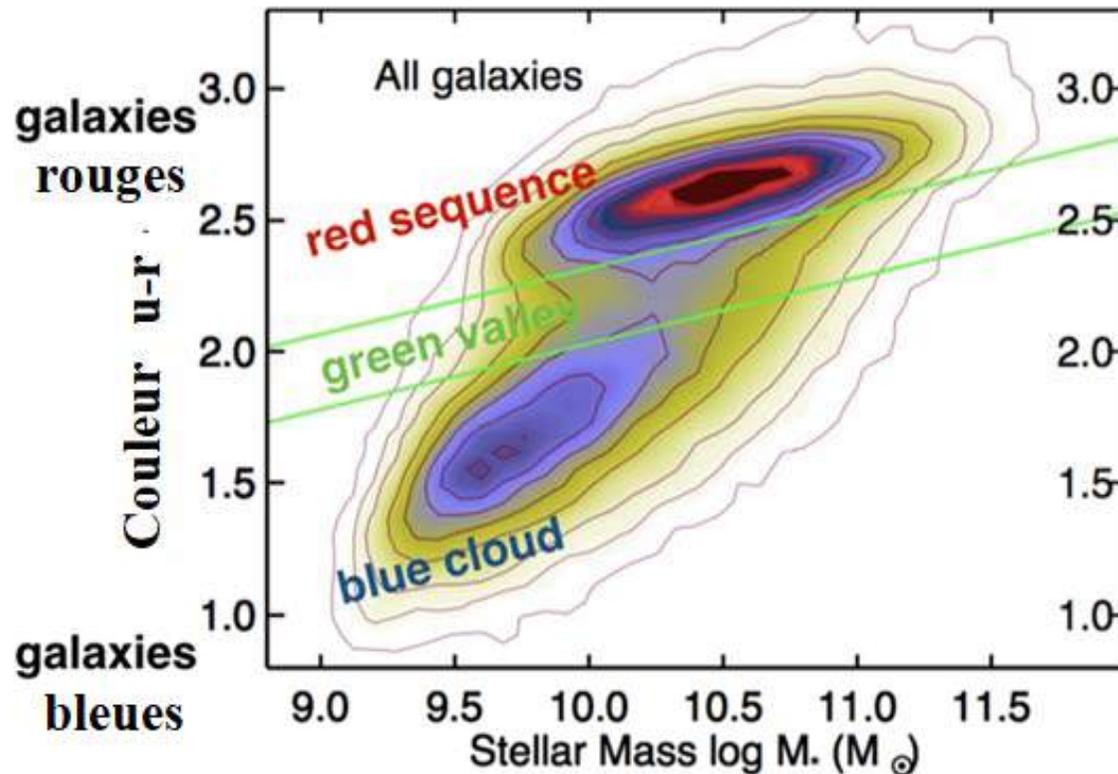




COLLÈGE
DE FRANCE
—1530—

Chaire Galaxies et Cosmologie

Séquence rouge et nuage bleu ou séquence de Hubble

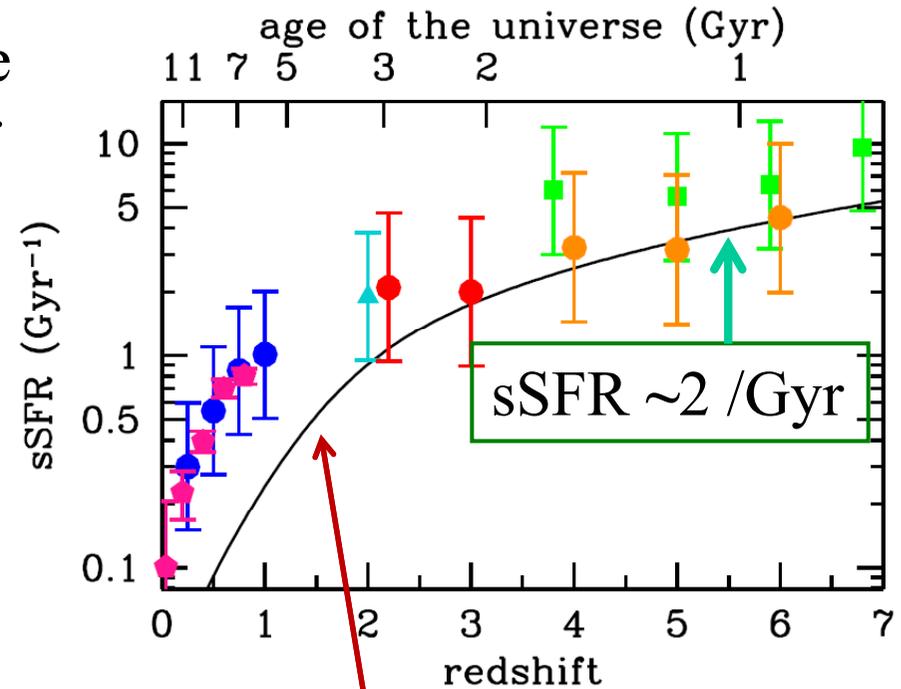
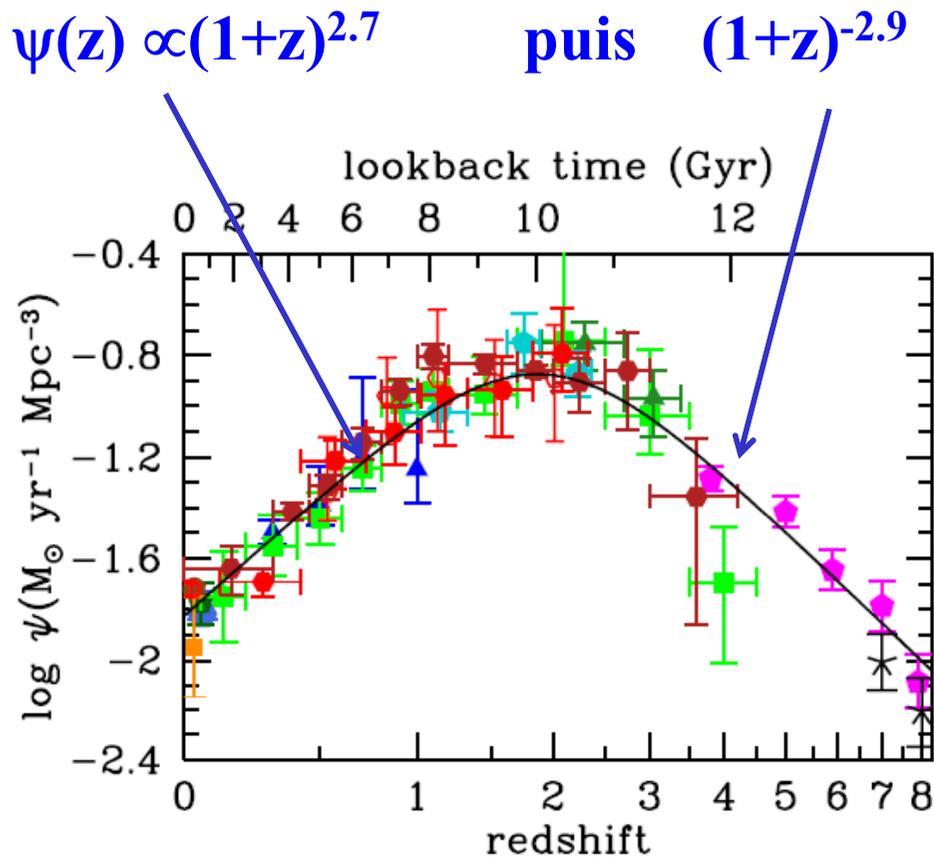


Françoise Combes



Histoire de la formation d'étoiles (SF)

Modèle de la densité de SF cosmique
 Ne correspond pas à $sSFR = SFR/M^*$



La majorité des galaxies
 sont passives

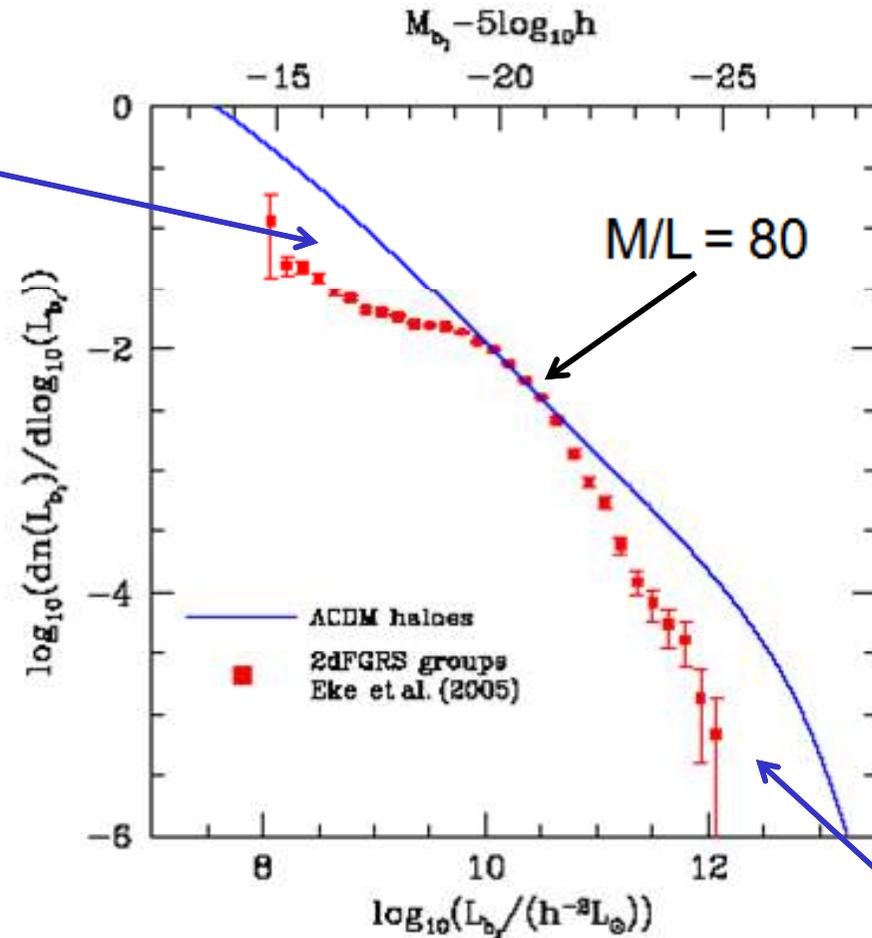
$$\Psi(z) = \int L \phi(L, z) dL \quad (\text{UV}, \text{IR})$$

Madau & Dickinson 2014

Comment stopper la formation d'étoiles?

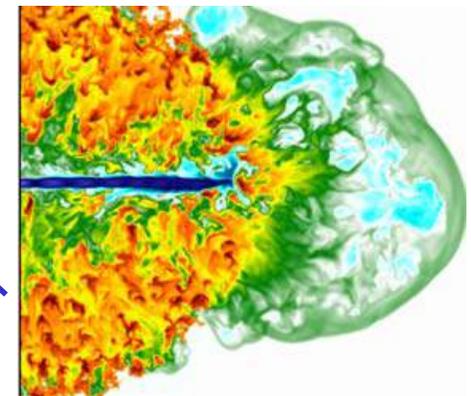


Formation de vents stellaires, supernovae



Plus de 80% des baryons sont hors des galaxies

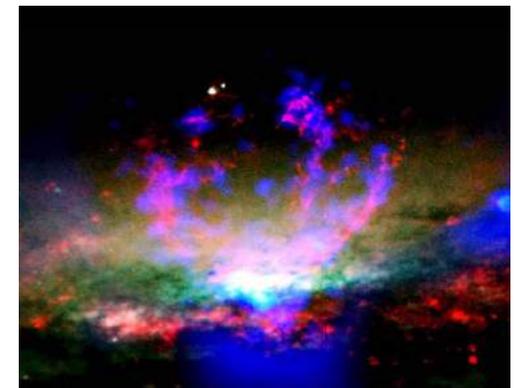
Feedback des AGN, jets



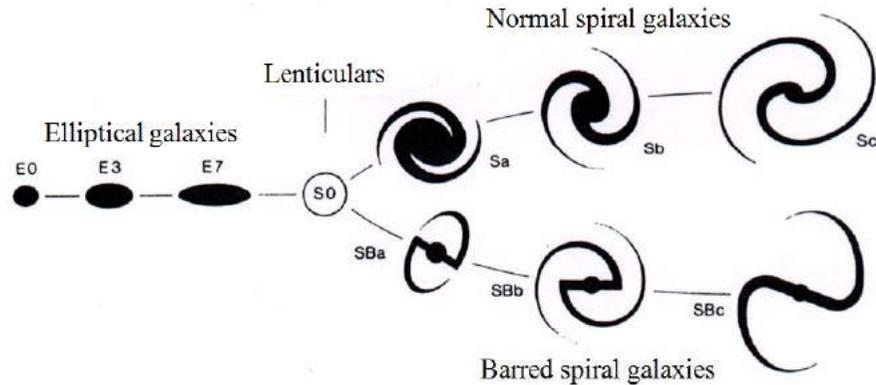
Baugh 2006, Eke et al 2006, Jenkins et al 2001



- 1- Les composantes bleues et rouges (disques & sphéroides)
- 2- Lois empiriques pour stopper la formation d'étoiles
- 3- Processus physiques associés: AGN
- 4- Effets d'environnement



1-de la séquence de Hubble à la séquence rouge



Un changement de paradigme

Baldry et al 2004

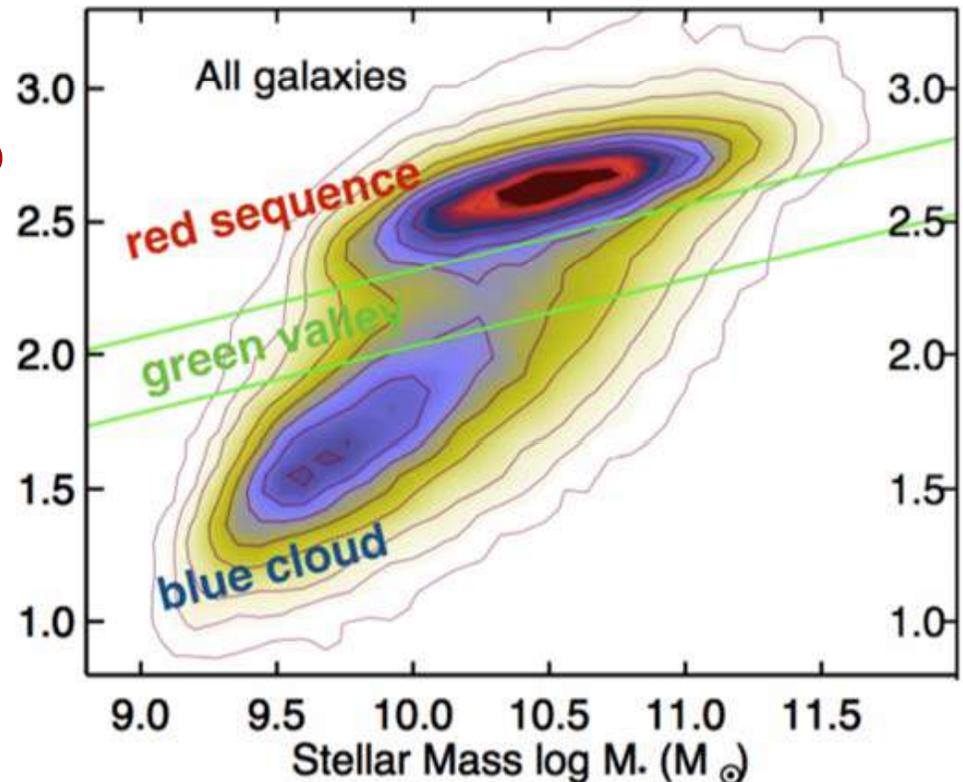
Schavinski et al 2014

Diagramme Couleur-Magnitude
150 000 galaxies dans le SDSS

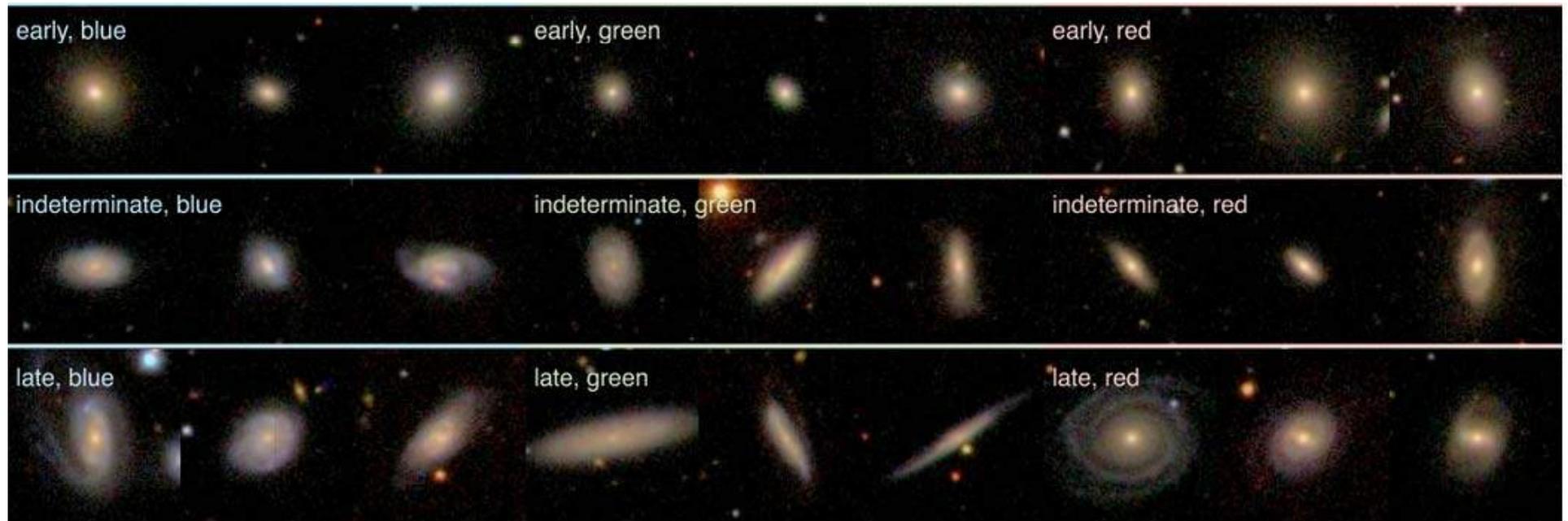
→ Paramètres: essentiel SFR
Et aussi SFH, poussière, âge,
métallicité

→ 2 mécanismes de formation
Masse* critique $3 \cdot 10^{10} M_{\odot}$

← Bleu Couleur Rouge →



Le Zoo des Galaxies



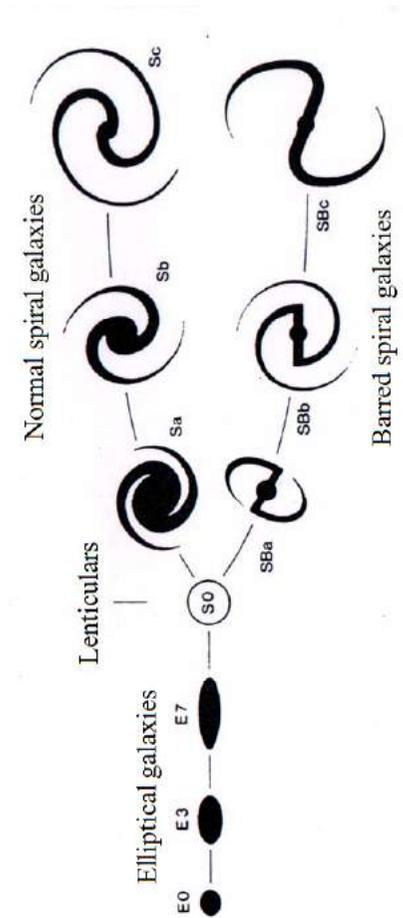
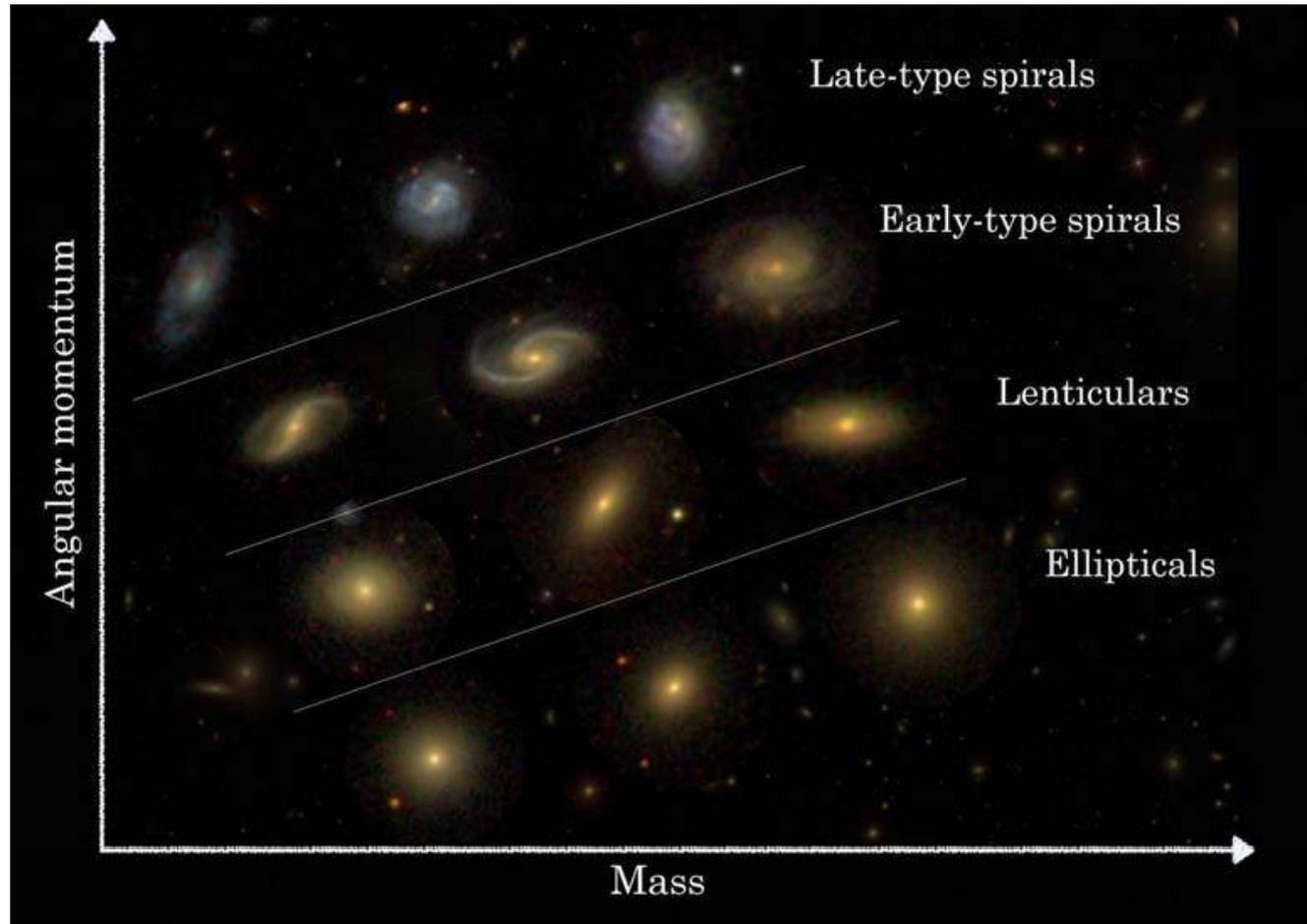
La première partie a reçu des **millions** de classifications (depuis 2007)
SDSS, puis CANDELS, DECals, Computer images, GAMA, KIDS
Maintenant le galaxy Zoo-4 (7/2017): 1 million de galaxies à classifier



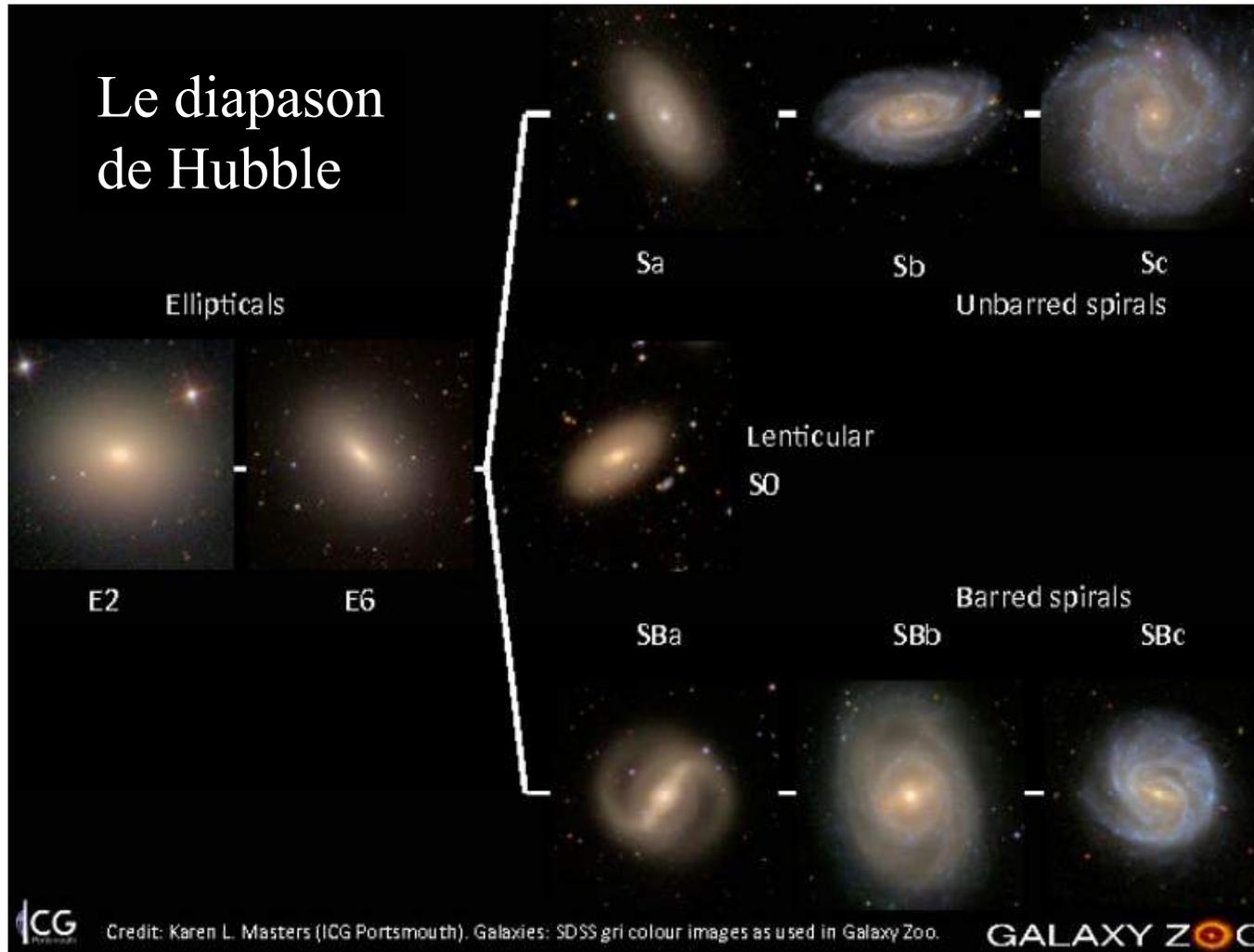
Archives des publications (55)

Moment Angulaire

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



Lien avec la séquence de Hubble



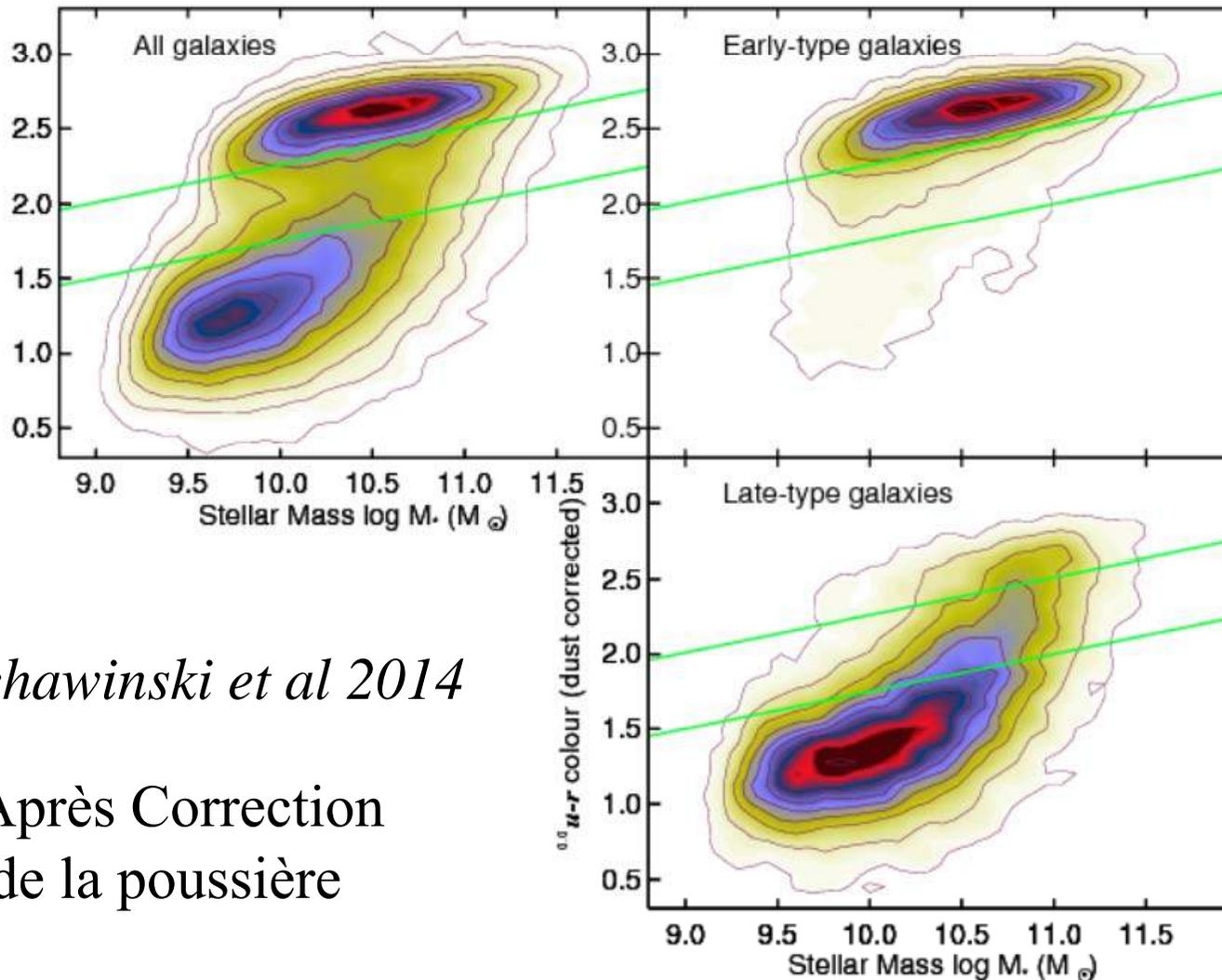
La couleur évolue
--avec la fraction
de gaz (SF)
--avec le rapport B/T
--avec l'âge des *
--la morphologie

Et la poussière?

