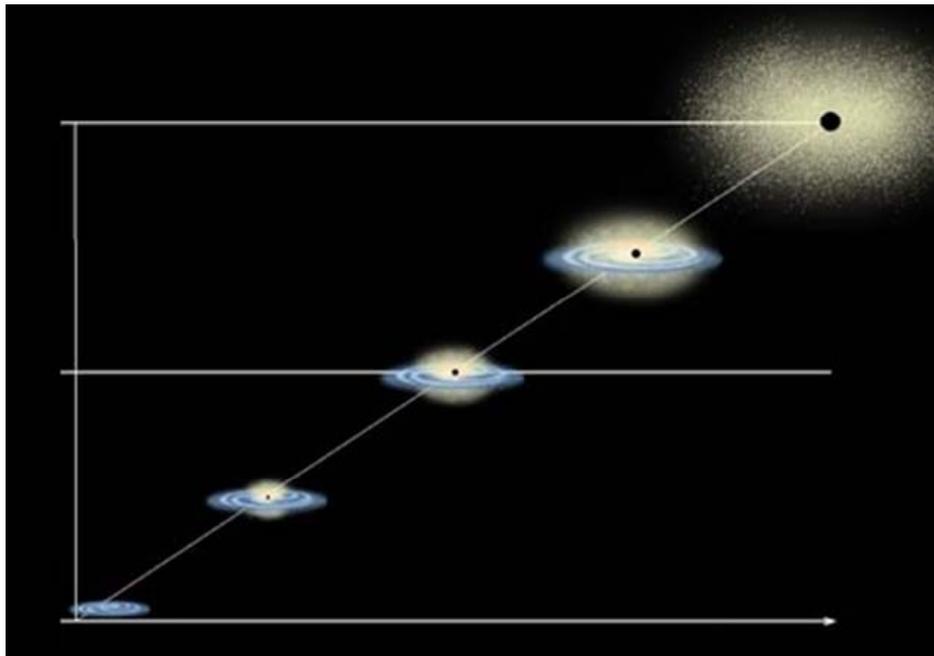




COLLÈGE
DE FRANCE
— 1530 —

Chaire Galaxies et Cosmologie

Co-évolution cosmique Trous noirs/Galaxies



Françoise Combes



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

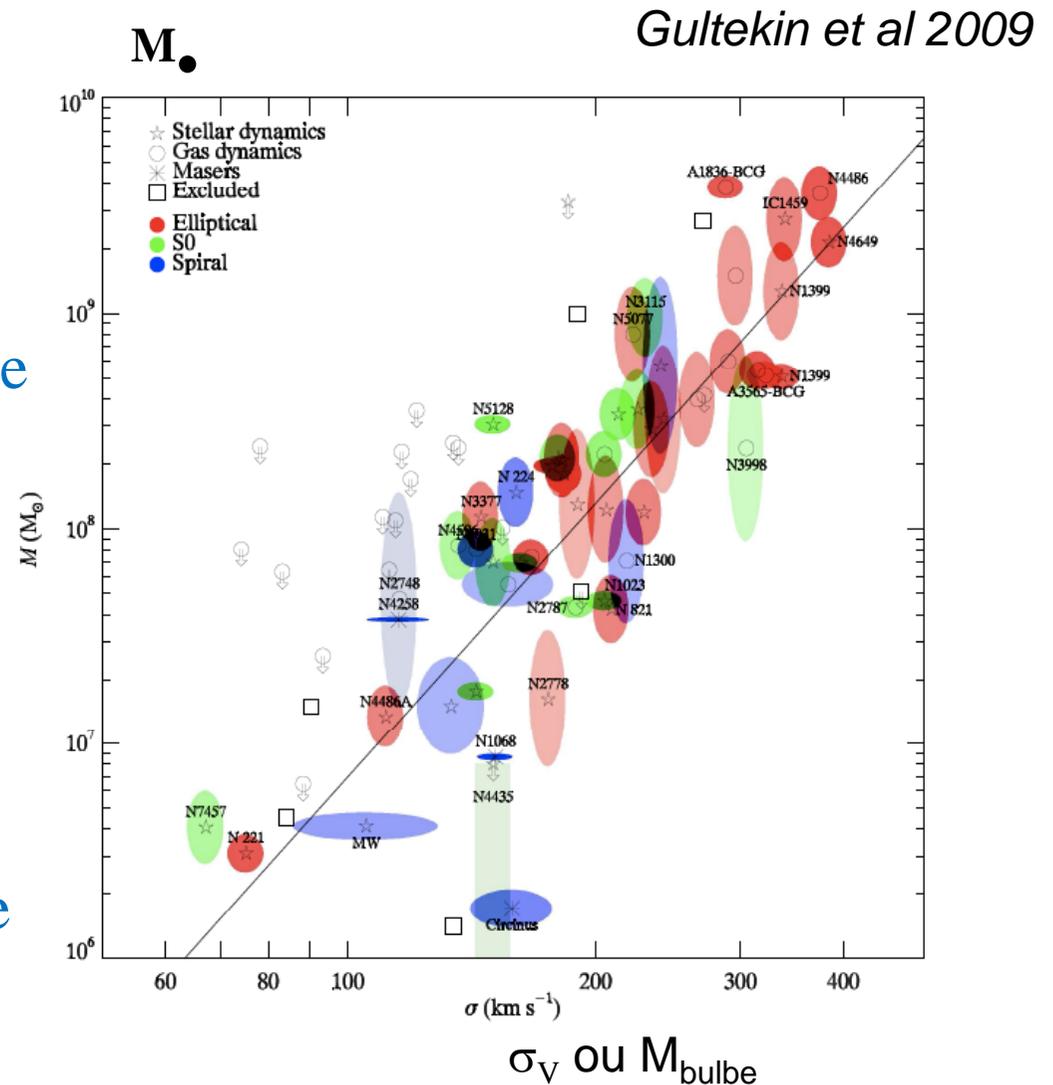
Relation étroite entre masses

Masse du trou noir M_{\bullet}
 $\sim 0.5\%$ Masse du bulbe

→ Ce n'est pas la masse totale
mais seulement le sphéroïde

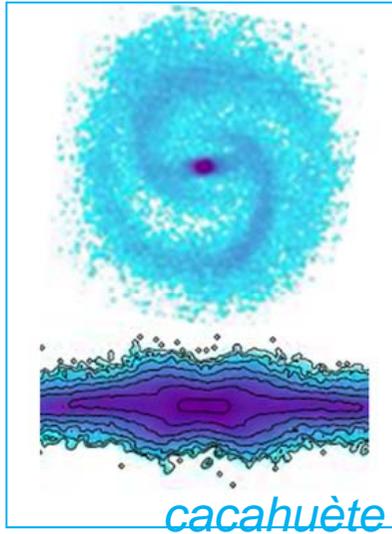
→ Bulbe « classique » et non
pseudo-bulbe des spirales
barrées

→ Ne dépend pas non plus de
la matière noire

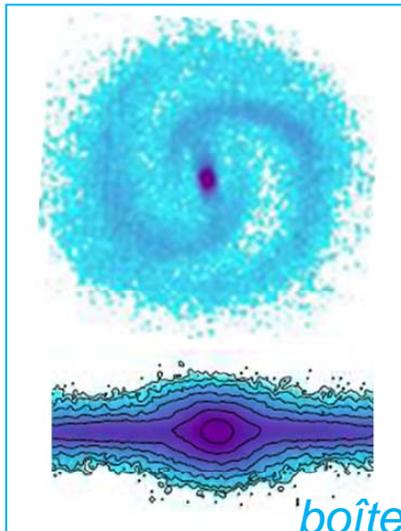


Exception pour les spirales barrées

Barre dans le plan du ciel

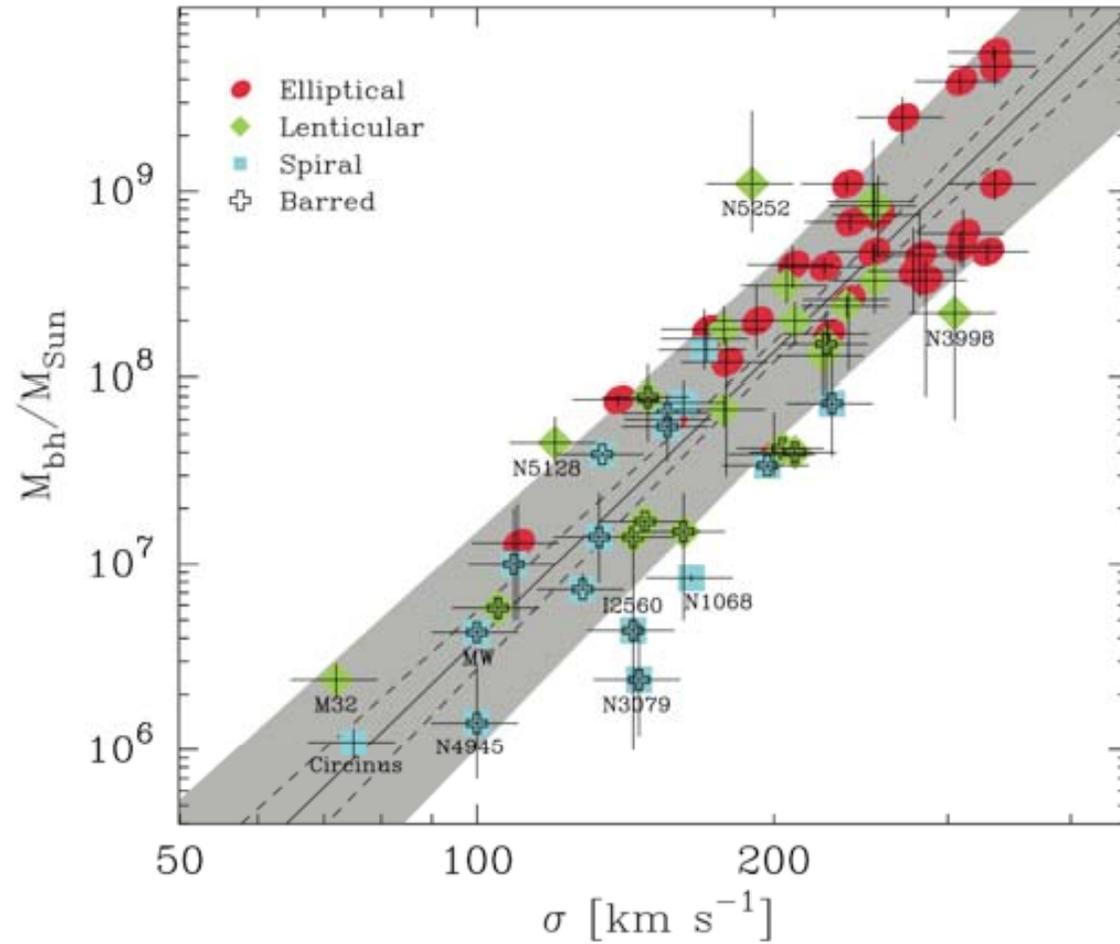


cacahuète



boîte

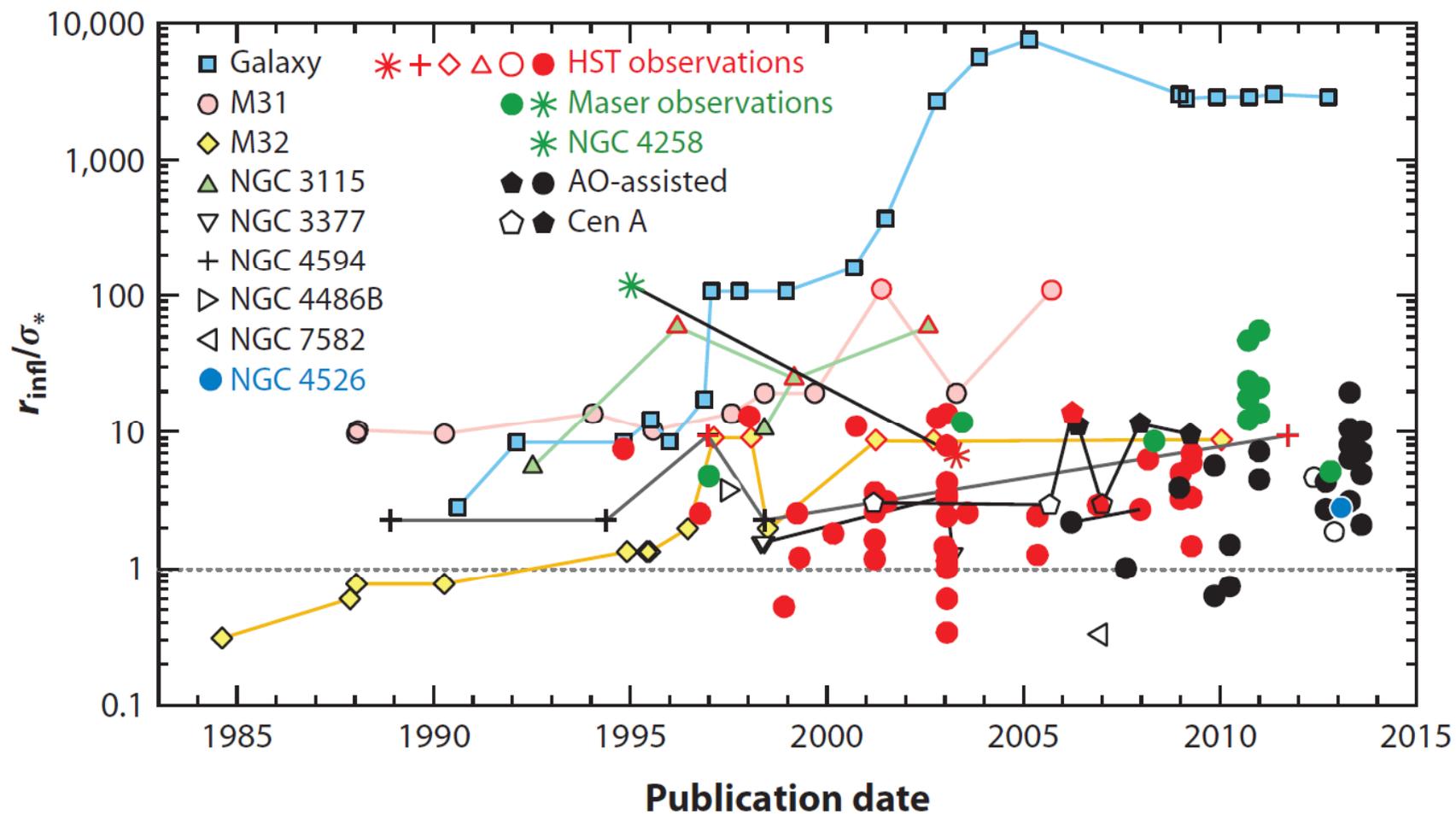
Barre le long de la ligne de visée



Graham et al 2010

Trous noirs connus (~50)

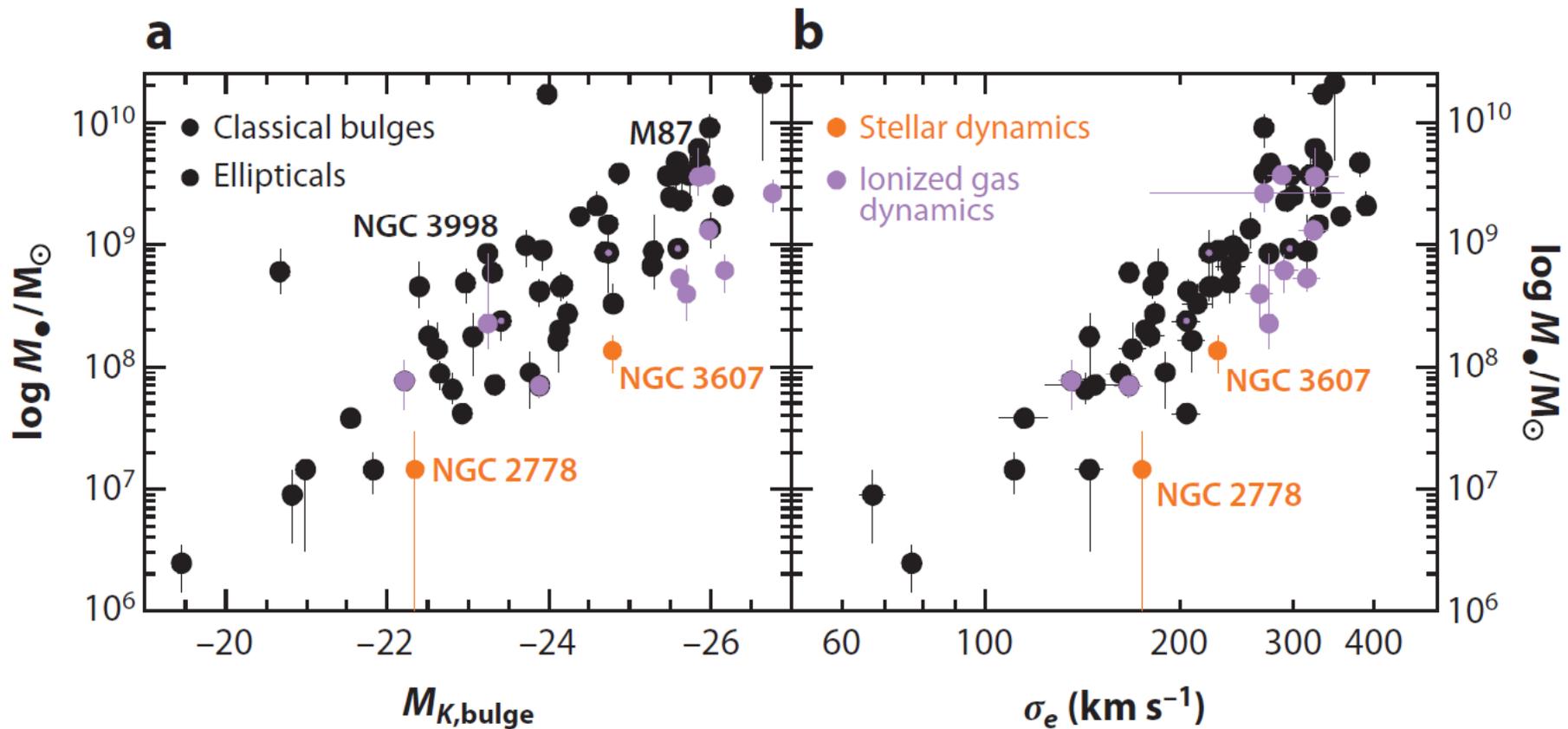
r_{infl} = Rayon de la sphère d'influence du trou noir $GM_{\bullet}/r_{\text{infl}} = \langle V^2 \rangle$
 σ^* est la résolution spatiale



Meilleure corrélation avec σ ?

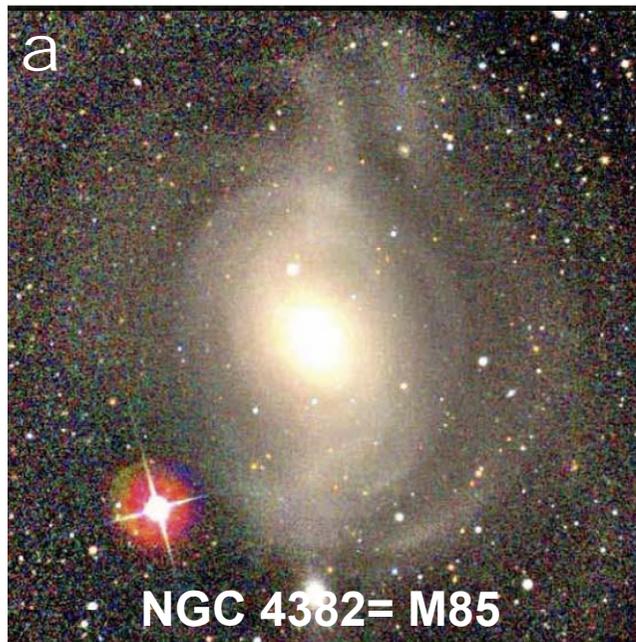
$M_{\text{bulge}} \sim \sigma^4$

Mais attention, M_{\bullet} est calculée à partir de σ !

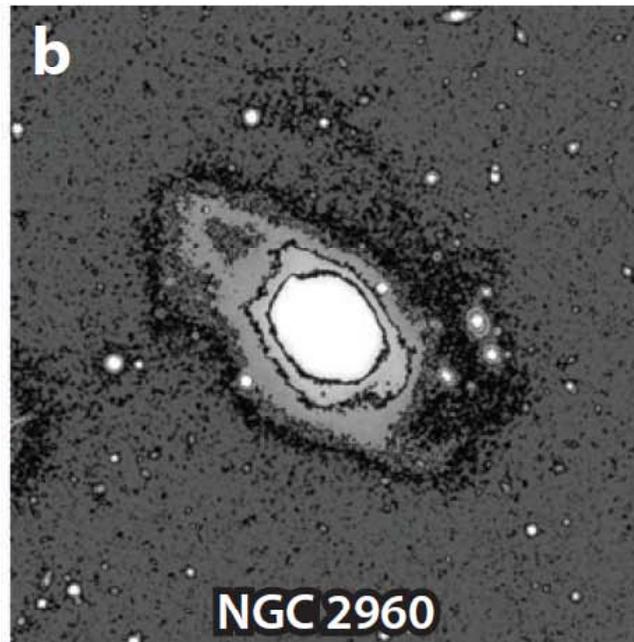


Exception pour les fusions en cours

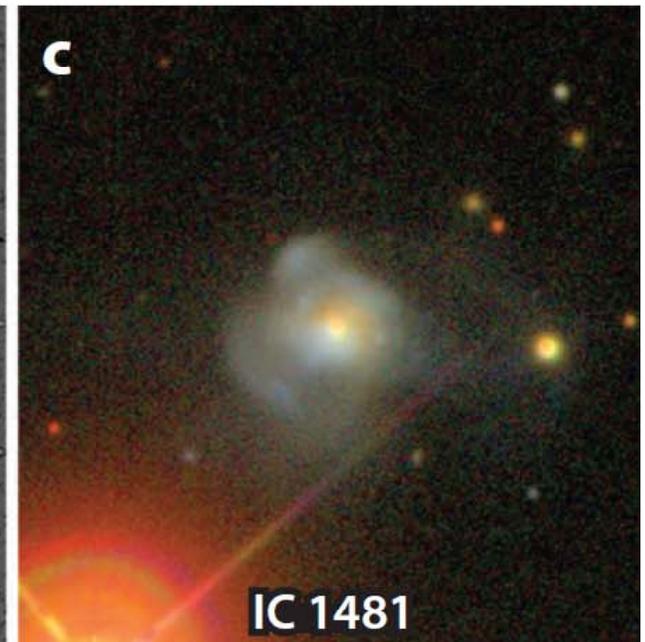
Les signes de fusion sont les queues de marée, les coquilles, les perturbations dans les morphologies:
NGC4382, NGC2960, IC1481



S0pec



Sa LINER

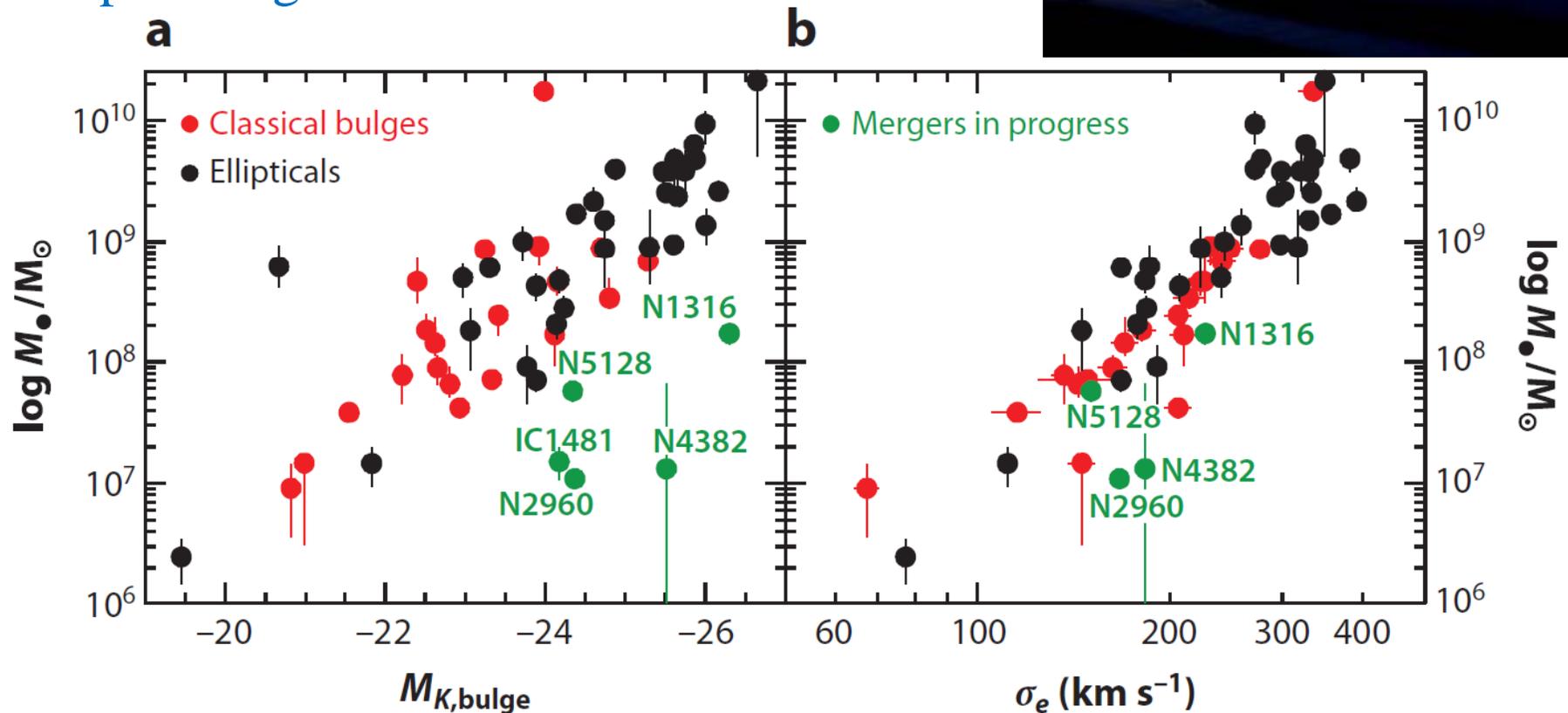


S? LINER

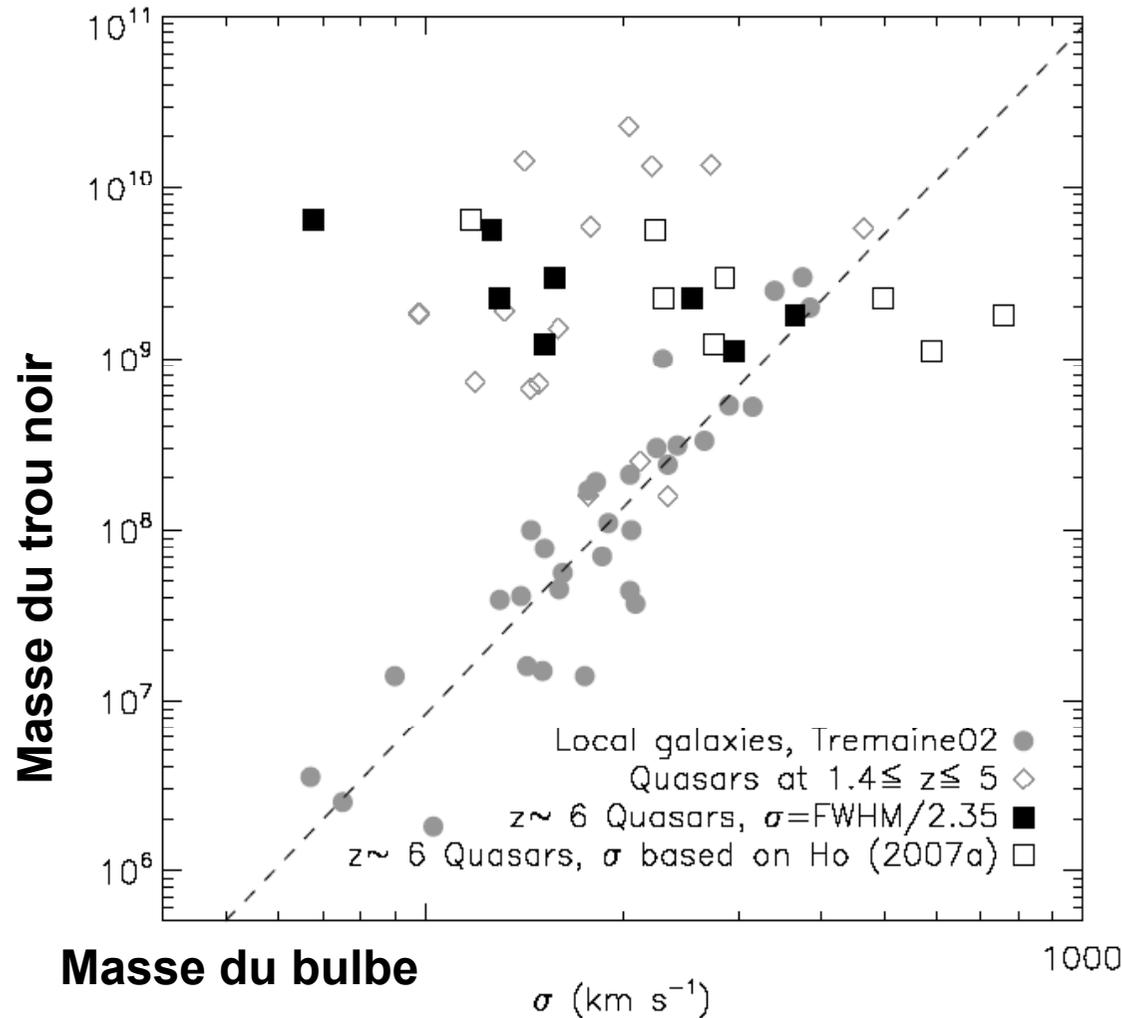
Trous noirs plus faibles pour les fusions en cours

Peut-être nous ne voyons qu'un seul des 2 trous noirs, et après fusion, les TN auront fusionné \rightarrow Masse x 2

Ou alors, la fusion survient tard, quand il ne reste plus de gaz!



