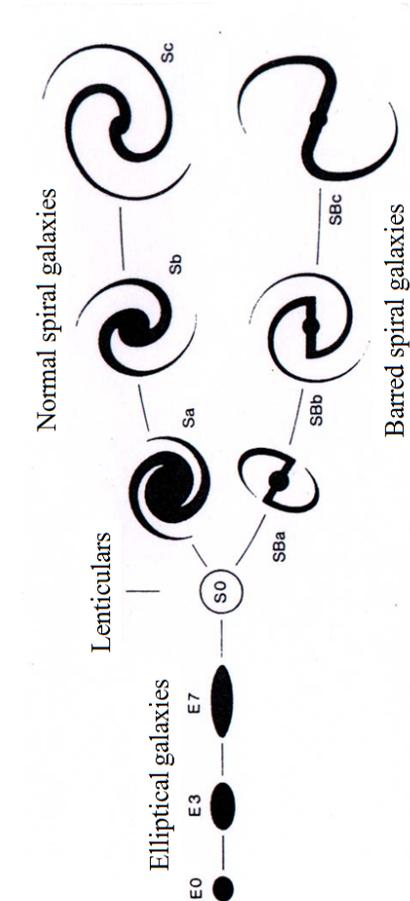
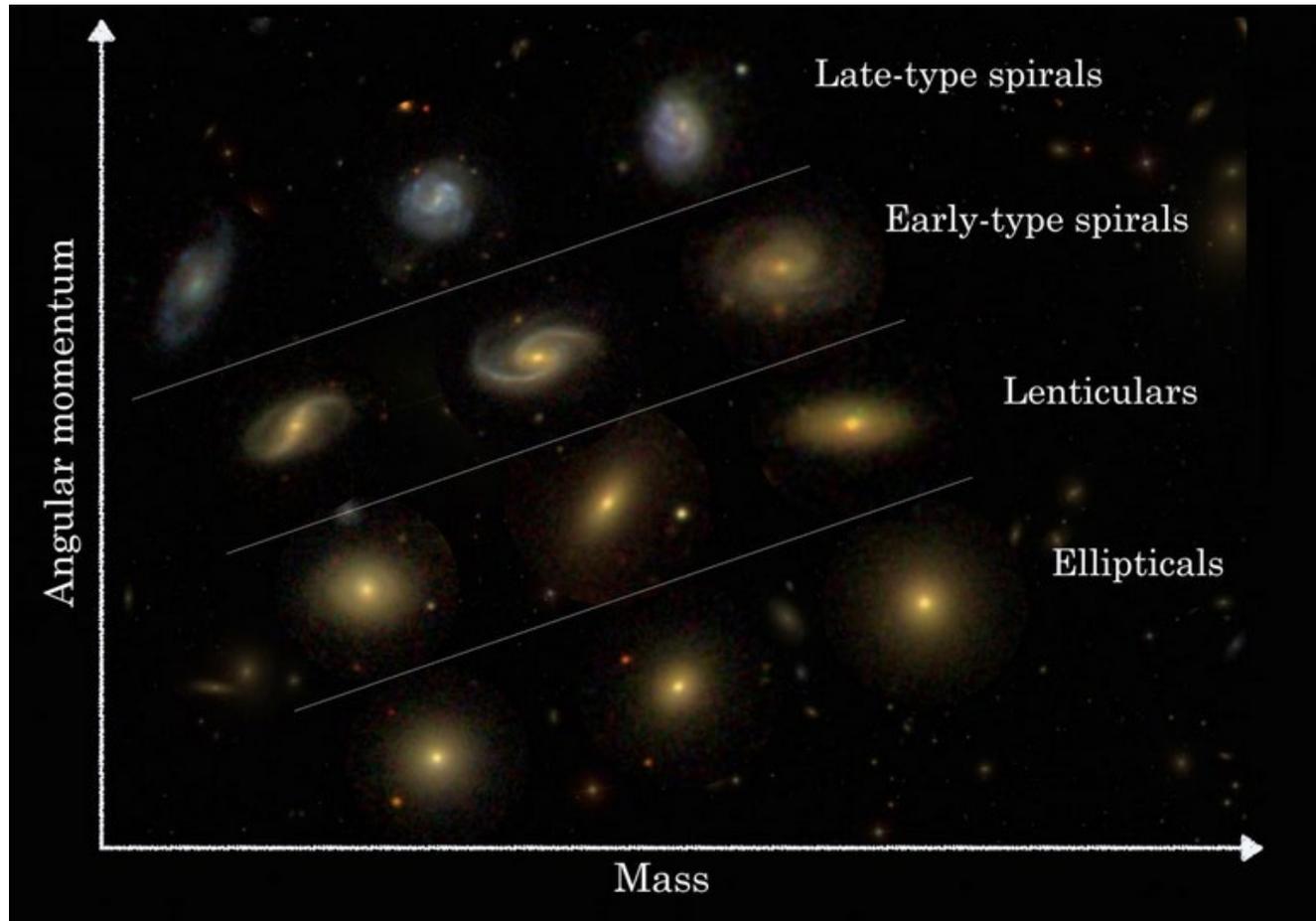
Chaque processus peut être représenté par un vecteur ΔM , Δj , dans le diagramme M - j . La somme de tous ces vecteurs doit correspondre à la position DM-baryons

Romanowsky & Fall 2012

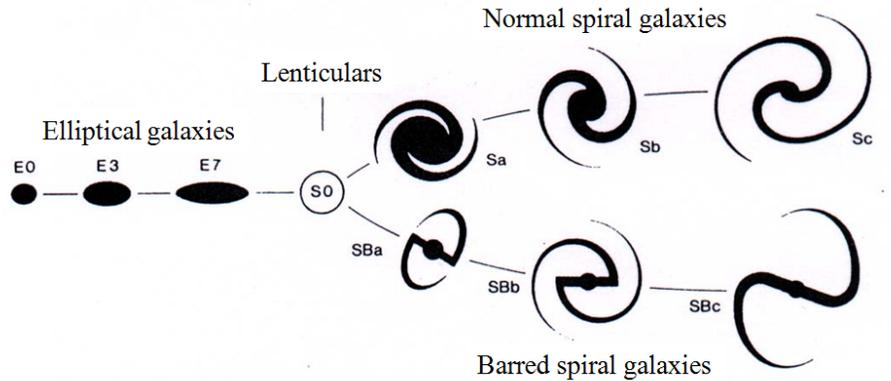


Moment Angulaire

Un des facteurs essentiels du destin des galaxies en plus de l'environnement (sur-densité)



De la séquence de Hubble à la séquence rouge



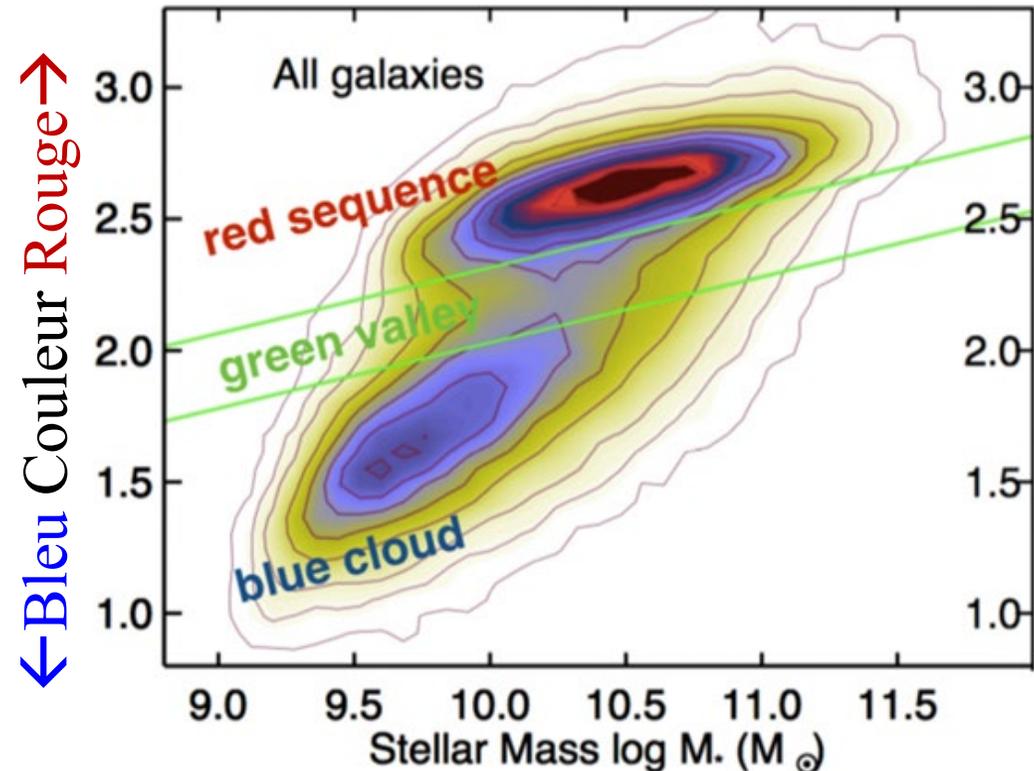
Un changement de méthode
adapté au Big-Data

Baldry et al 2004
Schavinski et al 2014

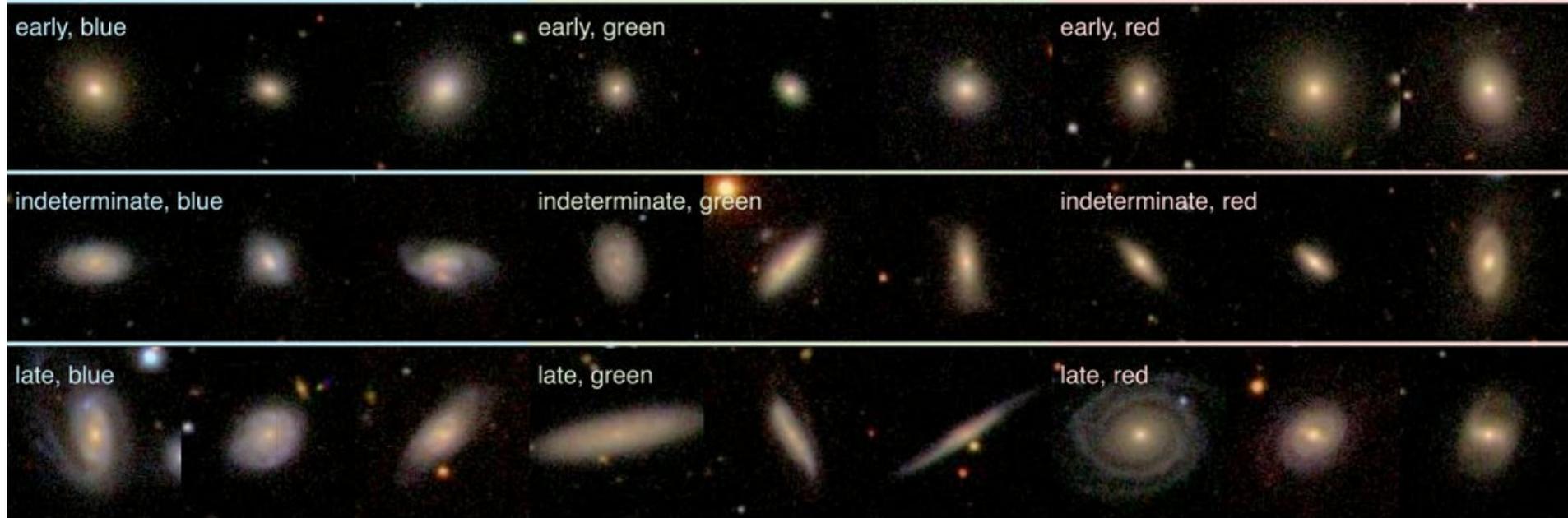
Diagramme Couleur-Magnitude
150 000 galaxies dans le SDSS

→ Paramètres: SFR essentiel
SFH aussi, poussière, âge, métallicité

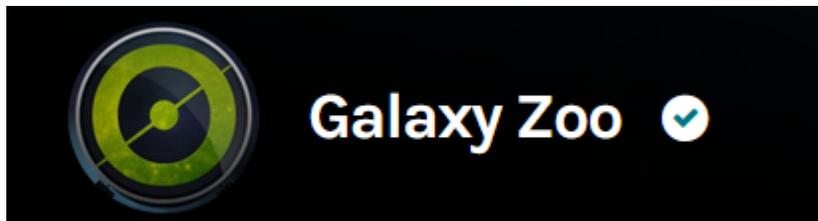
→ 2 mécanismes de formation
Séparés par $M_* = 3 \cdot 10^{10} M_\odot$



Le Zoo des Galaxies

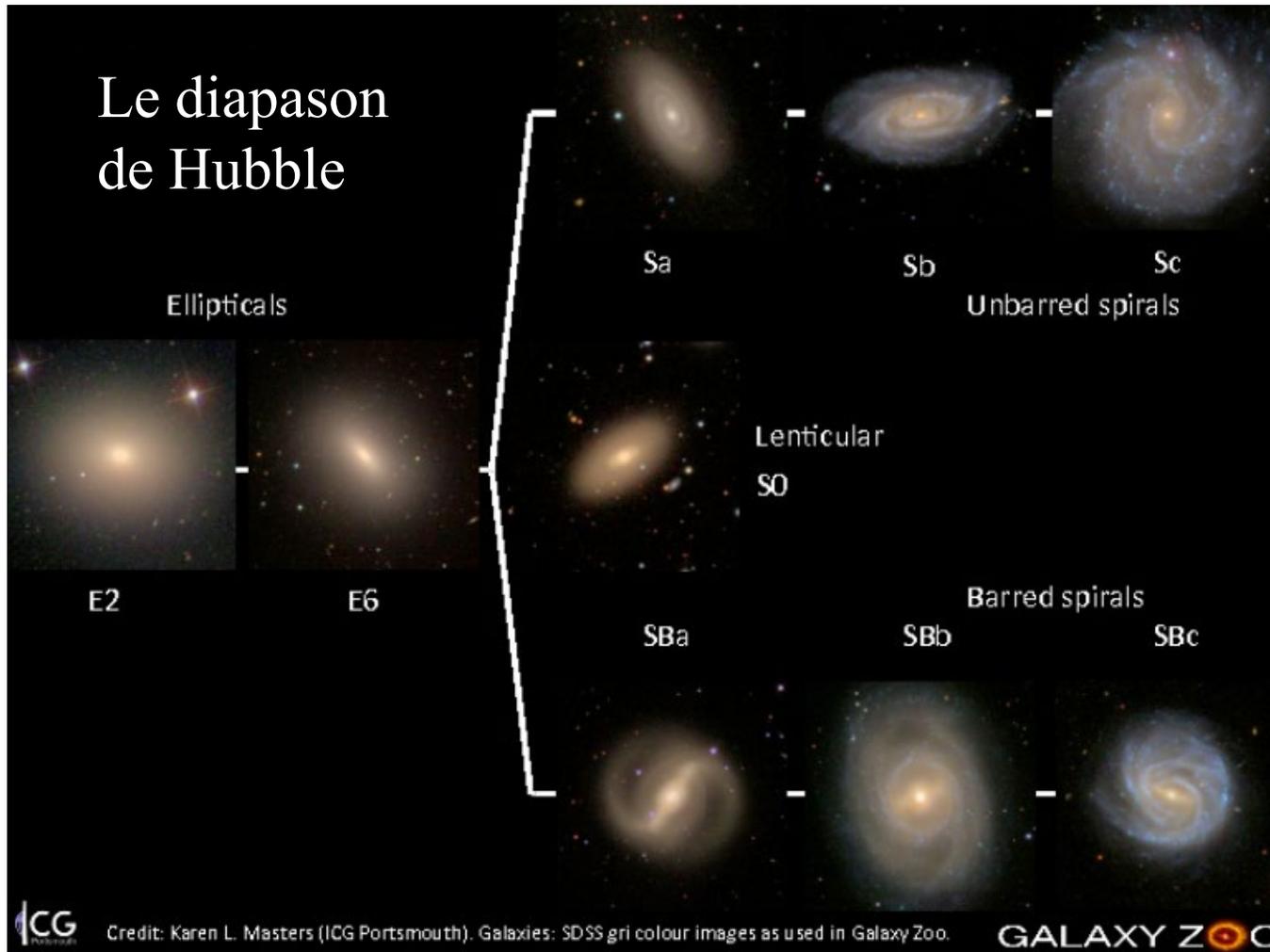


La première partie a reçu des **millions** de classifications (depuis 2007)
SDSS, puis CANDELS, DECals, Computer images, GAMA, KIDS
Maintenant le [galaxy Zoo-4 \(7/2017\)](#): 1 million de galaxies à classifier



~100 000 volontaires, ~500 000 classifications
Avec **IA maintenant** + images JWST

Lien avec la séquence de Hubble



La couleur évolue
--avec la fraction de gaz (SF)
--avec le rapport B/T
--avec l'âge des étoiles
--la morphologie

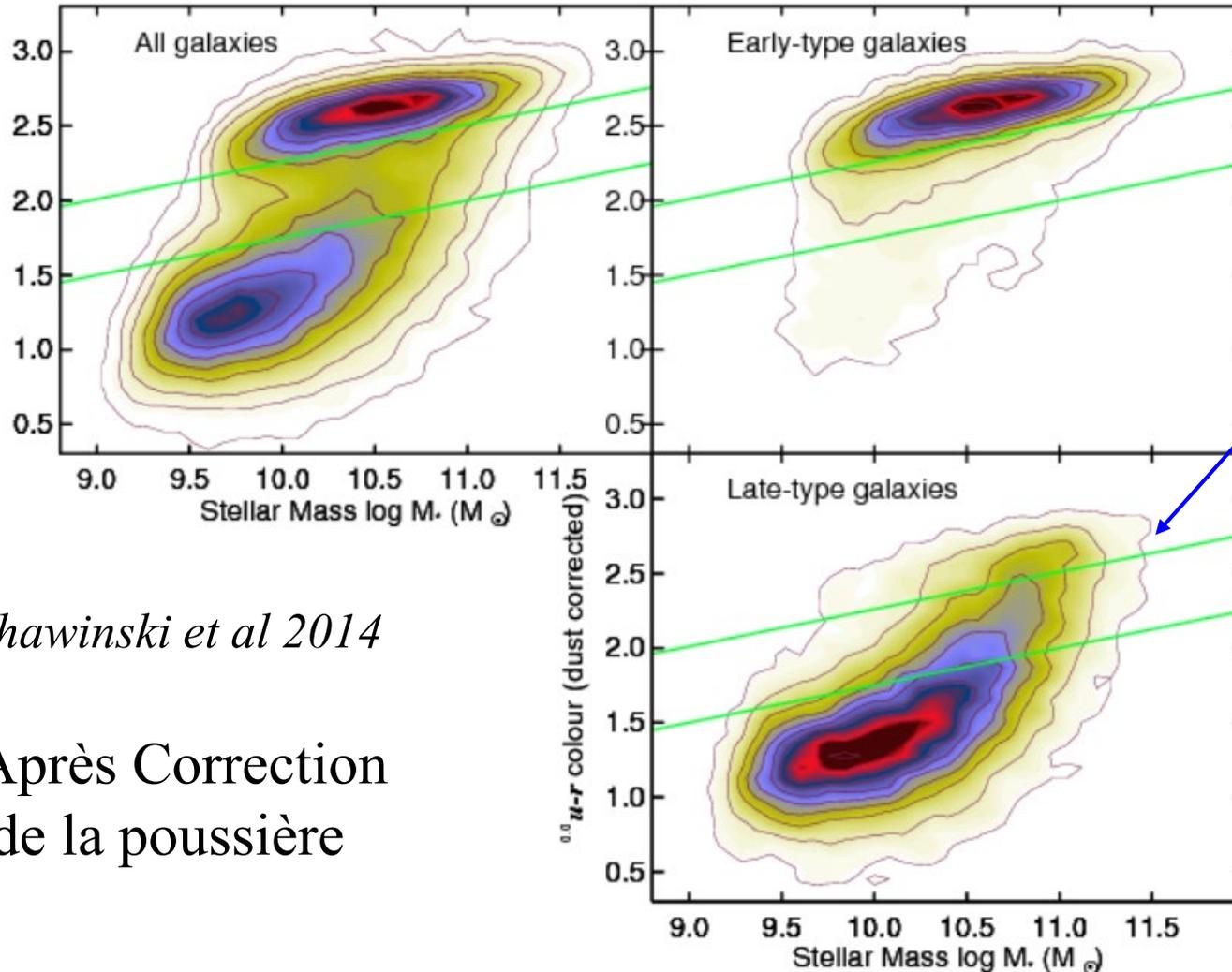
Et la poussière?

← Sens de l'évolution

La vallée verte: contient peu de galaxies

Le passage vers la séquence rouge est rapide,
→ la formation d'étoiles est brutalement stoppée

← SFR
← Bleu Couleur Rouge →



Pour le nuage bleu
Processus plus lent
disque toujours là
même après
l'arrêt de la SF

Fusions majeures
versus
Accrétion lente
de gaz?

Schawinski et al 2014

Après Correction
de la poussière

Correspondances entre classifications

Bimodalité: 2 composantes

Rouge, vieille, non-SF, haute concentration

Bleue, jeune, SF, faible concentration

« **Downsizing** »

Les galaxies massives

rouges, de type « early »

n'évoluent plus, pas de SF

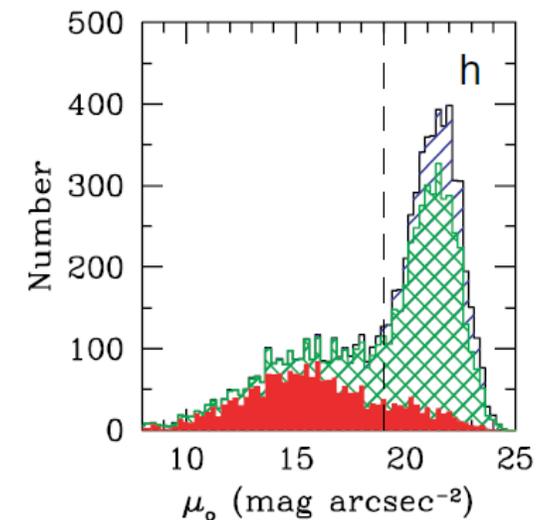
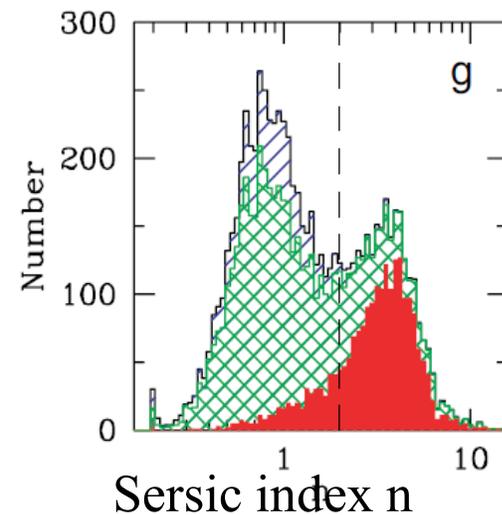
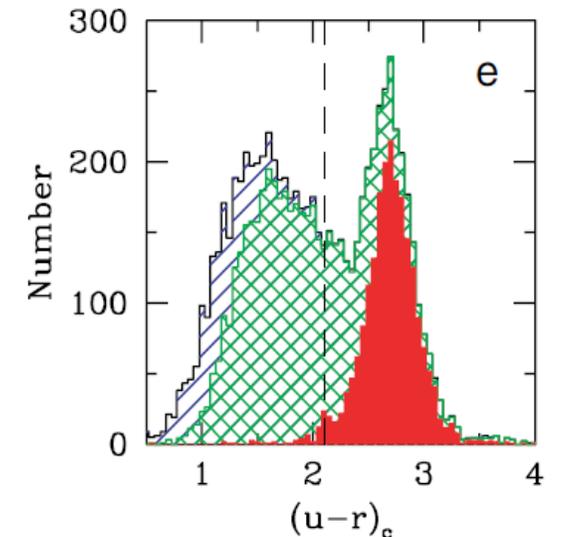
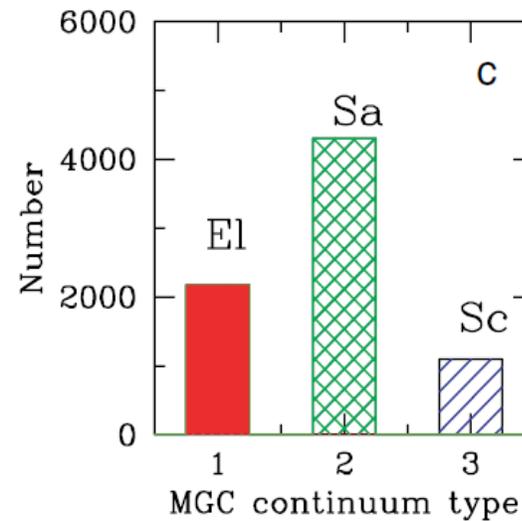
seulement passivement

La formation d'étoiles

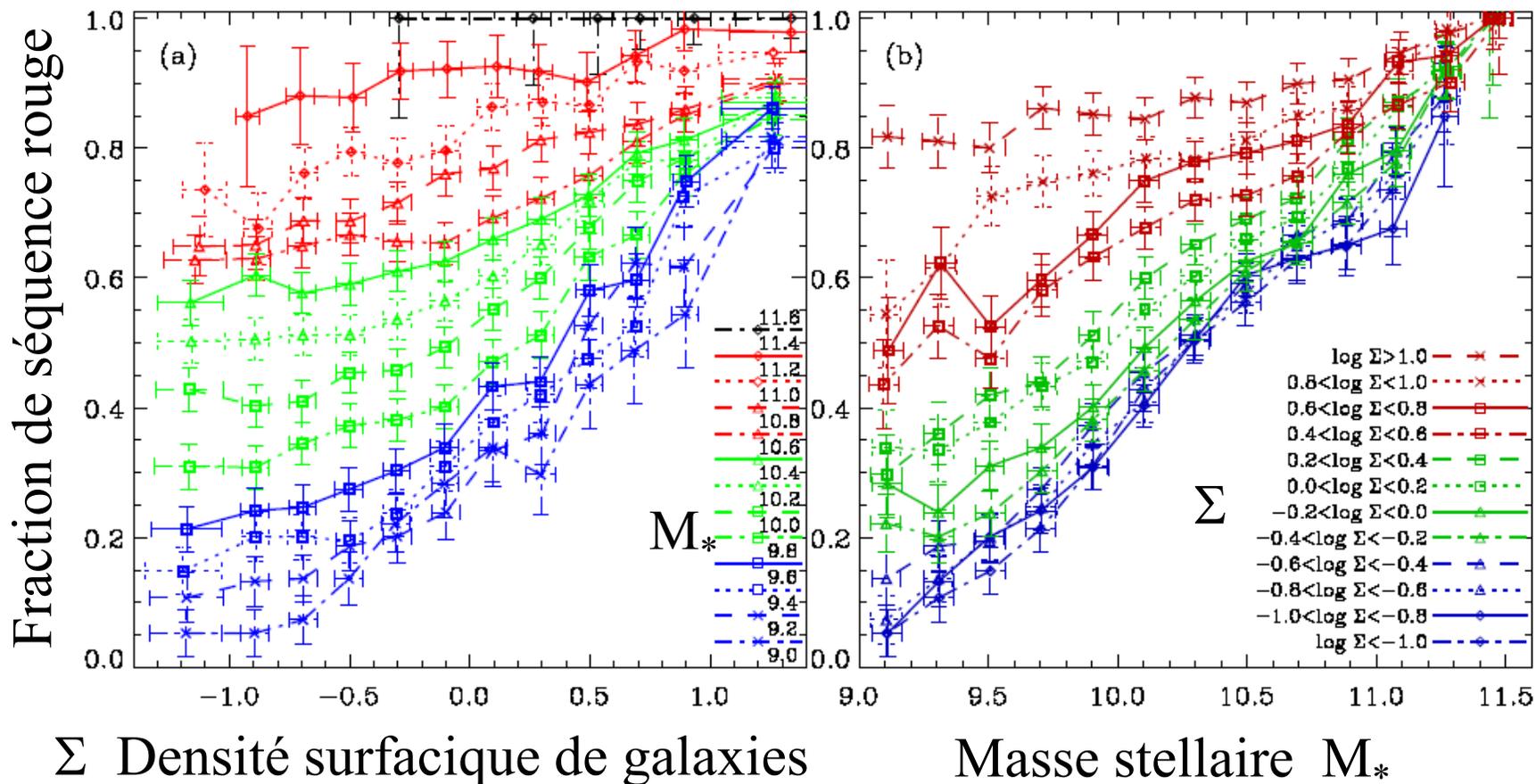
se produit aujourd'hui dans

les spirales et naines

S. Driver et al 2006



La fraction de séquence rouge croît avec la masse et l'environnement



Formation d'étoiles et densité de surface

LSB: naines, riches en gaz, formation d'étoiles jeunes intense

HSB massives, concentrées, population vieille d'étoiles

Transition à $M_* = 3 \cdot 10^{10} M_\odot$, $\mu = 3 \cdot 10^8 M_\odot/\text{kpc}^2$ (densité de surface)

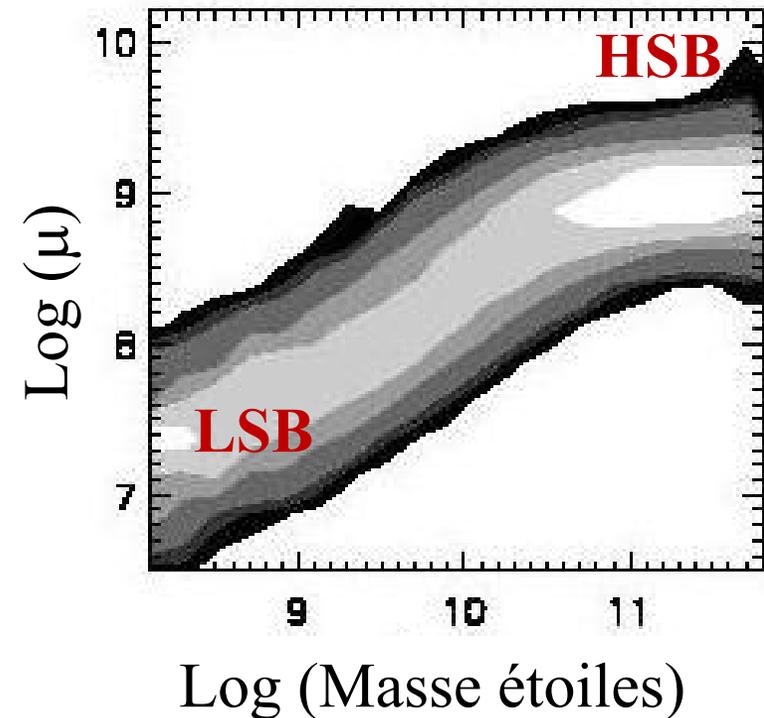
L'histoire de la formation stellaire dépend de la masse

→ densité de surface

Il y a une transition, quand le gaz commence à s'échapper

Vitesse des supernovae $V_{\text{SN}} \sim 100 \text{ km/s}$

→ Une LSB n'accumule pas les métaux



Les questions clés

Quand la séquence de Hubble commence-t-elle?

