

Deuxième partie

LE RELEVÉ SPECTRAL ESO-SCULPTEUR

Chapitre 1

Acquisition des données

1.1 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),
- Gaspar Galaz (alors doctorant IAP; actuellement maître de conférences à l’Universidad Pontificia Católica, Chili),
- Guy Mathez (Laboratoire d’Astrophysique de Toulouse-Tarbes, Toulouse),
- Alain Mazure (actuellement au Laboratoire d’Astrophysique de Marseille),
- Yannick Mellier (actuellement à l’IAP).

1.2 L’opportunité nouvelle des programme-clés

Le relevé ESO-Sculpteur a été rendu possible par la mise en place des “programmes-clé” en 1989, par Prof. Harry van der Laan, alors récent directeur général de l’ESO. La mise en service imminente du NTT conduisait à un supplément de nuits d’observations. En répartissant ce temps supplémentaire sur les différents télescopes, pondéré en fonction de la taille des miroirs, on pouvait estimer que cela conduisait à 2000 nuits supplémentaires sur une période de quatre ans, dont la moitié sur le 3.6 m et le NTT. Prof. van der Laan proposait d’utiliser ces nuits supplémentaires d’une nouvelle façon (van der Laan 1988b).

L’analyse de la distribution des missions d’observations en fonction du nombre de nuits allouées montrait que la majorités des attributions et temps étaient de deux à trois nuits pour le 3.6 m et le 2.2 m, de trois à cinq nuits pour les deux télescopes de 1.5 m, et de quatre à huit nuits pour le 1.4 m. Prof. van der Laan proposait d’offrir la possibilité d’une attribution garantie de 15 à 50 nuits de télescopes sur une période de un à quatre ans pour des programmes scientifiques pour lesquels un échantillon statistique nécessitant un grand nombre de nuits de télescope était indispensable (van der Laan 1988b). Ces programmes ne devaient pas être la simple accumulation d’un grand catalogue, mais devaient répondre à une question-clé de l’astrophysique avec des objectifs spécifiques et une stratégie bien structurée.

Après un appel d’intention au printemps 1988, 60 réponses parvinrent pour un temps total d’observation estimé de ~ 1850 nuits sur le 3.6 m et le NTT, et 1550 nuits sur le 2.2 m les 2.5 m et les 1.4 m, soit 3400 nuits au total (van der Laan 1988a). L’appel à propositions fut lancé avec une attribution de 125 nuits sur les 3.6 m et le NTT pour la première année (1989), et un objectif de 240 nuits par an sur ces mêmes télescopes pour les années suivantes (van der Laan 1989).

Le système des “programme-clés”, innové par Prof. van der Laan sur les télescopes de l’ESO, inspira ensuite d’autres observatoires et a conduit aux “Key-Projects” avec le Télescope Spatial de Hubble, et aux “Large Programmes” à l’ESO et au Télescope Canada-France-Hawaï(TCFH). L’avènement d’instruments

de plus en plus performants pour effectuer des relevés extra-galactiques comme MEGACAM au TCFH, et VIMOS au VLT, permit aussi la mise en place de programmes de type “Legacy”. Ces programmes sont des grands relevés effectués par des équipes compétentes pour mener à bien les observations et le traitement des données de haute qualité, les données traitées étant ensuite mises à la disposition de tout la communauté (par exemple le centre TERAPIX - IAP/INSU,CNRS - de traitement des données provenant des images MEGACAM prises au TCFH).

1.3 Motivations et contexte scientifique

Le système des programme-clés était indispensable à la réalisation de relevés de galaxies, pour lesquels un grand volume de l’Univers doit être sondé afin qu’il soit représentatif de la distribution et permette des analyses quantitatives fiables. Des groupes de chercheurs américains avaient pu effectuer de tels relevés grâce à des télescopes appartenant à leur laboratoire ou à un groupe de laboratoires. C’est dans ce cadre qu’avait été effectué l’acquisition du relevé du Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics (CfA) : un relevé complet de galaxies avec décalage spectral et magnitude B limite de 14.5 (Huchra et al. 1983), utilisant le télescope de 1.5 m du “Fred Lawrence Whipple Observatory” appartenant au CfA, et situé à Mount Hopkins dans l’Arizona.

