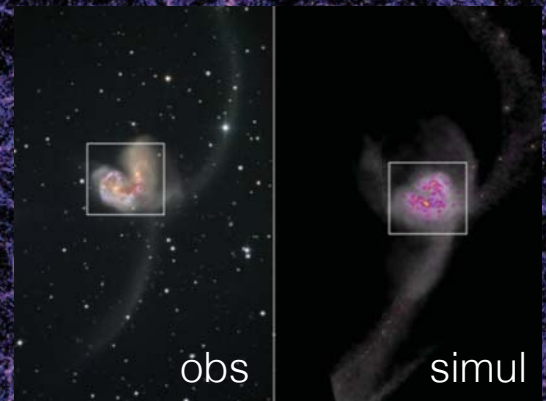
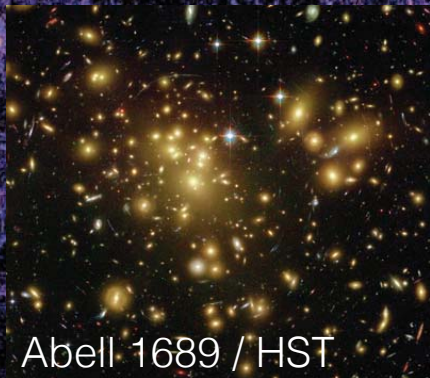


La dynamique de l'Univers : des grandes structures aux petits groupes de galaxies

Gary MAMON

*Institut d'Astrophysique de Paris
Sorbonne Université*



Motivations

Tests & améliorations des modèles standards :

- de physique des particules
 - particule de matière noire
 - nombre des saveurs de neutrinos
- de cosmologie : Λ CDM
- de gravitation : *Relativité Générale*
- de formation et d'évolution des galaxies
 - efficacité de la formation d'étoiles
 - effets des explosions de supernovae
 - effets des jets de trous noirs supermassifs
 - ...

Plan

- Rappels de Dynamique
- Tutoriel de Cosmologie
- Evolution dynamique à grande échelle
- Halos de matière noire
- Evolution dynamique à petite échelle (amas & groupes)
- Processus dynamiques
- Orbites des galaxies dans les groupes & amas
- Galaxies en fusion ou interaction dans les amas & groupes
- Perspectives

Rappels de dynamique

Force & accélération



Newton (1642-1726)

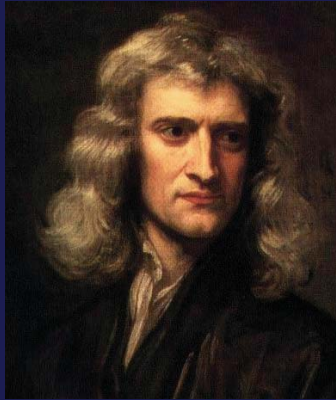
accélération proportionnelle
à somme des forces extérieures (*système inertiel*)

$$F = ma = m \frac{d^2x}{dt^2}$$



$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{F}{m}$$

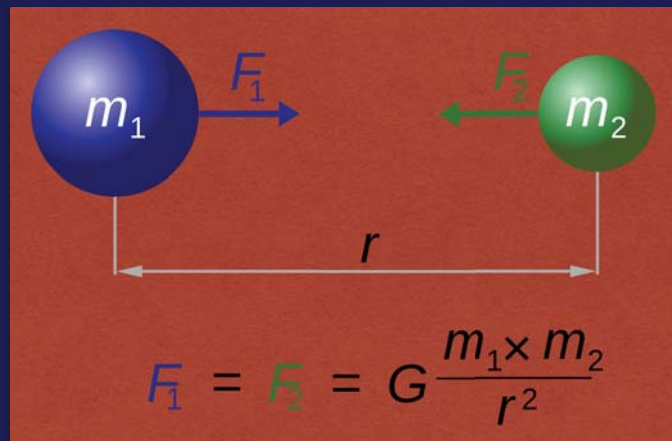
accélération de la pesanteur = cte sur Terre
⇒ mouvement uniformément accéléré



Newton (1642-1726)

Gravitation & Attraction Universelle

force de gravitation



explique orbites elliptiques des planètes & lois de Kepler

Énergie & moment angulaire

Conservation de l'énergie
mécanique (orbitale + orbitale-interne)
+ thermique
+ magnétique
+ rayonnement

Énergie mécanique = cinétique + potentielle

Systèmes en equilibrium dynamique :

Théorème du *viriel* : $2 E_{\text{cin}} + E_{\text{pot}} = 0$ (moyennée sur le temps)

variation du moment angulaire = *torque* (moment des forces)
 $dJ/dt = T$

Tutoriel de cosmologie

Histoire de l'Univers

1ers quarks : $T = 10^{12}K$, $t = 10^{-5}s$

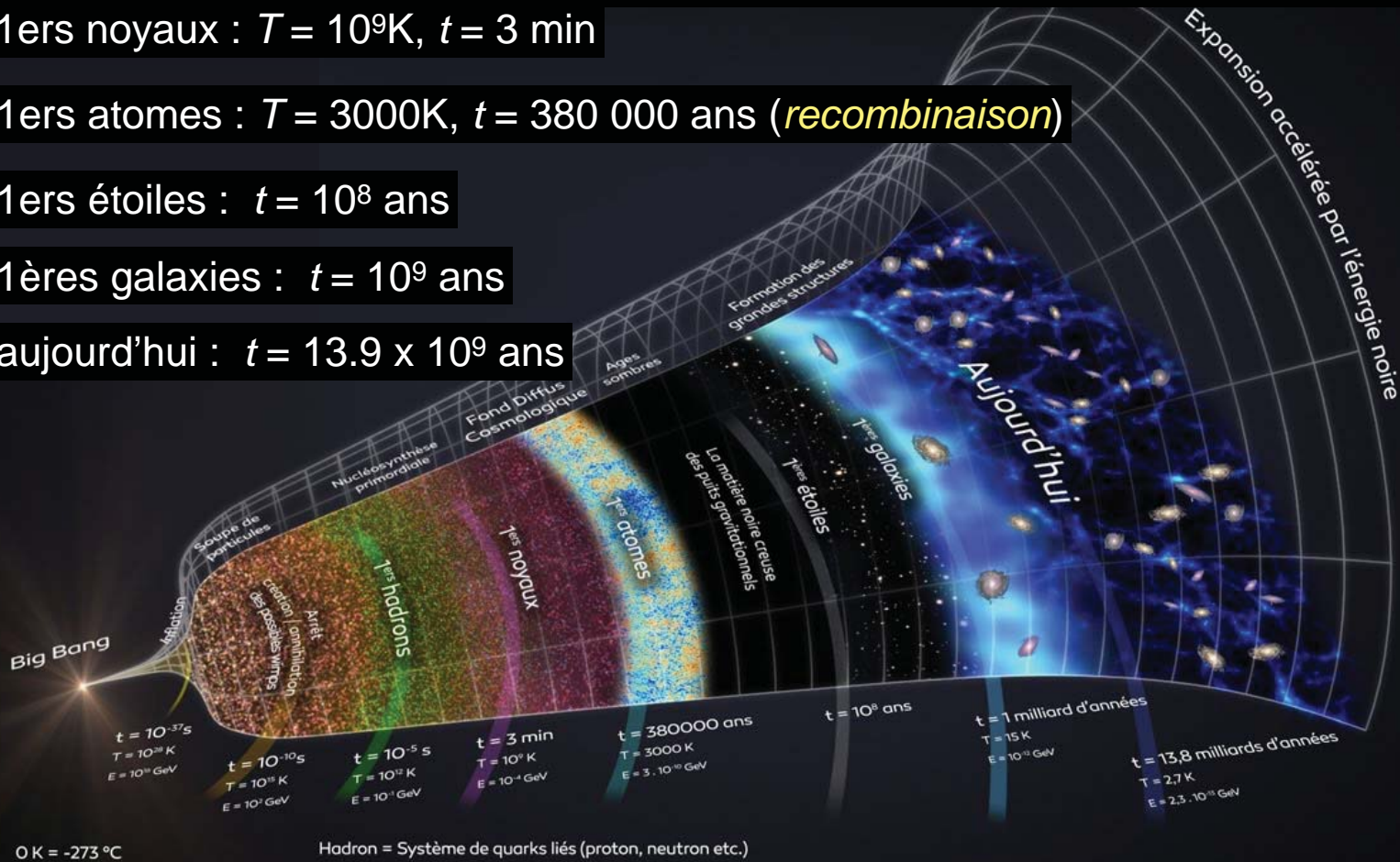
1ers noyaux : $T = 10^9K$, $t = 3 \text{ min}$

1ers atomes : $T = 3000K$, $t = 380\,000 \text{ ans}$ (*recombinaison*)

