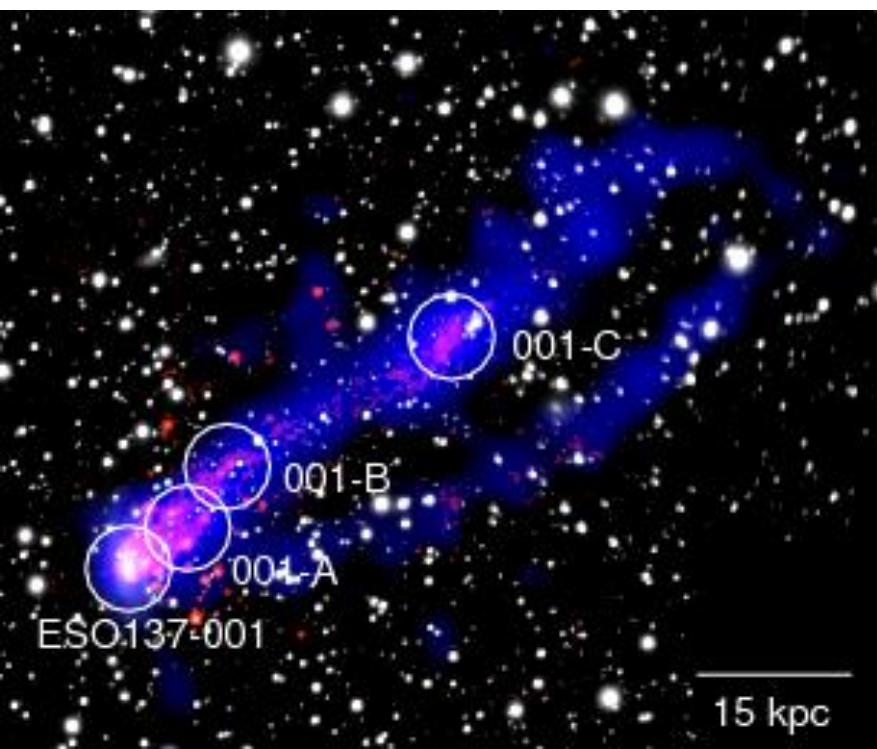




COLLÈGE
DE FRANCE
—1530—

Chaire Galaxies et Cosmologie

Physique des galaxies dans les amas et filaments



Françoise Combes



Laboratoire d'Étude du Rayonnement et de la Matière en Astrophysique

Les grandes questions

Quelle est l'influence de l'environnement sur les galaxies?

« **Nature or Nurture** »: Part de l'acquis et de l'inné?

La morphologie des galaxies peut changer

Sp \rightarrow E, puis avec accrétion de gaz E \rightarrow Sp

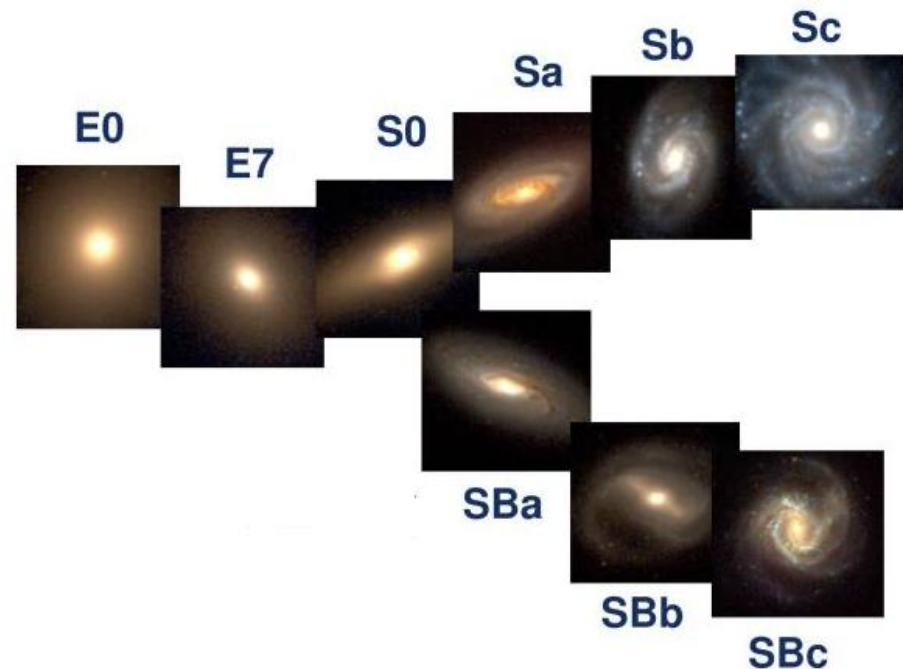
Ou bien, uniquement dans un sens

Spirales \rightarrow Elliptiques

Groupe ou amas?

Ou bien, **tout est pré-destiné:**

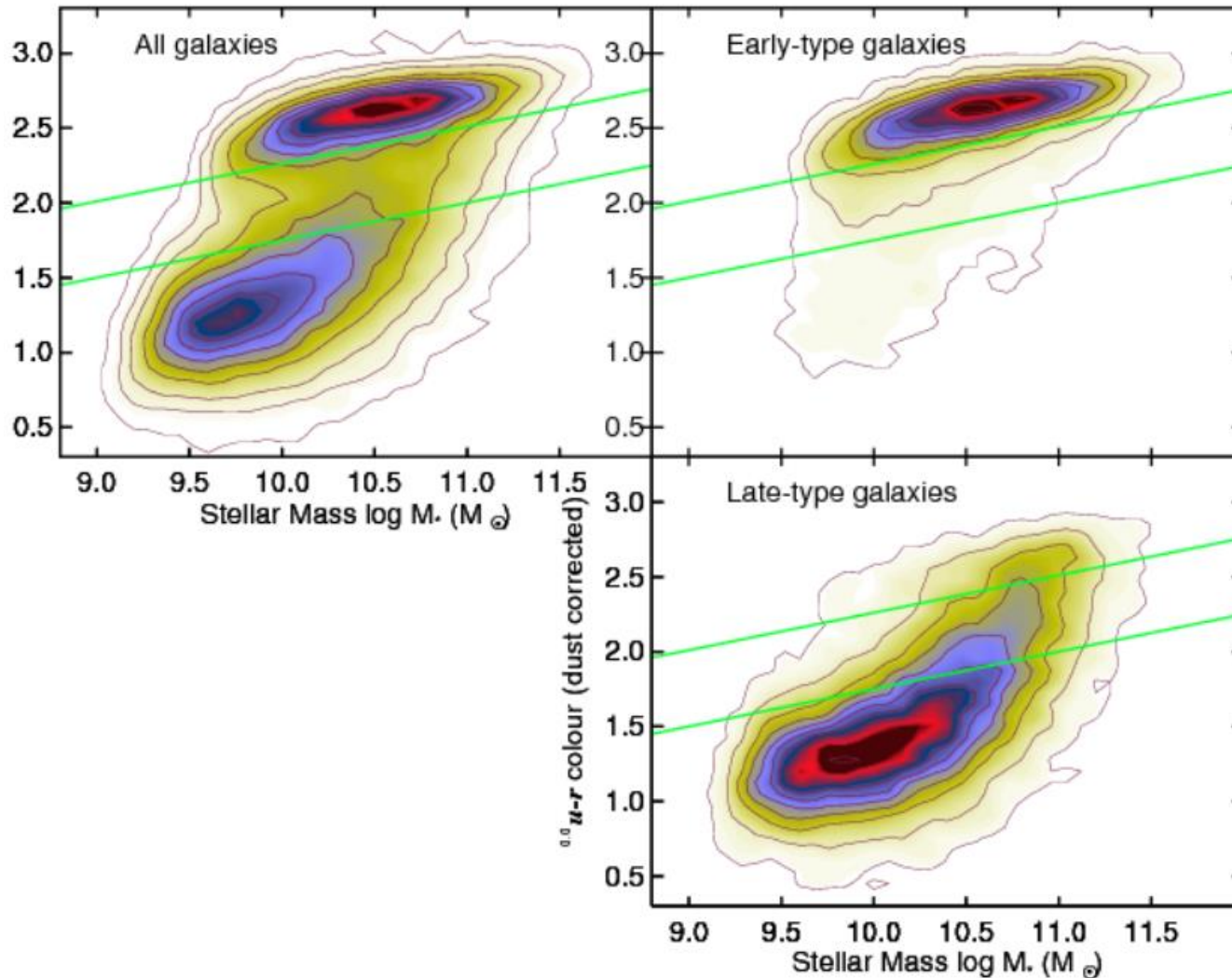
Selon les conditions initiales de sur-densité au départ



Morphologie et formation d'étoiles

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

← Bleu Couleur Rouge →



E



S0



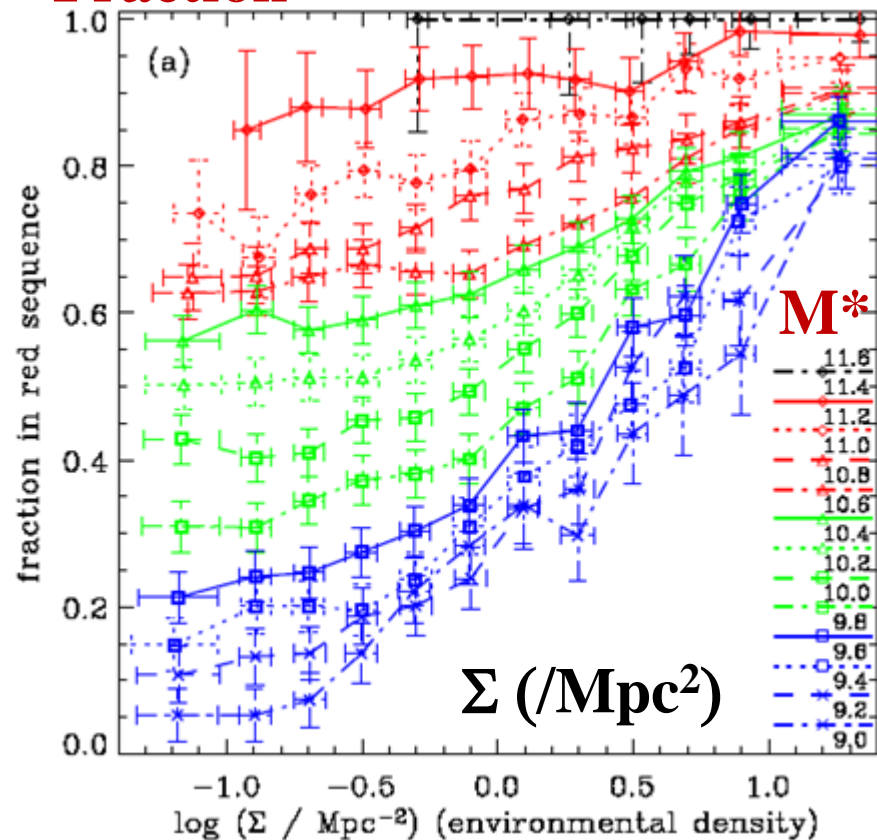
S

La fraction des galaxies passives augmente avec la masse et l'environnement

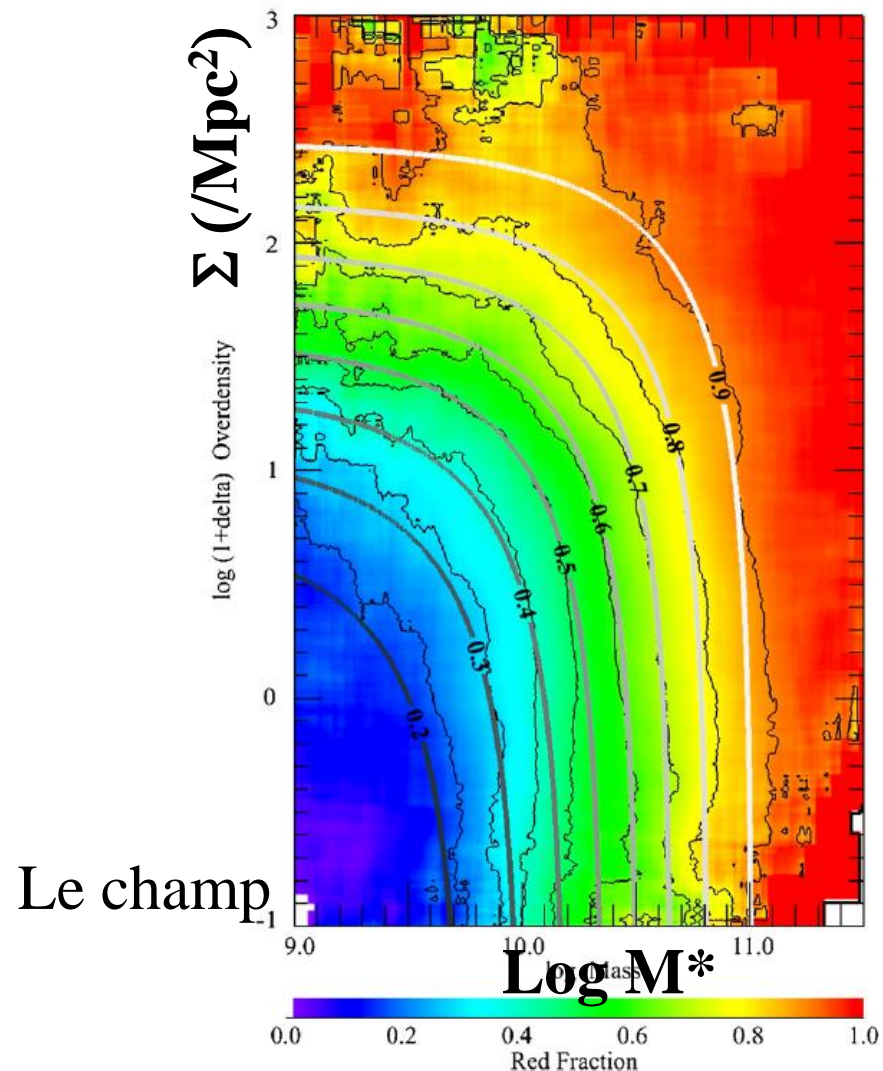
Séparabilité des deux facteurs

Masse et environnement

Fraction



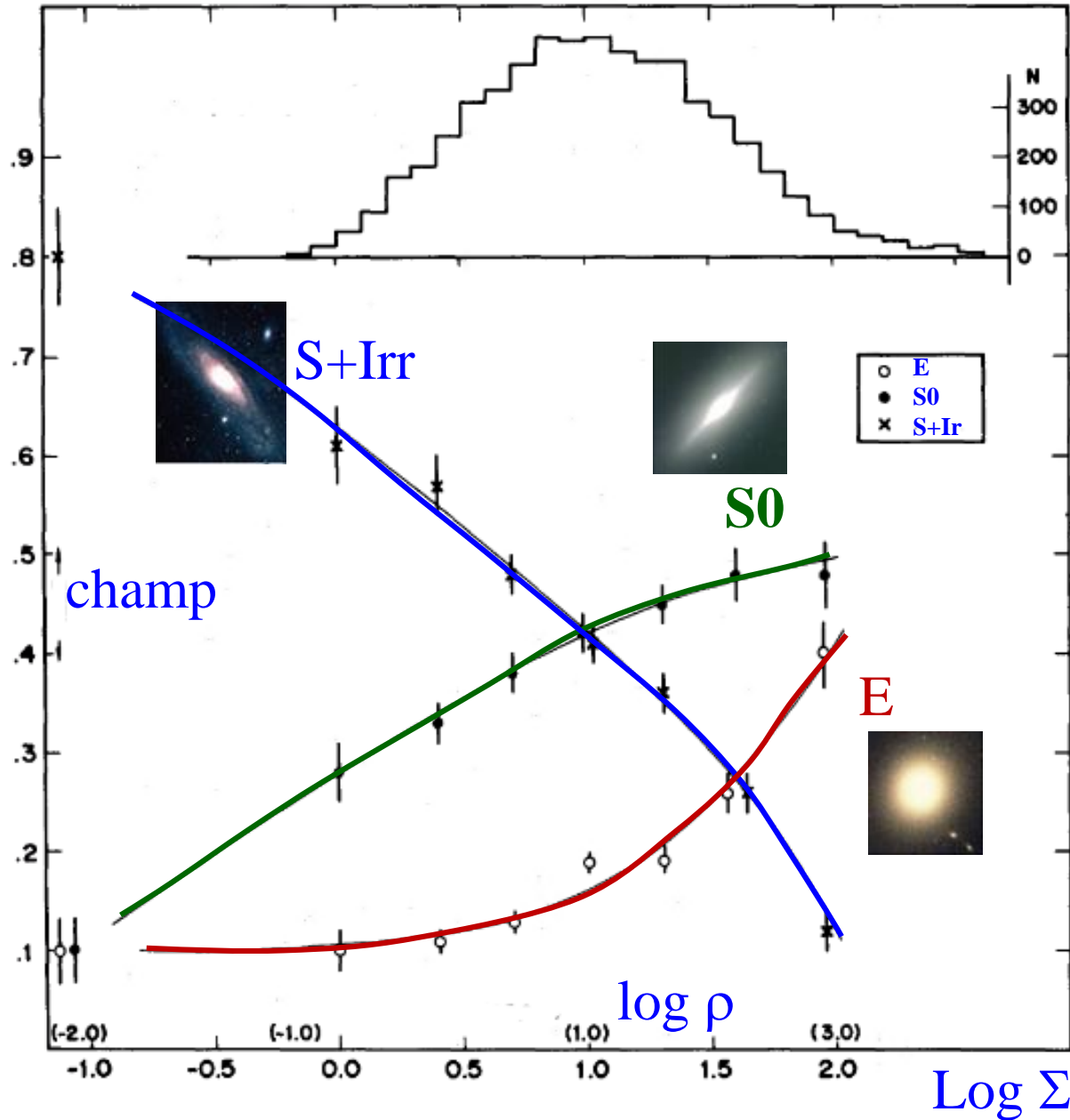
Baldry et al 2006



Peng et al 2010

Ségrégation morphologique

Fraction de population

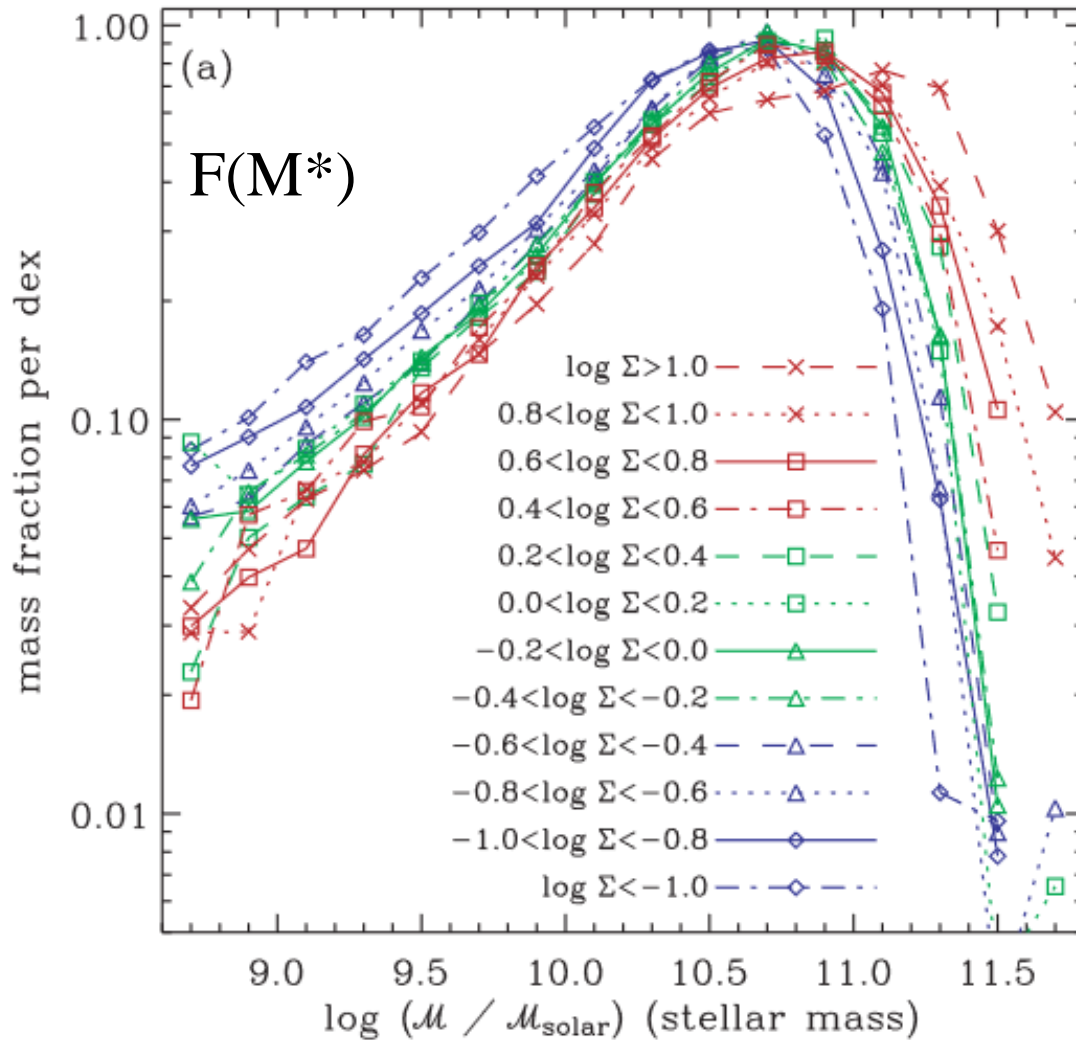


Plus la densité surfacique des galaxies augmente

→ Fréquence des S0 et E
Formation d'étoiles
supprimée

Dressler 1980

La fonction de masse et l'environnement



Log (M^*)

Rouge: hautes densités
Bleu: Faibles densités

Le tournant à la
masse de Schechter
croît avec Σ

L'environnement affecte les satellites

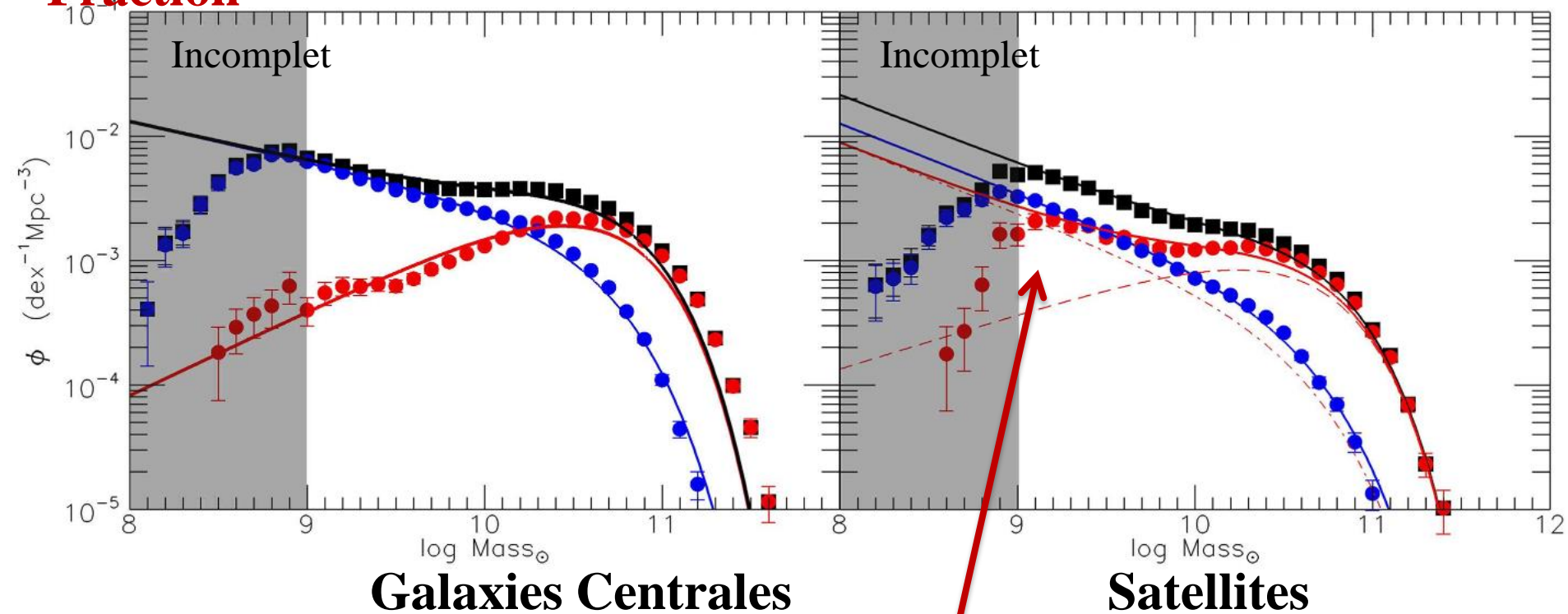
La fraction des galaxies centrales passives dépend de la masse

Pour les satellites, c'est surtout l'environnement

L'environnement se manifeste surtout par la sur-densité

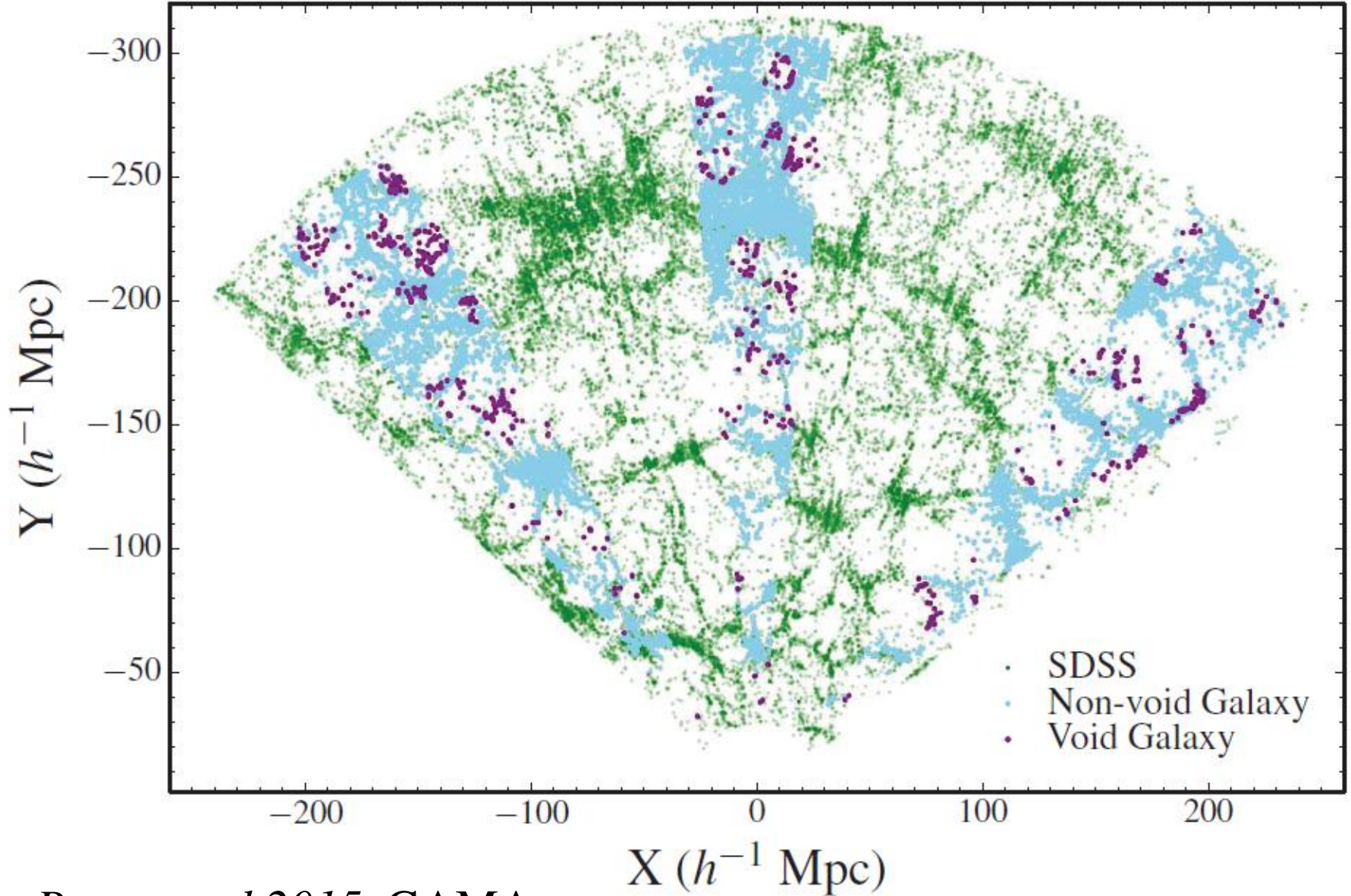
Pas M^* ou M_h des galaxies satellites

Fraction



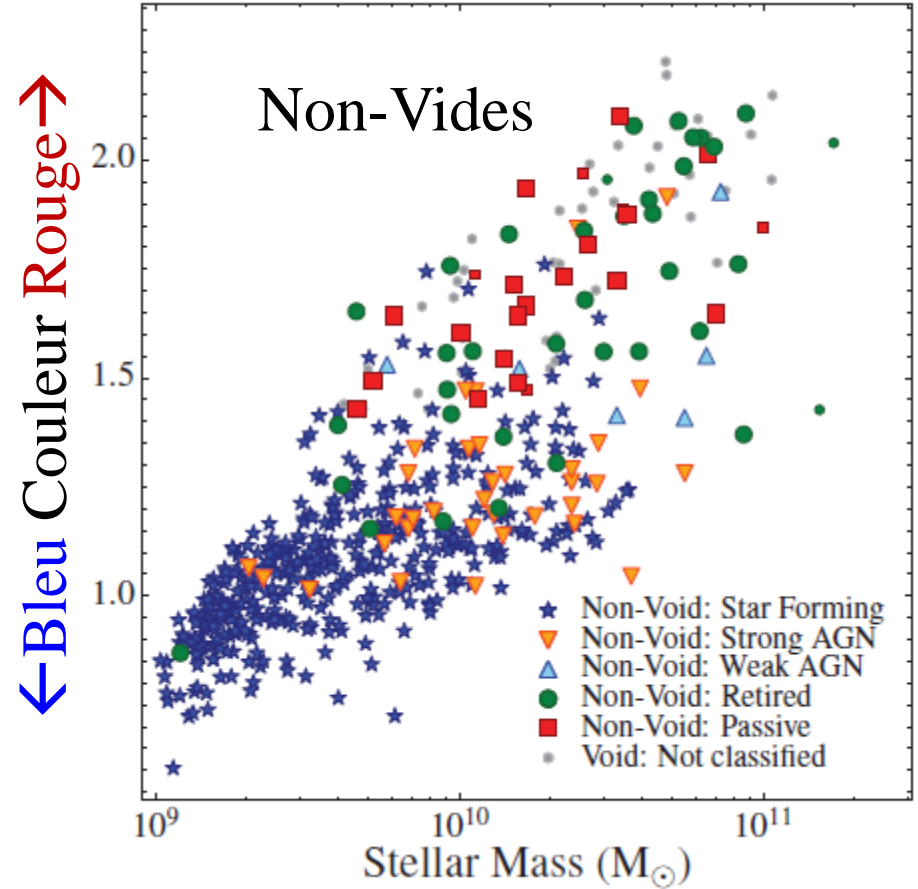
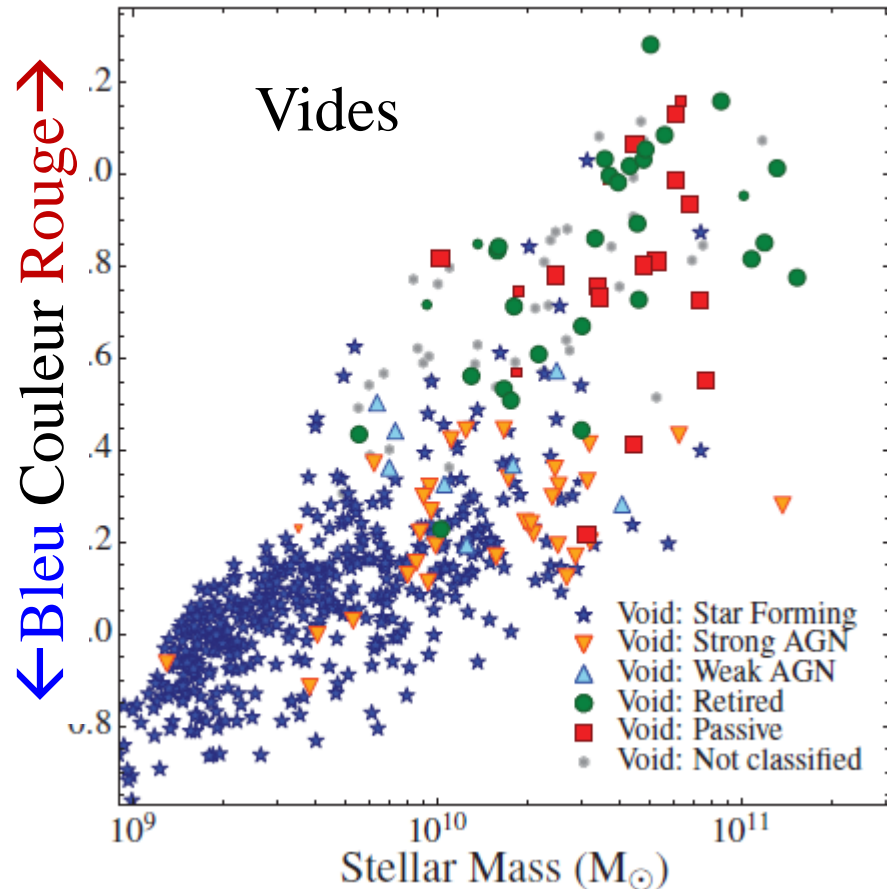
Effet de l'environnement

Galaxies dans les vides



Penny et al 2015 GAMA

Dans les vides, les galaxies massives sont passives

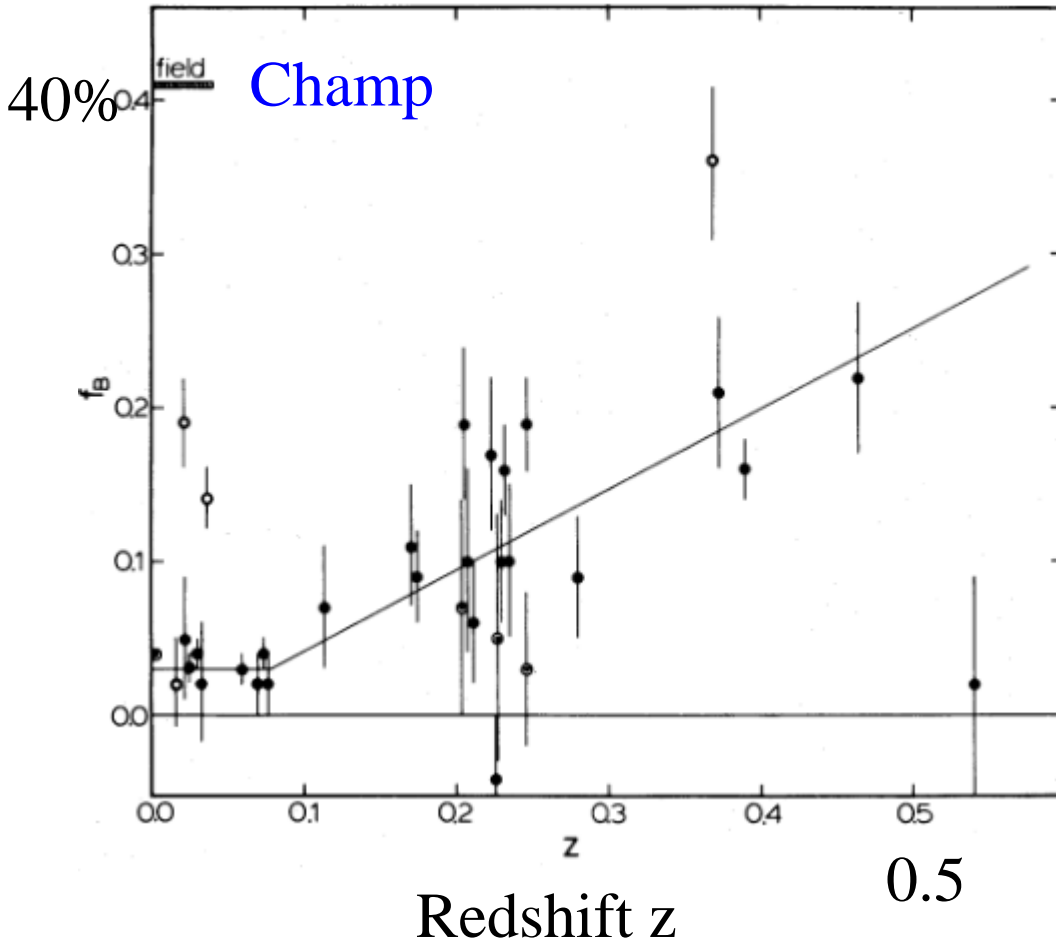


Pour des masses $M > 10^{10} M_{\odot}$, les processus internes dominent
Dans les vides, les galaxies massives ont plus de disques

Penny et al 2015

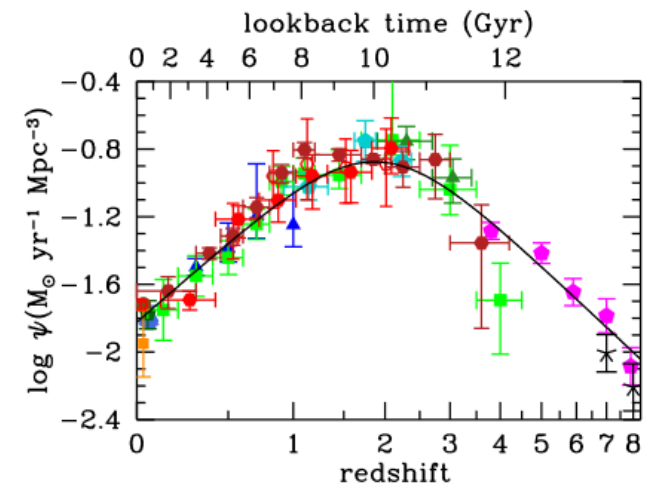
Evolution avec le redshift z

Fraction de galaxies bleues f_b



Effet Butcher-Oemler (1984)
→ La passivation des galaxies est récente?