$M_{\text{trou noir}}$ – Masse bulbe (ou σ), à $z \sim 6$



Trous noirs précoces?

QSO à $z=6$

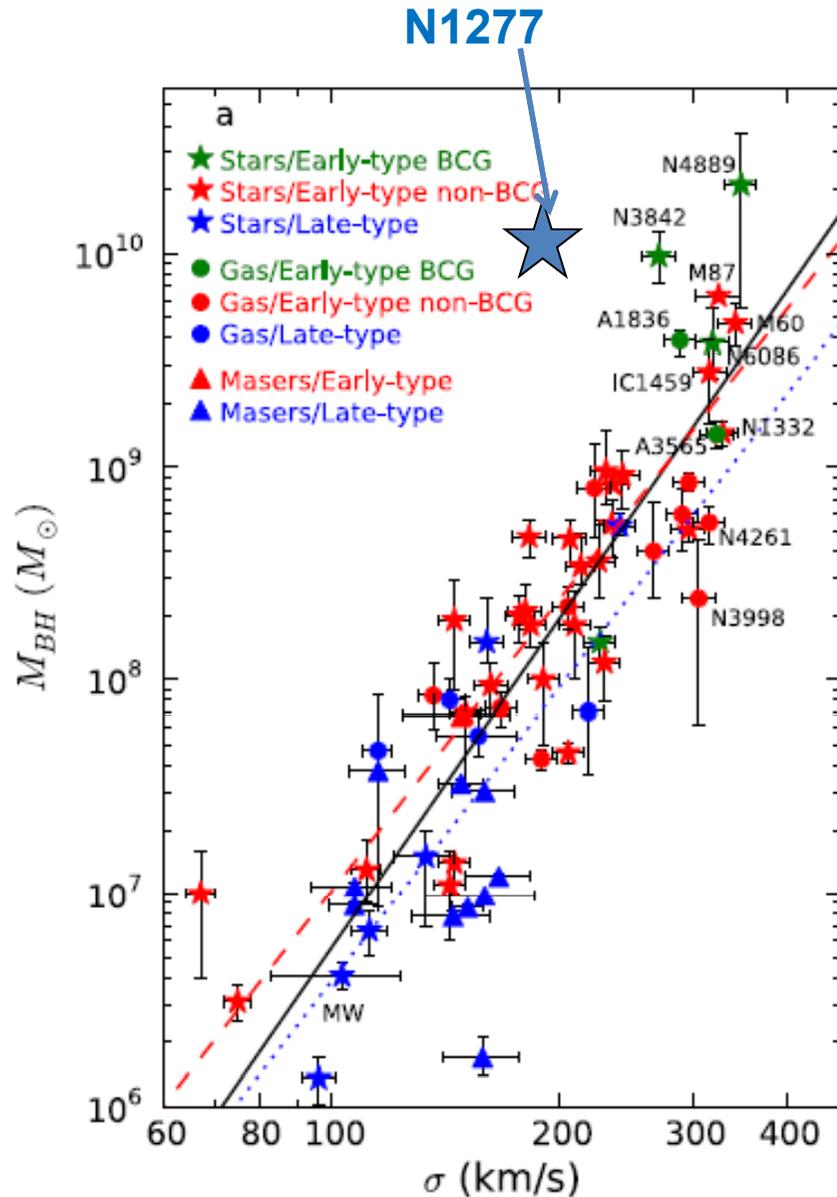
→ La masse des trous noirs est plus grande que prévue

Mais:

Inclinaison incertaine

→ ALMA pourra donner la morphologie, et les inclinaisons

Écarts à la relation M_{\bullet} - M_{bulbe}



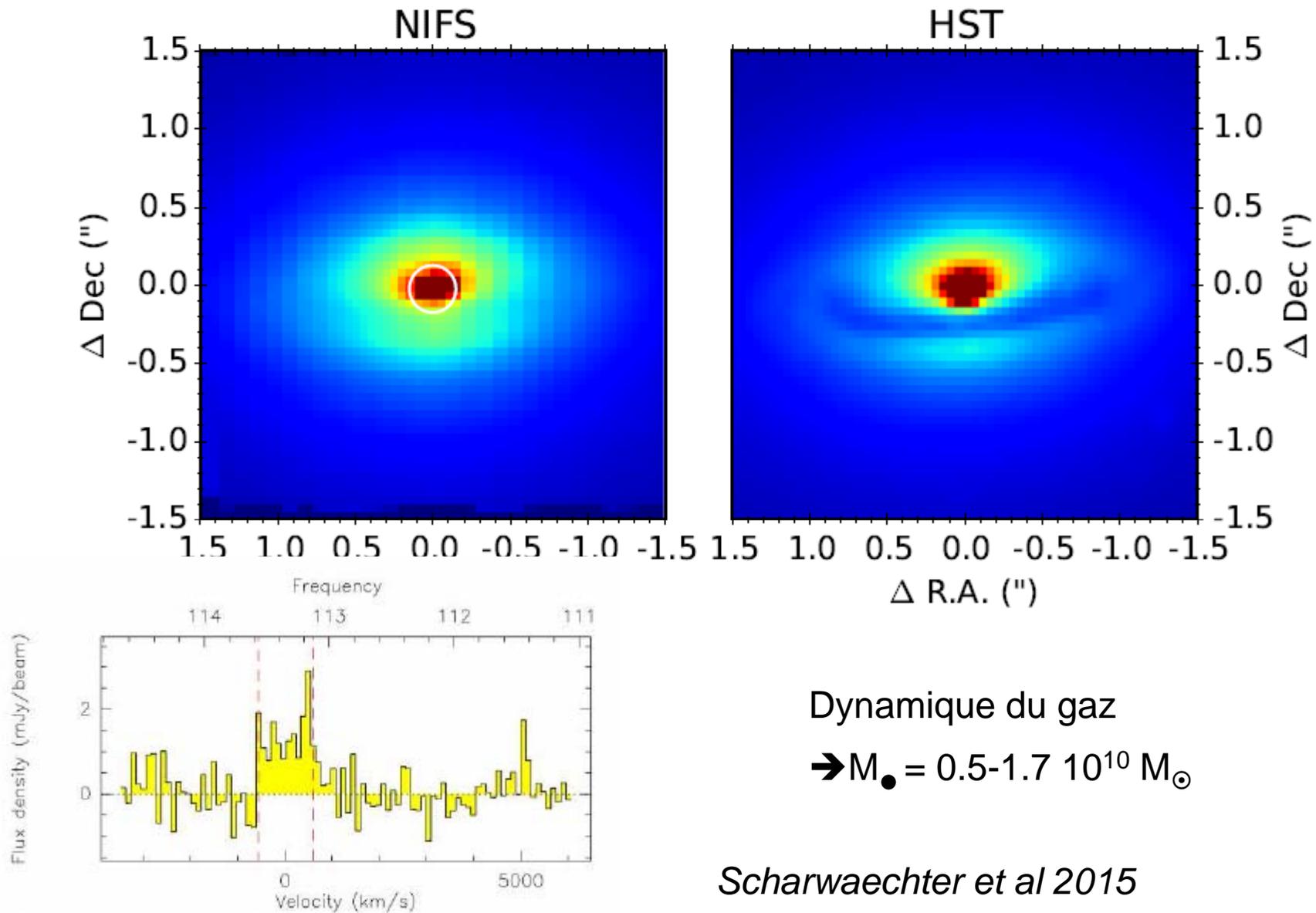
$$M_{\text{bulbe}} \sim 700 M_{\bullet}$$

Parfois, on arrive un peu au-dessus, dans les amas de galaxies

Galaxies cannibales au centre

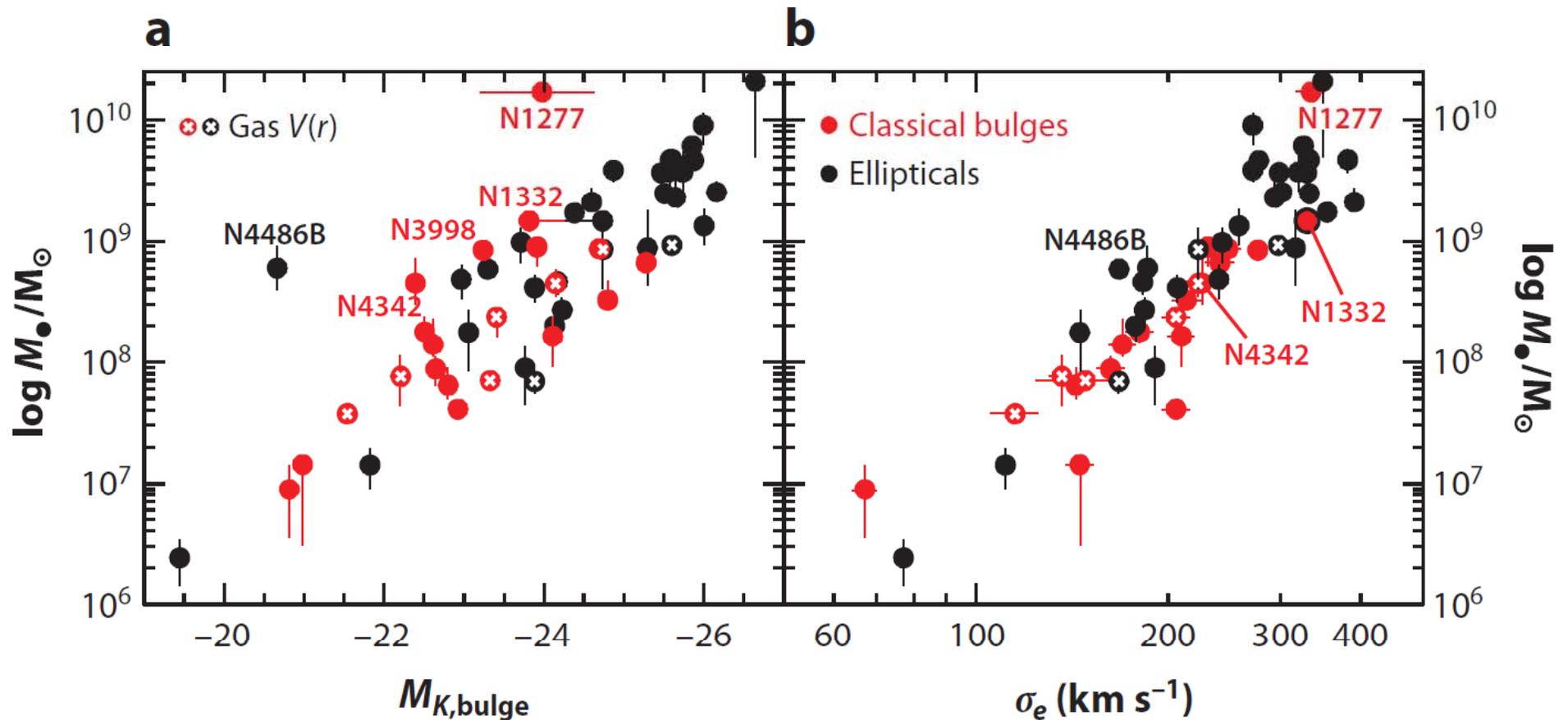
Avalent le gaz chaud avant la formation d'étoiles?

NGC 1277: un trou noir obèse?

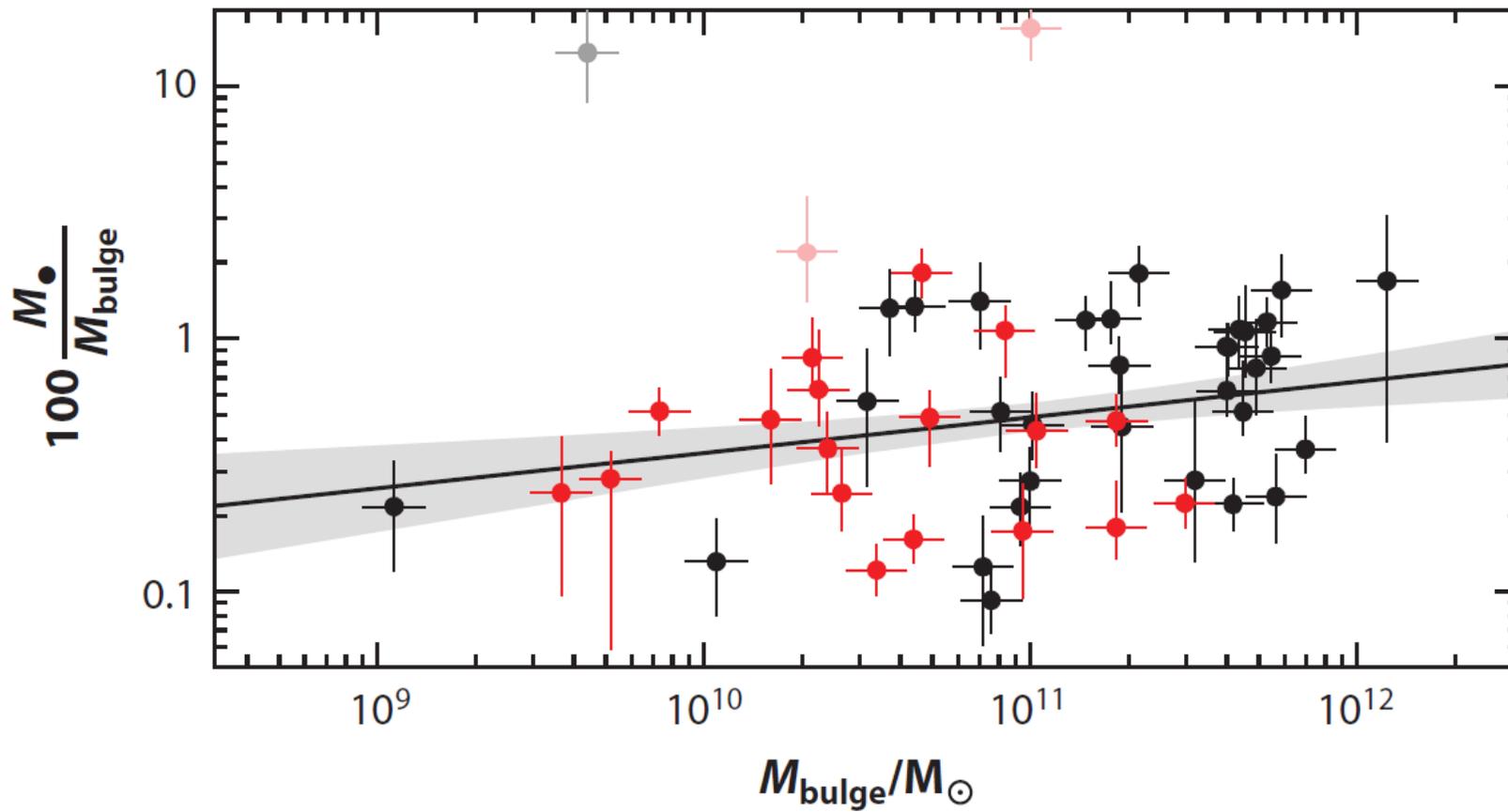


Trous noirs trop massifs?

Peut-être n'est-ce que par méconnaissance de leur bulbe?
Certains mesurent une dispersion σ plus forte...



Rapport M_{\bullet} - M_{bulbe} Entre 0.2 et 1%, selon la masse



Cause ou effet? Distribution de lumière dans les elliptiques et les bulbes

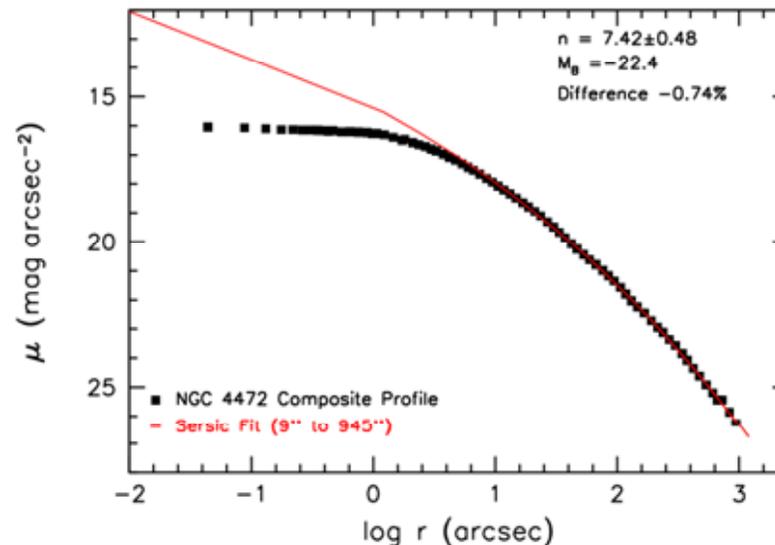
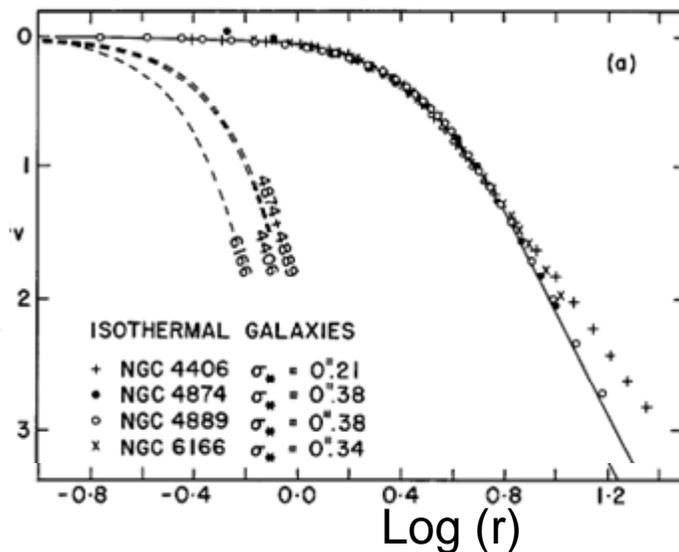
De Vaucouleurs (1948) en $r^{1/4}$

Sersic (1968) en $r^{1/n}$

$$\Sigma_{deV} = \Sigma_0 \exp \left[- \left(\frac{r}{r_0} \right)^{\frac{1}{4}} \right] \quad \Sigma_{ser} = \Sigma_0 \exp \left[- \left(\frac{r}{r_0} \right)^{\frac{1}{n}} \right]$$

$n=1$ disque exponentiel, $n=4$ Elliptique

Mais parfois les profils sont plats au centre \rightarrow coeur



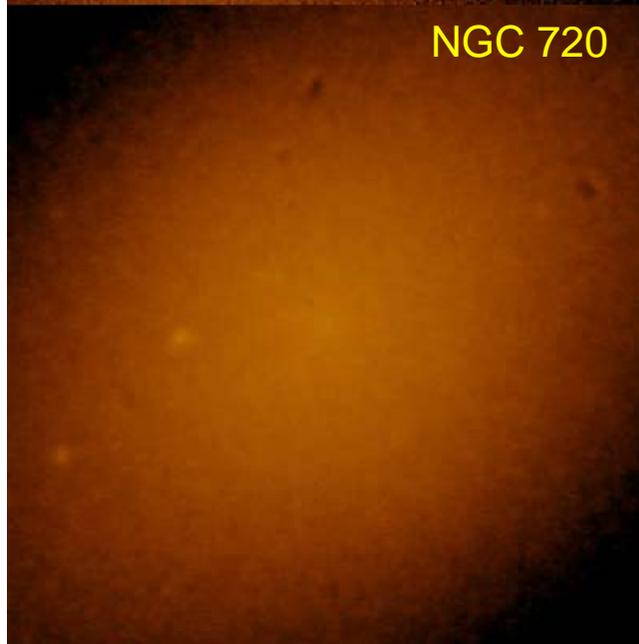
Dichotomie: coeur vs. sans coeur

E5



Distribution des étoiles en pic
de lumière ou cuspide
(loi de puissance, $\Sigma \sim r^{-\alpha}$)