Existe-t-il vraiment une vallée verte?

Dans la séquence rouge, la formation d'étoiles est brutalement stoppée

←Bleu Couleur Rouge→



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

Fusions majeures
versus
Accrétion lente
de gaz?

Schawinski et al 2014

Après Correction
de la poussière

Les grands surveys: SDSS, 2dF, MGC..

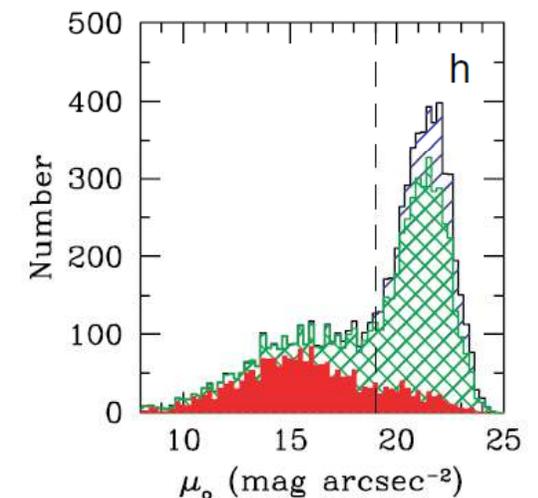
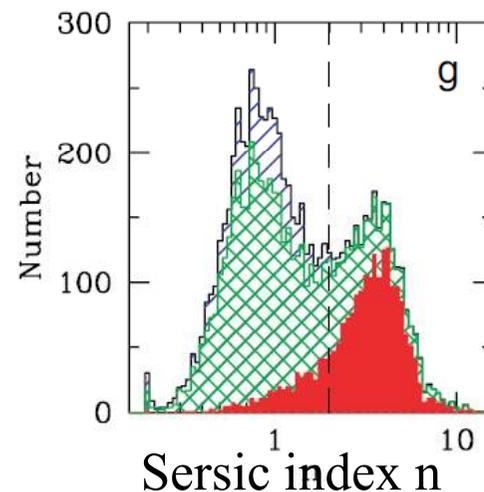
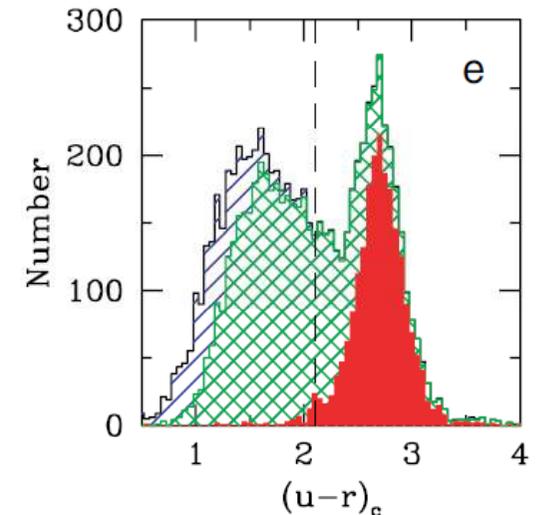
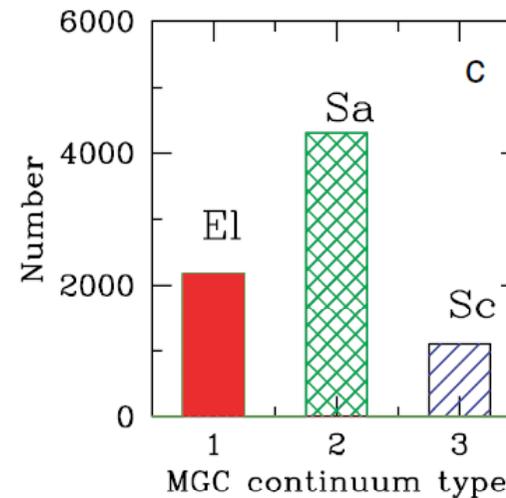
Bimodalité: 2 composantes
Rouge, vieille, non-SF, haute concentration
Bleue, jeune, SF, faible concentration

« **Downsizing** »

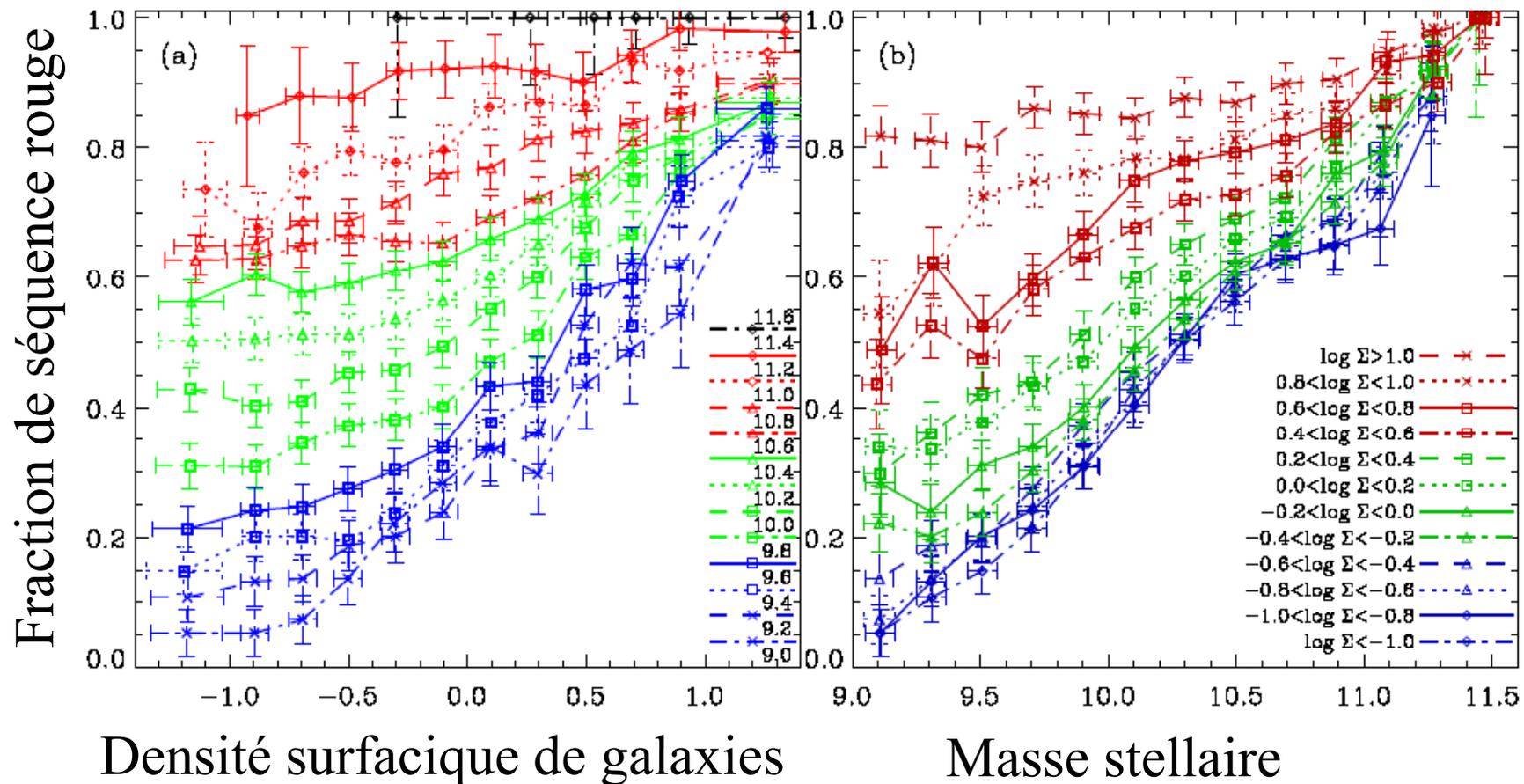
Les galaxies massives
Rouges, type « early »
n'évoluent plus
seulement passivement

La formation d'étoiles
se produit aujourd'hui dans
les spirales et naines

S. Driver et al 2006



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



Baldry et al 2006

L'histoire de la SF dépend de la densité de surface

LSB/naines, riches en gaz, SF intense et jeune

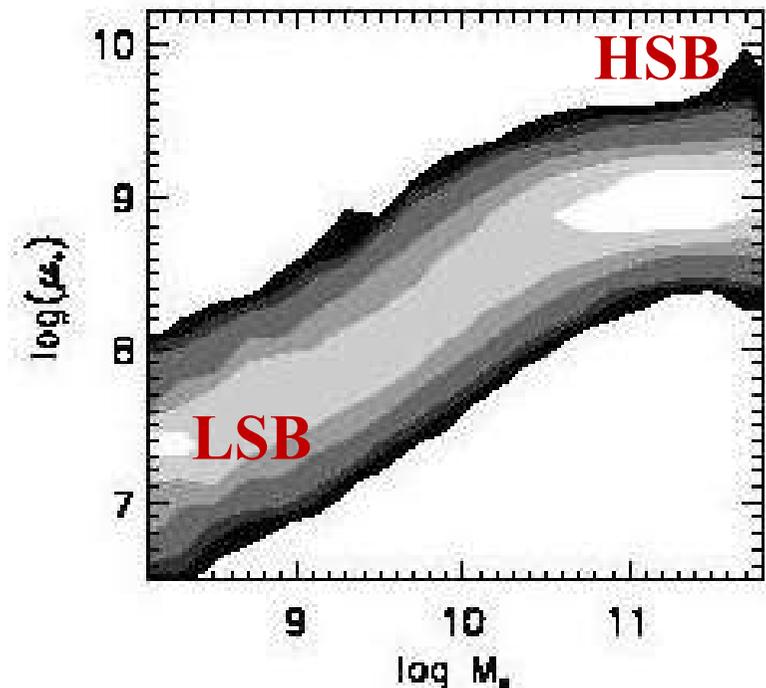
HSB massives, concentrées, population vieille d'étoiles

Transition à $M_* = 3 \cdot 10^{10} M_\odot$, $3 \cdot 10^8 M_\odot/\text{kpc}^2$

L'histoire de la SF dépend plus de la densité de surface que de la masse

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

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



Kauffmann et al 2003

Origine de la bimodalité

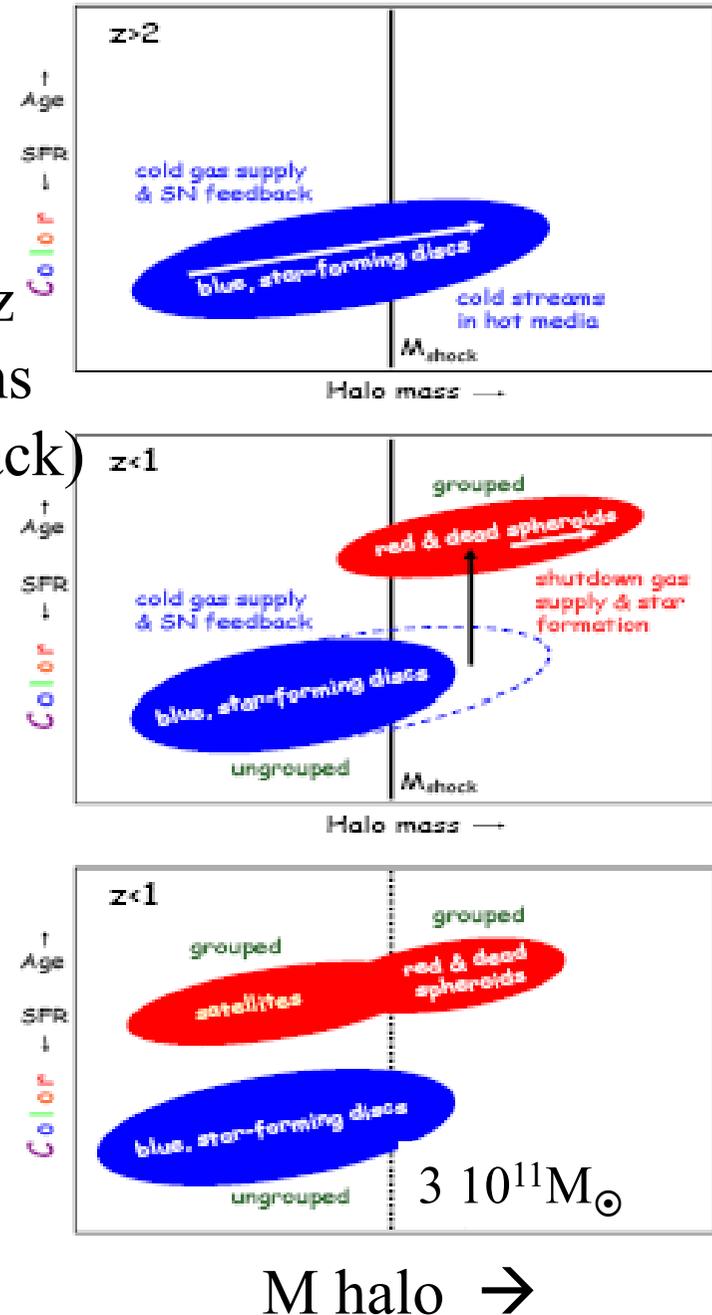
→ Au-dessus d'un halo $M = 3 \cdot 10^{11} M_{\odot}$, le gaz n'est plus accrété froid, mais est chauffé dans les chocs, et ne refroidit plus (+AGN feedback)

Dekel & Birnboim 2006

Keres et al 2005

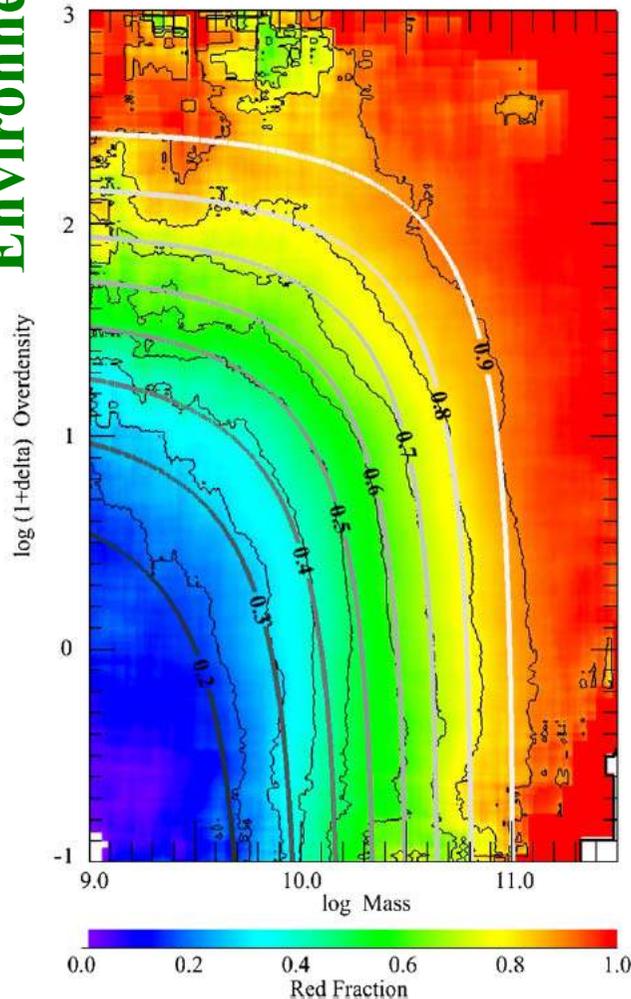
→ Ou bien au delà d'une densité de surface Σ^* ($3 \cdot 10^8 M_{\odot}/\text{kpc}^2$), le gaz est rapidement transformé en étoiles, et le temps passé dans le nuage bleu est court

Kauffmann et al



2- Lois empiriques pour stopper la SF

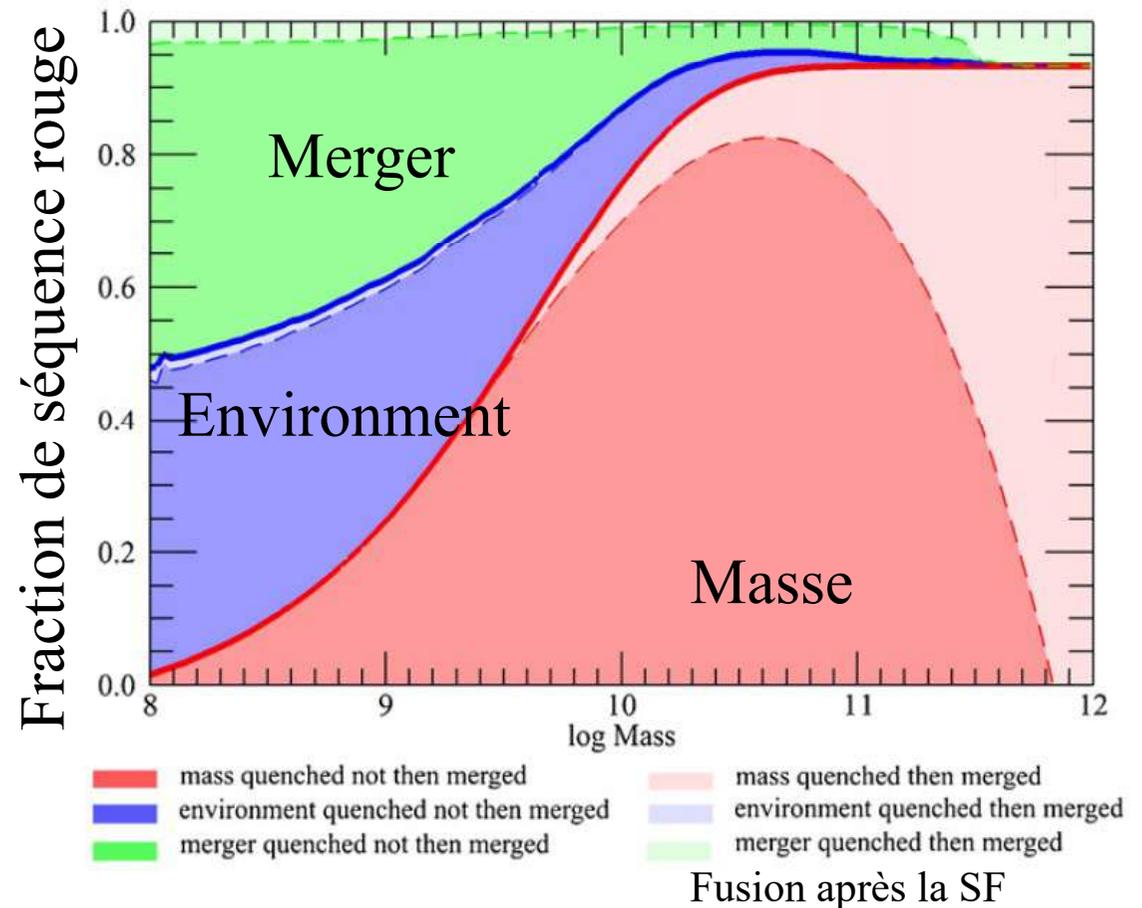
Environnement



Masse

Peng et al 2010

Histoire des galaxies passives à $z=0$



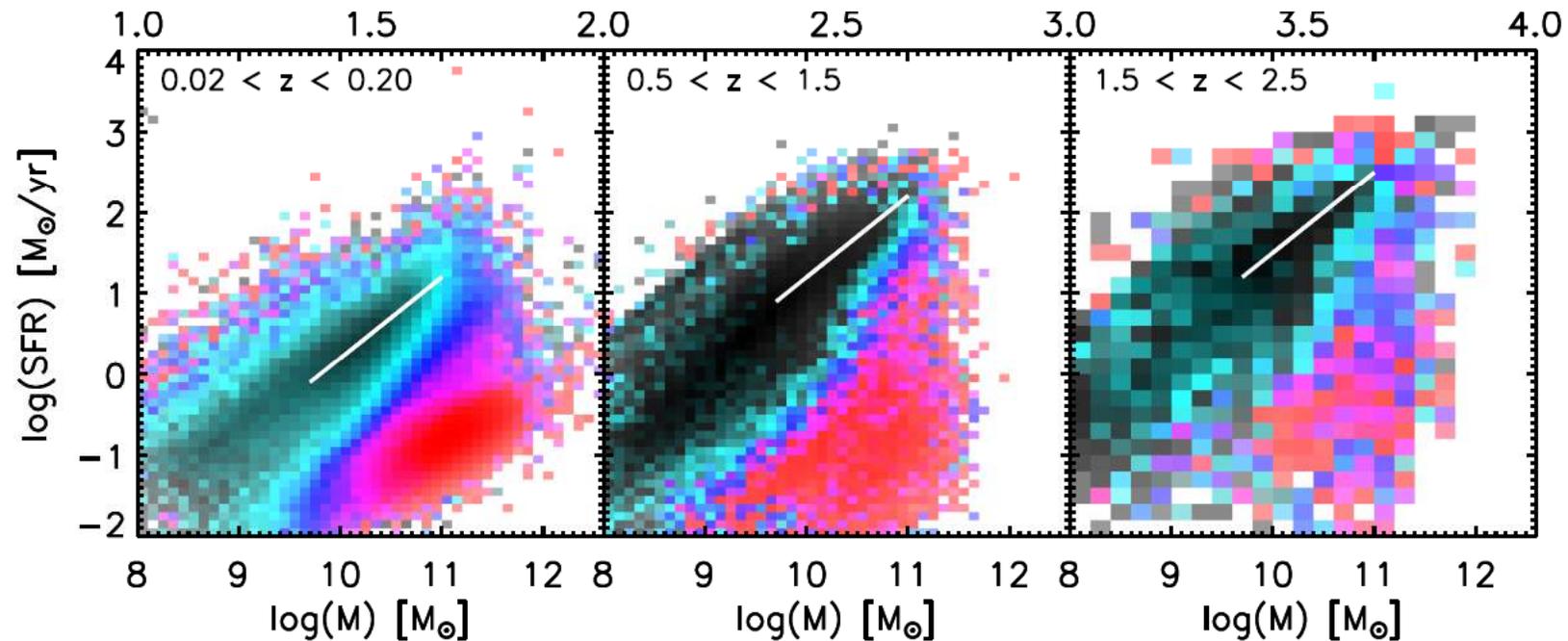
Séparabilité des deux facteurs

Masse et environnement

La séquence principale des galaxies à SF

800 000 galaxies: corrélation entre morphologie et population stellaire depuis $z \sim 2.5$, les **galaxies** sur la séquence principale sont des **disques exponentiels**

Les systèmes passifs sont des sphéroïdes (indice de Sersic $n > 2$)



90% de la formation d'étoiles cosmique se fait sur la séquence principale (pente ~ 1)

Wuyts et al 2011

3- Processus physiques pour stopper la SF

Plusieurs mécanismes

→ Couper l'approvisionnement: Lent (2-4 Gyr)

Halo massifs, Effets de l'environnement
(étouffement, pression dynamique, forces de marée)

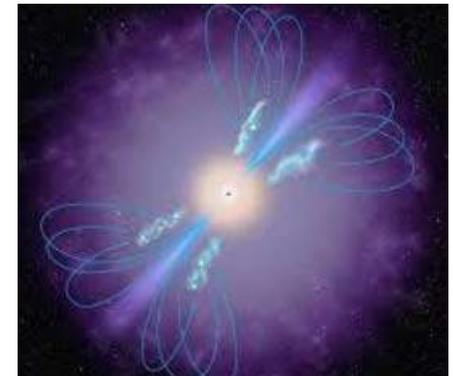


→ Stabiliser le gaz: Lent

Formation de bulbes, et stabilisation par la morphologie

→ Ejecter le gaz présent: Rapide (<~0.1 Gyr)

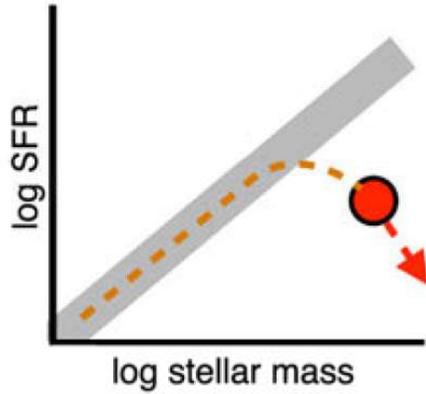
Feedback des supernovae et des AGN (vents, jets)



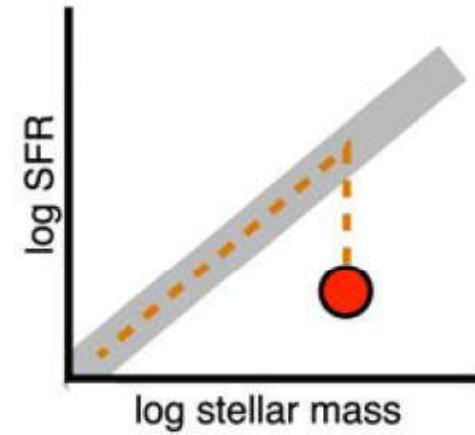
→ Chauffer le gaz (transitoire) Rapide

Turbulence par interactions de galaxies, SN feedback
Le gaz dissipe son énergie, et la SF revient

