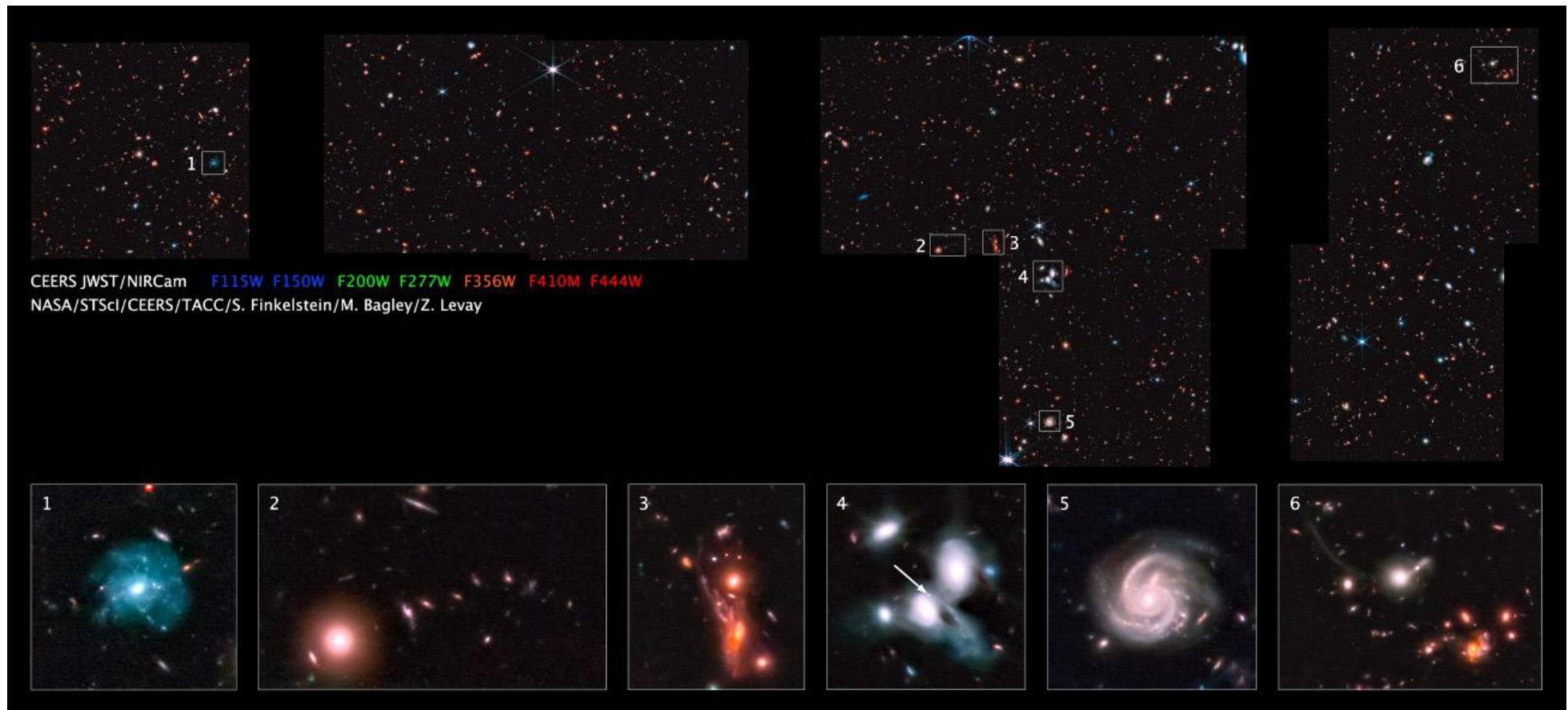


Les galaxies en morceaux



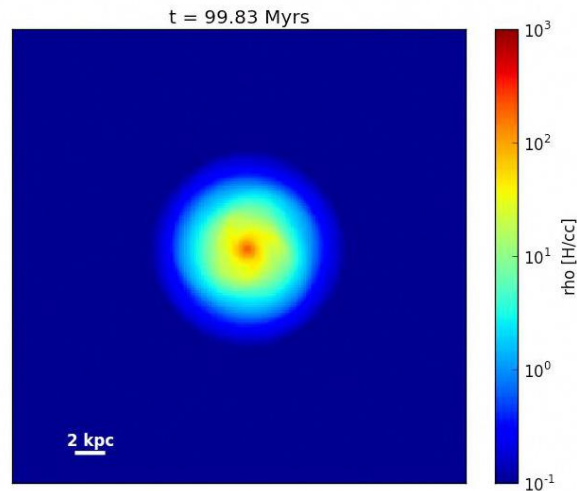
Frédéric Bournaud

Département d'Astrophysique, IRFU, CEA Paris-Saclay

Université Paris-Saclay

Simulations numériques de formation et évolution des galaxies

Simulations idéalisées, simulations cosmologiques



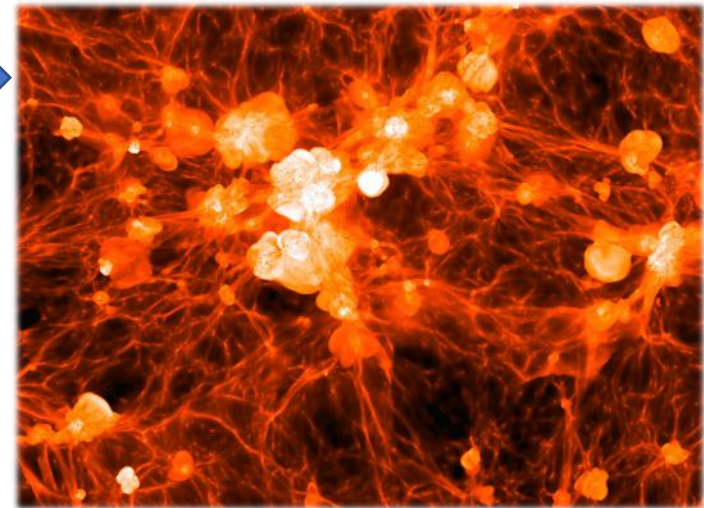
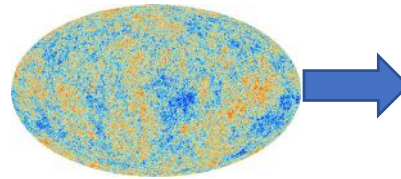
Simulation idéalisée :

résolution de l'ordre de 1pc

Conditions initiales = 1 ou 2 galaxies,

taille, masse, profil, rotation, basés sur les données,

Pas d'évolution sur l'âge complet de l'Univers



Simulation cosmologique :

résolution de l'ordre de 10-100pc

Conditions initiales = fluctuations primordiales

Formation « ab initio » des galaxies

Avec toujours : formation des étoiles, rétroaction des étoiles, trous noirs supermassifs et noyaux actifs...

Les populations de galaxies actuelles

La Séquence de Hubble moderne

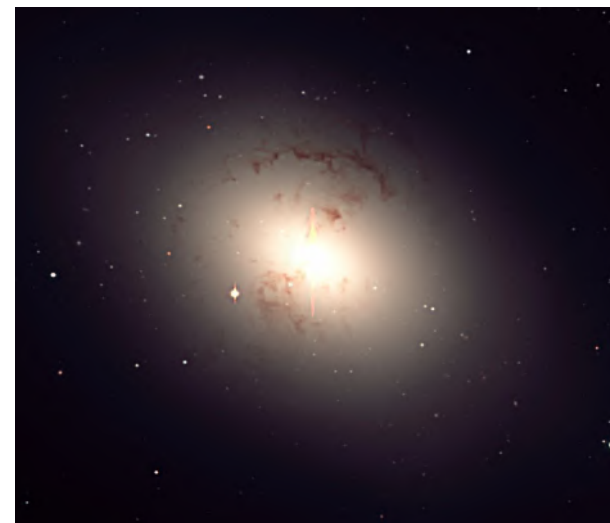


Les galaxies les plus massives sont généralement des galaxies elliptiques « rouges », sans formation d'étoiles, dominées par la dispersion de vitesses

(Emsellem et al. 2011, ATLAS3D)

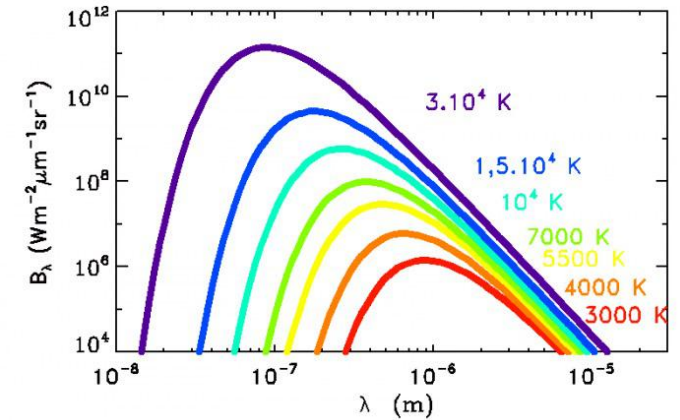
Les galaxies à $10^{10} < M^* < 10^{11}$ sont très majoritairement des disques, avec des bras spiraux et généralement une barre, +/- un bulge central

(Eskridge et al. 2000, Block et al. 2002)



Les populations de galaxies actuelles

La Séquence de Hubble moderne



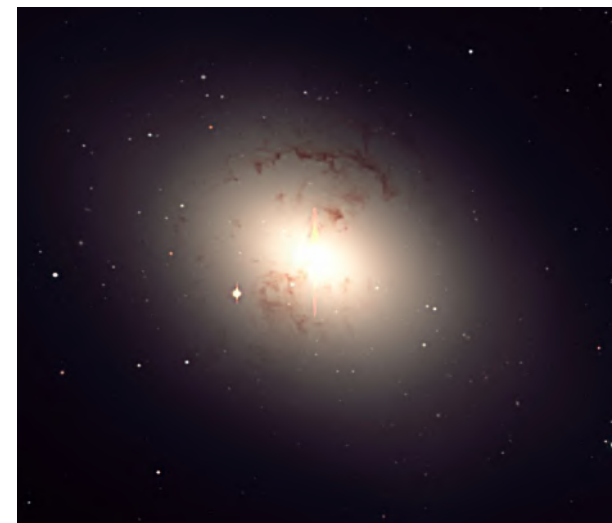
Les galaxies les plus massives sont généralement des galaxies elliptiques « rouges », sans formation d'étoiles, dominées par la dispersion de vitesses

(Emsellem et al. 2011, ATLAS3D)

Les galaxies à $10^{10} < M^* < 10^{11}$ sont très majoritairement des disques, avec des bras spiraux et généralement une barre, +/- un bulge central

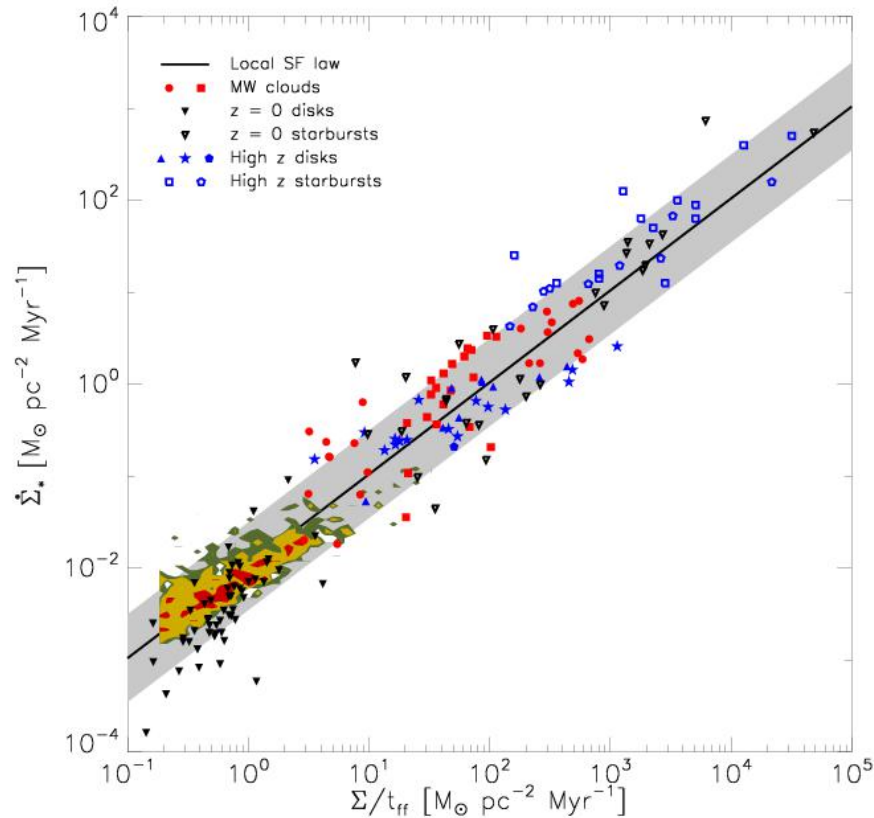
(Eskridge et al. 2000, Block et al. 2002)

Nombreux petits nuages moléculaires de gaz et amas d'étoiles jeunes dans les bras spiraux (<<1% de la galaxie)



En quoi les galaxies primordiales different-elles ?

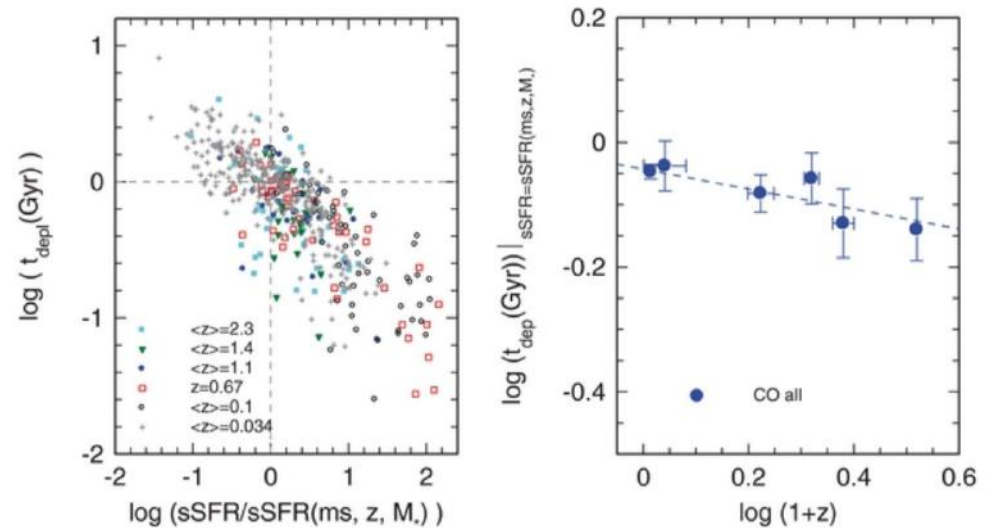
La formation d'étoiles "universelle"



Le gaz s'effondre en étoiles avec la même efficacité par unité de masse de gaz disponible dans les galaxies distantes ($z \sim 2$) et les galaxies proches

=> relation de « Schmidt-Kennicutt » universelle.

(Daddi et al. 2010, Krumholz, Dekel & McKee 2012 ; Silk 2012)

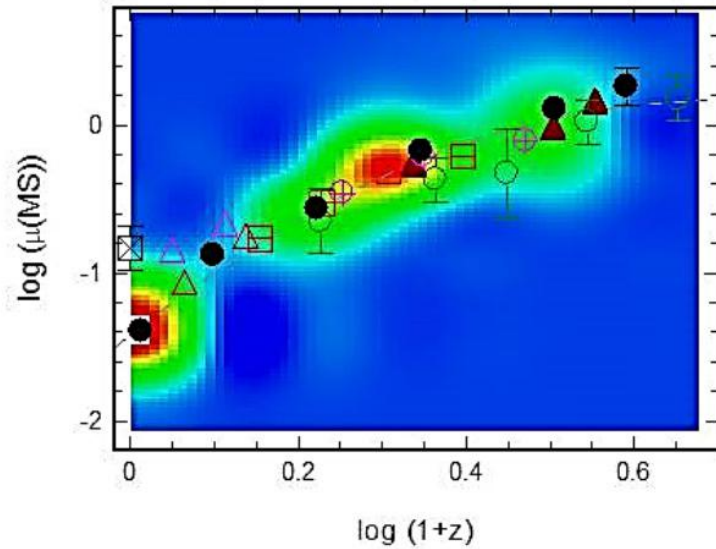


Les galaxies distantes ($z=2$) forment plus d'étoiles parce qu'elles ont 50% de leur masse baryonique (hors matière noire) sous forme de gaz, contre 5% dans les galaxies proches

(Daddi et al. 2010, Combes et al. 2013, Genzel et al. 2015)

En quoi les galaxies primordiales different-elles ?

Des galaxies bien plus riches en gaz diffus

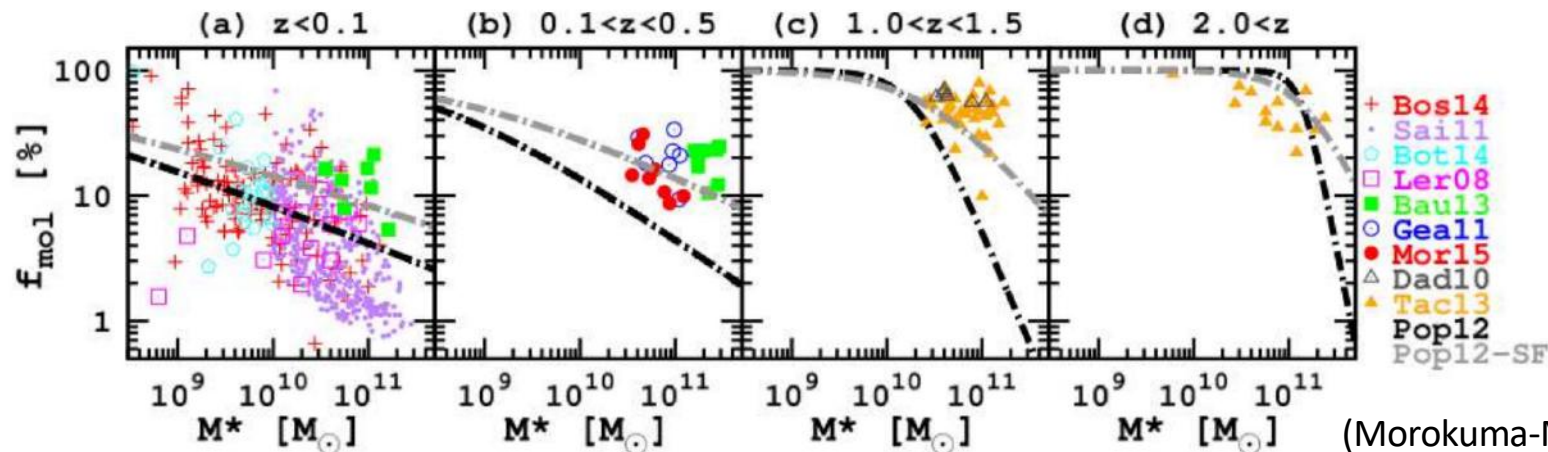


Les galaxies à $10^{10} < M^* < 10^{11}$ contiennent en moyenne :

- 5% de gaz à $z=0$
- 37% de gaz à $z=1$
- 52% de gaz à $z=2$

La dispersion intrinsèque est large (~ 0.3 dex),
Mais l'incertitude statistique sur la moyenne est faible (~ 0.04 dex)

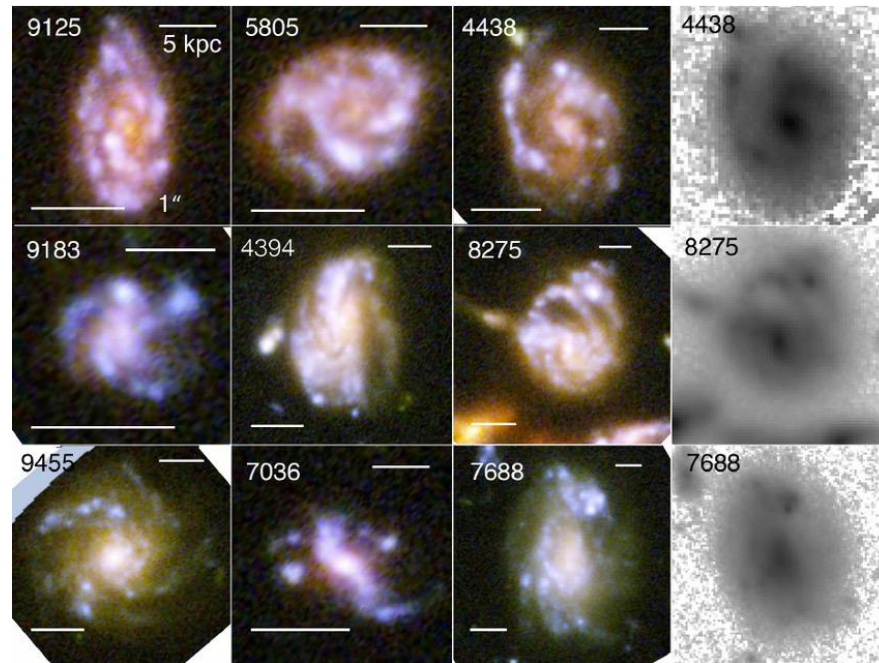
(Tacconi et al. 2018)



(Morokuma-Matsui and Baba 2017)

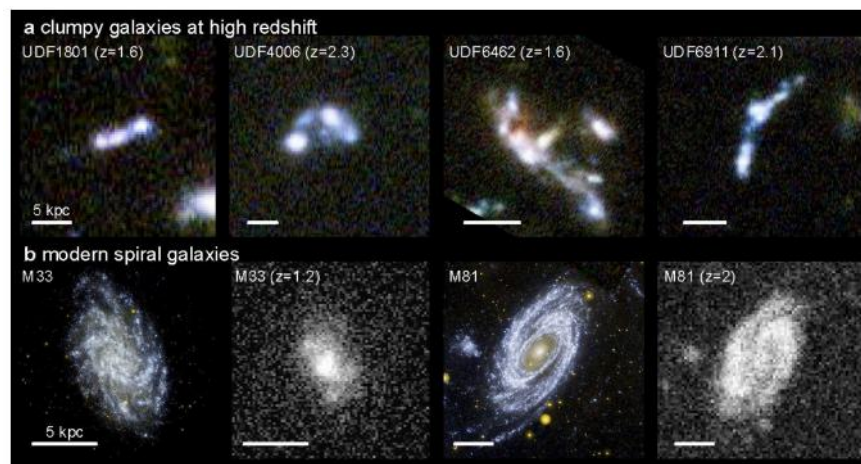
Morphologie des galaxies dans l'Univers lointain

Les galaxies primordiales sont de plus en plus irrégulières, fragmentées, "clumpy"



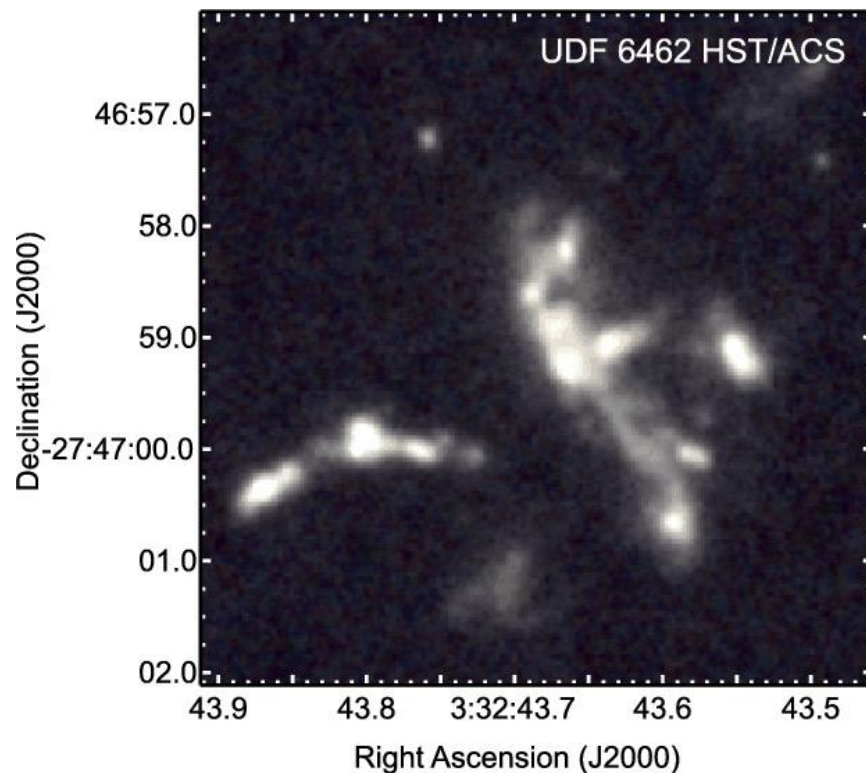
- Les galaxies formant des étoiles à $10^{10} < M^* < 10^{11}$ à $z=1-3$ sont irrégulières, fragmentées
- Fragments géants de 10^{8-9} masses solaires
- Les fragments observés ne proviennent pas de la résolution ni du décalage spectral

=> Grands disques fragmentés ou fusions multiples de petites galaxies ?



