

Démographie *des* Trous noirs

Eric Emsellem





Sommaire

■ *Démographie* \Rightarrow *méthodes et approches*

- ★ Equation de continuité
- ★ Exemples d'échantillons : rayonnement X, puis à $z=0$
- ★ Relations d'échelle

■ *Ancrage des relations à $z=0$*

- ★ Méthodes
- ★ Problèmes de mesure...

■ **Trous noirs extrêmes : grandes / petites masses**

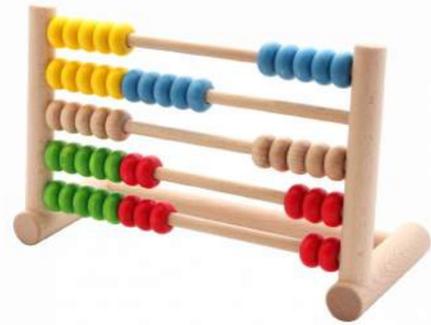
Si le temps le permet...



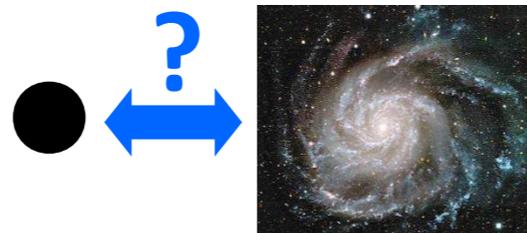
Démographie \Rightarrow quelle distribution de masse pour les trous noirs ?

Pourquoi est-ce important ?

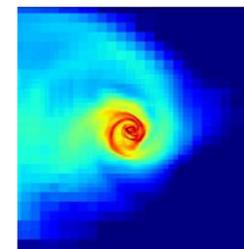
Recensement



Quel trou noir pour quelle galaxie ?



Processus de croissance

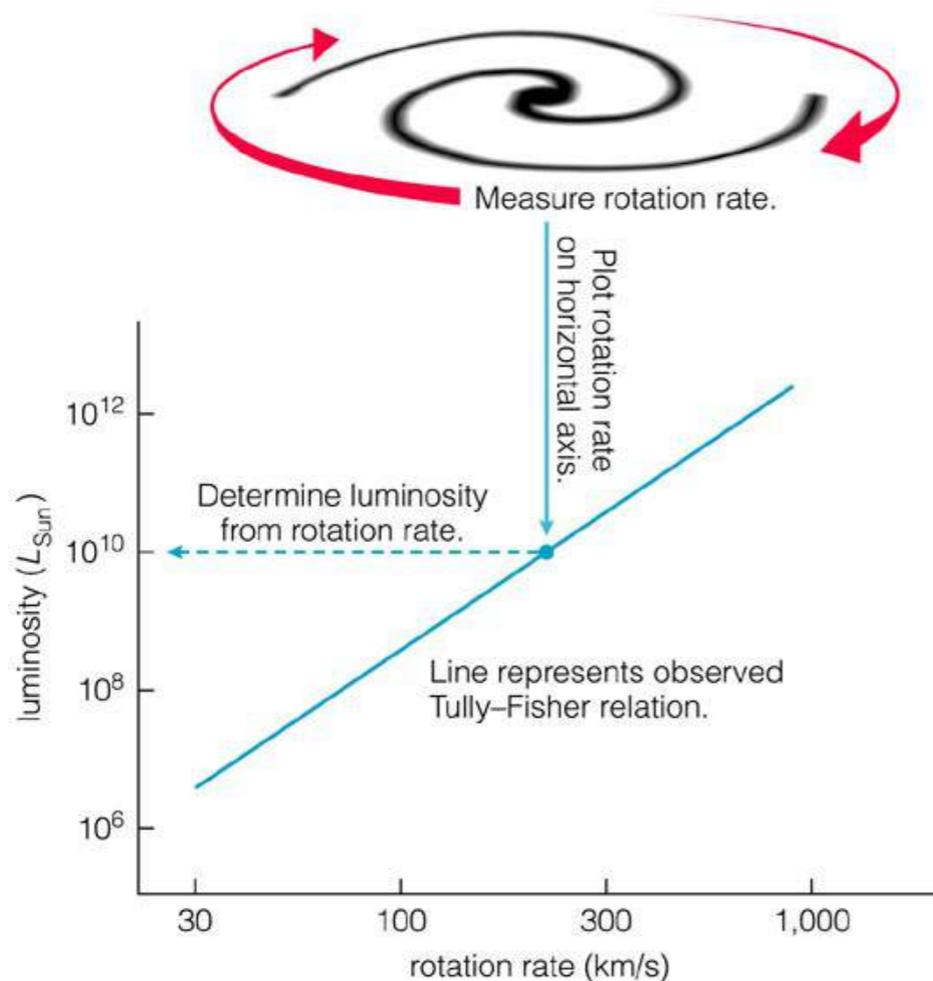


AGN et feedback



Démographie \Rightarrow Comment compte-t-on ?

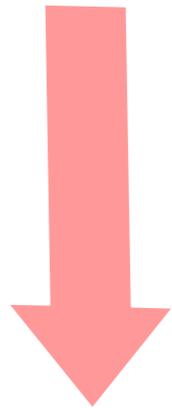
Besoin d'un échantillon représentatif



ou d'une relation d'échelle

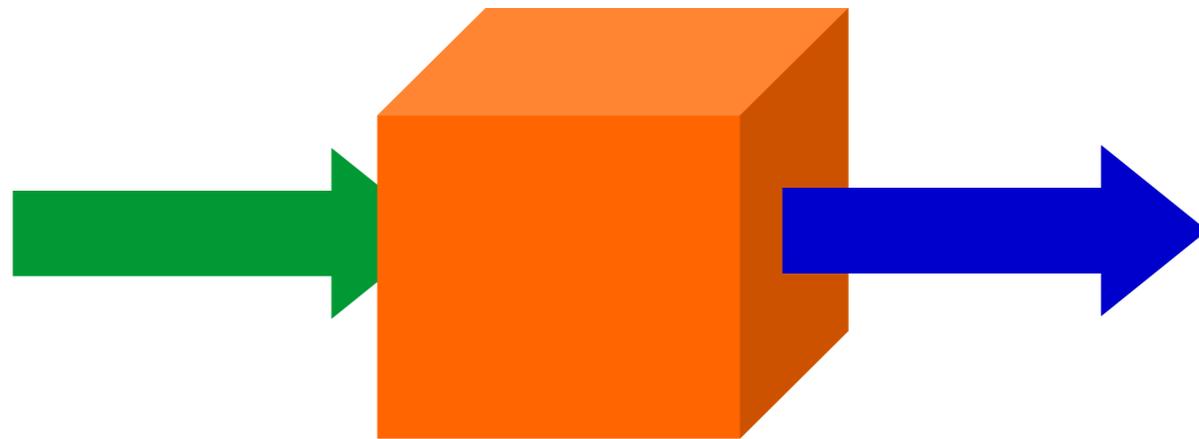
Démographie ⇒ Comment compte-t-on ?

**Echantillon
représentatif**



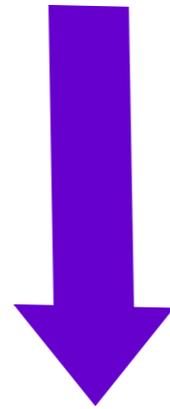
- ◆ *Est-il vraiment représentatif ?*
- ◆ *Comment passe-t-on de cet échantillon à la population totale ?*
 - ⇒ **biais, facteurs correctifs**

L'équation de continuité



L'argument de Soltan (1982)

- Lynden-Bell (1969) : les Quasars → l'univers proche = trou noir
- **Approche de Soltan** : calculer la masse accumulée à $z=0$ par accrétion



L'équation de continuité

$$\frac{\partial n(M_{BH}, t)}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial M_{BH}} \left[\left(\frac{dM}{dt}(M_{BH}, t) \right) n(M_{BH}, t) \right] + \frac{dS}{dt}_{in} - \frac{dS}{dt}_{out}$$

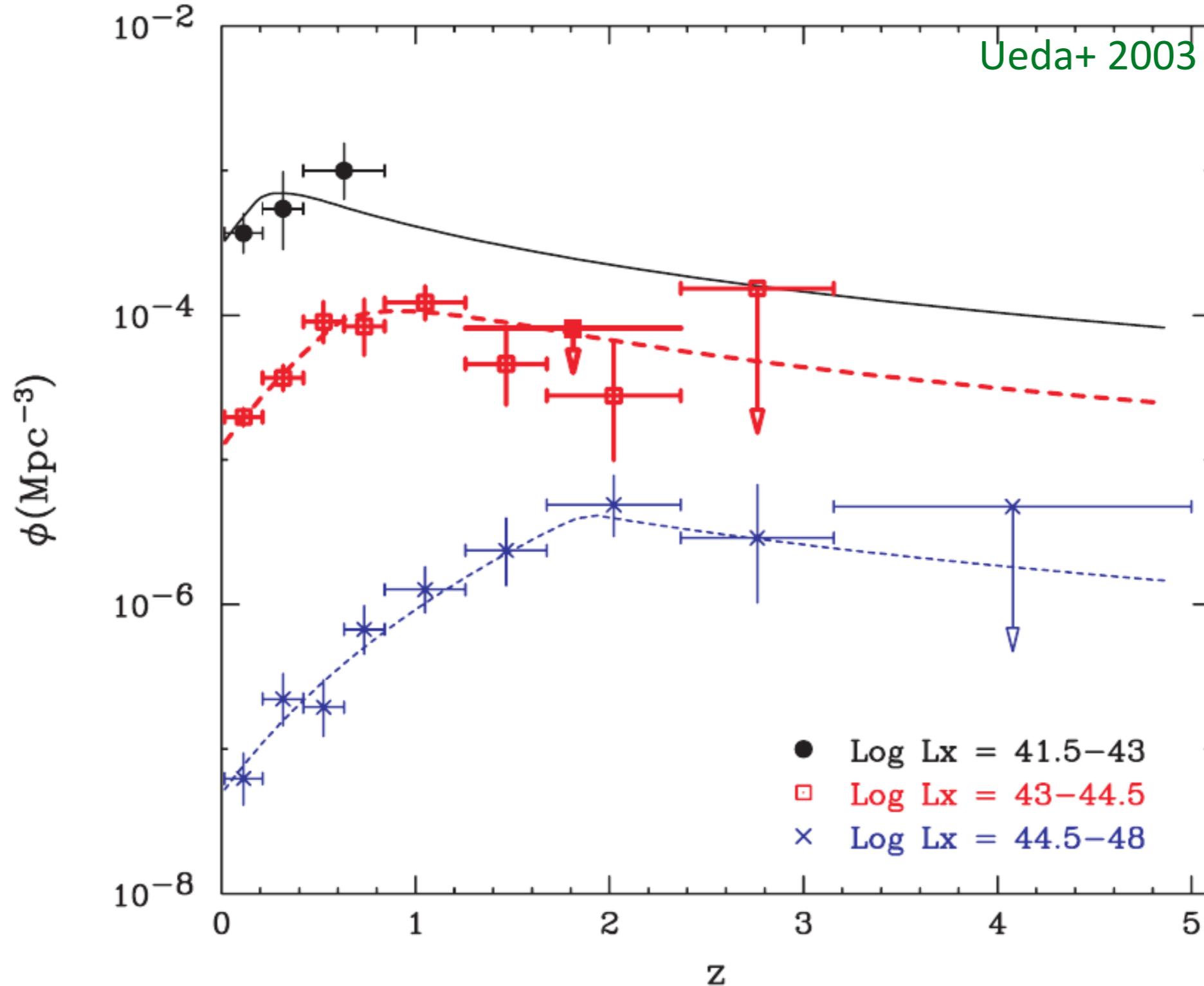
Terme d'accrétion

Terme du aux fusions

Quels échantillons ?

⇒ Campagnes de détection de sources X

(HEAO1, ASCA, Chandra)



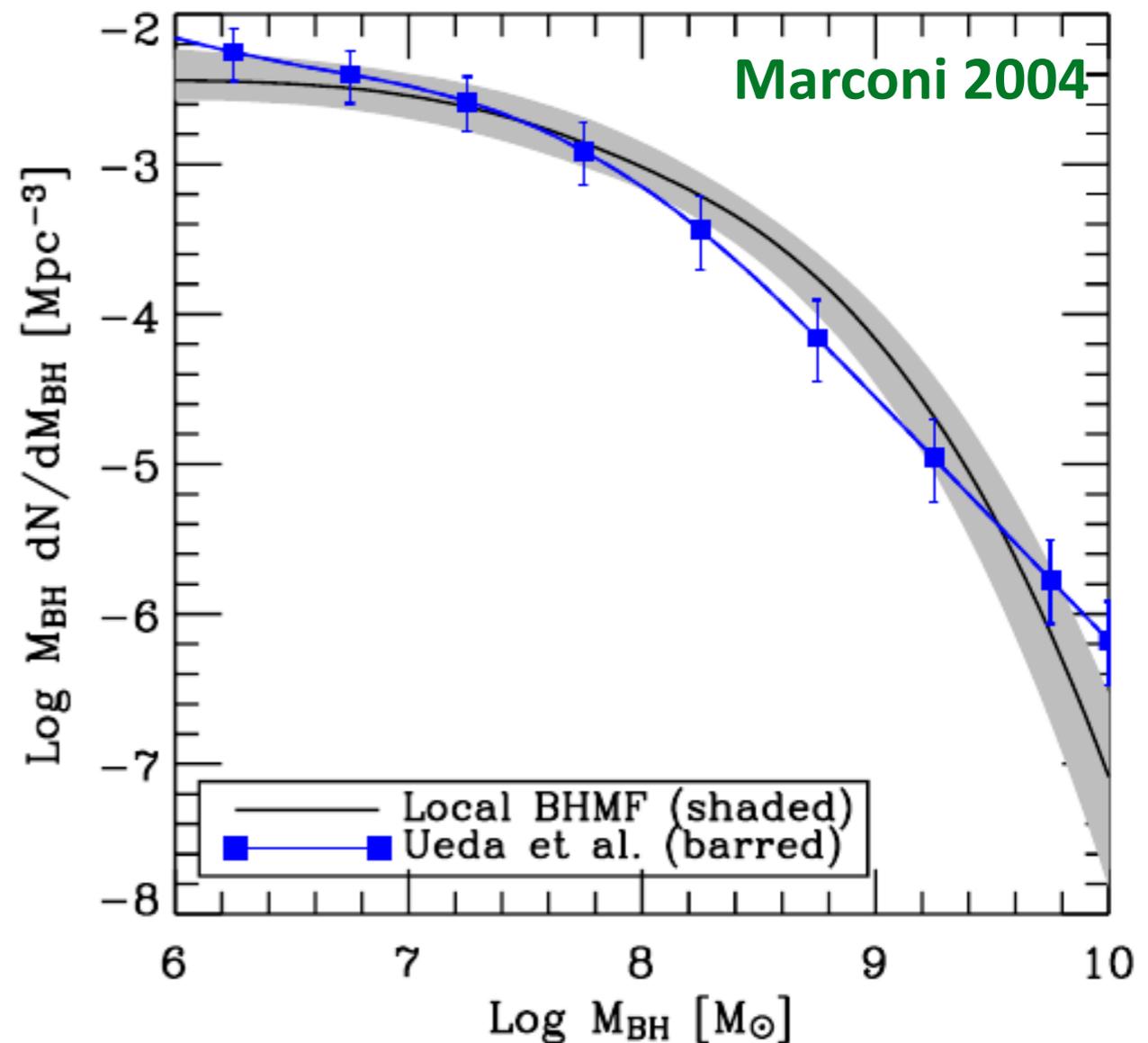
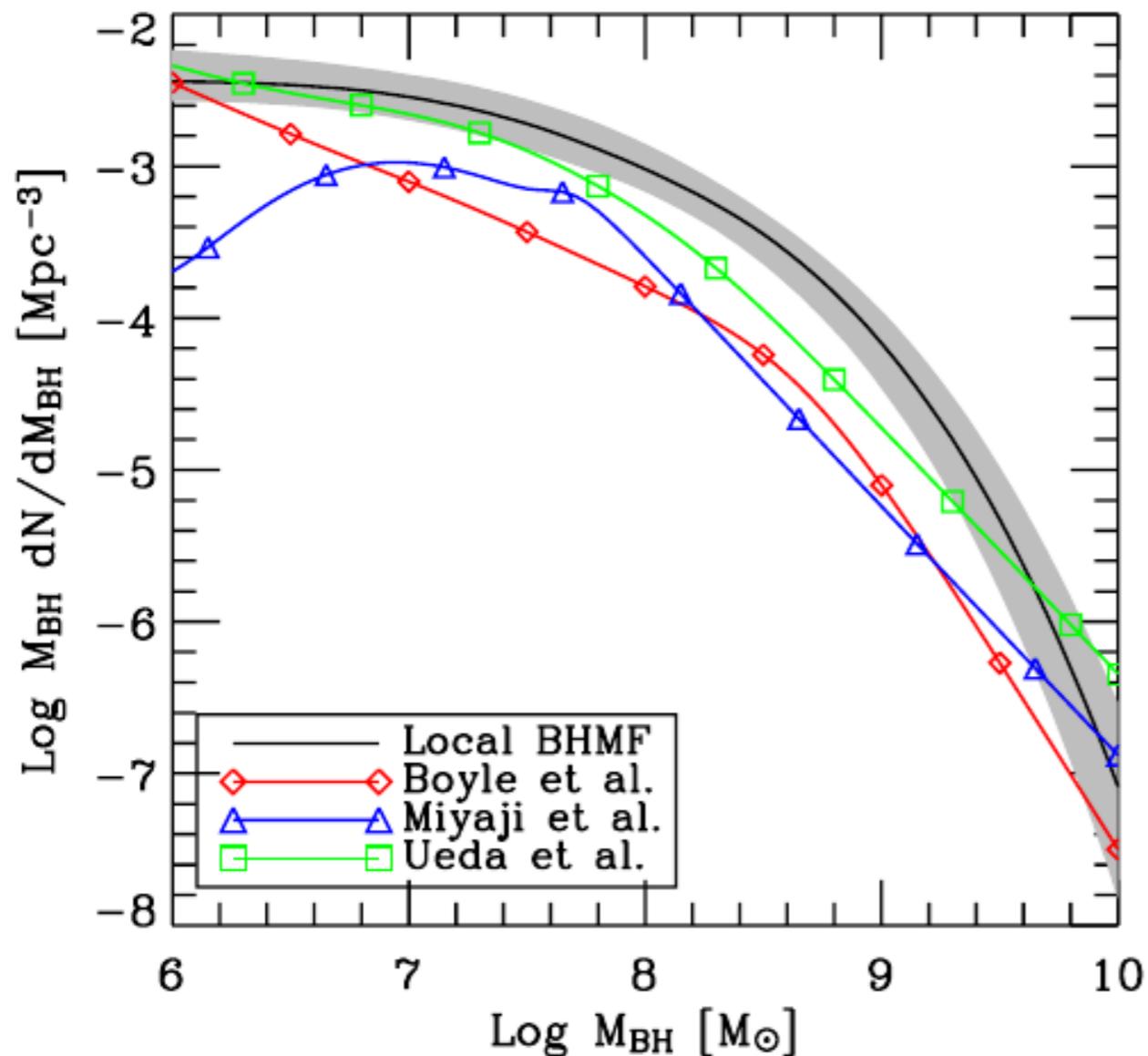
247
sources

L'équation de continuité

$$\frac{\partial n(M_{BH}, t)}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial M_{BH}} \left[\left\langle \frac{dM}{dt} (M_{BH}, t) \right\rangle n(M_{BH}, t) \right] + \frac{dS}{dt}_{in} - \frac{dS}{dt}_{out}$$

Paramètres : λ (efficacité du trou noir) et ε (efficacité de rayonnement)

[Valeurs **fixes** + correction des sources « Compton-thick »]

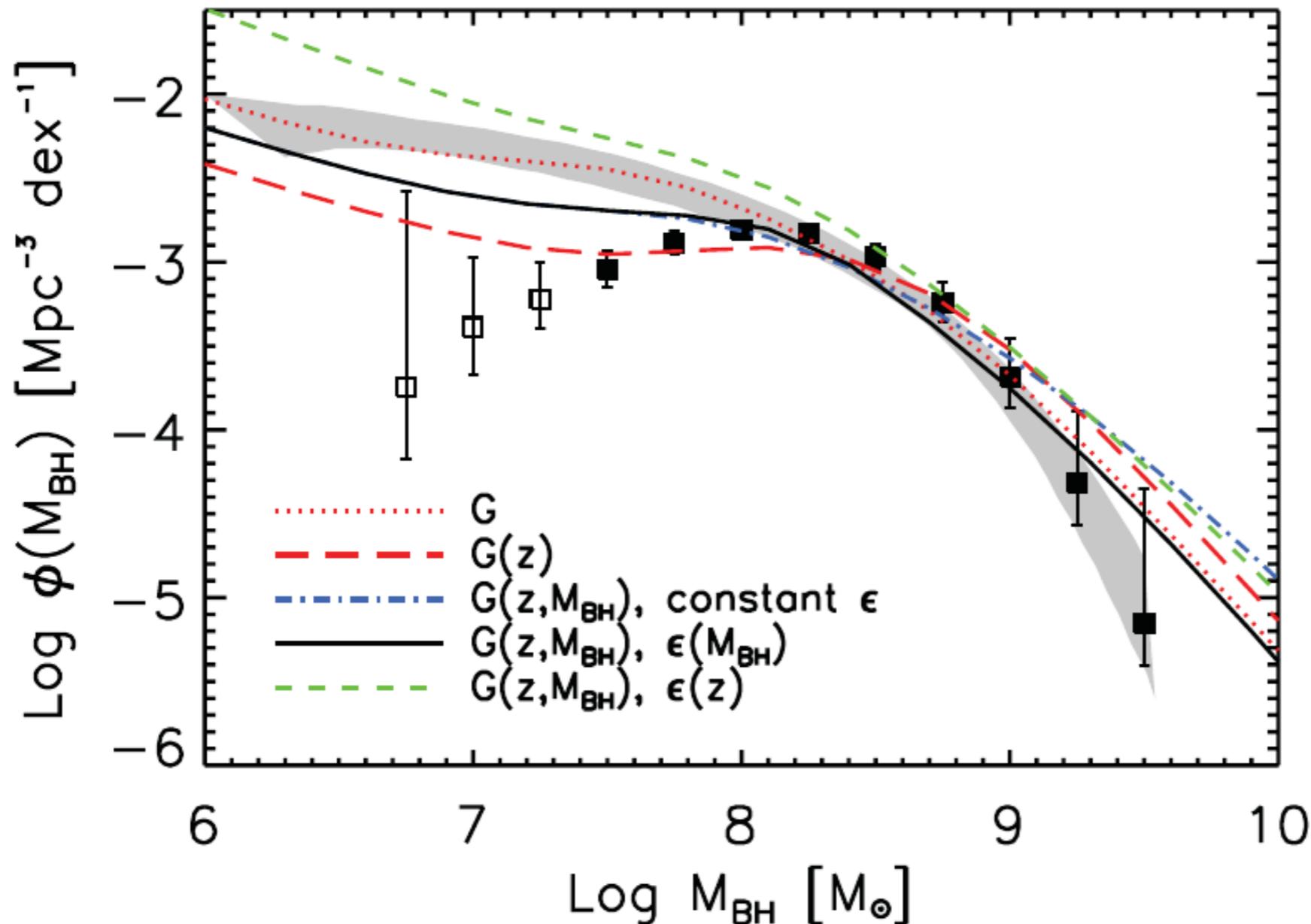


L'équation de continuité

$$\frac{\partial n(M_{BH}, t)}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial M_{BH}} \left[\left\langle \frac{dM}{dt}(M_{BH}, t) \right\rangle n(M_{BH}, t) \right] + \frac{dS}{dt}_{in} - \frac{dS}{dt}_{out}$$

Paramètres : λ (efficacité du trou noir) et ϵ (efficacité de rayonnement)

[Valeurs **dépendantes** de la masse et/ou du redshift]



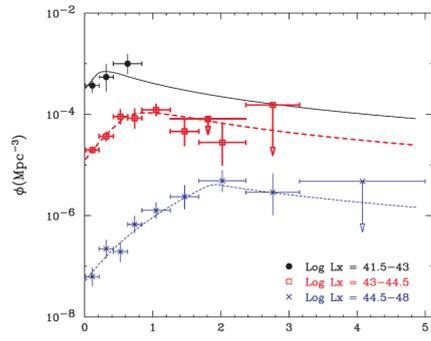
Shankar+ 2013

Quels échantillons aujourd'hui?

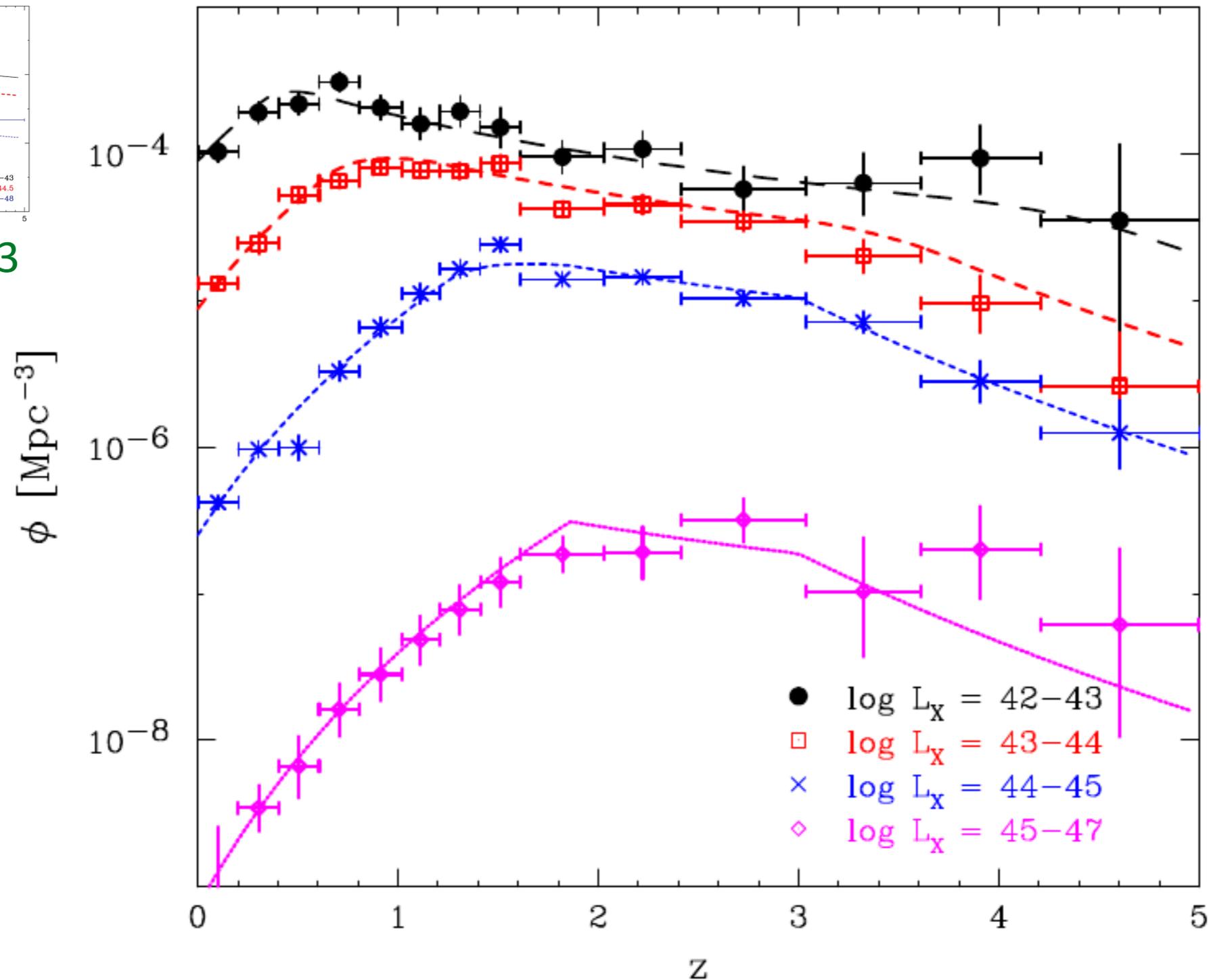
Par exemple \Rightarrow Campagnes de détection de sources X

(Swift, MAXI, ASCA, XMM-Newton, Chandra, ROSAT)

Ueda+ 2014



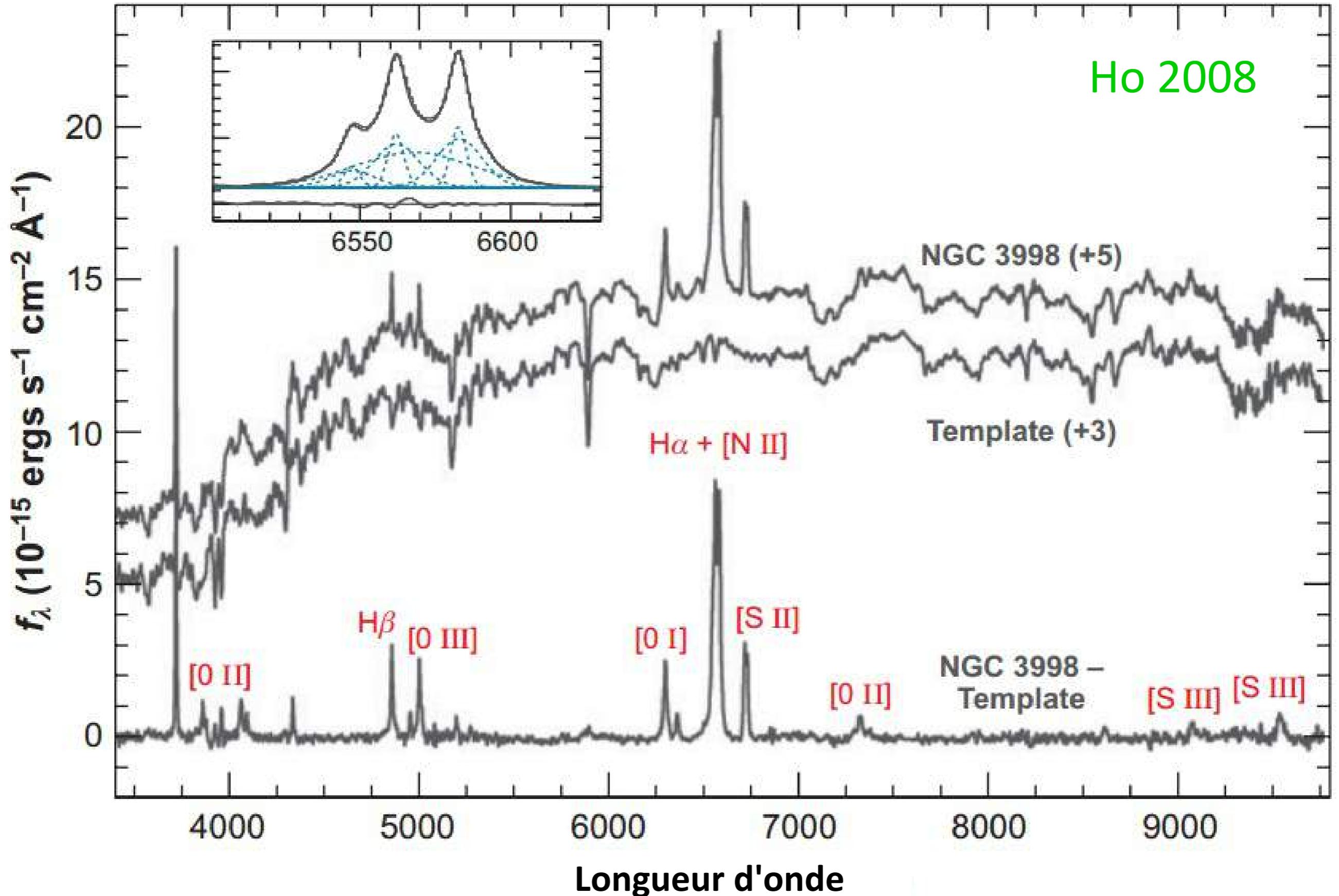
Ueda+ 2003



4039
sources

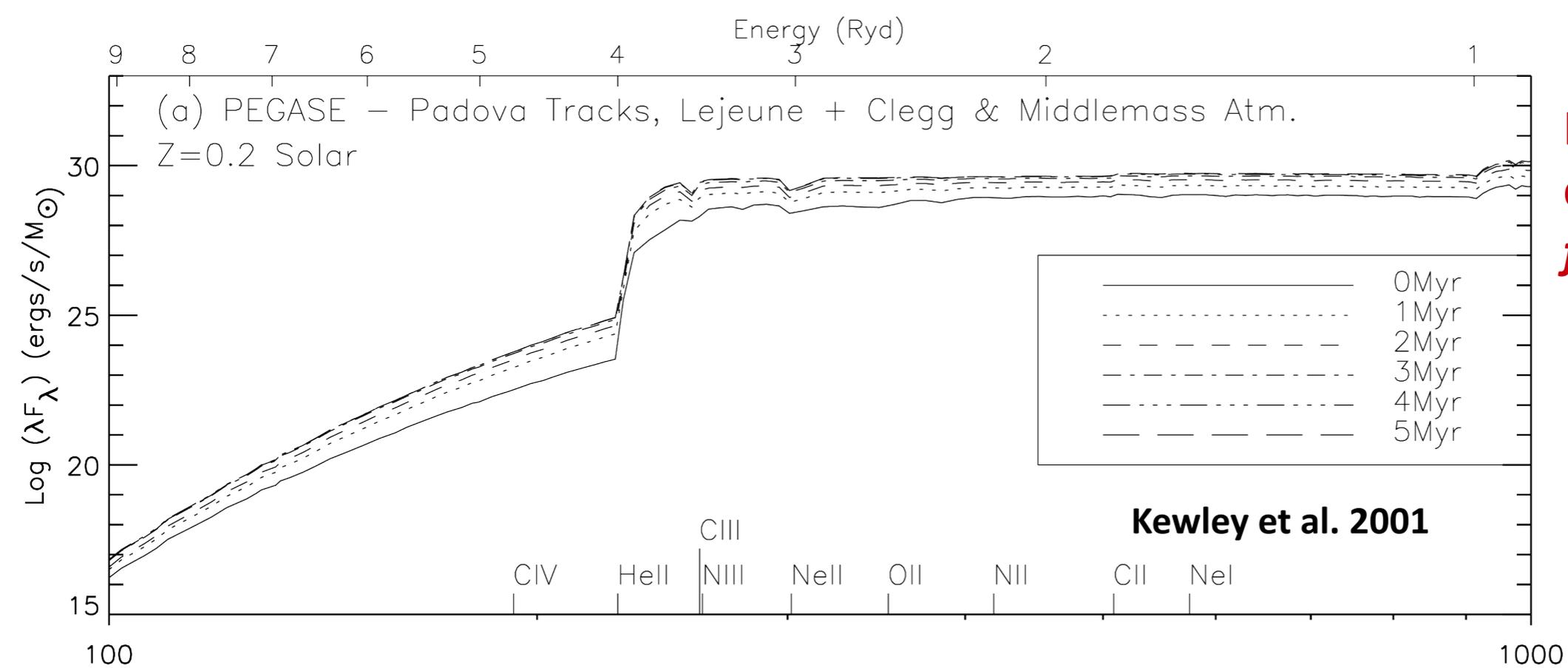
Quels échantillons aujourd'hui \Rightarrow à $z=0$

A bas redshift \Rightarrow Spectres optiques des régions centrales de galaxies



Quel mécanismes d'ionisation ?

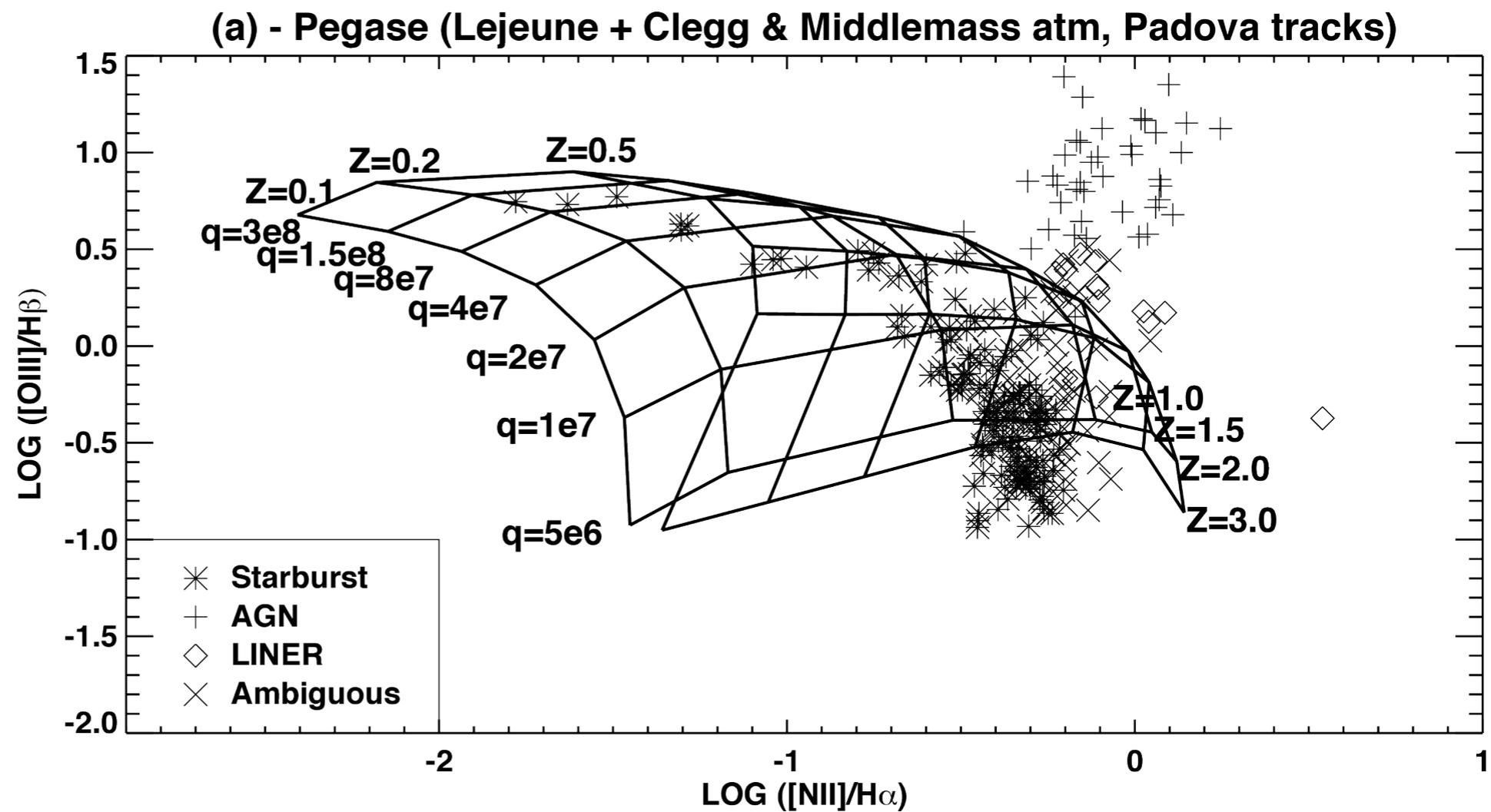
- Photoionisation par des étoiles O (galaxies HII, Starburst, etc)
- Photoionisation par un continu en loi de puissance – différents niveaux d'ionisation
- PNe – photoionisation par des étoiles évoluées
- Chocs, ...



Hypothèses
 diverses sur la
forme du continu

Modèles de Photoionisation

Hypothèses diverses
 sur la *métallicité et*
densité du gaz



Le fameux diagramme “BPT”

PUBLICATIONS OF THE
ASTRONOMICAL SOCIETY OF THE PACIFIC

Vol. 93

February 1981

No. 551

CLASSIFICATION PARAMETERS FOR THE EMISSION-LINE SPECTRA OF EXTRAGALACTIC OBJECTS

J. A. BALDWIN AND M. M. PHILLIPS

Cerro Tololo Inter-American Observatory,* Casilla 603, La Serena, Chile

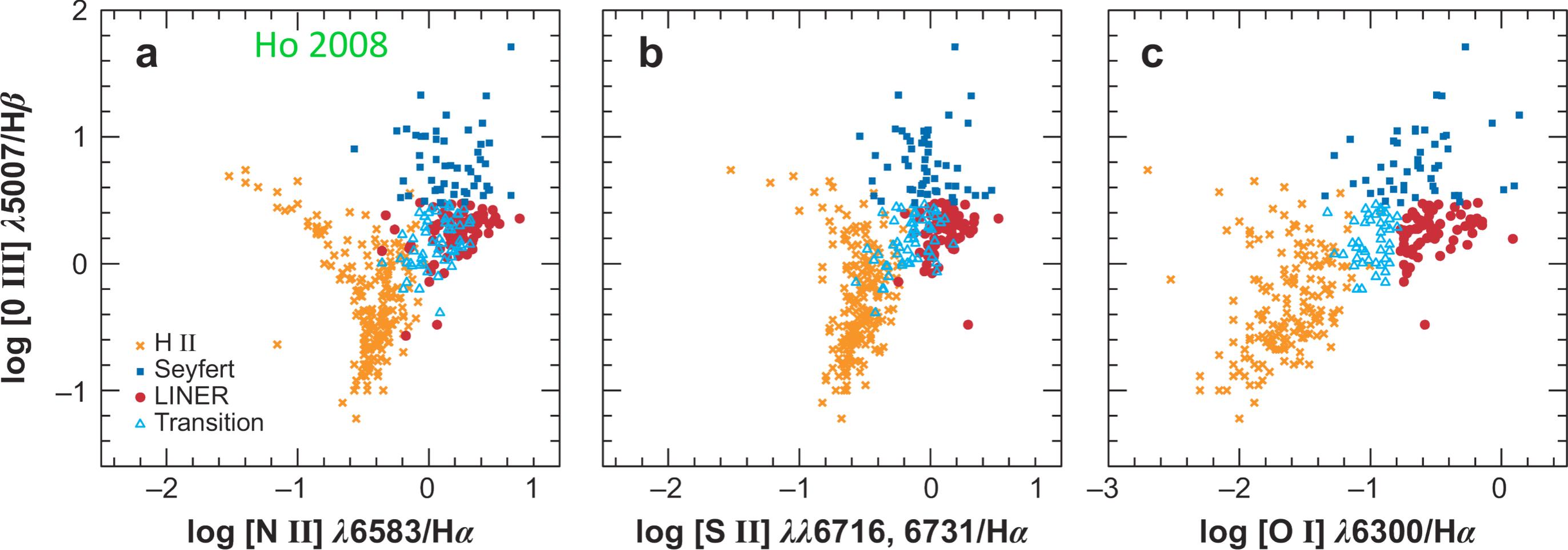
AND

ROBERTO TERLEVICH

Institute of Astronomy, Madingley Road, Cambridge, England CB3 0HA

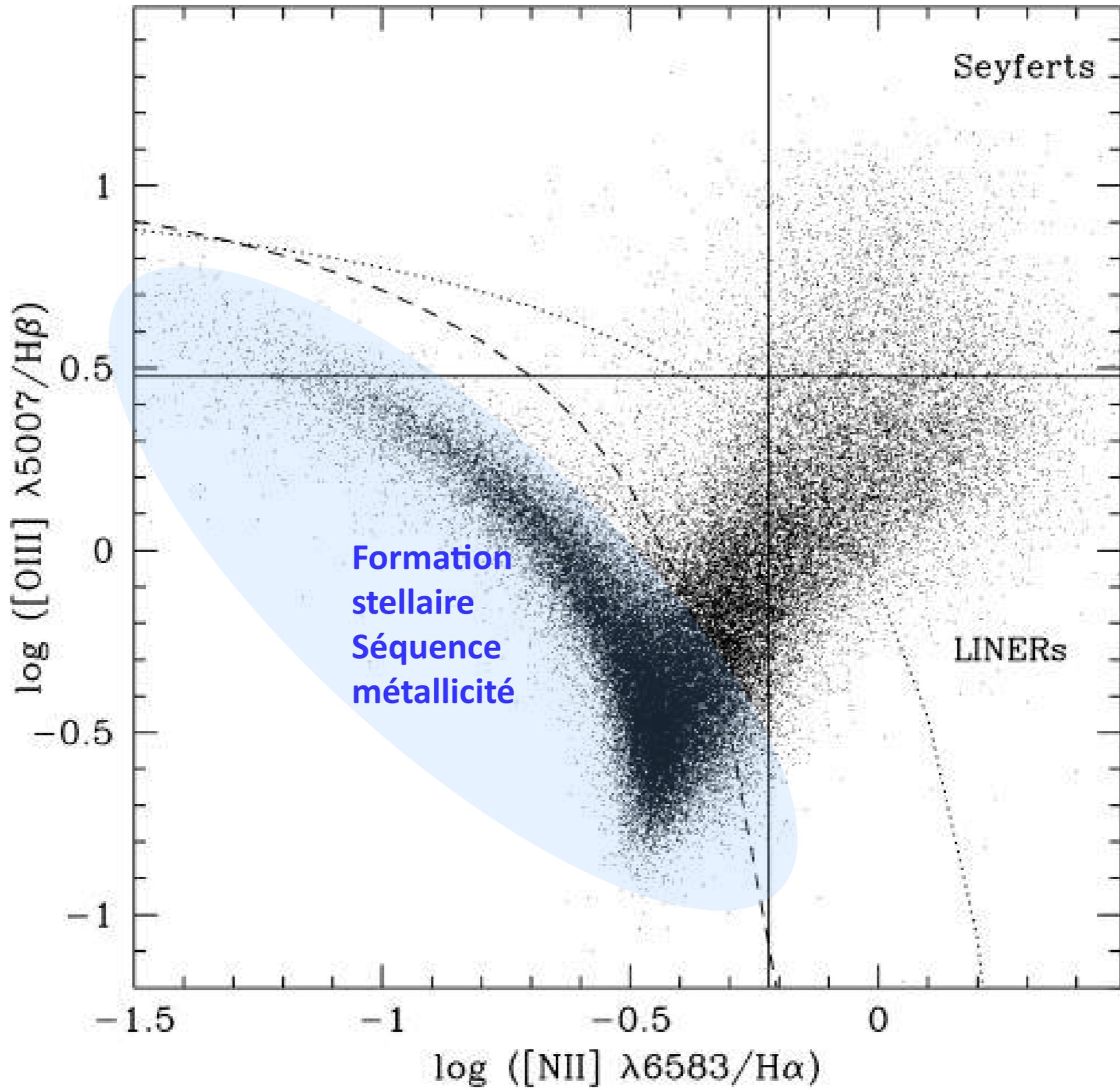
Received 1980 August 21

An investigation is made of the merits of various emission-line intensity ratios for classifying the spectra of extragalactic objects. It is shown empirically that several combinations of easily-measured lines can be used to separate objects into one of four categories according to the principal excitation mechanism: normal H II regions, planetary nebulae, objects photoionized by a power-law continuum, and objects excited by shock-wave heating. A two-dimensional quantitative classification scheme is suggested.



