

attrayante et importante pour tirer partie des potentialités exceptionnelles des nouveaux spectrographes qui seront associés à ces grands télescopes. Il était donc essentiel de tester cette technique en grandeur nature sur le ciel afin de la valider et de l'optimiser pour motiver une implantation sur les futurs spectrographes des huit mètres qui verront leur première lumière dès 1997. Le CFHT a constitué en ce sens un terrain d'expérimentation parfait comme je le discute dans le chapitre suivant.

Chapitre C.2

Implantation sur télescope

C.2.1 Implantation sur le spectrographe MOS/SIS du CFHT

Le spectrographe MOS-SIS (Le Fèvre et al. 1994) étant un instrument très modulaire (modes multifente, argus, spectroscopie à haute qualité d'image avec la voie SIS et son correcteur de turbulence, ...), l'implantation du mode d'observation par va-et-vient de charges n'a pas rencontré d'obstacle (printemps 1995). Le va-et-vient dans sa phase active d'observation ne concerne en fait que le contrôle du CCD et du télescope mais cette technique impose des contraintes fortes sur la préparation des masques; ce point est discuté en détail dans ce chapitre.

J'ai implanté le mode de transfert des charges dans les deux directions sur le CCD épais Loral3 du CFHT qui est géré par le même type de contrôleur que celui de MOCAM. Cette caméra mosaïque m'a d'ailleurs servi de banc de développement et de test du logiciel de va-et-vient dans l'environnement Pegasus, le CCD Loral3 étant alors très souvent utilisé pour les observations. Pour automatiser la procédure d'observation, il fallait coupler le contrôle des horloges du CCD et de décalage du télescope. C'est une action qui s'oppose à la philosophie générale de l'environnement Pegasus qui est basée sur une architecture logicielle très hiérarchisée interdisant les communications entre des couches de très bas niveau. Cependant grâce au logiciel de contrôle du télescope "*tcs*" (Telescope Control System Handler), il est très facile d'effectuer des décalages très fins du télescope sur le champ depuis l'interface utilisateur. Ce programme a été spécialement développé pour MOS/SIS afin de permettre un recentrage parfait (à la fraction de pixel) de l'objet dans la fente. Comme ce programme est contrôlable depuis un autre logiciel, le système de commande a été intégré dans le logiciel CCD de Pegasus. La modification du logiciel de contrôle du CCD consiste en l'ajout de fonctions de décalages d'un nombre donné de lignes de haut en bas ou de bas en haut le long des colonnes. L'ensemble du séquençement est amené à un très haut niveau dans Pegasus (la première couche après la session utilisateur) afin d'accéder au contrôle du télescope et du CCD d'une façon transparente.

Les paramètres qui définissent une pose en va-et-vient sont le nombre de cycles à effectuer, le temps de pose élémentaire d'un demi-cycle et le nombre de lignes à décaler entre chaque cycle de va-et-vient. Les deux premiers paramètres définissent

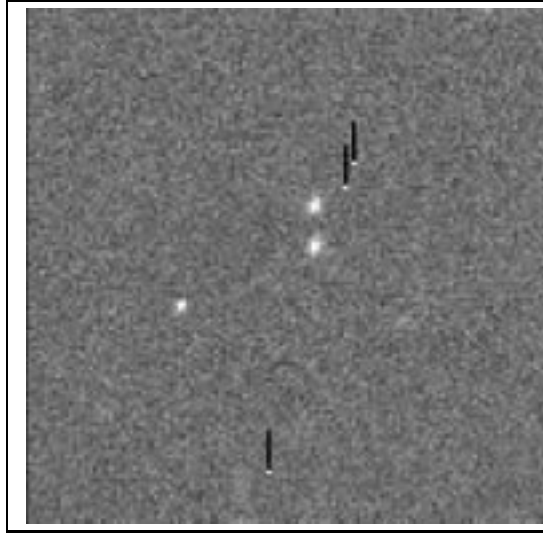


Figure C.2.1: Mise en évidence des pièges sur la surface du CCD par la technique de va-et-vient des charges (“pocket pumping”).

le temps de pose total et le troisième va être traduit en échelle angulaire sur le ciel pour la commande du décalage du télescope. Le temps de pose élémentaire est défini par les propriétés spectrales du ciel au-dessus de l’observatoire. Comme je l’ai discuté en fin de chapitre précédent, trois minutes au CFHT amènent des variations relatives du spectre du ciel à moins de 0.5% entre deux poses élémentaires successives. Le nombre de lignes à décaler est défini par le choix des objets et le ciel vide qui peut être utilisé de part et d’autre (voir le paragraphe suivant sur la construction du masque). Le fractionnement du temps de pose total est conditionné par le rapport signal sur bruit désiré sur l’objet, par la résolution utilisée et le flux du fond de ciel afin d’aboutir à une pose finale où le bruit de photon du fond de ciel domine le bruit de lecture de la caméra. En basse résolution ($R \sim 100$), et pour un bruit de lecture de cinq électrons, le temps de pose standard est de trente minutes à une heure.

Cette manipulation du télescope en mode chopping était une première et il fallait tester la capacité du télescope à se recentrer parfaitement sur ses positions au fil des cycles successifs, et pour différents degrés d’inclinaison. Trois poses sont nécessaires pour valider cet aspect au travers de l’analyse de la qualité d’image: une pose en imagerie normale pour déterminer la valeur du seeing, une pose en imagerie mais en mode va-et-vient du télescope uniquement pour voir apparaître deux images décalées de la même étoile afin de valider la précision de décalage du télescope, et enfin une pose en imagerie va-et-vient (10 cycles) qui donne une image unique de l’étoile pour tester la combinaison du décalage synchronisé des charges et du télescope. La qualité d’image est apparue uniforme entre ces trois poses, prouvant ainsi que le logiciel de contrôle du CCD et du télescope sont parfaitement combinés. Ce test a bien confirmé que le système de décalage du télescope est précis à mieux que l’échelle du pixel ($0''.3$). Ce processus consiste à

décaler le télescope sur le champ puis à aller rechercher automatiquement l'étoile guide avec la sonde de guidage. Au contraire du test du va-et-vient effectué sur le NTT en 1993 (Cuillandre et al. 1994) qui laissait le télescope sans guidage pendant la moitié des cycles, le CFHT permet un guidage pendant l'ensemble de la pose.

Lors des tests préliminaires du CCD Loral3, les pièges ont été mis en évidence en procédant à plusieurs cycles de va-et-vient avec l'obturateur fermé mais avec une illumination initiale (Cf. partie A de ce mémoire sur l'optimisation des CCDs). Il se forme alors des zones oblitérées (figure C.2.1) dont la longueur est égale au nombre de lignes décalées lors des cycles de va-et-vient. J'ai pu estimer à 40 le nombre de défauts de ce type qui peuplent la surface du Loral3. Ce nombre est négligeable et apporte très peu de perte de surface efficace du détecteur.

Une règle établie consiste à aligner la dispersion des spectres le long des colonnes afin d'éviter la contamination d'un grand nombre d'entre eux par d'éventuelles mauvaises colonnes. Le va-et-vient requiert cependant impérativement un alignement de la dispersion le long des lignes puisque le décalage se fait le long des colonnes. Nous avons donc utilisé la roue à grism du mode argus qui donne une dispersion le long des lignes. L'utilisation du mode va-et-vient n'implique donc pas une configuration matérielle particulière mais la modularité du spectrographe MOS/SIS a été un facteur déterminant du succès de l'implantation du mode va-et-vient au CFHT.

C.2.2 Optimisation de l'aspect multiplex du mode va-et-vient

C.2.2.1 Définition du masque

Les figures précédentes donnant le principe de fonctionnement du va-et-vient présentent des fentes qui incluent beaucoup de ciel mais en réalité celles-ci n'ont pas à être plus longue que la largeur du profil de l'objet. La taille caractéristique des galaxies de redshift 0.2 à 0.3 est de quatre à deux secondes d'arc soit entre dix et quinze pixels pour des conditions d'échantillonnage normales ($0''.2$ à $0''.4$ par pixel). Lors de l'extraction finale du spectre de l'objet, seules les lignes contenant un signal significatif sont utilisées, une valeur typique pour une galaxie distante est de sept à dix lignes.