1ers étoiles : $t = 10^8 \text{ ans}$

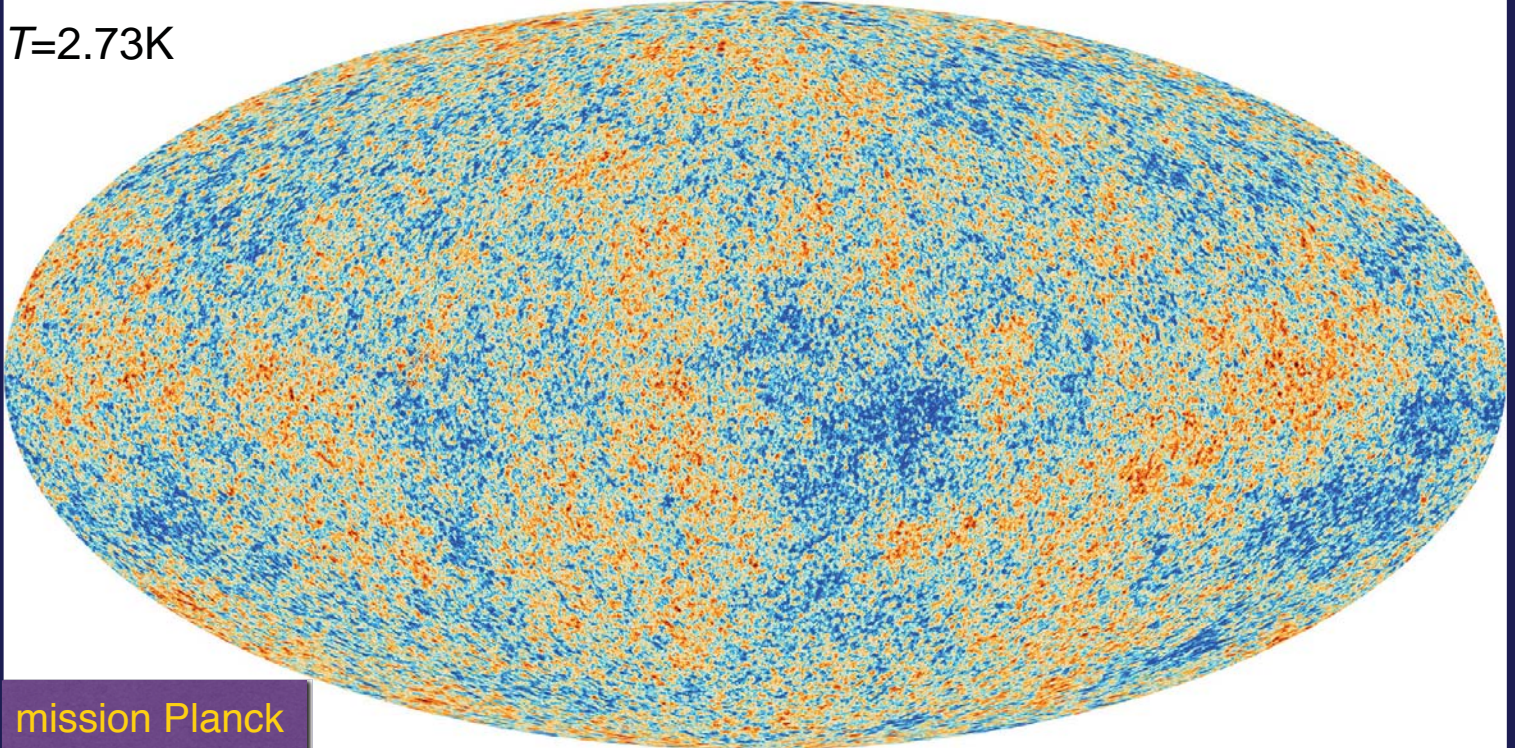
1ères galaxies : $t = 10^9 \text{ ans}$

aujourd'hui : $t = 13.9 \times 10^9 \text{ ans}$



Époque de recombinaison
(380 000 ans après Big Bang) :
Ère lumière de l'Univers

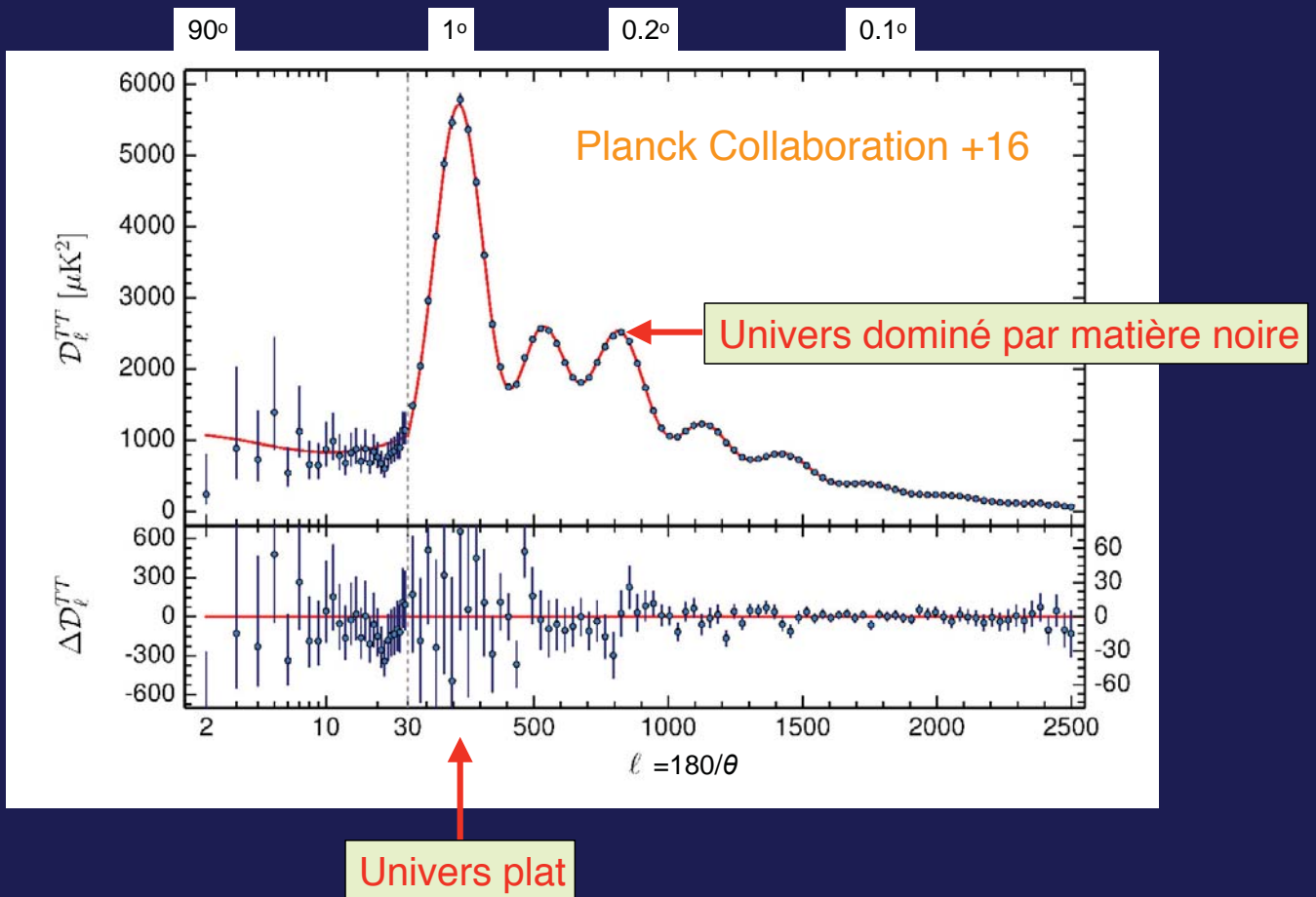
$T=2.73\text{K}$



mission Planck

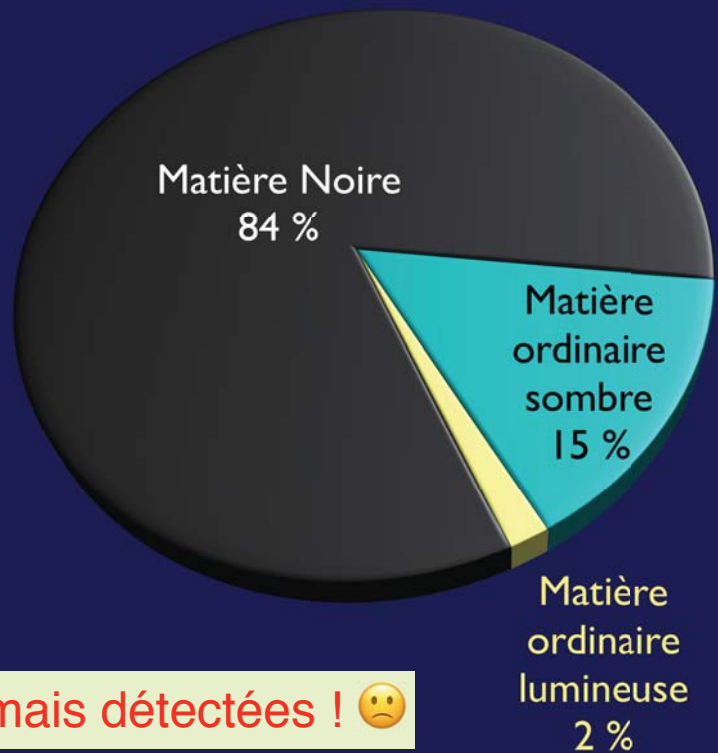
fluctuations de densité de ~ 1 sur 1000

Spectre des fluctuations angulaires de température



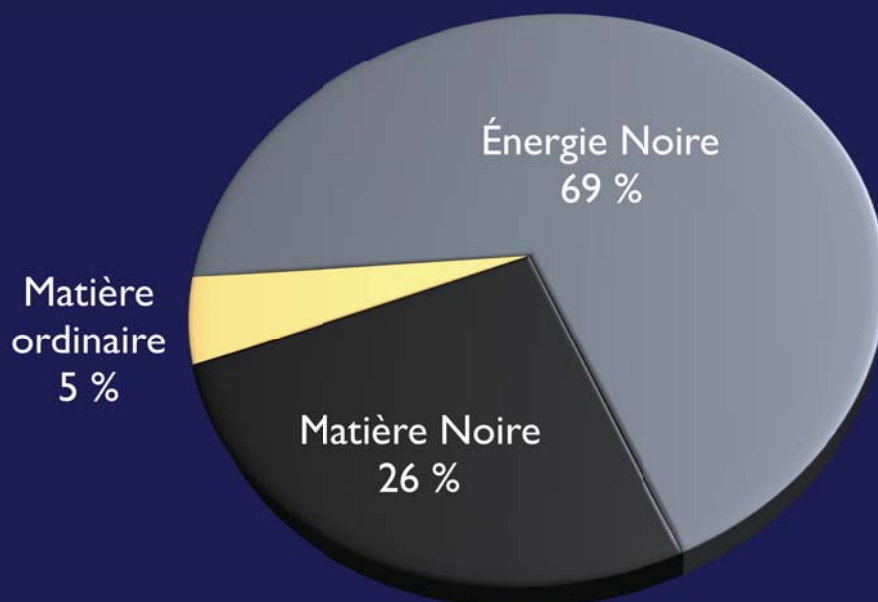
Budget de masse de l'Univers

84% de la masse de l'Univers est invisible, non faite d'atomes
= Matière Noire



Particules de Matière Noire jamais détectées ! 😞

Budget d'énergie de l'Univers



L'Énergie Noire est responsable de l'accélération de l'expansion

Quantité d'Énergie Noire 60 à 120 ordres de magnitude trop faible ?

Évolution dynamique à grande échelle

Simulation “cosmologique” de l’Univers en expansion matière noire seulement

1024³ particules
boîte de 45 Mpc
tranche de 9 Mpc

z	âge (10 ⁹ ans)
50	0.05
20	0.2
10	0.5
5	1
2	3
1	6
0.5	8.5
0.2	11
0.1	12.5
0	13.9

$a = 0.02$
 $t = 0.1$ Gyr

Diemer & Kravtsov 14; Diemer & Mansfield ~17

Simulation "cosmologique" de l'Univers en expansion matière noire seulement

1024³ particules
carré de 45 Mpc,
comobile
avec l'Univers,
tranche de 9 Mpc

z	âge (10 ⁹ ans)
50	0.05
20	0.2
10	0.5
5	1
2	3
1	6
0.5	8.5
0.2	11
0.1	12.5
0	13.9

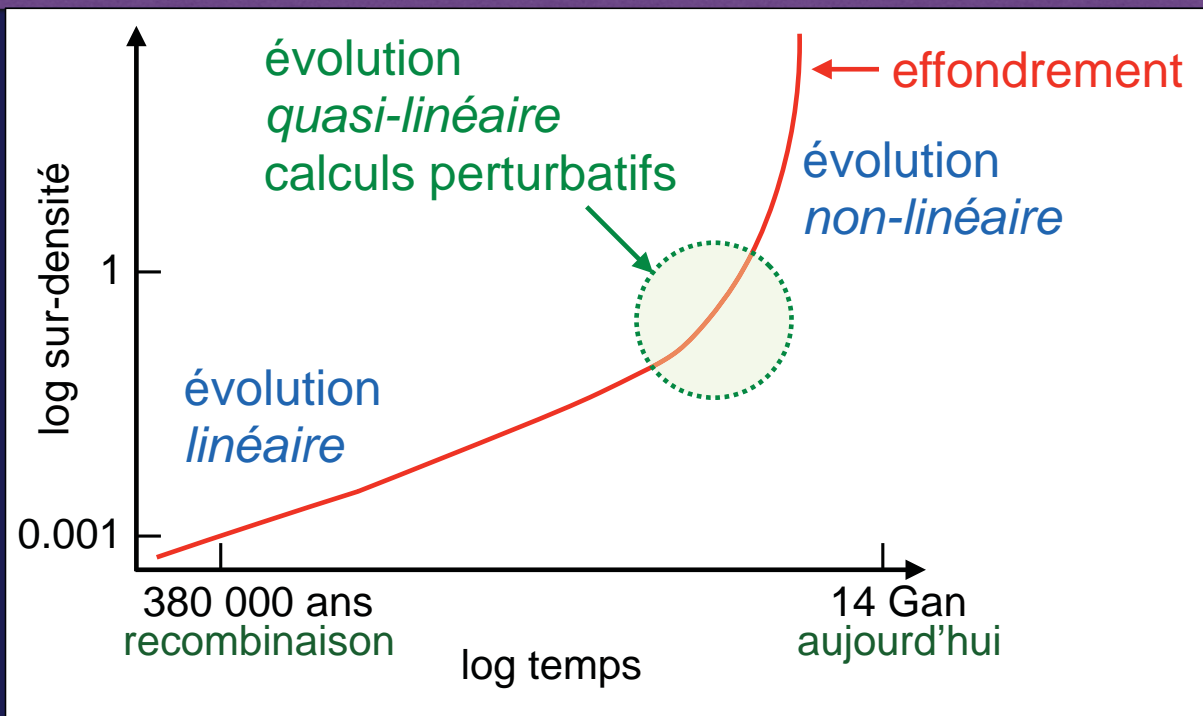
contraste de densité s'amplifie fortement
toile cosmique : filaments & halos
zones vides croissent lentement
zones denses se contractent rapidement

eld ~17

Évolution linéaire & non-linéaire

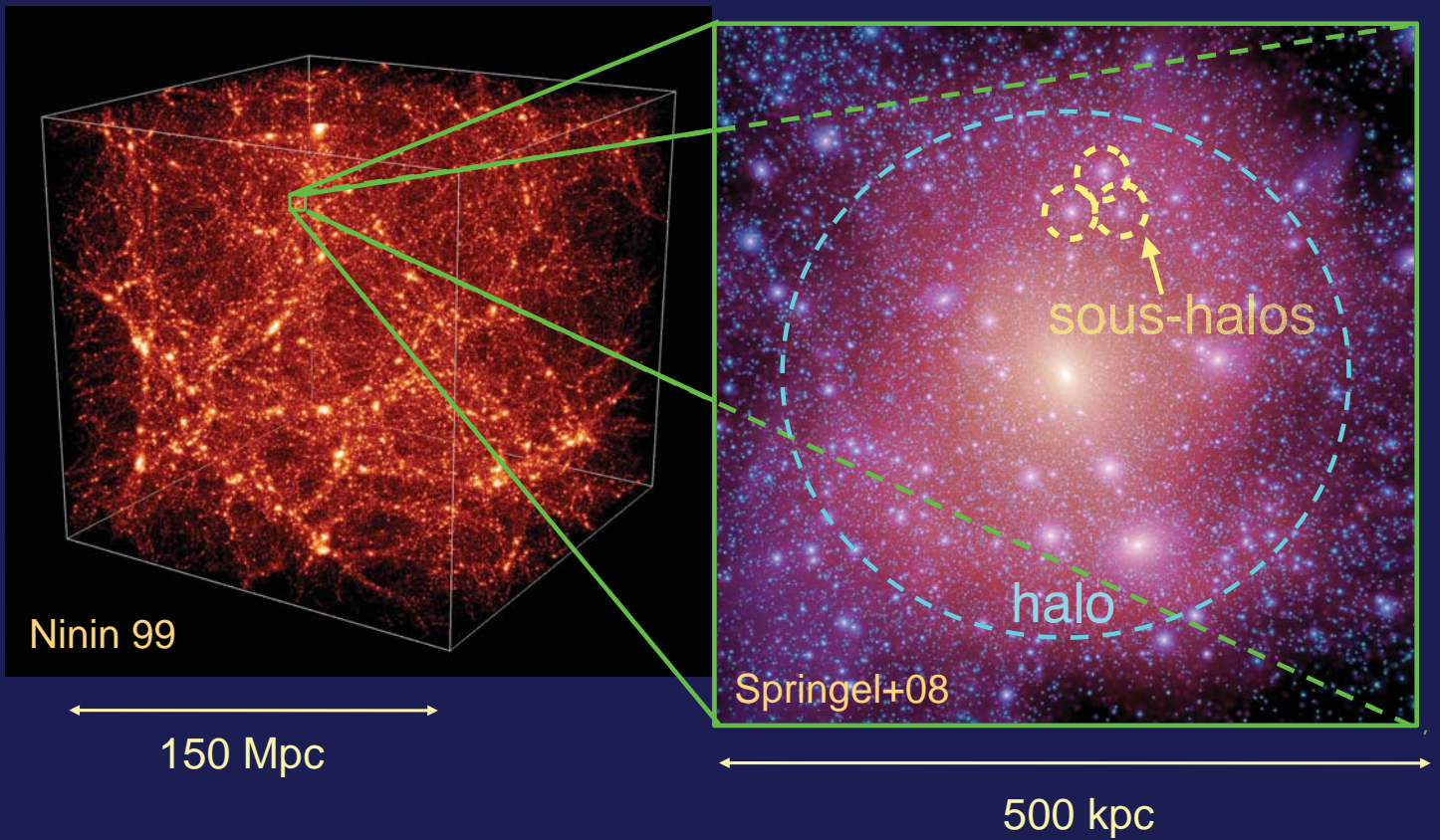
densité de matière moyenne de l'Univers $\sim a^3 \sim 1/(1+z)^3$

sur-densité de matière



Galaxies
& halos de matière noire

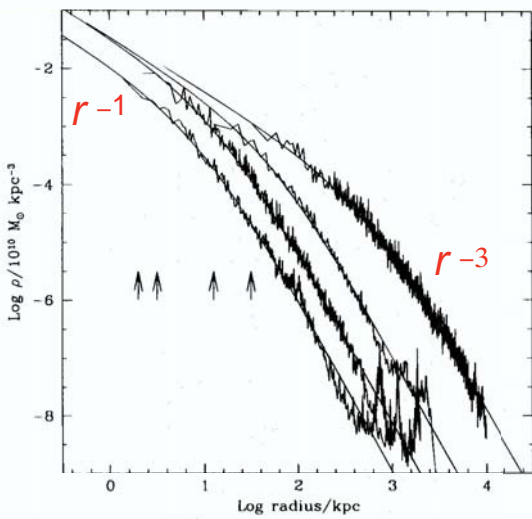
Simulation cosmologique à N-corps



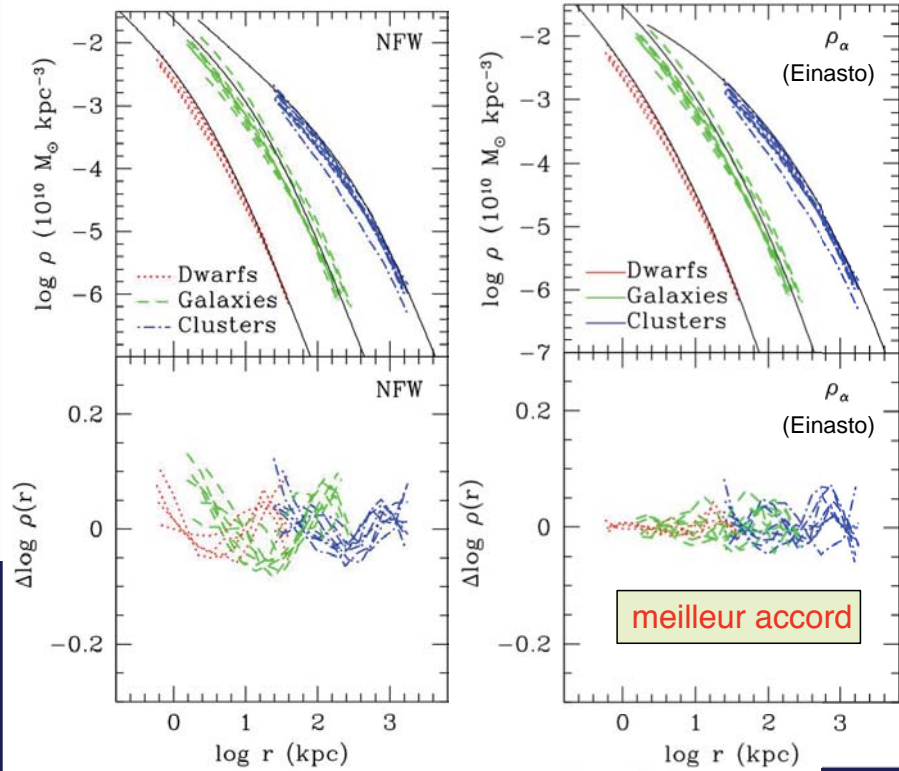
rayon d'équilibre dynamique
= *rayon du viriel*: densité moyenne $\approx 300x$ densité de l'Univers

