



COLLÈGE
DE FRANCE
— 1530 —

Chaire Galaxies et Cosmologie

Rétro-action des trous noirs sur la formation d'étoiles



Françoise Combes

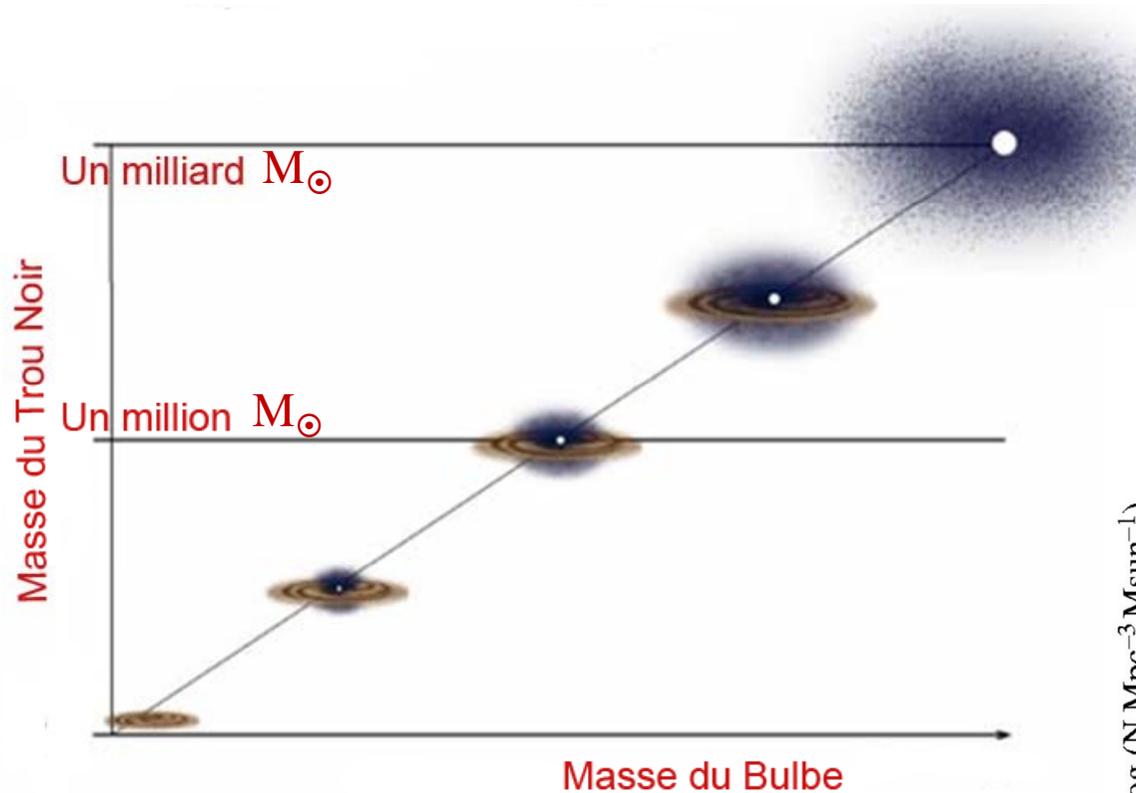


Laboratoire d'Étude du Rayonnement et de la Matière en Astrophysique

Symbiose entre Trous Noirs et Galaxies

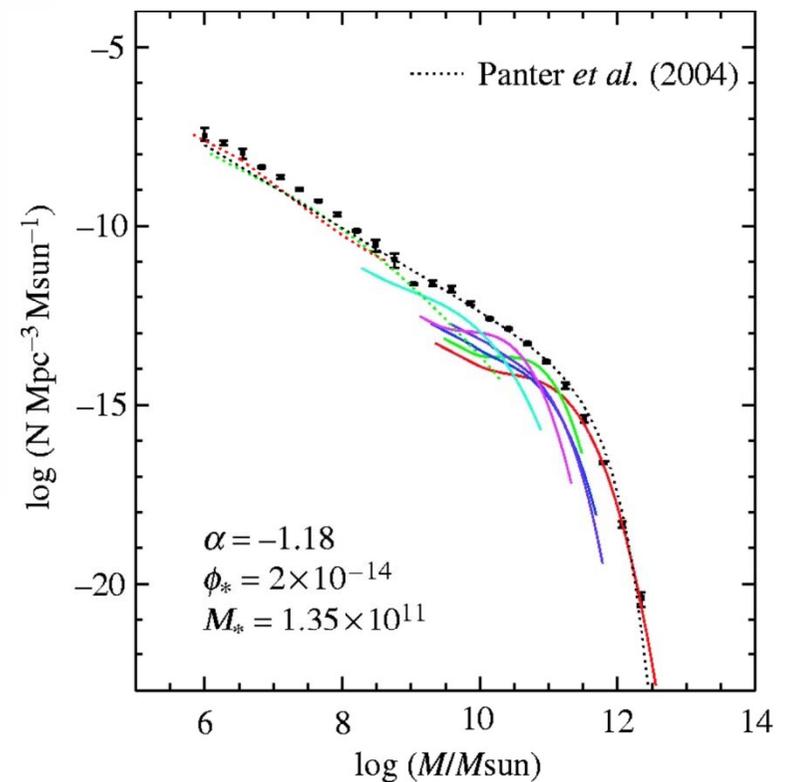
$M_{\bullet} \sim 0.5\% M_{\text{bulbe}}$

Jusqu'à quelle masse maximum?

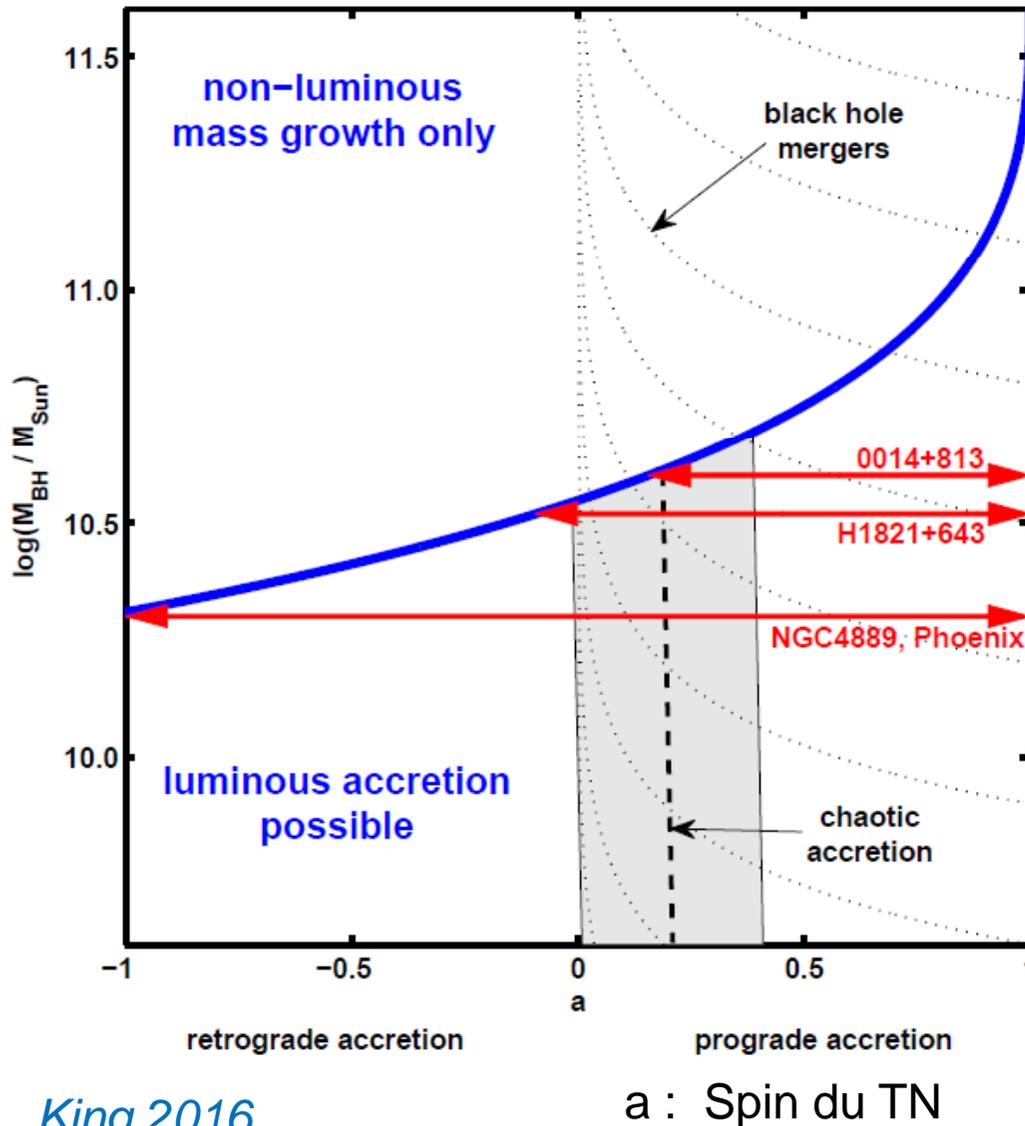


Masse max des bulbes
 $10^{12} M_{\odot}$

$\rightarrow M_{\bullet} \sim 10^{10} M_{\odot}$



Masse maximum d'un AGN?



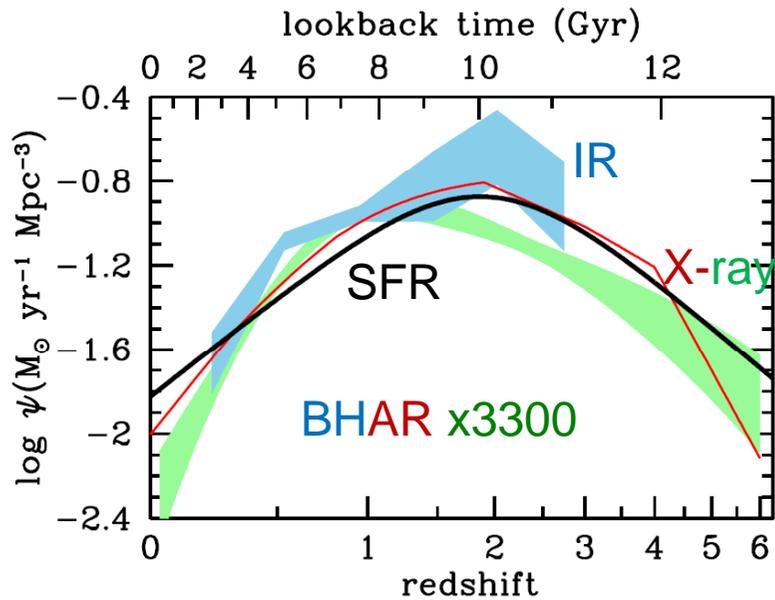
La limite extérieure du disque d'accrétion, à l'origine de l'AGN est une fonction presque indépendante de la masse

$$R_{\text{disk}} \sim 0.01 \text{ pc} \sim 2000 \text{ AU}$$

$$\text{Horizon} \sim 20 (M_{\bullet} / 10^9 M_{\odot}) \text{ AU}$$

Le disque ne peut plus exister entre dernière orbite stable et R_{disk} , pour $M_{\bullet} > 10^{10.5} M_{\odot}$

→ TN peut être plus massif mais invisible



Un AGN a assez d'énergie pour détruire le bulbe

$$M_{\text{BH}} = 1-2 \cdot 10^{-3} M_{\text{gal}} \quad E_{\text{gal}} \sim M_{\text{gal}} \sigma^2$$

$$E_{\text{BH}} \sim 0.1 M_{\text{BH}} c^2 \rightarrow E_{\text{BH}}/E_{\text{gal}} > 80$$

Mais cela suppose qu'il rayonne efficacement!

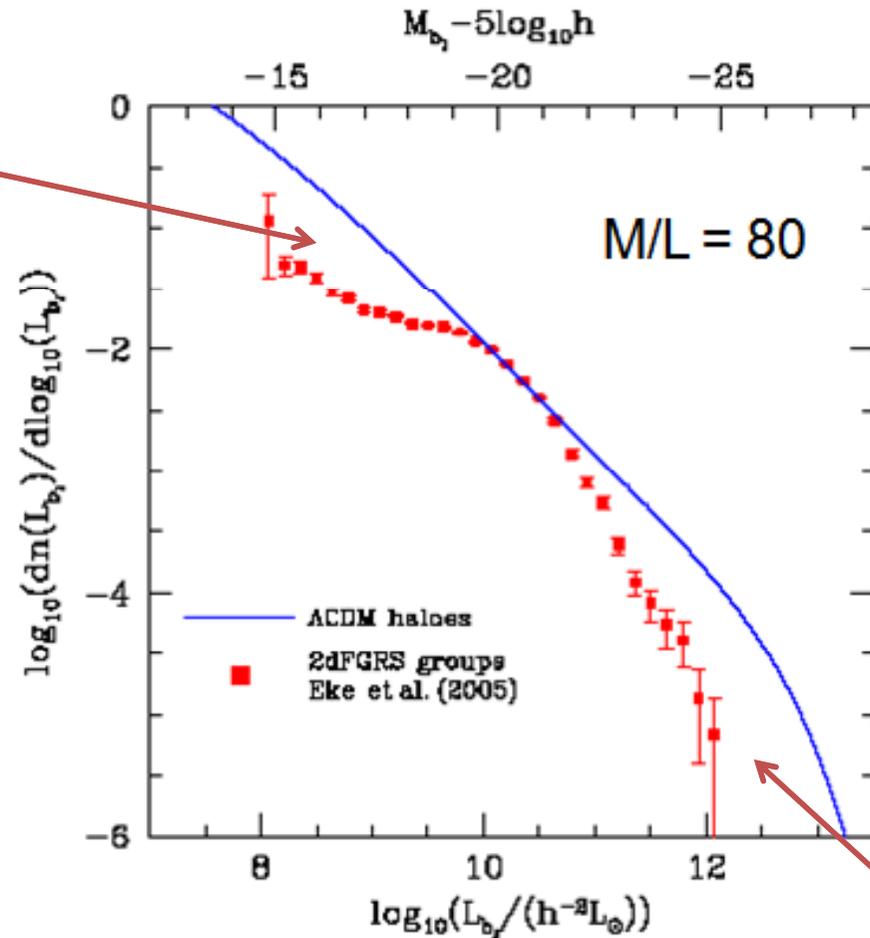
Si on dépasse la masse limite $M_{\bullet} > 10^{10.5} M_{\odot}$

→ Plus aucune influence sur la galaxie

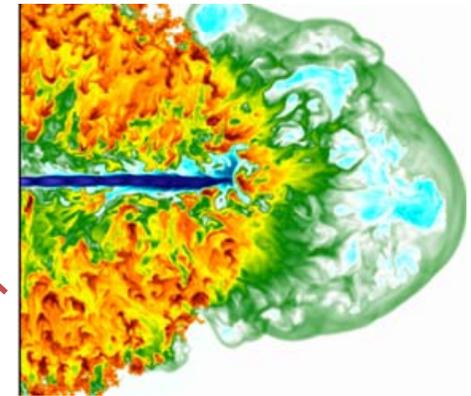
Nécessité des AGN pour stopper la formation d'étoiles



Formation de supernovae,
Vents stellaires

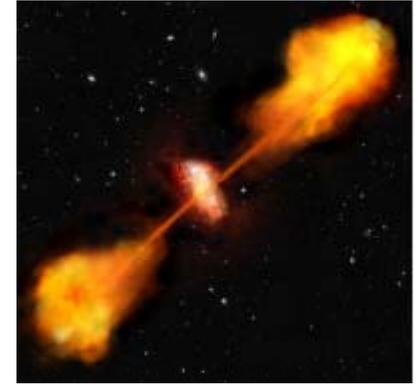


Vents relativistes des AGN
Jets Radio



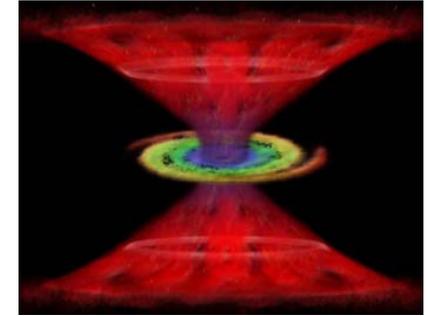


Les grandes lignes



- 1- Deux modes de feedback
- 2- Découvertes de flots moléculaires
- 3- Conservation Energie ou Moment?
- 4- Le feedback des AGN est-il efficace?

1- Deux modes pour le feedback



Le mode Quasar: radiatif ou vents relativistes

Quand la luminosité est proche d'Eddington, QSO jeune, grand z

$$L_{\text{Edd}} = 4\pi GM_{\text{BH}} m_p c / \sigma_T \rightarrow M_{\text{BH}} \sim f \sigma_T \sigma_V^4, \text{ f fraction de gaz}$$

Même considération avec la pression de radiation sur les grains de poussière, avec σ_d

$$\sigma_d / \sigma_T \sim 1000, \text{ limitation de } M_{\text{bulbe}} \text{ à } 1000 M_{\text{BH}} ?$$

Le mode Radio, ou cinétique, jets

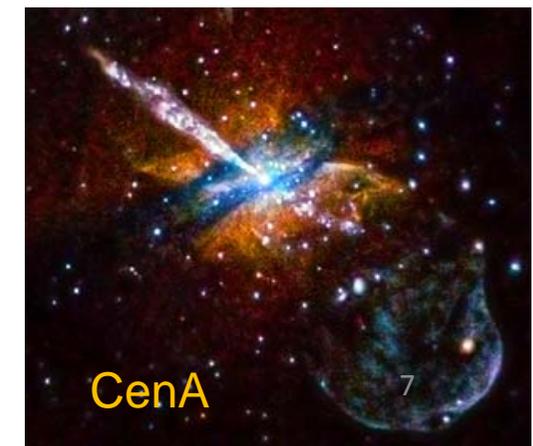
Quand $L < 0.01 L_{\text{Edd}}$, bas z , Galaxies massives, Elliptiques Radio

Non destructif: équilibre chauffage-refroidissement

Radiatively inefficient flow ADAF

Flots de refroidissement dans les amas de galaxies

AGN de faible luminosité, Seyferts..



Limite d'Eddington en détails

Lorsque la luminosité émise par un astre (étoile ou AGN) est si intense qu'elle commence à souffler tout le gaz autour

L_{Edd} = luminosité maximum qui peut traverser le gaz en équilibre,
Au-delà l'équilibre est rompu

Pour une étoile, la limite est atteinte autour de $120 M_{\odot}$, ensuite l'enveloppe est soufflée \rightarrow ce qu'on appelle vent stellaire

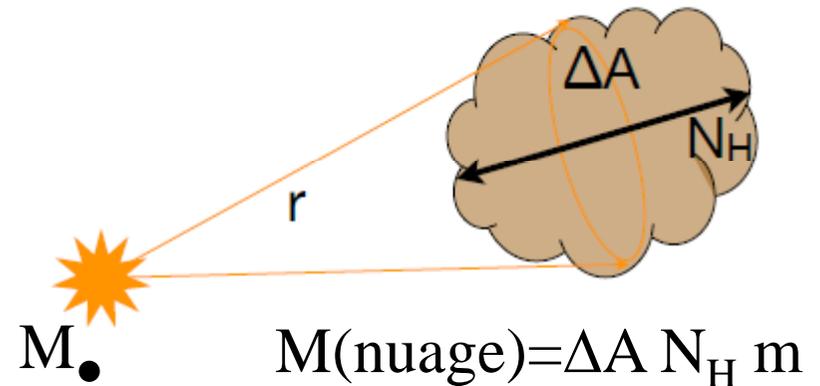
Force de gravité = $GM_{\bullet} / r^2 (\Delta A N_H m)$

Force radiation = $L/c \Delta A / 4\pi r^2 (1 - e^{-\tau})$

En général $\tau \ll 1$, $1 - e^{-\tau} \sim \tau = N_H \sigma$

$F_{\text{grav}} = F_{\text{rad}} \rightarrow L_{\text{Edd}} = 4\pi c GM_{\bullet} m / \sigma$

Si $\tau \gg 1 \rightarrow L_{\text{Edd}} = 4\pi c GM_{\bullet} m N_H$



Conditions du vent autour de l'AGN

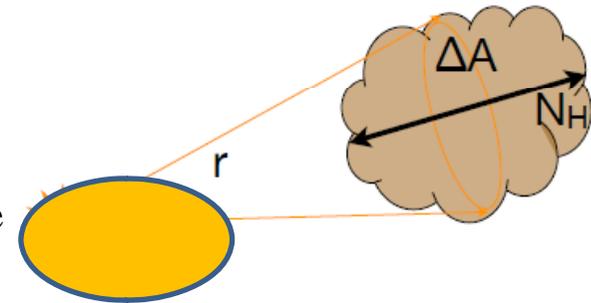
F_{grav} est calculée avec M_{\bullet} seule: il faut être **très près du trou noir**

Si le gaz est ionisé, section efficace Thomson σ_T diffusion des électrons

Si le gaz est neutre, et il existe des grains de poussière, ce sera la section efficace

$\sigma_{\text{dust}} = 1000 \sigma_T$, en compensation F_{grav} de M_{bulbe}

Coincidence? $M_{\text{bulbe}} \sim 1000 M_{\bullet}$



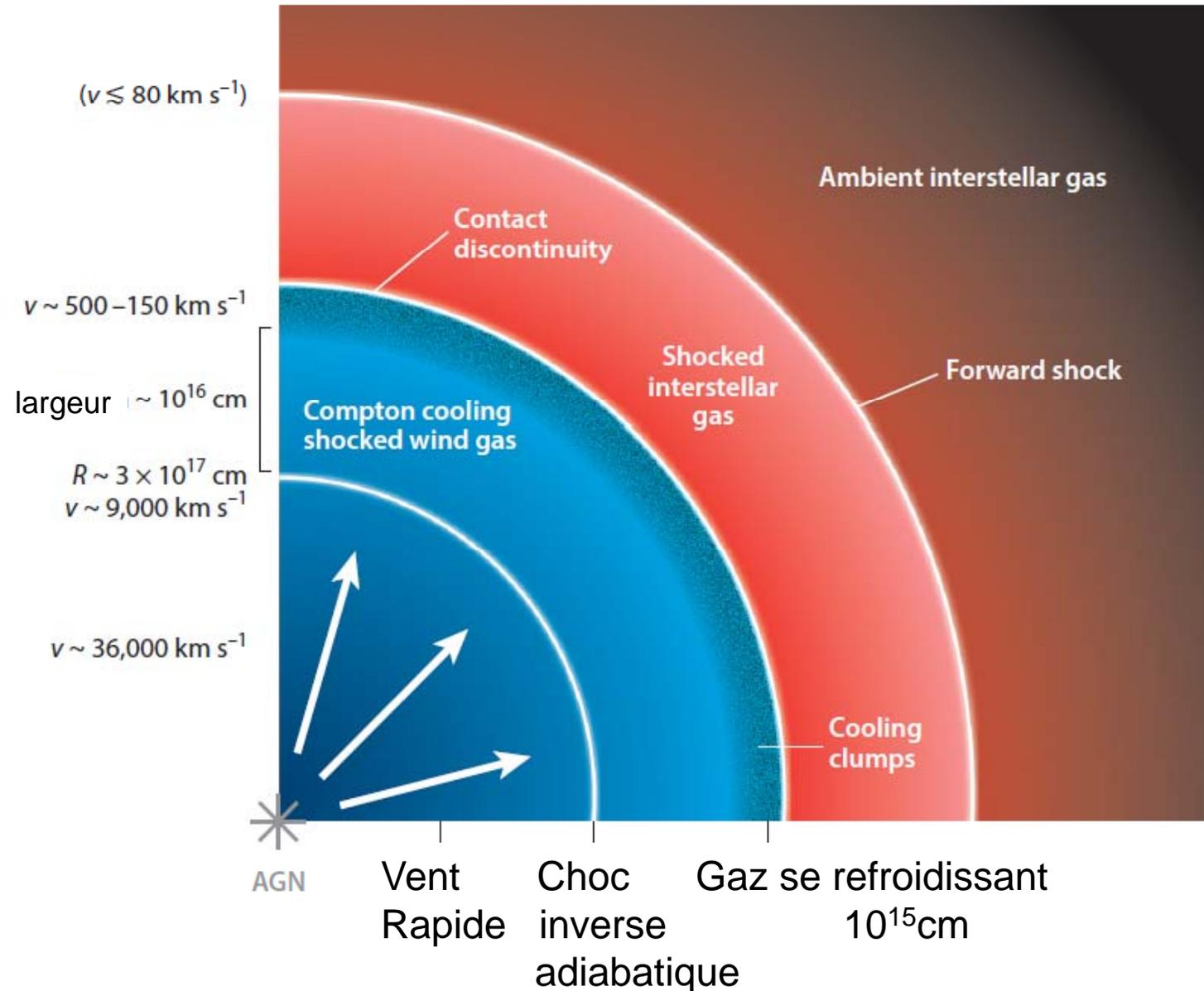
Pression de radiation L_{Edd}/c équilibre et repousse le gaz $M_{\text{gaz}} = fM_{\text{gal}}$ au bord de la galaxie $M_{\text{bulbe}} \sim 2 \sigma_V^2 r / G$ (Viriel)

$$L_{\text{Edd}}/c = GM_{\text{bul}} M_{\text{gaz}} / r^2 = Gf/r^2 (2 \sigma_V^2 r / G)^2 = 4f \sigma_V^4 / G$$

$$L_{\text{Edd}}/c = 4\pi GM_{\bullet} m / \sigma_T \rightarrow M_{\bullet} \sim f \sigma_T \sigma_V^4 \quad \text{proche de la relation } M-\sigma$$

→ Un calcul d'ordre de grandeur conforte l'idée du feedback

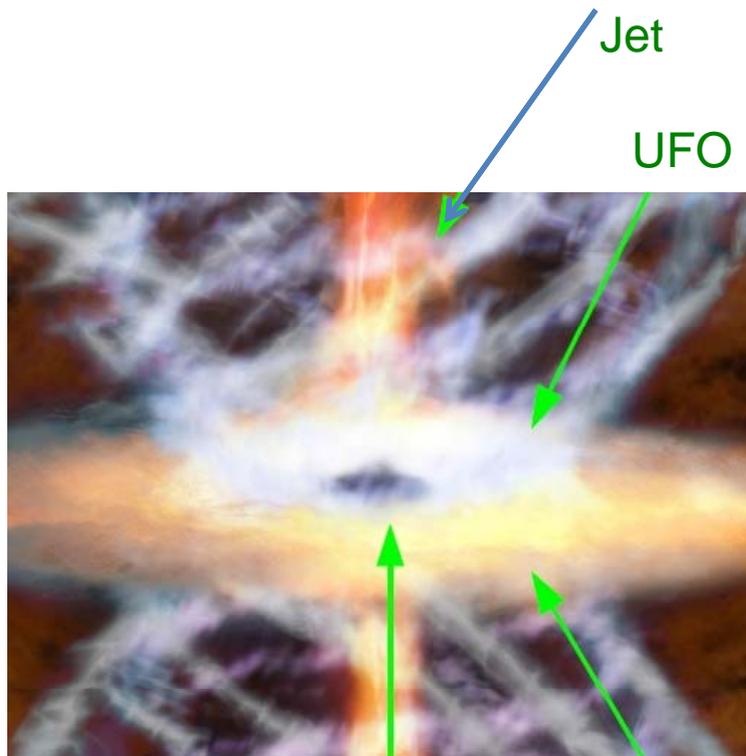
Mode Quasar: vents ~relativistes



UFO: « Ultra-Fast Outflow »

