

L'ALIMENTATION DES TROUS NOIRS

Santiago GARCIA-BURILLO

Observatorio Astronómico Nacional (OAN)-Madrid, Espagne

LA RÉTROALIMENTATION DES TROUS NOIRS

Santiago GARCIA-BURILLO

Observatorio Astronómico Nacional (OAN)-Madrid, Espagne

LA RÉTROALIMENTATION DES TROUS NOIRS

COEVOLUTION GALAXIES-TROUS NOIRS

Santiago GARCIA-BURILLO

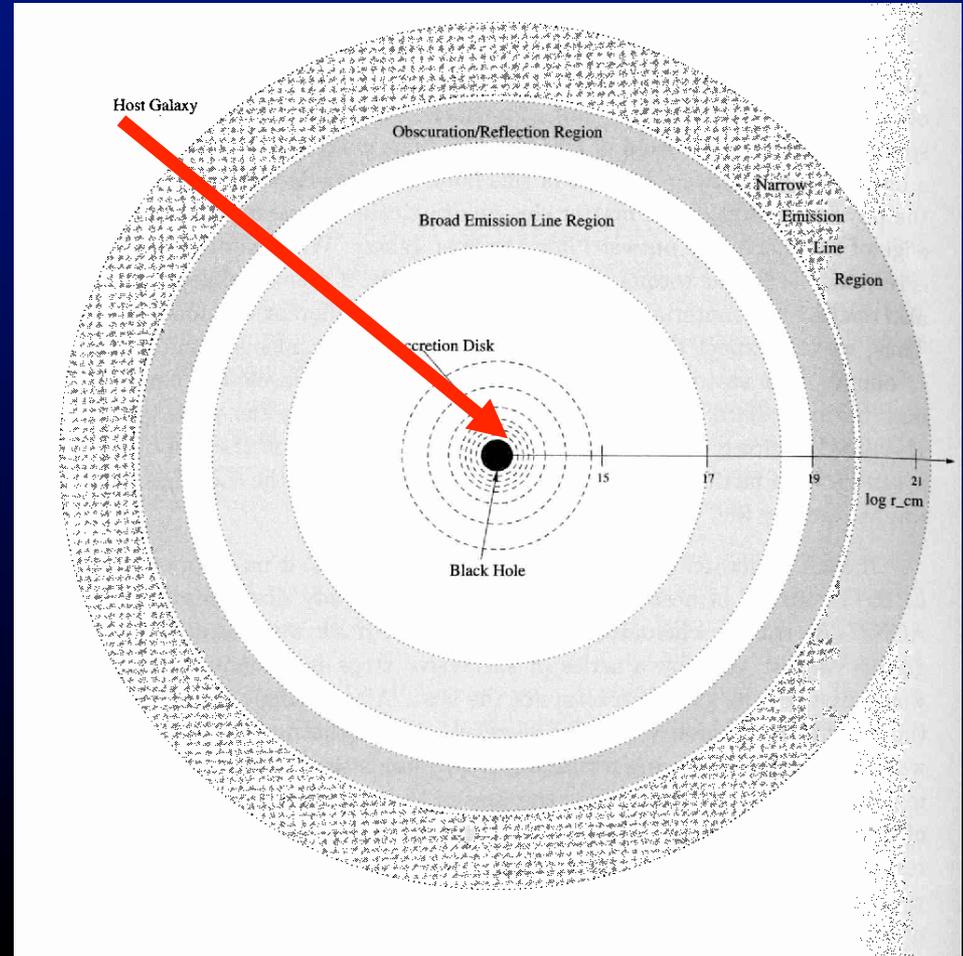
Observatorio Astronómico Nacional (OAN)-Madrid, Espagne

COMMENT ALIMENTER LE MONSTRE?

➔ Les trous noirs sont alimentés à partir de gaz qui se trouve à l'origine à des distances de \sim kpc dans le disque
Presque tout le moment angulaire du gaz doit être transféré

Un 'long' trajet qui relie des distances \sim kpc avec des distances $\sim 10^6$ - 9 plus petites: le rayon de l'horizon du trou noir

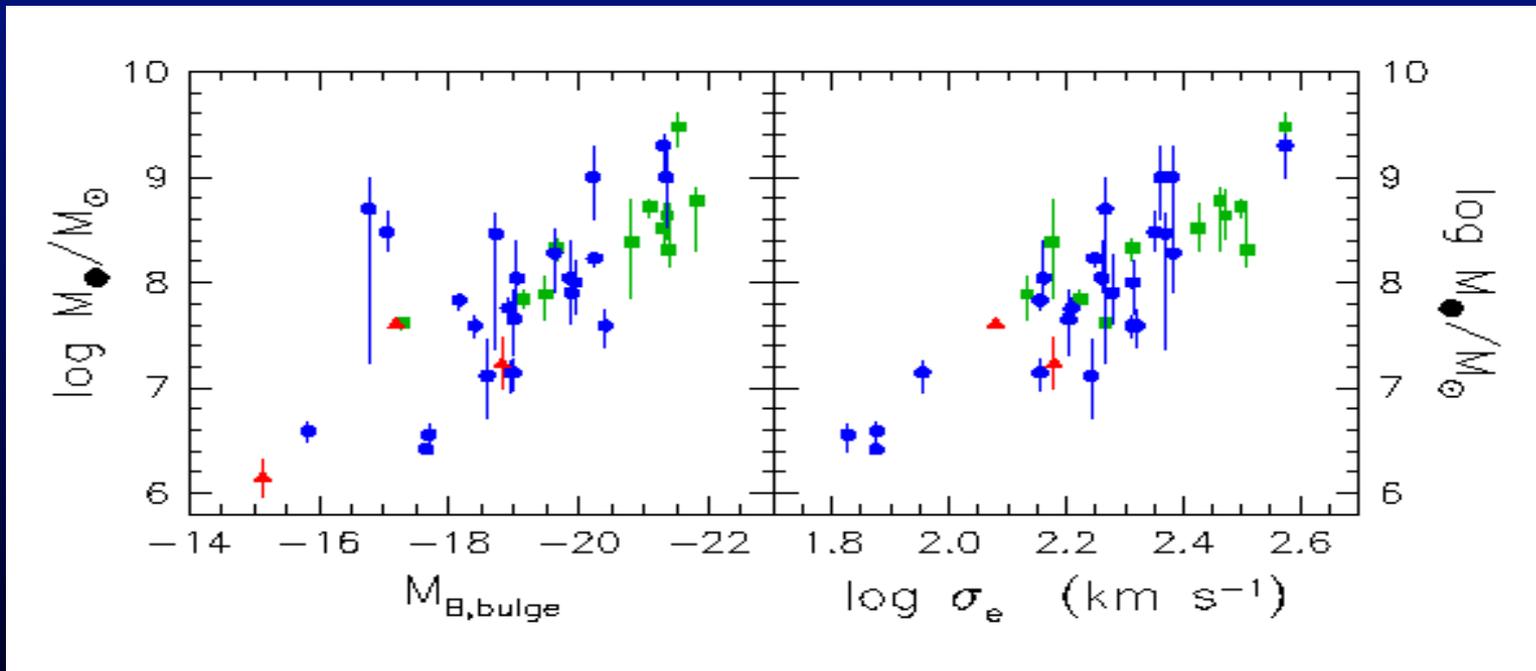
$$R_H \sim (0.1-10^2) \times \text{UA}$$



DÉMOGRAPHIE DES TROUS NOIRS

Les trous noirs super-massifs (SMBH) sont un équipement standard des sphéroides galactiques (bulbes) (AGNs et non-AGNs)

Corrélations entre M_{bh} - M_{bulbe} ou entre M_{bh} - σ



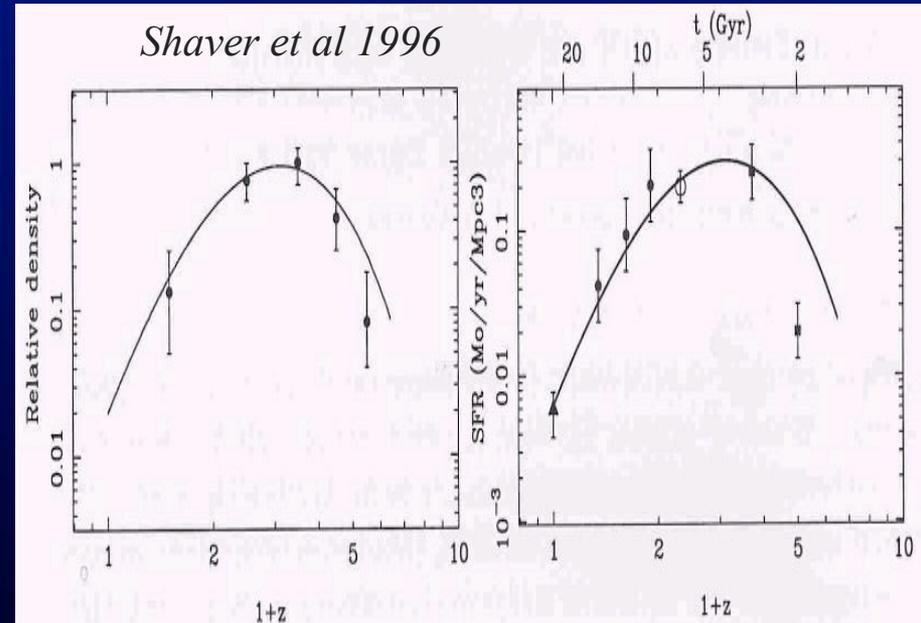
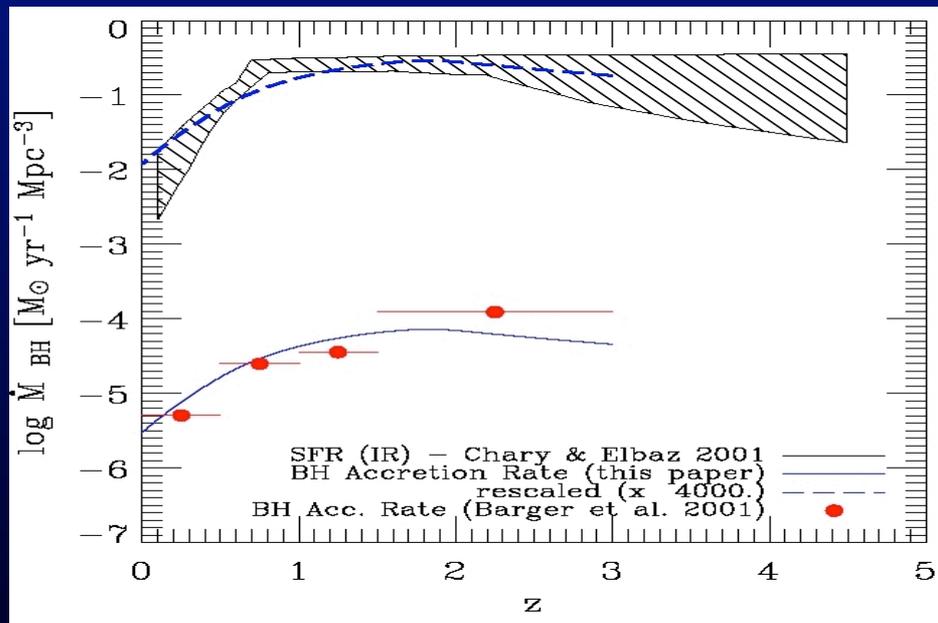
Magorrian et al 1998, Gebhardt et al 2000

Ces corrélations suggèrent que l'alimentation des trous noirs et la formation d'étoiles sont liées: $M_{bh} \sim 1/700 \times M_{bulbe}$

LA CONNEXION SF-AGN

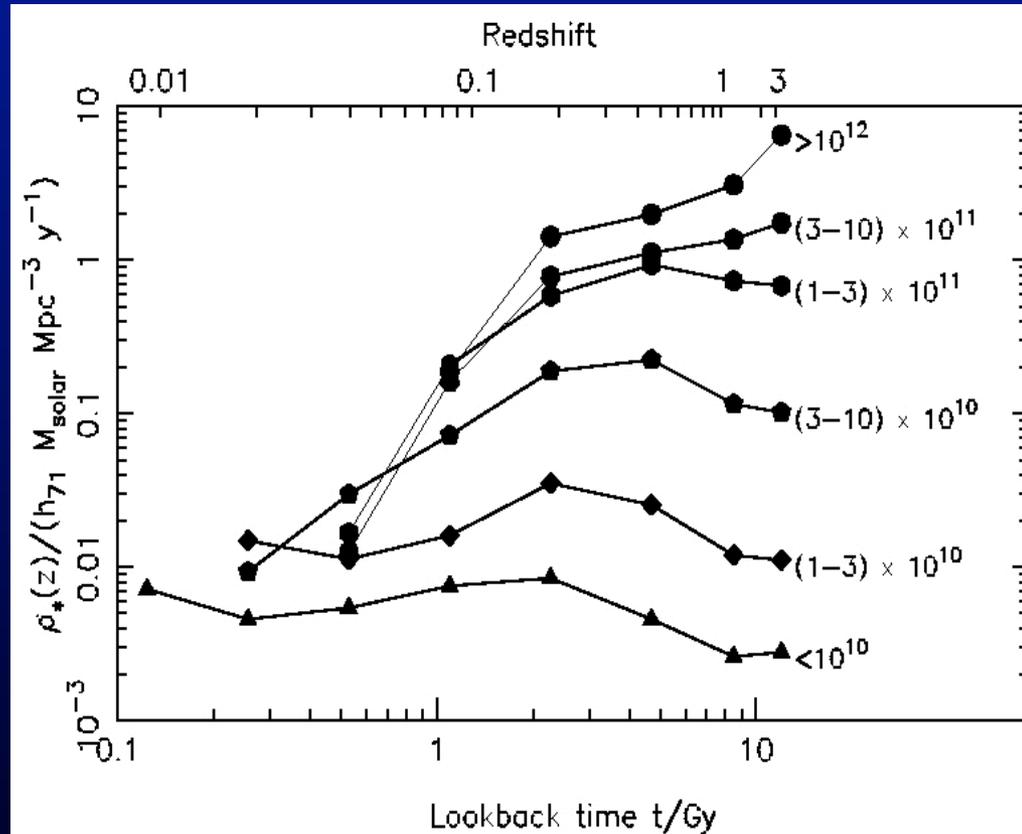
Les 'quasars' (AGN plus extrêmes) sont plus abondants (x100) à des $z=2-3$, par rapport à l'univers local à $z=0$

C'est le même profil de la densité de SFR en fonction du décalage z !



Sur des échelles de temps cosmologiques l'alimentation des trous noirs et la formation d'étoiles sont reliées...**malgré les différentes échelles associées aux deux phénomènes!**

LA CONNEXION SF-AGN: ANTI-HIÉRARCHIQUE?



Heavens et al 2007

Les trous noirs les plus massifs et les galaxies les plus massives se forment surtout quand l'univers est jeune!