Profils de densité dans les simulations cosmologiques à N corps

Navarro, Frenk & White 96 « NFW »



Navarro et al. 04



$$\rho(r) \propto \frac{1}{(r/r_{-2}) (1 + r/r_{-2})^2}$$

NFW projeté $\approx m=3$ Sérsic
Łokas & Mamon 01

3D Sérsic
Einasto 63

$$\rho(r) \propto \exp\left[-2\mu\left(\frac{r}{r_{-2}}\right)^{1/\mu}\right]$$

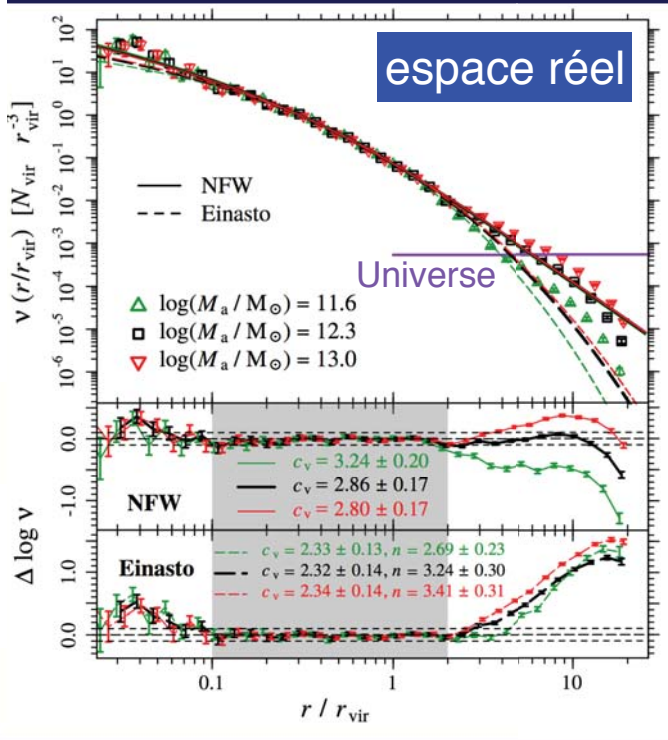
Navarro et al. 04

Profil de densité intrinsèque des amas jusqu'à $20 r_{\text{vir}}$ Trevisan, GM & Stalder 17

= f (masse minimale des groupes auquel on assigne les galaxies)

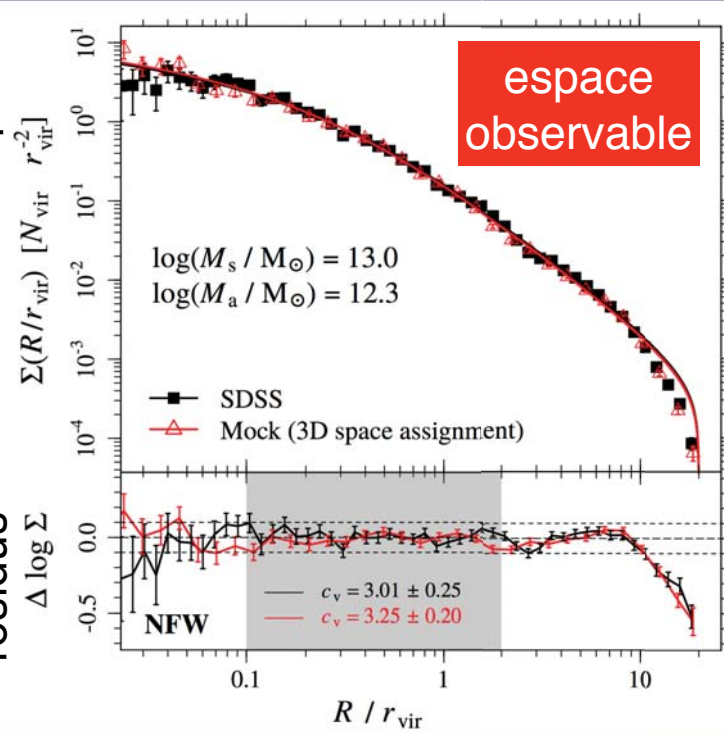
densité en nombre

résidus



densité surfacique

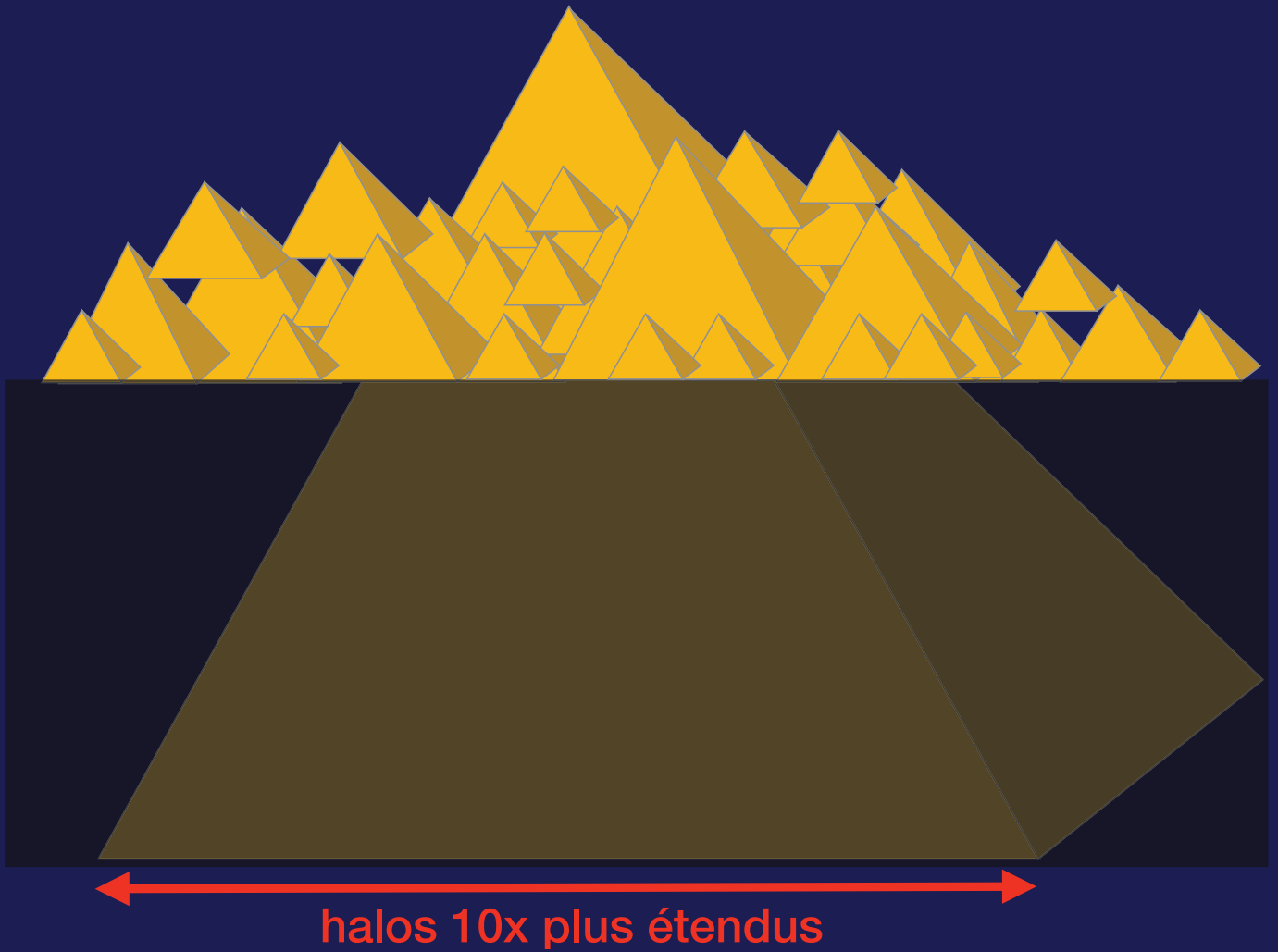
résidus



profil NFW $\rightarrow 13 r_{\text{vir}}$ pour masse optimale d'assignation aux groupes (espace réel)

profil NFW $\rightarrow 10 r_{\text{vir}}$ pour masse optimale d'assignation aux groupes (espace obs)

La face cachée des halos (groupes & amas)

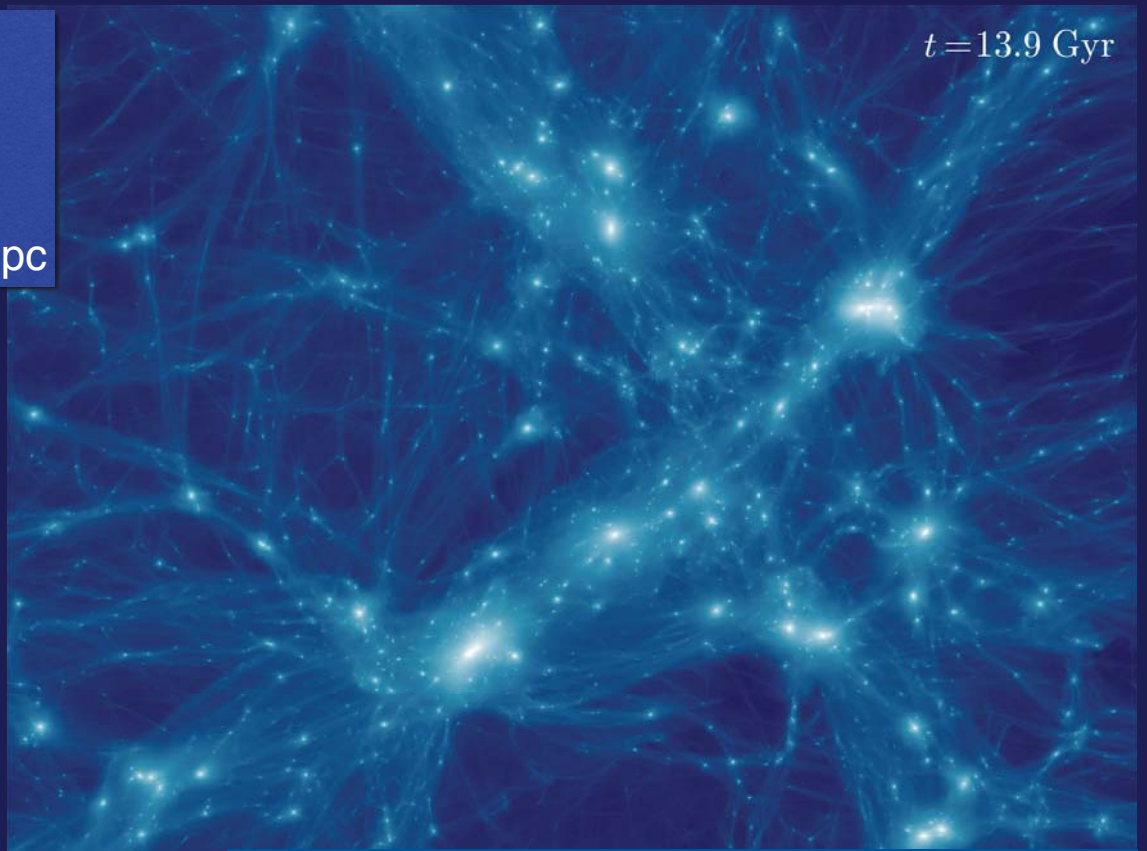


Évolution dynamique à plus petite échelle

Simulations

Simulation “cosmologique” de l’Univers matière noire seulement

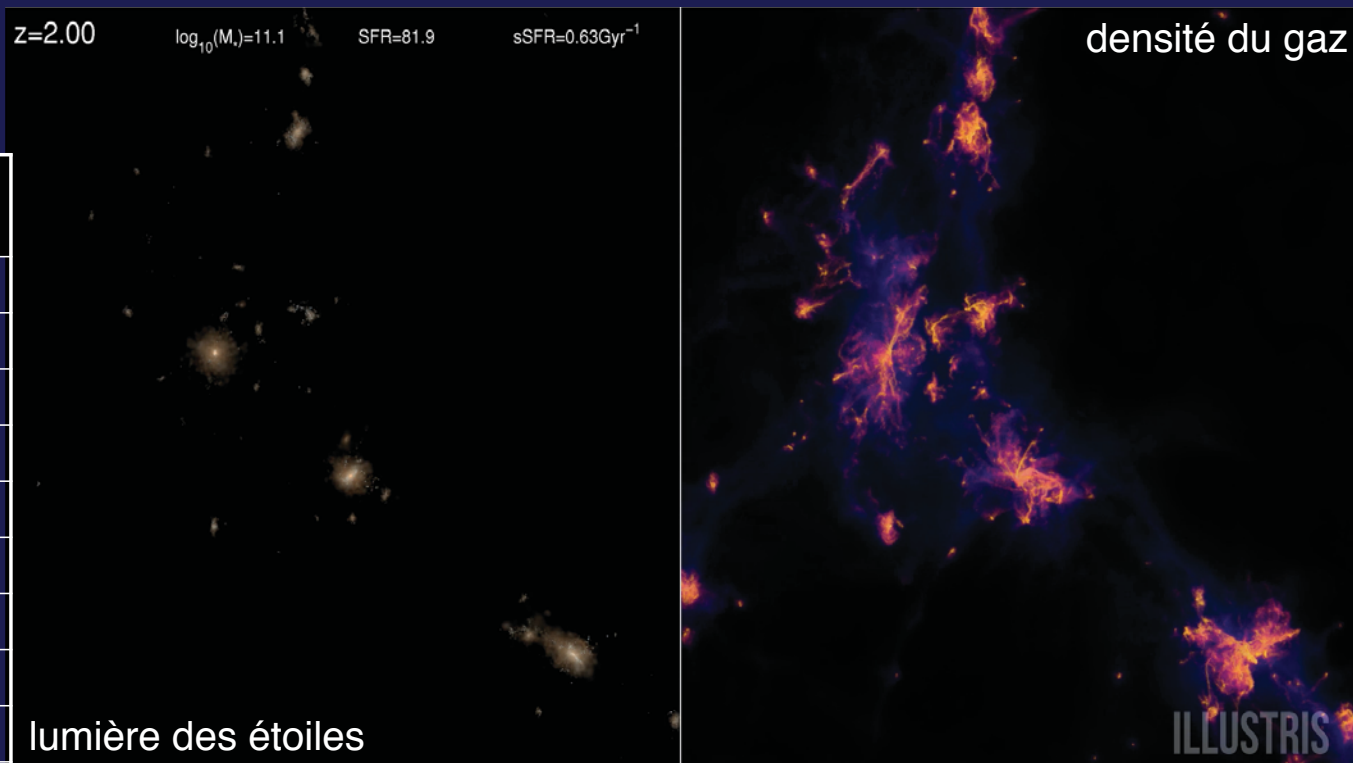
1024³ particules
22x17 Mpc,
comobile
avec l’Univers,
tranche de 14 Mpc



