

Andrea Cattaneo

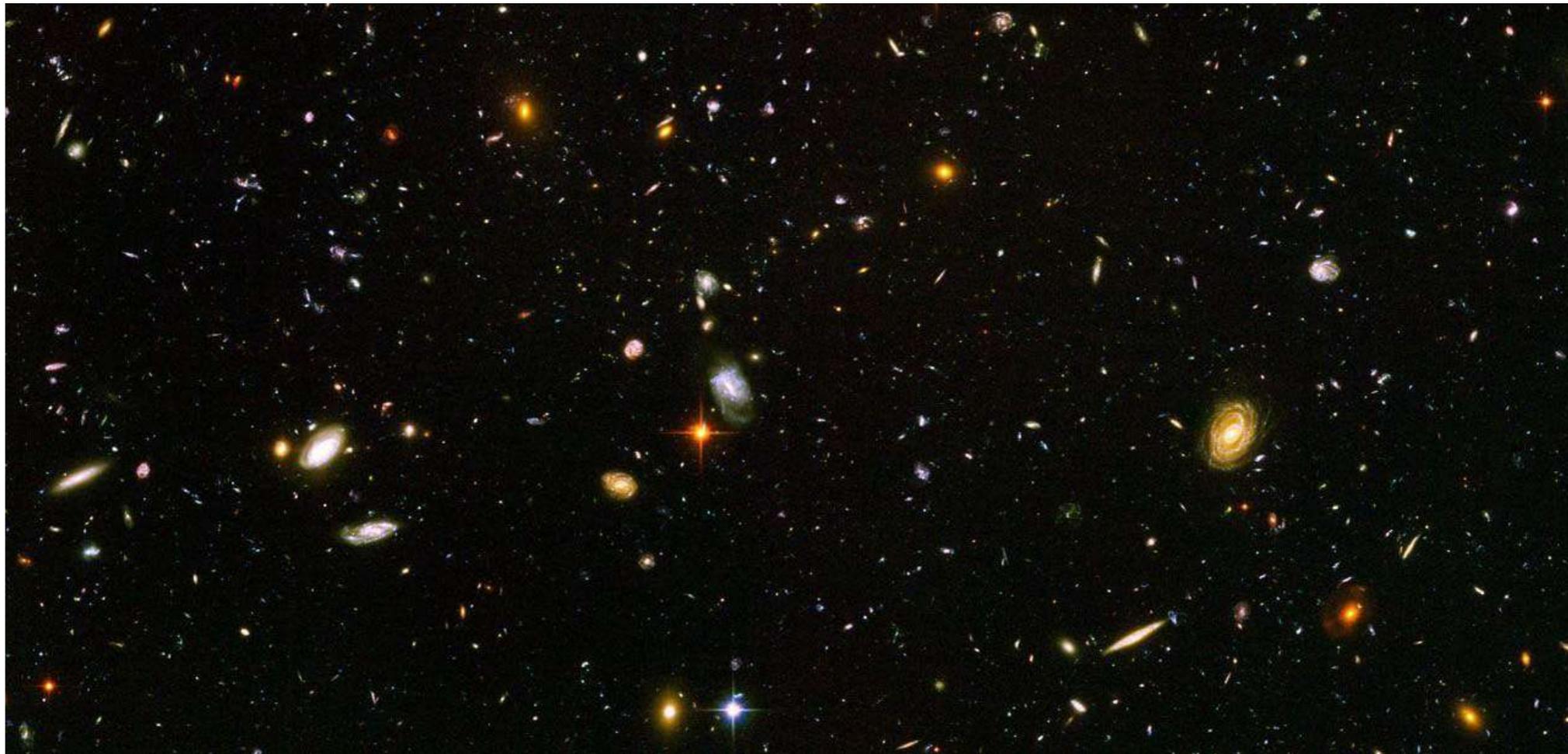


Formation hiérarchique des galaxies

Modèles semi-analytiques

Objectif

- La modélisation semi-analytique est un outil.
- Le but est comprendre l'évolution des propriétés **statistiques** des **galaxies** en **cosmologie**.



Descripteurs des galaxies

Les valeurs pour la Voie Lactée sont données comme exemple

- **Masse stellaire** $M^* \approx 5 \times 10^{10} M_{\odot}$
- **Masse gazeuse** $M_{\text{gaz}} \approx 10^{10} M_{\odot}$
- **Couleur/taux de formation stellaire** $1-2 M_{\odot}/\text{an}$
- **Morphologie** $B/T \approx 0.3$
- **Taille** $R_d \approx 2-3 \text{ kpc}$

Objectif : modéliser

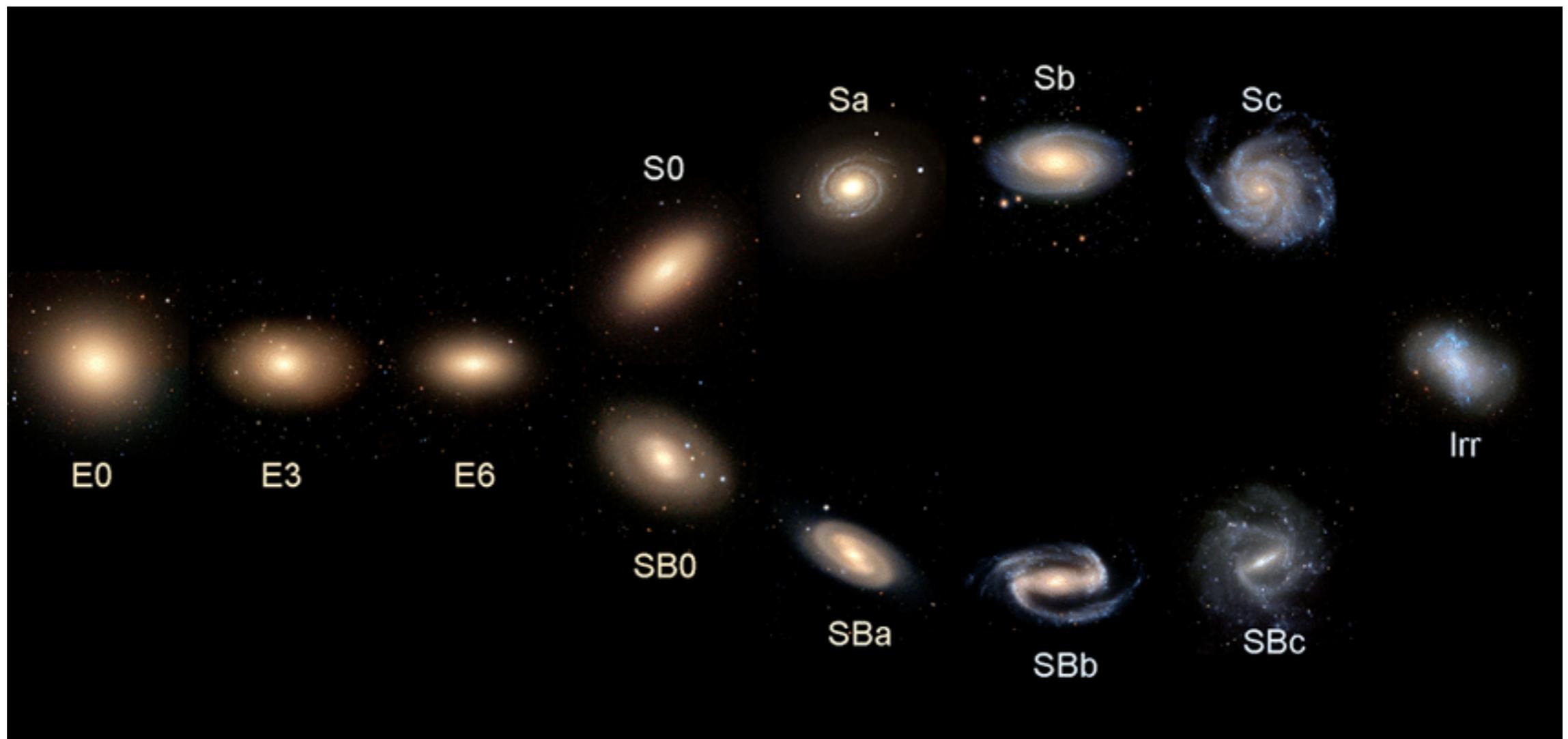
- **distributions** de valeurs pour ces propriétés (notamment M^*)
- **correlations** entre ces propriétés



La séquence de Hubble est plus qu'une classification morphologique

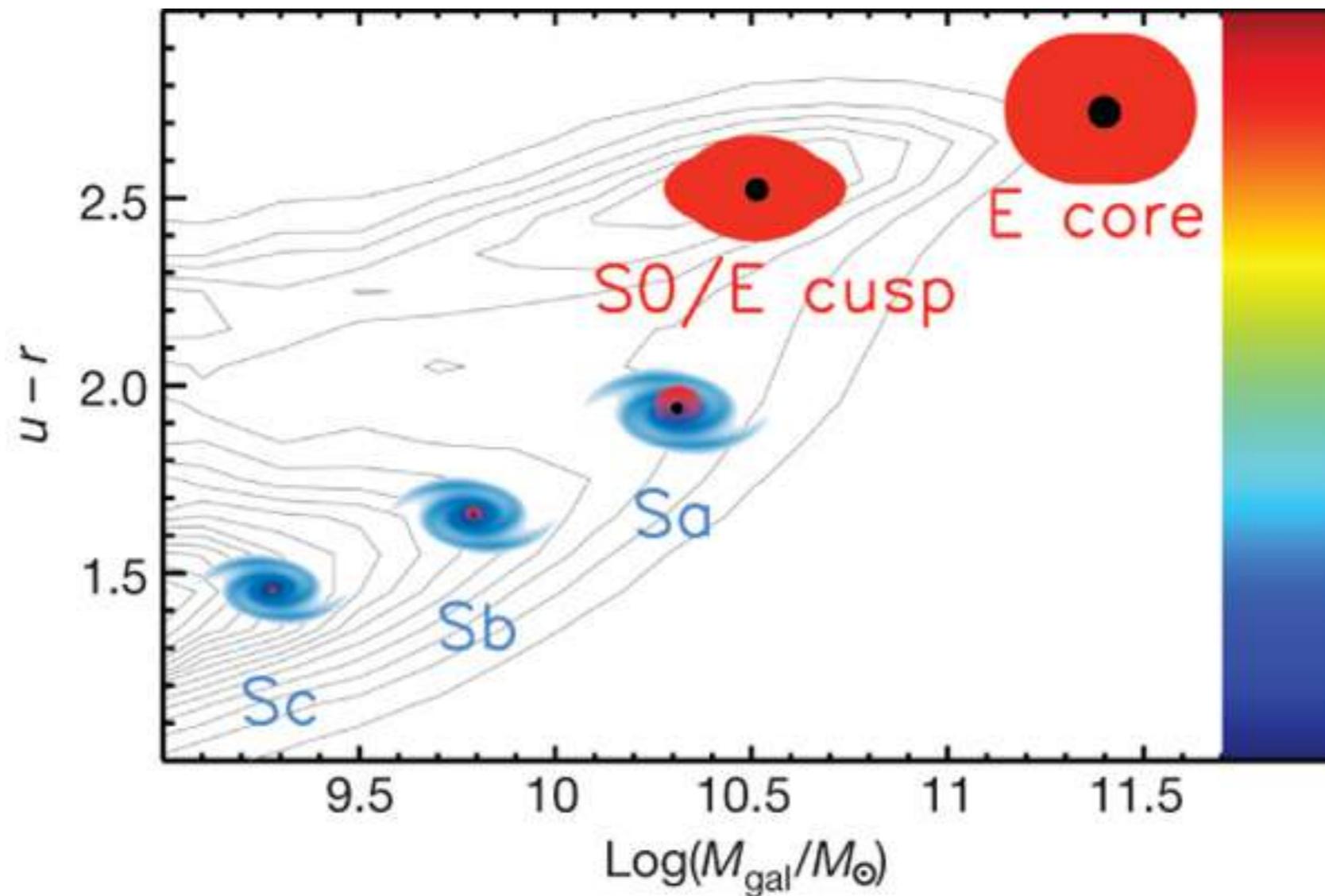
Il y a des corrélations entre les différentes propriétés galactiques

← Plus rouges, plus massives et avec des densités surfaciques plus élevées



La bi-modalité des galaxies

sur en diagramme couleur—masse

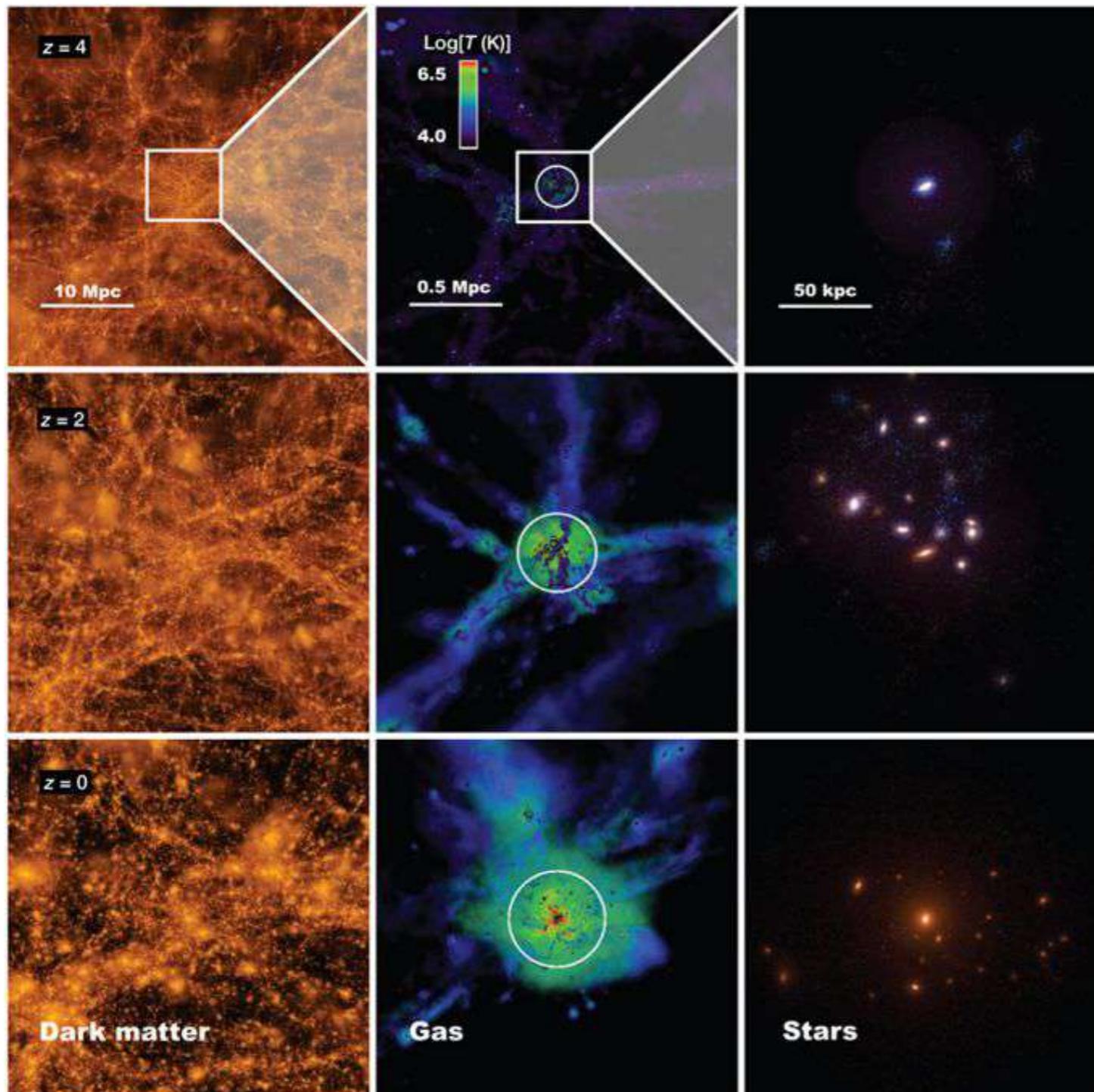


Kauffmann et al. 2003, Baldry et al. 2004; image: Cattaneo et al. 2009

Le contexte cosmologique

White & Rees 1978 : “Core condensation in heavy halos: **a two-stage theory for galaxy formation** and clustering”

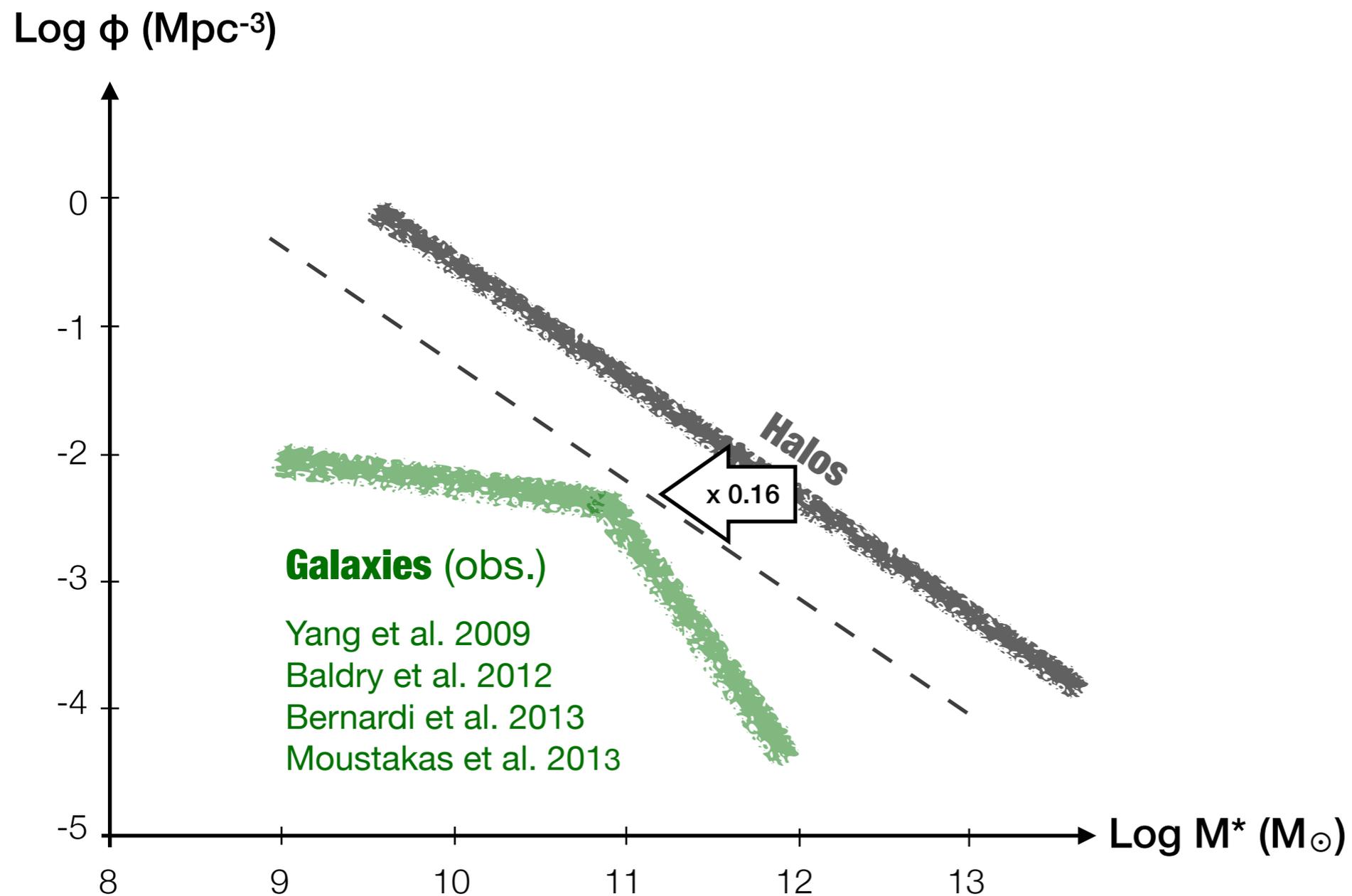
Blumenthal et al. 1984 : “**Formation of galaxies** and large-scale structure **with cold dark matter**”



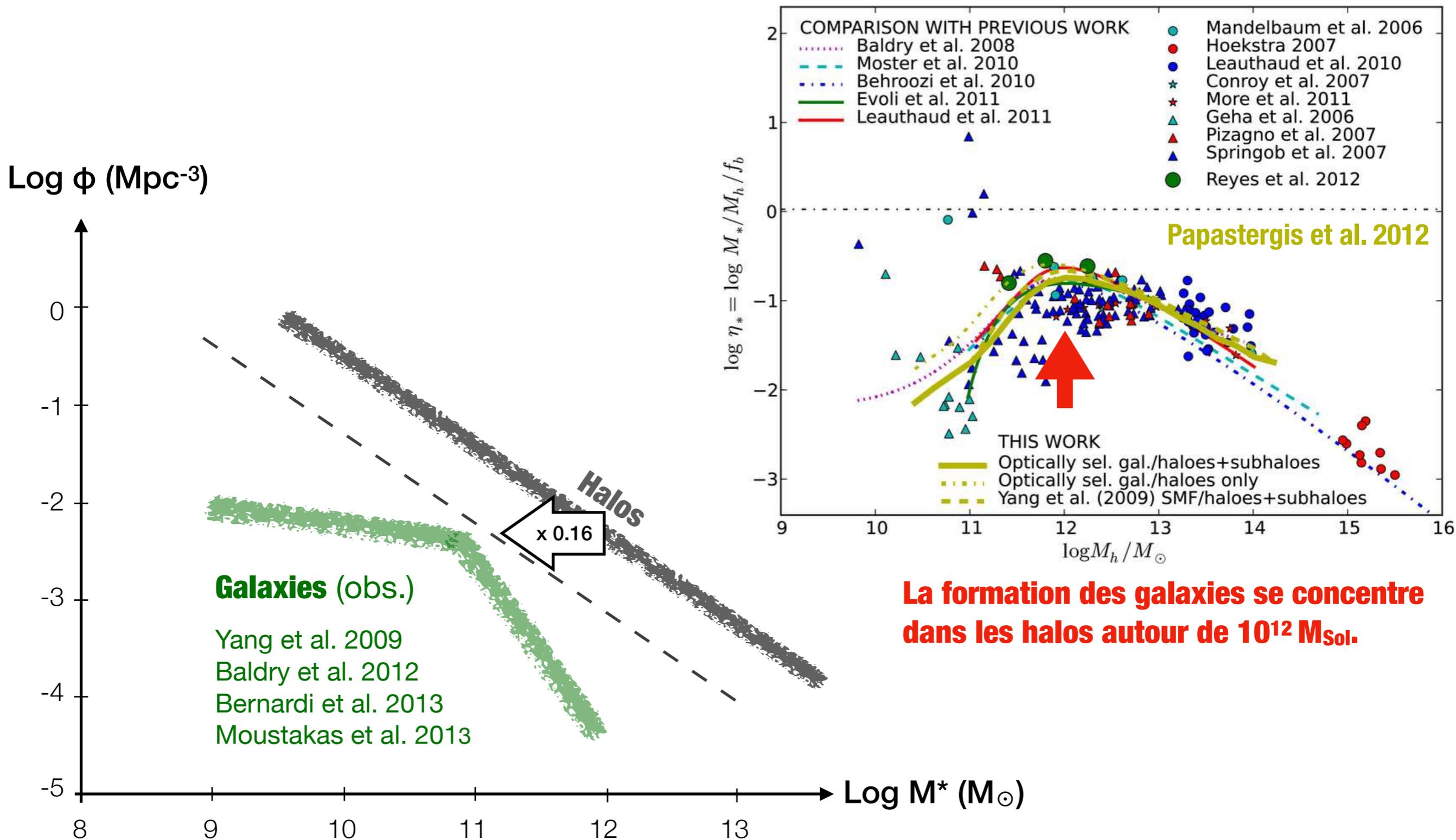
- L'**instabilité gravitationnelle** de fluctuations de densité primordiales forme les **halos de matière noire**.
- L'**effondrement du gaz** au centre des halos de matière noire forment les **galaxies**.
- Dans les galaxies, le gaz se condense en **étoiles**.

Image : Cattaneo et al. 2009

Pourquoi la fonction de masse des galaxies ne suit pas celle des halos ?



Pourquoi la fonction de masse des galaxies ne suit pas celle des halos ?



Origine de la masse caractéristique

Début de la théorie de la formation des galaxies : **Rees & Ostriker 1977, Silk 1977, Binney 1977**

Origine de la masse caractéristique

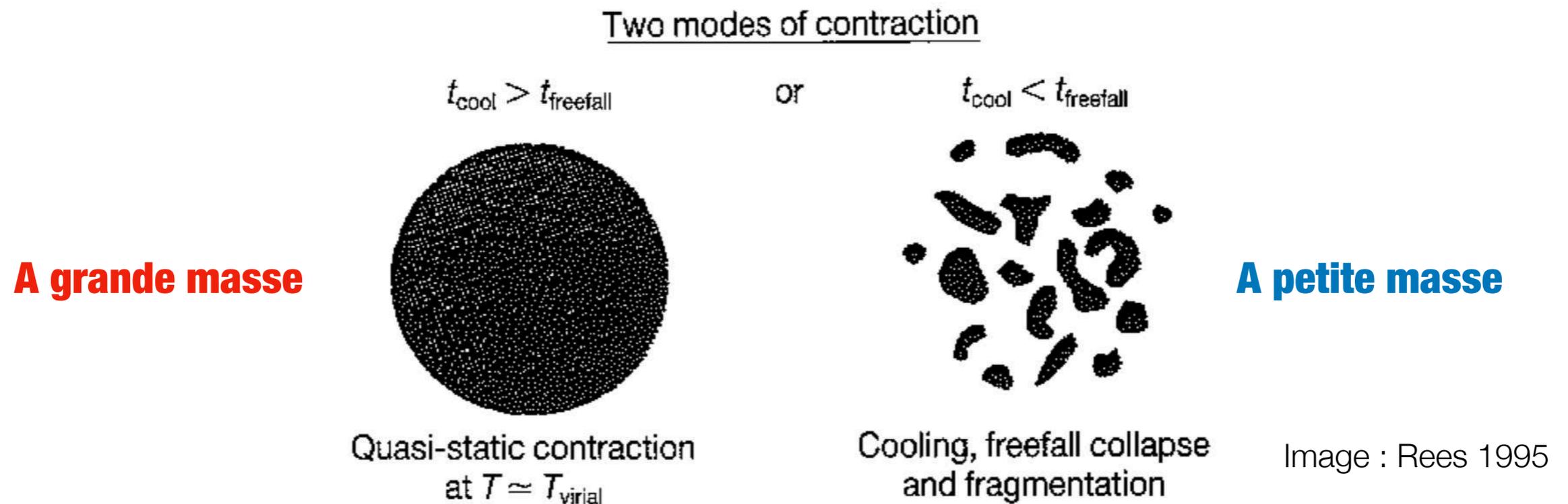
Début de la théorie de la formation des galaxies : **Rees & Ostriker 1977, Silk 1977, Binney 1977**

- Gaz en chute libre \Rightarrow vitesses élevées \Rightarrow **choques** \Rightarrow **réchauffement** \Rightarrow
le gaz chaud a trop de pression pour s'effondrer et se fragmenter en nuages
- **Pour former des galaxies, le gaz doit rayonner** son énergie thermique.