La plus forte contrainte du va-et-vient est la nécessité de trouver un ciel de référence le long des colonnes équidistant de part et d'autre des objets et à une même distance pour tous les objets observés. La soustraction du ciel étant le point clé de la technique, la définition du masque apparaît comme la phase la plus importante et la plus difficile d'une observation en mode va-et-vient. Pour des objets peu étendus dans des champs raisonnablement peuplés, il est facile de trouver un ciel de référence très proche de part et d'autre de l'objet. Dans le cas du mode à trois bandes, les deux fentes peuvent en fait fusionner en une seule et la hauteur de la fente résultante doit être au moins le double de la largeur intégrée sur l'objet. Les trois bandes de signal apparaissent donc adjacentes sur la pose

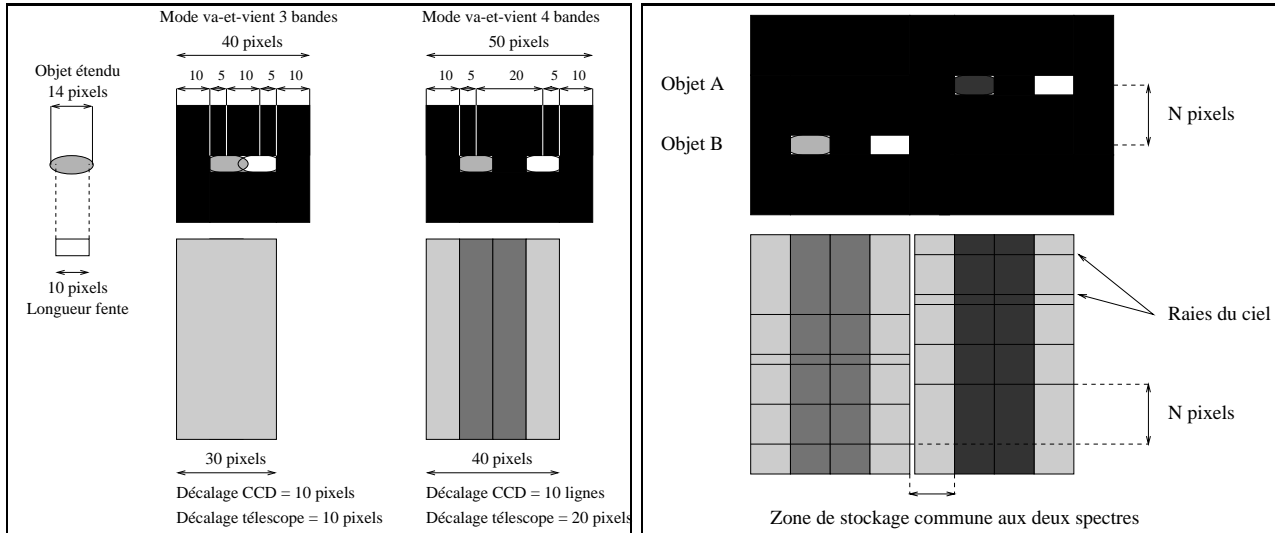


Figure C.2.2: Optimisation de l'encombrement des bandes de signal en fonction de la configuration des fentes.

finale (Cf. figure C.2.2). Pour un objet de largeur dix pixels, la fente mesure alors vingt pixels. Le nombre de lignes à décaler lors des cycles de va-et-vient est de dix pixels et l'encombrement final sur le CCD est de trente pixels seulement, des zones de stockage pouvant être commune à deux objets (la zone de stockage droite peut être une zone de stockage gauche pour l'objet se trouvant à droite, la partie droite de la figure C.2.2 illustre cet aspect).

Pour un CCD $2K \times 2K$, on peut ainsi placer idéalement soixante objets sur la hauteur du CCD! En réalité la position relative et la densité des objets à observer sur le champ n'amène pas à placer plus de trente à quarante fentes sur la hauteur du CCD mais cette remarque vaut tout autant pour le mode d'observation multifentes normal. L'encombrement supplémentaire imposé par le mode va-et-vient à quatre bandes n'apparaît pas comme une limitation. D'un point de vue formel, comme il a été discuté en fin du chapitre précédent, le va-et-vient est moins efficace que le mode standard fente longue dans le domaine du continu du ciel. Mais les contraintes d'observations fixent des règles qui vont à l'encontre de celles préconisées pour obtenir la meilleure qualité finale des données. Ainsi, nombre d'observateurs préfèrent observer un grand nombre d'objets avec alors des petites fentes qui ne permettent pas une bonne évaluation du ciel de référence. Il ne peut y avoir seulement que deux fois plus de lignes intégrées sur le ciel que sur l'objet, le bruit de photon est alors encore présent dans le ciel de référence et contribue à dégrader la limite de détection. Le mode va-et-vient semble donc bien adapté aux multiples contraintes de la spectroscopie multi-objets mais ses capacités supérieures en limite de détection restent l'atout majeur vis-à-vis de la spectroscopie normale.

C'est cet aspect multiplex que je voulais tester lors de la première évaluation sur le spectrographe MOS en avril 1995, avec l'observation d'un champ de galaxies à $z \sim 0.2$. Une pose de trente minutes obtenue avec le grism R150 ($R \sim 300$) et

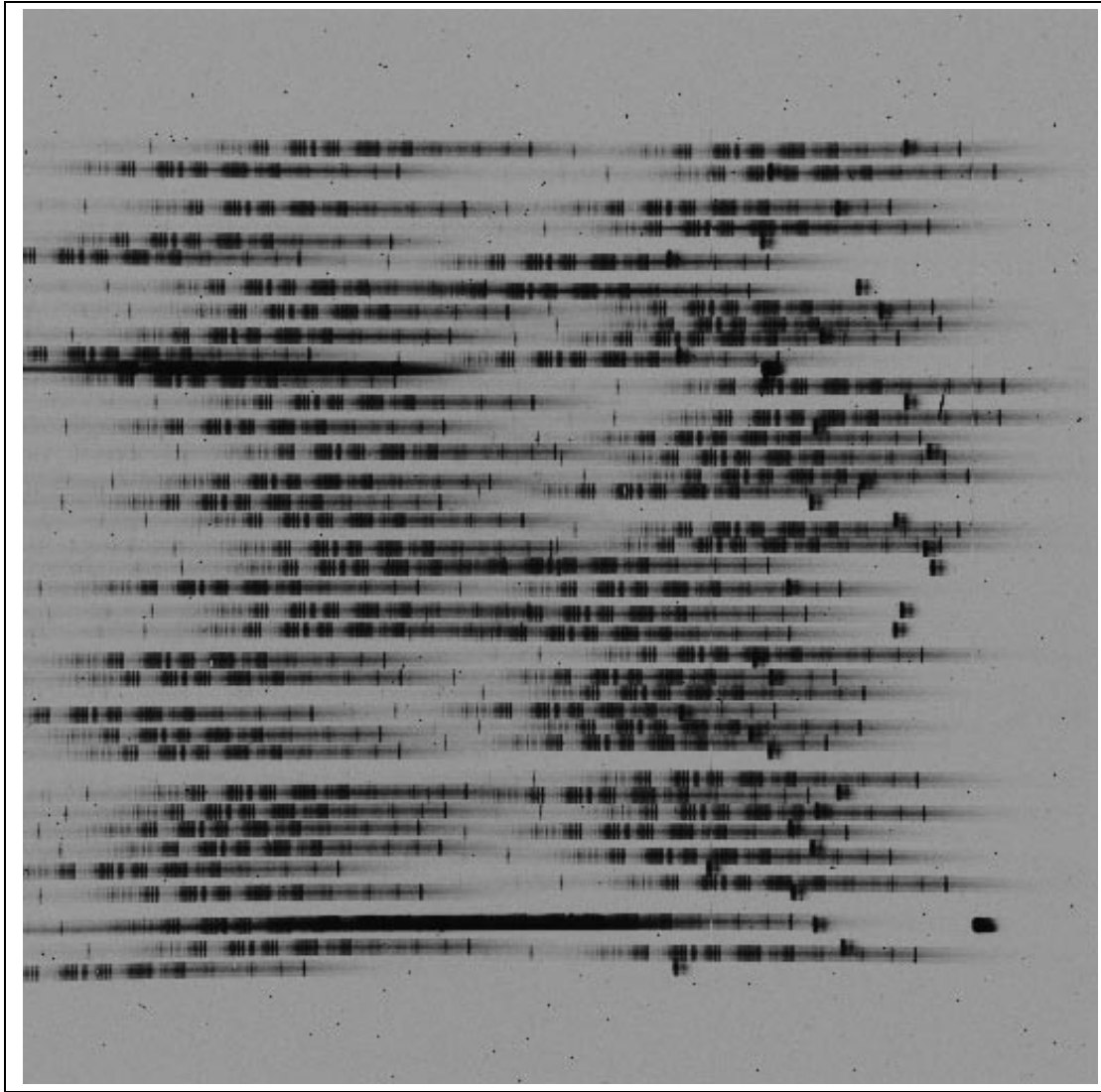


Figure C.2.3: Pose spectroscopique en mode va-et-vient multi-objet à trois bandes sur un champ de galaxies à $z \sim 0.2$. Image $2K \times 2K$, pose de $30'$ avec le grism R150 sur MOS. Deux bandes de 35 fentes occupent le CCD. Aucun filtre n'ayant été utilisé, les spectres des deux régions se chevauchent légèrement.

