



COLLÈGE
DE FRANCE
—1530—

Chaire Galaxies et Cosmologie

Physique des Amas de Galaxies



K. Dolag

Françoise Combes



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

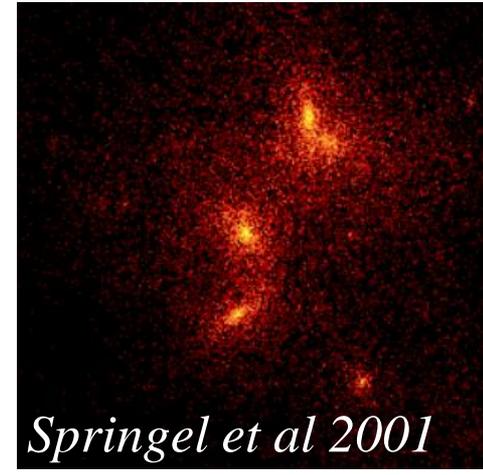
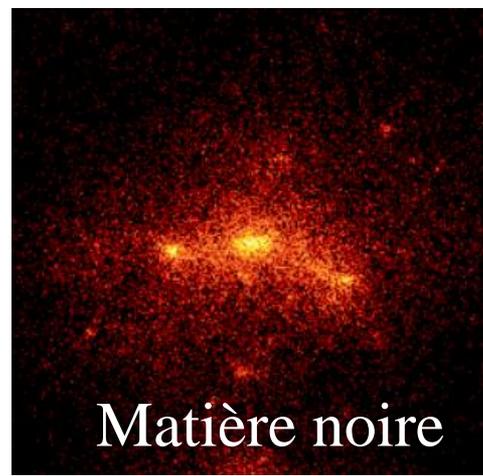
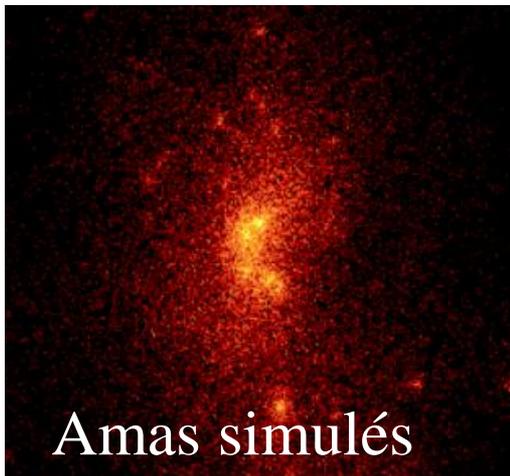
Connaître mieux la physique

Amas de galaxies: les plus grandes structures virialisées de l'Univers

Comment les amas se forment-ils? (gravité, refroidissement)

Quelle est leur forme intrinsèque? Leur masse? contenu en baryons?

Fréquence des sous-structures: fusions ou accrétion?



→ Outil cosmologique: Amplitude σ_8 , Ω_m , taux de formation avec $N(M,z)$, M/L , dM/dt

→ Gravité modifiée?

→ Mieux connaître la matière noire $M(r)$, $M/L(r)$, baryons?

Les outils et les surveys

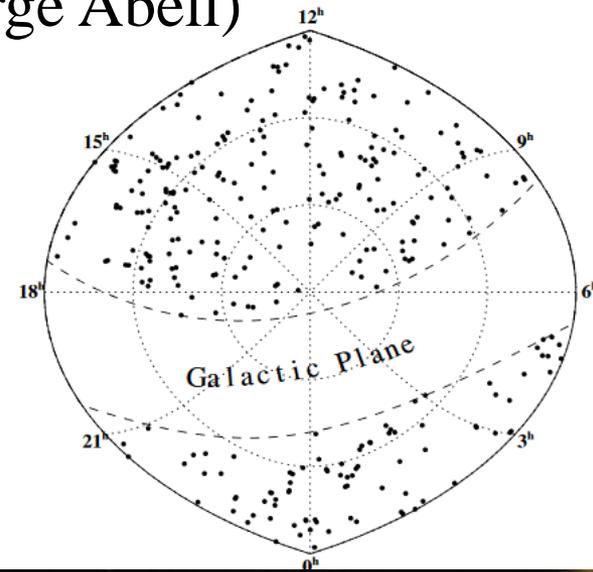
Premiers temps 1930-90: optique, photométrie et spectroscopie
(9100 amas de Fritz Zwicky, 4700 amas de George Abell)

Rayons-X, ROSAT (1990-2000) survey
systématique de tout le ciel, 300 amas (eBCS)

Effet Sunyaev-Zeldovich (2000-18)
~1600 amas par Planck

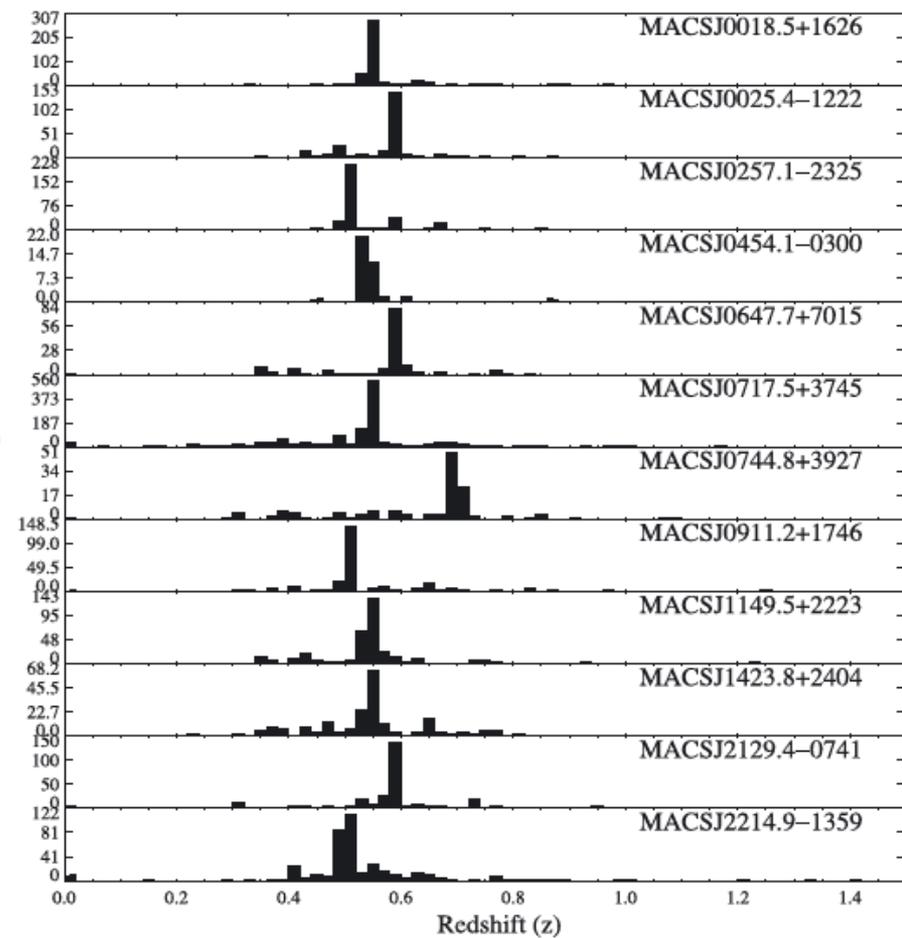
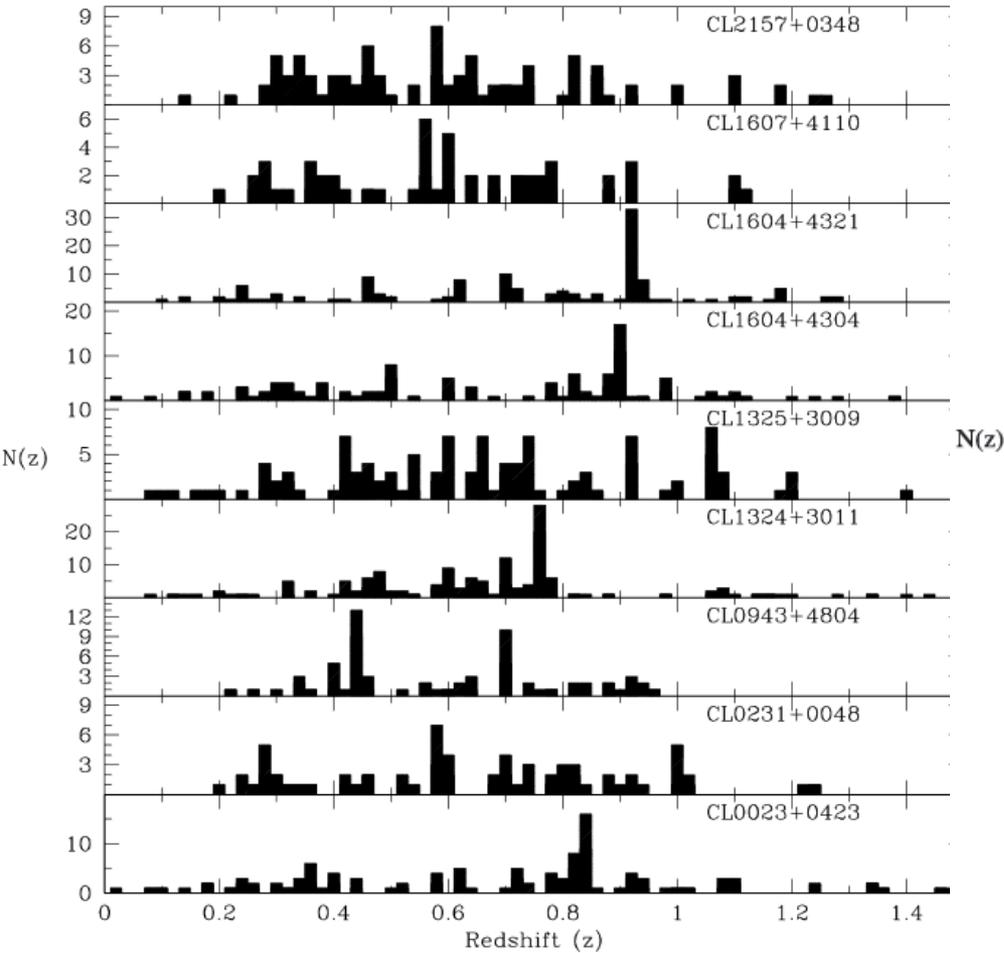
Lentilles gravitationnelles (1987-2018)
– Cartographie de la matière
totale → matière noire

Simulations numériques



Abell 370

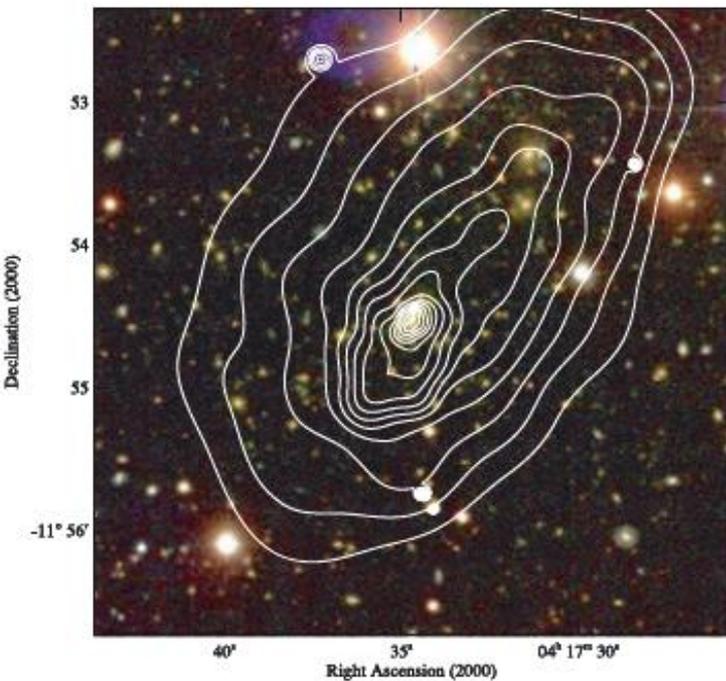
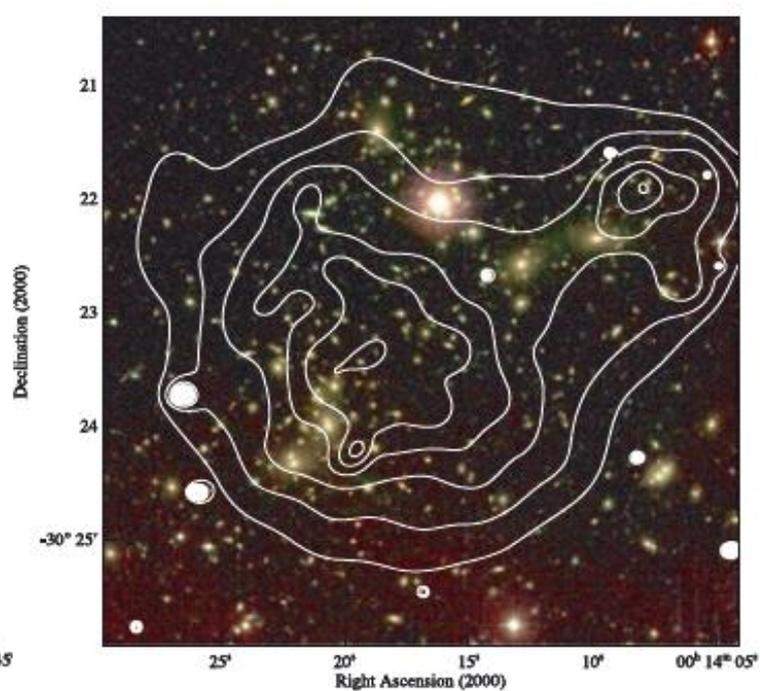
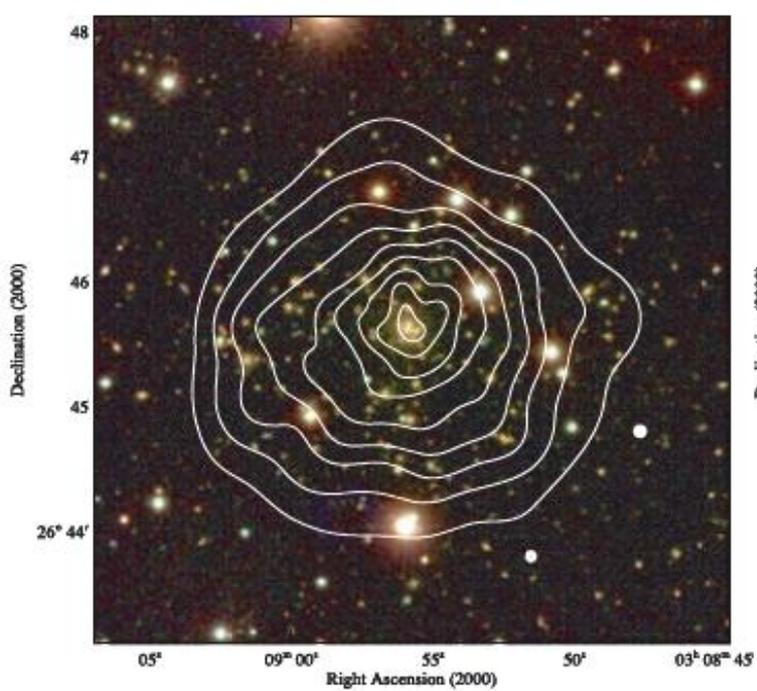
Comparaison des histogrammes $N(z)$: les surveys optiques souffrent de contamination (avant-plan, arrière-plan)



Redshift $0 < z < 1.5$ (mêmes critères de sélection)

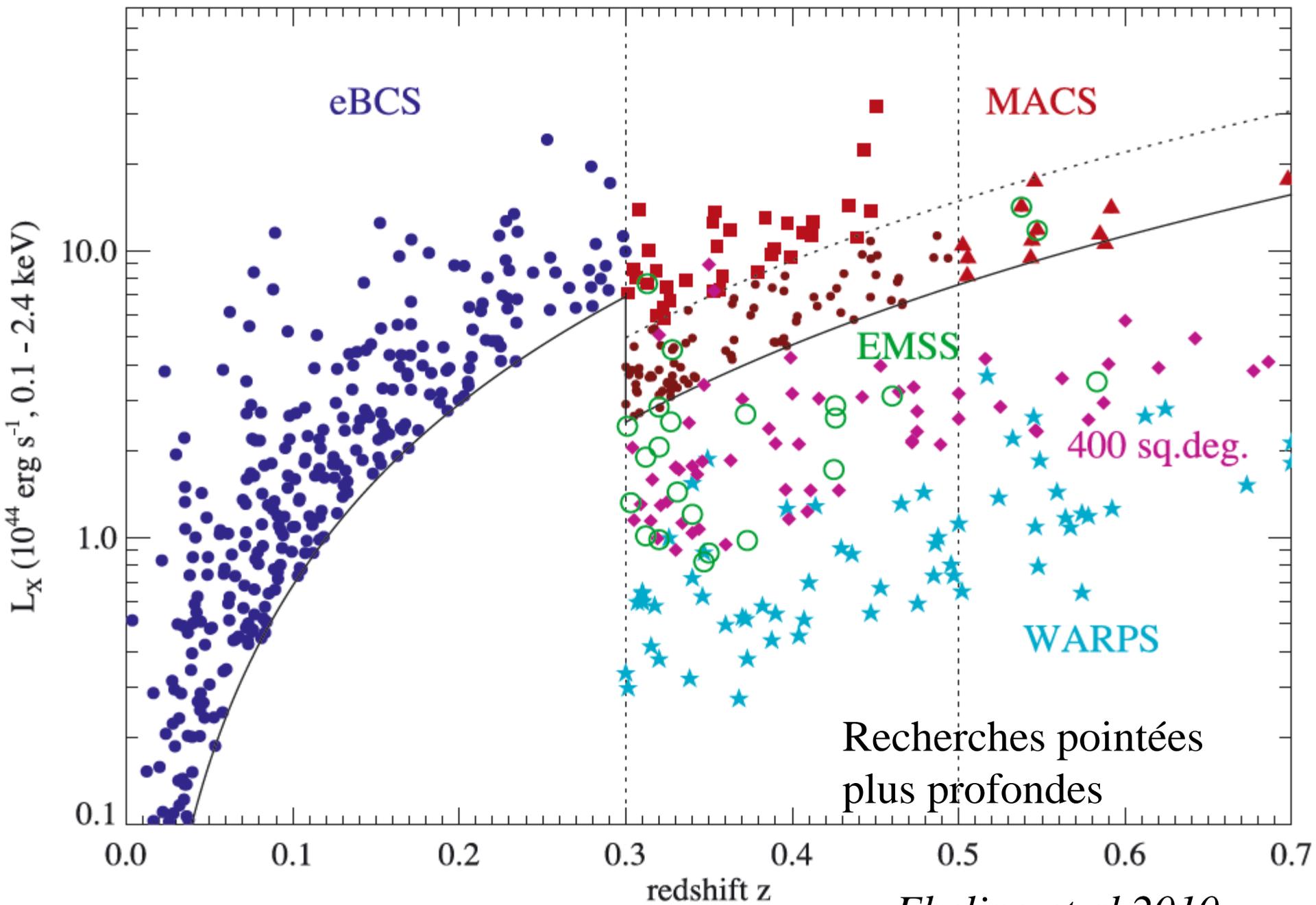
Oke et al 1998

Ebeling et al 2010



Contours: 0.5-7keV de Chandra
 Sur images optiques (V, R, I)
 Boîtes de 1.5 Mpc

Ebeling et al 2010



Ebeling et al 2010

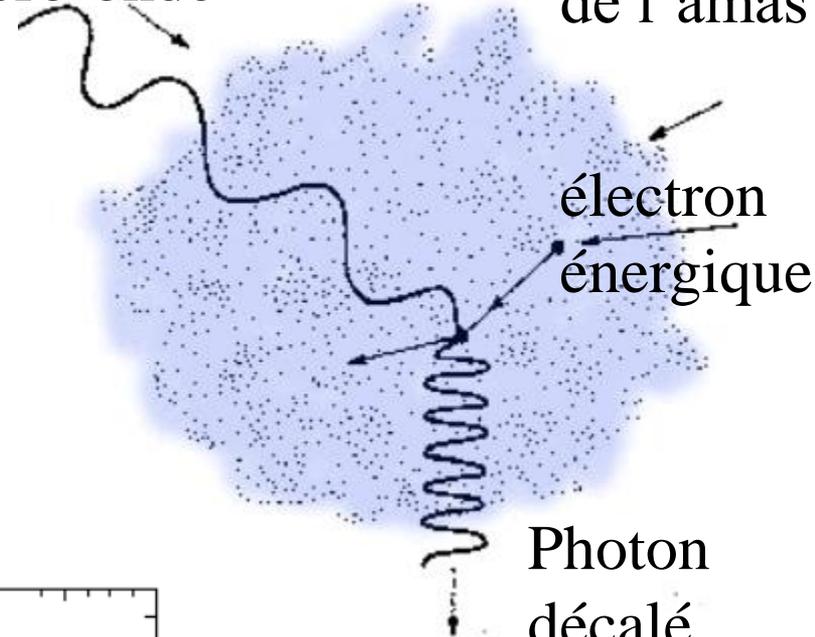
Effet Sunyaev-Zeldovich (SZ)

Diffusion Compton inverse,
 → donne de l'énergie au photon

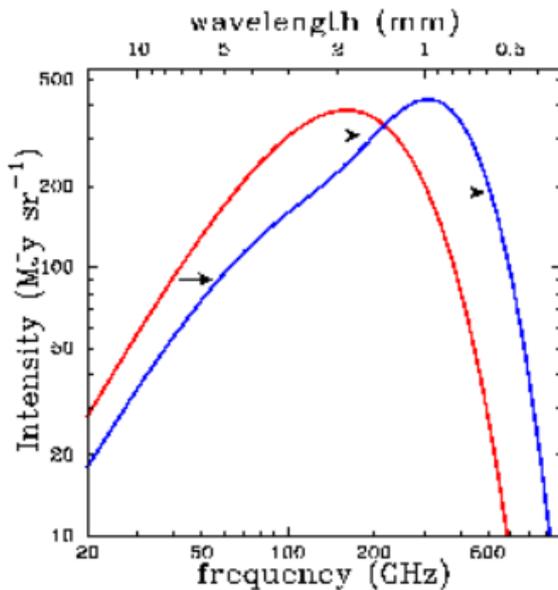
Indépendant du redshift, facile
 de détecter des amas à grand z
 Plus loin qu'avec les rayons X

Photon
 micro-onde

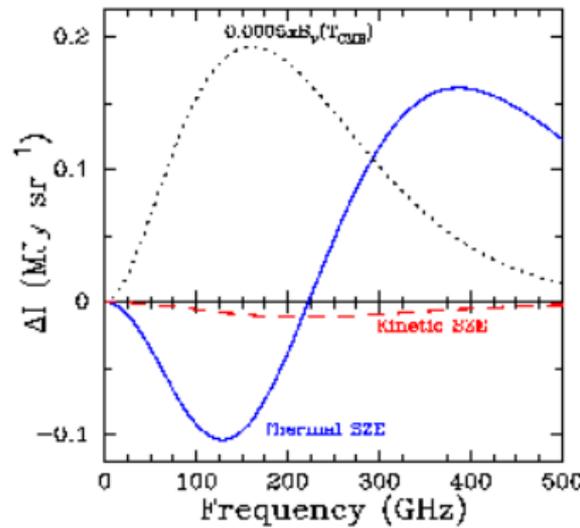
Gaz chaud
 de l'amas



Photon
 décalé
 vers le bleu



(a)

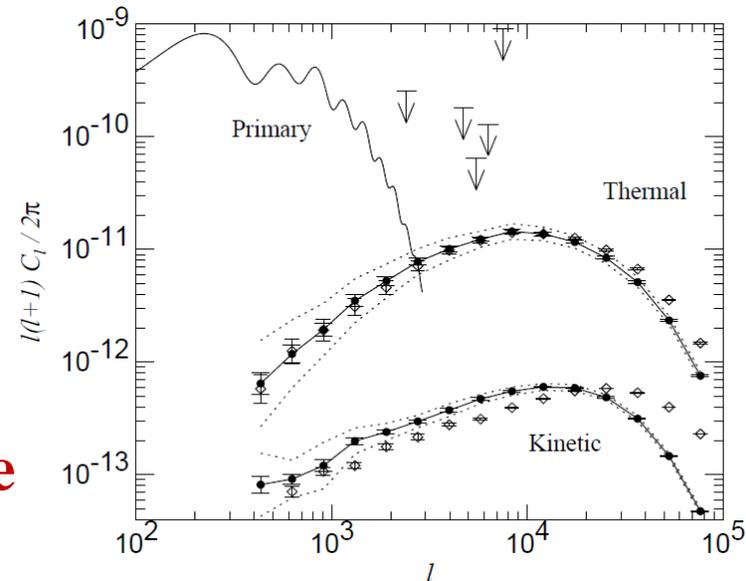
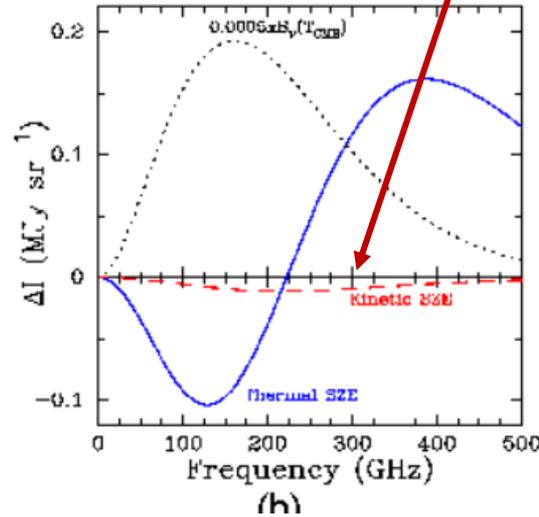
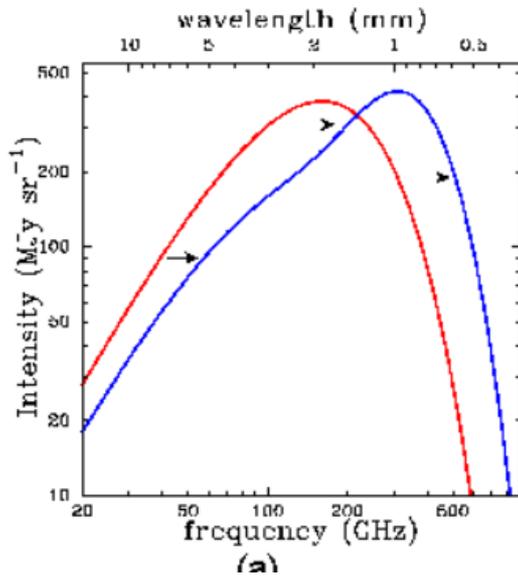