Origine de la masse caractéristique

Début de la théorie de la formation des galaxies : **Rees & Ostriker 1977, Silk 1977, Binney 1977**

- Gaz en chute libre \Rightarrow vitesses élevées \Rightarrow **choques** \Rightarrow **réchauffement** \Rightarrow
le gaz chaud a trop de pression pour s'effondrer et se fragmenter en nuages
- Le temps de réchauffement est le temps de chute libre $t_{\text{freefall}} \sim (G\rho)^{-1/2} = \text{const}$
- **Pour former des galaxies, le gaz doit rayonner** son énergie thermique.
- A haute température le gaz est plus ionisé et le rayonnement moins efficace.



Le rôle des supernovas

- **Larson 1974** : premier à reconnaître l'importance des supernovas dans la formation des galaxies et à les inclure dans les simulations

Le rôle des supernovas

- **Larson 1974** : premier à reconnaître l'importance des supernovas dans la formation des galaxies et à les inclure dans les simulations
- **Dekel & Silk 1986** : premiers à reconnaître leur importance pour la formation des galaxies naines dans une cosmologie avec de la matière noire froide.

$$\frac{1}{2}M_w v_w^2 = \epsilon_{\text{SN}} E_{\text{SN}} \Psi_{\text{SN}} M_\star \quad v_w \geq v_{\text{esc}} \sim v_{\text{vir}} \sqrt{2}$$

$$E_{\text{SN}} = 10^{51} \text{ erg}, \quad \Psi_{\text{SN}} = \frac{1}{150 M_\odot}$$

Le rôle des supernovas

- **Larson 1974** : premier à reconnaître l'importance des supernovas dans la formation des galaxies et à les inclure dans les simulations
- **Dekel & Silk 1986** : premiers à reconnaître leur importance pour la formation des galaxies naines dans une cosmologie avec de la matière noire froide.

$$\frac{1}{2}M_w v_w^2 = \epsilon_{\text{SN}} E_{\text{SN}} \Psi_{\text{SN}} M_\star \quad v_w \geq v_{\text{esc}} \sim v_{\text{vir}} \sqrt{2}$$

$$E_{\text{SN}} = 10^{51} \text{ erg}, \quad \Psi_{\text{SN}} = \frac{1}{150 M_\odot}$$

$$\eta = \frac{M_w}{M_\star} = \frac{2\epsilon_{\text{SN}} E_{\text{SN}} \Psi_{\text{SN}}}{v_{\text{esc}}^2} \sim 30\epsilon_{\text{SN}} \left(\frac{100 \text{ km s}^{-1}}{v_{\text{vir}}} \right)^2$$

Le rôle des supernovas

- **Larson 1974** : premier à reconnaître l'importance des supernovas dans la formation des galaxies et à les inclure dans les simulations
- **Dekel & Silk 1986** : premiers à reconnaître leur importance pour la formation des galaxies naines dans une cosmologie avec de la matière noire froide.

$$\frac{1}{2}M_w v_w^2 = \epsilon_{\text{SN}} E_{\text{SN}} \Psi_{\text{SN}} M_\star \quad v_w \geq v_{\text{esc}} \sim v_{\text{vir}} \sqrt{2}$$

$$E_{\text{SN}} = 10^{51} \text{ erg}, \quad \Psi_{\text{SN}} = \frac{1}{150 M_\odot}$$

$$\eta = \frac{M_w}{M_\star} = \frac{2\epsilon_{\text{SN}} E_{\text{SN}} \Psi_{\text{SN}}}{v_{\text{esc}}^2} \sim 30\epsilon_{\text{SN}} \left(\frac{100 \text{ km s}^{-1}}{v_{\text{vir}}} \right)^2$$

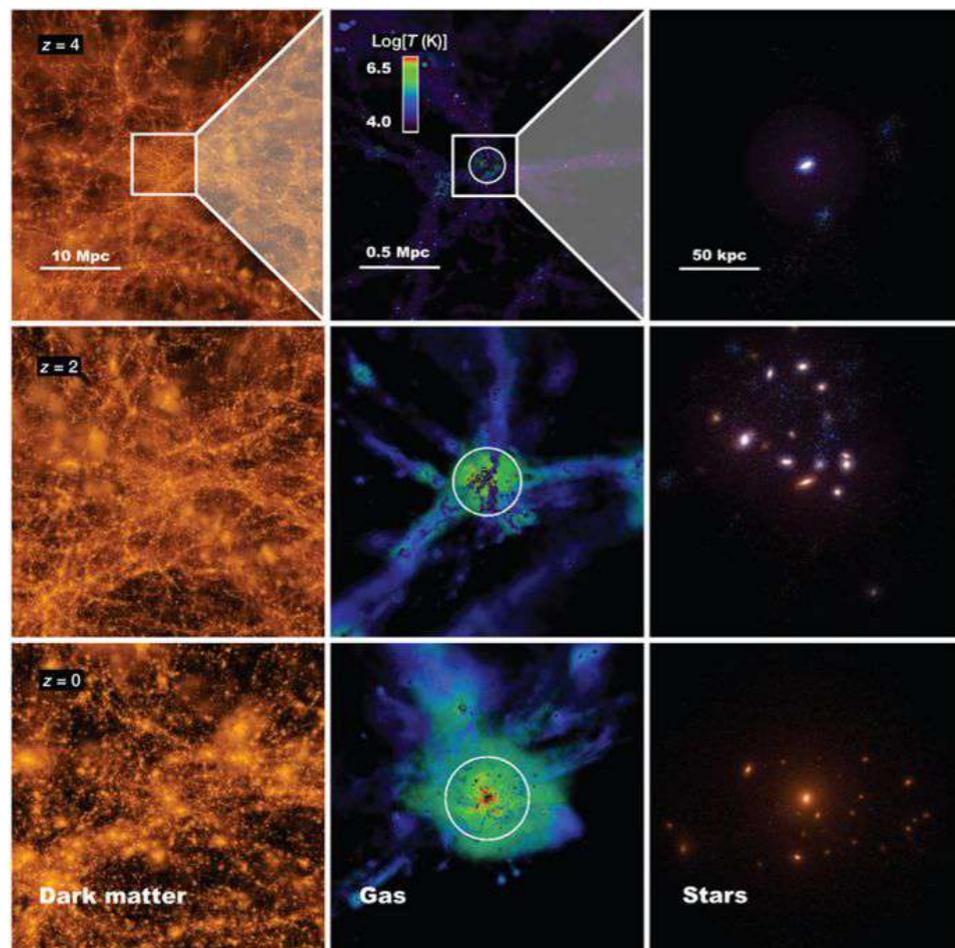
Dans un halo avec $v_{\text{vir}} = 100 \text{ km/s}$, $M_{\text{vir}} = 5 \times 10^{11} M_\odot$, les SN peuvent réduire la masse stellaire de ≤ 30 fois (mais attention à prendre des efficacités réalistes)

Deux approches

à la formation des galaxies en cosmologie

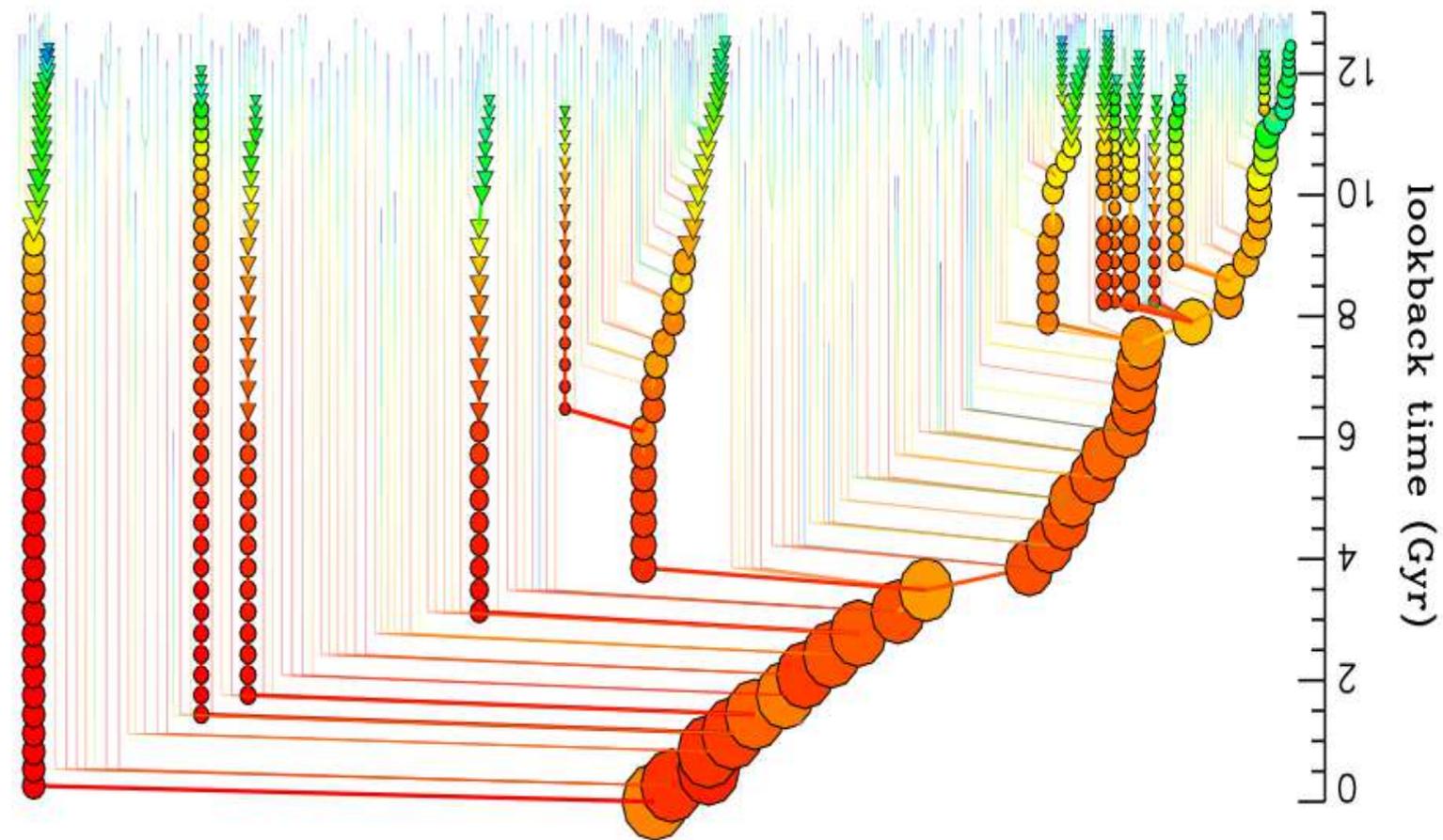
Simulations hydrodynamiques

L'évolution des baryons et de la matière noire est suivie en même temps en intégrant leurs équations du mouvement.



Modélisation semi-analytique

- Arbres de fusion pour les haloes de matière noire.
- Modèles analytiques pour l'évolution des baryons dans les halos de matière noire

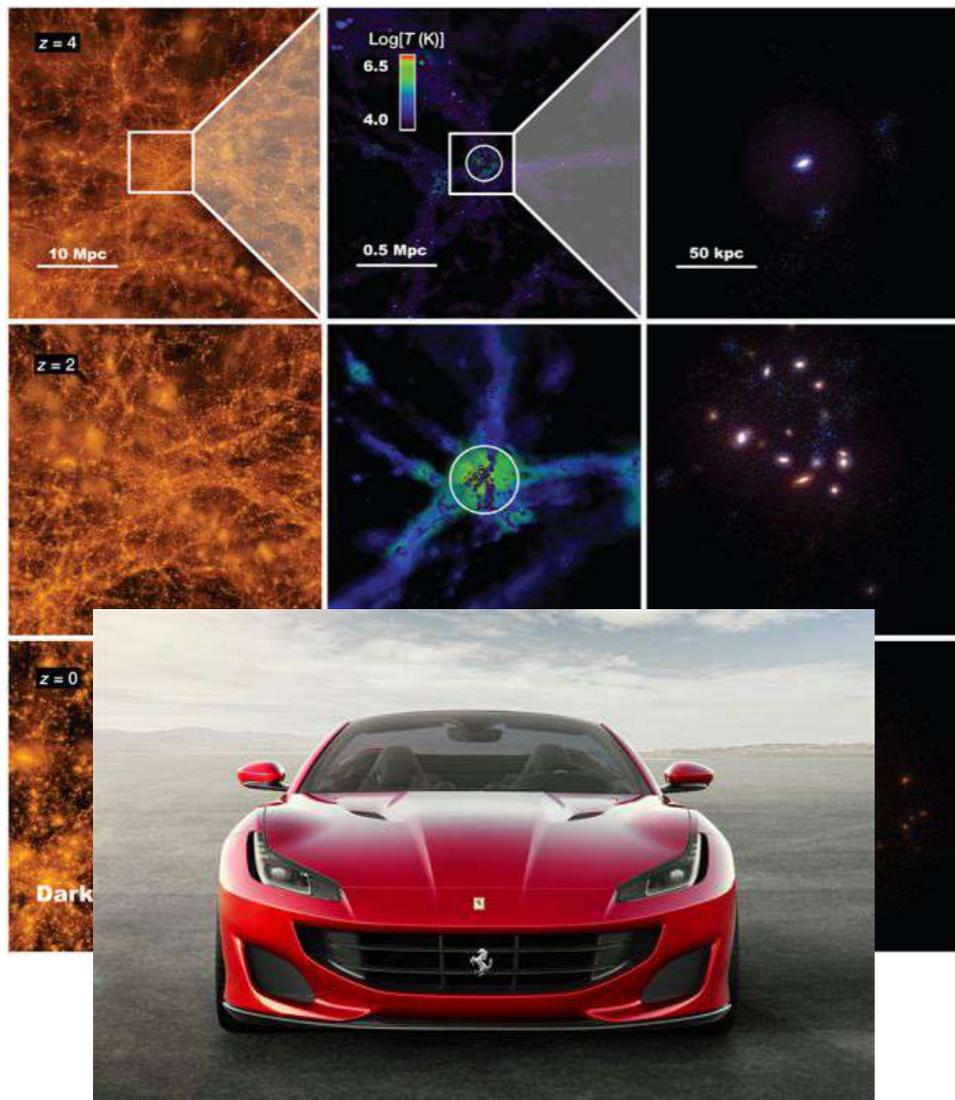


Deux approches

à la formation des galaxies en cosmologie

Simulations hydrodynamiques

L'évolution des baryons et de la matière noire est suivie en même temps en intégrant leurs équations du mouvement.



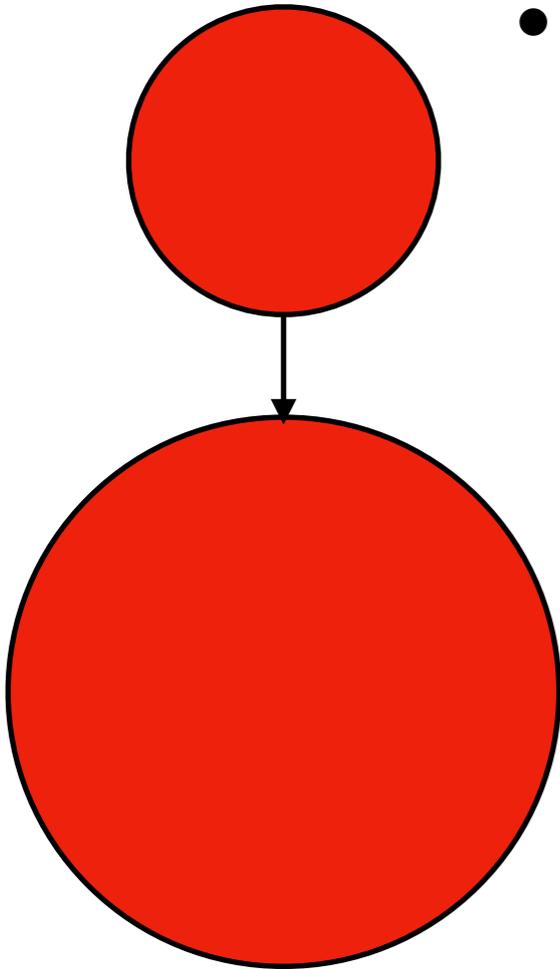
Modélisation semi-analytique

- Arbres de fusion pour les haloes de matière noire.
- Modèles analytiques pour l'évolution des baryons dans les halos de matière noire



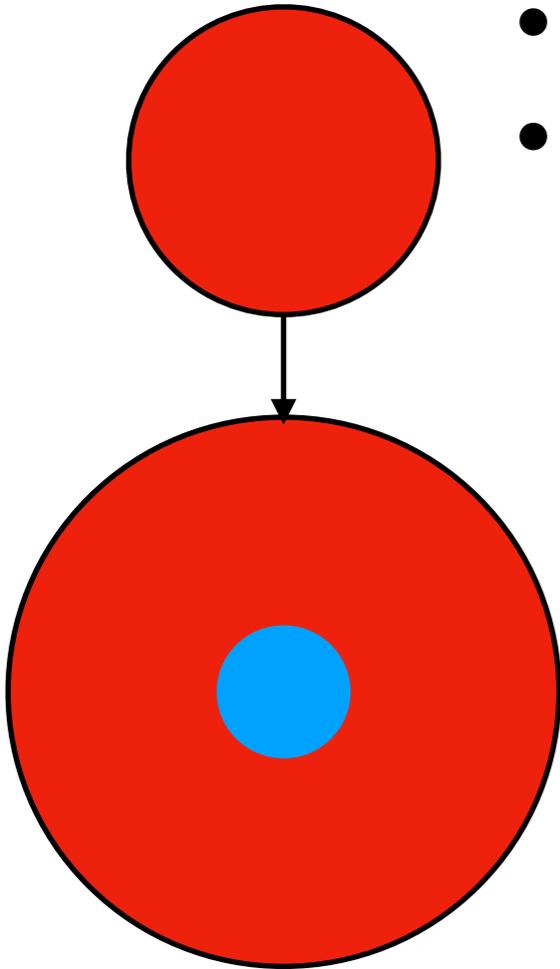
Un modèle semi-analytique classique

- Le gaz qui chute dans un halo est réchauffé par choc : au début tout le gaz est chaud
- La masse du gaz chaud croît avec celle du halo : $\Delta M_{\text{hot}} = f_b \Delta M_{\text{DM}}$



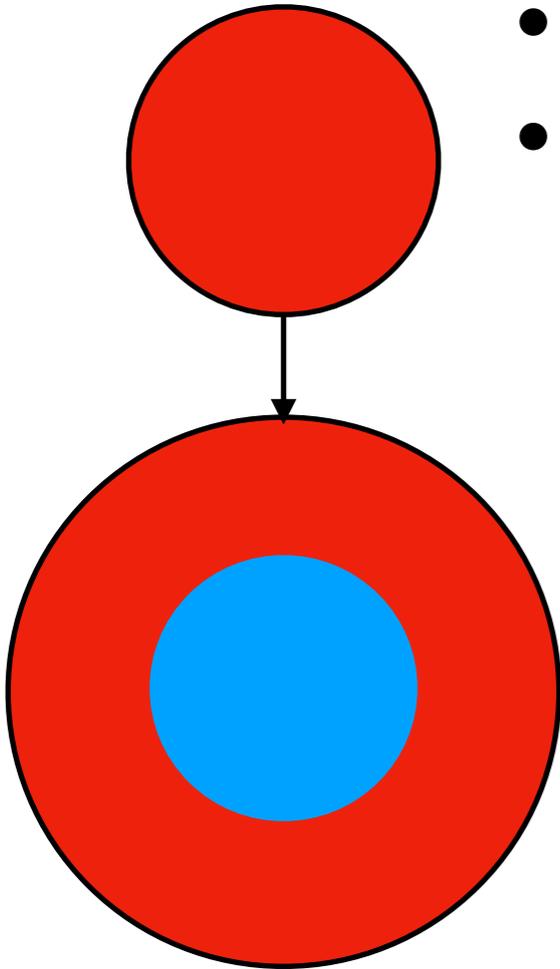
Un modèle semi-analytique classique

- **Le gaz qui chute dans un halo est réchauffé par choc** : au début tout le gaz est chaud
- La masse du gaz chaud croît avec celle du halo : $\Delta M_{\text{hot}} = f_b \Delta M_{\text{DM}}$
- **Le gaz chaud refroidit** à partir du centre, où il est plus dense

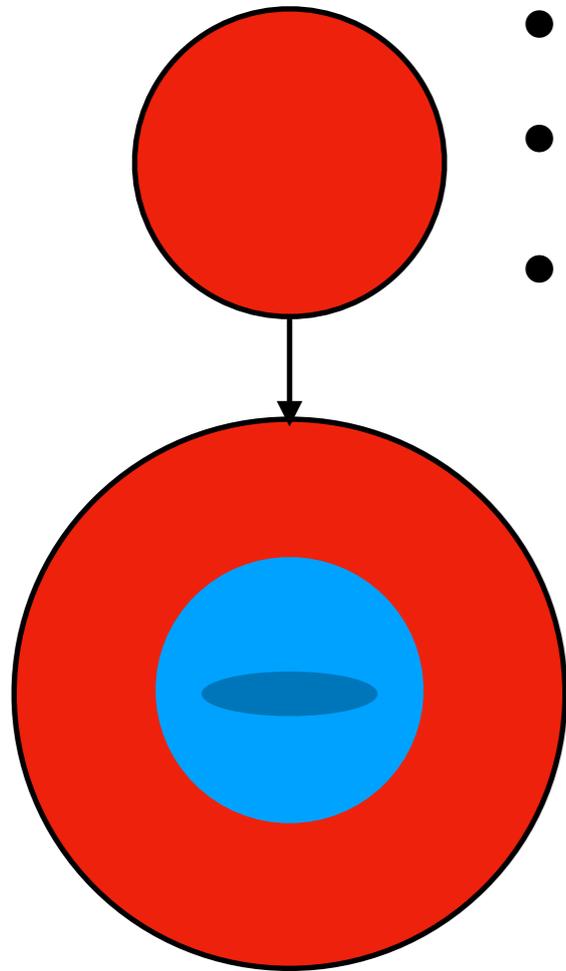


Un modèle semi-analytique classique

- **Le gaz qui chute dans un halo est réchauffé par choc** : au début tout le gaz est chaud
- La masse du gaz chaud croît avec celle du halo : $\Delta M_{\text{hot}} = f_b \Delta M_{\text{DM}}$
- **Le gaz chaud refroidit** à partir du centre, où il est plus dense

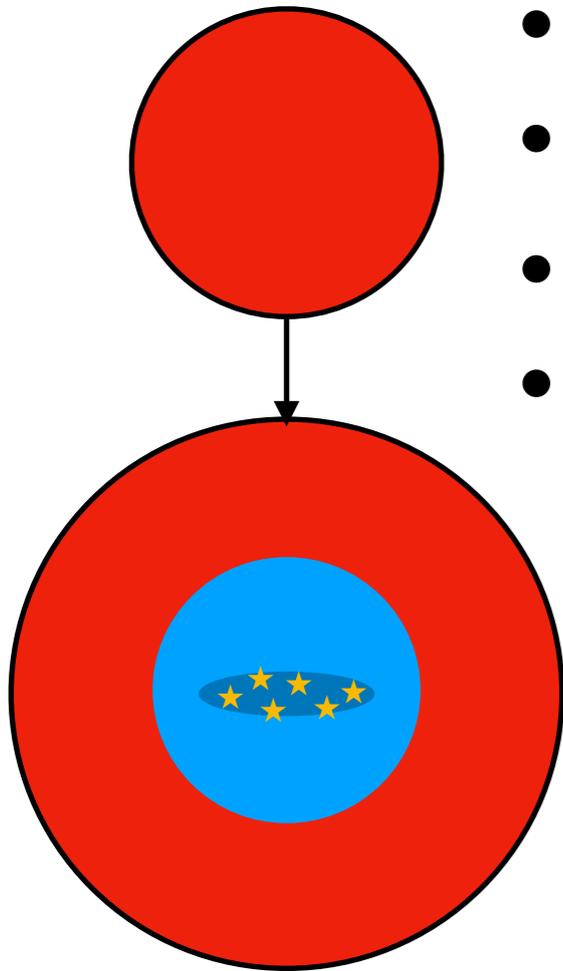


Un modèle semi-analytique classique



- **Le gaz qui chute dans un halo est réchauffé par choc** : au début tout le gaz est chaud
- La masse du gaz chaud croît avec celle du halo : $\Delta M_{\text{hot}} = f_b \Delta M_{\text{DM}}$
- **Le gaz chaud refroidit** à partir du centre, où il est plus dense : le disque de **la galaxie centrale croît au taux du refroidissement du gaz**
- La conservation du moment angulaire détermine la taille du disque (Fall & Efstathiou 1980, Mo et al. 1998)

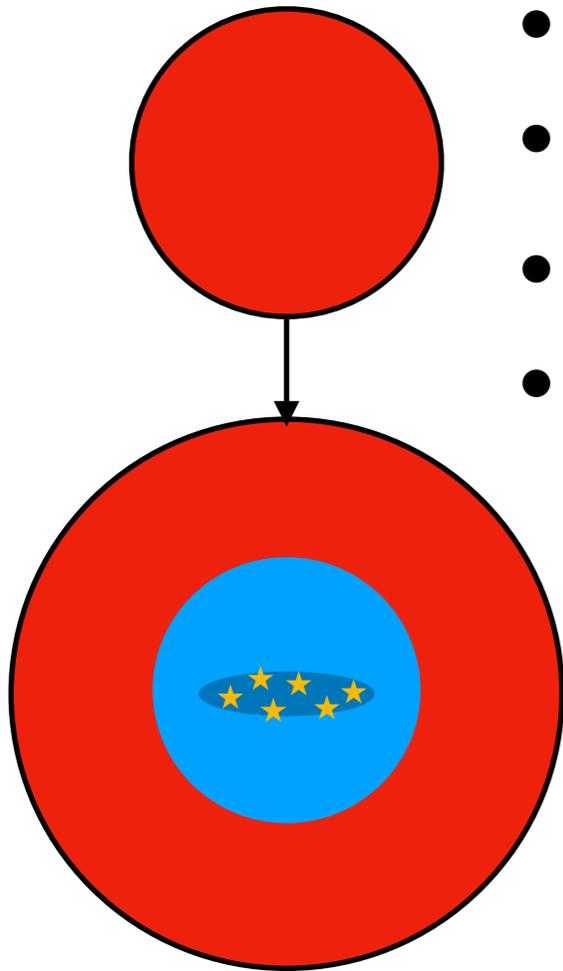
Un modèle semi-analytique classique



- **Le gaz qui chute dans un halo est réchauffé par choc** : au début tout le gaz est chaud
- La masse du gaz chaud croît avec celle du halo : $\Delta M_{\text{hot}} = f_b \Delta M_{\text{DM}}$
- **Le gaz chaud refroidit** à partir du centre, où il est plus dense : le disque de **la galaxie centrale croît au taux du refroidissement du gaz**
- La conservation du moment angulaire détermine la taille du disque
- Le disque gazeux **forme des étoiles** sur une échelle de temps proportionnelle au temps orbital ou bien à $\Sigma_{\text{gaz}}^{-1/2}$ (Kennicutt 1998, de los Reyes & Kennicutt 2019)