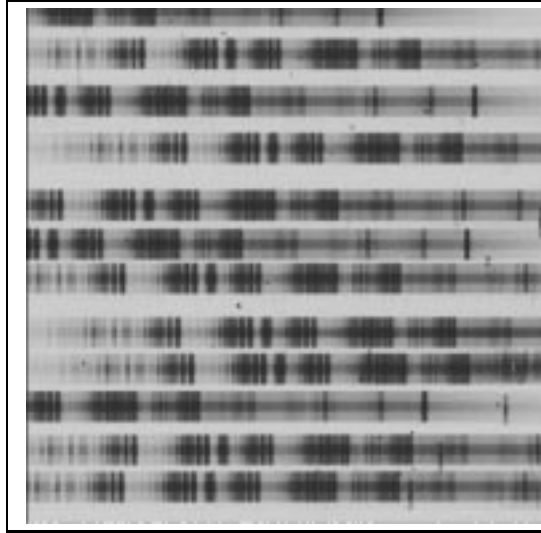


Figure C.2.4: Détail de la figure C.2.3. Comme les objets remplissent la fente, on ne perçoit par leur flux par rapport au fond du ciel. Ces onze spectres contiennent majoritairement du flux du ciel.

le Loral3 est montrée en figure C.2.3. Les conditions météorologiques n'ont permis d'acquérir que cette unique pose obtenue avec dix cycles de va-et-vient soit 1 mn 30 s par pose élémentaire afin d'échantillonner au mieux le spectre du ciel qui évoluait alors très vite à cause de la montée de la lune. Le décalage était de dix lignes et j'ai pu placer deux bandes de spectres sur le CCD, ce qui a amené le nombre d'objets observés à 70. Les mauvaises conditions d'observation (lune, cirrus, masse d'air importante) n'ont pas permis d'estimer d'autres caractéristiques du va-et-vient d'autant que nous n'avions pas d'éléments de comparaison en mode d'observation standard. Ce test a néanmoins démontré la faisabilité et la compétitivité du mode va-et-vient en spectroscopie multi-objets.

Pour des objets étendus, il n'est pas facile de trouver une grande zone de ciel vide au voisinage direct et de part et d'autre de l'objet. J'ai été confronté à ce problème lors de l'observation du grand arc de Cl 2244 avec MOS. Nous avons choisi cet objet aux limites actuelles de détection de l'instrument ($\mu_R = 24.5$) afin de confirmer le redshift de 2.24 mesuré précédemment avec le spectrographe EFOSC sur le 3.6m de l'ESO en 1988 (Mellier et al. 1991). Les conditions météorologiques désastreuses n'ont cependant permis d'obtenir qu'une pose de trente minutes. L'arc s'étendant sur près de quinze secondes d'arc, on trouve de nombreuses galaxies de l'amas dans son voisinage proche. Les deux zones de ciel de référence sont prises à vingt secondes d'arc de l'arc et les deux fentes sont alors dissociées comme le montre la figure C.2.5 pour une pose de trente minutes avec trois cycles de va-et-vient et un décalage de 67 lignes. Ce test a également démontré que le va-et-vient n'interdit pas l'observation simultanée d'objets de tailles très différentes. La hauteur des petites fentes n'a pas été optimisée comme dans le cas précédent pour s'ajuster au profil d'une galaxie mais pour contenir du ciel seul afin d'en tester la

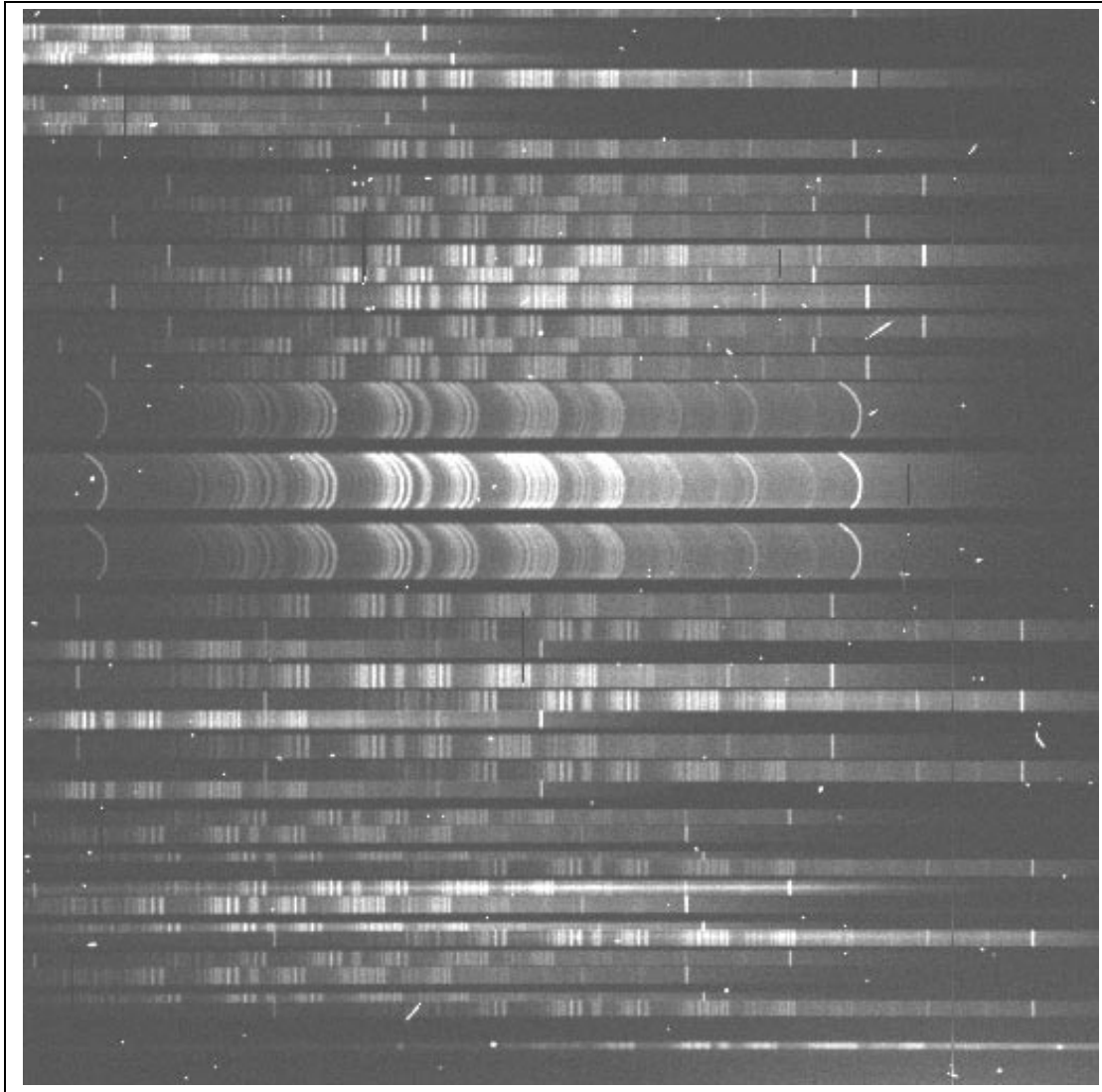


Figure C.2.5: Pose spectroscopique en mode va-et-vient à trois bandes sur l'arc géant de l'amas lentille C12244 et d'autres objets du champ (arclets, galaxies de l'amas). Fenêtre 1K×1K, pose de 30' avec le grism R150 sur MOS.