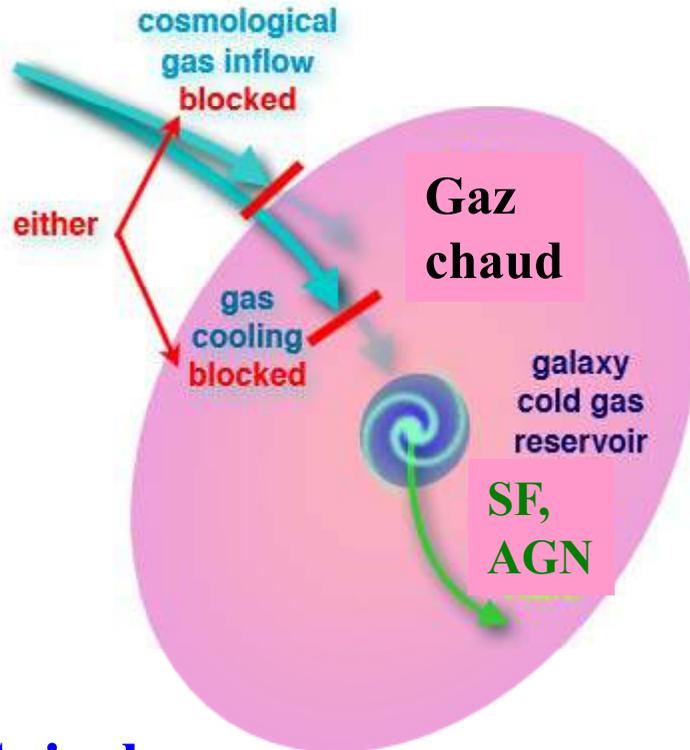
Passage dans la vallée verte



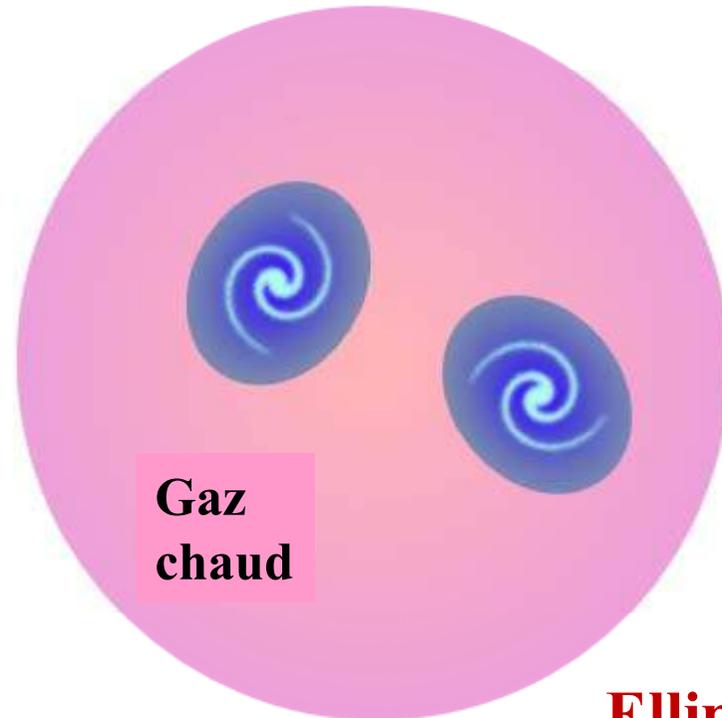
Echelles de temps différentes
2-4 Gyr



100 Myr



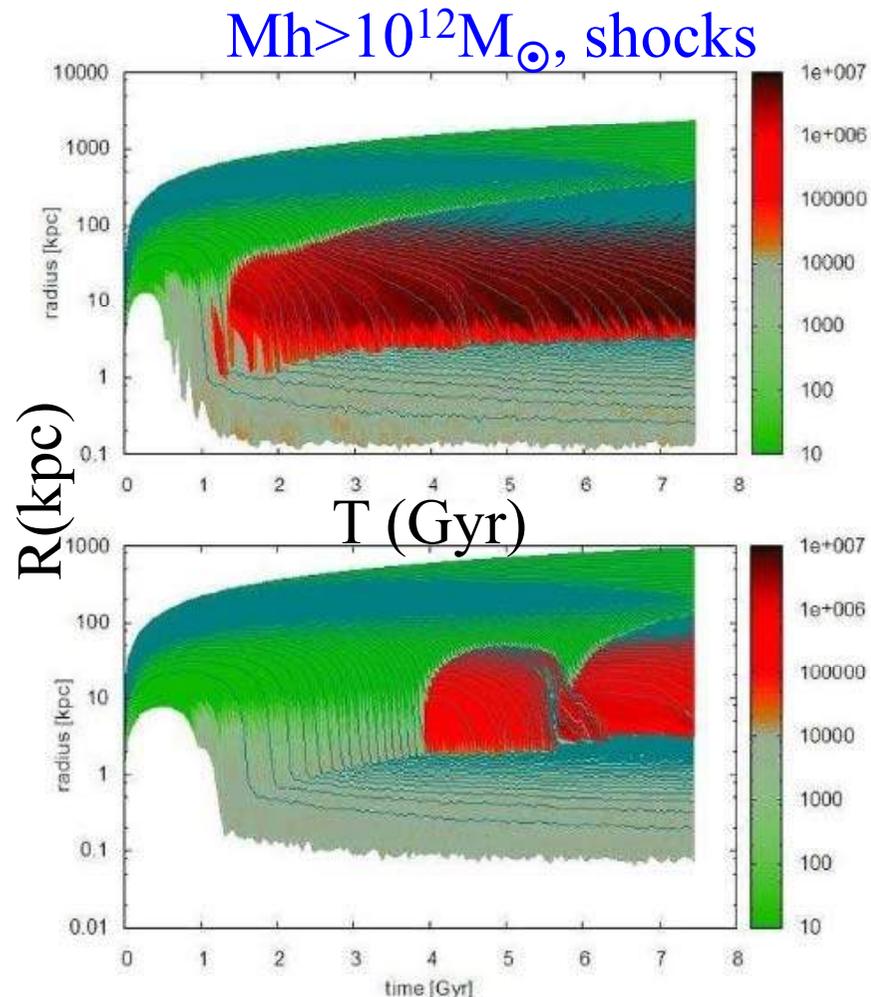
Spirales



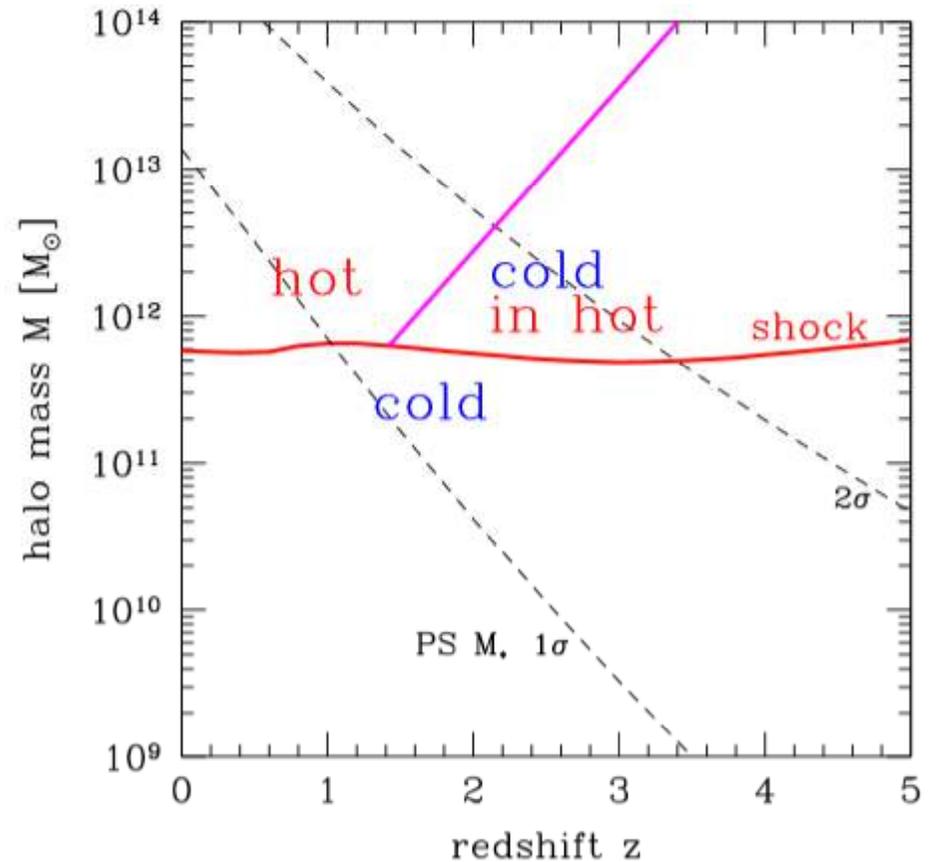
Elliptiques

Schawinski 2013

Halos massifs



$M_h < 10^{12} M_\odot$



Dépend de la masse du halo
 Peut stopper l'alimentation en gaz
 déjà dans les groupes → séquence rouge

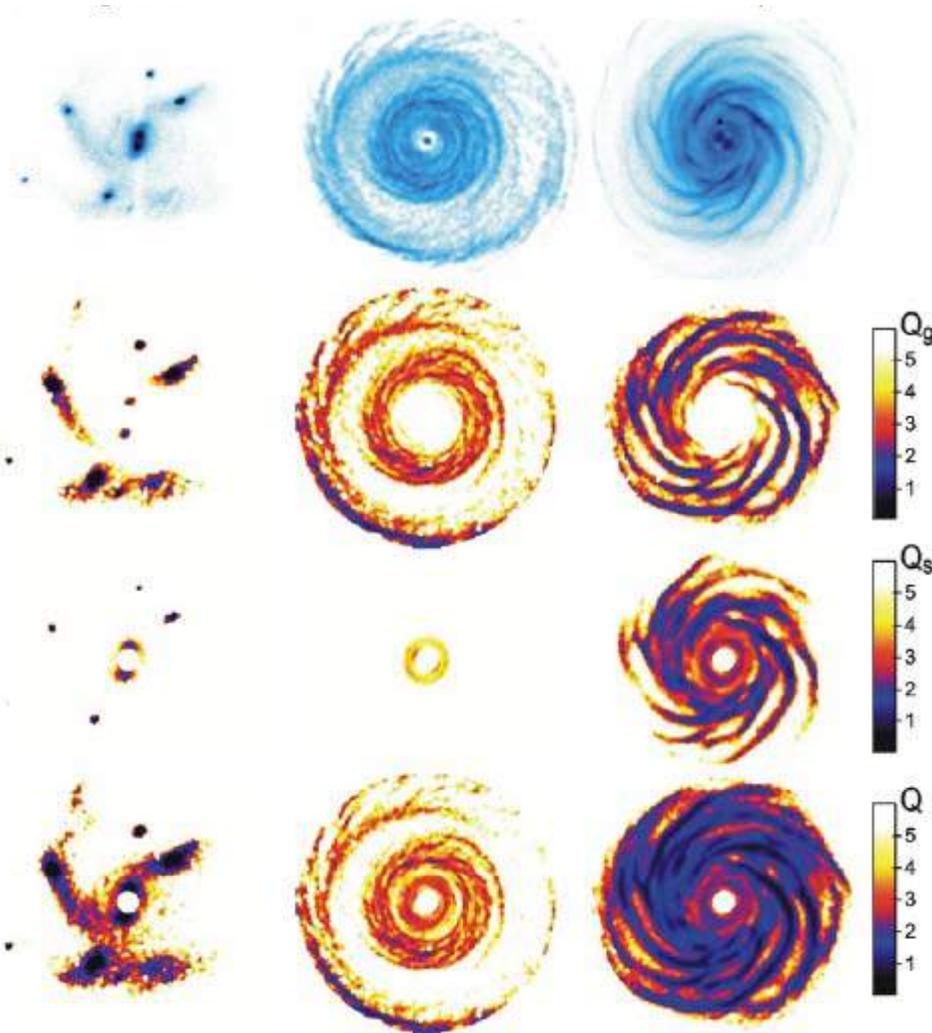
Dekel & Birnboim 2005

Stopper la formation d'étoiles par un bulbe

3.5Gyr

10Gyr

13.7Gyr



Les disques seuls sont très instables

Bulbes et condensations centrales stabilisent les disques

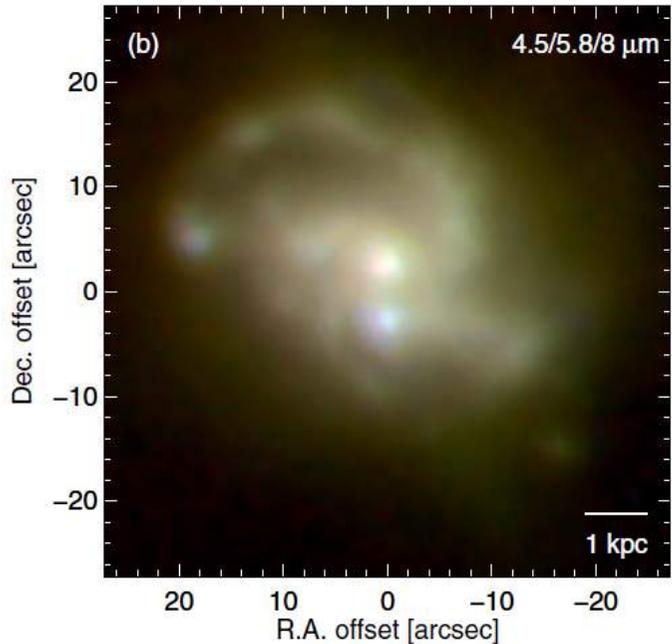
Paramètre de Toomre $Q = \sigma / \sigma_{\text{crit}}$

$$\sigma_{\text{crit}} = 3.36 G\Sigma / \kappa$$

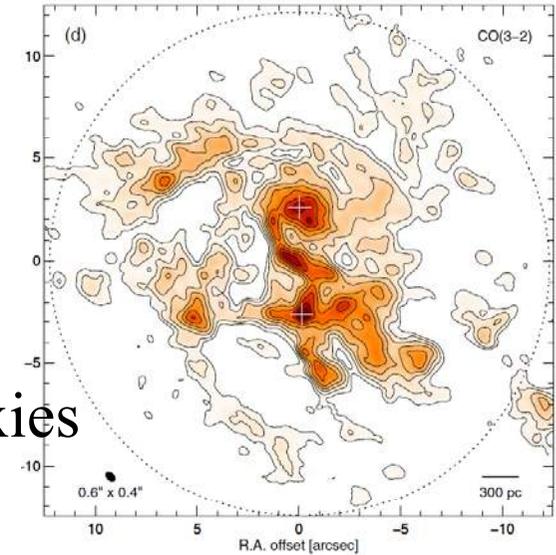
Le bulbe fait croître κ , et Q
si σ et Σ restent constants

Martig et al 2009

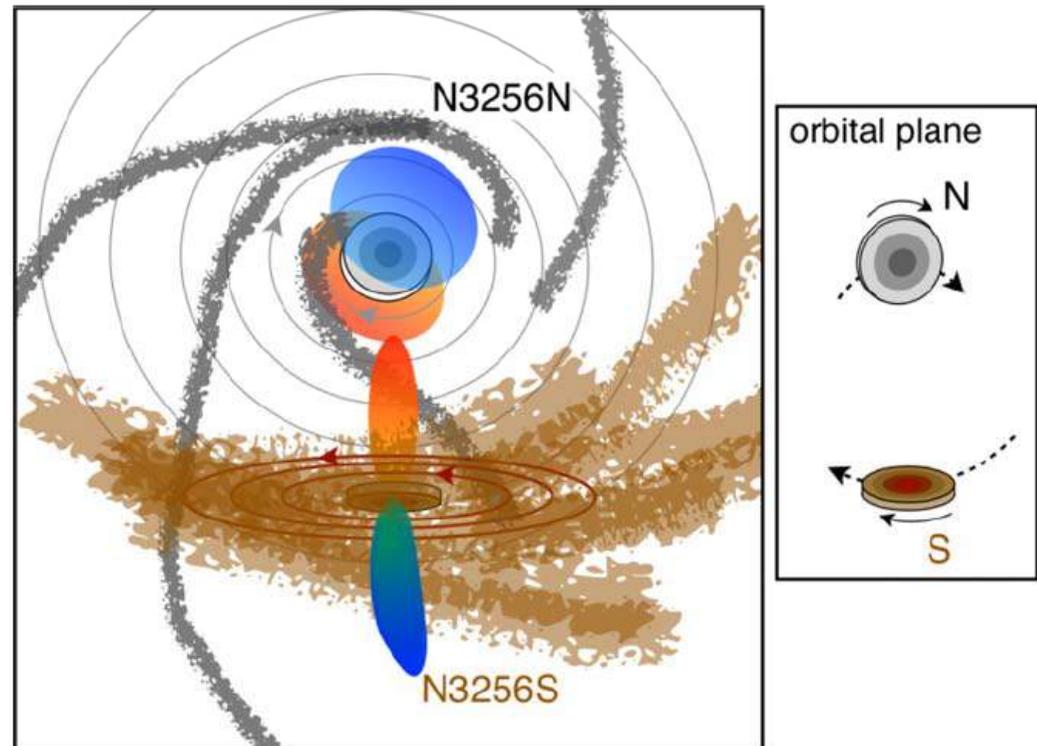
Les vents galactiques



Obs ALMA CO(3-2)
Starburst: N3256
Dû à une fusion de galaxies
ULIRG $z=0.01$

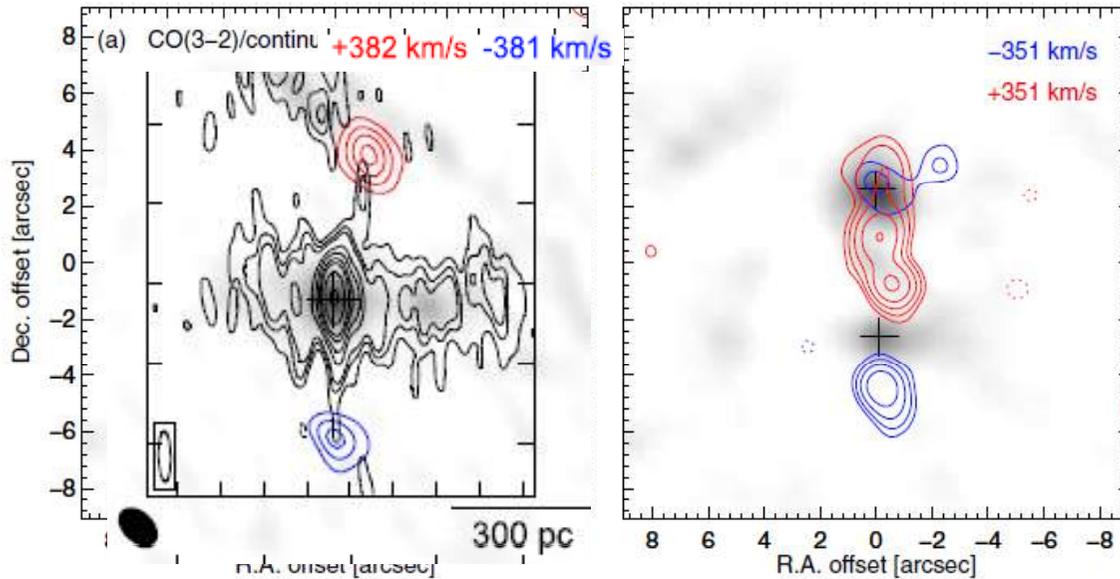


Gaz à grande vitesse dans les deux noyaux!
L'un est vu par la tranche, l'autre de face



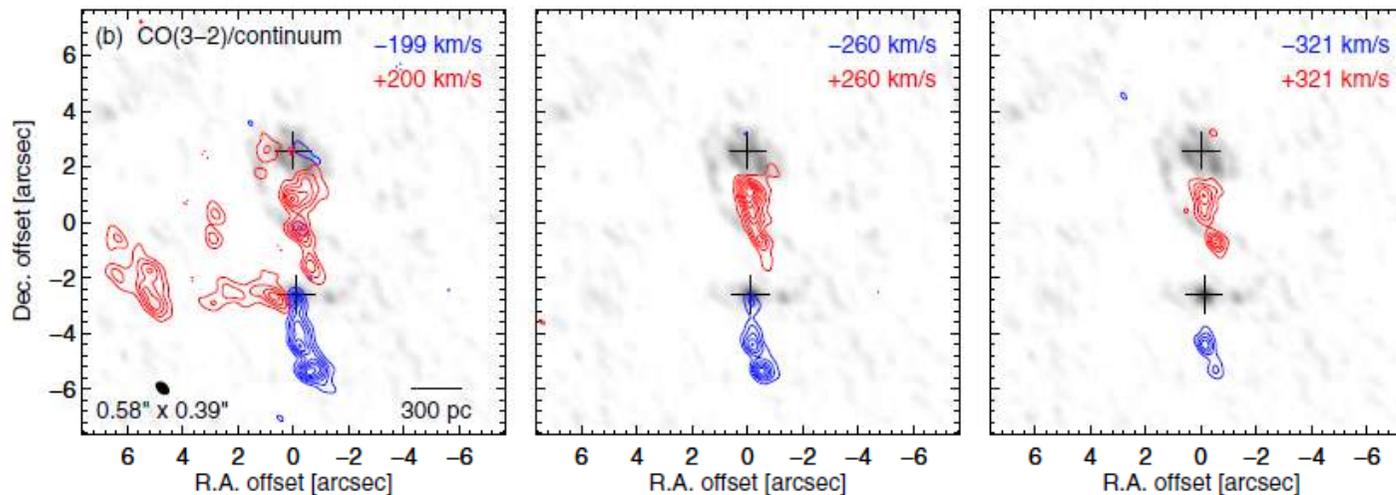
Sakamoto et al 2014

Deux flots bipolaires, $\tau \sim 1$ Myr



Au Nord, flot dû à la SF
 $V > 750 \text{ km/s}$, $60 M_{\odot}/\text{yr}$
Très grand angle

Au Sud, flot dû à l'AGN
 $V \sim 2000 \text{ km/s}$ jusqu'à 300 pc
 ➤ $50 M_{\odot}/\text{yr}$
 ➤ Hautement collimaté



Flot comparable
 au taux SFR
 ➔ stoppe la SF
 efficacement?

Deux modes pour le feedback des AGN

Quasar: mode radiatif ou vents

Quand L proche d'Eddington, jeune quasar, à grand z

$$L_{\text{Edd}} \sim M_{\text{BH}}/\sigma_{\text{T}} \rightarrow M_{\text{BH}} \sim f \sigma_{\text{T}} \sigma^4, \text{ f fraction de gaz}$$



Même considération avec la pression de radiation sur la poussière σ_{d}

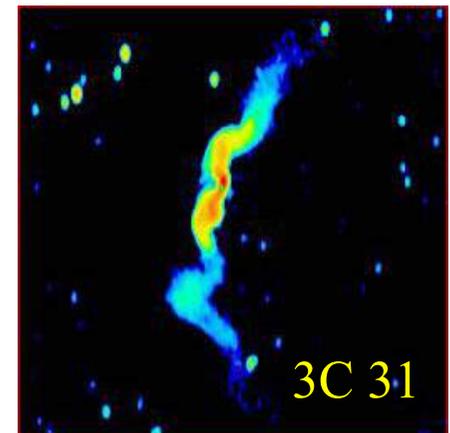
$$\sigma_{\text{d}}/\sigma_{\text{T}} \sim 1000, \text{ limitation de } M_{\text{bulbe}} \text{ à } 1000 M_{\text{BH}} ?$$

Mode radio, ou mode cinétique: jets

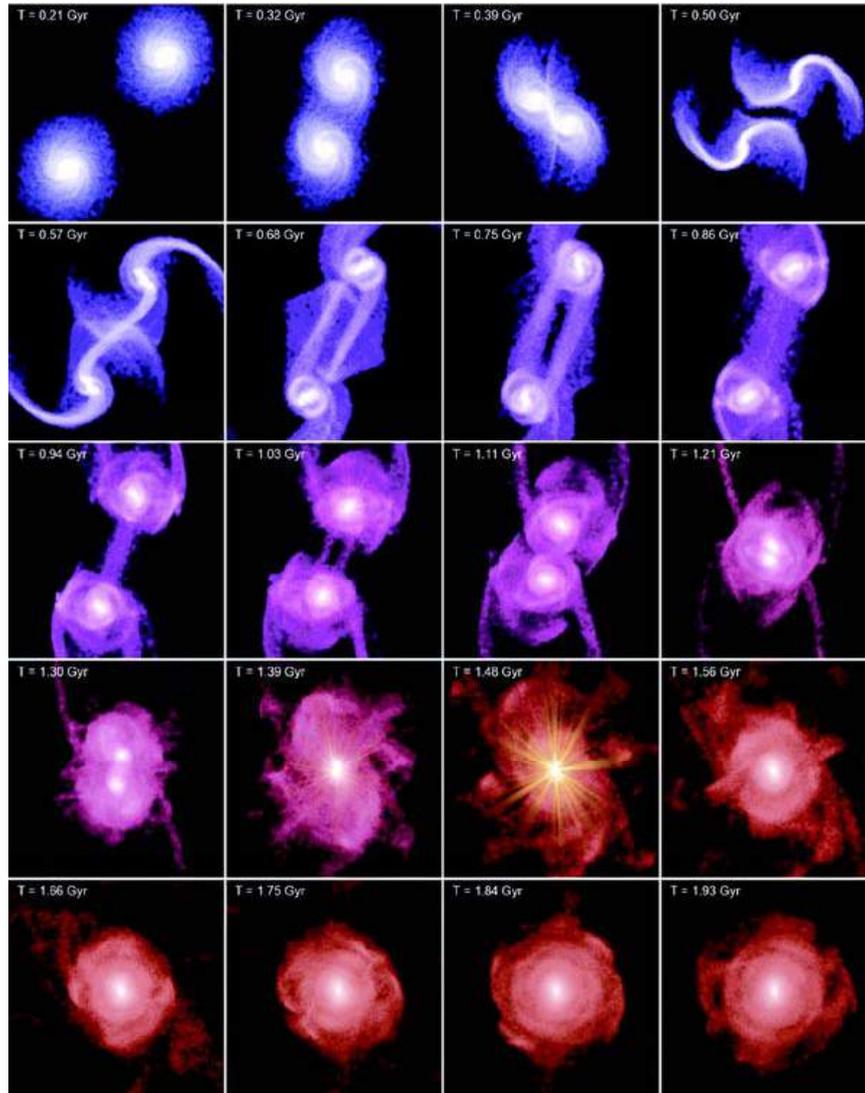
Quand $L < 0.01 L_{\text{edd}}$, faible z , Galaxies massives, radio

Flot inefficace à rayonner (ADAF)

Grande fréquence des flots de refroidissement dans les amas, AGN de faible luminosité, Seyferts



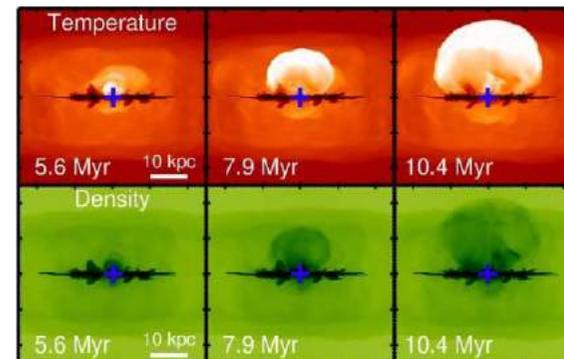
Dans les simulations (mode quasar)



*Springel et al. (2003-2005),
Hopkins et al. 2006*

SFR $\sim \rho^n$ avec $n=1, 1.5, 2$
feedback des SN +
croissance des trous noirs