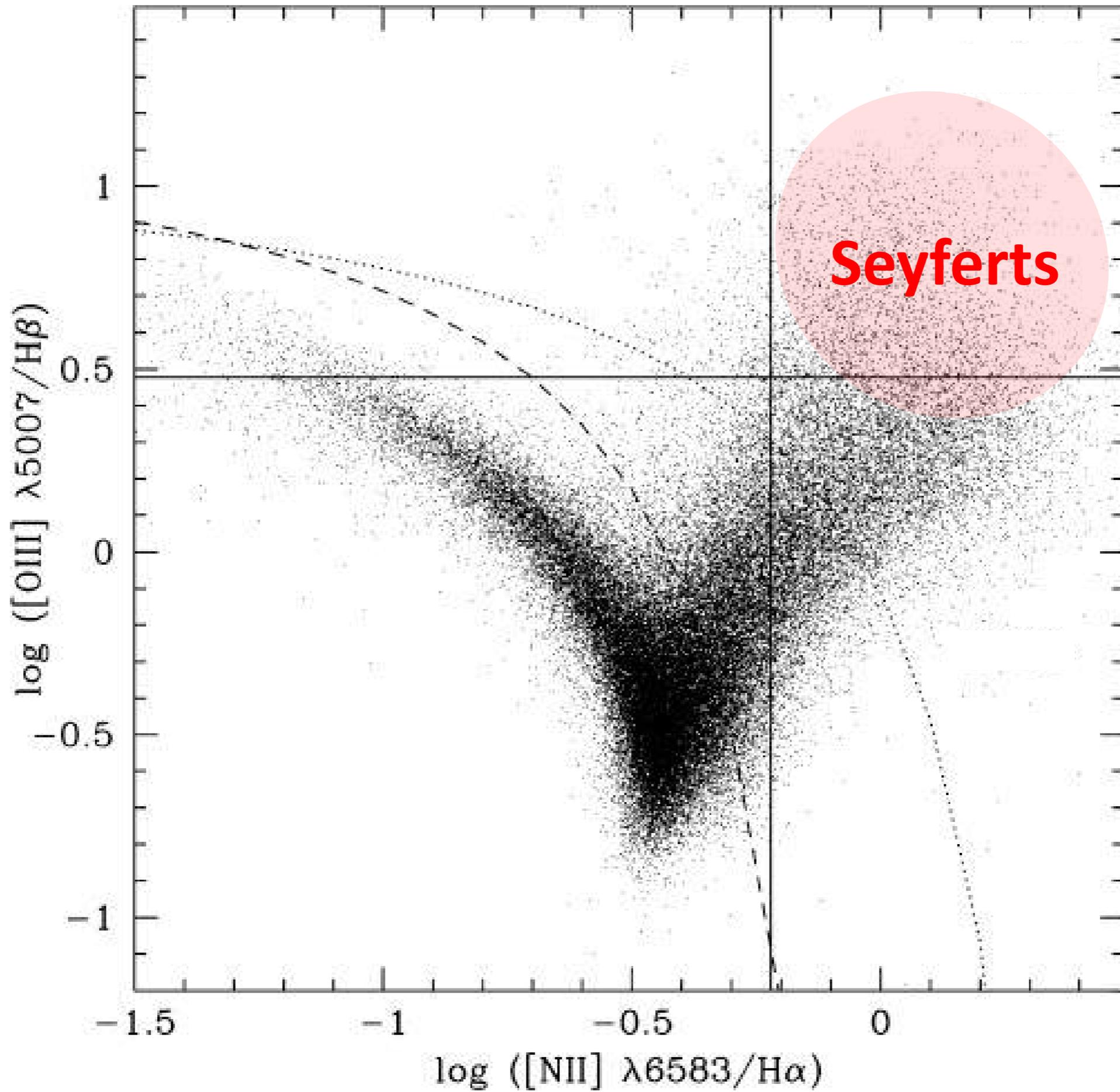
- Raies d'émission fortes ($[O III] 4363 / [O III] 5007$ est un bon traceur de température ... mais difficile à mesurer): **Veilleux & Osterbrock 1987**
- Raies optiques \Rightarrow idéal pour la démographie à bas redshift
- Raies sont proches les unes des autres
 \Rightarrow *rôle du rougissement/extinction minimisé*

Galaxies à raies d'émission du SDSS



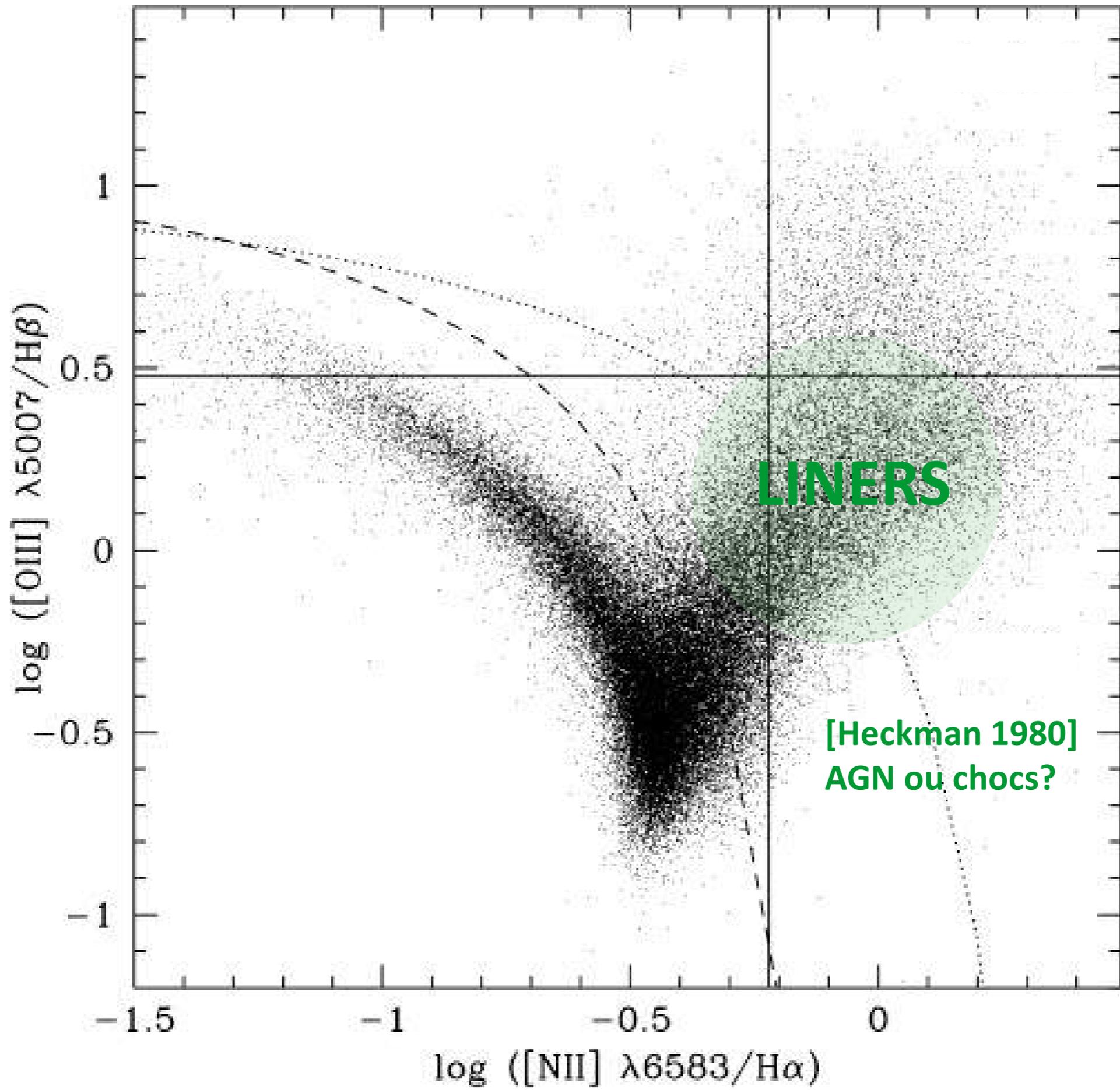
Galaxies à raies d'émission du SDSS

Kauffmann et al. 2003



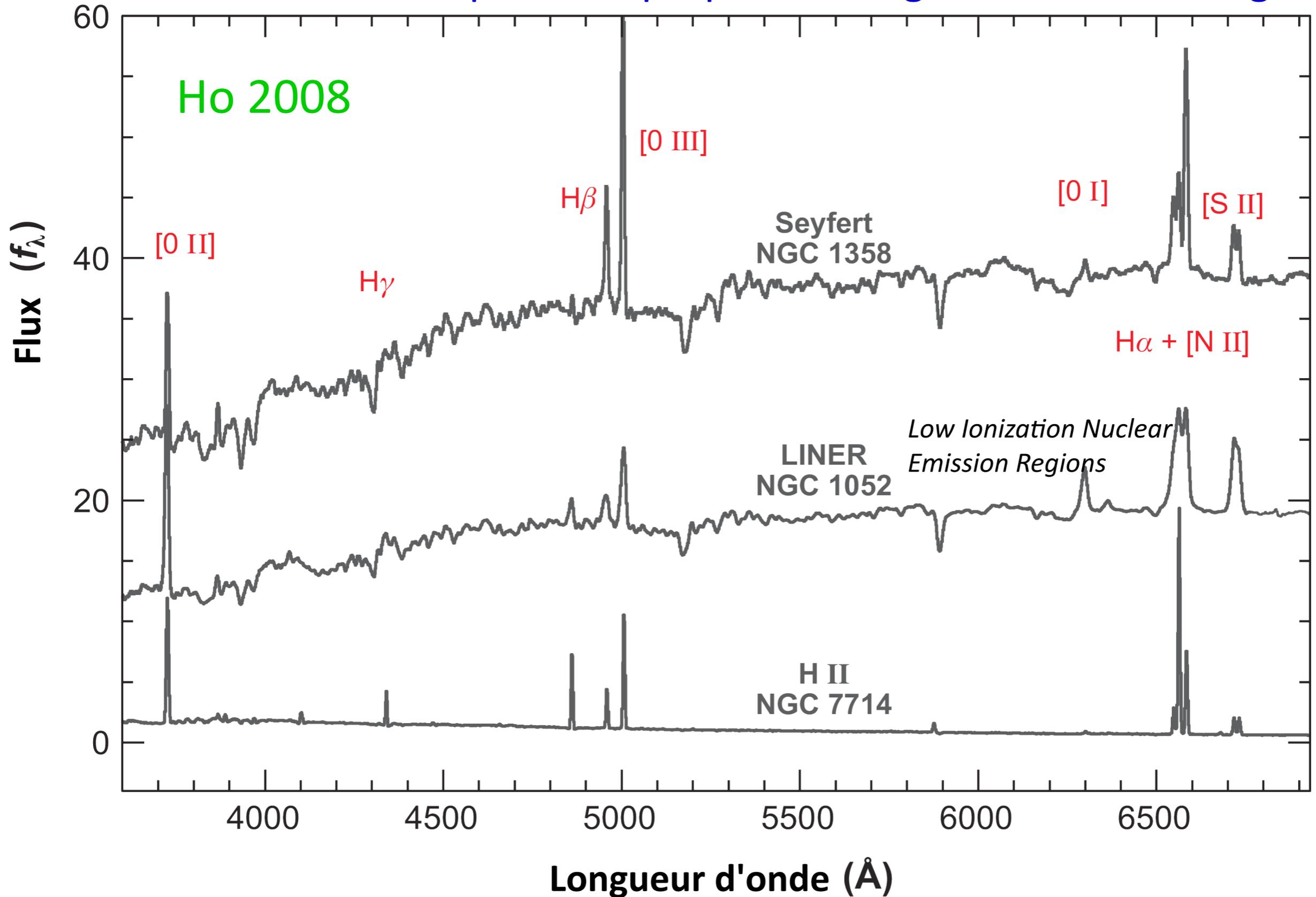
Galaxies à raies d'émission du SDSS

Kauffmann et al. 2003

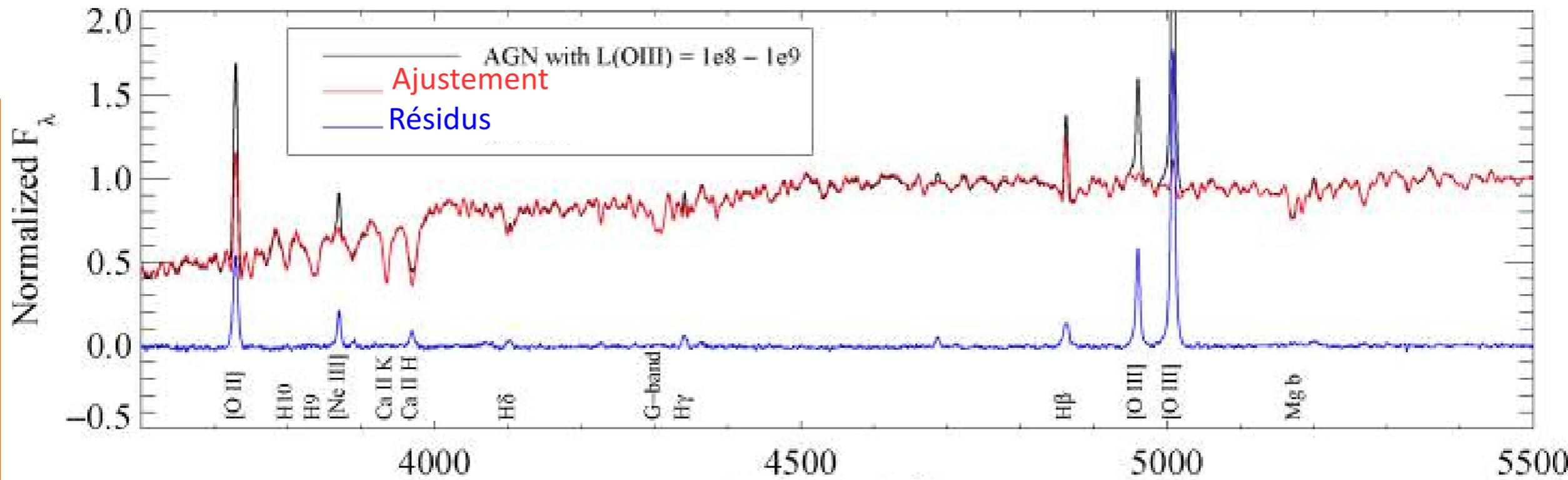


Quels échantillons aujourd'hui?

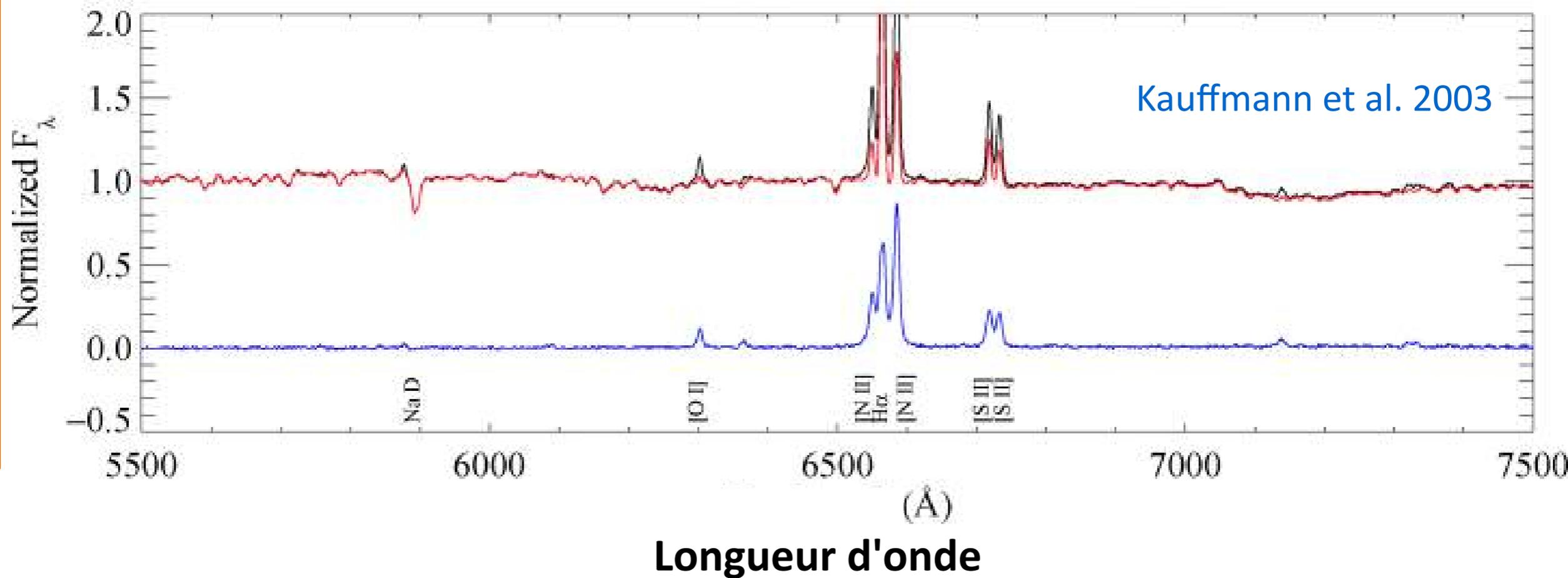
A bas redshift \Rightarrow Spectres optiques des régions centrales de galaxies



Galaxies à raies d'émission du SDSS



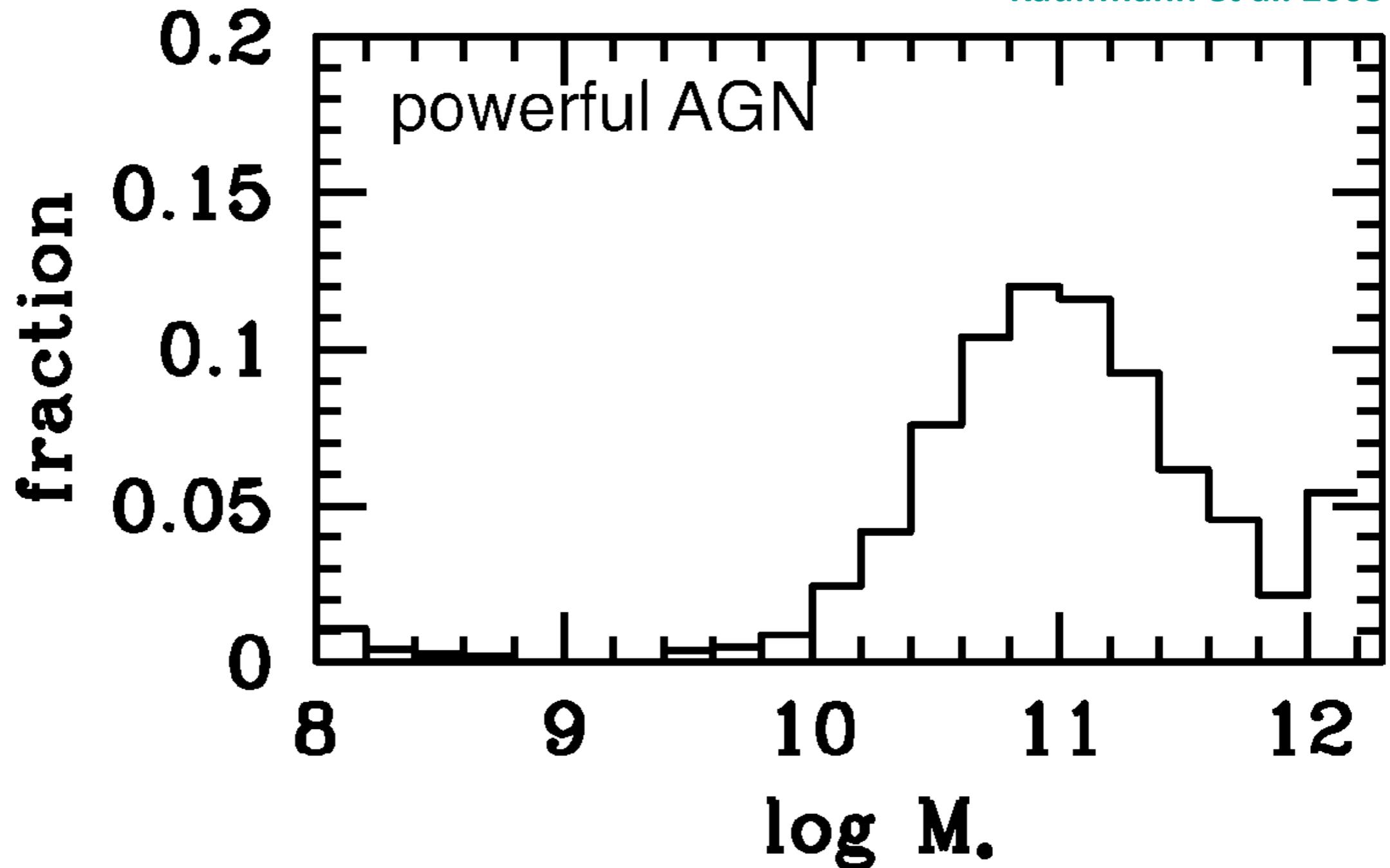
SDSS \Rightarrow plus de 120.000 galaxies



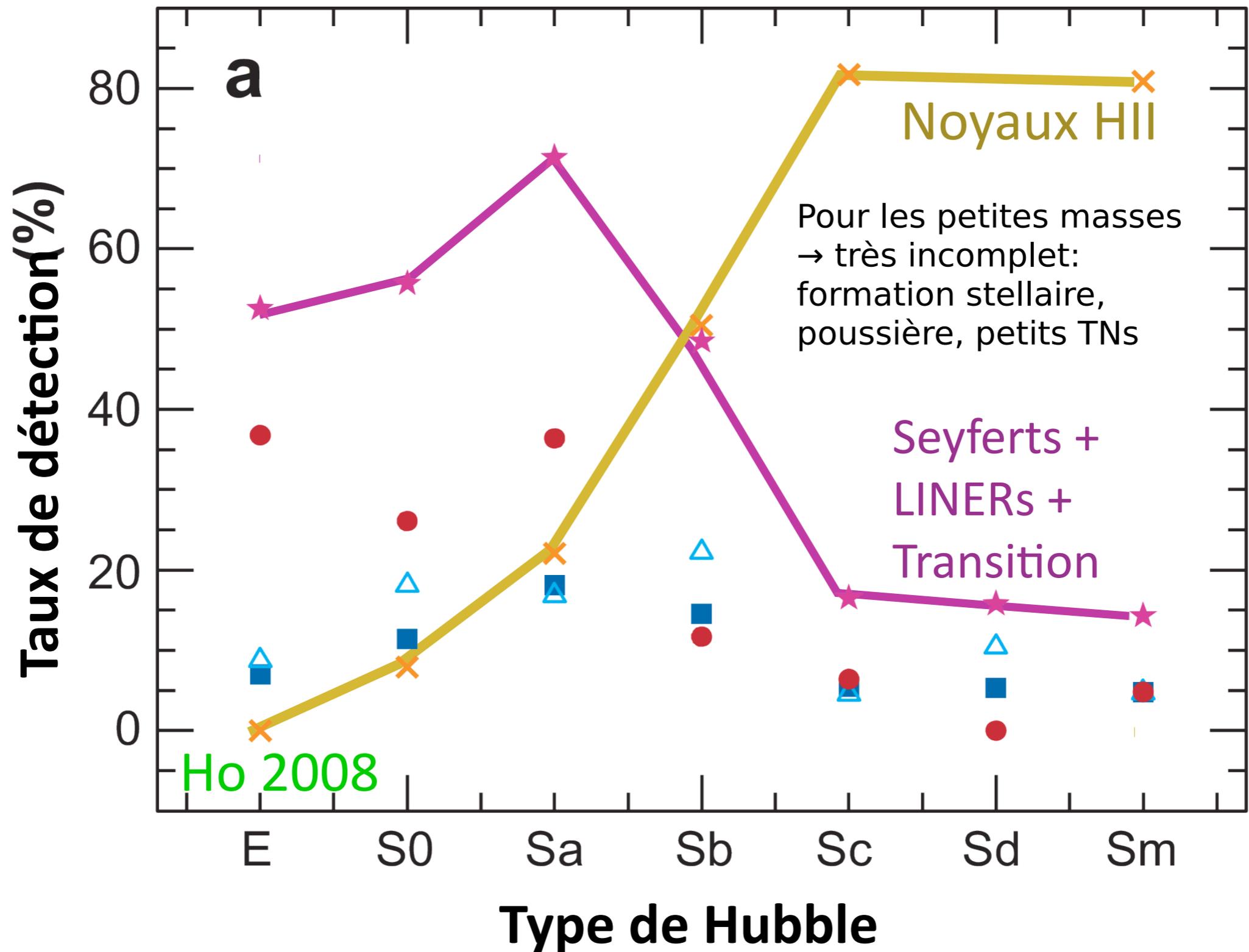
Démographie des Trous Noirs

Galaxies à raies d'émission du SDSS

Kauffmann et al. 2003



Point 1: les trous noirs “actifs” (qui accrètent) sont plutôt dans des galaxies massives et avec un sphéroïde

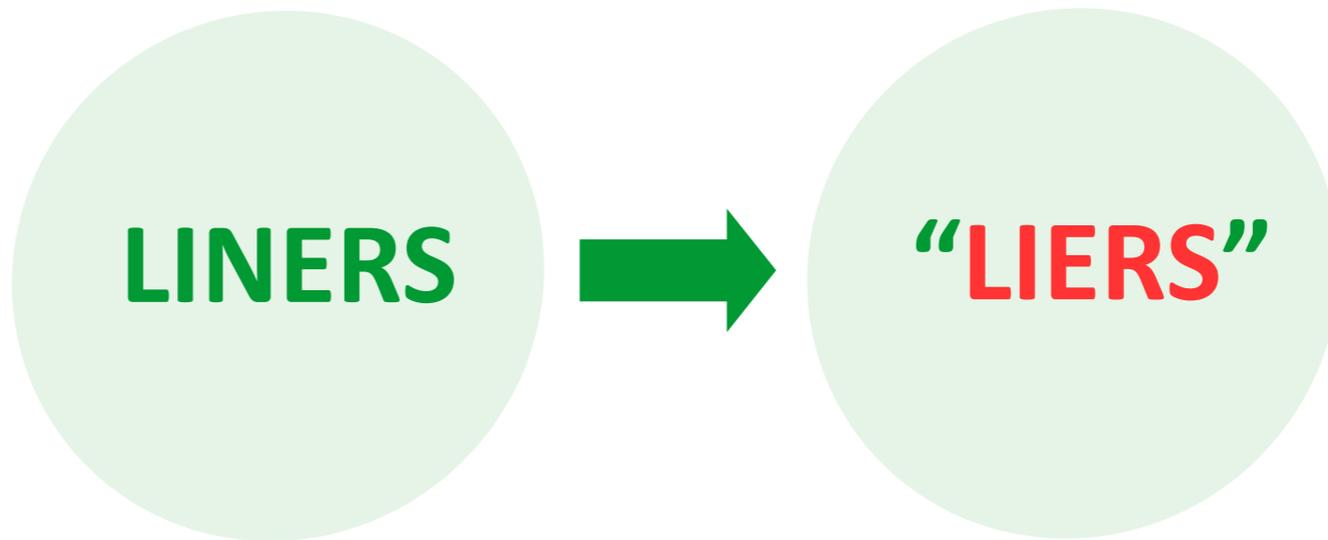
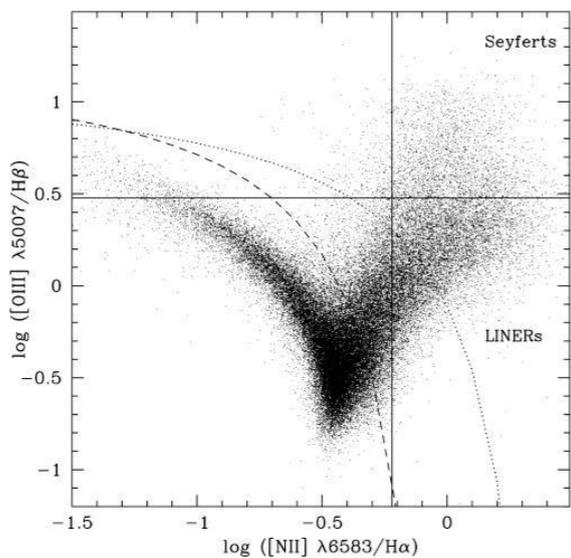


Point 2: si vous regardez suffisamment bien...

⇒ toutes les galaxies massives et dominées par un sphéroïde **ont un trou noir qui accrète** (même faiblement)

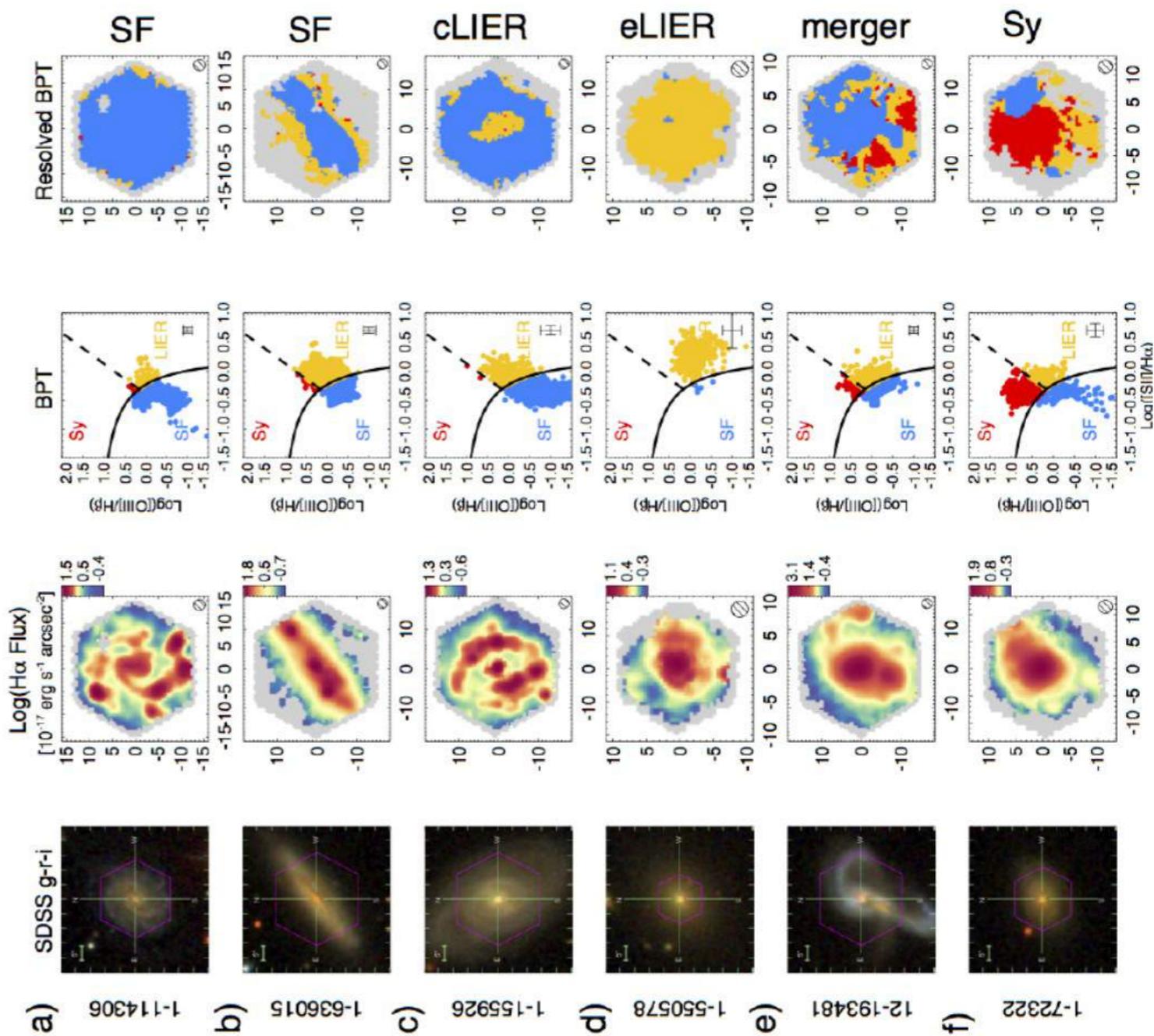
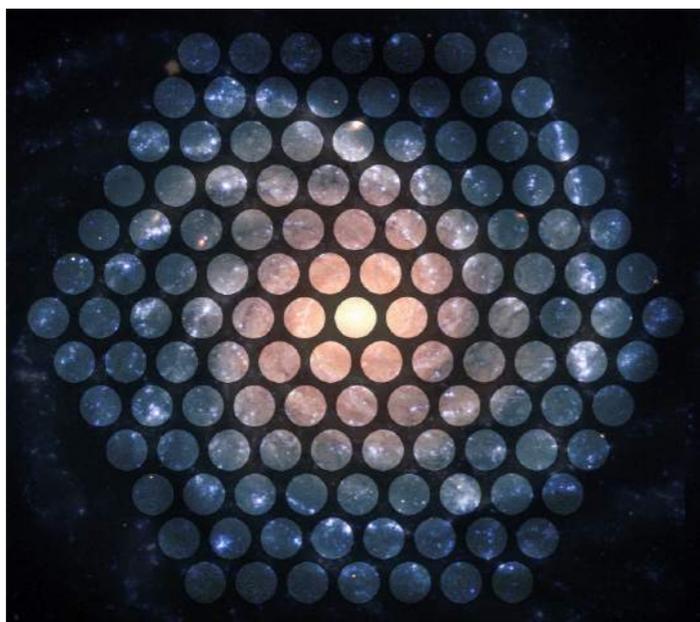
Galaxies à raies d'émission du SDSS

Kauffmann et al. 2003



Belfiore+2016

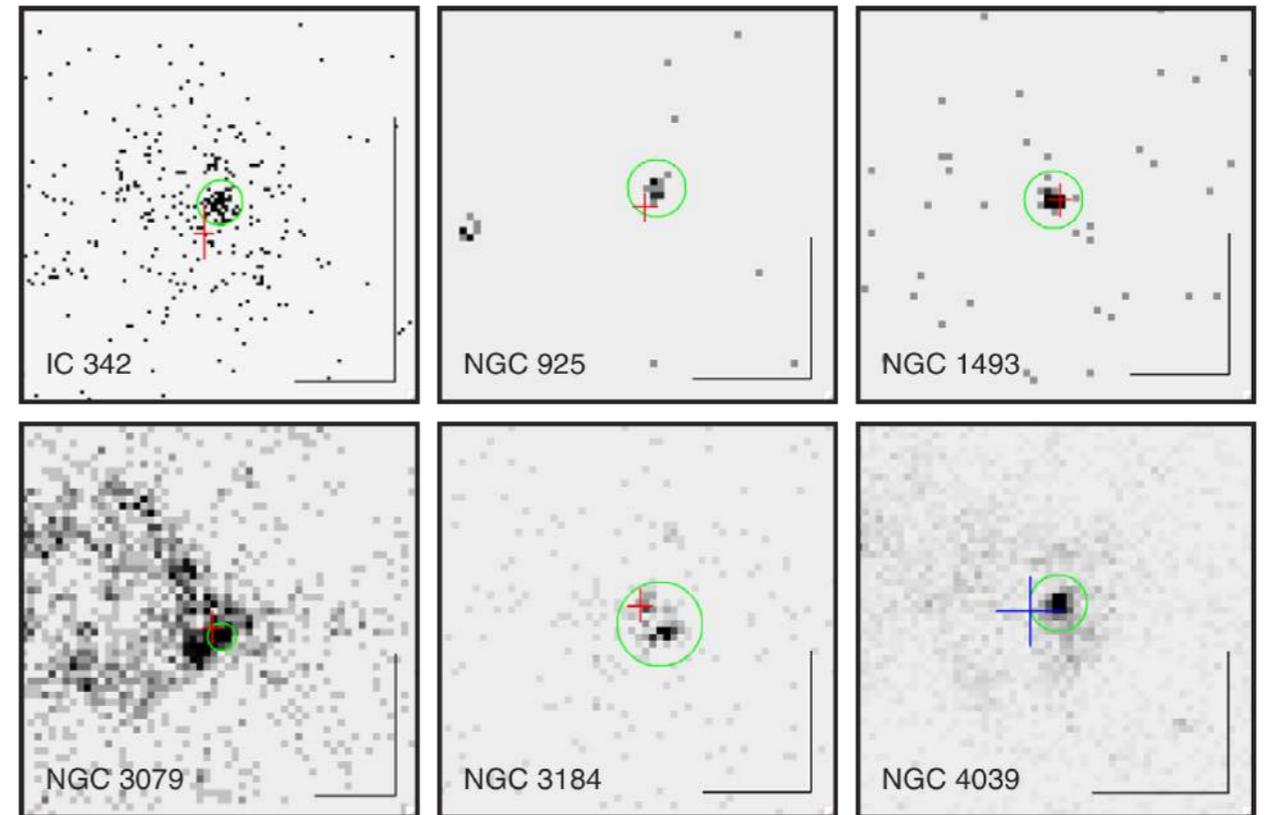
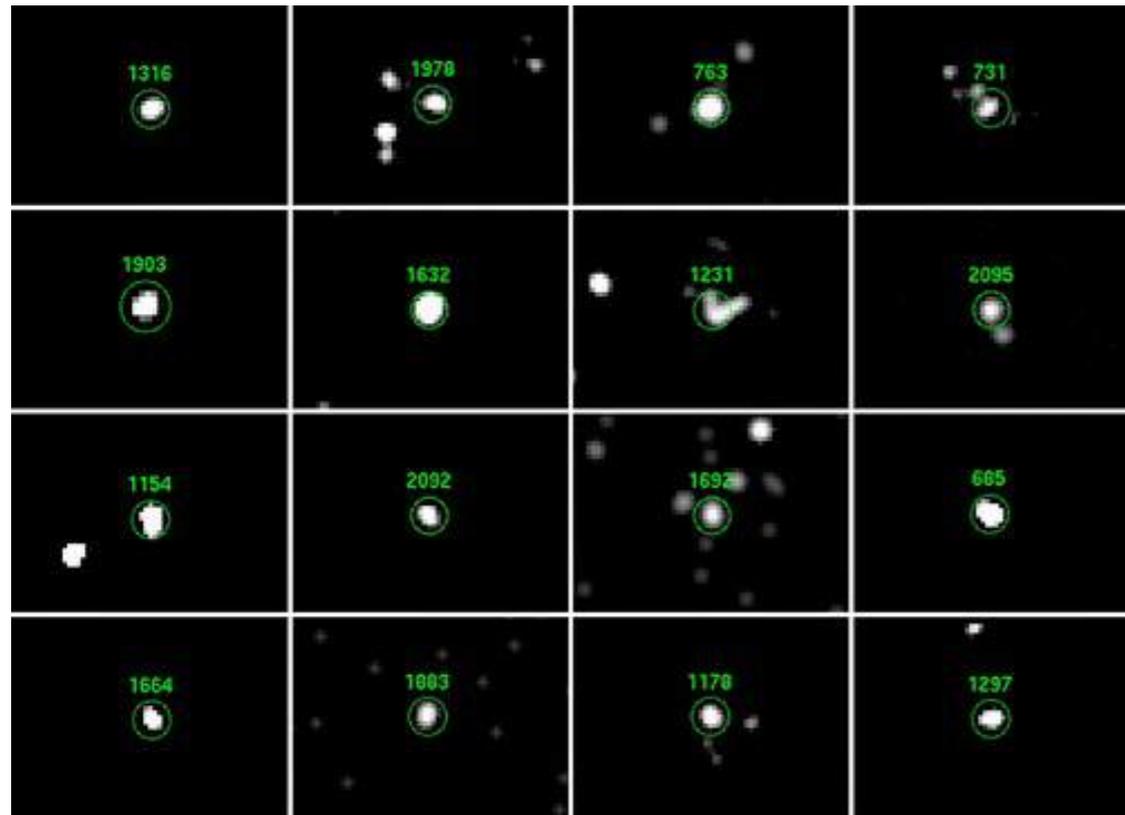
Données MaNGA
(SDSS + IFU)



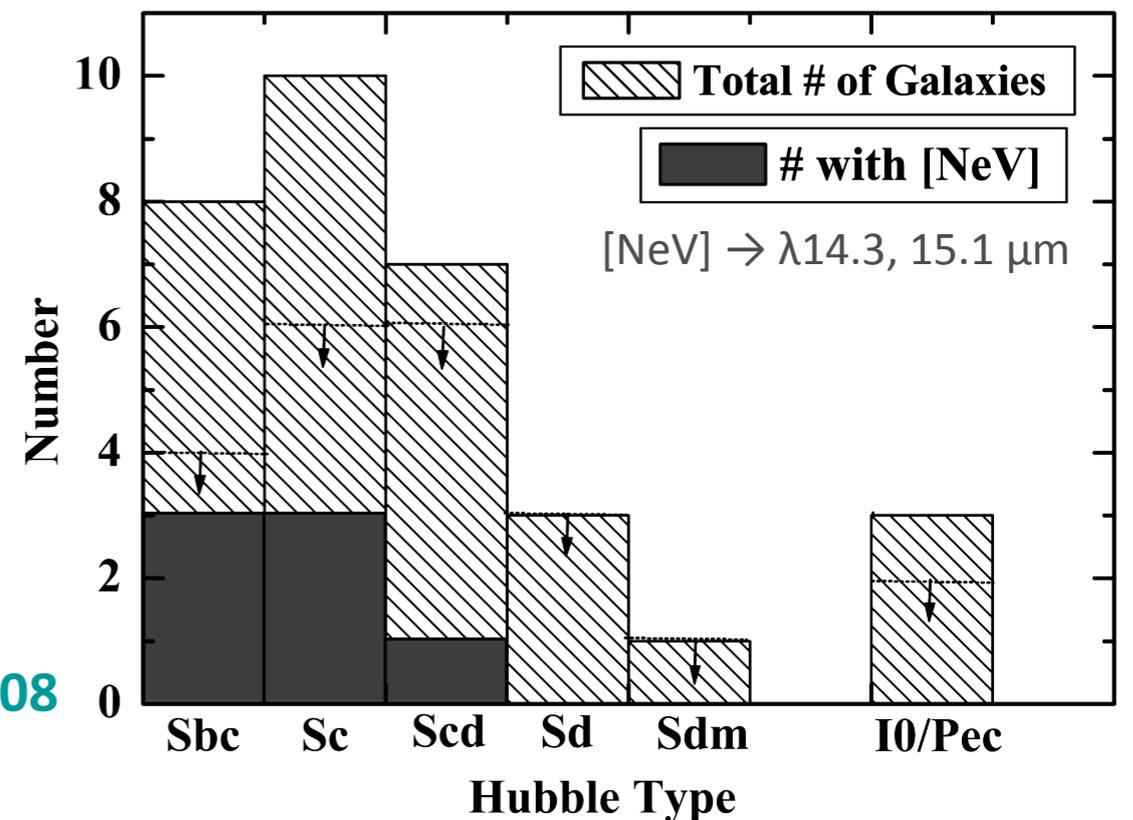
⇒ Besoin de confirmer l'activité avec :

rayonnement X, Radio ou Infra-Rouge moyen

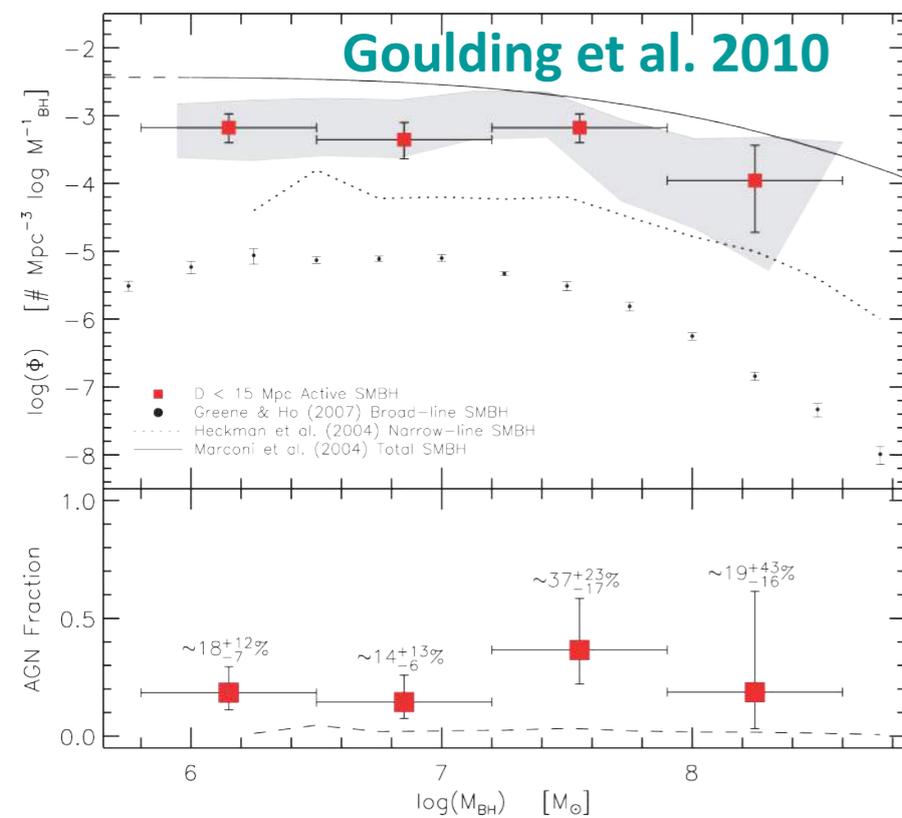
Gallo et al. 2010



Desroches & Ho 2009

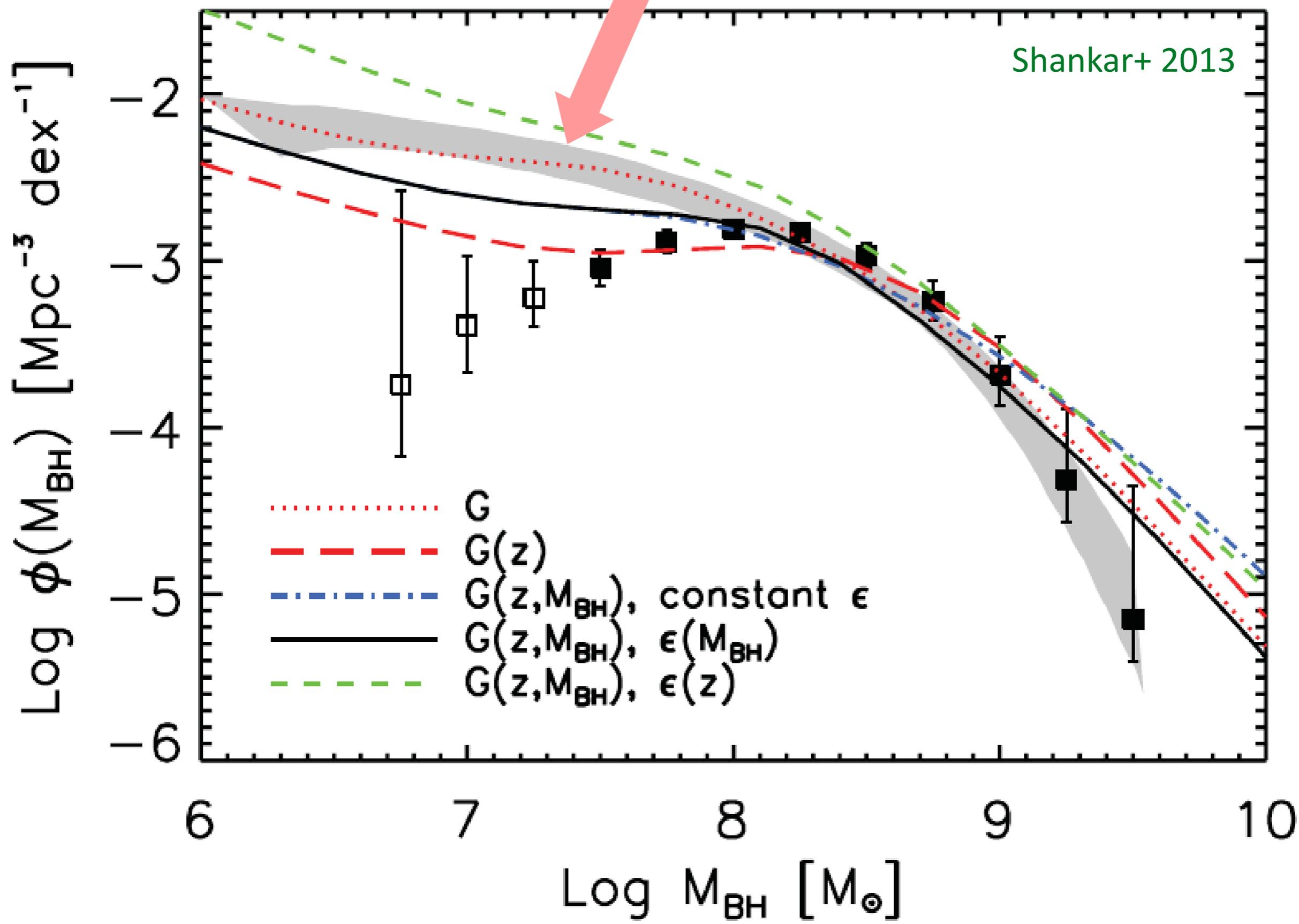


Satyapal et al. 2008



Ancrage à $z=0$?