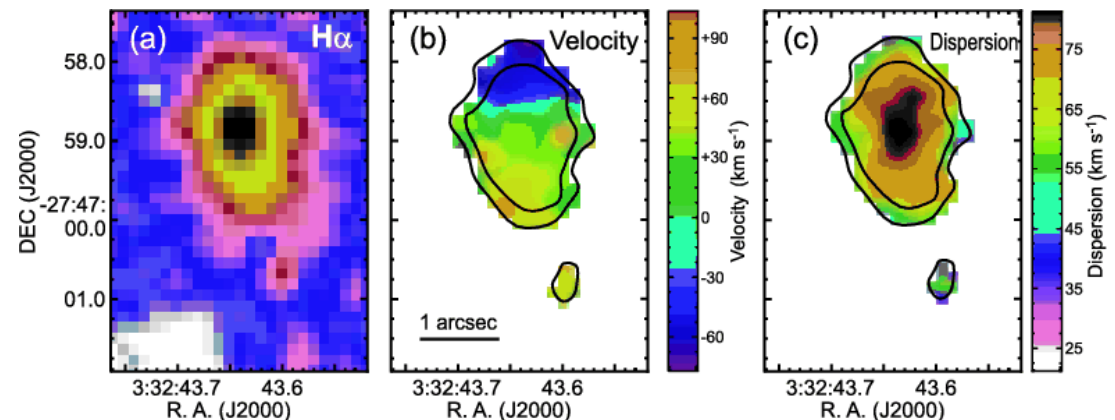
Les galaxies fragmentées sont des disques en rotation

Champs de Vitesse en rotation avec quelques irrégularités locales



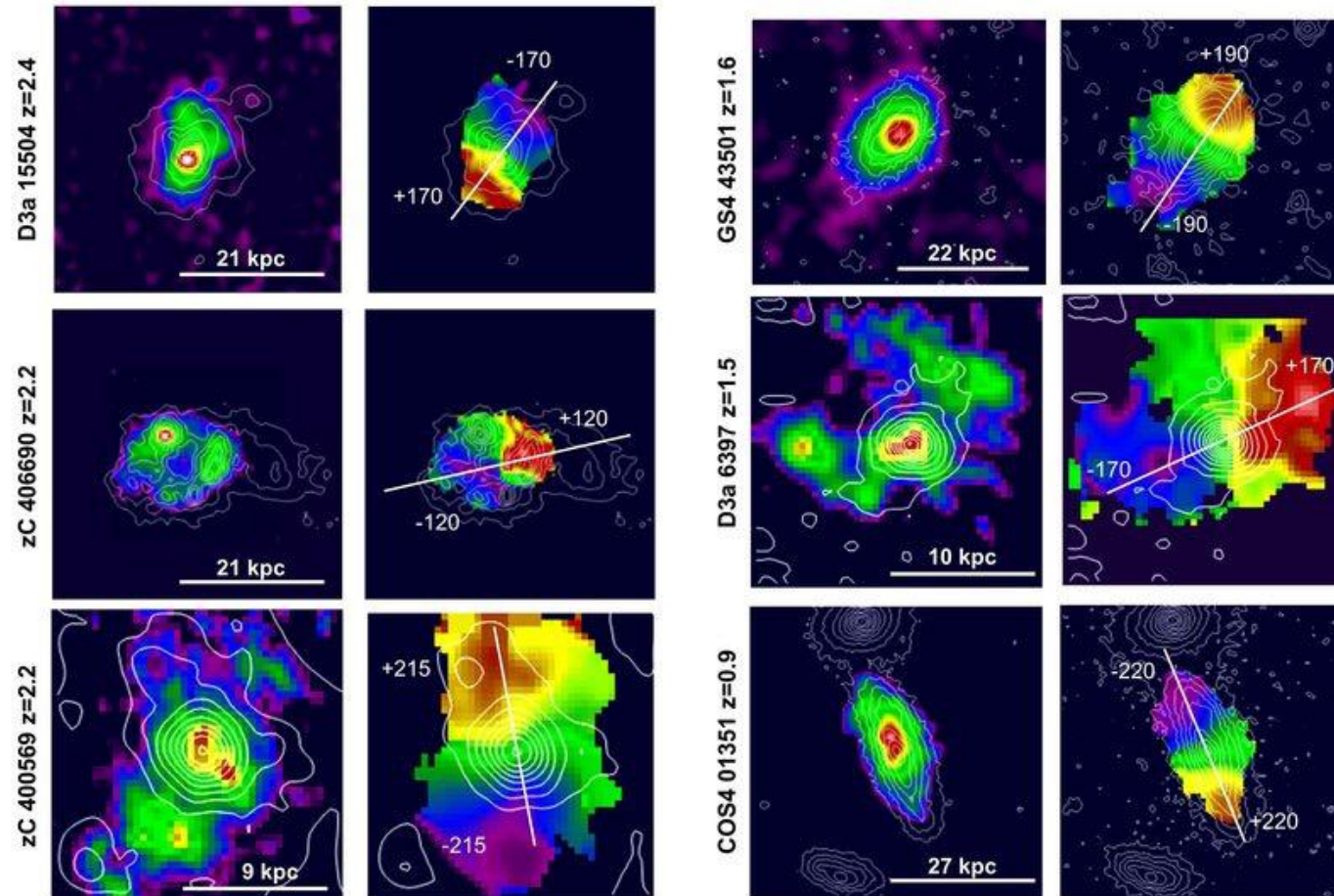
Décalages spectraux résolus spatialement
avec VLT/SINFONI

Champ de vitesse en rotation avec une
dispersion élevée et quelques irrégularités locales



Les galaxies fragmentées sont des disques en rotation

Champs de Vitesse en rotation avec quelques irrégularités locales

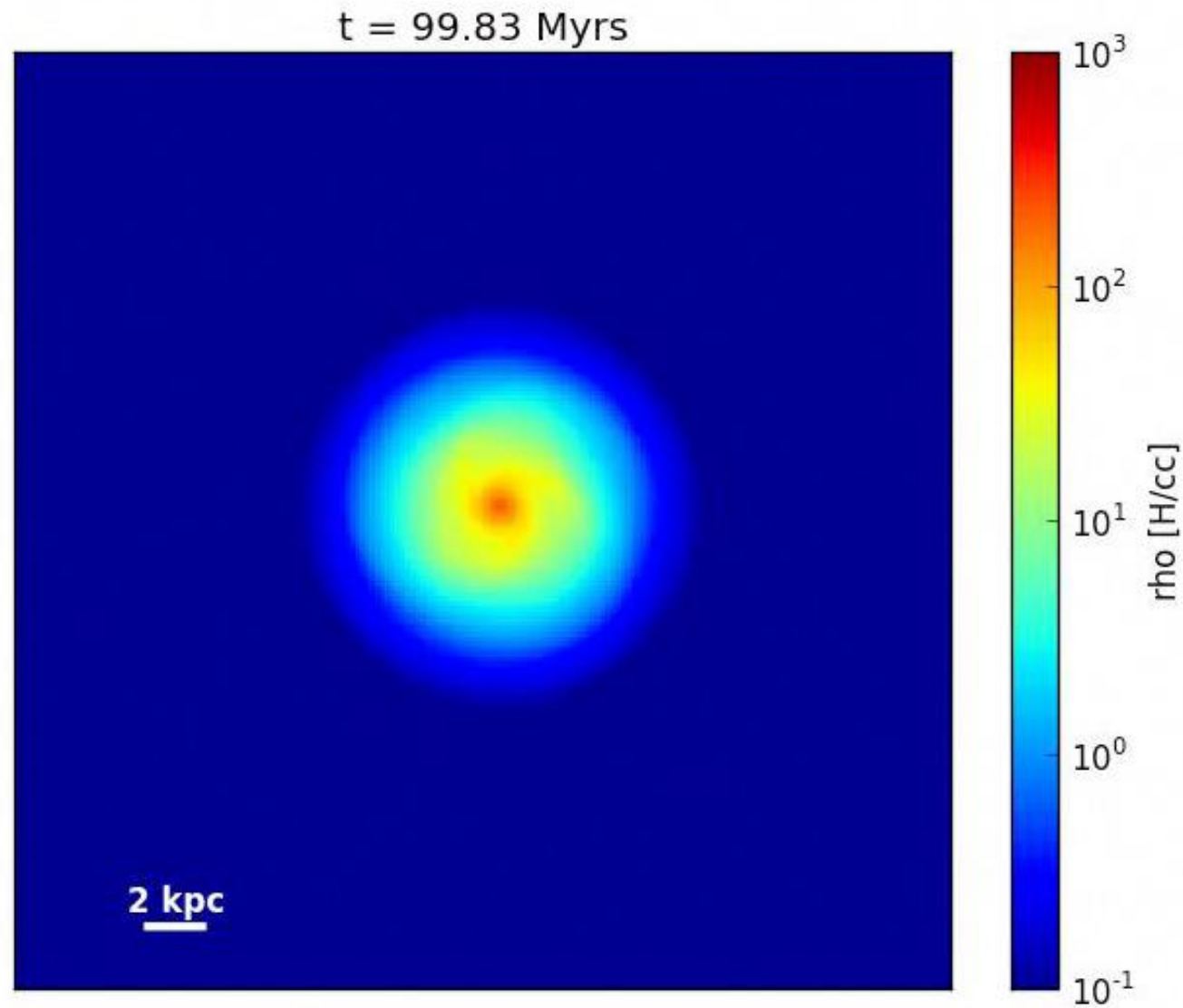


Décalages spectraux résolus spatialement avec VLT/SINFONI

Champ de vitesse en rotation avec une dispersion élevée et quelques irrégularités locales

Instabilité de disque riche en gaz

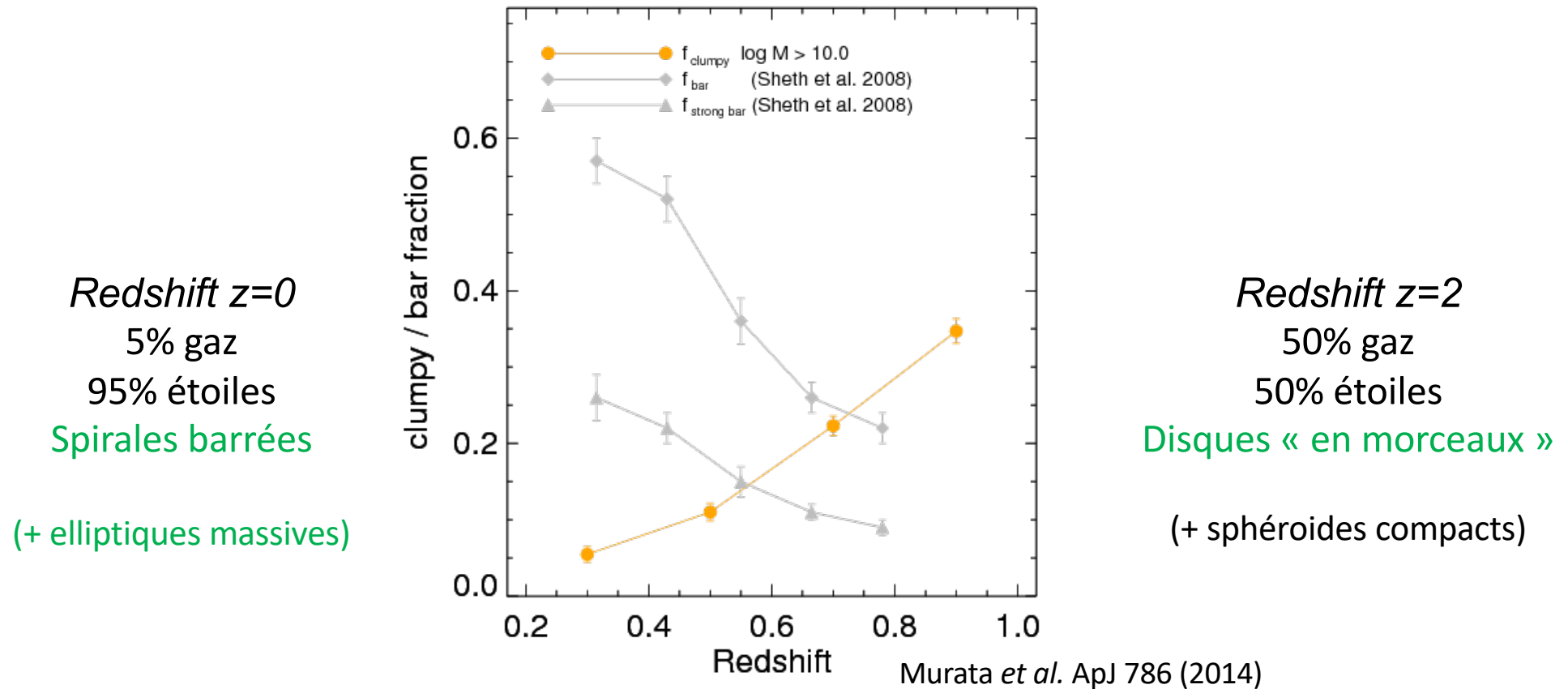
Fragmentation spontanée des galaxies jeunes en “gros morceaux”



Simulation idéalisée : évolution spontanée d'un disque typique à z=2 (progéniteur de la Voie Lactée)

Les populations de galaxies de l'Univers actuel à l'Univers primordial

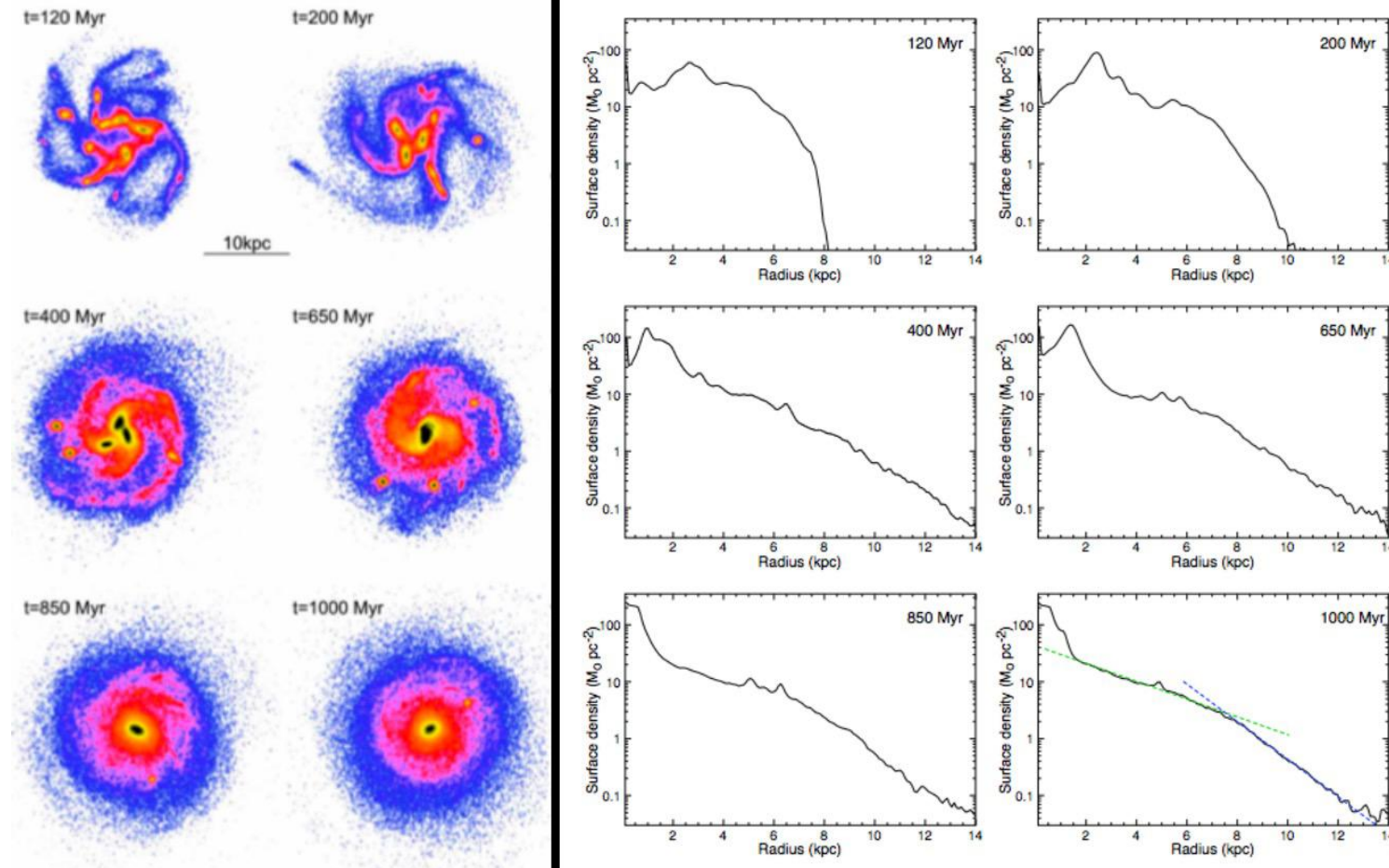
Une transition de galaxies riches en gaz et fragmentées à la séquence de Hubble vers $z=1$?



⇒ Conséquences pour la formation de la séquence de Hubble ?

Des galaxies primordiales aux disques spiraux à profil exponentiel

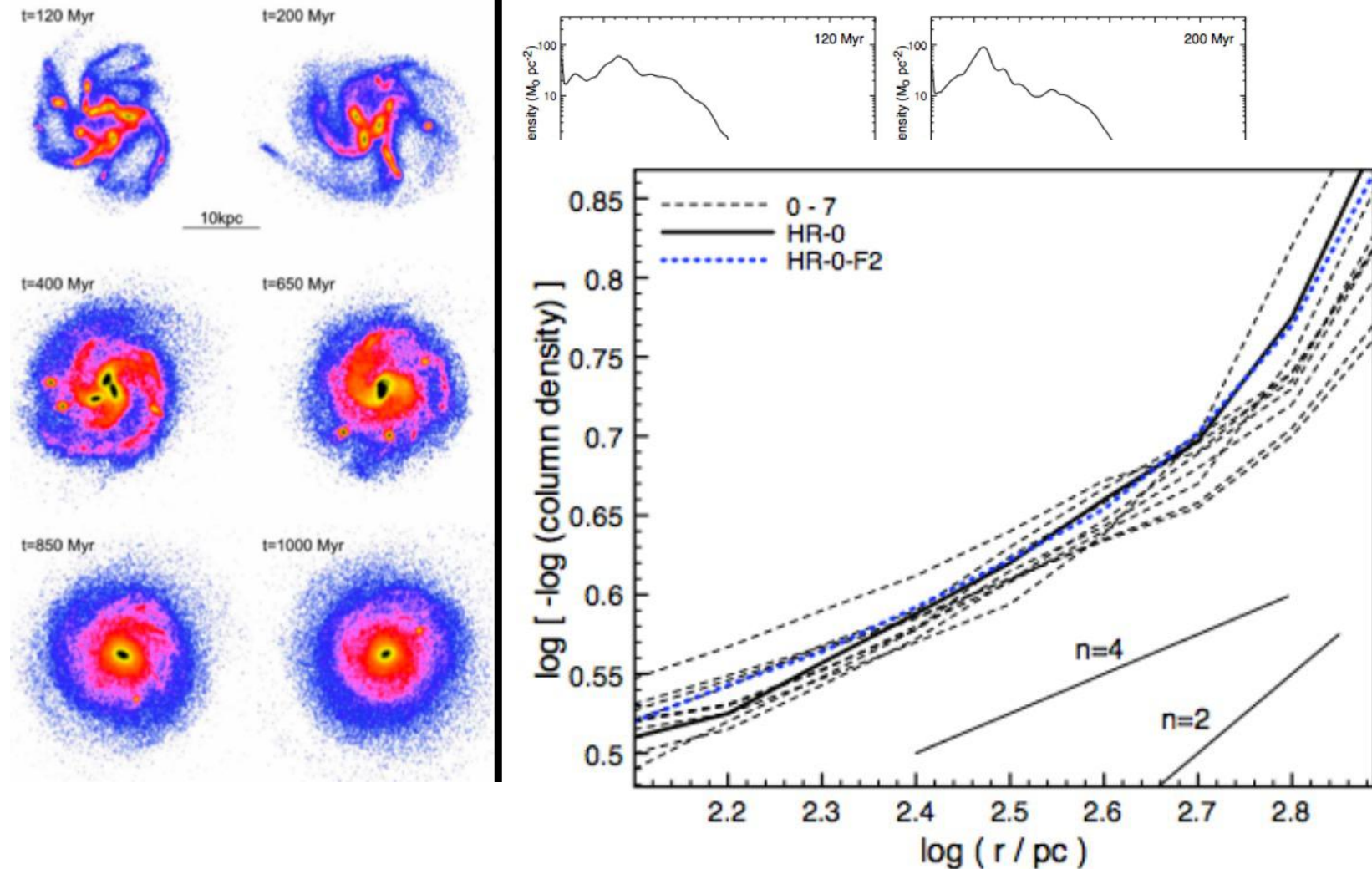
Migration et coalescence des fragments géants



La migration des fragments (friction dynamique) et les couples de gravité associés forment naturellement un disque (double)-exponentiel

