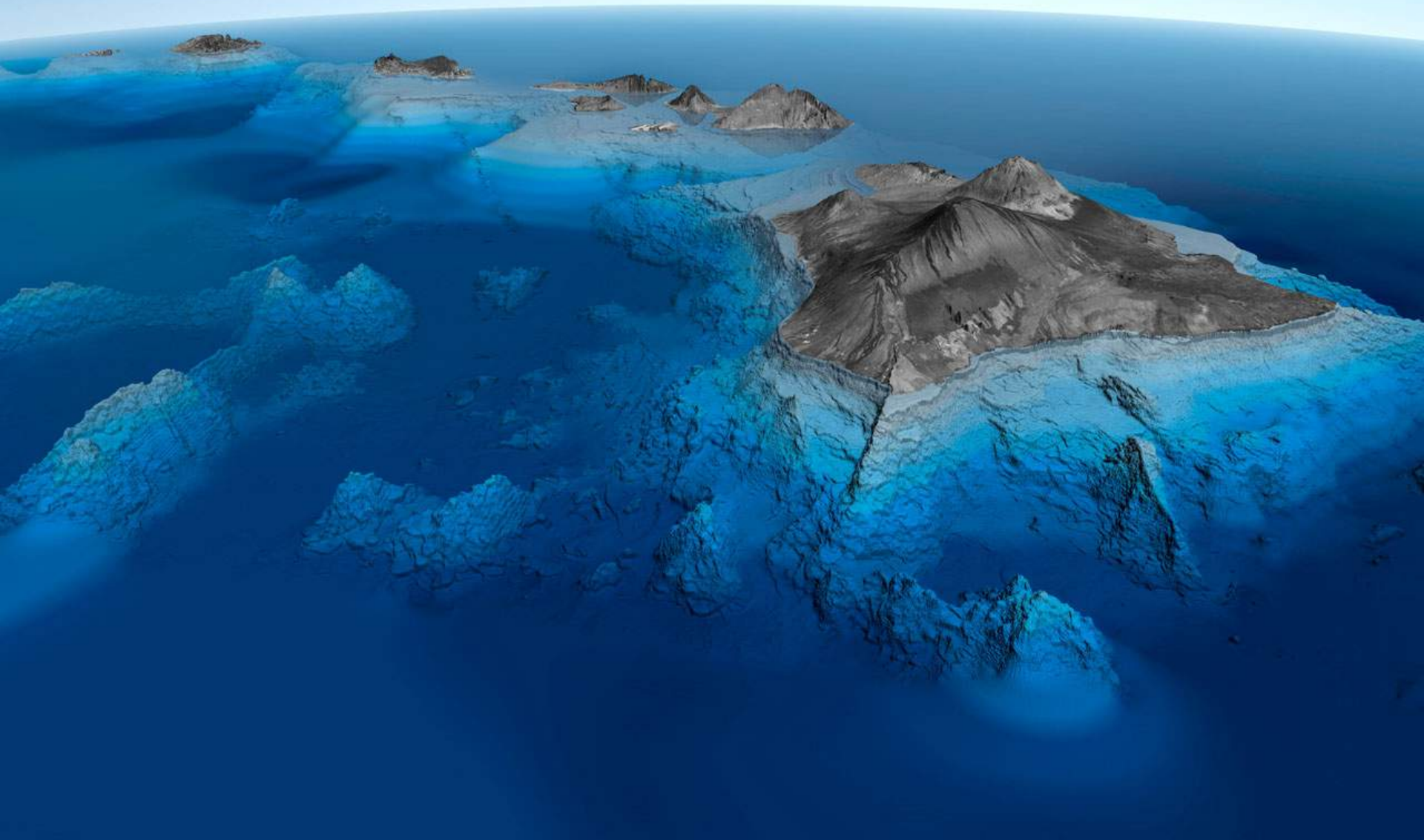


Séquence rouge et nuage bleu

Une enquête sur l'origine de la bimodalité des galaxies

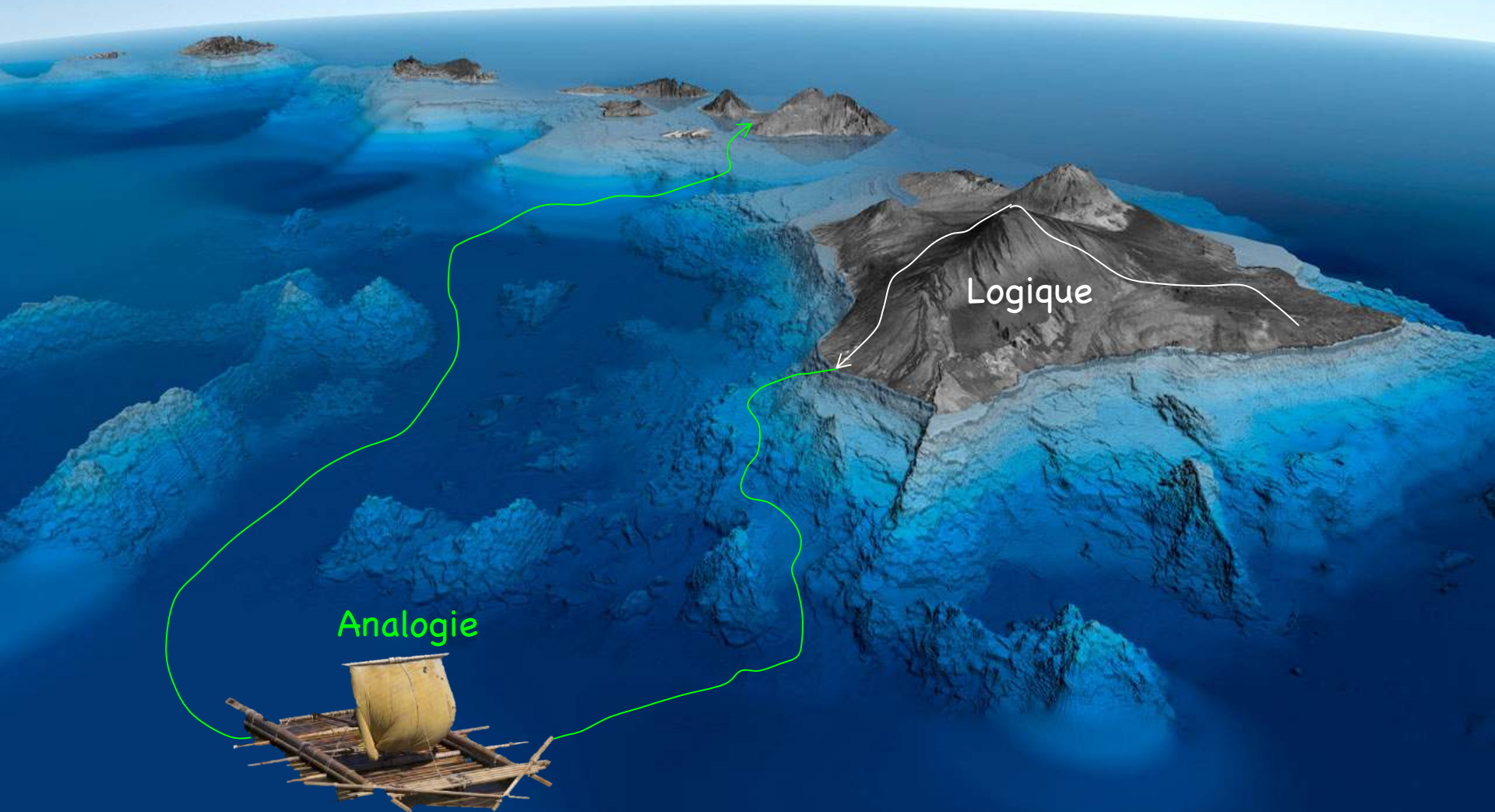
David Elbaz – CEA Saclay



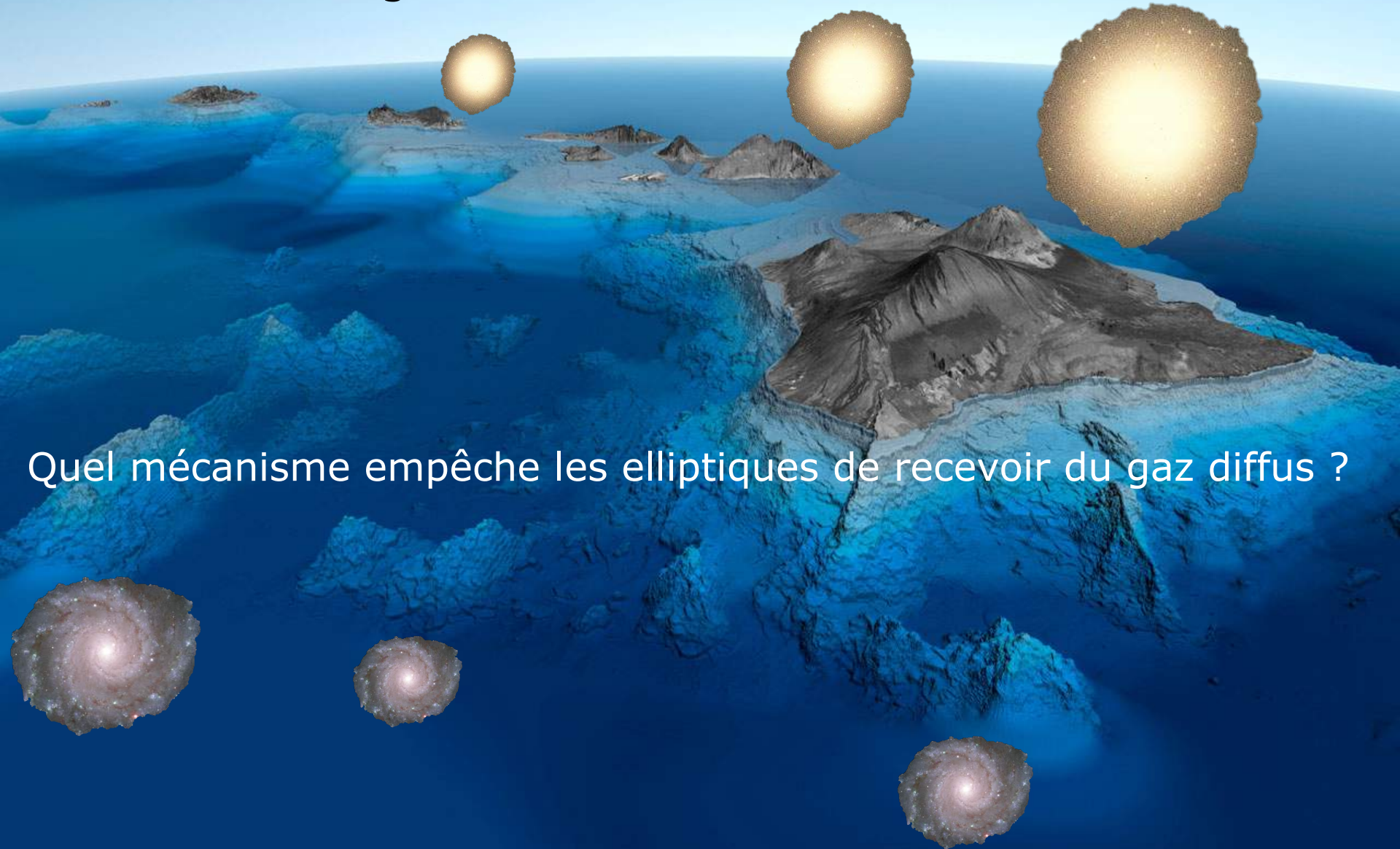
Séquence rouge et nuage bleu

Une enquête sur l'origine de la bimodalité des galaxies

David Elbaz – CEA Saclay



Analogie: vie = formation d'étoiles & eau = source de vie
galaxie rouge / passive = asséchée
galaxie bleue / active = humide



Quel mécanisme empêche les elliptiques de recevoir du gaz diffus ?

Ceci est une galaxie morte



Ceci est une galaxie morte



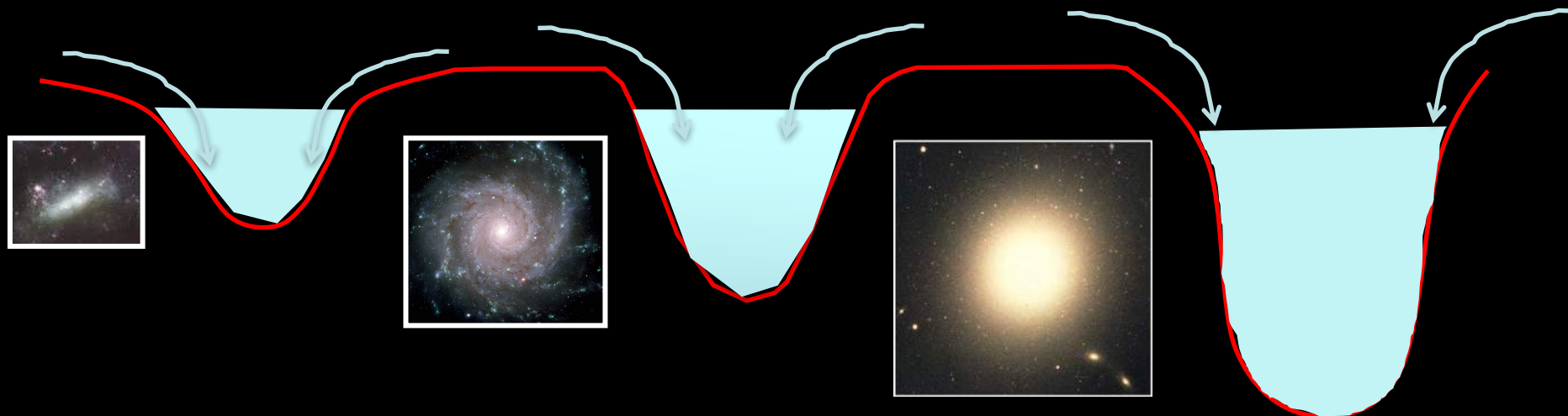
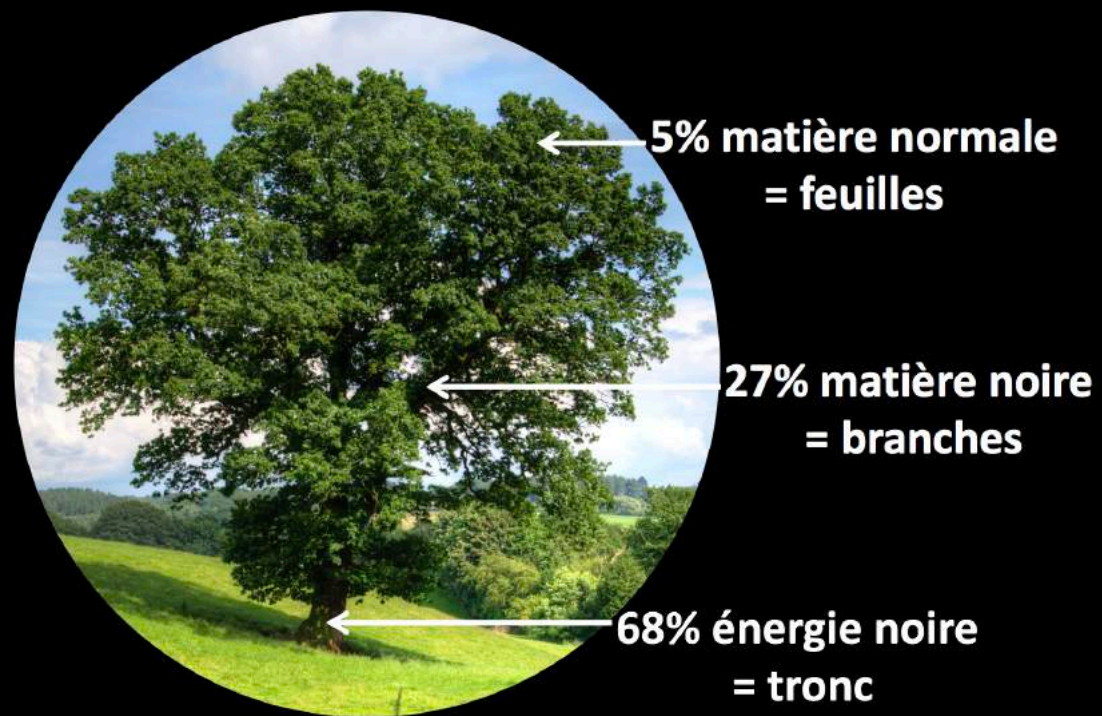
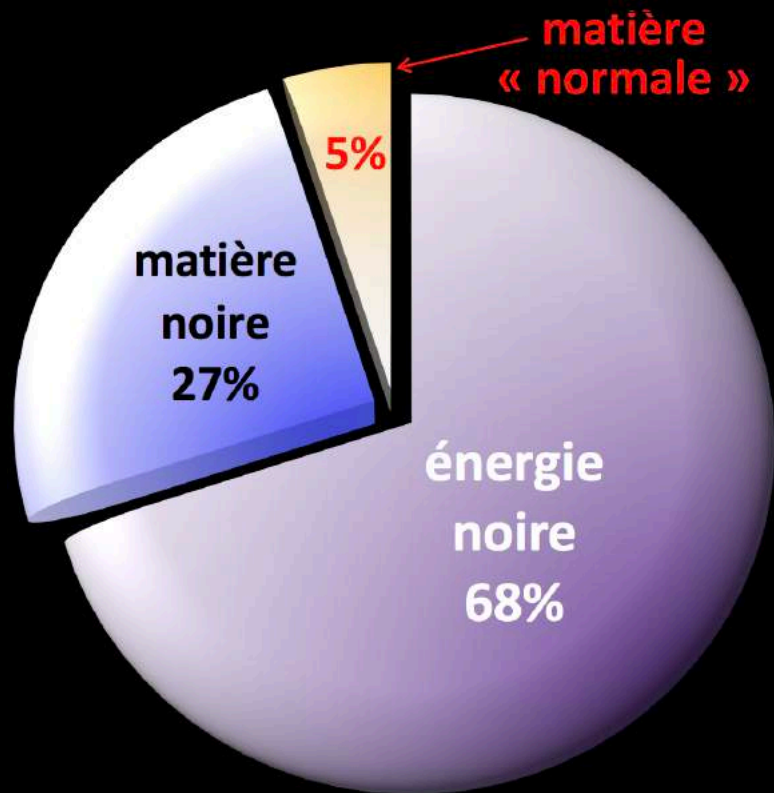
Diagnostic:

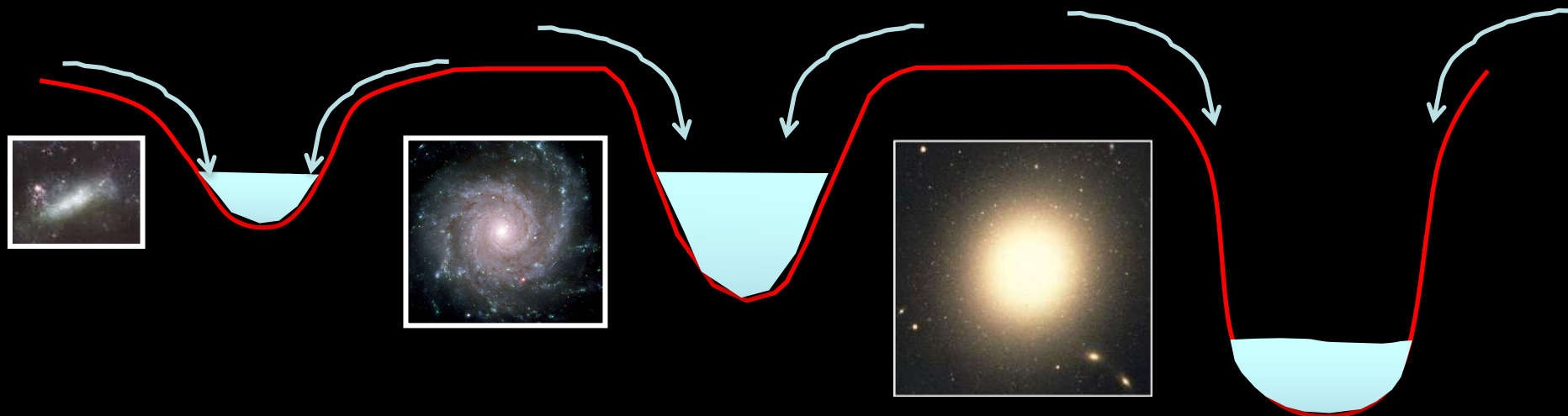
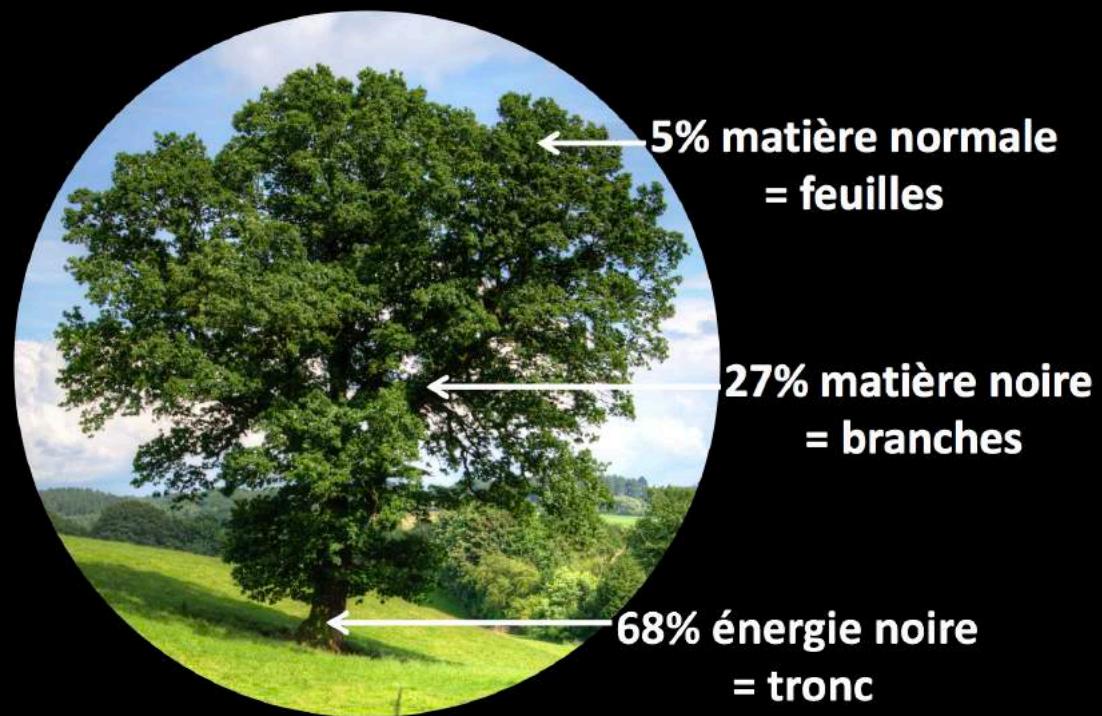
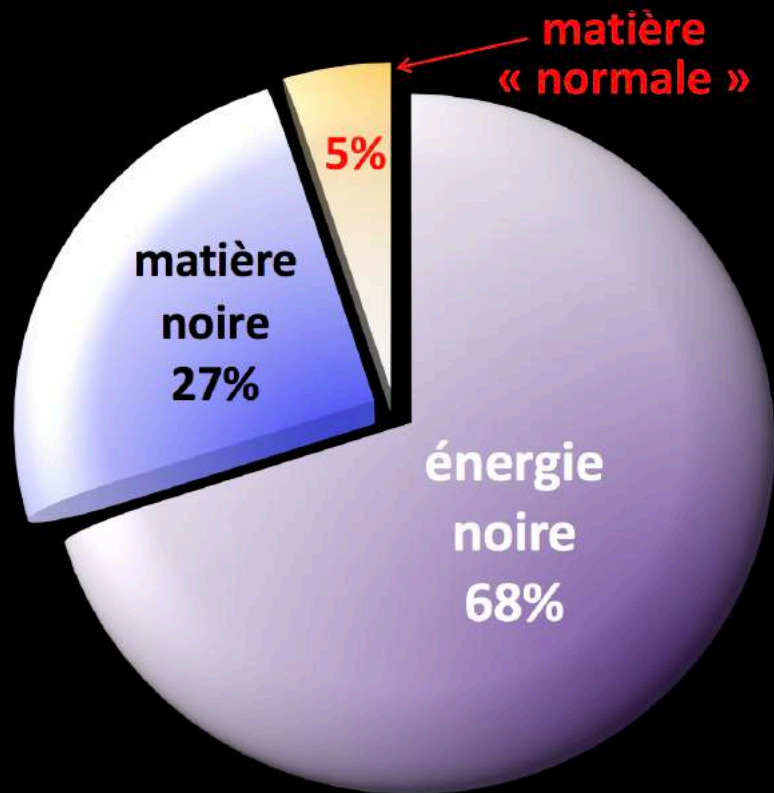
- Elle a perdu son disque
- Ses étoiles ne suivent pas un mouvement global de rotation (perte du moment angulaire)
- Elle ne forme plus d'étoiles depuis plusieurs milliards d'années → couleur dominée par des étoiles de masse $<$ celle du Soleil
- Fort rapport Oxygène / Fer

Cause de la mort ?

