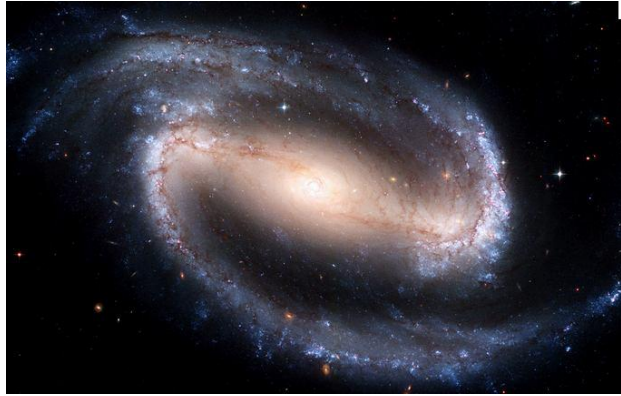


L'origine des populations de galaxies : connaissances et mystères



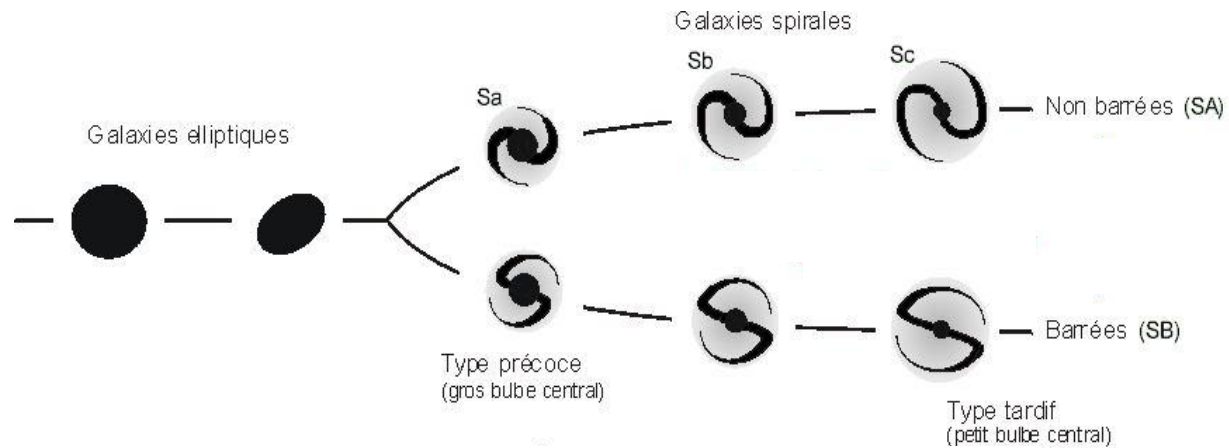
Frédéric Bournaud - CEA Saclay

Morphologie des galaxies proches



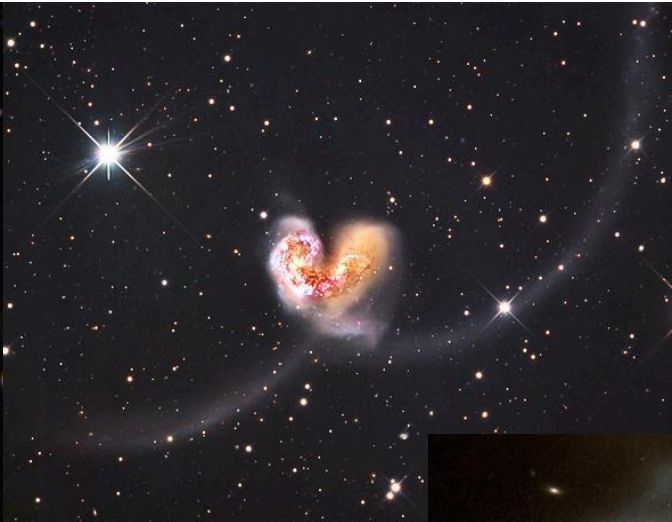
Spirales et elliptiques
Spirales barrées / non barrées

La "séquence de Hubble"



Classification des types "précoces" aux types "tardifs", couvre toutes les galaxies de l'Univers proche ("redshift $z=0-0.5$ ") sauf les naines (compactes, irrégulières, etc)

Les galaxies en collision/fusion

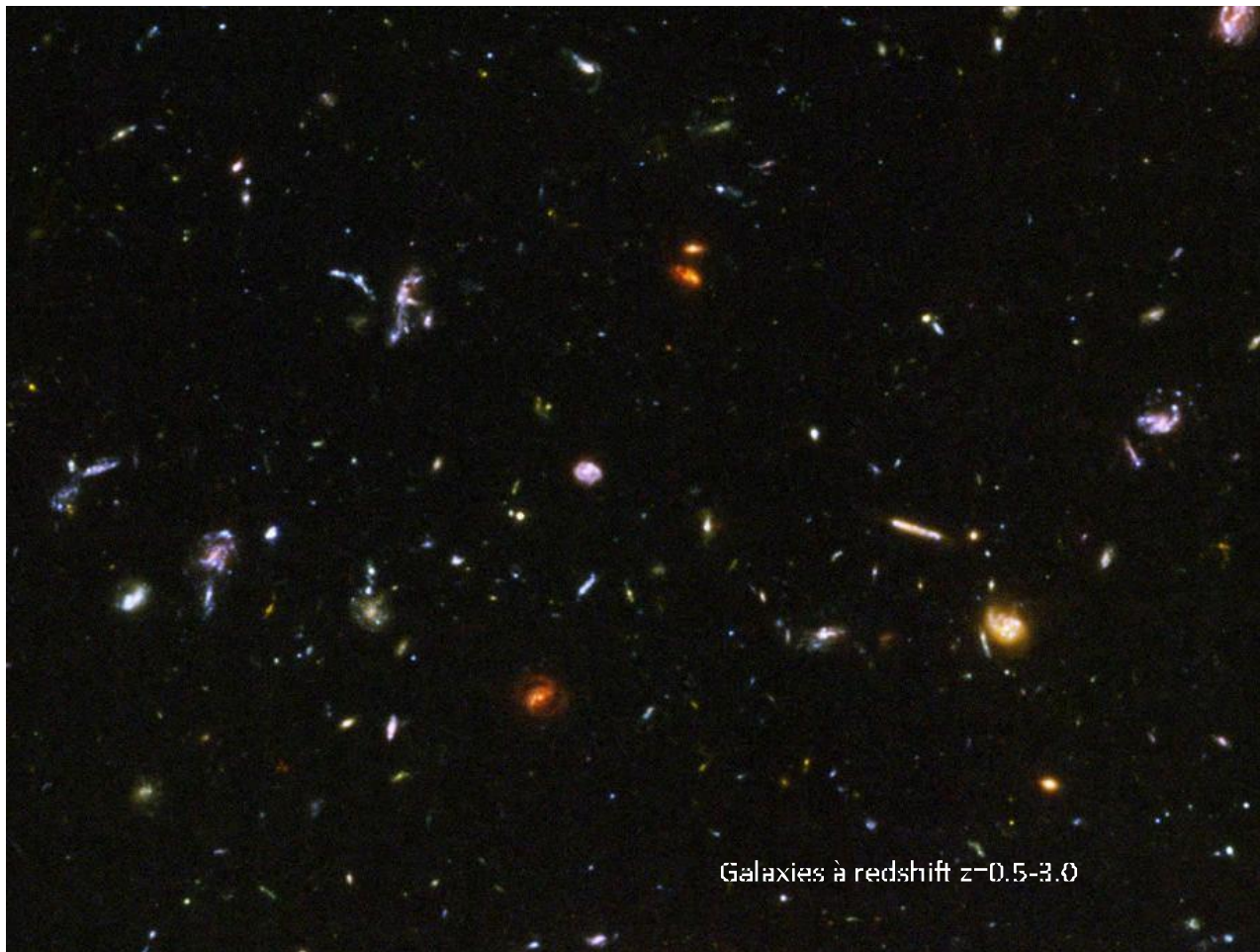


Plusieurs stades de
collision/fusion,
Spirales => elliptiques

Les galaxies distantes de l'Univers jeune

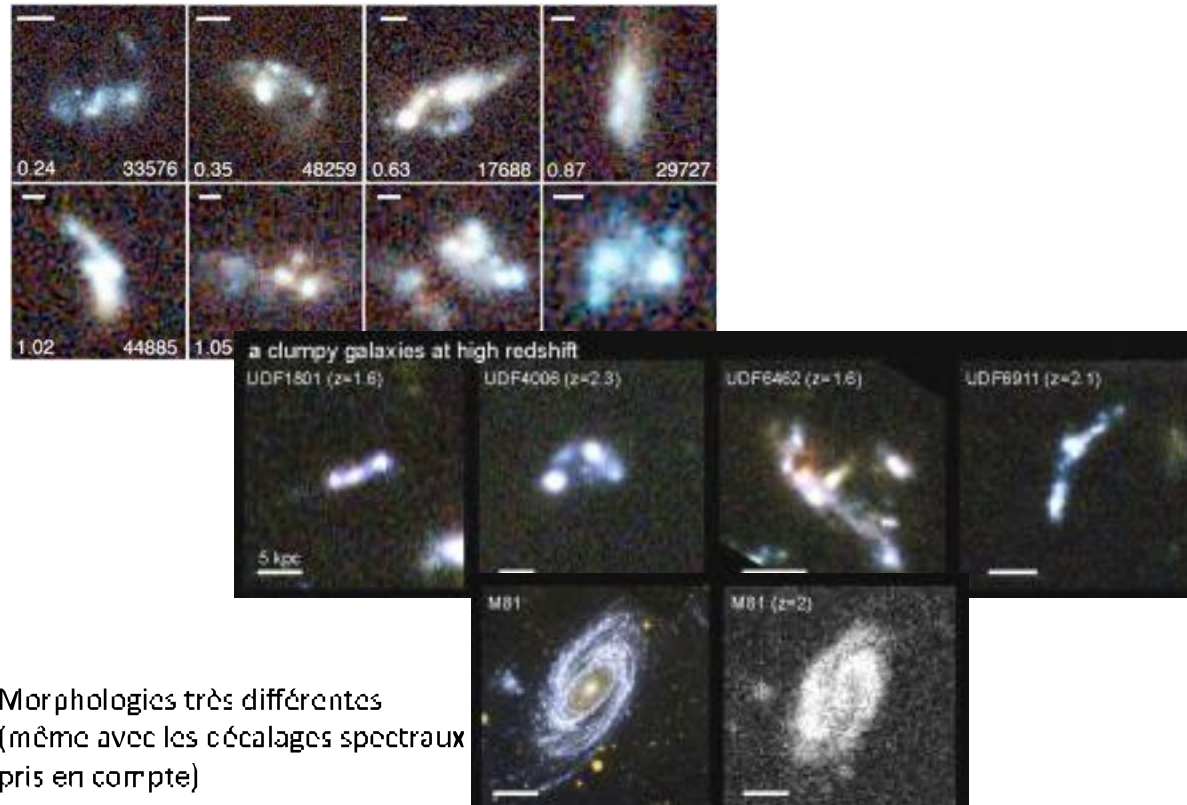


Le Champ Ultra-profond
de Hubble



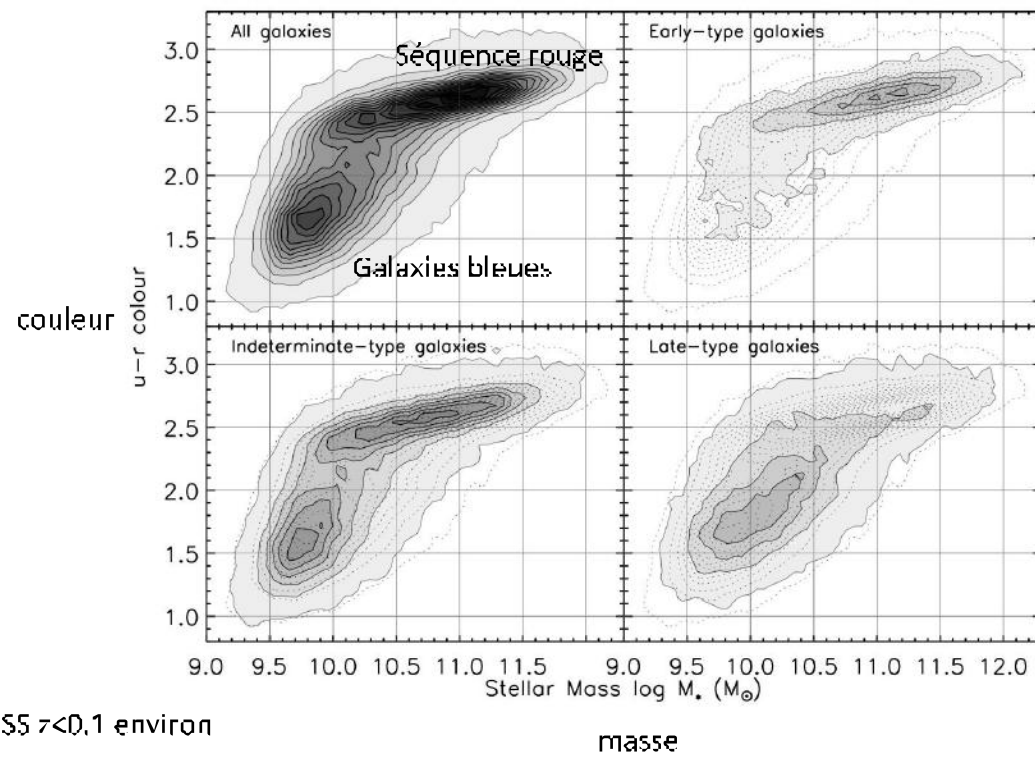
Galaxies à redshift $z=0.5-3.0$

Les galaxies jeunes: des morphologies différentes

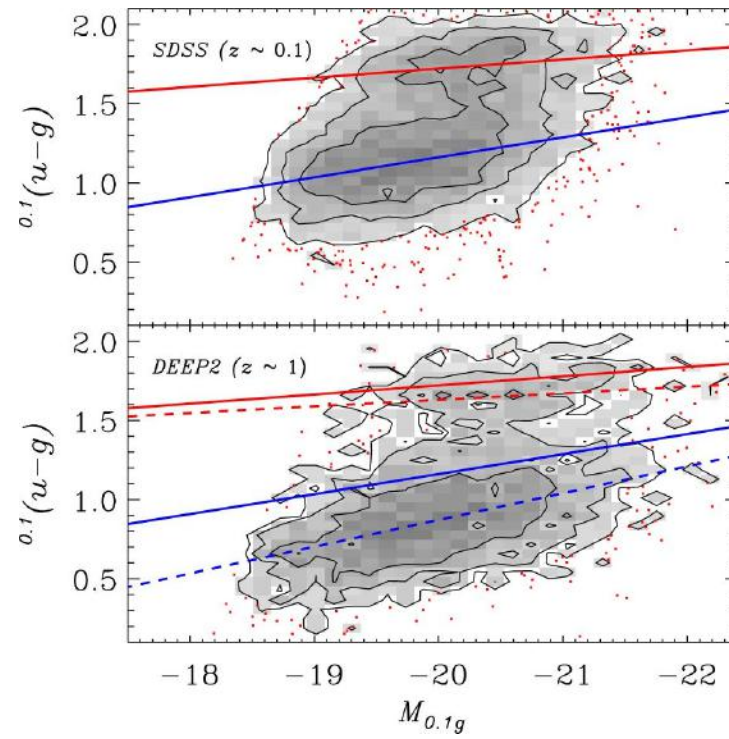


Morphologies très différentes
(même avec les décalages spectraux
pris en compte)