Augmentation du taux de formation d'étoiles supérieure au taux cosmique



Harcèlement des galaxies

Dans les amas, les interactions en paires sont rares
Vitesses relatives très grandes $V \sim 600-1000 \text{ km/s}$

Approximation impulsive

$$\text{Force de marée} \quad dv/dt = GM_p \delta / r^3$$

On peut négliger le mouvement des particules à l'intérieur
d'une galaxie, **durant** $t=b/V$: $\Delta v = dv/dt \cdot b/V = GM_p \delta / V b^2$

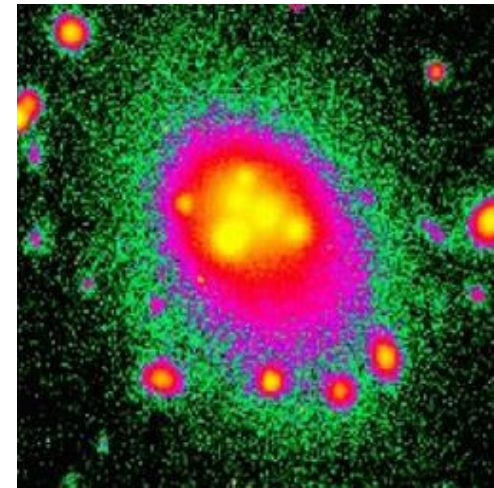
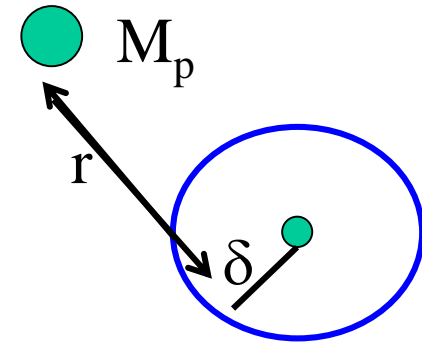
Perturbations pour des faibles paramètres d'impact b

Un grand nombre de collisions peuvent faire perdre de la masse
aux galaxies \rightarrow étoiles intra-amas

En plus, force de marée de l'amas lui-même

Gradient de force gravitationnelle sur les galaxies

Ne survivent que si densité $> M(\text{amas})/D^3$



Fusion des halos

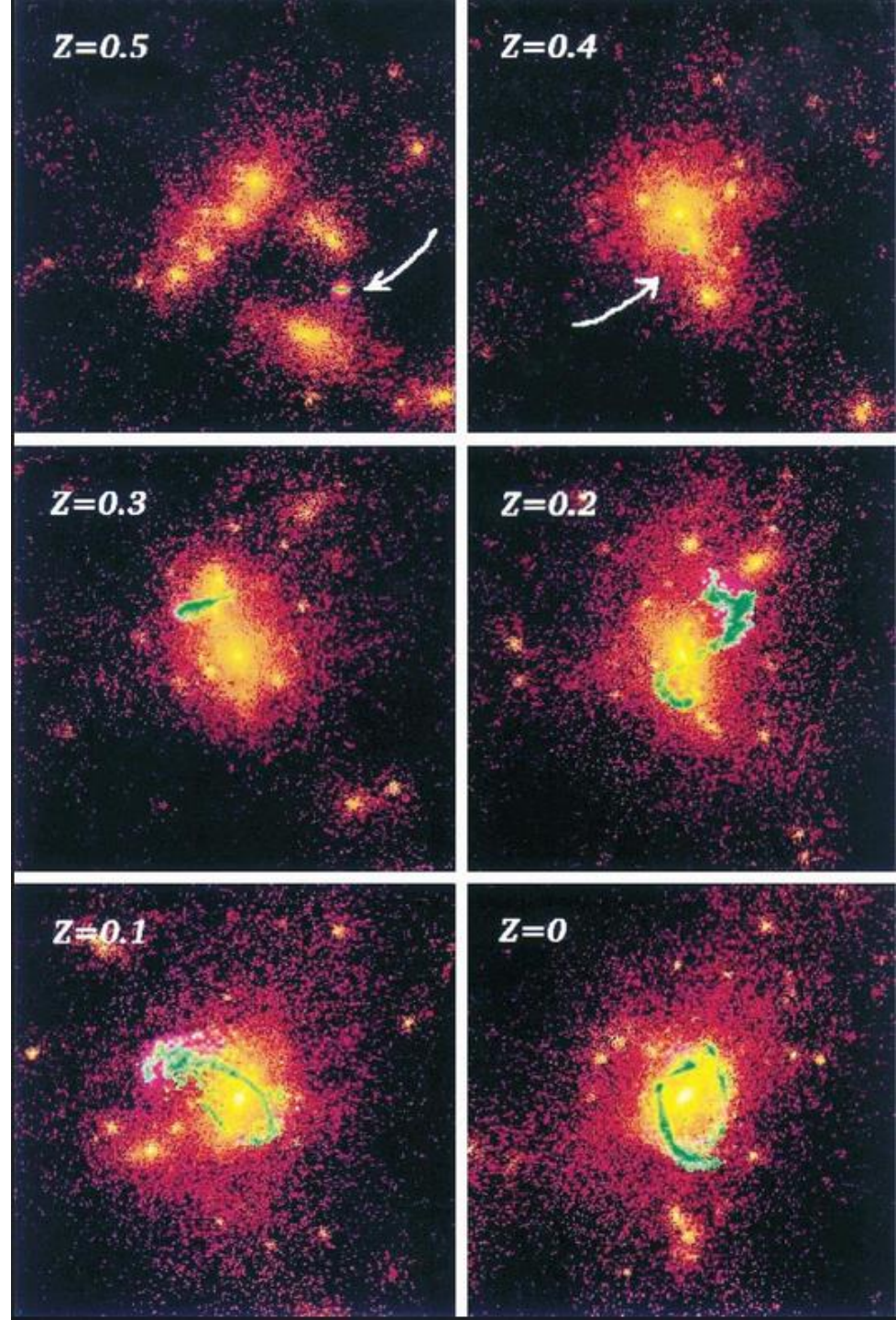
Boîte de 10Mpc au centre de l'amas
Couleur: matière noire

En vert: particules stellaires
dans le plan d'une des galaxies
→ Elles orbitent autour de
la galaxie centrale

Et tracent l'orbite de la Galaxie
détruite
1000-250kpc apocentre-pericentre

$R_{\text{vir}}(z=0) = 2 \text{ Mpc}$

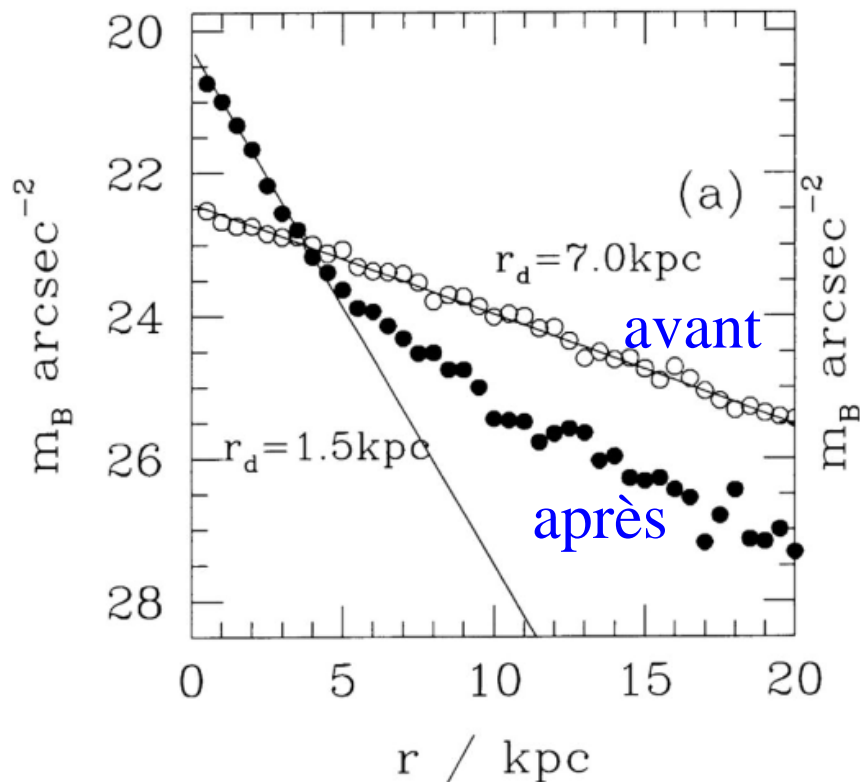
Moore et al 1999



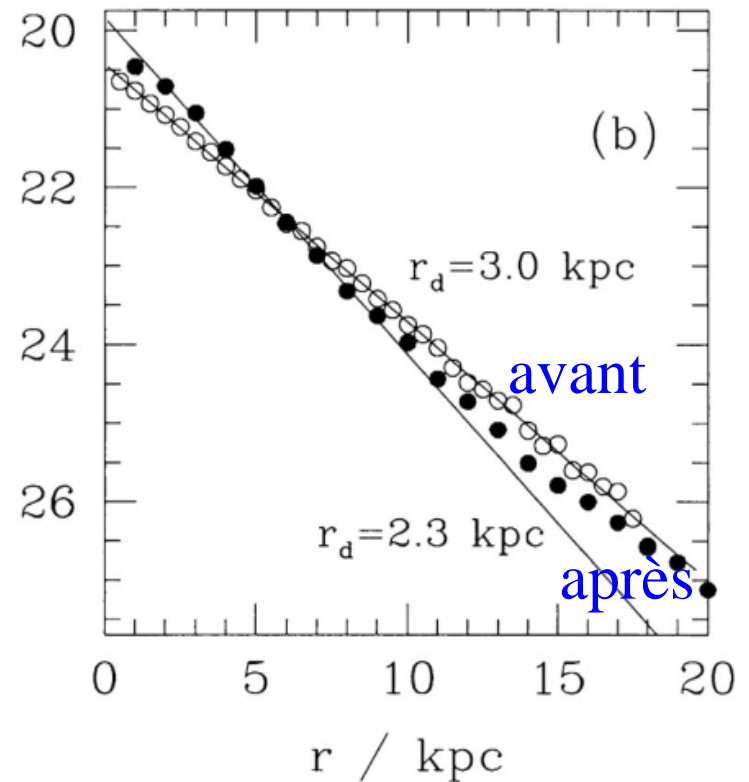
Destin des galaxies LSB, HSB

Les galaxies plus concentrées, et disques plus massifs résistent mieux

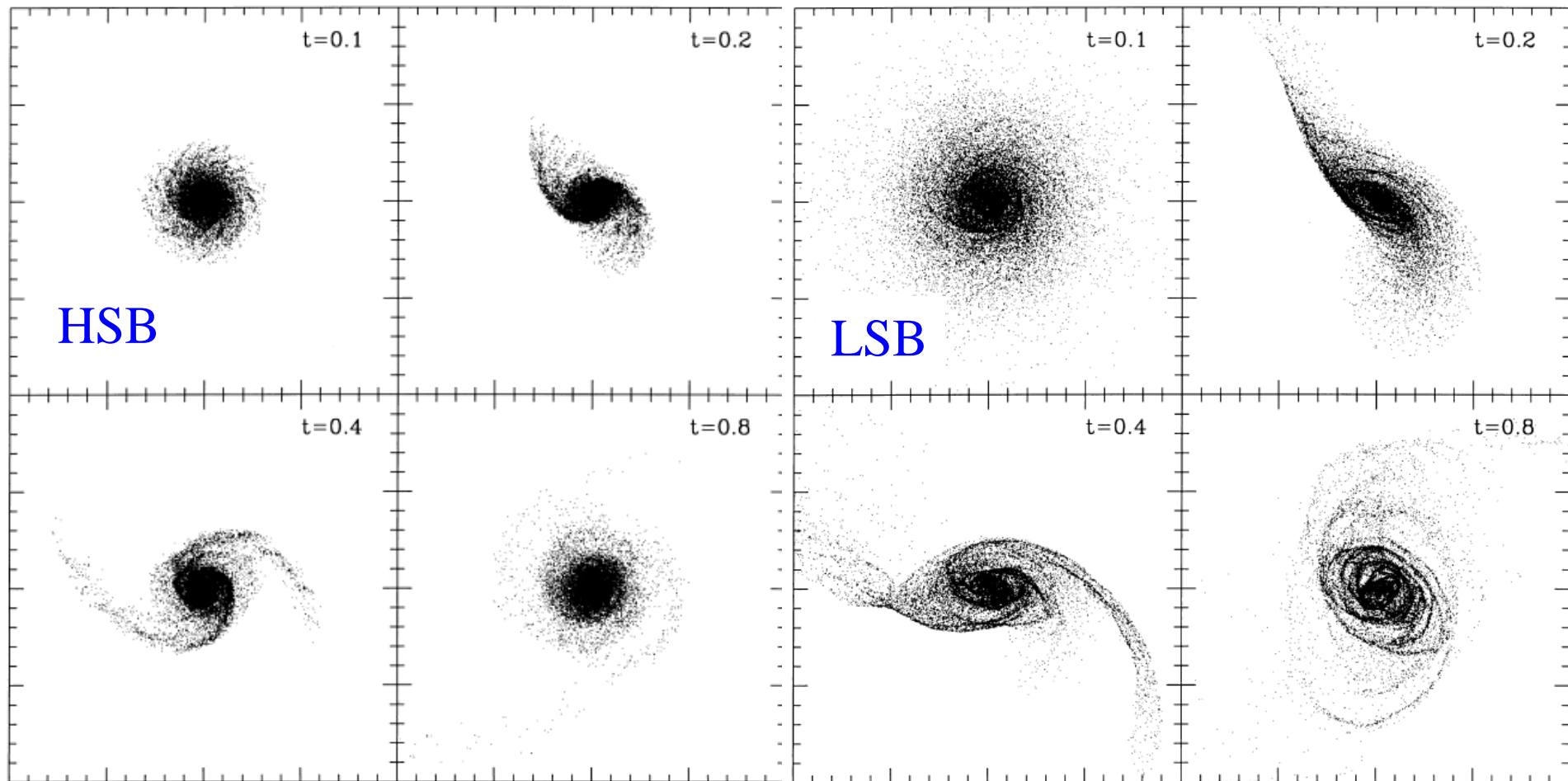
LSB: Low Surface Brightness



HSB: High Surface Brightness



Collisions rapides, paramètre d'impact 60kpc
Dans tous les cas, épaissement des plans



-60

0

60kpc

UDG (Ultra Diffuse Galaxies)

Très faibles luminosités, en moyenne $6 \cdot 10^7 L_{\odot}$

Grandes tailles $r_{\text{eff}} = 1.5\text{-}4.6$ kpc, comparable à MW, L*

→ Très faible brillance de surface $24 < \mu < 27$ mag/arcsec²
Sersic $n=1$ (not $n=4$)

Fréquentes dans les amas

(Koda et al 2015, van Dokkum et al 2015)

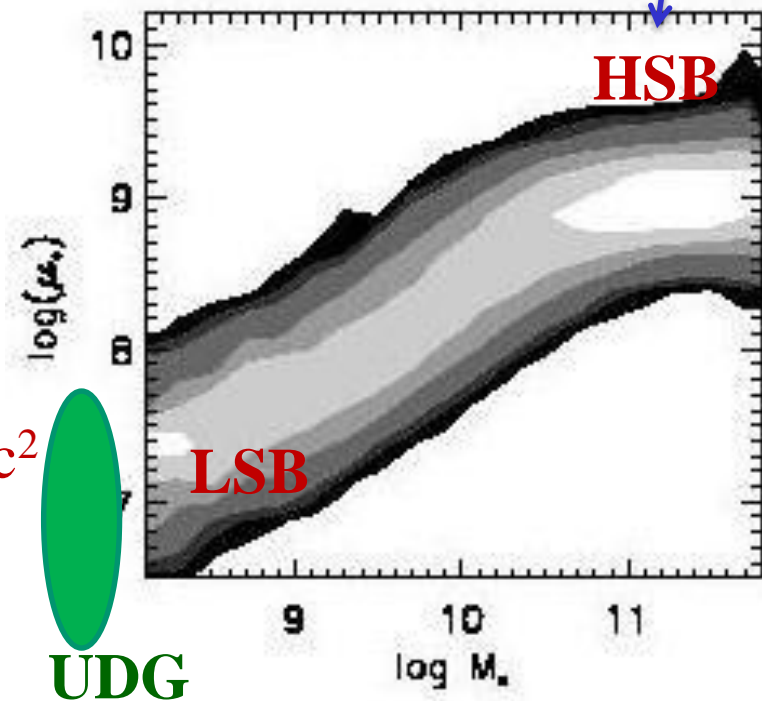
8 amas $z=0.04\text{-}0.06$ (van der Burg et al 2016)

En équilibre dans l'amas depuis longtemps

Dominées par la MN

25mag/asec²

21mag/asec²



Kauffmann et al 2003

UDG

UDG Ultra Diffuse Galaxies dans Coma

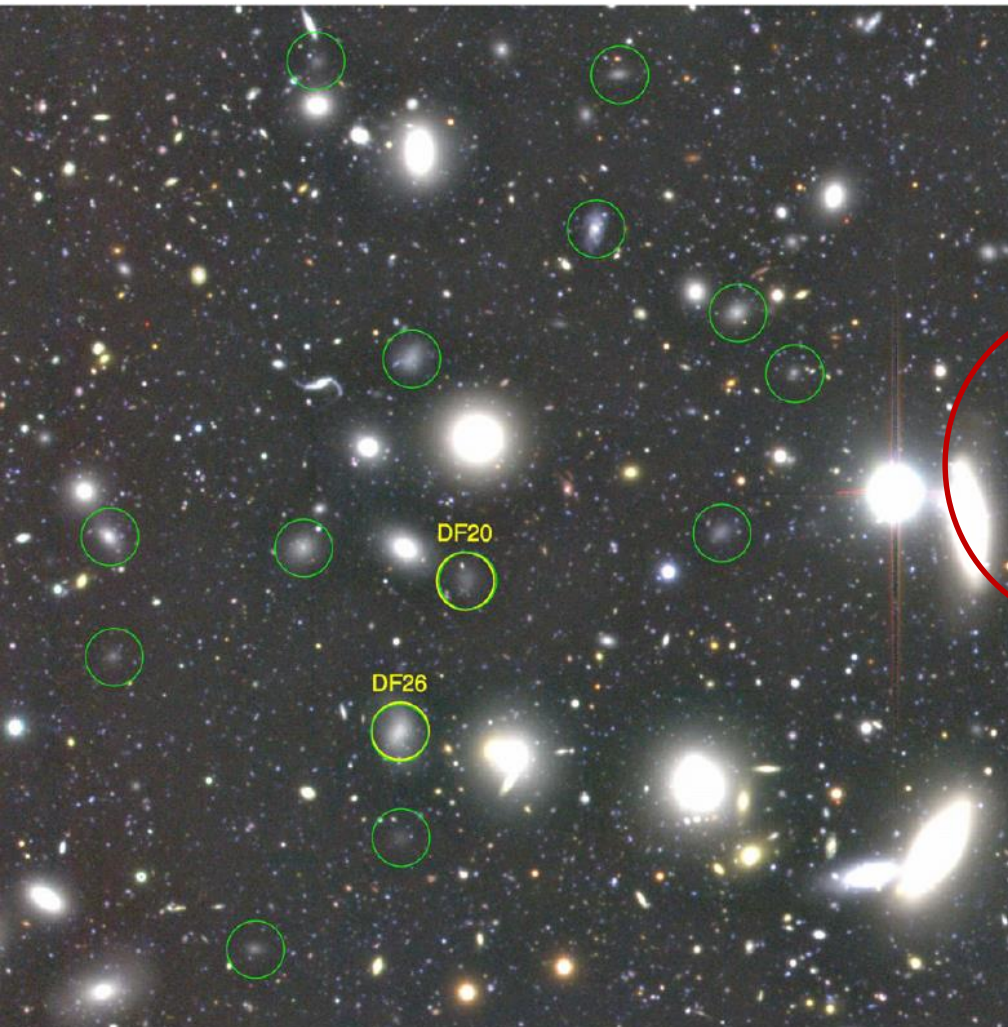
854 UDG, 332 aussi grandes que MW
Distribuées au centre de l'amas

Koda et al 2015

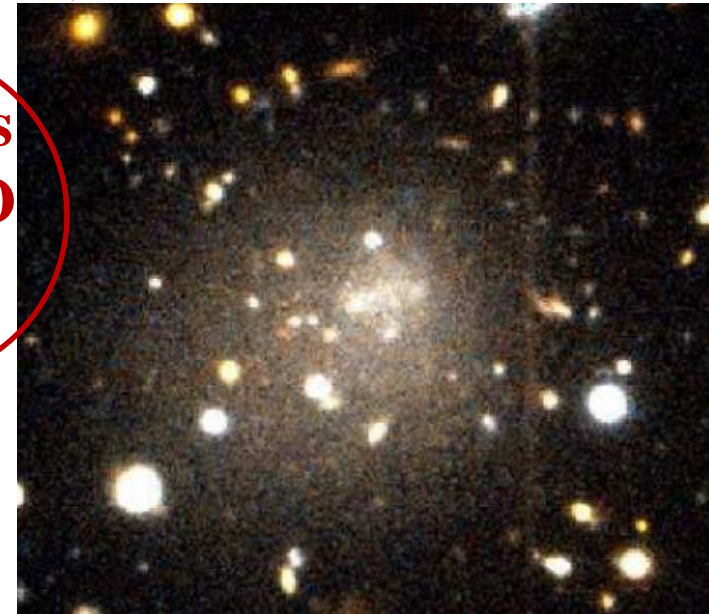
Plus dans les amas que le champ?
Parfois du gaz (Papastergis +17)

Forme sphéroïdale due aux
marées et pression dynamique

DGSAT-1, hors de tout amas

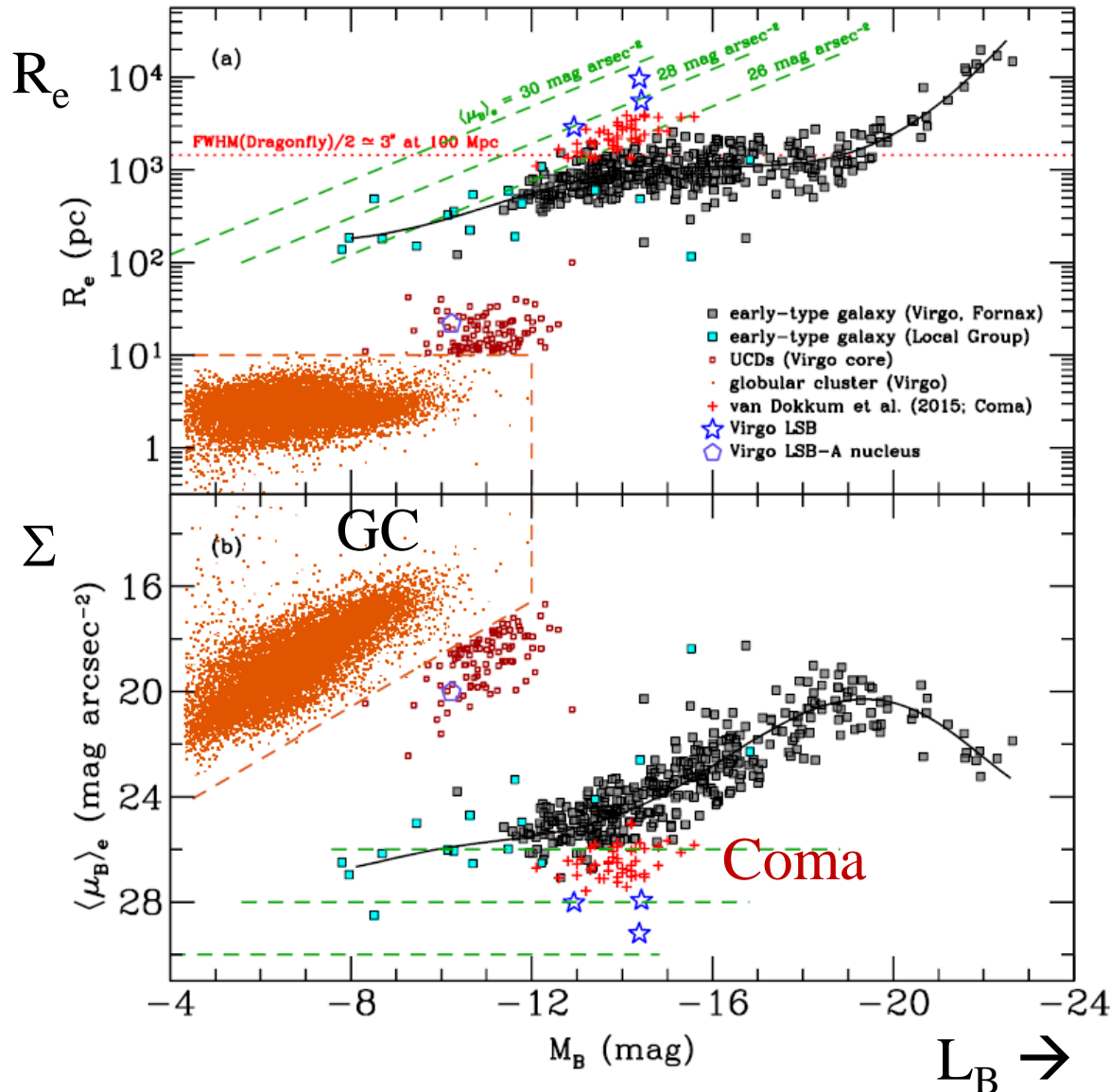


**No gas
HI, CO
+DF44**



Martinez-Delgado et al 2016
Roman & Trujillo 2017

UDG dans Virgo: pas de perturbation de marée



Objets $R_e = 3\text{--}10$ kpc
 $L_V = 2\text{--}9 \times 10^7 L_\odot$
 Pas de marée
 Moins brillantes que
 dans Coma

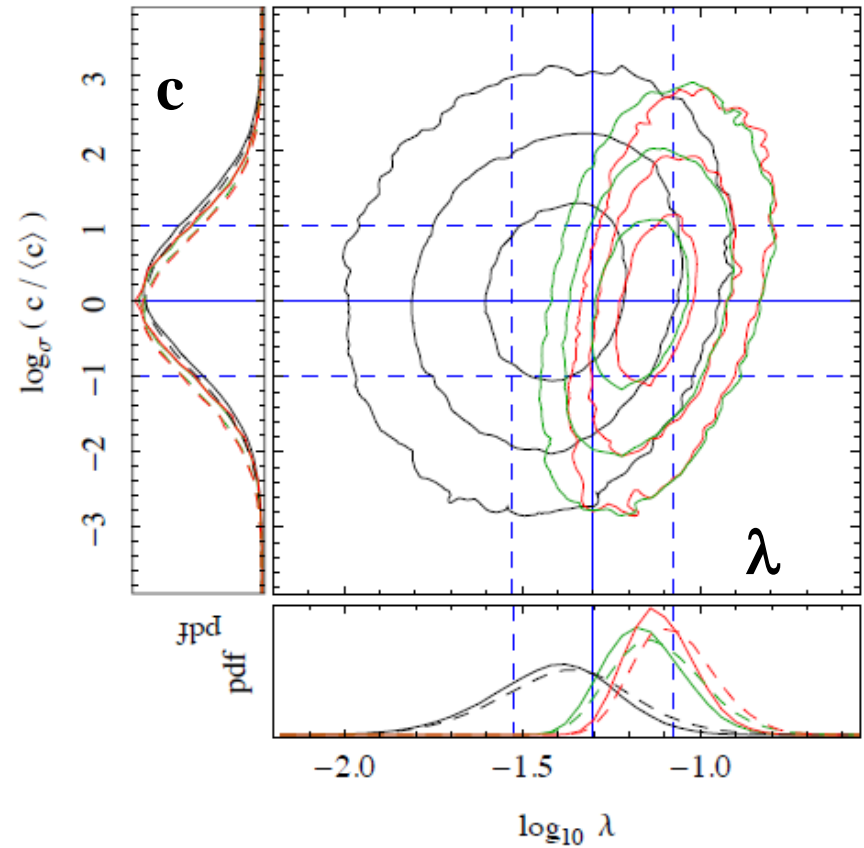
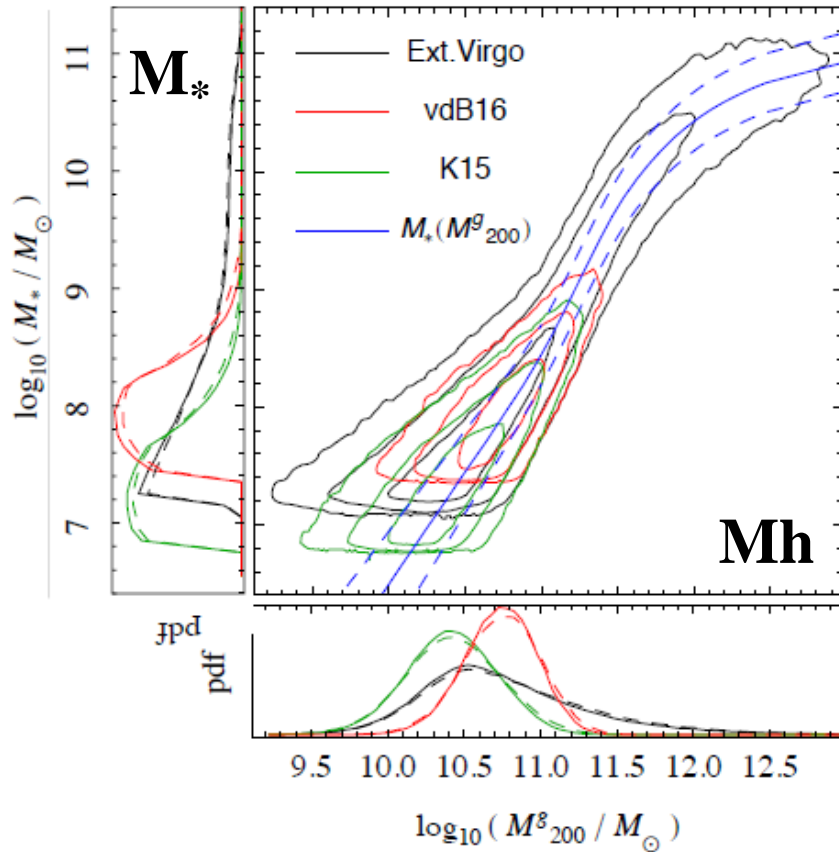
Une naine avec noyau
 → Va devenir UCD?

Mihos et al 2015

Moment angulaire λ , M_* , M_h , c

Trait plein: UDG des amas

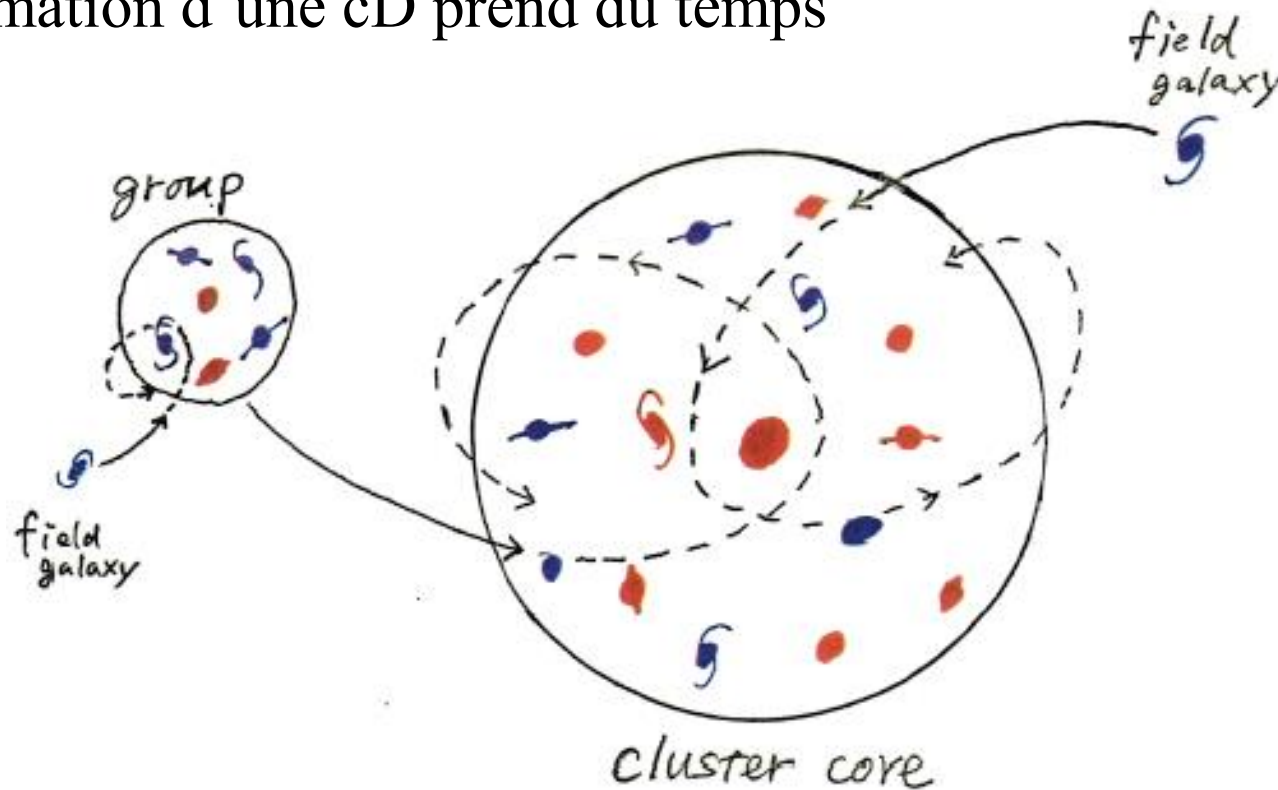
Pointillé: champ \rightarrow les marées n'ont pas grand effet $\lambda \equiv J|E|^{1/2}G^{-1}M^{-5/2}$



Bleu: M_h par abundance matching

Pré-processing dans les groupes

La formation d'une cD prend du temps



Les interactions/fusions de paires s'effectuent dans des groupes

Puis les groupes fusionnent en amas

→ Balayage par pression dynamique, harcèlement



Abell 1185, interactions de galaxies (La Guitare)

Les interactions lentes de paires se font aux bords des amas

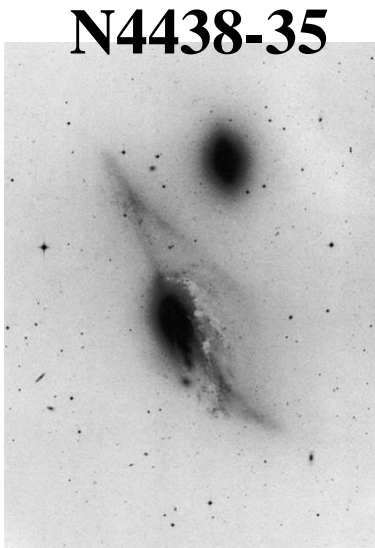
Les Souris, dans l'amas de Coma



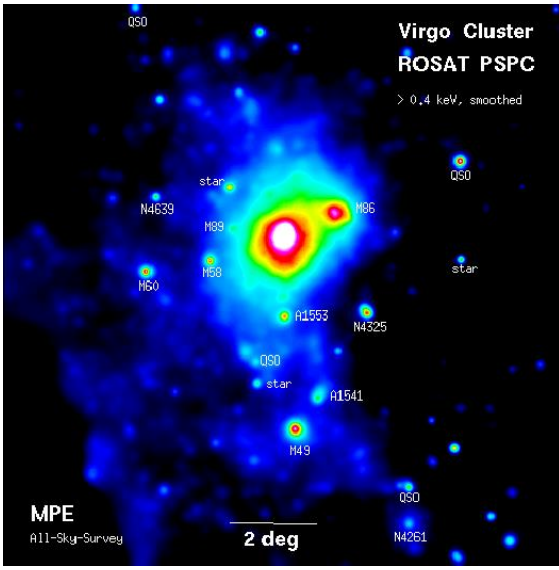
Hubble Image

Intéraction d'une galaxie avec l'amas

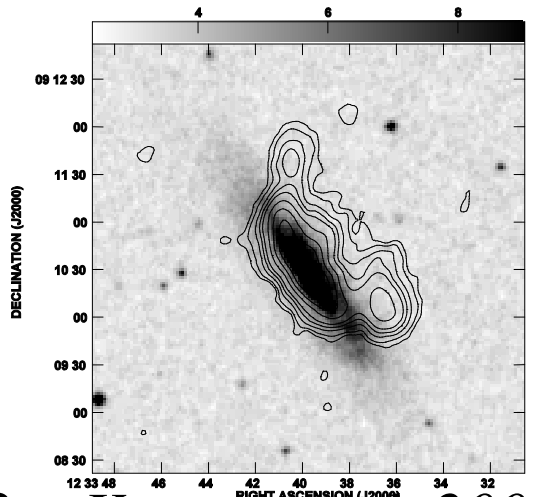
- Interaction gravitationnelle galaxie - amas
- Interaction Gravitationnelle galaxie - galaxie
- Pression dynamique galaxie ISM – milieu inter-amas (ICM)
- Parfois tout à la fois!