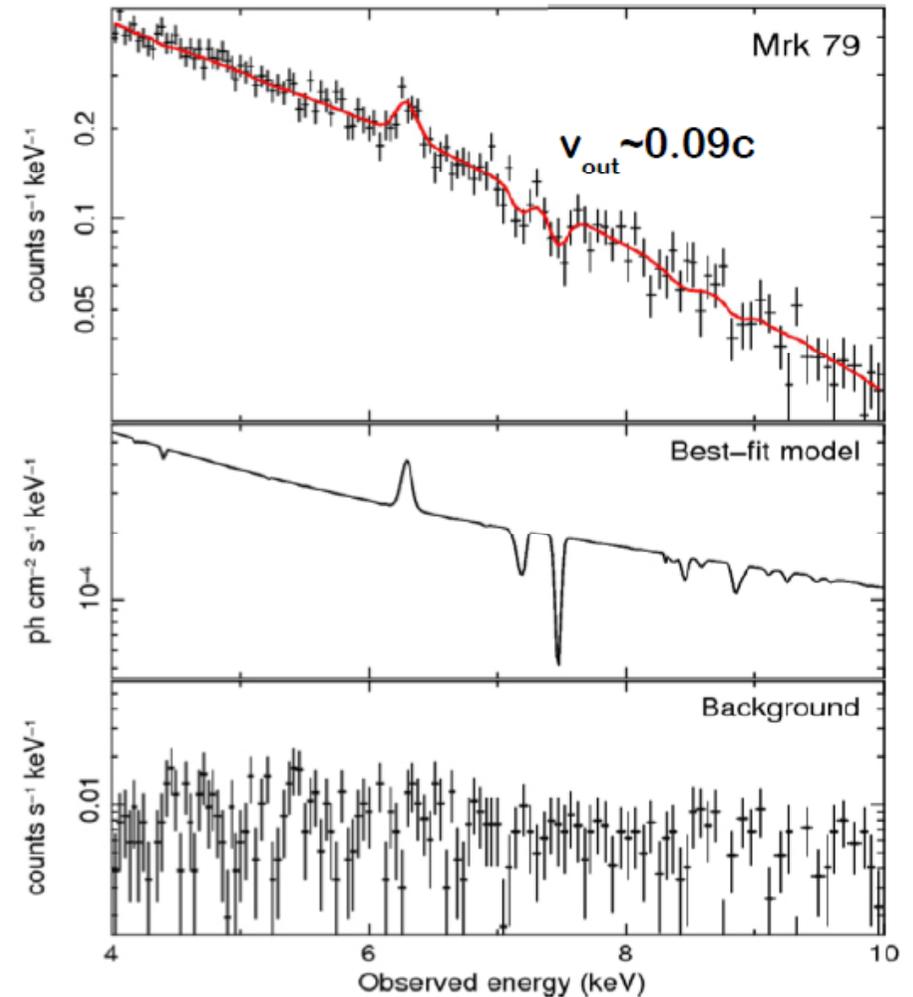
Raies Fe XXV/XXVI en absorption
Gaz hautement ionisé, relativiste
Flots de gaz vus en rayons X

$V > 10\,000\text{ km/s}$



Trou noir

Disque d'accrétion

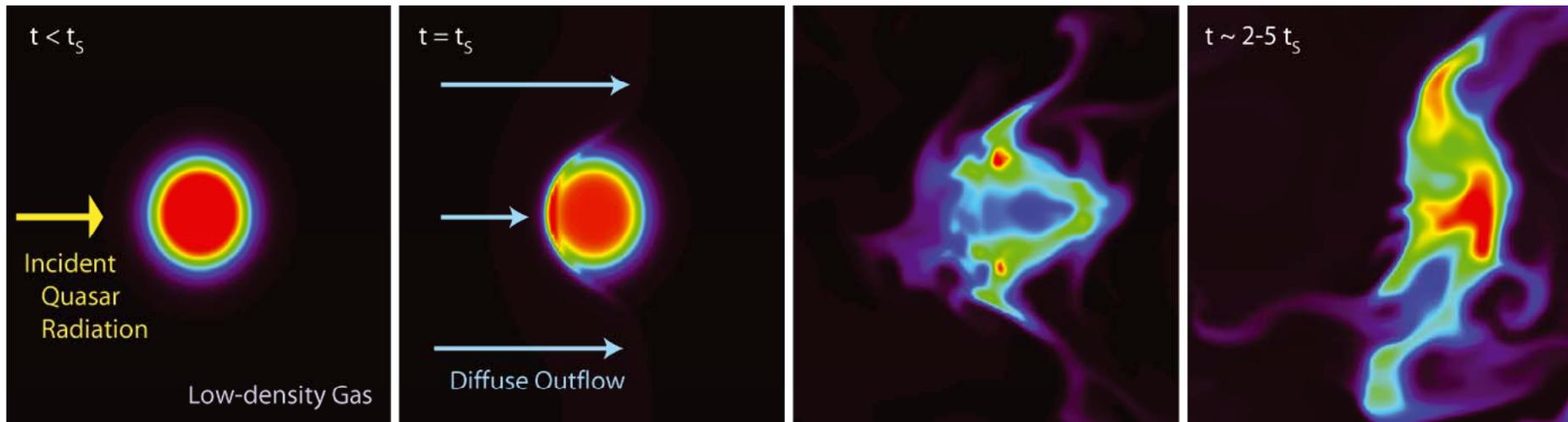


Tombesi et al. 2011

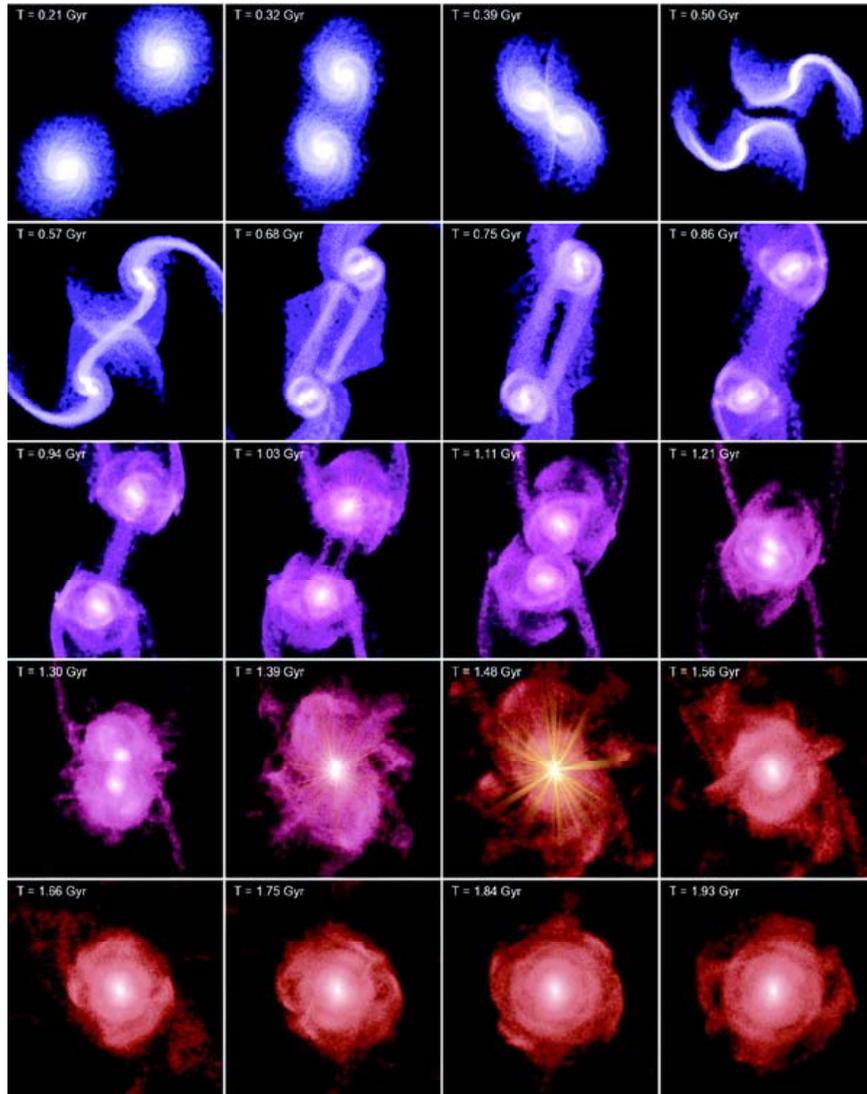
Destruction des nuages de gaz

Si le milieu est très fragmenté en petits nuages denses, la surface ΔA est insuffisante pour avoir un effet. Par contre un vent même faible peut désintégrer les nuages, et augmenter leur surface

Instabilités Kelvin-Helmholtz $\rightarrow N_H$ diminue, ΔA augmente

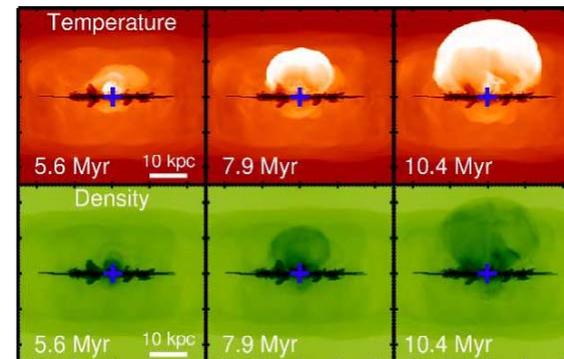


Mode radiatif dans les simulations



SFR $\sim \rho^n$ avec $n=1, 1.5, 2$
Feedback des supernovae+
Croissance du trou noir et
feedback associé

Physique sous-maille
Le feedback est-il efficace?

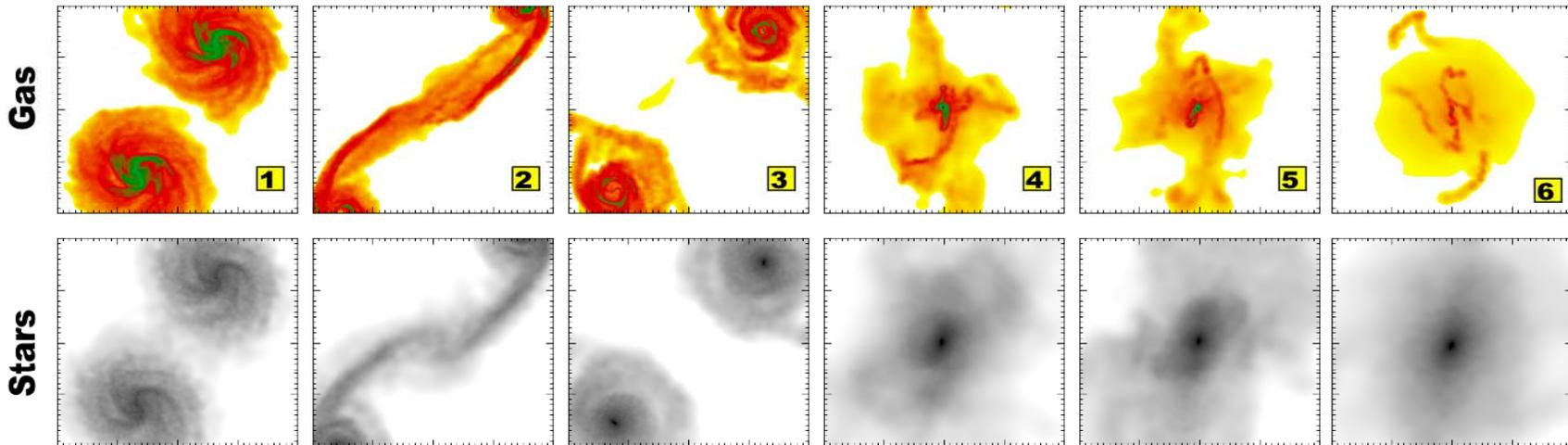
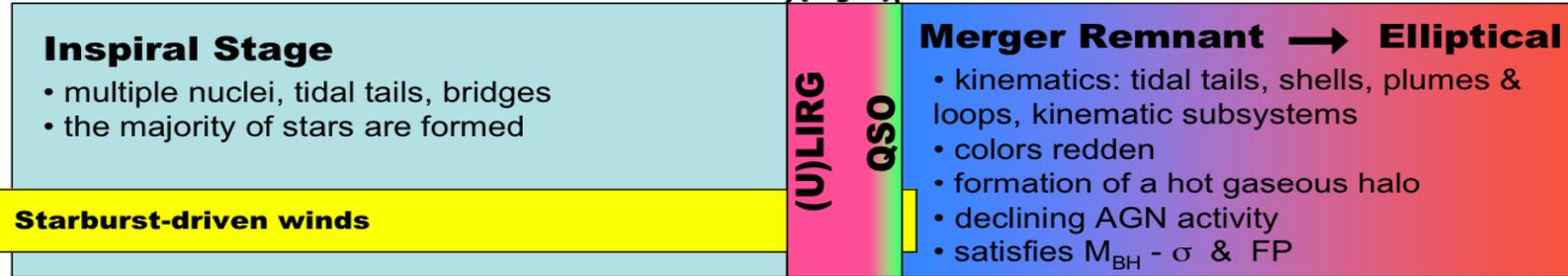
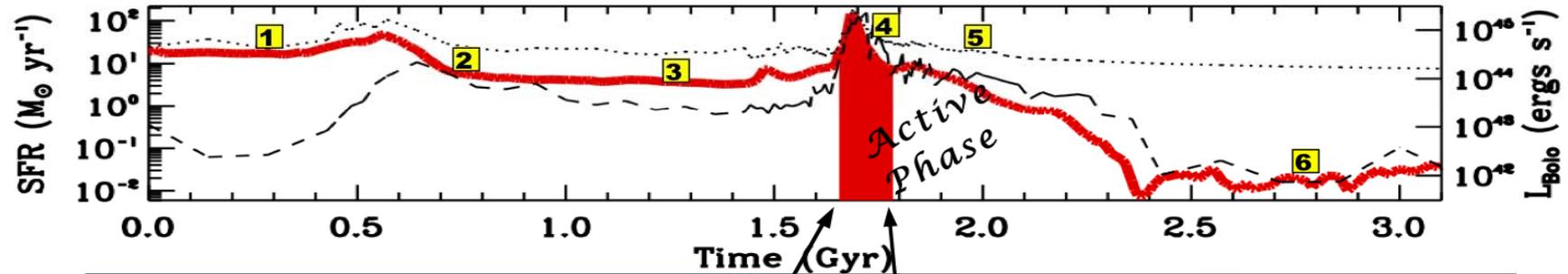


N'arrête pas la formation d'étoiles!

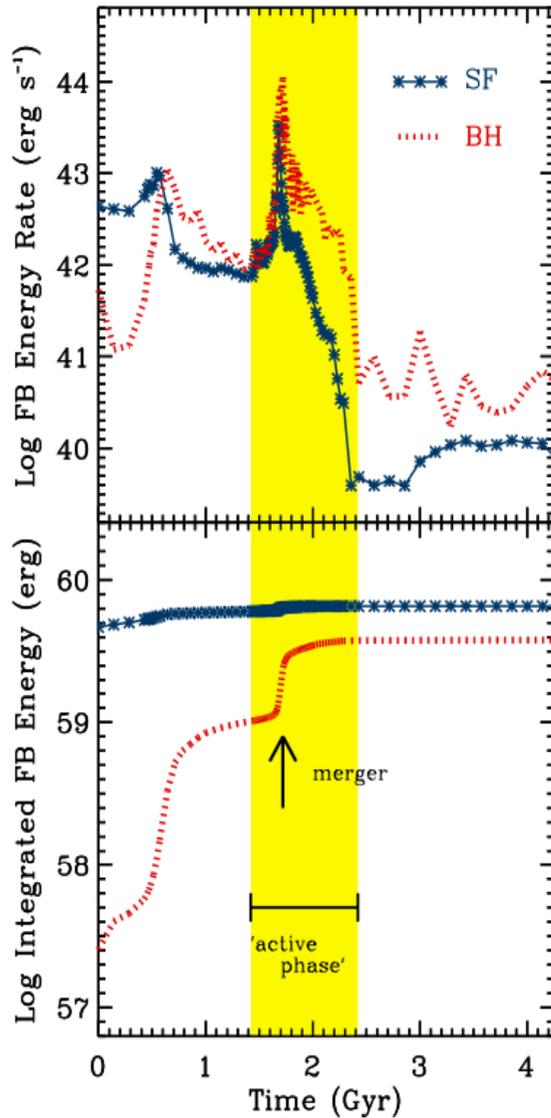
*Springel et al. (2003-2005),
Hopkins et al. 2006*

Gabor & Bournaud 2014:

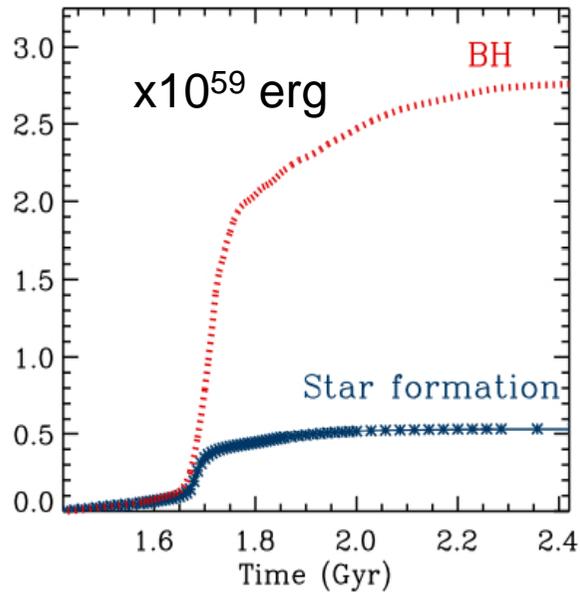
Les différentes étapes: starburst- quasar



Rôle respectif Supernovae - AGN



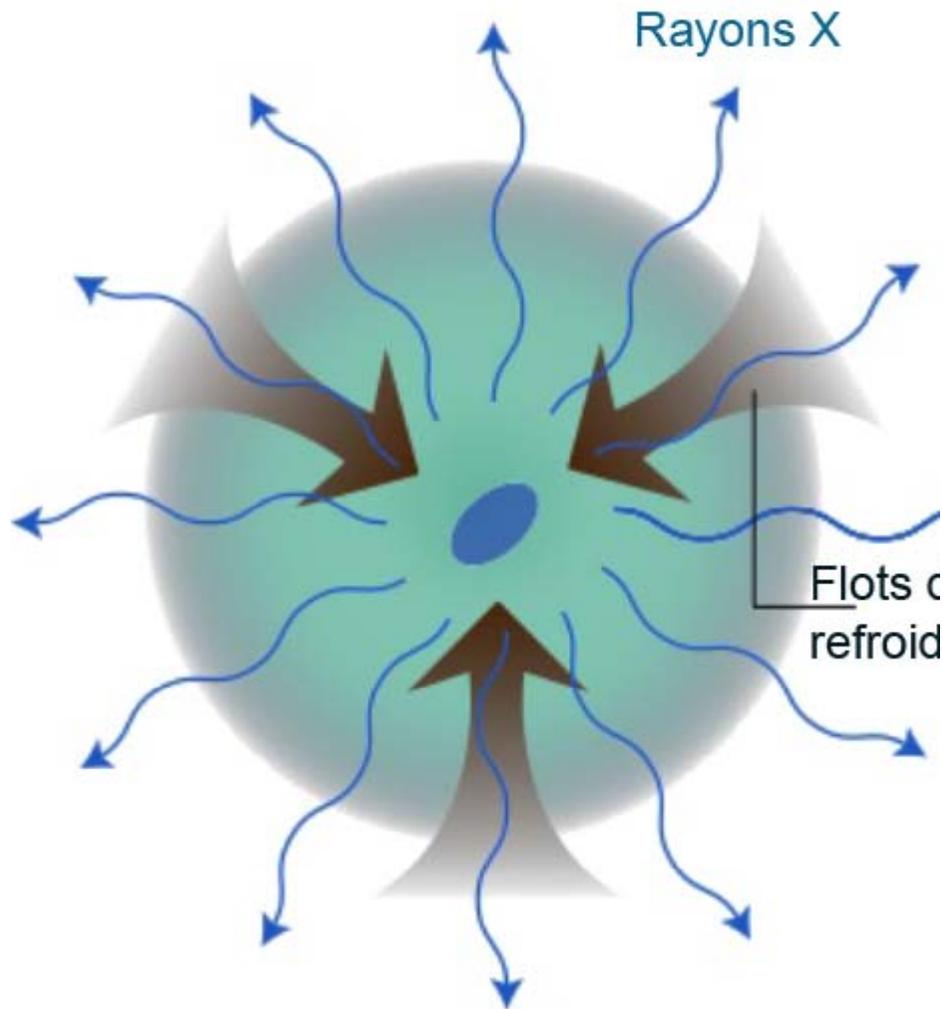
Energie intégrée pendant la phase active



La formation d'étoiles concerne des régions étendues des disques

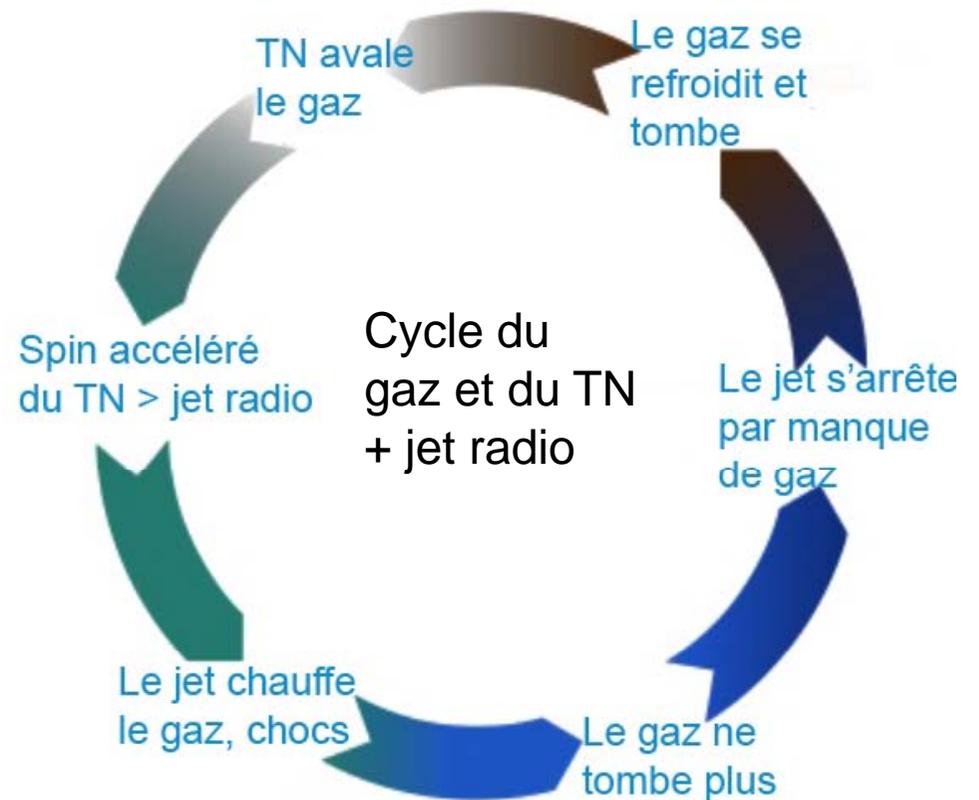
5 fois plus d'énergie de feedback pour l'AGN

Flots de refroidissement



Dans les amas de galaxies, la densité est si forte au centre $t_{cool} \ll t_{Hubble}$

Le gaz se refroidit, perd son support et tombe vers le centre



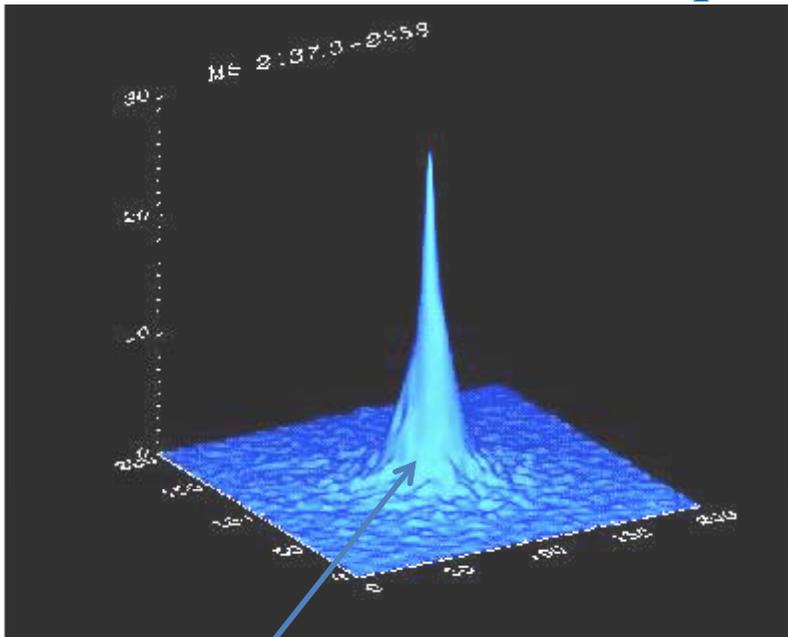
→ Peu de formation d'étoiles!