Naturelle (maladie, asphyxiée/privée de nourriture) vs accidentelle/meurtre

→ Lente vs rapide/violente



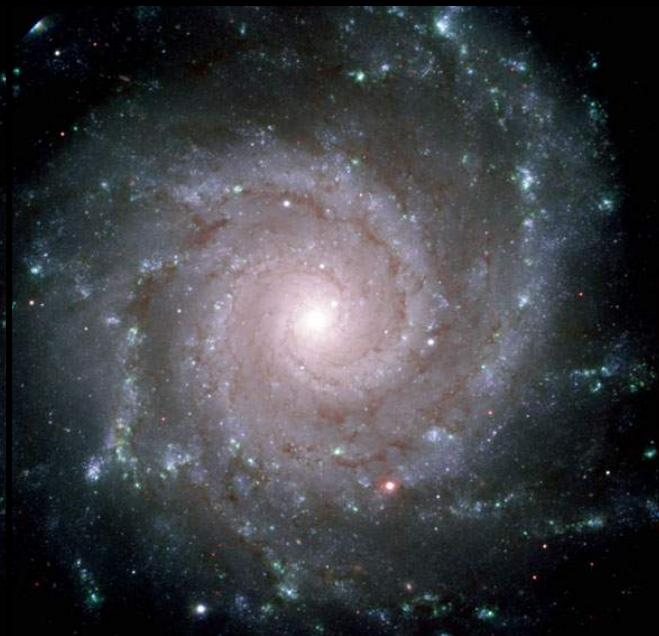


Séquence rouge et nuage bleu

7 chances sur 10 de tirer 1 étoile au hasard dans une région morte

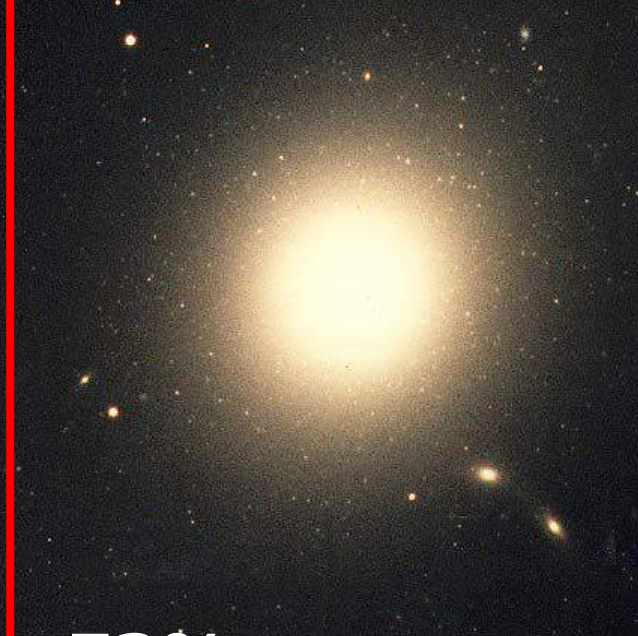
Spirales

61% en nombre



Elliptiques

34%



73% en masse

Irr/Part.

5%



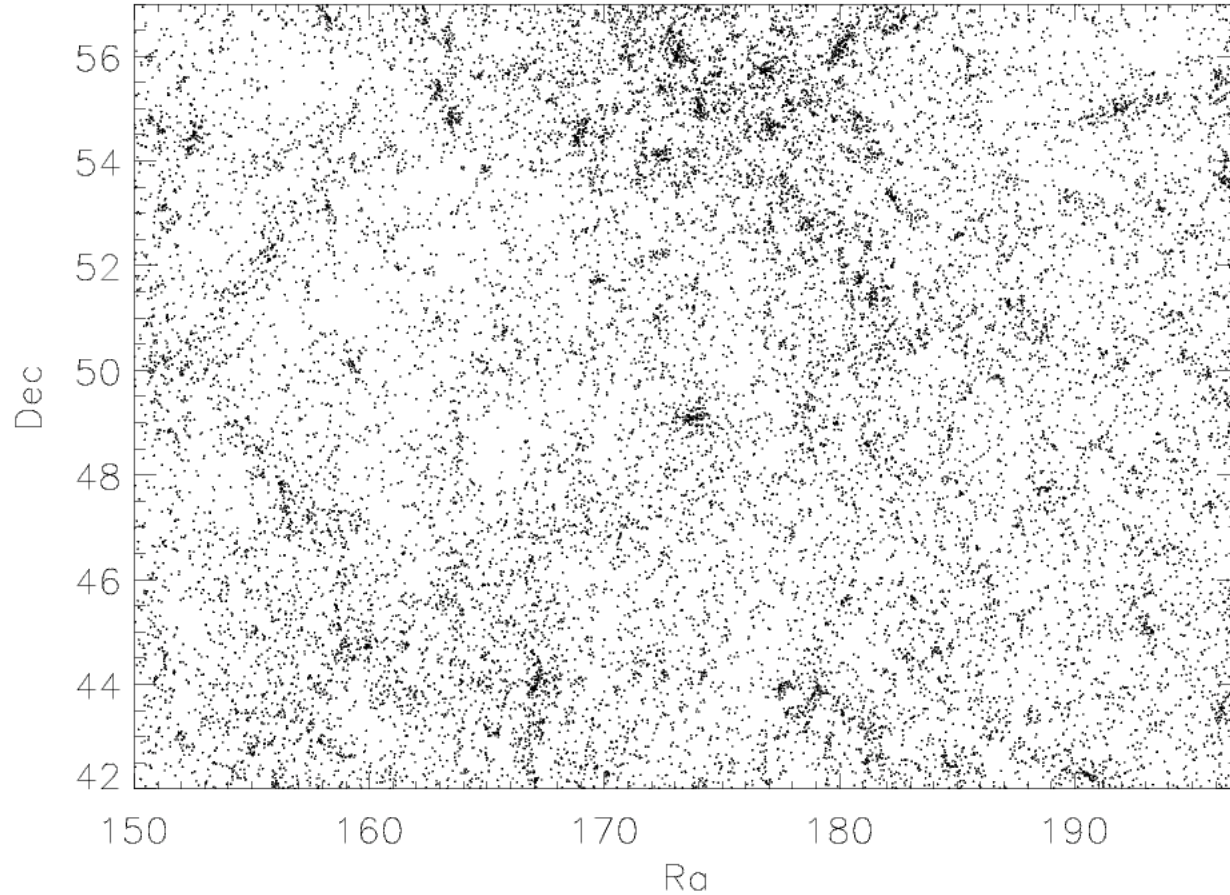
Irrégulières



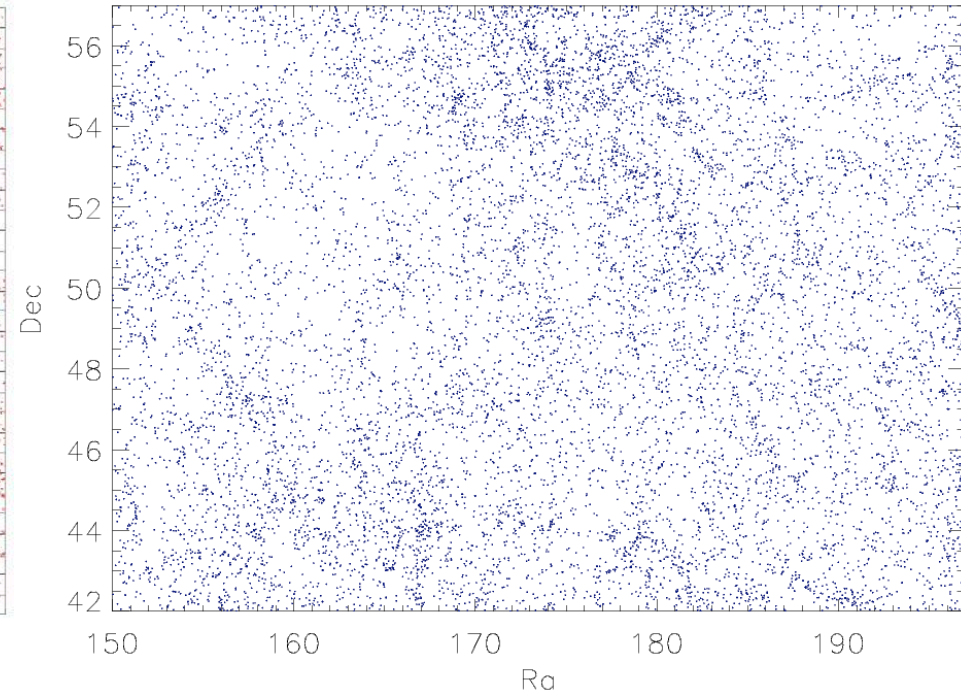
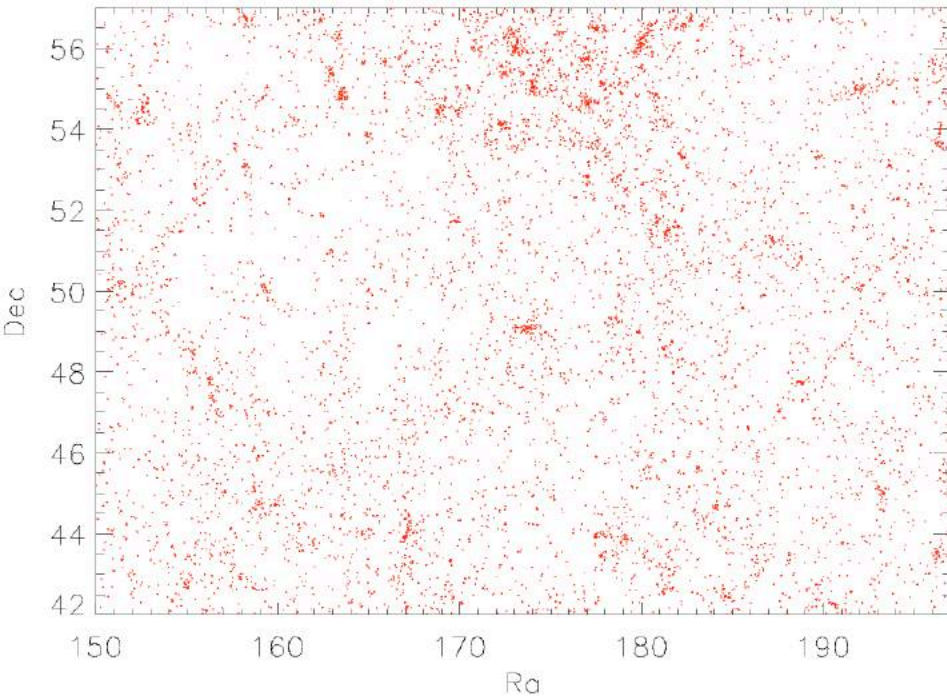
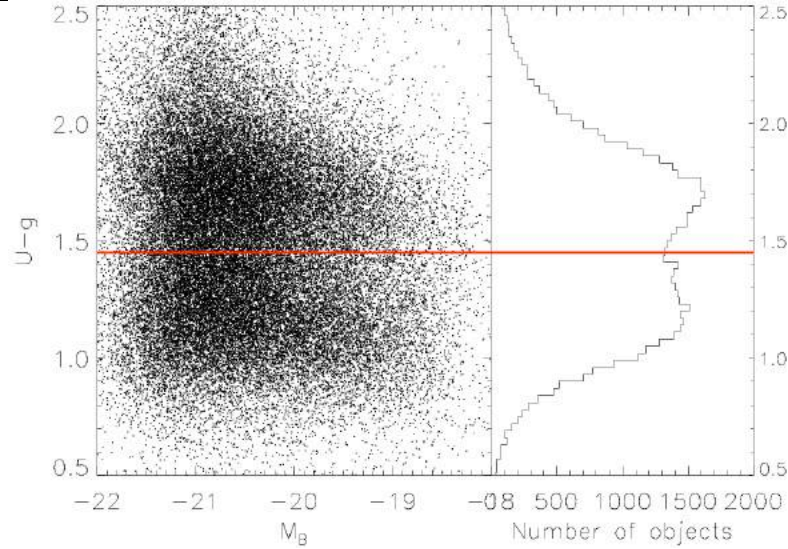
Particulières

L'étrange rôle de l'environnement sur les galaxies

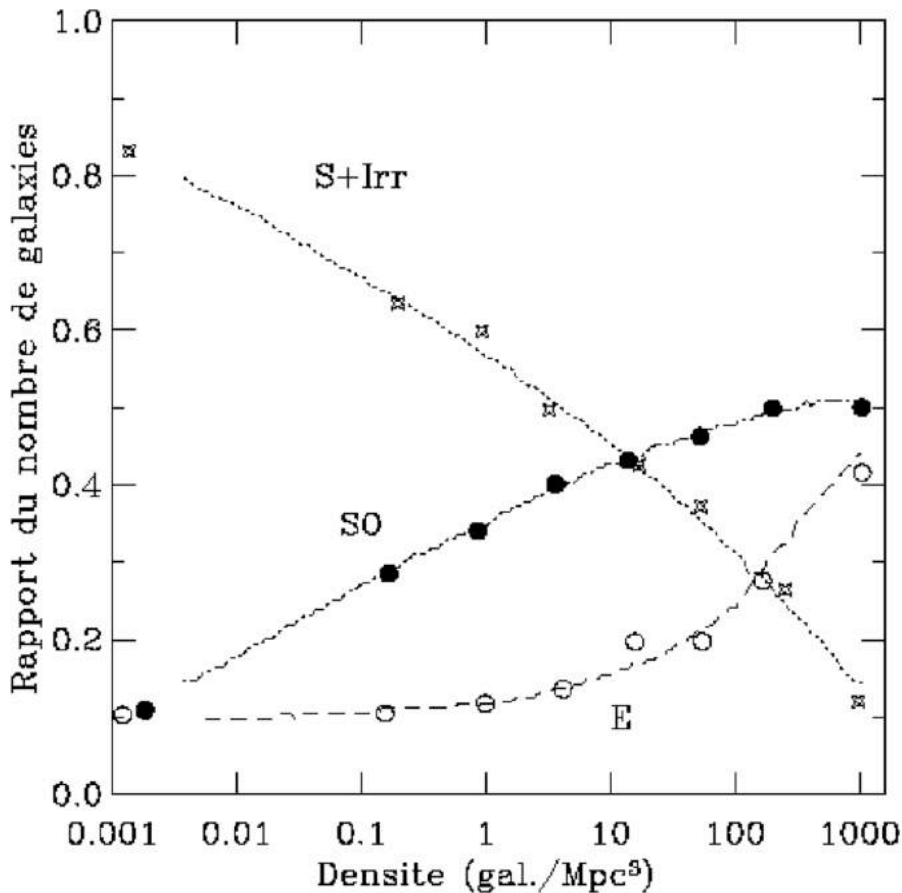
Distribution spatiale des galaxies ($z < 0.2$) dans le SDSS



Distributions spatiales des galaxies rouges et bleues



Effets d'environnement dans les amas de galaxies



"Ségrégation morphologique" :
(cf Dressler 1980, ApJ 236, 351):

- Interactions gravitationnelles : **Sp → E**
 - fusions (mergers)
 - passages non fusionnels (fly-by) avec effets de marée (tidal effects)
= galaxy harassment
- Epluchage par pression dynamique (Ram Pressure Stripping) par le gaz intra-amas:
Sp → S0

Lenticulaires (S0) : 10-20 % dans le champ
Spirales : 80 % dans le champ

-> 50 % dans les amas riches
-> 10-20 % dans les amas riches !

Effets d'environnement dans les amas de galaxies

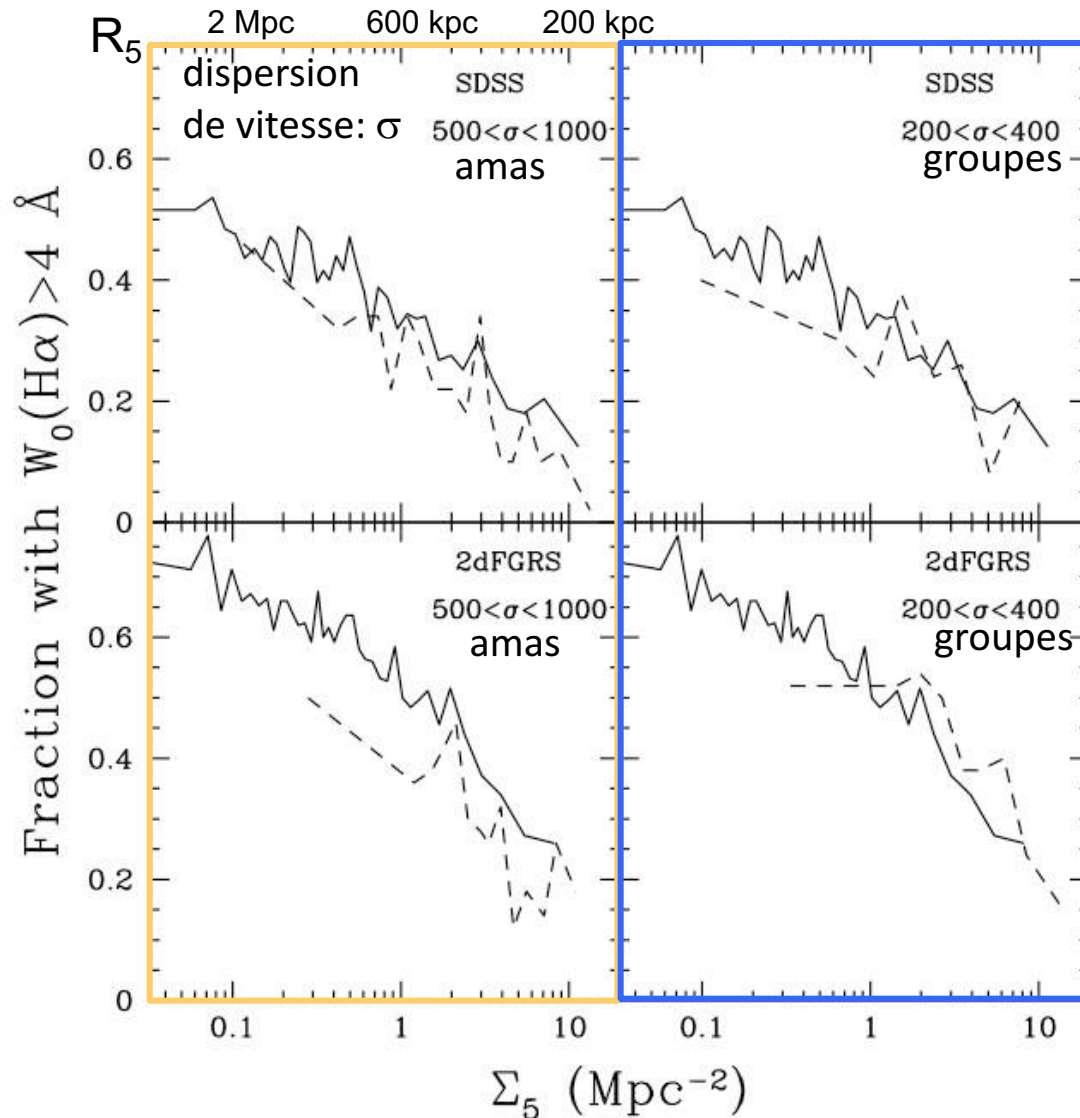
Alors que la distance entre étoiles au sein d'une galaxie sont très grandes:
 20×10^6 x leur diamètre

La distance moyenne entre 2 galaxies est bien plus réduite dans un amas:
15-20 x leur diamètre

Il en résulte que les collisions entre galaxies sont bien plus fréquentes qu'entre étoiles, mais la dispersion de vitesses des galaxies d'amas ($\sigma_v \sim 1000 \text{ km s}^{-1}$) est beaucoup plus grande que celles des étoiles des galaxies ($\sigma_v \sim 200-300 \text{ km s}^{-1}$), donc l'énergie cinétique \gg potentiel gravitationnel et la fusion de deux galaxies est peu probable dans un amas. Par contre, les effets de marée multiples (harcèlement, harassment, en anglais), affectent les galaxies.