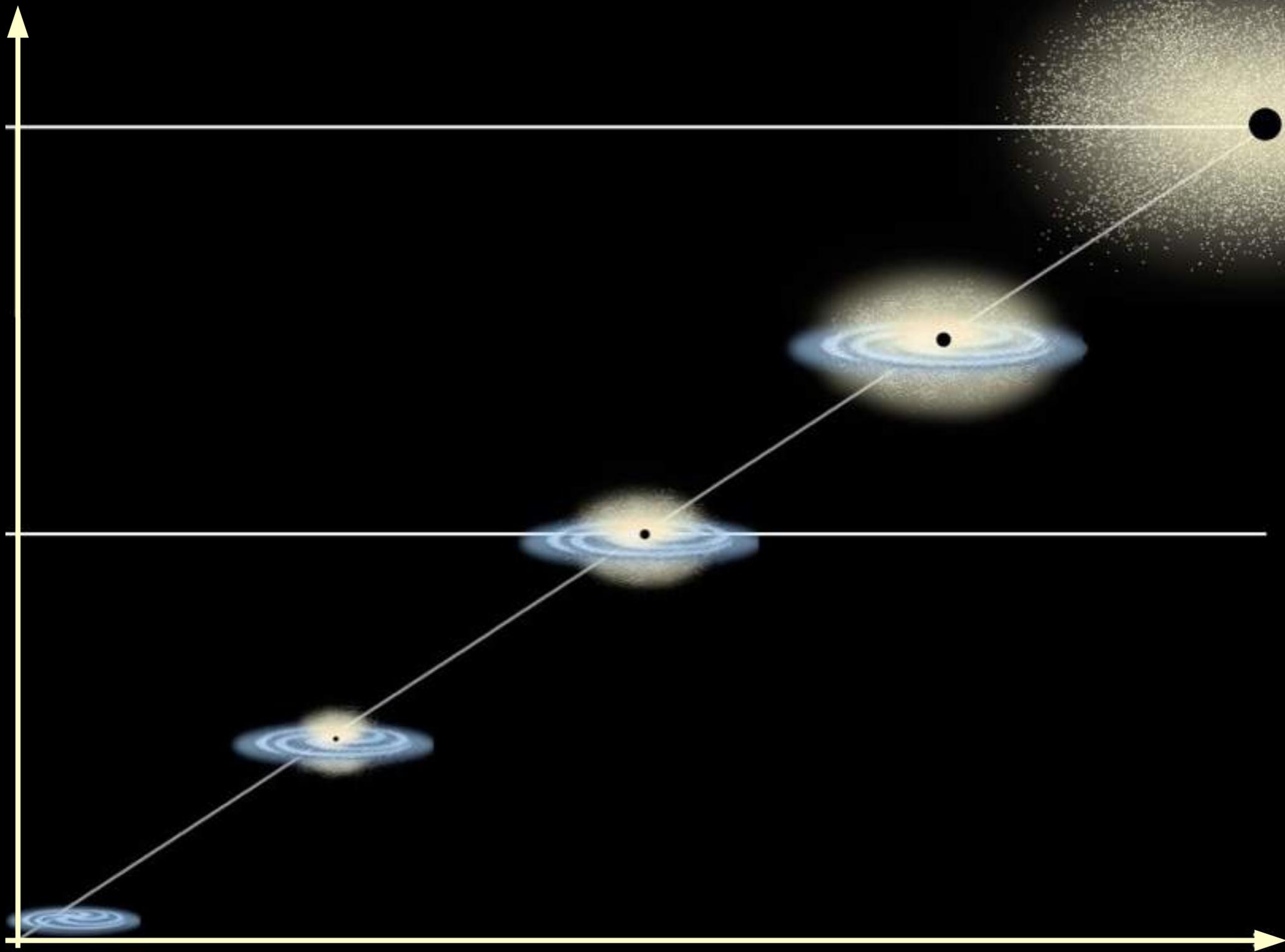
Besoin d'une relation d'échelle



Ancrage à $z=0$

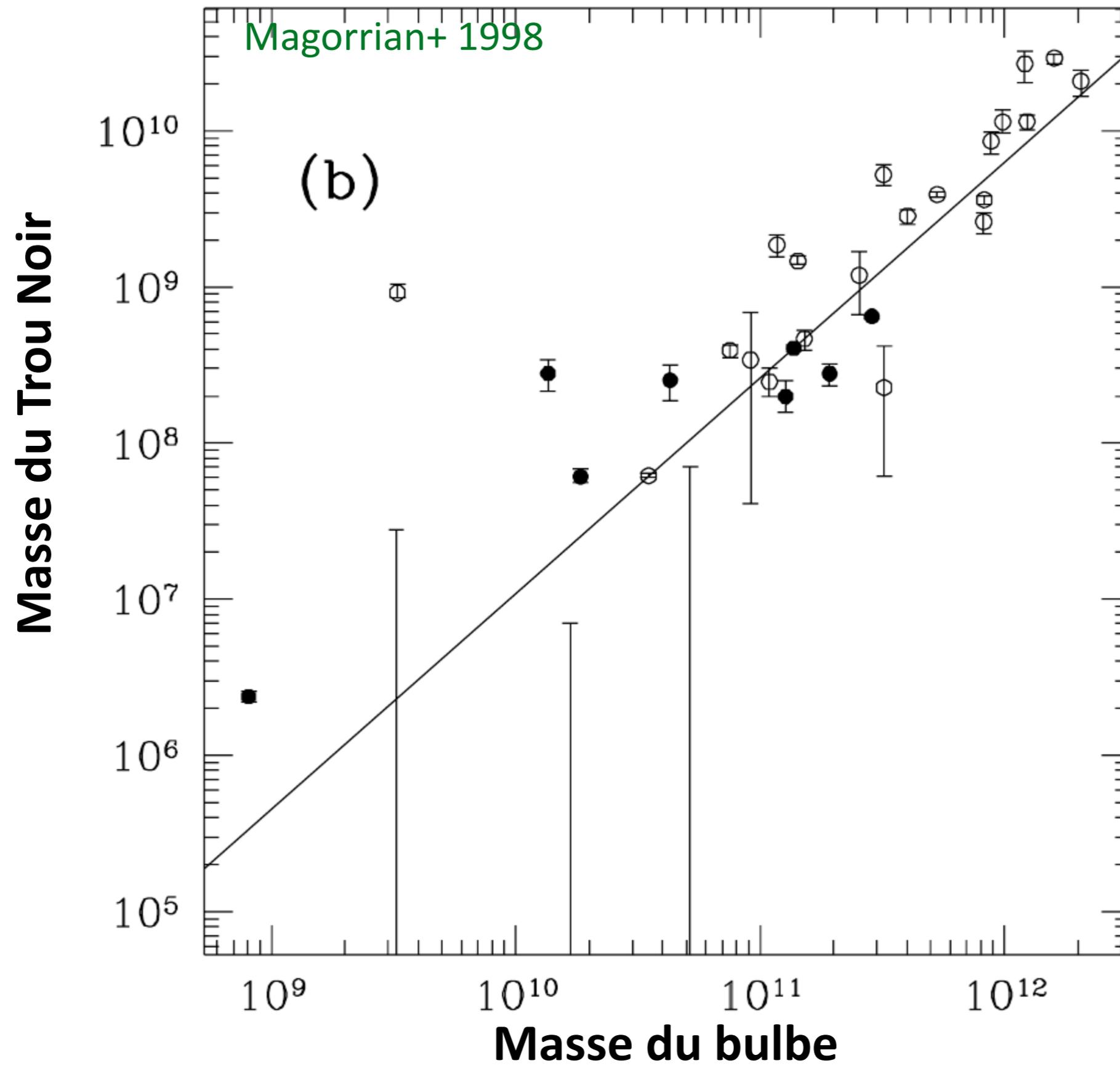
Relations d'échelle

Masse du Trou Noir



Masse du Bulbe

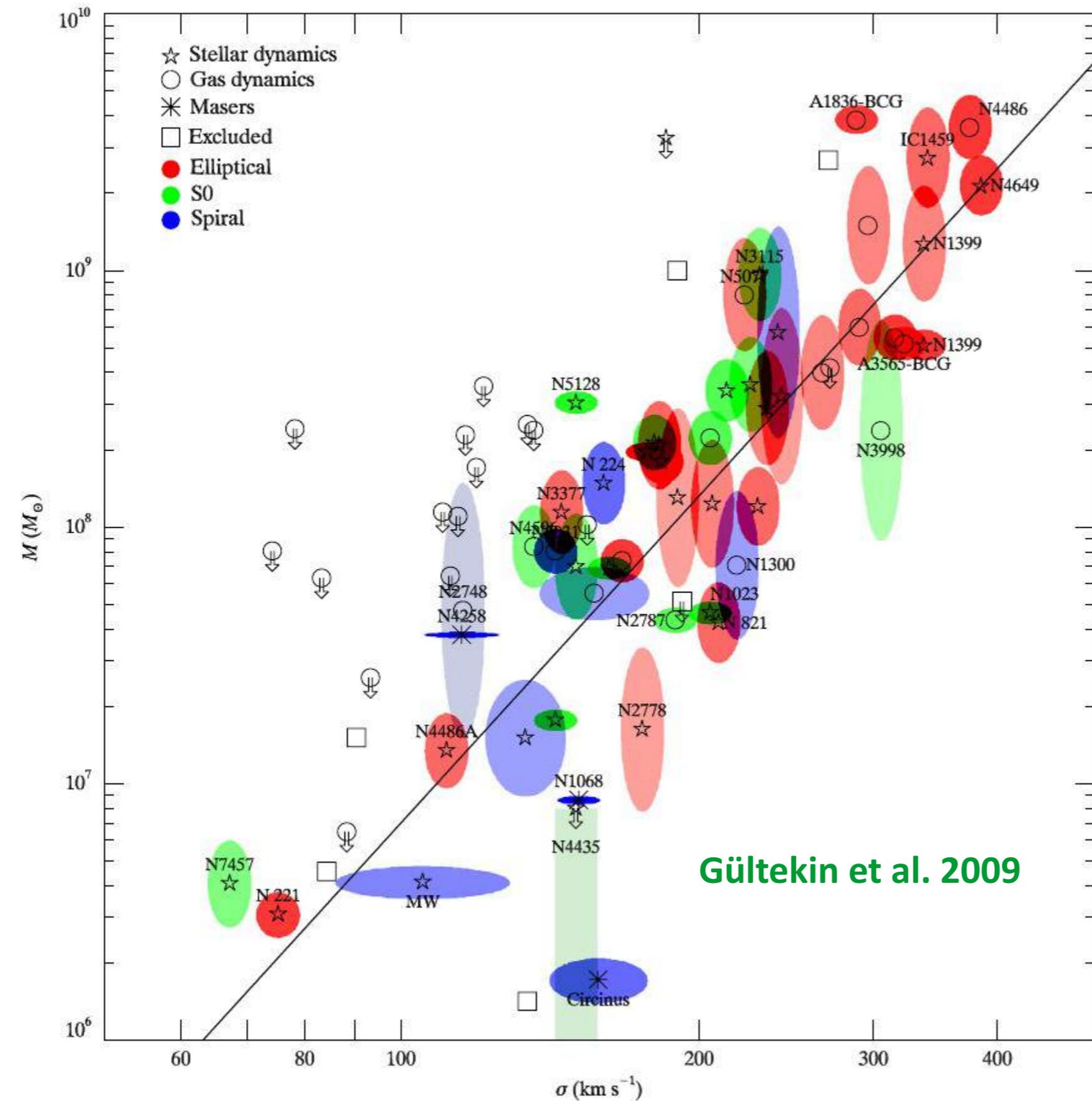
La relation de Maggorian



Les relations d'échelle

- Luminosité du bulbe ($M - L_{\text{bulbe}}$)
 - ◆ Kormendy 93 ; Kormendy & Richstone 95
- Masse du bulbe ($M - M_{\text{bulbe}}$)
 - ◆ Dressler 89 ; Magorrian+98
- Dispersion des vitesses stellaires ($M - \sigma$)
 - ◆ Gebhardt+2000 ; Ferrarese & Merritt 2000
- Autres propriétés
 - ◆ Profil photométrique (indice de Sersic), nombre d'amas globulaires, « déficit » central de masse, etc.

$M_{\text{TN}} - \sigma_{\star}$



Importance de

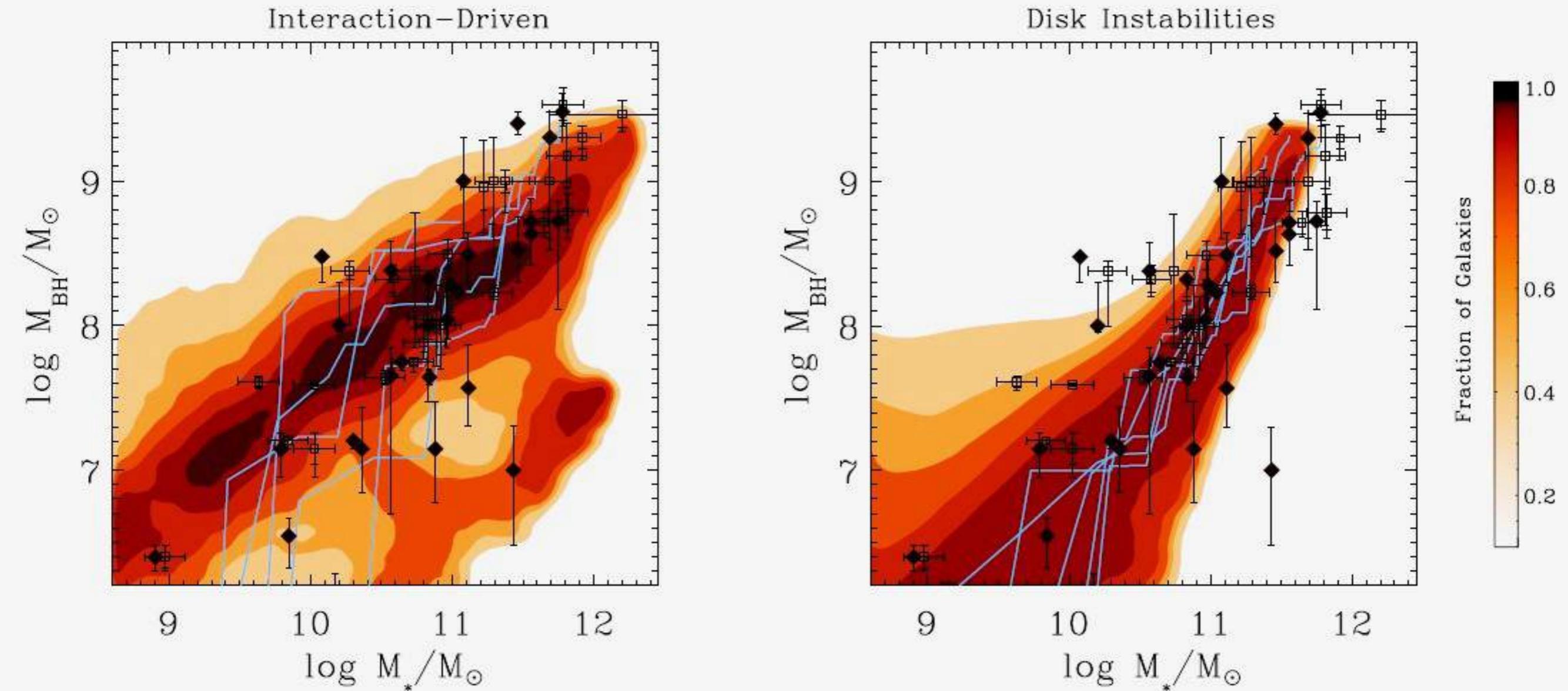
- ◆ la pente (4 – 5 ?)
- ◆ la dispersion (0.3 – 0.5 dex?)
- ◆ Variations en fonction de la population ?

⇒ scénario de formation et d'évolution

Nombreuses théories

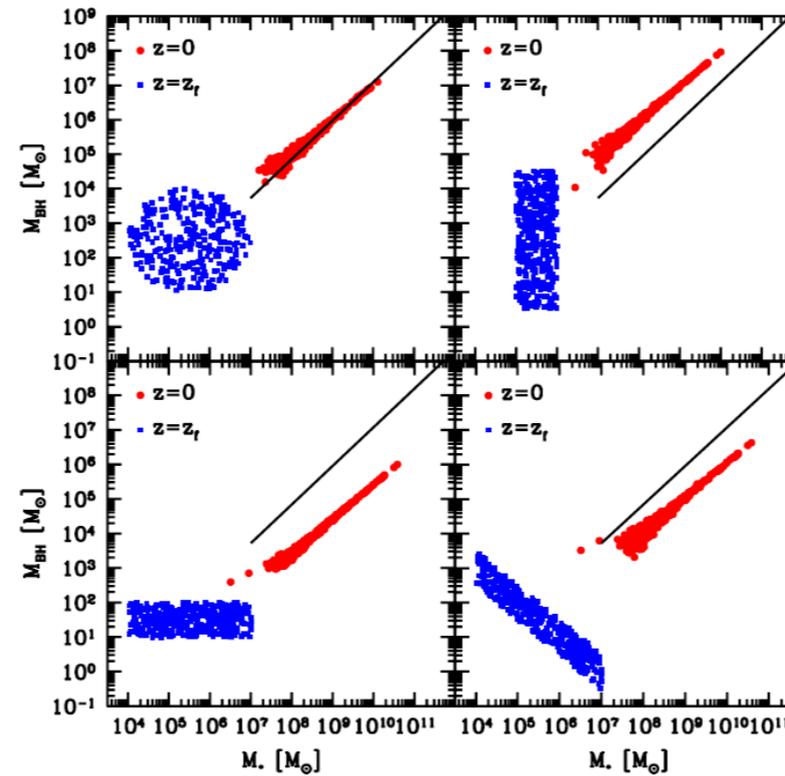
- ◆ Conservation de l'énergie
⇒ σ^5
- ◆ Conservation du moment
⇒ σ^4

La dispersion dans les relations d'échelle

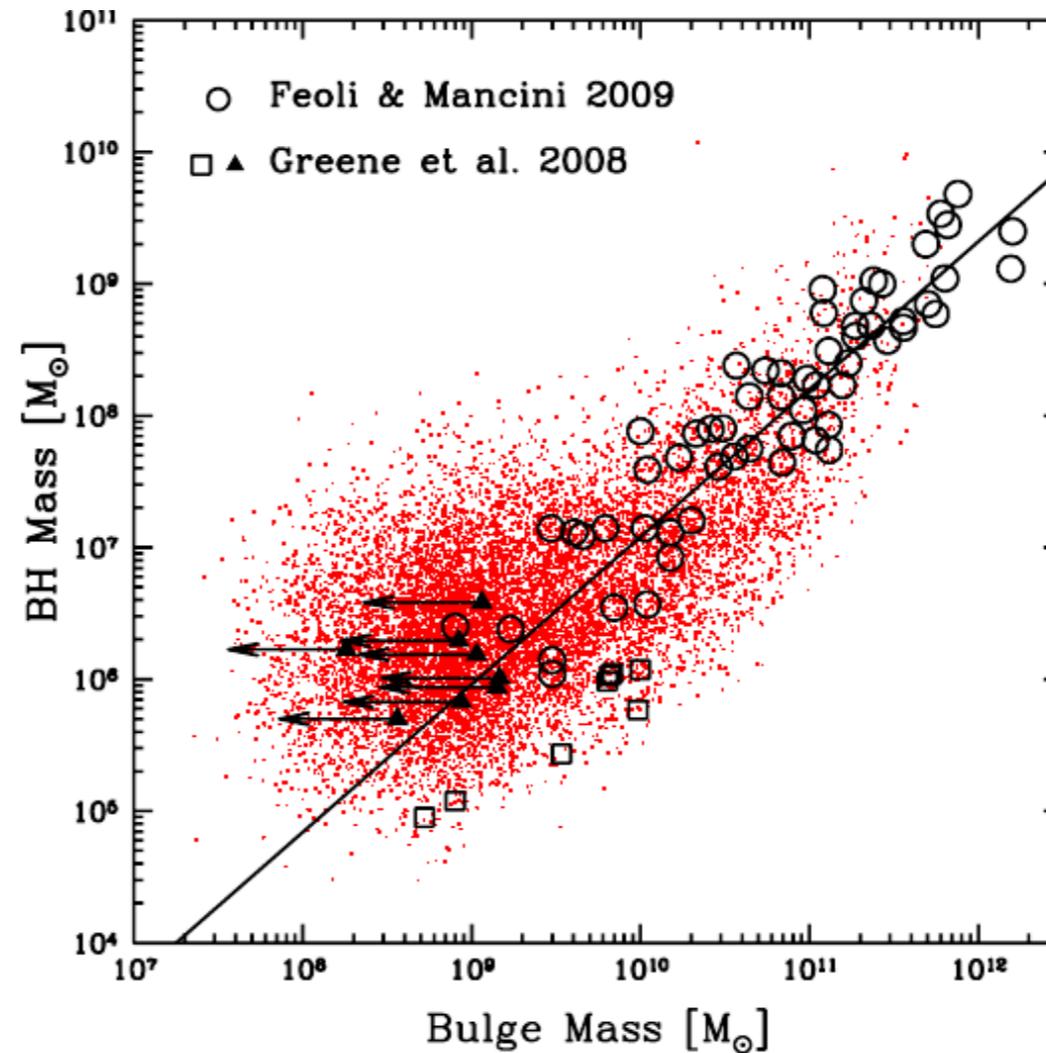
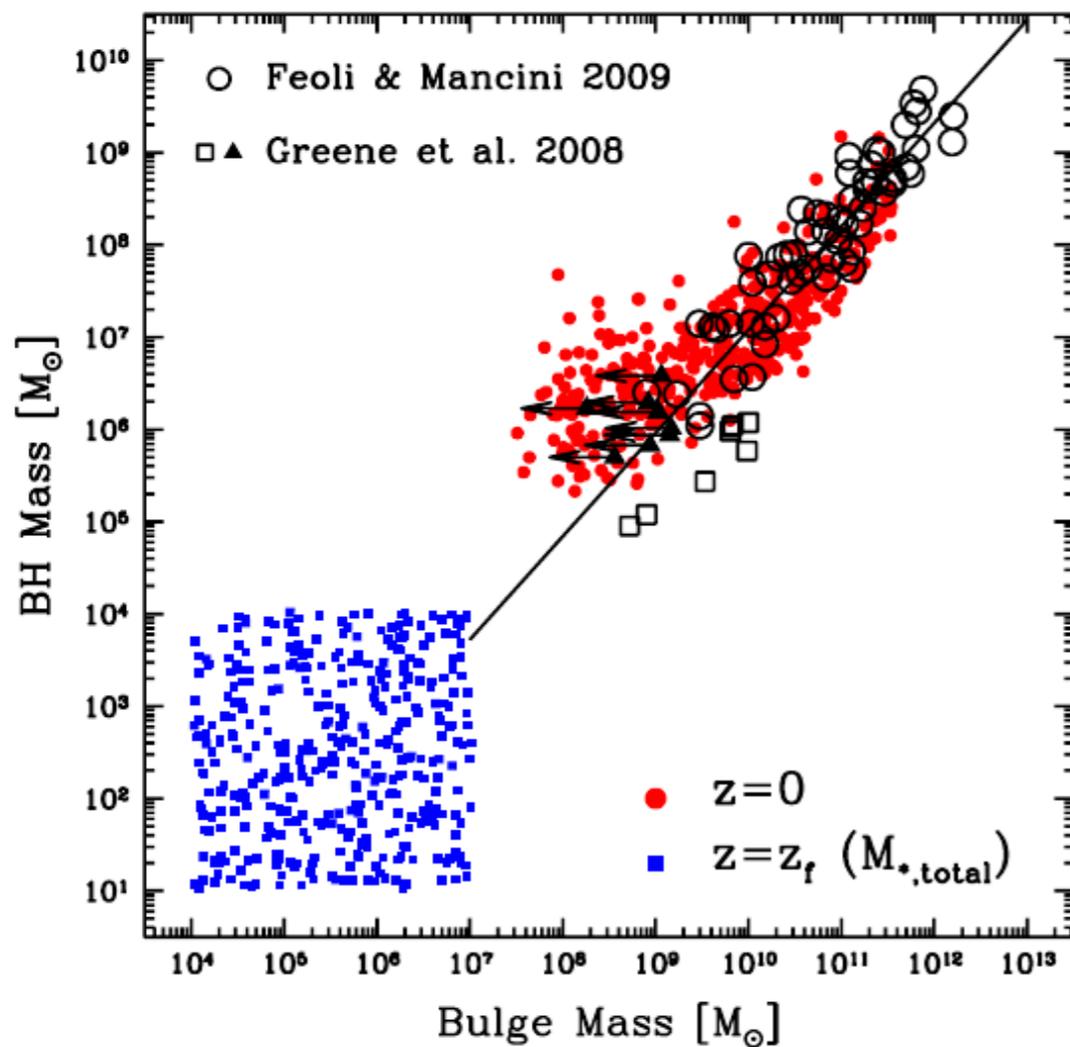


Shankar+

Jahnke+Maccio 11



Même sans accrétion,
on reproduit une loi linéaire avec la masse
du Bulbe



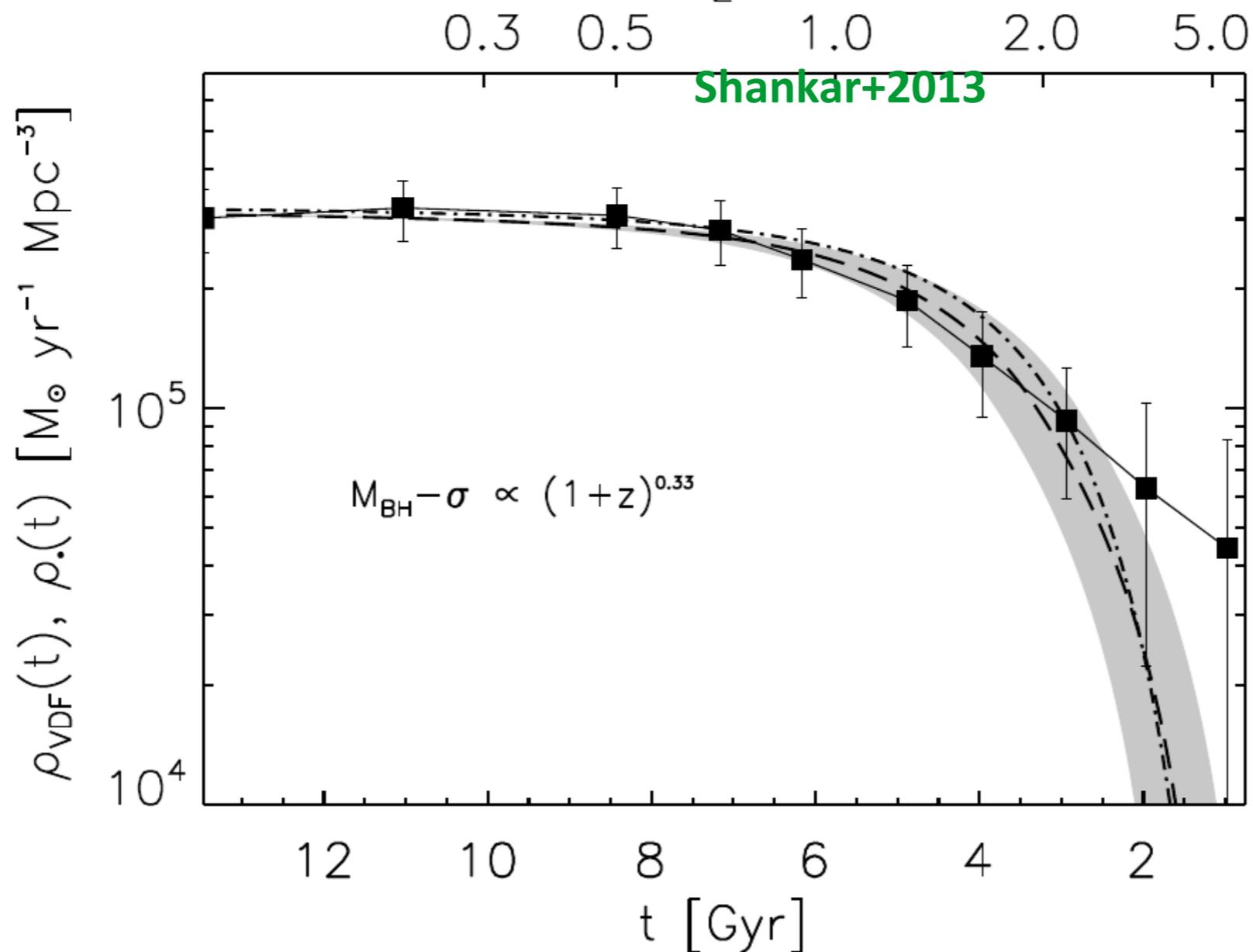
⇒ Démographie : Evolution dans le temps

Evolution en $(1+z)^\alpha$: α proche de 0

⇒ pratiquement pas d'évolution

⇒ les galaxies évoluent le long de la relation

⇒ Evolution en fonction de M_{bulbe}



Par contre... Comment mesurer ces paramètres ?

■ M_{bulbe}

- ◆ Quel bulbe ? → « au dessus du disque » ?
- ◆ Mesure du profil photométrique ?

■ σ

- ◆ Quelle ouverture ?
- ◆ Intégration du spectre ou addition des mesures ?

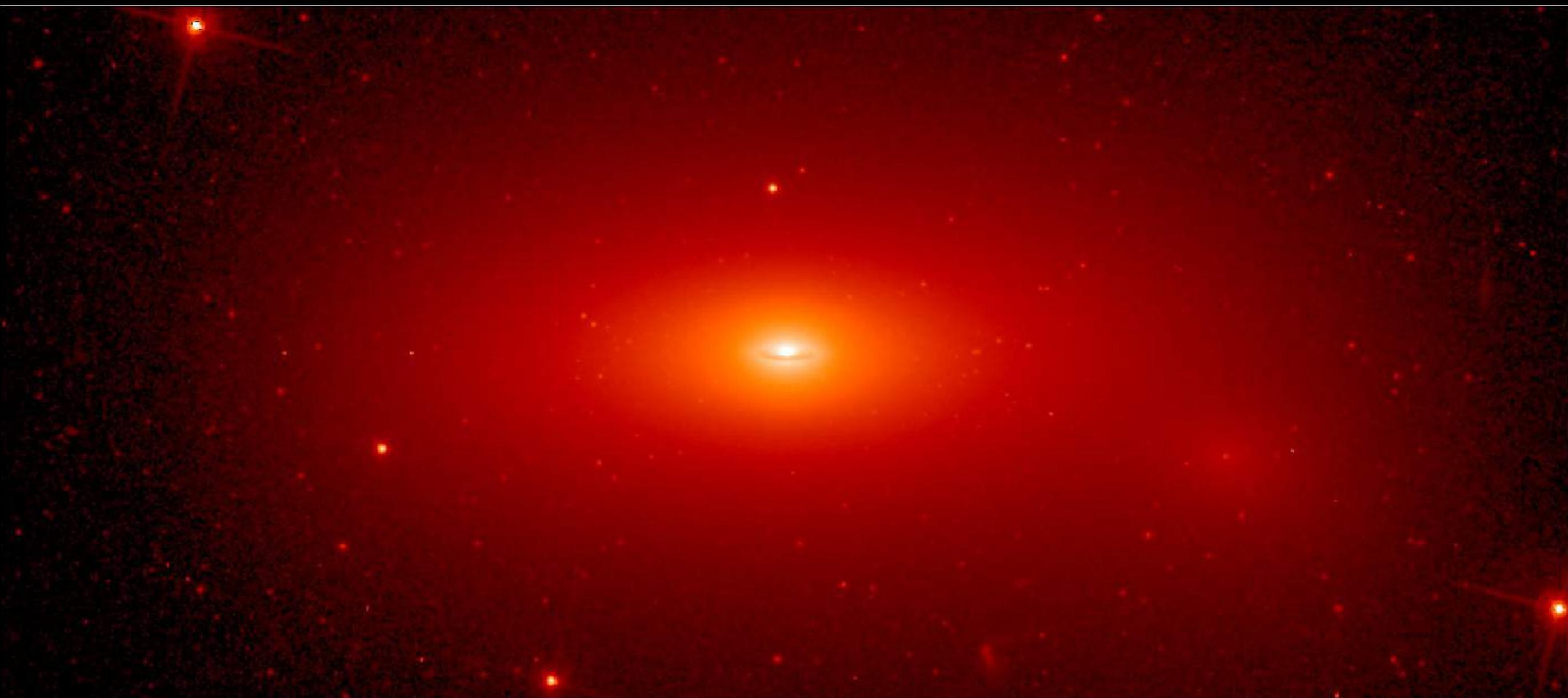
■ M_{BH}

- ◆ Quelle précision pour quelle méthode ?









Le rayon d'influence

Plusieurs définitions suivant le principe :

⇒ à quel rayon la force du trou noir domine celle due aux baryons ?

$$\Rightarrow M_*(< r_m) = 2 M_\bullet$$

ou

$$\Rightarrow r_h = GM_\bullet / \sigma^2$$

[$r_m = r_h$ pour la sphère isotherme $\rho \propto r^{-2}$]

En terme de résolution $\theta \approx \frac{r_h}{D}$

$$\approx 0.2'' \left(\frac{M_\bullet}{10^8 M_\odot} \right) \left(\frac{\sigma}{200 \text{ km s}^{-1}} \right)^{-2} \left(\frac{D}{10 \text{ Mpc}} \right)^{-1}$$

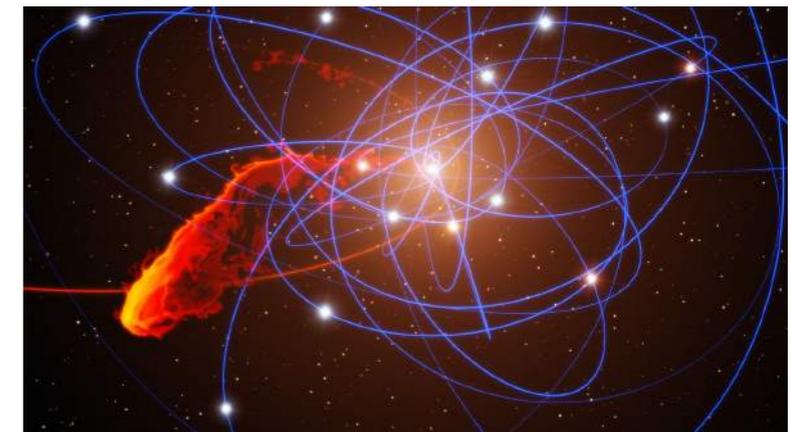
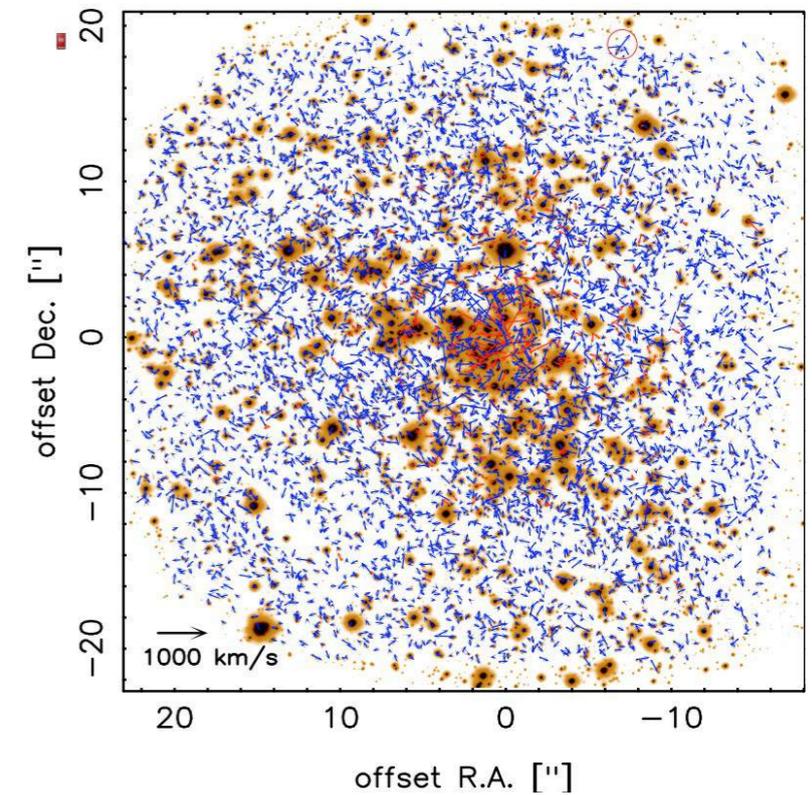
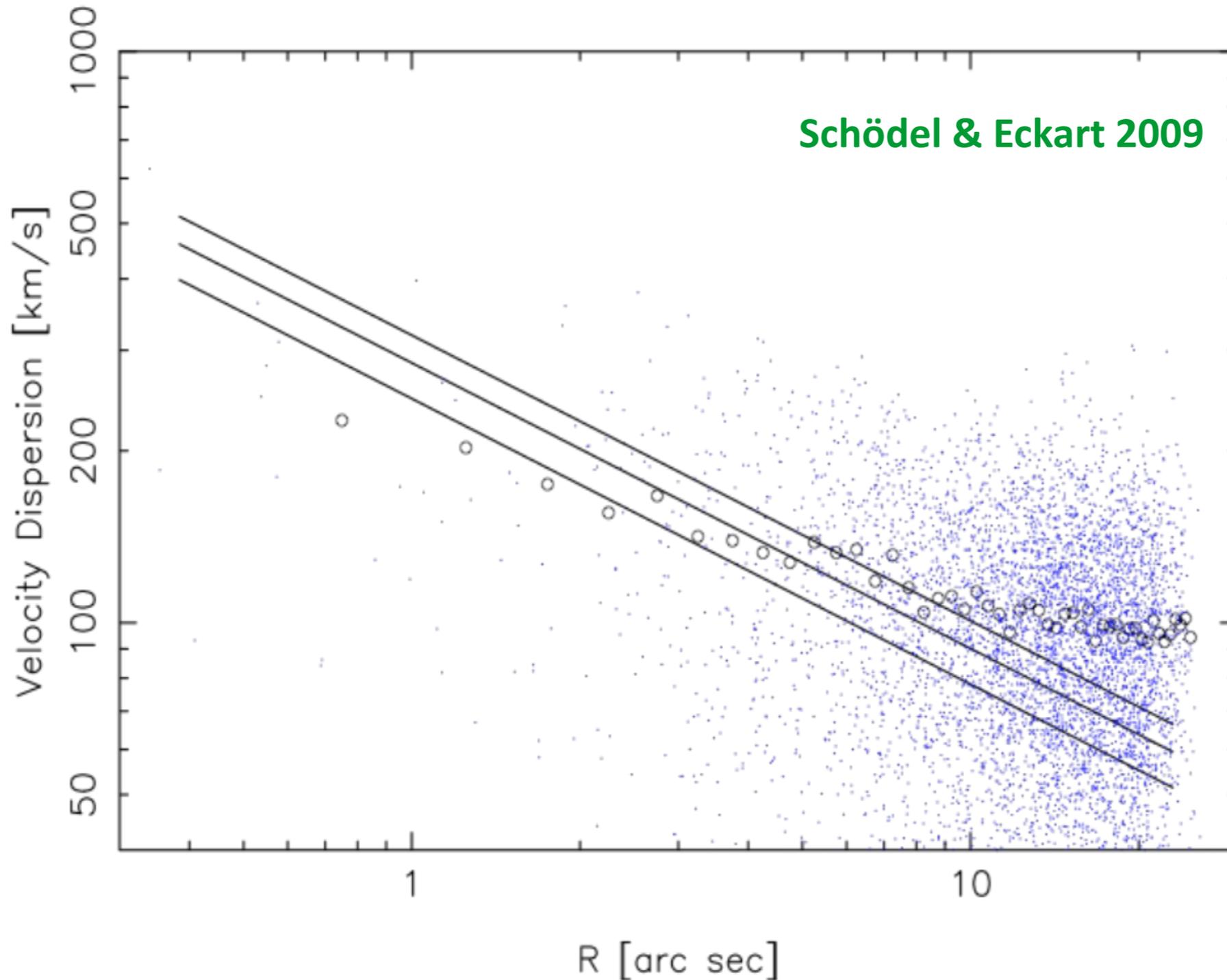
Lorsqu'on est proche du trou noir, qui domine le potentiel, on devrait observer une croissance Keplérienne de la vitesse...

$$V^2(r) \approx \frac{GM_\bullet}{r}$$

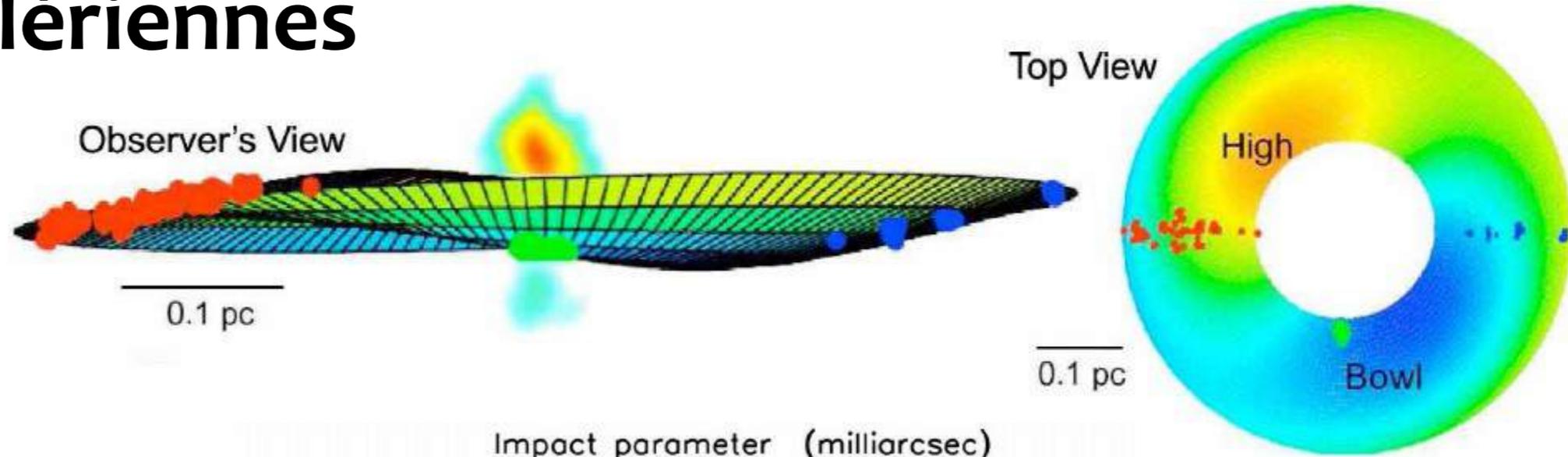
Le rayon d'influence \Rightarrow Vitesses Képlériennes

Pour la Voie Lactée :

$\Rightarrow r_h \sim 3$ pc (25 arcsecondes)



Vitesse Képlériennes

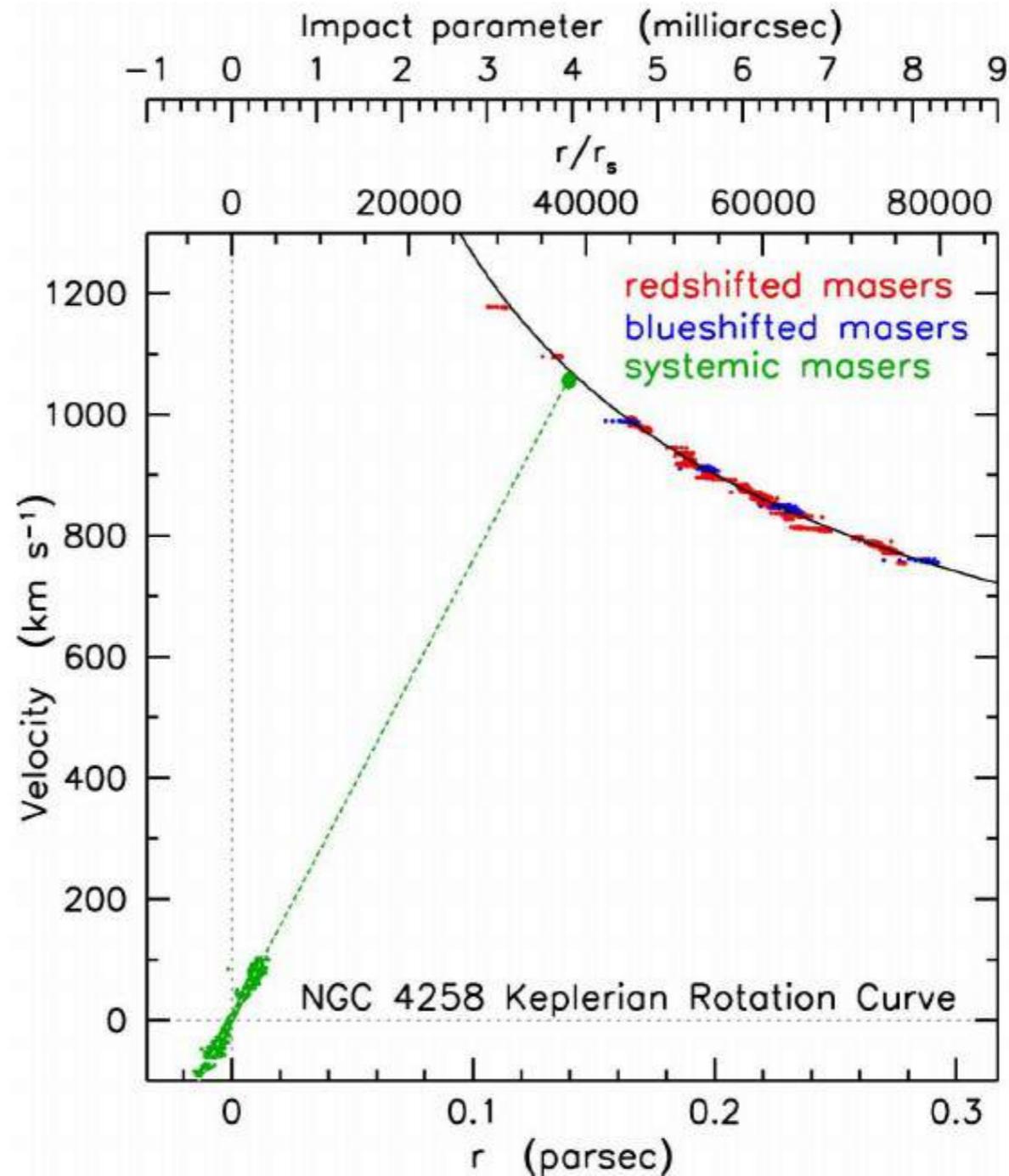


Pour NGC 4258

⇒ Masers H₂O

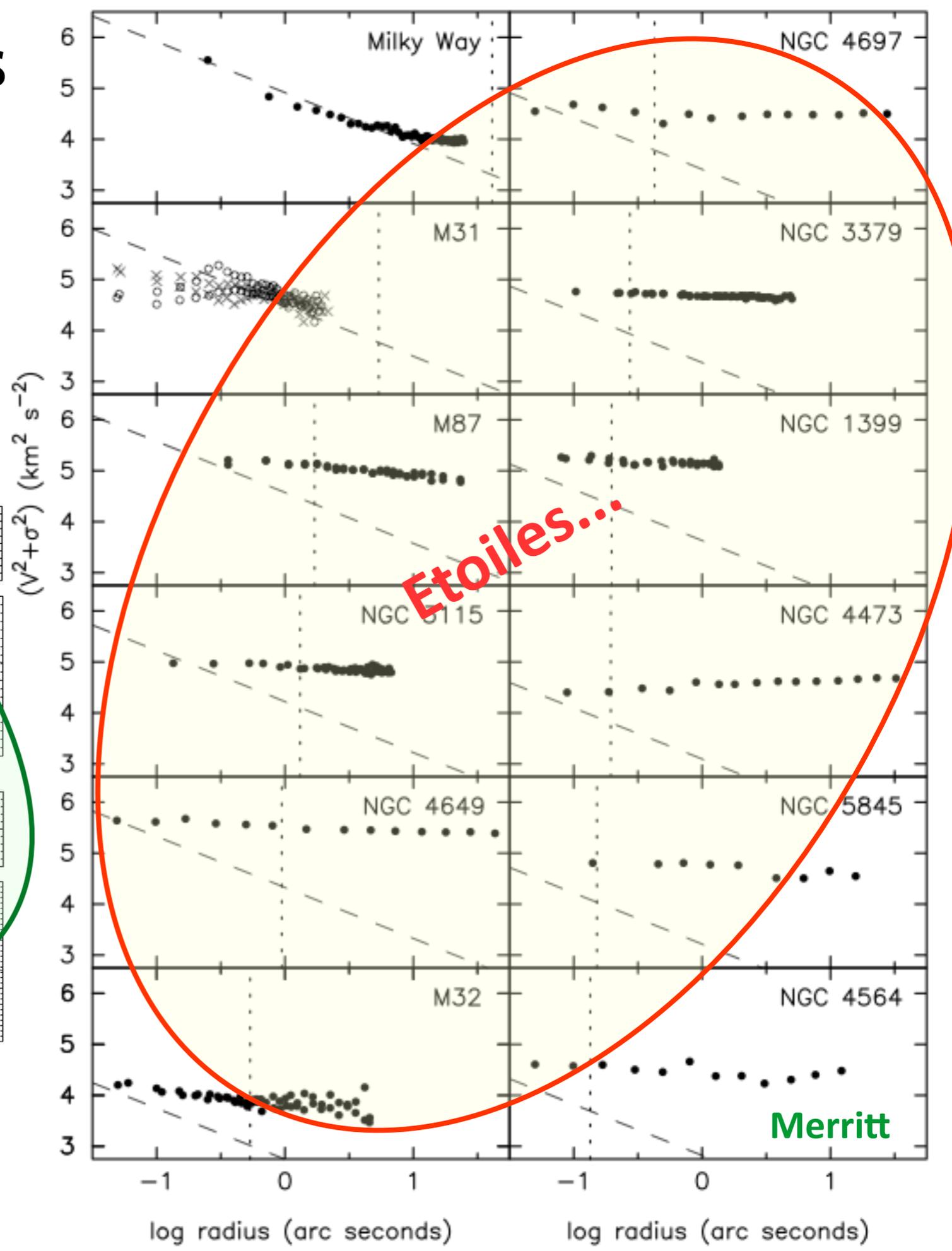
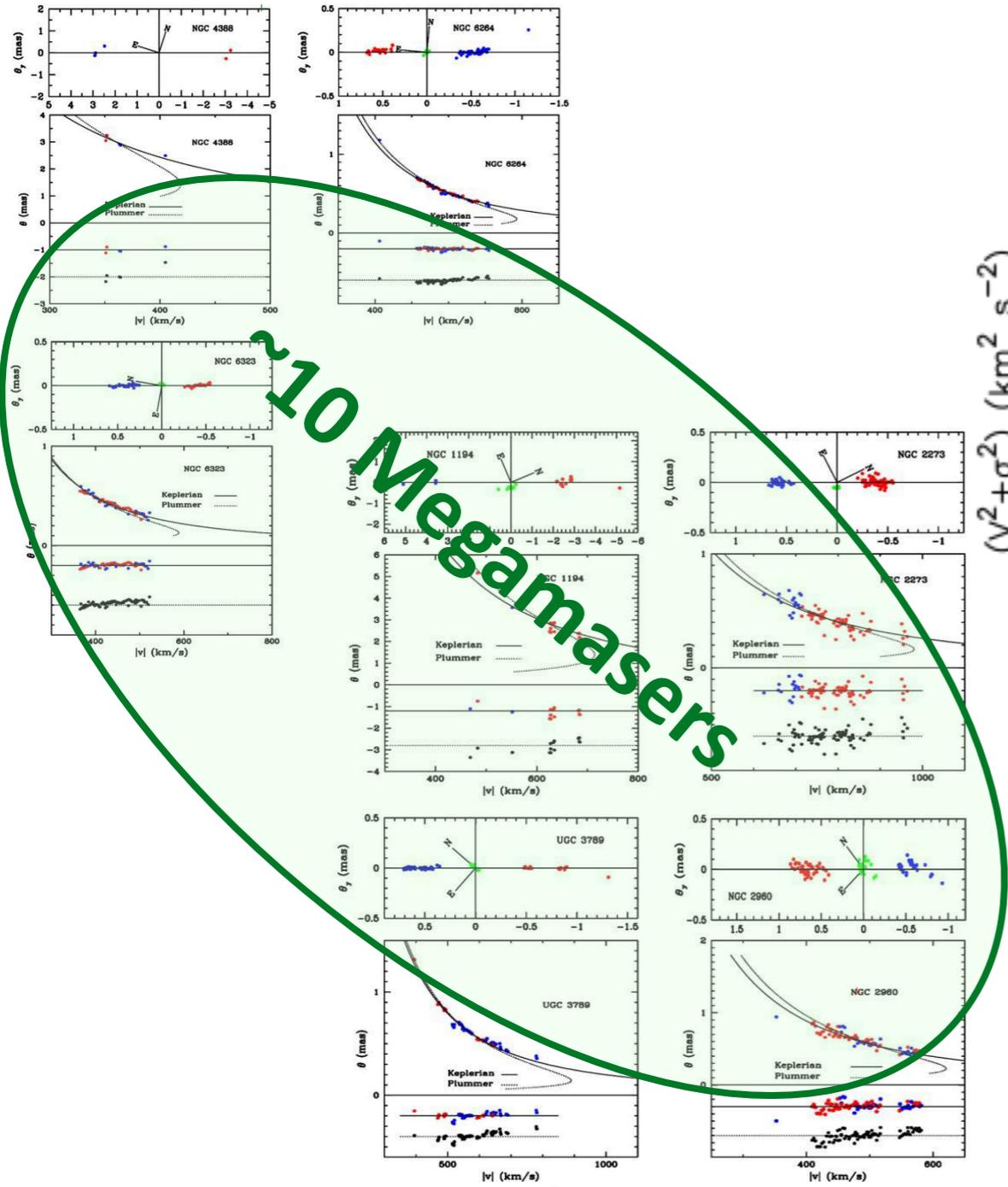
$3.9 \cdot 10^7 M_{\odot}$