Filaments de gaz ionisé (H α)

$n_e \sim 0.1 \text{ cm}^{-3}$, $T = 10^4 \text{ K}$

$dM/dt \sim 100\text{-}1000 M_{\odot}/\text{yr}$

Formation d'étoiles n'est que de 1%



Pic de refroidissement

$L(X) = 10^{44-45} \text{ erg/s}$ bien supérieure
au rayonnement radio synchrotron

10^{40-42} erg/s



Rayons X Perseus A, *Fabian et al 2003*



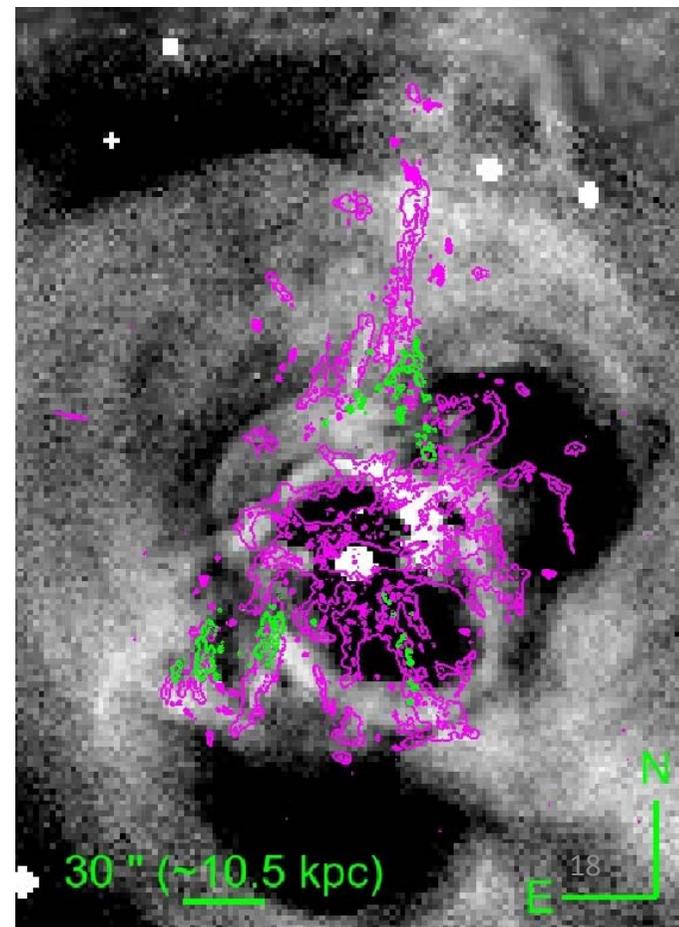
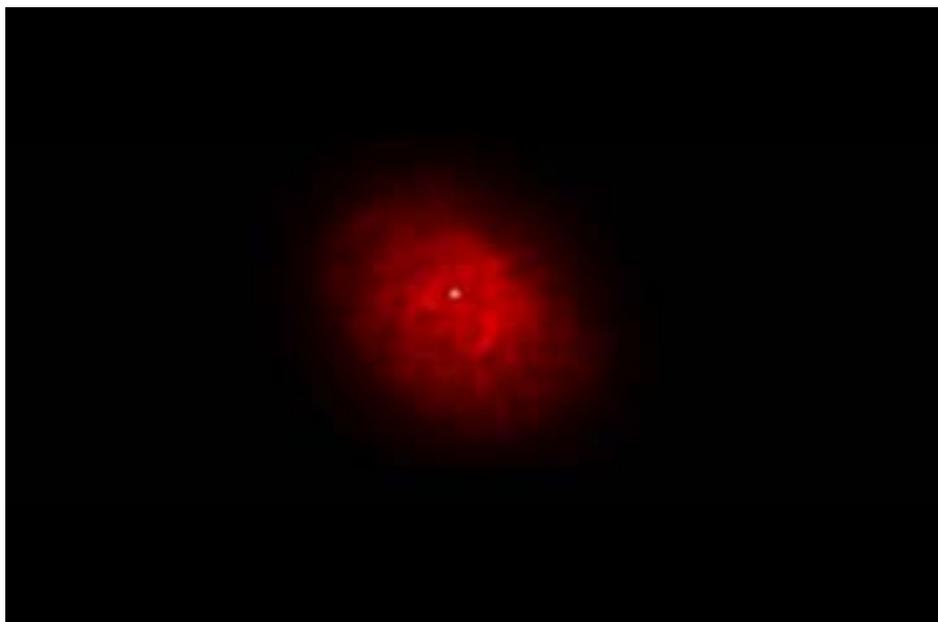
Flots de gaz dans les amas

Formation d'étoiles (vert)

Gaz ionisé (rose)

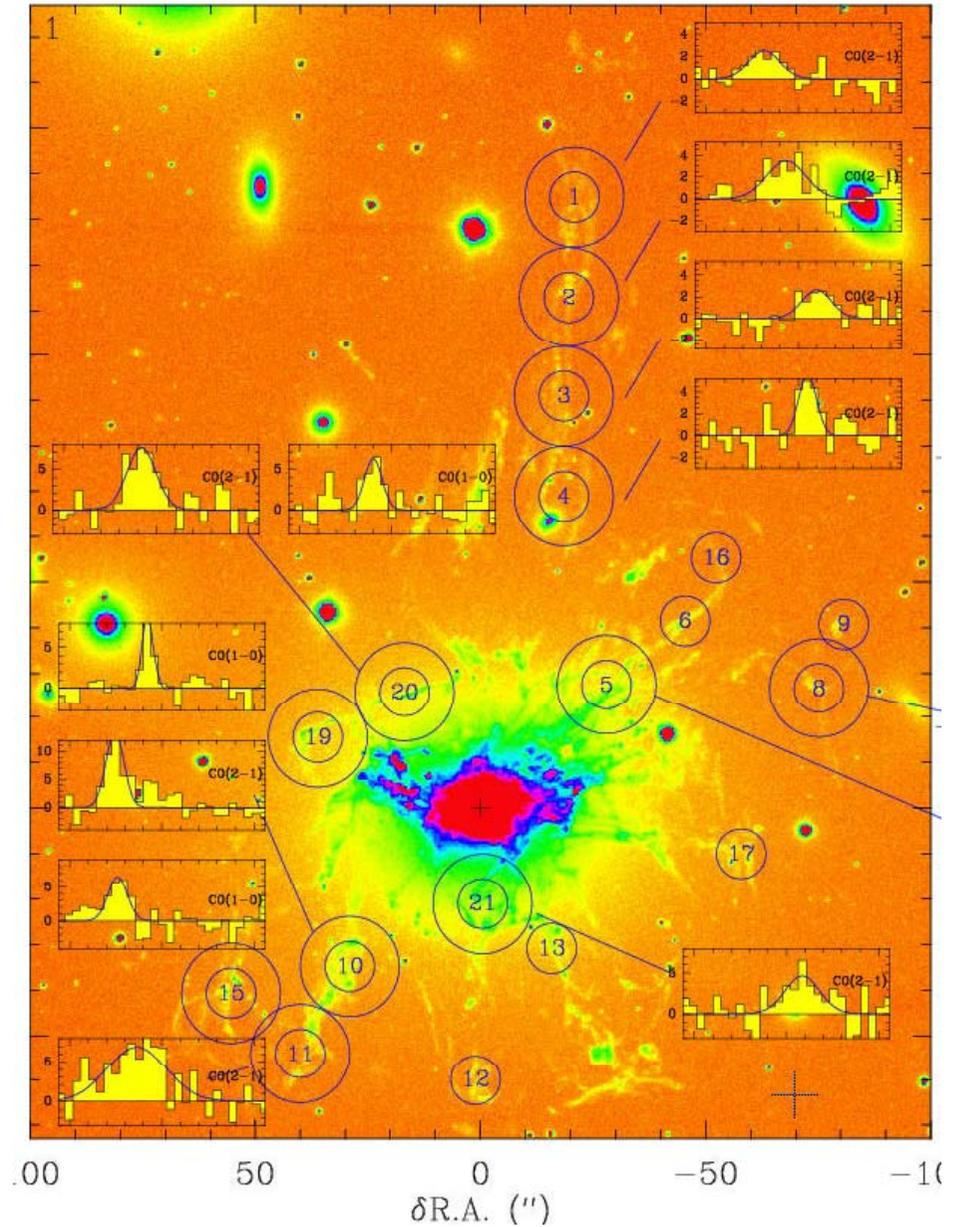
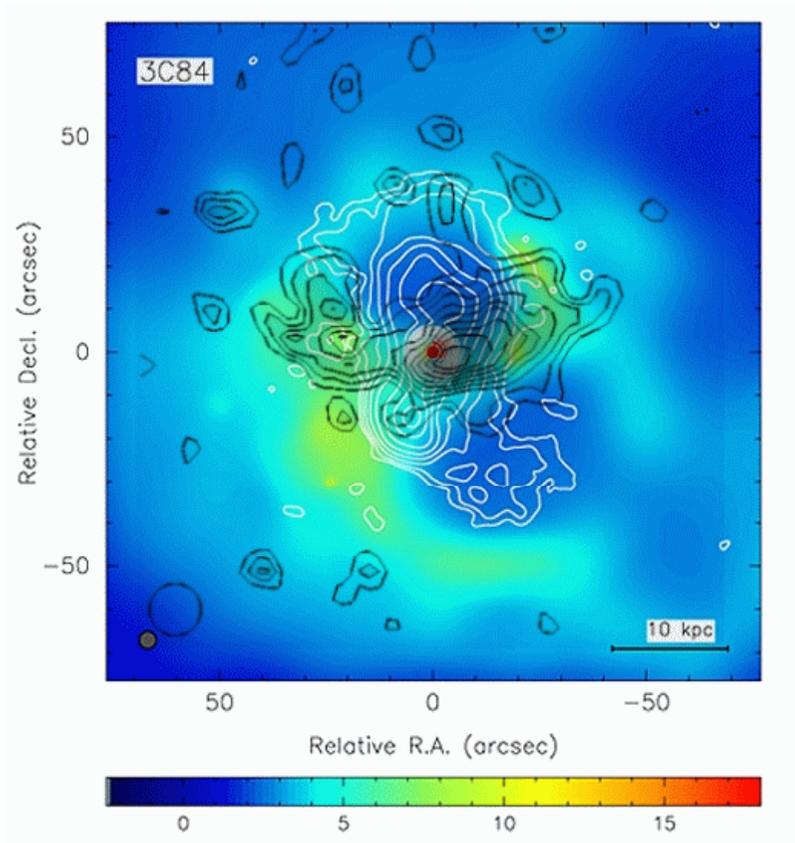
Canning et al 2014

Cavités et ondes sonores



Gaz froid moléculaire dans les filaments

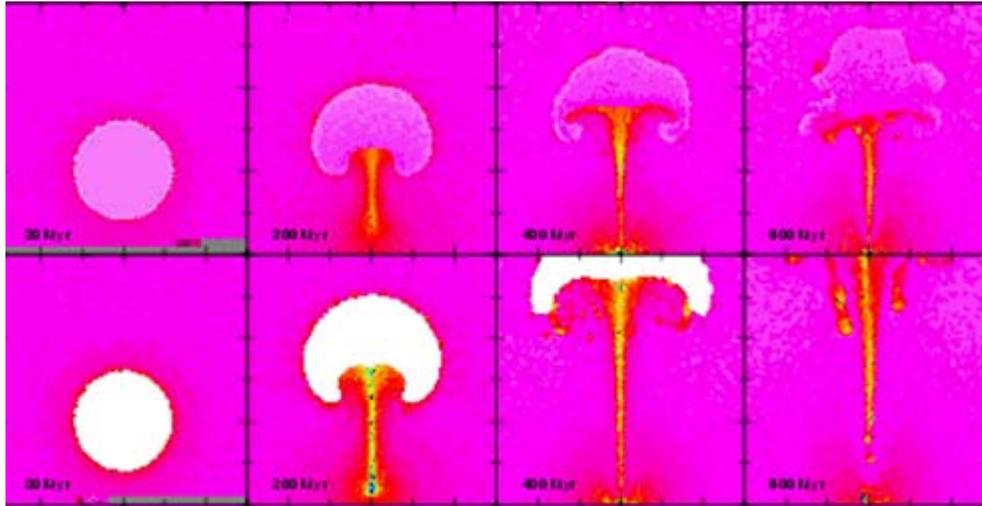
Les flots entrant et sortant coexistent



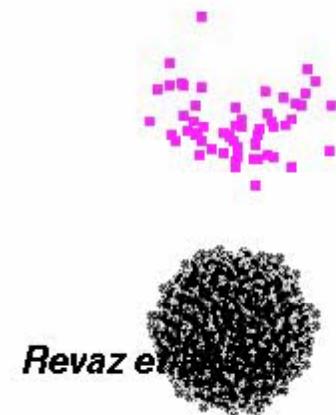
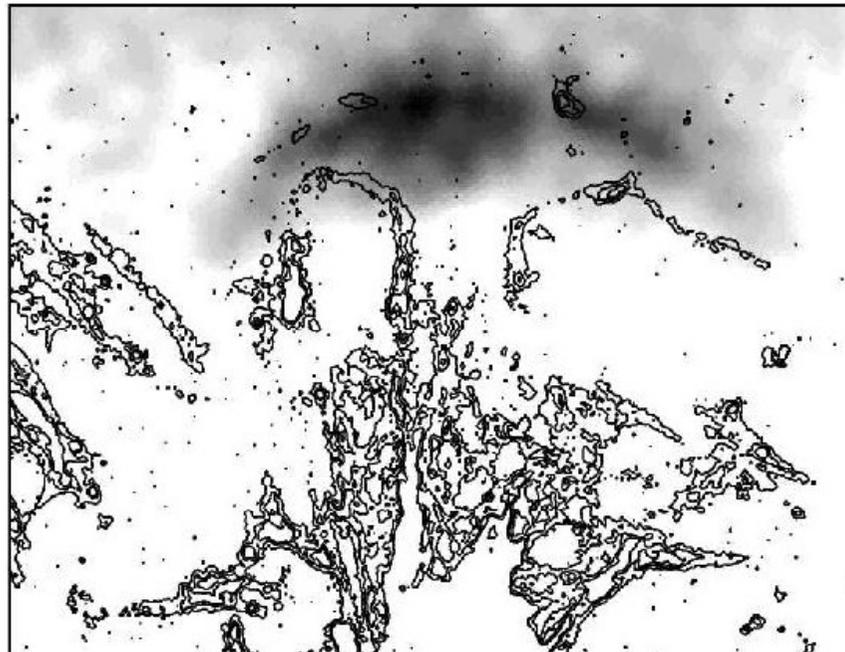
Le gaz refroidi tombe et nourrit l'AGN

Salome et al 2008

Refroidissement et force d'Archimède



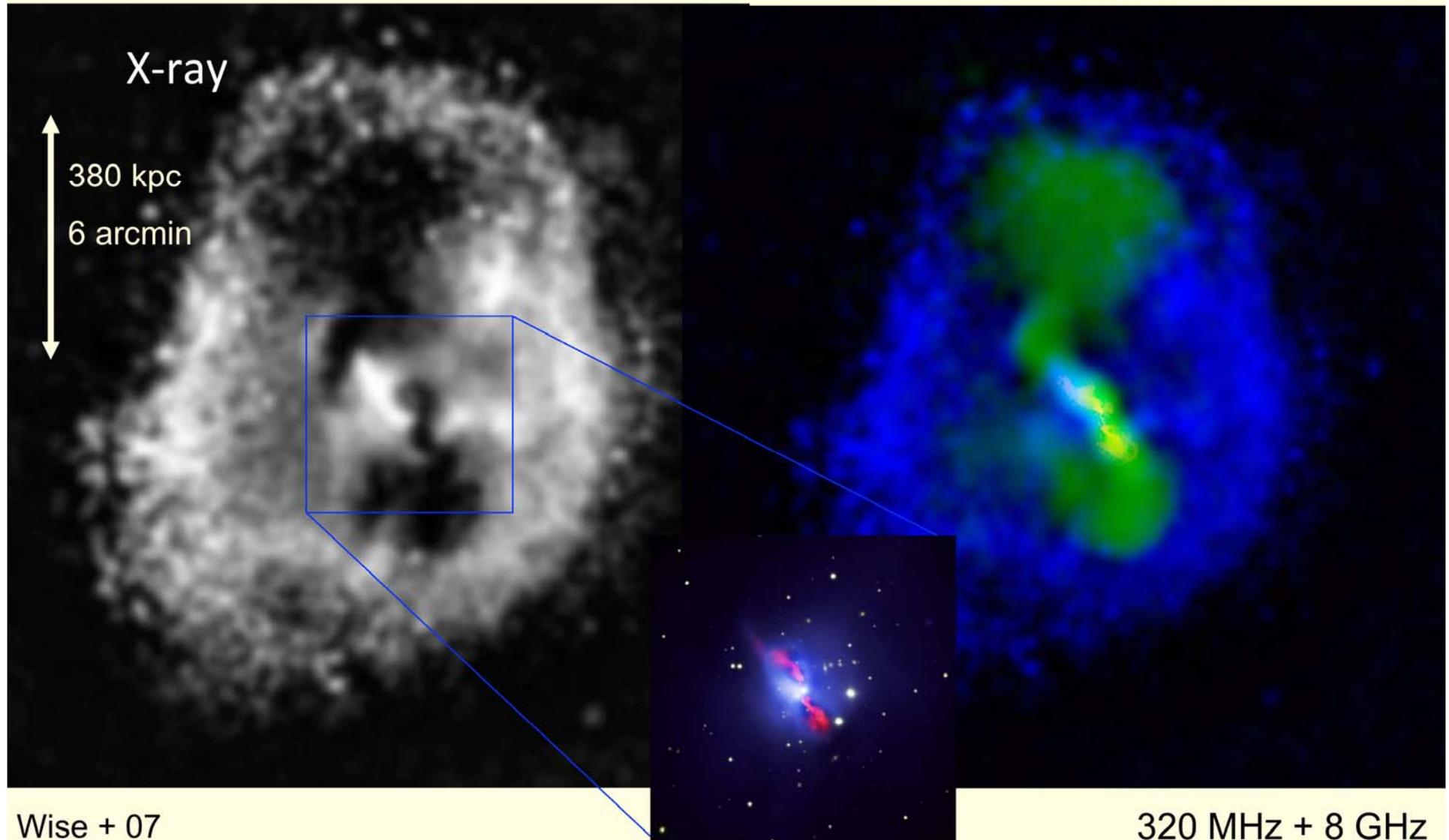
Time = 0 Myr

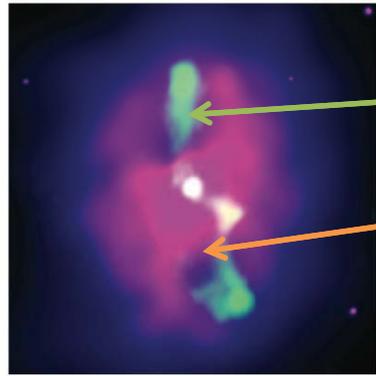


Cavités creusées par des jets multi-échelles

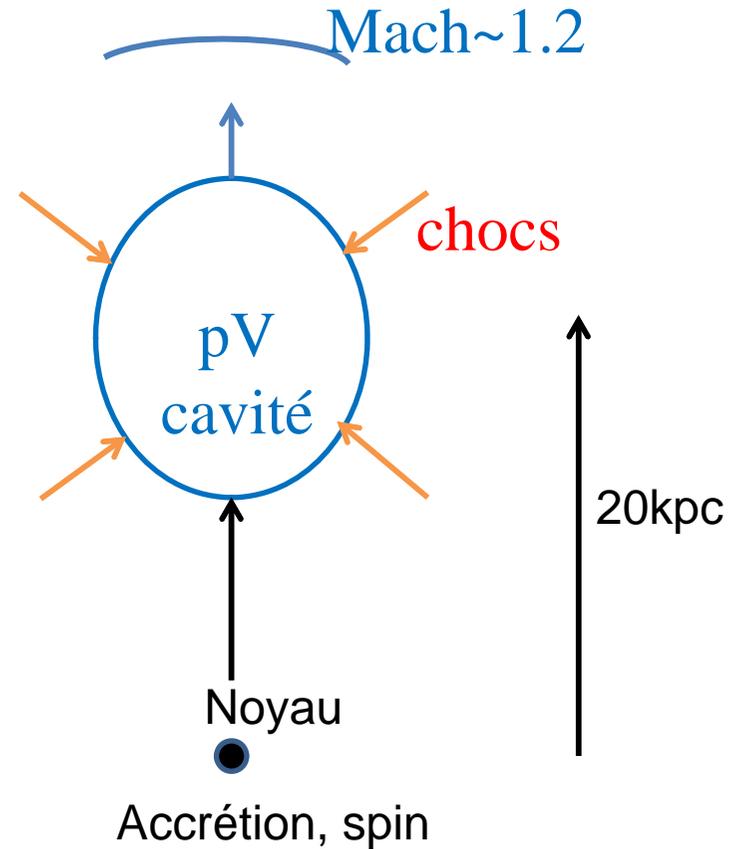
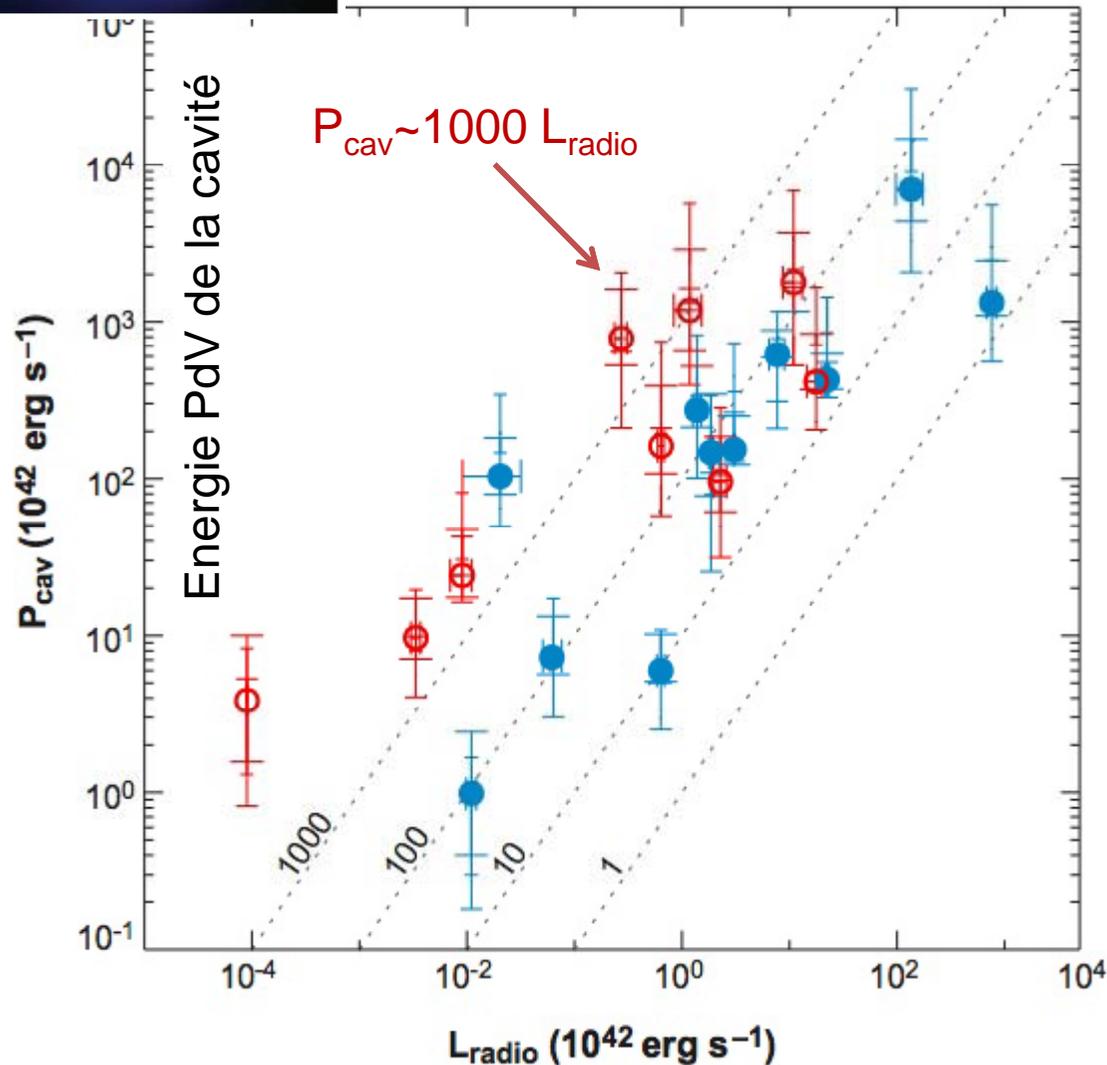
Hydra A Cluster $z=0.05$

$E_{\text{jet}} > 10^{61}$ erg AGN outburst: Le gaz chaud intra-amas a l'aspect de gruyère





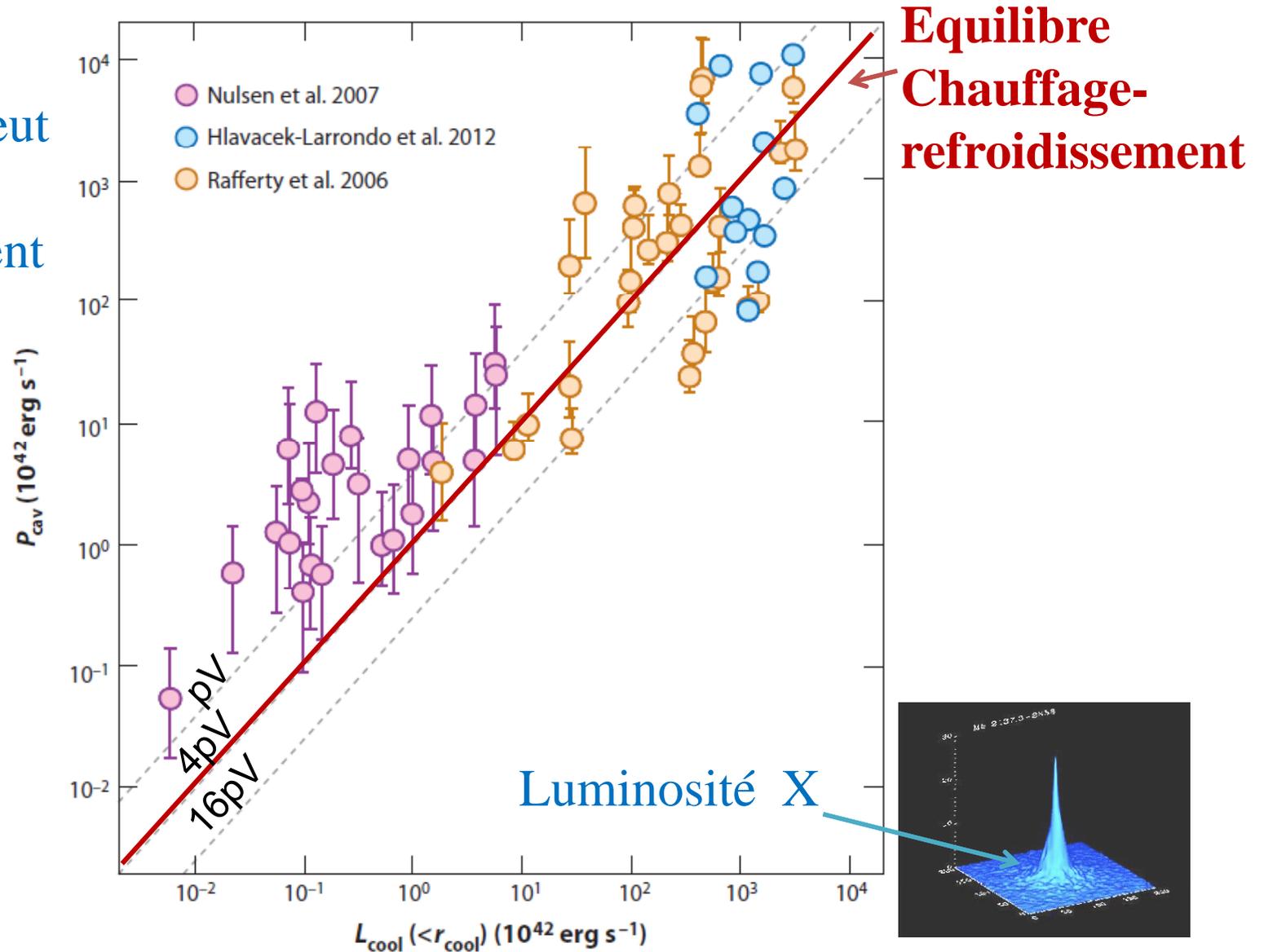
Energie jet (cavité) versus énergie radio