Le gas intra-amas de son côté a pour effet d'éplucher les galaxies de leur réservoir de gaz (RPS= Ram Pressure Stripping; épluchage par pression dynamique).

La relation formation stellaire - densité : le rôle des groupes

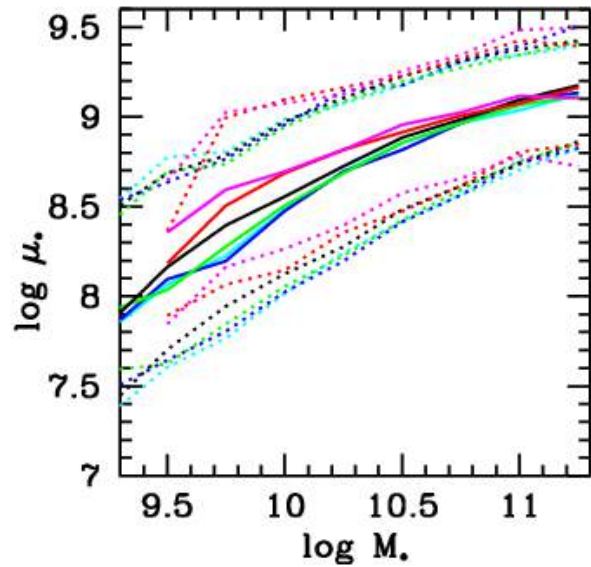


Etude des amas (Balogh et al. 2000): *"le principal effet de l'environnement est la suppression du SFR par épluchage dynamique du réservoir de gaz »*

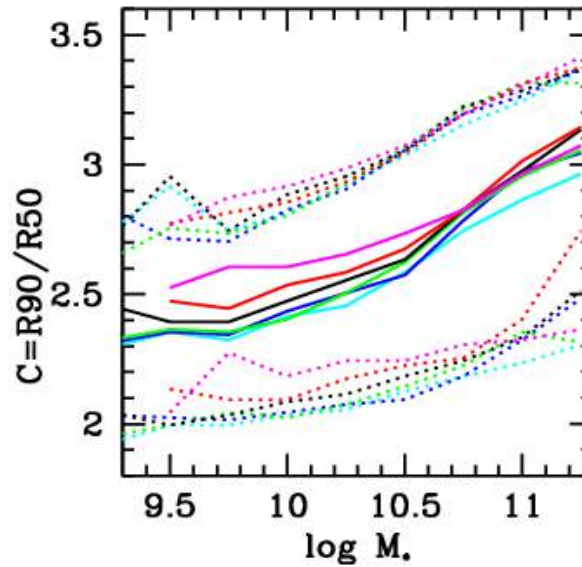
Etude de l'environnement des groupes (Balogh et al. 2004): *"l'épluchage ne peut agir à ces densités, il faut donc qu'il y ait eu accélération de la formation d'étoiles dans le passé avec l'environnement »*

$\Sigma_5 = 5 / (4\pi R_5^2)$, R_5 = distance de la 5^e gal. la + proche

densité projetée en masse



indice de concentration



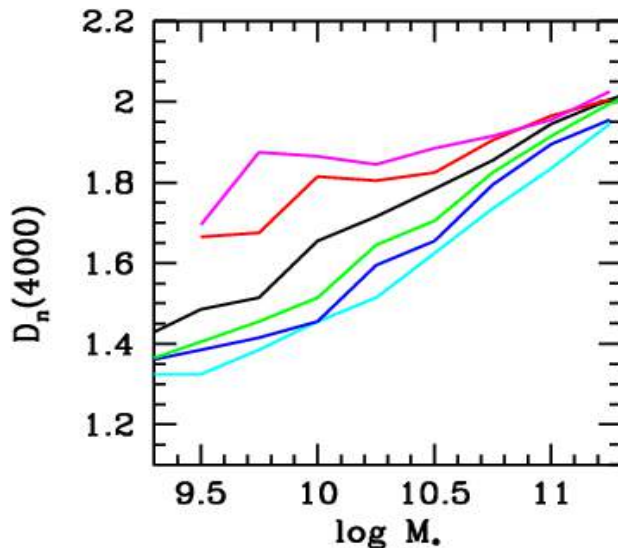
Kauffmann 2004
(*MNRAS* 353, 713)

Forte variation avec M^*
Faible variation avec densité

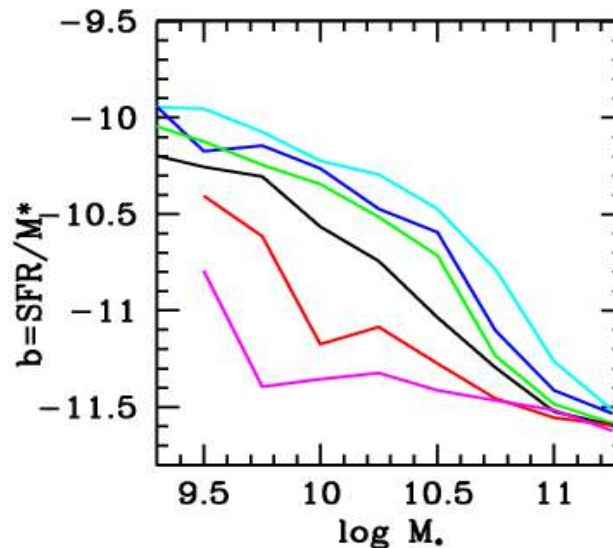
La densité n'affecte pas la distribution spatiale de lumière (morphologie)

Les courbes de couleur \neq correspondent à des densités \neq : bleu clair= galaxies ayant 0 ou 1 voisins dans un rayon de 2Mpc et $\pm 500\text{km/s}$ bleu foncé: 2-3 voisins, vert: 4-6, noir: 7-11, rouge: 12-16, violet: >17 voisins
courbes pointillées: 10-90% des gals

Age des étoiles (D4000)



taux spécifique de formation d'étoiles

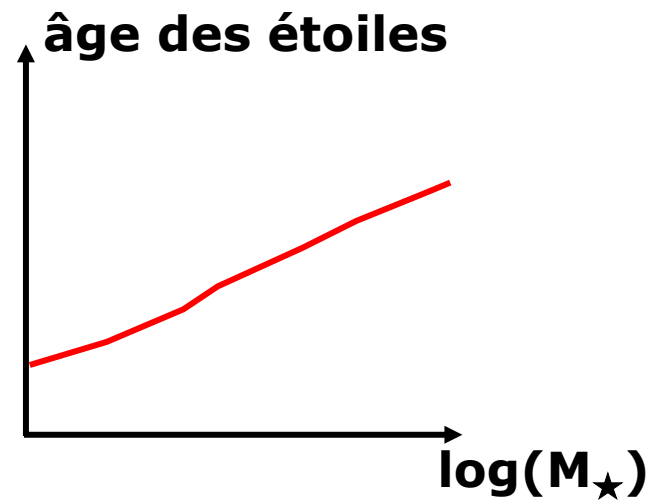
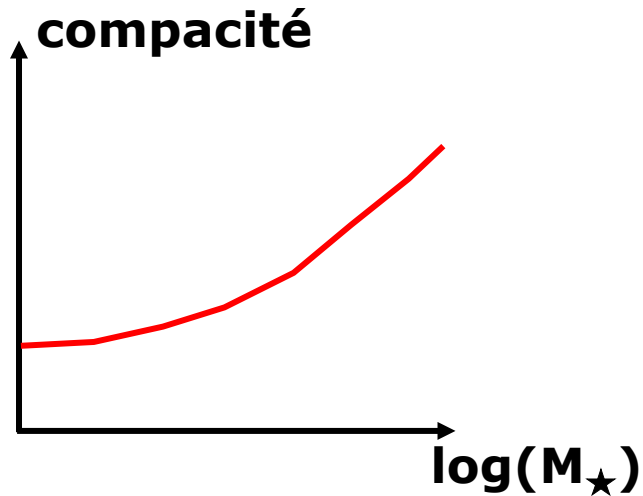


Les indicateurs d'âge et de formation d'étoiles sont sensibles à l'environnement et à la masse

($\text{SFR}/M^* \sim \text{SFR}/\langle \text{SFR} \rangle$)

Rôle négligeable de l'environnement

Dans l'univers local (aujourd'hui): plus une galaxie est massive, plus ses étoiles sont âgées et concentrées au centre de la galaxie.

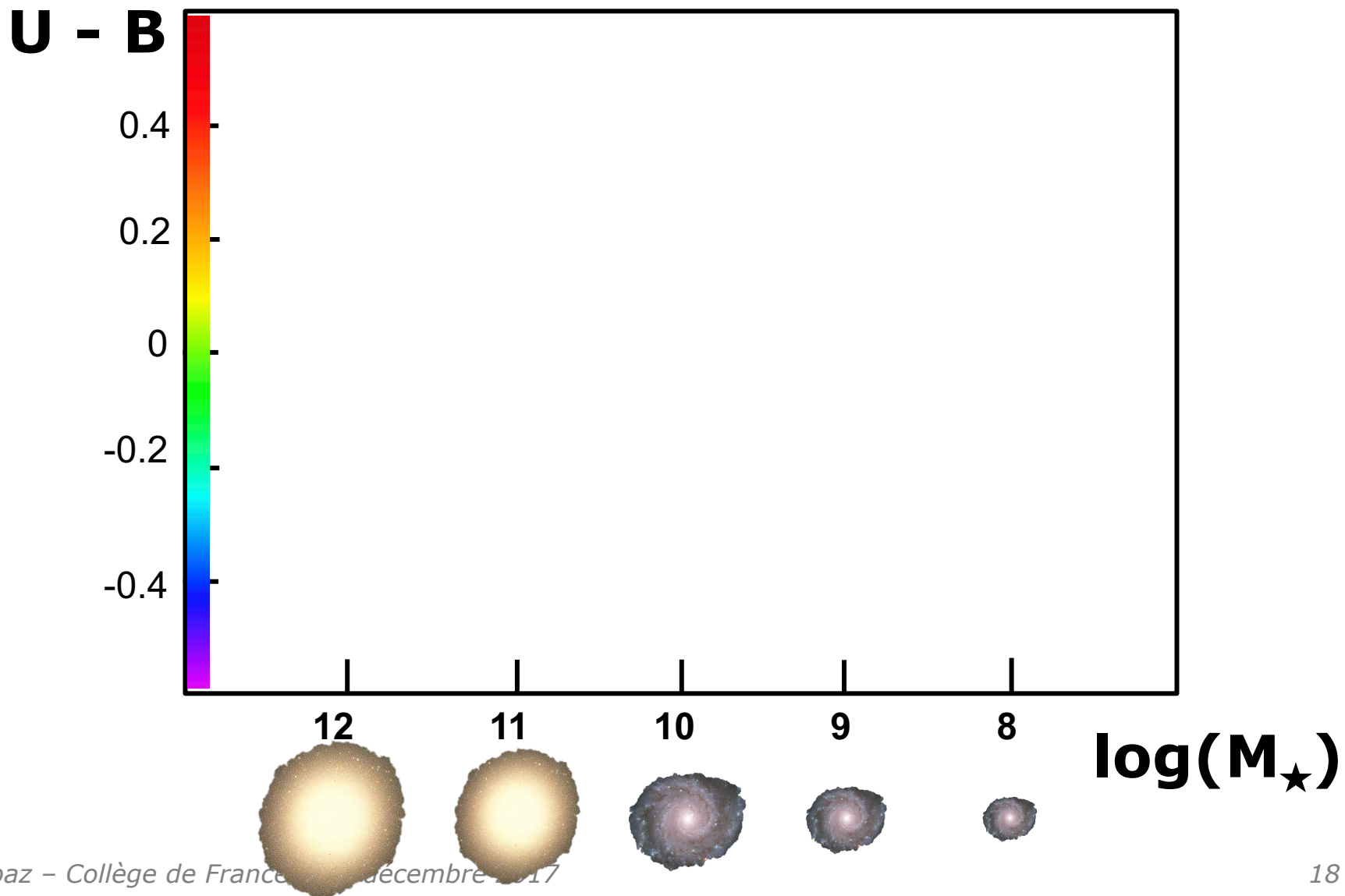


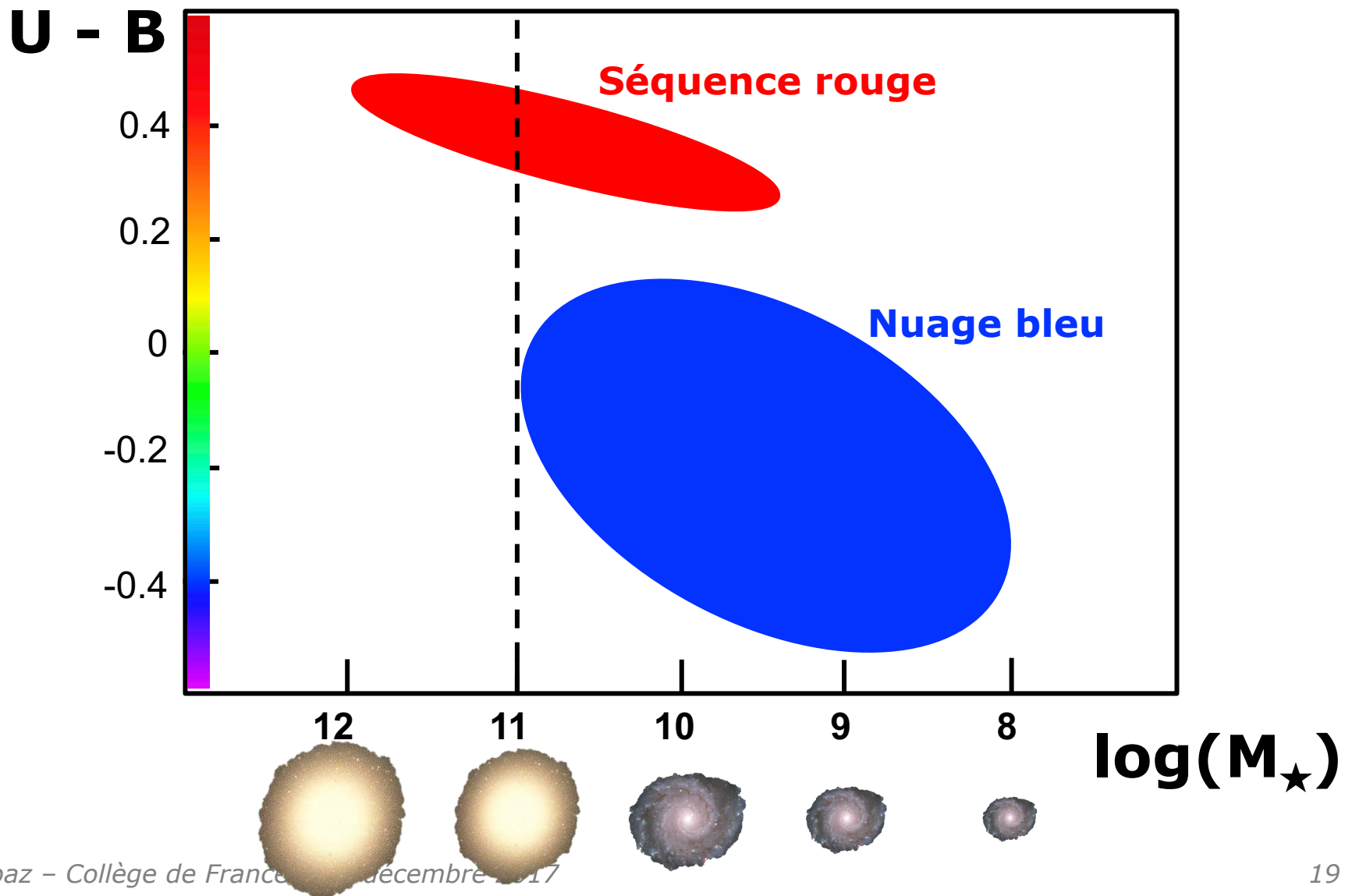
Il n'y a pas de relation morphologie – densité

Quel processus physique peut dire à une galaxie comment adapter le taux auquel elle forme ses étoiles sans modifier de façon notable sa morphologie ?

Je pense que la conclusion doit être que les processus qui définissent la morphologie sont d'une certaine manière interne aux galaxies. Cela va être difficile à réconcilier avec la cosmogonie de la matière noire froide. D.Hogg (2005)

La pièce manquante du puzzle

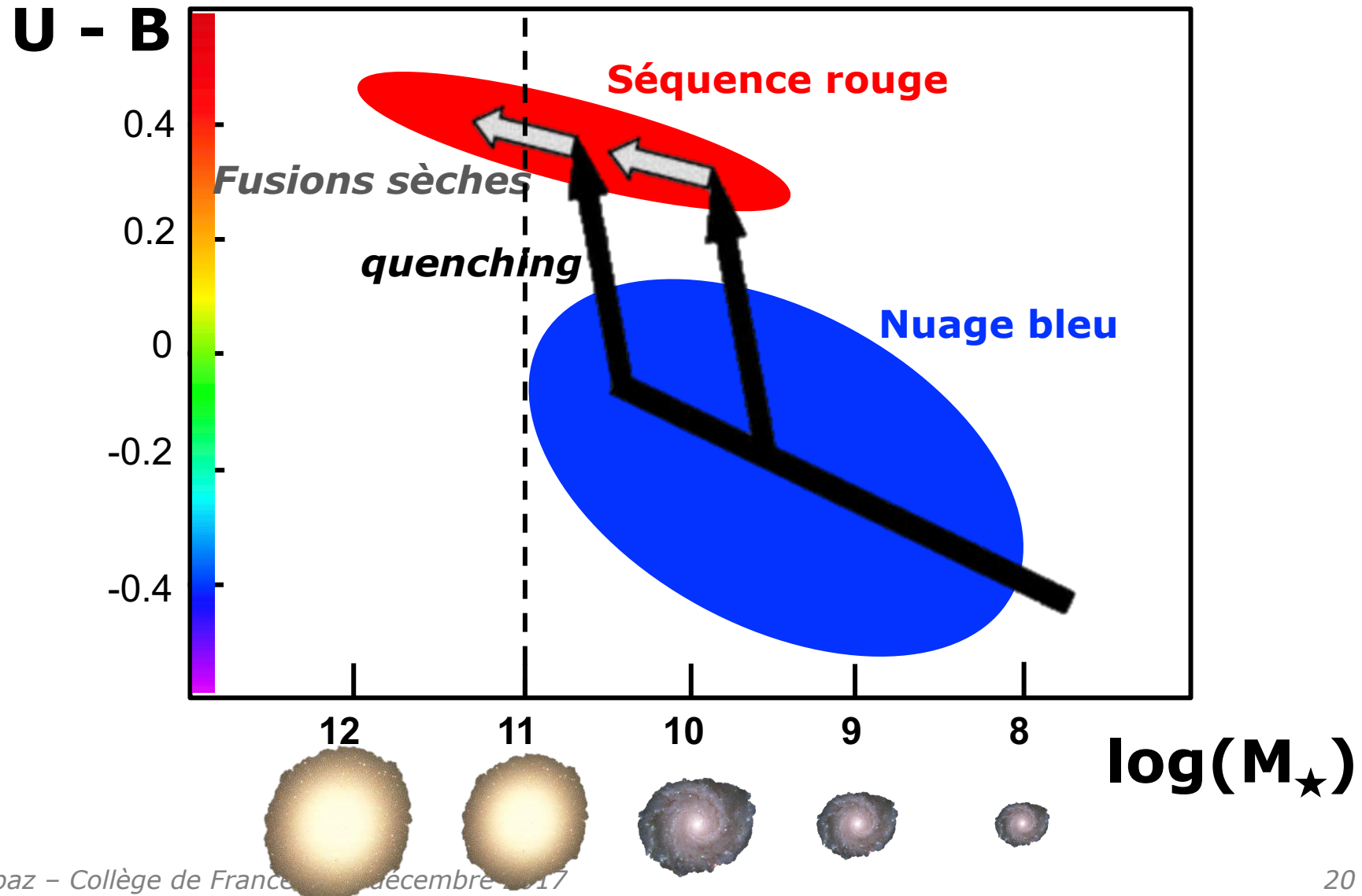




GALAXY LUMINOSITY FUNCTIONS TO $z \sim 1$ FROM DEEP2 AND COMBO-17: IMPLICATIONS FOR RED GALAXY FORMATION¹

S. M. FABER,² C. N. A. WILLMER,^{3,4} C. WOLF,⁵ D. C. KOO,² B. J. WEINER,³ J. A. NEWMAN,^{6,7} M. IM,⁸ A. L. COIL,³

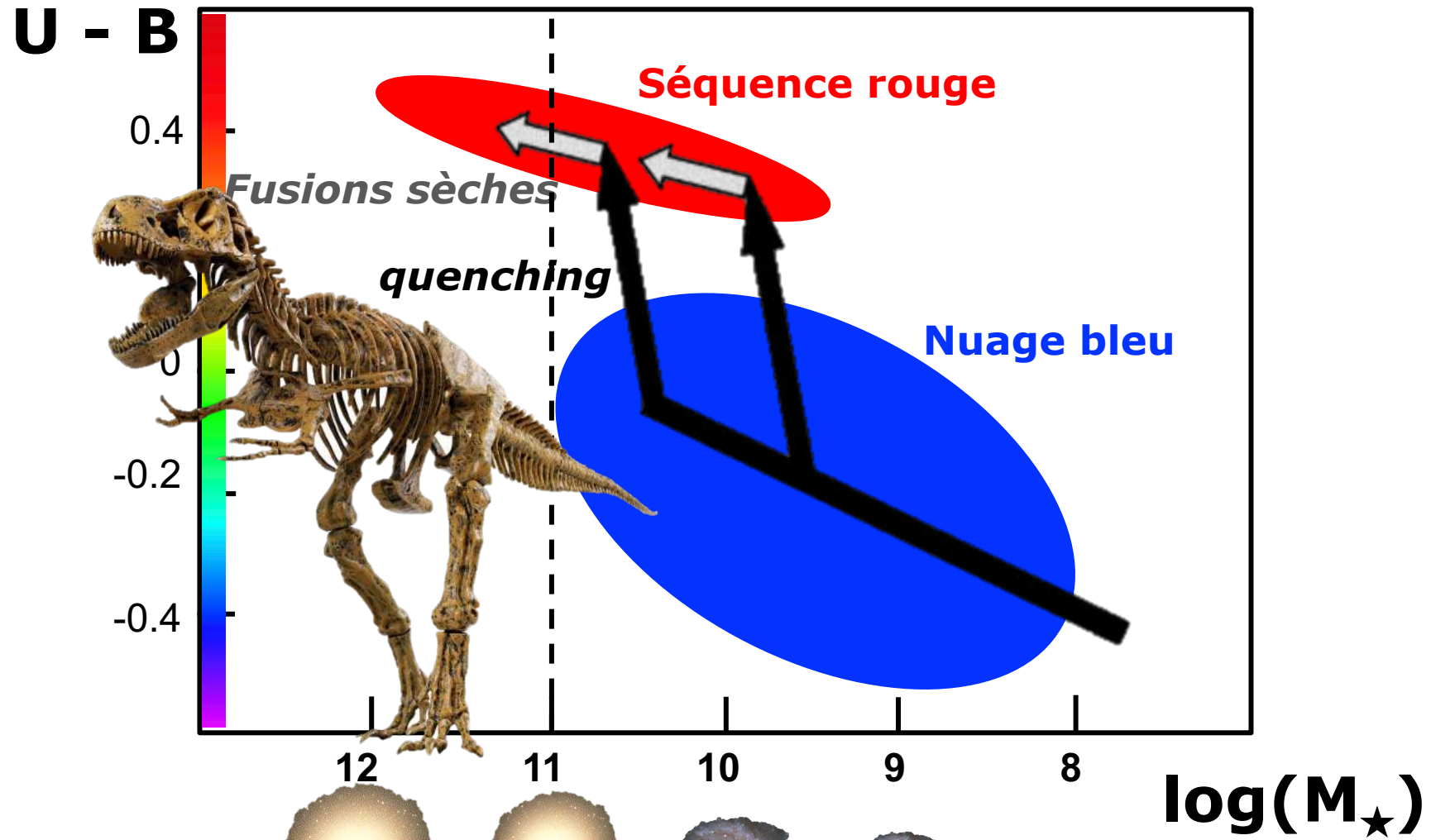
THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 665:265–294, 2007 August 10