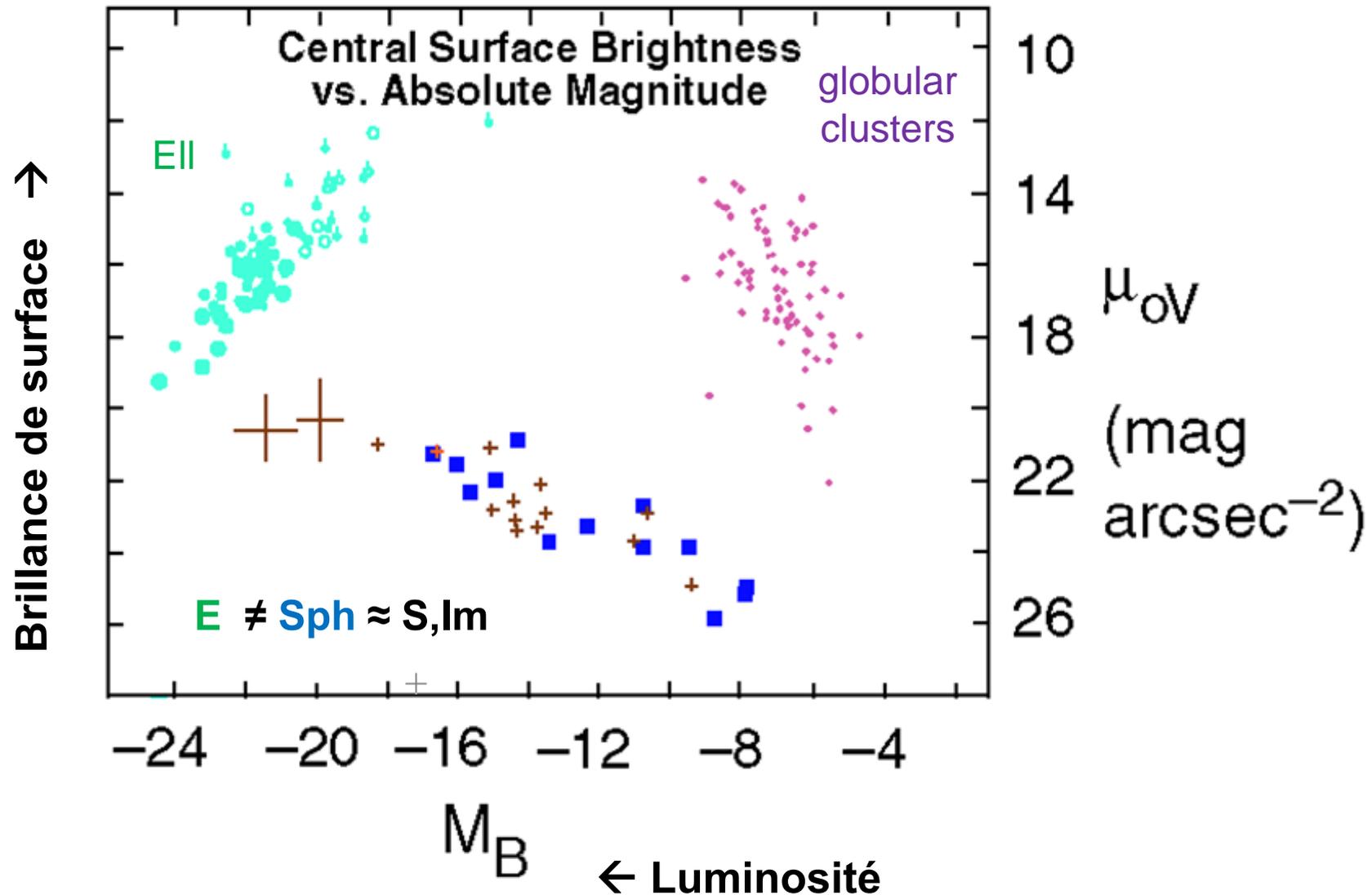
E5



Distribution des étoiles en plateau
de lumière ou coeur

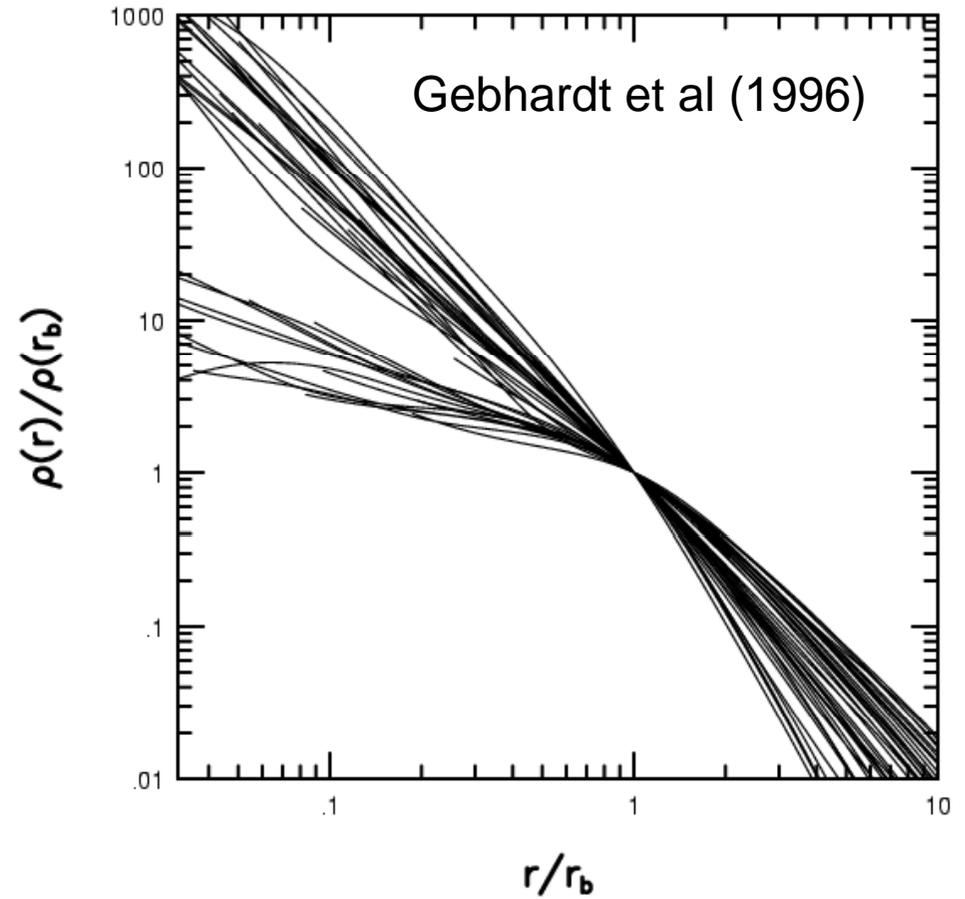
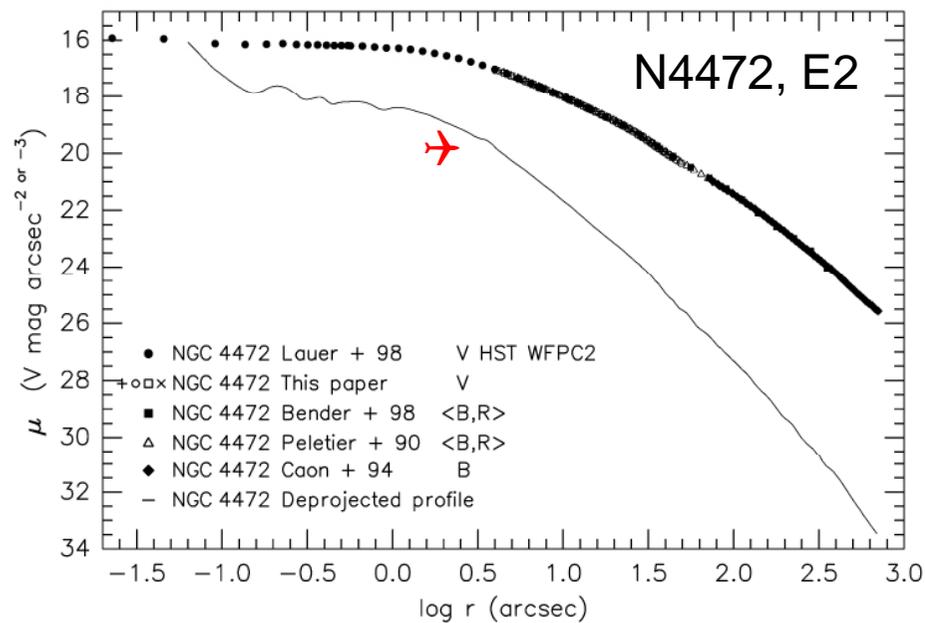
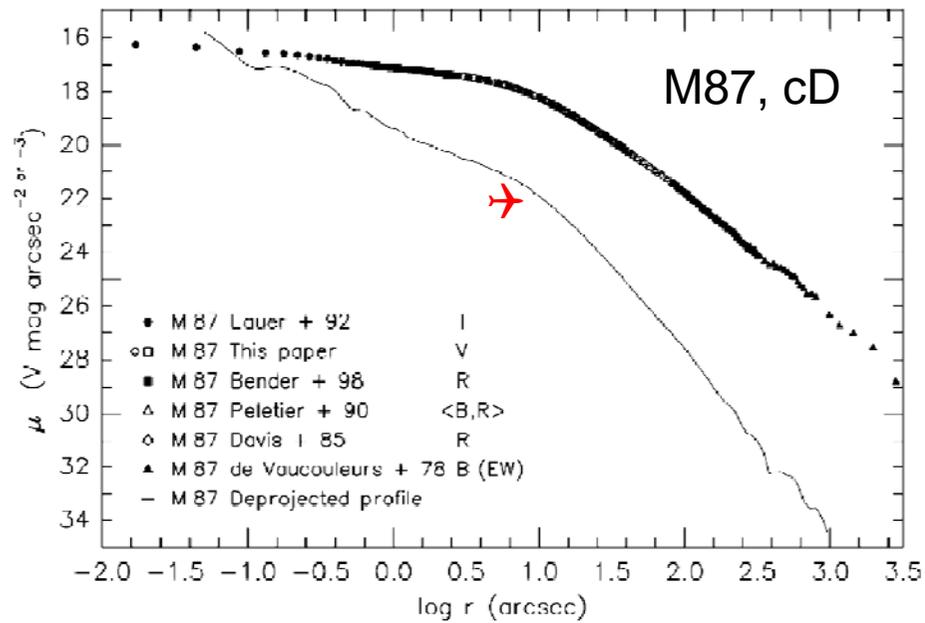


Correlations du "plan fondamental" distinguant les galaxies Elliptiques des Sphéroidales



Kormendy (1985, 1987)

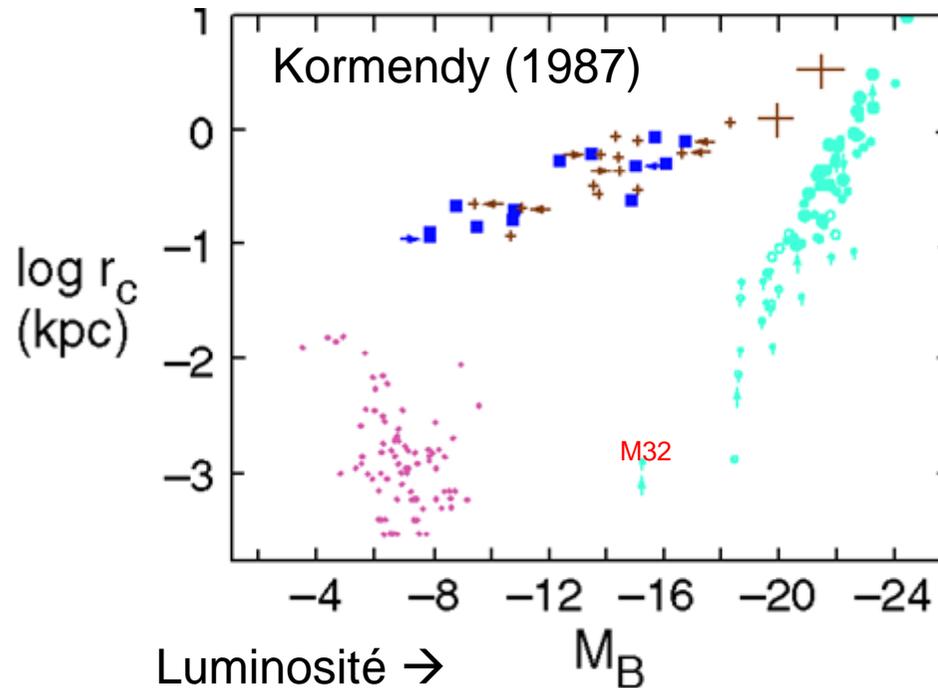
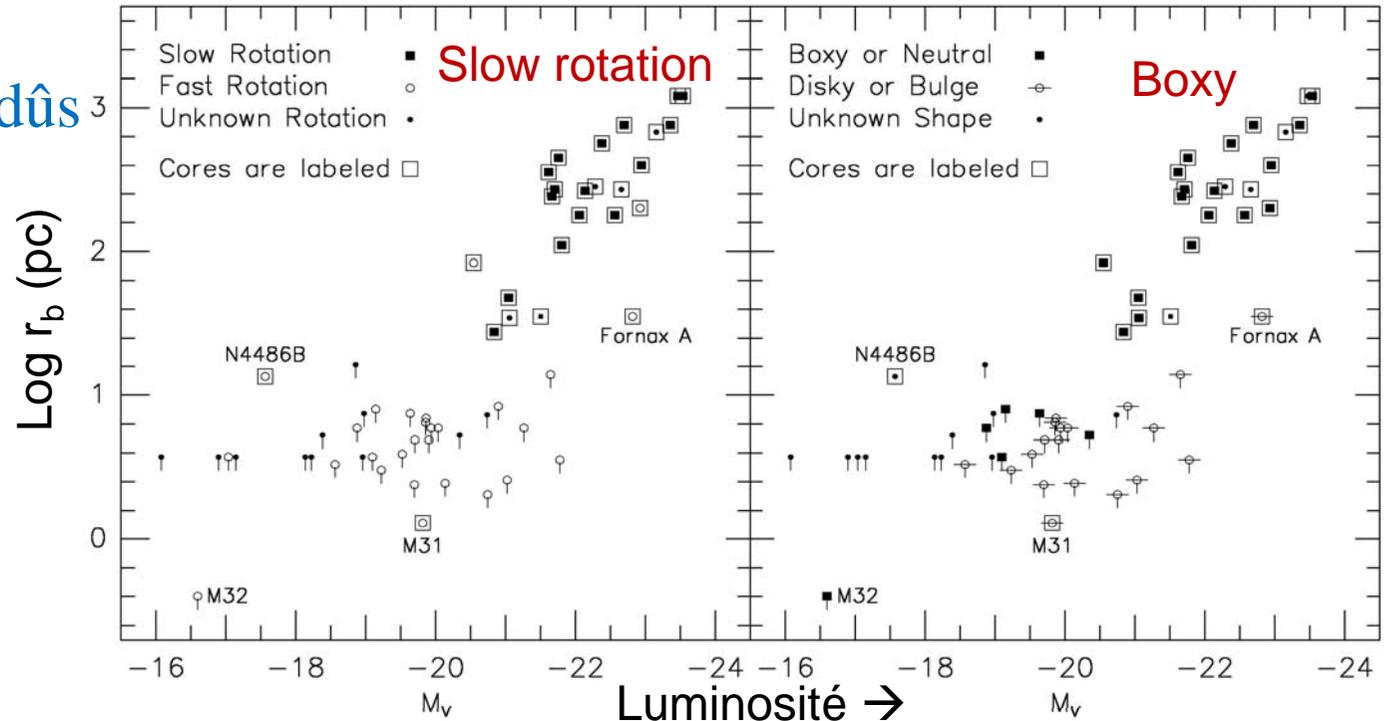
Dichotomie: coeur vs. sans coeur



Le coeur est une
coupure véritable
(Kormendy 1999)

Les cœurs seraient dûs
à la fusion
des trous noirs?

Faber et al (1997),
Kormendy (1999),
Nieto et al (1991)



Dichotomie: coeur
vs. sans coeur

Les galaxies à coeur sont boxy &
rotateurs lents

Les galaxies sans coeur ont un
disque & tournent rapidement

Comment le trou noir influence le bulbe?

Rayon de la sphère d'influence du trou noir $GM_{\bullet}/r_{\text{infl}} = \langle V^2 \rangle$

$$r_{\text{infl}} = GM_{\bullet}/\langle V^2 \rangle$$

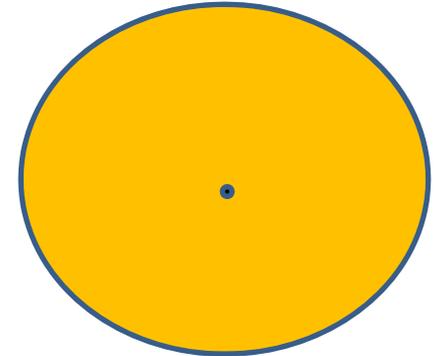
Corrélation observée $M_{\bullet} \sim 0.002 M_{\text{bulbe}}$

Masse du bulbe $M_{\text{bulbe}} \sim 5 \langle V^2 \rangle R_{\text{bulbe}} / G$

$$r_{\text{infl}} \sim 10^{-2} R_{\text{bulbe}}$$

→ Volume d'influence = 10^{-6} Volume du bulbe

Difficile d'imaginer des échanges gravitationnels d'information



Comment le trou noir influence le bulbe?

Energie renvoyée lors de la croissance du trou noir $\varepsilon \sim 0.1$

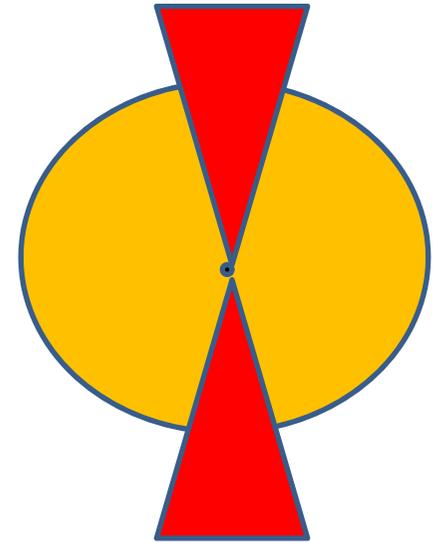
$$L = \varepsilon \, dm_{\text{acc}}/dt \, c^2$$

$$dM_{\bullet}/dt = (1-\varepsilon) \, dm_{\text{acc}}/dt$$

Energie de croissance $E_c = \varepsilon / (1-\varepsilon) M_{\bullet} c^2$

Energie grav. du bulbe $E_{\text{bulbe}} \sim M_{\text{bulbe}} \langle V^2 \rangle$

$$E_c/E_{\text{bulbe}} = \varepsilon / (1-\varepsilon) (M_{\bullet} / M_{\text{bulbe}}) c^2 / \langle V^2 \rangle \sim 400 !$$

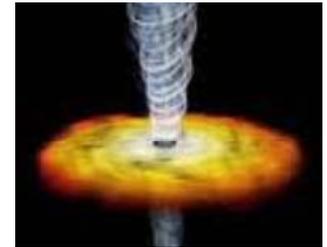


→ Le noyau actif déploie assez d'énergie pour détruire le bulbe

Même si une grande partie de cette énergie est perdue dans l'espace intergalactique, cela suffit pour modérer la croissance du bulbe

Comment suivre l'évolution des trous noirs?

1- Etudier les **noyaux actifs (AGN)** en fonction de **z**: fonction de luminosité, masse obtenue à partir de la BLR



2- Comparaison avec la fonction de masse des trous noirs aujourd'hui **z=0**, basée sur M_{\bullet} - M_{bul} et fonction de L_{bul}

3- **Rayonnement de fond** accumulé, surtout en rayons X

→ Taux de rayonnement ϵmc^2 ? L/L_{edd} ? rôle des fusions?

Phases obscurcies ou peu efficaces?

Quand se forment les trous noirs?

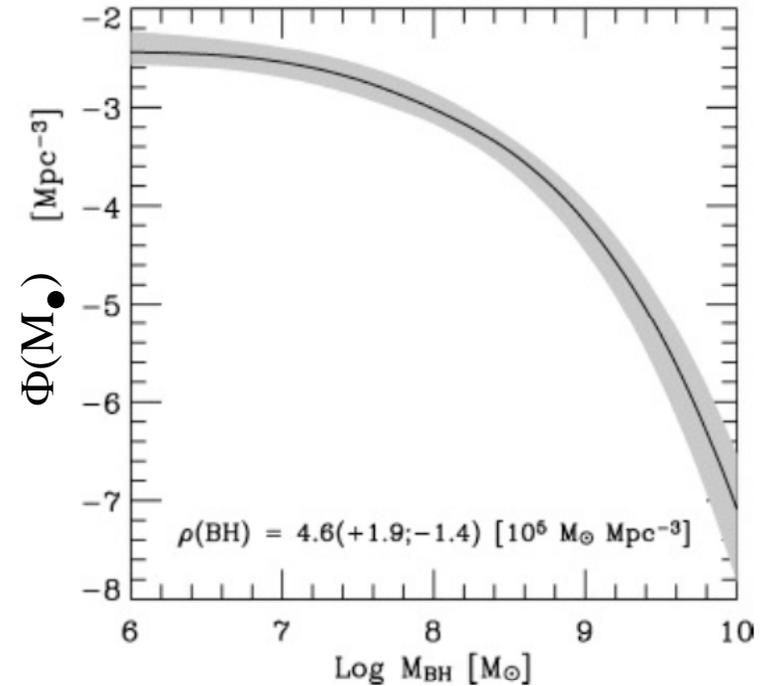
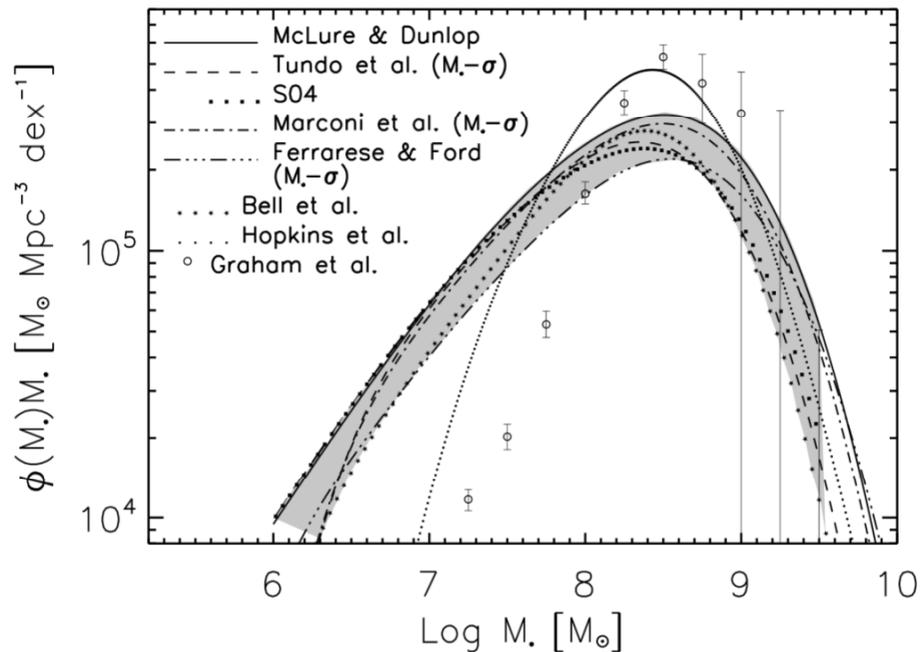


Fonction de masse des trous noirs

$$dn/dM_{\bullet} = \Phi(M_{\bullet})$$

$$\rho_{\bullet} = \int_0^{+\infty} M_{\bullet} \Phi(M_{\bullet}) dM_{\bullet}$$

$$\rho_{\bullet} = 3.5-5.5 \cdot 10^5 M_{\odot} / \text{Mpc}^3$$



Marconi et al 2004

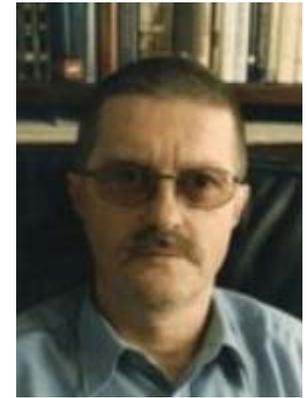
Shankar 2009

Argument de Soltan (1982)

$$L = \varepsilon \, dm_{\text{acc}}/dt \, c^2$$

$$dM_{\bullet}/dt = (1-\varepsilon) \, dm_{\text{acc}}/dt$$

$$dM_{\bullet}/dt = (1-\varepsilon)/\varepsilon \, L/c^2 \quad \rightarrow \textit{s'accumule dans tous les noyaux}$$



Andrzej Soltan

En intégrant la fonction de luminosité des AGN $\Phi(L, z)$

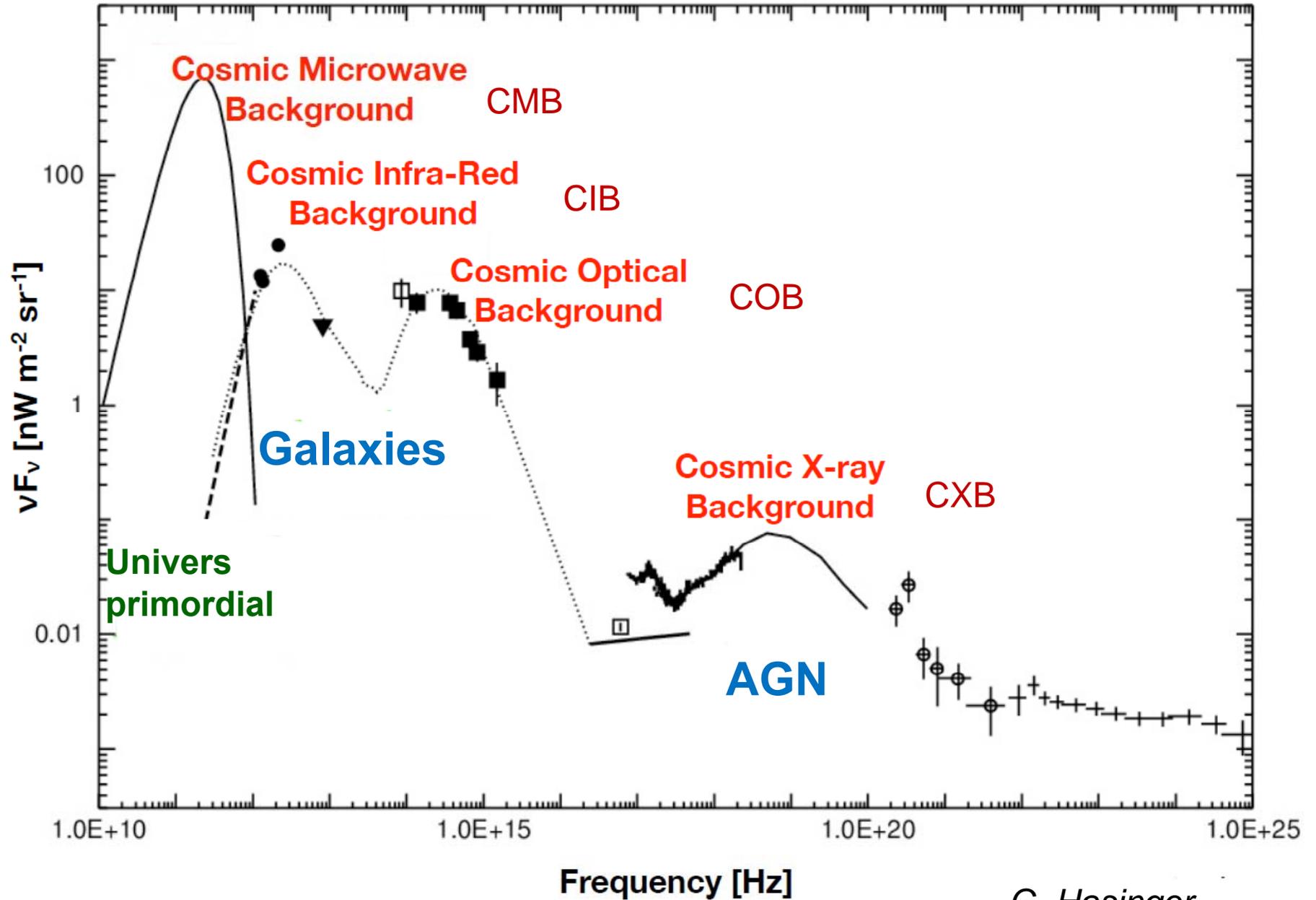
On obtient $=2.2 \cdot 10^5 \, M_{\odot} / \text{Mpc}^3$ avec $\varepsilon = 0.1$

On doit obtenir le même résultat qu'en intégrant aujourd'hui la fonction de masse de tous les trous noirs dormant

$\rho_{\bullet} = 3.5\text{-}5.5 \cdot 10^5 \, M_{\odot} / \text{Mpc}^3$, soit 1.6-2.5 plus grand