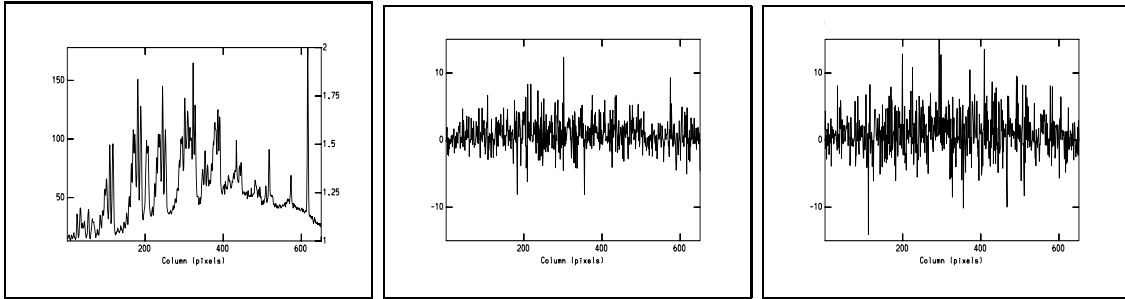


Figure C.2.6: Résidu de soustraction du spectre du ciel présenté à gauche pour le mode fente longue (centre) et le mode va-et-vient (droite). Le va-et-vient est moins efficace sur cette pose de seulement 30 minutes à $R \sim 300$, le bruit de photon y est plus élevé que le mode standard. L'échelle des longueurs d'onde est inversée sur ces figures (bleu à droite).

qualité de soustraction. Comme l'impose la grande fente courbe, le ciel de référence est pris à plus de $20''$ ce qui est moins favorable qu'un ciel proche compte tenu des fluctuations spatiales du spectre qui peuvent exister à ces échelles (Wise & Gilmore 1992). La taille et la position des zones de sélection des objets sont contraintes par la taille de la grande fente courbe de l'arc qui impose la valeur du décalage des lignes et du télescope. Ici, au contraire du test précédent sur le champ de galaxies, les bandes des différents petits objets sont intercalées car le décalage est supérieur à la taille de ces petites fentes.

C.2.2.2 Découpe du masque

L'observation de l'arc de C1 2244 avait été choisie pour évaluer les capacités du mode va-et-vient en fente courbe. La machine de découpe LAMA (Laser Machine, Le Fèvre et al. 1994) permet la taille de fentes de tous types et la découpe du masque ne constitue pas une difficulté. L'observateur crée son masque avec l'outil CFHTimage (un clône de SAOimage avec des modifications apportées pour la sélection des masques de MOS/SIS), des fentes rectangulaires peuvent être positionnées avec une taille pré-définie alors que les fentes courbes sont dessinées avec la souris, une interpolation par spline cubique ajustant le tracé final de la fente sur les points indiqués.

Il a fallu développer une routine spécifique au va-et-vient pour créer la duplication automatique des fentes décalées d'un même nombre de lignes l que le seront les charges sur le CCD. L'observateur sélectionne donc ses objets en prenant soin à ce qu'il existe un ciel de référence de chaque côté à une distance l en pixels qu'il s'est défini pour son observation. Après cette étape, le fichier généré par CFHTimage est modifié par la routine pour dupliquer toutes les fentes à une distance $+l$ sur le masque. Ce fichier est ensuite interprété par la machine LAMA pour découper le masque.

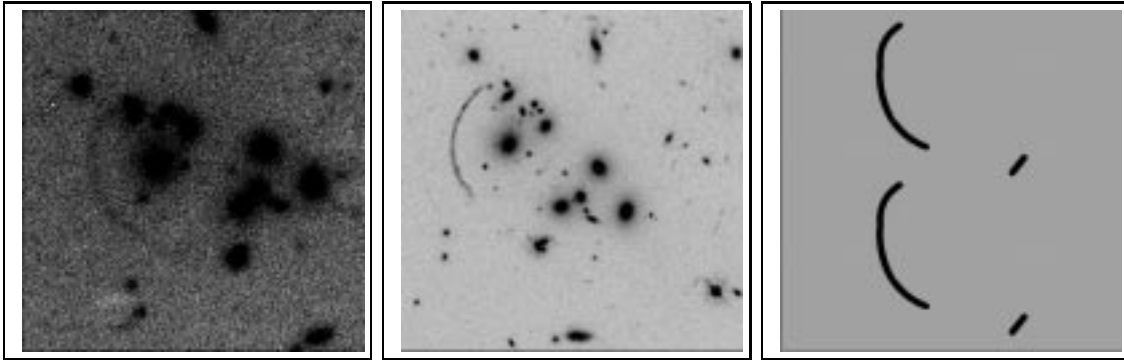


Figure C.2.7: Utilisation d'une image HST à haute résolution (centre, pose de 2 h 30 mn en V) pour définir la coupe optimale de la fente courbe (droite). La pose de 10 mn en lumière blanche sur SIS (gauche) ne permet pas une parfaite détermination du profil de l'arc.

C.2.3 Evaluation sur le ciel

C.2.3.1 Qualité de soustraction du ciel

Le masque MOS du champ de l'amas Cl 2244 comportait des fentes sans objet afin d'estimer la qualité de soustraction du ciel. La figure C.2.6 donne les résidus du dépouillement en mode fente longue et en va-et-vient d'un spectre d'une même fente. Le spectre va-et-vient est plus bruité, ce qui était prévisible compte tenu du temps de pose très court. On est encore dans la phase rapide de montée sur la figure C.1.6, c'est à dire bien loin du point de croisement.

C.2.3.2 L'arc géant de l'amas lentille Cl 2244

Une autre observation en mode va-et-vient de l'arc géant de l'amas Cl 2244 avec la voie SIS à haute résolution spatiale a apporté 3 h 10 mn de pose cumulée. Des cirrus épais généraient néanmoins une absorption d'au moins un facteur deux ce qui est critique pour un objet aussi faible. Nous avons utilisé le grism "V150" (2 Å/pixel) et une fente de 0''9 ($R = 300$) pour un échantillonnage de 0''09/pixel. Nous sommes donc loin des conditions optimales d'échantillonnage de la fente et de basse résolution.

Préparation du masque

La pose courte (10 mn) en mode imagerie SIS n'autorise pas de définir parfaitement le profil de l'arc afin de trouver le tracé optimal de la fente courbe pour intégrer le maximum du flux de l'arc. La figure C.2.7 (gauche) présente la pose de dix minutes acquise deux heures avant l'observation spectroscopique, le seeing est d'environ 0''9 car la masse d'air est importante. Je me suis donc aidé de l'image HST à haute résolution de l'arc que notre équipe a obtenu durant le cycle IV du télescope spatial Hubble (Collaboration Toulouse Cambridge, 1995). Le masque a été dessiné sur

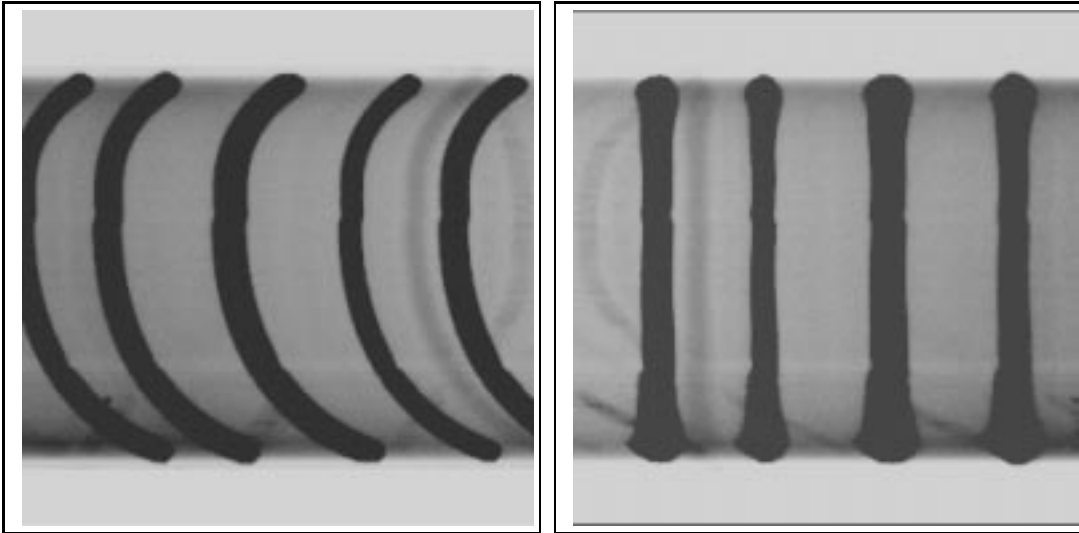


Figure C.2.8: Redressement du spectre courbe: les raies intenses de cette pose de calibration hélium-argon mettent en évidence la largeur variable de la fente suivant l’axe de dispersion.

l’image HST en amenant celle-ci au préalable à la même échelle que celle de SIS ($0''.01/\text{pixel}$ contre $0''.008/\text{pixel}$).