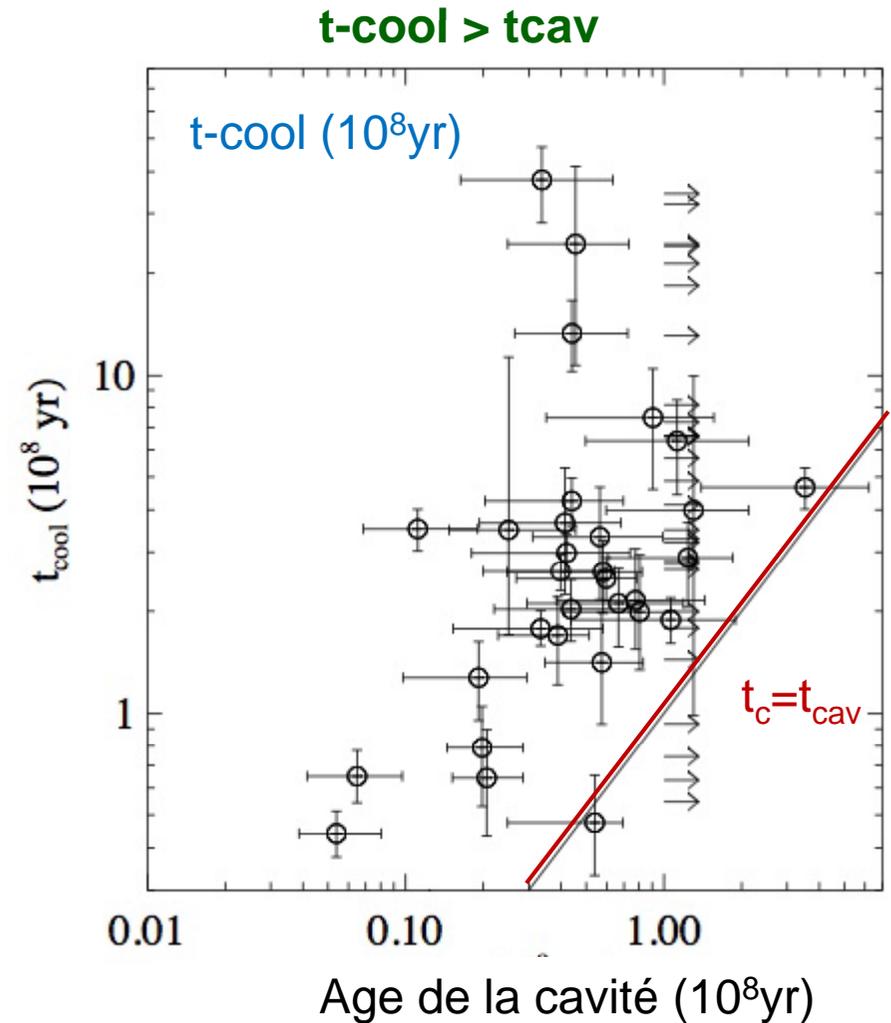
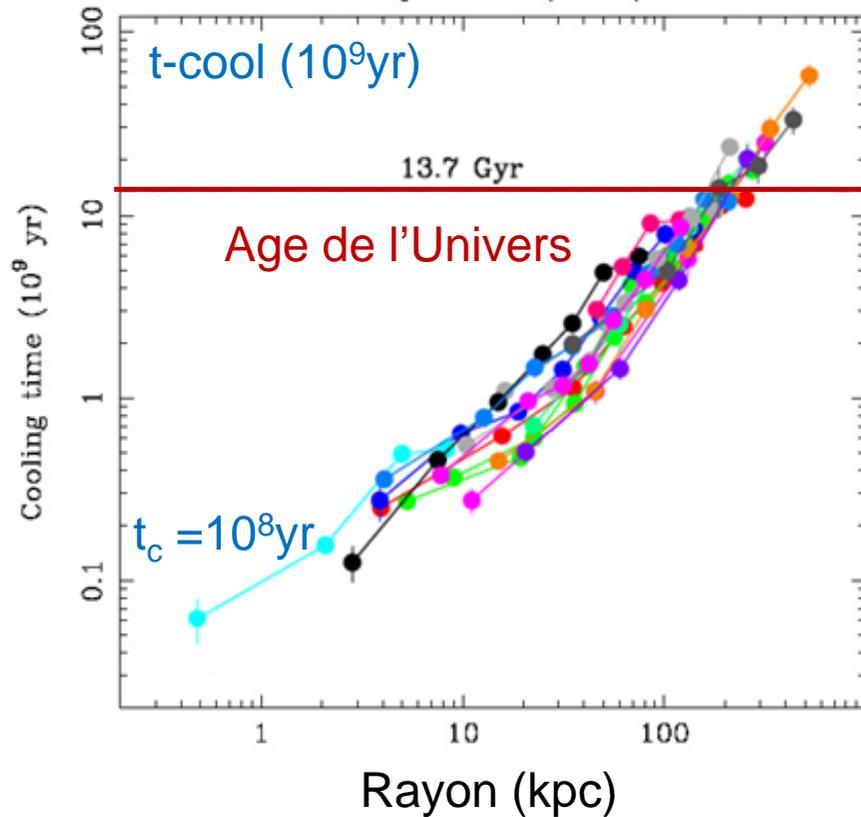
Birzan et al 2004

Comparaison avec la luminosité X

Le jet radio peut compenser le refroidissement



Temps caractéristiques



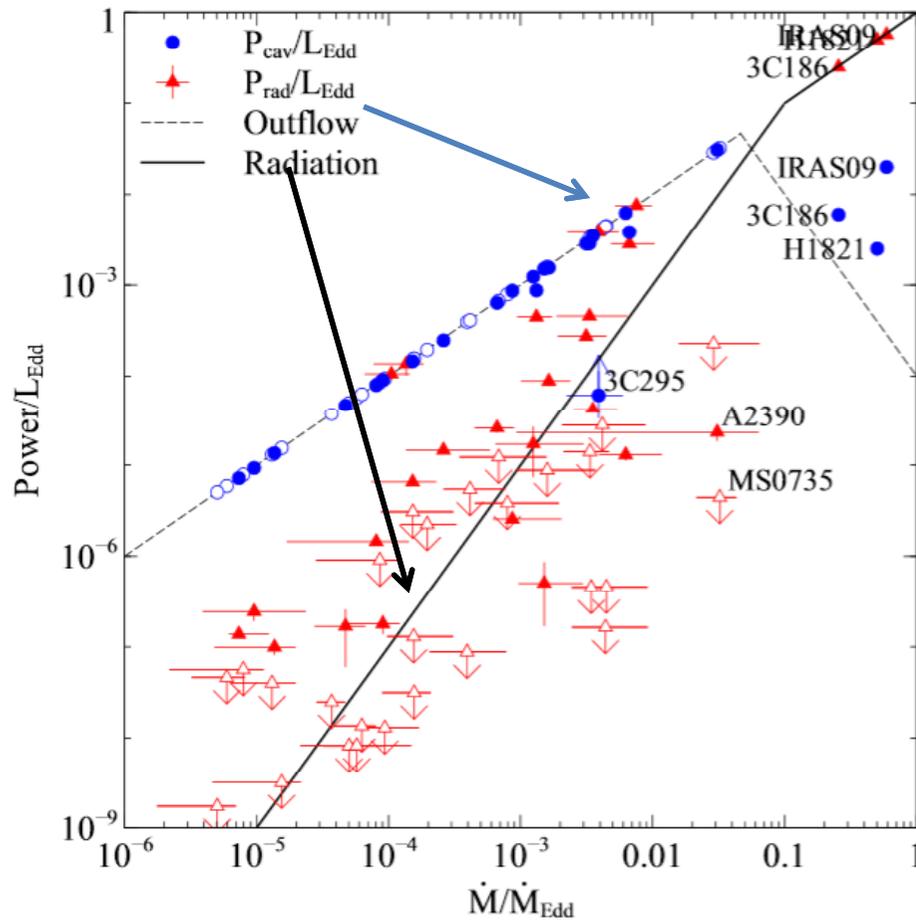
t_{cool} supérieur à l'âge des cavités

Le feedback est intermittent, et le trou noir peut être alimenté par le gaz refroidi

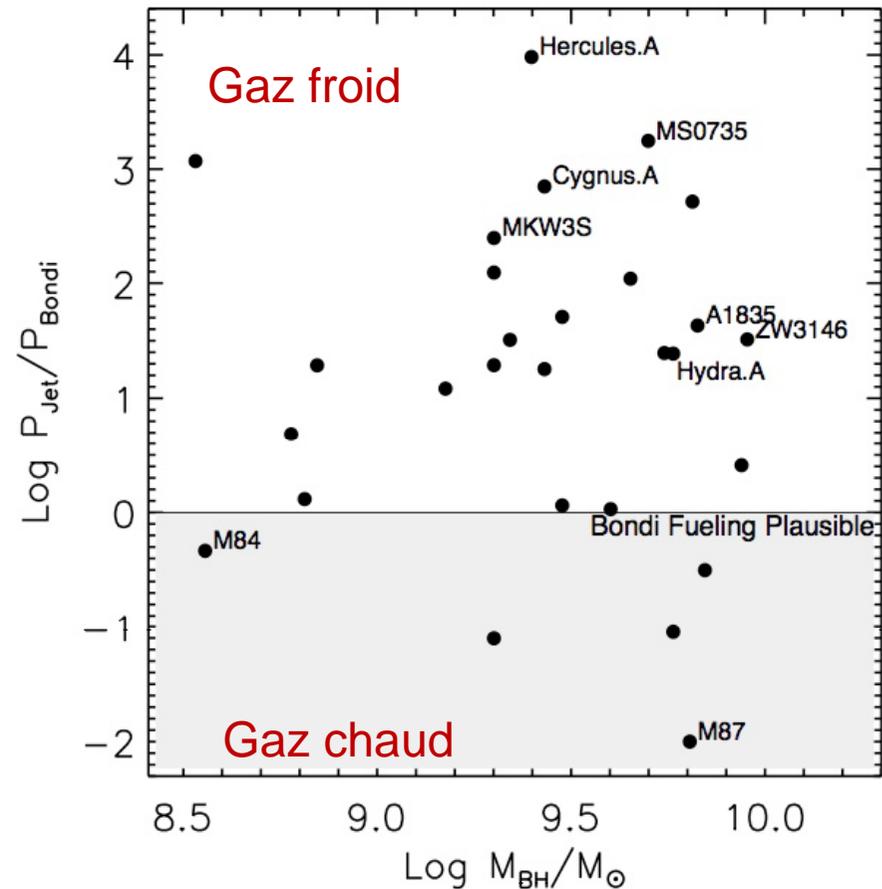
Accrétion de gaz froid, gaz chaud, ou spin?

Transition mode Radio \leftrightarrow Quasar
à 0.1 Eddington

Pour de faibles luminosités,
l'accrétion de Bondi de gaz chaud
pourrait suffire



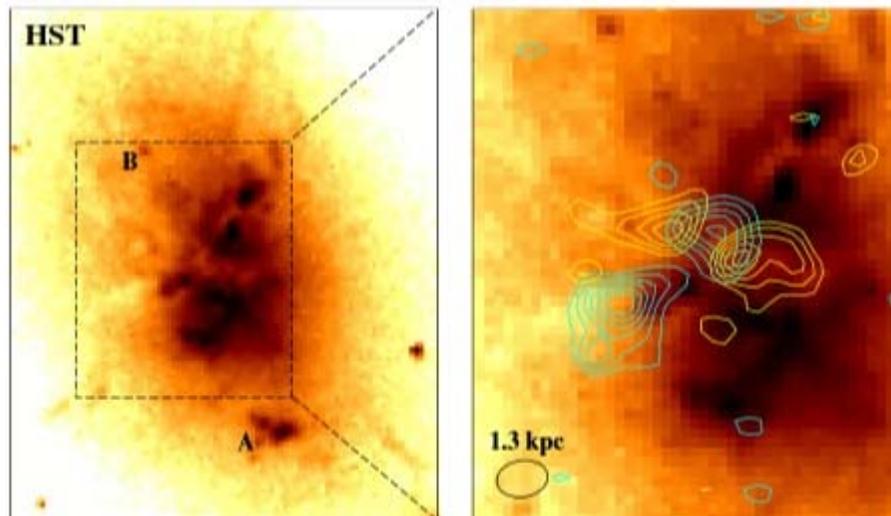
$$\frac{\dot{M}}{\dot{M}_{\text{Edd}}} = \frac{(P_{\text{cav}} + L_{\text{bol}})}{L_{\text{Edd}}}$$



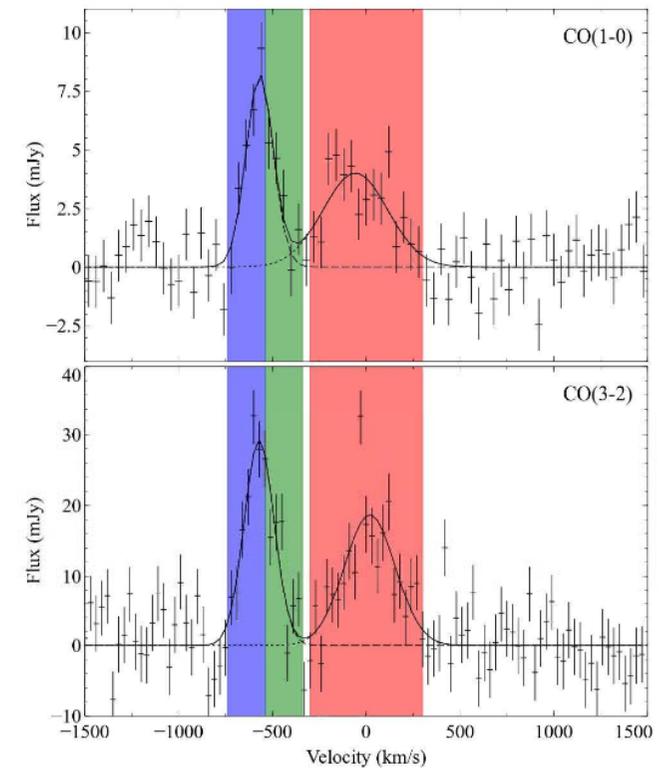
Russell et al 2013, McNamara et al 2011

ALMA: gaz froid dans les amas

Masse H₂ $1.1 \cdot 10^{10} M_{\odot}$ dans intervalle $-250 \rightarrow 250 \text{ km/s}$ autour de V_{sys}
+ un nuage grande V à -570 km/s (jet sortant si devant le noyau?)

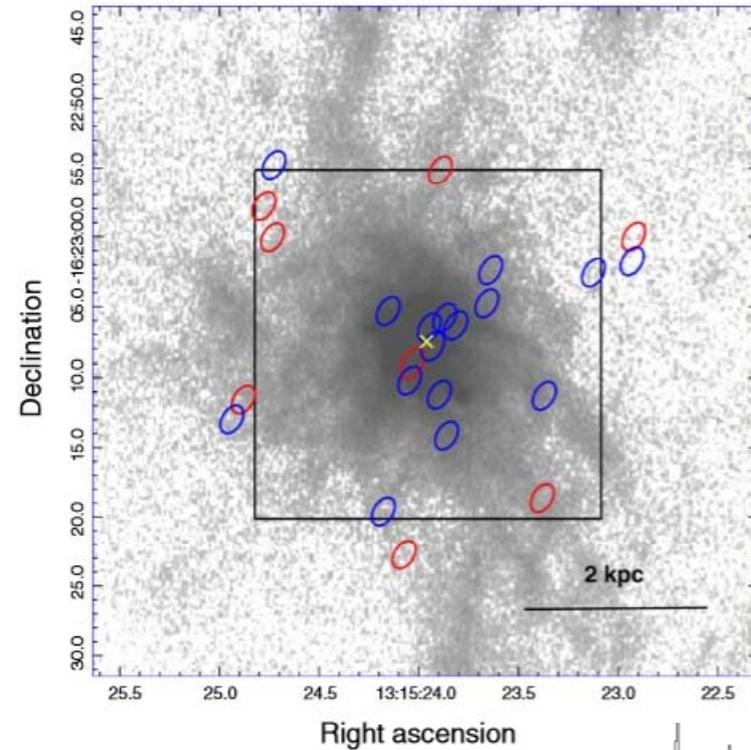
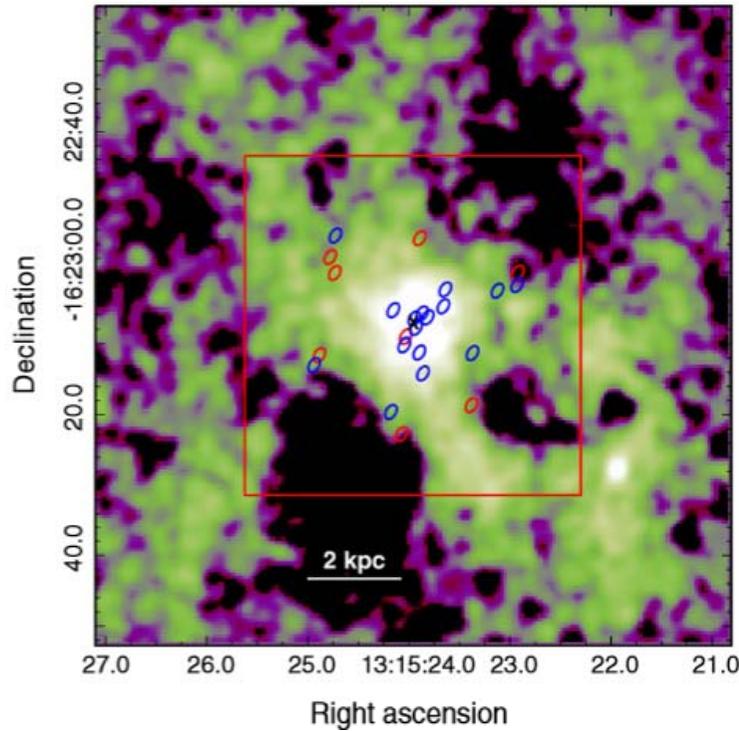
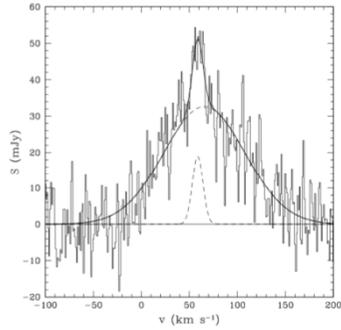


A1664 : CO(3-2) à $V=\text{systemique}$ et nuage grande V



ALMA, gaz froid dans les groupes

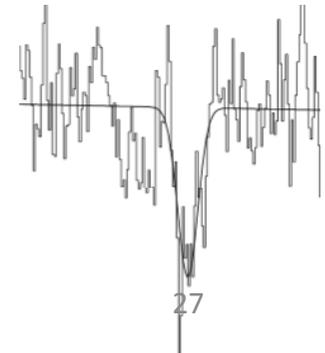
Nuages moléculaires CO (décalés bleu & rouge), sur l'image Chandra image HST



Masses des fragments, ou GMA, $3 \cdot 10^5$ à $10^7 M_{\odot}$, 10-50 km/s

Pas de disque en rotation, mais nuages aussi en absorption

David et al 2014



Grande variété de simulations

Pour des amas ou des galaxies elliptiques massives

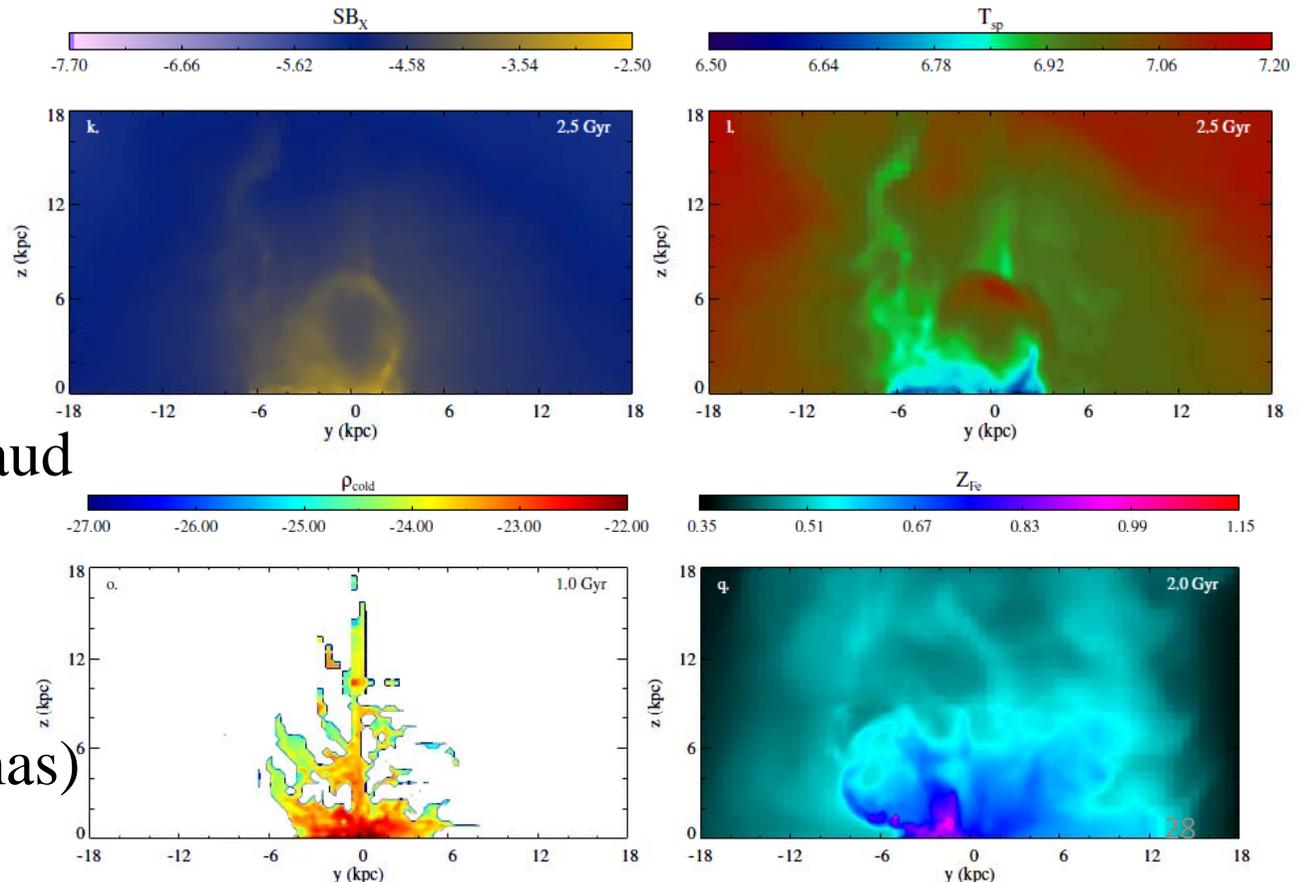
Taux de refroidissement \sim Bondi multiplié, + **Accrétion de gaz froid**

Pression de radiation insuffisante

**Feedback mécanique
avec jets ou vents**

Succès pour modérer
le refroidissement +
Distribution de gaz chaud

Efficacité mise à
l'échelle
 $3 \cdot 10^{-4}$ (E-gal) $5 \cdot 10^{-3}$ (amas)
Gaspari et al 2012

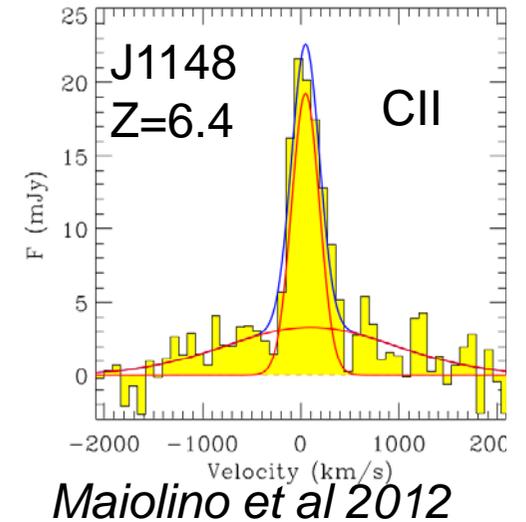


2- Gaz moléculaire sortant (outflow)

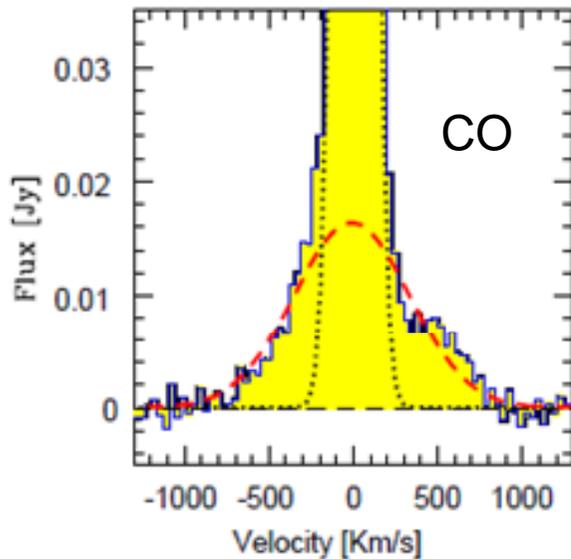
Mrk 231

AGN + starburst
nucléaire, 10^7 - $10^8 M_{\odot}$
Flot sortant $700 M_{\odot}/\text{yr}$

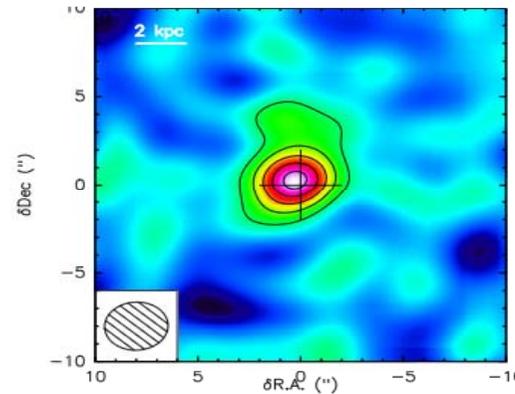
**Etendu sur ~kpc, →
Affecte toute la galaxie**



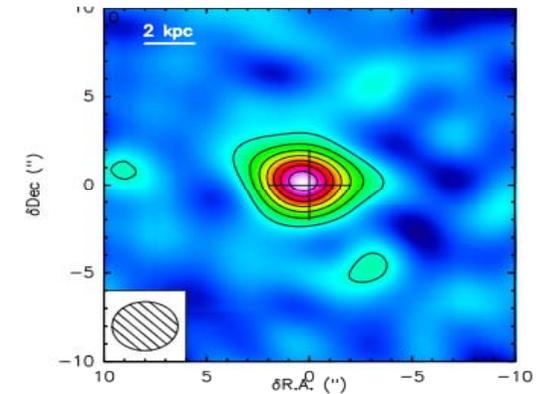
IRAM Ferruglio et al 2010



Aile bleue



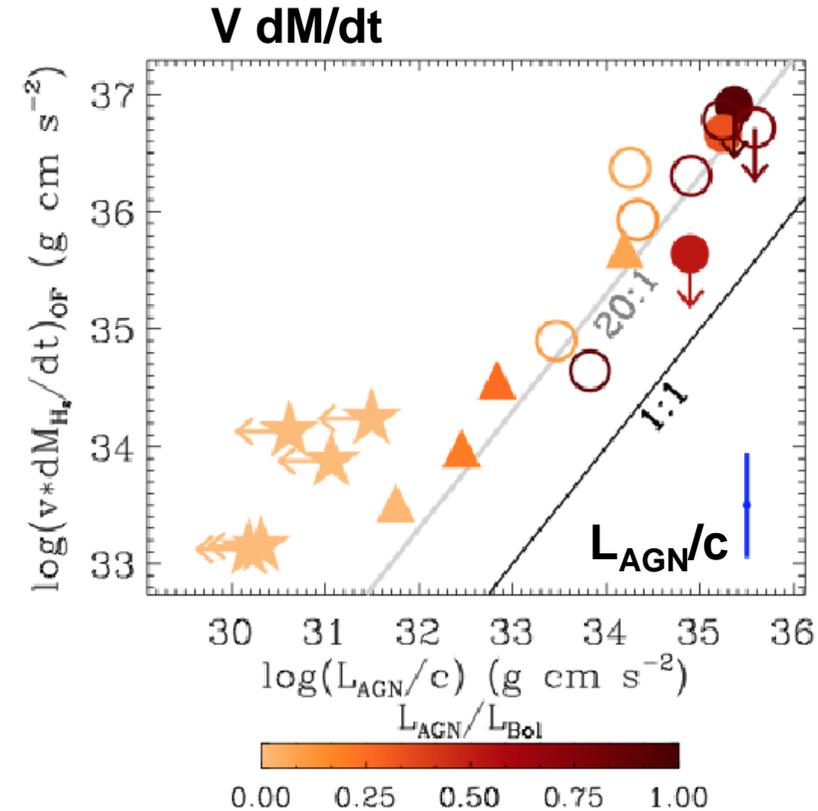
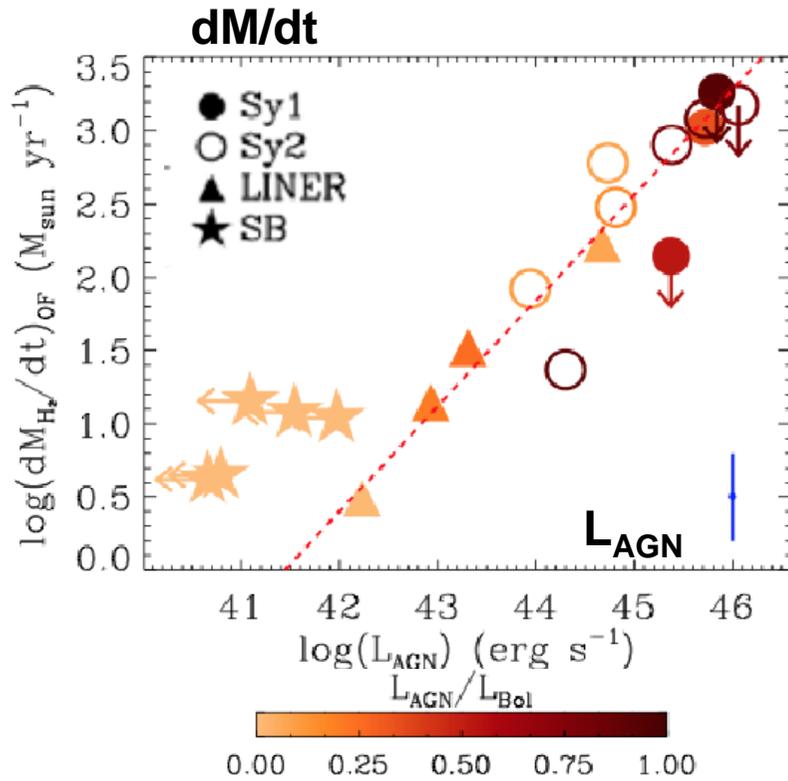
Aile rouge



