

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

cea

Congrès SFP 2013

Marseille

04/07/2013



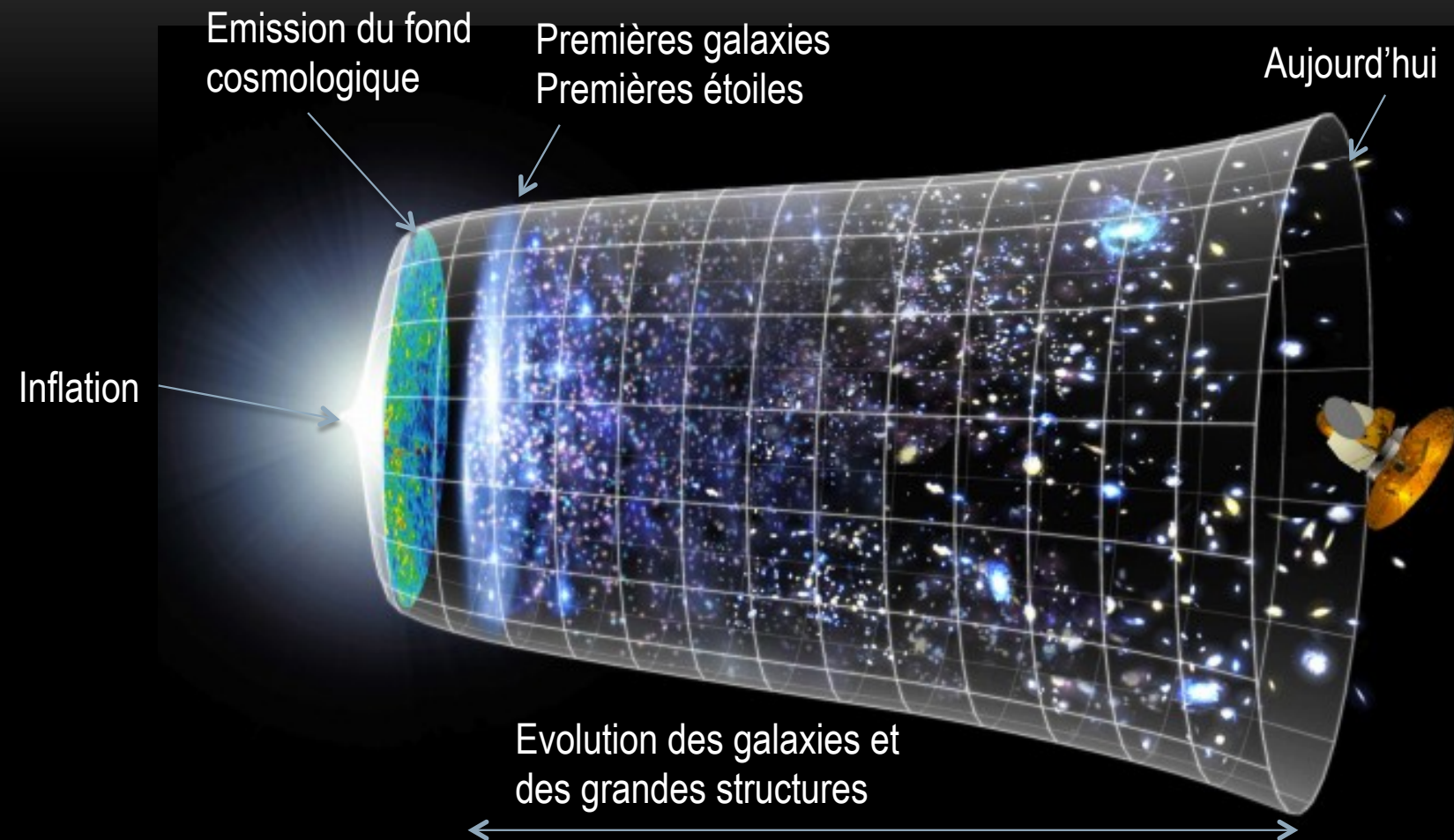
Agence Nationale de la Recherche
ANR

OÙ SE FORMENT ET VIVENT LES ÉTOILES À GRAND REDSHIFT?

Matthieu Béthermin

Service d'astrophysique (DSM/IRFU/SAp), CEA Saclay

FORMATION DES GALAXIES DANS LE CONTEXTE COSMOLOGIQUE



COMMENT COMPRENDRE L'EVOLUTION DES GALAXIES DANS LE CONTEXTE COSMOLOGIQUE?

Une vision simplifiée: accrétion des baryons dans les halos de matière noire, refroidissement du gaz et formation d'étoiles

MAIS des questions importantes en suspens:

- Formation d'étoiles trop efficace dans les structures de faibles masses dans les modèles
- Rétroaction des noyaux actifs de galaxies invoquée pour expliquer la faible formation d'étoiles dans les galaxies massives mal comprise
- Formation d'étoiles séculaire ou par flambées? (courant de gaz froid vs fusions)

COMMENT COMPRENDRE L'EVOLUTION DES GALAXIES DANS LE CONTEXTE COSMOLOGIQUE?

Une vision simplifiée: accrétion des baryons dans les halos de matière noire, refroidissement du gaz et formation d'étoiles

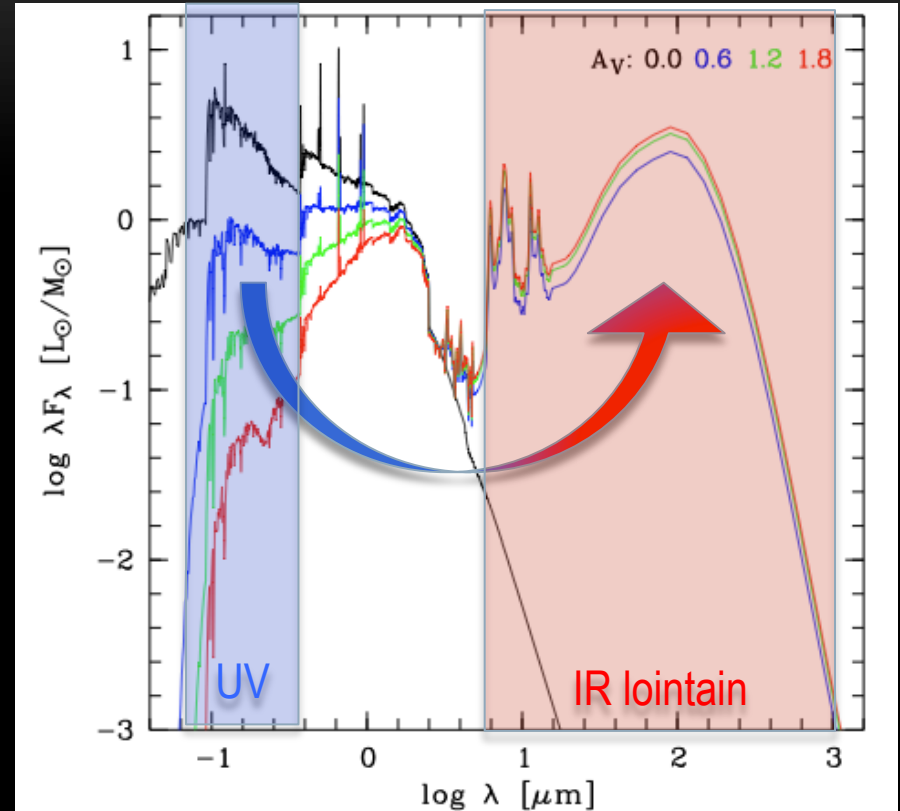
MAIS des questions

- Formation des galaxies: comment se fait-elle?
- Rétroaction: comment expliquer les galaxies massives mais compactes?
- Formation d'étoiles séculaire ou par flambées? (courant de gaz froid vs fusions)

Nécessité d'identifier observationnellement où, quand et comment se forment les étoiles au sein des grandes structures de l'Univers

ESTIMATION DU TAUX DE FORMATION D'ÉTOILES DANS LES GALAXIES DISTANTES

- A partir de l'UV: émission d'une galaxie dominée par les étoiles massives, chaudes et de courtes durée de vie.
- A partir de la raie d'émission H α : fortement liée aux régions de formation d'étoiles, MAIS nécessite spectroscopie
- PROBLEME: UV et H α sont en partie absorbée par la poussière contenue dans les galaxies, mais des techniques permettent corriger cet effet.
- Ré-émission dans l'infrarouge lointain de la poussière chauffée par l'UV= bon traceur de la formation d'étoiles, MAIS sensibilité des instruments infrarouges limitée.

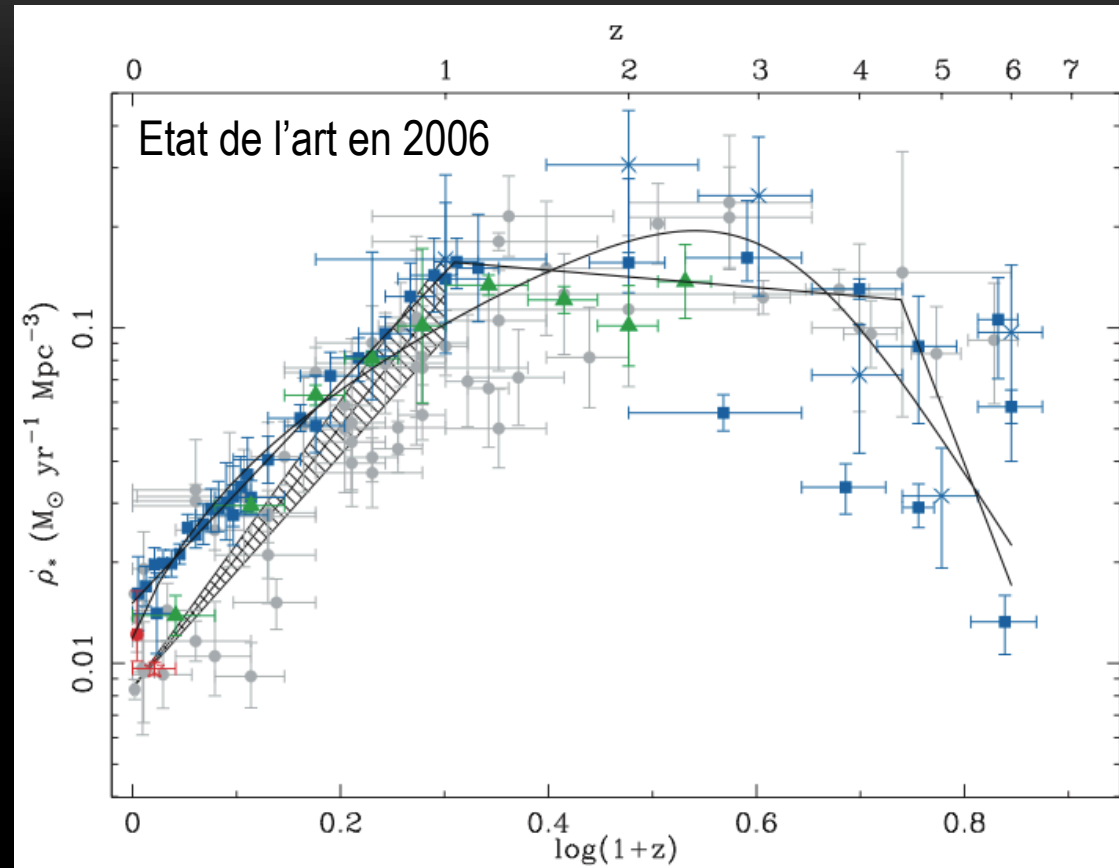


Spectre d'une galaxie de l'UV à l'infrarouge
issue du code CIGALE (Noll+09)

Voir aussi la présentation de Denis Burgarella sur le lien entre formation d'étoiles tracées par l'UV et par infrarouge lointain

HISTOIRE DE FORMATION D'ÉTOILES DANS L'UNIVERS

- Diminution de la formation d'étoiles depuis $z=1$.
- Pas d'évolution claire entre $z=1$ et $z=3$.
- Grosses incertitudes à $z>3$.
- Incohérences significatives entre les différentes mesures.



