

Etude des distributions spectrales d'énergie des galaxies infrarouges

Sommaire

V.1	Estimation de la luminosité totale infrarouge des galaxies	120
V.1.1	Introduction	120
V.1.2	Construction du catalogue de sources	124
V.1.3	Corrélations et estimation de L_{IR}	131
V.1.4	Application à l'Univers lointain	135
V.1.5	Evolution avec le redshift?	136
V.1.6	Lien avec la population des galaxies submillimétriques	137
V.2	Etude détaillée des SEDs de quelques galaxies	137
V.2.1	Présentation des données	139
V.2.2	Analyse	146
V.3	Observation sub-millimétrique d'un proto-amas à $z = 2.38$	154

On s'intéresse dans cette partie à la description des distributions spectrales d'énergie (SED pour *Spectral Energy Distribution*) des galaxies infrarouges. C'est en effet grâce à l'étude détaillée de ces SEDs que l'on peut remonter à certaines grandeurs physiques, comme la température, la distribution de taille, l'abondance des poussières ou encore l'intensité du champ de rayonnement. C'est aussi, par exemple, à l'aide de ces SEDs que l'on peut détecter la présence éventuelle d'un noyau actif grâce à son émission infrarouge. Ce genre de diagnostic est complétementaire à la spectroscopie optique qui apporte plus d'informations mais est beaucoup plus coûteuse en temps d'observation. La luminosité totale L_{IR} émise dans l'infrarouge (entre quelques microns et ~ 1 mm) est également un paramètre important à mesurer puisque, pour les galaxies qui sont dominées par les processus de formation stellaire, elle est bien corrélée au taux de formation stellaire (ou SFR pour *Star Formation Rate*) et permet donc une estimation de celui-ci (Kennicutt 1998a).

Bien évidemment, plus la SED contient de points photométriques et plus on pourra en tirer d'informations. De plus, chaque gamme de longueurs d'onde nous apporte des informations spécifiques : par exemple l'infrarouge proche ($2\text{--}8\ \mu\text{m}$) nous renseigne sur la présence éventuelle d'un AGN, ou permet encore d'estimer des masses stellaires. L'infrarouge moyen permet, entre autres, une étude détaillée des PAHs (composition, taille...). L'infrarouge lointain ($50\text{--}300\ \mu\text{m}$), qui est la gamme de longueurs d'onde où l'émission infrarouge est maximum, et le domaine sub-millimétrique ($300\ \mu\text{m}\text{--}1\ \text{mm}$) sont quant à eux essentiels pour déterminer la température des gros grains de poussière (BG). On comprend donc pourquoi il est intéressant d'obtenir des SEDs les plus complètes possibles.

Dans ce chapitre, nous présentons différentes études de SEDs de galaxies. Dans une première partie, nous étudierons les corrélations entre luminosités monochromatiques (dans tout le domaine infrarouge) et luminosité totale infrarouge. Ces mêmes corrélations pourront servir d'estimateurs de L_{IR} et donc du taux de formation d'étoiles. Cette première étude a donné lieu à une publication (Bavouzet et al. (2008), reproduite en Annexe A.1). Nous présenterons ensuite quelques résultats préliminaires sur des observations spectroscopiques (IRS et MIPS-SED) obtenues par Spitzer sur un échantillon de 17 galaxies infrarouges à $z \sim 0.15$. Enfin nous présenterons les résultats de l'observation à 3.6 , 24 et $870\ \mu\text{m}$ d'un proto-amas situé à $z = 2.38$ contenant quatre sources de type blob Ly α .

V.1 Estimation de la luminosité totale infrarouge des galaxies

V.1.1 Introduction

La compréhension fine de la physique des galaxies infrarouges nécessite l'obtention de SEDs couvrant une gamme spectrale la plus large possible. Malheureusement certaines gammes de longueurs d'onde sont plus difficilement accessibles que d'autres du fait de la sensibilité limitée des détecteurs. C'est en particulier le cas dans l'infrarouge lointain et le domaine submillimétrique. De plus la résolution angulaire augmentant avec la longueur d'onde (pour une taille de télescope donnée), la confusion vient également limiter les relevés à grande longueur d'onde. Il est donc plus difficile d'obtenir des points photométriques au delà de $\lambda \gtrsim 50\ \mu\text{m}$ pour la plupart des galaxies infrarouges. La figure V.1 montre les seuils de détection pour différents relevés typiques ainsi que la région où se situent les galaxies qui dominent les comptages et le fond diffus infrarouge (c'est-à-dire celles de luminosité infrarouge de l'ordre de L^*). On voit clairement qu'entre $z = 1$ et $z = 2$, les galaxies typiques (c'est-à-dire telles que $L_{\text{IR}} \sim L^*$) ne sont actuellement observables que dans l'infrarouge moyen (à $24\ \mu\text{m}$ avec *Spitzer*). PACS et SPIRE $250\ \mu\text{m}$ ne permettront d'étudier ces galaxies que jusqu'à

$z \sim 0.4$. Ainsi, la partie infrarouge lointain des SEDs de galaxies est difficile à contraindre au delà de $z \sim 0.15$ à l'heure actuelle et $z \sim 0.4$ dans quelques années. Il existe toutefois quelques relevés profonds mais limités à une petite surface qui permettent de détecter ces galaxies à plus grand redshifts (le relevé GOODS-Herschel par exemple). Pourtant c'est dans cette gamme de longueur d'onde que l'émission infrarouge est maximale. L'estimation de la luminosité totale infrarouge L_{IR} en est donc d'autant plus délicate car on ne dispose en général que de quelques points photométriques (souvent un) dans l'infrarouge moyen (8 et/ou 24 μm).

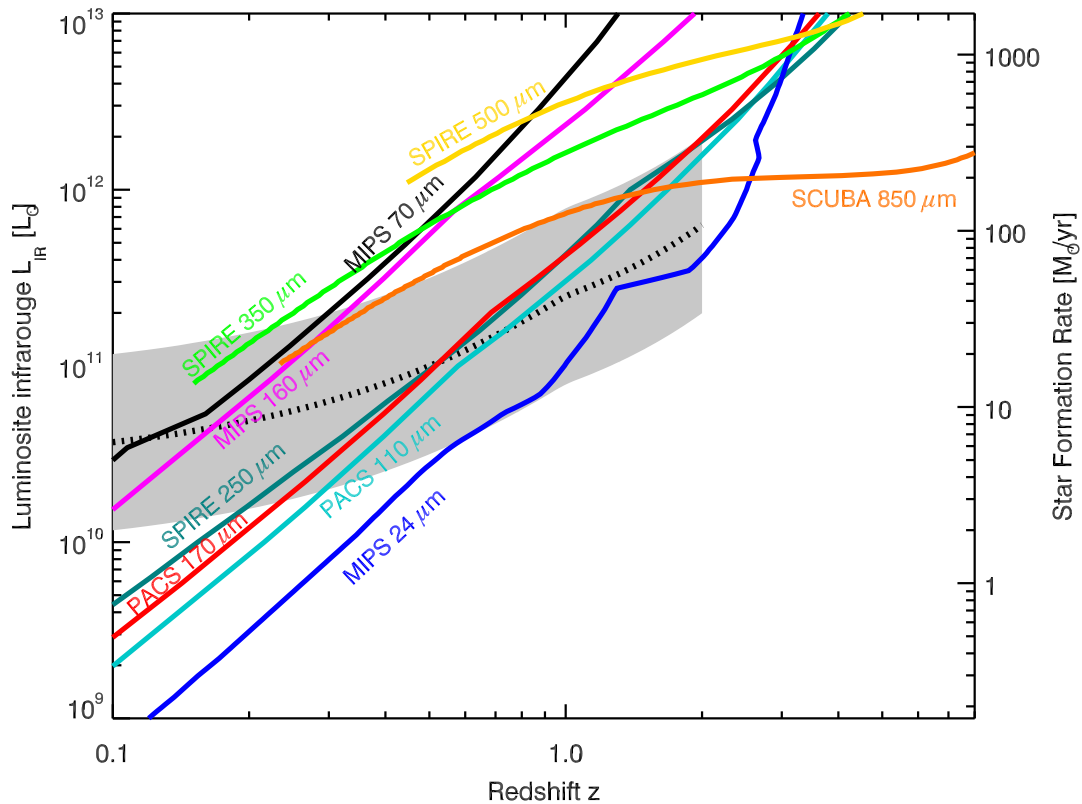


Figure V.1 – Limites de détection pour différents relevés actuels ou futurs dans l'infrarouge moyen, lointain et le domaine submillimétrique. Au moins 10 des galaxies situées dans la région au-dessus de la courbe sont (ou pourront) être détectées. Ces limites ont été calculées à partir du modèle de Lagache et al. (2004). La ligne pointillée représente L^* (le coude de la fonction de luminosité, cf I.3.3) en fonction du redshift z (mesuré par Le Floc'h et al. (2005) entre $z = 0$ et $z = 1$ et par Caputi et al. (2007) à $z = 1$ et $z \sim 2$). La zone grisée regroupe, à un redshift donné, les galaxies telles que $-0.5 < \log \frac{L_{\text{IR}}}{L^*} < 0.5$. Les seuils de détection choisis pour tracer cette figure sont les suivants : MIPS 24 μm : $S_{24} > 80 \mu\text{Jy}$; MIPS 70 μm : $S_{70} > 25 \text{ mJy}$; MIPS 160 μm : $S_{160} > 50 \text{ mJy}$; SCUBA 850 μm : $S_{850} > 1 \text{ mJy}$; PACS 110 μm : $S_{110} > 6.2 \text{ mJy}$; PACS 170 μm : $S_{170} > 9 \text{ mJy}$; SPIRE 250 μm : $S_{250} > 11 \text{ mJy}$; SPIRE 350 μm : $S_{350} > 14.7 \text{ mJy}$; SPIRE 500 μm : $S_{500} > 12.5 \text{ mJy}$. Cette figure est une adaptation de la figure 3 de Lagache et al. (2005).

Grâce à l'étude détaillée des SEDs des galaxies locales, il a été possible de modéliser l'émission infrarouge des galaxies. Par exemple, le modèle de Dale & Helou (2002) (que l'on notera DH par la suite) fournit une librairie de SEDs qui reproduisent les diagrammes couleur-couleur S_{12}/S_{25} vs S_{60}/S_{100} et S_7/S_{15} vs S_{60}/S_{100} observés par IRAS et ISOCAM. La construction de cette librairie repose sur la physique des grains de poussière. Cette librairie est paramétrée par α (l'exposant de la loi de puissance qui décrit la variation de la masse de poussière en fonction de l'intensité du champ de rayonnement) qui est lui-même relié à la couleur S_{60}/S_{100} . De plus, la couleur S_{60}/S_{100} est corrélée avec la luminosité infrarouge L_{IR} (Soifer et al. 1987; Soifer & Neugebauer 1991) et il est donc possible de paramétrer la librairie DH par la luminosité totale infrarouge en utilisant par exemple l'équation 1 de Marillac et al. (2006). Les SEDs de cette librairie sont très variées et permettent de reproduire les SEDs d'objets extrêmes. Cependant la grande majorité (80%) des galaxies infrarouges locales ont des SEDs dont le paramètre α est compris entre 1.3 et 3.5 (Dale et al. 2005).

Les SEDs du modèle de Chary & Elbaz (2001) (que l'on notera CE par la suite) ont été construites dans le but de reproduire les corrélations couleurs-couleurs et corrélations entre luminosité monochromatiques (7, 12 et 15 μm) et la luminosité infrarouge observées pour les galaxies locales. Elles reposent en partie sur les SEDs observées de quatre galaxies bien connues (Arp220, NGC6090, M82 et M51). Cette famille de SEDs a également été construite avec l'idée que pour un flux donné à une longueur d'onde donnée, il ne pouvait correspondre qu'une seule SED. Autrement dit, la luminosité totale infrarouge L_{IR} est le seul paramètre libre introduit. Ensuite, la comparaison avec d'autres types d'observations (comptages de sources, distributions en redshift) a permis, en utilisant ces SEDs de faire des prédictions sur l'évolution de la fonction de luminosité avec le redshift.

L'ajout de nouvelles observations (fonctions de luminosité, comptages de sources, distribution en redshift, valeur du fond diffus infrarouge...) permet de mieux contraindre les SEDs des galaxies infrarouges et d'obtenir des SEDs *représentatives* pour une luminosité donnée, en même temps que des contraintes sur l'évolution avec le redshift de la fonction de luminosité. Le modèle Lagache et al. (2004) a été construit dans cette optique et les SEDs ainsi obtenues sont donc, en quelque sorte, une moyenne des SEDs des galaxies de chaque luminosité. Elles ne sont donc pas supposées reproduire la diversité des galaxies observées. En revanche, comme ce modèle est en accord avec un grand nombre d'observations à différents redshifts, on peut espérer que les SEDs de ce modèle soient utilisables à plus grand redshift.

Tous ces modèles ne sont paramétrés que par une seule grandeur : la couleur S_{60}/S_{100} pour DH et la luminosité infrarouge L_{IR} pour CE et LDP. Il est donc possible, connaissant le redshift z et le flux à une longueur d'onde d'estimer la luminosité totale infrarouge. Ceci est illustré, à 24 μm , figure V.2 avec les modèles LDP et CE. D'une part, on remarque qu'il existe des différences pouvant aller jusqu'à 45% (c'est-à-dire presque un facteur 2) entre les prédictions des deux modèles. D'autre part, ces modèles ne permettent pas d'estimer l'incertitude sur

la mesure de L_{IR} due au fait qu'un seul paramètre libre est en réalité insuffisant pour rendre compte de la diversité des galaxies d'une luminosité donnée.

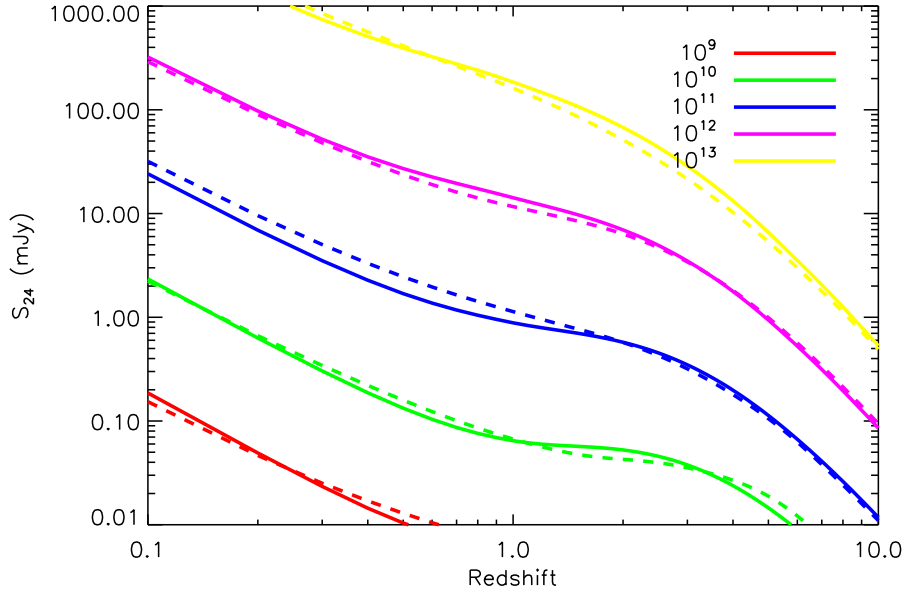


Figure V.2 – Illustration de la méthode permettant d'estimer la luminosité totale infrarouge (ici entre $8 \mu\text{m}$ et 1 mm) à partir du flux S_{24} et du redshift à partir des modèles Lagache et al. (2004) (ligne continue) et Chary & Elbaz (2001) (ligne en tirets).

Une autre méthode qui permet d'estimer la luminosité infrarouge est d'exploiter le fait que la luminosité dans l'infrarouge lointain L_{FIR} (entre $\sim 40 \mu\text{m}$ et $\sim 120 \mu\text{m}$) est très bien corrélée avec l'émission radio à 1.4 GHz (21 cm). Cette corrélation a été observée pour la première fois par van Der Kruit (1971) entre les flux à $10 \mu\text{m}$ et les flux radios. Helou et al. (1985) ont introduit le paramètre q , défini par :

$$q = \log \left(\frac{L_{\text{FIR}}(\text{W})}{3.75 \times 10^{12}(\text{Hz})} \frac{1}{L_{1.4\text{GHz}}(\text{W/Hz})} \right) \quad (\text{V.1})$$

qui permet de mesurer la pente de cette corrélation. Diverses études ont permis de montrer que pour une grande variété d'objets, on obtenait $q \sim 2.3$ avec une dispersion $\sigma_b \lesssim 0.2$ (voir Yun et al. (2001) pour une discussion plus détaillée et des références). On interprète cette corrélation de la façon suivante (Harwit & Pacini 1975; Dickey & Salpeter 1984; Condon 1992) : l'émission radio aurait pour origine l'émission synchrotron des électrons relativistes accélérés dans les restes de supernovae des étoiles massives (les premières à arriver à ce stade dans une région de formation d'étoiles). Or ce sont ces mêmes étoiles massives qui chauffent les poussières responsables de l'émission infrarouge. Une fois connu le flux d'une galaxie dans le domaine radio, il est facile d'estimer la luminosité à 1.4 GHz car le spectre de l'émission synchrotron est bien connu ($S_\nu \propto \nu^{-0.75}$) et la K-correction ne pose pas de problème. On obtient ensuite la luminosité dans l'infrarouge lointain qui est elle-même reliée à l'émission

totale infrarouge par la relation suivante (Elbaz et al. 2002) :

$$L_{\text{IR}} = 1.91 (\pm 0.17) \times L_{\text{FIR}} \quad (\text{V.2})$$

La mesure d'un flux dans le domaine radio permet donc, si on connaît le redshift de la source, d'estimer sa luminosité totale infrarouge L_{IR} .

Enfin, la dernière méthode qui peut-être utilisée pour estimer L_{IR} est l'utilisation des corrélations entre luminosités monochromatiques dans l'infrarouge et la luminosité totale L_{IR} , ce qui font des luminosités, en particulier dans l'infrarouge moyen ($\sim 25 \mu\text{m}$), de très bons traceurs de L_{IR} . On peut par exemple citer les études de Chary & Elbaz (2001) et Takeuchi et al. (2005b) à ce sujet. Toutefois ces relations sont calibrées sur des échantillons de galaxies locales et l'extrapolation à plus grand redshift est incertaine parce que ce ne sont pas les mêmes galaxies qui dominent les populations à $z = 0$ et $z \gtrsim 1$. Symeonidis et al. (2008) ont réalisé une étude similaire à plus grand redshift ($0.1 < z < 1.2$) sur un échantillon de 43 galaxies et ont montré que ces corrélations s'appliquaient encore.