Un modèle semi-analytique classique



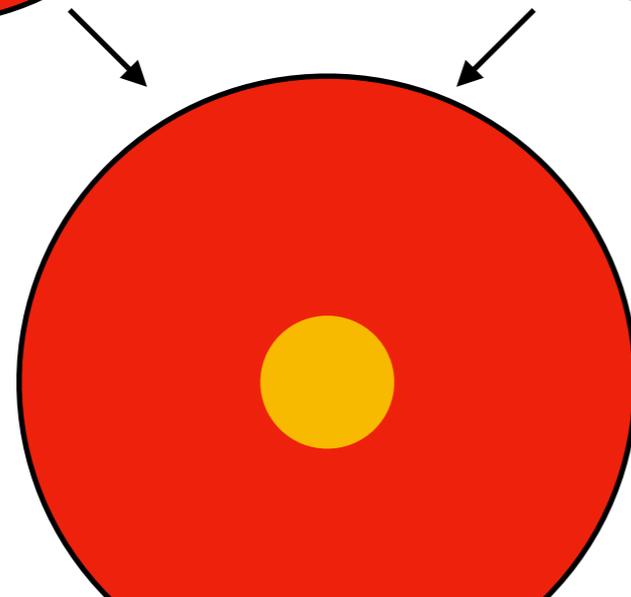
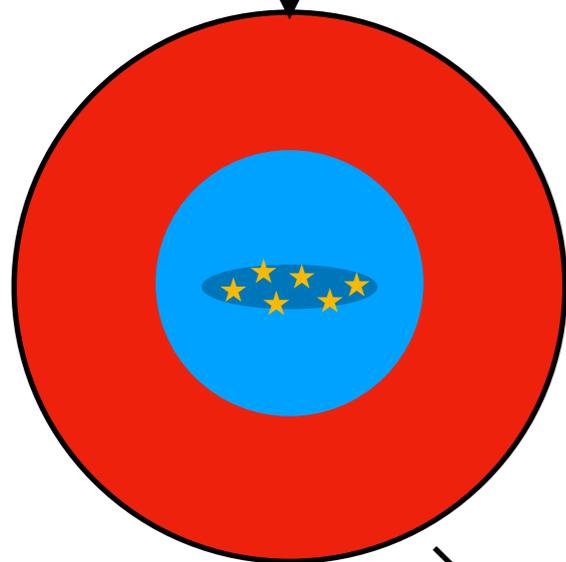
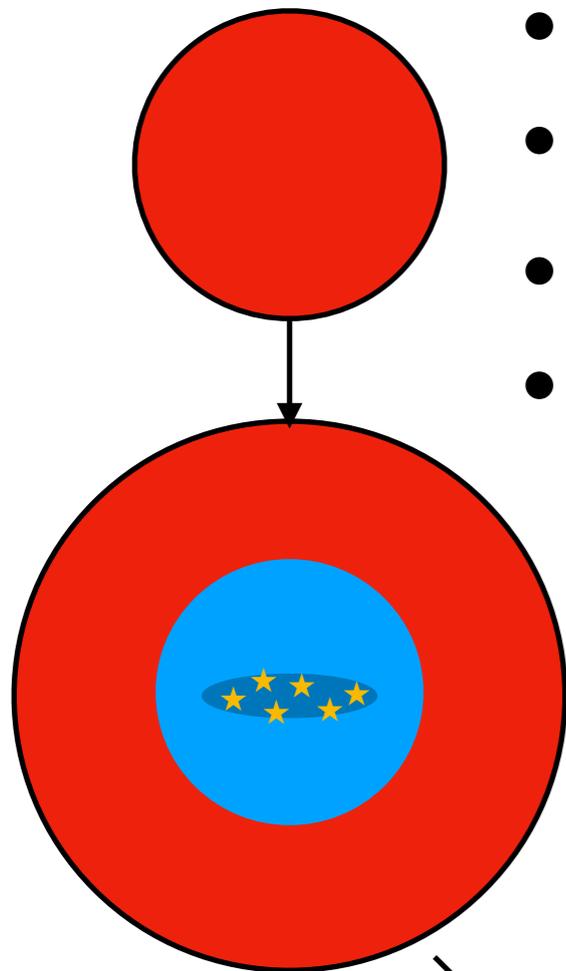
- **Le gaz qui chute dans un halo est réchauffé par choc** : au début tout le gaz est chaud
- La masse du gaz chaud croît avec celle du halo : $\Delta M_{\text{hot}} = f_b \Delta M_{\text{DM}}$
- **Le gaz chaud refroidit** à partir du centre, où il est plus dense : le disque de **la galaxie centrale croît au taux du refroidissement du gaz**
- La conservation du moment angulaire détermine la taille du disque
- Le disque gazeux **forme des étoiles** sur une échelle de temps proportionnelle au temps orbital ou bien à $\Sigma_{\text{gaz}}^{-1/2}$

White & Frenk 1991 : $\dot{M}_{\star} = \frac{\min(\dot{M}_{\text{cool}}, \dot{M}_{\text{ff}})}{1 + \epsilon_0 \left(\frac{700 \text{ km s}^{-1}}{v_{\text{vir}}} \right)^2}$

↑
Efficacité des SN

Un modèle semi-analytique classique

- **Le gaz qui chute dans un halo est réchauffé par choc** : au début tout le gaz est chaud
- La masse du gaz chaud croît avec celle du halo : $\Delta M_{\text{hot}} = f_b \Delta M_{\text{DM}}$
- **Le gaz chaud refroidit** à partir du centre, où il est plus dense : le disque de **la galaxie centrale croît au taux du refroidissement du gaz**
- La conservation du moment angulaire détermine la taille du disque
- Le disque gazeux **forme des étoiles** sur une échelle de temps proportionnelle au temps orbital ou bien à $\Sigma_{\text{gaz}}^{-1/2}$



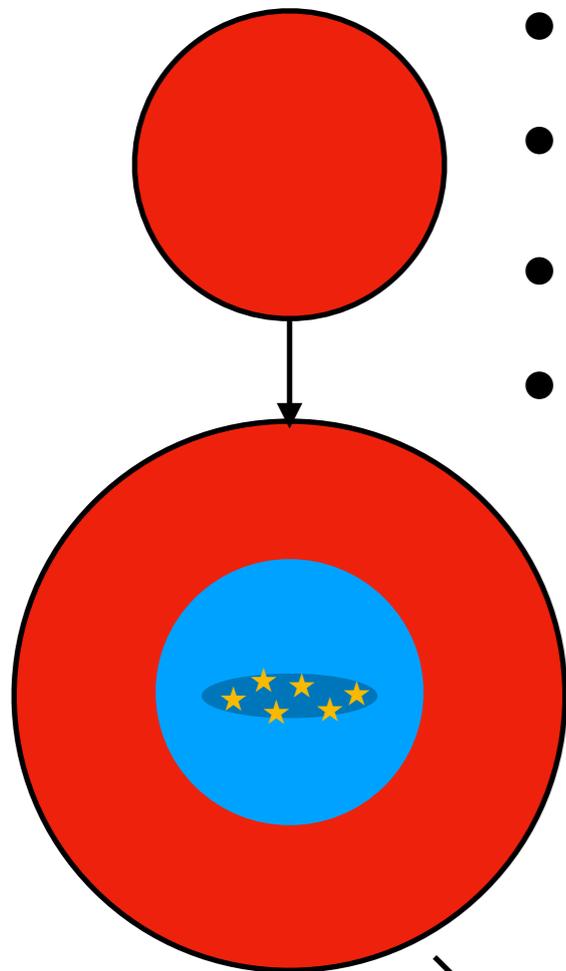
White & Frenk 1991 :
$$\dot{M}_* = \frac{\min(\dot{M}_{\text{cool}}, \dot{M}_{\text{ff}})}{1 + \epsilon_0 \left(\frac{700 \text{ km s}^{-1}}{v_{\text{vir}}} \right)^2}$$

↑
Efficacité des SN

- Les **galaxies elliptiques** sont issues de la **fusion** de galaxies à disque de masse comparables (Toomre & Toomre 1972, Hopkins et al. 2008)
- La **conservation de l'énergie** détermine les **tailles** des galaxies elliptiques (Hatton et al. 2003, Covington et al. 2008)

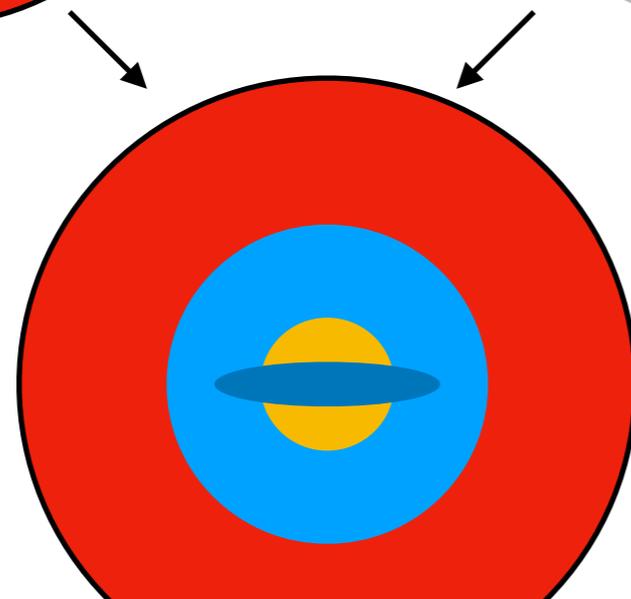
Un modèle semi-analytique classique

- **Le gaz qui chute dans un halo est réchauffé par choc** : au début tout le gaz est chaud
- La masse du gaz chaud croît avec celle du halo : $\Delta M_{\text{hot}} = f_b \Delta M_{\text{DM}}$
- **Le gaz chaud refroidit** à partir du centre, où il est plus dense : le disque de **la galaxie centrale croît au taux du refroidissement du gaz**
- La conservation du moment angulaire détermine la taille du disque
- Le disque gazeux **forme des étoiles** sur une échelle de temps proportionnelle au temps orbital ou bien à $\Sigma_{\text{gaz}}^{-1/2}$



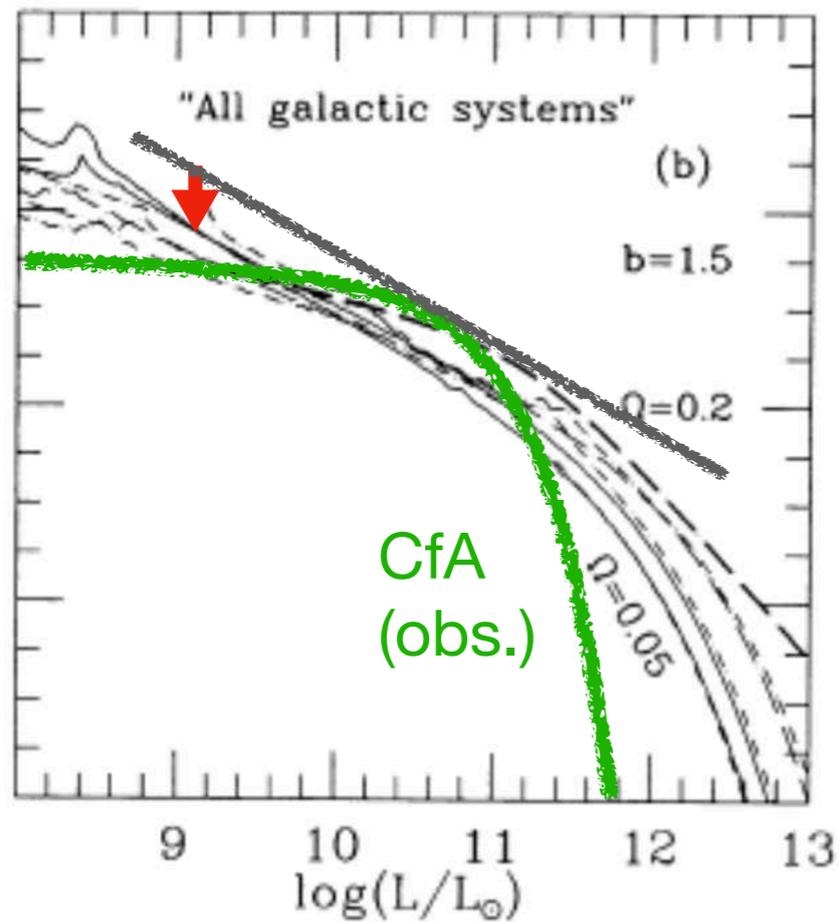
White & Frenk 1991 :
$$\dot{M}_* = \frac{\min(\dot{M}_{\text{cool}}, \dot{M}_{\text{ff}})}{1 + \epsilon_0 \left(\frac{700 \text{ km s}^{-1}}{v_{\text{vir}}} \right)^2}$$

↑
Efficacité des SN



- Les **galaxies elliptiques** sont issues de la **fusion** de galaxies à disque de masse comparables
- La **conservation de l'énergie** détermine les **tailles** des galaxies elliptiques
- Si le refroidissement continue, **le disque se reforme**

Premiers résultats



White & Frenk 1991

Trop de galaxies à faible et grande luminosité

Un feedback plus fort réduit l'écart avec les données, mais n'améliore pas la pente.

Un scénario plus réaliste

Birnboim & Dekel 2003, Keres et al. 2005, Dekel & Birnboim 2006

Le gaz peut s'effondrer sur les galaxies sans jamais être passé par une phase chaude (**écoulements filamentaires**)

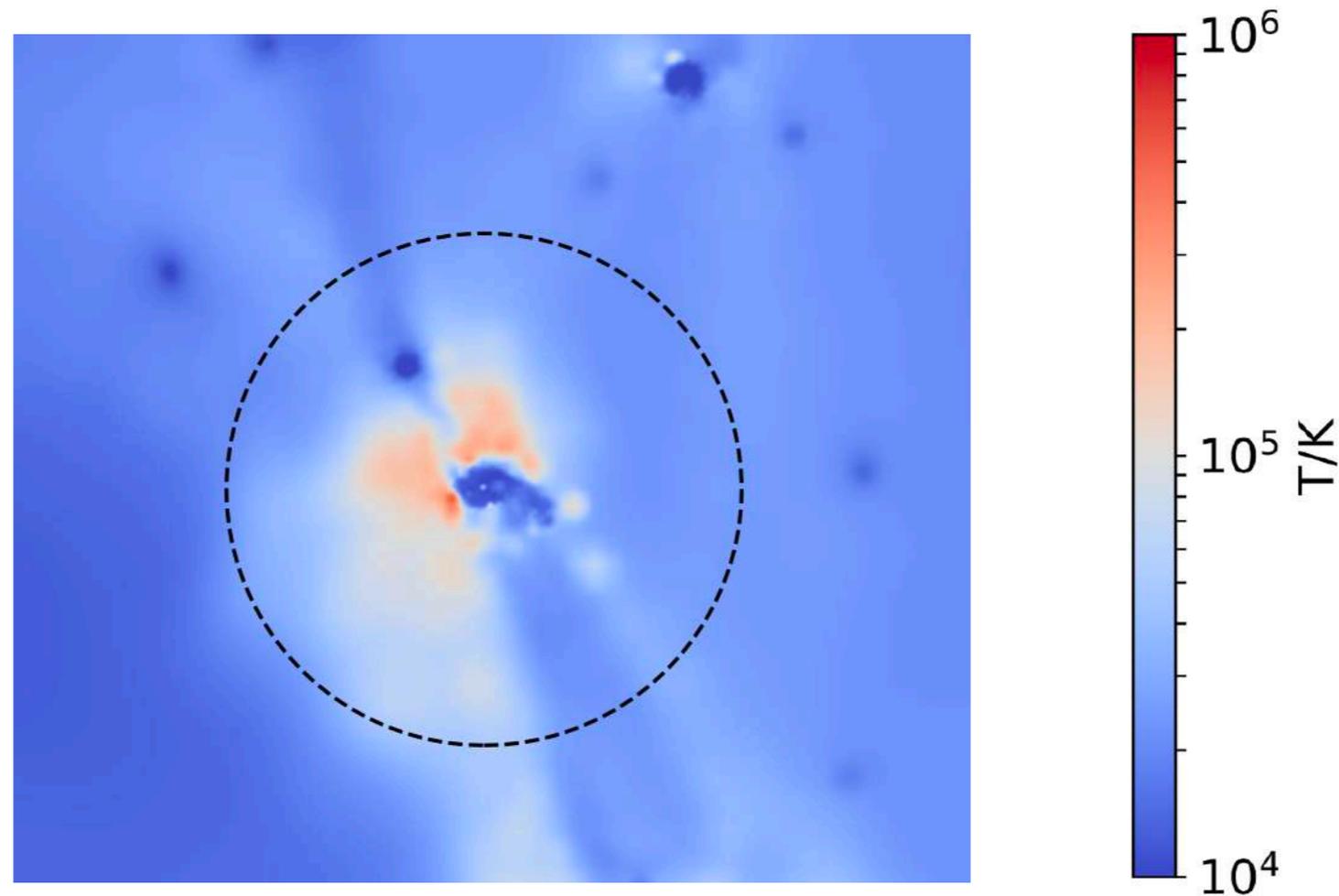
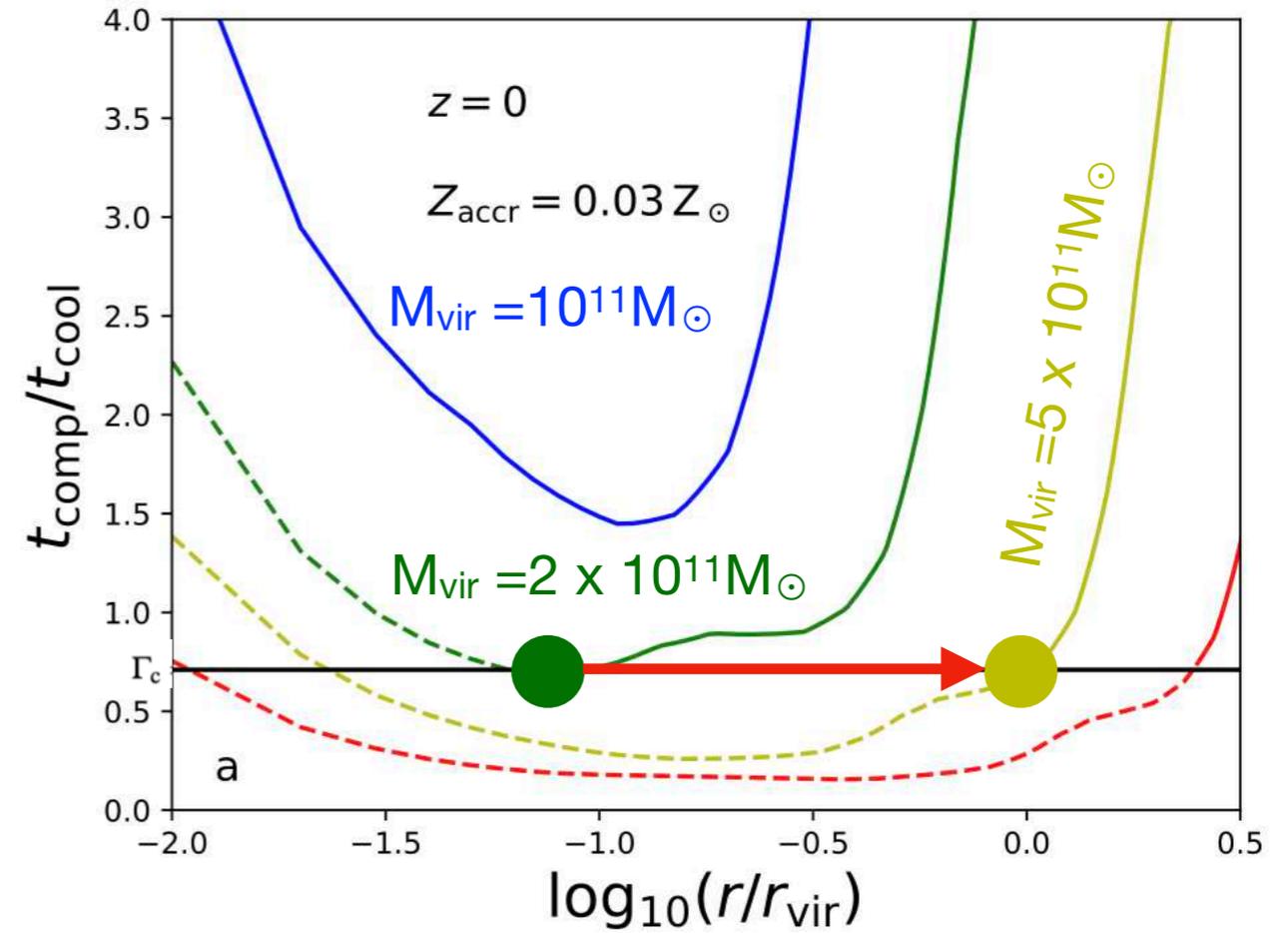
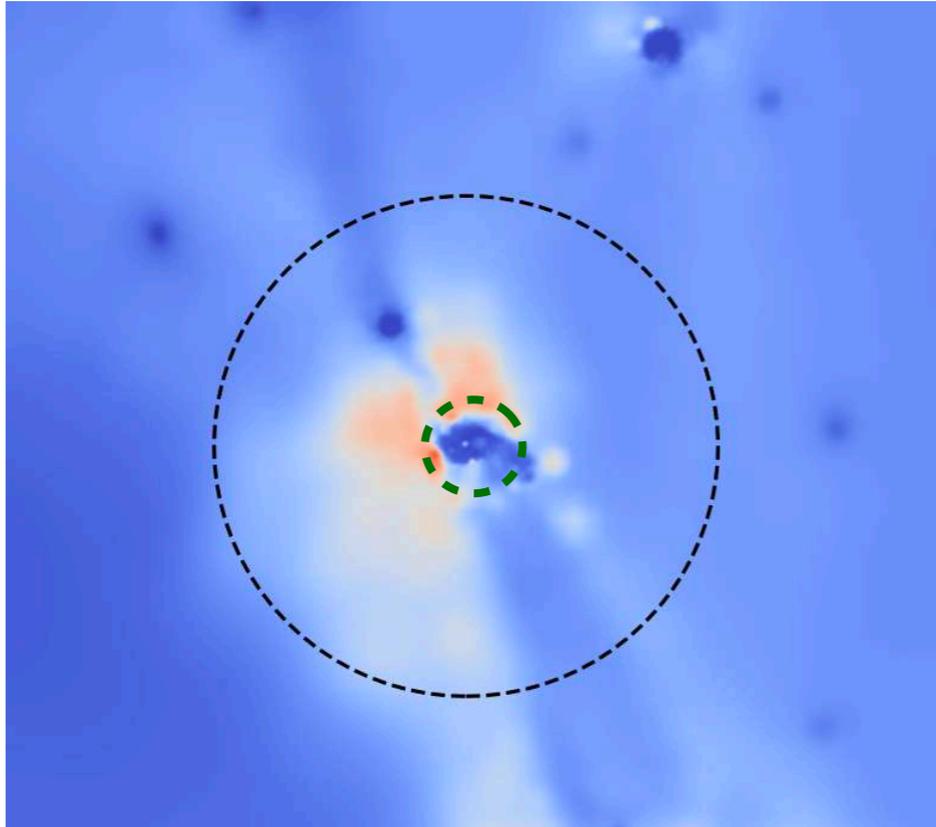


Image : Tollet et al. 2022

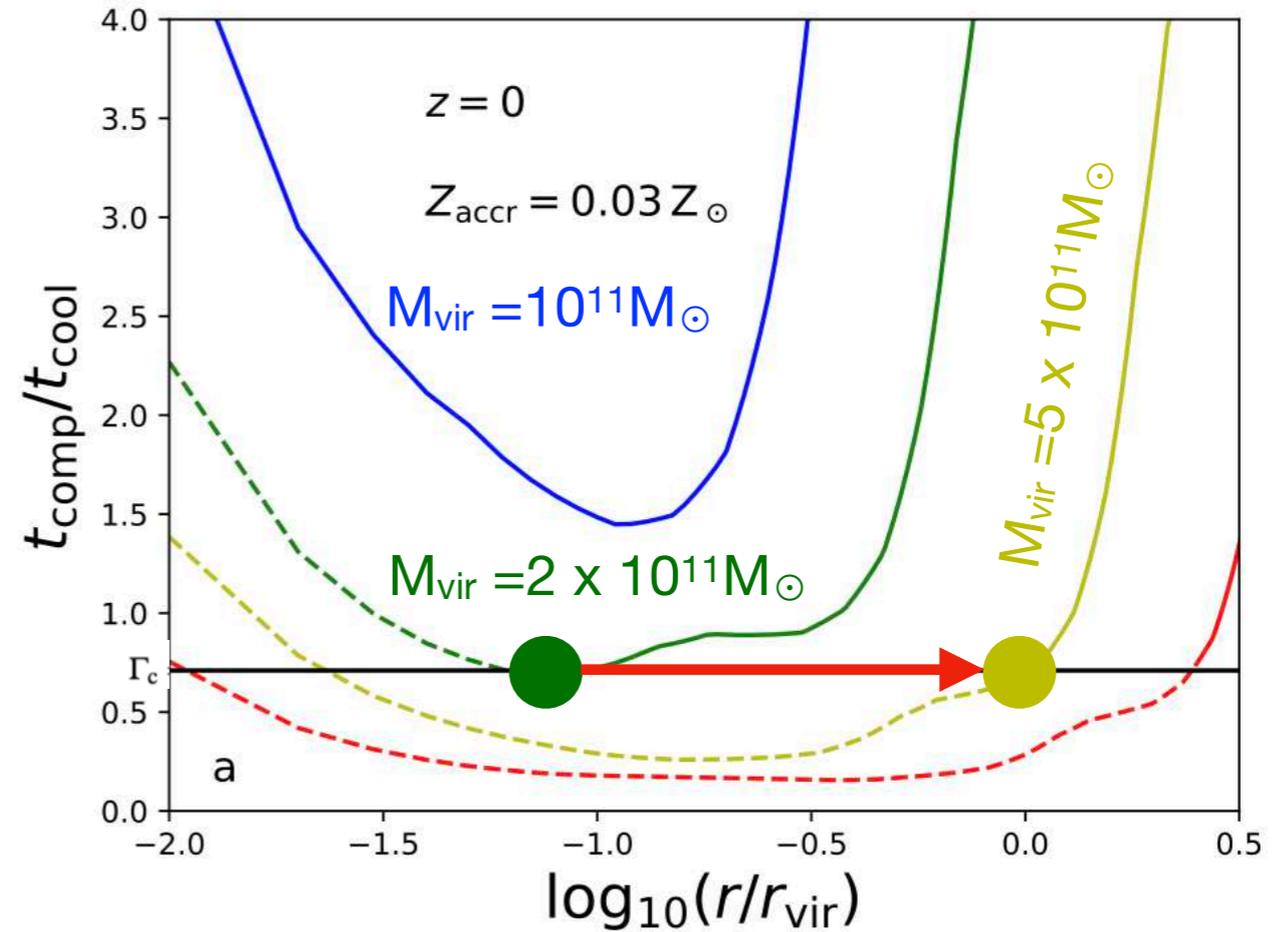
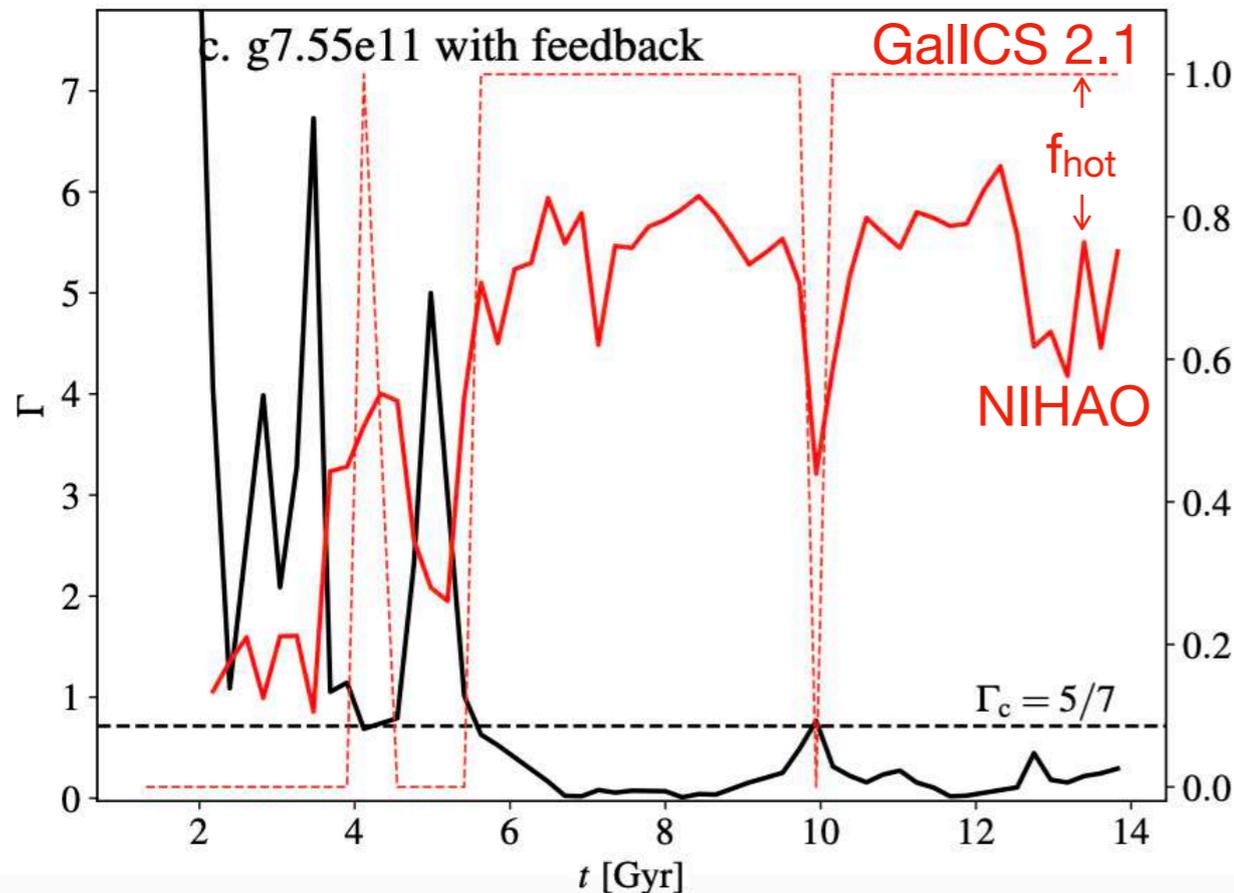
Un modèle semi-analytique qui en tien compte