Evolution du taux de formation d'étoiles par unité de volume comobile en fonction du redshift (Hopkins&Beacom 2006)

UNE VUE NOUVELLE SUR L'UNIVERS INFRAROUGE AVEC HERSCHEL ET PLANCK



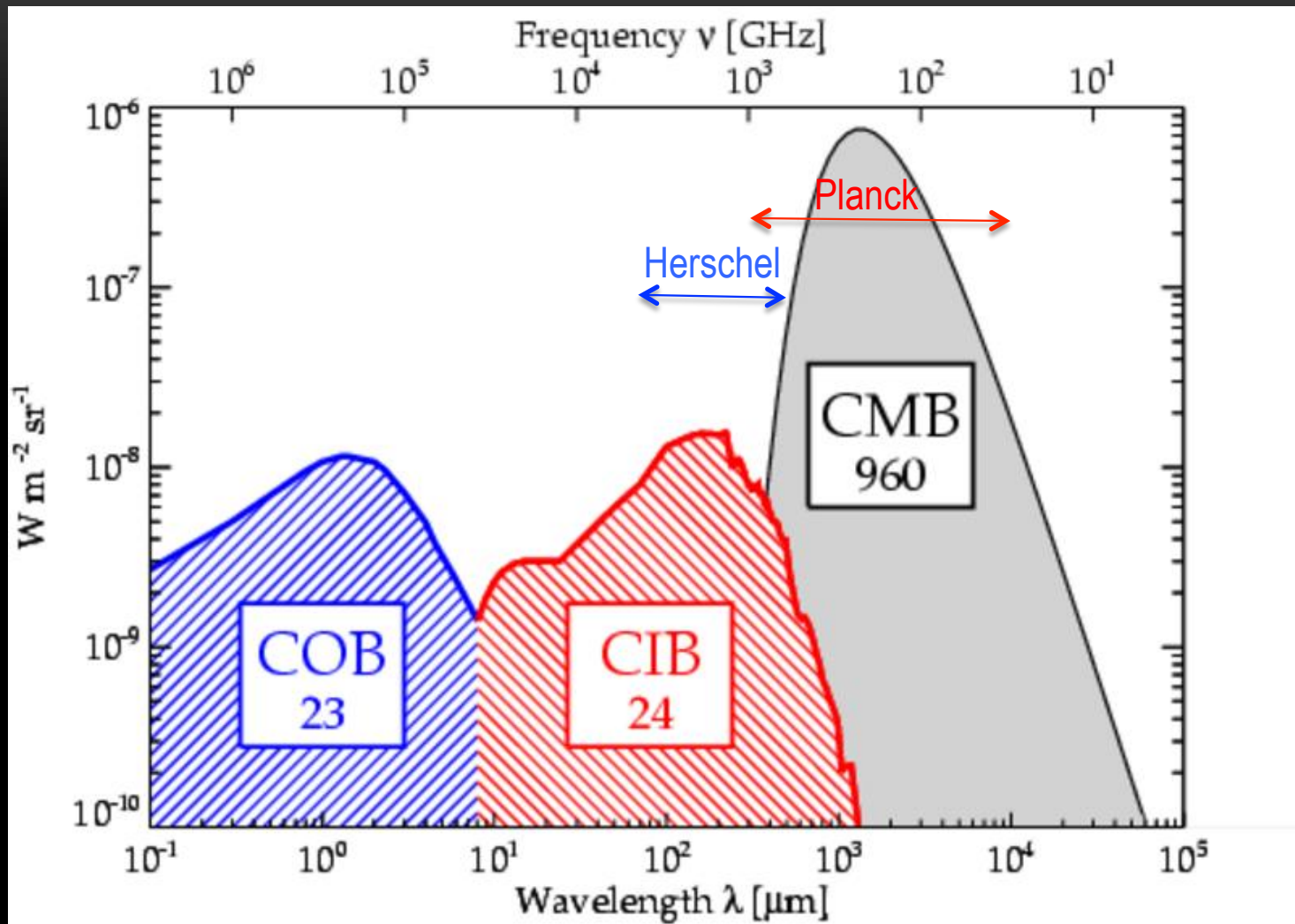
- Observations entre 60 et 600 microns
- “Bonne” résolution angulaire: 4.5” (70 microns) à 36” (500 microns)
- Observe de petites régions du ciel



- Observations entre 350 et 3000 microns (pour l'instrument HFI)
- Faible résolution angulaire: ~5 arcmin mais très stable aux grandes échelle
- Relevé du ciel complet

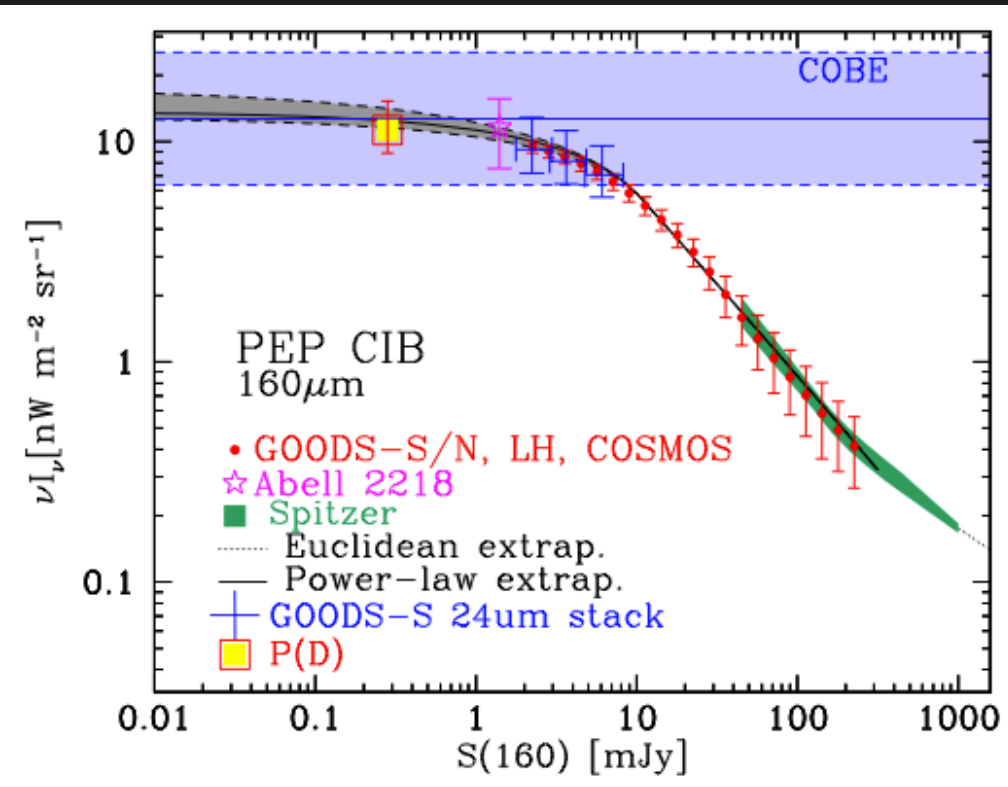
Lancé en tandem en mai 2009

LE FOND DE RAYONNEMENT INFRAROUGE



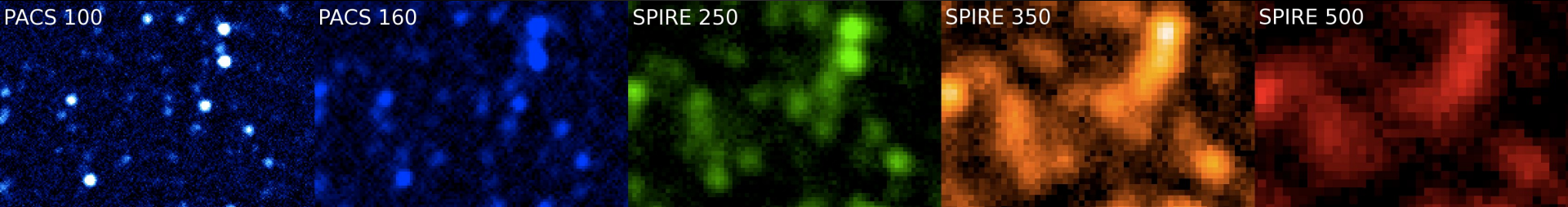
Distribution spectrale d'énergie du fond de rayonnement extragalactique (Dole+06)

FOND COSMIQUE INFRAROUGE RESOLU PAR HERSCHEL

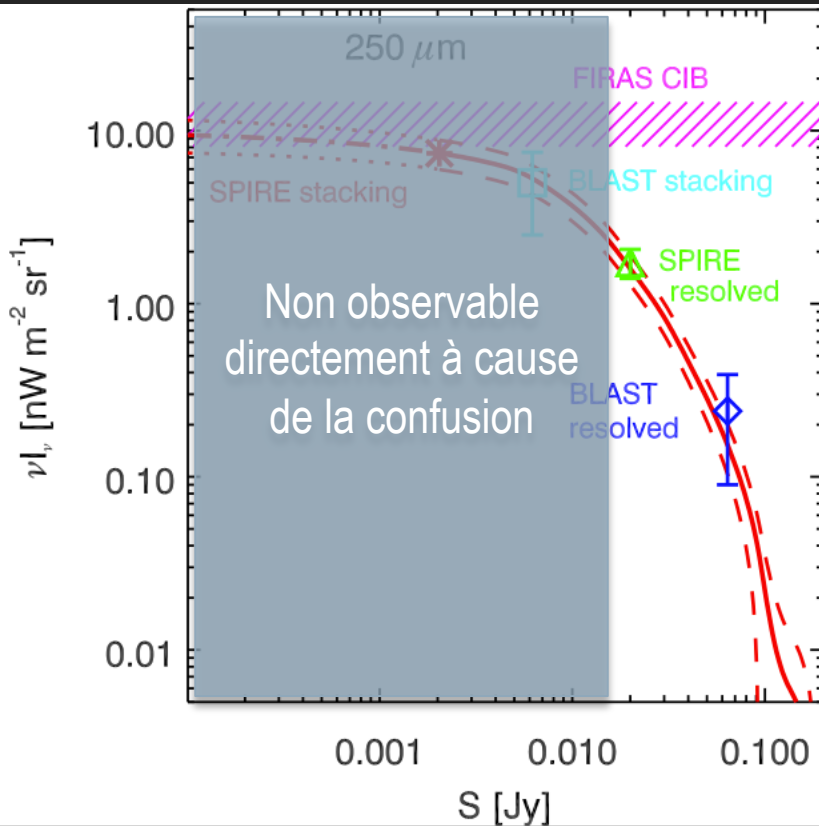


- Herschel a permis pour la première fois de résoudre directement la majeure partie du fond infrarouge à son pic d'émission (Berta+11), alors que ce n'était possible avant avec Spitzer (Dole+04, Frayer+09, Bethermin+10a).