Des galaxies primordiales aux disques spiraux à profil exponentiel

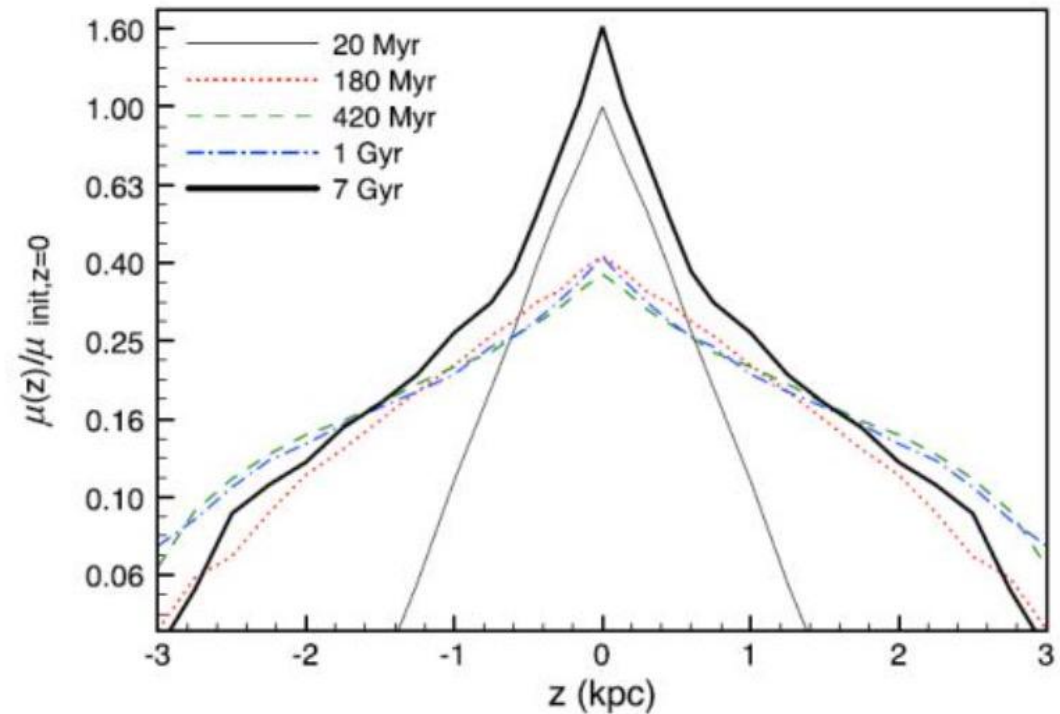
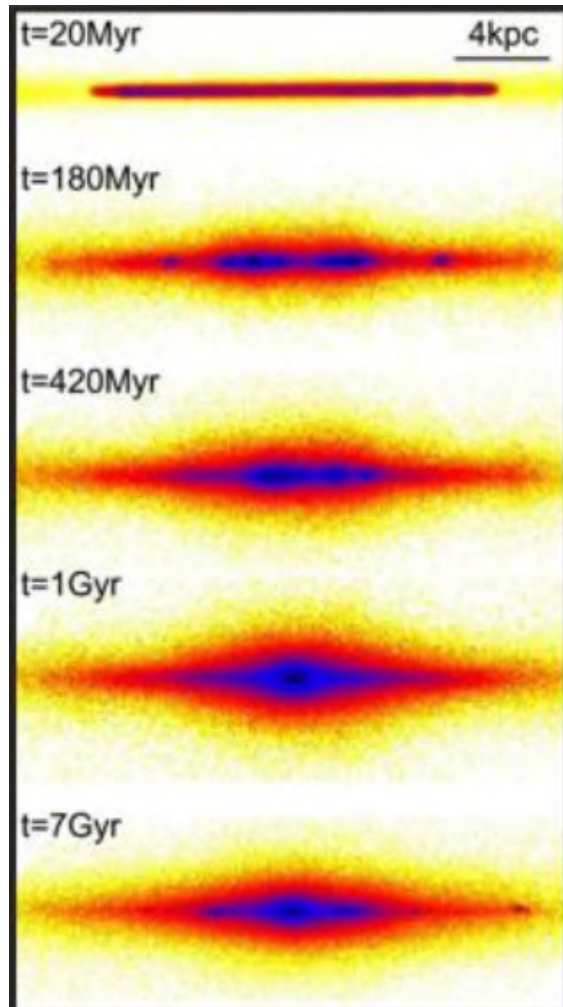
Migration et coalescence des fragments géants



La migration des fragments (friction dynamique) et les couples de gravité associés forment naturellement un disque (double)-exponentiel et un bulbe central (classique)

Formation des bulbes et des disques épais

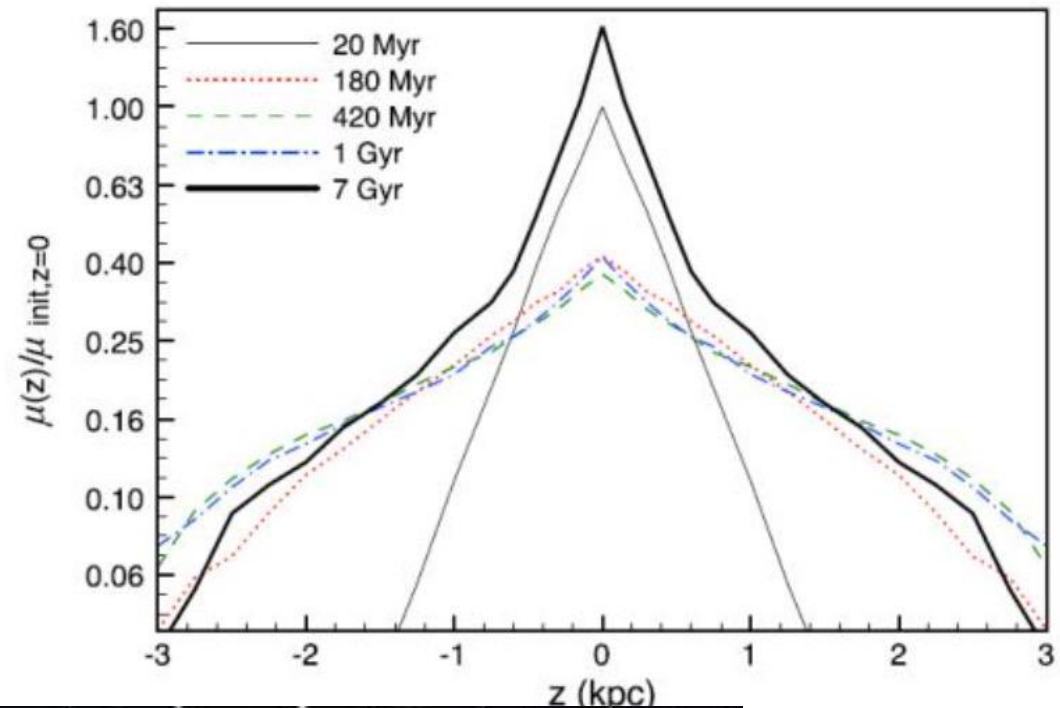
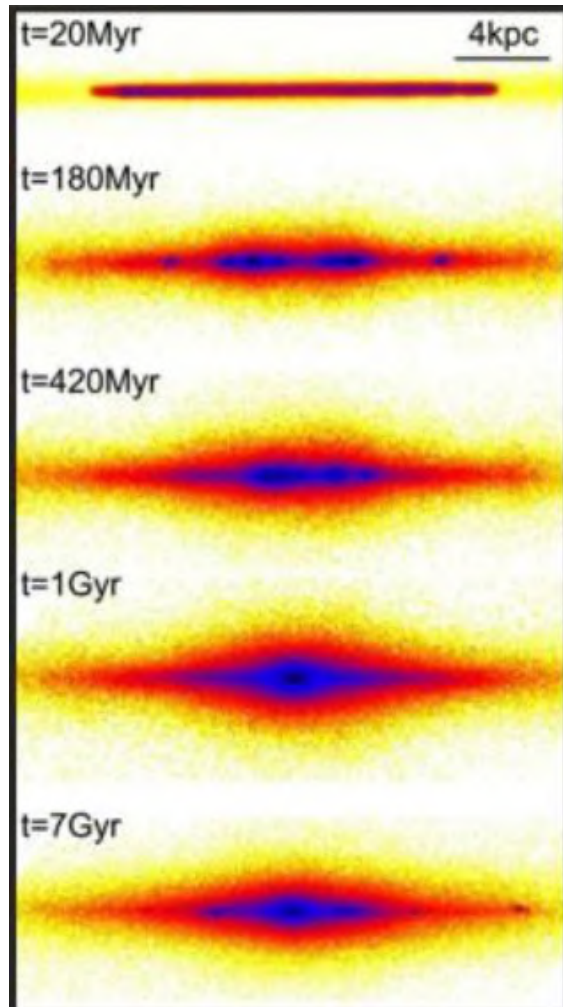
Migration et agitation des gros fragments



L'agitation par les gros fragments forme un « disque épais », puis formation d'un disque mince après la phase instable et la croissance du bulbe central

Formation des bulbes et des disques épais

Migration et agitation des gros fragments



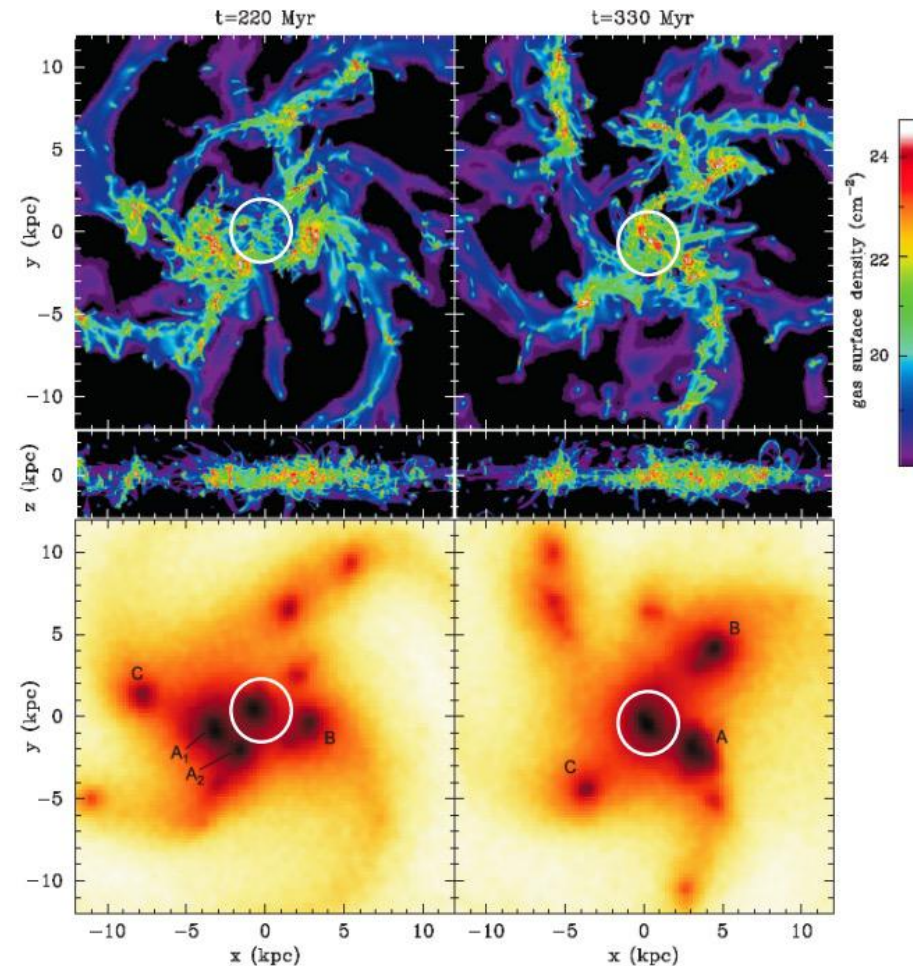
NGC891

L'agitation par les gros fragments
disque mince après la phase

formation d'un
central

Alimentation du trou noir central

Par alimentation continue et coalescence des fragments



Bournaud, Dekel + 2012
Bournaud 2016

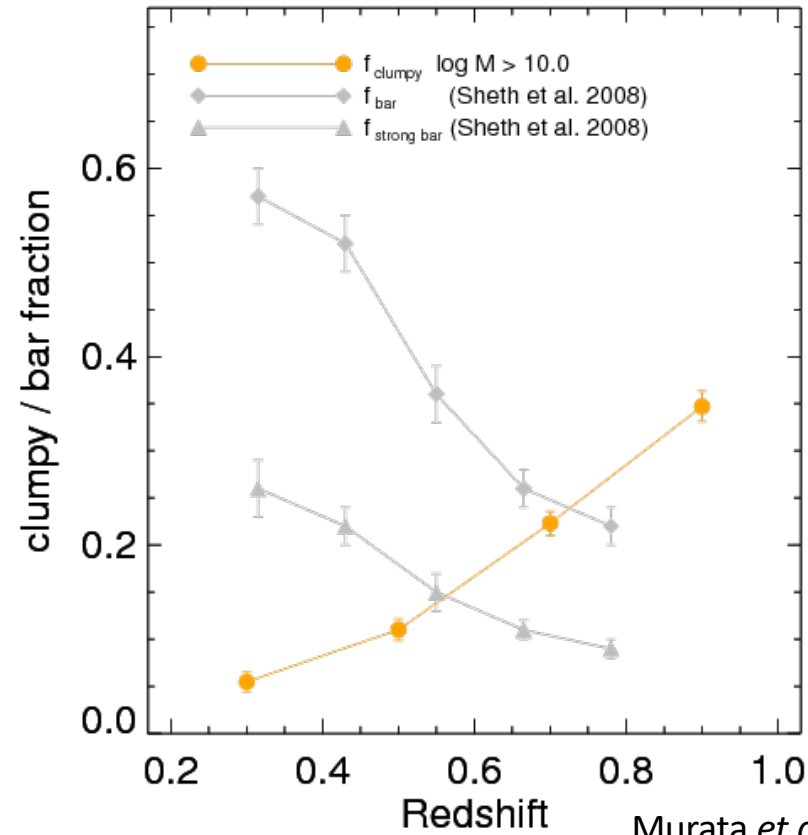
Le trou noir central peut être alimenté par :

- la migration des gros fragments
- l'écoulement continu de gaz diffus vers le centre causé par l'instabilité
- potentiellement, des trous noirs de masse intermédiaire formés dans les fragments denses

Un paradigme remis en cause ?

Les fragments invisibles avec lentillage ou avec ALMA ?

Redshift z=0
5% gaz
95% étoiles
Spirales barrées
(+ elliptiques massives)



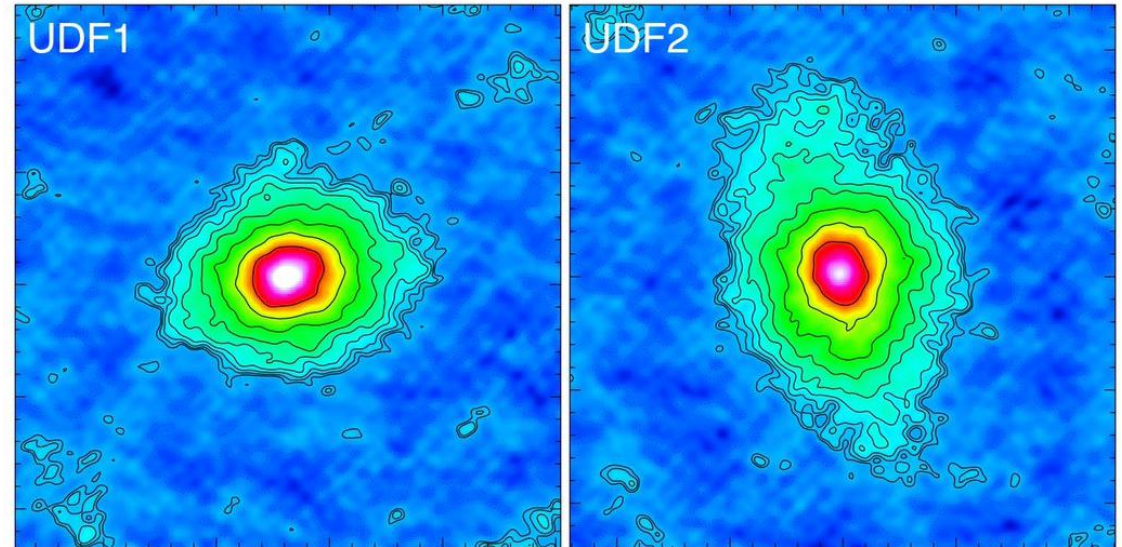
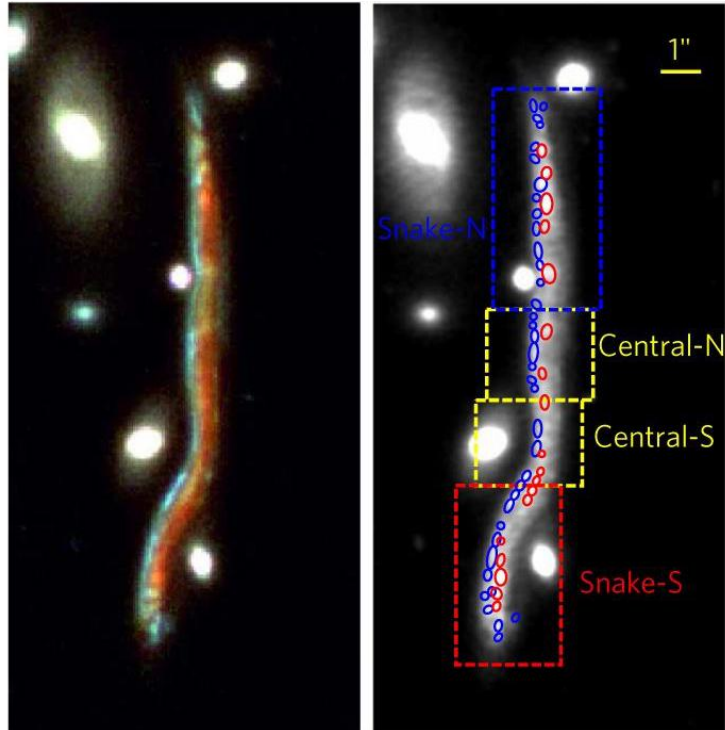
Redshift z=2
50% gaz
50% étoiles
Disques « en morceaux »
(+ sphéroides compacts)

Murata *et al.* ApJ 786 (2020)

Un paradigme remis en cause ?

Les fragments invisibles avec lentillage ou avec ALMA ?

« Cosmic snake »



WR+19, submitted; arXiv:1904.04507

Haute résolution grâce au lentillage gravitationnel

⇒ Nombreux petits nuages de 10^{6-7} masses solaires, pas de gros fragment apparent

(Dessaugue-Zavadsky, Schaerer et al. 2016-19)

Cartographie ALMA du gaz à 100pc de résolution

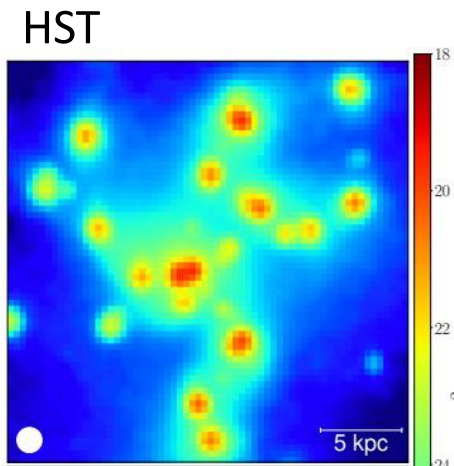
Raies de CO ou continuum de la poussière

⇒ Disques lisses ou fragments $< 10^7 M_{\text{sol}}$

(e.g. Rujopakarn et al. 2020, JVLA Hodge+19)

Simulation du lentillage des galaxies primordiales

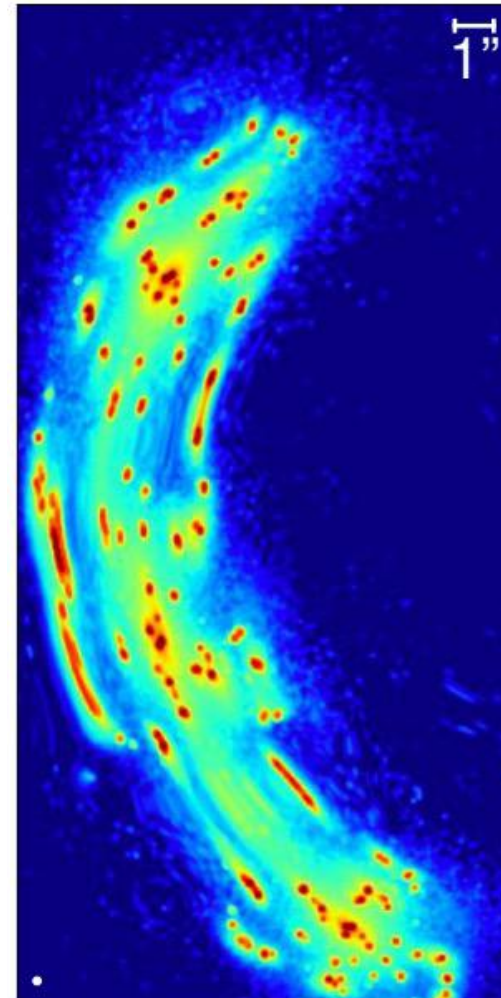
Les grands « clumps » ont une sous-structure hiérarchique spontanément résolue



Simulation d'une galaxie fragmentée,
observée par le HST, puis lentillée
comme le « cosmic snake »

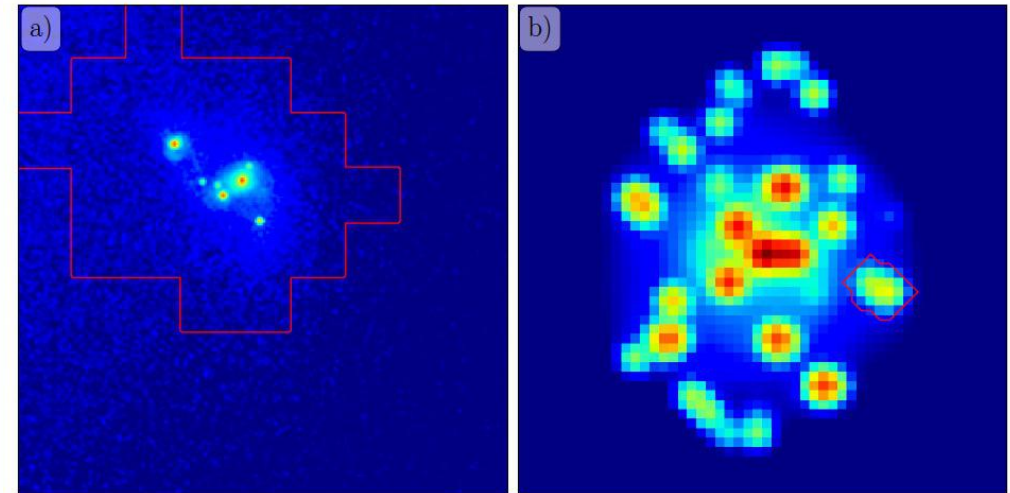
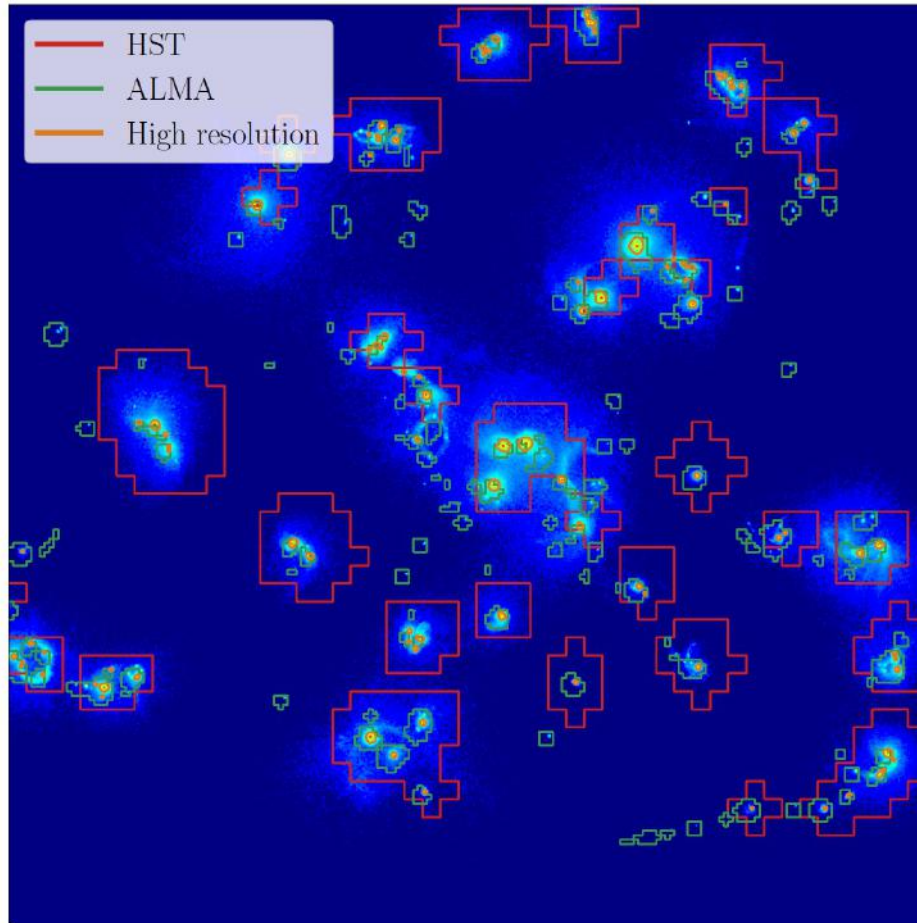
=> Nombreux petits nuages résolus