→ Des galaxies fragmentées, irrégulières à grand redshift

Disques épais, dominés par la dispersion $\sigma > V_{rot}$

→ Les galaxies elliptiques surprenamment tôt

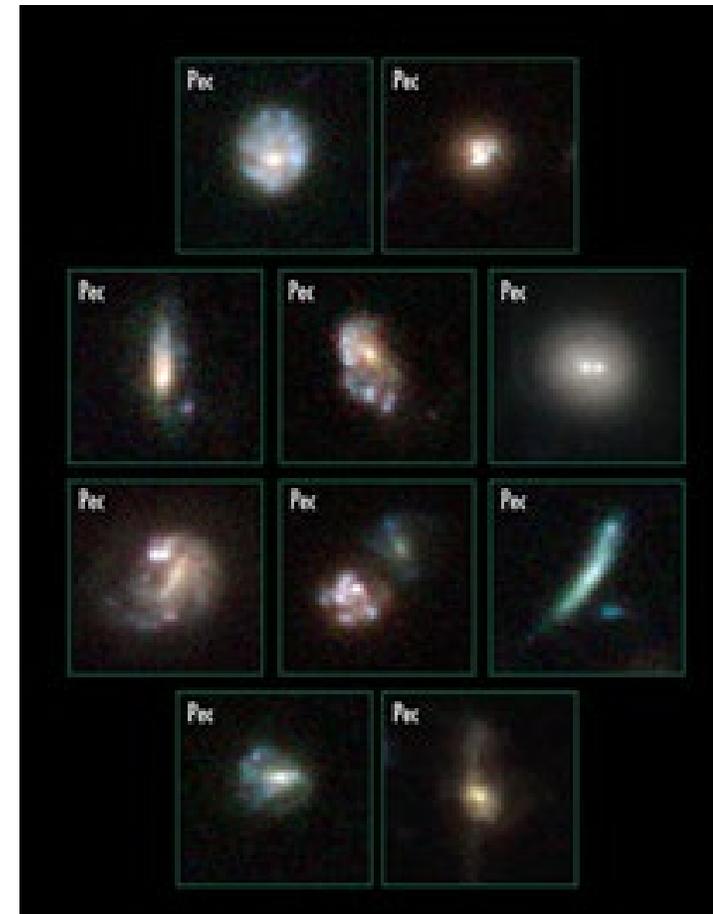
→ Quand et où se sont formées les étoiles?

→ Quand la masse est assemblée

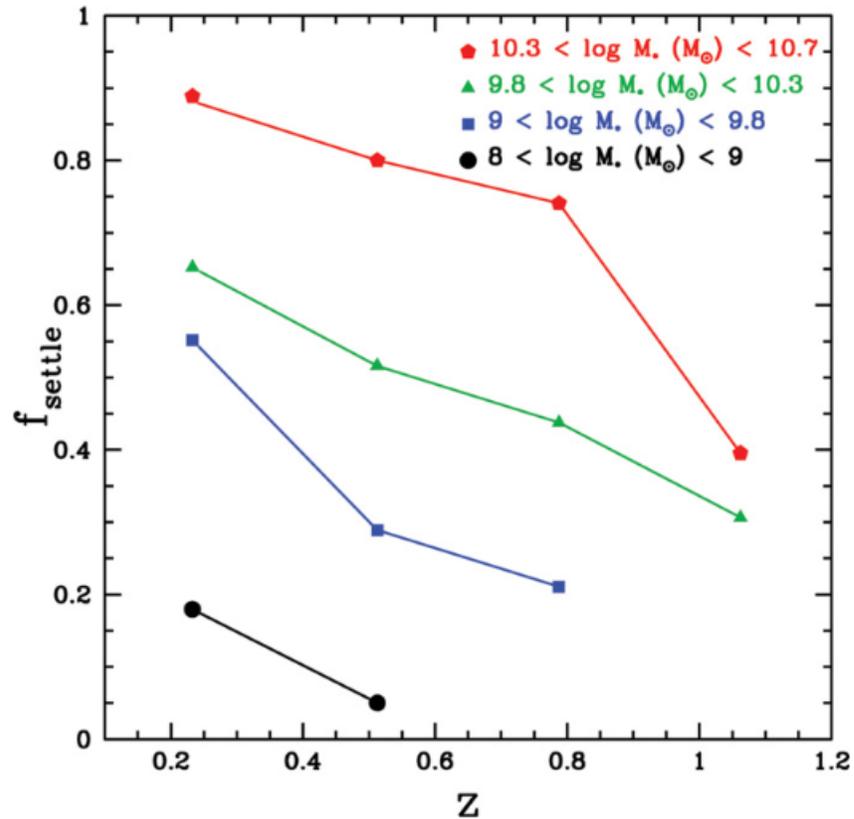
→ Effets d'environnement

→ Noyaux actifs, SMBH et bulbes

HST



La séquence de Hubble survient lorsque la formation d'étoiles décline



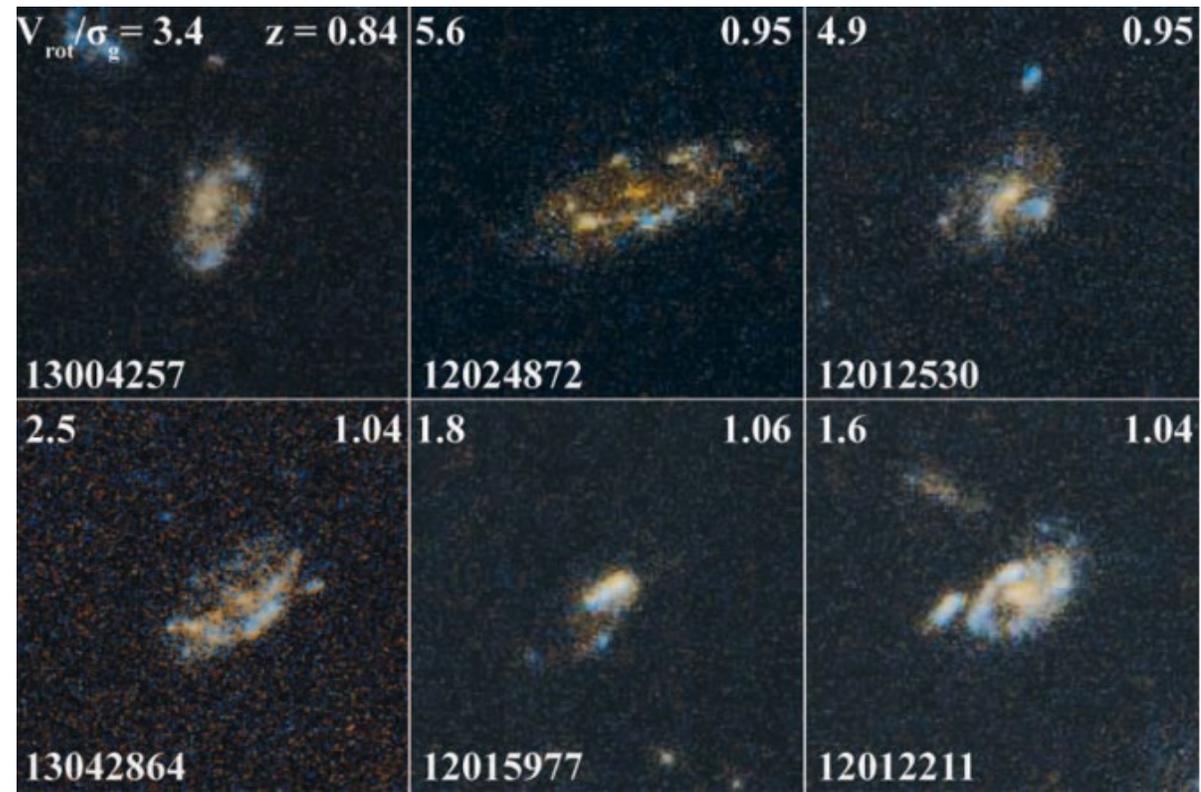
La fraction de disques croît avec le temps

Disques lorsque $V/\sigma > 3$

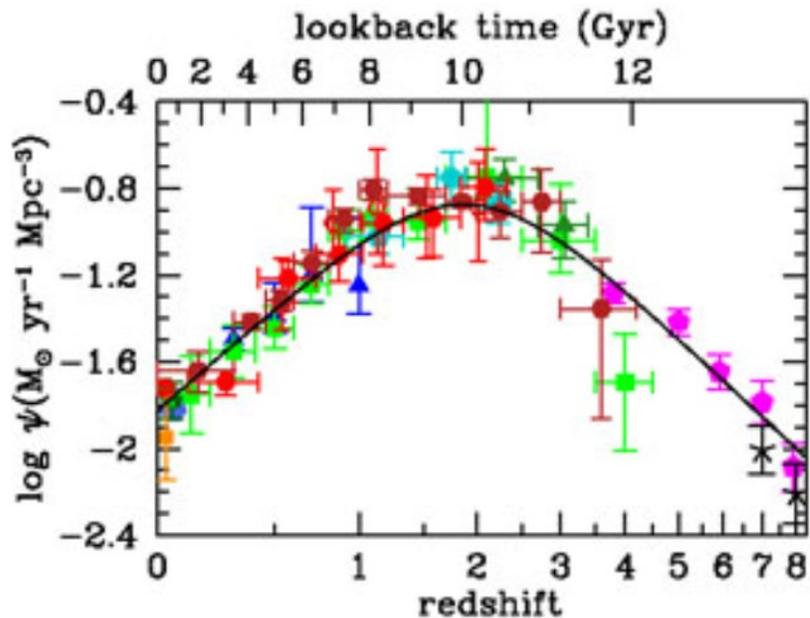
F_{gaz} trop grande?

Trop turbulents?

(Kassin et al 2012)

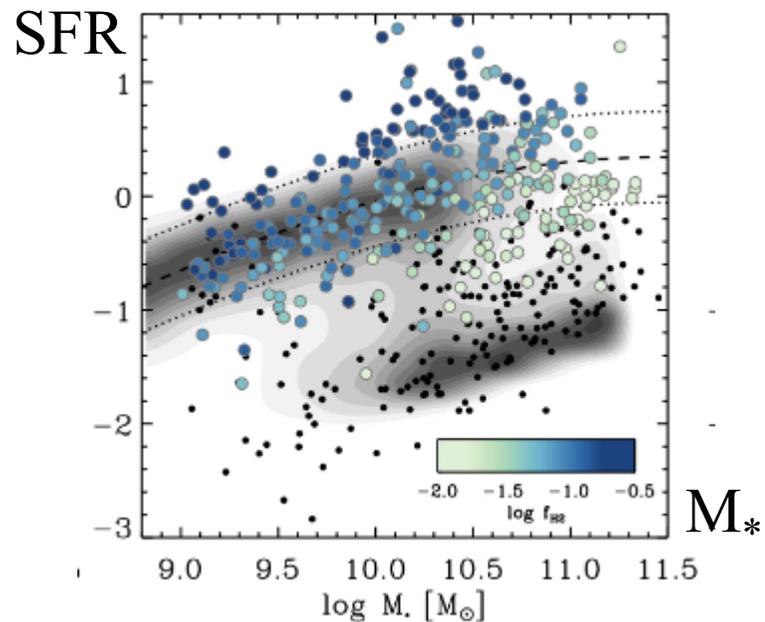


Quand se forment la majorité des étoiles?

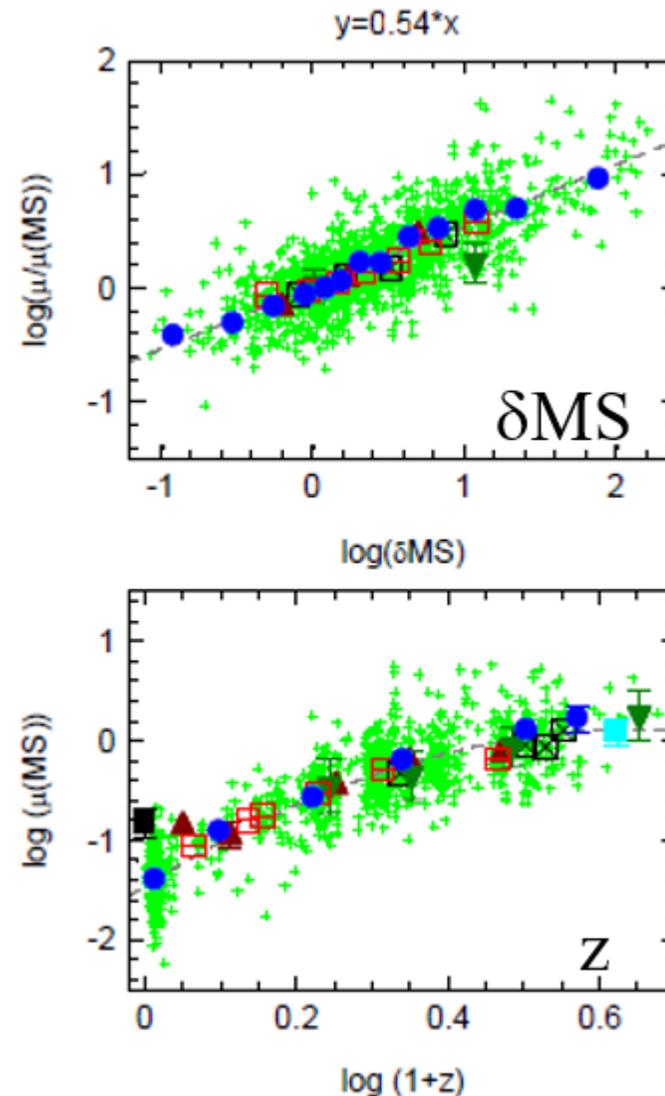


Madau & Dickinson 2014

La séquence principale



Saintonge et al 2017

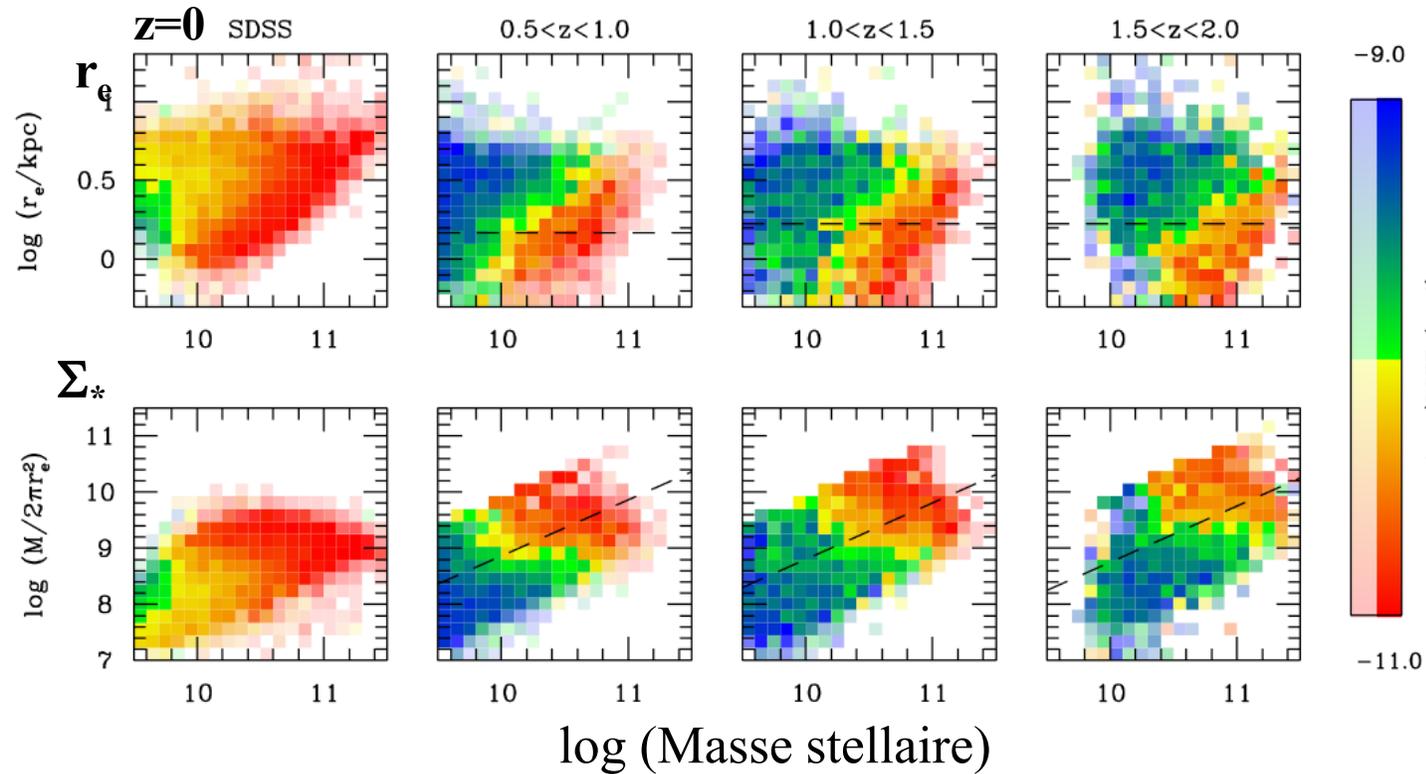


Histoire de la formation d'étoiles cosmique:

le facteur clé est la fraction de gaz $\mu = M_{\text{mol}}/M_{*}$

(Tacconi et al 2018)

Couleur: $sSFR = SFR/M_* \sim (\text{temps de formation})^{-1}$

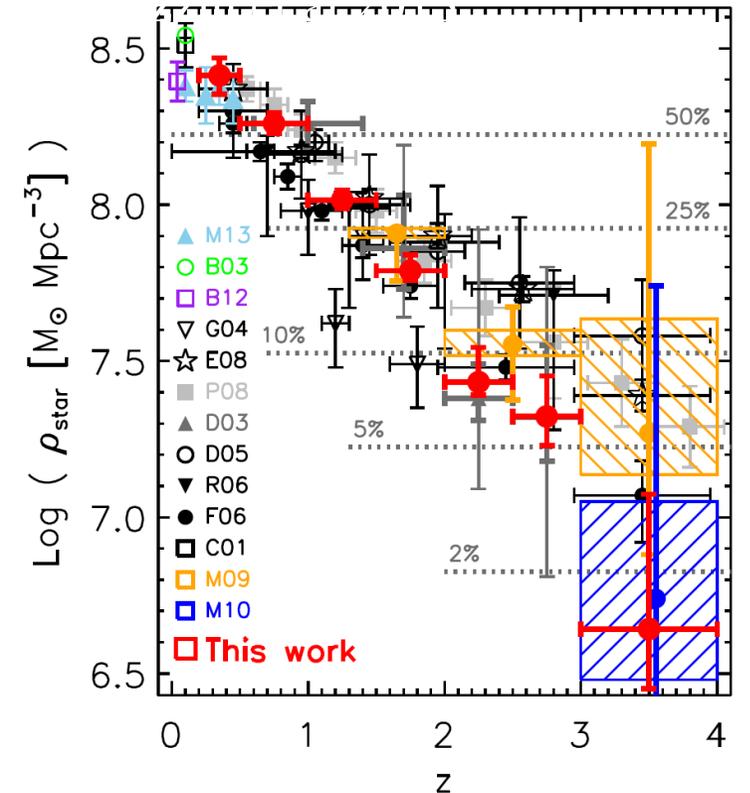
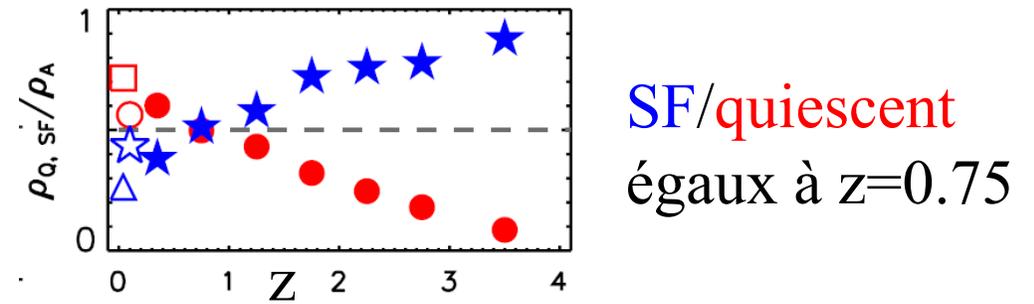


Galaxies quiescentes déjà à $z=2$
à masse stellaire donnée, d'autant plus qu'elles sont compactes

Les galaxies rouges compactes disparaissent à $z=0$

Williams et al 2010

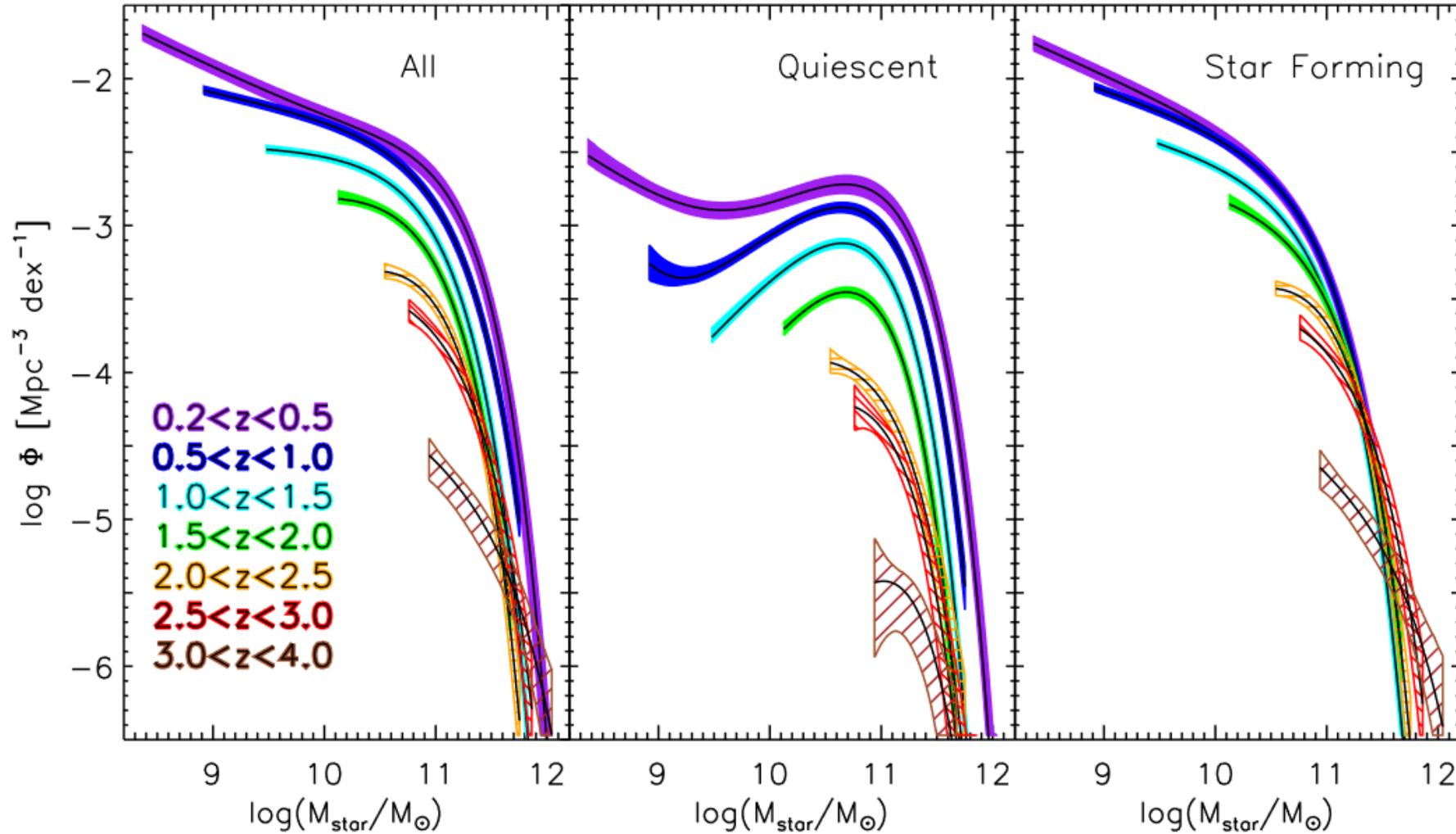
La moitié des étoiles depuis $z=1$
Bulbes forment à $z > 1$, disques à $z < 1$