**Physique sous-grille, recettes
Quantifier le feedback?**



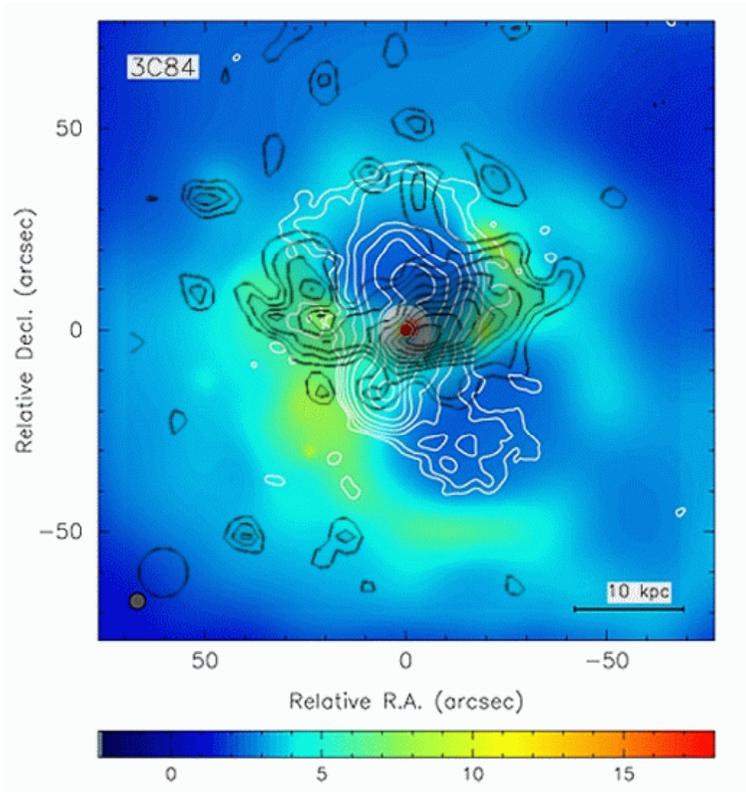
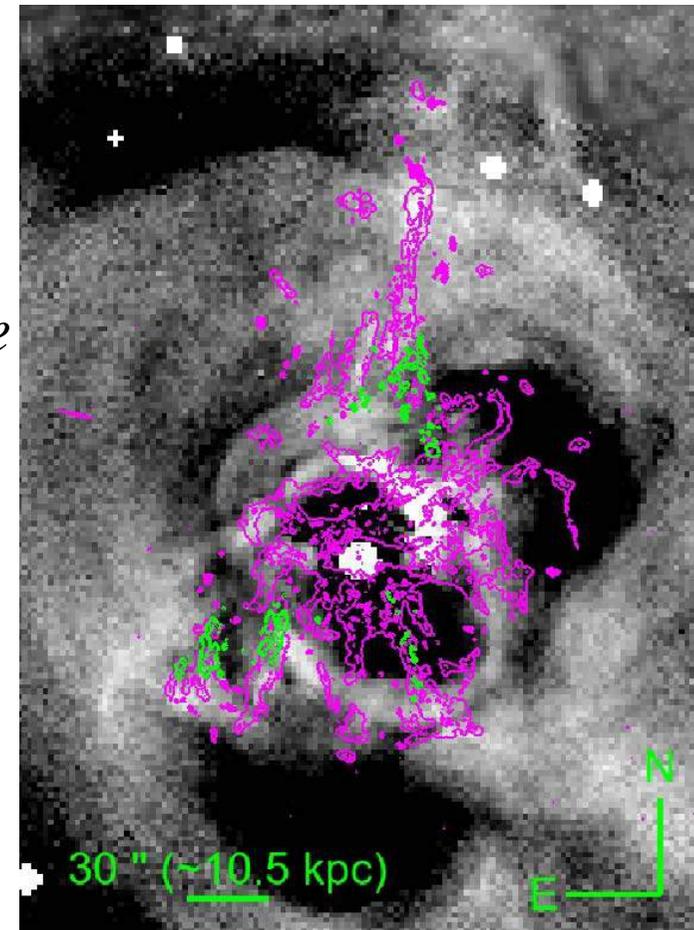
Gabor & Bournaud 2014:
Pas d'effet sur la SF

X-ray Perseus A, Fabian et al 2003



Flots de refroidissement

*Formation d'étoiles (vert)
Canning et al 2014*



*Gaz moléculaire
Salomé
et al 2006*

Gaz froid dans les filaments

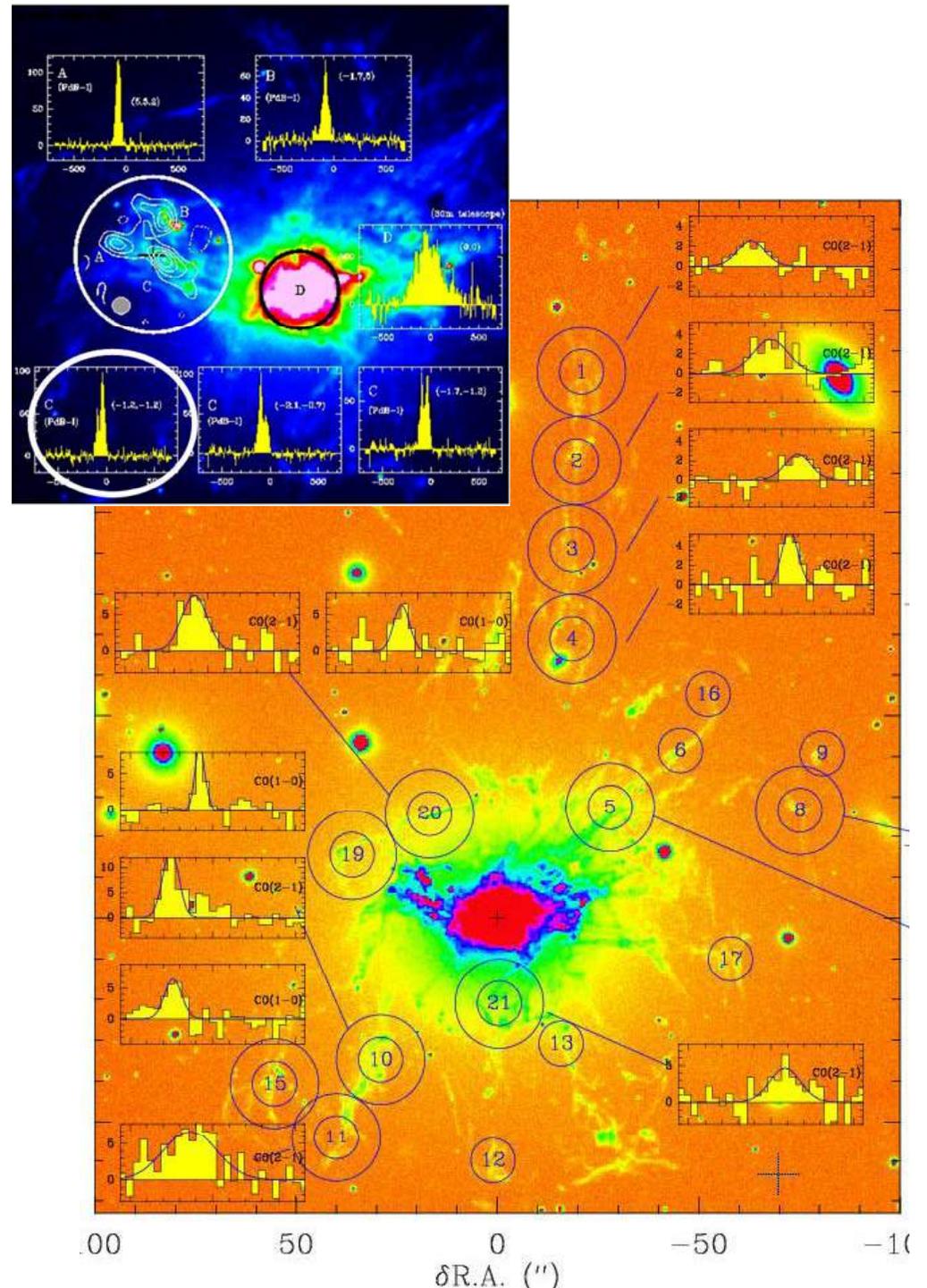
Des flots dans les deux sens coexistent

Le gaz moléculaire venant d'un précédent refroidissement est entraîné par le jet radio

Les bulles qui montent par la force d'Archimède créent des inhomogénéités et plus de refroidissement

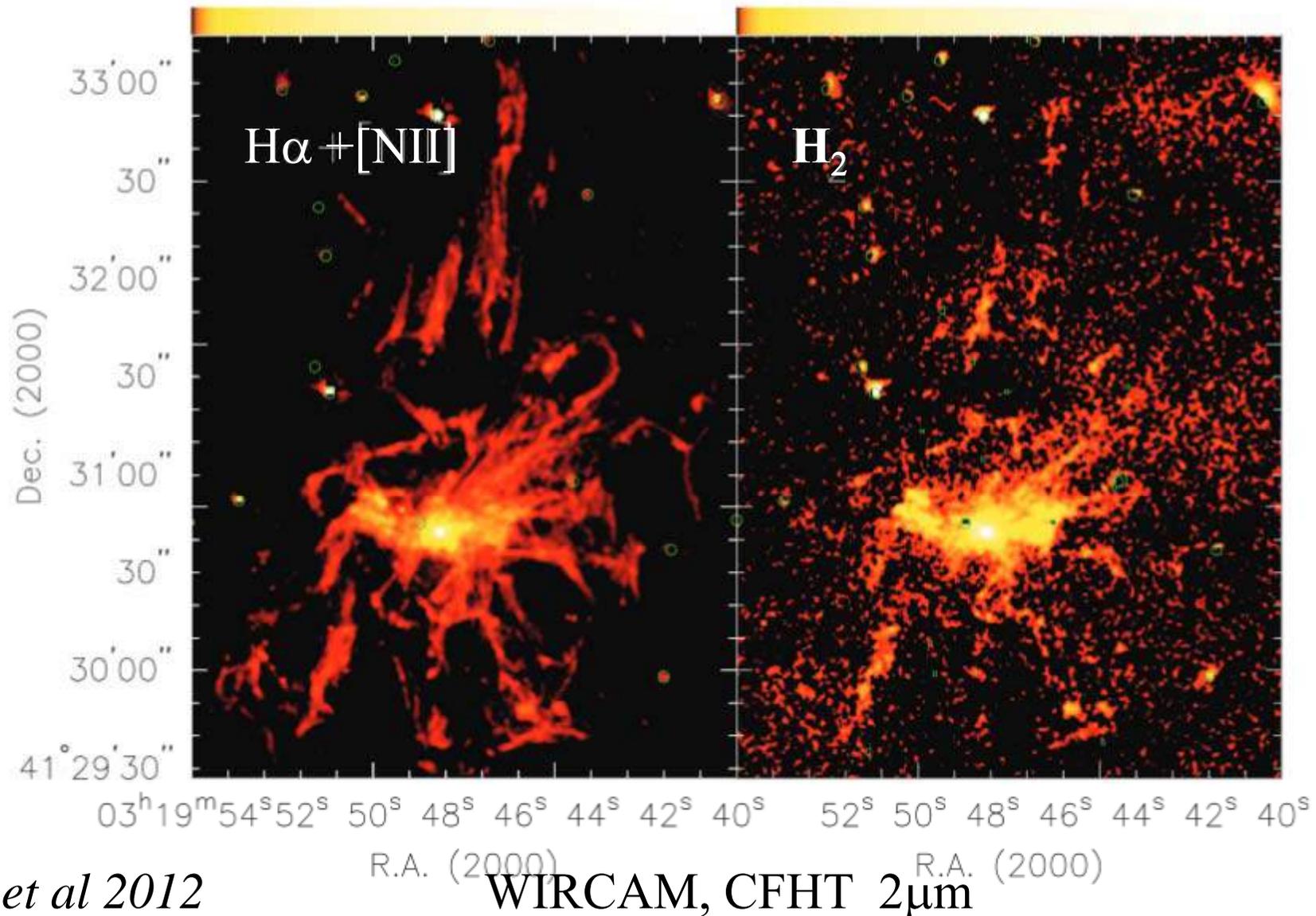
Le gaz froid alimente l'AGN

Salome et al 2008, 2011



Carte de H₂ dans les filaments

Transition 1-0 S(1) ro-vibrationnelle, infrarouge 2 μ m



Lim et al 2012

Simulations du phénomène

Refroidissement artificiellement augmenté **Accrétion de gaz froid**

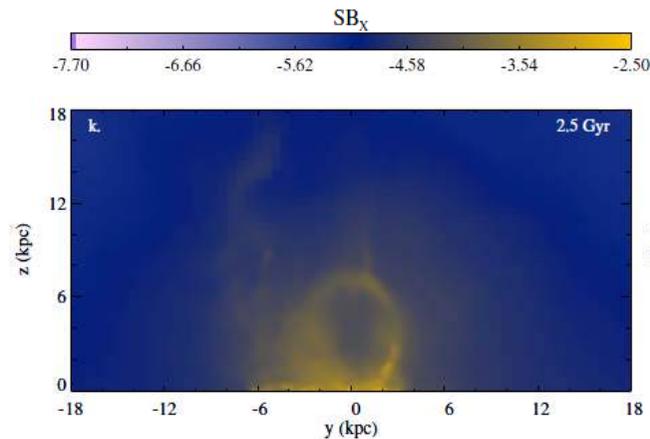
Pression de radiation insuffisante

Gaspari et al 2011, 2012, ou galaxies E massives

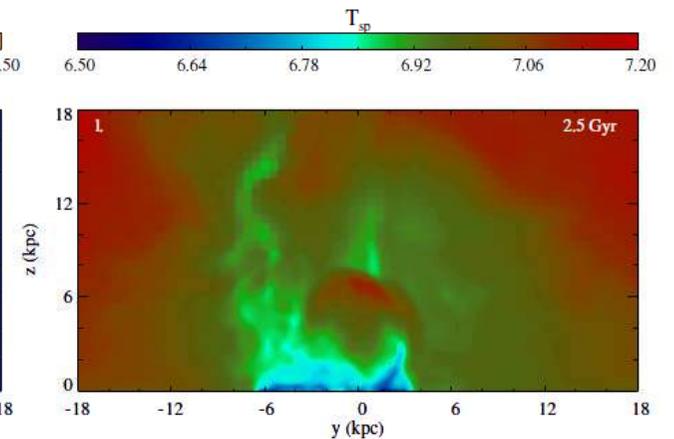
**Feedback mécanique
avec vents et jets**

Parvient à modérer
le refroidissement,
en gardant la structure

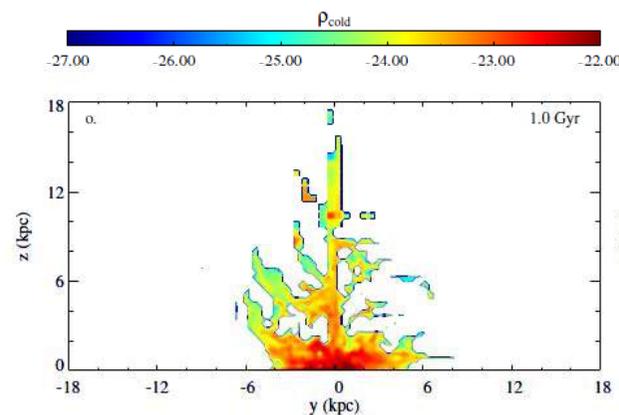
Brillance X



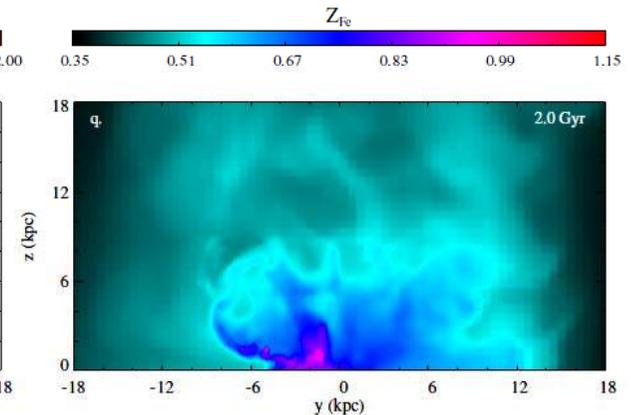
Température



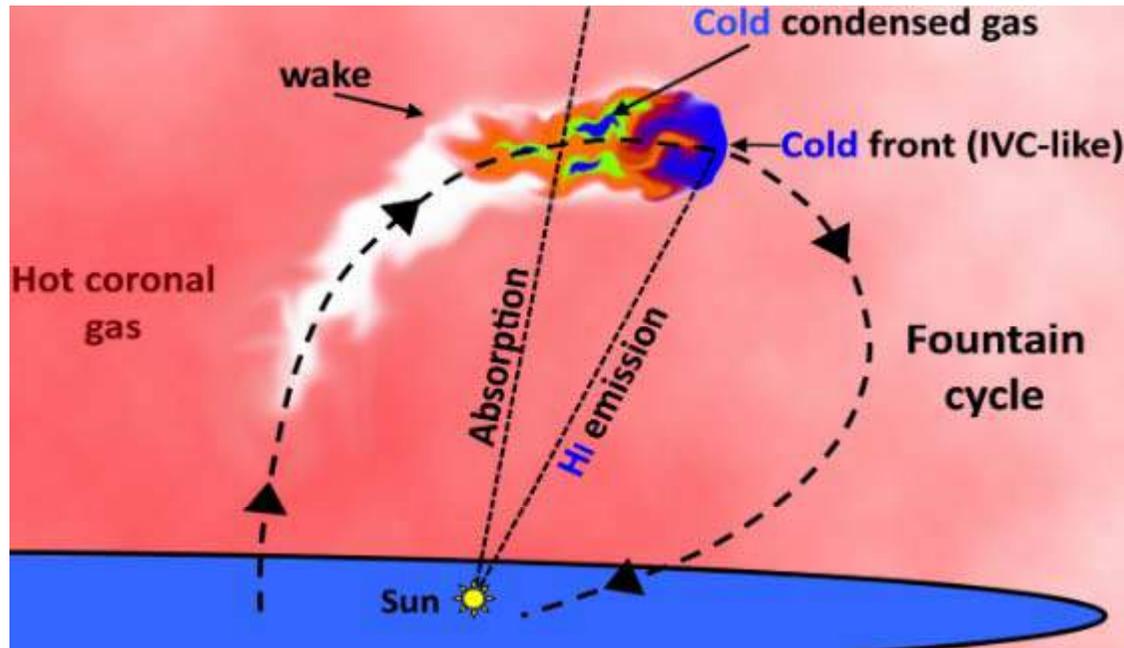
Gaz froid



Métallicité



Induire l'accrétion de gaz froid



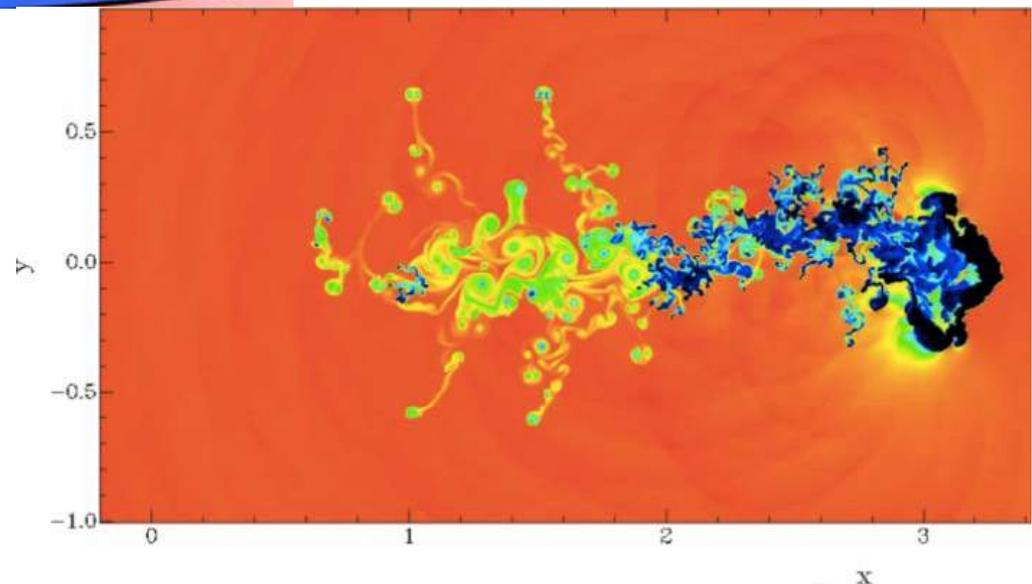
Semblable au phénomène de fontaine dans la Voie Lactée

Fraternali & Binney 2008

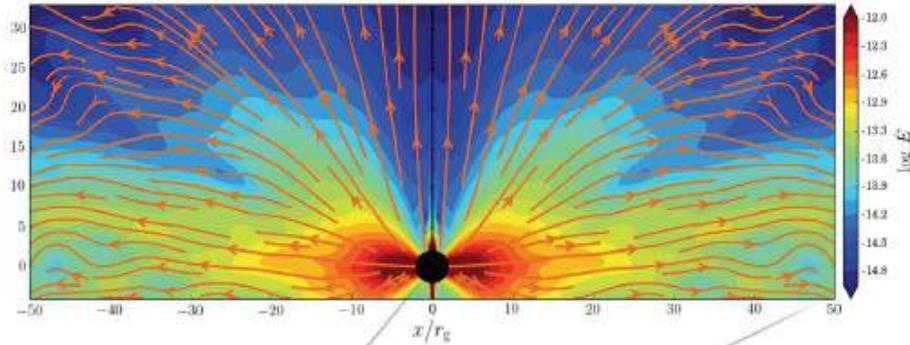
Marinacci et al 2011

Les supernovae éjectent du gaz dans le halo
Aident le gaz chaud du halo à refroidir

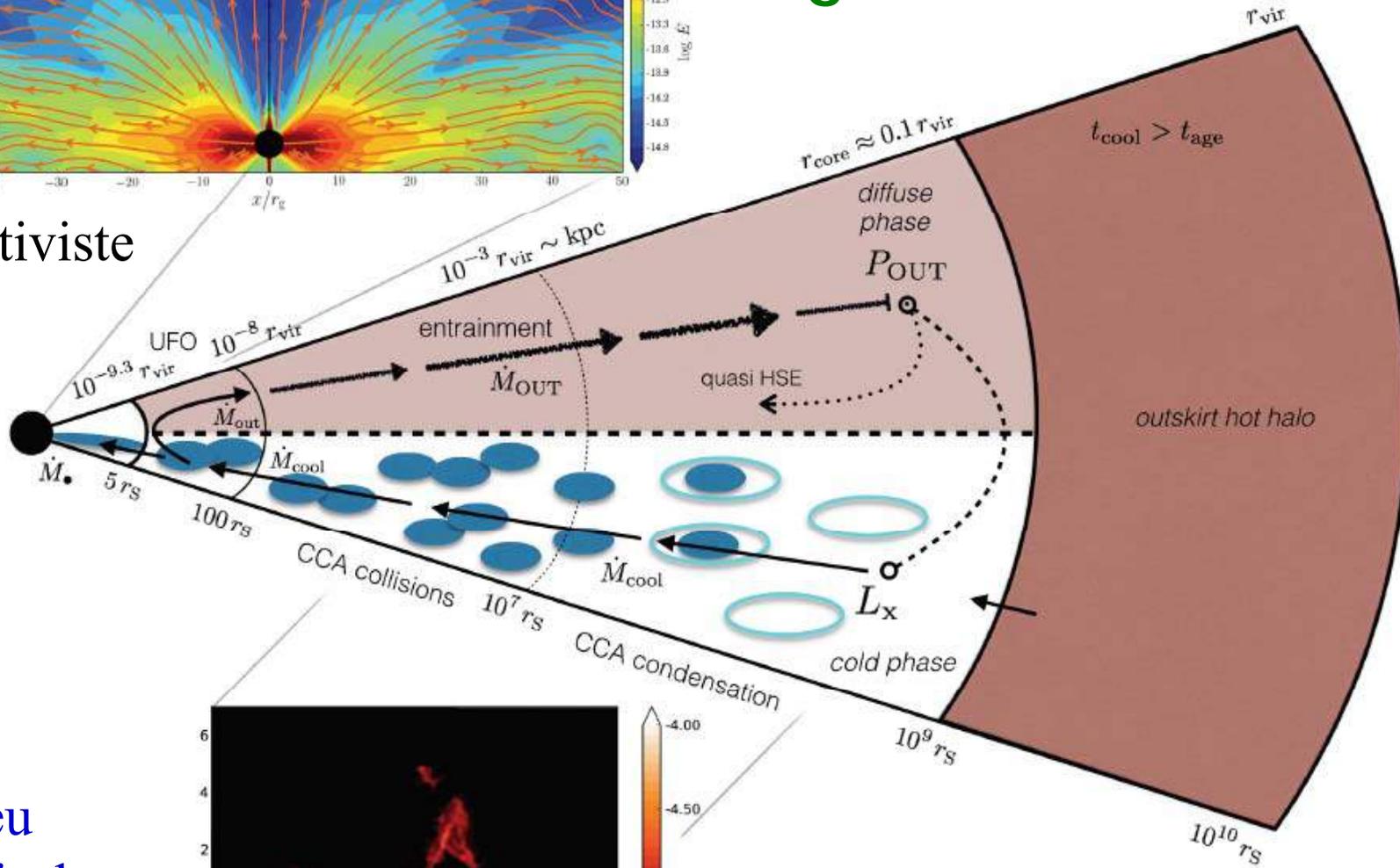
Marasco et al 2013, 2017



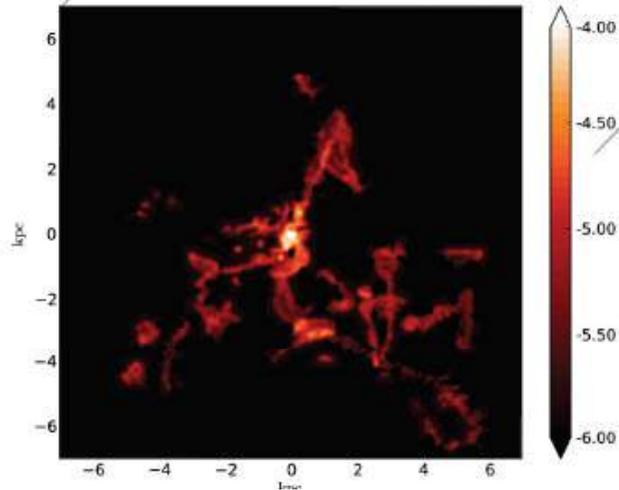
Le gaz retombe!