Kenney et al. 1995



Böhringer et al. 1994

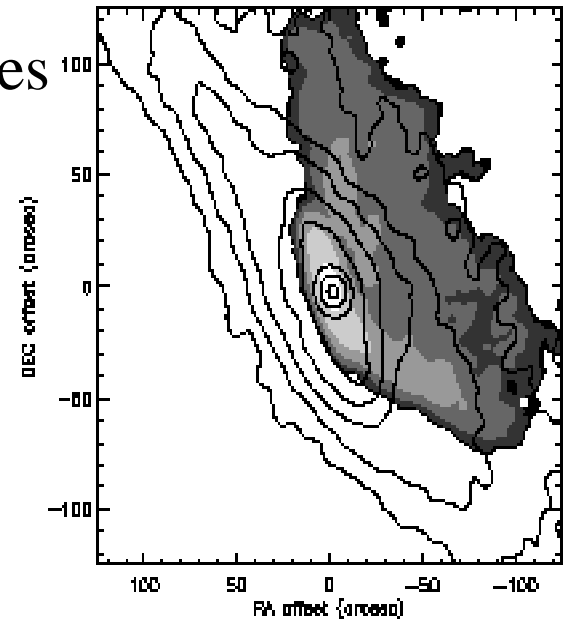
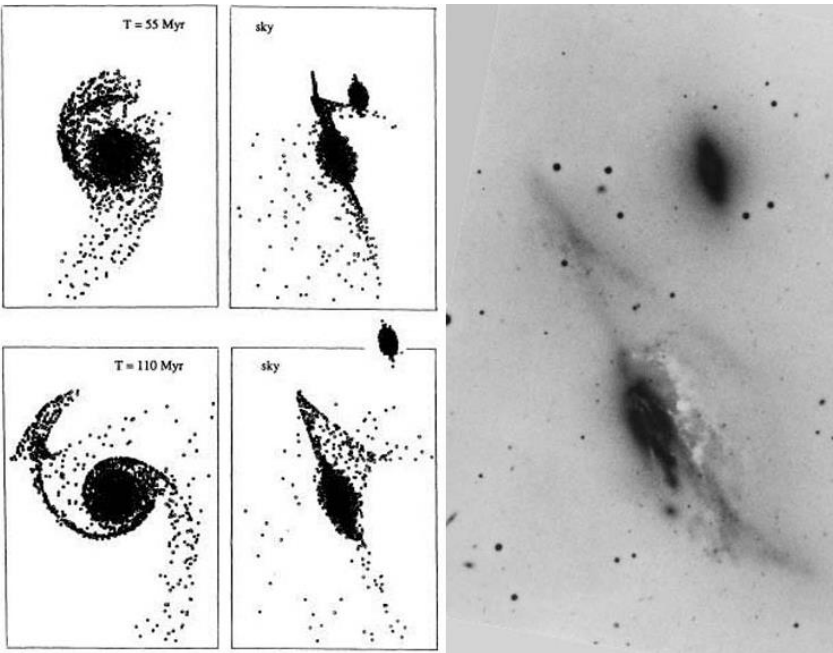


N4522

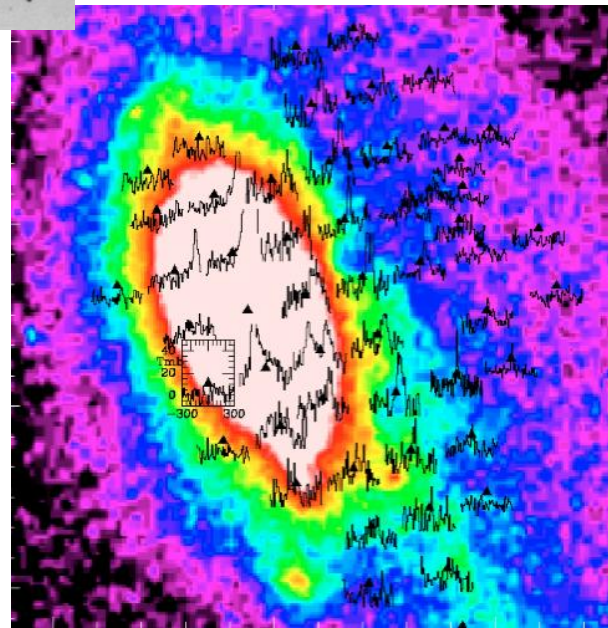
Kenney et al. 2004

NGC 4438-35

Grisé: gaz
Contours: étoiles



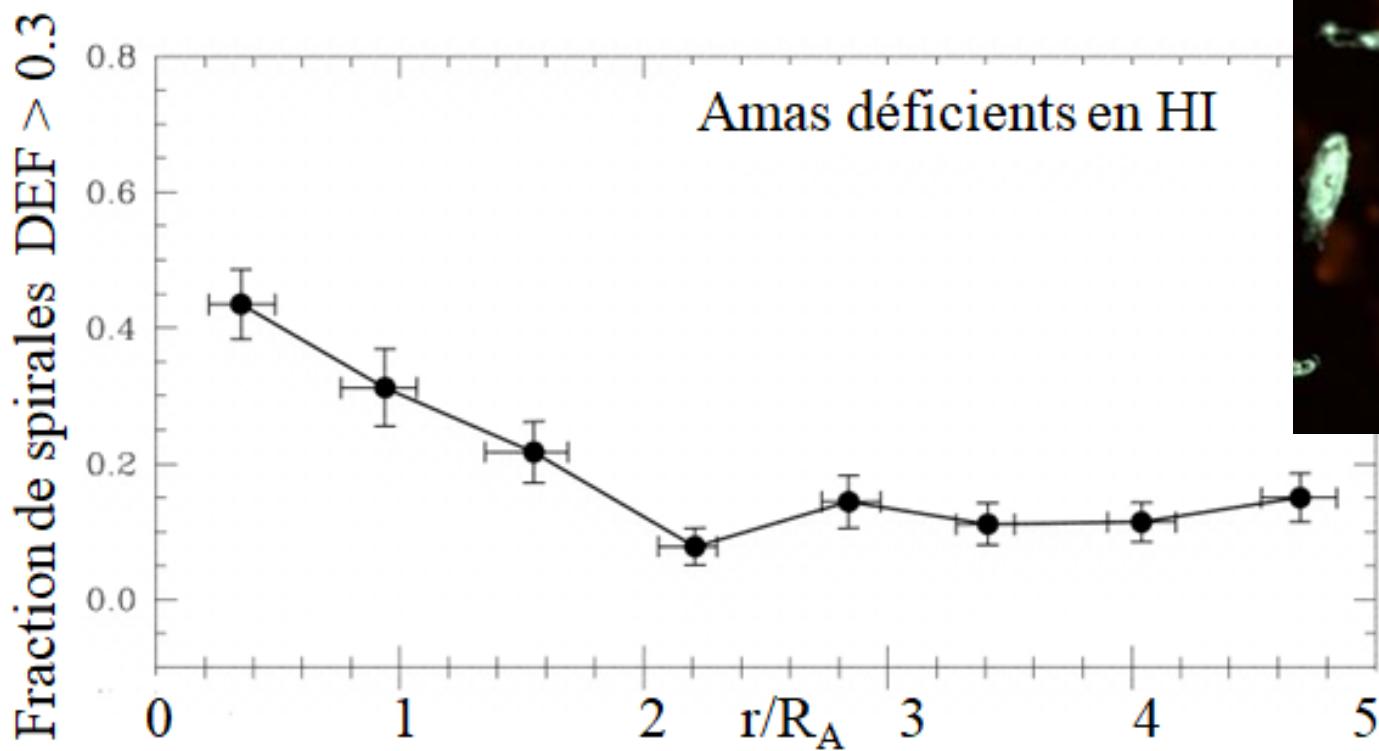
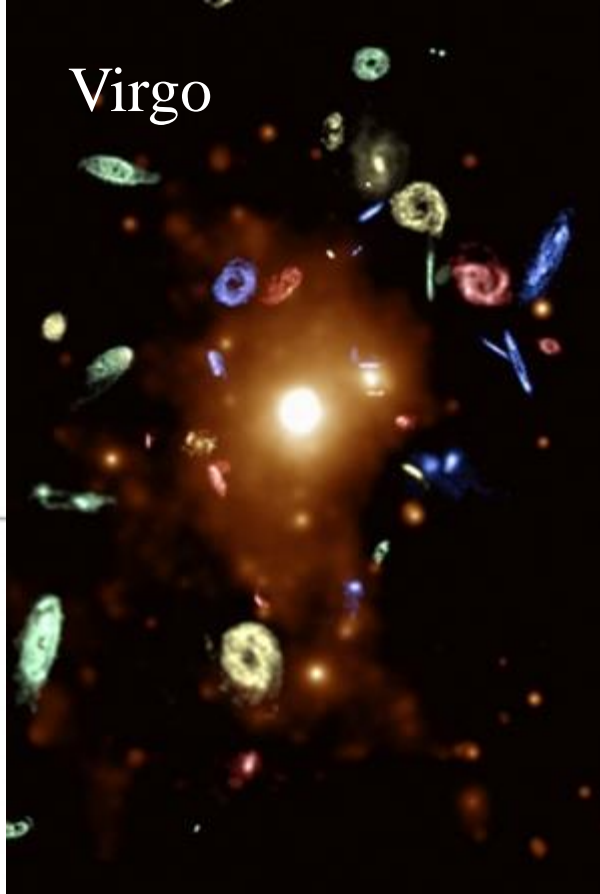
Pour cette paire, il faut à la fois l'interaction de marée pour les étoiles + pression dynamique pour le gaz



Couleur: optique B
Spectres: IRAM
30m CO(1-0)

Vollmer et al. 2005

Galaxies déficientes en gaz

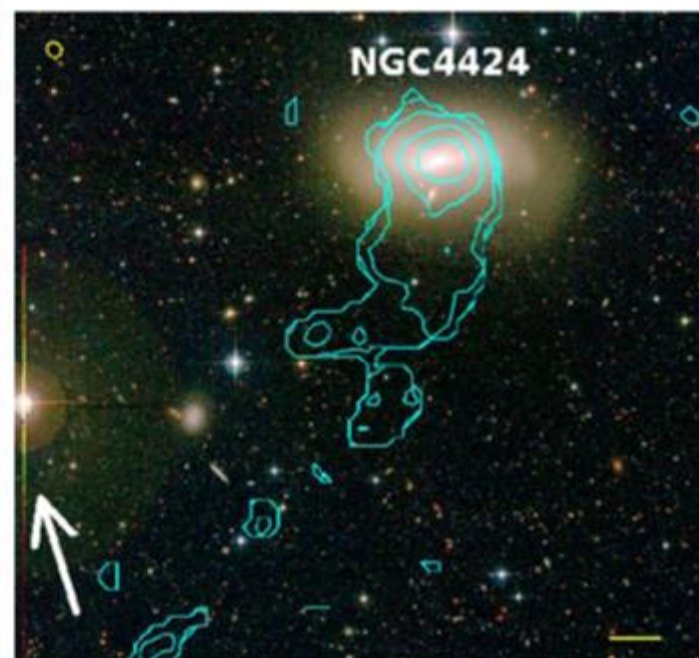
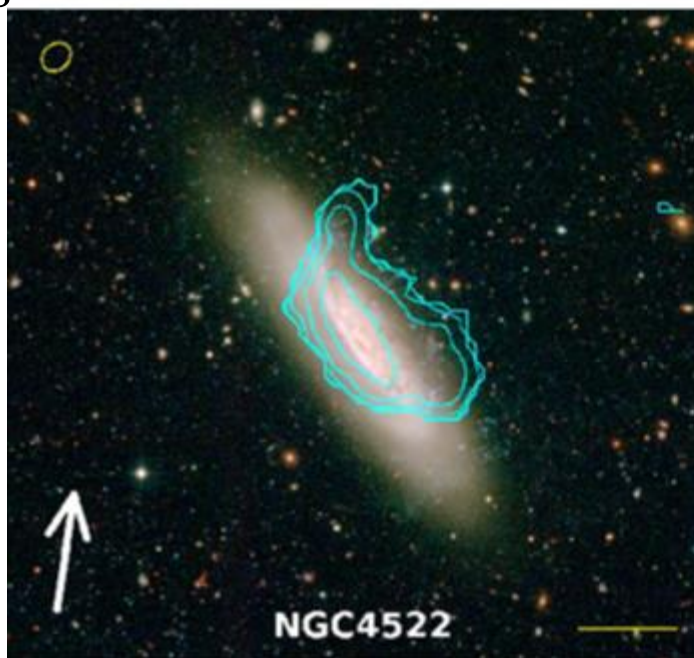
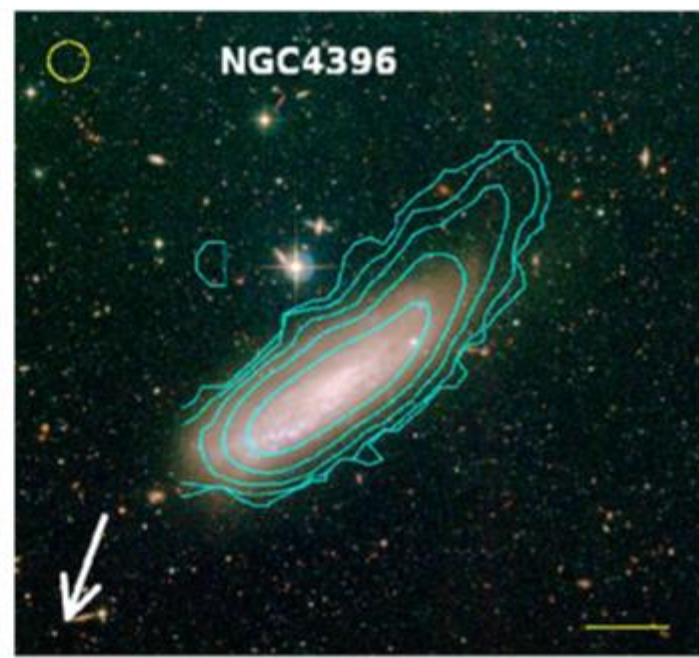
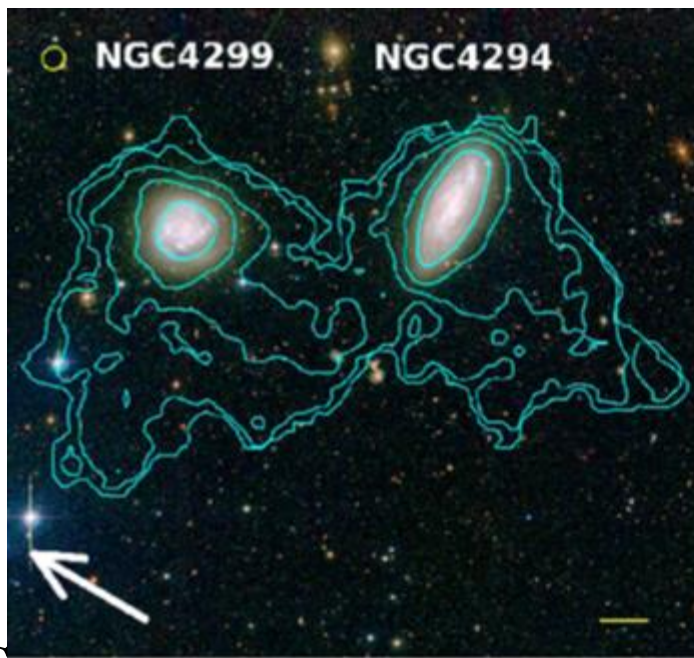


Tous les amas déficients, sauf Virgo

Solanes et al 2001

Contours HI
sur images
optiques

Barre 1' = 6kpc
Flèche = direction
du centre de l'amas



Pression dynamique du gaz chaud

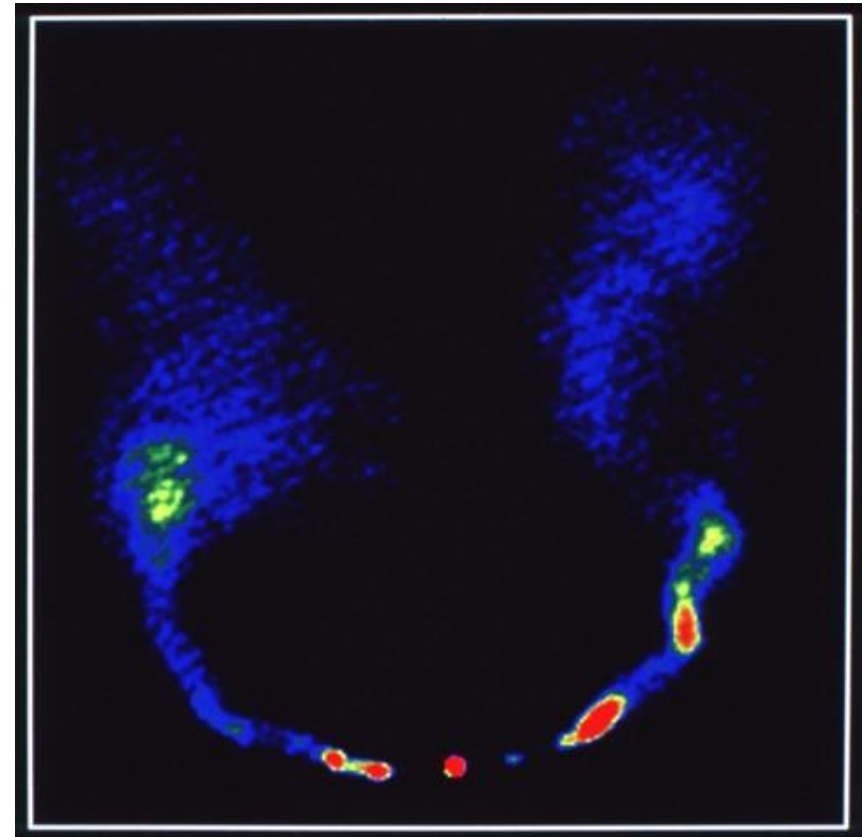
Morphologie spécifique: asymétrie

Impossible avec forces de marée – pratiquement que le gaz
et pas les étoiles



Balayage des
jets radio

3C83.1 (NGC 1265)

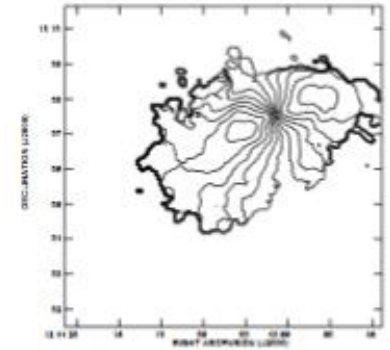
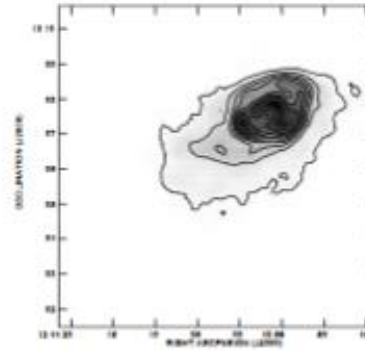


Chung et al 2007

NGC 4654: Marées ou pression dynamique?

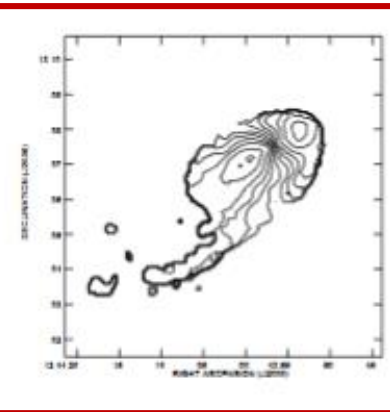
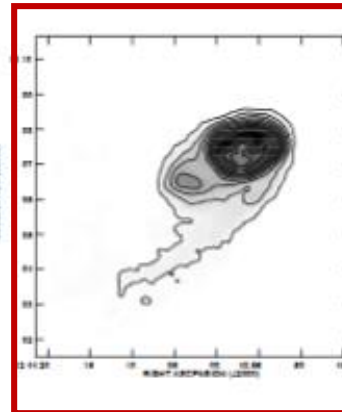
Interactions de marée →

Vollmer 2003

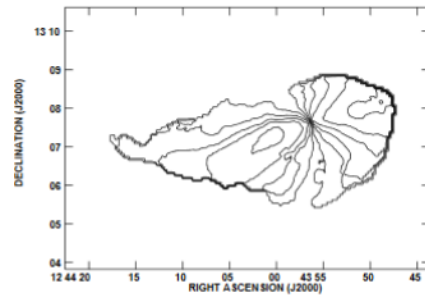
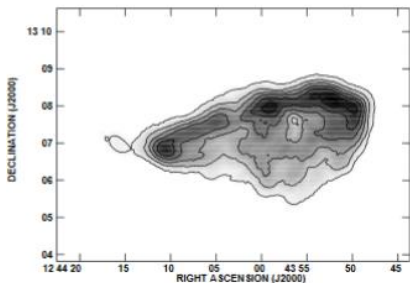


Interactions de marée →

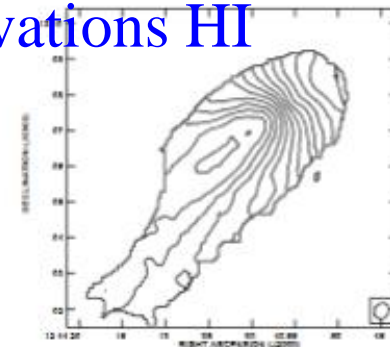
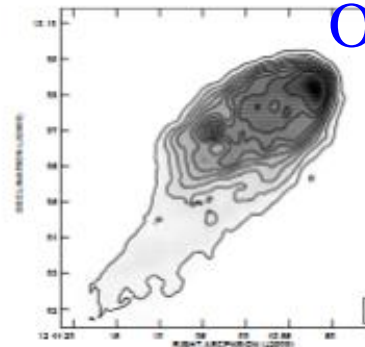
+ pression dynamique



Pression dynamique

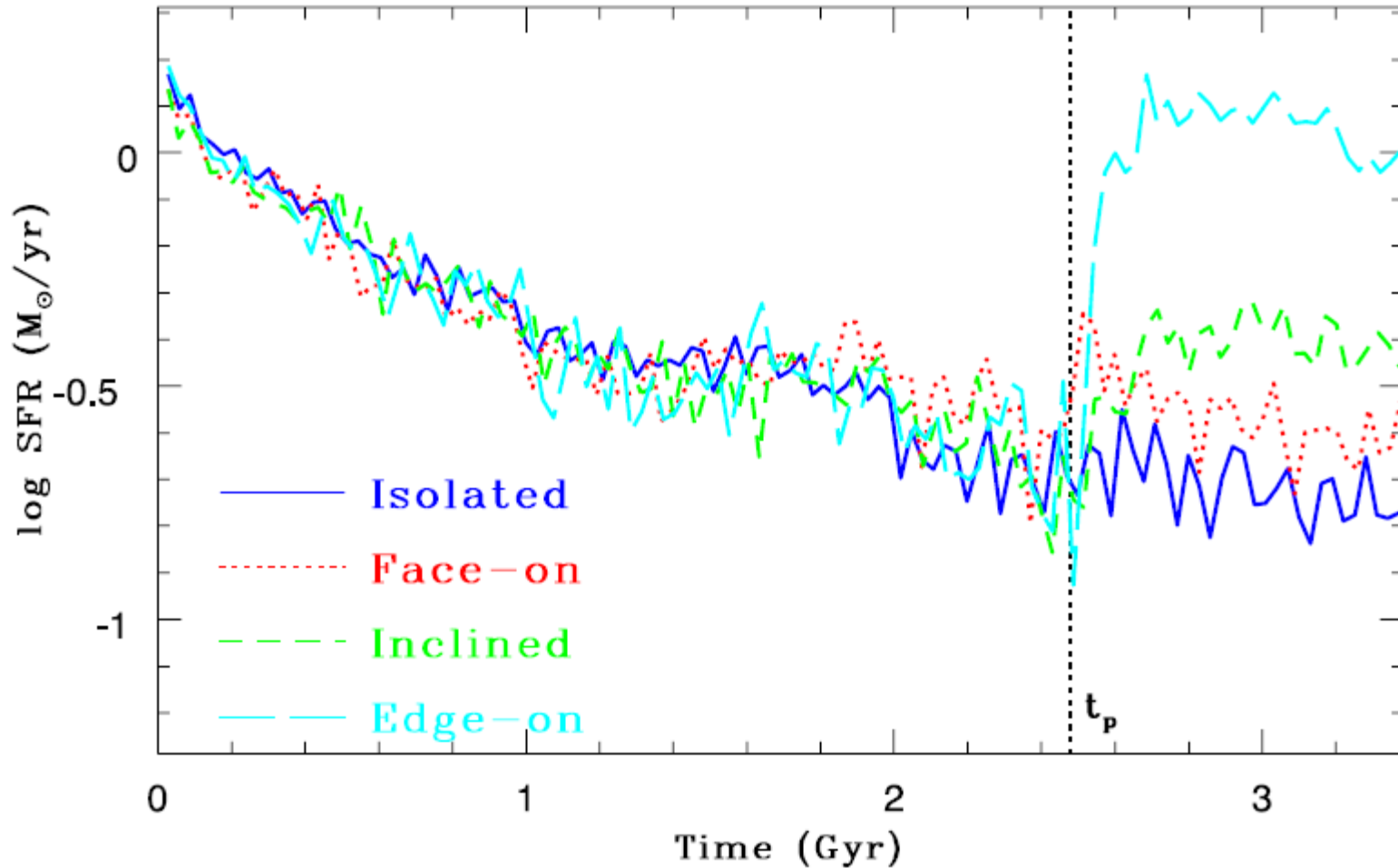


Observations HI

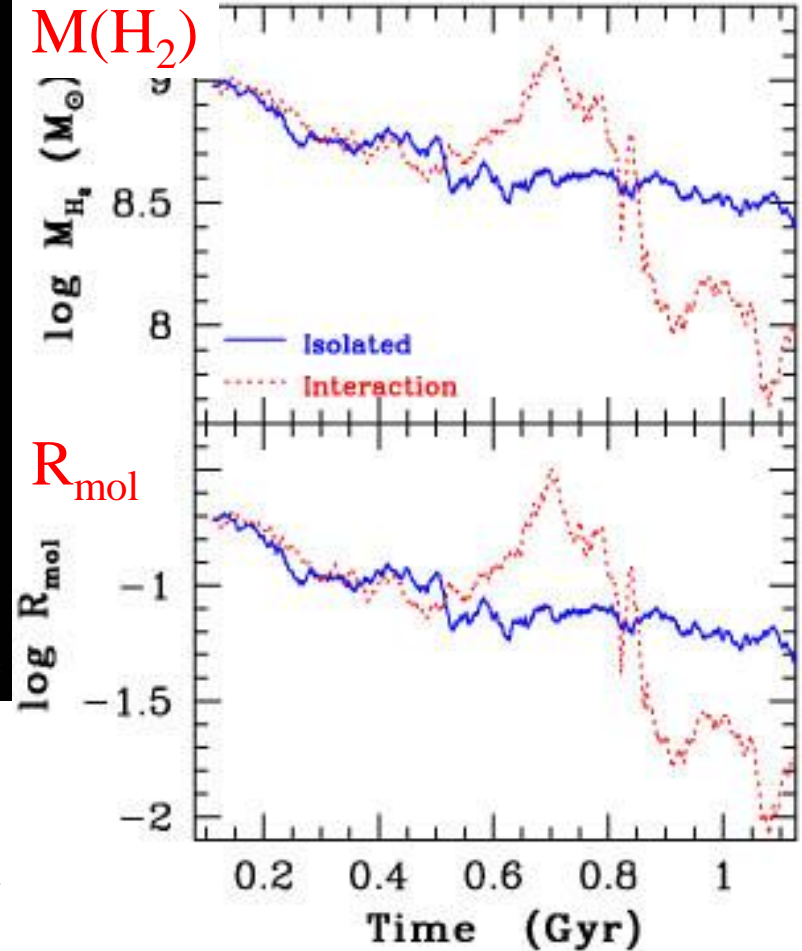
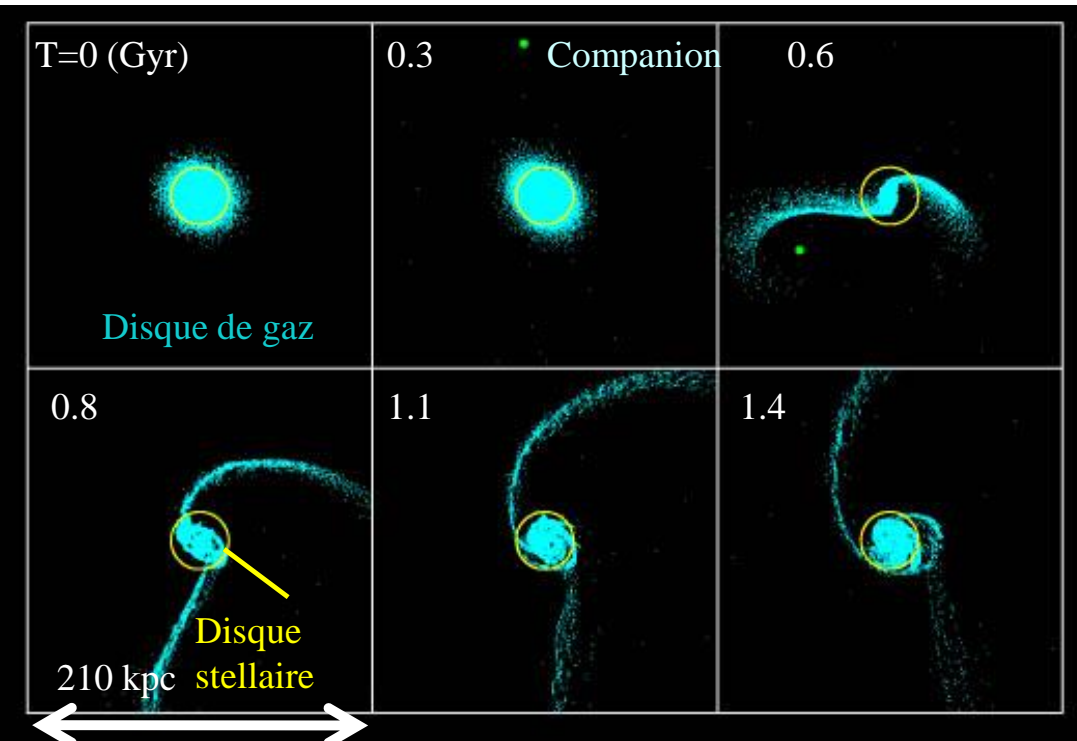


(Phookun & Mundy 1995)

Effet de la pression dynamique sur le taux de formation d'étoiles

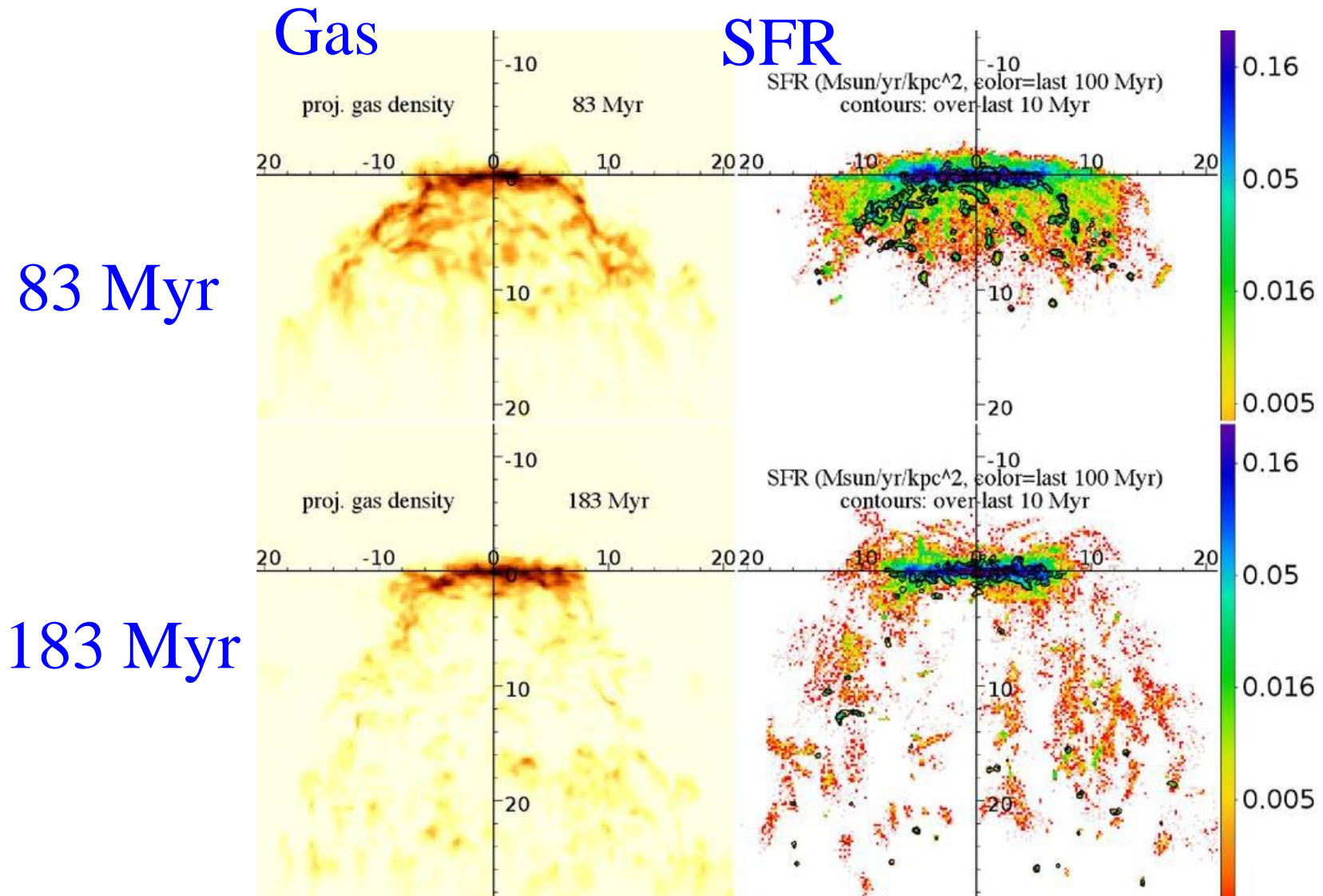


Formation de H₂ dans les interactions

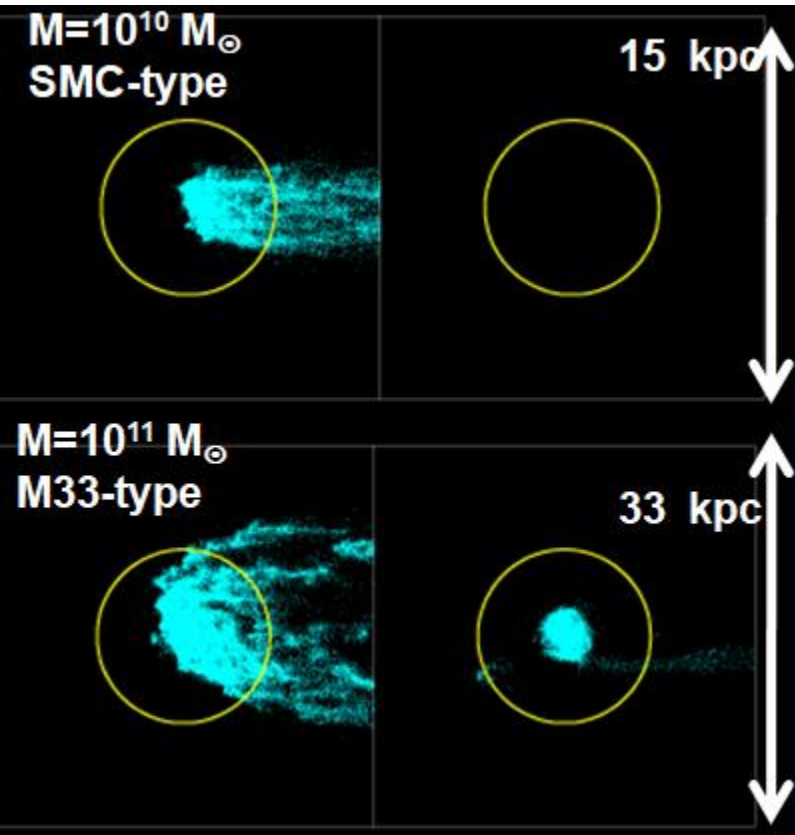


L'interaction de marée augmente H₂ d'un facteur 3-5 selon le rapport M₁/M₂, et la géométrie