Muzzin et al 2013

Assemblage de la masse

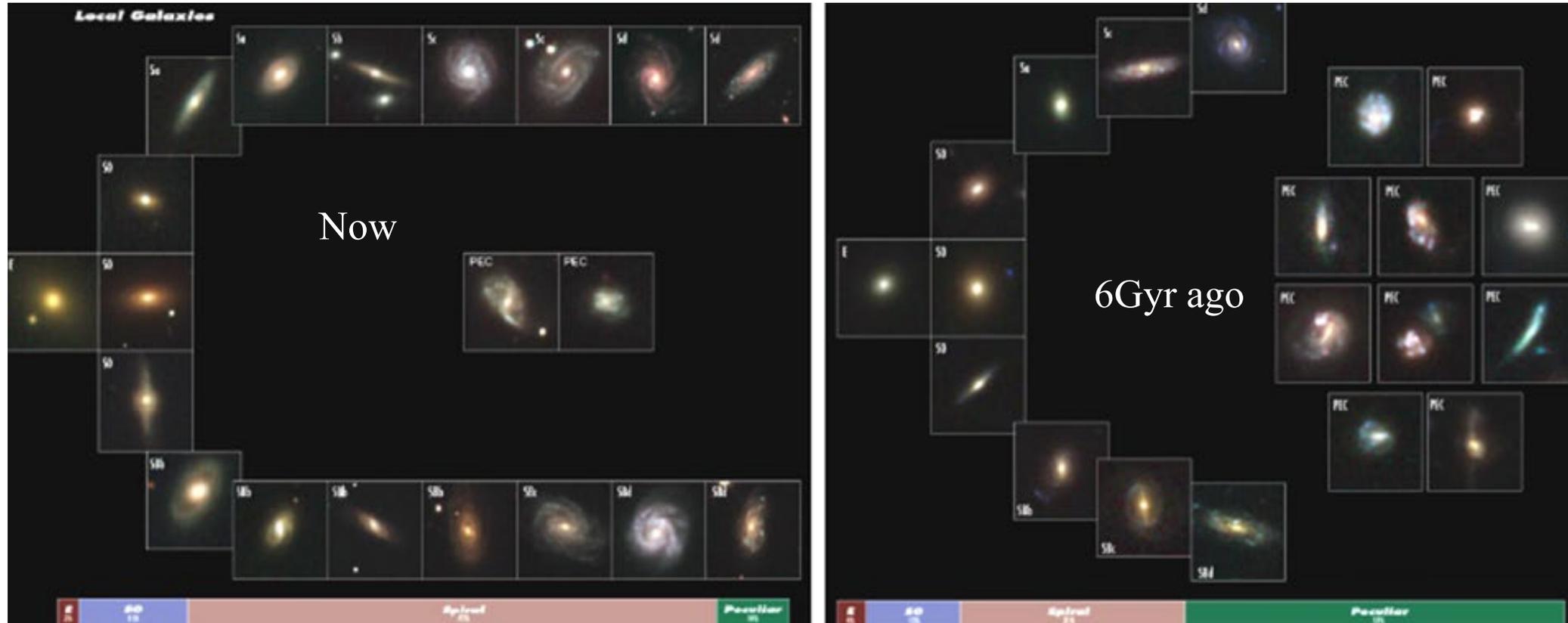
Formation des étoiles dans
de petites galaxies qui ensuite
fusionnent



Les galaxies SF
dominent en nombre

Evolution rapide des
galaxies quiescentes
à la fois à grand M_*
et faible M_*

Beaucoup plus de galaxies irrégulières à $z \sim 1$



50% des galaxies étaient perturbées, il y a 6 Gyr selon les images du HST

Les galaxies spirales dominant à grand z

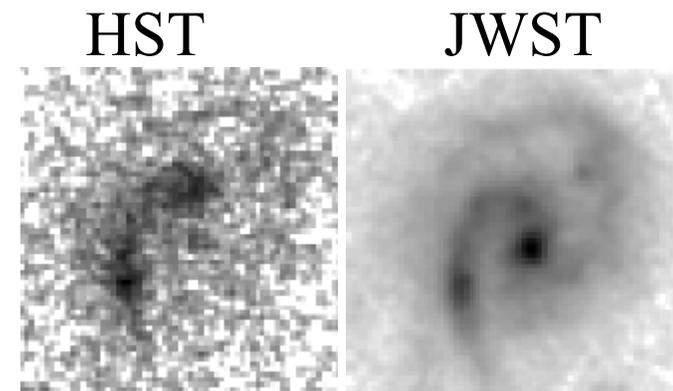
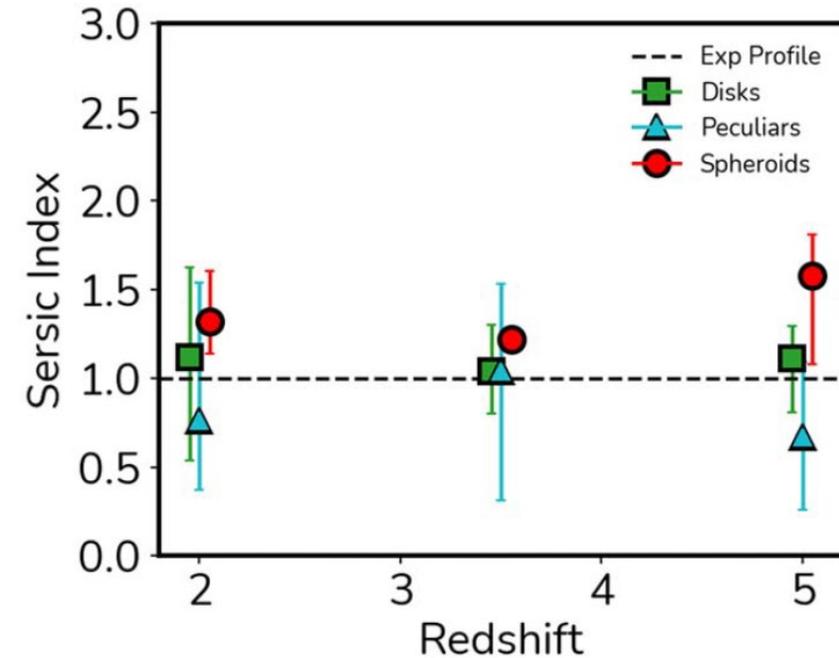
4265 galaxies observées
avec JWST à $1.5 < z < 8$

Morphologies modifiées: 10x disques!

Avec HST, les galaxies sont
vues dans le filtre visible ou UV,
et apparaissent “clumpy”

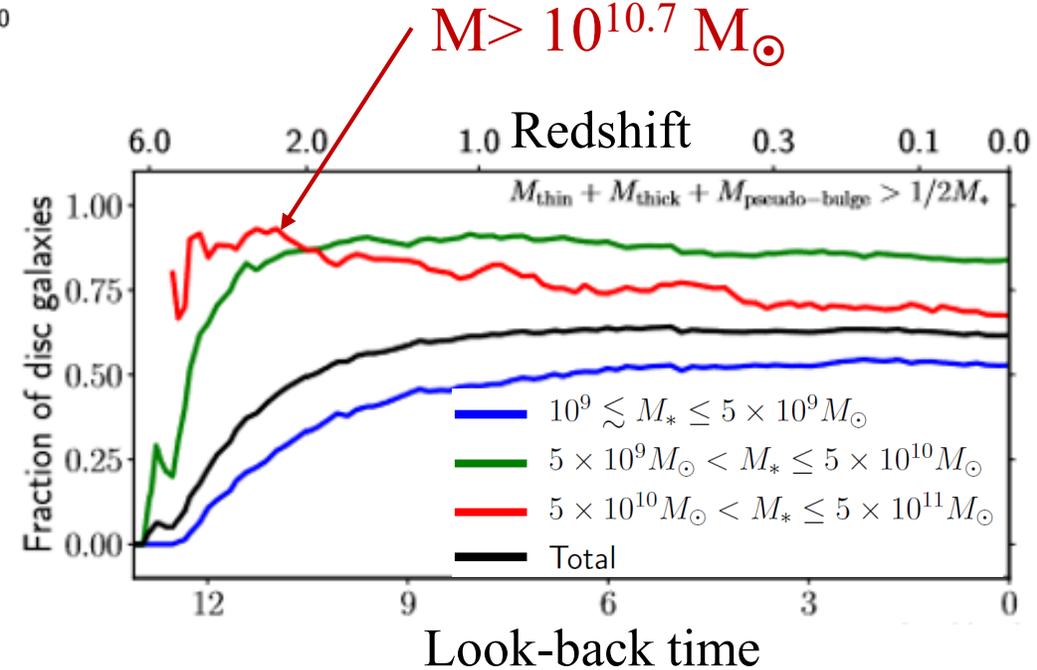
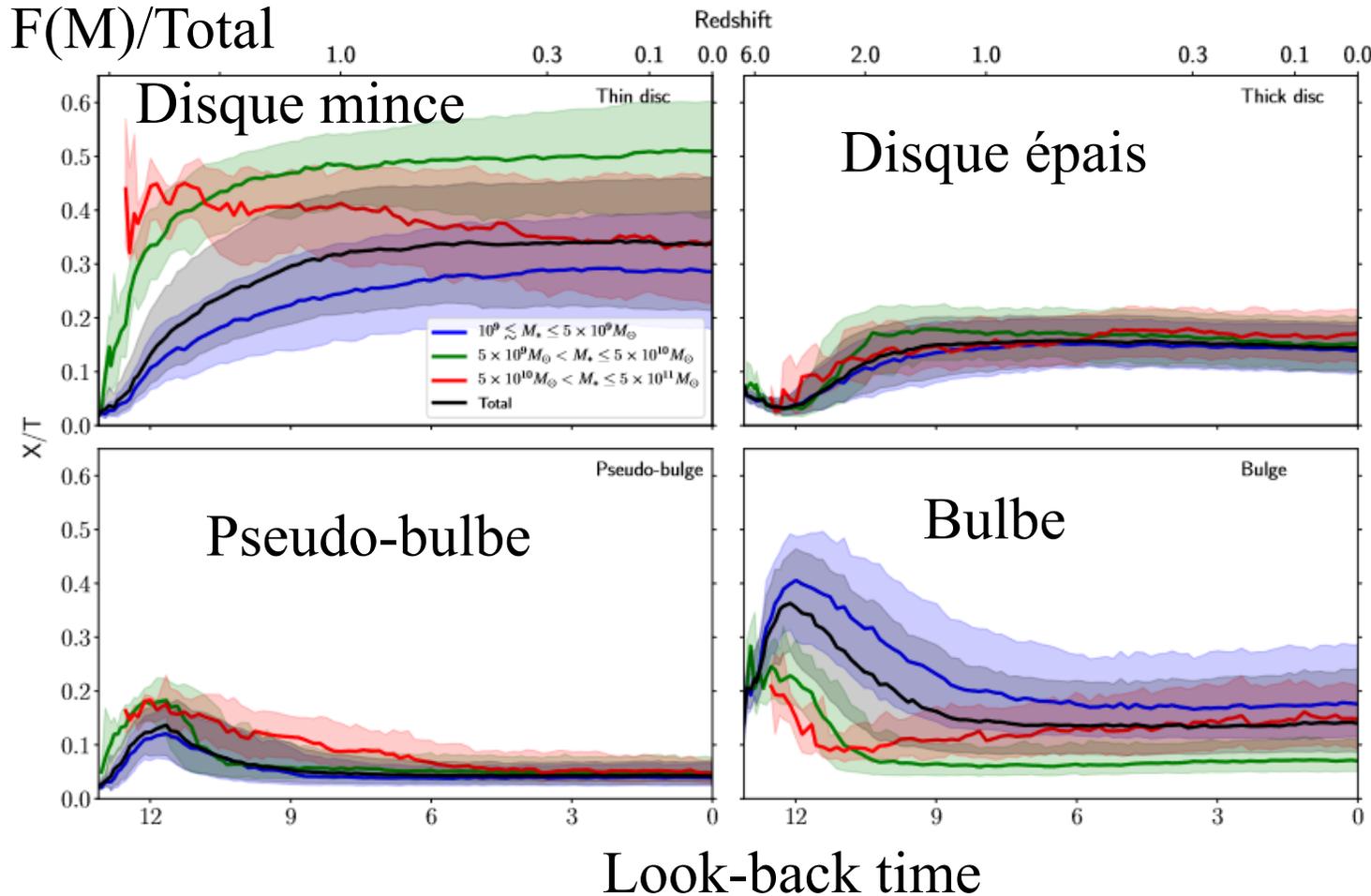
Avec JWST, les galaxies spirales dominant
jusqu’à $z=6$ au moins, alors que l’on pensait
que les irrégulières dominaient dès $z>3$

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



TNG50: évolution des disques de galaxies

Les disques épais évoluent le plus vite -- dûs à la grande turbulence du gaz au départ
 La fraction de bulbe diminue!



Les plus massives développent un sphéroïde par les fusions

La séquence de Hubble apparaît plus tôt

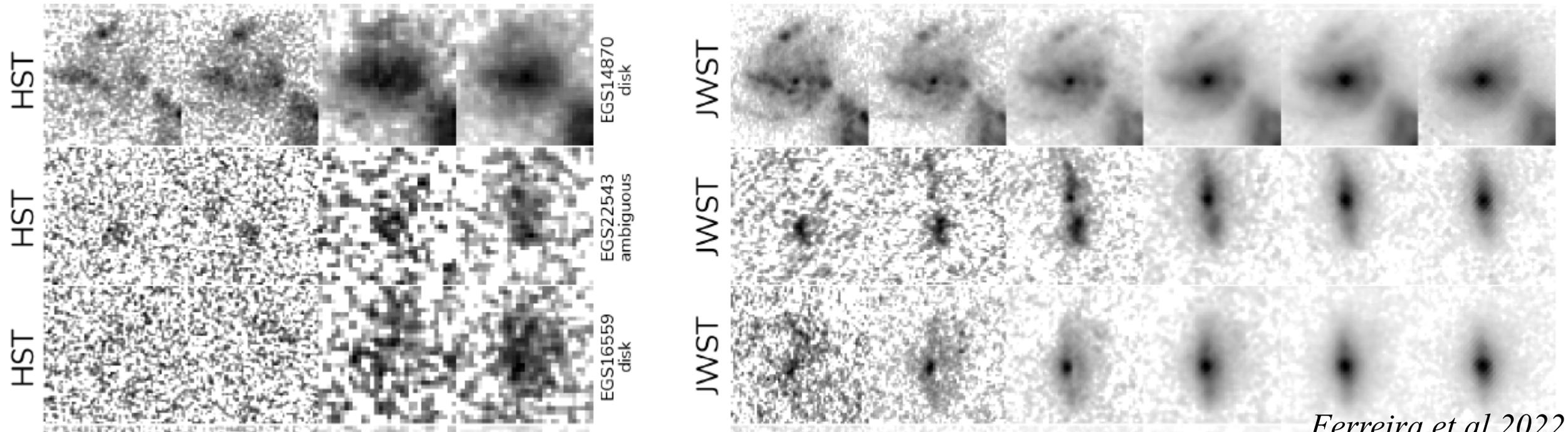
Avec HST, il semblait que la séquence de Hubble disparaissait dès $z=1$

Galaxies plus instables, dominées par le gaz \rightarrow galaxies irrégulières, clumpy

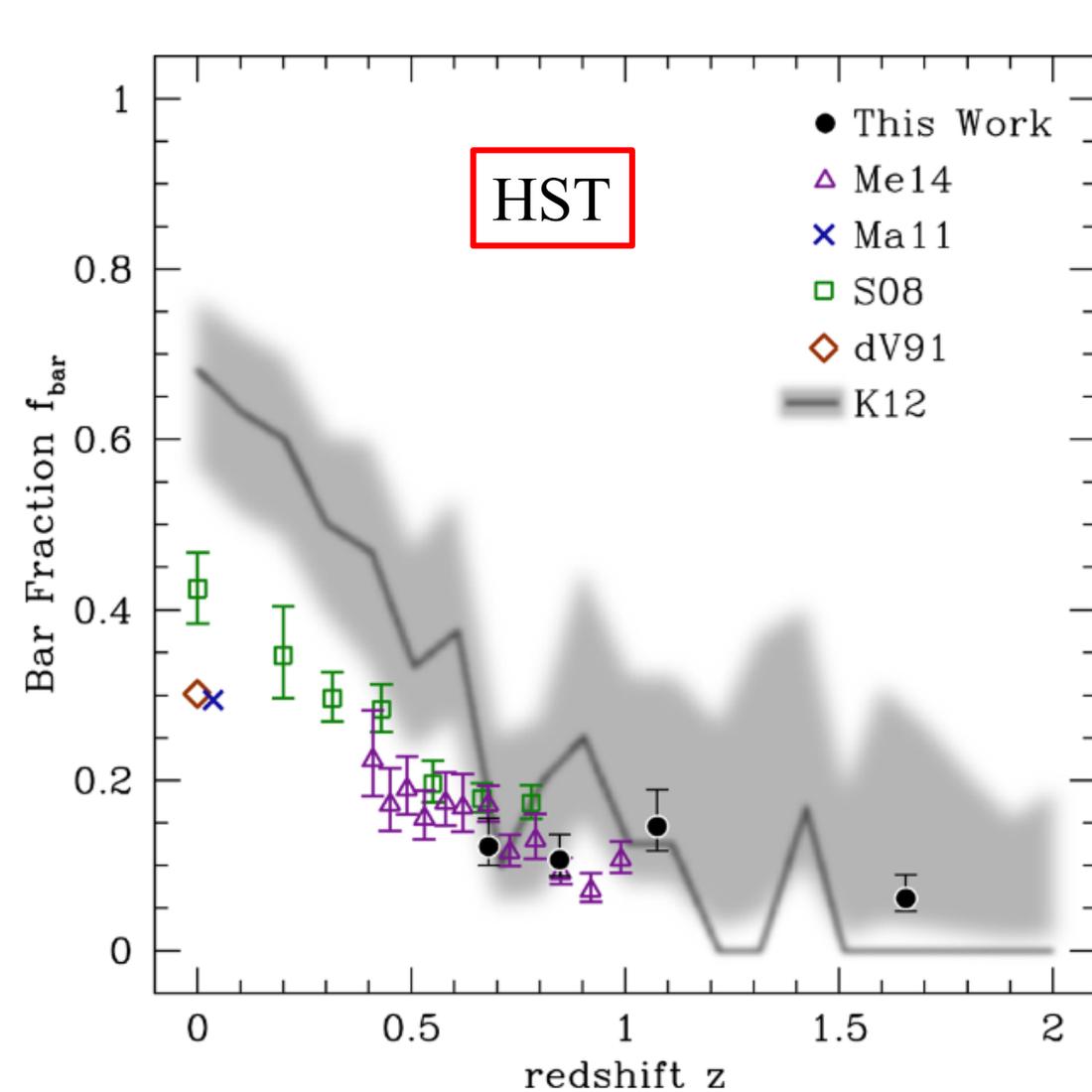
Mais ce n'était que la lumière ultra-violette

Le JWST voit en V et NIR, des barres et spirales jusqu'à $z=4-6$

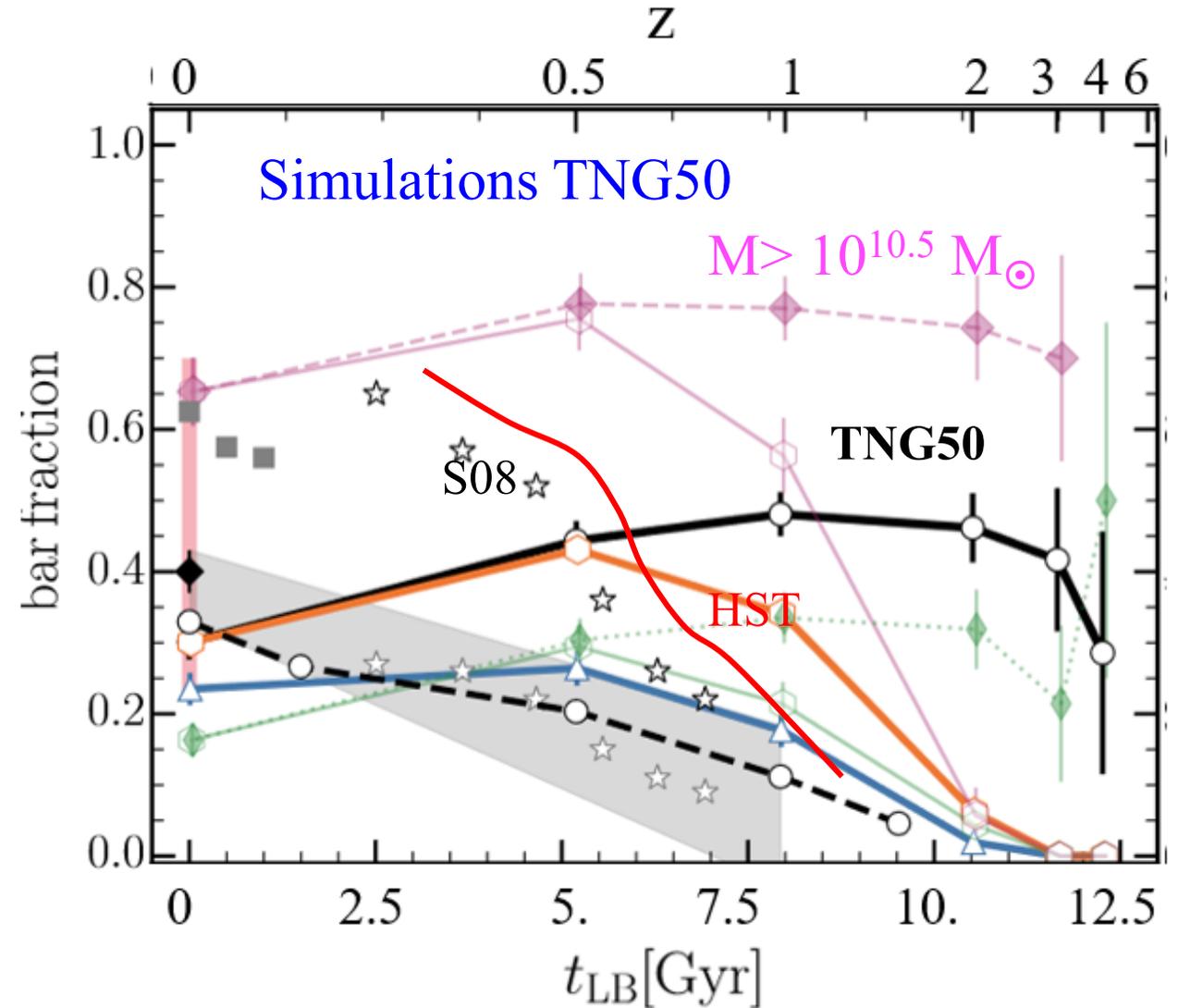
Exemple: 3 galaxies, dans les bandes du HST (à gauche) et celle du JWST (à droite).



Des barres plus tôt dans les simulations



Simmons et al 2014

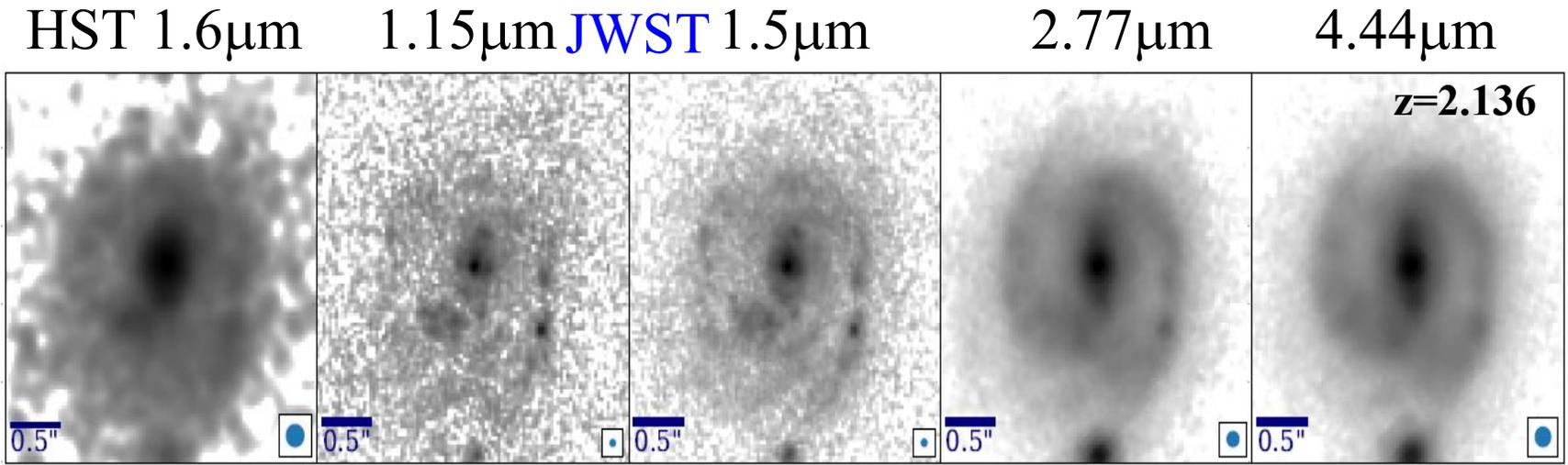
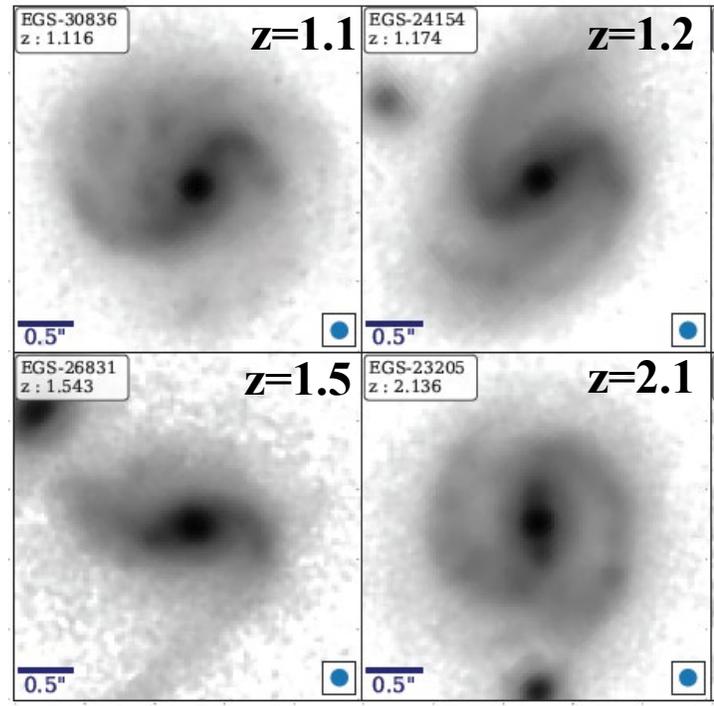


Rosas-Guevara et al 2022

Formation des barres très tôt avec JWST

La bande 4.44μm du JWST révèle les vieilles étoiles dont sont faites les barres, jusqu'à $z > 2$

