



# INSTABILITÉS & FORMATION STELLAIRE

## *LA DIVERSITÉ DANS L'UNIVERSALITÉ*



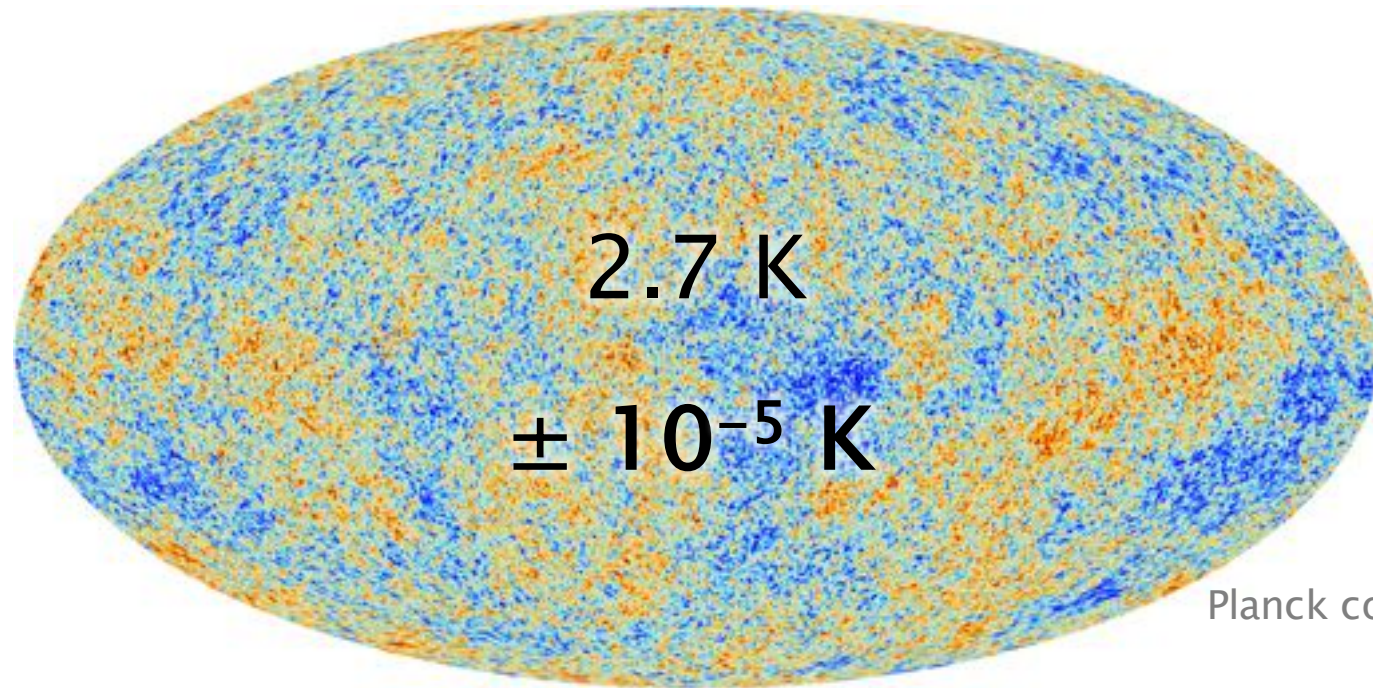
**FLORENT RENAUD**  
UNIVERSITÉ DE LUND, SUÈDE



**– INTRODUCTION –**

**DE L'IMPORTANCE DE  
LA FORMATION STELLAIRE**

# Formation des galaxies (en 3 minutes)



Planck collaboration

fluctuations de densité et température dans l'Univers primordial  
(fond diffus cosmologique = big bang + 380 000 ans)

instabilités gravitationnelles et formation des halos  
proto-galactiques : matière noire + gaz (H+He)

# Formation des galaxies

gaz : collisionnel  
→ friction → pression  
→ s'oppose à la gravité

refroidissement du gaz →  
pression < gravité



Simulation par Y. Revaz

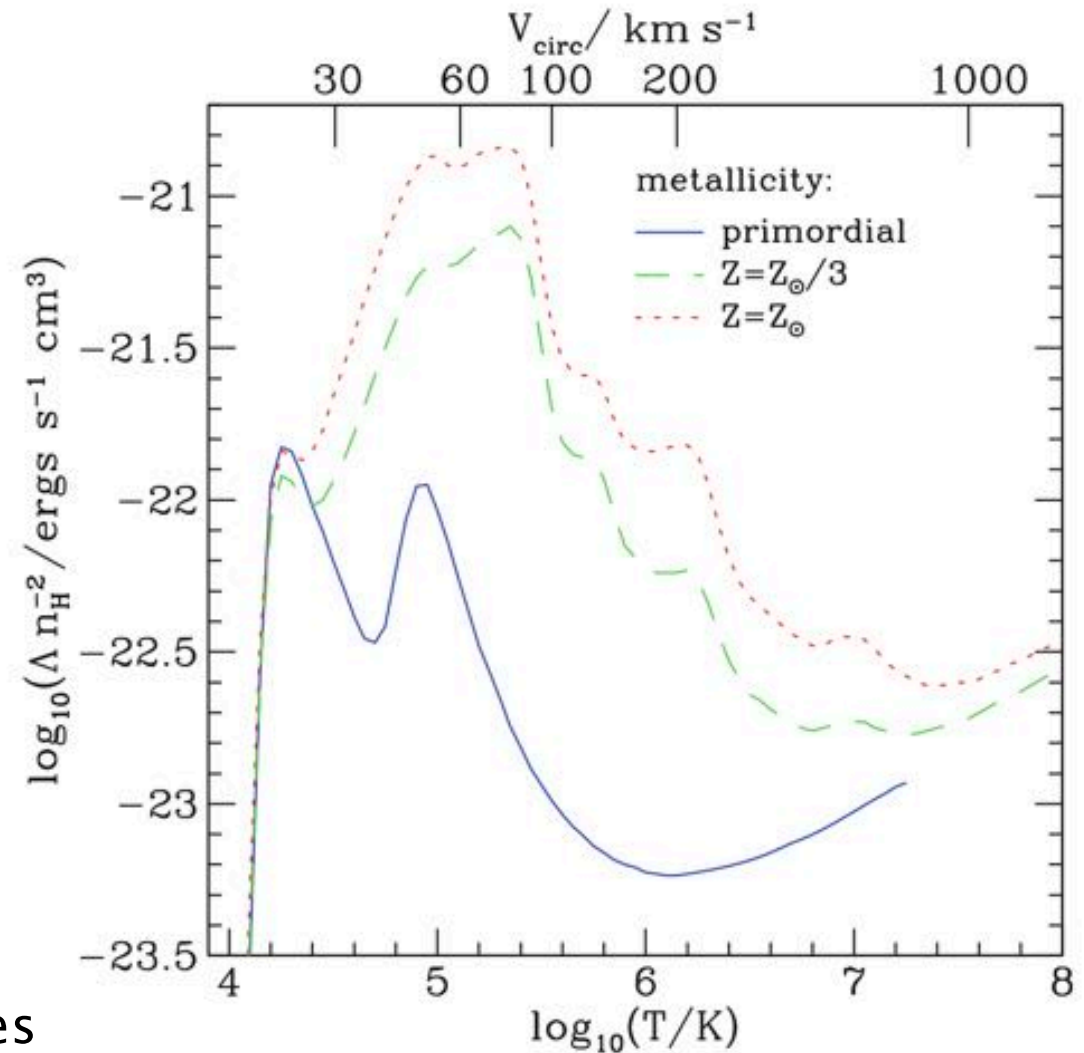
# Refroidissement

refroidissement par émission:

- émission free-free (bremsstrahlung)
- recombinaison collisionnelle
- de-excitation collisionnelle

refroidissement atomique efficace pour  $> 10^4$  K

besoin des transitions supplémentaires des molécules

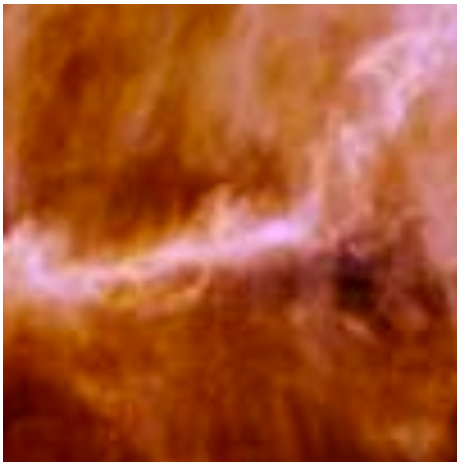


Baugh (2006)

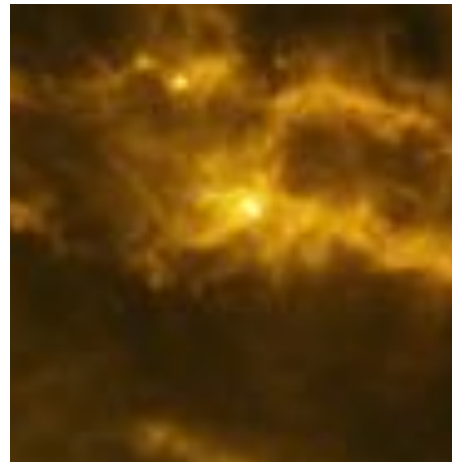
# Conversion du gaz

- Augmentation de la densité de gaz
- Fragmentation du gaz en nuages
- Effondrement en cœurs pré-stellaires (croissance par accrétion)
- puis en proto-étoiles (contraction)
- puis en étoiles

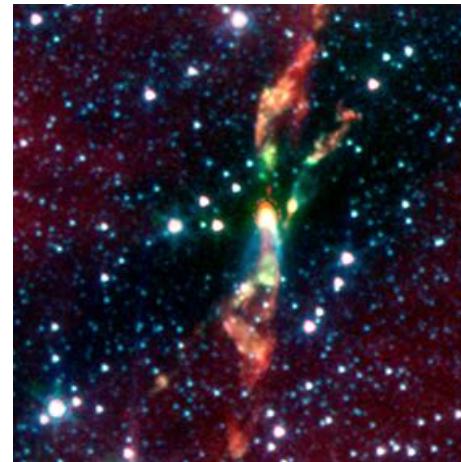
Taurus  
(Palmeirim et al.)



IC 5146  
(Arzoumanian et al.)



BHR 71  
(Bourke et al.)



Rosetta  
(Motte et al.)



# Feedback et enrichissement

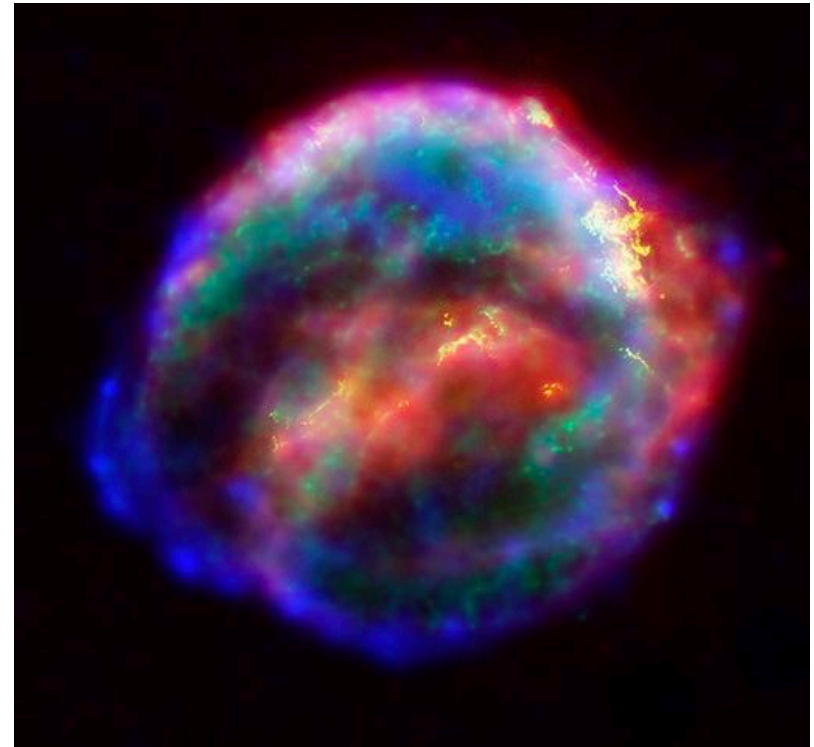
Réaction thermo-nucléaires (fusion)

Formation des éléments plus lourds  
(C, N, O etc.)

Dispersion de ces éléments : feedback  
(vents stellaires, supernovae etc.)

Formation des éléments plus massifs  
lors des explosions

Formation d'étoiles et systèmes  
planétaires à partir de ces éléments



Chandra / Hubble / Spitzer (NASA)

# Instabilités

Comprendre les origines de galaxies revient à comprendre la formation stellaire.

Comprendre la formation stellaire revient à comprendre les ruptures d'équilibre du milieu interstellaire.