- Miyoshi+ 1998
- Moran 2008
- Herrnstein 2005
- Argon 2007



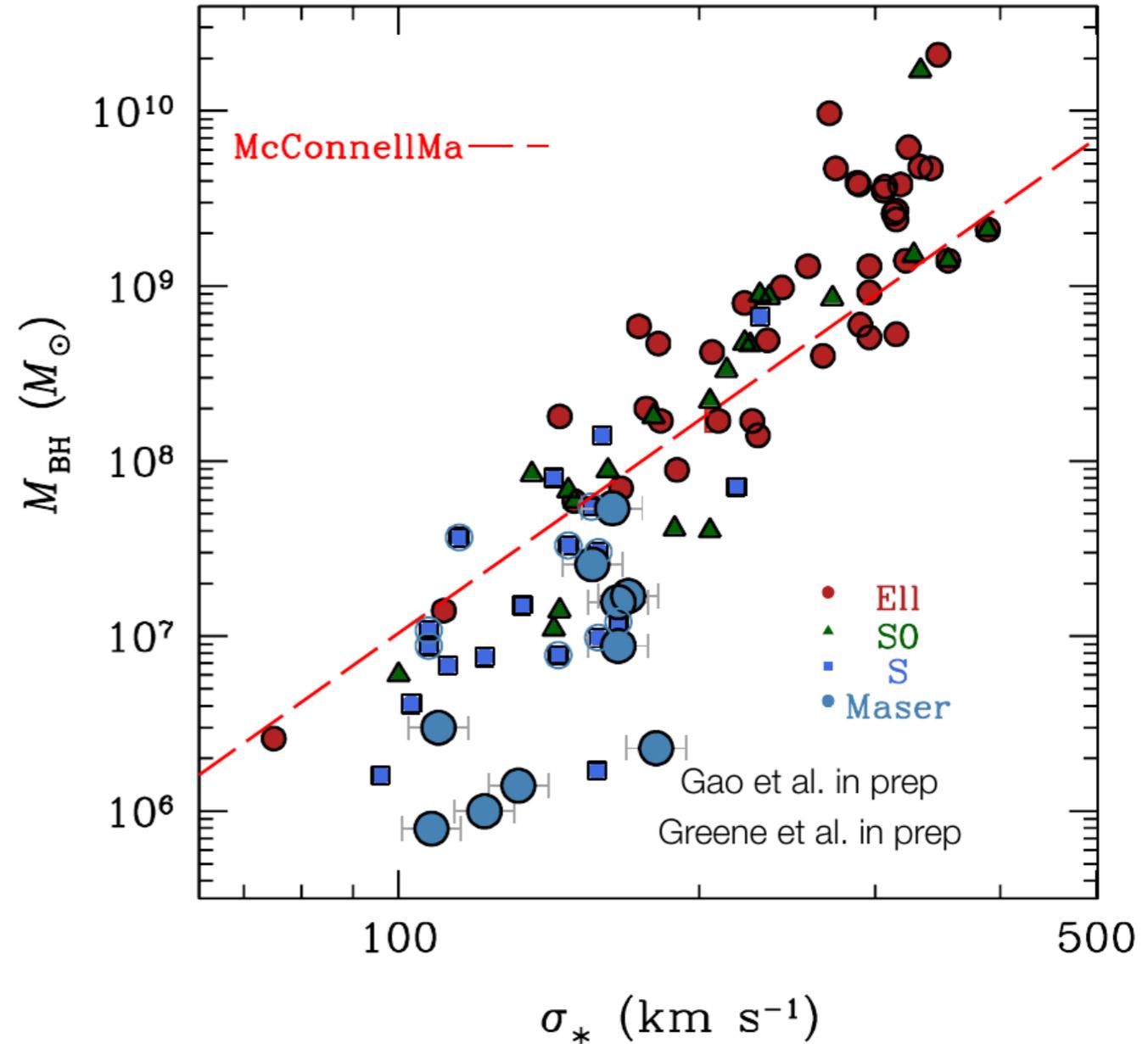
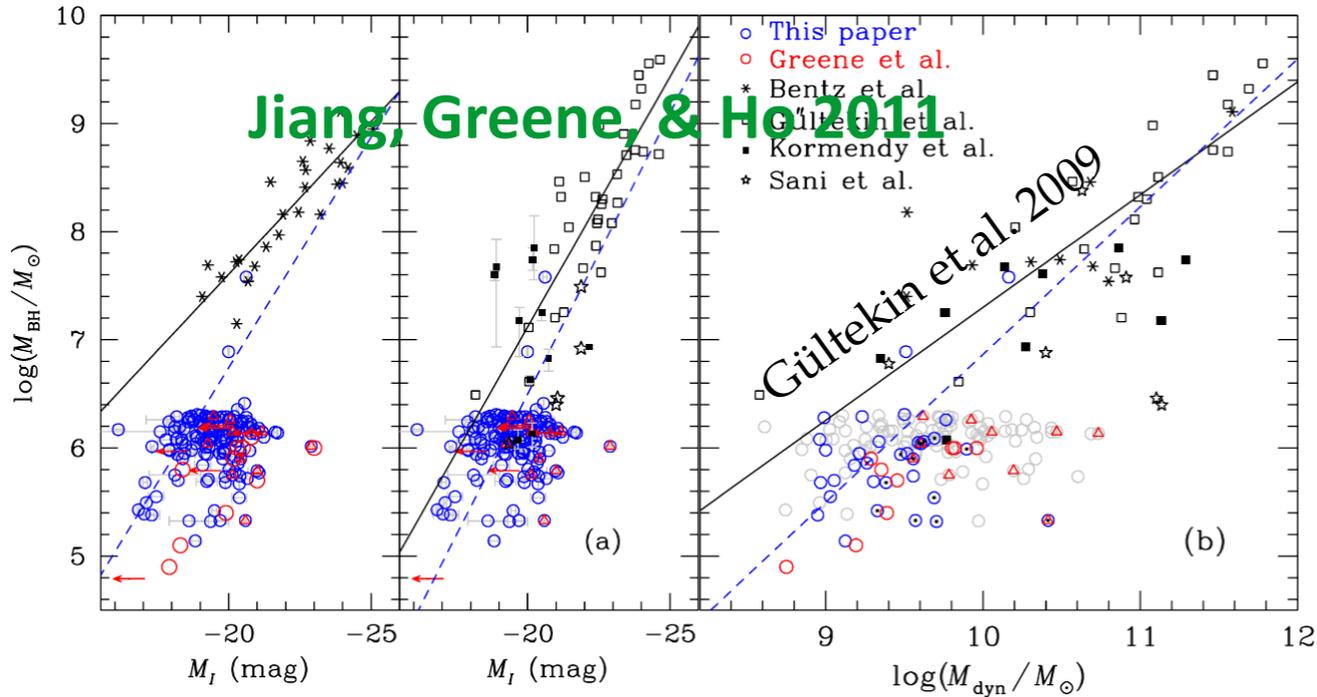
Vitesse Képlériennes

Autres galaxies ????



Approche systématique
 ⇒ échec

Autres techniques → Cartographie de la réverbération

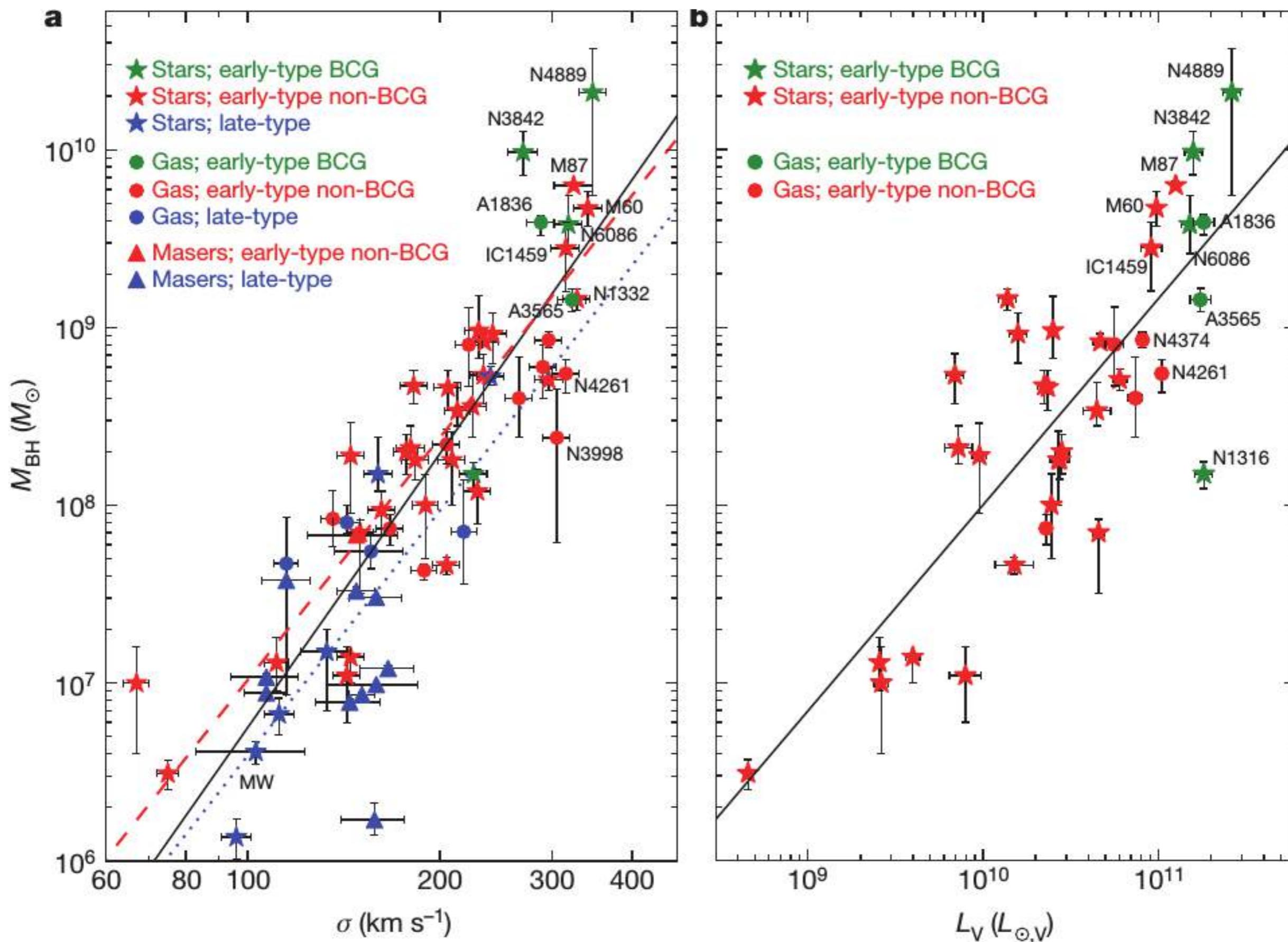


$$M_{BH} = f R_{BLR} v^2 / G$$

Observations HST pour des noyaux actifs avec $M_{BH} < 10^6 M_{\odot}$.

⇒ aplatissement de la relation ? ⇒ peut-on y croire ?

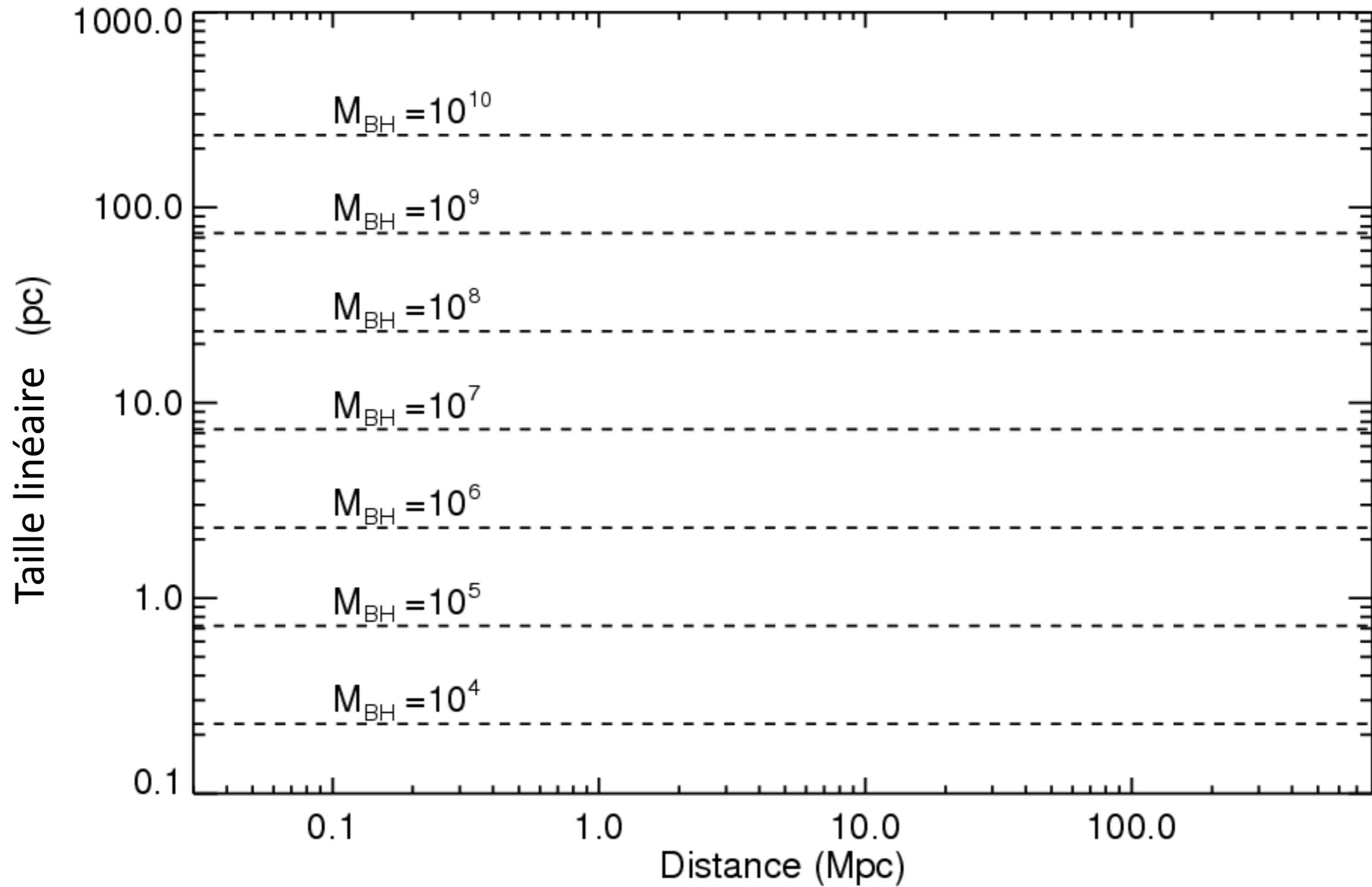
Les relations d'échelle: *état des lieux*



Ancrage à $z=0$

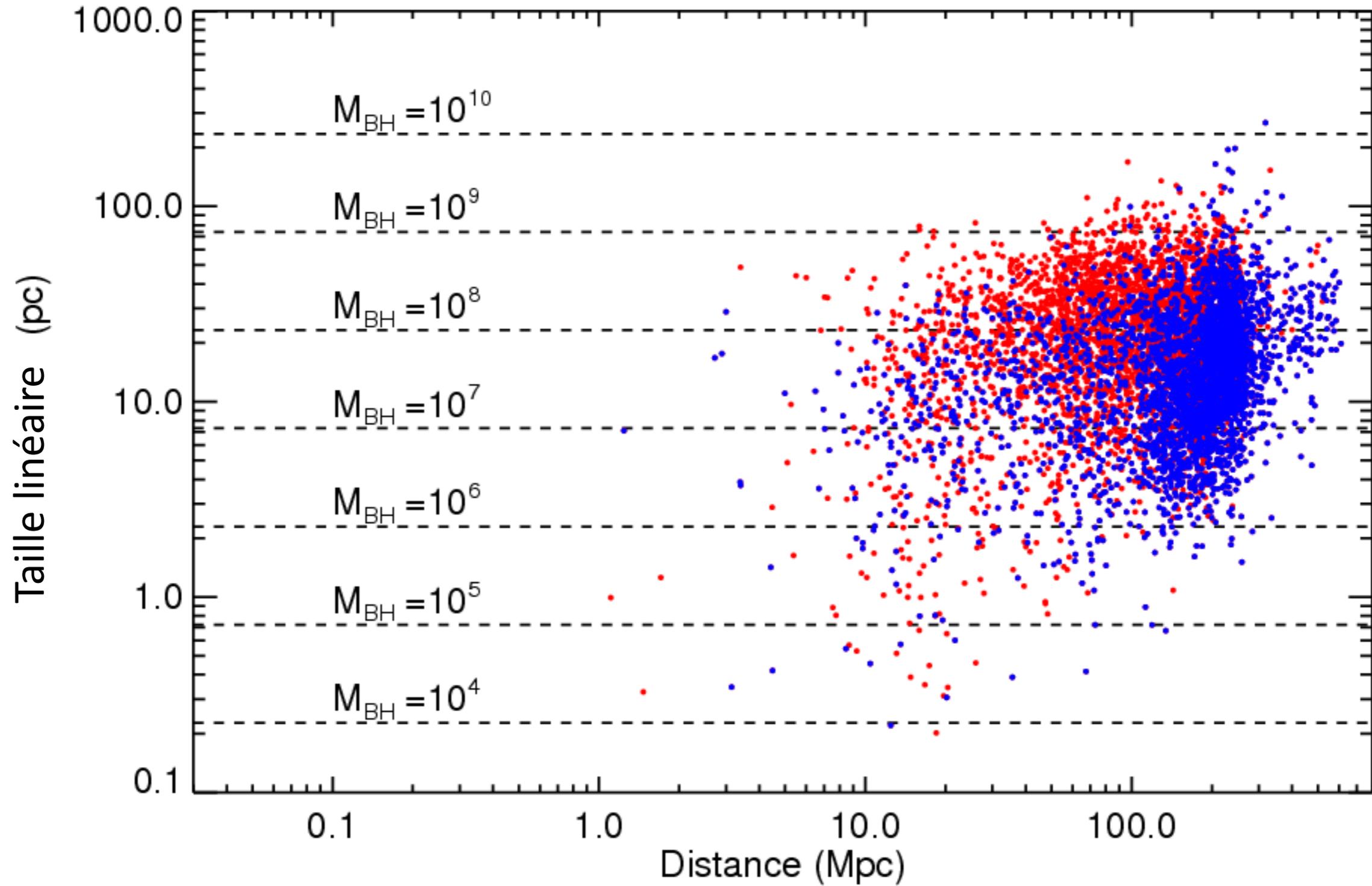
Méthodes / Difficultés

Le problème de la résolution

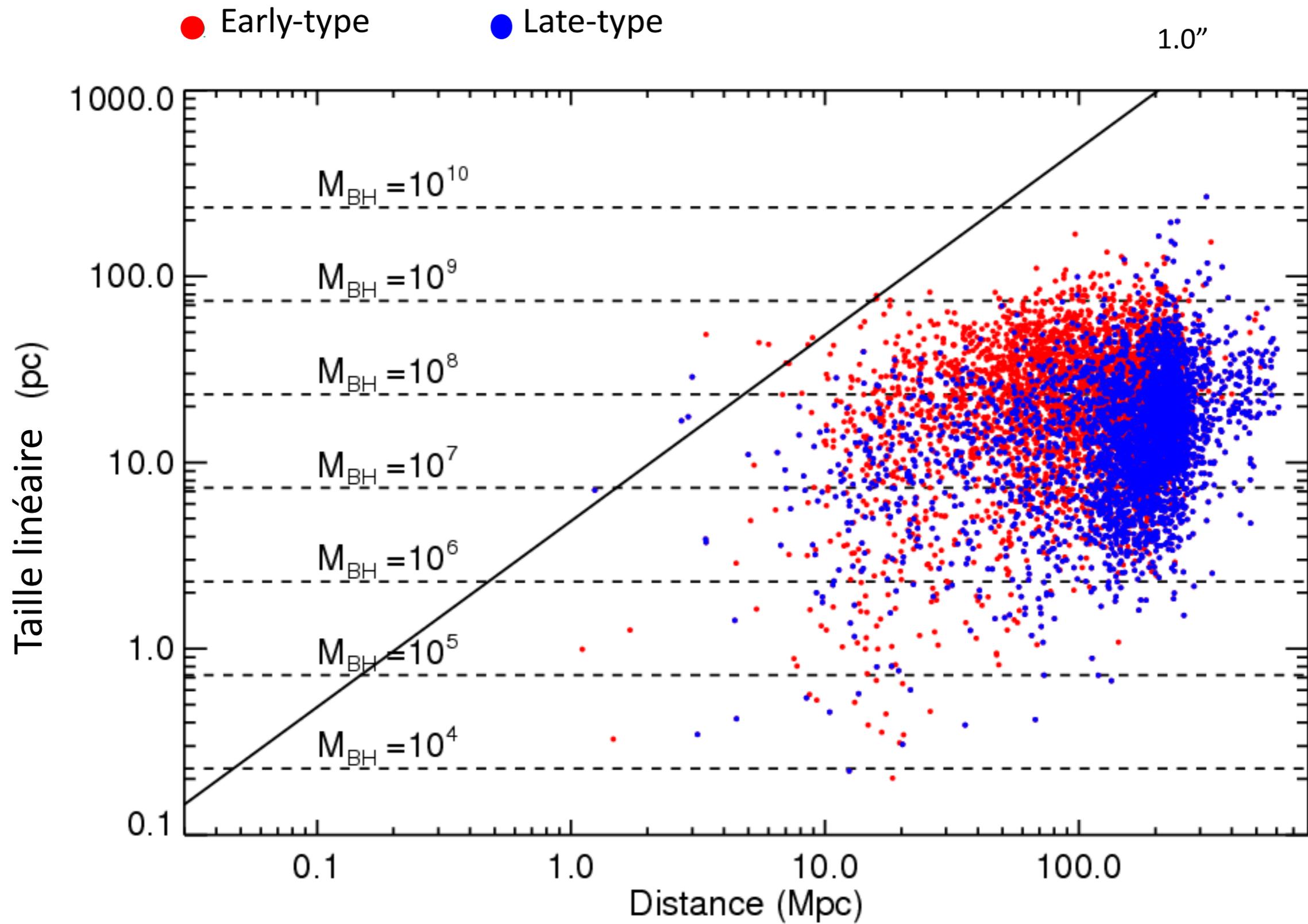


Le problème de la résolution

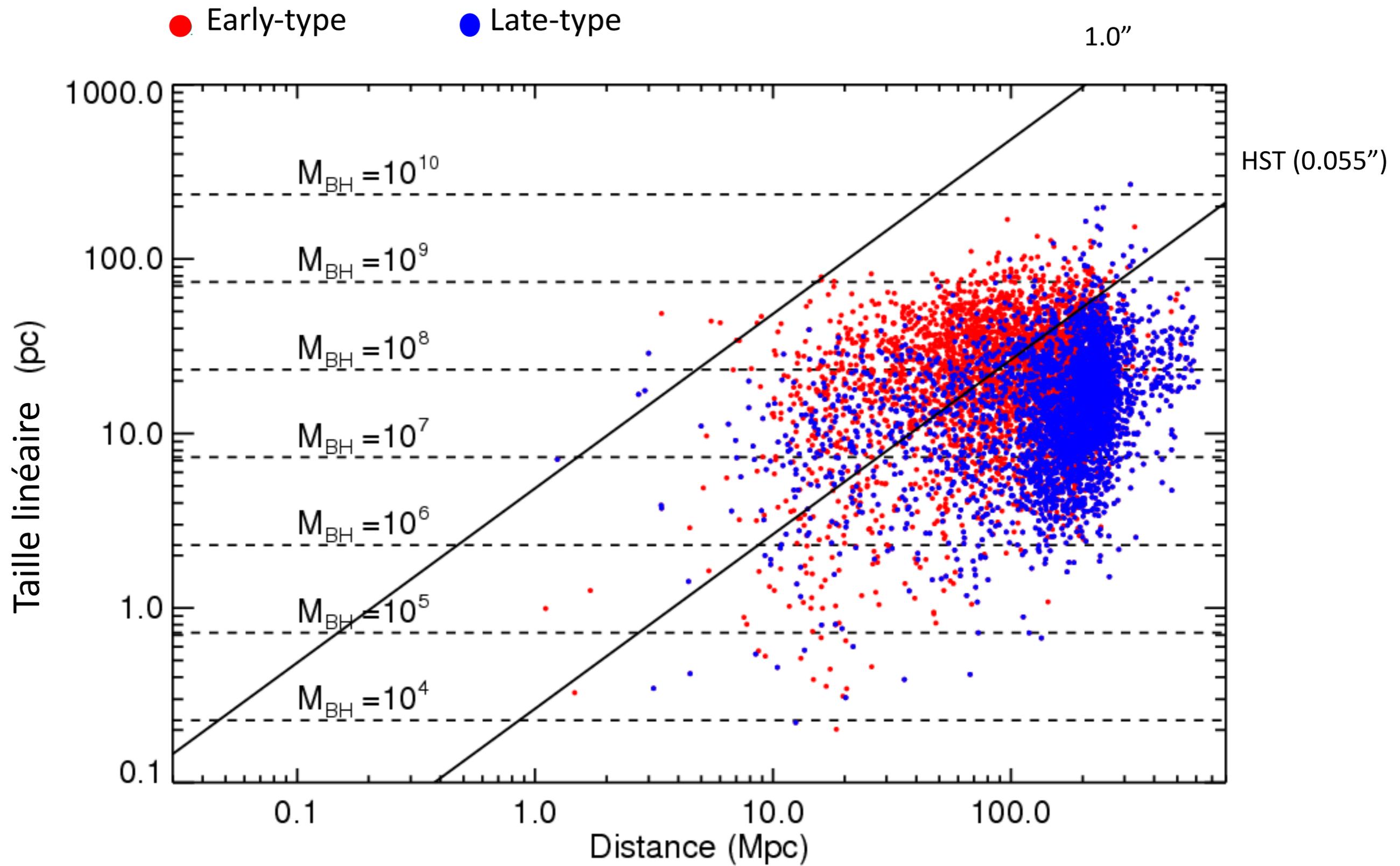
● Early-type ● Late-type



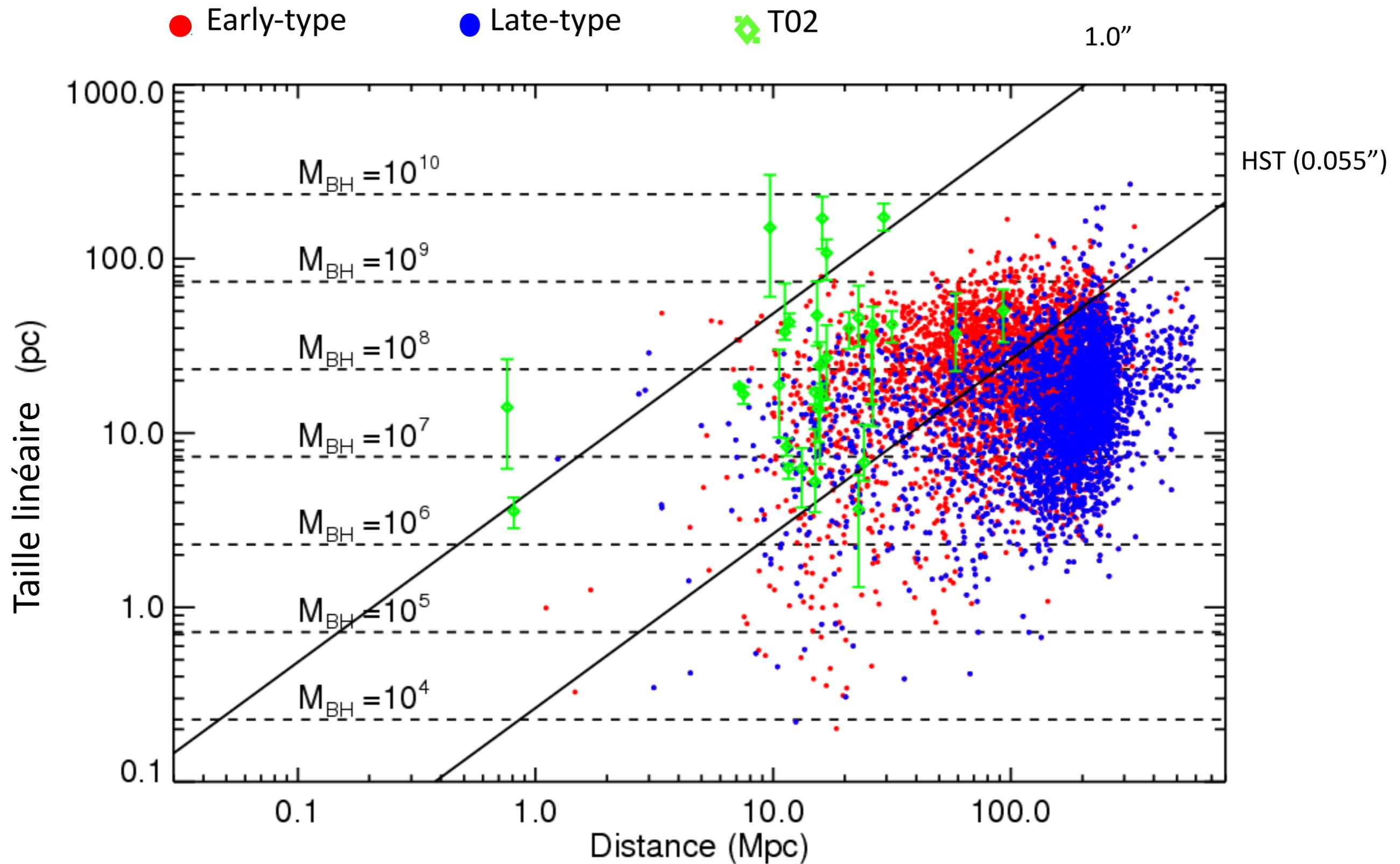
Le problème de la résolution



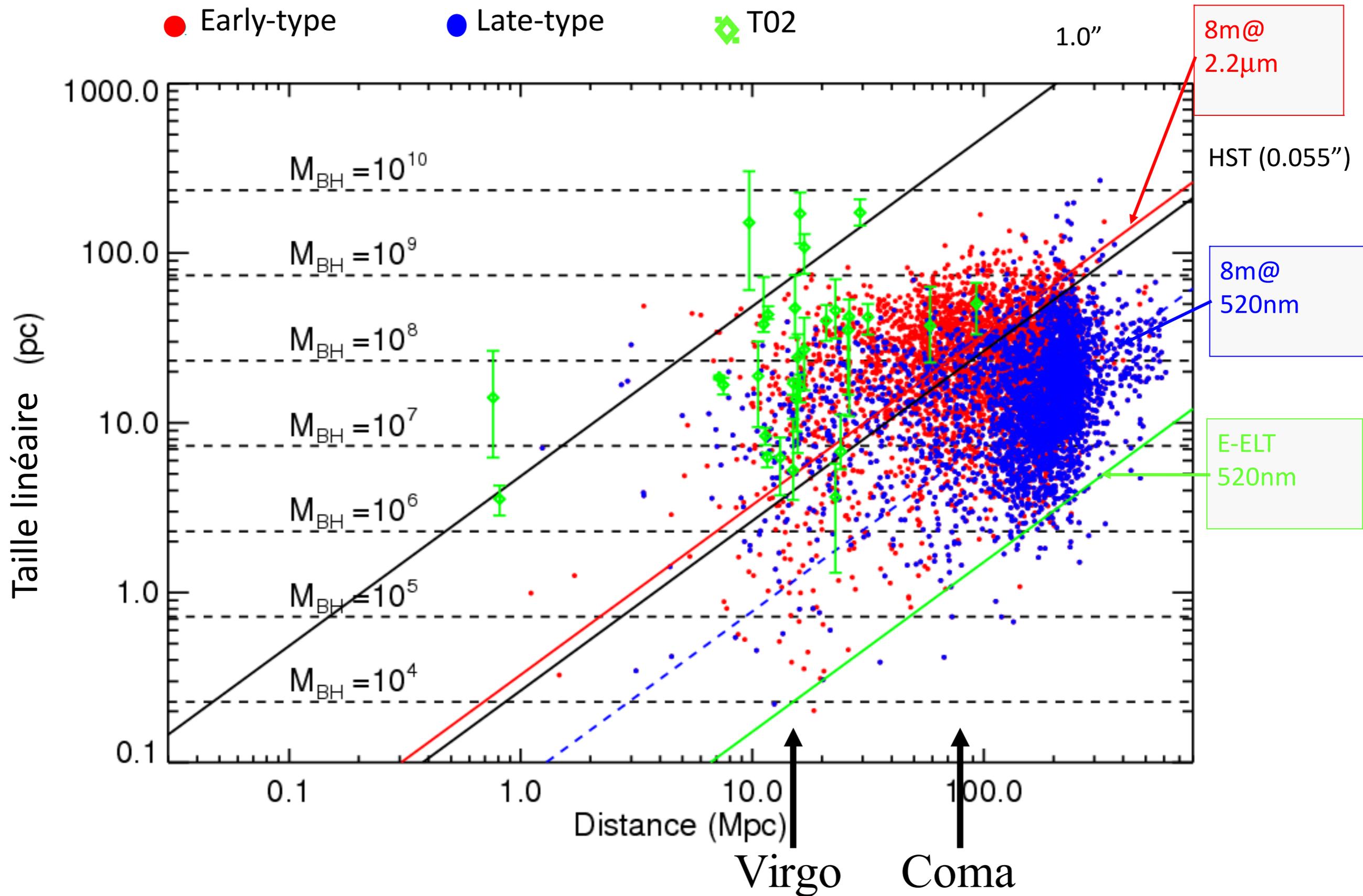
Le problème de la résolution



Le problème de la résolution



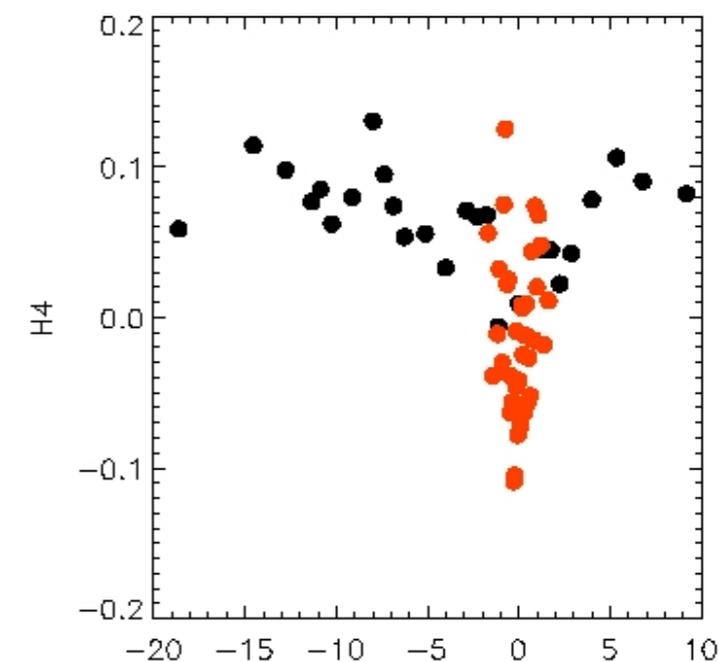
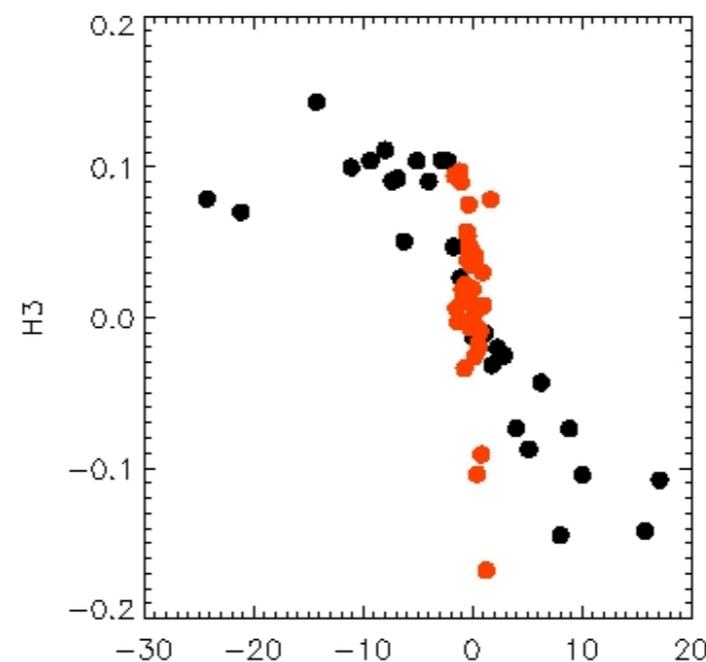
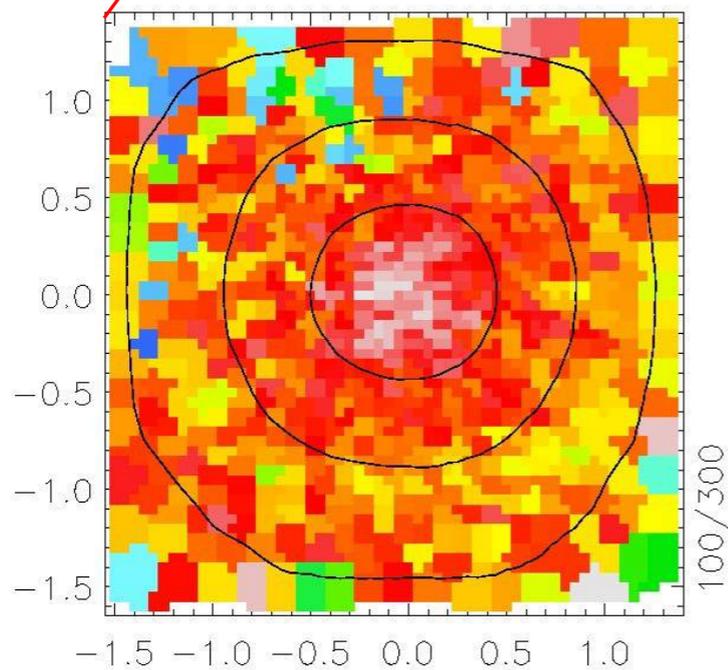
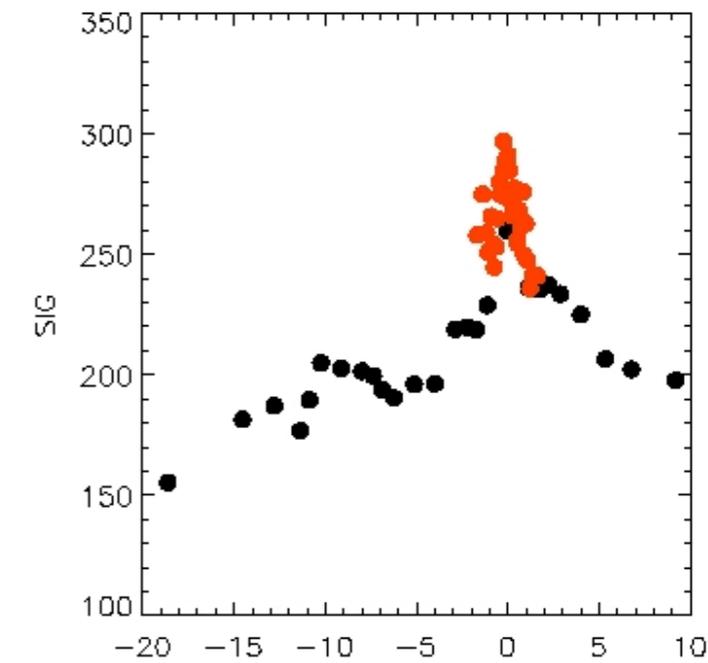
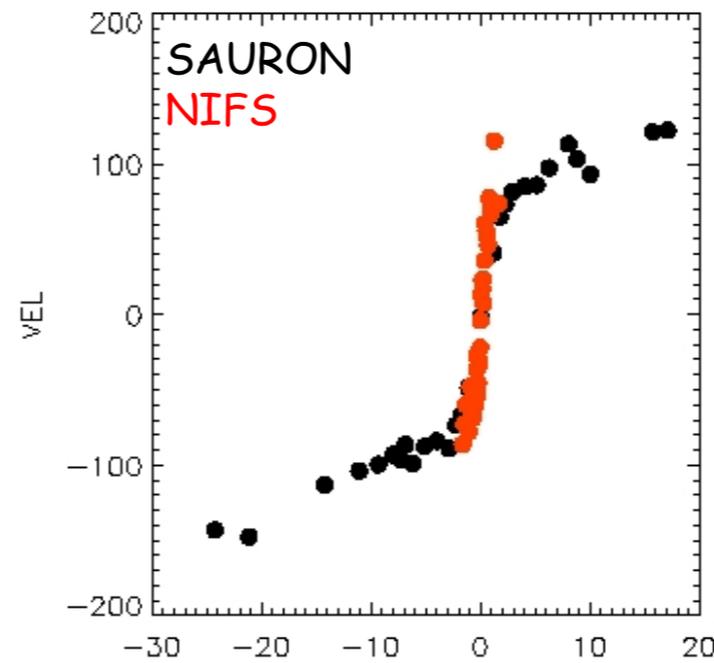
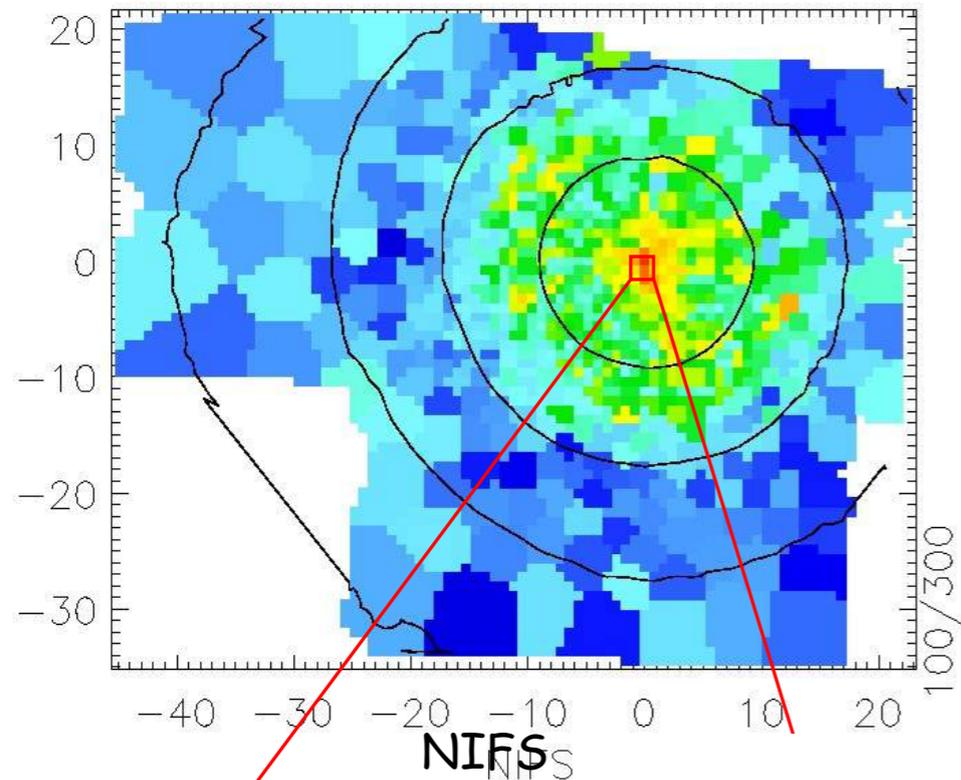
Le problème de la résolution



Cinématique des étoiles : comparaison entre 2 échelles / résolutions

SAURON

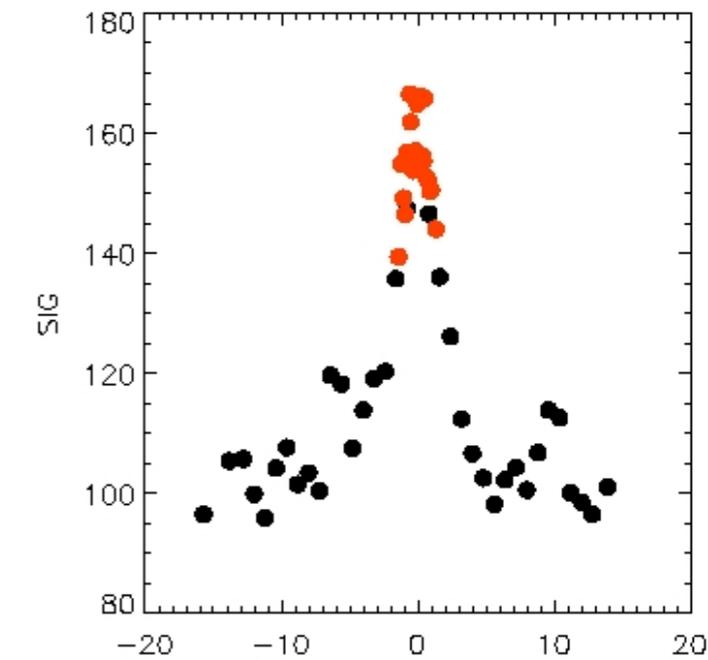
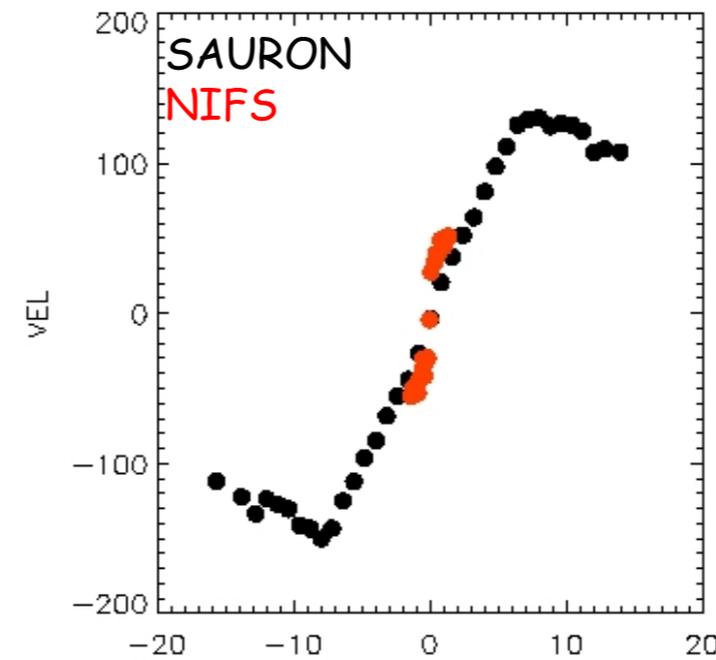
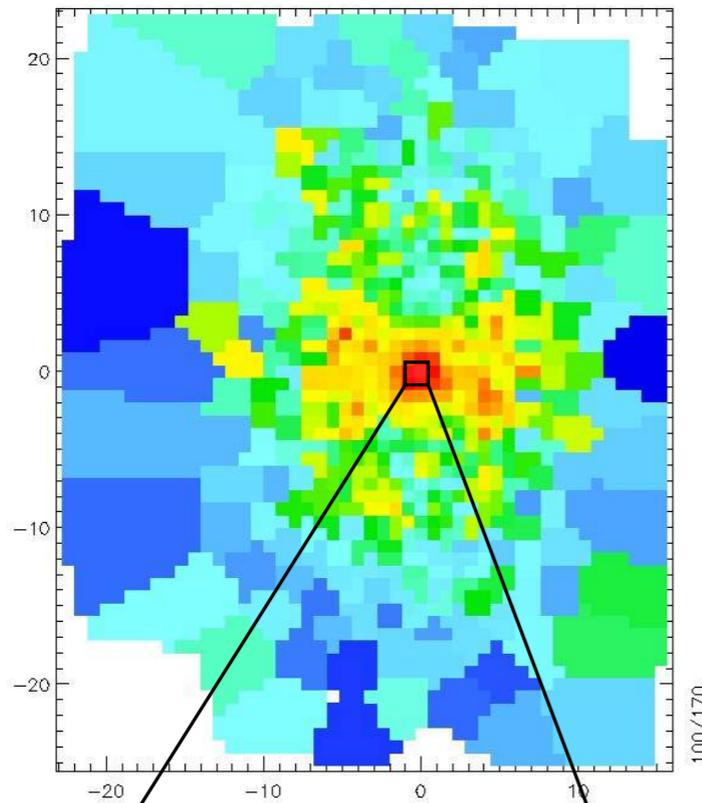
NGC 524