En utilisant la moitié du temps de ce télescope, et plus particulièrement toutes les nuits sombres, le relevé spectroscopique du CfA a pu être étendu jusqu’à la magnitude B limite de 15.5. Ces cartes eurent un impact important, car elles révélèrent pour la première fois la structure cellulaire de la distribution des galaxies (de Lapparent et al. 1986a). Elles ont aussi participé à faire évoluer la façon de concevoir l’attribution du temps d’observation, par la prise de conscience que la communauté devait non seulement investir une large fraction de son temps de télescope sur des projets de relevés systématiques, mais aussi dédier des petits télescopes pour de tels projets. Le relevé “Sloan Digital Sky Survey” (SDSS, <http://www/sdss.org>) fut conçu dans cet esprit.

La découverte de la structure cellulaire de la distribution des galaxies à grand échelle (de Lapparent et al. 1986a), et l’existence d’un “mur” de galaxies sur environ 200 Mpc (Geller & Huchra 1989) conduisait naturellement à se poser la question de la taille maximale des vides et feuillets détectés, celle-ci étant forcément limitée afin d’être compatible avec l’isotropie du rayonnement cosmologique à 2.7 deg. K (Bennett et al. 1996). Il était de surcroît naturel de se demander si l’alternance de vides et feuillets se prolongeait à plus grand décalage spectral.

L’autre motivation du programme était d’examiner les effets d’évolution des galaxies individuelles sur l’intervalle de décalage vers le rouge 0.1 – 0.5. Au vu des résultats récents montrant l’excès de galaxies bleues dans les comptages profonds Tyson (1988), et l’excès de galaxies bleues dans les amas de galaxies à $z \simeq 0$. (Butcher & Oemler 1978), il était légitime de s’interroger sur la nature des galaxies causant ce bleuissement, et sur leur répartition spatiale.

1.4 Observations

Compte-tenu des objectifs scientifiques et des performances instrumentales du moment, il me sembla opportun d’obtenir la photométrie et la spectroscopie d’environ un millier de galaxies de champ jusqu’à un décalage spectral de 0.5 et une magnitude limite équivalente à $B \simeq 22$. L’acquisition du relevé photométrique par *imagerie CCD*, et un suivi spectroscopique *complet* furent posés comme conditions indispensables à la réalisation du projet.

1.4.1 Choix du champ sur le ciel

Afin de minimiser l’extinction galactique, le champ fut choisi à proximité du pôle sud galactique (dans la constellation du Sculpteur), ce qui impliquait une déclinaison voisine de la latitude de l’observatoire de La Silla, et présentait donc l’avantage d’observer avec une masse d’air inférieure à 1.4.

Afin d'échantillonner largement la distribution des galaxies, il fallait choisir un champ dans lequel il n'y avait pas d'amas riche de galaxies, car cela aurait conduit à consacrer une grande partie du temps d'observation sur ce système, au détriment de l'exploration des grandes structures. Les amas d'avant-plan pouvaient être évités à priori grâce au catalogue d'Abell (1958) : plusieurs régions proches du pôle sud galactique et dénuées de tout amas d'Abell étaient envisageables. J'ai examiné ces régions visuellement à partir des plaques photographiques de Schmidt (ESO), dont des copies sur papier étaient disponibles à l'IAP. Certaines contenaient des amas riches d'arrière plan (à un décalage spectral de 0.3 – 0.5), pour lesquels le catalogue d'Abell est largement incomplet : ceux-ci sont visibles sous la forme d'une surdensité de galaxies à la limite de la plaque photographique.

La région que je choisis est dénuée d'amas proches d'avant et d'arrière-plan, tout en montrant un grand nombre de galaxies faibles apparemment “de champ”. Les coordonnées de la région sont indiquées dans la Table 1.4.1 1, ainsi que la latitude galactique et l'étendue angulaire du relevé.

TAB. 1.1 – Localisation du relevé ESO-Sculpteur

R.A., DEC.	b^{II}	Aire couverte en Photométrie	Aire couverte en Spectroscopie
centre	[deg]	[deg ²]	[deg ²]
$0^{\text{h}}22^{\text{m}}30^{\text{s}}, -30 \text{ deg } 06'$	-83	$0.24 \times 1.53 = 0.37$	$0.24 \times 1.03 = 0.26$

1.4.2 Choix d'un relevé digital

A l'époque à laquelle le programme a démarré, il n'existait pas de relevé profond CCD du ciel, et le seul relevé du ciel austral était le catalogue de Maddox et al. (1990b), obtenu à partir des plaques photographiques du télescope UK Schmidt numérisées par la machine APM (“Automated Plate Measurement”), atteignant une magnitude limite $B_J \simeq 22$.