Observations

Nous avons accumulé cinq poses successives de quarante minutes obtenues chacune en quatre cycles de va-et-vient, soit cinq minutes de pose élémentaire. Le rapport signal sur bruit par pixel est très bas en raison de la moyenne résolution, du sur-échantillonnage de la fente et des quarante minutes qui n’étaient pas suffisantes pour amener un régime de bruit de photon du fond de ciel (quatre pas codeurs sur le continu du ciel pour un bruit de lecture de deux pas codeurs).

Réduction des données

Les données brutes sont similaires à celles obtenues sur la voie MOS (figure C.2.5). La procédure de réduction sous IRAF a d’abord consisté à soustraire le niveau zéro de la caméra (offset et courant d’obscurité), puis à soustraire les bandes de signal latérales à la bande de signal contenant l’objet. Ces cinq images à deux dimensions sont alors médianées avec un algorithme de réjection avec écrêtage à $n\sigma$ qui élimine parfaitement les très nombreux rayons cosmiques. Les modules de dépouillement spectroscopique d’IRAF “onedspec” et “twodspec” sont alors utilisés pour la calibration en longueur d’onde ligne à ligne de la fente et pour redresser la fente. Les mauvaises colonnes doivent être “effacées” au préalable pour éviter de les voir apparaître comme des artefacts courbés sur l’image redressée. La figure C.2.8 montre le spectre 2D redressé d’une pose de calibration hélium-argon. Il apparaît que la fente était un peu trop incurvée aux extrémités ce qui a amené

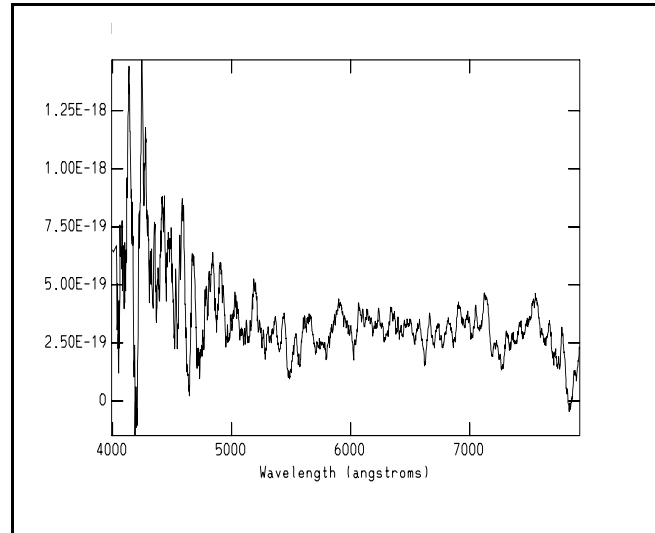


Figure C.2.9: Spectre de l'arc Cl 2244-02 obtenu en mode va-et-vient à une résolution $R = 300$. Spectre composité de trois heures sur la voie SIS (mais absorption forte par les cirrus).

un élargissement suivant l'axe X et a donc modifié la résolution. Le programme de découpe du masque devra être modifié pour générer des fentes inclinées ayant une largeur constante suivant l'axe de dispersion au lieu d'une succession de petits tronçons rectangulaires identiques plus ou moins inclinés.

Ces quelques lignes ont été exclues du calcul de la moyenne des 130 lignes utilisées pour aboutir au spectre 1D qui est alors lissé puis calibré en flux. Le spectre final est donné sur la figure C.2.9. Il faut noter le niveau extrêmement faible du signal dont la valeur maximale du continu ne dépasse pas 0.4 pas codeur contre 6 pour le continu du ciel soit moins de 6% du fond du ciel. Ce rapport chute à moins du pourcent sous les raies du ciel.

Comparaison avec des résultats précédents

La figure C.2.10 présente deux spectres de l'arc obtenus en mode fente longue. Le premier, issu d'une observation sur le spectrographe EFOSC du 3.6m de l'ESO en 1988, a permis d'établir le redshift de 2.24 de l'objet lentillé. Le temps de pose cumulé est de cinq heures à une résolution $R \sim 200$ (Mellier et al. 1991). Le second spectre obtenu en 1995 sur la voie bleue de EMMI sur le NTT en une heure de pose et une fente droite à une résolution $R \sim 300$ fait bien apparaître la raie $\text{Ly}\alpha$ à 3938 Å (J. Bézecourt, communication privée 1996). Cette seconde observation ne fait cependant pas ressortir le continu de l'objet à cause d'un temps de pose trop court (ce spectre n'a pas été mis à la même échelle que les deux autres).

La fente de l'observation va-et-vient était malheureusement trop peu décalée sur le CCD dans la direction spectrale et la raie $\text{Ly}\alpha$ n'a pas été intégrée sur le détecteur. Nos observations ont néanmoins permis de faire ressortir le continu faible de l'objet malgré un temps de pose équivalent faible à cause de l'absorption

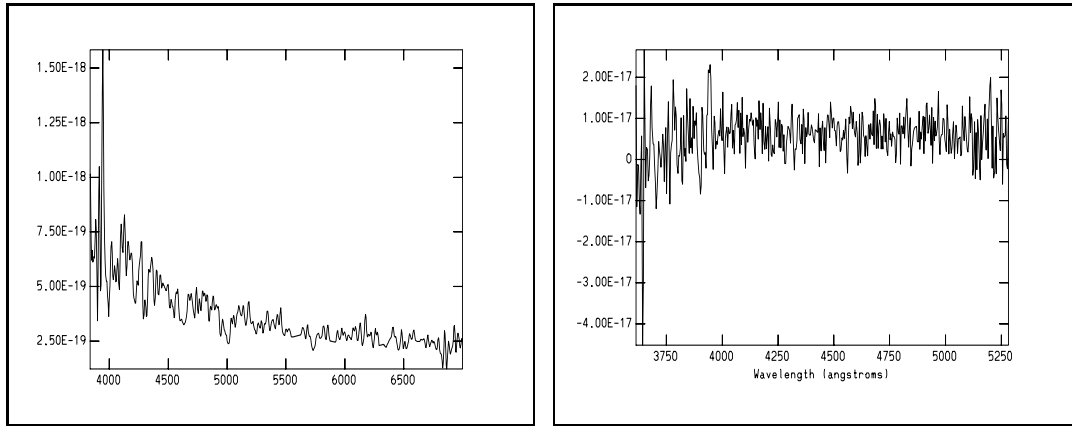


Figure C.2.10: Spectres de l'arc Cl2244-02. Gauche: spectre composé de cinq heures de pose obtenu sur le spectrographe du 3.6m de l'ESO en 1988 en mode fente longue (Mellier et al. 1991), le redshift de l'objet est 2.24. Droite: observation sur la voie bleue de EMMI sur le NTT (1995), une heure de pose fait déjà apparaître la raie Ly α à 3940 Å et confirme bien le redshift de la source.

par les cirrus (< 2 h). La corrélation entre les trois spectres n'a pas mis en évidence de structures communes dans le continu.

C.2.3.3 Perspectives pour les futures observations

Même si la non-linéarité du CCD reste dans les normes standards (résidu $< 1\%$), elle peut perturber la technique du va-et-vient à trois bandes. Le mode à quatre bandes doit donc être adopté pour que les effets de non-linéarité n'apparaissent pas entre les bandes de signal.

Nous n'avons pas pu évaluer le gain entre la technique va-et-vient à basse résolution et à moyenne résolution accompagnée d'un binning. C'est un point important que de nouvelles observations autoriseront d'aborder.