Contribution au fond extragalactique des sources au dessus d'un certain seuil en flux en fonction de ce seuil (Berta+11)



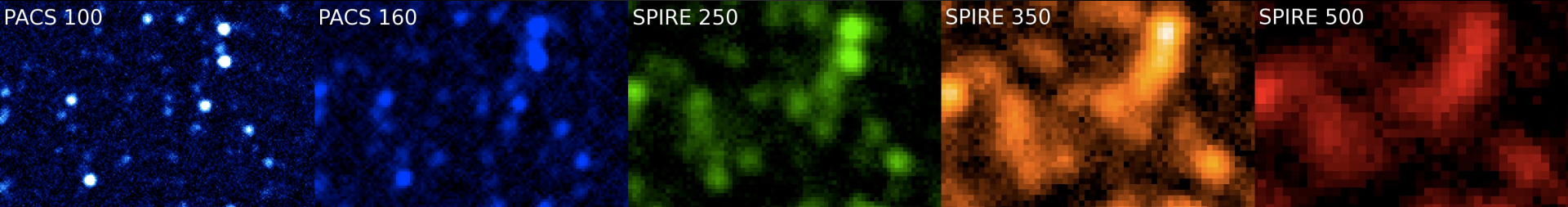
FOND COSMIQUE INFRAROUGE RESOLU PAR HERSCHEL



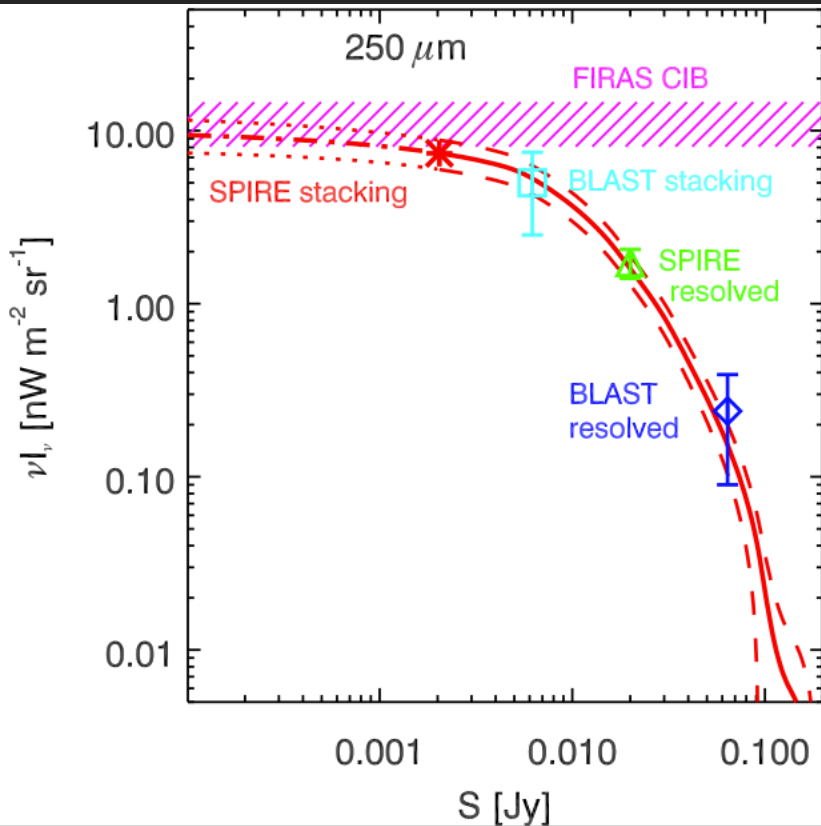
- Au delà du pic (où le fond est dominé par les galaxies à haut redshift), seule une faible fraction du fond est résolue directement en source à cause du phénomène de confusion (voir figure ci-dessous).

Voir aussi Bethermin+10b, Berta+10, Oliver+10, Clements+10, Glenn+10, Viero+13

Contribution au fond infrarouge des sources au dessus d'un certain flux (Béthermin+12b)



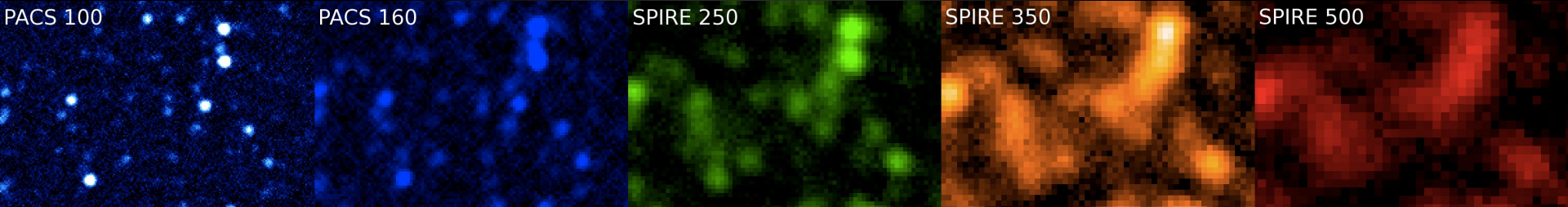
FOND COSMIQUE INFRAROUGE RESOLU PAR HERSCHEL



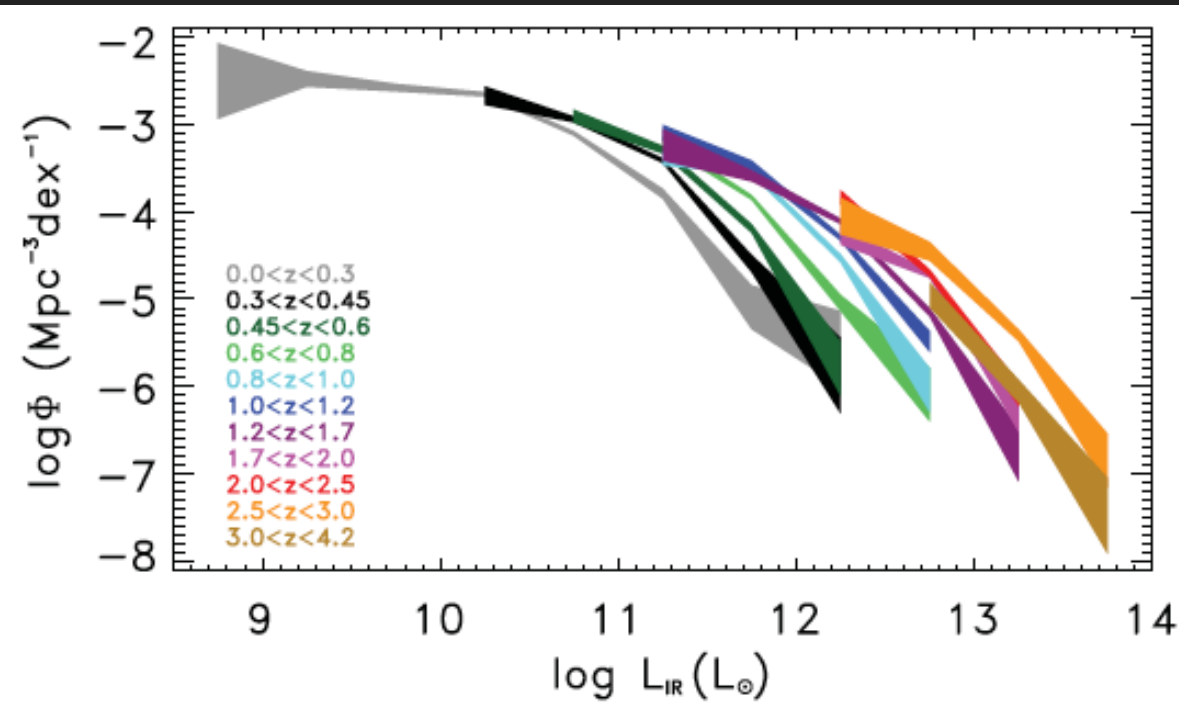
- Au delà du pic (où le fond est dominé par les galaxies à haut redshift), seule une faible fraction du fond est résolue directement en source à cause du phénomène de confusion (voir figure ci-dessous).
- Toutefois, possible de reconstruire la contribution des sources plus faibles par des méthodes statistiques (stacking, analyse P(D)).

Voir aussi Bethermin+10b, Berta+10, Oliver+10, Clements +10, Glenn+10, Viero+13

Contribution au fond infrarouge des sources au dessus d'un certain flux (Béthermin+12b)



EVOLUTION DES GALAXIES INFRAROUGES

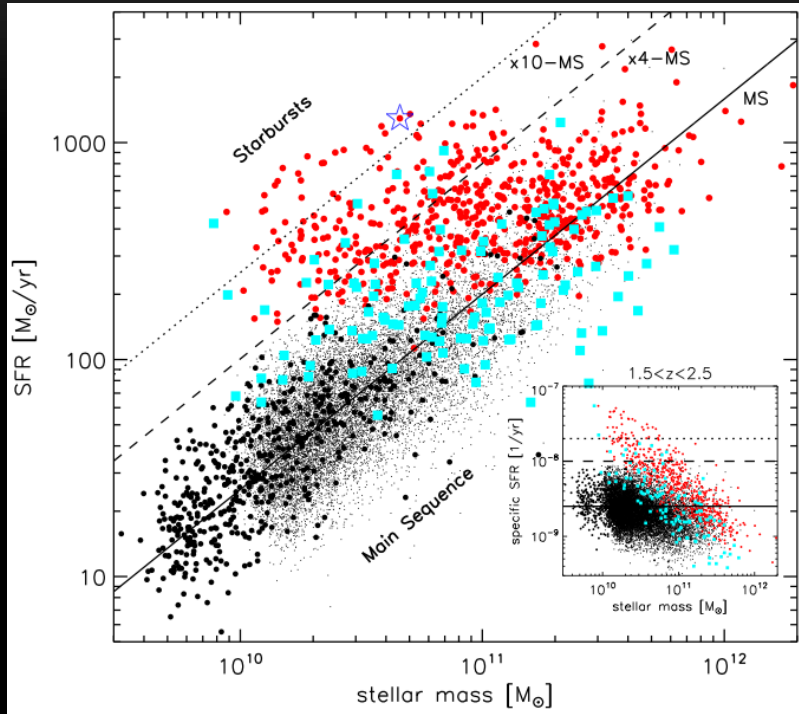


Evolution de la fonction de luminosité infrarouge des galaxies avec le redshift (Gruppioni+13)

- Le nombre de galaxies très brillantes en infrarouge (i.e. formant beaucoup d'étoiles) augmente fortement avec le redshift, alors que le densité de galaxies faibles évolue peu.
- Fort «downsizing»: de plus en plus de galaxies, mais formant de moins en moins d'étoiles avec le temps.

