

Chapitre 6

Suivi en infrarouge-moyen avec ISO

6.1 Introduction

L'observation des galaxies dans l'infrarouge offre une opportunité unique d'étudier le processus de formation d'étoiles via le chauffage des poussières (Sanders & Mirabel 1996). Ces dernières étant le résultat des éjections stellaires, l'infrarouge fournit un diagnostic complémentaire, celui de la formation d'étoiles passée. Des preuves d'une évolution marquée furent fournies par des observations dans l'infrarouge moyen avec le satellite *ISO* (Pozzi et al. 2004), puis avec *Spitzer* (Papovich et al. 2004; Dole et al. 2004; Le Floch et al. 2005; Rodighiero et al. 2010). L'extension à l'infrarouge lointain et au domaine sub-millimétrique suggèrent une évolution rapide des sources infrarouges entre $z = 0$ et $z \simeq 1$ (Lagache et al. 2003; Magnelli et al. 2009), et l'existence d'une population de galaxies très lumineuses avec un pic d'activité à $z \simeq 2$ (Franceschini et al. 2010). La modélisation des flux et des distributions de comptages dans les différentes bandes peuvent apporter des informations sur la nature des sources et leur mode d'évolution (Xu et al. 2001; Sajina et al. 2006; Popescu et al. 2011). Les mesures du rayonnement de fond dans l'infrarouge posent de surcroît des contraintes fortes sur l'histoire de la formation d'étoiles des galaxies émettant dans l'infrarouge (Lagache et al. 2005; Le Borgne et al. 2009; Jauzac et al. 2011). Les observations récentes dans l'infrarouge lointain avec le satellite *Herschel* fournissent de nouvelles contraintes sur l'évolution des sources à l'origine du fond diffus (Berta et al. 2010).

6.2 Collaborateurs

- Brigitte Rocca-Volmerange (IAP)
- Nick Seymour (post-doctorant à l'IAP au moment de la collaboration, actuellement au Mullard Space Science Laboratory, University College London, Royaume-Uni)
- Michel Fioc (IAP)

6.3 Catalogue à $12\mu\text{m}$

Article: “A $12\mu\text{m}$ ISOCAM survey of the ESO-Sculptor field. Data reduction and analysis”, Seymour, N., Rocca-Volmerange, B., de Lapparent, V., 2007, *A&A* 475, pp. 791-799.

Par son taux de complétude élevé et la séparation des différents types de galaxies, le relevé ESO-Sculpteur constitue une base de donnée intéressante pour des suivis observationnels dans d'autres domaines de longueur d'onde. Nous observâmes avec *ISOCAM* la région du champ ESO-Sculpteur la moins affectée par les cirrus galactiques, avec le filtre LW10 qui couvre la bande passante $\simeq 12 \pm 3.5\mu\text{m}$, et fut conçu pour mimer la bande à $12\mu\text{m}$ d'*IRAS*. Nos observations ont une profondeur ($\sim 80\%$ de complétude à ~ 0.7 mJy) et une surface (~ 680 minutes d'arc-carrés) comparable aux champs “Lockman Deep” et

“Marano Deep” observés à $15\mu\text{m}$ dans le cadre du temps garanti consacré aux relevés extra-galactiques (Elbaz et al. 1999), et offrirent un complément spécifique aux autres relevés par l’utilisation du filtre LW10. Nous avons ajouté à l’ensemble de ces données les magnitudes infrarouges proche extraites des relevés DENIS (I) et 2MASS (J,H,K),

Les observations *ISOCAM* produisirent un catalogue de 142 sources avec un flux intégré supérieur à 0.31mJy à un niveau de détection équivalent à 5-sigma (Seymour et al. 2007). 20 étoiles furent identifiées en utilisant les couleurs infrarouge proche/infrarouge moyen. Par l’ajustement de modèles de spectres stellaires (incluant les modèles de Kurucz 1992) aux flux dans l’optique (USNO) et l’infrarouge proche (DENIS, 2MASS) de ces étoiles, nous pûmes prédire leurs flux dans le filtre IRAS à $12\mu\text{m}$ au moyen des relations de couleur infrarouge moyen/optique du catalogue *IRAS*, que nous convertîmes en flux dans le filtre *ISOCAM* à $12\mu\text{m}$. La comparaison entre les magnitudes observées par *ISOCAM* et celles prédites nous fournit une calibration absolue que nous appliquâmes ensuite à l’ensemble de notre catalogue (Seymour et al. 2007).

Parmi les 120 galaxies détectées à $12\mu\text{m}$, 105 sont présentes dans le relevé ESO-Sculpteur optique. Ce catalogue de 120 galaxies est complet jusqu’à une densité de flux de 1.29mJy , et nous corrigeons de l’incomplétude jusqu’à 0.31mJy par deux méthodes indépendantes, basées respectivement sur les étoiles et sur les contreparties optiques des sources faibles (les corrections d’incomplétude obtenues sont similaires; Seymour et al. 2007). Les Figs. 6.1 et 6.2 montrent la répartition en flux des sources, et leur distribution sur le ciel.