Effet de la rétro-alimentation de l'activité?: **AGN feedback**

LES TROUS NOIRS ET LES AGN

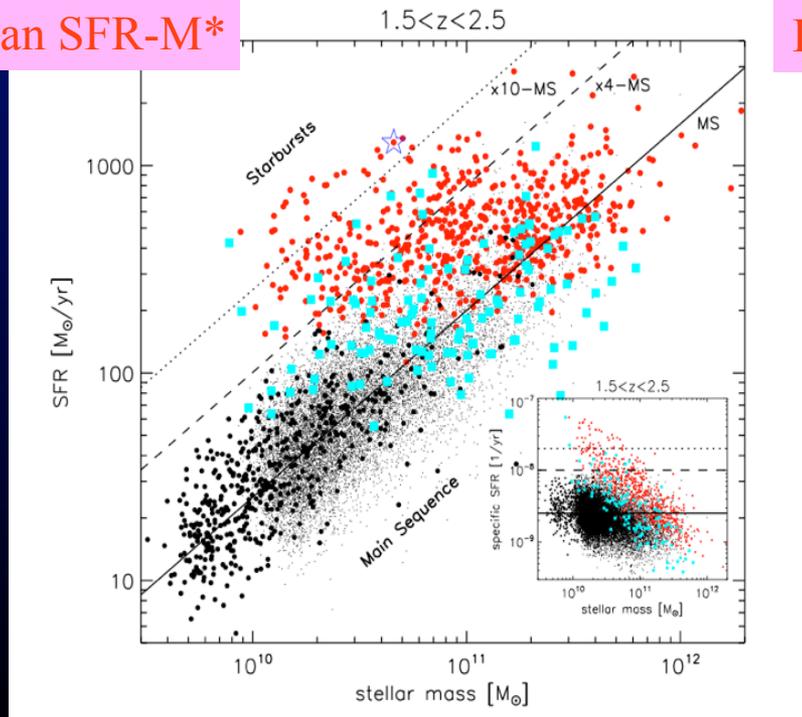
- Seulement 10% des galaxies sont actives à présent, mais les trous noirs sont 'partout' à $z=0$
- Si toutes les galaxies en ont, la période d'activité doit être courte \sim 10 millions d'années
- Quels sont les mécanismes qui déclenchent l'alimentation des trous noirs?
- Quelle est la durée de vie de ces mécanismes?
- Ce sont les mêmes mécanismes à tous les redshifts?

LES MOTEURS DE L'ÉVOLUTION GALACTIQUE

- ➔ Évolution 'violente' : fusions et **interactions** -> 'En dehors de la Séquence Principale (Main Sequence=MS)'. Formation Stellaire (FS) rapide (starbursts): $T \sim 100$ Myr
- ➔ Évolution 'tranquille' : à long terme **par accrétion** -> 'Sur la Séquence Principale (MS)'. La FS s'étale sur des $T \sim 1-2$ Gyr.

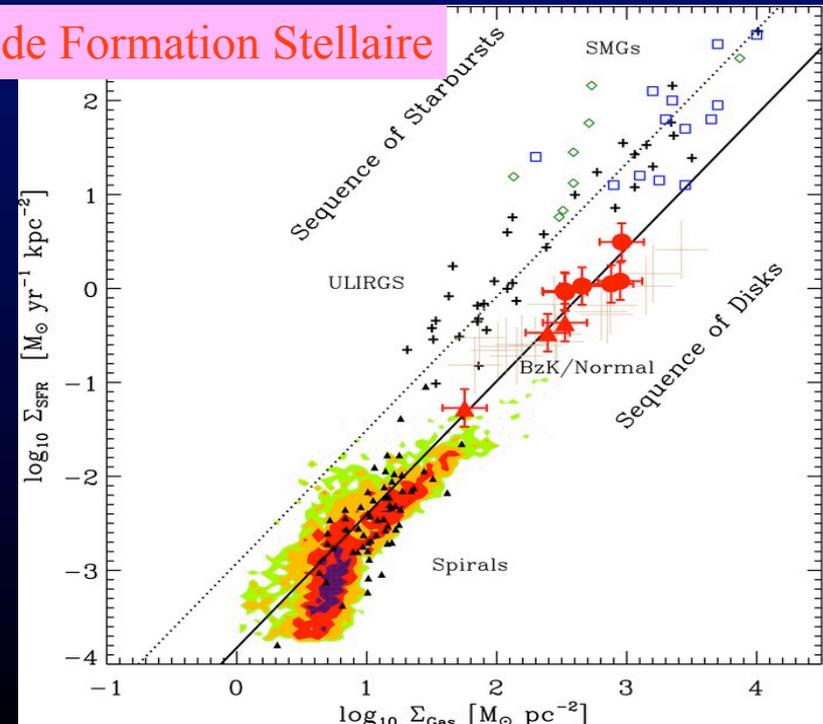
La plupart de la FS à des redshifts < 2 a lieu dans des disques galactiques sur la MS, maintenue par un flot continu de gaz: *l'évolution séculaire dominerait à des redshifts < 2 ?*

Plan SFR- M^*



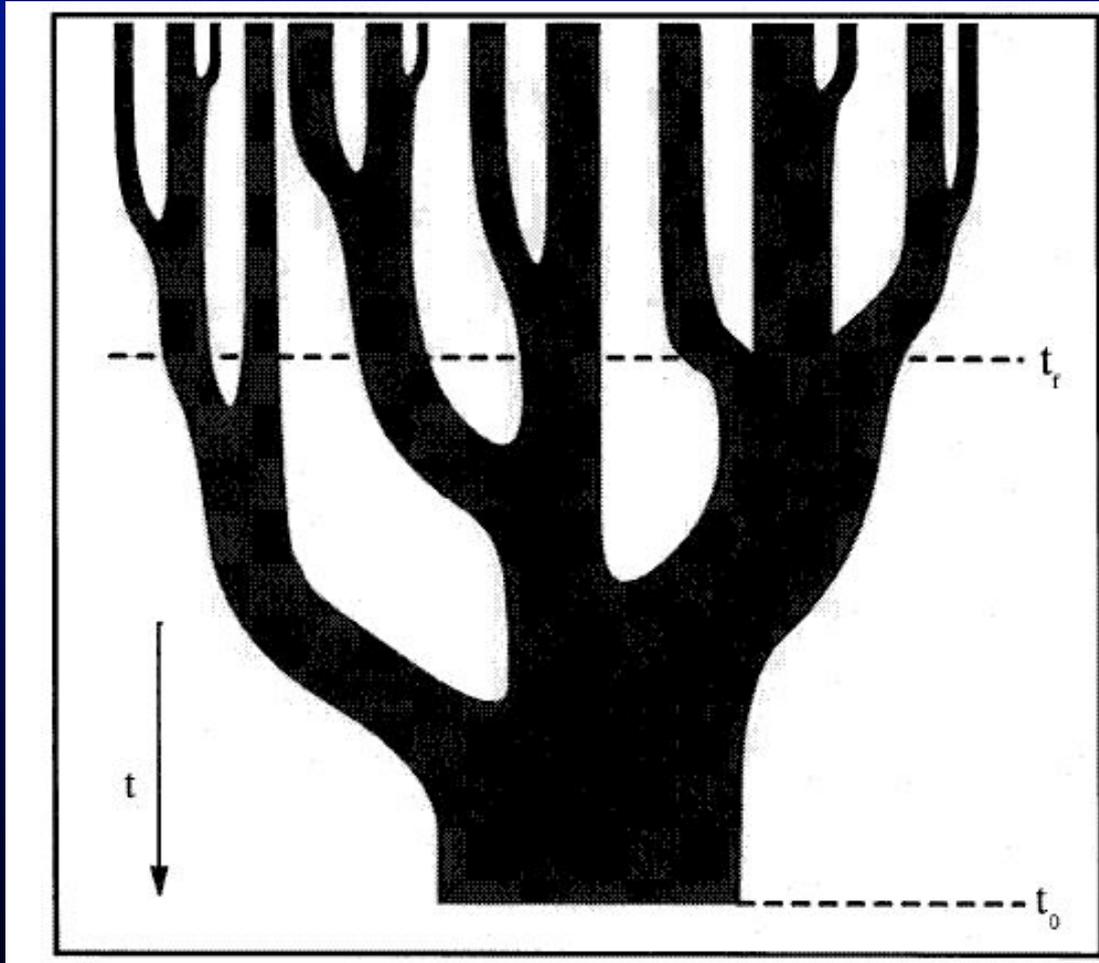
Rodighiero+2011

Lois de Formation Stellaire



Daddi+2010, Genzel+2010, Garcia-Burillo+2012

INTERACTIONS ET FUSIONS



Les galaxies sont plus petites et plus nombreuses dans le passé

Les fusions, plus fréquentes dans l'univers jeune, font grandir en taille et en masse les galaxies:

scénario hiérarchique

ALIMENTATION DES TROUS NOIRS: INTERACTIONS?

Canalizo+01; Urrutia+08; Zakamska+06; Chiaberge+15

La majorité des quasars sont observés dans les fusions de galaxies



Évidence de cette corrélation dans les QSOs et Radio Galaxies: AGN extrêmes

Mais cette évidence est faible pour d'autres populations d'AGN à $z < 2$

(e.g. *Cisternas+11; Kocevski+12; Schawinski+11, 12; Mechtley+15*)

SIMULATIONS: RÔLE DES INTERACTIONS

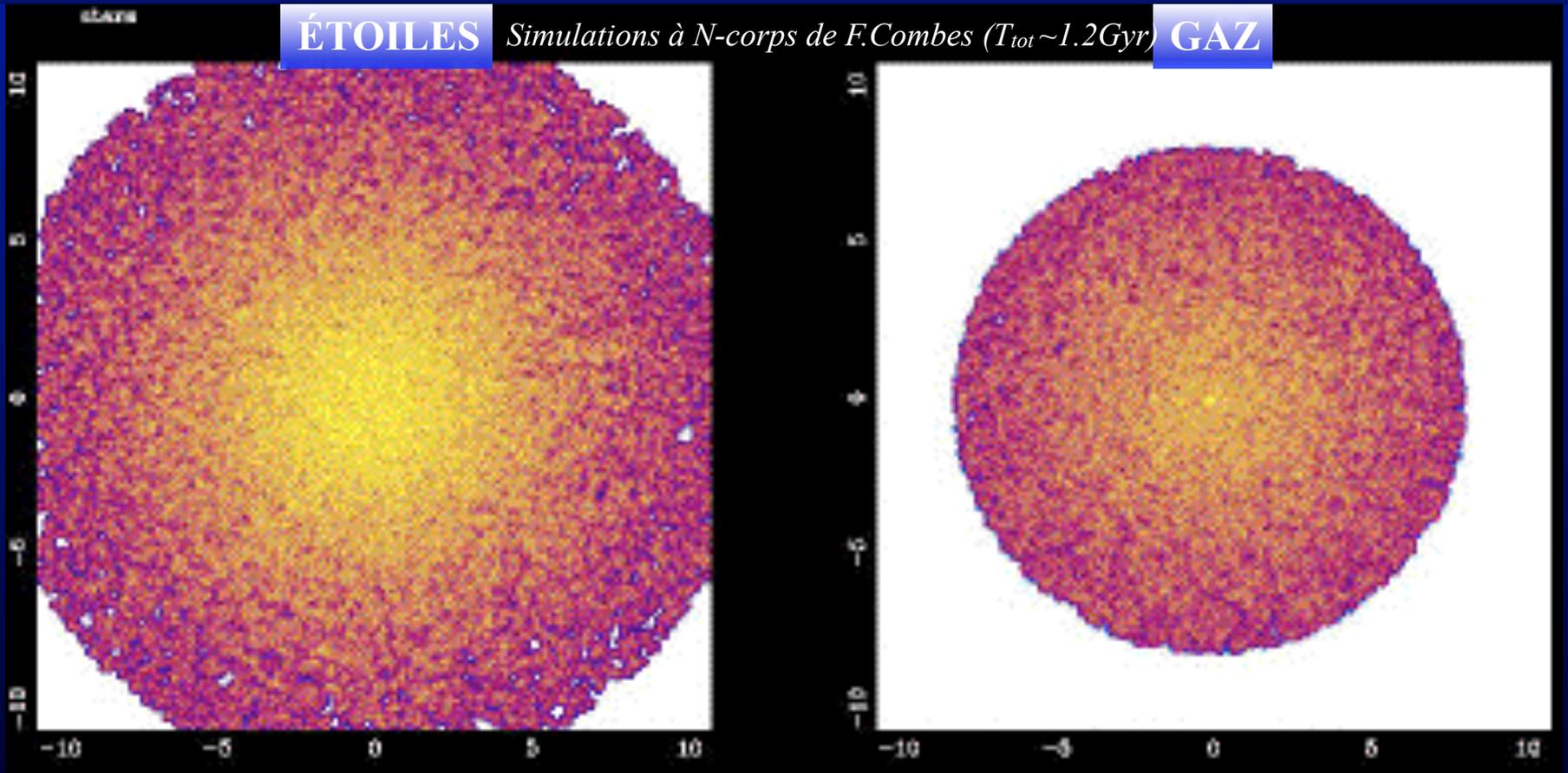
Hopkins & Quataert+2010

Simulations à N corps suivant l'accrétion de gaz à différentes échelles au cours d'une fusion



➔ Même après une fusion majeure, ce sont les instabilités du disque à différentes échelles qui amènent le gaz vers le trou noir : barres, barres nucléaires, spirales, modes de décentrement $m=1$... ➔ **l' evolution séculaire est clé!**

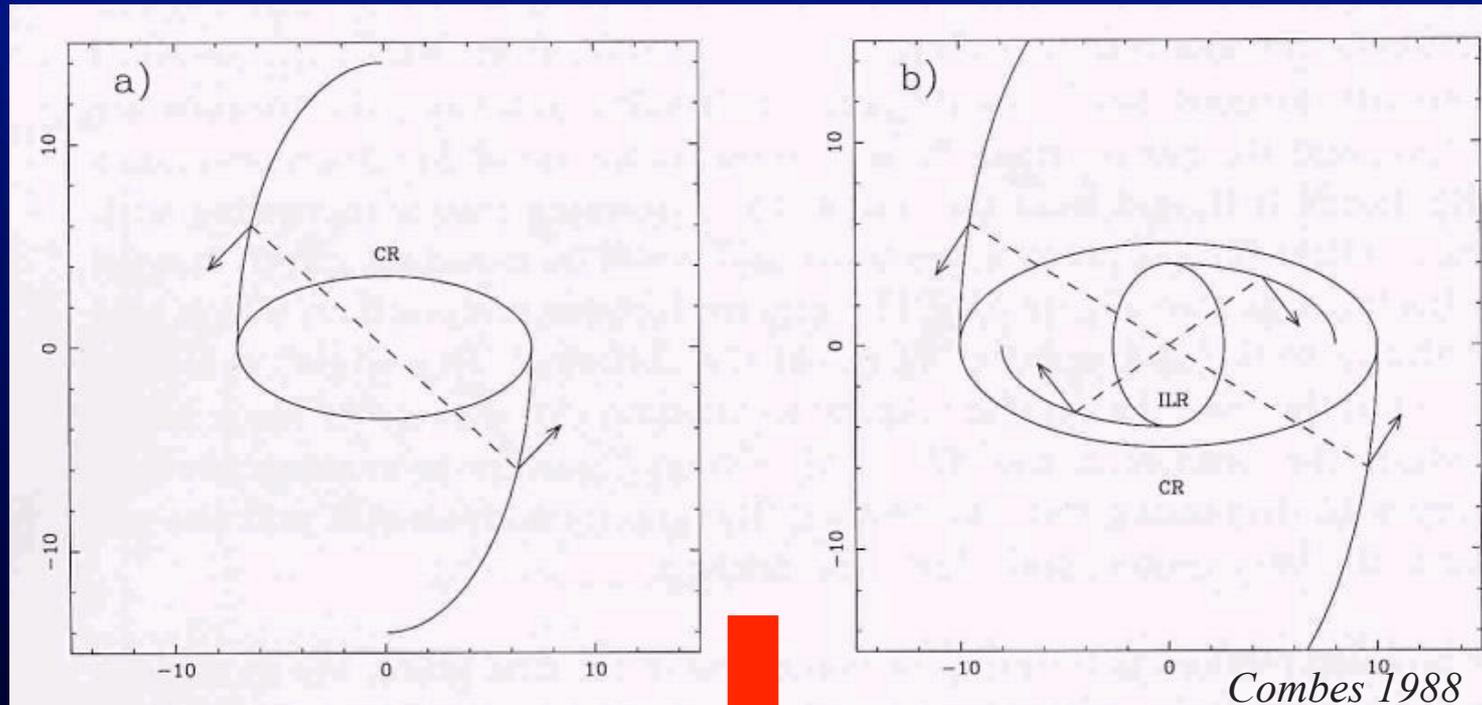
BARRES: MOTEURS DE L'ÉVOLUTION SÉCULAIRE



- Contrairement aux ondes spirales, les barres stellaires durent longtemps $> 1-8 \text{ Gyr}$
- Les barres sont formées et reformées efficacement grâce à l'accrétion de gaz.
- Les barres redistribuent la matière (gaz+étoiles) dans le disque en échangeant du moment angulaire. Le gaz se précipite vers le centre.