HST + lentille



Simulation du lentillage des galaxies primordiales

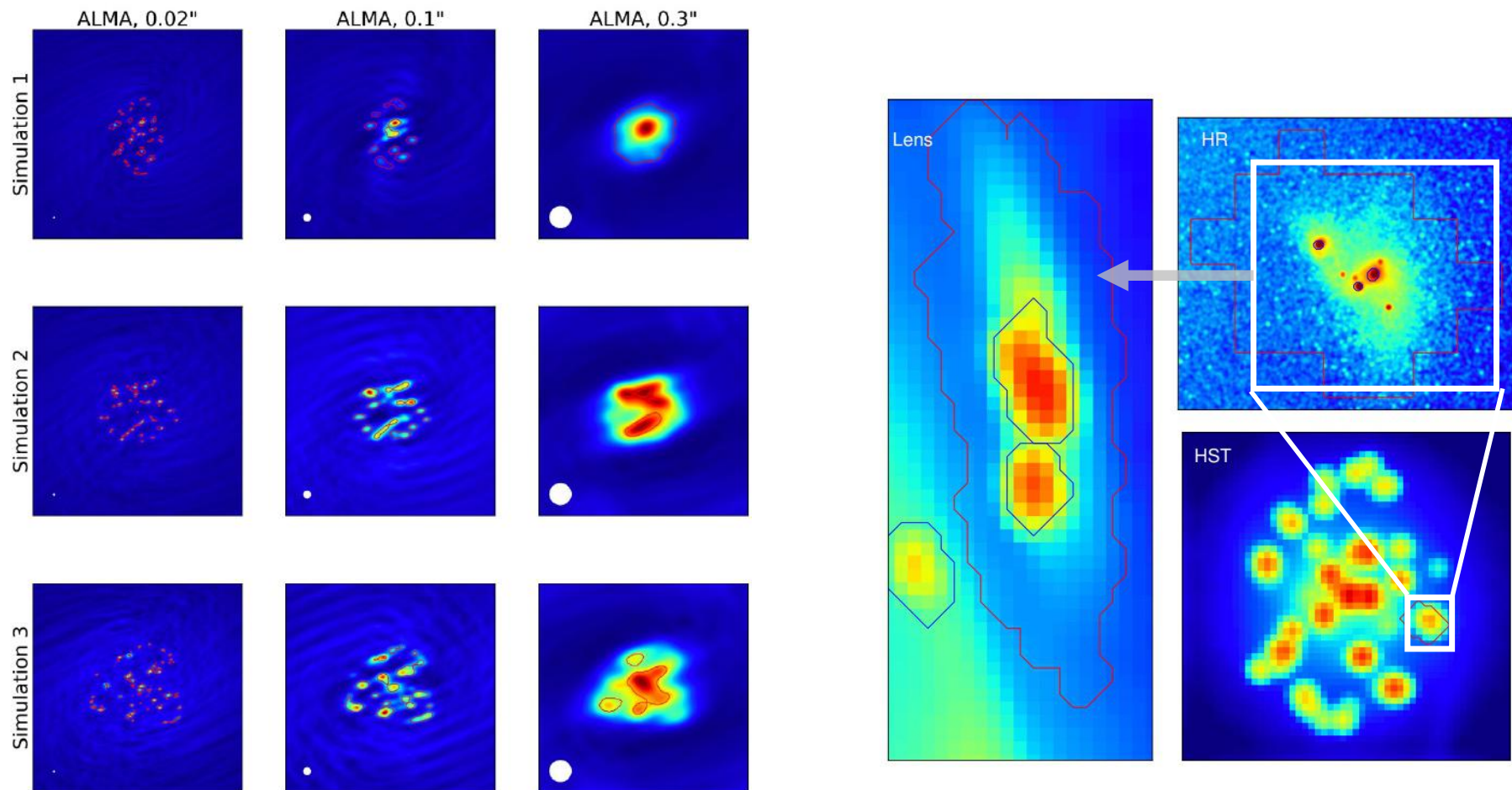
Les grands « clumps » ont une sous-structure hiérarchique spontanément résolue



- Les gros fragments ne sont pas homogènes, ils contiennent de nombreux nuages denses de formation stellaire
- Sous-fragments de 10^{6-7} masses solaires
- Les sous-fragments peuvent être détruits par les supernovae

Simulation du lentillage des galaxies primordiales et des données ALMA

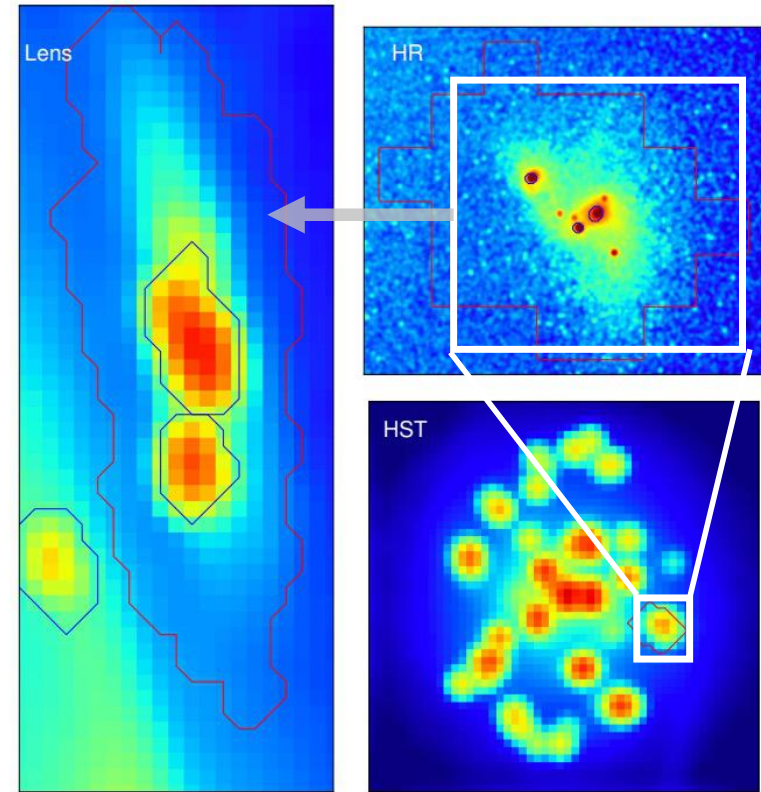
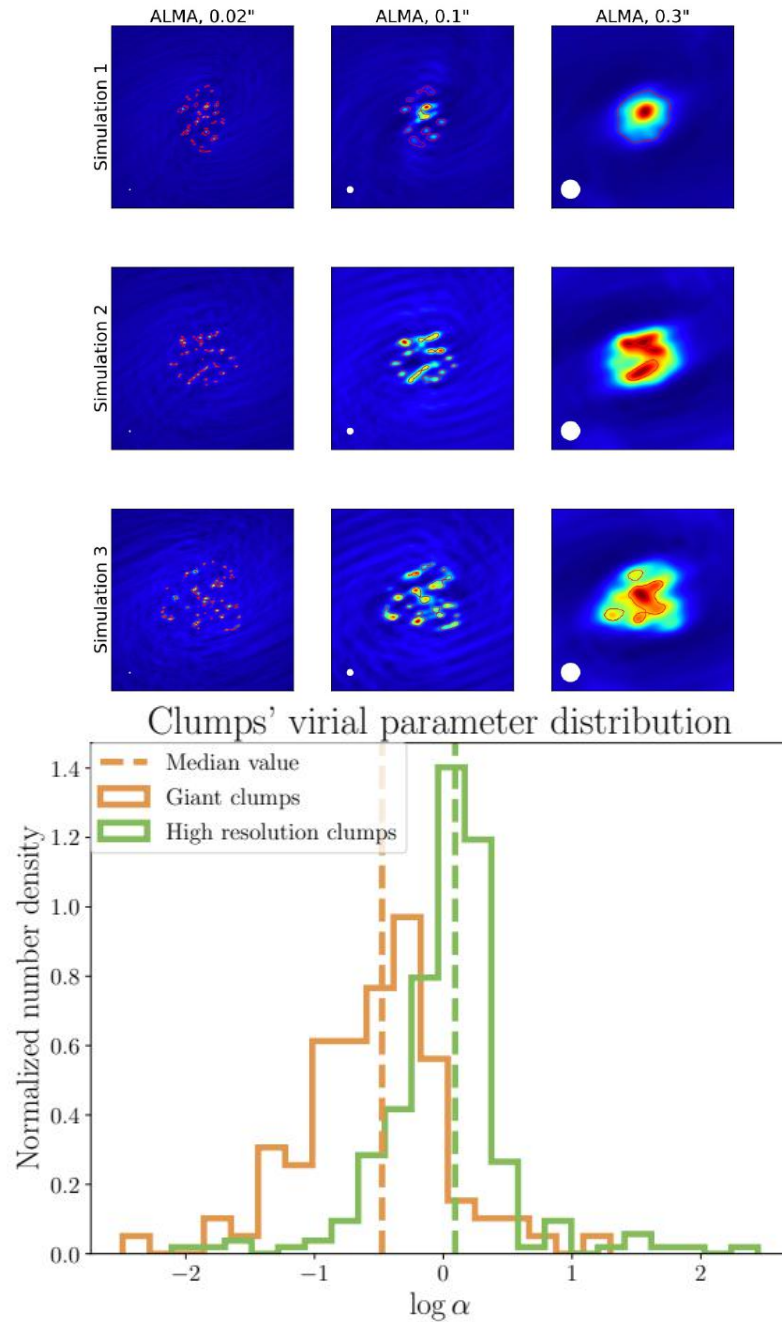
Les grands « clumps » ont une sous-structure hiérarchique spontanément résolue



- Le même effet existe sur les cartes de « gaz » (ou poussière) à très haute résolution par ALMA
- Sans la sensibilité pour les détecter, disque « homogène »

Simulation du lentillage des galaxies primordiales

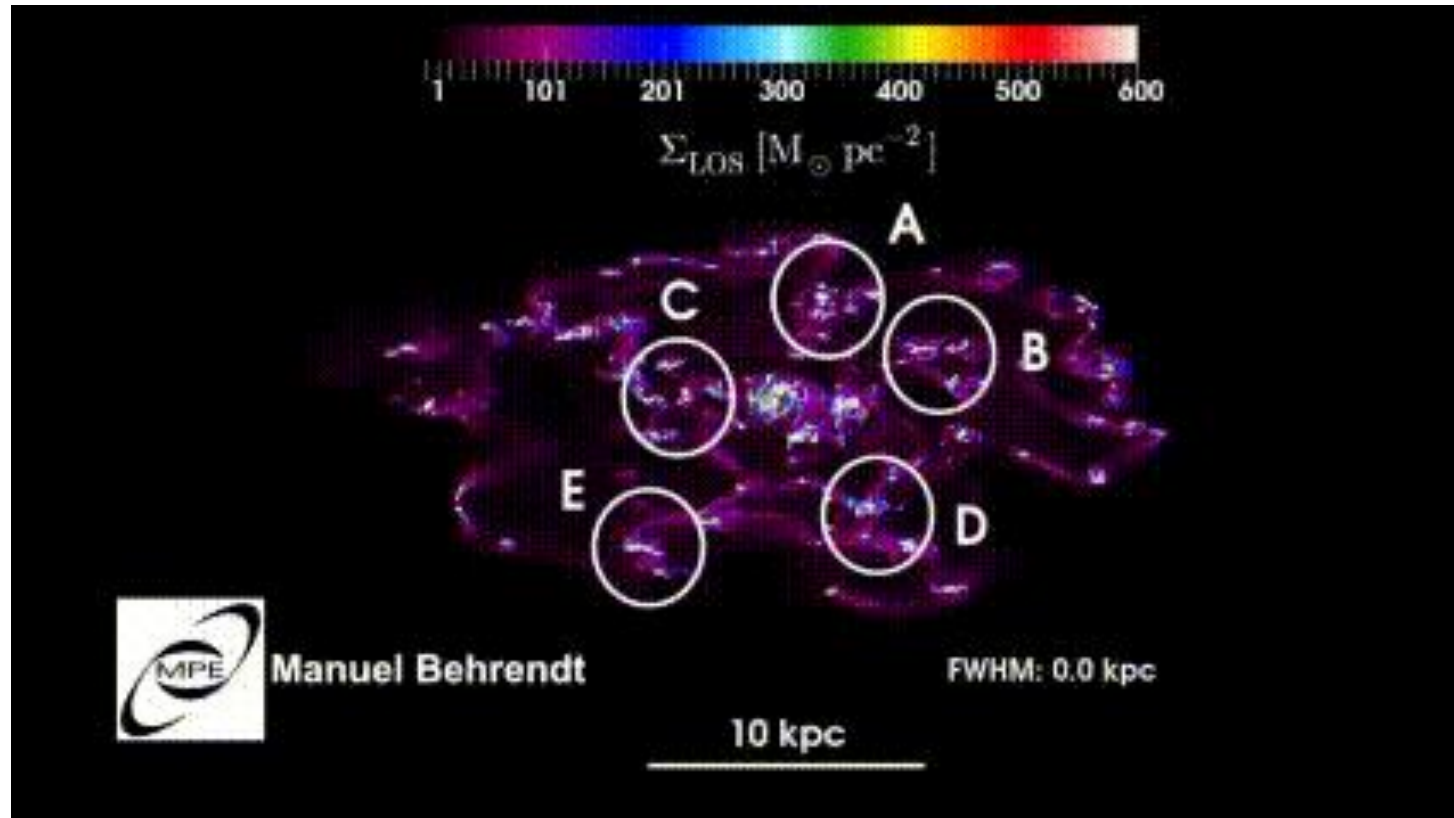
Les grands « clumps » ont une sous-structure hiérarchique spontanément résolue



- Les gros fragments sont liés gravitationnellement
- Les sous-fragments ne le sont pas (supernovae ?)

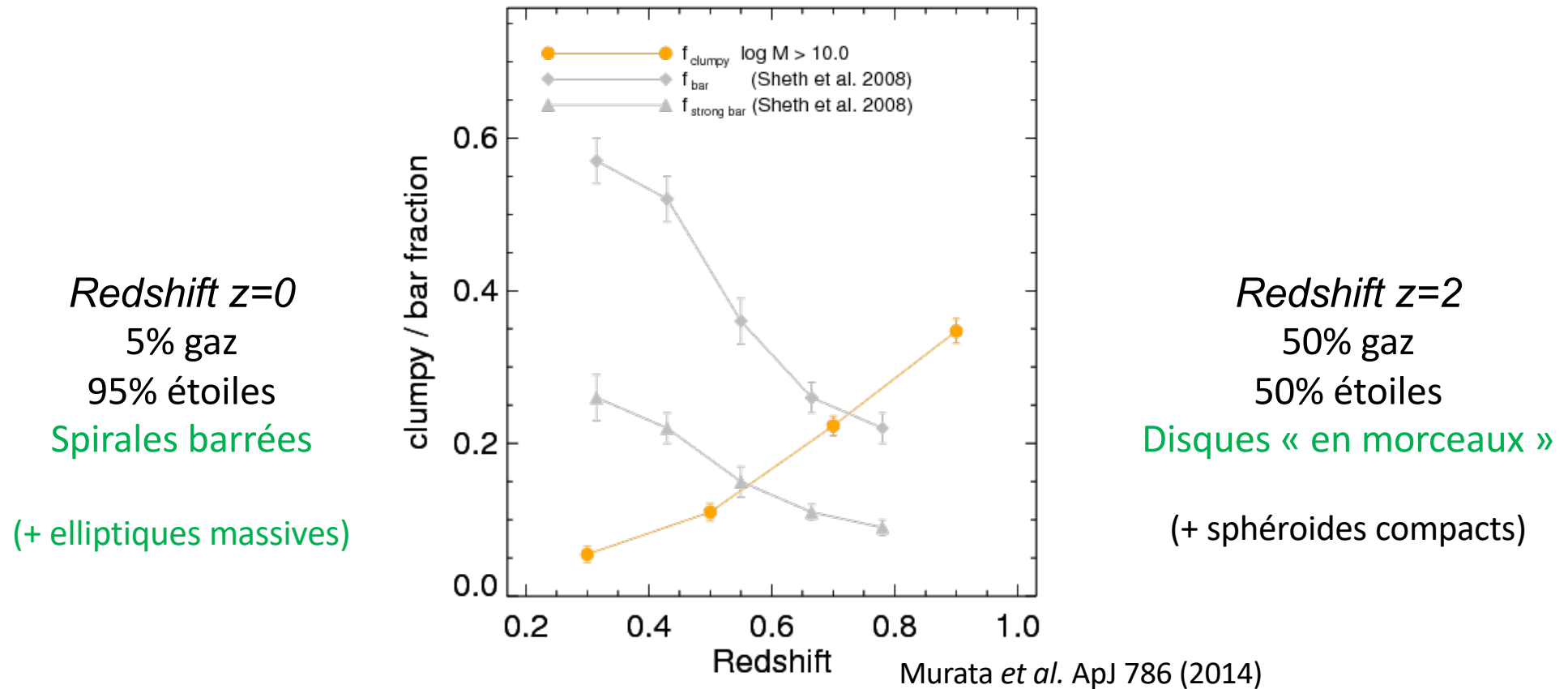
La sur-résolution peut manquer les grandes échelles fragmentées

Les grands « clumps » ont une sous-structure hiérarchique spontanément résolue



Les populations de galaxies de l'Univers actuel à l'Univers primordial

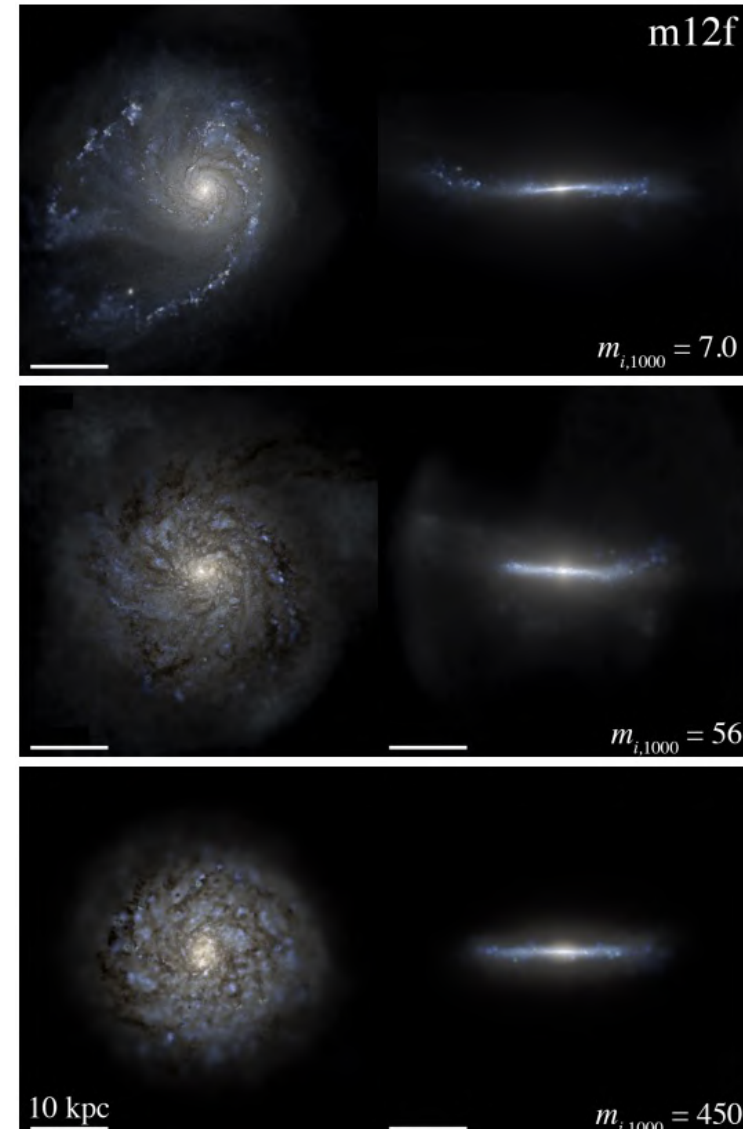
Une transition de galaxies riches en gaz et fragmentées à la sequence de Hubble vers $z=1$?



⇒ Les simulations cosmologiques fournissent-elles une explication à ces données observées ?

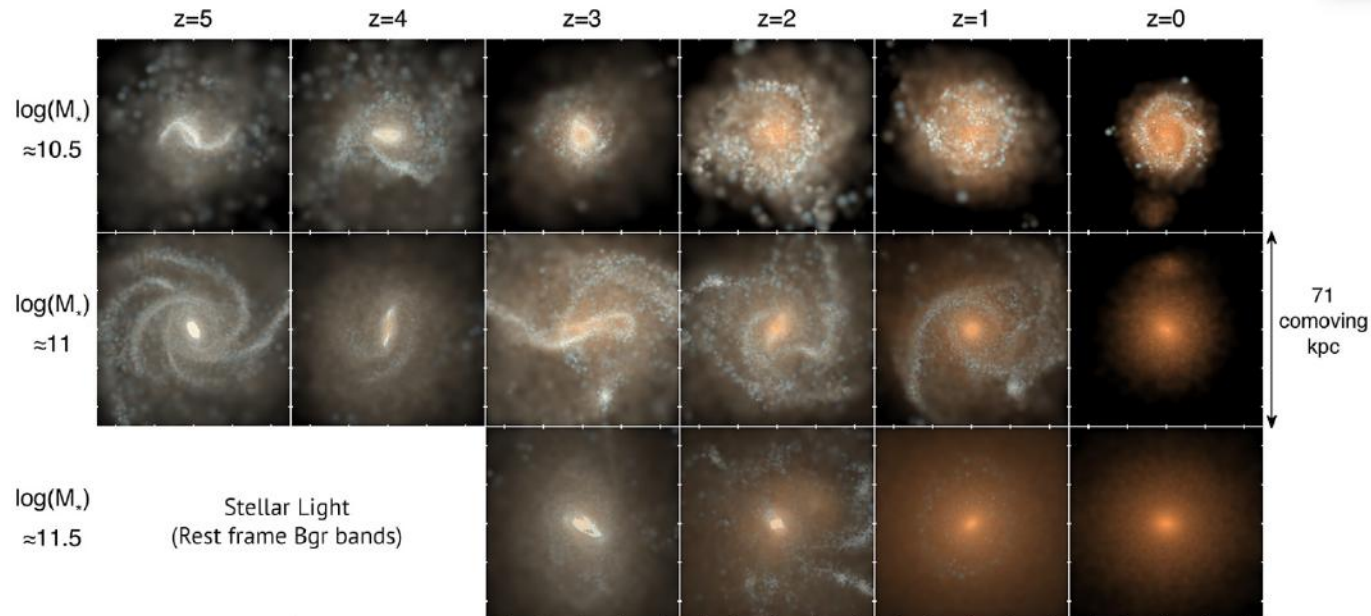
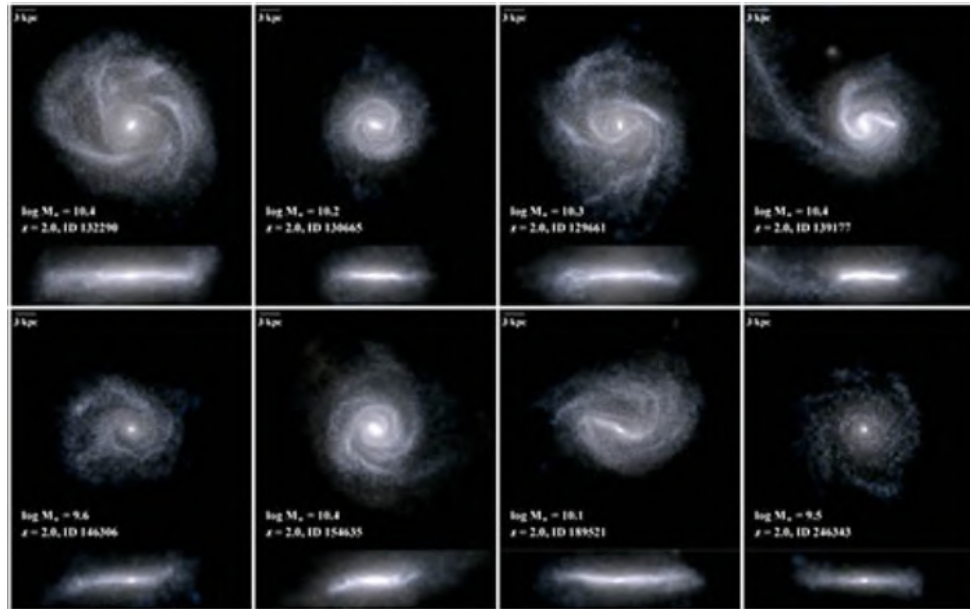
Les galaxies primordiales dans les simulations cosmologiques

La Séquence de Hubble actuelle formée trop précocément ?