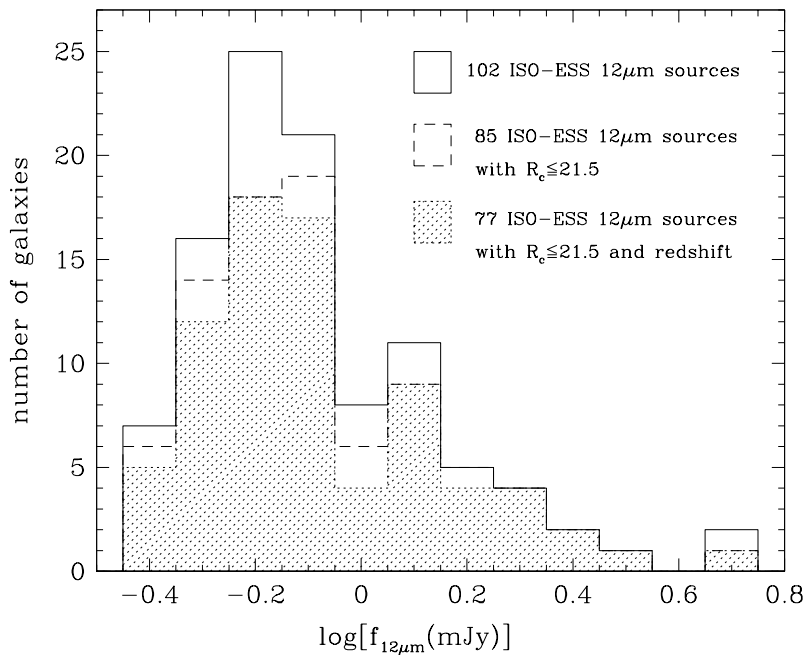


FIG. 6.1 – La distribution en flux des 102 galaxies détectées à $12\mu\text{m}$ avec *ISOCAM* dans la région explorée du relevé ESO Sculpteur. La ligne pointillée indique les 85 sources avec contre-parties optiques dans la limite $R_c \leq 21.5$, et la région hachurées les 77 sources ayant de surcroît une mesure de décalage vers le rouge. La limite de complétude de 1.29mJy correspond à $\log[f_{12\mu\text{m}}] = -0.11$, et les comptages sont corrigés de l’incomplétude jusqu’à $\log[f_{12\mu\text{m}}] = -0.51$.

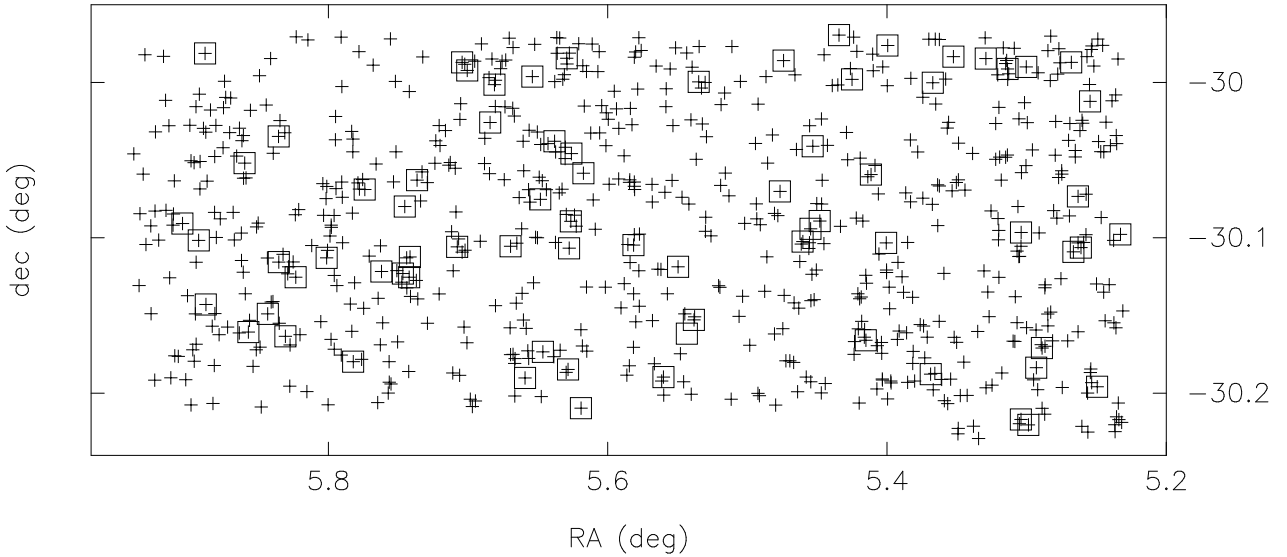


FIG. 6.2 – La distribution sur le ciel des 74 sources à $12\mu\text{m}$ détectées avec ISOCAM (carrés) parmi les 409 galaxies avec $R_c \leq 20.5$ du relevé ESO-Sculpteur (croix), dans la région commune des deux relevés.

