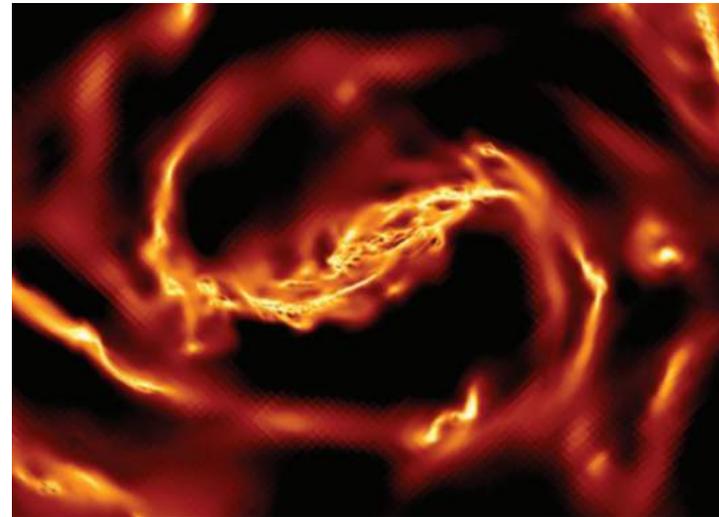


# Barres et structures morphologiques :

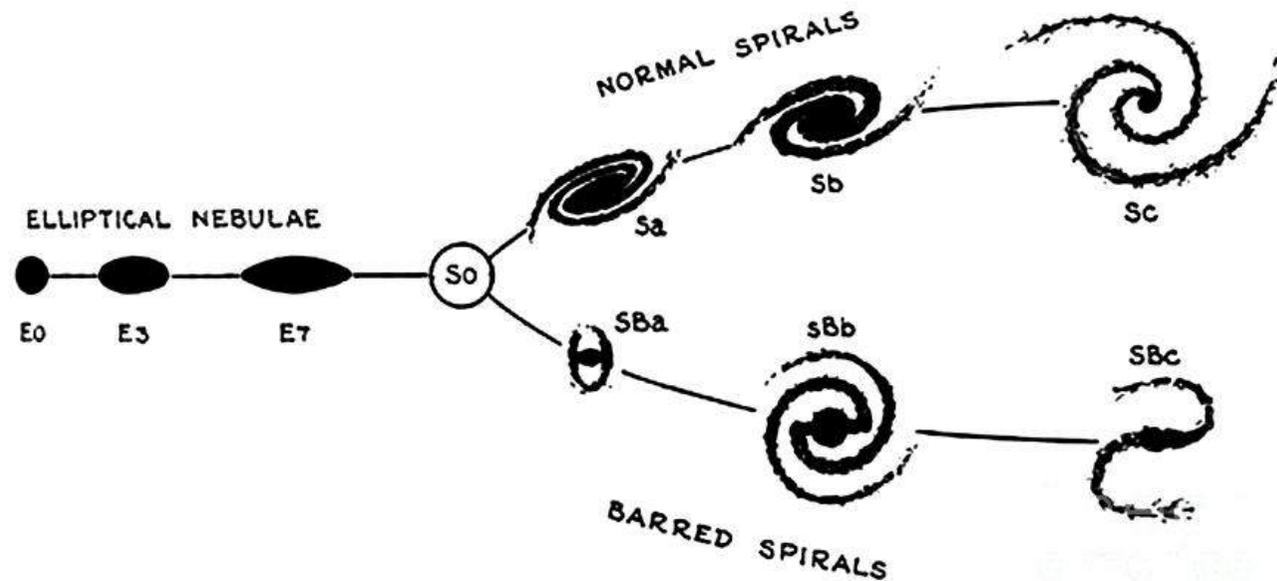
Traceurs de la formation et moteurs de l'évolution des galaxies



Frédéric Bournaud – CEA Saclay

# Barres et structures morphologiques

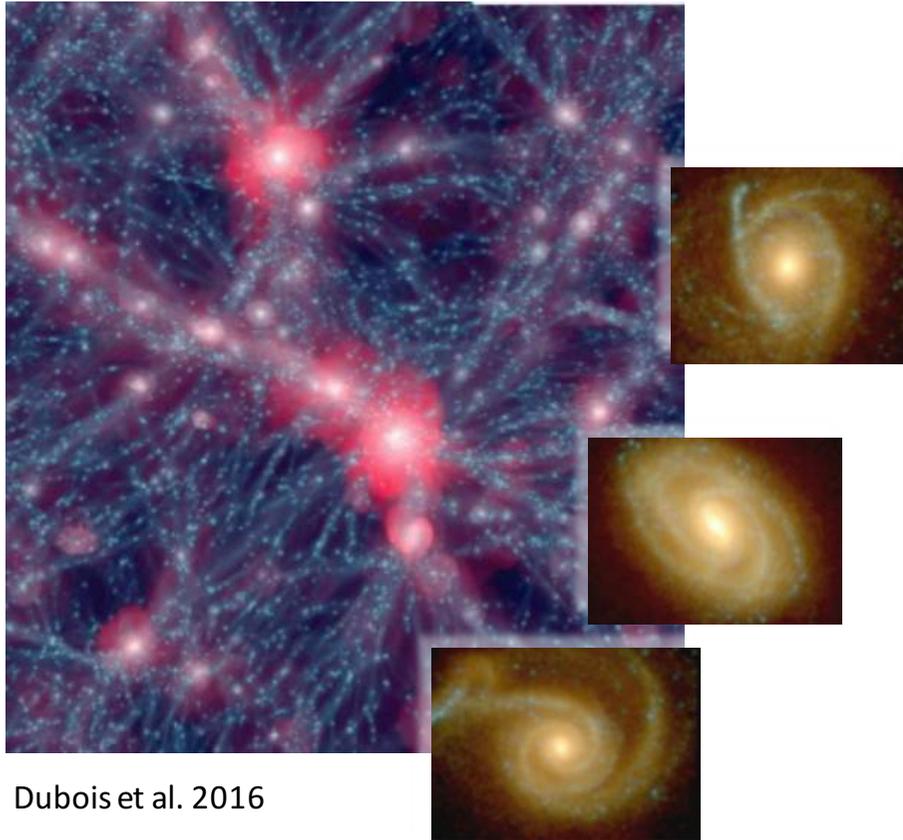
## Traceurs de la formation et moteurs de l'évolution des galaxies



La majorité des galaxies ont aujourd'hui une morphologie barrée, encore plus si l'on considère les galaxies à formation stellaire :

- Pourquoi ces structures sont-elles omniprésentes ?
- Cela a-t-il toujours été le cas ?
- Quelle est l'influence des ces structures sur l'évolution structurelle des galaxies, leur formation stellaire, leurs trous noirs centraux ?

# Simulations numériques de formation et évolution des galaxies



Dubois et al. 2016

## Simulations cosmologiques :

Grands volumes (10-100 Mpc)

Histoire complète

Résolution limitée ( $\sim 100$ pc)

Histoire nécessairement incorrecte (biais numériques ?)

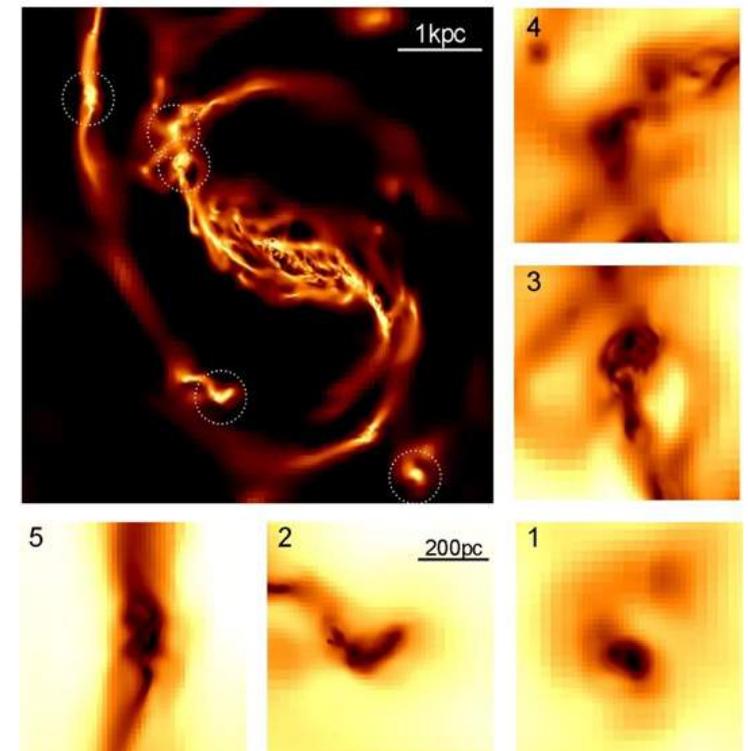
## Simulations idéalisées :

Une ou quelques galaxies (1 Mpc)

Une phase d'évolution (1-2 Gans)

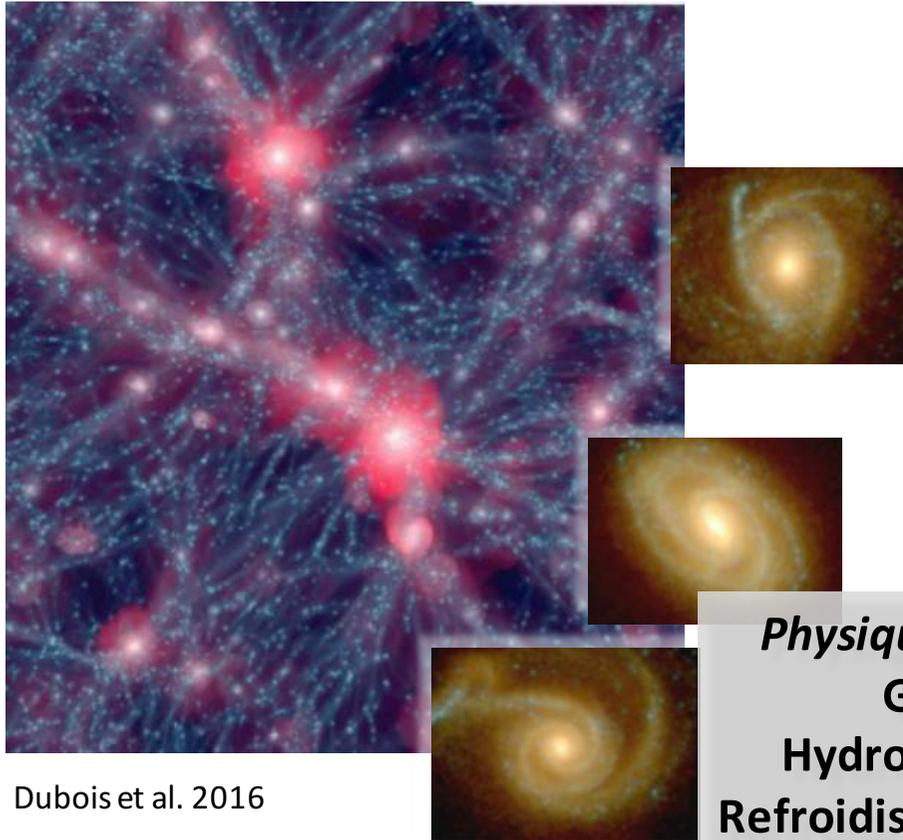
Haute résolution ( $\sim 1$  pc)

Paramètres basés sur les observables  
mais pas expliqués *ab-initio*.



Bournaud et al. 2010

# Simulations numériques de formation et évolution des galaxies



Dubois et al. 2016

**Simulations cosmologiques :**  
Grands volumes (10-100 Mpc)  
Histoire complète  
Résolution limitée ( $\sim 100$ pc)

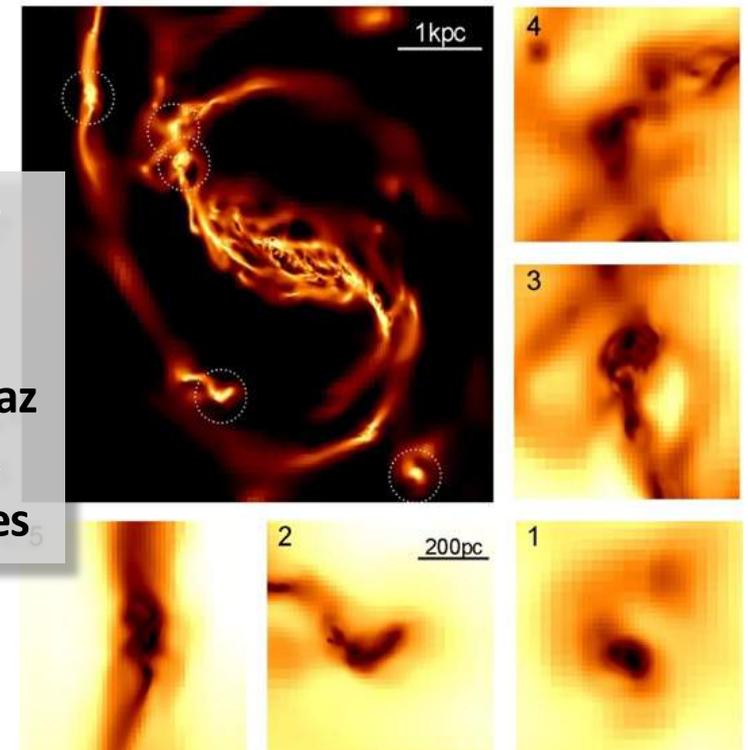
Histoire nécessairement incorrecte (biais numériques ?)

## Simulations idéalisées :

Une ou quelques galaxies (1 Mpc)  
Une phase d'évolution (1-2 Gans)  
Haute résolution ( $\sim 1$  pc)

Paramètres basés sur les observables  
mais pas expliqués *ab-initio*.

**Physique commune**  
**Gravité**  
**Hydrodynamique**  
**Refroidissement du gaz**  
**Formation d'étoiles**  
**Rétroactions stellaires**



Bournaud et al. 2010

# Morphologies spirales et fréquence des barres

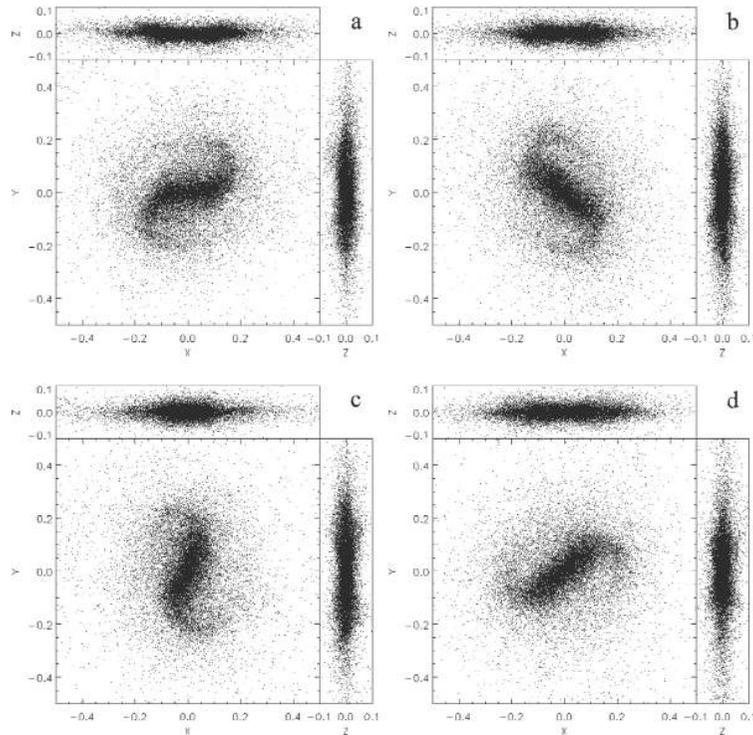
---



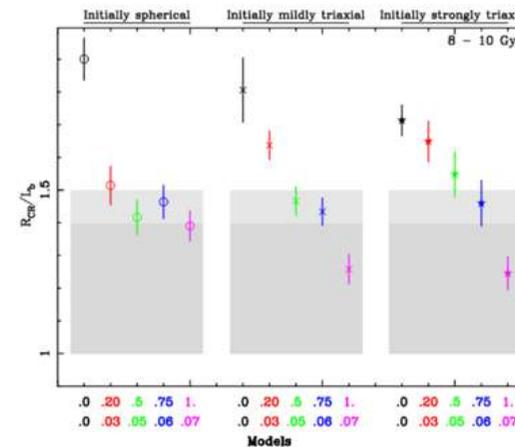
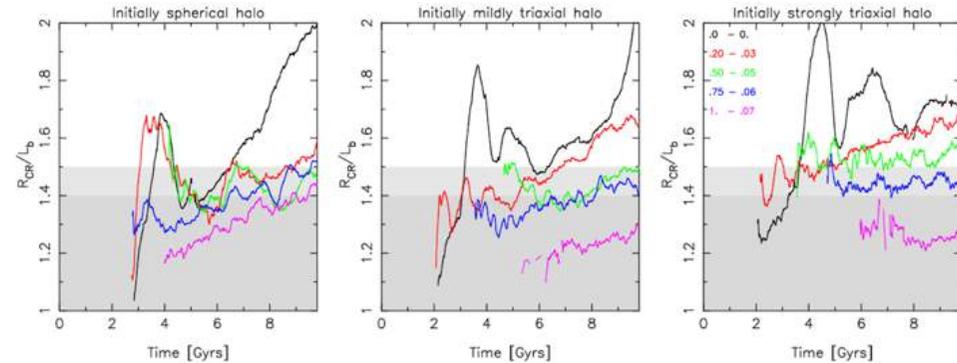
La quasi-totalité des galaxies spirales actuelles sont barrées

La barre n'est parfois visible que dans l'infrarouge :  
c'est une structure stellaire, et non gazeuse

# Renforcement spontané, friction dynamique



Sellwood 2006



Résonance de corotation  
et longueur de barre

Athanassoula 2014

Les barres stellaires peuvent se renforcer spontanément à partir de faibles fluctuations initiales: échanges de moment angulaire dans le disque, friction dynamique sur le halo de matière noire.

Ces processus expliquent les barres rapides/lentes observées

# Interactions et évolution des barres

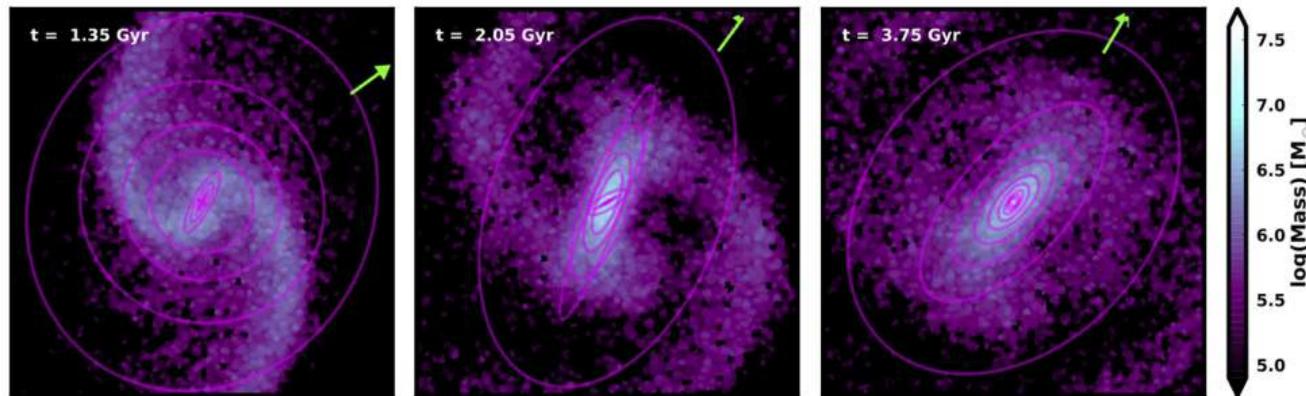
Les interactions de galaxies peuvent:

- créer ou renforcer des barres
  - affaiblir des barres existantes
- selon l'orbite et les conditions initiales

Le bilan dans les études statistiques de grandes simulations cosmologiques semble positif.



*La collision des « Antennes »*



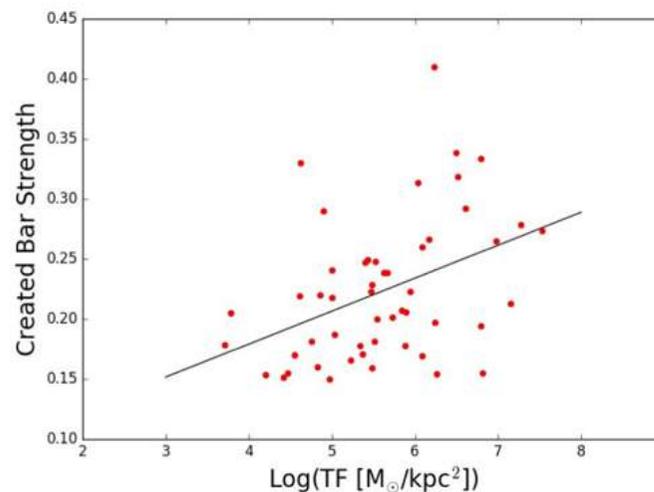
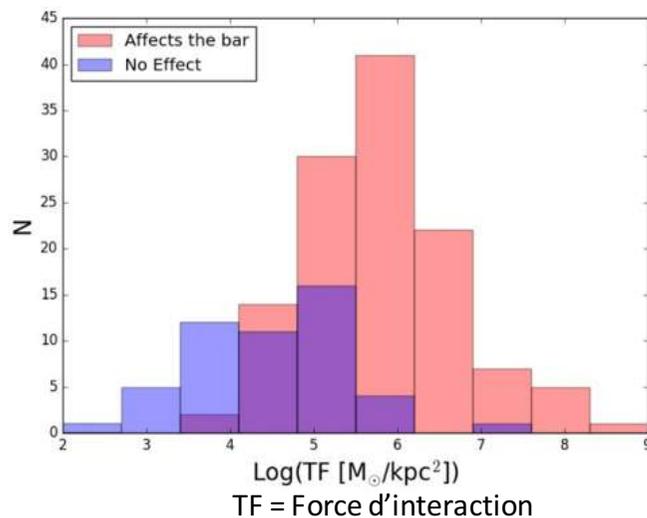
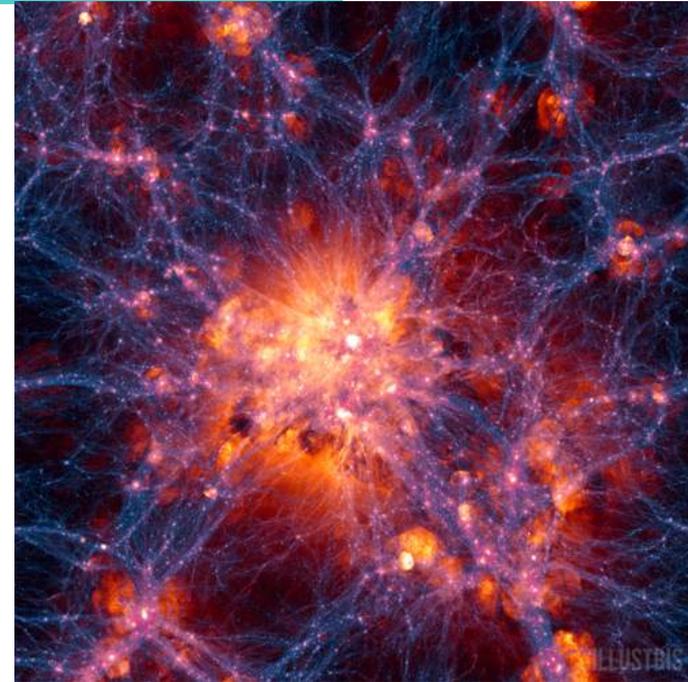
Simulation idéalisée de formation d'une barre dans une interaction (Lang et al. 2014)

# Interactions et évolution des barres

Les interactions de galaxies peuvent:

- créer ou renforcer des barres
  - affaiblir des barres existantes
- selon l'orbite et les conditions initiales

Le bilan dans les études statistiques de grandes simulations cosmologiques semble positif.