(Bate et al. 2012)



# Un sujet multi-physique et multi-échelle



accrétion de gaz

interactions, fusions

turbulence

refroidissement

cisaillement

magnétisme

vents, feedback

ionisation

gravitation



– PREMIÈRE PARTIE –

**UNIVERSALITÉ DE LA  
FORMATION STELLAIRE**

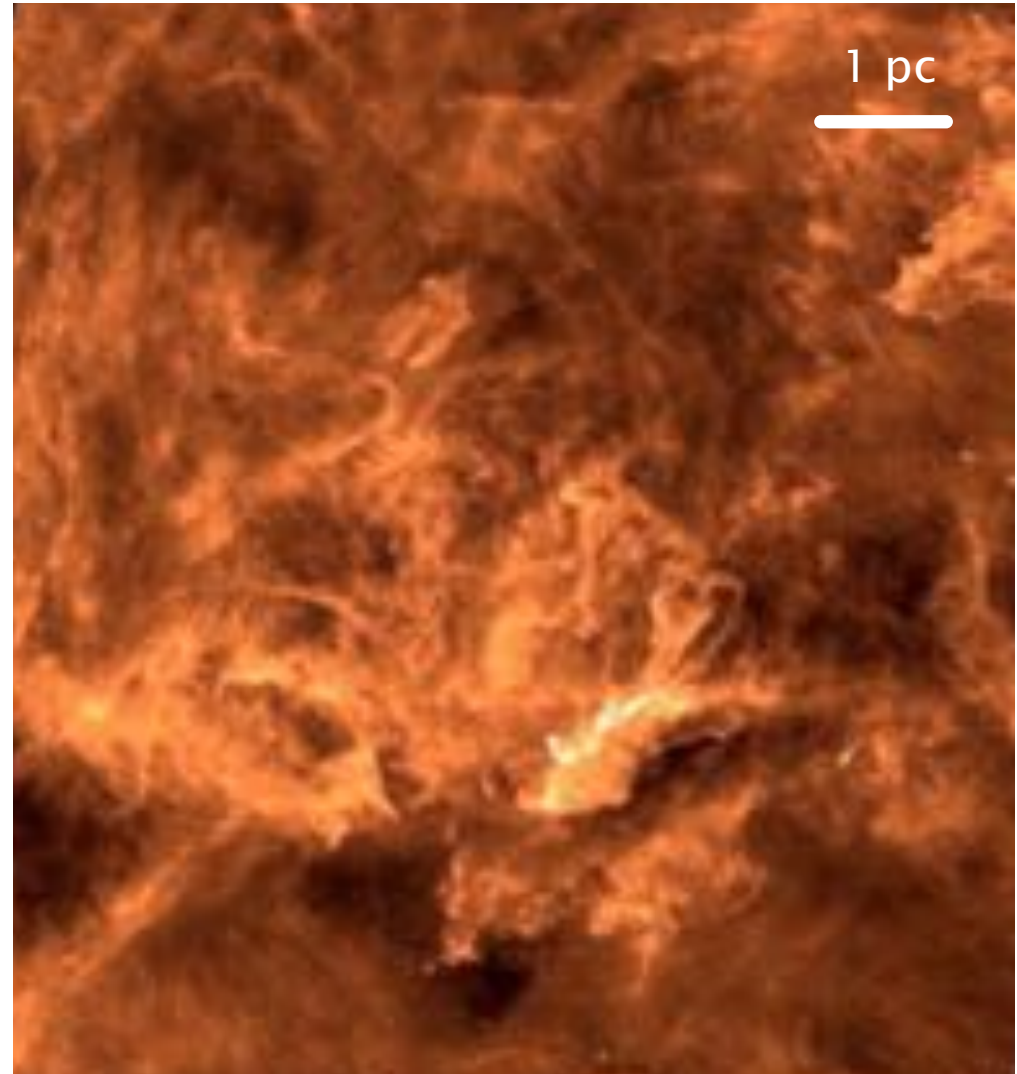
# Nuages et filaments

Instabilités du gaz

Rôle prépondérant  
de la turbulence

Confinement et élongation  
par champ magnétique

Fragmentation gravitationnelle  
en cœurs pré-stellaires



Polaris (André et al.)

# Universalité filamentaire

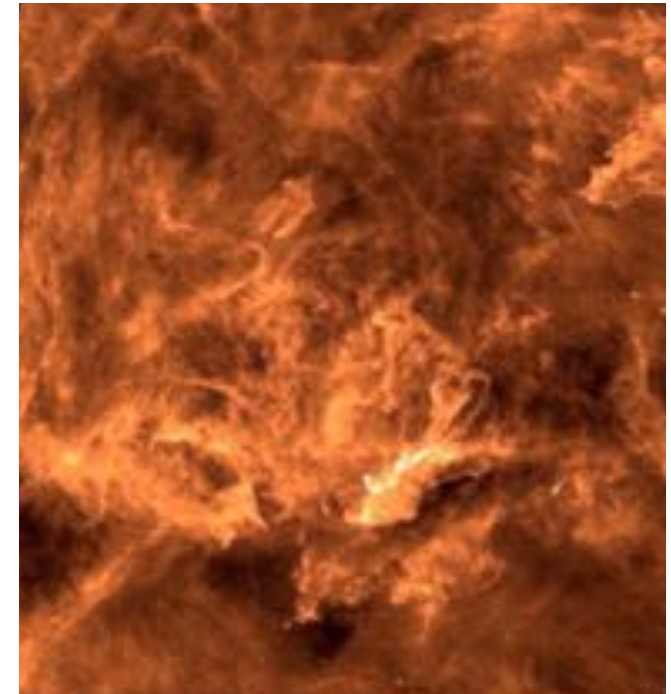
Diamètre universel (0.1 pc)

Arzoumanian et al. (2012)

Extinction universel ( $A_V > 7$ )

André et al. (2013)

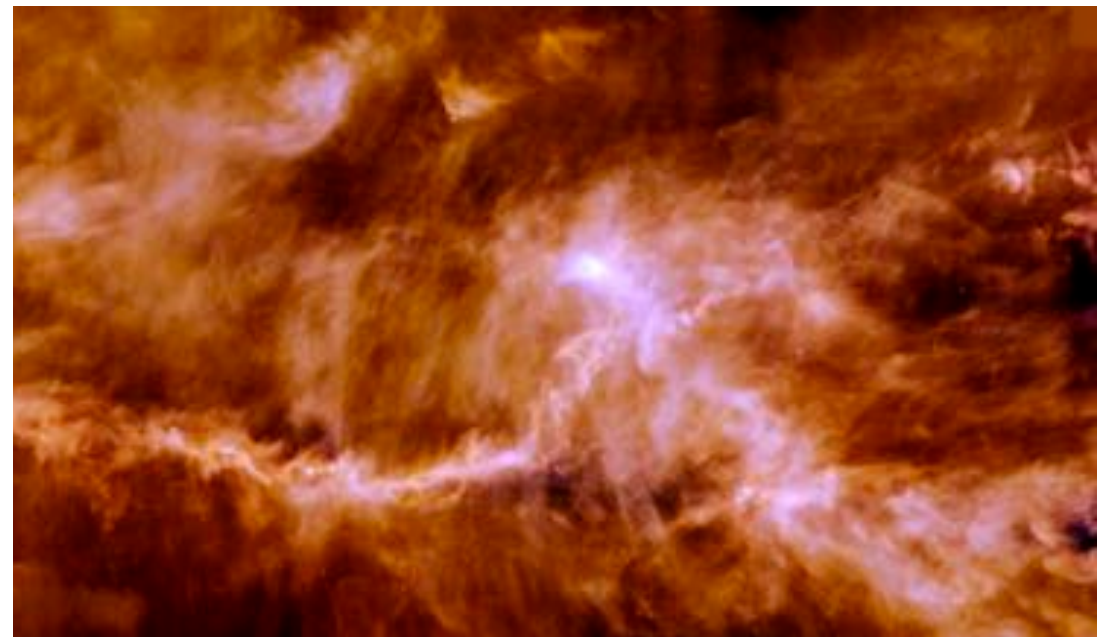
Formation d'amas aux intersections



Polaris (André et al.)



IC 5146 (Arzoumanian et al. 2012)



Taurus (Palmeirim et al. 2013)

# Universalité filamentaire

Reproduit numériquement



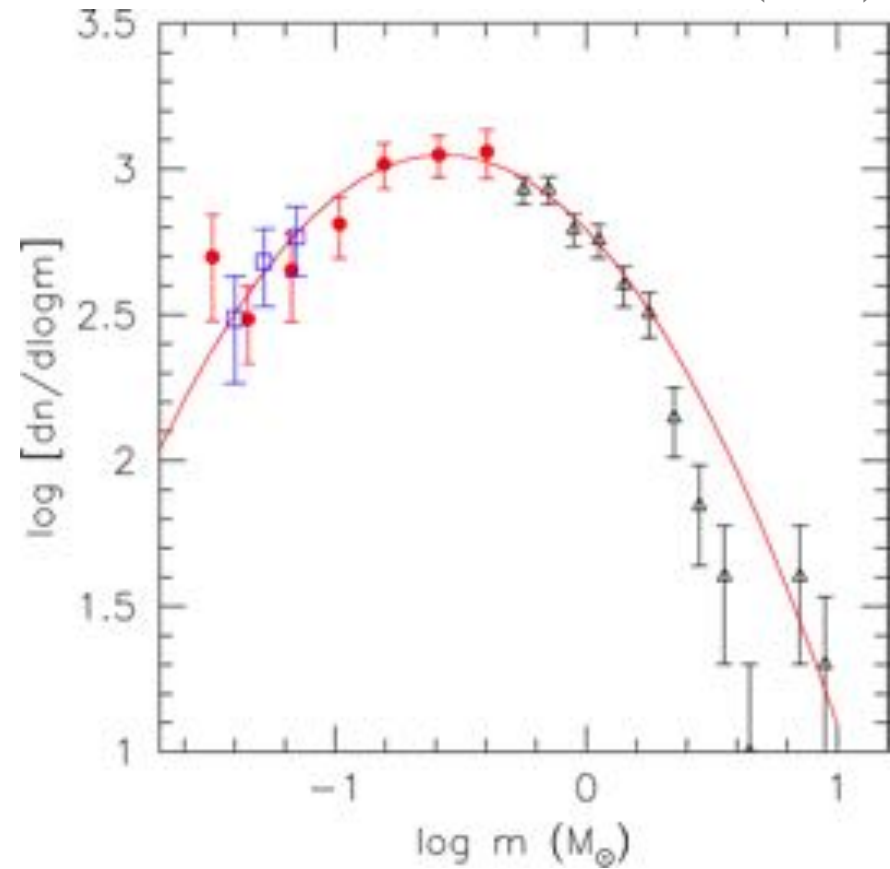
Bate et al. (2012)

# Fonction de masse initiale

Dérive de la fragmentation du gaz et de l'accrétion des cœurs

Difficile à mesurer

Moreaux et al. (2004)

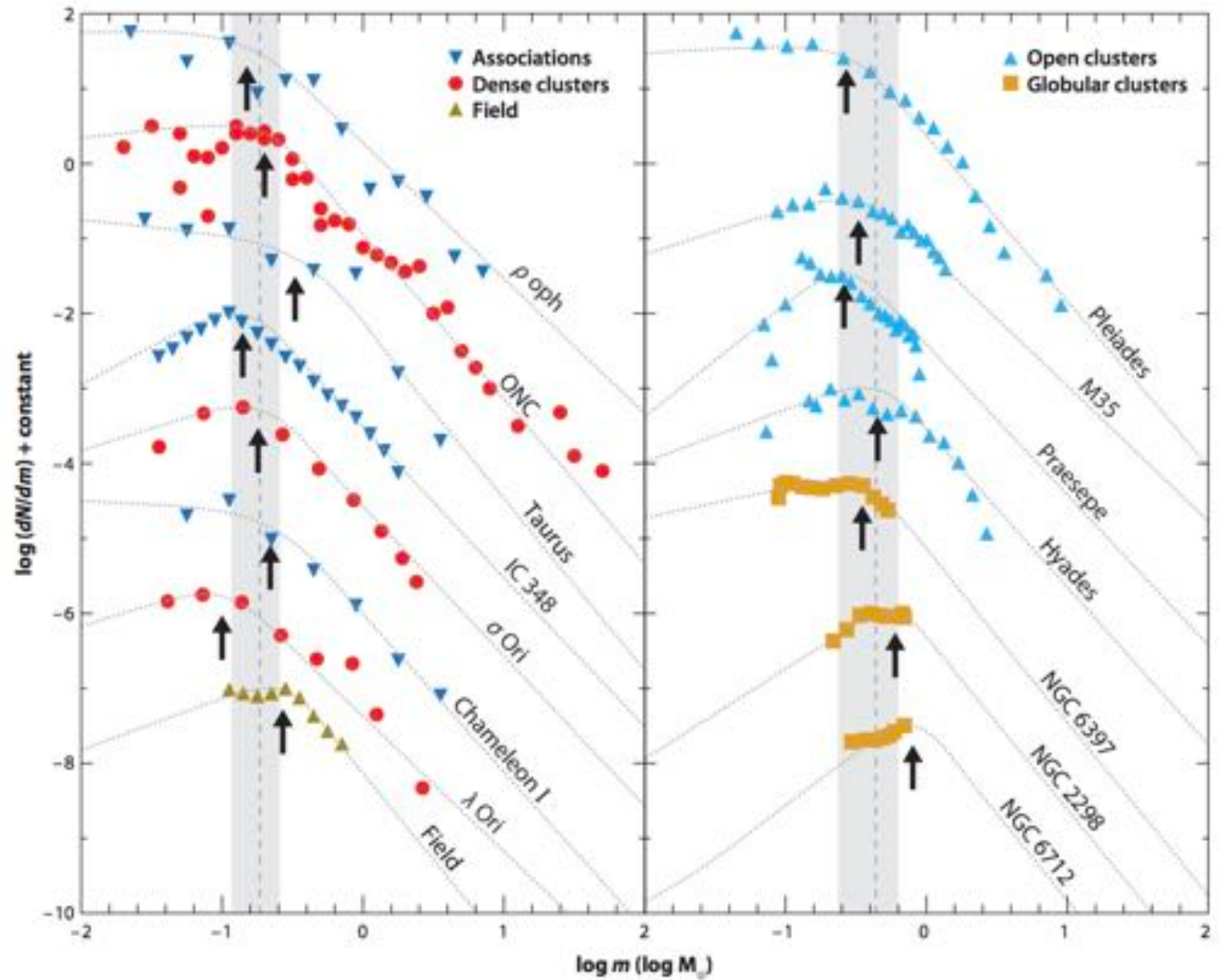


# Fonction de masse initiale universelle

Bastian et al. (2010)

