

Chapitre 2

Traitement et catalogues

2.1 Introduction

Le traitement des données du programme-clé ESO-Sculpteur fut un lourd travail. Sur les conseils répétés de Prof. van der Laan, j’engageai la supervision de 3 doctorants à l’IAP, en 1992 (C. Bellanger), 1993 (S. Arnouts), et 1994 (G. Galaz). Ce renfort fut précieux et efficace. Les doctorants participèrent à la fois aux longues missions d’observation, et au traitement des images et spectres. S. Bardelli apporta une aide importante dans la phase la plus longue, celle de la mesure des décalages vers le rouge, au moyen des logiciels que nous avons mis au point à l’IAP. Nous avons aussi bénéficié d’une aide technique pendant une année (Christian Oberto, pour le traitement de la spectroscopie).

Le programme-clé étant en quelque sorte “pionnier” par la combinaison d’imagerie CCD et de spectroscopie multi-fente, aucun logiciel n’existait à l’époque pour effectuer les traitements systématiques des images et spectres multi-objets. Emmanuel Bertin commença à cette époque à développer son logiciel “SExtractor” pour l’extraction de sources d’images astronomiques, pour lequel le relevé ESO-Sculpteur servit de banc d’essai.

Les autres outils performants d’AstrOmatic (<http://www.astromatic.net>; E. Bertin) destinés à la calibration astrométrique et l’homogénéisation photométrique, au compositage et à la co-addition d’images, ainsi qu’à la mesure de la réponse impulsionnelle, virent le jour plus tard. En outre, un logiciel complet pour le traitement des données de spectroscopie multi-objet fut développé ultérieurement en vue de traiter les données de l’instrument VIMOS au VLT (“VIMOS Interactive Pipeline Graphical Interface”, ou VIPGI Scodreggio et al. 2005).

Par conséquent, le traitement des données photométriques et spectroscopiques du programme ESO-Sculpteur nécessita l’écriture de nombreuses procédures automatiques dans le langage MIDAS, le logiciel de traitement des données d’observations développé par l’ESO, pour un total de 50 000 lignes de commandes (dont les 3/5 pour la spectroscopie multi-objet).

Si les observations furent terminées en 1995, le traitement de l’ensemble des observations spectroscopiques et des mesures de décalage vers le rouge, ainsi que la constitution des catalogues furent terminés en 1998, soit 9 ans après le début des observations.

2.2 Collaborateurs

- Christèle Bellanger (alors doctorante IAP),
- Stéphane Arnouts (alors doctorant IAP; actuellement au Télescope Canada-France-Hawaï, en détachement du Laboratoire d’Astrophysique de Marseille),
- Sandro Bardelli (Observatoire de Bologne, Italie),
- Gaspar Galaz (alors doctorant IAP; actuellement maître de conférences à l’Universidad Pontificia Católica, Chili),

2.3 Catalogue photométrique

Article: “The ESO-Sculptor faint galaxy redshift survey: The photometric sample”, Arnouts, S., de Lapparent, V., Mathez, G., Mazure, A., Mellier, Y., Bertin, E., Kruszewski, A., 1997, *A&A Suppl.* 124, pp. 163-182.

Thèse: “Etude photométrique multi-couleur d’un catalogue de galaxies lointaines”, Arnouts, S., 1996, *Thèse de Doctorat*, Univ. Paris 7.

Le traitement des images CCD et la constitution d’un catalogue photométrique homogène firent l’objet d’une thèse d’Astrophysique à l’IAP par Stéphane Arnouts. Les différentes étapes des procédures de traitement des images écrites spécifiquement pour le programme dans l’environnement MIDAS par S. Arnouts et moi-même furent : (1) la soustraction du biais; (2) l’aplatissement des images au moyen d’un “super-flat” obtenu par filtre médian sur plusieurs images des champs; (3) la soustraction des sauts de flux causés par les rayons cosmiques; (4) la calibration photométrique au moyen de séquences stellaires obtenues en début, fin et milieu de nuit de photométrie; (5) la mesure des coordonnées astronomiques des objets.