Marcillac et al. (2006) ont comparé différentes méthodes pour estimer L_{IR} : tout d'abord la méthode présentée ci dessus qui utilise les flux 15 et $24 \mu\text{m}$ et les modèles CE et DH, et également la méthode qui repose sur les corrélations radio-infrarouge lointain. Ils ont montré que, sur un échantillon de 49 galaxies situées entre $z = 0.4$ et $z = 1.3$, ces deux méthodes donnaient des résultats cohérents et que la dispersion résultante était de l'ordre de 40%. Cependant, ils n'ont pas pu étudier directement les corrélations entre luminosités monochromatiques et luminosité totale infrarouge car leur premier estimateur impose déjà cette relation (en fait celle prédite par le modèle utilisé).

Dans cette section, nous étudions les SEDs de ~ 2000 galaxies (372 directement et le reste de façon statistique) sur tout le domaine infrarouge et situées entre $z = 0$ et $z = 2$. Nous étudions, entre autres, les corrélations entre luminosité totale infrarouge et luminosités monochromatiques (à 8, 24, 70 et $160 \mu\text{m}$). Ceci permet alors d'estimer L_{IR} à partir d'un (ou plusieurs) flux et du redshift et également de connaître la précision de cette estimation. Enfin, comme notre échantillon couvre une large gamme de redshifts et de luminosité infrarouge, il sera possible d'étudier une éventuelle évolution des SEDs des galaxies infrarouges avec le redshift et d'étudier le lien avec la population des galaxies submillimétriques.

V.1.2 Construction du catalogue de sources

Nous avons étudié les SEDs dans l'infrarouge de 372 galaxies détectées à 8, 24, 70 et $160 \mu\text{m}$. Le redshift de chacune des galaxies est connu : 387 (93%) sont spectroscopiques et proviennent du relevé AGES¹ (Kochanek et al., en préparation) et les 25 (7%) restants

1. <http://cmb.as.arizona.edu/~eisenste/AGES/index.html>

sont photométriques et viennent du relevé COMBO-17 (Wolf et al. 2004). Ces galaxies sont situées dans les champs Boötes, FLS et CDFS. La photométrie de ces sources a été réalisée comme décrit au paragraphe II.2. C'est l'obtention du flux à $160 \mu\text{m}$ qui limite la taille principalement de l'échantillon, ce qui implique que cet échantillon est sélectionné dans l'infrarouge lointain.

Nous disposons également du redshift d'un grand nombre de sources détectées à 8 et $24 \mu\text{m}$ mais qui ne sont pas détectées dans l'infrarouge lointain (à cause des problèmes de sensibilité et de confusion cités plus haut). Une partie de ces sources provient de l'échantillon de Caputi et al. (2007). Pour toutes ces sources non détectées dans l'infrarouge lointain, nous avons utilisé la technique de stacking décrite au paragraphe II.3 afin d'obtenir les flux moyens à 70 et $160 \mu\text{m}$. Nous avons ainsi obtenu 13 SEDs moyennes contruites à partir d'un échantillon de ~ 1700 galaxies sélectionnées dans l'infrarouge moyen et classées selon leur flux à $24 \mu\text{m}$ et leur redshift z . Nous avons également ajouté les 3 SEDs moyennes obtenues par Zheng et al. (2007) à un redshift de $z \sim 0.7$.

Les AGNs ont également été rejetés de notre échantillon grâce à des critères spectroscopiques pour les galaxies détectées directement à toutes les longueurs d'onde et les galaxies stackées dans les champ Boötes et FLS. Pour les galaxies provenant de l'échantillon de Caputi et al. (2007) des critères X et infrarouge-moyen ont été utilisés (voir les détails et la discussion dans le papier de Caputi et al. (2007)).

• Estimation de la luminosité totale infrarouge

Dans cette partie, nous définissons la luminosité totale infrarouge par :

$$L_{\text{IR}} = \int_{5\mu\text{m}}^{1000\mu\text{m}} L_{\nu} d\nu \quad (\text{V.3})$$

Cette définition diffère de celle introduite par Sanders & Mirabel (1996) qui mesurent la luminosité infrarouge entre $8 \mu\text{m}$ et $1000 \mu\text{m}$. Nous avons modifié la borne inférieure de l'intégrale afin de prendre en compte la totalité de l'émission des PAHs : en effet, $5 \mu\text{m}$ est une limite plus raisonnable pour séparer l'émission stellaire de celle des poussières. En utilisant les SEDs du modèle de Lagache et al. (2004), nous avons établi une relation entre ces deux définitions : $L_{5-1000\mu\text{m}}/L_{8-1000\mu\text{m}} = 1.07 \pm 0.04$.

Nous avons choisi d'estimer la luminosité totale infrarouge en faisant le moins d'hypothèses possibles. Nous avons en particulier décidé de ne pas ajuster de modèles de SEDs sur les points photométriques, comme il est pourtant souvent fait. Notre méthode nécessite uniquement la connaissance du redshift z et des 4 points photométriques (à 8, 24, 70 et $160 \mu\text{m}$) de la source considérée. C'est une méthode simple similaire aux méthodes usuelles d'intégration (méthode des rectangles ou méthode des trapèzes). Cette méthode est illustrée figure V.3.

La luminosité L_{IR} est la somme des aires des cinq régions hachurées sur la figure V.3.

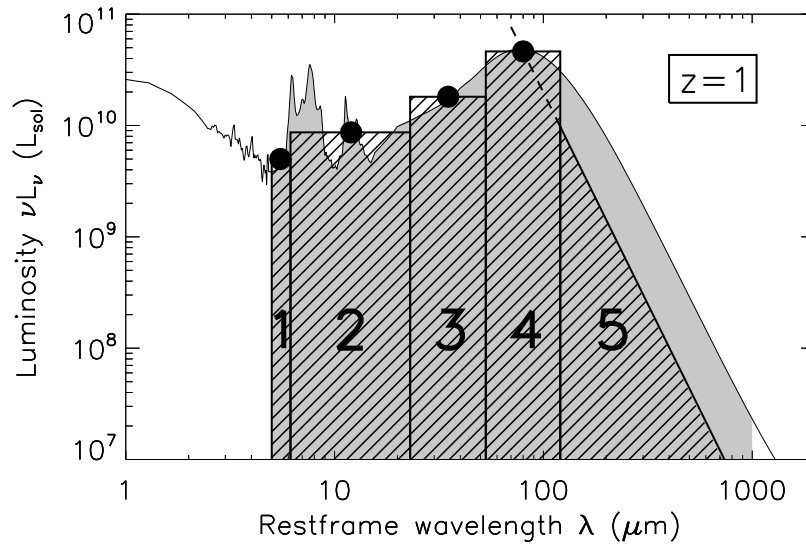


Figure V.3 – Illustration, sur une SED arbitraire (ici à un redshift $z = 1$), de la méthode utilisée pour mesurer la luminosité totale infrarouge à partir du redshift et de quatre points photométriques (les points noirs). L'aire de la région hachurée est égale à la luminosité mesurée grâce à cette méthode et est à comparer à la vraie luminosité (aire de la région grisée).

Les régions 2, 3 et 4 sont des rectangles centrés (en échelle logarithmique) sur les longueurs d'onde $24/(1+z)$, $70/(1+z)$ et $160/(1+z)$ μm (dans le référentiel au repos de la galaxie). Ces rectangles sont contigus, ce qui fixe leur largeur. Leur hauteur est donnée par la valeur des luminosités observées. La région 1 est également un rectangle qui va de 5 μm au début de la région 2. La hauteur de ce rectangle est égale à la luminosité au centre de ce dernier et est obtenue en faisant une interpolation linéaire entre les points photométriques (en νL_ν) à 8 et 24 μm . Au delà de $z = 1.5$ la largeur de cette boîte sera nulle et le flux à 8 μm ne sera donc plus utilisé. Enfin, afin de prendre en compte l'émission au delà du quatrième rectangle, c'est-à-dire dans l'infrarouge lointain, on définit une cinquième région triangulaire (en échelle logarithmique) dont la pente est -4 et dont la hauteur est fixée de telle sorte que le prolongement de l'hypothénuse passe par le point photométrique à 160 μm . Cette pente a été choisie car elle modélise correctement l'émission de type corps noir modifié des gros grains. La valeur de cette pente a peu d'influence sur l'estimation finale de L_{IR} , qui varie de $\sim 1\%$ quand la pente passe de -3.5 à -4.5 . L_{IR} est donc finalement une combinaison linéaire des quatre luminosités observées $L_{8,\text{obs}}$, $L_{24,\text{obs}}$, $L_{70,\text{obs}}$ et $L_{160,\text{obs}}$, les coefficients multiplicatifs dépendant du redshift. L'incertitude sur cette estimation peut facilement être obtenue en repercutant les erreurs photométriques de chacune des quatre luminosités.

Nous avons validé cette méthode sur des SEDs connues (celles du modèle de Lagache et al. (2004)) en comparant les luminosités mesurées de cette façon à celles mesurées en intégrant proprement l'aire sous les SEDs entre 5 et 1000 μm . Les résultats sont donnés

figure V.4. A bas redshift, cette méthode donne de très bon résultats : pour $0 < z < 1$, les erreurs sont inférieures à 15%. A plus grand redshift, comme le point photométrique à $160\ \mu\text{m}$ sonde les plus courtes longueurs d'onde, il ne permet plus d'estimer correctement l'amplitude du pic d'émission des gros grains. La luminosité infrarouge mesurée grâce à cette méthode est alors sous-estimée. Pour les SEDs les plus froides (c'est à dire celles dont le maximum d'émission est à plus grande longueur d'onde), l'erreur peut aller jusqu'à 30%. Toutefois, ces SEDs ne sont pas représentatives des galaxies à grand redshift et en considérant des SEDs typiques pour cette gamme de redshift (telles que $L_{\text{IR}} \sim L^*$), on obtient des erreurs plus petites ($< 20\%$).

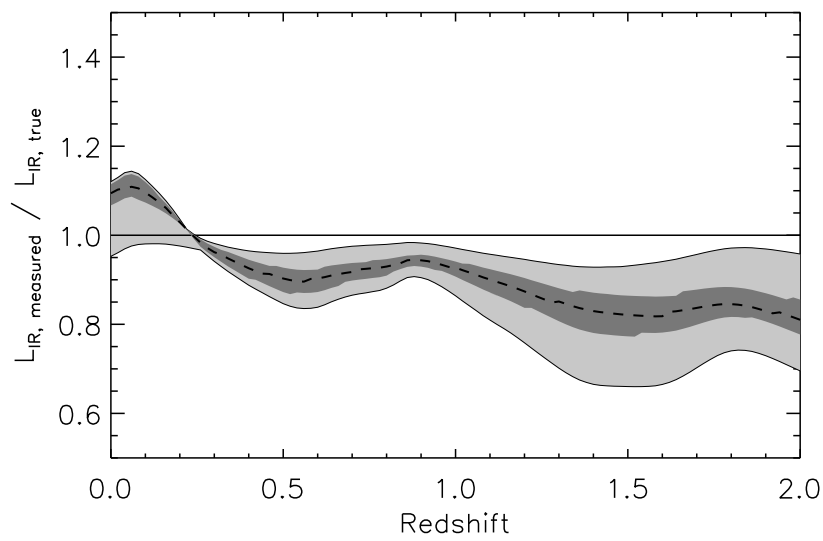


Figure V.4 – Comparaison de la luminosité totale infrarouge L_{IR} estimée avec la méthode des rectangles décrites ci-dessus et la vraie luminosité estimée en intégrant proprement la SED en fonction du redshift. Cette validation a été faite sur les SEDs du modèle LDP. Les valeurs obtenues pour l'ensemble des SEDs correspondent à la région en gris clair. La région en gris foncé correspond, pour un redshift donné, aux SEDs de luminosité typique telles que $-0.5 < \log \frac{L_{\text{IR}}}{L^*} < 0.5$. La ligne pointillée correspond aux SEDs telles que $L_{\text{IR}} = L^*$.

Grâce à cette méthode, nous avons mesuré la luminosité totale infrarouge des 372 galaxies de notre échantillon et des 18 SEDs moyennes. Notre échantillon couvre une large gamme de luminosité : de 10^9 à $10^{13} L_{\odot}$.

• Estimation des luminosités monochromatiques dans le référentiel au repos grâce à la K-correction

Afin de calculer les luminosités monochromatiques à 8, 24, 70 et $160\ \mu\text{m}$ dans le référentiel des galaxies, il est nécessaire d'appliquer une K-correction. Pour cela, nous avons utilisé la librairie de Dale et al. (2001) qui est, comme il a été expliqué précédemment, plus adaptée

pour ajuster les données de galaxies individuelles.

Pour chaque SED observée (individuelle ou moyenne), nous avons cherché parmi les 64 SEDs de la librairie DH celle qui minimisait le χ^2 défini par :

$$\chi^2 = \sum_{\lambda=8,24,70,160\mu\text{m}} (\log(S_\lambda) - \log(S_{\lambda,DH_i}))^2 \quad (\text{V.4})$$

Des exemples d'ajustement de SEDs pour quelques unes des 372 sources détectées à toutes les longueurs d'onde sont montrés figure V.5. La SED qui minimise le χ^2 est alors utilisée pour calculer la K-correction. Pour $z \gtrsim 1$, l'effet de la K-correction peut être minimisé en utilisant par exemple la luminosité observée à $24 \mu\text{m}$ pour calculer la luminosité au repos à $8 \mu\text{m}$. Ceci n'est pas applicable à $160 \mu\text{m}$ et la K-correction peut alors devenir importante à grand redshift et très dépendante du choix de la SED utilisée pour son calcul.

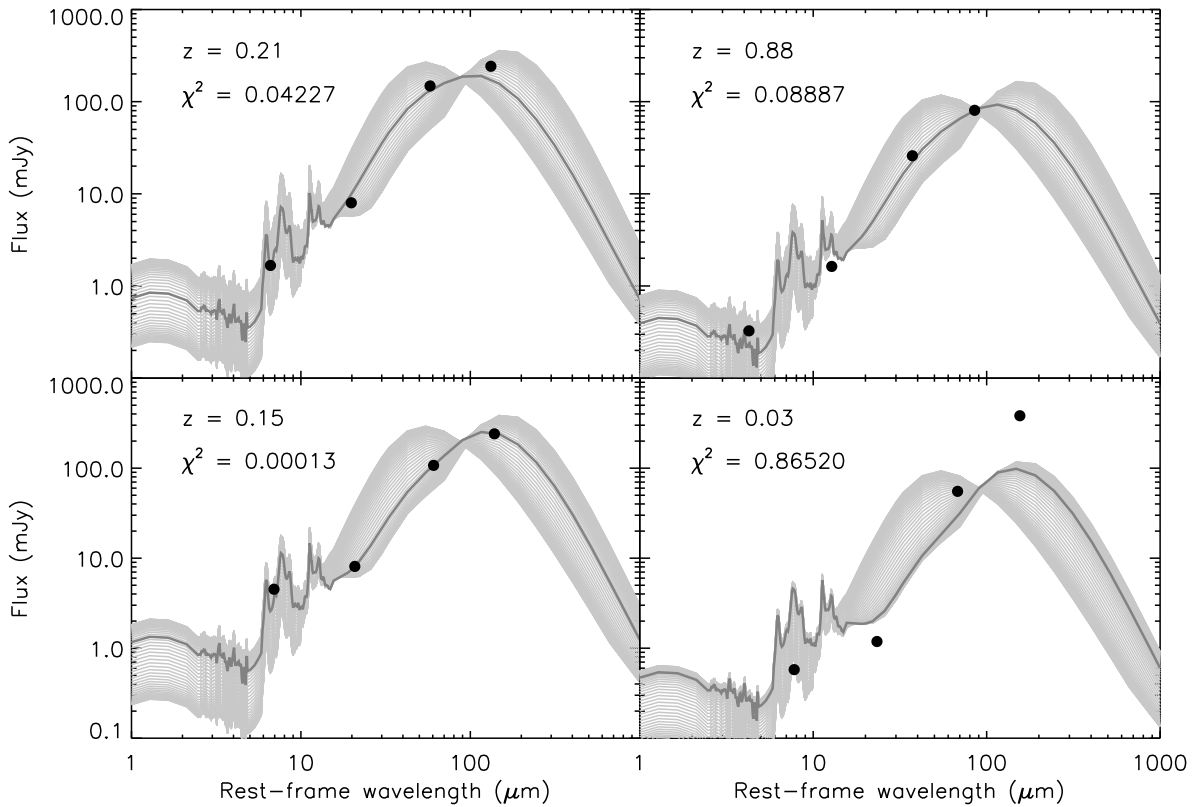


Figure V.5 – Exemple d'ajustement des points photométriques (en noir) par les SEDs du modèle DH (en gris clair) pour quatre SEDs observées de notre échantillon. La SED qui minimise le χ^2 est en gris foncé.

• Caractérisation de l'échantillon

Nous obtenons ainsi, pour les 372 SEDs individuelles et les 18 SEDs moyennes de l'échantillon, une SED complète à 8, 24, 70 et $160 \mu\text{m}$ dans le référentiel au repos de la galaxie. Nous

disposons également du redshift de chaque source et de la luminosité totale infrarouge L_{IR} que nous avons mesurée comme expliqué précédemment. Sur la figure V.6, nous montrons L_{IR} en fonction du redshift pour toutes les SEDs de notre échantillon. Celui-ci couvre une large gamme de luminosité infrarouge et de redshift. Il contient en particulier des galaxies de type LIRG jusqu'à $z \sim 1.1$ et des ULIRGs jusqu'à $z \sim 1.7$. La figure V.6 montre aussi que notre échantillon contient des galaxies de luminosité L^* jusqu'à $z \sim 0.8$ et des galaxies telles que $L_{\text{IR}} \lesssim 3L^*$ jusqu'à $z \sim 2$.