Forme universelle

Variations stochastiques

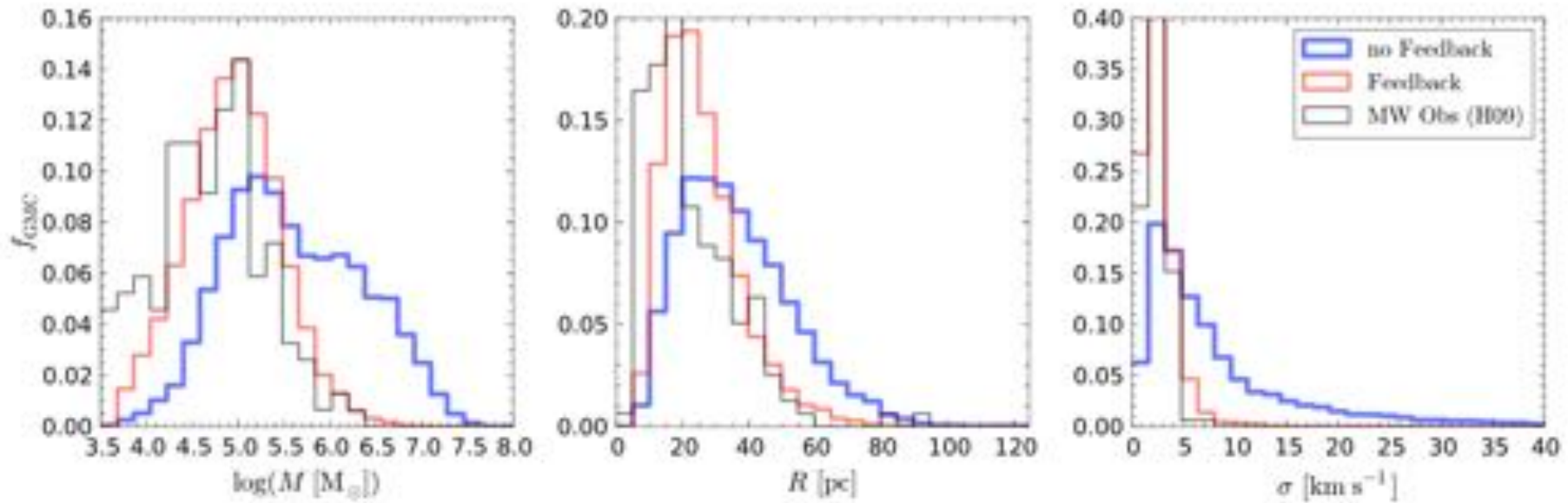


# Régulation par feedback

Rétroaction (vents, ionisation, pression de radiation, supernovae)

Nécessaire à la régulation de la formation stellaire et du milieu interstellaire

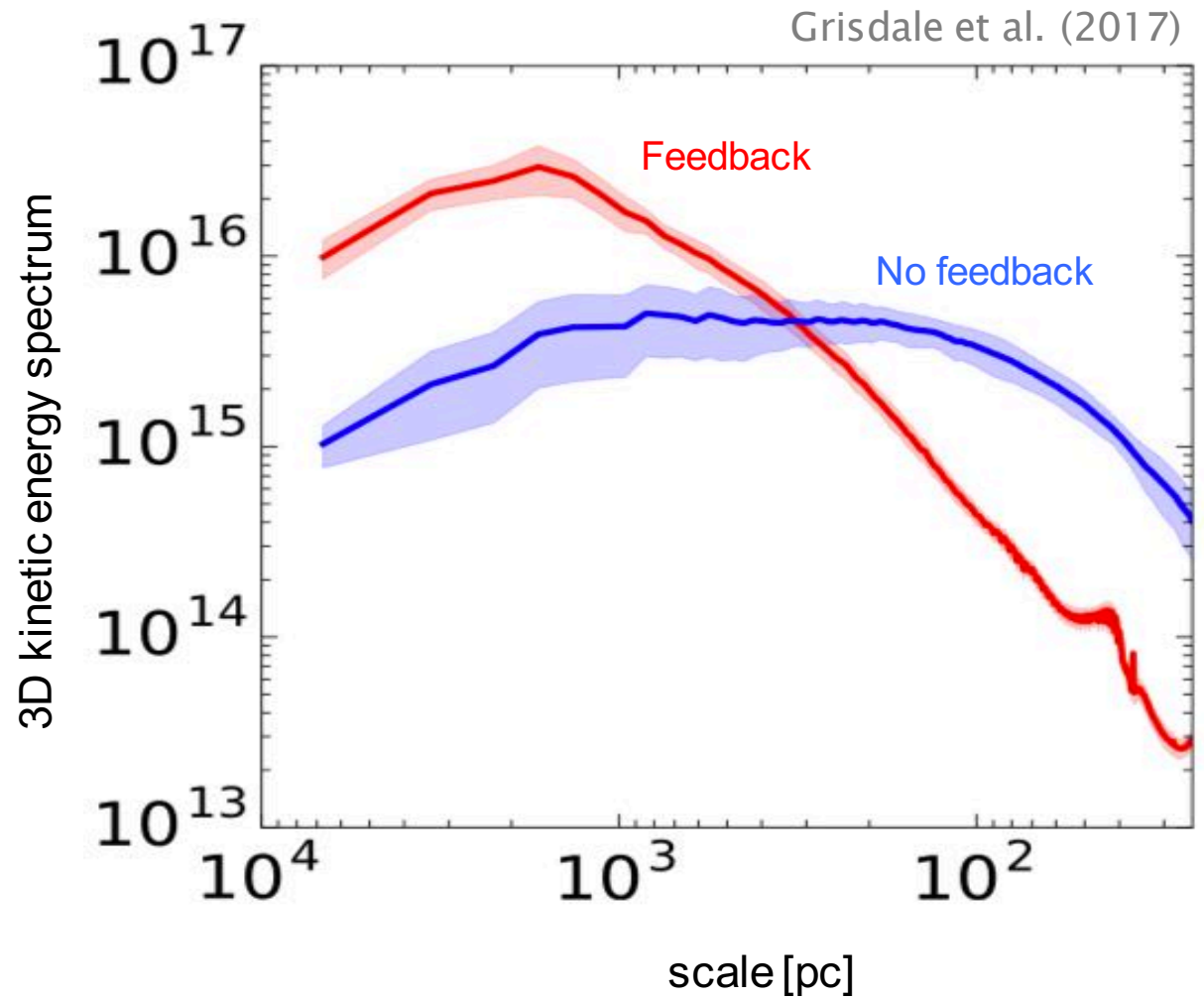
Grisdale et al. (en préparation)





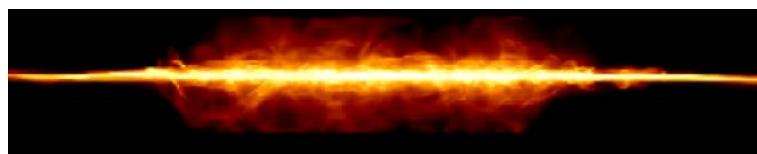
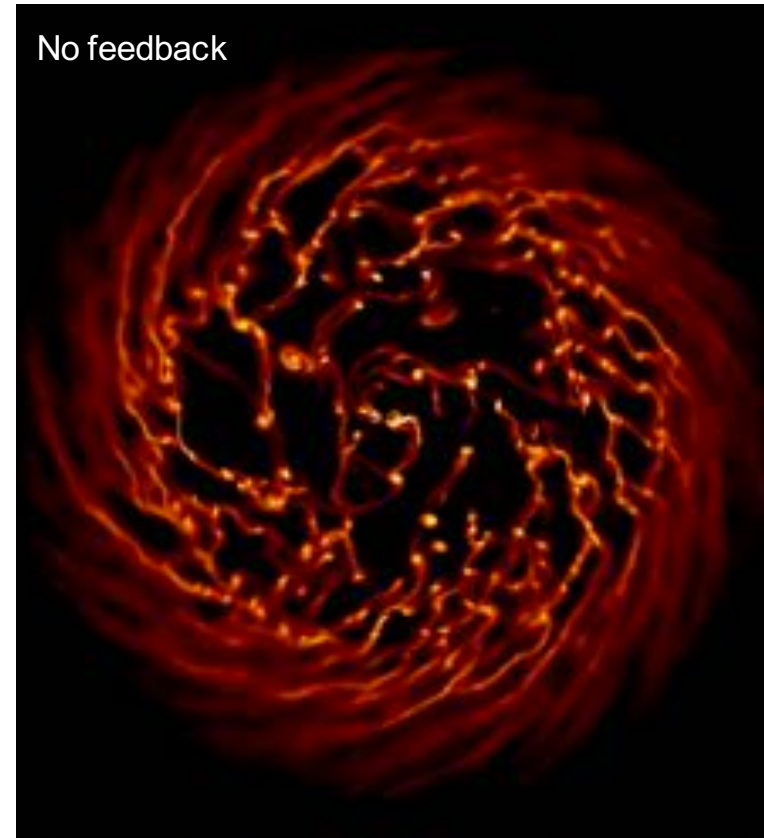
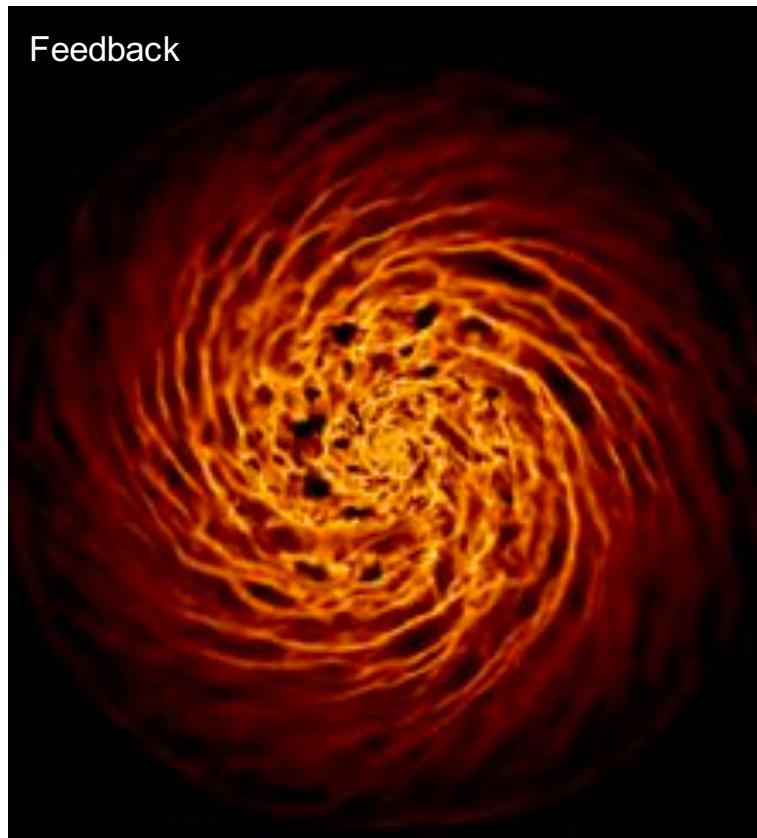
# Régulation multi-échelle par feedback

Affecte la région de formation, le milieu interstellaire et le milieu intergalactique



# Régulation multi-échelle par feedback

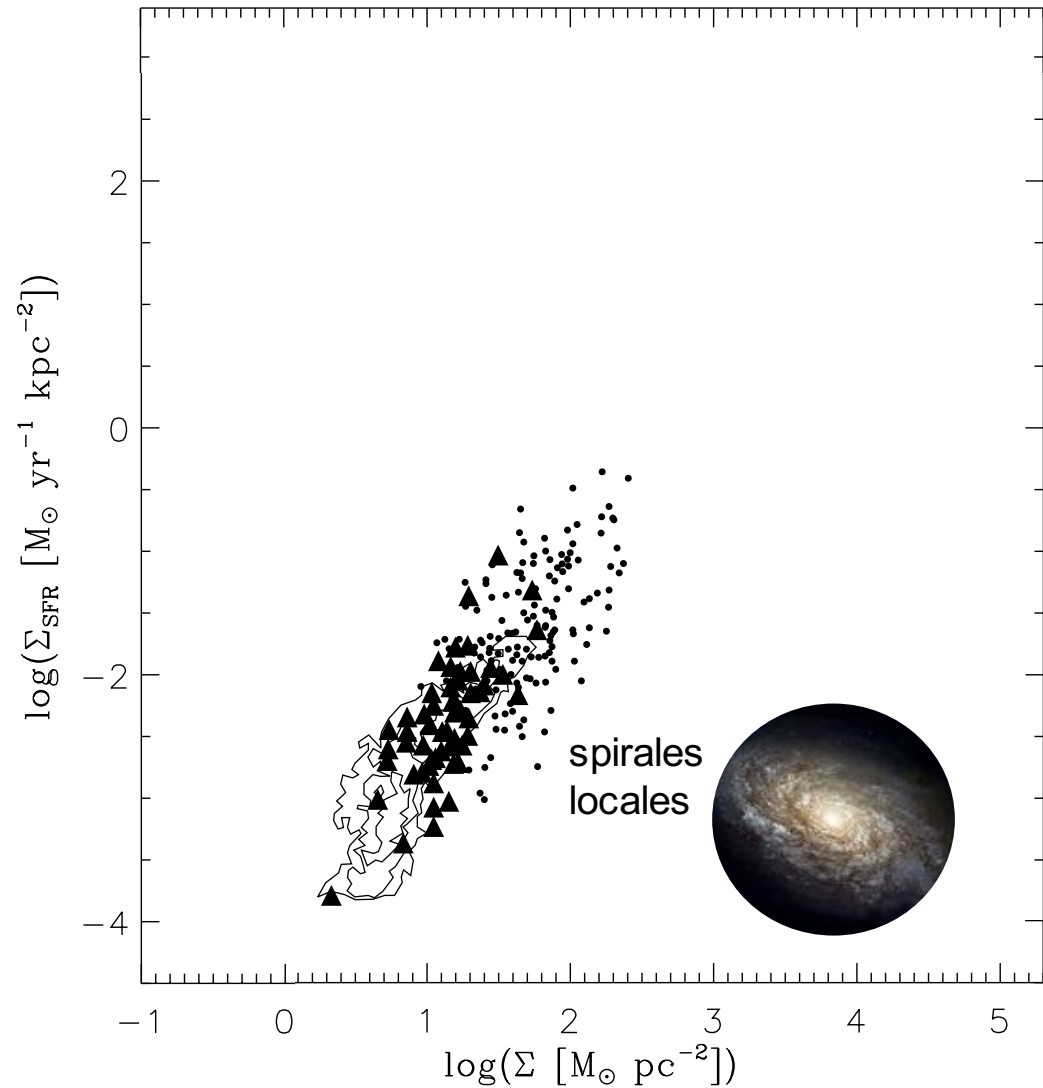
Grisdale et al. (2017)



# D'une galaxie à l'autre

Diagramme de Schmidt-Kennicutt

Galaxies entières, ou large portions ( $> 100$  pc)