UNE “SEQUENCE PRINCIPALE” DE GALAXIES

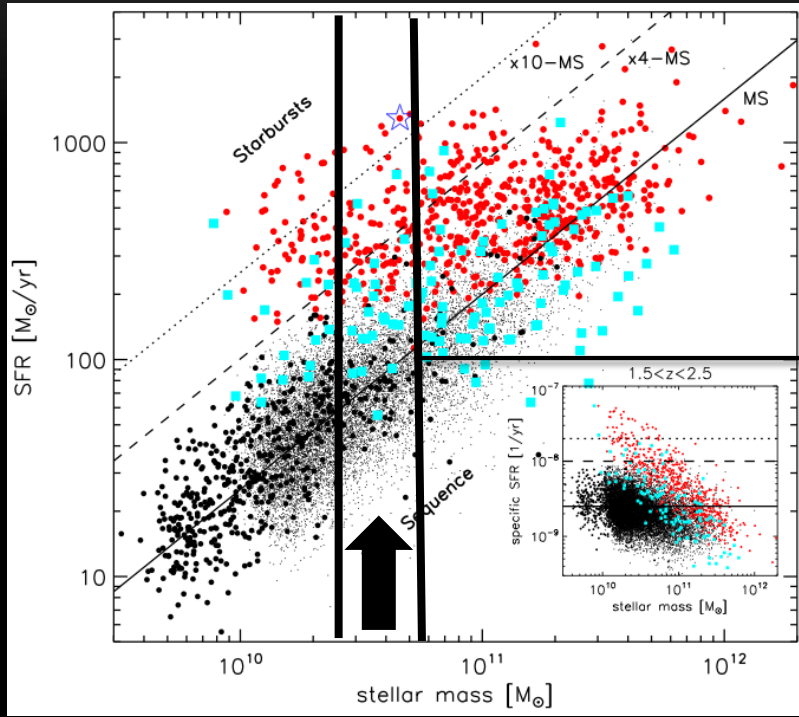
Relation SFR- M_{\star} à $z \sim 2$ (Rodighiero+11):



Voir aussi e.g. Noeske+07, Elbaz+07,
Elbaz+11, Sargent+12, Withaker+12

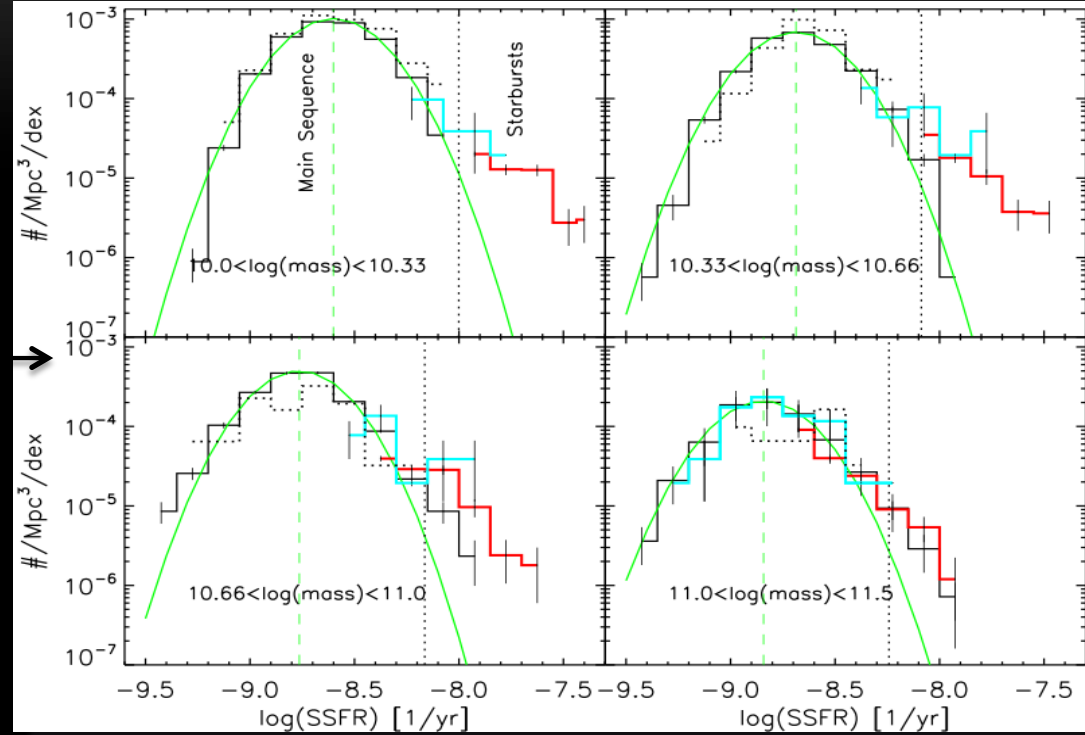
UNE "SEQUENCE PRINCIPALE" DE GALAXIES

Relation SFR- M_{\star} à $z \sim 2$ (Rodighiero+11):



Section à travers la
"séquence principale" à
masse fixées

Distribution de sSFR à M_{\star} fixée at $z \sim 2$ (Rodighiero+11):

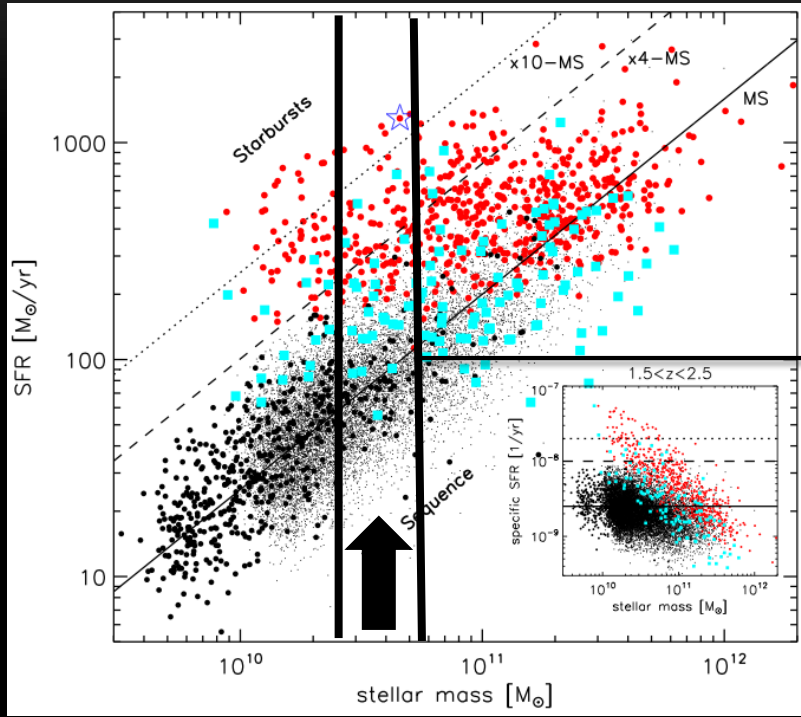


-> Distribution auto-similaire avec
la mass stellaire

Voir aussi e.g. Noeske+07, Elbaz+07,
Elbaz+11, Sargent+12, Withaker+12

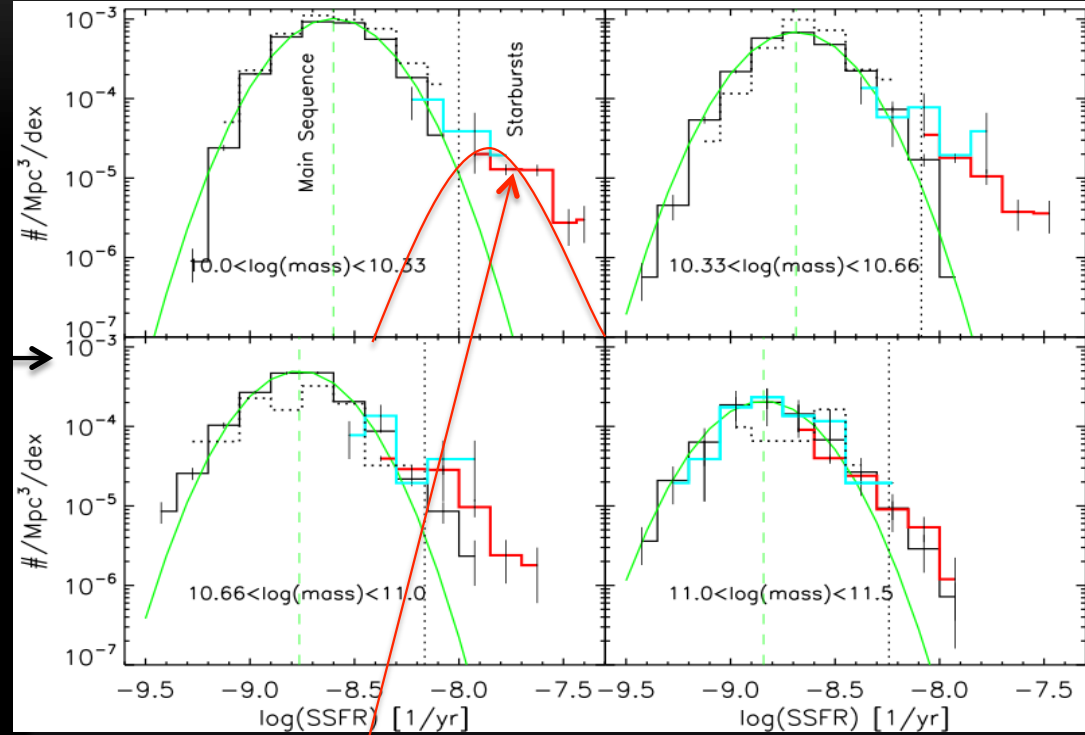
UNE "SEQUENCE PRINCIPALE" DE GALAXIES

Relation SFR- M_{\star} à $z \sim 2$ (Rodighiero+11):



Section à travers la "séquence principale" à masse fixées

Distribution de sSFR à M_{\star} fixée at $z \sim 2$ (Rodighiero+11):



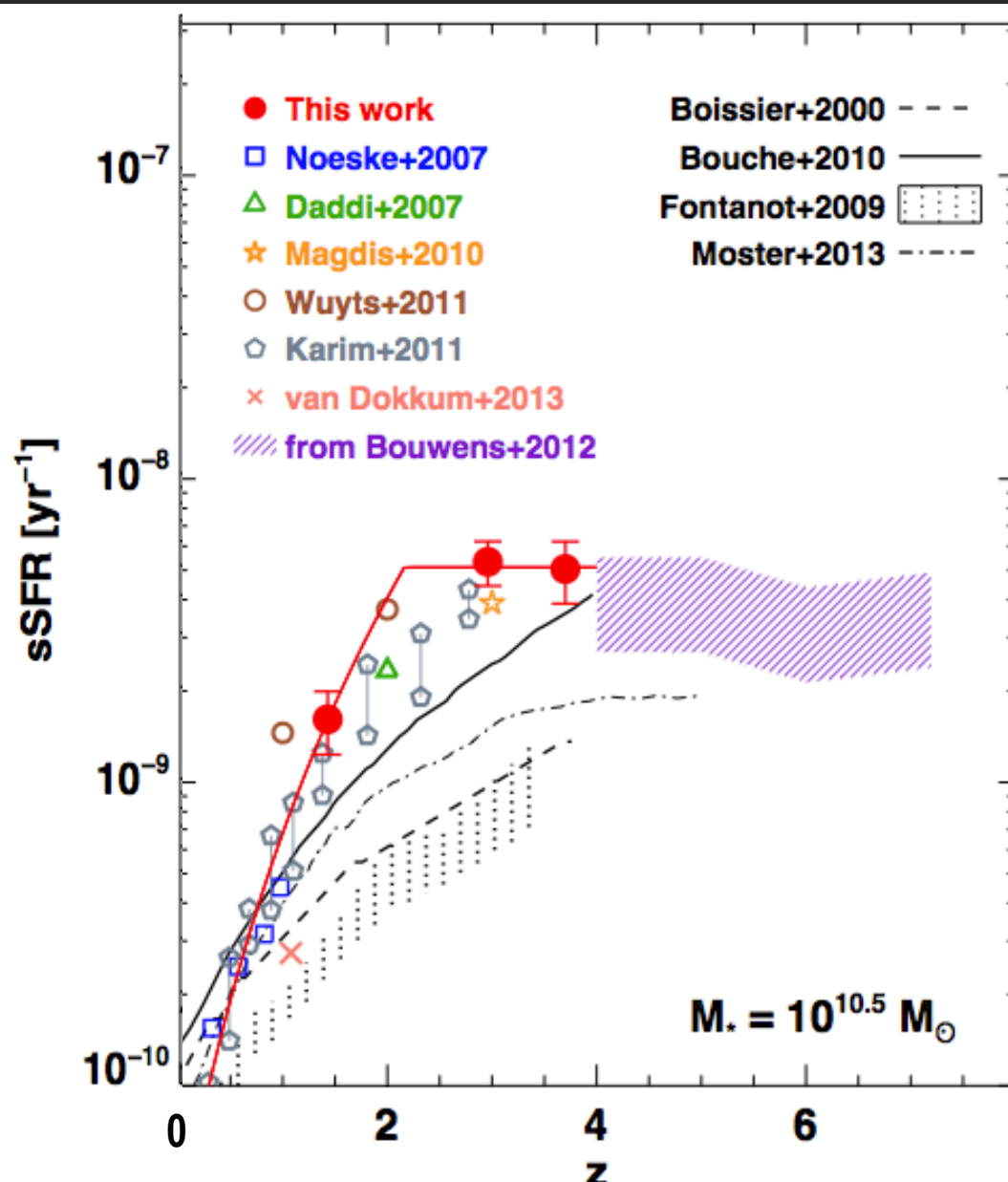
-> Distribution auto-similaire avec la mass stellaire