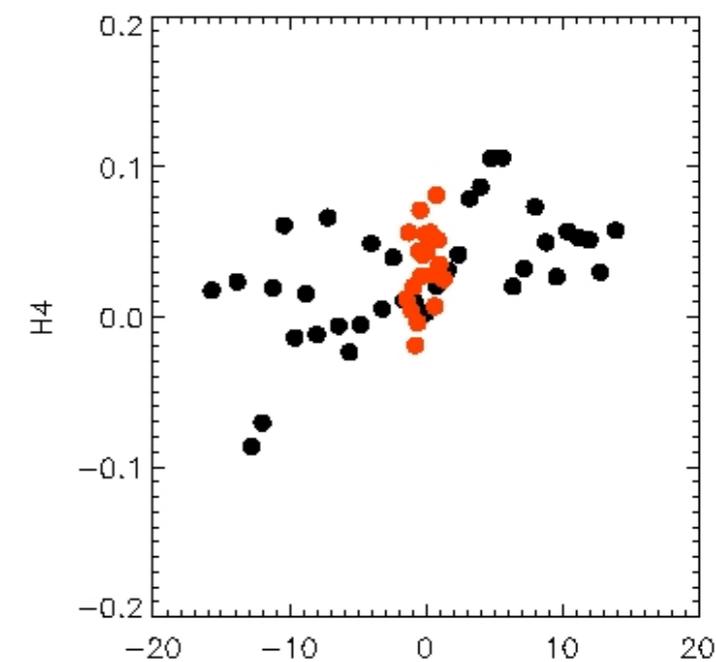
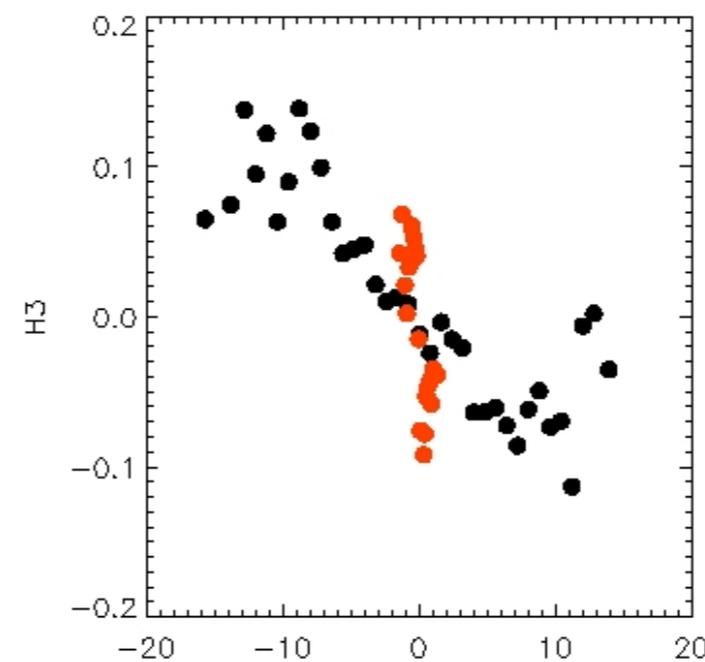
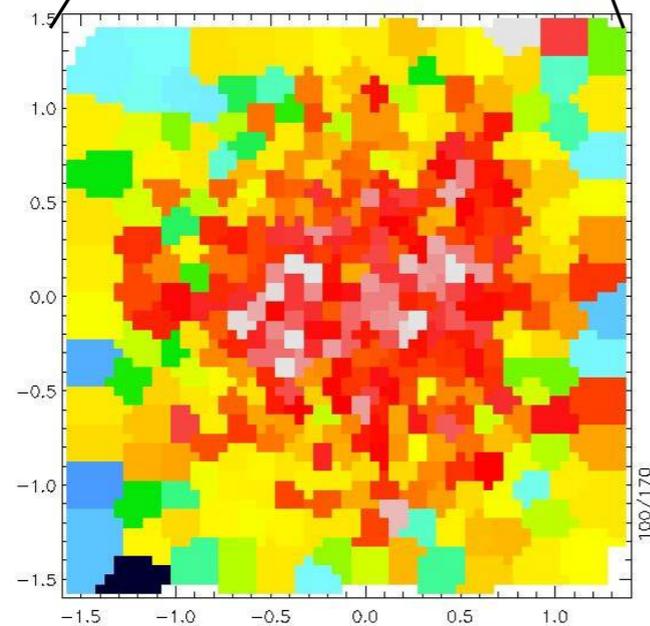
Cinématique des étoiles : comparaison entre 2 échelles / résolutions

SAURON

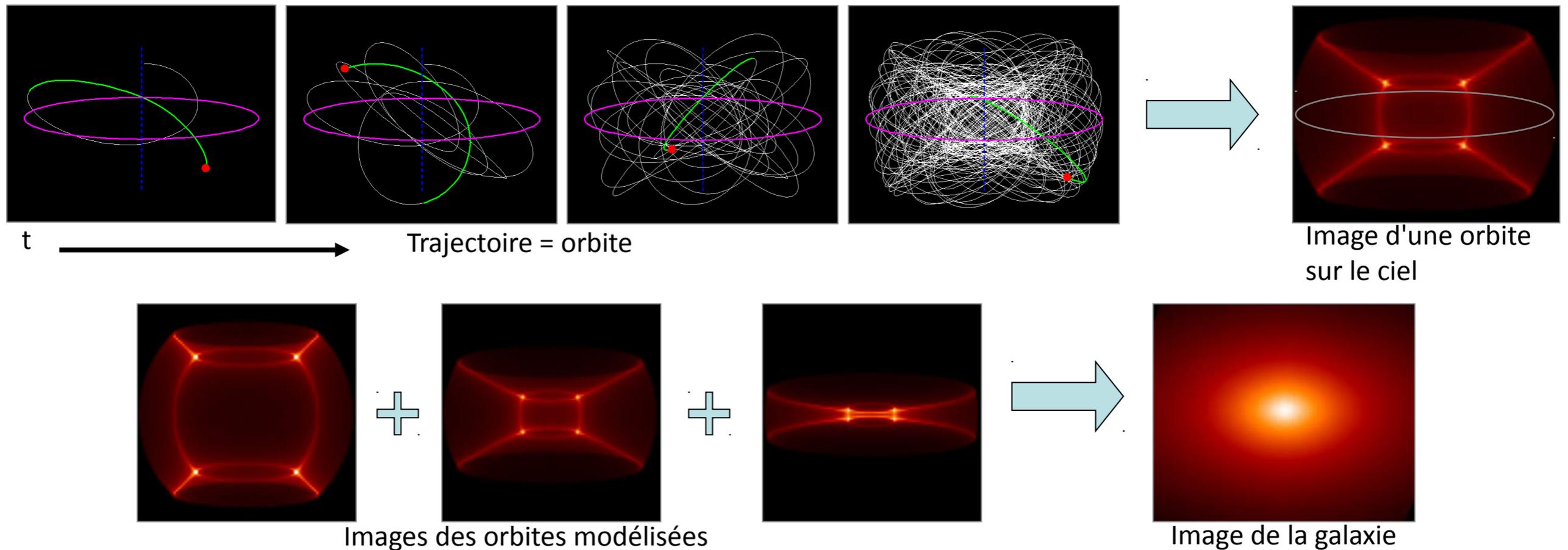
NGC 2549



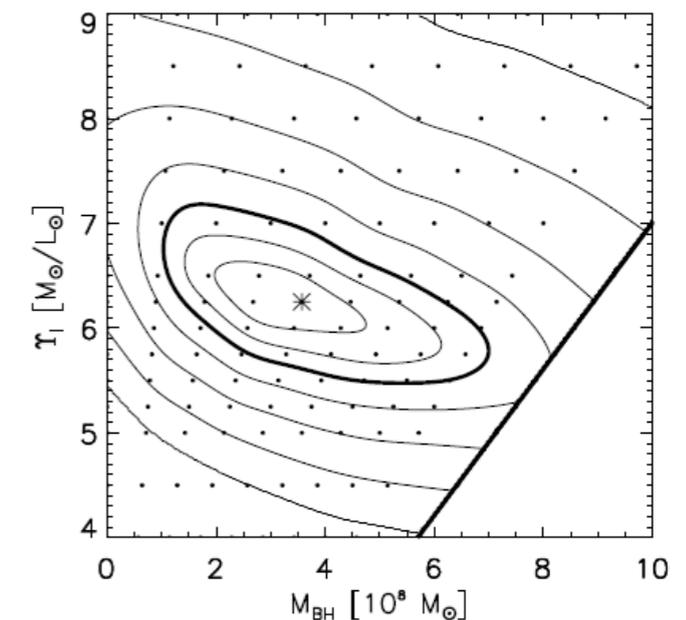
NIFS



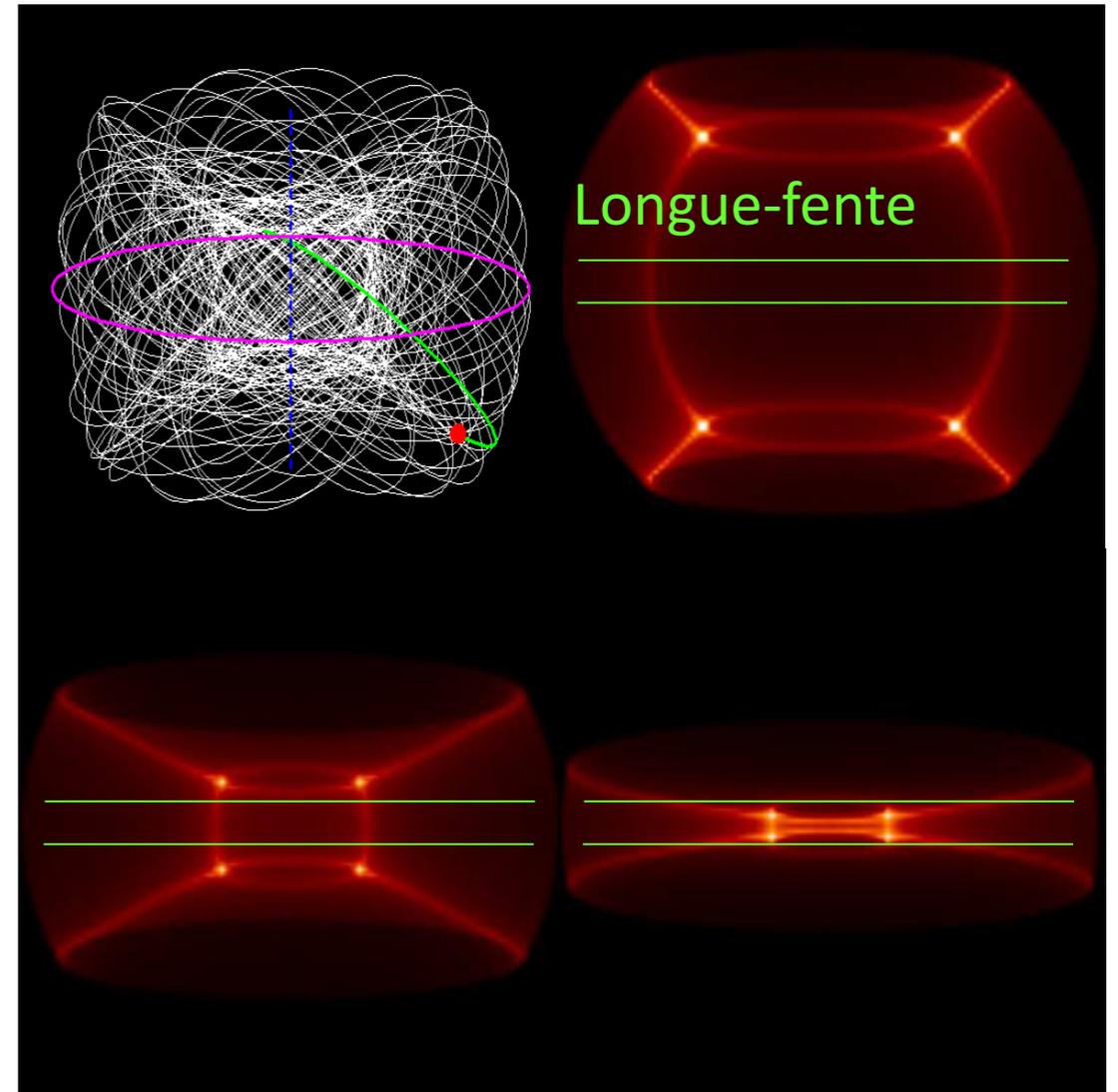
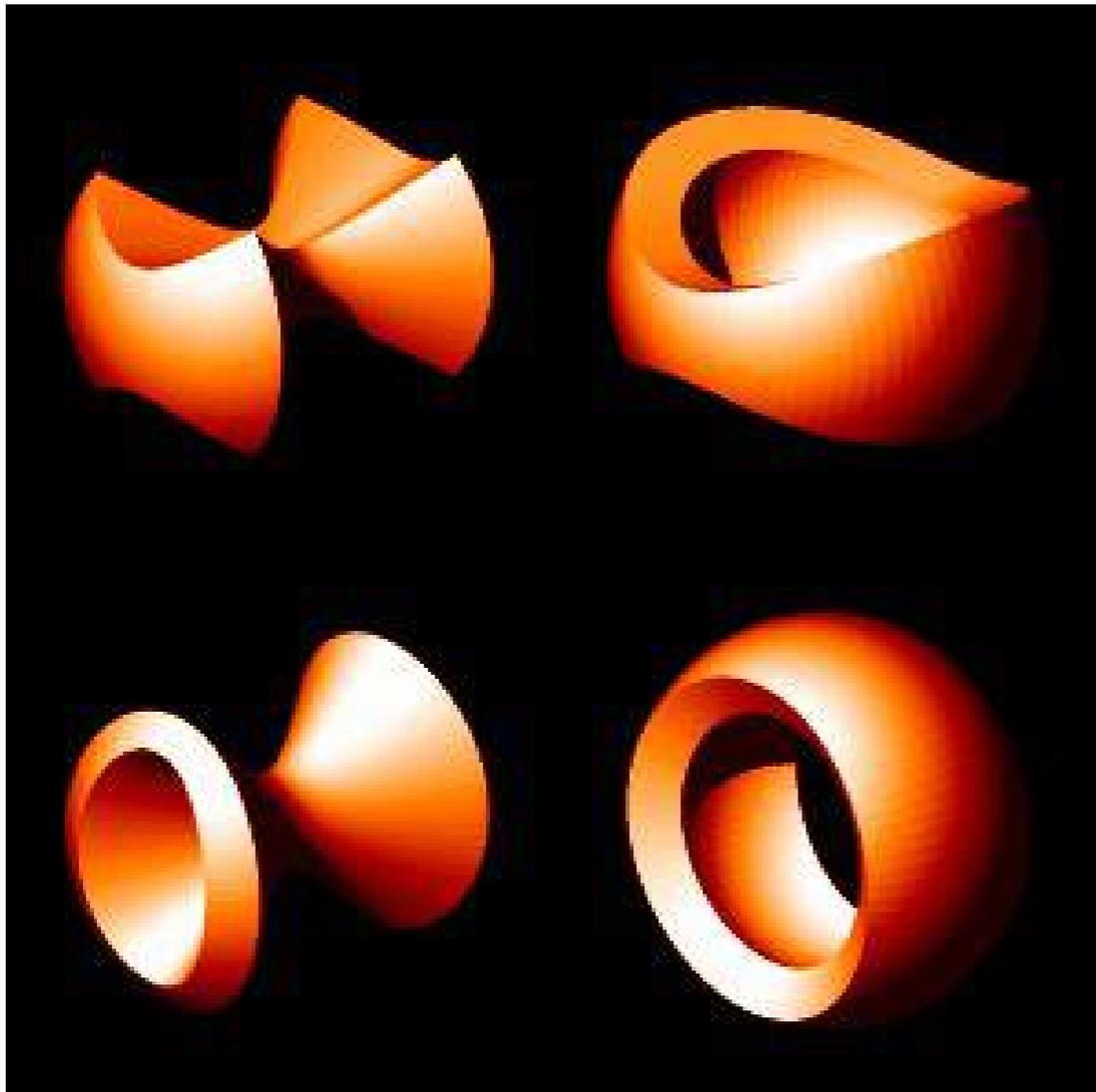
Modélisation : Schwarzschild



- Pour un potentiel donné: générer les orbites
- Trouver la meilleure combinaison qui ajuste les données
- Déterminer: - M/L
- Masse du trou noir
- Structure orbitale



Les orbites... \Rightarrow besoin de données 2D (IFU)



Même si les orbites ont des volumes bien définis
 \Rightarrow leur projection sur le ciel a des singularités

Couverture spatiale

NGC 3379

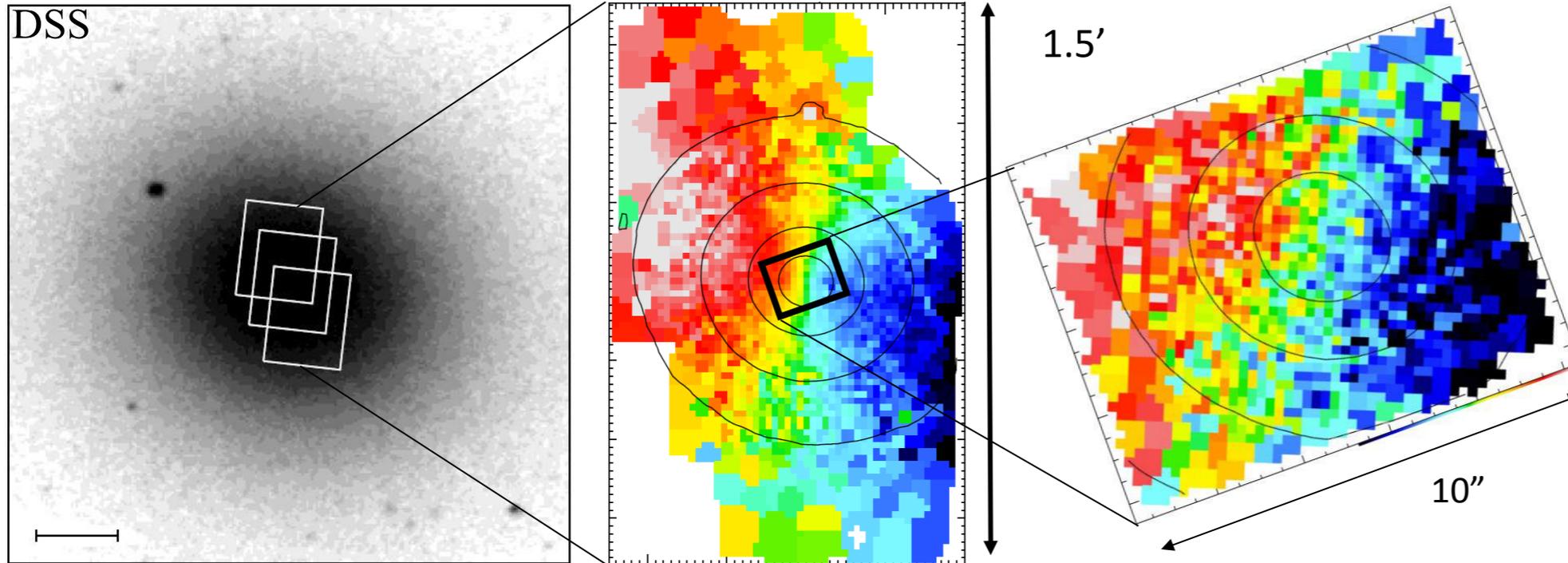
SAURON

OASIS

SAURON: Emsellem et al. 2003, MNRAS, 2004, 352, 721

OASIS: McDermid et al. 2006, MNRAS, 373, 906

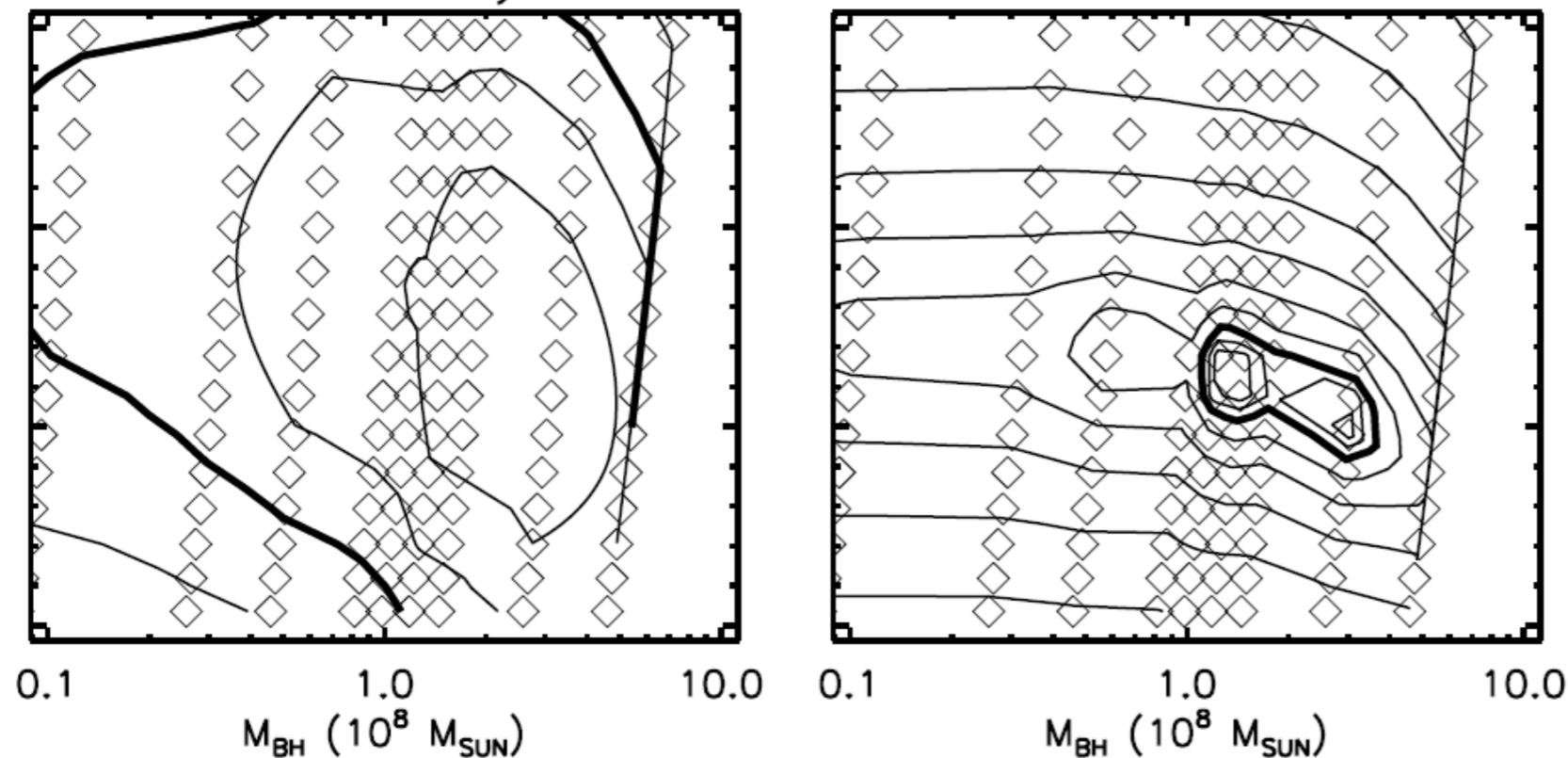
Modèles: Shapiro et al. 2006, MNRAS, 370, 559



OASIS-only

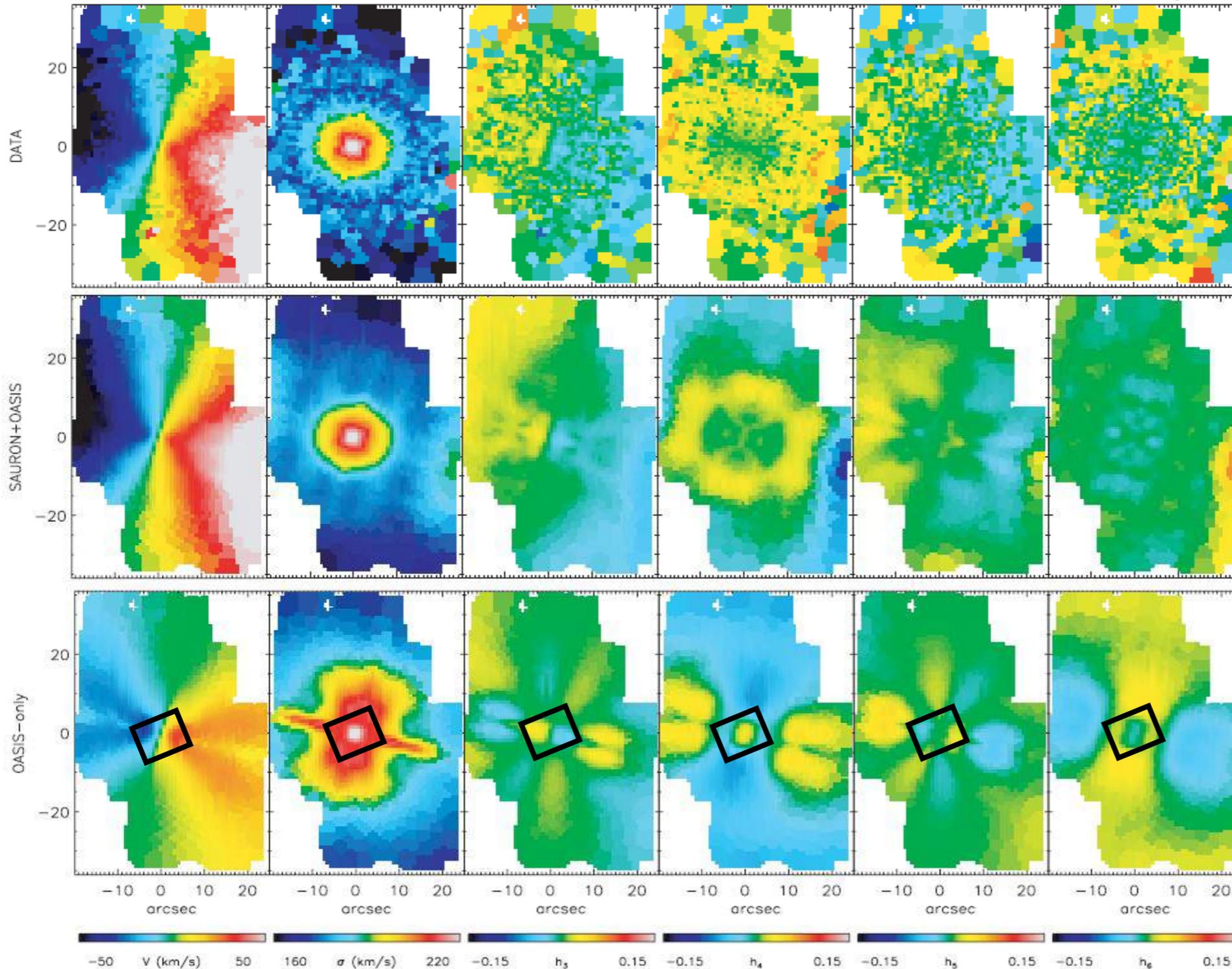
SAURON + OASIS

Ajuster OASIS (centre) seul
⇒ aucune contrainte sur
– M/L
– Trou noir



Couverture spatiale

V σ h_3 h_4 h_5 h_6



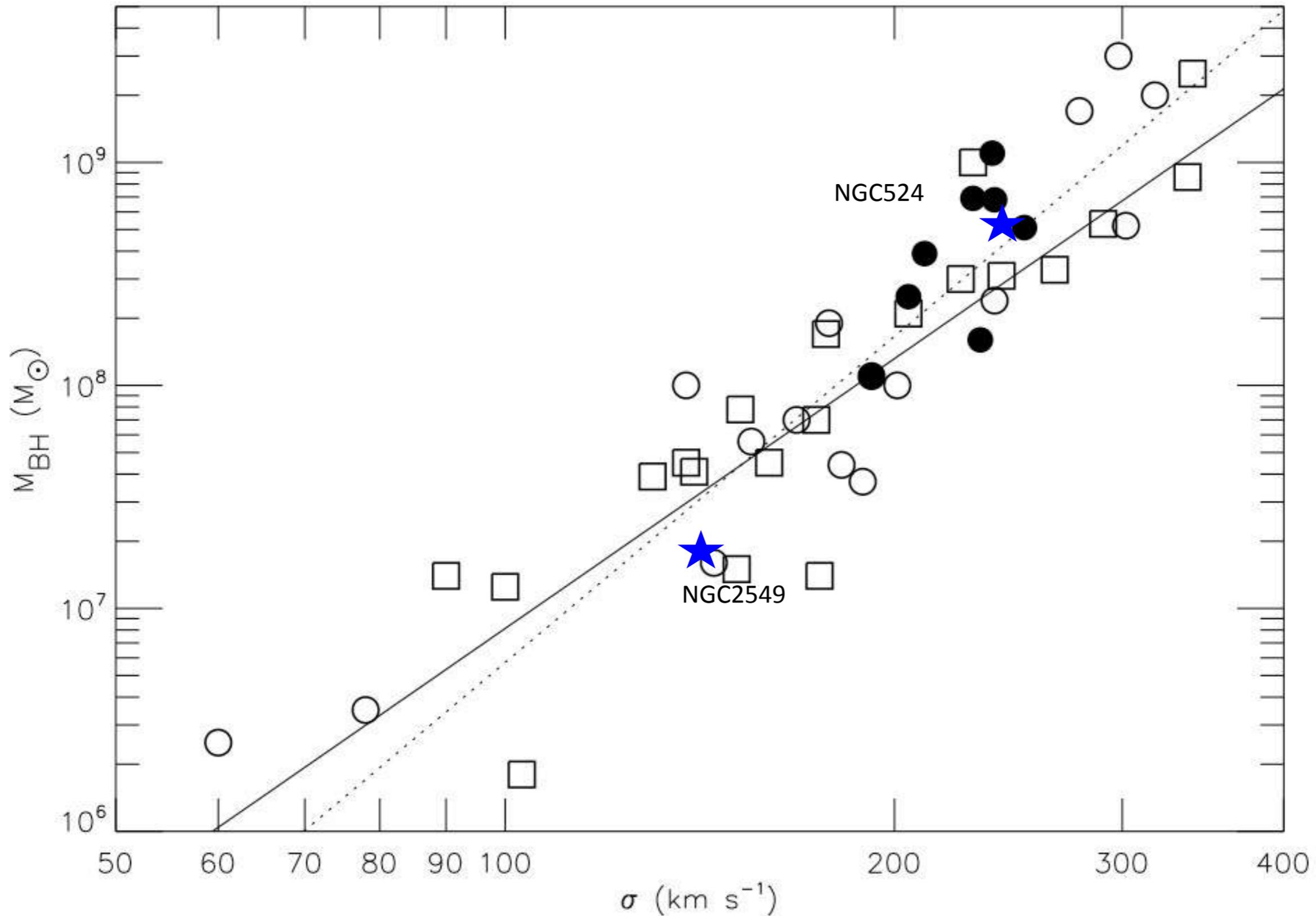
SAURON

Modèle du champ
SAURON

Modèle de
OASIS seul

La haute résolution n'est pas suffisante !!!

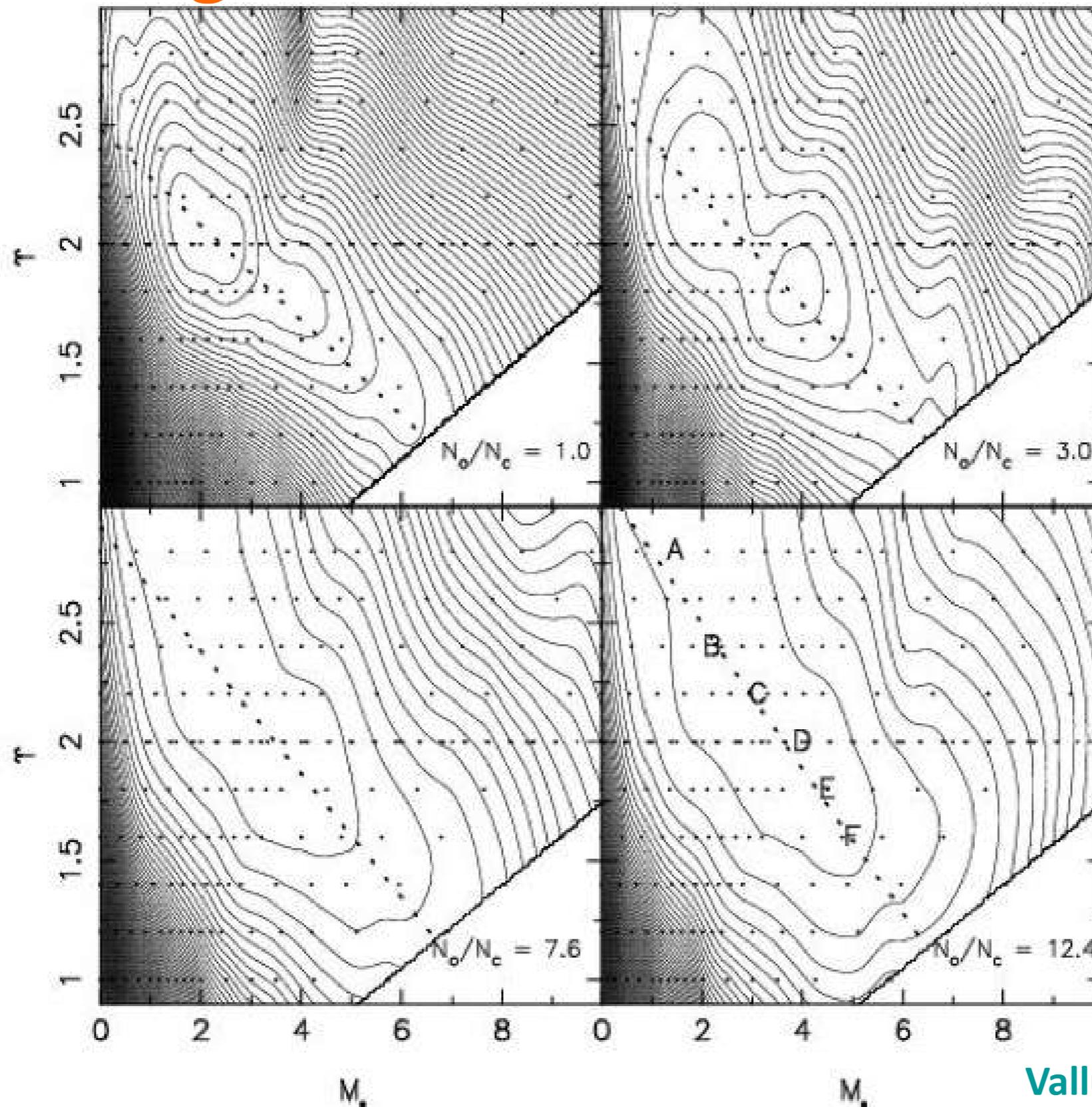
Mbh - σ : le retour



⇒ chaque point est très cher en temps d'observation

D'autres problèmes...

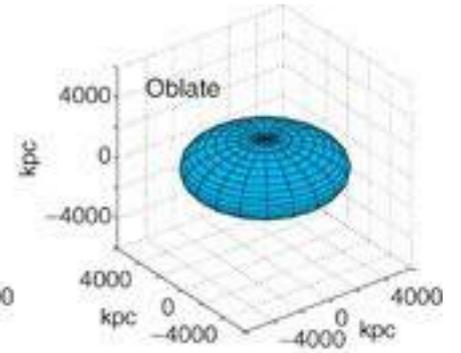
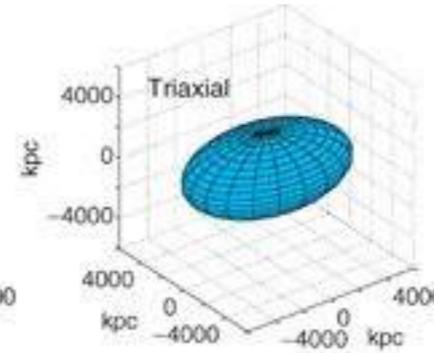
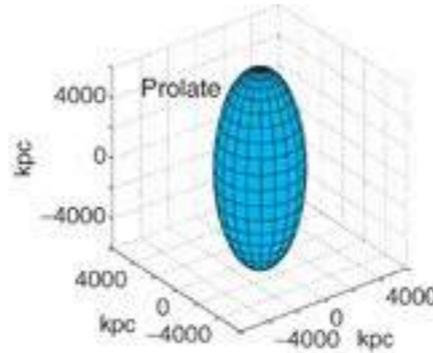
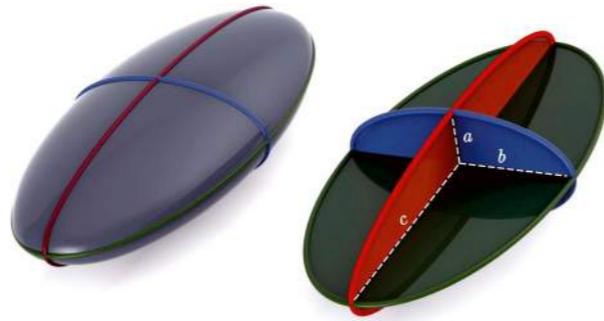
Dégénérescence des modèles



D'autres problèmes...

❖ Géométrie

Triaxialité ?



- ❖ Inclinaison de la galaxie
- ❖ Rapport masse luminosité variable ?
- ❖ Présence de matière noire à grande échelle ?
- ❖ Traceurs dynamiques : amas globulaires, étoiles (jeunes, vieilles?), gaz, nébuleuses planétaires, ...
⇒ *rarement deux traceurs donnant les mêmes réponses*
[Par exemple : NGC 4258 (Maser H₂O)...]

Un cas d'Ecole !

LETTER

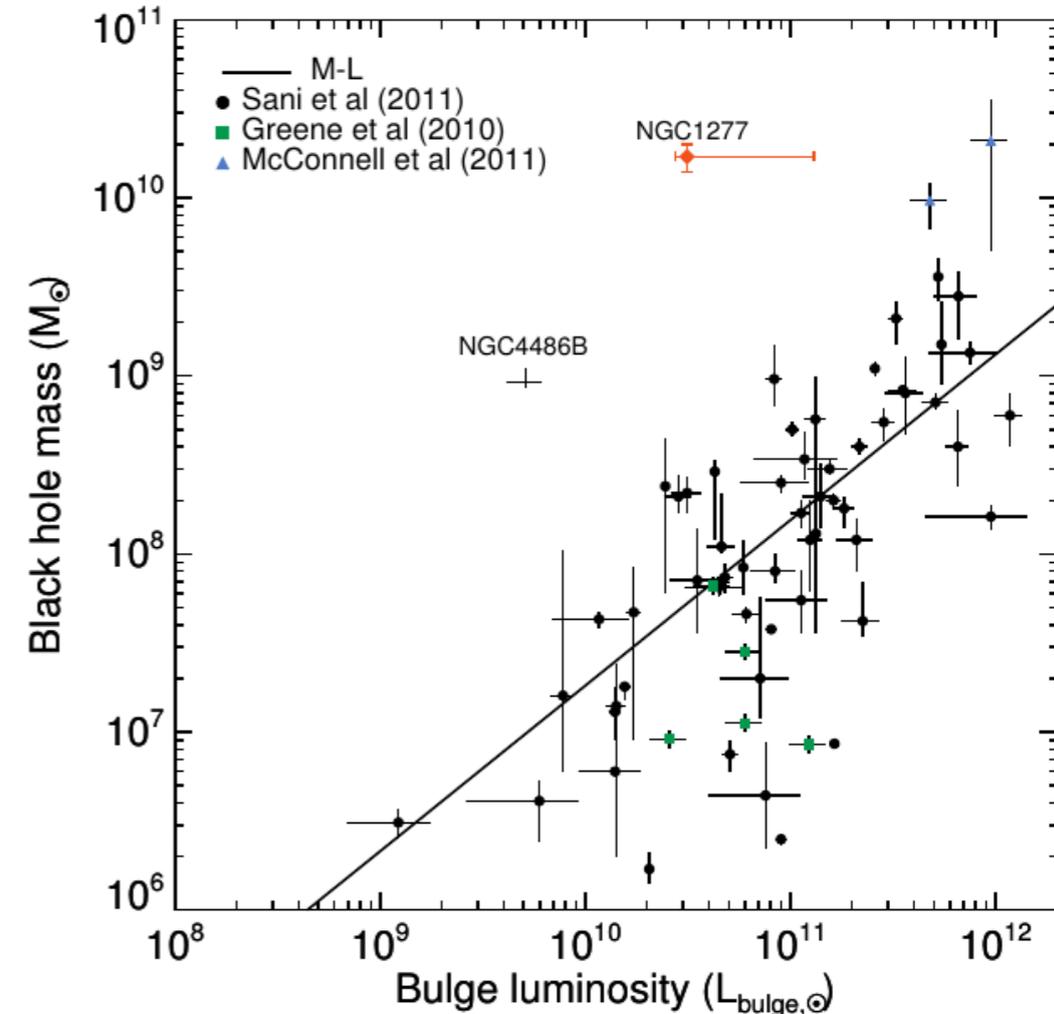
An over-massive black hole in the compact lenticular galaxy NGC 1277

Remco C. E. van den Bosch^{1,2}, Karl Gebhardt², Kayhan Gültekin³, Glenn van de Ven¹, Arjen van der Wel¹ & Jonelle L. Walsh²

⇒ **Vraiment si massif?**

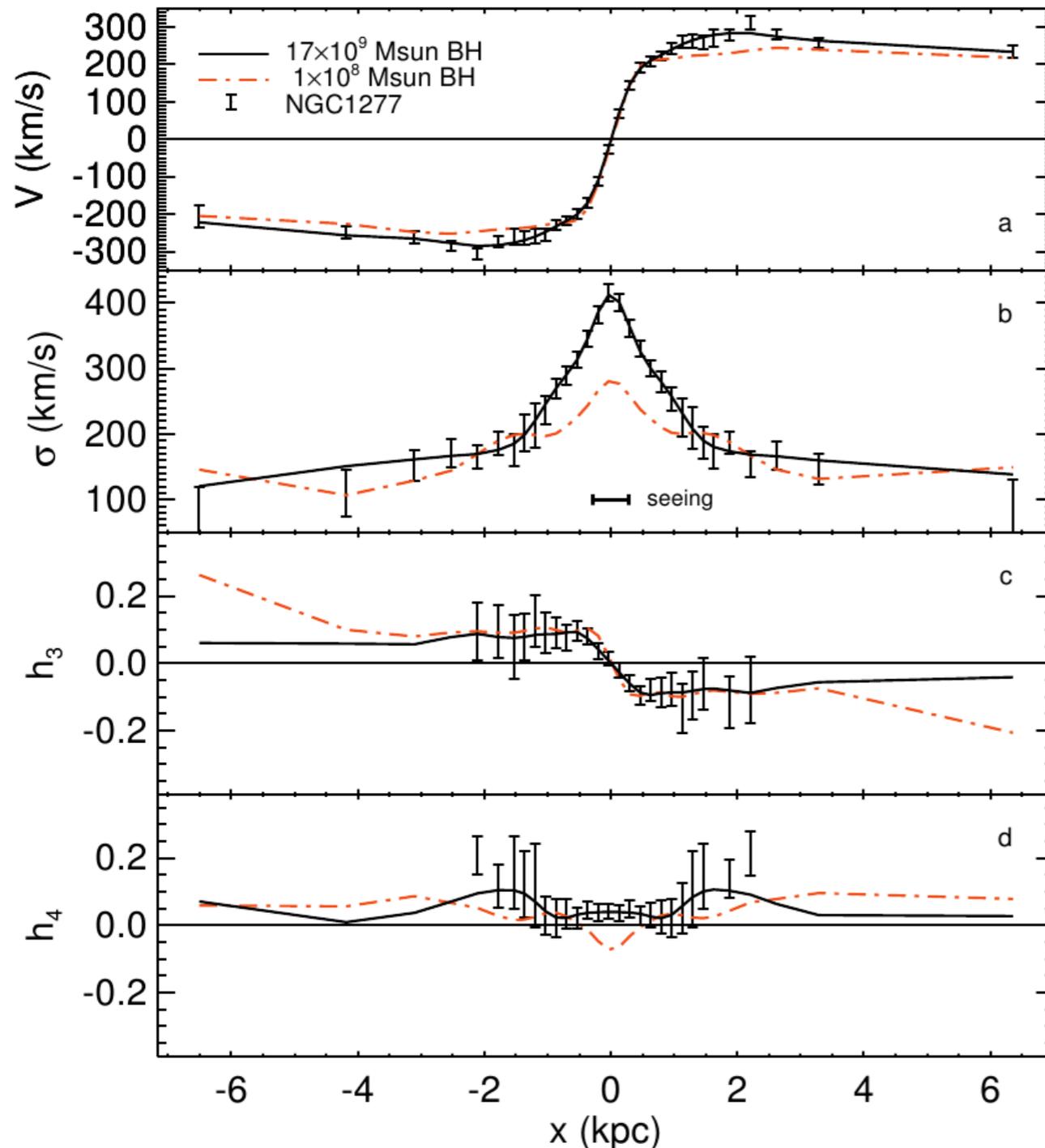
- **17 $10^9 M_{\odot}$!**
- **> 50% de la masse du bulbe ?**

Object	Distance (Mpc)	σ_c (km s^{-1})	$R_{e,K}$ (kpc)	Luminosity $\log(L_K)$	ϵ ($1 - b/a$)
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
ARK90	131	392 ± 4	1.6	11.2	0.7
NGC1270	69	393 ± 3	1.8	11.2	0.8
NGC1277	73	403 ± 4	1.6	11.1	0.5
UGC1859	82	362 ± 4	2.0	11.2	0.6
UGC2698	89	397 ± 3	2.7	11.4	0.7
MRK1216	94	354 ± 4	1.9	11.2	0.6



Approche

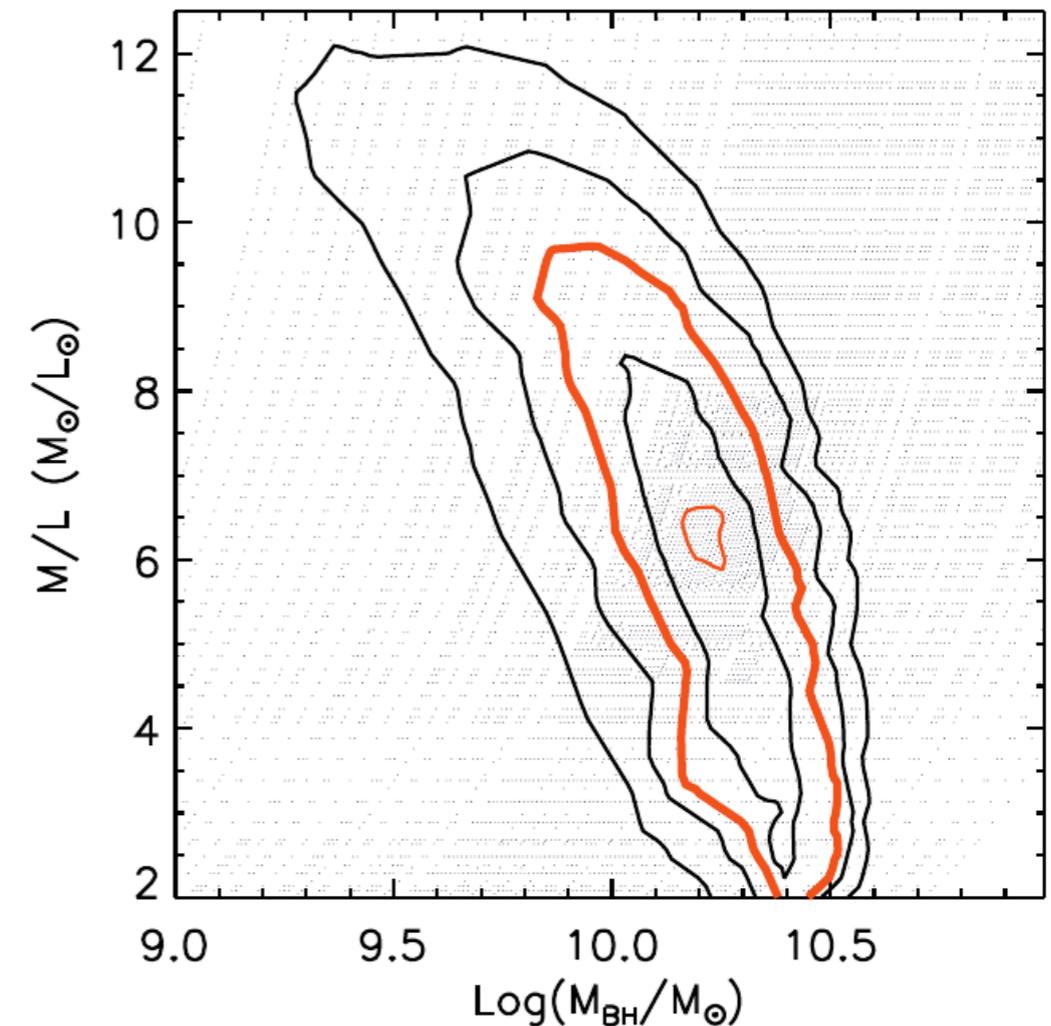
- ◆ *Données longue-fente*
 - ◆ V, σ, h_3, h_4
- ◆ *Modélisation de Schwarzschild*
 - ◆ *Grille de modèles en M/L et M_{TN}*



LETTER

An over-massive black hole in the compact lenticular galaxy NGC 1277

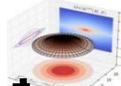
Remco C. E. van den Bosch^{1,2}, Karl Gebhardt², Kayhan Gültekin³, Glenn van de Ven¹, Arjen van der Wel¹ & Jonelle L. Walsh²



Supplemental Figure 1 | Goodness-of-fit contours for 600 000 dynamical models (black dots) of NGC 1277 with different V -band mass-to-light ratios and black hole masses, after marginalizing over the dark halo parameters; i.e. for every combination of M/L and M_{\bullet} the best-fitting dark matter halo is chosen. The contours indicate 1 σ (red), 2 σ , 3 σ (red, thick), 4 σ and 6 σ confidence levels for one degree of freedom.