(b)



Effet SZ cinétique

En plus de l'effet SZ principal (dit thermique), il y a aussi un effet cinétique, dû au mouvement de l'amas dans le référentiel du fonds micro-onde → la diffusion par les électrons crée alors un effet Doppler des photons



→ Dispersion de vitesse à grande échelle

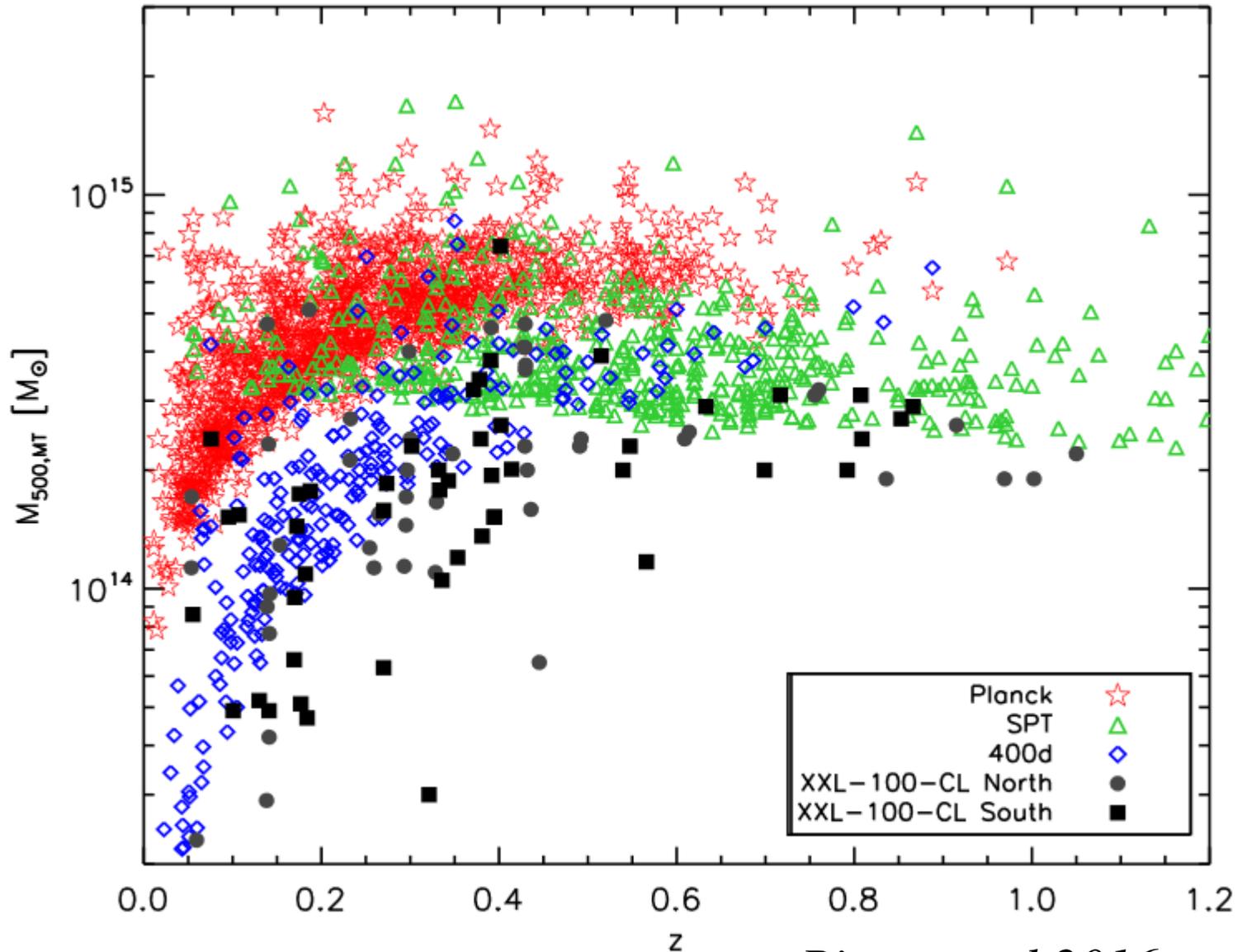
Comparaison des diverses méthodes

Effet SZ

Planck, SPT

Optique

XXL

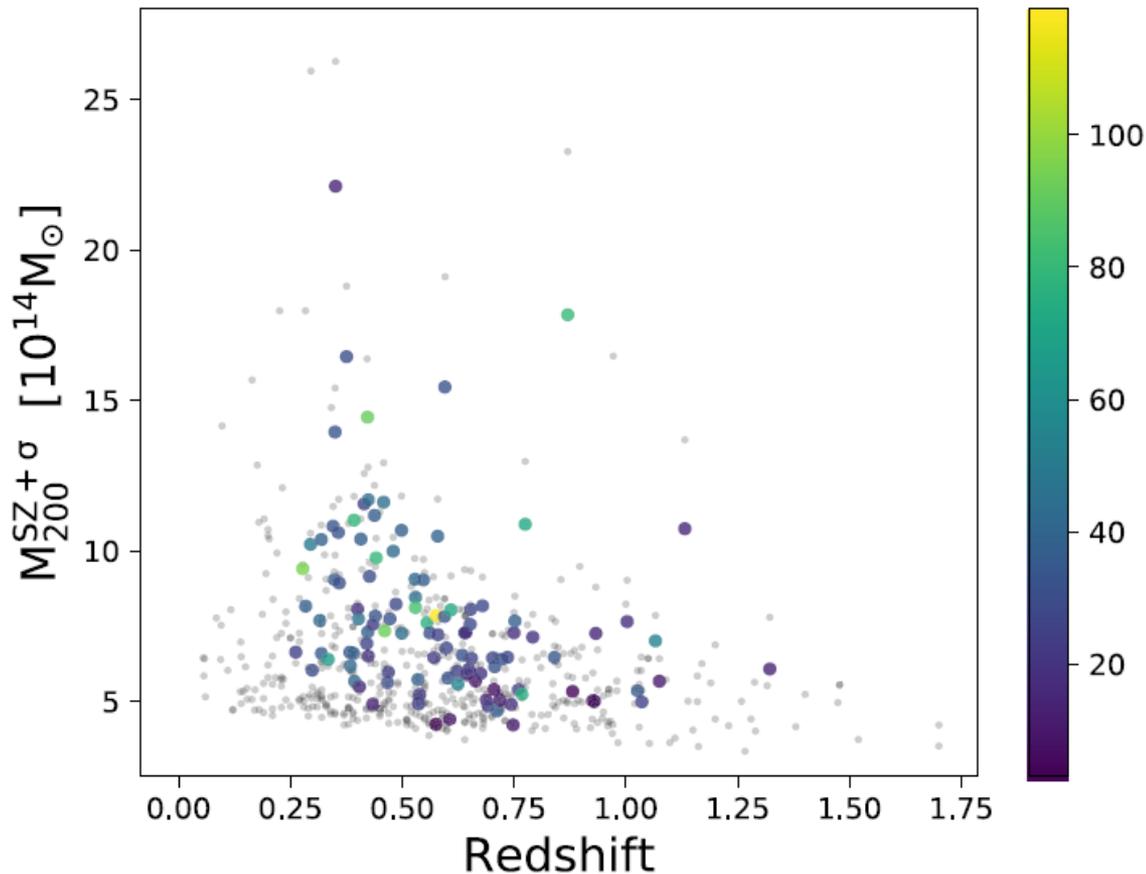


Pierre et al 2016

Etude statistique de 110 amas (3000 galaxies)

Survey de $2500^{\circ 2}$ du télescope SPT (South Pole Telescope)

Amas détectés par effet SZ, avec $0.2 < z < 1.3$



Couleur=
Nombre de galaxies
membres de l'amas
(suivi spectro)

Point noirs:
Ensemble des amas-SZ

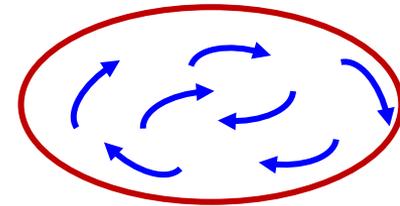
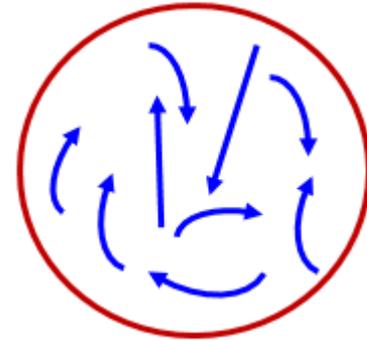
Capasso et al 2019

Distribution dans l'espace des phases: R - V

La distribution détaillée des vitesses des galaxies, en fonction de leur position dans l'amas, peut nous renseigner sur la formation de l'amas

S'il y a dissipation à partir de systèmes gazeux, il y aura des vitesses **tangentiels (rotation)**, et une anisotropie particulière

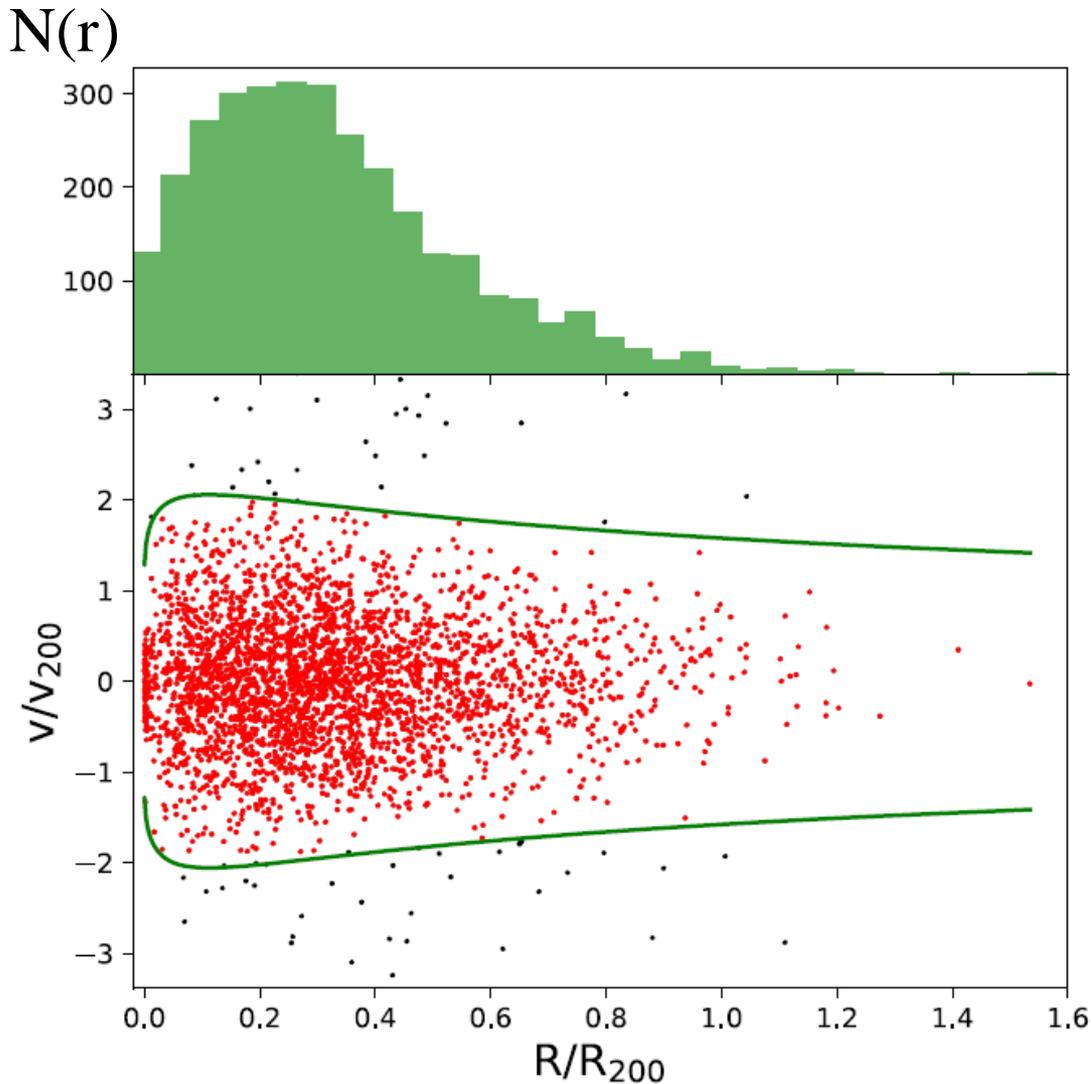
Sans dissipation, les vitesses sont plutôt **radiales**



Pour avoir plus de poids dans cette détermination, les amas vont être empilés, en prenant en compte leur masse (\rightarrow 3000 galaxies)

\rightarrow Première estimation de la masse requise
(mesure approchée par SZ intégré)

Eliminer les intrus



Distribution radiale
de galaxies
dans les amas
« normalisés »

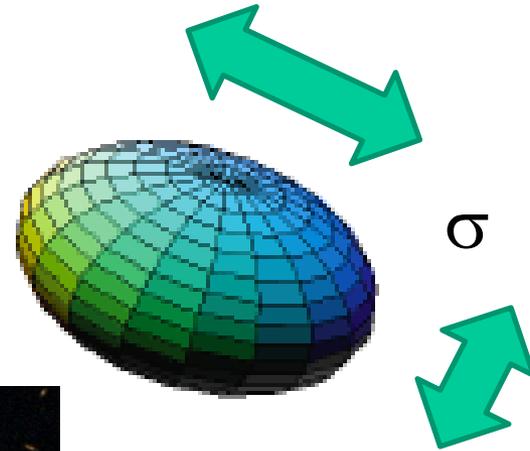
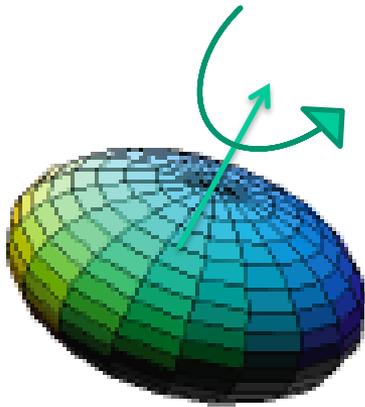
Vitesses radiales observées
et profil $V(r)$ servant de
Filtre

Après une première
estimation de la masse
avec SZ $\rightarrow R_{200}$

Amas et Galaxies Elliptiques

Parallèle avec les galaxies elliptiques, qui ne tournent pas
Mais sont aplaties par dispersion de vitesses anisotrope

Cette propriété vient de leur formation par fusion
Les amas se forment aussi par fusion et accrétion

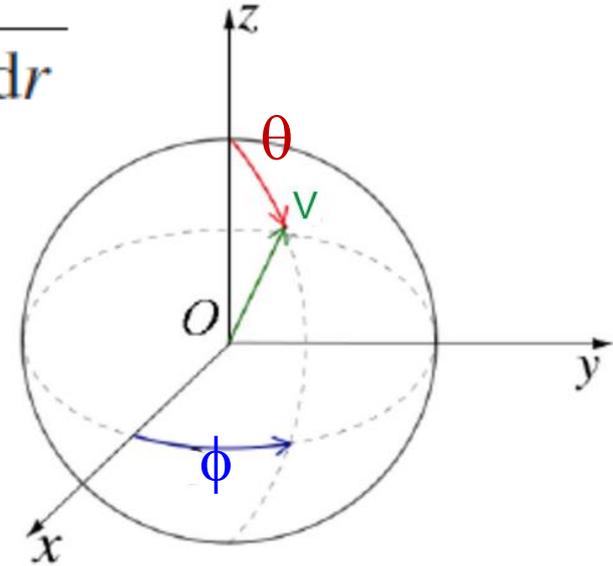


Dégénérescence masse-anisotropie

Equation de Jeans pour un système sphérique

$$\frac{d(v\sigma_r^2)}{dr} + \frac{v}{r} [2\sigma_r^2 - (\sigma_\theta^2 + \sigma_\phi^2)] = -v \frac{d\Phi}{dr}$$

Avec $v(r)$ = densité de galaxies,
 σ les dispersions de vitesses



$$\frac{GM(r)}{r} = -\sigma_r^2 \left(\frac{d \ln v}{d \ln r} + \frac{d \ln \sigma_r^2}{d \ln r} + 2\beta \right)$$

Et β le paramètre d'anisotropie

$$\beta \equiv 1 - (\sigma_\theta^2 / \sigma_r^2)$$

On suppose $\sigma_\theta = \sigma_\phi$ par symétrie sphérique

$\beta \rightarrow -\infty$, orbites tangentielles, $\beta \rightarrow 1$ orbites radiales

Anisotropie des vitesses

$$\beta = 1 - \sigma_{\theta}^2 / \sigma_{\rho}^2, \quad -\infty, 0, 1$$

orbites

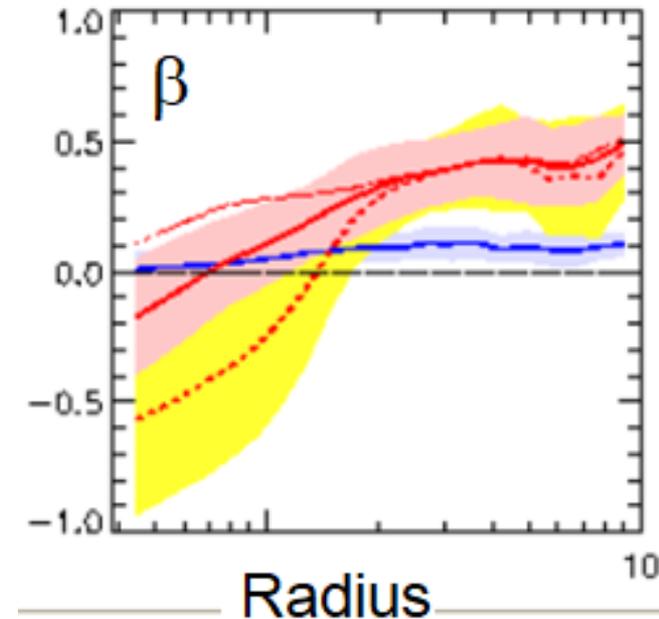
tangentielles, isotropes et orbites radiales

Comme pour les galaxies

Les amas ont dans leur centre des orbites tangentielles ou isotropes

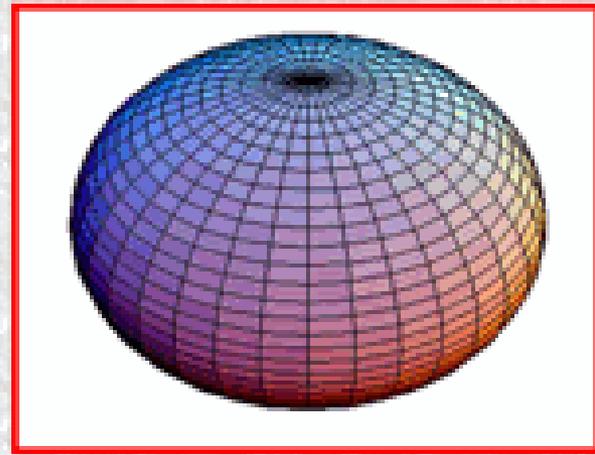
Puis aux bords, à cause de la chute secondaire, essentiellement des orbites radiales

L'observation du profil de vitesses est plutôt dégénérée et ne peut pas donner le contenu en matière noire sans ambiguïté

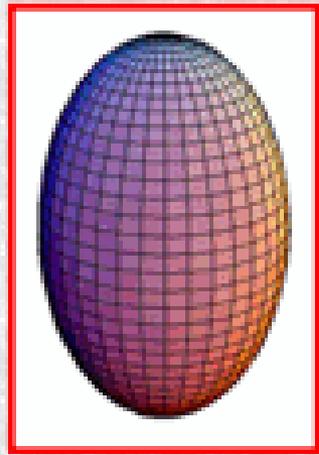


Formes extrêmes: sphéroïdes

Oblate



Prolate

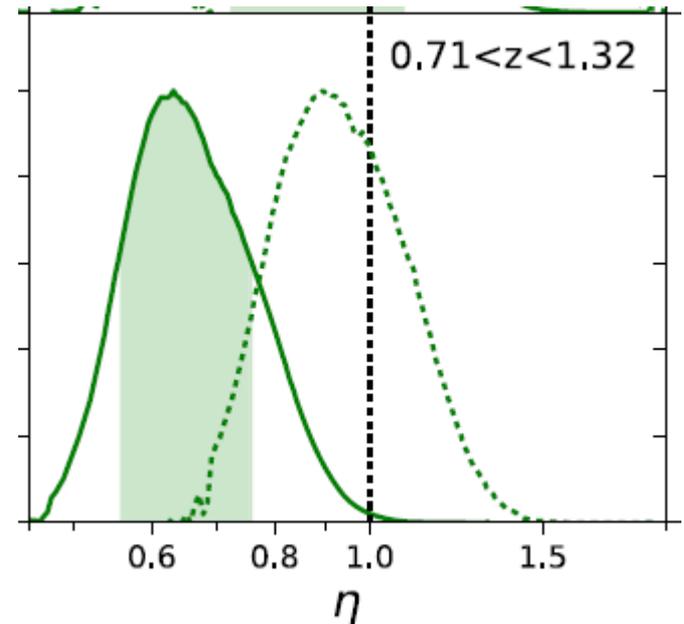


Sphéroïdes de révolution

→ 2 axes égaux

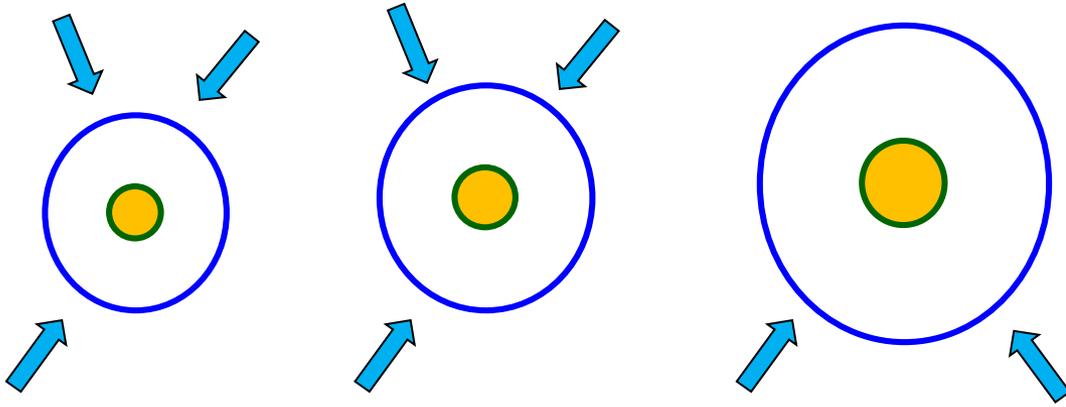
Ou alors cas général
triaxial

En utilisant les mêmes méthodes que
pour les galaxies
MAMPOSSt (Mamon et al 2013)
La masse dynamique est obtenue
Semble plus faible que les autres
masses (SZ+Planck), surtout à grand z
 $\eta = M_{\text{dyn}}/M_{\text{SPT}} = 0.63$



Capasso et al 2019

Modèles de distribution de masse

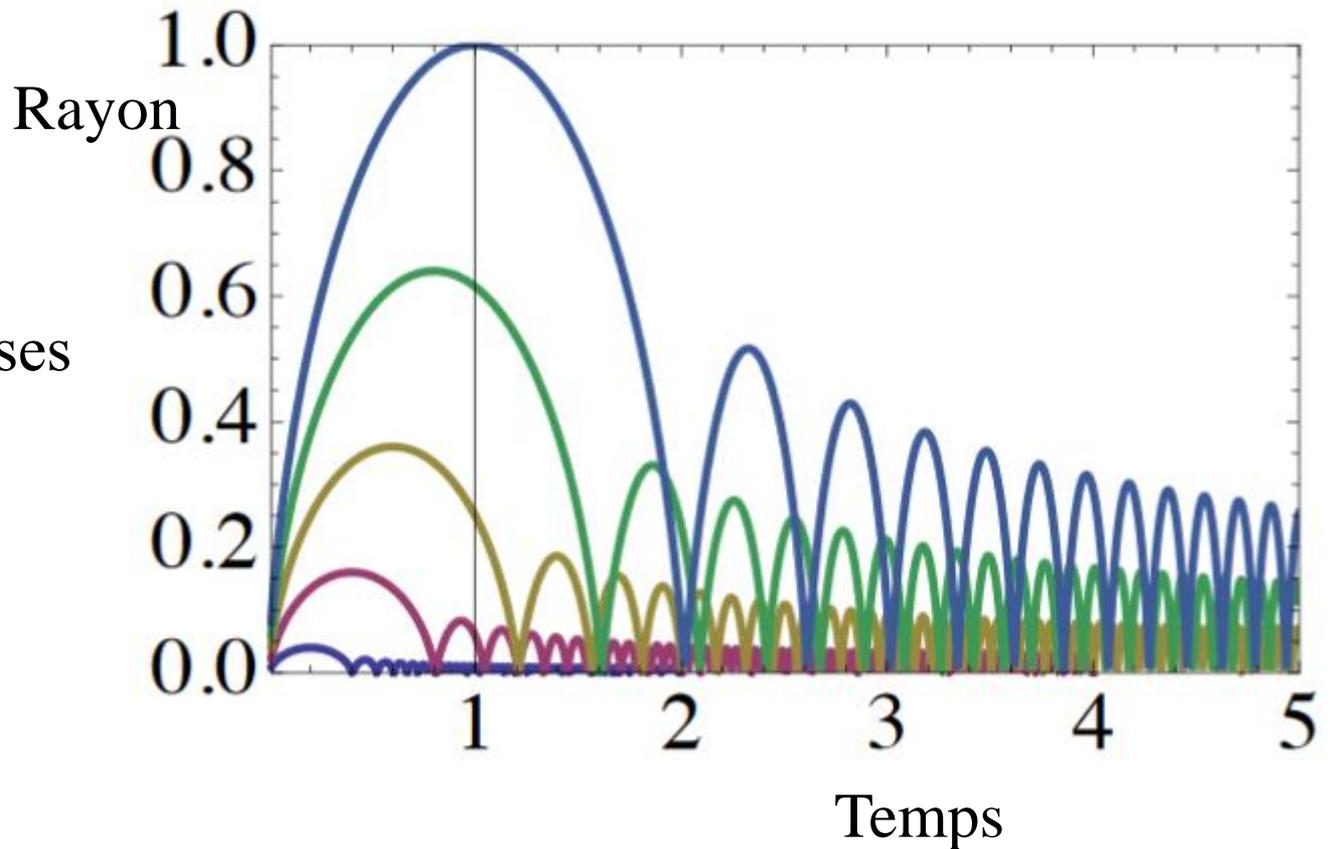


Hypothèse self-similaire
Tout au long de l'accrétion

Densité dans
l'espace des phases
 $M/(d\mathbf{r} d\mathbf{v})$

ρ / σ^3

universelle?