Diemer & Kravtsov 14; Diemer & Mansfield ~17

boîte de 1 Mpc,
comobile
avec l'Univers

Simulation cosmologique hydrodynamique



z	âge (Gan)
50	0.05
20	0.2
10	0.5
5	1
2	3
1	6
0.5	8.5
0.2	11
0.1	12.5
0	13.9

ILLUSTRIS: 19M heures sur 8192 coeurs à Saclay & Munich
Vogelsberger, Genel et al.

Évolution dynamique à plus petite échelle

Processus dynamiques

Temps caractéristiques & densité moyenne

σ_v = dispersion de vitesses

- traversée

$$t_{\text{trav}} = \frac{R}{\sigma_v}$$

$$\sigma_v^2 = \text{cte} \frac{G M}{R}$$

- dynamique

$$t_{\text{dyn}} = \text{cte} (G \bar{\rho})^{-1/2}$$

au rayon du "viriel" (rayon maximum d'équilibre) :
 $t_{\text{dyn}} \sim 1/4$ de l'âge de l'Univers

- chute libre

$$t_{\text{chute}} = \text{cte} t_{\text{dyn}} = \text{cte} (G \bar{\rho})^{-1/2}$$

au rayon du viriel :
 $t_{\text{chute}} \sim 1/4$ de l'âge de l'Univers

- effondrement cosmologique

$$t_{\text{eff}} = \text{cte} [G (\bar{\rho} - \bar{\rho}_{\text{Univers}})]^{-1/2}$$

Diffusion des trajectoires

Chandrasekhar 42

- relaxation à 2 corps

$$t_{\text{relax},2} \approx \frac{N}{\ln N} t_{\text{dyn}}$$

temps long \Rightarrow comportement “fluide”

temps court \Rightarrow équipartition d'énergie, ségrégation de masse

Diffusion des trajectoires

oublier sa trajectoire ou son énergie

Chandrasekhar 42

- relaxation à 2 corps

$$t_{\text{relax},2} \approx \frac{N}{\ln N} t_{\text{dyn}}$$

- relaxation violente

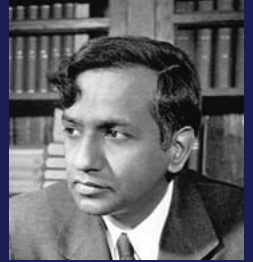
$$t_{\text{relax-violente}} \approx t_{\text{dyn}}$$

galaxies elliptiques apparaissent lisses

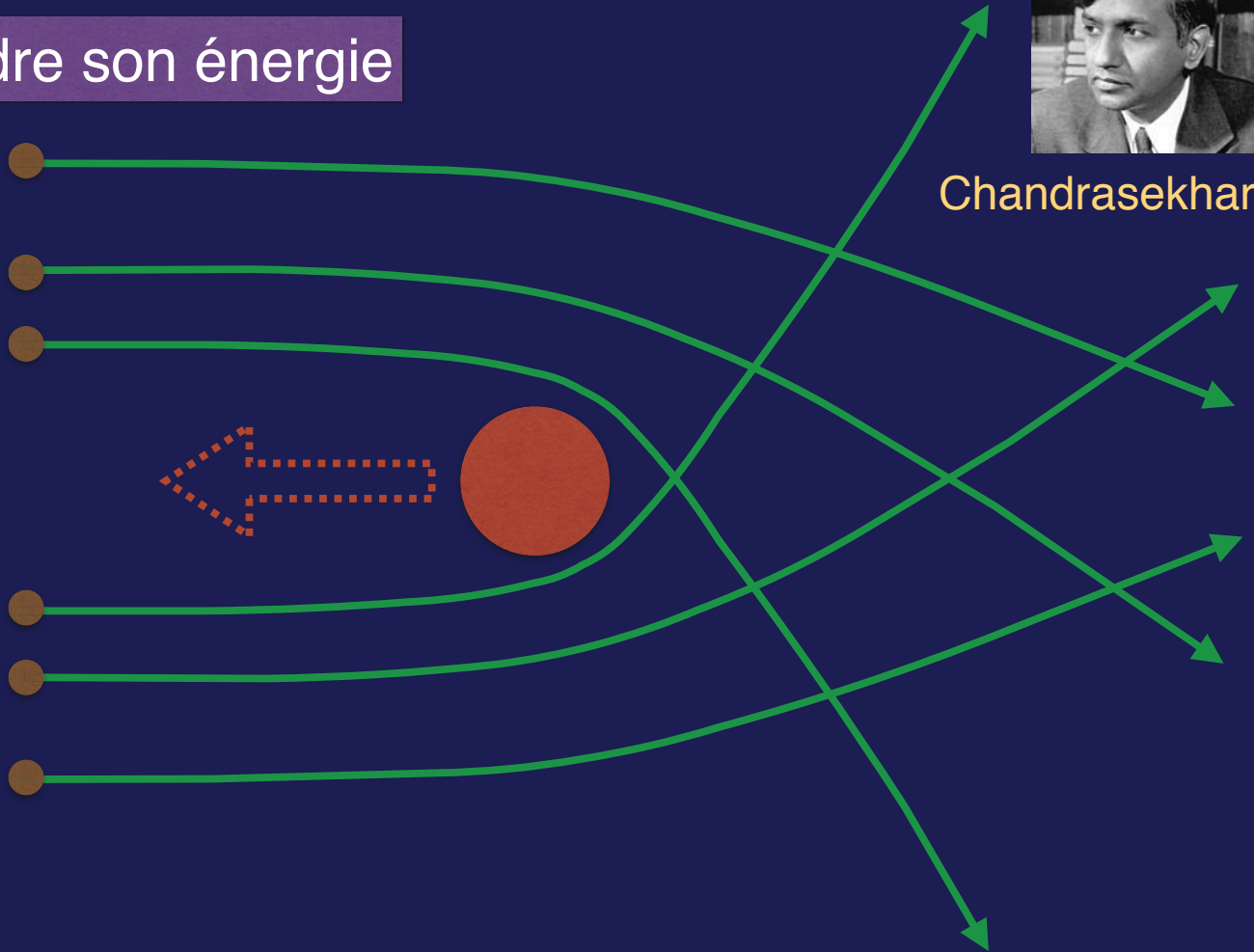


Friction dynamique

perdre son énergie

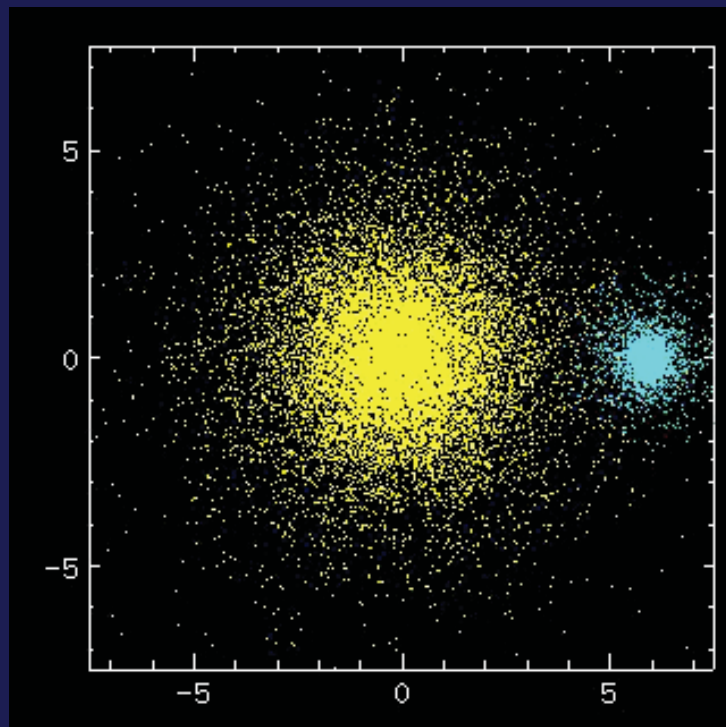


Chandrasekhar 43



Simulation idéalisée

Fusion mineure sans gaz



Mihos ~1999

Diffusion des trajectoires

oublier sa trajectoire ou son énergie

Chandrasekhar 42

- relaxation à 2 corps

$$t_{\text{relax},2} \approx \frac{N}{\ln N} t_{\text{dyn}}$$

- relaxation violente

$$t_{\text{relax-violente}} \approx t_{\text{dyn}}$$

perdre son énergie

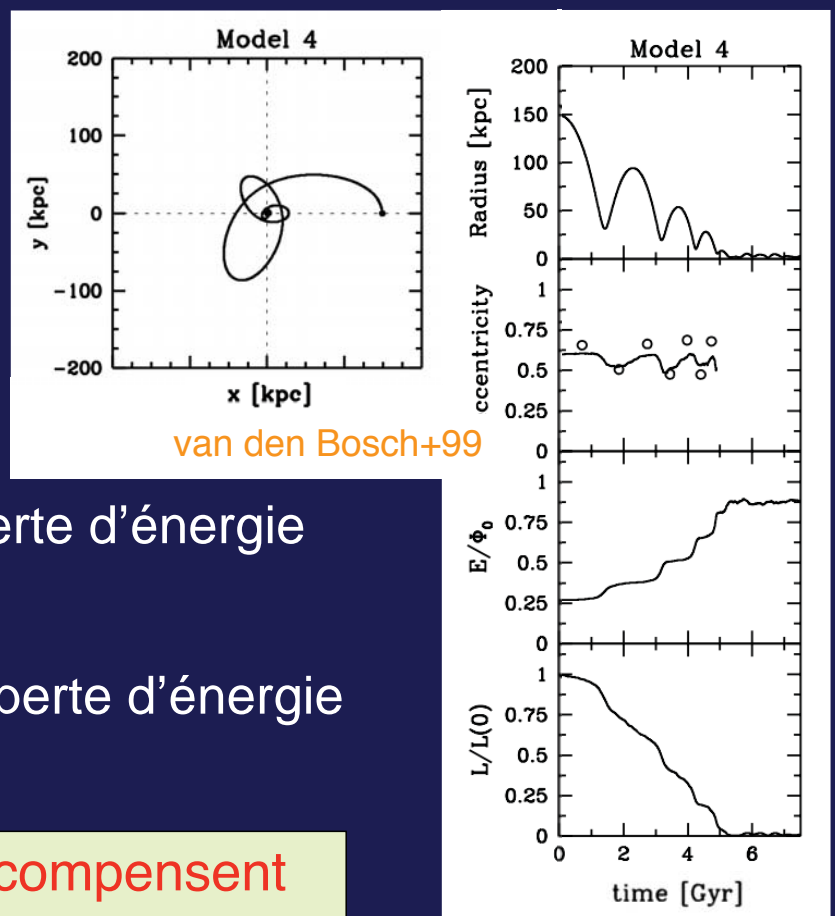
Chandrasekhar 43

- friction dynamique

$$t_{\text{fric-dyn}} \approx \frac{M/m}{\ln(M/m)} t_{\text{dyn}}$$

galaxies massives au centre des groupes & amas

Déclin orbital par friction dynamique en orbites allongées



van den Bosch+99

péricentre : friction max \rightarrow perte d'énergie
 \rightarrow circularisation

apocentre : longue durée \rightarrow perte d'énergie
 \rightarrow allongement

simulations : les 2 effets se compensent
 \rightarrow les formes des orbites restent \approx stables