BARRES: MOTEURS DE L'ÉVOLUTION SÉCULAIRE

Le potentiel barré soumet le gaz, qui suit des orbites inclinées par rapport aux axes de symétrie de la barre, à des forces tangentielles dont il en résulte un couple!

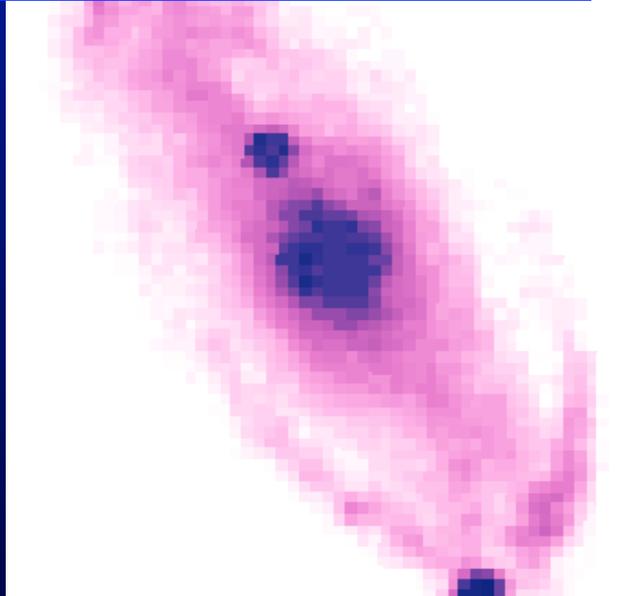


Le couple change de signe à chaque résonance: formation d'anneaux de gaz aux résonances Interne (ILR) et Externe (OLR) de Lindblad

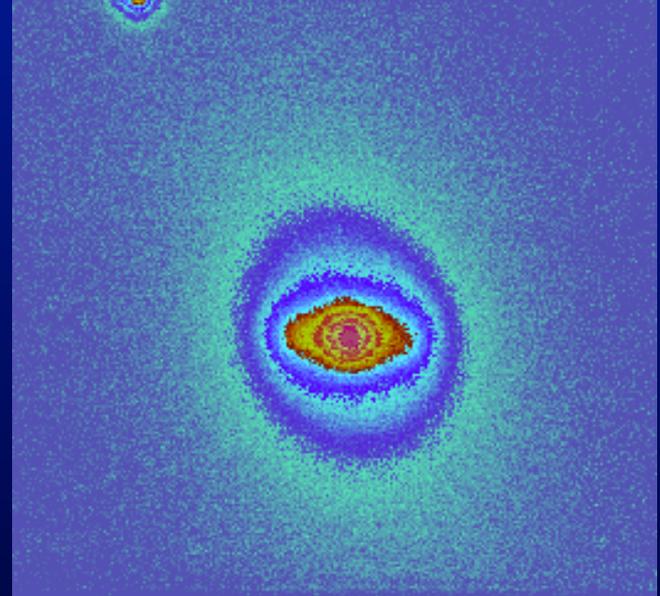
Le gaz reste à l'ILR et y forme des étoiles ('cul de sac')

BARRES SECONDAIRES EMBOÎTÉES

barre primaire FOV~108''



barre secondaire FOV~108''



NGC 5728
DSS
+CFH
Optique adaptative
NIR

Des barres nucléaires sont formées à l'intérieur des anneaux ILR des barres primaires en amenant le gaz plus près du centre comme des poupées russes.

La barre secondaire augmente sa vitesse de rotation
(Combes+2001)

BARRES ET AGN

Taux d'alimentation requis (dM/dt)

Table 1. Typical L_{bol} and \dot{M}_{bh} for QSOs and local AGN

Type of AGN (1)	$L_{\text{bol}}^{\text{a}}$ (ergs s ⁻¹) (2)	Typical L_{bol} (ergs s ⁻¹) (3)	Typical $\dot{M}_{\text{bh}}^{\text{b}}$ (M _⊙ yr ⁻¹) (4)
QSOs	10 ⁴⁶ –10 ⁴⁸	10 ⁴⁷ –10 ⁴⁸	10–100
Seyferts	10 ⁴⁰ –10 ⁴⁵	10 ⁴³ –10 ⁴⁴	10 ⁻³ –10 ⁻²
LINERs	10 ³⁹ –10 ^{43.5}	10 ⁴¹ –10 ⁴²	10 ⁻⁵ –10 ⁻⁴

**Existe-t-il une
corrélacion entre
les barres et les
AGN?**

→ AGN extrêmes (QSOs): encore
controversée...ça dépend des populations...

→ Seyferts, LINERs: très faible, presque
inexistente

L'ALIMENTATION DES BH DANS LES GALAXIES PROCHES

Existe-t-il un mécanisme universel?

- Barres primaires, barres secondaire emboîtées, modes de décentrement, disques gauchis, ondes spirales, vents stellaires, viscosité,...
- L'efficacité de ces mécanismes est controversée d'après les différents modèles
- *Complication dans les Seyferts, LINERs:*
 - *La durée de vie d'un épisode d'accrétion peut être très courte ($T \sim 10^5$ années)*
 - *Différents mécanismes en action à différentes échelles spatiales*

Prédictions controversées des modèles...

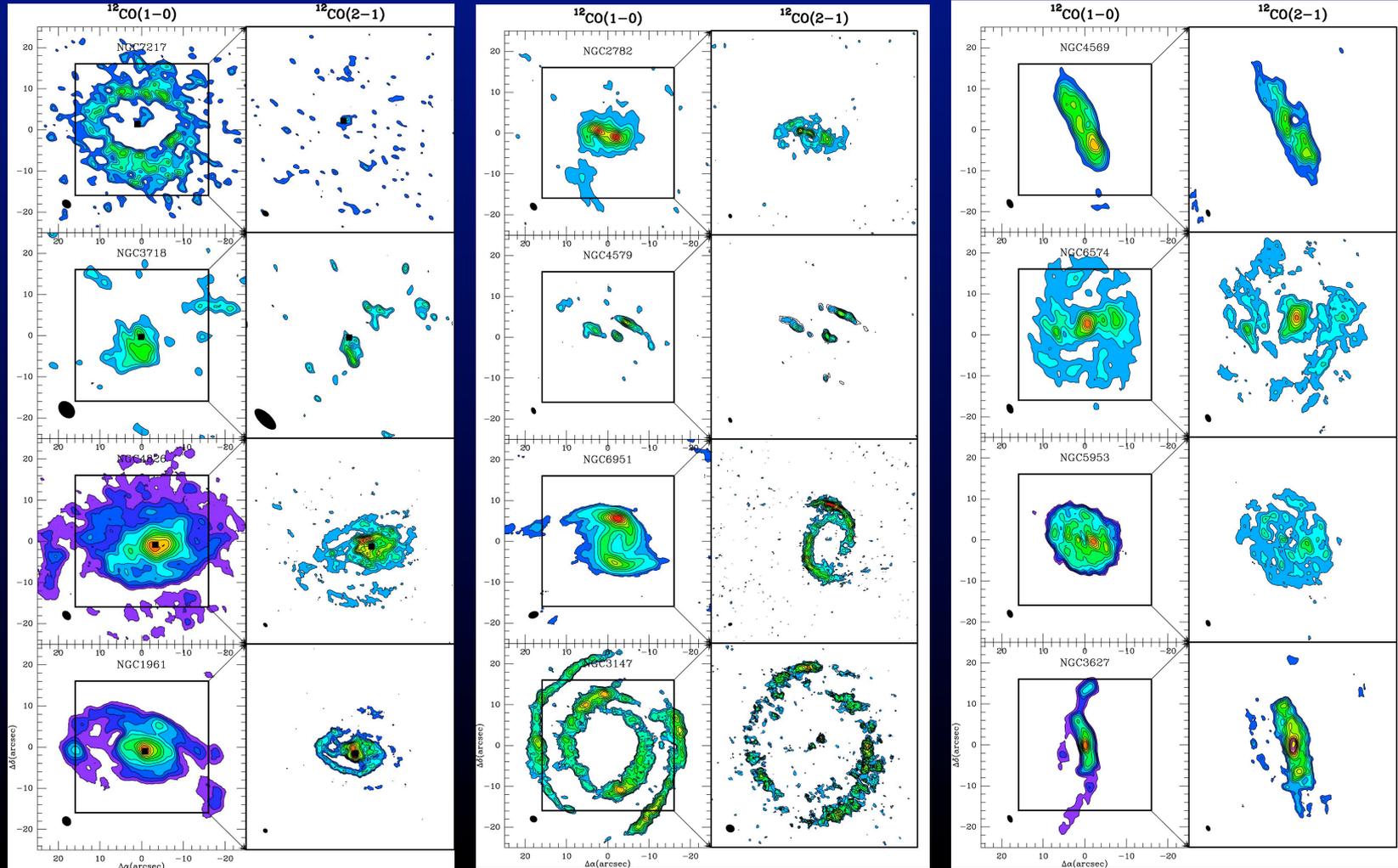
Approche empirique: cartographie des disques nucléaires des galaxies

CARTES CO DE NUGA

García-Burillo+03,+05,+09,+12; Combes+04,+09; Krips+05,+06,+07; Boone+07, Lindt-Krieg+08; Hunt+08, Casasola+08, +10,+11,+15; van der Laan+11

NUGA: Cartes en CO(1-0) et (2-1) de 25 LLAGN avec l'interféromètre de l'IRAM

Images de la distribution et dynamique du gaz moléculaire dans le \sim kpc central avec une résolution adaptée pour étudier le transfert du moment angulaire (<10 - 100 pc)($D\sim 5$ - 30 Mpc)



LE TRANSFERT DU MOMENT ANGULAIRE

García-Burillo+2005

→ Images CO : gaz moléculaire

Distribution et cinématique du gaz moléculaire: phase dominante de l'ISM dans les régions centrales

→ Images NIR: potentiel stellaire

NIR → potentiel stellaire
CO → distribution du gaz

→ Profil des couples $t(r)$ exercés par le potentiel sur le gaz

$$t(r) = \frac{\int_{\theta} N(x, y)(x.F_y - y.F_x)}{\int_{\theta} N(x, y)}$$

LE TRANSFERT DU MOMENT ANGULAIRE

García-Burillo+2005

→ Images CO : gaz moléculaire

Distribution et cinématique du gaz moléculaire: phase dominante de l'ISM dans les régions centrales

→ Images NIR: potentiel stellaire

NIR->potentiel stellaire

CO->distribution du gaz

→ Profil des couples $t(r)$ exercés par le potentiel sur le gaz

$$\epsilon = dL/dt \times 1/L \times T_{rot} = t(r)/L \times T_{rot}$$

'SMOKING GUNS' : $t < 0$

García-Burillo & Combes 2012

★ $\sim 1/3$ LLAGNs montrent $t(r) < 0$ jusqu'à $r < 20-100$ pc

→ Modes stellaires emboîtés (ovales, barres nucléaires)

e.g.; NGC2782, NGC4579 (Hunt+08; García-Burillo+09)

→ Barres primaires sans ILRs *e.g.; NGC3627 (Casasola+11)*

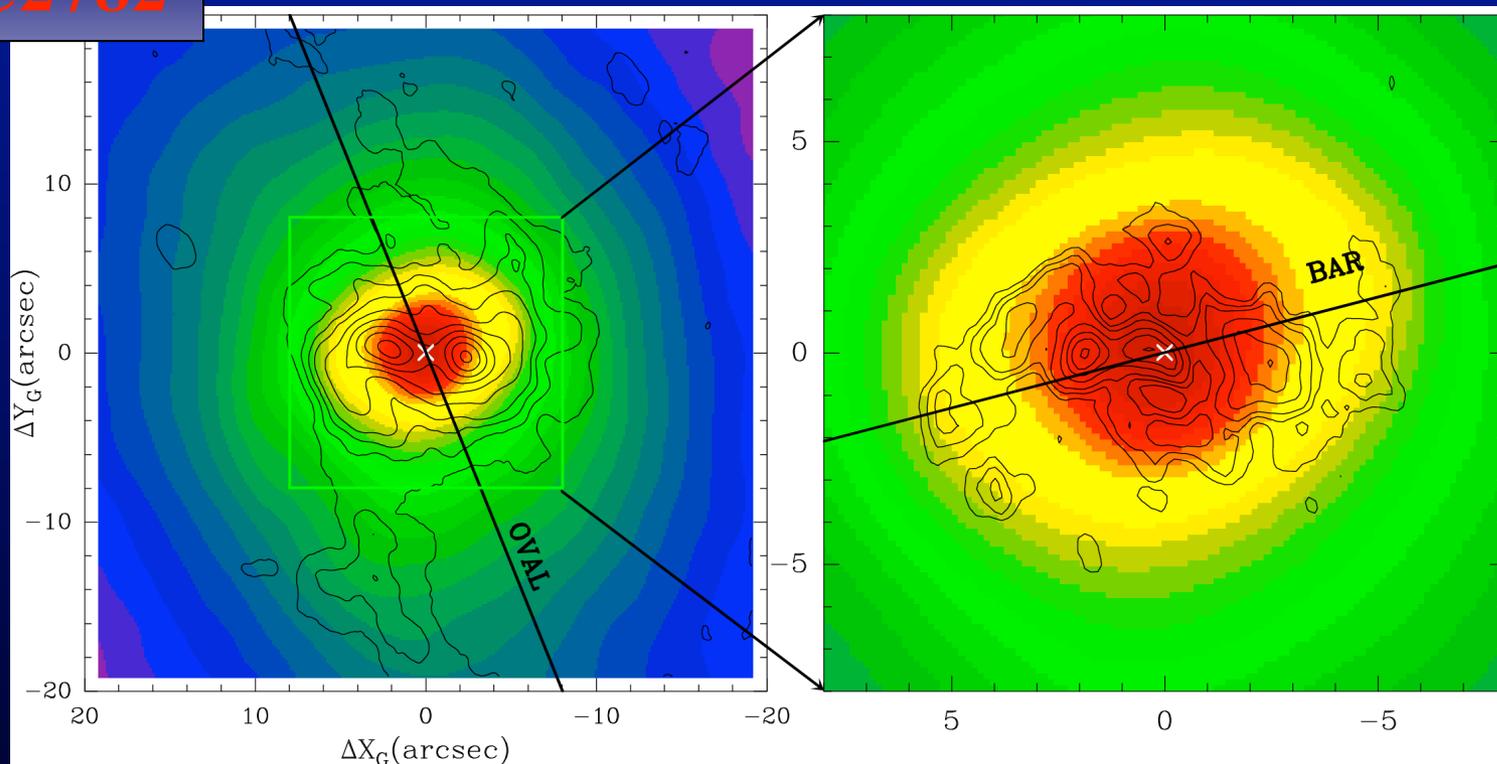
→ Spirales nucléaires dans le gaz: influence du BH

e.g.; NGC1156 (Combes+14)