**\rightarrow Les AGN sont obscurcis, ou rayonnent de façon inefficace
Ou bien le calcul est inexact**

Rayonnement de fond cosmique

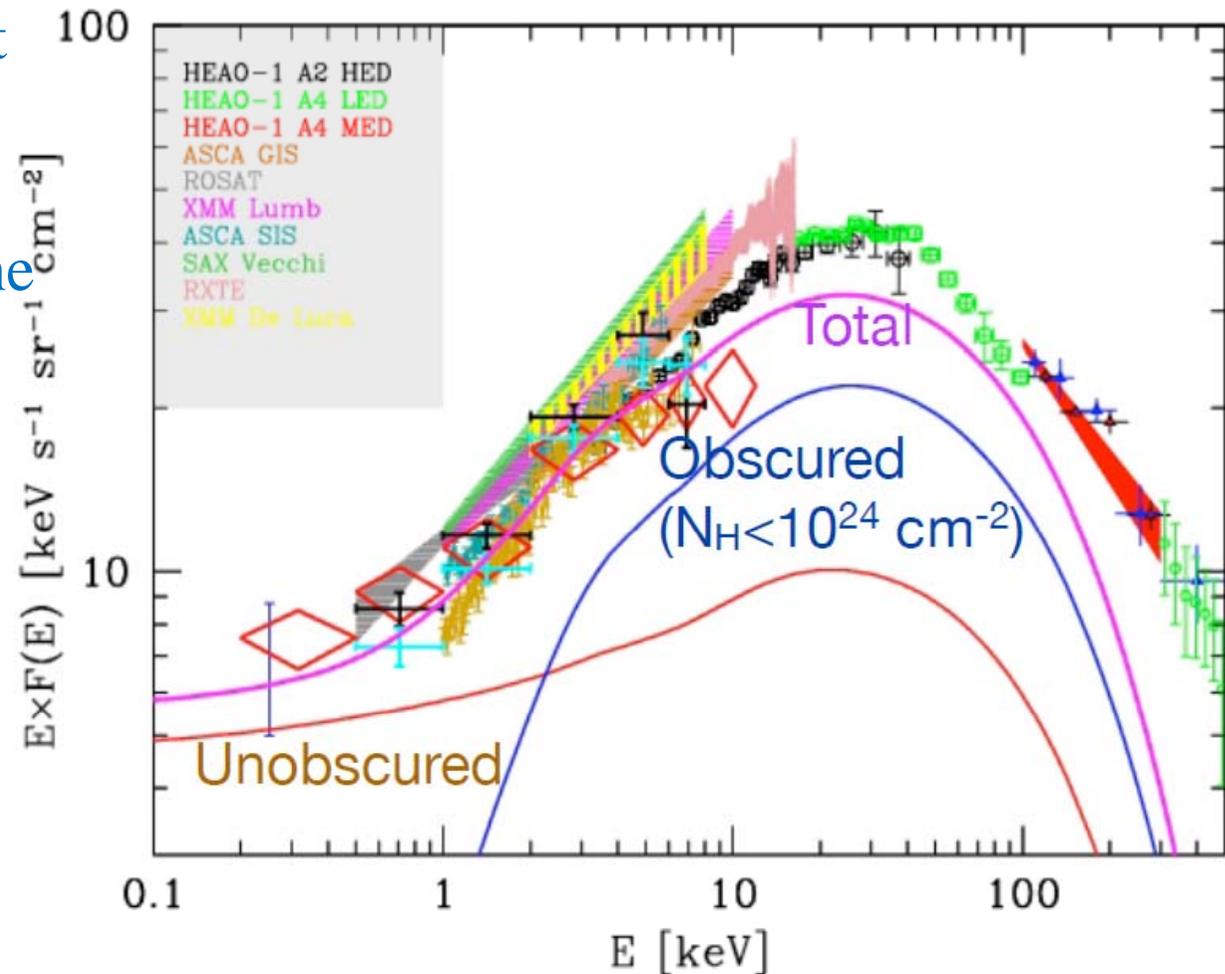


G. Hasinger

Spectre en rayons X des quasars

Les rayons X permettent de détecter les AGN obscurcis
Mais jusqu'à une colonne densité de 10^{24}cm^{-2}

Au-delà, même les X ne sortent pas, ce sont les sources dites « Compton-thick »

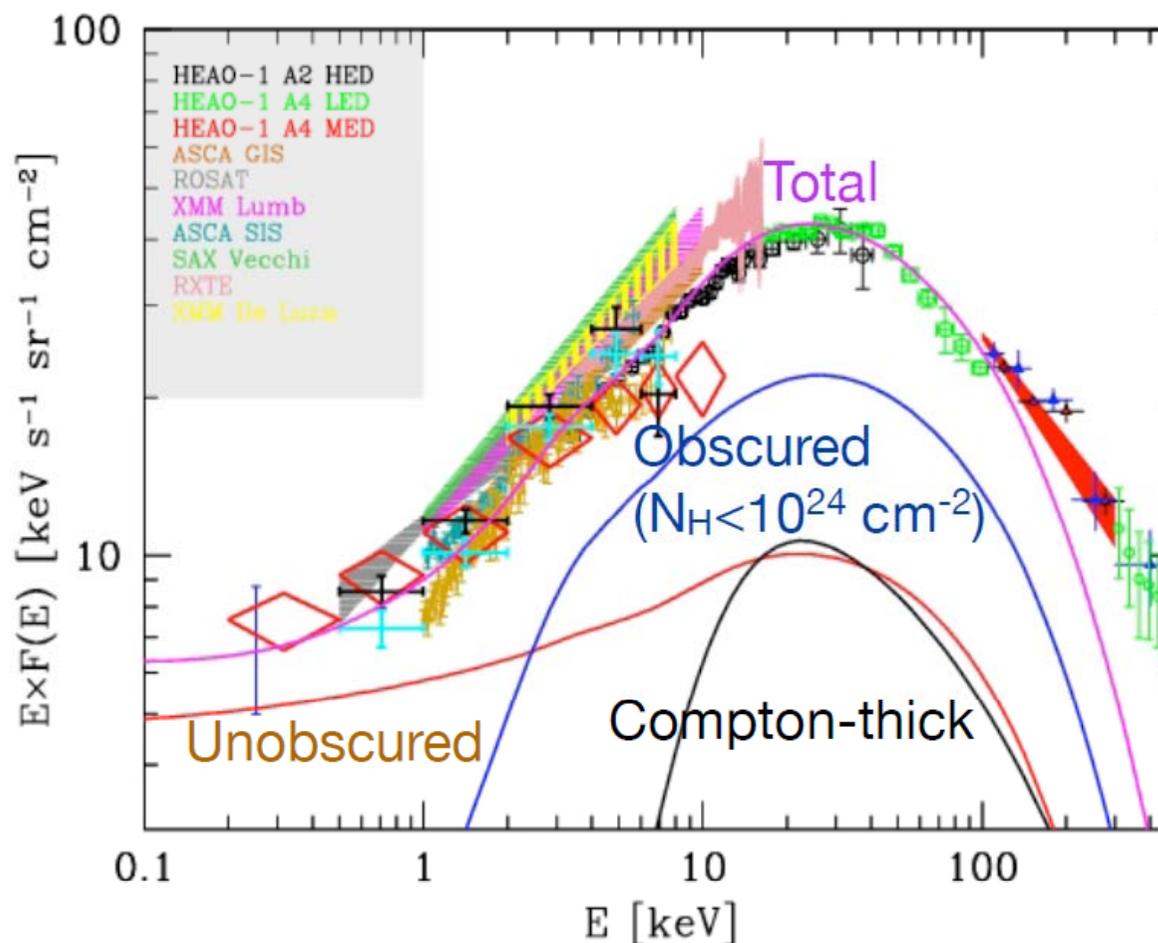


Prendre en compte les « Compton-thick »

Une fois pris en compte les quasars les plus obscurcis

En supposant que leur fonction de luminosité est la même que pour les autres (uniquement facteur de proportionnalité)

→ On arrive à retrouver les observations

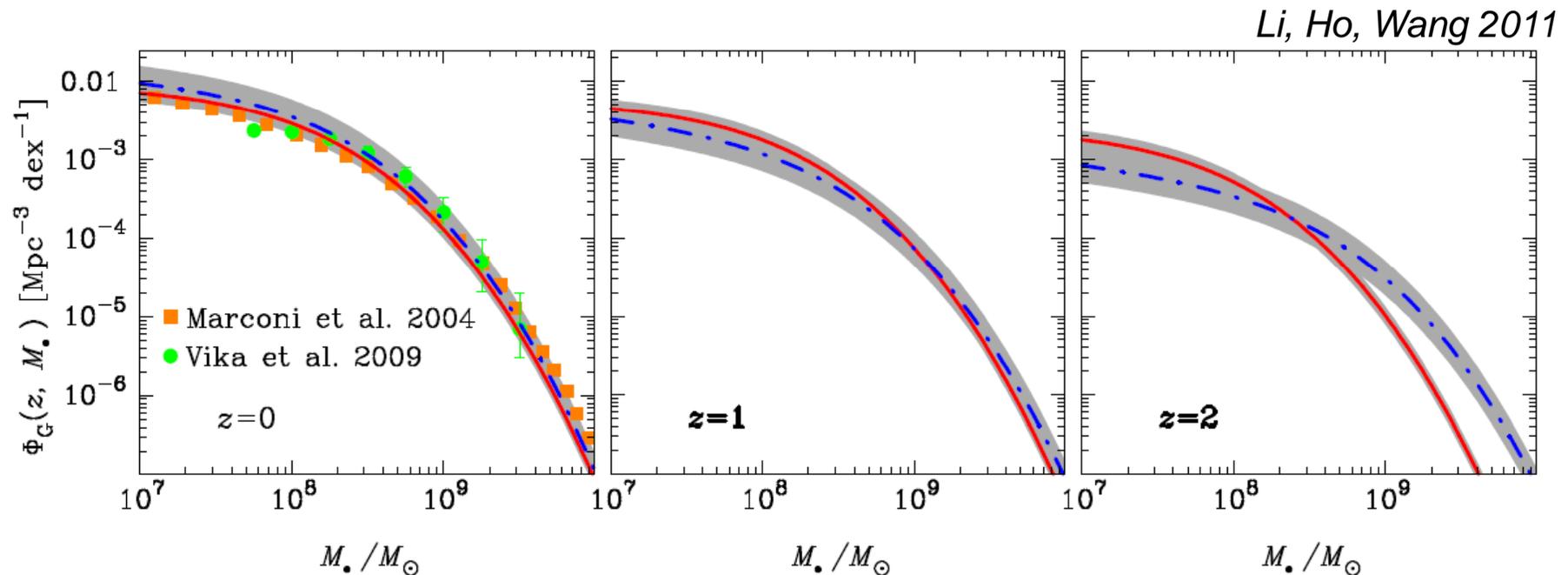


Fonctions de luminosité versus z

$$dN = \Phi(L,z) dV dL \quad \text{Recensement AGN de L donnée, à z donné}$$

Pour corriger le biais de Malmquist, dû à la détection des objets seulement au-dessus d'un flux limite F_{lim} , on utilise le volume maximum basé sur la distance $D_{\text{max}}^2(z) = L / 4\pi F_{\text{lim}}$

$$V_{\text{max}} < V, \quad \Phi_{\text{corr}}(L,z) = dN/(dV_{\text{max}} dL) > \Phi(L,z) = dN/(dV dL)$$



Fonction de luminosité des AGN

Fonction en loi de puissance double α et β

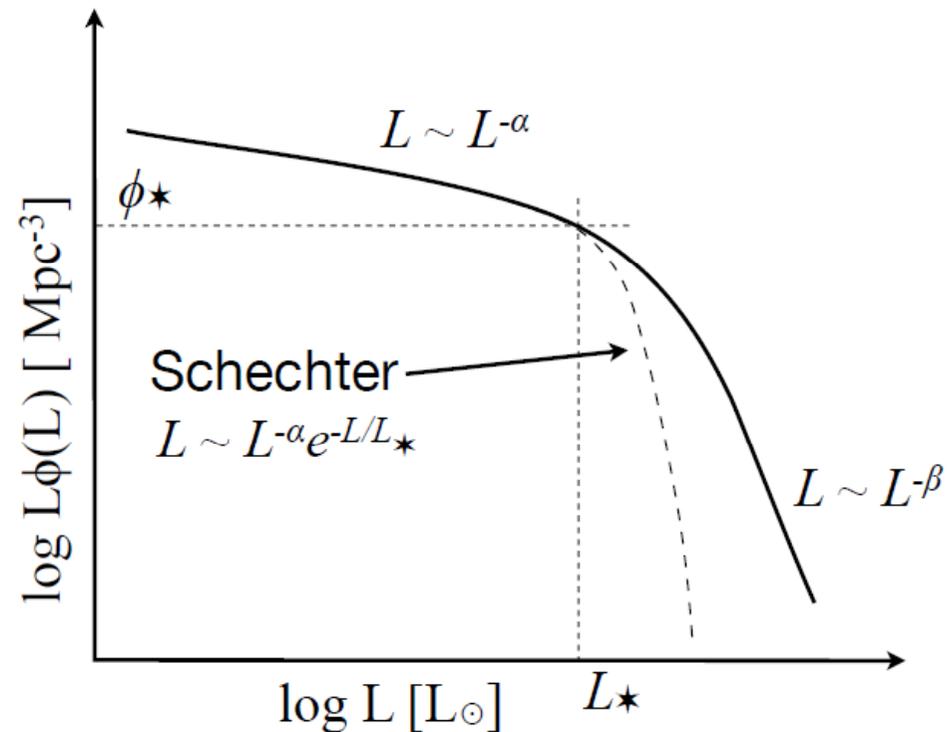
Différente de la fonction des galaxies

Loi de Schechter

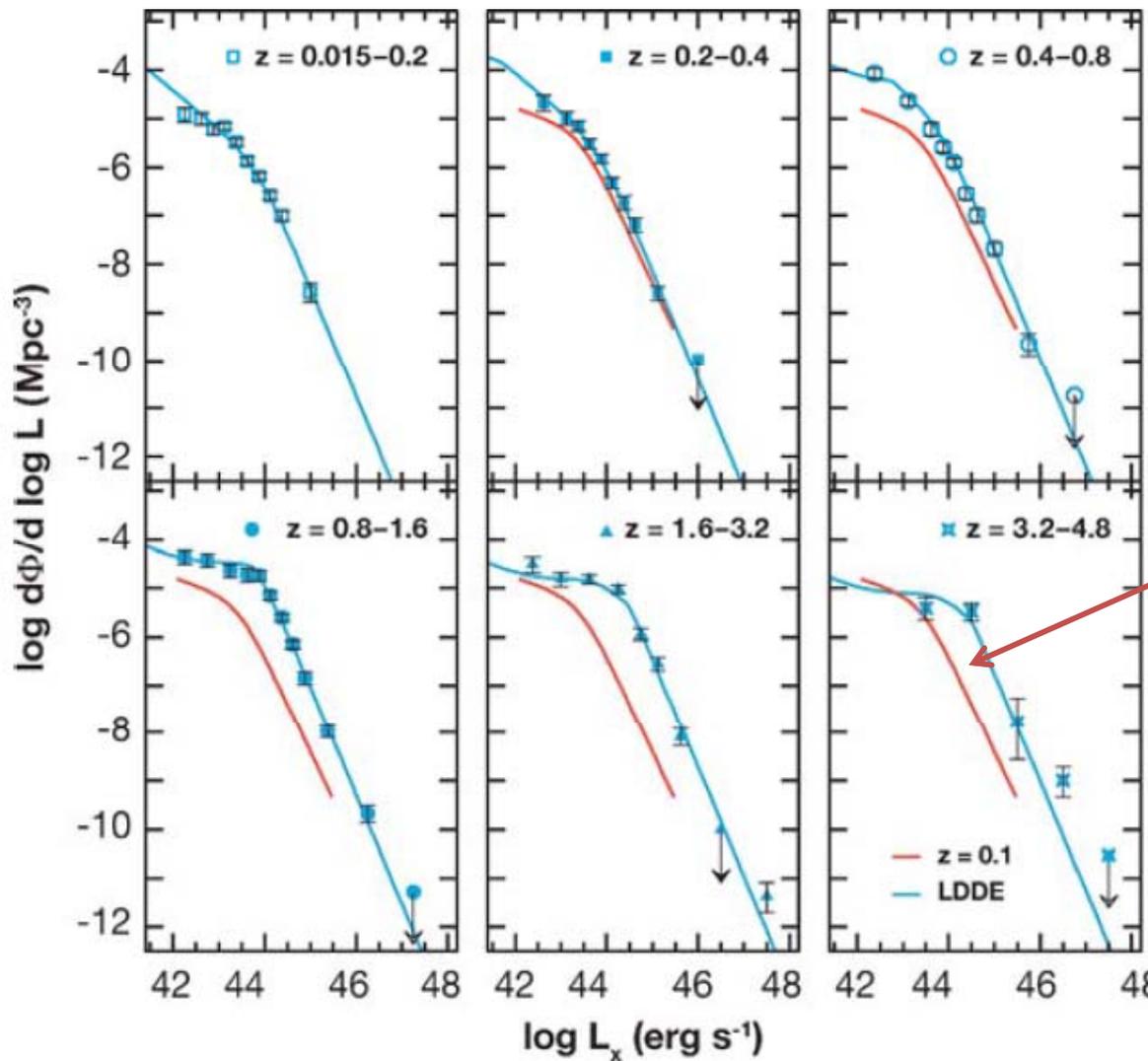
Puissance α + exponentielle

$$\phi(L) = \phi(L_*) \left(\frac{L}{L_*} \right)^{-\alpha} e^{-\left(\frac{L}{L_*} \right)}$$

$$\phi(L) = \frac{\phi(L_*)}{\left(\frac{L}{L_*} \right)^\alpha + \left(\frac{L}{L_*} \right)^\beta}$$

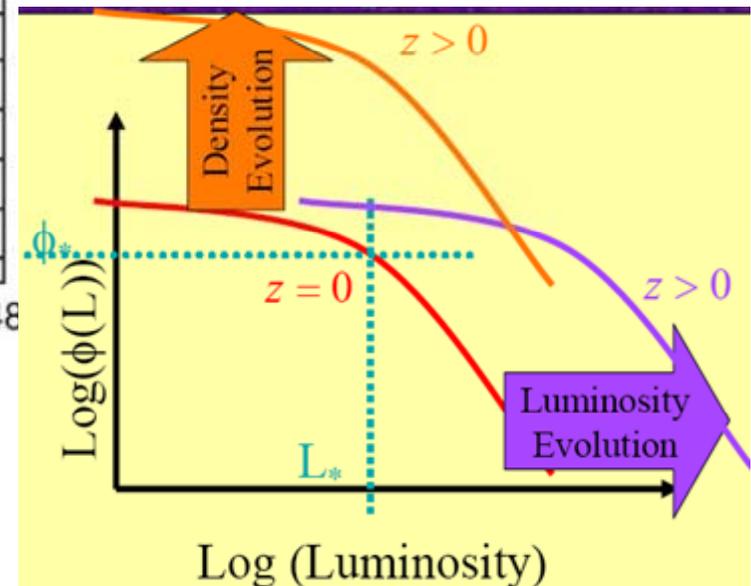


Plusieurs modèles pour rendre compte des obs

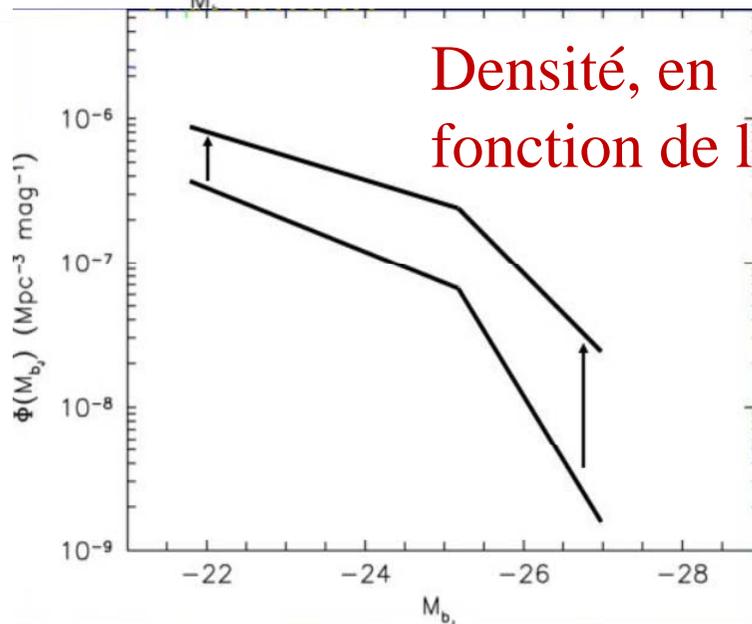
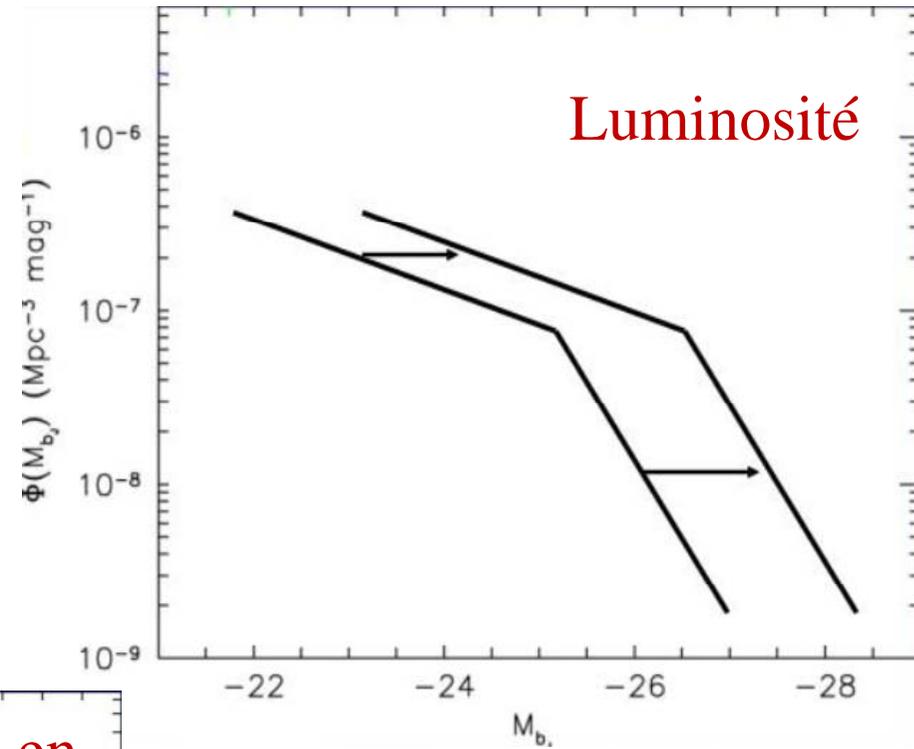
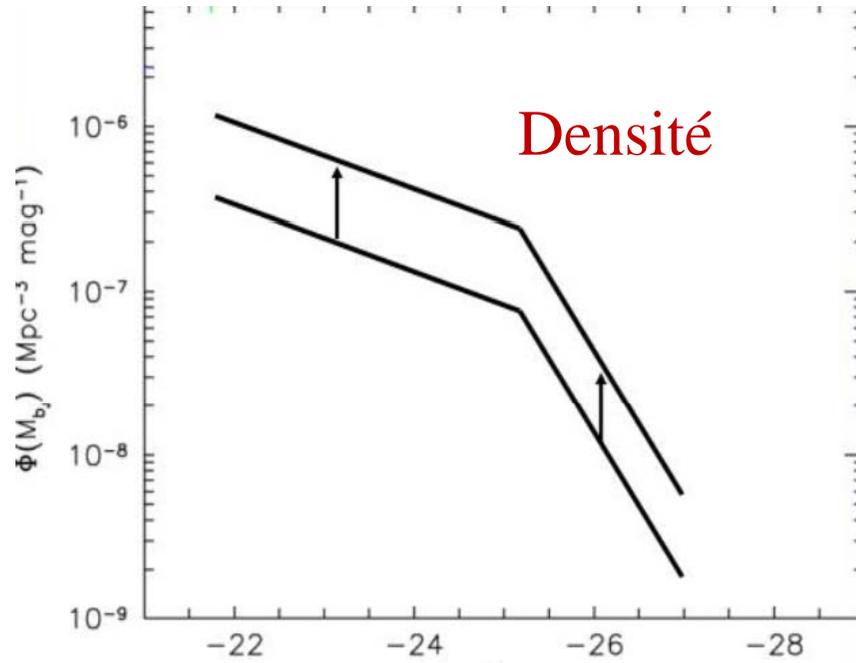


Pas seulement une
Pure Lum Evolution PLE
Pure Density Evolution PDE

Référence $z=0$

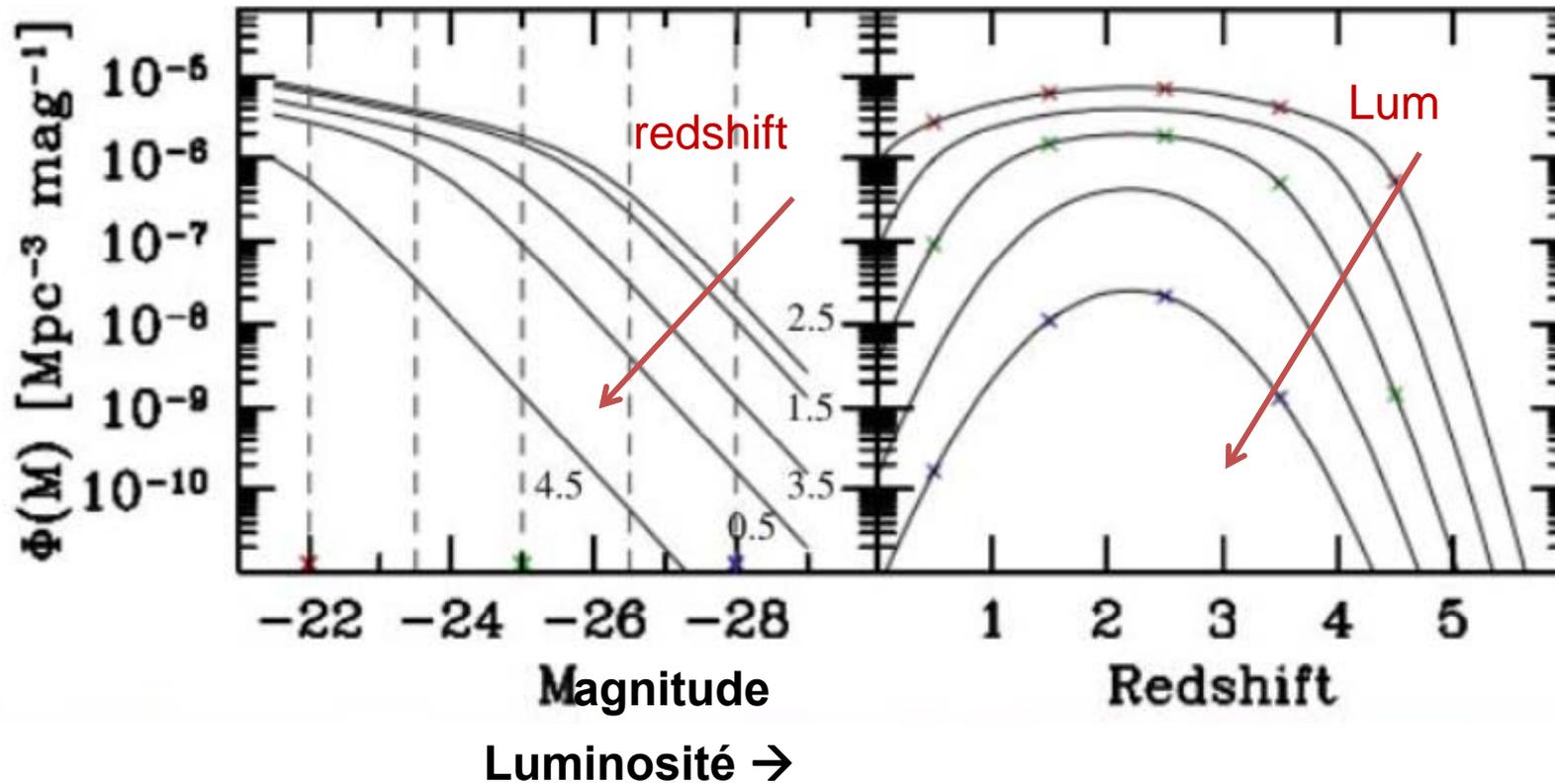


Evolution en densité ou luminosité?