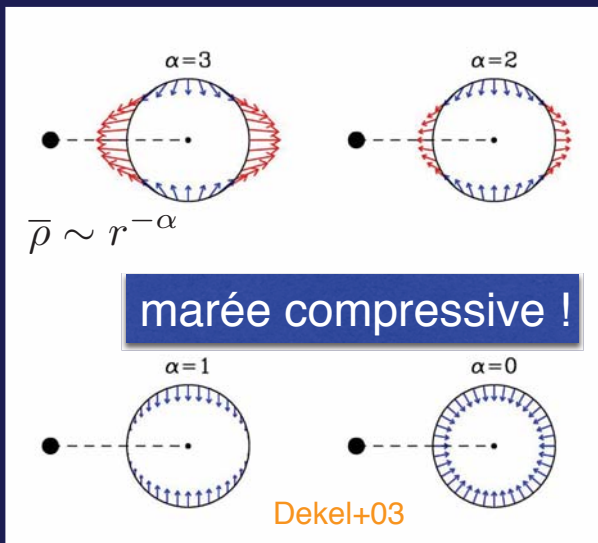
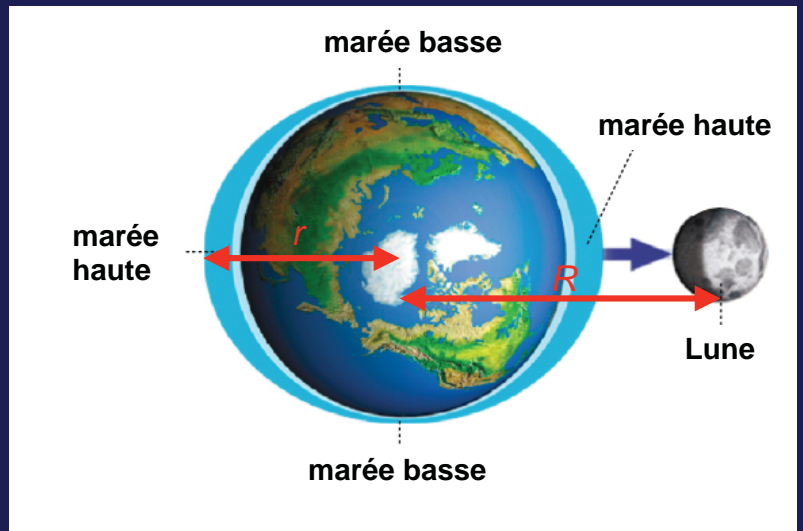
Marées

force marée = force subie localement – force subie par système

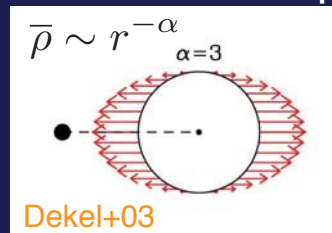
$$a_{\text{marée}}(\mathbf{r}) = a(\mathbf{R} + \mathbf{r}) - a(\mathbf{R})$$

$$a_{\text{marée}} \approx \frac{GM(R)}{R^3} r$$

marée irrotationnelle



marée verrouillée en phase



Marées dans l'Univers

Collision de galaxies
(durée = 10^9 ans)



Disruption de la comète Shoemaker-Levy
à l'approche de Jupiter (1994)



17 mai 1994



1er août 1994

Effets des marées sur la friction dynamique

ralentissent

Colpi+99

$$t_{\text{fric-dyn}} \approx \frac{M/m}{\ln(M/m)} t_{\text{dyn}}$$

accélèrent

Prugniel & Combes 92

déformation de la secondaire

→ énergie interne augmente (moins négative)

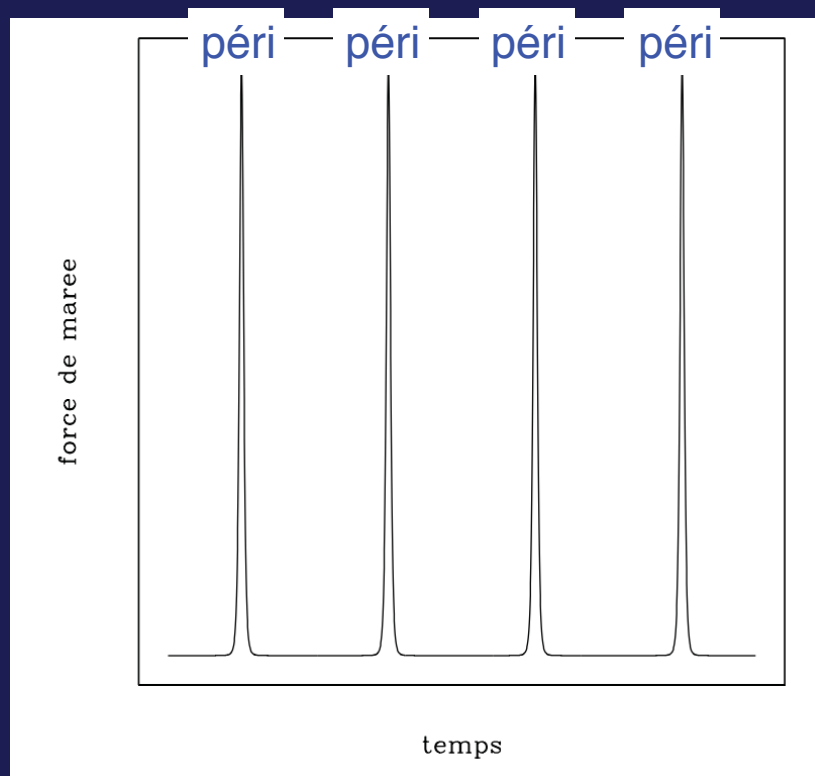
→ énergie orbitale diminue

dépend de :

- l'orbite (circulaire ou allongée)
- la concentration de masse de la secondaire

Marées en orbites allongées

orbites allongées en moyenne : $\langle r_{\text{apo}} / r_{\text{péri}} \rangle \approx 6$ Ghigna+98

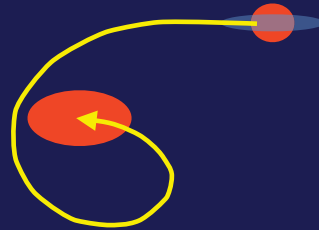


Marée instantanée varie énormément, max aux péricentres
⇒ *moyenner sur l'orbite*

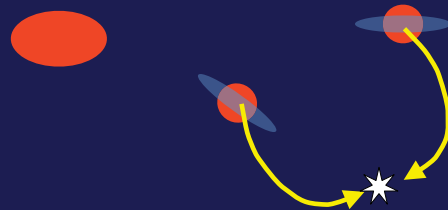
Fusions (coalescences) de galaxies

3 types d'interactions entre galaxies

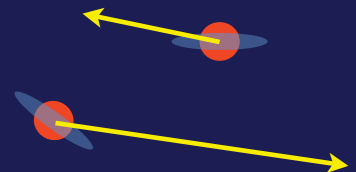
Fusions après déclin orbital par friction dynamique
("centrale-satellite")



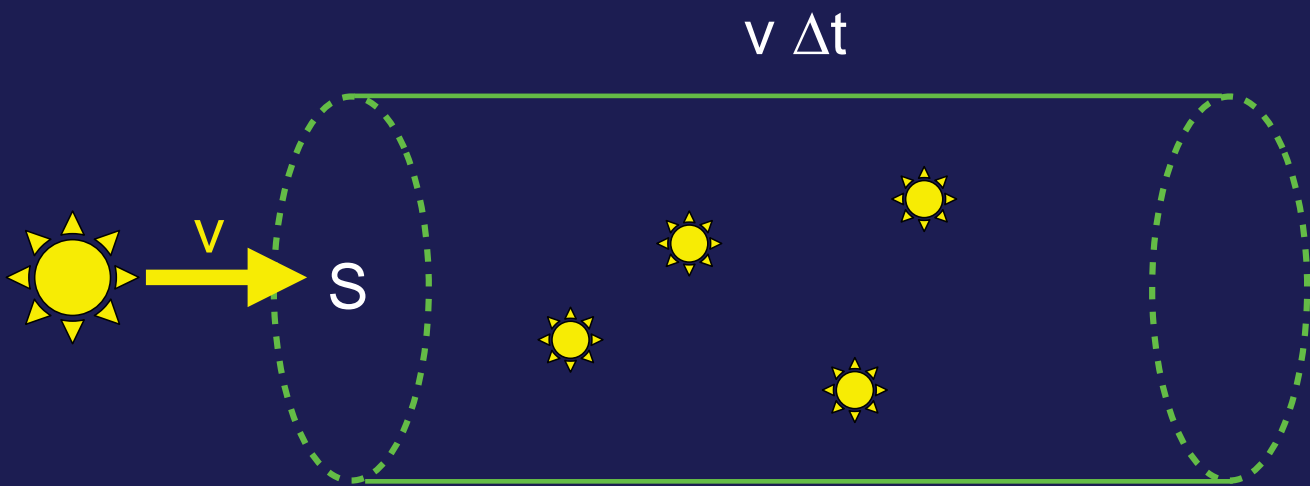
Fusions *directes* ("satellite-satellite")



Rencontres rapides
"Flybys"
("satellite-satellite")



Taux de of fusions directes majeures en fonction de la masse du groupe/amas



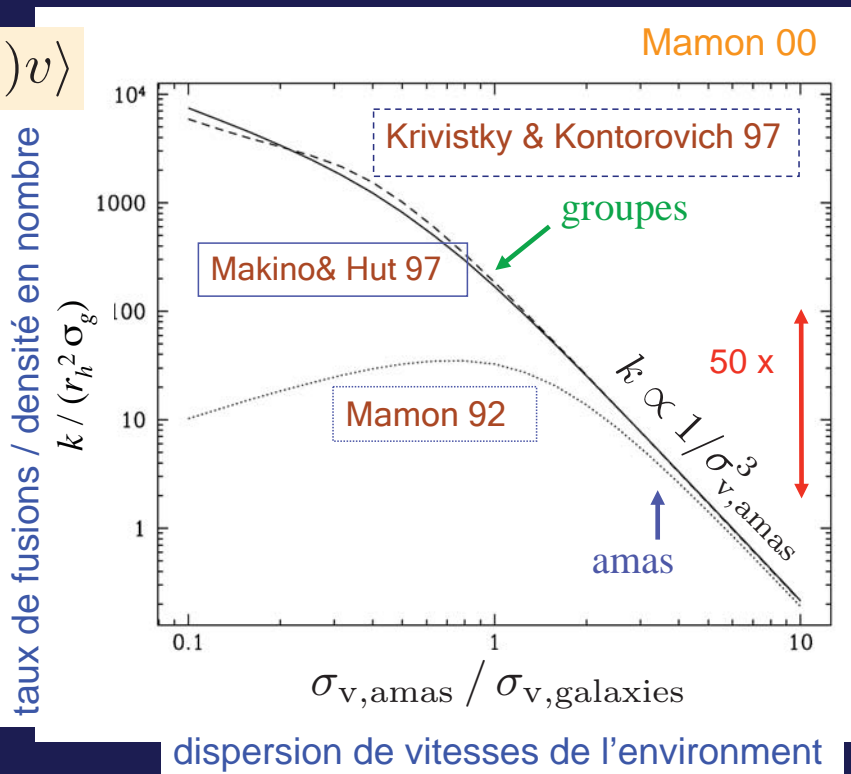
taux par unité de temps = $n S v$
= (densité en nombre d'objets) x (volume du cylindre)

section efficace $S = S(v)$

Taux de of fusions directes majeures en fonction de la masse du groupe/amas

$$k = \langle S(v)v \rangle$$

$$\frac{dN}{dt} = nk$$



taux de fusions majeures satellite-satellite $\propto 1/\sigma_v^3 \approx M_{subhalo}/M_{halo}$

Taux de fusions

par friction dynamique

$$\tau_{\text{fric}}^{-1} = \text{cst} \frac{G^2 \rho(R) M(R)}{v^3} R_{\text{fric}} \left(\frac{M_{\text{sub}}}{M(R)} \right)$$

Chandrasekhar 43

directes

$$\tau_{\text{direct}}^{-1} = \text{cst} \frac{G^2 \rho_{\text{sub}}^*(R) M_{\text{sub}}^*(R)}{\sigma_{\text{cl}}^3} R_{\text{direct}} \left(\frac{M_{\text{sub}}}{M_{\text{sub}}^*(R)} \right)$$

d'après Mamon 00

ces taux sont modulés par les marées du groupe/amas !

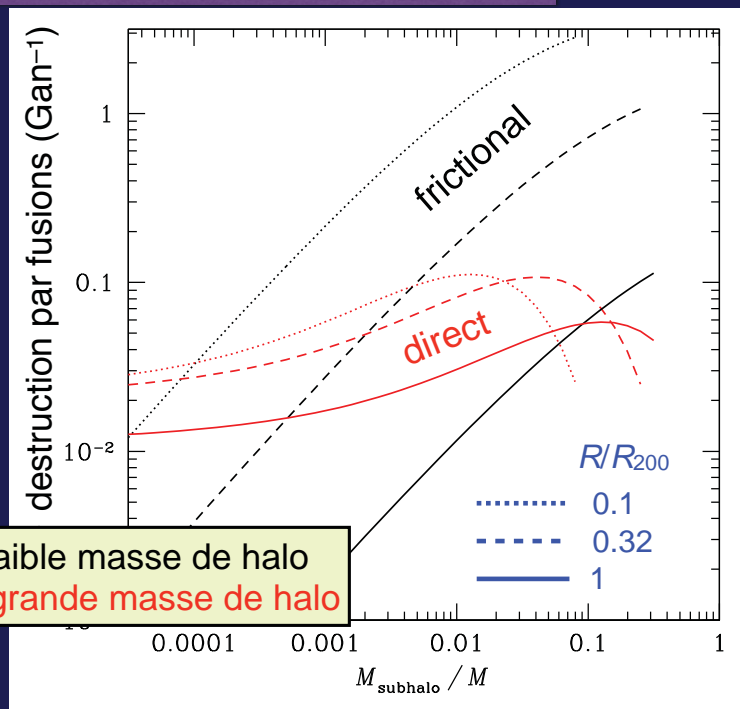
f (forme de l'orbite)