Observations de Kennicutt+1998, Kennicutt+2007, Bigiel+2008

# Galaxies grumeleuses (*clumpy galaxies*)

redshift  $\sim 1-2$  (= il y a 8-11 Gyr)

30 à 60 % de gaz

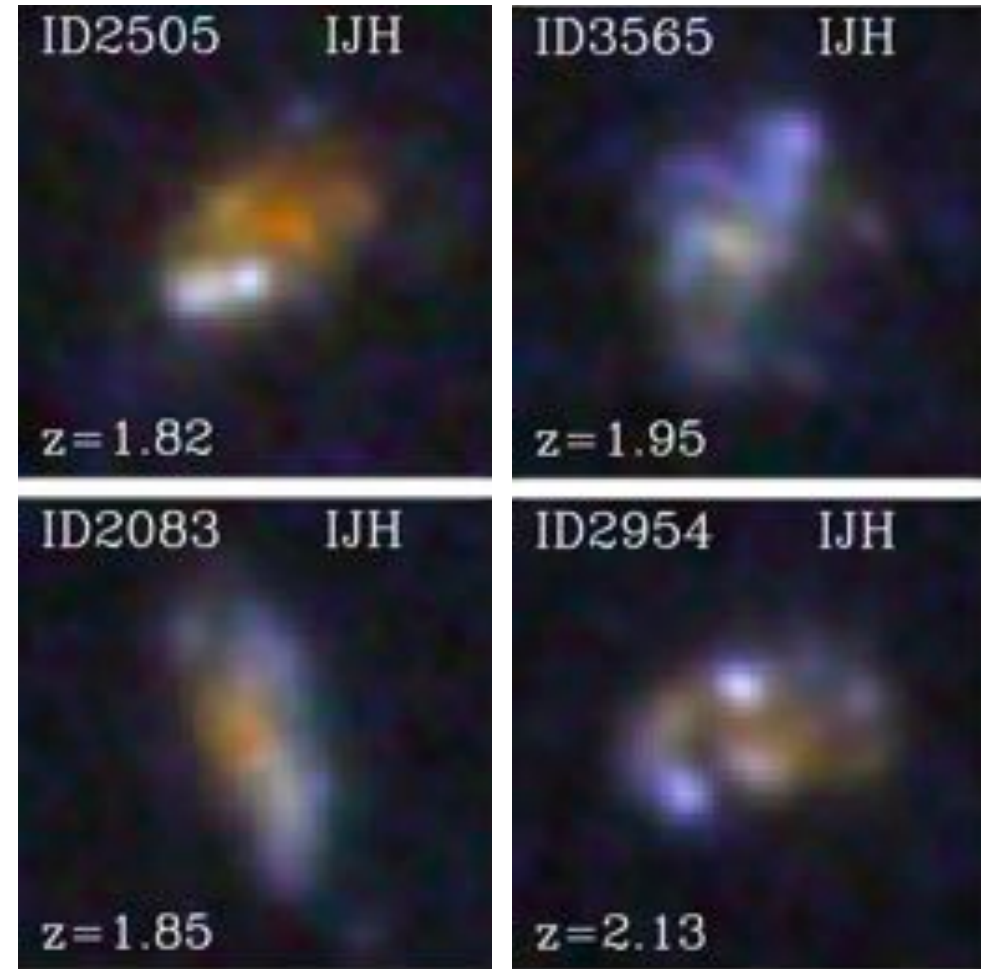
instabilités gravitationnelles

formation de grumeaux massifs  
(1 kpc,  $10^{7-9} M_{\odot}$ )

sites de formation stellaire

taux de formation  $\times 100-1000$

formation possible d'amas  
globulaires

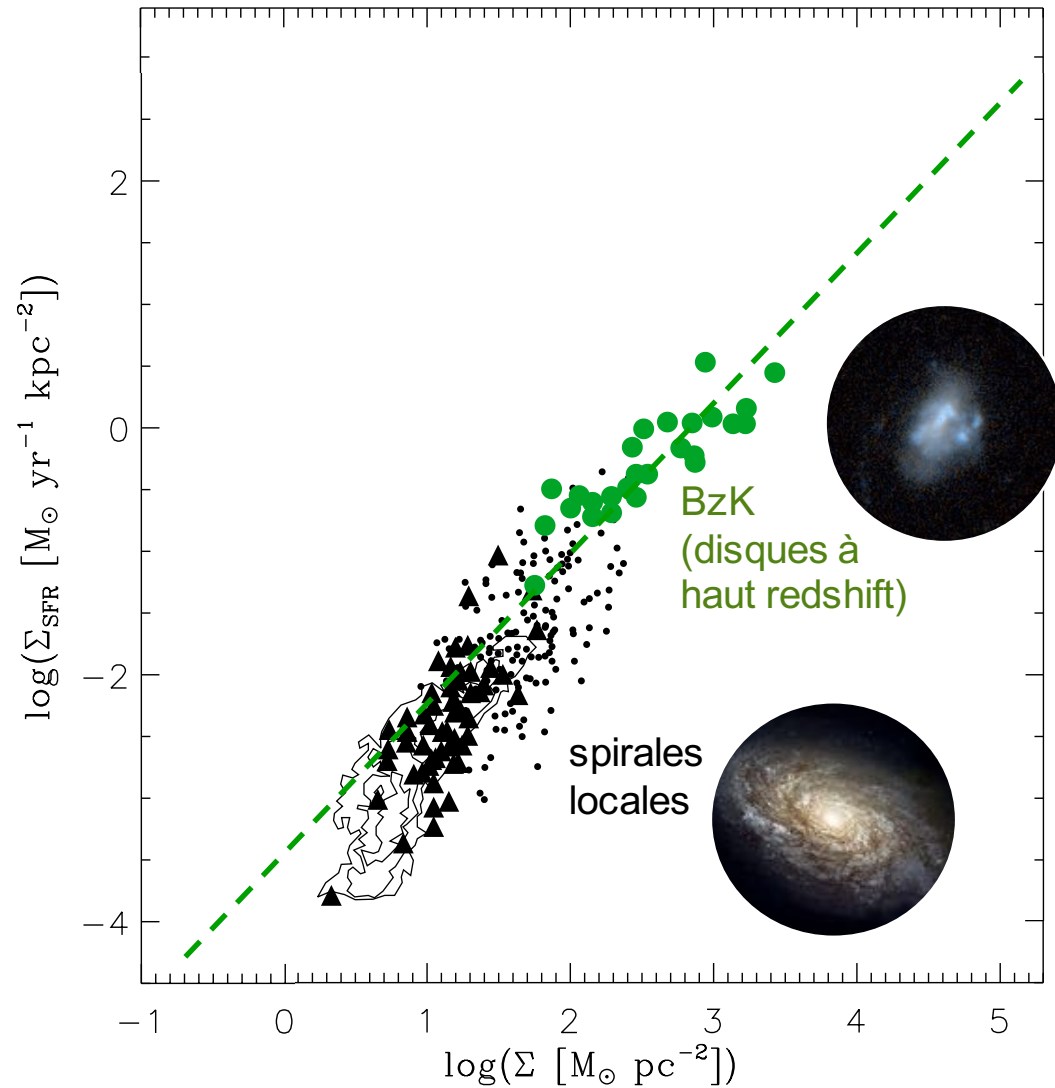


Wuyts et al. (2012)

# D'une galaxie à l'autre

$$\Sigma_{\text{SFR}} \propto \Sigma_{\text{gas}}^{\alpha}$$
$$\alpha \approx 1.5$$

Apparente uniformité  
des lois de formation  
stellaire



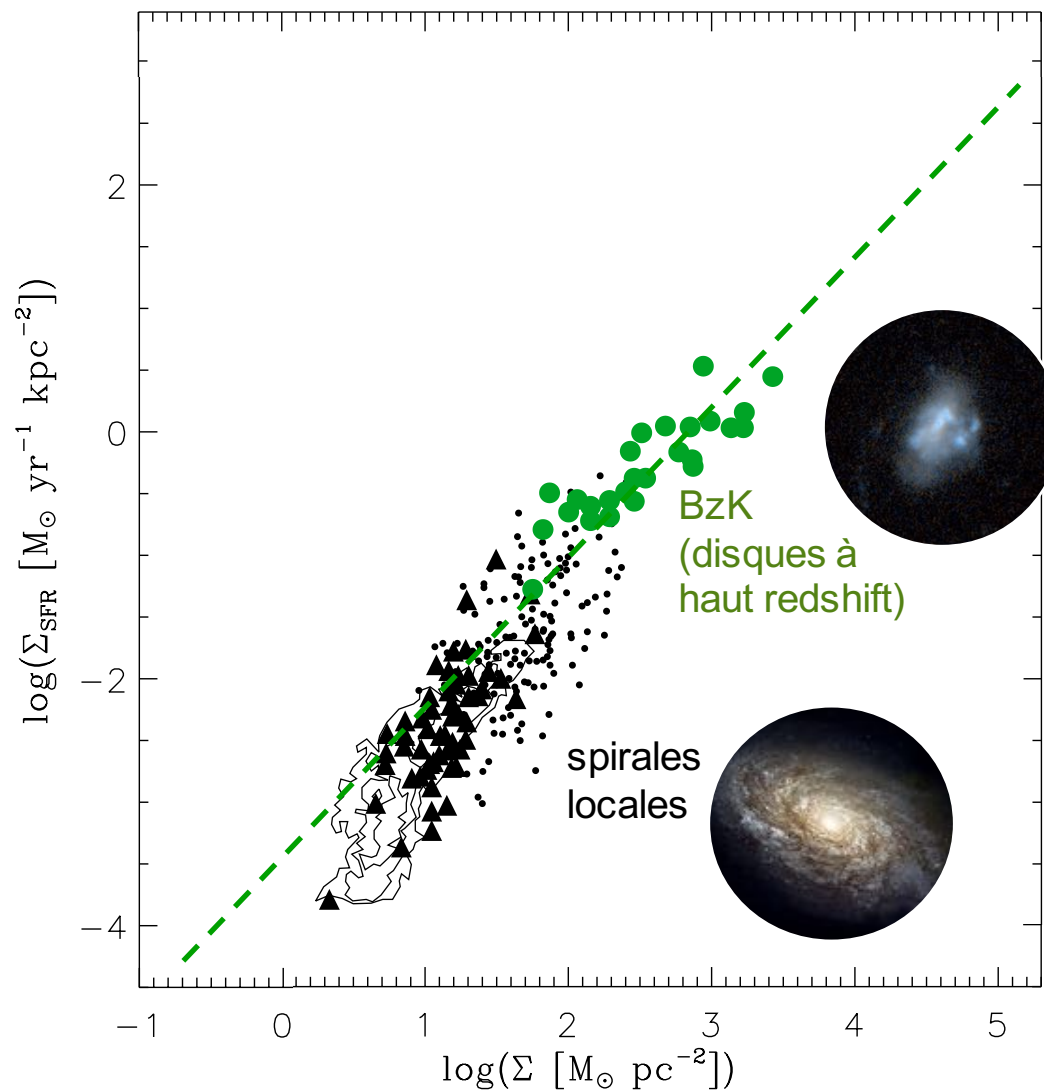
Observations de Kennicutt+1998, Kennicutt+2007, Bigiel+2008  
Tacconi+2010, Daddi+2010



– SECONDE PARTIE –

**DIVERSITÉ DE LA  
FORMATION STELLAIRE**

# Encore plus extrême ?



Observations de Kennicutt+1998, Kennicutt+2007, Bigiel+2008  
Tacconi+2010, Daddi+2010

# Flambées de formation *(starbursts)*

Galaxies en interaction

Collision et compression  
du gaz par turbulence

Augmentation violente et  
temporaire du taux de  
formation stellaire  
(x10-100)

Formation d'amas massifs  
( $\sim 10^{6-7} M_{\odot}$ )

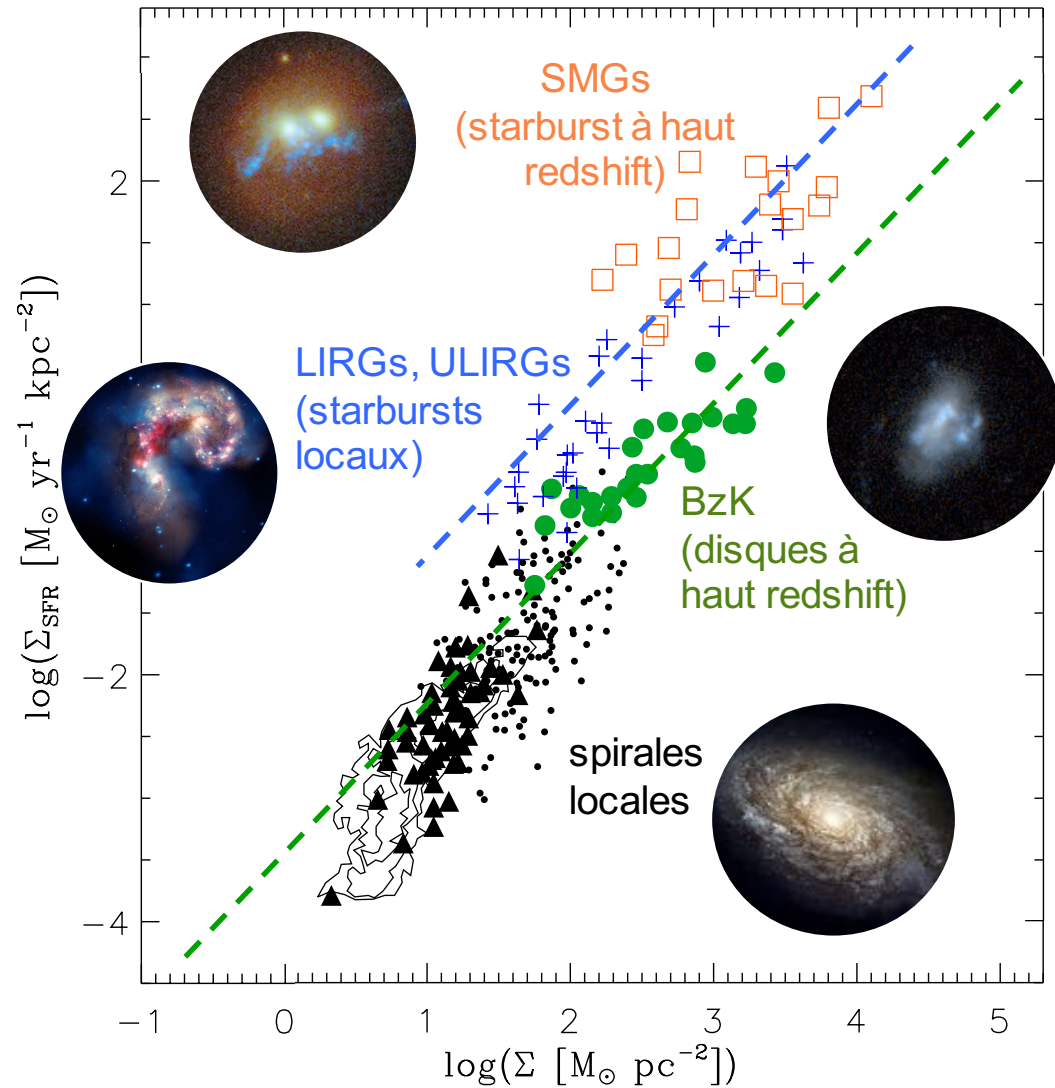


Galaxies des Antennes (HST/NASA)