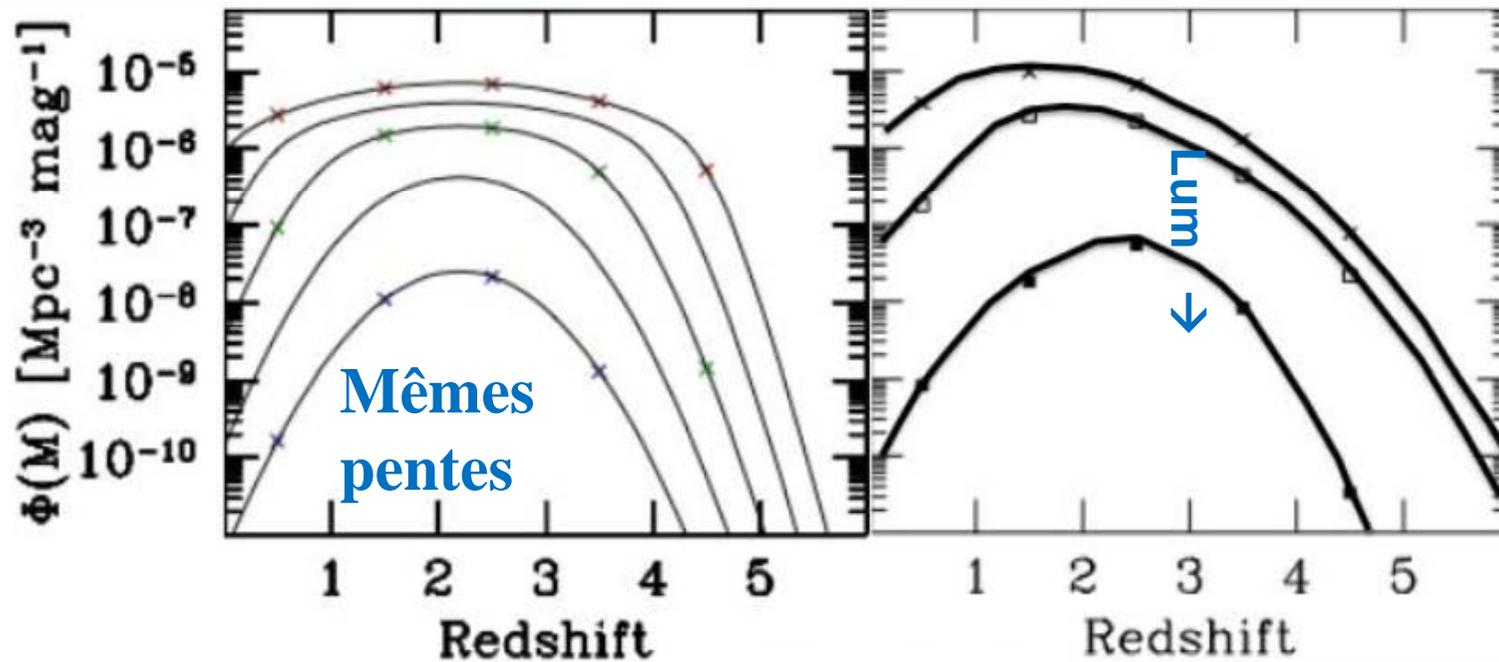
→ Les pentes changent

Distribution en Mag (ou L) et redshift



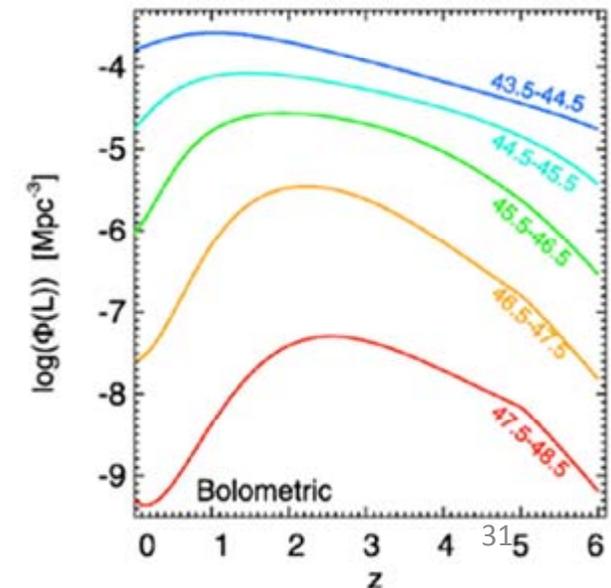
La dépendance en Luminosité et redshift sont deux aspects indissociables → Fonction à 3D

Downsizing → Les pentes doivent changer

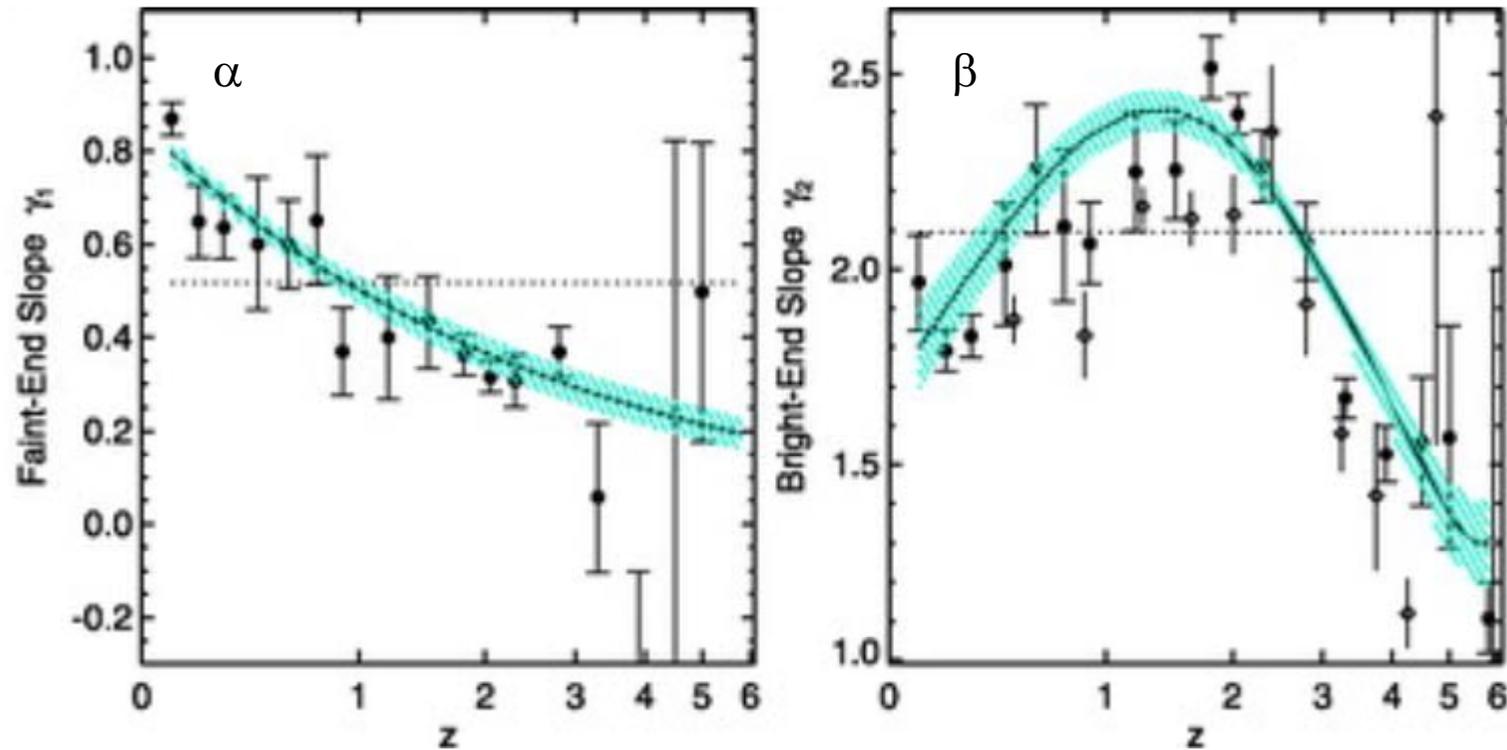


Si les observations montrent que les AGN de plus fortes masses et luminosités se forment plus tôt (« downsizing » ou formation anti-hiérarchique), alors cela implique des évolutions couplées Luminosité et densité

→ Les pentes α et β doivent changer avec z



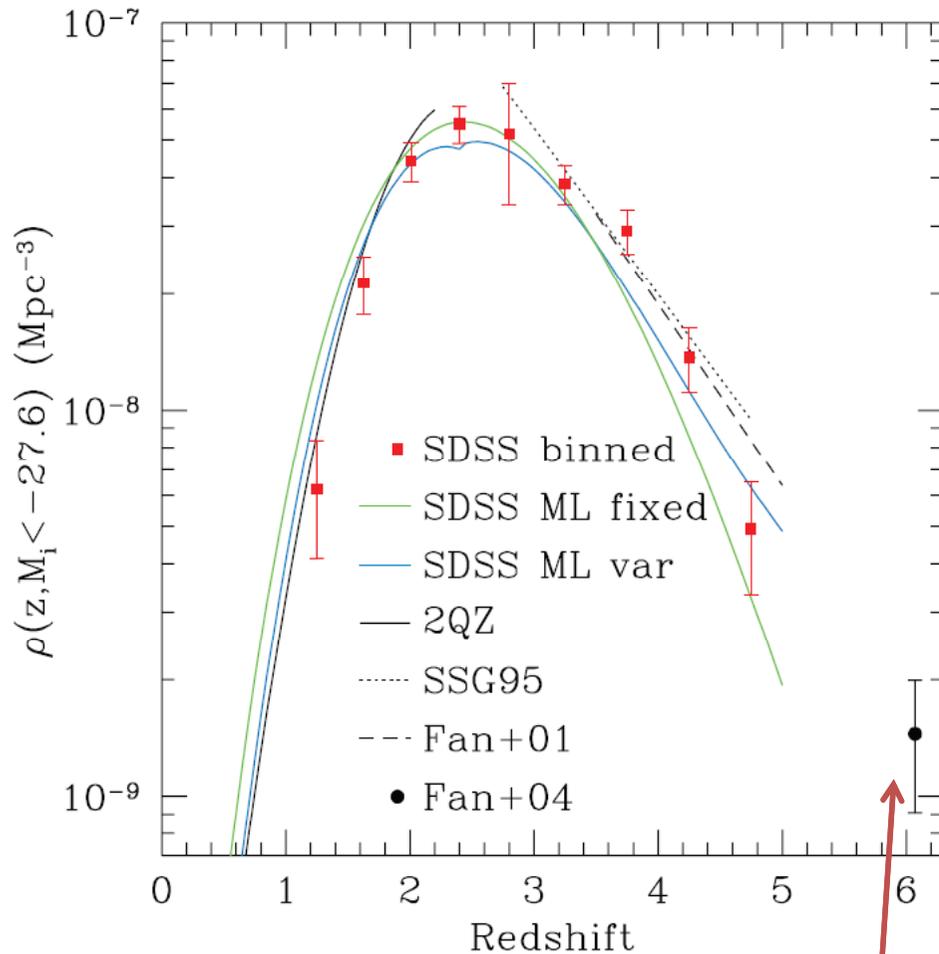
Evolution des pentes avec z



La fonction de luminosité devient plus plate à grand z

→ Ceci devrait être reproduit par les modèles

Distribution de luminosité des QSO avec z

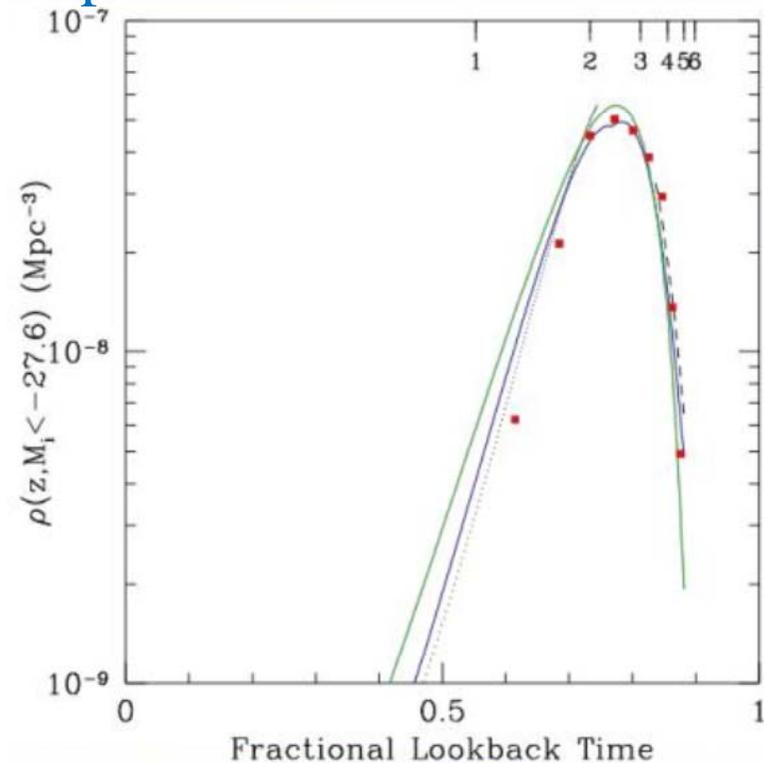


Le plus surprenant est à z=6

Le pic est à $z=2.15$

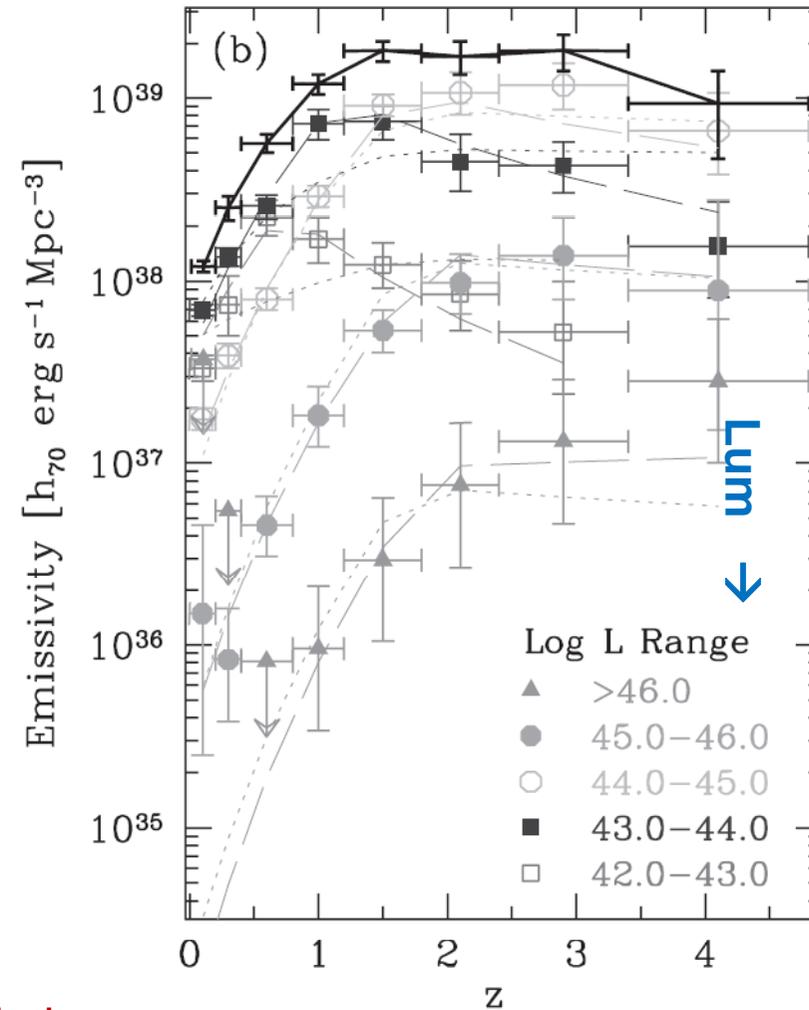
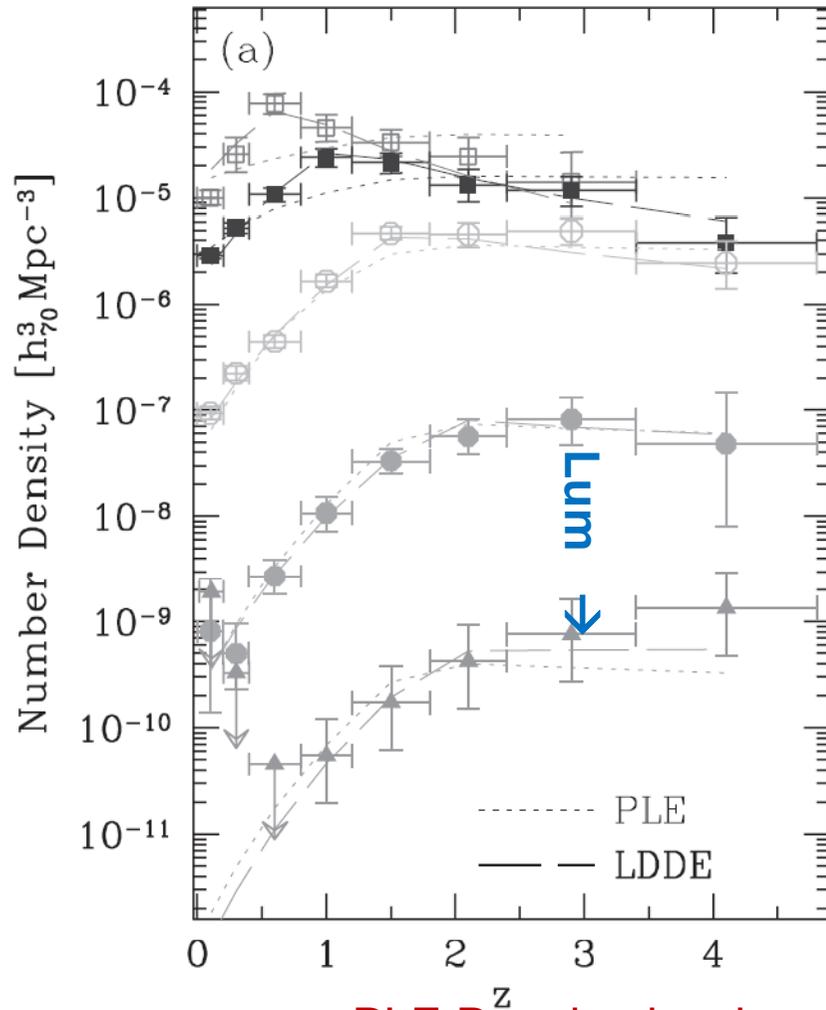
Comme la formation d'étoiles,

Encore plus marqué en fonction du temps!



Distribution N et L en rayons X

Evidence de « downsizing »: les trous noirs plus massifs se forment les premiers, plus rapidement

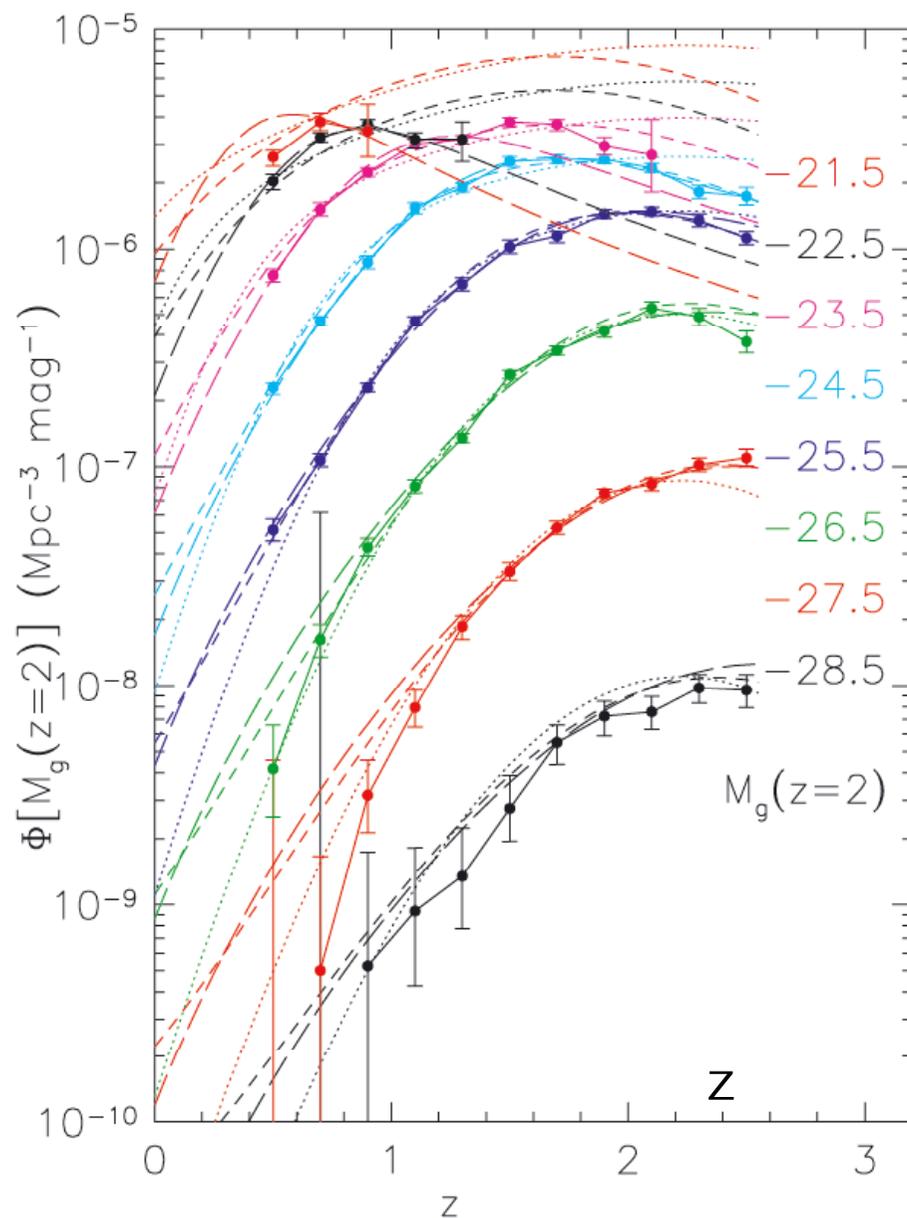


PLE Pure luminosity evolution

LDDE Lum-dependent density evolution

*Hasinger et al 2005*³⁴

Modèles et Downsizing

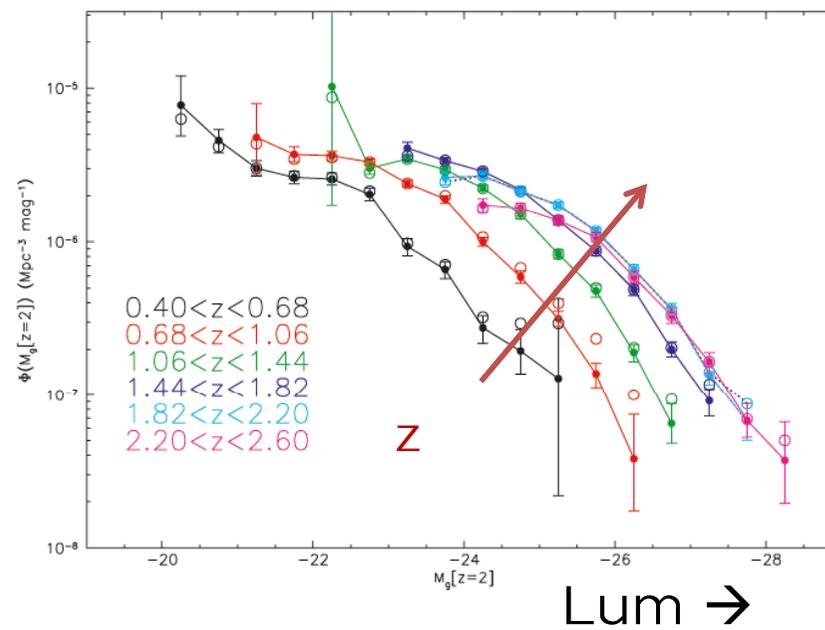


10 600 quasars, $200^{\circ 2}$
 $0.4 < z < 2.6$

PLE;.....