GALAXY LUMINOSITY FUNCTIONS TO $z \sim 1$ FROM DEEP2 AND COMBO-17: IMPLICATIONS FOR RED GALAXY FORMATION¹

S. M. FABER,² C. N. A. WILLMER,^{3,4} C. WOLF,⁵ D. C. KOO,² B. J. WEINER,³ J. A. NEWMAN,^{6,7} M. IM,⁸ A. L. COIL,³

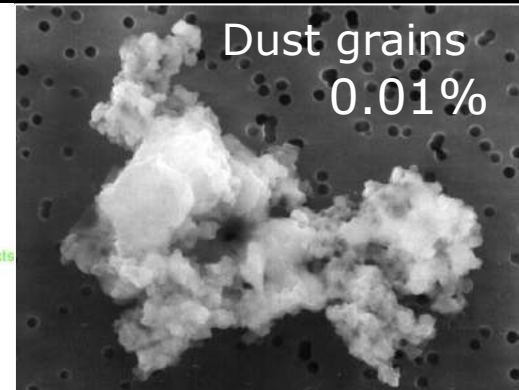
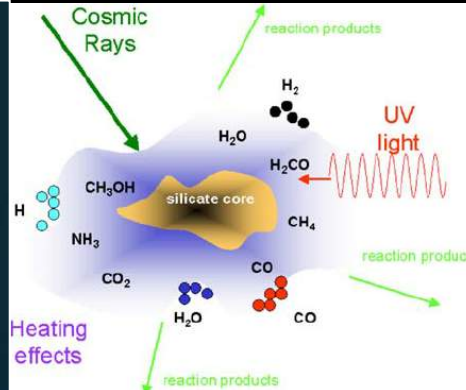
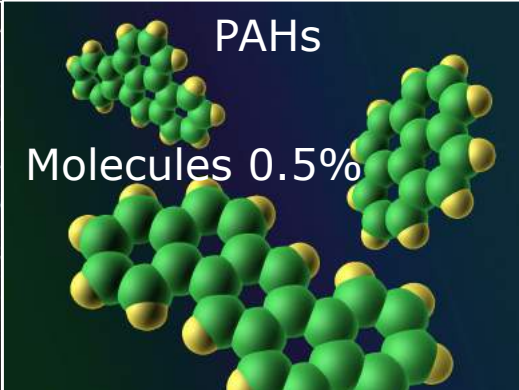
THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 665:265–294, 2007 August 10



À la recherche des dinosaures galactiques



La face cachée des galaxies
révèle leur universalité



90% dark matter

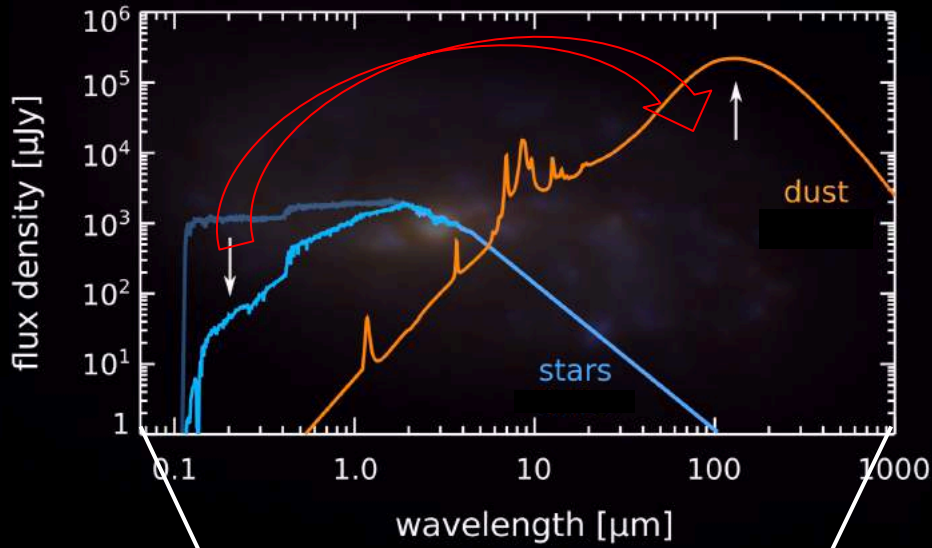


- Mass in stars ~ 10% of total mass (dominated by dark matter)
- Mass in gas ~ 10% of mass in stars
- Mass in dust ~ 1% of mass in gas

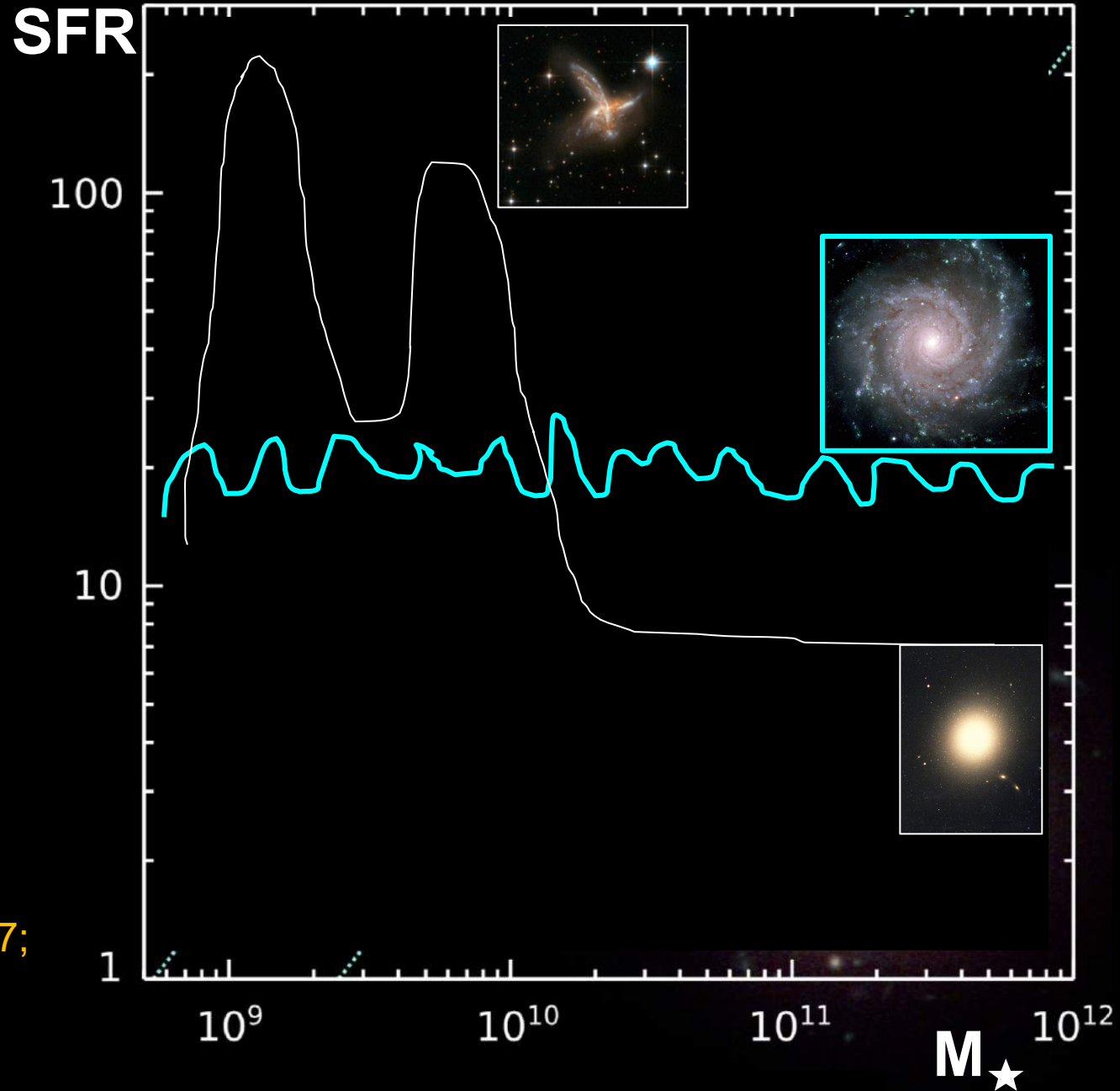
short-lived high-mass stars
radiate mostly in the UV
→ birthrate of stars

long-lived low-mass stars
radiate mostly in the NIR

most UV light is absorbed by dust
which radiates in the far-infrared

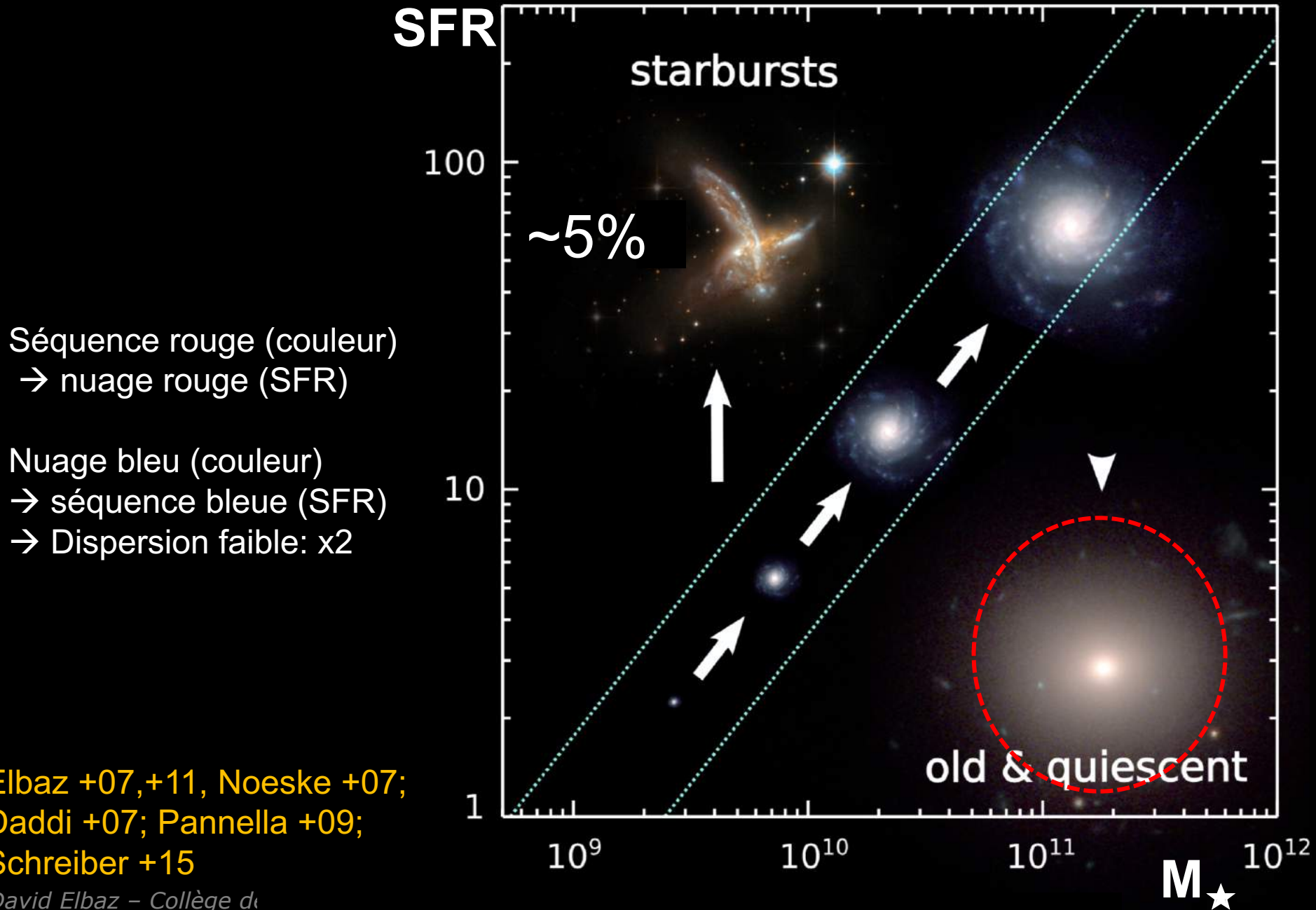


Star formation history of galaxies



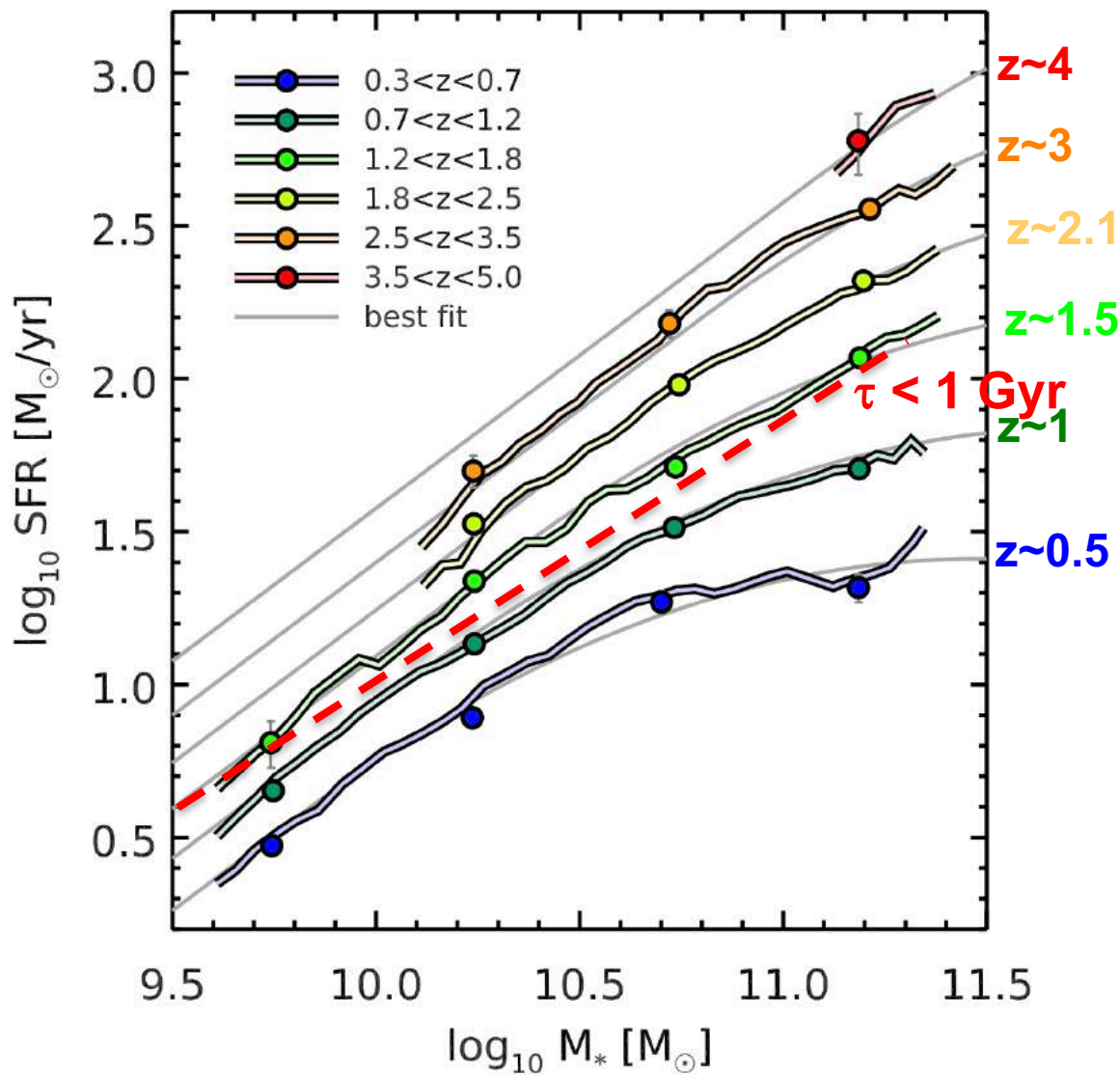
Elbaz +07,+11, Noeske +07;
Daddi +07; Pannella +09;
Schreiber +15

Star formation history of galaxies

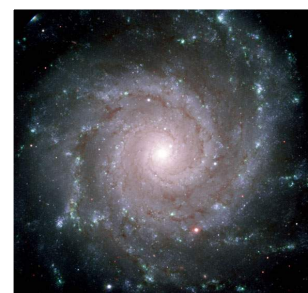


Elbaz +07,+11, Noeske +07;
Daddi +07; Pannella +09;
Schreiber +15

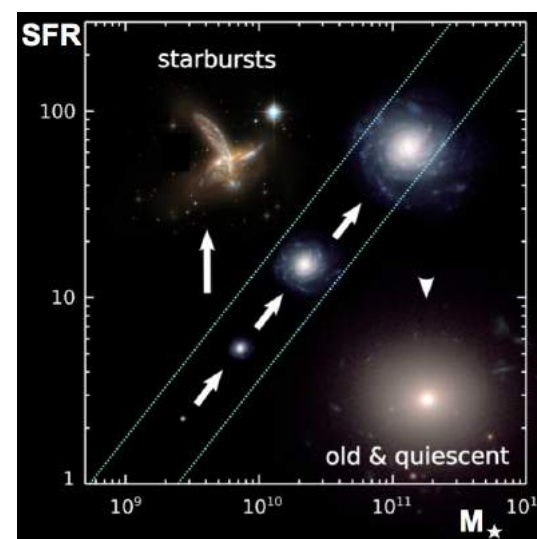
Comment et quand sont nées les étoiles des elliptiques et bulbes ?



$\tau < 1 \text{ Gyr}$



$\tau > 1 \text{ Gyr}$



Schreiber et al. (2015)

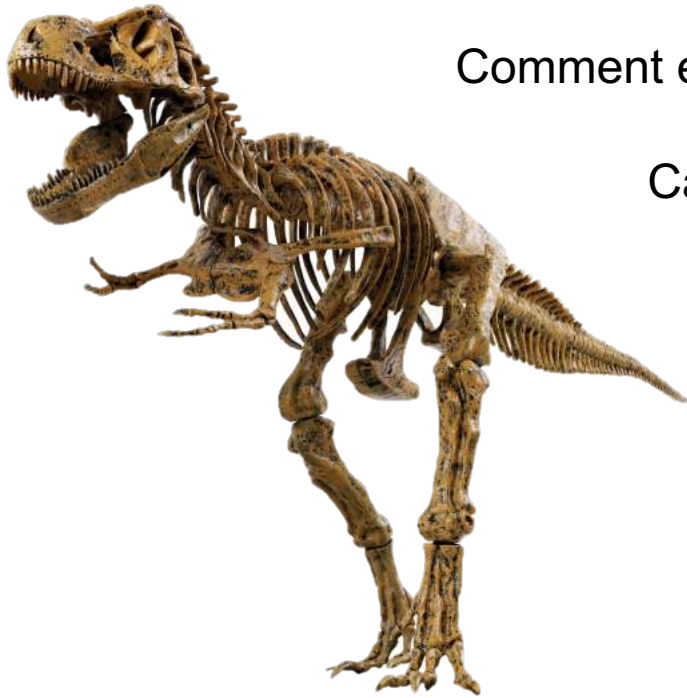
À la recherche des dinosaures galactiques

Les dinosaures galactiques existent bien.
Ils avaient été manqués par les méthodes employées.