Test de vérification

1 – Modélisation de la photométrie

 **pyGME** (Emsellem et al. 1994, Emsellem 1995, Emsellem & Renaud in prep.)

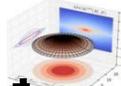
↗ Images ou fonctions pré-définies (1D, 2D ou 3D)

↗ Module python pour une Multi-Gaussian Expansion



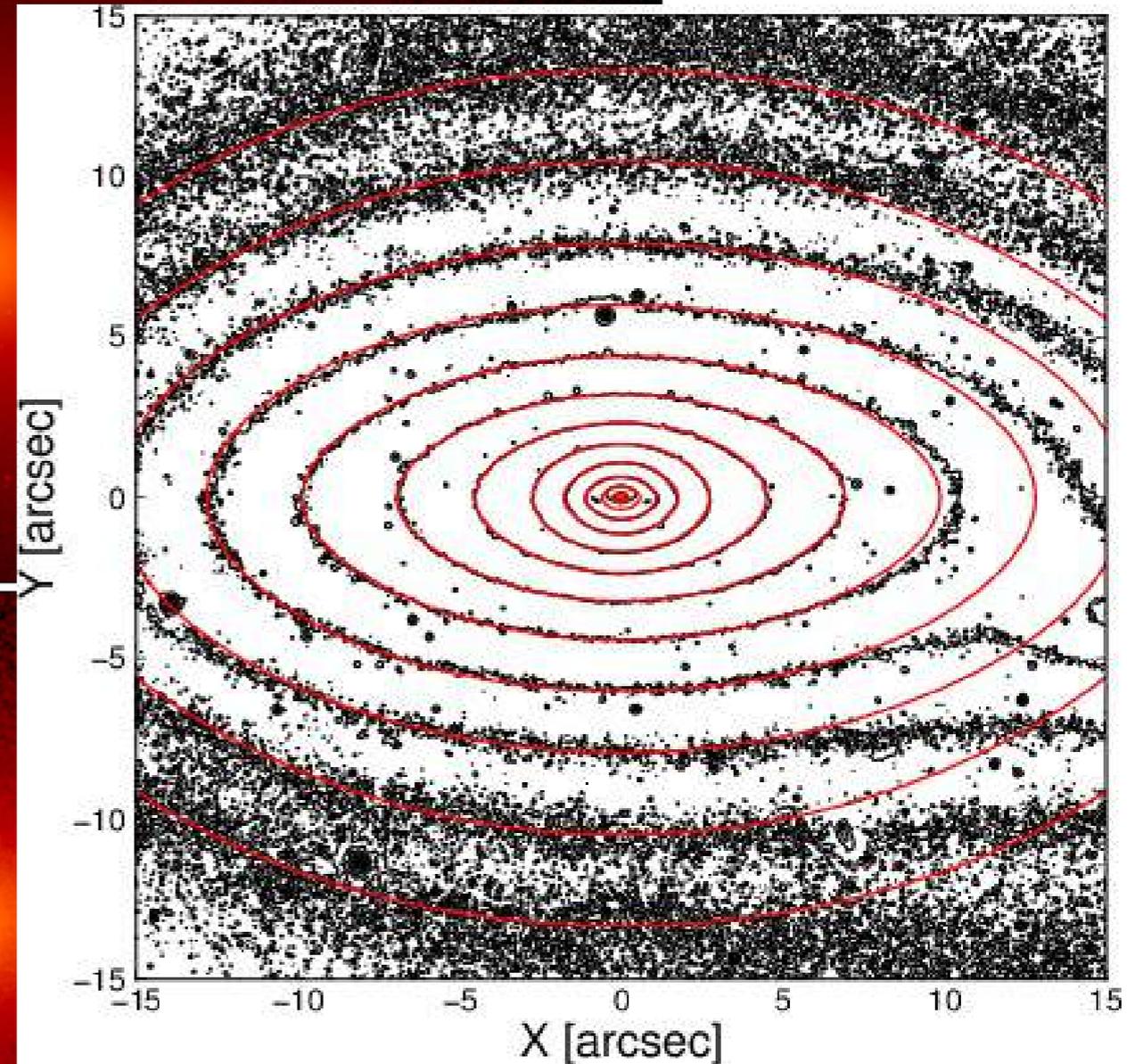
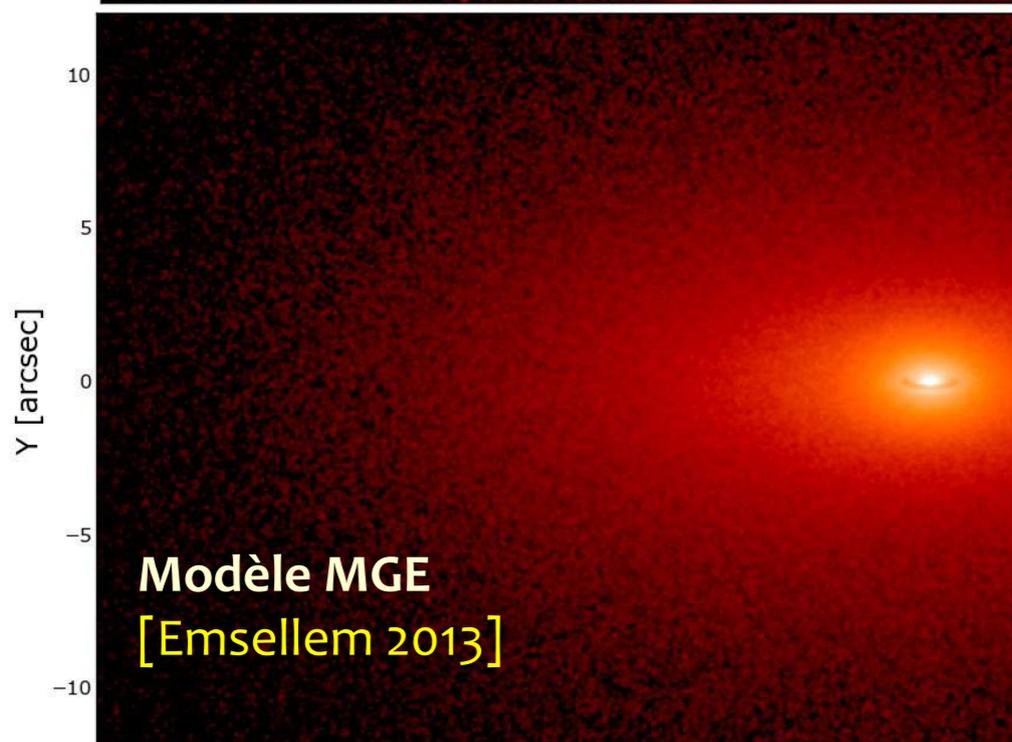
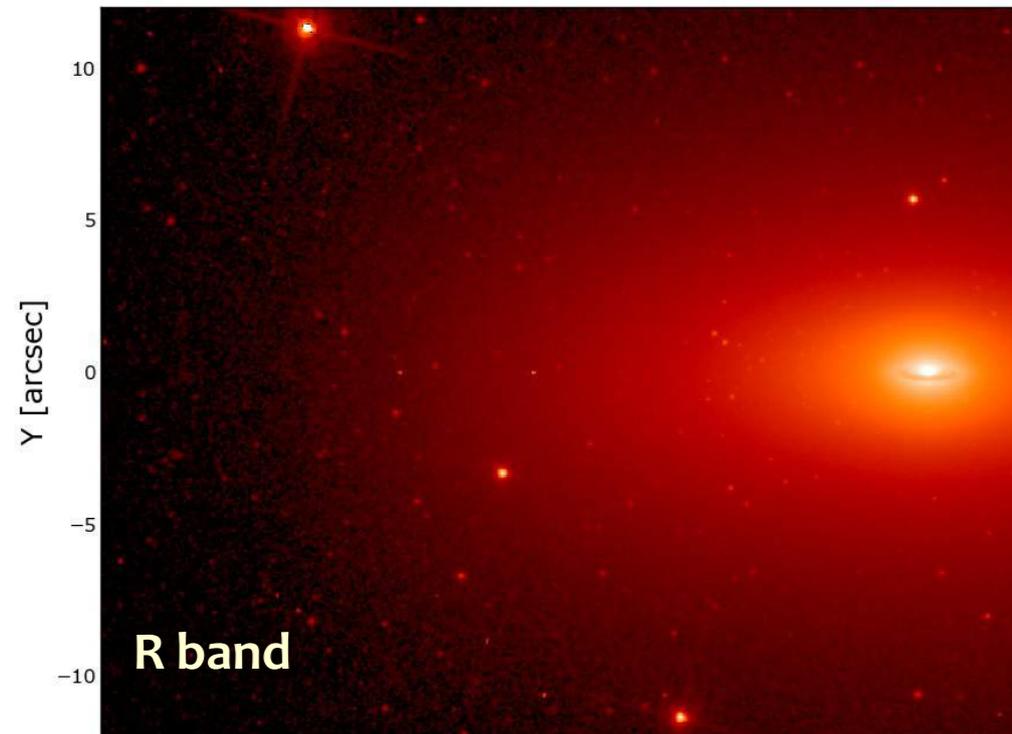
Test de vérification

1 – Modélisation de la photométrie

 **pyGME** (Emsellem et al. 1994, Emsellem 1995, Emsellem & Renaud in prep.)

↗ Images ou fonctions pré-définies (1D, 2D ou 3D)

↗ Module python pour une Multi-Gaussian Expansion



2 – Test direct : modèle « hydrodynamique »

■ *Mêmes données longue-fente*

▶ V, s, h_3, h_4

■ 2 Modèles

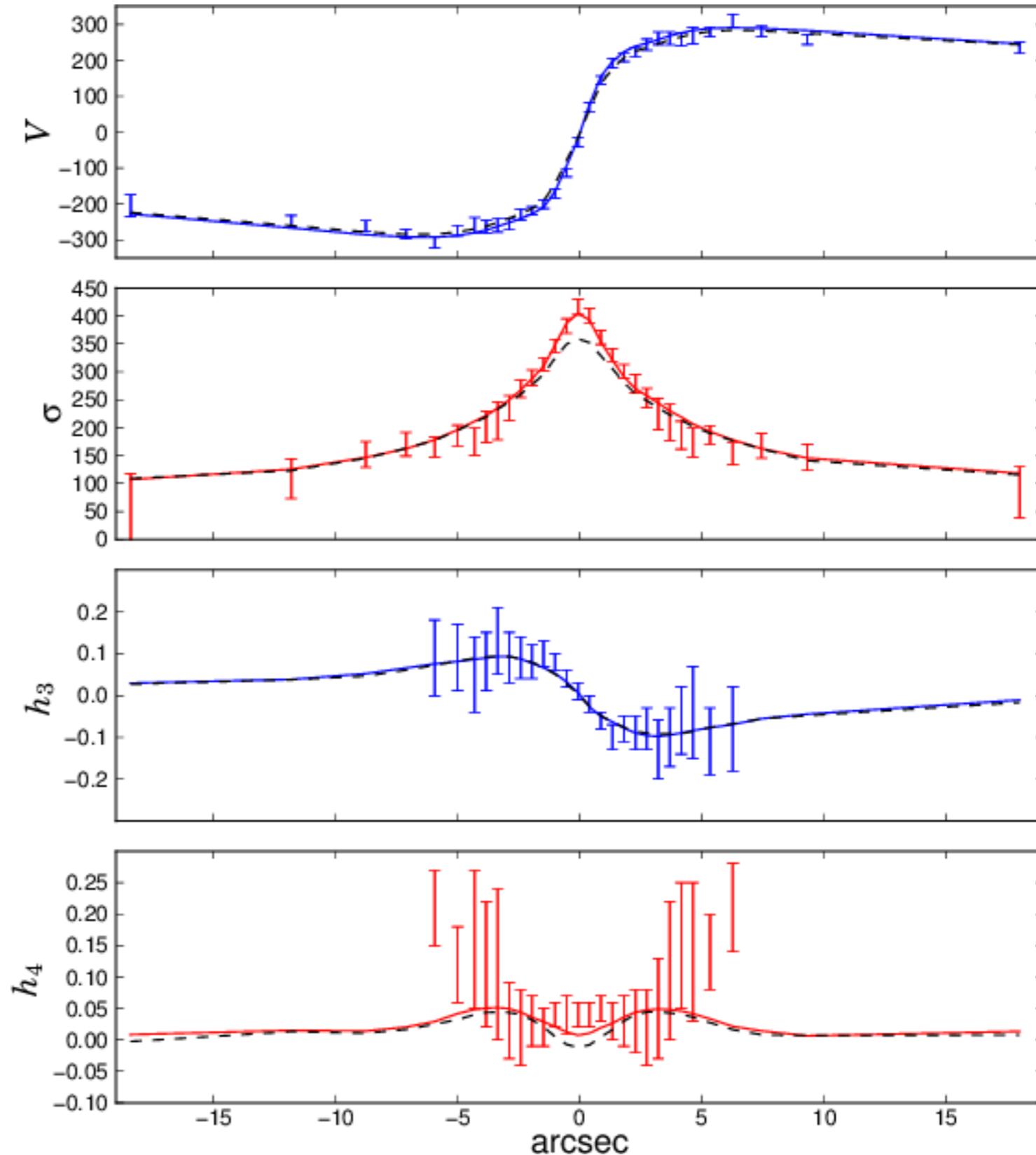
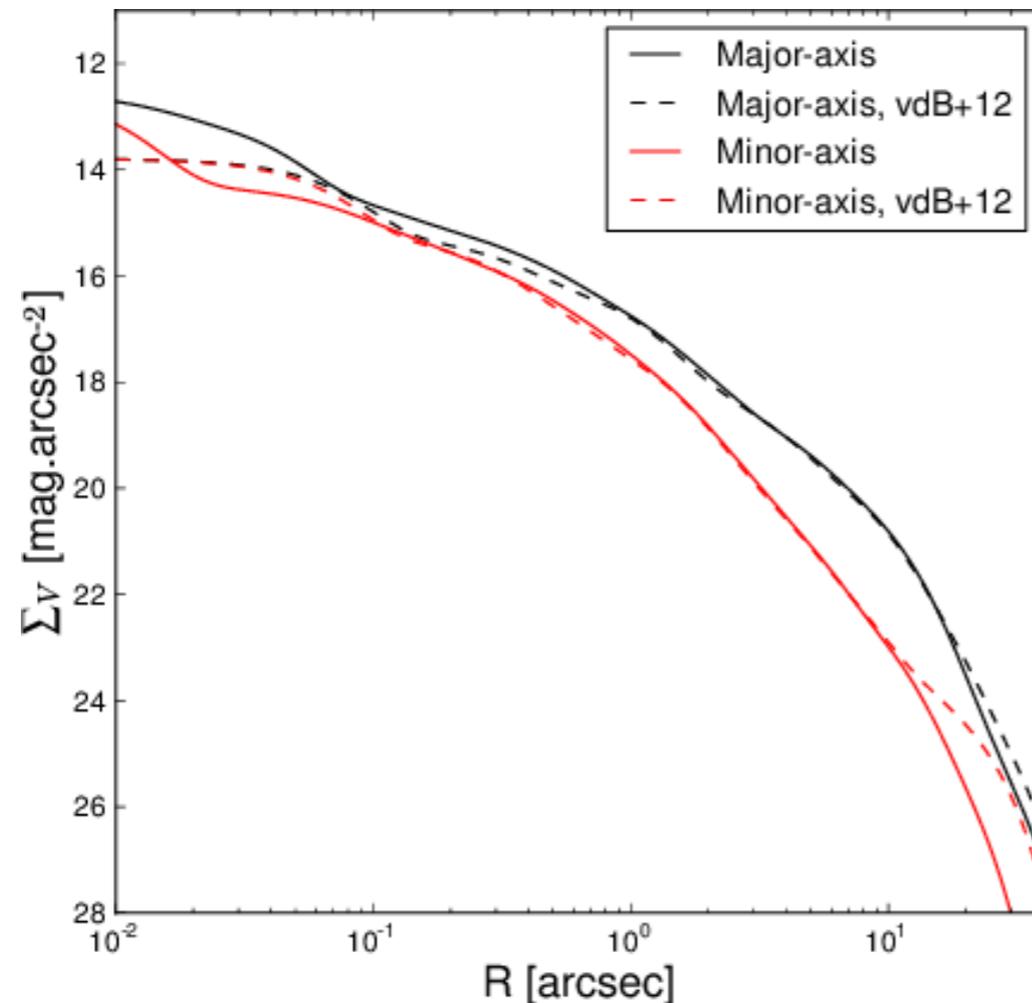
▶ On fixe le M/L

▶ On prend une anisotropie générale

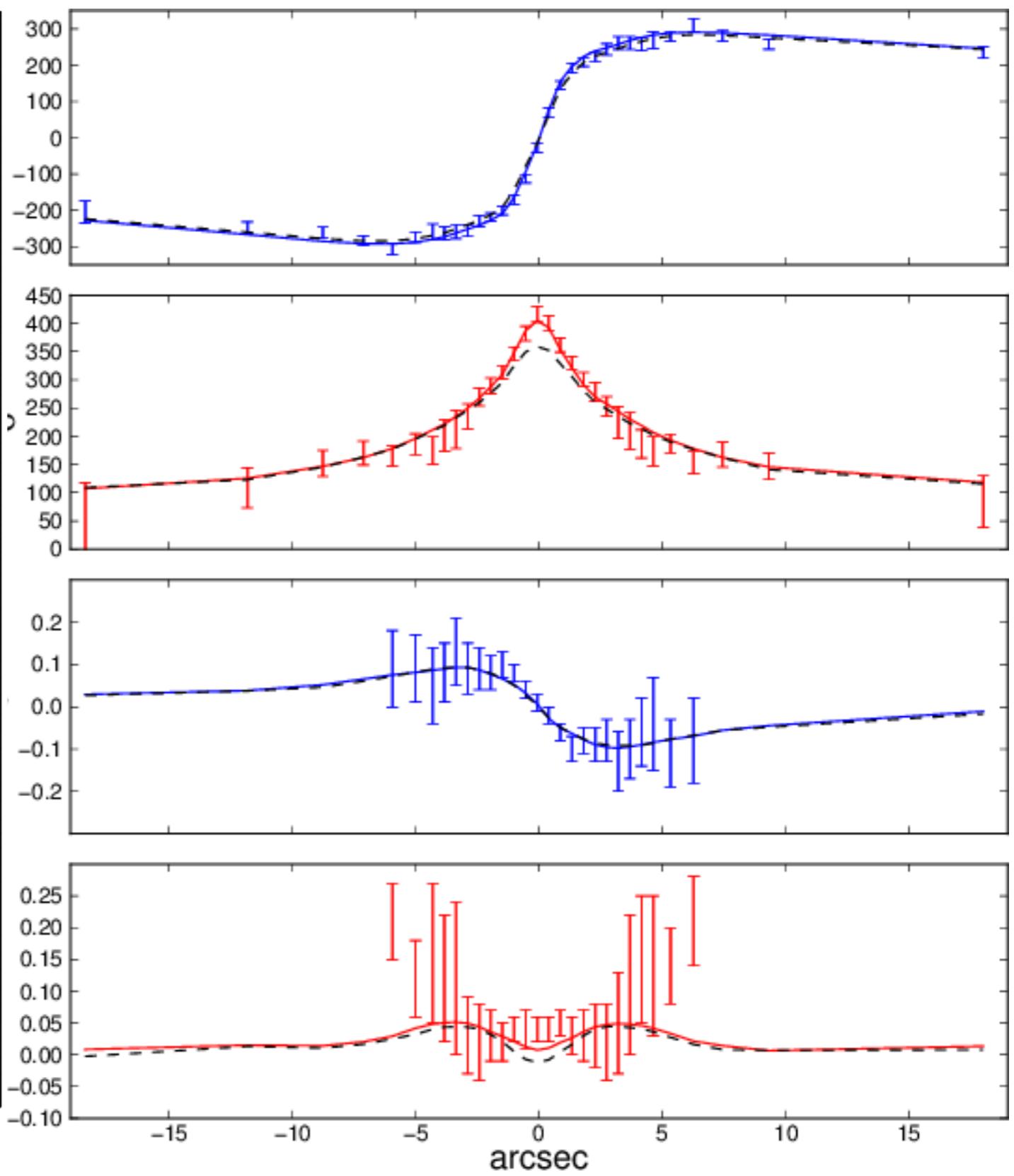
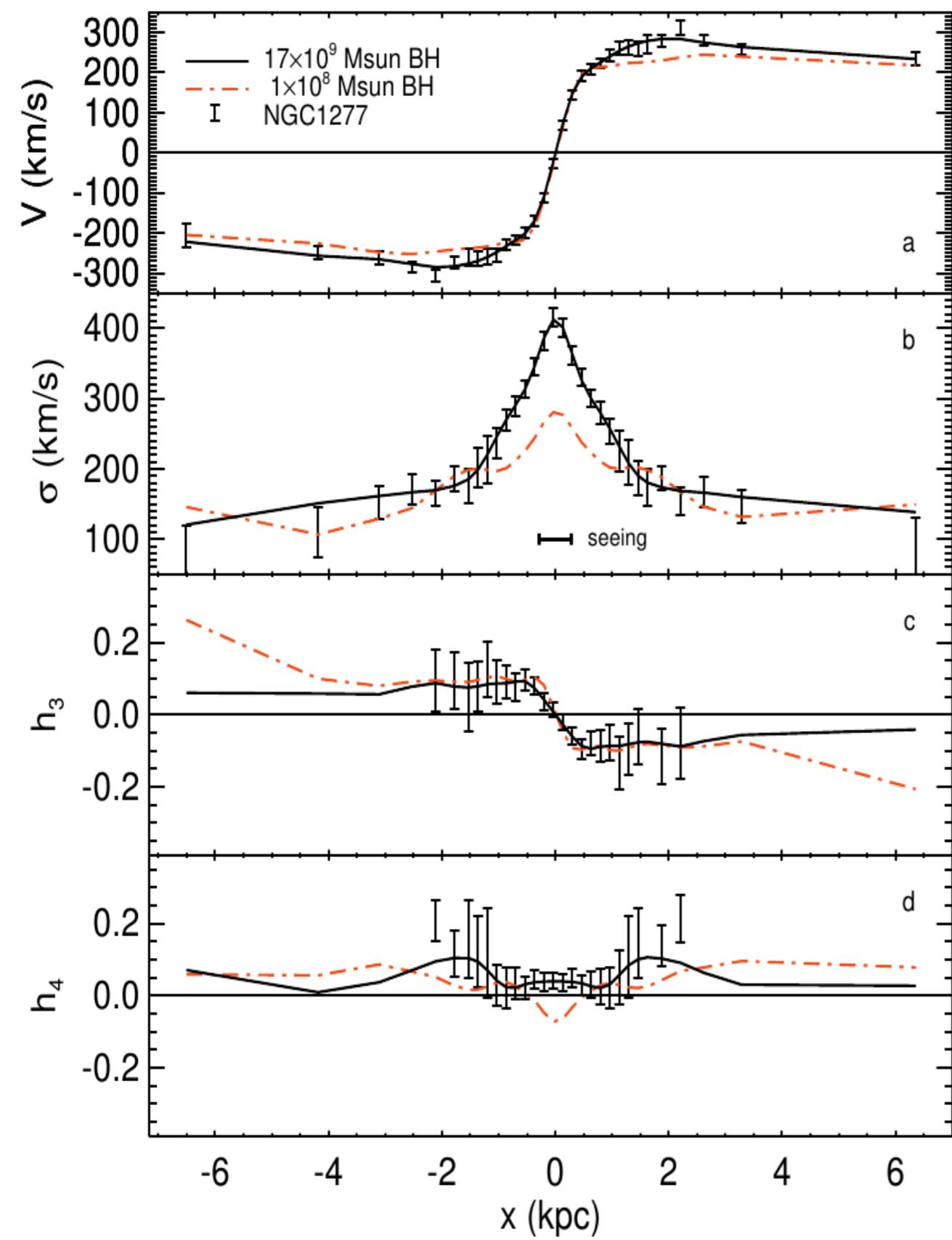
■ Modèle de Jeans et N-corps

▶ Sans Trou noir

▶ $5 \cdot 10^9 \text{ Msun}$



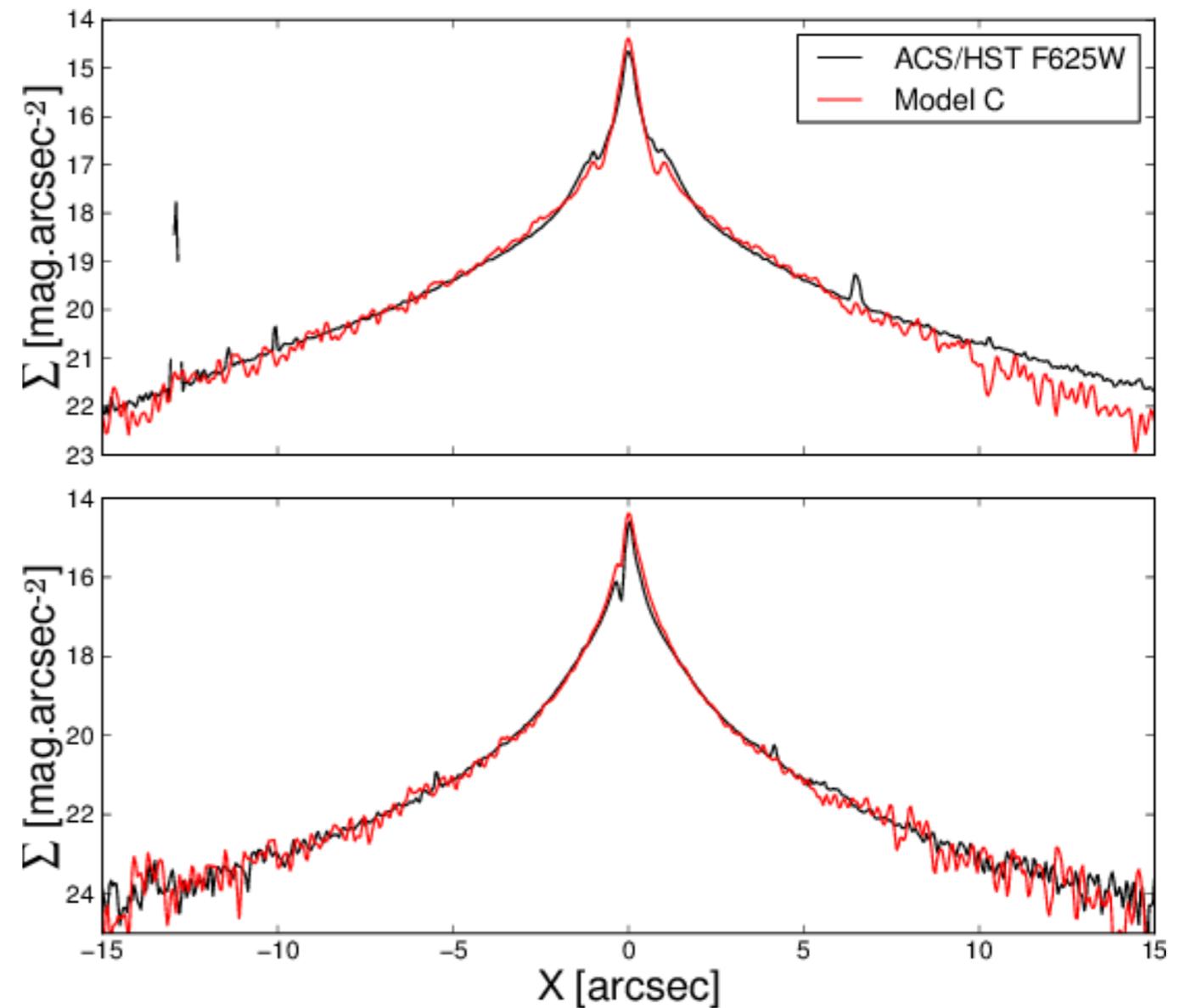
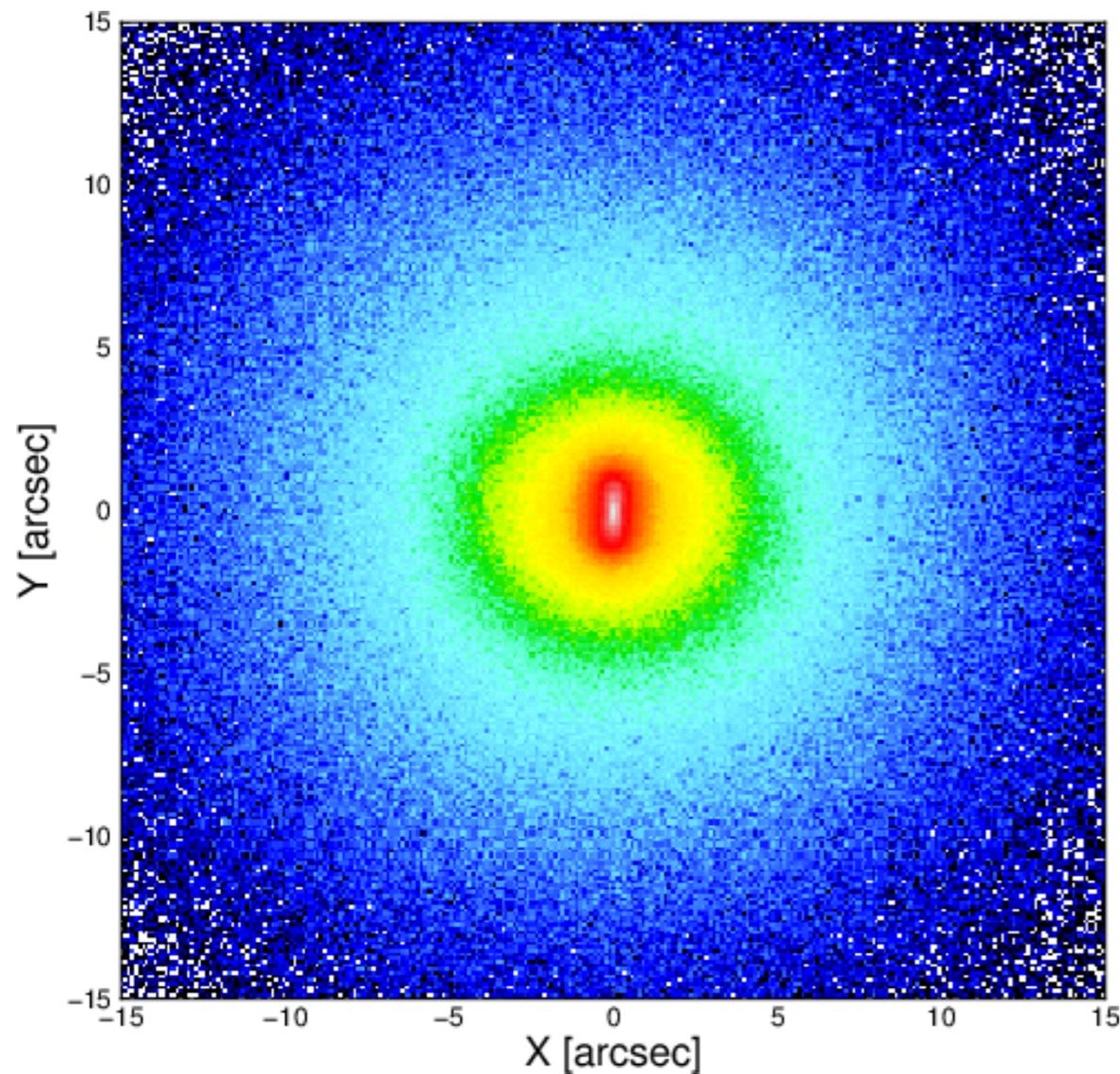
???



3 – Test indirect : stabilité

Evolution par modélisation N corps

- ↗ **Modèle standard** ⇒ stable
- ↗ **Deuxième modèle avec anisotropie extrême** ⇒ mini barre



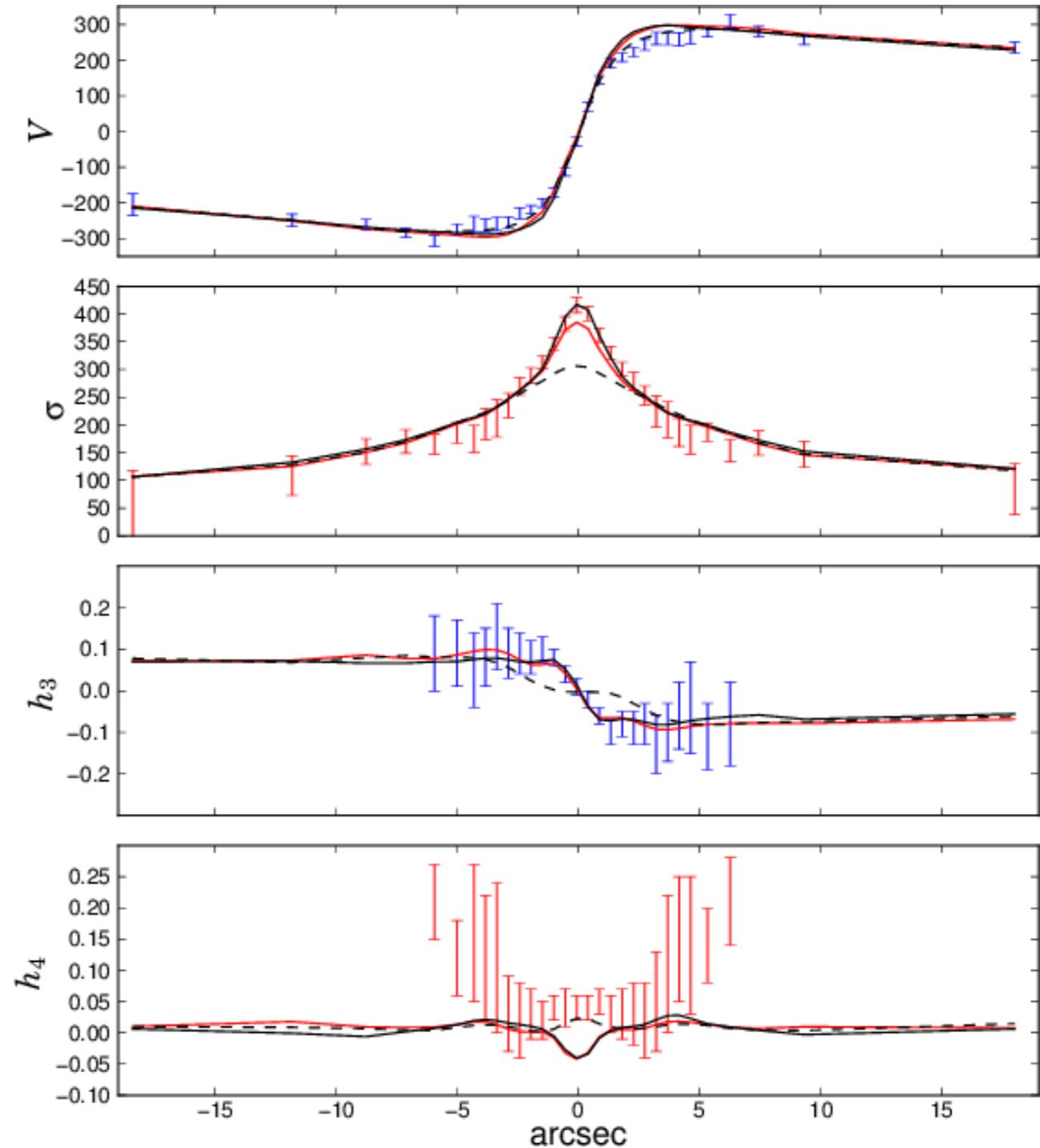
3 – Test indirect : stabilité

Evolution par modélisation N corps

- ↗ **Modèle standard \Rightarrow stable**
- ↗ **Deuxième modèle avec anisotropie extrême \Rightarrow mini barre**

Comparison with kinematics

- ↗ **Modèles avec et sans trou noir ($2.5 \cdot 10^9 M_{\odot}$)**



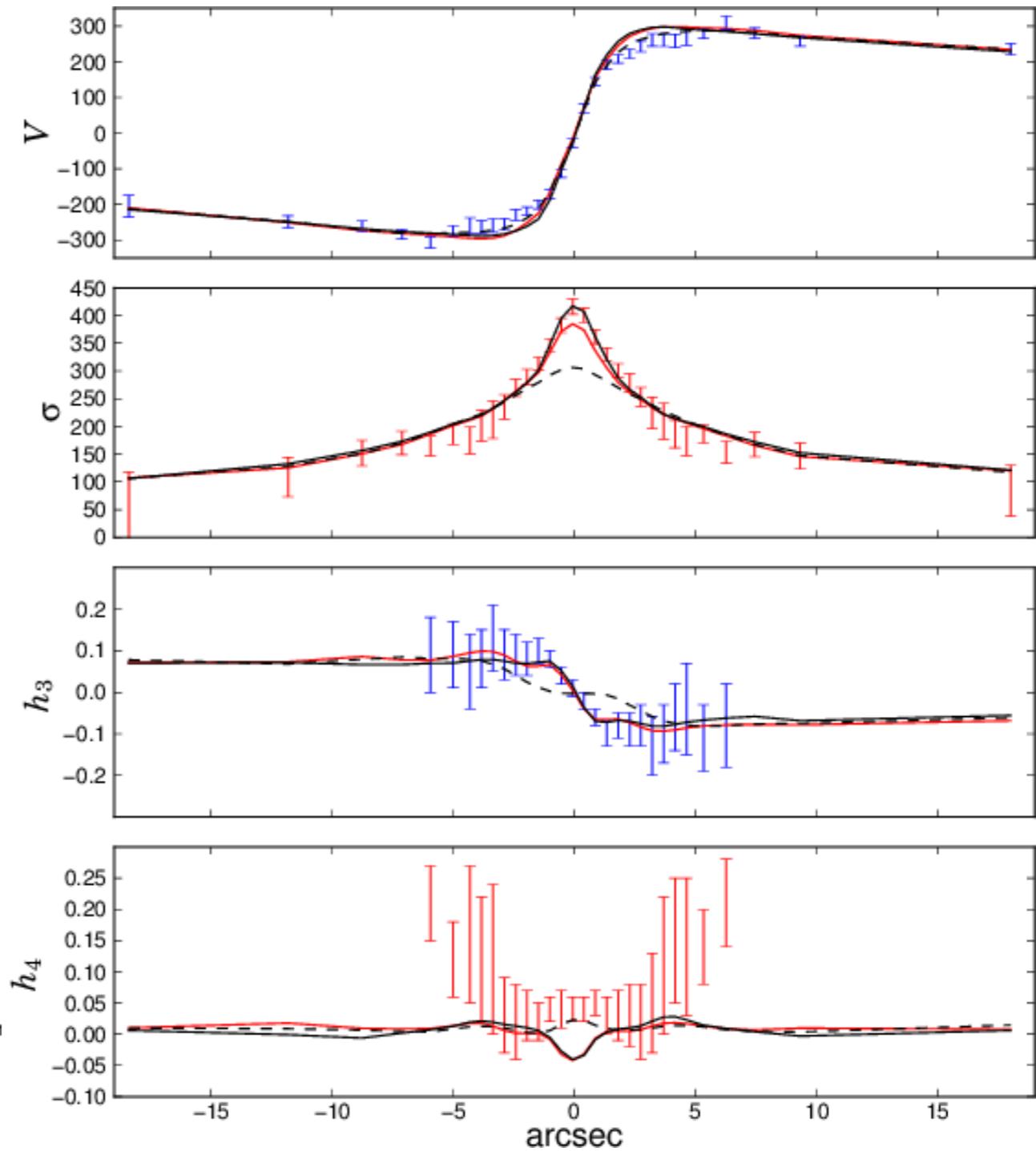
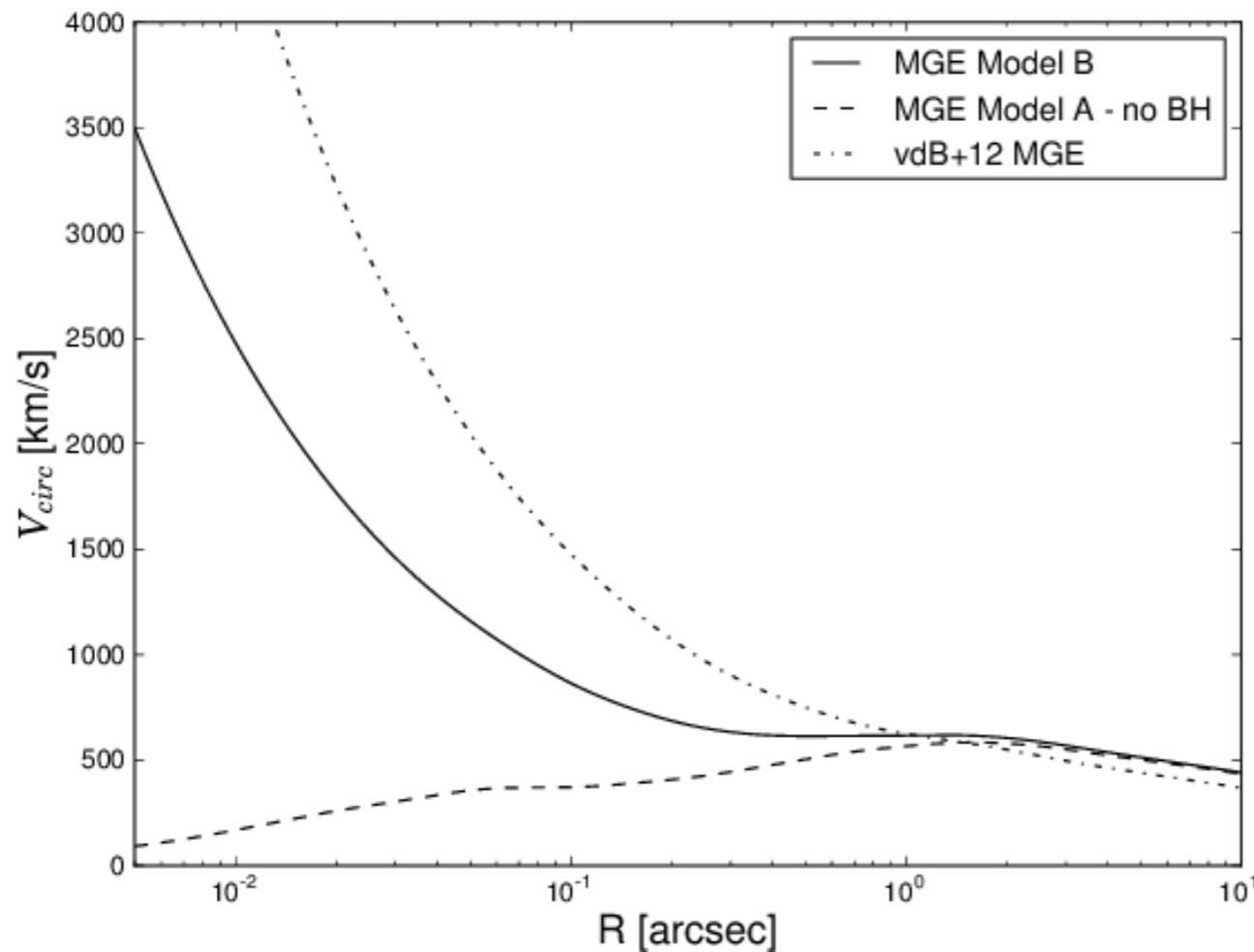
3 – Test indirect : stabilité

Evolution par modélisation N corps

- ↗ **Modèle standard \Rightarrow stable**
- ↗ **Deuxième modèle avec anisotropie extrême \Rightarrow mini barre**

Comparison with kinematics

- ↗ **Modèles avec et sans trou noir ($2.5 \cdot 10^9 M_{\odot}$)**



4 – Conclusions sur NGC 1277 [2013]

Le rasoir d'Occam

La photométrie semble bien prédire la cinématique avec une simple normalisation

Trou noir requis est **presque 4 fois plus petit ?** ($5 \cdot 10^9 M_{\odot}$)

Rapport masses Trou noir / Bulbe ?

Définition du bulbe \Rightarrow toujours ambiguë !

Barre ?

Demande confirmation

Mais hypothèse intéressante

Incertitudes mentionnées dans les papiers ?

Ne reflète que la réalité mathématique de l'ajustement

Une réponse plus robuste demande des données 2D (IFU)

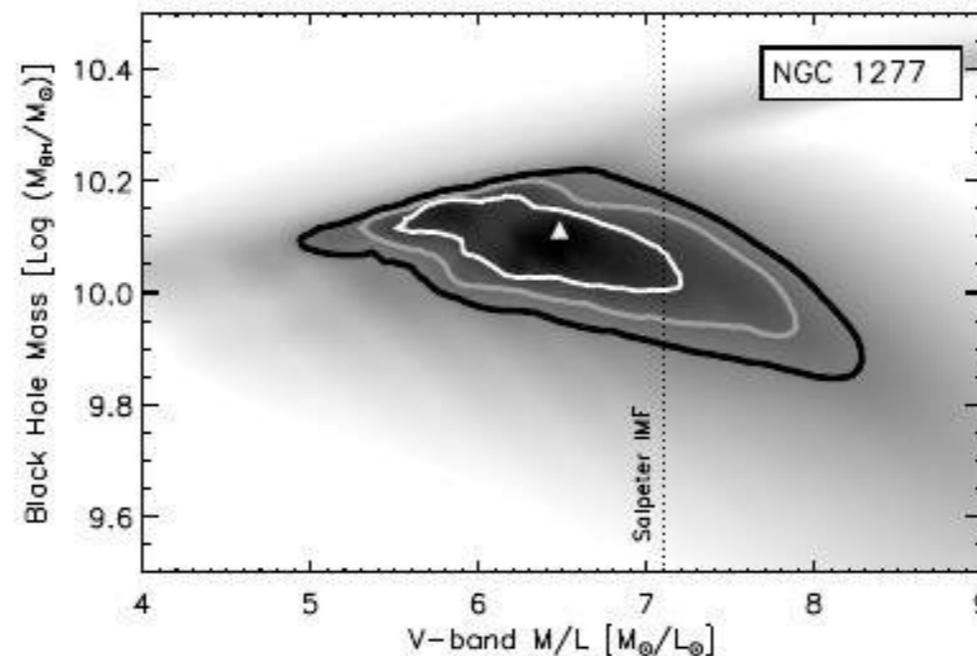
Le rasoir d'Occam

Quelles nouvelles de NGC 1277 ?

MRK 1216 & NGC 1277 - An orbit-based dynamical analysis of compact, high velocity dispersion galaxies

Akın Yıldırım^{1*}, Remco C. E. van den Bosch¹, Glenn van de Ven¹, Bernd Husemann^{2,3}, Mariya Lyubenova^{1,4}, Jonelle L. Walsh^{5,6}, Karl Gebhardt⁵ and Kayhan Gültekin⁷

content and stellar mass-to-light ratios. We obtain a black hole mass of $\log(M_{\bullet}/M_{\odot}) = 10.1^{+0.1}_{-0.2}$ for NGC 1277 and an upper limit of $\log(M_{\bullet}/M_{\odot}) = 10.0$ for MRK 1216, within 99.7 per cent (3σ) confidence. The stellar mass-to-light ratios span a range of $\Upsilon_V = 6.5^{+1.5}_{-1.5}$ in NGC 1277 and $\Upsilon_H = 1.8^{+0.5}_{-0.8}$ in MRK 1216 and are in good agree-



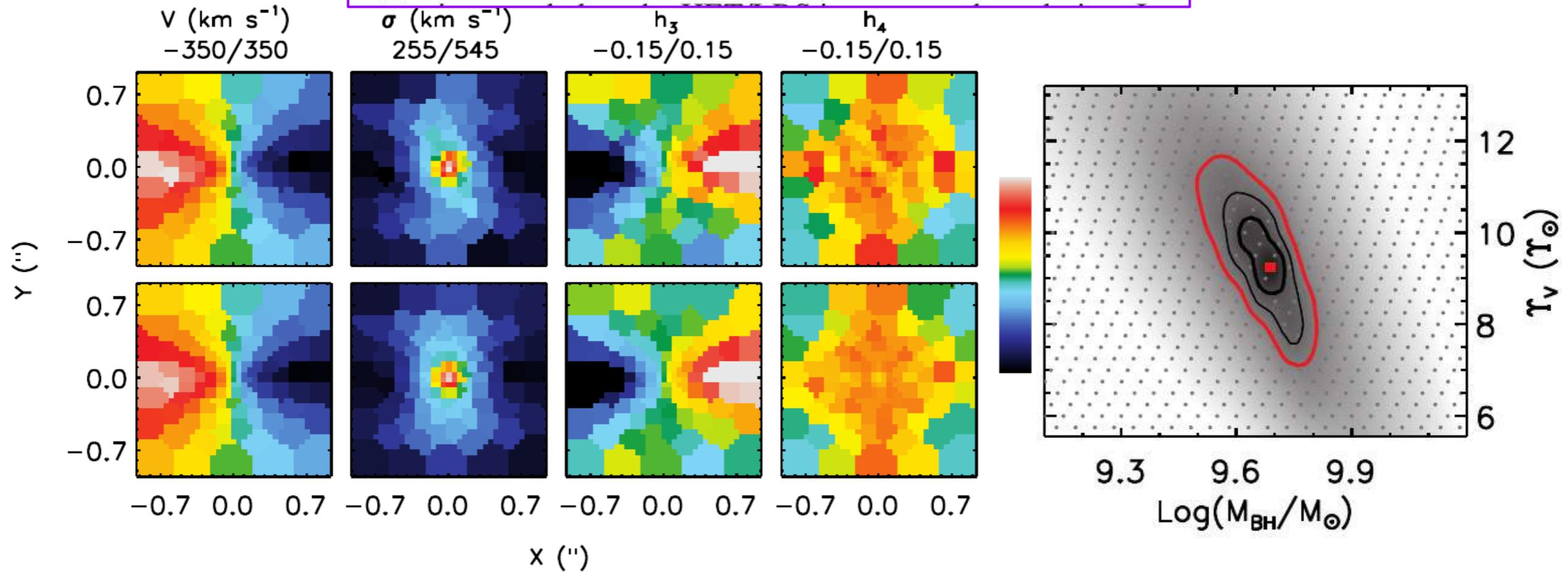
Le rasoir d'Occam

Quelles nouvelles de NGC 1277 ?