# 2 régimes de formation

Augmentation violente et temporaire du taux *et* de l'efficacité de formation stellaire



Observations de Kennicutt+1998, Bouché+2007, Bothwell+2009

# Amas stellaires



Messier 4

## Amas globulaires

vieux ( $\sim 10\text{--}12$  Gyr)

massifs ( $10^6 M_{\odot}$ )

denses (= résistants)



Messier 45

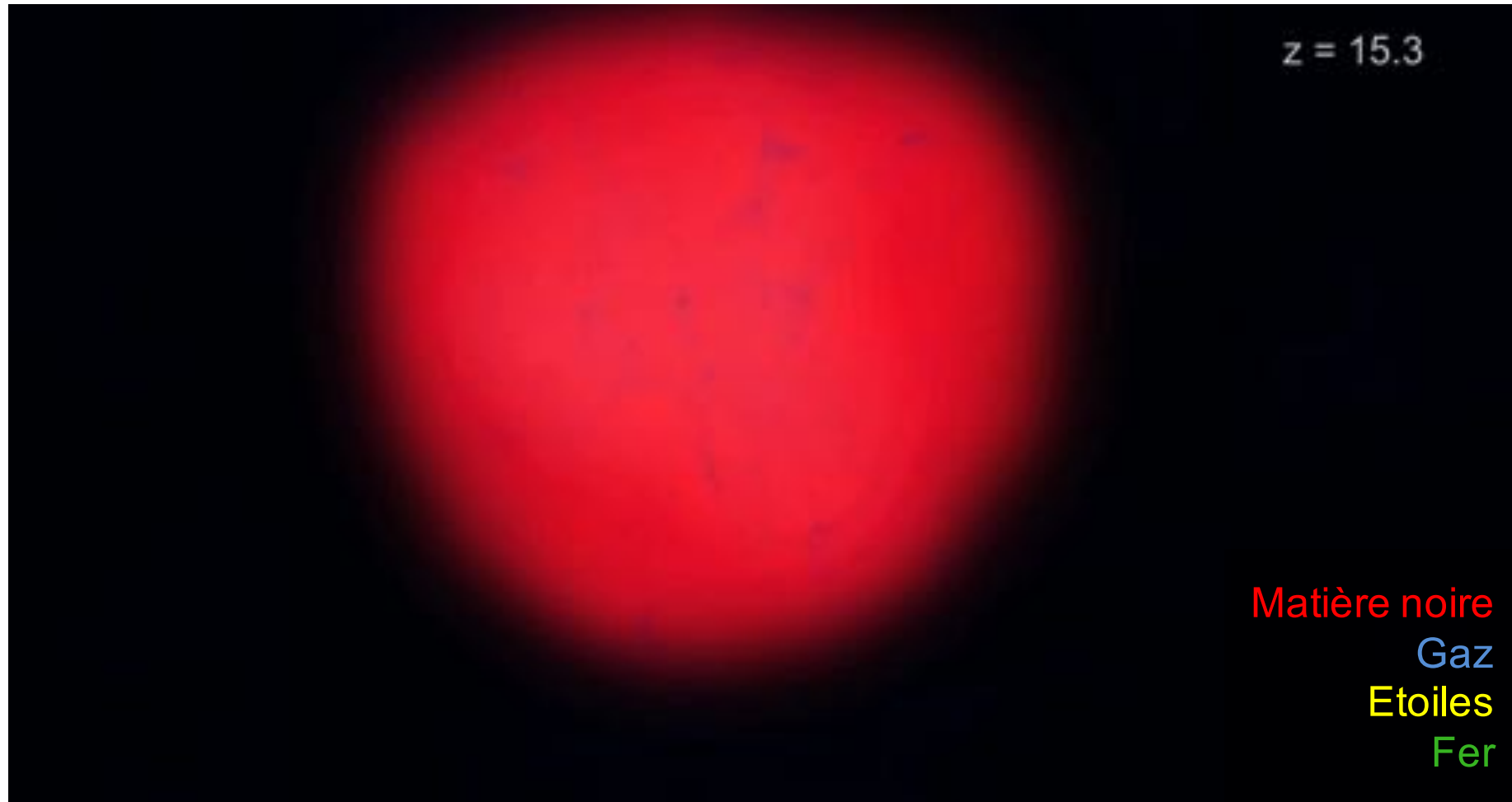
## Amas ouverts

jeunes

peu massifs

peu denses (= fragiles)

# Différentes époques et conditions



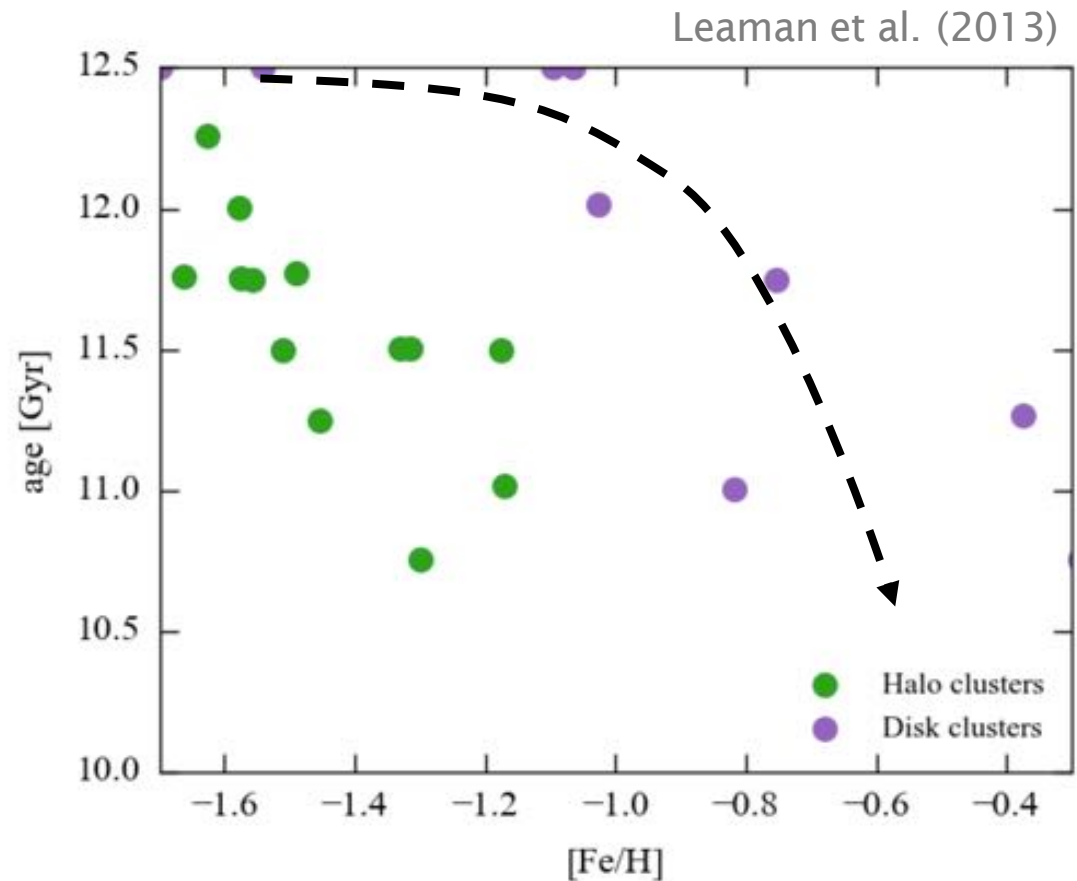
Renaud et al. (2017)

# Evolution chimique de la galaxie

Enrichissement du milieu interstellaire

Changement des conditions de refroidissement

Fragmentation différente du gaz



# Rôle des spirales

Ondes de densité, pas de matière

Rôle non-clairement établi



Messier 83

# Accumulation ou compression ?

Film par C. Dobbs

Formation de nuage plus efficace  
dans les bras spiraux

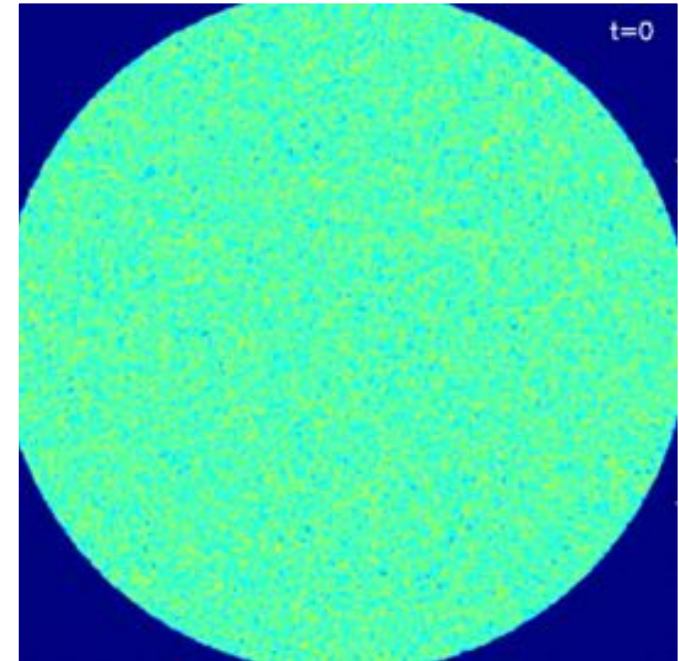
Heyer & Terebey (1998)

Destruction à la sortie

Dobbs & Bonnell (2006)

Roman-Duval et al. (2010)

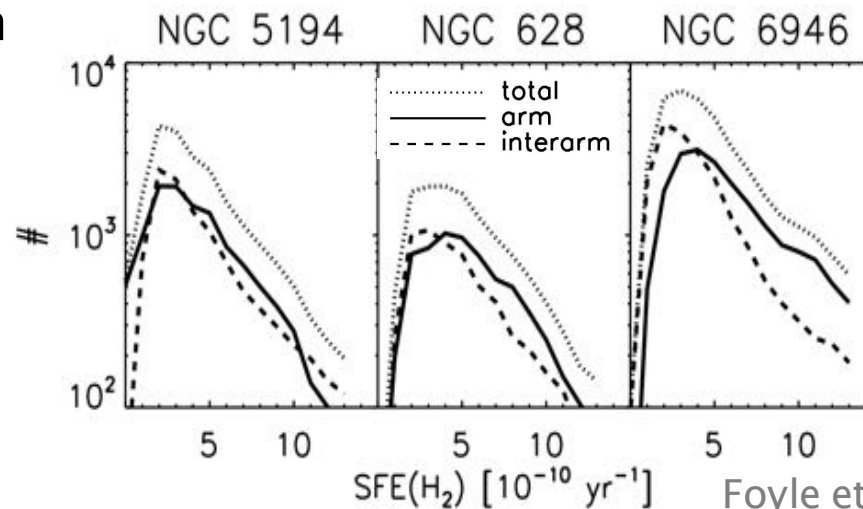
Dobbs et al. (2011)



Peu d'effet sur la fraction  
de gaz moléculaire

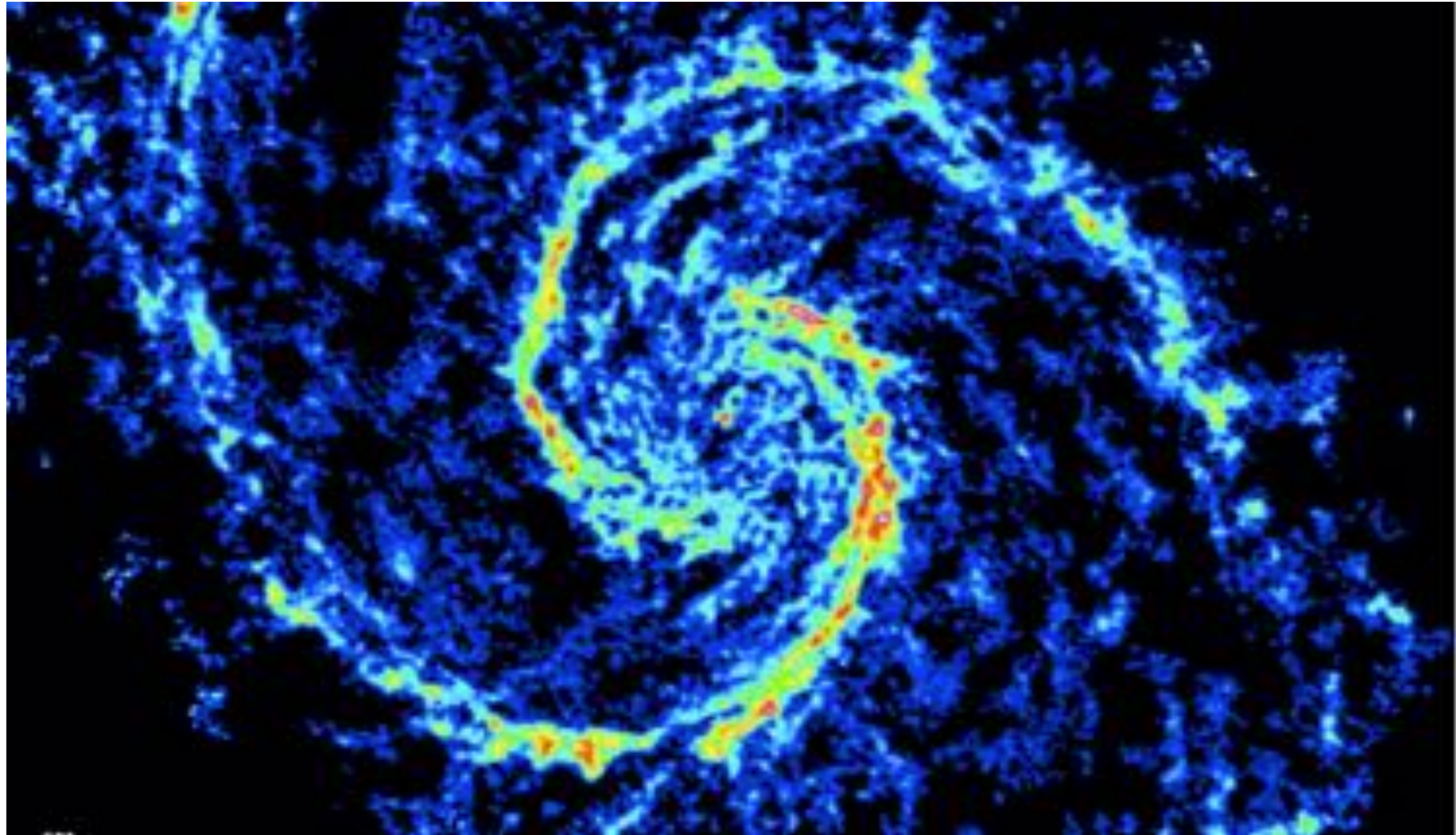
Foyle et al. (2010)