GalICS 2.1 : Cattaneo et al. 2021



Un modèle semi-analytique qui en tient compte

GallCS 2.1 : Cattaneo et al. 2021

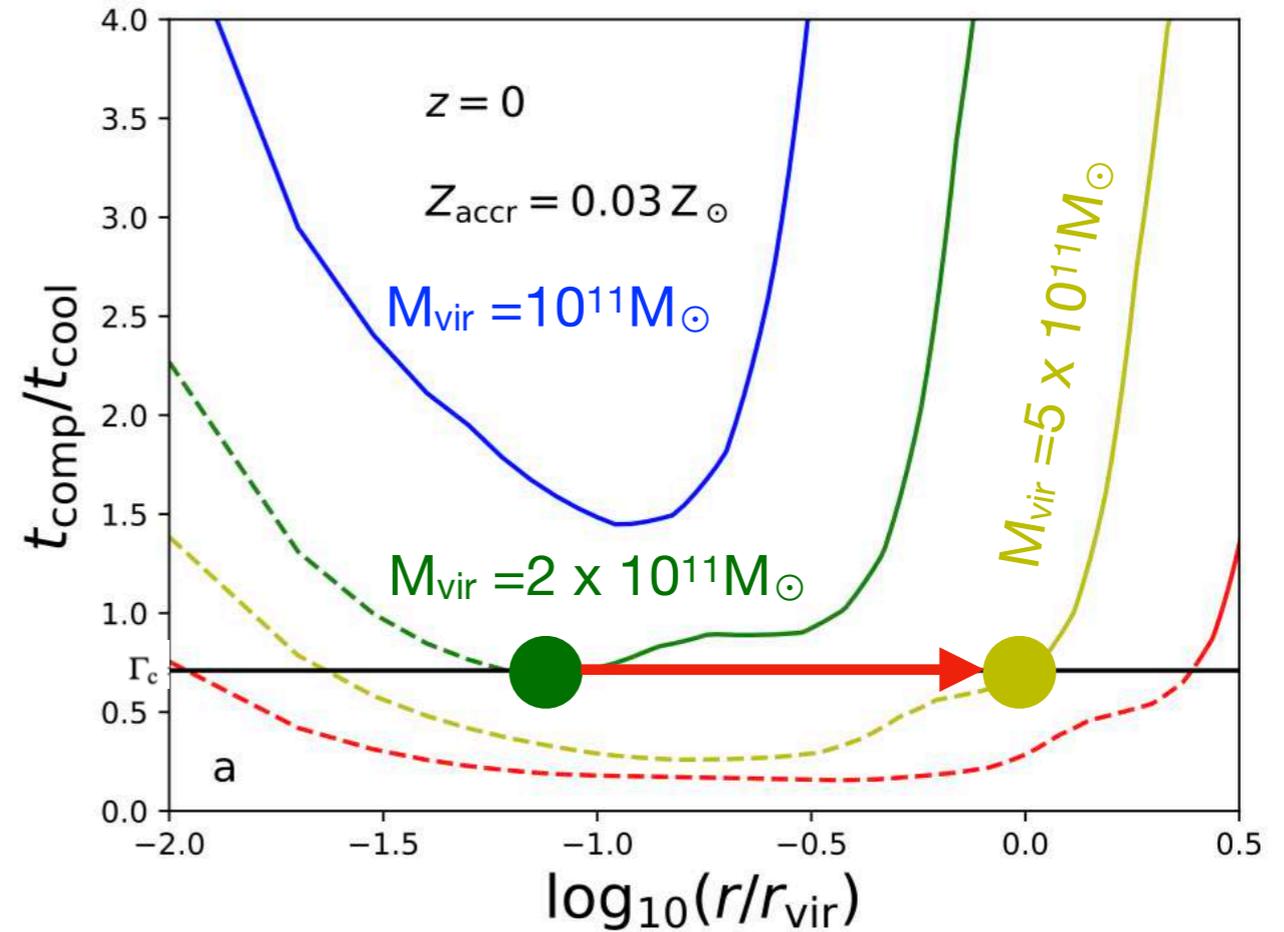
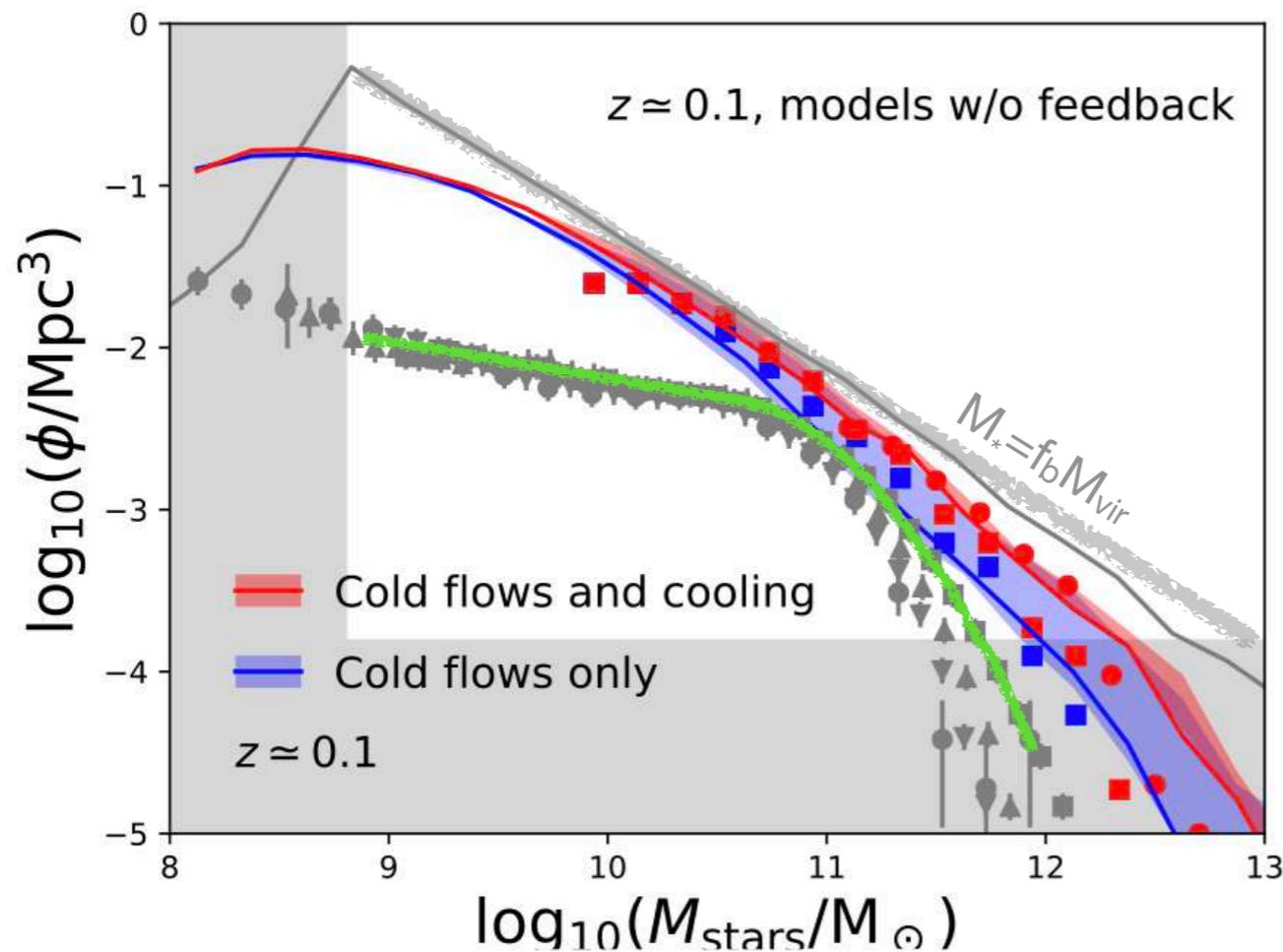


Comparaisons avec NIHAO
(simulations hydrodynamiques) :
accord aussi bien que possible
pour un modèle binaire.

Tollet et al. 2022

Un modèle semi-analytique qui en tient compte

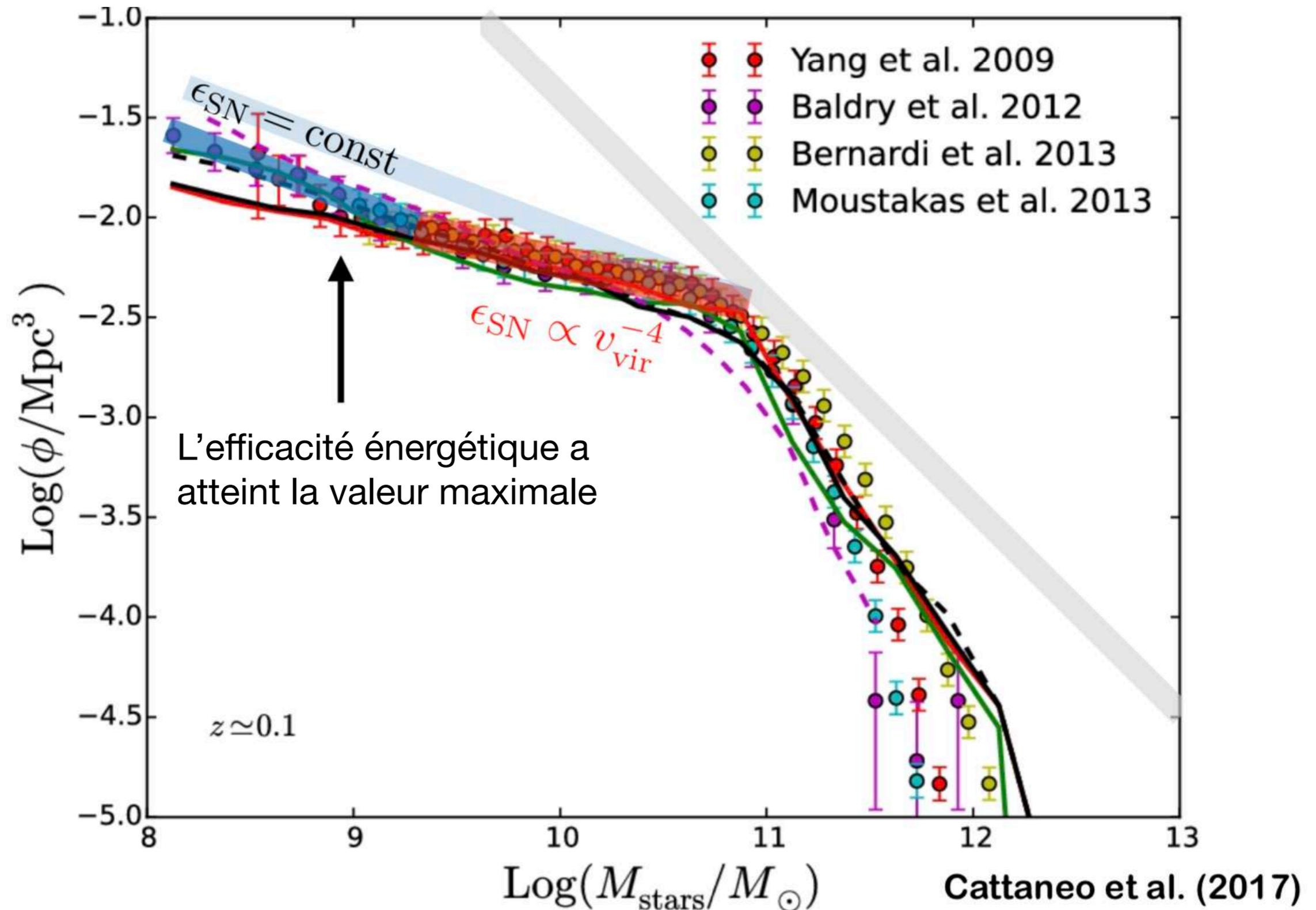
GaICS 2.1 : Cattaneo et al. 2021



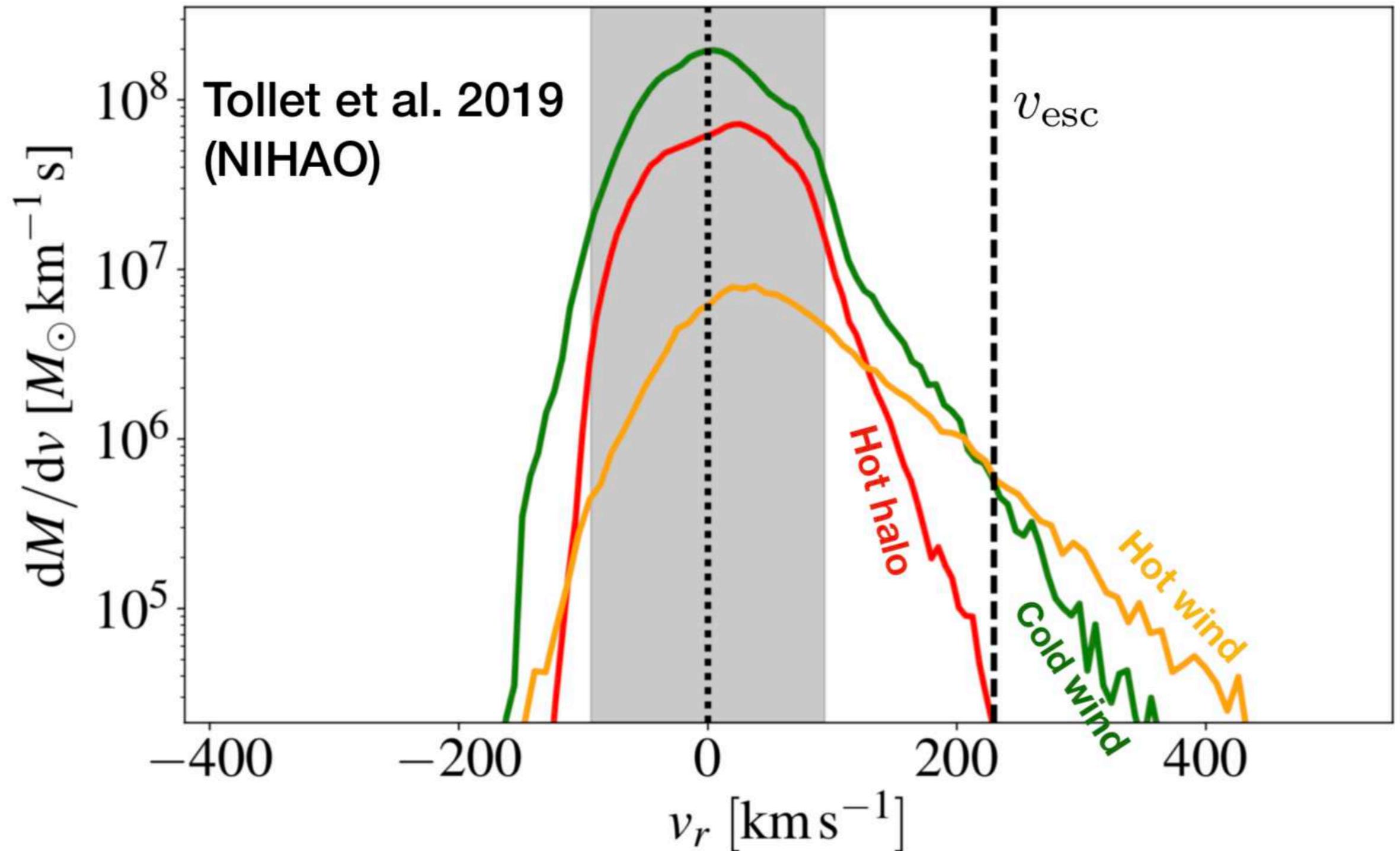
Peu de différence

en ce qui concerne la fonction de masse

La pente à petites masses

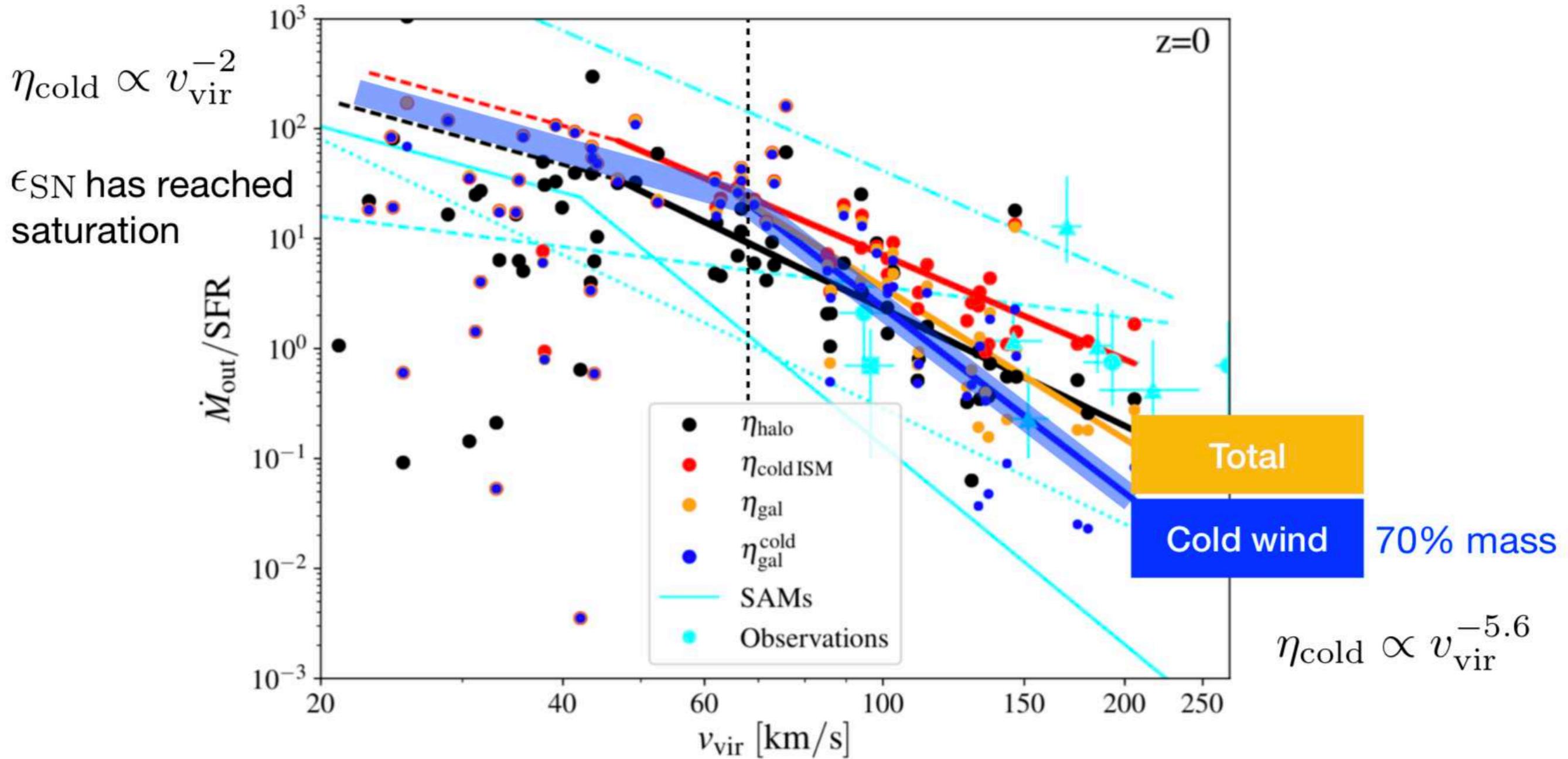


Vents galactiques : distribution de vitesse



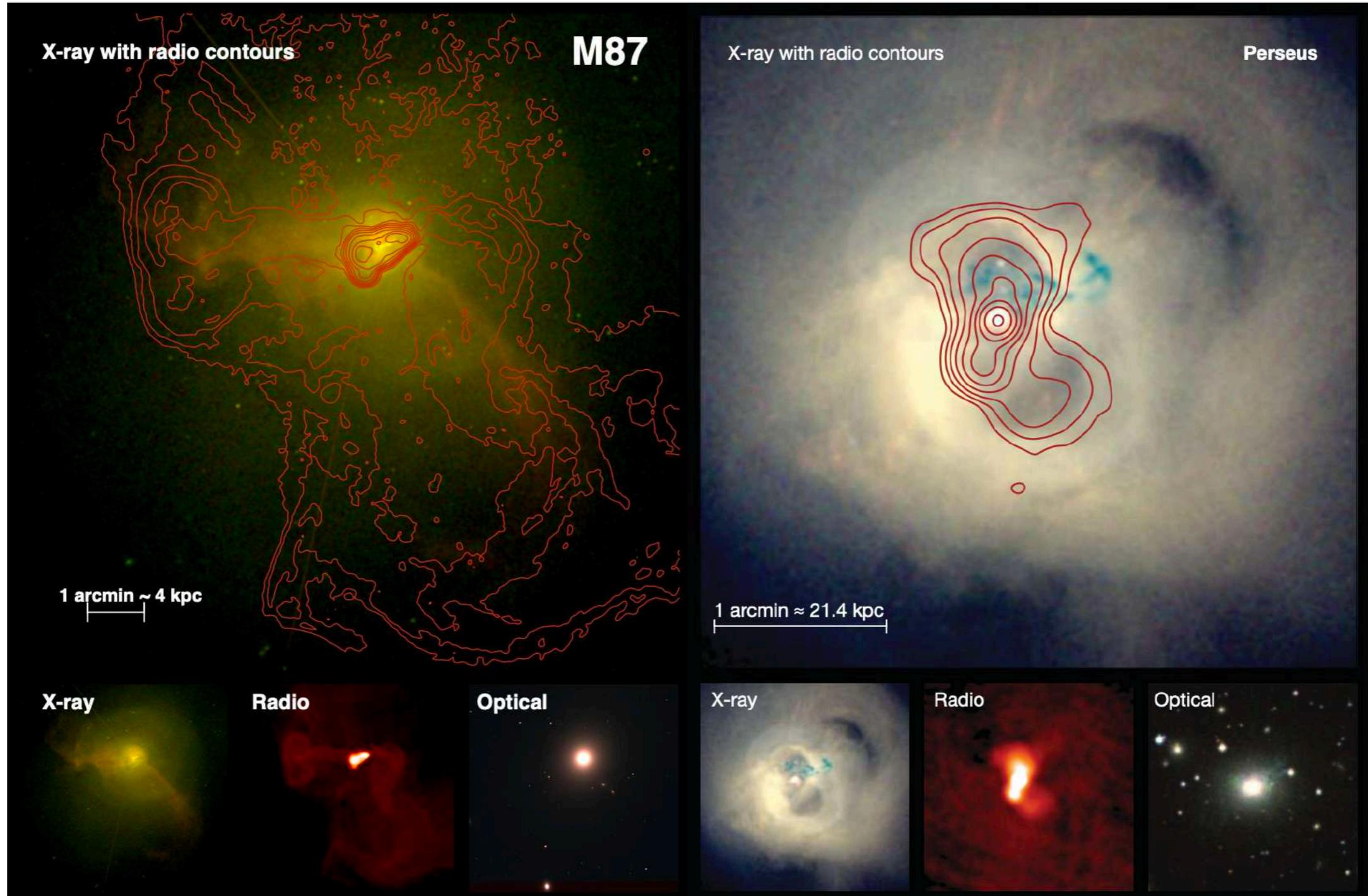
A v_{esc} élevée, une grande partie de l'**énergie** des supernova est **gaspillée** en accélérant du gaz qui ne s'échappera pas.