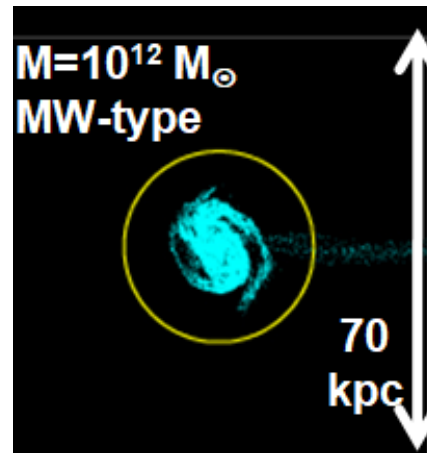
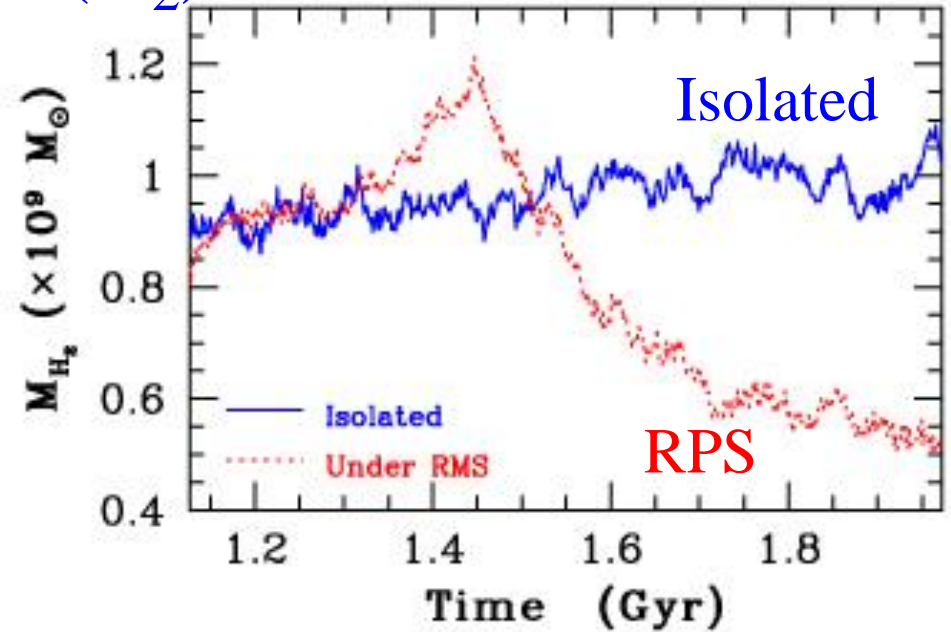
Formation d'étoiles dans les nuages balayés



Augmentation de la formation de H₂



$M(\text{H}_2)$

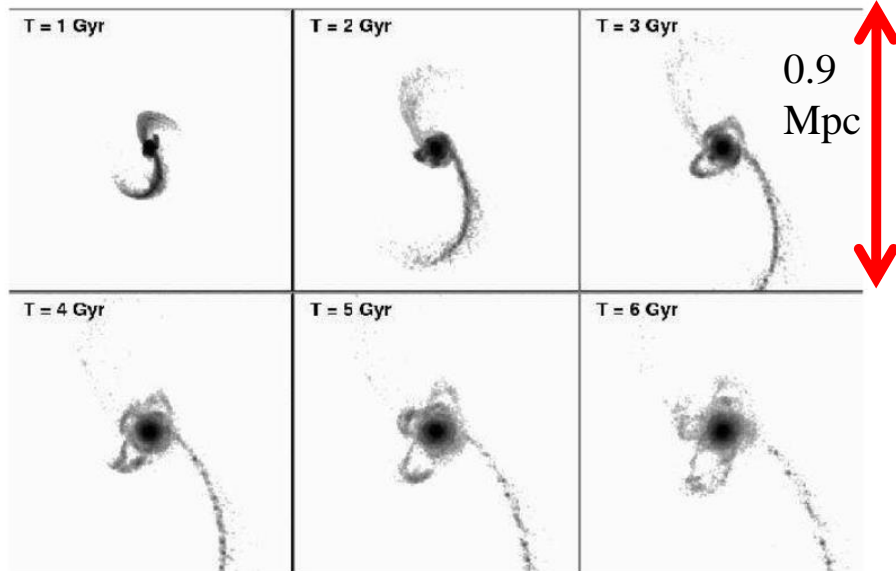


Formation de H₂ au centre,
mais de façon transitoire
Dépend beaucoup de la masse

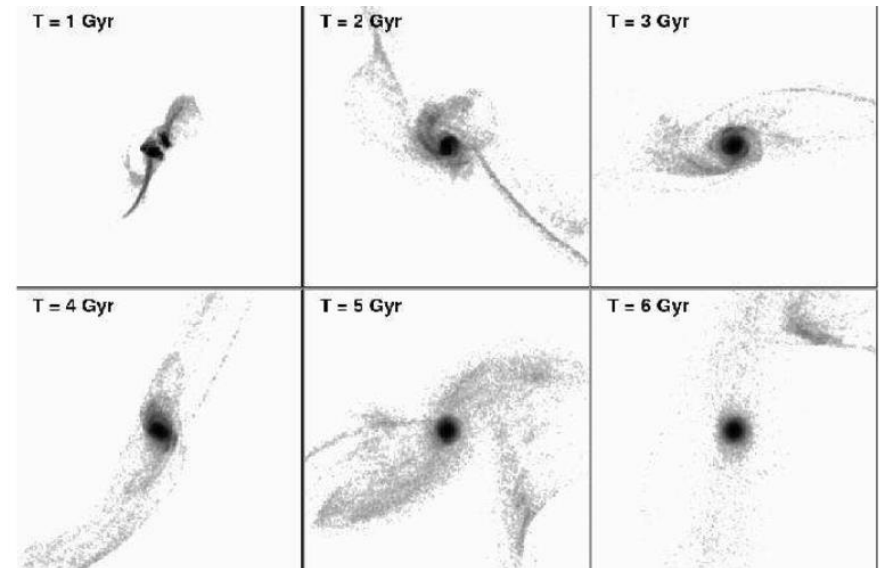
Les galaxies ne peuvent plus se reconstruire

Les débris de marée normalemnet retombent sur les galaxies
Mais les débris sont balayés dans l'amas
→ Plus de reconstruction des disques

Dans le champ

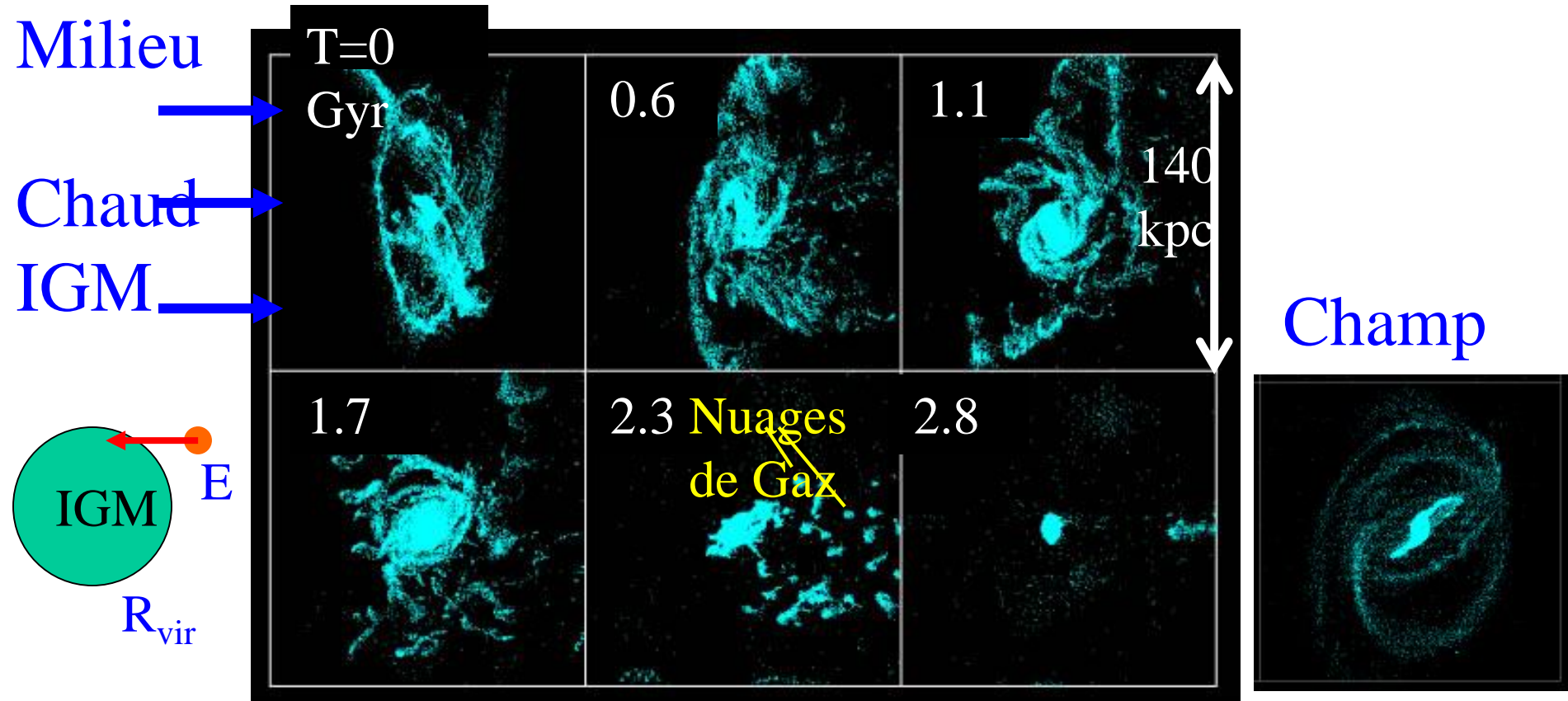


Dans un amas

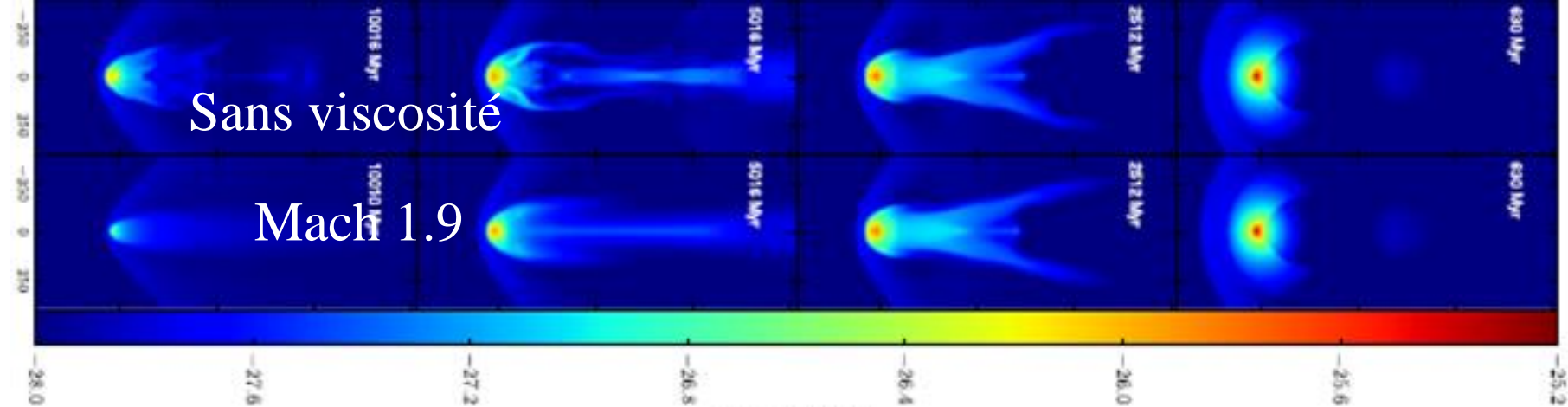


Evolution de paires durant 6 Gyr , *Mihos 2004*

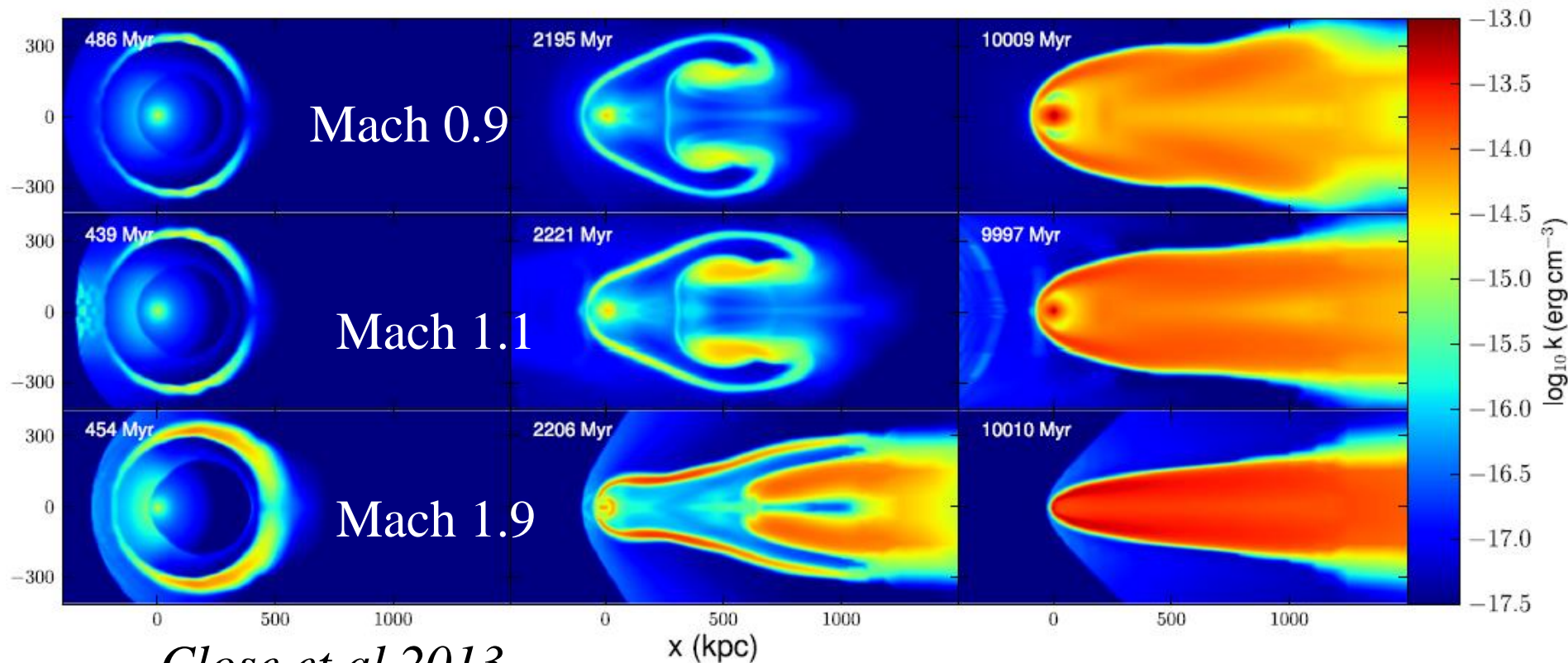
Conspiration marée/pression dynamique



Les interactions de marée étalent le gaz, qui devient alors plus facile à balayer par la pression dynamique



Energie turbulente $k - \varepsilon$ K-H instabilités \rightarrow plus de gaz balayé

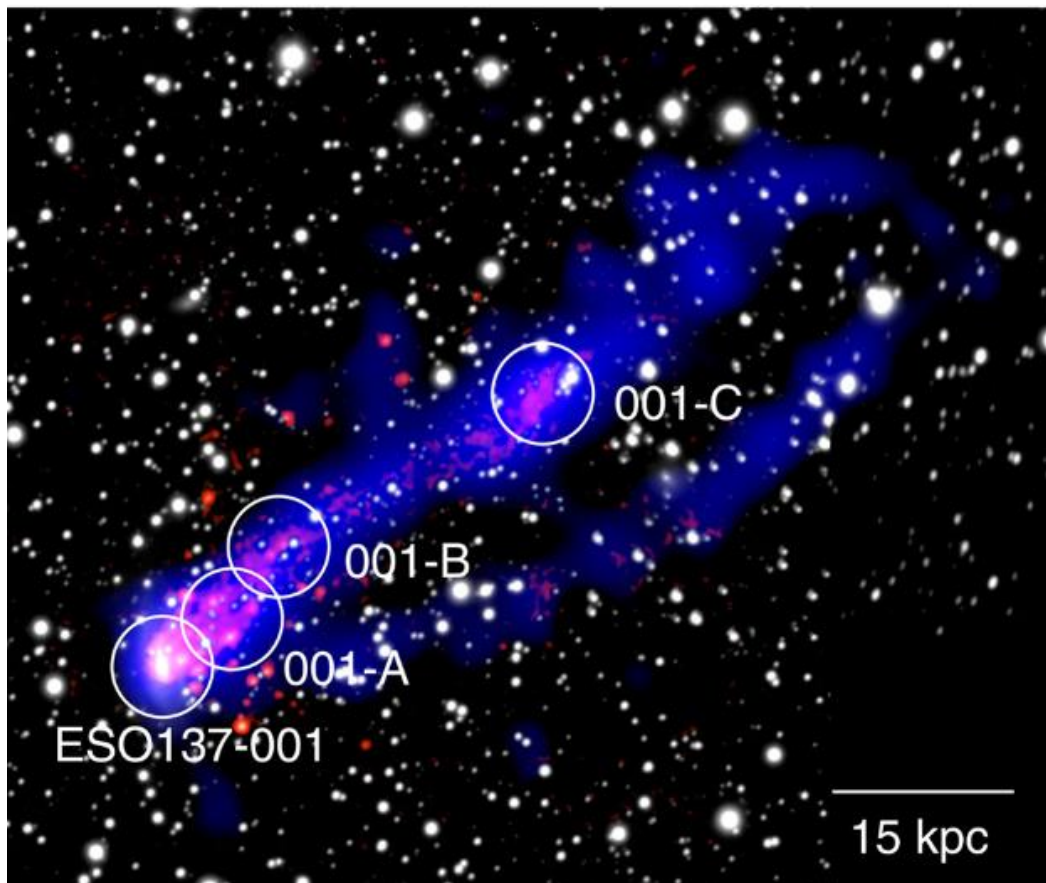


Close et al 2013



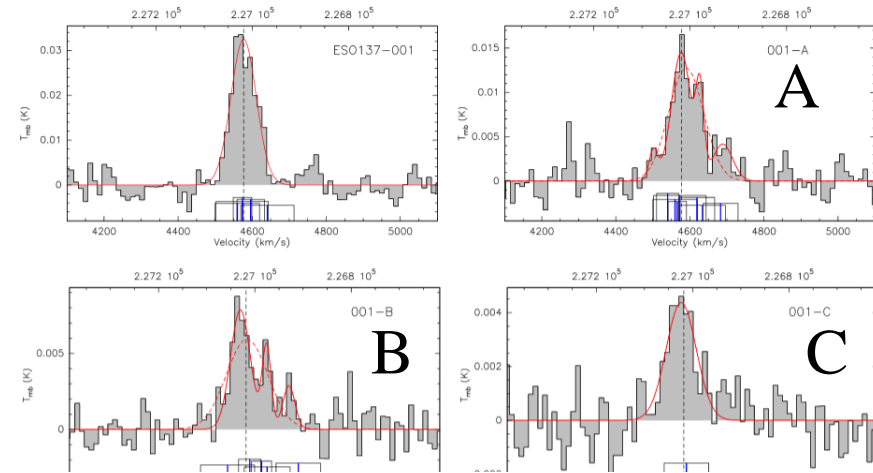
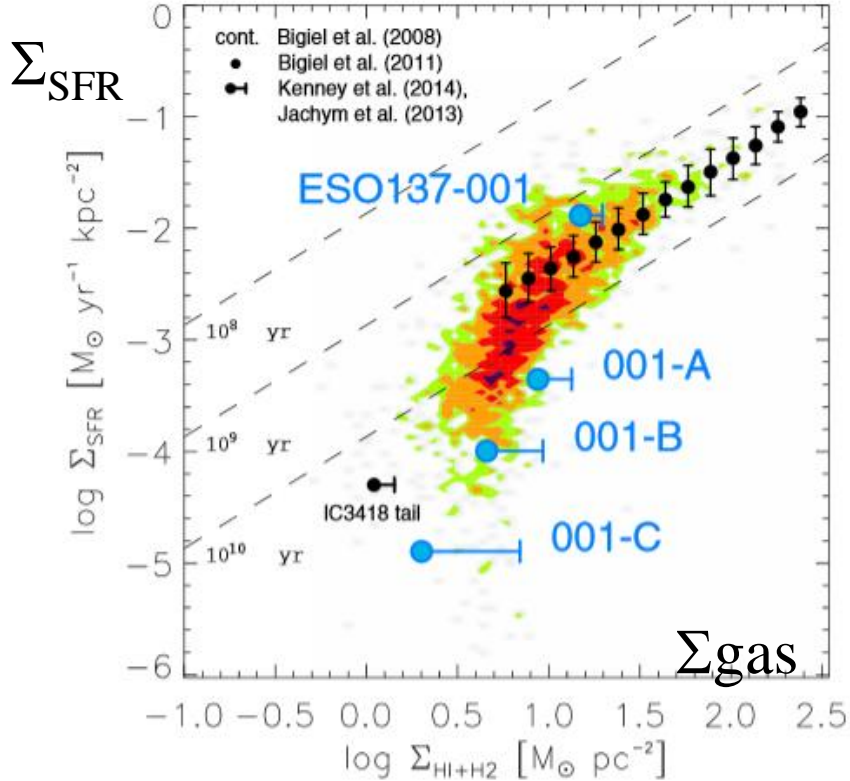
Traînées de gaz dans le vent

Pression dynamique du gaz chaud dans les amas
Peut-être très rapide et violent: ESO137-001

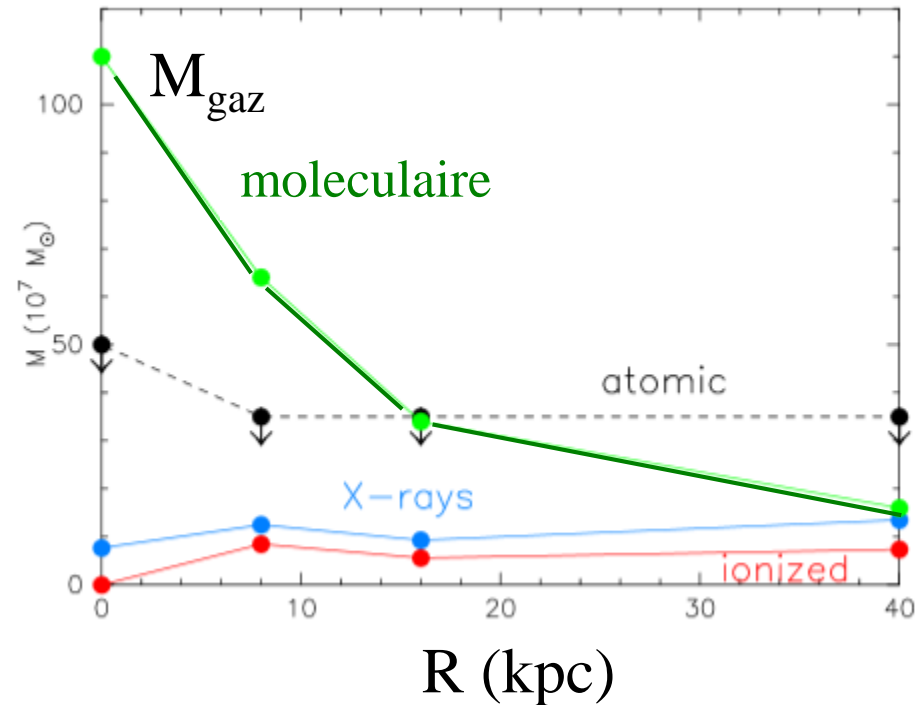


Jachym et al 2014

Pression dynamique



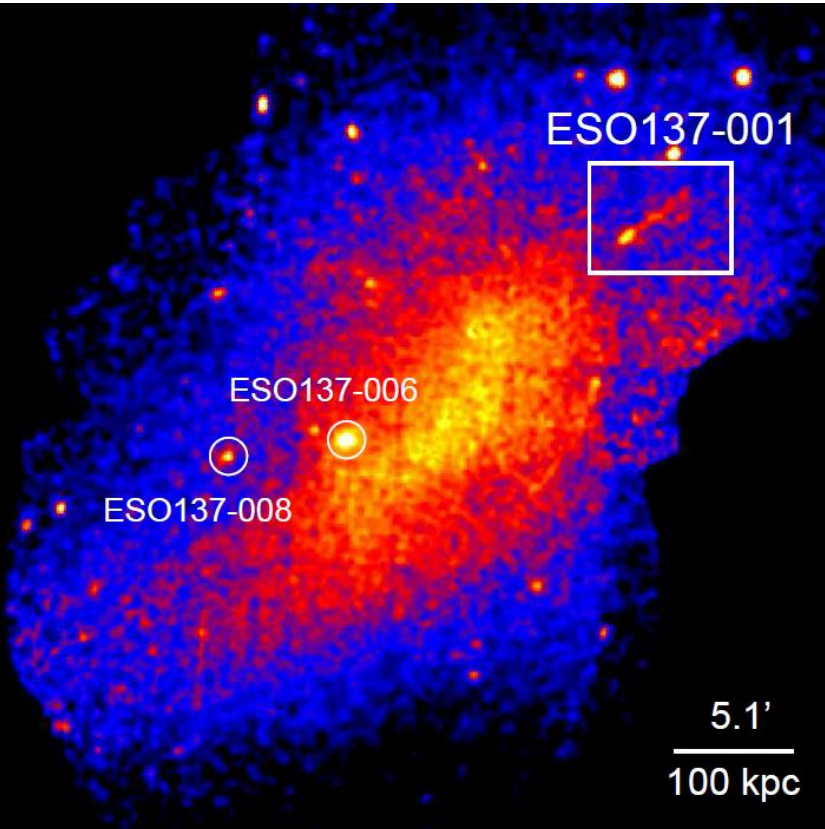
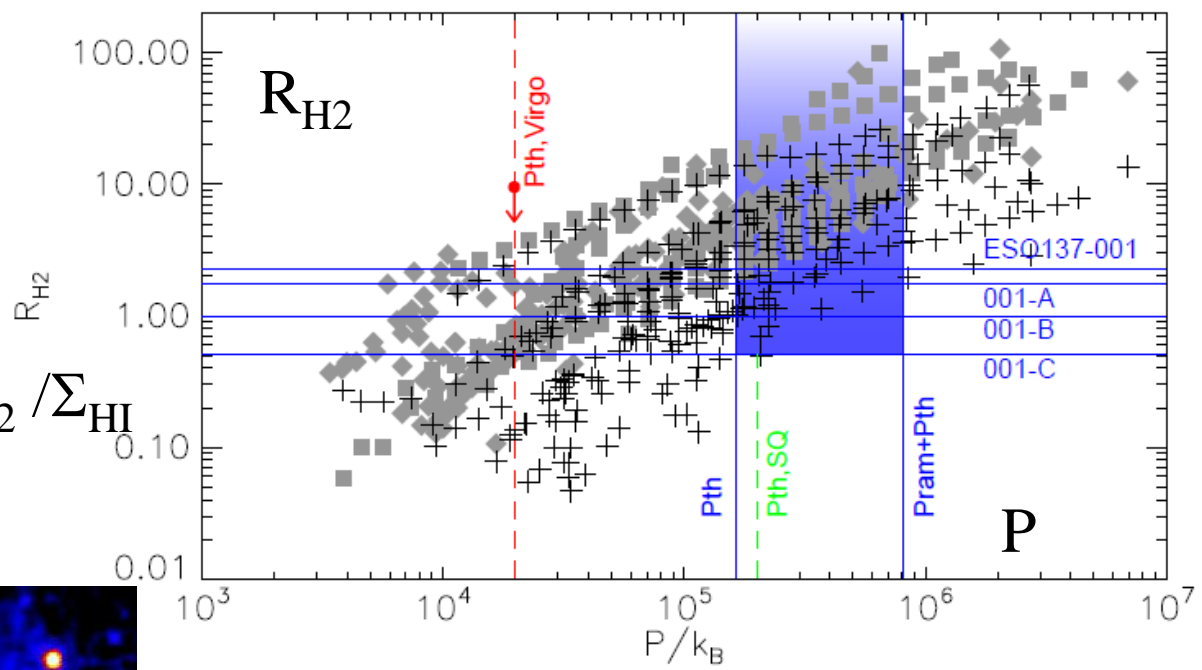
Traînée de 80kpc en rayons-X
 40kpc en CO
 $M(\text{H}_2) \text{ en CO} = 1.5 \cdot 10^8 M_{\odot}$



Jachym et al 2014

Amas de Norma: A3627

Limite inférieure $R_{H2} = \Sigma_{H2} / \Sigma_{HI}$
(HI non détecté)



Pression en $K.cm^3$

Symboles pleins: data

++ Krumholz et al 2009

Rouge: Virgo

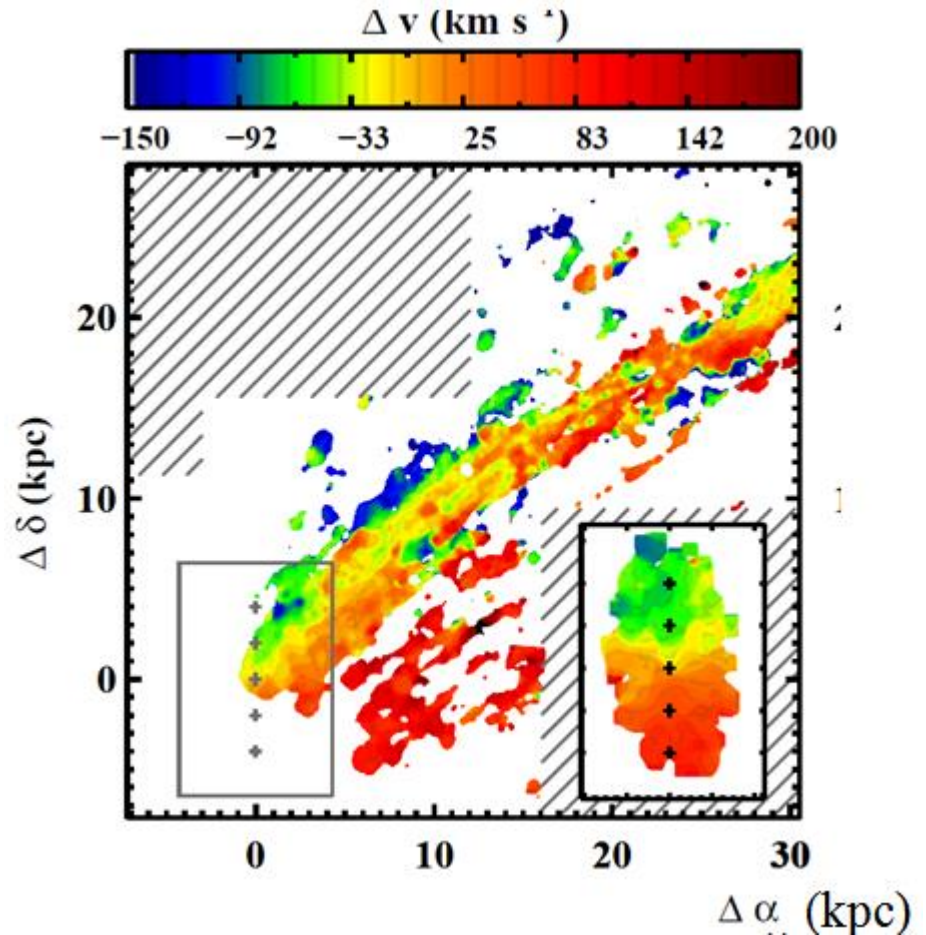
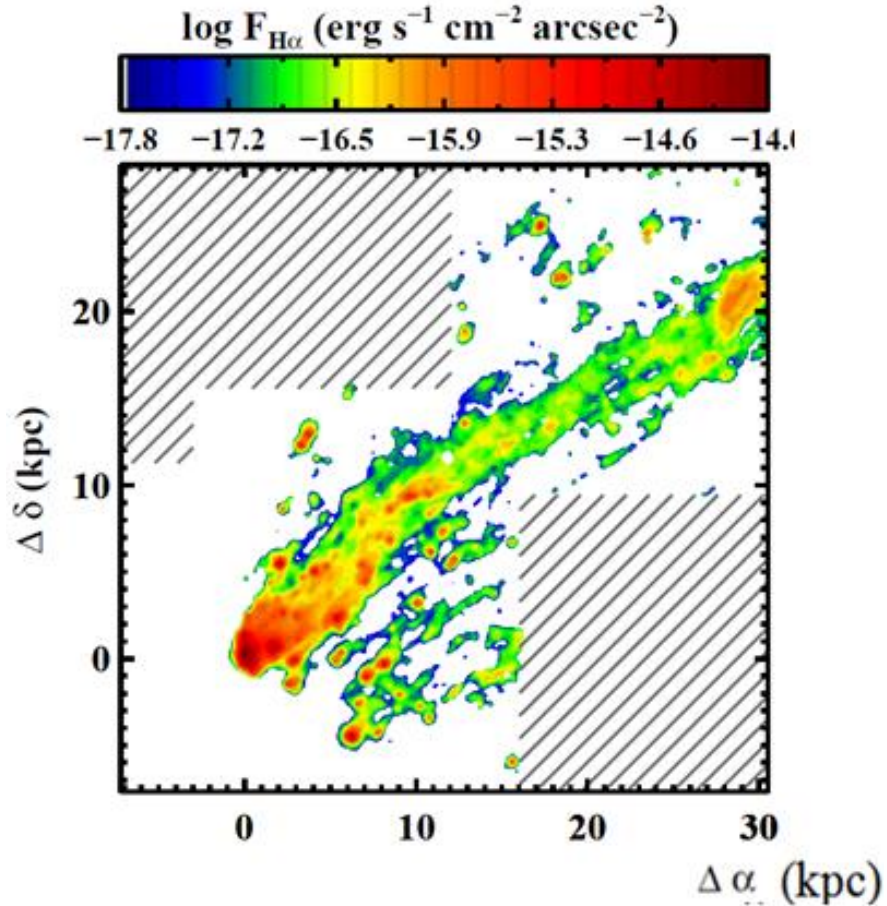
Vert: Stephan Quintet

$N_{HI} = 10 M_{\odot}/pc^2$ requis pour abriter H_2

Jachym et al 2014

Halpa avec MUSE (VLT)