6.4 Modélisation des comptages à $12\mu\text{m}$ et $24\mu\text{m}$

Article: “The $12\mu\text{m}$ ISO-ESO-Sculptor and $24\mu\text{m}$ Spitzer faint counts reveal a population of ULIRGs as dusty massive ellipticals. Evolution by types and cosmic star formation”, Rocca-Volmerange, B., de Lapparent, V., Seymour, N., 2007, *A&A* 475, pp. 801-812.

Le suivi à $12\mu\text{m}$ du catalogue ESO-Sculpteur produit des comptages de galaxies intégrés et différentiels par intervalle de magnitude en bon accord avec ceux des autres relevés extragalactiques à $15\mu\text{m}$, obtenus également avec *ISOCAM*: un comportement Euclidien aux grands flux, puis un excès marqué aux faibles flux, entre 0.1 et 1 mJy, comme le montre la Fig. 6.3 (Rocca-Volmerange et al. 2007).

Comme les échelles de temps caractéristiques de l’émission des étoiles et de la poussière sont différentes, les comptages dans l’infrarouge moyen sont a priori distincts des comptages optiques. Une interprétation cohérente doit décrire simultanément les deux types d’émission. Dans ce but, nous modélisâmes les comptages *ISOCAM* du champ ESO-Sculpteur au moyen du modèle d’évolution spectro-photométrique PÉGASE, développé à l’IAP (“Projet d’Etude des GALaxies par Synthèse Evolutive” ; <http://www.iap.fr/pegase>). La version PÉGASE.3 (Fioc et al. 2011) de ce code permet de décrire simultanément l’émission des étoiles et de la poussière, caractérisées par des échelles de temps et des domaines de longueur d’onde différents. Dans ce modèle, chaque type de galaxie est défini par un scénario spécifique de transformation du gaz en étoiles, calibré à $z = 0$ sur les spectres observés dans l’Univers local (Rocca-Volmerange & Guiderdoni 1988). Ce modèle permet de prédire les distributions spectrales d’énergie depuis l’UV jusqu’à l’infrarouge lointain. Nous utilisons les différents types de galaxies normales ainsi que les fractions par type provenant du bon ajustement des comptages profonds dans l’optique et l’infrarouge proche (bandes *UBVRIK*) effectués avec PÉGASE.2 (Fioc & Rocca-Volmerange 1999).

La modélisation avec PÉGASE.3 montra que les populations de galaxies normales ne permettent pas d’expliquer l’excès dans les comptages infrarouge moyen, et confirme la contribution négligeable des galaxies elliptiques normales à $z \leq 4$, car à ce stade d’évolution des scénarios, elles ont expulsé tout leur gaz et leur poussière. Cependant, en ajoutant une petite population de galaxies elliptiques sur-lumineuses dans l’infrarouge moyen, nous obtînmes un bon ajustement des comptages *ISOCAM* à $12\mu\text{m}$ (Rocca-Volmerange et al. 2007). Ces galaxies sur-lumineuses sont massives et poussiéreuses, et sont interprétées comme des ULIRGs (“Ultra Luminous Infrared Galaxies”) qui présenteraient des similarités avec les galaxies hôtes de radio-galaxies. Le même modèle ajuste de surcroît les comptages à $24\mu\text{m}$ obtenus avec