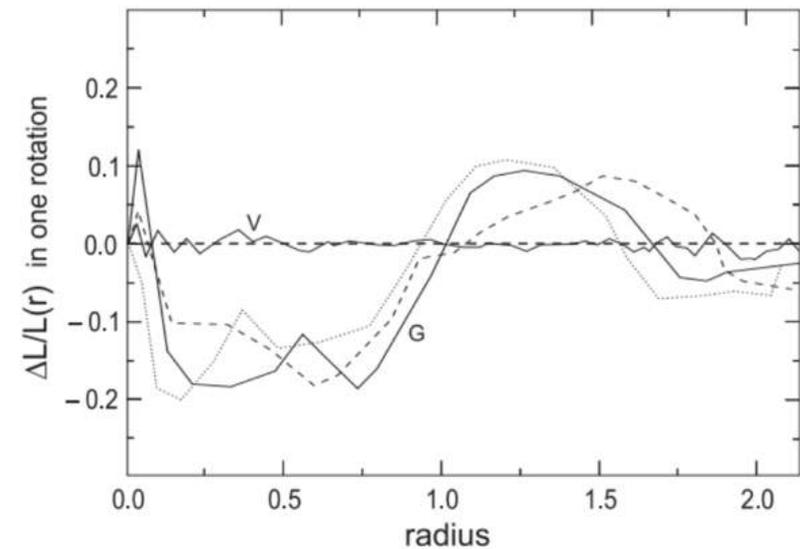
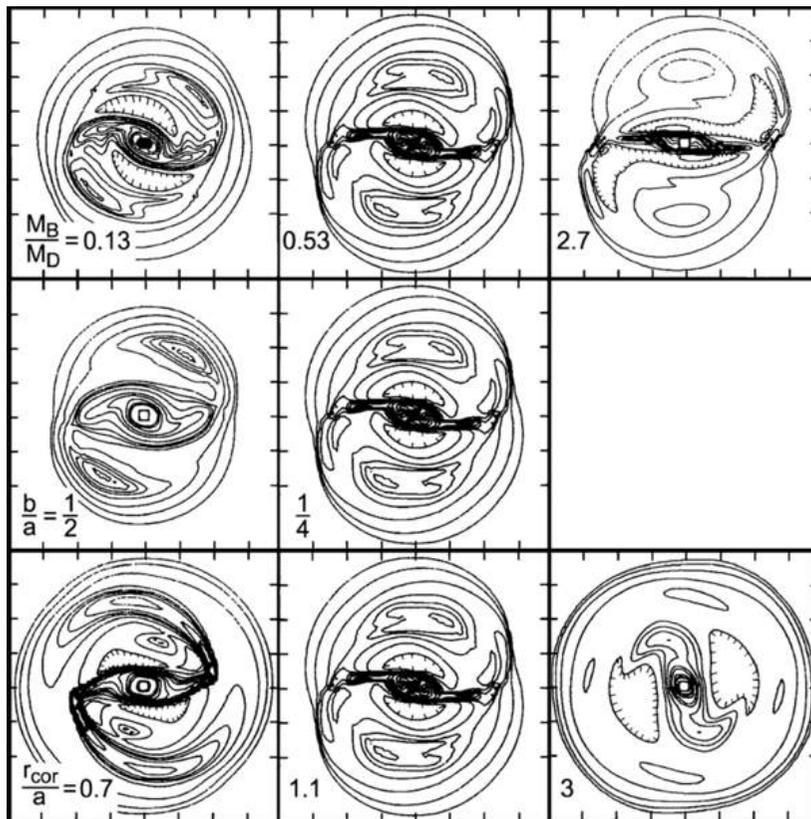


Vogelsberger et al. 2015  
Peschken et al. 2017

# Concentration centrale de masse et dissolution

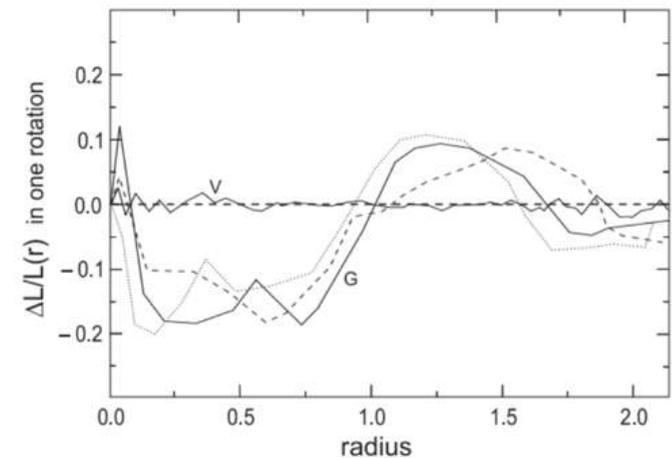
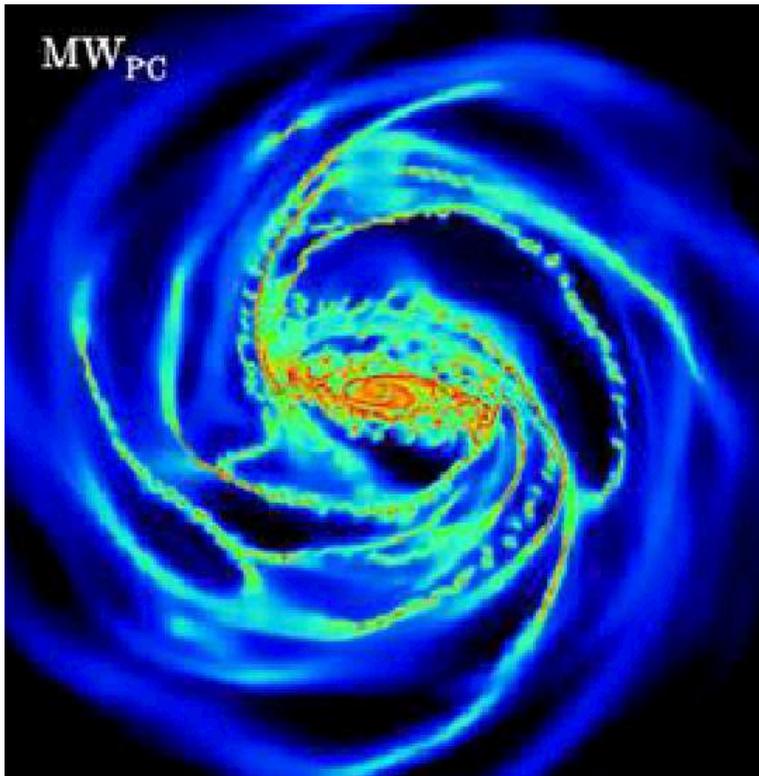
Le gaz ne suit pas la barre, mais plutôt une onde spirale côté avant selon le sens de rotation.

Le gaz perd donc son moment angulaire par interaction avec les étoiles de la barre.



# Concentration centrale de masse et dissolution

- Le gaz ne suit pas la barre stellaire mais forme une spirale en avance selon le sens de rotation du disque (pas de croisement d'orbites).
- Les couples de gravité négatifs des étoiles sur le gaz entraînent un écoulement de gaz vers le noyau.
- 10% de perte de moment angulaire par rotation dans les barres fortes.



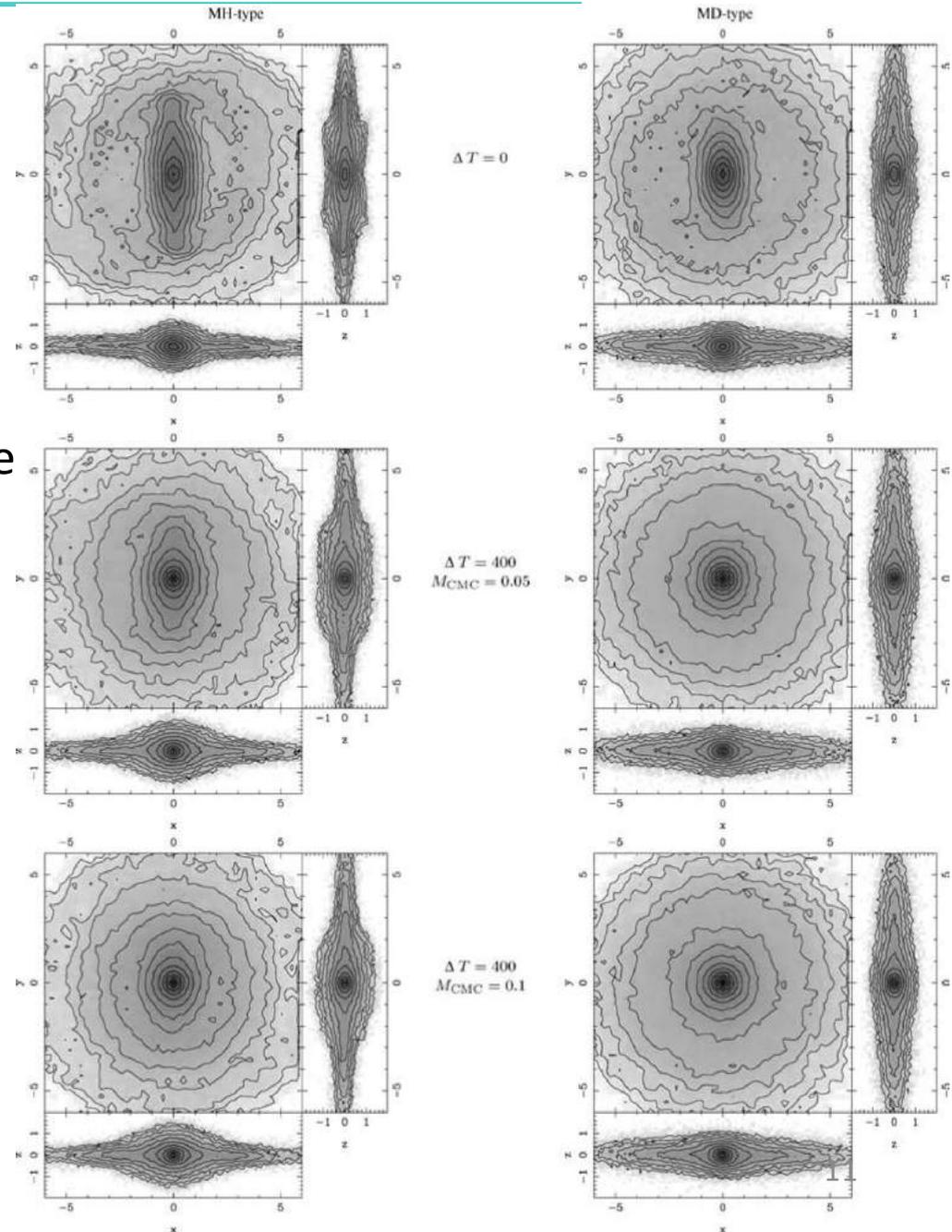
Schwarz 1980, Sanders & Tubbs 1980  
Kraljic et al. 2014

# Concentration centrale de masse et dissolution

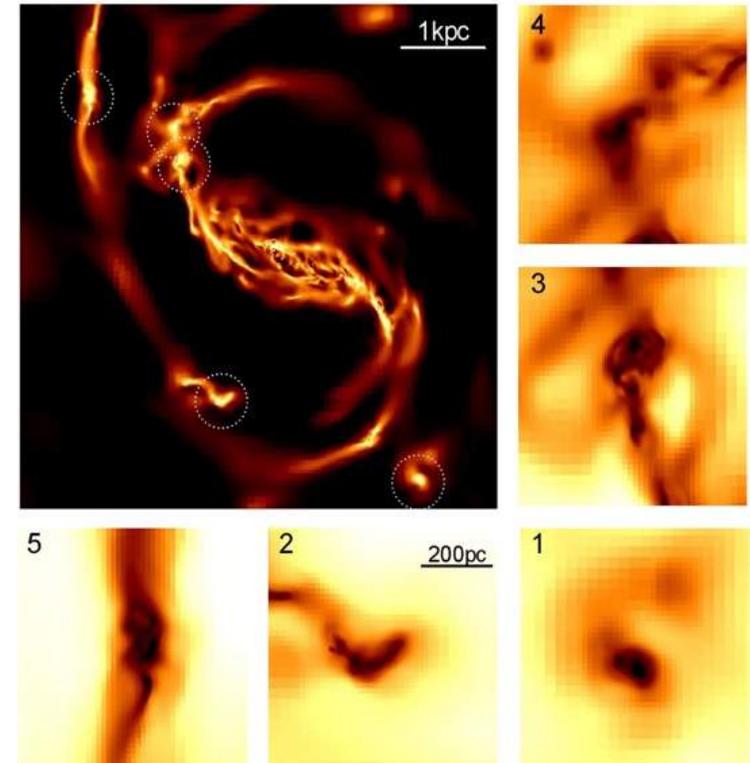
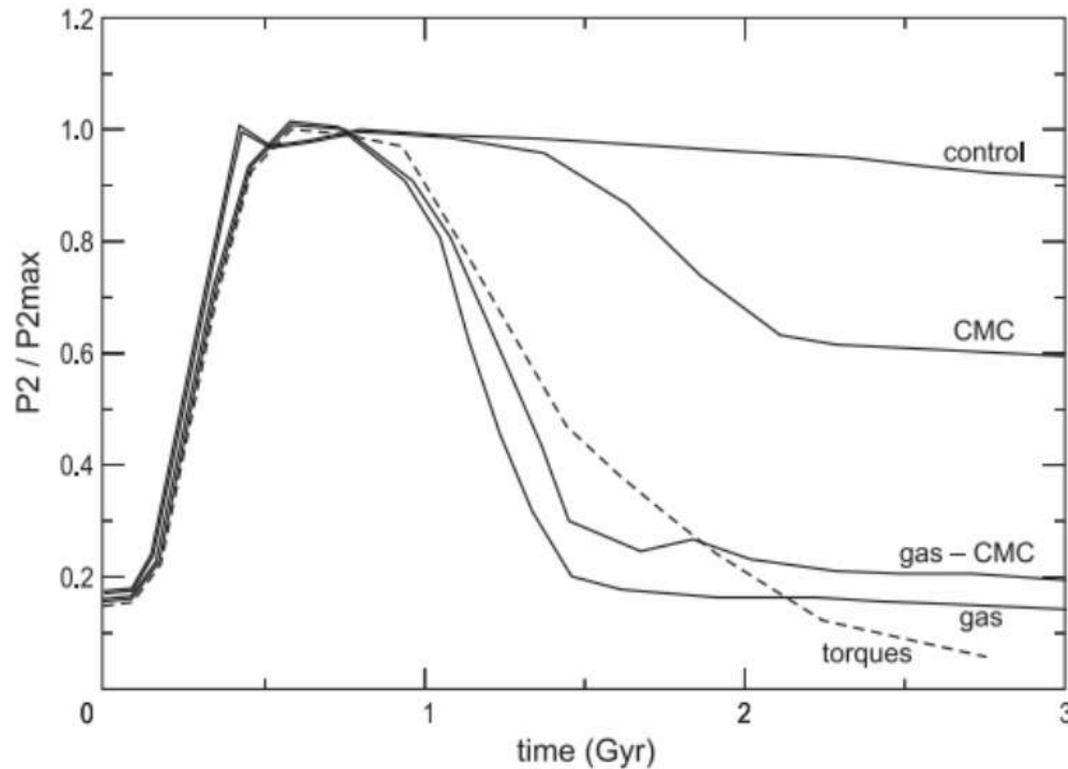
La croissance d'une concentration centrale de masse de l'ordre du pourcent de la masse totale peut détruire une barre stellaire.

La croissance doit être très concentrée et rapide.

Les simulations hydrodynamiques (avec gaz) montrent que la barre peut être détruite.



# Echanges de moment angulaire



La croissance de masse centrale n'est généralement pas seule responsable.

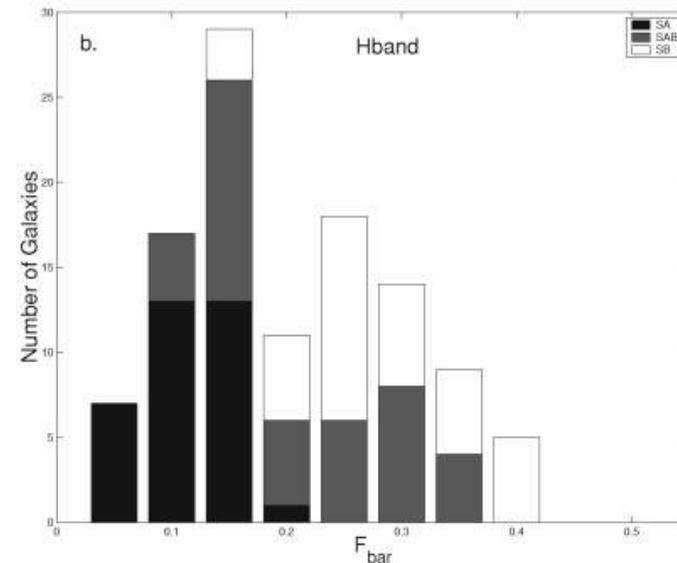
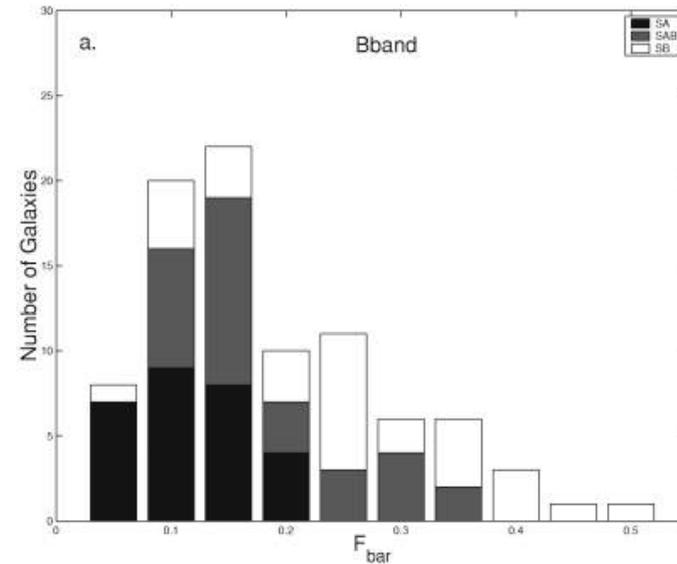
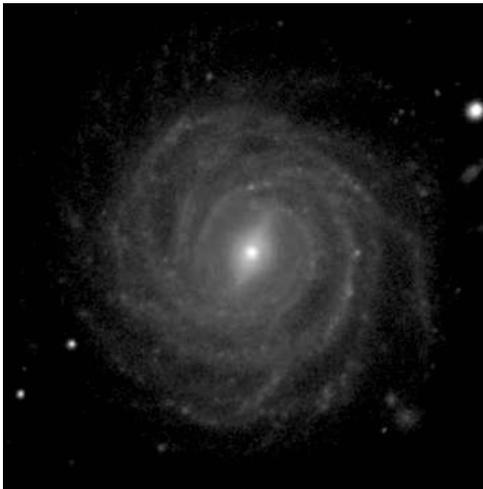
Le gaz perd son moment angulaire...qu'il redonne aux étoiles : destruction de l'alignement d'orbites eccentrices.

# Bilan : distribution des barres et asymétries

Historiquement la séquence de Hubble comporte la moitié à deux tiers de galaxies barrées, parmi les spirales.