LDDE ----

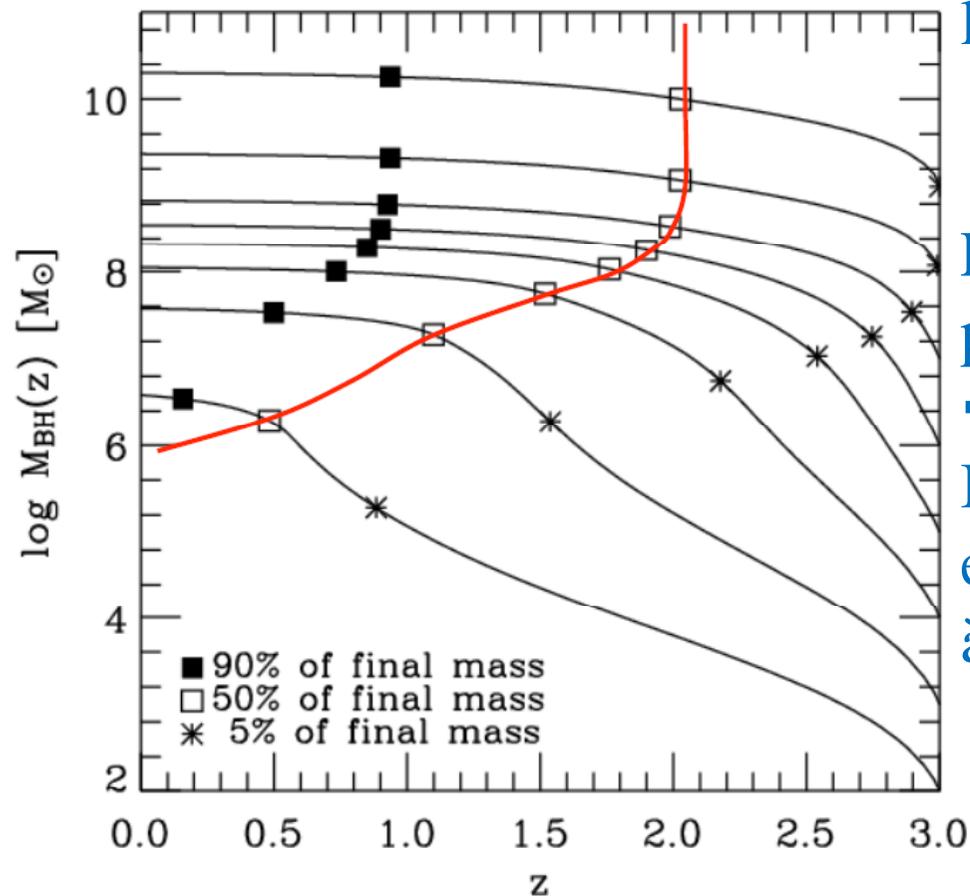
LE +DE ----- meilleur fit



Croom et al 2009

Croissance anti-hiérarchique des trous noirs

50% de la masse finale



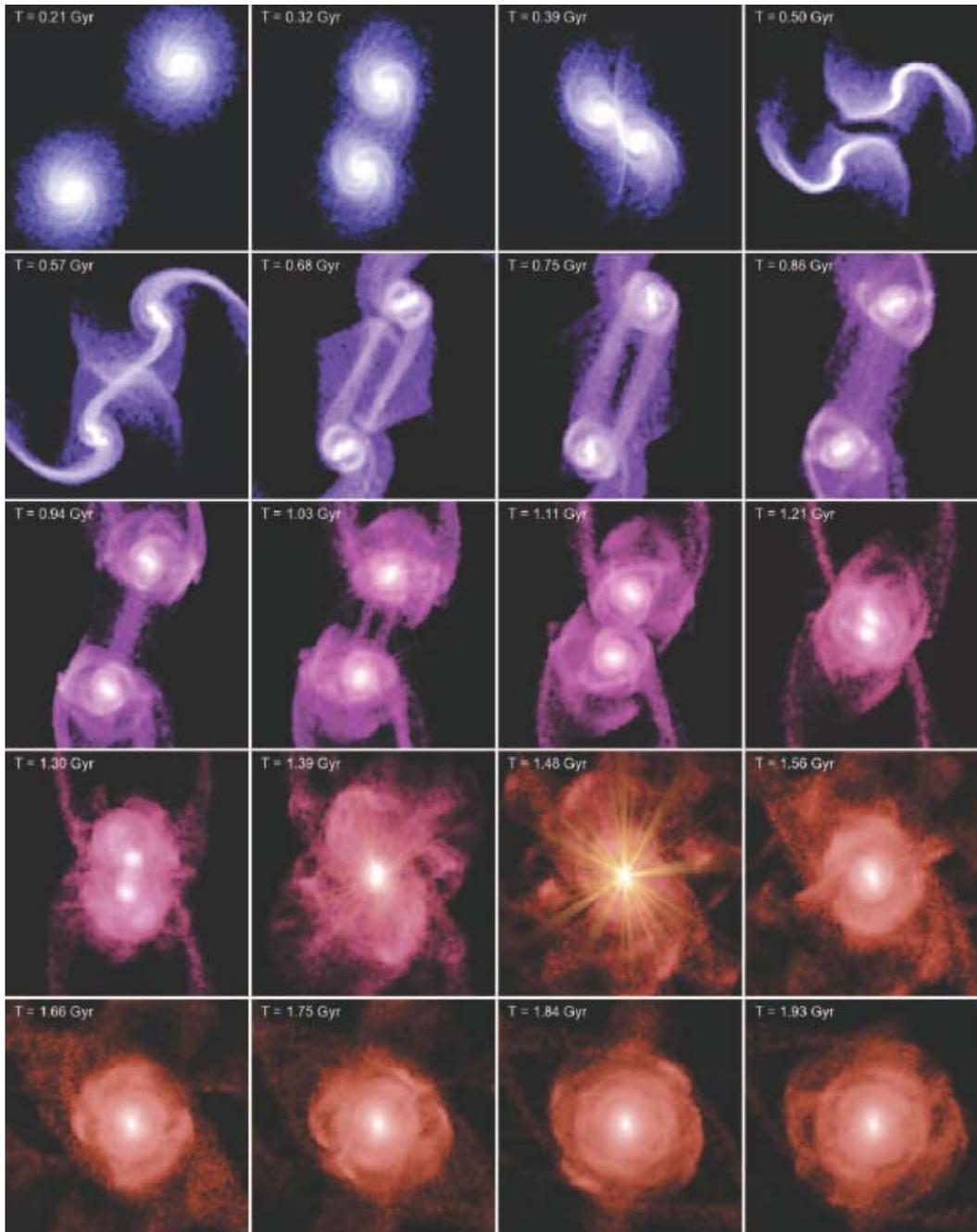
Les TN massifs sont formés dans les puits de potentiel plus profonds et croissent les premiers

Les TN légers se forment dans les puits peu profonds

→ Il se forment après

Ils sont sensibles au feedback et prennent beaucoup de temps à croître

Modèle: les quasars sont activés durant les fusions de galaxies



Interaction entre deux galaxies spirales

**Drainage du gaz vers le centre
Flambées de formation d'étoiles**

**Après le starburst,
→ activité des noyaux, AGN**

**Couleur: fraction de gaz
← Episode Quasar**

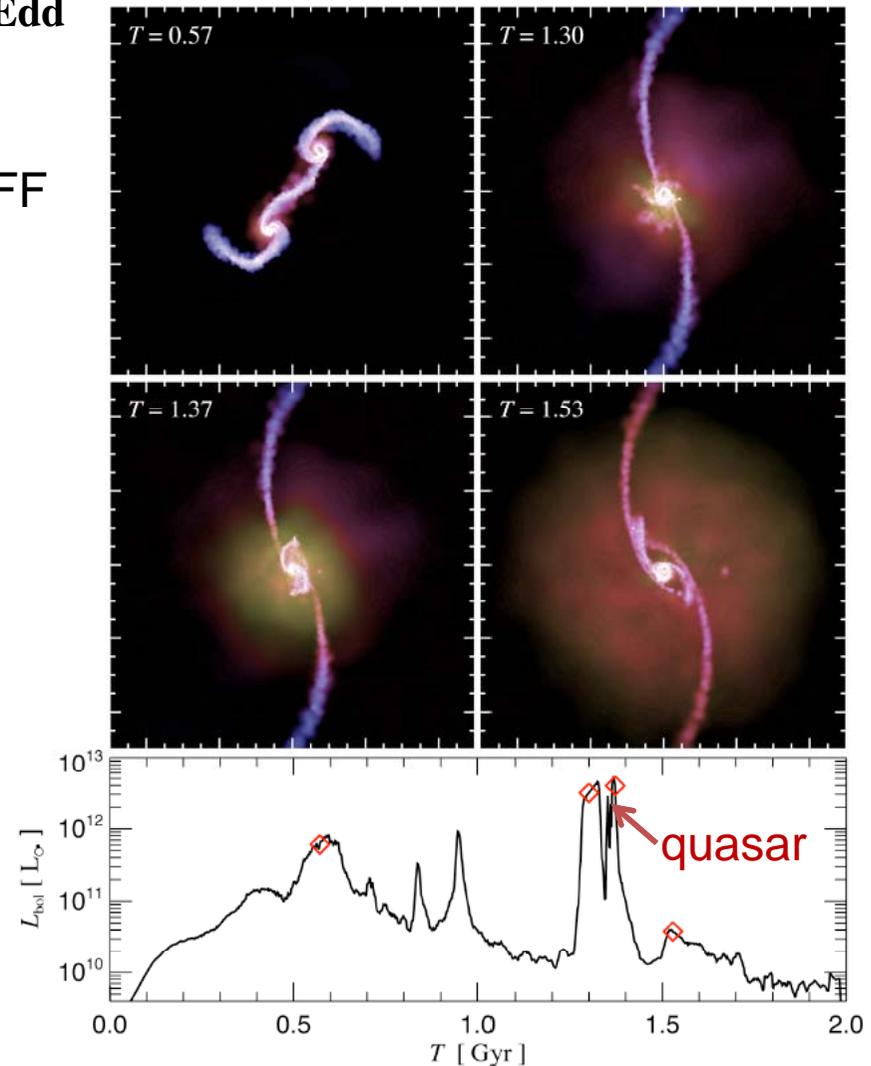
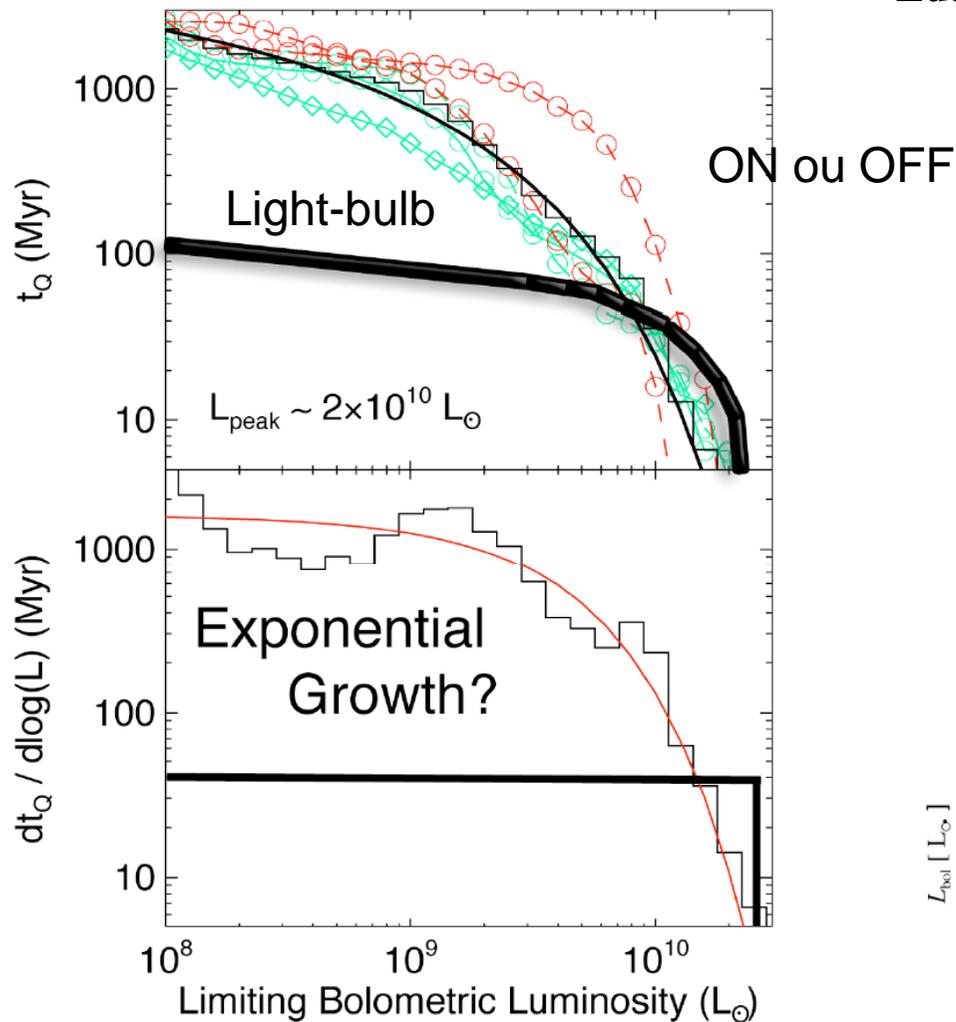
Fusion des trous noirs (2Gyr)

Hopkins et al 2006

Evolution temporelle de l'activité

Durée de vie intégrée du quasar, t_Q , au-dessus d'une Luminosité L

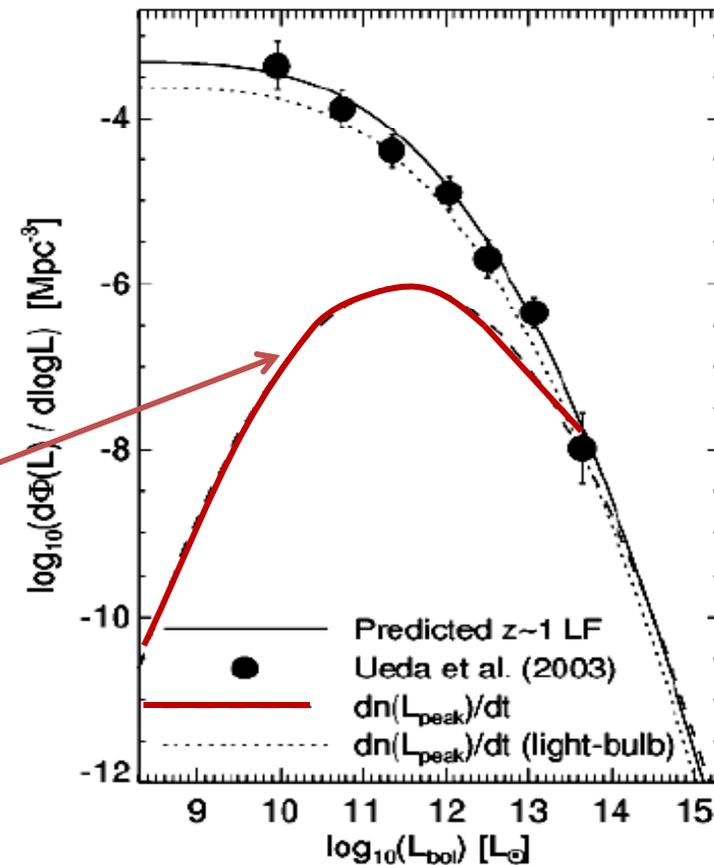
Référence: Lum constante $\sim L_{\text{Edd}}$



Hopkins et al 2006

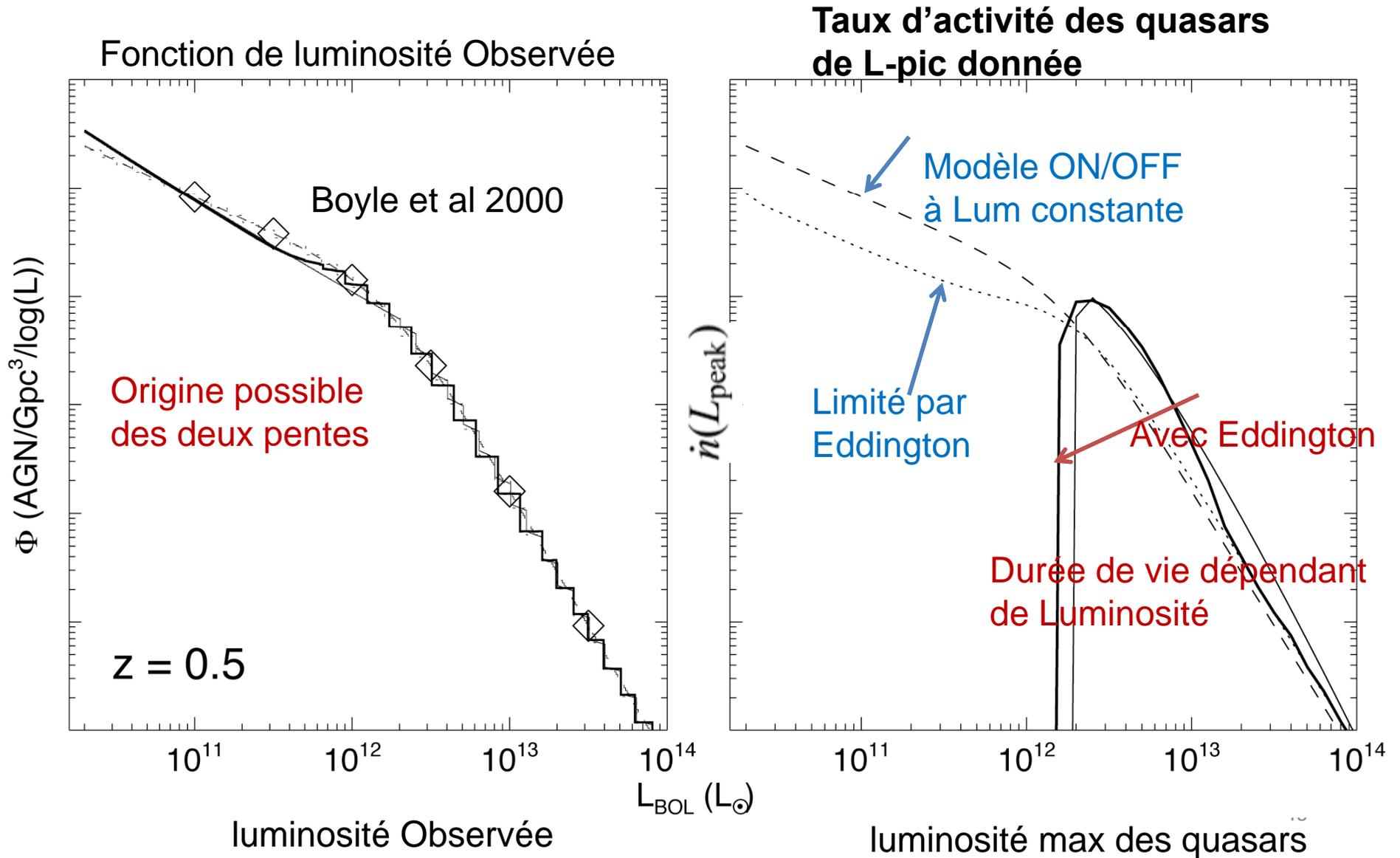
Nouvelle interprétation de la fonction de luminosité (et de ses 2 pentes)

- De longues périodes à faible luminosité \rightarrow les quasars faibles ou lumineux sont les mêmes sources, vues à différentes époques de leur vie
- La coupure est déterminée par le pic de $dn(L_{\text{pic}})/dt$
- Très différent d'un modèle à luminosité cste



“light-bulb” On ou OFF

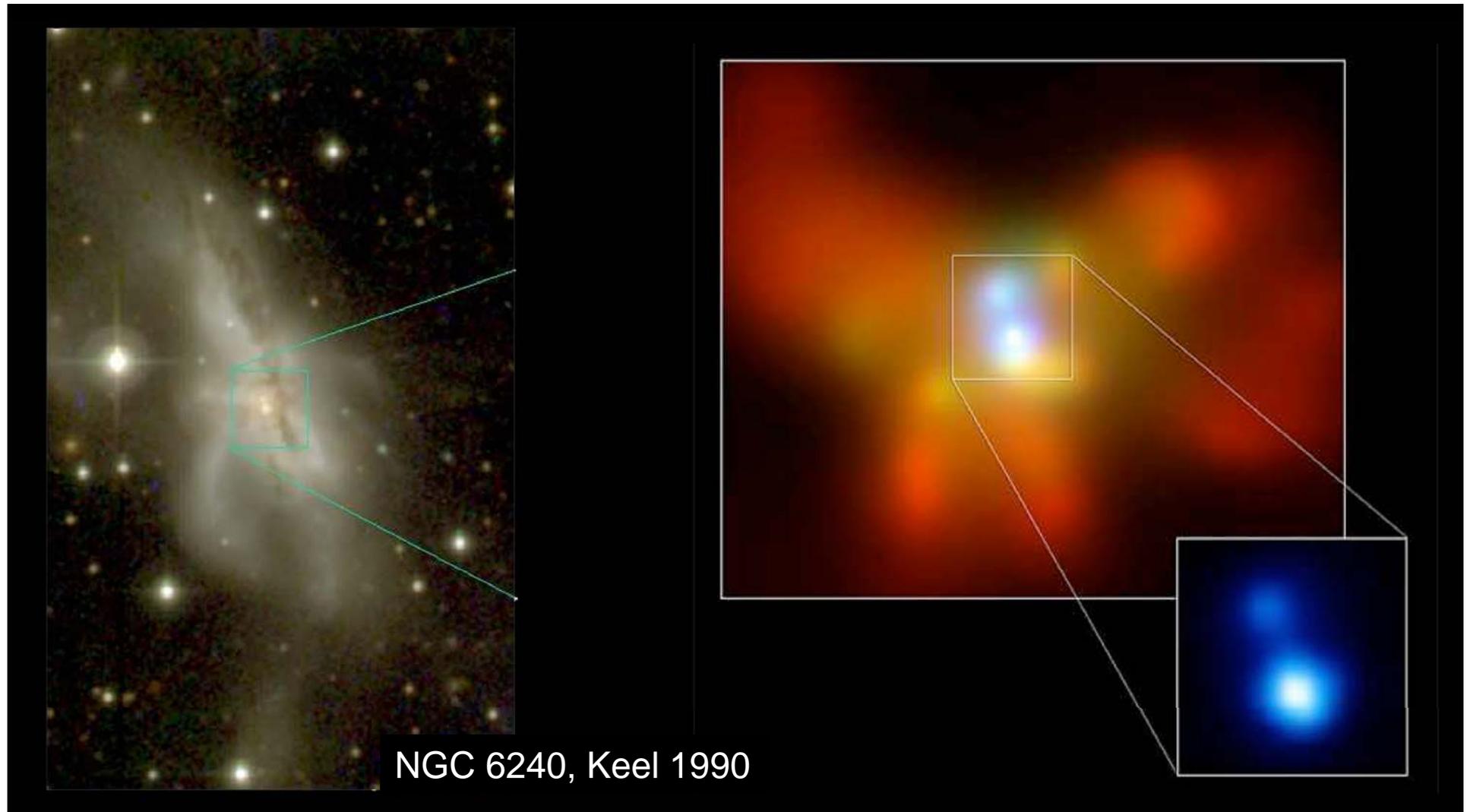
Plusieurs interprétations possibles: durée d'activité et L_{\max}



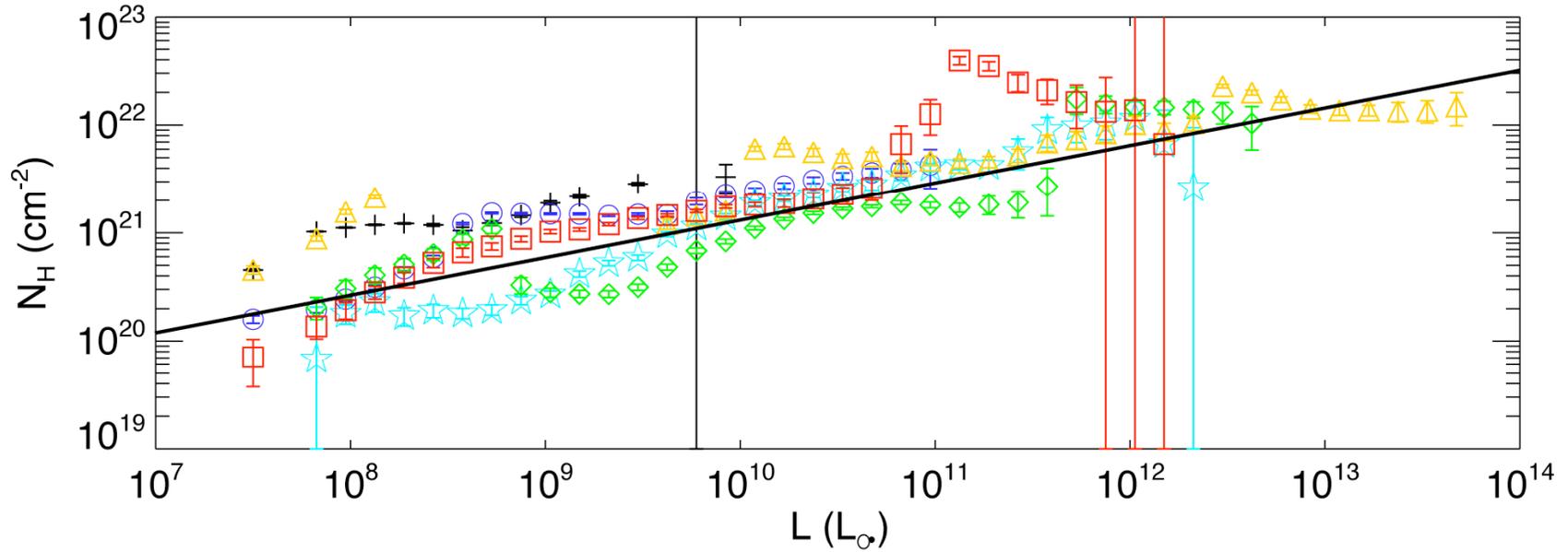
Quasars formés dans les fusions

Période obscure, NH_2 , starburst, 100 Myr

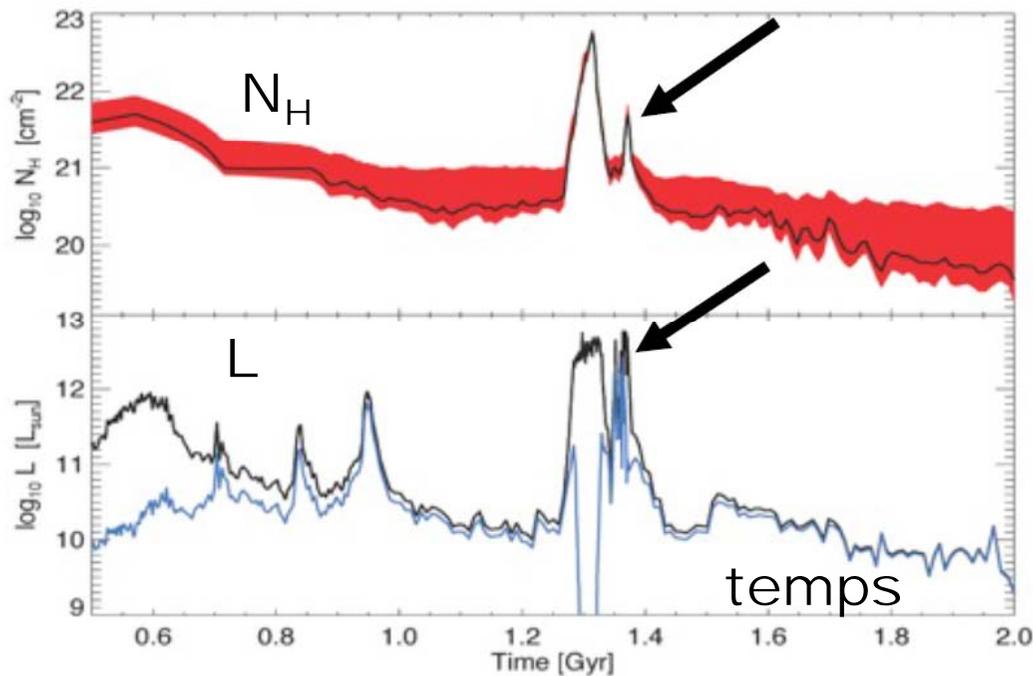
Feedback disperse gaz & poussière. Quasar visible durant 10-20 Myr