Facteur d'entrainement



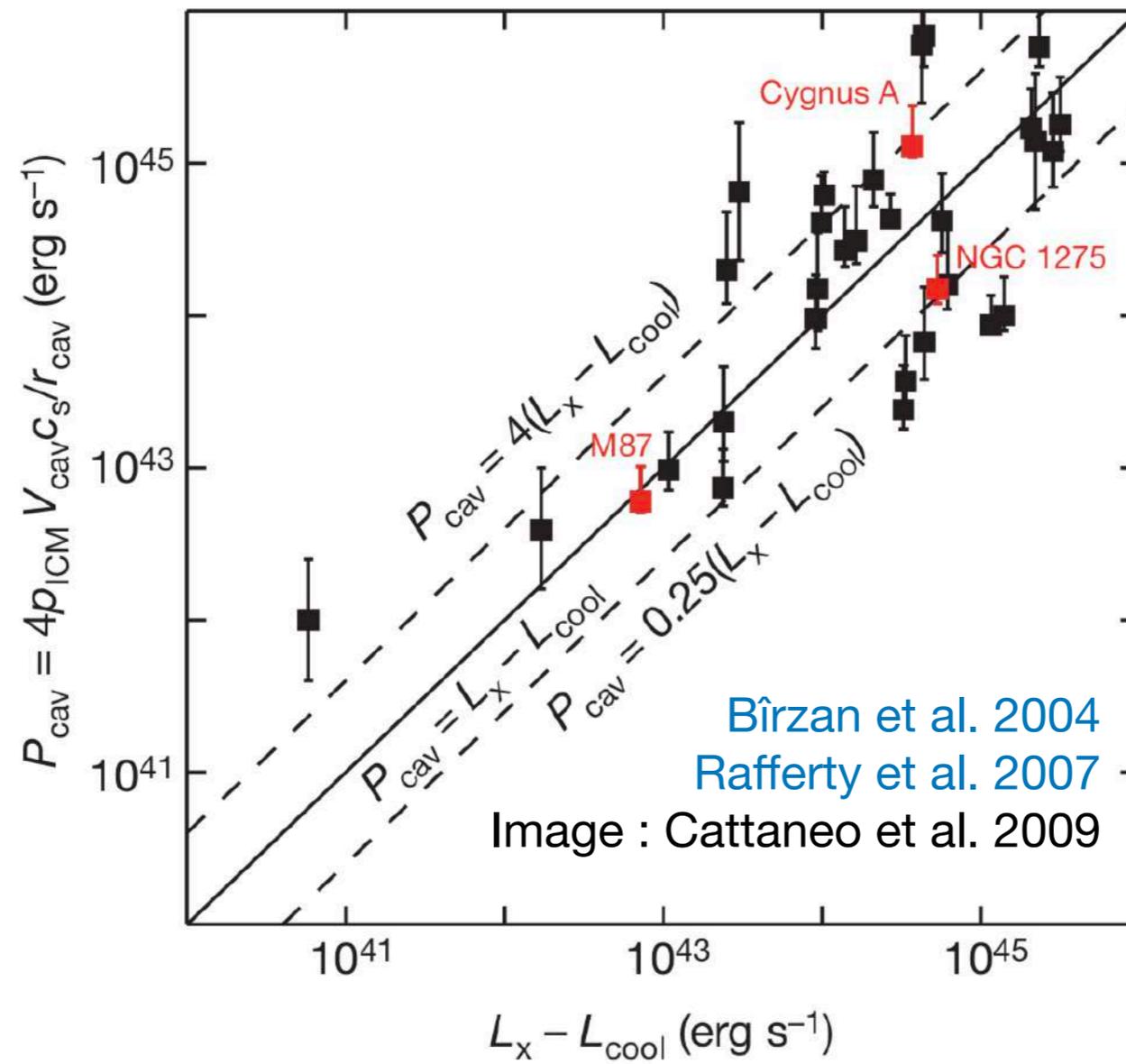
Pourquoi le gaz ne refroidit pas dans les halos massifs ?

Problème des écoulements de refroidissement (Fabian 1994)

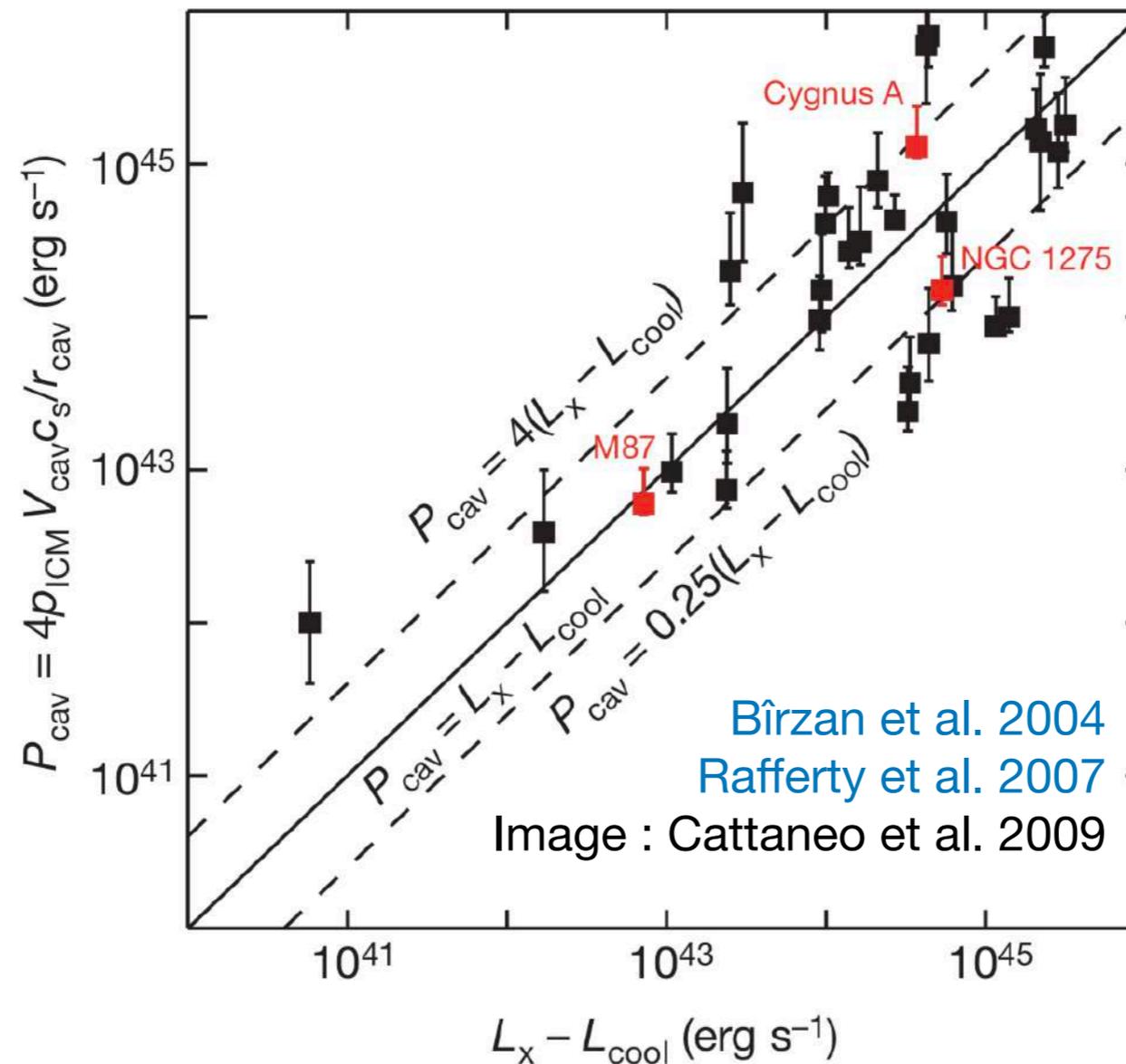


Réchauffement mécanique par les radio galaxies (Peterson & Fabian 2006, McNamara & Nulsen 2007, Cattaneo et al. 2009, Hlavecek-Larrondo et al. 2022)

Equilibre réchauffement - refroidissement

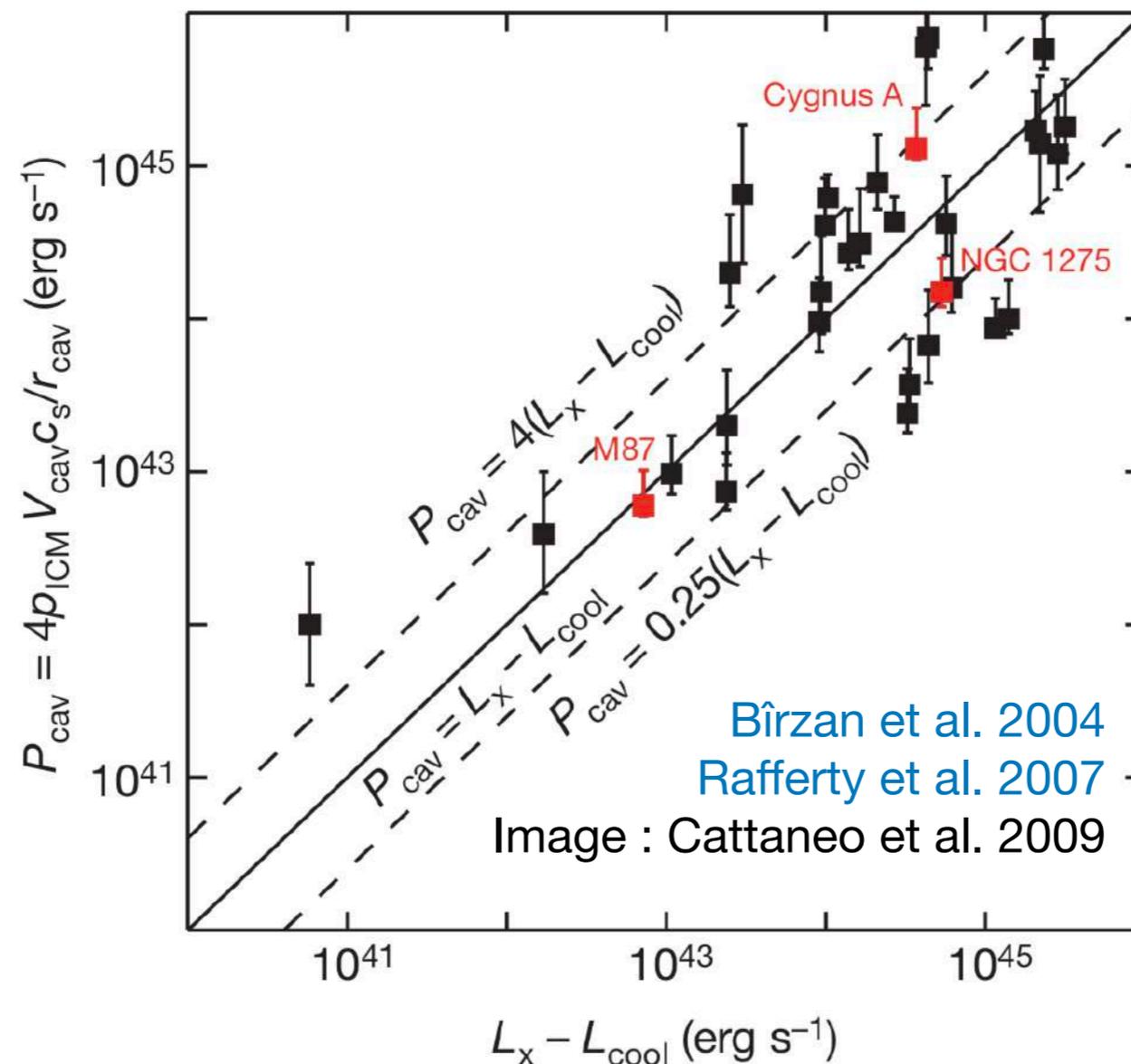


Equilibre réchauffement - refroidissement



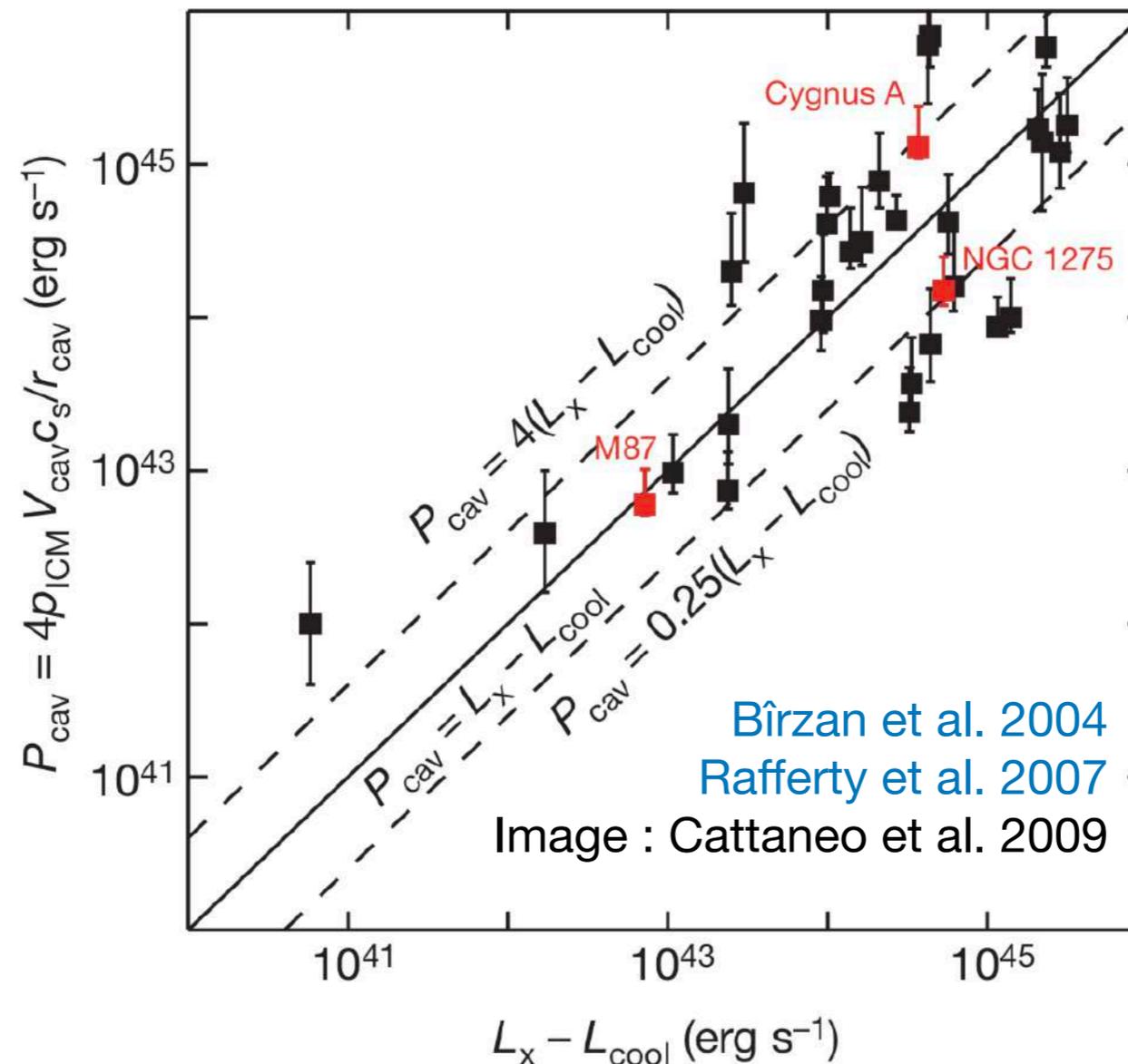
- Simulations hydrodynamiques : **le taux d'accroissement du trou noir central s'auto-régule** pour préserver l'équilibre thermique du milieu intra-amas (Cattaneo & Teyssier 2007, Brüggén & Scannapieco 2009, Dubois et al. 2010, Gaspari et al. 2011)

Equilibre réchauffement - refroidissement



- Simulations hydrodynamiques : **le taux d'accroissement du trou noir central s'auto-régule** pour préserver l'équilibre thermique du milieu intra-amas (Cattaneo & Teyssier 2007, Brüggén & Scannapieco 2009, Dubois et al. 2010, Gaspari et al. 2011)
- Modèles semi-analytiques : le taux de refroidissement du gaz est réduit proportionnellement à P_{jet}/L_x (Croton et al. 2006, Somerville et al. 2008, Henriques et al. 2015)

Equilibre réchauffement - refroidissement

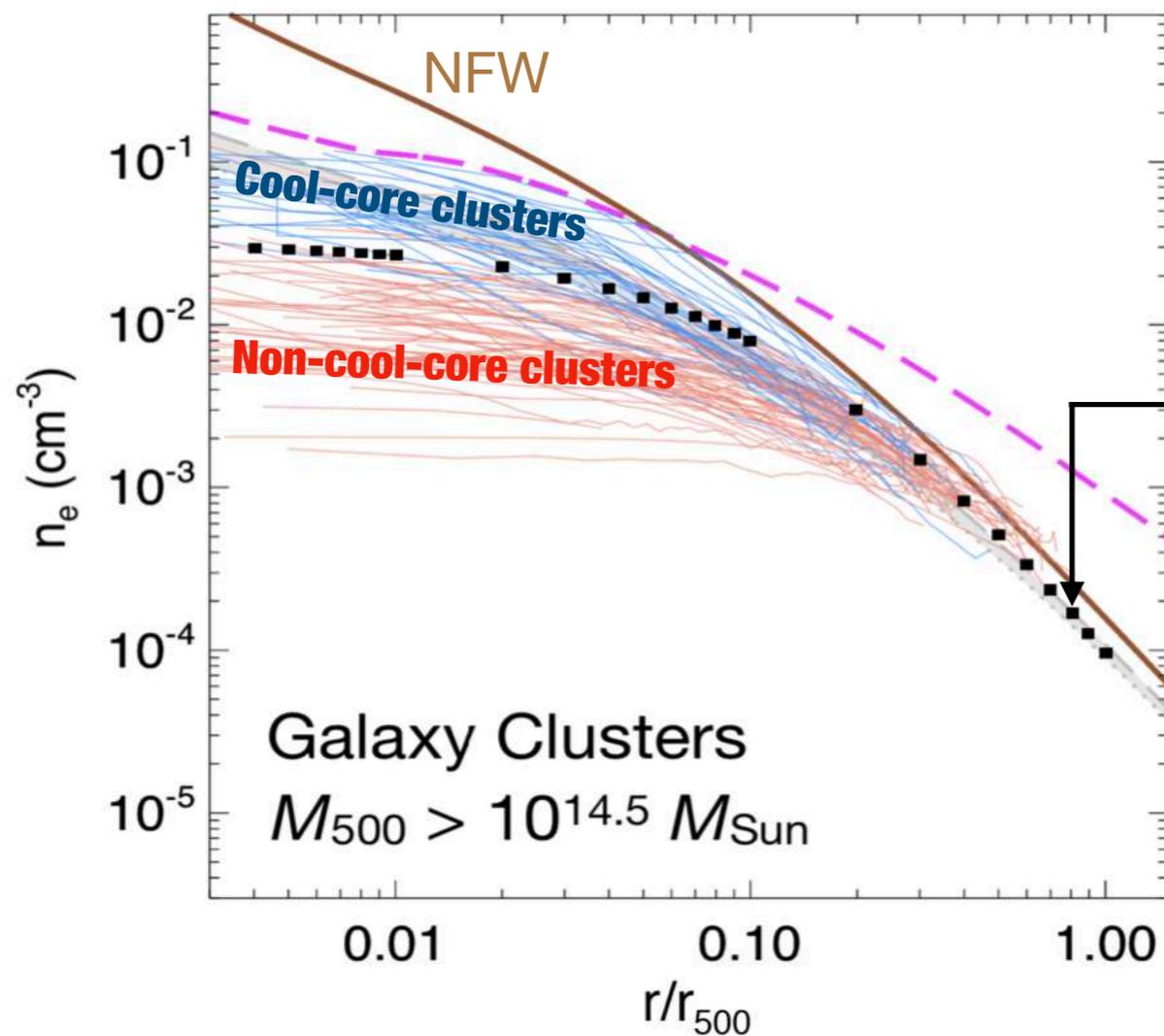


- Simulations hydrodynamiques : le taux d'accroissement du trou noir central s'auto-régule pour préserver l'équilibre thermique du milieu intra-amas (Cattaneo & Teyssier 2007, Brüggén & Scannapieco 2009, Dubois et al. 2010, Gaspari et al. 2011)
- Modèles semi-analytiques : le taux de refroidissement du gaz est réduit proportionnellement à P_{jet}/L_x (Croton et al. 2006, Somerville et al. 2008, Henriques et al. 2015)

Problème : l'équilibre n'est pas unique. Qu'est-ce qui détermine la L_x d'équilibre ?

Une approche cosmologique

Komatsu & Seljak 2001



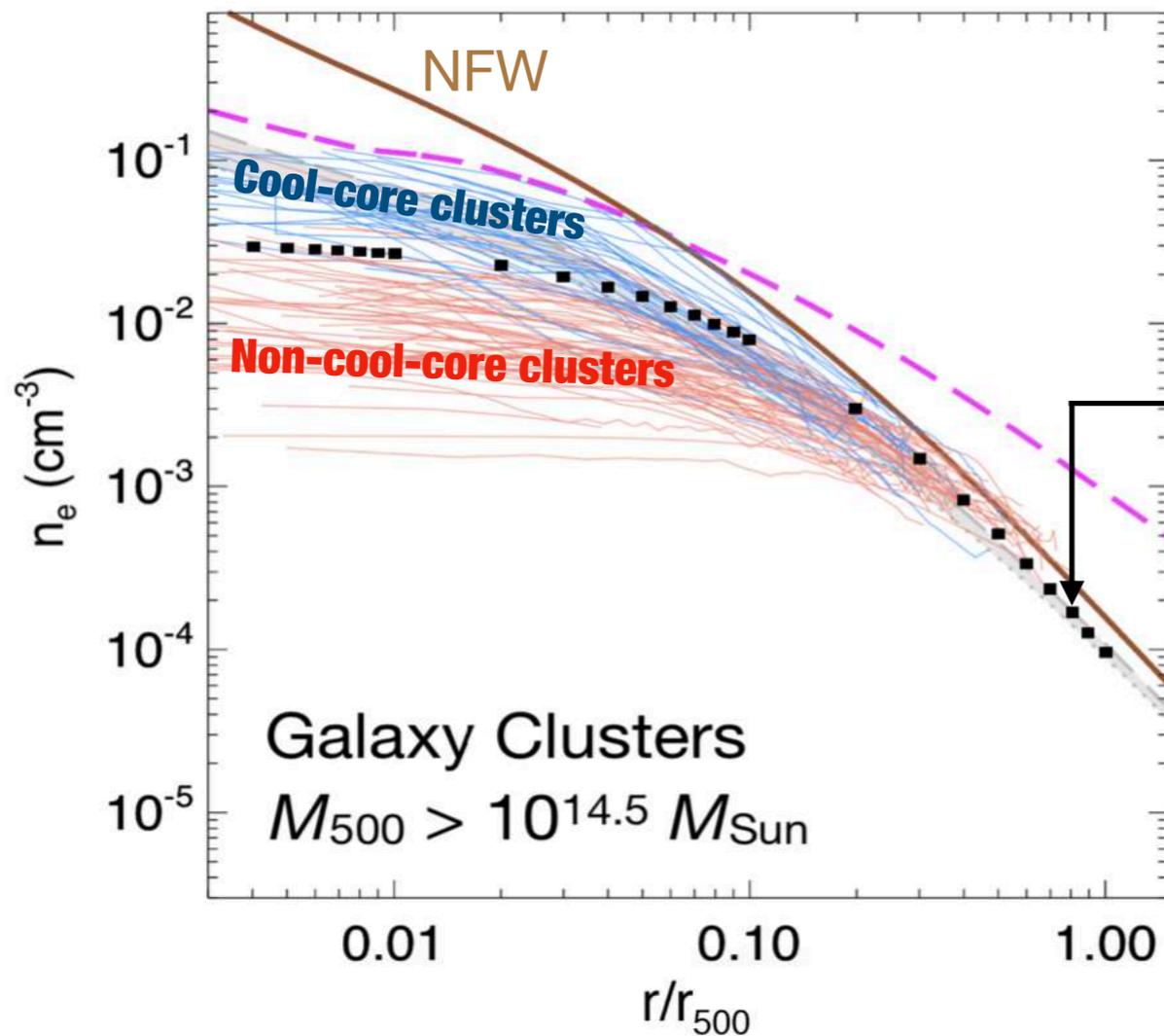
Hypothèses :

- gaz **polytropique**
- en équilibre **hydrostatique**
- dans le potentiel gravitationnel de la matière noire (**NFW**)
- le gaz suit la matière noire **à grande échelle**

Image : Koutsouridou & Cattaneo 2022

Une approche cosmologique

Komatsu & Seljak 2001



Hypothèses :

- gaz **polytropique**
- en équilibre **hydrostatique**
- dans le potentiel gravitationnel de la matière noire (**NFW**)
- le gaz suit la matière noire **à grande échelle**

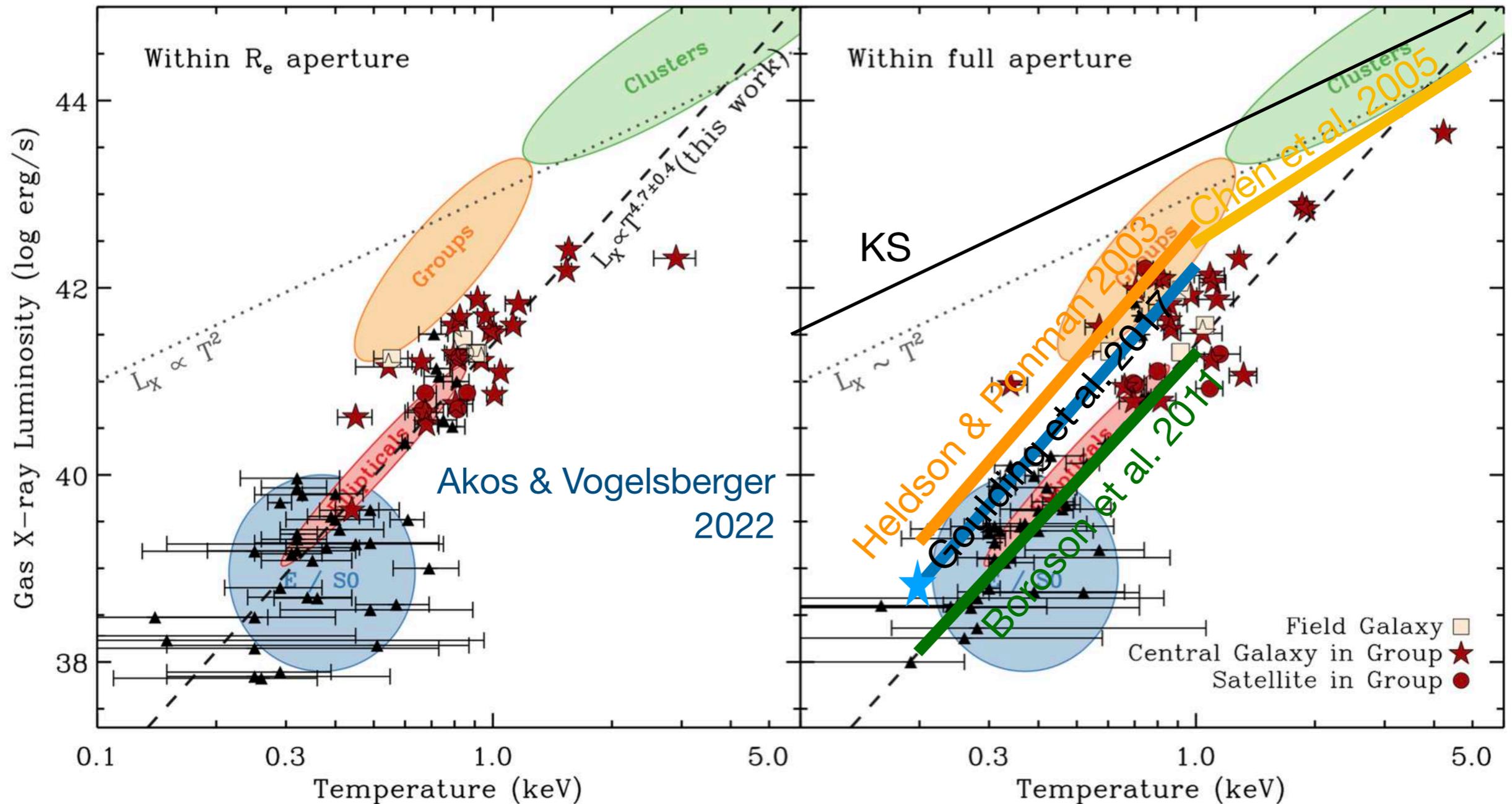
Dans un tel modèle :

$$L_X \propto n^2 T^{\frac{1}{2}} r^3 \propto T^{\frac{1}{2}} M_{\text{vir}} \propto T^2$$