Eden et al. (2012, 2013)



Foyle et al. (2010)

# Diversité de sites de formation



M51 (PAWS), Schinnerer et al. (2013)

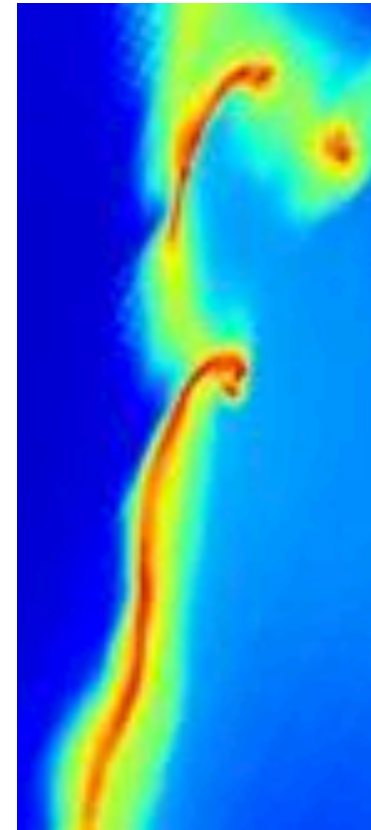
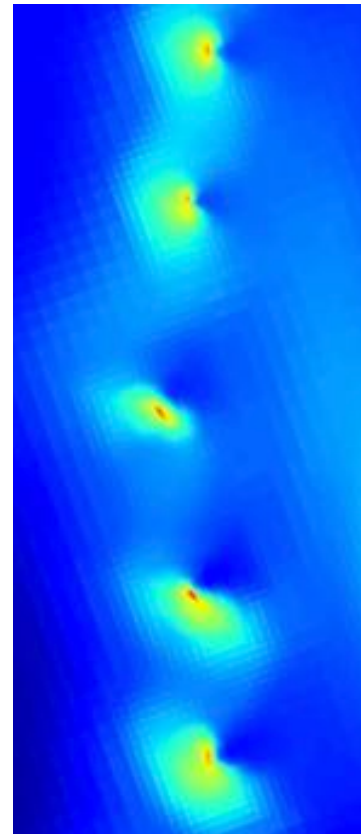
# Perles, plumes et éperons *(beads, feathers, spurs)*

Différentes structures gazeuses

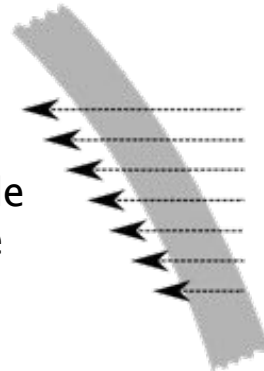
- Elmegreen et al. (1983)
- Dobbs et al. (2011)
- Meidt et al. (2013)
- Bonnell et al. (2013)

Fragmentation ou instabilités de Kelvin-Helmholtz

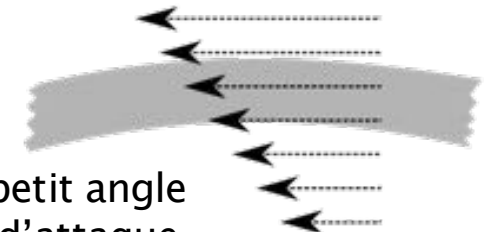
- Renaud et al. (2013)



grand angle d'attaque



petit angle d'attaque





# Centre galactique

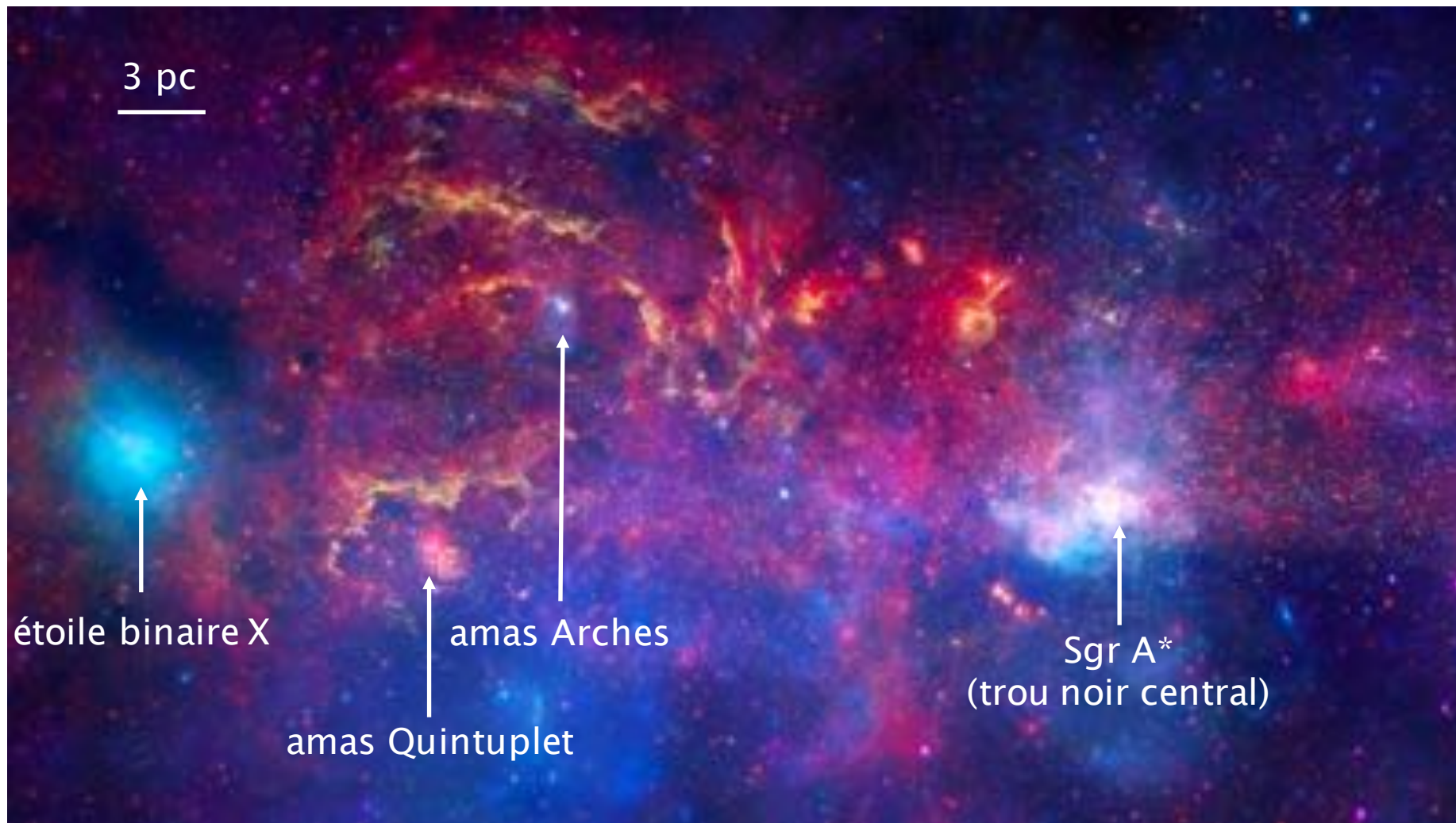
~ 300 pc centraux

$10^7 M_{\odot}$  de gaz moléculaire



Vue d'artiste par Nick Risinger

# Zone moléculaire centrale

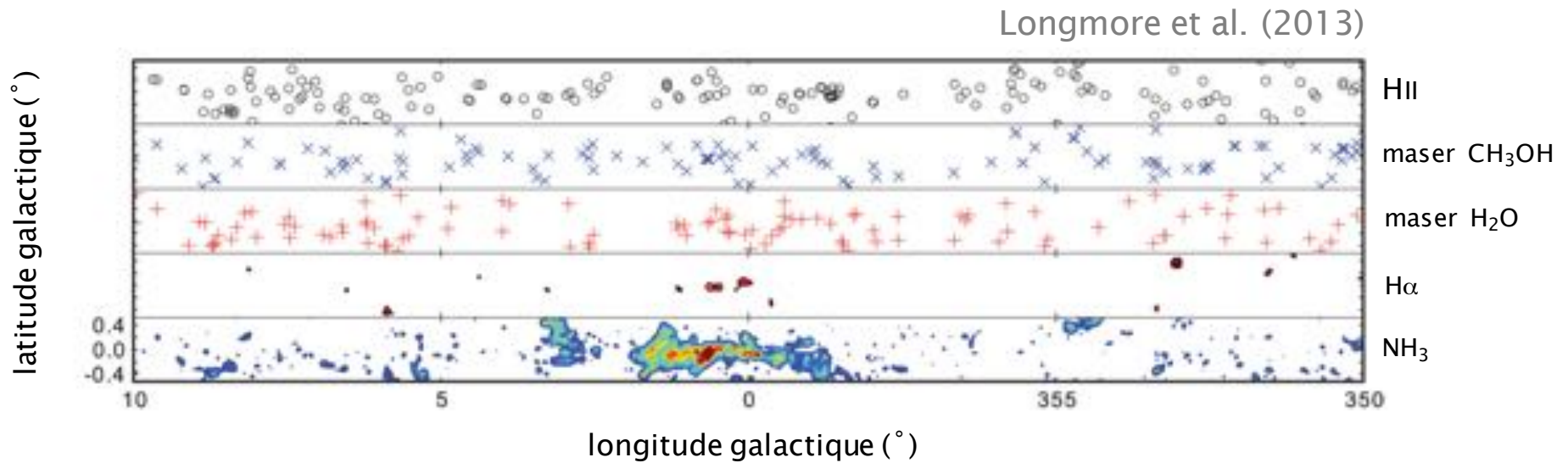


Chandra/Hubble/Spitzer (NASA)

# Zone moléculaire centrale

Plus chaud, plus dense, plus turbulent et plus riche qu'ailleurs

Ginsburg et al. (2015)

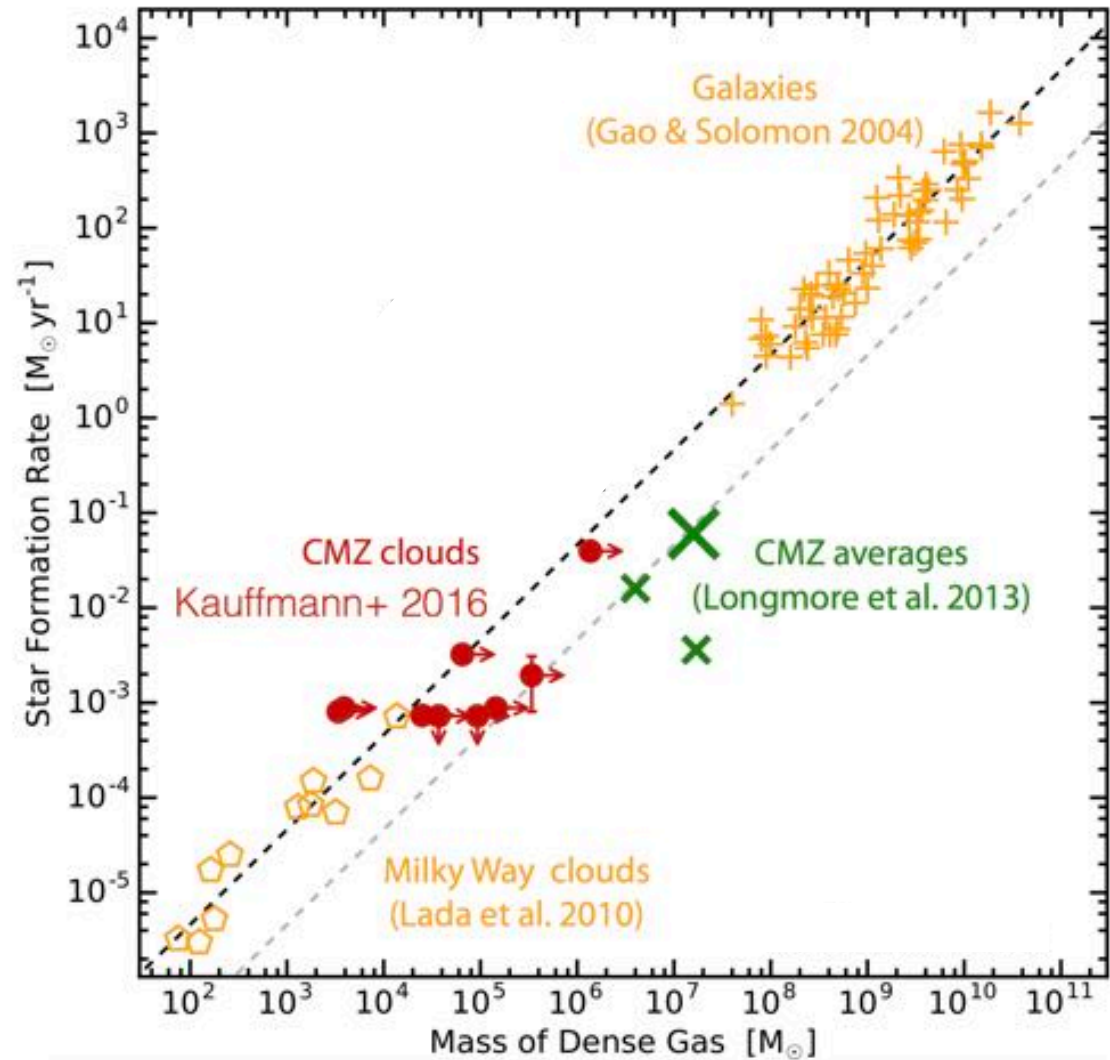


# Zone moléculaire centrale

Taux de formation 20x  
moins que prévu par  
les modèles

Morris et al. (1989)