Les plus lumineux sont les plus obscurcis

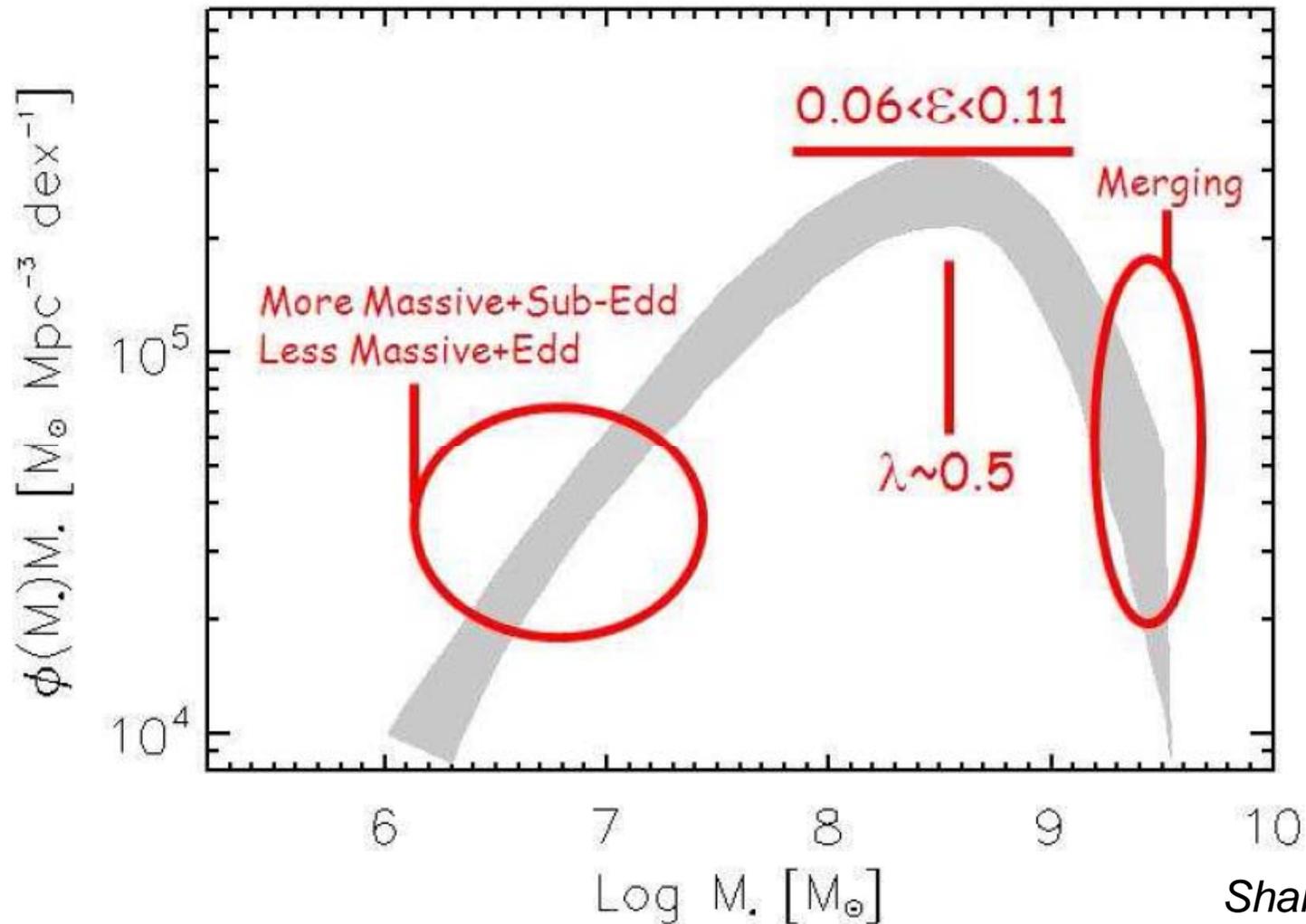


N_H fonction de Luminosité

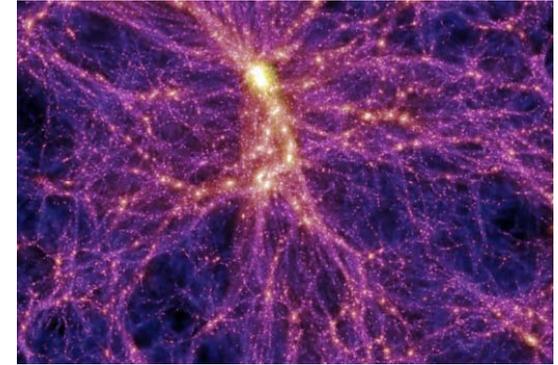


Encore plusieurs possibilités

Paramètres libres: efficacité ϵ , et rapport d'Eddington $\lambda = L/L_{\text{edd}}$
Courbe en grisé: densité de trous noirs à $z=0$



Test de l'agglomération des quasars

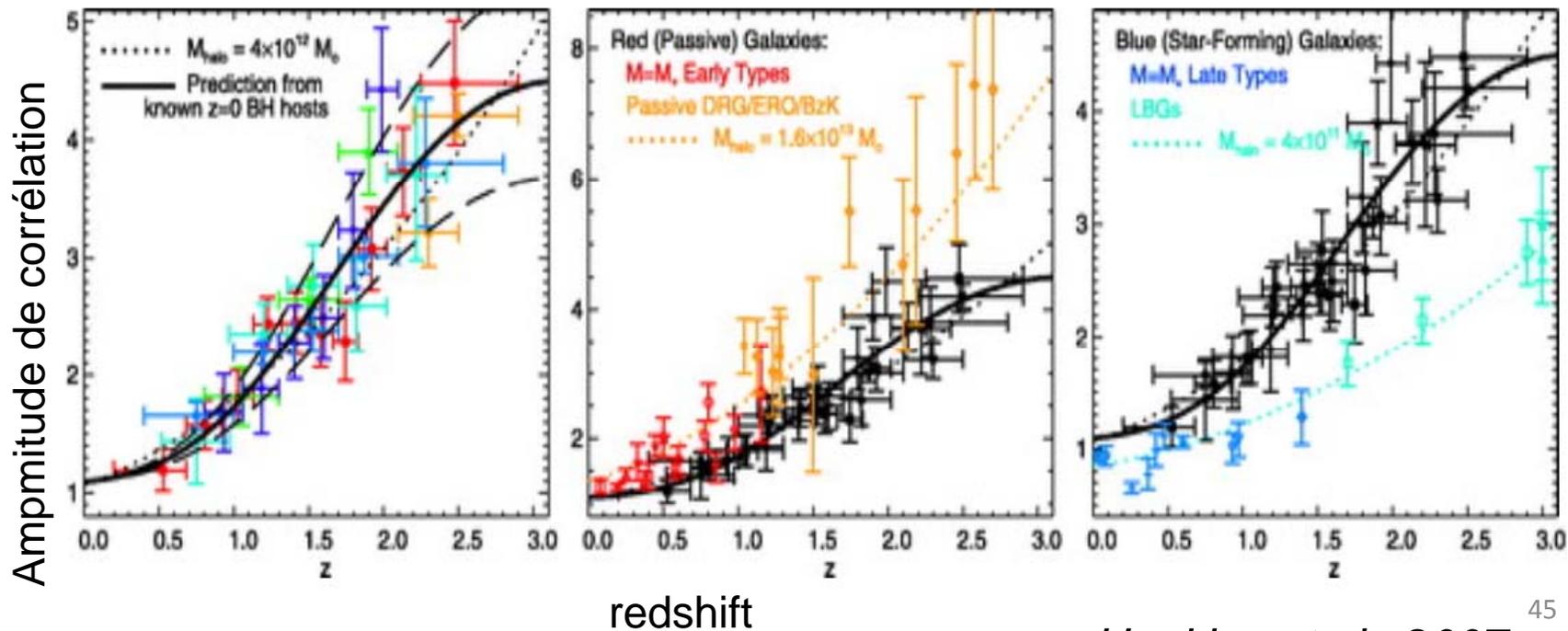


- Deux modèles reproduisent $\Phi(L)$:
nombreux quasars de courte durée de vie ou rares quasars de longue durée de vie? Distinction par **leur taux d'agglomération avec la distribution de matière noire!**
- Dans le modèle où les quasars sont activés par les fusions, L_{pic} est corrélé avec la masse du halo, mais pas la luminosité **instantanée**
 - Etude détaillée des courbes de lumière simulées, du degré de corrélation avec la masse du halo
 - Très peu de dépendance avec la luminosité, compatible avec les prédictions du modèle

Lidz et al 2006

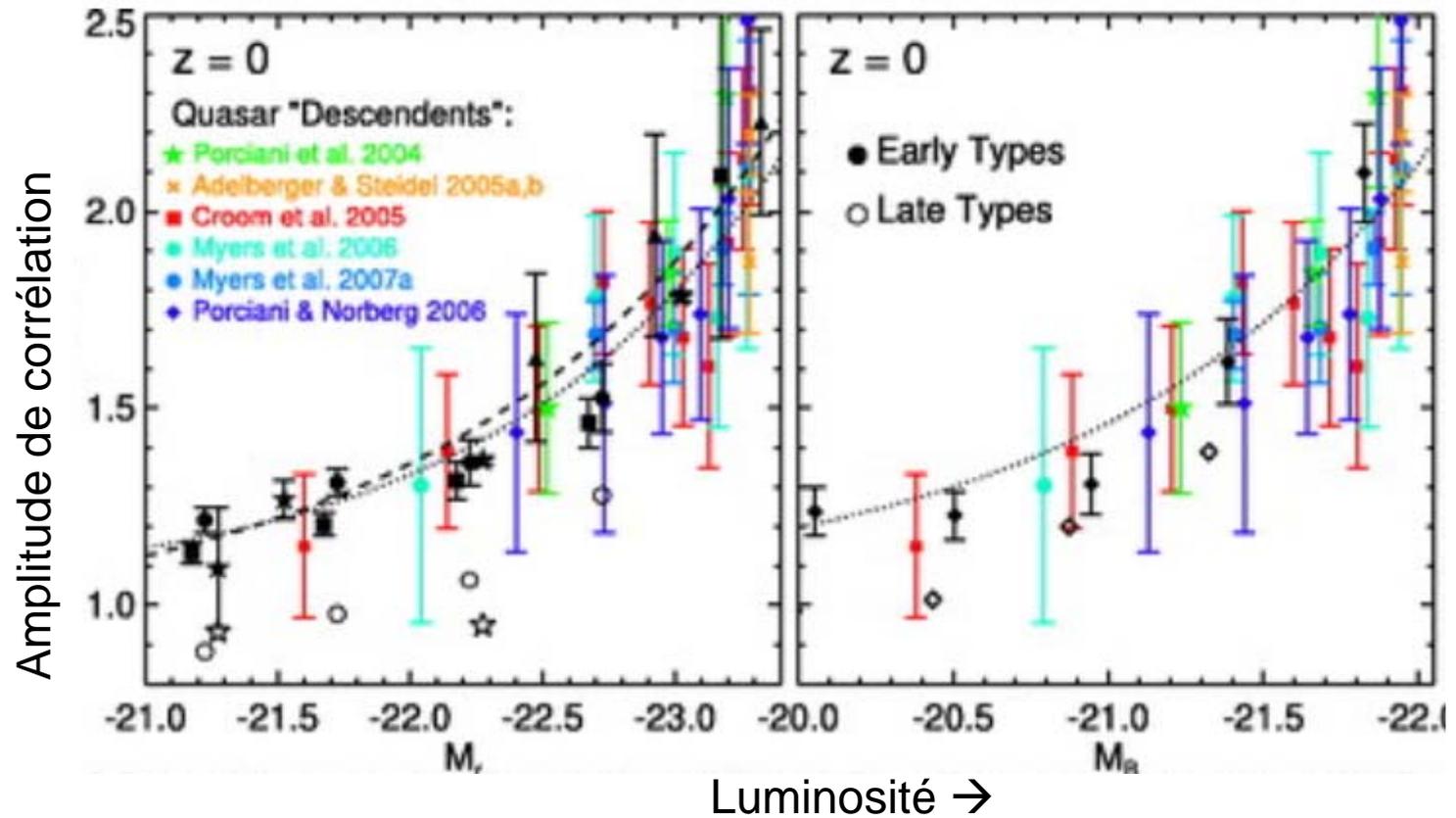
Comparaison avec les galaxies

- Les quasars s'agglomèrent moins que les **galaxies elliptiques (rouges)** mais plus que les **galaxies spirales (bleues)**
- Ils constituent une population intermédiaire
- A $z \sim 2.5$, semblables aux starbursts



Descendants des quasars

- L'amplitude à $z=0$ et z sont liées par la cosmologie
- A chaque z , M_{\bullet} - M_{bulbe}
- L'amplitude correspond à celle des elliptiques, mais pas des spirales



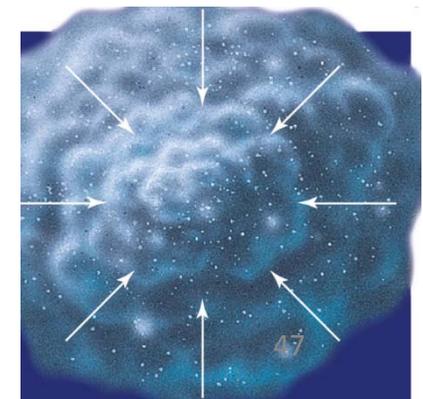
→ Les quasars habitent des halos $M \sim 4 \times 10^{12} M_{\odot}$, quels que soient z et L

Comment former des trous noirs très tôt ?

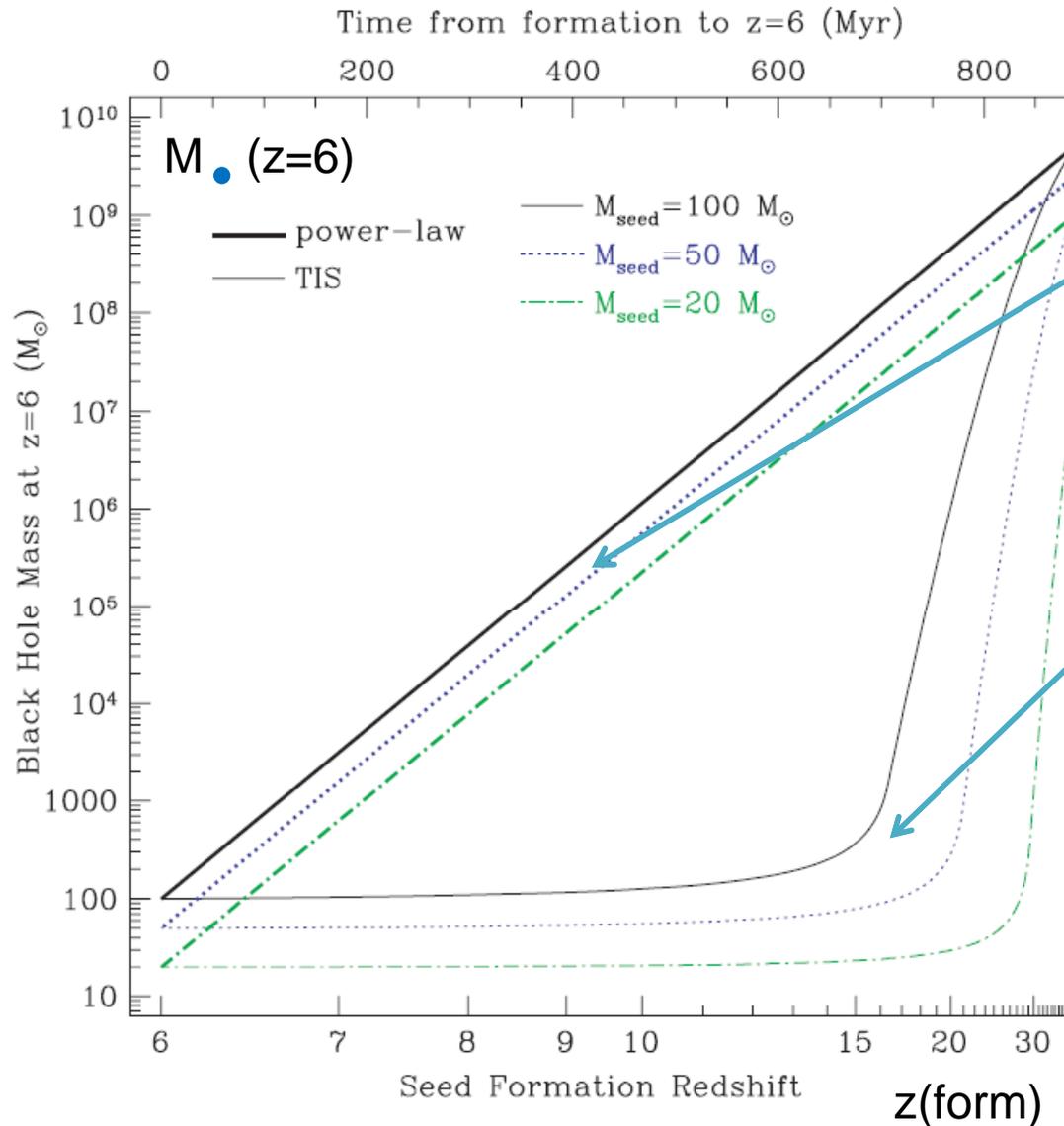
- **Reste des super-étoiles Pop III**
 - Des étoiles super-massives, car sans métaux
 - $M_* \sim 10^3 M_\odot$, explosent en supernovae
 - $M_\bullet \sim 10^2 M_\odot$



- **Effondrement direct**
 - Nuages de gaz massifs et denses s'accumulent au centre
 - Effondrement en étoile supermassive qui ne s'arrête pas de croître, jusqu'à l'effondrement en trou noir
 - $M_* > 10^6 M_\odot$
 - $M_\bullet > 10^4 M_\odot$



Formation des quasars à $z=6$

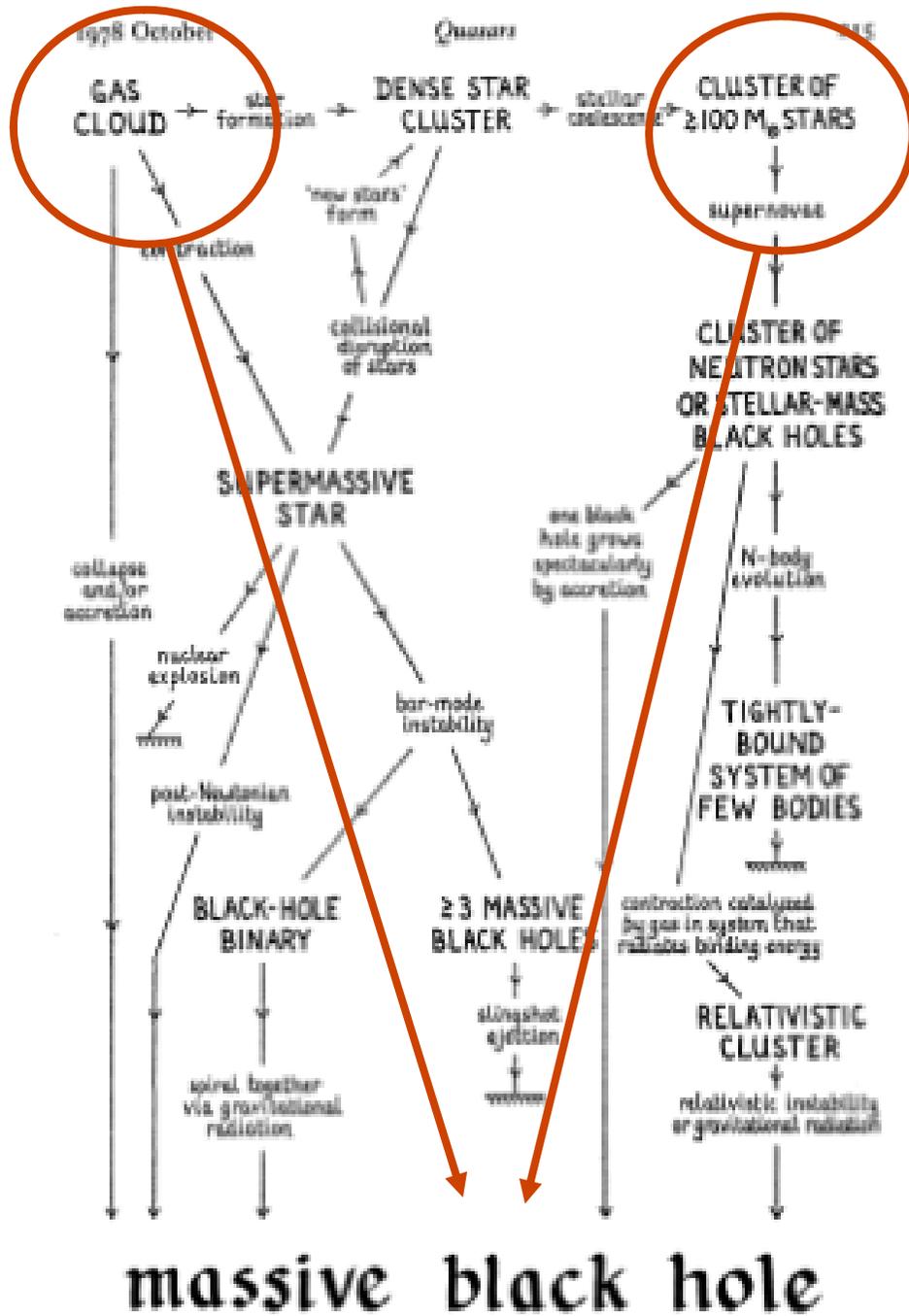


Distribution de gaz piquée
Croissance continue à L_{Edd}

Ou en plateau, plus difficile

TIS = Truncated Isothermal
sphere

Tanaka & Haiman 2009



Dessin de Martin Rees

massive black hole

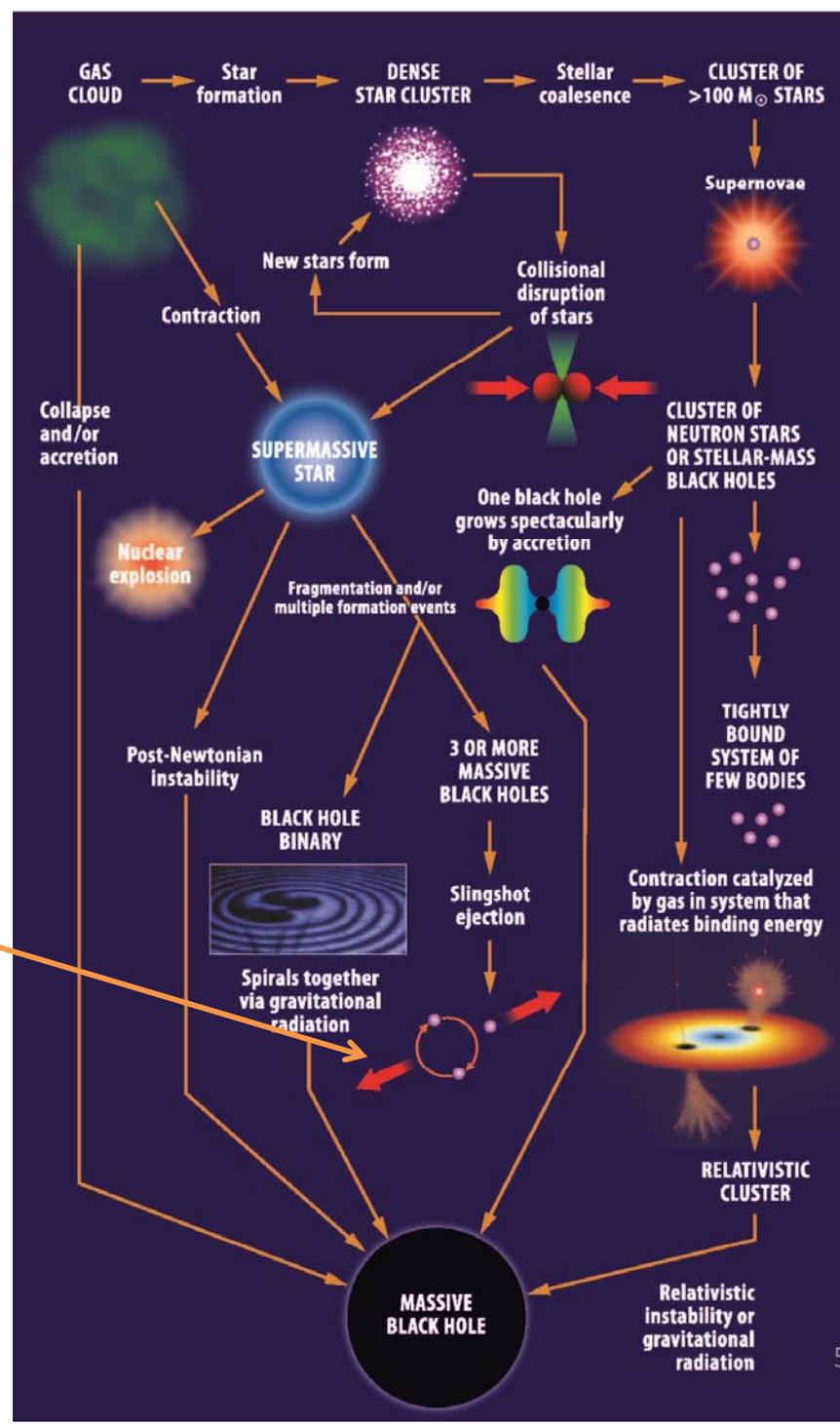
FIG. 1
Possible modes of formation of a massive black hole in a galactic nucleus.