Voir aussi e.g. Noeske+07, Elbaz+07, Elbaz+11, Sargent+12, Withaker+12

Excès causé par les starbursts:

- ~15% de la densité de formation d'étoiles
- qq % en nombre

EVOLUTION DE LA NORMALISATION DE LA «SEQUENCE PRINCIPALE»

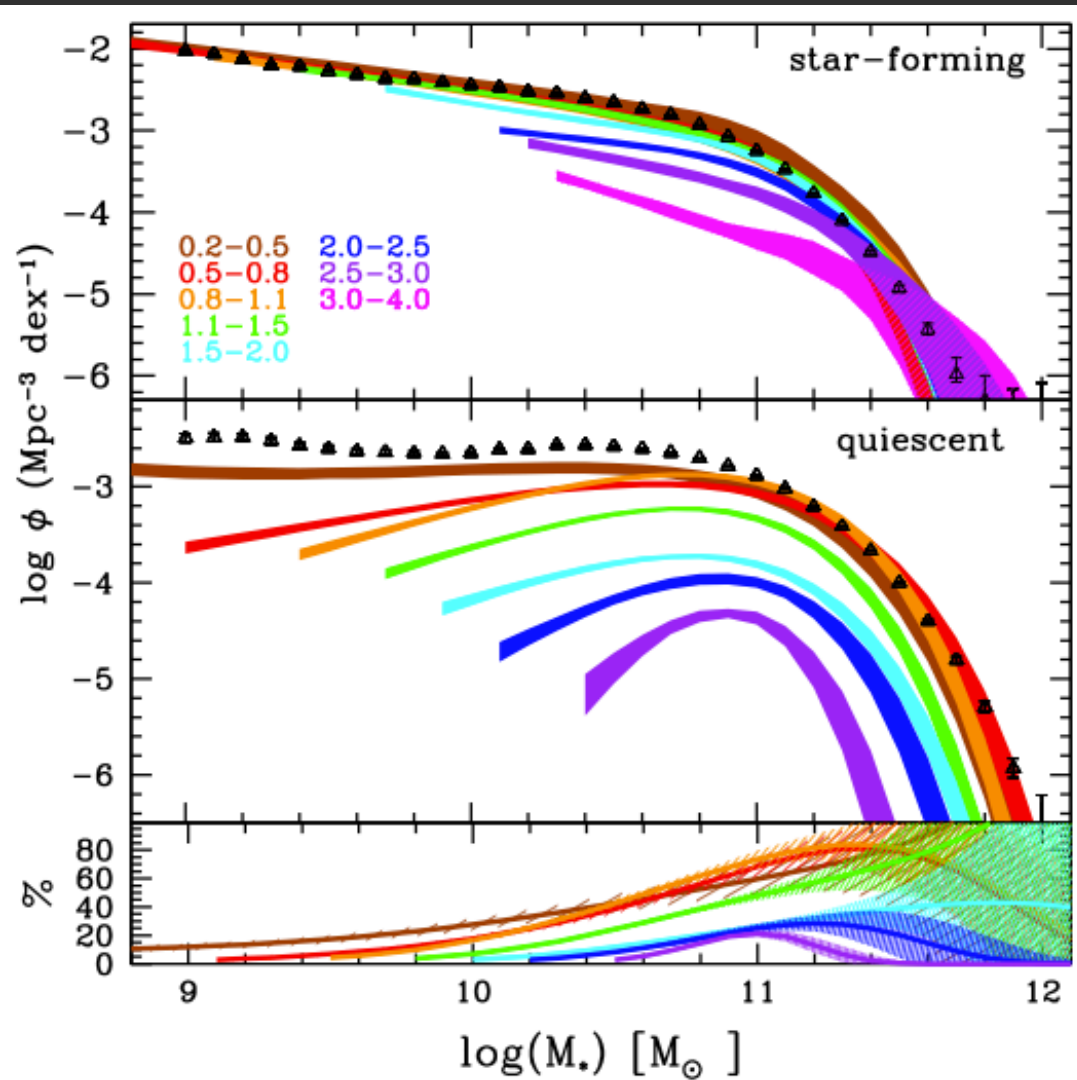


- Forte augmentation du taux de formation d'étoiles spécifique avec le redshift.
- Les galaxies observées à haut redshift ne peuvent pas rester sur la «séquence principale», car elles auraient une masse trop importante dans l'Univers local

Evolution du sSFR moyen à $\log(M_*)=10.5$
(Heinis+13, to be sub.)

Voir aussi e.g. Noeske+07, Elbaz+07, Elbaz+11, Sargent+12, Withaker+12

«QUENCHING» DES GALAXIES A HAUTE MASSE

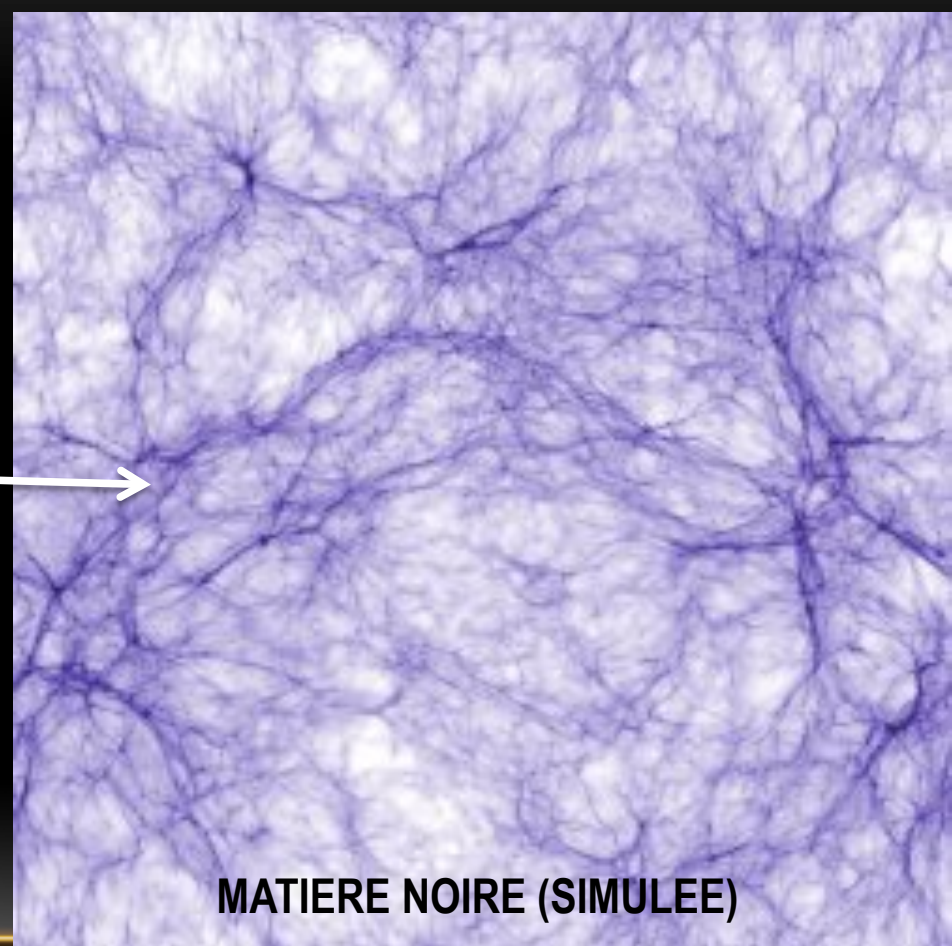
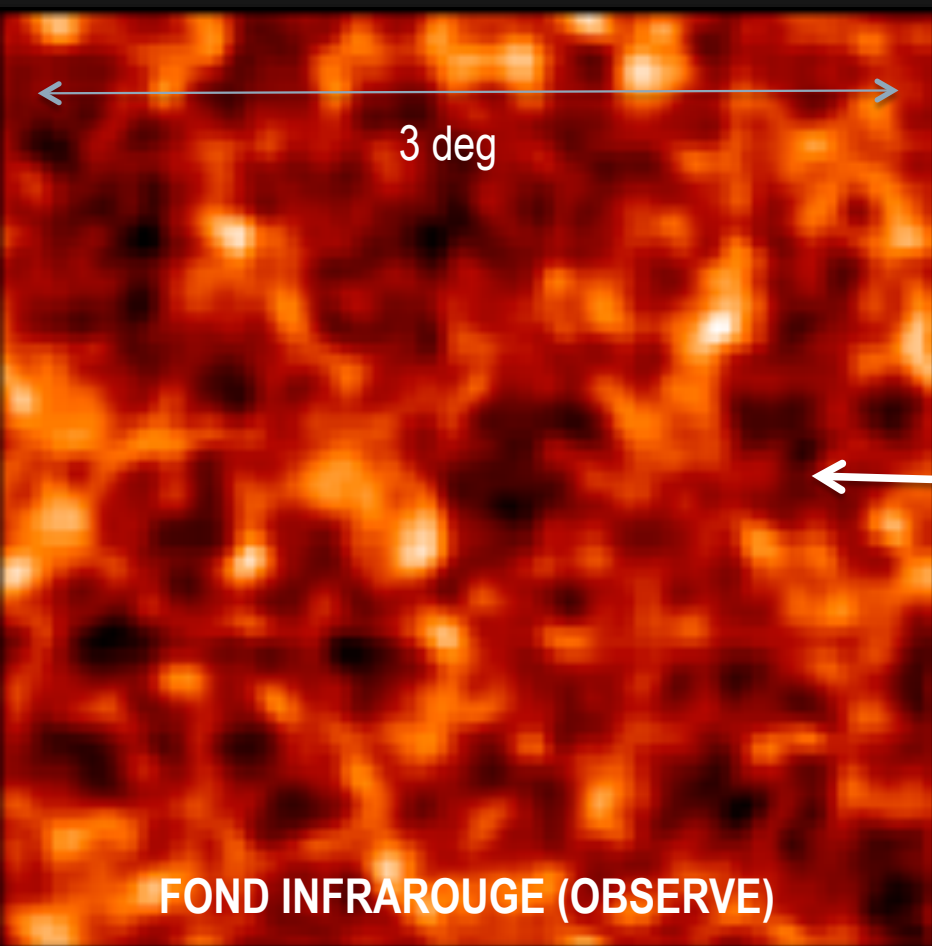


- L'étude de l'évolution de la fonction de masse stellaire montre qu'à haute masse, les galaxies sont essentiellement passive.
- Implique un phénomène de «quenching» à haute masse, qui fait quitter la « séquence principale».
- Raison pour laquelle le quenching intervient à cette masse encore mal comprise.