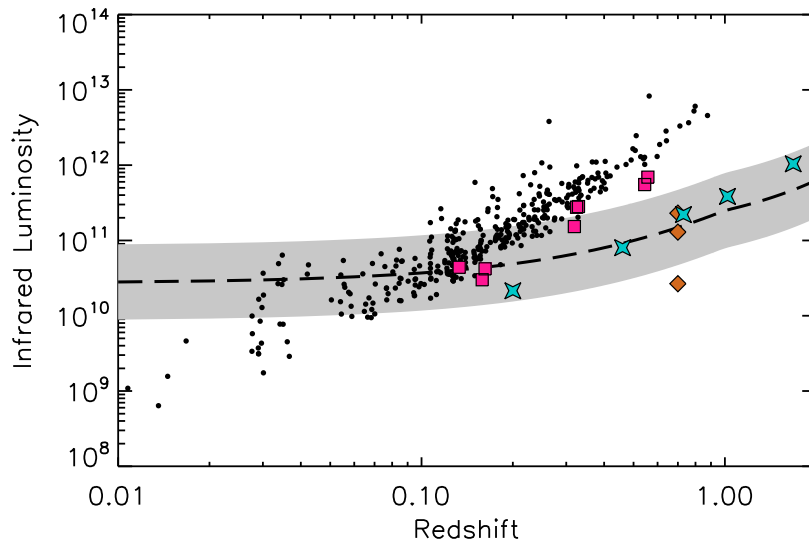


Figure V.6 – Luminosités infrarouges L_{IR} en fonction du redshift pour toutes les galaxies de l'échantillon. Les points noirs correspondent aux sources détectées directement à toutes les longueurs d'onde et les points colorés aux SEDs moyennes obtenues grâce au stacking : les carrés roses correspondent aux sources stackées dans le Boötes et le FLS, les losanges oranges aux SEDs de Zheng et al. (2007) et les étoiles bleues aux SEDs moyennes obtenues à partir de l'échantillon de Caputi et al. (2007). La zone grisée contient les galaxies telles que $-0.5 < \log \frac{L_{\text{IR}}}{L^*} < 0.5$ et la ligne pointillée correspond aux sources telles que $L_{\text{IR}} = L^*$.

• Comparaison aux modèles

Nous avons également comparé les SEDs obtenues (individuelles et moyennes) aux SEDs prédites par les différents modèles (DH, LDP et CE). Nous avons en particulier tracé les SEDs normalisées par la luminosité totale infrarouge L_{IR} et comparé à l'ensemble des SEDs possibles pour chaque modèle (voir figure V.7). On remarque qu'une partie des SEDs observées n'est pas compatible avec les prédictions des modèles. On note en particulier que les modèles ont tendance à sous-estimer le flux à $160 \mu\text{m}$ et à surestimer le flux à $24 \mu\text{m}$.

On remarque également sur la figure V.7 que les SEDs des sources détectées individuellement à toutes les longueurs d'onde (points noirs) sont différentes des SEDs moyennes

obtenues grâce au stacking (points colorés). Ces dernières sont en particulier plus chaudes, c'est-à-dire que leur maximum d'émission est à plus courte longueur d'onde. Ceci est dû aux sélections différentes des deux sous-échantillons : comme nous l'avons déjà signalé, les sources détectées aux quatre longueurs d'onde sont en réalité sélectionnées à $160\ \mu\text{m}$ contrairement aux SEDs moyennes qui résultent d'une sélection à $24\ \mu\text{m}$. Nous montrons au paragraphe suivant que cela se traduit par une différence de température des galaxies ainsi sélectionnées.

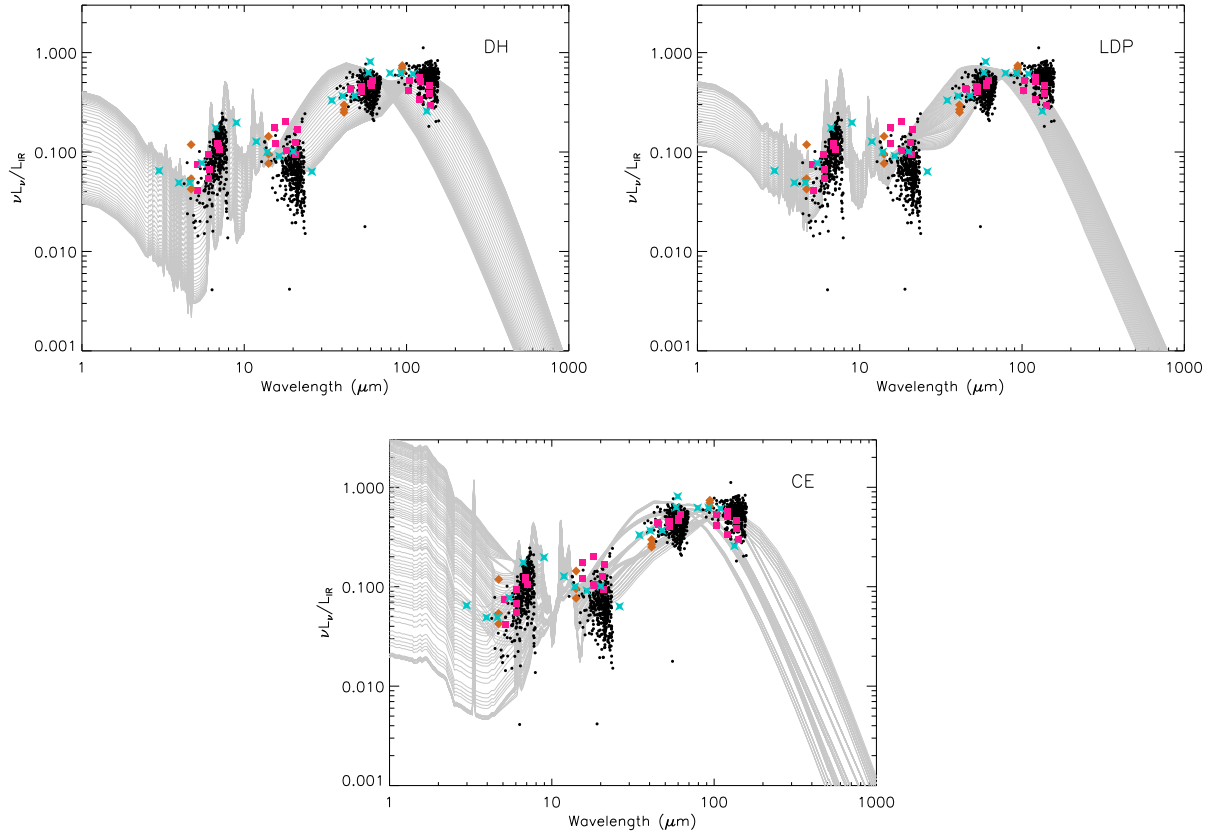


Figure V.7 – Comparaison des SEDs obtenues aux prédictions des trois modèles : DH, LDP et CE. Les symboles sont les mêmes que ceux de la figure V.6.

• Effets de sélection

Nous avons vérifié sur des simulations que les galaxies sélectionnées à $24\ \mu\text{m}$ n'avaient pas la même température de poussière que celles sélectionnées dans l'infrarouge lointain. Pour cela, nous avons distribué uniformément dans le plan $L_{\text{IR}}-z$ (en évitant la région correspondant aux sources lumineuses situées à petit décalage spectral, qui sont rares) 2000 galaxies de deux types différents : 1000 galaxies «froides» avec la SED de paramètre $\alpha = 3.5$ de la librairie DH et 1000 galaxies dites «chaudes» de SED de paramètre $\alpha = 1.3$. Pour chacune de ces galaxies, connaissant la luminosité totale, le redshift et la forme de la SED, nous avons calculé les flux à 8, 24, 70 et $160\ \mu\text{m}$. Nous avons enfin sélectionné les galaxies détectées à toutes les longueurs d'onde avec les seuils de détection suivants :

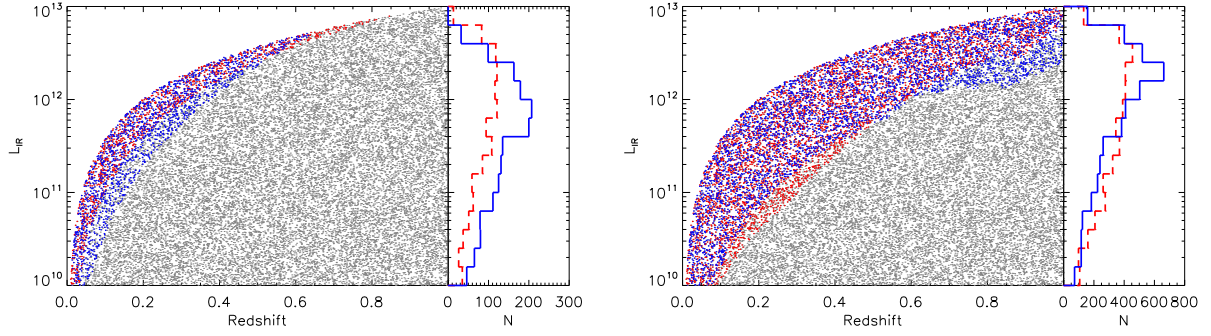


Figure V.8 – Résultats de la simulation montrant la répartition des galaxies sélectionnées dans le plan $L_{\text{IR}}-z$ avec deux jeux de seuils de détection. A gauche : $[0.006, 1, 23, 92]$ (mJy) à 8, 24, 70 et 160 μm respectivement ; à droite : $[0.006, 1, 2.3, 9.2]$ (mJy). Les galaxies «froides» sont représentées en bleu (ligne continue pour l'histogramme) et les galaxies «chaudes» sont en rouge (ligne en tirets pour l'histogramme). Les points gris correspondent aux galaxies non détectées.

- 6 μJy à 8 μm , 1 mJy à 24 μm , 23 mJy à 70 μm et 92 mJy à 160 μm . Ces seuils de détection sont ceux utilisés dans le champ Boötes pour les sources détectées directement aux quatre longueurs d'onde.
- 6 μJy à 8 μm , 1 mJy à 24 μm , 2.3 mJy à 70 μm et 9.2 mJy à 160 μm . Ces seuils de détection correspondent aux limites de détection effectives pour le cas typique où 100 sources ont été stackées à 70 et 160 μm dans le champ Boötes.

La figure V.8 illustre les effets d'une telle différence de sélection. Pour les galaxies de luminosité $L_{\text{IR}} < 3 \times 10^{11} L_{\odot}$, les galaxies détectées directement aux quatre longueurs d'onde (c'est-à-dire sélectionnées dans l'infrarouge lointain) sont plus froides que les galaxies dont les SEDs moyennes ont été obtenues grâce au stacking (c'est-à-dire sélectionnées dans l'infrarouge moyen). A plus grande luminosité ($L_{\text{IR}} > 10^{12} L_{\odot}$), on observe l'effet inverse. Ceci aura des conséquences sur les résultats présentés dans la suite.

V.1.3 Corrélations et estimation de L_{IR}

Une fois déterminées la luminosité totale infrarouge L_{IR} et les luminosités monochromatiques à 8, 24, 70 et 160 μm (dans le référentiel au repos des galaxies) nous pouvons étudier les corrélations entre ces différentes luminosités. On notera L_8 , L_{24} , L_{70} et L_{160} les quatre luminosités monochromatiques². Celles-ci s'expriment en Watt, de même que L_{IR} .

Les corrélations entre les quatre luminosités monochromatiques et L_{IR} sont présentées figure V.9 pour les 372 galaxies détectées directement aux quatre longueurs d'onde. Au premier ordre, ces corrélations sont un effet de taille : plus l'émission infrarouge est importante

2. Afin d'éviter toute ambiguïté, il vaudrait mieux utiliser les notations suivantes $(\nu L_{\nu})_{8 \mu\text{m}, \text{rest}}$, $(\nu L_{\nu})_{24 \mu\text{m}, \text{rest}}$, $(\nu L_{\nu})_{70 \mu\text{m}, \text{rest}}$ et $(\nu L_{\nu})_{160 \mu\text{m}, \text{rest}}$ qui sont plus explicites.

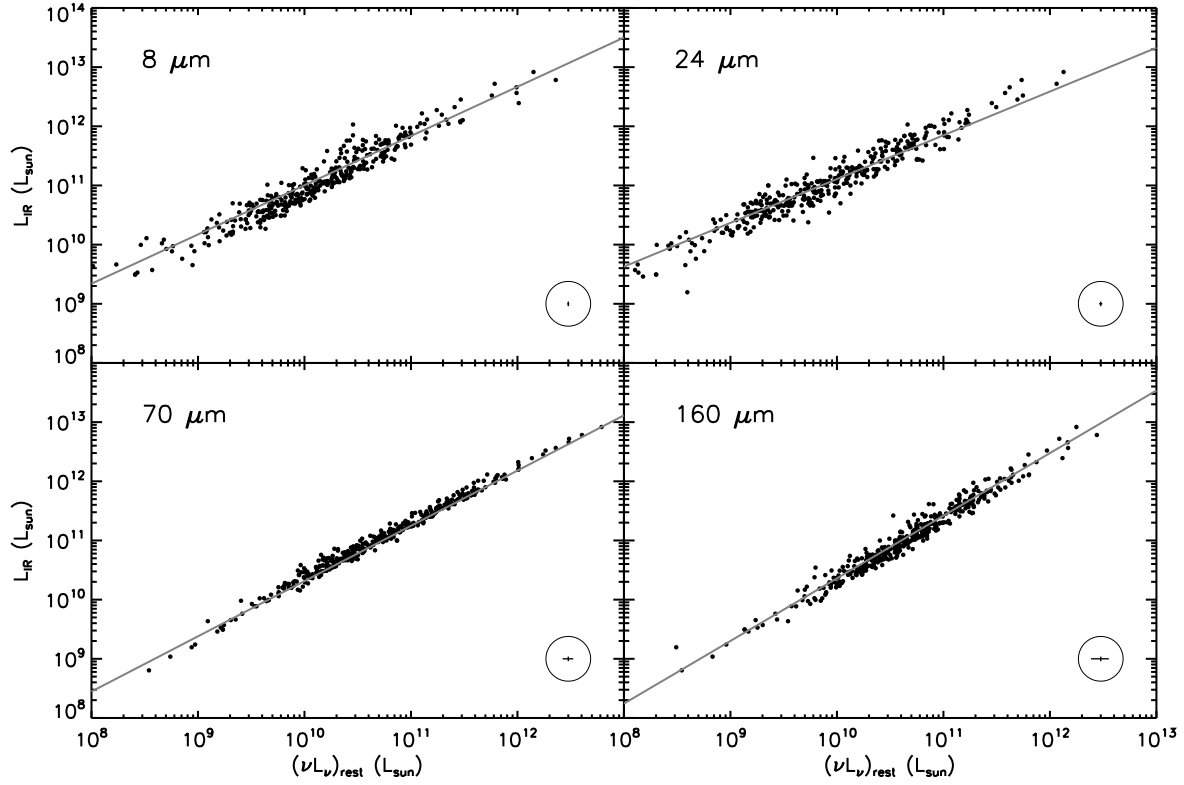


Figure V.9 – Corrélations entre les luminosités monochromatiques à 8, 24, 70 et 160 μm et la luminosité totale infrarouge L_{IR} . Les symboles sont les mêmes que figure V.6. Des barres d'erreur caractéristiques sont montrées dans le cercle en bas à droite. Le meilleur ajustement (équations V.5) est la droite grise.

plus l'émission à chaque longueur d'onde le sera. Ce n'est donc pas tant les corrélations en elles-même qui importent, mais la pente de ces corrélations et la dispersion autour de la valeur moyenne qui nous renseignent toutes les deux sur les SEDs des galaxies étudiées. En effet, si la pente de la droite (en échelle logarithmique) est plus grande que 1, cela signifie que la luminosité totale L_{IR} augmente plus vite que la luminosité à la longueur d'onde considérée. La dispersion nous renseigne quant à elle sur la variété des SEDs des galaxies.

Nous avons ajusté les corrélations précédentes par une droite (en échelle logarithmique, c'est-à-dire une loi de puissance en échelle linéaire). Nous obtenons les relations suivantes qui peuvent être utilisées pour estimer L_{IR} à partir d'une luminosité monochromatique :

$$\begin{cases} L_{\text{IR}} = 482.5 \times L_8^{0.83} & (\pm 37\%) \\ L_{\text{IR}} = 5113 \times L_{24}^{0.74} & (\pm 37\%) \\ L_{\text{IR}} = 9.48 \times L_{70}^{0.93} & (\pm 16\%) \\ L_{\text{IR}} = 0.596 \times L_{160}^{1.06} & (\pm 26\%) \end{cases} \quad (\text{V.5})$$

Les chiffres entre parenthèses donnent la dispersion relative ($1-\sigma$) autour du meilleur ajustement (en échelle linéaire). Comme on aurait déjà pu le noter sur la figure V.7, on remarque

que la luminosité à $70\ \mu\text{m}$ est le meilleur traceur de L_{IR} . L_8 et L_{24} , bien qu'étant de moins bons traceurs, permettent toutefois d'estimer L_{IR} avec une précision meilleure que 40%. Ces corrélations ayant été établies à partir des 372 galaxies sélectionnées dans l'infrarouge lointain, les équations V.5 ne sont a priori valables que pour de telles galaxies.

L'échantillon précédent sur lequel nous avons établi les corrélations est dominé par des galaxies situées à des redshifts intermédiaires (93% sont à $z < 0.4$). Les SEDs moyennes obtenues grâce au stacking permettent de sonder des galaxies à plus grand redshift (pour une luminosité donnée). Nous avons donc ajouté ces points sur les corrélations précédentes (voir figure V.10). Ces derniers sont en plutôt bon accord avec les précédents, même si on observe un léger décalage qui peut être expliqué par les effets de sélection présentés au paragraphe précédent. En effet, à faible luminosité ($L_{\text{IR}} \lesssim 10^{11} L_{\odot}$), les galaxies sélectionnées dans l'infrarouge moyen (c'est-à-dire les points obtenus avec le stacking) sont plus chaudes que les galaxies sélectionnées dans l'infrarouge lointain et, pour une même luminosité infrarouge L_{IR} , les galaxies les plus chaudes sont celles qui émettent le plus à $24\ \mu\text{m}$ et le moins à $160\ \mu\text{m}$. A plus grande luminosité, on a l'effet inverse. Ceci est cohérent avec les décalages observés figure V.10.