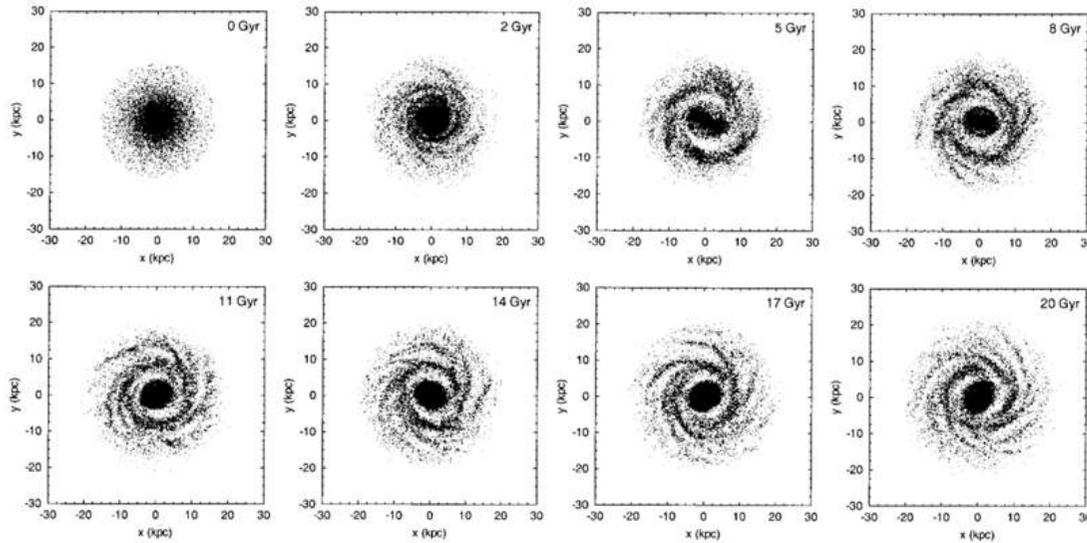
L'arrivée de l'imagerie infrarouge, traçant au mieux la masse stellaire, a mis en évidence des barres dans quasiment toutes les galaxies:

On trouve presque toujours un mode «  $m=2$  » avec un degré d'enroulement nul au centre (enroulement non nul = spirale)

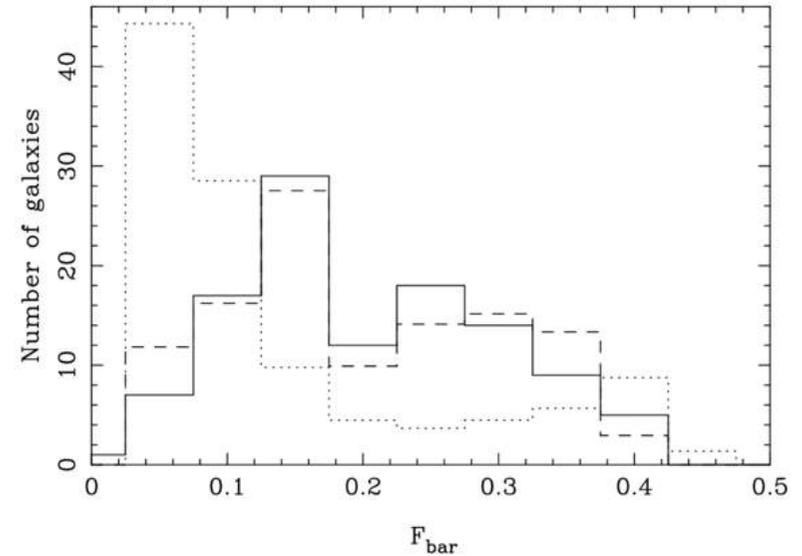
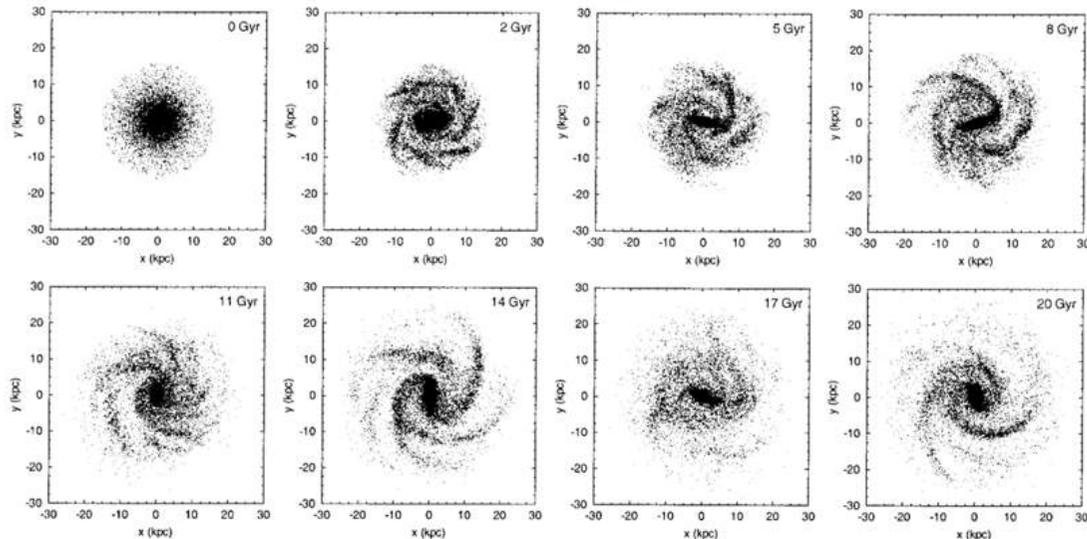


# Bilan : distribution des barres et asymétries

## Évolution isolée



## Évolution avec accrétion continue de gaz

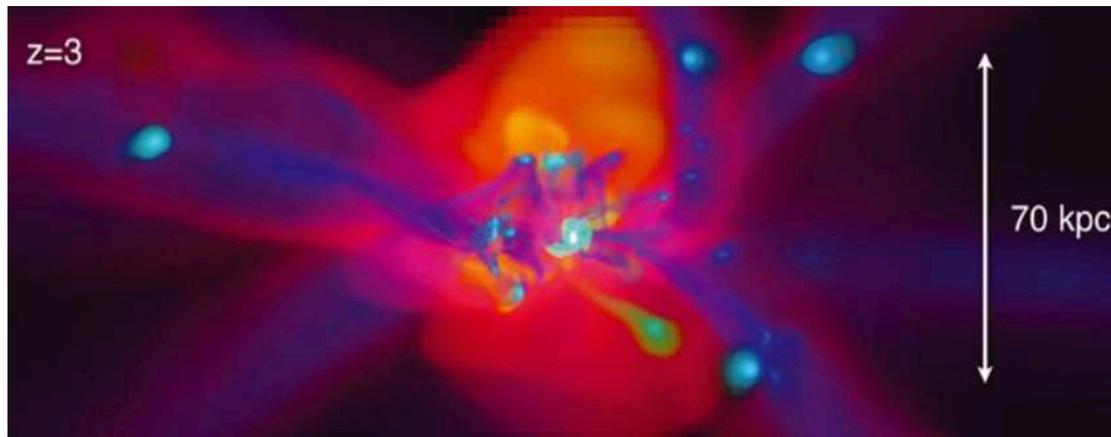
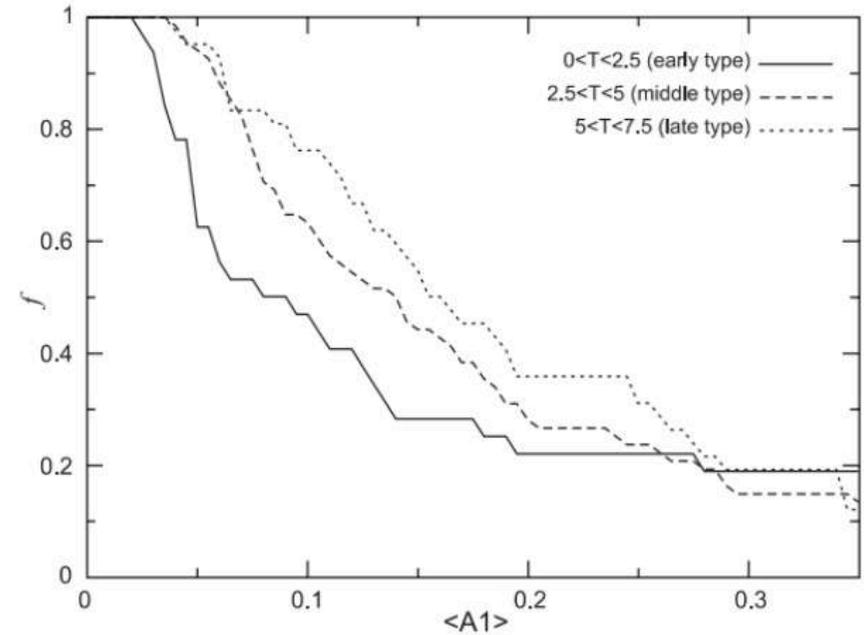
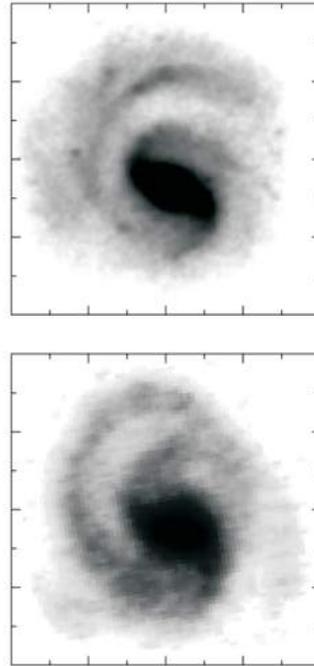


Les barres tendent à se dissoudre en moins d'un temps de Hubble.

Leur omniprésence actuelle peut s'expliquer par la reformation d'un disque froid issu d'accrétion continue de gaz diffus depuis des réservoirs cosmologiques.

Le taux d'interactions/collisions récentes ne suffirait pas.

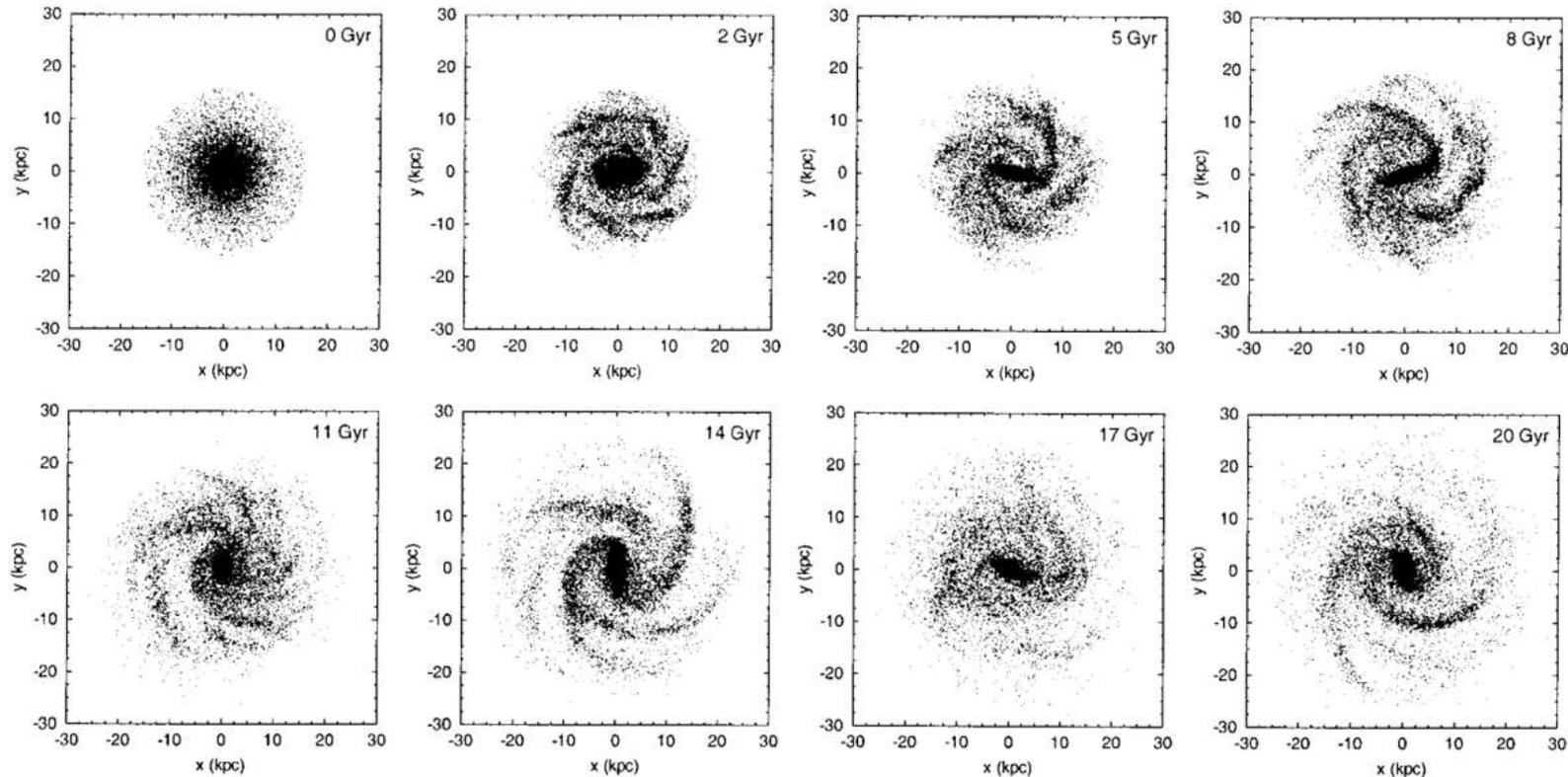
# Bilan : distribution des barres et asymétries



Les symétries de disque sont un autre argument en faveur de la croissance des galaxies par accrétion diffuse.

Les dernières générations de simulations cosmologiques ont mis en avant de tels « courants froids » d'accrétion de gaz.

# La séquence de Hubble a-t-elle toujours été en place ?



Les galaxies à disque étaient-elles similaires il y a 5 ou 10 milliards d'années ?

Les barres existaient-elles déjà, ou les types morphologiques ont-ils évolués ?

Les constituants (étoiles, gaz, matière noire) étaient-ils présents dans les mêmes proportions ?

# Sondages (infrarouge) de l'Univers profond

---

Champ Ultra-Profond de Hubble :  
Plus de 10 jours d'intégration

Visible : dès 2004

Haute résolution : 2009

Proche infrarouge : 2012

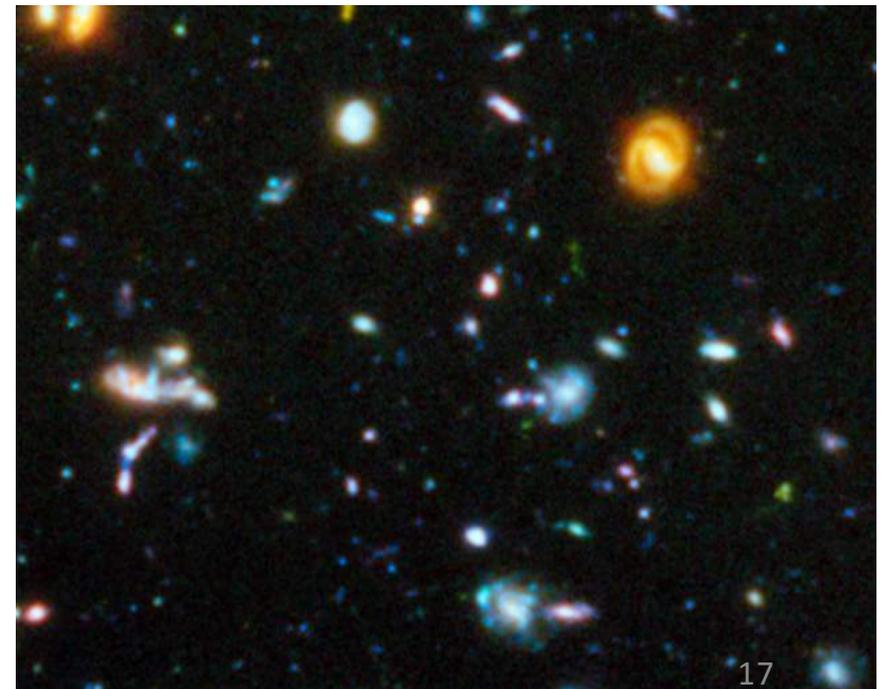
Ultraviolet : 2014



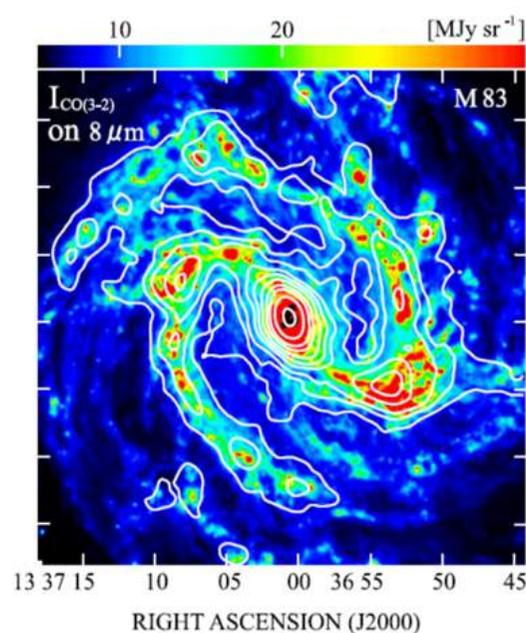
**Hubble Ultra Deep Field**  
Hubble Space Telescope • Advanced Camera for Surveys

NASA, ESA, S. Beckwith (STScI) and the HUDF Team

STScI-PRC04-07a



# Sondages (infrarouge) de l'Univers profond



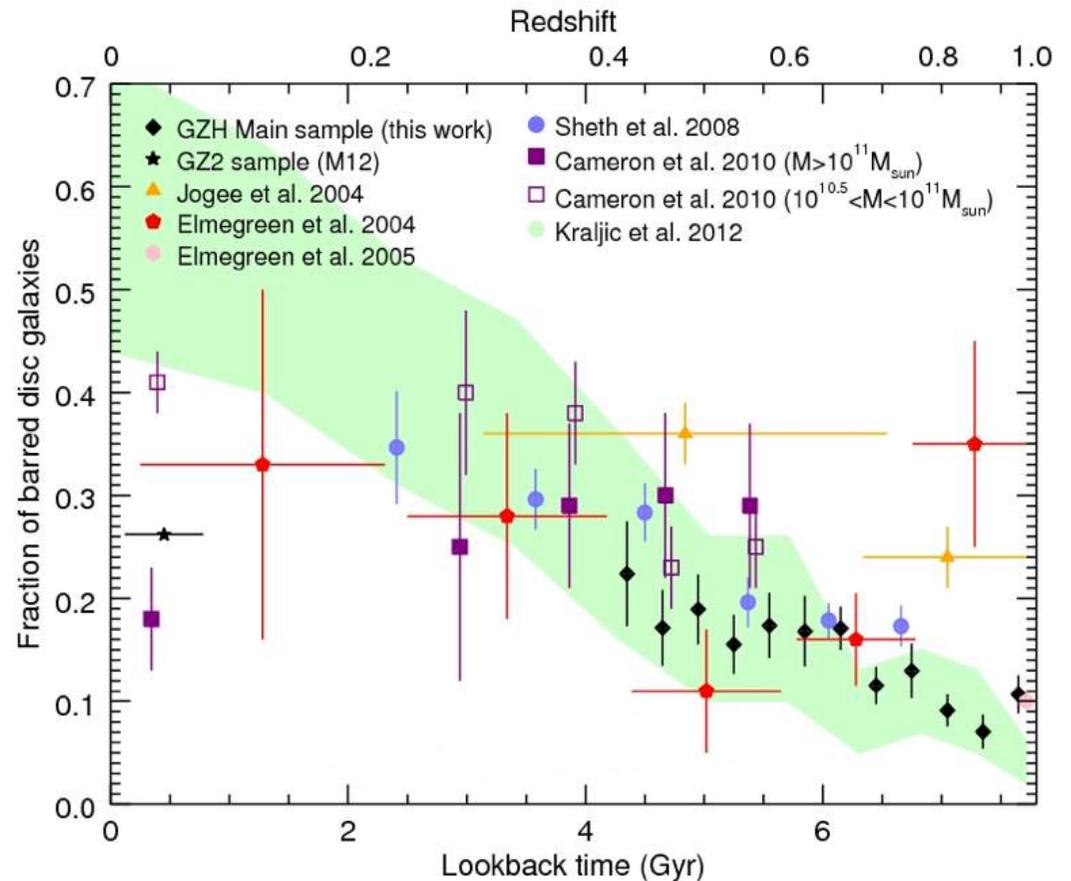
Une galaxie à décalage spectral  $z=1-2$  observée dans le domaine visible, montre l'émission UV des étoiles jeunes et massives: distribution selon les spirales de gaz, pas de barre visible.

# Fraction de barres dans l'Univers lointain

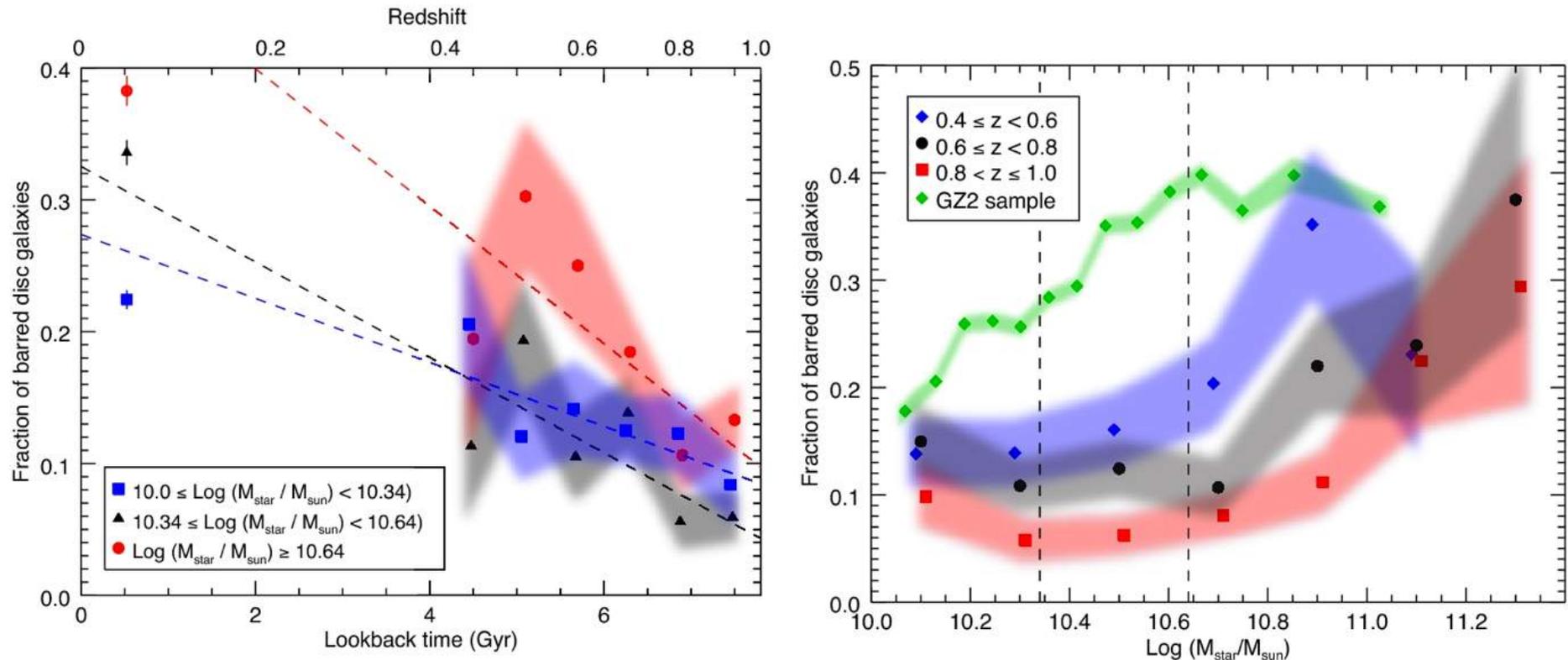
Des barres mêmes fortes sont présentes à  $z=1-2$

Les études statistiques montrent par contre une fraction de barres décroissantes, surtout au-delà de  $z=0.5-0.8$

A  $z=1$  et plus, la majorité des galaxies de la masse de la Voie Lactée ne sont pas barrées.