$$R_{\text{fric}}(x) = x \ln \left(1 + \frac{1}{x} \right)$$

Jiang+08

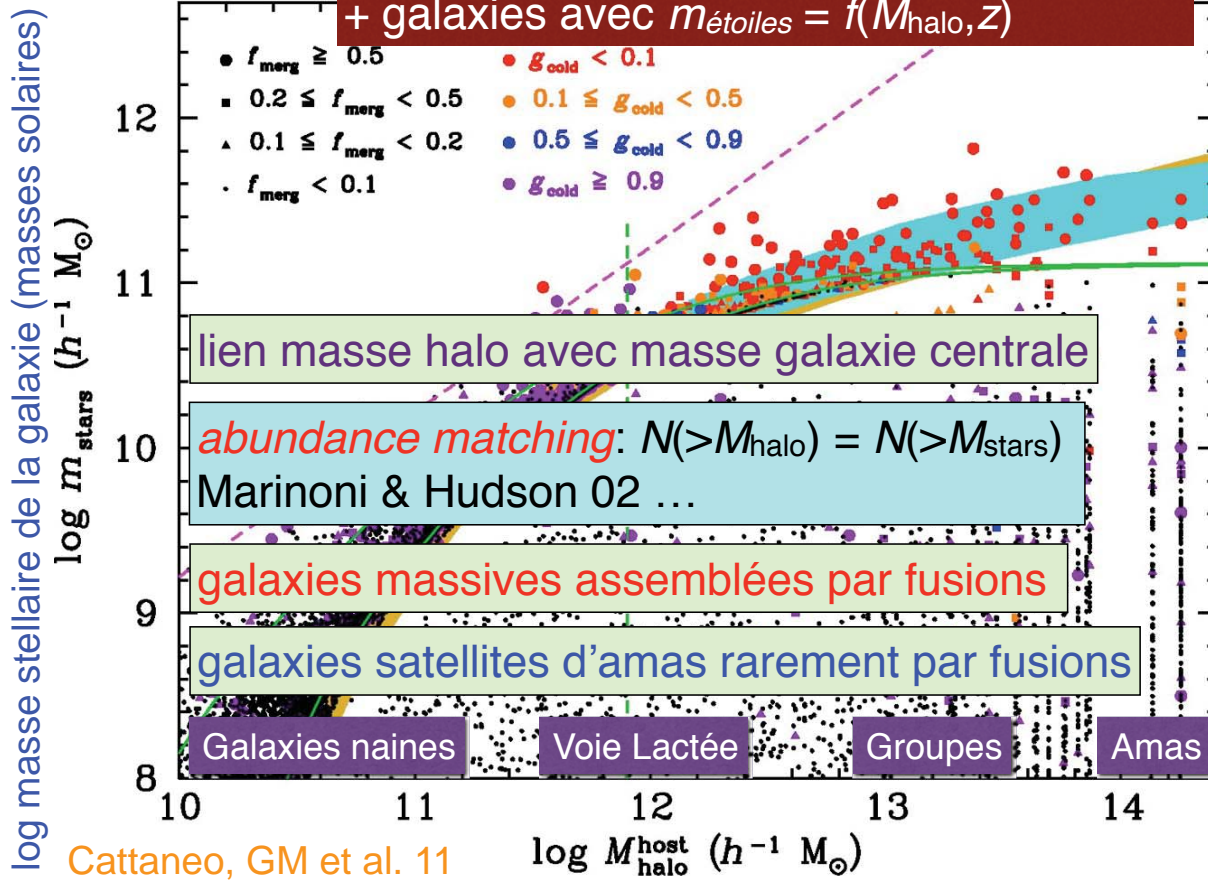
Friction dynamique domine à faible distance ou faible masse de halo
Directes (satellite-satellite) à grande distance et grande masse de halo

aussi Hopkins 10



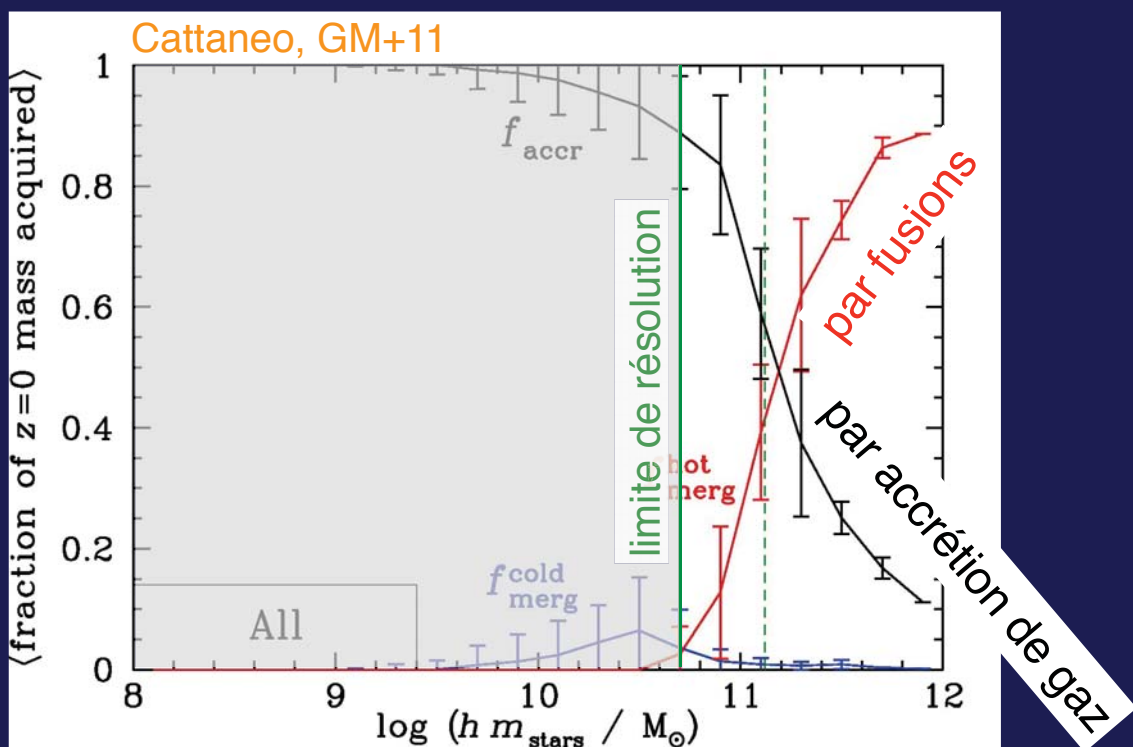
Importance des fusions de galaxies

simulation cosmologique analytique
 simulation cosmologique de matière noire
 + galaxies avec $m_{\text{étoiles}} = f(M_{\text{halo}}, z)$



log masse du halo hôte (masses solaires)

Importance des fusions de galaxies



$z=0$:

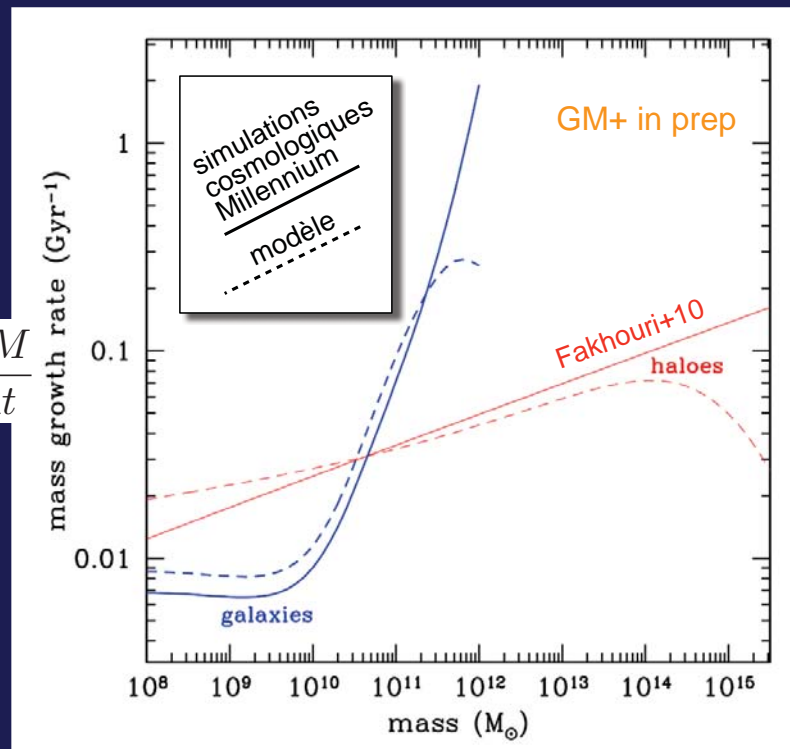
galaxies massives : **assemblées par fusions**

autres galaxies : **assemblées par accrétion de gaz**

Taux d'assemblage de masse par fusions des halos & des galaxies

modèle du taux de fusions:
fonction de masse / temps friction dynamique

$$\frac{1}{M} \frac{dM}{dt}$$

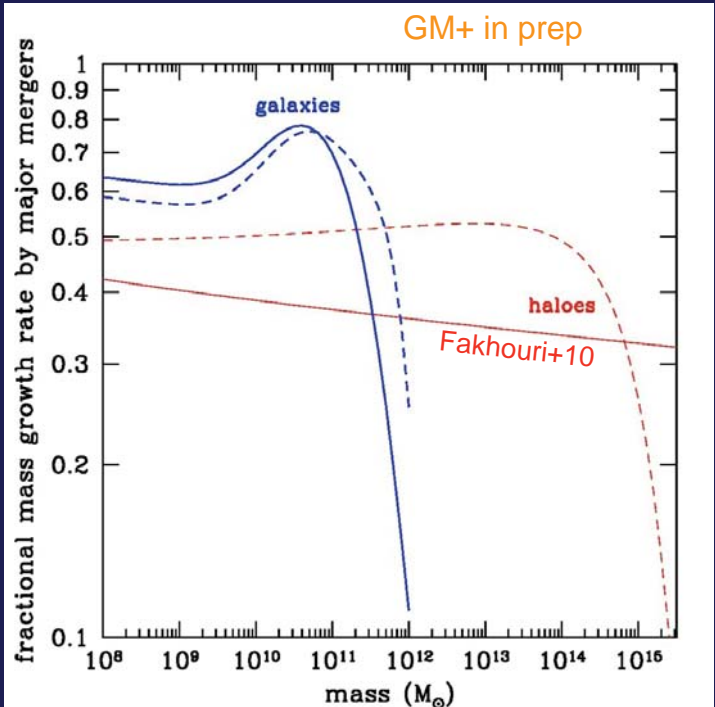
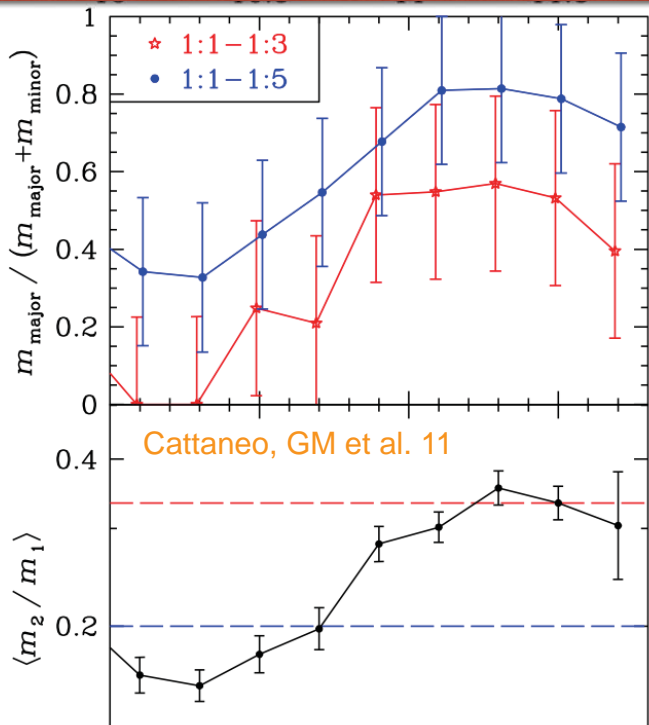


Seules les galaxies massives aujourd'hui ont assemblé leur masse par fusions

Fusions majeures vs. mineures

modèle $m(M,z)$ sur halos de la simulation cosmologique

modèle basé sur halos de la simulation cosmologique & **Abundance Matching**

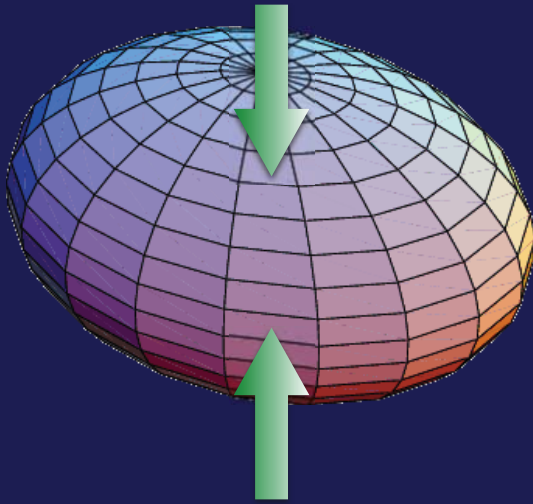


Galaxies massives ont assemblé leur masse par fusions surtout majeures
Galaxies moins massives " " par accretion de gaz & fusions surtout mineures

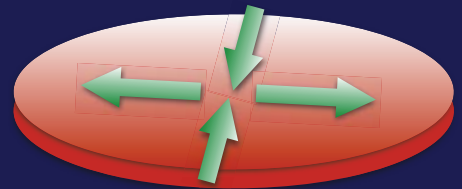
$\log m_{\text{stars}} (h^{-1} M_{\odot})$

Evolution non-sphérique

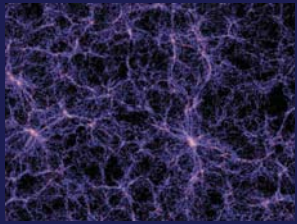
Sphéroïde triaxiale



Nappe



Filament

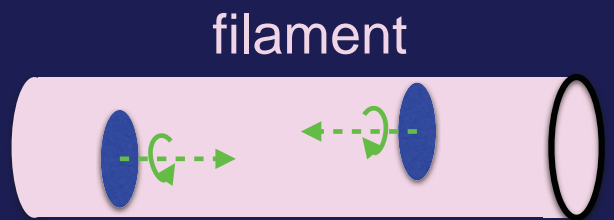
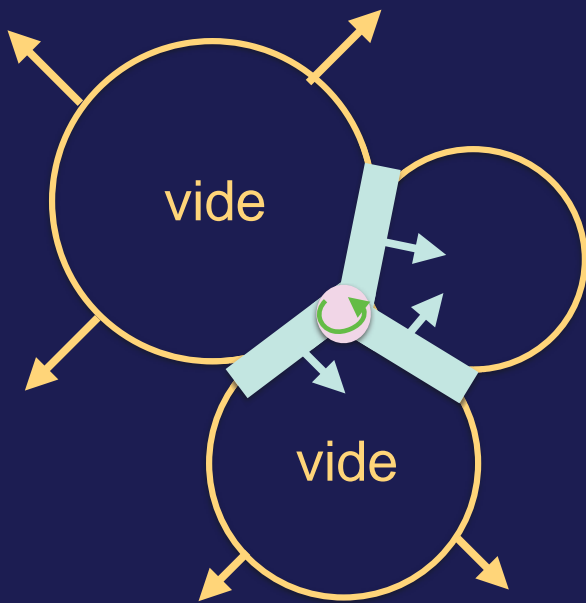


Evolution dynamique dans la toile cosmique

Pichon:
Codis+12
Welker+14
Laigle+15

Vides \rightarrow Nappes \rightarrow Filaments \rightarrow Halos

galaxies spirales: spin // filament



fusion



galaxies elliptiques: spin \perp filament

Effets de l'hydrodynamique dissipative & de l'astrophysique explosive

Dissipativité \Rightarrow gaz tombe au centre du puits de potentiel

\rightarrow galaxies plus liées

Explosions de supernovae & jets des noyaux actifs

\rightarrow (perte de gaz au centre \Rightarrow matière noire suit le gaz)