Au cours de ma thèse, j'avais mis en évidence les variations de point-zéros et les effets de vignettage (obscurcissement des objets à la périphérie des plaques) qui affectaient le catalogue de Shane et Wirtanen (Geller et al. 1984). Nous avons ensuite évalué les biais qui en résultaient sur les mesures du regroupement spatial (de Lapparent et al. 1986b), et remettaient en cause les modélisations de Groth & Peebles (1977). Il fut montré que des effets analogues entâchaient le catalogue de l'APM (Maddox et al. 1990a; Bertin & Dennefeld 1997), biaisant les modélisations de Maddox et al. (1990c).

Au vu de ces problèmes d'hétérogénéité des catalogues basés sur les plaques photographiques, il nous sembla judicieux de ne pas utiliser le catalogue APM, et d'acquérir la photométrie du relevé ESO-Sculpteur par imagerie CCD, afin de bénéficier non seulement d'une meilleure homogénéité, mais aussi d'une garantie de sensibilité et de linéarité.

1.4.3 Choix des instruments d'observation

L'instrument EFOSC (“ESO Faint Object Spectrograph and Camera”) qui venait d'être installé sur le télescope de 3m60 de l'ESO offrait l'opportunité nouvelle de coupler l'acquisition de la photométrie et de la spectroscopie sur le même télescope (Buzzoni et al. 1984). Par trois nuits d'observations sur le télescope de 3.60 m à La Silla en août 1987, avec mes collaborateurs Yanick Mellier, Guy Mathez, et Alain Mazure, nous prouvions la faisabilité du projet. Cela conduisit à l'attribution de trois nuits supplémentaires en août 1988.

Au cours de ces deux missions nous avons obtenu les images dans la bande R d'une région du ciel de 172 minutes d'arc-carrés. Durant la même mission, au cours de l'après-midi, nous sélectionnions à l'oeil les galaxies avec une magnitude plus brillante que 20.5 en R . Puis nous utilisons le nouvel instrument PUMA2 (“Punching Machine”), la copie de la machine conçu par le groupe de Toulouse et installée au Télescope Canada-France-Hawaï, permettant de percer des trous et fentes sur des plaques métalliques afin d'effectuer la spectroscopie simultanée de plusieurs galaxies d'un champ donné (Fort et al. 1986).

Nous pouvions effectuer les observations spectroscopiques dès la nuit suivante, et obtenir en deux fois 1h30 les spectres de galaxies à $R \simeq 20.5$ avec un rapport signal-sur-bruit de 10 dans le continu, pour environ 10 galaxies dans un champ de 5×3 minutes d’arc-carrés.

L’avènement des programme-clés (voir Sect. 1.2) nous conduisit à réviser la stratégie et l’ampleur de notre programme, et à proposer un programme-clé, qui fut accepté en février 1989 (de Lapparent et al. 1989a). Ces programmes étant particulièrement nouveaux, Prof. van der Laan appelait personnellement les P.I. des projets pour leur annoncer l’acceptation de leur proposition. Nous obtinmes ainsi une attribution garantie de 60 nuits sur les 65 demandées sur les télescopes de 3.6 m et le NTT (de Lapparent et al. 1989b).

En octobre 1990, lors de l’installation d’EMMI (“ESO multi-mode instrument”; D’Odorico 1990) sur le tout nouveau NTT (“New Technology Telescope”), ayant un miroir de 3.50 m de diamètre ajusté par optique active (Tarengi & Wilson 1989), les champs du relevé ESO-Sculpteur furent utilisés pour effectuer un test de faisabilité technique de spectroscopie multi-objet (Dekker et al. 1991). Les spectres obtenus furent d’excellente qualité compte-tenu de la faible brillance de surface de certaines des galaxies observées. EMMI sur le NTT était ainsi parfaitement adapté à réalisation du programme ESO-Sculpteur, par sa meilleure qualité d’image, sa sensibilité accrue et sa plus grande couverture de champ en imagerie et spectroscopie par rapport à EFOSC. Le comité d’attribution du temps de télescope, accepta alors de transférer notre programme sur le NTT à partir d’Octobre 1991, ce qui permit d’accélérer d’au moins un facteur 2 le rythme d’obtention des données, et garantissant dans le temps d’observation total imparti, de pouvoir atteindre la couverture du ciel initialement visée (de Lapparent et al. 1993).