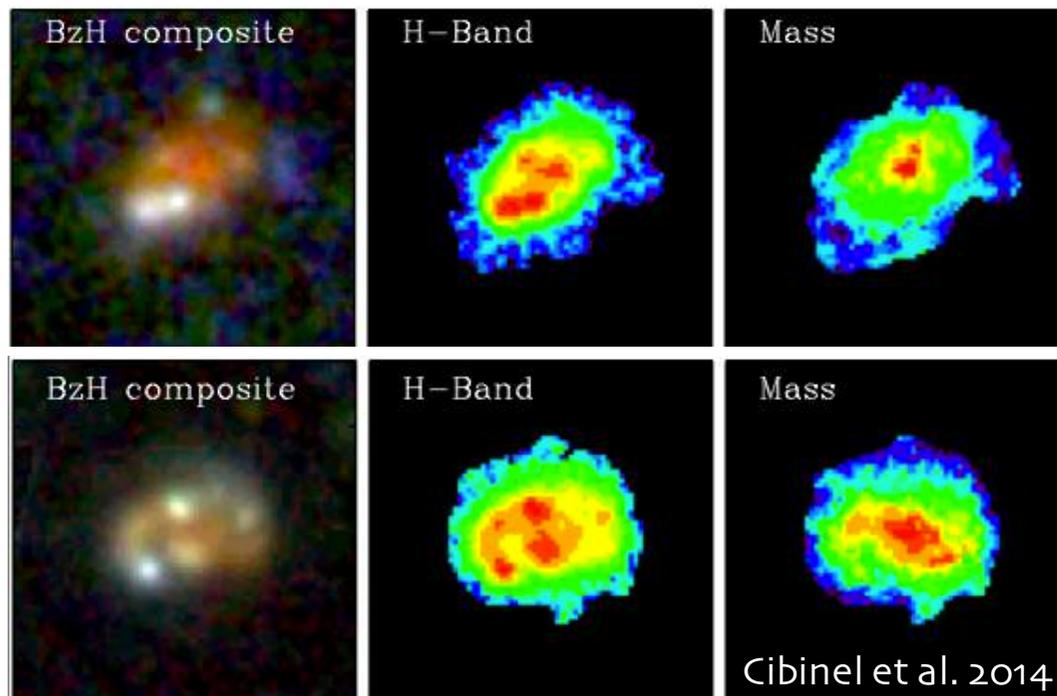
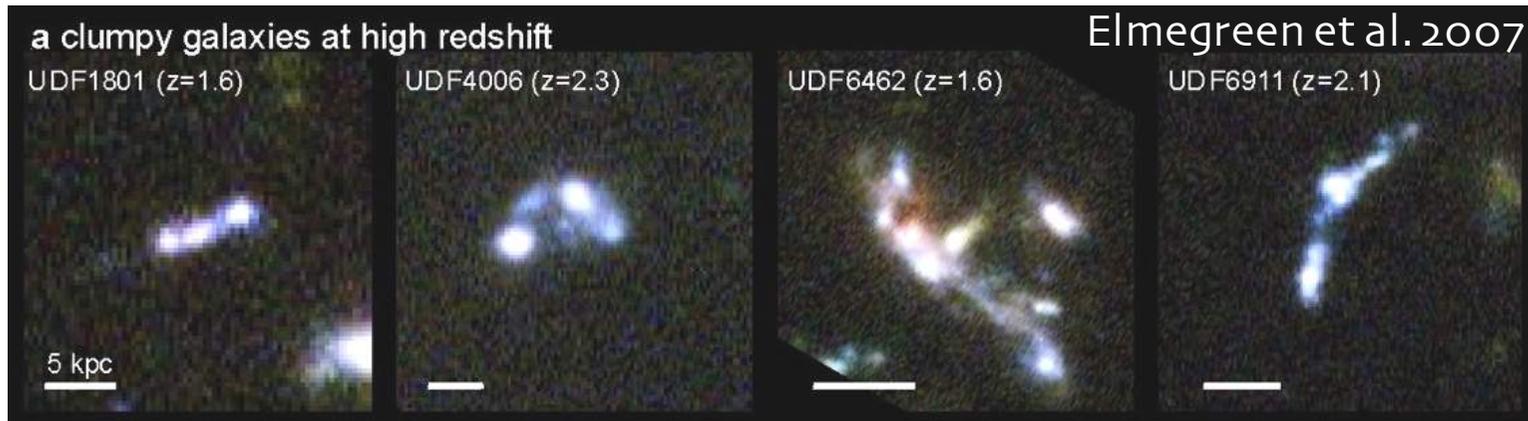
# Fraction de barres dans l'Univers lointain



La fraction de barres s'élève plus tôt pour les galaxies les plus massives, elle suit en cela l'histoire de formation stellaire des galaxies.

Pour toutes les masses de disques toutefois les barres sont rares à  $z > 1$ , la rareté des barres dans les galaxies primordiales ne provient pas de leur plus faible masse.

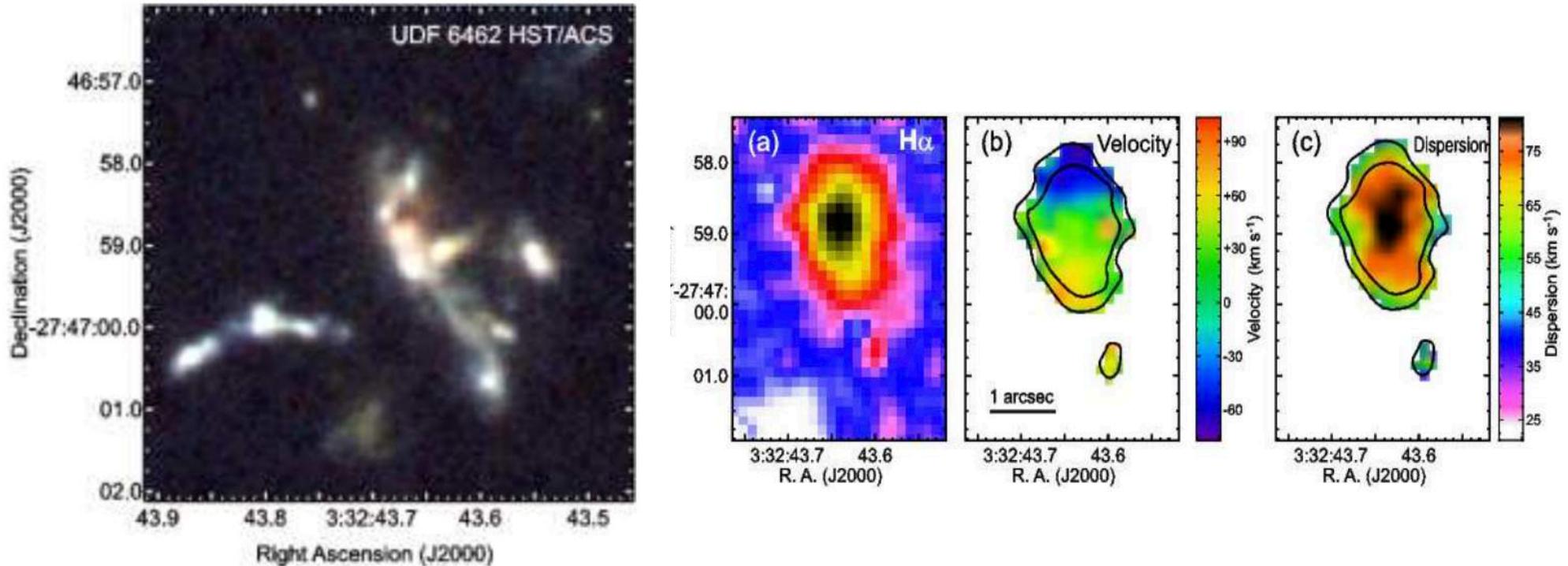
# Galaxies primordiales irrégulières



Morphologies irrégulières,  
dominées par de gros grumeaux :  
« *clumpy galaxies* »

Les grumeaux de  $\sim 100$  millions de  
masses solaires sont aussi présents  
en proche infra-rouge et dans les  
cartes de masse reconstituées.

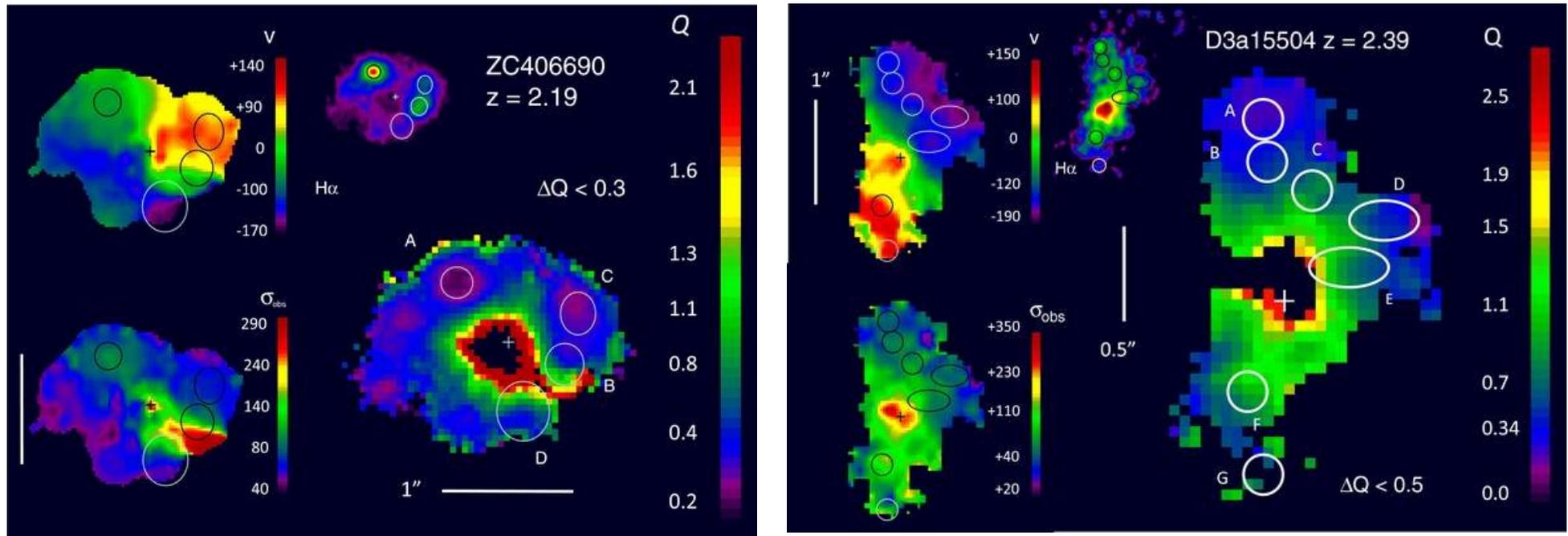
# Galaxies primordiales – disques instables et fragmentés



Spectroscopie intégrale de champ au VLT/SINFONI d'un cas à  $z=1.6$  :

- Champ de vitesse continu identique à un disque en rotation
- Dispersions de vitesses très élevées sur l'ensemble du système
- Pas d'anomalie majeure du champ de vitesse attribuable à une collision de galaxies

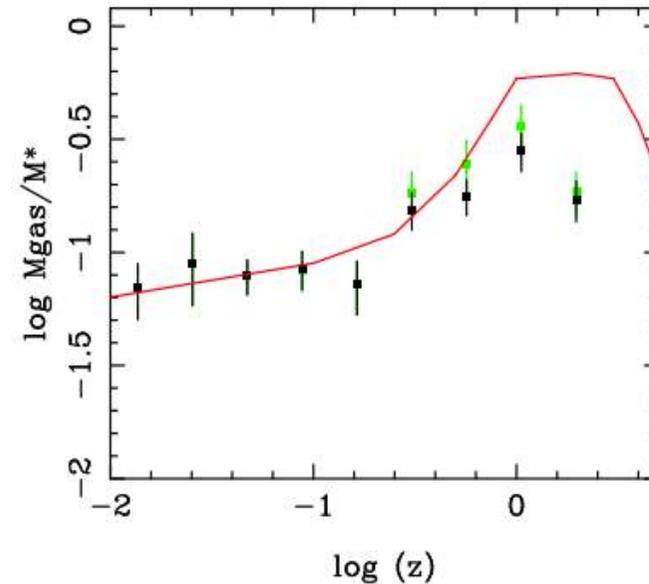
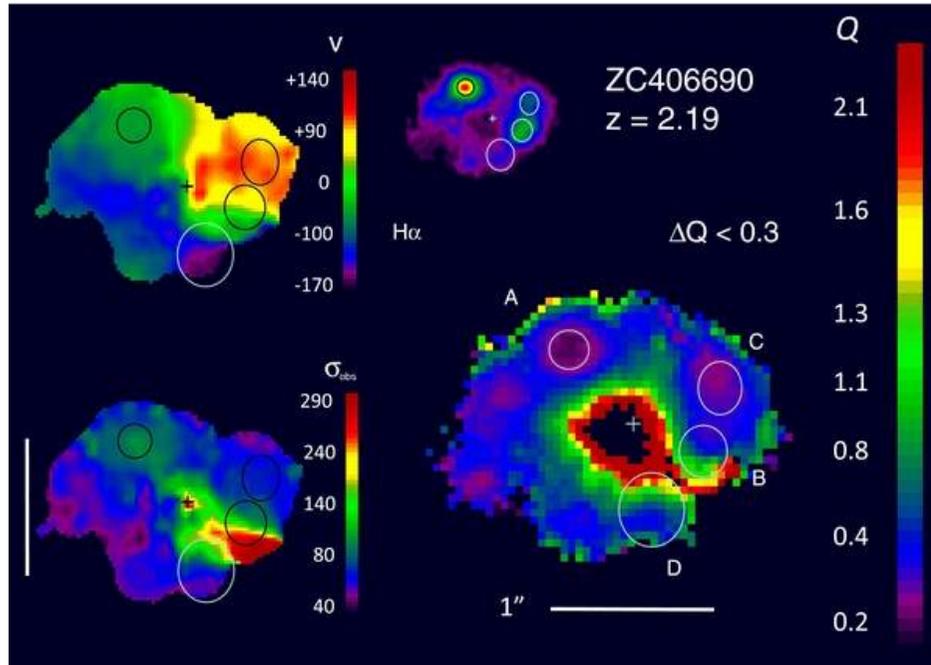
# Galaxies primordiales – disques instables et fragmentés



L'accumulation d'observations détaillées permet d'exclure une dominance des systèmes issus de collisions/fusions de galaxies.

Les dispersions élevées indiquent une masse de Jeans élevée ( $10^{8-9}$  masses solaires) donc la fragmentation en « grumeaux géants » est possible...

# Galaxies primordiales – disques instables et fragmentés



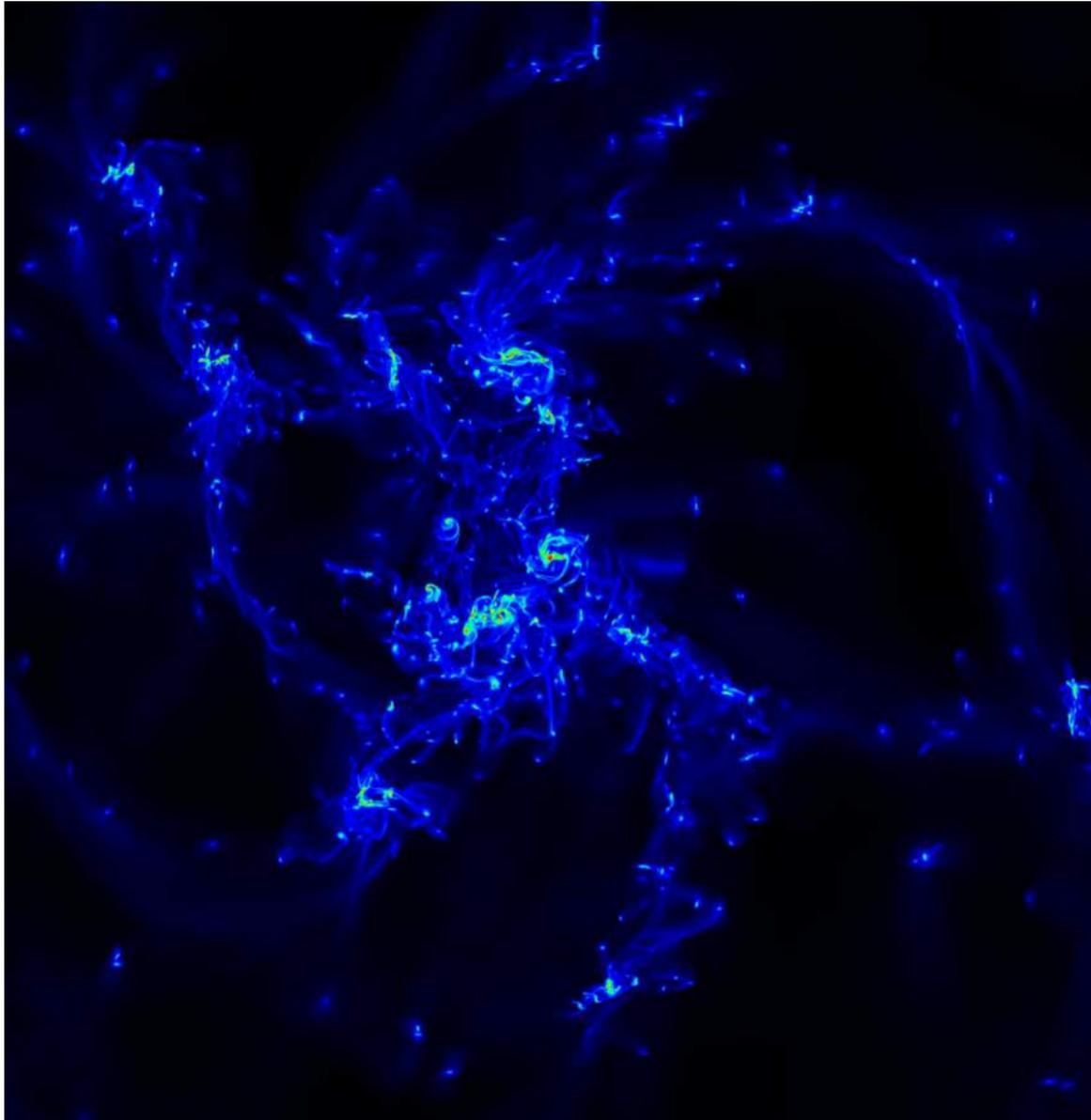
Daddi et al. 2011, 2016, Combes et al. 2013

L'accumulation d'observations détaillées permet d'exclure une dominance des systèmes issus de collisions/fusions de galaxies.

Les dispersions élevées indiquent une masse de Jeans élevée ( $10^{8-9}$  masses solaires) donc la fragmentation en « grumeaux géants » est possible.

La densité surfacique élevée du gaz ( $\sim 50\%$  de gaz à  $z=2$ ) rend le gaz instable, et permet la fragmentation à l'échelle de Jeans environ.

# Galaxies primordiales – disques instables et fragmentés

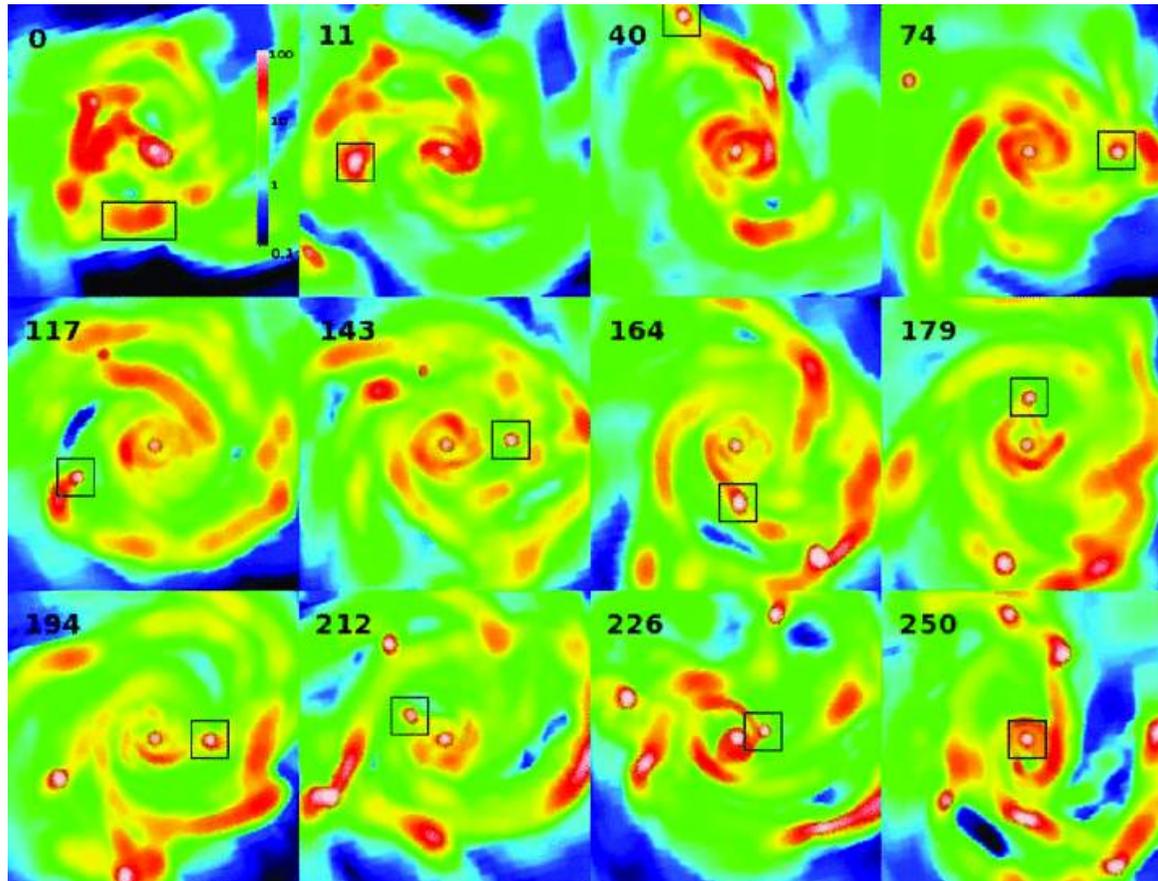


Simulation idéalisée à 1pc  
et 100 Masses solaires de  
résolution.

Condition initiale :  
Disque homogène ayant les  
propriétés observées d'un  
progéniteur de spirale à  $z=2$  ;  
courbe de rotation,  
fraction de gaz,  
bulbe d'étoiles, etc...

Résultat : le disque se fragmente  
tout en développant une forte  
turbulence, grumeaux géants,  
pas de bras spiraux dominants,  
pas de barre.