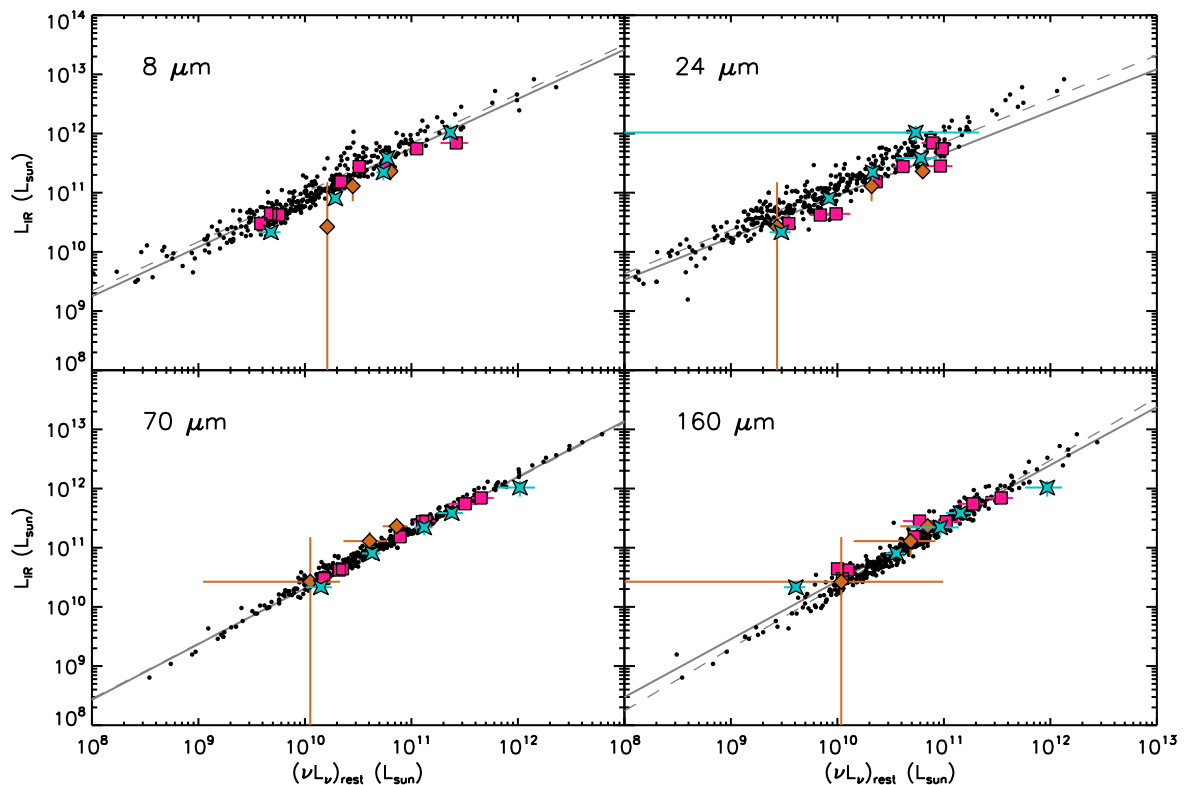


Figure V.10 – Même figure que la figure V.9 mais avec les points de stacking ajoutés. Les droites grises continues représentent les meilleurs ajustements obtenus avec tous les points (équations V.6) et les droites grises en tirets, les meilleurs ajustements obtenus sans les points de stacking (équations V.5).

En tenant compte de ces nouveaux points, on obtient les relations suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} L_{\text{IR}} = 377.9 \times L_8^{0.83} \quad (\pm 37\%) \\ L_{\text{IR}} = 6856 \times L_{24}^{0.71} \quad (\pm 54\%) \\ L_{\text{IR}} = 7.90 \times L_{70}^{0.94} \quad (\pm 19\%) \\ L_{\text{IR}} = 4.24 \times L_{160}^{0.98} \quad (\pm 31\%) \end{array} \right. \quad (\text{V.6})$$

Ces dernières relations sont représentatives de l'ensemble de la population des galaxies infrarouges puisqu'elles ont été établies sur un grand nombre d'objets différents. Elles sont en particulier valables jusqu'à $z = 1.1$ pour les LIRGs et jusqu'à $z \sim 2$ pour les ULIRGs.

On peut noter que la dispersion à $24 \mu\text{m}$ est celle qui a le plus augmenté. L'origine de cette augmentation n'est pas bien comprise. En premier lieu, cela pourrait être du à une éventuelle (bien que peu probable de par notre sélection) contamination par des AGNs. Ensuite, l'incertitude sur la K-correction des sources à $z \sim 0.8$ due à la présence des bandes PAHs pourraient aussi introduire une dispersion supplémentaire. Enfin, cet effet est également observé sur les SEDs du modèle de Dale et al. (2001), où l'importance relative de l'émission dans l'infrarouge moyen ($20\text{--}50 \mu\text{m}$) est celle qui varie le plus avec le paramètre α , c'est-à-dire avec l'activité de formation stellaire. Ceci fait de l'infrarouge moyen la gamme de longueur d'onde la plus sensible aux événements récents dans les galaxies observées puisque c'est l'émission des VSG qui dépend le plus fortement de l'intensité du champ de radiation (par exemple Boselli et al. 1998).

Lorsque c'est possible, combiner différentes luminosités monochromatiques permet de mieux contraindre la luminosité totale infrarouge. Nous avons en particulier établi les relations suivantes à partir de la totalité de notre échantillon :

$$\left\{ \begin{array}{l} L_{\text{IR}} = 5607 \times L_8^{0.71} + 1.00 \times 10^{-5} \times L_{24}^{1.50} \quad (\pm 34\%) \\ L_{\text{IR}} = 8.9 \times 10^{-4} \times L_{24}^{1.27} + 12.62 \times L_{70}^{0.92} \quad (\pm 20\%) \\ L_{\text{IR}} = 3.87 \times L_{70}^{0.96} + 1.58 \times L_{160}^{0.95} \quad (\pm 11\%) \\ L_{\text{IR}} = 0.0071 \times L_8^{1.11} + 7.4 \times 10^{-4} \times L_{24}^{1.28} + 12.8 \times L_{70}^{0.92} \quad (\pm 19\%) \\ L_{\text{IR}} = 1.62 \times L_{24}^{0.99} + 1.59 \times L_{70}^{0.98} + 3.78 \times L_{160}^{0.94} \quad (\pm 7\%) \\ L_{\text{IR}} = 8.86 \times L_8^{0.81} + 1.28 \times L_{24}^{1.00} + 1.45 \times L_{70}^{0.98} + 3.92 \times L_{160}^{0.94} \quad (\pm 6\%) \end{array} \right. \quad (\text{V.7})$$

On remarque par exemple que combiner les luminosités à 8 et $24 \mu\text{m}$ permet d'améliorer légèrement l'estimation de L_{IR} . Il en est de même si on combine L_{70} et L_{160} : on obtient L_{IR} avec une précision de 11%. Enfin, combiner les quatre luminosités permet d'estimer L_{IR} à 6% près.

Ces relations sont très utiles pour étudier les galaxies à grand redshift puisque on dispose très rarement pour ces galaxies d'informations sur leur SED dans l'infrarouge lointain (cf. paragraphe V.1.1). Dans ce cas, on peut alors, à l'aide des relations précédentes, donner une

estimation de la luminosité totale infrarouge uniquement à partir des flux à 8 et/ou 24 μm et du redshift. On obtient également l'incertitude sur cette estimation.

V.1.4 Application à l'Univers lointain

Ces résultats ont été utilisés par Caputi et al. (2007) pour déduire les fonctions de luminosité bolométrique à $z = 1$ et $z \sim 2$ des fonctions de luminosité à 8 μm obtenues aux mêmes redshifts. Ces dernières avaient été obtenues à partir d'un échantillon très profond de galaxies sélectionnées à 24 μm et dominées par la formation stellaire (les AGNs ont été supprimés grâce à des critères X et infrarouges). Les redshifts de toutes ces sources sont connus. A partir des flux à 24 μm et des redshifts, il est facile d'obtenir les luminosités à 8 μm dans le référentiel de la galaxie, puisque la K-correction à appliquer est petite (en particulier à $z \sim 2$). On en déduit alors les fonctions de luminosité à 8 μm qui peuvent ensuite être converties en fonction de luminosité bolométriques à partir des relations V.6. Ces deux fonctions de luminosité sont représentées figure V.11.

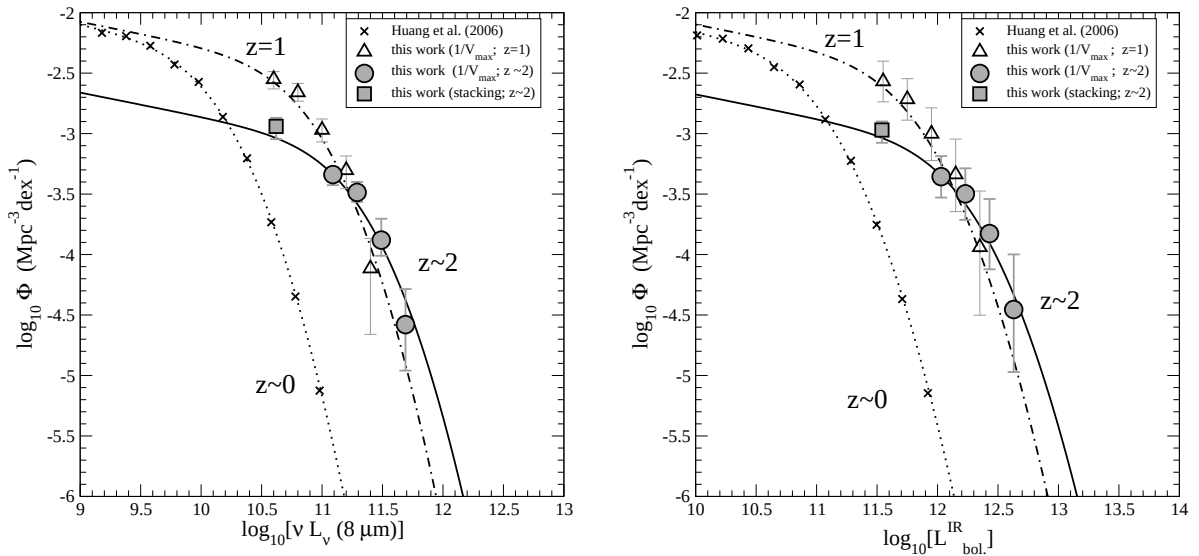


Figure V.11 – A gauche : fonction de luminosité à 8 μm à $z = 1$ (triangles blancs) et $z \sim 2$ (symboles gris). A droite : fonction de luminosité bolométrique à $z = 1$ et $z \sim 2$ (même symboles). D'après Caputi et al. (2007).

Il est ensuite possible de calculer la densité d'énergie infrarouge à partir de ces fonctions de luminosité (voir équation I.76) (la pente de la partie faible luminosité étant fixée à $\alpha = 1.2$). On obtient $\rho_{\text{IR}}(z = 1) = (1.2 \pm 0.7) \times 10^9 L_{\odot} \text{ Mpc}^{-3}$ et $\rho_{\text{IR}}(z \sim 2) = (6.6 \pm 3.6) \times 10^8 L_{\odot} \text{ Mpc}^{-3}$ qui peuvent être transformées en taux de formation stellaire volumiques : $\delta_{\text{SFR}}(z = 1) = 0.20 M_{\odot} \text{ yr}^{-1} \text{ Mpc}^{-3}$ et $\delta_{\text{SFR}}(z \sim 2) = 0.11 M_{\odot} \text{ yr}^{-1} \text{ Mpc}^{-3}$. Ces valeurs sont en bon accord avec les autres études (Barger et al. 2000; Perez-Gonzalez et al. 2005; Reddy et al. 2008)

et montrent que la densité d'énergie semble être maximum entre $z = 1$ et $z = 2$. A $z \sim 2$, environ 90% de l'énergie infrarouge est émise par les galaxies de type LIRGs et ULIRGs et ces deux populations contribuent de façon égale à la densité totale d'énergie infrarouge.

V.1.5 Evolution avec le redshift ?

Comme notre échantillon couvre une large gamme de redshift et de luminosité, nous avons pu étudier s'il était possible de détecter une éventuelle évolution des SEDs avec le redshift.

Une des propriétés bien connue des galaxies infrarouges est l'augmentation de la température des gros grains, tracée par exemple par le rapport L_{160}/L_{70} , avec la luminosité infrarouge L_{IR} . Nous avons en particulier étudié si cette relation évoluait avec le redshift. Notre échantillon permet d'étudier indépendamment trois gammes de redshifts : l'échantillon à bas redshift est composé des galaxies détectées directement à toutes les longueurs d'onde, celui à redshift intermédiaire des galaxies provenant du stacking dans le champ Boötes (les carrés roses sur les figures) et enfin l'échantillon à grand redshift est composé des galaxies provenant du stacking des sources de Caputi et al. (2007) (étoiles bleues sur les figures). La figure V.12 montre qu'il n'y a pas d'évolution notable de cette relation avec le redshift : les points à plus haut redshift étant compatibles avec les points à bas redshift, même si on observe quelques différences qui sont dues aux effets de sélection déjà présentés (figure V.8). En particulier, à faible luminosité, les points provenant du stacking (c'est-à-dire sélectionnés dans l'infrarouge moyen) ont une couleur L_{160}/L_{70} plus faible, c'est-à-dire une température de gros grains plus élevée, que les sources sélectionnées dans l'infrarouge lointain.

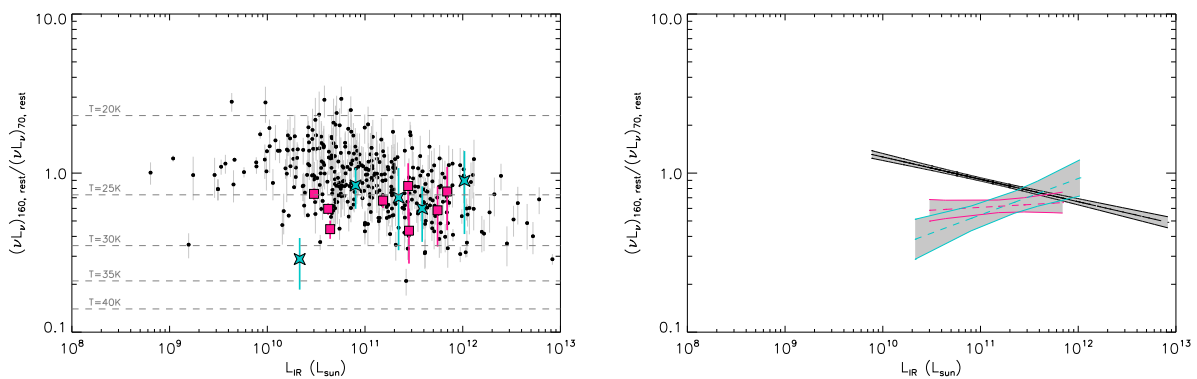


Figure V.12 – A gauche : évolution de la relation entre la couleur L_{160}/L_{70} et L_{IR} avec le redshift. Les symboles sont les mêmes que précédemment. La température des gros grains a été calculée en supposant que ceux-ci avaient une émission de type corps noir modifié avec un indice spectral $\beta = 2$. A droite : meilleur ajustement (et intervalle de confiance à $1-\sigma$) des relations température–luminosité pour chacun des trois sous-échantillons.

V.1.6 Lien avec la population des galaxies submillimétriques

Enfin nous avons étudié le lien entre notre large échantillon de galaxies infrarouges et la population des galaxies sub-millimétriques (SMG) en comparant l'évolution de la température de la poussière froide $T_{d,cold}$ de ces galaxies avec la luminosité totale infrarouge L_{IR} (figure V.13). Il est d'ailleurs possible de remarquer une fois encore sur cette figure les effets de sélection mentionnés précédemment : en effet, aux faibles luminosités ($L_{IR} \lesssim 10^{11} L_{\odot}$) les points provenant du stacking correspondent à des températures plus importantes que les galaxies détectées directement à toutes les longueurs d'onde alors qu'aux plus grandes luminosités ($L_{IR} \gtrsim 10^{12} L_{\odot}$), on observe l'effet inverse.

Nous avons comparé nos résultats à ceux de Chapman et al. (2003) (galaxies IRAS locales), Sajina et al. (2006) (sources FIRBACK 170 μm), Kovács et al. (2006) (galaxies submillimétriques) et Benford et al. (1999); Beelen et al. (2006) (AGNs) et l'on observe un bon accord entre toutes ces études même si elles ne couvrent pas toutes les mêmes régimes de température et de luminosité. Une des questions que l'on peut se poser est de savoir si les galaxies submillimétriques constituent, à un redshift donné, une population dominante ou si elles sont au contraire marginales. Pour cela, nous avons sélectionné dans notre échantillon initial deux tranches de redshift et comparé aux sources des précédentes études situées aux mêmes redshifts (figure V.13). A $z \sim 1$, on voit que les deux SMGs sont plus froides que nos galaxies. Il est possible que notre échantillon contienne quelques galaxies aussi froides, mais il n'est pas dominé par celles-ci. A $z \sim 2$, notre point moyen est en bon accord avec les galaxies submillimétriques de plus faible luminosité. Ceci suggère que les populations de galaxies infrarouges et submillimétriques sont identiques mais ces deux types d'observation se complètent bien : la première est bien adaptée à l'étude des galaxies à $z \lesssim 2$ alors que le domaine submillimétrique est plus adapté à l'étude des galaxies situées à plus grand redshift à cause de la K-correction avantageuse dans cette gamme de longueur d'onde.

V.2 Etude détaillée des SEDs de quelques galaxies

Afin d'étudier plus en détail les SEDs des galaxies infrarouges, 21 heures d'observations ont été obtenues sur le télescope spatial *Spitzer* dans le cadre d'un programme de temps ouvert (ModzSED ; PI : Hervé Dole). 17 galaxies sélectionnées à 70 μm et situées à des redshifts intermédiaires ($0.02 < z < 0.56$, $z_{median} = 0.12$) ont été observées à l'aide des instruments IRS et MIPS-SED.