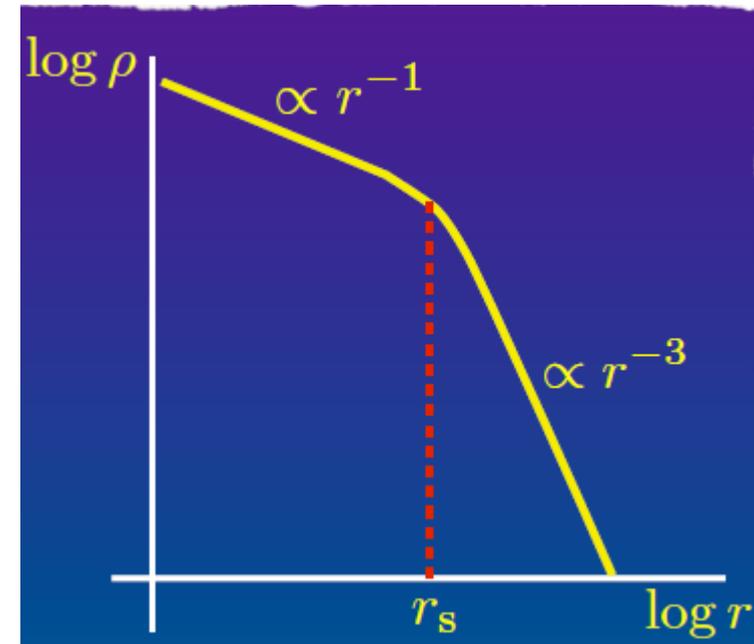
Profil de matière noire NFW

Les résultats des simulations Λ CDM montrent une loi de densité universelle pour les halos de MN
→ Profils NFW (Navarro, Frenk & White 1997)

Deux lois de puissance $\rho \sim r^{-1}$ au centre, puis $\rho \sim r^{-3}$ au bord

Les halos de petite masse sont plus denses
Car ils se forment plus tôt dans l'univers

La densité moyenne d'un halo est proportionnelle à la densité moyenne de l'univers à sa formation

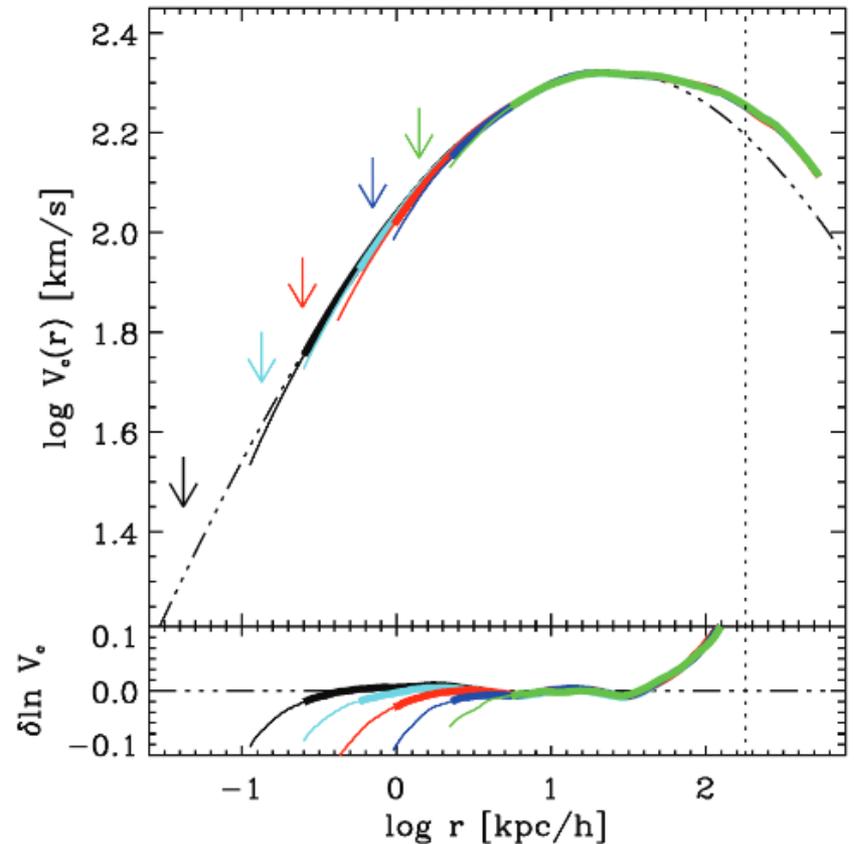
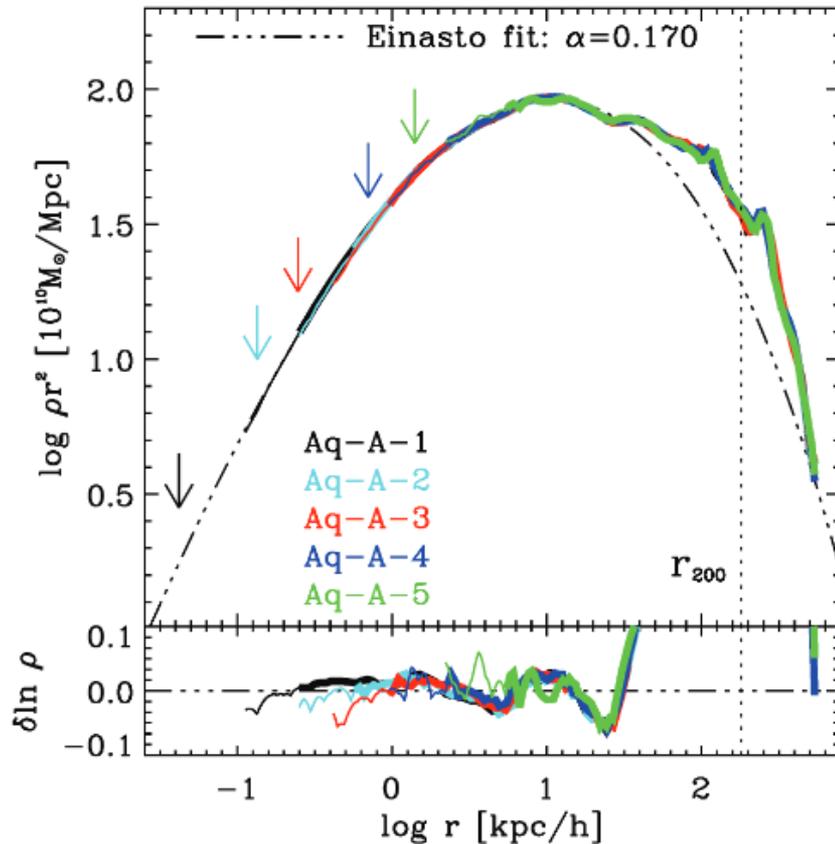


Profil universel

2 paramètres M_{vir}
Concentration $c = r_{\text{vir}}/r_s$

$$\frac{\rho(r)}{\rho_{\text{crit}}} = \frac{\delta_c}{(r/r_s)(1 + r/r_s)^2}$$

Flèches: résolution des simulations



Navarro et al 2010

Masse dérivée de SZ, rayons-X ?

$$y_e = \int n_e \sigma_T dl \left(\frac{k_B T_e}{m_e c^2} \right) = \int d\tau_e \left(\frac{k_B T_e}{m_e c^2} \right) \propto N_e T_e \text{ avec un Signal/Bruit}=\xi$$

$\propto U \text{ thermique}$

N_e et T_e croissent avec la masse de l'amas (peu précis, concentration?)
Calibré par des simulations

Rayons X \rightarrow T_e , dérivation de la quantité de gaz, fraction de baryons

Mesure l'énergie thermique du gaz

Par le théorème du Viriel, cela doit donner le potentiel gravitationnel

Autres proxy de la masse $Y_X = M_g T_X$ (rayons X), σ des galaxies

$N(\xi, z)$

M_g obtenue avec le rayonnement total X

Modèle isotherme: profil beta

Modèle simple d'abord:
exemple vache sphérique!

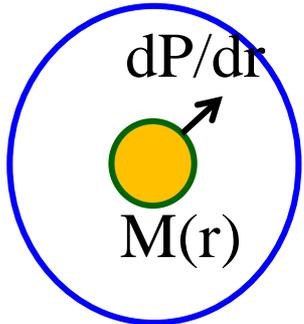
$$\rho(r) = \frac{\sigma_V^2}{2\pi G r^2}$$

$$1/\rho \, dP/dr = -GM(r)/r^2$$

$$P = n \, kT \text{ (gaz)} \propto n \, \sigma_V^2 \text{ (galaxies)}$$

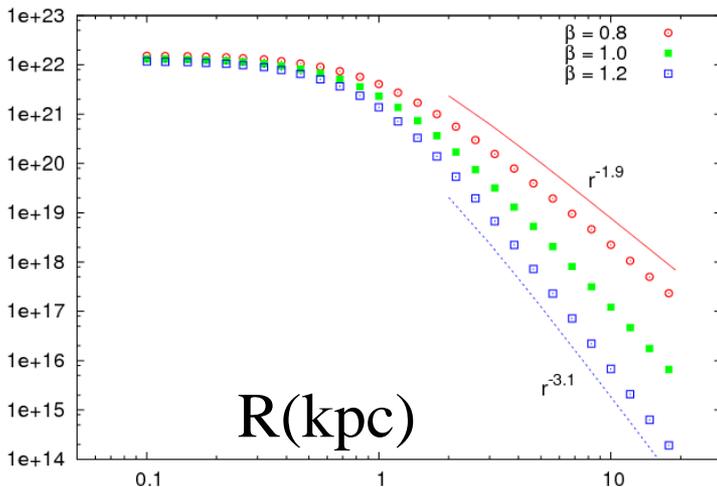
$$kT = \mu m \, \sigma_V^2 = 6 \text{ keV} \text{ } (\sigma_V/1000\text{km/s})^2$$

$$\beta = \mu m \, \sigma_V^2 / kT$$



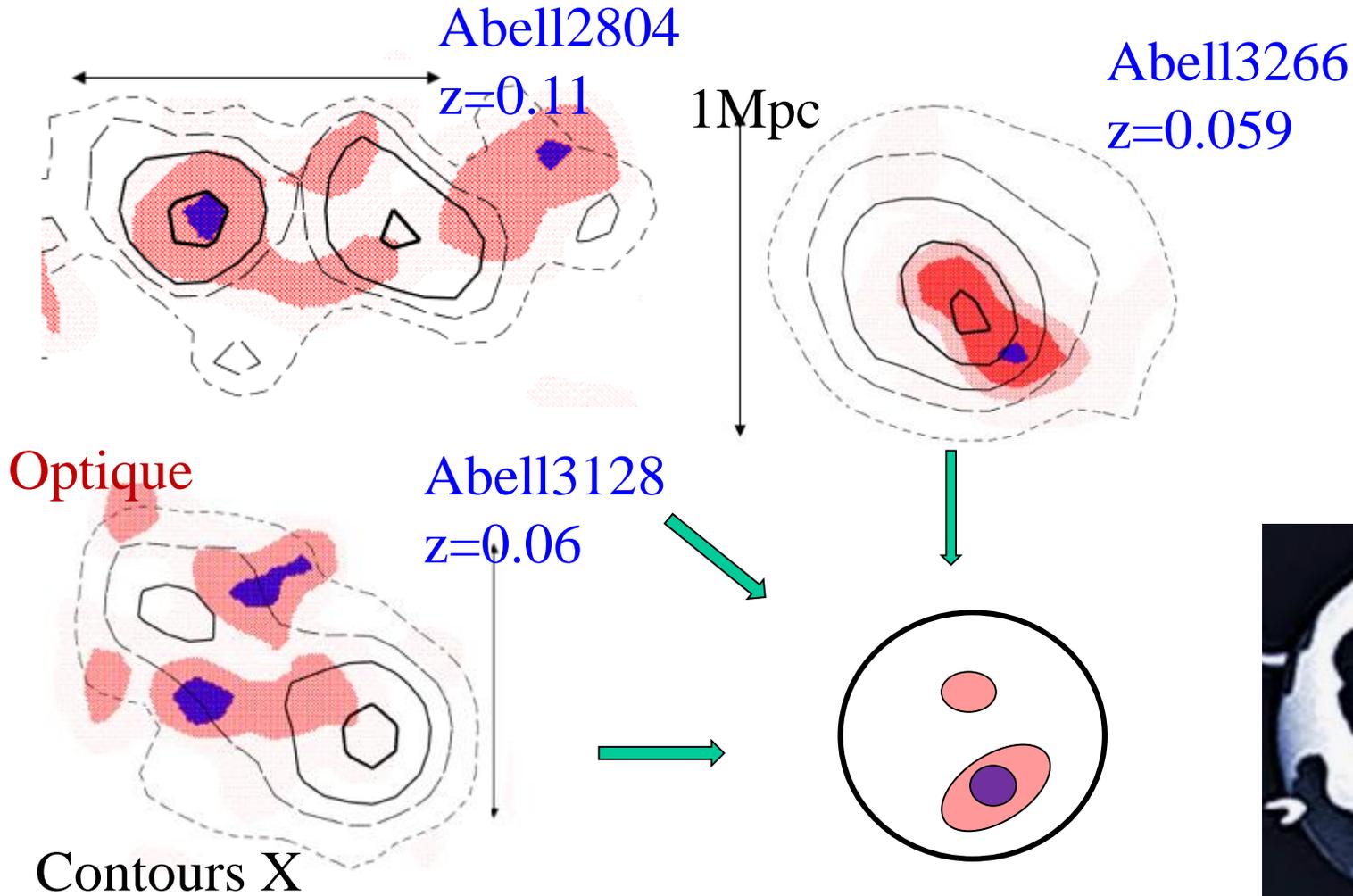
$$n_e(\mathbf{r}) = n_{e0} \left(1 + \frac{r^2}{r_c^2} \right)^{-\frac{3}{2}\beta}$$

$$I \propto r^{-3\beta}$$



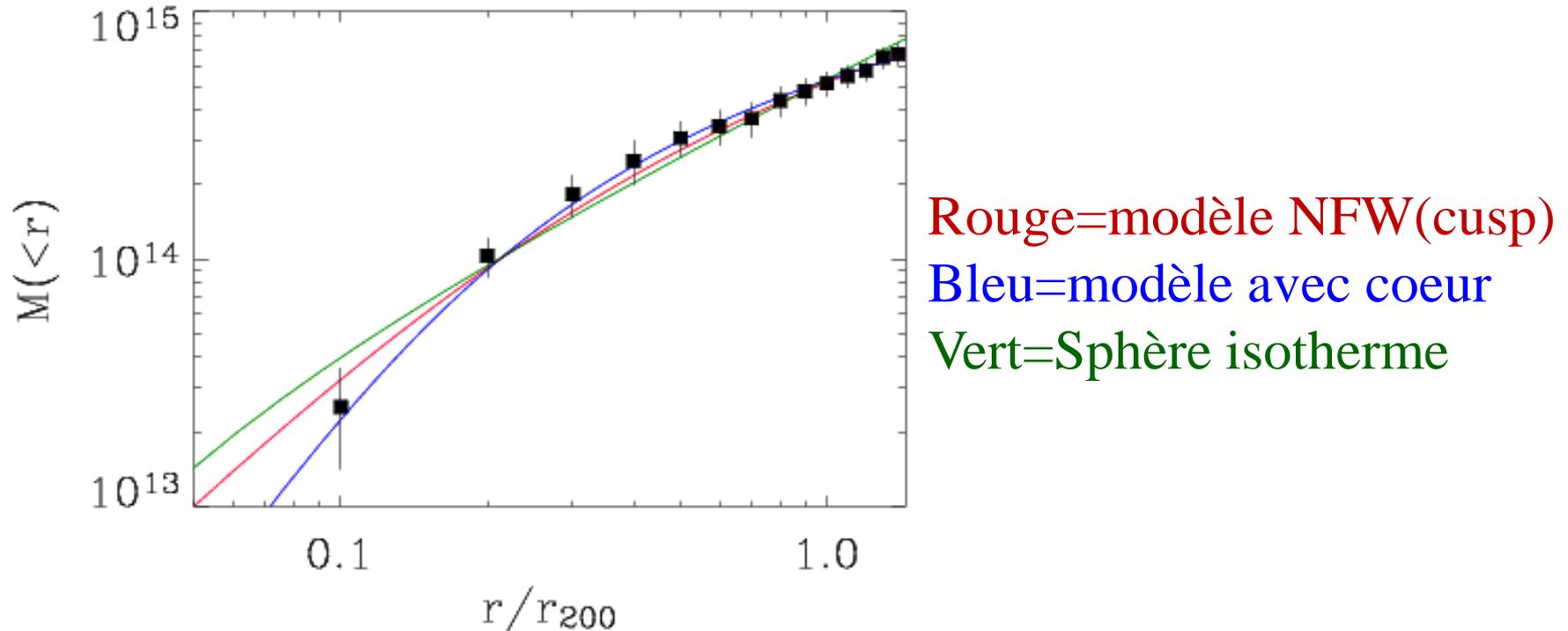
Méthode du « stacking »

Les amas ont très fréquemment des sous-structures,
Et aussi différentes formes, orientations



Distribution de masse

Les galaxies et la matière noire ont une distribution radiale semblable
S'il y a un cœur il est < 0.1 Mpc



60 amas d'Abell proches, ~ 3000 galaxies (échantillon ENACS, ESO)

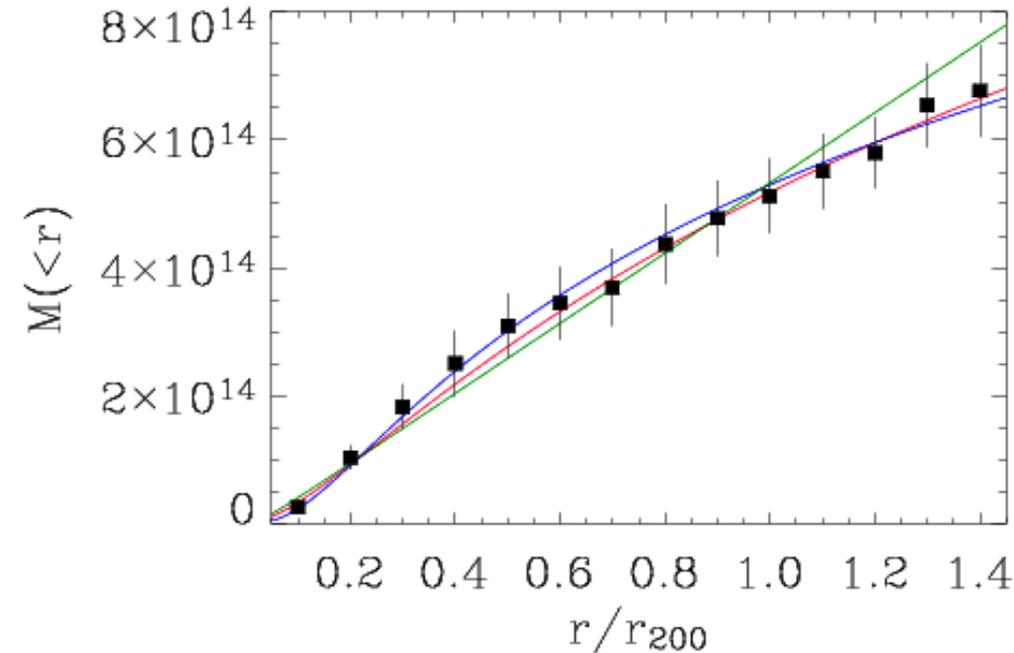
Katgert et al 2004

Distribution de masse

Les galaxies et la matière noire ont une distribution radiale semblable

→ Le modèle NFW standard est un bon fit! (cusp)

Contrairement aux galaxies (core)



Rouge=modèle NFW(cusp)

Bleu=modèle avec coeur

Vert=Sphère isotherme

Concentration

$$c=r_{200}/r_s = 4$$

60 amas d'Abell proches, ~ 3000 galaxies

Katgert et al 2004

Relations d'échelle des amas

Equilibre hydrostatique

ou équation de la sphère isotherme:

$$\frac{1}{\rho_{\text{gas}}} \frac{dP_{\text{gas}}}{dr} = -\frac{d\phi}{dr} = -\frac{GM_{\text{tot}}}{r^2} \quad P_{\text{gas}} = n_{\text{gas}} k T_{\text{gas}}$$

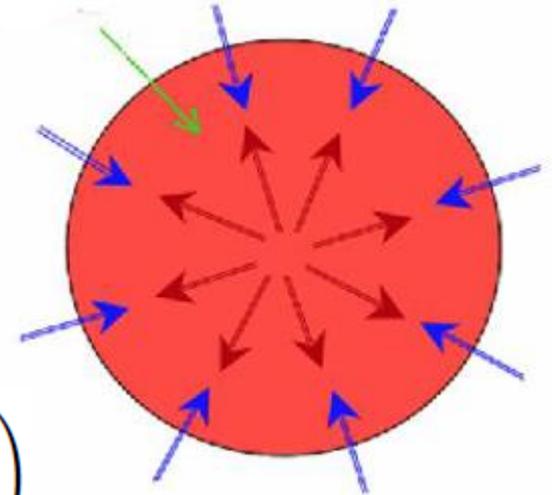
$$M_{\text{tot}}(< r) = -\frac{k T_{\text{gas}}(r) r}{\mu m_{\text{u}} G} \left(\frac{\partial \log T_{\text{gas}}}{\partial \log r} + \frac{\partial \log n_{\text{gas}}}{\partial \log r} \right)$$

$$M \approx \int \rho_{\text{DM}} r^2 dr \propto R^3 \propto R T$$

Alors $R \propto T^{1/2}$ et $M \propto T^{3/2}$

Supposant l'émission thermique (free-free) des électrons et $\rho_{\text{DM}} \propto n_{\text{gas}}$,

$$L \approx \int n_{\text{gas}}^2 \Lambda(T) r^2 dr \approx n_{\text{gas}}^2 T^{1/2} R^3 \propto f_{\text{gas}}^2 T^2 \propto f_{\text{gas}}^2 M^{4/3}$$

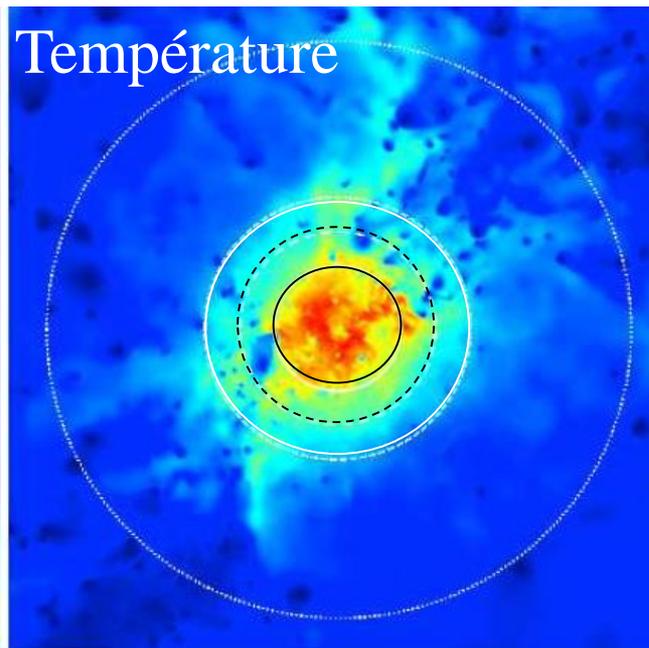
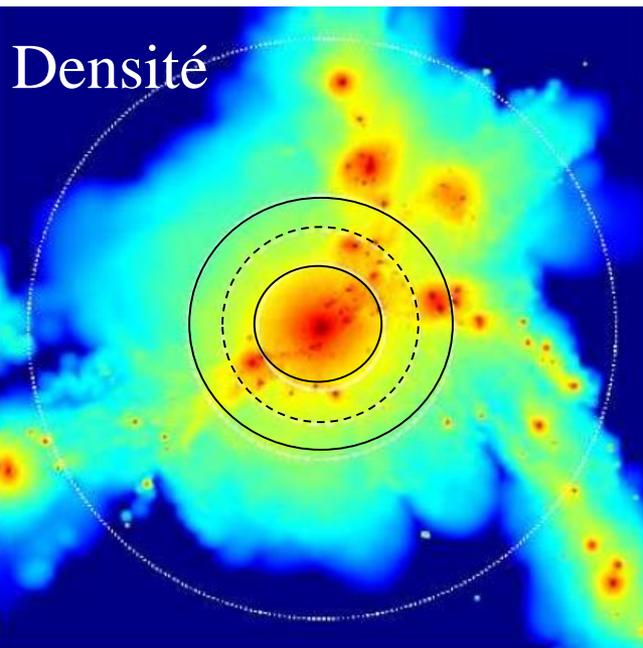