Kauffmann et al. (2016)



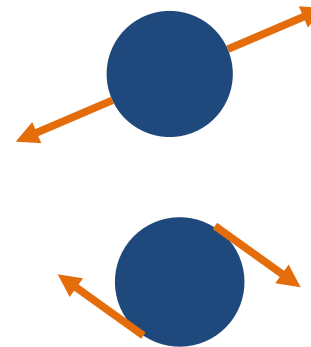
# Critère de stabilité

$$\lambda_J = \sqrt{\frac{\pi c_s^2}{G\rho}}$$

$$M_J = \frac{\pi^{5/2}}{6} \frac{c_s^3}{G^{3/2} \rho^{1/2}}$$

Ignore l'environnement galactique

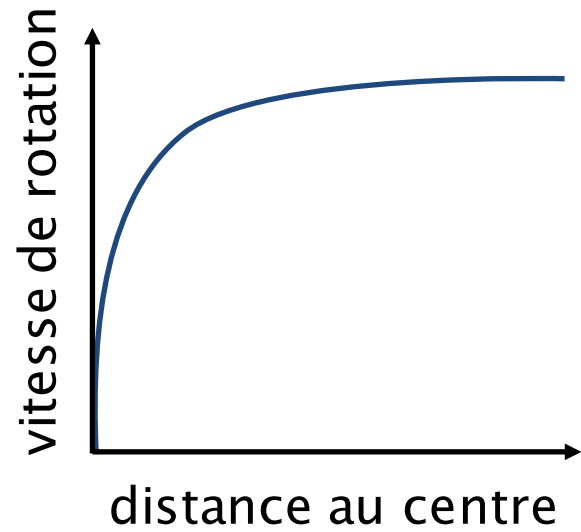
- Marées (gravitation différentielle)
- Cisaillement (vitesse différentielle)



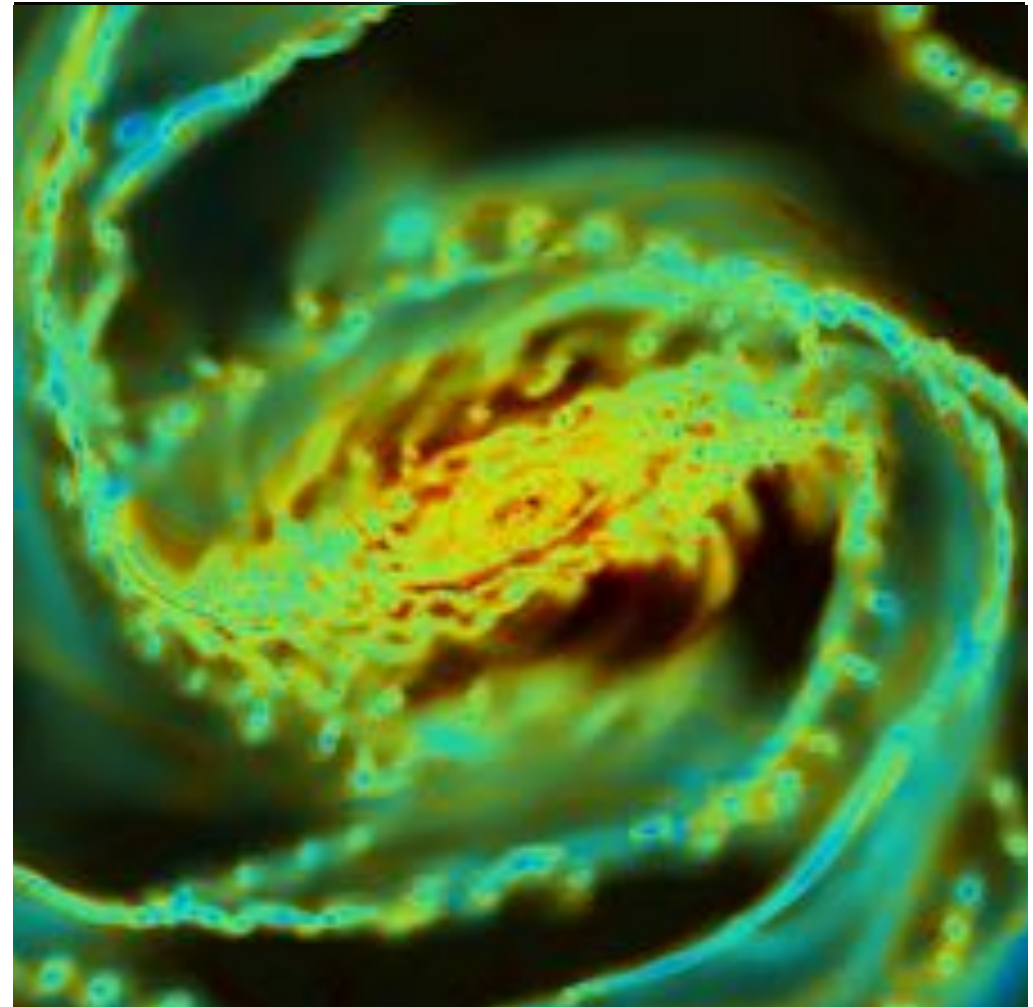
Particulièrement important au centre galactique

# Cisaillement

Emsellem, Renaud et al. (2015)



Lissage des surdensités



faible fort

cisaillement / gravitation

# Extrémités de la barre

Zones de convergence  
barre / spirales



Vue d'artiste par Nick Risinger

# Extrémités de la barre

Circulation le long de la barre  
(orbites  $x_1$ )

Contopoulos & Grosbol (1989)

> 200 km/s  
(20 Myr entre les 2 bouts)

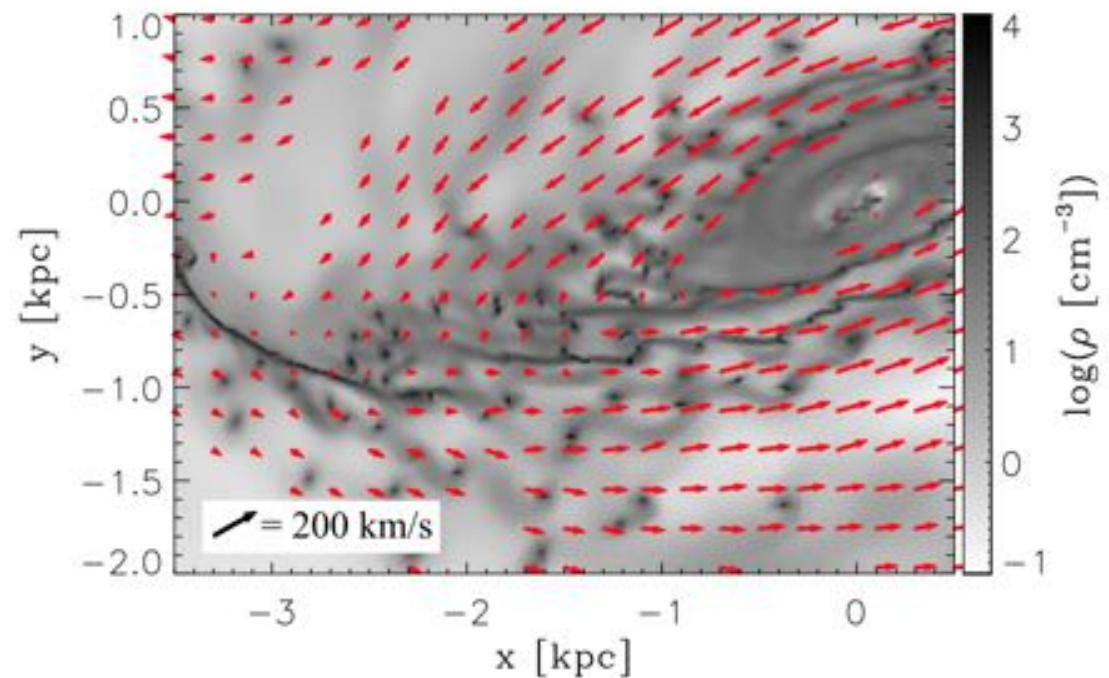
Extrémités = apocentres

Ralentissement

Embouteillage orbital

Kenney & Lord (1991)

Renaud et al. (2015)

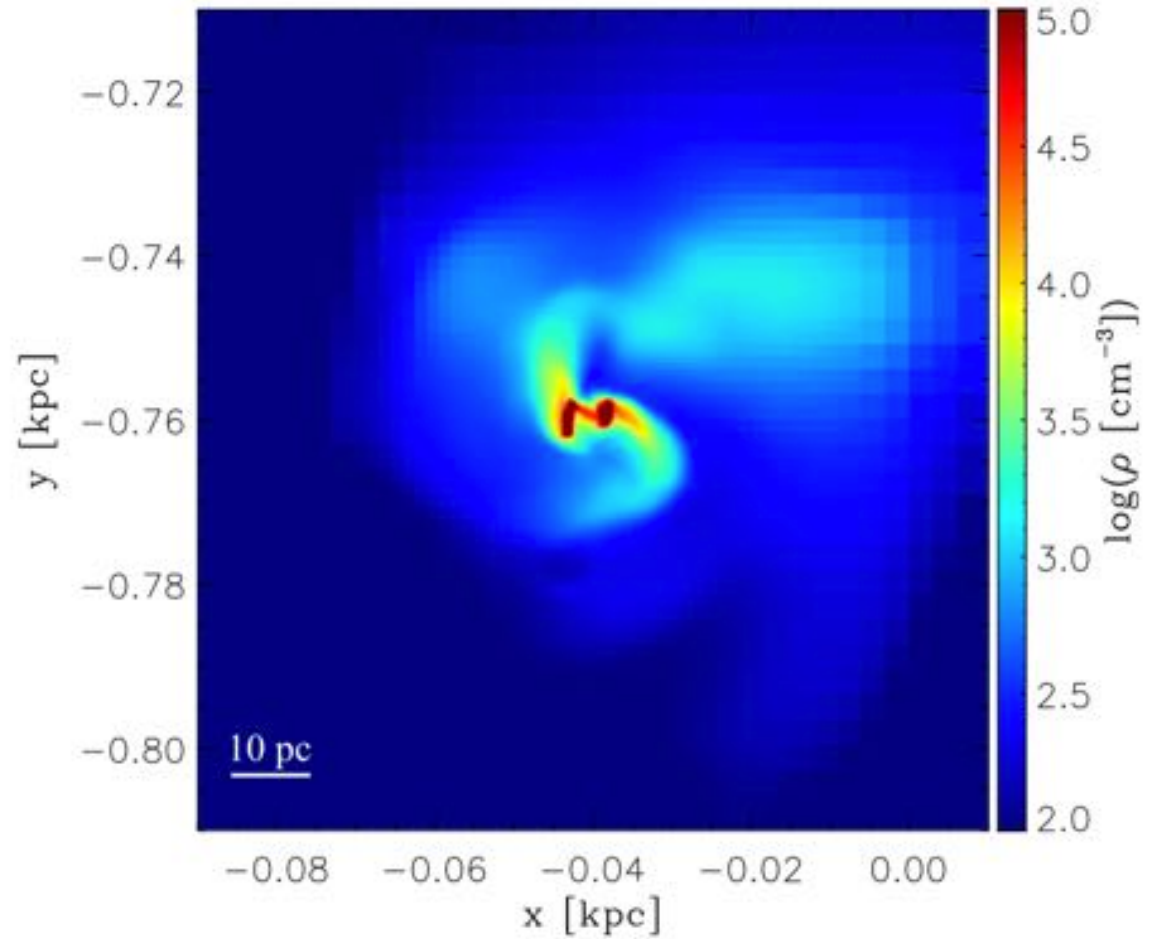




# Collisions nuage-nuage

Interactions et collisions

Renaud et al. (2015)