\rightarrow galaxies moins liées

PARCE QUE phénomènes intermittents ! Pontzen & Governato 12

*Orbites des galaxies
dans les groupes & amas*

3 classes d'orbites

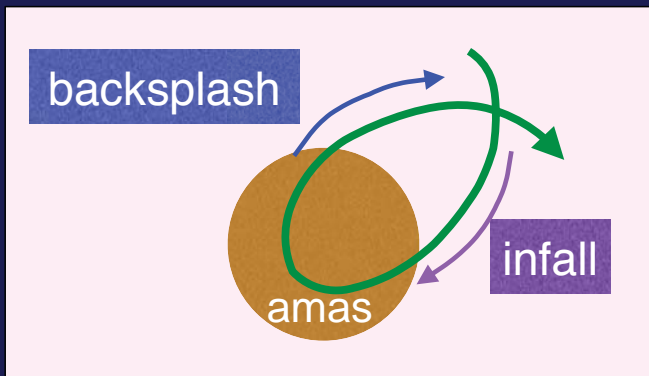
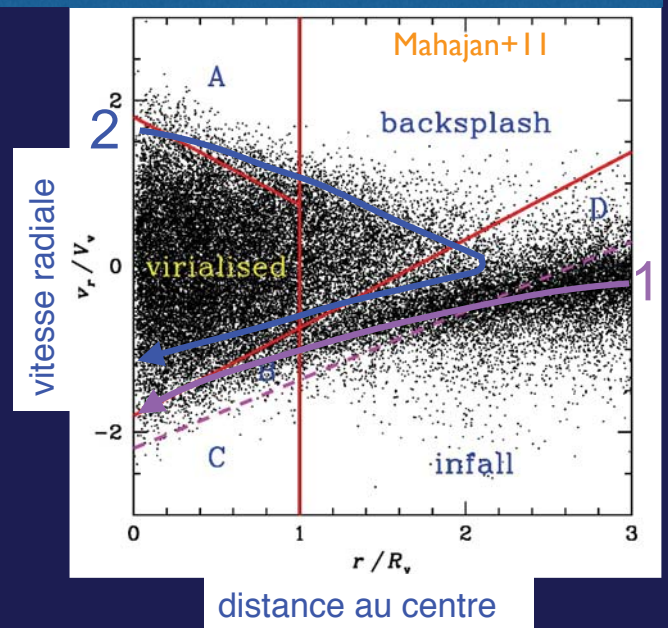


diagramme de phase (unités virielles)



Distance maximale de backsplash

2 to 2.5 r_{vir}

Balogh, Navarro & Morris 00

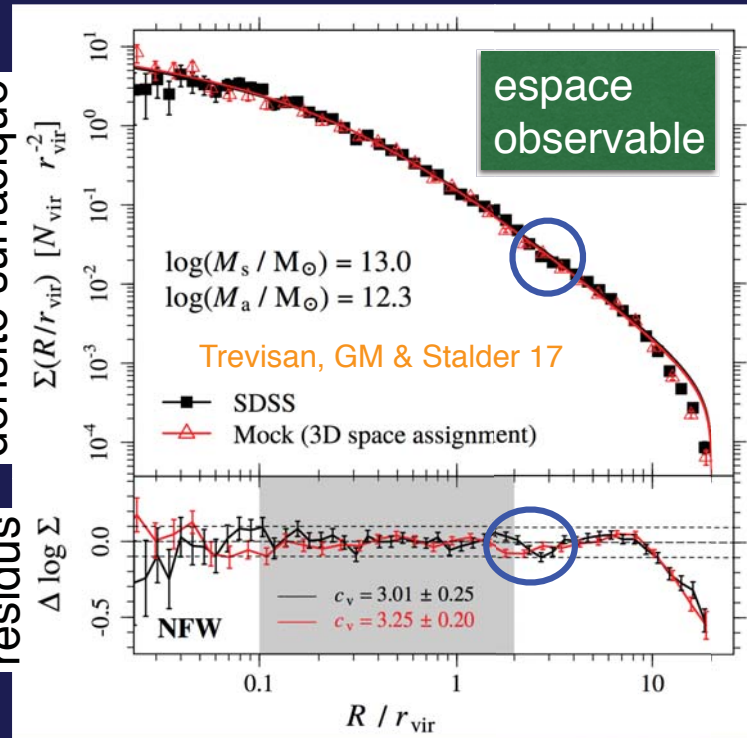
Mamon+04

Gill+05

distance backsplash
à 2-3 r_{vir}

densité surfacique

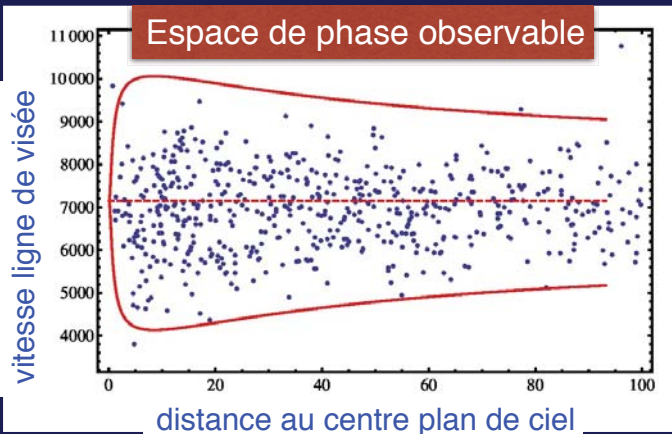
résidus



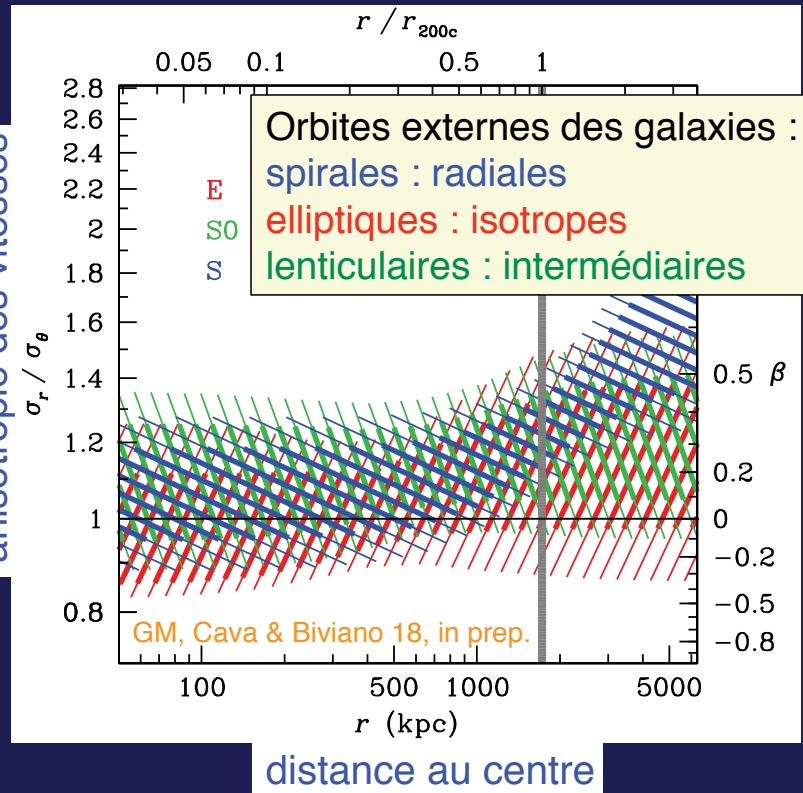
Orbites des galaxies dans les amas

stack de 67 amas WINGS
 5000 galaxies
 types E, S0 et S tracent
 potential gravitationnel
 analyse MAMPOSSt

Mamon+13



anisotropie des vitesses



Où sont les galaxies en interaction ? (ou en fusion ?)

GM, Felix, Kaviraj, Darg & Silk, in prep.

$$P_{\text{interaction}} = f(M, m, R/r_{200}, v, T)$$

M = masse du groupe

m = masse stellaire de la galaxie

R = rayon en projection sur le ciel

r_{200} = rayon du viriel

v = vitesse relative au groupe

T = type morphologique

Contrainte sur les modèles de formation de galaxies

Fusions satellite-satellite (directs) vs. central-satellite (frictionnels)

Galaxy Zoo

The screenshot shows the Galaxy Zoo website in a browser window. The URL is www.galaxyzoo.org/#/classify. The navigation menu includes: CLASSIFY, SCIENCE, STORY, GALAXY ZOO (logo), ASTRONOMERS, DISCUSS, and PROFILE. The main content area features a large image of a galaxy field on the left. On the right, there is a 'Classify' section with icons for SDSS, Favourite, and Invert, and buttons for Help and Restart. Below this is a 'SHAPE' question: 'Is the galaxy simply smooth and rounded, with no sign of a disk?'. Three options are provided: 'Smooth' (represented by a white circle), 'Features or disk' (represented by a spiral galaxy icon), and 'Star or artifact' (represented by a star icon).

~900k SDSS galaxies, chacune classifiée par ~50 amateurs
Lintott+08

3300 paires majeures dans Galaxy Zoo



Spirale + Spirale



Elliptique + Elliptique

Echantillon complet de paires de galaxies en interaction

échantillon Galaxy Zoo

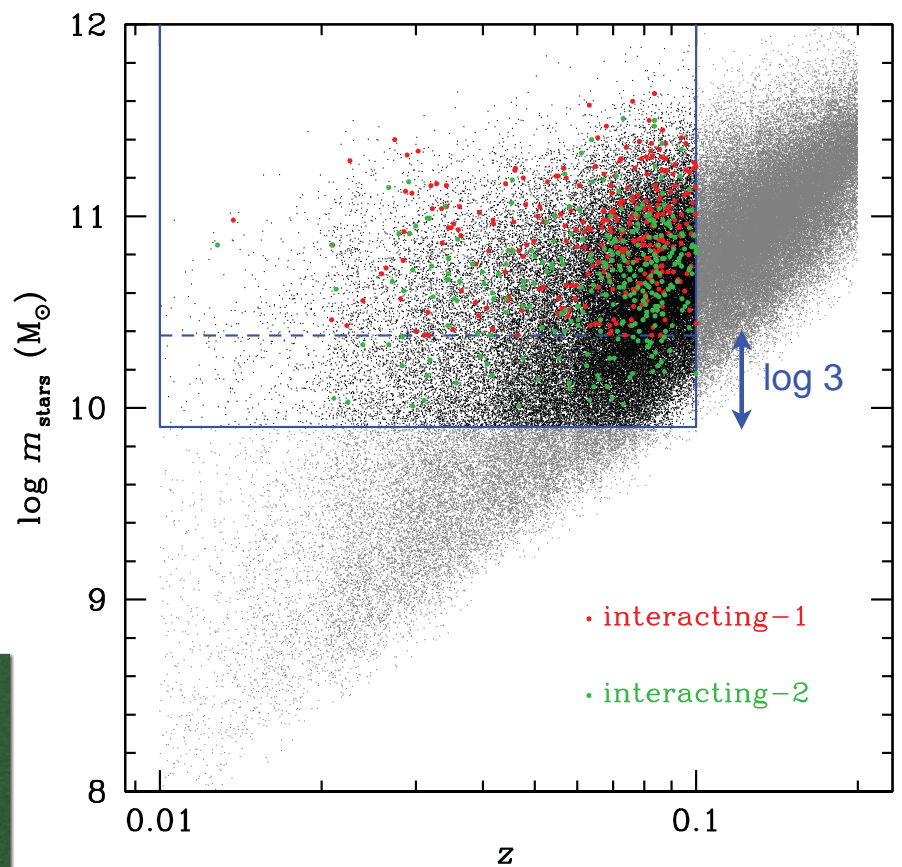
- $0.01 < z < 0.1$
- $\log m_{\text{stars},2} > 9.9$
- $\log m_{\text{stars},1} > 9.9 + \log 3$
- $m_2 > m_1/3$
- 2 dans même groupe
- $c\Delta z/(1+z) < 3 \sigma_{v,\text{group}}$
- interaction visible

300 paires:

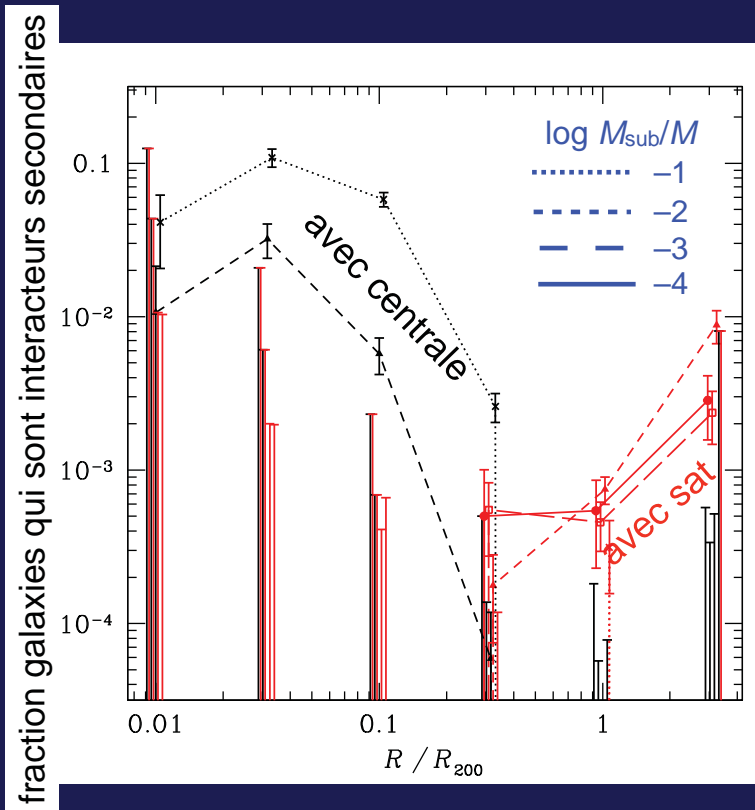
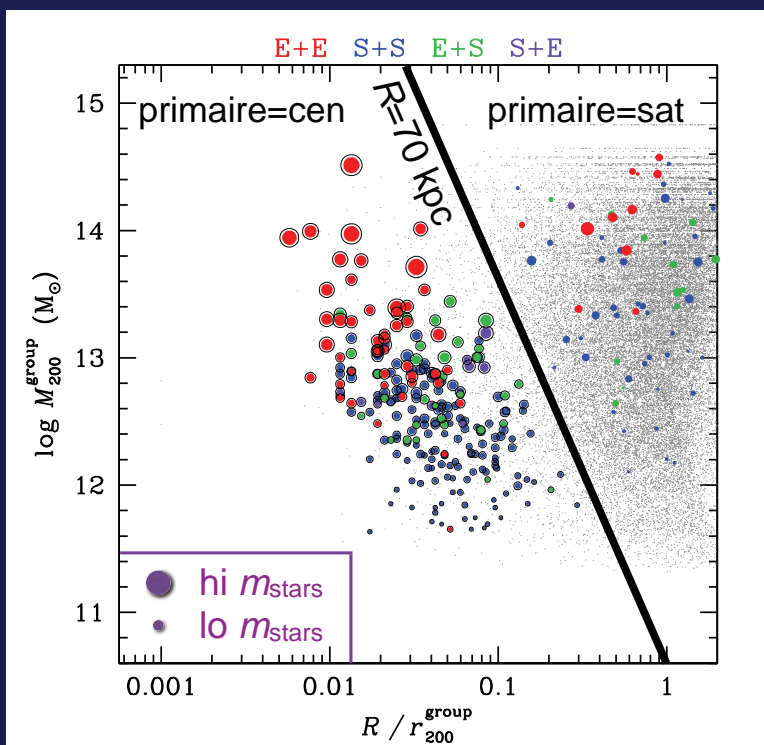
231 avec galaxie centrale