'SMOKING GUNS' : $t < 0$

NGC2782

Hunt+2008



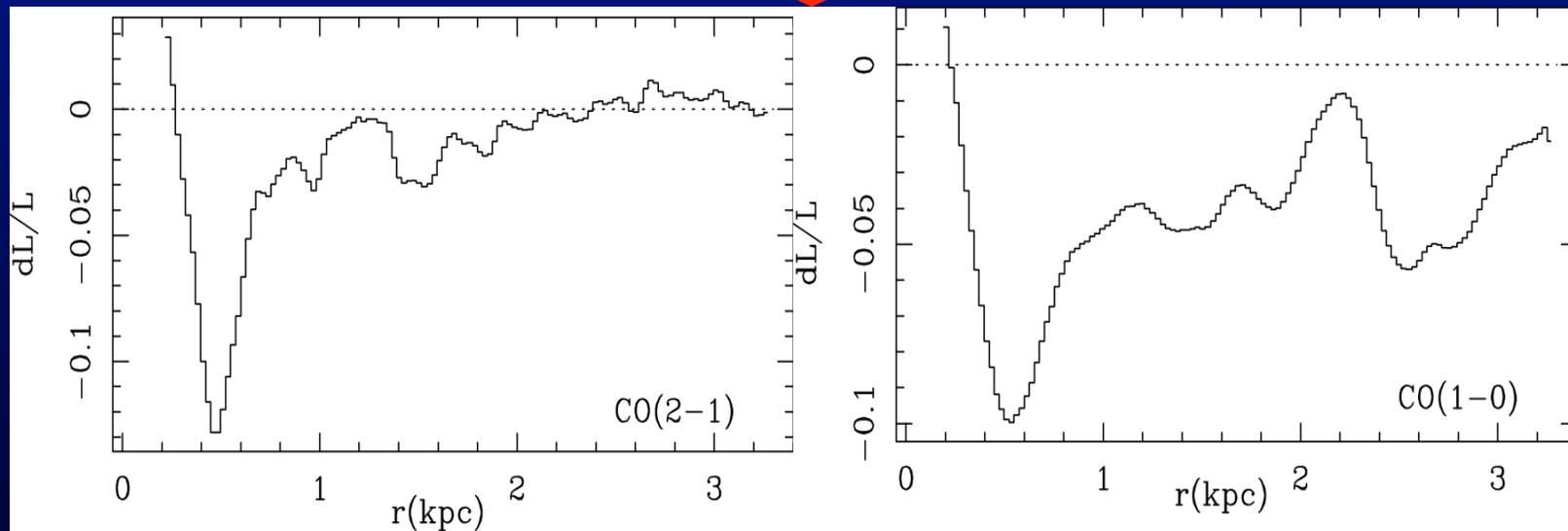
- ➔ Potentiel stellaire avec deux barres emboîtées:
Ovale externe ($D_{oval} \sim 6 \text{ kpc}$) + barre nucléaire ($D_{bar} \sim 1.5 \text{ kpc}$)
- ➔ Barre nucléaire découplée: gaz à l'intérieur de l'ILR_{ovale}!

'SMOKING GUNS' : $t < 0$

NGC2782

Hunt+2008

Profil des couples $t(r)$

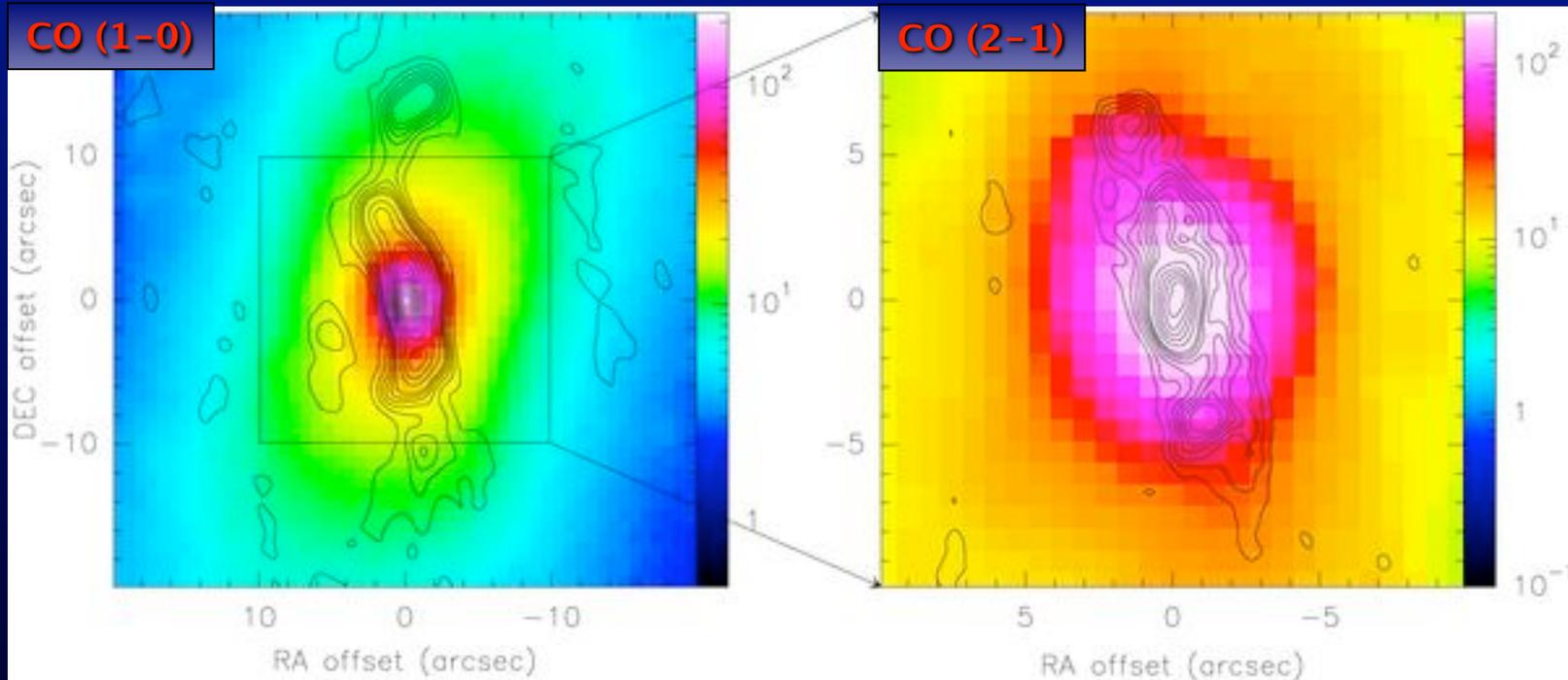


➔ Couples systématiquement < 0 de $r=3\text{kpc}$ à $r=200\text{pc}$

'SMOKING GUNS' : $t < 0$

NGC3627

Casasola+2011



➔ Barre stellaire sans ILR ($D_{bar} \sim 6$ kpc)

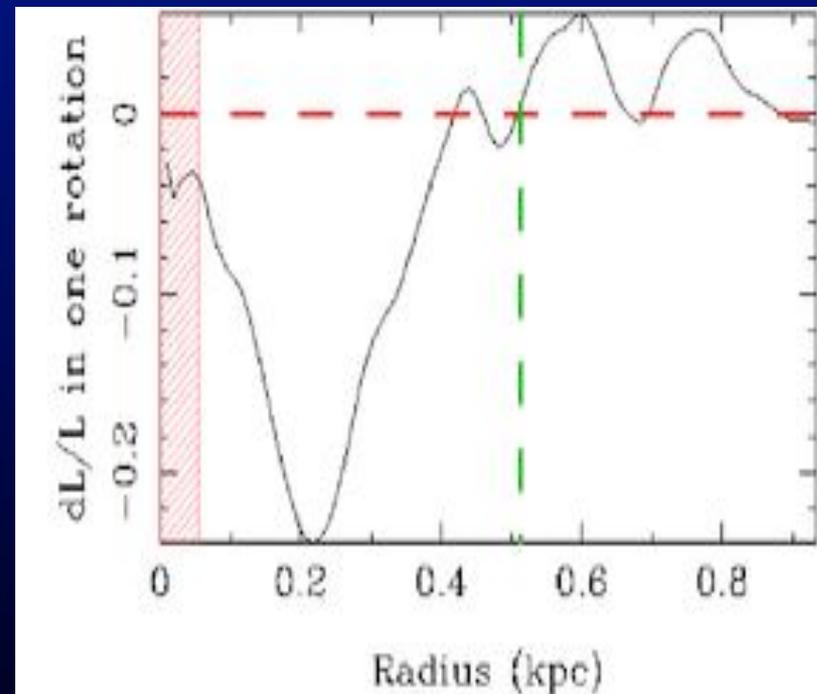
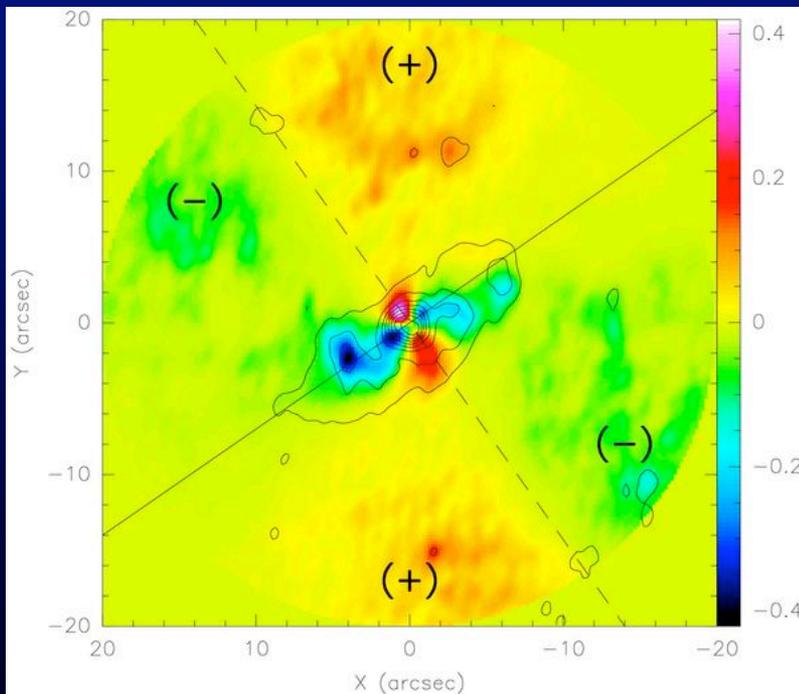
➔ Distribution du gaz moléculaire très concentrée
Pas d'anneau!

'SMOKING GUNS' : $t < 0$

NGC3627

Casasola+2011

Profil des couples $t(r)$



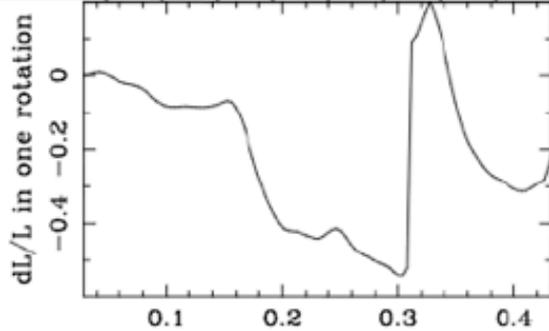
➔ Couples systématiquement < 0 de $r=500$ pc à $r=50$ pc

'SMOKING GUNS' : $t < 0$

NGC1566

Combes+2014

Profil des couples $t(r)$



Le gaz est amené de $r \sim 350$ pc jusqu'à $r \sim 50$ pc

Le gaz répond en formant une spirale 'trailing' à l'intérieur de l'ILR de la barre

Dû à l'influence du trou noir sur la dynamique !

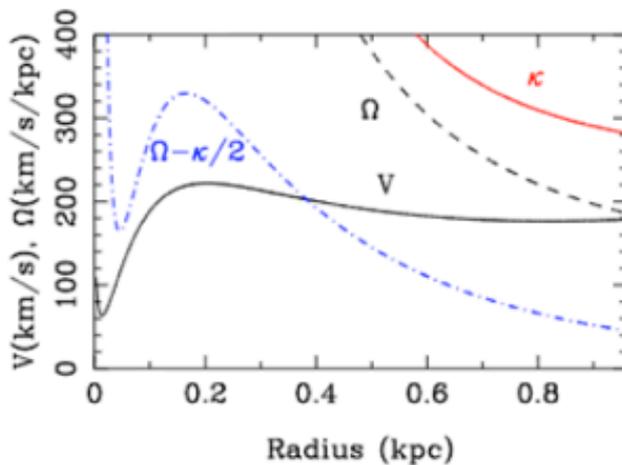
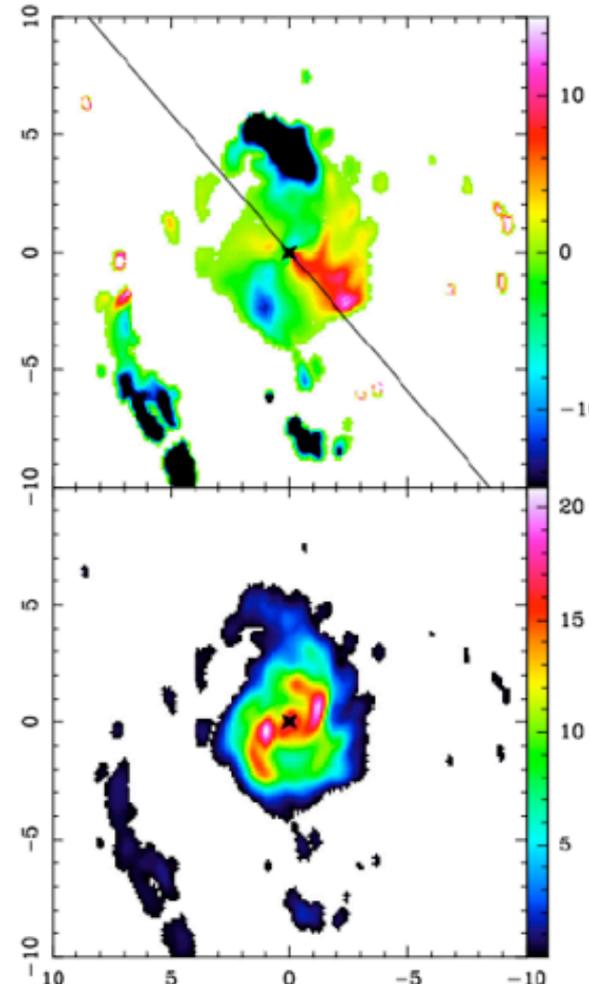


Image de ALMA en CO 3-2



PAS DE 'FUELING'? : $t > 0$

García-Burillo & Combes 2012

★ $\sim 2/3$ LLAGNs analysés montrent $t(r) > 0$ à $r \leq 300$ pc

→ Potentiel stellaire montre inefficacité à 'drainer' le moment angulaire du gaz

★ Solution au 'puzzle'...?