1.4.4 Stratégie d’observation

Afin de couvrir les 0.24×1.53 degré-carré sur ciel par les images CCD dont les plus grandes mesurait 9 minute d’arc de côté (CCD Loral sur EMMI au NTT; Arnouts et al. 1997), il fallait paver le champ avec une mosaïque d’images. Au total, 27 à 30 champs furent obtenus en B_J , V_J , R_c avec EFOSC, et 21 à 25 champs en B_J , V_J , R_c avec EMMI. Sauf sur les bords du relevé, chaque image CCD fut obtenue par un décalage de coordonnées de 90% de la taille du CCD en ascension droite et en déclinaison, ce qui assurait des zones communes nombreuses entre les images adjacentes, qui furent ensuite utilisées pour améliorer l’homogénéité de la photométrie.

Afin d’éviter la saturation des étoiles brillantes de certains champs, les poses de chaque image furent morcelées en deux ou trois poses, selon la sensibilité des instruments et filtres utilisés. Les temps d’observations pour les poses photométriques furent de 30, 25 et 20 minutes en B , V , et R resp. avec EFOSC, et de 25, 20 et 15 minutes en B , V , et R resp. avec EMMI, grâce à une sensibilité accrue. Les limites de complétudes atteintes sont 24.5, 24.0 et 23.5 en B , V , et R .

L’intervalle de seeing pour les observations d’imagerie effectuées avec EFOSC au 3.60 m fut de 1.1 – 1.65 seconde d’arc. Le 3.60m posa longtemps des problèmes de seeing médiocres, qui ne furent résolus qu’ultérieurement (Faucherre 1995; Guisard 1996; Guisard et al. 1997). La taille des pixels sur EFOSC était à l’époque de $0.675''$, ce qui impliquait un sous-échantillonnage des images. Les meilleur seeing obtenu au NTT avec EMMI (valeur moyenne de $1.0''$), et les plus petits pixels de détecteurs (de $0.27''$ à $0.44''$, voir Table 2, Arnouts et al. 1997) conduisirent à un meilleur échantillonnage de la réponse impulsionnelle.

Les galaxies à observer en spectroscopie étaient sélectionnées préalablement à la mission, à partir des observations précédentes. Celle-ci permettaient d’effectuer la photométrie des galaxies détectées et de sélectionner celles qui étaient suffisamment brillantes pour appartenir à l’échantillon spectroscopique.

L’intérêt d’effectuer les relevés photométriques et spectroscopiques avec les mêmes instruments EFOSC et EMMI, était celui d’une grand souplesse, permettant une optimisation de l’utilisation du temps d’observation. Lorsque les nuits étaient de qualité photométrique, la priorité était donnée aux observations photométriques. Puis l’on passait à des observations spectroscopiques lorsque les nuits (ou les parties de nuit) n’étaient plus photométriques.

Le lourd travail de préparation des masques pendant tout l’après-midi précédent chaque nuit rendait les missions d’observation particulièrement fatigantes, et nécessitait 2 personnes par mission. Je fus

présente à chaque mission, secondée dans les premiers temps par alternativement, A. Mazure, Y. Mellier, et G. Mathez. A partir de 1992, les trois doctorants formés à l'IAP m'accompagnèrent à tour de rôle à chaque mission.

1.4.5 Choix des filtres et des magnitudes limites des catalogues

Le choix d'observer tous les champs du relevé dans les bandes B , V et R (avec pour référence le système Johnson/Cousins), reposa sur le souhait d'avoir pour chaque galaxie deux couleurs couvrant une large partie du domaine visible par des filtres adjacents. En l'occurrence, les filtres choisis couvrent l'intervalle 4000-8000Å, correspondant au domaine de longueur d'onde observé en spectroscopie. Cela permettait aussi de tester la calibration en flux des spectres.

Le choix de la bande R pour la sélection des galaxies à observer en spectroscopie fut le résultat de trois constatations : les relevés de galaxies existants (APM, CfA etc.) avaient été sélectionnés dans la bande B à partir de plaques photographiques, et la bande B se décale dans la bande R à un décalage vers le rouge de 0.6 ; les galaxies spirales sont en moyenne 1.5 magnitude plus brillantes dans la bande R que dans la bande B ; les CCD ont un bien meilleur rendement quantique dans la bande R que dans la bande B . Le choix de la bande R permettait ainsi d'effectuer l'imagerie préalable à la spectroscopie en un temps d'observation plus court qu'avec la bande B , cette dernière pouvant être obtenue pendant les missions ultérieures.