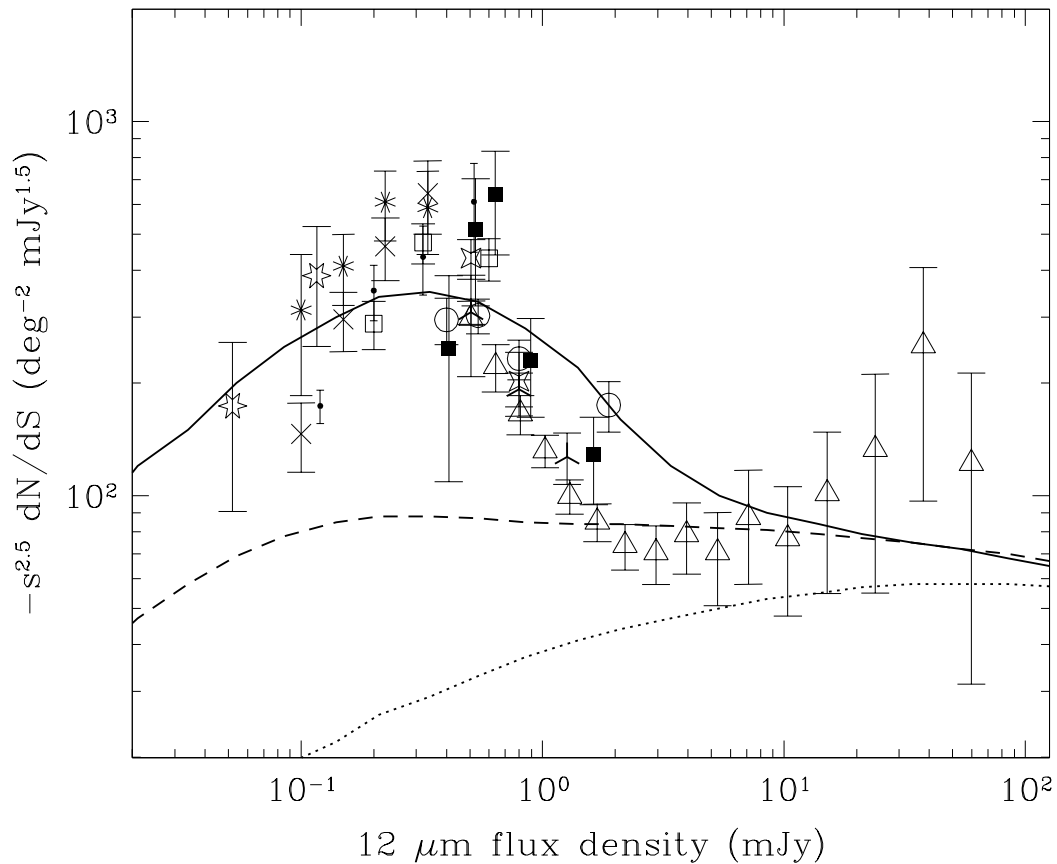


FIG. 6.3 – Les comptages différentiels du relevé ESO-Sculpteur obtenus à $12\mu\text{m}$ avec ISOCAM (carrés pleins), comparés aux autres comptages obtenus avec ISOCAM à $15\mu\text{m}$. Les comptages sont normalisés à un Univers Euclidien. La courbe en trait plein montre la prédiction avec PÉGASE.3 en incluant la population d’ULIRG évoluant selon un scénario de galaxies elliptiques. La courbe pointillée prend en compte les corrections- k mais ignore l’évolution ; la courbe pointillée correspond à l’effet d’expansion de l’Univers uniquement (corrections- k et évolution ignorées).

Spitzer (Papovich et al. 2004), en utilisant les mêmes paramètres de modélisation (Rocca-Volmerange et al. 2007).

Nous parvînmes ainsi à modéliser avec PÉGASE.3 l’évolution des comptages infrarouge moyen avec un modèle en quelque sorte “minimal” : sans introduire d’évolution intrinsèque du nombre de galaxies, comme pourraient l’induire des coalescences fréquentes de galaxies ou la formation récente de nouvelles galaxies, et sans évolution en luminosité qui resulterait d’une augmentation soudaine et massive du taux de formation d’étoiles à $z \simeq 2 - 3$. Dans cet intervalle de décalage vers le rouge, parmi les types de galaxies de PÉGASE.3, seules celles de type spirale précoce (Sa) montrent une augmentation de leur taux de formation d’étoiles, mais qui n’est pas suffisante pour expliquer l’excès des comptages dans l’infrarouge moyen.

6.5 Propriétés des sources à $12\mu\text{m}$

Sur les 120 galaxies du relevé ESO-Sculpteur détectées à $12\mu\text{m}$, 77 ont des mesures de type spectral et de décalage vers le rouge obtenus dans l’optique. Afin de mieux comprendre la nature des galaxies causant l’excès dans les comptages, nous avons calculé leur distribution en luminosité absolue à $12\mu\text{m}$.