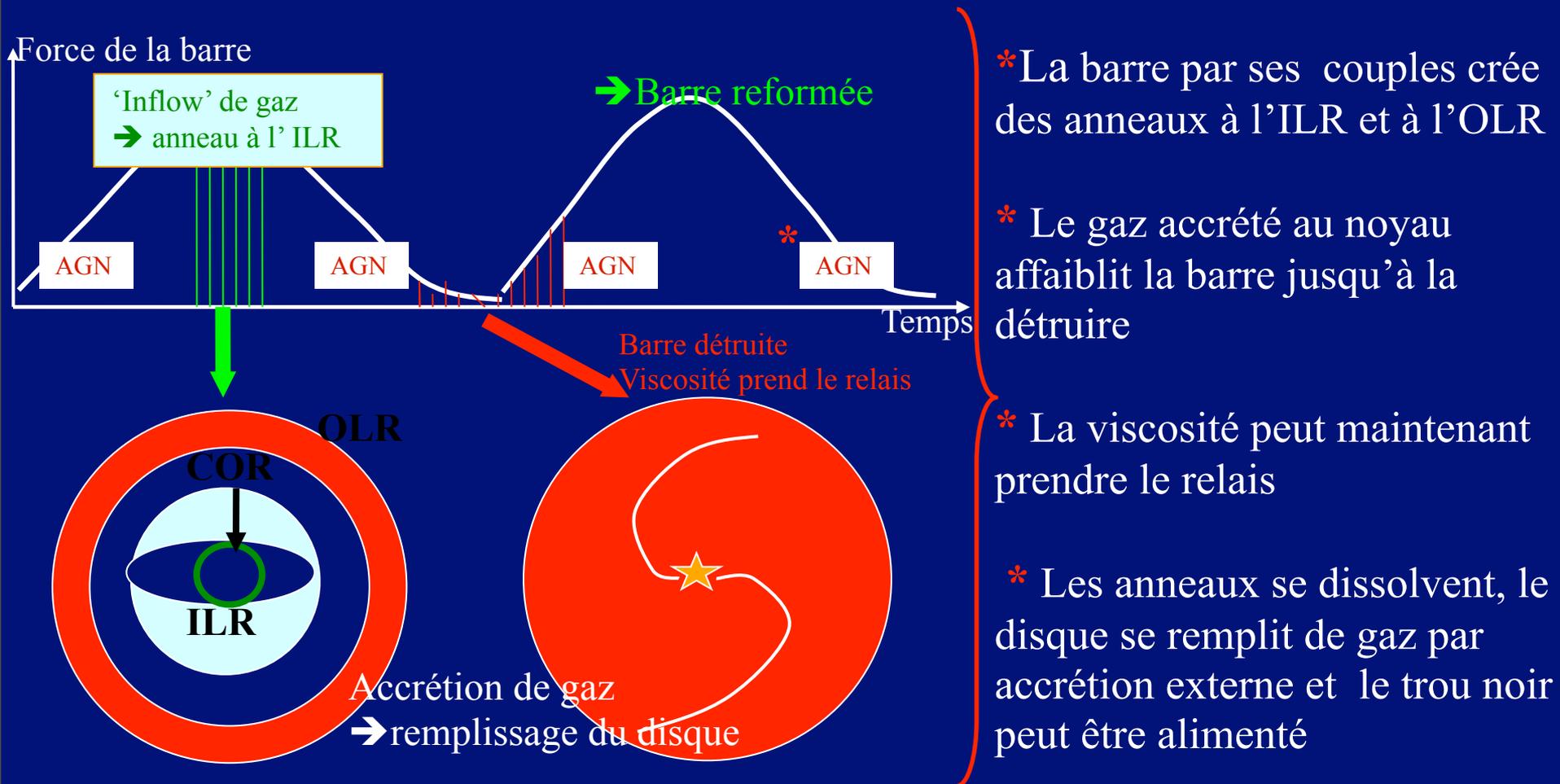
→ L'agent responsable est à chercher dans le potentiel plus près du trou noir: $r=1-10$ pc ?

→ Il y a d'autres mécanismes indépendants du potentiel stellaire qui se combinent pour aider au drainage:
Viscosité, friction dynamique...

LE CYCLE DES BARRES

Combes+2004, Bournaud+2005, García-Burillo+2005

- * Plusieurs barres (3-4?) peuvent se développer dans la vie d'une galaxie



- * La barre par ses couples crée des anneaux à l'ILR et à l'OLR

- * Le gaz accrété au noyau affaiblit la barre jusqu'à la détruire

- * La viscosité peut maintenant prendre le relais

- * Les anneaux se dissolvent, le disque se remplit de gaz par accrétion externe et le trou noir peut être alimenté

COMMENT DRAINER LE MOMENT ANGULAIRE?

-Échelles $\sim 100\text{pc}-1\text{kpc}$:

Barres primaires et forces de marée lors d'une interaction

-Échelles $\sim 10\text{pc} - \sim 100\text{pc}$:

Les galaxies trouvent différents moyens pour faire parvenir le gaz à ces distances:

Barres secondaires emboîtées, barres primaires sans ILRs, des spirales nucléaires...

Mais 'la plupart du temps', le gaz reste attrapé dans des anneaux.

-Échelles $\sim 1-10\text{pc}$:

Disques gauchis, décentrés, viscosité, friction dynamique...?

Manque de contraintes observationnelles pour les modèles:

(e.g., Wada+01,+09; Hopkins+11,+15, Emsellem+15...)

COMMENT DRAINER LE MOMENT ANGULAIRE?

-Échelles $\sim 100\text{pc}-1\text{kpc}$:

Barres primaires et forces de marée lors d'une interaction

-Échelles $\sim 10\text{pc} - \sim 100\text{pc}$:

Les galaxies trouvent différents moyens pour faire parvenir le gaz à ces distances:

Barres secondaires emboîtées, barres primaires sans ILRs, des spirales nucléaires...

Mais 'la plupart du temps', le gaz reste attrapé dans des anneaux.

-Échelles $\sim 1-10\text{pc}$:

Disques gauchis, décentrés, viscosité, friction dynamique...?

Manque de contraintes observationnelles pour les modèles:

(e.g., Wada+01,+09; Hopkins+11,+15, Emsellem+15...)

Et pour les galaxies à hauts redshifts?

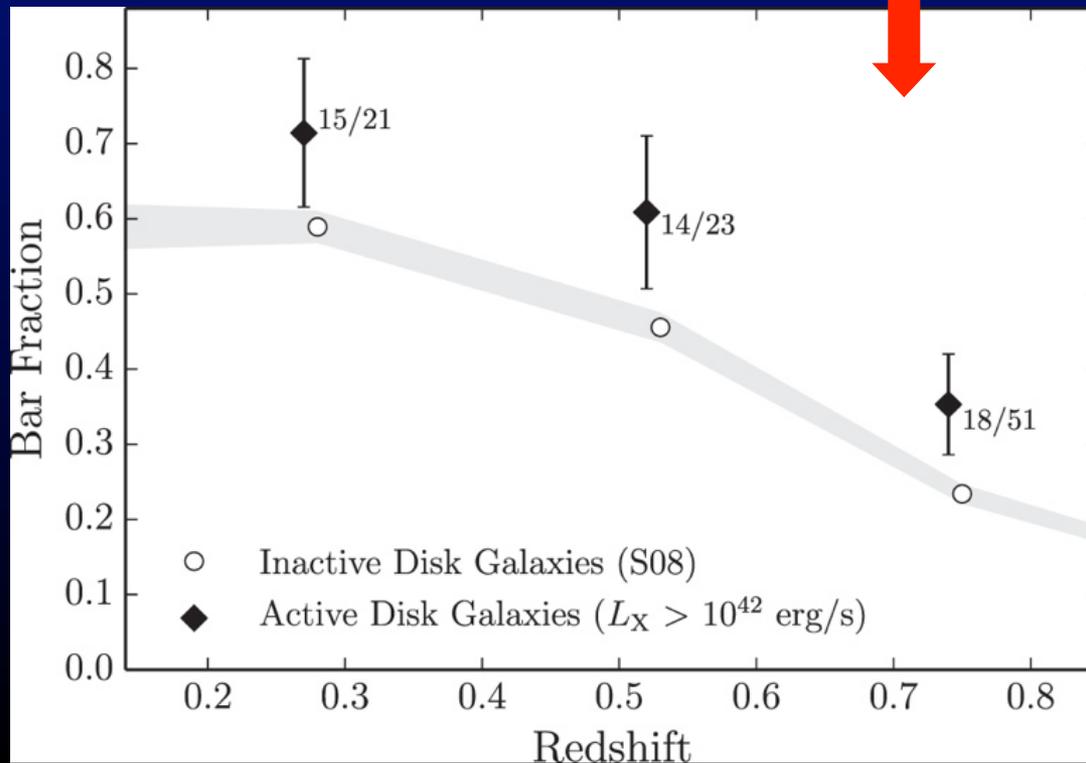
BARRES DANS LES GALAXIES À HAUTS REDSHIFTS...

La fraction des barres stellaires décroît avec le redshift croissant

Les barres ne durent-t-elles pas 'si longtemps'??

Les barres semblent être marginalement plus abondantes dans les AGNs

Relevé de ~centaines de galaxies avec HST-COSMOS entre $z=0.3-0.8$ (e.g., Cisternas+2015)



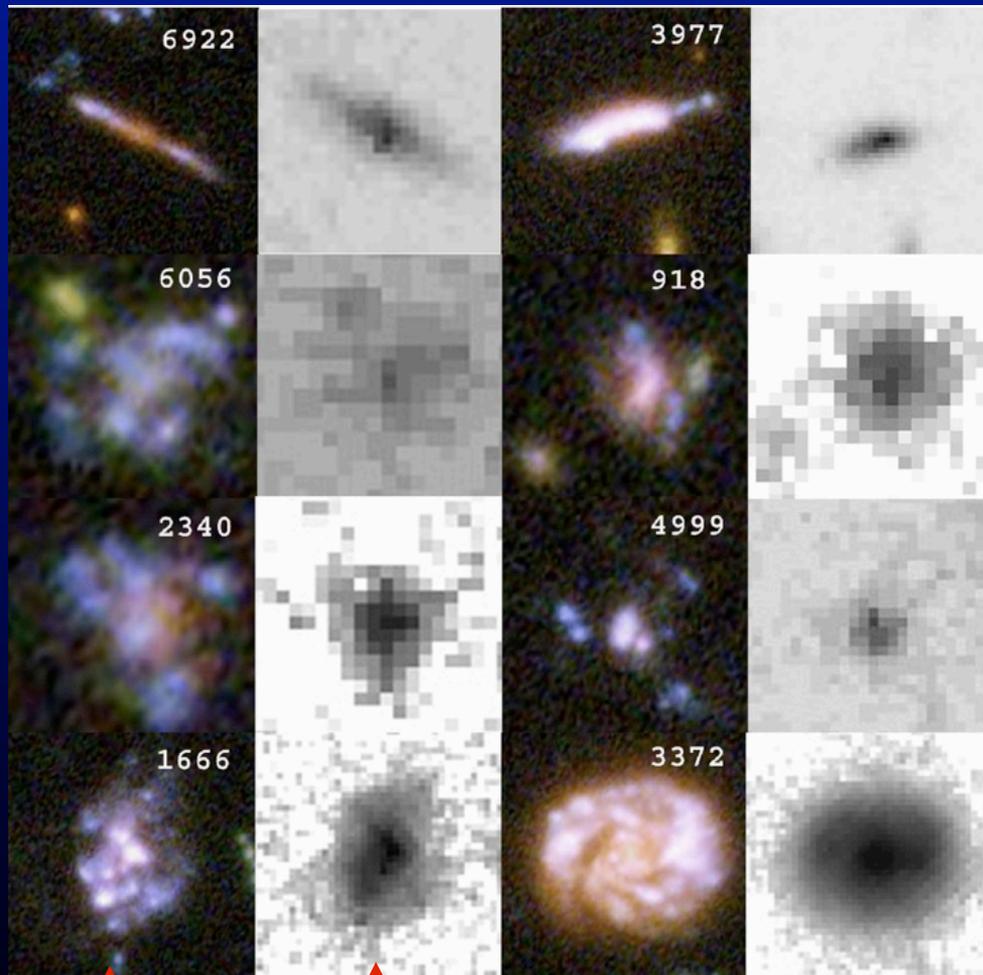
Les barres se formeraient à partir de $z \sim 0.8-1$ quand les disques sont bien en place

Avant, les galaxies subiraient des interactions ou seraient dominées par d'autres types d'instabilités violentes : **V.D.I**
(Bournaud+2015)

LES INSTABILITÉS VIOLENTES (VDI)

Elmegreen+09

Hubble Ultra Deep Field (ACS+NICMOS)



ACS (optique)

NICMOS (NIR)

-Les disques des galaxies à $z > 1$ ont une morphologie très différente: les barres disparaissent...

-Images dans l'optique (UV au repos) montrent une morphologie très fragmentée : **'clumpy galaxies'**

-Les 'clumps' sont très riches en gaz ($M \sim 10^8 - 9 M_{\odot}$) et des sites de formation stellaire

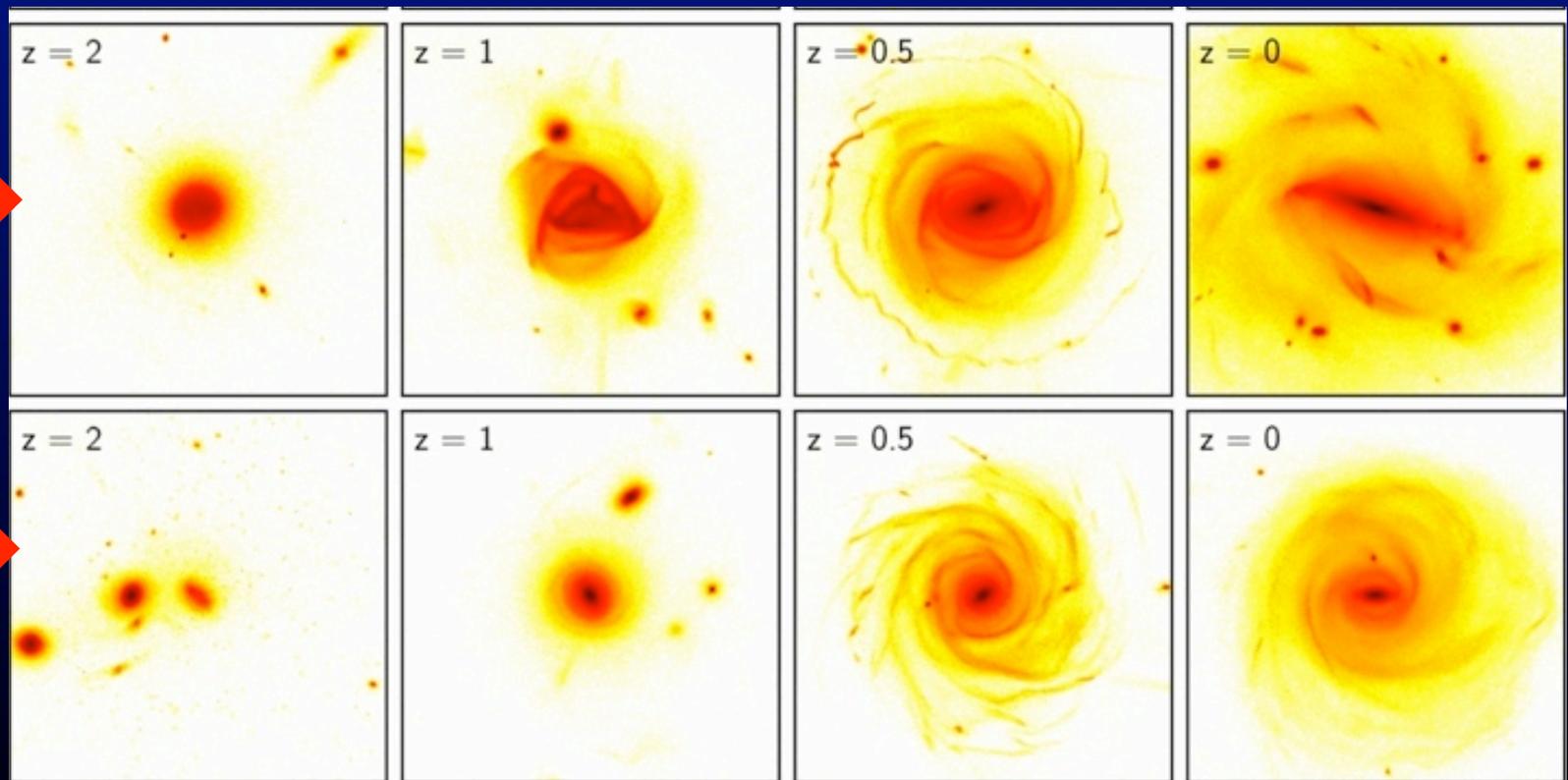
-Les 'clumps' détectés par NICMOS au centre de certaines galaxies correspondraient aux bulbes