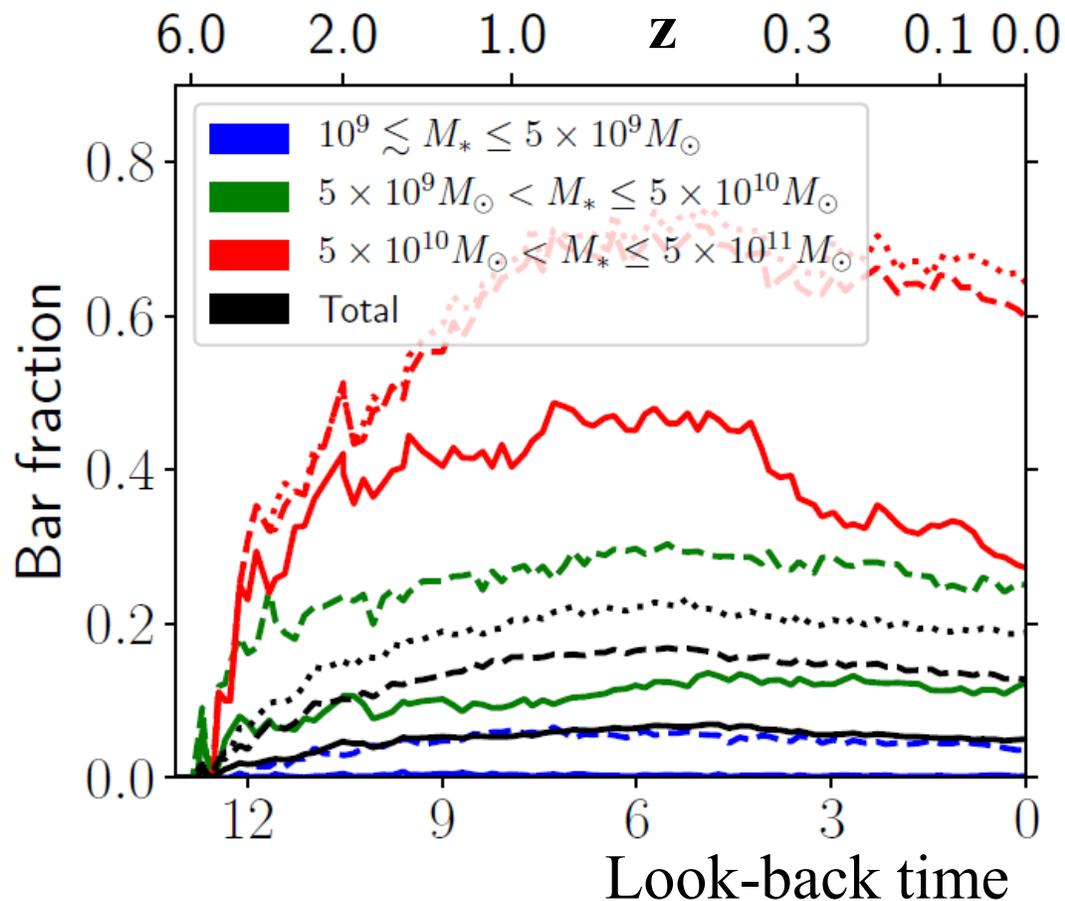
Gauche: Hubble (HST) à 1.6 micron
Droite: JWST NIRCcam à 1.15, 1.5 2.77 et 4.44 micron.
Le cercle bleu en bas à droite: résolution spatiale, barre horizontale = 0,5''



Images de 0.3''x0.3''
Guo, Jogee et al 2022

Fraction de galaxies barrées (TNG50)

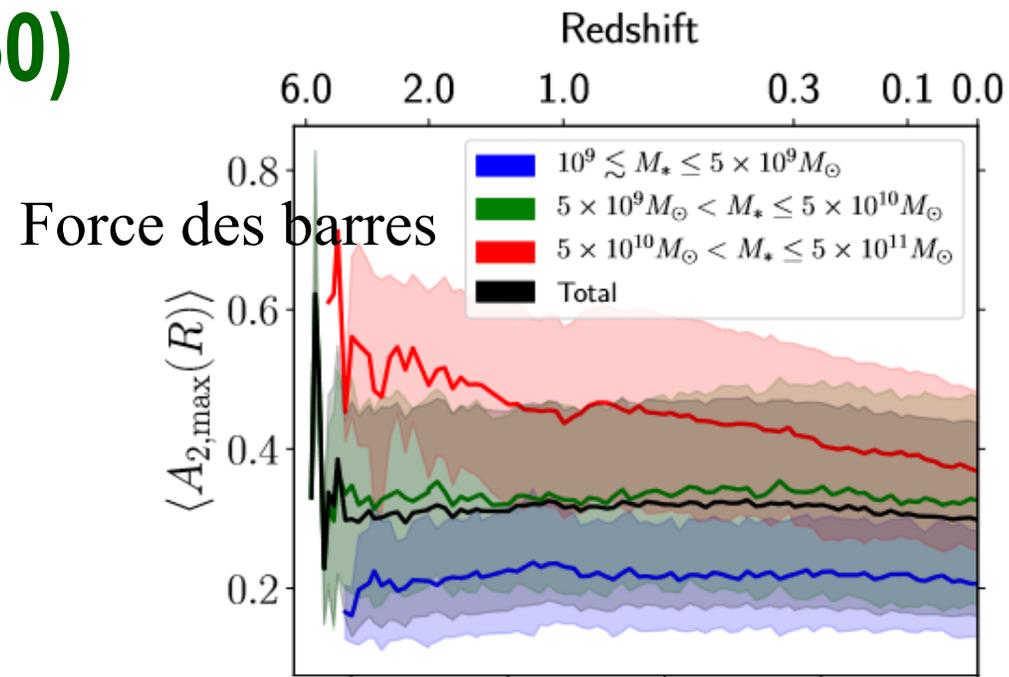
A $z=0$, la fraction de barres est la plus forte pour $M_* > 10^{10.5} M_\odot$



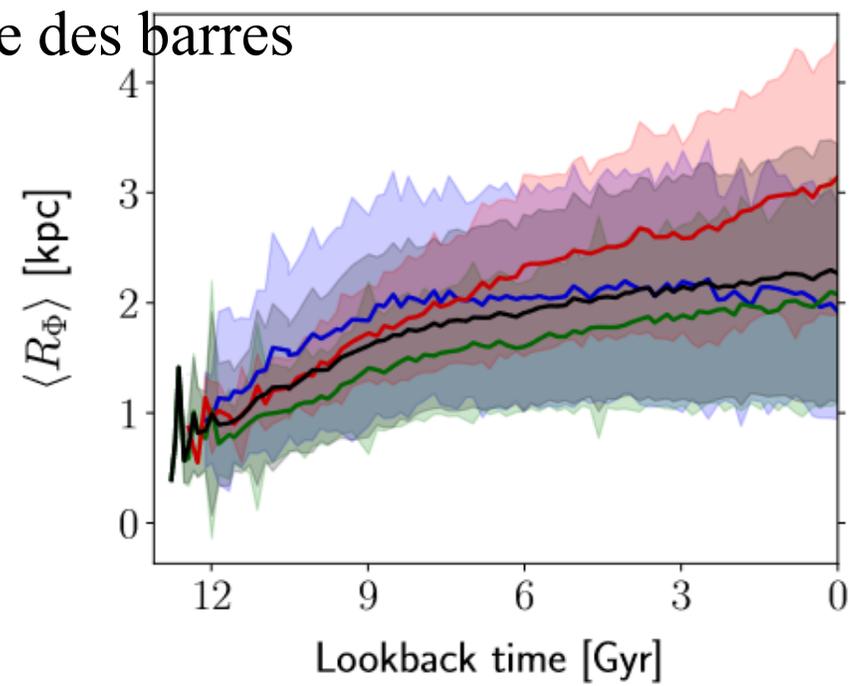
Trait plein: barre forte

Pointillés: barre intermédiaire

Zana et al 2022

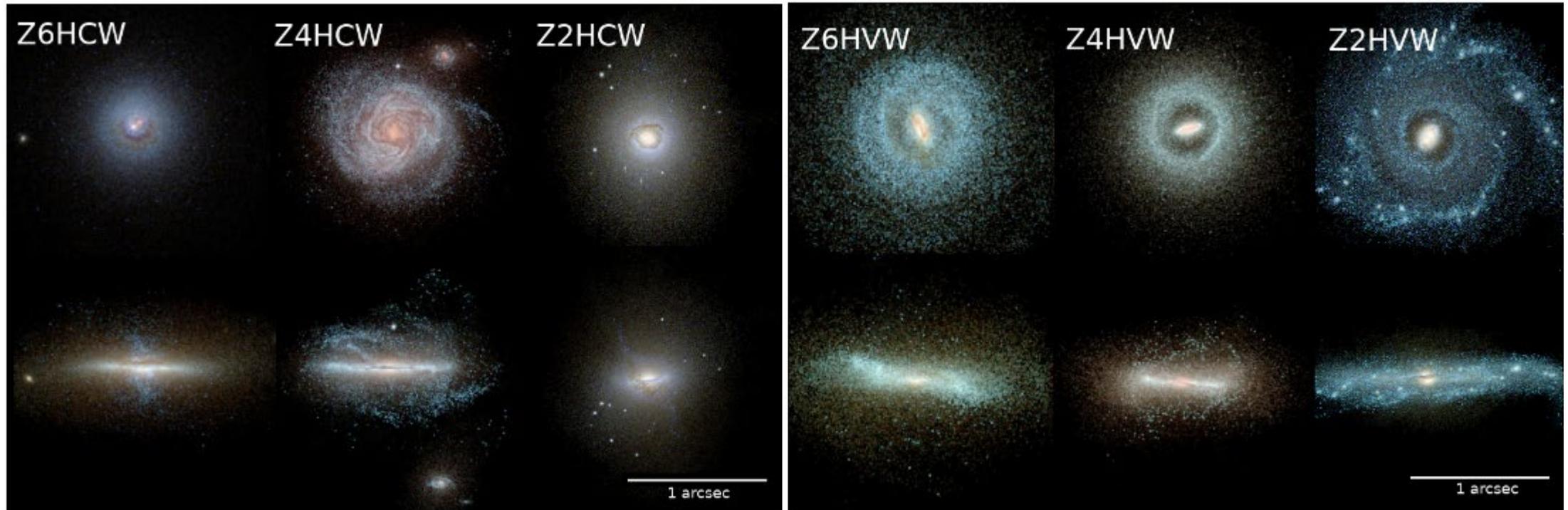


Taille des barres



Simulations de la formation des disques et des barres

Tous les modèles ont des barres, **même si $< 1\text{kpc}$** (invisibles avec JWST)
zf= redshift final, 6, 4, 2 H= sur-densité, L: sous-densité



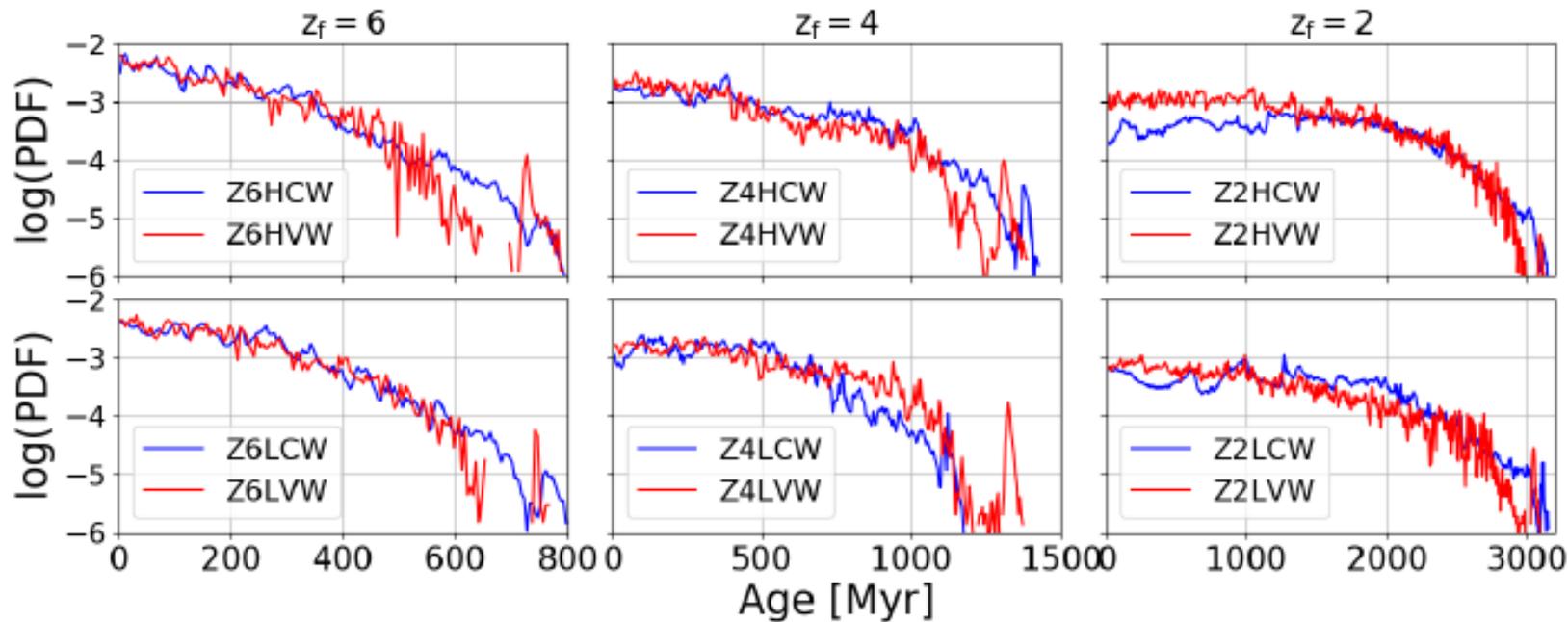
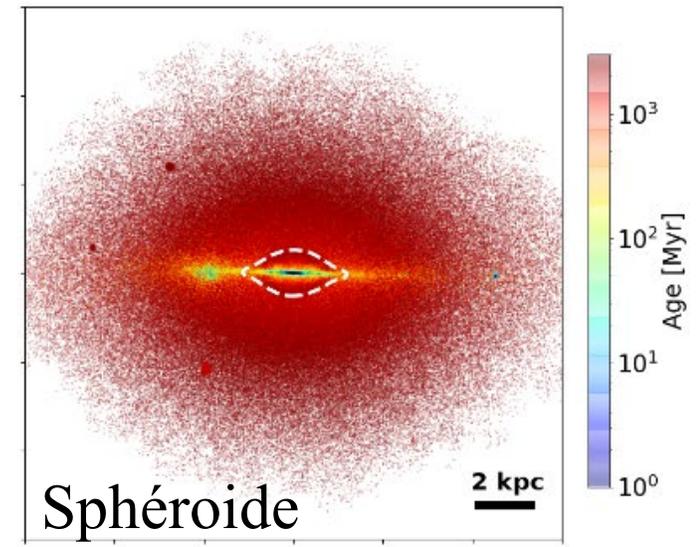
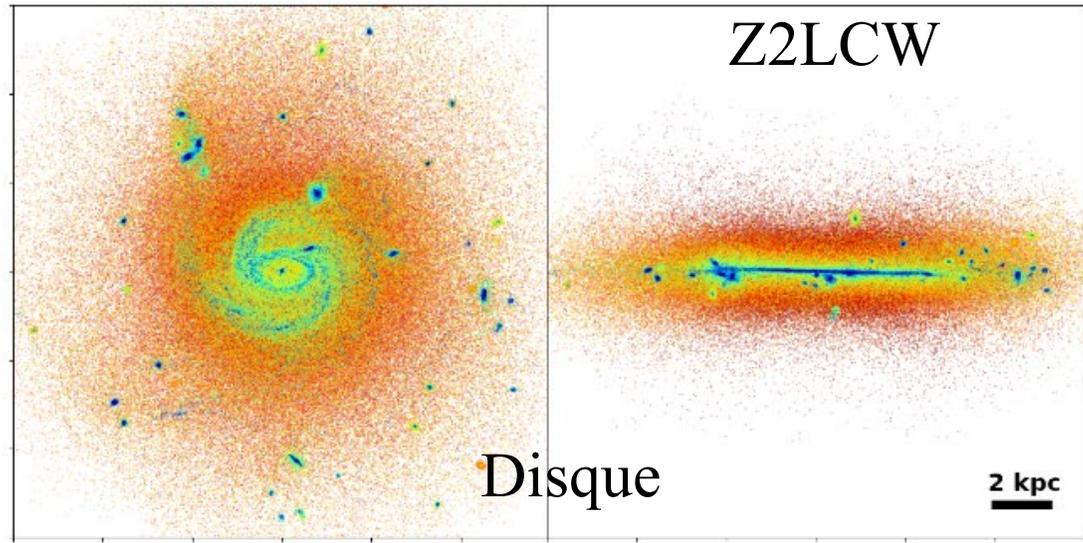
Feedback vent stellaire: CW Constant Wind, VW Variable Wind
Fraction de gaz supérieure avec VW

Bi, Shlosman, Romano-Diaz 2022

JWST et ALMA devraient voir les disques dominer

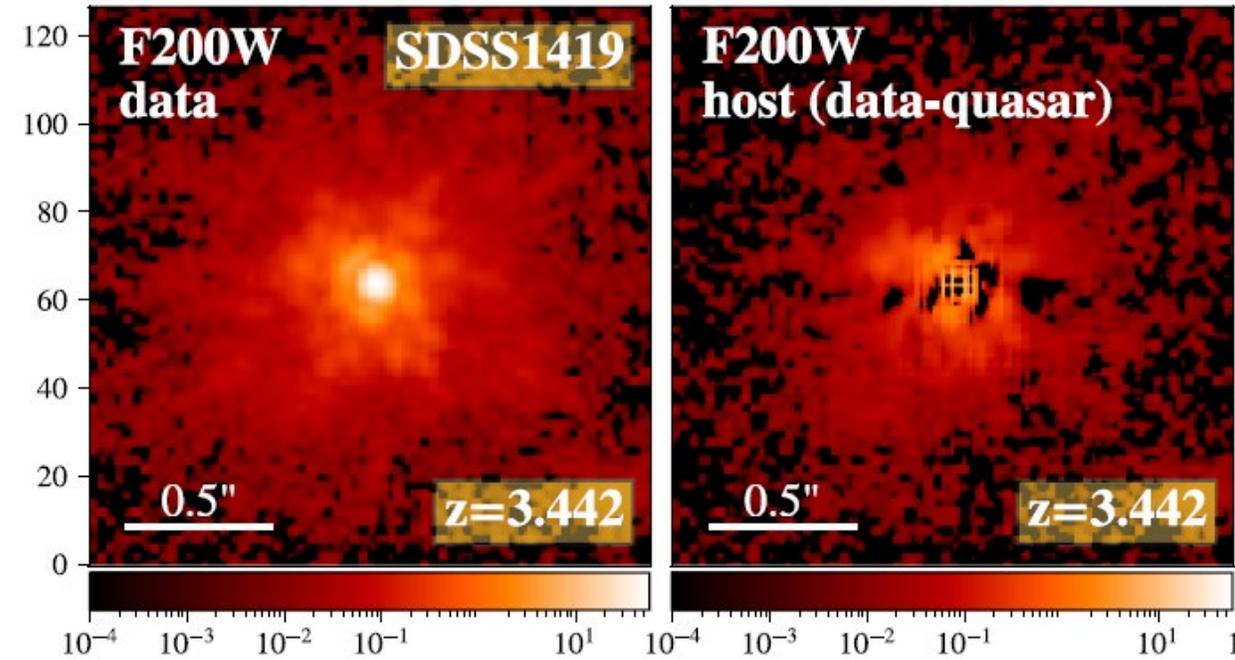
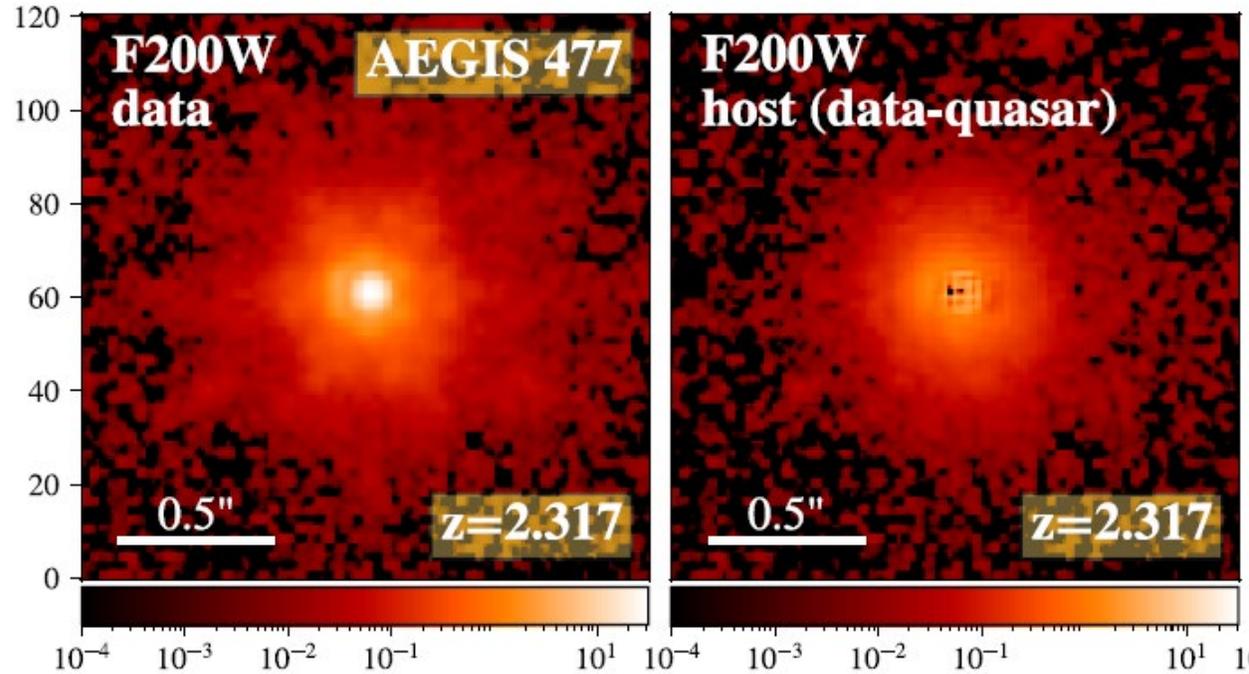
Age des étoiles

Pic de SFR entre $z=4$ et 2



CW Constant Wind,
VW Variable Wind

Hôte des quasars $1.6 < z < 3.5$ révélés par JWST



Rapport de luminosité disque/total = 5 à 60%

→ Grande sensibilité

Pour la première fois, les hôtes des quasars $1.6 < z < 3.5$ apparaissent

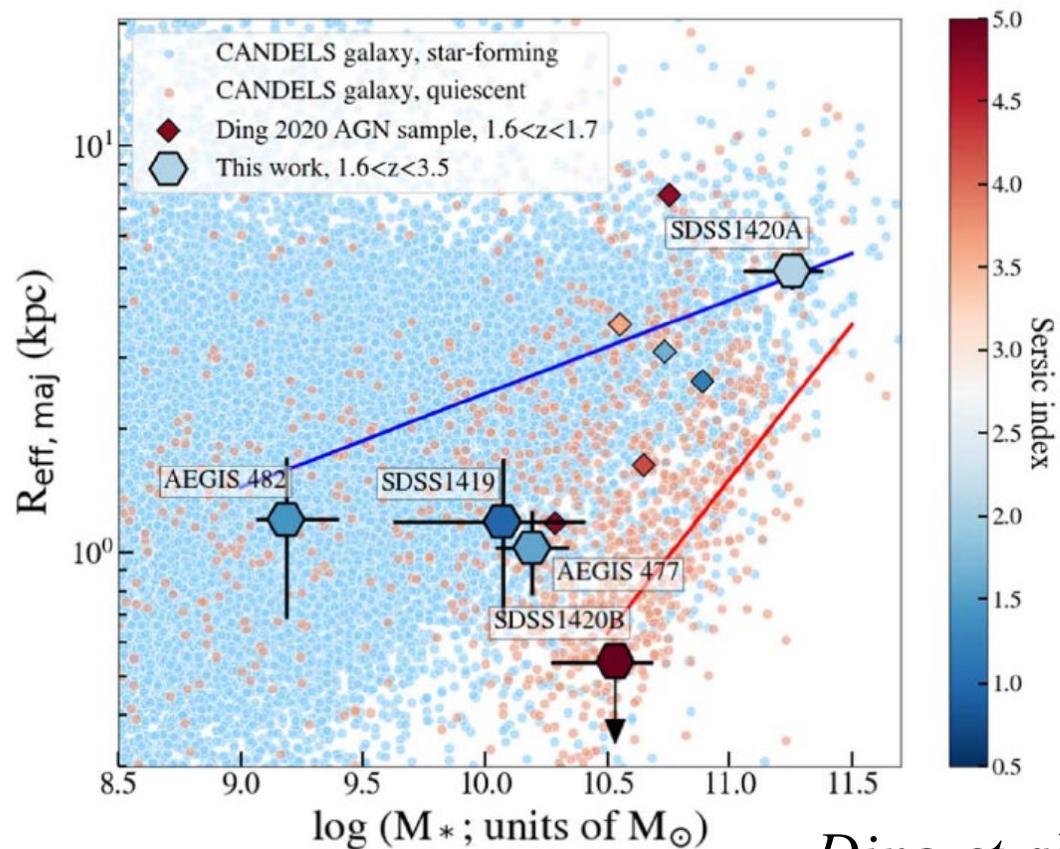
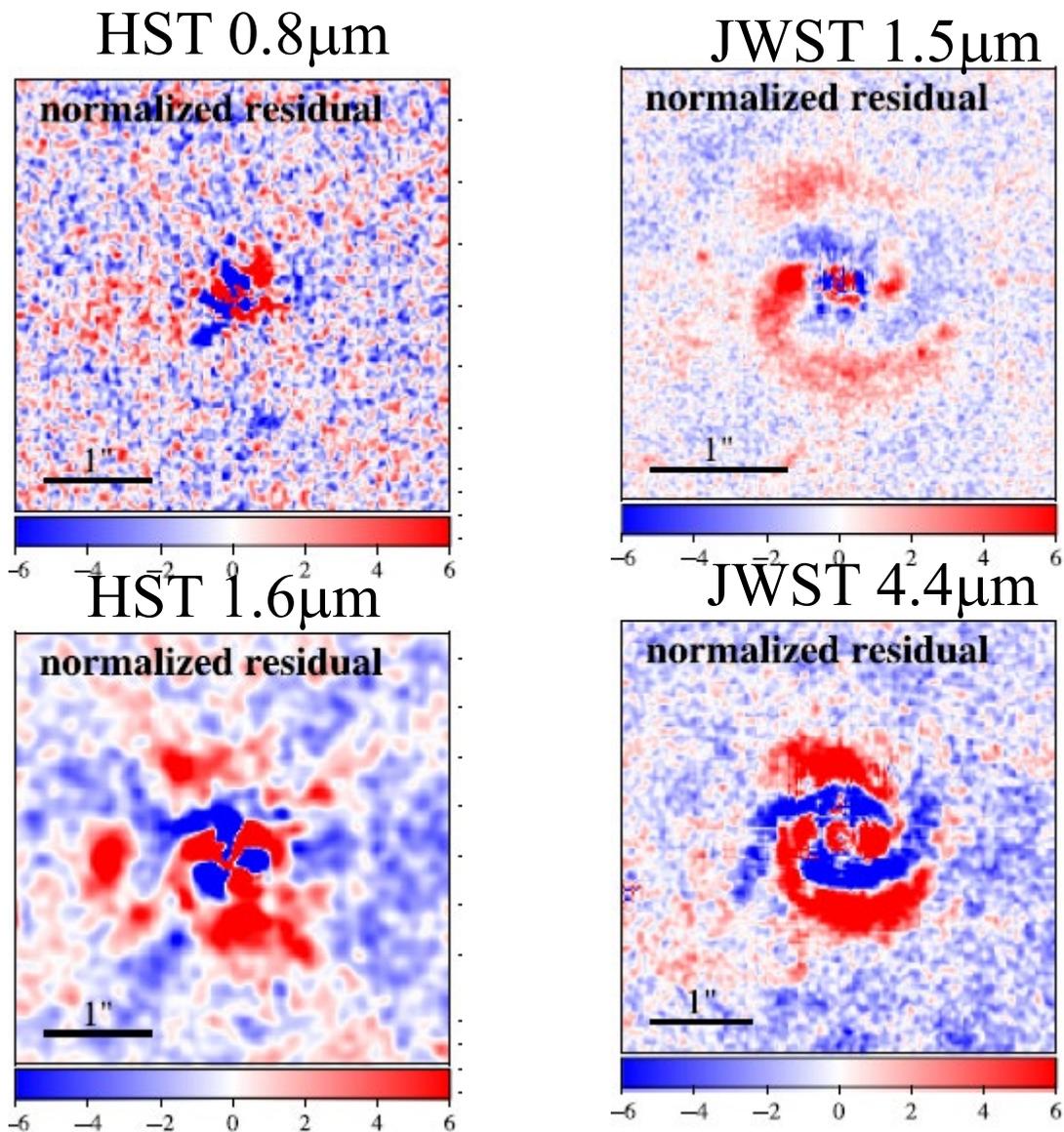
Index de Sersic $n < 2$ pour les 4/5 des objets

PSF du JWST très stable, facile à modéliser

SDSS 1420A, $z=1.65$, spirale + barre de face

Residus HST versus JWST

Les quasars apparaissent comme des galaxies spirales, $\log M_*(M_\odot) = 9.2-11.5$
 Très compacts en SF: défi pour le feedback?