Relations d'échelle globales

On considère que ces quantités sont généralement mesurées à une surdensité fixée Δ par rapport à $\rho_{cr}(z) = 3H_z / 8\pi G$, au redshift z de l'amas, $E(z)^2 = H(z)^2 / H_0^2 = \Omega_m (1+z)^3 + \Omega_\Lambda$

ces relations donnent alors ($F_z = \Delta^{1/2} H_z / H_0$):

$$F_z M \propto T^{3/2} \quad F_z^{-1} L \propto T^2 \quad F_z^{-1} L \propto (F_z M)^{4/3}$$



Roncarelli 2006

r_{500} , r_{200} , R_{vir} , $3 r_{200}$

$$r_{500} = 3.5 \text{ Mpc} \left(\frac{T}{5 \text{ keV}} \right)^{1/2}$$

$$M_{500} = 6 \times 10^{15} M_\oplus \left(\frac{T}{5 \text{ keV}} \right)^{1/2}$$

Relations d'échelle avec z

Hypothèses Simples: gravité, compression adiabatique, chocs

$$M \propto T_x^{3/2} (1+z)^{-3/2}$$

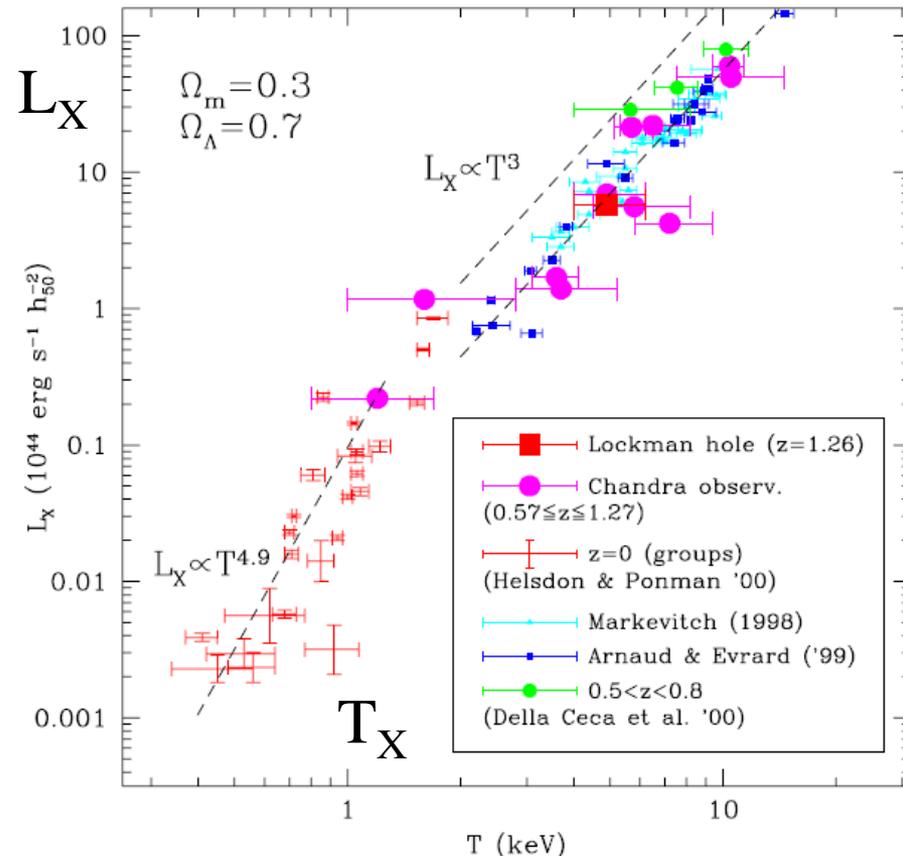
$$L_x \propto T_x^2 (1+z)^{3/2}$$

$$L_x \propto M^{4/3} (1+z)^{7/2}$$

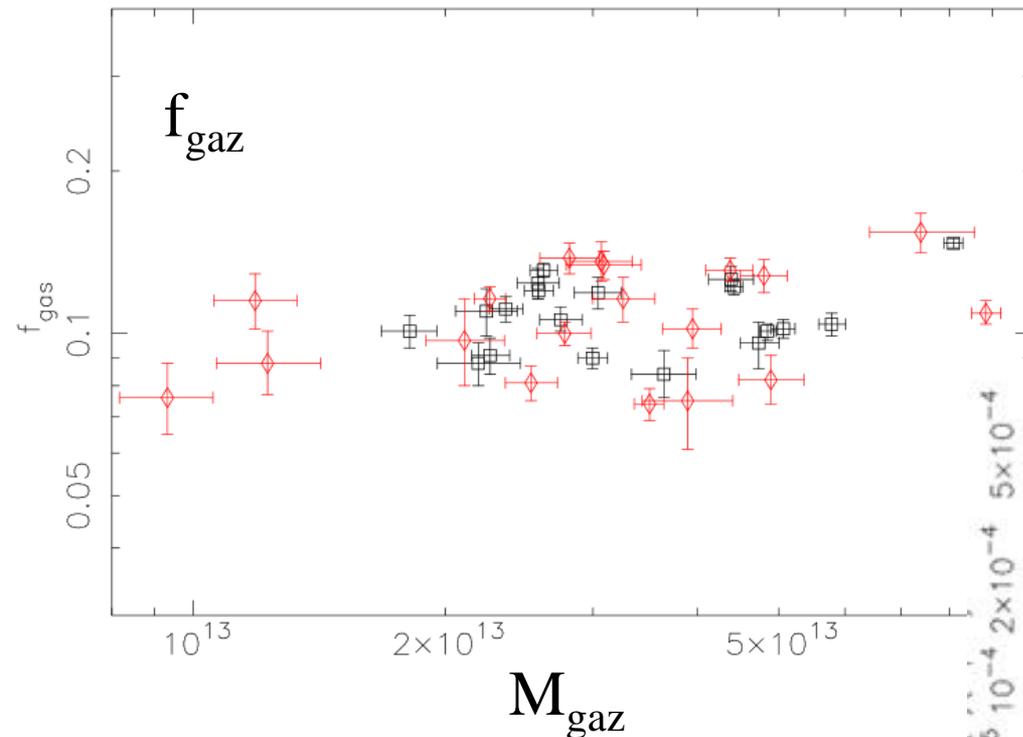
Implications:

Les amas ont tous la même structure interne, mais les amas distants sont plus denses, plus petits, et plus lumineux

Les écarts aux relations d'échelle: autre physique à rajouter (refroidissement, feedback, etc.)



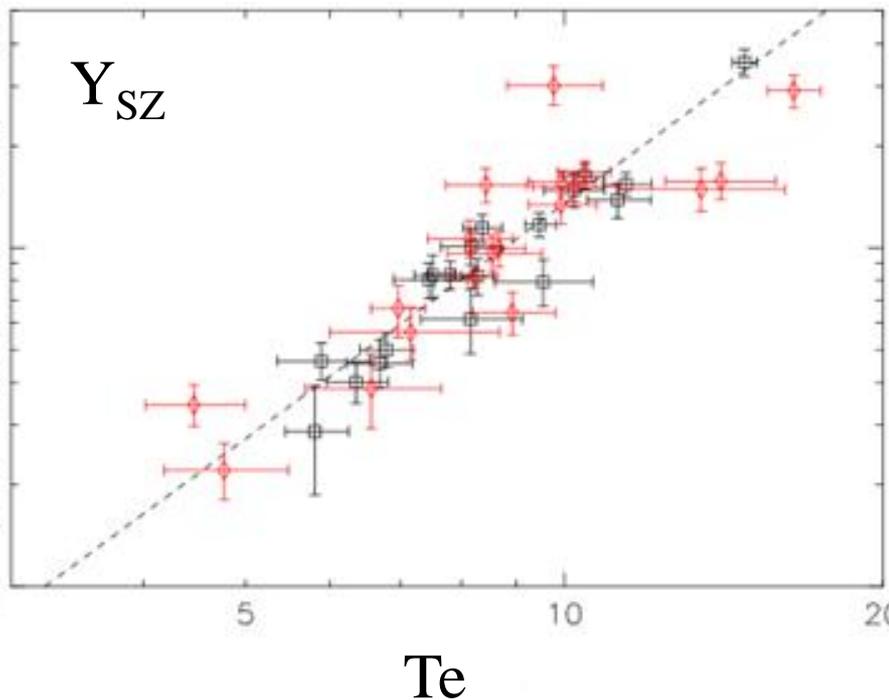
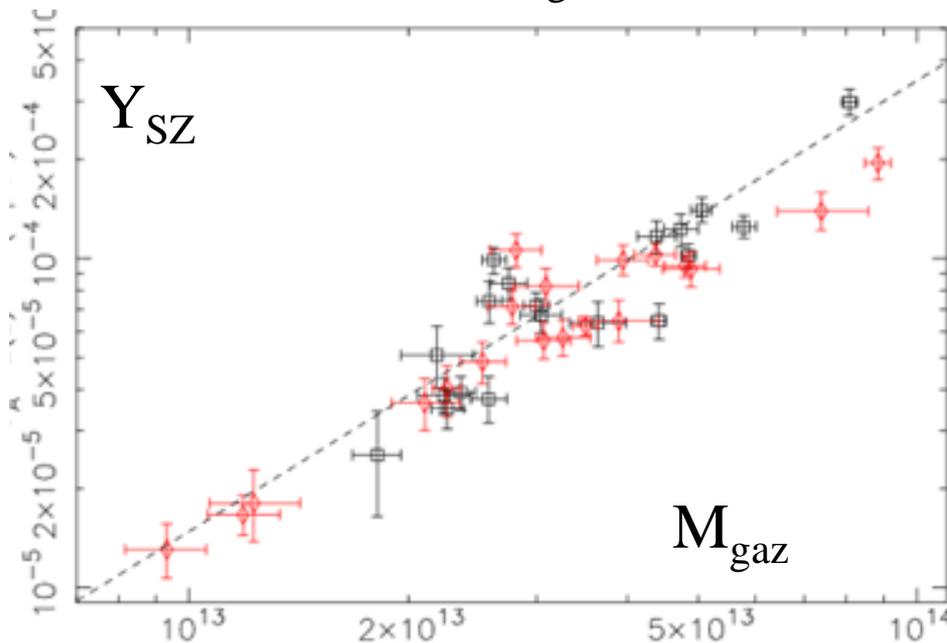
Rosati 2002



$$f_{\text{gaz}} = \text{cste}$$

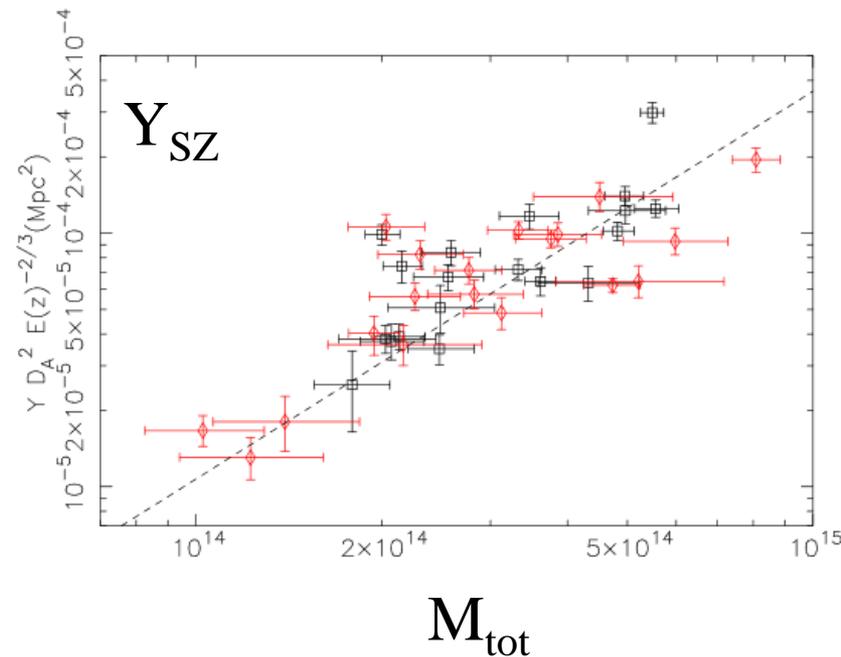
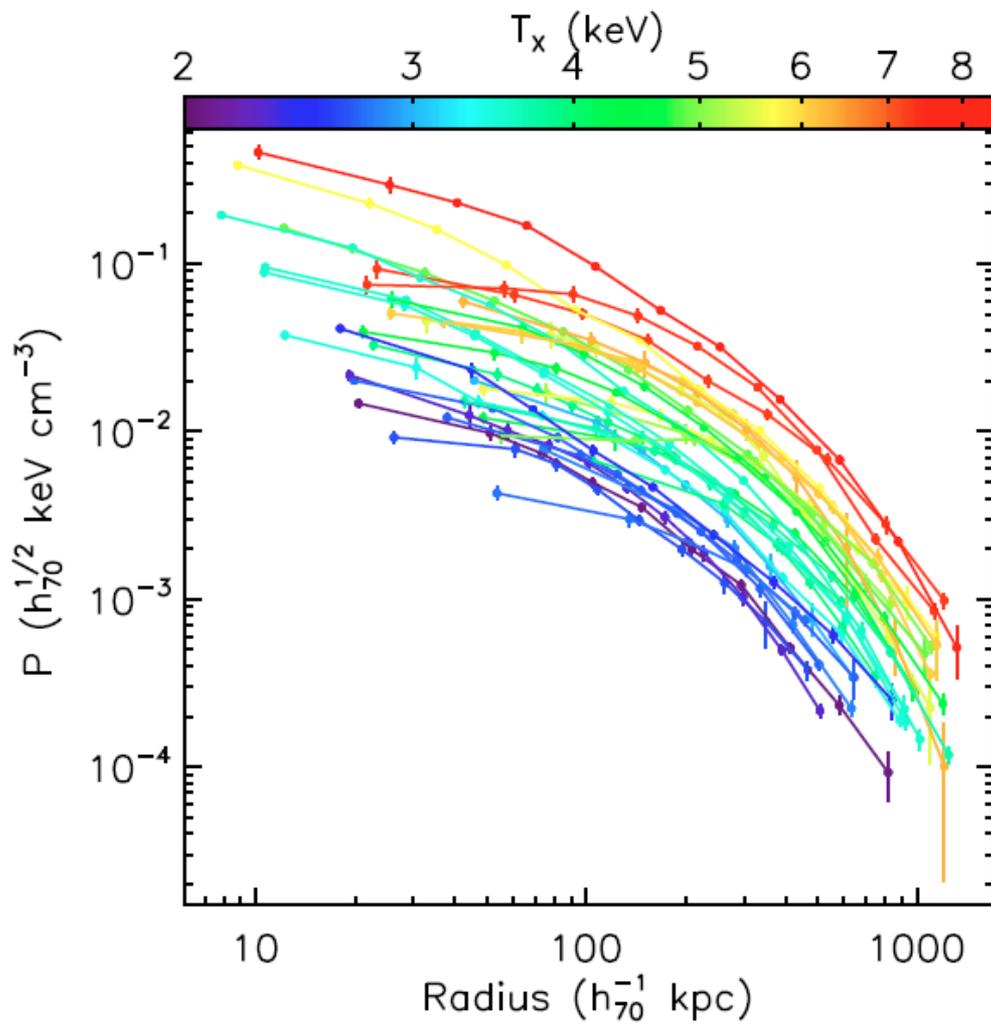
$$Y_{\text{SZ}} \propto M_{\text{gaz}}^{1.4}$$

$$Y_{\text{SZ}} \propto T_e^{2.4}$$



Bonamente et al 2008

Observations: pression du gaz



$$Y_{\text{SZ}} \propto M_{\text{tot}}^{1.7}$$

Loi de pression universelle
Similaire aux simulations

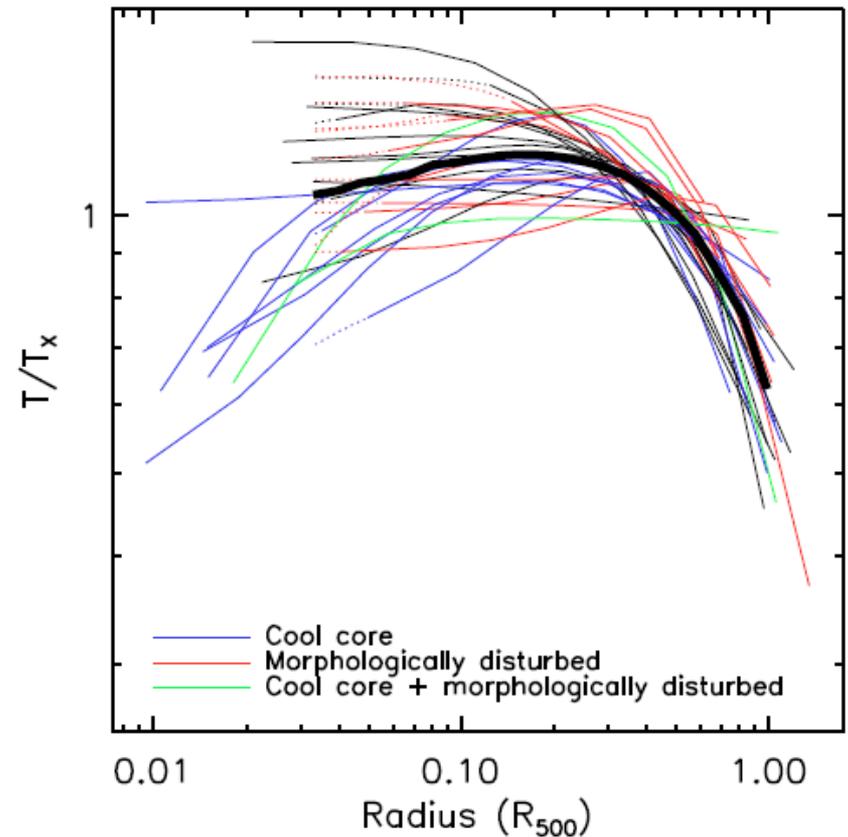
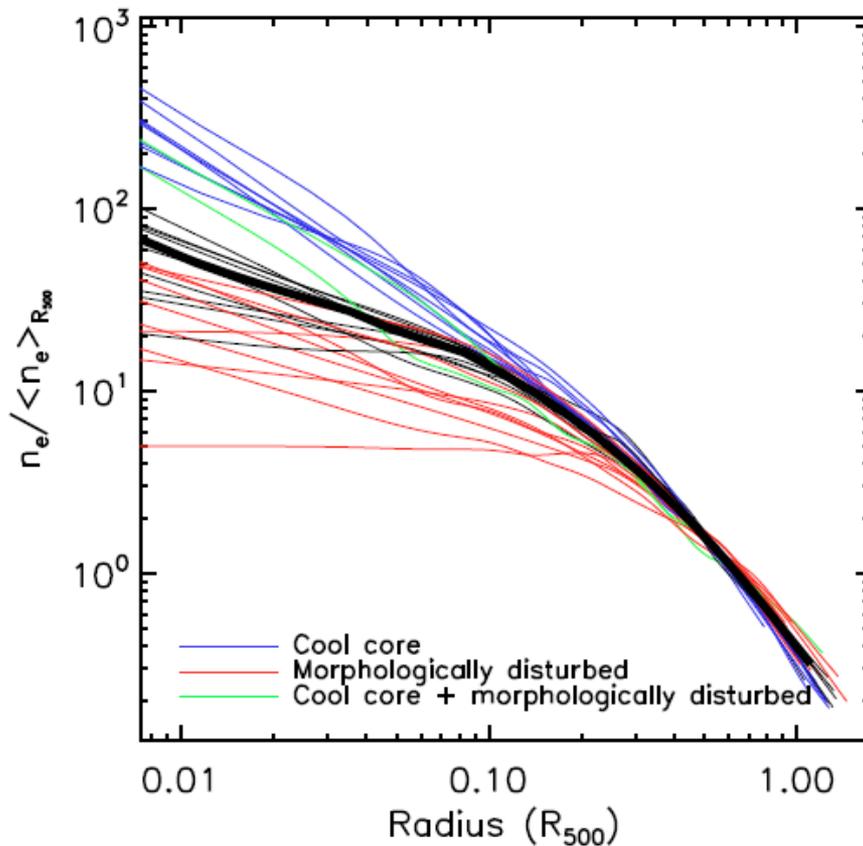
Arnaud et al 2010

Distribution de densité et température

Les amas se distribuent en 2 catégories: **relaxés**, « **cool core** »

La température descend au centre, $t_{\text{cool}} \ll t_{\text{Hubble}}$

Non-relaxés, en collision, perturbés (densité plus faible, cœur)



Comparaison Simulations & Observations

➡ Relations d'échelle ?

problèmes: les modèles traitent essentiellement la **matière noire**
les observations voient les **baryons**
les paramètres simulés & observés (eg. T) ne tracent pas toujours la même quantité

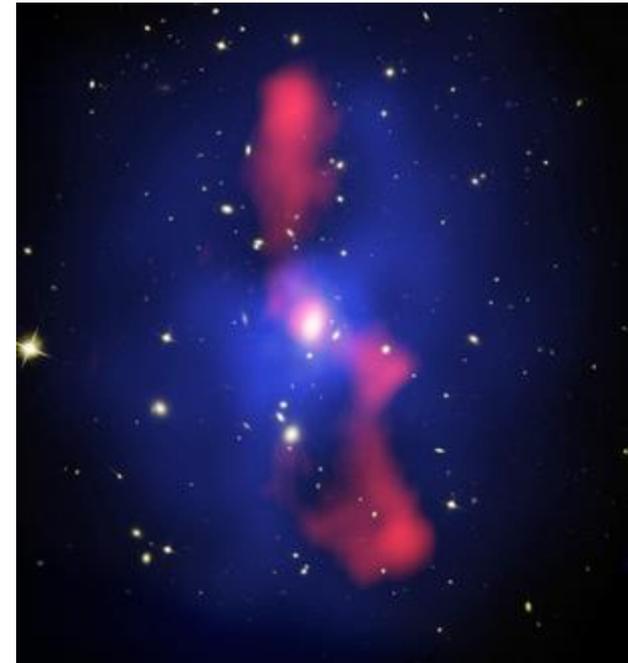
Relations d'échelle attendues si les processus sont uniquement gravitationnels