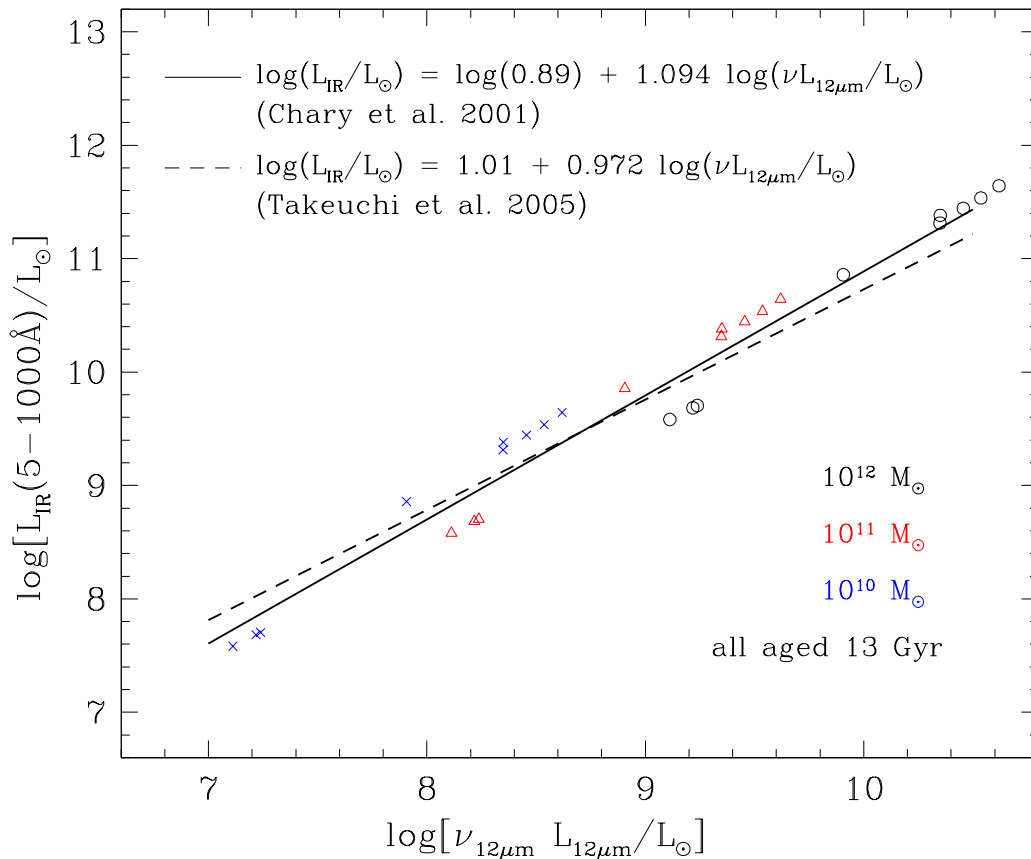


FIG. 6.4 – La relation entre la luminosité infrarouge totale $L(5 - 1000)\mu\text{m}$ et la luminosité monochromatique à $12\mu\text{m}$ prédite par les spectres des modèles PÉGASE.3 de différents types, âgés de 13 milliards d'années, et pour trois valeurs de la masse stellaire: $10^{10}M_{\odot}$ (cercles), $10^{11}M_{\odot}$ (triangles), et $10^{12}M_{\odot}$ (croix). Les ajustements obtenus par Chary & Elbaz (2001) et Takeuchi et al. (2005) sont indiqués.

Les flux mesurés sont convertis au moyen des corrections- k calculées avec PÉGASE.3, en utilisant pour chaque spectre observé le modèle de même type spectral. Les luminosités infrarouges totales (intégrées de 5 à $1000\mu\text{m}$) sont déduites en utilisant les rapports aux luminosités à $12\mu\text{m}$ prédits par PÉGASE.3 pour chaque type de galaxie. Ces calculs sont l'occasion de montrer que la corrélation observée entre la luminosité infrarouge à $12\mu\text{m}$ et la luminosité infrarouge totale des galaxies (Chary & Elbaz 2001; Elbaz et al. 2002; Takeuchi et al. 2005) est bien reproduite avec PÉGASE.3, et qu'elle résulte de la séquence des différents types de galaxies à différentes masses, comme indiqué dans la Fig. 6.4.

Appliquée aux galaxies détectées à $12\mu\text{m}$, la classification spectrale optique du relevé ESO-Sculpteur indique que 2/3 des sources ont des spectres de spirales tardives (Sbc, Sc, Sd), et 1/3 des spectres de spirales précoces (Sa, Sb). La répartition des sources à $12\mu\text{m}$ dans le plan des deux paramètres utilisés pour la classification spectral est montrée dans la Fig. 6.5, et l'on peut constater que plus de la moitié des sources présentent la raie d'émission de [OII] à 3727\AA . L'examen de la distribution des largeurs équivalentes de la raie de [OII] pour les sources à $12\mu\text{m}$ dans la Fig. 6.6 (panneau de gauche) suggère qu'elles présentent un taux de formation d'étoiles plus important que les galaxies non-émettrices dans l'infrarouge, affectant préférentiellement les galaxies de type spirale précoce (panneau de droite). Ces résultats sont en bon accord avec l'idée que l'émission infrarouge de ces galaxies serait due à des sursauts de formation d'étoiles enfouis dans la poussière (Pozzi et al. 2004; La Franca et al. 2004).