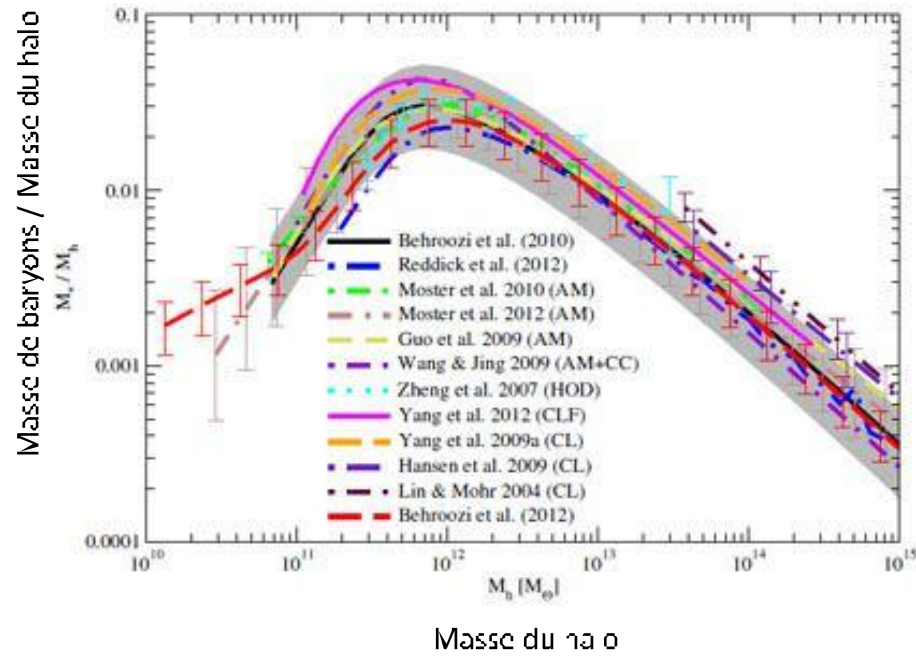
La bimodalité masse/couleur des galaxies



Croissance de la “séquence rouge”



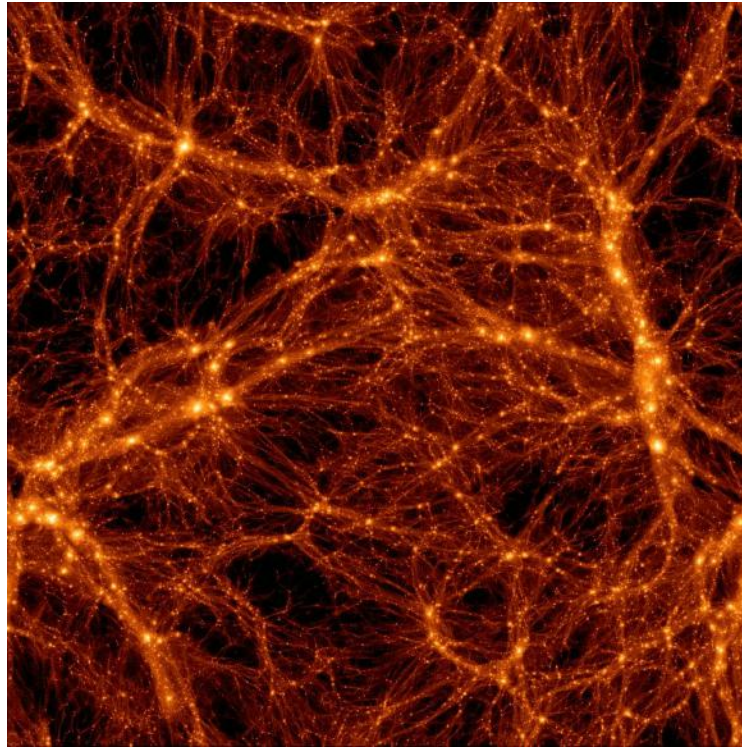
La formation des galaxies est très *inefficace*



Moins d'un quart des baryons disponibles sont trouvés dans les galaxies

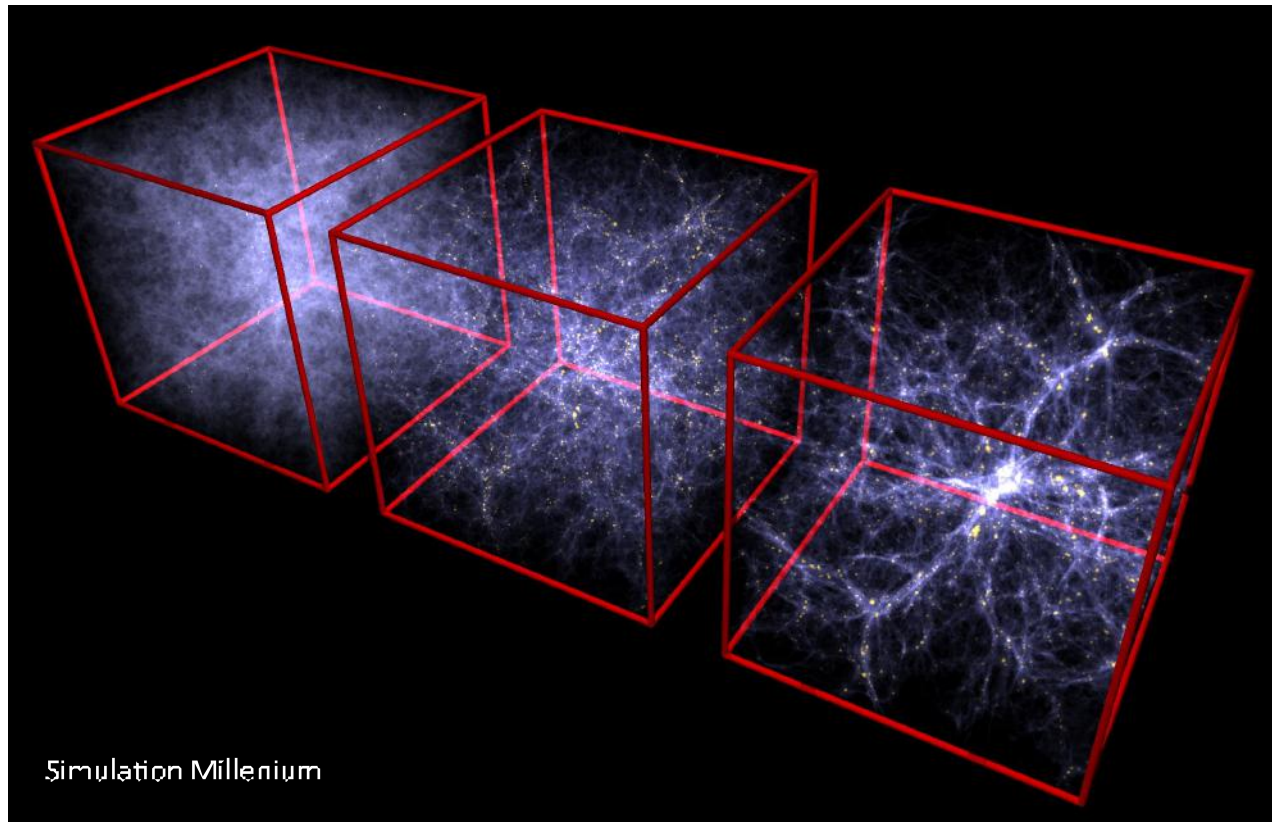
Formation des galaxies
dans le modèle cosmologique standard

Simulations des structures de matière noire

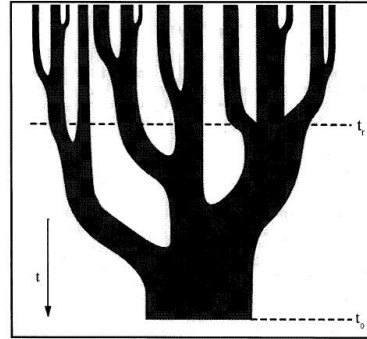
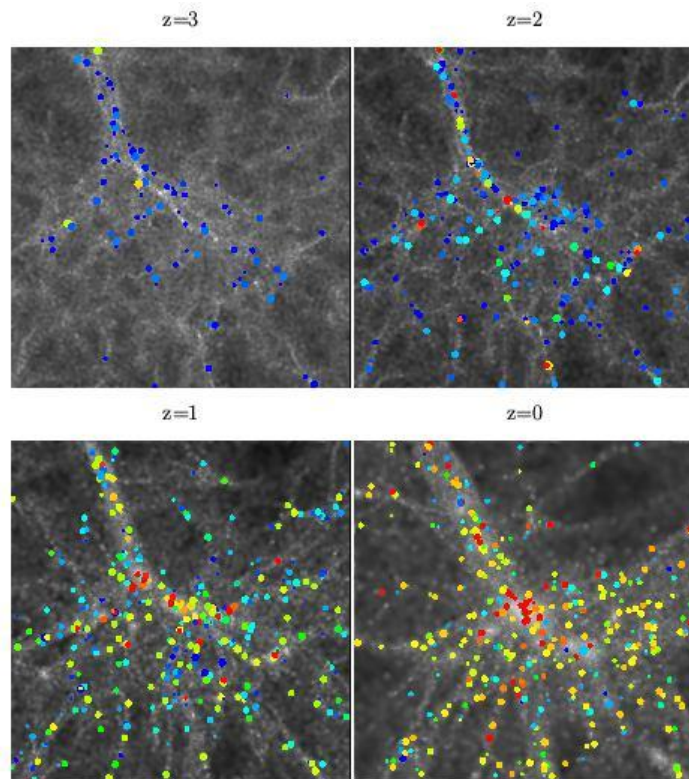


Projet Horizon 2006

Simulations des structures de matière noire



Les modèles semi-analytiques

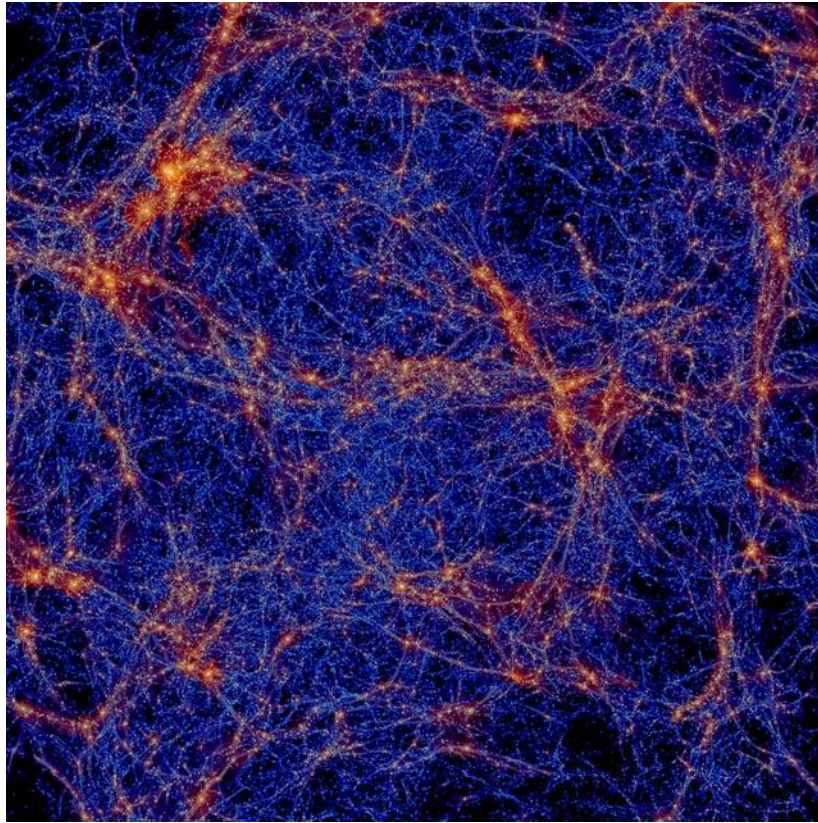


Suivi des halos de matière noire,
et arbres de fusion

On "peint" les baryons
à postériori sur les simulations
matière noire seules

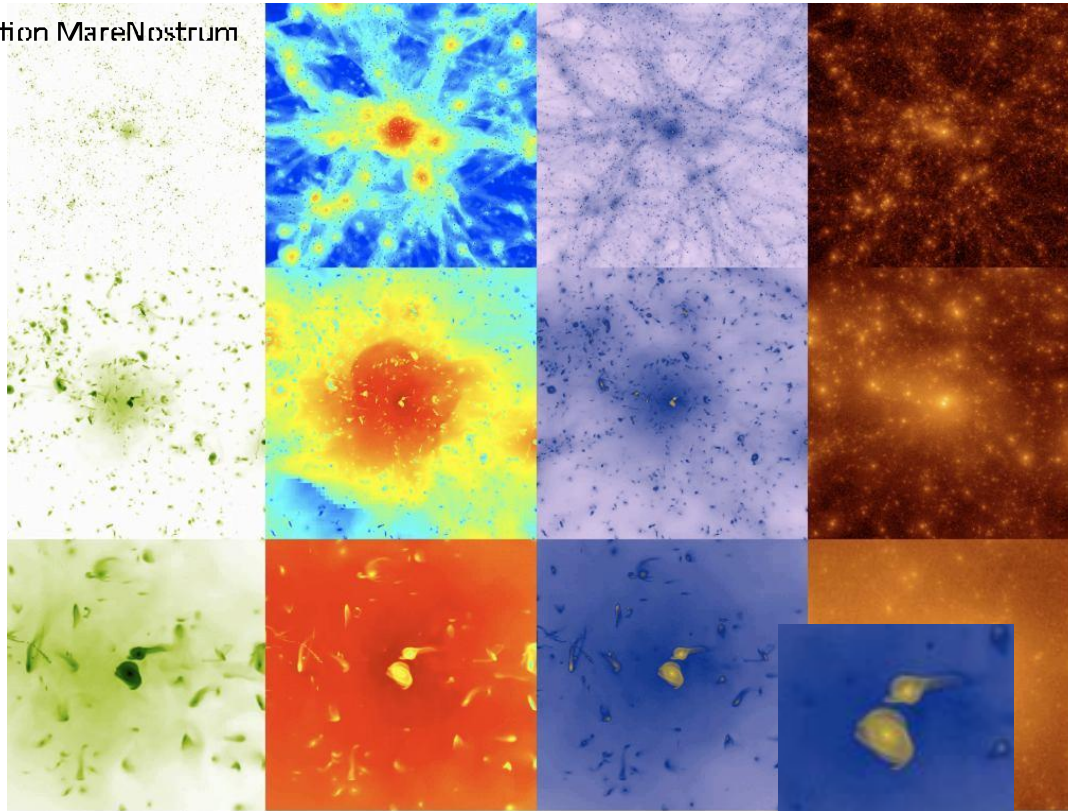
Galaxies rouges et bleues mais
beaucoup de galaxies jaunes/vertes,
Pas de bimodalité

Les simulations avec baryons

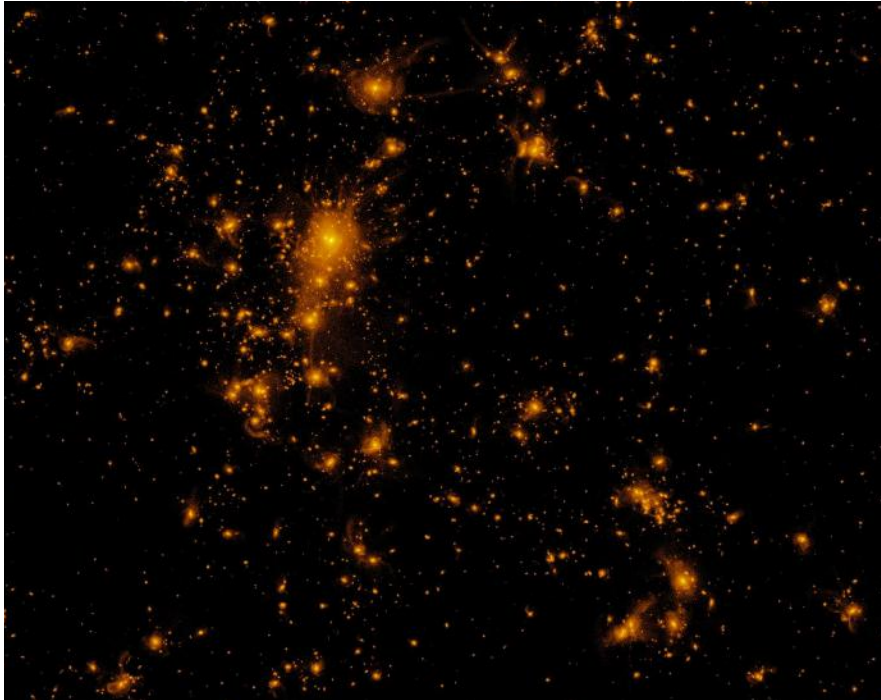


Galaxies dans les modèles cosmologiques

Simulation MareNostrum



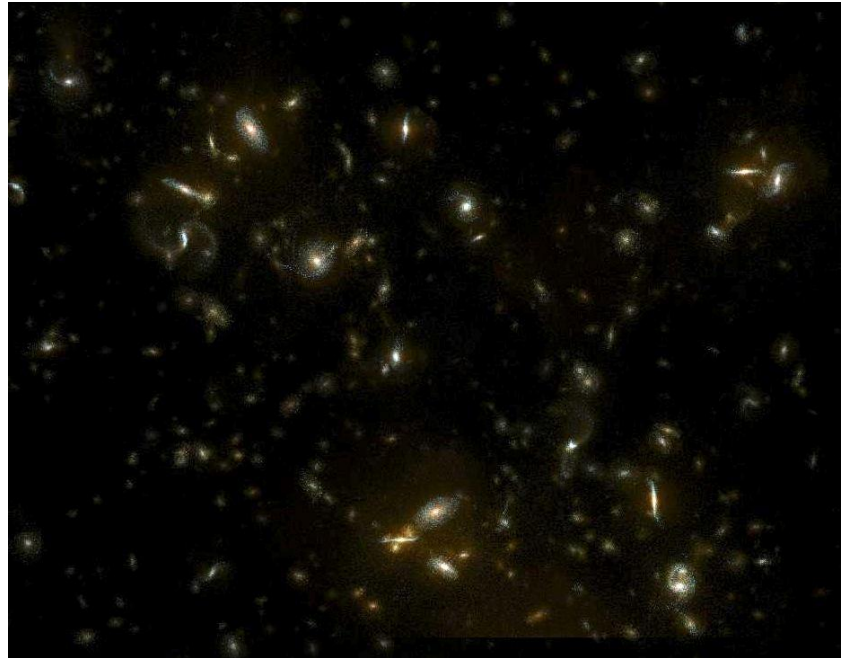
Morphologies dans les simulations cosmologiques