Cicone et al 2012

$dM/dt = 3v M_F/R_F \sim 1000 M_{\odot}/\text{yr}$, (5xSFR)
Puissance cinétique $\sim 2 \cdot 10^{44}$ erg/s → AGN₂₉

Relations des flots avec AGN



Pour les AGN, le taux de flot est proportionnel à $L(AGN)$

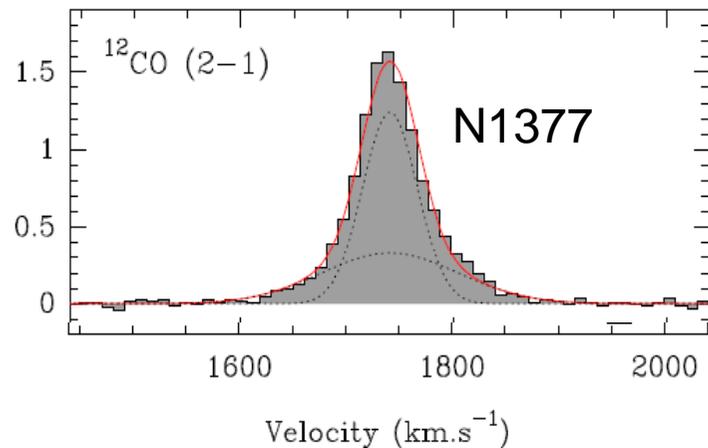
Cicone et al 2014

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

Peut être expliqué par un **mécanisme conservant l'énergie**
(Zubovas & King 2012)

Les flots moléculaires sont massifs

Aalto et al 2012



Plus massif que le disque nucléaire dense dans e.g. NGC1377

Taille 200pc avec $V = 140\text{km/s}$

$M_{\text{out}} = 1-5 \cdot 10^7 M_{\odot}$, masse disque $\sim 2 \cdot 10^7 M_{\odot}$

Flots de gaz dûs aux **supernovae**: moins massifs, vitesses plus faibles M82, $M_{\text{out}} \sim 5 \cdot 10^7 M_{\odot}$ $V \sim 200\text{km/s}$

Fusion NGC3256, $M_{\text{out}} \sim 10^7 M_{\odot}$, $10 M_{\odot}/\text{yr}$, $V \sim 420\text{km/s}$

Arp220, + absorption 100pc, $M_{\text{out}} \sim 10^8 M_{\odot}$

Flots dûs aux **AGN**: $V > 1000\text{km/s}$, jusqu'à $1200 M_{\odot}/\text{yr}$

Mrk231 $700 M_{\odot}/\text{yr}$, gas disparaît en 10^7 yrs

NGC1266 $M_{\text{out}} \sim 2 \cdot 10^7 M_{\odot}$, gaz disparu en $\sim 10^8$ yrs

Les flots de gaz ionisé plus fréquents

Statistique sur 200 galaxies $0.4 < z < 1.4$ (Martin C. et al 2012)

2% de l'absorption FeII sortant à 200Km/s, **20%** à 100km/s

Dépend du taux de formation d'étoiles (*FeII, MgII, Keck*)

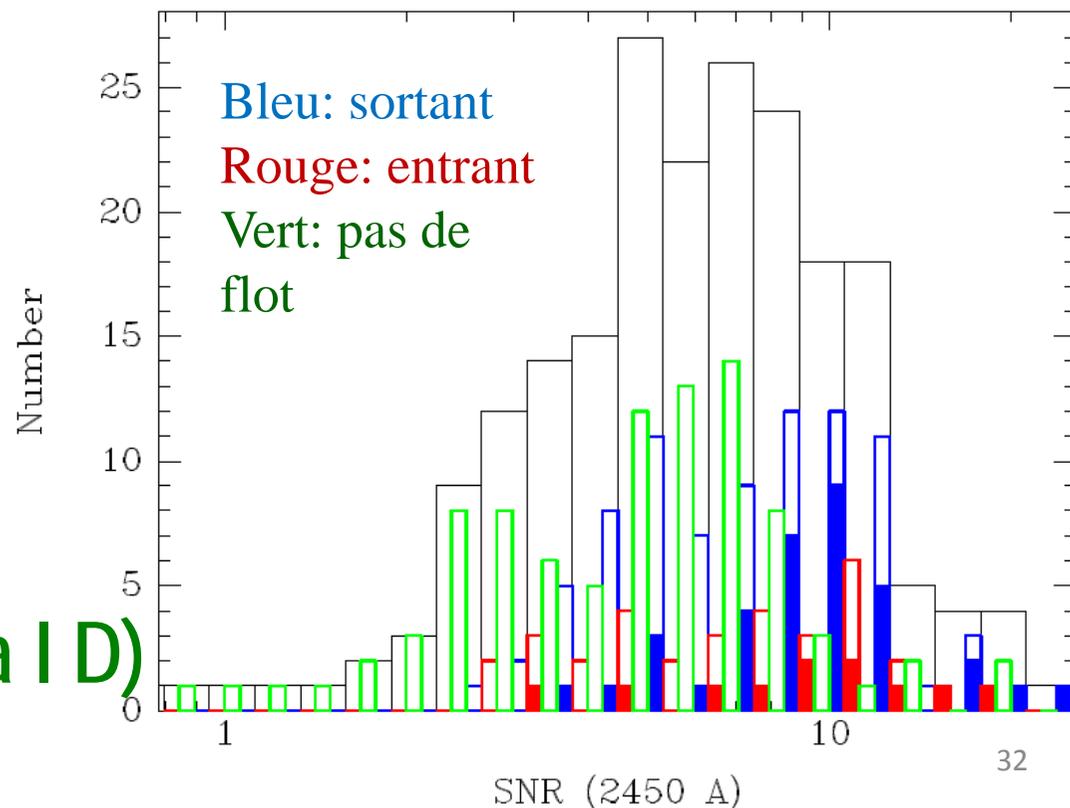
Flot sortant ou entrant

→ Collimaté

Angle plus petit à grand V

Gaz atomique (abs Na I D)

Rupke et al 2005



Vents moléculaires vus par Herschel

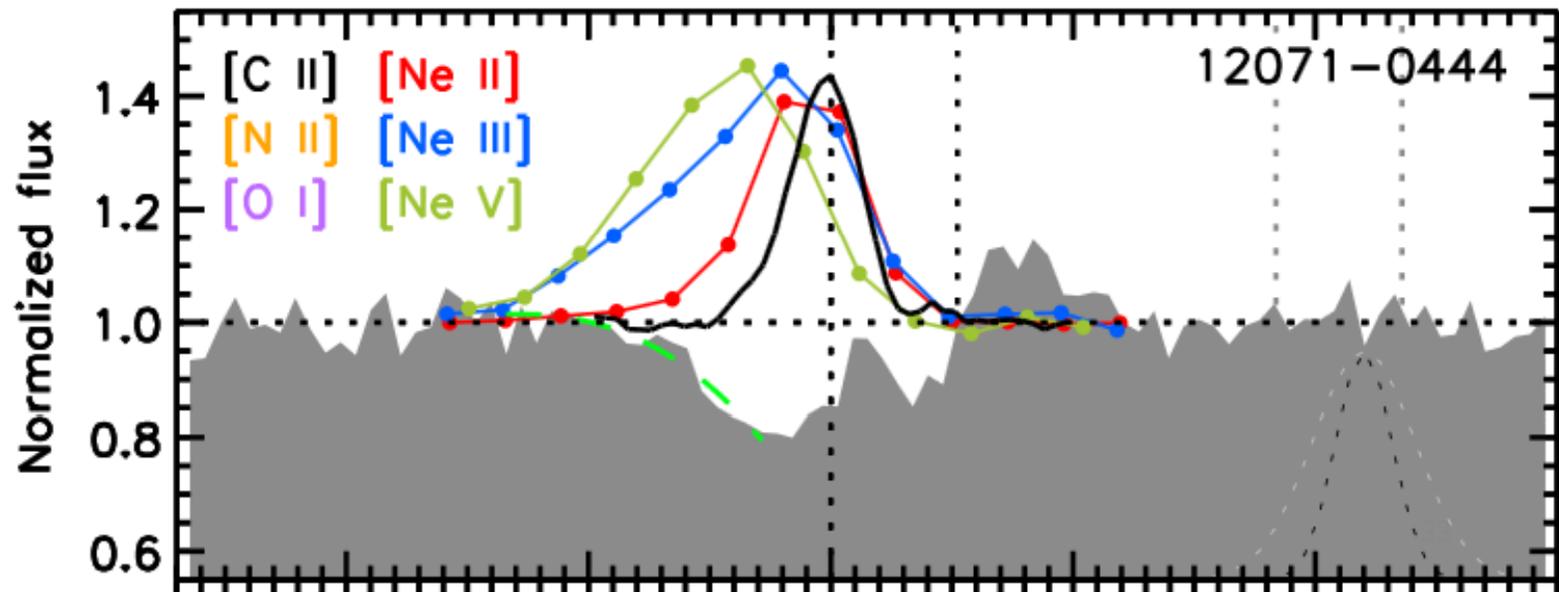
Raies d'absorption décalées vers le bleu dans 70% des objets

→ Flot sortant avec grand angle (145°) *Veilleux et al 2013*

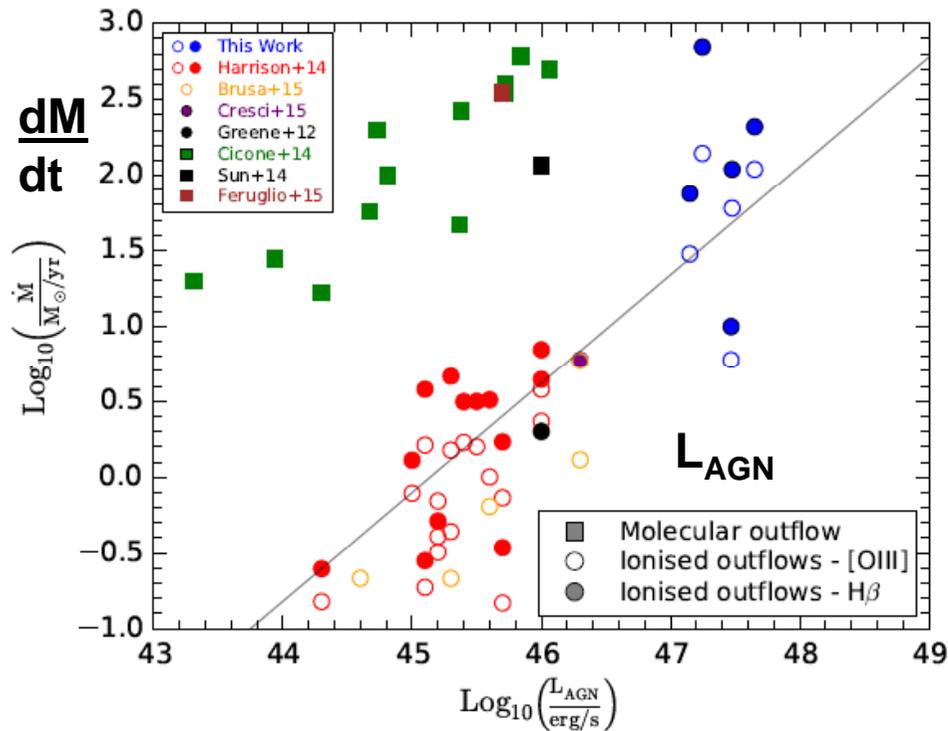
Seulement 10% d'absorption décalée vers le rouge:

→ Accrétion par les filaments, géométrie plane

$V_{\max} \sim -1000 \text{ km/s}$, $V_{\text{moy}} \sim -200 \text{ km/s}$, croît avec L_{AGN}



Flots moléculaires vs ionisés



6 QSO à $z=2.4$

Carniani et al 2015

Un seul objet en commun

AGN varie en amplitude

Puissance cinétique gaz ionisé

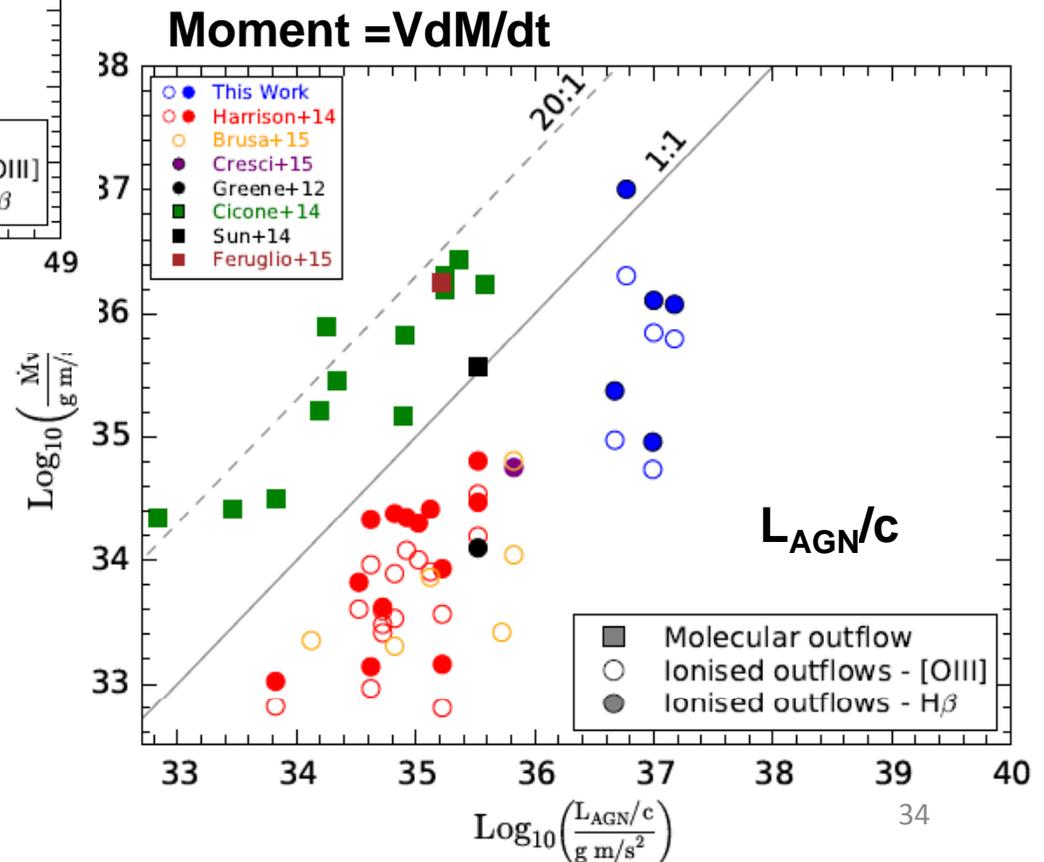
<0.1% LAGN

Flot de gaz moléculaire

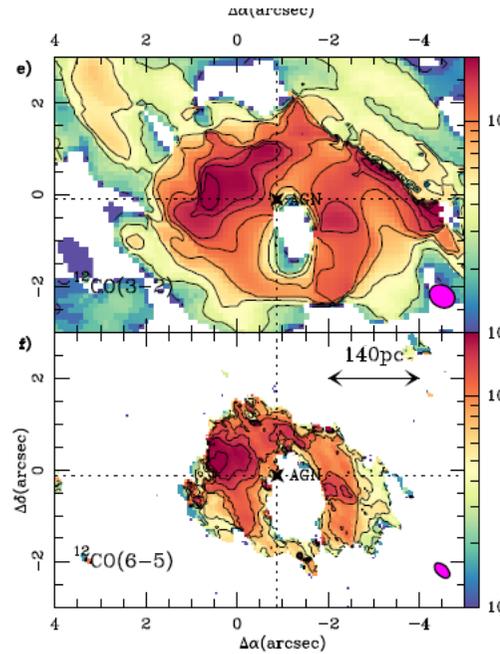
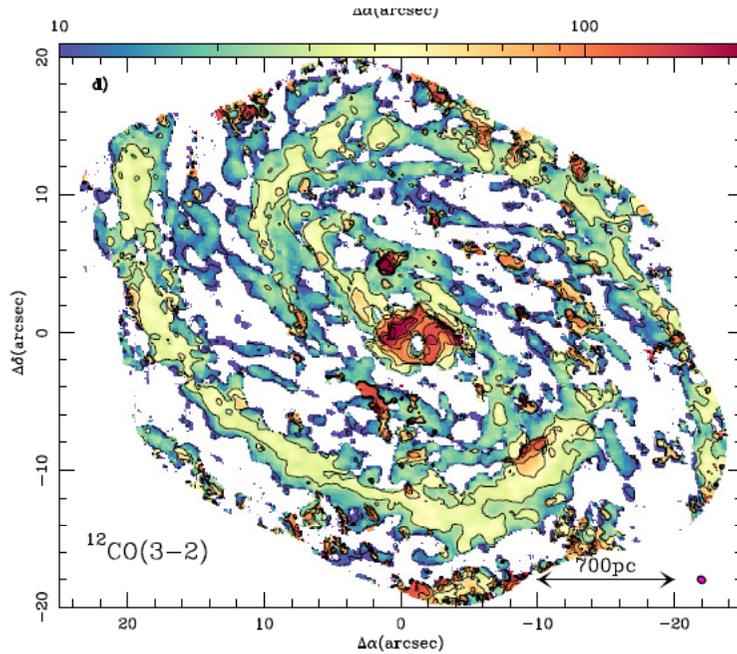
50x gaz ionisé

Mécanismes d'accélération

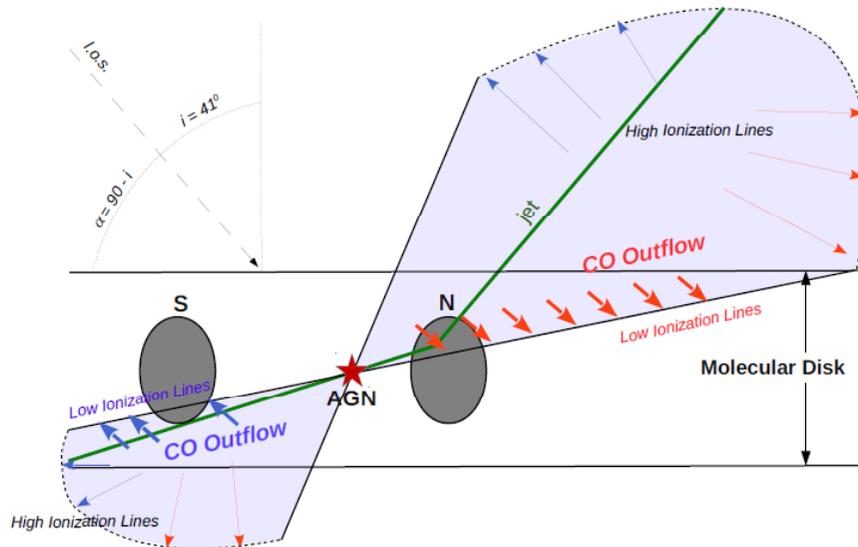
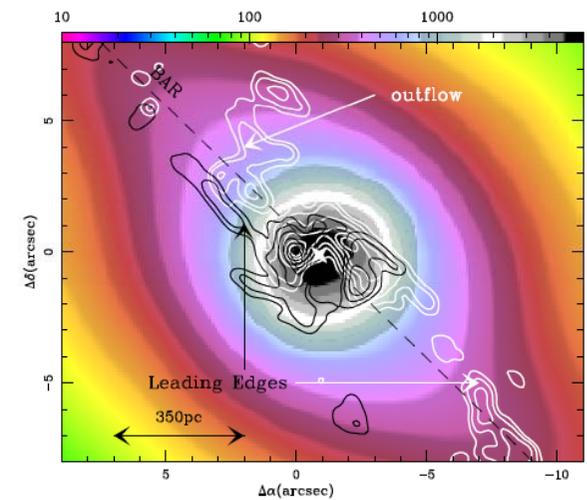
différents



Noyau décentré et flots dans NGC1068



Noir $V=-50\text{km/s}$
Blanc $V=50\text{km/s}$

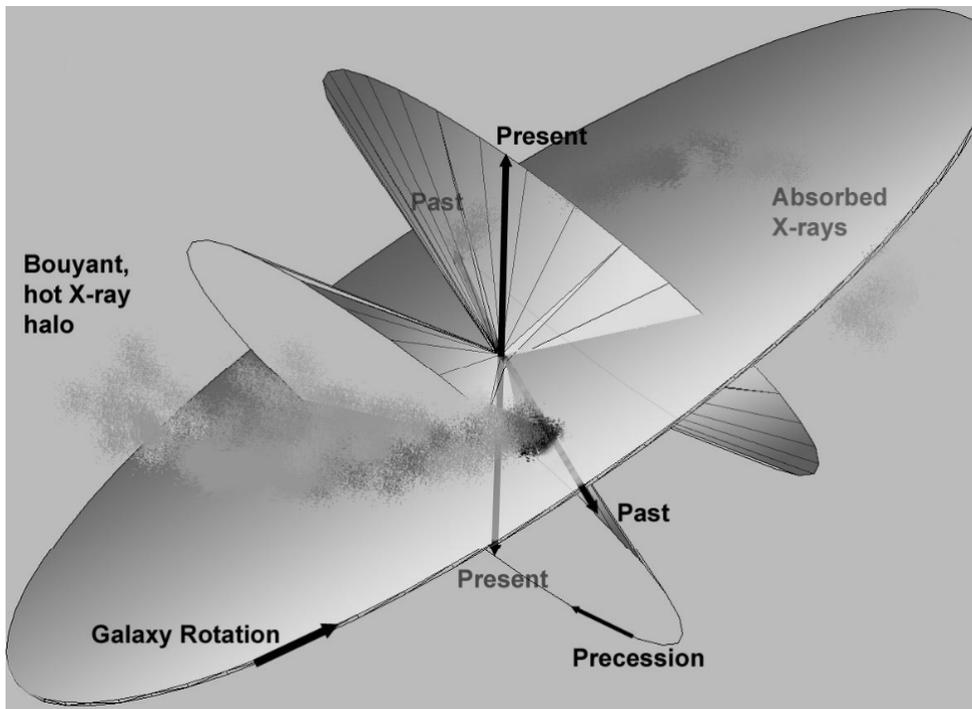
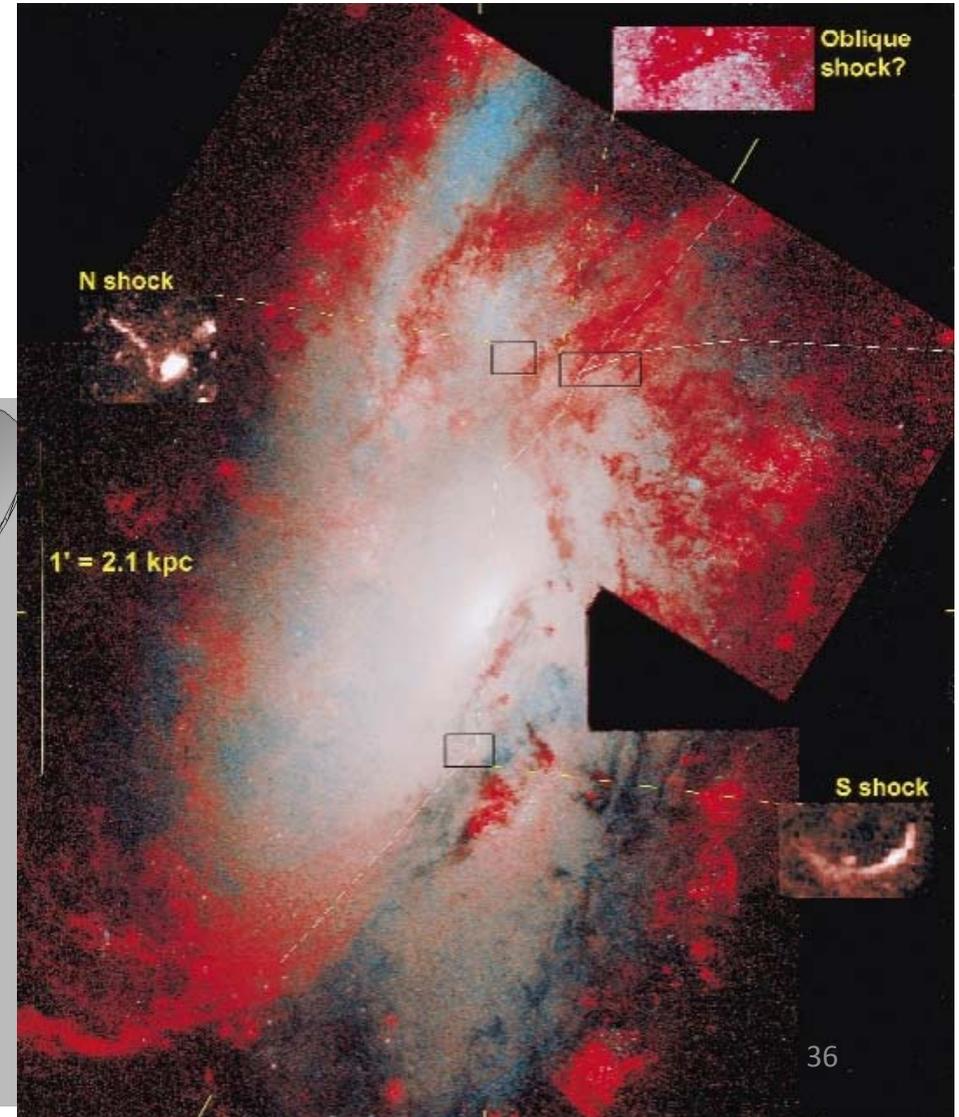


Flot de $63M_{\odot}/\text{yr}$
 $10\times$ taux de formation d'étoiles
dans cette région