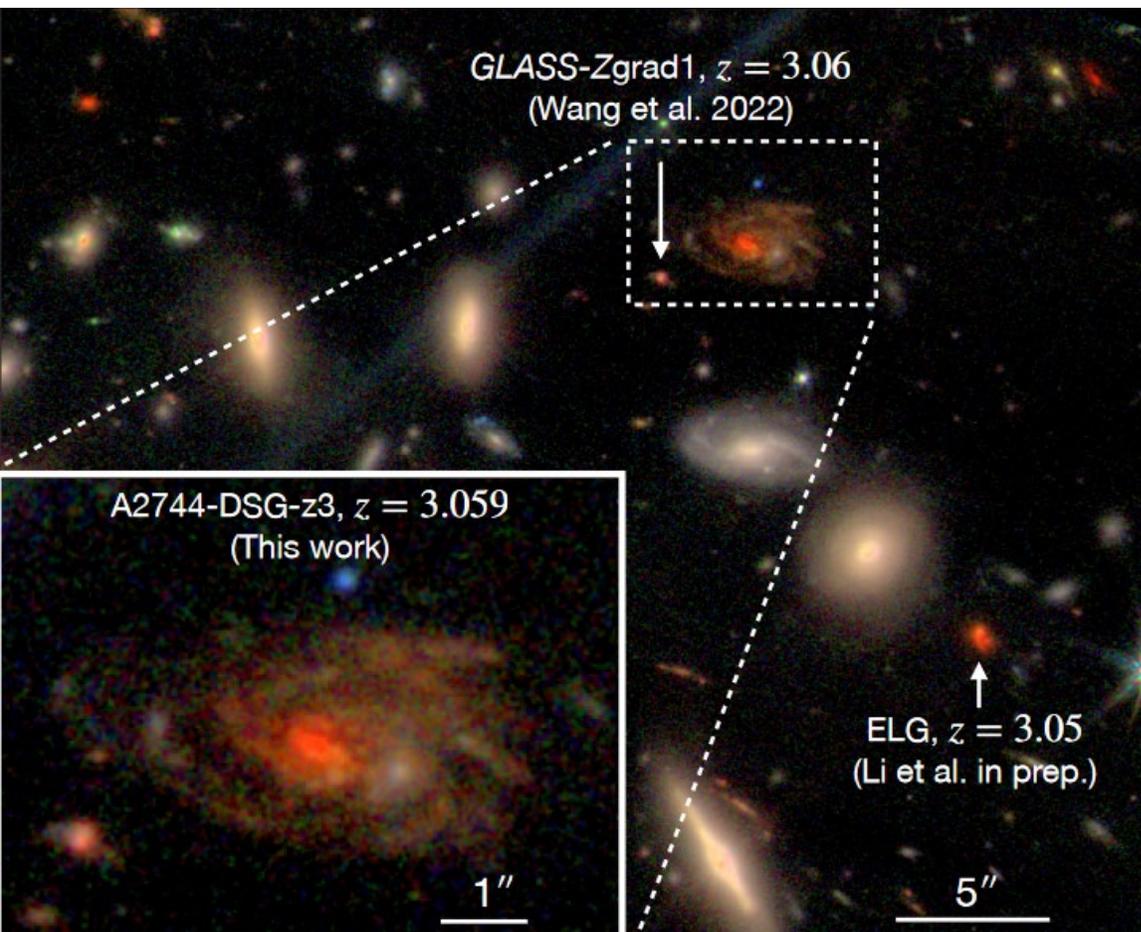
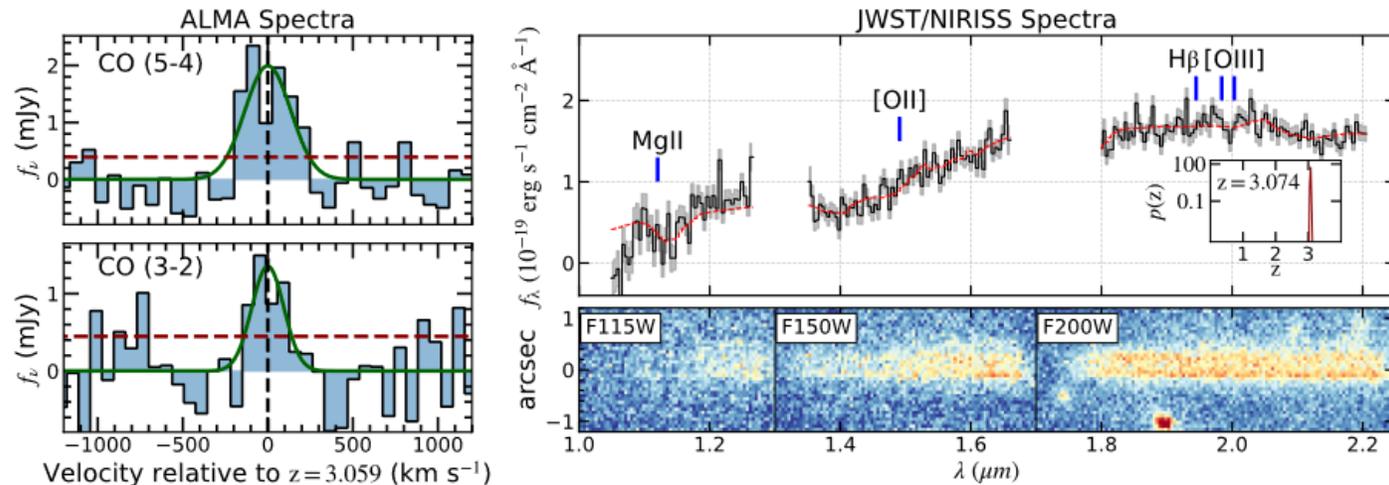
Ding et al 2022

Spirales rouges à $z \sim 3$

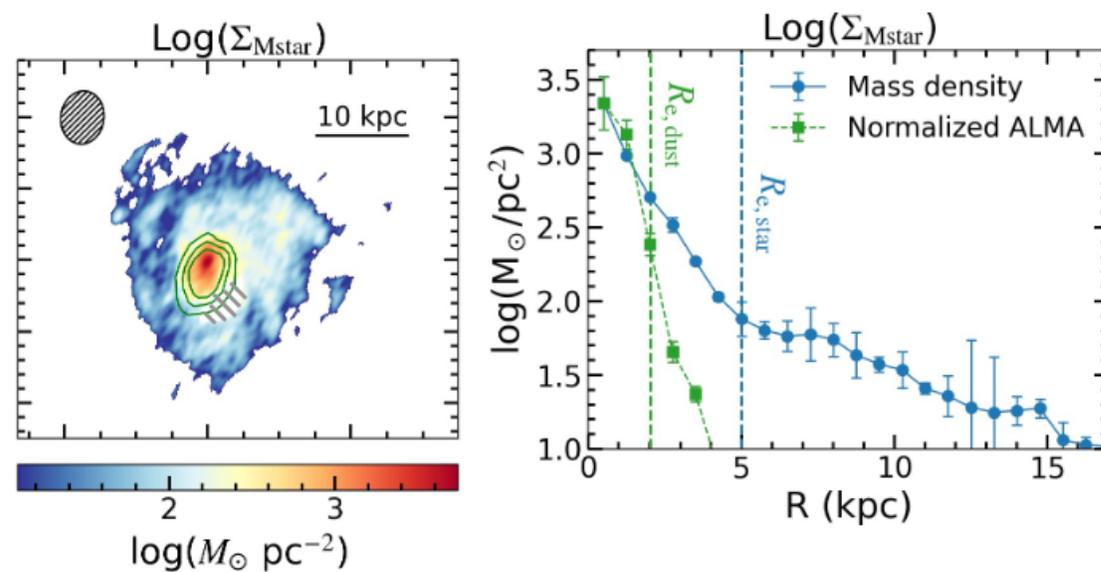
$R_e = 5 \text{ kpc}$

$R_{\text{dust}} = 2.04 \text{ kpc}$

Resolution 0.29 kpc

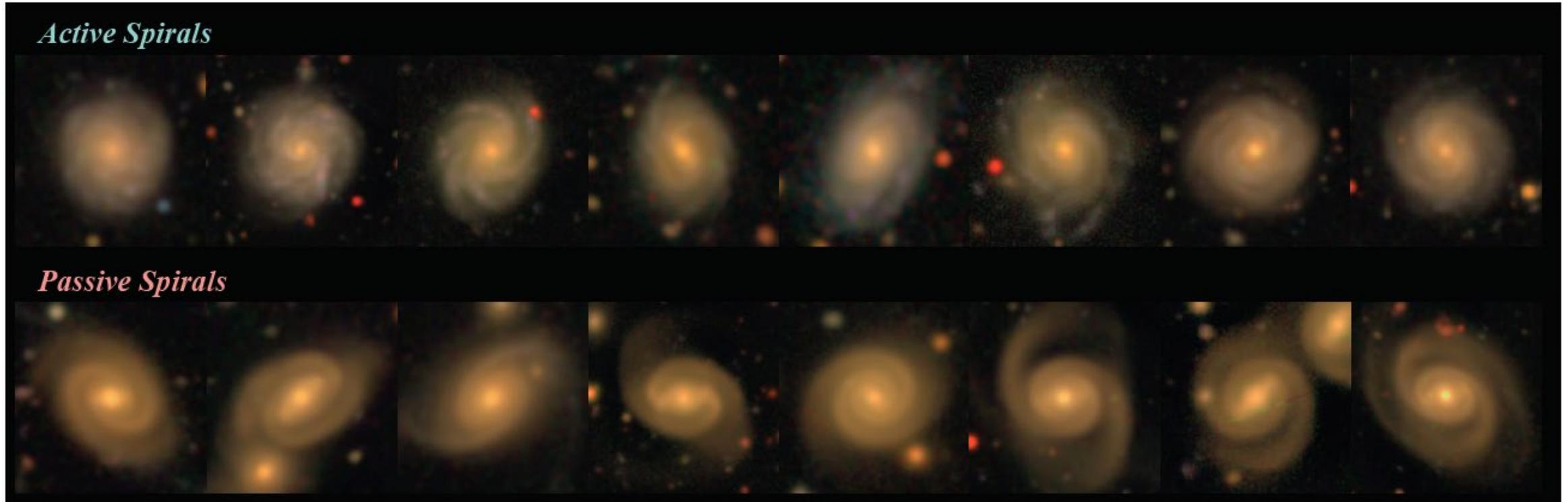


La spirale appartient à un groupe de galaxies



Wu, Cai et al 2022

Spirales passives à $z < 0.3$

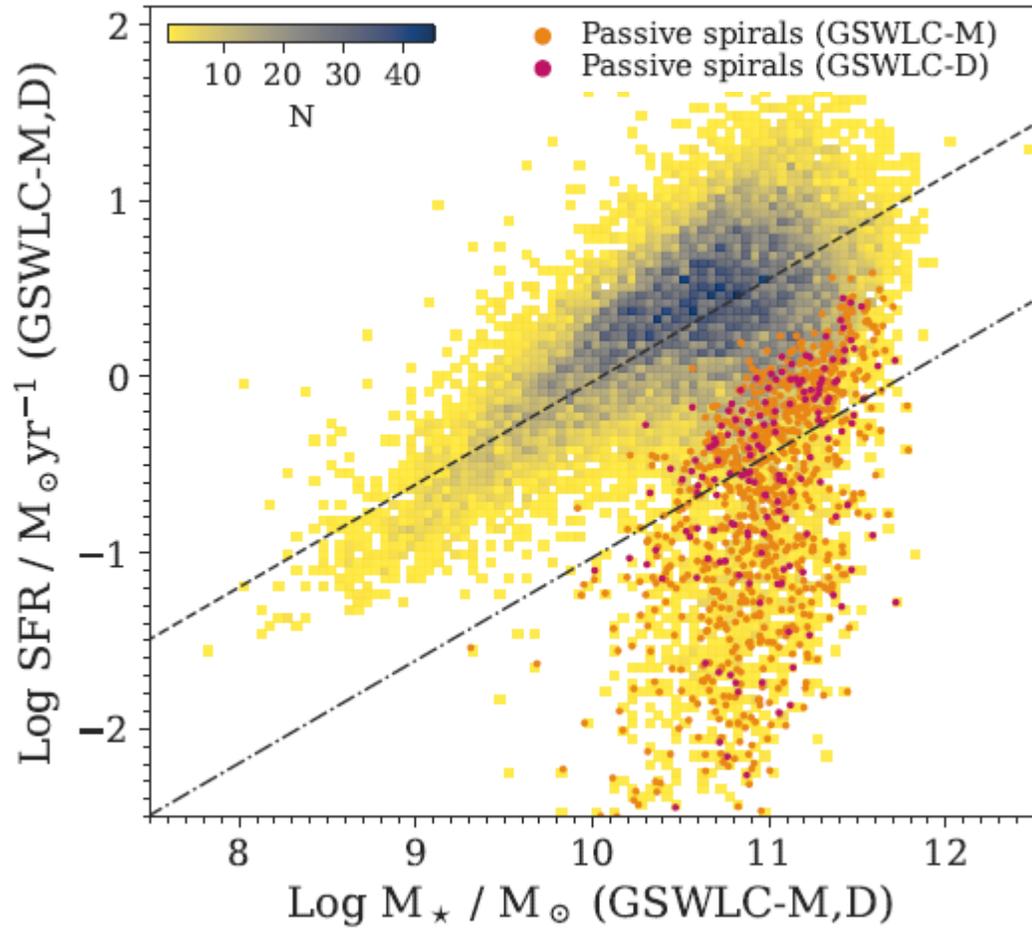


Sur **55 000 galaxies**, 1100 passives et 1141 lenticulaires avec anneau → **4%**

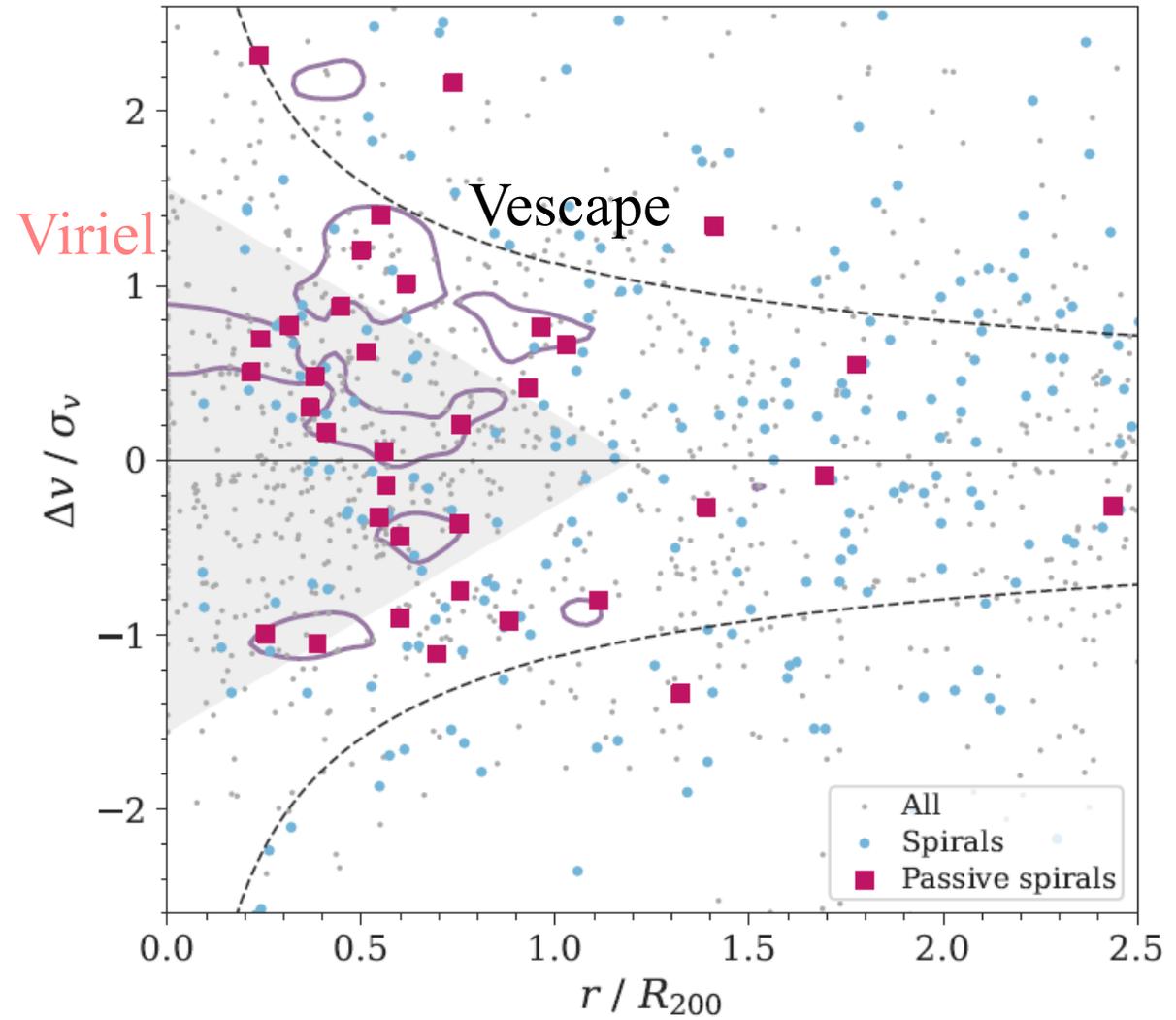
En général, ces galaxies anémiques, ont été dépouillées de leur gaz, et sont en transition vers les ETG (vallée verte?)

Shimakawa et al 2022

Spirales anémiques dans les amas



La position des passives est compatible avec la pression dynamique dans les amas

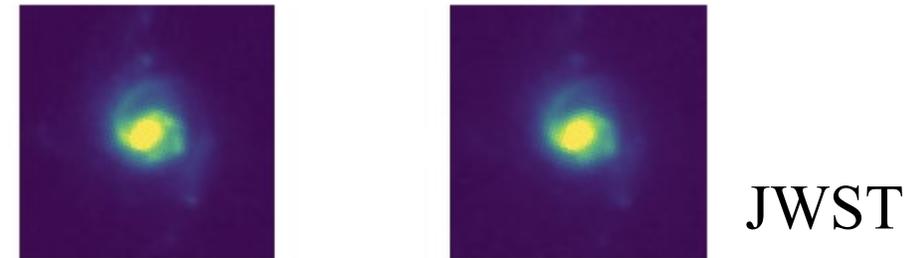
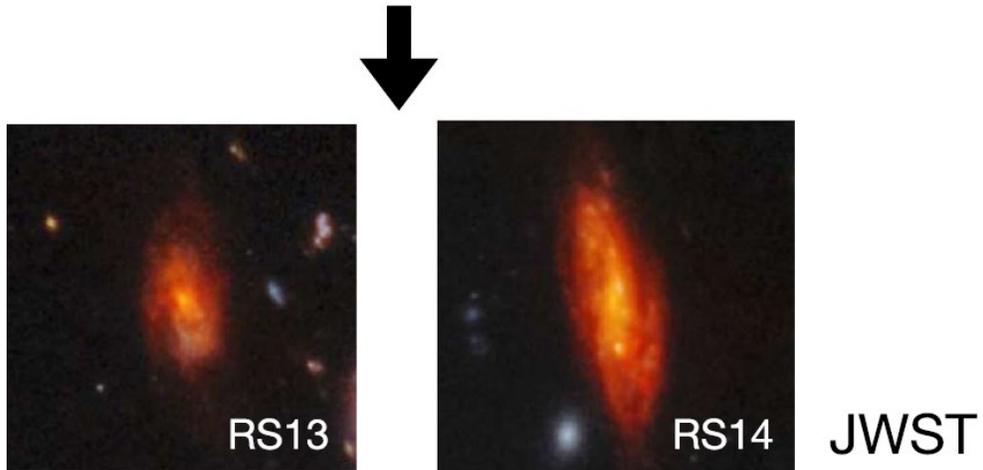
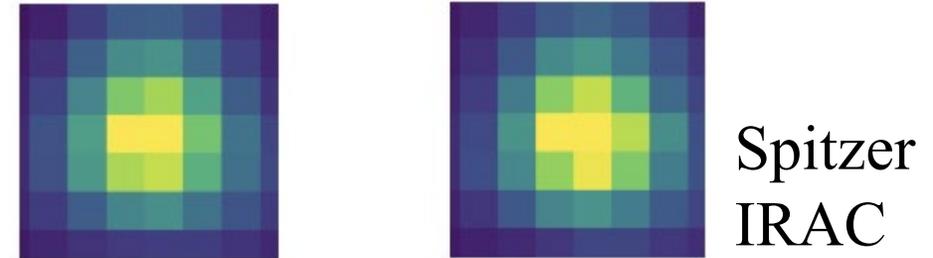
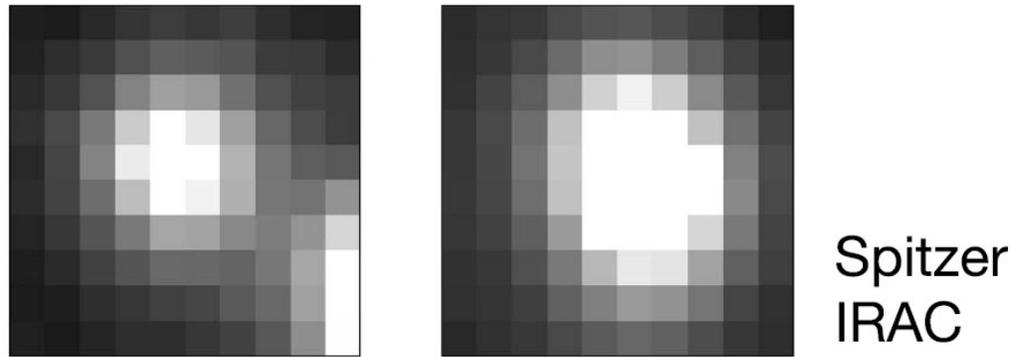


Contours: 40% de passives

Spirales passives à $1 < z < 3$ avec JWST

Vu leur rareté, surprenant d'en découvrir en nombre dans le champ SMACS0723

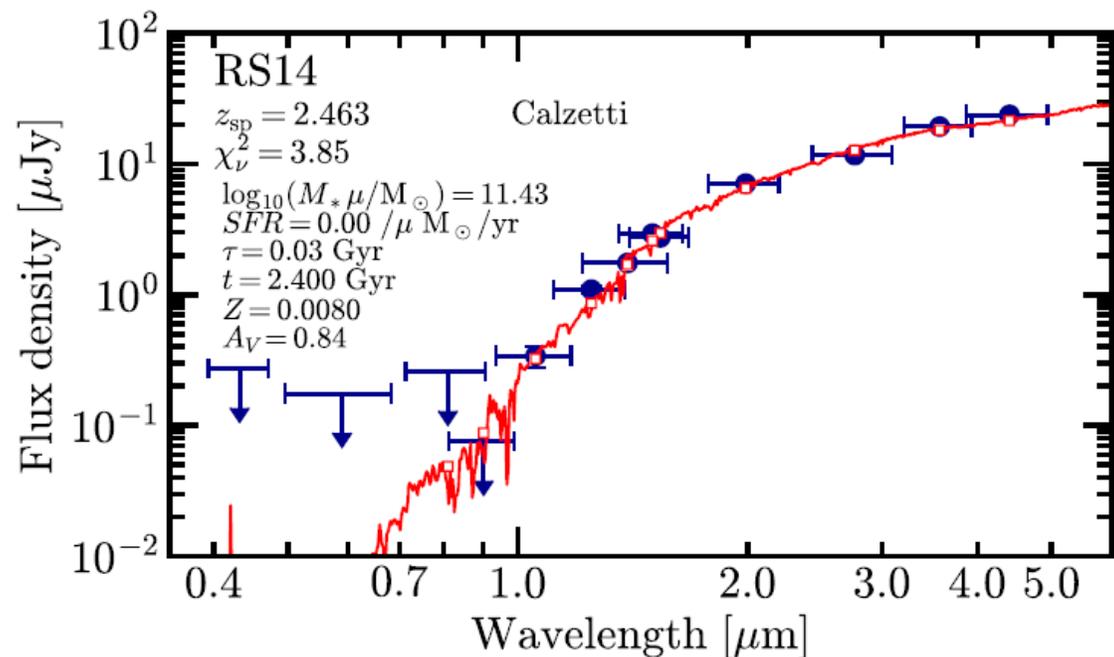
Des objets rouges avaient été vus par IRAC-Spitzer ($3.6\mu\text{m}$), mais pas leur morphologie