Le Champ UltraProfond de Hubb e simulé

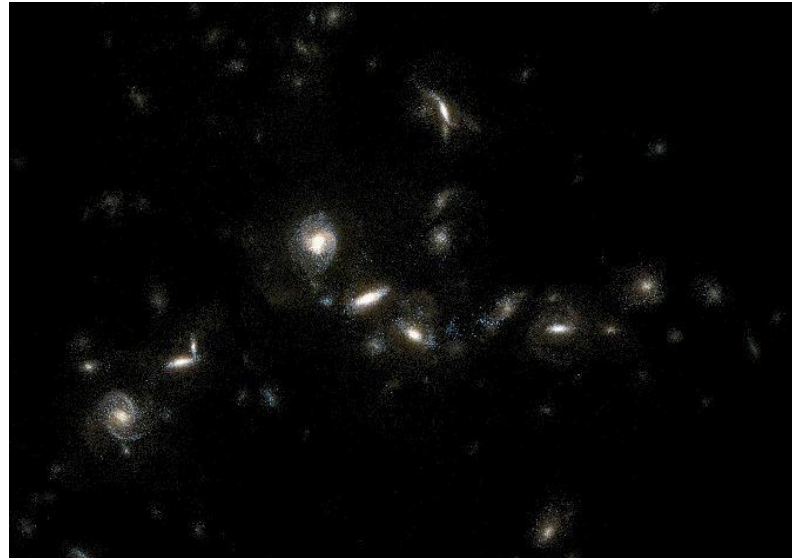
Morphologies dans les simulations cosmologiques

Des galaxies à $z=1.6$



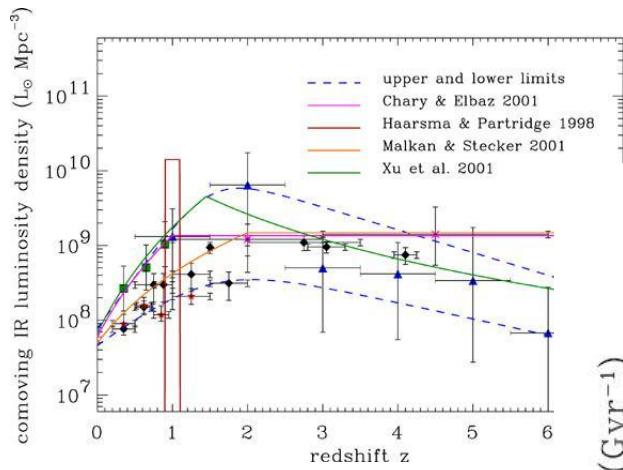
Morphologies dans les simulations cosmologiques

Des galaxies à $z=3.7$



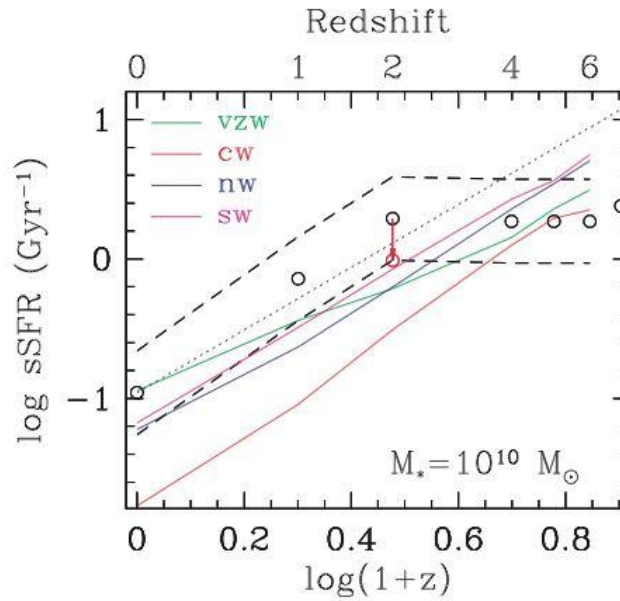
Toute galaxie semble être 50% disque 50% bulbe, même à haut redshift.

Histoire de formation stellaire: divergence à $z > 2$

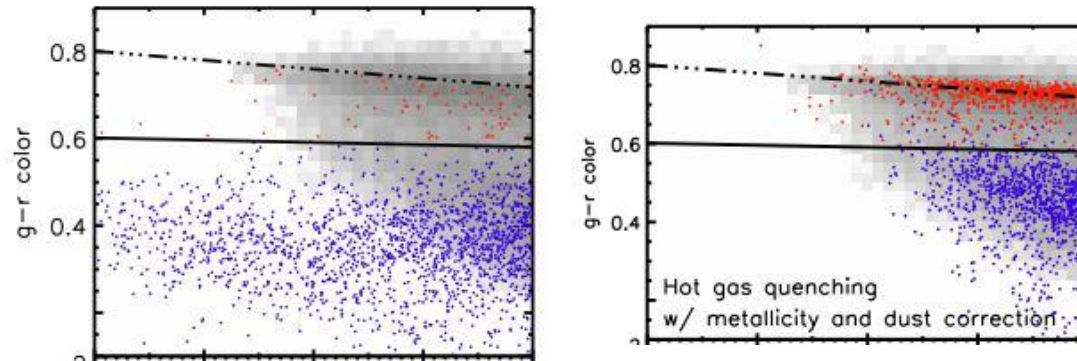


Les modèles forment leurs étoiles
Et épuisent leur gaz bien trop tôt

Observations: formation stellaire globale
En fonction du redshift

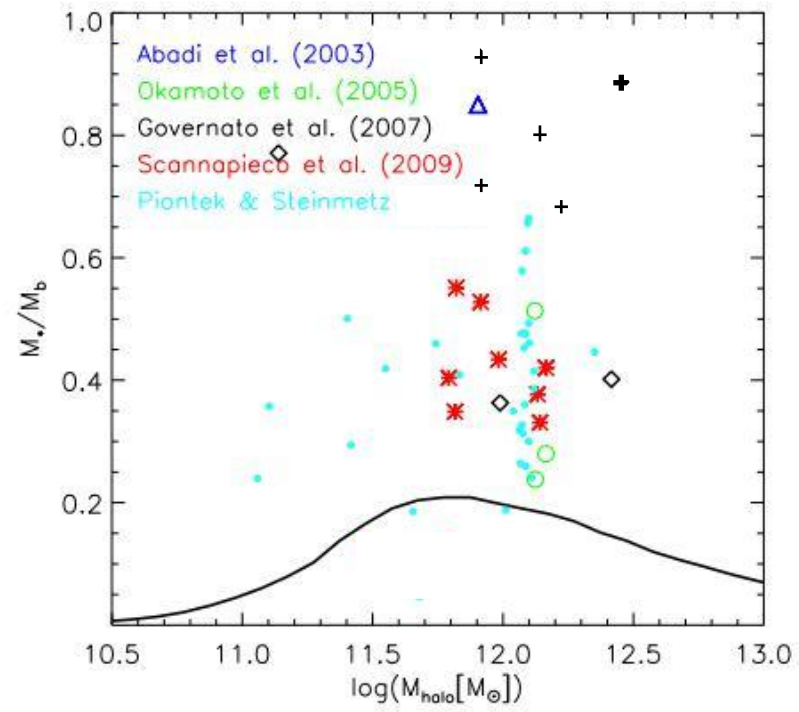


La bimodalité et les modèles cosmologiques



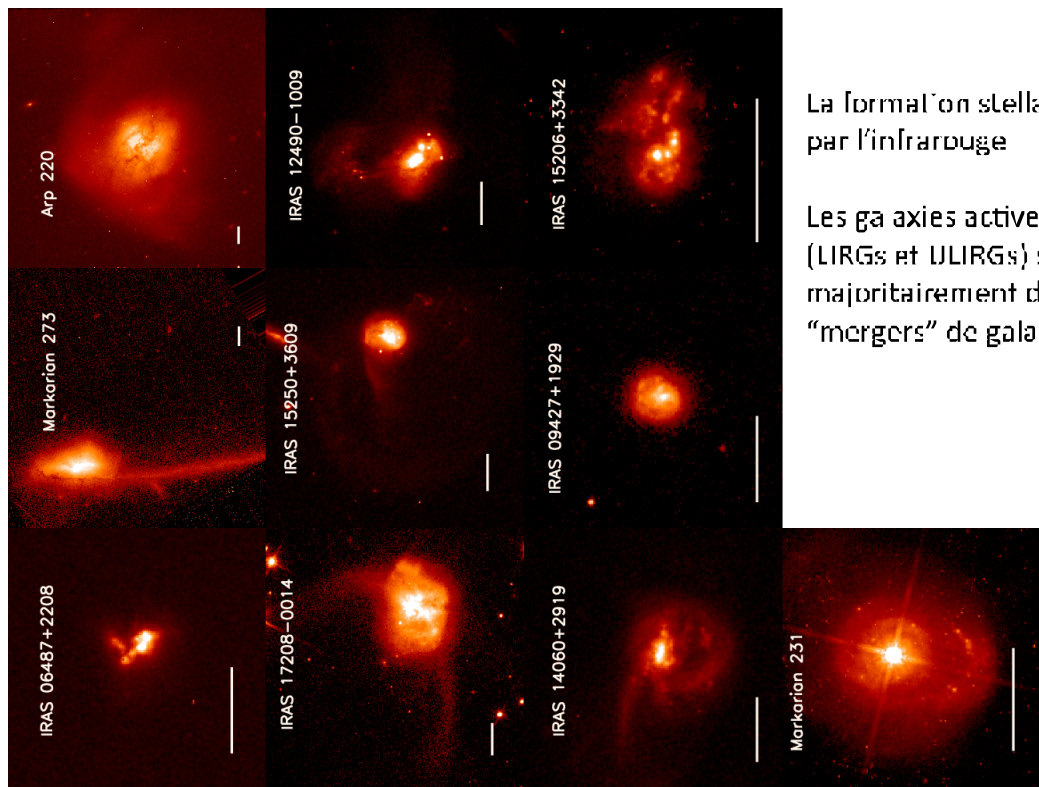
Il est difficile de former une « séquence rouge »,
sauf en invoquant un processus « magique » tel que la rétroaction des noyaux actifs
(trous noirs super massifs au centre des galaxies)

Les modèles forment trop d'étoiles, trop vite



La formation stellaire à l'échelle des galaxies

Morphologie des galaxies lumineuses en infrarouge

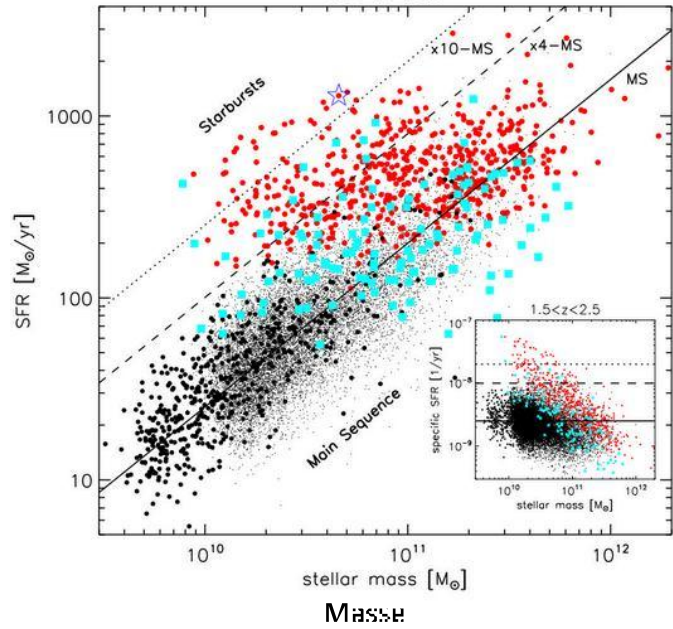


La formation stellaire est tracée par l'infrarouge

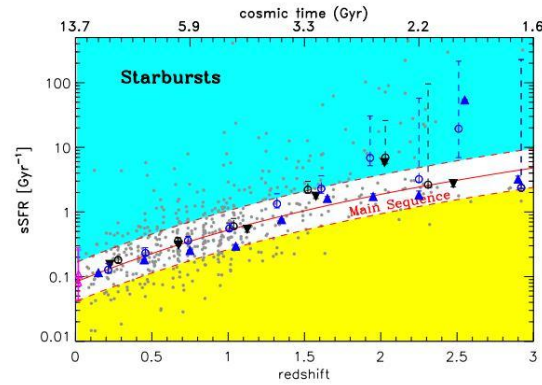
Les galaxies actives en infrarouge (LIRGs et ULIRGs) sont très majoritairement des collisions, "mergers" de galaxies

Une "séquence principale" très étroite

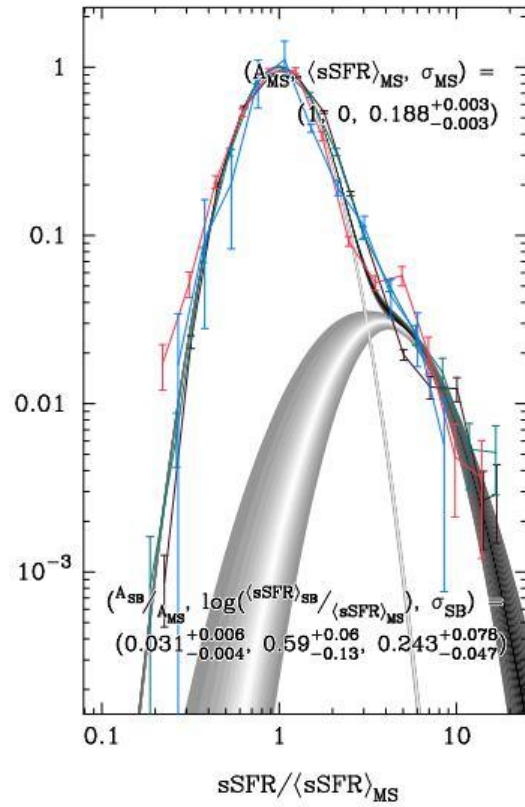
Taux de formation stellaire $1.5 < z < 2.5$



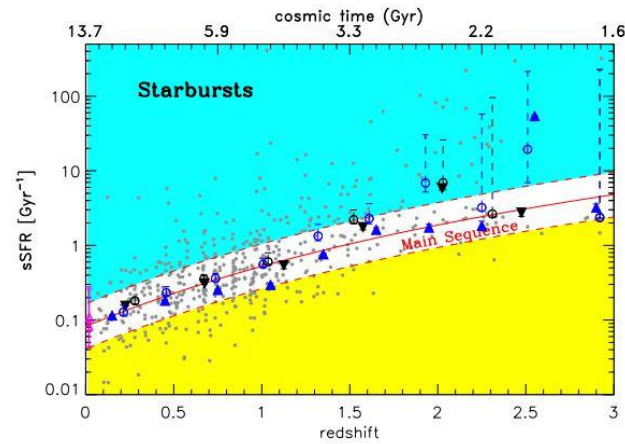
En fait les observations récentes révèlent une « séquence principale » avec une efficacité presque constante, et de rares « starbursts »