La calibration photométrique visait à obtenir d’un part les coefficients de couleur, donnant le rapport entre les couleurs d’une séquence d’étoiles observées à travers le dispositif expérimental (téléscope, instrument, détecteur) complété par le filtre d’observation, et les couleurs de ces étoiles dans le filtre de référence que le filtre d’observation vise à approcher. La calibration photométrique fournit en outre le “point-zéro” du dispositif observationnel dans chaque filtre d’observation. La connaissance des coefficients de couleurs et des point-zéros pour chaque filtre d’observation permet de transformer les flux mesurés des objets en magnitudes apparentes dans les filtres de référence.

Les coordonnées astronomiques des objets furent obtenues par alignement des images CCD sur les images provenant de la numérisation à la MAMA (Observatoire de Paris) du cliché photographique contenant la région du champ ESO-Sculpteur. Cet alignement produit les transformations MAMA-CCD, qui jointes aux transformations MAMA-J2000 fournies par le centre de numérisation, donna les transformations CCD-J2000. Ces procédures mises au point dans l’environnement MIDAS fournirent des coordonnées absolues avec une précision ≤ 0.2 seconde d’arc.

Les observations de photométrie et de spectroscopie furent effectuées avec deux instruments différents, EFOSC et EMMI, et pour ce dernier, quatre CCD différents furent utilisés (trois pour la voie rouge, et un pour la voie bleue), avec des tailles et échantillonnages différents. Les différents paramètres des CCD, et les point-zéros moyens dans les différentes bandes sont indiqués dans la Table 2 de (Arnouts et al. 1997). Il était donc important de réajuster les point-zéros de chaque image CCD de la mosaïque. Ceci fut effectué par une méthode itérative visant à minimiser les différences de magnitudes dans les régions de recouvrement des 50 images (voir Arnouts et al. 1997, pour les détails). Ce réajustement fut fait de façon séparée pour les images du NTT et du 3.6m, afin de ne pas introduire un gradient entre les deux régions du ciel, pour lesquels des décalages systématiques des point-zéros avait été détectés dans les bandes V_J et R_c . Le réajustement fut de surcroît contraint par des observations supplémentaires de quatre à cinq champs dans chaque filtre, observés au NTT dans de très bonnes conditions de seeing ($0.8 - 1.0''$) et de photométrie lors d’une même nuit d’observation, et répartis tout le long de la bande du ciel que constitue le relevé. Ces champs furent utilisés comme référence absolue de la photométrie. Le processus d’ajustement des recouvrements permit de réduire l’écart-type entre les magnitudes d’objets communs dans les recouvrements de 0.11 mag. en B_J , 0.13 mag. en V_J , et 0.14 mag. en R_c à 0.04 mag. dans les trois bandes.

La détection des objets, le calcul de leurs magnitudes ainsi que la séparation étoiles-galaxies furent effectués avec le logiciel d’analyse d’image SExtractor (Bertin & Arnouts 1996). Les magnitudes “MAG_AUTO” furent utilisées : ce sont des magnitudes d’ouverture adaptative, calculées dans un rayon adaptatif égal à 2.5 fois le premier moment de la distribution, calculé dans une ouverture elliptique dérivée des seconds moments du profil bidimensionnel de l’objet, et élargie à environ 2 diamètres isophotaux. Des simulations montrent que l’on perd ainsi une fraction constante de $\sim 6\%$ du flux des objets (Bertin & Arnouts 1996). Les données du programme ESO-Sculpteur contribuèrent à la mise à l’épreuve et à l’amélioration des performances de SExtractor pour la photométrie CCD de galaxies faibles, par une étroite collaboration entre