On ne trouve parfois que ce que l'on cherche...

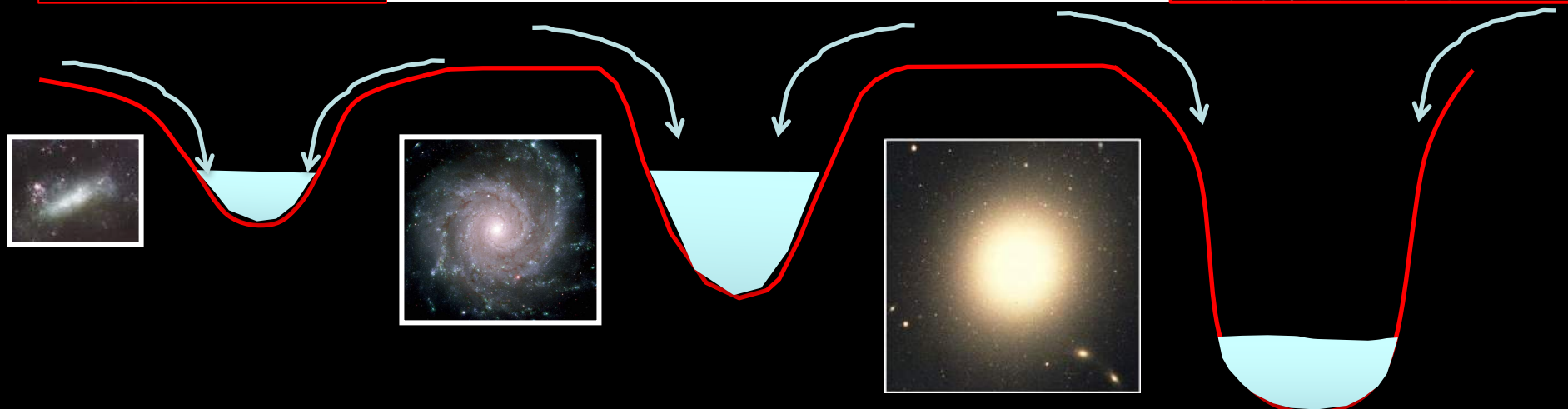
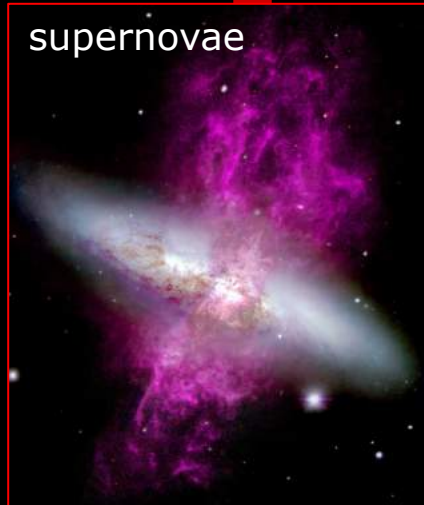
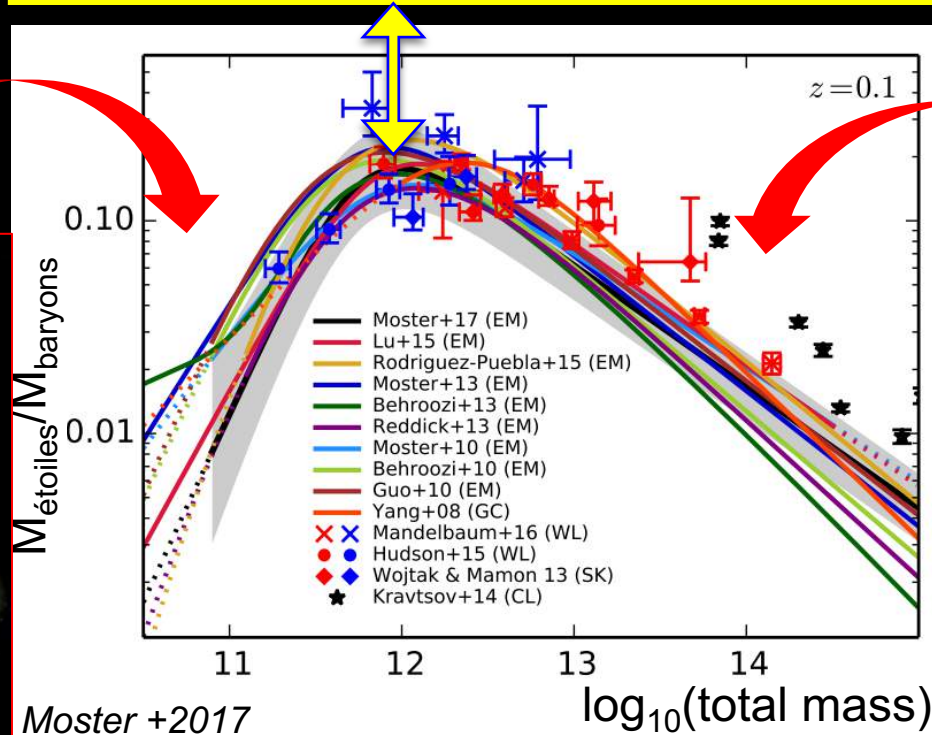
Comment expliquer l'extinction de ces dinosaures ?

Cataclysme ou mort naturelle ?



Le problème du surrefroidissement (*overcooling*)

Tous les baryons prévus par la théorie



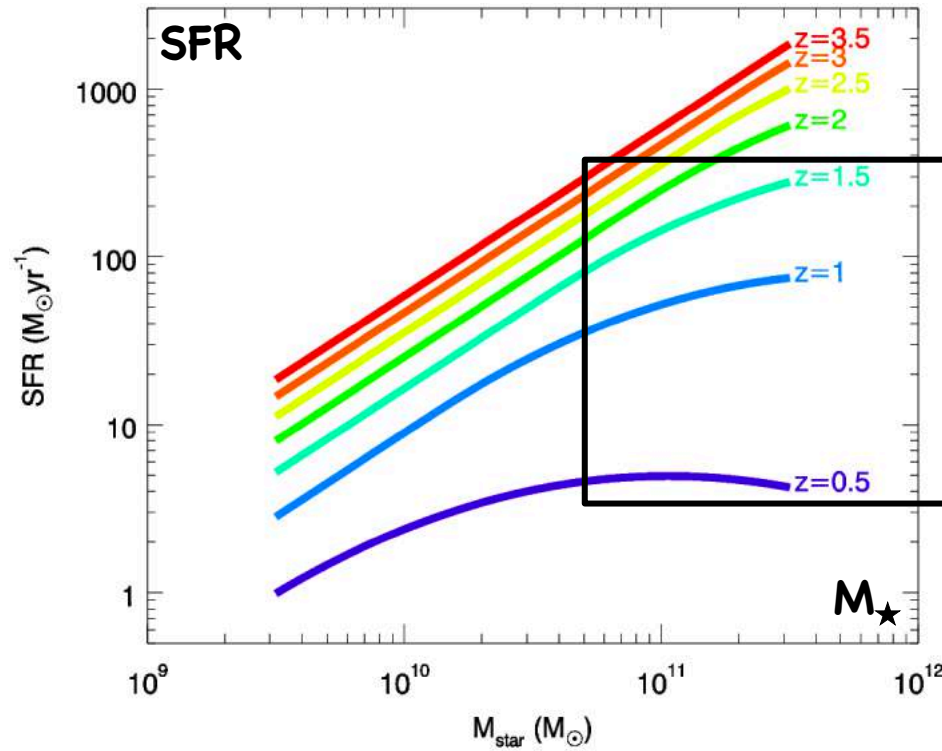
Les galaxies massives ont-elles succombé
à un cataclysme violent ?

La séquence principale des galaxies: entre **universalité** et **ébriété**



Les galaxies se saoulent-elles avant de mourir ?

Les galaxies elliptiques ont-elles vraiment été assassinées ?



Changement de pente
aux fortes M_{\star}

Whitaker +12, Magnelli +14, Schreiber +15, Lee +2015

$$sSFR = SFR / M_{\star}$$

Taux spécifique de formation d'étoiles =
quantité d'étoiles formées
par « kg » de galaxie

M_{\star}

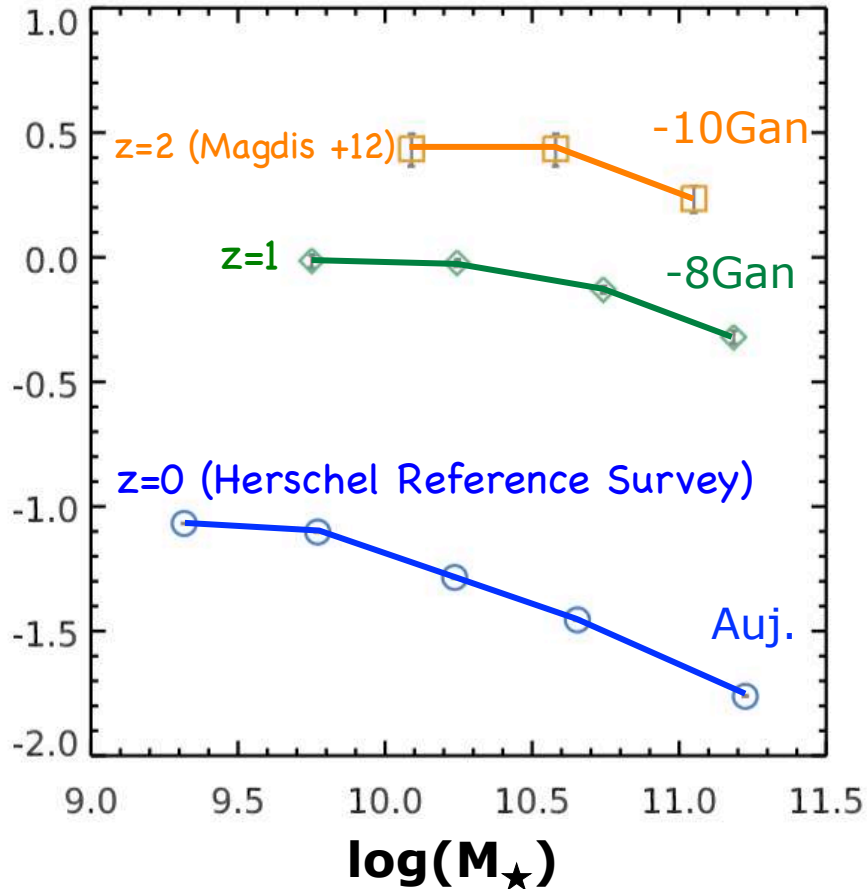
$$SFE = SFR / M_{\text{gaz}}$$

Efficacité de formation d'étoiles =
quantité d'étoiles formées
par « kg » de gaz interstellaire

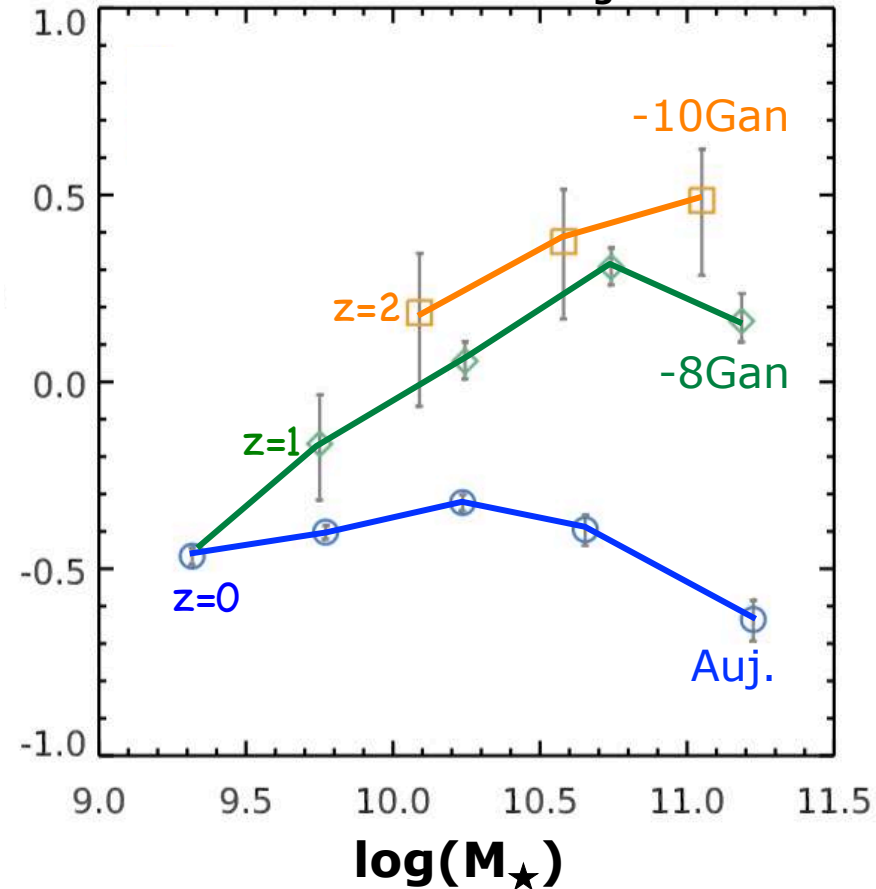
M_{\star}

La chute en sSFR est due à une chute en $SFE=SFR/M_{\text{gaz}}$

$\log(\text{sSFR}) = \log(\text{SFR}/M_{\star} [\text{Gyr}^{-1}])$

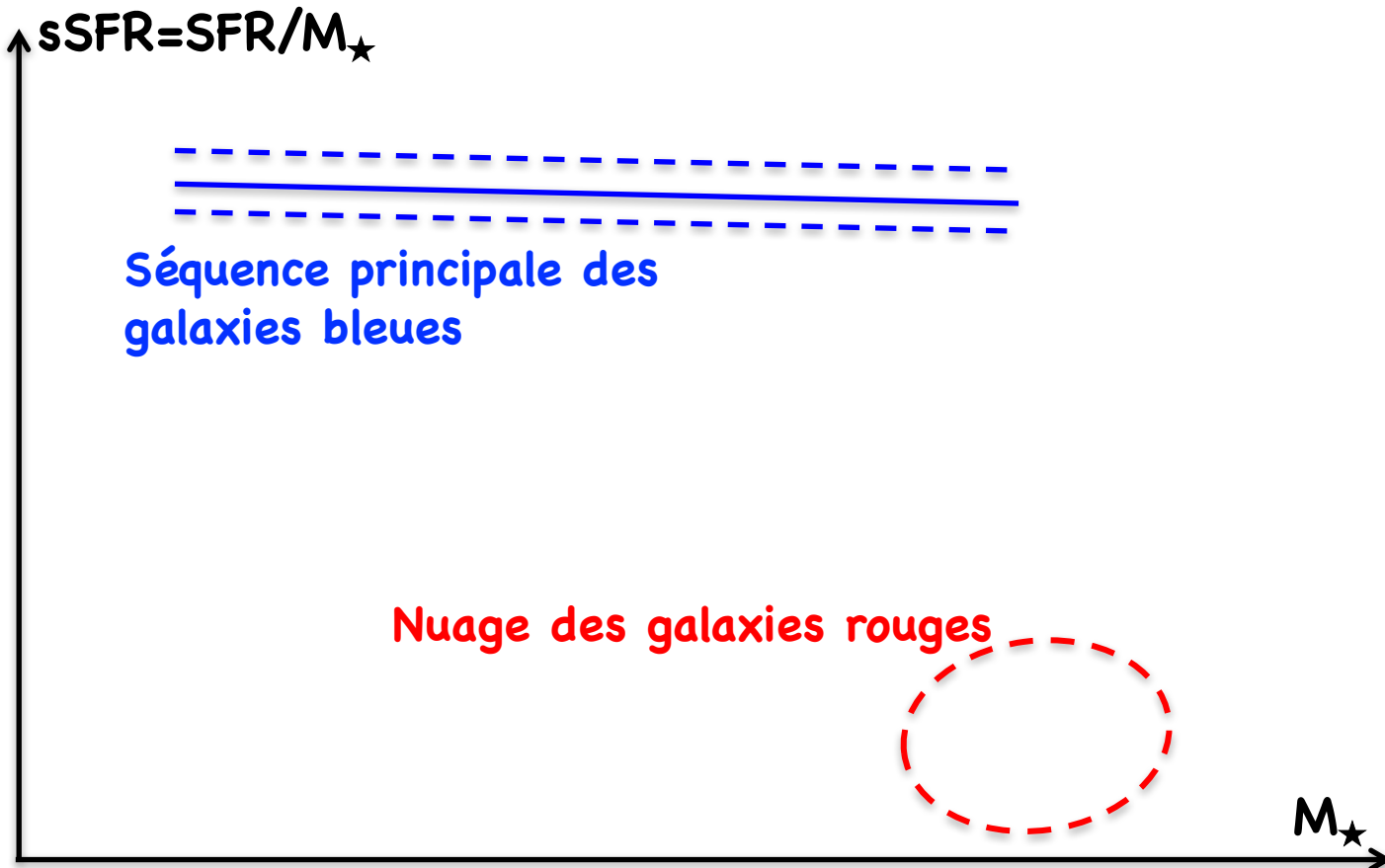


$\log(\text{SFE}) = \log(\text{SFR}/M_{\text{gas}} [\text{Gyr}^{-1}])$



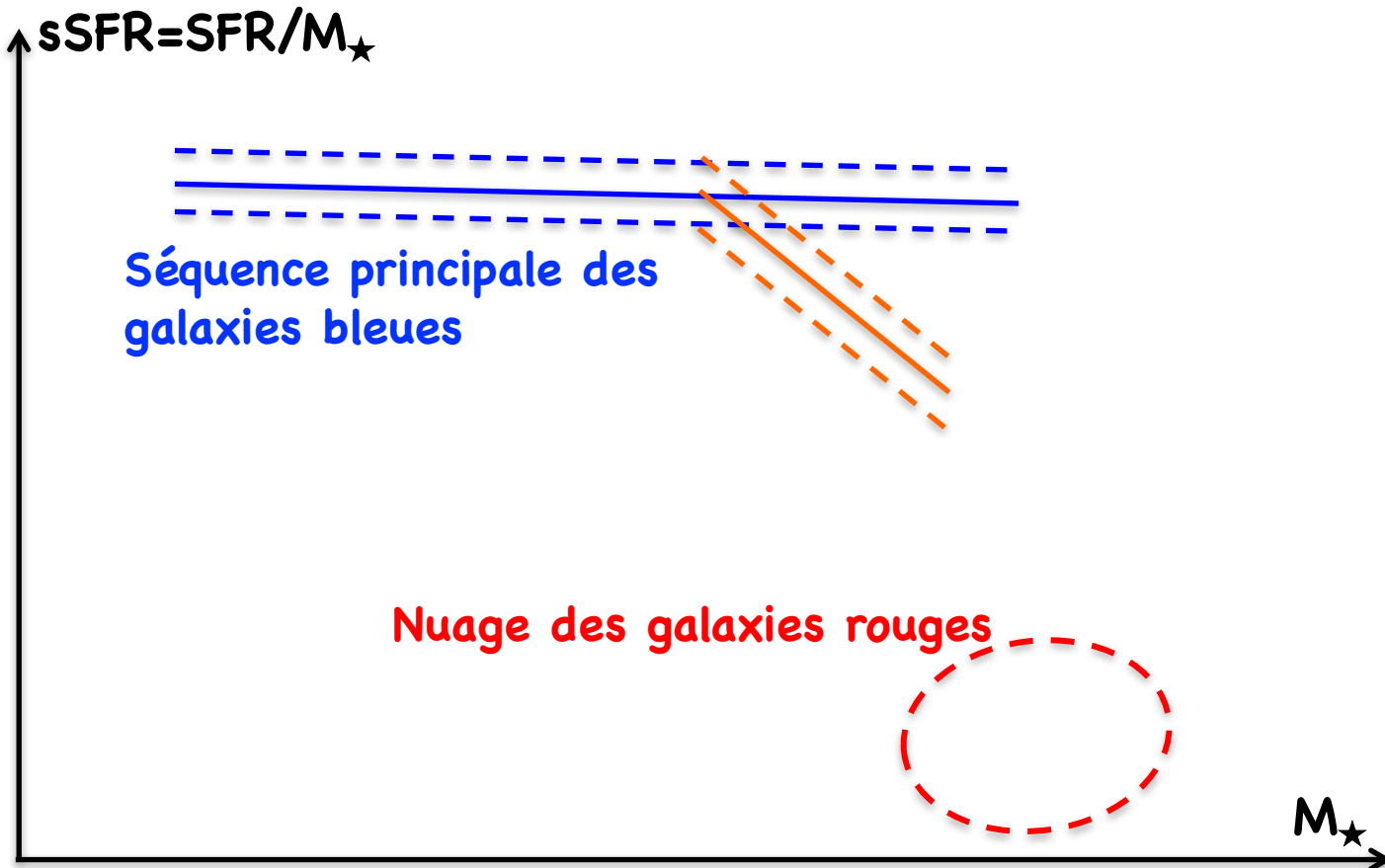
Schreiber, Elbaz et al. 2016

Taux spécifique de formation d'étoiles = quantité d'étoiles formées par « kg » de galaxie



Schreiber, Elbaz et al. 2016

Taux spécifique de formation d'étoiles = quantité d'étoiles formées par « kg » de galaxie



Naissance d'un grand cru galactique



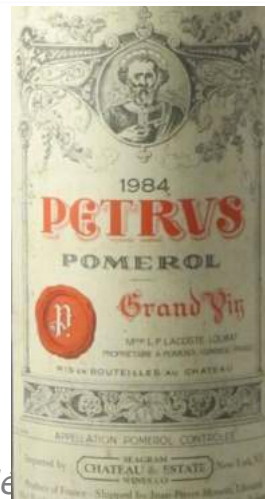
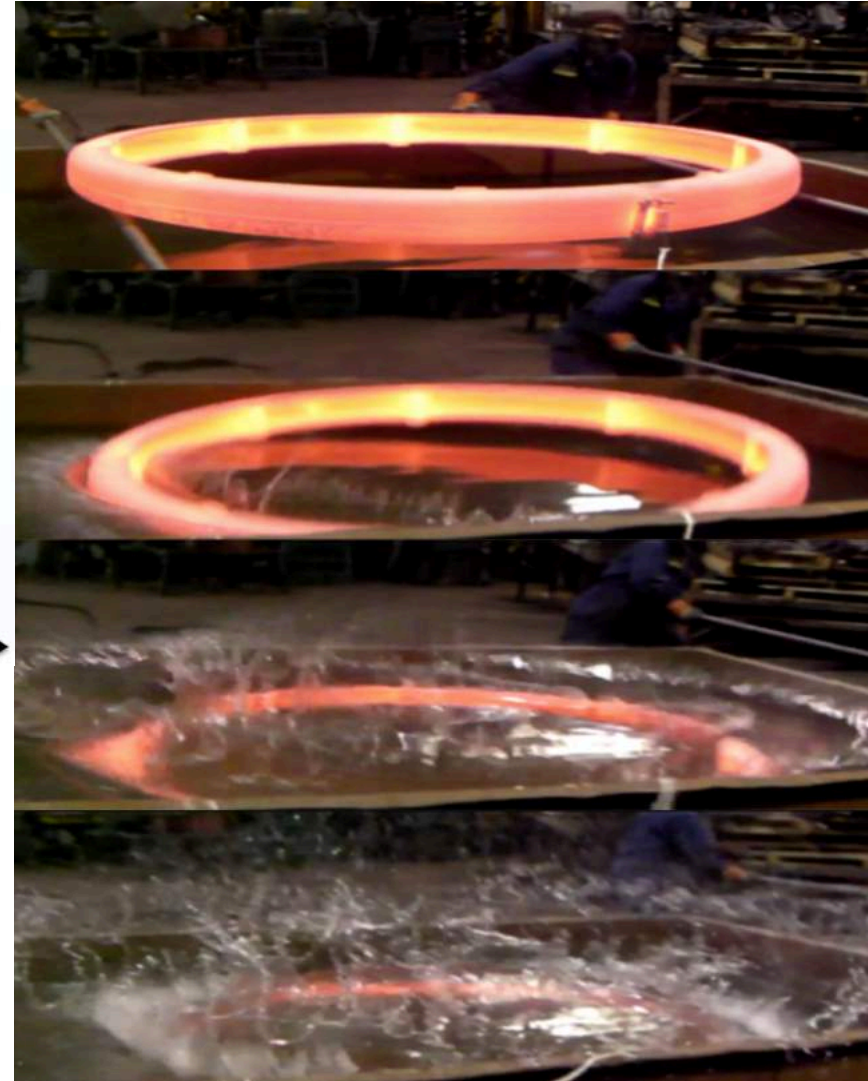
Les galaxies massives s'écoulent de la séquence principale comme du vin qui s'écoule d'une bouteille dans un verre. Au cours de la chute, elles acquièrent la belle couleur rouge du grand cru.