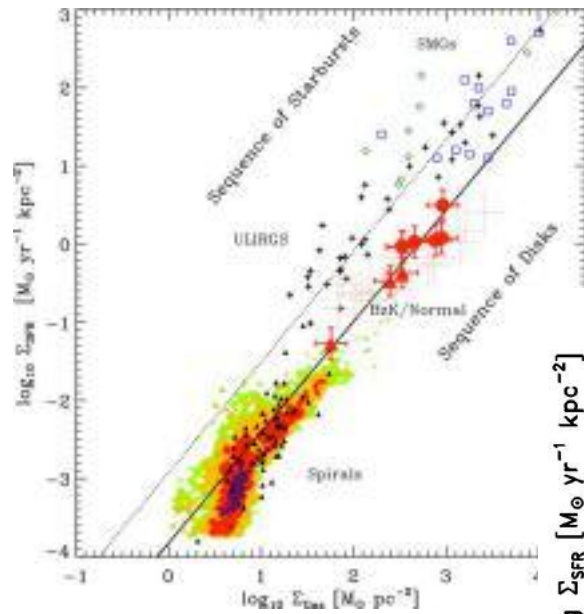
Une "séquence principale" très étroite



90% de la formation stellaire se fait dans la séquence principale

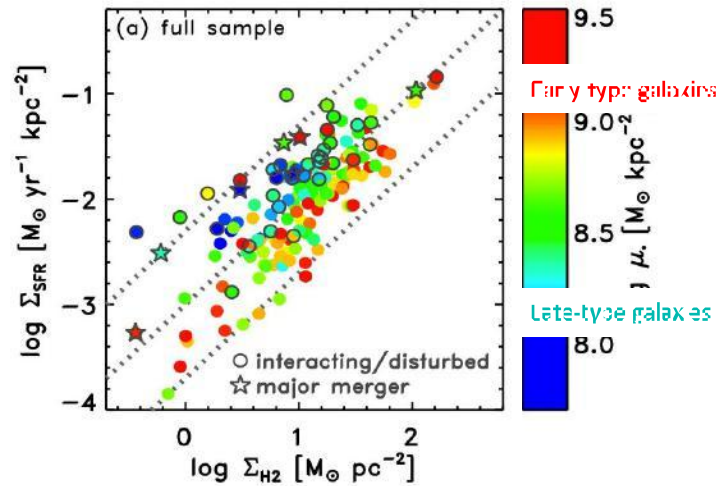


La formation stellaire n'est pas universelle

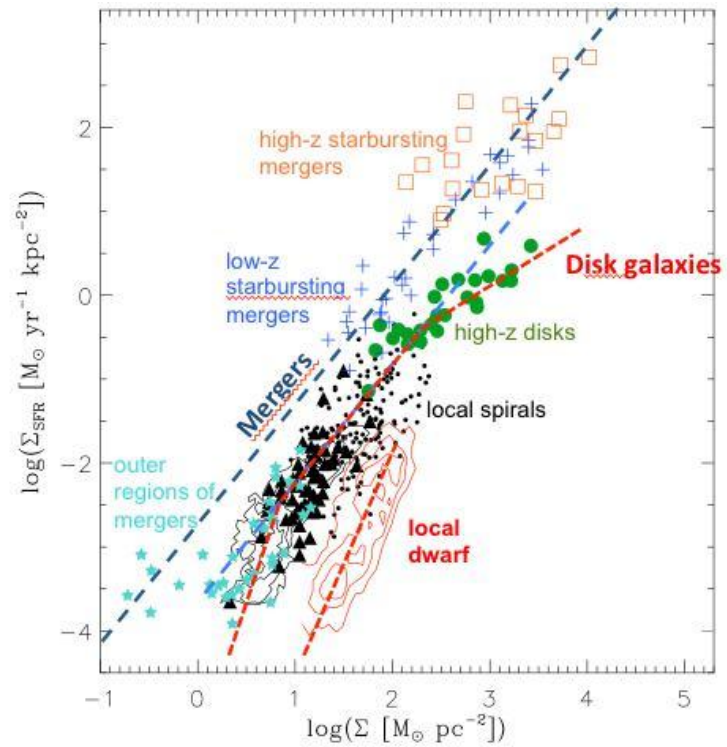


Pourtant l'efficacité de conversion gaz \rightarrow étoiles peut varier fortement

dans les « mergers »,
dans les elliptiques...



La formation stellaire n'est pas universelle

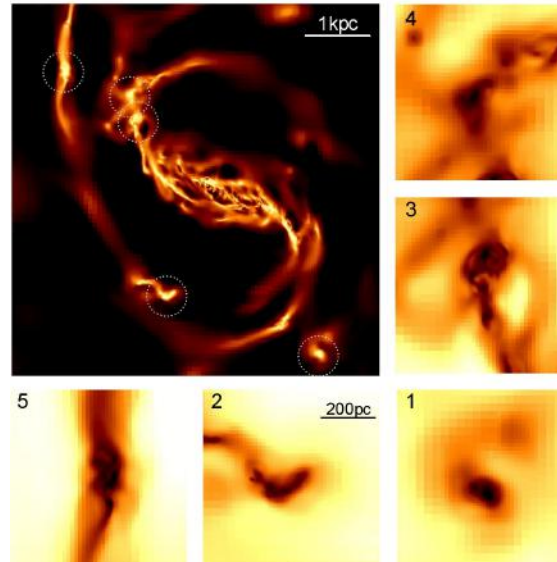


La formation stellaire à l'échelle des galaxies

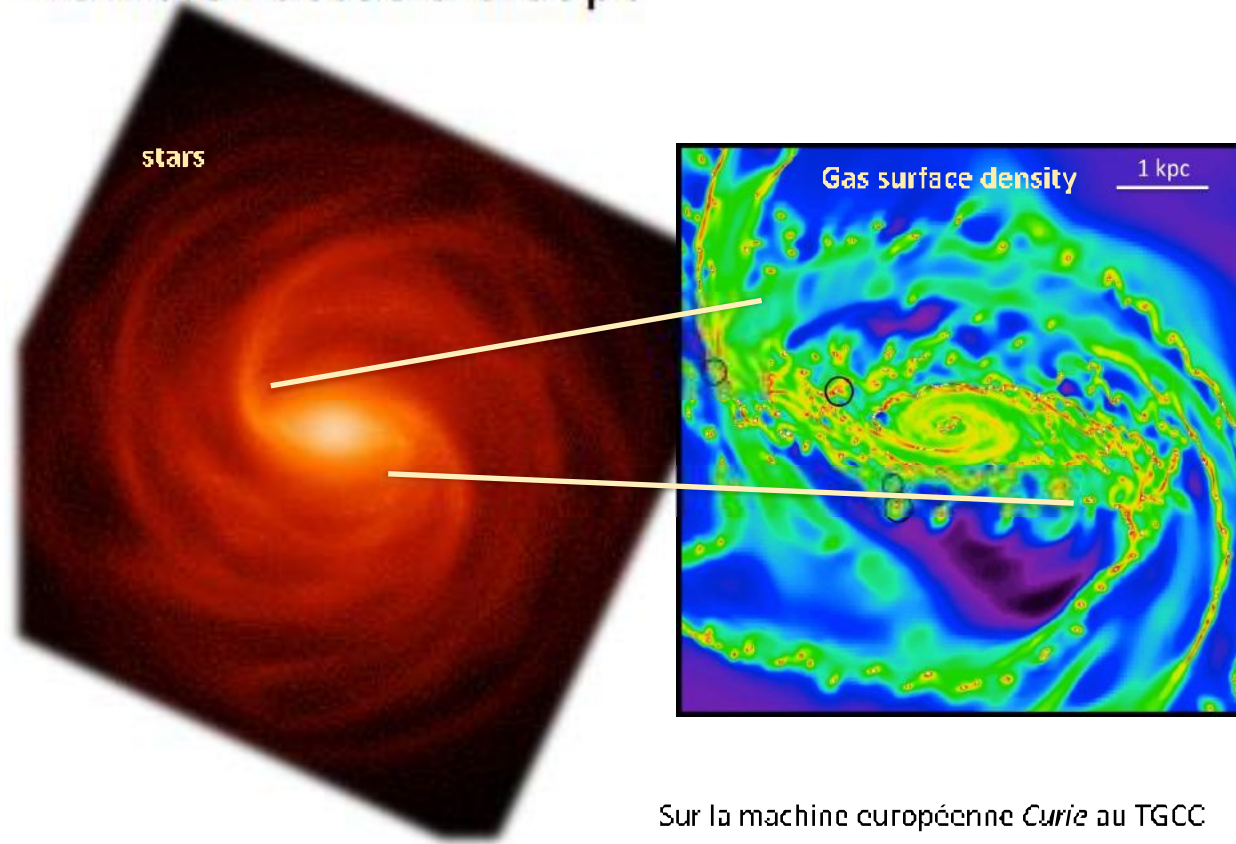
Modélisation et théorie

Des simulations à haute résolution: relier formatio stellaire et évolution de galaxies

- AMR Ramses adaptive mesh grid
- UV heating, gas cooling (fine structure, metals)
- Full stellar + dark halo dynamics
- Spatial resolution:
 - Often $\sim 5\text{pc}$
 - Sometimes 1pc
($\rightarrow 50\text{K} ; 10^6 \text{cm}^{-3}$)
 - Up to 0.05pc
- Stellar feedback:
 - supernovae, photo-ionisation, radiation pressure

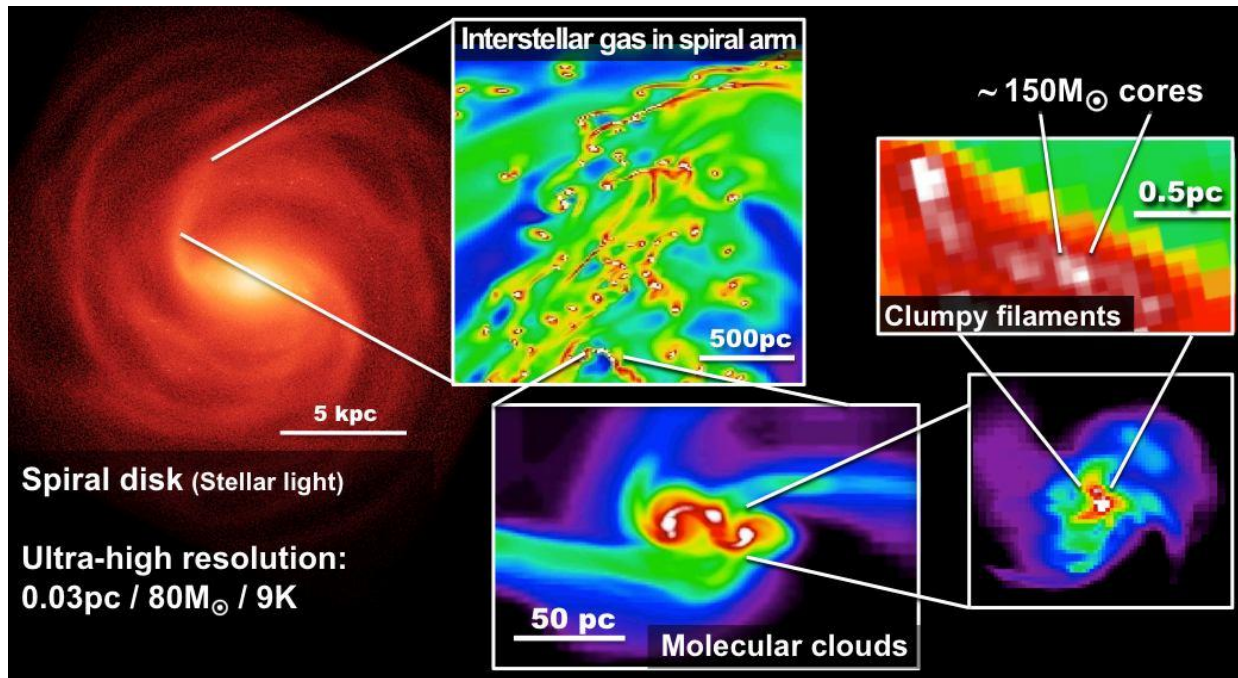


La Voie Lactée à 0.05pc



Sur la machine européenne *Curie* au TGCC

La Voie Lactée à 0.05pc



Entire Milky Way model, 0.05pc and $80 M_{\odot}$ resolutions

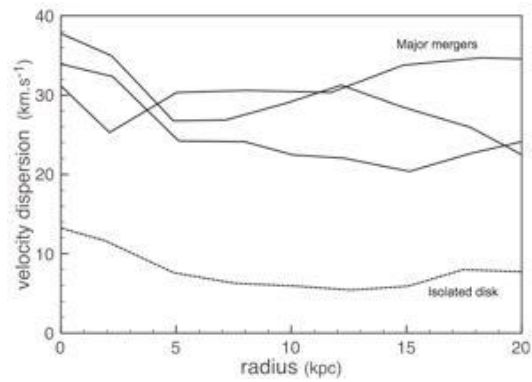
12 million hours of RAMSES AMR on 6080 cores of the Curie/PRAACE computer

Que se passe-t-il dans les collisions ?



Barnes 2004, Chien & Barnes 2010 -- Martig & Boumaud 2008 — Smith, Struck, Duc, Brinks etc..

Milieu interstellaire très turbulent



ISM turbulence gets 3-4 times larger in major interactions and mergers

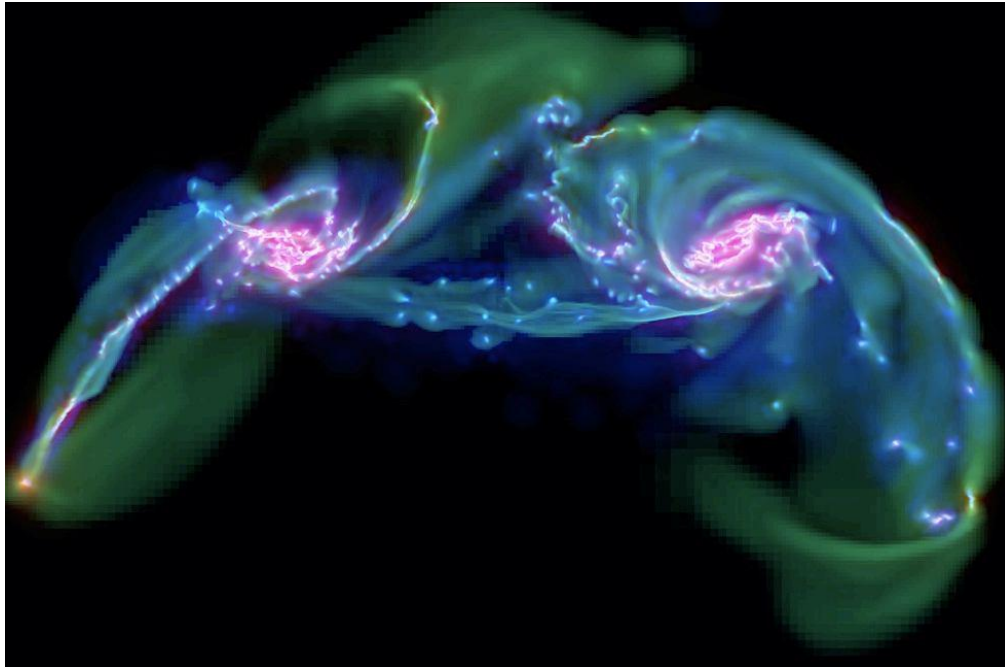
And this is *observed*

⇒ **La masse de Jeans typique de l'instabilité gravitationnelle augmente,**
→ **Formation de gros amas très denses**



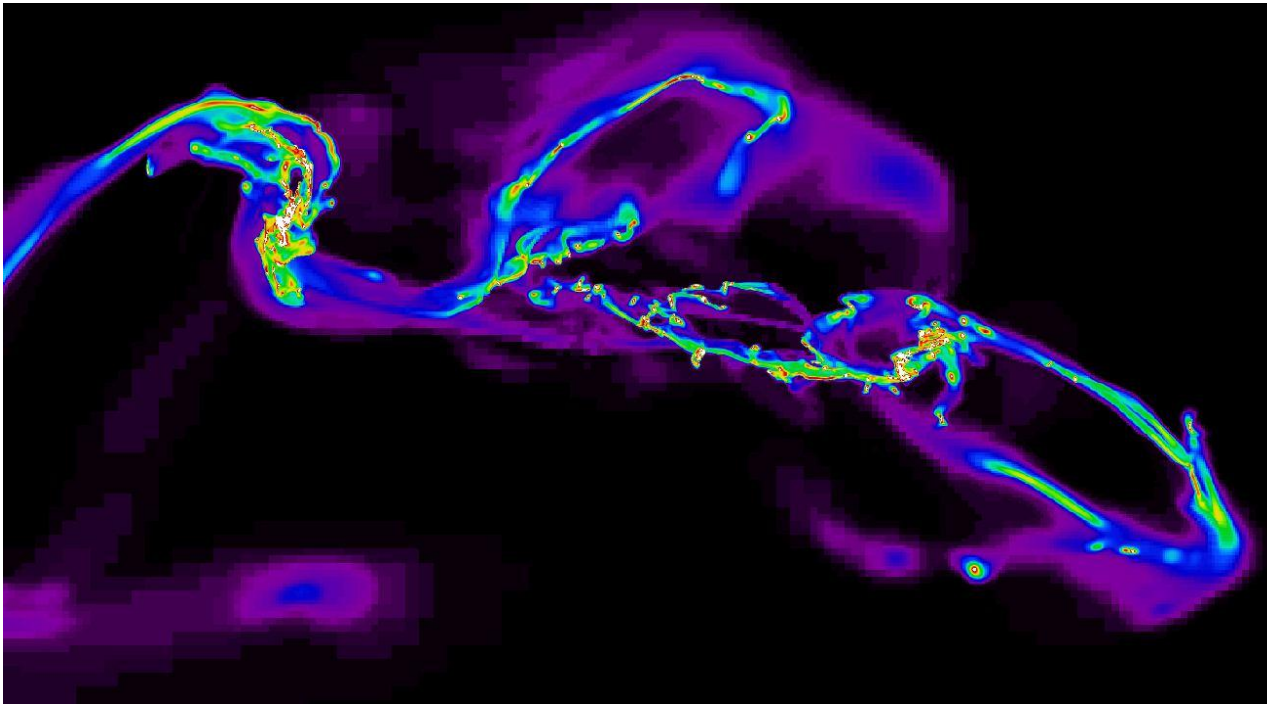
Irwin 1994, Elmegreen 1995, etc...