Les galaxies primordiales dans les simulations cosmologiques

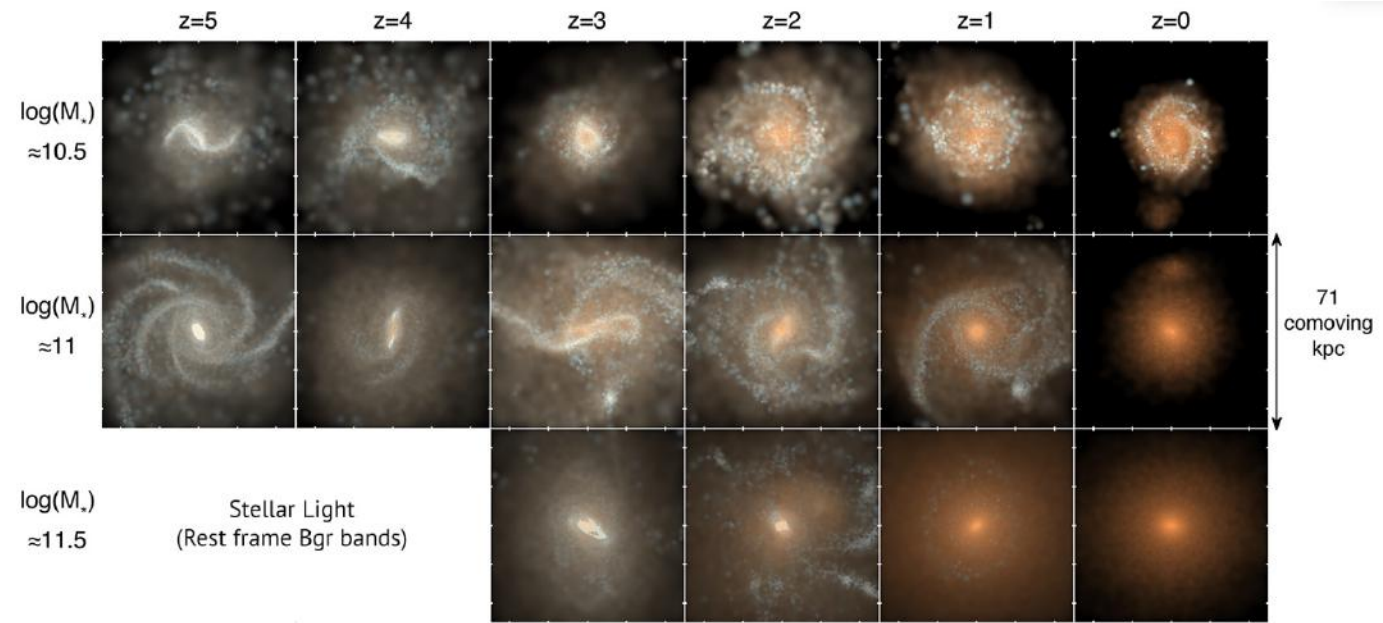
La Séquence de Hubble actuelle formée trop précocément ?



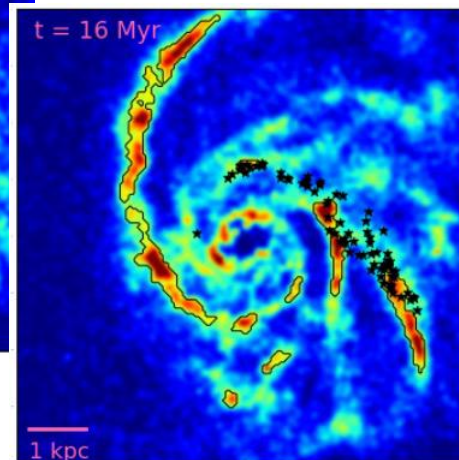
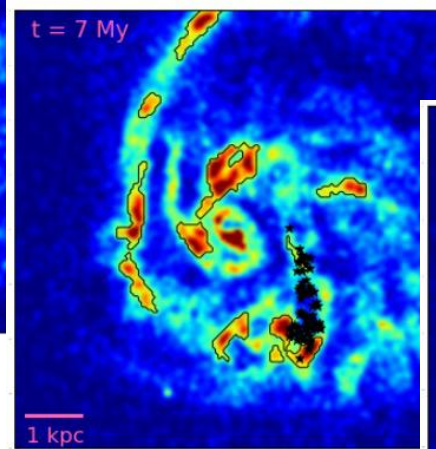
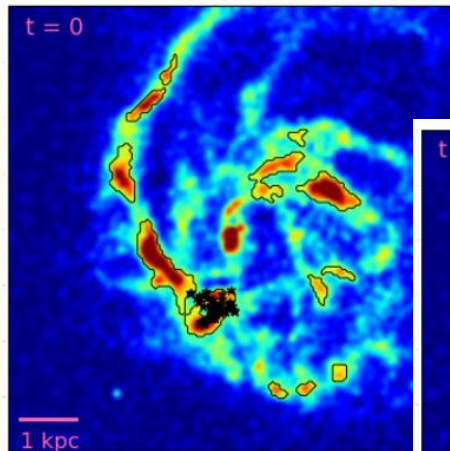
ILLUSTRIS GALAXIES

Les galaxies primordiales dans les simulations cosmologiques

La Séquence de Hubble actuelle formée trop précocément ?



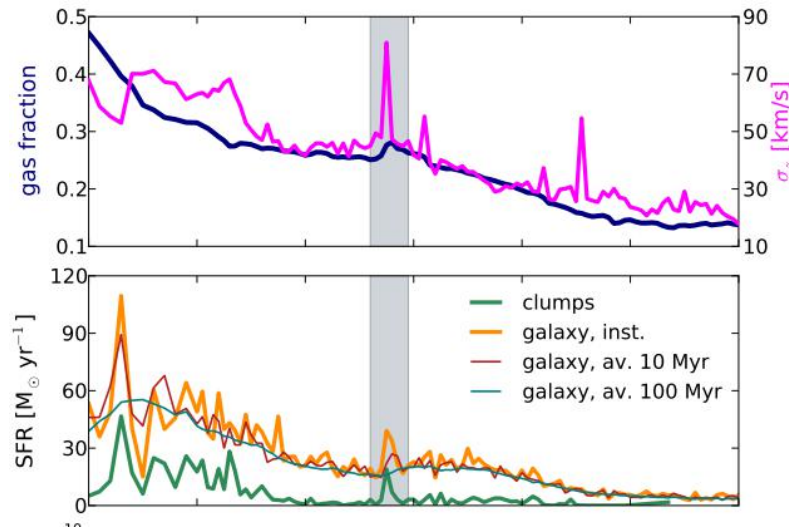
ILLUSTRIS GALAXIES



FIRE/Fire-2 : peu de gros clumps à $z \sim 2$, tout gros clump étant rapidement détruit ($< 10 \text{ Myr}$) (Oklopčić et al. 2015, Hopkins et al. 2018)

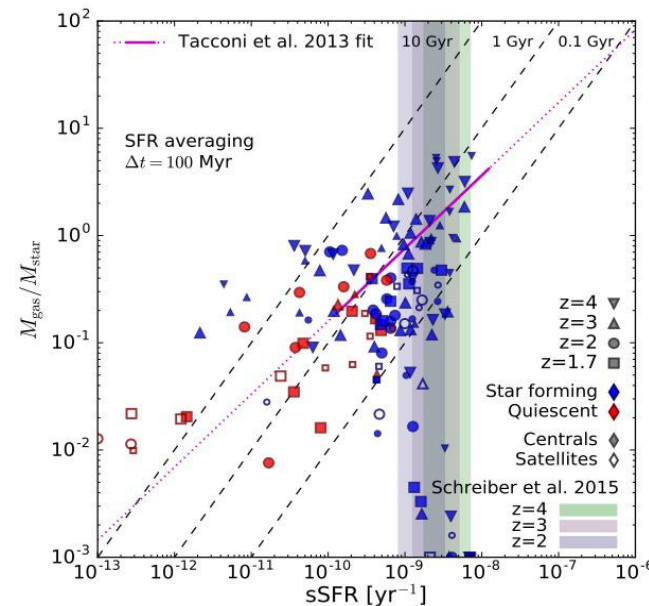
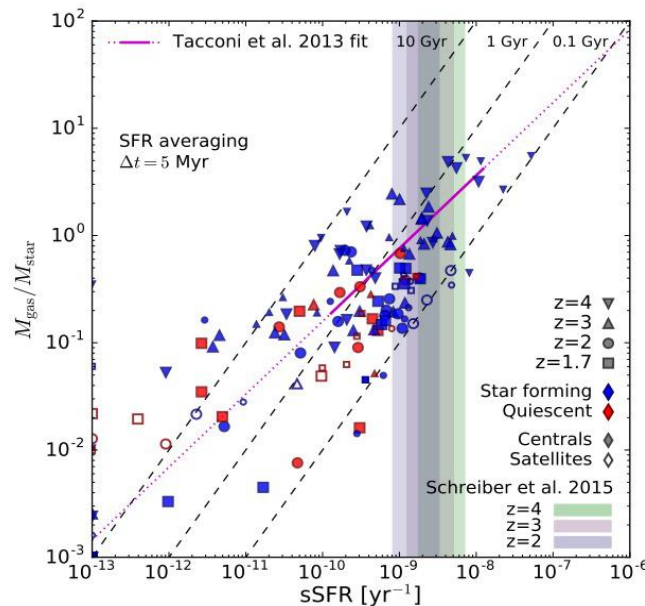
Les galaxies primordiales dans les simulations cosmologiques

Le gaz consommé ou expulsé trop vite ?



FIRE: fraction de gaz :
 ~20%, incluant tout le gaz dans une
 sphère de 25kpc de rayon...
 (Oklopčić Hopkins et al. 2016)

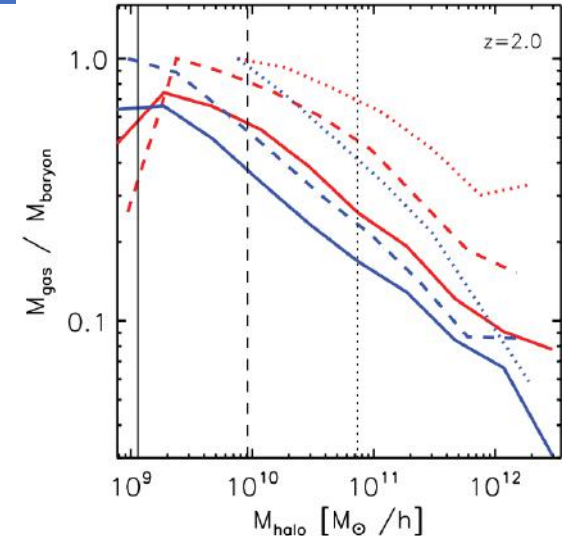
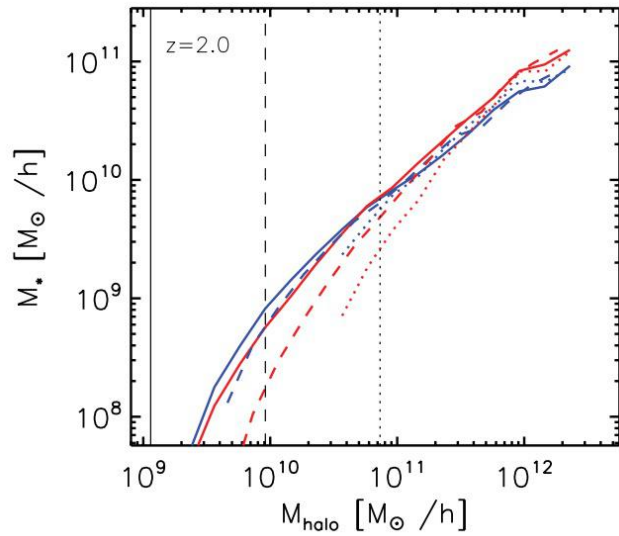
MassiveFIRE: Massive Galaxies at the Cosmic Noon



MassiveFIRE
 15% à z=2

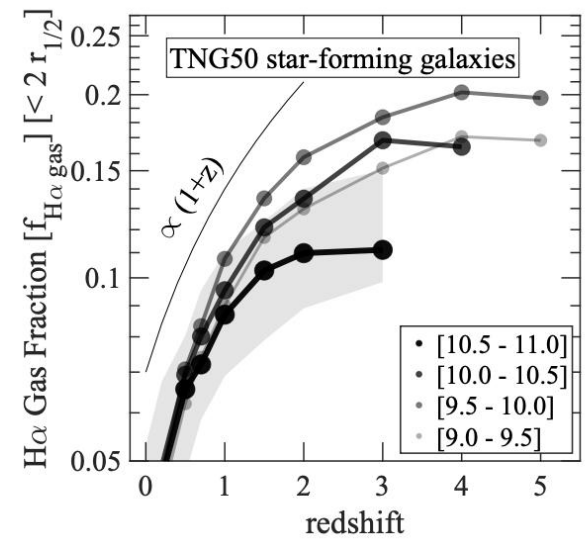
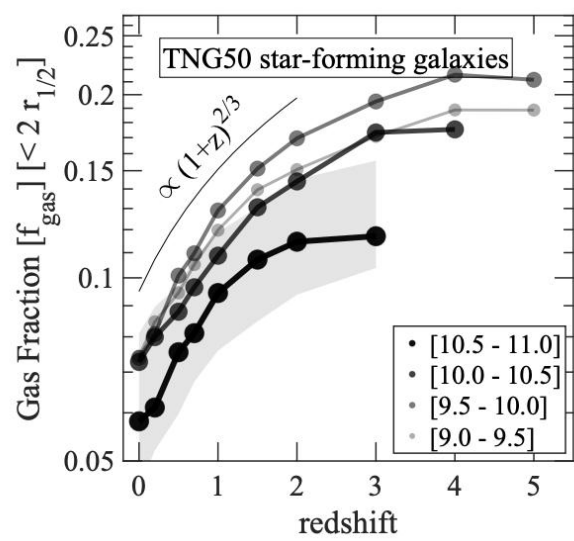
Les galaxies primordiales dans les simulations cosmologiques

Le gaz consommé ou expulsé trop vite ?



ILLUSTRIS : $M^* > 10^{10} \Rightarrow f_{\text{gas}}$ de 10-25% seulement (Keres et al. 17)

TNG50 galaxies: stellar and gaseous disks

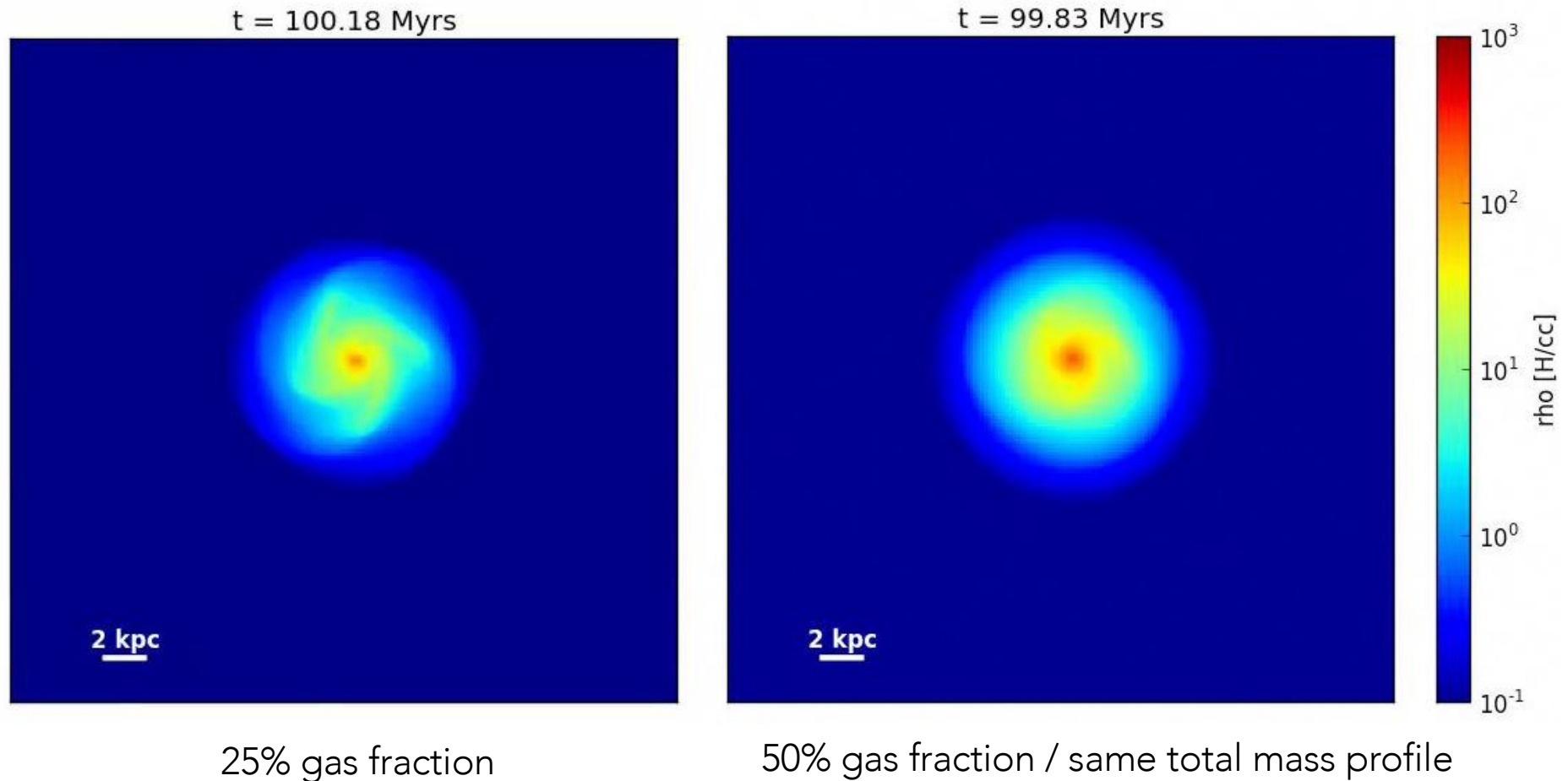


$z=2$ galaxies :
en moyenne 12%

ILLUSTRIS-TNG50 (Pillepich et al. 2019)

Les galaxies primordiales et la fraction de gaz

Un parametre majeur pour la morphologie



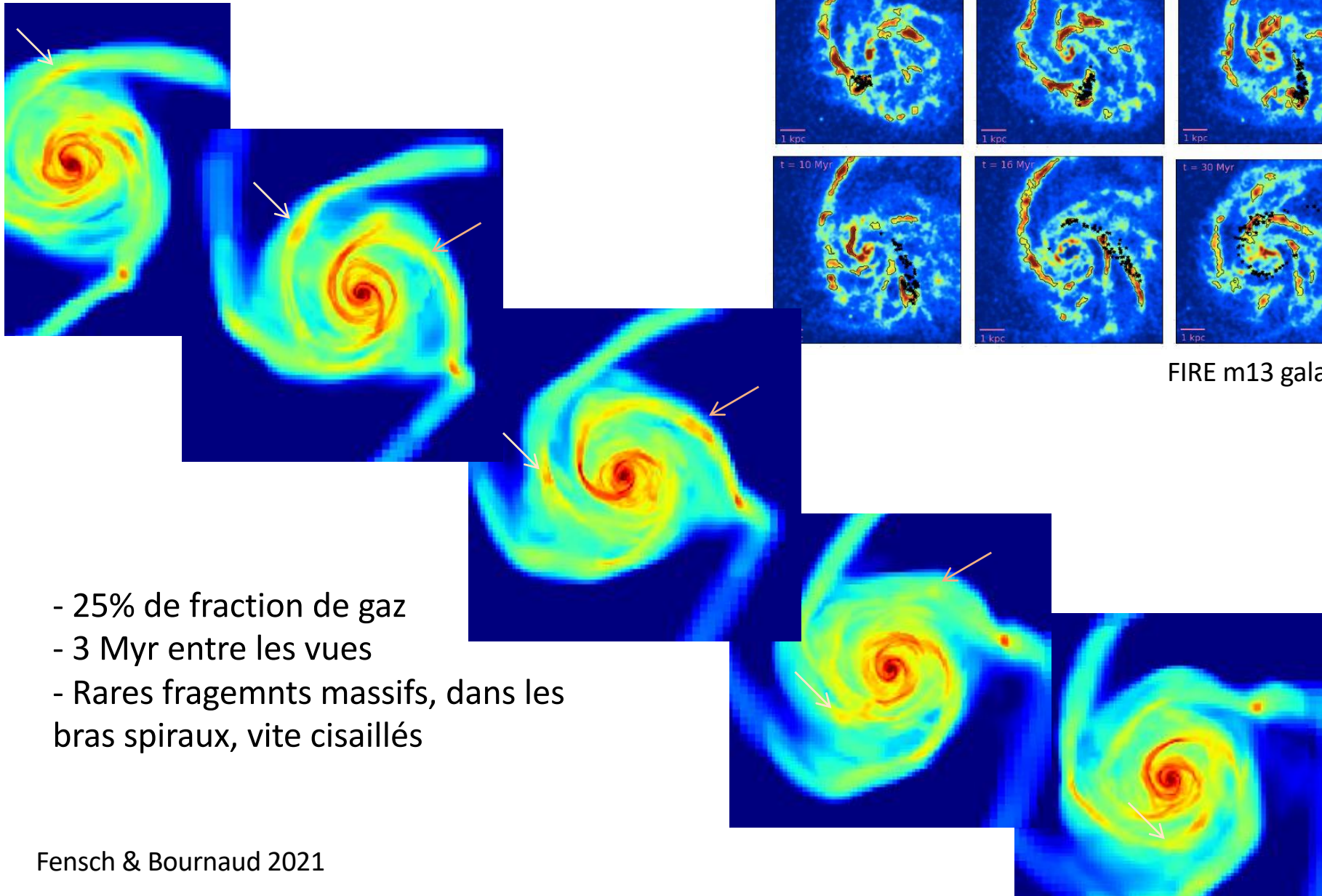
25% vs. 50% de gaz :

la morphologie et l'évolution disque/bulge sont radicalement différentes

(simulations idéalisées à meme distribution de masse totale)