Ces quelques tests concluants sur télescope ont motivé un programme d'observation au CFHT sur l'étude d'un échantillon de galaxies lointaines dans des amas-lentilles (juin 1996). L'analyse spectrale et la distribution en redshift des arclets apporte des contraintes fortes pour évaluer la pente du potentiel gravitationnel de l'amas et fournit des informations essentielles sur le contenu spectral des galaxies de champ à $z > 0.5$. L'observation d'arclets très faibles complètera les échantillons utilisés pour évaluer les techniques de prédiction du redshift des arclets à partir de la modélisation détaillée d'un potentiel gravitationnel à partir d'arcs (Kneib et al. 1994). Avec une bonne calibration qui nécessite un échantillon large d'objets jusqu'à des magnitudes élevées ($B_J = 24$), il sera possible de mesurer avec cette méthode, qui se base sur des critères géométriques, la distribution en redshift d'arclets de magnitude allant jusqu'à $B_J = 27$ qui constitue aujourd'hui la limite de détection fiable en photométrie et en géométrie d'objets grâce aux images du HST.

La faible brillance de surface des objets que nous projetons d'observer les avait jusqu'à présent placés au delà des limites de détection des instruments avec un

rapport signal sur bruit suffisamment élevé pour établir une détection sans ambiguïté du redshift ou du profil du continu. Cinq heures de pose sont nécessaires pour atteindre un rapport signal sur bruit de six sur les plus faibles objets à une résolution $R = 100$. Le binning 2×2 lors de la lecture du CCD est indispensable, même avec les grisms à plus basse dispersion du CFHT, pour diminuer la résolution et minimiser le bruit de lecture sur le superpixel résultant.

Les résultats et l'impact de ces observations seront déterminants pour motiver l'implantation de ce mode d'observation sur la nouvelle génération de spectrographes pour les télescopes de huit mètres.

Publication

**“Va-et-Vient” spectroscopy:
a new mode for faint object
CCD spectroscopy with very
large telescopes.**

J.-C. Cuillandre, B. Fort, J.P. Picat, G. Soucail, B. Altieri,
F. Beigbeder, J.P. Dupin, T. Pourthié et G. Ratier

Astronomy & Astrophysics, 1994, **281**, 603

Références bibliographiques

- Arnaboldi, M., Freeman, K.C., Hui, X., Capaccioli, M., Ford, H., 1994, *The Messenger*, **76**, 40
- Arnaud, M., Aubourg, E., Bareyre, P., Brehin, S., Caridroit, R., De Kat, J., Dispau, G., Djidi, K., Gros, M., Lachière-Rey, M., 1994, *ExA*, **4**, 279
- Arsenault, R., Salmon, D., Kerr, J., Rigaut, F., Crampton, D., Grundman, W., 1995, *Proceedings on the Workshop on Astronomy with the CFHT Adaptive Optics Bonnette*, 1
- Aubourg, E., 1993, *Thèse de l'Université Paris VI*
- Baade, W., Swope, H., 1963, *AJ*, **68**, 435
- Bahcall, J.N., Flynn, C., Gould, A., Kirhakos, S., 1994, *ApJL*, **435**, L51
- Bajaja, E., Gergeley, T.E., 1977, *A&A*, **61**, 229
- Beletic, J., 1996, *The Messenger*, **83**, 4
- Bertin, E., Arnouts, S., 1996, *A&AS*, sous presse
- Bessell, M.S., 1976, *PASP*, **88**, 557
- Bézecourt, J., Soucaïl, G., 1996, *A&A*, soumis
- Blouke, M.M., Janesick, J.R., Hall, J.E., Cowens, M.W., May, P.J., 1983, *Optical Engineering*, **22**, 607
- Blouke, M.M., Fanling, H.Y., Heidtmann, D.L., Janesick, J.R., 1987, *Instrumentation for Ground-Based Optical Astronomy*, 462, Springer Verlag
- Bocksberg, A., 1975, in *"Image Processing Techniques in Astronomy"*, C. de Jager and H. Nieuwenhuizen eds., Reidel
- Bohlin, R.C., Savage, B.D., Drake, J.F., 1978, *ApJ*, **224**, 132
- Bonnet, H., Mellier, Y., Fort, B., 1994, *ApJL*, **427**, L83
- Bonnet, H., Mellier, Y., 1995, *A&A*, **303**, 331
- Bouchet, P., Lequeux, J., Maurice, E., Prévot, L., Prévot-Burnichon, M.-L., 1985, *A&A*, **149**, 330
- Boutenko, V., 1994, *CFHT memorandum*
- Boyle, B.J., Fong, R., Shanks, T., 1988, *MNRAS*, **231**, 897
- Bredthauer, R.A., Pinter, J.H., Janesick, J.R., 1991, *SPIE*, **1447**, 310
- Buzzoni, A., 1989, *ApJS*, **71**, 817

- Chiu, L.-T.G., 1976, *PASP*, **88**, 803
- Christian, C., Brewster, J., McGonegal, R., Grundseth, B., Kerr, J., Smith, S., Waddell, P., 1989, *A.S.P. Conference Series*, **8**, 209
- Chun-Lin, L., 1993, *A&A*, **275**, 349
- Cole, S., Ellis, R.S., Broadhurst, T.J., Colless, M.M., 1994, *MNRAS*, **267**, 541
- Colless, M.M., Ellis, R.S., Broadhurst, T.J., Taylor, K., Peterson, B.A., 1993, *MNRAS*, **261**, 19
- Colless, M.M., Schade, D., Broadhurst, T.J., Ellis, R.S., 1994, *MNRAS*, **267**, 1108
- Cong Xu, Helou, G., 1996, *ApJ*, **456**, 163
- Cowie, L.L., Lilly, S.J., 1989, *ApJL*, **336**, L41
- Cowie, L.L., Hu, E.M., Songaila, A., 1995, *Nature*, **377**, 603
- Crampton, D., 1992, *Proceeding of the Third CFHT User's Meeting*, 52
- Cuillandre, J.-C., Fort B., Picat J.-P., Soucail G., Altieri B., Beigbeder F., Dupin J.-P., Pourthié T., Ratier G., 1994, *A&A*, **281**, 603
- Cuillandre, J.-C., Mellier, Y., Murowinski, R., Crampton, D., Luppino, G., Arsenault, R., 1995, *IAU Symposium No. 167, Kluwer Academic Pub.*, 213
- Cuillandre, J.-C., Lequeux, J., Mellier, Y., Allen, R. J., 1996a, *A&AL*, soumis
- Cuillandre, J.-C., Mellier, Y., Dupin, J.-P., Tilloles, P., Murowinski, R., Crampton, D., Wooff, R., Luppino, G.A., 1996b, *PASP*, soumis
- DaCosta, G.S., 1992, *ASP Conference Series*, **23**, 90
- Davidge, T.J., 1993, *ApJ*, **409**, 190
- de Paolis, F., Ingrassio, G., Jetzer, P., Roncadelli, M. 1995, *Phys. Rev. Letter*, **74**, 14
- Durrell, P.R., Harris, W.E., Pritchett, C.J., 1994, *AJ*, **108**, 2114
- Fall, S.M., Pei, Y.C., 1993, *ApJ*, **402**, 479
- Fischer, P., Tyson, J.A., Bernstein, G., Guhathakurta, P., 1994, *ApJL*, **431**, L71
- Fort, B., Prieur, J.-L., Mathez, G., Mellier, Y., Soucail, G., 1988, *A&AL*, **200**, L17
- Fort, B., Mellier, Y., 1994, *A&A Revue*, **5**, 239
- Geary, J.C., Robinson, L.B., Sims, G.R., Bredthauer, R.A., 1990, *SPIE*, **1242**, 38
- Geary, J.C., Luppino, G.A., Bredthauer, R.A., Hlivak, R.J., Robinson, L.B., 1991, *SPIE*, **1447**, 264
- Glazebrook, K., Ellis, R., Colless, M., Broadhurst, T., Allington-Smith, J., Tanvir, N., 1995a, *MNRAS*, **273**, 157
- Glazebrook, K., Peacock, J.A., Miller, L., Collins, C.A., 1995b, *MNRAS*, **275**, 169
- Grundahl, F., Sorensen, A.N., 1996, *A&A*, sous presse
- Heim, G.B., Buchholz, N.C., Luce, R.W., 1994, *SPIE*, **2158**, 1024
- Hodge, P., Lee, M.G., Mateo, M., 1988, *ApJ*, **324**, 172
- Hodge, P., 1992, *The Andromeda Galaxy*, Kluwer Academic. Pub.
- Horne, K., 1986, *PASP*, **98**, 609
- Jacoby, G.H., Ford H.C., 1986, *ApJ*, **304**, 490