Spatially-extended Starburst in a cloudy ISM



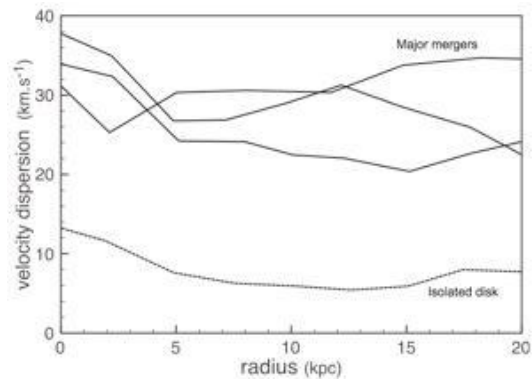
© Cassio: Chapon & Bournaud 2020 – Antennae simulation

Spatially-extended Starburst in a cloudy ISM



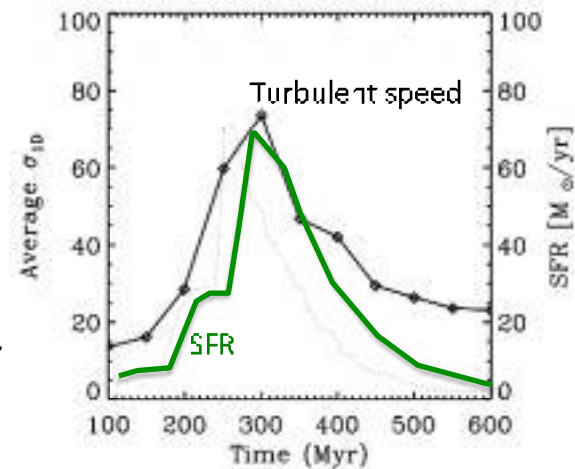
Le gaz dans une simulation des Antennes

Un milieu interstellaire agité

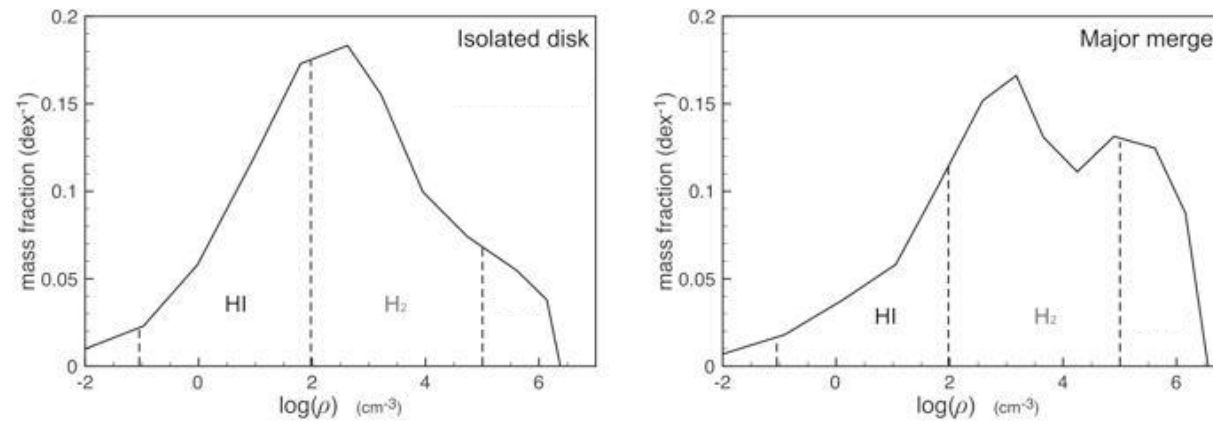


ISM turbulence gets 3-4 times larger in major interactions and mergers

- The starburst correlates with the increased gas dispersions
- This is also true without feedback, the starburst is not the cause of increase turbulence



Un milieu interstellaire agité, et du gaz comprimé



Interaction triggers non-circular motions, compression fronts throughout disks

=> cascade to all scales below ~kpc

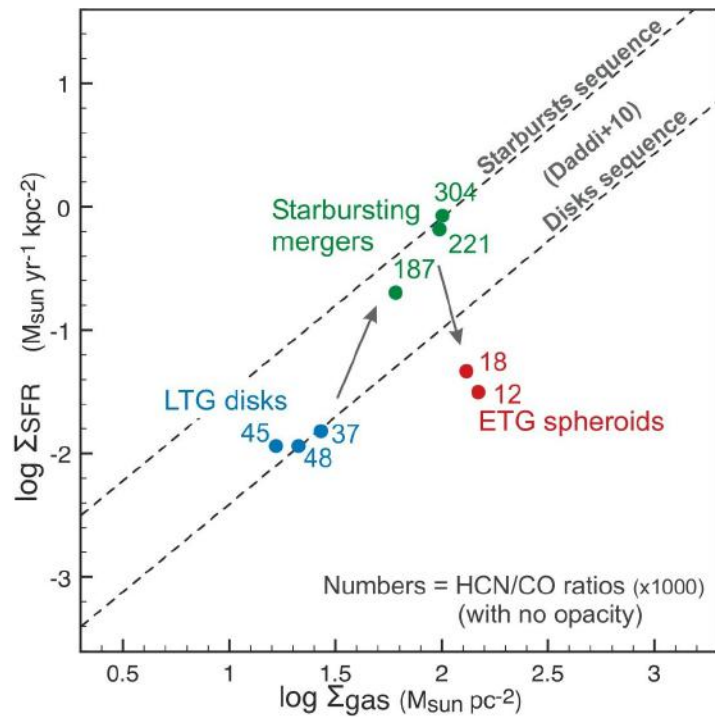
-> local shocks (Mach > 1)

-> gas compression in dense clouds with fast cooling

=> new self-gravitating cold SF clouds

- Why non log-normal PDF? Stirring is as fast as dissipation timescale
- Note also that dissipation timescale grows if the Mach number increases

Résultat: formation stellaire non uniforme



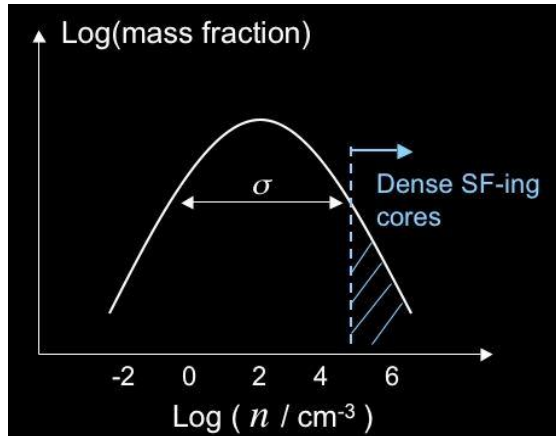
Disks/starburst sequences from:

- triggered turbulence
- perturbed ISM structure
- excess of high density gas (local shocks)
- > Σ_{SFR} raises faster than Σ_{gas}

(with universal SF on 1pc scales)

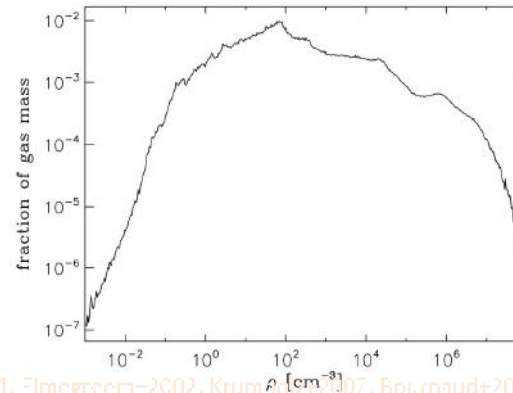
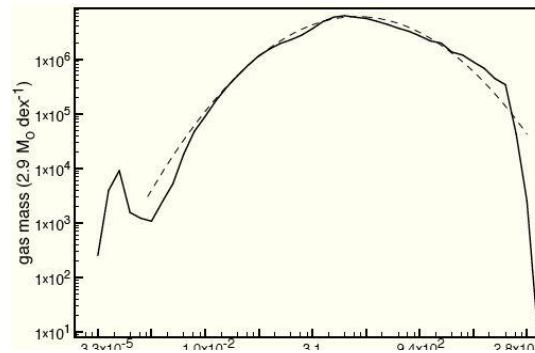
Not excess of "HCN-like" dense gas in mergers in our models, also observed (Gao-04, Juneau+09)

Comprendre simplement les lois de formation stellaire à l'échelle des galaxies, en fonction de la physique du milieu interstellaire



$$\frac{dp}{d \ln x} = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp \left[-\frac{(\ln x - \overline{\ln x})^2}{2\sigma^2} \right]$$

$\sigma^2 \approx \ln(1 + 3\mathcal{M}^2/4)$ **Stronger turbulence**
=> Wider density PDF



Kiminki & Padua 1999, Wada & Norman 2001, Elmegreen 2002, Kruijff et al 2007, Bournaud 2011

Comprendre simplement les lois de formation stellaire

(1) Distribution de densité d'autant plus large que le milieu est turbulent

$$f_{\sigma}(x) = \frac{1}{x\sqrt{2\sigma^2\pi}} \exp\left[-\frac{\left(\ln(x) - \frac{\sigma^2}{2}\right)^2}{2\sigma^2}\right]$$

$\sigma^2 \approx \ln(1 + 3\mathcal{M}^2/4)$

Comprendre simplement les lois de formation stellaire

(1) Distribution de densité d'autant plus large que le milieu est turbulent

$$f_{\sigma}(x) = \frac{1}{x\sqrt{2\sigma^2\pi}} \exp\left[-\frac{\left(\ln(x) - \frac{\sigma^2}{2}\right)^2}{2\sigma^2}\right]$$
$$\sigma^2 \approx \ln(1 + 3\mathcal{M}^2/4)$$
$$\sigma^4 \approx \ln(1 + 3\mathcal{M}^4/4)$$

(2) Local Star Formation Rate

Effondrement en temps de « free-fall »
gravitationnel dans le gaz dense

$$\rho_{\text{SFR}} = \begin{cases} 0 & \text{if } \rho \leq \rho_0 \\ \epsilon \frac{\rho}{t_{\text{ff}}} = \epsilon \sqrt{\frac{32G}{3\pi}} \rho^{3/2} & \text{else} \end{cases}$$

Comprendre simplement les lois de formation stellaire

(1) Distribution de densité d'autant plus large que le milieu est turbulent

$$f_{\sigma}(x) = \frac{1}{x\sqrt{2\sigma^2\pi}} \exp\left[-\frac{\left(\ln(x) - \frac{\sigma^2}{2}\right)^2}{2\sigma^2}\right]$$

$\sigma^2 \approx \ln(1 + 3\mathcal{M}^2/4)$
 $\sigma^4 \approx \ln(1 + 3\mathcal{M}^4/4)$

(2) Local Star Formation Rate

Effondrement en temps de « free-fall »
gravitationnel dans le gaz dense

$$\rho_{\text{SFR}} = \begin{cases} 0 & \text{if } \rho \leq \rho_0 \\ \epsilon \frac{\rho}{t_{\text{ff}}} = \epsilon \sqrt{\frac{32G}{3\pi}} \rho^{3/2} & \text{else} \end{cases}$$

(3) Régulation par le « feedback »

Pas plus de 30% d'un nuage moléculaire
ne sera convertit en étoiles

$$\rho_{\text{SFR}} = \begin{cases} 0 & \text{if } \rho \leq \rho_0 \\ \min\left(\epsilon \sqrt{\frac{32G}{3\pi}} \rho^{3/2}, \epsilon_s \frac{\rho}{t_s}\right) & \text{else} \end{cases}$$

Comprendre simplement les lois de formation stellaire

(1) Distribution de densité d'autant plus large que le milieu est turbulent

$$f_\sigma(x) = \frac{1}{x\sqrt{2\sigma^2\pi}} \exp \left[-\frac{\left(\ln(x) - \frac{\sigma^2}{2}\right)^2}{2\sigma^2} \right]$$

$$\sigma^2 \approx \ln(1 + 3\mathcal{M}^2/4)$$

$$\sigma^4 \approx \ln(1 + 3\mathcal{M}^4/4)$$

(2) Local Star Formation Rate

Effondrement en temps de « free-fall »
gravitationnel dans le gaz dense

$$\rho_{\text{SFR}} = \begin{cases} 0 & \text{if } \rho \leq \rho_0 \\ \epsilon \frac{\rho}{t_{\text{ff}}} = \epsilon \sqrt{\frac{32G}{3\pi}} \rho^{3/2} & \text{else} \end{cases}$$

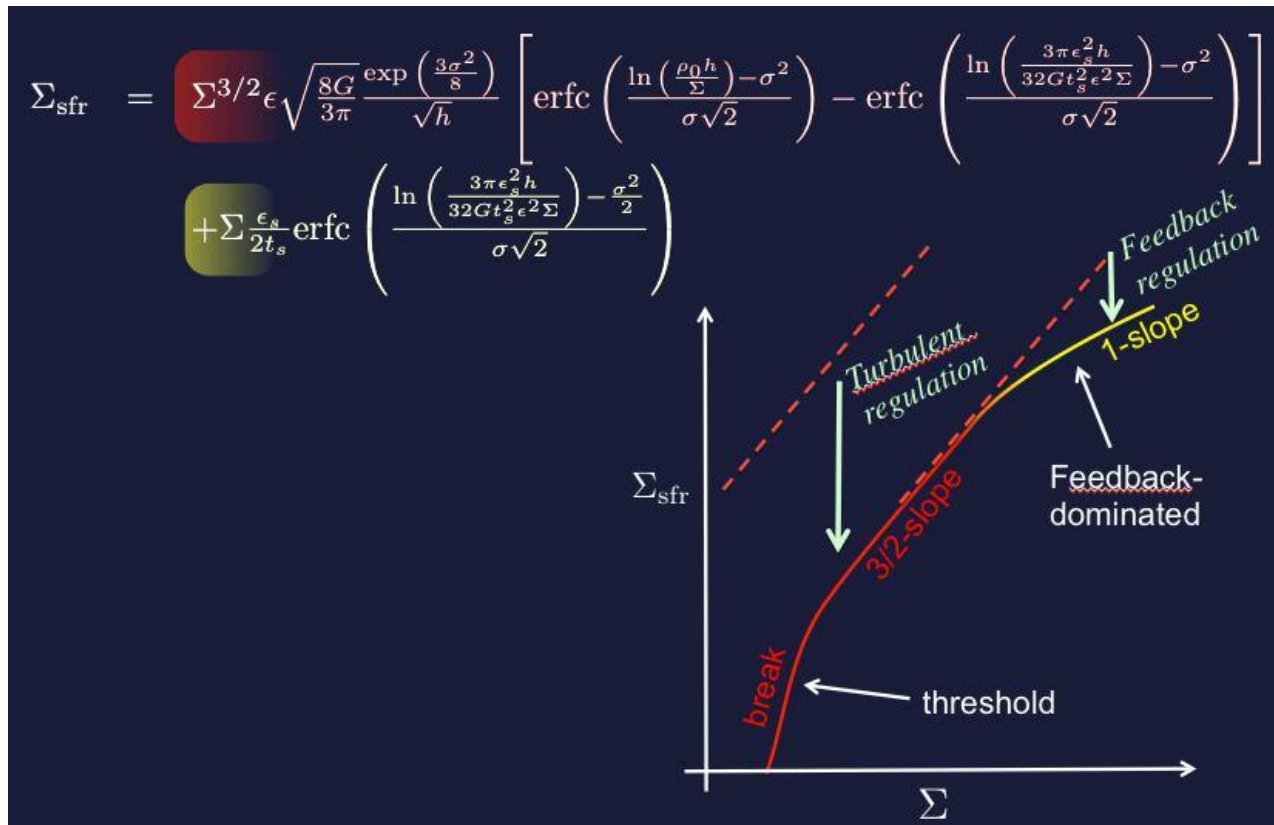
(3) Régulation par le « feedback »