Image : Koutsouridou & Cattaneo 2022

Le problème de l'entropie

Edge & Stewart 1991, Evrard & Henry 1991, Kaiser 1991, Lloyd-Davies et al. 2000

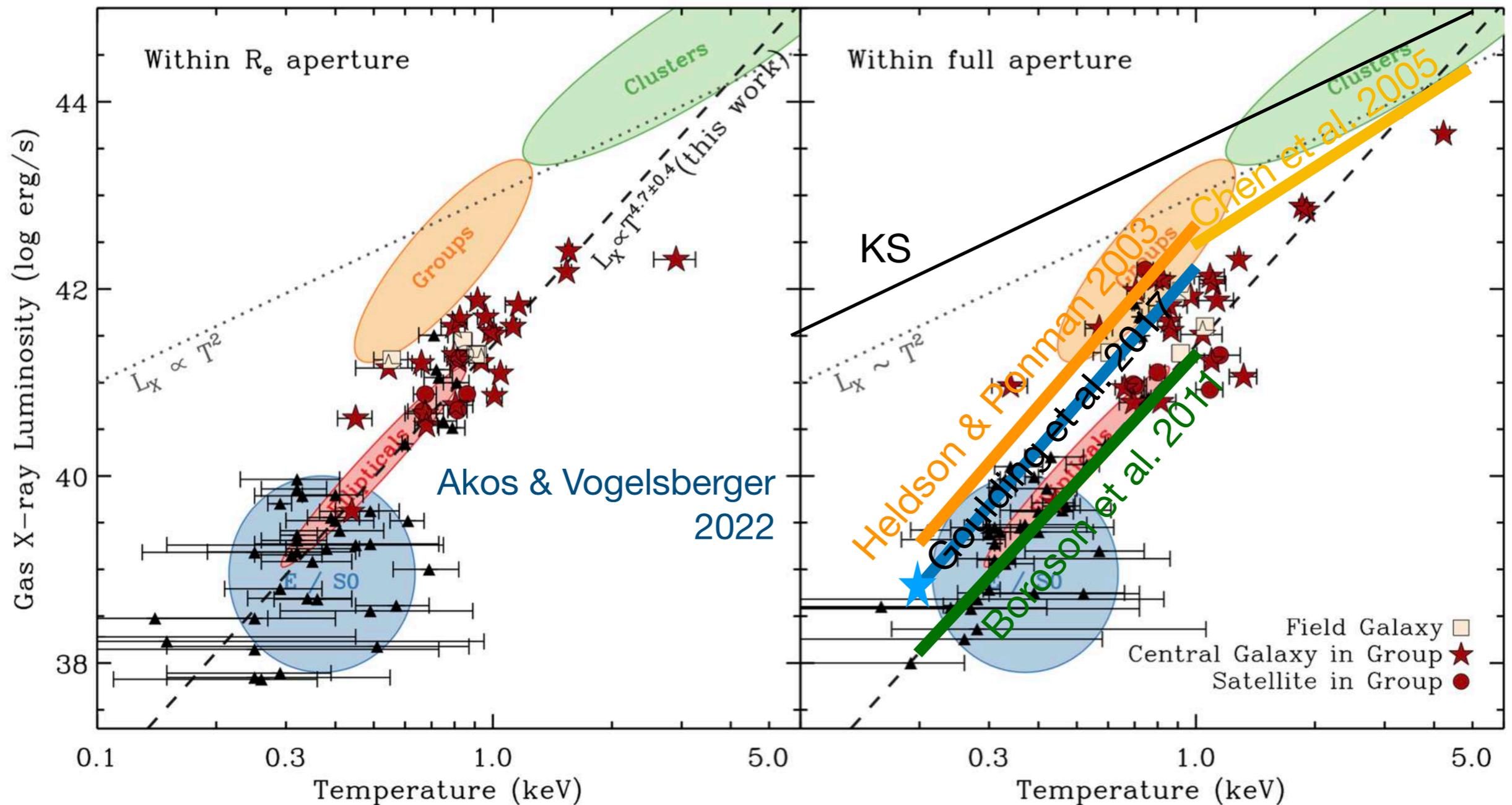


Constante d'entropie : $K = kTn^{-\frac{2}{3}}$

L_x plus faible \Rightarrow densité plus faible \Rightarrow entropie plus élevée

Le problème de l'entropie

Edge & Stewart 1991, Evrard & Henry 1991, Kaiser 1991, Lloyd-Davies et al. 2000



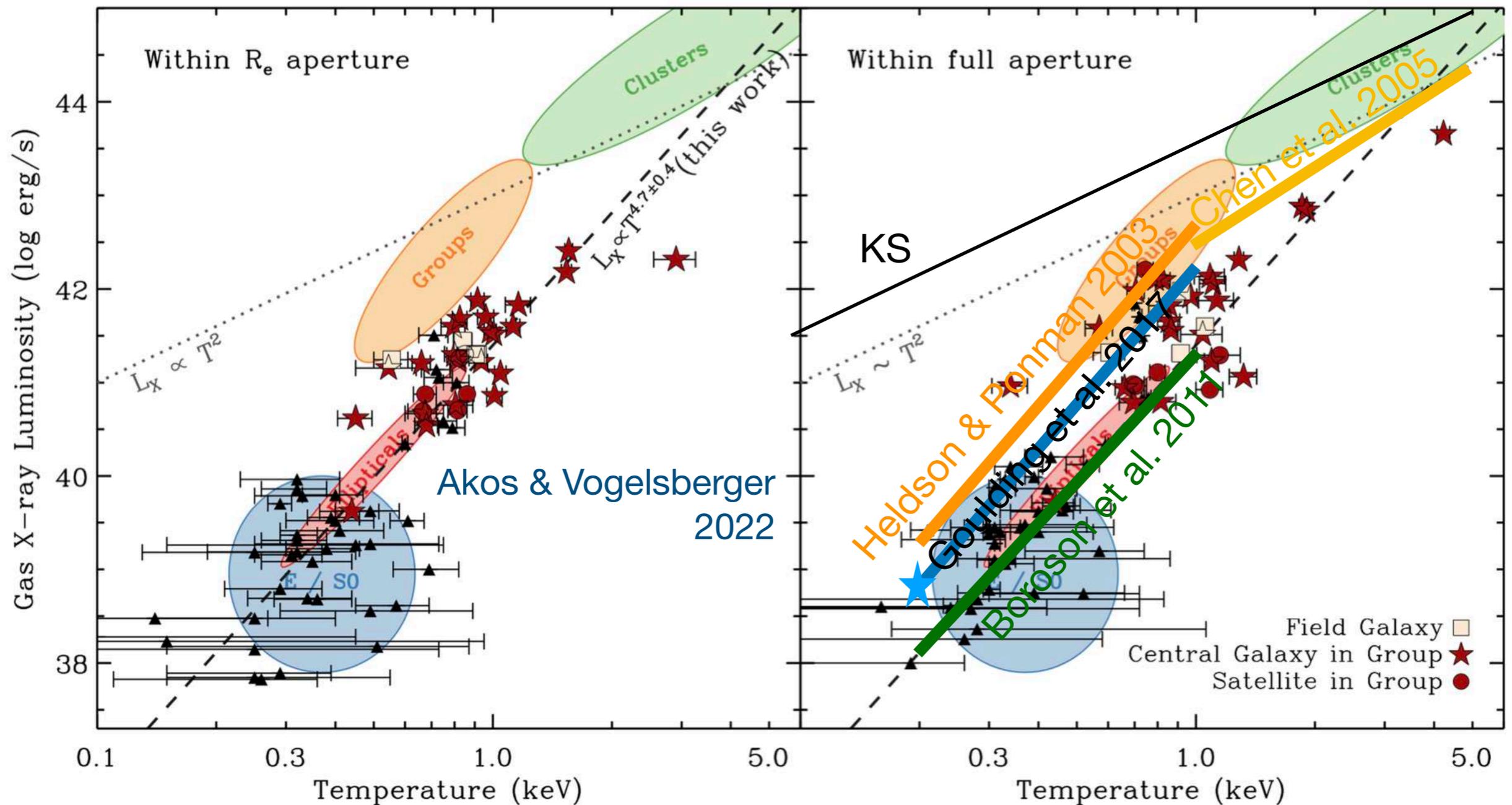
Constante d'entropie : $K = kTn^{-\frac{2}{3}}$

L_x plus faible \Rightarrow densité plus faible \Rightarrow entropie plus élevée

$dS = \frac{\delta Q}{T}$ **réchauffement par les trous noirs :** $\frac{Q}{E_{\text{bind}}} \simeq 0.2 \left(\frac{kT}{\text{keV}} \right)^{-0.3}$ (Chaudhuri et al. 2012)

Le problème de l'entropie

Edge & Stewart 1991, Evrard & Henry 1991, Kaiser 1991, Lloyd-Davies et al. 2000



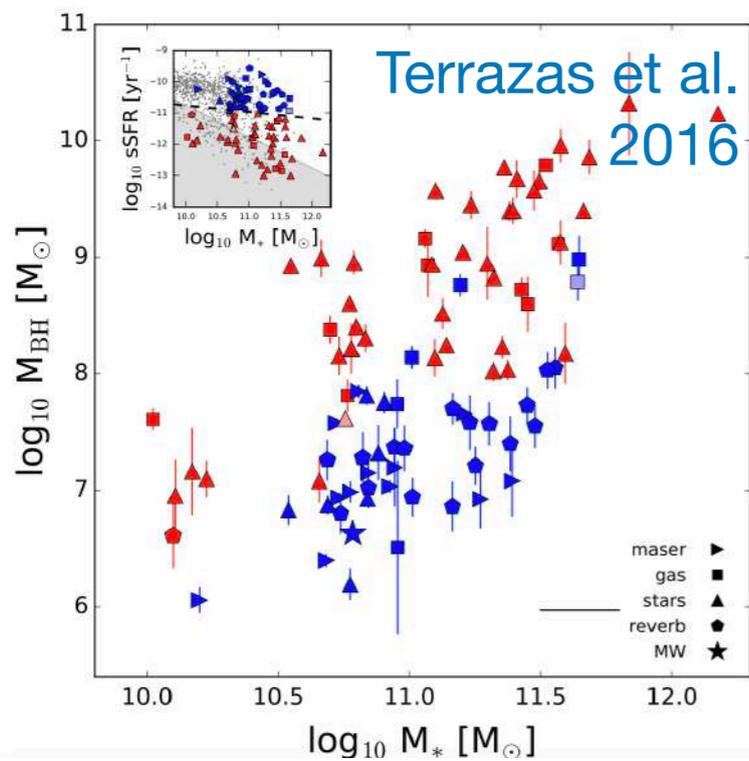
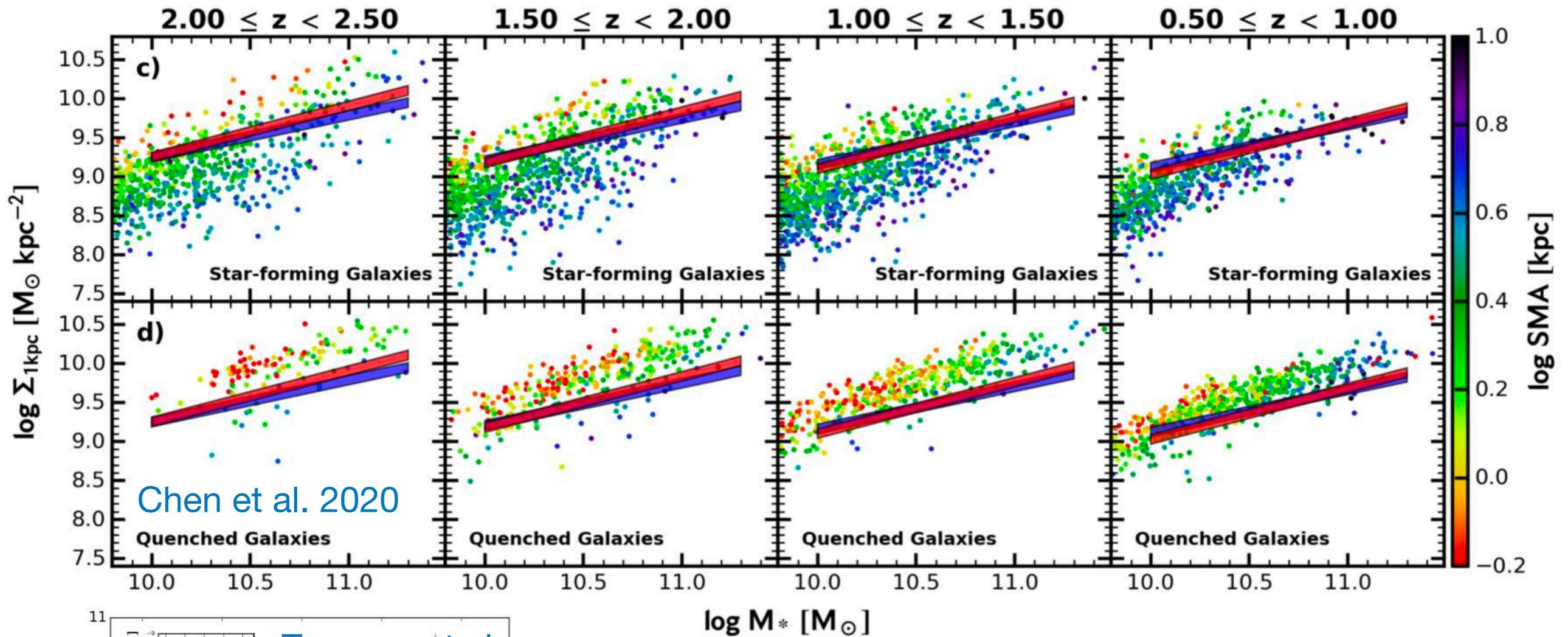
Constante d'entropie : $K = kTn^{-\frac{2}{3}}$

L_x plus faible \Rightarrow densité plus faible \Rightarrow entropie plus élevée

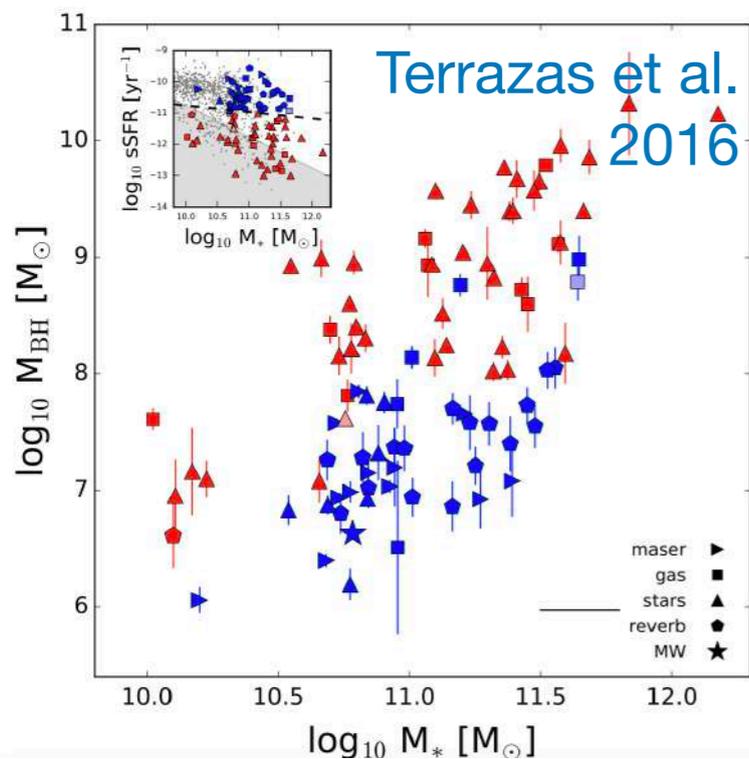
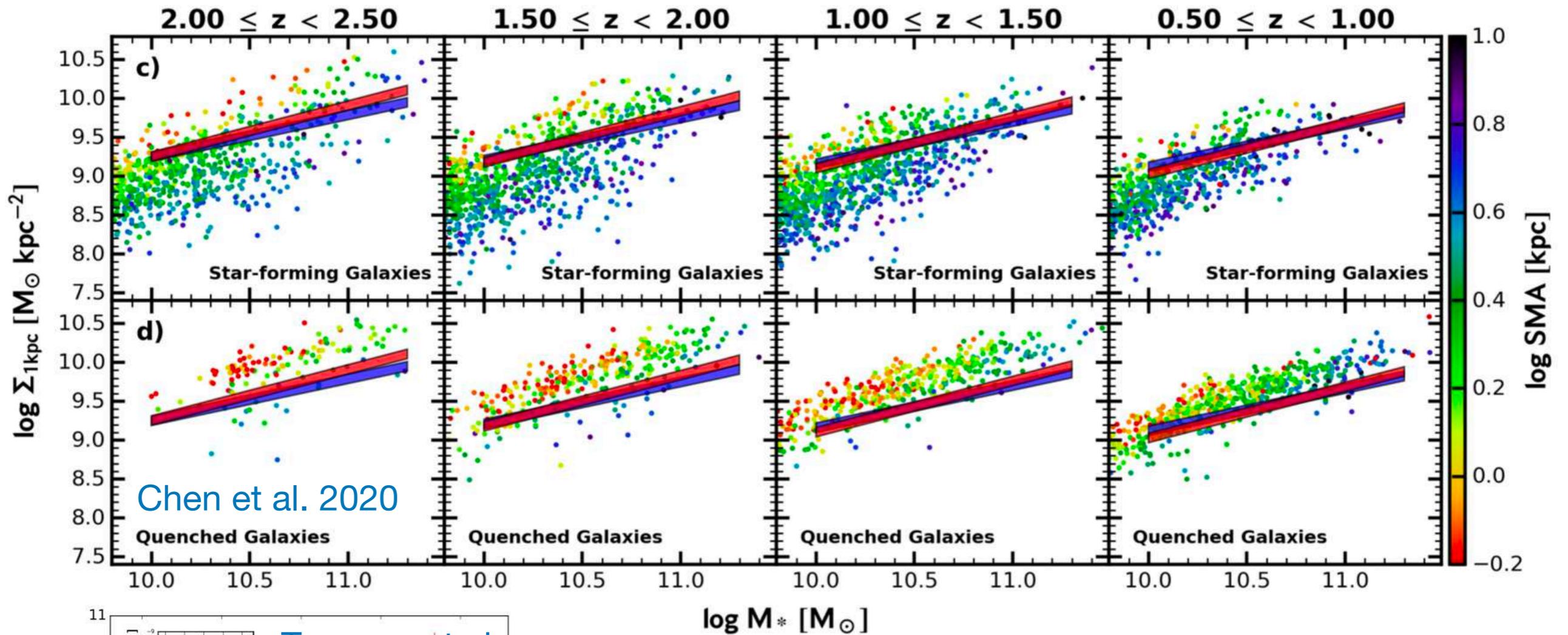
$dS = \frac{\delta Q}{T}$ **réchauffement par les trous noirs**

L'**entropie** centrale du gaz chaud dépend de beaucoup de facteurs (refroidissement, distribution spatiale du réchauffement par SN et trous noirs) : **difficile à prédire**

Galaxies avec formation stellaire et galaxies passives



Galaxies avec formation stellaire et galaxies passives



En exploitant les relations $M_{\text{BH}} - \Sigma_{1\text{kpc}}$ et $M^* - M_{\text{vir}}$,
Chen et al. trouvent que les **galaxies passives** sont celles avec :

$$\eta M_{\text{BH}} c^2 > f_{\text{binding}} \cdot \frac{1}{2} f_{\text{b}} M_{\text{vir}} v_{\text{vir}}^2$$

↑
Energie déposé par le
trou noir dans le gaz

↑
Energie de lien gravitationnel
des baryons dans le halo

Quatre modèles pour la suppression de la formation stellaire

Koutsouridou & Cattaneo 2023 (GalCS 2.2)

La formation stellaire s'arrête lorsque :

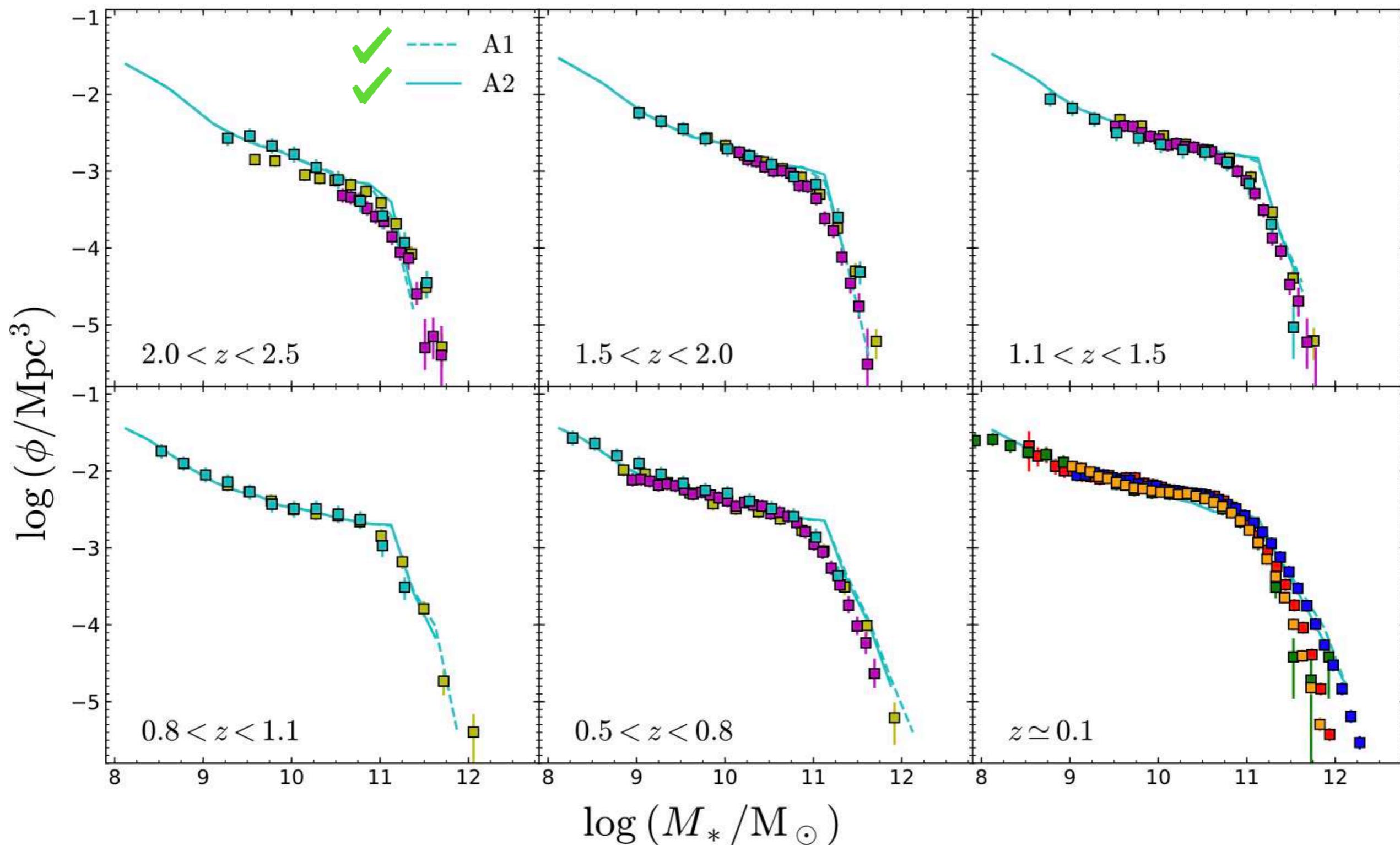
- modèle **A** : la masse du **halo** est telle que $M_{\text{vir}} > M_{\text{vir}}^{\text{crit}} = 2 \times 10^{12} M_{\odot}$
- modèle **B** : la masse du **trou noir** est telle que $0.001 M_{\text{BH}} c^2 > \frac{1}{2} f_b M_{\text{vir}} v_{\text{vir}}^2$

La croissance des bulbes galactiques et des trous noirs supermassifs :

- modèle **1** : est liée aux **fusions majeures** ($M_2/M_1 > 1/4$)
- modèle **2** : a lieu dans **toutes les fusions** (d'une manière qui dépend de M_2/M_1)

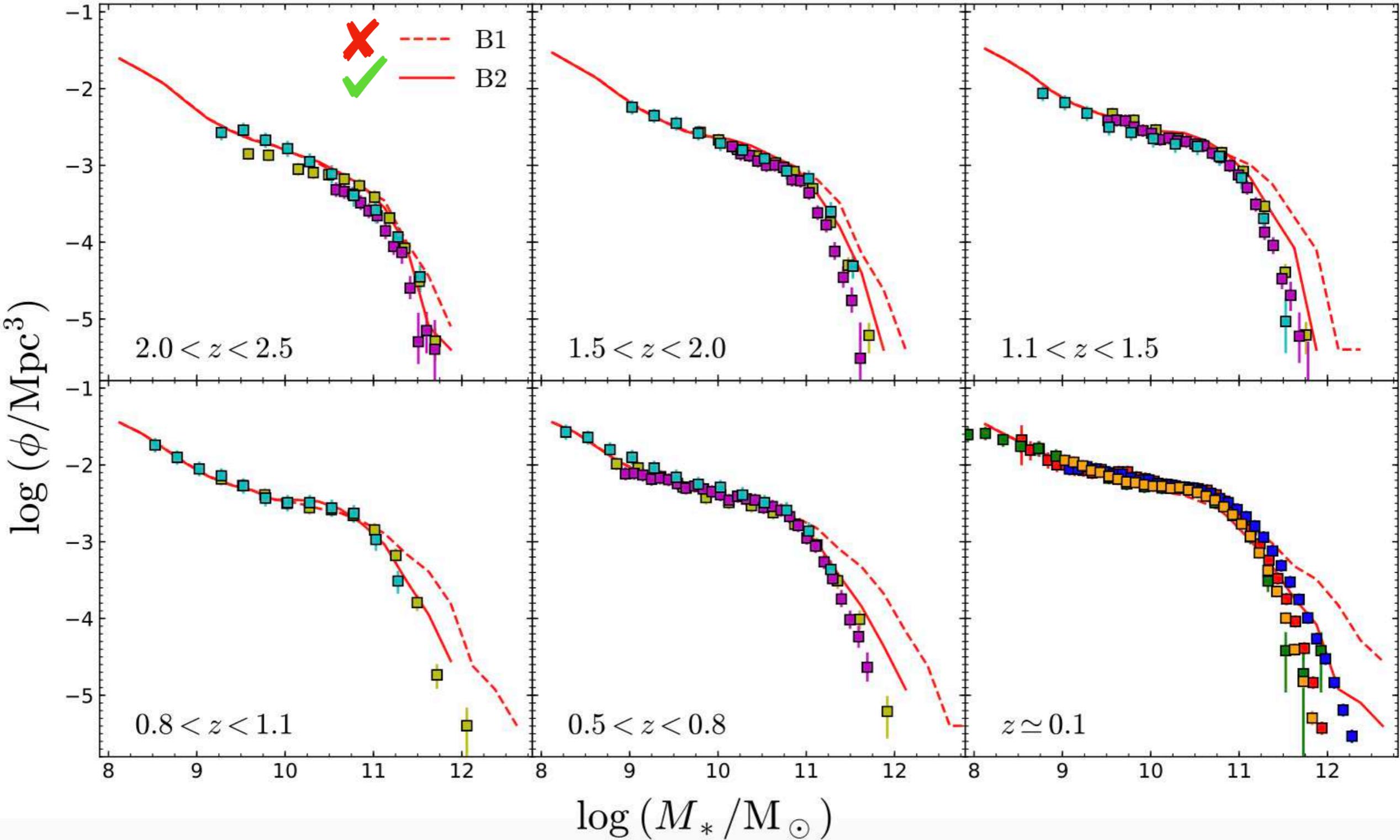
Fonction de masse des galaxies : modèle A