Ces observations ont pour objectif d'apporter des contraintes supplémentaires sur les SEDs des galaxies infrarouges à des redshifts intermédiaires, et plus particulièrement dans l'infrarouge lointain, où les données sont plus difficiles à obtenir comme il a déjà été signalé précédemment. Grâce à ces données on pourra par exemple mesurer la température des gros grains,

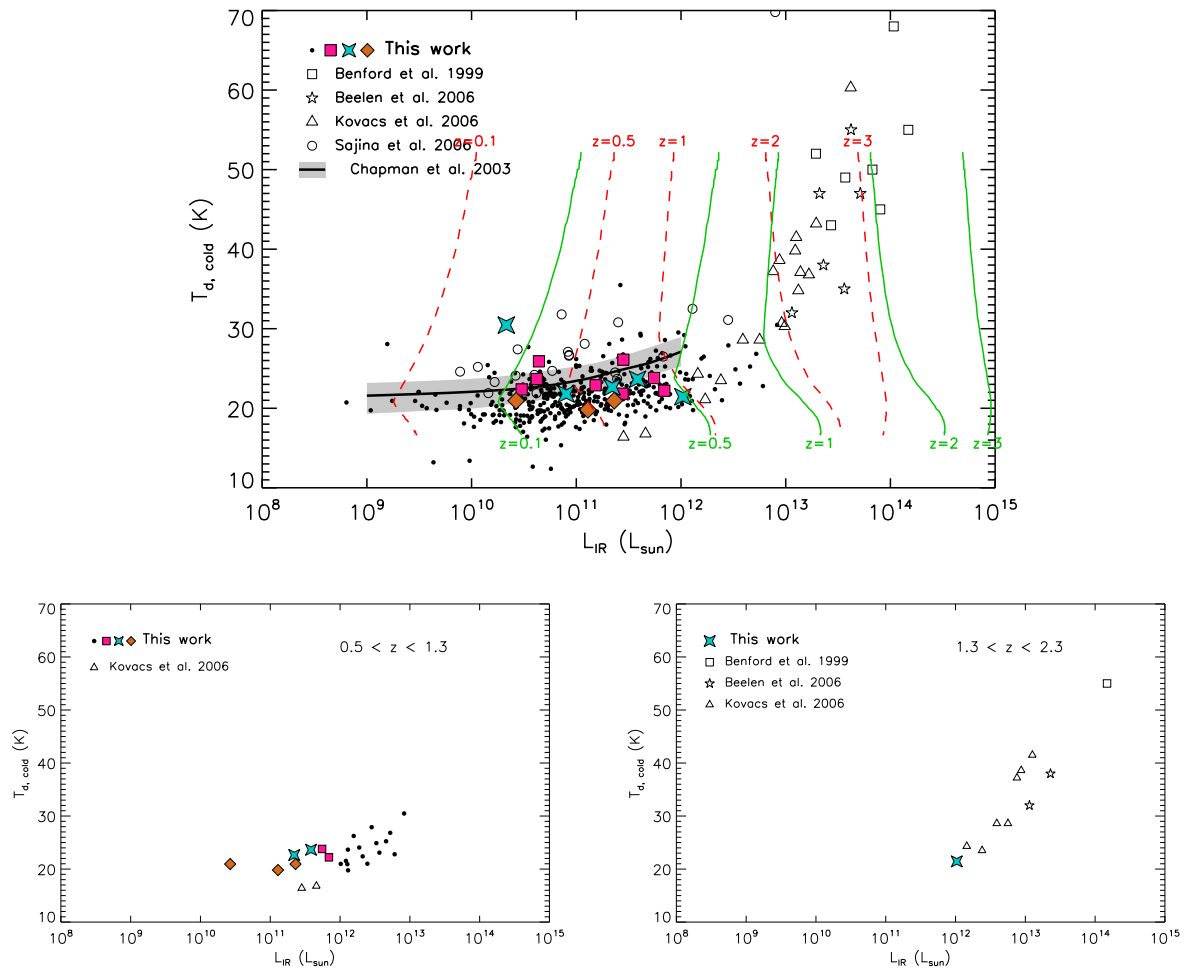


Figure V.13 – En haut : variation de la température de la composante froide de la poussière pour les galaxies de notre échantillon et quelques autres galaxies détectées dans le domaine submillimétrique (Chapman et al. 2003; Sajina et al. 2006; Kovács et al. 2006; Benford et al. 1999; Beelen et al. 2006). Les lignes continues cyan et les lignes tirets orange sont les limites de détection pour les galaxies de notre échantillon détectées directement et grâce au stacking. Seules les sources situées à droite de ces lignes sont détectables. En bas à gauche : idem pour la tranche de redshift $0.5 < z < 1.3$. En bas à droite : idem pour la tranche de redshift $1.3 < z < 2.3$.

ou encore estimer précisément la luminosité infrarouge totale L_{IR} . On pourra aussi étudier en détail la physique de la poussière (ionisation, taille, composition...) grâce aux bandes des molécules PAHs observées par IRS. On pourra enfin voir comment ces propriétés dépendent de la luminosité infrarouge et du redshift.

Cet échantillon est unique de par sa large couverture spectrale. Les données disponibles couvrent en effet la quasi-totalité du spectre infrarouge (de 3 à 200 μm). Nous présentons dans cette partie quelques résultats préliminaires.

V.2.1 Présentation des données

L'échantillon a été sélectionné dans l'infrarouge lointain, à $70\ \mu\text{m}$: $S_{70} > 200\ \text{mJy}$. Grâce au relevé spectroscopique AGES (Kochanek et al., en préparation), le redshift de toutes les sources telles que $S_{24} > 1\ \text{mJy}$, c'est-à-dire de toutes les sources de l'échantillon, est connu. Ce relevé permet également de rejeter les AGNs de notre l'échantillon grâce à des diagnostics spectroscopiques dans le domaine visible.

Ces 17 sources ont été observées en mode basse résolution sur le spectrographe IRS (avec les quatre modules LL1, LL2, SL1, SL2) et en très basse résolution avec MIPS-SED. La réduction des données a été essentiellement faite par Christophe Willmer (équipe MIPS, University of Arizona). Nous avons également mesuré le flux des 17 sources aux sept longueurs d'onde disponibles sur Spitzer (3.6, 4.5, 5.8, 8.0, 24, 70 et $160\ \mu\text{m}$). Les résultats sont donnés dans la table V.1. Certaines sources sont résolues aux plus courtes longueurs d'onde et/ou présentent un très proche voisin (voir figure V.14), ce qui nous a obligé à adapter les rayons d'ouverture à chaque source et éventuellement à soustraire la contribution de sources voisines. Certaines sources ont également été détectées par IRAS : le cas échéant, leur flux a été reporté dans la table V.1.

Des images optiques (SDSS) et infrarouge (3.6, 24 et $70\ \mu\text{m}$) des différentes galaxies de l'échantillon sont visibles figure V.14. On remarque qu'environ la moitié d'entre elles présente des signes forts d'interaction (voisin très proche, morphologie irrégulière, queue de marée). Le reste des galaxies ressemble plutôt à des spirales.

Nous avons donc pour chacune des 17 galaxies un grand nombre d'observations dans l'infrarouge que nous avons combinées afin d'obtenir les SEDs présentées figure V.15. Des spectres optiques sont également disponibles mais nous ne les avons pas utilisés. Lors de la calibration en flux des spectres IRS, deux corrections doivent être appliquées : sur le spectre 2D, le flux est intégré dans une ouverture donnée (qui peut dépendre de la longueur d'onde). Comme pour la photométrie d'ouverture, on doit corriger cet effet : cette correction est l'ALCF (*Aperture Loss Correction Factor*). Ensuite, une partie du flux de la source est perdue à cause de la taille finie de la fente d'entrée du spectrographe. Il faut alors appliquer une deuxième correction, dite SLCF (*Slit Loss Correction Factor*). Dans le cas des sources ponctuelles ces deux corrections (qui dépendent de la longueur d'onde) sont contenues dans le facteur de calibration puisque celui-ci a été établi sur des sources ponctuelles (des étoiles). Cependant, dans le cas de sources étendues (c'est-à-dire les sources 00, 01, 02, 03, 04, 05, 06 et 07 de notre échantillon), ces corrections ne sont plus valables et il faut faire des corrections supplémentaires. Pour cela, nous avons appliqué les corrections SLCF établies par le SSC³ dans le cas d'un profil plat à la fois dans les directions spatiales et spectrales. Pour corriger de l'autre effet, nous avons respectivement recalé les spectres IRS SL et LL

3. http://ssc.spitzer.caltech.edu/irs/calib/extended_sources/slcf.html

id	α (J2000)	δ (J2000)	z	$S_{3.6}$ (mJy)	$S_{4.5}$ (mJy)	$S_{5.8}$ (mJy)	$S_{8.0}$ (mJy)	S_{24} (mJy)	S_{60} (mJy)	S_{70} (mJy)	S_{100} (mJy)	S_{160} (mJy)
0.....	14 ^h 31 ^m 25.43 ^s	+33° 13' 49.7''	0.023	5.83	3.86	9.43	23.99	49.8	652	684	1240	862
1.....	14 ^h 35 ^m 18.21 ^s	+35° 07' 8.3''	0.028	25.14	17.38	65.98	215.64	225.7	2859	2992	5809	5322
2.....	14 ^h 36 ^m 41.23 ^s	+34° 58' 24.2''	0.030	6.01	4.08	10.28	31.13	25.8	...	468	...	937
3.....	14 ^h 31 ^m 56.23 ^s	+33° 38' 33.1''	0.034	16.67	11.28	20.54	66.44	52.3	739	765	1919	2426
4.....	14 ^h 31 ^m 19.76 ^s	+35° 34' 18.0''	0.035	4.27	2.80	7.93	24.64	31.0	...	470	...	628
5.....	14 ^h 31 ^m 21.12 ^s	+35° 37' 21.8''	0.035	13.54	8.79	24.12	72.84	47.7	811	1150	2269	2419
6.....	14 ^h 30 ^m 24.46 ^s	+32° 56' 16.4''	0.042	4.99	3.48	6.64	22.95	38.8	393	425	1309	634
7.....	14 ^h 34 ^m 45.32 ^s	+33° 13' 46.1''	0.074	2.09	1.50	1.65	5.92	14.2	...	241	...	421
8.....	14 ^h 32 ^m 28.36 ^s	+34° 58' 38.8''	0.129	1.08	0.84	0.67	3.46	2.9	...	119	...	338
9.....	14 ^h 26 ^m 59.12 ^s	+33° 33' 4.9''	0.150	0.50	0.47	0.80	4.71	11.7	368	525	1000	763
10.....	14 ^h 26 ^m 23.88 ^s	+32° 44' 35.8''	0.171	0.58	1.35	2.38	4.69	12.1	...	296	...	414
11.....	14 ^h 28 ^m 49.79 ^s	+34° 32' 40.2''	0.216	1.17	1.12	1.04	5.87	7.7	...	213	...	473
12.....	14 ^h 31 ^m 14.77 ^s	+33° 46' 23.0''	0.229	0.77	0.71	0.54	2.66	3.9	...	137	...	336
13.....	14 ^h 32 ^m 39.56 ^s	+35° 01' 51.3''	0.236	0.32	0.54	0.91	3.04	10.8	...	222	...	310
14.....	14 ^h 32 ^m 34.90 ^s	+33° 28' 32.3''	0.249	0.31	0.32	0.20	1.14	3.9	...	334	...	363
15.....	14 ^h 36 ^m 28.12 ^s	+33° 33' 58.0''	0.265	0.24	0.32	0.28	1.99	10.9	...	220	...	240
16.....	14 ^h 25 ^m 52.68 ^s	+34° 02' 40.1''	0.563	0.41	0.50	0.79	1.33	11.3	...	247	...	352

Table V.1 – Flux des 17 galaxies de l'échantillon ModzSED à 3.6, 4.5, 5.8, 8.0, 24, 60, 70, 100 et 160 μm .

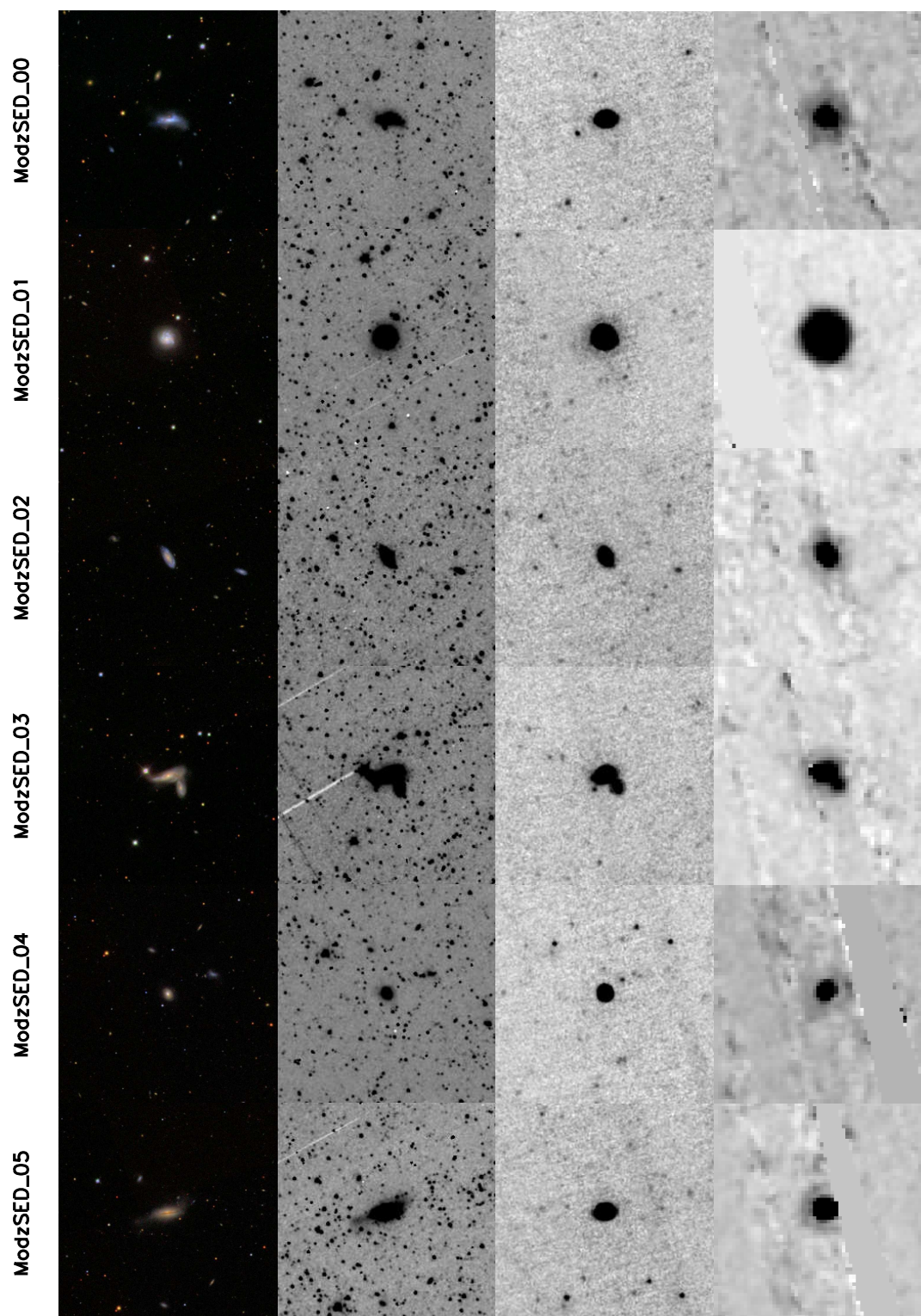
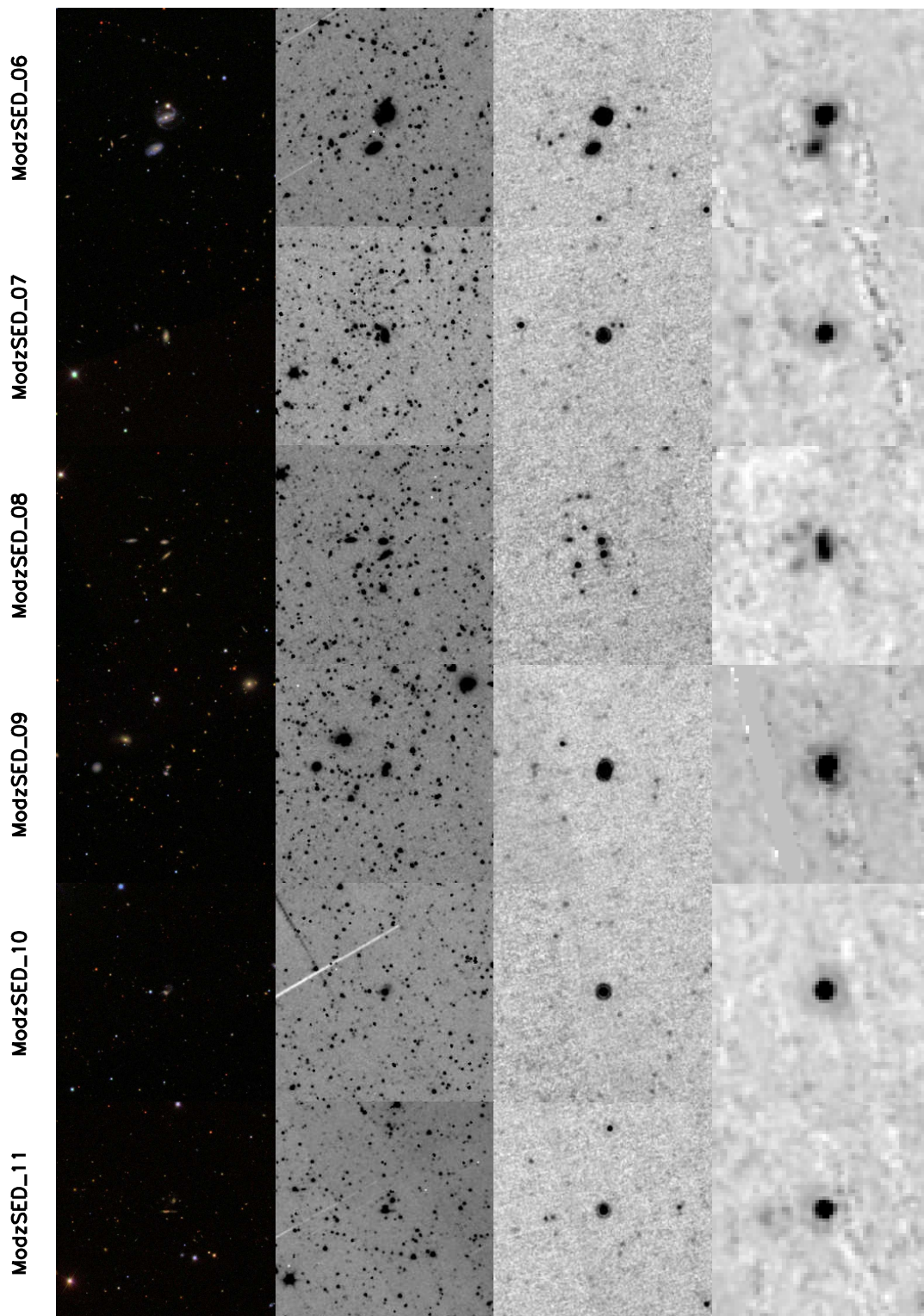


Figure V.14 – Images des 17 galaxies de l'échantillon ModzSED. La première image est une image optique du relevé SDSS, les trois suivantes correspondent aux longueurs d'onde 3.6, 24 et 70 μm . Chaque image a une taille de $5' \times 5'$.