Chen et al 2022

Fudamoto et al 2022

Spirales rouges à $1 < z < 3$



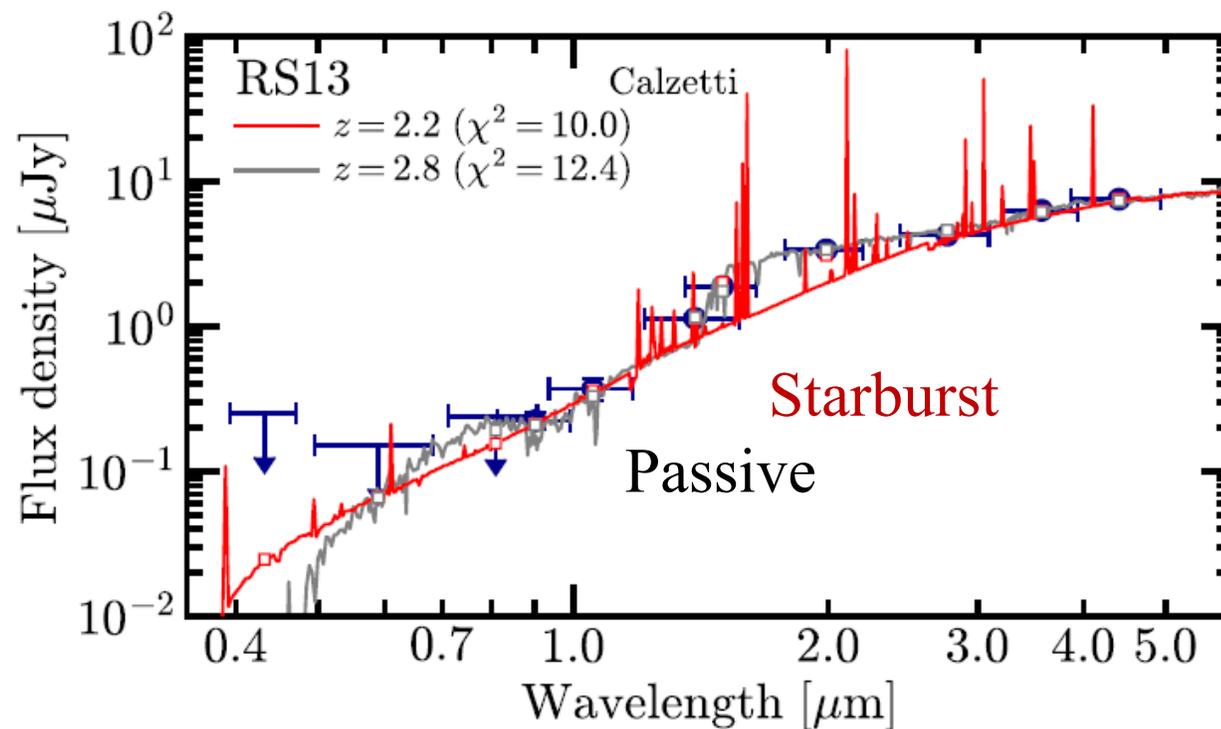
RS14: Spirale passive à $z=2.463$

Spirale passive à $z=2.8$

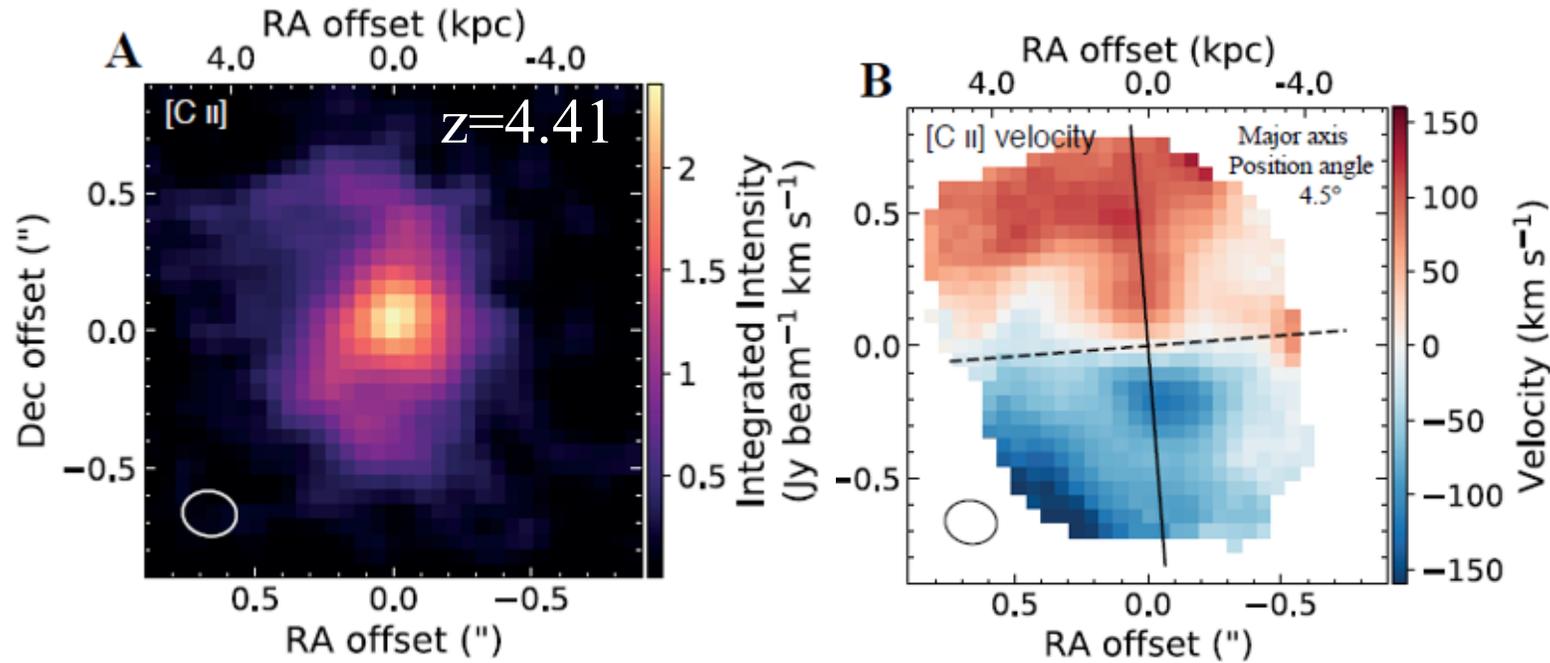
$SFR = 0$, $A_V \sim 1$

Ou bien Starburst à $z=2.2$ poussiéreux

$SFR = 450 M_{\odot} / \text{yr}$ $A_V = 3.1$



Avant JWST, avec ALMA

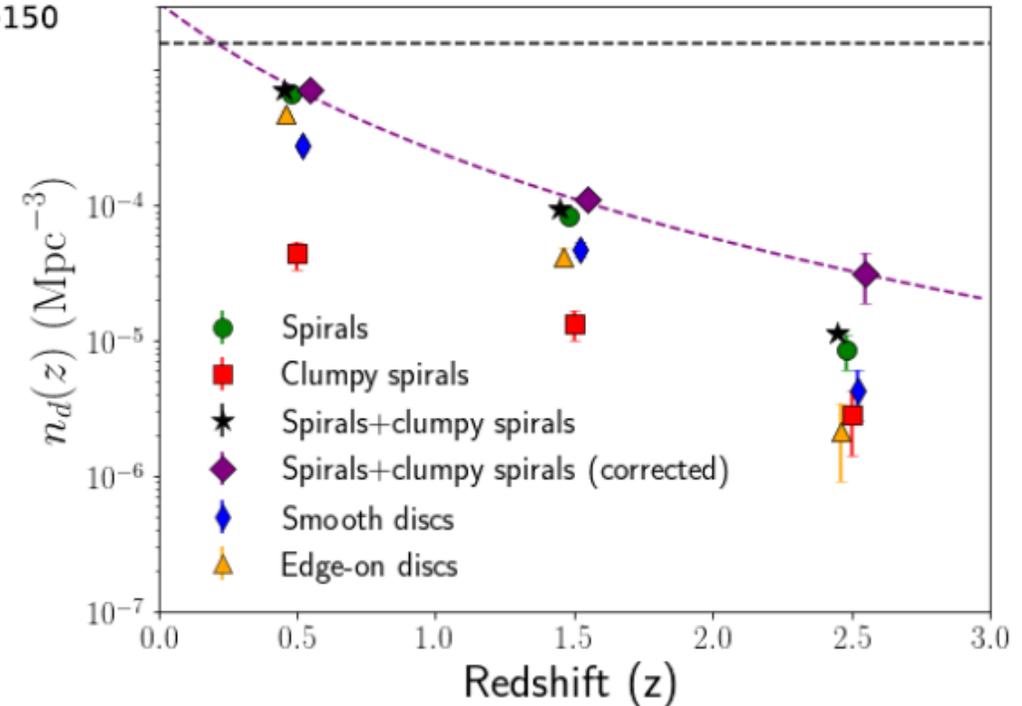


Quasar BRI 1335-0417, $z=4.41$,
1.4 Gyr après le Big-Bang

Tsukui & Iguchi 2021

Avant JWST, avec HST

Pour $M_* > 10^{10} M_\odot$, $f(\text{spirales})$ décroît comme $(1+z)^{-1.1}$
Facteur 10 entre $z=2.5$ et 0.5



Margalef-Bentabol et al 2022

Formation des spirales et barres

Instabilité gravitationnelle, en un temps dynamique

t_{dyn} plus court à grand redshift, galaxies plus concentrées

Densité de l'Univers $(1+z)^3 \rightarrow$ facteur 9000 ($z \sim 20$), $t_{\text{dyn}} \sim \rho^{-1/2}$,

facteur 100

Mais galaxies naines, $> 90\%$ de gaz, instables, disques plus épais

Uniquement les disques minces, auto-gravitants, peuvent former des spirales et des barres

Critère de Toomre $Q = \sigma / \sigma_{\text{crit}} < 2$ $\sigma_{\text{crit}} = 3.36 G \Sigma / \kappa$

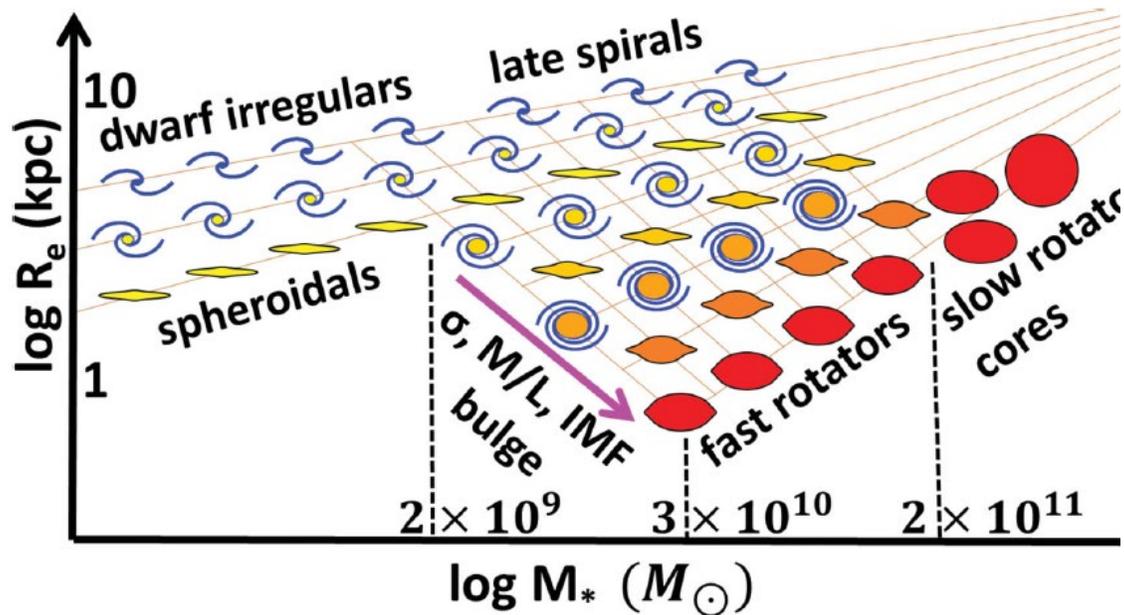
Et aussi la longueur d'onde critique, i.e. l'échelle où la self-gravité prend le dessus

$\lambda_{\text{crit}} = 4\pi^2 G \Sigma / \kappa$ Spirales (λ) développent lorsque $\lambda / \lambda_{\text{crit}} \sim 1-2$

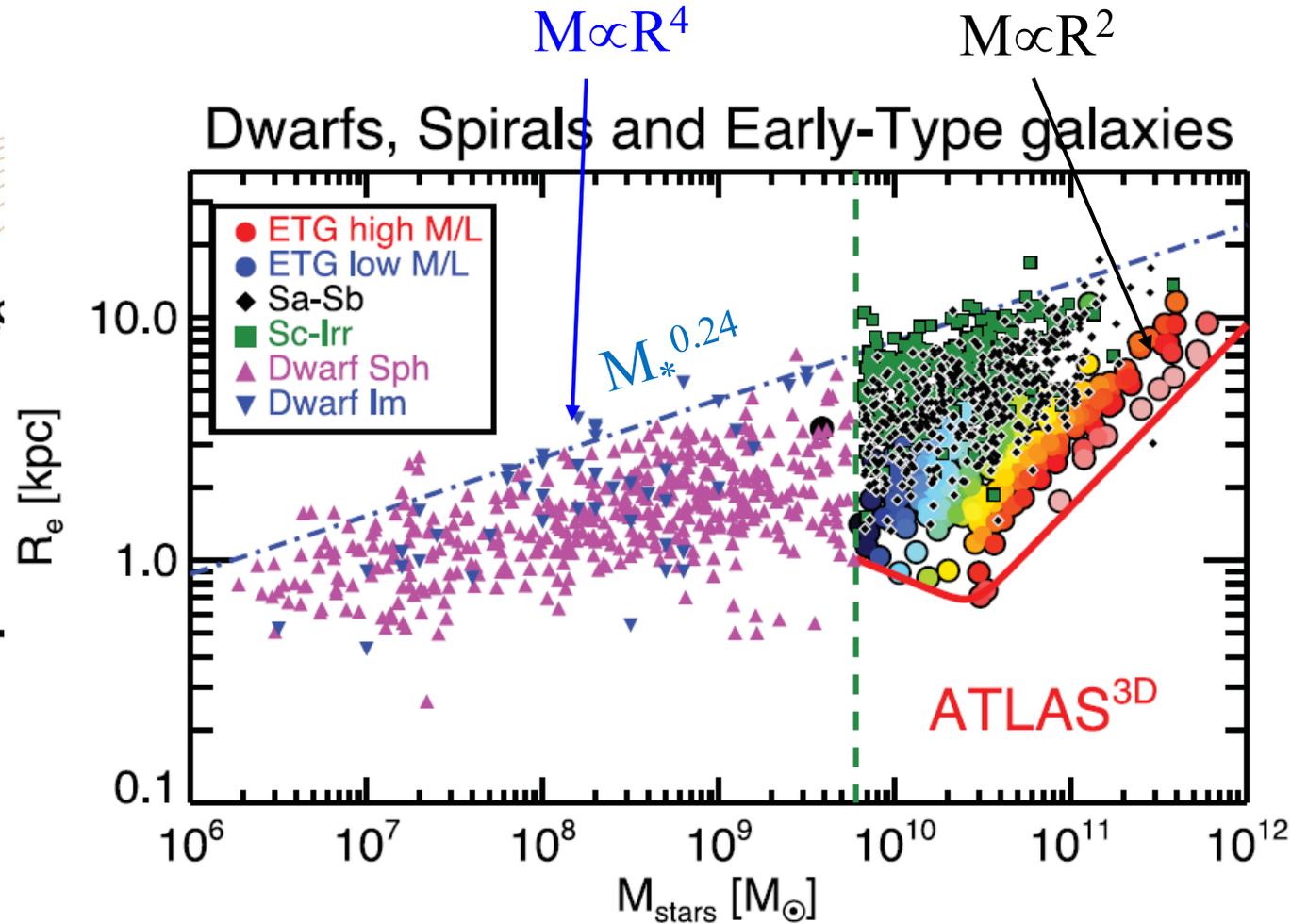


Masse minimum pour une structure-disque

En dessous de $2-3 \times 10^9 M_{\odot}$, galaxies Irr ou dSph

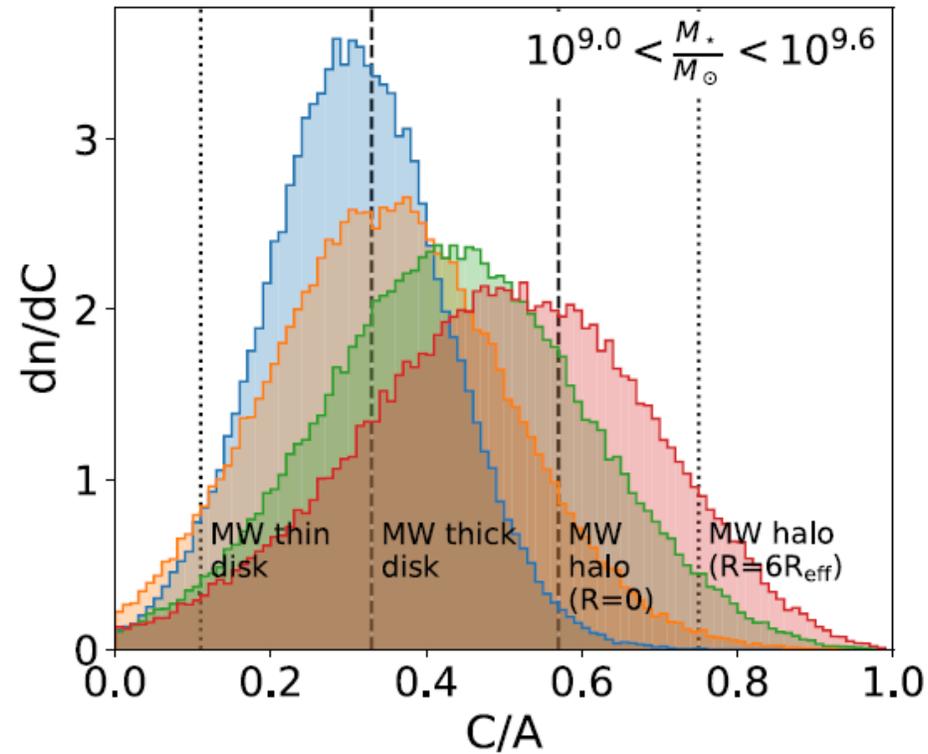
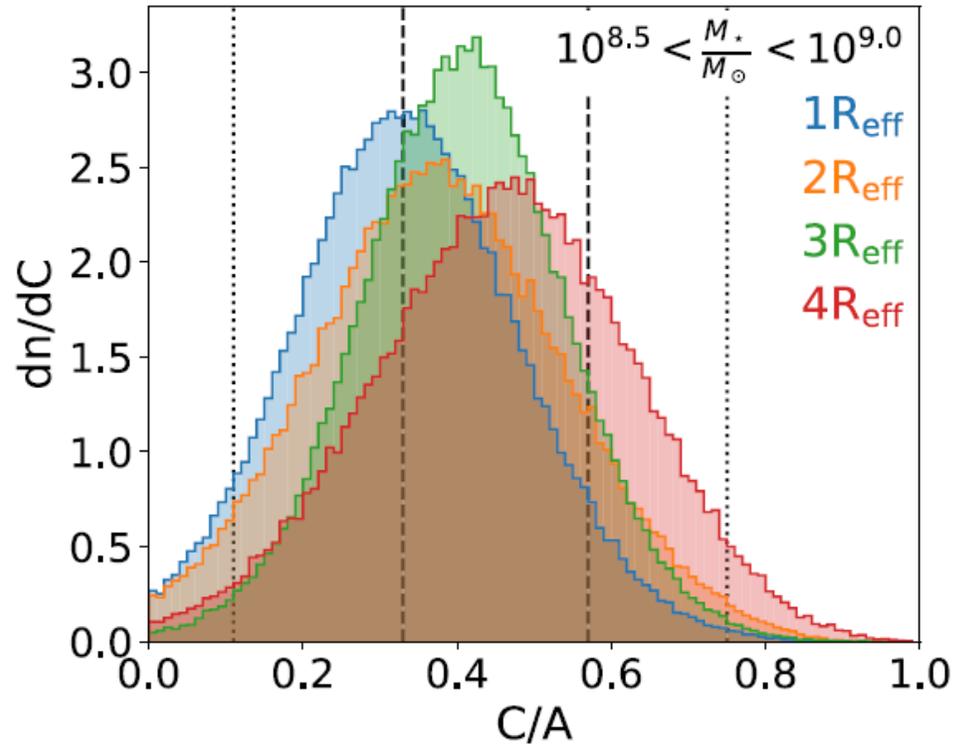


dIrr à disque: plus épais que les spirales



Forme à 3D des naines ($z \sim 0$)

Au-dessous d'une certaine masse ($10^{9.6} M_{\odot}$), disque épais, tendant vers un sphéroïde aux bords
Pour $M < 10^{8.5} M_{\odot}$, les objets deviennent de plus en plus ronds



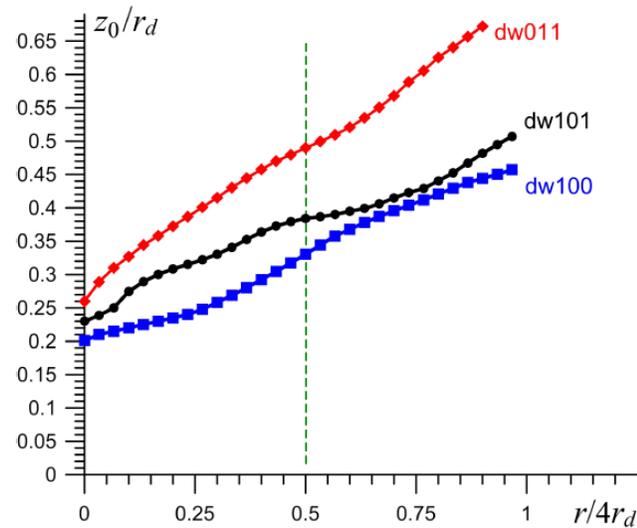
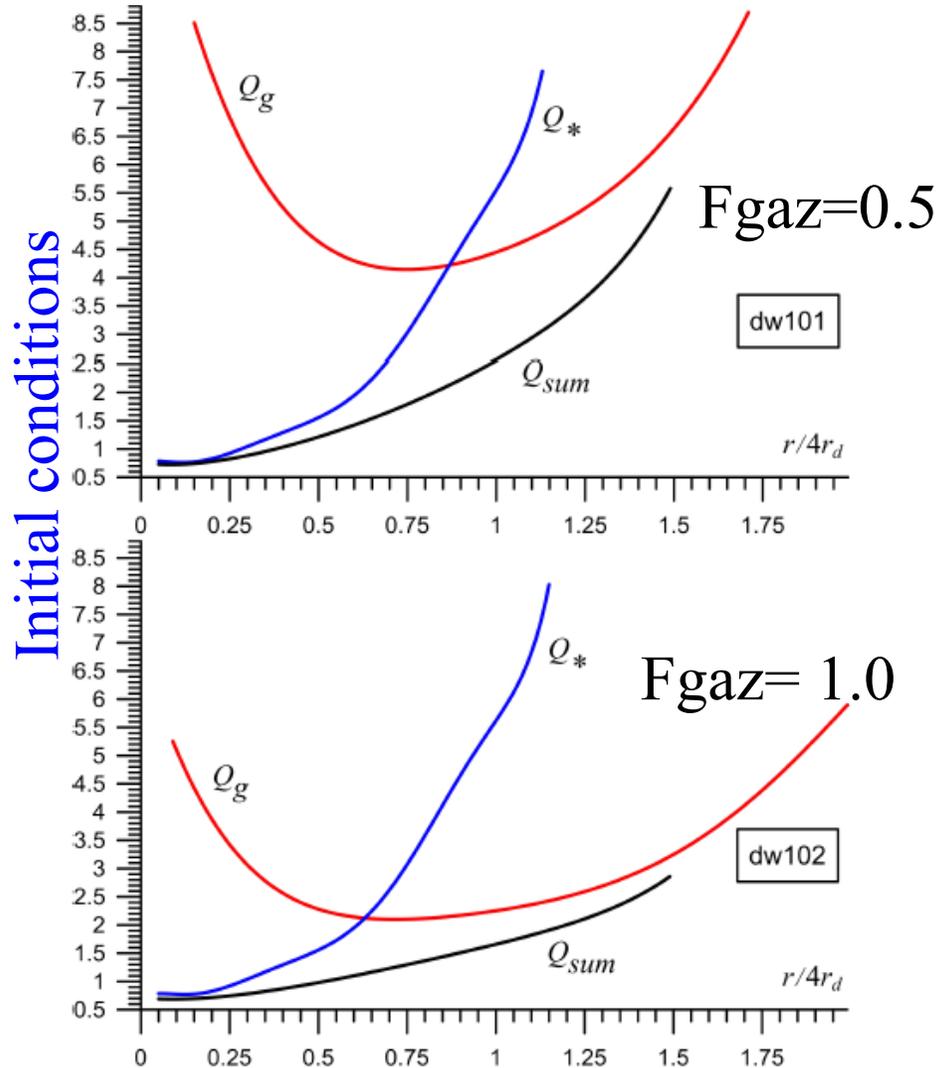
Le feedback des SNe épaisit les disques

Le balayage du gaz empêche le disque de redevenir fin

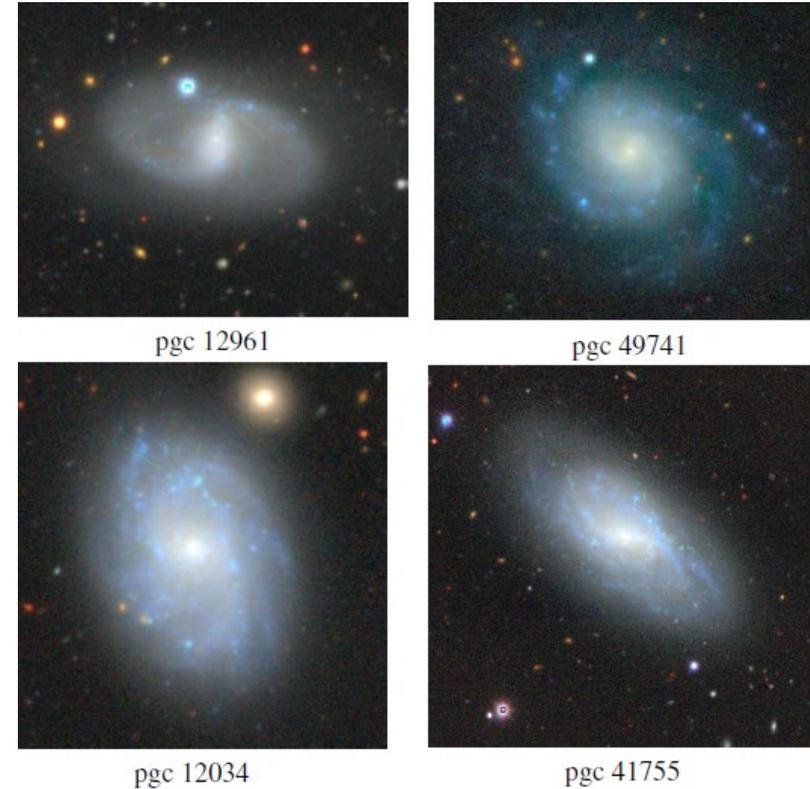
Autre cause: les naines réionisées par le fond UV à l'aube cosmique

Formation de bras spiraux dans les naines ($z=0$)

Seules les naines les plus massives $50 < V < 100\text{km/s}$ sont des dS, les autres des dIm, dSph