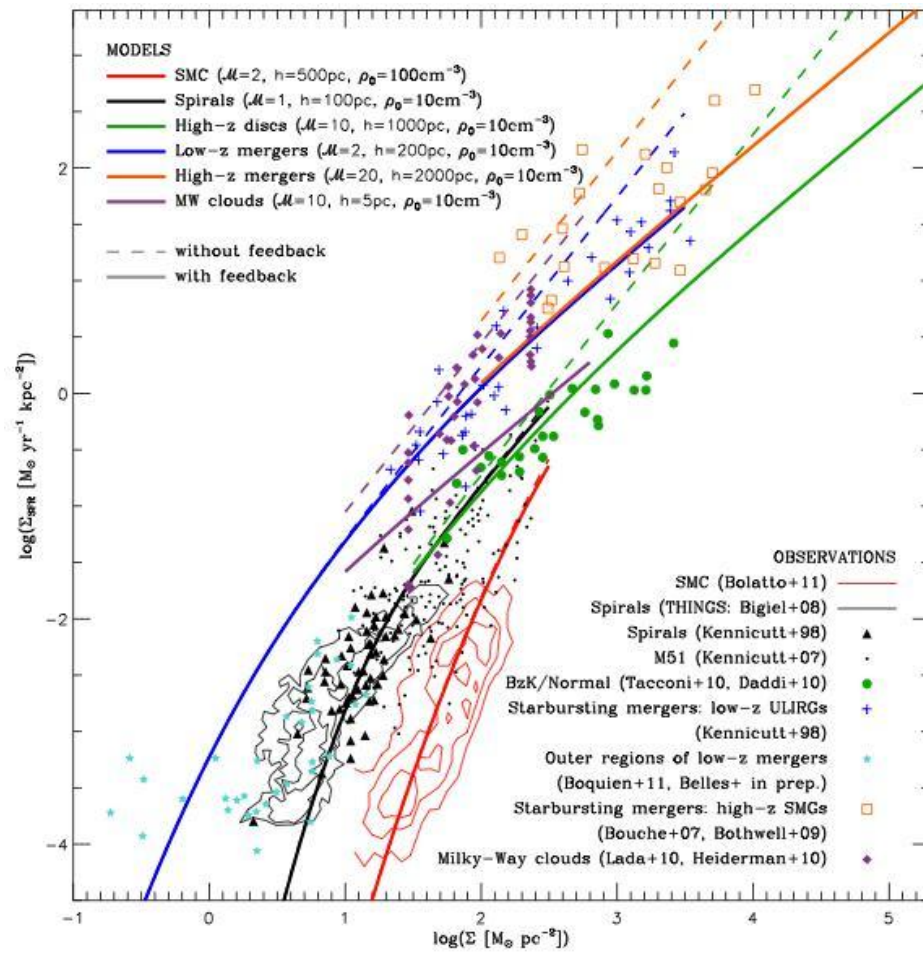
Pas plus de 30% d'un nuage moléculaire
ne sera convertit en étoiles

$$\rho_{\text{SFR}} = \begin{cases} 0 & \text{if } \rho \leq \rho_0 \\ \min \left(\epsilon \sqrt{\frac{32G}{3\pi}} \rho^{3/2}, \epsilon_s \frac{\rho}{t_s} \right) & \text{else} \end{cases}$$

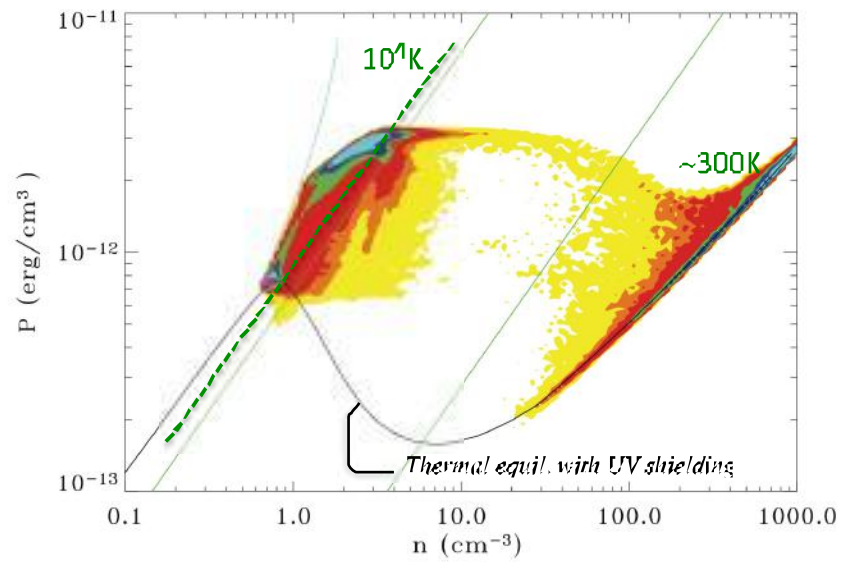
+ Géométrie 2D/3D $\Sigma_{\text{SFR}} = h \frac{\int_0^\infty f(x)x^{-1} \rho_{\text{SFR}} dx}{\int_0^\infty f(x)x^{-1} dx}$

Comprendre simplement les lois de formation stellaire



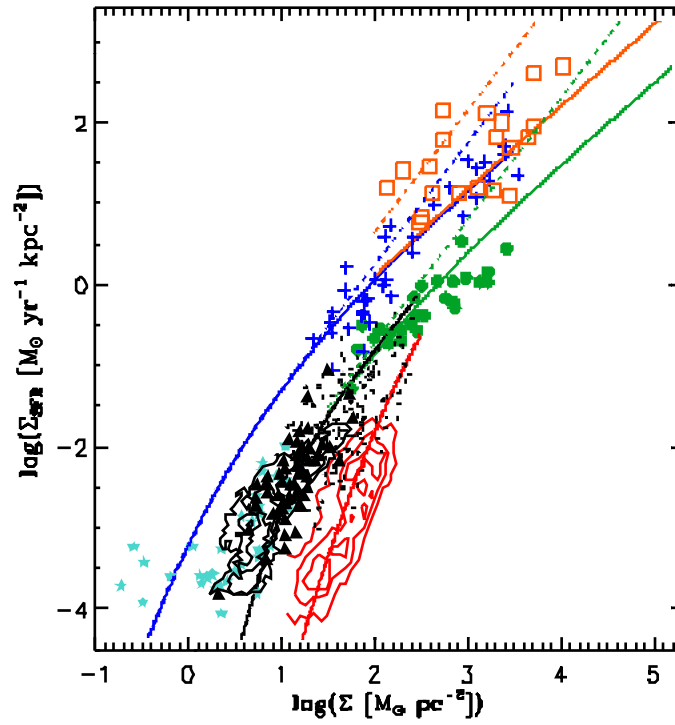


Transition supersonique et effets de seuil

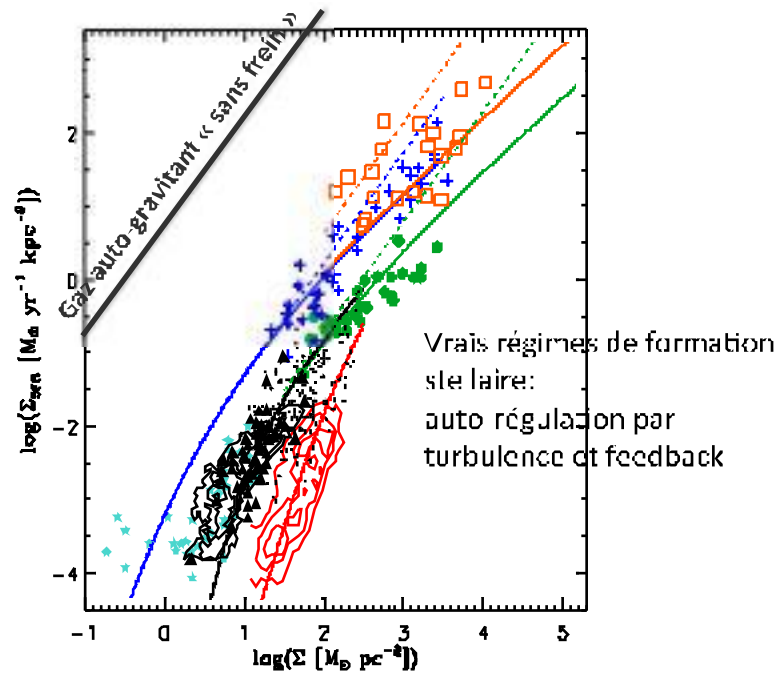


|| existe des phases subsonique et supersoniques

Les régimes de formation stellaire expliqués



Les régimes de formation stellaire expliqués



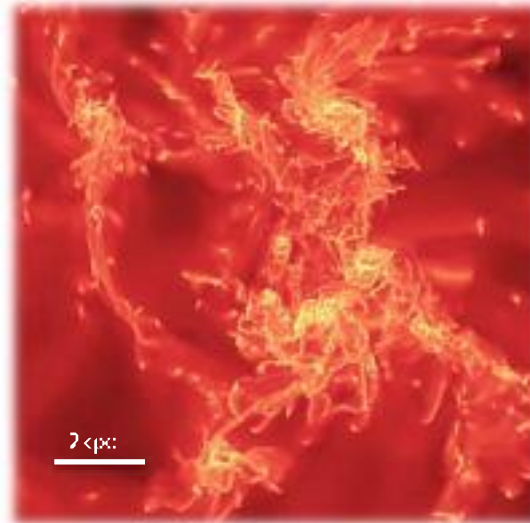
On comprend mieux la régulation de la
formation stellaire...

...peut-on maintenant mieux comprendre
la nature et l'évolution des galaxies?

Appliquons ces méthodes aux galaxies primordiales

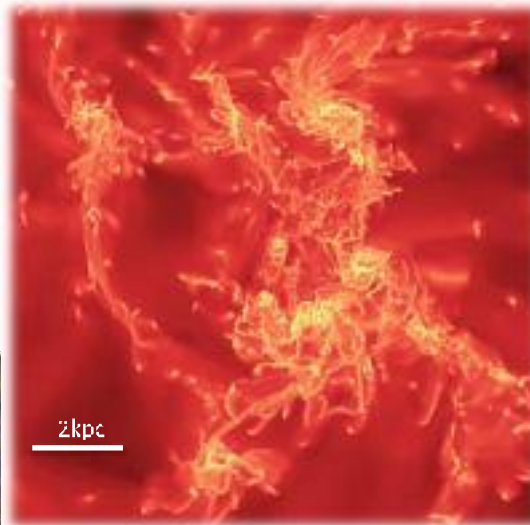
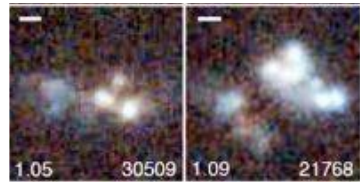
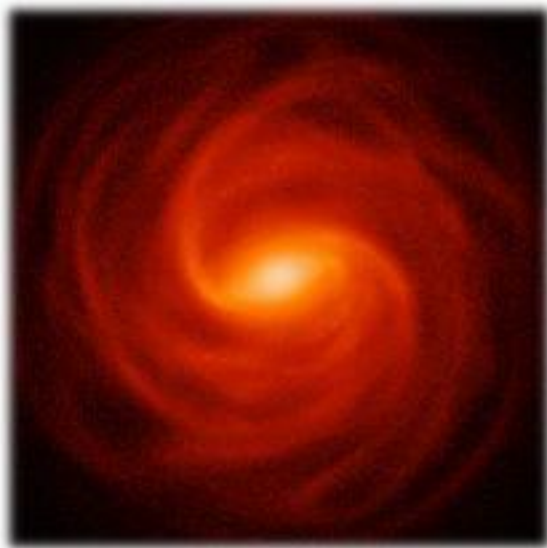


Galaxie type Voie Lactée



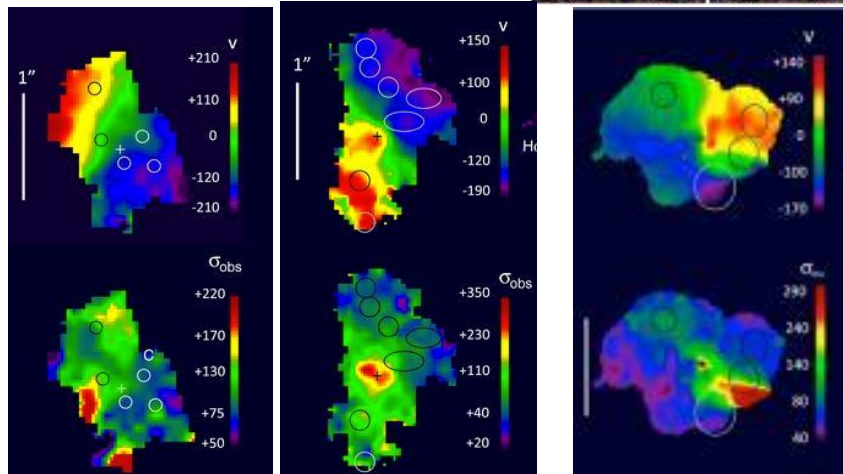
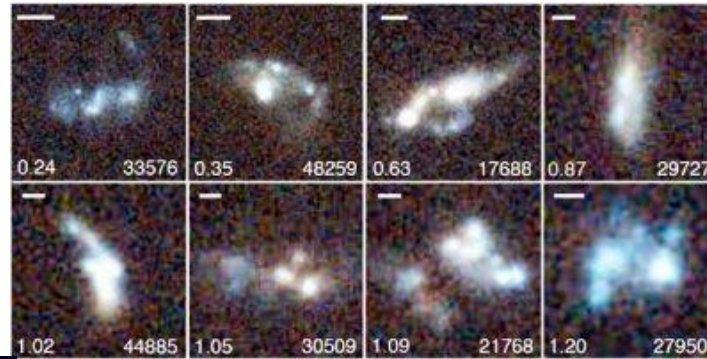
Galaxie type "redshift 2"
50% gaz 50% étoiles
Forte turbulence et
Instabilités gravitationnelles à masse de Jeans élevée