Jet relativiste

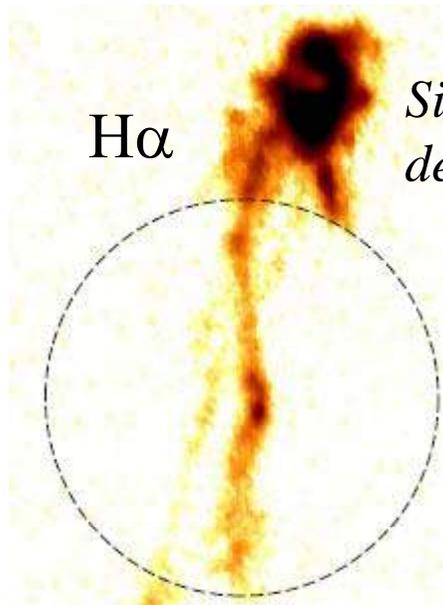


Milieu
Multi-phase
dans les
amas

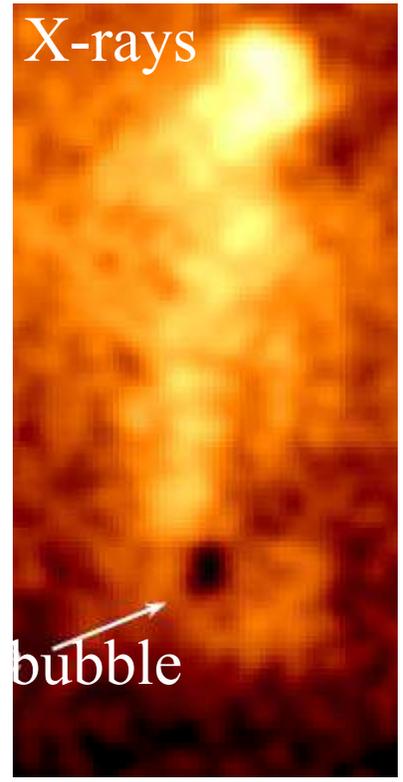
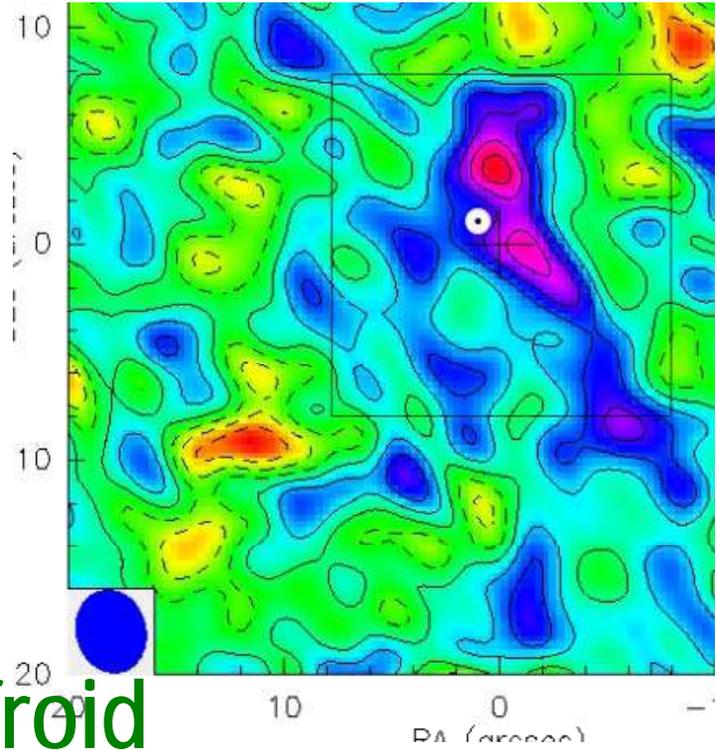


Accrétion de gaz froid chaotique

Gaspari & Sadowski 2017

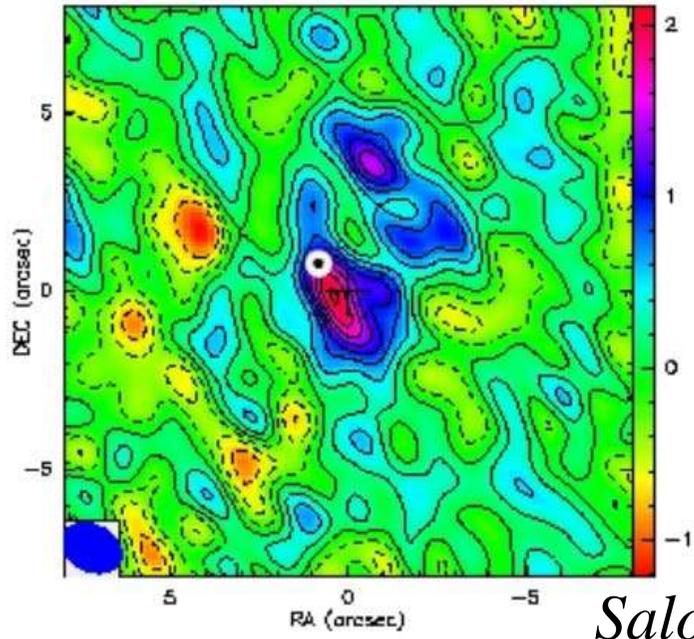


*Sillage H α
de 60kpc*

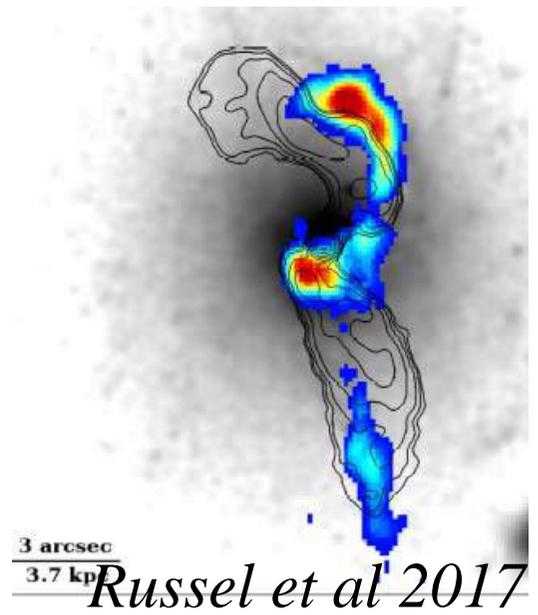
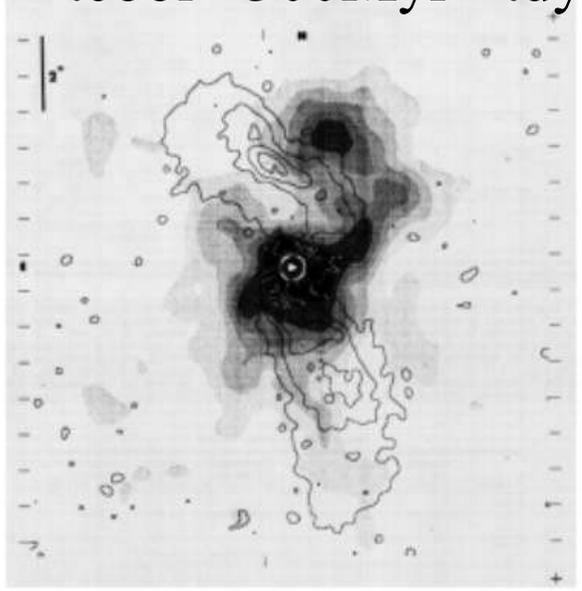


A1795: sillage froid

$t_{cool} = 300 \text{ Myr} = t_{dyn}$



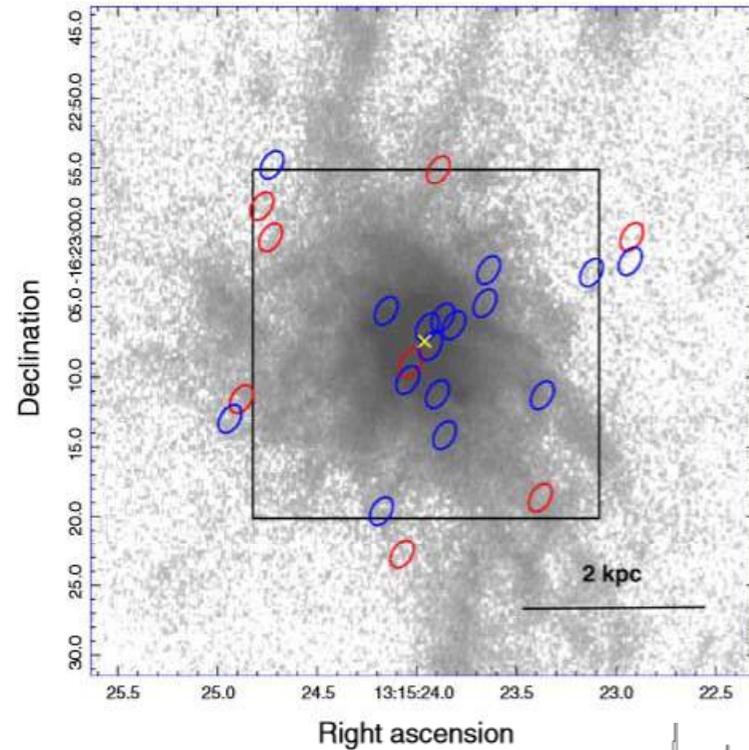
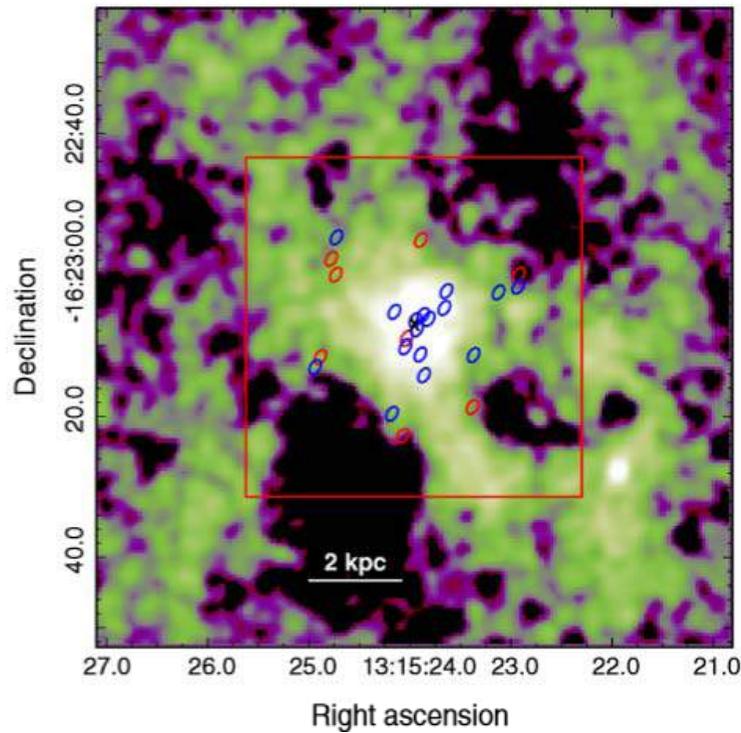
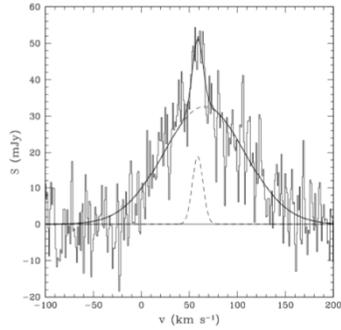
Salome & Combes 2004



Russel et al 2017

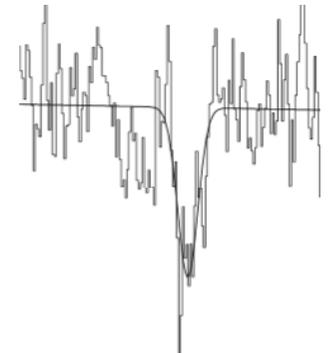
Gaz froid dans des groupes X

Nuages moléculaires en CO (ALMA), sur
l'image X (Chandra) image HST

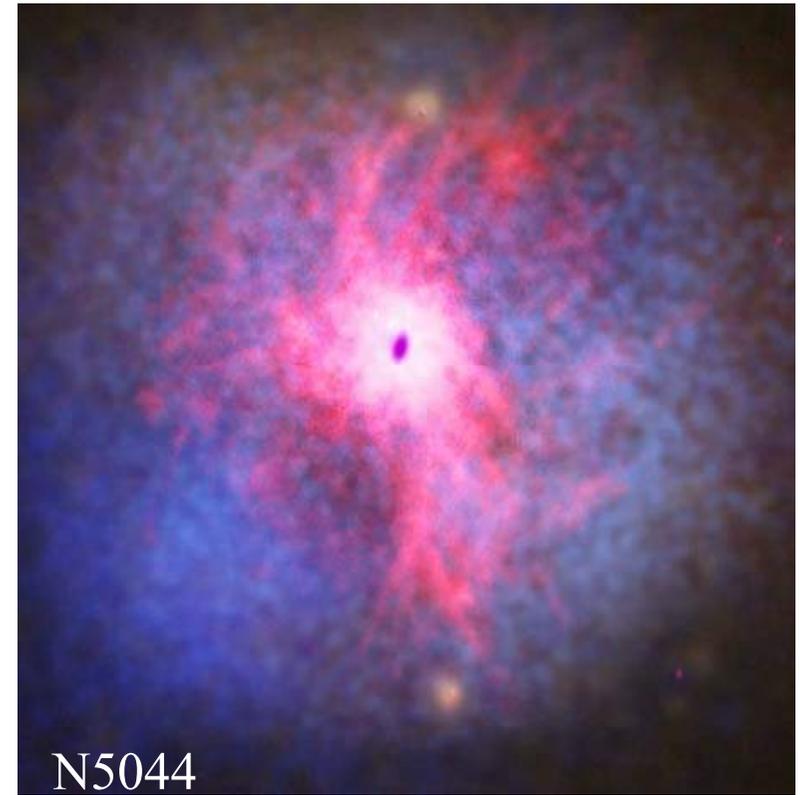
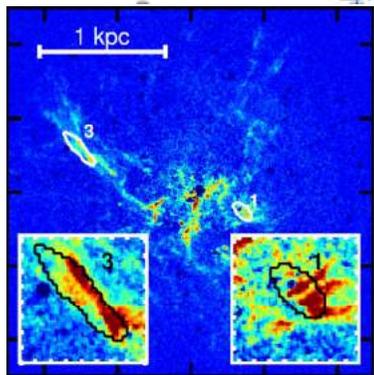
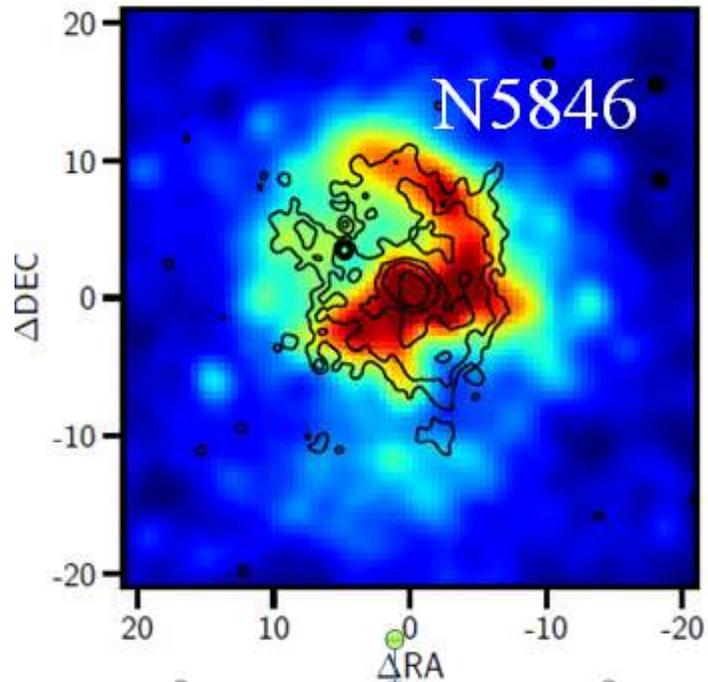


Masses des nuages, associations, $3 \cdot 10^5$ à $10^7 M_{\odot}$, 10-50 km/s
Pas de rotation, mais des nuages aussi en absorption

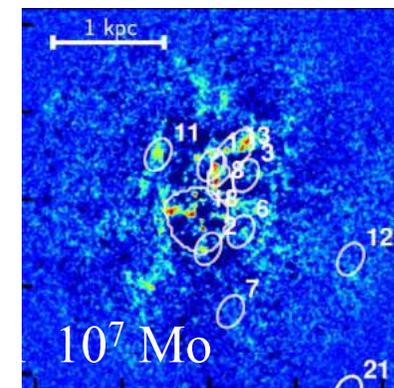
David et al 2014



Molécules dans des groupes

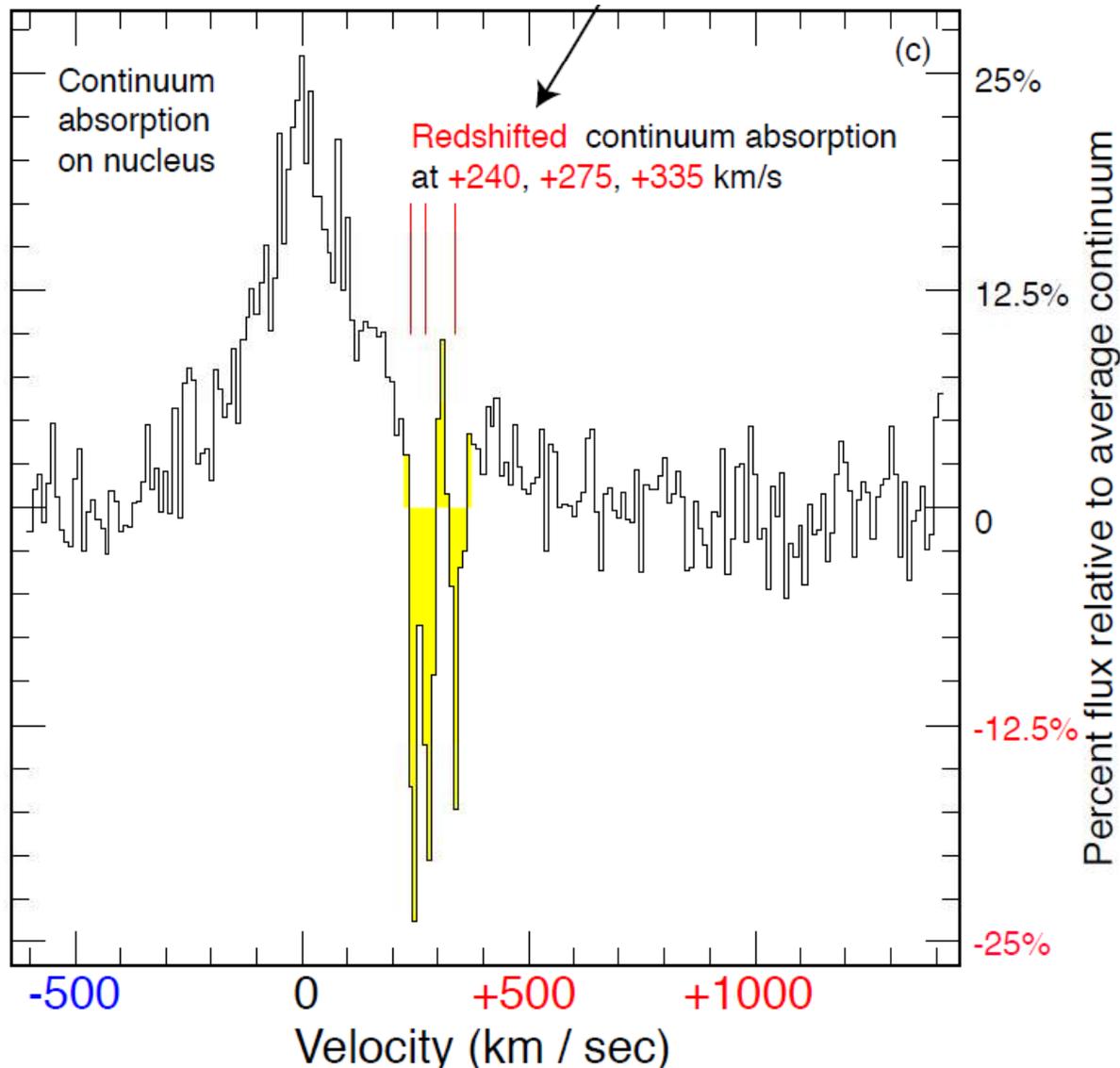


Origine du gaz froid:
refroidissement direct du milieu chaud
Mélange dans le milieu multi-phase



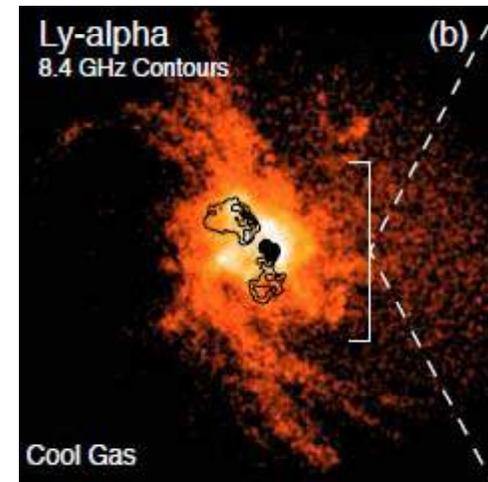
Temì et al 2017

Gas froid qui reflue dans les amas



Abell 2597 (ALMA)
CO en absorption
devant le continu
radio de l'AGN

Uniquement $V > 0$
Nuages tombant sur
le trou noir



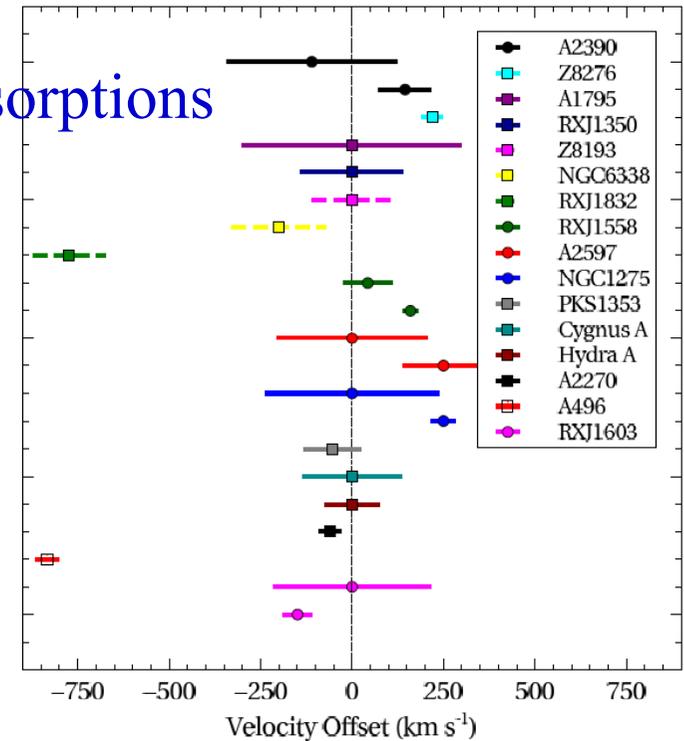
Tremblay et al 2016

Autres cas d'absorption

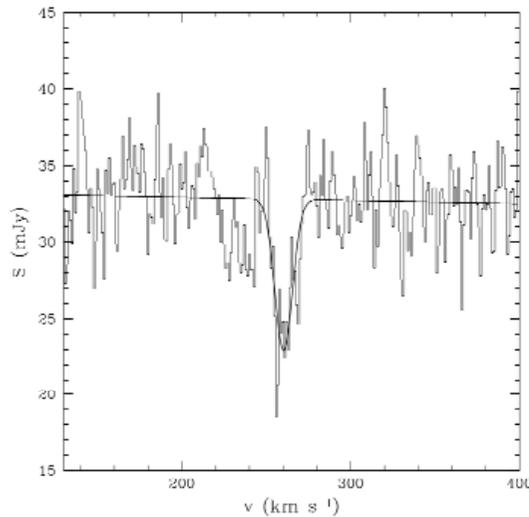
10^{21} - 10^{23} cm⁻² de gaz froid (< 40K)
dans un volume de 30kpc autour du centre

Le gaz moléculaire tombe
HI aussi, parfois est éjecté

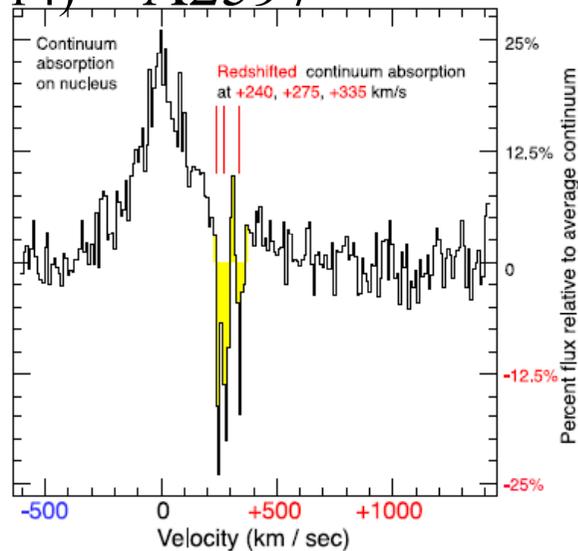
Absorptions HI



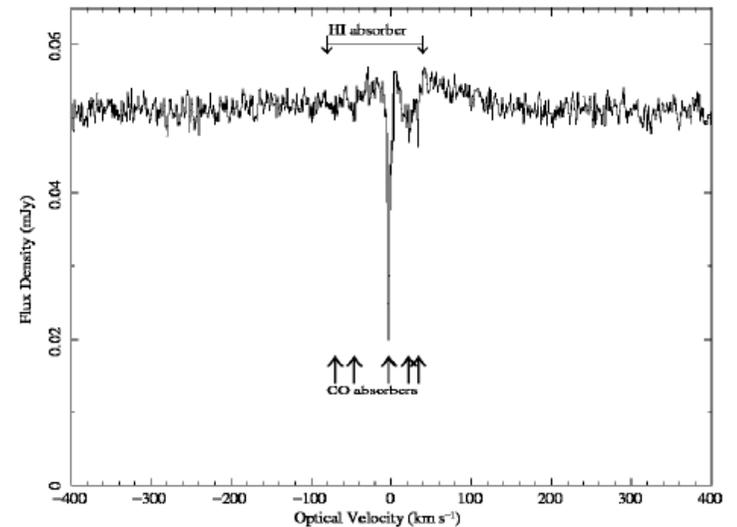
N5044 (David et al 2014)



A2597



Hydra A (Edge et al)

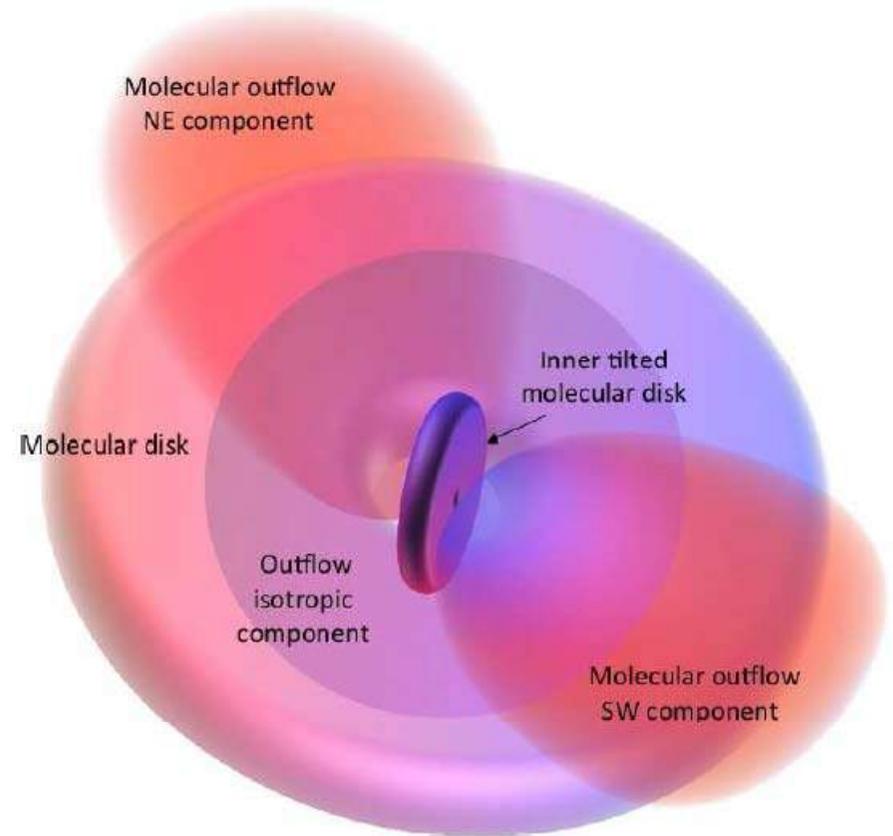
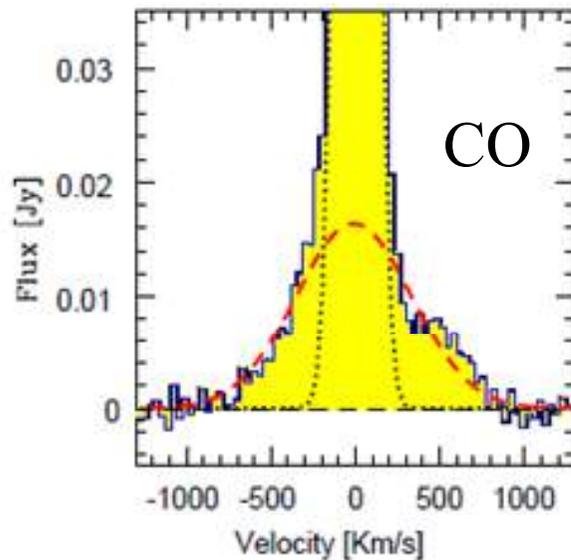