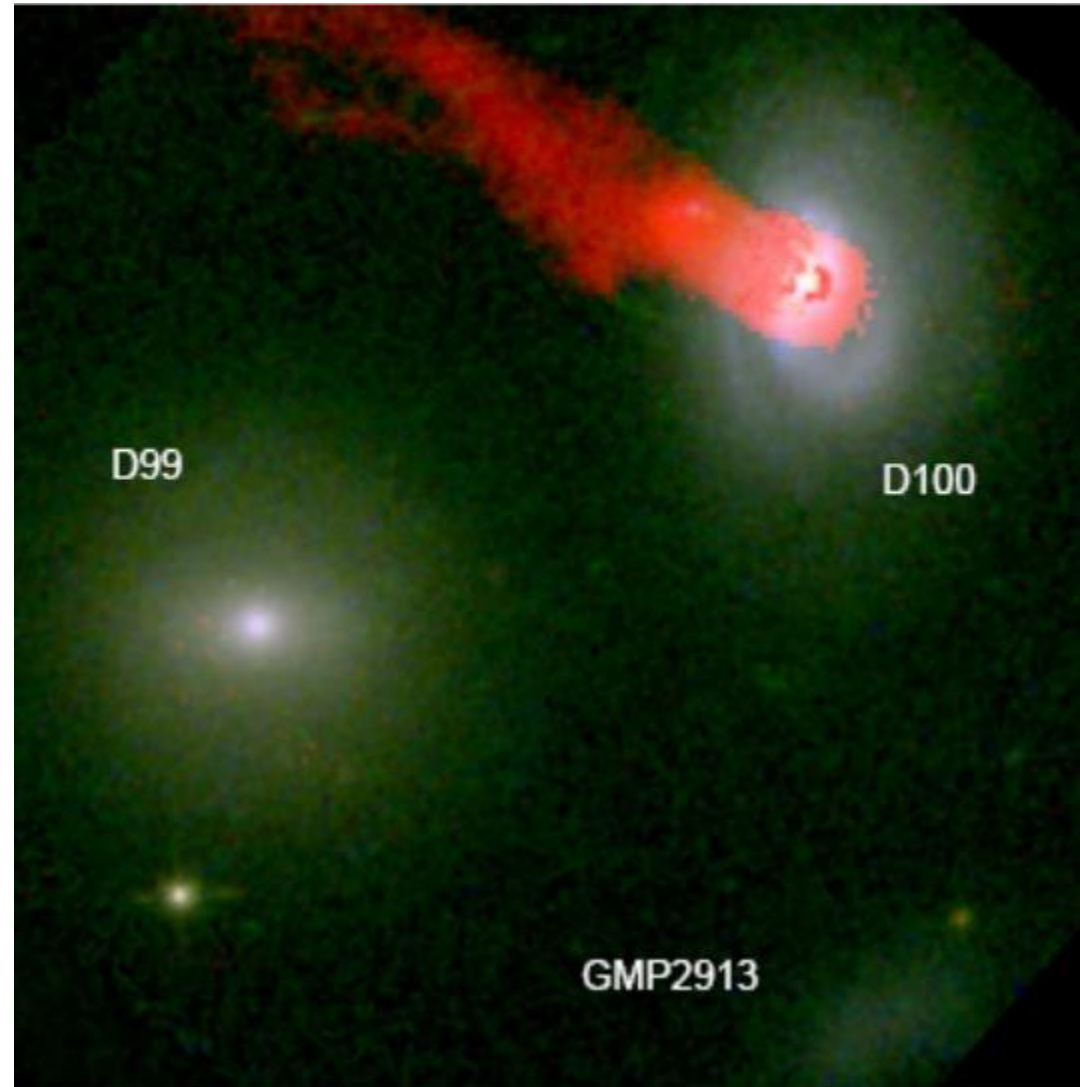
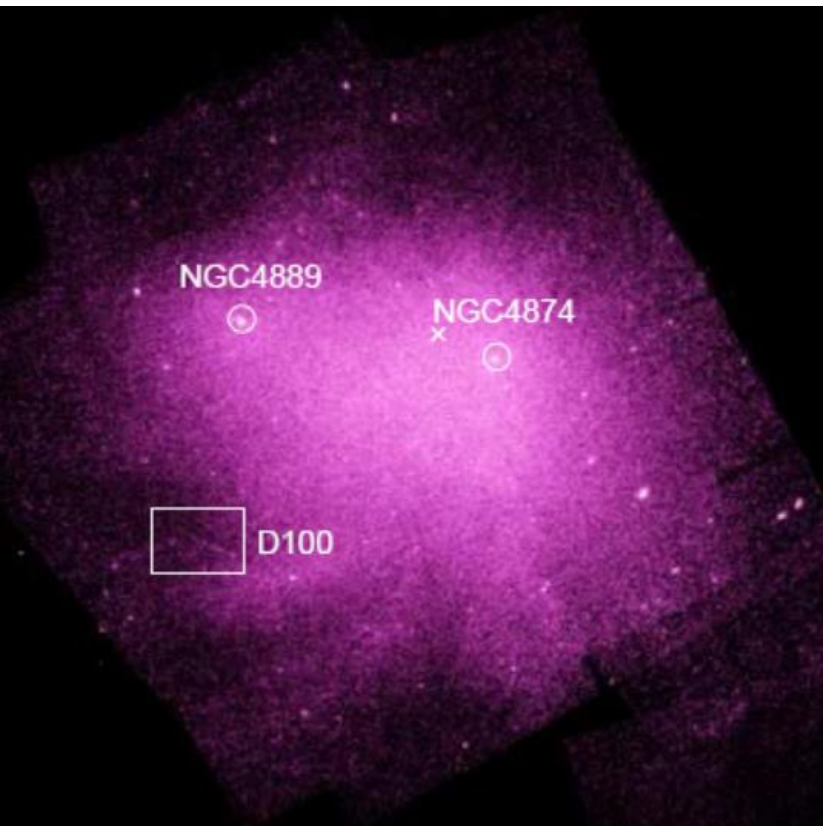
Les parties externes balayées en premier: reste le centre
Transition de laminaire à turbulent > 6.5 Myr



Fumagalli et al 2014

Pression dynamique dans Coma

HST image+
H α en rouge (Yagi et al 2007)

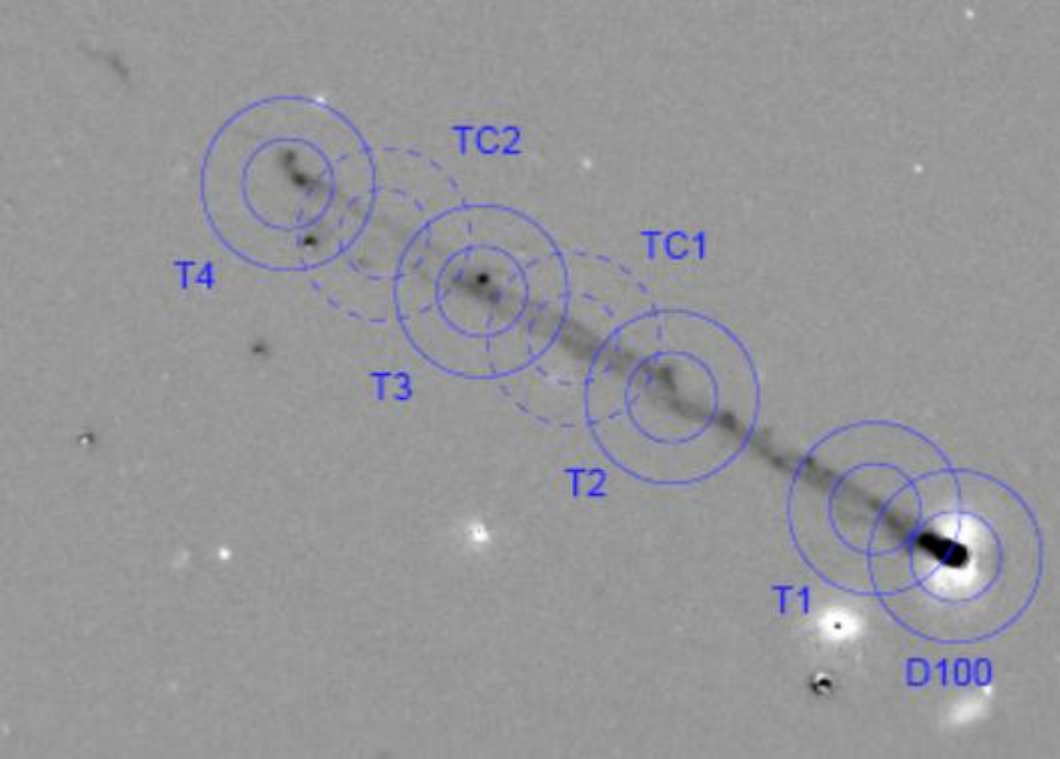


Chandra: traînée en rayons-X

D100, gaz moléculaire

CO $21'' = 9.9\text{kpc}$,
 $11'' = 5.2\text{kpc}$
sur H α (Yagi et al 2010)

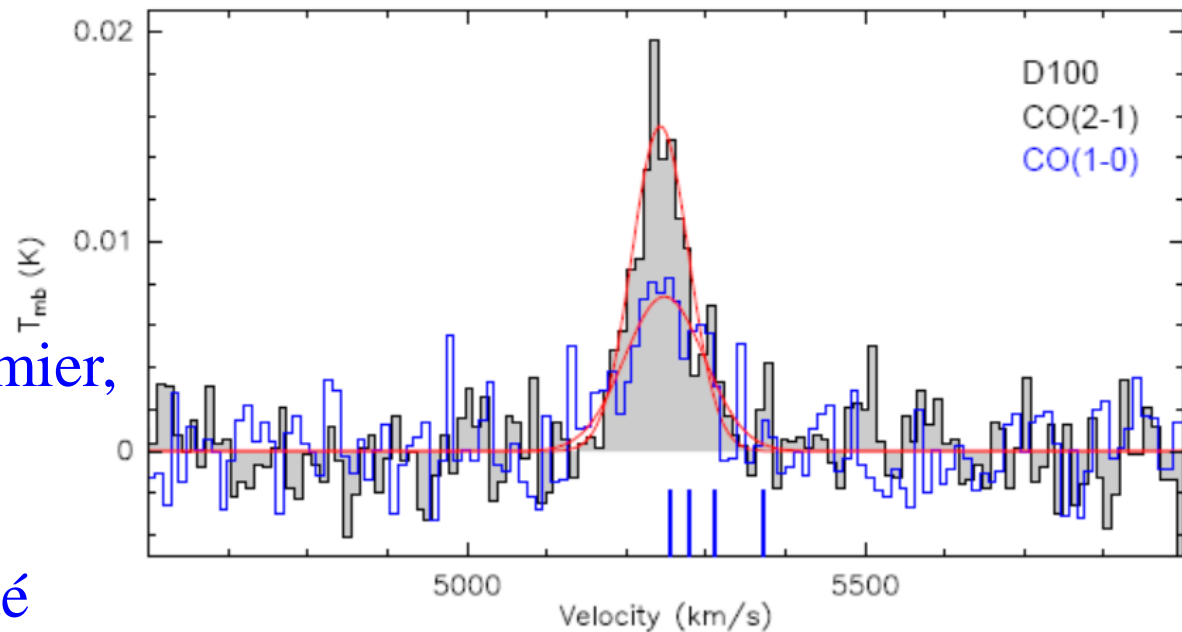
Jachym et al 2015



Un léger décalage entre
les vitesses H α et CO

Gaz ionisé balayé en premier,
Puis le CO, plus dense,
qui forme des étoiles

→ H α secondaire, retardé

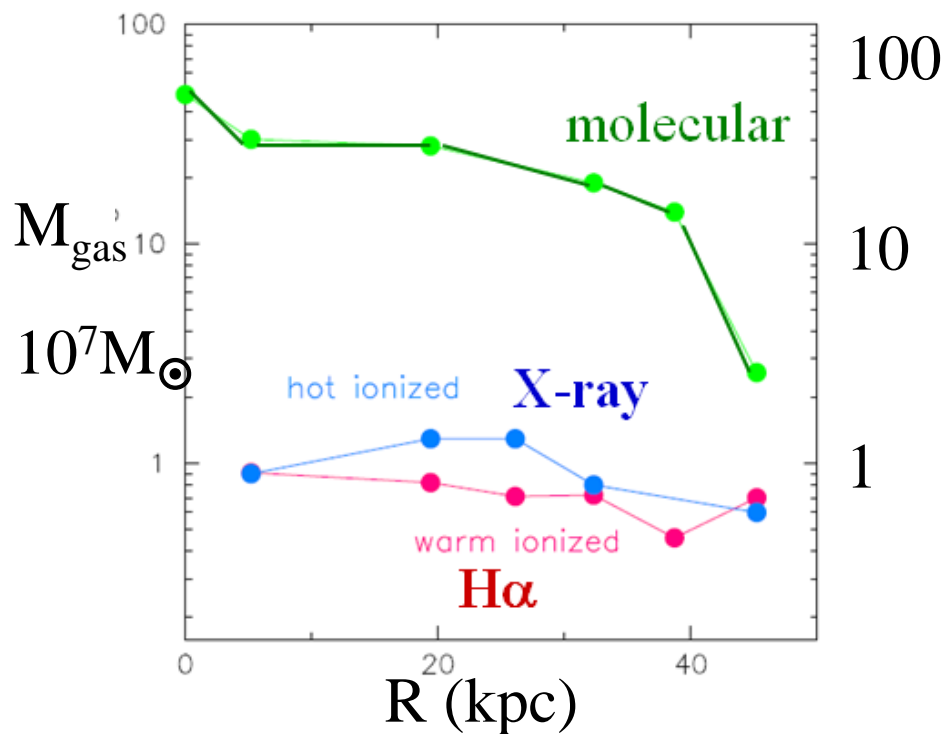


D100: traînée moléculaire

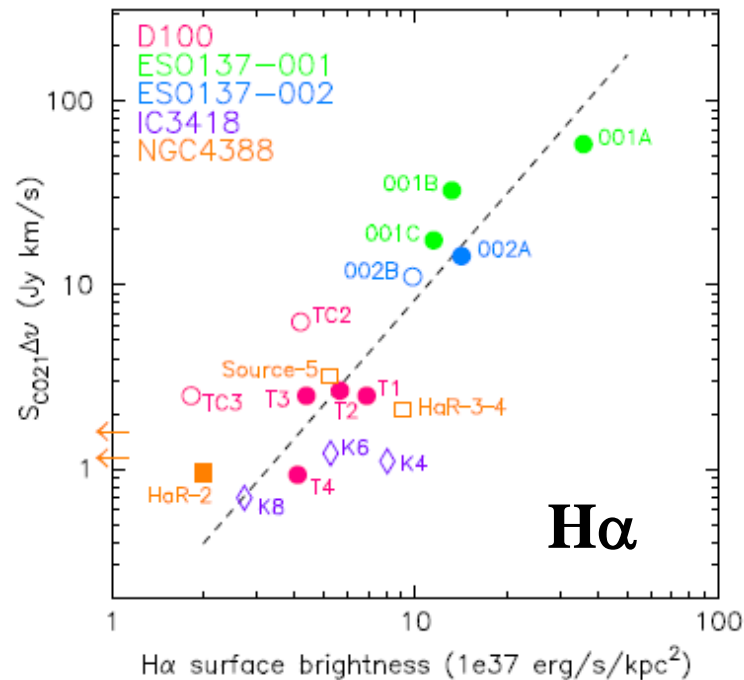
Vitesses H α décalées

H α trace le gaz balayé

10Myr avant, qui a formé des étoiles



CO

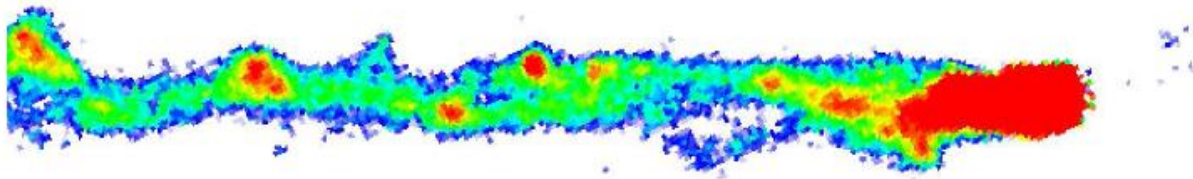


Gaz moléculaire
Distribution radiale

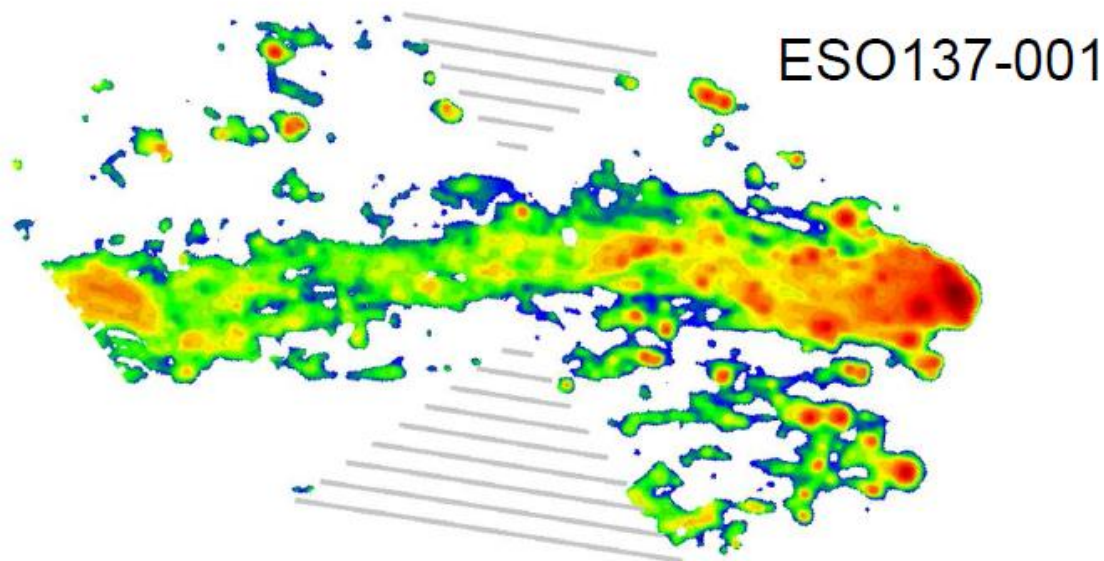
Jachym et al 2015

Comparaison D100 & ESO137-001

Largeur de la traînée décroît avec le temps?



→ Balayage plus ancien dans D100

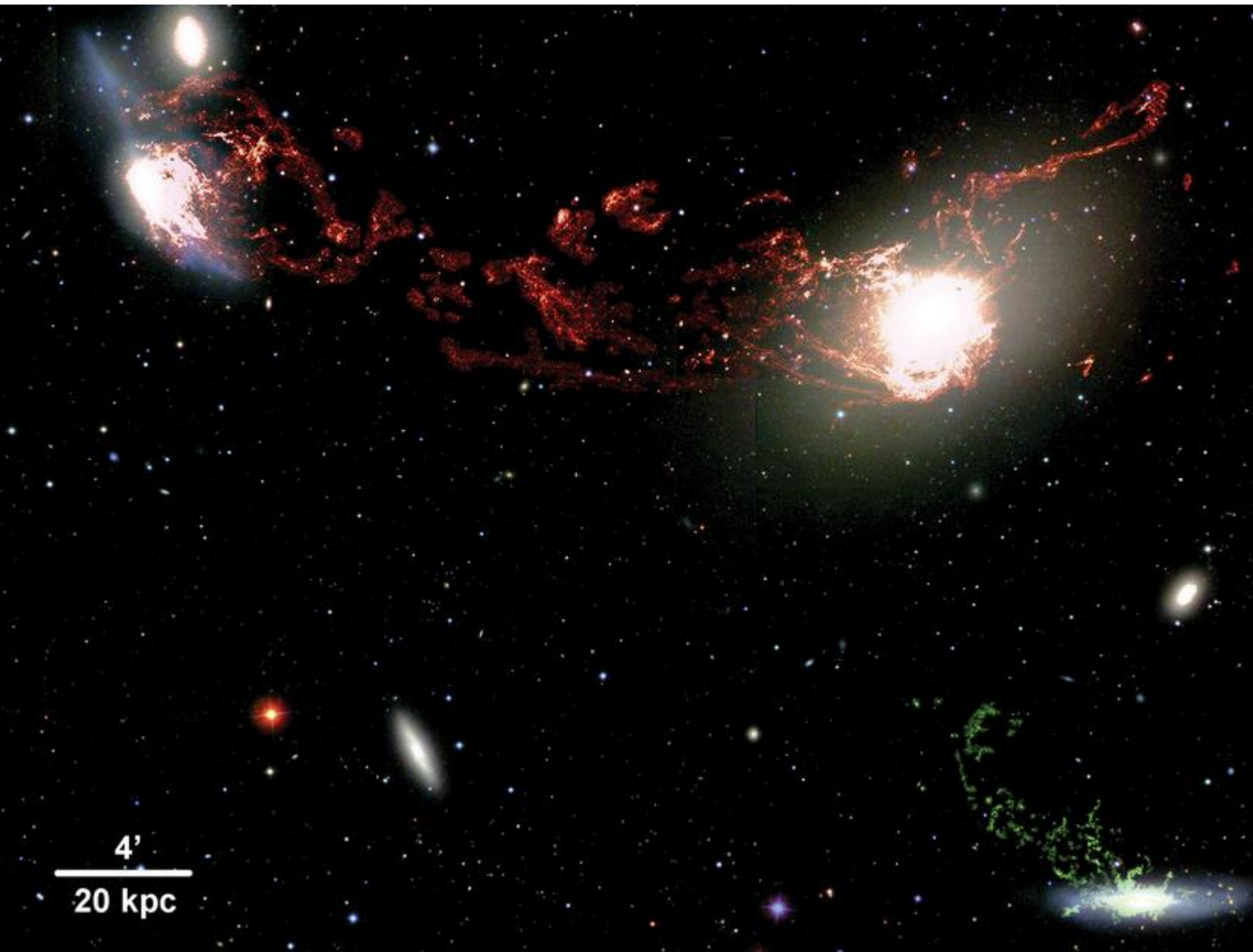


Mise à l'échelle, même longueur

Jachym et al 2015

Traînée géante en H α dans Virgo

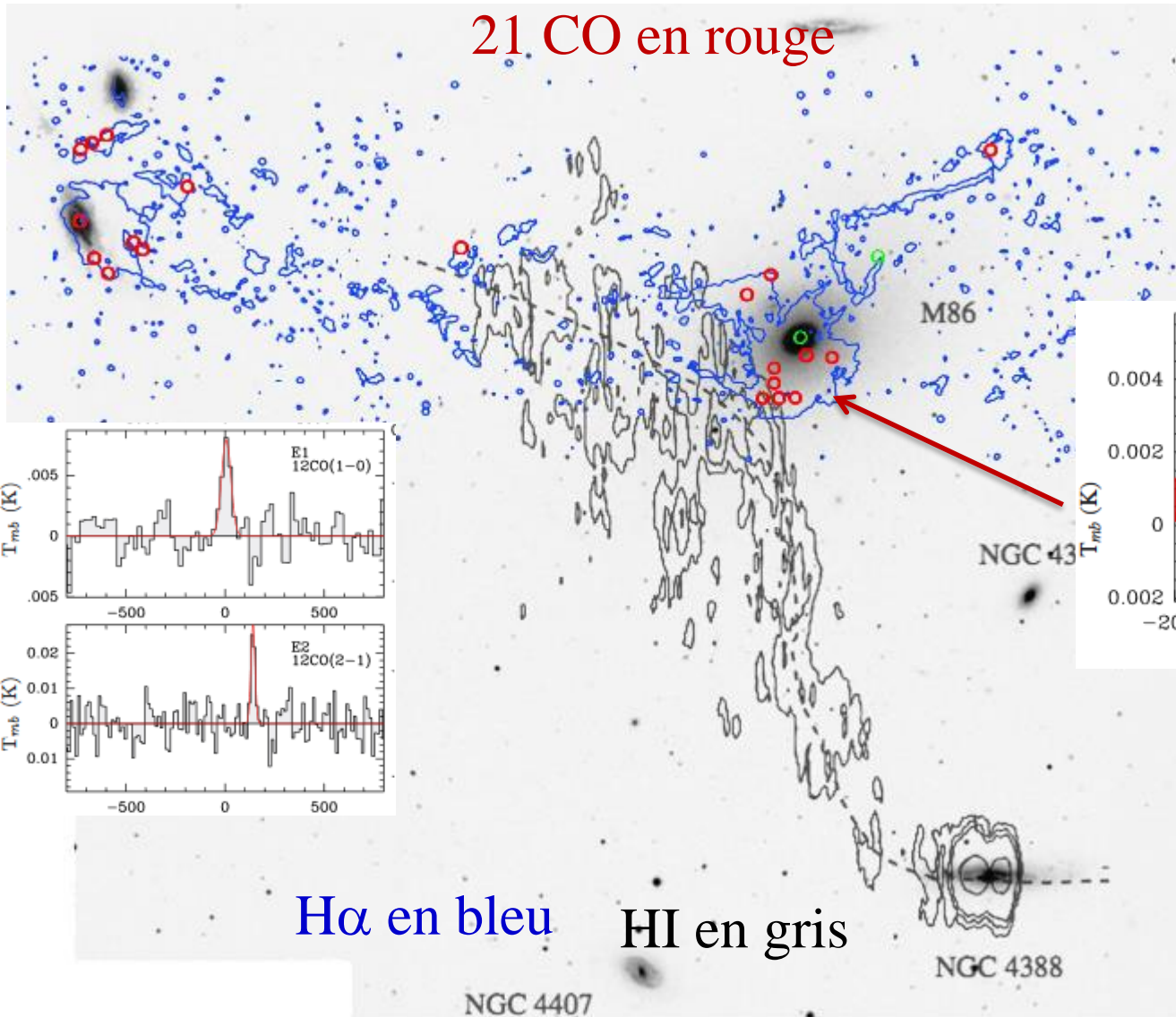
N4438-35



Kenney+
2008

M86

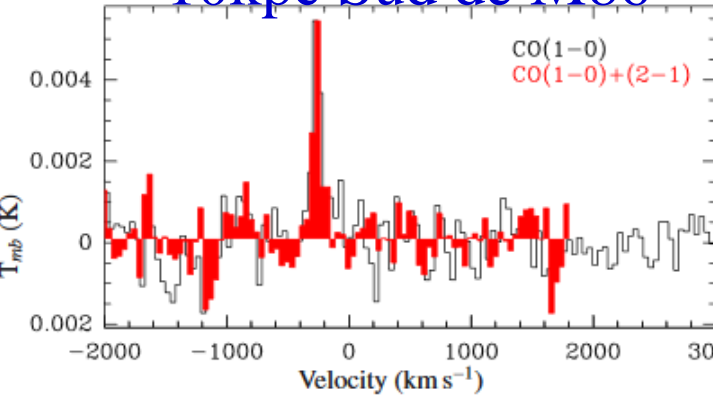
M86 : gaz H2 en environnement hostile



10^7 K ICM

H₂ survit pendant
100 Myr?

$M_{H_2} = 2 \cdot 10^7 M_{\odot}$
10 kpc Sud de M86

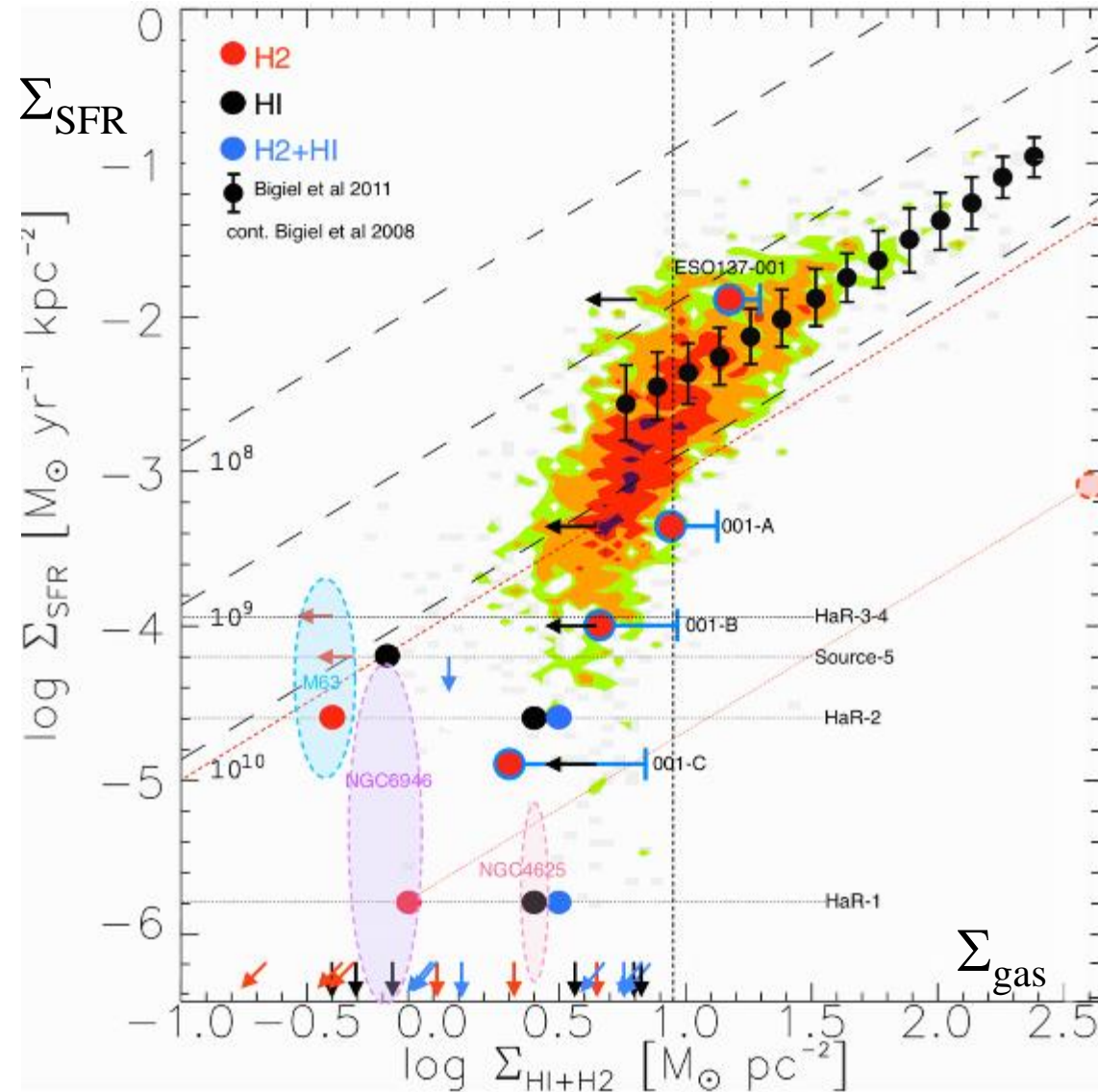


$M_{H_2} = 7 \cdot 10^6 M_{\odot}$
10 kpc NE M86

Formation in situ
Traînée de N4438

Efficacité de la formation d'étoiles

Comparaison avec les disques XUV



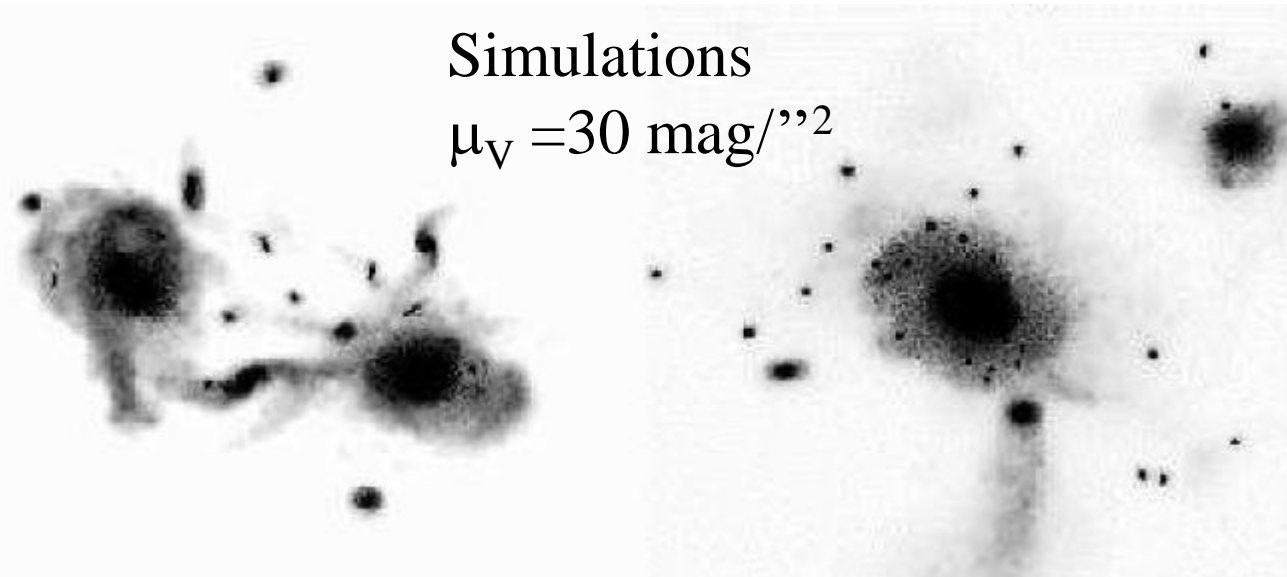
Le gaz dans les traînées
et les bras de marée:
Pas assez de pression pour
former des étoiles

La densité de surface
insuffisante pour la
transition HI \rightarrow H₂

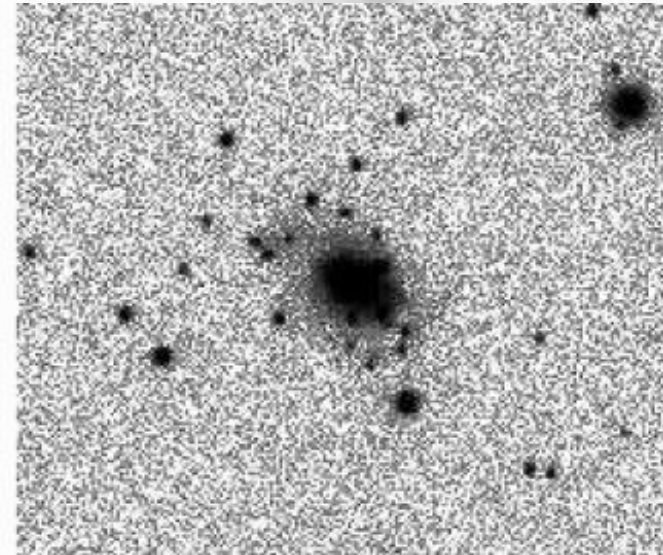
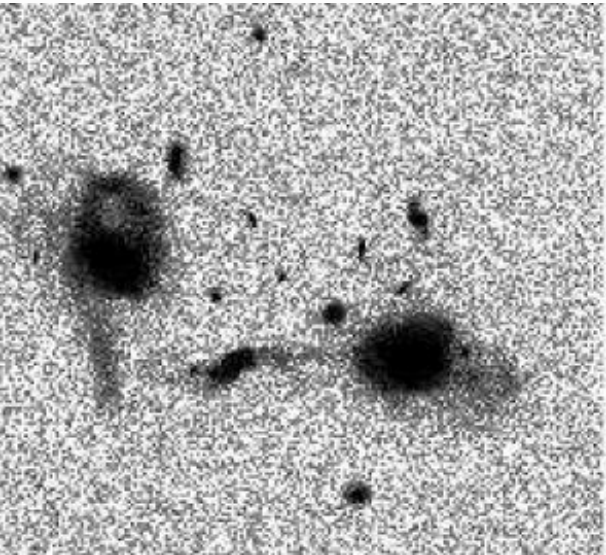
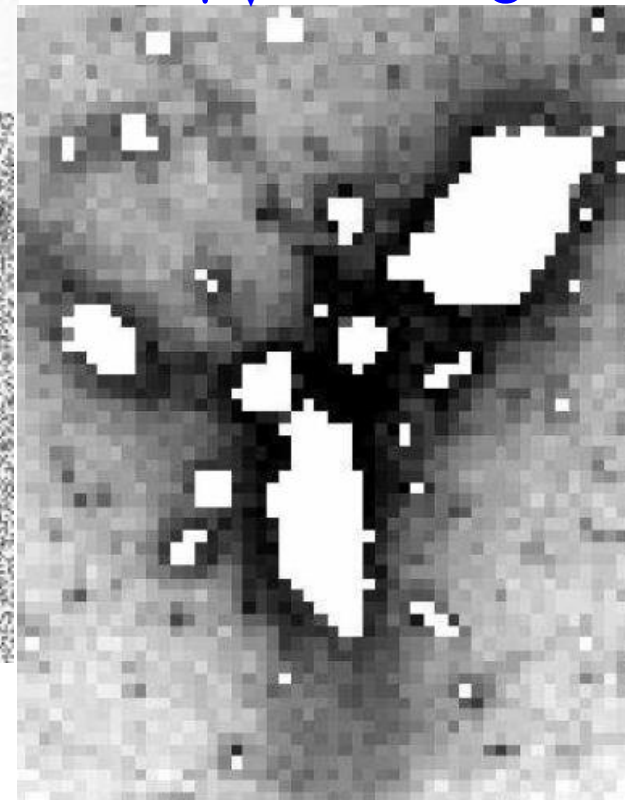
Verdugo et al 2015