La Fig. 6.7 montre que les luminosités infrarouges totales de l'ensemble des galaxies du relevé ESO-Sculpteur détectées à $12\mu\text{m}$ sont comprises entre $10^{10}L_{\odot}$ et $10^{12}L_{\odot}$, et environ la moitié des objets sont

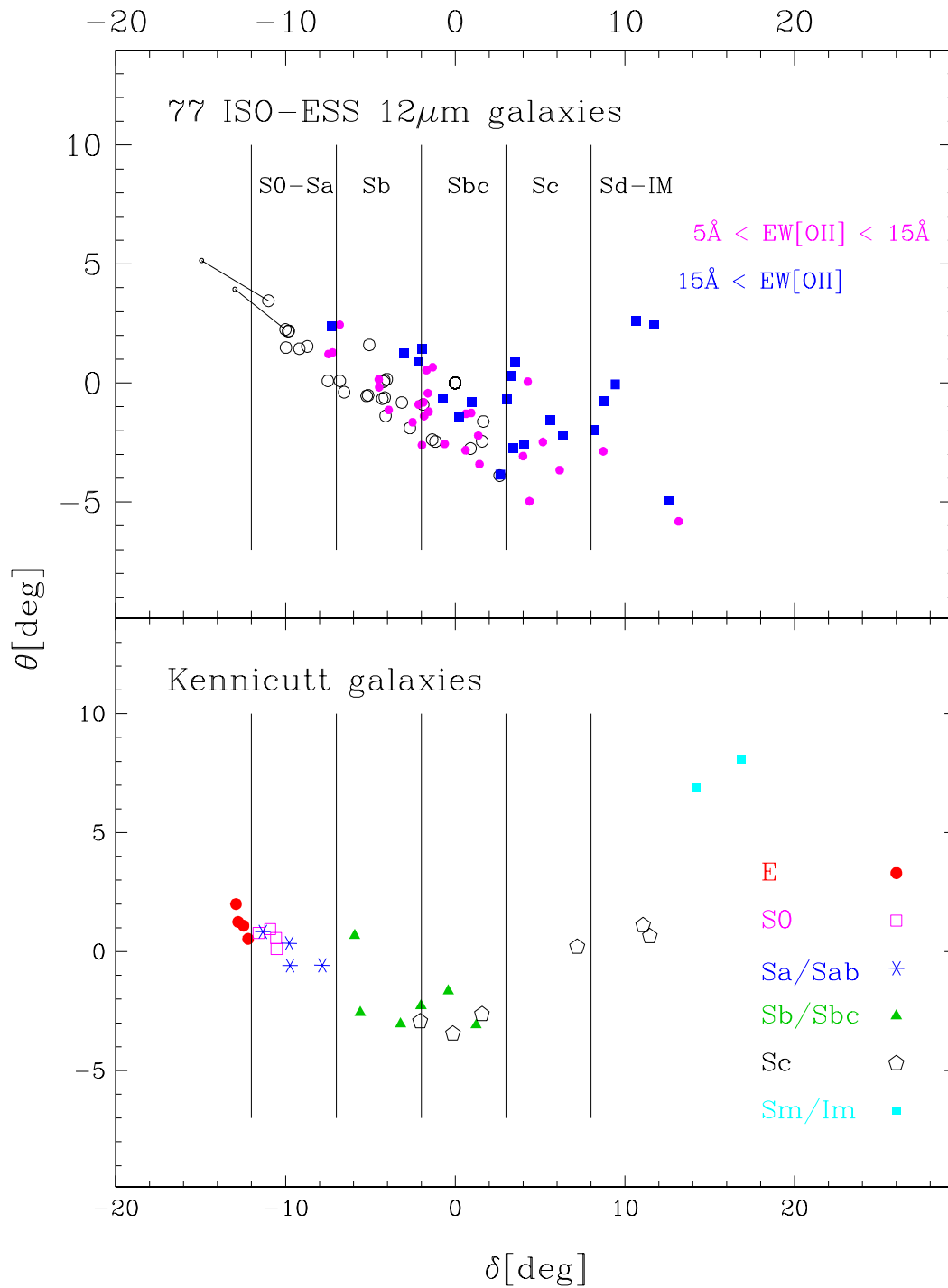


FIG. 6.5 – Dans le panneau du haut, la classification spectrale optique des 77 galaxies du relevé ESO-Sculpteur détectées à $12\mu\text{m}$. Les galaxies avec une largeur équivalente de la raie en émission de $[\text{OII}]$ inférieure ou supérieure à 5\AA , et supérieure à 15\AA sont indiquées avec des symboles différents. Les lignes verticales séparent l'échantillon en types spectraux par référence à la bibliothèque de galaxies de Kennicutt (1992) avec types morphologiques et spectroscopie, montrées dans le panneau du bas.