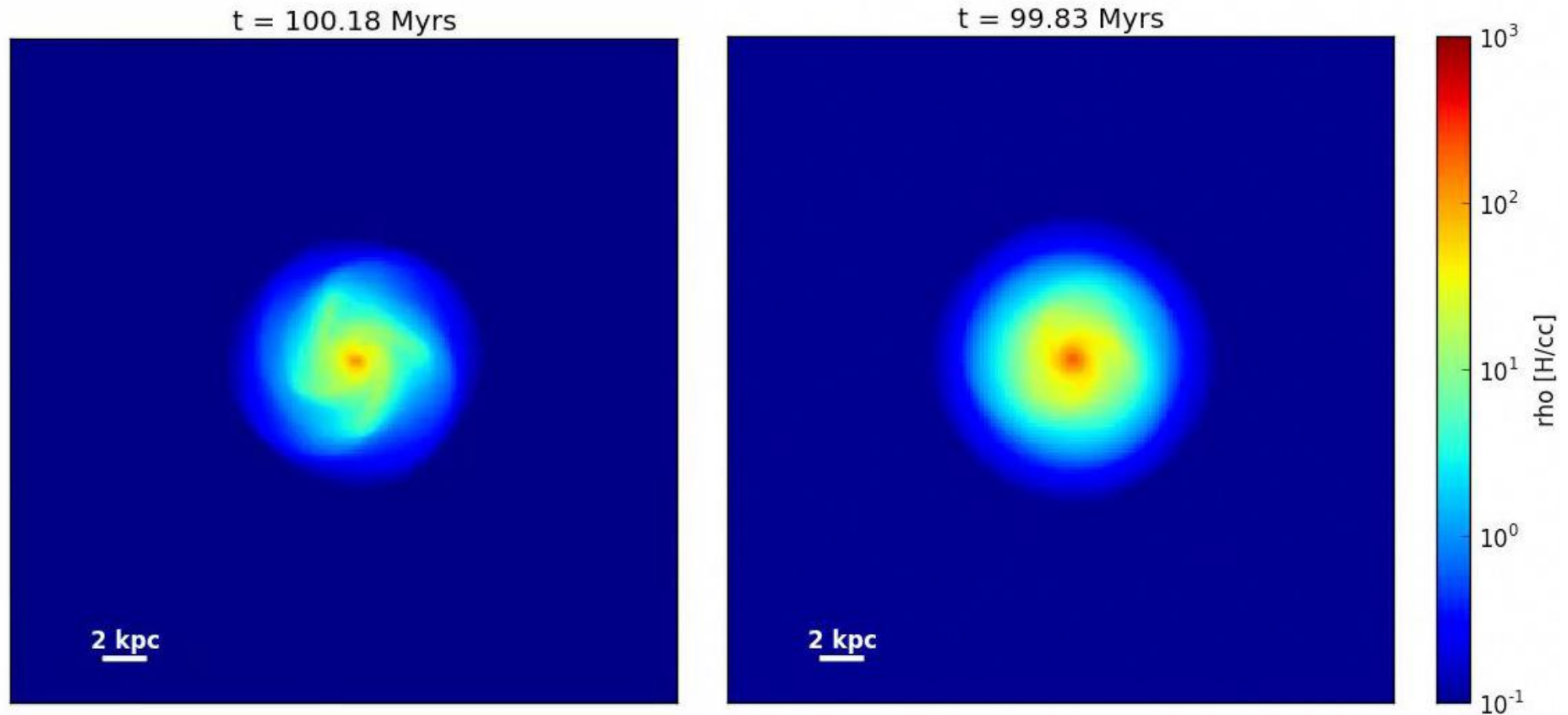
Les galaxies primordiales et la fraction de gaz

Un parametre majeur pour la morphologie



Les galaxies primordiales et la fraction de gaz

Un parametre majeur pour la morphologie



15-20% de gaz

Rétroaction Faible :

2nergie thermique des SN seulement

50% de gaz

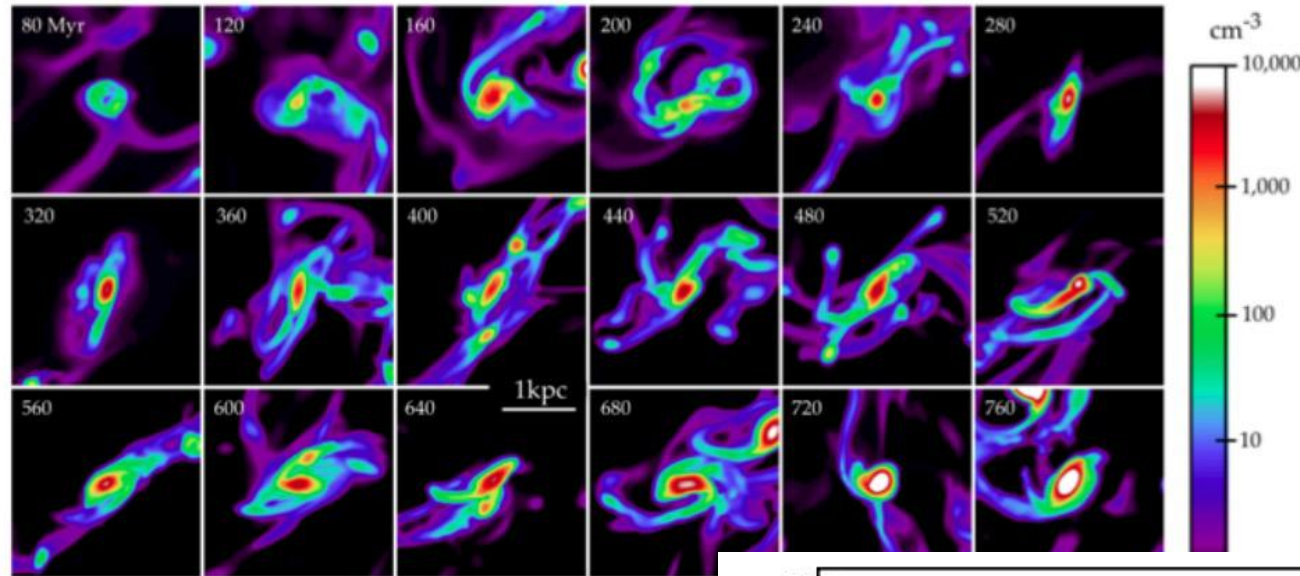
Rétroaction Forte :

SN thermique+cinétique + photoionisation
+ pression de rayonnement

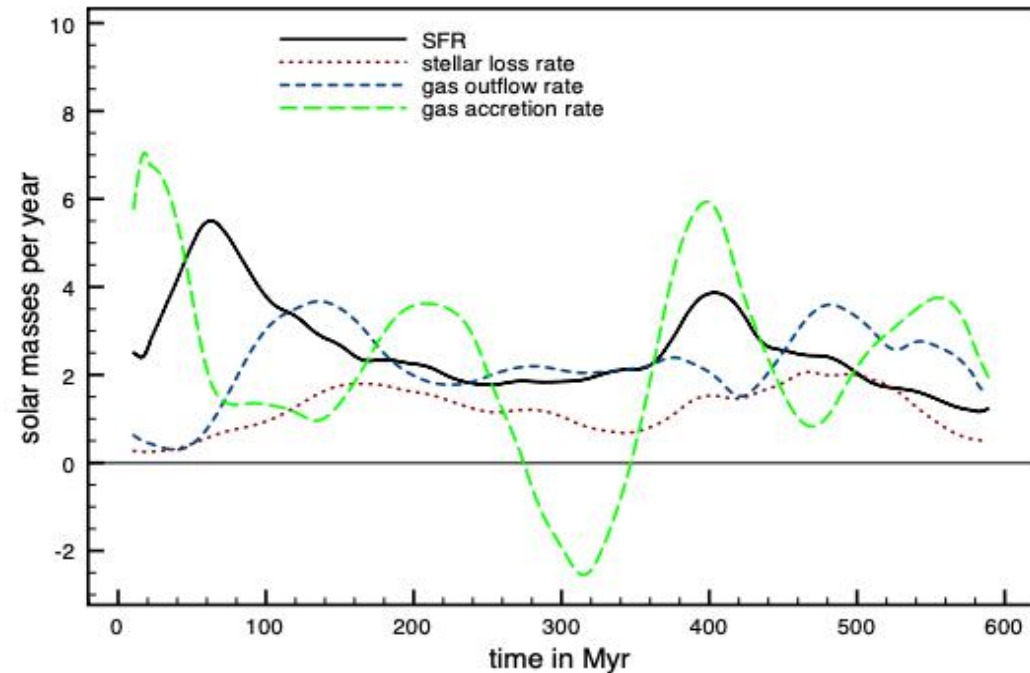
- La différence est bien dûe à la fraction de gaz
- La rétroaction n'y contribue pas

L'évolution des fragments galactiques géants

Ils résistent à la rétroaction des étoiles massives (supernovae...)

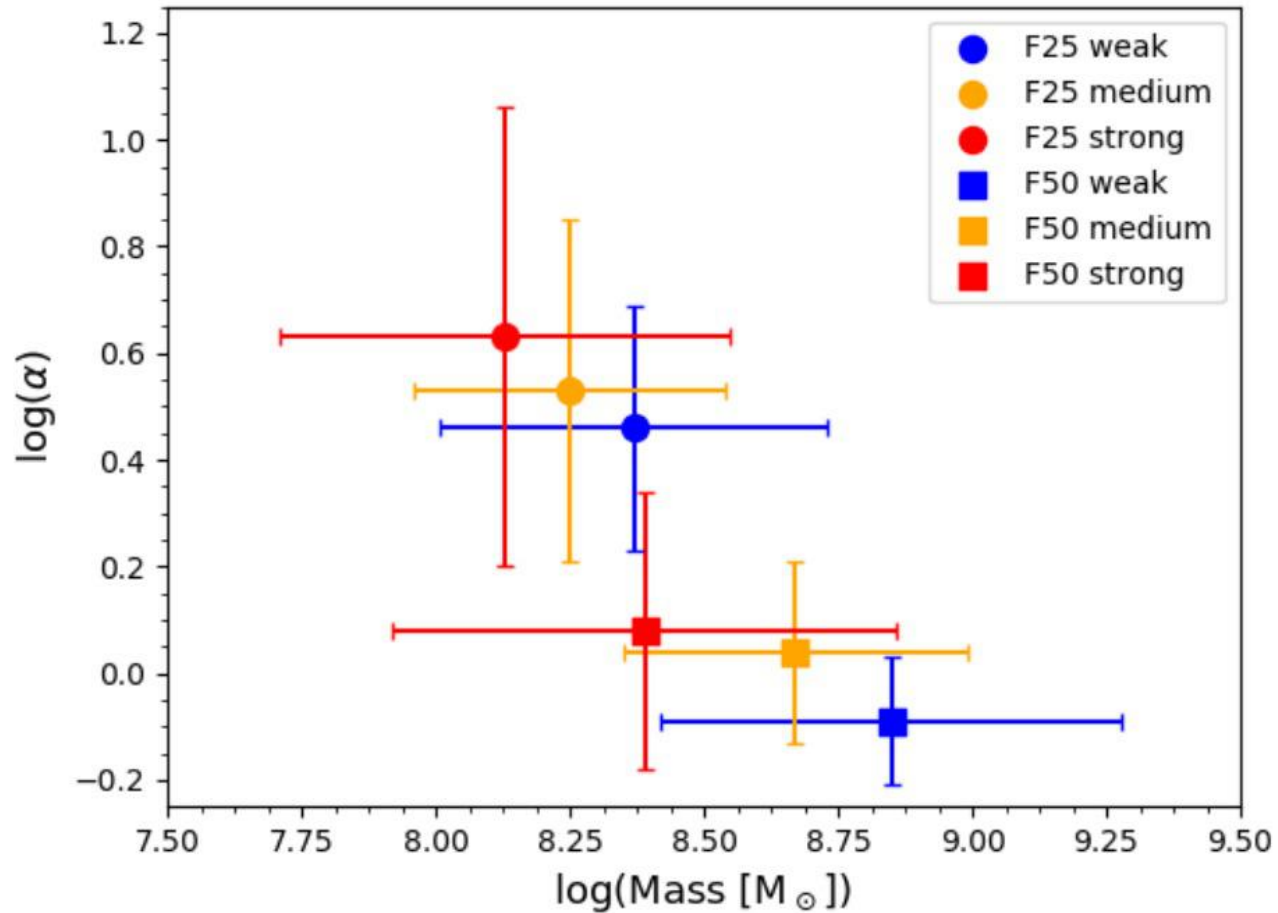


Un gros fragment qui orbite dans un disque a une section efficace de capture non négligeable : il accrète continuellement autant de masse qu'il en perd (gaz et étoiles)



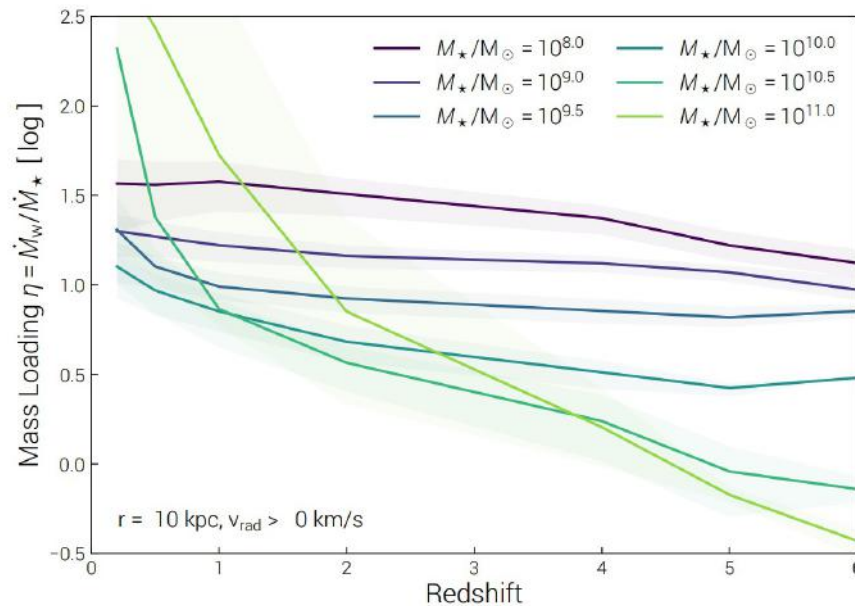
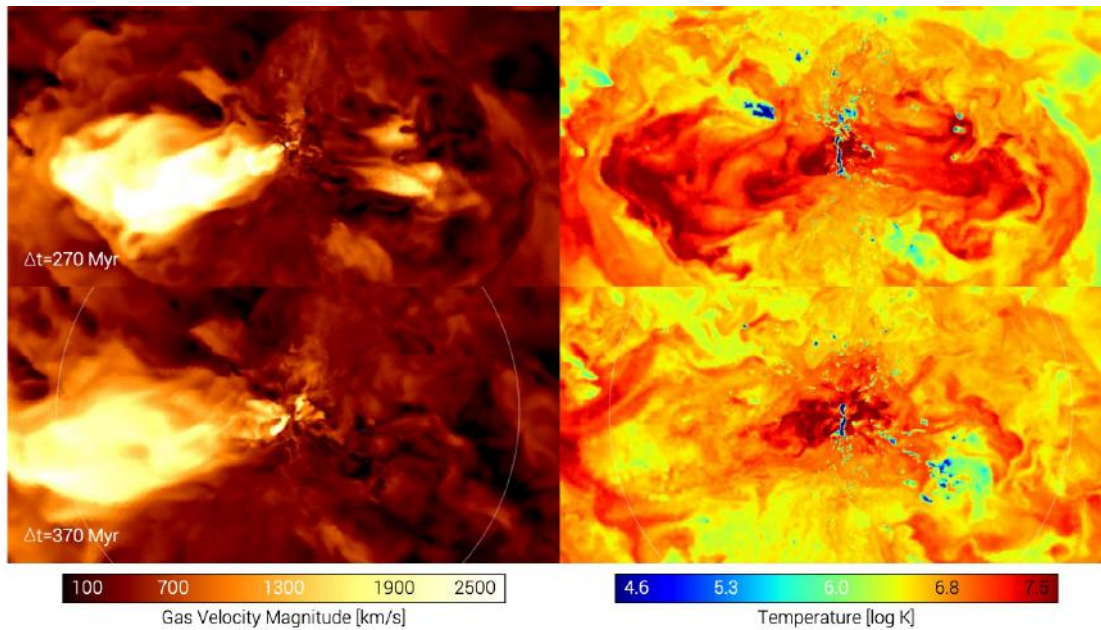
Les galaxies primordiales et la fraction de gaz

Un parametre majeur pour la morphologie



50% de gaz : fragments massifs, liés
25% de gaz : petits nuages transitoires

Les galaxies simulées expulsent trop de gaz (pour une bonne raison : réguler leur masse stellaire finale)



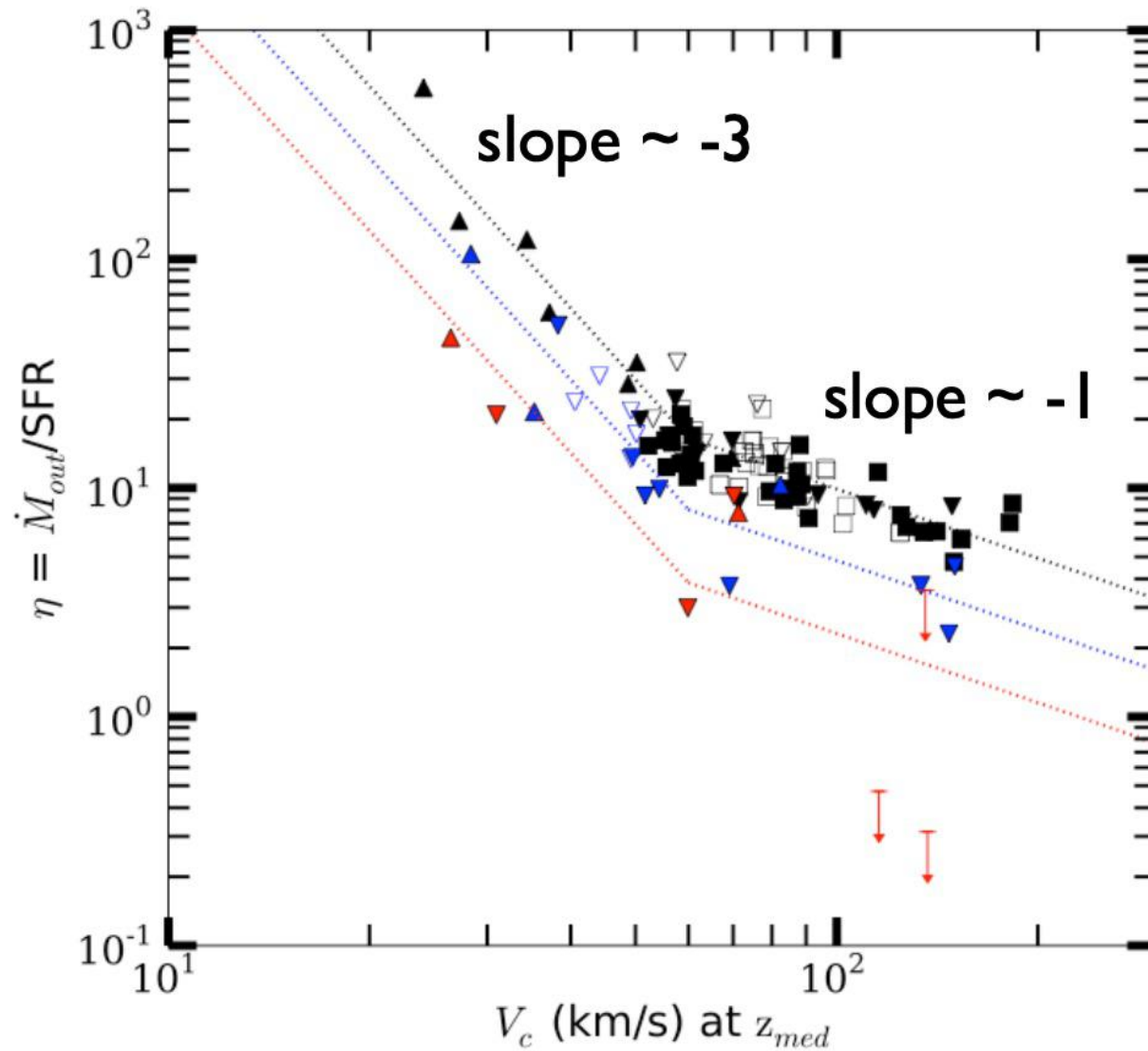
Facteur de charge η des vents galactiques:

$\eta = \text{taux d'échappement} / \text{taux de formation d'étoiles}$

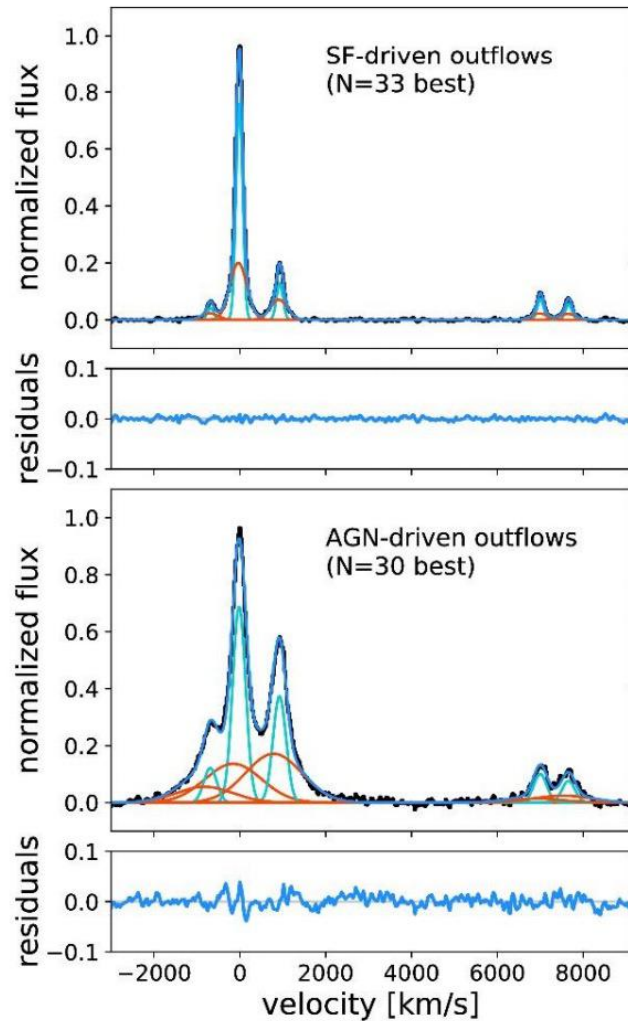
ILLUSTRIS : $\eta \sim 10\text{-}30$

**Nelson et al. 2019
(Illustris-TNG50)**

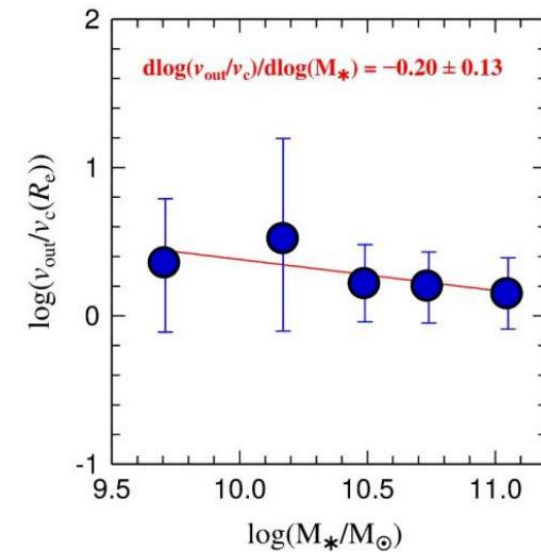
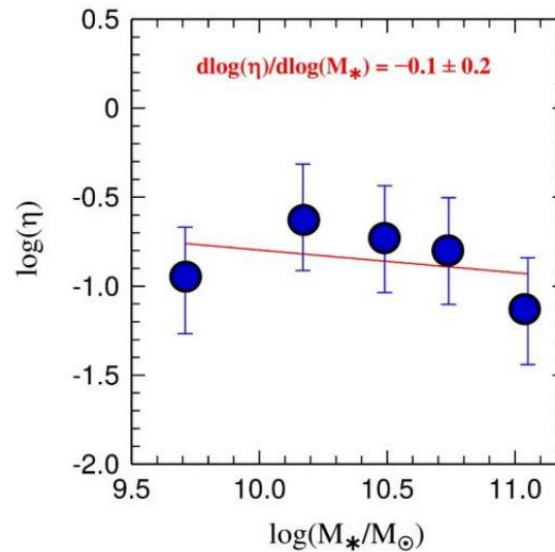
Les galaxies simulées expulsent trop de gaz (pour une bonne raison : réguler leur masse stellaire finale)



Les galaxies simulées expulsent trop de gaz (pour une bonne raison : réguler leur masse stellaire finale)

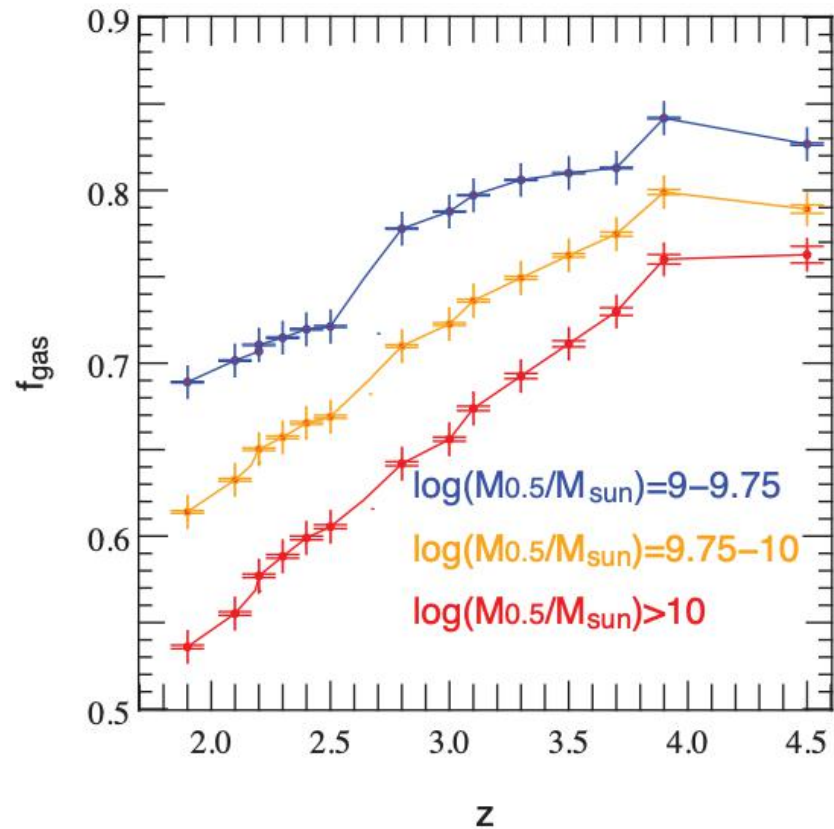


$$\eta \sim 0.3 \text{ et } \leq 1$$



« broad lines » dans les spectres de gaz des galaxies
= source des vents galactiques (> vitesse d'échappement)
Förster-Schreiber et al. (2019) (KMOS)

Une expulsion de gaz raisonnable formerait des galaxies fragmentées (mais peut-être trop massives (?))