Jet dans le plan du disque



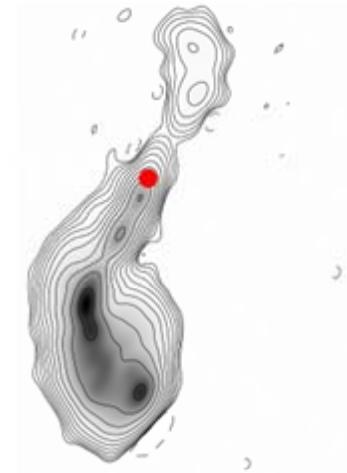
NGC 4258 *Cecil et al 2000*



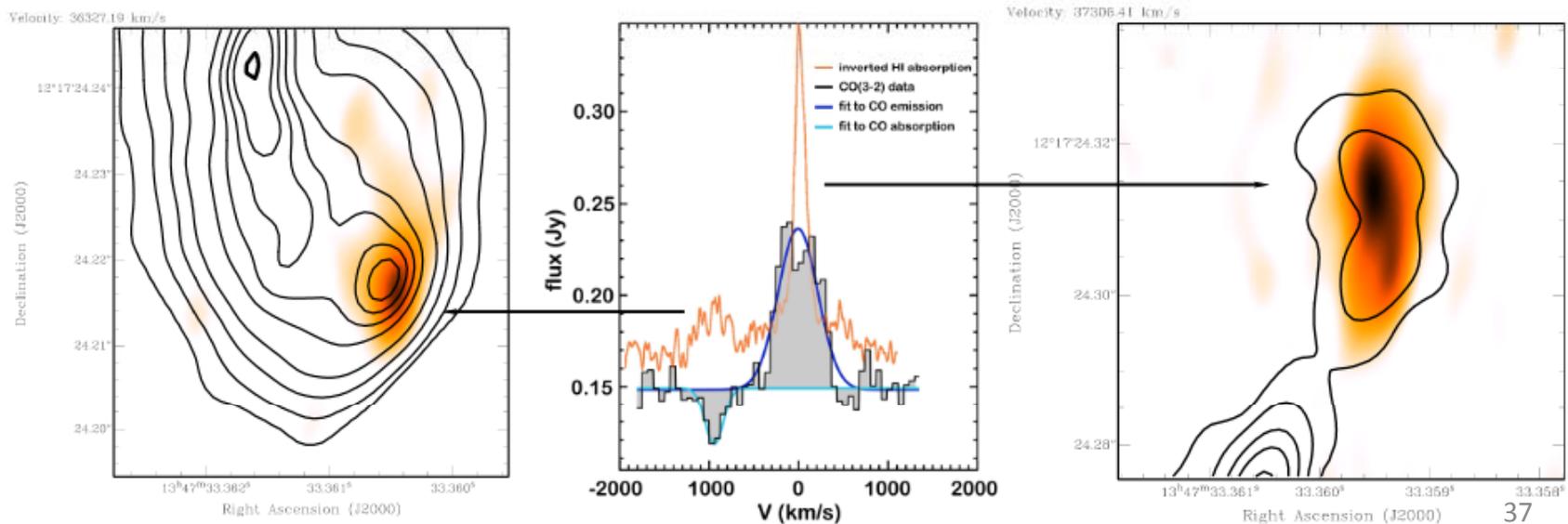
Feedback positif de l'AGN: les jets déclenchent la formation d'étoiles

AGN source radio 4C12.50: jeune, ou renouvelé

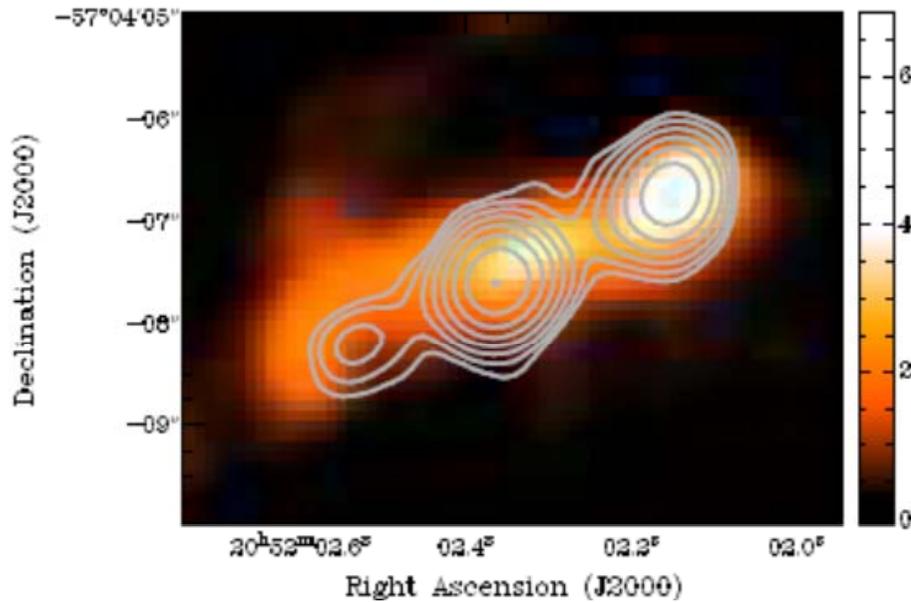
Le flot est à 100 pc du noyau
Où le jet interagit avec le milieu gazeux



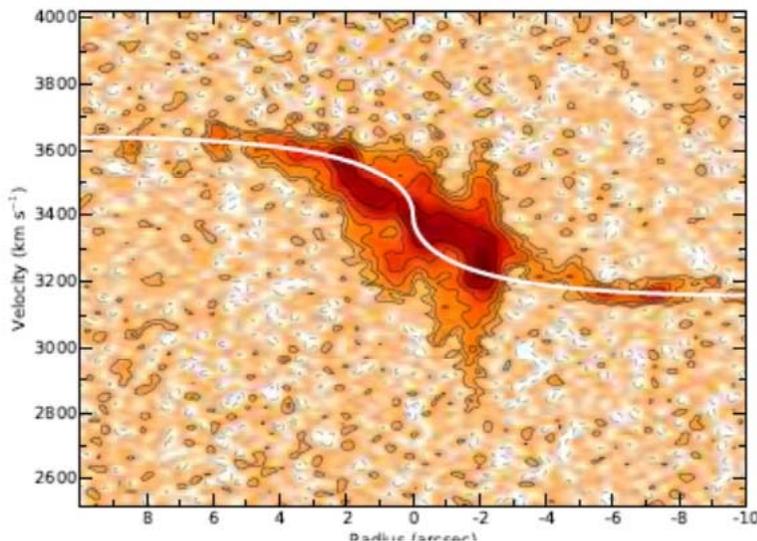
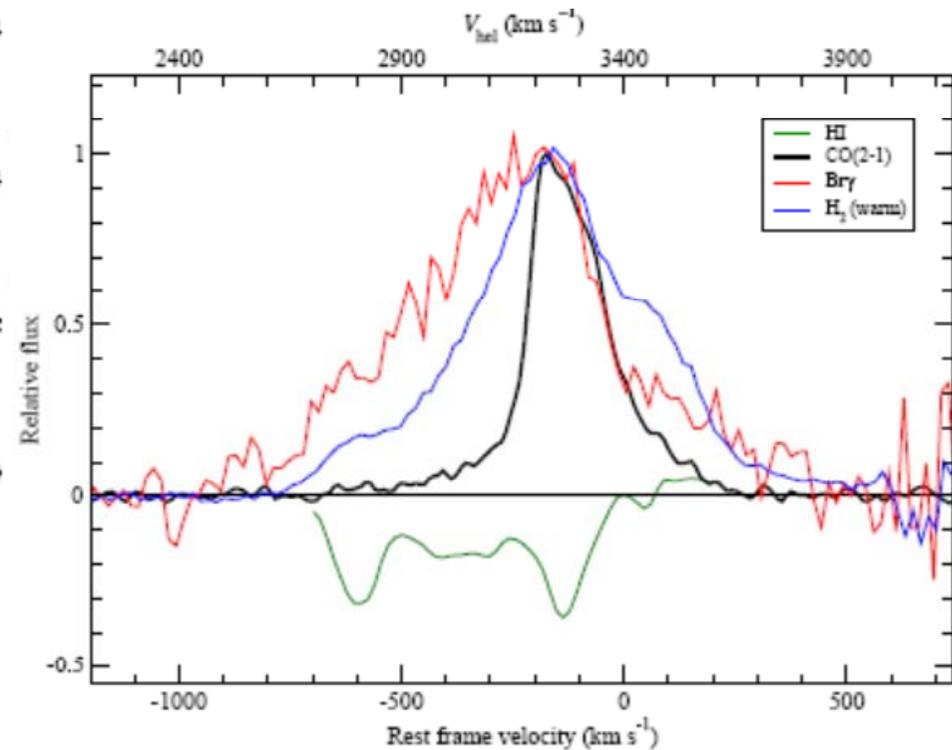
Morganti et al 2013, Dasyra & Combes 2012



Action du jet radio dans IC5063



Contours CO sur émission de poussière



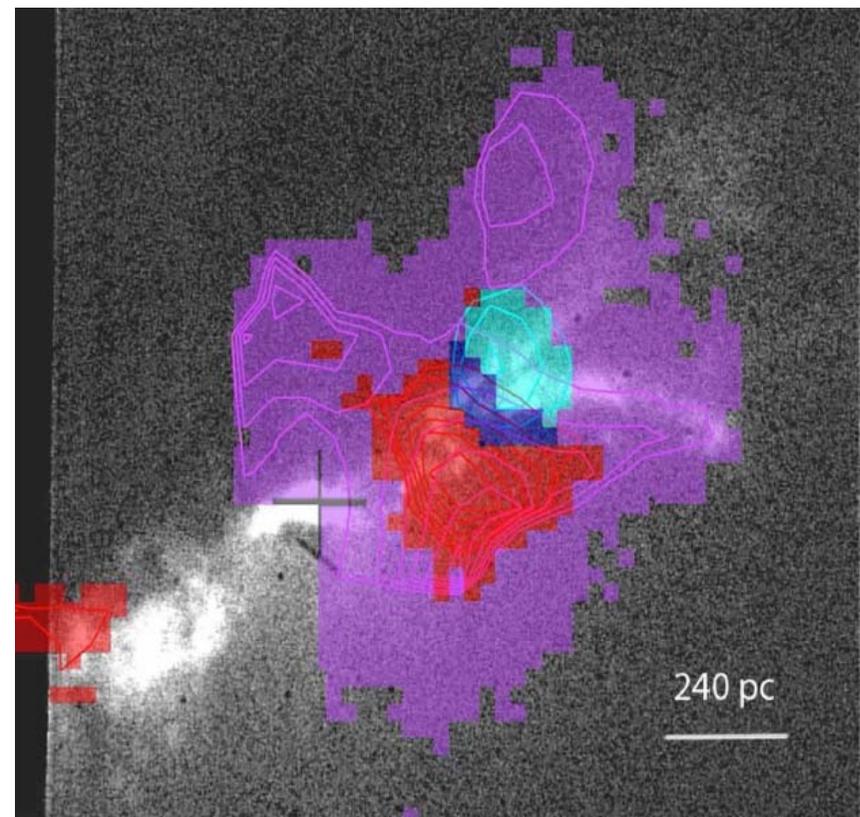
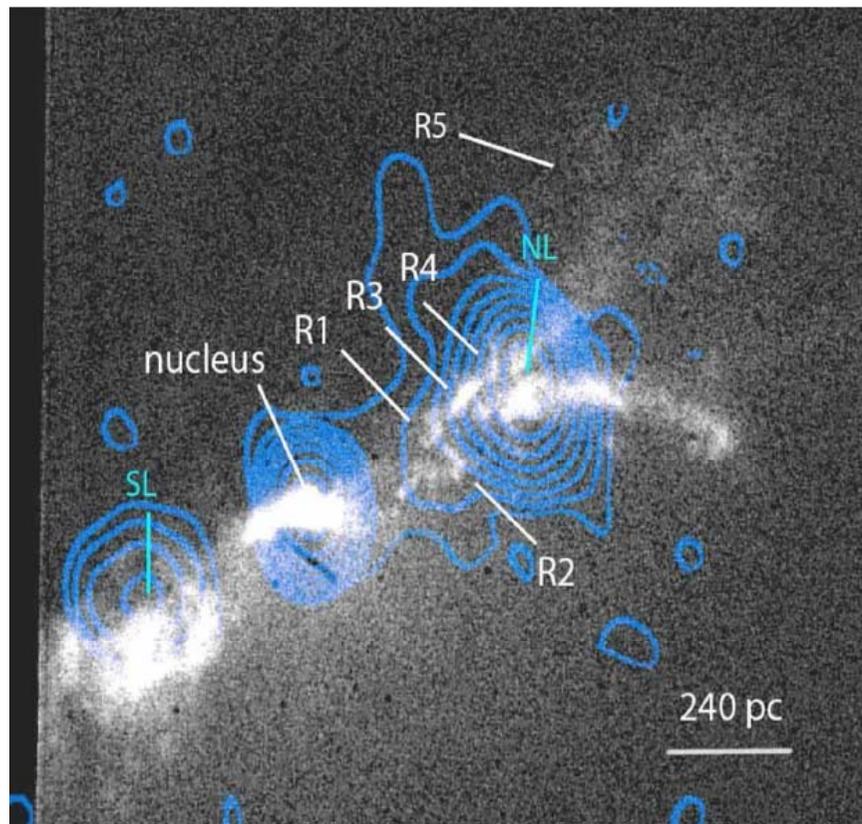
Flot moléculaire à $V=600\text{km/s}$
Galaxie de Seyfert, faible en radio

ALMA maps, Morganti et al 2015

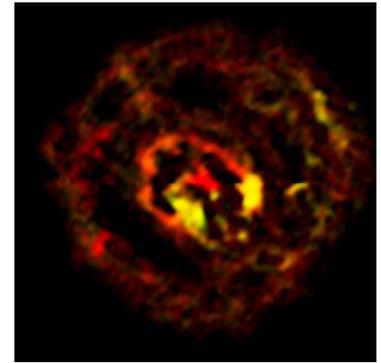
IC5063: vents multiples le long du jet

VLT SINFONI, NIR H₂, raies du Fer

Flots moléculaires en 4 points, où le jet est dévié



Feedback dans les AGN de faible luminosité



NGC 1433: spirale barrée, **CO(3-2) avec ALMA**

Le gaz moléculaire alimente l'AGN, + flot // petit axe



$M_{\text{H}_2} = 5.2 \cdot 10^7 M_{\odot}$ dans 1kpc

Flot de 100km/s

7% de la masse = $3.6 \cdot 10^6 M_{\odot}$

Le plus petit flot détecté

→ $L_{\text{kin}} = 0.5 \text{ dM/dt } v^2 \sim 2.3 \cdot 10^{40} \text{ erg/s}$

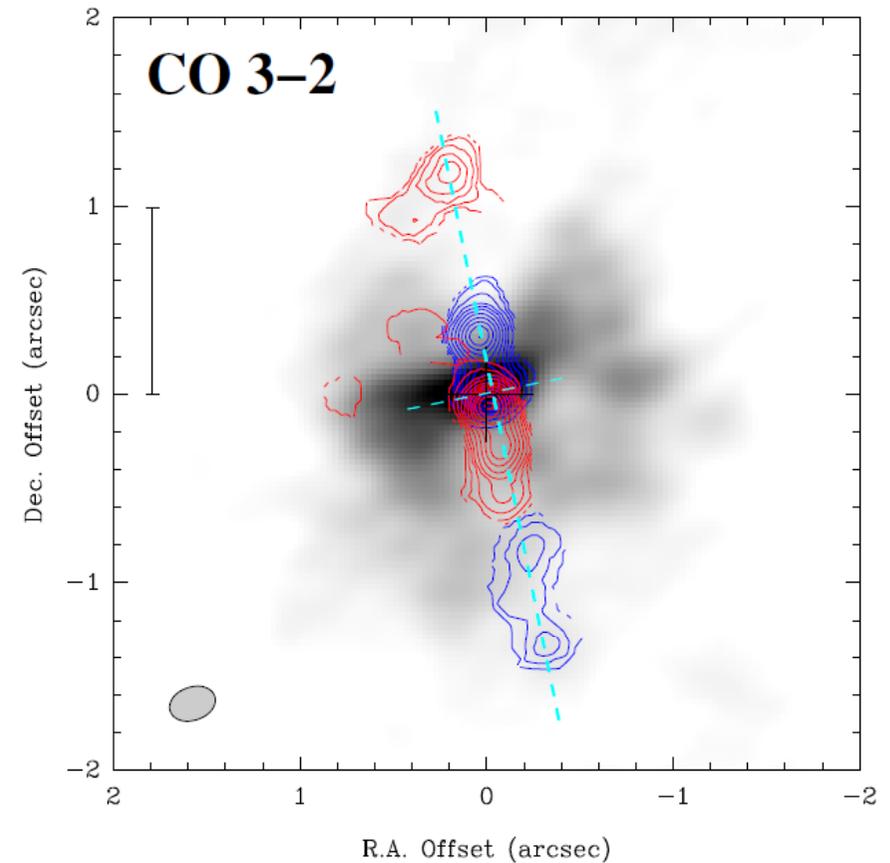
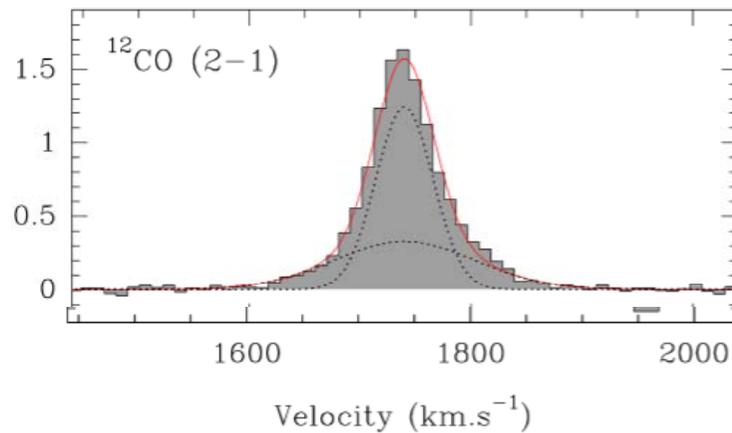
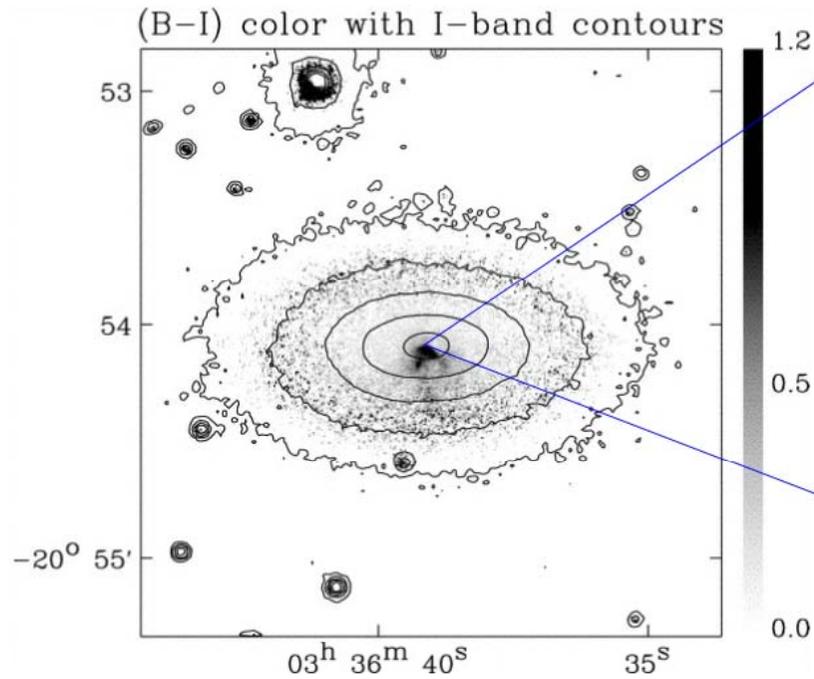
$L_{\text{bol}} (\text{AGN}) = 1.3 \cdot 10^{43} \text{ erg/s}$

Moment du flot $> 10 L_{\text{AGN}}/c$

Combes et al 2013

Observations ALMA de NGC 1377

Résolution 0.2 arcsec

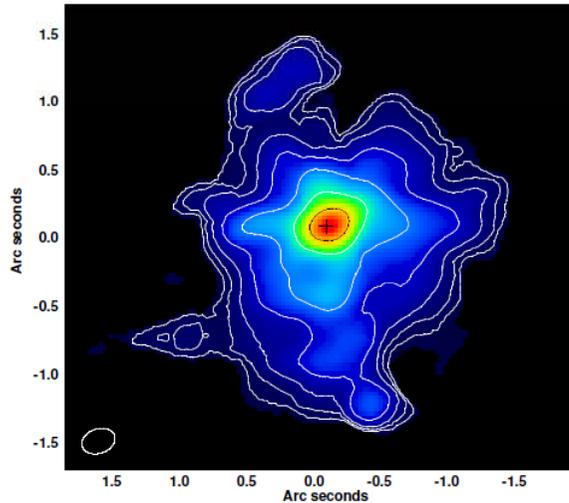


MH₂ dans le cone 10⁸ M_⊙
Dans le jet 10⁷ M_⊙

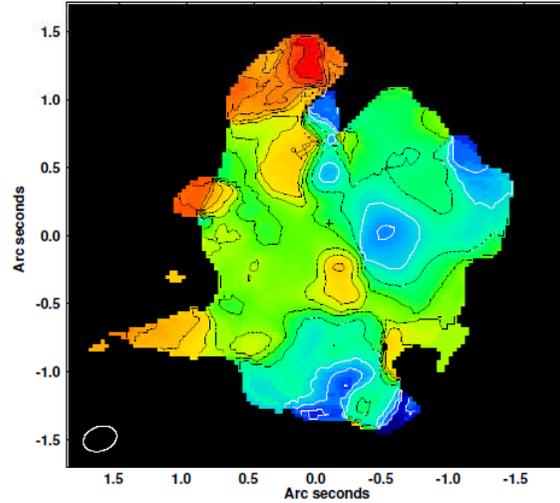
Aalto et al 2015

Jet en précession dans NGC 1377 ?

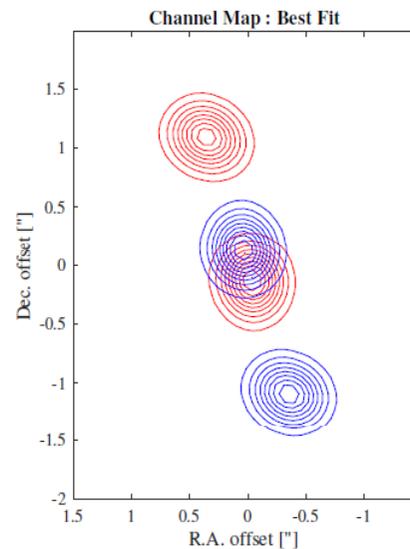
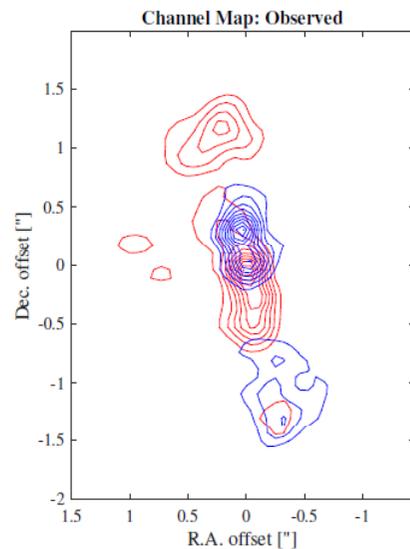
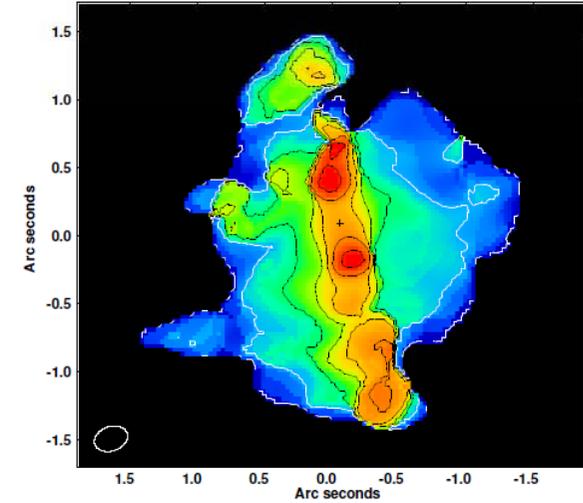
Densité projetée



Vitesse

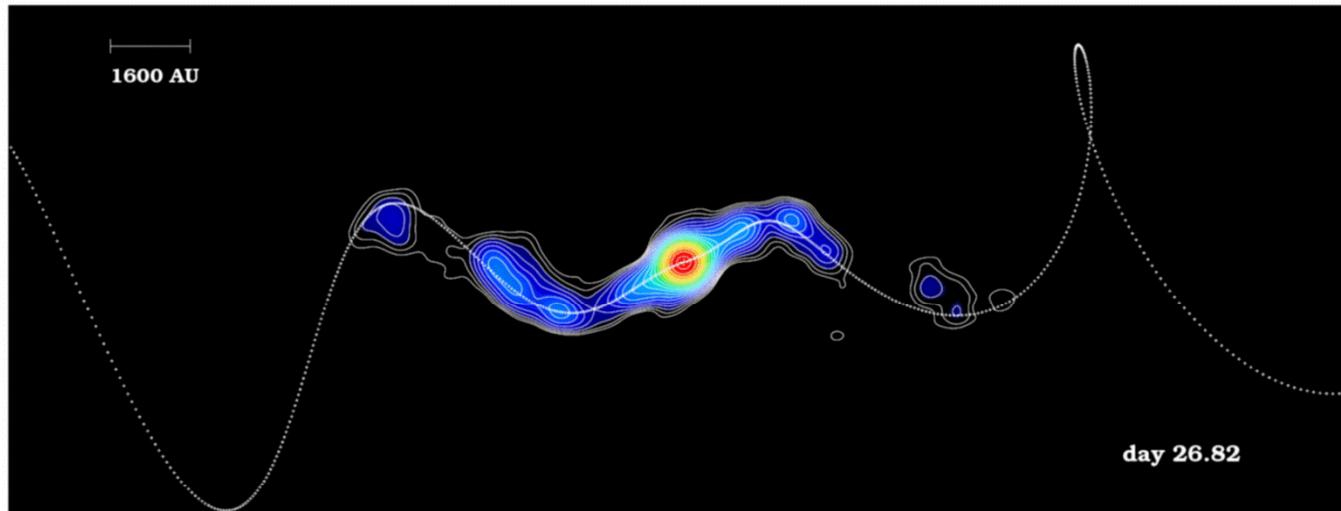


Dispersion



Modèle d'une simple précession
Le jet change de signe
symétriquement Nord/Sud
 $V = 250-600 \text{ km/s}$
Le flot part à $r < 10 \text{ pc}$