Figure V.14 – *suite*

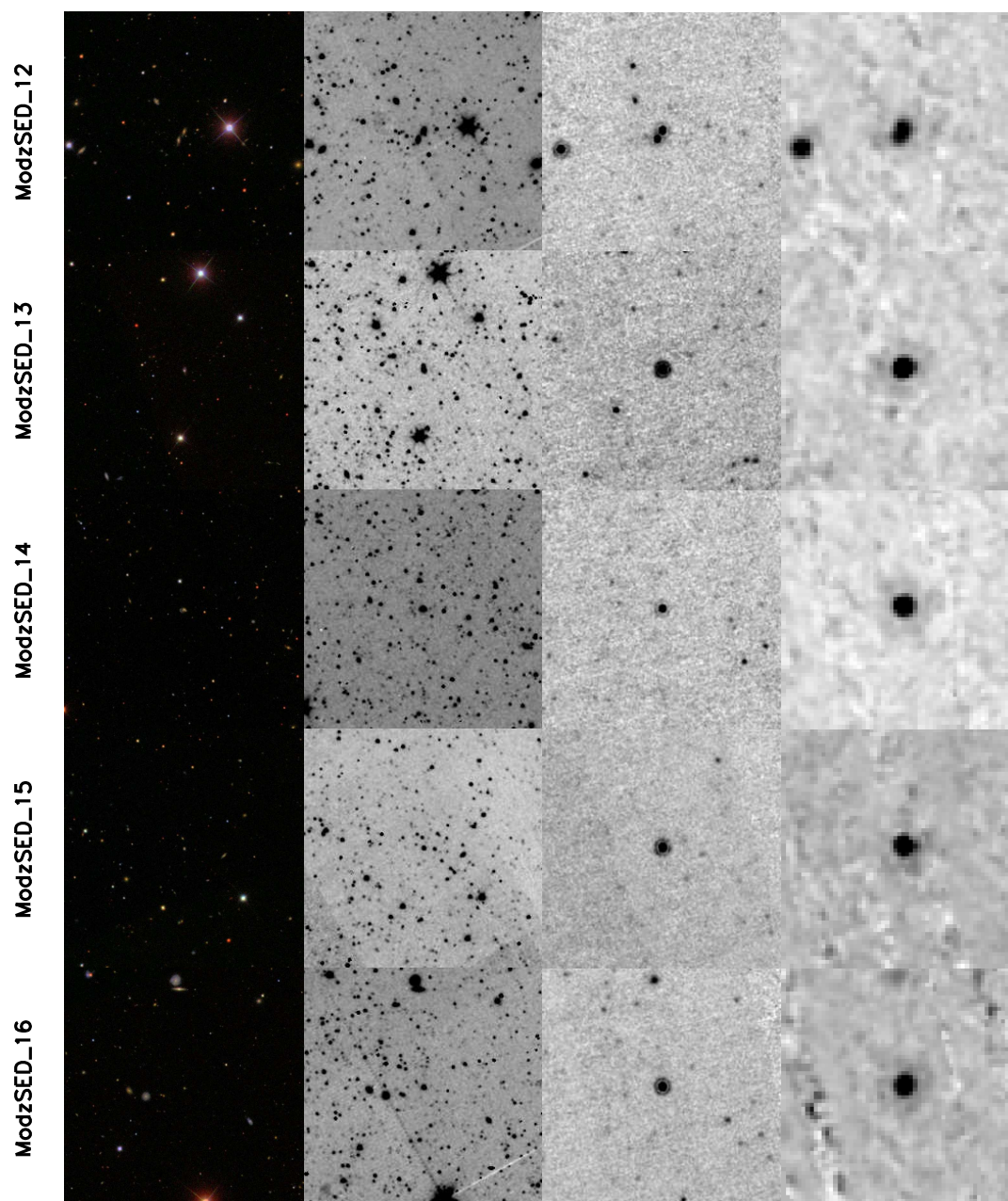


Figure V.14 – suite

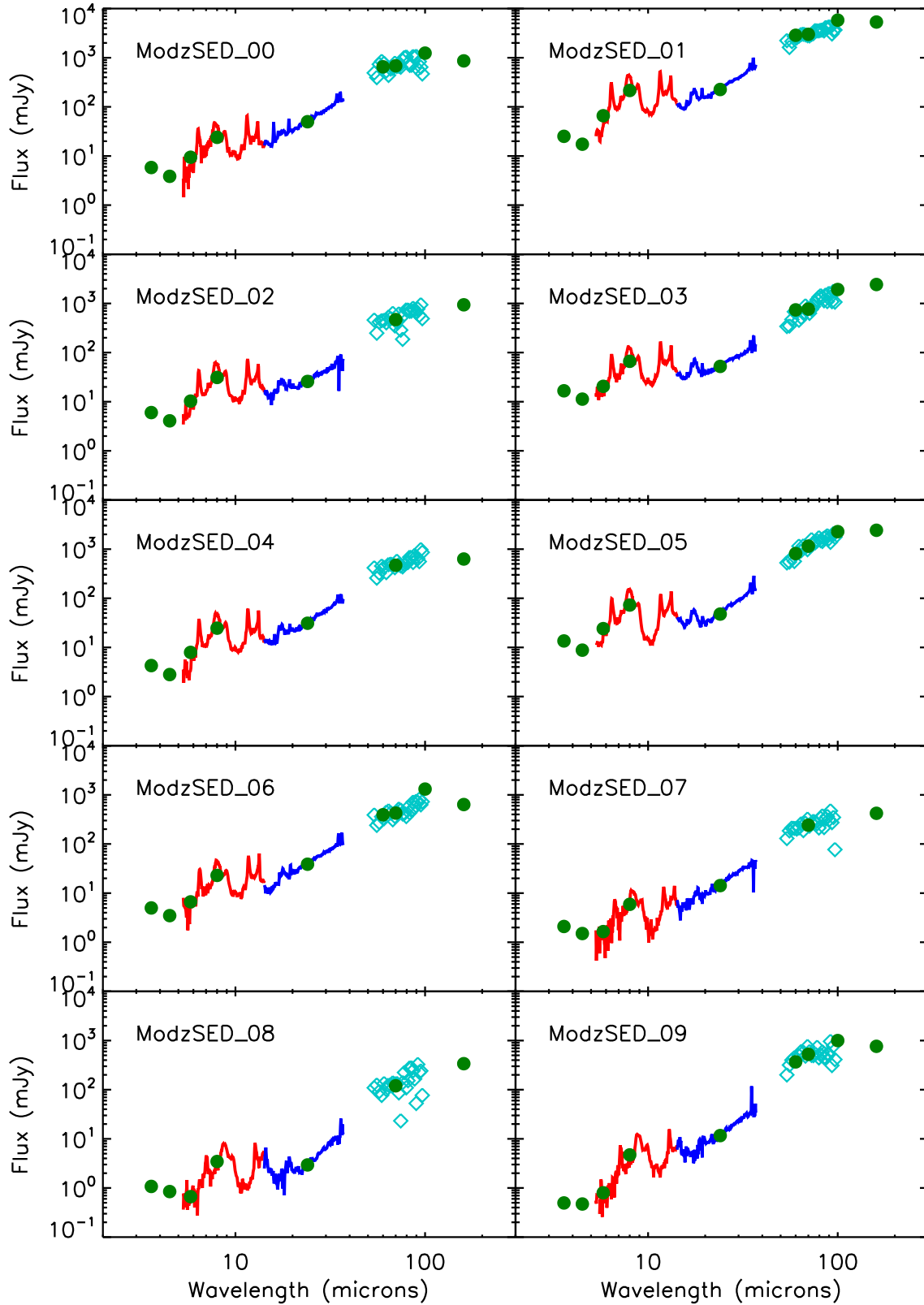


Figure V.15 – SEDs infrarouge des 17 sources de l'échantillon ModzSED. Les points verts sont les points photométriques à 3.6, 4.5, 5.8, 8.0, 24, 60 (si disponible), 70, 100 (si disponible) et 160 μm . Le spectre IRS est en rouge (partie SL) et en bleu (partie LL). Les données MIPS-SED sont représentées par des losanges cyans.

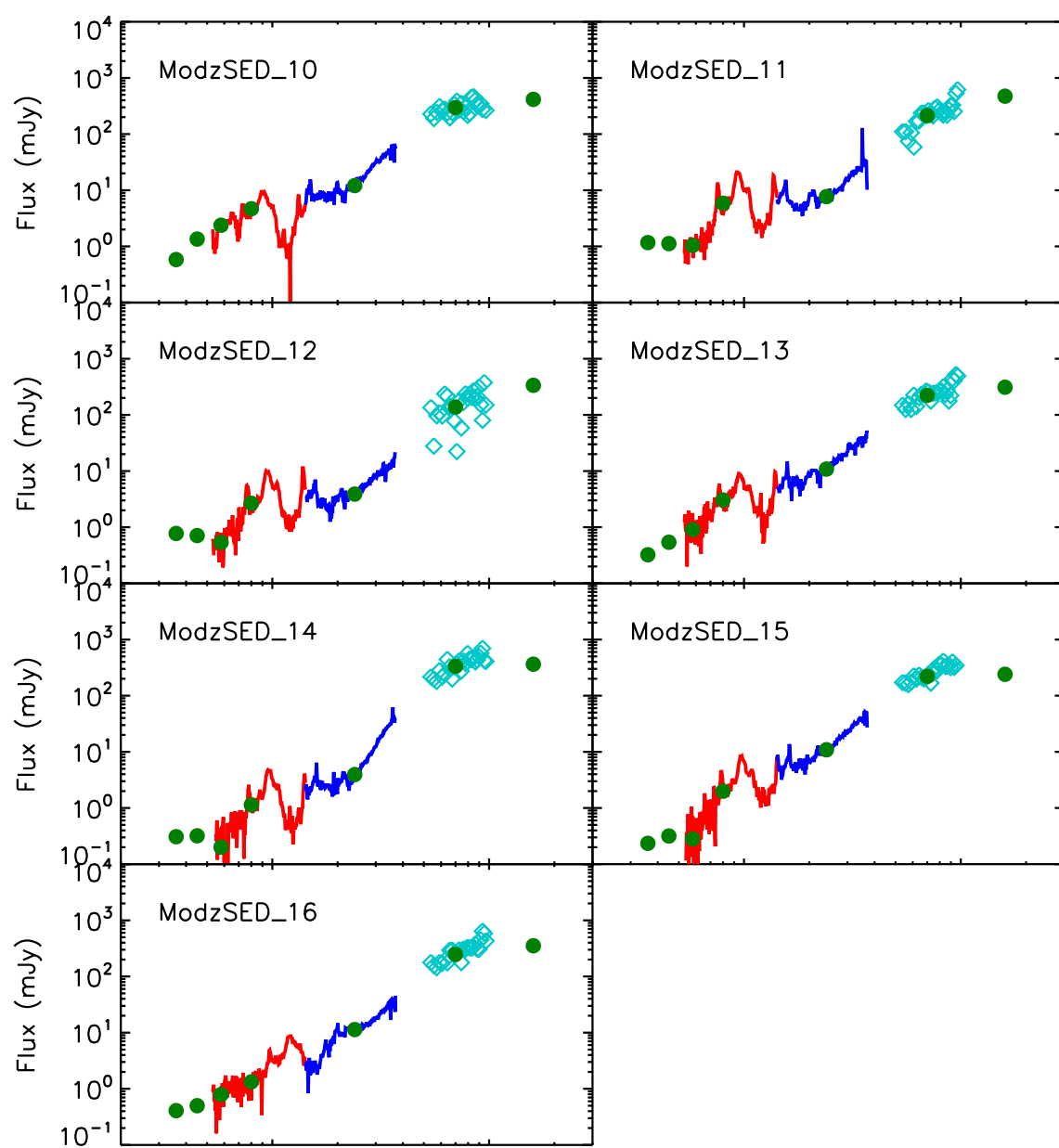


Figure V.15 – suite

sur les flux S_8 et S_{24} correctement intégrés sur toute la source même dans le cas des sources résolues. Enfin, nous avons aussi recalé le spectre basse résolution MIPS-SED sur le point photométrique à $70 \mu\text{m}$.

V.2.2 Analyse

• Estimation de la luminosité totale infrarouge

En utilisant la méthode décrite au paragraphe V.1.2, nous avons mesuré la luminosité totale infrarouge L_{IR} des 17 galaxies de l'échantillon à partir des quatre flux S_8 , S_{24} , S_{70} , S_{160} et du redshift z . Les luminosités totales infrarouges des galaxies sont majoritairement comprises entre $10^{10}L_{\odot}$ et $10^{12}L_{\odot}$. On peut séparer ces galaxies en deux groupes de taille similaire : les galaxies de luminosité inférieure à $2 \times 10^{11}L_{\odot}$ et celles telles que $L_{\text{IR}} > 2 \times 10^{11}L_{\odot}$. La source ModzSED_16 a une luminosité totale beaucoup plus grande ($L_{\text{IR}} \sim 10^{13}L_{\odot}$) mais il s'avère qu'elle contient un AGN. Les valeurs de L_{IR} obtenues sont données table V.2.

• Contribution des AGNs

Il est possible, grâce à des critères infrarouges, de détecter la présence d'un AGN très obscurci et donc non détecté dans le visible mais pouvant contribuer à l'émission infrarouge. Nous avons ici utilisé les critères de sélection proposés par Stern et al. (2005). Il en existe de nombreux autres. On peut par exemple citer Lacy et al. (2004); Hatziminaoglou et al. (2005); Alonso-Herrero et al. (2006); Richards et al. (2006). Les résultats sont présentés figure V.16. Deux sources sont clairement dans la région des AGNs (10 et 16) et une autre (13) est à la limite de la région. Ces trois sources font partie des plus lumineuses et des plus distantes. Il est toutefois possible que certains AGNs ne soient pas détectés par de tels critères infrarouges. Il faudrait alors combiner des informations sur l'émission dans le domaine X de ces galaxies (voir par exemple Barmby et al. (2006) pour une discussion de la complémentarité entre ces différentes méthodes de sélection des AGNs).

• Décomposition des PAHs avec PAHFIT

Afin de mesurer l'intensité des différentes bandes des PAHs observées par IRS pour les 17 galaxies de l'échantillon ModzSED, nous avons utilisé le programme PAHFIT (Smith et al. 2007). Ce programme permet d'ajuster simultanément des bandes PAH avec un profil lorentzien, des raies d'émission atomiques et moléculaires ainsi qu'un continu (modélisé par une somme de corps noirs de différentes températures). Ce continu rend compte à la fois de l'émission des étoiles vieilles mais aussi des poussières (VSG) et éventuellement d'un AGN. PAHFIT prend également en compte l'absorption par la poussière et permet de mesurer l'extinction via le paramètre $\tau_{9.7}$. Un exemple d'utilisation de PAHFIT est présenté figure V.17. La valeur des luminosités des principales bandes de PAHs sont données table V.2.

id	z	L_{IR} $10^{11} L_{\odot}$	L_{PAH} $10^{10} L_{\odot}$	$L_{6.2}$ $10^9 L_{\odot}$	$L_{7.7}$ $10^9 L_{\odot}$	$L_{8.6}$ $10^9 L_{\odot}$	$L_{11.3}$ $10^9 L_{\odot}$	$L_{12.6}$ $10^9 L_{\odot}$	L_{17} $10^9 L_{\odot}$	$L_{[\text{NeII}]}$ $10^8 L_{\odot}$	$L_{[\text{NeIII}]}$ $10^8 L_{\odot}$	$\tau_{9.7}$	T_{BG} (K)
0.....	0.02	0.16	0.14	0.18	0.71	0.13	0.18	0.08	0.06	0.19	0.19	0.000	27.2
1.....	0.03	1.37	1.87	2.22	8.34	1.80	2.26	1.33	0.85	2.92	0.34	0.000	24.4
2.....	0.03	0.24	0.31	0.42	1.41	0.30	0.36	0.21	0.09	0.36	0.05	0.000	24.2
3.....	0.03	0.65	0.85	1.13	3.70	0.68	0.96	0.57	0.41	0.99	0.06	0.000	21.9
4.....	0.04	0.29	0.34	0.44	1.55	0.31	0.36	0.21	0.13	0.51	0.05	0.000	27.3
5.....	0.04	0.80	1.18	1.49	5.61	0.98	1.14	0.81	0.58	1.22	0.11	1.937	23.9
6.....	0.04	0.41	0.45	0.64	1.97	0.50	0.59	0.32	0.12	0.81	0.00	0.000	26.5
7.....	0.07	0.69	0.39	0.46	1.70	0.35	0.43	0.35	0.15	0.43	0.02	0.101	25.7
8.....	0.13	1.36	0.92	1.00	3.97	0.74	1.11	0.75	0.50	0.57	0.23	1.589	24.5
9.....	0.15	5.85	1.70	2.06	7.28	1.65	2.24	0.74	0.76	3.47	0.38	0.709	28.4
10.....	0.17	4.85	3.33	2.32	13.19	2.19	2.67	2.91	3.52	4.25	2.10	2.622	28.7
11.....	0.22	7.38	7.76	10.31	36.58	6.84	8.64	4.08	3.93	6.81	0.63	1.661	27.6
12.....	0.23	5.52	3.75	4.90	16.82	3.62	5.28	1.93	0.99	3.62	0.73	0.923	27.5
13.....	0.24	7.91	4.33	4.19	17.06	2.27	4.62	3.62	1.86	8.16	4.00	0.000	32.1
14.....	0.25	10.77	2.53	2.61	11.50	2.06	2.88	1.54	1.57	3.79	0.48	2.919	35.0
15.....	0.27	9.62	4.27	4.33	16.30	3.92	4.66	4.47	3.46	10.43	2.80	1.733	36.2
16.....	0.56	82.68	23.47	26.05	97.73	24.30	9.73	17.83	28.48	32.90	0.00	3.052	41.0

Table V.2 – Tableau récapitulatif des différentes grandeurs physiques mesurées sur les SEDs de l'échantillon ModzSED.