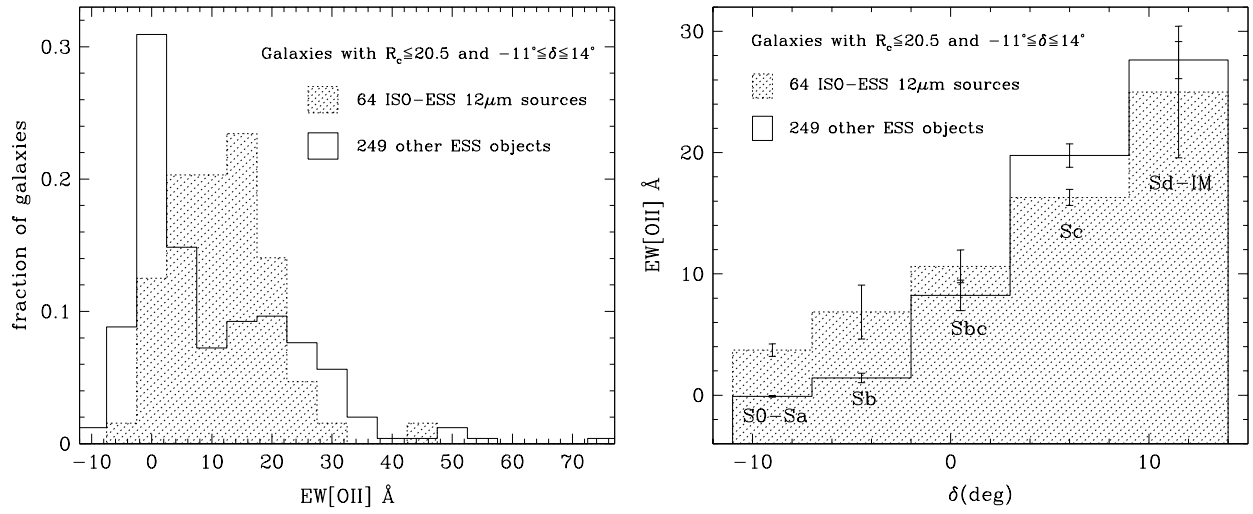


FIG. 6.6 – A gauche, comparaison de la répartition relative des largeurs équivalentes de la raie de $[OII]$ pour les 64 galaxies à $12\mu\text{m}$ (histogramme hachuré) et les 249 galaxies du relevé optique non émettrices à $12\mu\text{m}$. Ce diagramme ne considère que les galaxies dont l'intervalle spectral contient la raie de $[OII]$. Les deux échantillons sont limités à $R_c \leq 20.5$ et à $-11^\circ \leq \delta \leq 14^\circ$ (voir Fig. 6.5). A droite, les médianes des largeurs de la raie de $[OII]$ par intervalle de type spectral, comme défini dans la Fig. 6.5.

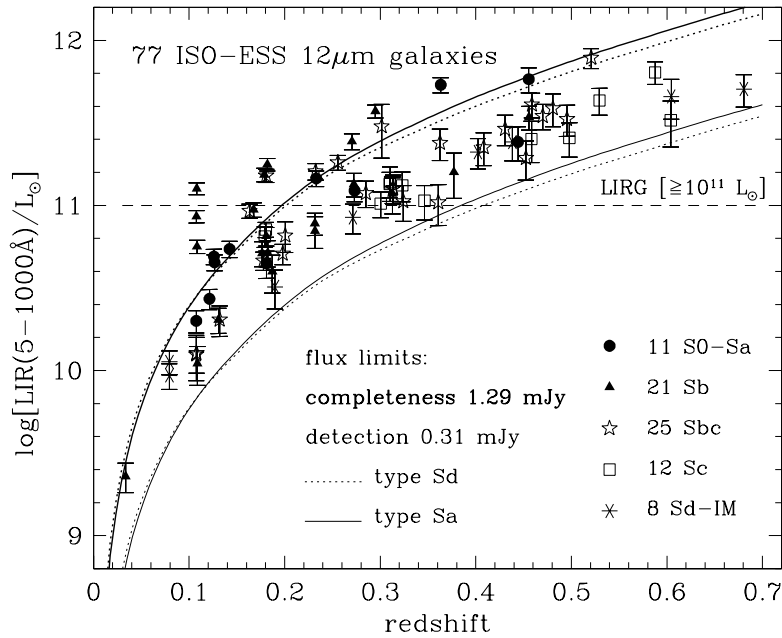


FIG. 6.7 – La distribution de la luminosité infrarouge totale pour les 77 sources ISO-ESO-Sculpteur ayant un décalage vers le rouge. Les corrections- k des différents types spectraux indiquées proviennent des modèles spectro-photométriques correspondants de PEGASE.3.

situés de part et d'autre de la limite à $10^{11}L_{\odot}$, correspondant aux LIRG (“Luminous Infrared Galaxies”). Les galaxies de type spirale précoce et tardive apparaissent des deux côtés de la luminosité maximale des LIRG. A noter qu’aucune des galaxies du relevé n’atteint la luminosité des ULIRGs ($10^{12}L_{\odot}$), qui pourrait cependant être atteinte par certaines des 43 galaxies n’ayant pas de spectroscopie optique.

La mesure des fonctions de luminosité à $12\mu\text{m}$ de l’ensemble de ces galaxies indique un excès de galaxies d’un facteur 2 à 5 aux luminosités infrarouges $\gtrsim 10^{10.4}L_{\odot}$ par rapport aux galaxies locales (Rush et al. 1993; Pozzi et al. 2004). Ces divers résultats sont en accord avec les résultats obtenus avec *Spitzer* (Pérez-González et al. 2005; Le Floch et al. 2005), ainsi que des résultats plus récents (Le Borgne et al. 2009), indiquant la prédominance de LIRGs à $z \sim 0.5$ au sein des comptages à $15\mu\text{m}$ et $24\mu\text{m}$.