- Janesick, J., Elliot, T., Collins, S., Blouke, M., Freeman, J., 1987, *Optical Engineering*, **26**, 692
- Janesick, J., Elliot, T., Fraschetti, G., Collins, S., 1989, *SPIE*, **1071**, 15
- Janesick, J., Elliot, T., 1992, *ASP Conference Series*, **23**, 1
- Janesick, J., 1992, *Applied Optics*, **31**, 4890
- Jorden, P.R., Deltorn, J.-M., Oates, P., 1994, , *SPIE*, **2198**, 836
- Kaufner A., Szeifert T., Krenzlin R., Baschek B., Wolf B., 1994, *A&A*, **289**, 740
- Kerr, J., Clark, C.C., Smith, S.S., 1994, *SPIE*, **2198**, 980
- Kneib, J.-P., Mellier, Y., Fort, B., 1993, *A&A*, **273**, 367
- Kneib, J.-P., Mellier, Y., Fort, B., Soucaïl, G., Longaretti, P.Y., 1994, *A&A*, **286**, 701
- Kneib, J.-P., Mellier, Y., Pellò, R., Miralda-Escudé, J., Le Borgne, J.-F., Boehringer, H., Picat, J.-P., 1995, *A&A*, **303**, 27
- Kochanek, C.S., Narayan, R., 1992, *ApJ*, **401**, 461
- Kohley, R., Reif, K., Pohlmann, T., Müller, P., 1995, *SPIE*, **2415**, 67
- Kristian J., Blouke, M., 1982, *Scientific American*, **24**, 48
- Kuhn, J.B., Lin, H., Loranz, D., 1991, *PASP*, **103**, 1097
- Landolt, A.U., 1992, *AJ*, **104**, 340
- Laurence, M., Barrick, G., 1995, *CFHT memorandum*
- Le Fèvre, O., 1991, *User's manual for CCD imaging with FOCAM*
- Le Fèvre, O., Crampton, D., Felenbok, P., Monnet, G., 1994, *A&A*, **282**, 325
- Le Fèvre, O., Crampton, D., Lilly, S., Hammer, F., Tresse, L., 1995, *ApJ*, **455**, 60
- Leach, R.W., 1988, *PASP*, **100**, 1287
- Lequeux, J., Guélin, M., 1996a, *Changing Perceptions of the Morphology, Dust Content and Dust-Gas Ratios in Galaxies*, D. Block & P. Grøsbøl, eds., Kluwer, Dordrecht, sous presse
- Lequeux, J., Peimbert, M., Rayo, J.F., Serrano, A., Torres-Peimbert, S., 1979, *A&A*, **80**, 155
- Lequeux J., Dantel-Fort M., Fort B. 1995, *A&AL*, **296**, L13
- Lequeux, J., Fort, B., Dantel Fort, M., Cuillandre, J.-C., Mellier, Y., 1996b, *A&AL*, soumis
- Lesser, M.P., 1989, *ASP Conference Series*, **8**, 65
- Lesser, M.P., 1994, *SPIE*, **2198**, 782
- Luppino, G.A., Miller, K.R., 1992a, *PASP*, **104**, 215
- Luppino, G.A., Jim, K.T.C., Hlivak, R.J., Yamada, H., 1992b, *SPIE*, **1656**, 414
- Luppino, G.A., Bredthauer, R.A., Geary, J.C., 1994, *SPIE*, **2198**, 810
- Luppino, G.A., Metzger, M., Miyazaki, S., 1995, *IAU Symposium No. 167, Kluwer Academic Pub.*, 297
- Manfroid, J., *A&AS*, **113**, 587
- Maihara, T., Iwamuro, F., Oya, S., Tsukamoto, H., Hall, D.N.B., Cowie, L.L., Tokunaga, A.T., Pickles, A.J., 1994, *SPIE*, **2198**, 194
- McClure, R.D., Grundmann, W.A., Rambold, W.N., Fletcher, J.M., Richardson, E.H., Stilburn,

- J.R., Racine, R., Christian, C.A., Waddell, P., 1989, *PASP*, **101**, 1150
- McLean, I.S., Cormack, W.A., Herd, J.T., Aspin, C., 1981, *SPIE*, **290**, 155
- McLean, I.S., 1989, *Electronic and Computer-Aided Astronomy*, Ellis Horwood Limited Pub.
- Mellier, Y., Fort B., Soucail, G., Mathez, G., Cailloux, M., 1991, *ApJ*, **380**, 334
- Metcalfe, N., Godwin, J.G., Peach, J.V., 1994, *MNRAS*, **267**, 431
- Metzger, M., Luppino, G., Miyazaki, S., 1996, *PASP*, soumis
- Milgrom, M., 1983, *ApJ*, **270**, 365
- Monnet, G., 1993, *CFHT memorandum*
- Morrison, H.L., Boroson, T.A., Harding, P., 1994, *AJ*, **108**, 1191
- Mould J., Kristian J., 1986, *ApJ*, **305**, 591
- Munari, U., Carraro, G., 1996, *A&A*, sous presse
- Neely, A.W., Janesick, J.R., 1993, *PASP*, **105**, 1330
- Neininger, M., Guélin, M., 1996. *SISSA*, astro-ph/9603005
- Newton K., Emerson, D.T., 1977, *MNRAS*, **181**, 573
- Ortolani, S., Barbuy, B., Bica, E., 1990, *A&A*, **236**, 362
- Pei, Y.C., Fall, S.M., 1991, *ApJ*, **378**, 6
- Peletier, R.F., Valentijn, E.A., Moorwood, A.F.M., Freudling, W., Knapen, J.H., Beckman, J.E., 1995, *A&AL*, **300**, L1
- Pellò, R., Miralles, J.-M., Le Borgne, J.-F., Picat, J.-P., soucail, G., Bruzual, G., 1996, *A&A*, soumis
- Pfenninger, D., Combes, F., Martinet, L., 1994, *A&A*, **285**, 79
- Pfenninger, D., Combes, F., 1994, *A&A*, **285**, 94
- Picat, J.-P., Cuillandre, J.-C., Fort, B. and Soucail, G., 1994, *SPIE*, **2198**, 1274
- Pylachowski, C.A., Africano, J.L., Goodrich, B.D., Binkert, W.S., 1989, *PASP*, **101**, 707
- Pritchett, C.J., van den Bergh, S., 1988, *ApJ*, **331**, 135
- Racine, R., 1967, *AJ*, **72**, 65
- Reiss, R., 1994, *SPIE*, **2198**, 895
- Rich M., 1996, *Changing Perceptions of the Morphology, Dust Content and Dust-Gas Ratios in Galaxies*, D. Block & P. Grøsbøl, eds., Kluwer, Dordrecht, sous presse
- Richer H.B., Crabtree D.R., Pritchett C.J., 1990, *ApJ*, **355**, 448
- Rix, A., Schneider, P., 1996, *A&A*, sous presse
- Romani, R.W., Maoz, D., 1992, *ApJ*, **386**, 36
- Sackett, P.D., Morrison, H.L., Harding, P., Boroson, T.A., 1994, *Nature*, **370**, 441
- Salmon, D., 1983, CFHT memorandum
- Salmon, D., 1995, CFHT memorandum
- Sanders, R.H., 1990, *A&A Revue*, **2**, 1
- Sarra, P.F., Bignami, G.F., 1993, *ExA*, **2**, 357