Les galaxies se saoulent-elles avant de mourir ?
Ou le paradogme du Château - Petrus

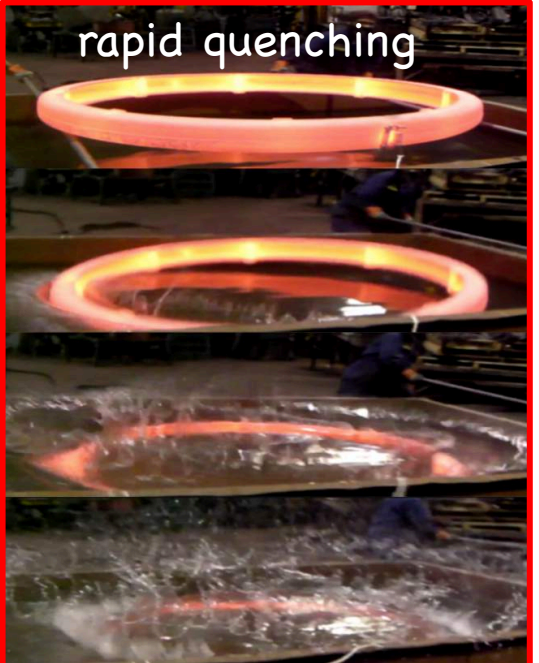
Chute lente ?



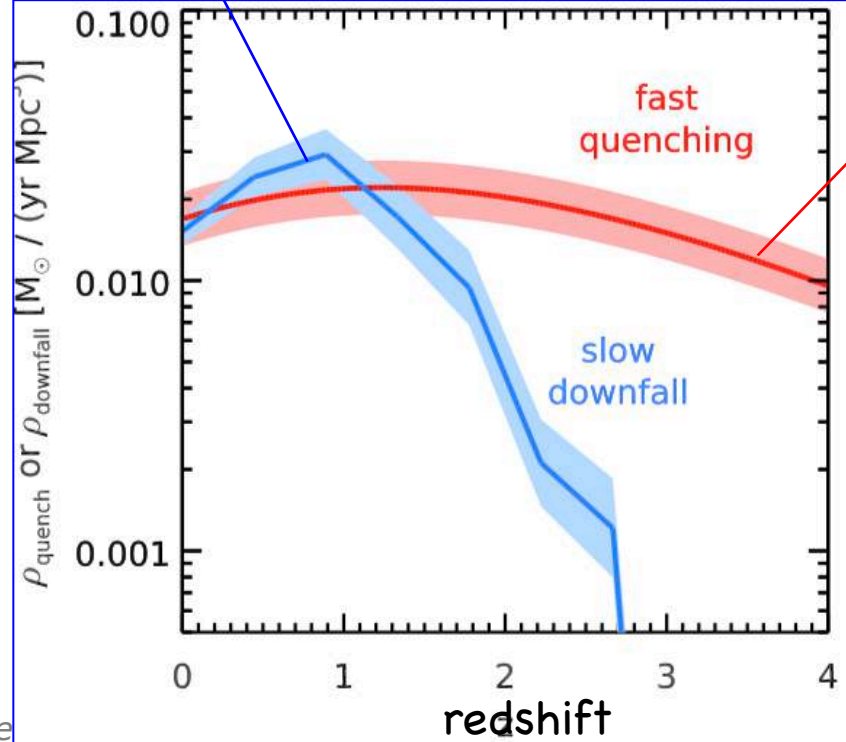
Quenching/trempage rapide ?



slow downfall rate= difference with no slope break



stellar mass density $\text{Mpc}^{-3} \text{yr}^{-1}$



assuming that all the U V J quiescent galaxies were quenched by a fast process

$$\rho_{\text{quench}} = \frac{d\rho_*^Q}{dt}$$

where :

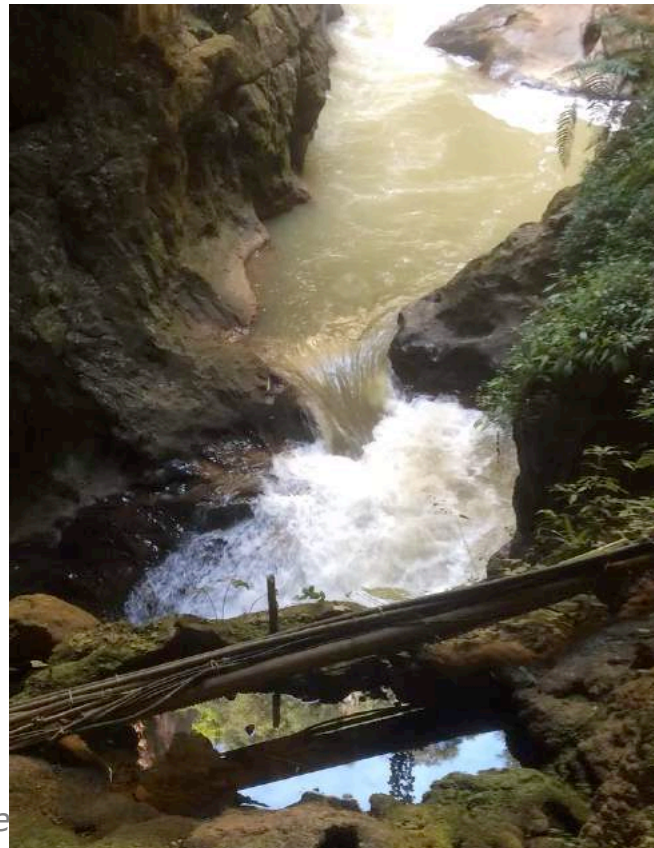
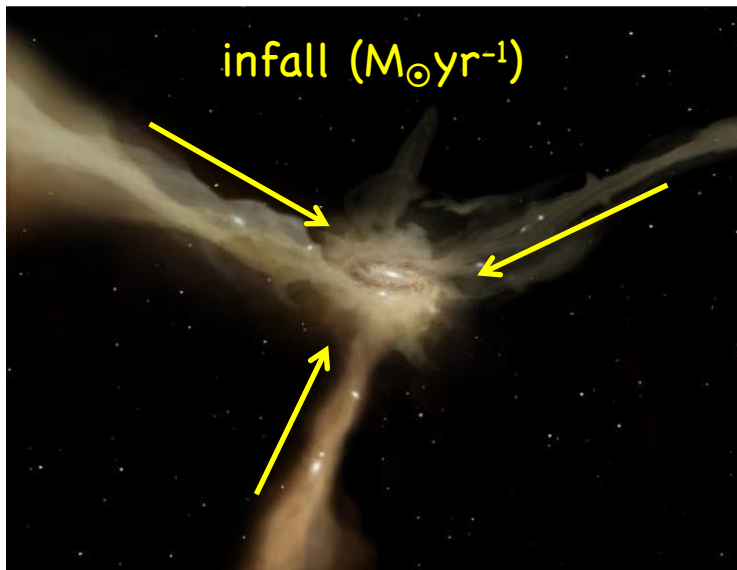
$$\rho_*^Q \left[\text{M}_\odot / \text{Mpc}^3 \right] = (2.6 \pm 0.7) \times 10^8 \exp(-z)$$

Une propriété liée à la masse des galaxies...

la masse creuse le puits de potentiel qui attire la matière intergalactique et nourrit une galaxie.

La profondeur du puits engendre l'intensité de l'apport de matière diffuse. Si le puits est trop profond, l'intensité dépasse un seuil qui engendre le chauffage de la matière et l'empêche de tomber

→ explique la mort par « asphyxie » des galaxies les plus massives.



Une propriété liée à la masse des galaxies...

la masse creuse le puits de potentiel qui attire la matière intergalactique et nourrit une galaxie.

La profondeur du puits engendre l'intensité de l'apport de matière diffuse.

Si le puits est trop profond, l'intensité dépasse un seuil qui engendre le chauffage de la matière et l'empêche de tomber

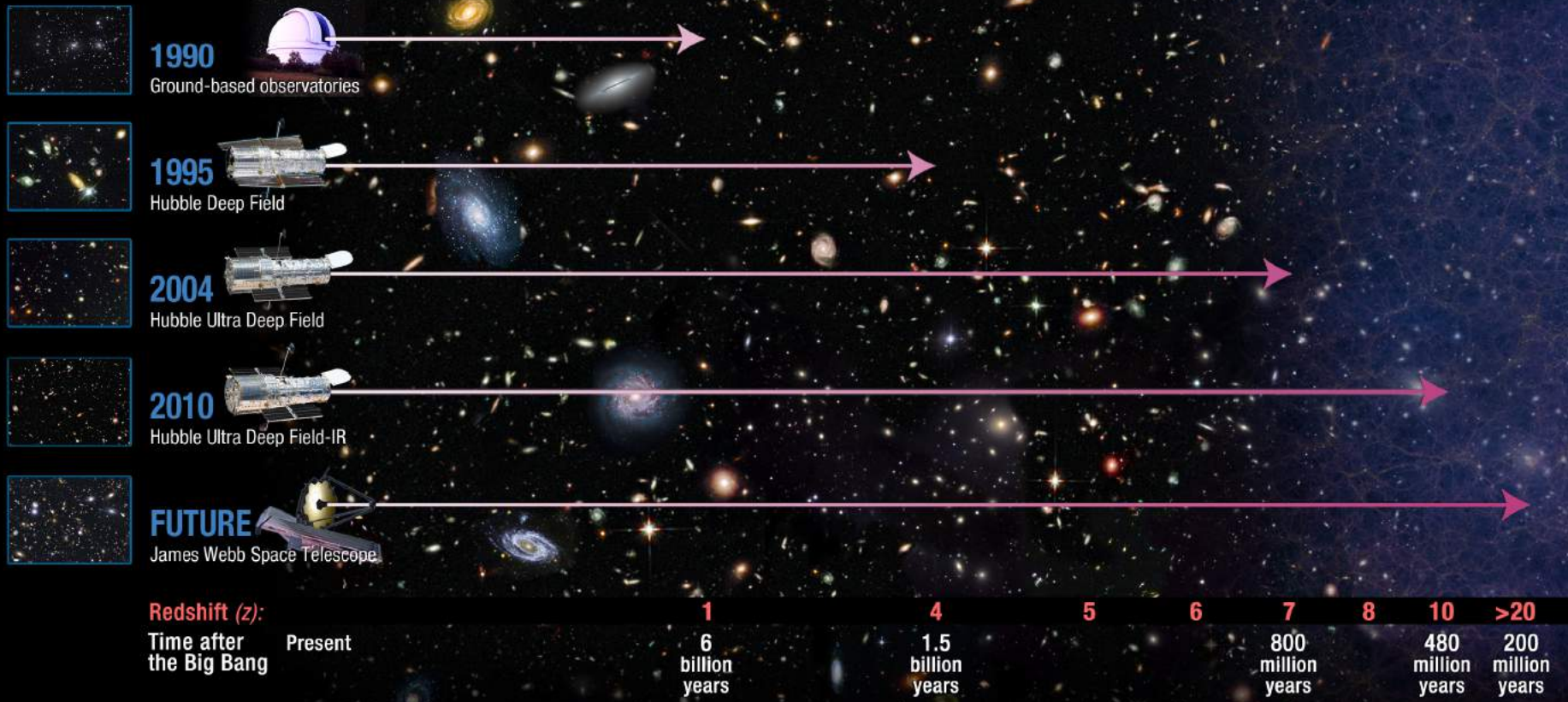
→ explique la mort par « asphyxie » des galaxies les plus massives.

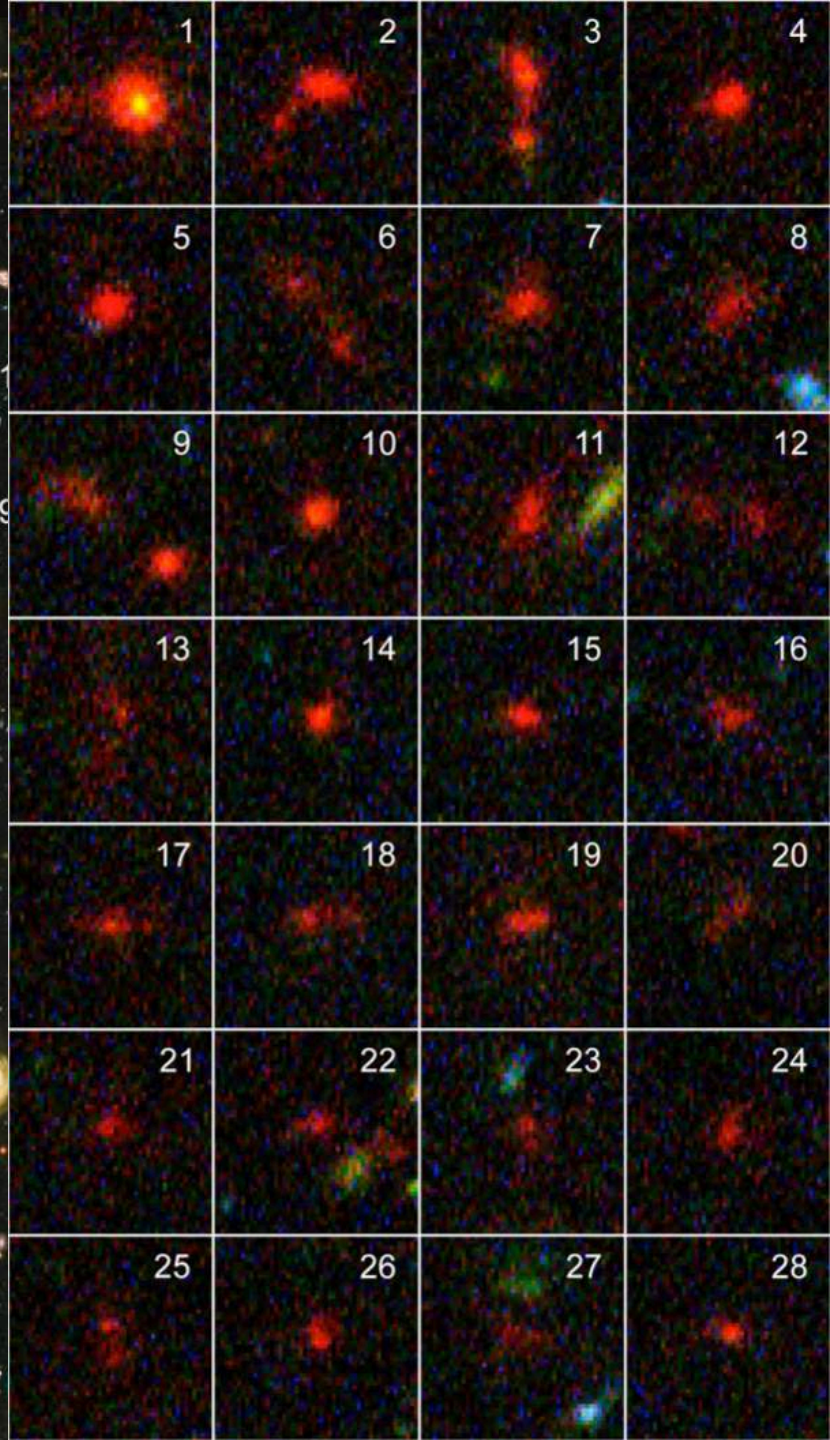
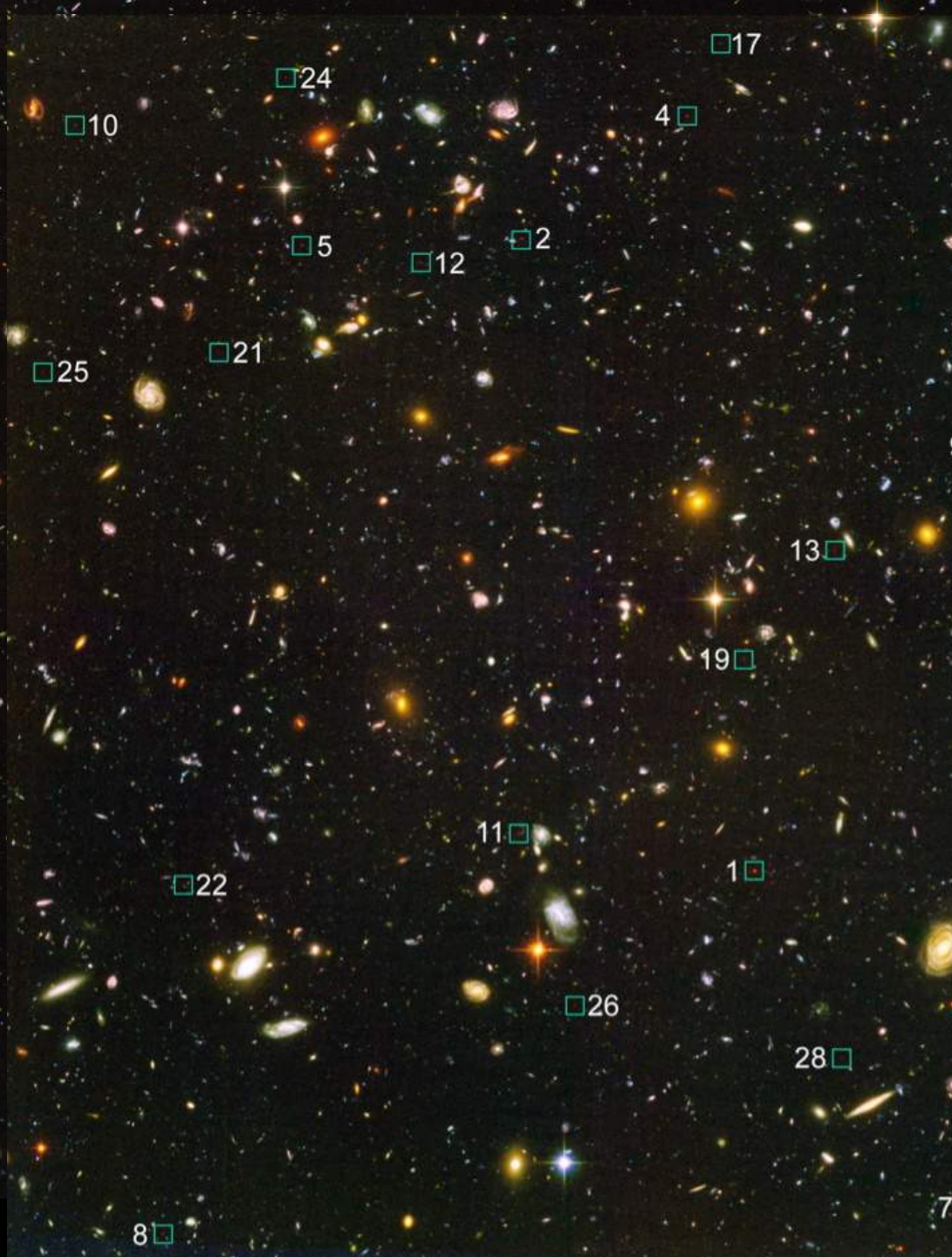
Des problèmes demeurent:

- Où sont passés les ancêtres-dinosaures des galaxies massives ?
- Les galaxies elliptiques distantes sont trop compactes pour être vraies...