Simulations

$\mu_V = 30 \text{ mag/''}^2$



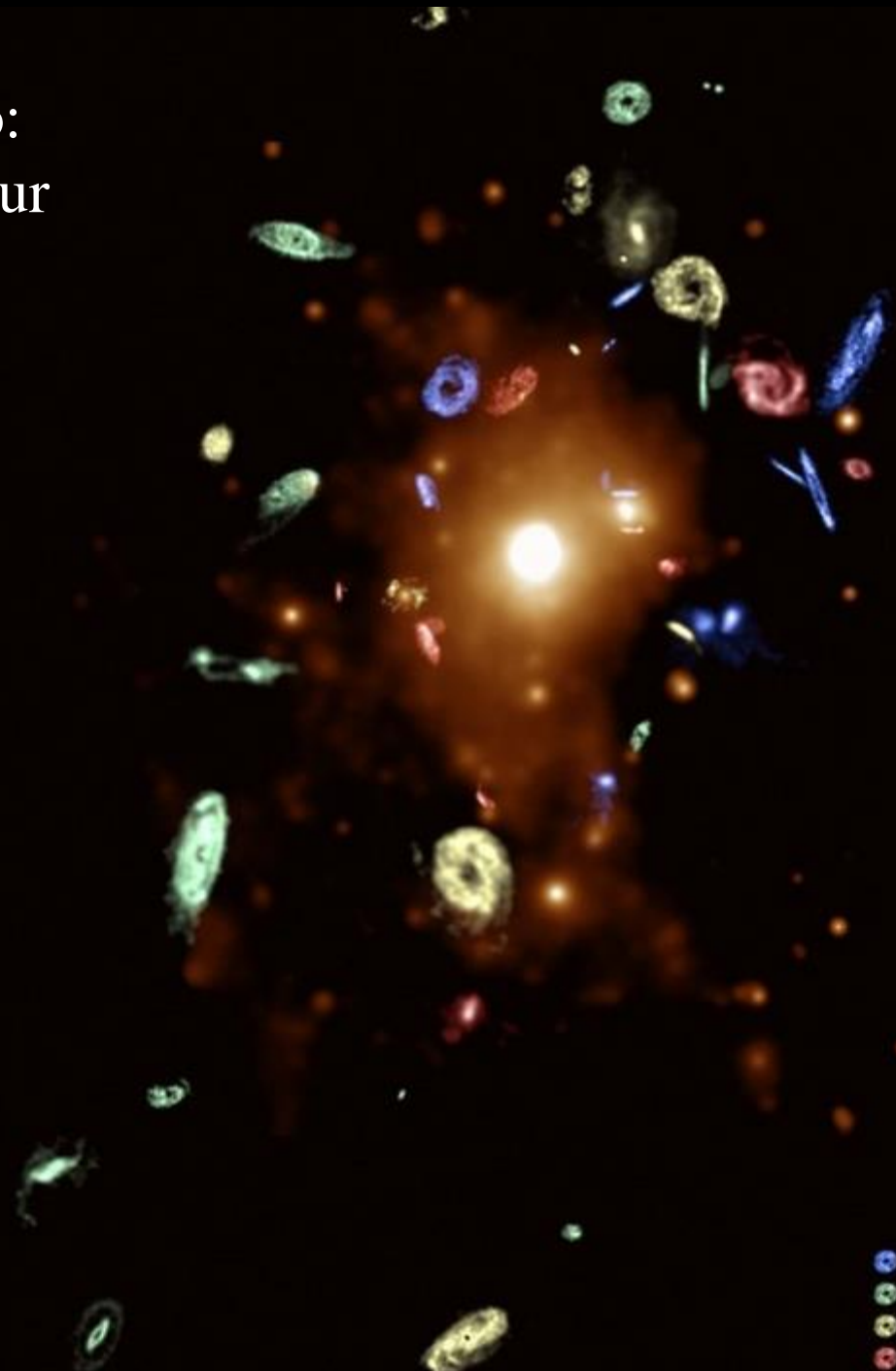
Lumière
Intra-amas
Abell 1914
 $\mu_V > 28 \text{ mag/''}^2$







Ajout du bruit
réaliste

Amas de Virgo:
Laboratoire pour
l'évolution des
galaxies

VIVA survey
VLA, HI-21cm



Taille des
disques HI x 10

-  $\mathcal{V} < 500 \text{ km/s}$
-  $600 \text{ km/s} < \mathcal{V} < 1300 \text{ km/s}$
-  $1400 \text{ km/s} < \mathcal{V} < 2000 \text{ km/s}$
-  $\mathcal{V} > 2000 \text{ km/s}$

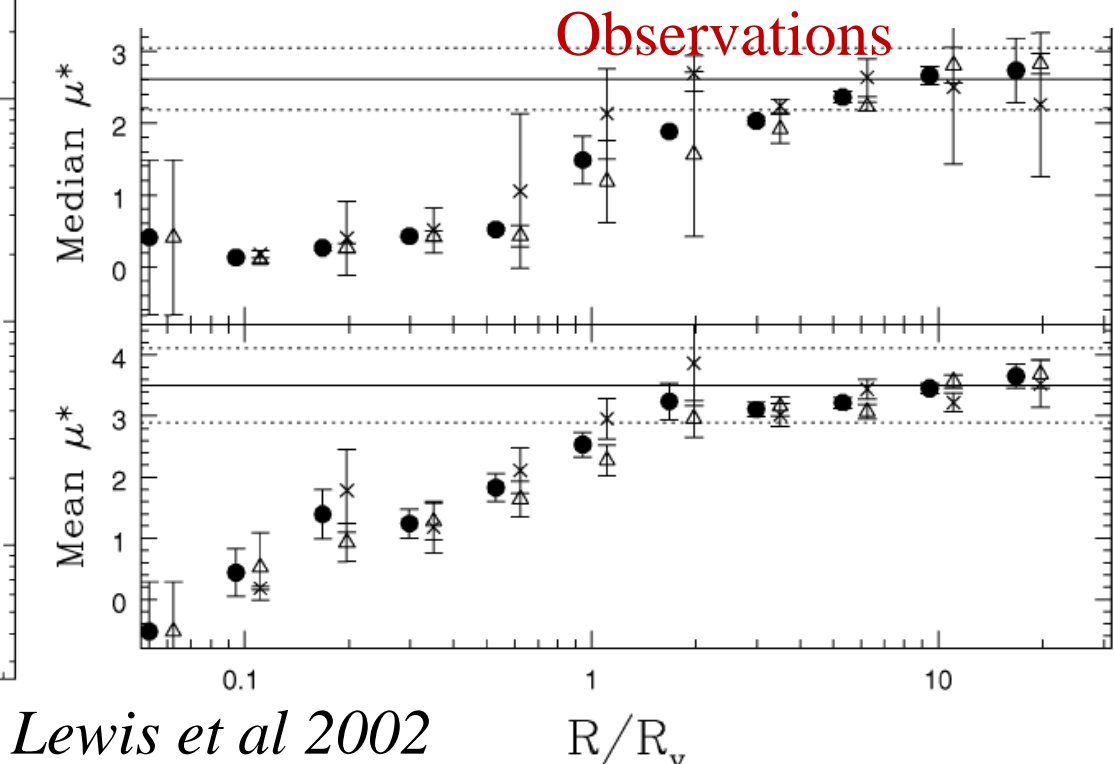
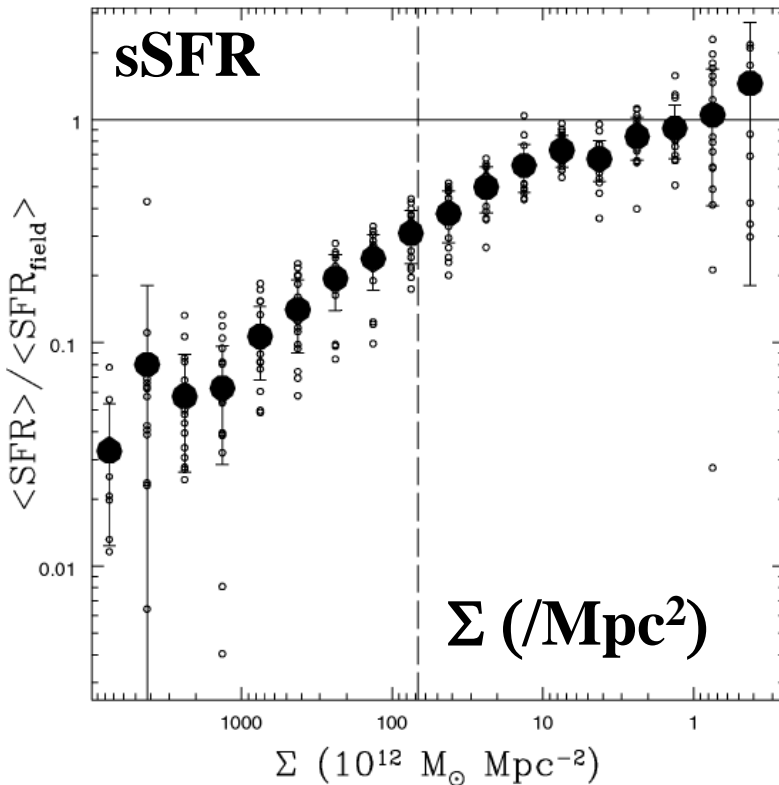
Parties externes des amas

SFR supprimée dans les galaxies jusqu'à 3-4 rayons viriel

Lewis et al (2002): 11000 galaxies dans les survey 2dF

$sSFR = SFR/M^*$ ne retrouve sa valeur qu'à 3-5 R_{vir}

Balogh et al 2004: $WH\alpha$ dépend plus de la densité de surface que de l'environnement



Pre-processing dans les filaments, les groupes

SFR est supprimée dans les galaxies jusqu'à $5 R_{200}$

Simulations GIMIC avec $\log M_{\text{halo}} = 13-15.2$

~50% de ces galaxies ont des orbites liées (pas le 1^{er} passage!)

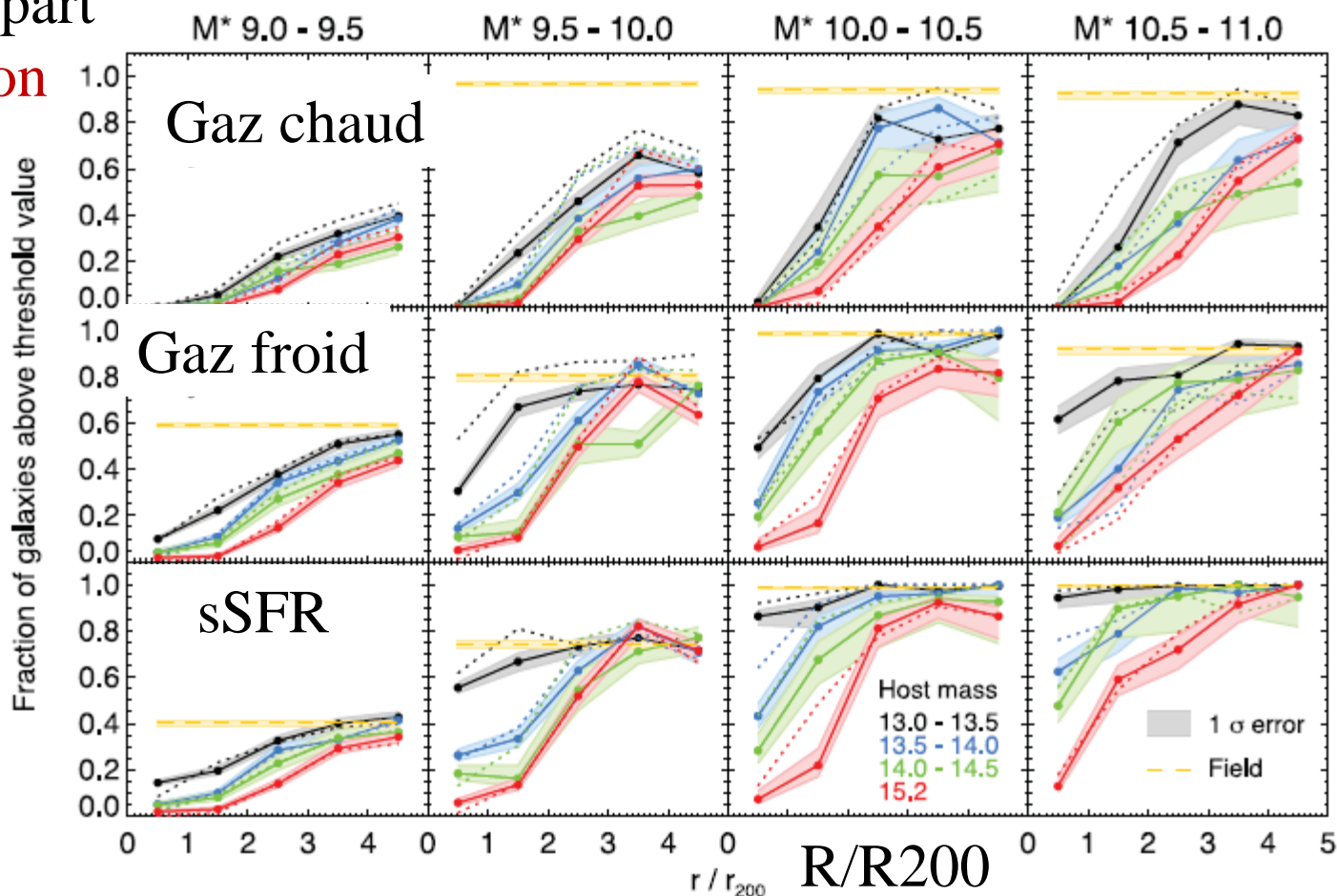
Quelques-unes sont pre-processées

en groupe, la plupart

ont subi la **pression dynamique des filaments,**

même si elles suivent leur mouvement (100x champ)

Simulations

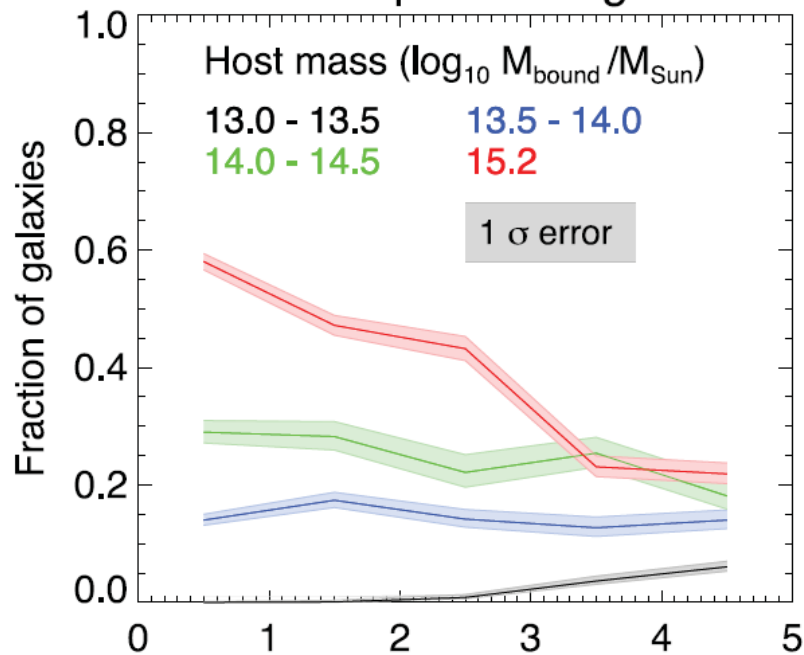


Causes

Rouge: filament

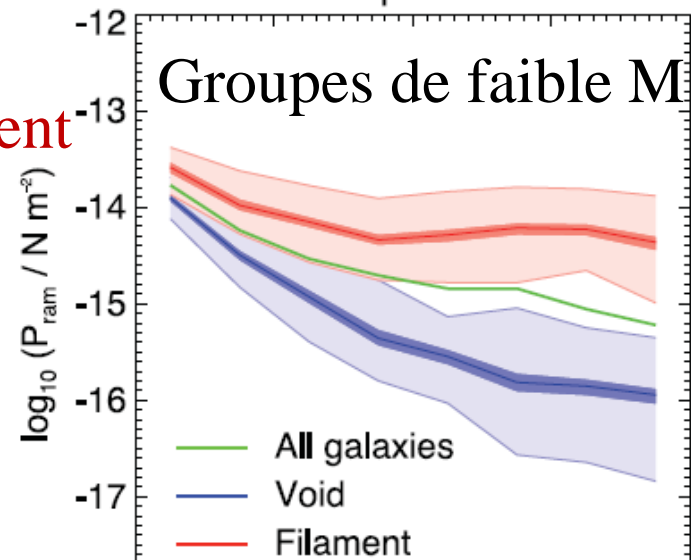
Bleu: vide

Pre-processing

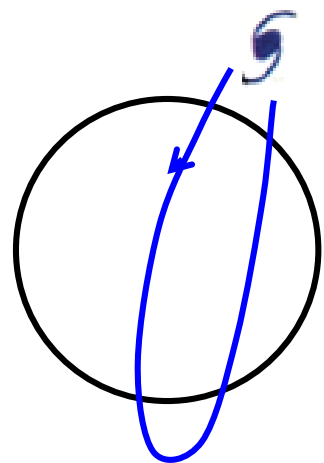


Ram pressure

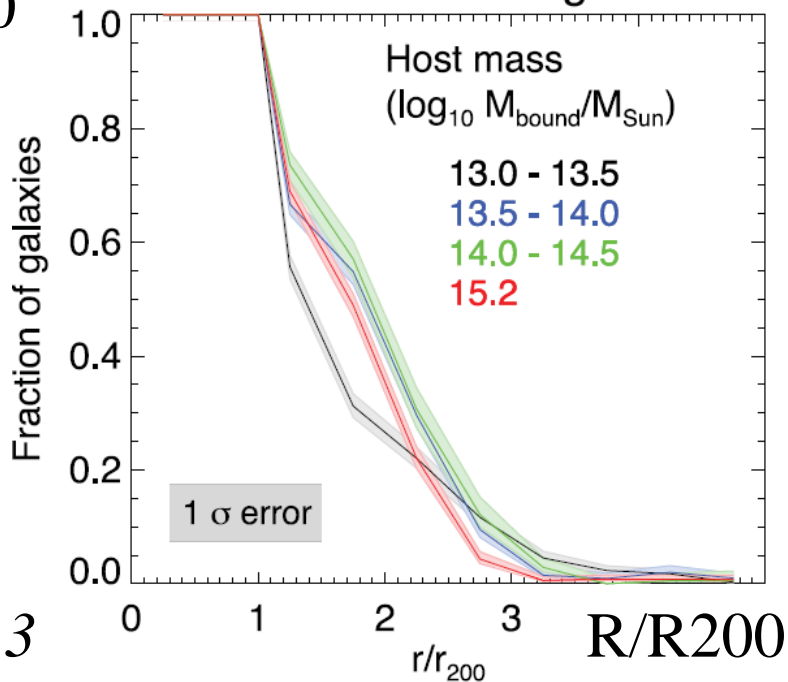
Groupes de faible M



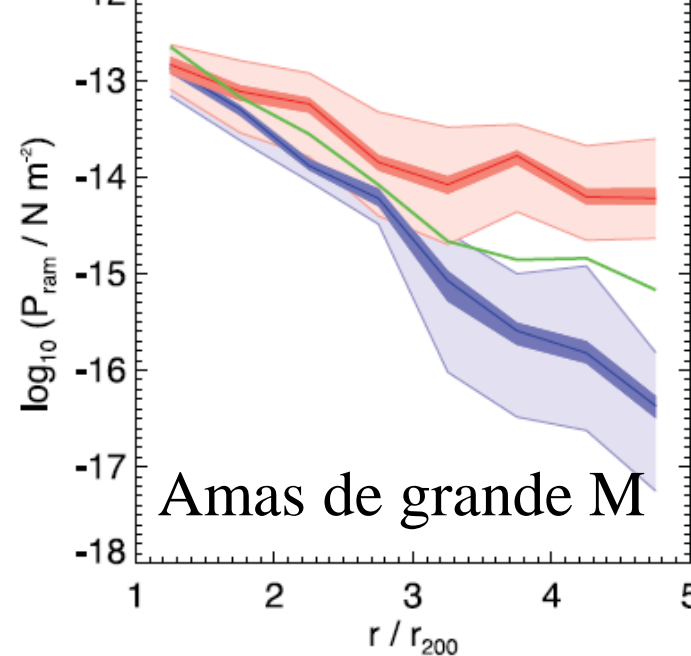
R/R200



Overshooting

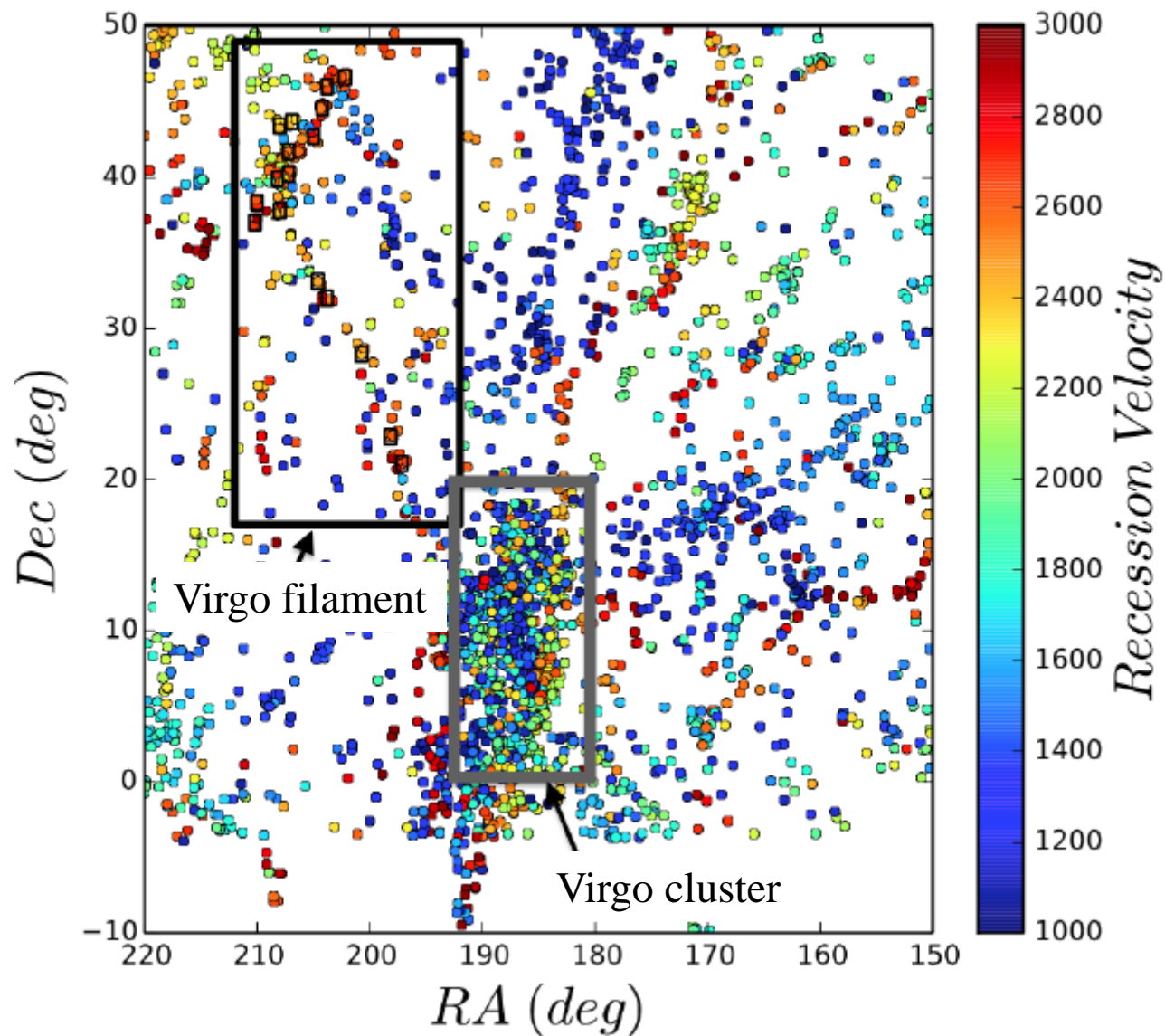


Amas de grande M



Filaments, galaxies tombant sur l'amas de Virgo

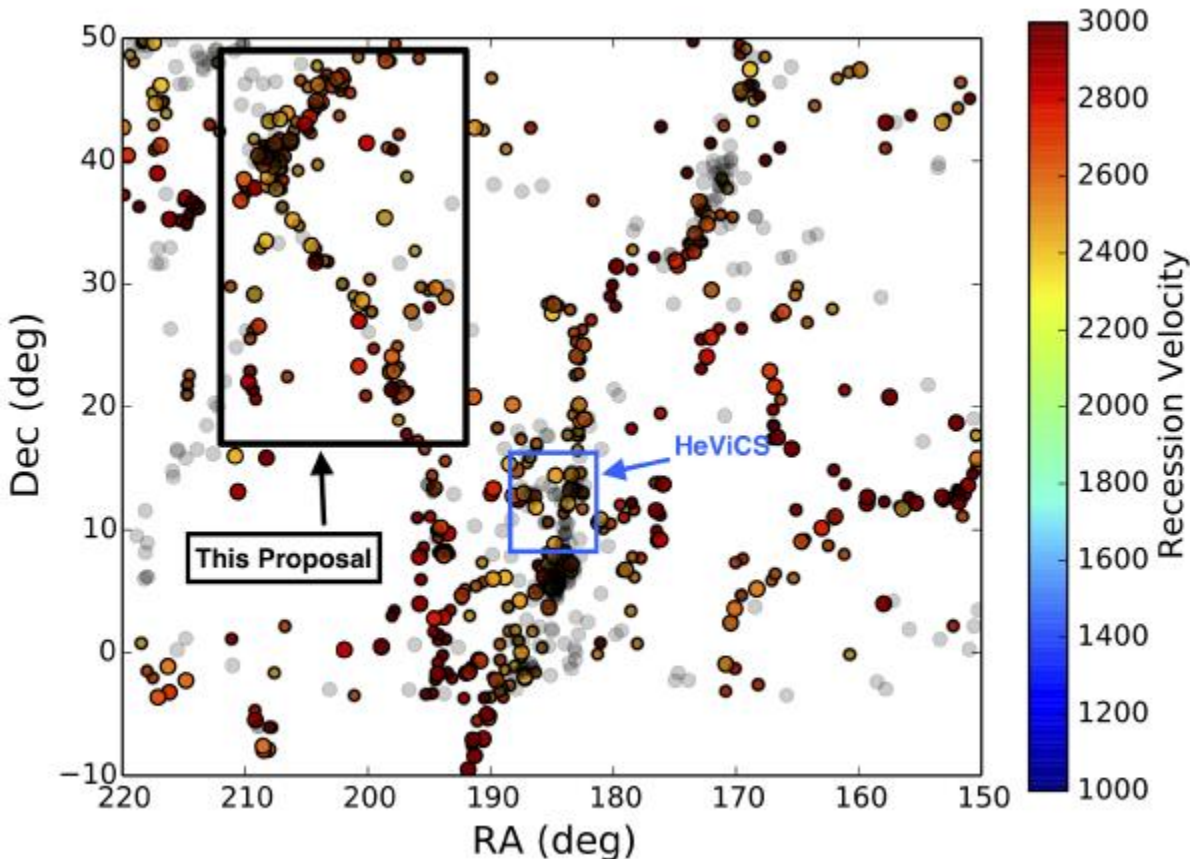
Couleur=
Vitesse



Filaments autour de Virgo

HeVICS: programme-clé avec Herschel , observations CO par
Pappalardo et al 2012

+ Projet CO, H α en cours, sur environ 300 galaxies



WISE-22 μ -detections
 $V < 2400$ km/s, gris

Echantillon
 $2400 < V < 3000$ km/s

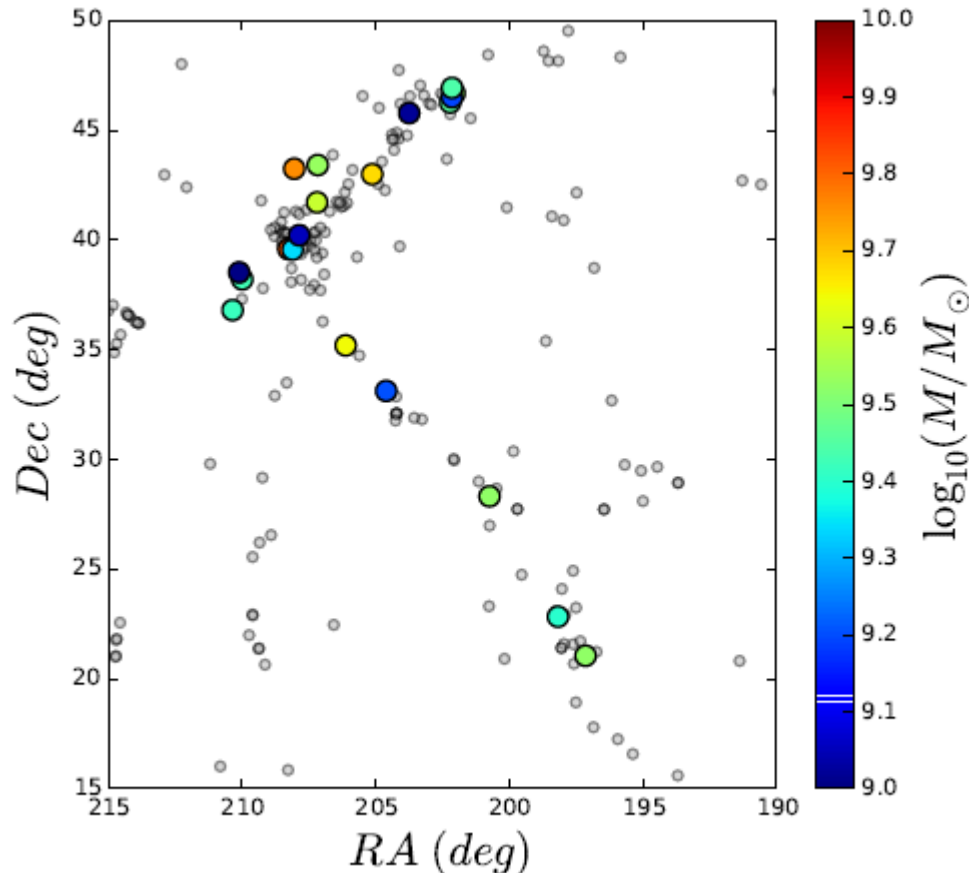
Au-delà de
EVCC 3.5 R_{vir}
Kim et al 2014

Filament 1, contenant le groupe N5353

Selection, couleur code la masse d'étoiles: $M^* = 10^9 - 10^{10} M_{\odot}$

En-dessous: problème de métallicité pour détecter CO

Au-dessus: passivation morphologique



WISE-22 μ -détectons

Gris: hors sélection

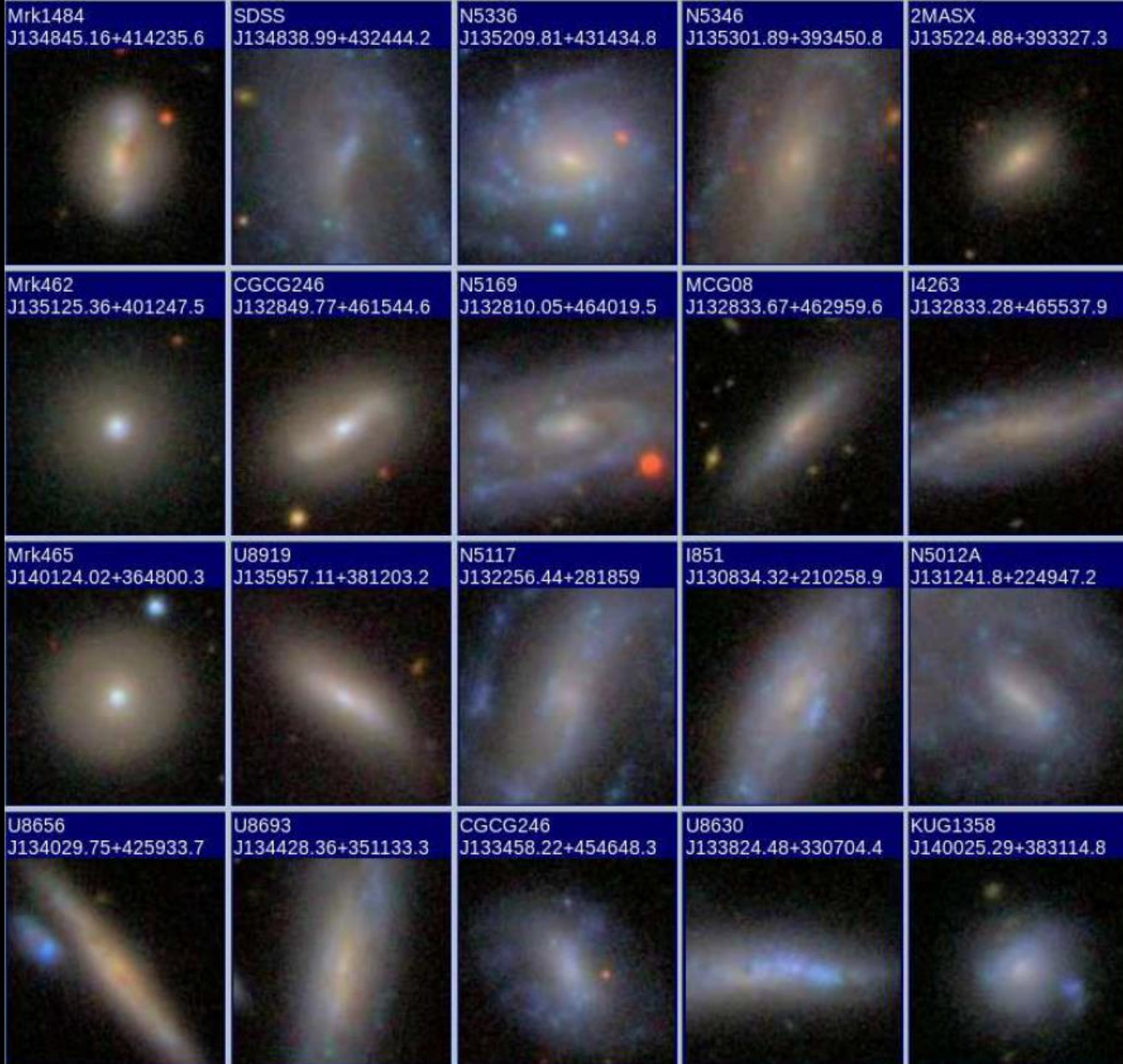
Echantillon

$2400 < V < 3000$ km/s

$M^* = 10^9 - 10^{10} M_{\odot}$

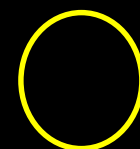
Extension $7 R_{\text{vir}}$, 20Mpc

HI disponible



Boîte
50''