- Smail, I., Hogg, D.W., Yan, L., Cohen, J.G., 1996, *ApJL*, **449**, L105
- Smith, R.M., 1989, *ASP Conference Series*, **8**, 153
- Steidel, C.C., Giavalisco, M., Pettini, M., Dickinson, M., Adelberger, K.L., 1996, *ApJL*, **462**, L17
- Stetson, P.B., 1989, *Highlights of Astronomy*, **8**, 635, XXth General Assembly of the IAU
- Stone, R.C., 1989, *AJ*, **97**, 1227
- Stubbs, C., Marshall, S., Cook, K., Hills, R., Noonan, J., Akerlof, C., Alcock, C., Axelrod, T., Bennet, D., dagley, K., Freeman, K., Griest, K., Park, H.-S., Perlmutter, S., Peterson, B., Quinn, P., Rodgers, A., Sosin, C., Sutherland, W., 1993, *SPIE*, **1900**, 192
- Surma, P., 1993, *A&A*, **278**, 654
- Takato, N., Aoki, T., Ichikawa, S., Iye, M., 1990, *SPIE*, **1235**, 242
- Theuwissen, J.P., 1995, *Solid-State Imaging with CCDs*, Kluwer Academic Pub.
- Thorne, D.J., Jorden, P.R., Waltham, N.R., van Breda, I.G., 1986, *SPIE*, **627**, 530
- Tresse, L., Hammer, F., Le Fèvre, O., Proust D., 1993, *A&A*, **277**, 53
- Tyson, A.J., 1986, *J. Opt. Soc. Am. A.*, **3**, 2131
- Tyson, A.J., 1988, *AJ*, **96**, 1
- Tyson, A.J., Wenk, R.A., Valdes, F., 1990, *ApJL*, **349**, L1
- Tyson, A.J., 1990, *J. Opt. Soc. Am. A.*, **7**, 1231
- Tyson, N.D., Gal, R.R., 1993, *AJ*, **105**, 1206
- van der Kruit, P.C., Searle, L., 1982, *A&A*, **110**, 79
- Valentijn, E.A., 1994, *MNRAS*, **266**, 614
- Véran, J.-P., Link, R., 1994, *CFHT archiving system manual*
- Van Waerbeke, L., Mellier, Y., Schneider, P., Fort, B., Mathez, G., 1996, *A&A*, accepté
- Walker, M.F., 1988, *PASP*, **100**, 496
- Walterbos, R.A.M., Schwering, P.B.W., 1987, *A&A*, **180**, 27
- Walterbos, R.A.M., Kennicutt, R.C. Jr. 1988, *A&A*, **198**, 61
- Wyse, R., Gilmore, G., 1992, *MNRAS*, **257**, 1
- Zaritsky, D., 1994, *AJ*, **108**, 1619

Conclusion

Les grandes caméras CCD développées conjointement avec des méthodes optimales d'observation et d'analyse des données devraient conduire à un formidable bond en avant en astronomie profonde grand champ, analogue à ceux correspondant à l'arrivée des CCDs, puis du télescope spatial. Les exemples que j'aborde dans cette thèse sont assez significatifs et démontrent en particulier que la photométrie ultra-profonde de galaxies proches est désormais possible avec les CCDs. L'analyse photométrique multicolore approfondie de la distribution des populations stellaires et des diverses composantes baryoniques s'avère un outil formidable pour sonder la distribution et la nature d'une fraction de la matière invisible. Dans le cas des régions externes de M31, l'étude du rougissement de la population de galaxies d'arrière-plan met en évidence un taux de poussières élevé à 20 kpc du centre. Sa distribution spatiale est remarquablement corrélée à celle du gaz H I, indiquant une métallicité élevée de l'ordre de 0.4 solaire. Nous en concluons que l'existence de gaz moléculaire H₂ froid sous forme diffuse, qui a été suggérée comme pouvant être une composante majeure de la matière noire dans les régions externes du disque, est peu probable car le gaz H₂ n'est en général pas distribué comme le gaz H I. L'existence de ce gaz moléculaire sous la forme de petits nuages denses (Pfenninger et al. 1994) reste cependant possible, l'effet d'extinction étant alors indétectable. L'analyse des populations stellaires dans cette région à l'extrême limite du disque révèle aussi une population d'étoiles bleues, probablement des étoiles jeunes. Il est vraisemblable qu'elle est une source de l'enrichissement du milieu. Sans aucun doute, ce type de cartographie profonde détaillée des populations stellaires dans les galaxies proches apporte de nouvelles perspectives d'investigation. Elle permettra par exemple d'étudier l'effet de la propagation d'une onde de densité dans les bras spiraux sur la formation stellaire à grande distance du centre.

L'imagerie grand champ est aussi un outil de diagnostic relativement précis de l'état dynamique des galaxies et des comportements de chacune de leurs composantes. L'analyse de NGC 5907 avec MOCAM révèle précisément la géométrie de son halo diffus et confirme les premières observations de Sackett et al. (1994). La structure de son profil photométrique semble compatible avec un modèle ellipsoïdal composé d'une population stellaire de masse inférieure à $0.8 M_{\odot}$. Selon Sackett et al. (1994), sa quantité de matière rendrait compte de l'excès de masse de cette galaxie.

Ces deux exemples récents montrent les potentialités de la photométrie CCD ultra-profonde grand champ pour l'astrophysique galactique et extragalactique.

Cependant, les caméras grand champ révèlent de nouvelles difficultés instrumentales et observationnelles. Dans le cadre de ce travail de thèse, j'ai pu les identifier pour définir une combinaison optimale de la caméra et du télescope parfaitement adaptée à l'imagerie ultra-profonde. Une meilleure protection contre les lumières parasites et la maîtrise des sources de bruit (notamment pendant la réduction des données) sont indispensables pour atteindre les limites des instruments et mesurer des brillances de surface aussi faibles que la trentième magnitude en V. Les résultats exposés dans cette thèse me conduisent alors à considérer l'observation des galaxies proches comme un des objectifs majeurs pour ces caméras. C'est un objectif qui me tient plus particulièrement à coeur, mais d'une façon générale, l'astronomie ultra-profonde portant sur l'observation des grands objets proches devrait prendre un nouvel essor. A titre d'exemple, l'observation des composantes diffuses faibles et des populations stellaires des parties externes des amas globulaires permettrait d'y détecter une hypothétique population d'étoiles de faible masse ou de naines brunes.

Comme le démontre le passage incroyablement rapide de FOCAM ($2K \times 2K$) à MOCAM ($4K \times 4K$) puis à la UH8K ($8K \times 8K$) et bientôt la CFH10K ($8K \times 10K$) en moins de quatre ans au CFHT, l'imagerie CCD grand champ est dans une phase spectaculaire de développement. Dans le monde entier, des projets scientifiques s'articulent autour de cette nouvelle classe d'instruments qui exploite les derniers progrès technologiques du domaine des semi-conducteurs. Sans fournir ici une liste exhaustive, on peut citer quelques projets particulièrement actifs: MACHO, EROS et OGLE, dont les objectifs sont la recherche de matière noire baryonique sous forme d'objets compacts, et qui s'orientent aujourd'hui vers la détection des supernovae lointaines pour mesurer q_0 et H_0 . Le projet américain Sloan Digital Sky Survey (comportant une mosaïque de 54 CCDs $2K \times 2K$ pixels) devrait combiner la photométrie en cinq couleurs jusqu'à la magnitude 23, la mesure de plus d'un million de redshifts de galaxies proches et d'environ 100000 quasars, sur plus d'un quart du ciel. L'impact scientifique pressenti de ces programmes a déjà conduit de nombreux autres observatoires à s'engager dans le développement de caméras grand champ. C'est le cas de la caméra $8K \times 8K$ de Kitt Peak, de la caméra mosaïque infrarouge du télescope William-Herschell mise au point par les britanniques, et dans un futur proche de la caméra $8K \times 8K$ pour le foyer primaire du grand télescope Subaru (8 m). L'ESO s'oriente vraisemblablement vers une caméra grand champ pour son télescope de 2.20 m qui pourrait être ensuite déportée sur un télescope dédié à l'imagerie grand champ sur le site du Paranal.

Le plus ambitieux de tous les projets est MEGACAM, une caméra mosaïque $16K \times 16K$ équipée de CCDs amincis qui sera installée au foyer primaire du CFHT à l'orée de l'an 2000. Parmi les programmes observationnels, la mesure du cisaillement gravitationnel induit par les grandes structures de l'Univers, la détection de supernovae, les comptages ultra-profonds multicolores, la fonction de corrélation galaxie-galaxie et la (les) fonction(s) de luminosité des galaxies sont des priorités à l'origine du projet. Cette caméra fera (temporairement) du CFHT un instrument

unique au monde avec des performances inégalables en imagerie grand champ à haute résolution spatiale. Ce télescope complètera alors efficacement les capacités exceptionnelles des télescopes de la classe des 8 mètres pour la spectroscopie d'objets faibles. Une telle association autorisera la sélection d'objets rares tels que les galaxies lointaines en formation actuellement si recherchées pour une analyse spectroscopique. Compte tenu de mon expérience, j'imagine qu'une combinaison constituée de MEGACAM et d'un spectrographe basse résolution montée sur un VLT disposant du mode va-et-vient de charges serait alors idéale pour les programmes de cosmologie observationnelle et de physique extragalactique si présents autour de moi!