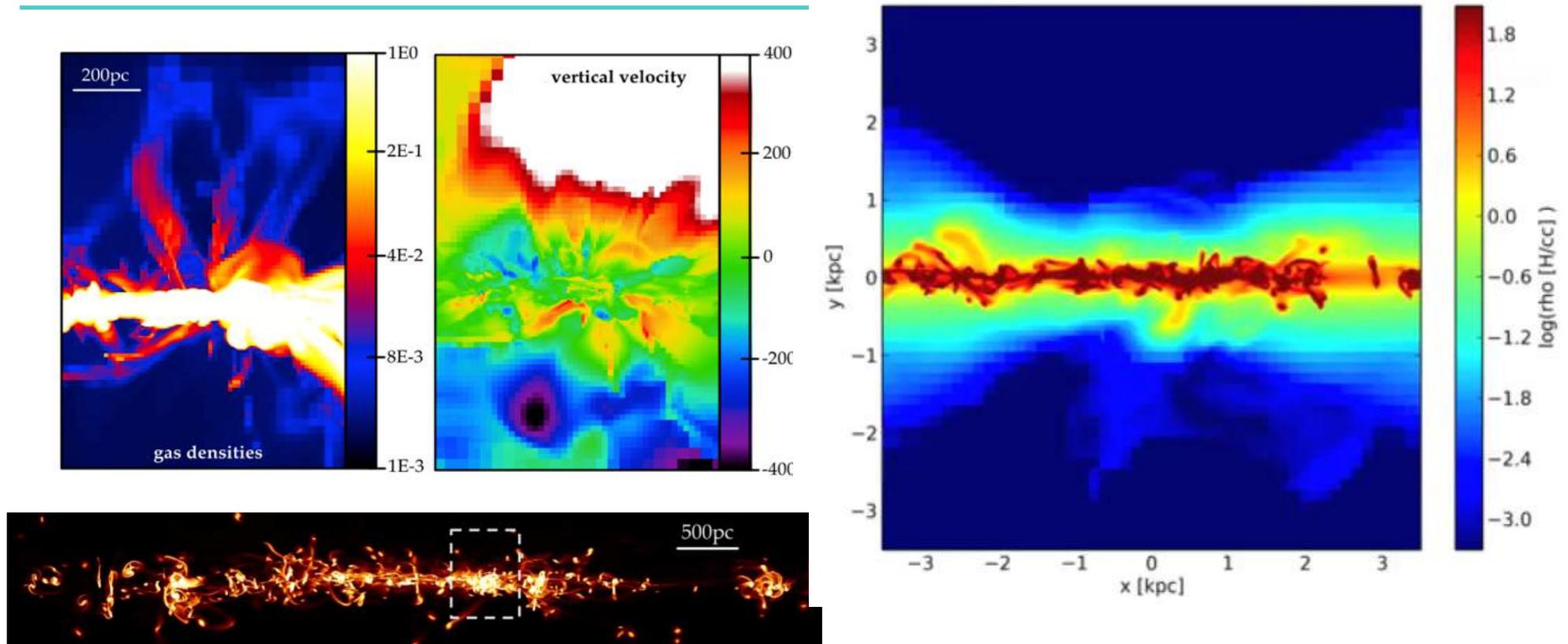
# Galaxies primordiales – disques instables, évolution



Les fragments sont liés gravitationnellement et suffisamment massifs pour :

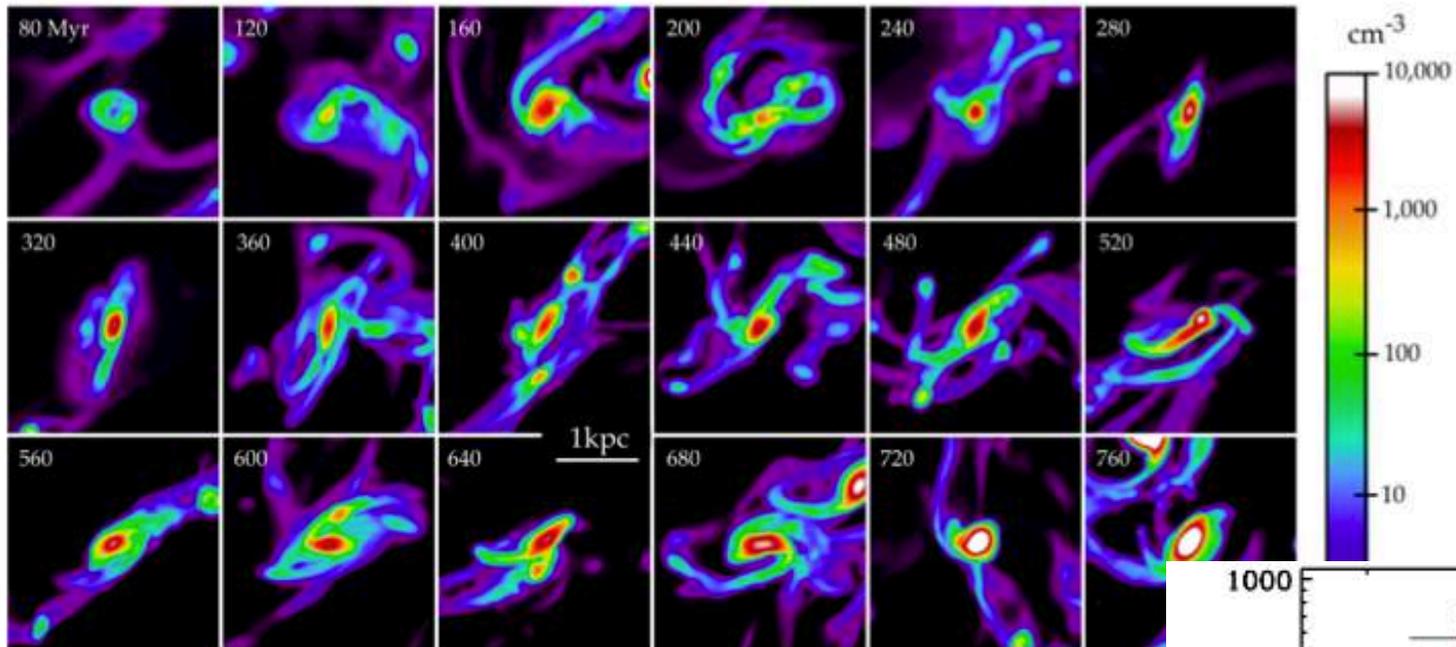
- résister au champ de marée galactique
- migrer par friction dynamique
- alimenter la croissance du bulbe central
- agiter et épaissir le disque d'étoiles (origine du « disque épais »?)

# Galaxies primordiales – disques instables, évolution



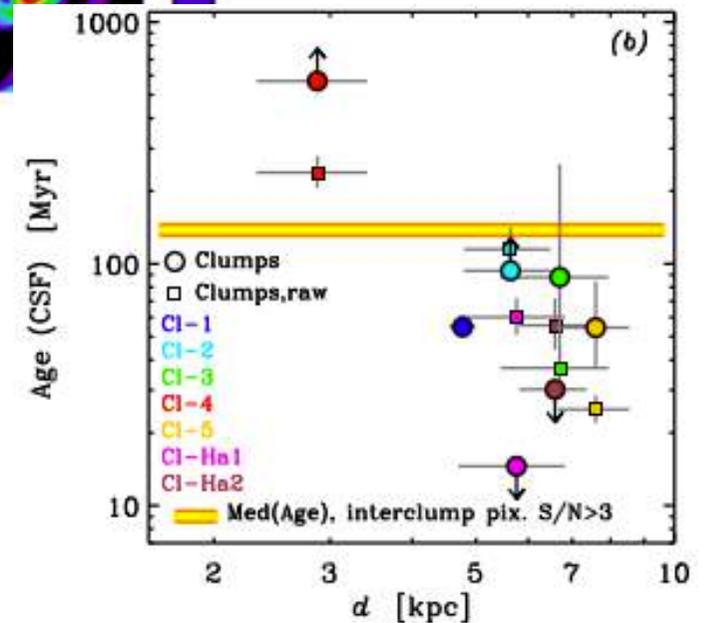
Les fragments sont aussi suffisamment massifs pour survivre à la rétroaction stellaire (supernovae), tout en étant un lieu de naissance de « vents galactiques »

# Galaxies primordiales – disques instables, évolution



Les fragments expulsent du gaz mais en ré-accrètent continuellement : leur masse fluctue en restant stable en moyenne

Observation d'un gradient d'âge cohérent avec la migration vers le centre des fragments les plus âgés



# Transition morphologique – époque clé ?

---



$z=2$  : instabilité « violente »,  
axisymétrique, fragmentation

Forte densité de gaz

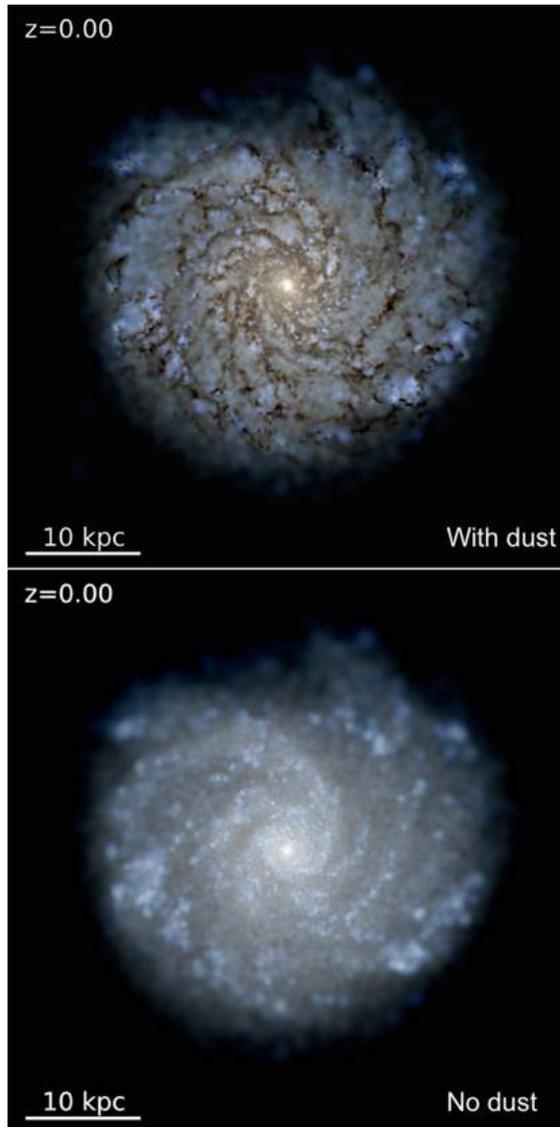
$Z=0$  : instabilité « séculaire »,  
non-axisymétrique, spirales barrées

Faible densité de gaz

Ces types de galaxies sont progéniteurs/descendants typiques l'un de l'autre, compte tenu de l'évolution en masse.

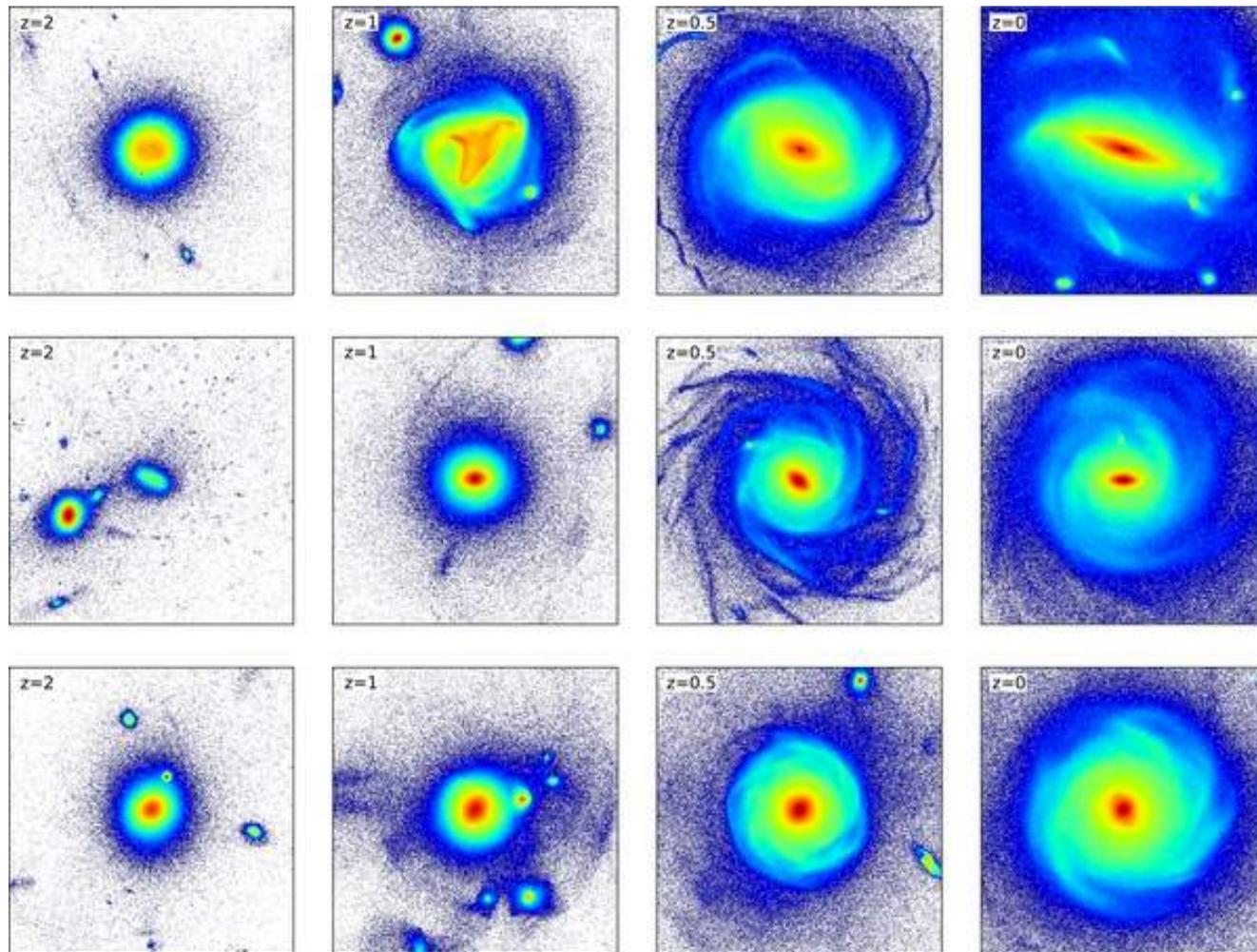
La cosmologie  $\Lambda$ -CDM peut-elle expliquer la transition morphologique ?

# Transition morphologique – simulations



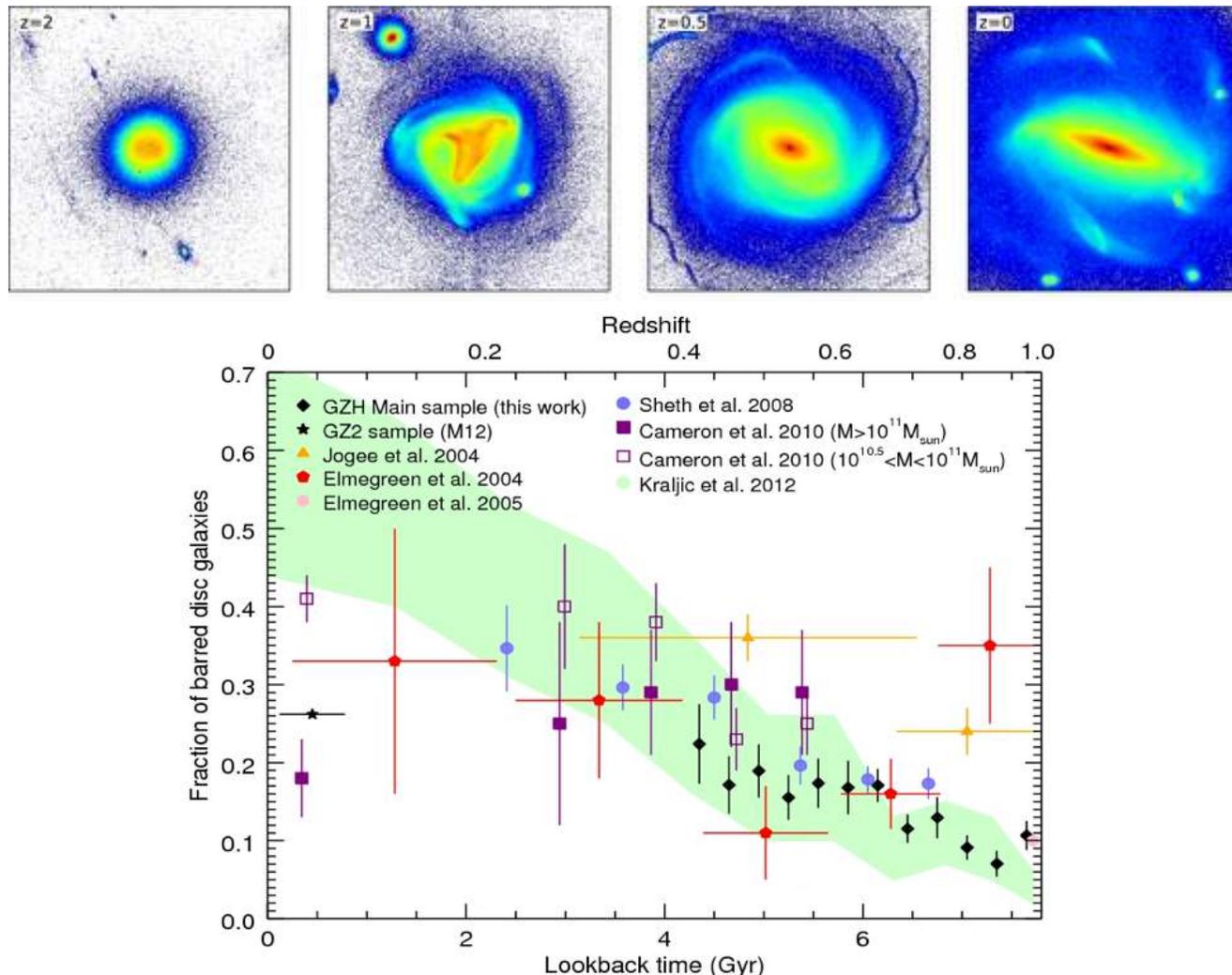
- Les simulations cosmologiques ne montrent pas de barres, ou rarement.
- Problèmes de résolution numérique et de biais associés ?
- Manque global de moment angulaire dans les régions centrales des galaxies simulées ?

# Transition morphologique – simulations



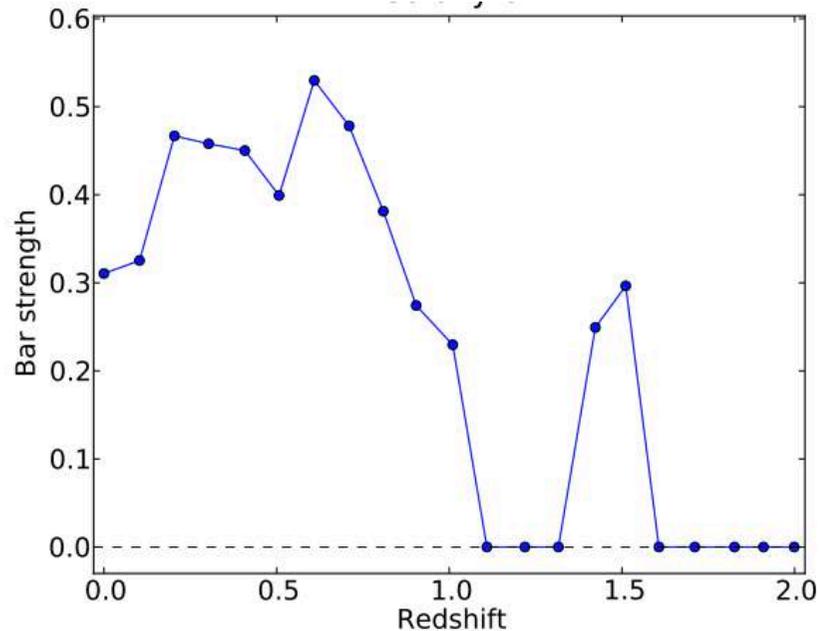
Des simulations en contexte cosmologique complet, mais démarrant après le premier milliard d'année de l'Univers, produisent des spirales barrées à  $z < 1$  : l'histoire de ces galaxies simulées suit la cosmologie  $\Lambda$ -CDM, mais le problème de la consommation trop rapide du gaz et du moment angulaire dans l'Univers très jeune est corrigée artificiellement.

# Transition morphologique – simulations



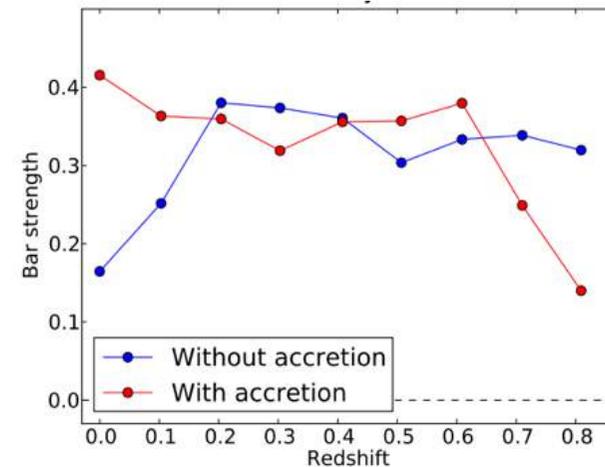
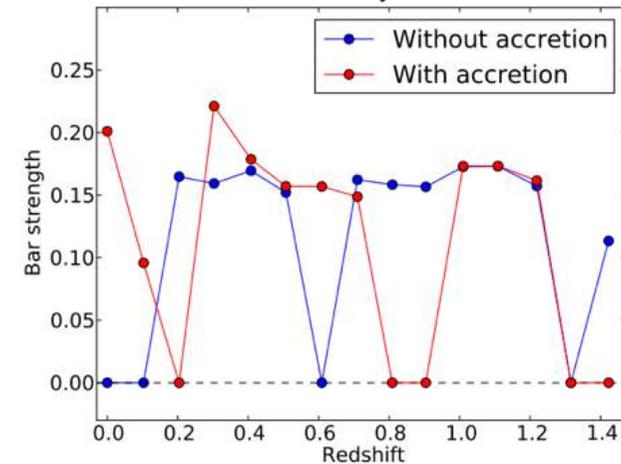
Des simulations en contexte cosmologique complet, mais démarrant après le premier milliard d'année de l'Univers, produisent des spirales barrées à  $z < 1$  : l'histoire de ces galaxies simulées suit la cosmologie  $\Lambda$ -CDM, mais le problème de la consommation trop rapide du gaz et du moment angulaire dans l'Univers très jeune est corrigée artificiellement.

# Transition morphologique – cycles évolutifs des barres



Après leur formation à  $z=1-2$  les barres suivent bien des cycles évolutifs avec dissolution et reformation.

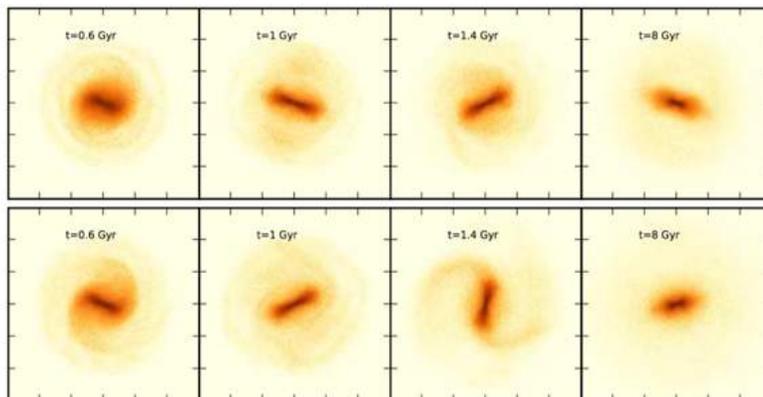
L'accrétion diffuse de gaz froid est nécessaire au maintien d'une fraction de barres élevées jusqu'à l'époque actuelle.