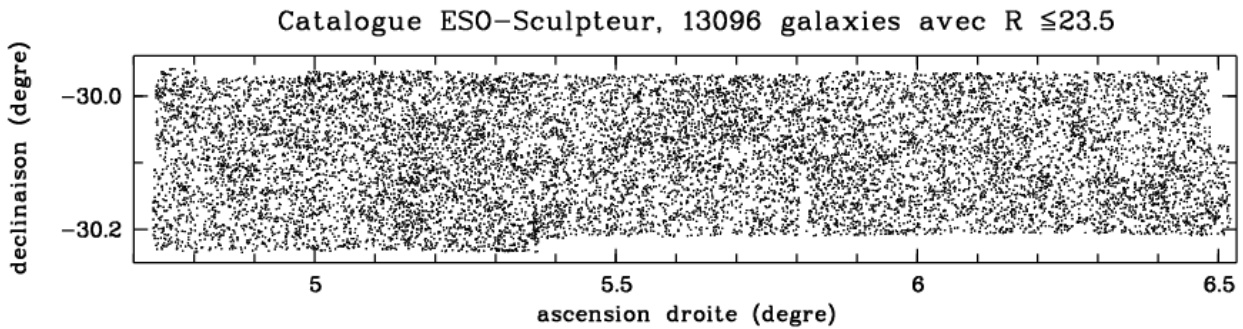


FIG. 2.1 – La répartition sur le ciel des galaxies du relevé ESO-Sculpteur, dans une région de 0.37 deg^2 du ciel austral [Arnouts et al. 1997].

Stéphane Arnouts et Emmanuel Bertin. Ce logiciel est maintenant largement utilisé par la communauté astronomique.

Le catalogue obtenu est complet jusqu'à $R_c \simeq 23.5$, $V_J \simeq 24$ et $B_J \simeq 24.5$ dans une région de 0.37 deg^2 du ciel à proximité du pôle sud Galactique. Il fournit pour $\sim 13\,000$ galaxies les magnitudes totales dans ces trois filtres du système Johnson/Cousins et les coordonnées équatoriales (J2000) avec une précision de $0.2''$. La distribution projetée des objets est montrée dans la Fig. 2.1. Les données photométriques produisirent des distributions de comptages et de couleurs qui sont en bon accord avec les diverses données existantes (Arnouts 1996; Arnouts et al. 1997), et confirmèrent le “bleuissement” des galaxies à $R_c > 21$, visible également dans les distributions de couleur $B_J - V_J$ des galaxies à faible magnitude.

2.4 Catalogue spectroscopique

Article: “The ESO-Sculptor faint galaxy redshift survey: the spectroscopic sample”, Bellanger, C., de Lapparent, V., Arnouts, S., Mathez, G., Mazure, A., Mellier, Y., 1995, *A&A* 110, pp. 159-171

Thèse: “Un nouveau catalogue pour cartographier les grandes structures à $z \sim 0.5$ ”, Bellanger, C., 1995, *Thèse de Doctorat*, Univ. Paris 6.

Le traitement des données de spectroscopie et de la mesure des décalages spectraux fit l'objet d'une thèse d'Astrophysique à l'IAP par Christhèle Bellanger. Avec son aide concernant la corrélation-croisée des spectres, je développai pendant de long mois dans l'environnement MIDAS des procédures semi-automatiques permettant le dépouillement de la spectroscopie multi-objet, qui permirent de traiter toutes les données de façon optimisée et homogène. Les spectres des galaxies les plus faibles ne représentant que quelques pourcents du fond de ciel, il était crucial d'optimiser chaque étape du traitement des spectres. Ces procédures ne requièrent que quelques rares interventions humaines, comme celle de la sélection des extrémités des fentes (cette approche est plus fiable que toute méthode automatique, et serait lourde à programmer pour prendre en compte tous les cas réels possibles, dont, par exemple, le recouvrement de fentes voisines sur quelques pixels).