-Les bulbes (**et les trous noirs?**) en formation le seraient suite à la chute des clumps par friction dynamique renforcée

LES INSTABILITÉS VIOLENTES (VDI)

Martig+12, Bournaud+15

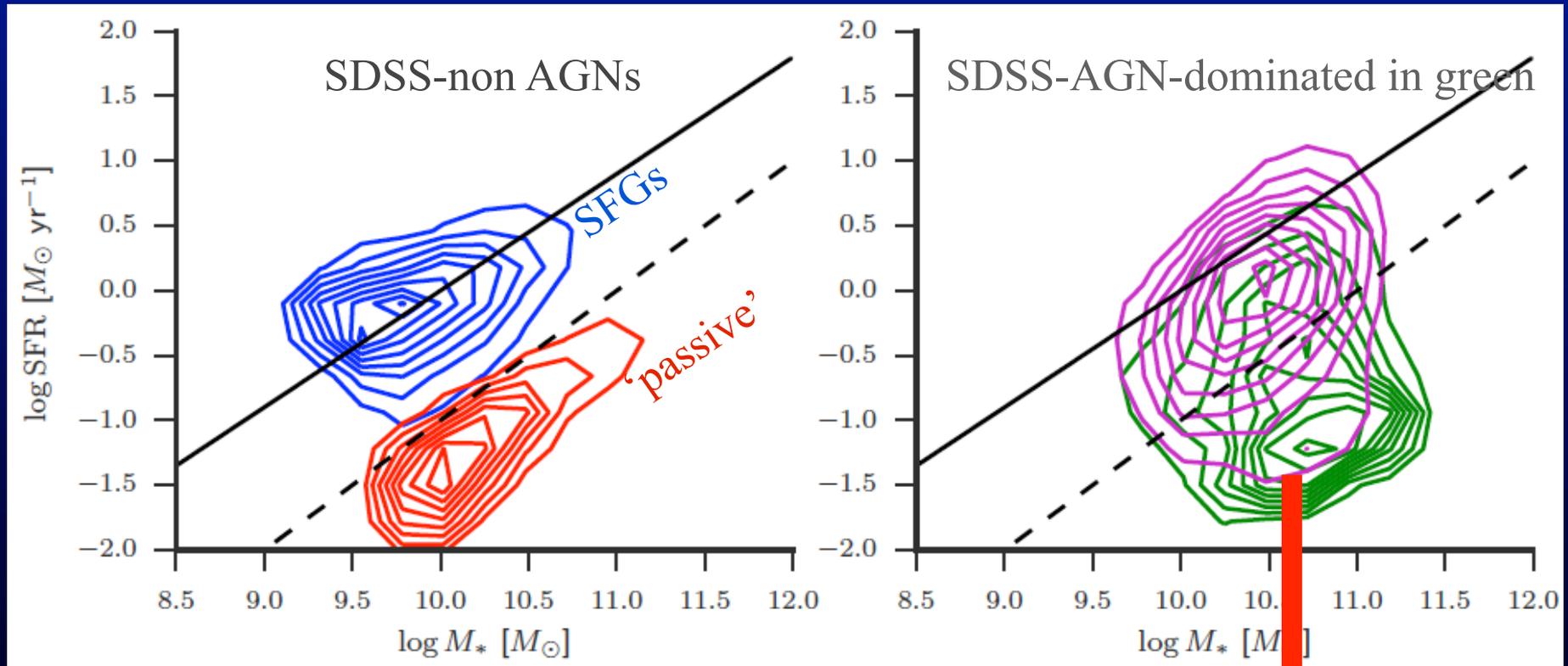
Les simulations numériques montrent que les deux chemins d'évolution galactique (interactions et accrétion) favorisent l'apparition des **barres stellaires** dans les disques **après $z \sim 1$**



← barres + spirales →

LA CONNEXION SF-AGN

Formation stellaire perturbée par rétroaction des AGNs? *Shimizu+15; Mulaney+15*



Shimizu+15

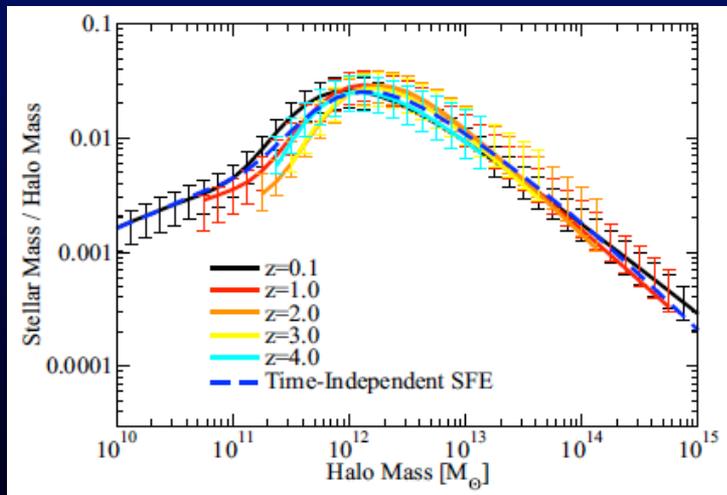
Les AGNs dans les galaxies les plus massives sont capables d'inhiber la formation stellaire: **'AGN feedback' (rétroaction)**

OUTFLOWS

Evidence observationnelle de l'existence de flots massifs de gaz éjectés dûs à la rétroaction de la formation stellaire et de l'activité nucléaire: **feedback**

Les flots de gaz aident à réguler l'alimentation des trous noirs et la formation stellaire, et entraînent les baryons en dehors des galaxies

*Les trous noirs peuvent **rejeter** une partie de sa nourriture!*



Behroozi+13

baryons/matière noire ~ 4% dans les galaxies

~20% dans l'univers

Il faut que la rétroaction éjecte les baryons!

OUTFLOWS

→ Rapport entre la rétroaction de la SF et celle de l'AGN?

→ -Mécanismes d'éjection dans les AGN?:

Mode quasar: taux d'accrétion élevés ($L \sim L_{Edd}$): vents par rayonnement

Mode radio: taux d'accrétion bas ($L < 0.01 L_{Edd}$): jets radio

$dM/dt ? L_{kin} ? dP/dt ?$

→ -'Inflow' vs 'Outflow': autorégulation?

OUTFLOWS IONISÉS+MOLÉCULAIRES(?): RADIOGALAXIES

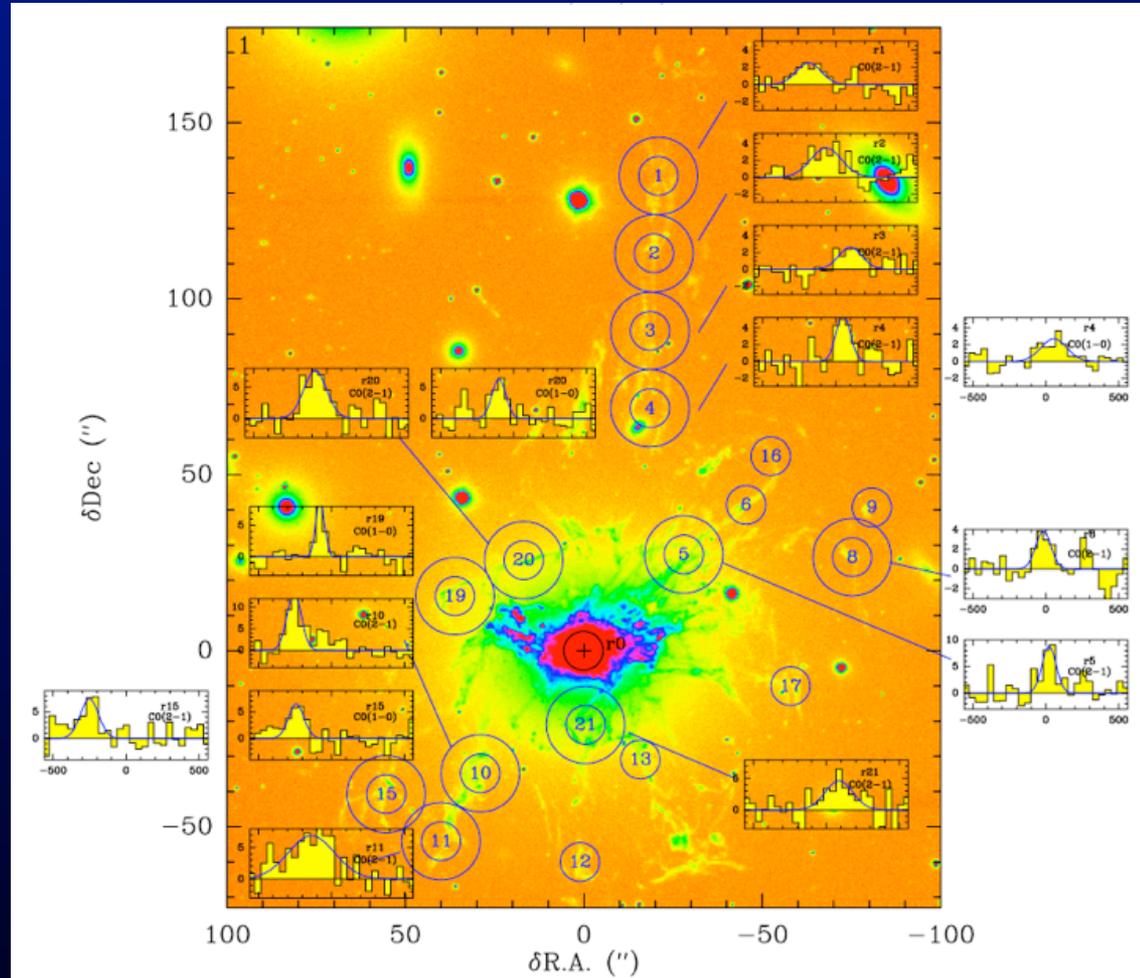
NGC1275

Conselice+2001; Fabian+2003; Hatch+2006; Salomé+2008

Outflow de gaz chaud+ionisé
détecté en H α (filaments) et
rayons X (cavités) :
rétroaction de l'AGN

Gaz moléculaire dans les
filaments: 'cooling flow'

inflow? outflow?



➔ Mode radio (jets) très efficace dans les amas de galaxies

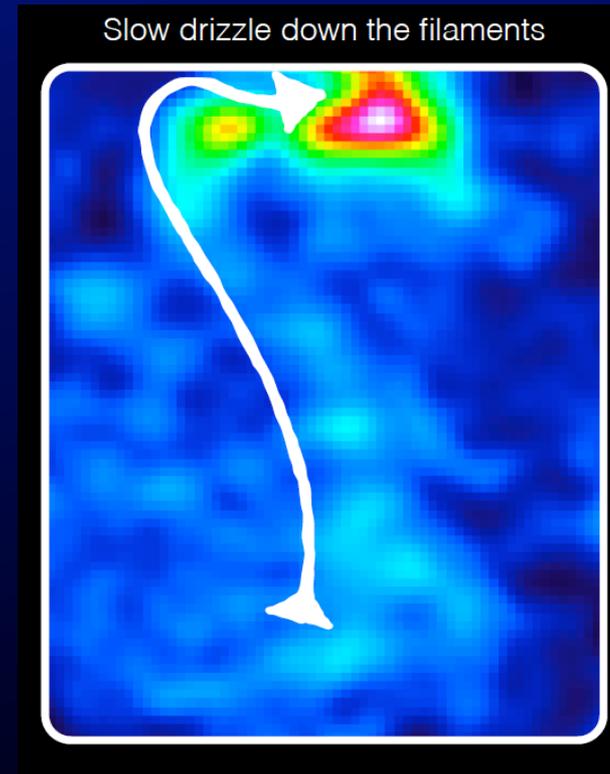
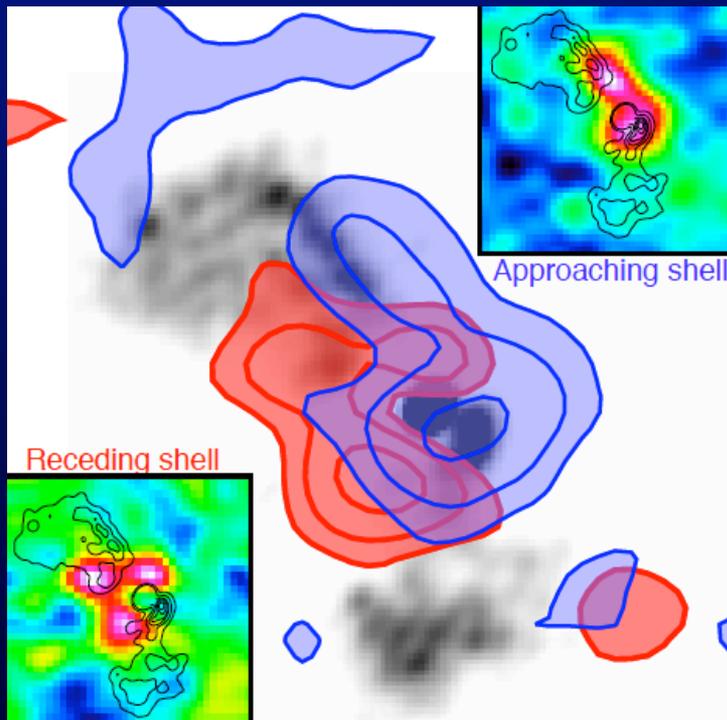
OUTFLOWS MOLÉCULAIRES: RADIOGALAXIES

Abell 2597

Tremblay+in prep.