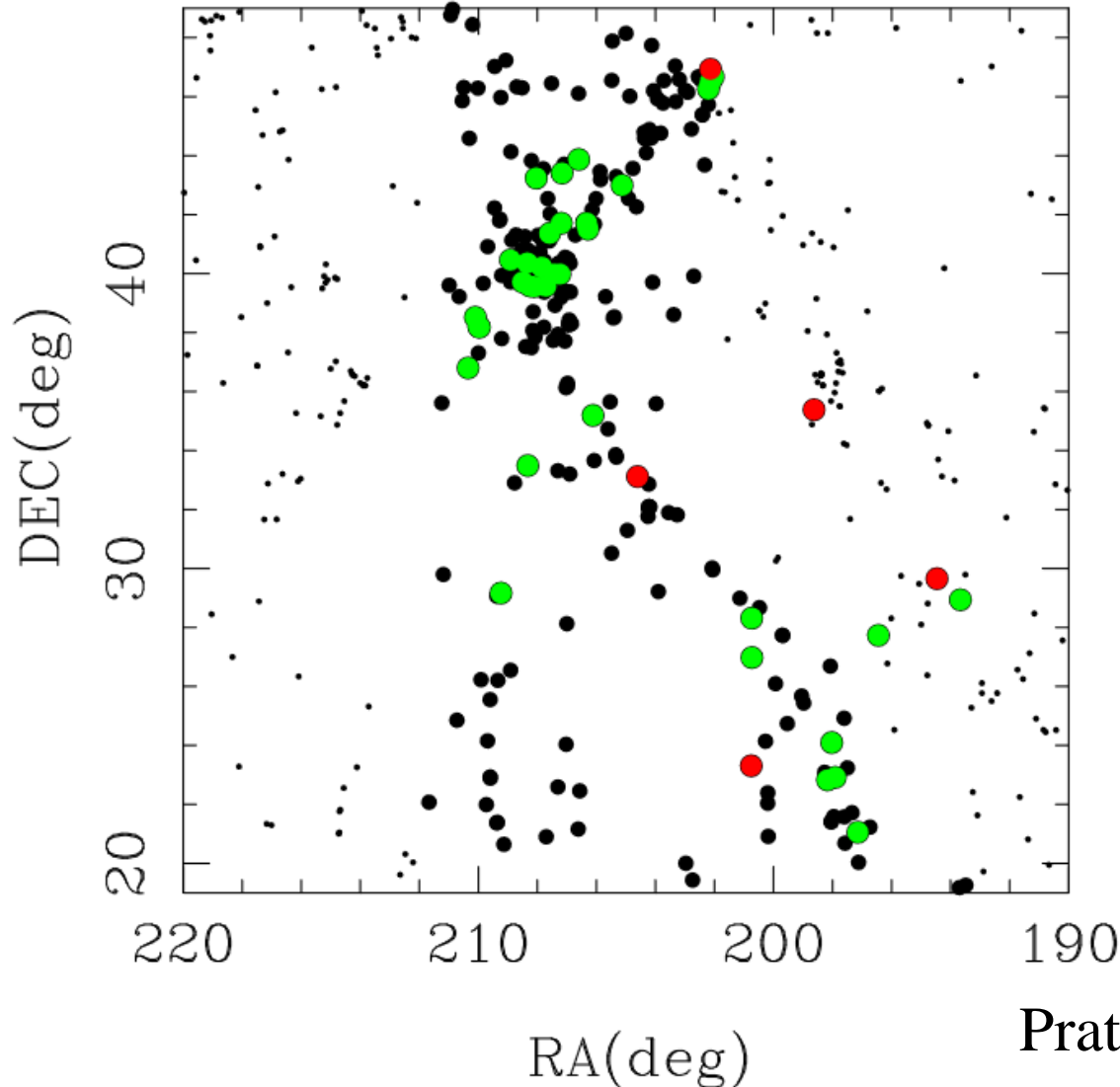
Lobes
CO(1-0)
22''



CO(2-1)
11''



CO observé dans le Filament 1



Vert: detections

Rouge: limites supérieures

Noir: non observé

Flux: 0.3 to 21 Kkm/s

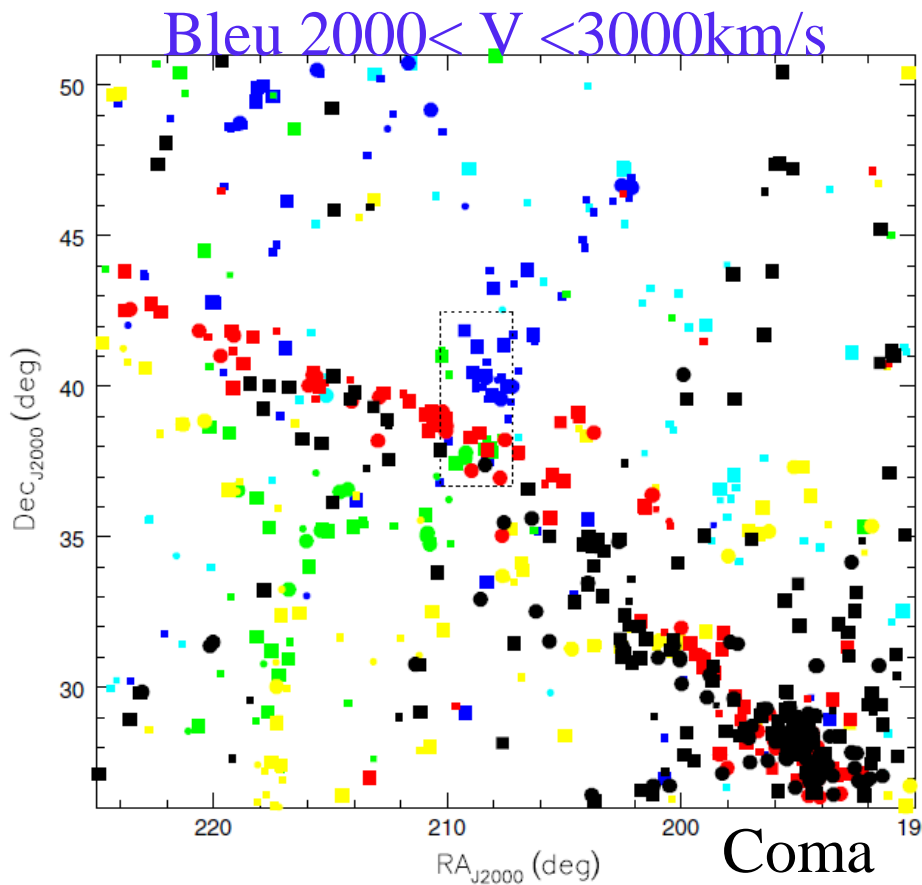
Presque 100 de dynamique

Pratiquement 80% de détections!

Le groupe N5353/4

Dans le super-amas local, $2.1 \cdot 10^{13} M_{\odot} = \text{HCG 68}$, $M/L_R = 105$

Moins évolué dynamiquement, pas de superlumineuses, activité SF

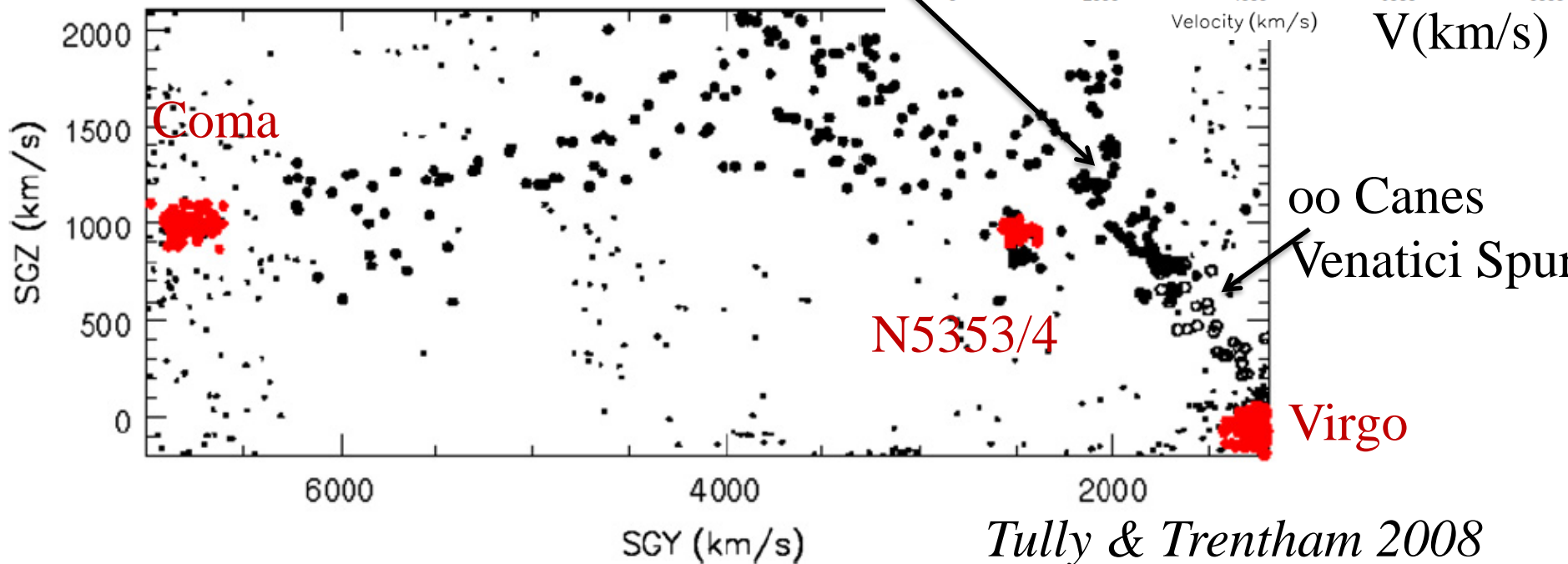
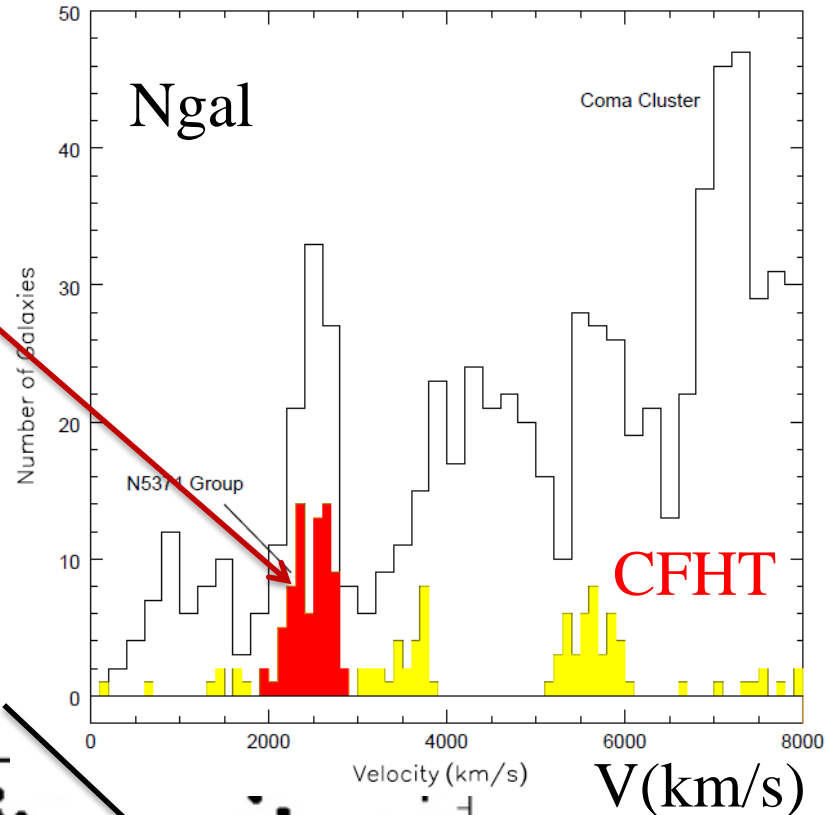


Tully & Trentham 2008

Groupe N5353/4

$-300 < \text{SGX} < 1200 \text{ km/s}$

Filament



Autres filaments du web cosmique

Couleur=
Vitesse

Filament 1

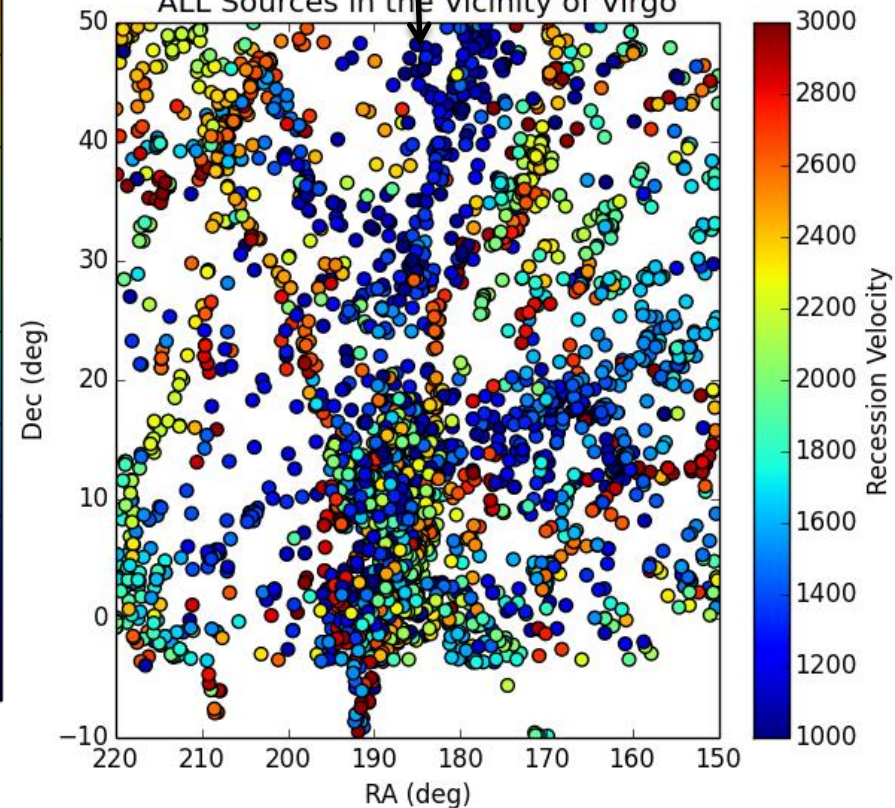
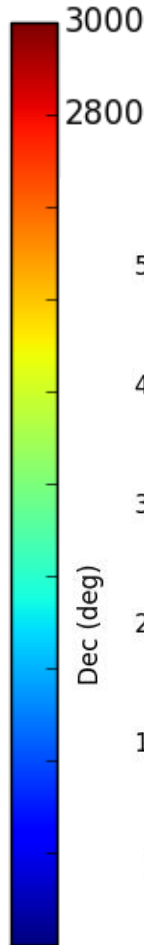
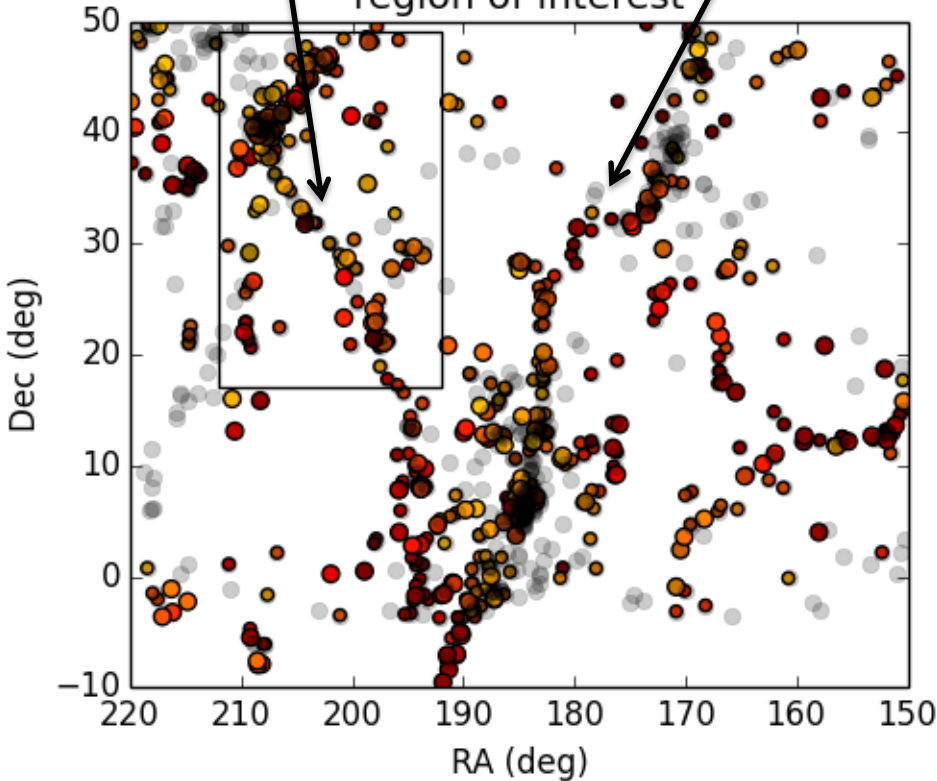
Filament 3

Filament 2

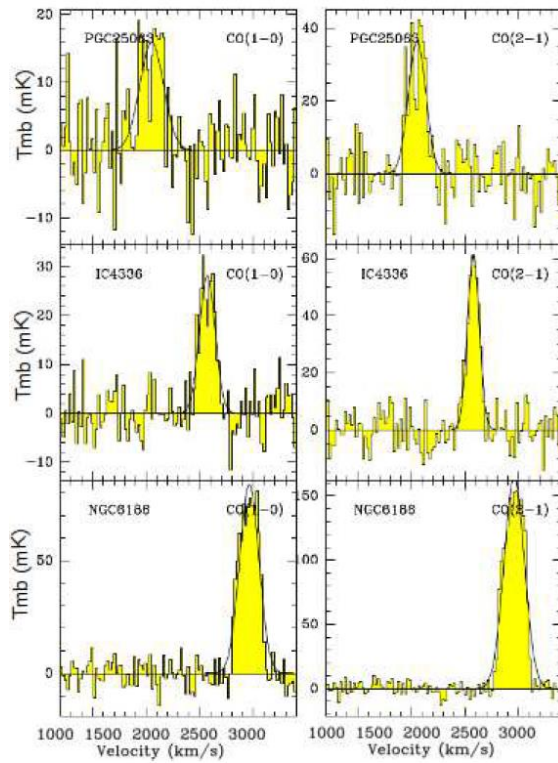
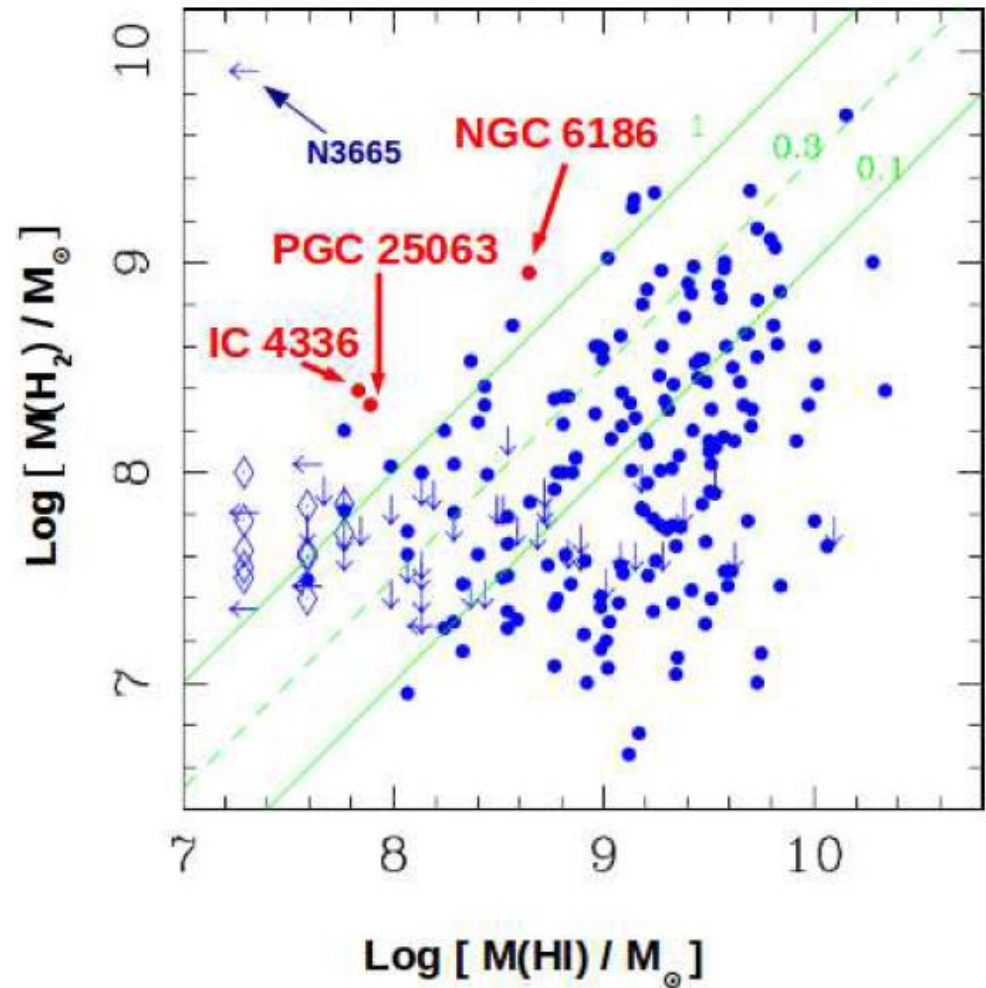
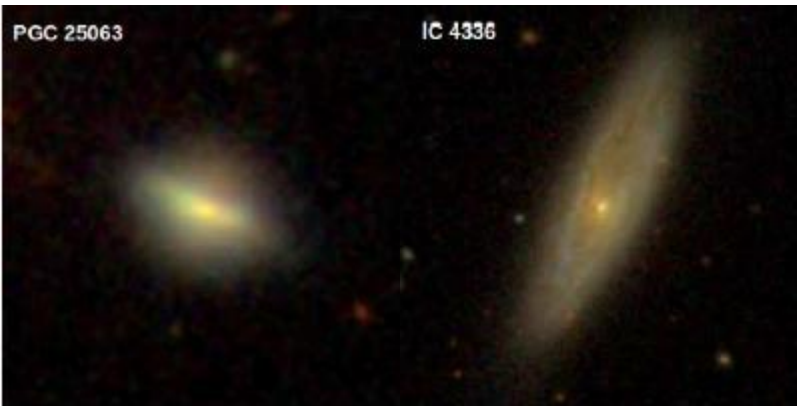
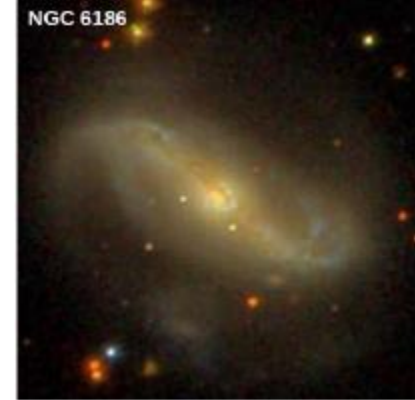
$V \sim 1200$ km/s

region of interest

ALL Sources in the Vicinity of Virgo



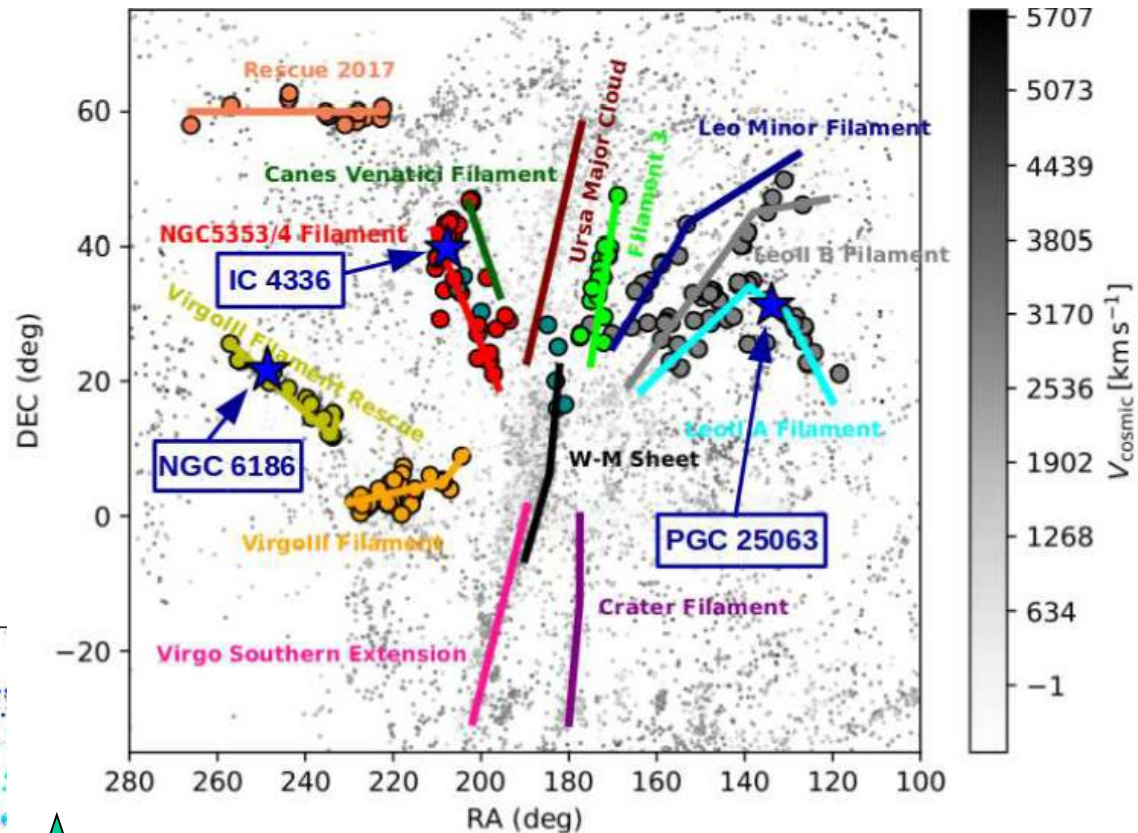
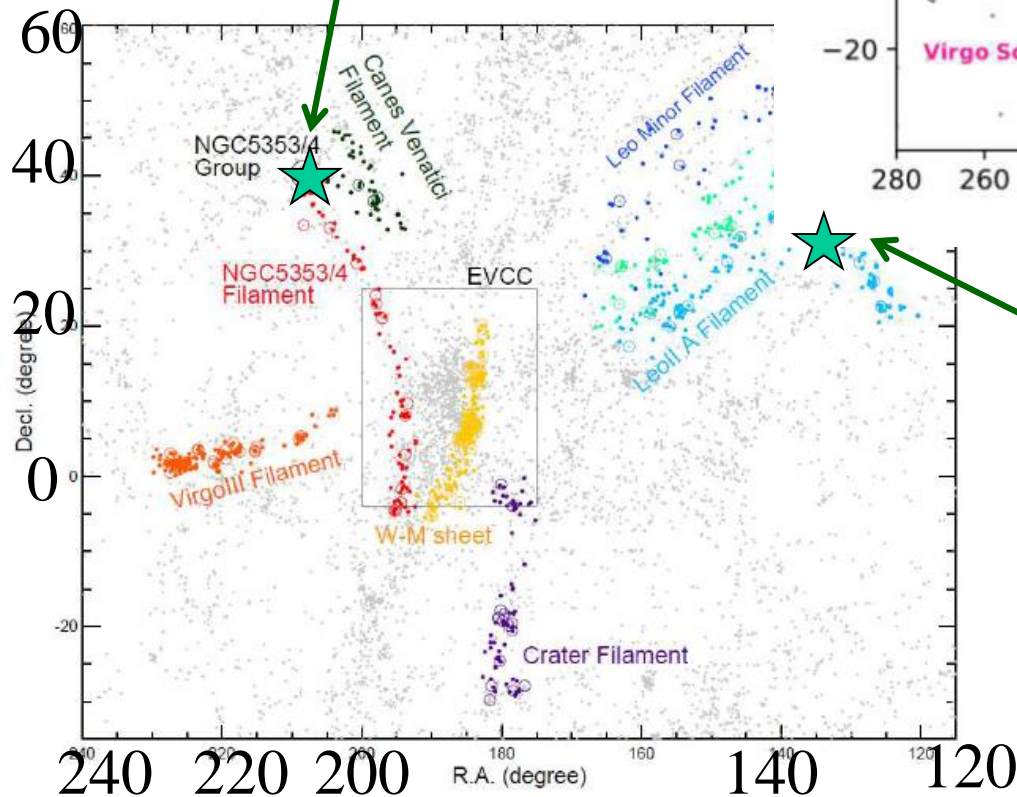
Galaxies déficientes HI, riches en CO



Où sont-elles?

Ces galaxies balayées récemment sont au centre de filaments

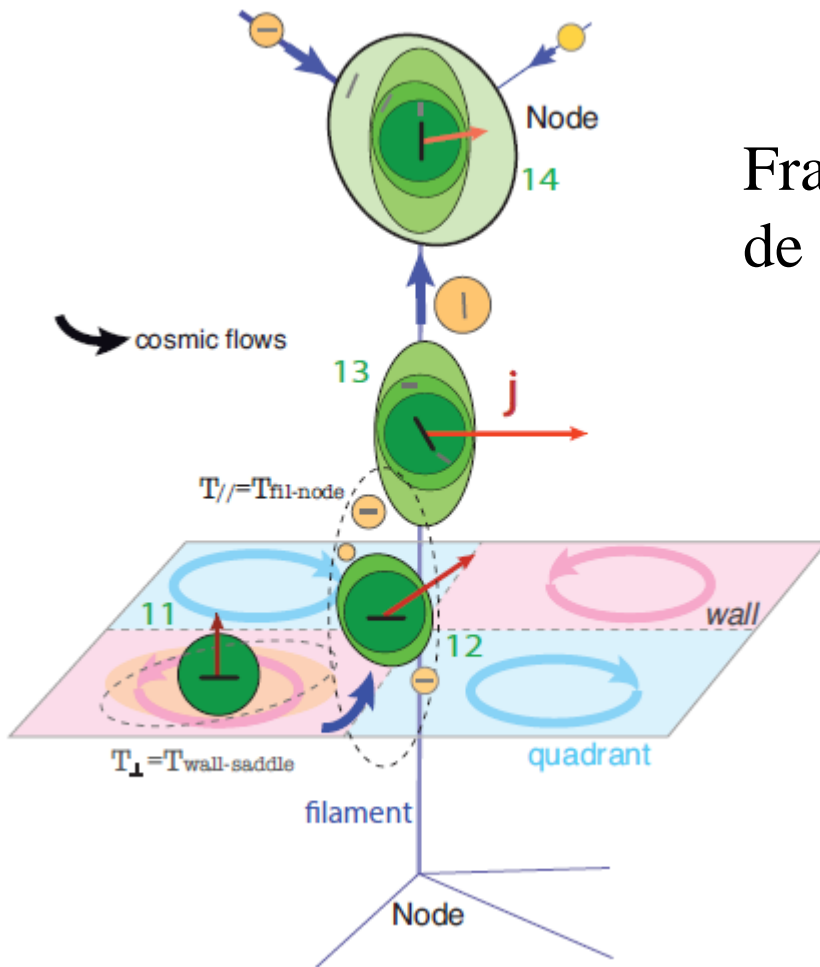
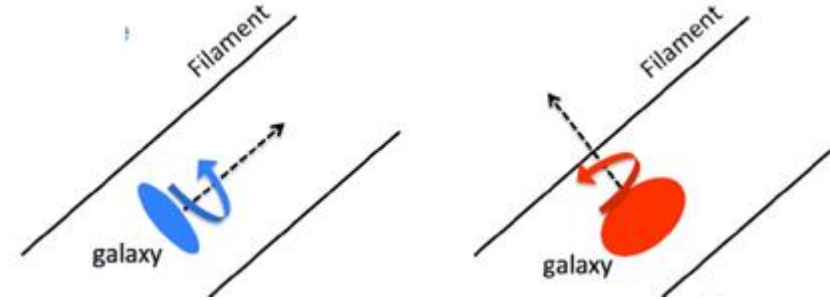
IC4336



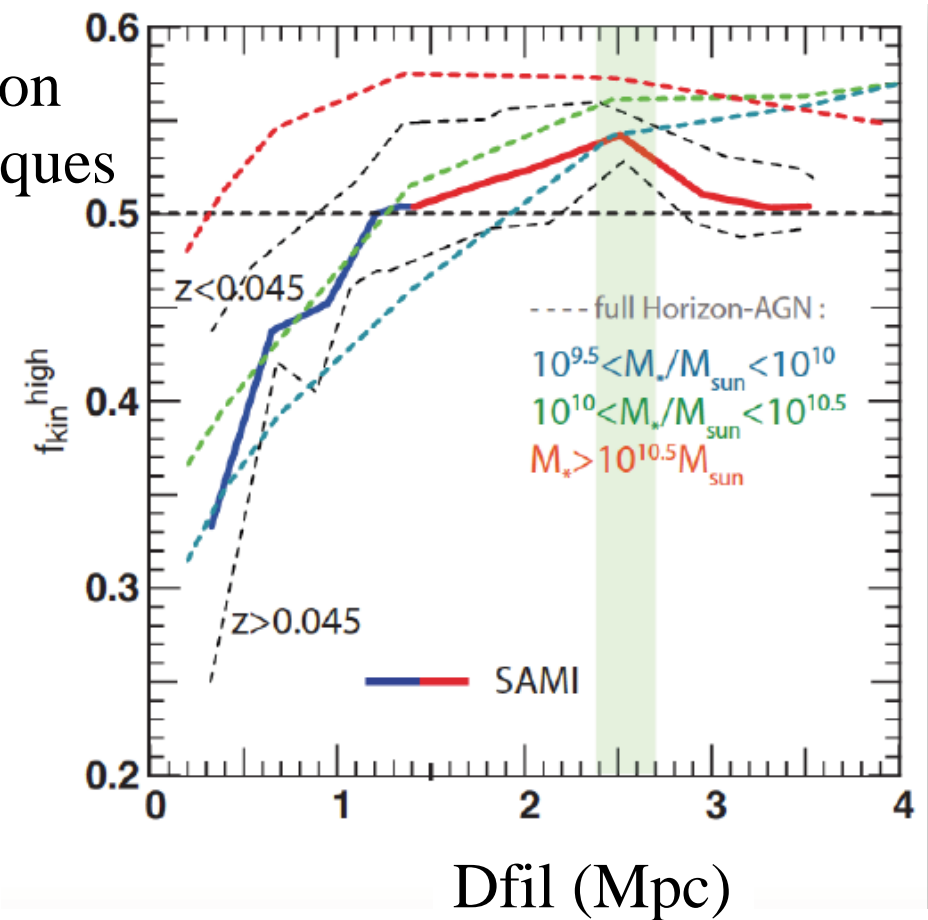
PGC25063

Soit par les forces de marée
Soit la pression dynamique

Elliptiques et spirales selon la distance au filament



Fraction
de disques

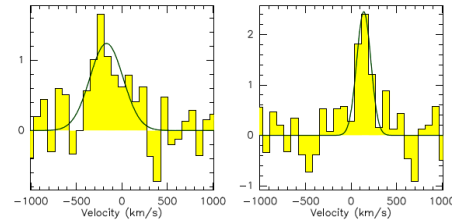
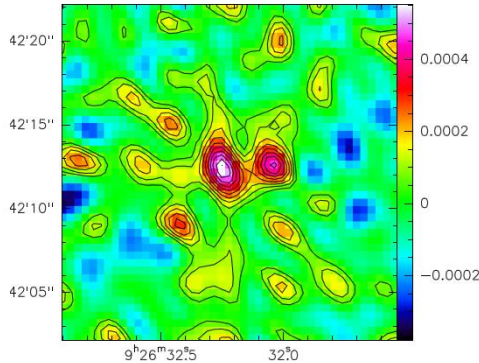


Galaxies bleues: spin // filament

Galaxies rouges, spin perpendiculaire

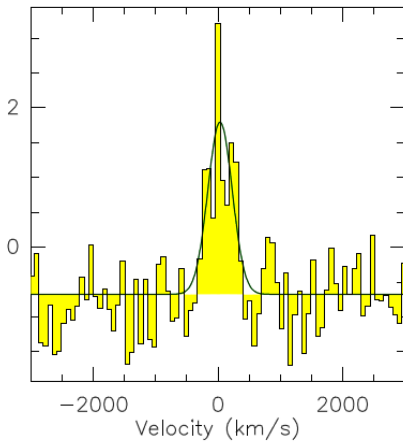
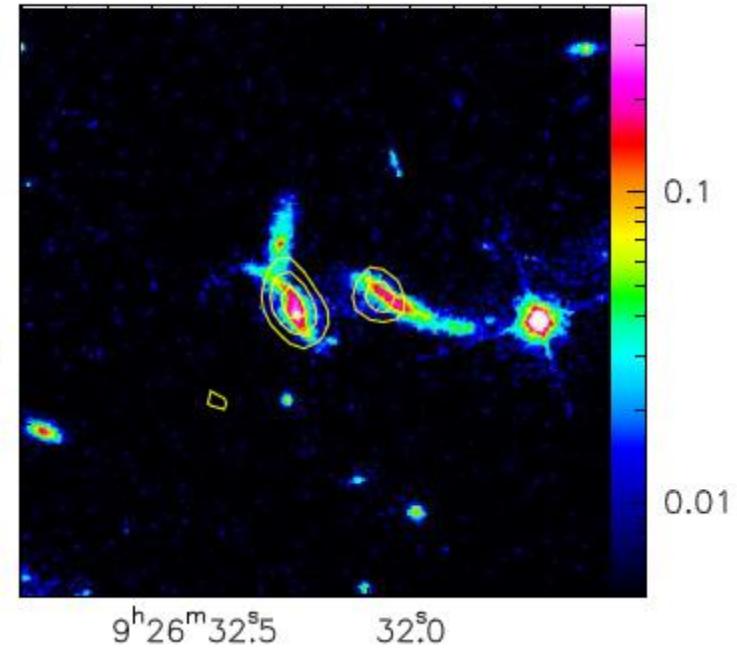
Codis et al 15, Welker et al 18