Enfin, en mesurant, pour les sources à $12\mu\text{m}$, les luminosités totales infrarouges par unité de masse stellaire (estimées par l’émission optique), nous obtenons un excès d’un facteur 3 à 5 par rapport aux prédictions des scénarios de PÉGASE.3 (voir Fig. 6.8). Nous parvenons à modéliser cette dispersion en introduisant une stochasticité temporelle dans le taux de formation d’étoiles d’un facteur 5 et maintenue pendant plusieurs dizaines de millions d’années (Fioc, communication privée). L’examen visuel des images optiques indique qu’une partie des galaxies semblent être des spirales apparemment normales, d’autres objets ont des isophotes perturbés et se situent dans des environnements denses (groupes ou amas).

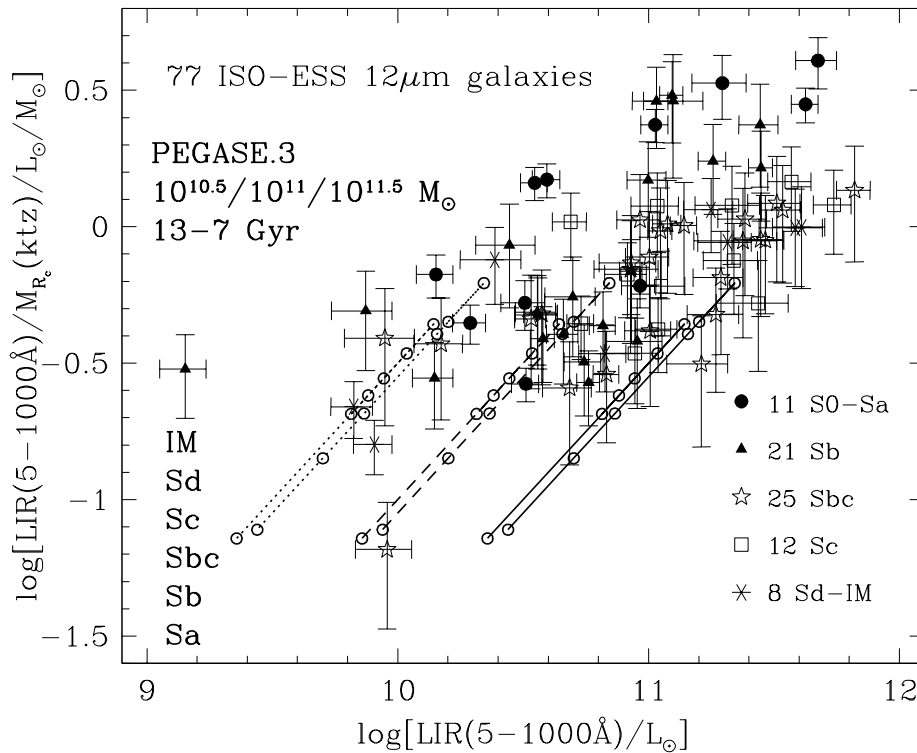


FIG. 6.8 – La distribution de la luminosité infrarouge totale par unité de masse stellaire pour les galaxies du relevé ESO-Sculpteur détectées à $12\mu\text{m}$ avec ISOCAM. On observe des galaxies de type spectral précoce qui sont 3 à 5 fois plus lumineuses que les spirales de type plus tardif, contrairement à ce qui est prédit par les scénarios de types Sa à Im de PÉGASE.3 (de bas en haut) pour des masses de $10^{10.5}M_{\odot}$ (lignes pointillées), $10^{11}M_{\odot}$ (lignes pointillées à tirets), $10^{11.5}M_{\odot}$ (lignes continues). Pour chaque valeur de masse, la prédiction est montrée pour des âges de 13 et 7 milliards d’années (avec un petit décalage des derniers vers la droite).

La meilleure photométrie qui sera obtenue avec le VST et VISTA (relevés KIDS et VIKING) dans cette région du ciel permettrait d'effectuer des décompositions bulbe+disque des galaxies du relevé ESO-Sculpteur au moyen des outils de morphologie automatique développés dans le cadre du programme EFIGI (voir Sect. 3 de la Partie III), et avec une meilleure fiabilité qu'à partir des images existantes. On pourra alors examiner si certaines des sources contribuant à l'excès des comptages à $12\mu\text{m}$ sont compatibles avec des profils de galaxies composées uniquement d'un bulbe, ce qui permettrait de tester directement le modèle de Rocca-Volmerange et al. (2007). De manière générale, on pourra préciser la nature optique des sources et distinguer les objets atypiques.