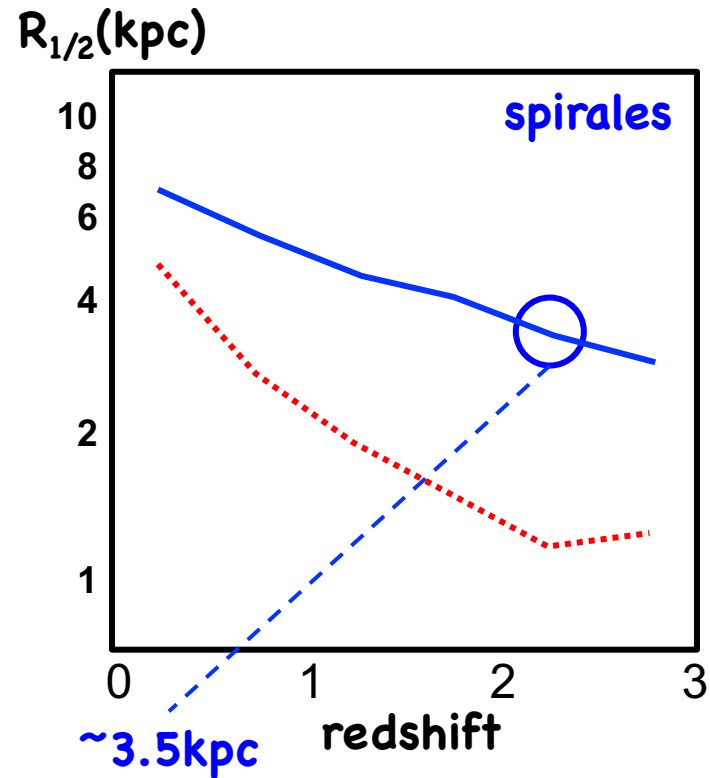
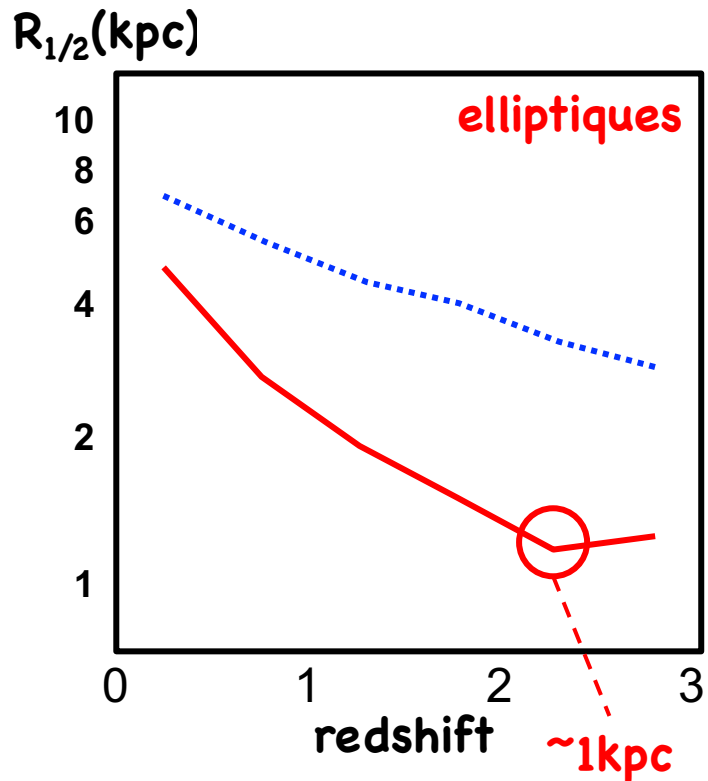
La clé de la mort des elliptiques
est-elle liée à leur naissance ?

Hubble Probes the Early Universe





Taille des galaxies bleues et rouges distantes ($z=2$)



$\text{Log}(M_{\star})=10.5-11$



Atacama Large Millimeter Array (ALMA)

Atacama Large Millimeter Array (ALMA) + Herschel + IRAM + SCUBA

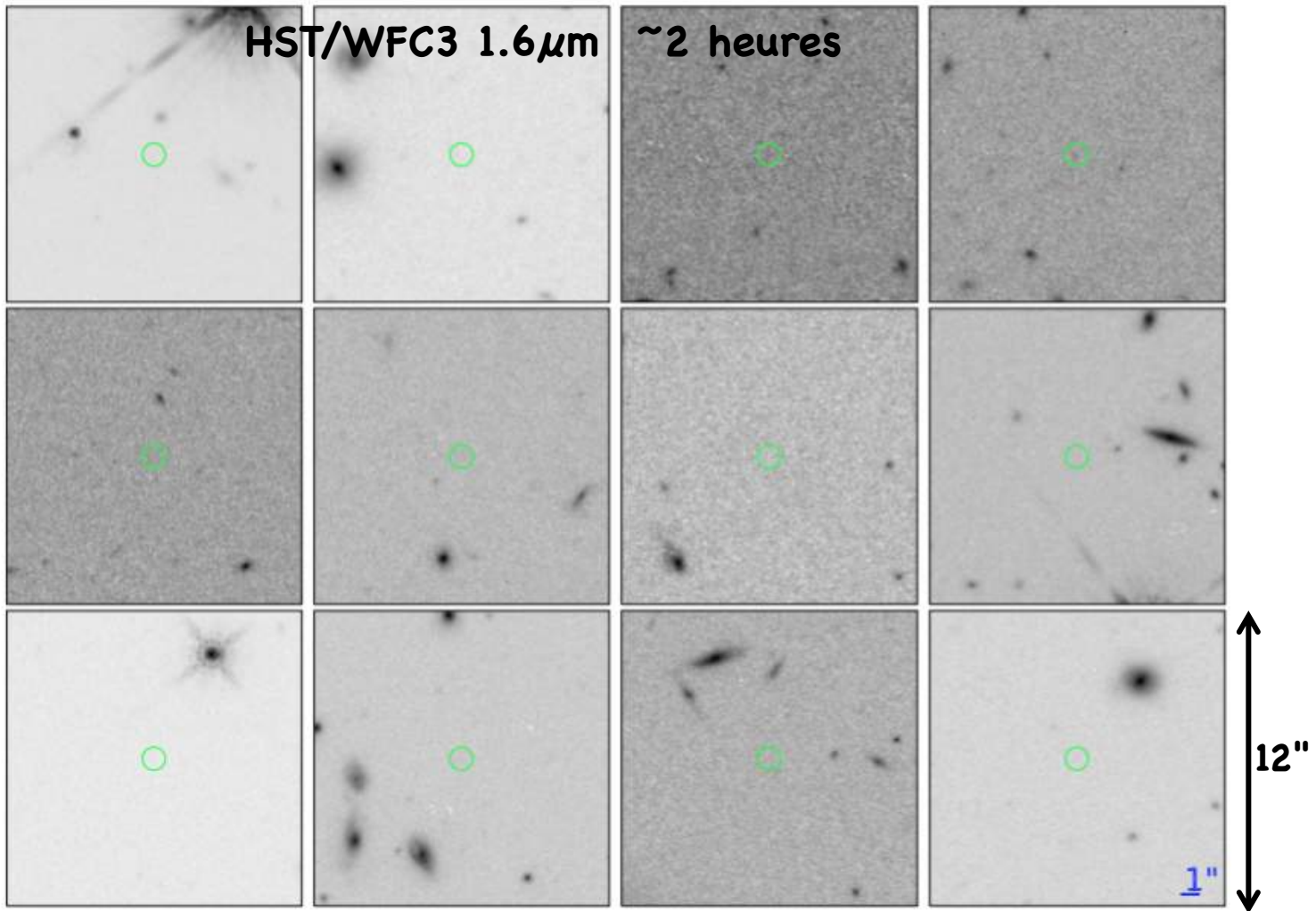
Ont révélé que les galaxies contenaient 5 fois plus de gaz dans le passé

Les simulations cosmologiques avec feedback ne retrouvent que $<20\%$!



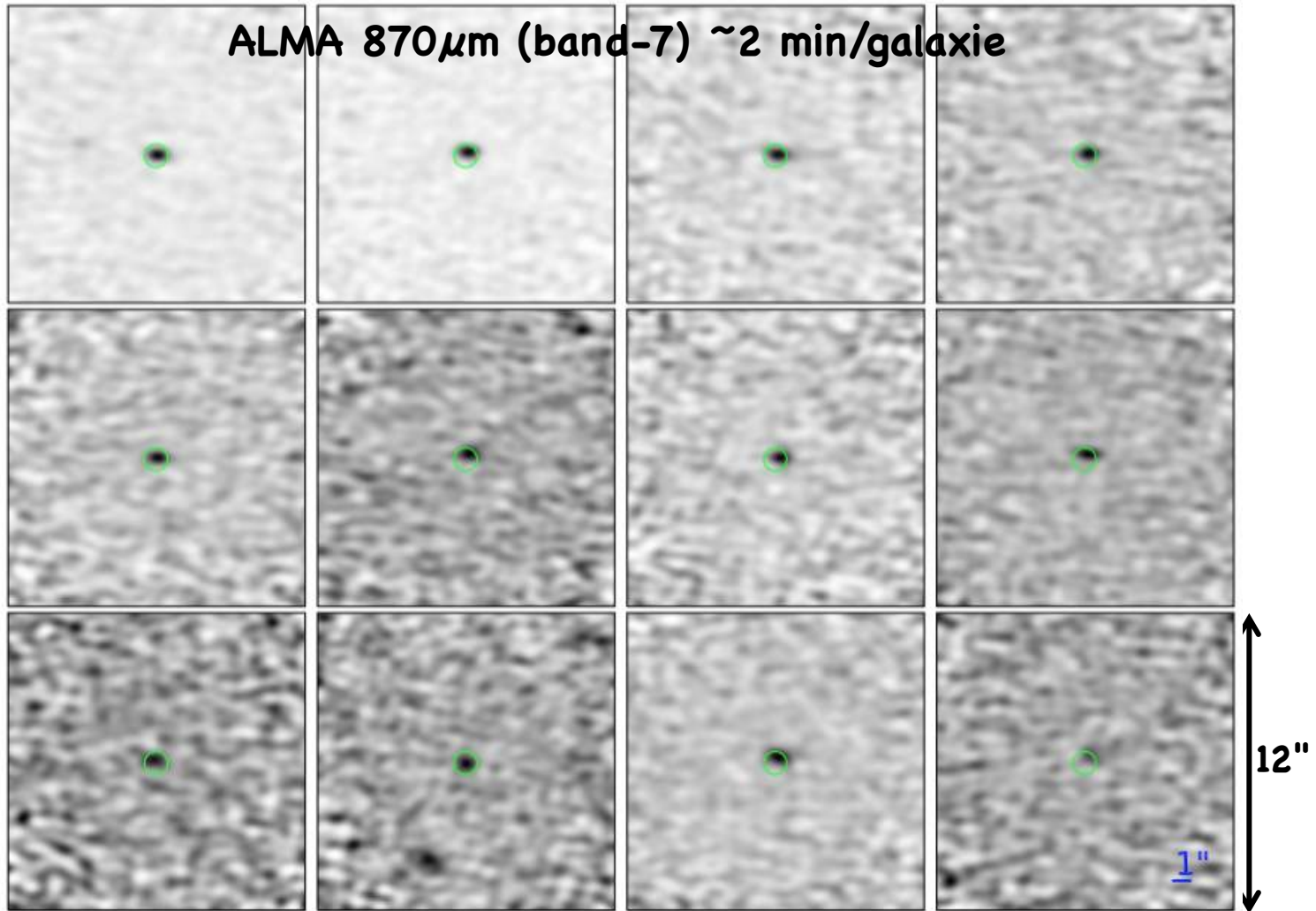
Les galaxies-dinosaures sont-elles invisibles au HST ?

Wang, Elbaz (+2017)



Les galaxies-dinosaures sont-elles invisibles au HST ?

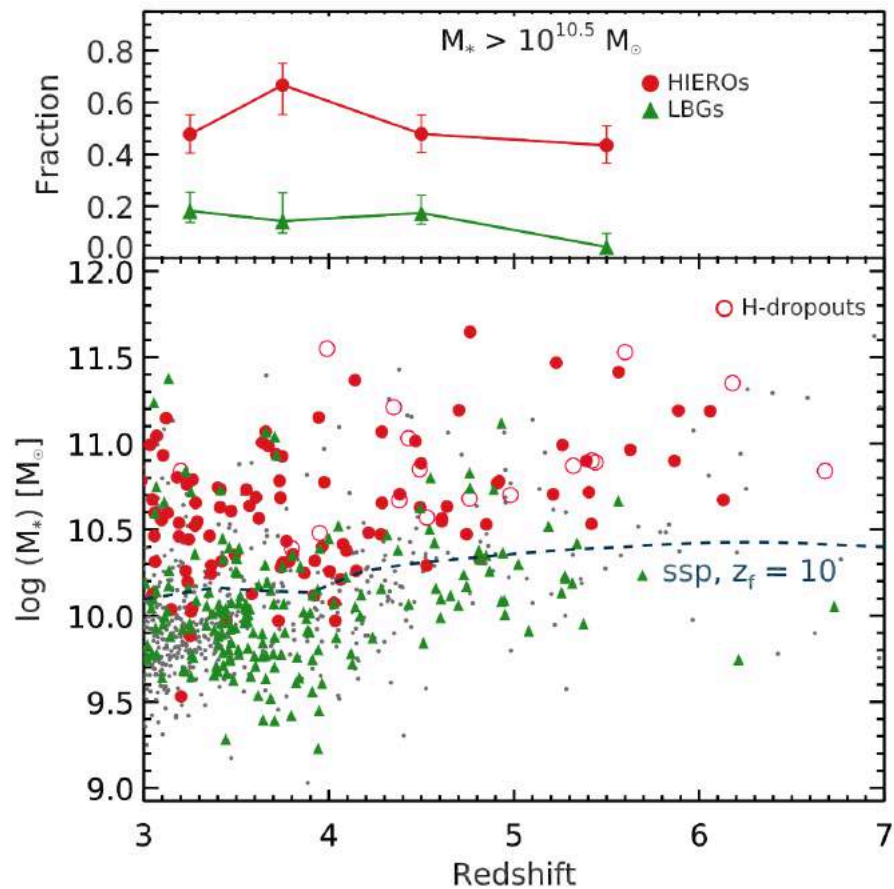
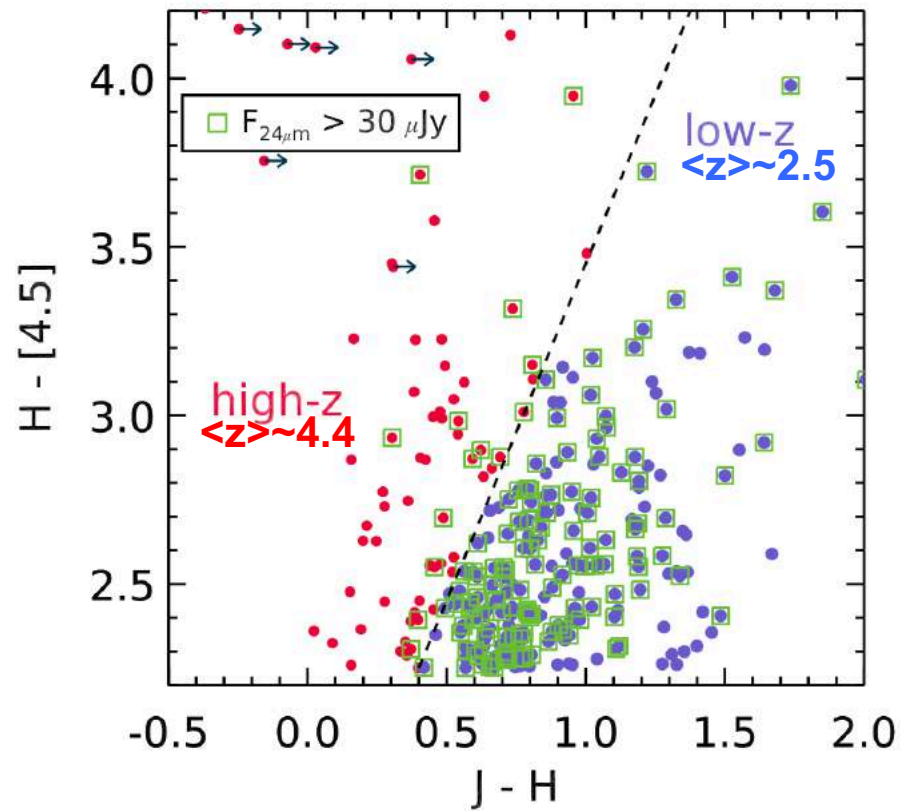
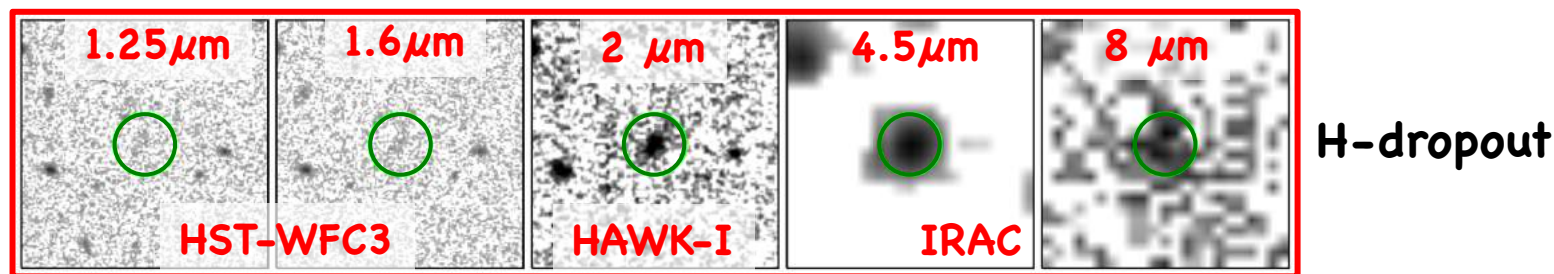
Wang, Elbaz (+2017)



INFRARED COLOR SELECTION OF MASSIVE GALAXIES AT $z > 3$

T. WANG (王涛)¹, D. ELBAZ¹, C. SCHREIBER¹, M. PANNELLA¹, X. SHU², S. P. WILLNER³, M. L. N. ASHBY³, J.-S. HUANG

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 816:84 (17pp), 2016



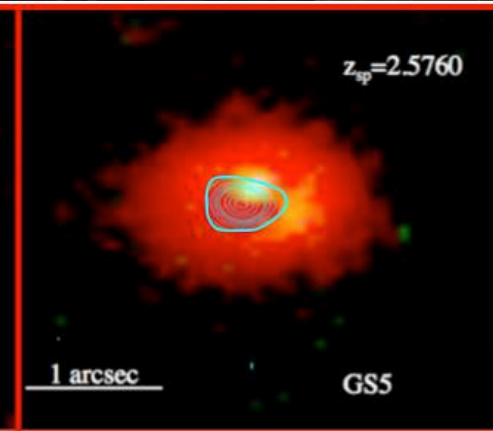
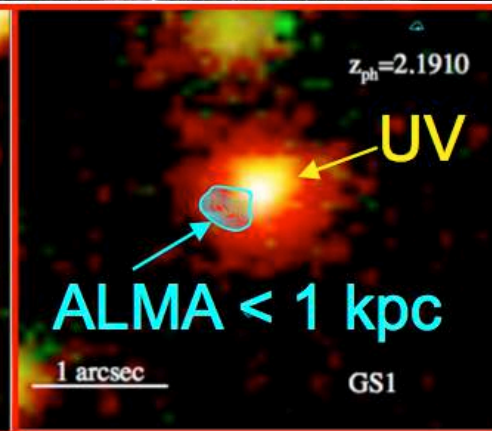
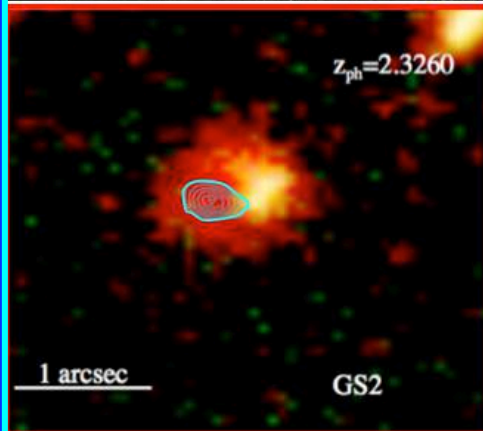
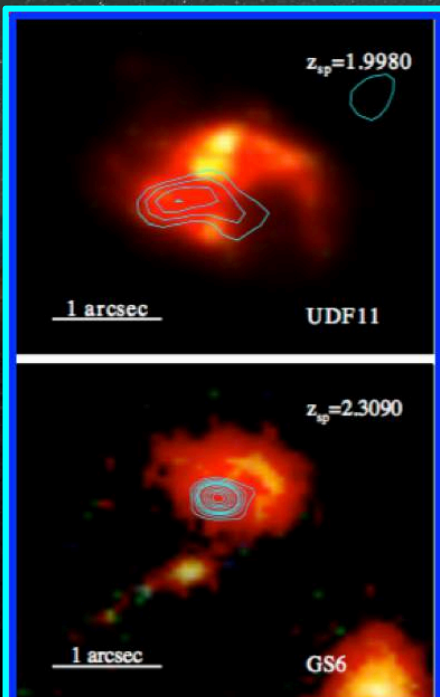
Atacama Large Millimeter Array (ALMA)

Atacama Large Millimeter Array (ALMA) + Herschel + IRAM + SCUBA

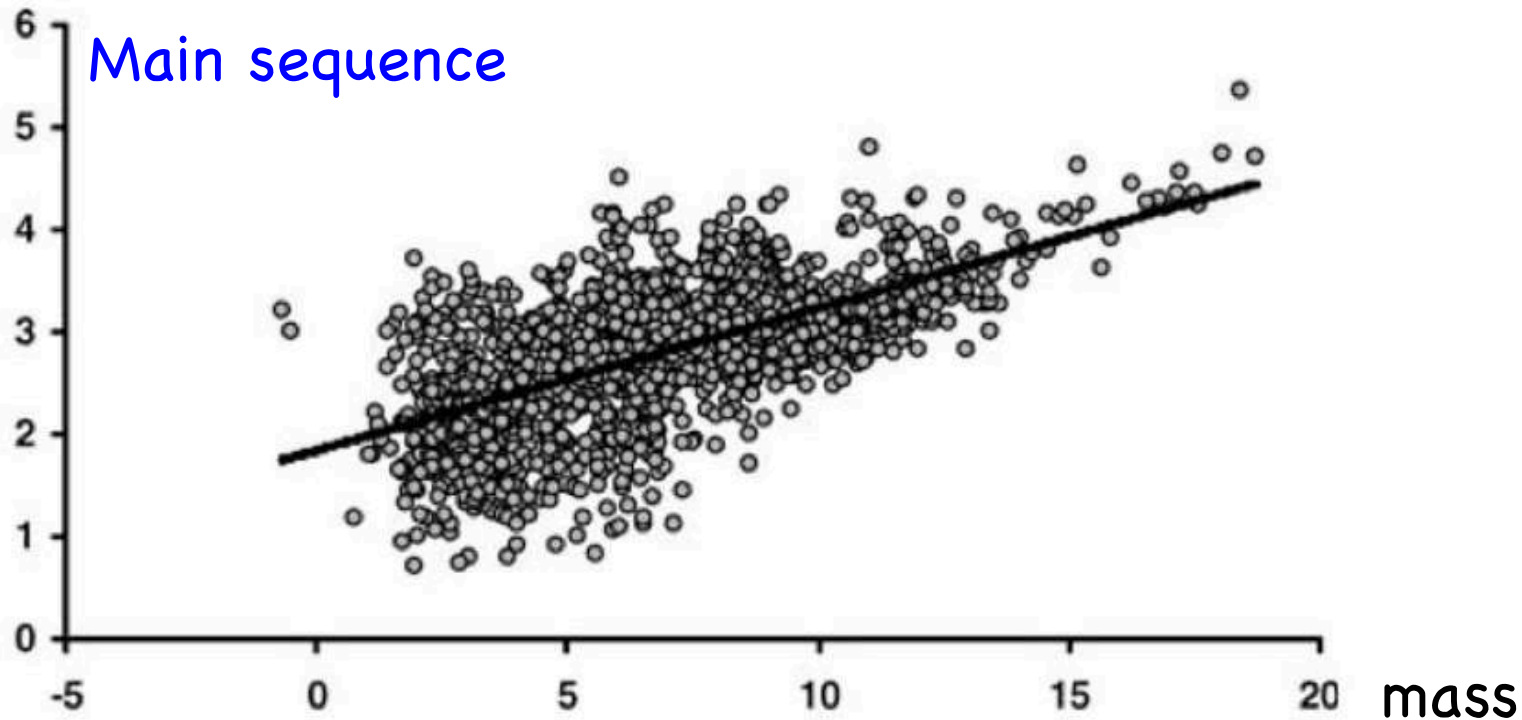
Ont révélé que les galaxies contenaient 5 fois plus de gaz dans le passé

Les simulations cosmologiques avec feedback ne retrouvent que $<20\%$!