Flots moléculaires fréquents

Mrk 231 prototype

AGN et Starburst,
de 10^7 - $10^8 M_{\odot}$

Ferruglio et al 2010



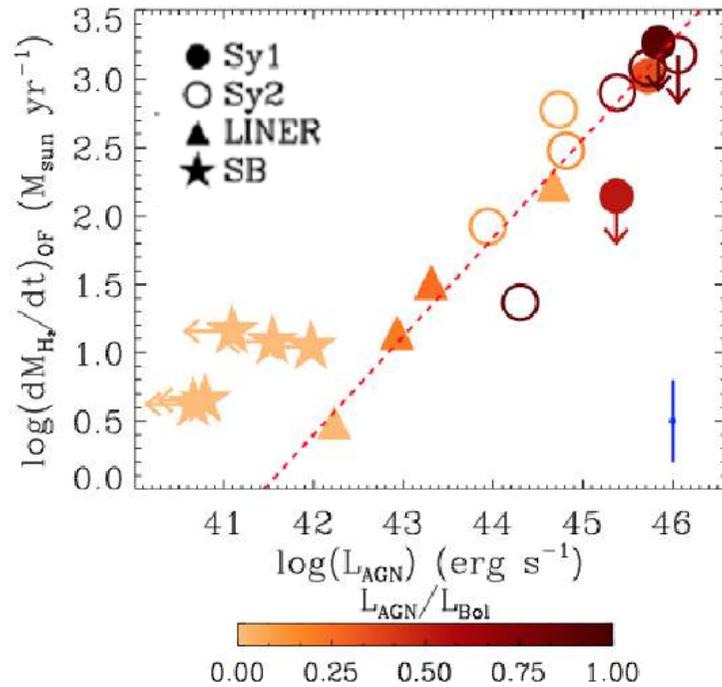
**Le flot s'étale sur des kpc →
affecte la galaxie, pourrait arrêter
la formation d'étoiles**

$$dM/dt = 800 M_{\odot}/\text{yr}, (4 \times \text{SFR})$$

Puissance cinématique $\sim 2 \cdot 10^{44}$ erg/s → AGN

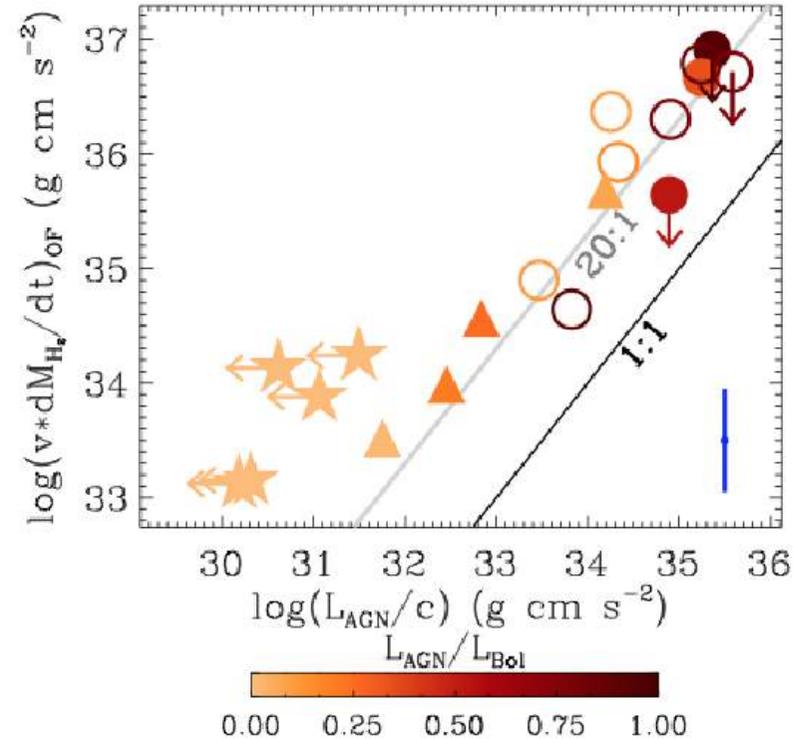
Gaz très dense, HCN, HCO⁺, *Aalto et al 2012*

Origine des flots



Pour les galaxies hôtes d'AGN,
l'intensité du flot est corrélé
avec la puissance de l'AGN

Cicone et al 2014



$$dM/dt v \sim 20 L_{AGN}/c$$

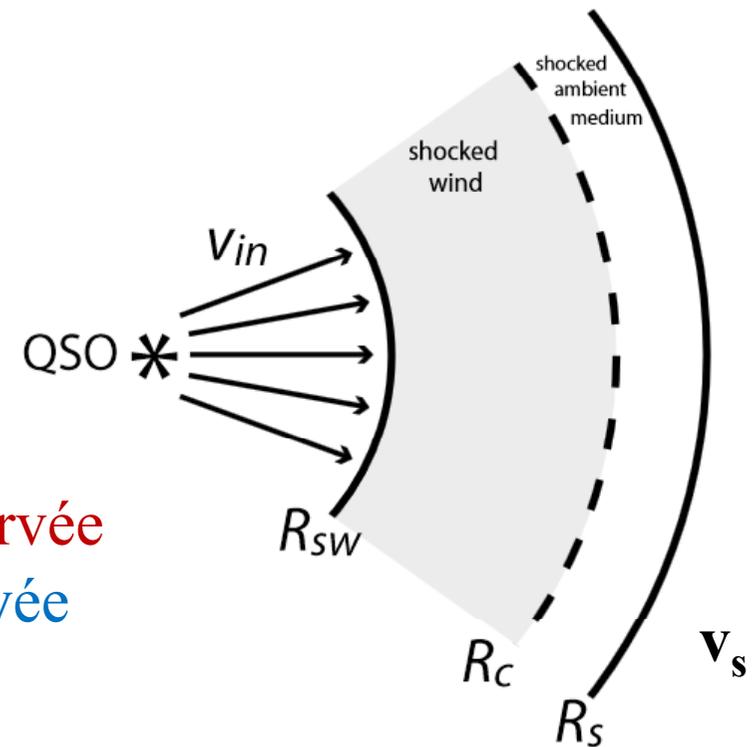
Le moment du flot est 20 fois
plus grand que celui de l'AGN
→ énergie conservée

(Zubovas & King 2012)

Flots conservant l'énergie

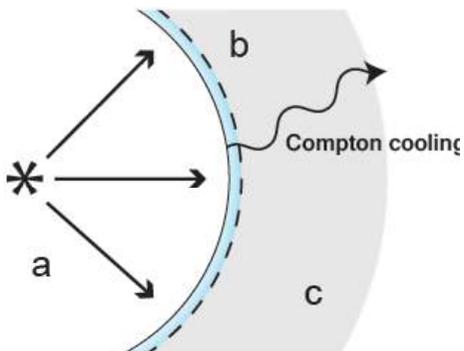
Si refroidissement très efficace
 → seulement le moment conservé

Si vents très rapides $v_{in} > 10\,000\text{ km/s}$,
 peu de pertes radiatives → Energie conservée
 Booste le moment $m_s v_s$ de la matière balayée
 conservation de $m_s v_s^2 = m_{in} v_{in}^2$

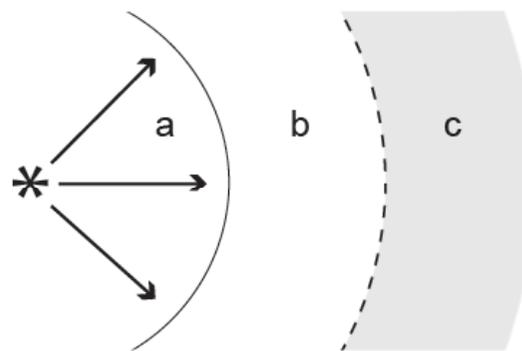


Jusqu'à $v_{in} / v_s \sim 50!$ Explique que le moment $\gg L_{AGN}/c$

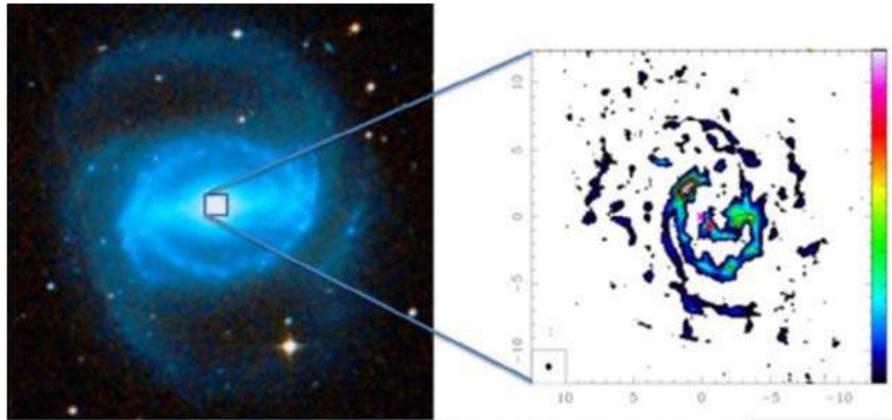
Momentum-driven outflow



Energy-driven outflow



Alimentation des AGN et feedback

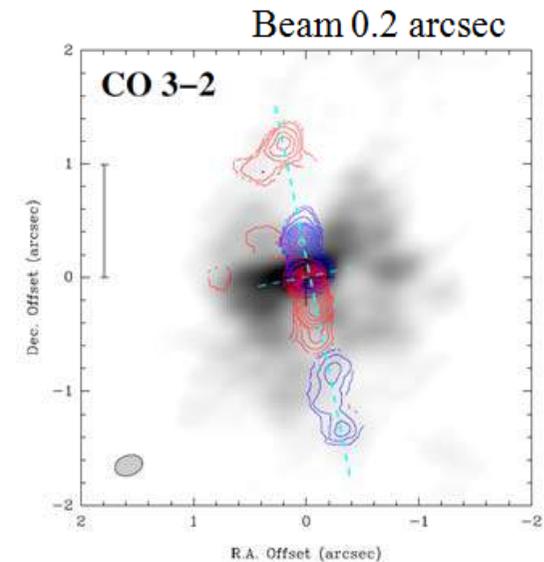
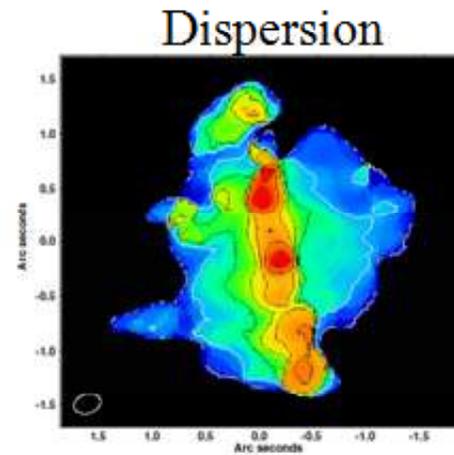


Le flot moléculaire le plus petit détecté
 $V=100\text{km/s}$, 7% de la masse
 $M_{\text{BH}} = 4 \cdot 10^6 M_{\odot}$
Moment du flot $= 10 L_{\text{AGN}}/c$
Combes et al 2013

N1433
CO(3-2)
ALMA
On HST

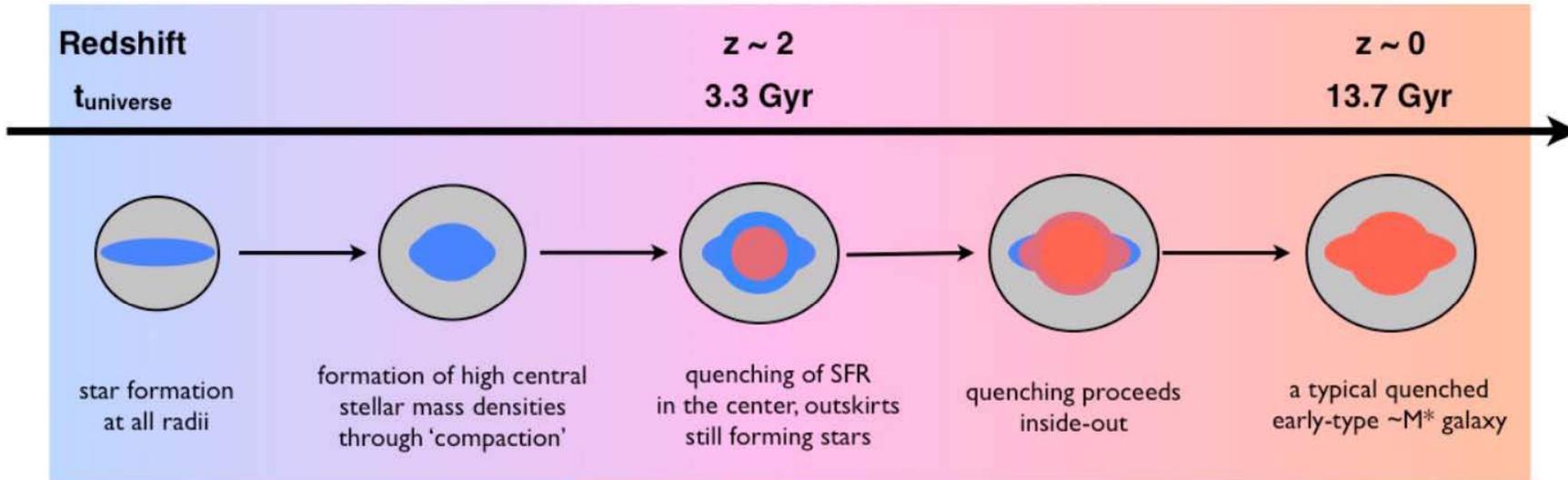


N1377: précession du jet



Aalto et al 2015

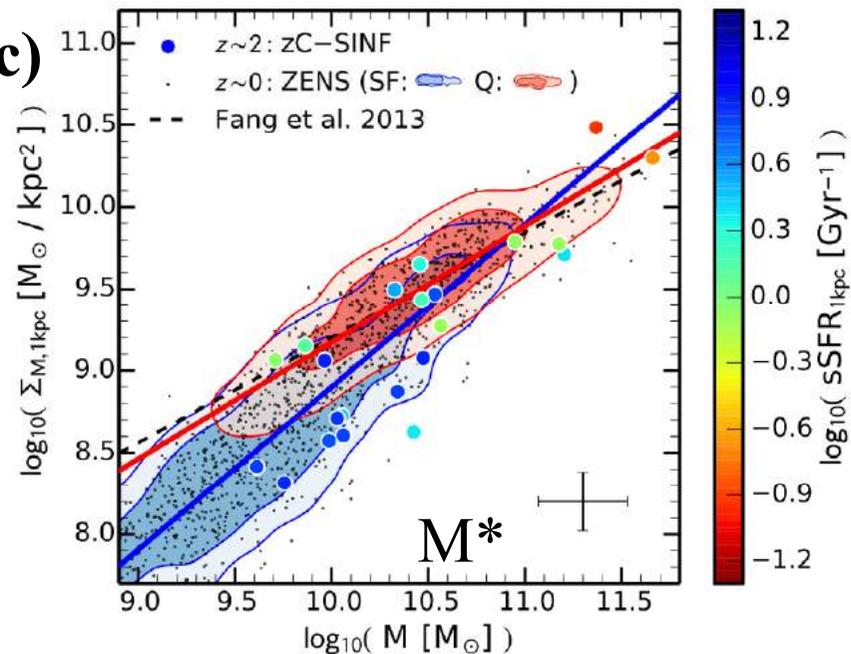
Indice-1: la SF s'arrête de l'intérieur



Tacchella et al 2015

→ Arrêt dû à la **morphologie**
 A $z=2$, les régions centrales des galaxies passives sont plus rouges

$\Sigma^*(1\text{kpc})$

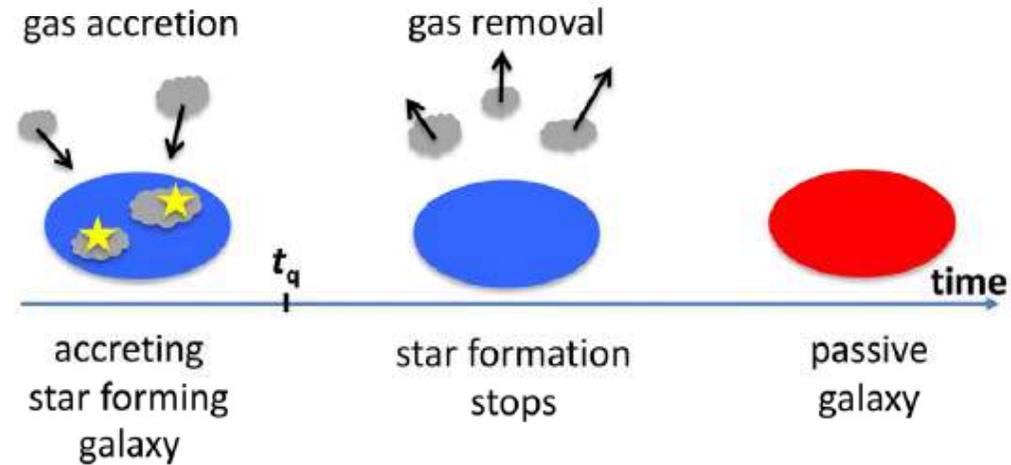
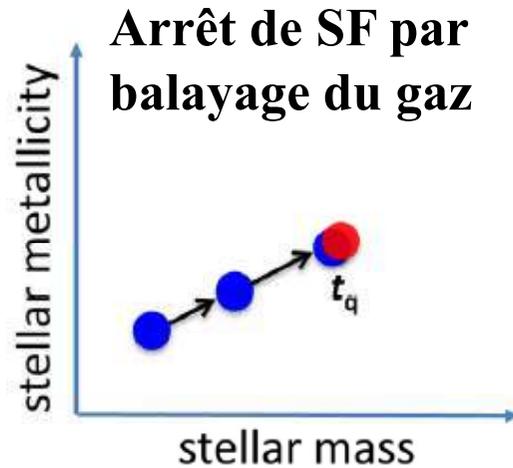


Indice-2: métallicité

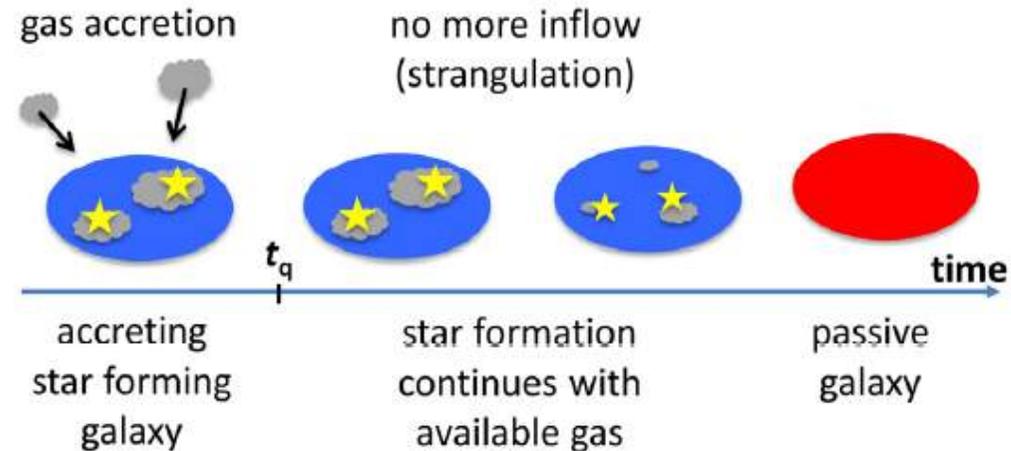
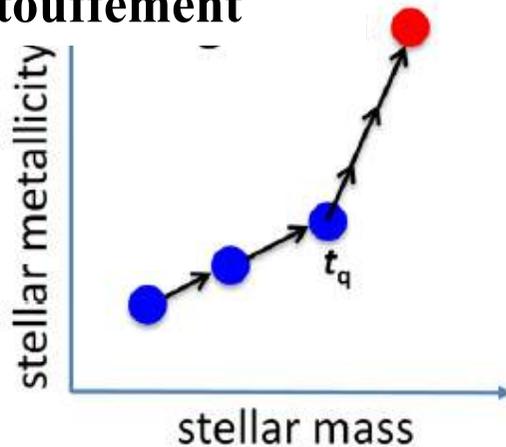
Etouffement ou pression dynamique

Peng, Maiolino & Cochrane 2015

a



Arrêt de SF par étouffement



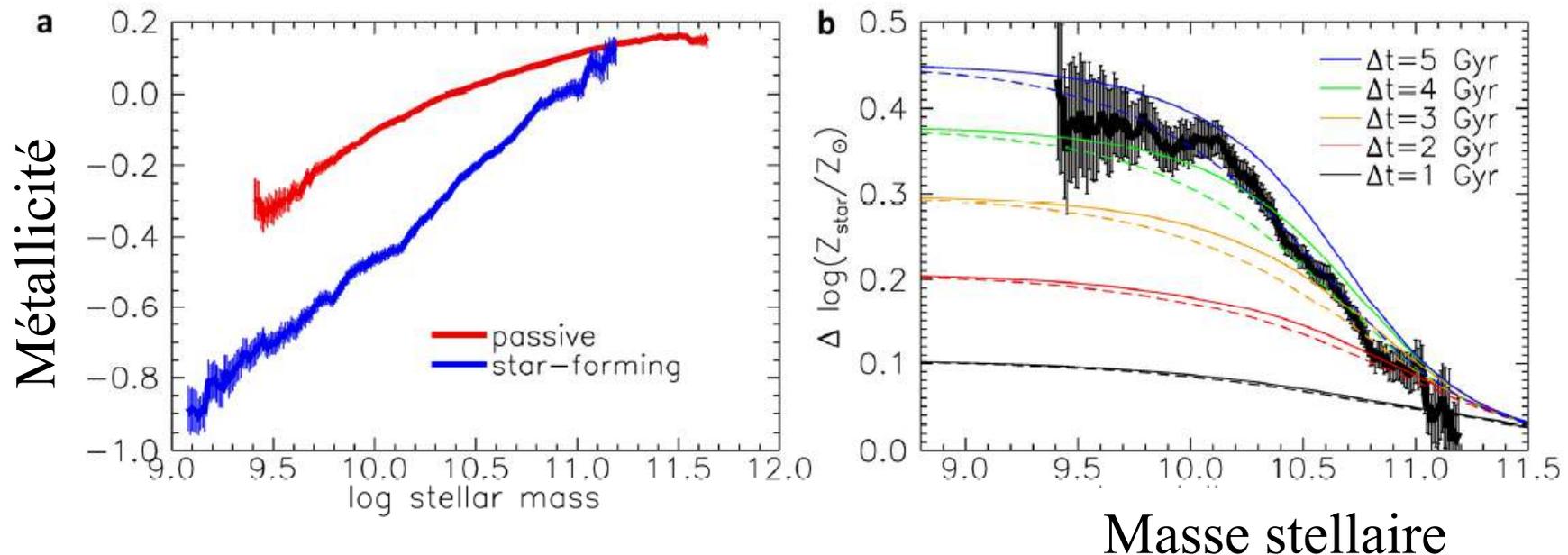
L'étouffement domine

Si le gaz est enlevé rapidement, les étoiles seront moins métalliques
Dans le cas de l'étouffement, la SF et l'enrichissement continuent

→ L'étouffement domine pour 26 000 galaxies du SDSS

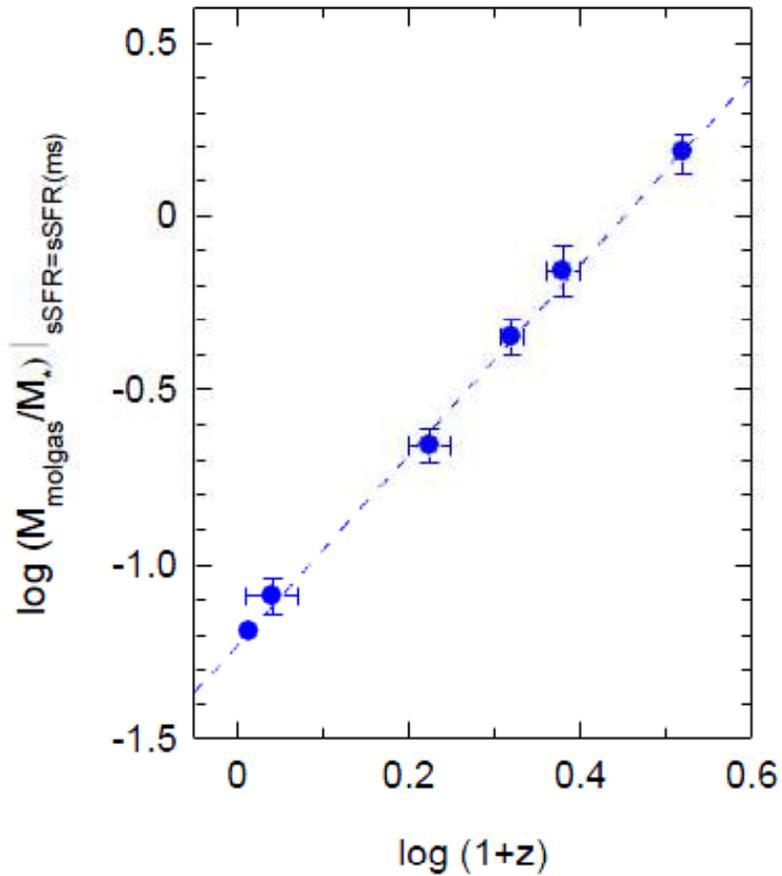
Le temps pour stopper la SF ~ 4 Gyr, Galaxies $M < 10^{11} M_{\odot}$

Confirmé par les âges stellaires différents de 4 Gyr rouge/bleu



Indice-3: fraction de gaz des galaxies (z)

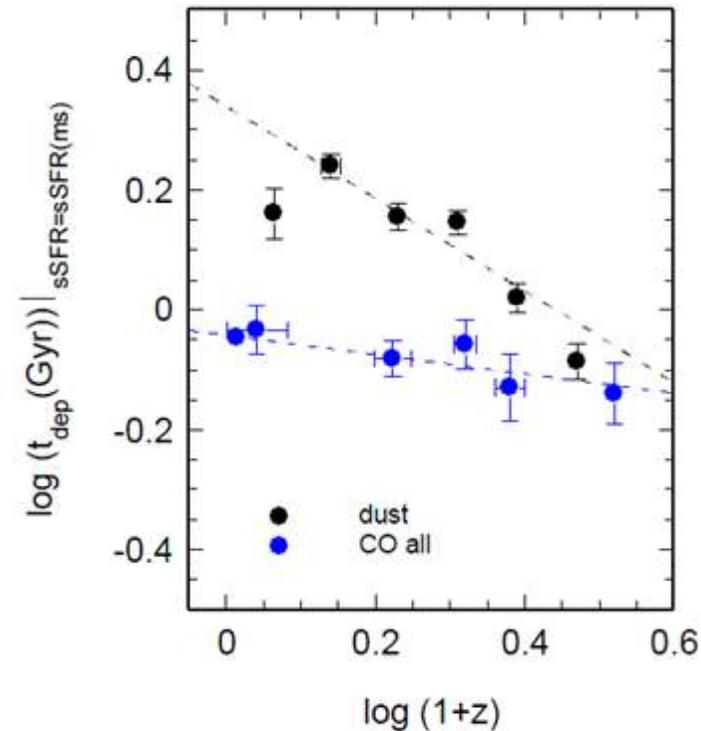
$$M_{\text{gaz}}/M_* \sim (1+z)^{2.7}$$



Sur la séquence principale,
temps de dépletion t_{dep}

$$t_{\text{dep}} = 1.5/(1+z) \text{ Gyr}$$

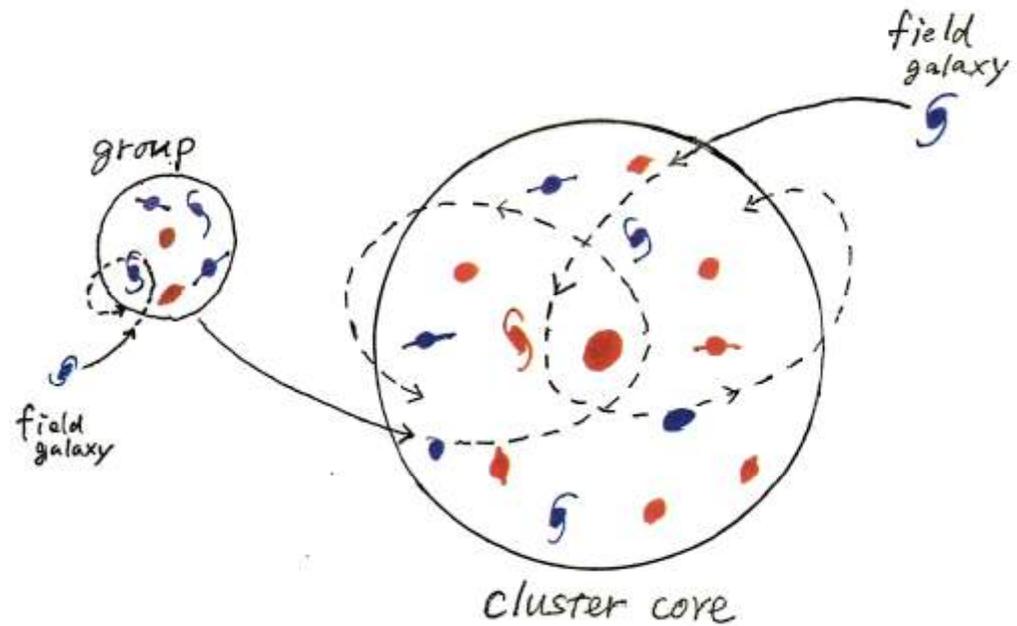
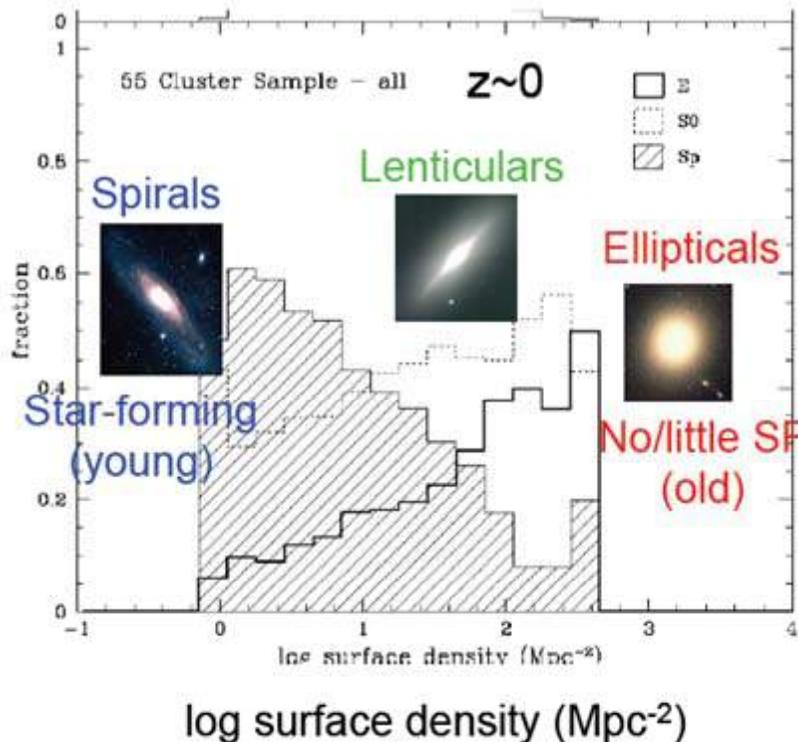
→ Efficacité de SF croît avec z