Evolution de la fonction de masse de galaxies actives et passives (Ilbert+13)

Voir aussi e.g. Ilbert+10, Baldry+12, Muzzin+13

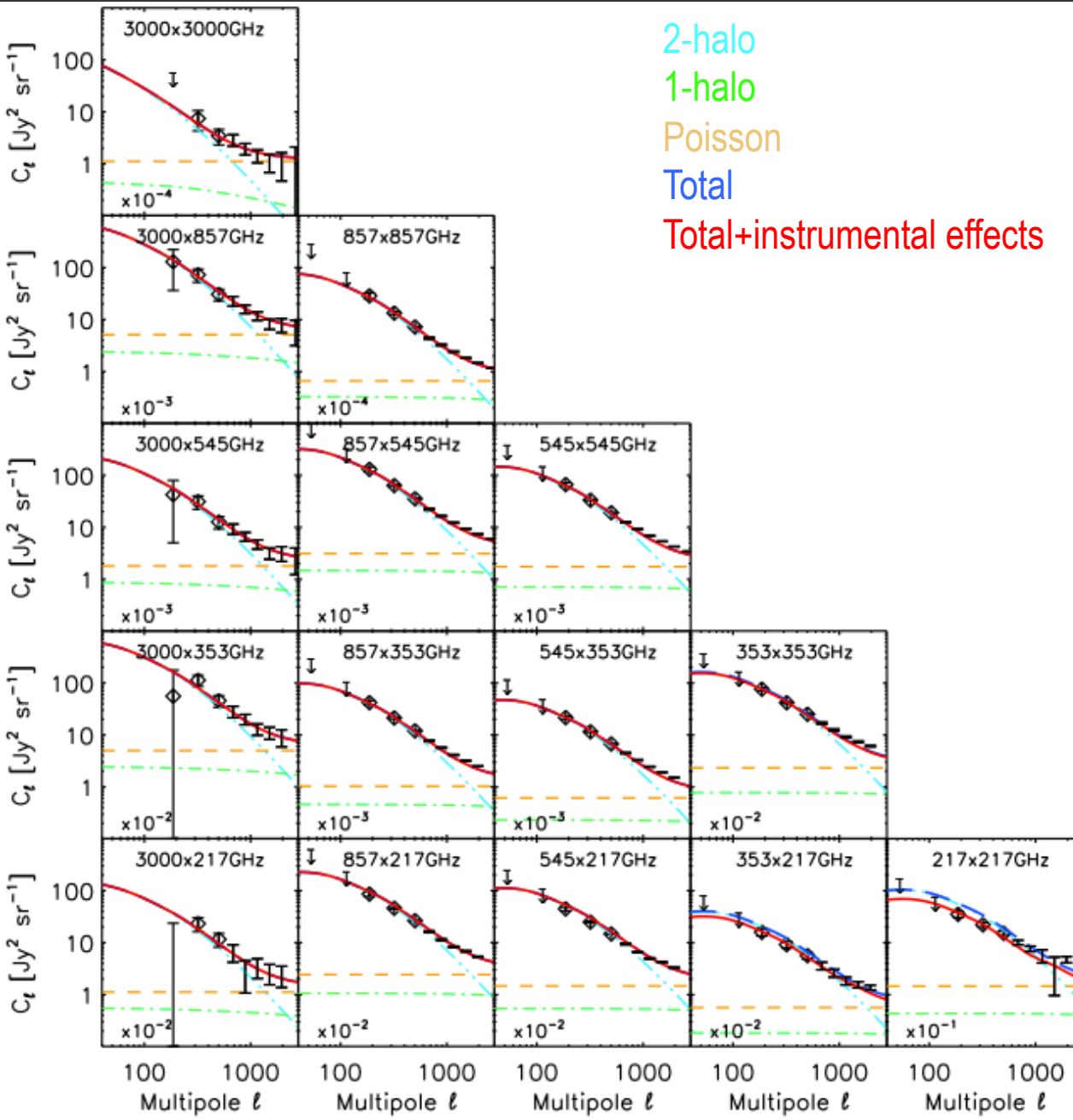
LIEN ENTRE LES GALAXIES INFRAROUGES ET LES GRANDES STRUCTURES



Anisotropies du fond infrarouge observées par Planck collaboration et al. (2011)

Simulation de grandes structures de matière noire (Pichon, Teyssier)

ANISOTROPIES DU FOND IR MESUREES PAR PLANCK

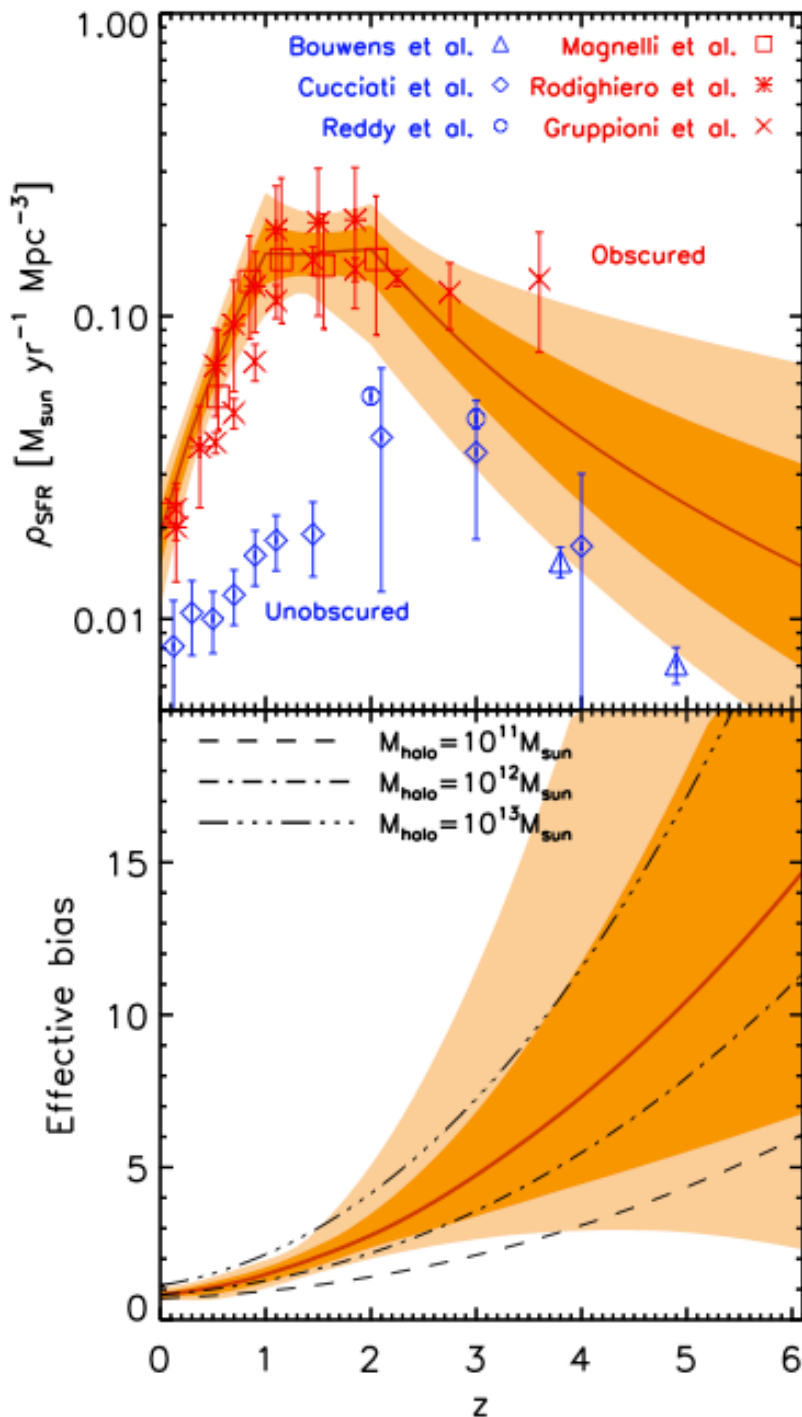


- Fluctuations du fond infrarouges mesurées dans de nombreuses bandes entre 100 microns et 1.4 mm.
- Les grandes longueurs d'ondes sont dominés par les plus grands redshift.
- Les cross-corrélation entre bandes aident à lever les dégénérescences entre plusieurs scénarios d'évolution.

Spectre de puissance des anisotropies du fond infrarouge (Planck collaboration et al., soumis à A&A)

Voir aussi Lagache+07, Viero+09, Amblard+10, Viero+12

HISTOIRE DE FORMATION D'ÉTOILES ET HALOS HOTES

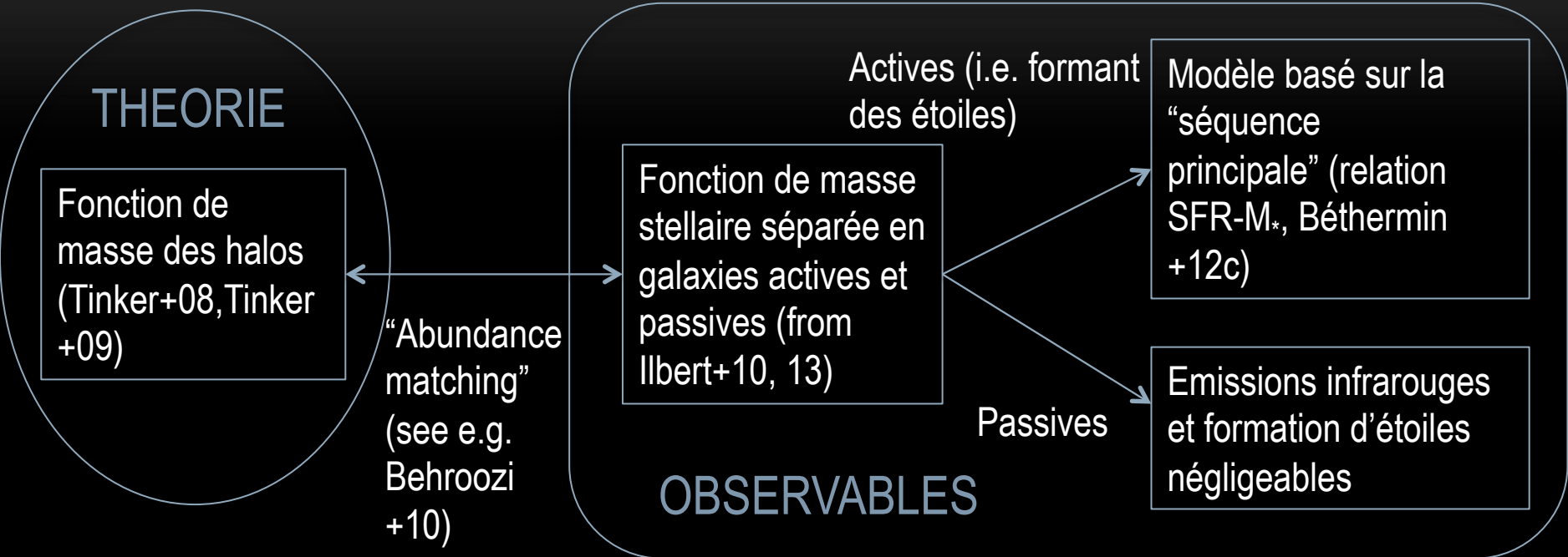


- Histoire de formation d'étoiles:
 - Très bon accord entre les extrapolation à partir des fonction de luminosité Spitzer et Herschel (en rouge) jusqu'à $z=3$. Décroissance au delà.
 - L'UV non corrigé (en bleu) de l'extinction ne trace qu'une faible fraction de la formation d'étoiles entre $z=1$ et 2 . Par contre, indication que l'Univers redevient transparent à haut z .
- Clustering des galaxies IR:
 - Modélisé par un facteur appelé bias qui décrit l'excès de clustering par rapport au spectre de puissance de la matière totale ($P_{gal} = b^2 P_{DM}$)
 - Compatible avec une formation d'étoiles hébergée à tout redshift dans des halos en moyenne de $\sim 2 \times 10^{12} M_{solaire}$.