Mais : ➡ énergie de formation d'étoiles

➡ AGN, et réchauffage, chocs

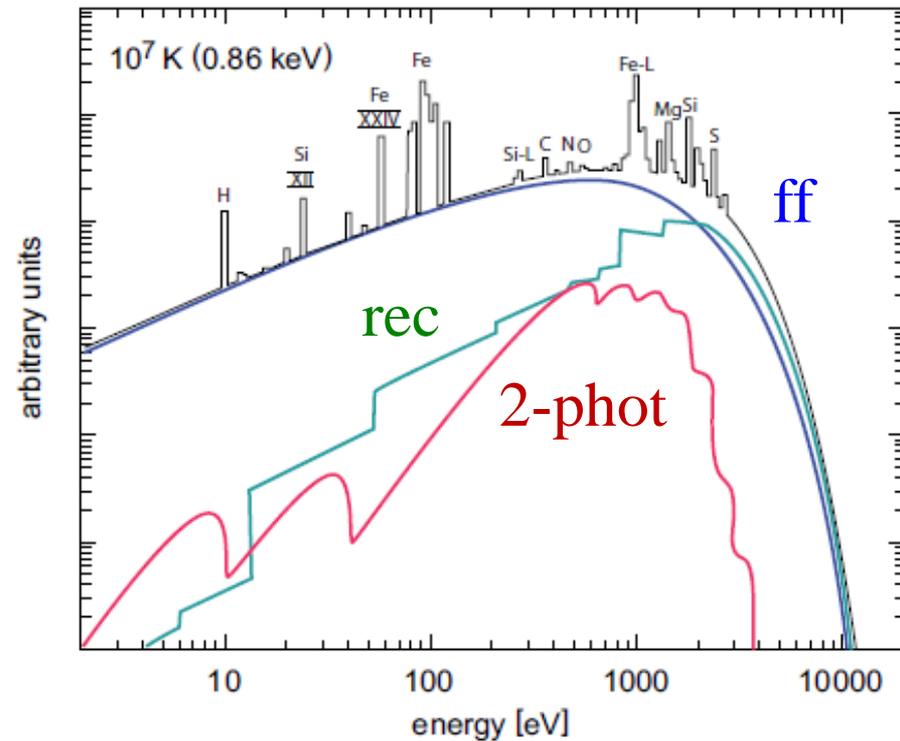
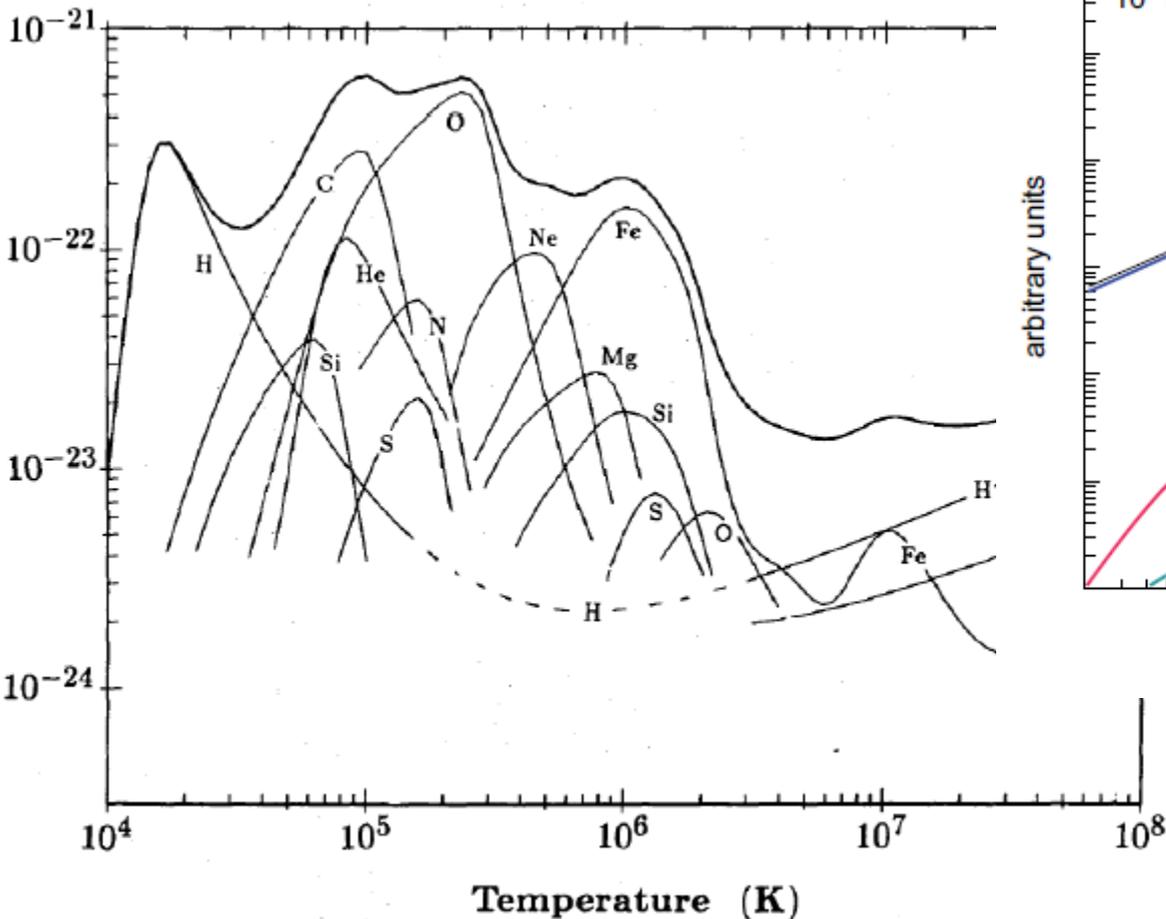
➡ plancher d'entropie, résumant

les événements de la formation de l'amas



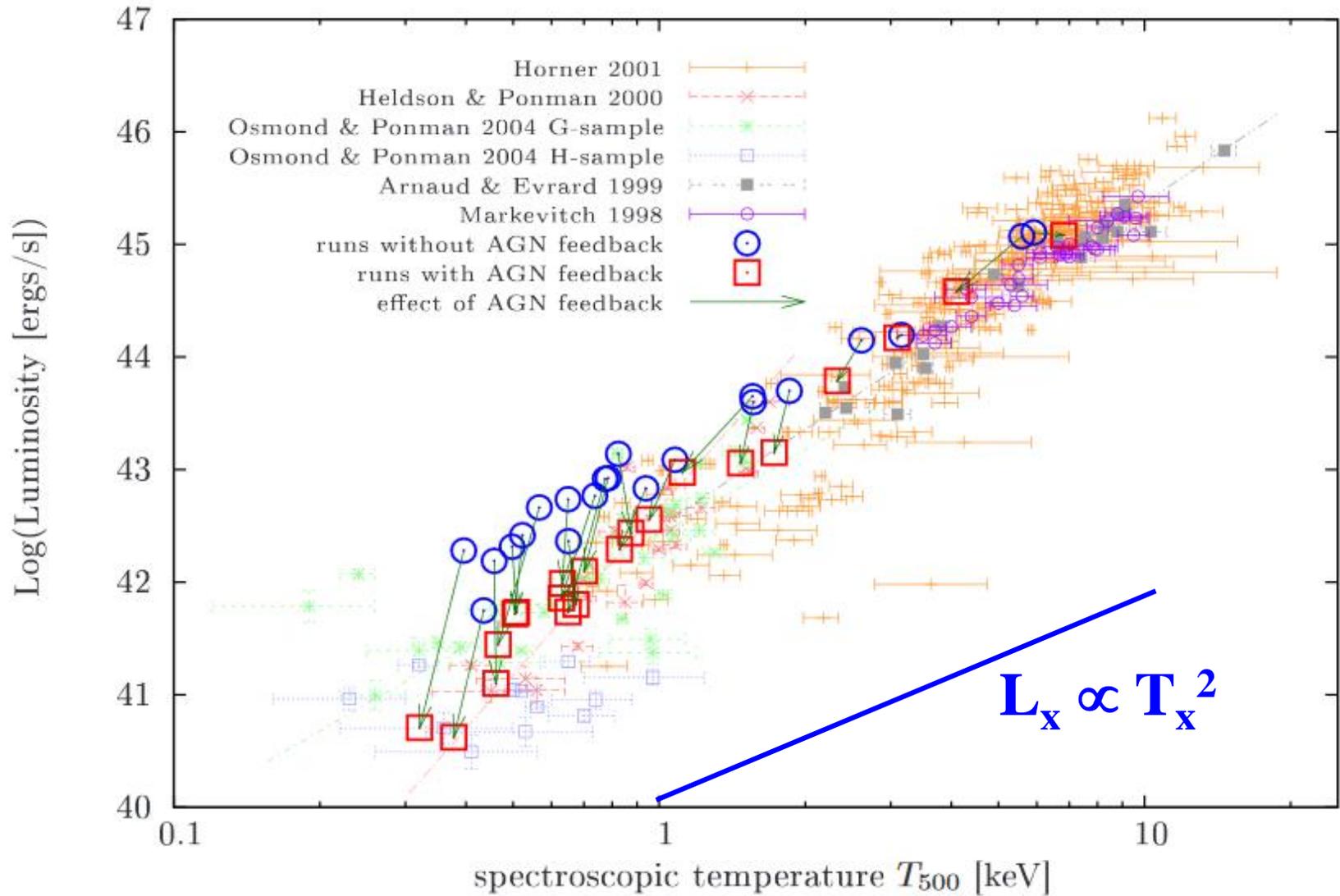
Chauffage et refroidissement

Soit par **free-free**, soit par les raies, qui sont nombreuses, en équilibre thermique ou d'ionisation



Böhringer 2009

Relation Luminosité-Température



Les AGN améliorent l'accord avec
les observations

Puchwein et al 2008

Fraction de baryons

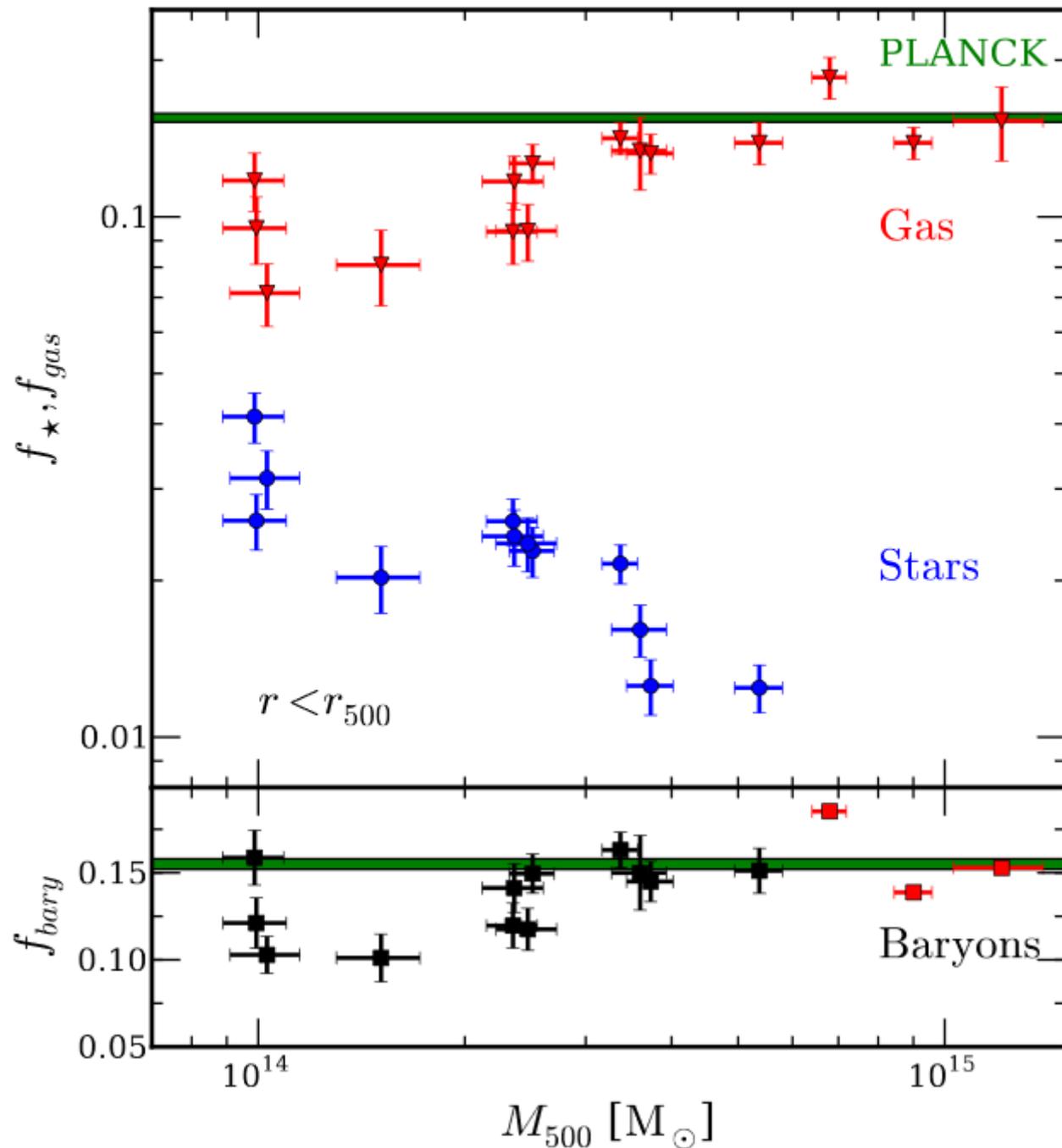
Incluant les étoiles
Intra-amas

10% en-dessous de
La valeur universelle

hypothèse:
 f_b universel

$$f_b = \Omega_b / \Omega_m \\ = 5/30 = 0.17$$

Gonzalez et al 2013



Sous-structure des amas en SZ

Simulation de l'effet SZ pour un amas NFW

Carte SZ

GGM

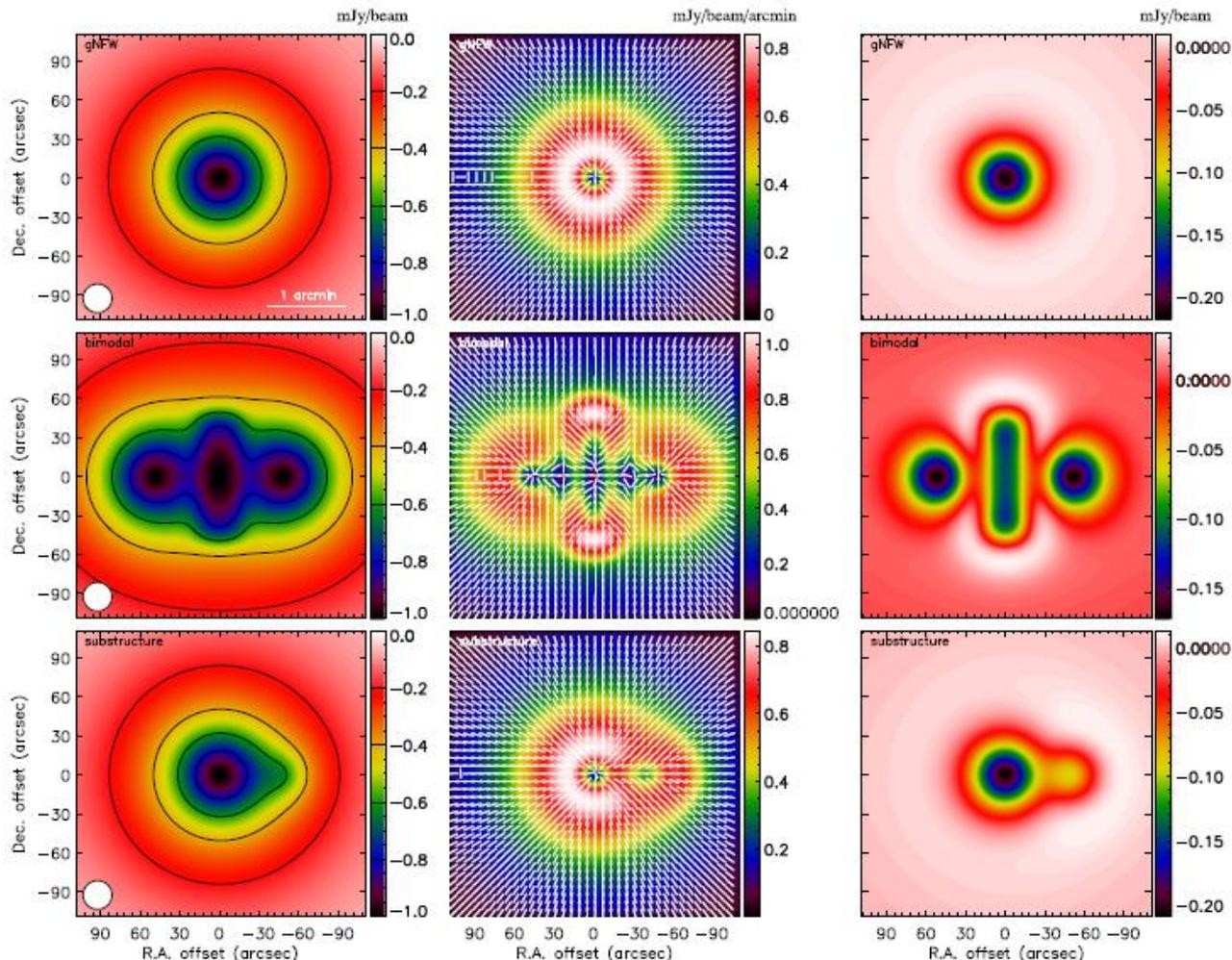
DoG

$$y = \frac{\sigma_T}{m_e c^2} \int P_e d\ell$$

Symétrie sphérique

2 composantes+choc

Une sous-structure
secondaire



GGM=Gaussian Gradient Magnitude DoG: Difference of Gaussian

Adam et al 2018

Observations avec NIKA (IRAM)

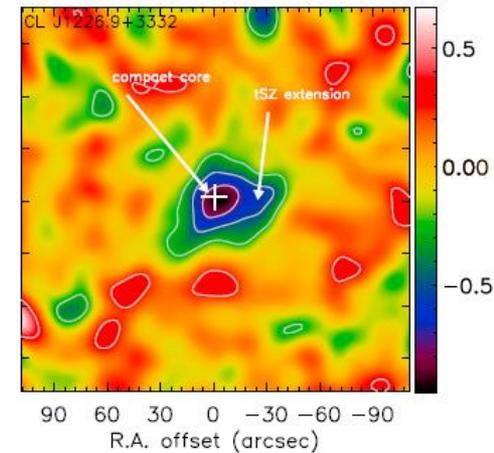
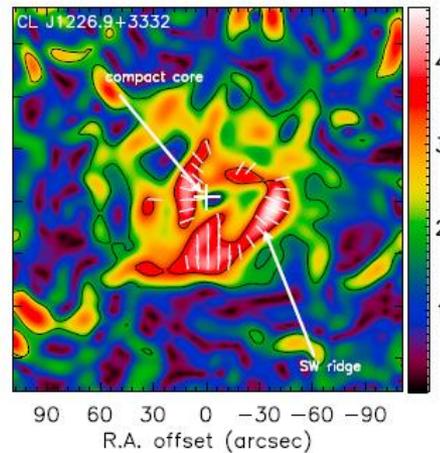
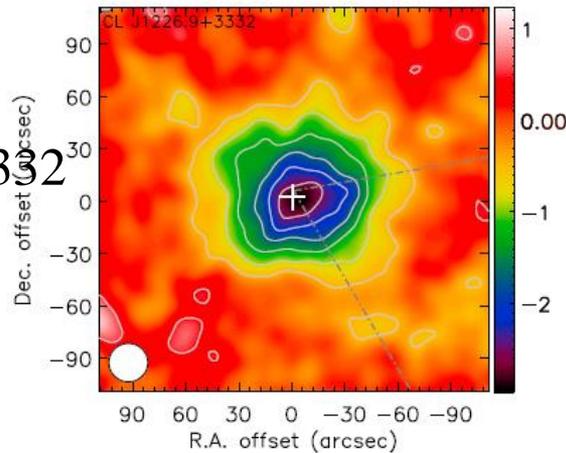
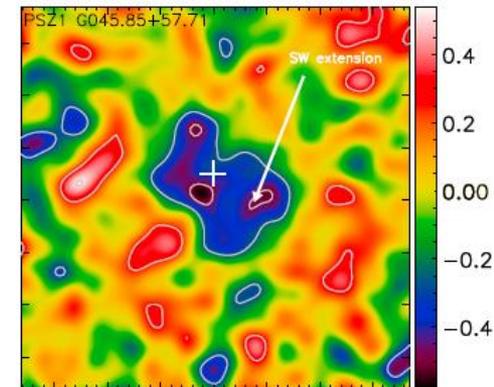
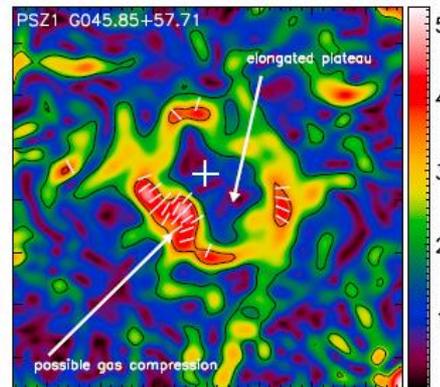
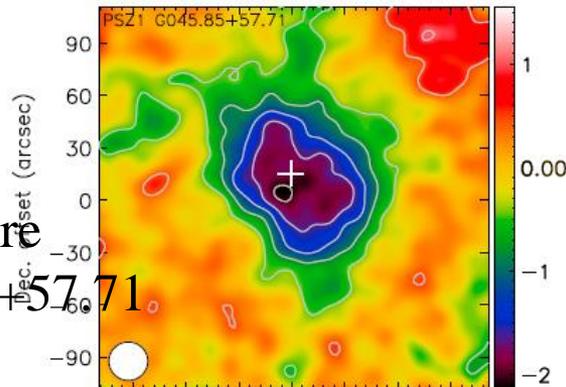
Les observations SZ à $\lambda=2\text{mm}$ permettent de détecter des sous-structures de pression (fronts, chocs..)

→ Signes de fusions récentes? Flottement du gaz ? (sloshing)

Carte SZ

GGM

DoG

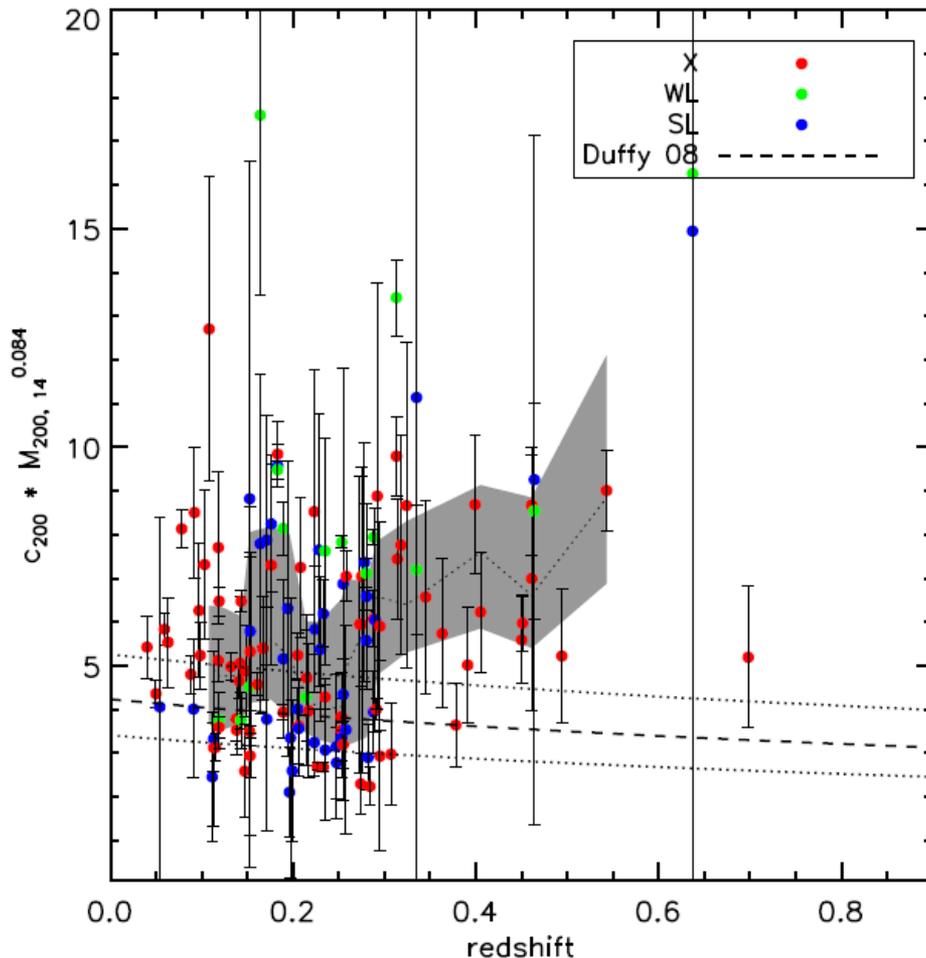


Plateau au centre
PSZ1 G045.85+57.71
z=0.61 (cool)

CL J1226.9+3332
z=0.89

Comparaison des traceurs

Concentration de la masse obtenue avec des rayons X, les lentilles fortes (SL) ou faibles (WL)



Encore beaucoup de barres d'erreur!