A $5 \times 10^9 M_{\odot}$ BLACK HOLE IN NGC 1277 FROM ADAPTIVE OPTICS SPECTROSCOPY

JONELLE L. WALSH¹, REMCO C. E. VAN DEN BOSCH², KARL GEBHARDT³, AKIN YILDIRIM², DOUGLAS O. RICHSTONE⁴, KAYHAN GÜLTEKIN⁴, AND BERND HUSEMANN⁵

the same dark halos described in Section 7. We recovered best-fit values of $M_{\text{BH}} = 4.8 \times 10^9 M_{\odot}$ and $\Upsilon_{\text{V}} = 10.3 \Upsilon_{\odot}$ with a reduced χ^2 of 0.8 when fitting all 31 HET spatial bins, and $M_{\text{BH}} = 4.6 \times 10^9 M_{\odot}$ and $\Upsilon_{\text{V}} = 9.8 \Upsilon_{\odot}$ with a reduced χ^2 of 0.8 when excluding three outer bins because their dis-

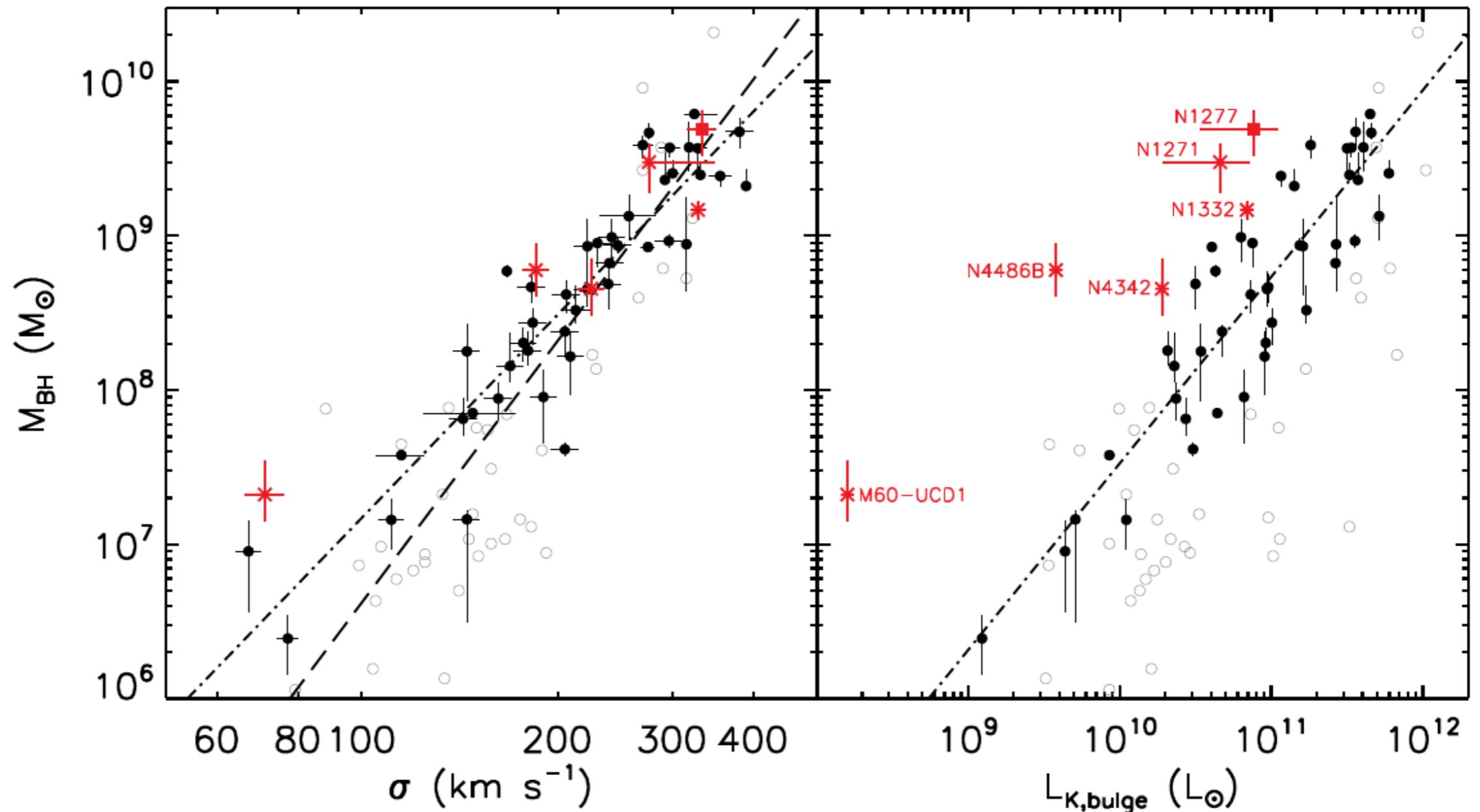


Le rasoir d'Occam

Quelles nouvelles de NGC 1277 ?

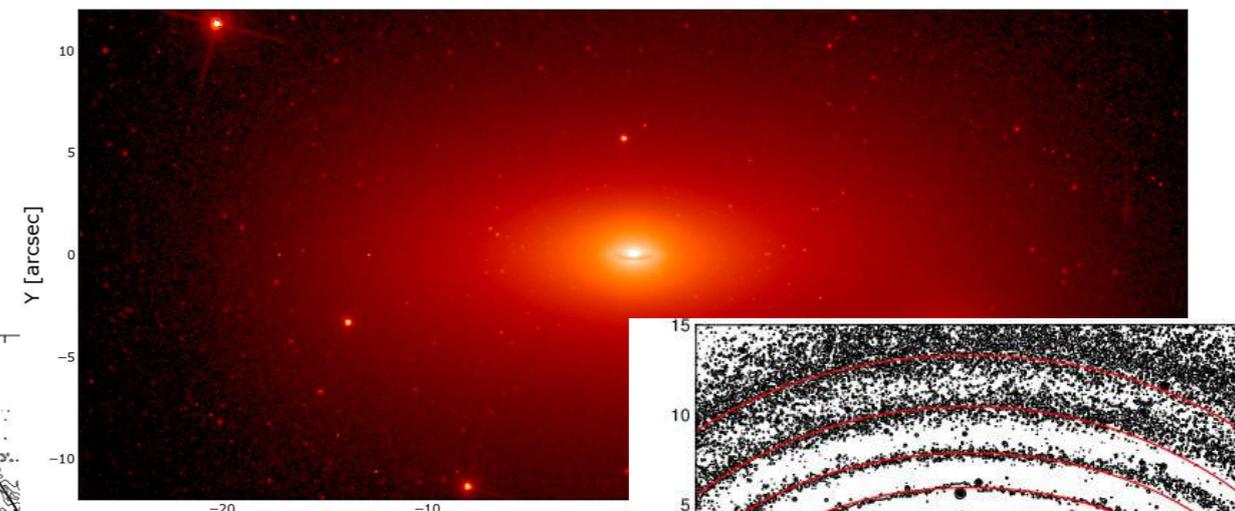
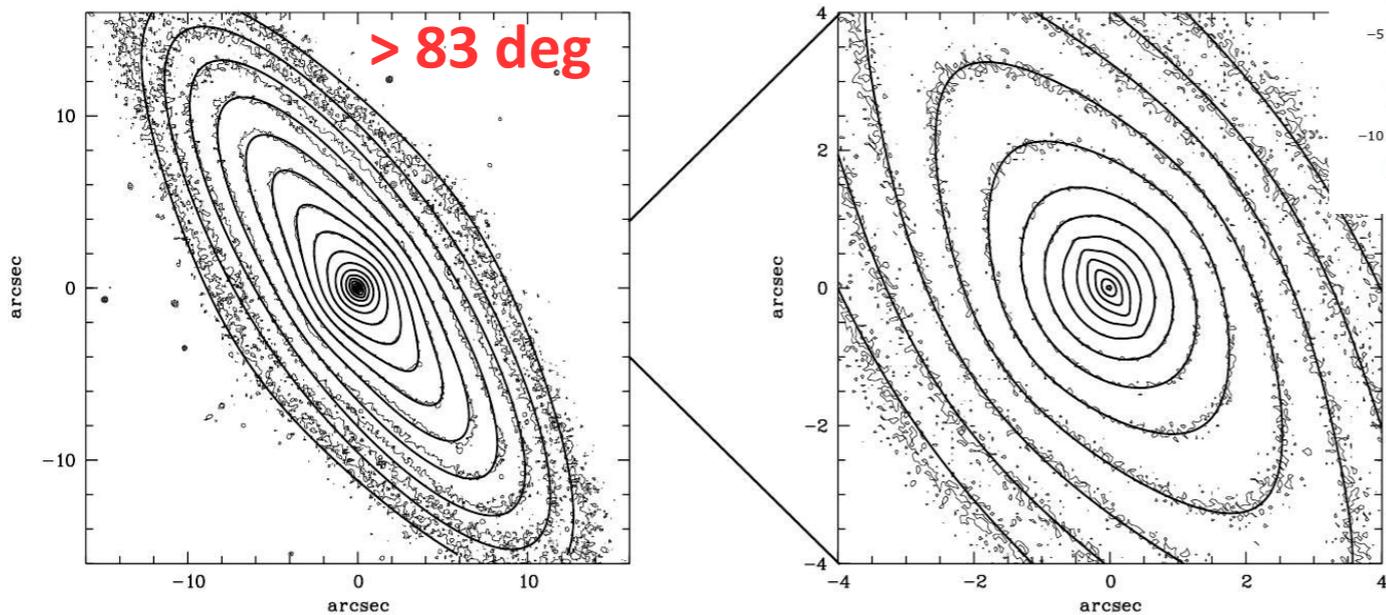
A $5 \times 10^9 M_{\odot}$ BLACK HOLE IN NGC 1277 FROM ADAPTIVE OPTICS SPECTROSCOPY

JONELLE L. WALSH¹, REMCO C. E. VAN DEN BOSCH², KARL GEBHARDT³, AKIN YILDIRIM², DOUGLAS O. RICHSTONE⁴, KAYHAN GÜLTEKIN⁴, AND BERND HUSEMANN⁵

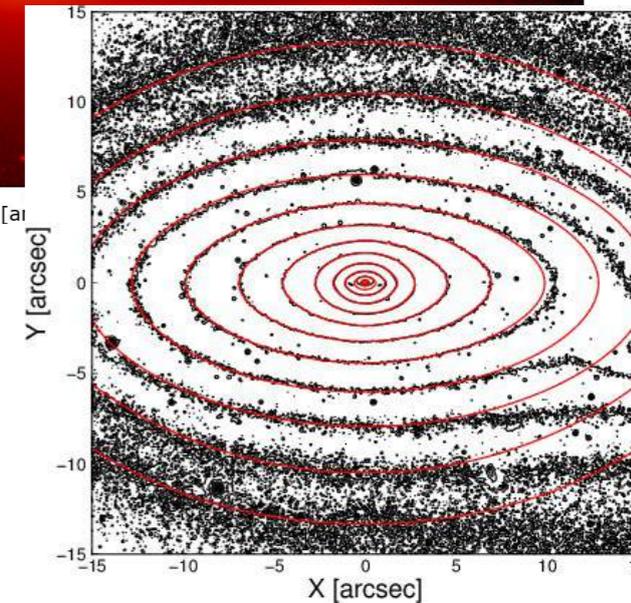


Quelque chose de bizarre ? Simple biais de sélection ?

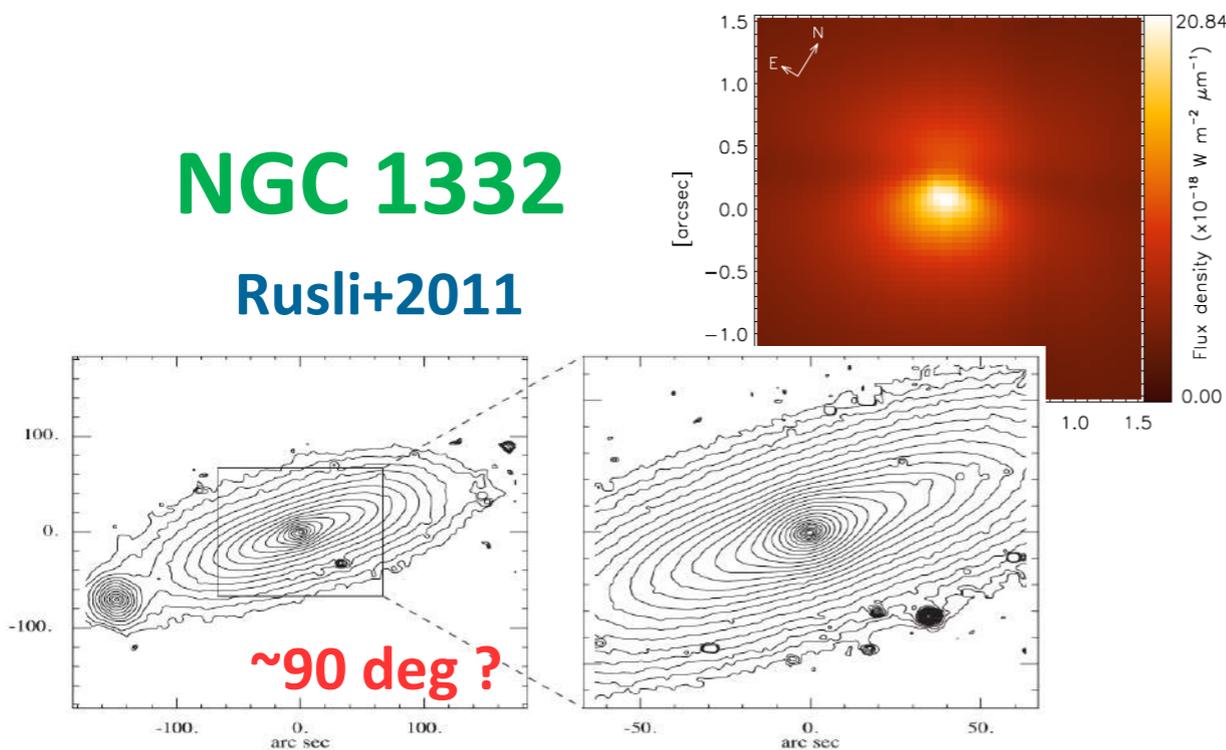
NGC 4342 Cretton+1999



NGC 1277
vdBosch+2012
> 75 deg

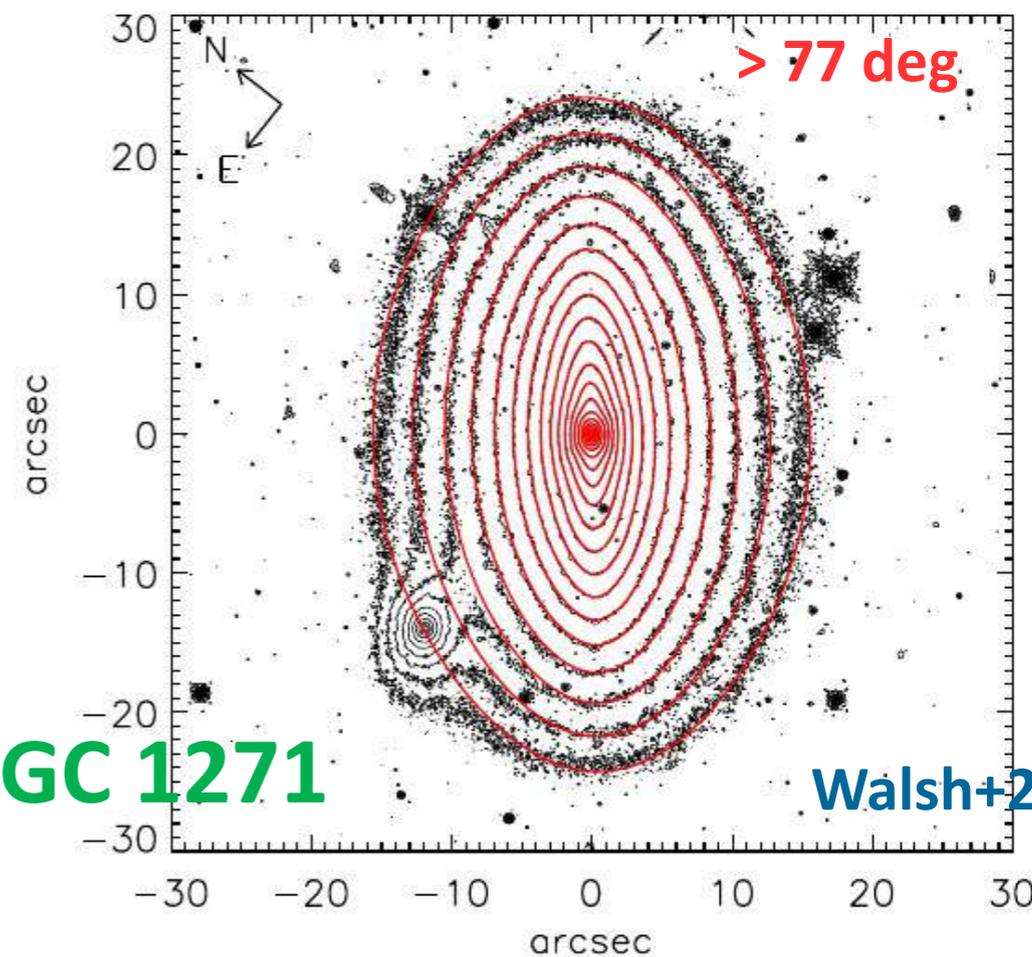


NGC 1332
Rusli+2011



NGC 1271

Walsh+2015



Que sait-on aujourd'hui ?

Les galaxies à sphéroïde ont un trou noir supermassif

⇒ mais pas une condition nécessaire

On comprend – statistiquement parlant – les populations de trous noirs supermassifs ($2-5 \cdot 10^5 M_{\odot} / \text{Mpc}^3$)

⇒ mais on ne sais pas encore ce qui domine leur formation/évolution

Des relations d'échelle existent

⇒ mais problèmes de mesure ⇒ dispersion de la relation peu robuste

⇒ Peu de contraintes à grande et petite masse

Le futur

Maintenant ⇒ MUSE, ALMA

Demain ⇒ James Webb, ELTs

Après demain ⇒ Campagnes en rayon X (Athena – 2028...), SKA

Relation d'échelle : Homogénéisation des données

Campagne en cours avec MUSE pour re-mesurer σ !!

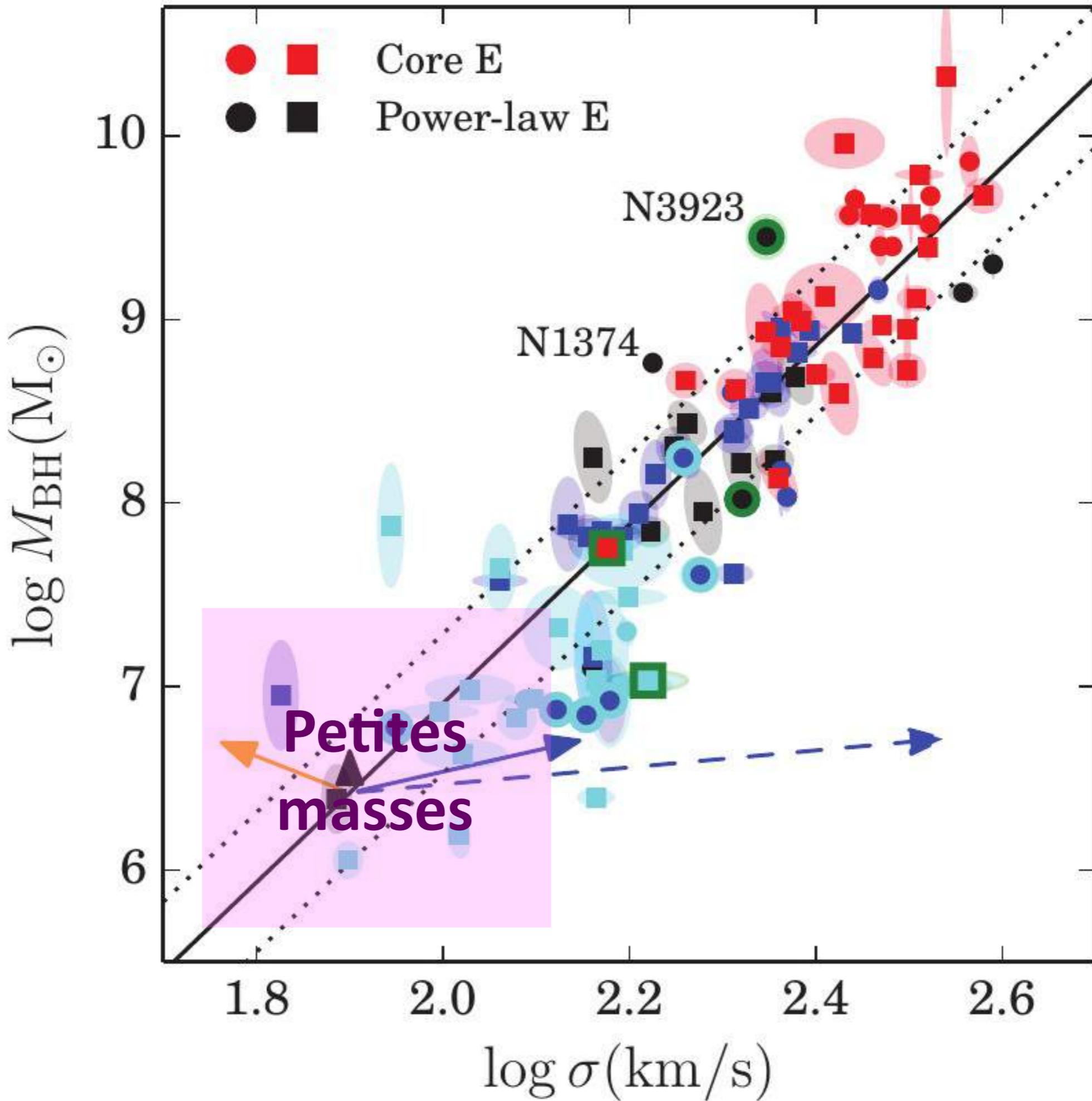
Biais – Incertitudes

Trouver des références et comparer les méthodes

Les trous noirs extrêmes

Petits et Gros

La relation $M_{bh} - \sigma$



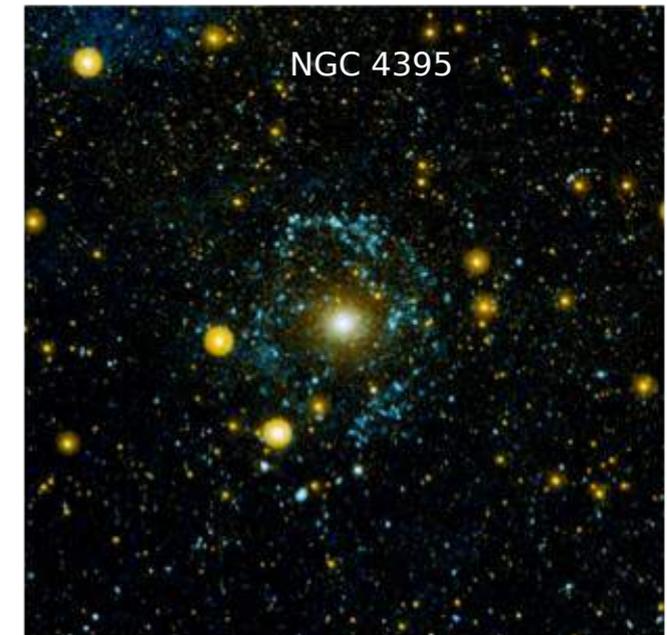
Saglia et al.

Trous noirs de masse intermédiaire

- Galaxies naines



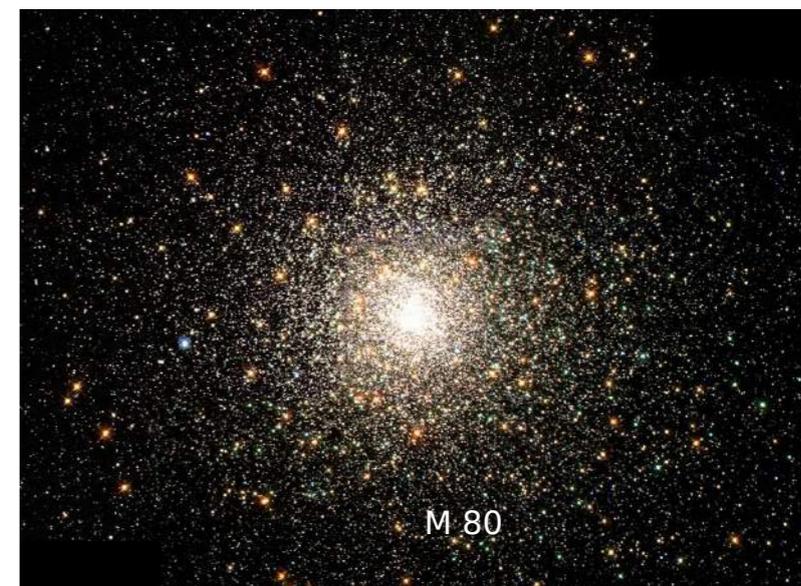
- Noyaux

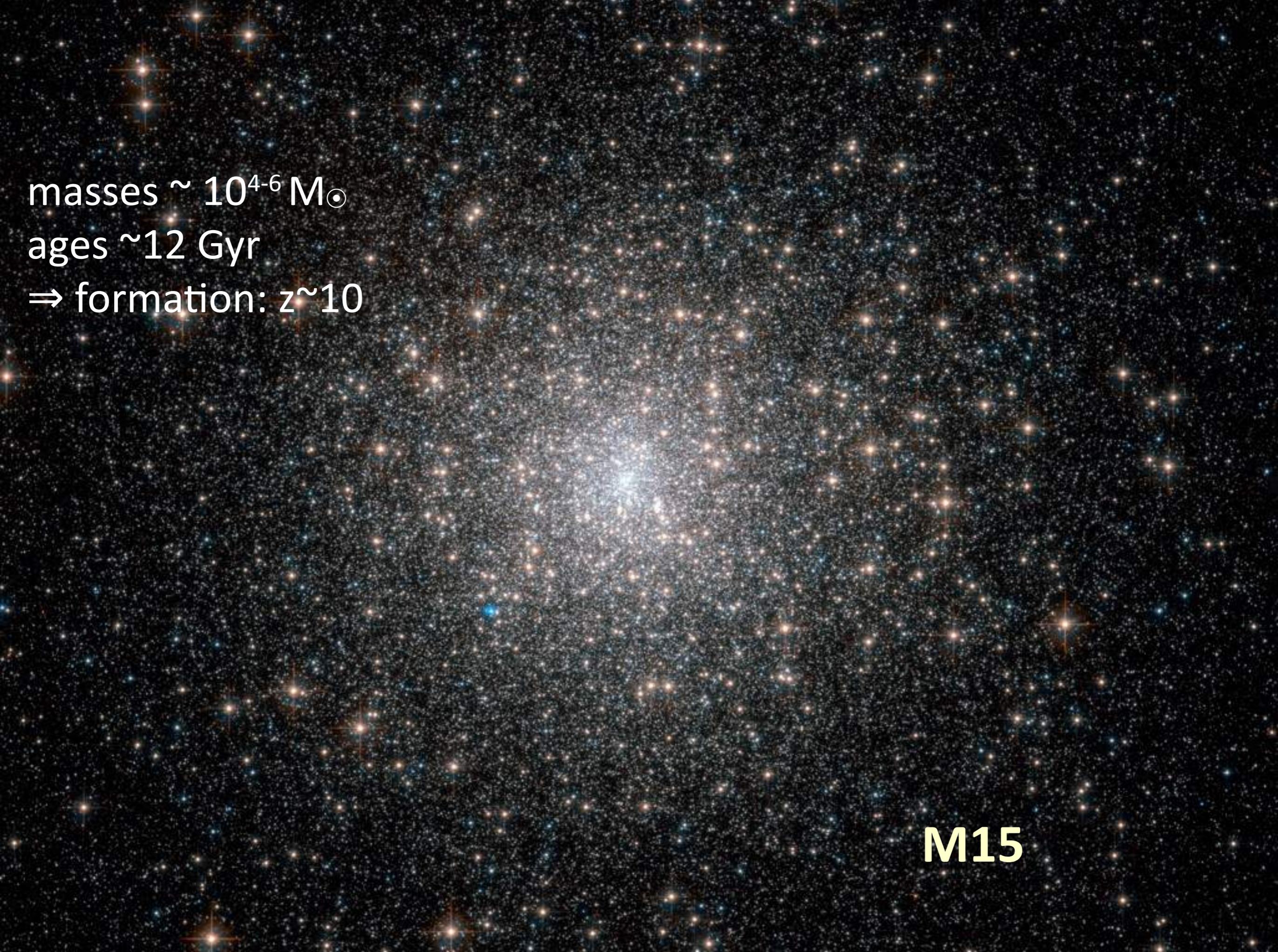


GALEX

Thiiker et al. 2010

- Amas globulaires





masses $\sim 10^{4-6} M_{\odot}$
ages ~ 12 Gyr
 \Rightarrow formation: $z \sim 10$

M15

14 amas globulaires étudiés

7 ont peut-être un TN

et pour 7, on a une limite haute sur la masse

Table 6.1: Properties of the 14 GCs of our sample. The references for the measurements are a) Harris (1996), b) Chapter 2, c) Chapter 3, d) Chapter 5 e) Feldmeier et al. (2013), f) Gerssen et al. (2002), g) McLaughlin & van der Marel (2005), h) Ma et al. (2007) i) Meylan et al. (2001) j) Stephens et al. (2001), k) Noyola et al. (2010), l) Ibata et al. (2009), m) Gebhardt et al. (2005) n) Meylan et al. (1995). For clusters not provided with uncertainties in M_{tot} and L_{tot} we adopted a value of 0.02 dex.

ID		D_{SUN} [kpc]	D_{GC} [kpc]	[Fe/H]	e	c	r_h [pc]	$\log M_{tot}$ [$\log M_\odot$]	δM_{tot}	$\log L_{tot}$ [$\log L_\odot$]	δL_{tot}	σ [km s^{-1}]	$\delta\sigma$	M_\bullet [M_\odot]
G1		675.0 ⁱ	36.8 ⁱ	-1.22 ^h	0.19 ^h	2.01 ^h	6.5 ^h	6.76 ^m	0.02	6.31 ^a	0.02	25.1 ⁱ	0.3	$(1.8 \pm 0.5) \times 10^{4g}$
NGC 104	47Tuc	4.5 ^a	7.4 ^a	-0.72 ^a	0.09 ^a	2.07 ^a	4.1 ^a	6.04 ^g	0.02	5.66 ^g	0.02	9.8 ^g	0.0	$< 1.5 \times 10^3$
NGC 1851		12.1 ^a	16.6 ^a	-1.18 ^a	0.05 ^a	1.86 ^a	1.8 ^a	5.57 ^d	0.04	5.25 ^d	0.04	9.3 ^d	0.5	$< 2.0 \times 10^{3d}$
NGC 1904	M79	12.9 ^a	18.8 ^a	-1.60 ^a	0.01 ^a	1.70 ^a	2.4 ^a	5.15 ^d	0.03	4.94 ^d	0.03	8.0 ^d	0.5	$(3.0 \pm 1.0) \times 10^{3d}$
NGC 2808		9.6 ^a	11.1 ^a	-1.14 ^a	0.12 ^a	1.56 ^a	2.2 ^a	5.91 ^c	0.04	5.59 ^c	0.04	13.4 ^c	0.2	$< 1.0 \times 10^{4c}$
NGC 5139	ω Cen	5.2 ^a	6.4 ^a	-1.53 ^a	0.17 ^a	1.31 ^a	7.6 ^a	6.40 ^k	0.05	5.97 ^a	0.05	22.0 ⁿ	4.0	$(4.7 \pm 1.0) \times 10^{4k}$
NGC 5286		11.7 ^a	8.9 ^a	-1.69 ^a	0.12 ^a	1.41 ^a	2.5 ^a	5.45 ^e	0.02	5.42 ^e	0.01	9.3 ^e	0.4	$(1.5 \pm 1.1) \times 10^{3e}$
NGC 5694		35.0 ^a	29.4 ^a	-1.98 ^a	0.04 ^a	1.89 ^a	4.1 ^a	5.41 ^d	0.05	5.09 ^d	0.05	8.8 ^d	0.6	$< 8.0 \times 10^{3d}$
NGC 5824		32.1 ^a	25.9 ^a	-1.91 ^a	0.03 ^a	1.98 ^a	4.2 ^a	5.65 ^d	0.03	5.40 ^d	0.03	11.2 ^d	0.4	$< 6.0 \times 10^{3d}$
NGC 6093	M80	10.0 ^a	3.8 ^a	-1.75 ^a	0.00 ^a	1.68 ^a	1.8 ^a	5.53 ^d	0.03	5.17 ^d	0.03	9.3 ^d	0.3	$< 8.0 \times 10^{2d}$
NGC 6266	M62	6.8 ^a	1.7 ^a	-1.18 ^a	0.01 ^a	1.71 ^a	1.8 ^a	5.97 ^d	0.01	5.57 ^d	0.01	15.5 ^d	0.5	$(2.0 \pm 1.0) \times 10^{3d}$
NGC 6388		9.9 ^a	3.1 ^a	-0.55 ^a	0.01 ^a	1.75 ^a	1.5 ^a	6.04 ^b	0.08	5.84 ^b	0.08	18.9 ^b	0.3	$(1.7 \pm 0.9) \times 10^{4b}$
NGC 6715	M54	26.5 ^a	18.9 ^a	-1.49 ^a	0.06 ^a	2.04 ^a	6.3 ^a	6.28 ^g	0.05	6.20 ^g	0.05	14.2 ⁱ	1.0	$(9.4 \pm 5.0) \times 10^{3j}$
NGC 7078	M15	10.4 ^a	10.4 ^a	-2.37 ^a	0.05 ^a	2.29 ^a	3.0 ^a	5.79 ^f	0.02	5.59 ^a	0.02	12.0 ^f	0.0	$< 4.4 \times 10^{3f}$

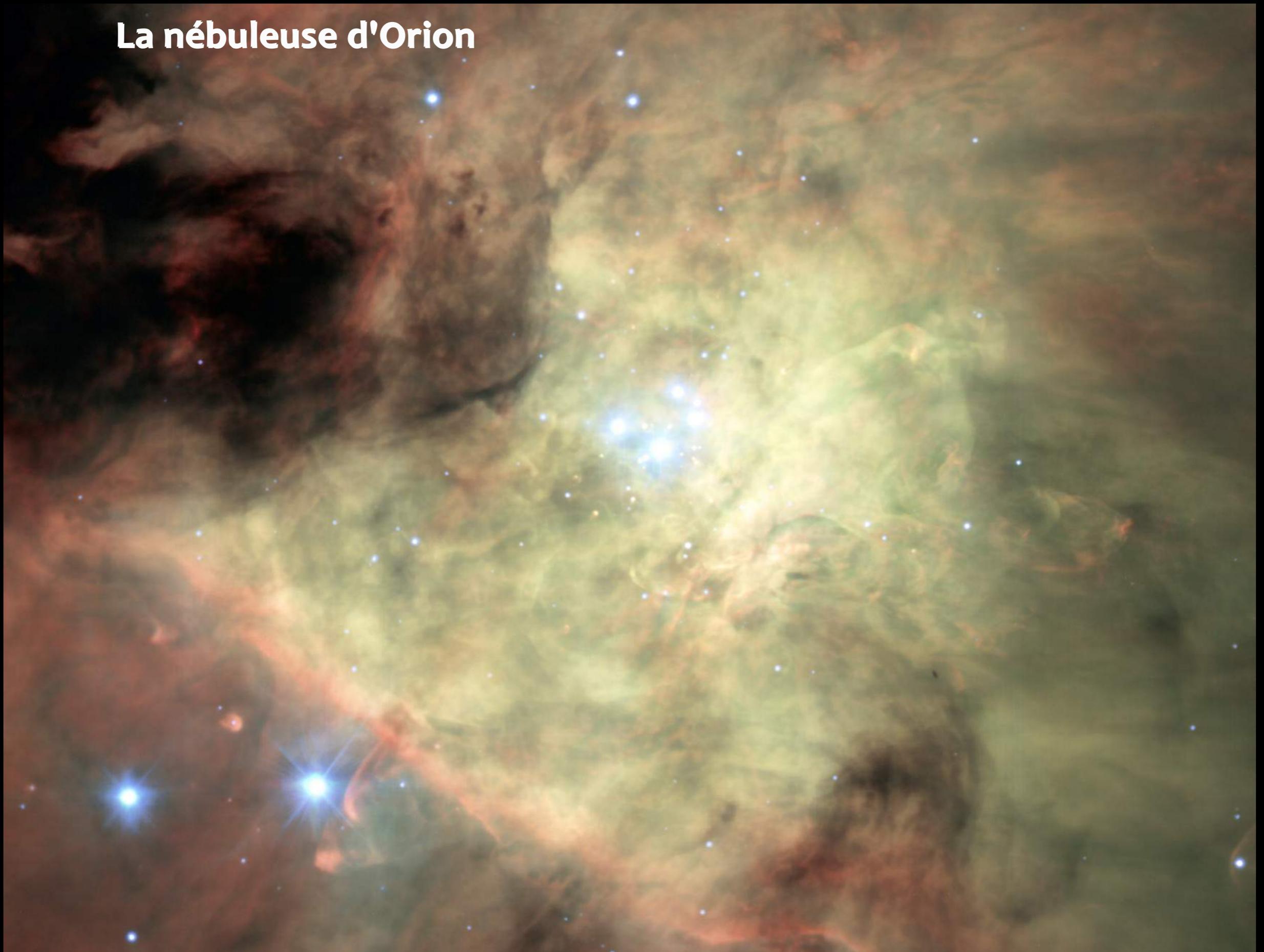
Lützgendorf, Kissler-Patig et al. 2013

MUSE

- 1x1 arcminute @ 0.2"
- 465-930nm, R~3000
- 90,000 spectres pas pose
- 35 % efficacité
- Travaillera avec l'optique adaptative

PI: Roland Bacon

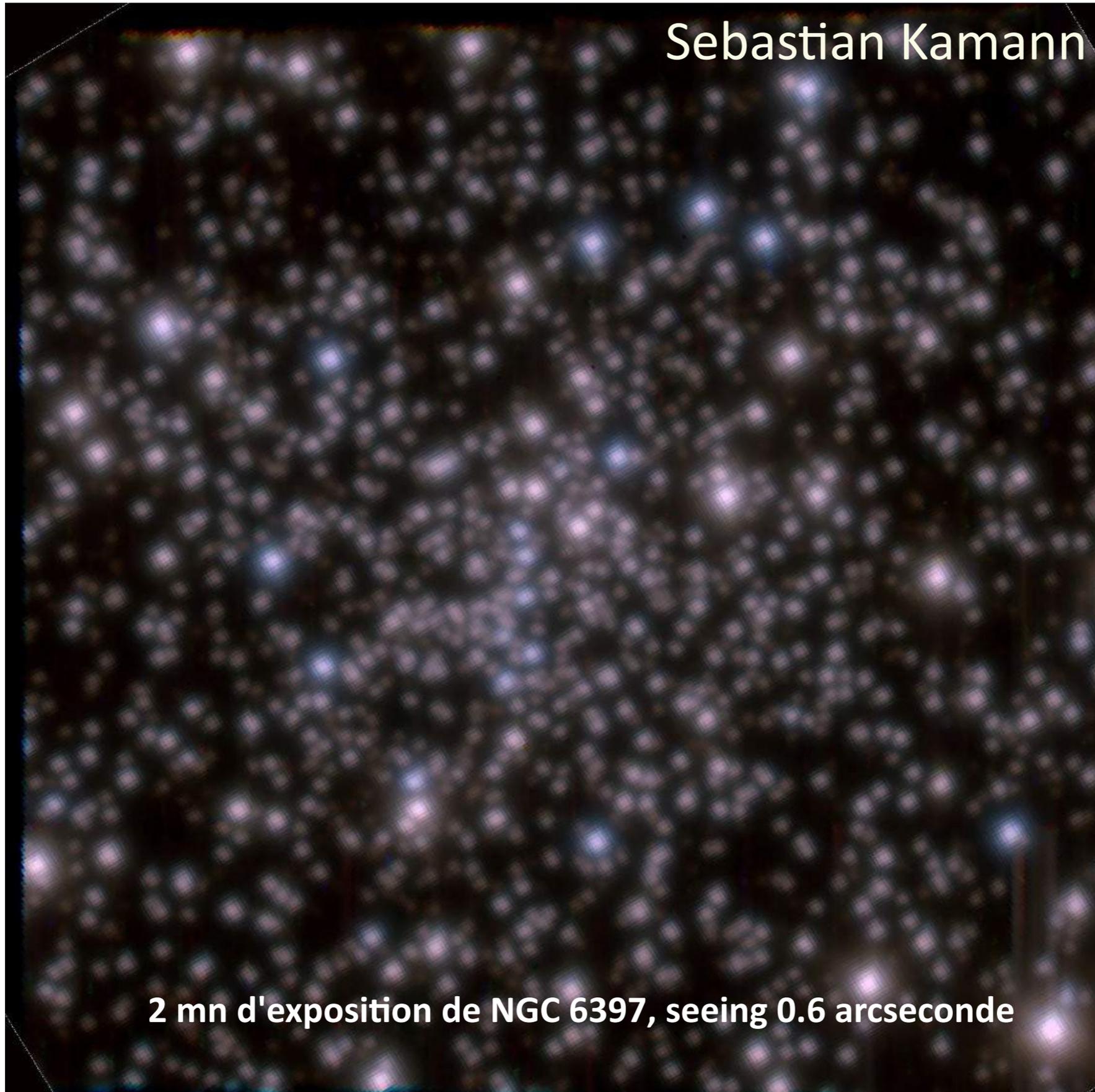
La nébuleuse d'Orion



Peter Weilbacher, AIP

H β +OIII	Cont 5300	H α +NII
-----------------	-----------	-----------------

La vision MUSE

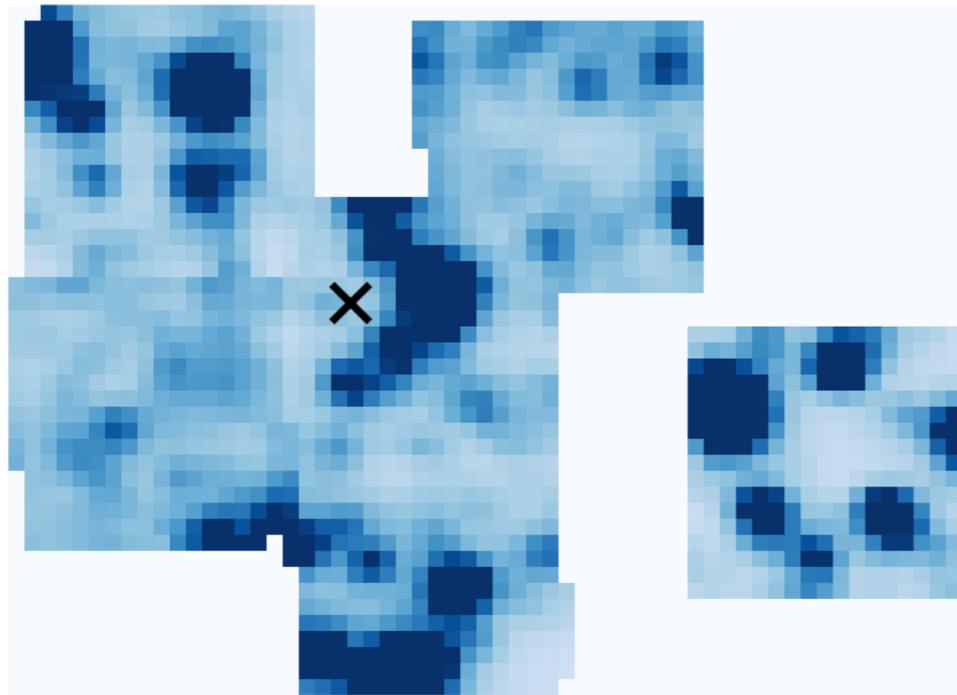


Sebastian Kamann

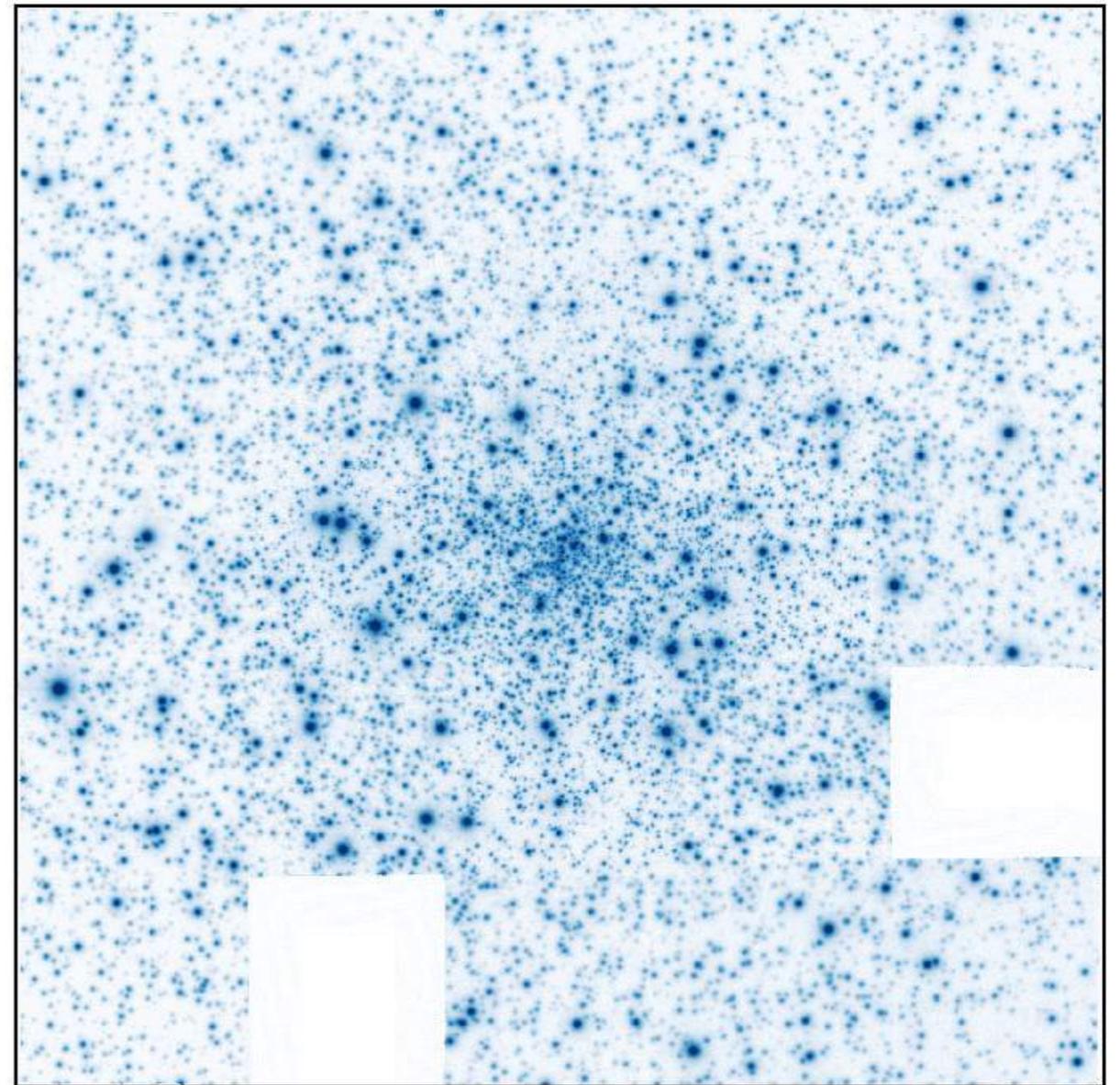
2 mn d'exposition de NGC 6397, seeing 0.6 arcseconde