Evolution de la densité de formation d'étoiles et du bias en fonction du redshift (Planck collaboration et al., soumis à A&A)

Voir aussi e.g. Planck collaboration+11, Shang+12, Penin +12a, Addison+13

UNE APPROCHE PLUS DETAILLEES...



- Hypothèse principales:
- même relation $M_{\text{star}}-M_{\text{halo}}$ pour les halos et sous-halos,
 - même relation $M_{\text{star}}-M_{\text{halo}}$ pour les galaxies actives et passives,
 - la probabilité d'être passive ne dépend que de la masse du halo.

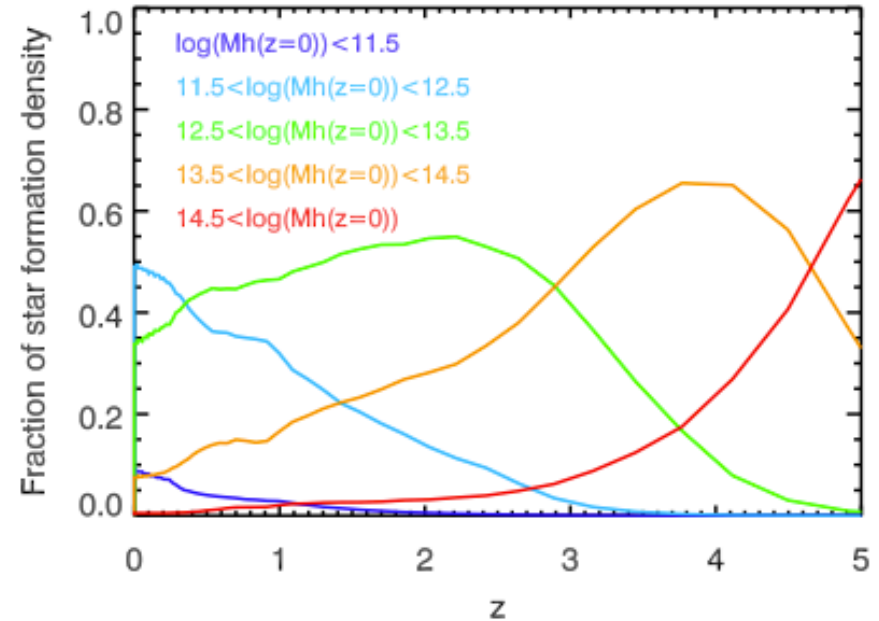
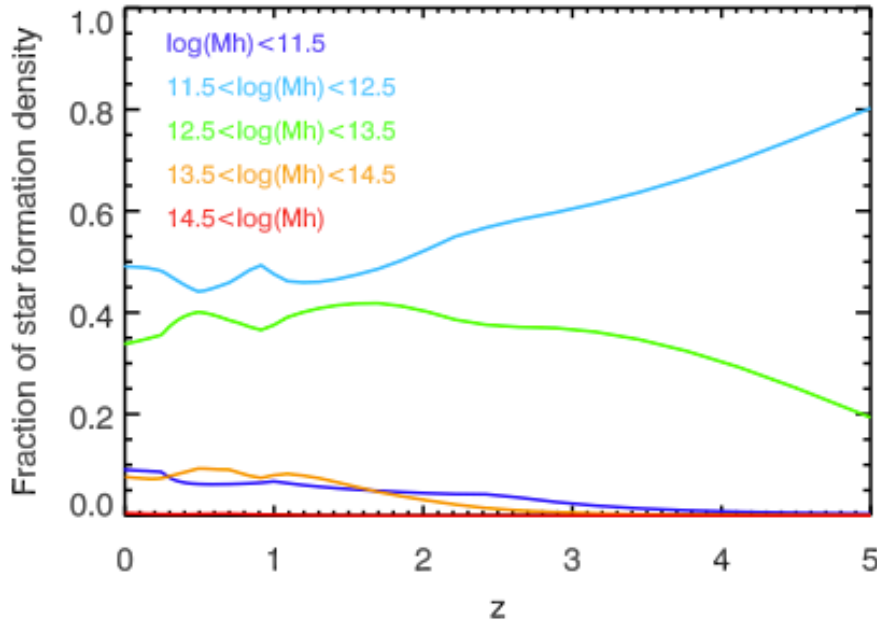
FORMATION D'ÉTOILES ET HALOS HOTES

Si vous voulez voir une universalité:

Si vous voulez voir un "downsizing":

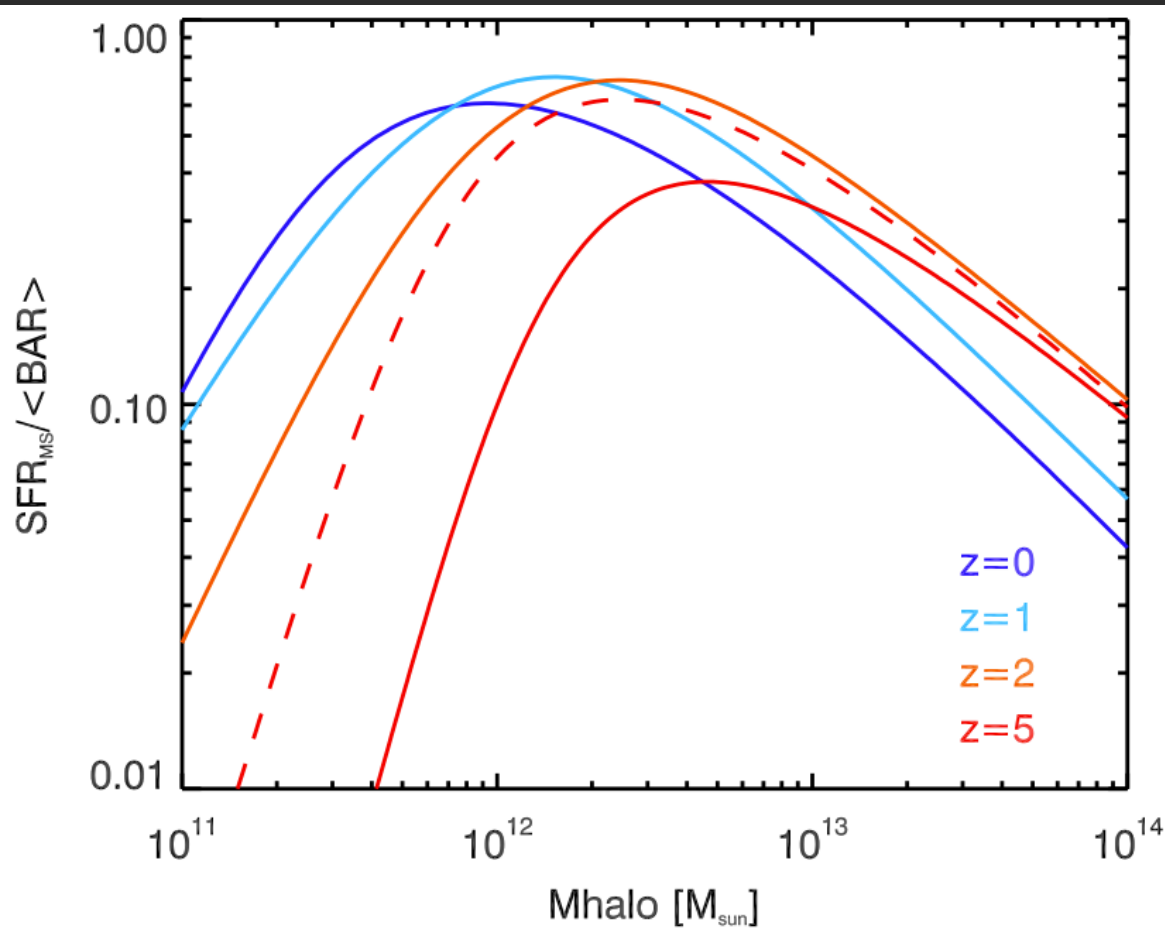
Masse du halo instantanée

Masse du halo extrapolée à $z=0$



Contribution relative des différentes masses de halos au budget de formation d'étoiles au cours de l'histoire de l'Univers (Béthermin+13)

EFFICACITE DE FORMATION D'ETOILES DANS LES HALOS DE MATIERE NOIRE



- Efficacité de formation d'étoiles instantanée du système {halo+galaxie(s)}: SFR/BAR (néglige effets de réservoirs)
- Efficacité maximum ($\sim 50\%$) pour des halos proches de $\sim 10^{12} M_{\text{sun}}$ à tout redshift.
- Efficacité plus faible à basse (SN feedback?) et haute (AGN feedback? halo chaud?) masse.

Rapport moyen entre le taux de formation d'étoiles et l'accrétion de baryon sur le halo (Béthermin+13)

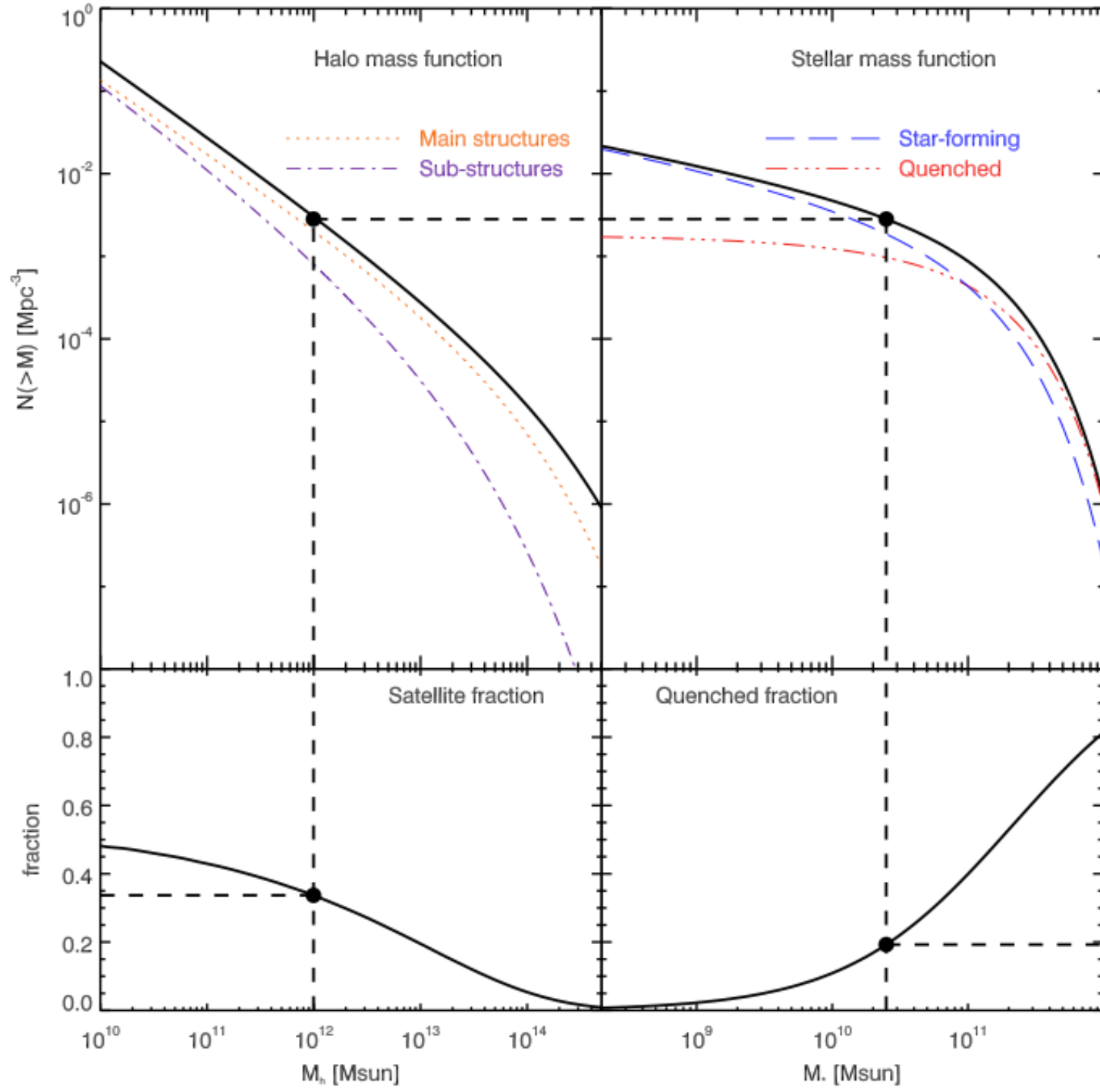
Voir aussi Behroozi+13ab, Mutch+13

Baryon Accretion Rate (BAR) = Accretion moyenne à partir de Fakhouri+10) $\times \Omega_b / \Omega_m$