Simulations numériques
Duffy et al 2008

Les parties extérieures

Jusqu'à présent, seulement les parties internes des amas sont cartographiées, jusqu'à r_{200} ou R_{vir}

Mais le plus intéressant pour les scénarios de formation, sont les filaments aux bords, en train d'être accrétés

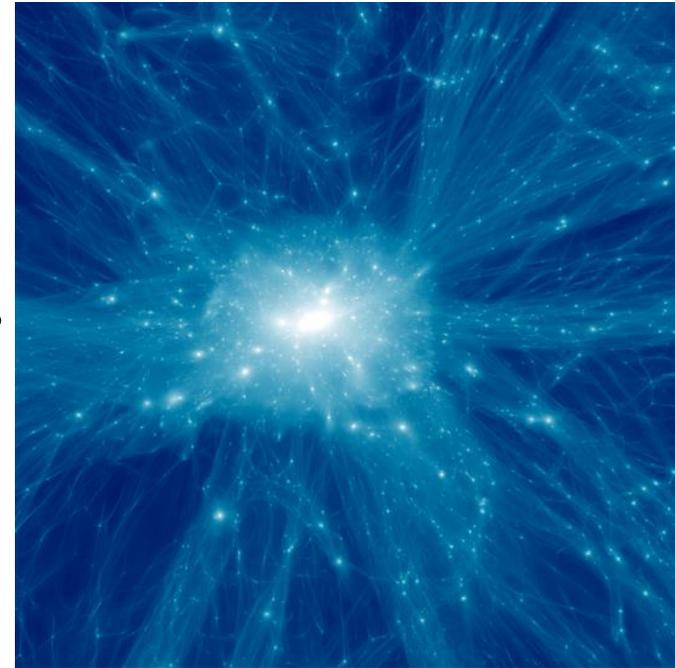
Plus facile de comprendre les phénomènes, dépendant du taux d'accrétion, et non des phénomènes astro complexes: refroidissement, formation d'étoiles, AGN feedback

Effondrement self-similaire

Profil d'entropie plus plat, et dépend de z
(Lau et al 2015)

Normal que le gaz dissipatif ne suive pas la matière noire

Rapport Gaz/DM variable aux bords



B. Diemer

Horizon-AGN simulation, in a random region

1 Mpc

$z=38.305$

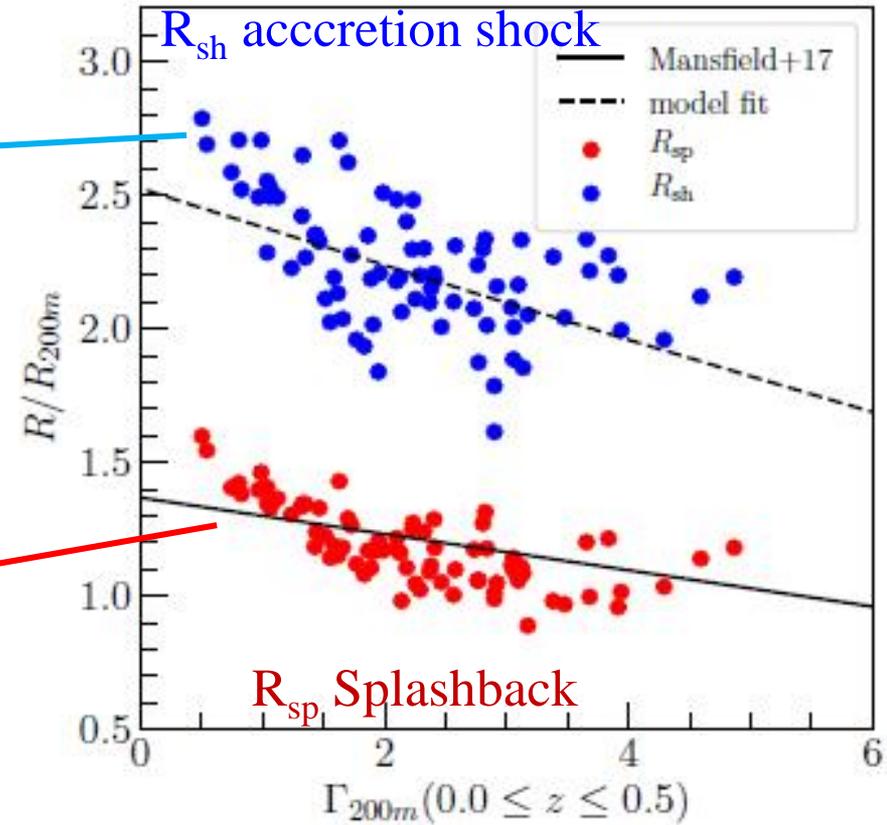
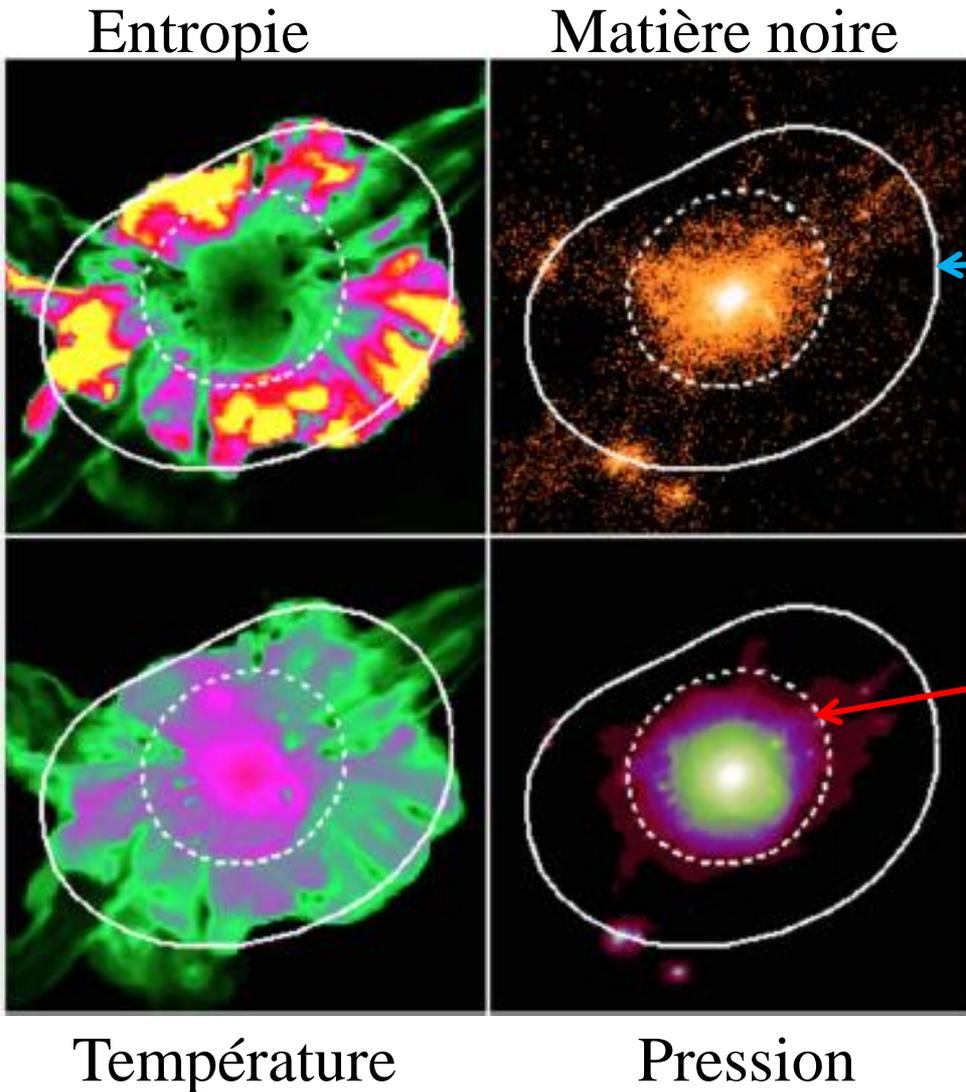
Horizon-AGN simulation, in an overdense region

1 Mpc

$z = 38.305$

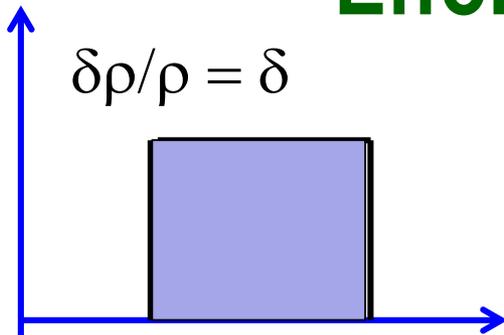
Manfield et al 17

Simulations matière noire seule



Walker et al 2018

Effondrement non-linéaire



Avec une sur-densité $\delta > 1$
sur une sphère (top-hat)

Si les diverses coquilles ne se croisent pas
 $M(r) = \text{cste}$

$$M(r) = \frac{4\pi}{3} r^3 \rho(1+\delta) \rightarrow \frac{d^2r}{dt^2} = -GM/r^2 \quad \frac{1}{2}\left(\frac{dr}{dt}\right)^2 - GM/r = E$$

Facile à résoudre
si pas de croisement

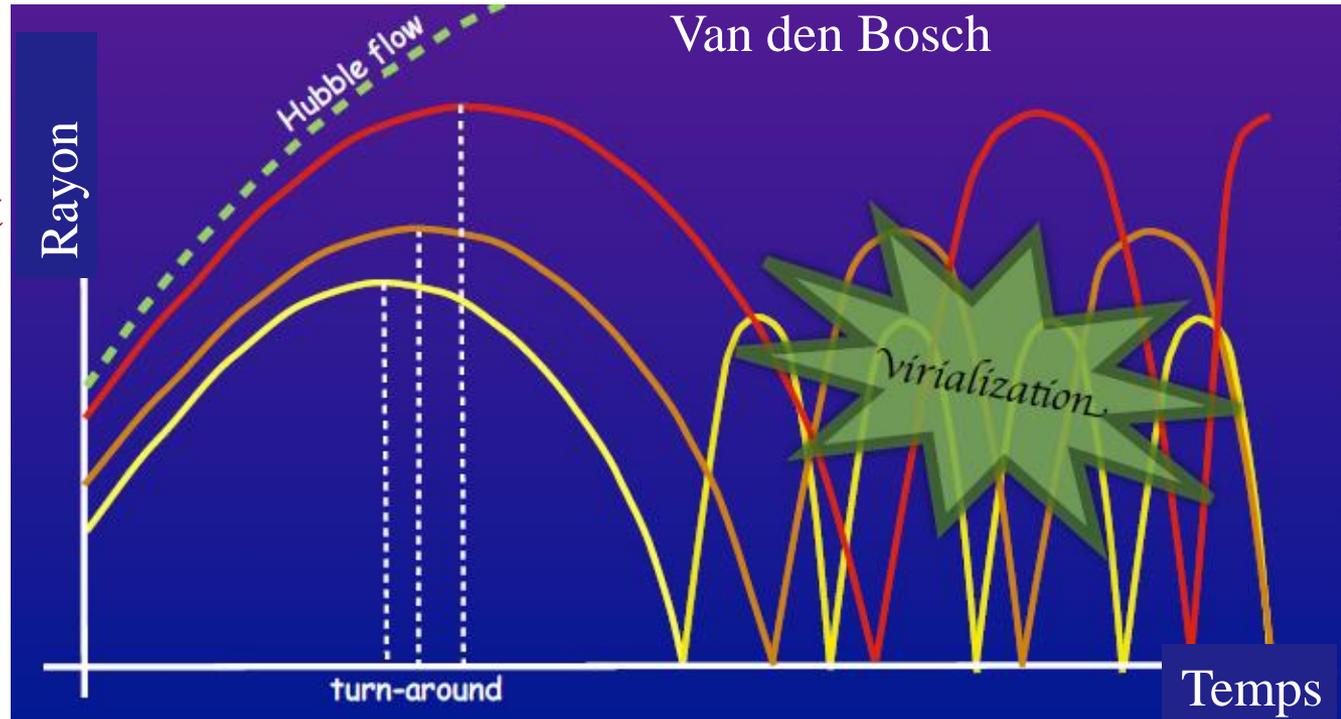
$$r = A(1 - \cos \theta)$$

$$t = B(\theta - \sin \theta)$$

$$A = GM/2|E|$$

$$A^3 = GMB^2$$

$$t_{\text{vir}} = 2 t_{\text{turn}}$$

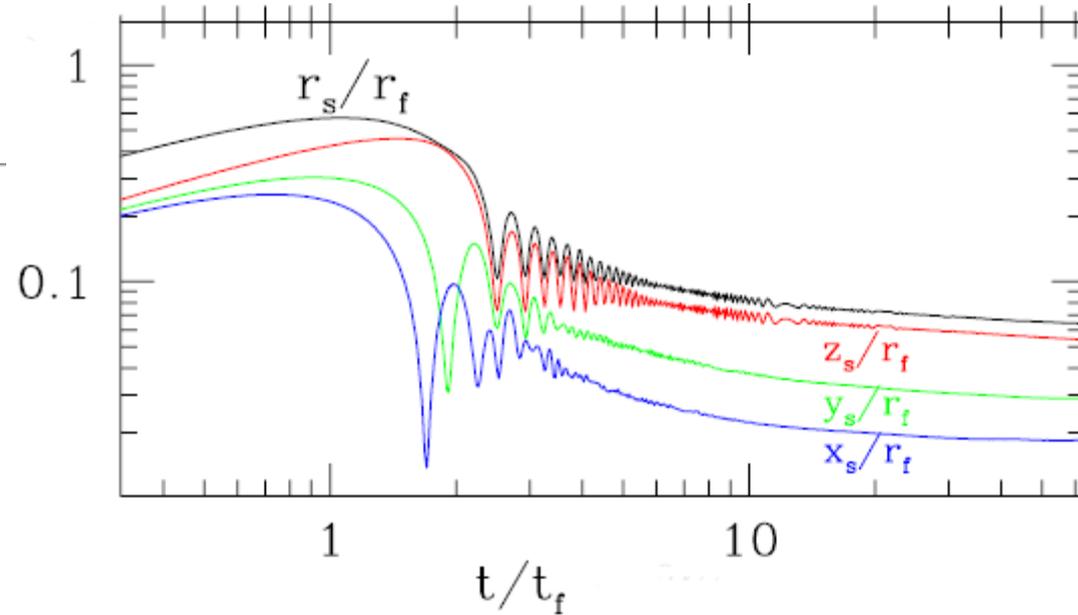
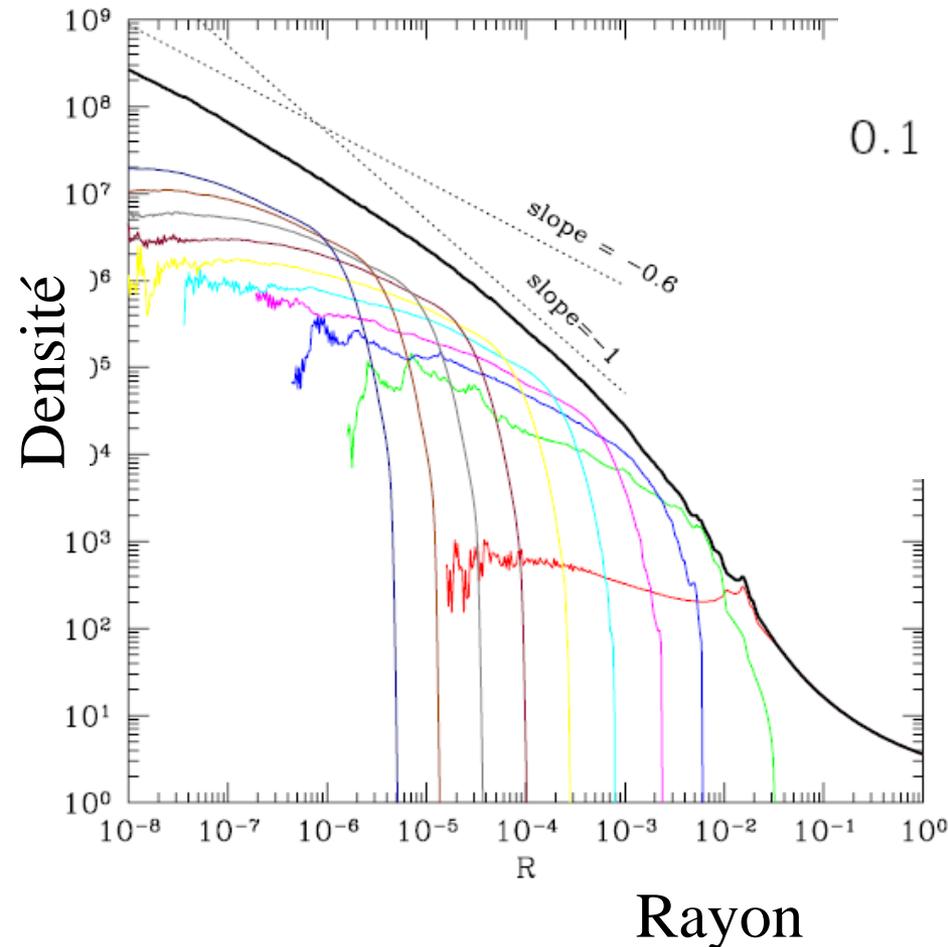


Van den Bosch

Effondrement des coquilles

Croisement des coquilles de matière
lors de l'effondrement

Solutions self-similaires



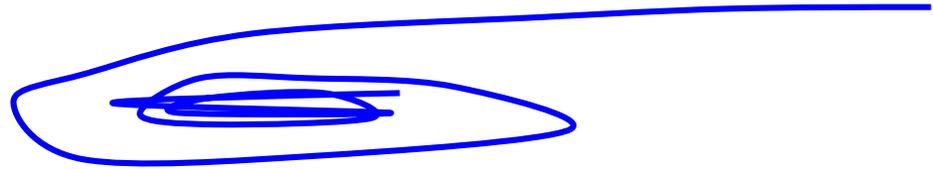
Solution self-similaire
triaxiale, très différente de la
symétrie sphérique

Lithwick & Dalal 2011

Définition d'un rayon de retombée (splashback)

On a l'habitude de parler de R_{Δ} , ou $\langle \rho \rangle = \Delta \rho_{\text{crit}}$ soit R_{200} , R_{500} ..
Arbitraires, et insuffisants

Par accréation, le rayon du viriel augmente sans cesse, par fusion aussi
D'autre part, le halo est triaxial, non sphérique

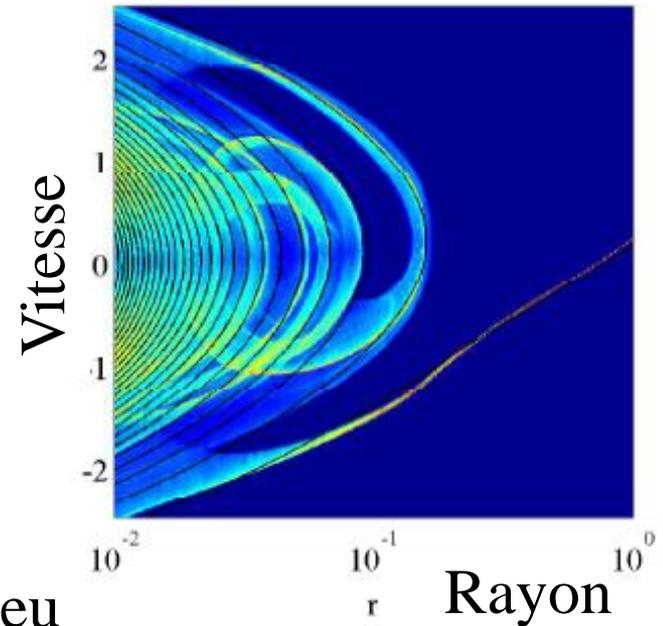


→ Meilleure définition: premier apocentre de la matière qui a effectué une première orbite dans le halo

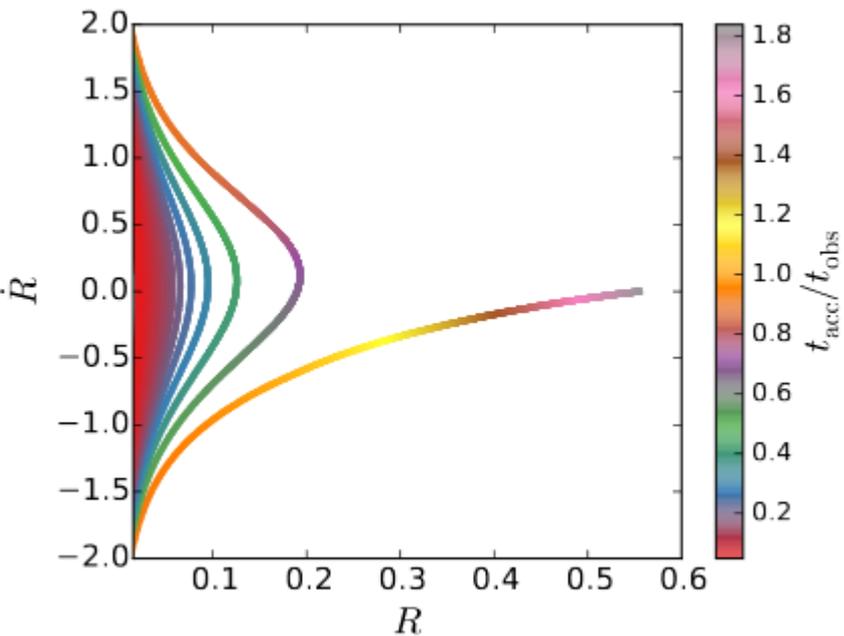
Distinct de la matière qui n'est pas encore rentrée

Pourquoi cette coupure?

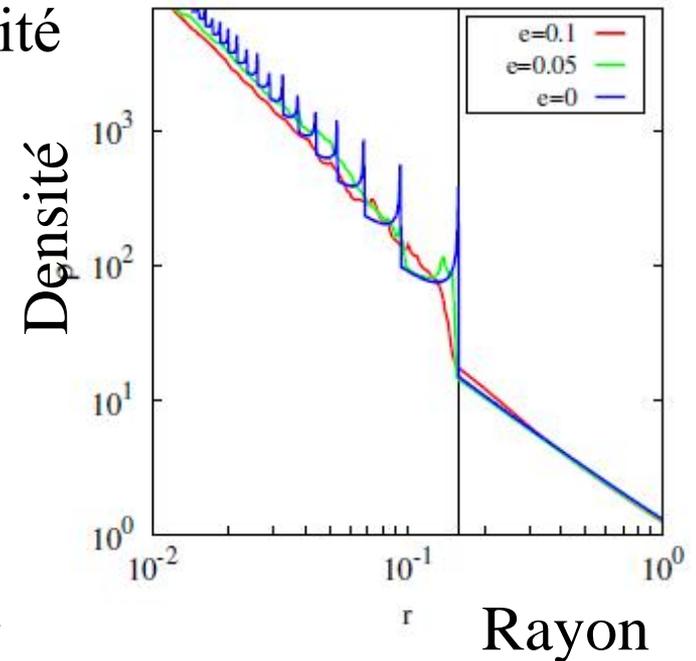
Courbes noires
Symétrie sphérique
Couleur: 3D $e=0.05$



Shi 2016

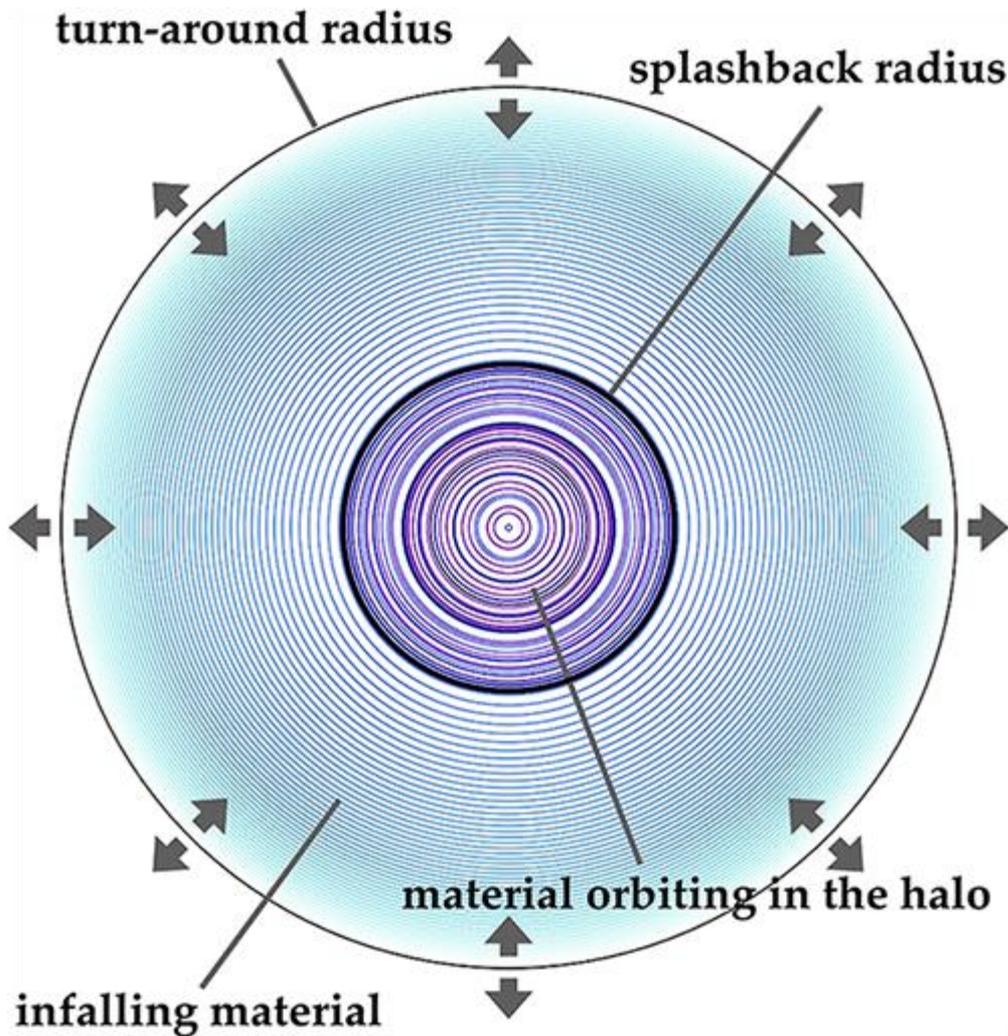


R_{sp} dépend peu
de l'ellipticité

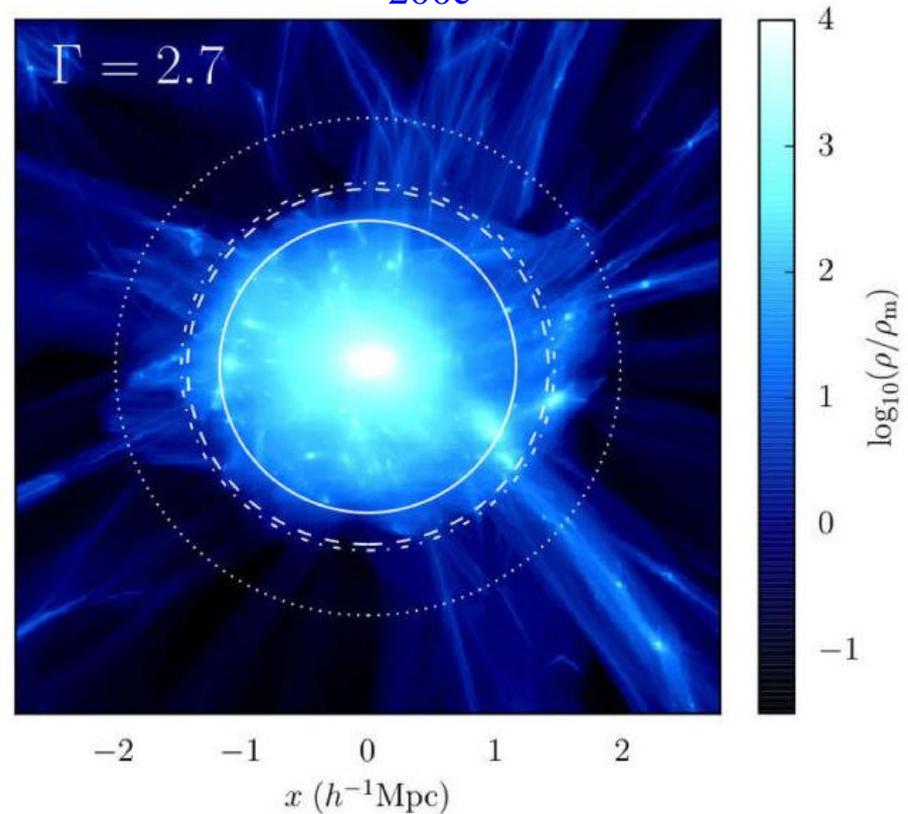


Adhikari et al 2014

Positions relatives des divers rayons

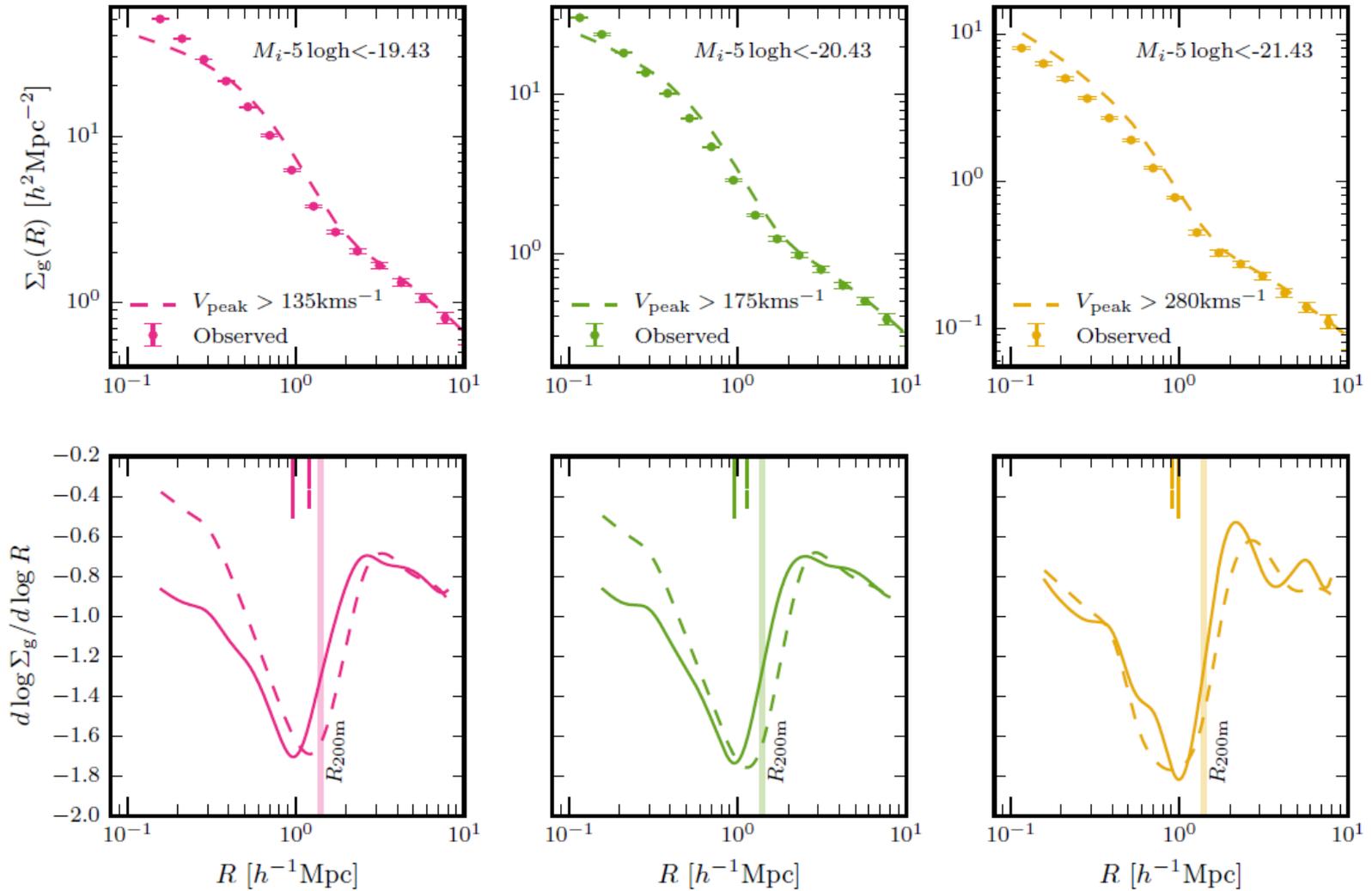


R_{200m} référence ρ_m
 R_{200c} référence ρ_{crit}
Plus self-similaire
avec R_{200c}