Appliquons ces méthodes aux galaxies primordiales



Haut redshift: galaxies instables, irrégulières, fragmentées

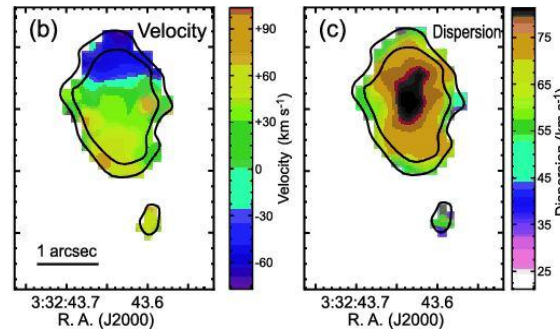
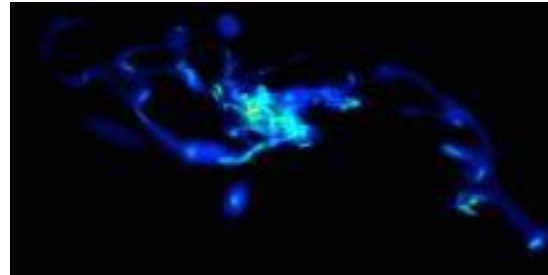
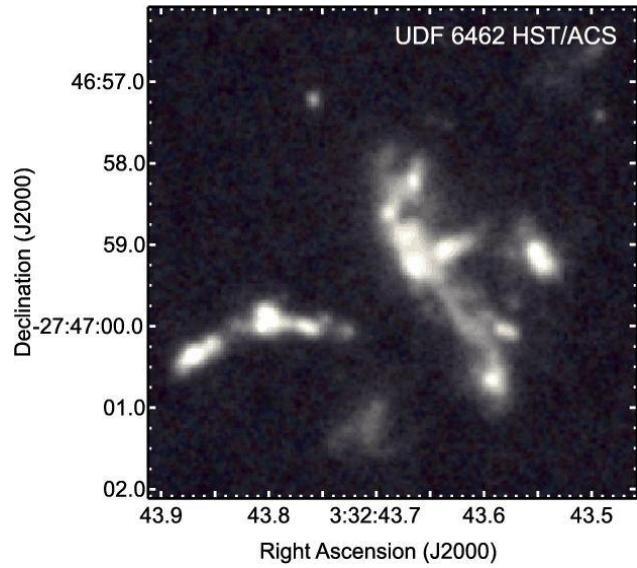
- Clumps of $10^{8-9} M_{\text{sun}}$
- Each clump:
 - 1% of stellar mass
 - 5-10% of SFR
- Rotating turbulent disks, $\sigma/V \sim 4$
- Gas fraction $\sim 50\%$
- Clumps form by grav. instab. $Q < 1$



Les champs de vitesse du gaz H α montrent bien la rotation, pas de signes de collisions/fusions

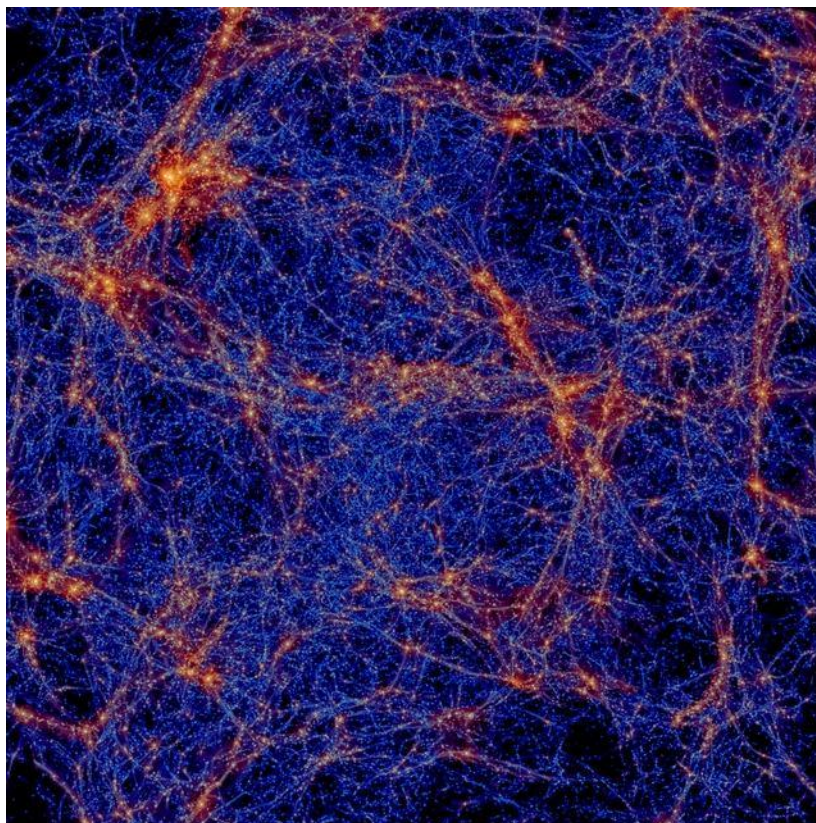
{spectro infrarouge au VLT}

Haut redshift: galaxies instables, irrégulières, fragmentées

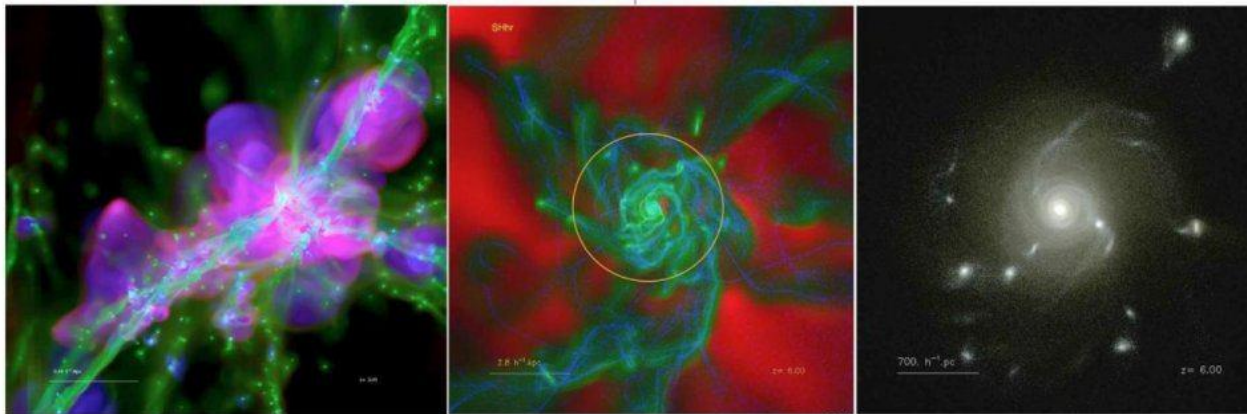


Mêmes ces galaxies très irrégulières et asymétriques sont des "disques"

Les « courants froids »: une formation peu hiérarchique

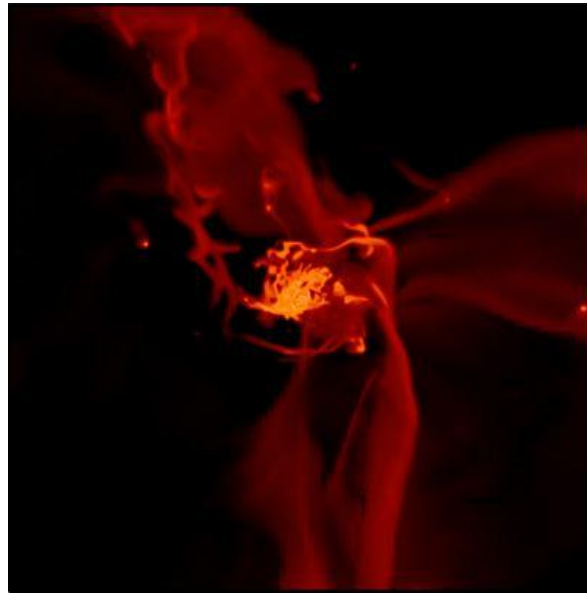


Les « courants froids »: une formation peu hiérarchique



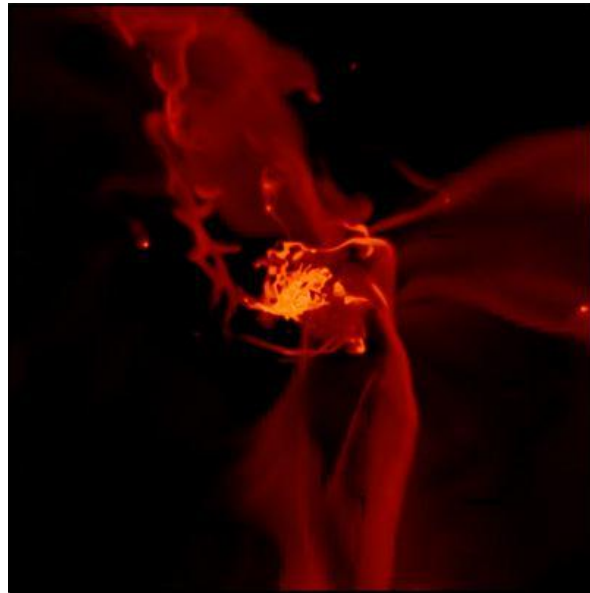
Le gaz froid ($<10^5\text{K}$) pénètre les halos chauds,
Alimente les disques de galaxies,
Apporte plus de 2/3 des baryons aux galaxies, les collisions/fusions ne dominent pas

Accrétion diffuse, galaxies riches et gaz et irrégulières



Le gaz froid ($<10^5$ K) pénètre les halos chauds,
Alimente les disques de galaxies,
Apporte plus de 2/3 des baryons aux galaxies, les collisions/fusions ne dominent pas

Accrétion diffuse, galaxies riches en gaz et irrégulières



=>



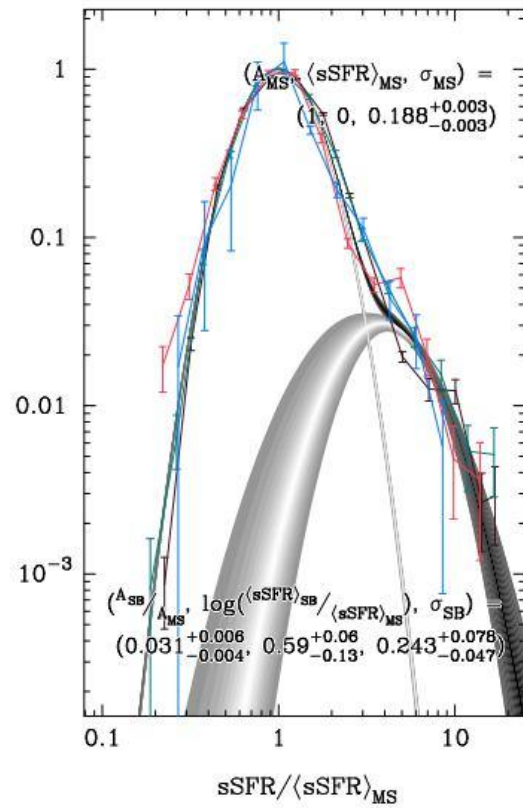
Conséquence:

Galaxies alimentées en gaz en permanence,

Hors la formation stellaire est lente, régulée => Beaucoup de gaz est « stocké »,

Galaxies à 50% de gaz, très instables/turbulentes, irrégulières

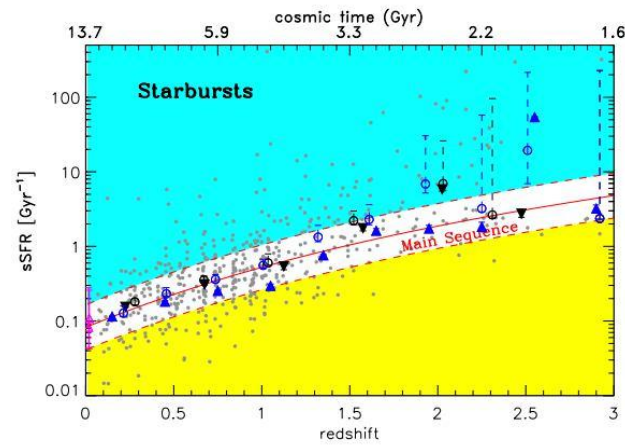
De l'origine de la séquence principale



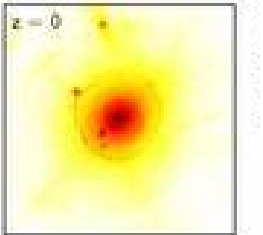
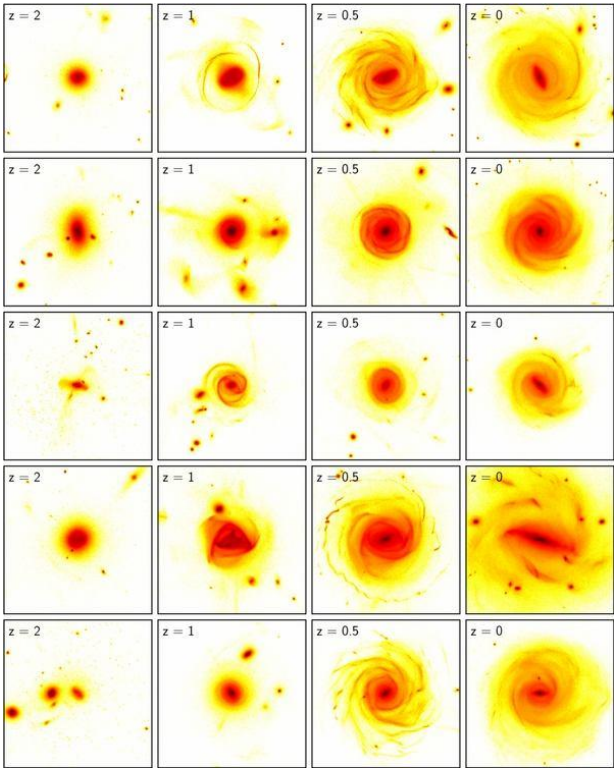
Le taux d'accrétion cosmologique fixe une fraction de gaz typique (50% à $z=2$, 5% à $z=0$),

La majorité des galaxies forment leur étoiles de manière lente et régulière

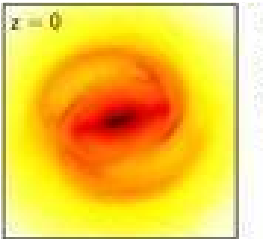
Les mergers/starbursts sont rares



Des morphologies réalistes dans les modèles



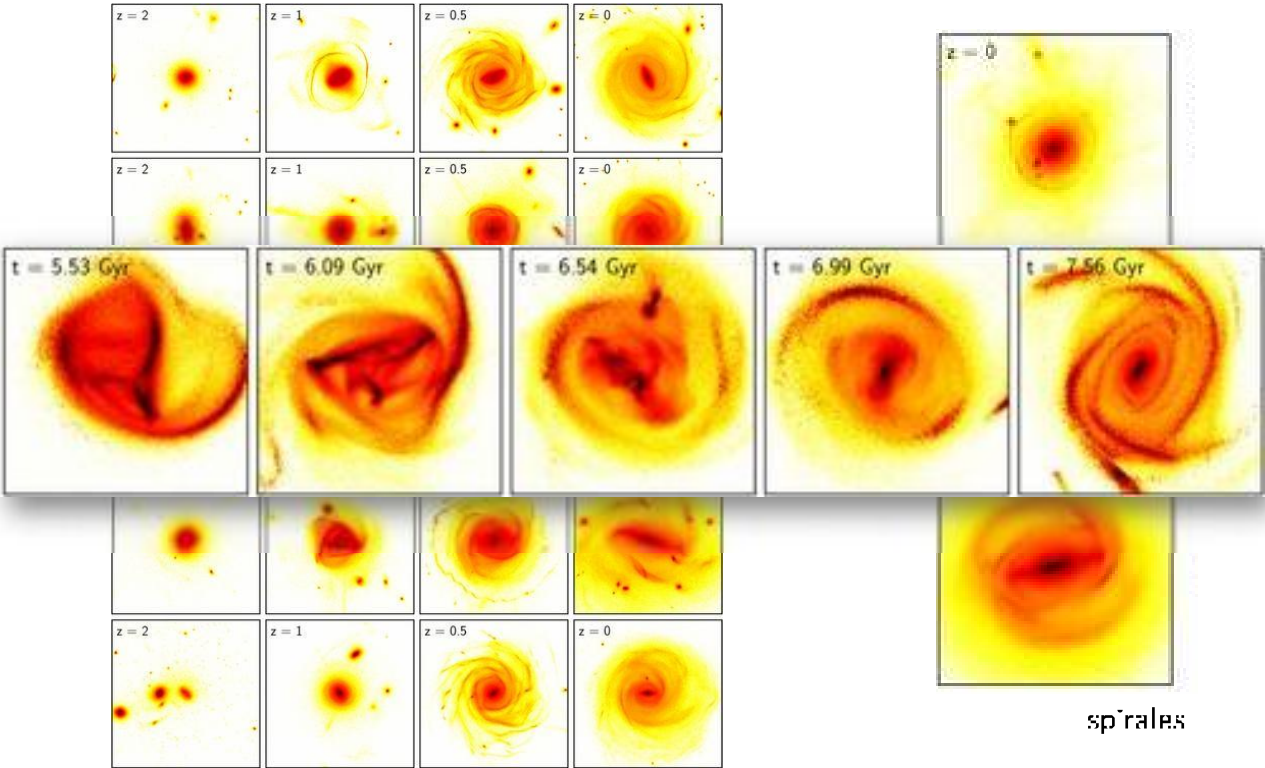
elliptiques



spiraies

Marin et al. 2012, Krajjic et al. 2012

Des morphologies réalistes dans les modèles

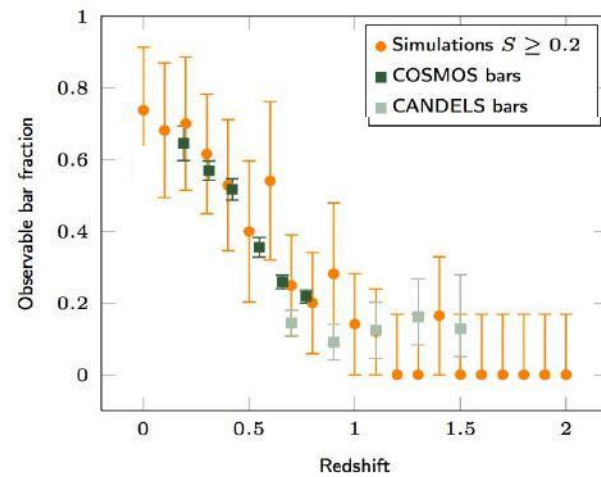
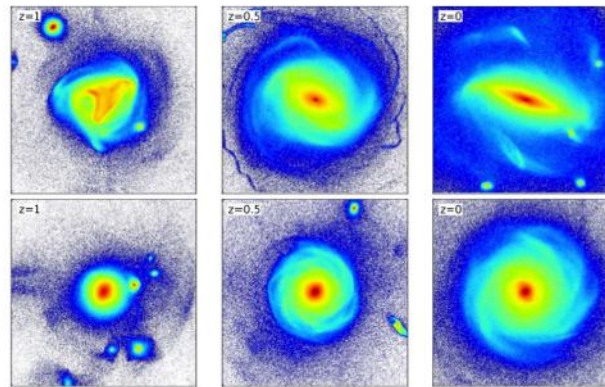


Marin et al. 2012, Krajl et al. 2012

Des morphologies réalistes dans les modèles

Même la fraction de disques barrés peut être expliquée par les simulations,

Cela vient en grande partie de la formation stellaire régulée à petite échelle !