La réduction des données des images de spectroscopie multi-objet fut basée sur les étapes automatiques suivantes (sauf si indiqué autrement) :

- Le nettoyage des sauts de flux causés par les rayons cosmiques, qui peuvent mimer des raies d'émission s'ils sont sur le spectre d'un objet; pour cela, les poses sont toujours doublées (1h30 par pose), et le nettoyage se fait dans la majeure partie des cas de façon automatique par comparaison des deux poses.
- La correction de la variation de transmission des fentes, qui sont percées par une succession de trous pour EFOSC, et de mini-fentes pour EMMI; cette correction se fait par éclaircissement du masque par

- une lampe de spectre proche du ciel, et permet de réduire les variations de transmission de 4% à 1% avec EFOSC, et de 2.5% à 0.3% avec EMMI.
- L'extraction des fentes individuelles par intervention visuelle sur le profil moyen des spectres 2D le long des fentes.
- La calibration en longueur d'onde effectuée dans l'espace à deux dimensions que constitue chaque fente individuelle.
- La soustraction du ciel par un ajustement à deux dimensions prenant en compte les variations d'intensité du spectre du ciel le long de la fente en fonction de la longueur d'onde. La plage de ciel est choisie visuellement, afin d'éviter les biais par les voisins et les bords des fentes (le choix visuel est ici aussi la méthode la plus fiable).
- L'extraction des colonnes de spectre dans chaque objet pondérée par le profil de l'objet à travers chaque fente, afin de donner moins de poids aux spectres des ailes de l'objet qui souffrent d'un moins bon rapport signal-sur-bruit.

L'ensemble de cette procédure permet d'extraire facilement les spectres des ~ 10 galaxies par champ d'EFOSC, et ~ 30 galaxies par champ d'EMMI. Avec une dispersion de 230 Å/mm, les spectres couvrent 4300–7000 Å avec EFOSC1 et 3500–9000 Å avec EMMI, et leur résolution varie de 20 Å avec EFOSC1 à 10 Å avec EMMI. Environ 100 spectres furent obtenus avec EFOSC1 au 3.6m, les 800 autres furent obtenus avec EMMI au NTT.

Pour chaque galaxie, l'intervalle de longueur d'onde dans le référentiel de la galaxie dépend de la combinaison de la dispersion du grisme, de la position de l'objet dans le masque multi-fente, et du décalage spectral de l'objet. La majorité des spectres d'EFOSC ont un intervalle dans le référentiel de la galaxie de 3300–4700 Å pour les spectres d'EMMI il est de 3300–5700 Å. Par conséquent, peu de spectres incluent la raie d'émission $H\alpha$, à 6563 Å, qui est utile pour déterminer l'extinction du spectre par le rapport avec la raie $H\beta$. En revanche, les raies H (3968.5 Å) et K (3933.7 Å) du Ca II et la bande G de la molécule CH (4304.4 Å) sont détectées dans la plupart des spectres.

Le spectre de chaque galaxie fut ensuite obtenu par soustraction du spectre du ciel correspondant, et par somme des deux poses pondérées par le rapport signal-sur-bruit de chacun des deux spectres. Les spectres résultants ont un rapport signal-sur-bruit moyen dans leur continu variant entre 10 et 50 pour les galaxies à $R_c \leq 20.5$, et entre 5 et 15 aux magnitudes plus faibles.

Les décalages spectraux furent mesurés d'une part par corrélation croisée avec un spectre du bulbe de M31, qui fournit un "point-zéro" précis et fiable pour l'échelle des décalages spectraux, ainsi qu'avec six spectres de référence décrivant les différents types spectraux E, S0, Sa, Sb, Sc, Irr (voir Bellanger et al. 1995 pour les détails). Ces corrélations croisées fournissent un signal basé sur les raies d'absorption.

Les raies d'émission sont d'autre part ajustées par des gaussiennes et produisent une autre mesure, le décalage spectral d'émission. Une fraction importantes des galaxies (48%) présente des raies d'émission (Galaz & de Lapparent 1998), principalement [OII] 3727 Å, $H\beta$ 4851 Å, [OIII] 4958.9 Å, et 5006 Å, dont les largeurs équivalentes furent mesurées après calibration en flux des spectres (voir Sect. 2.5).