Rees, *Physica Scripta*, 1978

Mis à jour 32 ans plus tard

Eviter l'effet de fronde
Ejection du 3ème trou noir

*Begelman & Rees,
"Gravity's Fatal Attraction"
2nd Edition, 2010*

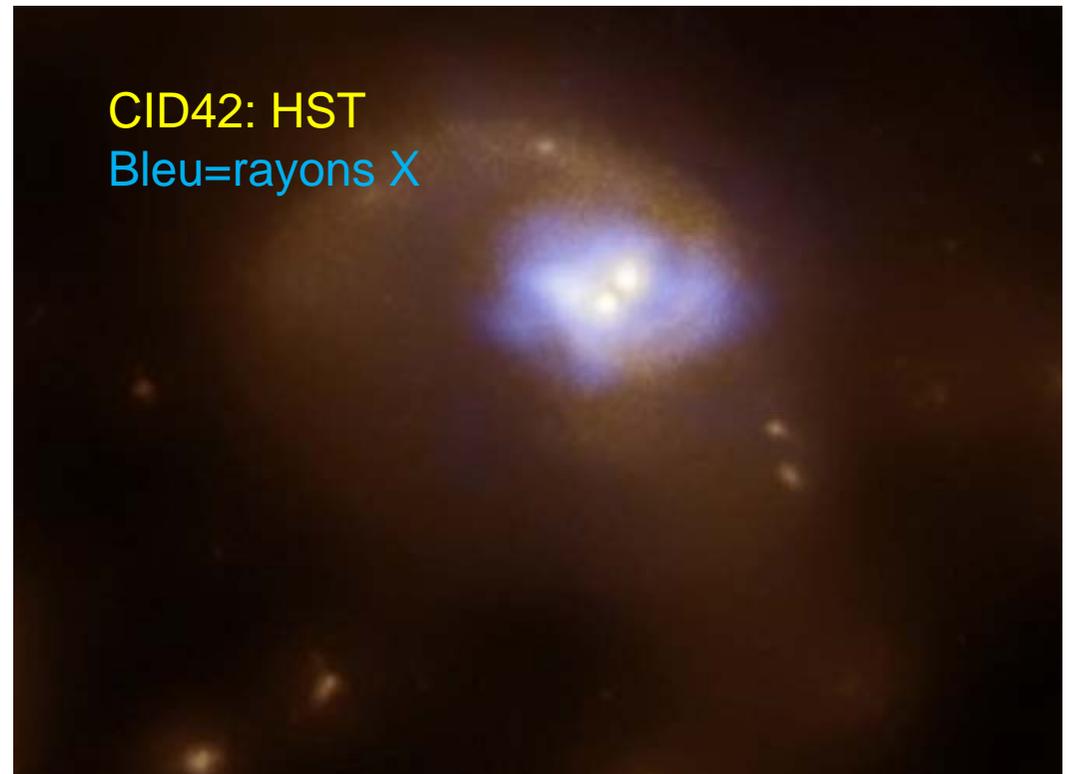
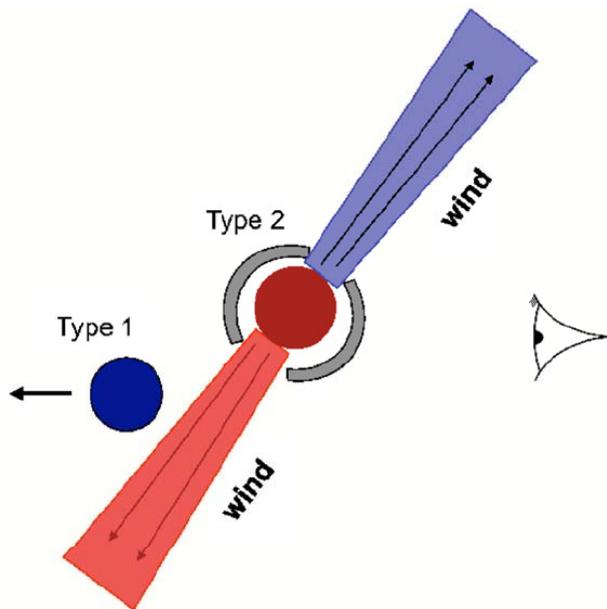


Effet de fronde: éjection d'un 3^{ème} TN

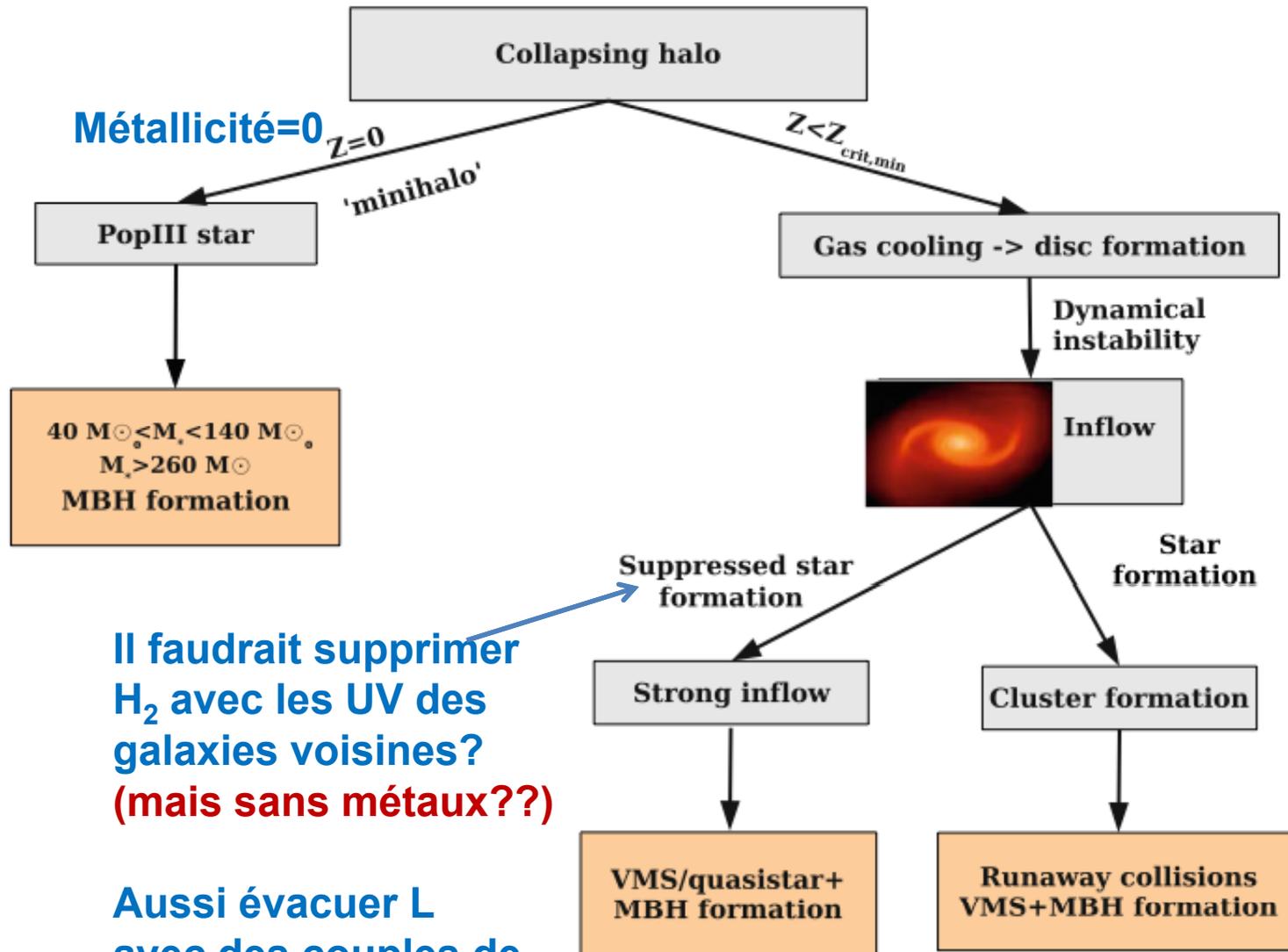
Un des TN (type 1) a une vitesse $\sim 1200\text{km/s}$ par rapport à la galaxie hôte
Type 2: absorption et émission de gaz ionisé, variabilité

Soit 3 trous noir \rightarrow un éjecté, ou le reste de fusion d'un trou noir binaire peut reculer (après avoir émis des ondes gravitationnelles)

Civano et al 2010



Formation des premières graines

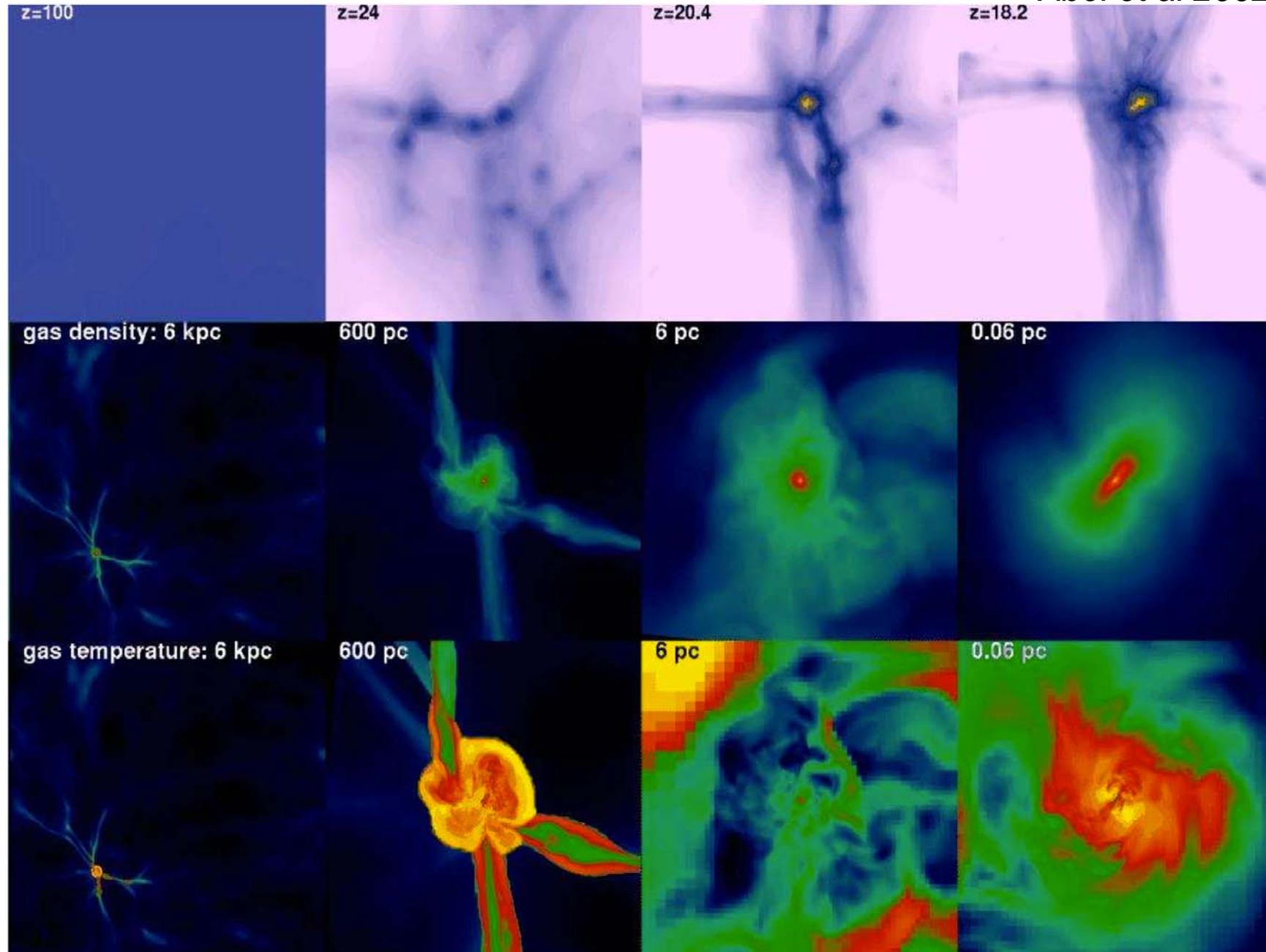


Il faudrait supprimer H_2 avec les UV des galaxies voisines? (mais sans métaux??)

Aussi évacuer L avec des couples de gravité dans un disque

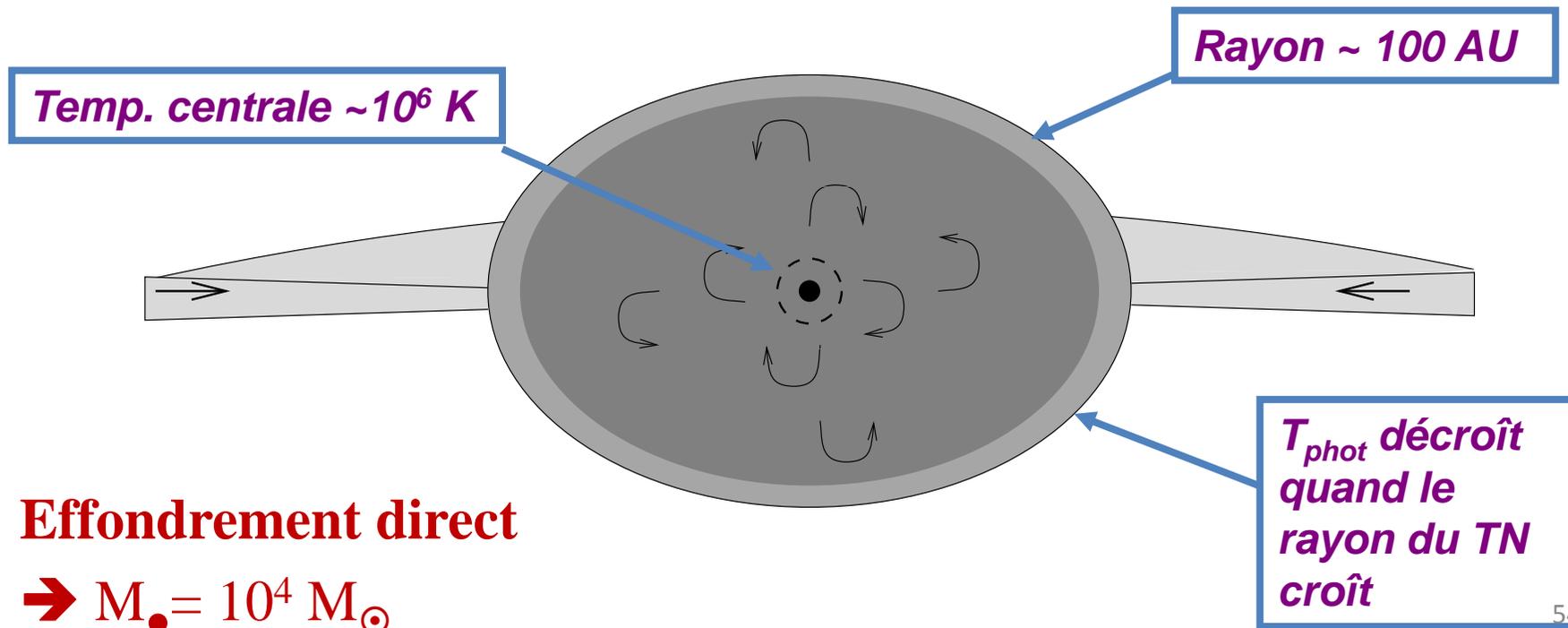
Formation des étoiles Pop III

Abel et al 2002



Formation d'une "QUASISTAR"

- Ressemble à une géante rouge
- Une enveloppe convective, soutenue par la pression
- Température photosphérique décroît avec la croissance du trou noir



Mort d'une QUASISTAR : explosion en supernova

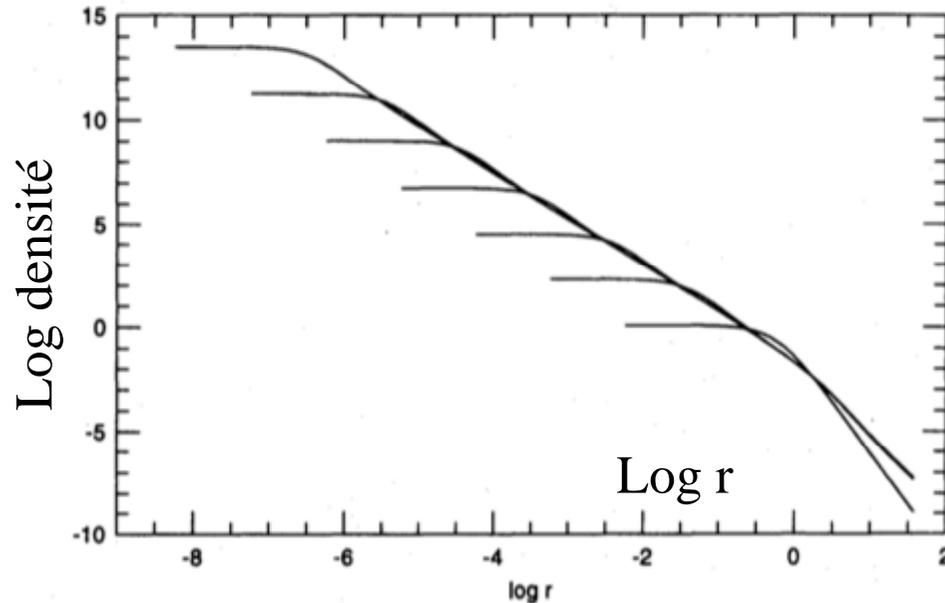
- Rapport critique: $R_M = (\text{Masse enveloppe}) / (\text{Masse TN})$
- $R_M < 10$: "crise d'opacité" (chemin de Hayashi)
- $R_M < 100$: vents puissants, difficile de rendre compatible accrétion et enveloppe (détails très incertains)

Masse finale du trou noir:

$$M_{BH} \sim 10^7 R_M^{-2} \left(\frac{\dot{M}}{1 M_{Sol} \text{ yr}^{-1}} \right) M_{Sol}$$
$$\sim 10^4 - 10^6 M_{Sol}$$



Effondrement du cœur d'un amas globulaire



Relaxation à deux corps

$$t_{relax} = 0.34 \frac{\sigma^3}{G^2 m \rho \ln \Lambda}$$

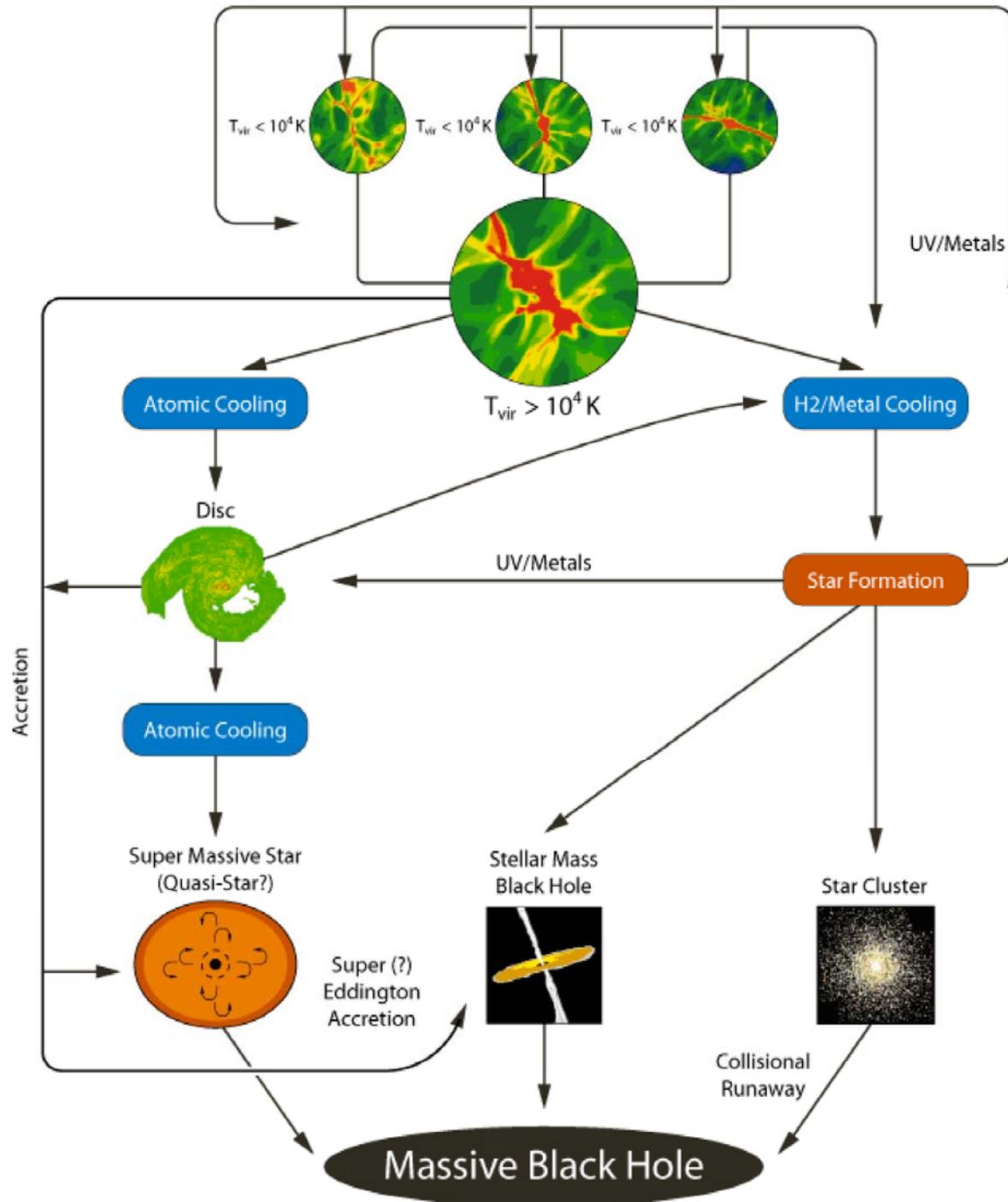
Le transfert d'énergie du centre vers le bord produit l'effondrement du cœur, en $10 t_{relax}$

$$t_{relax} \approx \frac{0.8 \text{Gyr}}{\ln(0.1N)} \left(\frac{M_{cl}}{10^5 M_{\odot}} \right)^{1/2} \left(\frac{R_h}{1 \text{pc}} \right)^{3/2} \left(\frac{1 M_{\odot}}{m} \right)$$

Au centre, les collisions entre étoiles produisent un emballement, et la formation d'un trou noir

Résumé:

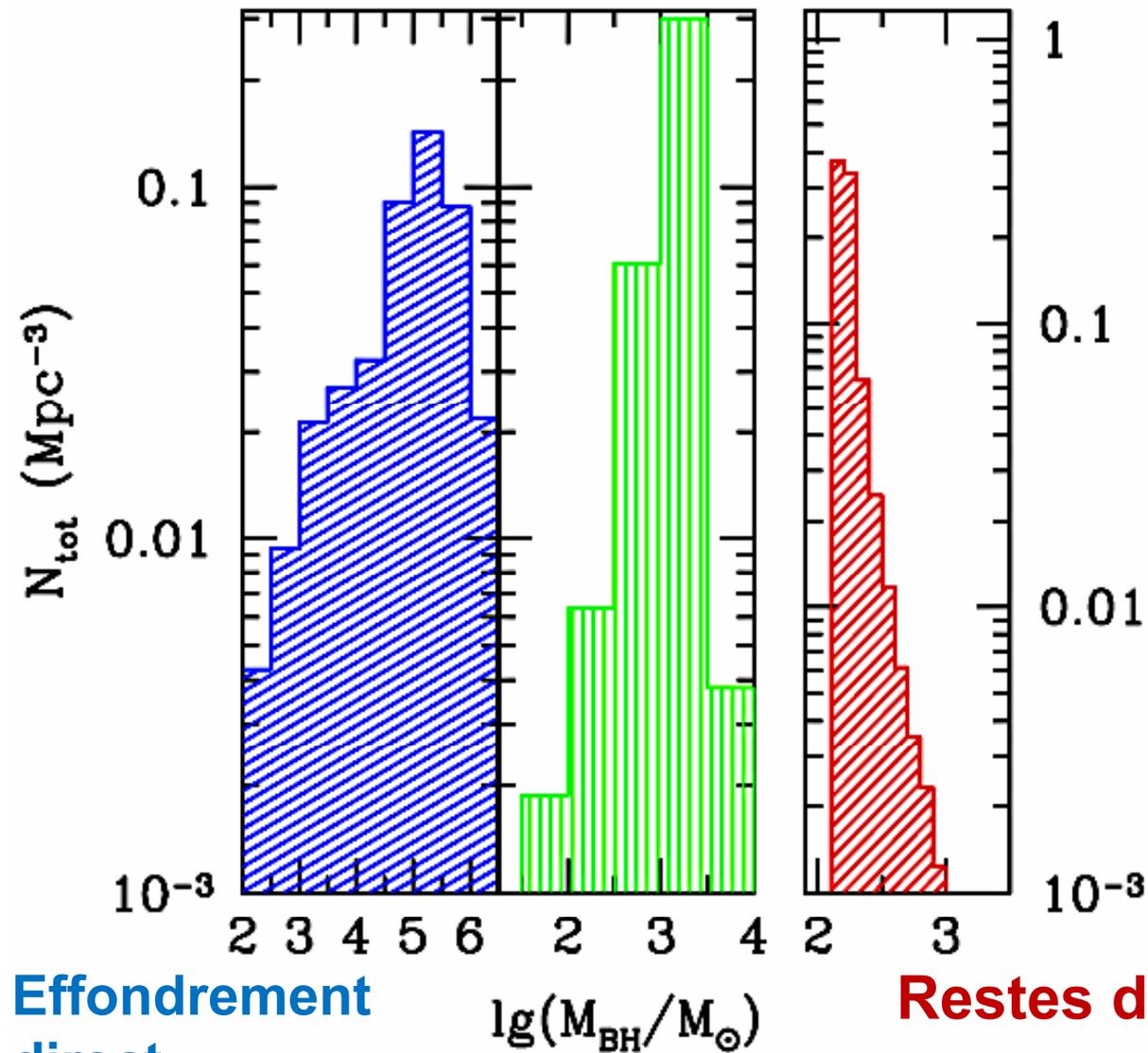
2/ 3 voies possibles



Regan & Haehnelt 2009

Masses formées par les divers processus

Amas d'étoiles



Devecci & Volonteri 2008

**Effondrement
direct**

Restes de Pop III

Conclusions

Relation M_{\bullet} - M_{bulbe}

- Plus serrée avec σ
- exceptions: mergers, pseudo-bulbes, barres,
- origine de cette relation?
- Histoire de la formation, ou feedback?

-- Argument de Soltan, peut-on recenser toute l'activité?

→ Activité obscurcie (Compton-thick)

Ou bien accréation inefficace à rayonner ? (ADAF, RIAF..)

Modèles des fusions de galaxies: starburst → quasar obscurci

Puis quasar visible avec une gamme étroite de Luminosité max

Comment se forment les trous noirs super-massifs?

- Très tôt, très vite, $z=6$ $T < 1$ Gyr
- Effondrement direct de gaz, ou bien quasi-star, ou amas d'étoiles