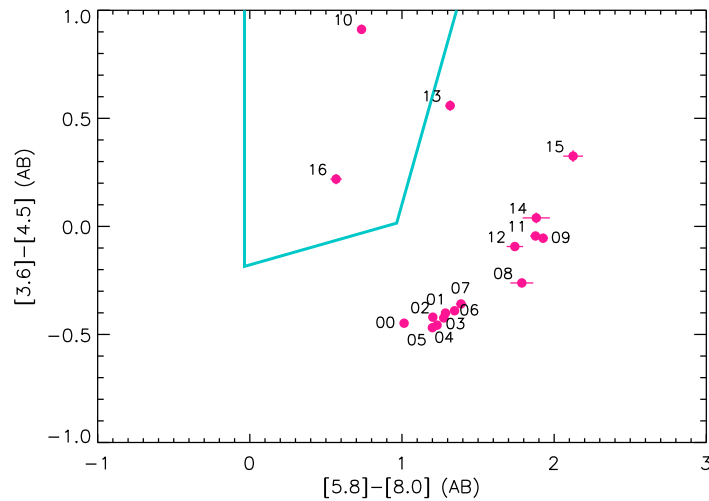


Figure V.16 – Sélection des AGNs de notre échantillon (en rose) à l’aide du critère proposé par Stern et al. (2005). Les candidats AGNs sont les sources qui sont situées dans la région délimitée par les traits bleus.

Une fois les luminosités de chaque bande PAH mesurées, nous pouvons étudier comment celles-ci dépendent de la luminosité totale infrarouge. La figure V.18 montre que la luminosité des bandes PAHs augmente moins vite que la luminosité totale infrarouge : en effet, les pentes des corrélations sont inférieures à 1 (et ceci est vérifié à plus de $3\text{-}\sigma$). On observe également quelques différences dans les pentes L_{band} vs L_{IR} entre les différentes bandes PAHs mais celles-ci ne sont pas statistiquement significatives. On avait d’autre part montré au paragraphe V.1.3 que la luminosité à $8\text{ }\mu\text{m}$ augmentait plus vite que L_{IR} . Etant donné que la luminosité à $8\text{ }\mu\text{m}$ est la somme de la luminosité des PAHs et de la luminosité du continu (fait par l’émission des VSGs), cela signifie que l’émission des VSGs augmente plus vite que la luminosité totale infrarouge.

Nous avons également étudié la dépendance de certains rapports de bandes en fonction de L_{IR} (figure V.19). Ces rapports montrent une assez grande dispersion mais ne dépendent pas fortement de la luminosité totale infrarouge. Les rapports 6.2/11.3 et 11.3/17 semblent dépendre de L_{IR} (détection à 2.7 et $2.3\text{ }\sigma$ respectivement) contrairement aux rapports 7.7/11.3 et 6.2/7.7. Le rapport 7.7/11.3 est un traceur de l’état d’ionisation des PAHs (Flagey et al. 2006), ce qui signifie que l’état d’ionisation des PAHs ne dépend pas de L_{IR} dans notre échantillon. On remarquera aussi que ce rapport est en moyenne plus élevé que celui trouvé par Smith et al. (2007) ce qui suggère un état d’ionisation plus élevé dans notre échantillon que dans l’échantillon SINGS. Toutefois, Smith et al. (2007) ont montré que le rapport 7.7/11.3, mesuré sur une grande variété de galaxies locales, était légèrement plus élevé pour les galaxies dominées par une région HII que pour les galaxies dominées par un AGN, ce qui expliquerait le décalage observé. On observe les mêmes effets pour le rapport 11.3/17. Enfin, le rapport

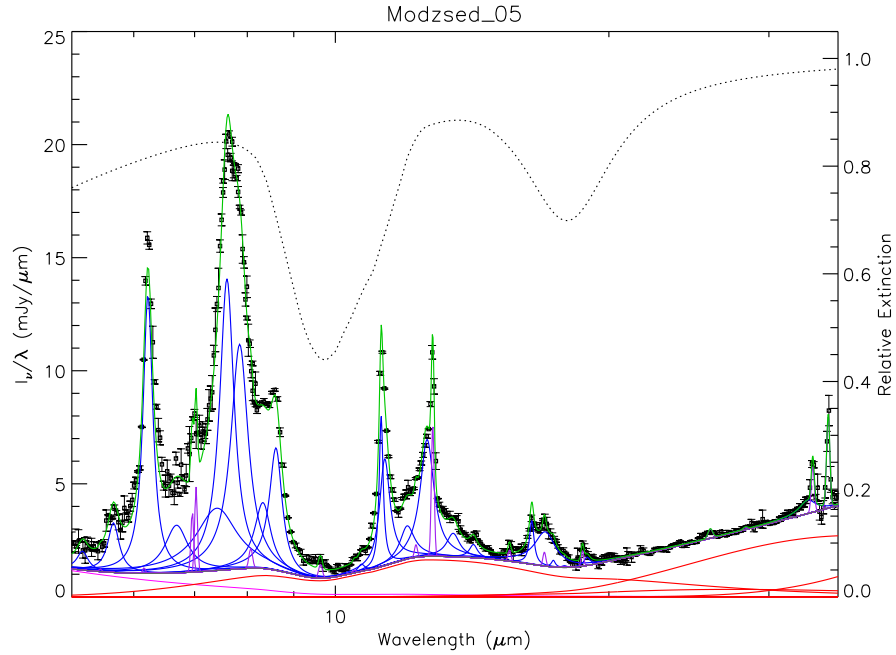


Figure V.17 – Exemple de décomposition des PAHs à l'aide de PAHFIT sur le spectre IRS de la source ModzSED_05. Les lignes rouges représentent le continu provenant de l'émission thermique de la poussière, la ligne magenta le continu provenant de l'émission stellaire et la ligne continue grise épaisse est la somme de ces deux composantes. Les lignes bleues au-dessus de ce continu sont les bandes aromatiques des PAHs alors que les lignes d'émission plus étroites (en violet) sont les raies d'émission moléculaires et atomiques. Toutes ces composantes sont atténuées par la courbe d'extinction tracée avec la ligne pointillée (axe à droite). La ligne verte est le meilleur ajustement des données (les petits carrés noirs).

6.2/7.7 est un traceur de la taille des PAHs (Draine & Li 2001) et cette taille ne semble pas dépendre de la luminosité infrarouge L_{IR} .

• Estimation de la température de la poussière froide

Les gros grains ont une émission thermique de type corps noir modifié. Nous avons mesuré leur température en ajustant sur les points photométriques à 70 et 160 μm ainsi que sur le spectre MIPS-SED un spectre de corps noir modifié. Un poids supérieur est affecté à la luminosité à 160 μm afin de «forcer» le spectre à passer par ce point. L'indice spectral β est fixé successivement à 1.5, 2 et 2.5 afin d'étudier l'influence de cette valeur sur la détermination de la température de la poussière froide étant donné la dégénérescence entre ces deux paramètres (voir par exemple Sajina et al. 2006). Les résultats sont donnés figure V.20 et les valeurs de température obtenues avec l'indice spectral $\beta = 2$ sont rappelées table V.2.

Il est alors possible de déduire le champ de rayonnement χ auquel sont soumis les gros grains. Ceux-ci sont à l'équilibre thermique et émettent donc autant d'énergie qu'ils en reçoivent : la puissance émise est donc proportionnelle au champ de rayonnement. De plus, la

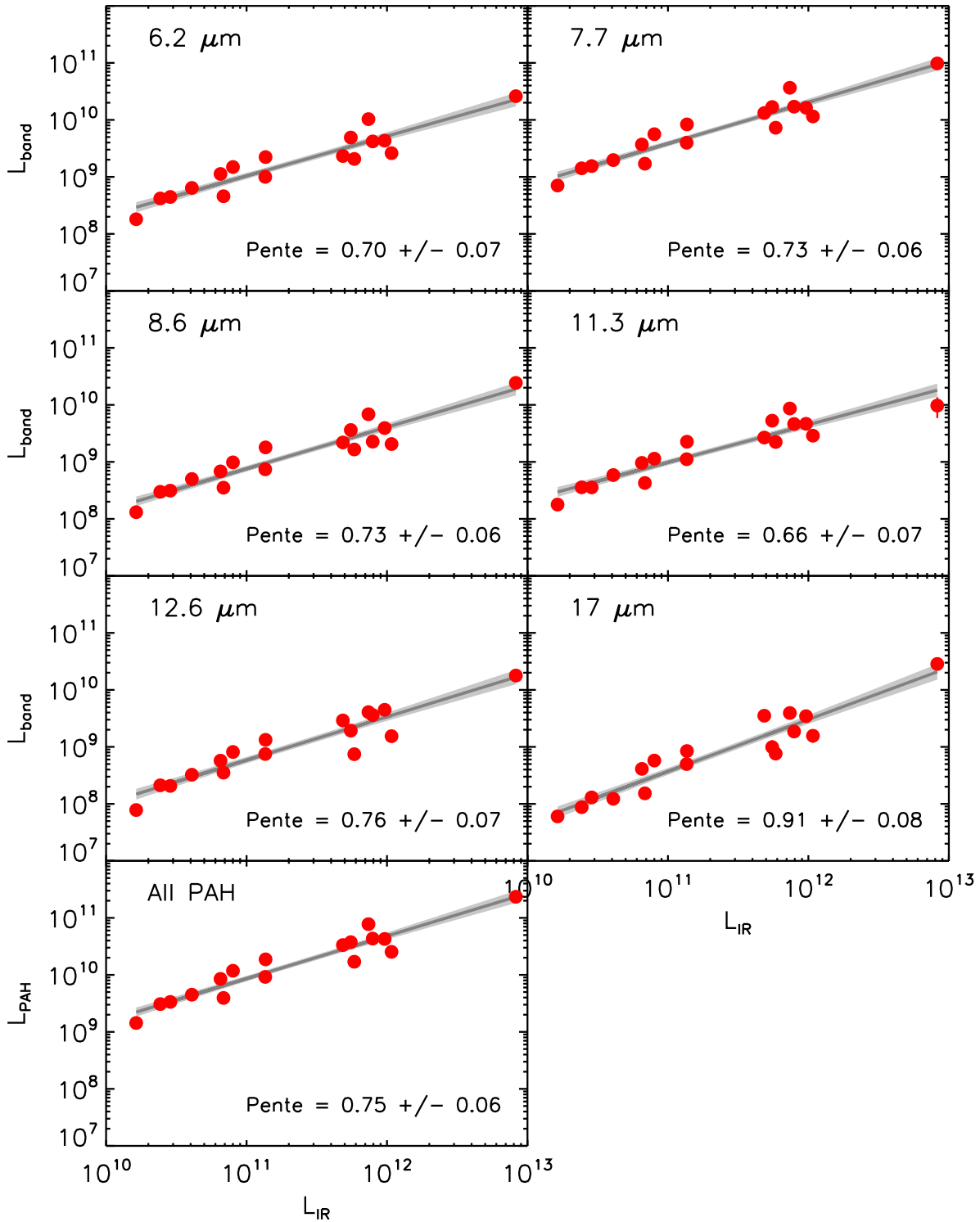


Figure V.18 – Variation de la luminosité des 6 principales bandes de PAHs (6.6 μm , complexe à 7.7 μm , 8.6 μm et complexes à 11.3, 12.6 et 17 μm) et de la luminosité totale des bandes PAHs en fonction de la luminosité totale infrarouge L_{IR} pour les 17 galaxies de l'échantillon ModzSED. La droite qui ajuste le mieux les données est représentée en gris foncé et la zone de confiance à 1- σ en gris clair.

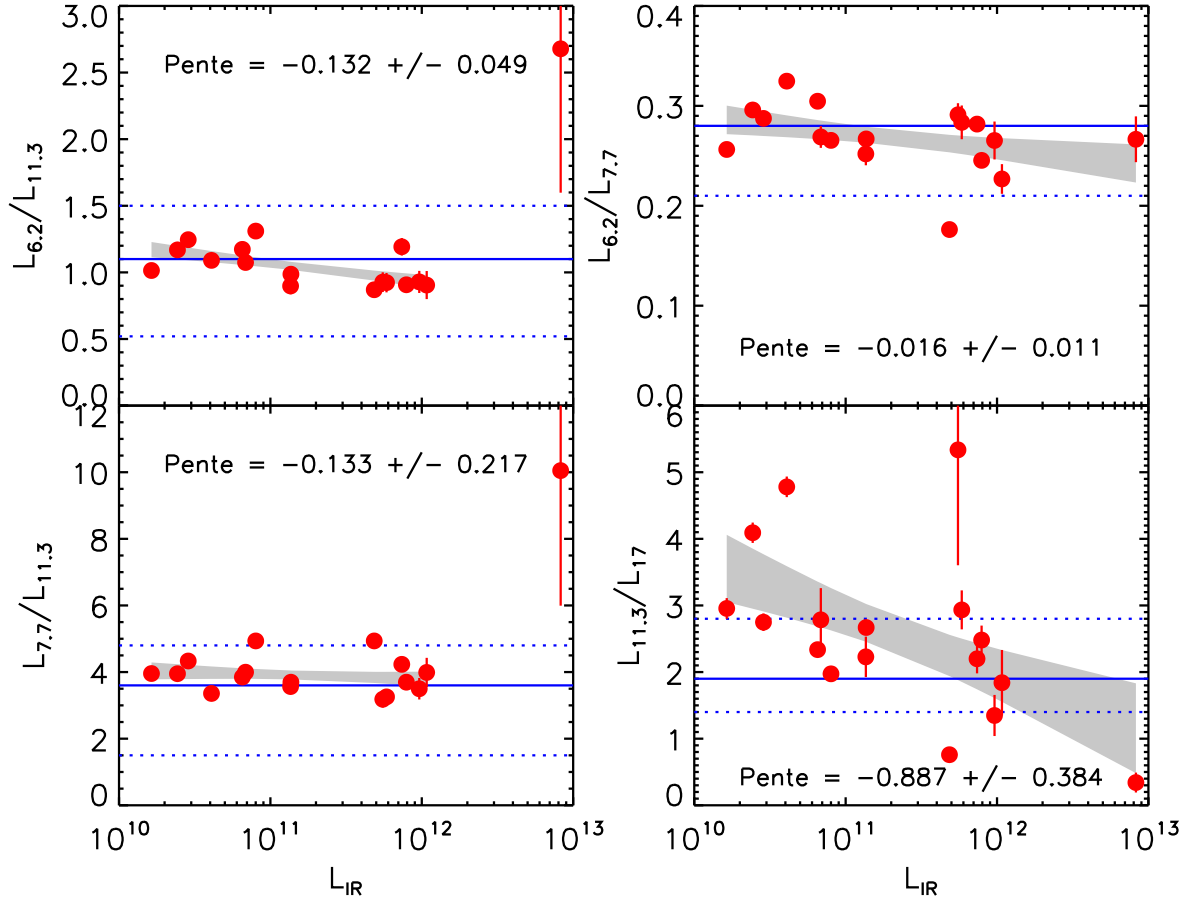


Figure V.19 – Variation des rapports entre différentes bandes de PAH en fonction de l'émission totale infrarouge pour les 17 galaxies de l'échantillon ModzSED. Les traits bleus horizontaux représentent la médiane (trait continu) et les quartiles à 10% et 90% (traits pointillés) mesurés par Smith et al. (2007) sur un échantillon local.

loi de Stefan permet d'écrire que la puissance émise par ces gros grains à l'équilibre thermique est proportionnelle à $T^{4+\beta}$. Le champ de rayonnement est généralement mesuré en unité de champ de rayonnement solaire. Sachant que des gros grains, dans un tel champ seraient à une température d'équilibre de 17.4 K, on obtient la relation entre le champ de rayonnement χ et la température T_{BG} des gros grains :

$$\chi = \left(\frac{T_{BG}}{17.4} \right)^{4+\beta} \quad (V.8)$$

Nous avons mesuré le champ de rayonnement des 17 galaxies de l'échantillon ModzSED grâce à cette méthode. Nous avons ensuite étudié la variation de la contribution des PAHs à l'émission totale infrarouge en fonction du champ de rayonnement χ (figure V.21). On observe une nette décroissance du rapport L_{PAH}/L_{IR} en fonction du champ de rayonnement χ . Ceci peut-être interprété par le fait que les PAHs sont détruits lorsqu'ils se trouvent dans un fort champ de rayonnement.

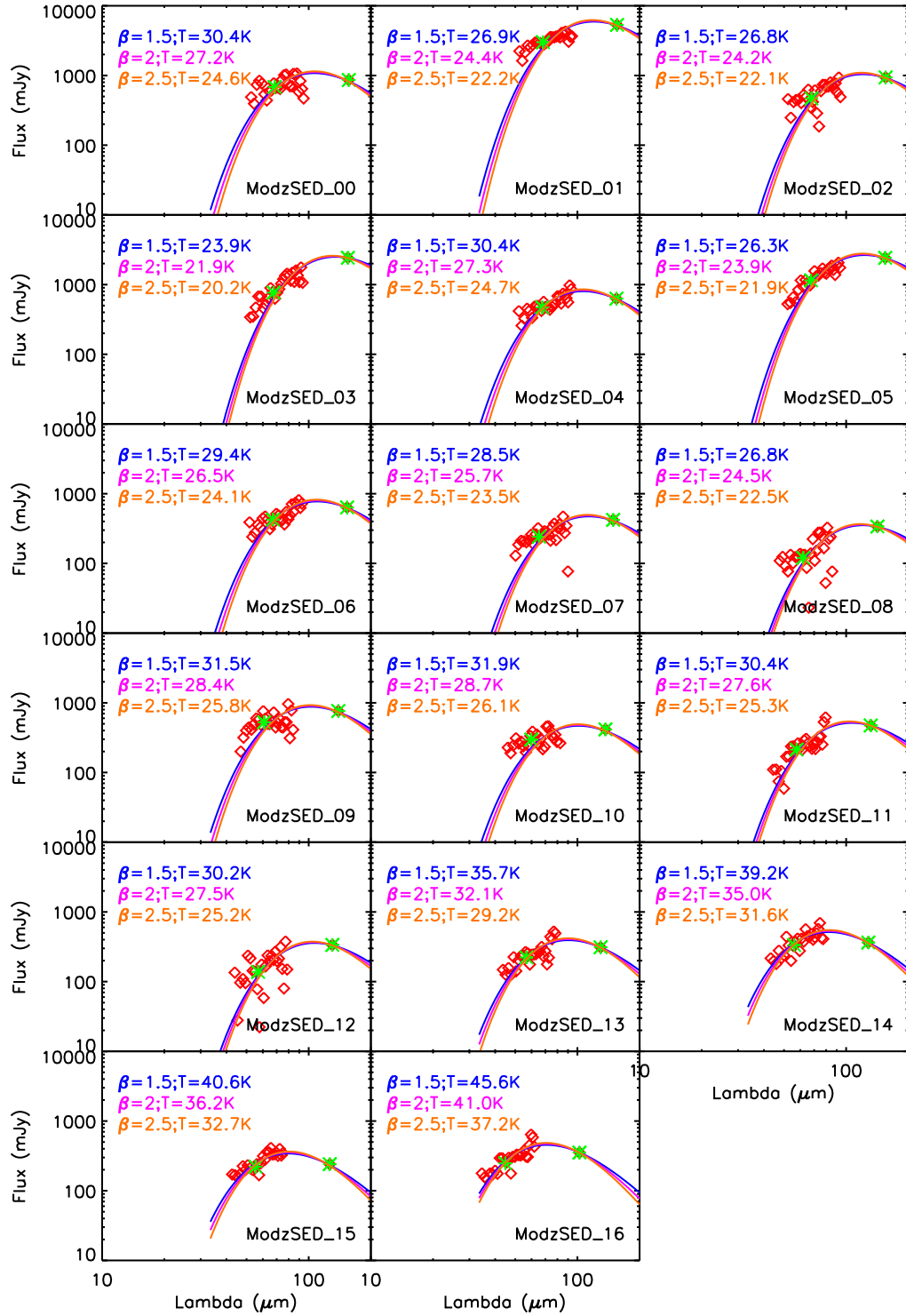


Figure V.20 – Mesure de la température des gros grains à partir des flux à 70 et 160 μm (étoiles vertes) et du spectre MIPS-SED (losanges rouges) pour les 17 galaxies de l'échantillon ModzSED. L'indice spectral a été successivement fixé à 1.5 (courbe bleue), 2 (courbe rose) et 2.5 (courbe orange).