# Barres et structures morphologiques

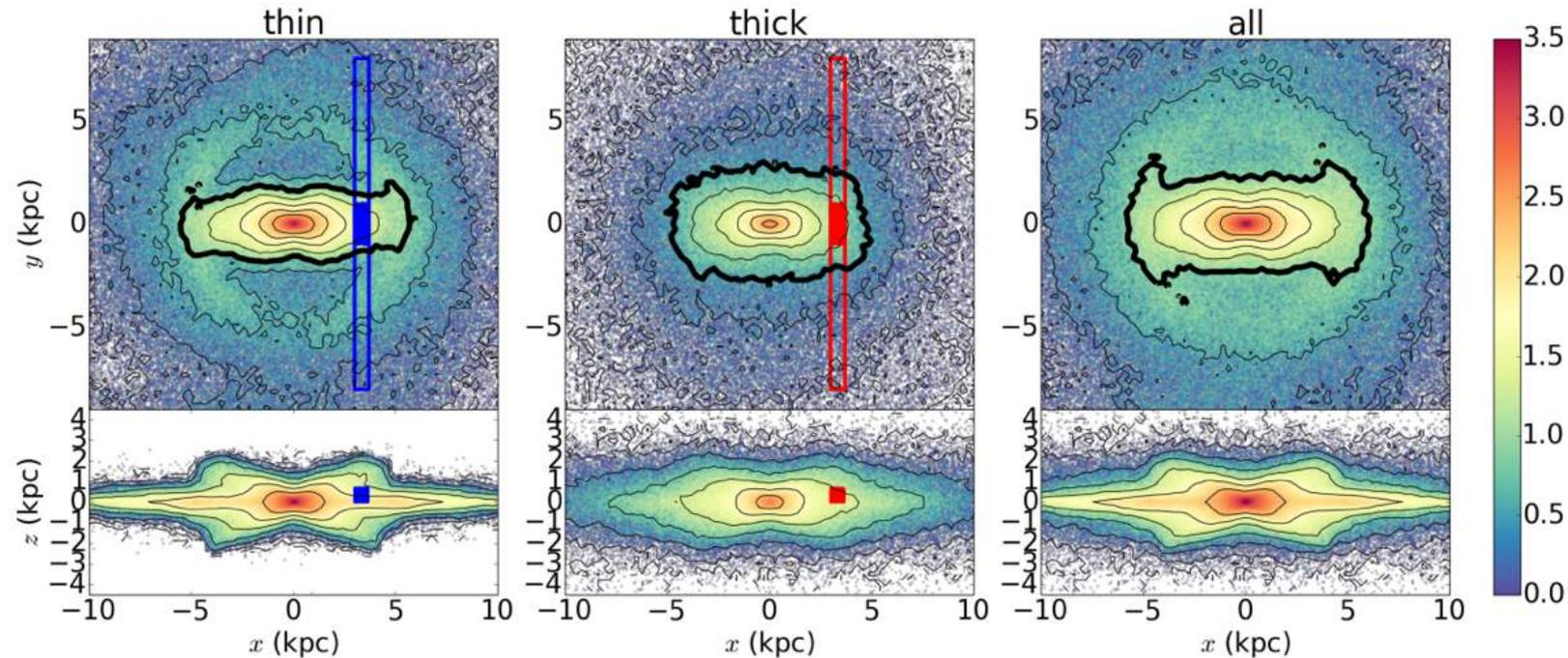
## Traceurs de la formation et moteurs de l'évolution des galaxies

- Les barres galactiques, ainsi que leur absence dans l'Univers jeune, sont un traceur direct des processus de formation des galaxies.
- La cosmologie « standard »  $\Lambda$ -CDM, semble permettre d'expliquer leur évolution de manière réaliste.
- Un défi majeur reste d'expliquer ces évolutions morphologiques tout en expliquant aussi l'évolution des masses de baryons (gas/étoiles) et l'histoire de la formation stellaire.
- D'autres modèles cosmologiques ne sont pas exclus



*Barres avec matière noire (haut) et gravité modifiée (MOND, bas) – Tiret & Combes 2008*

# Moteurs d'évolution morphologique



Les barres peuvent former des bulbes centraux : il s'agit essentiellement de « pseudo-bulbes », peu concentrés et en rotation.

Les « bulbes classiques », concentrés et à faible rotation, sont plutôt expliqués par la fragmentation des disques primordiaux et/ou les collisions et fusions de galaxies

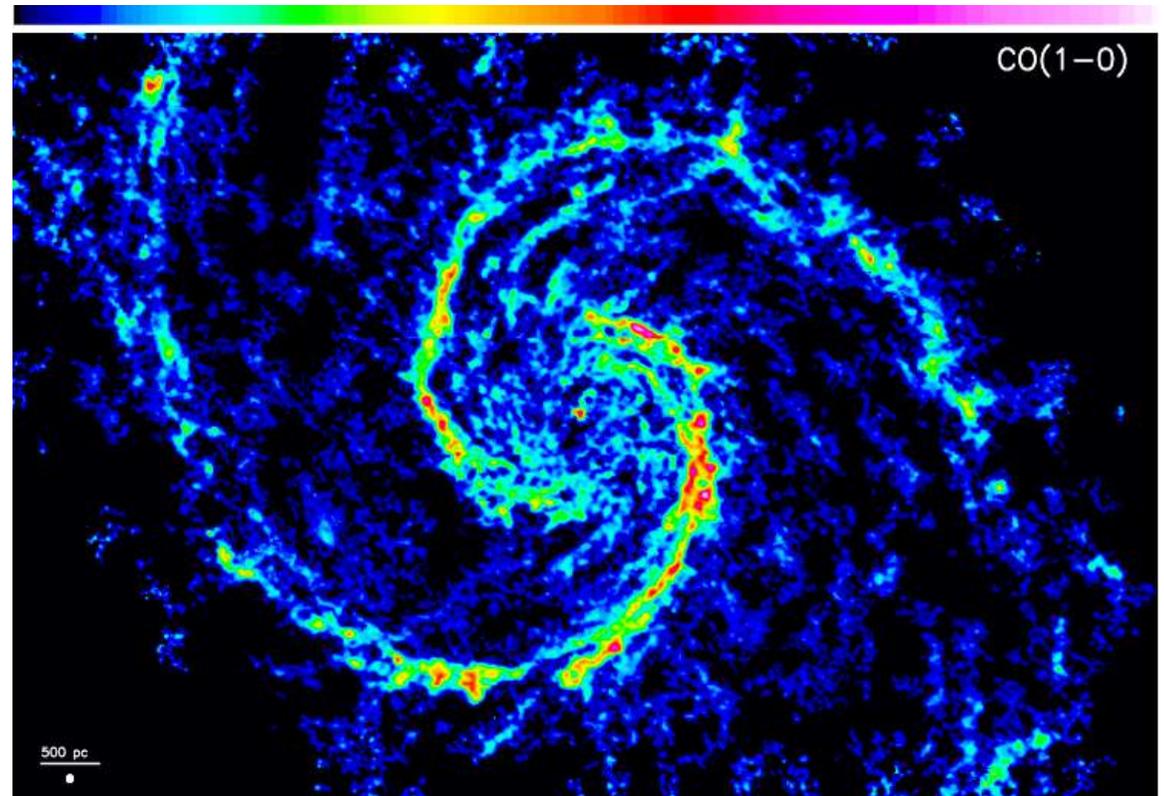
L'âge des populations stellaires dans ces différents composants ainsi que les propriétés chimiques sont cohérents avec ces mécanismes.

# Formation stellaire : induction et régulation

---

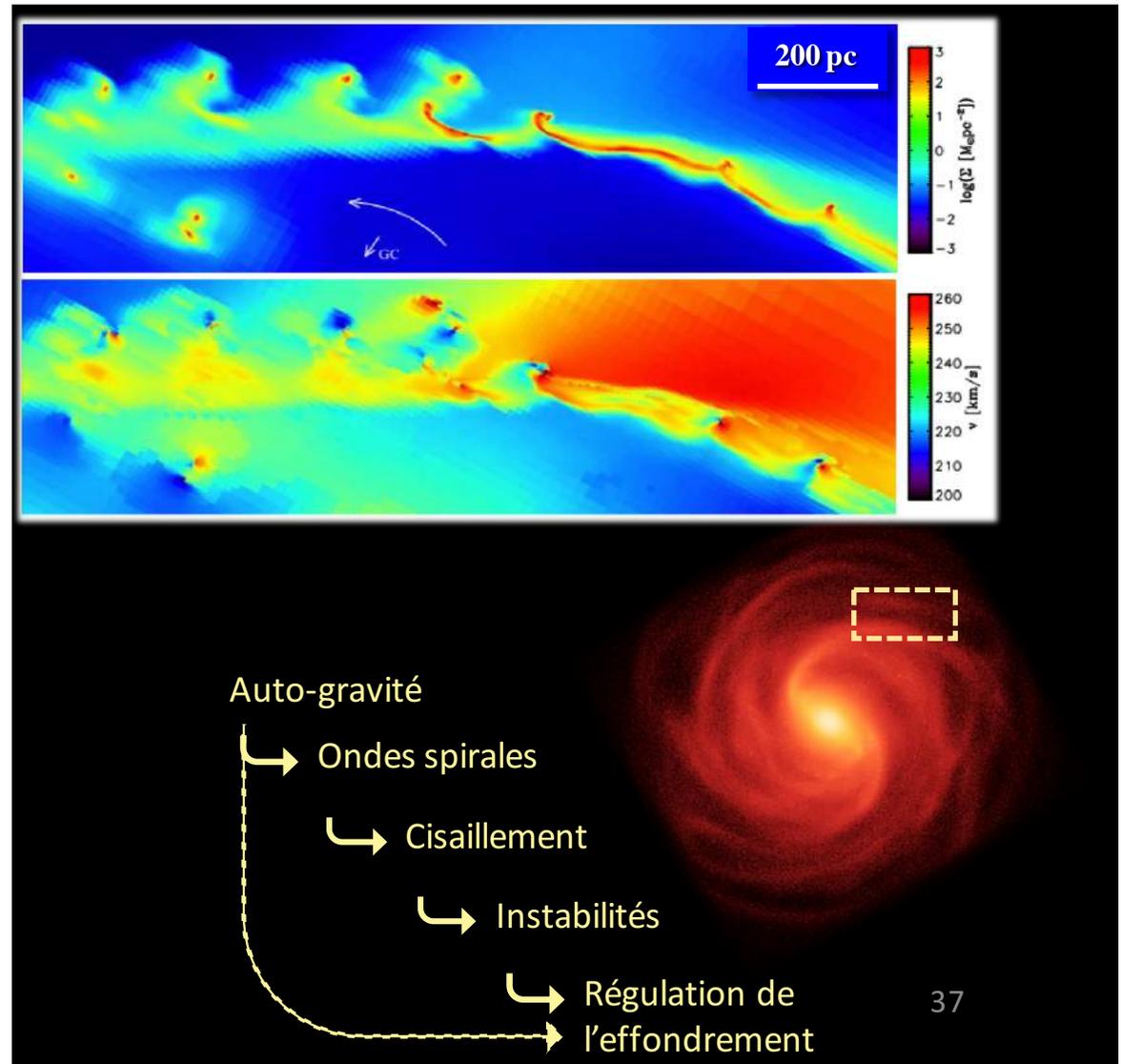
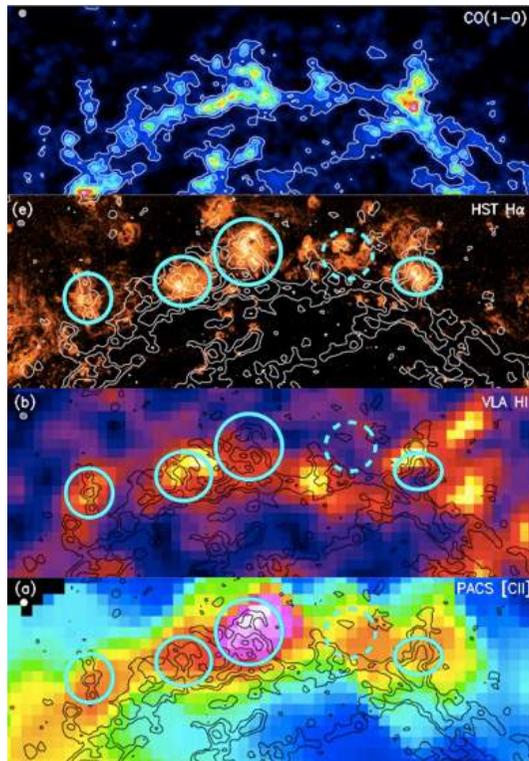
Formation stellaire la plus « universelle » : dans les bras spiraux

Masse et espacement caractéristiques des régions de formation stellaire  
Présence d' « éperons » s'échappant des bras spiraux



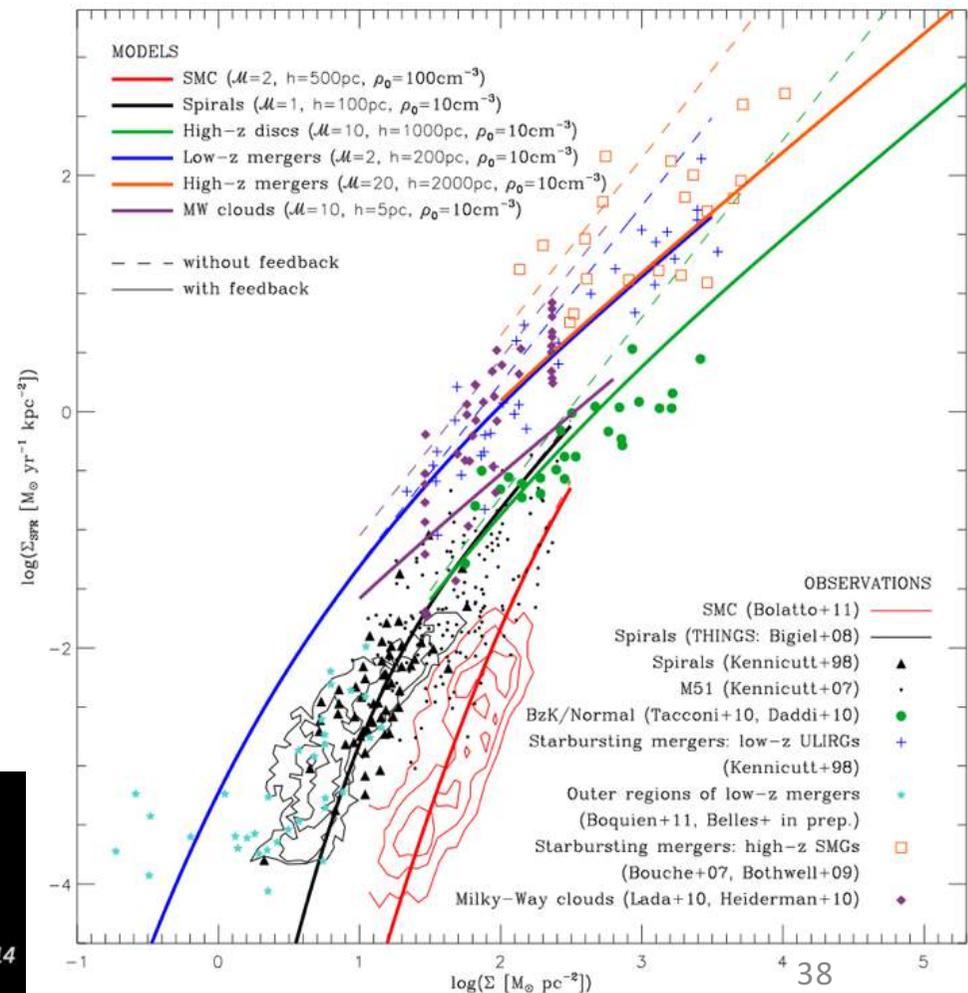
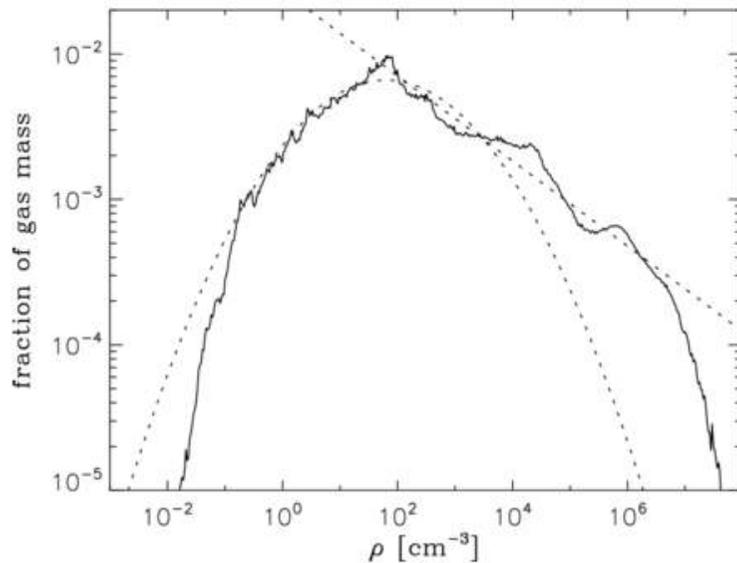
# Formation stellaire : induction et régulation

Le gaz est compacté dans les bras *mais* soumis à un fort cisaillement qui évolue en instabilités hydrodynamiques et turbulence interne => auto-régulation en formation stellaire de faible efficacité



# Formation stellaire : induction et régulation

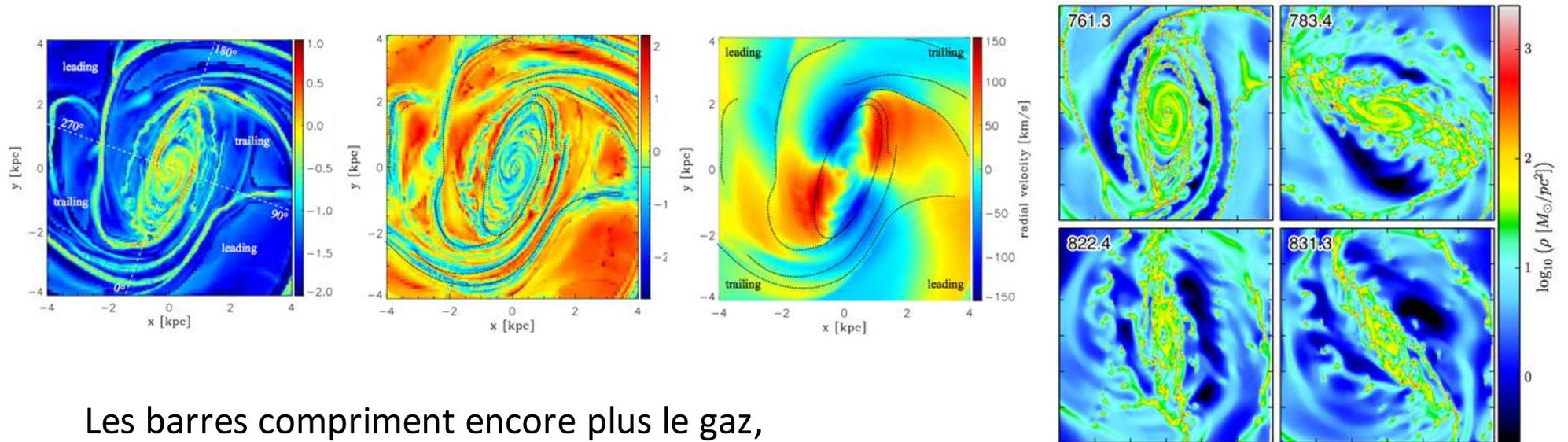
Les propriétés d'un gaz turbulent (supersonique) expliquent naturellement les relations d'échelles observées pour la formation stellaire aux échelles galactiques: Le gaz turbulent possède une distribution universelle de densité.



$$\Sigma_{\text{sfr}} = \Sigma^{3/2} \epsilon \sqrt{\frac{8G}{3\pi}} \frac{\exp\left(\frac{3\sigma^2}{8}\right)}{\sqrt{h}} \left[ \text{erfc}\left(\frac{\ln\left(\frac{\rho_0 h}{\Sigma}\right) - \sigma^2}{\sigma\sqrt{2}}\right) - \text{erfc}\left(\frac{\ln\left(\frac{3\pi\epsilon^2 h}{32G\epsilon_s^2 \epsilon^2 \Sigma}\right) - \sigma^2}{\sigma\sqrt{2}}\right) \right] + \Sigma \frac{\epsilon_s}{2l_s} \text{erfc}\left(\frac{\ln\left(\frac{3\pi\epsilon^2 h}{32G\epsilon_s^2 \epsilon^2 \Sigma}\right) - \frac{\sigma^2}{2}}{\sigma\sqrt{2}}\right)$$

Renaud Kraljic & Bournaud 14  
Bournaud et al. 2015

# Formation stellaire : induction et régulation

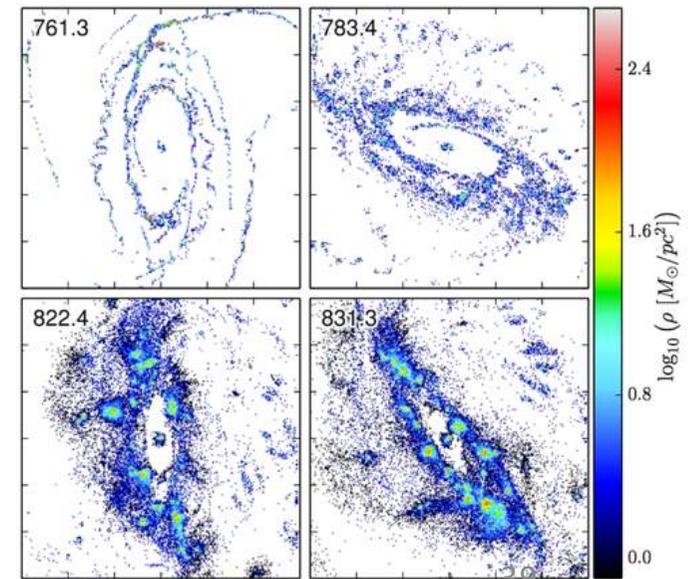


Les barres compriment encore plus le gaz, mais ce sont des zones de cisaillement très marqué.