Précession des jets des micro-quasars



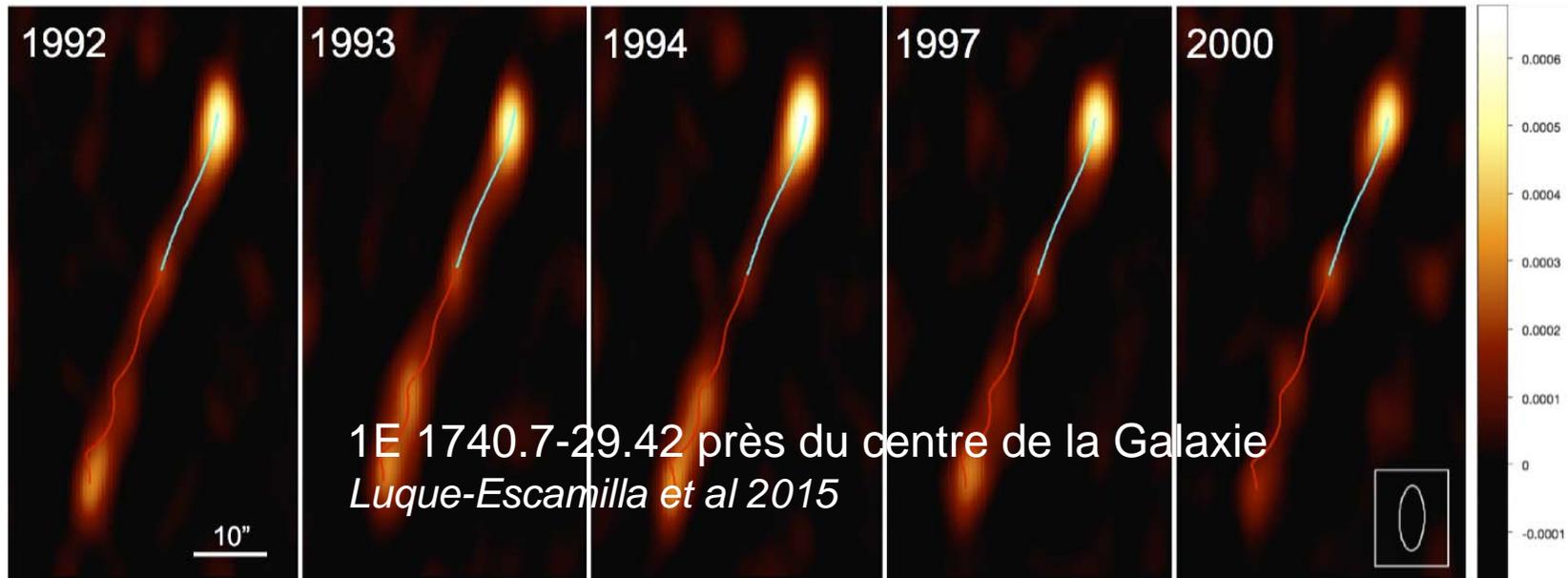
SS433 VLBA 15GHz

1mas = 3AU

Mioduszewski et al. 2006

Jet interne 5mas

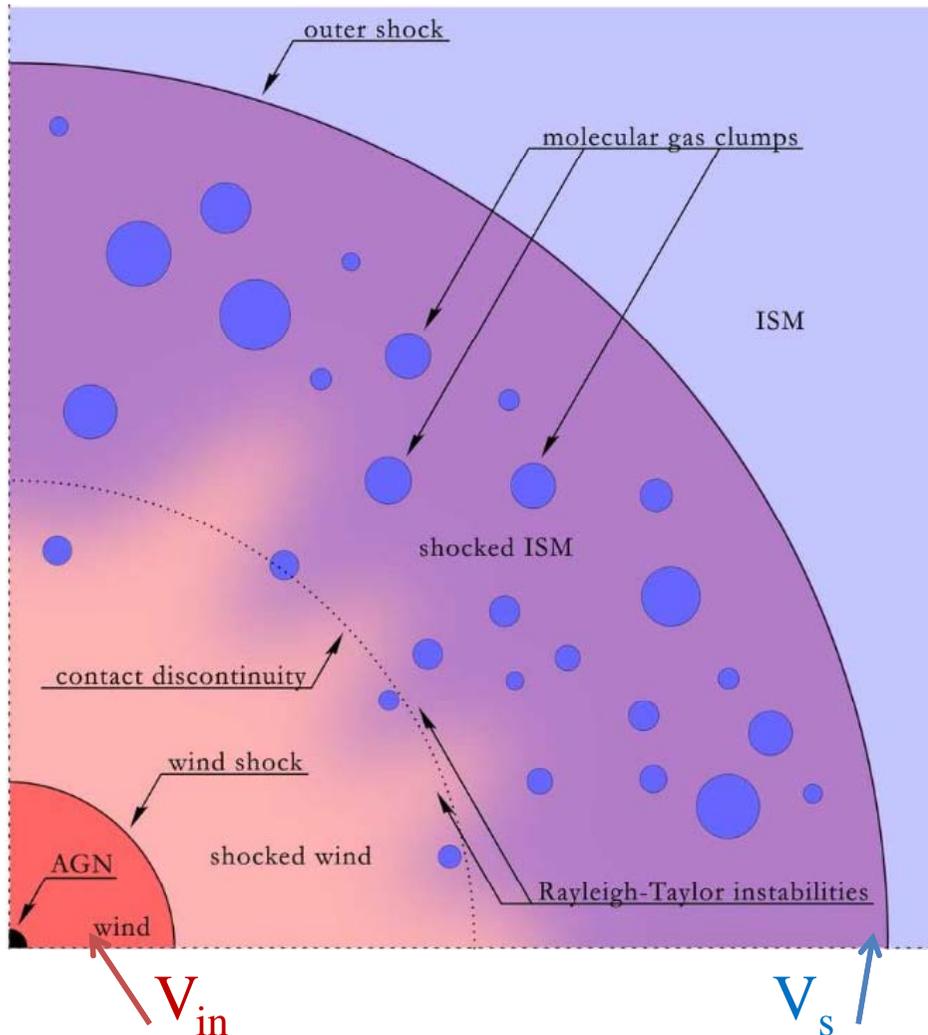
Avance de 7-10mas
par jour



Pourquoi des molécules dans les flots?

Zubovas & King 2014

Gaz chauffé par les chocs à 10^6 - 10^7 K
Molécules dissociées?



Refroidissement efficace

→ Multiphase, avec instabilités
Rayleigh-Taylor

$t_{cool} \ll 1\text{Myr}$

→ induit la formation d'étoiles

Cela induit une luminosité
comparable à $L_{AGN} \quad 100M_{\odot}/\text{yr}!$

**Il est difficile de distinguer des flots
dûs au starburst ou à l'AGN**

3- Flots conservant l'énergie?

Si le refroidissement est efficace → flot conservant le moment ($m\dot{v}$)

Pour des vents très rapides $> 10\,000\text{km/s}$, peu de pertes radiatives
→ Flot conservant l'énergie (Faucher-Giguère & Quataert 2012)

Le gaz moléculaire à V_s , reçoit un boost de moment

Conservation de

$$\dot{M}_s v_s^2 \approx \frac{1}{2} \dot{M}_{\text{in}} v_{\text{in}}^2$$

$$\dot{M}_{\text{in}} v_{\text{in}} \equiv \tau_{\text{in}} \frac{L_{\text{AGN}}}{c} \quad \tau_{\text{in}} \text{ de l'ordre de } 1$$

$$L_{\text{in}} \equiv (1/2) \dot{M}_{\text{in}} v_{\text{in}}^2$$

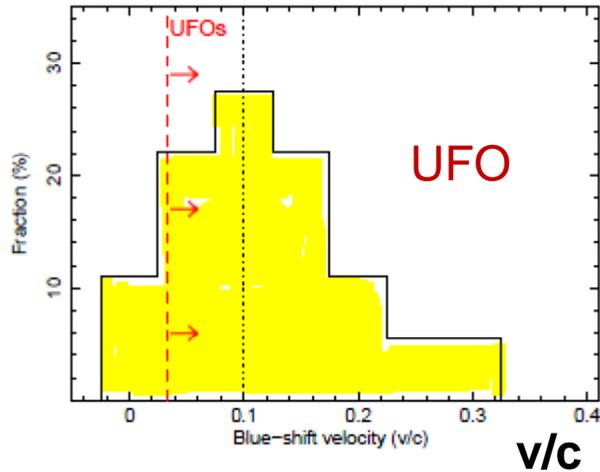
$$\dot{P}_s \equiv \dot{M}_s v_s \quad \dot{P}_{\text{in}} \equiv \dot{M}_{\text{in}} v_{\text{in}}$$

$$\frac{\dot{P}_s}{\dot{P}_{\text{in}}} \approx \frac{1}{2} \frac{v_{\text{in}}}{v_s}$$

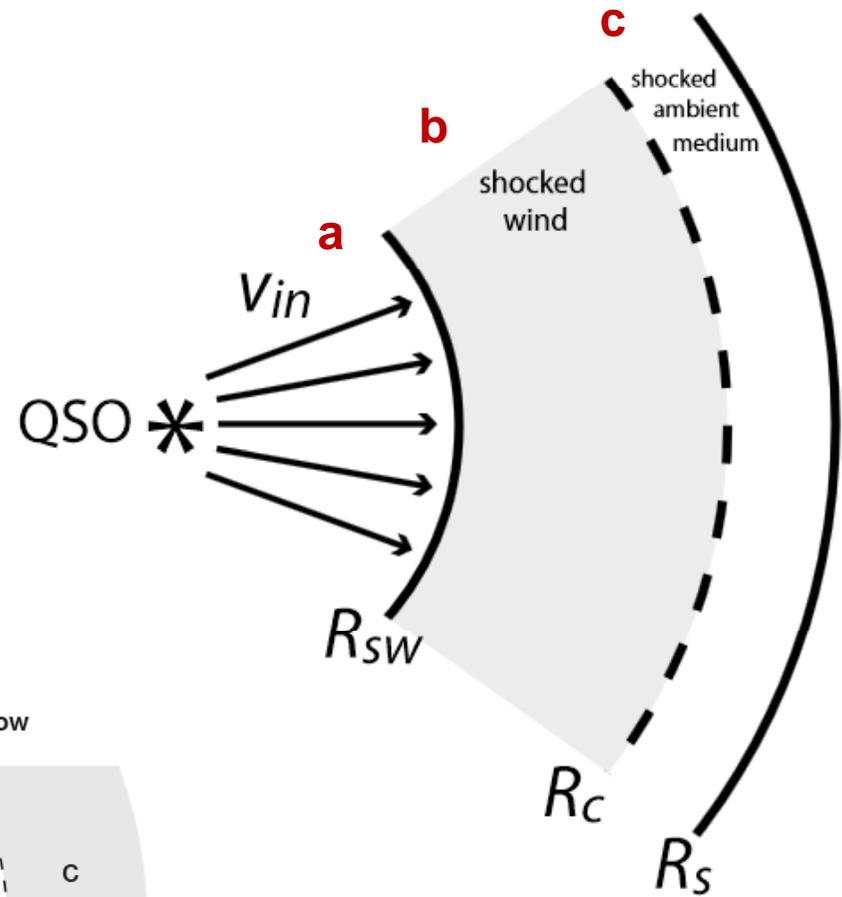
Boost de $v_{\text{in}}/2 V_s \sim 50!$ Explique pourquoi le moment $\gg L_{\text{AGN}}/c$

Refroidissement lent – grand moment VdM/dt

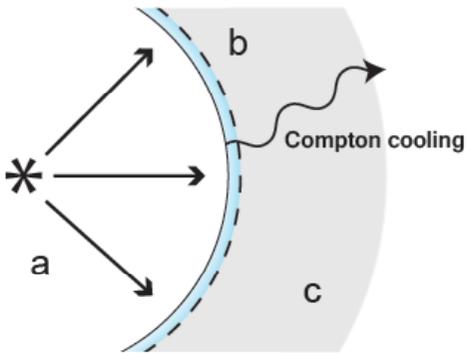
Faucher-Giguère & Quataert 2012



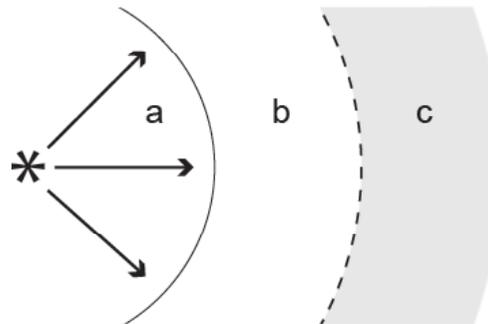
Tombesi 10, 14



Momentum-driven outflow



Energy-driven outflow



Costa, Sijacki, Haehnelt, 2014

Autres possibilités

Flots sortant >1000 km/s avec un grand moment p ($10 L/c$)

Pourrait être obtenu en considérant les effets d'épaisseur optique dans l'infrarouge

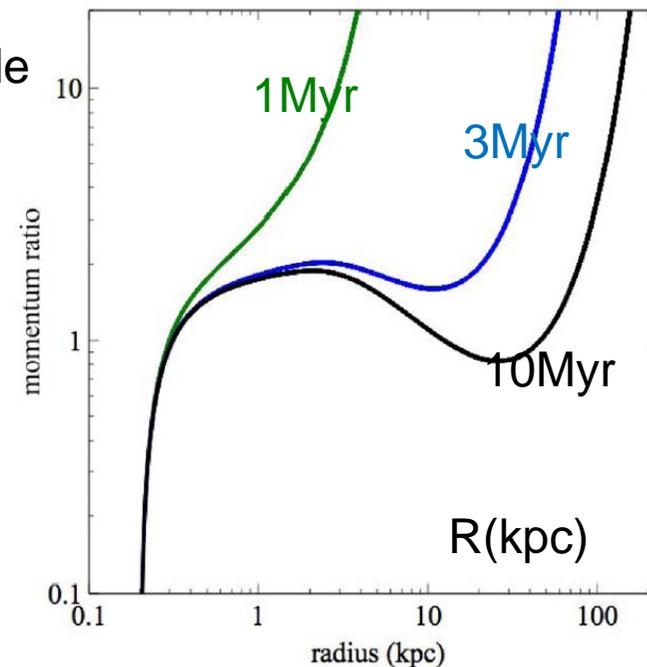
Et surtout la variabilité des AGN

Il est possible que l'AGN ait disparu, quand on voit le flot

→ reliques d'épisodes passés de l'AGN

Ishibashi & Fabian (2015)

Rapport de Moment



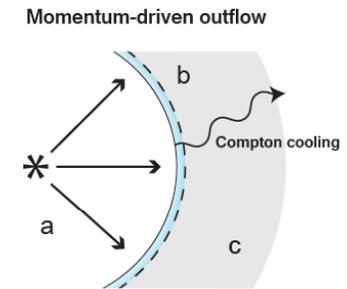
Impact d'un vent ultra-rapide (UFO)

Deux phases

1- Au départ, M_{BH} en dessous de la relation $M-\sigma$

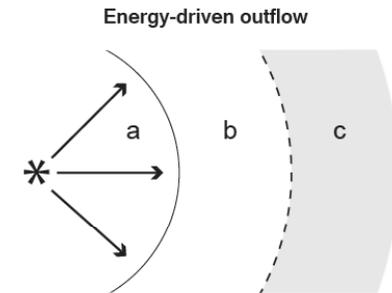
le vent $v=0.1c$ est arrêté par un choc $\ll 1\text{kpc}$

→ flot conservant le **moment**, l'énergie est rayonnée,
Pas suffisant pour arrêter le gaz, le trou noir croît



2- Puis M_{BH} arrive sur la relation $M-\sigma$, le flot s'étend sur de grands rayons $> 1\text{kpc}$, et devient conservateur d'énergie

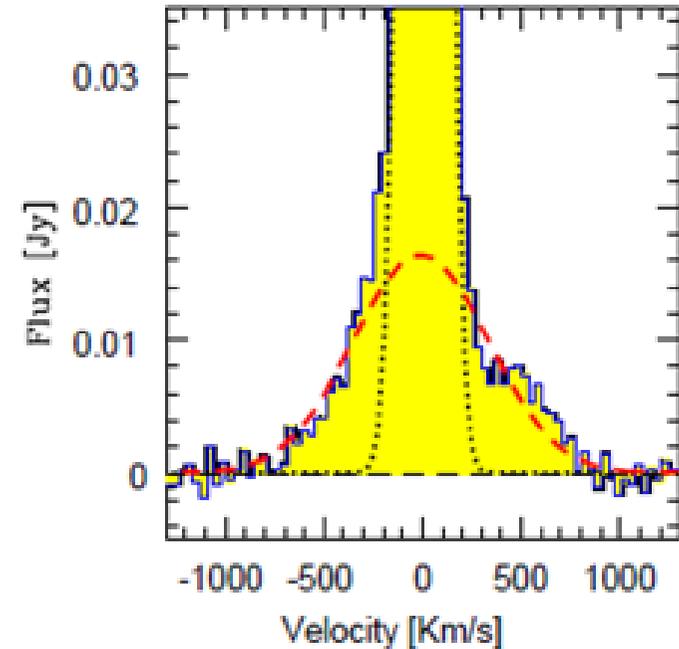
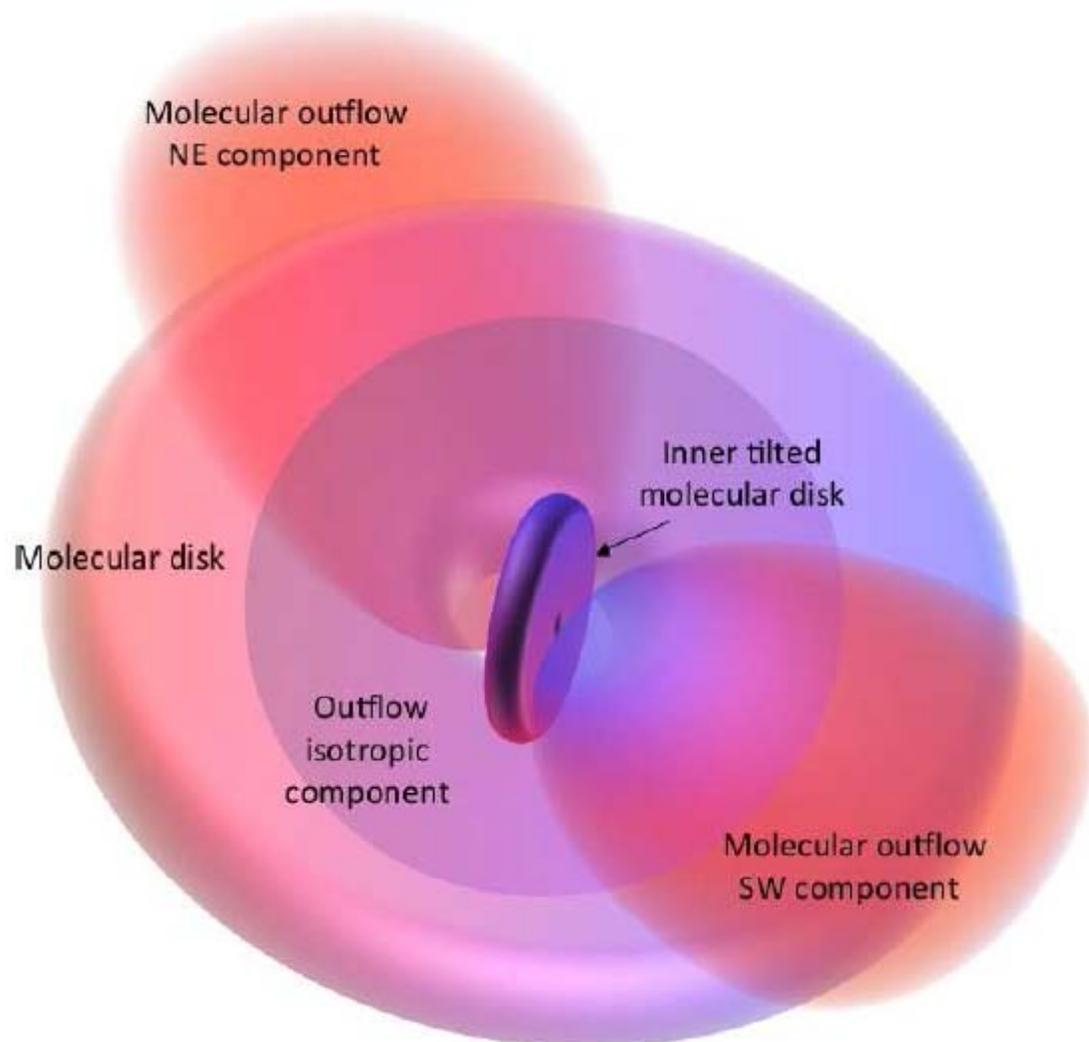
La pression est $\gg \rho v^2$, le milieu est facilement ejecté avec V_{esc} (comme les flots moléculaires observés)



→ Régulation de M_{bulbe}

Le disque est un obstacle trop massif, le jet es dévié → bipolaire

UFO+ flot moléculaire dans Mrk231



Mrk 231

AGN + starburst

Gaz éjecté 10^7 - $10^8 M_{\odot}$

Flot de $700 M_{\odot}/\text{yr}$

Feruglio et al 2015

Plusieurs modes simulés

Mode Quasar, quand $dM_{\text{BH}}/dt > 0.01 \text{ Edd}$ – Energie symétrie sphérique

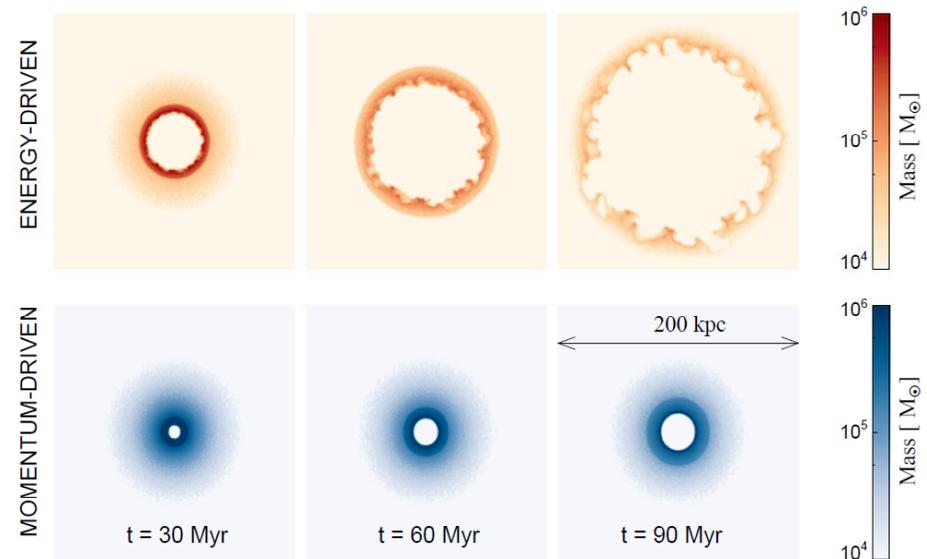
Mode Radio: $V = 10^4 \text{ km/s}$, dans un cylindre perp. Au disque

Conservant l'énergie, mécanisme
bien plus efficace

AGN flot avec $> 10 L_{\text{Edd}}/c$

Gaz froid entraîné $> 10^9 M_{\odot}$

Après le choc refroidissement par
les métaux

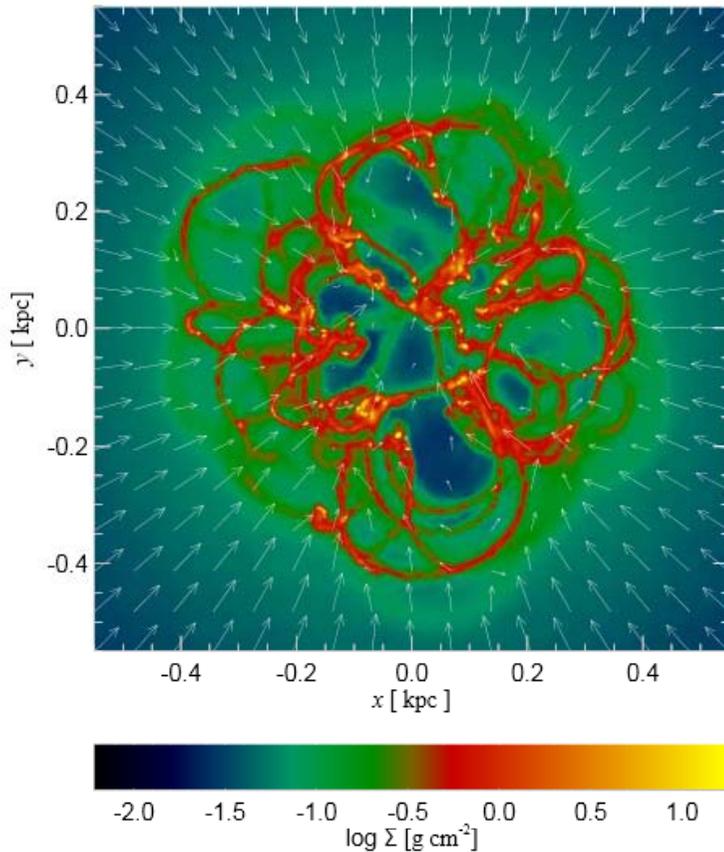


Costa et al 2014

Comparison entre des simulations cosmologiques réalistes et
des modèles idéalisés en symétrie sphérique

→ Le feedback des AGN ne serait efficace qu'avec des flots 10 fois
supérieurs

Mode Quasar: simulations multi-phase



Pourrait expliquer la relation M - σ

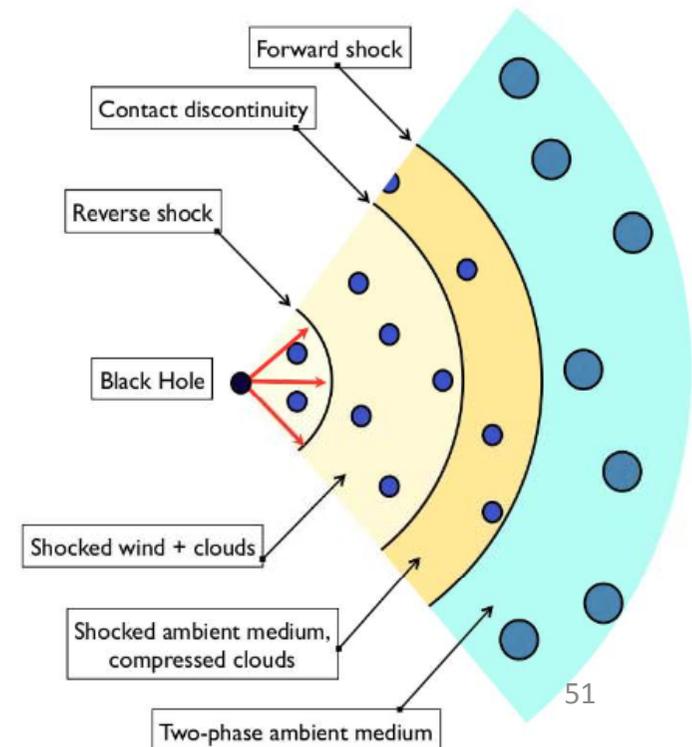
Nayakshin 2014

L'essentiel de l'énergie cinétique du flot est perdue dans les vides

Feedback positif et négatif

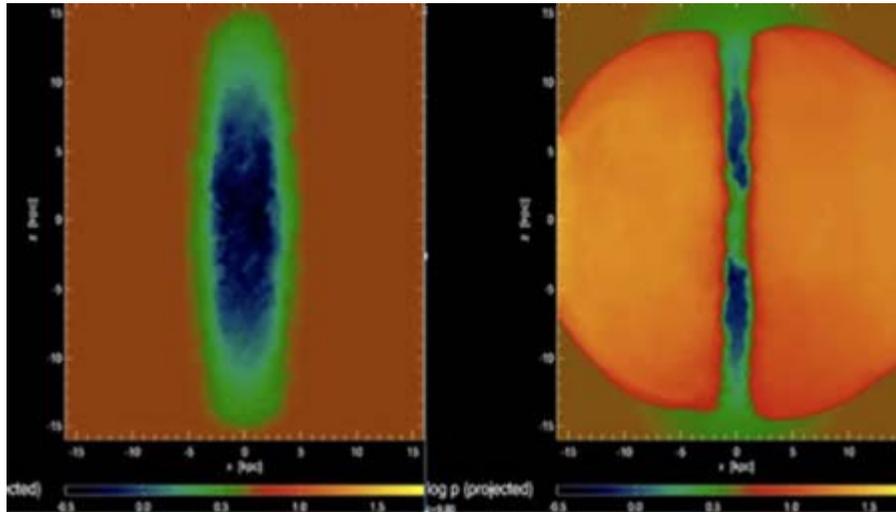
Le gaz froid est poussé par la pression dynamique

Plus de feedback sur le gaz diffus



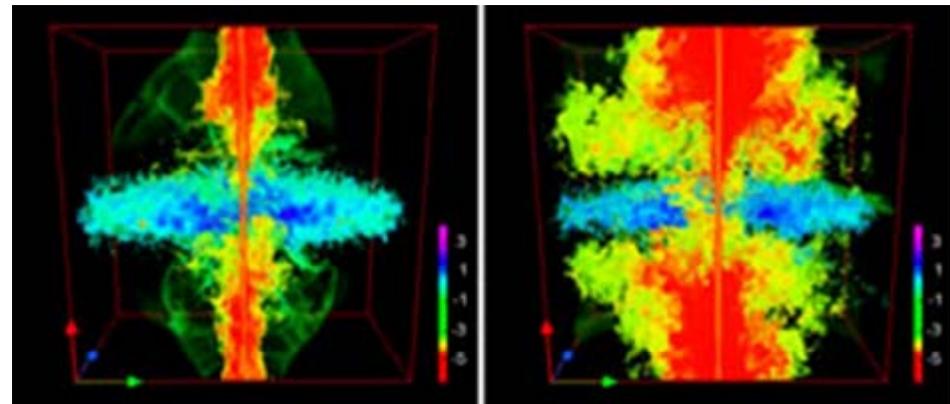
4- Feedback des AGN: efficace ou pas?