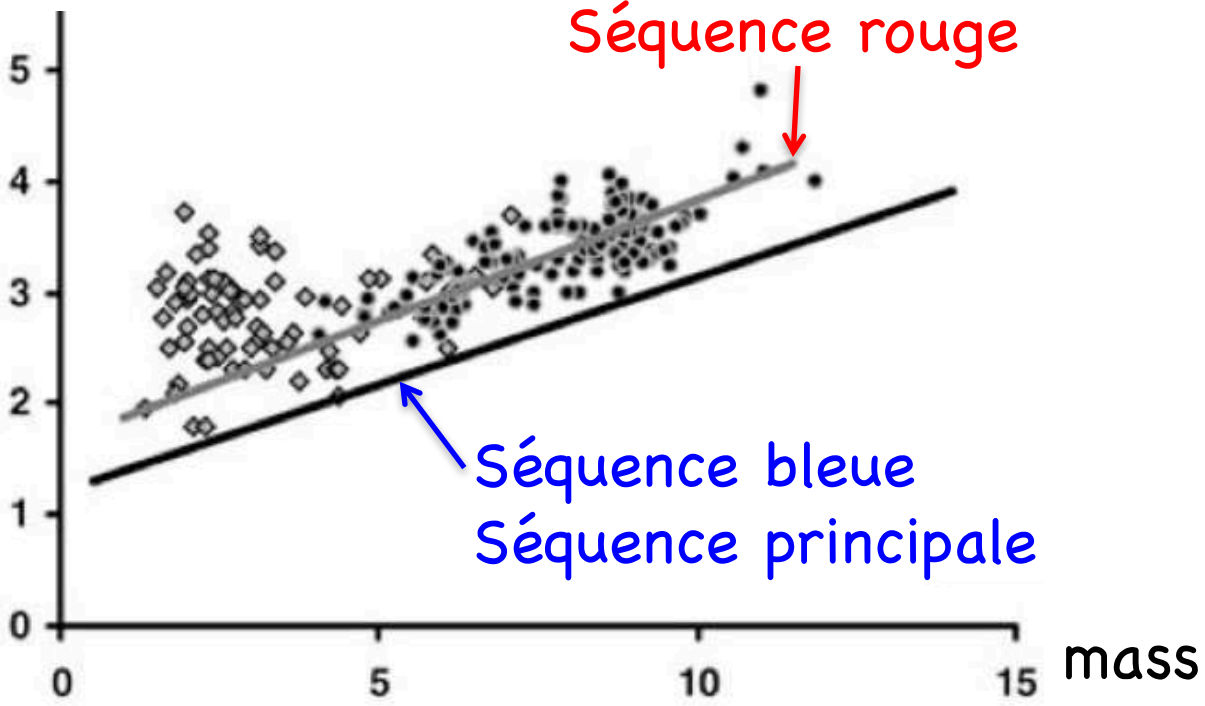
La résolution angulaire de l'interférométrie avec ALMA montre que la formation d'étoiles dans ces dinosaures galactiques était ultra-compacte
→ Comment l'expliquer ?...



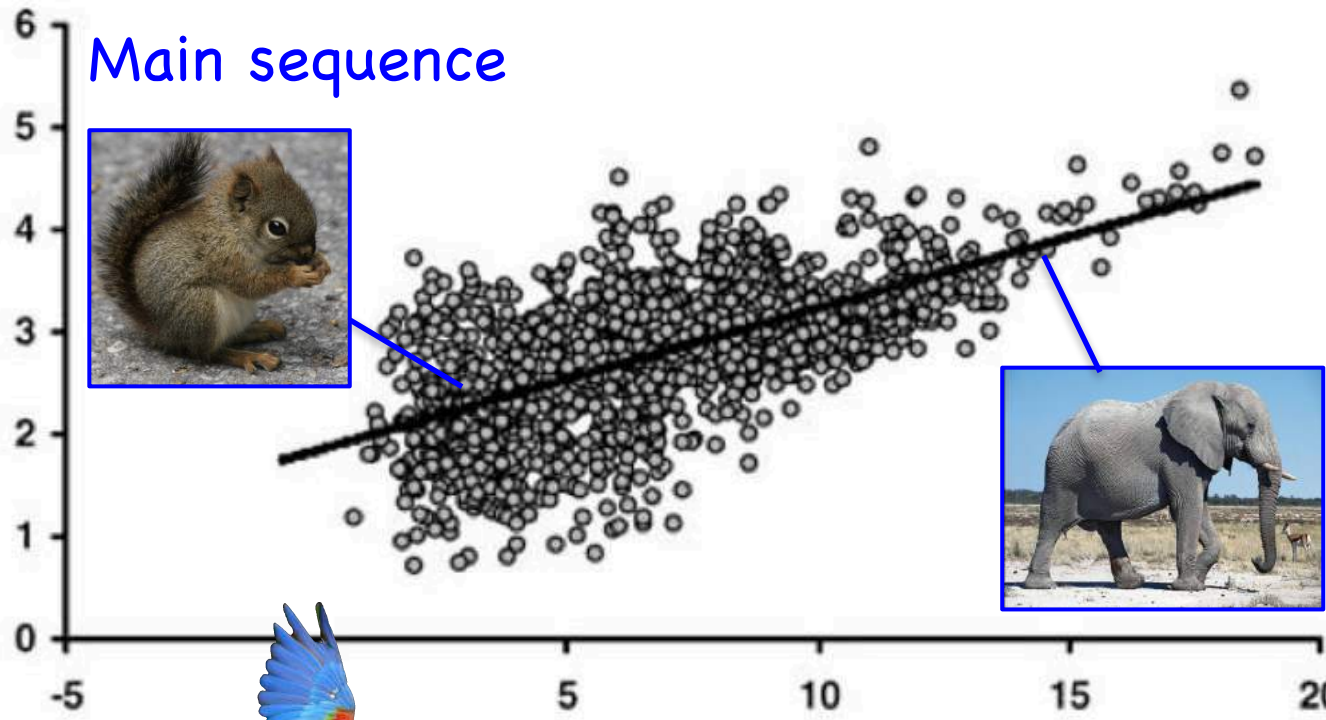
Main sequence



Séquence rouge



Main sequence



Espérance de vie

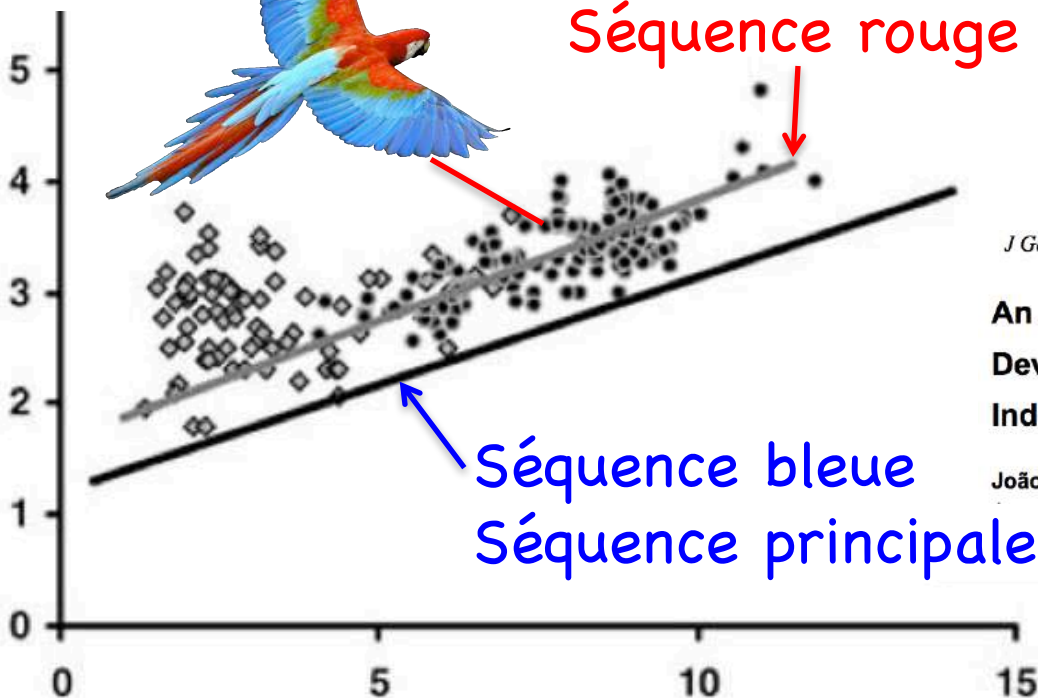
1 milliard de pulsations cardiaques

Analogie:
Rythme cardiaque
 $\sim 1/SFR$



mass

Séquence rouge



Séquence bleue
Séquence principale

J Gerontol A Biol Sci Med Sci. 2007 February ; 62(2): 149–160.

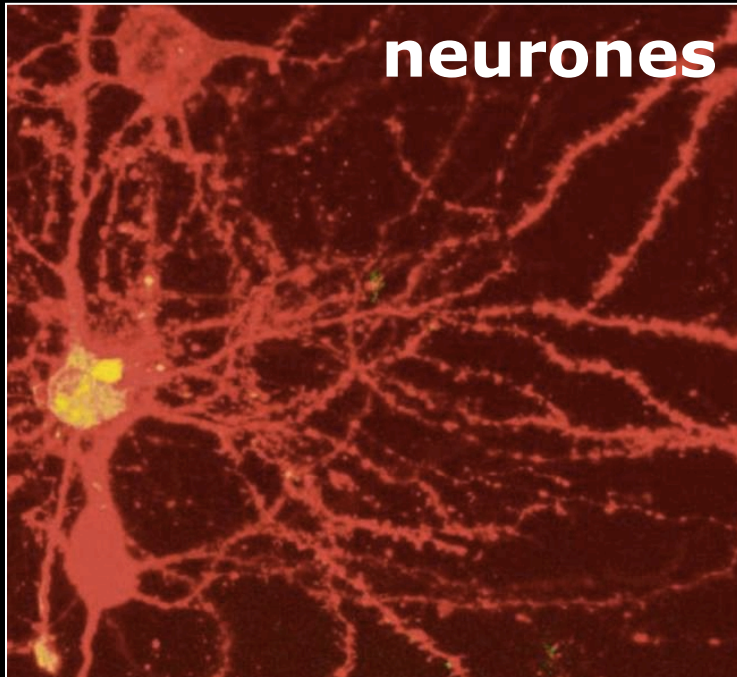
An Analysis of the Relationship Between Metabolism, Developmental Schedules, and Longevity Using Phylogenetic Independent Contrasts

João Pedro de Magalhães¹, Joana Costa², and George M. Church¹

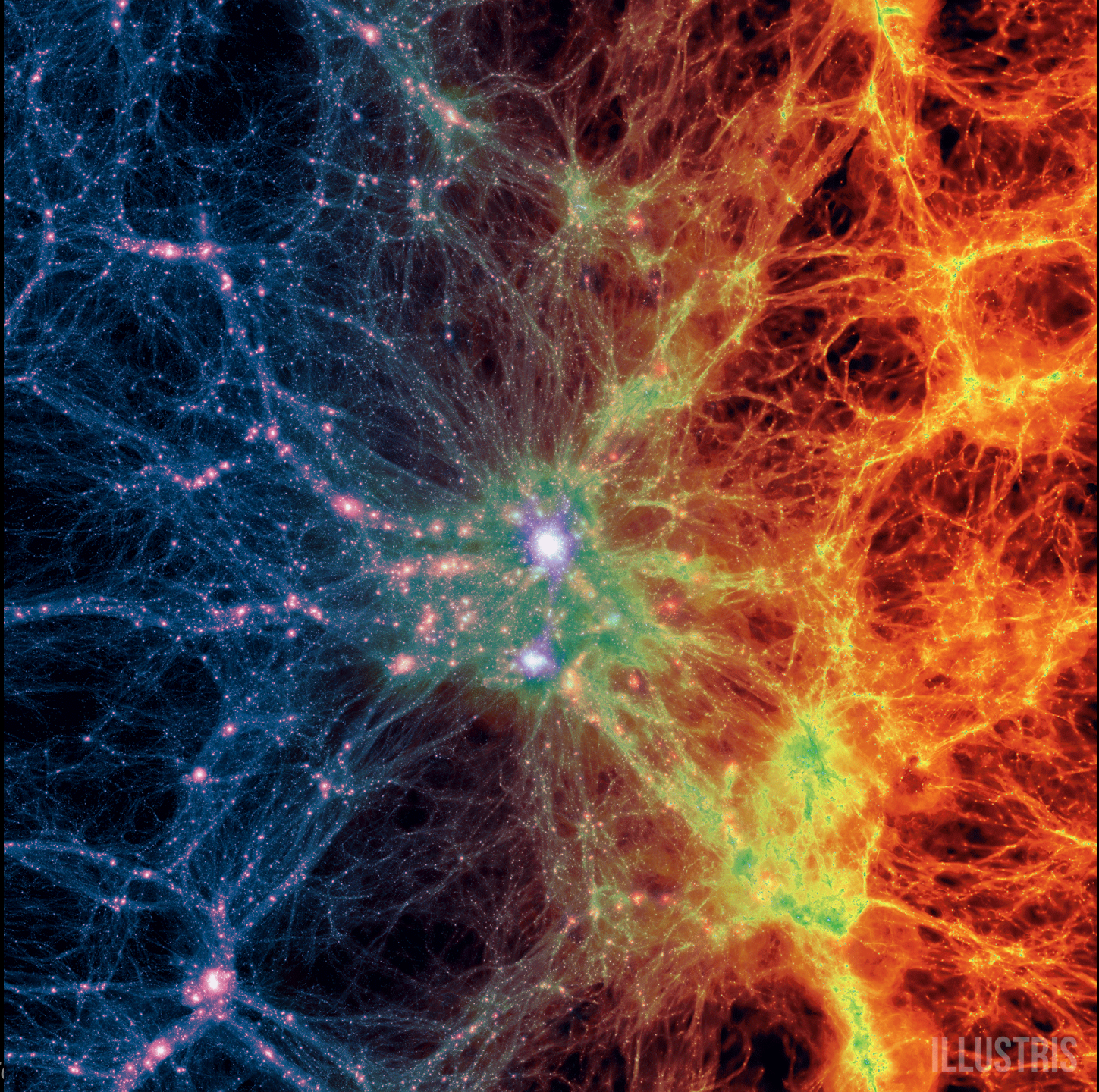
1456 mammals, birds, amphibians, reptiles

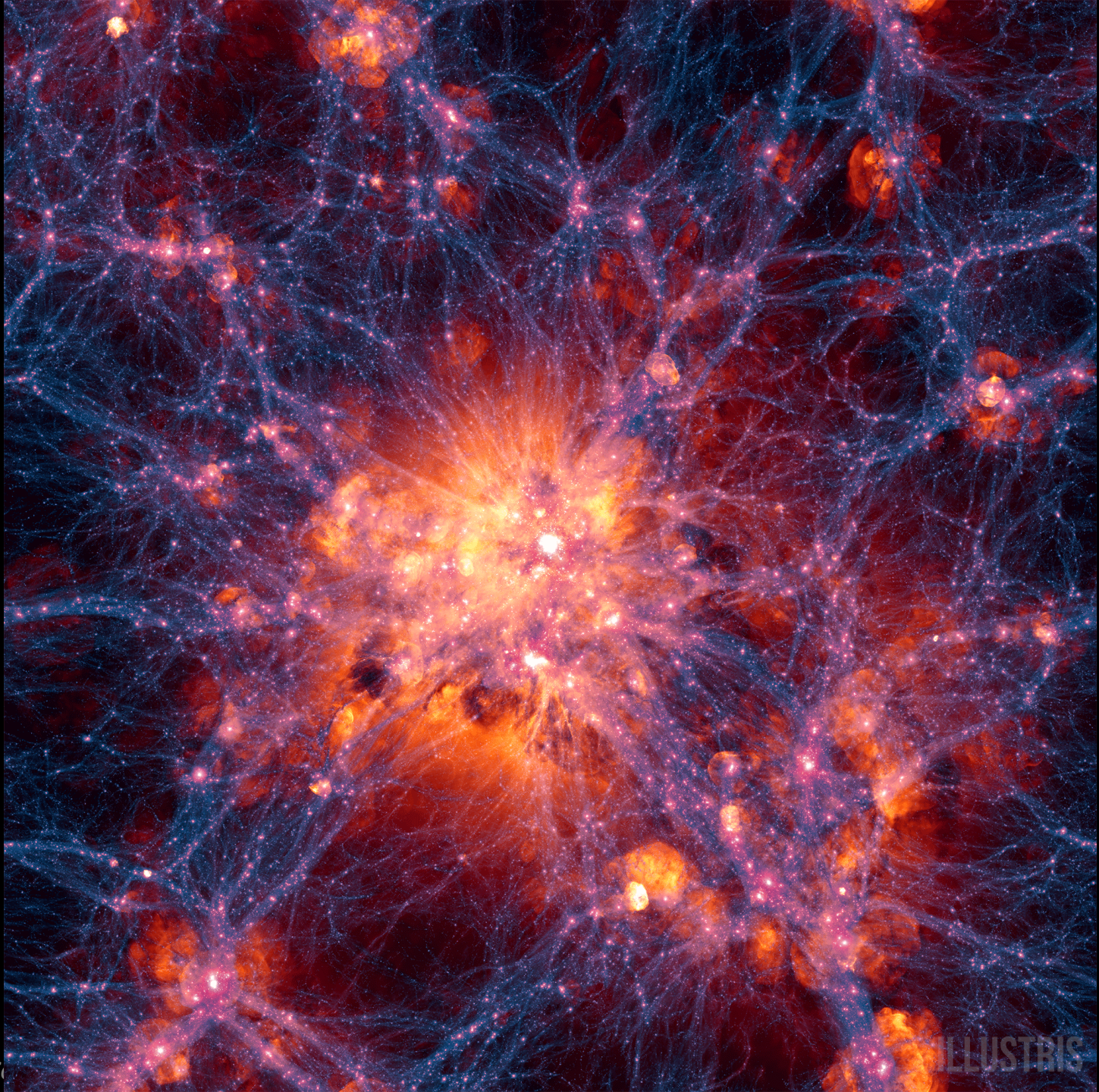
mass

Les galaxies sont analogues à des cellules de l'univers.
Comme nos neurones, elles peuvent être excitées ou inhibées
= le *feedback*



<0 ou >0 le feedback est engendré par les supernovae, les trous noirs (jets et pression radiative), la pression radiative des étoiles.





Séquence rouge et nuage bleu

Une enquête sur l'origine de la bimodalité des galaxies

David Elbaz – CEA Saclay

Le problème reste ouvert:

*le feedback engendre de nouveaux problèmes
quand il en résoud certains
et son efficacité est surestimée d'après les
simulations hydrodynamiques à haute résolution*



*La complexité des galaxies est encore cachée à nos observatoires:
Un éléphant n'est pas un écureuil...*

FUTUR: ALMA, JWST, SKA, Euclid, E-ELT