Exemples de dS



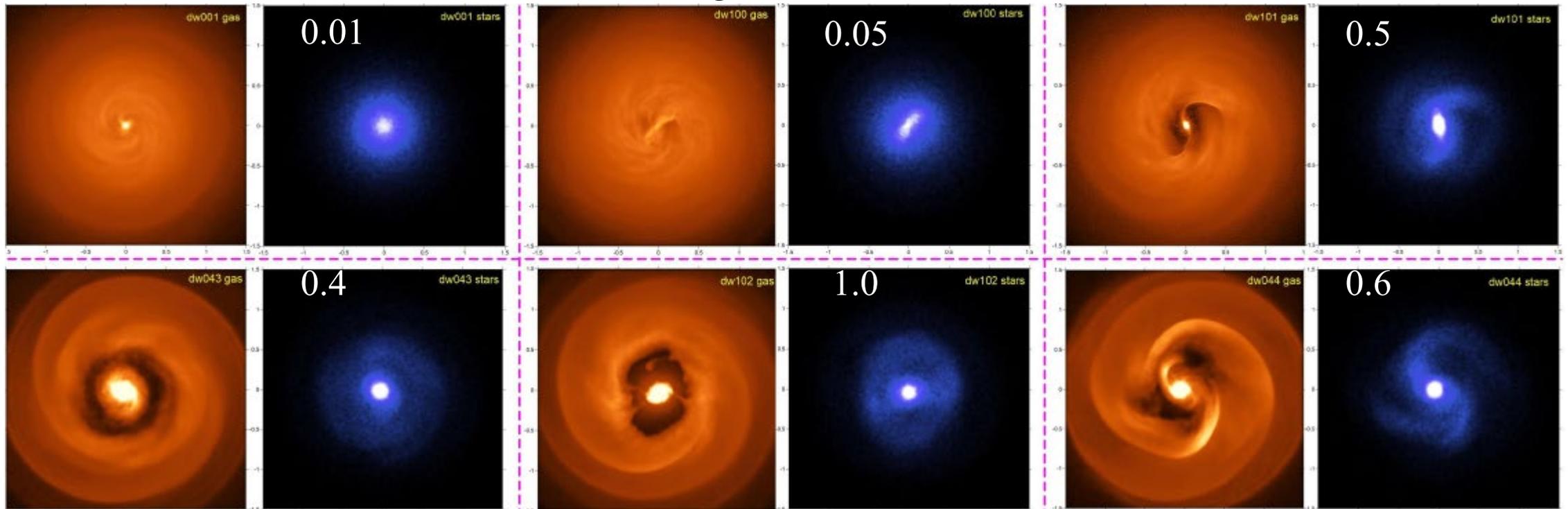
Naines à structure spirale

Zasov et al 2021

Simulation de structure spirale dans les naines

Instabilité gravitationnelle, formation de spirales et barres,
en fonction de la **fraction de gaz, de son épaisseur, et de la masse du halo**

Fraction de gaz →



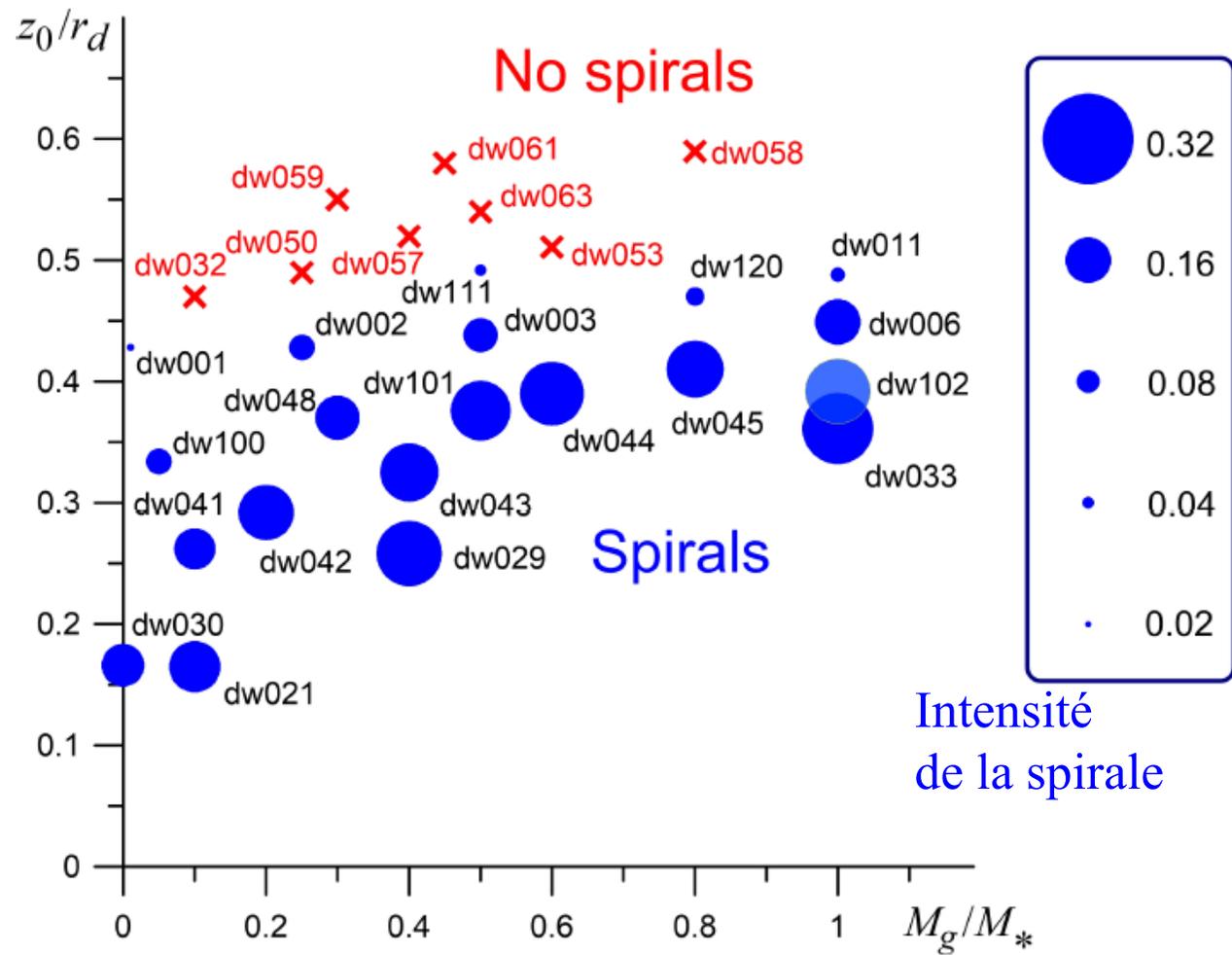
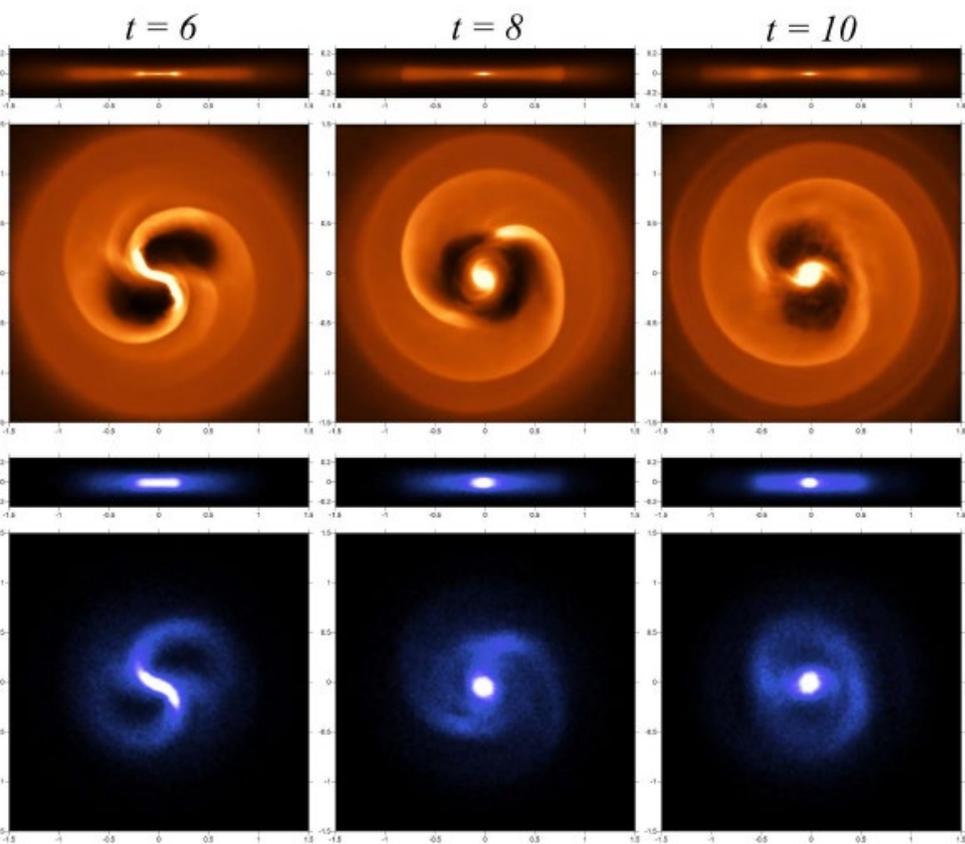
Simulation de bras spiraux

Selon l'épaisseur z_0/r_d , ou f_{gaz}

N-body + SPH code, 4×10^6 particules

Incluant matière noire

dw102, $f_{\text{gaz}}=1.0$

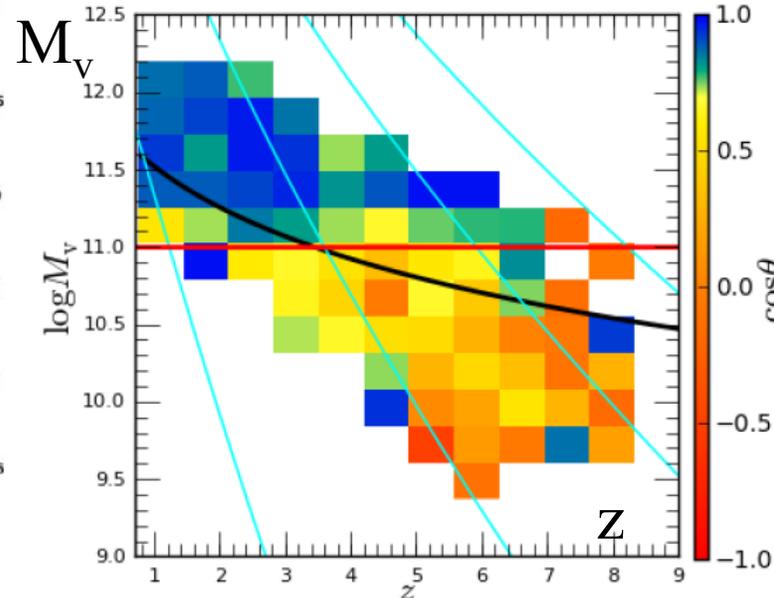
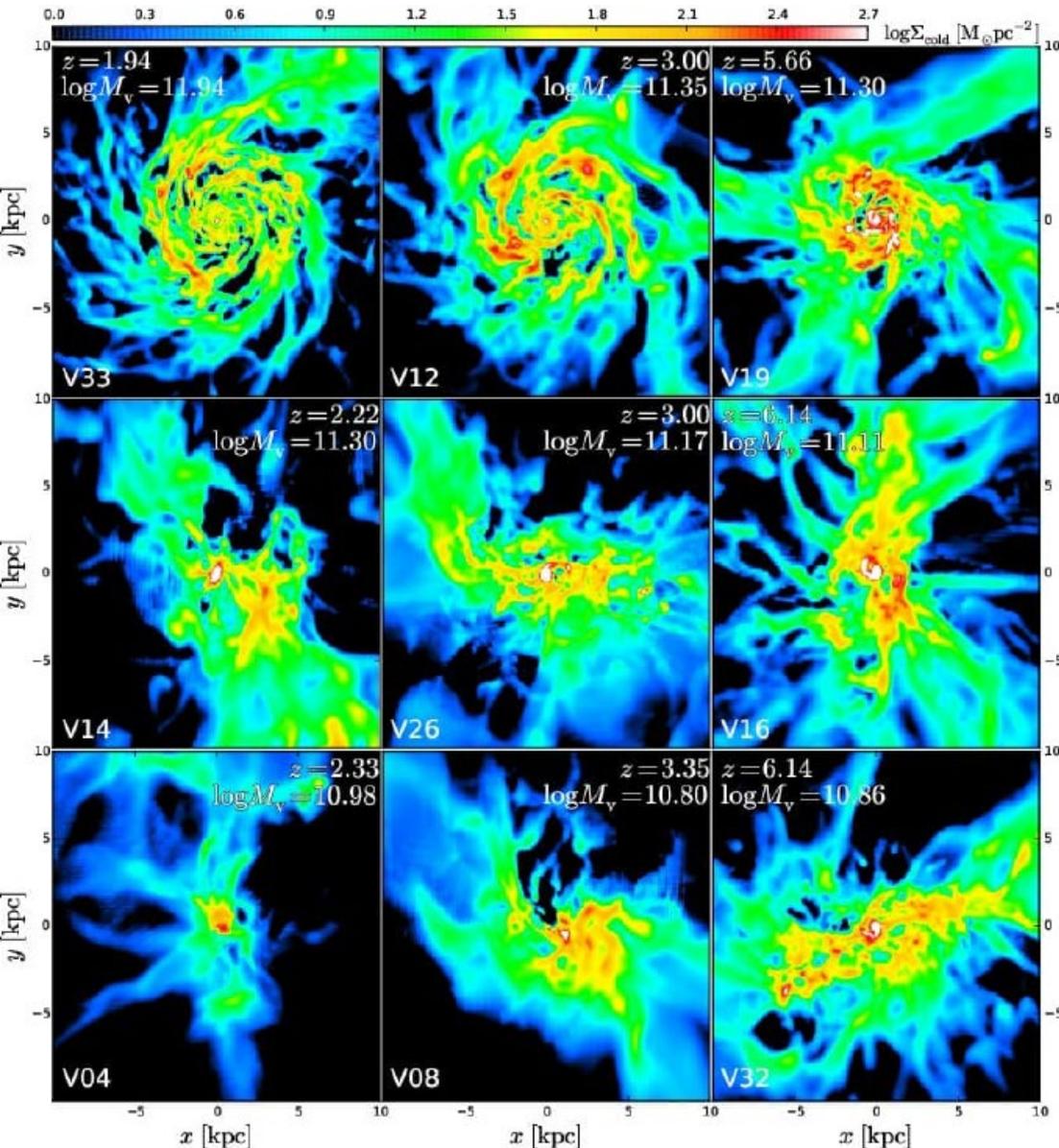


Masse minimum pour les disques

Les disques ne survivent que pour des $M_{\text{halo}} = 2 \cdot 10^{11} M_{\odot}$, ou $M_{*} = 10^9 M_{\odot}$

Pour des masses plus petites, le spin du disque change complètement, à cause de l'accrétion de matière des filaments cosmiques

Au-dessus de cette masse, le disque se compactifie et **résiste mieux, à la fois au feedback, et aux accrétions externes**



Couleur = Δ angle du Moment angulaire

Pour $M < 10^{11} M_{\odot}$, $\theta > 90^{\circ}$, mais au-dessus \rightarrow disque stable

Dekel et al 2020

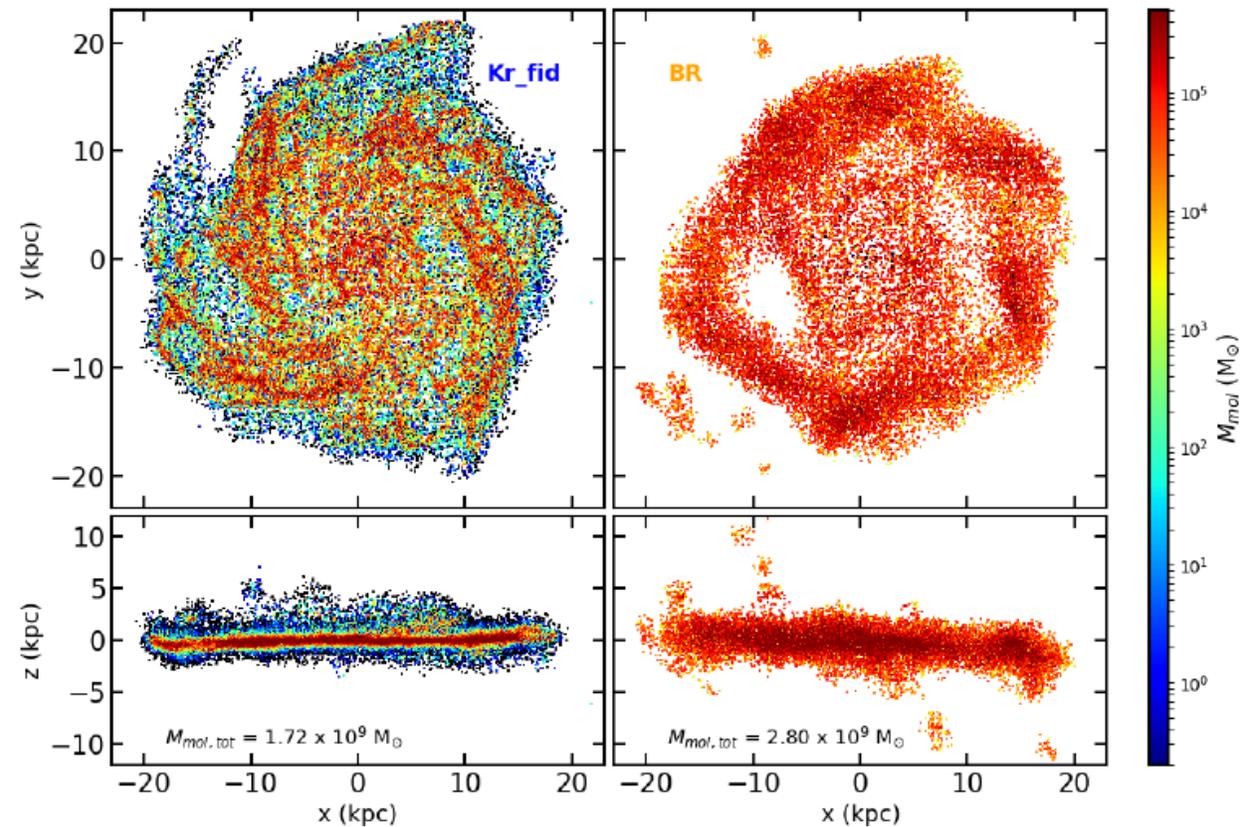
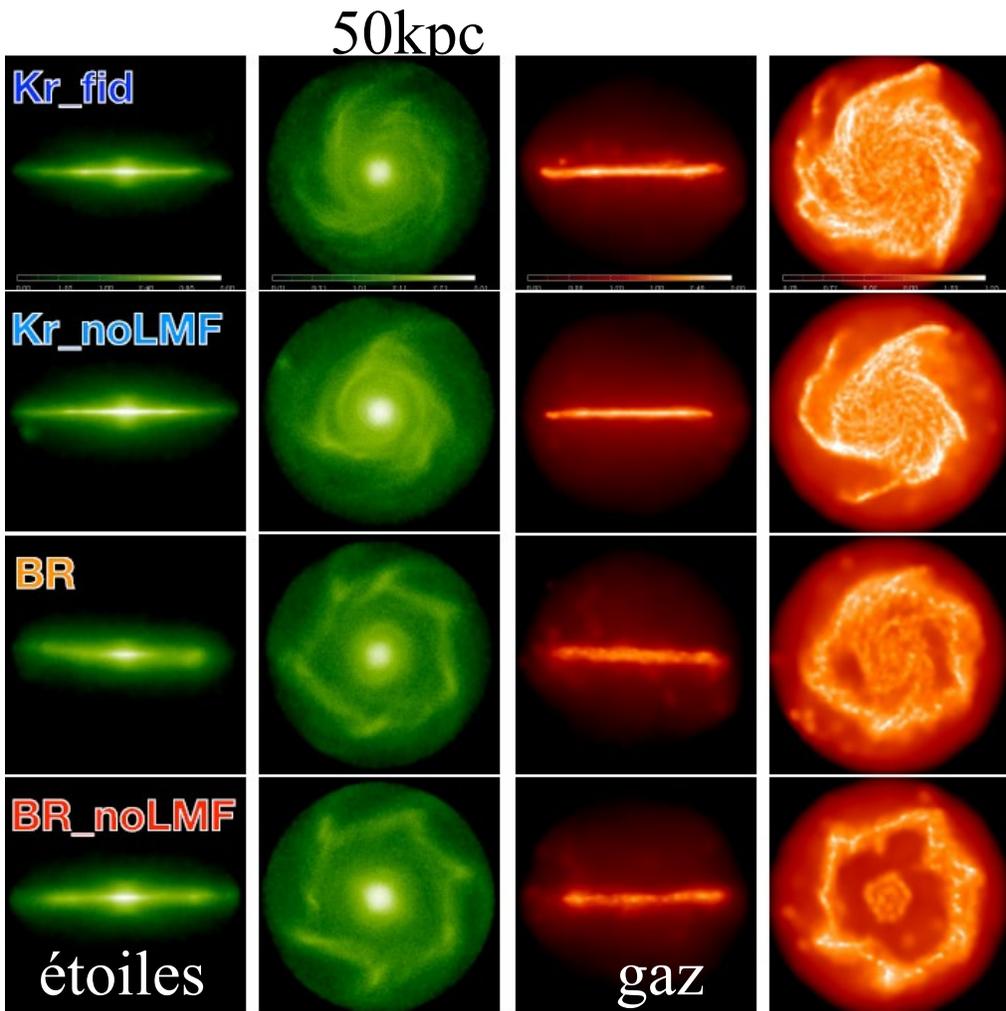
Simulation des galaxies primordiales

Particules multi-phase (froide, chaude) dès que $T < 10^4 \text{K}$,

Formation de H_2 , où se forment les étoiles, **LMF**: Low Metallicity Feedback

Recettes **KMT09**, **BR06** → H_2 crucial pour la structure

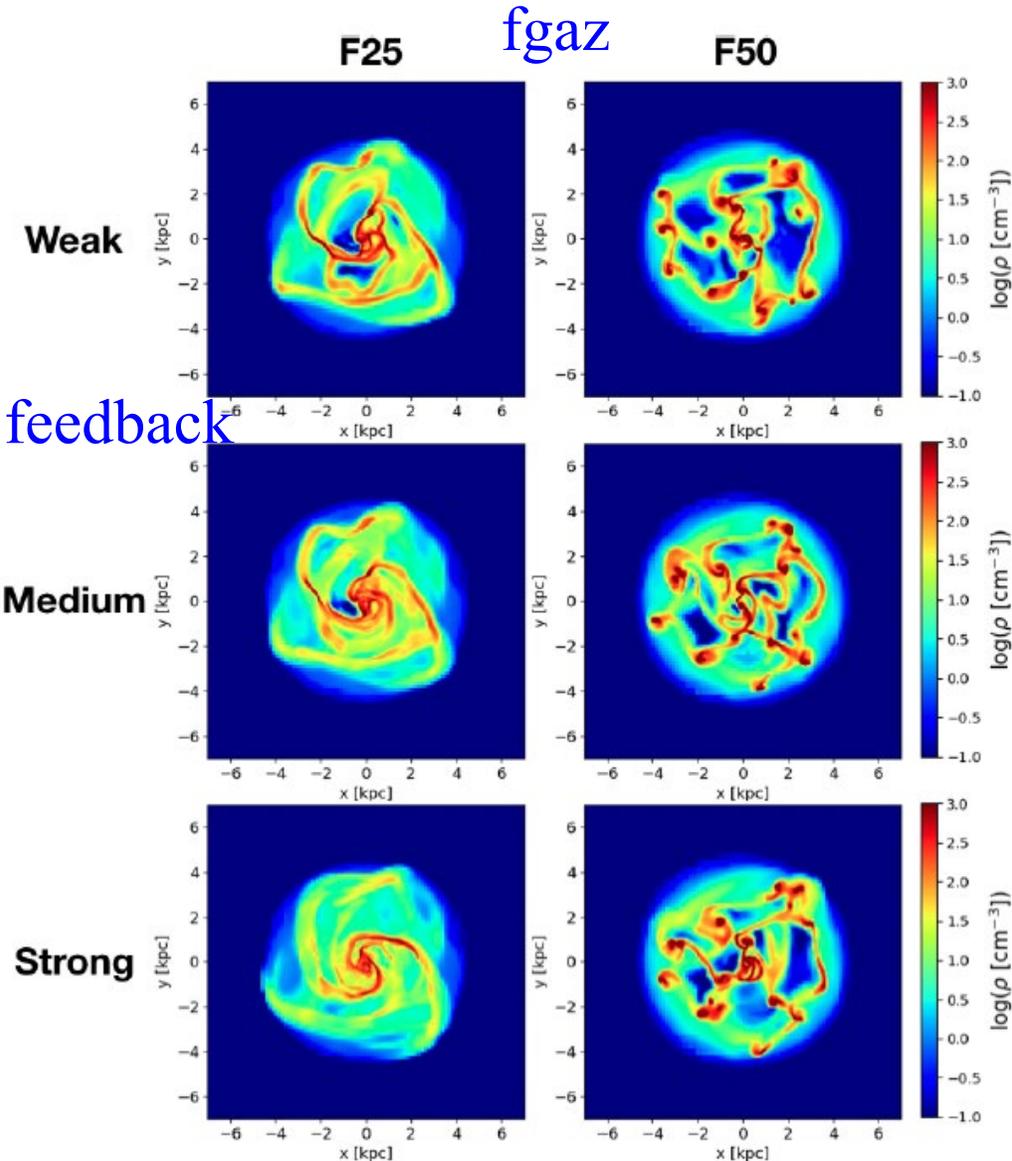
Même à $z=0$, pas de barre: trop de matière noire?