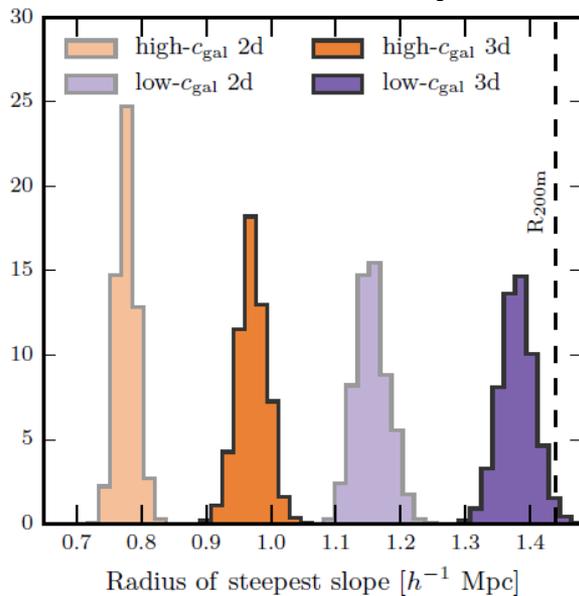
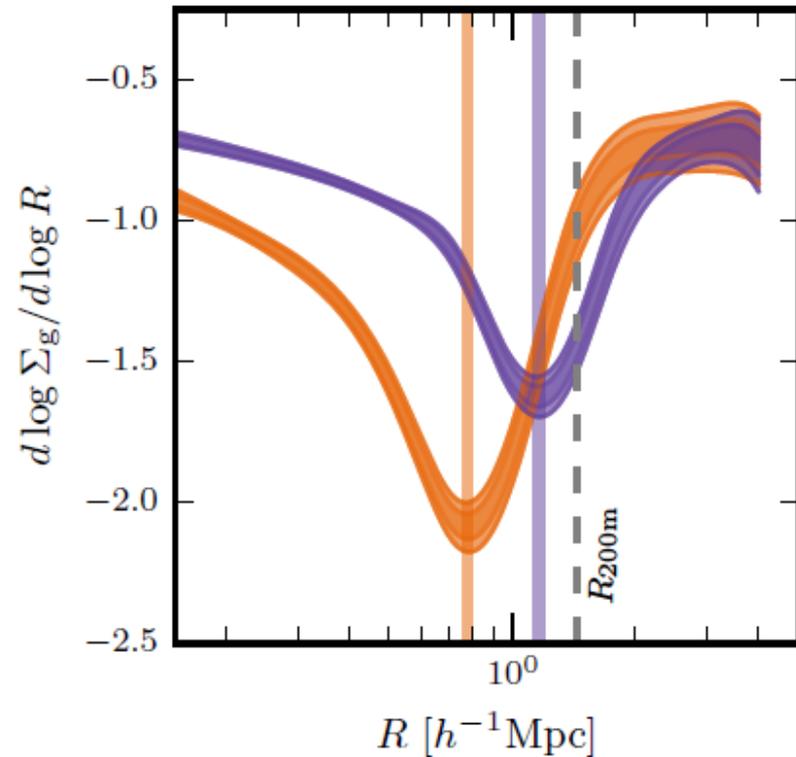
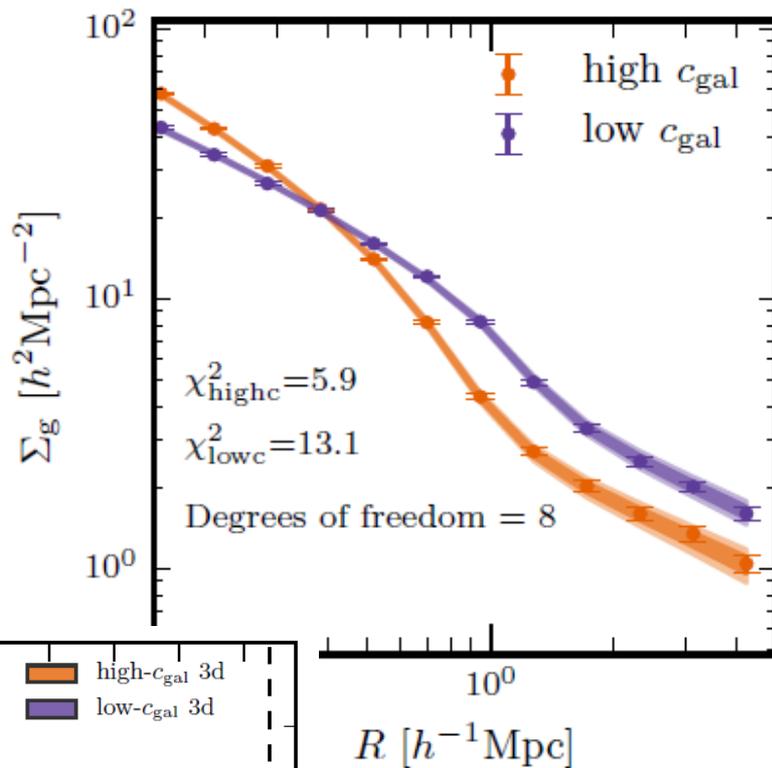


Diemer & Kravtsov 2014

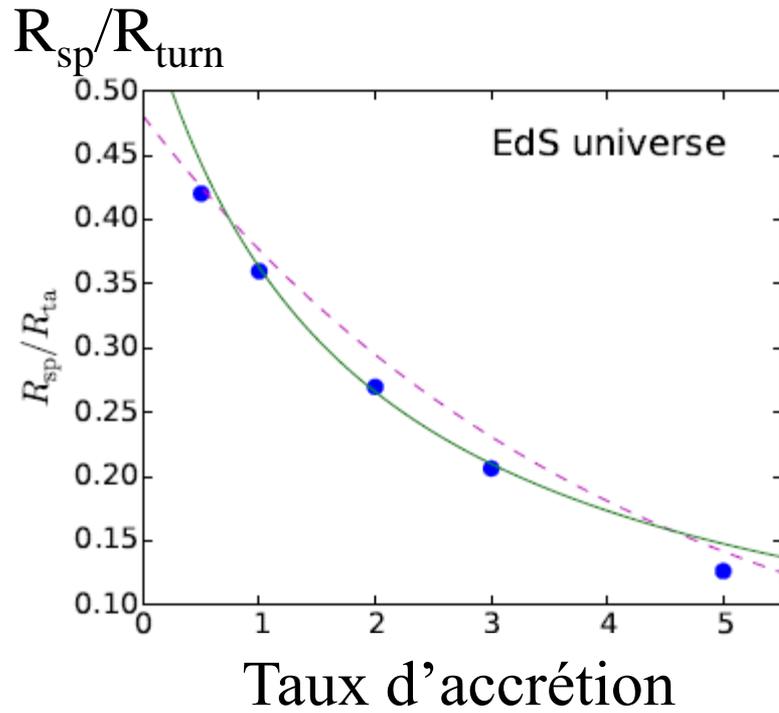
Detection du rayon splashback (SDSS)



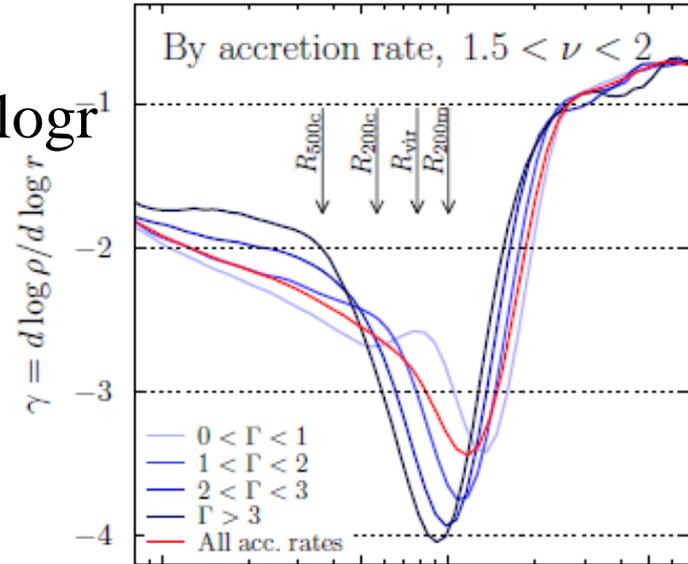
Rayon Rsp versus concentration



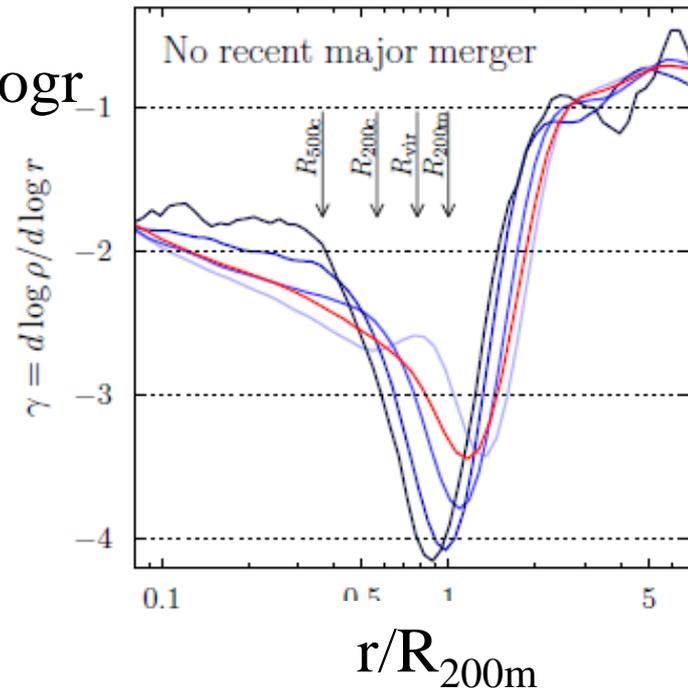
Déterminer le taux d'accrétion Γ



$d \log \rho / d \log r$



$d \log \rho / d \log r$



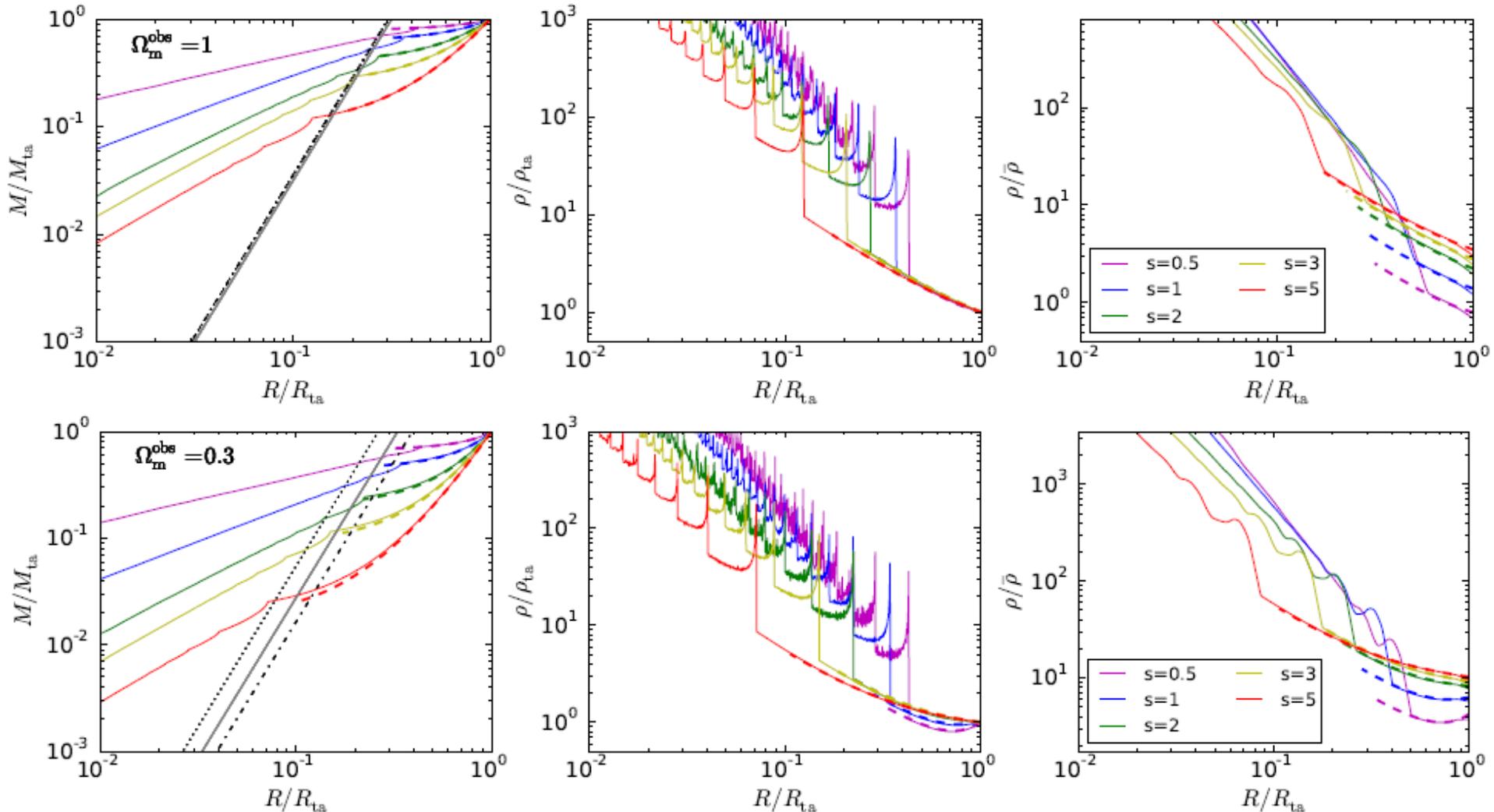
Shi 2016

Plus Γ est grand, plus le R_{sp} est petit

Diemer & Kravtsov 2014

Variation avec Ω_m

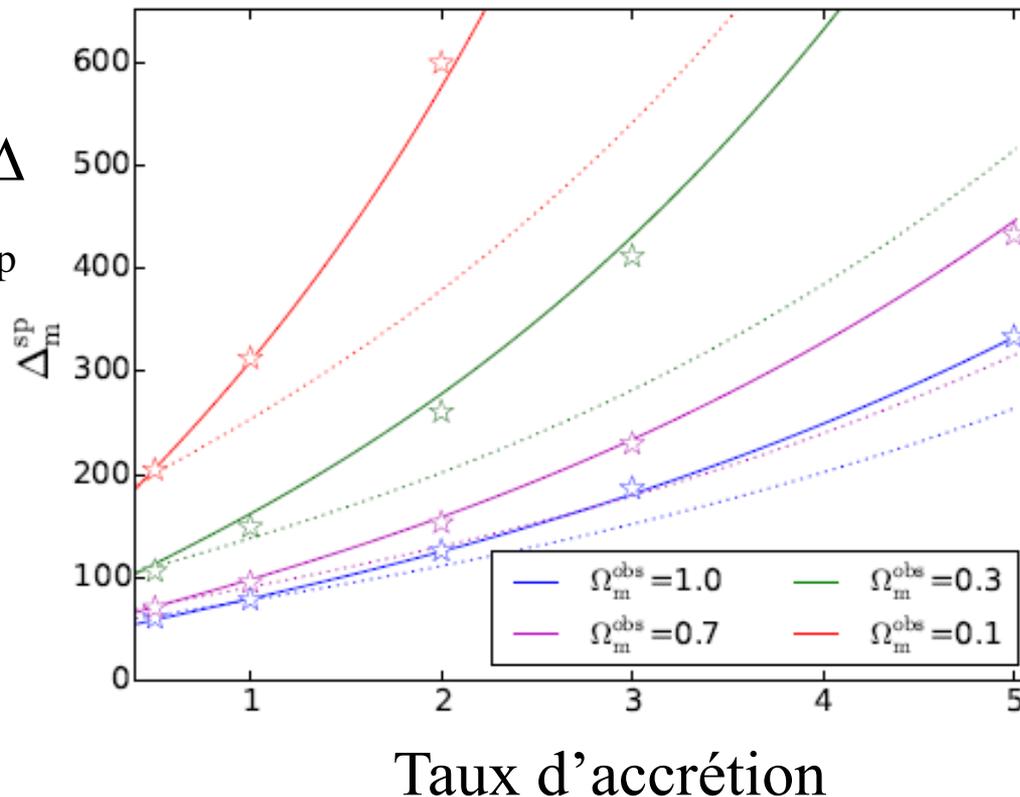
Turn-around à $1/4$ de l'oscillation
Accretion à $1/2$, R_{sp} à $3/4$ oscillation



Vitesse de croissance des amas

La matière au rayon de retombée R_{sp} à redshift zéro dans un univers plat avec $\Omega_m = 0.3$ a été ajoutée à environ $z=0.4$ pour un taux d'accrétion $s = 1$ et $z=0.2$ pour un taux d'accrétion $s = 5$

Sur-densité Δ
Au rayon R_{sp}



Shi 2016

Les parties externes → taux de croissance

Possible de déterminer à partir des observations le taux de croissance

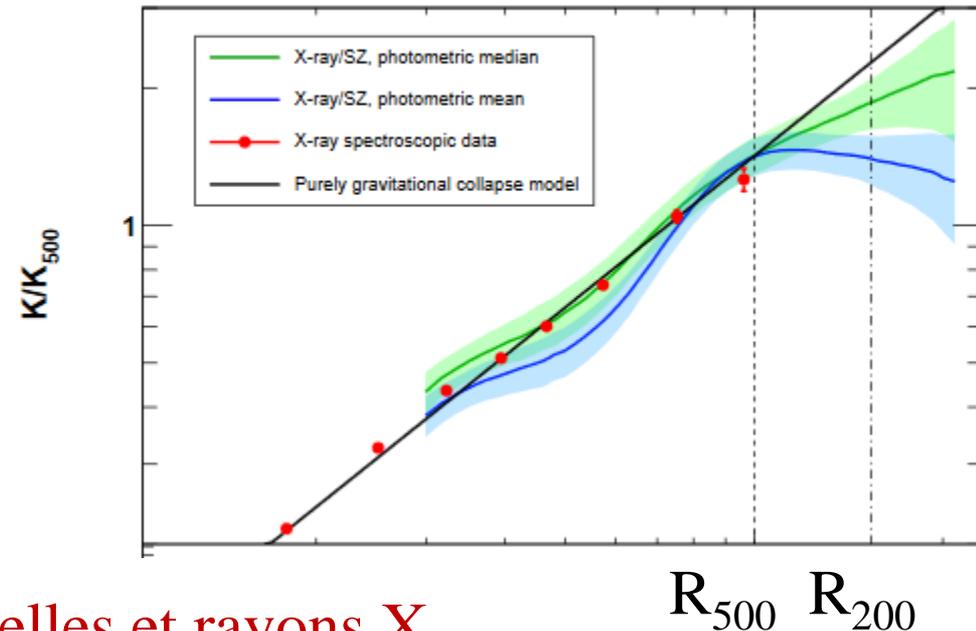
La forme des profils de densité:

-- partie interne loi de puissance: pente ne dépendant pas de z ,
Seulement du taux d'accrétion

-- partie externe, dépend des deux, mais possible de l'estimer avec
calcul auto-similaire, et effondrement sphérique d'une coquille

Les deux parties sont séparées par
le rayon R_{sp} , où la densité chute
d'un facteur 4-5 (caustique)

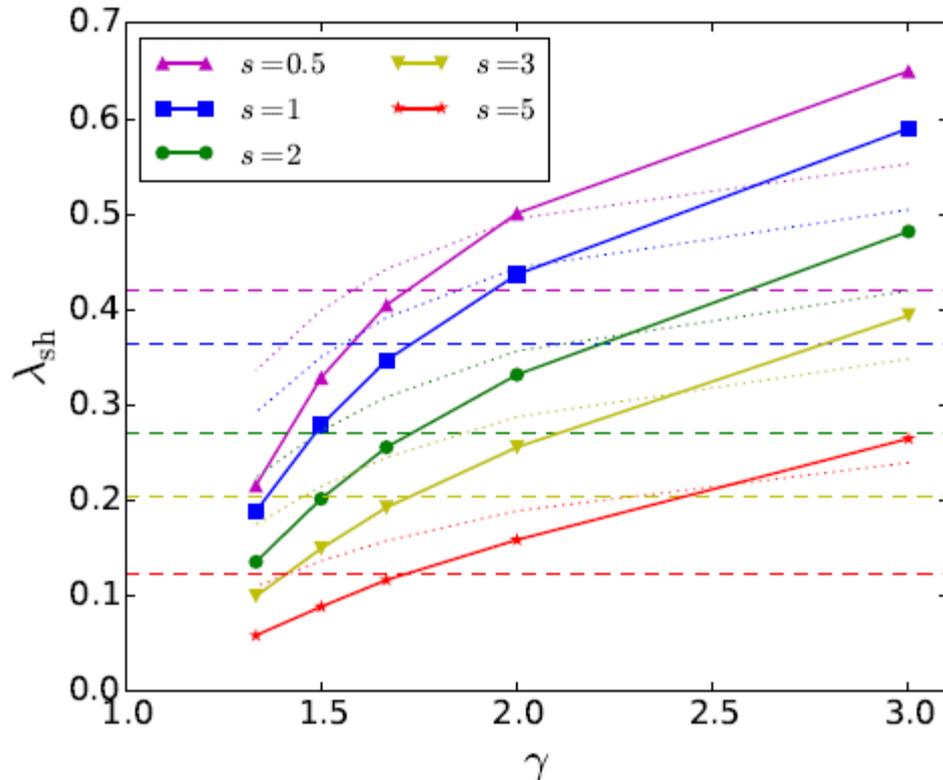
Entropie plate (Tchernin et al 16)