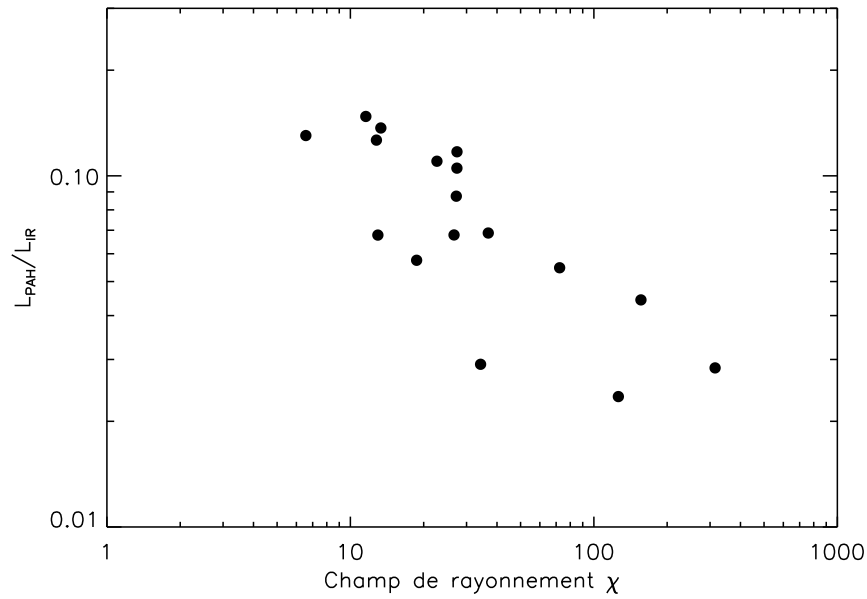


Figure V.21 – Variation de la luminosité relative des PAHs en fonction du champ de rayonnement χ .

• Classification des galaxies

Nous avons également classé les 17 galaxies de notre échantillon selon les critères définis par Spoon et al. (2007). Nous avons mesuré l'intensité de l'absorption par les silicates et la largeur équivalente de la bande à $6.2 \mu\text{m}$ comme expliqué dans le papier de Spoon et al. (2007) afin de ne pas introduire de biais. En effet les valeurs obtenues de cette façon diffèrent de celles obtenues avec PAHFIT (voir Smith et al. 2007, pour plus de détails). On obtient le diagramme présenté sur la figure V.22. On remarque que la plupart des galaxies de l'échantillon ModzSED sont situées dans la région 1C qui correspond aux sources dont le spectre dans l'infrarouge moyen est dominé par l'émission des PAHs. Les autres sources situées dans les régions 1B, 2D et 2C montrent une légère diminution de la largeur équivalente de la bande à $6.2 \mu\text{m}$ et/ou une légère absorption par les silicates.

• Conclusion

Les SEDs des 17 galaxies de l'échantillon ModzSED ont une très large couverture spectrale ce qui rend cet échantillon unique et très intéressant. L'étude préliminaire que nous avons effectuée a permis de mettre en évidence quelques résultats intéressants qui devront être approfondis :

- nous avons tout d'abord détecté la présence des bandes PAHs dans toutes les galaxies de l'échantillon. Même si certaines de ces galaxies semblent contenir un noyau actif, ce n'est pas ce dernier qui domine l'émission infrarouge.
- nous avons également montré que la luminosité des bandes de PAHs augmentait moins

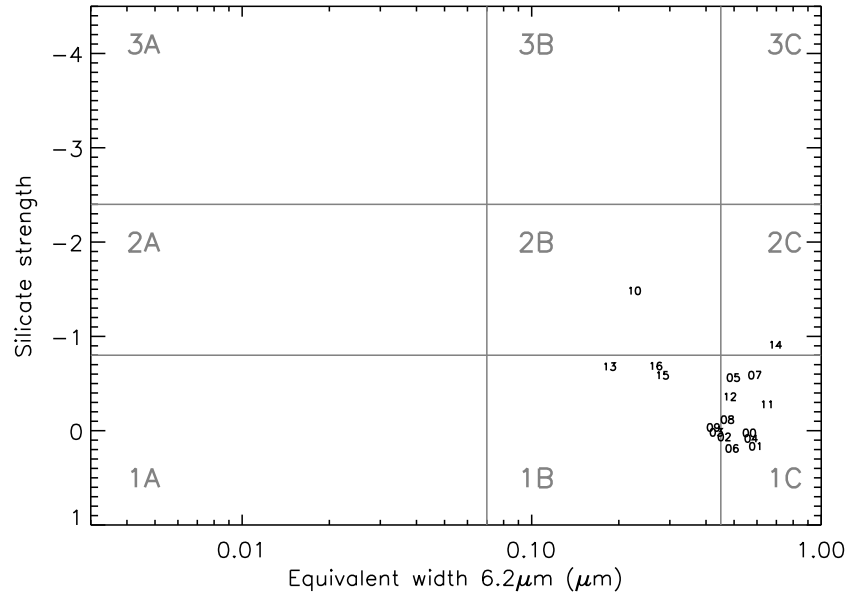


Figure V.22 – Classification des galaxies de l'échantillon ModzSED selon le critère introduit par Spoon et al. (2007).

vite que la luminosité totale infrarouge et que certains rapports de bandes (6.7/11.3 et 11.3/17) semblaient dépendre de L_{IR} .

- enfin, nous avons mesuré la température des gros grains et le champ de rayonnement dans ces galaxies. Nous avons alors montré que la contribution des PAHs à l'émission totale infrarouge diminuait lorsque le champ de rayonnement augmentait. Ceci suggère une destruction des PAHs lorsque le champ de rayonnement est plus important.

V.3 Observation sub-millimétrique d'un proto-amas à $z = 2.38$

L'étude présentée ici a été faite par Alexandre Beelen avec qui j'ai collaboré en particulier pour la mesure des flux à 3.6 μm et 24 μm des sources détectées à 870 μm . Ces travaux ont donné lieu à une publication : Beelen et al. (2008).

Une des plus grandes structures connue à l'heure actuelle à grand redshift est un filament de 110 Mpc situé autour du proto-amas J2143-4423. Cette structure est également connue pour contenir 37 galaxies avec une forte émission $\text{Ly}\alpha$ (Palunas et al. 2004; Francis et al. 2004). Certaines sources $\text{Ly}\alpha$ sont également étendues ($\gtrsim 50$ kpc) : on les appelle des *blobs Ly α* . L'origine de cette émission étendue est encore aujourd'hui sujet à discussions. Elle pourrait provenir de puissants starbursts associés à des explosions de supernovae qui produiraient des chocs et fourniraient l'énergie nécessaire pour exciter l'hydrogène neutre. Des phénomènes

d'accrétion autour d'un AGN obscurci pourraient également fournir l'énergie nécessaire. Enfin les *cooling flow* seraient une autre source d'énergie possible.

Le proto-amas considéré ici contient 4 blobs $\text{Ly}\alpha$. Parmi ces 4 sources étendues, 3 ont été détectées à $24\ \mu\text{m}$ par Colbert et al. (2006) ce qui en fait des sources très lumineuses⁴ dans l'infrarouge ($L_{\text{IR}} \sim 10^{13} L_{\odot}$). Cette dernière étude suggère également que ces blobs $\text{Ly}\alpha$ sont associés à des interactions et/ou collisions entre galaxies. Toutefois afin de mieux estimer la luminosité totale infrarouge de ces objets, et donc leur taux de formation stellaire, il vaut mieux utiliser des observations sub-millimétriques, qui, à ces redshifts, sondent le pic de l'émission infrarouge. Geach et al. (2005) ont détecté, à $870\ \mu\text{m}$ avec SCUBA, 20% des blobs $\text{Ly}\alpha$ au sein d'une structure similaire située à $z = 3.09$, ce qui implique une très forte luminosité infrarouge et privilégie donc l'hypothèse d'un puissant starburst. Les auteurs de cette étude suggèrent également que ces émissions étendues $\text{Ly}\alpha$ pourraient être une particularité de la population des galaxies sub-millimétriques.

L'étude présentée ici consiste en une observation de cette large structure à $z = 2.38$ avec LABoCa (Siringo et al. 2007) à $870\ \mu\text{m}$. Cela constitue la première publication d'une image profonde obtenue avec cet instrument. Après réduction des données et extraction des sources, il a été possible d'obtenir les comptages de sources dans ce champ (figure V.23). Ces derniers montrent une surdensité de sources sub-millimétriques dans cette région et plus particulièrement dans une région de $5'$ de diamètre centrée sur le blob $\text{Ly}\alpha$ B7.

En revanche, parmi les 22 sources détectées à $870\ \mu\text{m}$, seulement une est associée avec un blob $\text{Ly}\alpha$. Les trois autres blobs $\text{Ly}\alpha$ du champ ne sont donc pas détectés à $870\ \mu\text{m}$.

Dans cette étude j'ai contribué à l'identification dans l'infrarouge des sources détectées par LABoCa. J'ai en particulier contruit les mosaïques IRAC à partir des données disponibles sur l'archive Spitzer et ensuite extrait un catalogue des sources détectées à $3.6\ \mu\text{m}$. J'ai ensuite mesuré le flux à 4.5 , 5.8 et $8.0\ \mu\text{m}$ de toutes ces sources afin de construire un catalogue global. Ce catalogue a été ensuite corrélé au catalogue des sources détectées à $24\ \mu\text{m}$. Enfin pour chaque source détectée à $870\ \mu\text{m}$, nous avons cherché une contrepartie à $24\ \mu\text{m}$. Environ $1/3$ des sources ont une contrepartie infrarouge évidente. $1/3$ des sources a une possible contrepartie avec une probabilité d'erreur inférieure à 20%. Le dernier tiers n'a pas de contrepartie infrarouge.

Pour les 9 sources détectées à $870\ \mu\text{m}$ et pour lesquelles nous avons clairement identifié la contrepartie infrarouge, nous avons étudié leurs couleurs infrarouges (figure V.24). Ce genre de diagramme permet en particulier de séparer les sources dont l'émission infrarouge est dominée par un AGN de celles pour lesquelles cette émission est dominée par la formation stellaire. On remarque que $\sim 75\%$ ($7/9$) des sources ont des couleurs infrarouges compatibles avec celles de starburst situés entre $z = 1$ et $z = 3$ et que les deux autres sources ont des SEDs

4. La luminosité L_{IR} a été calculée en utilisant la relation entre $L_{6.7}$ et L_{IR} établie par Chary & Elbaz (2001).

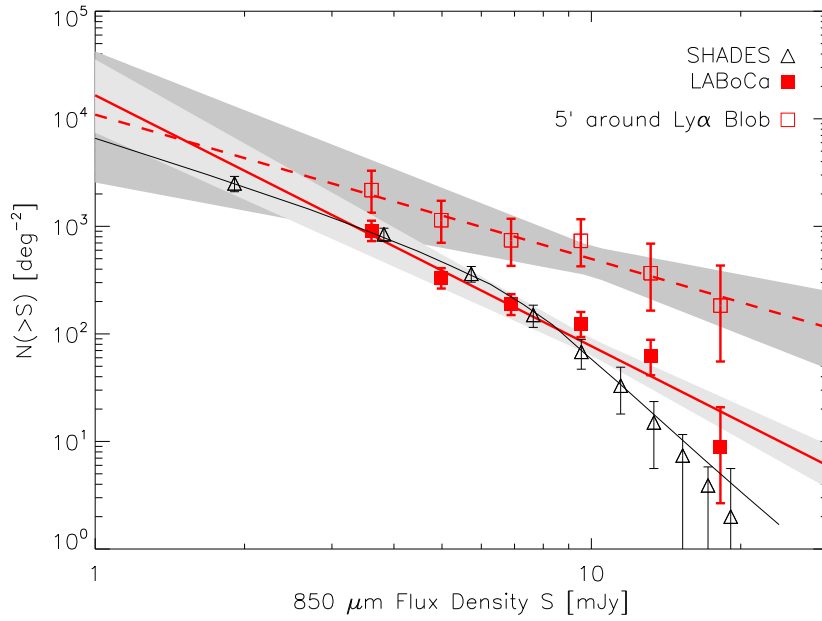


Figure V.23 – Comptages de sources cumulatifs à $870\ \mu\text{m}$ (carrés pleins) comparés aux comptages obtenus à $850\ \mu\text{m}$ par SCUBA (Coppin et al. 2006) (triangles vides). Les carrés vides représentent les comptages obtenus dans une région de $5'$ centrée sur le blob $\text{Ly}\alpha$ B7. Extrait de Beelen et al. (2008).

d'AGNs. En effet les sources sub-millimétriques sont supposées être de puissants starbursts (voir par exemple Pope et al. 2006).

L'observation de cette structure à $870\ \mu\text{m}$ a montré un possible excès de sources à cette longueur d'onde. Une partie importante ($\sim 1/3$) de ces sources pourrait être associée à la structure elle-même mais ceci devra être confirmé par un suivi spectroscopique des sources détectées à $870\ \mu\text{m}$. Enfin, seulement un des quatre blob $\text{Ly}\alpha$ présents dans cette structure a été détecté à $870\ \mu\text{m}$ ce qui permet de donner une limite supérieure de $\sim 10^{13} L_{\odot}$ sur la luminosité totale infrarouge de ces sources. Ces prédictions sont inférieures à celles faites par Colbert et al. (2006).

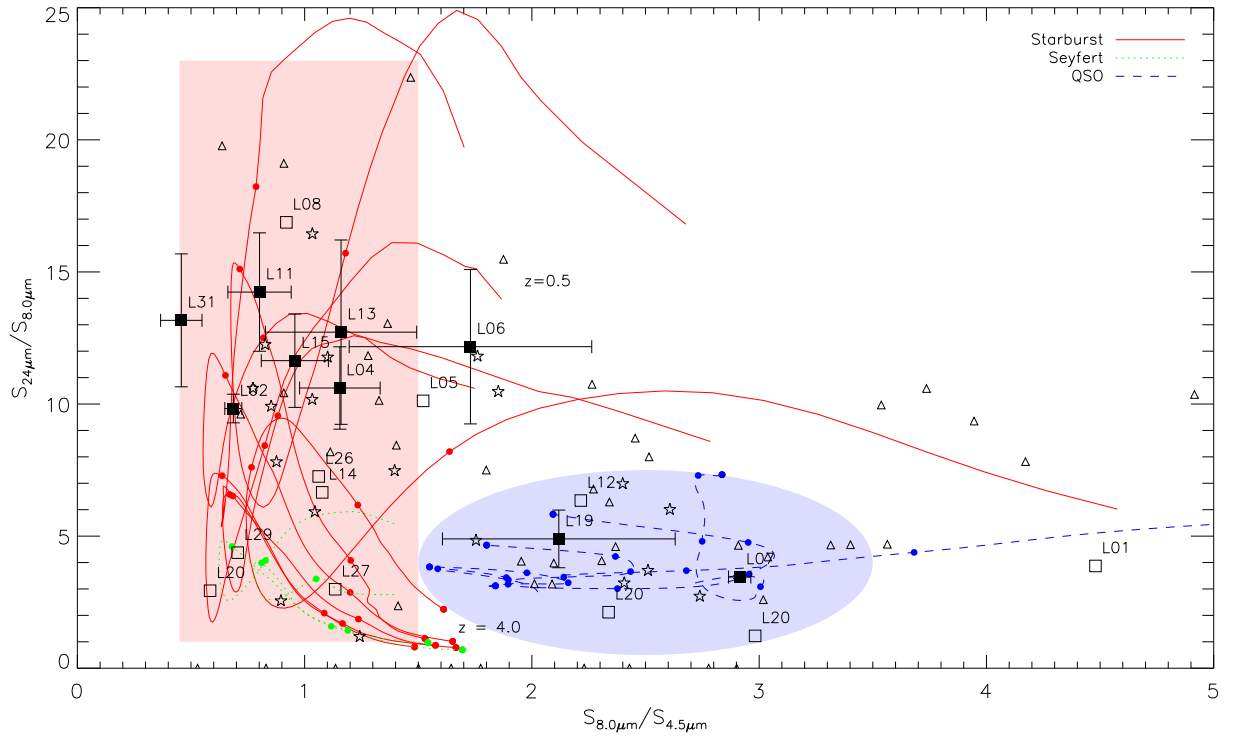


Figure V.24 – Couleur S_{24}/S_8 en fonction de la couleur $S_8/S_{4.5}$ pour les sources détectées à $870\ \mu\text{m}$ (carrés pleins et vides). La ligne continue (respectivement pointillée et tirets) montre les prédictions obtenues avec des SEDs de type starburst (respectivement Seyfert, QSO) pour des redshifts variant de 0.5 à 4 (les points montrent les redshifts 1, 2, 3 et 4). Le rectangle rose délimite la région où sont attendus les starbursts et l'ovale bleu celle où sont attendus les QSO. Extrait de Beelen et al. (2008).