Ces diverses mesures et leurs incertitudes furent comparées, et lorsqu'elles étaient cohérentes, furent combinées et pondérées afin d'en déduire le décalage spectral final de chaque objet. Des tests extensifs de comparaison interne des mesures spectroscopiques multiples, fournirent une évaluation détaillée de la qualité des données du relevé ESO-Sculpteur (de Lapparent et al. 2003). La précision des décalages spectraux est $\sigma_z = 0.00055$, soit 165 km/s ou 2.35 Mpc. Il est à noter que tous les spectres furent examinés visuellement au cours de toute la chaîne de traitement, et qu'un indice de confiance inférieur à 100% fut attribué lorsque qu'un ou plusieurs critères remettaient en doute la fiabilité du décalage spectral.

La dernière étape fut celle de l'identification croisée du catalogue photométrique avec les galaxies observées en spectroscopie, pour lesquelles le logiciel utilisé au télescope ne fournissait pas de coordonnées. Ceci fut fait par repérage visuel des galaxies au sein des images correspondantes du relevé photométrique, à partir des cartes de champs imprimées au télescope lors de la fabrication des masques, produisant des listes de coordonnées [x,y] approximatives. Celles-ci furent ensuite converties en coordonnées astronomiques et croisées avec le catalogue photométrique.

Le catalogue ainsi obtenu fournit les spectres et décalages spectraux de ~ 900 galaxies avec $R_c \leq 21.8$ (et $0.1 \leq z \leq 0.6$) dans 0.25 deg² du ciel. Les 613 galaxies à $R_c \leq 20.5$ constituent un catalogue

spectroscopique complet à 92%. L'échantillon de 270 galaxies supplémentaires avec mesure de décalage spectral dans l'intervalle de magnitude $20.5 < R_c \leq 21.8$ conduit à une complétude spectroscopique de 14%, mais celle-ci augmente à 46% pour les 176 galaxies avec $R_c \leq 21$, soit une complétude cumulée de 76% à $R_c \leq 21$, et 52% à $R_c \leq 21.5$ (voir Table 1 de l'article choisi n° 4, p. 127, de Lapparent et al. 2003).

2.5 Calibration en flux, classification spectrale, et corrections- k

Article: “The ESO-Sculptor Survey: spectral classification of galaxies with $z \leq 0.5$ ”, Galaz, G., de Lapparent, V., 1998, *A&A* 332, pp. 459-478.

Thèse: “Classification spectrale et fonctions de luminosité des galaxies lointaines”, Galaz, G., 1997, *Thèse de Doctorat*, Univ. Paris 7.

La calibration en flux des spectres fut effectuée dans le cadre d'une troisième thèse à l'IAP, par Gaspar Galaz, un étudiant Chilien qui venait d'effectuer le DEA d'Astrophysique et Techniques Spatiales de l'Observatoire de Meudon.

Cette calibration fut basée sur l'observation en début, milieu et fin de nuit, de standards spectro-photométriques positionnés sur une grille pavant la région du champ disponible pour la spectroscopie. Les 2/3 des spectres ESO-Sculpteur furent obtenus dans des conditions météorologiques de qualité spectro-photométrique. Pour chaque spectre, nous avons ensuite mesuré les largeurs équivalentes des raies d'émission et d'absorption, qui fournissent des indicateurs complémentaires à la classification spectrale.