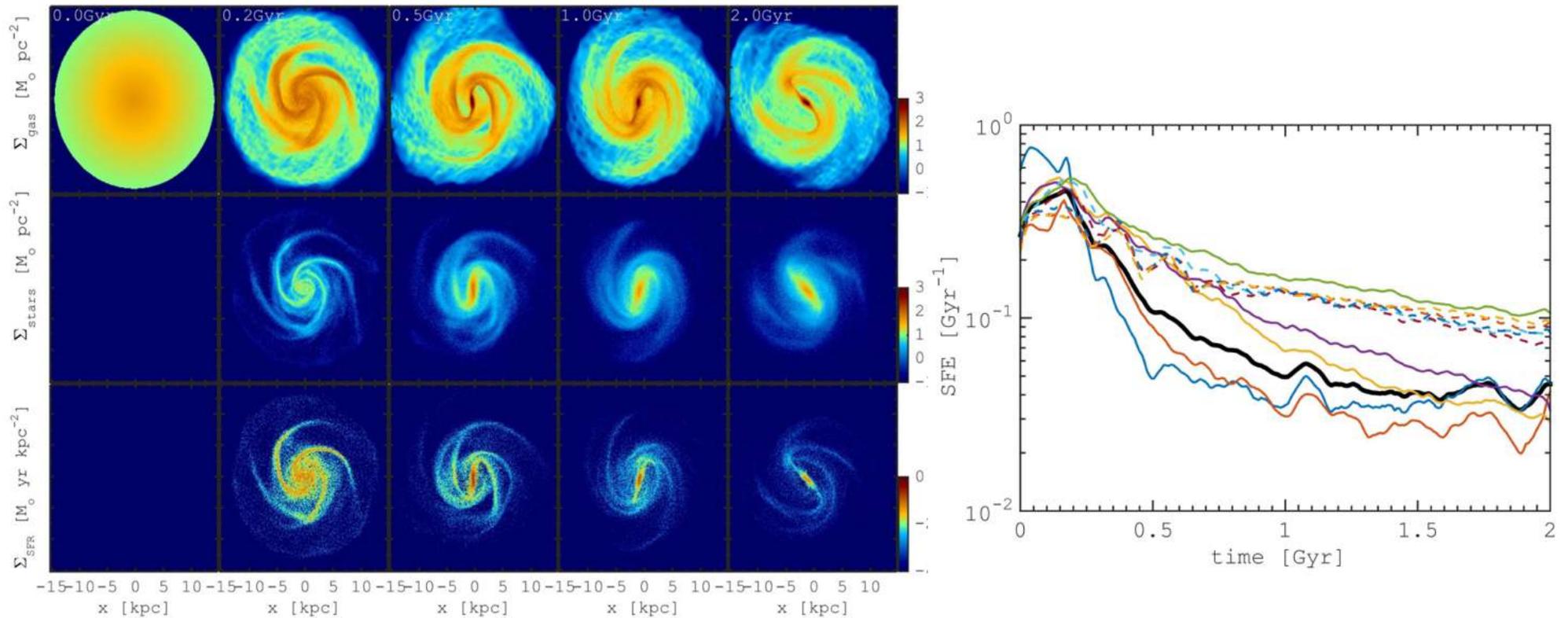
Les mouvements turbulents sont essentiellement solénoïdaux, avec faible compression.

S'y ajoute un champ de marée extensif.

L'ensemble régule la formation stellaire malgré la forte compression du gaz.



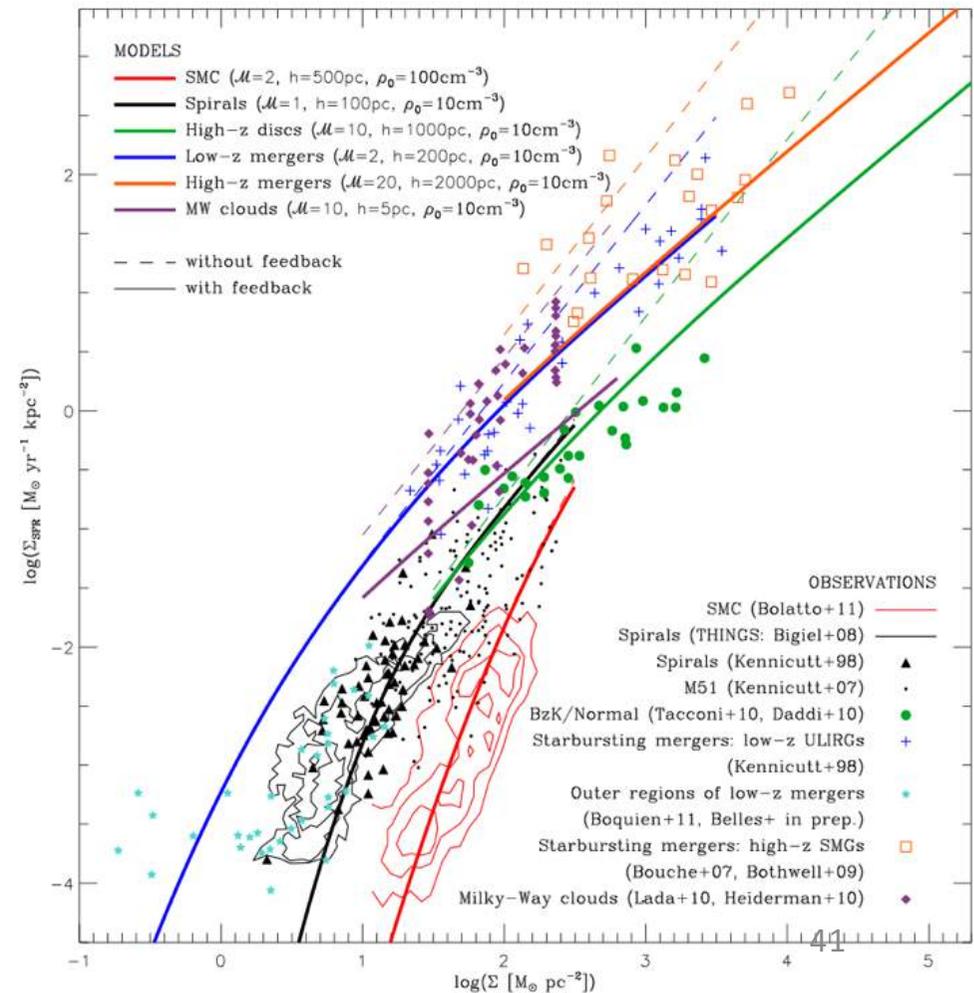
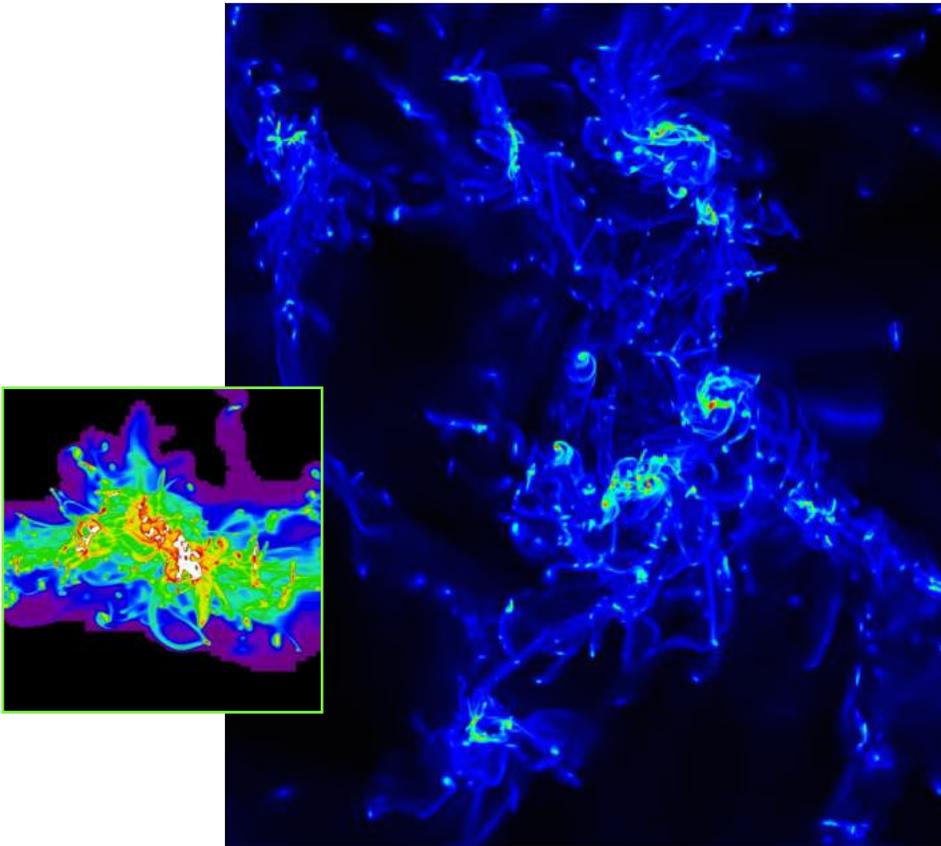
# Formation stellaire : induction et régulation



La formation de barres comprime le gaz, augmente sa densité, mais les mécanismes de régulation réduisent l'efficacité de formation stellaire (à densité donnée) d'un ordre de grandeur, si bien que le taux de formation stellaire n'est pas augmenté.

# Formation stellaire : induction et régulation

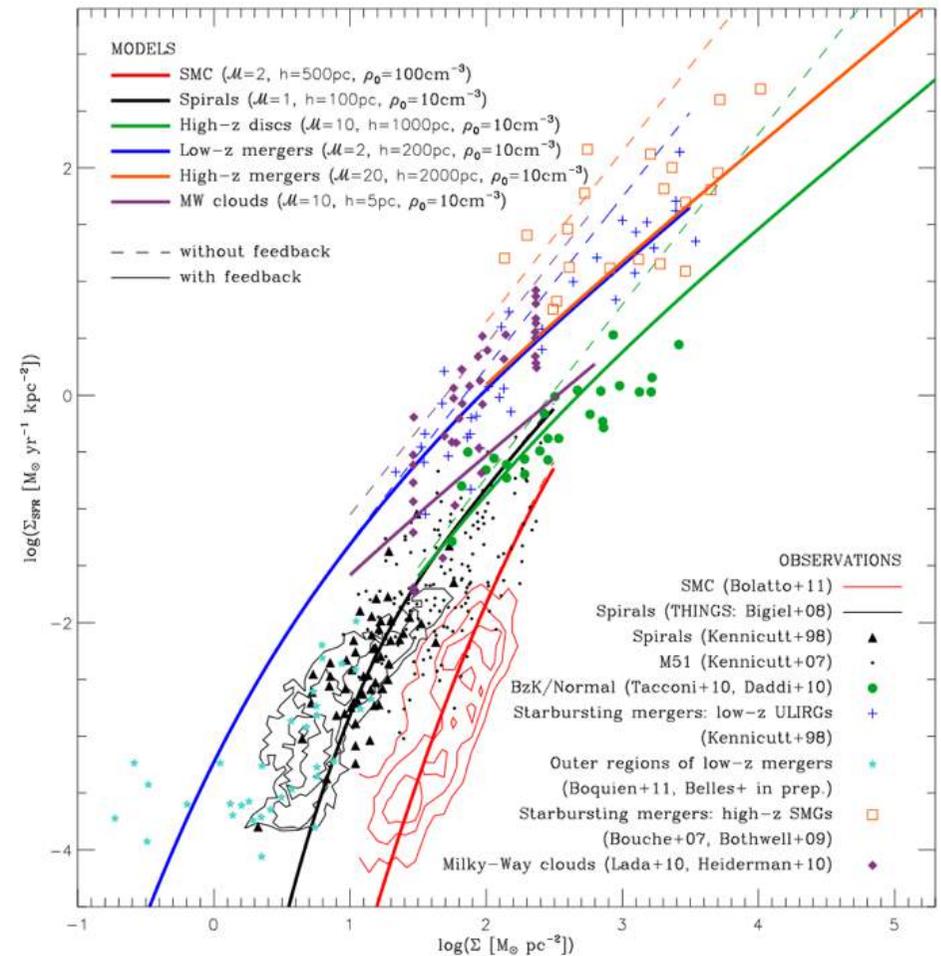
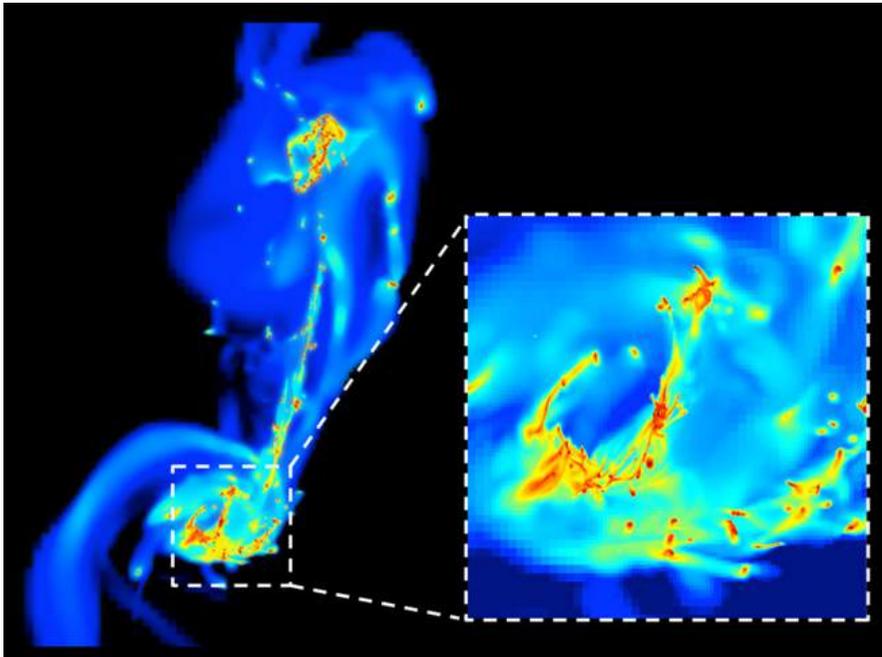
Cas des galaxies primordiales instables : même principe d'auto-régulation.  
La fragmentation comprime le gaz mais la turbulence associée régule les densités atteintes dans les grands fragments, seule une petite fraction de la masse de gaz se trouve dans des sous-fragments denses où les étoiles se forment



# Formation stellaire : induction et régulation

Cas échappant à la régulation universelle:

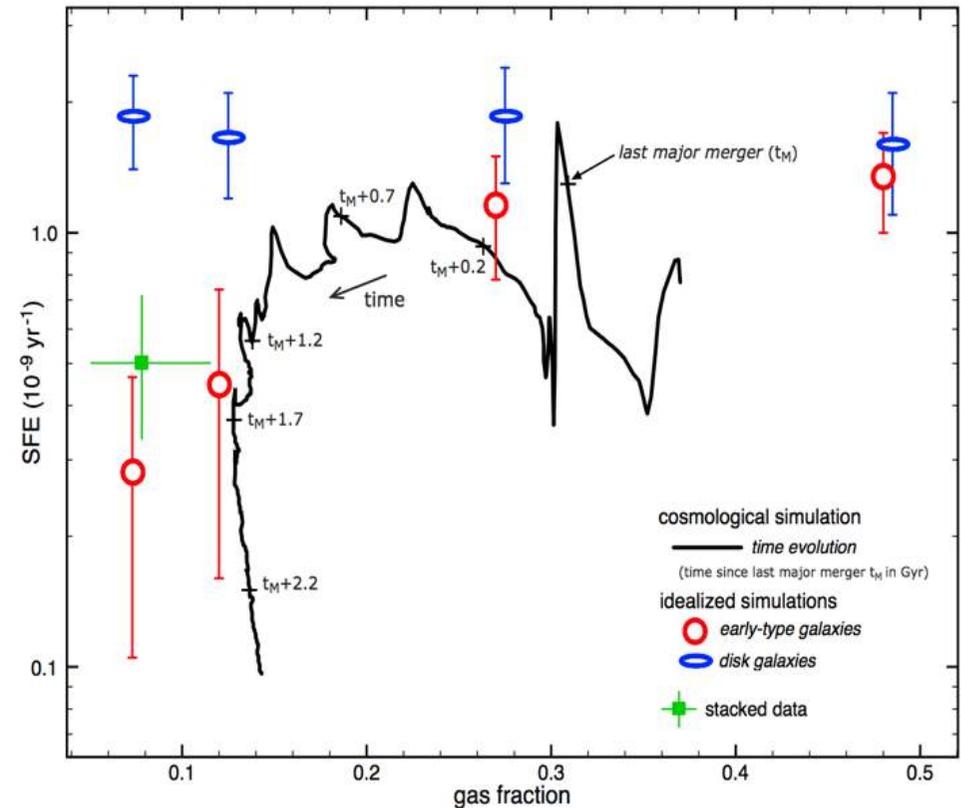
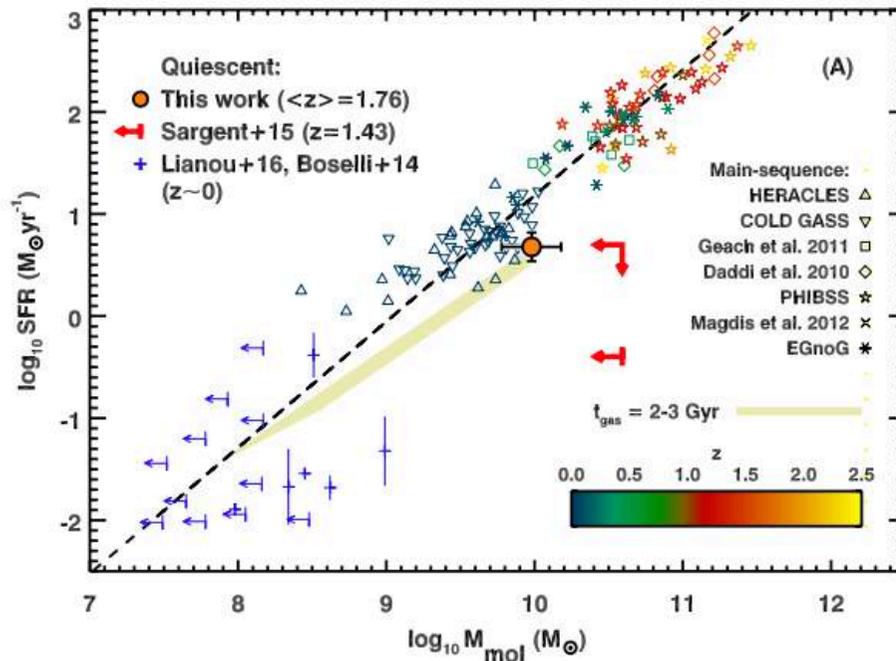
- Collisions/fusions de galaxies  
⇒ Flambées de formation stellaire
- Galaxies elliptiques sans disque d'étoiles  
⇒ Stabilisation et étanchement



# Formation stellaire : induction et régulation

Cas échappant à la régulation universelle:

- Collisions/fusions de galaxies  
⇒ Flambées de formation stellaire
- Galaxies elliptiques sans disque d'étoiles  
⇒ Stabilisation et étanchement

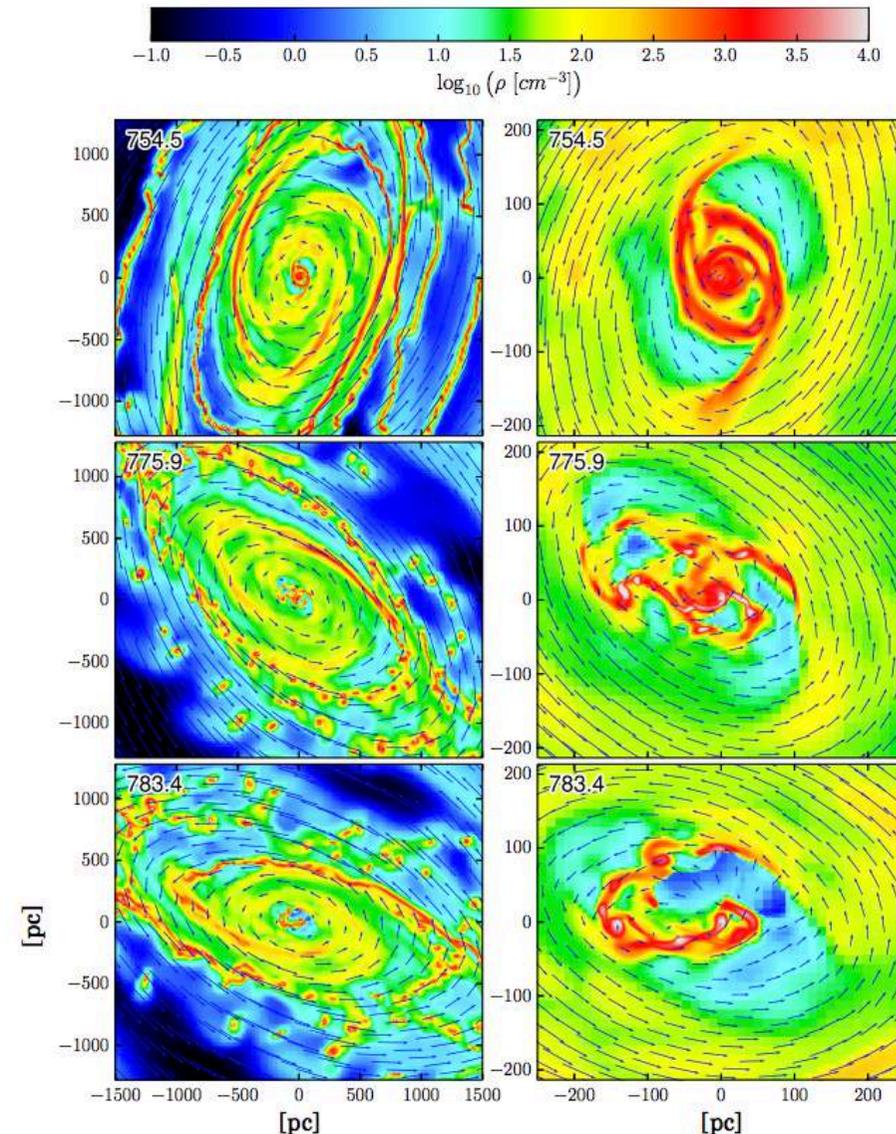
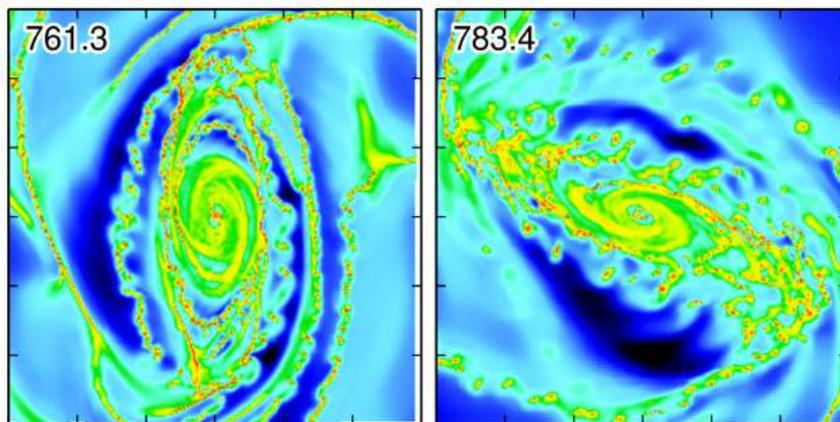