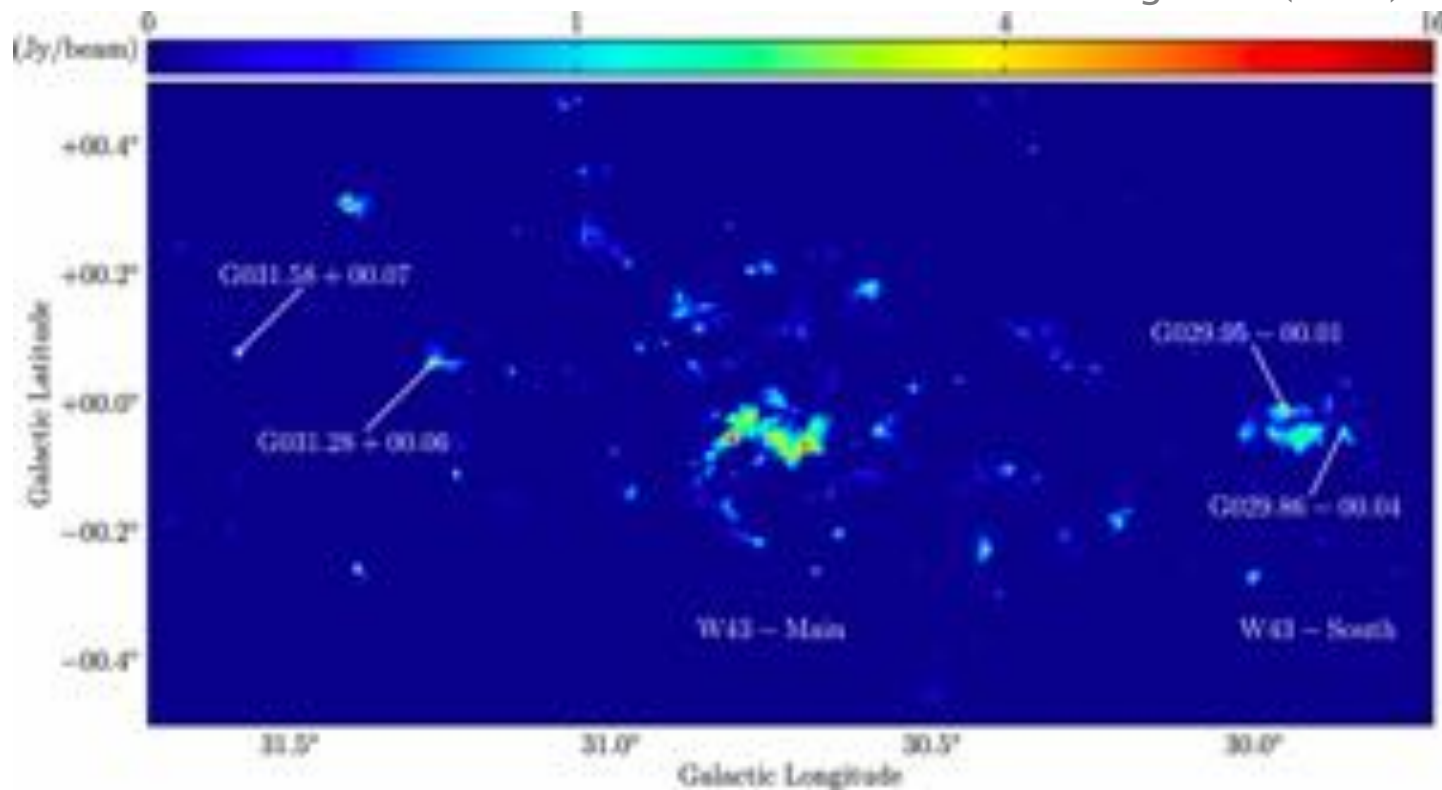
# Collisions nuage-nuage

## Formation d'associations moléculaires géantes

Carlhoff et al. (2013)

Motte et al. (2004)

Zhang et al. (2014)



# Augmentation de l'efficacité

Même processus que dans  
les interactions galactiques

Renaud et al. (2014, 2015)

Déclenchement de  
formation stellaire

Loren (1976)

Tan (2000)

Tasker & Tan (2009)

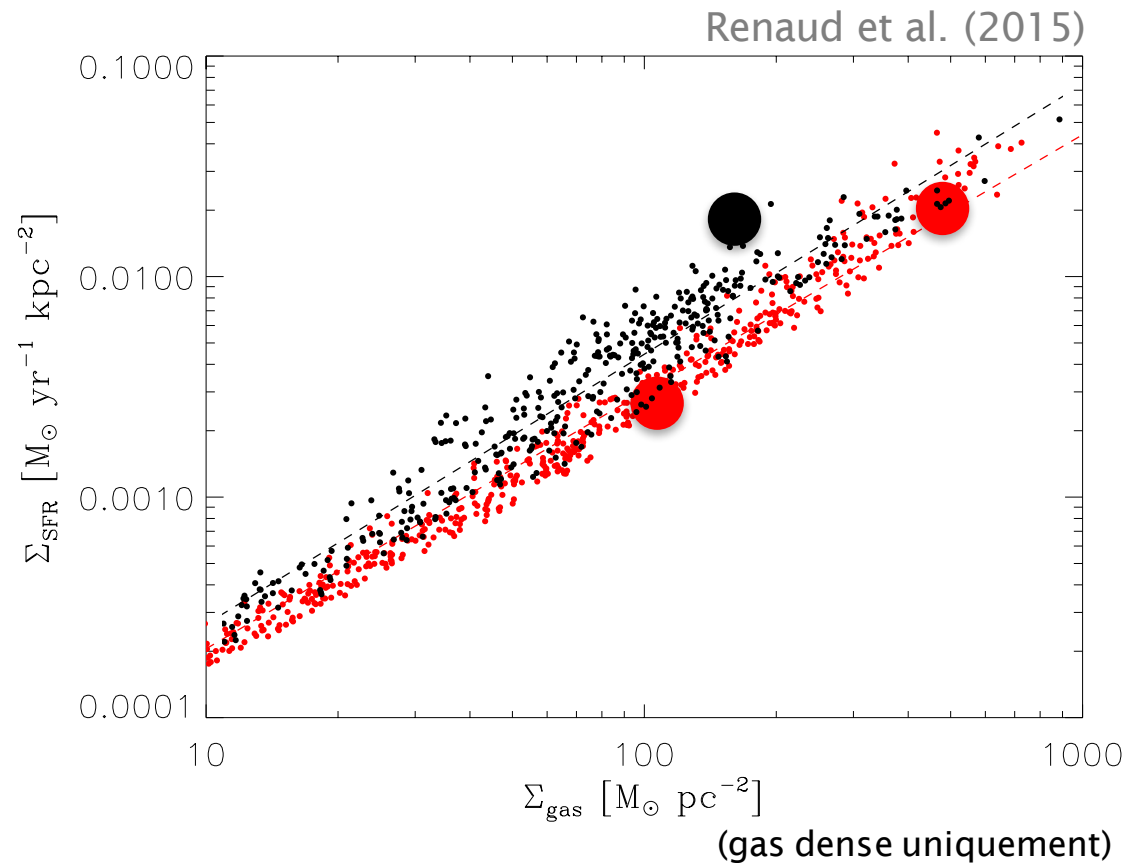
Inoue & Fukui (2013)

Sous la forme d'étoiles  
massives

Anathpindika (2010)

Motte et al. (2014)

Takahira, Tasker & Habe (2014)





– CONCLUSION –

**LA DIVERSITÉ DANS  
L'UNIVERSALITÉ**

# La diversité dans l'universalité

Variations dans le temps et l'espace des conditions physiques

- quantité de gaz
- turbulence
- composition chimique
- dynamique galactique

Apparente universalité de régions de formation

- morphologie filamentaire
- densités caractéristiques
- fonction de masse initiale

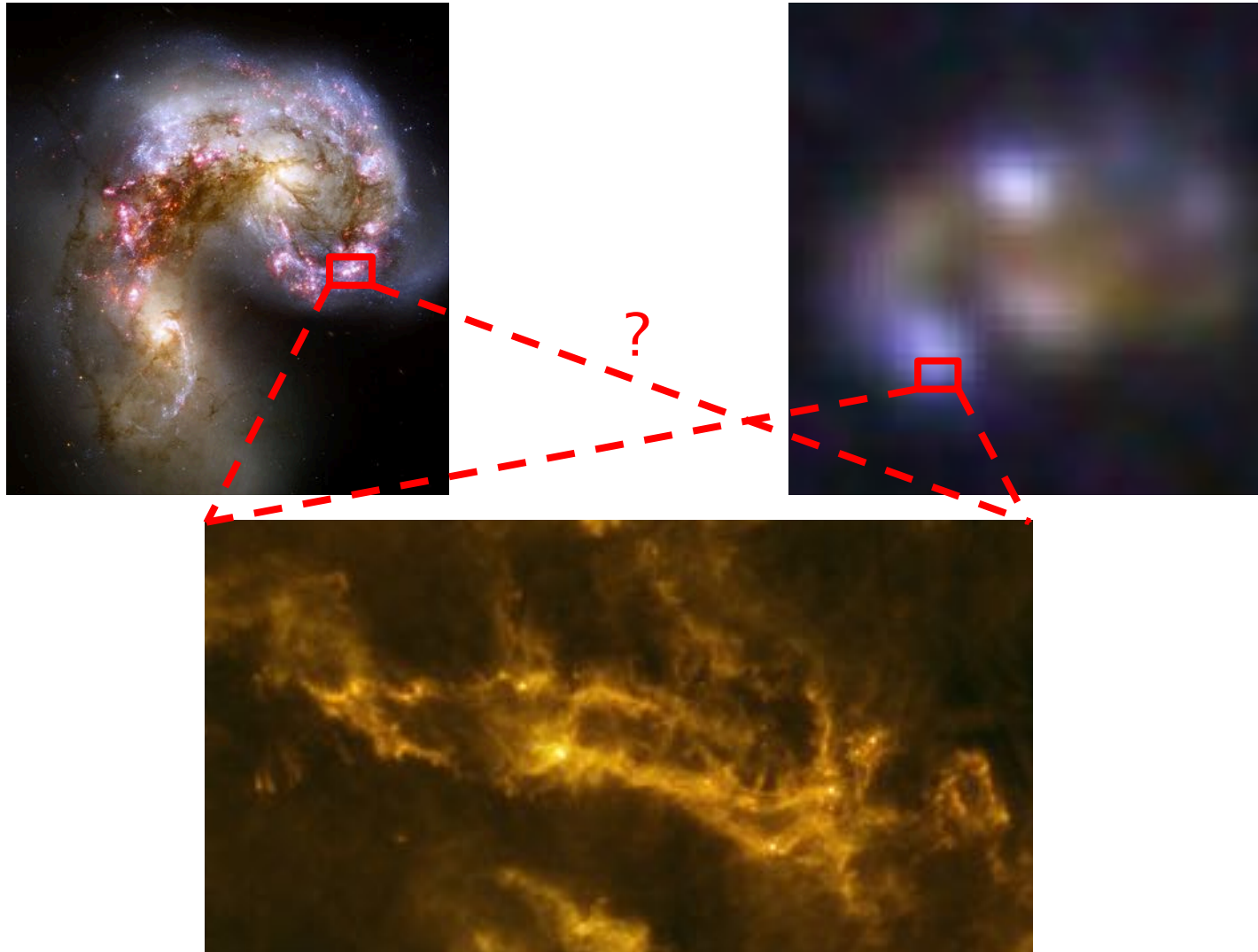
→ paradoxe

Incomplétude observationnelle ?

Manque de compréhension du couplage d'échelle ?

# Incomplétude observationnelle

Structure interne des sites de formation sondée uniquement dans le voisinage solaire



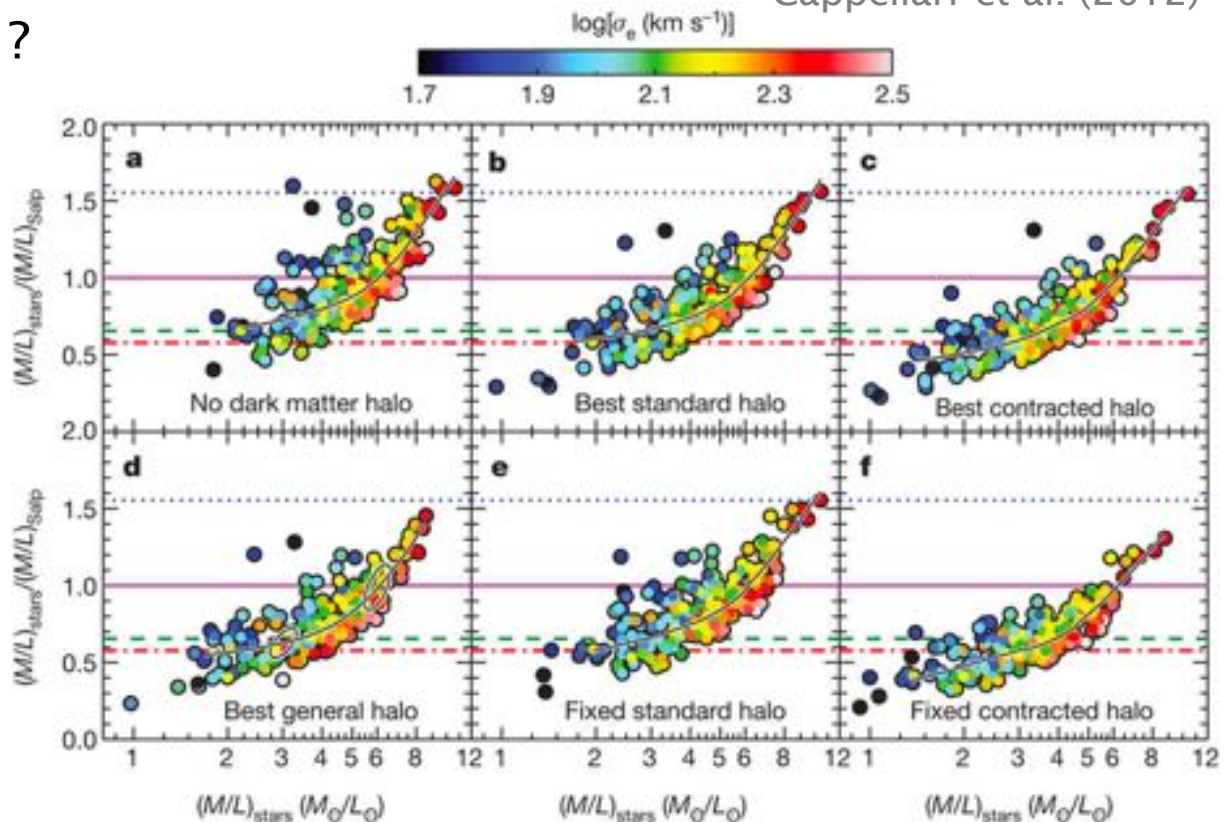
# Couplage d'échelle

Existe t'il une échelle en deçà de laquelle les différentes sont lissées ?

Par quel phénomène(s) ?

Dans quelles conditions ?

Cappellari et al. (2012)



Mais la fonction de masse initiale est-elle vraiment universelle ?

# INSTABILITÉS & FORMATION STELLAIRE

## *LA DIVERSITÉ DANS L'UNIVERSALITÉ*



**FLORENT RENAUD**  
UNIVERSITÉ DE LUND, SUÈDE