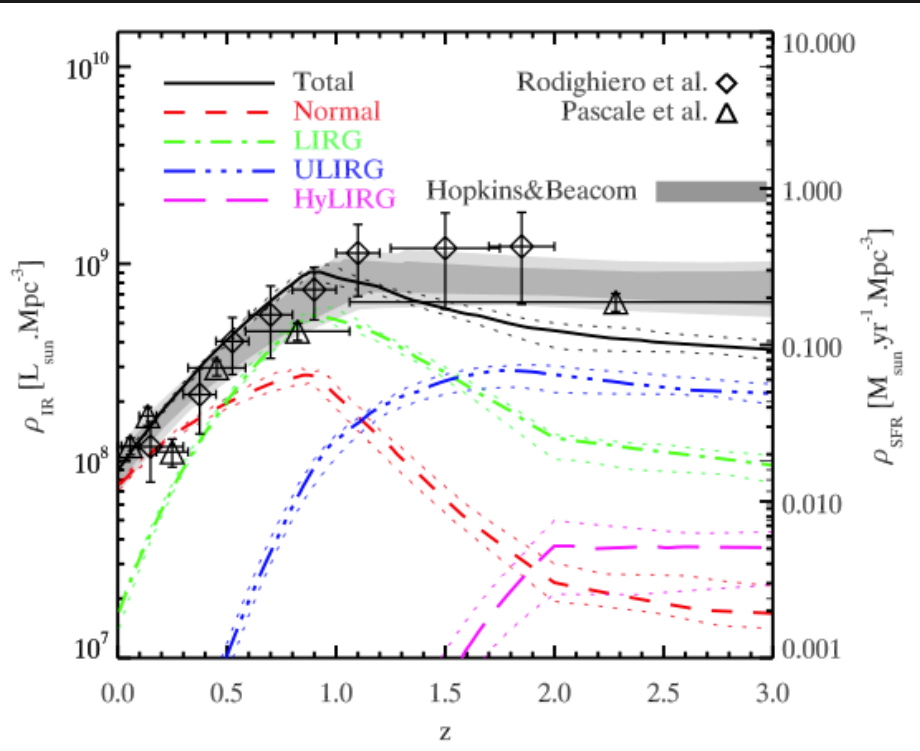
CONCLUSION

- Les données infrarouges produits par Herschel et Planck permettent aujourd'hui de sonder efficacement la formation d'étoiles enfouie dans la poussière jusqu'à haut redshift.
- L'analyse des données révèle un très fort «downsizing» des galaxies infrarouges, mais aussi une corrélation entre masse stellaire et taux de formation d'étoiles (« séquence principale») suggérant que celle-ci est dominée par des processus séculaires.
- L'analyse des fluctuations du fond infrarouge combiné à un travail de modélisation montre que la formation d'étoiles est très efficaces autour de $10^{12} M_{\text{sol}}_{\text{aire}}$ à tout redshift, qui pourrait piloter l'évolution des galaxies observées en infrarouge.

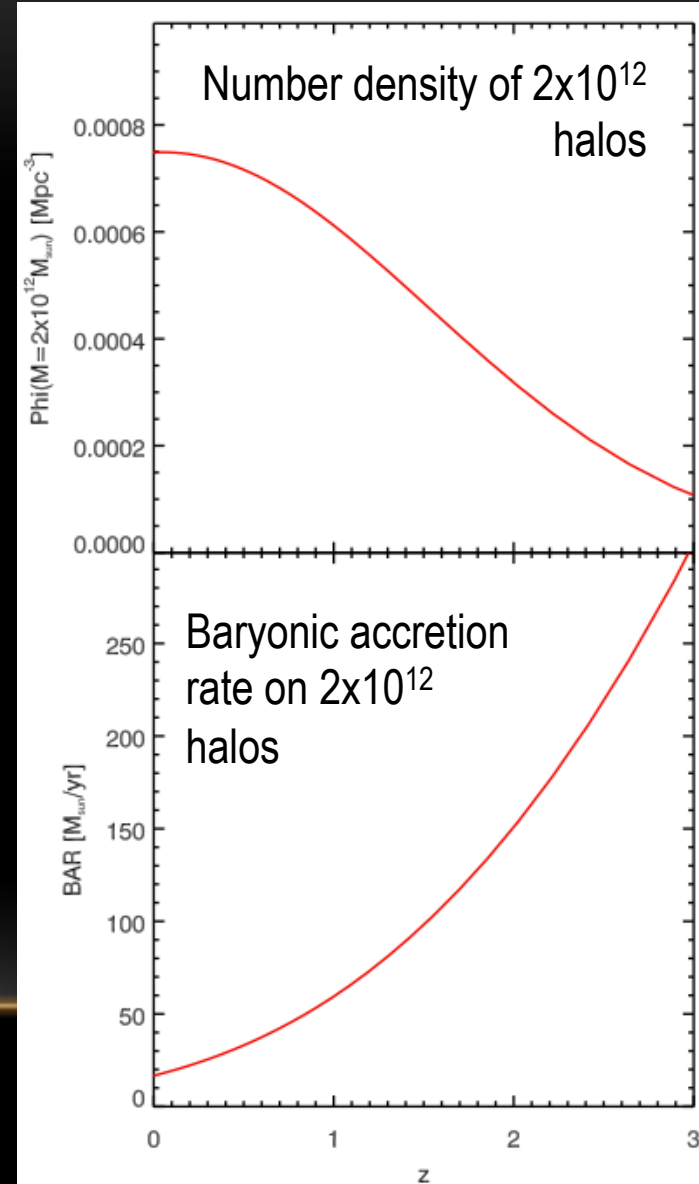
PROCEDURE OF ABUNDANCE MATCHING



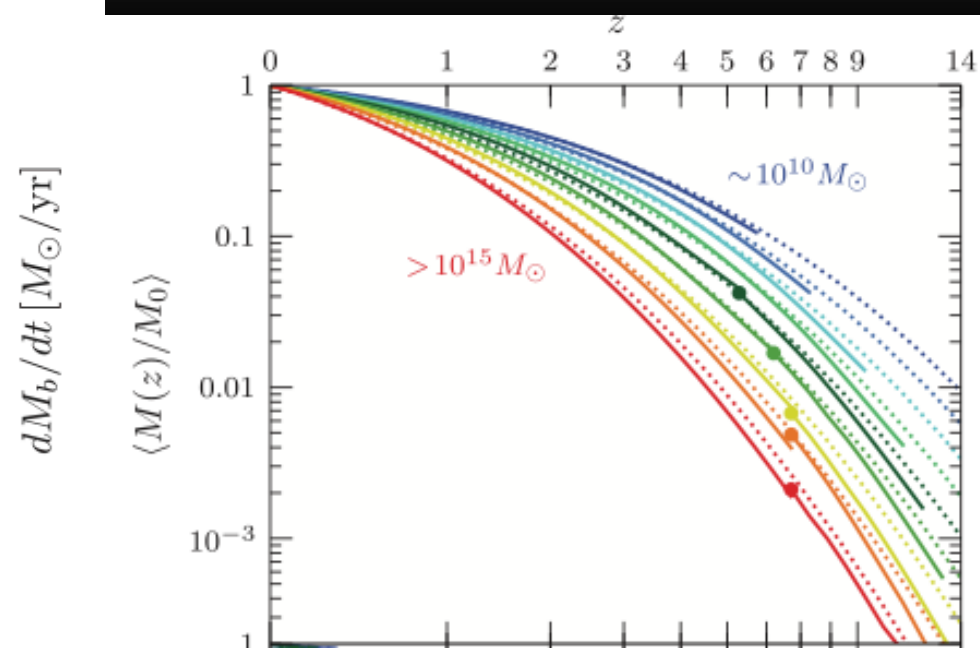
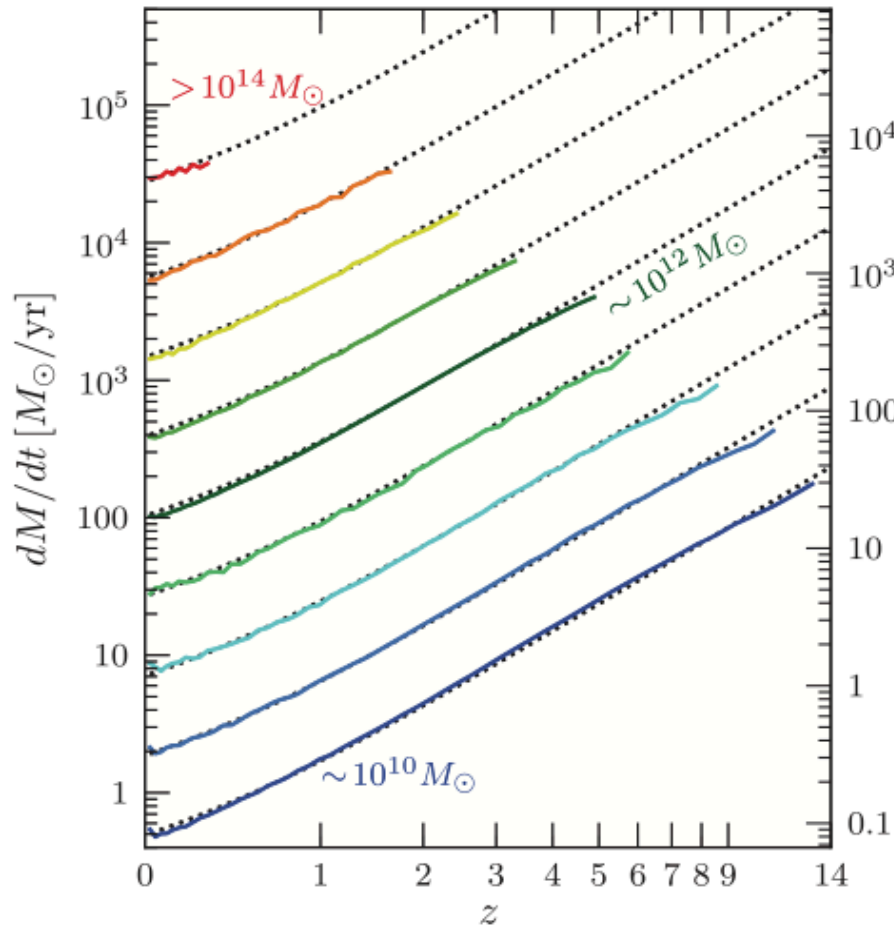
LINK WITH THE EVOLUTION OF THE INFRARED POPULATION DOMINATING THE BACKGROUND



Contribution of the various class of IR luminosity to the SFRD (Béthermin+11)



CROISSANCE DES HALOS DE MATIERE NOIRE



Figures de Fakhouri+10