69 toutes 2 = satellites

⇒ visibilité indépendante de
masse du halo
masse de la galaxie
rapport de mass des galaxies



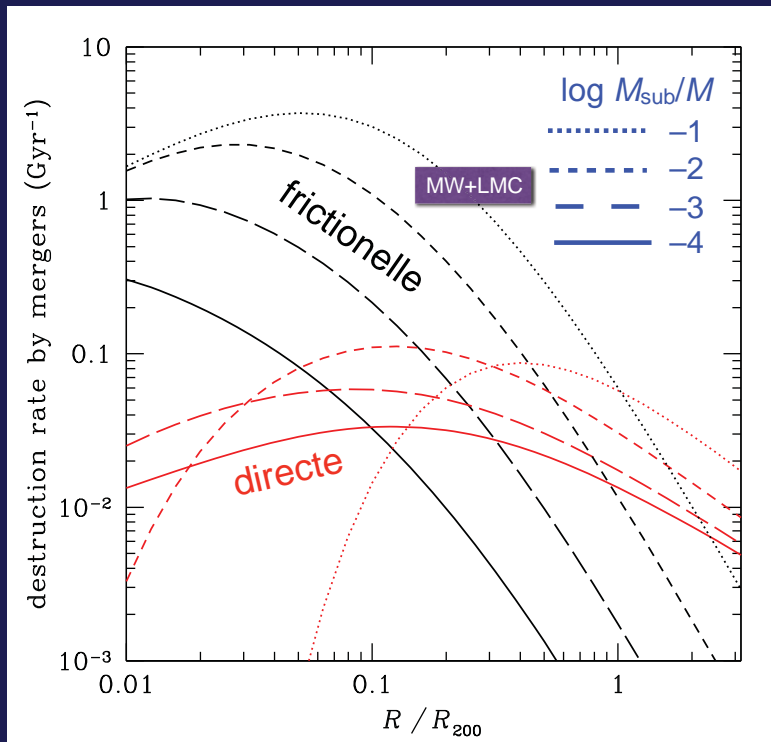
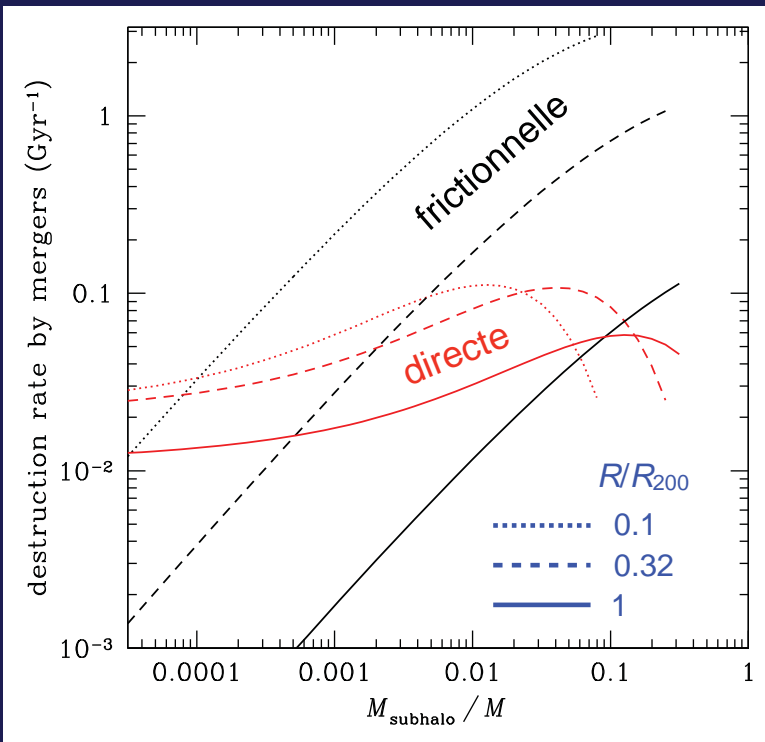
Interacteurs secondaires



100% cen-sat pour $R_2 < 70 \text{ kpc}$; 100% sat-sat pour $R_2 > 70 \text{ kpc}$

cen-sat dominant à faible distance; sat-sat (directs) à grande distance

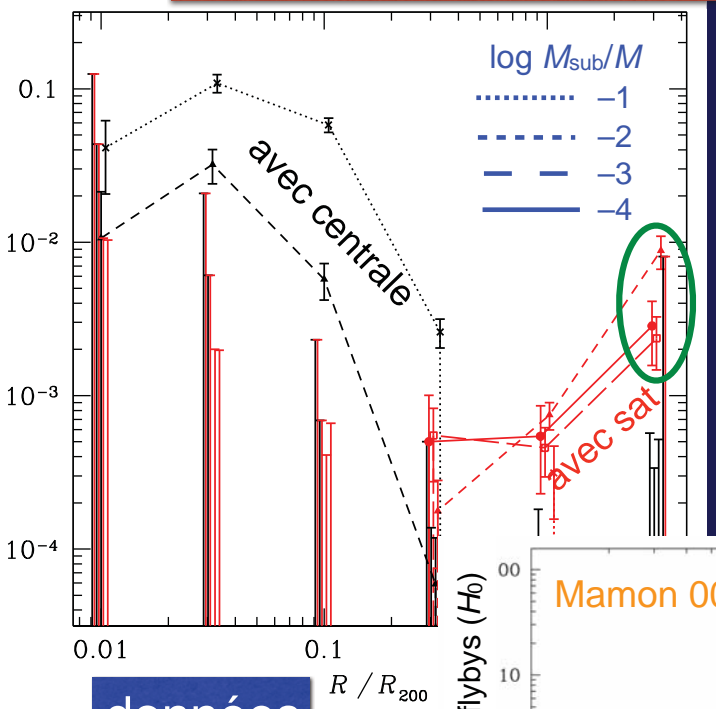
Modèle



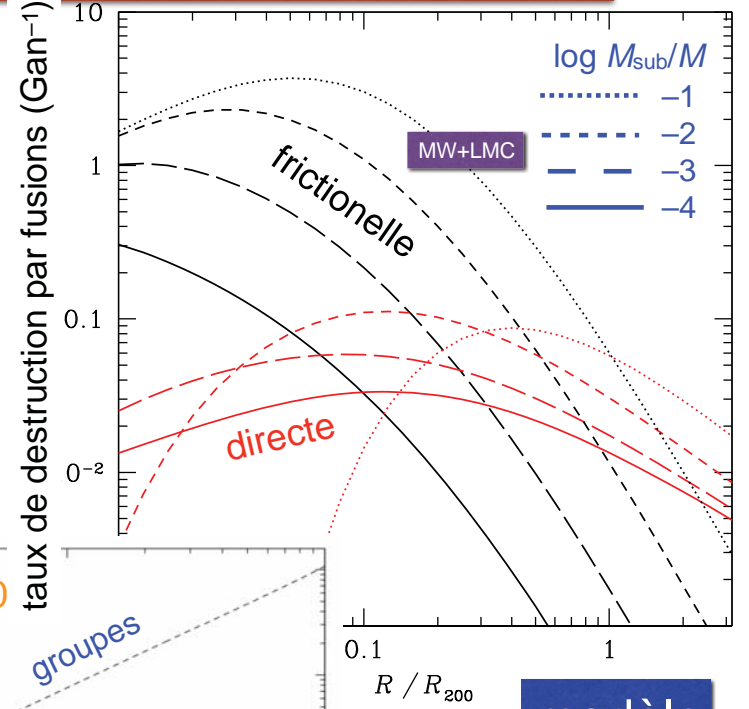
Statistiques : données vs. modèle

Fraction en interaction = Taux x (Durée de l'interaction visible)

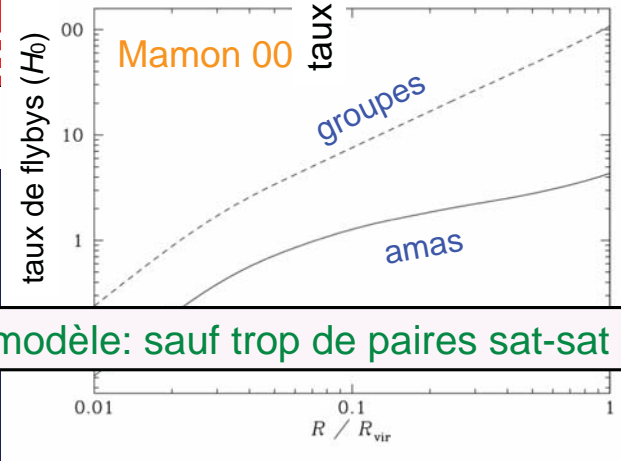
fraction galaxies qui sont interacteurs secondaires



données



modèle



Données cohérentes avec modèle: sauf trop de paires sat-sat à ~1-3 R₂₀₀ ⇒ flybys!

Conclusions

La **gravitation** joue rôle prédominant dans l'évolution dynamique de l'Univers : **attraction**, mais aussi **marées**, **friction dynamique**, **fusions** ...

Physique dissipative du gaz & **effets astrophysiques de rétro-action** : rôles importants à l'intérieur des galaxies, mais secondaires ailleurs

L'évolution dynamique peut se comprendre par **observations** & **calculs analytiques simples**
MAIS **simulations numériques** → vision bien + précise

Les galaxies massives acquièrent leur masse par **fusions, plutôt majeures**
Les galaxies peu massives par **accrétion de gaz**

La distribution des **galaxies en interaction** dans les groupes & amas : conforme aux prédictions des **fusions après friction dynamique**, moindre rôle pour les fusions directes, rôle important des **rencontres rapides** aux bords des groupes & amas

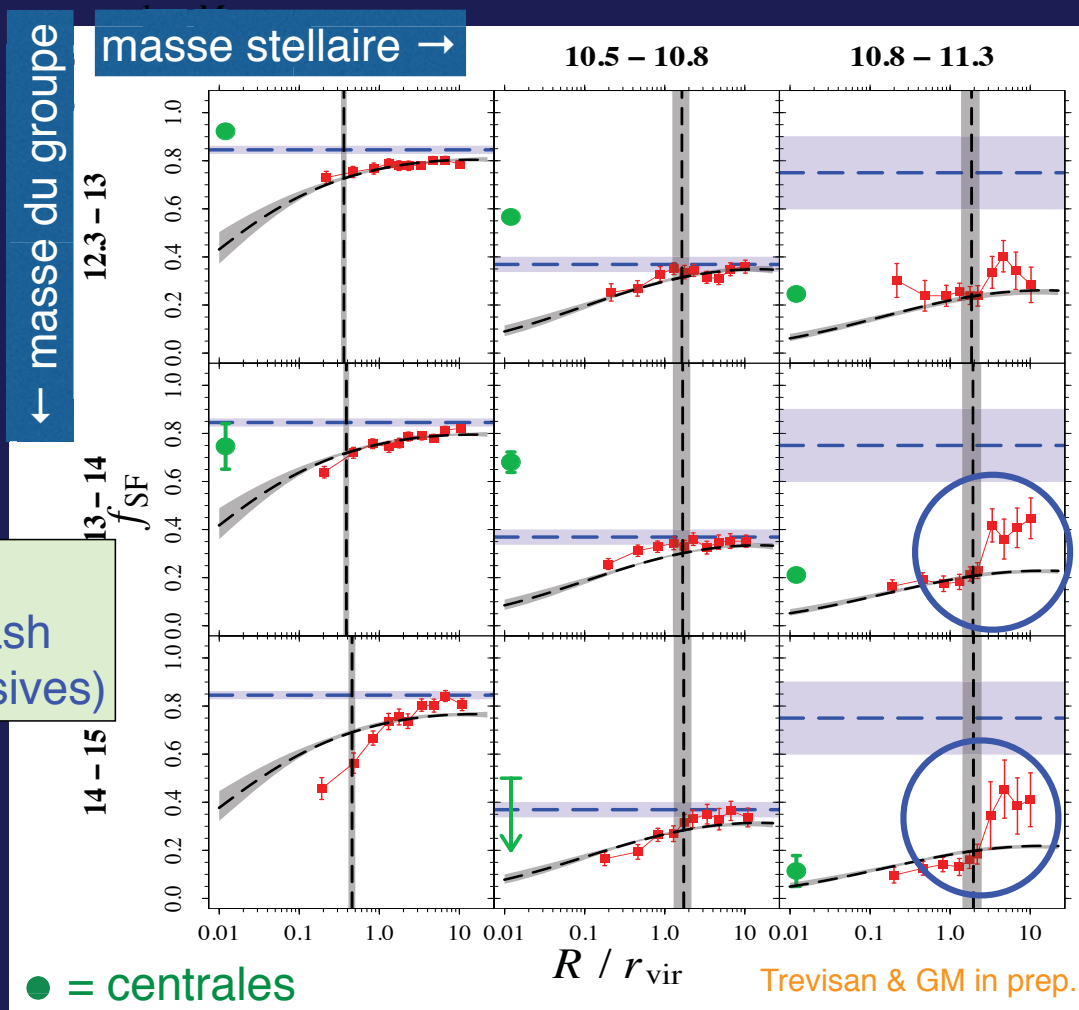
Perspectives en modélisation

Analyse des dernières simulations hydrodynamiques
ILLUSTRIS-TNG

Cinématique déduite : des simulations vs. des observations

Liens dynamique & hydrodynamique avec *fertilité* des galaxies

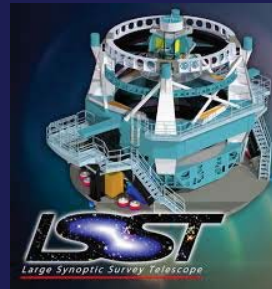
Fraction de galaxies fertiles



saut de f_{SF} à $2.5 r_{vir}$
 = distance backsplash
 (pour galaxies massives)

Perspectives observationnelles

Évolution des grandes structures



Mesure des accélérations par dz/dt



Cartes très profondes de l'Univers local



Duc & Cuillandre 12

Historique assemblage du groupe Voie Lactée