ALMA: image en CO(2-1)

- 1/ Coquille de gaz moléculaire en expansion perpendiculaire au jet: **rétroaction**
- 2/ Inflow de gaz à d'autres échelles : **alimentation**

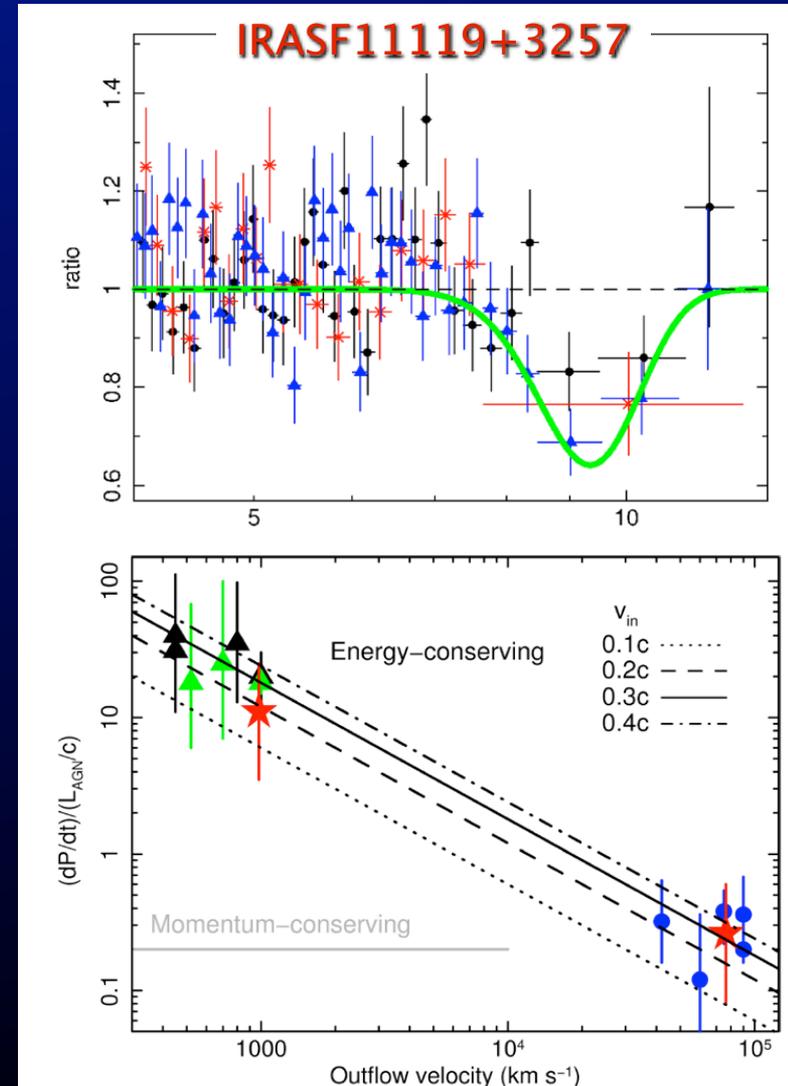
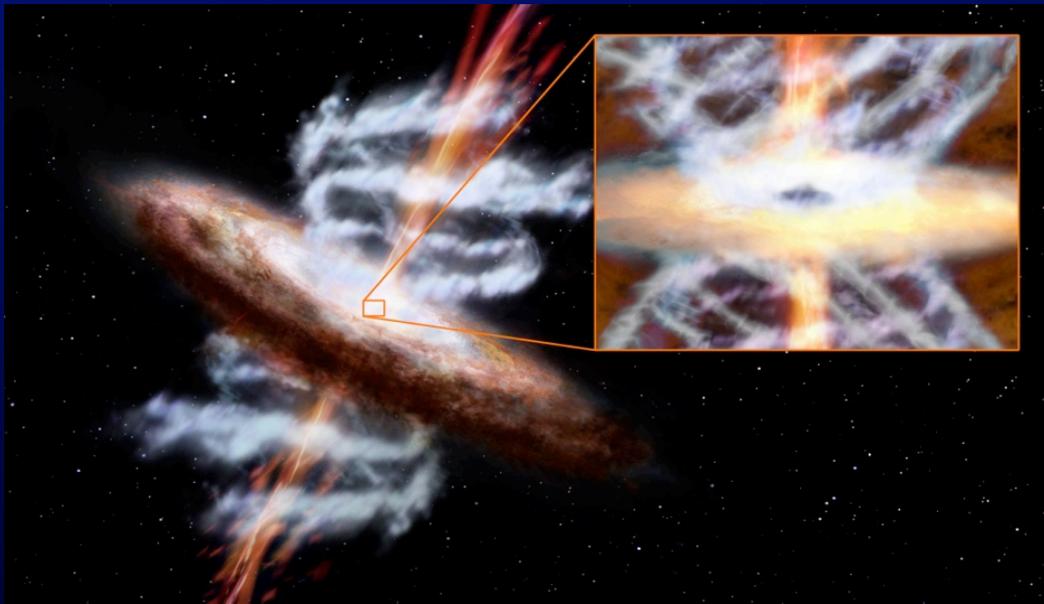


➔ **Mode radio (jets) très efficace dans les amas de galaxies**

OUTFLOWS IONISÉS: QSOs

Tombesi+2011, 2013, 2015

- Vents de gaz très ionisé vus en absorption en rayons X
- Vitesses relativistes: $v \sim 50000$ km/s
- Le vent ionisé entraînerait le flot moléculaire dans une deuxième phase ou le moment du flot est amplifié

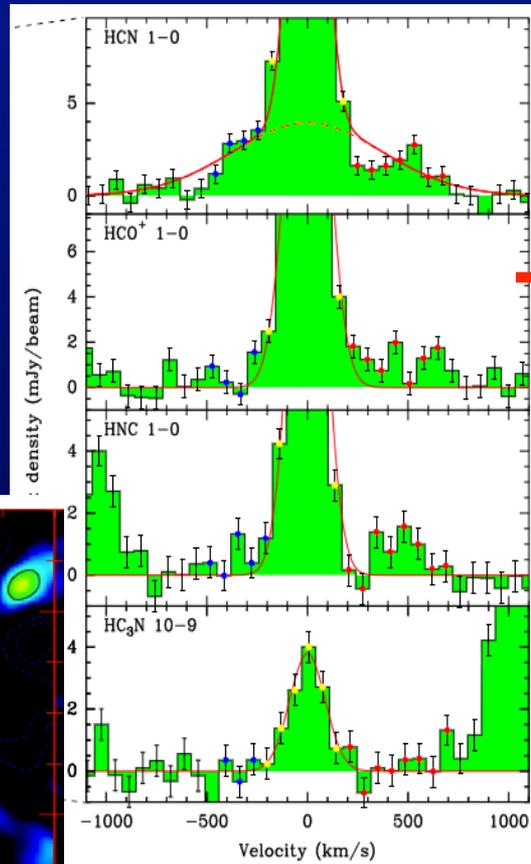
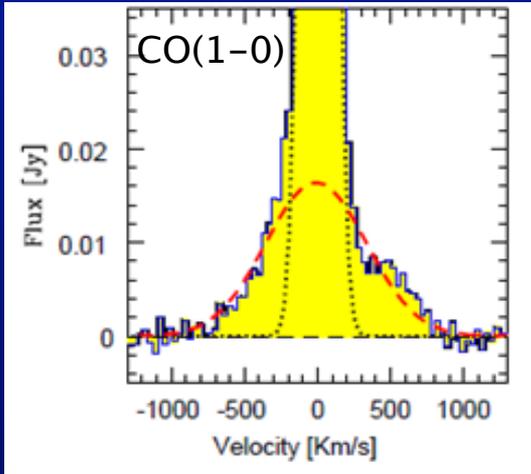


OUTFLOWS MOLÉCULAIRES: QSOS

Mrk231

Feruglio+2010, 2012, 2015; Fischer+10; Aalto+2012, 2015

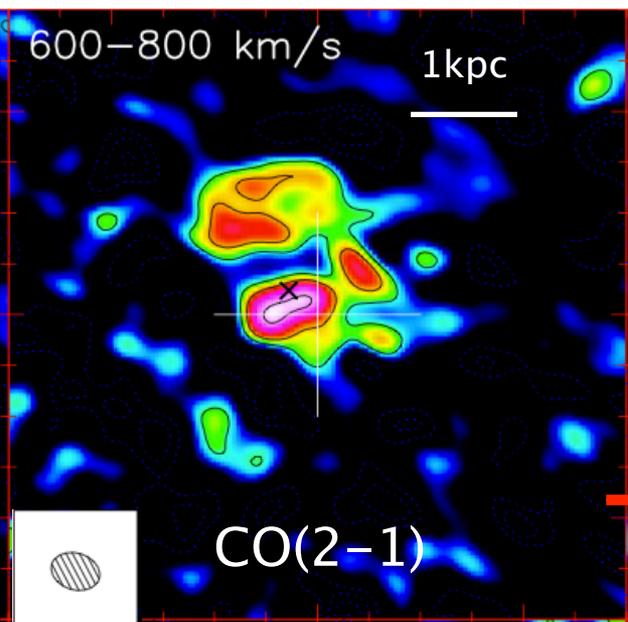
SFR $\sim 200 M_{\odot}/\text{yr}$ Outflow $\sim 1000 M_{\odot}/\text{yr}$ \rightarrow lancé par l'AGN!



Aalto +2012

Traceurs de gaz moléculaire dense
 $n(\text{H}_2) > 10^{4-5} \text{ mol}/\text{cm}^3$
HCN, HCO+, HNC

Beaucoup de gaz dense
dans le flot: comment
survit-il?



Feruglio +2015

Le flot de $M \sim 10^8 M_{\odot}$ s'étend sur des $\sim \text{kpc}$

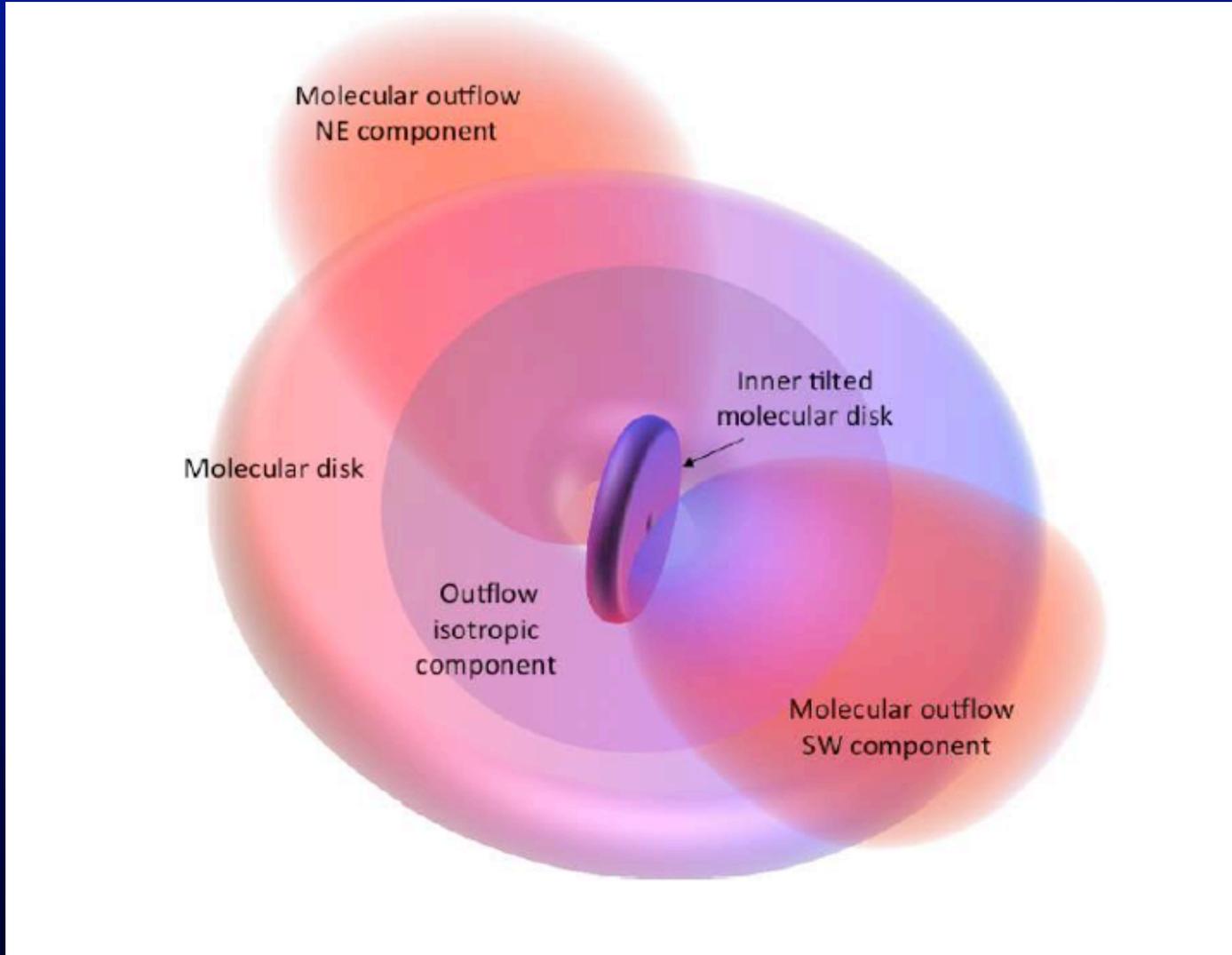
$L_{\text{kin}} \sim 0.05 L_{\text{AGN}}$

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

OUTFLOWS MOLÉCULAIRES: QSOs

Mrk231

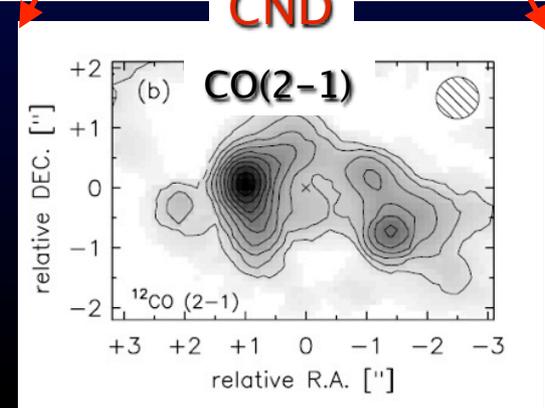
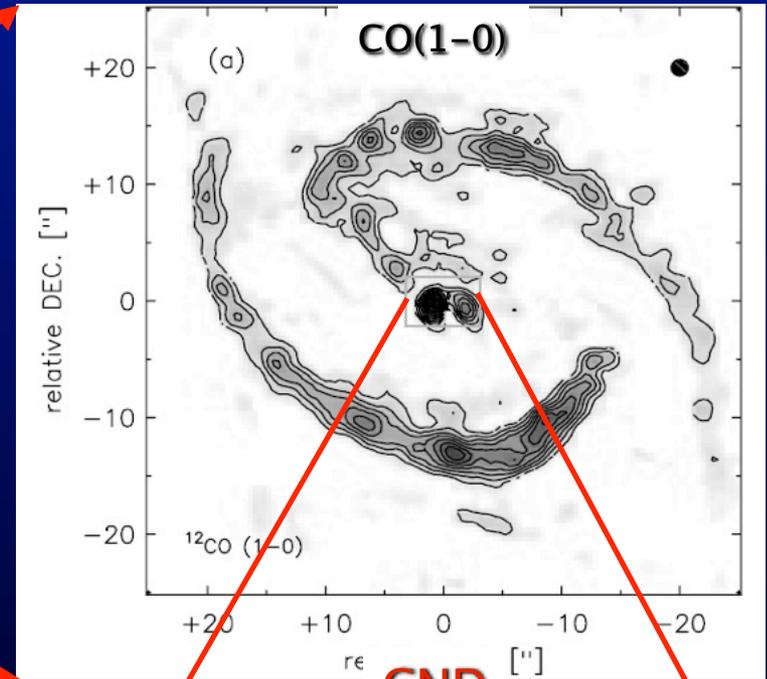
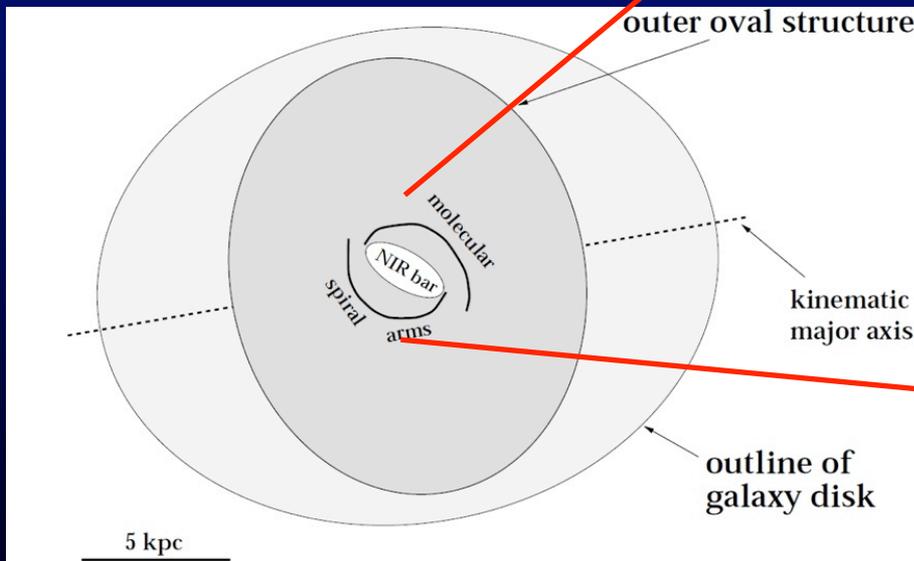
Feruglio+2015