Koutsouridou & Cattaneo 2023



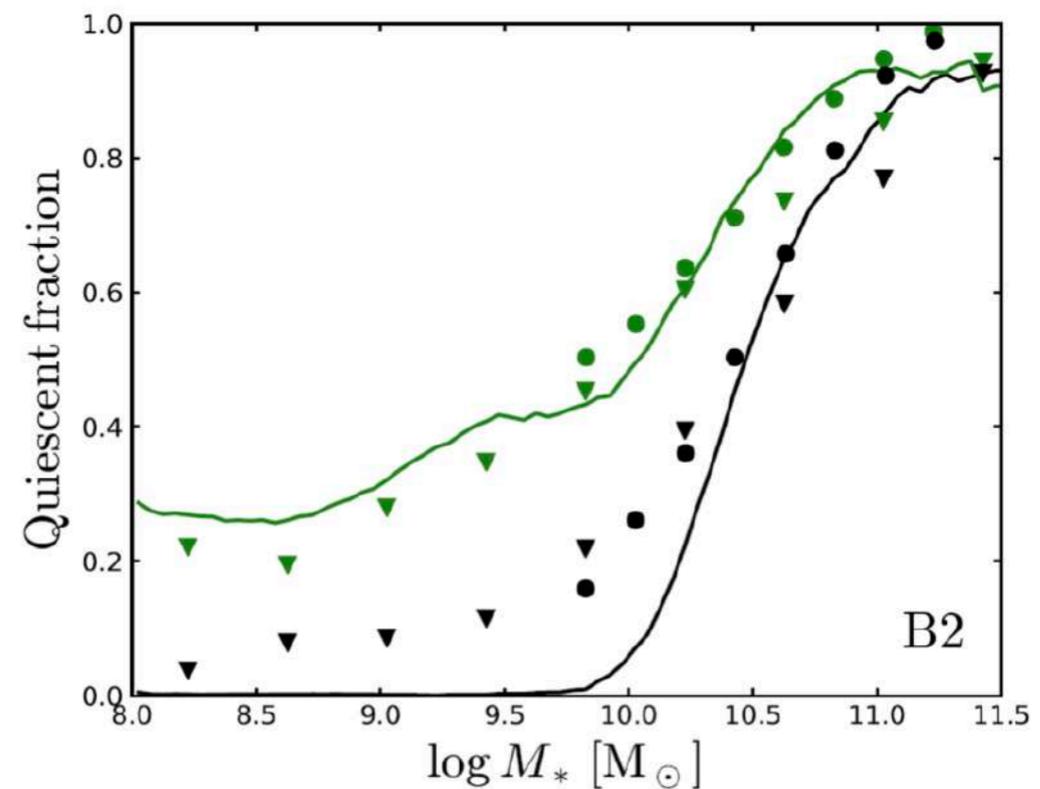
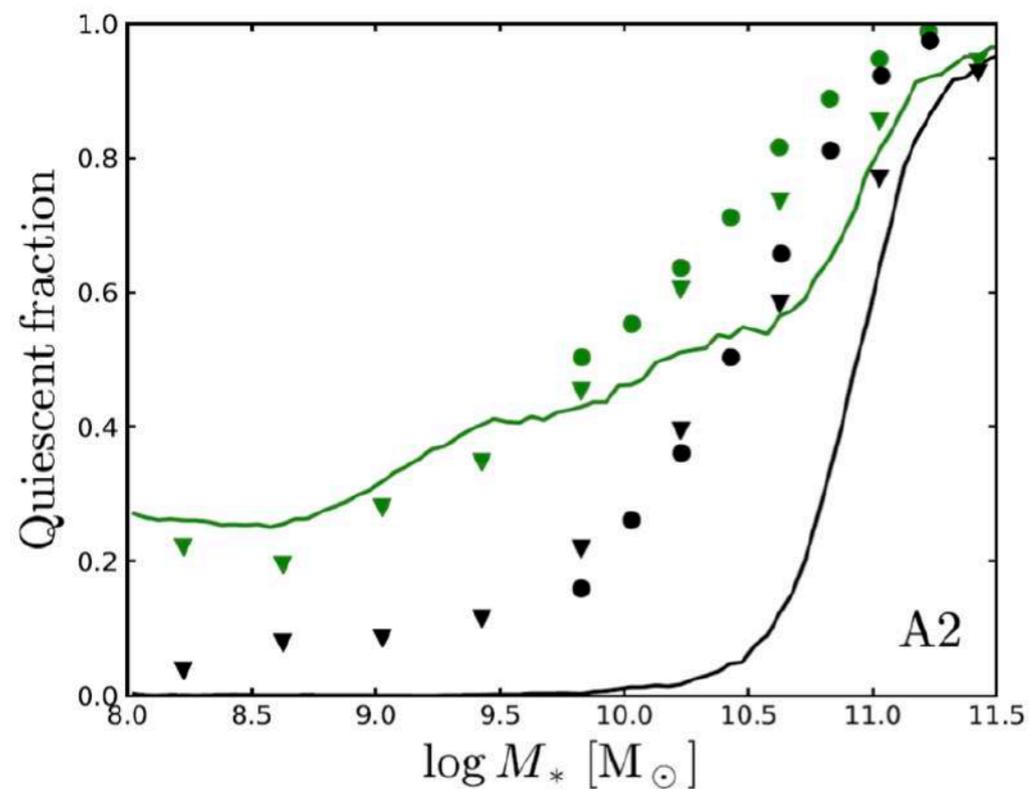
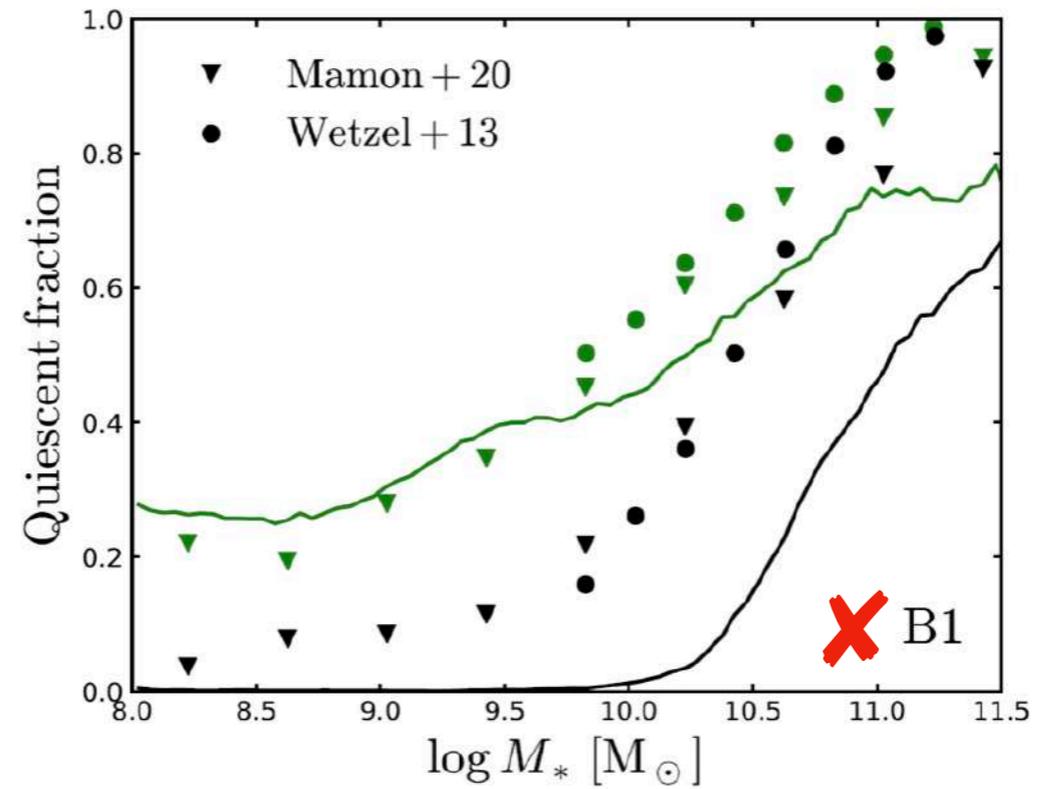
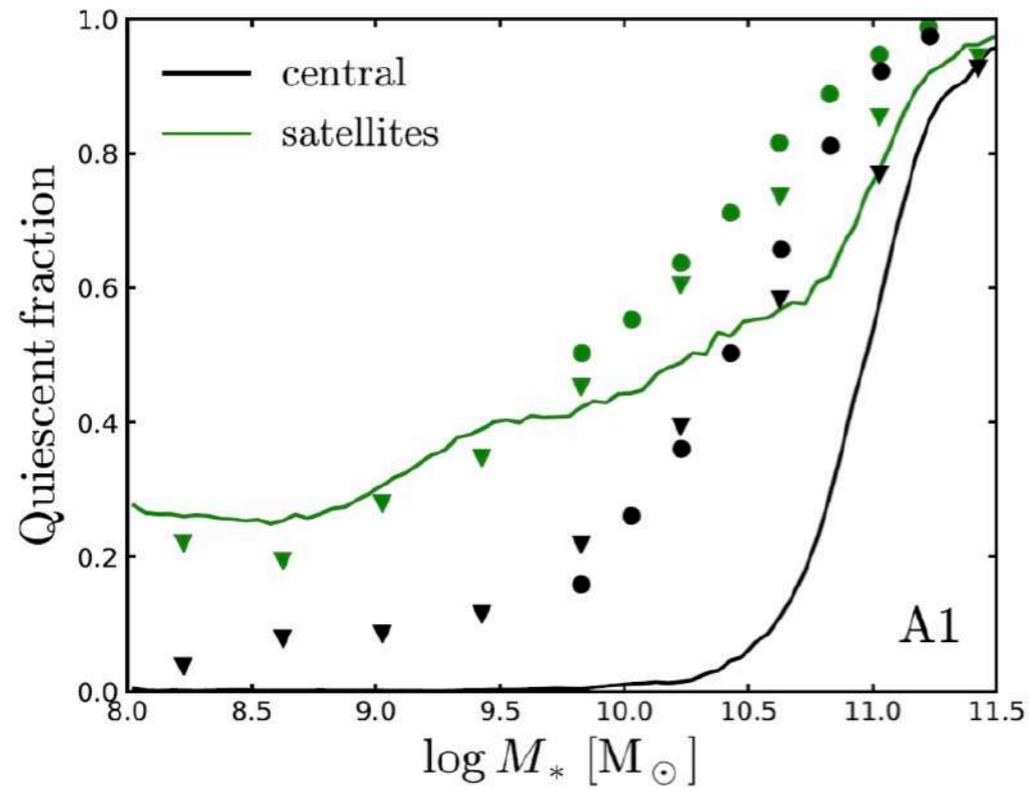
Fonction de masse des galaxies : modèle B

Koutsouridou & Cattaneo 2023



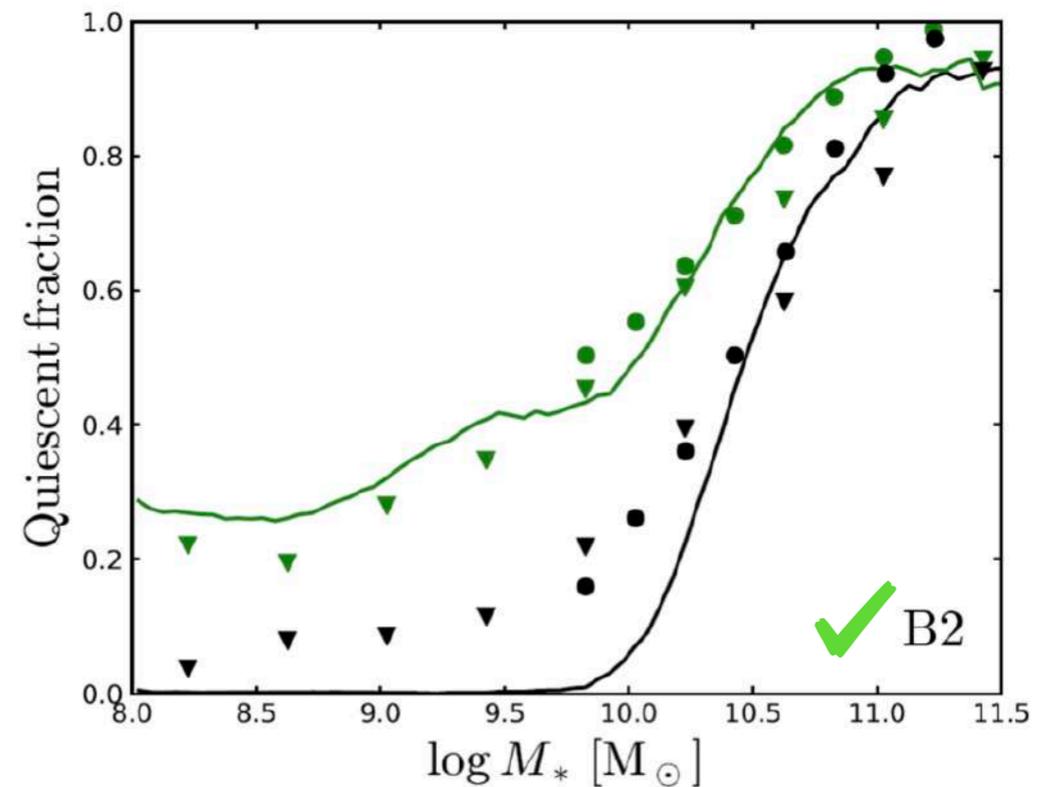
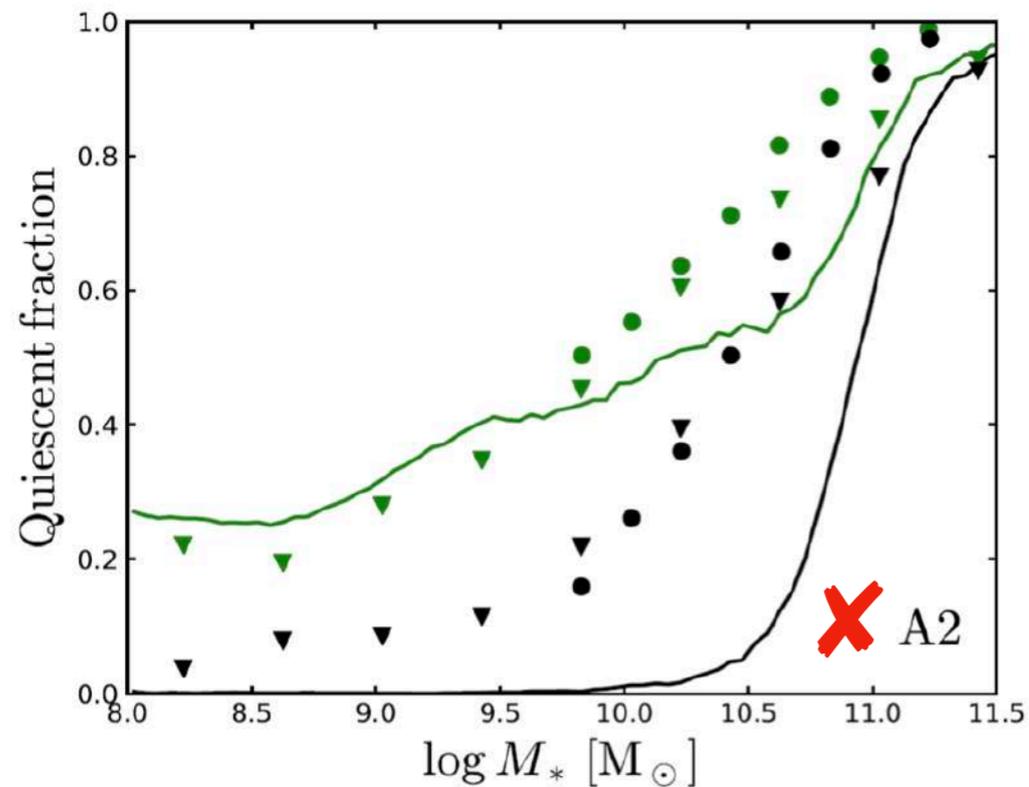
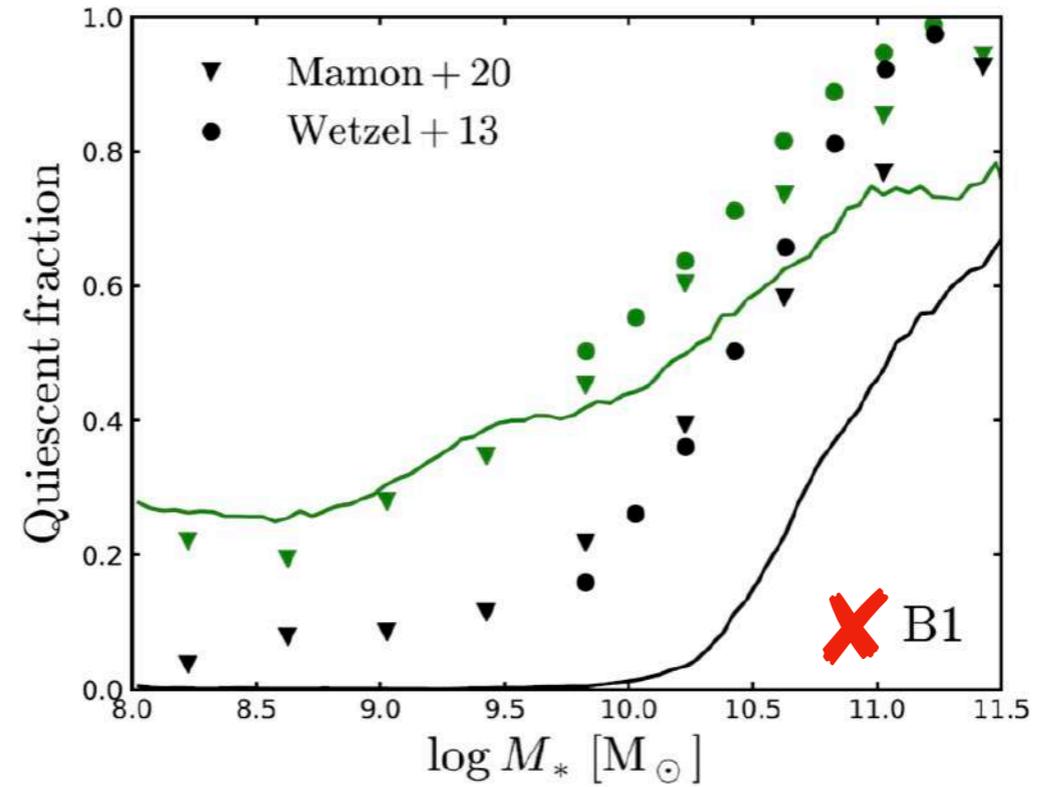
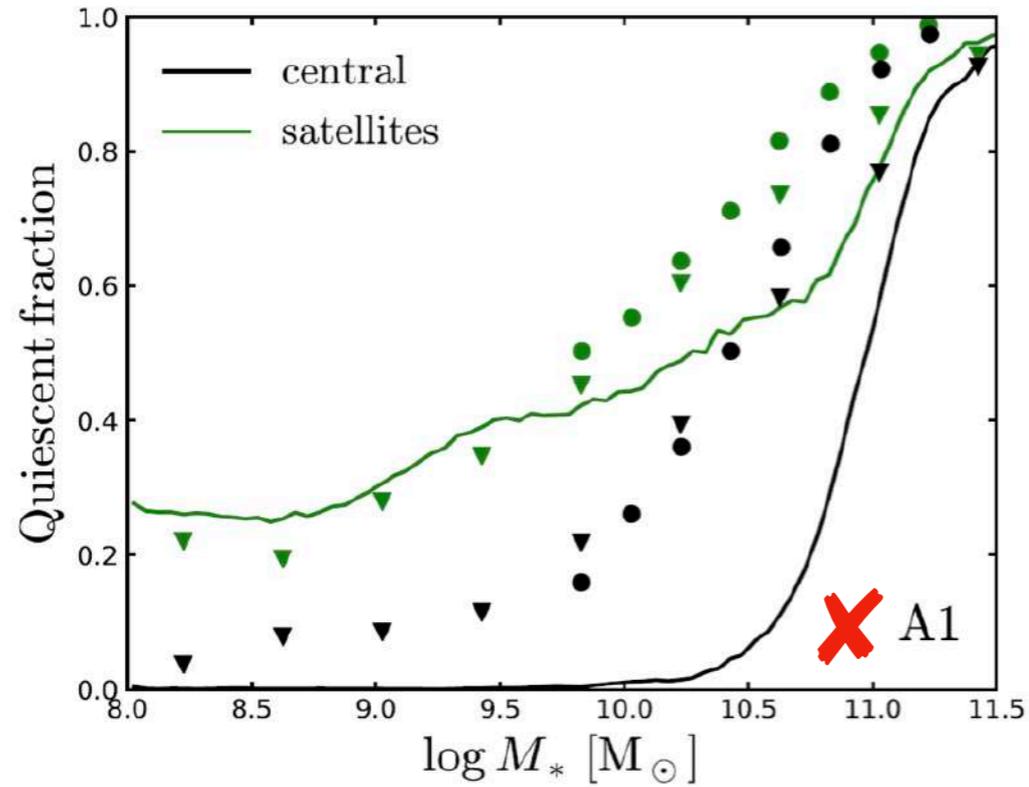
Fraction de galaxies passives

Koutsouridou & Cattaneo 2023



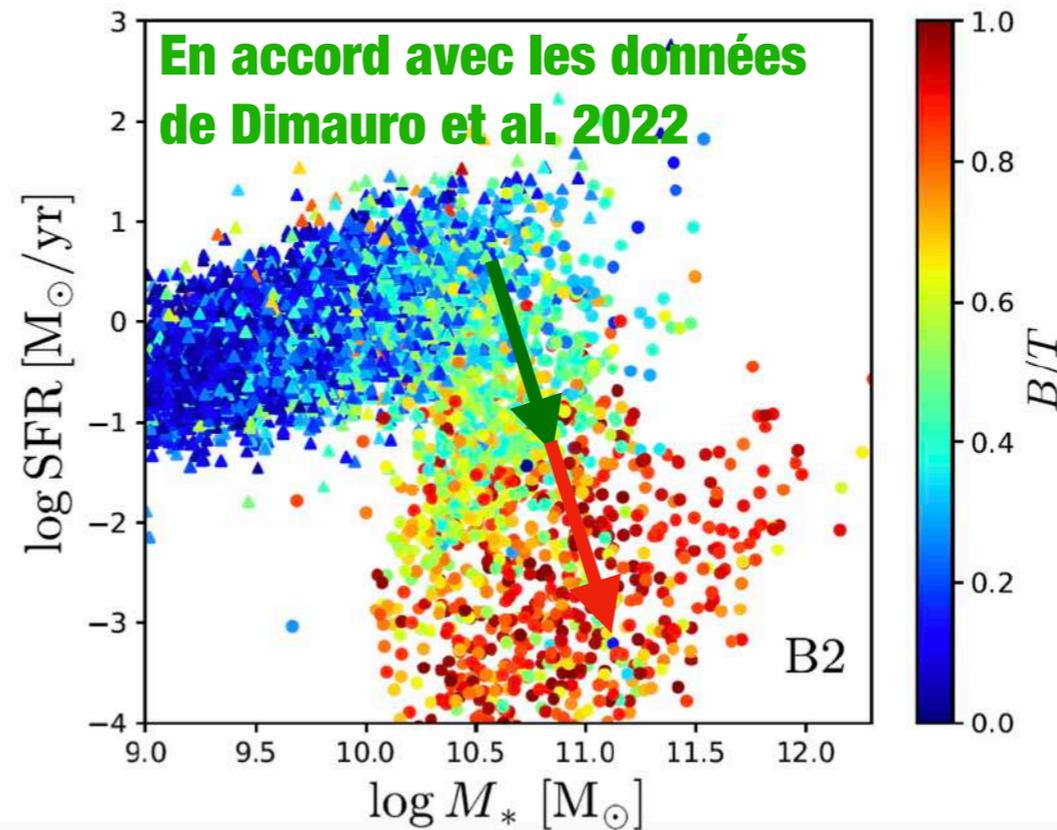
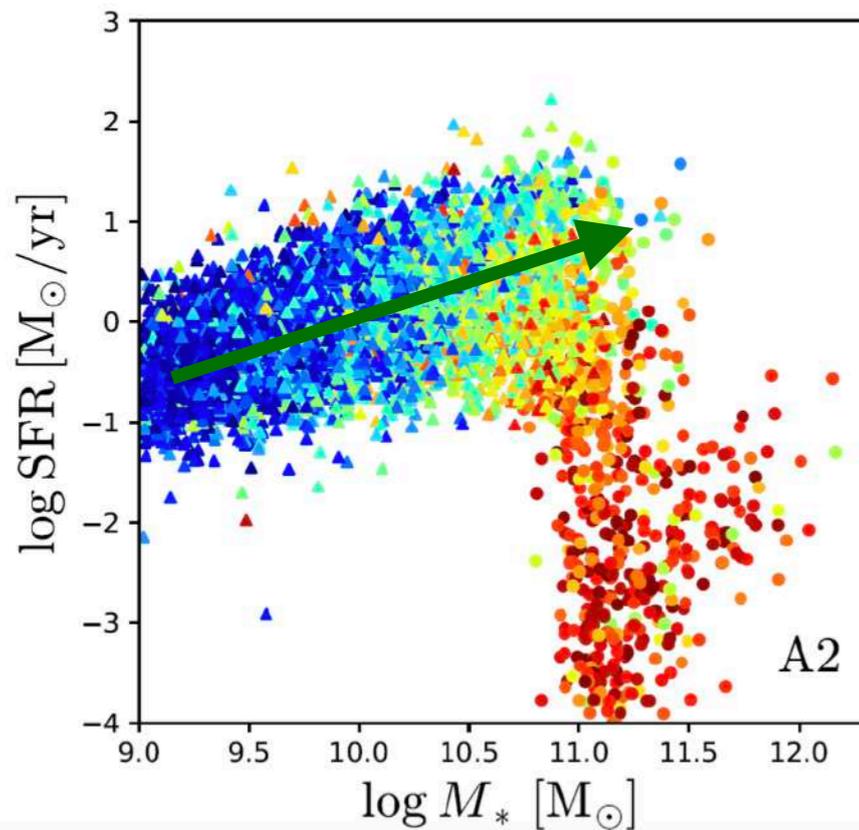
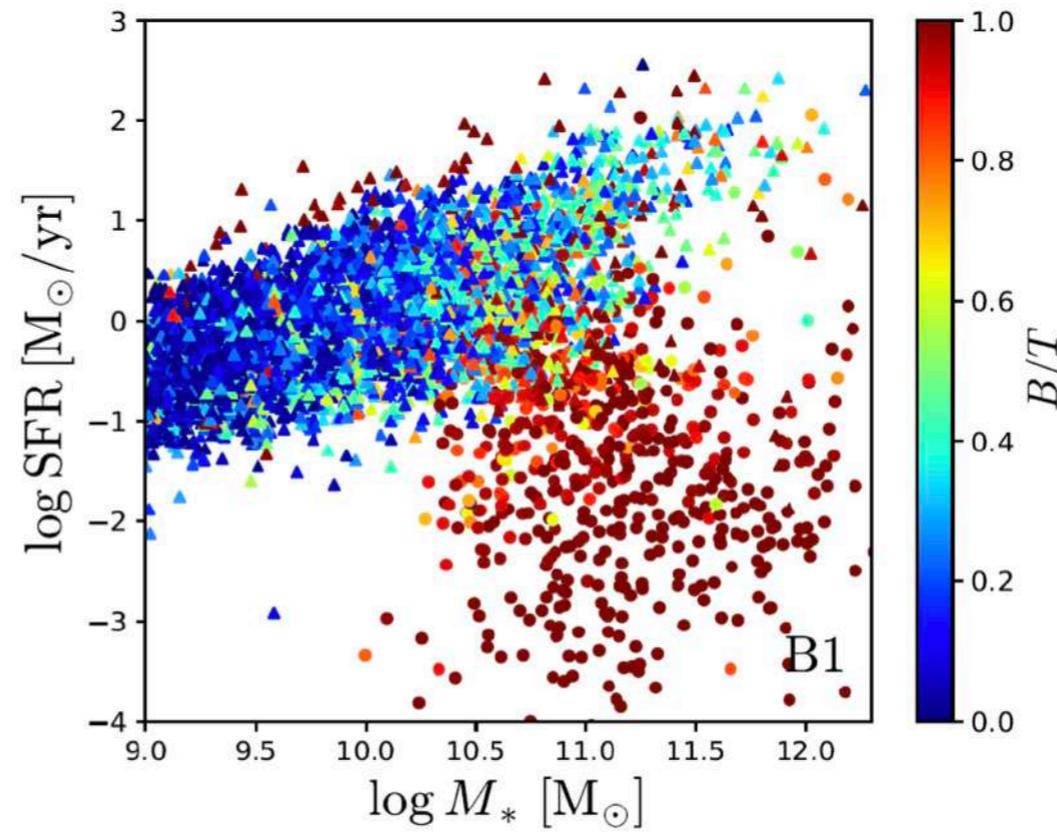
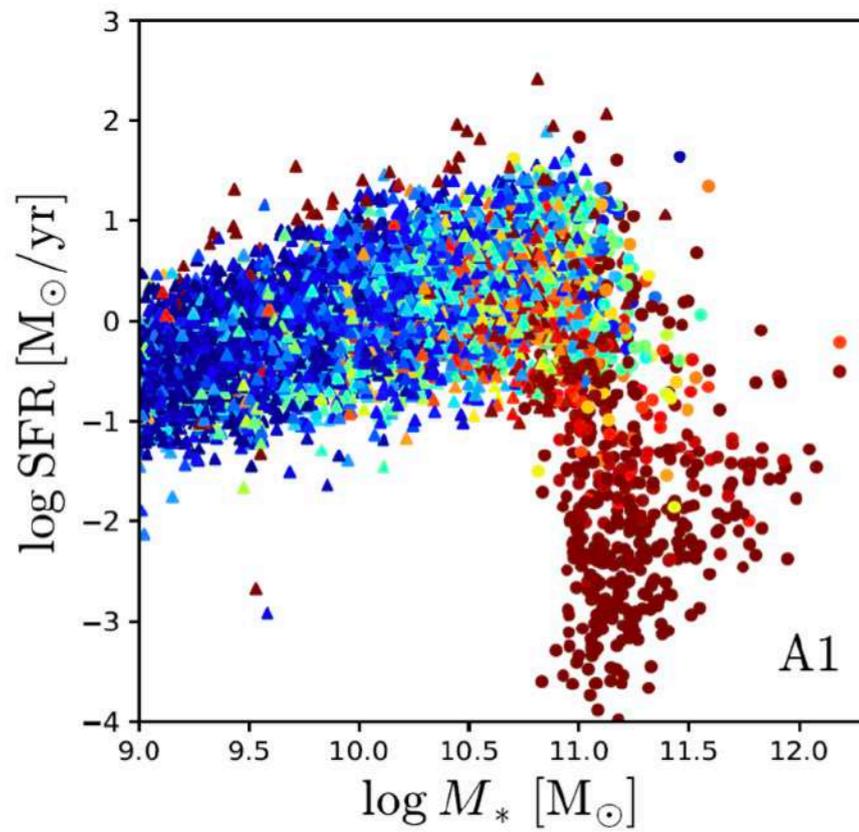
Fraction de galaxies passives