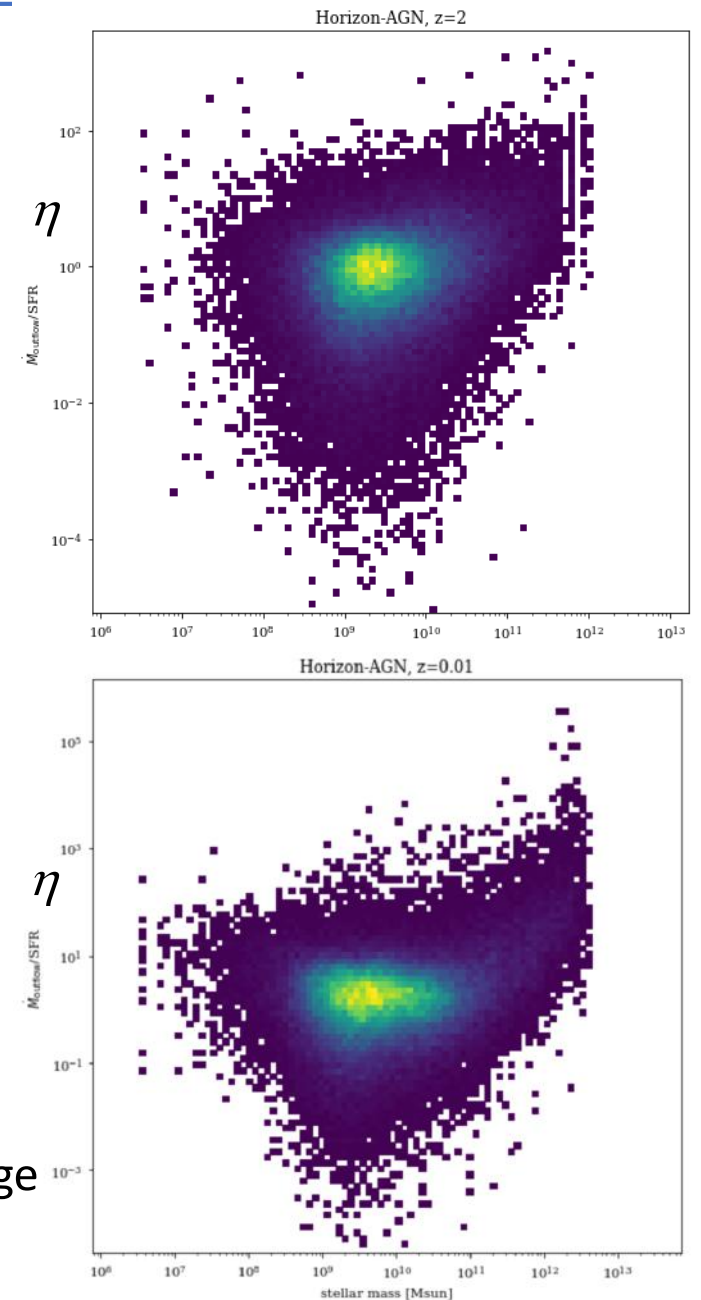


Horizon-AGN

Dubois et al. 2016

Welker et al. 2017

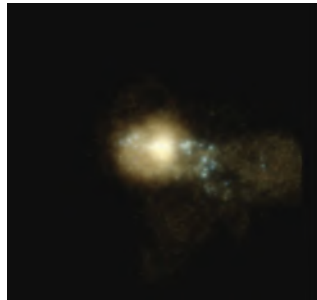
Facteurs de charge
Chabanier+2020



Une expulsion de gaz raisonnable formerait des galaxies fragmentées (*mais peut-être trop massives (?)*)

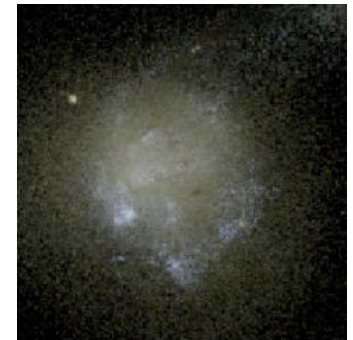


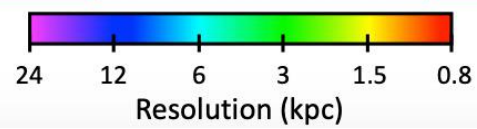
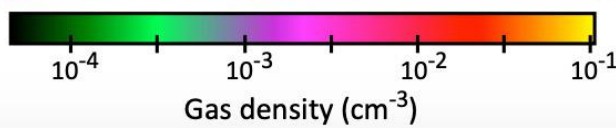
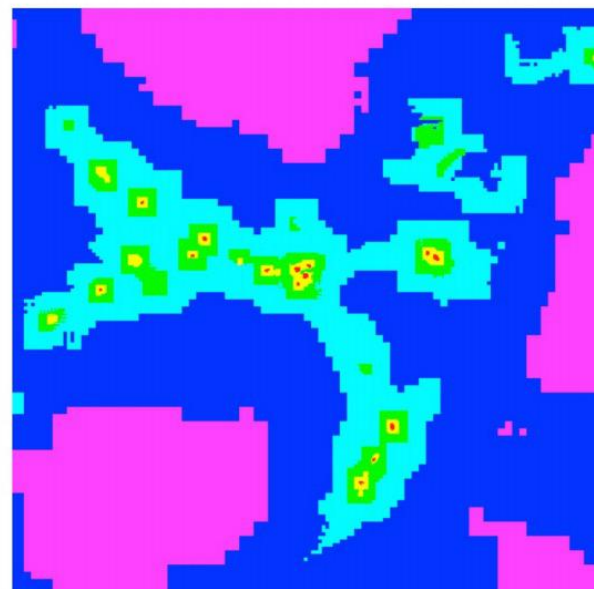
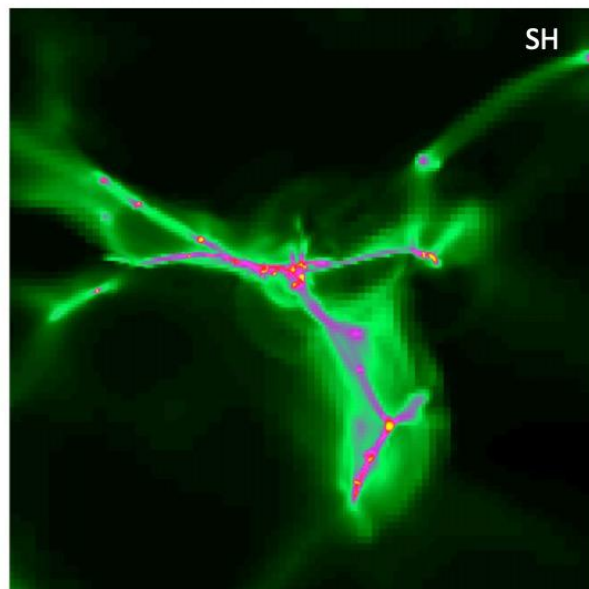
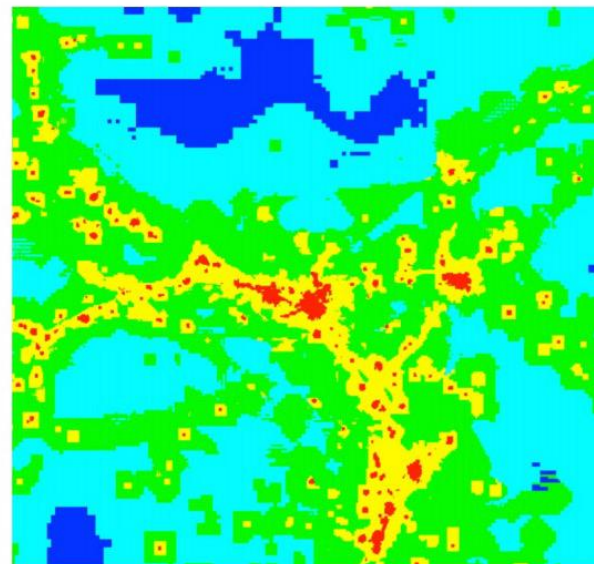
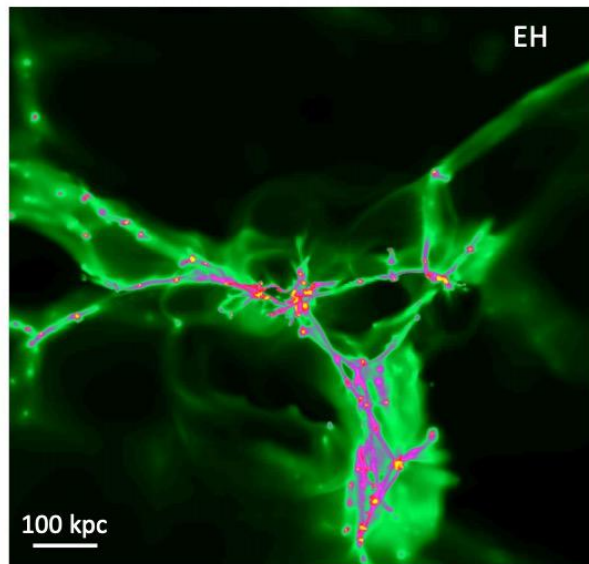
Welker+17
Z~2 Horizon-AGN



New-Horizon

Dubois et al. 2020

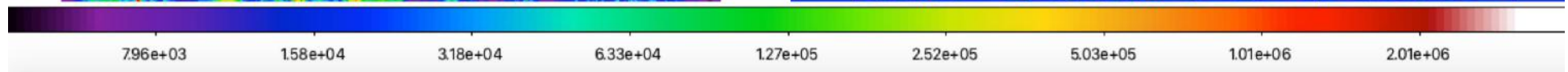
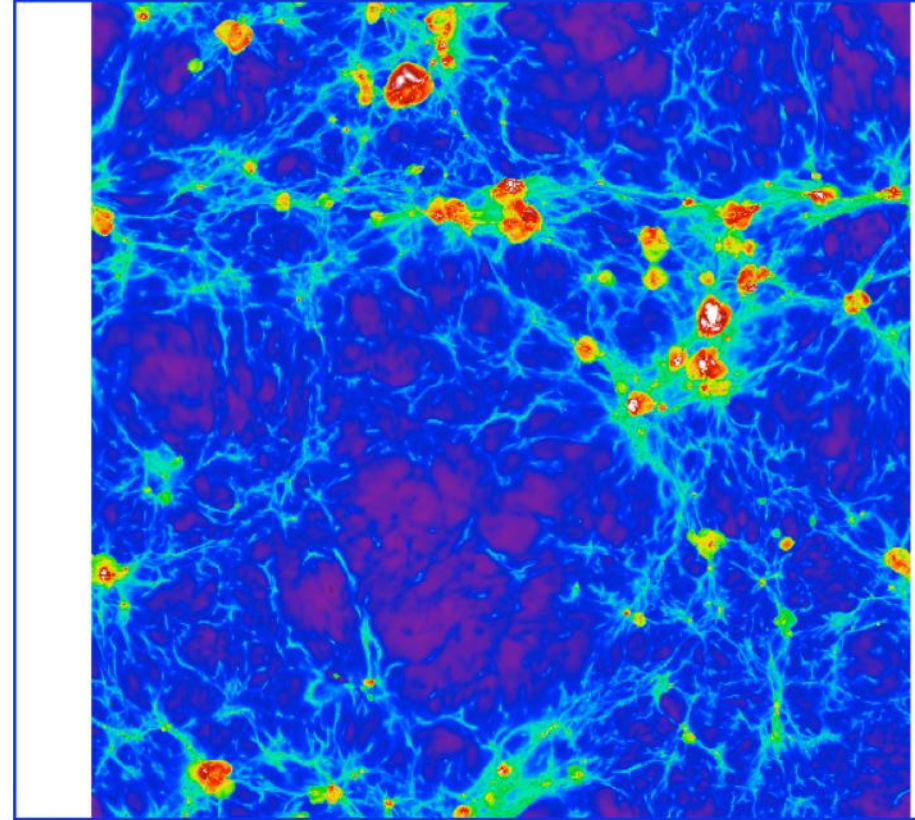
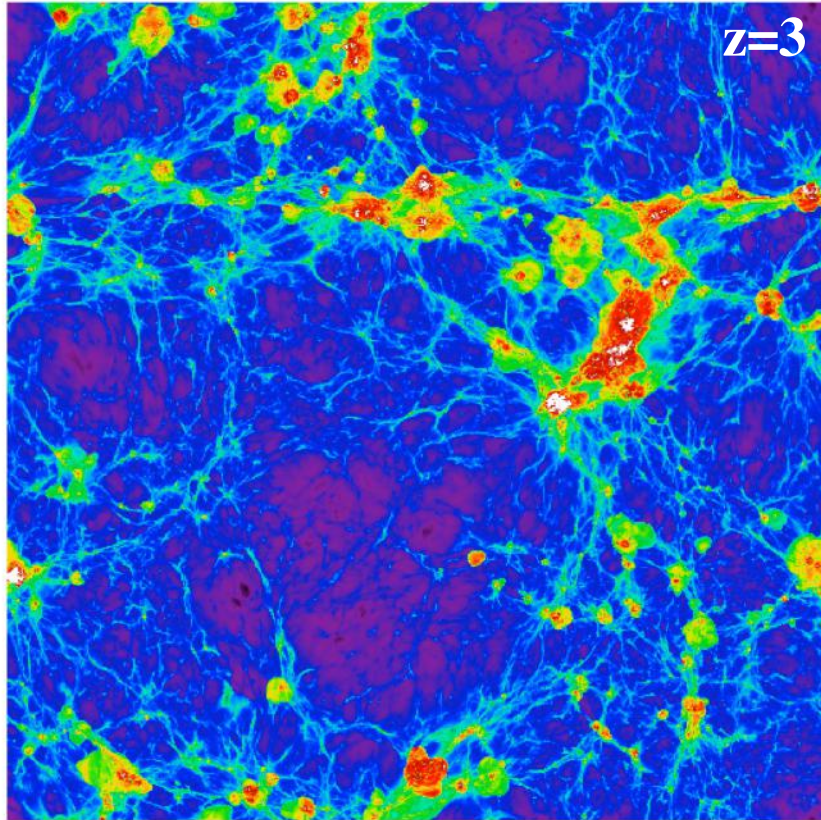




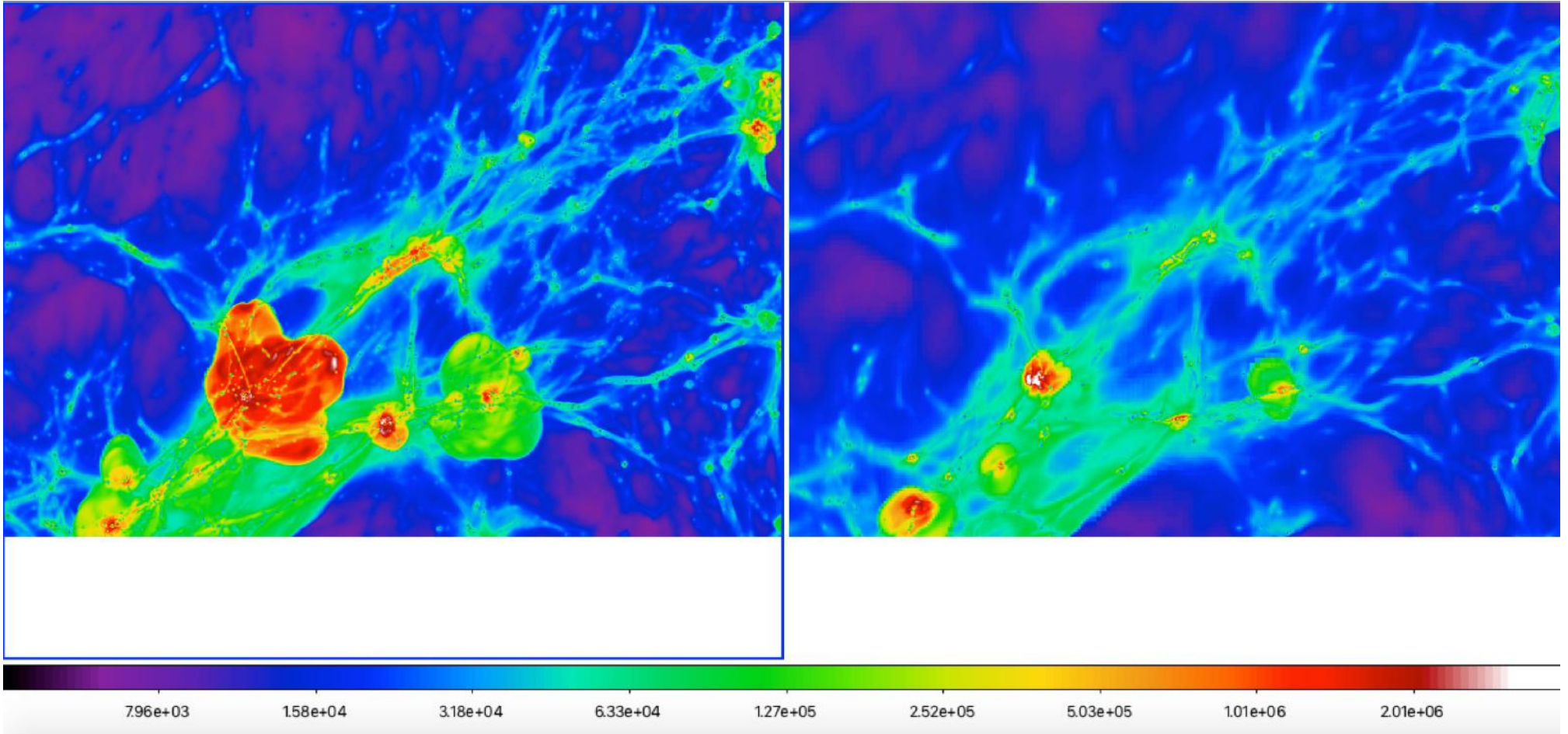
Chabanier+2020

EXTREME-HORIZON

Same box, Horizon-AGN resolution

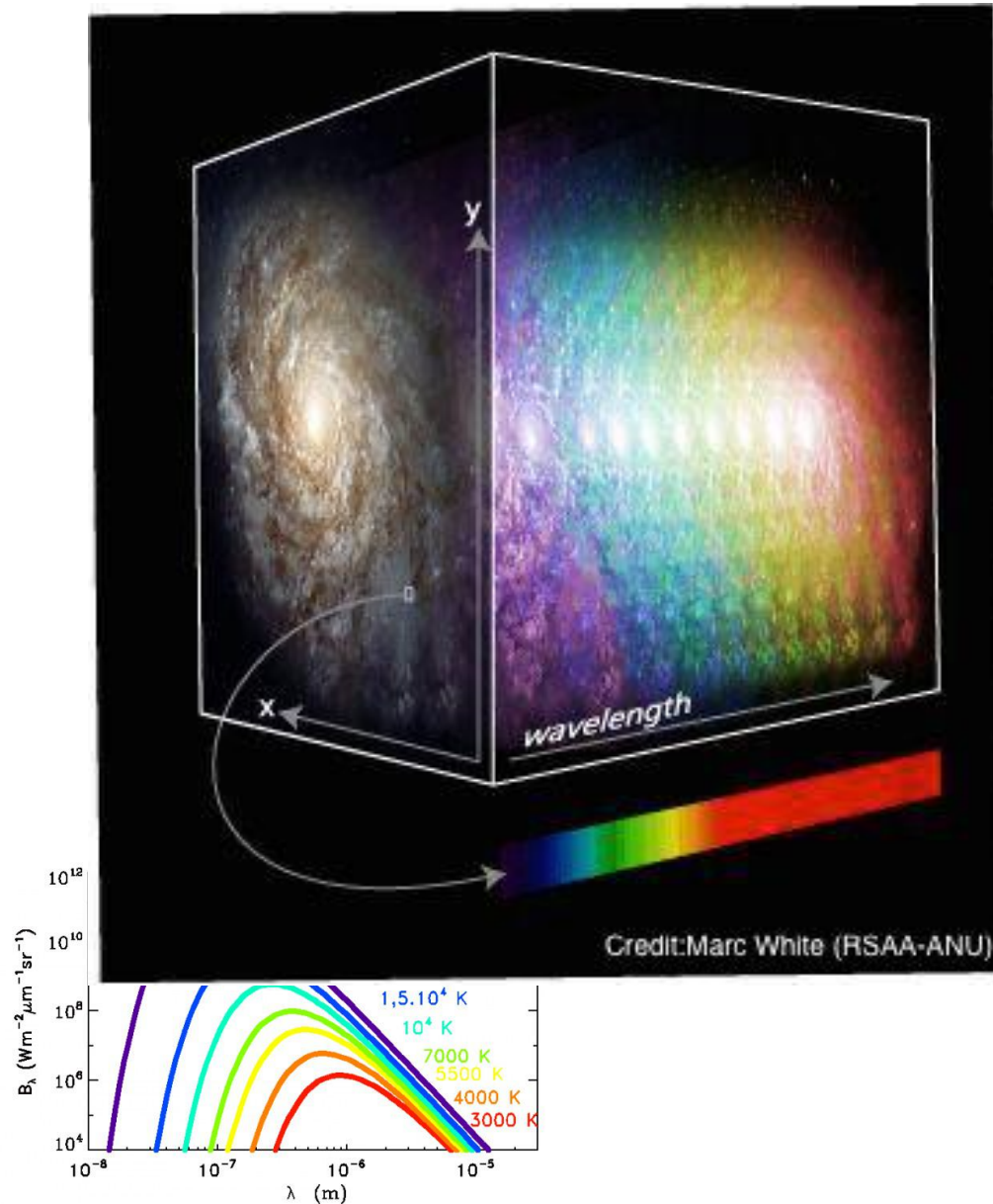


Same box, Horizon-AGN resolution



Une nouvelle vue des galaxies lointaines avec JWST

Une formation très rapide de la sequence de Hubble ?