OUTFLOWS MOLÉCULAIRES: SEYFERTS

NGC1068

- NGC1068 galaxie barrée Seyfert 2 à $D=14\text{Mpc}$ ($1''=70\text{pc}$)
- Deux barres emboîtées: barre secondaire ($r\sim 1.3\text{kpc}$) emboîtée dans un ovale ($r\sim 8\text{kpc}$)
- Starburst dans anneau moléculaire ($r\sim 1.3\text{kpc}$)
- 'Circumnuclear molecular disk' (CND) à $r\sim 200\text{pc}$



PdBI: Schinnerer+2000

OUTFLOWS MOLÉCULAIRES: SEYFERTS

NGC1068

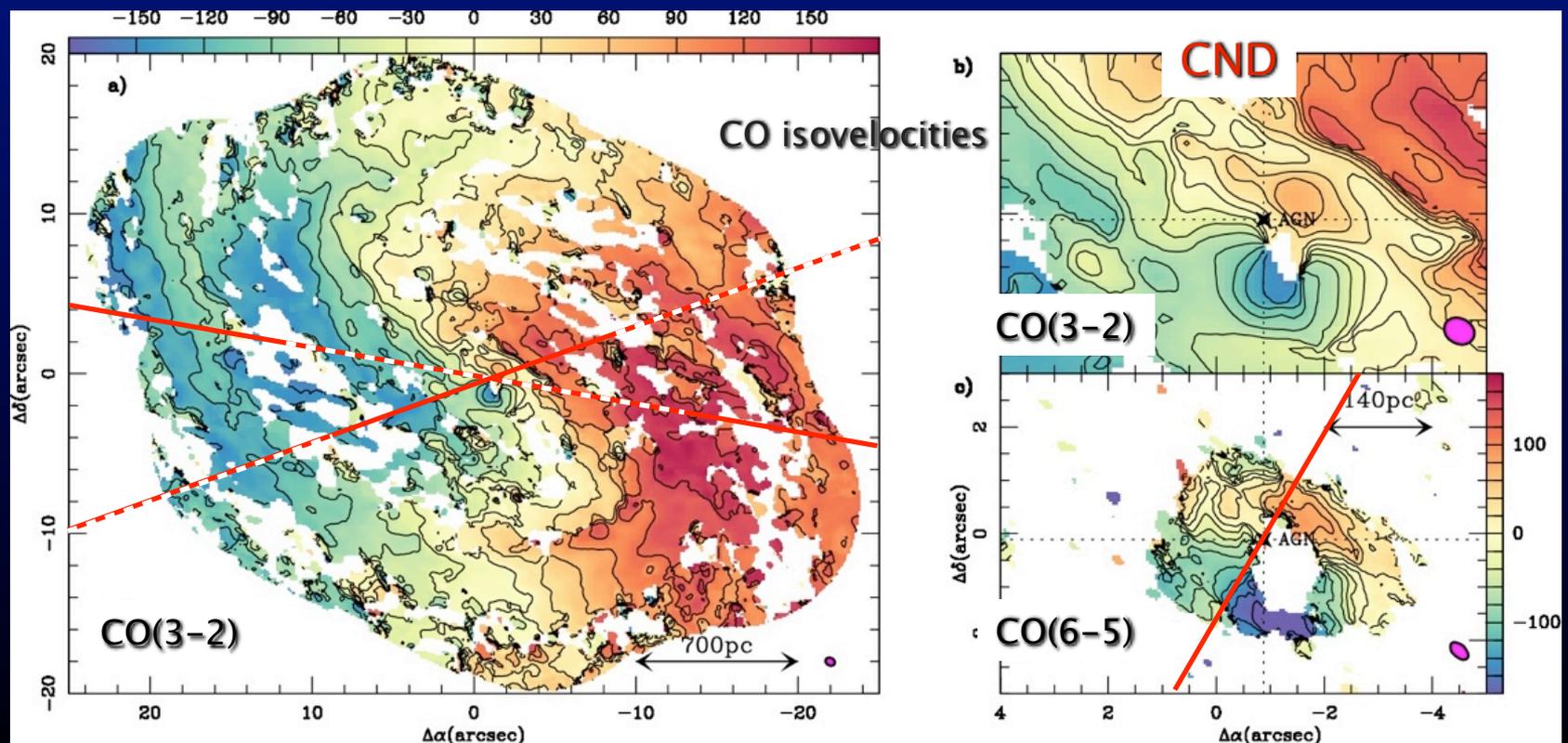
García-Burillo+2014

-ALMA: cartographie en CO (3-2) et (6-5) avec résolutions $\sim 0.3''$ - $0.5''$ (20-35pc)

-Cinématique du gaz:

inflow induit par barre+spirale dans la partie externe du disque $r > 0.5$ - 1.5 kpc

outflow près du centre (CND) $r < 500$ pc



➔ Inflow et outflow coexistent dans des régions différentes

OUTFLOWS MOLÉCULAIRES: SEYFERTS

NGC1068

García-Burillo+2014

-Le flot moléculaire est détecté dans tous les traceurs du gaz dense

$dM/dt \sim 60 M_{\odot}/yr \gg SFR \sim 1 M_{\odot}/yr$

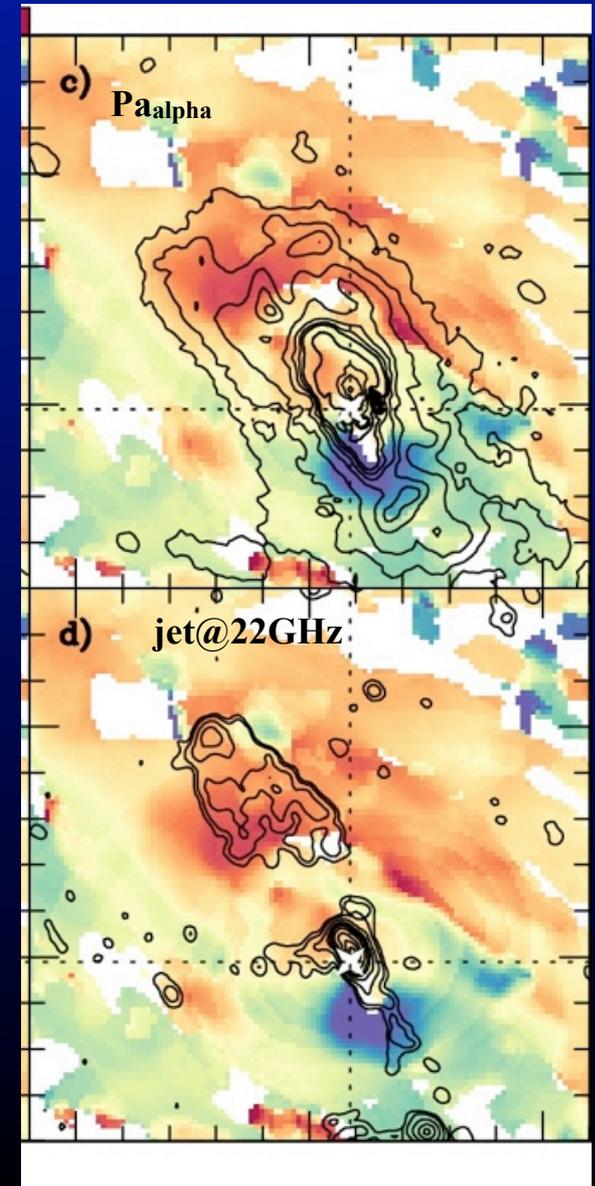
$dP/dt \sim 2-6 \times L_{AGN}/c$

$L_{kin} < 0.1 \% L_{AGN}$

...similaire à d'autres Seyferts (*Alatalo+10,+15; Aalto+12; Combes+13; Matsushita+15; Querejeta+in prep*)

-Le jet ou/et le flot de gas ionisé entraîne le flot moléculaire dans le plan!

➔ **La rétroaction de l'AGN aide à réguler l'alimentation du trou noir!**

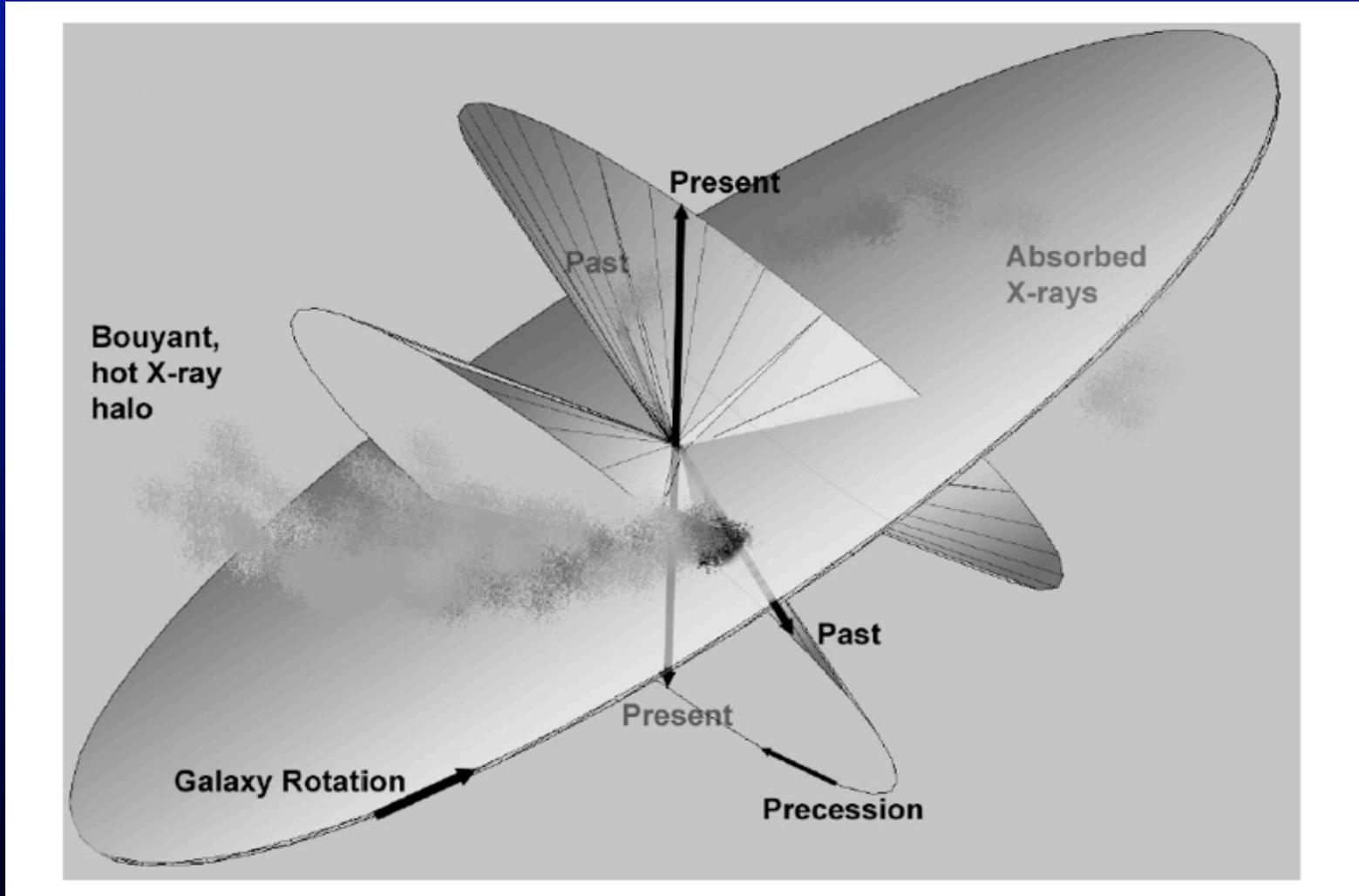


color= CO residual vel. field in CNB

OUTFLOWS MOLÉCULAIRES: SEYFERTS

Cecil+2000

NGC4258



➔ **La rétroaction de l'AGN aide à réguler l'alimentation du trou noir!**

RÔLE DES OUTFLOWS...

Flots de gaz moléculaire témoignent de l'importance du 'feedback'
La phase moléculaire domine!

$$dM/dt \sim \text{jusqu'à } 1000 M_{\text{sun}}/\text{yr}, dp/dt \sim (1-30) L_{\text{bol}}/c$$

Les vitesses mesurées dans les flots moléculaires sont normalement au dessous de la vitesse d'échappement

Rôle prééminent des AGN vs SF surtout pour les AGN extrêmes

Dans les Seyferts le feedback contribue à réguler l'alimentation des trous noirs

Le mode radio est présent dans les radiogalaxies mais aussi dans les Seyferts

ALMA +NOEMA surveys !

SPECTROSCOPIE NIR/MIR: JWST

NIRSpec: IFU (1-5 μ m)

-H₂ raie ro-vibrationnelle @2.1 μ m :

Gaz moléculaire chaud ($T_k=1000-3000$ K) $\sim 0.1''$ jusqu' à $z=1.3$

-Pa α , Br γ , FeII @ 3-5 μ m jusqu' à $z=1.5-2$; et H α jusqu' à $z=3-5$ en 3-4hrs

Gaz ionisé avec résolutions $\sim 0.1''$

MIRI: IFU (5-28 μ m)

-Toutes les raies observées par NIRSpec mais jusqu' à $z>2$

-H₂ raies rotationelles à $z=0$:

Gaz moléculaire ($T_k \sim 100$ K) avec résolutions $\sim 0.2''-0.4''$

-NeII, III à $z=0$ etc

Gaz ionisé avec résolutions $\sim 0.2''-0.4''$

→ inflows/outflows en H₂ + et gaz ionisé avec résolutions \sim ALMA

SPECTROSCOPIE HI: SKA

HI absorption science with SKA1 possible observing parameters

Science goal	SKA1	Redshift range	Receiver band	Spatial res.	Sky area	Spectral-line rms noise	Optical depth τ	Detections
1. Inventory of HI in distant galaxies	Survey or Mid	to $z=3$	Band 1	~ 1 arcsec <i>search at best resolution => then reprocessing/ follow up</i>	1,000 deg ²	<0.1 mJy	<0.01 <i>(10 mJy source)</i>	~ 5000 assoc.; several hundred interven.
2. (i) Cold outflows (assoc.), (ii) Evolution of HI in galaxies (interv.)	Survey or Mid	to $z=3$	Band 1	~ 1 arcsec <i>search at best resolution => then reprocessing/ follow up</i>	10,000 deg ²	<0.1 mJy	0.001 to 0.005 <i>(20-100 mJy source)</i>	A few hundred outflows; Several thousand intervening absorbers to $z=3$
3. HI at very high redshift	Low	$3 < z < 8+$	220 MHz band	~ 5 arcsec	>1,000 deg ²	<0.5 mJy	<0.05 <i>(10 mJy source)</i>	Unknown, new discovery space!

➔ inflows/outflows en HI avec résolutions $\sim 1''$

Merci!