Evolution des amas avec le redshift



CL0926+1242
Z=0.489

2°42'20''
12°42'10''



CL1416+4446
Z=0.4

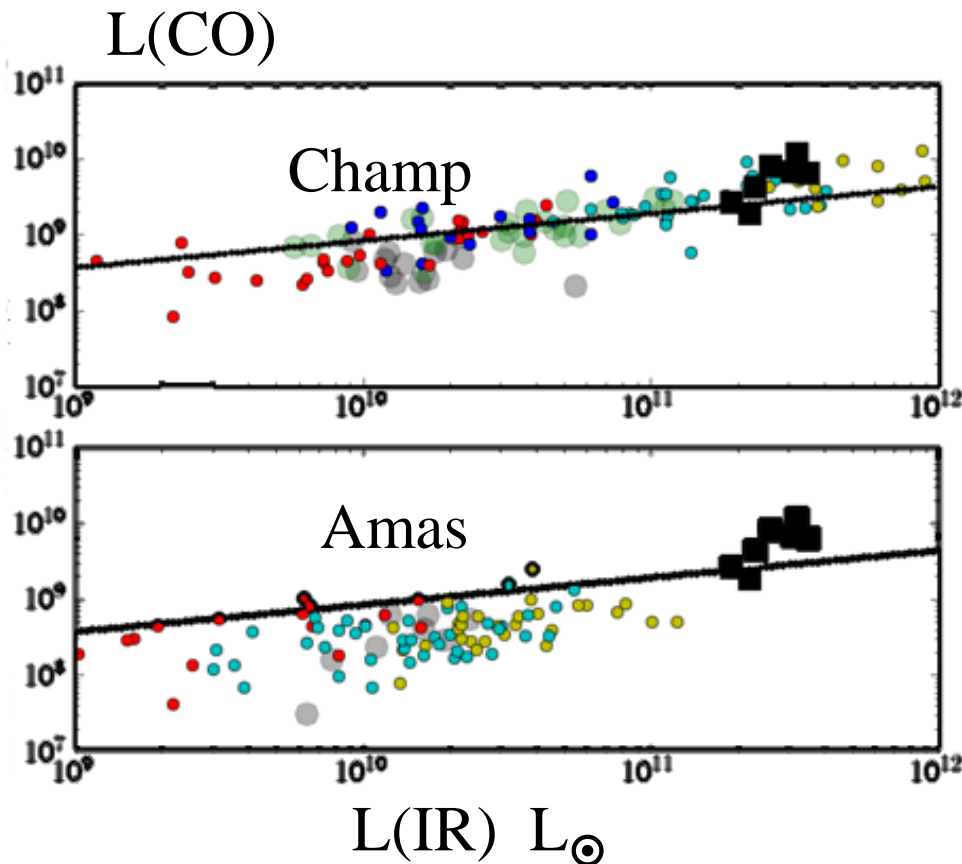
Trois galaxies détectées en CO
dans le cœur des amas
(précédemment à l'extérieur
Geach et al 2009, 2011)

Comparaison amas-champ

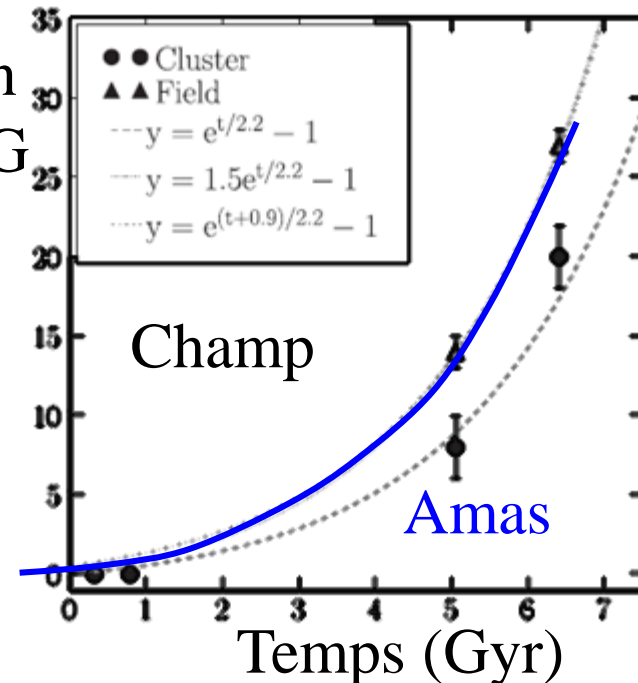
La fraction de LIRG décroît
exponentiellement (Finn et al 2010)

On s'attend à un **retournement**
vers $z \sim 1.5$:

→ Les galaxies d'amas devraient
former plus d'étoiles que le champ

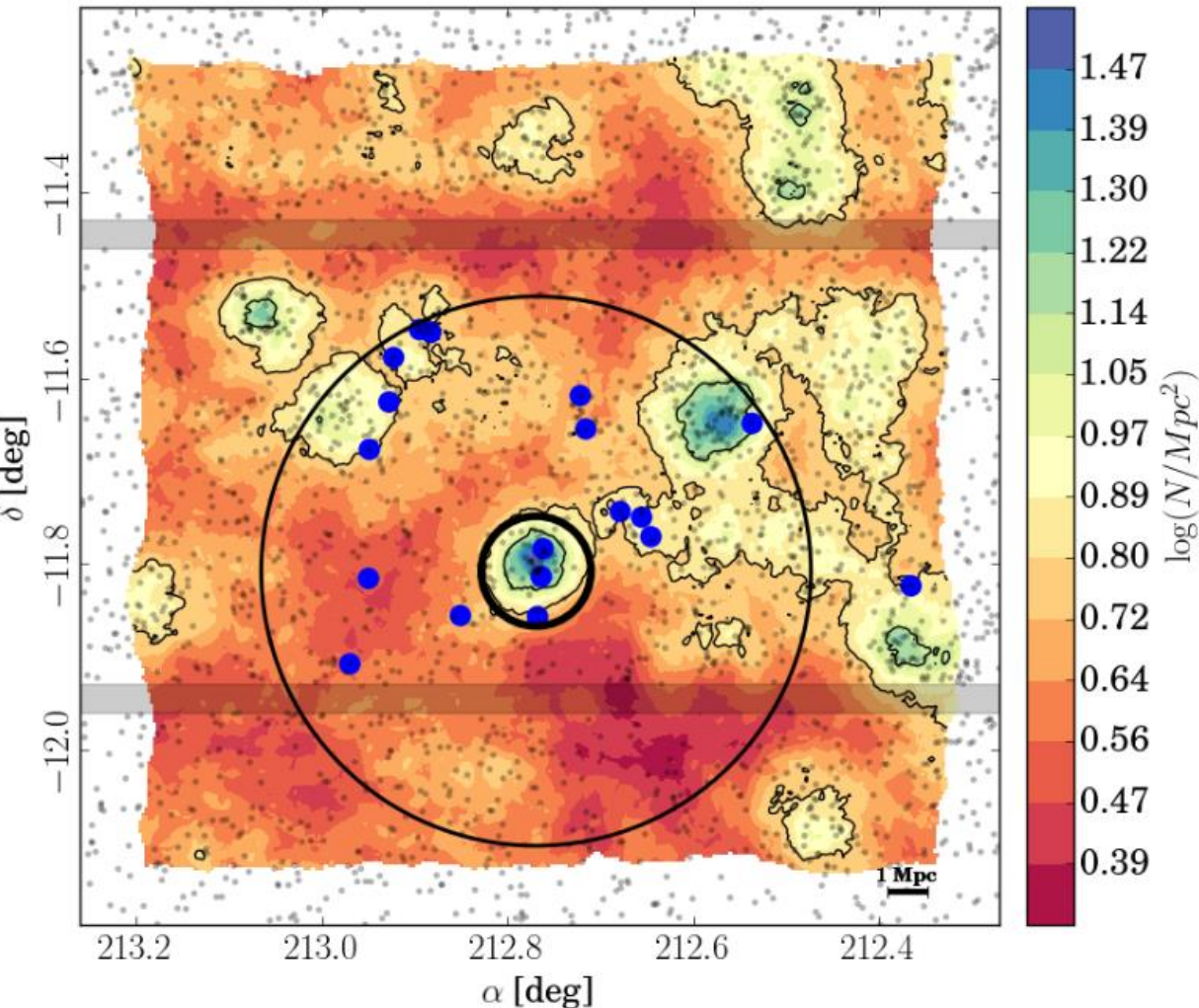


Fraction
de LIRG



Résultats ALMA dans CL1411

Recherche dans les filaments autour de l'amas, jusqu'à 8 R200



CL1411.1-1148

Champ 1 degré carré

R200 rayon du viriel

Cercle 5x R200

Image avec CFHT

Megacam

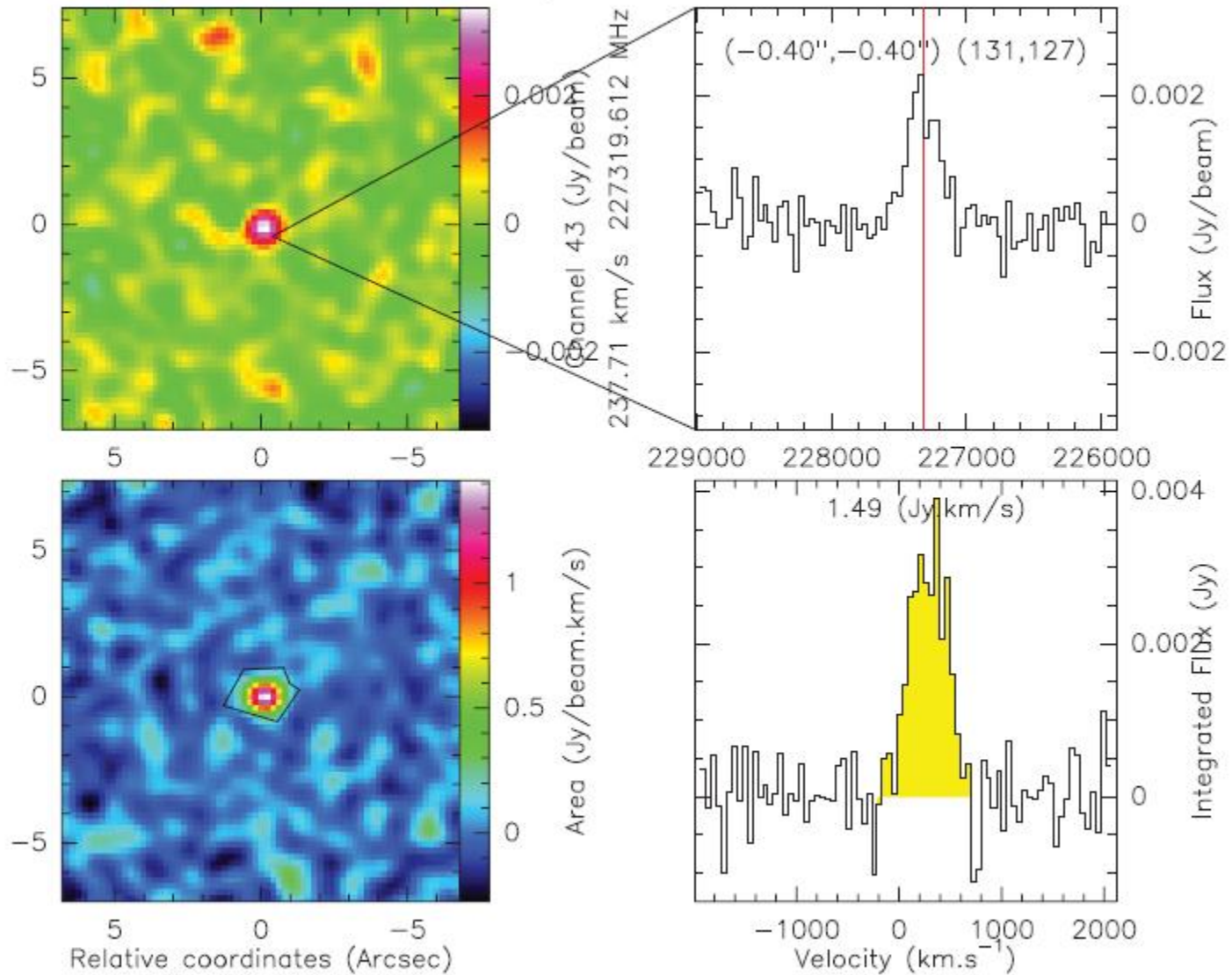
ALMA: 18 galaxies

Détectées en CO(3-2)

Jablonka et al

CO(3-2) Bande 6 d'ALMA

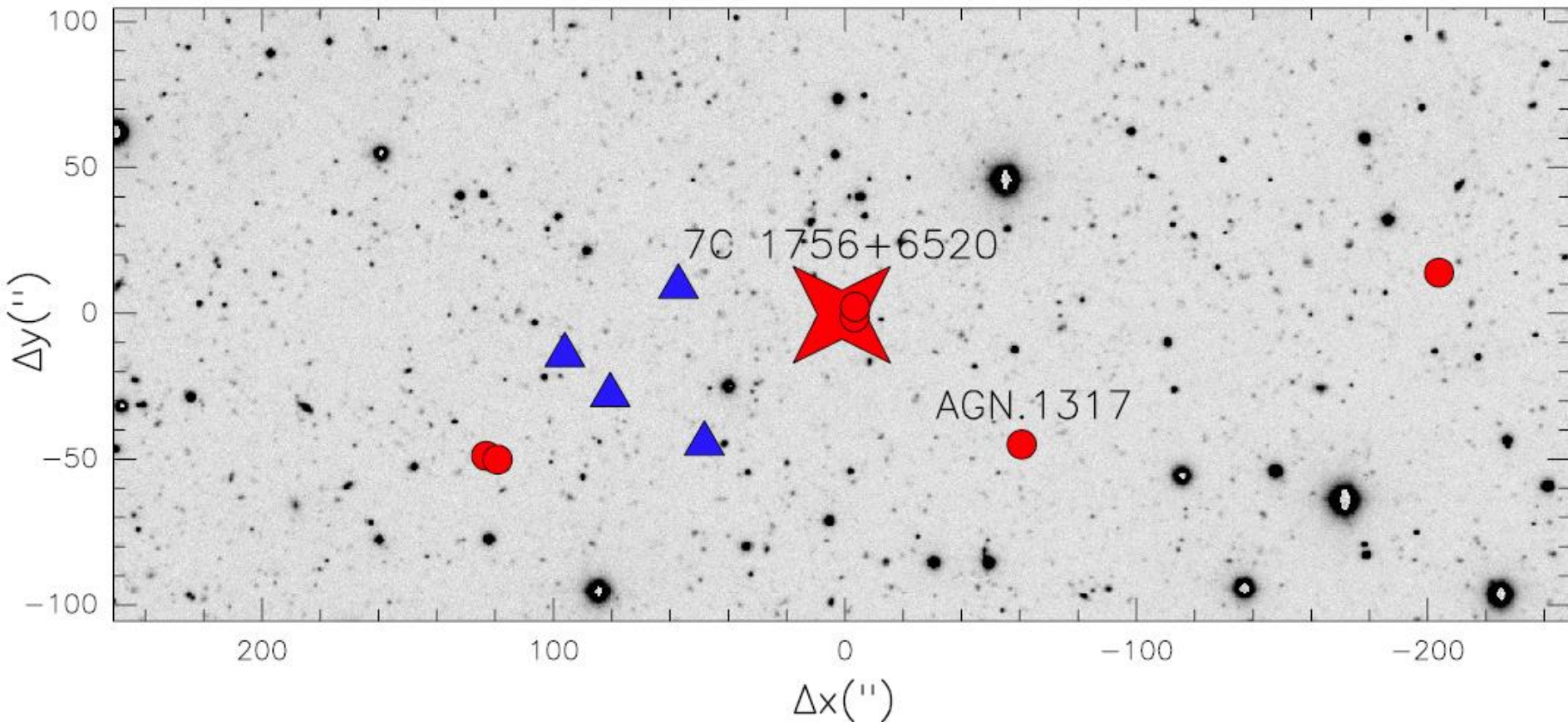
S: CL1411 L: 227.5 GHz @ 0 km/s LSR B: 0.98 x 0.91 PA -78°



Galaxie AGN au centre d'un amas à $z=1.4$

Les amas formés il y a 9 Gyr, à $z=1.4-1.6$

Galaxie radio centrale 7C 1756+6520 – AGN.1317 à 780kpc



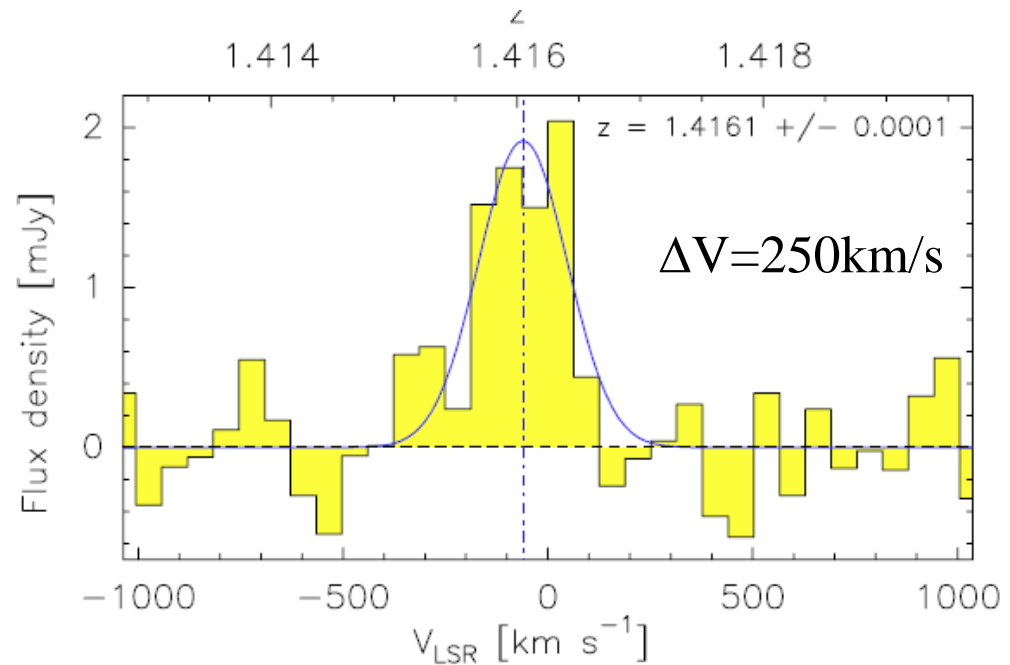
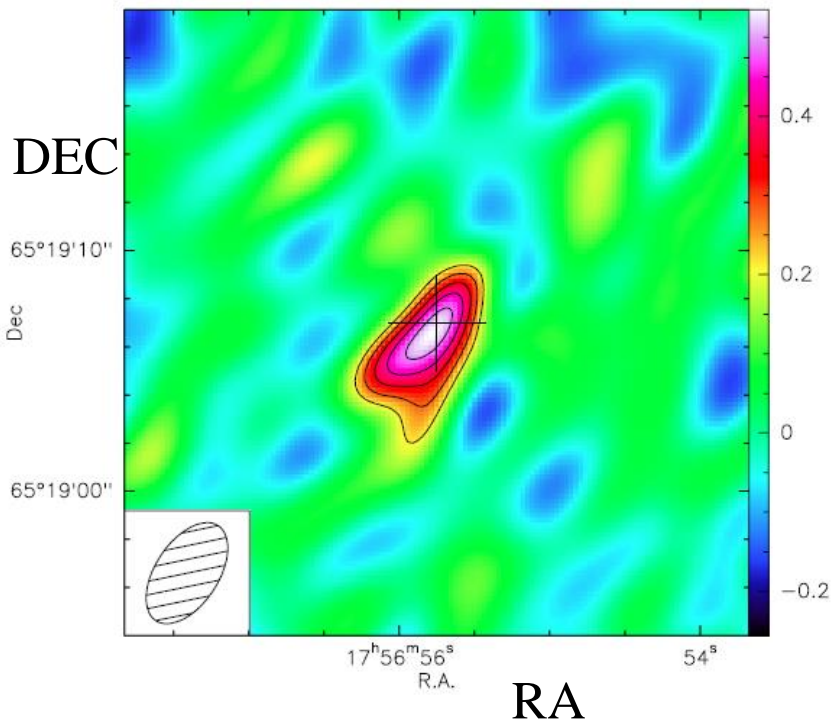
Casasola et al 2013, Galametz et al 2010

Flambée de formation d'étoiles?

La relation SF-environnement inversée à $z > 1$ (Elbaz et al 2007)

$1.1 \cdot 10^{10} M_{\odot}$ de gaz moléculaire, vu en CO(2-1) **tdep=0.2Gyr ($\alpha=0.8$)**

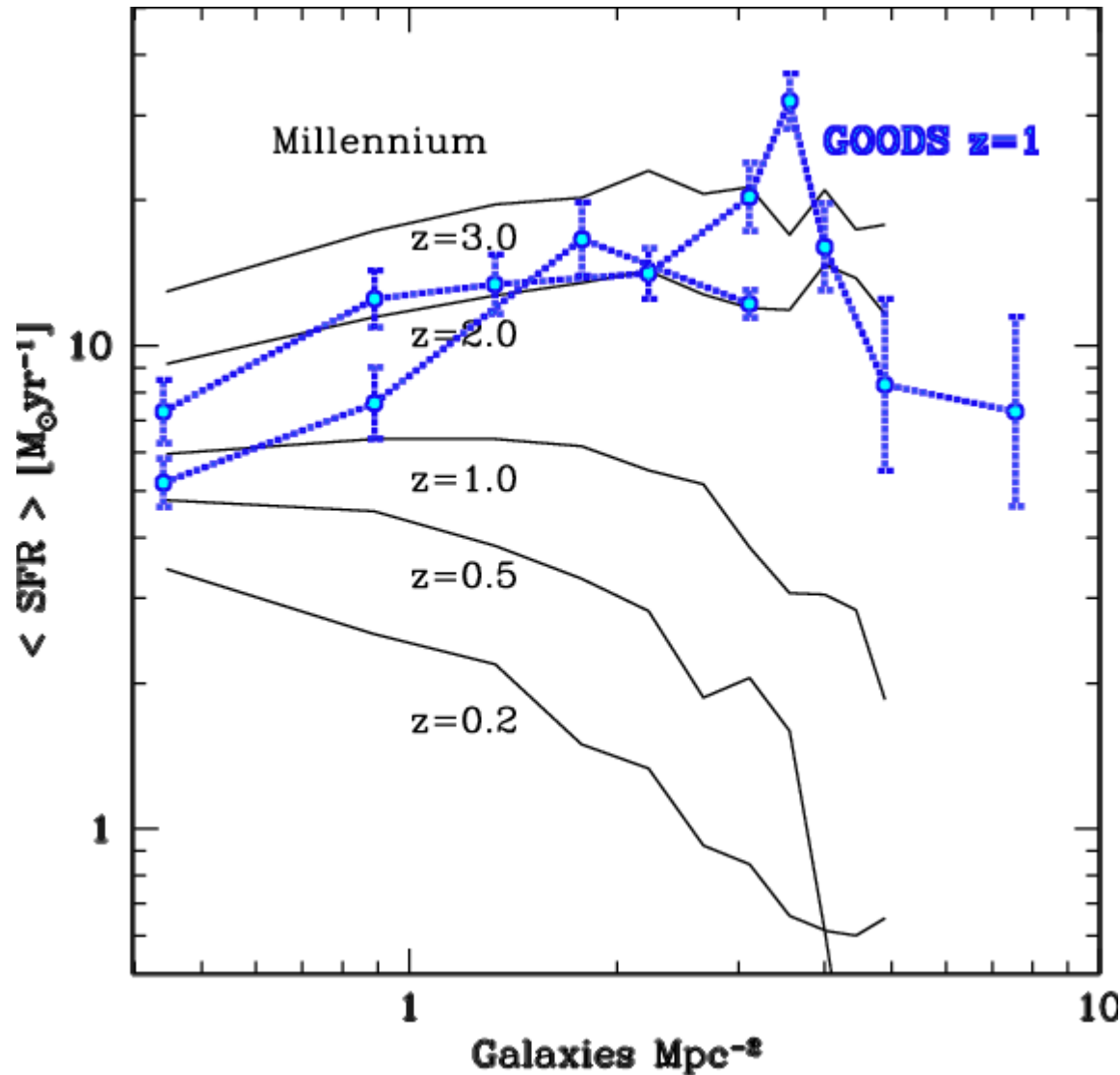
SFR = $65 M_{\odot}/\text{yr}$ (NIR, LBT)



Observations IRAM à 3mm

Casasola et al 2013

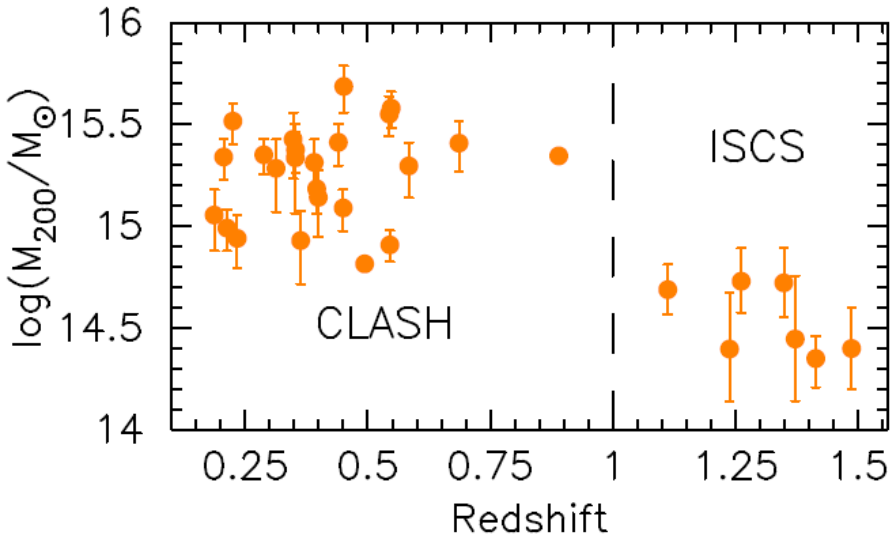
Renversement SFR-Densité (modèles)



Les modèles à partir
des simulations
Millennium

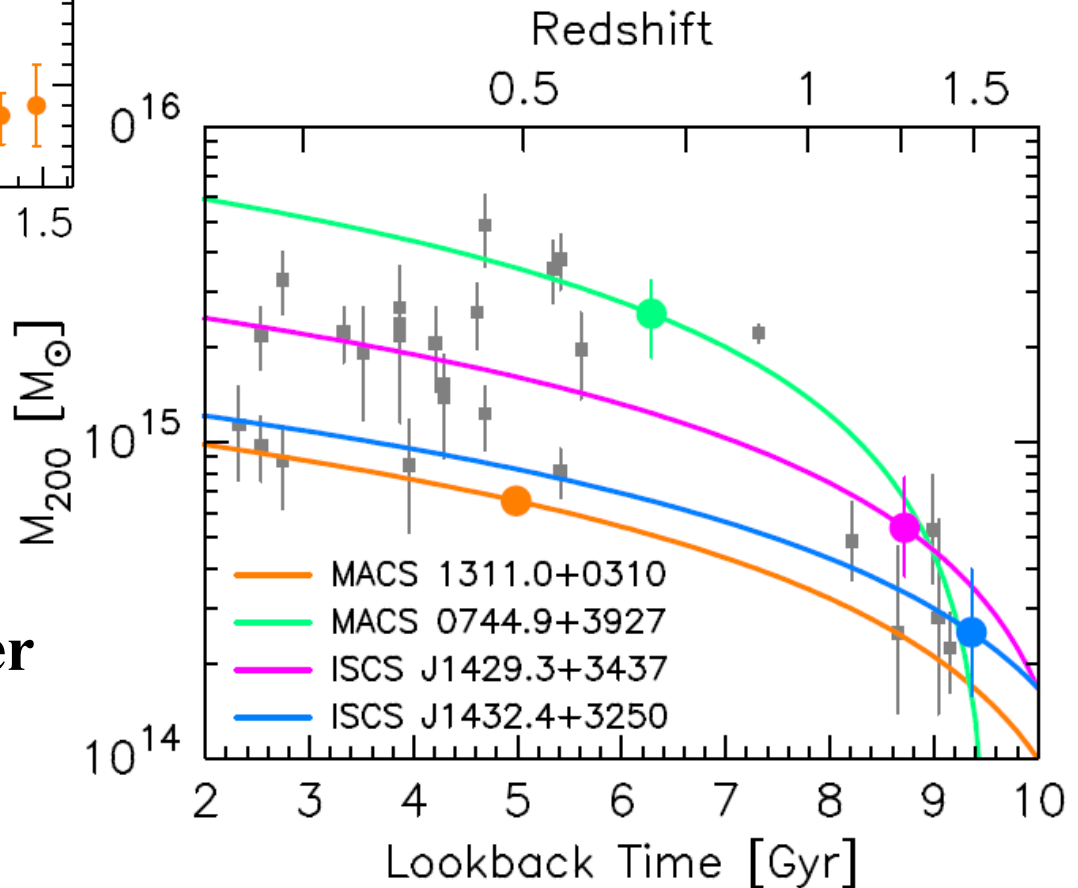
Compatibles avec
les observations
GOODS

Evolution des masses avec z



25 amas, SFR à partir de SED

$$M_{200}(t_L) = - (t_L - t_0) \frac{d(M_{200})}{dt_L} + M_{200}(t_0)$$



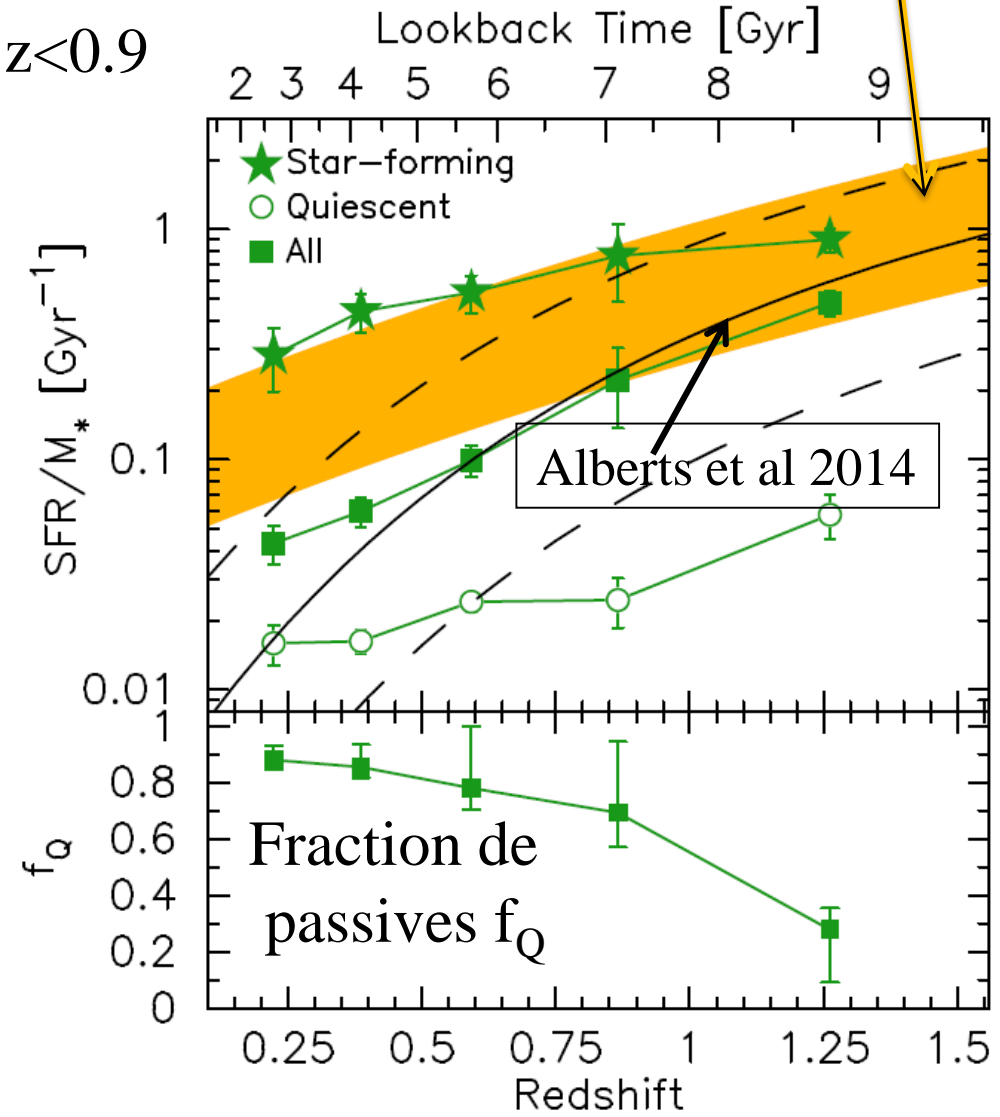
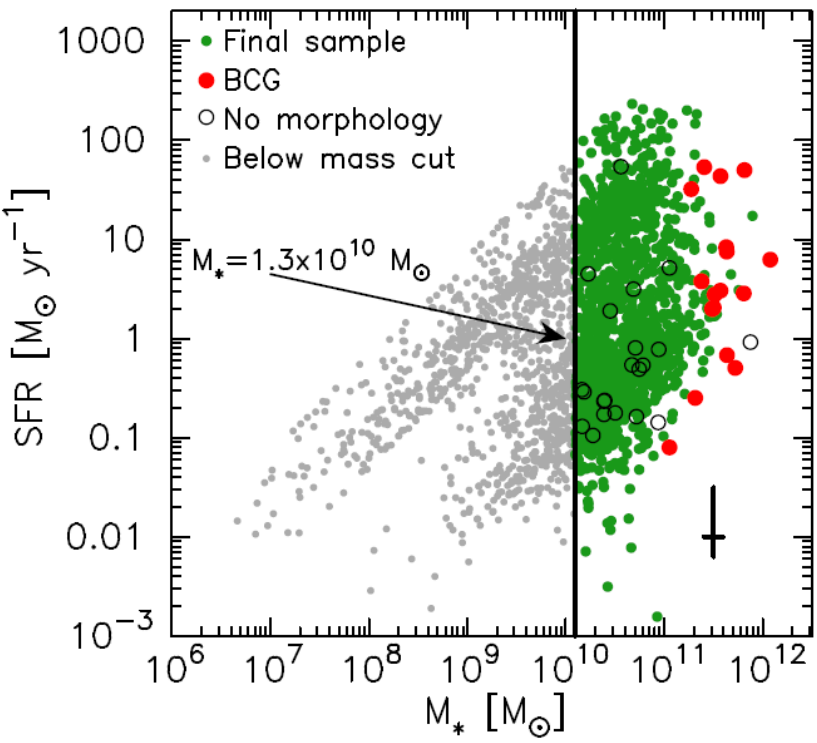
De z=1.3 à 0.2 sSFR
chute de 3-4 pour les MS
Facteur 11 pour l'amas entier

Wagner, Courteau et al 2017

Evolution du SFR avec z

Séquence principale
Elbaz et al 2011

Processus lents de passivation à $z < 0.9$
Plus rapides à $z > 0.9$



Conclusions: acquis plutôt qu'inné

D100

Amas à $z=0$: balayage du gaz, harcèlement, strangulation très efficaces (Virgo, Norma, Coma..)

Filaments (Virgo), pre-processing dans les groupes

Le harcèlement, l'étouffement, la conspiration marée/pression dynamique peuvent transformer $Sp \rightarrow E$, mais empêchent $E \rightarrow Sp$

z Intermédiaire ~ 0.5 , CL1416, CL1411 ALMA, renversement?

Recherches à $z \sim 1.4$ autour des radio galaxies, **$z=2-3$ proto-amas**
FRII, puissantes mais rares, FRI de Cosmos, plus répandues