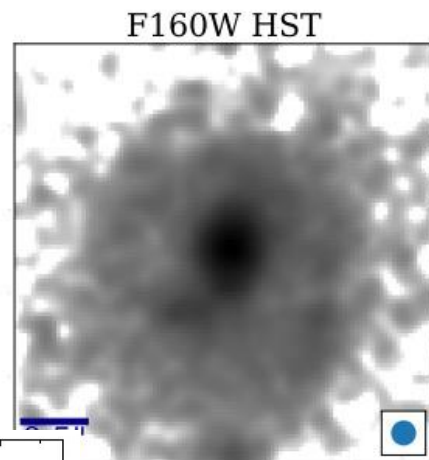
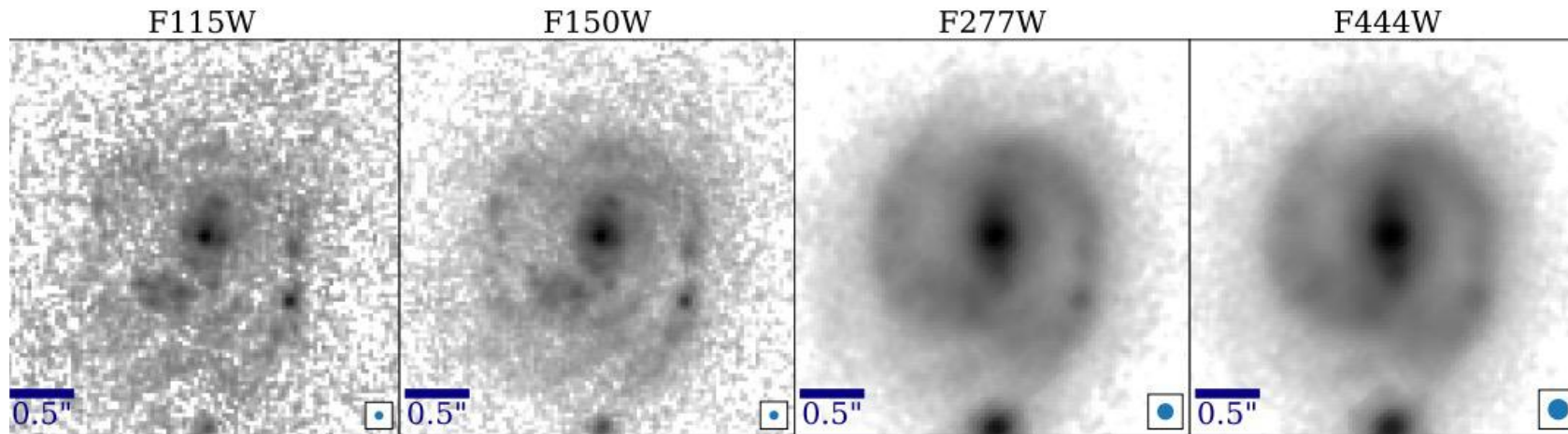
Les galaxies se morcellent aussi en fonction de la longueur d'onde

Ici $M^* = 10^{11}$ à $z=2$, $f_{\text{gas}}=26\%$

Clumps bleus/UV seulement
Masse essentiellement spirale
Surprise : forte barre

Une nouvelle vue des galaxies lointaines avec JWST

Une formation très rapide de la séquence de Hubble ?



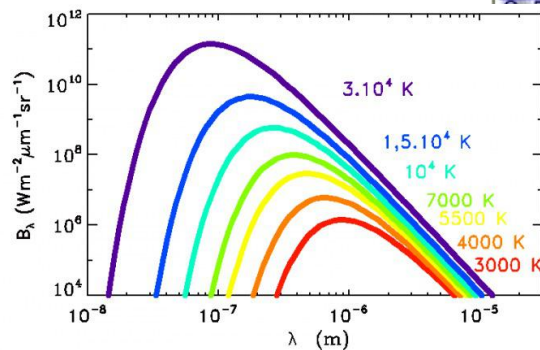
Guo, Jogee et al. 2022

Les galaxies se morcellent aussi en fonction de la longueur d'onde

Ici $M^* = 10^{11}$ à $z=2$, $f_{\text{gas}}=26\%$

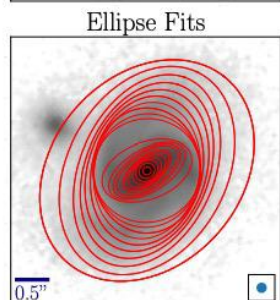
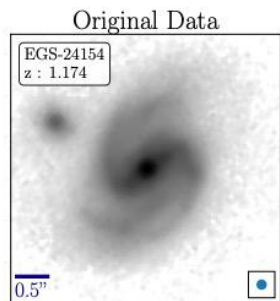
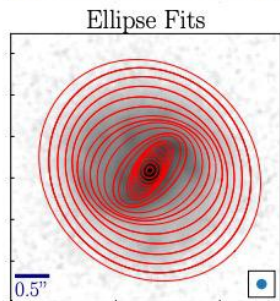
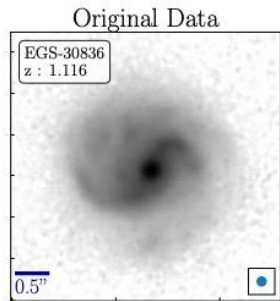
Clumps bleus/UV seulement
Masse essentiellement spirale

Surprise : forte barre



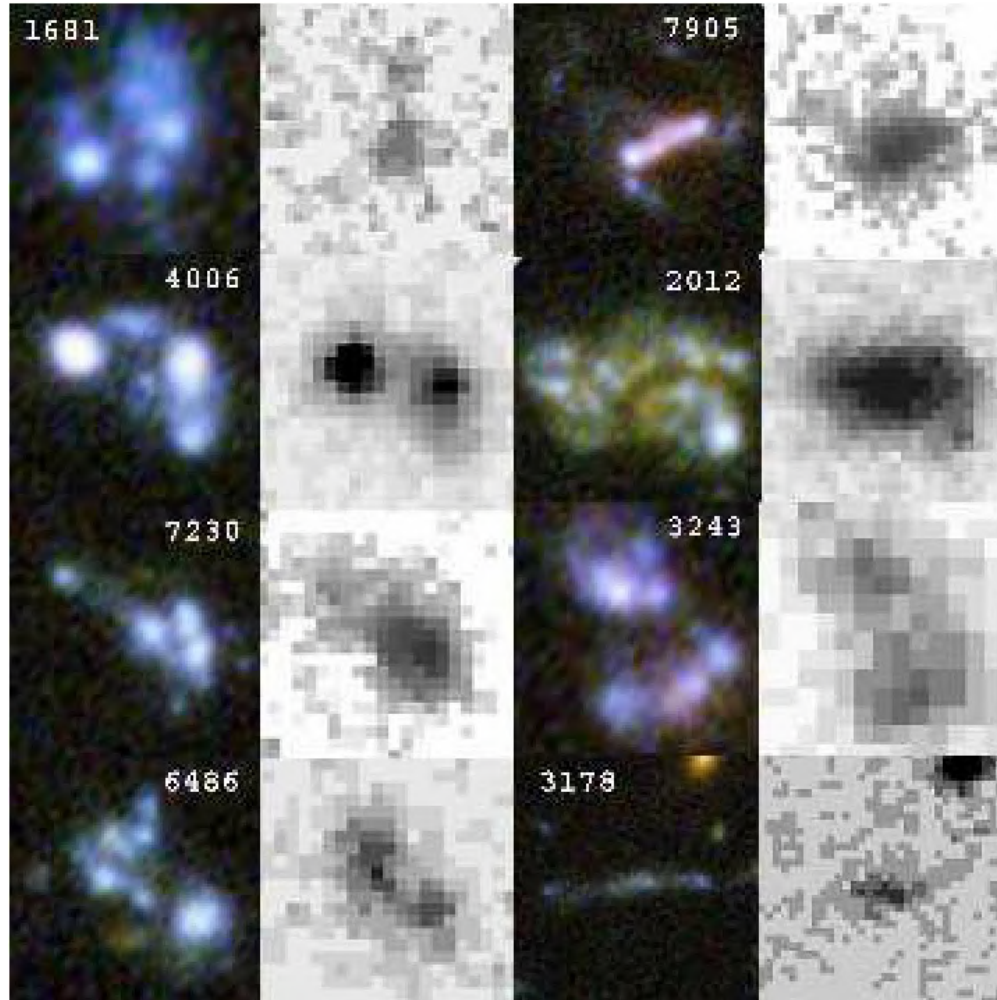
Une nouvelle vue des galaxies lointaines avec JWST

Une formation très rapide de la sequence de Hubble ?



Guo, Jogee et al. 2022

JWST proche-infrarouge

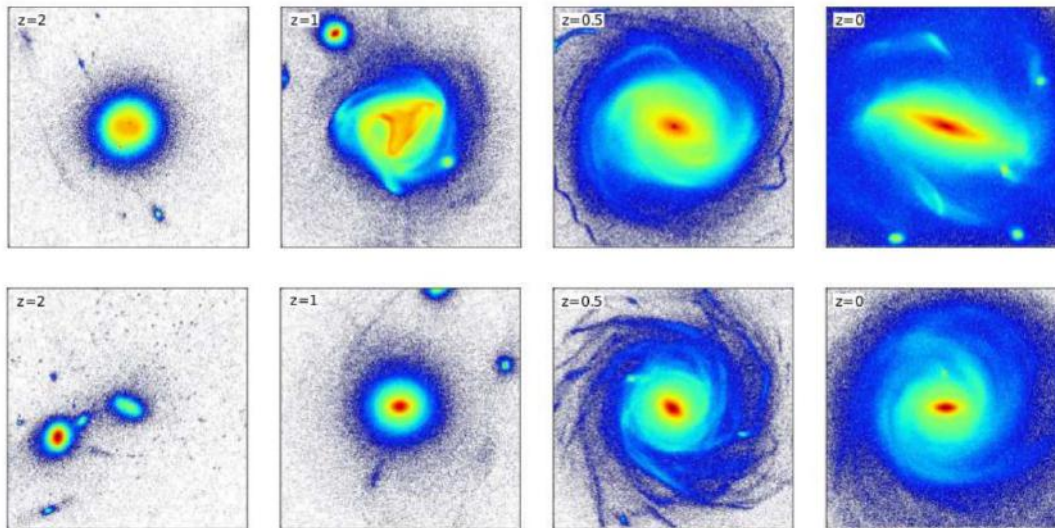
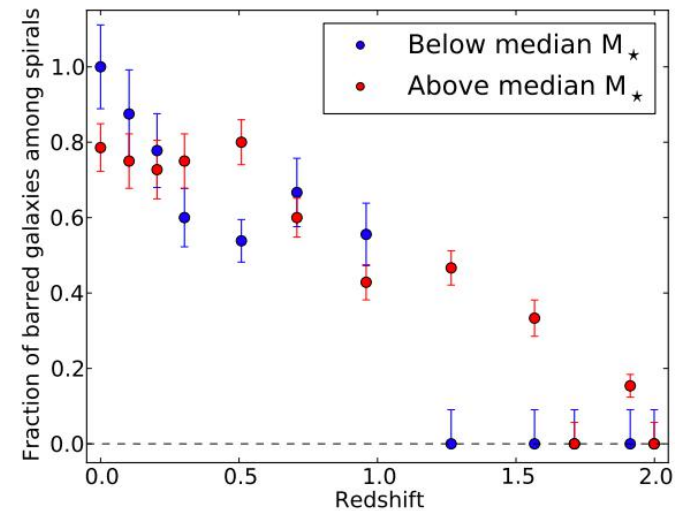
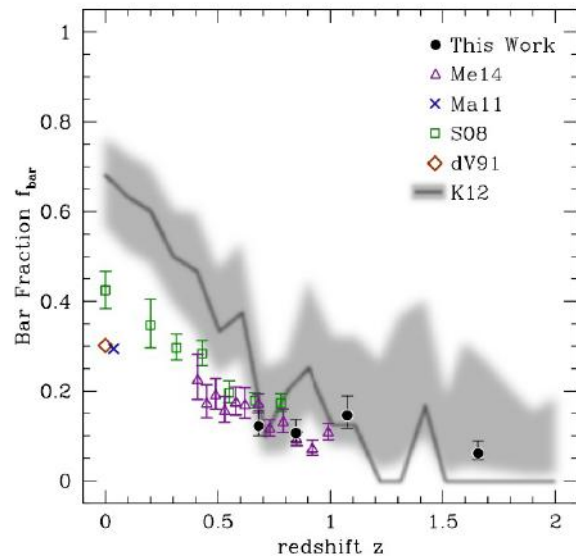


HST optique + proche-infrarouge

Elmegreen+2015

Formation tardive des barres... ou précoce ?

Vers une forte dépendance en masse



Karljic + 2014
Sheth+2008,16

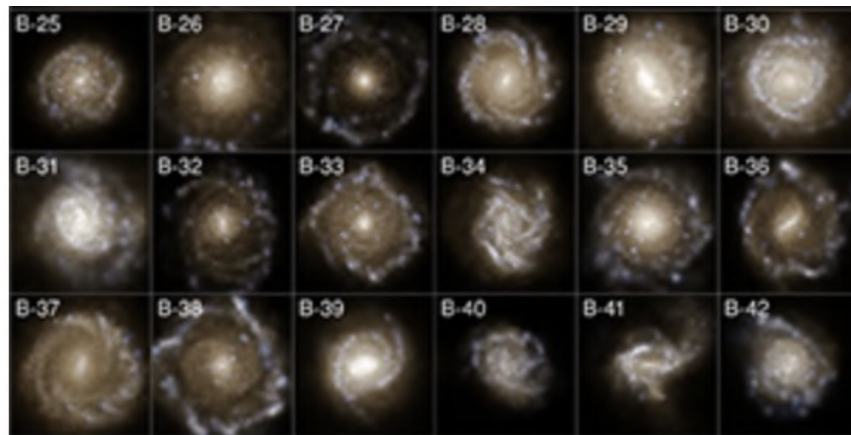
A la masse de la Voie Lactée et de ses progéniteurs, les barres se forment tardivement ($z < 1$) et les disques primordiaux ($z > 1$) sont irréguliers/fragmentés

Cette vision n'est pas forcément remise en Cause par JWST pour la masse de la Voie Lactée

=> Mais comment les galaxies plus massives peuvent-elles aboutir très tôt à une séquence de Hubble « calme » ?

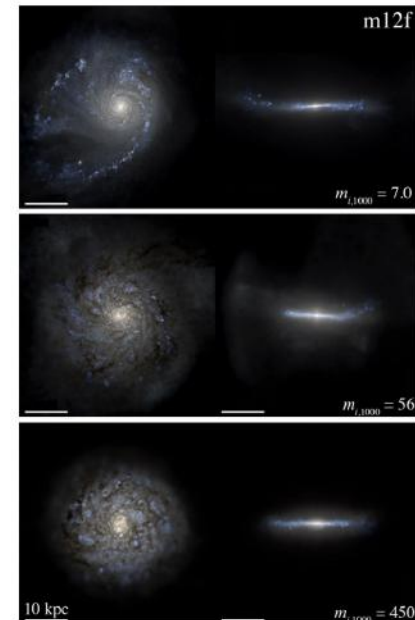
Une nouvelle vue des galaxies lointaines avec JWST

Des barres peu présentes dans les simulations cosmologiques



Sample of 42 blue, disk galaxies, showing the stellar light distribution (SDSS g,r,i band composites).

ILLUSTRIS

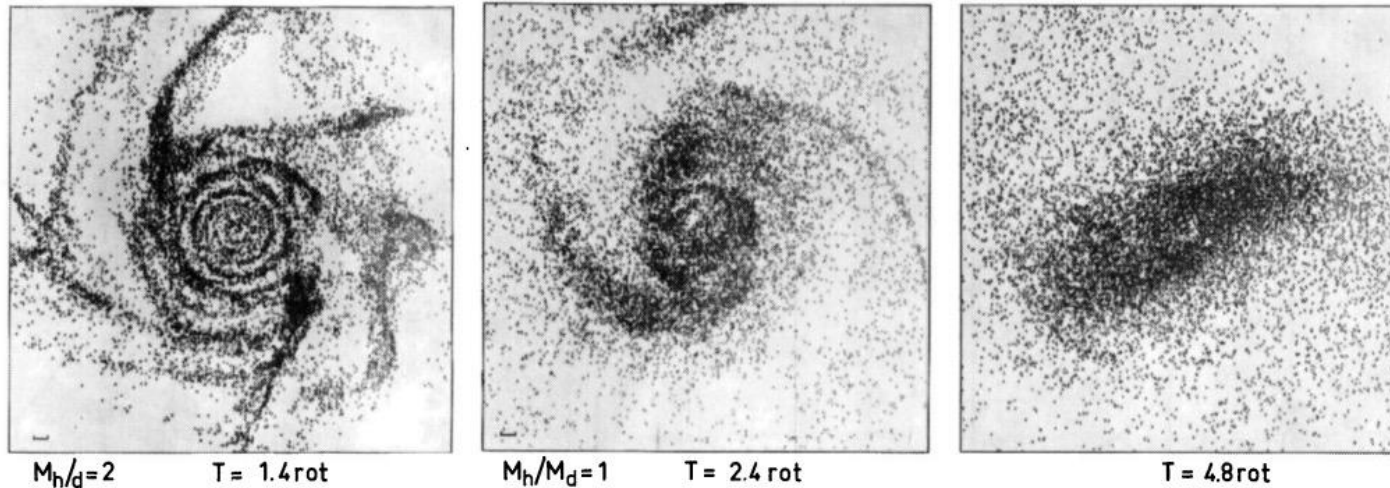


FIRE

Les simulations cosmologiques manquent de barres à $z=2$
(même à $z=0$, problème supplémentaire)

Des barres qui devraient se former aisément

Presque toute simulation idéalisée forme une barre en un temps de Hubble



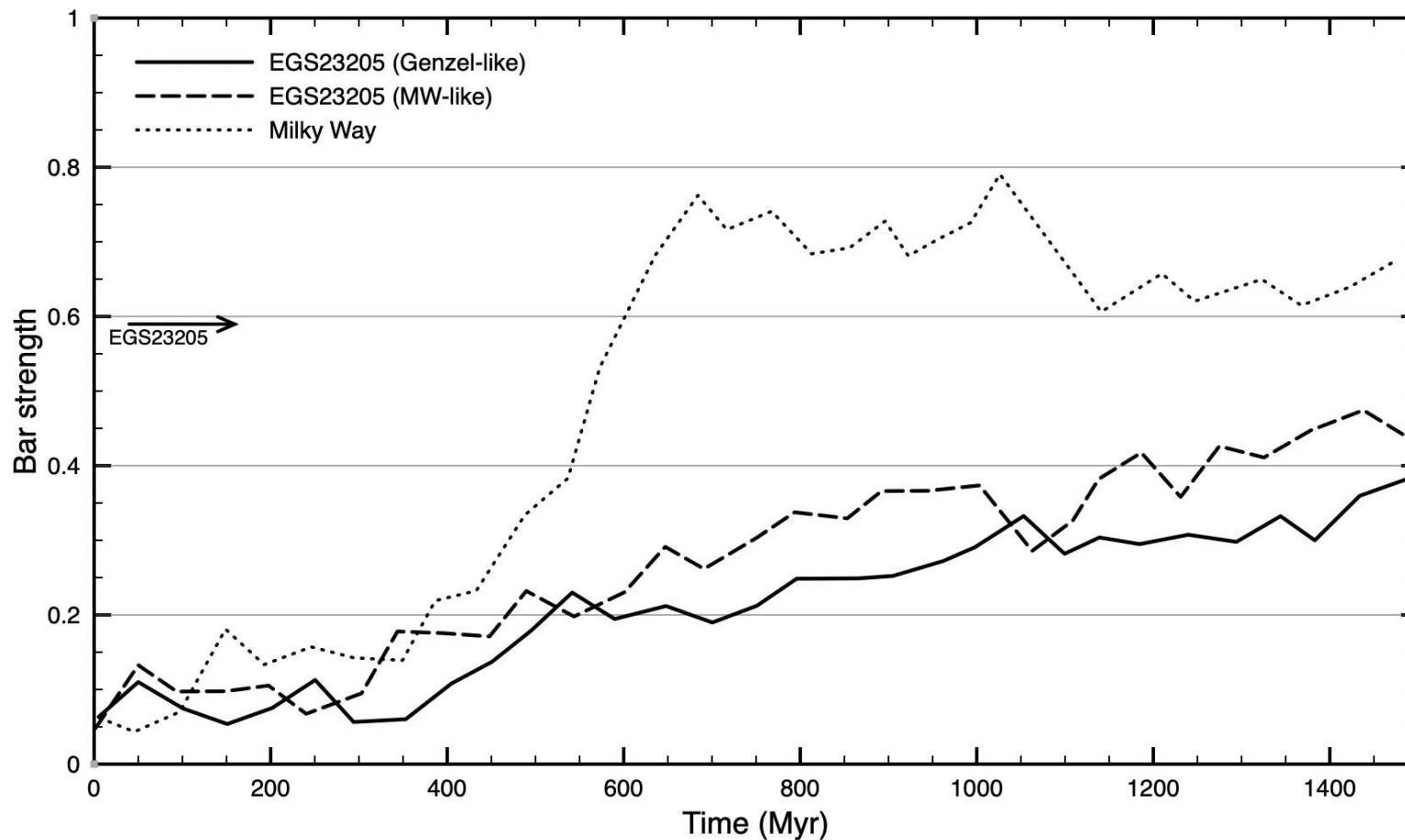
Combes & Sanders 1981 – simulations idéalisées

Sur un temps de Hubble (quelques Gyr) les barres se forment spontanément pour presque toute condition initiale réaliste

Un halo de matière noire massif/concentré peut retarder, mais aussi renforcer la formation de la barre

Mais à l'époque de $\Rightarrow 2$?

Des barres qui devraient se former aisément... ...mais difficilement avant $z=2$ dans des galaxies massives



Bournaud et al. in prep

Formation des barres lente et faible taux de croissance.

Quid des barres observées à $z > 2$?

Croissance rapide par accrétion de filaments de gaz ?

Très faible concentration de matière noire dans les galaxies primordiales ? ???

Conclusions



Les galaxies naissent « en morceaux », pas uniquement parce qu'elles fusionnent avec d'autres galaxies nées séparément, mais aussi parce qu'elles se forment en disques massifs et gazeux qui se fragmentent violemment

Divers mécanismes peuvent potentiellement expliquer l'émergence de la séquence de Hubble, notamment la morphologie « spirale barrée » des Voies Lactées actuelles

L'histoire complète de ces mécanismes reste incomprise, et l'émergence très rapide de la séquence de Hubble pour les galaxies les plus massives pourrait être le nouveau défi posé par les observations du JWST.