Pourquoi MUSE révolutionne le domaine

- Plusieurs nuits avec PMAS



- Moins d'une nuit avec MUSE



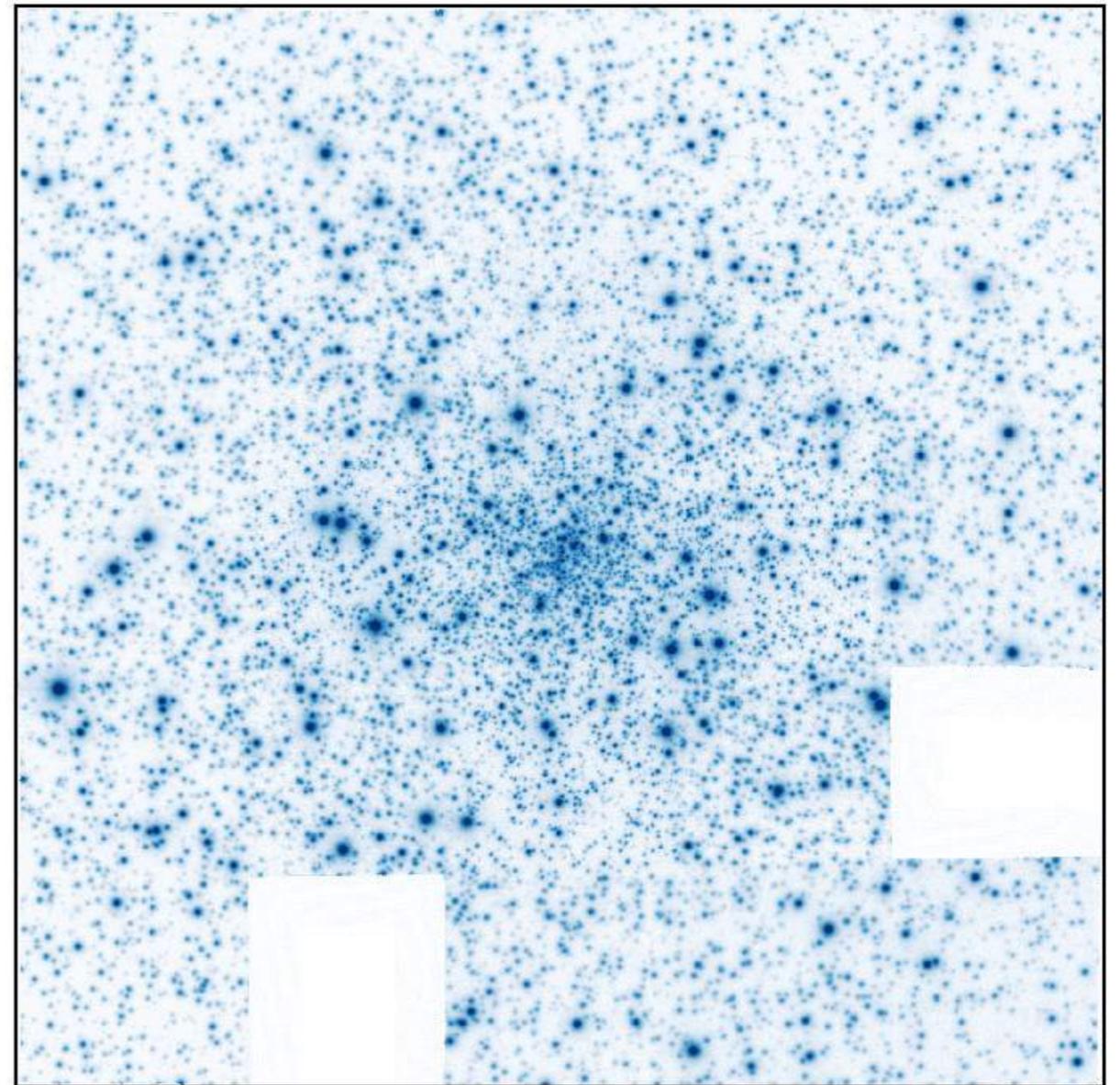
Kamann et al., 2015

Pourquoi MUSE révolutionne le domaine

■ Plusieurs nuits avec PMAS



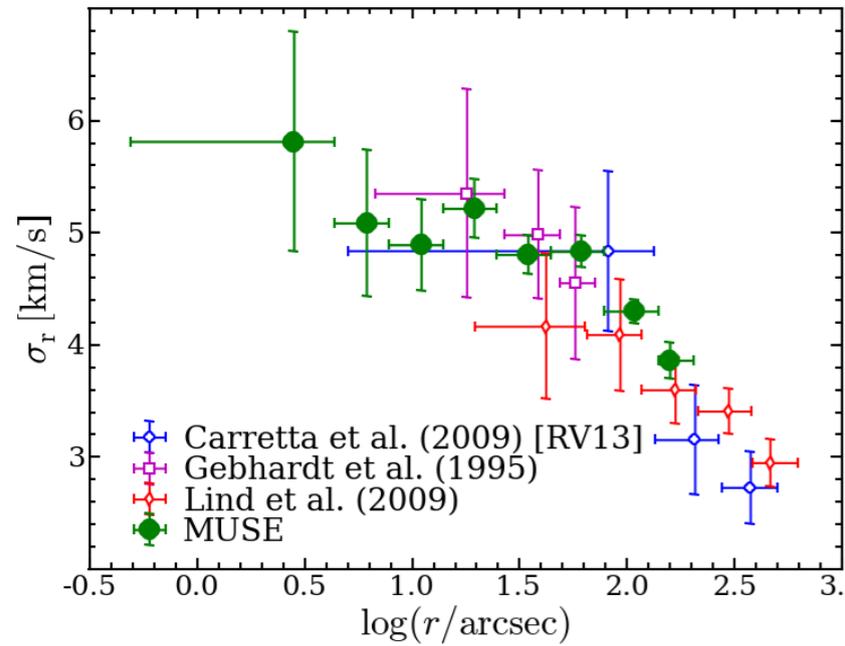
■ Moins d'une nuit avec MUSE



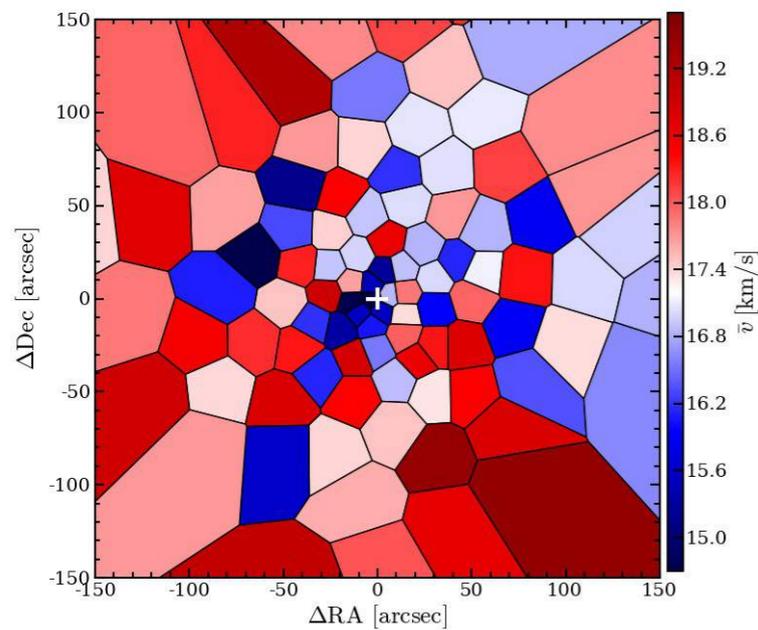
Kamann et al., 2015

Cinématique interne

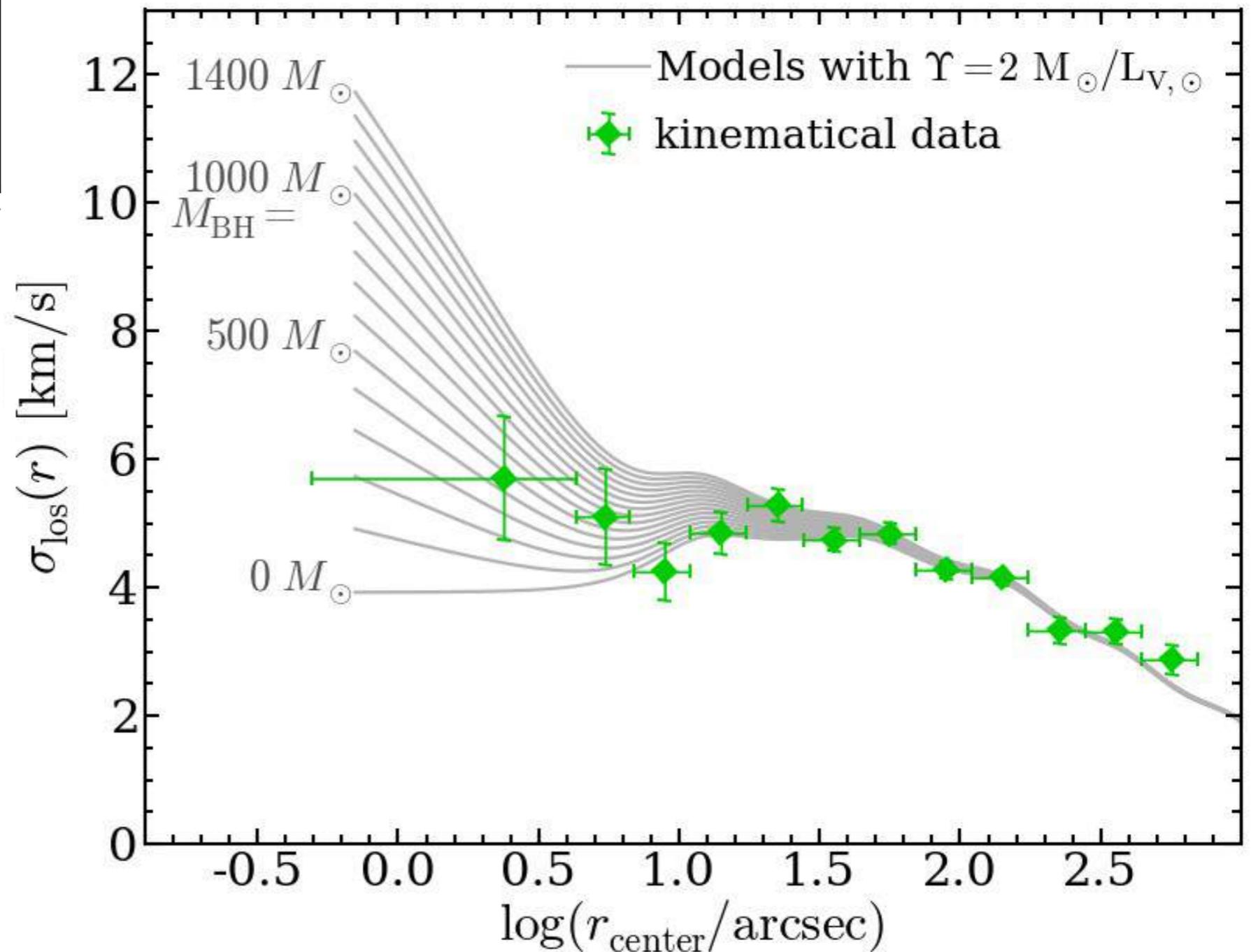
Dispersion



Rotation

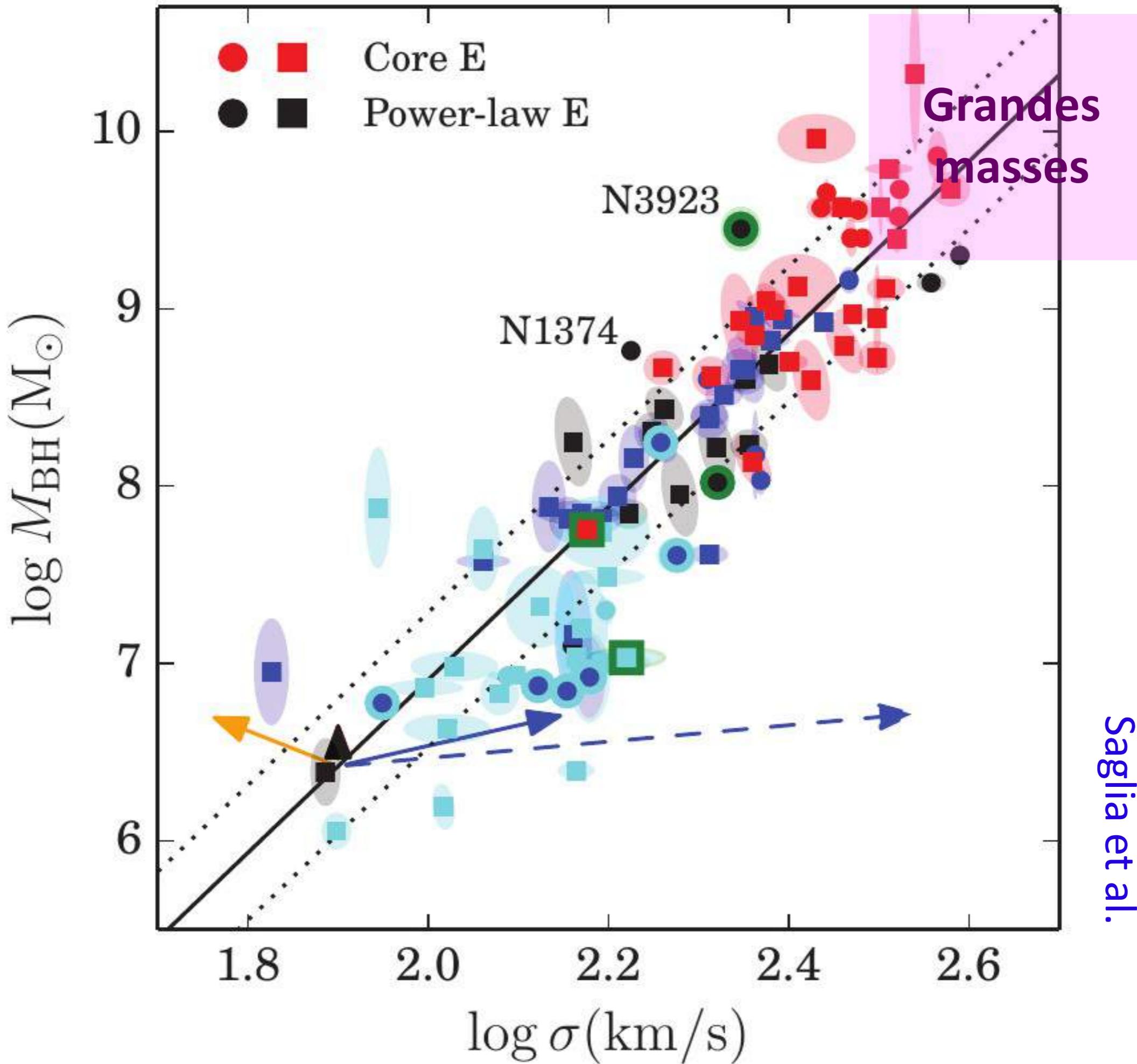


Grille de modèles dynamiques simples

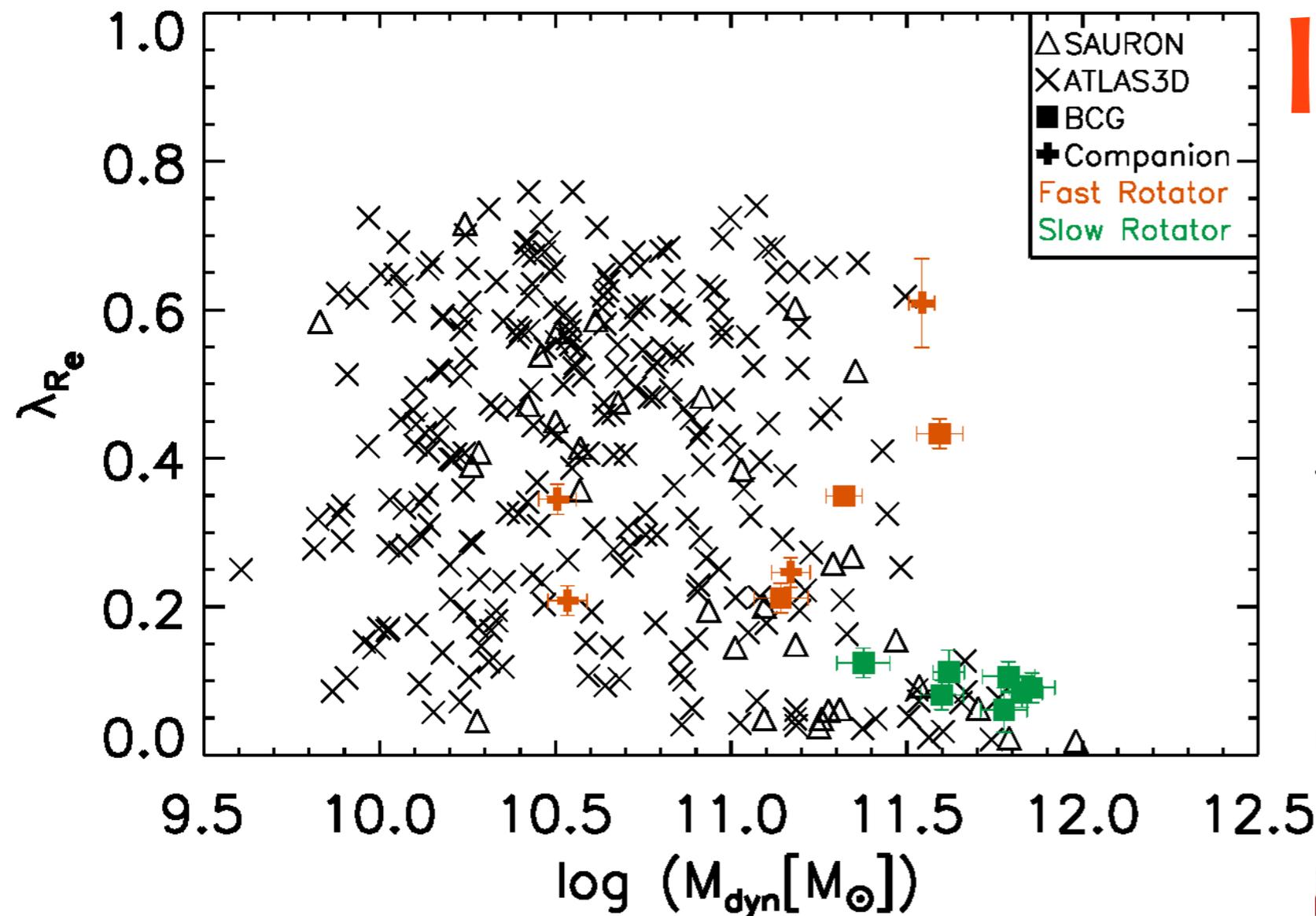


Kamann et al., 2016

La relation $M_{bh} - \sigma$



$\log_{10}[M] > 11.5$

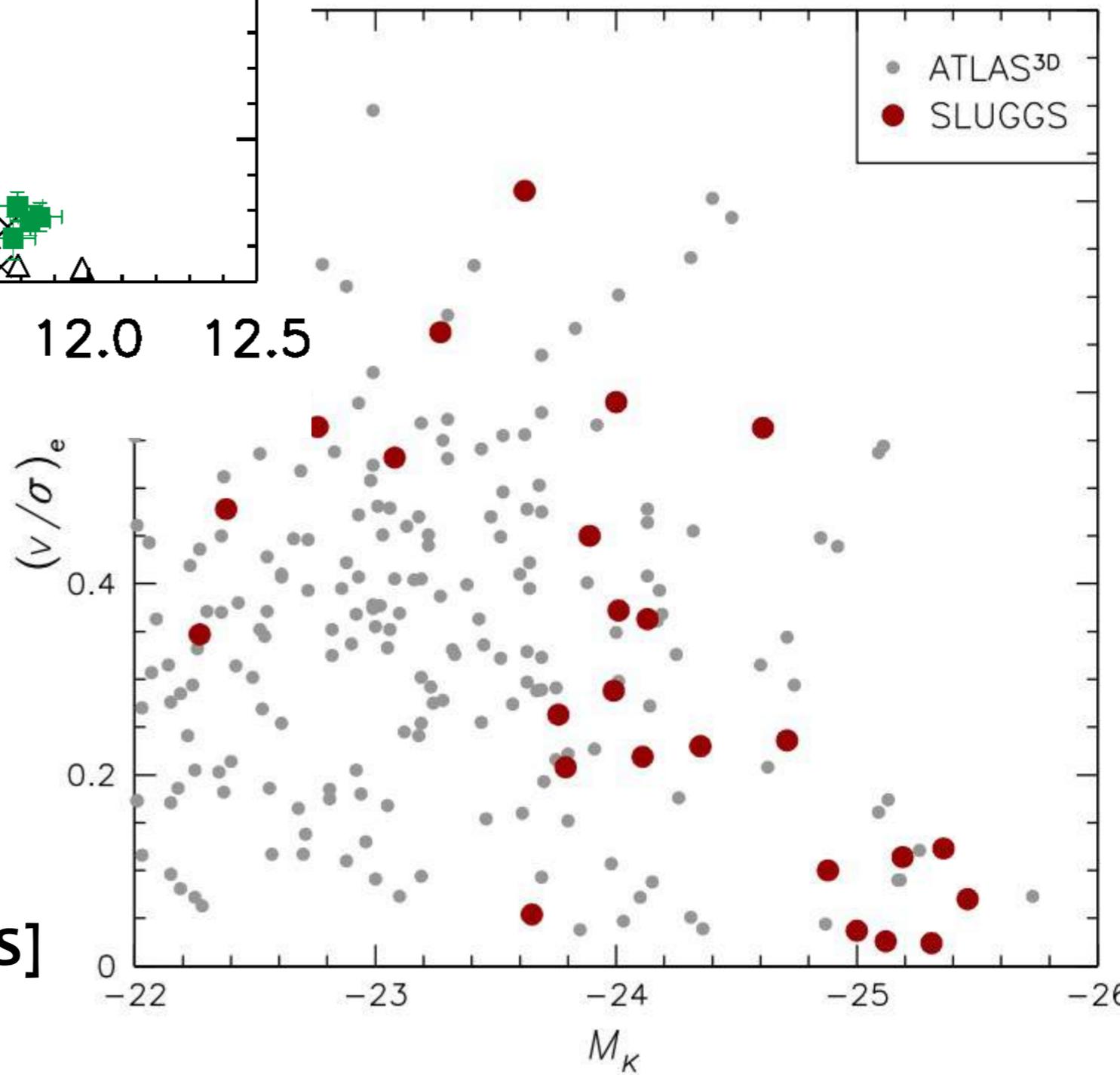


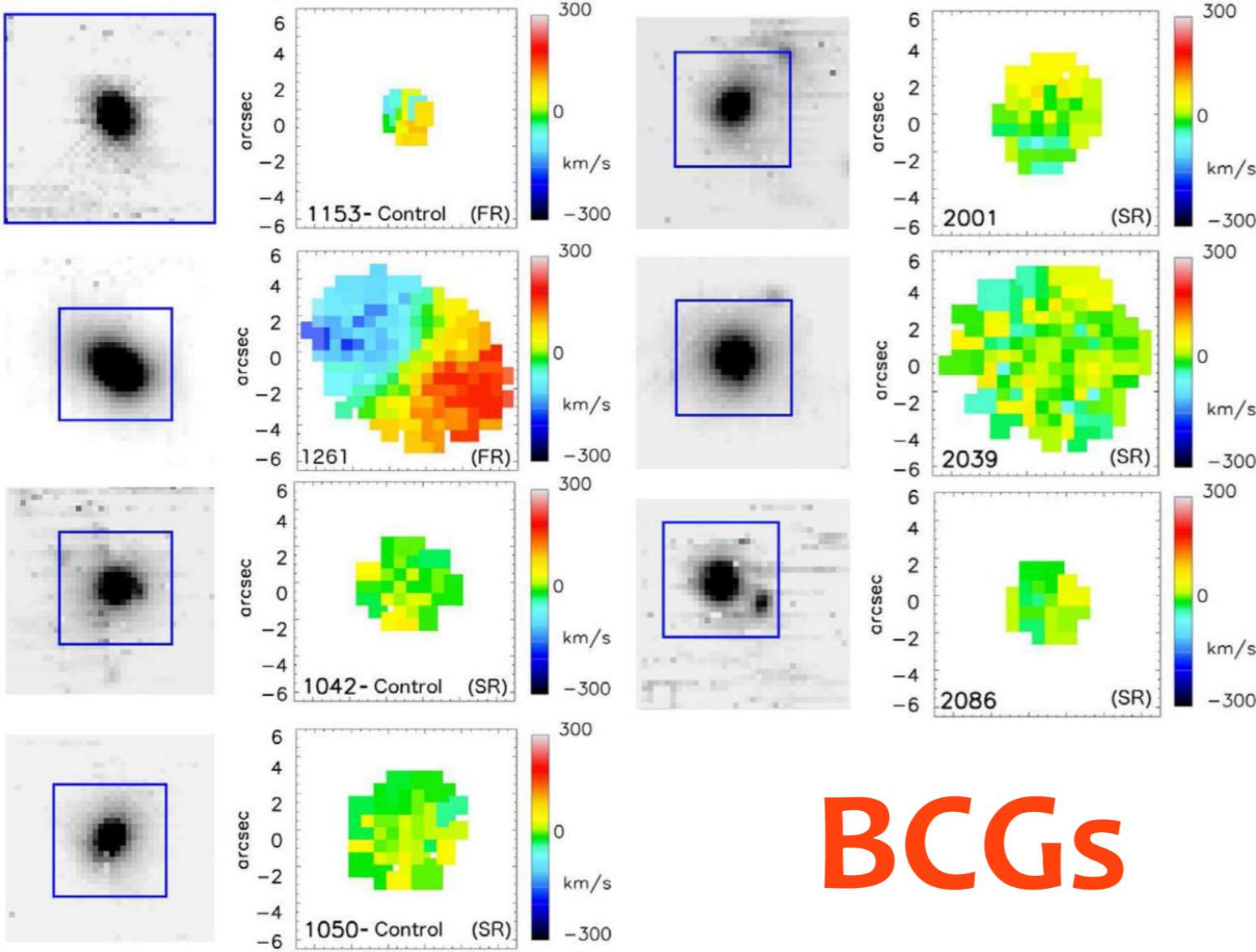
Jimmy, Brough et al. 2013

[VLT/VIMOS]

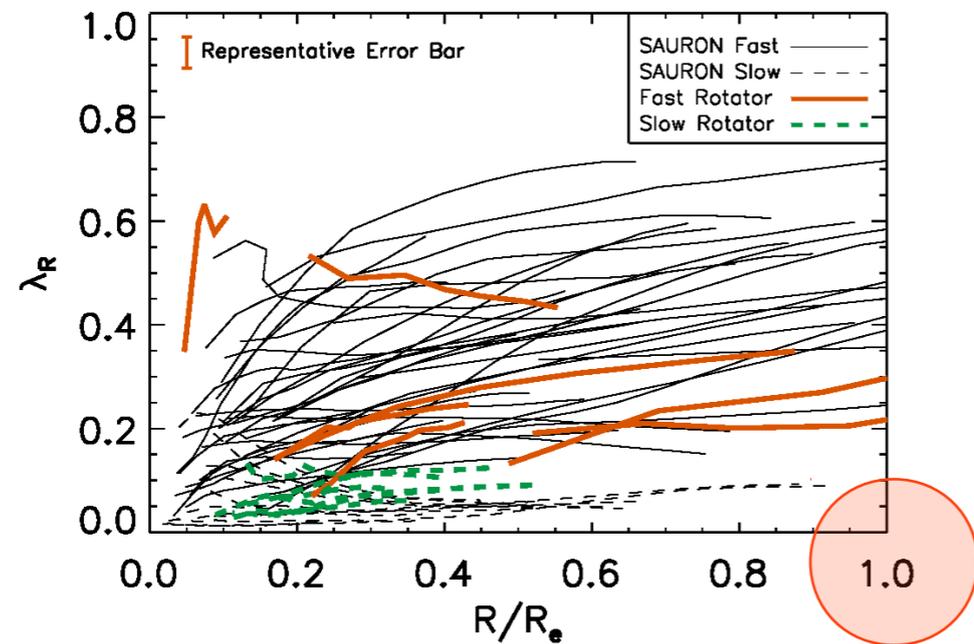
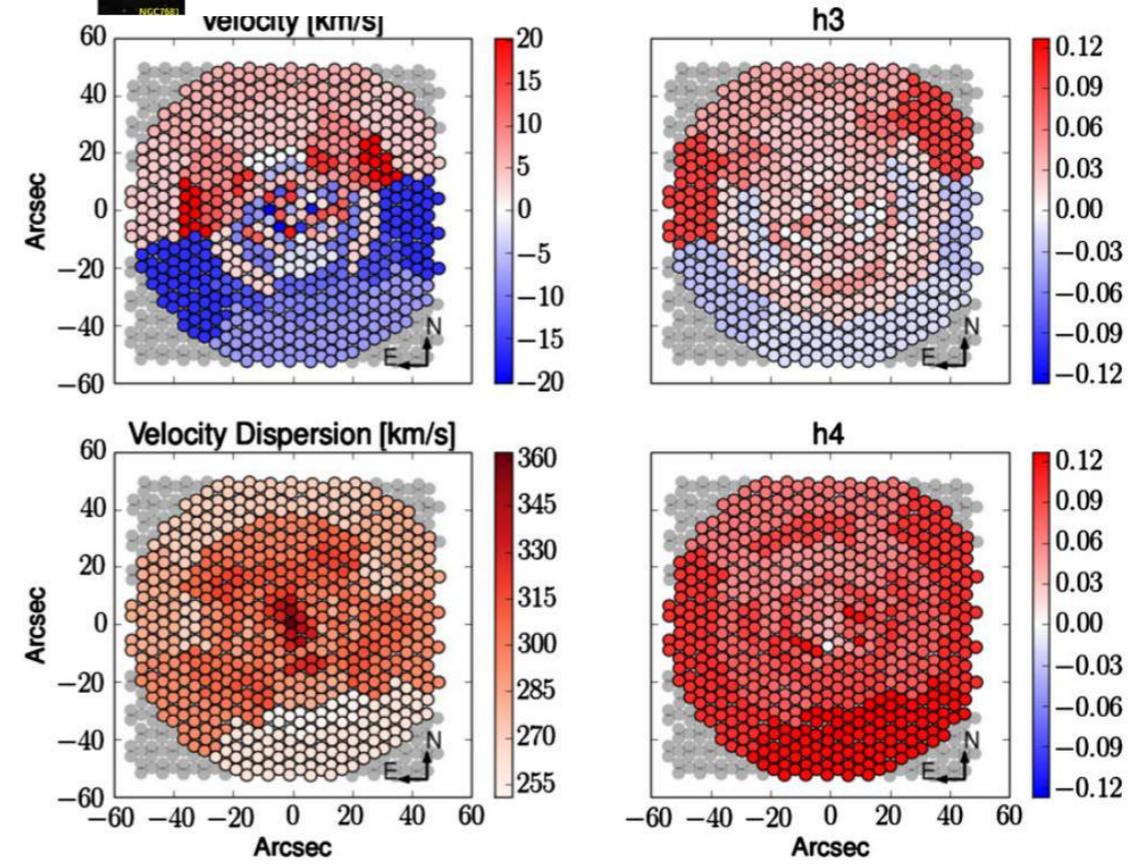
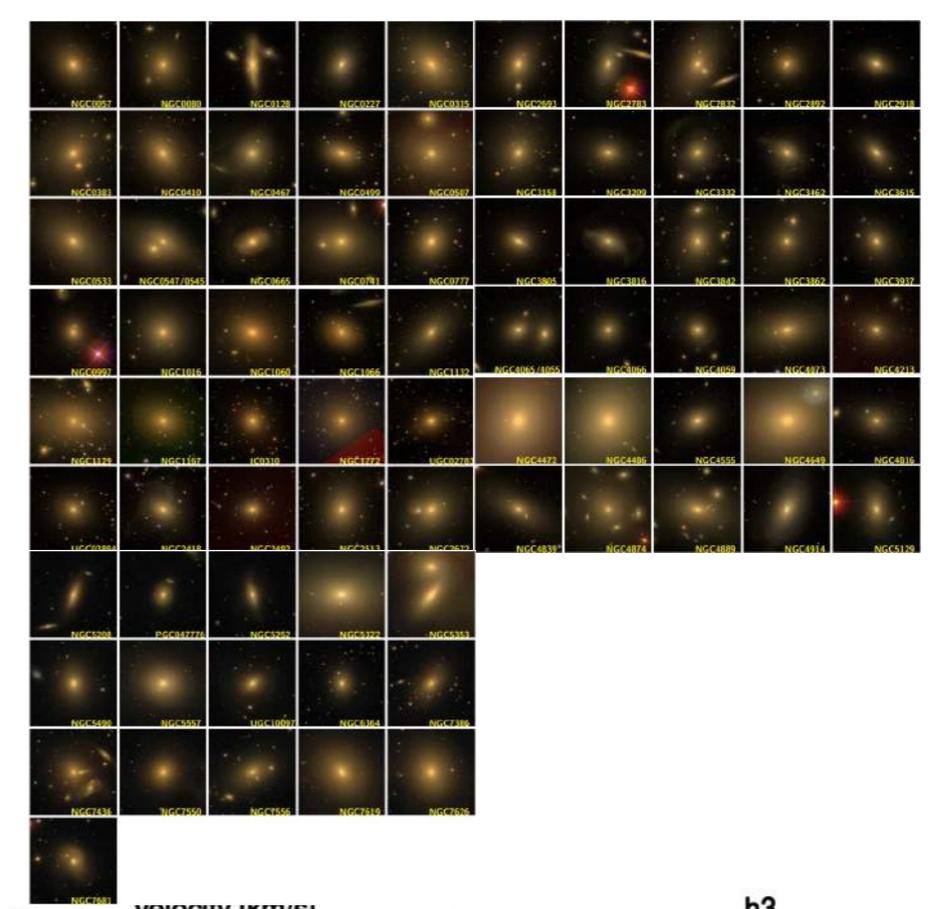
Brodie et al. 2014

[SLUGGS- Keck/DEIMOS]





BCGs



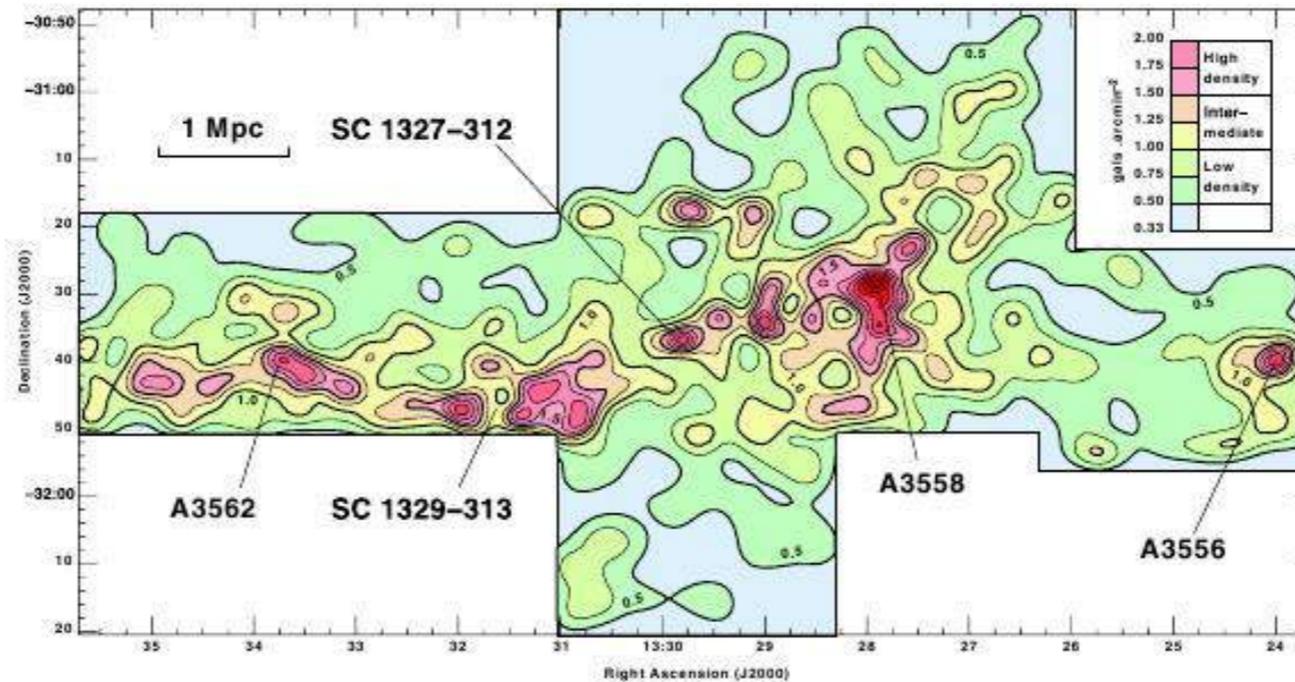
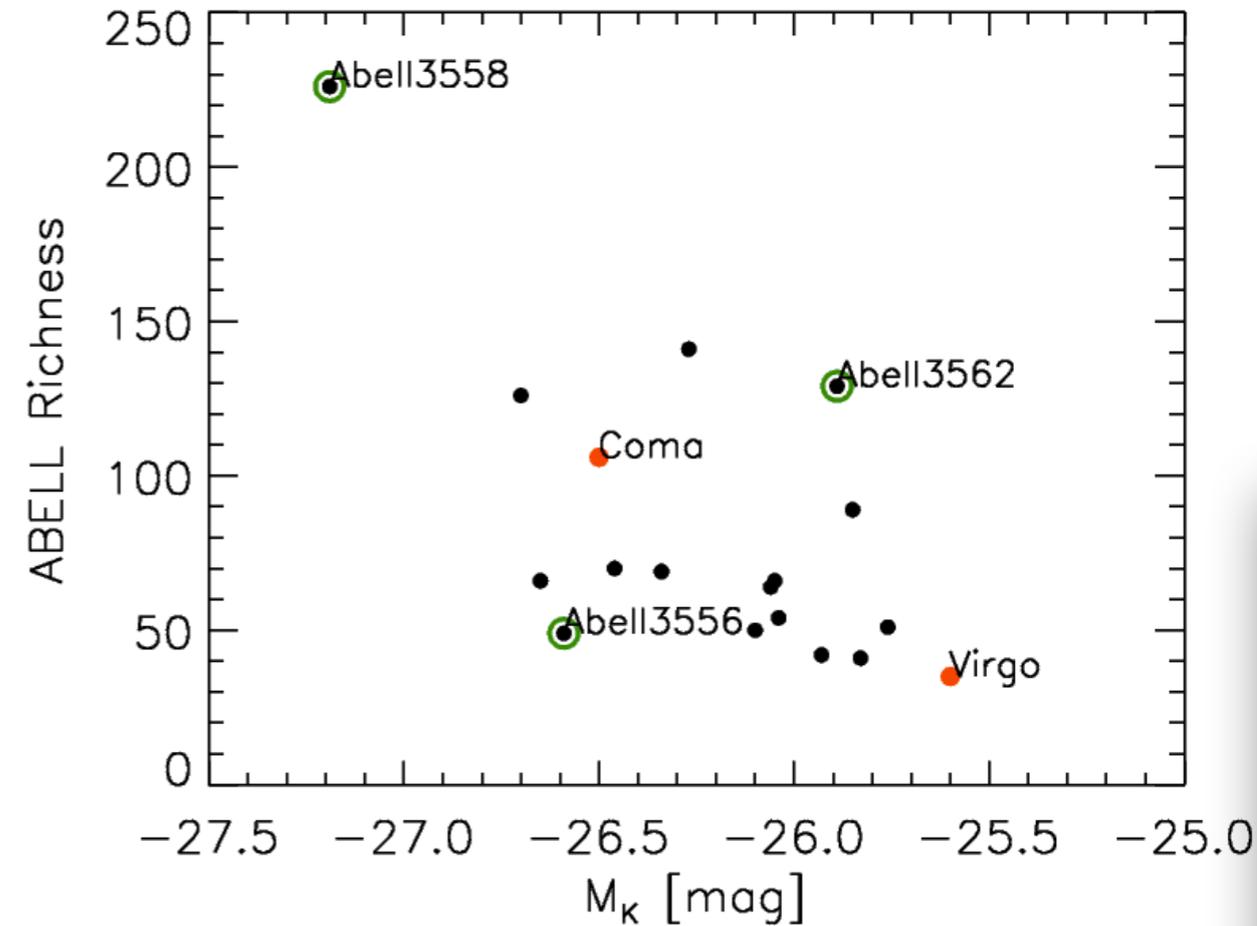
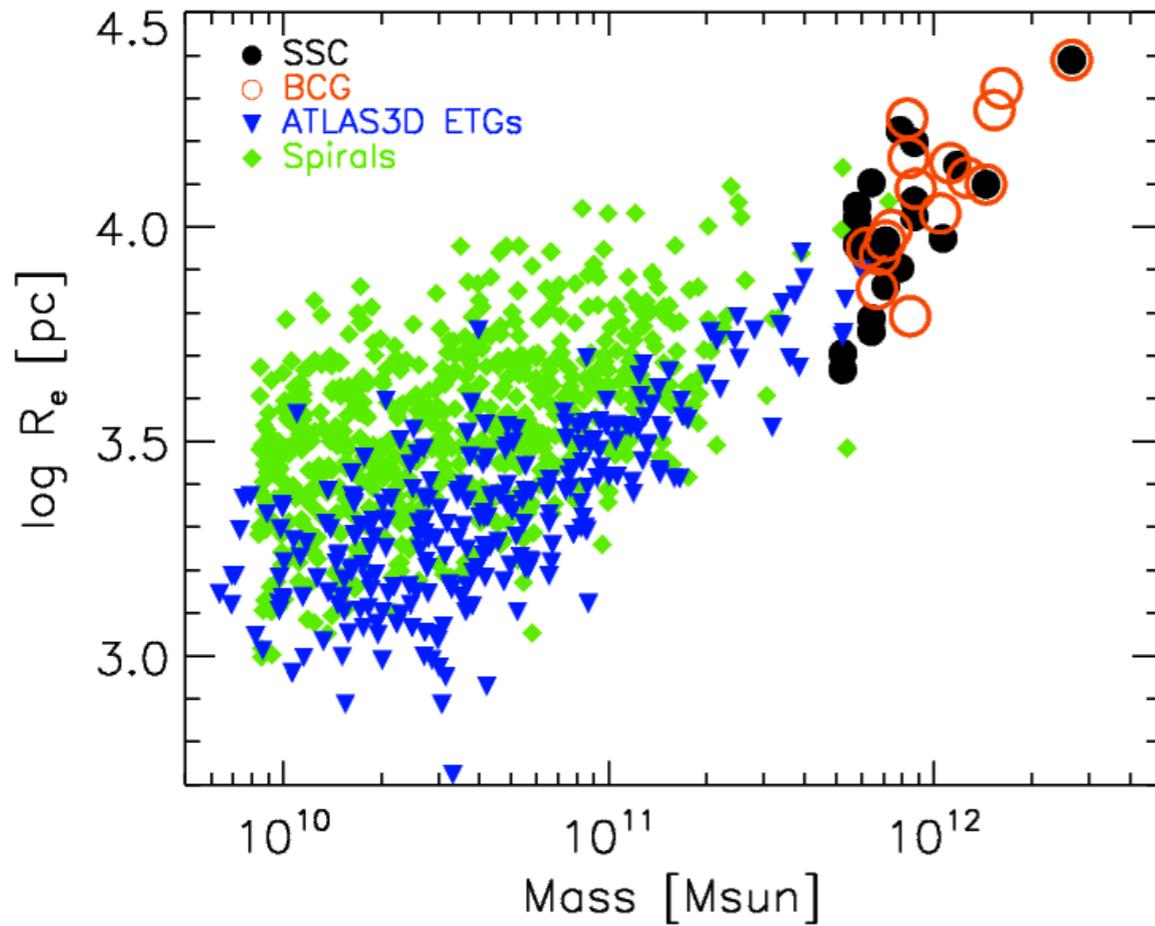
Jimmy, Brough et al. 2013
[VLT/VIMOS]

Ma et al. 2014
[MASSIVE – Mitchell Spec + AO-NIFS]

Le projet



Emsellem, Krajnović et al.



Le projet



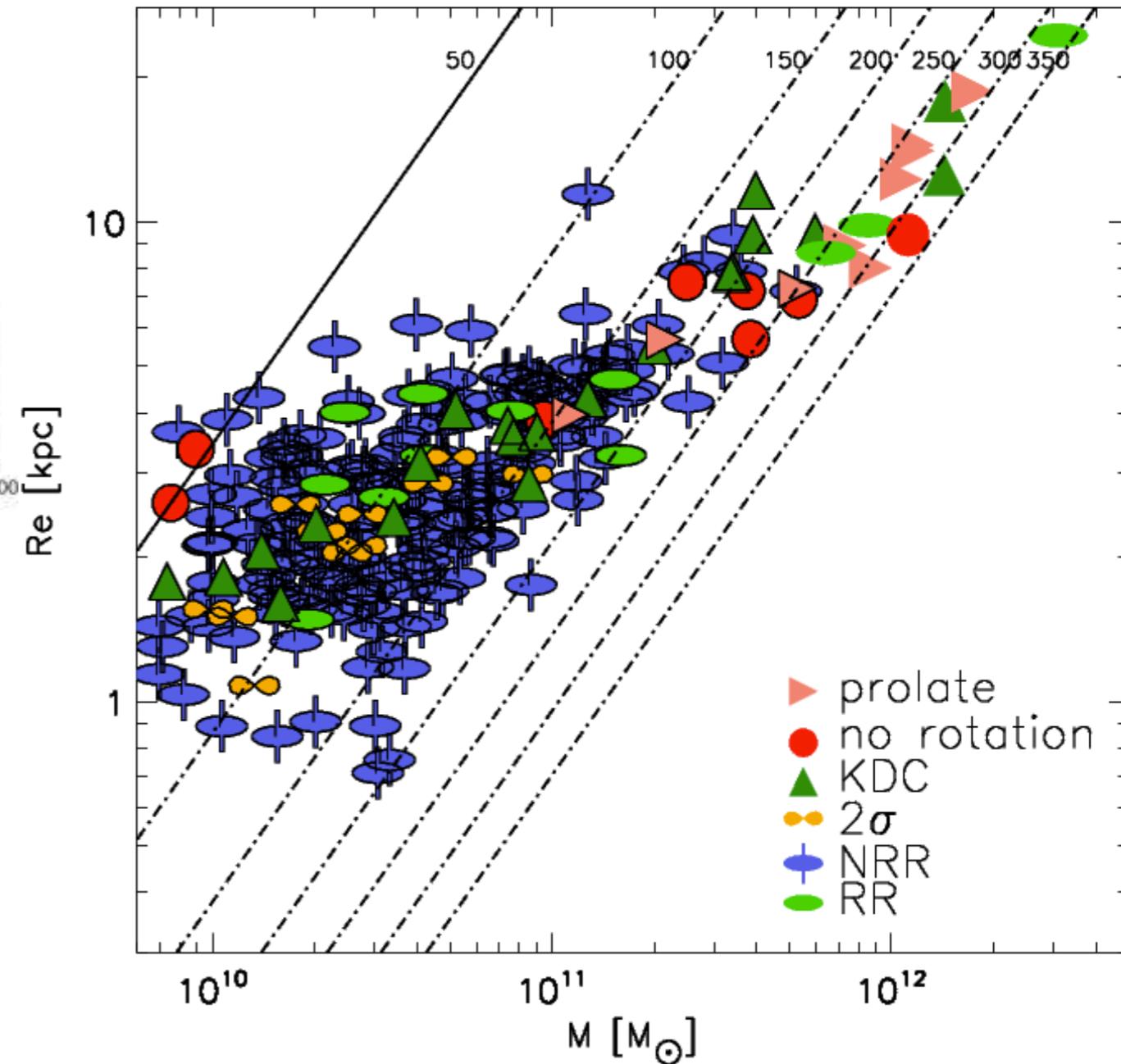
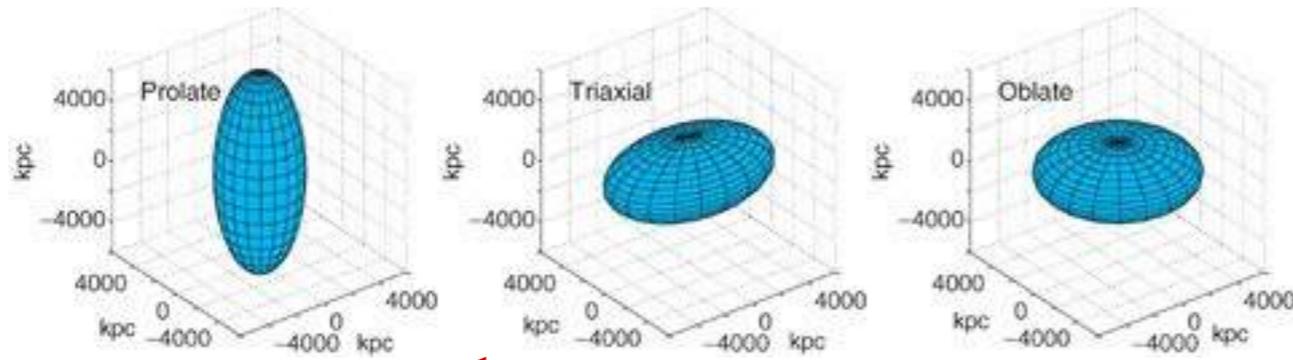
Emsellem, Krajnović et al.

La morphologie des galaxies change à grande masse

Oblate \Rightarrow Triaxiale \Rightarrow Prolate ?

Géométrie

Masse



Difficultés supplémentaires :

Modélisation ?

Distance (rayon d'influence...)

Que sait-on aujourd'hui ?

Les galaxies à sphéroïde ont un trou noir supermassif

⇒ mais pas une condition nécessaire

On comprend – statistiquement parlant – les populations de trous noirs supermassifs ($2-5 \cdot 10^5 M_{\odot} / \text{Mpc}^3$)

⇒ mais on ne sais pas encore ce qui domine leur formation/évolution

Des relations d'échelle existent

⇒ mais problèmes de mesure ⇒ dispersion de la relation peu robuste

⇒ Peu de contraintes à grande et petite masse

Le futur

Maintenant ⇒ MUSE, ALMA

Demain ⇒ James Webb, ELTs

Après demain ⇒ Campagnes en rayon X (Athena – 2028...), SKA

Relation d'échelle : Homogénéisation des données

Campagne en cours avec MUSE pour re-mesurer σ !!

Biais – Incertitudes

Trouver des références et comparer les méthodes