Nous avons effectué un test de la qualité de la calibration en flux en comparant les couleurs photométriques avec les couleurs “spectroscopiques”. Ces dernières furent obtenues en convoluant les spectres du relevé ESO-Sculpteur par les filtres standard B_J , V_J , et R_c , après calibration par des étoiles standards pour lesquelles photométrie et spectro-photométrie sont disponibles (Hamuy et al. 1992, 1994; Landolt 1992). Les couleurs “spectroscopiques” $V_J - R_c$ et $M_{B_J} - M_{V_J}$ furent calculées à partir des spectres présentant l'intervalle spectral correspondant. La comparaison avec les couleurs photométrique indiqua que les spectres ESO-Sculpteur ont un continuum trop rouge de 9% tous les 1000 Å dans l'intervalle $\sim 4000 - 8000$ Å. Nous interprétons ce résultat comme une sous-évaluation de la calibration spectro-photométrique dans la partie bleue des spectres, qui est affectée par une faible sensibilité des détecteurs. Un autre cause possible est la réfraction atmosphérique différentielle, qui a tendance à séparer la partie bleue de la partie rouge des spectres. Les fentes étant alignées sur les images en R_c , la spectroscopie aura tendance à atténuer la partie bleue des spectres.

La classification spectrale du catalogue est basée sur une décomposition en composantes principales (“Principal Component Analysis” ou PCA en anglais), prenant en compte les différents intervalles de longueur d'onde décrits par les spectres (Galaz 1997; Galaz & de Lapparent 1998; de Lapparent et al. 2003). Il avait déjà été montré que les couleurs des galaxies peuvent être décrites par une combinaison linéaires des couleurs stellaires (Aaronson 1978). La méthode PCA fournit une démonstration plus générale de cet effet sur un grand échantillon de spectres et à plus grand décalage vers le rouge. Elle permet d'écrire chaque spectre comme une combinaison linéaire de trois composantes qui reproduisent 98% du flux des galaxies : les 2 premières composantes déterminent la proportion des différentes populations stellaires présentes dans chaque galaxie, alors que la 3ème composante détermine la contribution des raies nébulaires. Cela fournit une classification continue dans un espace à deux paramètres, indépendante de tout spectre de référence. Les deux paramètres de classification sont de surcroît corrélés, les galaxies de type tardif ayant des raies d'émission plus fortes. Cette classification présente l'avantage d'être faiblement dépendante du niveau de bruit des spectres. Elle est de surcroît étroitement liée à la classification morphologique (Connolly et al. 1995; Sodre & Cuevas 1997). En projetant les spectres de référence de Kennicutt (1992) sur la séquence PCA, nous constatons que la séquence de Hubble s'organise de façon monotone dans le sens d'un accroissement de la contribution des jeunes populations stellaires et des raies nébulaires pour les types plus tardifs. Par ailleurs, nous estimions que les fractions de galaxies ESO-Sculpteur ayant des spectres similaires aux spectres de référence pour les types morphologiques E, S0, Sa, Sb, Sc, et Sm/Im sont : 17%, 9%, 15%, 32%, 24%, et 3% (Galaz & de Lapparent 1998).

La connaissance des types spectraux des galaxies permet le calcul des corrections- k , donnant la transformation des magnitudes apparentes observées en magnitudes absolues. Les corrections- k sont fonction de la répartition spectrale de chaque galaxie, et de son décalage spectral. Ces calculs, qui nécessitent la connaissance de la partie UV non-observée des spectres, sont basés sur les spectres de bibliothèques de synthèse spectrale (Fioc & Rocca-Volmerange 1997; Bruzual & Charlot 1993). Nous développâmes une méthode originale selon laquelle les spectres observés sont comparé aux spectres synthétiques au moyen de la classification spectrale PCA. La précision des magnitudes absolues qui en résultent en $B_J V_J R_c$ est de 0.1 à 0.2 mag (Galaz & de Lapparent 1998; de Lapparent et al. 2003). Une évaluation détaillée de la qualité des données photométriques, de la classification spectrale, des corrections- k , et de la calibration en flux de la spectroscopie du relevé ESO-Sculpteur fut produite dans de Lapparent et al. (2003, article choisi n° 3, p. 71).

2.6 Article choisi n° 1

“The ESO-Sculptor Survey: spectral classification of galaxies with $z \leq 0.5$ ”

Galaz, G., **de Lapparent**, V.

Astronomy & Astrophysics, Vol. 332, pp. 459-478

1998