# Barres et croissance des trous noirs supermassifs

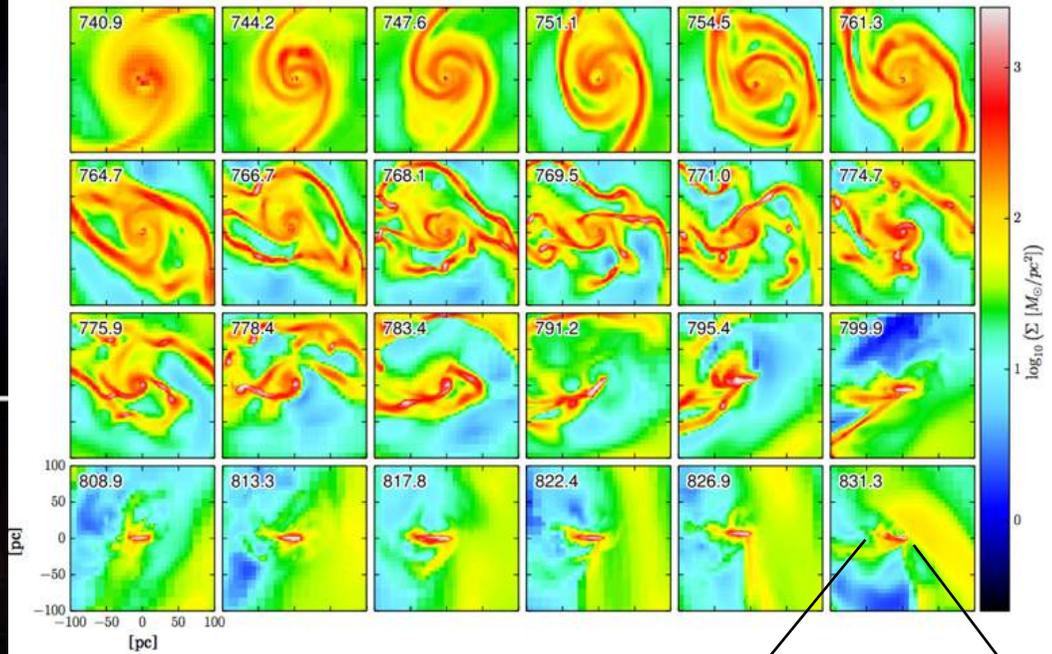
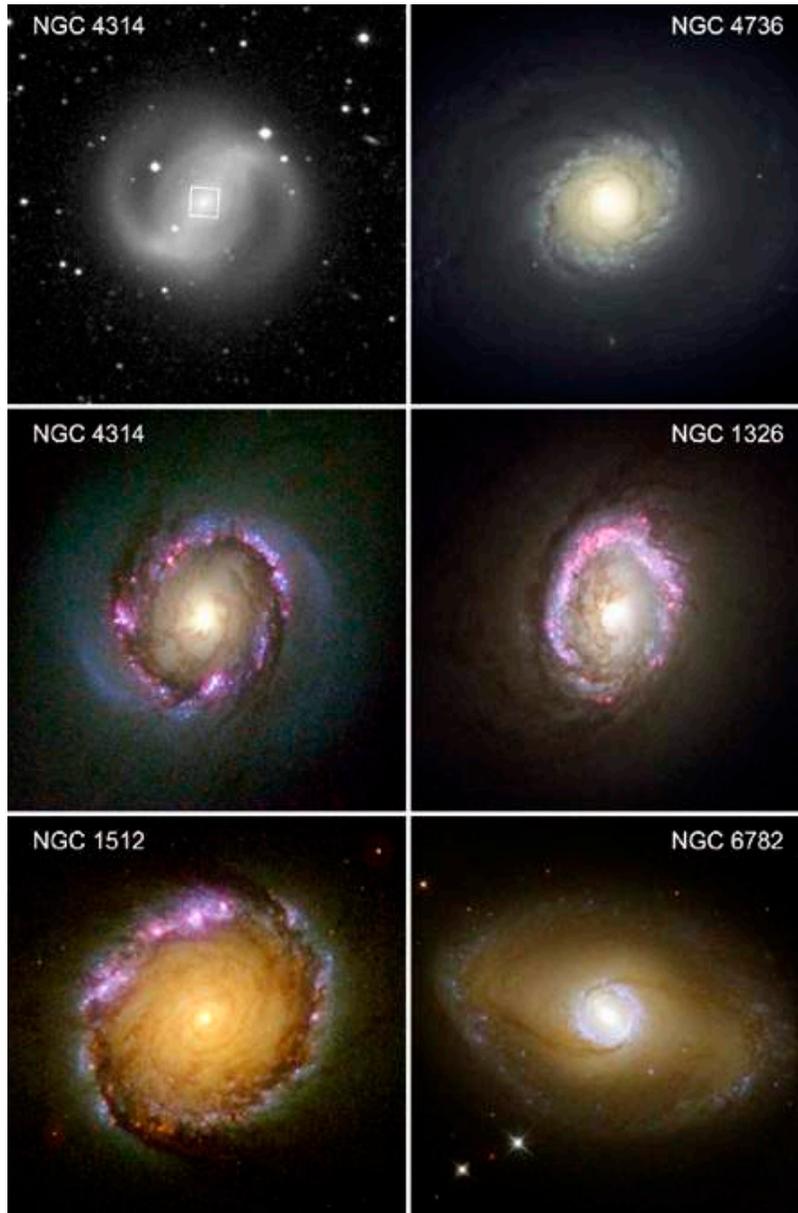
Les couples des barres induisent un flot de gaz vers le centre, ce qui peut alimenter le trou noir supermassif central.

Problème : à 90° d'enroulement des bras de gaz les couples s'inversent, c'est la « résonance interne de Lindblad ».

L'anneau de gaz bloqué à la résonance peut devenir instable.



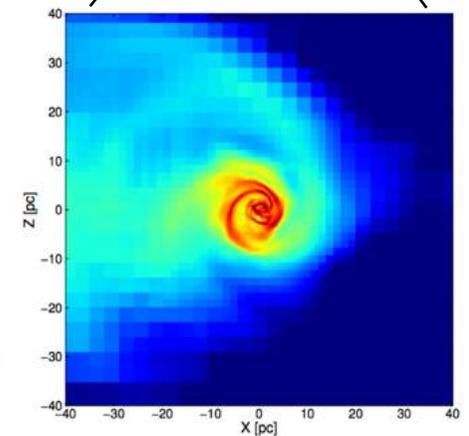
# Barres et croissance des trous noirs supermassifs



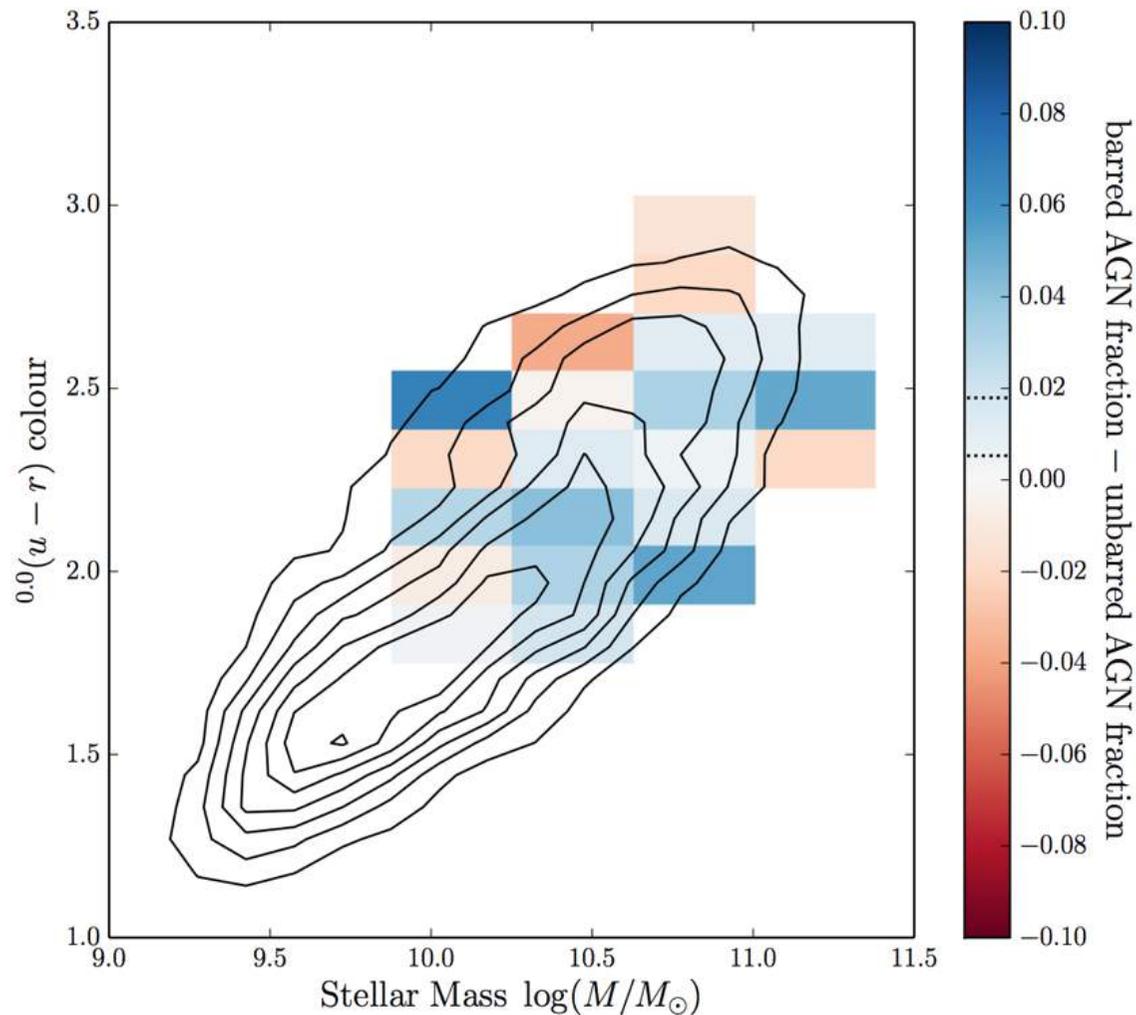
Réserves de gaz préservées par la barre.

Fragmentation à la résonance interne.

Alimentation du noyau et trou noir de manière cyclique.



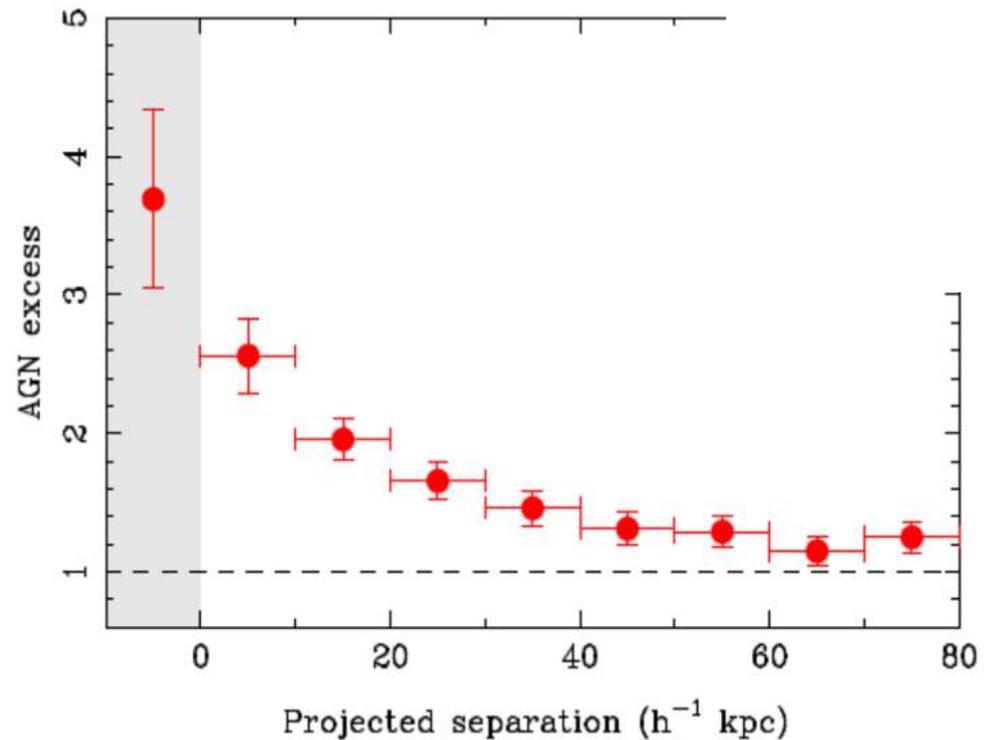
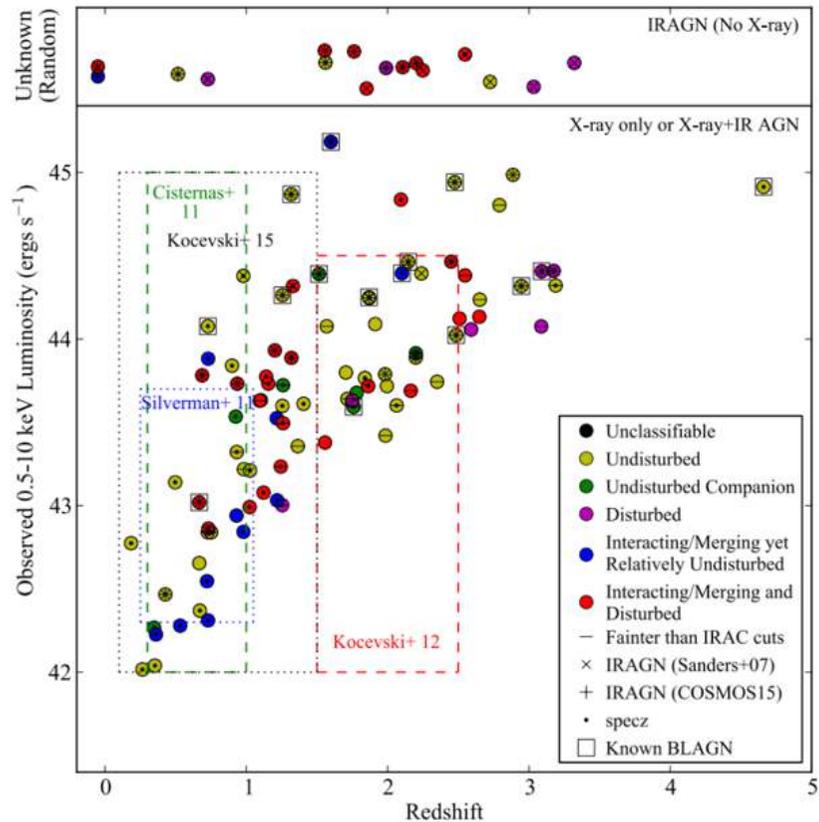
# Barres et croissance des trous noirs supermassifs



Les barres favorisent les noyaux actifs dans les galaxies les plus nombreuses.

Les noyaux dans les galaxies les plus actives ne sont pas favorisés par les barres, mais plutôt par des collisions (pas de blocage résonant des flots de gaz).

# Barres et croissance des trous noirs supermassifs

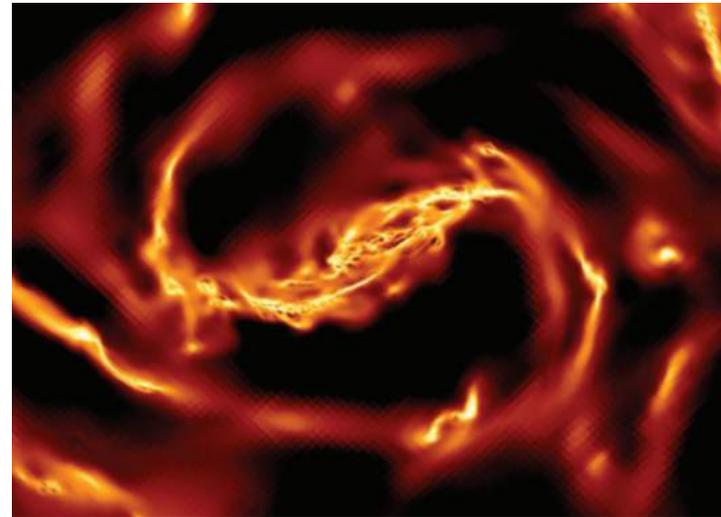


Les noyaux dans les galaxies les plus actives ne sont pas favorisés par les barres, mais plutôt par des collisions.

Elison et al. 2013  
Donley et al. 2017

# Barres et structures morphologiques :

Traceurs de la formation et moteurs de l'évolution des galaxies



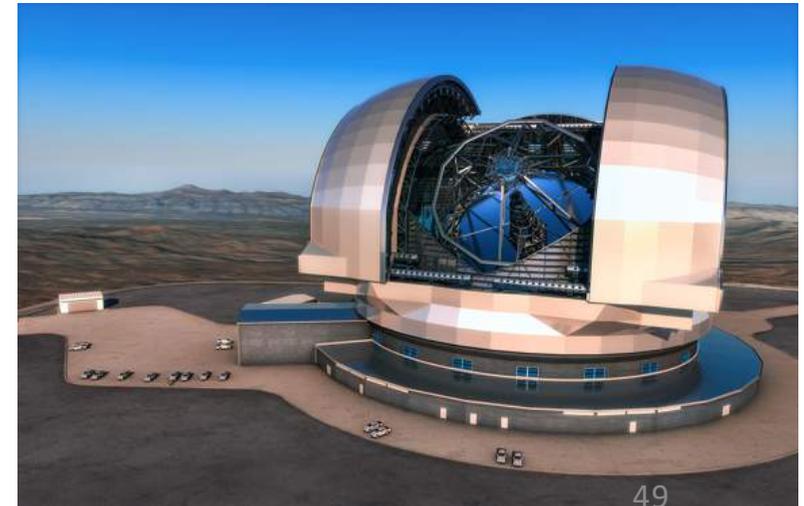
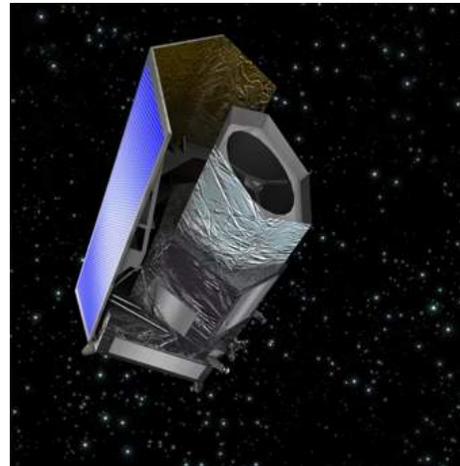
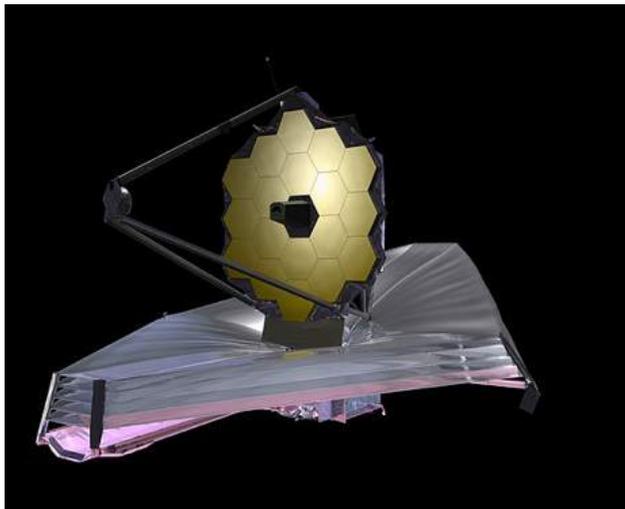
Perspectives et défis

# Enjeux – formation des galaxies spirales et barrées

---

Observations profondes de la distribution de masse stellaire  
Trois grands observatoires :

JWST EUCLID E-ELT

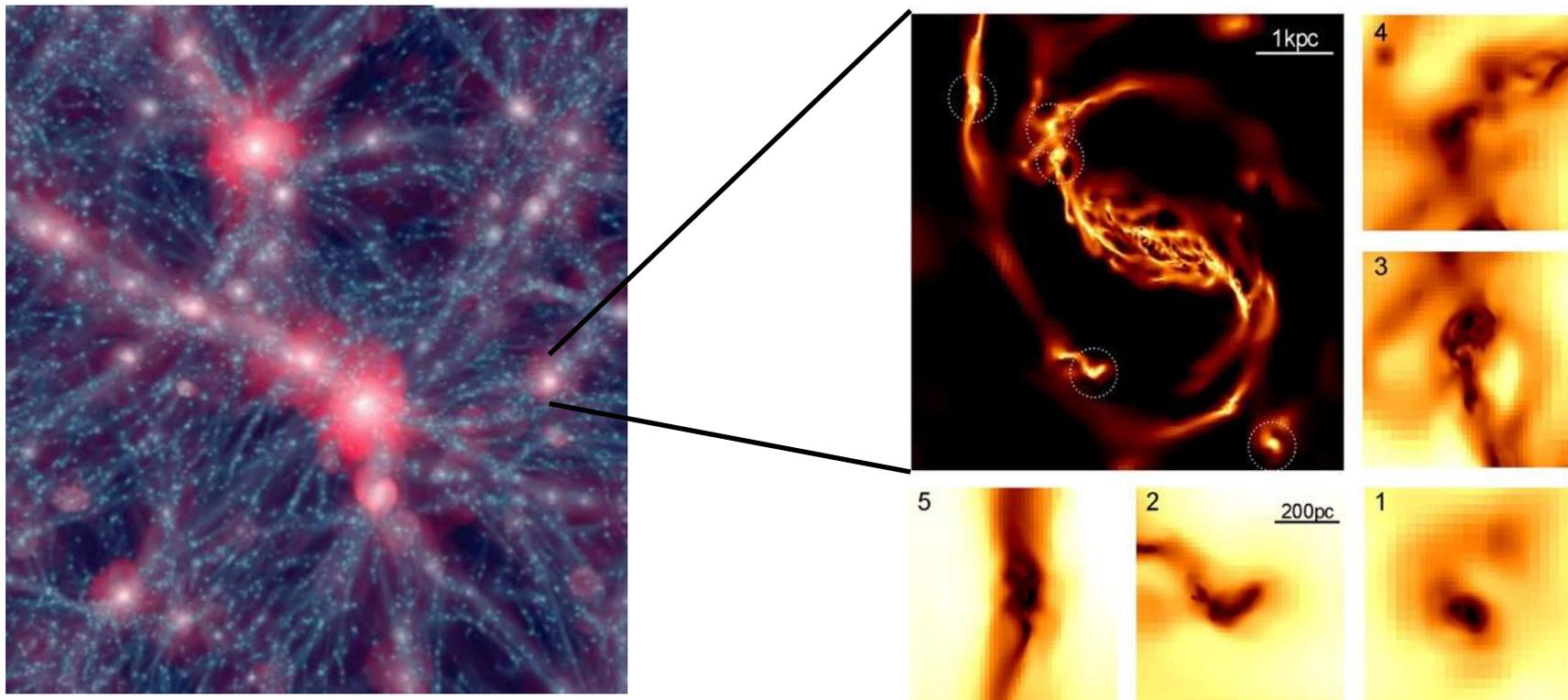


# Enjeux – formation des galaxies spirales et barrées

---

Simuler l'histoire cosmologique complète avec la physique de la formation stellaire et des processus de rétroaction :

- Les supercalculateurs « exaflopiques »... mais aussi les codes de calcul adaptés.
- Défi de simulations particulièrement longues (échelles de temps imbriquées).



# Enjeux – formation des galaxies spirales et barrées

---

**Défi central de l'étude de la formation des galaxies :**

**Expliquer simultanément  
l'évolution morphologique *et* l'histoire de formation stellaire**