4- Effets d'environnement

- Sphéroïdes favorisés à haute densité de galaxies, $z=0$
- A $z=3$, il y a déjà une relation morphologie-densité (Cooke et al 2014)

Dressler 1980



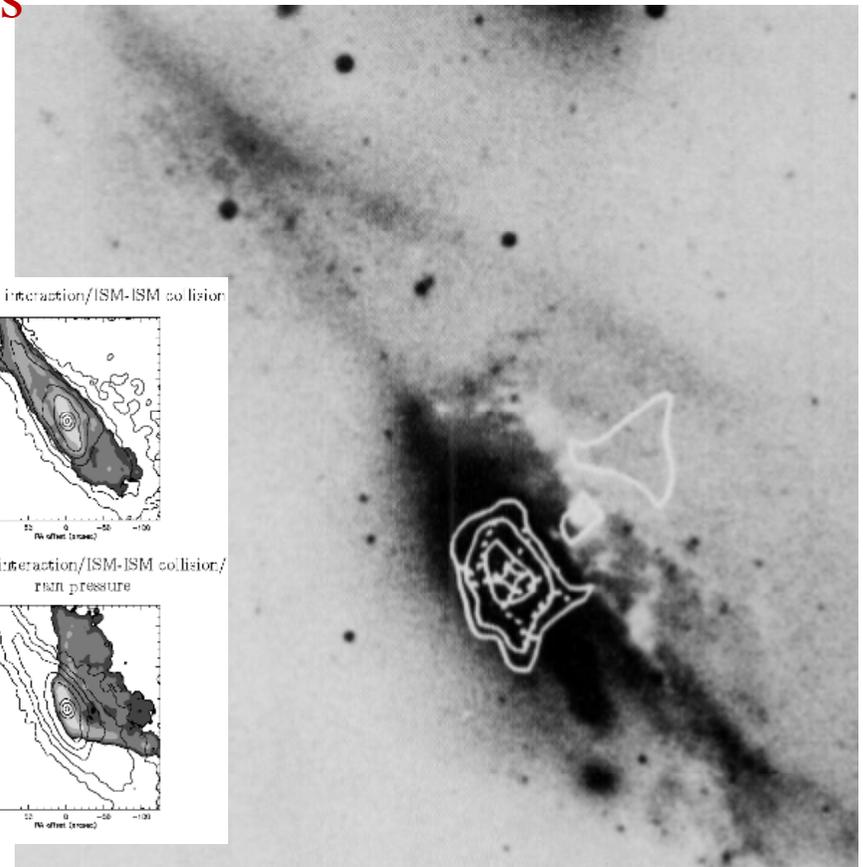
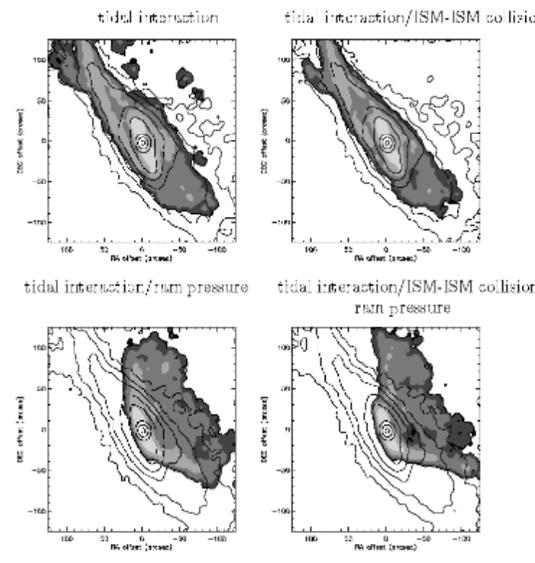
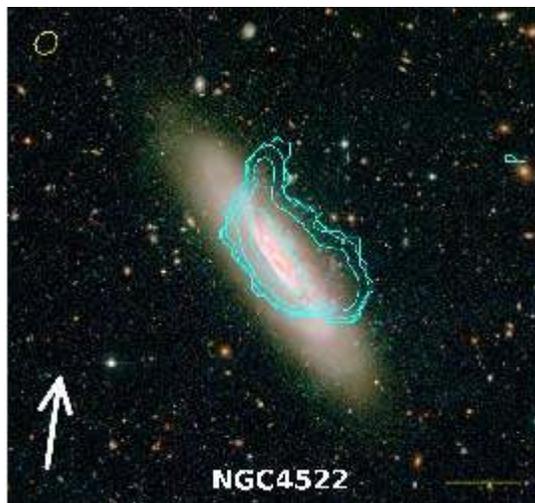
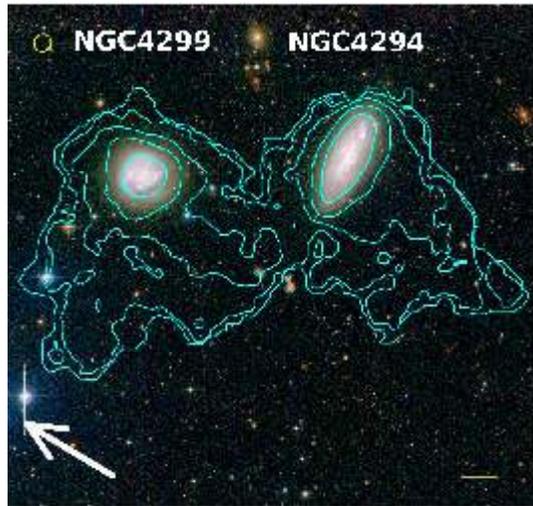
- Fusions dans les groupes de galaxies
- Les groupes fusionnent en amas,
- Pression dynamique, harcèlement

Marées et pression dynamique

Les interactions de marée, et le balayage du gaz agissent simultanément

NGC 4438 & 4435 dans Virgo

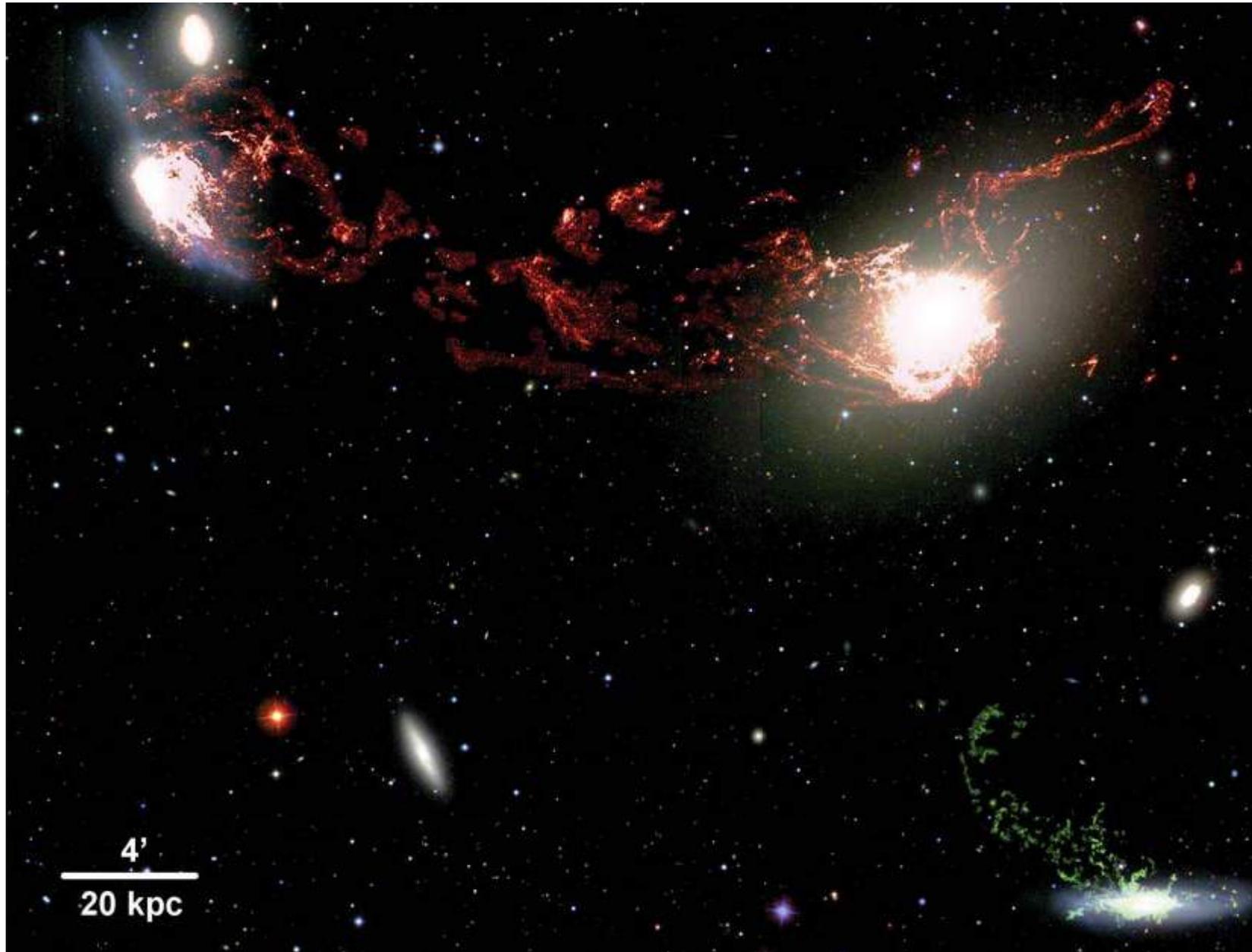
Même les nuages moléculaires sont projetés en dehors des galaxies



Vollmer et al 2005

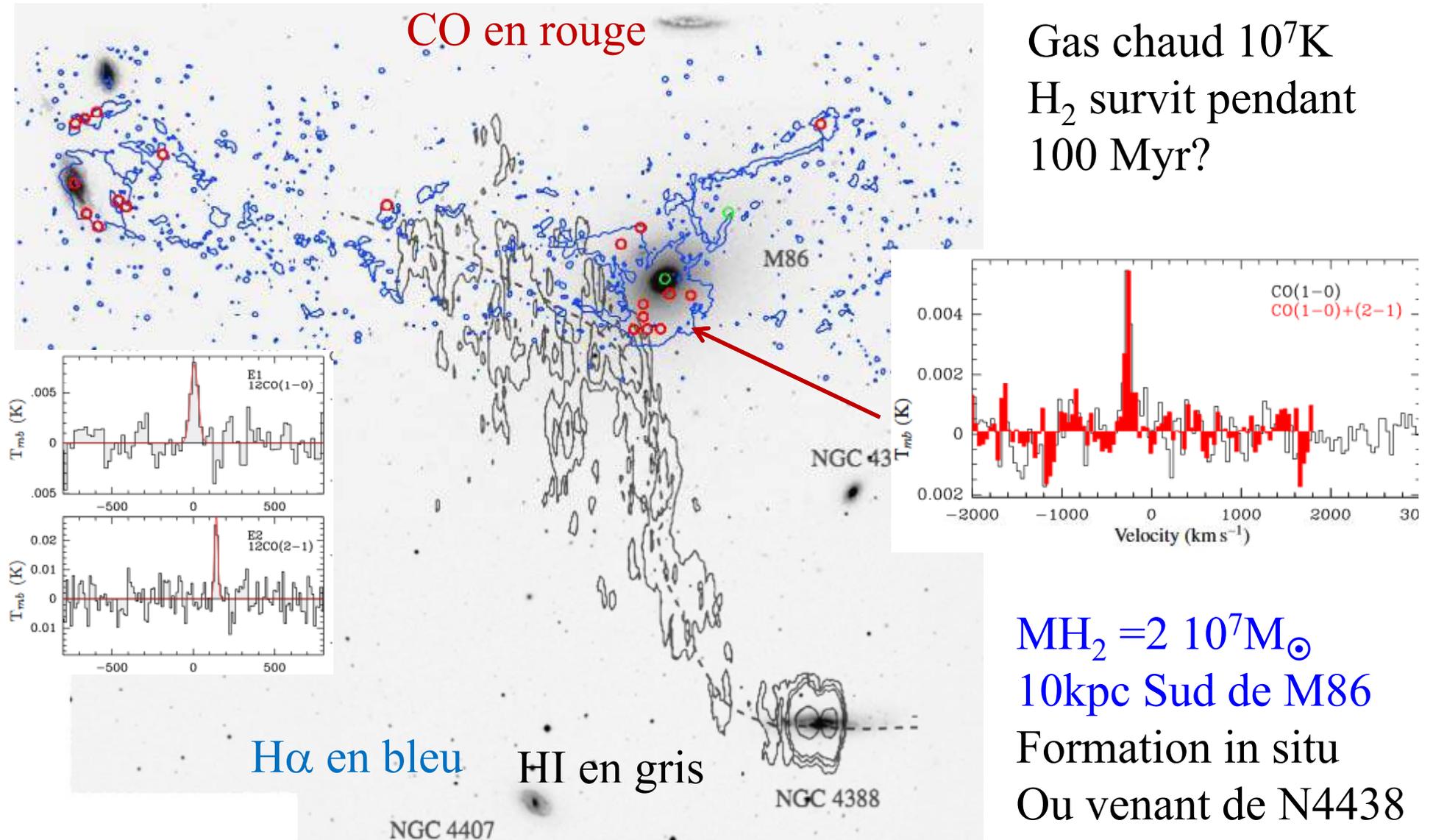
Combes et al 1988

Traînée géante de gaz ionisé dans Virgo



Kenney+
2008

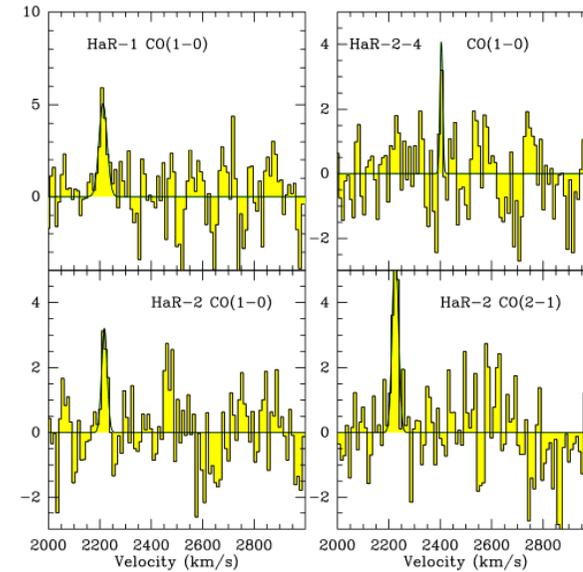
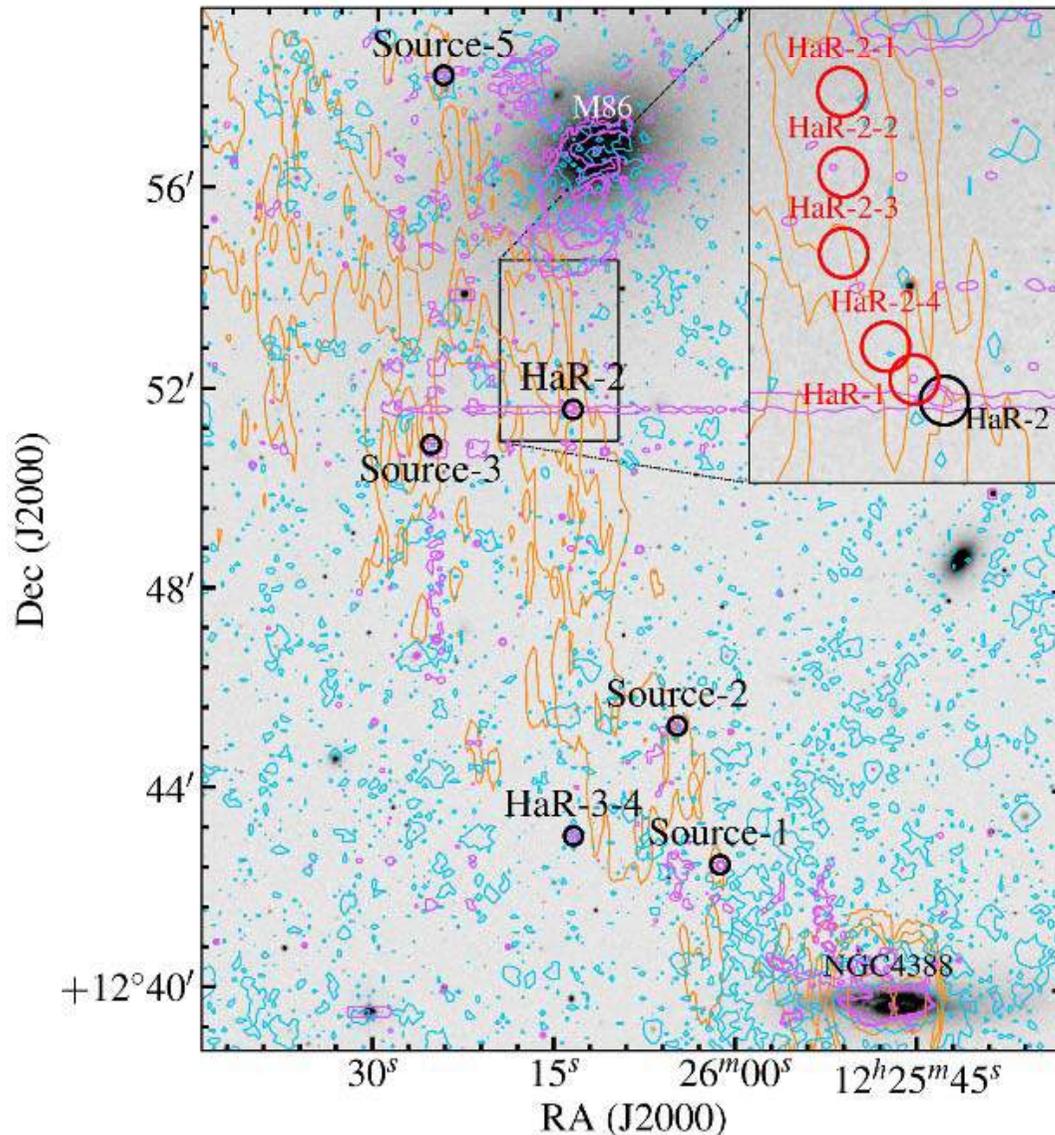
Gaz autour de M86 : HI et H₂



Dasyra et al 2012

Queue de marée N4388 – M86

A 100kpc de distance, $2 \cdot 10^6 M_{\odot}$ of H_2



➔ Formation in situ de H_2
La formation d'étoiles
enrichit le milieu chaud

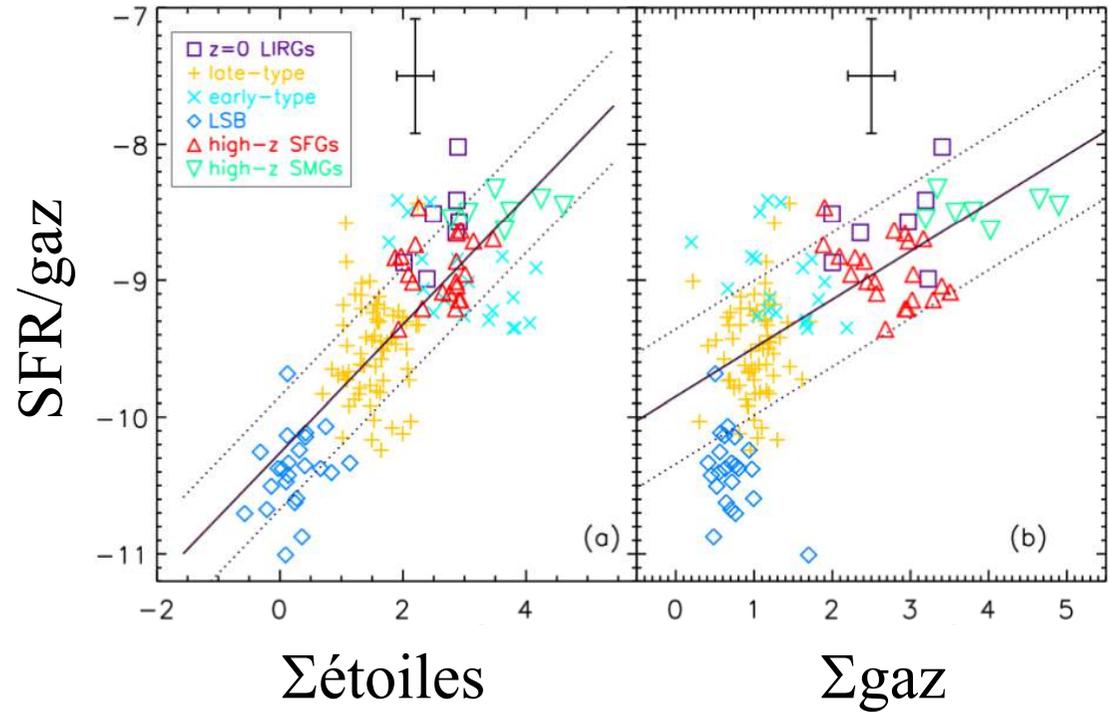
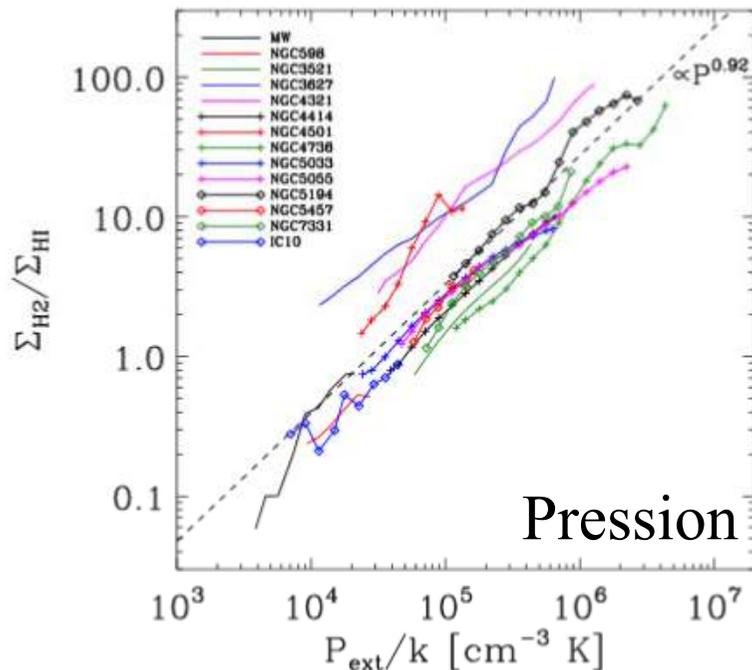
Faible efficacité, $t_{\text{dep}} \sim 500 \text{Gyr}$

Verdugo et al 2015

Importance de la pression

La densité de surface des étoiles est très importante pour l'efficacité de la SF

H_2/HI



Shi, Helou et al 2011

La transition $HI \rightarrow H_2$
est favorisée par la pression externe

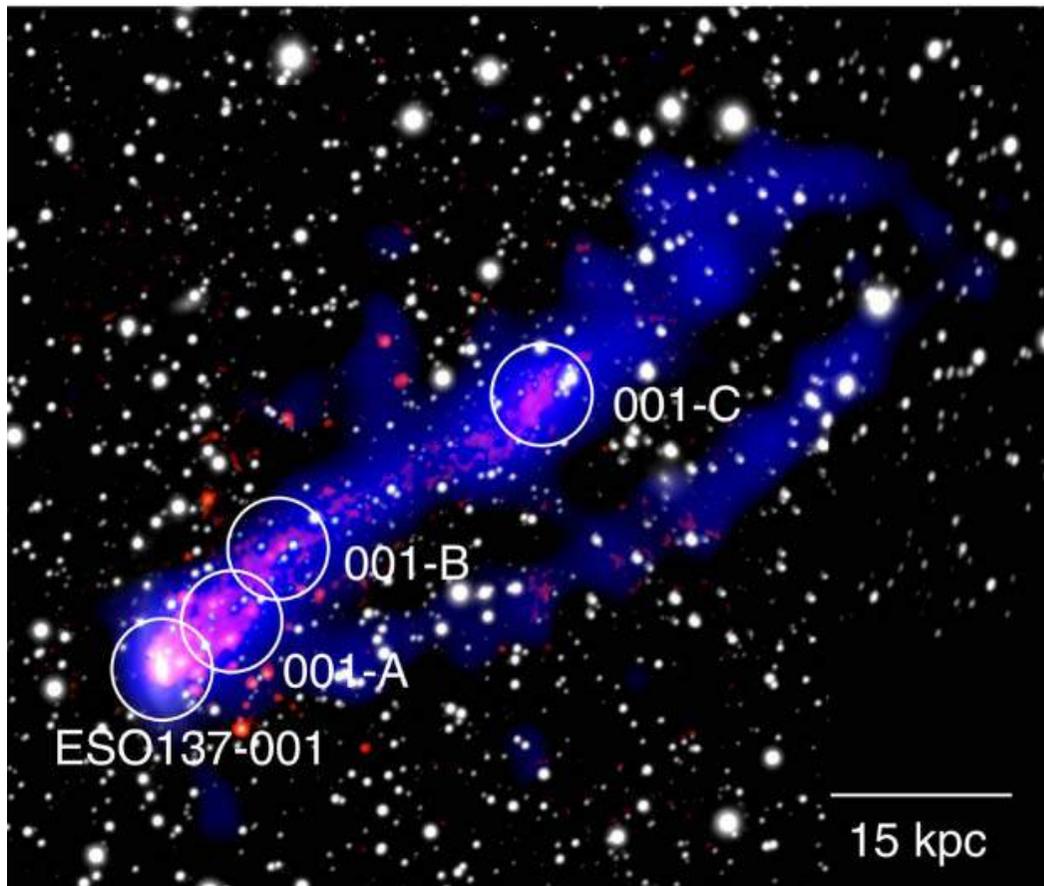
Blitz & Rosolowsky 2006

Balayage par pression dynamique

Dans des amas comme Virgo, c'est un processus lent

Mais dans les amas riches, bien plus rapide:

Exemple de ESO137-001

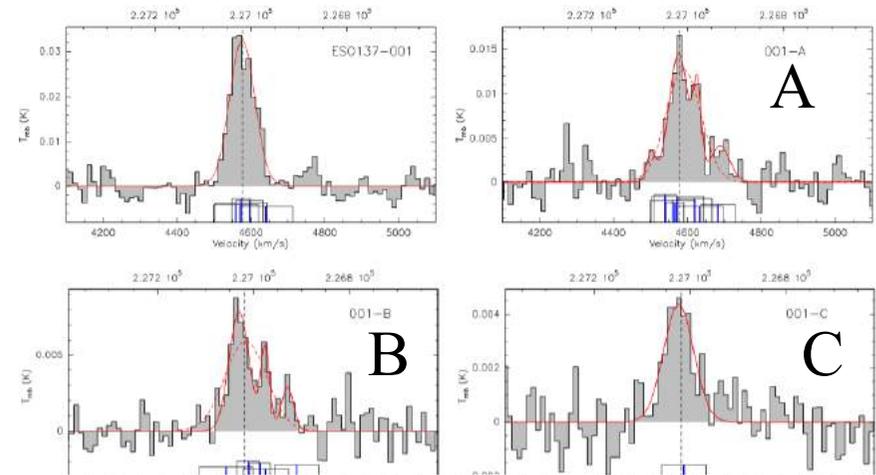
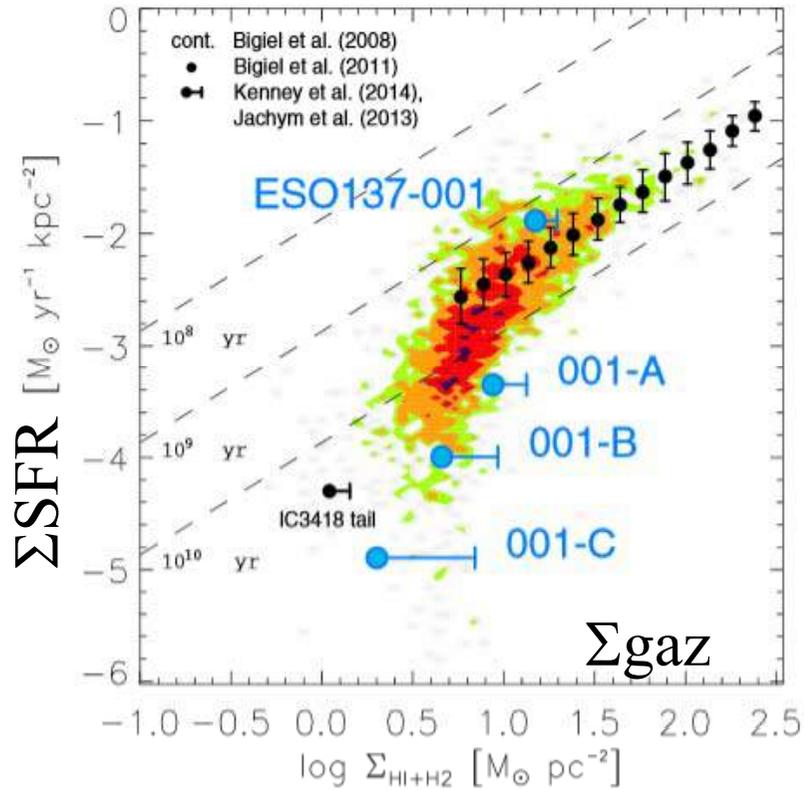


Jachym et al 2014

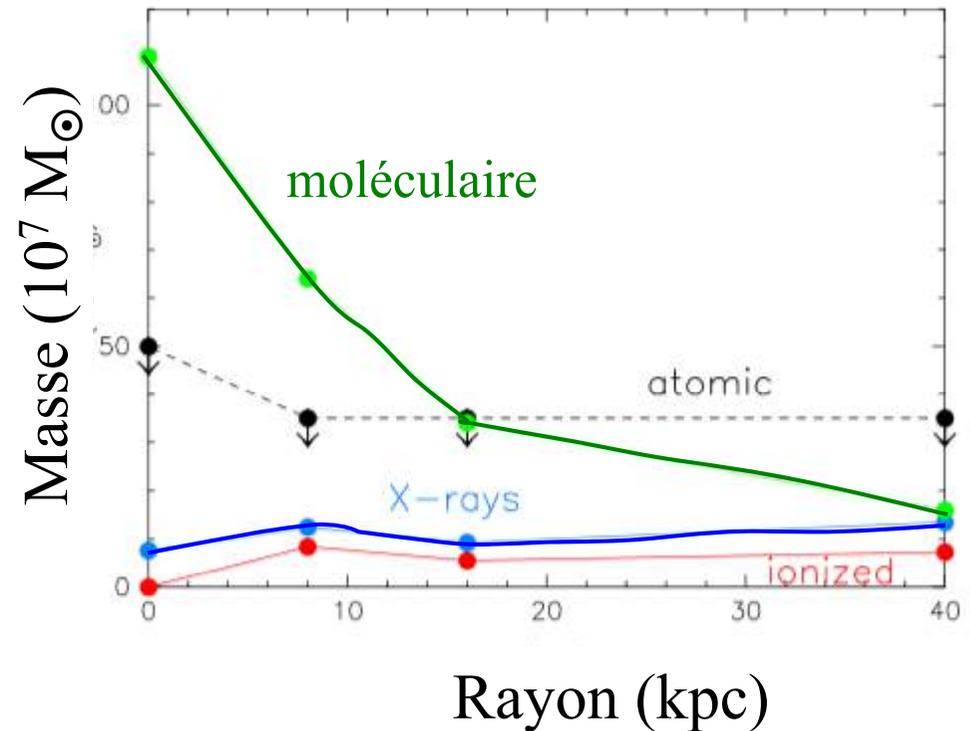


Amas de Norma

Stoppe la formation d'étoiles

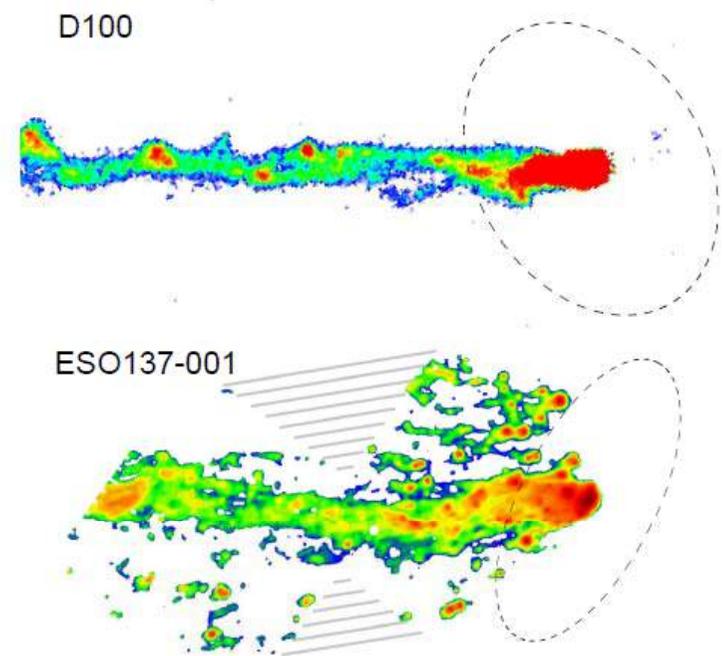
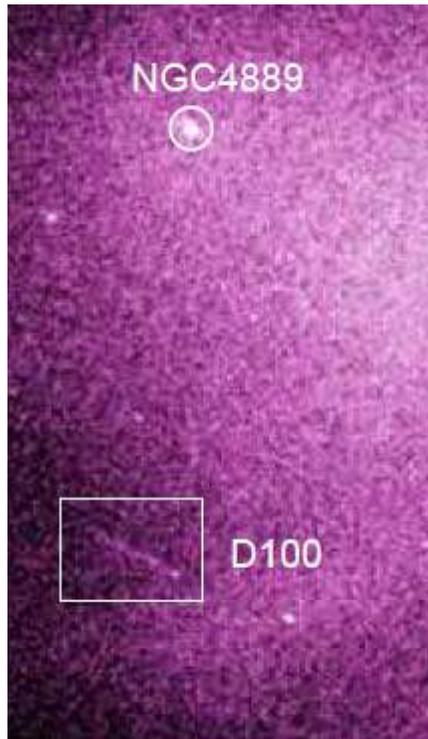


Traînée de 80kpc dans le gaz X
 40kpc en CO
 $M(\text{H}_2)$ en C = $1.5 \cdot 10^8 M_{\odot}$



Jachym et al 2014

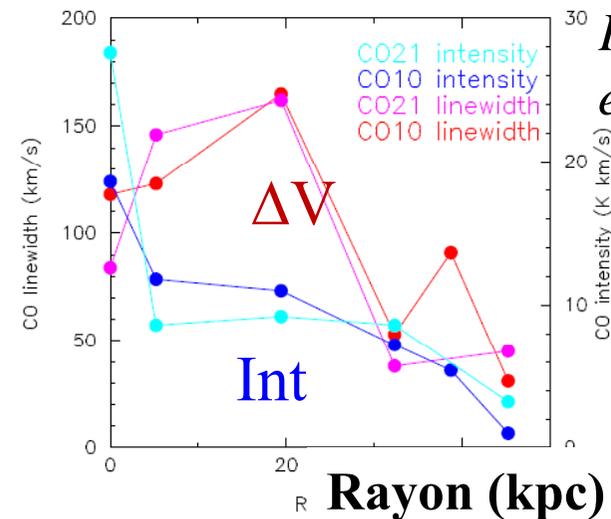
Pression dynamique dans Coma



MUSE
Fumagalli
et al 2014

Traînée plus fine dans D100
 Dernière étape du balayage?
 CO détecté jusqu'à 45kpc

Jachym et al 2016



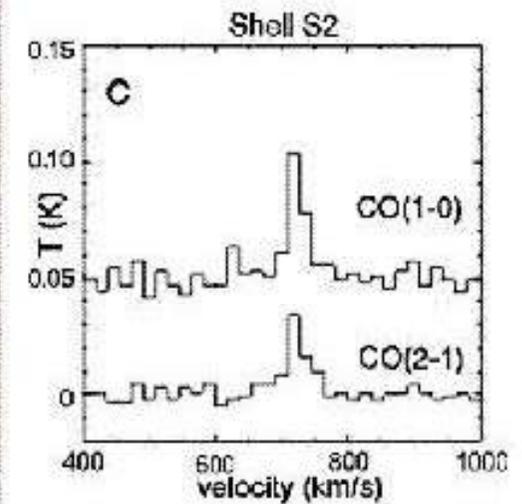
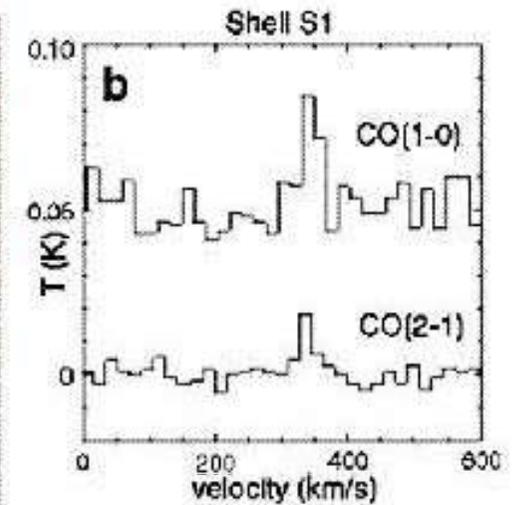
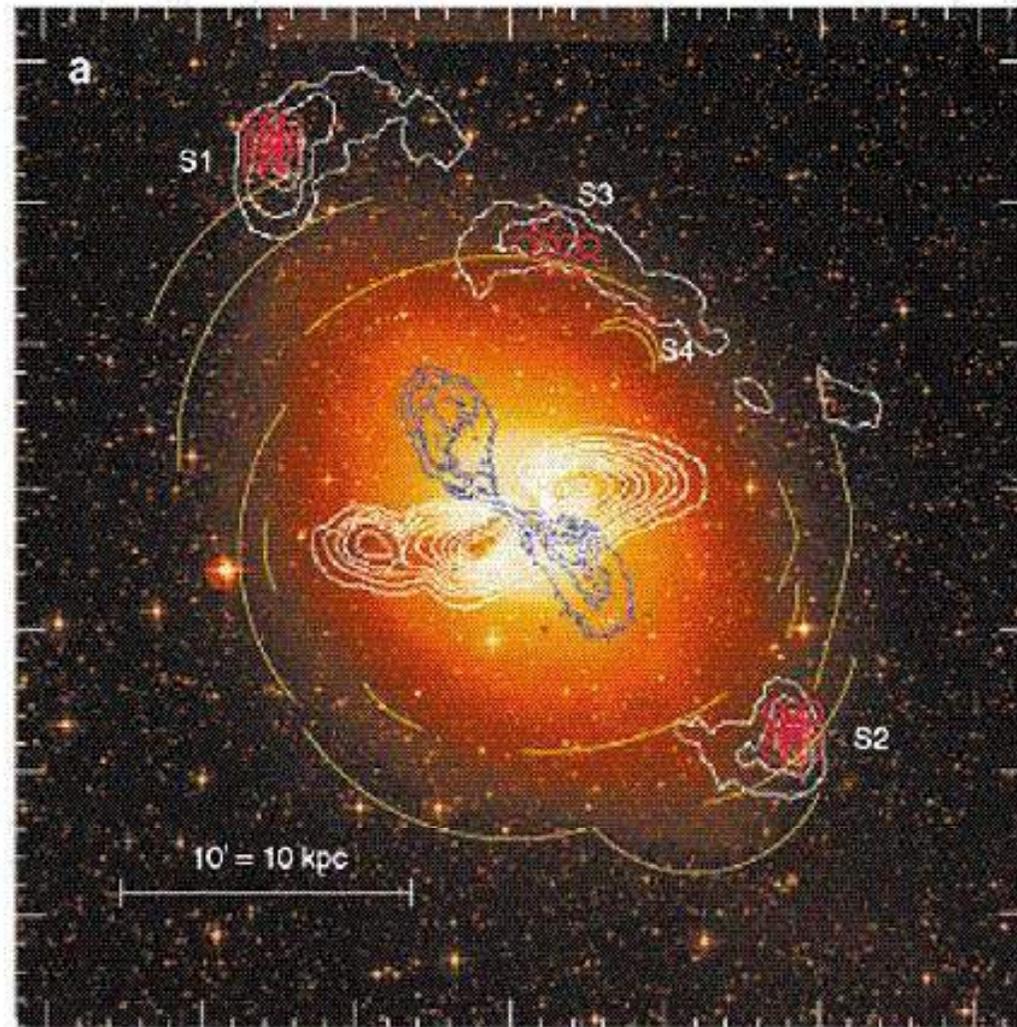
Gaz moléculaire dans les coquilles

Jaune:
étoiles

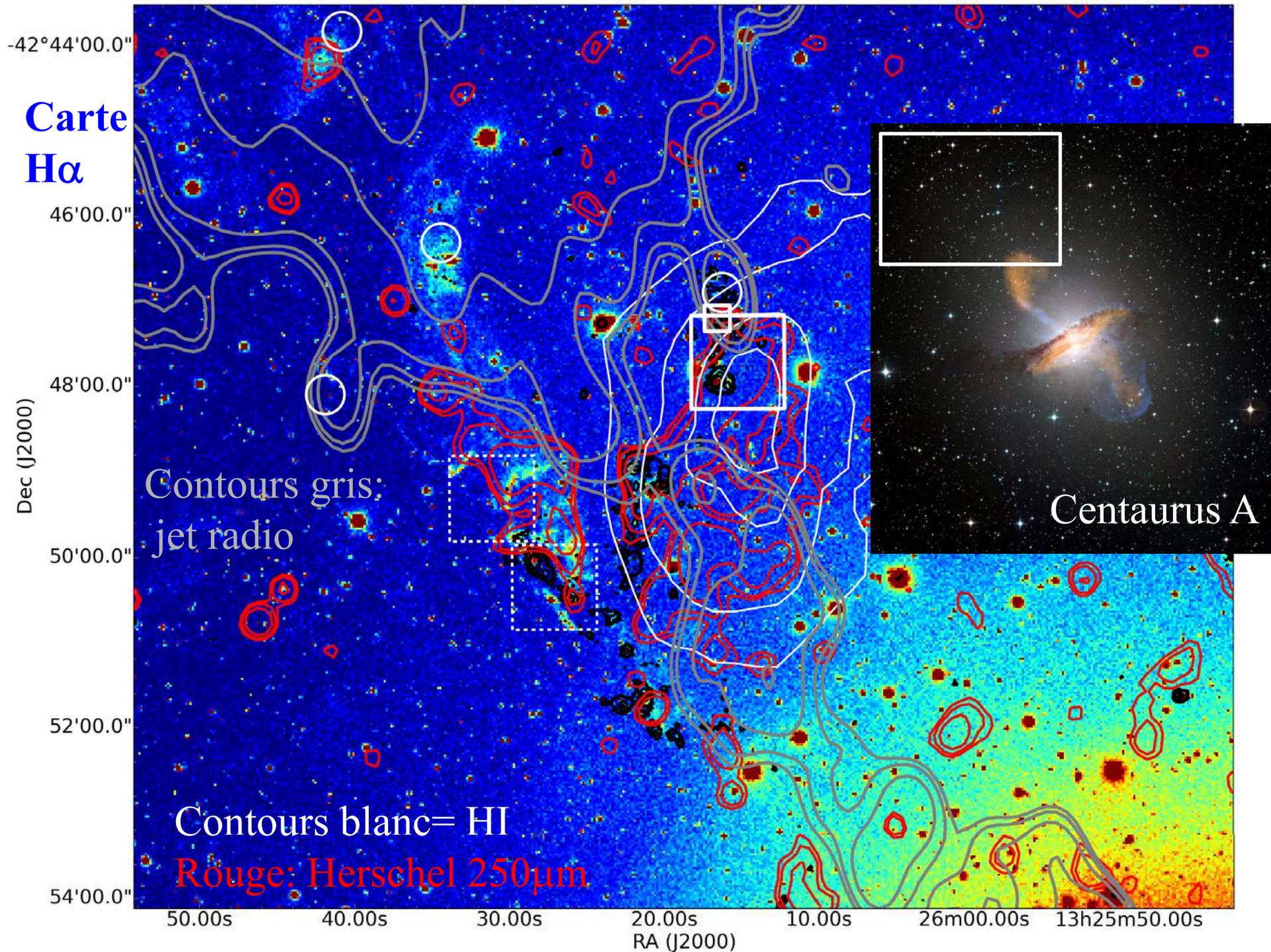
Blanc: HI

Bleu: jets
radio

Rouge
CO observé



Charmandaris et al 2000

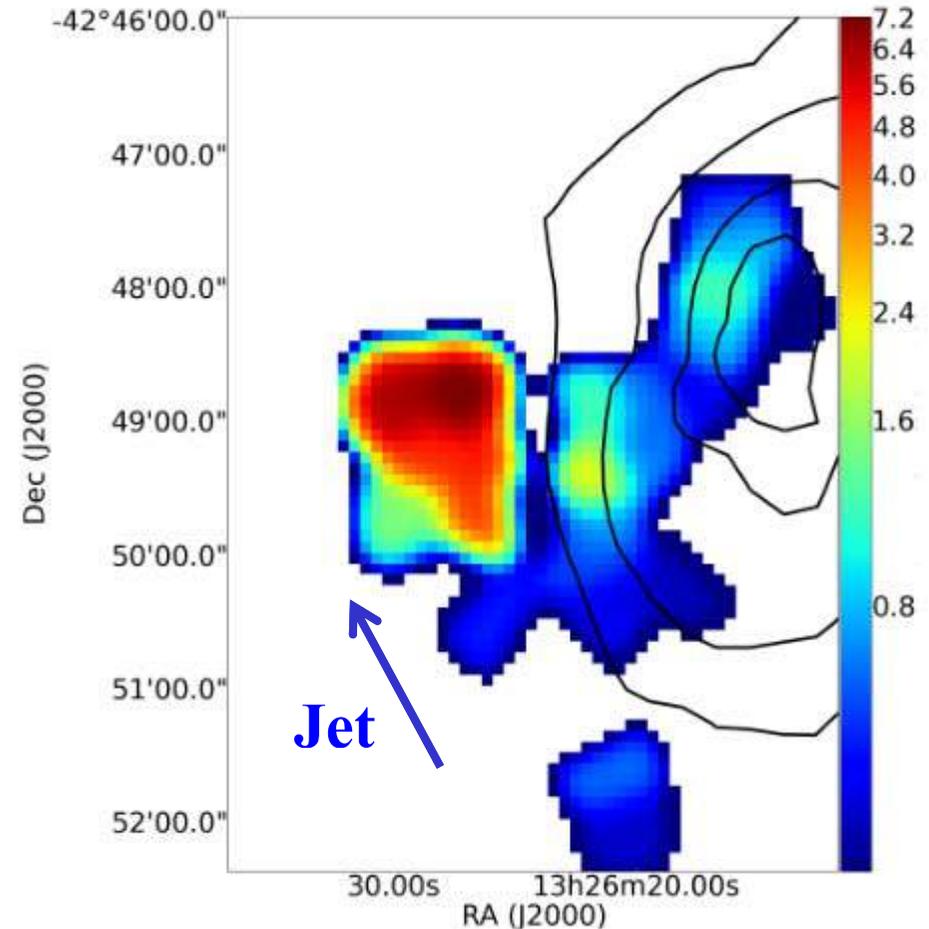
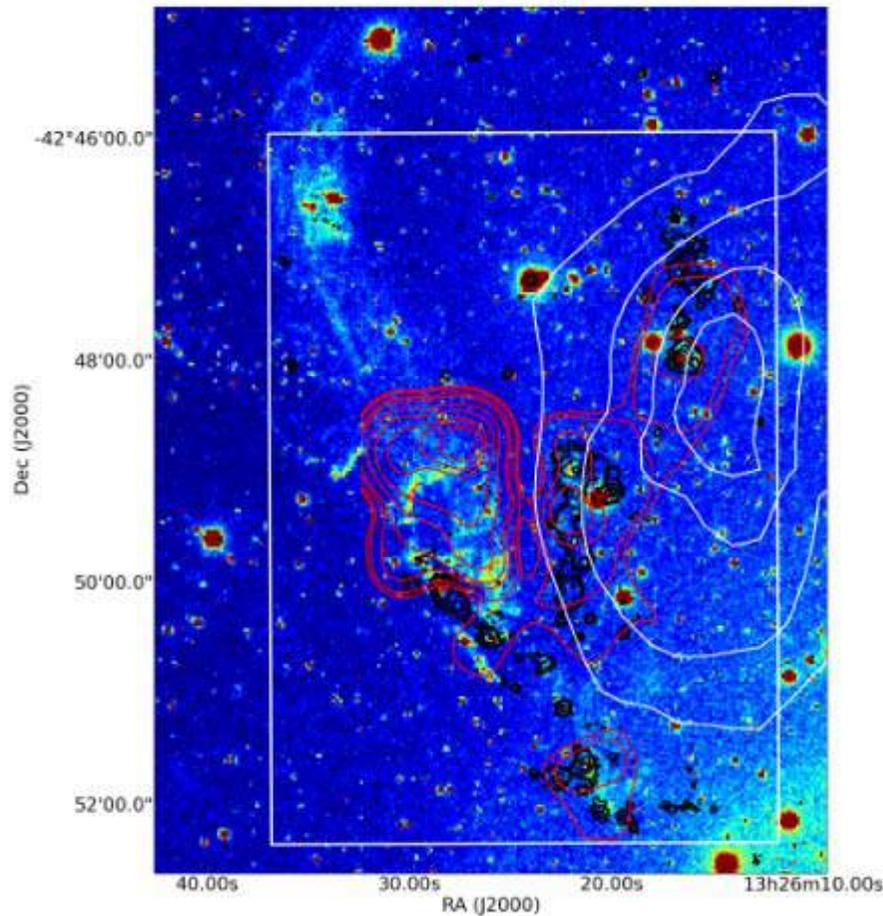


Transition gaz atomique → moléculaire

H₂ domine à l'Est, et HI à l'Ouest

Carte H α

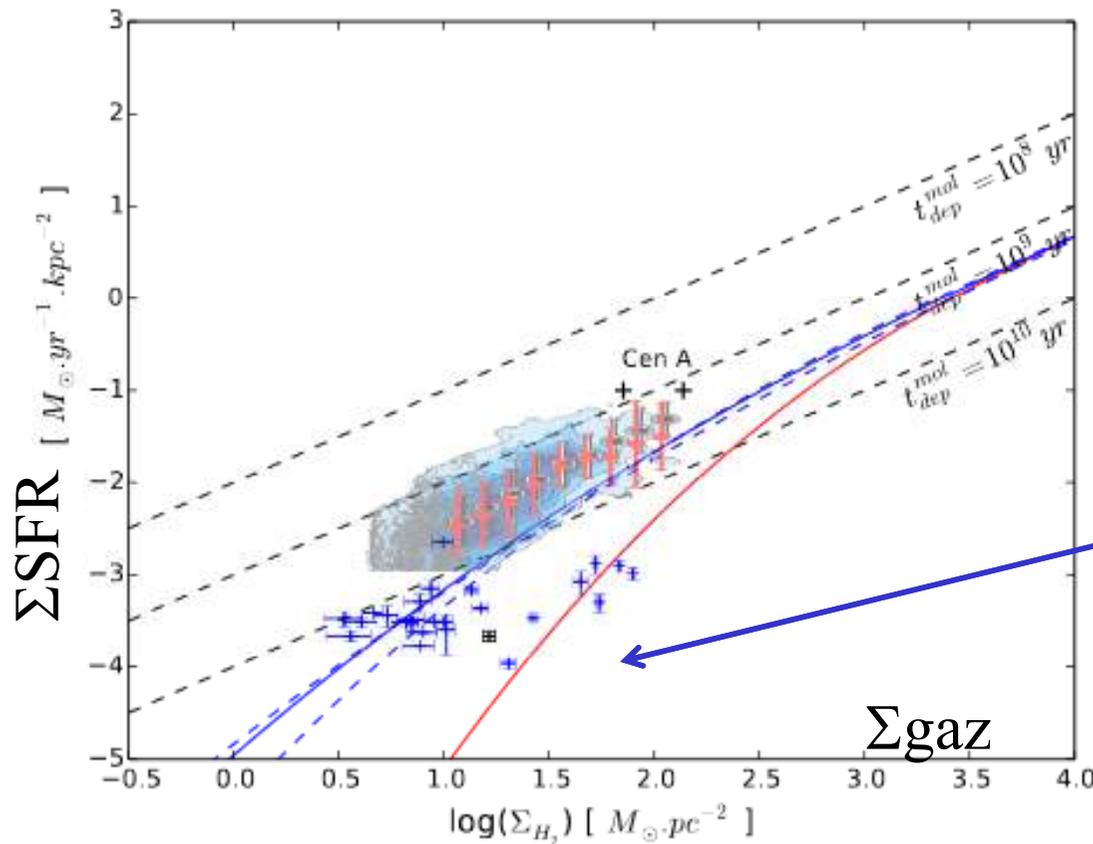
Salome et al 2016



Rouge: CO, Blanc: HI, FUV-Galex: noir CO21, contours HI

Le jet induit la formation d'étoiles

Le jet radio provoque la formation d'étoiles, en comprimant le gaz HI le long du jet \rightarrow H_2 -- feedback positif de l'AGN



Cependant, l'efficacité de formation d'étoiles est plus faible que dans les disques

\rightarrow Pas assez de pression

\rightarrow Le temps de dépletion plus grand que l'âge de l'Univers

Résumé

La formation d'étoiles doit être étouffée,
pour les petites et fortes masses

Deux séquences de galaxies: rouge et bleue
Lois empiriques: Masse et environnement

Feedback des AGN: en mode quasar, flot conservant l'énergie
en mode radio: jets des AGN, flots de refroidissement

Processus d'environnement: Marées, pression dynamique du gaz chaud
Gravité ou étouffement par le sphéroïde (plus lent)

Feedback négatif, parfois positif des AGN, formation d'étoiles induite
Mais avec faible efficacité