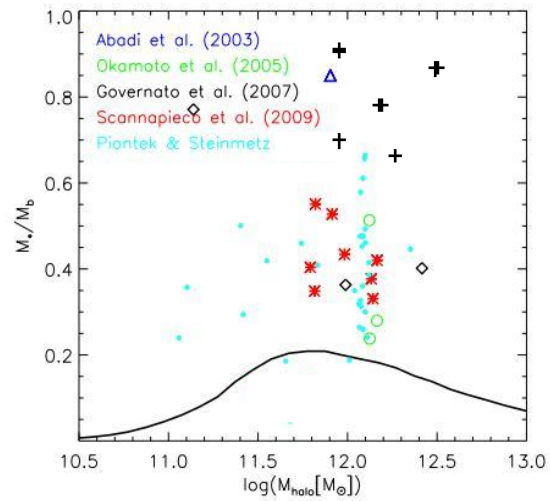
Marin et al. 2012, Kravljic et al. 2012

Tous les modèles forment toujours trop d'étoiles

On comprend que la formation stellaire est lente,
les galaxies conservent leur gaz longtemps,
les morphologies sont alors plus réalistes...

Mais sur 13 milliards d'années, tout le gaz
a le temps de tomber dans les galaxies,
et de s'y convertir en étoiles à 90%!

Mais sur 13 milliards d'années, tout le gaz
a le temps de tomber dans les galaxies,
et de s'y convertir en étoiles à 90%!



Les meilleures morphologies
ont les moins bornes masses...

Tous les modèles forment toujours trop d'étoiles

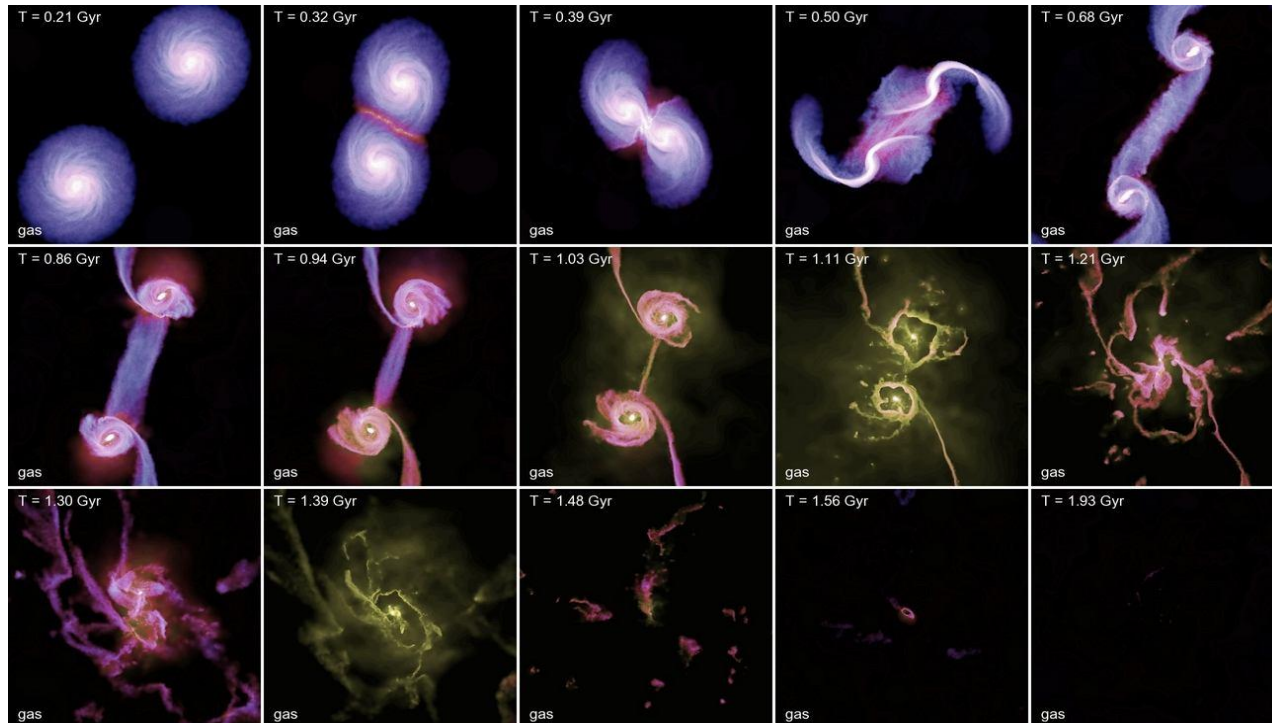
On comprend que la formation stellaire est lente,
les galaxies conservent leur gaz longtemps,
les morphologies sont alors plus réalistes...

Mais sur 13 milliards d'années, tout le gaz
a le temps de tomber dans les galaxies,
et de s'y convertir en étoiles à 90%!

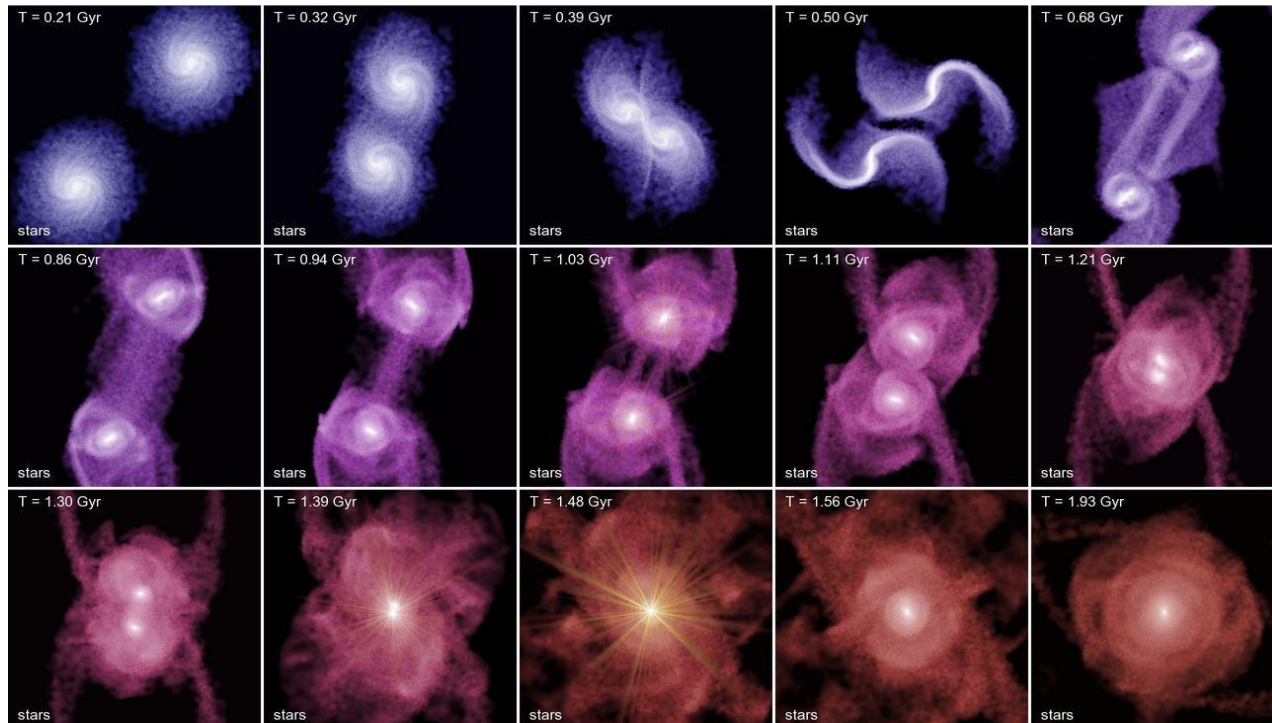
- *Il faut arrêter la formation stellaire pour faire la "séquence rouge"*
- *Il faut enlever des baryons de toutes les galaxies*

=> *Les noyaux actifs sont-ils la clé?*

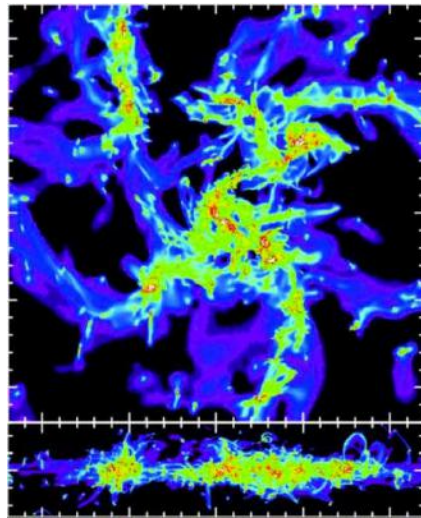
Les AGN pour arrêter la formation stellaire



Les AGN pour arrêter la formation stellaire



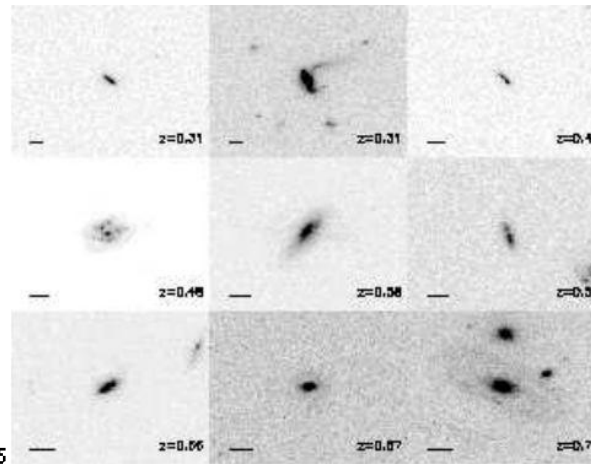
Les AGN pour freiner la formation galactique?



gas surface density (cm^{-2})

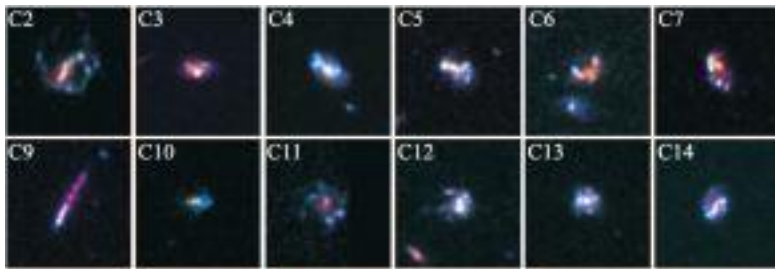
24
22
20

Les disques primordiaux avec instabilités gravitationnelle font tomber beaucoup de gaz vers leur centre... et vers leur trou noir central



Les AGN ne sont pas souvent dans des collisions de galaxies

Nombreux AGN dans les galaxies à haut redshift, sans nécessiter de collisions/fusions



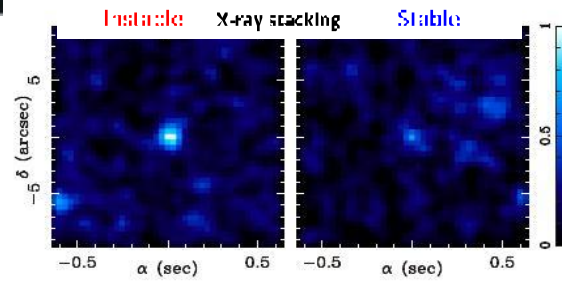
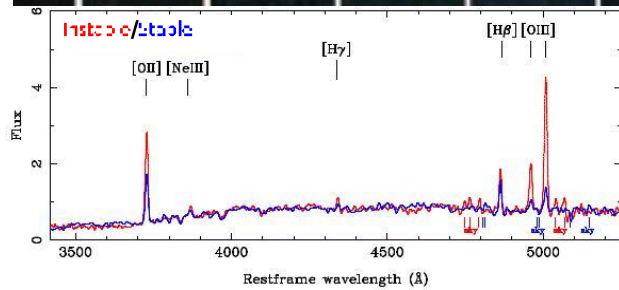
Instable – typique de $z=2$

=> Beaucoup d'AGN

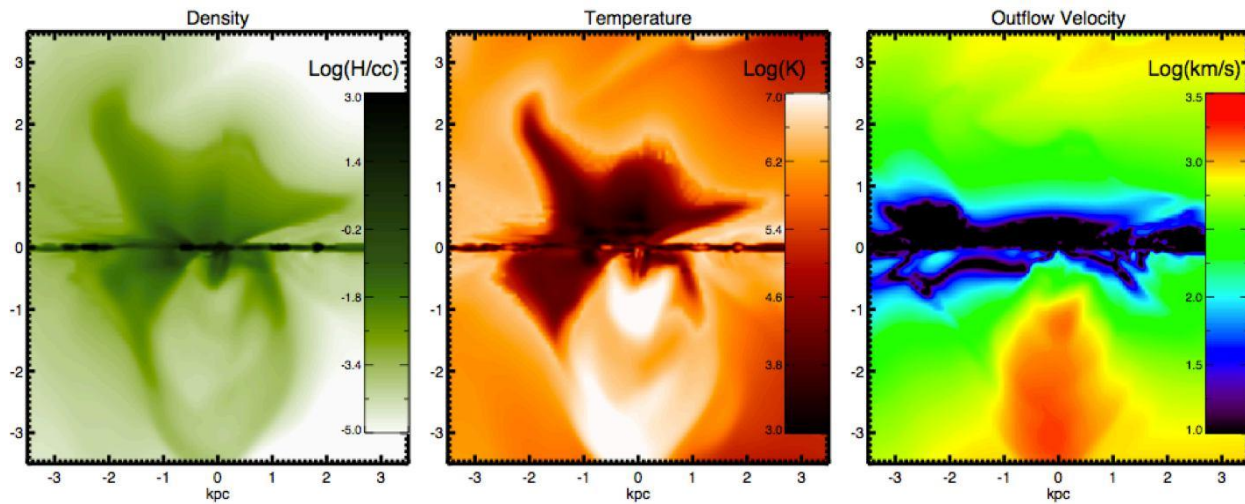


Stable - typique de $z=0$

=> AGN plus rares



Les AGN pour freiner la formation galactique?



Une instabilité de disque, telle qu'on en trouve à haut redshift (sous l'effet des "courants froids") peut très bien alimenter un AGN

L'AGN peut chasser du gaz à >1000 km/s de la galaxie

Deux défis majeurs pour la formation des galaxies:

- Mettre les ingrédients essentiels (physique du gaz turbulence, formation stellaire, AGN) dans des modèles auto-consistants.
- Comprendre comment réguler la croissance en masse des galaxies (expulser des baryons?) *sans* rendre leur croissance chaotique ou épisodique.