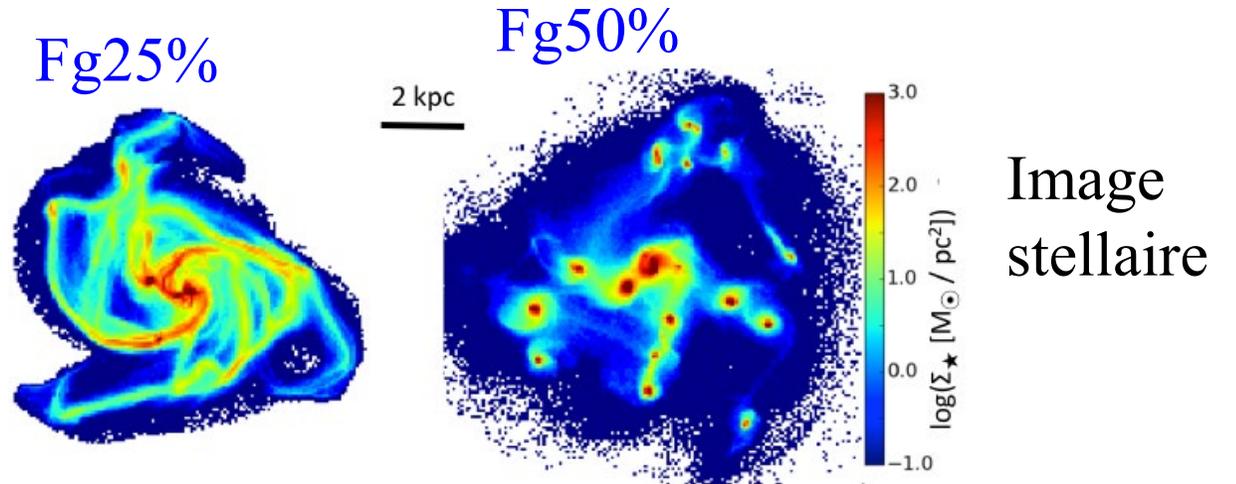
Valentini et al 2023

Simulation des galaxies « clumpy »

La durée de vie des clumps, et leur importance dépend beaucoup de la fraction de gaz



150Myr

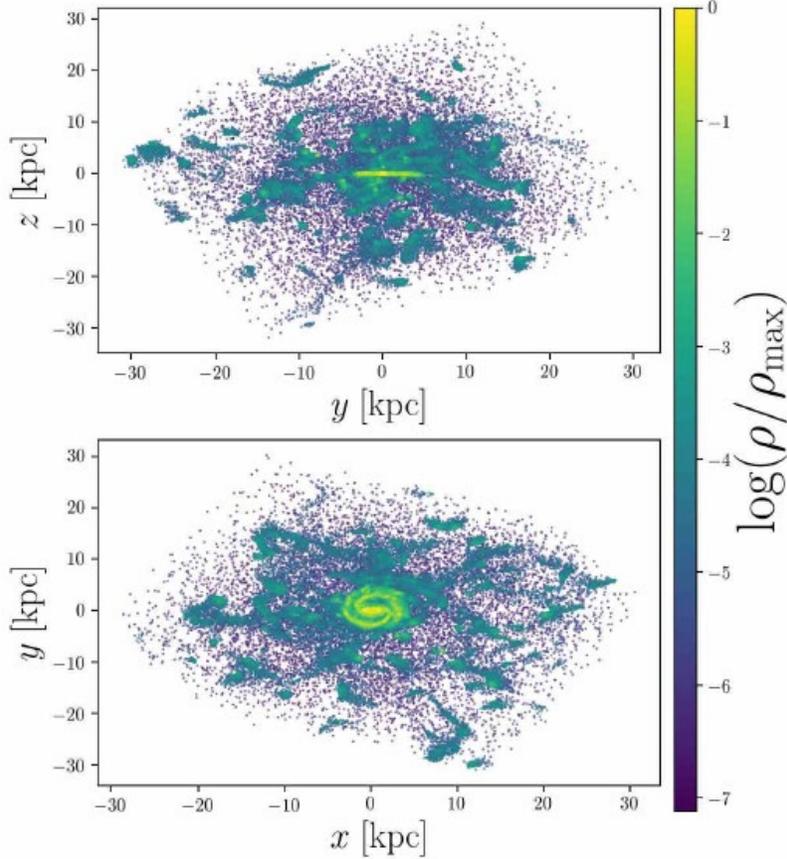


Avec fg ~25%, clumps moins virialisés, détruits facilement avec le cisaillement en moins de 100Myr

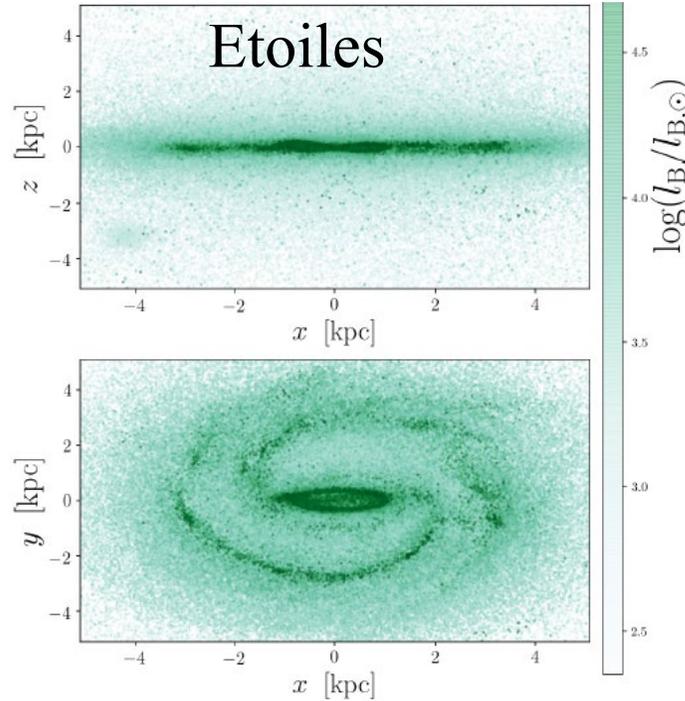
Simulations cosmologiques: fg < ~ 25%

Simulation de galaxies barrées

Gaz $z=2$

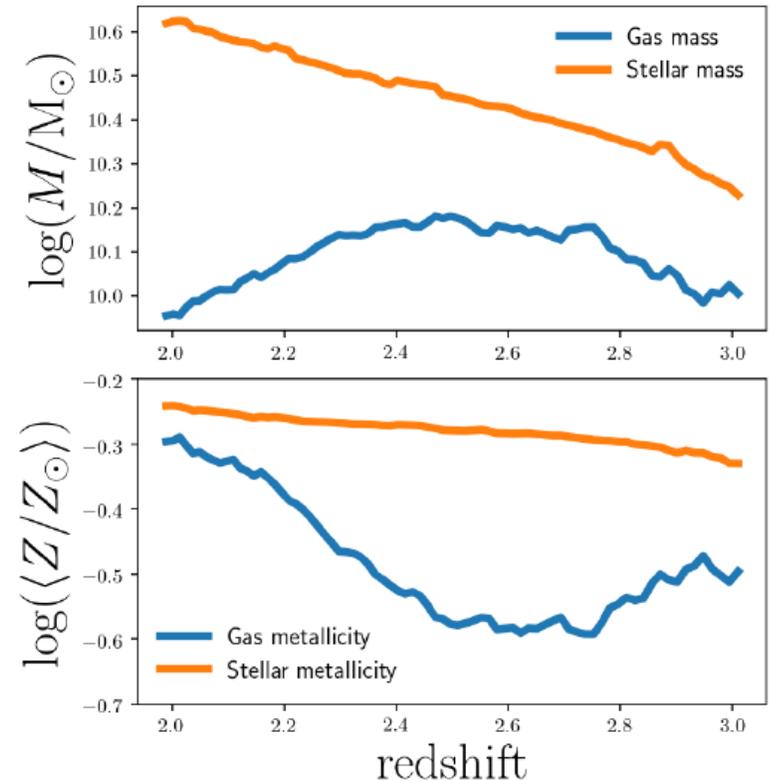


Etoiles

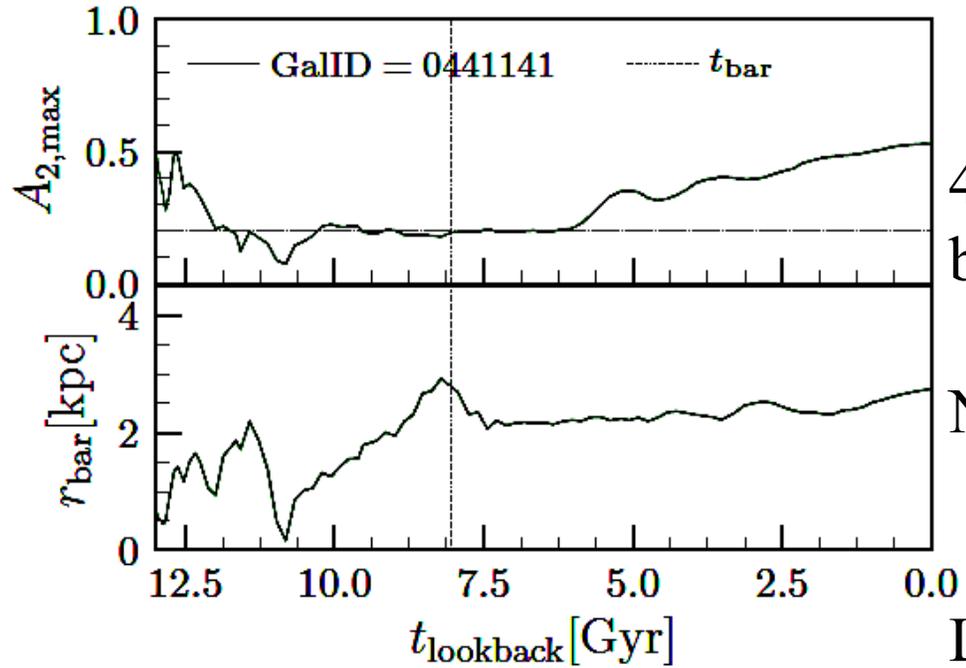


Corotation à 13kpc
Très semblable à $z=0$

Galaxie spirale barrée suivie de $z=3$ à $z=2$, avec disque mince **plus métallique, plus jeune**
Onde de densité avec $\Omega_p = \text{cste}$
Augmente avec le temps ($M_* \nearrow$)



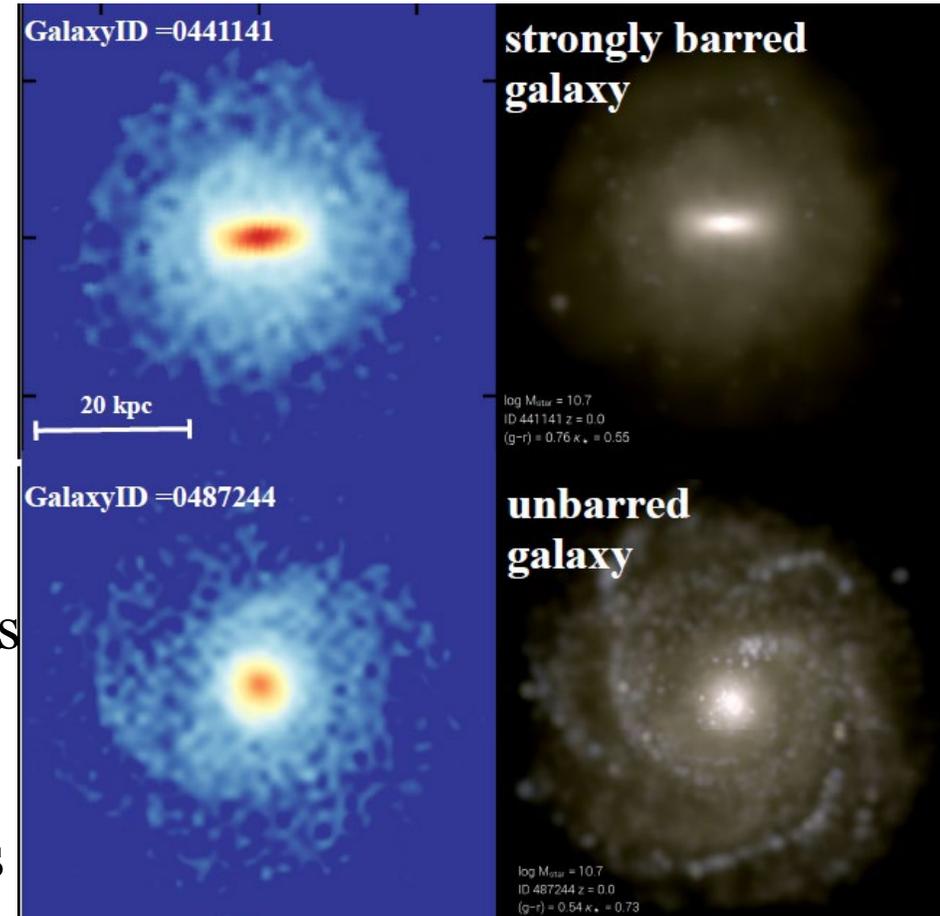
Galaxies barrées dans TNG100



40% de galaxies barrées à $z=0$

Ne forment plus d'étoiles

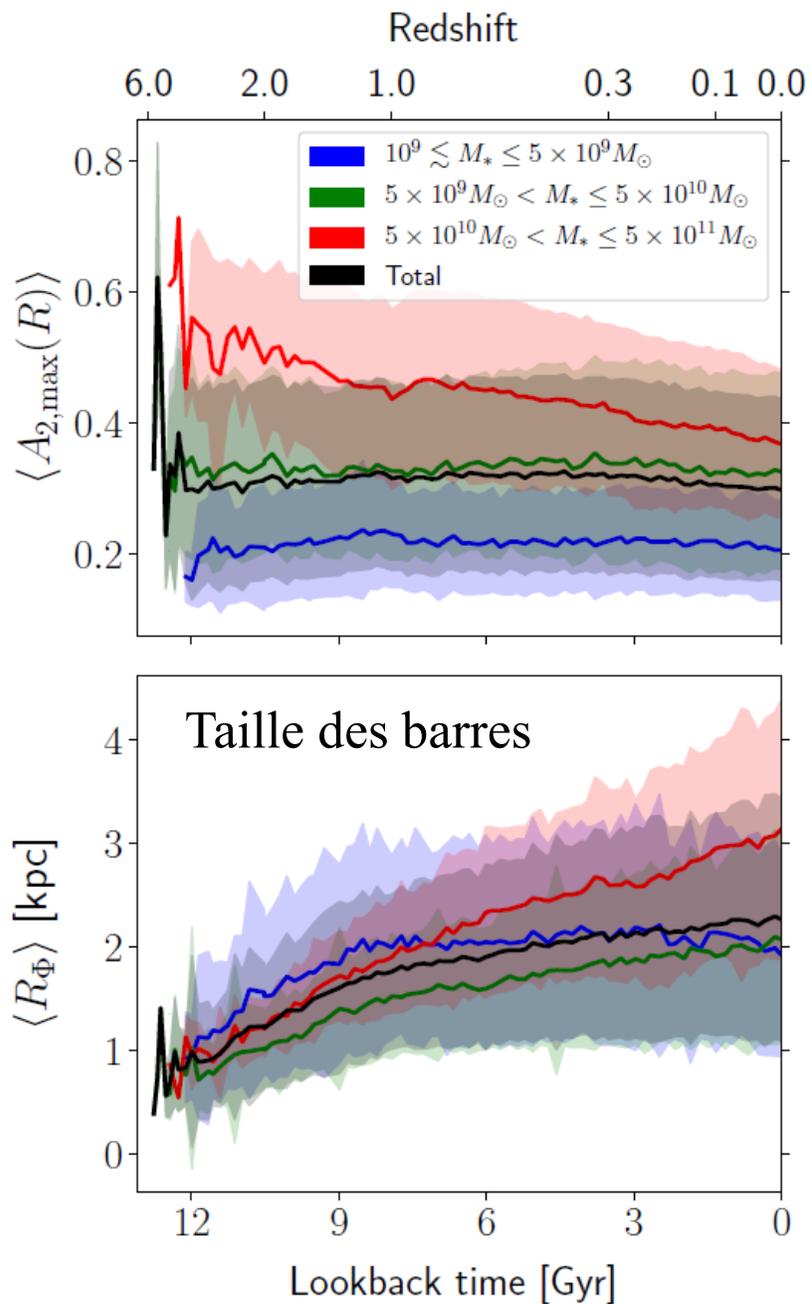
Les galaxies non-barrées continuent leur formation stellaire



→ Les galaxies barrées assemblent leur masse plus vite

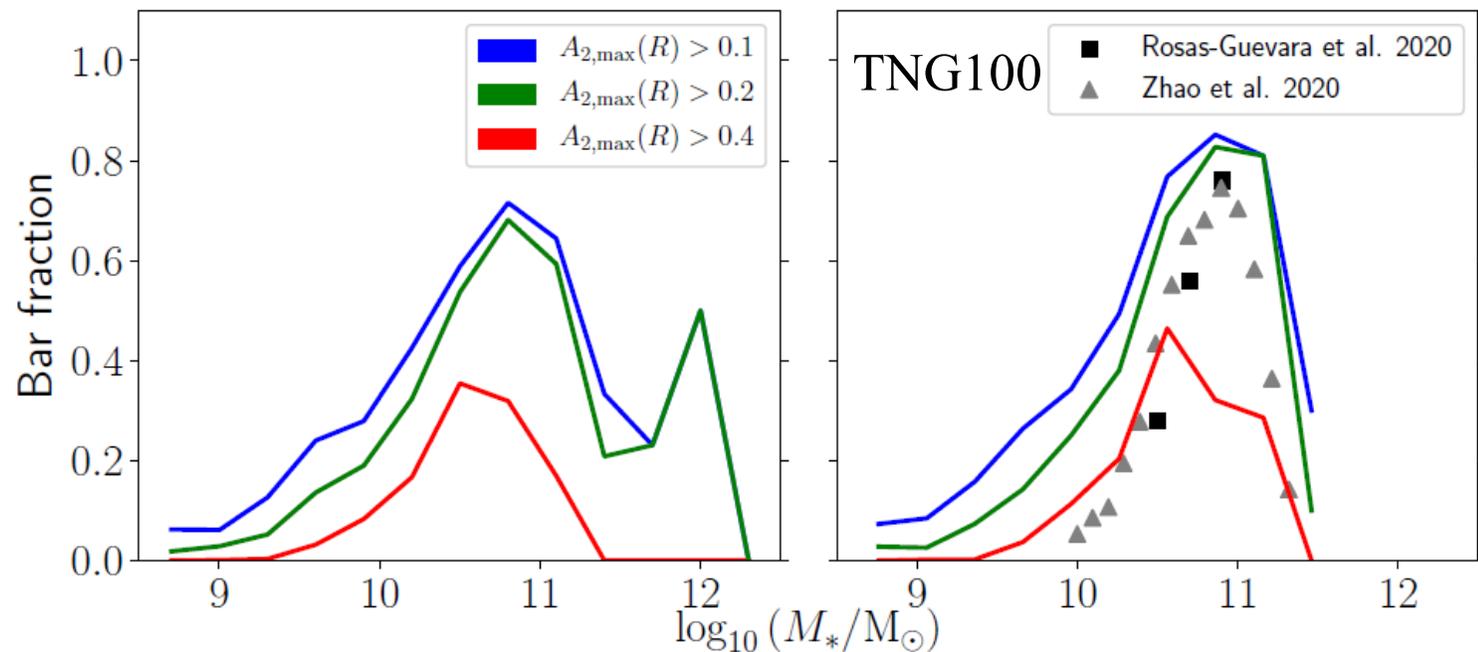
Evolution des barres dans TNG50

En fonction du temps,
de la masse des galaxies



F_{bar} population totale

disques seulement



Force variable des barres

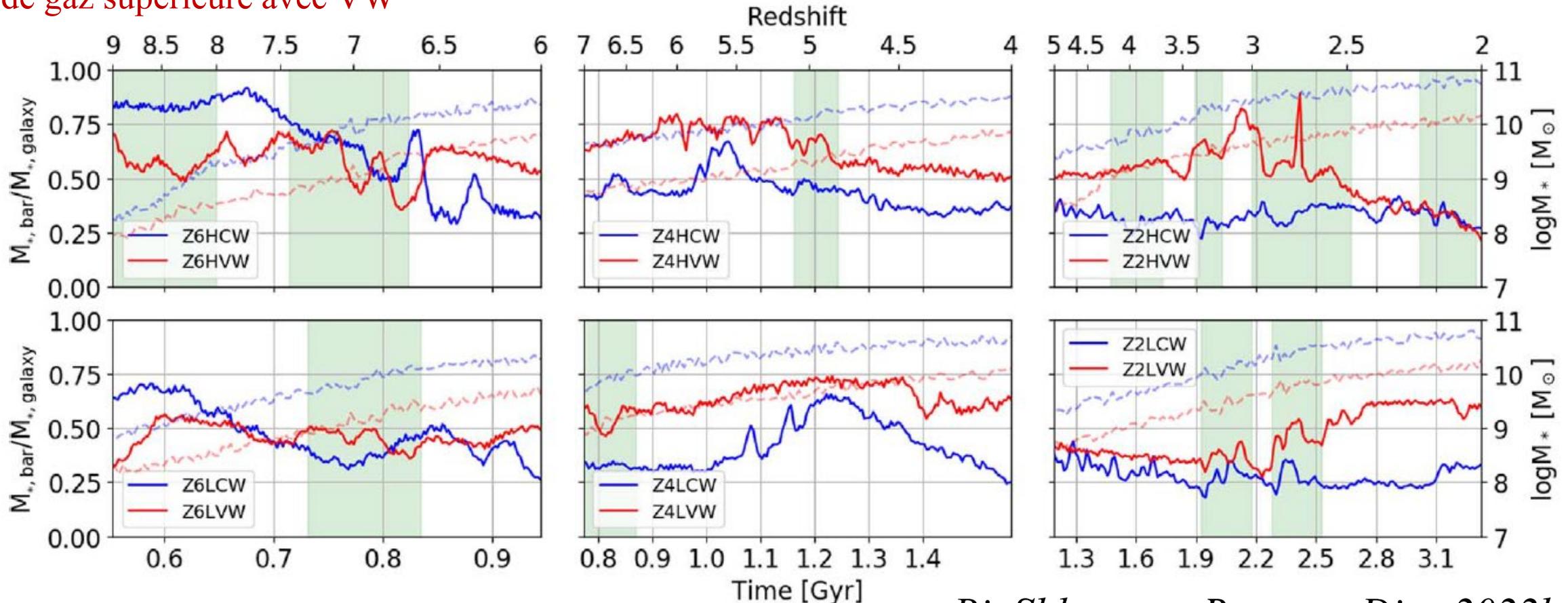
→ Plusieurs épisodes de barres au cours du temps

Les barres se détruisent, et se reforment de multiples fois, selon l'accrétion de gaz froid, + compagnons

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

H

L



H=sur-densité, L: sous-densité

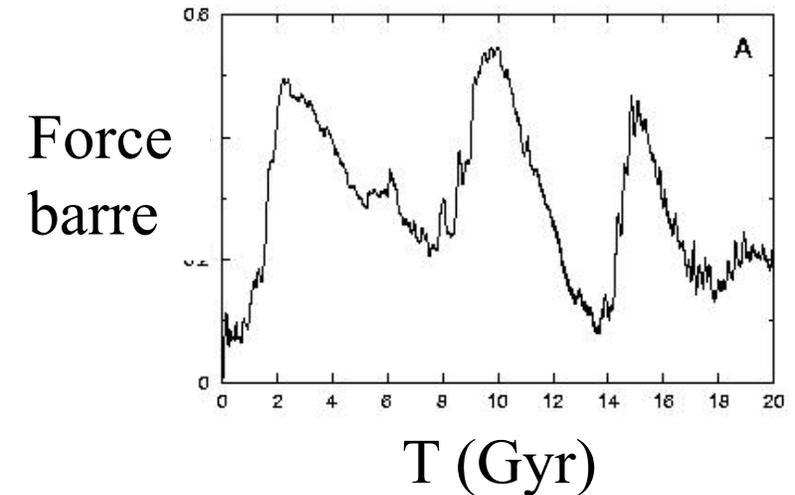
Bi, Shlosman, Romano-Diaz 2022b

Destruction et reformation 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



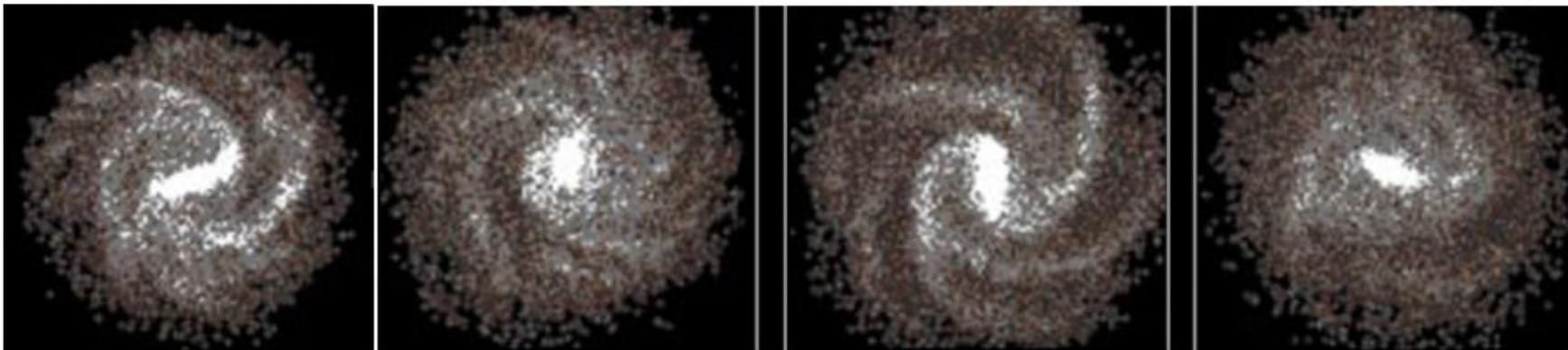
Une galaxie accrète du gaz
→ 2 ou 3 épisodes barrés

Barre initiale

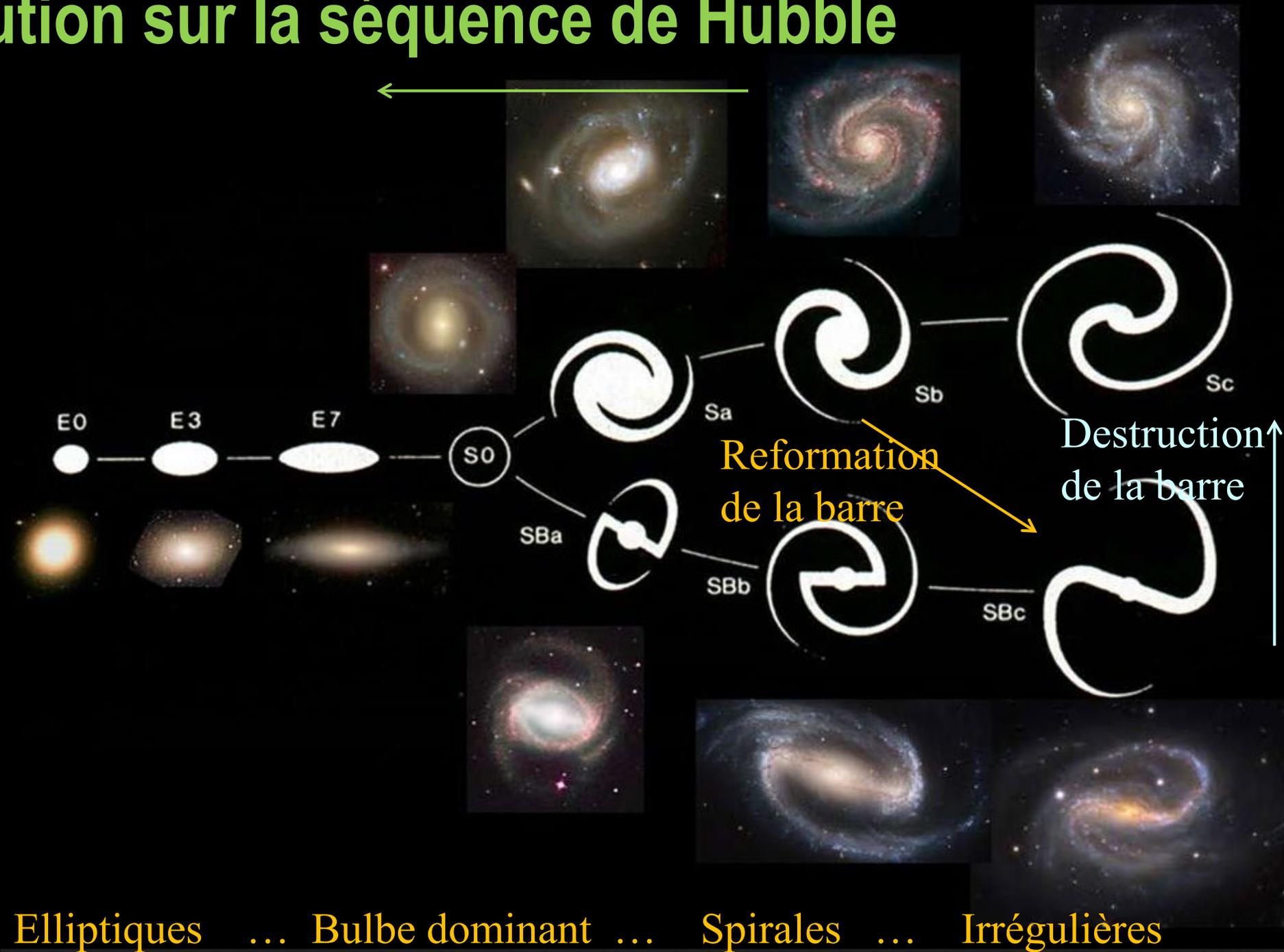
Destruction

Reformation

Affaiblissement



Evolution sur la séquence de Hubble



Résumé



→ Séquence de Hubble plus utile que jamais
Séquences de couleurs plus automatiques

→ Galaxies massives évolution plus rapide jusqu'à $z=3-6$ avec le JWST: séquence de Hubble dès $z=6$, spirales rouges, SF et quenching, barres fortes

→ Dynamique de la formation des spirales, et des barres, des sphéroides par fusion tôt dans l'Univers