Si les AGN déclenchent la formation d'étoiles → feedback des SN?



Les vents AGN ne suffisent pas à stopper la SF

Starburst dans un anneau



Feedback positif par compression du gaz
Gaibler et al 2012

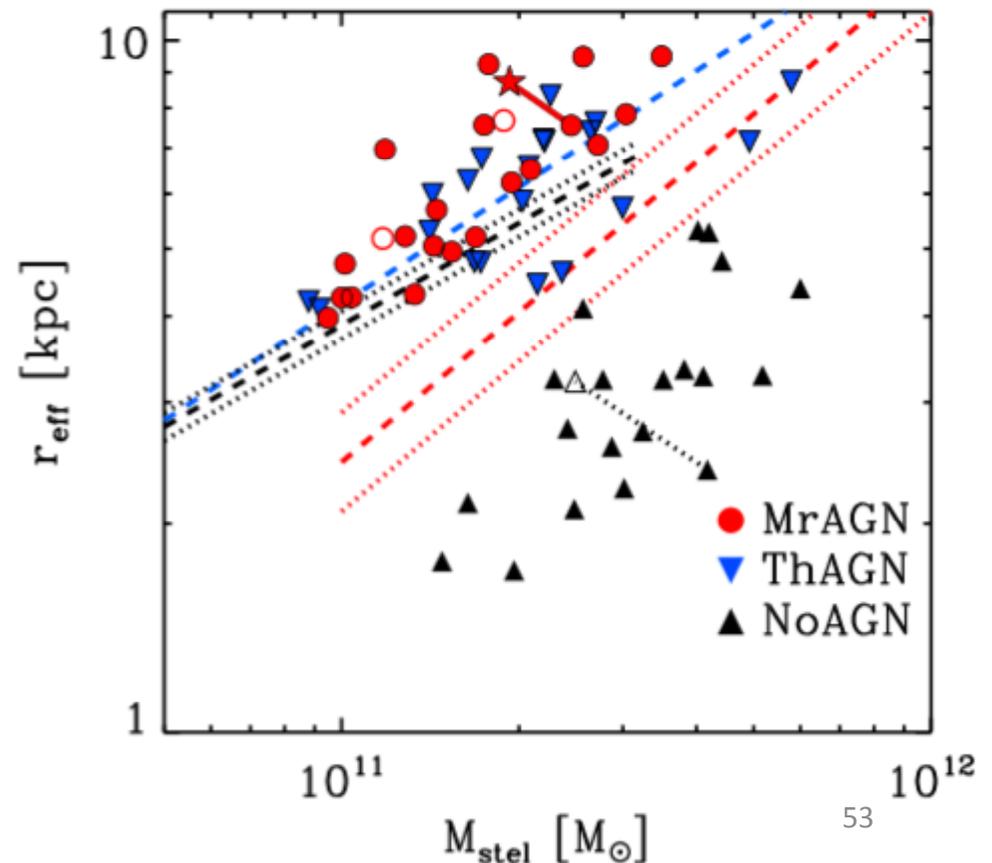
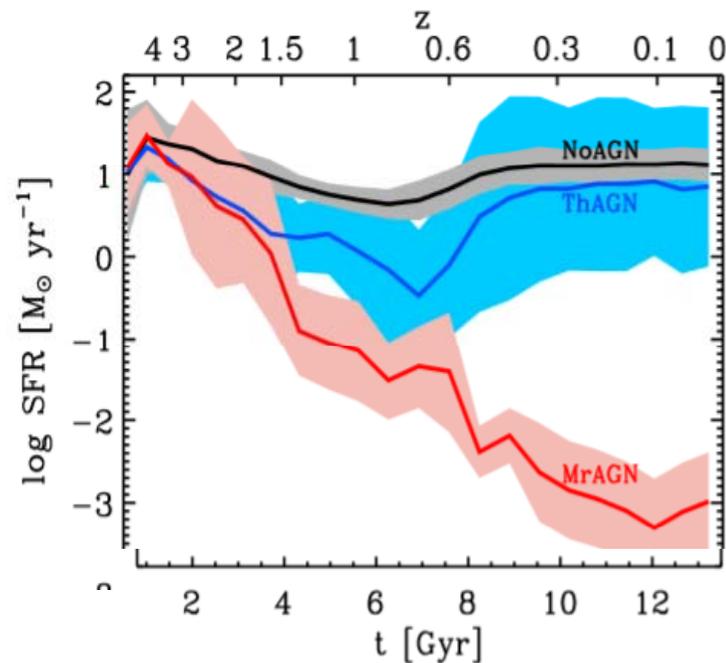
Efficacité du feedback (modèles)

Le feedback à la fois thermique et cinétique construit la relation M - σ
Deux fois moins de baryons en étoiles

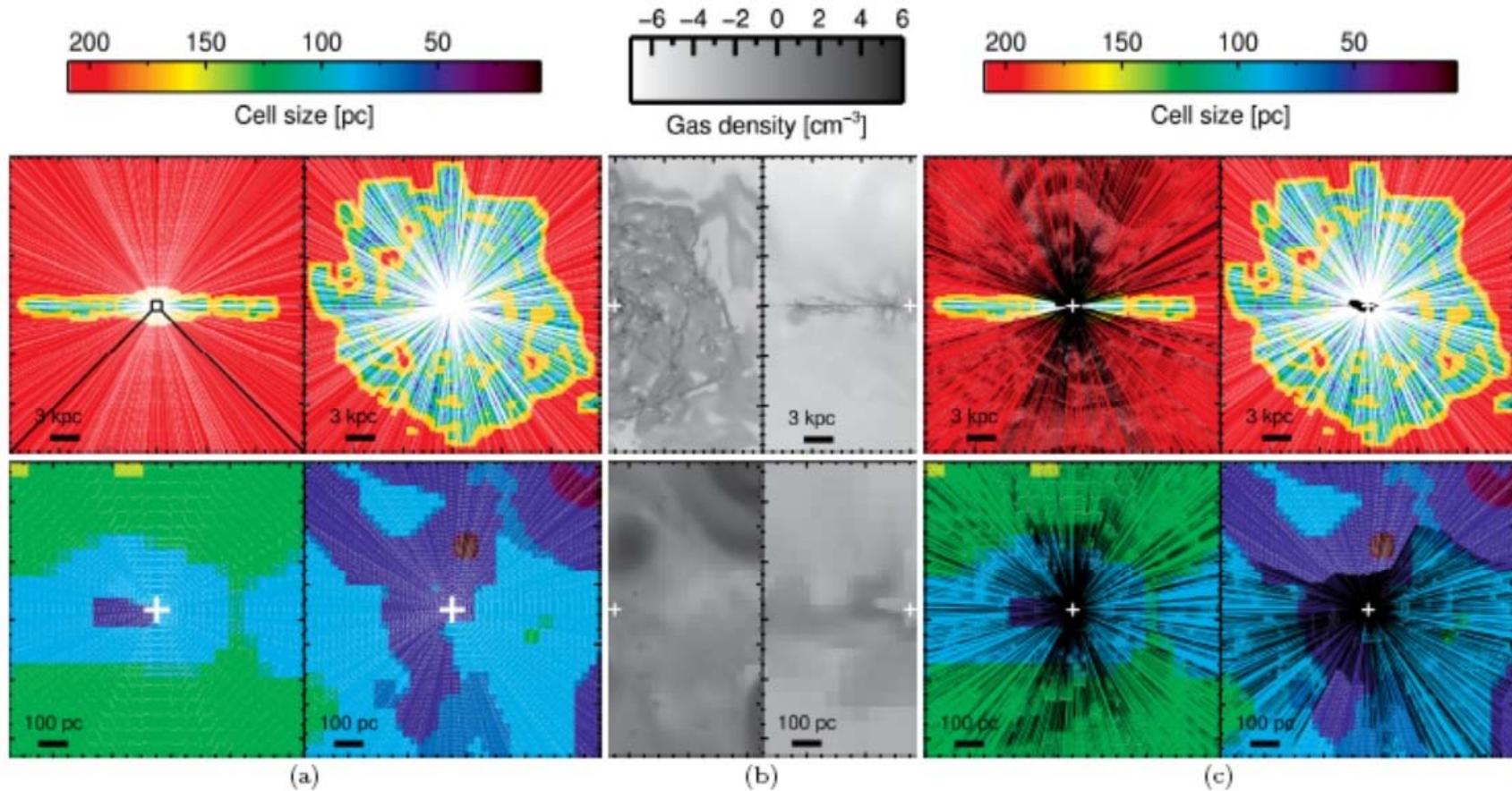
Feedback mécanique + radiatif

est efficace pour réduire
la formation d'étoiles

Choi et al 2015

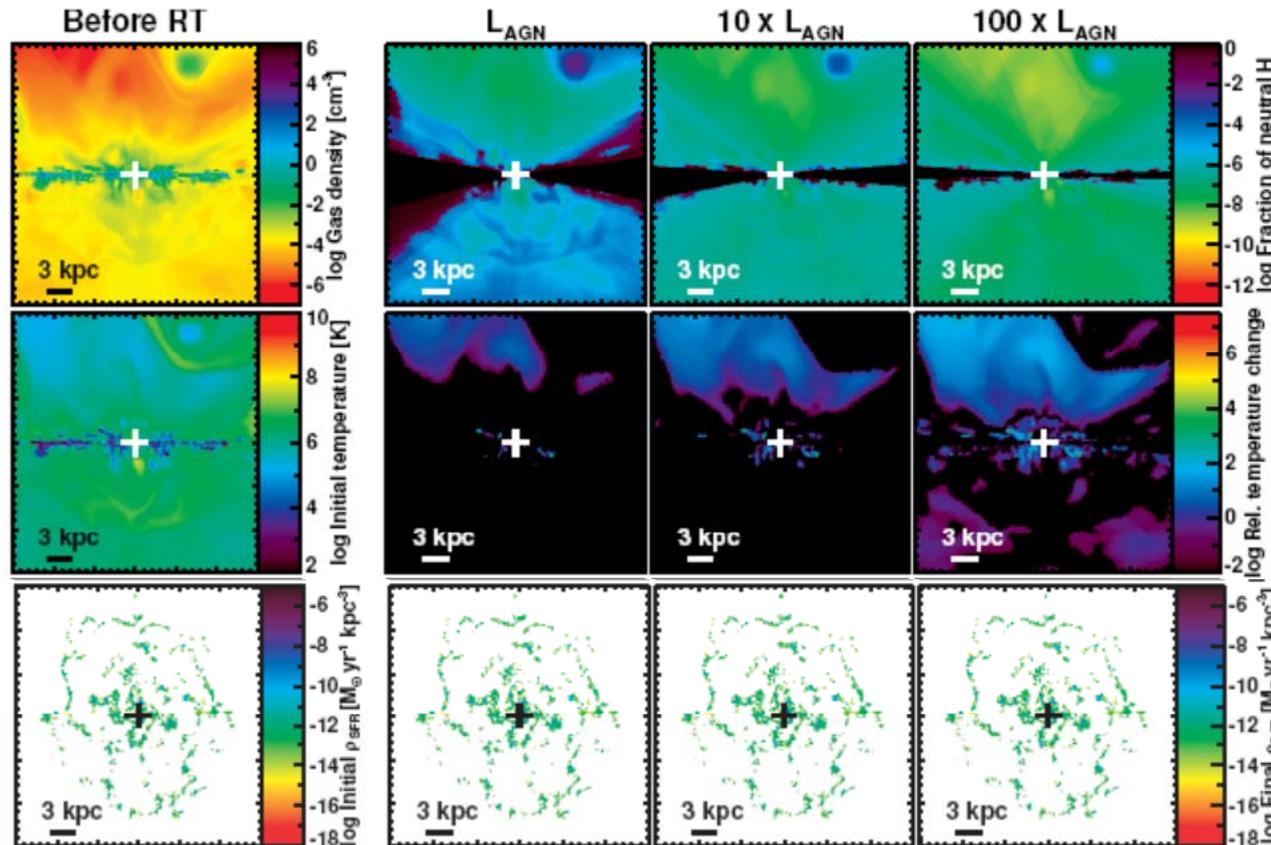


... ou inefficace (modèles)



Feedback négligeable dans les simulations avec ionisation +transfert de rayonnement *Roos et al 2015*

Effet négligeable sur la formation d'étoiles



Ionisation et chauffage de la phase diffuse

Nuages denses peu affectés

Malgré des flots sortants
3-10 x SFR

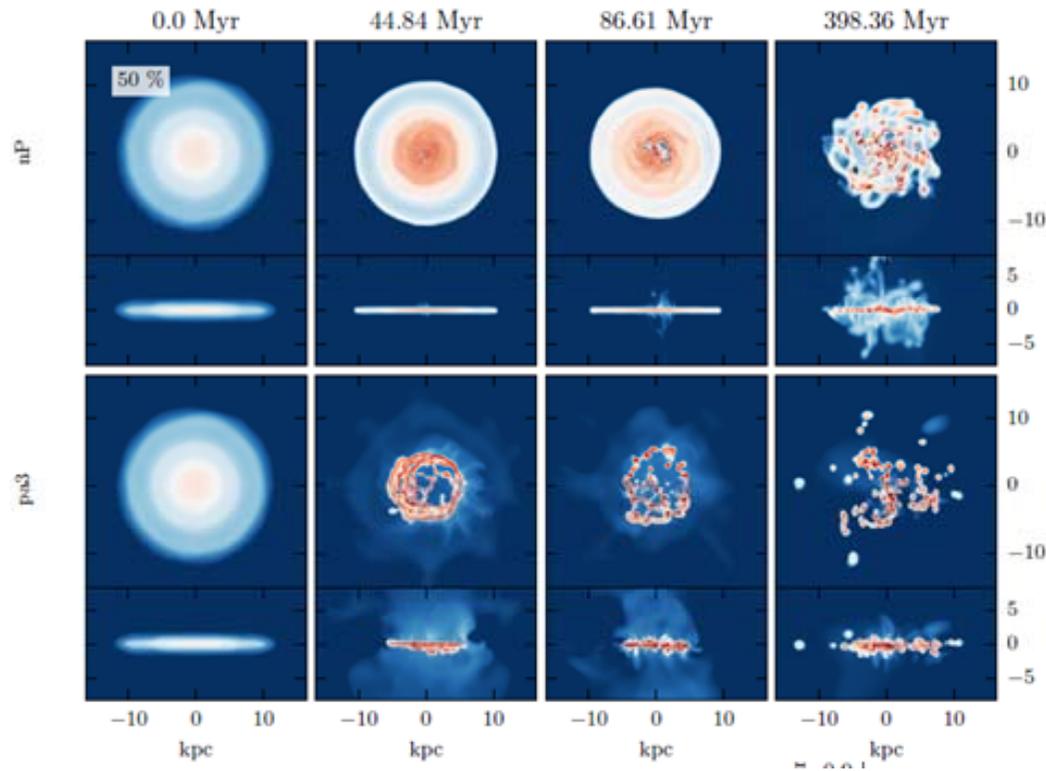
Effet négligeable sur la SF

$$L_{\text{AGN}} = 10^{44.5} \text{ erg/s}$$

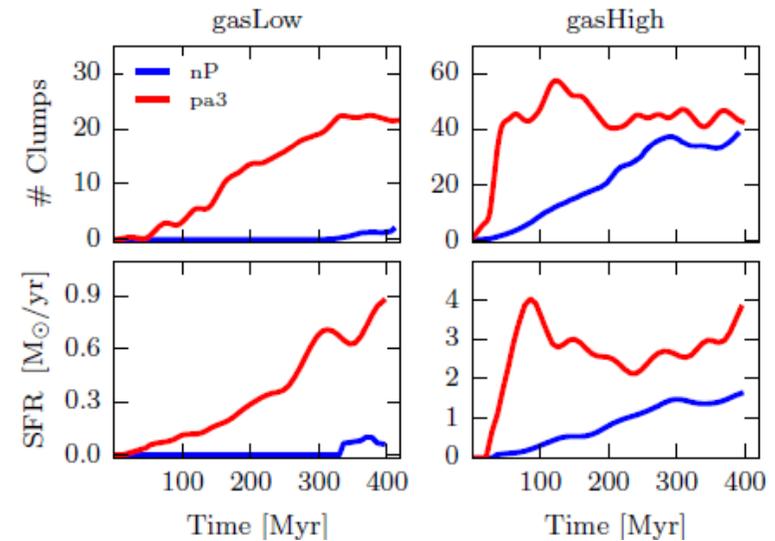
Seulement $r < 40 \text{ pc}$ est concerné, et seulement le gaz diffus

*Roos et al 2015, Vogelsberger et al 2013, 2014, Illustris
Rosdahl et al 2013, RAMSES-RT*

Parfois déclenche la formation d'étoiles

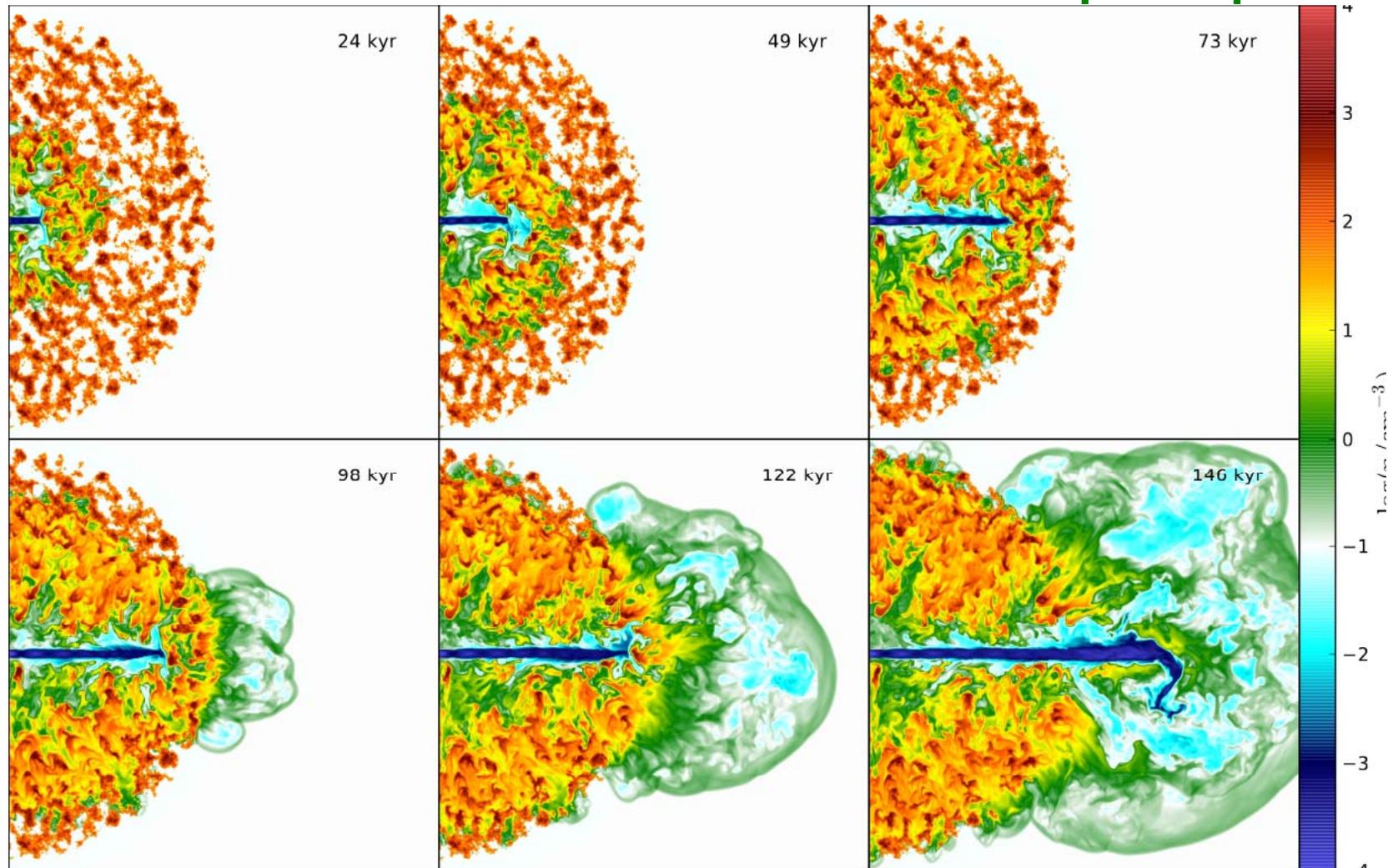


L'AGN procure un excès de pression qui produit plus de fragmentation du gaz moléculaire



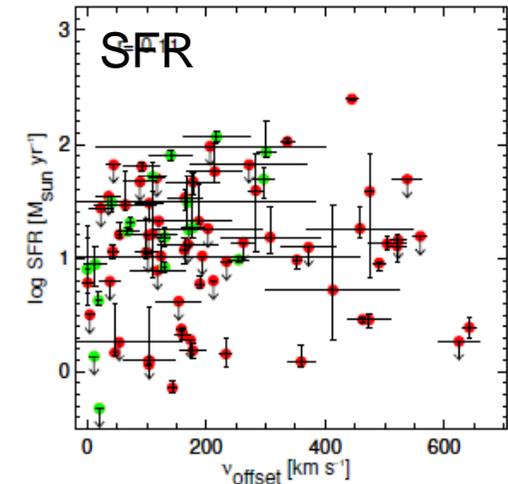
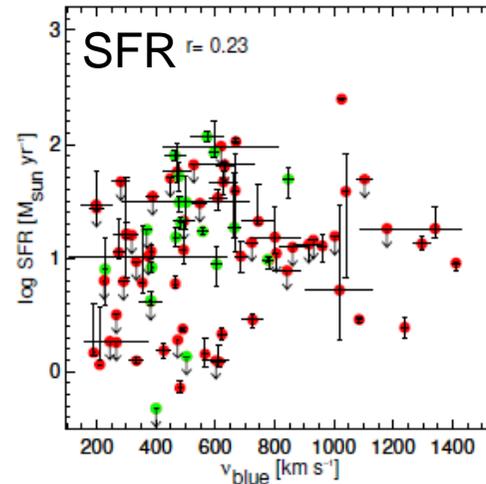
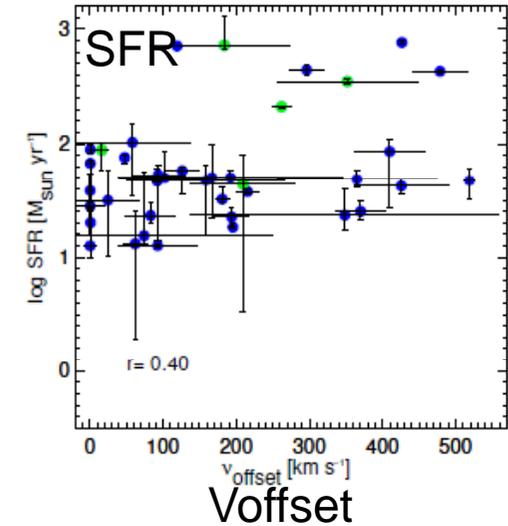
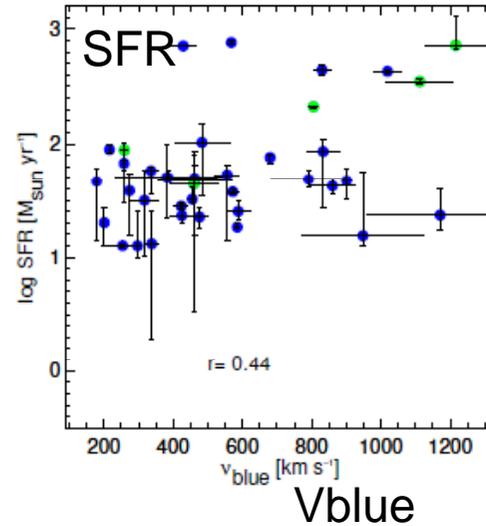
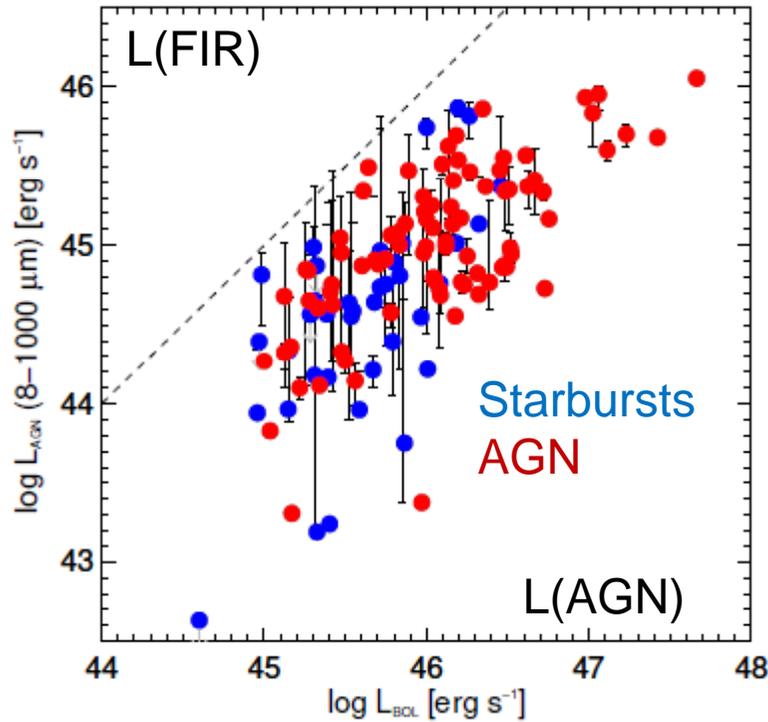
Bieri et al 2015

Mode Radio: structure fractale 2pc-1kpc



Jets relativistes efficaces; Influence de la porosité
Wagner & Bicknell 2011

Feedback inefficace (observations)



224 quasars $z < 1$ pas de relation entre SFR et V_{flot}

AGN feedback pas évident

→ Soit deux échelles de temps différentes, soit feedback positif aussi

Conclusions

- Mécanismes: mode Quasar (vents relativistes), AGN lumineux
Ou mode Radio (jets), pour les AGN peu lumineux, bas z
- Flots moléculaires observés très fréquemment, autour des AGN,
 $v=200-1200\text{km/s}$ $10^7-10^9 M_{\odot}$, flot sortant/formation d'étoiles= 1-5
- Flot conservant l'énergie: augmentation du moment $p \sim 20 L_{\text{AGN}}/c$
Cependant, **pas efficace pour stopper** la formation d'étoiles
- Le mode radio est très efficace dans les amas pour modérer le refroidissement: action mécanique des jets, accrétion de gaz froid