Koutsouridou & Cattaneo 2023



Suppression de la formation stellaire et morphologie

Koutsouridou & Cattaneo 2023



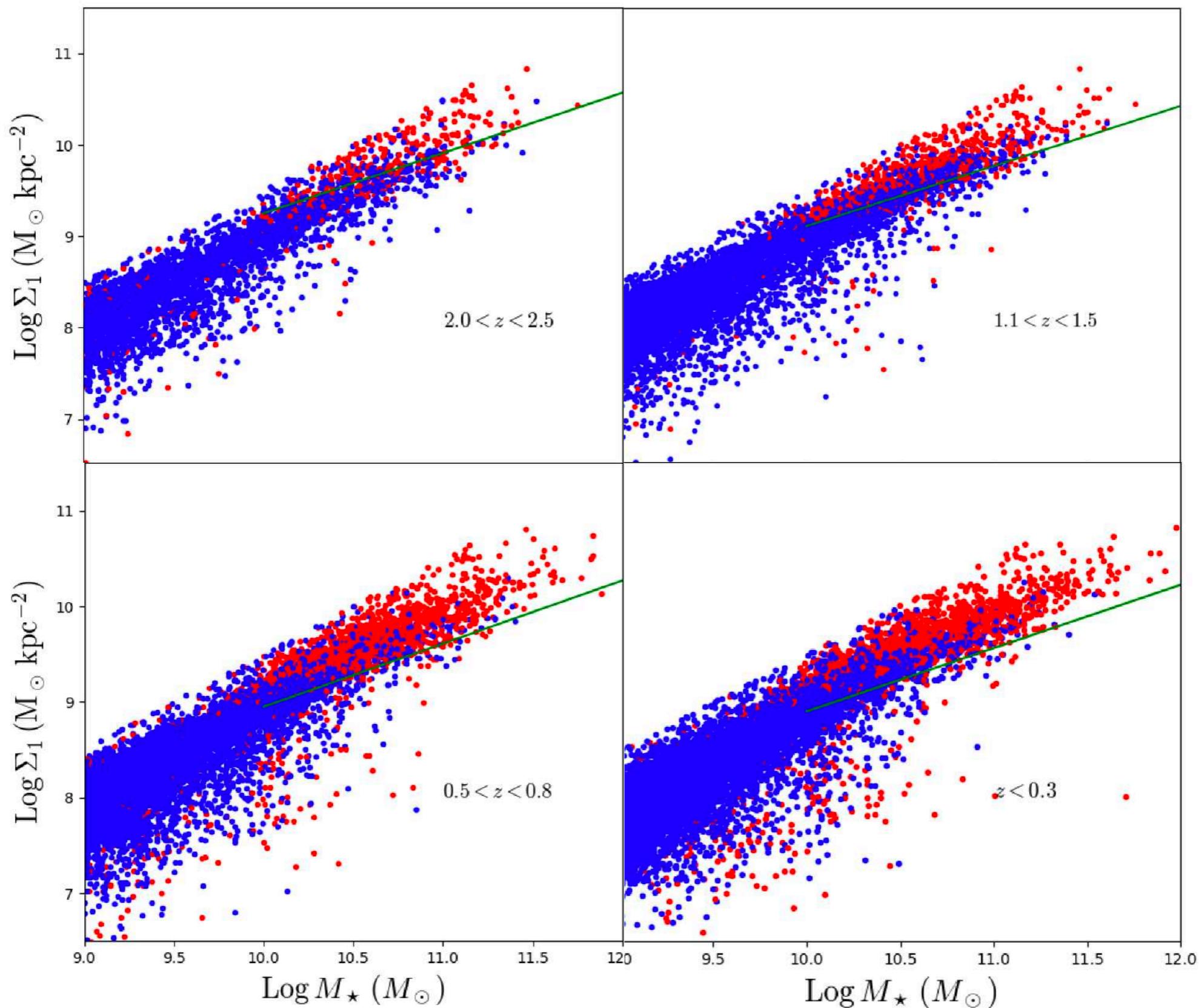
En accord avec les données de Dimauro et al. 2022

Formation d'un bulbe massif → suppression de la formation stellaire

Les galaxies passives continue à croître en B/T

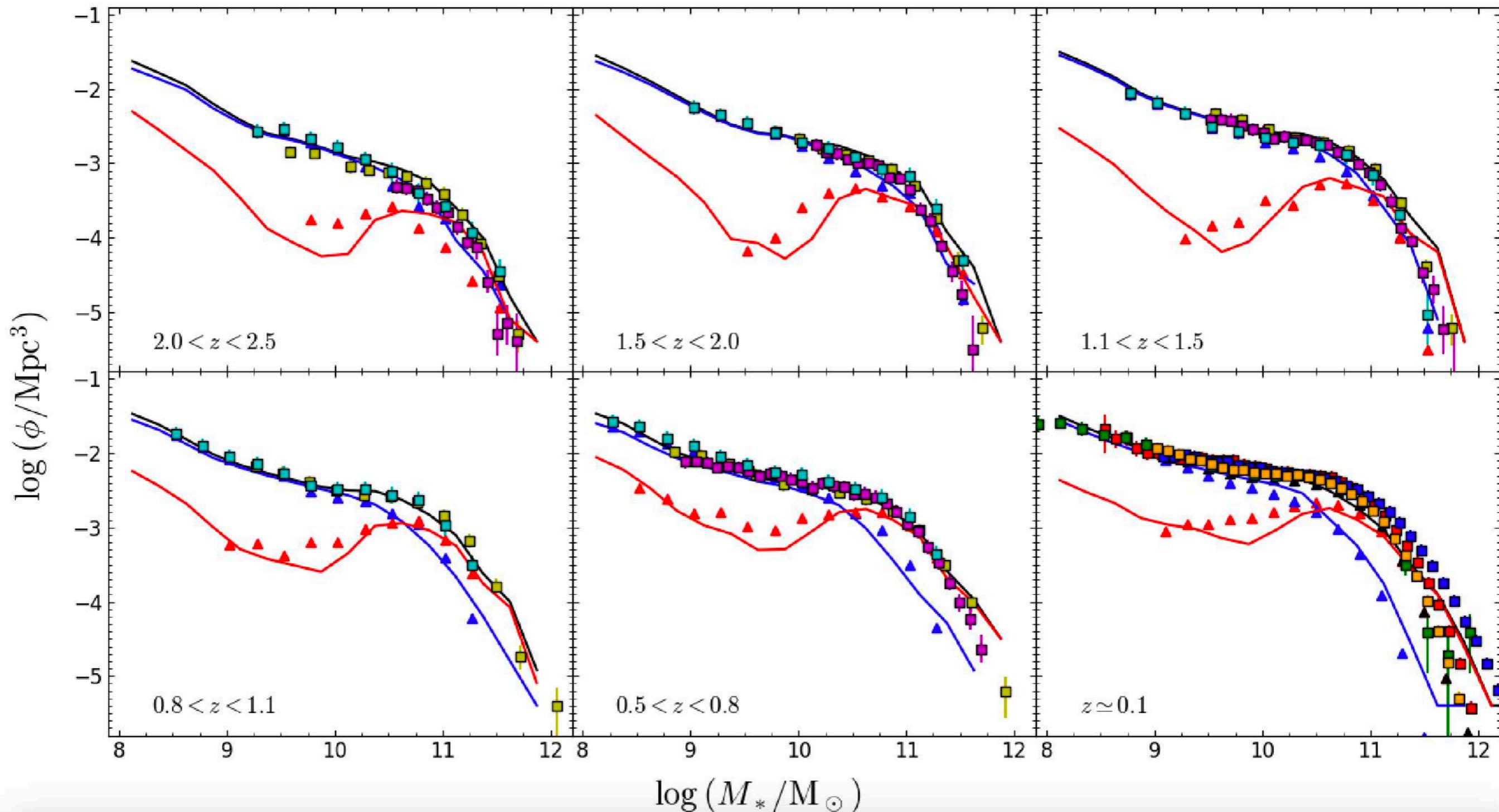
Galaxies avec formation stellaire et galaxies passives

(GalCS 2.2 v. B2)



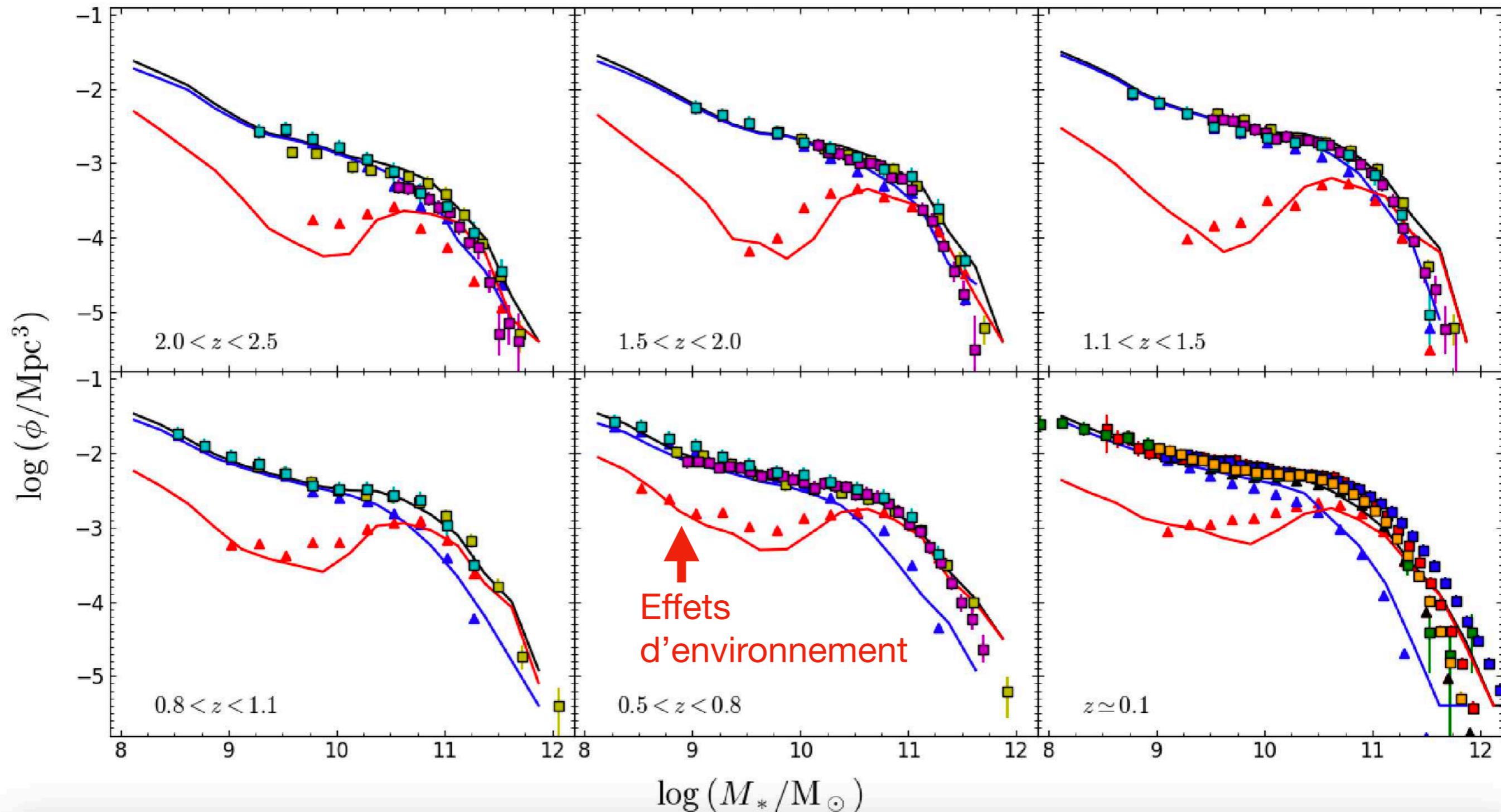
Fonctions de masse des galaxies avec formation stellaire et des galaxies passives

(GalICS 2.2 v. B2)

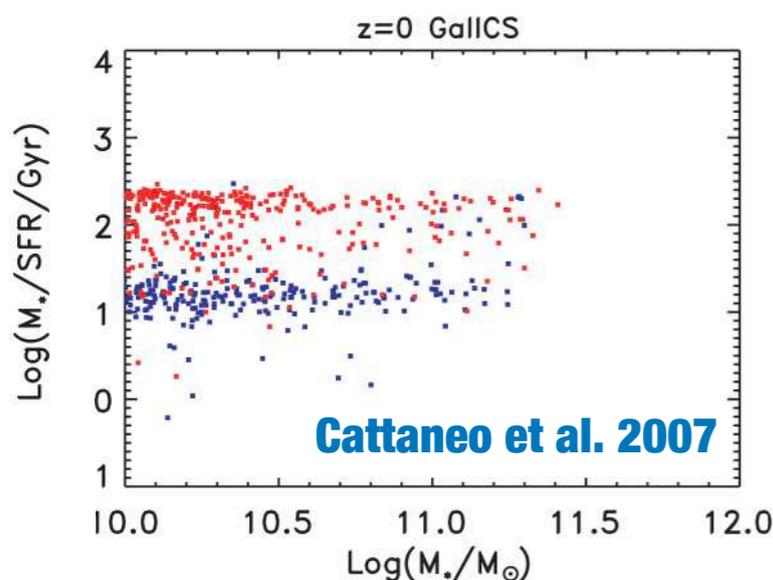
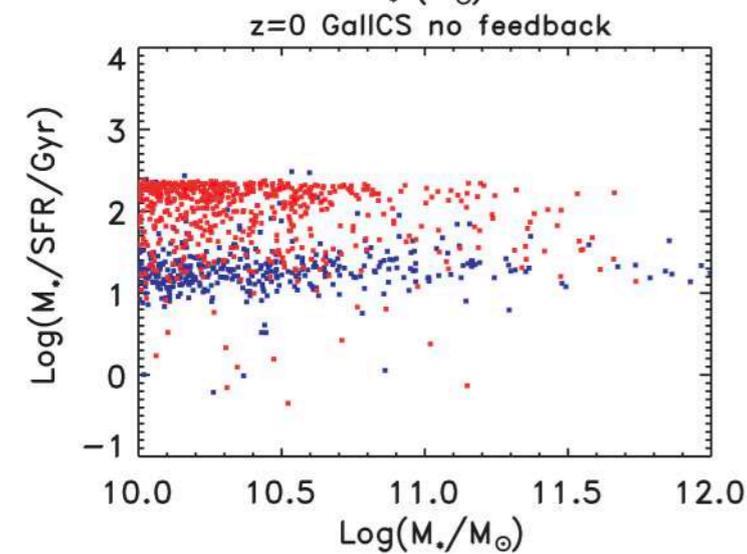
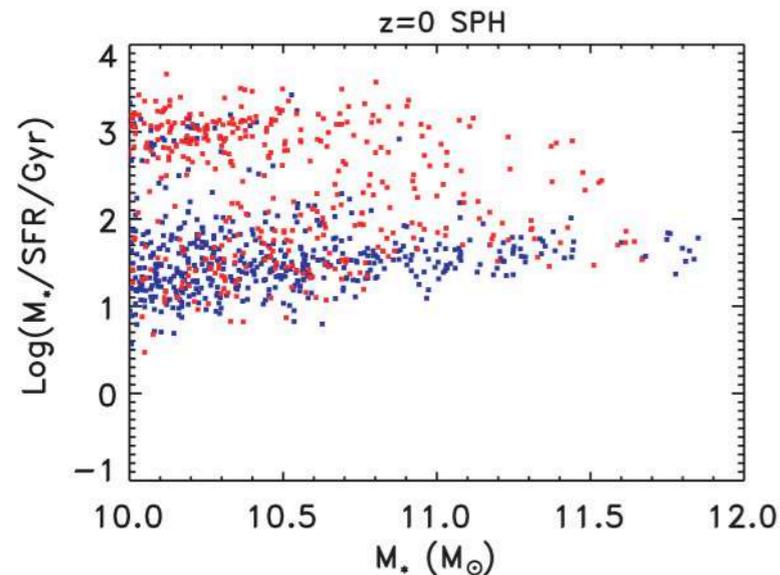


Fonctions de masse des galaxies avec formation stellaire et des galaxies passives

(GalICS 2.2 v. B2)



Suppression de la formation stellaire à petite masse

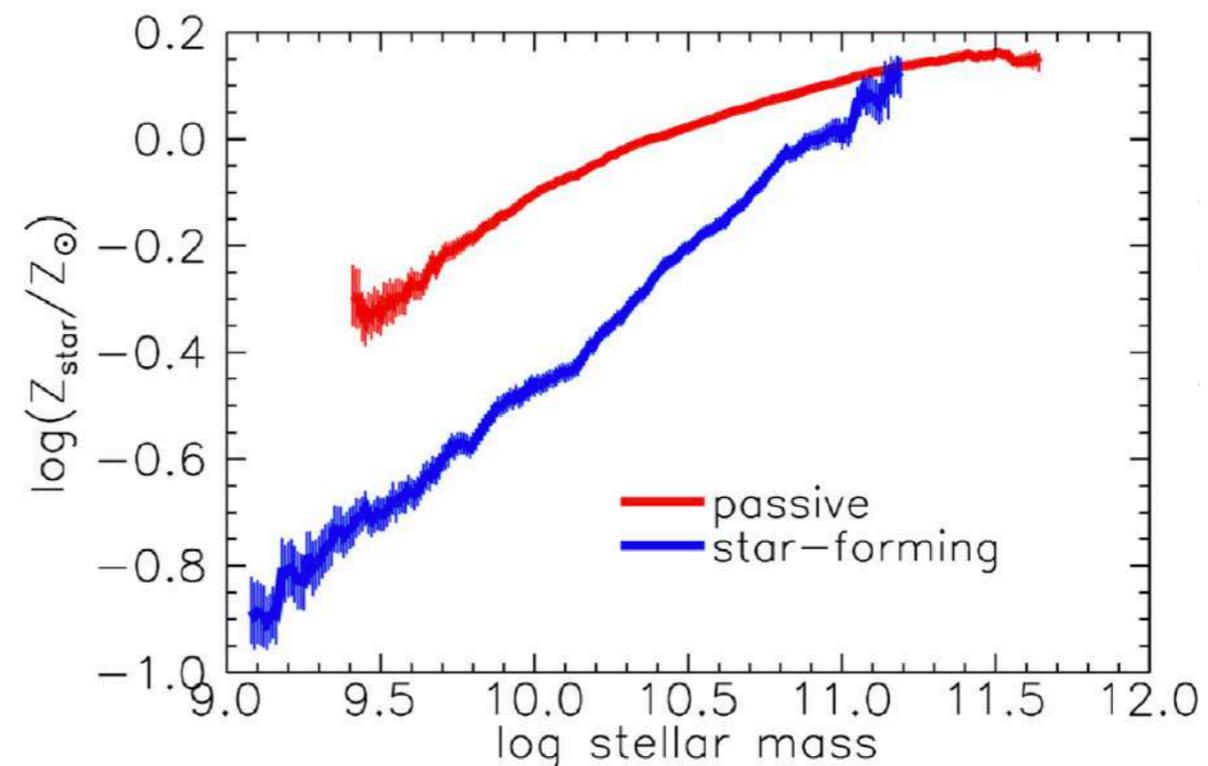


Dans :

- les modèles semi-analytiques (**GalICS**)
- les simulations hydrodynamiques (**SPH**)
- les observations (SDSS)

la plupart des galaxies passives à petite M^* sont des galaxies **satellites** (Cattaneo et al. 2007, 2008, Yang et al. 2012).

Les **abondances chimiques** des ces galaxies sont cohérentes avec un **étranglement** lent (Peng et al. 2015).



Conclusions

- Les **propriétés des galaxies** sont liées aux **histoires de formation des halos** de matière noire, mais aussi très influencées par la rétroaction de la formation stellaire et de trous noirs supermassifs.

Conclusions

- Les **propriétés des galaxies** sont liées aux **histoires de formation des halos** de matière noire, mais aussi très influencées par la rétroaction de la formation stellaire et de trous noirs supermassifs.
- La **pente de la fonction de masse à petite M^*** requière une **rétroaction stellaire très efficace dans les galaxies naines** et moins efficace dans les galaxies massives (Cattaneo et al. 2017, 2020).
- Les simulations supportent cette conclusion (Anglés-Alcázar et al. 2017, Tollet et al. 2019).
- Mais on n'observe pas les taux d'éjection requis par la théorie (Marasco et al. 2023).

Conclusions

- Les **propriétés des galaxies** sont liées aux **histoires de formation des halos** de matière noire, mais aussi très influencées par la rétroaction de la formation stellaire et de trous noirs supermassifs.
- La **pente de la fonction de masse à petite M^*** requière une **rétroaction stellaire très efficace dans les galaxies naines** et moins efficace dans les galaxies massives (Cattaneo et al. 2017, 2020).
- Les simulations supportent cette conclusion (Anglés-Alcázar et al. 2017, Tollet et al. 2019).
- Mais on n'observe pas les taux d'éjection requis par la théorie (Marasco et al. 2023).
- La suppression rapide de la formation stellaire (**quenching**) **dans les galaxies massives** est liée à la rétroaction par les trous noirs supermassifs
- Un modèle dans lequel la formation stellaire s'arrête **lorsque l'énergie déposée par le trou noir central dans le gaz environnant atteint une fraction de son énergie de liaison gravitationnelle** donne des résultats en bon accord avec les observations (Koutsouridou & Cattaneo 2022).
- Une telle injection d'énergie serait **cohérente avec le réchauffement nécessaire pour résoudre le problème de l'entropie** (Chaudhuri et al. 2012).
- Dans les halos massifs, observations et simulations montrent que **le taux d'accroissement du trou noir central s'auto-régule pour préserver l'équilibre thermique** du gaz chaud (Bîrzan et al. 2004, Cattaneo & Teyssier 2007, Cattaneo et al. 2009, Brüggén & Scannapieco 2009, Dubois et al. 2010, Gaspari et al. 2011, Hlavecek-Larrondo et al. 2022).

Conclusions

- Les **propriétés des galaxies** sont liées aux **histoires de formation des halos** de matière noire, mais aussi très influencées par la rétroaction de la formation stellaire et de trous noirs supermassifs.
- La **pente de la fonction de masse à petite M^*** requière une **rétroaction stellaire très efficace dans les galaxies naines** et moins efficace dans les galaxies massives (Cattaneo et al. 2017, 2020).
- Les simulations supportent cette conclusion (Anglés-Alcázar et al. 2017, Tollet et al. 2019).
- Mais on n'observe pas les taux d'éjection requis par la théorie (Marasco et al. 2023).
- La suppression rapide de la formation stellaire (**quenching**) **dans les galaxies massives** est liée à la rétroaction par les trous noirs supermassifs
- Un modèle dans lequel la formation stellaire s'arrête **lorsque l'énergie déposée par le trou noir central dans le gaz environnant atteint une fraction de son énergie de liaison gravitationnelle** donne des résultats en bon accord avec les observations (Koutsouridou & Cattaneo 2022).
- Une telle injection d'énergie serait **cohérente avec le réchauffement nécessaire pour résoudre le problème de l'entropie** (Chaudhuri et al. 2012).
- Dans les halos massifs, observations et simulations montrent que **le taux d'accroissement du trou noir central s'auto-régule pour préserver l'équilibre thermique** du gaz chaud (Bîrzan et al. 2004, Cattaneo & Teyssier 2007, Cattaneo et al. 2009, Brüggén & Scannapieco 2009, Dubois et al. 2010, Gaspari et al. 2011, Hlavecek-Larrondo et al. 2022).
- La **suppression de la formation stellaire dans les galaxies de faible masse** est vraisemblablement due aux **effets d'environnement** (Cattaneo et al. 2007, 2008, Yang et al. 2012, Peng et al. 2015).