→ Masses par lentilles gravitationnelles et rayons X

Distribution du gaz à R_{sp}

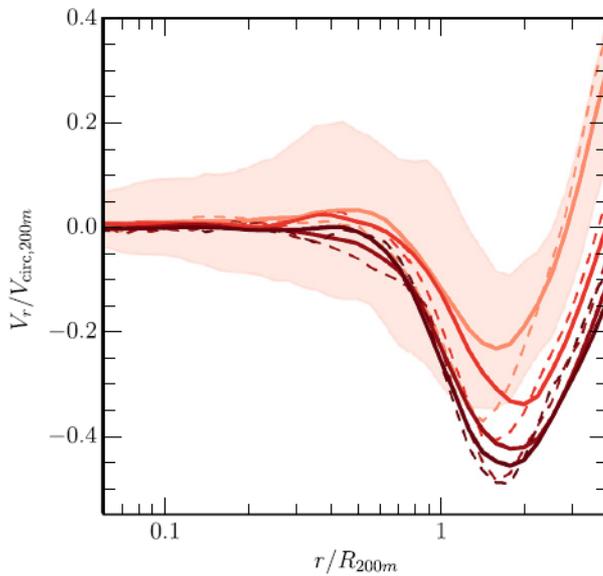
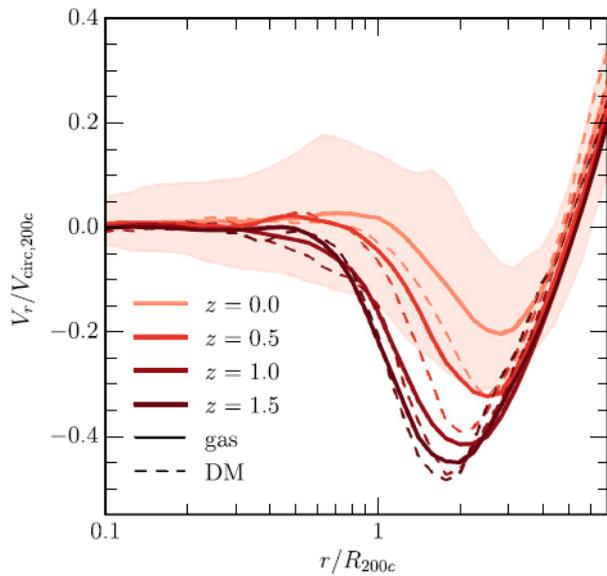
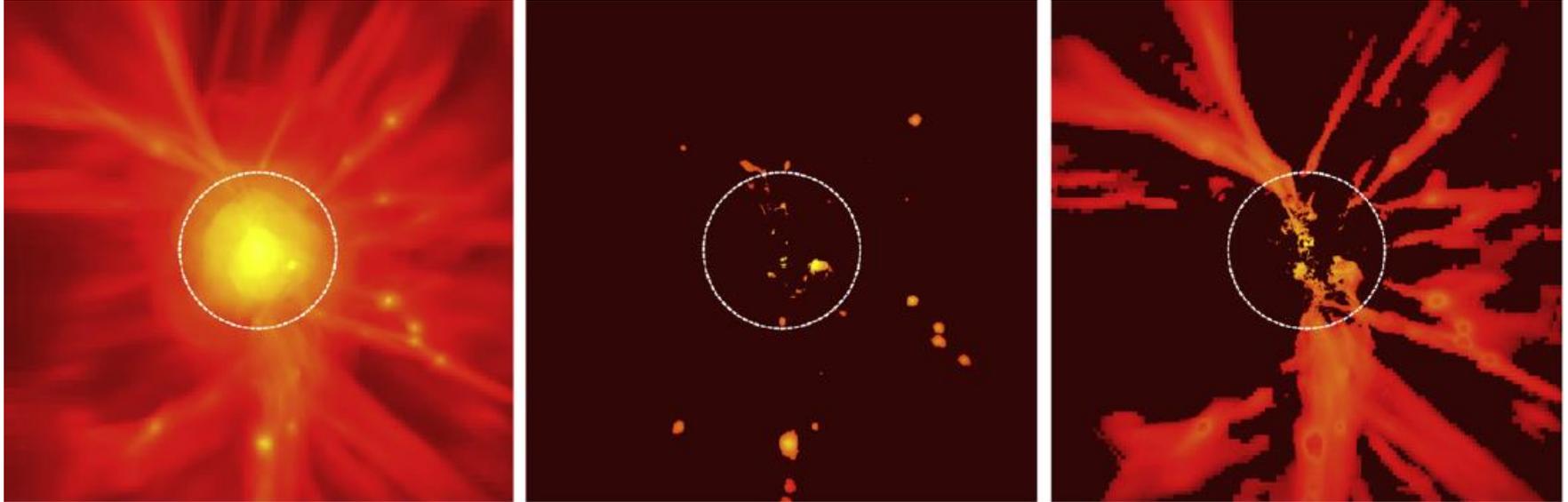
Le rayon du choc d'accrétion du gaz parfois correspond à R_{sp}
Si l'index adiabatique $\gamma = 5/3$, et si le taux d'accrétion est modéré



Le gaz et la matière noire peuvent se dissocier

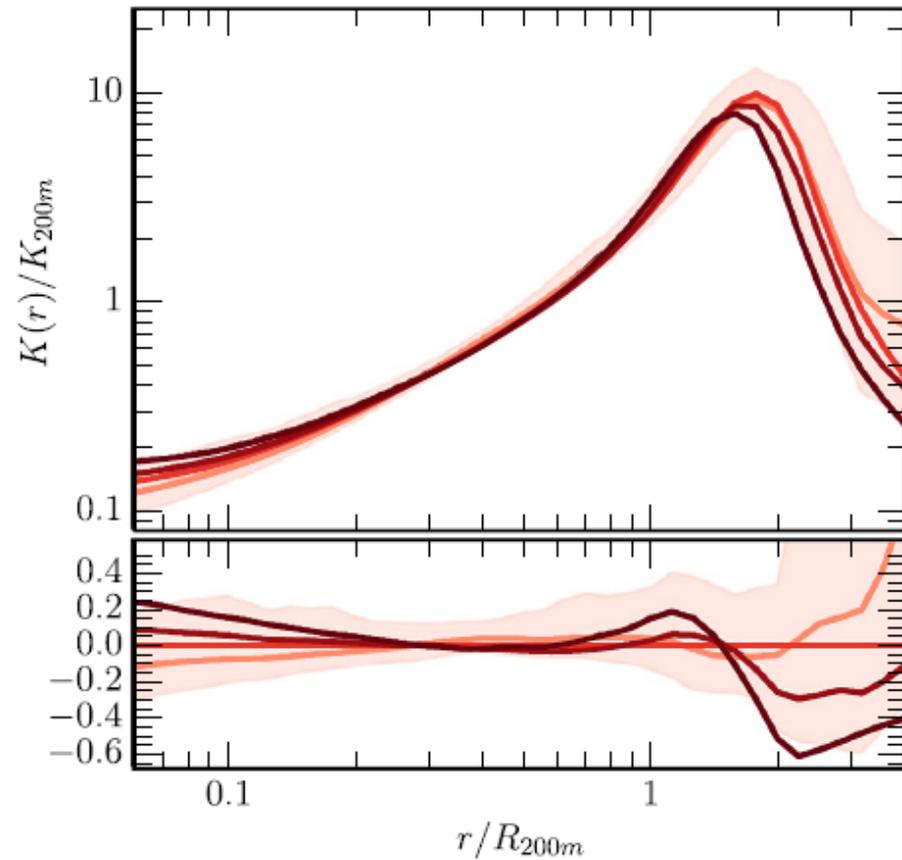
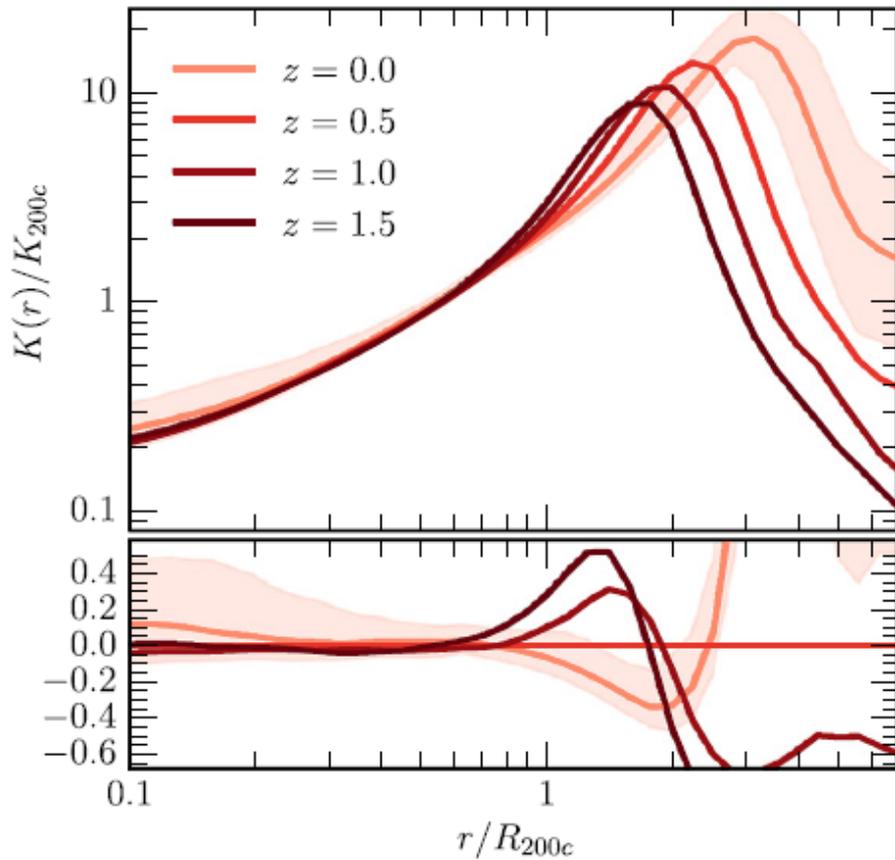
Taux d'accrétion dans les simulations

$$\text{Taux} = V_{\text{DM}} / V_{\text{cir}} < 0$$



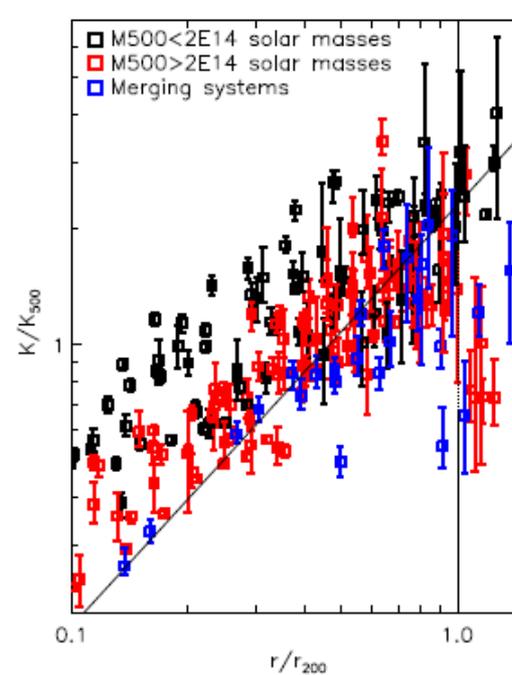
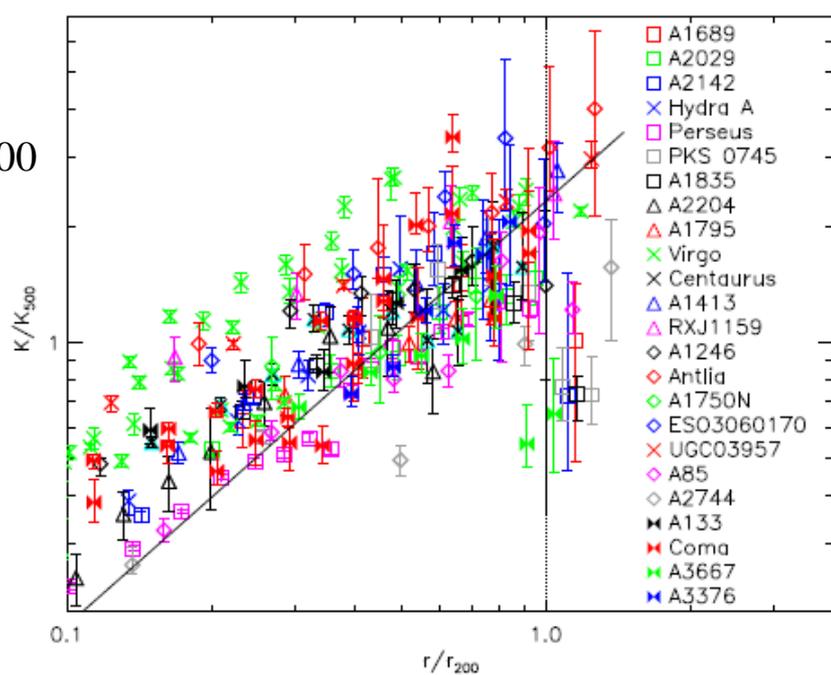
Lau et al 2015

Distribution de l'entropie

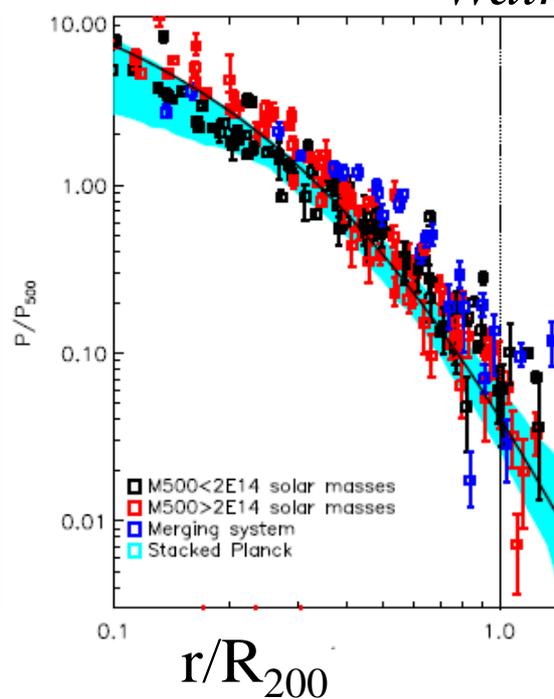
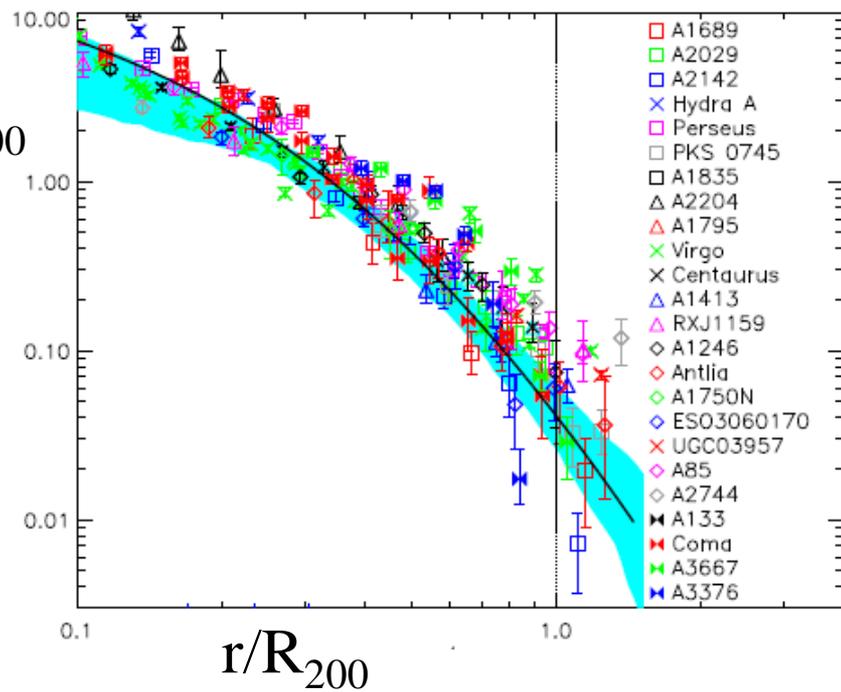


Simulations hydrodynamiques

Lau et al 2015

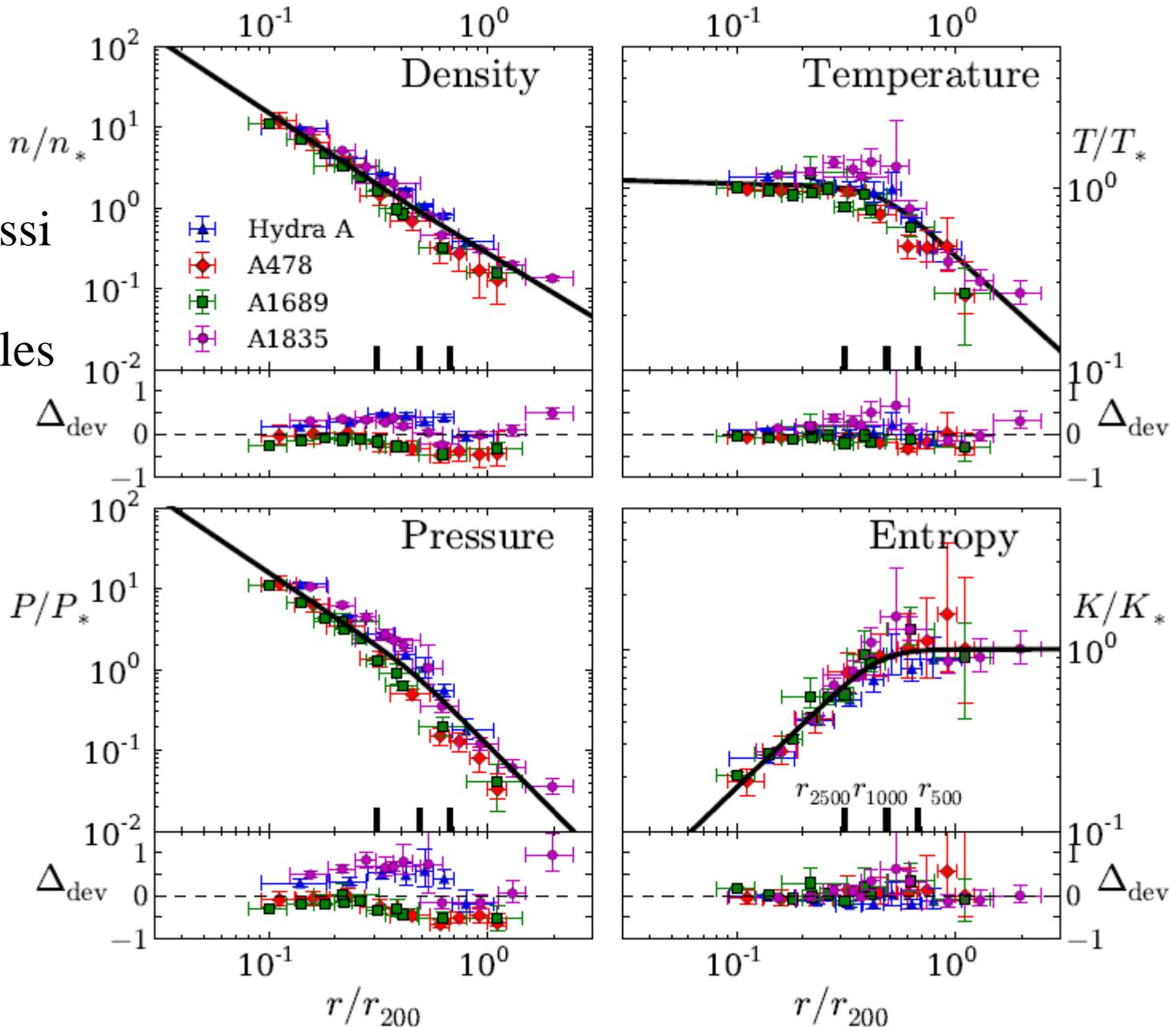
K/K_{500} 

Walker et al 18

 P/P_{500} 

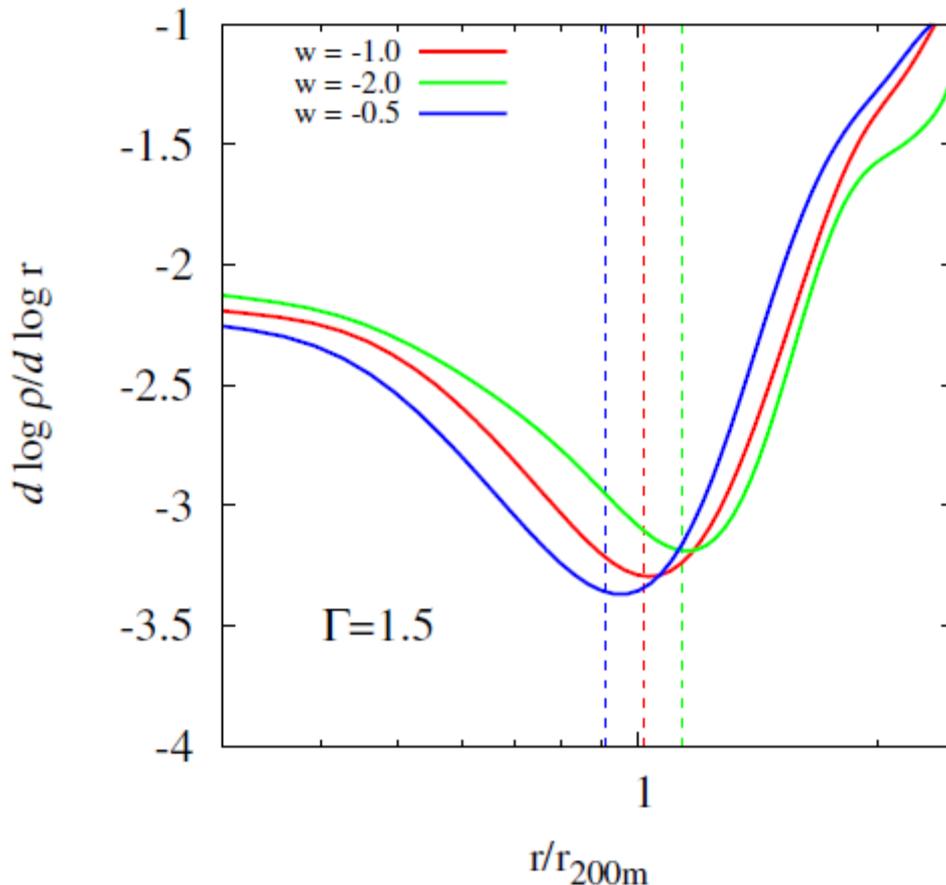
4 amas bien étudiés où existent aussi des lentilles gravitationnelles

→ Dispersion d'un amas à l'autre



Gravité modifiée et rayon R_{sp} (splashback)

Beaucoup de modèles de gravité modifiée sont « écrantés » au-dessus d'une certaine densité (ou champ fort), jusqu'au rayon de retombée (théories Caméléon, Vainshtein, par exemple)



A un taux d'accrétion donné
 $\Gamma = 1.5$

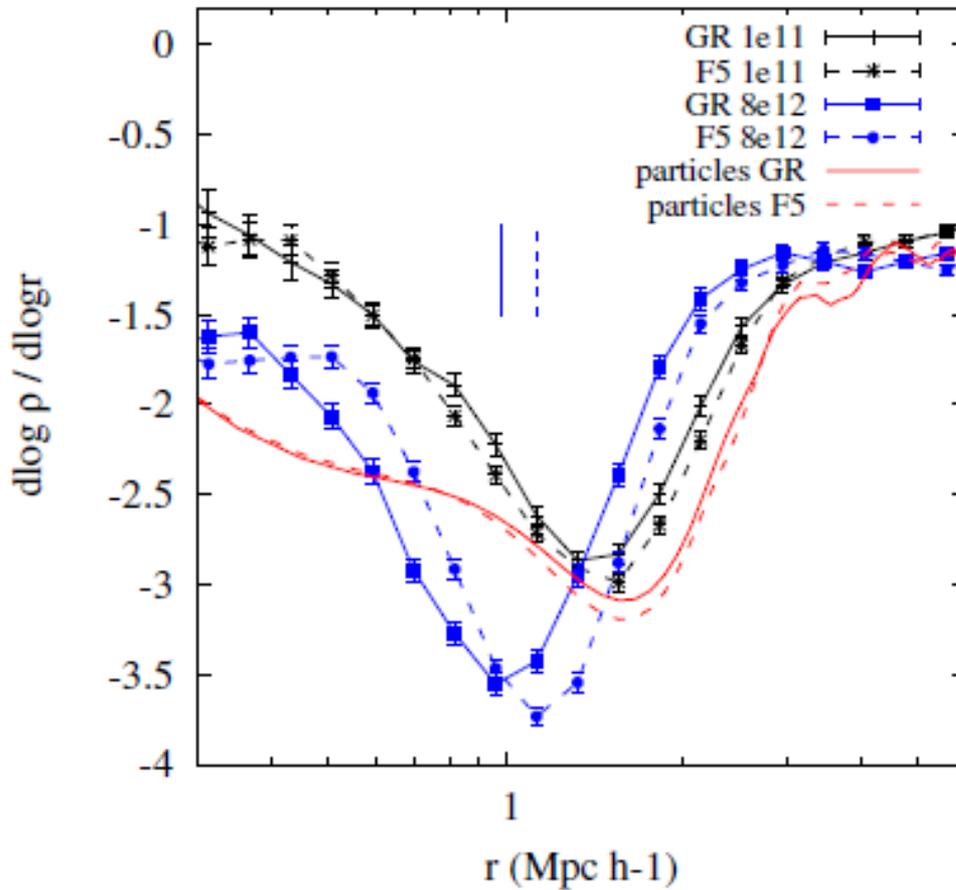
La position du rayon dépend
de l'équation d'état de
l'énergie noire w

(surtout dû au taux
d'expansion différent

Gravité modifiée et rayon R_{sp} (tests)

Beaucoup de modèles DGP (monde des branes, et des cordes)

$F(r)$, particules ou sous-halos



Il y a aussi une importance différente de la friction dynamique selon les Théories

Cela affecte les sous-halos et pas les particules

→ Lentilles faibles

Résumé

- Parties internes: relaxées ou non

Profil NFW, distribution de gaz et de pression universelle? → Lois d'échelle

- Masses connues avec approximations, Statistiquement – Influence de la triaxialité, évolution avec z

- Parties externes: rayon de retombée (**splashback**) bien défini

→ Permet de mesurer le taux d'accrétion

- Outils de diagnostics pour la gravité – rôle de la caustique et R_{sp}

→ recherches avec Euclid, LSST, etc.