Le choix de la magnitude limite pour le catalogue spectroscopique $R_c = 20.5$ fut essentiellement déterminé par le temps de pose maximum qui pouvait être envisagé pour un relevé spectroscopique profond de galaxies faisable en environ environ 50 nuits de 3.6 m et NTT : 3h par champ de spectroscopie multi-objet, produisant les spectres simultanés d'environ 30 galaxies par champ. Cela permettait de viser l'acquisition d'un catalogue virtuellement complet d'environ 700 décalages spectraux. De surcroît, cette magnitude limite assurait la détection des galaxies spirales avec une magnitude absolue de $M^* \simeq -20$ au pic de la fonction de sélection du catalogue ($z \sim 0.3$). La magnitude $R_c = 20.5$ représentait par ailleurs un bon compromis entre l'efficacité d'EFOSC et d'EMMI entre l'obtention de la spectroscopie d'un échantillon de plusieurs centaines de galaxies, et la nécessité d'une couverture angulaire suffisante pour échantillonner chaque feuillet de galaxies intercepté par la ligne de visée. On peut remarquer qu'incidemment, la limite $R_c = 20.5$ correspondait à la magnitude limite $B \simeq 22$ des catalogues basés sur les plaques photographiques, comme celui de l'APM (Maddox et al. 1990b).

1.4.6 Répartition temporelle et déroulement des observations

L'allocation initiale de temps d'observation fut de 60 nuits de 3.6 m et de NTT réparties en deux missions par an (septembre et octobre) pendant six ans (1989-1994). Le contexte logistique des programme-clé était très souple : à la fin de chaque année d'observation (tous les deux semestres), on transmettait le nombre de nuits souhaité pour la prochaine année, en joignant un rapport sur les observations de l'année écoulée, et sur le traitement de ces données. La garantie de temps d'observation pendant chaque semestre s'est vérifiée être sans faille. Sur les 60 nuits, il y eut 12 nuits de mauvais temps, qui furent compensées par une attribution supplémentaire de 11 nuits en 1995.

Les premières missions du programme furent consacrées aux observations d'imagerie pendant chaque nuit photométrique. Pendant les nuits non photométriques, les observations de spectroscopie multi-objet furent effectuées. Celles-ci étaient préparées dans un premier temps à l'IAP par le traitement des images de la mission précédente, et la sélection des galaxies plus brillantes que la magnitude limite visée de $R_c = 20.5$ visée. La fabrication des masques pour les observations de spectroscopie multi-fente se faisait pendant la mission, en prenant une image du champ à observer pendant la première nuit, à partir de laquelle les fentes pouvaient être positionnées avec précision sur les galaxies qui avaient été sélectionnées lors du traitement des images. L'image de préparation du champ devait être positionnée et orientée de manière à pouvoir observer le plus grand nombre de galaxies par champ tout en maintenant des largeurs de fentes suffisantes pour échantillonner suffisamment le fond de ciel de part et d'autre des galaxies, et ainsi effectuer des soustractions de ciel de qualité. Aucun logiciel n'existait à cette époque pour effectuer cette préparation des masques, et l'optimisation fut effectuée visuellement. Les fentes percées pour le

relevé mesuraient 0.18 à 0.25 mm de largeur, se projetant sur 1.3-1.8 secondes d'arc sur le ciel. La longueur des fentes était ajustée en fonction de l'encombrement des galaxies dans le champ observé, et variait de 10 à 15 secondes d'arc sur le ciel.

L'excellente complétude spectroscopique atteinte avec une couverture spatiale homogène (92% à $R_c \leq 20.5$) atteste du succès de la méthode. À noter que nous prenions en compte les galaxies déjà observées lors des missions précédentes, et ajoutions des galaxies avec $R_c > 20.5$ lorsqu'il restait de la place pour quelques fentes supplémentaires sur un masque (souvent le cas pendant les dernières missions du programme). Cela permit d'obtenir la spectroscopie de 176, 77 et 18 galaxies supplémentaires avec dans les intervalles de magnitude R_c 20.5 – 21, 21 – 21.5, et 21.5 – 22 resp. (voir Sect. 2.5), conduisant à une complétude spectroscopique de 75% à $R_c \leq 21$.